



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ
ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ
ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ Ν. ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ

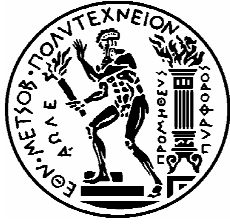
Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Δ.Ι.ΠΑΝΤΕΛΗΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ
ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ
ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ Ν. ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ

ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Δ.Ι.ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.,
Διευθυντής ENT (Επιβλέπων)
2. Γ.-Χ. ΒΟΣΝΙΑΚΟΣ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Ν. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ

ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Δ.Ι.ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.,
(Επιβλέπων)
2. Γ.-Χ. ΒΟΣΝΙΑΚΟΣ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Ν. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.
4. Β. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ, Καθ. Ε.Μ.Π.
5. Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
6. Μ. ΦΟΥΝΤΗ, Καθ. Ε.Μ.Π.
7. Λ. ΚΑΪΚΤΣΗΣ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ολοκληρώνοντας τη διδακτορική διατριβή θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου και την ευγνωμοσύνη μου προς τους ανθρώπους με τους οποίους είχα την τύχη να συνεργαστώ.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Δημήτριο Παντελή, Καθηγητή Ε.Μ.Π. και Διευθυντή του Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, για την εμπιστοσύνη και την καθοδήγησή του. Η συνεργασία μαζί του αποτέλεσε σημαντική εμπειρία και η επιστημονική του συμβολή ήταν πολύτιμη. Τον ευχαριστώ, επίσης, που μου προσέφερε την ευκαιρία της ενεργούς συμμετοχής στις δράσεις του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, παράλληλα με την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής.

Θα ήθελα, φυσικά, να εκφράσω θερμότερες ευχαριστίες μου στον Αναπλ. Καθηγητή Γεώργιο-Χριστόφορο Βοσνιάκο, της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.. Η εμπιστοσύνη του και η συμπαράσταση ήταν καθοριστικής σημασίας σε τα στάδια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής. Η καθοδήγησή του ήταν διαρκής και ουσιαστική. Η εμπειρία της στενής συνεργασίας μαζί του ήταν ανεκτίμητη.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Ν. Τσούβαλη, Αναπλ. Καθηγητή Ε.Μ.Π., μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για τις πολύτιμες συμβουλές αλλά και για τη συμβολή του σε τεχνικά ζητήματα, σημαντικά για την εκπόνηση της διατριβής. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. Β. Παπάζογλου για το ενδιαφέρον που έδειξε για το θέμα της διδακτορικής του διατριβής και τη διάθεσή του απέναντί μου.

Ευχαριστώ πολύ τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. Δ. Μανωλάκο, την Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. Μ. Φούντη και τον Αναπλ. Καθηγητή Ε.Μ.Π. Λ. Καϊκτοσή για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και τα πολύτιμα σχόλιά τους.

Επίσης, ευχαριστώ πολύ το προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών: τον κ. Μιχάλη Νουνό για τις ώρες που περάσαμε στο μηχανουργείο του εργαστηρίου και τη βοήθειά του, τον Χάρη Ξάνθη για την τεχνική υποστήριξη, τη Δρ. Χ. Σαράφογλου, την Υ.Δ. Θ. Τσιούρβα.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους κυρίους Αλέκο και Θεοδόση Νείλα καθώς και τους Γιώργο και Γιάννη Νείλα, για τη διαθεσιμότητά τους όλα αυτά τα χρόνια και την υποστήριξή τους σε τεχνικό επίπεδο.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά τα μέλη του Εργαστηρίου και φίλους: Δρ. Κωστούλα Τριάντου, Δρ Α. Κυριακόγγονα, Υ.Δ. Ν. Δανιόλο, Βέρα Μπουγιούρη, Υ.Δ. Ε. Κιοσίδου, Υ.Δ. Σ. Χιονόπουλο, Δρ. Θ. Μαζαράκο για τις ώρες στο εργαστήριο και τις στιγμές που περάσαμε μαζί. Ευχαριστώ

θερμά τον Δρ. Τίτο Γιαννακάκη, για τις αξέχαστες στιγμές συστέγασης στο γραφείο, καθώς επίσης και τους Δρ. Πανώριο Μπενάρδο, Δρ. Ξενοφώντα Γωγουβίτη, Λέκτορα Δρ. Ε. Μπαδογιάννη και τον Παναγιώτη Παύλου για τις πολύτιμες συμβουλές τους. Δεν μπορώ να μην αναφερθώ στη Δρ. Ιωάννα Κυριοπούλου και τον Λέκτορα Δρ. Δ. Κάραλη, εκφράζοντάς τους την εκτίμησή μου για τις συμβουλές τους κατά την έναρξη του διδακτορικού μου, όπως και στην Υ.Δ. Α. Γκρινιάρη για τη συνεργασία. Επιπλέον, η καθημερινότητα με τους Δρ και Υ.Δ. των διπλανών γραφείων ήταν ξεχωριστή. Τους ευχαριστώ όλους θερμά και τους εύχομαι καλή πρόοδο.

Είχα την τύχη να συνεργαστώ με πλήθος φοιτητών στα πλαίσια μαθημάτων. Ιδιαίτερως ευχαριστώ τους τότε φοιτητές και νυν Διπλωματούχους Μηχανικούς με τους οποίους συνεργάστηκα κατά την εκπόνηση των διπλωματικών τους εργασιών: τον Ευάγγελο Πελεκάνο, την Ειρήνη Αρβανιτάκη, το Στέφανο Μιχαήλ, τον Αθανάσιο Ατσαλάκη, την Ευθυμία Χατζούλη, το Χρήστο Σταθάκη και τον Δημήτριο Βλαγκούλη.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και ειλικρινά τον Επικ. Καθηγητή του Kingston University London Δρ. Δημήτριο Βενετσάνο. Μου μετέδωσε την αγάπη του για την έρευνα και υπήρξε συμπαραστάτης στις όμορφες και τις δύσκολες στιγμές αυτής της πορείας, ενθαρρύνοντάς με πάντα.

Στην πορεία αυτή, ήταν πάντα κοντά μου οι φίλοι και συνάδερφοι μηχανικοί Δ. Λούβρος, Δ. Κάτσαρος, Μ. Πλυταριά, Μ. Μακροδημήτρης, Ι. Καλιακάτσος. Η ενθάρρυνση της Διπλ. Μηχ. Χριστίνας Κοντοβαζαϊνίτη ήταν ουσιαστική.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου -τους γονείς και τον αδερφό μου- μου ήταν δίπλα μου πάντα, προσφέροντάς μου τα εφόδια για να πορεύομαι, τη συμπαράσταση και την αγάπη τους.

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	i
Πίνακας Περιεχομένων	iii
Κατάλογος Σχημάτων	k
Κατάλογος Πινάκων	xxv
Περίληψη	1
Abstract	2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΧΥΤΕΥΣΗ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	9
1.1 Γενικά περί Χύτευσης	9
1.2 Τεχνικές Χύτευσης	11
1.2.1 Ταξινόμηση Μεθόδων Χύτευσης	11
1.2.2 Σύγκριση Μεθόδων Χύτευσης	12
1.3 Φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη χύτευση	13
1.3.1 Στερεοποίηση κατά τη Χύτευση - Μορφολογία Στερεοποιημένης Ζώνης	13
1.3.2 Θερμικά Φαινόμενα κατά τη Στερεοποίηση	16
1.3.3 Τάσεις / παραμορφώσεις	18
1.3.4 Μηχανισμοί κατά τη στερεοποίηση	20
1.4 Ατέλειες Χυτών	21
1.5 Η χύτευση ακριβείας (Χύτευση με τη μέθοδο του Χαμένου Κεριού)	26
1.5.1 Περιγραφή της Μεθόδου	26
1.5.2 Εφαρμογές Χύτευσης Ακριβείας (Χαμένου Κεριού).....	29
1.6 Τεχνικές χύτευσης κενού	30
1.6.1 Η έννοια του κενού	31
1.6.2 Χύτευση με Υποβοήθηση Κενού (Vacuum – assisted casting)...	31
1.6.3 Χύτευση Κενού – Υπερπίεσης (Vacuum-Pressure Casting).....	32
1.6.4 Χύτευση Κενού με Αντιβαρύτητα (Counter-gravity Vacuum Casting)	34
1.6.5 Ειδικότερα χαρακτηριστικά μηχανών κενού	36
1.7 Επίδραση παραμέτρων χύτευσης κενού στο χυτό προϊόν	37
1.7.1 Παράμετροι Μηχανών Χύτευσης Κενού	38
1.7.2 Επίδραση της προστατευτικής ατμόσφαιρας στο θάλαμο τήξης..	38
1.7.3 Επίδραση του κενού	38
1.7.4 Επίδραση της υπερπίεσης.	45
1.7.5 Επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος.....	45
1.7.6 Επίδραση της θερμοκρασίας καλουπιού	47
1.7.7 Επίδραση της γεωμετρίας του δέντρου	47
1.7.8 Απόσταση από τα τοιχώματα της φλάσκας	47
1.7.9 Υψομετρική διαφορά ανώτατου – κατώτατου σημείου του χυτού.	48

1.7.10	Πάχος χυτού	49
1.8	Προσομοίωση Χύτευσης	50
1.8.1	Η αναγκαιότητα της προσομοίωσης της χύτευσης	50
1.8.2	Ιστορική Εξέλιξη	51
1.8.3	Φαινόμενα που μοντελοποιούνται	53
1.8.4	Κατηγορίες προγραμμάτων προσομοίωσης χύτευσης	55
1.8.5	Εργασίες στη διεθνή βιβλιογραφία που κάνουν χρήση της προσομοίωσης της χύτευσης	60
1.9	Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας	62
1.9.1	Εισαγωγή	62
1.9.2	Προσδιορισμός του ΣΜΘ στη διεθνή βιβλιογραφία με χρήση μετρήσεων θερμοκρασίας	65
1.9.3	Επίδραση της παρουσίας των θερμοστοιχείων στην ακρίβεια των μετρήσεων	71
1.9.4	Προσδιορισμός ΣΜΘ στη διεθνή βιβλιογραφία με μέτρηση του μεγέθους του κενού (air gap)	73
1.9.5	Επίδραση των Παραμέτρων της Χύτευσης στην Τιμή του ΣΜΘ....	76
1.9.6	Η μορφή του ΣΜΘ	78
1.9.6.1	ΣΜΘ ως συνάρτηση του Χρόνου.....	78
1.9.6.2	ΣΜΘ ως εκθετικός συντελεστής.....	87
1.9.6.3	ΣΜΘ ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.....	88
1.10	Ελλιπώς Ορισμένα Αντίστροφα Προβλήματα	91
1.10.1	Ελλιπώς ορισμένα προβλήματα (Ill-posed problems).....	91
1.10.2	Αντίστροφα Προβλήματα	92
1.10.3	Χρήση Γενετικών Αλγορίθμων για την επίλυση Ελλιπώς Ορισμένων Προβλημάτων	92
1.11	Γενετικοί Αλγόριθμοι για προσδιορισμό ΣΜΘ κατά τη χύτευση	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ - ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	97
2.1	Περιγραφή Κεφαλαίου	97
2.2	Χύτευση Ακριβείας: Εργαστηριακός Εξοπλισμός & Διαδικασία	98
2.2.1	Εξοπλισμός χύτευσης - Χρησιμοποιούμενα μέσα	98
2.2.2	Εκτέλεση Πειραματικής διαδικασίας	99
2.3	Μηχανή Χύτευσης Κενού - Υπερπίεσης	113
2.3.1	Χαρακτηριστικά και πρωτοτυπία μηχανής χύτευσης.....	113
2.3.2	Είδη Χύτευσης	114
2.4	Υλικά που Χυτεύθηκαν	115
2.4.1	Κράματα Χαλκού	116
2.4.1.1	Ορείχαλκος.....	119
2.4.1.2	Αλπακάς	121
2.4.2	Αλουμίνιο	122
2.4.3	Κριτήρια επιλογής κραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν.....	123
2.5	Γεωμετρίες που χυτεύθηκαν	124
2.6	Περιγραφή Εξοπλισμού και Τεχνικών για Λήψη και Επεξεργασία Πειραματικών Αποτελεσμάτων και Δοκιμών	127
2.6.1	Λήψη Μετρήσεων θερμοκρασίας με χρήση θερμοστοιχείων.....	127
2.6.1.1	Data Acquisition Hardware.....	127

2.6.1.2	Λογισμικό Λήψης Μετρήσεων (Data Acquisition Software)	129
2.6.1.3	Επεξεργασία ψηφιακού σήματος	129
2.6.1.4	Θέσεις Τοποθέτησης Θερμοστοιχείων	133
2.6.2	Μεταλλογραφική Εξέταση Χυτών Δοκιμίων	138
2.6.3	Μέτρηση Πορώδους	140
2.6.4	Μέτρηση Απόστασης μεταξύ Δευτερογενών Δενδριτικών Κλάδων (SDAS)	141
2.7	Μέθοδος Σχεδιασμού Πειραμάτων Taguchi	141
2.8	Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA)	143
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	147
3.1	Εισαγωγή	147
3.2	Μεθοδολογία πειραμάτων	148
3.3	Καμπύλες Απόψυξης – Παραμετρική Μελέτη	150
3.3.1	Επίδραση «Θερμοκρασίας Προθέρμανσης Καλουπιού»	150
3.3.1.1	1η Ομάδα Πειραμάτων Tmould – Χύτευση Βαρύτητας	151
3.3.1.2	2η Ομάδα Πειραμάτων Tmould – Χύτευση με Υπερπίεση	154
3.3.1.3	3η Ομάδα Πειραμάτων Tmould – Χύτευση Κενού	156
3.3.1.4	4η Ομάδα Πειραμάτων Tmould – Χύτευση 0.5bar	157
3.3.1.5	5η Ομάδα Πειραμάτων Tmould – Χύτευση Κενού-Υπερπίεσης	158
3.3.1.6	Συμπεράσματα Πειραμάτων Μελέτης Επίδρασης της Θερμοκρασίας Καλουπιού	160
3.3.2	Επίδραση της Αρχικής Θερμοκρασίας Τήγματος	162
3.3.2.1	1η Ομάδα Πειραμάτων Tinlet – Χύτευση Κενού	164
3.3.2.2	2η Ομάδα Πειραμάτων Tinlet – Χύτευση Βαρύτητας	165
3.3.2.3	Συμπεράσματα Πειραμάτων Μελέτης Επίδρασης της Θερμοκρασίας Έγχυσης του Τήγματος	166
3.3.3	Επίδραση «Συνθηκών Πίεσης» κατά τη Χύτευση	167
3.3.3.1	1η Ομάδα πειραμάτων ΔΡ	168
3.3.3.2	2η Ομάδα Πειραμάτων ΔΡ	170
3.3.3.3	3η Ομάδα Πειραμάτων ΔΡ	172
3.3.3.4	4η Ομάδα Πειραμάτων ΔΡ	173
3.3.3.5	5η Ομάδα Πειραμάτων ΔΡ	175
3.3.3.6	Συμπεράσματα Πειραμάτων Μελέτης Επίδρασης των Συνθηκών Πίεσης κατά τη Χύτευση	176
3.4	Καμπύλες Απόψυξης – Μέθοδος Taguchi	178
3.4.1	Αποτελέσματα Σχεδιασμού Πειραμάτων	178
3.4.2	Συμπεράσματα	184
3.5	Καμπύλες Απόψυξης – Διαφοροποίηση Θέσης Θερμοστοιχείων	185
3.6	Μακροσκοπικές Παρατηρήσεις Χυτών	189
3.7	Μέτρηση Απόστασης Δευτερογενών Δενδριτικών Κλάδων (SDAS)	191
3.7.1	Αποτελέσματα Μετρήσεων	192
3.7.2	Συμπεράσματα	194
3.8	Μέτρηση Πορώδους	196
3.8.1	1η Ομάδα Πειραμάτων ΔΡ	196
3.8.2	2η Ομάδα Πειραμάτων ΔΡ	198
3.8.3	3η Ομάδα Πειραμάτων ΔΡ	203

3.8.4	5η Ομάδα Πειραμάτων ΔΡ	205
3.9	Συμπεράσματα	209
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ . 215		
4.1	Περιγραφή Κεφαλαίου	215
4.2	Εισαγωγή – Προσομοίωση της Χύτευσης	217
4.3	Προσομοίωση της Χύτευσης με το ProCAST	219
4.3.1	Τι είναι το ProCAST	219
4.3.2	Παράμετροι Εισόδου (Inputs)	221
4.3.3	Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης	225
4.3.4	Πορώδες	227
4.4	Είδη Χύτευσης που μοντελοποιήθηκαν	232
4.4.1	Ταχύτητα έγχυσης	232
4.4.2	Ιδιότητες Διεπιφάνειας	234
4.4.3	Παράμετροι εκτέλεσης της προσομοίωσης	234
4.5	Υλικά – Ιδιότητες Υλικών	235
4.5.1	Διμερές κράμα χαλκού (Ορείχαλκος CuZn33)	235
4.5.2	Τριμερές κράμα χαλκού (CuZn12Ni24)	237
4.5.3	Αλουμίνιο	238
4.5.4	Το υλικό καλουπιού	239
4.6	Πειραματισμός με το Μοντέλο	241
4.6.1	Επίδραση της θερμοκρασίας προθέρμανσης του καλουπιού (αρχική συνθήκη)	241
4.6.2	Επίδραση της θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του καλουπιού (οριακή συνθήκη)	245
4.6.3	Επίδραση του ποσοστού πλήρωσης του καλουπιού	247
4.6.4	Επίδραση του ΣΜΘ (οριακή συνθήκη διεπιφάνειας)	248
4.6.4.1	Επίδραση της τιμής του h_1	249
4.6.4.2	Επίδραση της τιμής του t_1	249
4.6.4.3	Επίδραση της τιμής του h_2	250
4.6.4.4	Επίδραση της τιμής του t_2	250
4.6.4.5	Επίδραση της τιμής του h_3	251
4.6.5	Επίδραση λοιπών παραμέτρων	252
4.6.6	Επιπρόσθετη Διερεύνηση για την Επίδραση του ΣΜΘ σε Δοκιμαστικές Γεωμετρίες	253
4.6.6.1	Διερεύνηση Επίδρασης ΣΜΘ για τη Δοκιμαστική Γεωμετρία 1	253
4.6.6.2	Διερεύνηση Επίδρασης ΣΜΘ για τη Δοκιμαστική Γεωμετρία 2	256
	Η μορφή του ΣΜΘ στην περίπτωση αυτή είναι:	256
4.7	Προσομοίωση Πραγματικών Περιπτώσεων Χύτευσης	258
4.7.1	Χυτεύσεις με Διαφορετικές «Συνθήκες Πίεσης»	258
4.7.2	Άλλα Σενάρια Χύτευσης	264
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗ 271		
5.1	Περιγραφή του Κεφαλαίου	271
5.2	Αναλυτικός υπολογισμός	272

5.2.1	Μακροσκοπικά Φαινόμενα Μετάδοσης Θερμότητας κατά τη Χύτευση .	272
	
5.2.1.1	Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας.....	272
5.2.1.2	Εξισώσεις μετάδοσης θερμότητας σε σύστημα με αλλαγή φάσεων	274
5.2.2	Αντίσταση στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού.....	277
5.2.3	Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας - Αναλυτική Σχέση.....	280
5.2.4	Περιπτώσεις που μελετήθηκαν και αποτελέσματα.....	281
5.2.4.1	Περίπτωση I - Αποτελέσματα.....	282
5.2.4.2	Περίπτωση II - Αποτελέσματα.....	283
5.2.5	Εισαγωγή.....	286
5.2.6	Περιορισμοί.....	288
5.2.7	Εξισώσεις.....	289
5.2.8	Περίπτωση που μελετήθηκε.....	290
5.2.9	Αποτελέσματα.....	290
5.3	Προσδιορισμός με τη διαδικασία δοκιμής-και-σφάλματος.....	294
5.4	Συζήτηση επί των Αποτελεσμάτων.....	302
5.5	Συμπεράσματα.....	304
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:	ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΜΘ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ, ΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΥ ΧΥΤΟΥ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ CASTING MODULUS.....	307
6.1	Περιγραφή του Κεφαλαίου.....	307
6.1.1	Στόχος του Κεφαλαίου.....	307
6.1.2	Δομή του Κεφαλαίου - Περιπτώσεις που Εξετάστηκαν.....	308
6.1.2.1	Εισαγωγή.....	308
6.1.2.2	Δομή.....	310
6.2	Βελτιστοποίηση.....	313
6.2.1	Γενικά περί βελτιστοποίησης.....	313
6.3	Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	315
6.3.1	Φιλοσοφία των Γενετικών Αλγορίθμων.....	315
6.3.2	Ορολογία.....	317
6.3.3	Στάδια ενός ΓΑ - Διάγραμμα ροής.....	319
6.3.4	Χαρακτηριστικά και Τελεστές ενός ΓΑ.....	320
6.3.4.1	Κωδικοποίηση Μεταβλητών.....	320
6.3.4.2	Φυσική Επιλογή (Natural Selection).....	320
6.3.4.3	Ζευγάρωμα (Pairing).....	321
6.3.4.4	Αναπαραγωγή (Mating) - Διασταύρωση (Crossover).....	322
6.3.4.5	Μετάλλαξη (Mutation).....	323
6.3.4.6	Η Επόμενη Γενεά.....	325
6.3.4.7	Τερματισμός.....	325
6.4	Ο Γενετικός Αλγόριθμος που αναπτύχθηκε.....	326
6.4.1	Περιγραφή των χαρακτηριστικών του ΓΑ που αναπτύχθηκε.....	326
6.4.2	Κωδικοποίηση Μεταβλητών.....	326
6.4.3	Διάγραμμα Ροής του ΓΑ.....	327
6.4.4	Αντικειμενική Συνάρτηση.....	330
6.4.5	Ταχύτητα του ΓΑ.....	333

6.4.6	Δημιουργία Αρχικού Πληθυσμού	334
6.4.7	Επιλογές ΓΑ (ga Options)	335
6.5	Προσδιορισμός ΣΜΘ με ΓΑ για Δοκιμαστικές Περιπτώσεις Χύτευσης	336
6.5.1	Σκοπός Διερεύνησης	336
6.5.2	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 1η: Χρήση Ενιαίου ΣΜΘ στο Χυτό	337
6.5.2.1	Περιγραφή Γεωμετρίας - Είδος Χύτευσης	337
6.5.2.2	Εξαντλητική Διερεύνηση.....	338
6.5.3	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 2η: Χρήση Διακριτών ΣΜΘ στο Χυτό	340
6.5.3.1	Περιγραφή Γεωμετρίας - Είδος Χύτευσης	340
6.5.3.2	Η μορφή του ΣΜΘ και το Χρωμόσωμα.....	341
6.5.3.3	Προσδιορισμός ΣΜΘ με ΓΑ.....	342
6.6	Προσδιορισμός ΣΜΘ με ΓΑ για Πραγματική Περίπτωση Χύτευσης ...	343
6.6.1	Περιγραφή Προβλήματος	343
6.6.2	Πείραμα	343
6.6.3	Μοντελοποίηση	345
6.6.4	Η μορφή του ΣΜΘ	346
6.6.5	Θεώρηση ΕΝΙΑΙΟΥ ΣΜΘ σε ολόκληρο το χυτό: Αποτέλεσμα ΓΑ (με Integers) και ΣΜΘ = βηματική συνάρτηση του χρόνου.....	347
6.6.5.1	Ενιαίος ΣΜΘ - Κριτήριο η ταυτόχρονη προσέγγιση των Πειραματικών Μετρήσεων και στις 3 Διατομές	347
6.6.5.2	Ενιαίος ΣΜΘ - Με Κριτήριο την Πειραματική Μέτρηση στη Μεγάλη Διατομή.....	351
6.6.5.3	Ενιαίος ΣΜΘ - Με Κριτήριο την Πειραματική Μέτρηση στη Μεσαία Διατομή.....	353
6.6.5.4	Ενιαίος ΣΜΘ - Με Κριτήριο την Πειραματική Μέτρηση στη Μικρή Διατομή.....	355
6.6.5.5	Συμπεράσματα.....	356
6.6.6	Θεώρηση ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΜΘ στις 3 περιοχές του χυτού: Αποτέλεσμα ΓΑ (με Integers) και ΣΜΘ=βηματική συνάρτηση της θερμοκρασίας	358
6.6.6.1	Η μορφή του ΣΜΘ και το Χρωμόσωμα.....	358
6.6.6.2	Κωδικοποίηση Μεταβλητών.....	360
6.6.6.3	Χαρακτηριστικά Γενετικού Αλγορίθμου	361
6.6.6.4	Πορεία / Εξέλιξη του Γενετικού Αλγορίθμου	361
6.6.6.5	Αποτέλεσμα του Γενετικού Αλγορίθμου - Βέλτιστη Λύση ..	361
6.6.7	Θεώρηση ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΜΘ στις 3 περιοχές του χυτού: Αποτέλεσμα ΓΑ (με Integers) και ΣΜΘ=βηματική συνάρτηση του χρόνου.....	367
6.6.7.1	Η μορφή του ΣΜΘ και το Χρωμόσωμα.....	367
6.6.7.2	Κωδικοποίηση Μεταβλητών.....	368
6.6.7.3	Χαρακτηριστικά Γενετικού Αλγορίθμου	369
6.6.7.4	Η Εξέλιξη του Γενετικού Αλγορίθμου.....	370
6.6.7.5	Αποτέλεσμα του Γενετικού Αλγορίθμου - Βέλτιστη Λύση ..	370
6.6.8	Θεώρηση ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΜΘ στις 3 περιοχές του χυτού: Αποτέλεσμα ΓΑ (με Πραγματικούς αριθμούς - Continuous GA) και ΣΜΘ=βηματική συνάρτηση του χρόνου	378
6.6.8.1	ΓΑ με Πραγματικές Μεταβλητές - Προσέγγιση 1η	378
6.6.8.2	ΓΑ με Πραγματικές Μεταβλητές - Προσέγγιση 2η	380
6.6.8.3	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων ΓΑ με Πραγματικές Μεταβλητές	382

6.6.9	Θεώρηση ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΜΘ στις 3 περιοχές του χυτού: Αποτέλεσμα ΓΑ (με Integers) και ΣΜΘ=εκθετική συνάρτηση της θερμοκρασίας	384
6.6.9.1	Η μορφή του ΣΜΘ και το Χρωμόσωμα	384
6.6.9.2	Κωδικοποίηση Μεταβλητών	384
6.6.9.3	Χαρακτηριστικά Γενετικού Αλγορίθμου	385
6.6.9.4	Πορεία / Εξέλιξη του Γενετικού Αλγορίθμου	385
6.6.9.5	Αποτέλεσμα του Γενετικού Αλγορίθμου - Βέλτιστη Λύση ..	385
6.7	Συνοπτική Παρουσίαση και Σχολιασμός των Κυριότερων Αποτελεσμάτων από τη χρήση των ΓΑ	390
6.8	Συμπεράσματα	392
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	397
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ	403
Βιβλιογραφία	405

Η σελίδα αυτή έχει αφιερωθεί σκοπίμως κενή.

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1	(α) Κολώνες του ναού του Σολομώντα (968π.Χ), από χυτό μπρούντζο, (β) Χυτό κανόνι 15 ^{ου} αι. στην πόλη Ghent, (γ) Ξυλογραφία, Vannoccio Biringuccio <i>Pirotechnia</i> , Βενετία [Biringuccio 1540]. 10
Σχήμα 1.2	Στερεοποίηση πλινθώματος διμερούς κράματος, σε καλούπι χύτευσης. Οι οριακές επιφάνειες της ζώνης στερεοποίησης έχουν θερμοκρασίες που αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες Liquidus (L) και Solidus (S), του διαγράμματος φάσεων, για τη δεδομένη περιεκτικότητα του κράματος [Κονοφάγος 1965]..... 13
Σχήμα 1.3	Μορφολογία στερεοποιημένης ζώνης (α) σχηματική αναπαράσταση η σε εγκάρσια τομή του χυτού [Κονοφάγος 1965], (β).σε πραγματικό σε τομή κατά πλάτος [American Molybdenum Corp n.d.]. 14
Σχήμα 1.4	Οι πρώτοι κρύσταλλοι πυρηνοποιούνται με τυχαίους κρυσταλλογραφικούς προσανατολισμούς. Αναπτύσσονται με δενδριτική μορφή, ακολουθώντας πάντοτε συγκεκριμένες κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις [Κονοφάγος 1965]..... 15
Σχήμα 1.5	Τρισδιάστατη απεικόνιση δενδριτών [M Jolly 2003]..... 15
Σχήμα 1.6	Τρεις περιπτώσεις πλινθωμάτων με διαφορετικούς ιστούς στερεοποίησης: (α) μικροκρυσταλλική και βασαλτική ζώνη σε πλίνθωμα καθαρού μετάλλου, (β) μικροκρυσταλλική, βασαλτική και ισοαξονική σε ένα τυπικό κράμα, (γ) ύπαρξη ισοαξονικής ζώνης σε όλο το χυτό, λόγω παρουσίας παραγόντων πυρηνοποίηση [Kalpakjian 1997]. 15
Σχήμα 1.7	Χαρακτηριστική καμπύλη συστολής καθαρού μετάλλου, συναρτήσει της θερμοκρασίας [Κονοφάγος 1965]..... 19
Σχήμα 1.8	Γενική Κατηγοριοποίηση των Ελαττωμάτων των Χυτών (βασισμένο στο [Χρυσουλάκης & Παντελής 1996]) 21
Σχήμα 1.9	Μακροπορώδες και Μικροπορώδες [McClain 2002]..... 25
Σχήμα 1.10	Ένα από τα πρώτα δείγματα κατασκευής με τη μέθοδο χύτευσης του χαμένου κεριού, το αγαλματίδιο «η χορεύτρια του Mohenjo Daro» (“The dancing girl of Mohenjo Daro”) χρονολογείται από το 3000π.Χ. [Meier 1970]. 26
Σχήμα 1.11	Η τεχνική της χύτευσης χαμένου κεριού [Non-Ferrous Founders’ Society n.d.], [Prasad 2012]. 27
Σχήμα 1.12	Διάφορα τεμάχια υψηλών απαιτήσεων ακρίβειας [Horton 2008], [ASM International 1992]. 29
Σχήμα 1.13	Τυπικά δέντρα στη χύτευση χαμένου κεριού για την κατασκευή κοσμημάτων [Hitesh Hansora n.d.], [Gainsbury 1979]..... 29
Σχήμα 1.14	Οδοντιατρικά χυτά (dental castings) [New Image Dental Laboratory n.d.]. 29
Σχήμα 1.15	Έλικες πλοίων: εφαρμογή στη ναυπηγική τεχνολογία [France Helices n.d.], [Chauncy Maples Malawi Trust 2913], [R2 Quality Castings n.d.], [R2 Quality Castings n.d.]..... 29
Σχήμα 1.16	Χυτά μηχανολογικά τεμάχια [Marshall Technocast Pvt. Ltd. n.d.]. 29
Σχήμα 1.17	Κελυφοειδή καλούπια τυπικών βιομηχανικών δέντρων χύτευσης [Philip Bralsford Consultancy n.d.], [Ningbo Casting

	Machinery Industry Co. Ltd. n.d.], [Tracy Die Cast INC. n.d.].....	30
Σχήμα 1.18	Δέντρα χύτευσης πτερωτών υπερσυμπιεστή (turbocharger hot wheels) [Chandley 1999], μετά τη χύτευση, πριν τη χύτευση (με κελυφοειδές καλούπι) και μεμονωμένα χυτά τεμάχια.....	30
Σχήμα 1.19	Εξοπλισμός χύτευσης με υποβοήθηση κενού (α) [Sin & Dubé 2004], (β) [Ott & Raub 1985].....	31
Σχήμα 1.20	Εξοπλισμός χύτευσης κενού [Ott & Raub 1985].....	32
Σχήμα 1.21	Σχηματικό διάγραμμα χυτόπρεσας κενού-υπερπίεσης. Διακρίνεται η δημιουργία κενού τόσο εντός της κοιλότητας του τύπου όσο και εξωτερικά του μούφλου [Prasad 2012].....	33
Σχήμα 1.22	Τυπικός κύκλος χύτευσης , [TopCast Engineering 2010].....	33
Σχήμα 1.23	Σχηματική αναπαράσταση των βημάτων της διαδικασίας CLV: (α) τήξη εν κενώ και εισαγωγή καλουπιού σε ανεξάρτητο θάλαμο κενού, (β) παροχή αργού, άνοιγμα βαλβίδας επικοινωνίας άνω και κάτω θαλάμου και είσοδος του καναλιού τροφοδοσίας του καλουπιού στη λεκάνη τήγματος. Εφαρμογή επιπλέον κενού στον πάνω θάλαμο και εισχώρηση του τήγματος στο καλούπι, (γ) η εφαρμογή κενού διακόπτεται όταν ολοκληρωθεί η στερεοποίηση των χυτών τεμαχίων. Το τήγμα που έχει απομείνει στους αγωγούς τροφοδοσίας επιστρέφει στο δοχείο τήξης [Prasad 2012].....	35
Σχήμα 1.24	(α) Διάγραμμα της υστέρησης των μετρήσεων θερμοκρασίας με τη βύθιση θερμοστοιχείου. Εάν δεν διορθωθούν, οι μετρήσεις θα είναι χαμηλότερες από τις πραγματικές κατά τη θέρμανση (κόκκινη γραμμή), και μεγαλύτερες κατά την απόψυξη (μαύρη γραμμή). (β) Διάταξη μέτρησης θερμοκρασίας τήγματος ενσωματωμένη στη χυτόπρεσσα, [Faccenda 1998].....	36
Σχήμα 1.25	Το προφίλ του τήγματος καθώς εισέρχεται στο καλούπι (α) υπό χαμηλό κενό και (β) υπό υψηλό κενό, [Ji-qiang et al. 2007].....	40
Σχήμα 1.26	Ο μηχανισμός δημιουργίας ατελειών και το προφίλ του τήγματος καθώς αυτό εισέρχεται στο καλούπι (a) με μικρή, (b) με μέτρια και (c) με μεγάλη ταχύτητα [Ji-qiang et al. 2007].....	40
Σχήμα 1.27	Δέντρο χύτευσης με τρεις έλικες, για τον καθορισμό της ικανότητας πλήρωσης [Ott & Raub 1985].....	41
Σχήμα 1.28	Χαρακτηριστικό μοντέλο ελικοειδούς μορφής για προσδιορισμό της εύροιας.....	41
Σχήμα 1.29	Σχηματική αναπαράσταση σπείρας για διεξαγωγή δοκιμής εύροιας	41
Σχήμα 1.30	Μοντέλα χύτευσης με τη μορφή σπειροειδούς ελάσματος (α) ατελής πλήρωση καλουπιού, (β) επιτυχής πλήρωση. [Sin & Dubé 2004].....	41
Σχήμα 1.31	Μικροδομές κράματος AZ91, από δοκίμια διατομής (30mmx6mm), τοποθετημένα σε δέντρο χύτευσης σε δύο διαφορετικές αποστάσεις από τον κεντρικό αγωγό τροφοδοσίας: (α) 2cm, (β) 36cm (Συνθήκες χύτευσης: $T_{inlet}=710^{\circ}C$, κενό: 0.05MPa) [Zili Liu et al. 2002].....	44
Σχήμα 1.32	Επίδραση του κενού στις μηχανικές ιδιότητες [S. Kumar et al. 2007].....	44

Σχήμα 1.33	Επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος και του κενού στην εύροια [Hakon Hero & Waarli 1991].	46
Σχήμα 1.34	Επίδραση της υπέρτηξης στην εύροια [Sin & Dubé 2004].	46
Σχήμα 1.35	Επίδραση της θερμοκρασίας προθέρμανσης καλουπιού στην εύροια [Sin & Dubé 2004].	47
Σχήμα 1.36	Επίδραση της απόστασης του χυτού από τα τοιχώματα της φλάσκας στην εύροια.	48
Σχήμα 1.37	Δέντρο χύτευσης για πειραματική διερεύνηση της επίδρασης γεωμετρικών στοιχείων στην εύροια [Sin & Dubé 2004].	48
Σχήμα 1.38	Επίδραση της υψομετρικής διαφοράς στην εύροια [Sin & Dubé 2004].	49
Σχήμα 1.39	Επίδραση του πάχους του χυτού t στην εύροια [Sin & Dubé 2004].	49
Σχήμα 1.40	(α) Η διεπιφάνεια μετάλλου-καλουπιού στο αρχικό στάδιο, που το ρευστό μέταλλο εισέρχεται στο καλούπι. Η μακροσκοπική επαφή μεταξύ μετάλλου και καλουπιού είναι πολύ καλή, ενώ κενά υπάρχουν σε μικροσκοπική κλίμακα, (β) Το ρευστό μέταλλο αρχίζει και στερεοποιείται, με αποτέλεσμα να συρρικνώνεται και να μειώνεται η επαφή του με τα τοιχώματα του καλουπιού, δημιουργώντας μεγαλύτερα κενά. [Kai Ho & Robert D Pehlke 1985], [John Campbell 1993].	64
Σχήμα 1.41	(α) Σχηματική απεικόνιση τριών ειδών θερμοστοιχείων τύπου-K, (β) Οι αποκρίσεις των τριών ειδών θερμοστοιχείων [Long et al. 2011].	72
Σχήμα 1.42	Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του σχηματιζόμενου κενού [Lagerstedt et al. 2005].	74
Σχήμα 1.43	Σχηματική παράσταση του κυκλώματος μέτρησης [Majumdar et al. 1977].	74
Σχήμα 1.44	(α) ΣΜΘ και σχηματιζόμενο κενό συναρτήσει του χρόνου και (β) ΣΜΘ συναρτήσει του σχηματιζόμενου κενού [Trovant & Argyropoulos 2000].	75
Σχήμα 1.45	Σχηματική αναπαράσταση του ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου [Lau, W B Lee, et al. 1998].	79
Σχήμα 1.46	Ο ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου όπως υπολογίστηκε με βάση πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, από τους [Lau, W B Lee, et al. 1998].	79
Σχήμα 1.47	Ο ΣΜΘ για χύτευση αλουμινίου σε άμμο [K Ho & Robert D. Pehlke 1984].	79
Σχήμα 1.48	Ο ΣΜΘ που υπολογίστηκε συναρτήσει του χρόνου στην [Şahin et al. 2006].	80
Σχήμα 1.49	Η μορφή του ΣΜΘ όπως θεωρείται στην εργασία [Mirbagheri et al. 2007].	81
Σχήμα 1.50	(α) Η γεωμετρία χυτού, (β) ΣΜΘ και ροή θερμότητας που αντιστοιχούν στη μεσαία περιοχή του χυτού (μεγέθυνση) και (γ) Οι ΣΜΘ που υπολογίστηκαν για τις περιοχές διαφορετικής γεωμετρίας του χυτού, σύμφωνα με την εργασία [Z.-P. Guo et al. 2009].	82
Σχήμα 1.51	Ο ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου κατά τη στερεοποίηση Al [Moraru 2002].	83

Σχήμα 1.52	(α) Η γεωμετρία χυτού και καλουπιού για χύτευση κράματος Al σε άμμο και (β) Ο ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου, στην εργασία [Rajaraman & Velraj 2007].....	84
Σχήμα 1.53	(α) Η γεωμετρία του χυτού και (β) ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη θερμοκρασιακή κατανομή που ελήφθη από θερμοστοιχεία, στην [L. Zhang et al. 2010].....	84
Σχήμα 1.54	(α) Η γεωμετρία του χυτού και (β) ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη θερμοκρασιακή κατανομή που ελήφθη από θερμοστοιχεία, στην [L. Zhang & L. Li 2013].....	85
Σχήμα 1.55	(α) Πειραματικές καμπύλες απόψυξης χυτού και καλουπιού, (β) Σχηματική απεικόνιση της εξέλιξης της στερεοποίησης και (γ) Τιμές ΣΜΘ [Todoroki & Phinichka 2009].....	85
Σχήμα 1.56	άποιοι από τους ΣΜΘ στις δημοσιεύσεις του καθ. W.D. Griffiths (α) [W. D. Griffiths & Kayikci 2007] και (β) [W D Griffiths 2000].....	86
Σχήμα 1.57	Ο ΣΜΘ σύμφωνα με (α) [Martorano 2000] και (β).....	86
Σχήμα 1.58	(α) Η γεωμετρία του χυτού, (β) ο χρονικά μεταβαλλόμενος ΣΜΘ για διάφορες θερμοκρασίες έγχυσης τήγματος, σύμφωνα με την εργασία [C. Santos et al. 2001].....	87
Σχήμα 1.59	Ο ΣΜΘ για χύτευση κράματος αλουμινίου σύμφωνα με την εργασία (α) [José E Spinelli et al. 2012] και (β) [Cheung et al. 2009].....	87
Σχήμα 1.60	Οι ΣΜΘ για χύτευση μονοκρυστάλλου κράματος DD6, (α) για τη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού και (β) για τη διεπιφάνεια χυτού-ψύχοντος σώματος [Y. Dong et al. 2011a].....	88
Σχήμα 1.61	Ο ΣΜΘ συναρτήσει της θερμοκρασίας, για στερεοποίηση χάλυβα Ck45 εντός υδρόψυκτου κεραμικού καλουπιού, με διάφορους ρυθμούς απόψυξης [Rappaz et al. 1995].....	88
Σχήμα 1.62	Ο ΣΜΘ στην εργασία [Nayak & Sundarraaj 2009], αν θεωρηθεί (α) συνέρτηση του χρόνου και (β) συνάρτηση της θερμοκρασίας.....	89
Σχήμα 1.63	Ο ΣΜΘ ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [Aweda & Adeyemi 2009]..	89
Σχήμα 1.64	Γραφική αναπαράσταση των ΣΜΘ που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία [Long et al. 2011].....	90
Σχήμα 1.65	Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία [Wong & Rao 2011]. (α) Με μπλε χρώμα απεικονίζεται το καλούπι, με καφέ το χυτό. Ο ενδιάμεσος άξονας της γεωμετρίας φαίνεται με κίτρινο χρώμα και με κόκκινες κουκίδες επισημαίνονται οι κόμβοι του πλέγματος που βρίσκονται πλησιέστερα στον ενδιάμεσο άξονα. (β) Η χρωματική απεικόνιση παρουσιάζει το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, με χρήση του βέλτιστου σταθερού ΣΜΘ. (γ) Αποτελέσματα προσομοίωσης με χρήση βέλτιστου συνδυασμού ΣΜΘ στην αριστερή και τη δεξιά πλευρά του χυτού.....	94
Σχήμα 2.1	(α) Λαστιχέρα, (β) Κεριέρα, (γ) Ξεραρωτής, (δ) Φούρνος αποκέρωσης, (ε) Φούρνος ψησίματος, (στ) Μηχανή χύτευσης κενού-υπερπίεσης.....	99
Σχήμα 2.2	(α) Η διάτρητη φλάσκα με τη λαστιχένια βάση και το λαστιχένιο κολάρο, (β) Νυστέρι, κόφτης και ψαλίδι, (γ) Μπολ ανάμιξης (δ) Κολλητήρι.....	99
Σχήμα 2.3	Το πρότυπο και οι διαστάσεις του.....	101

Σχήμα 2.4	Το πρότυπο και ο δευτερεύων αγωγός τροφοδοσίας, πάνω στις πρώτες στρώσεις λάστιχου. 101
Σχήμα 2.5	Τα δύο τμήματα του λαστιχένιου καλουπιού, μετά το ψήσιμό του. 101
Σχήμα 2.6	Κερί σε μορφή σφαιριδίων, κατάλληλο για τήξη στην κεριέρα... 101
Σχήμα 2.7	Η έγχυση του κεριού στο λαστιχένιο καλούπι..... 101
Σχήμα 2.8	Το σχηματιζόμενο κέρινο ομοίωμα, μαζί με τον δευτερεύοντα αγωγό τροφοδοσίας. 101
Σχήμα 2.9	Κέρινο δέντρο χύτευσης (α) με τη βασική χρησιμοποιούμενη γεωμετρία και (β) με τεμάχια που κατασκευάστηκαν για εξοικείωση με τη διαδικασία. 105
Σχήμα 2.10	Η απαέρωση (α) του μίγματος γύψου και (β) του μούφλου..... 106
Σχήμα 2.11	(α) Καλούπι μετά τη στερεοποίηση του γύψου και την απομάκρυνση της λαστιχένιας βάσης, (β) Καλούπια πριν την αποκέρωση. Διακρίνονται τα καλώδια των θερμοστοιχείων, (γ) Καλούπια μέσα στον αποκερωτή. 107
Σχήμα 2.12.	Η ρύθμιση της θερμοκρασίας ψησίματος του καλουπιού..... 108
Σχήμα 2.13	Το καλούπι στο φούρνο ψησίματος, ακτινοβολεί τους 730°C. 108
Σχήμα 2.14	Τρία καλούπια στο φούρνο ψησίματος 108
Σχήμα 2.15	(α) Τυπικοί κύκλοι έψησης(θέρμανσης) της φλάσκας και (β) Συνιστώμενοι κύκλοι έψησης από διάφορους κατασκευαστές γύψου (1.Ransom&Randolph, 2.Kerr, 3.Coben, 4.Caster)..... 108
Σχήμα 2.16	Το γραφιτένιο χωνί (σκεύος τήξης) της μηχανής χύτευσης (α) πλάγια όψη.(β) όπως φαίνεται από πάνω. Στο εσωτερικό του διακρίνεται η οπή έγχυσης του τήγματος. Στη μικρότερη οπή στο τοίχωμα του χωνιού τοποθετείται θερμοστοιχείο για την ένδειξη της θερμοκρασίας τήξης. 109
Σχήμα 2.17	Ορείχαλκος με τη μορφή σφαιριδίων, κατάλληλος για τήξη..... 109
Σχήμα 2.18	Το κράμα (αλπακάς) μέσα στο χωνί (σκεύος τήξης), (α) λίγο πριν την τήξη του και (β) μετά την τήξη, όπως φαίνεται από το παράθυρο της χυτόπρεσας. 110
Σχήμα 2.19	Ο θάλαμος τήξης της μηχανής χύτευσης. 110
Σχήμα 2.20	Το κράμα χύτευσης έχει γεμίσει πλήρως την κοιλότητα του τύπου. Διακρίνεται η είσοδος του οχετού έγχυσης (α) όσο το χυτό έχει υψηλή θερμοκρασία και ακτινοβολεί, (β) όταν το χυτό έχει αποψυχθεί αρκετά, (γ) Πλάγια όψη του καλουπιού με το ορειχάλκινο χυτό να διακρίνεται στην είσοδο του οχετού έγχυσης. 111
Σχήμα 2.21	Μέταλλο σε υψηλή θερμοκρασία στην είσοδο του κυρίως αγωγού τροφοδοσίας του δέντρου χύτευσης. 112
Σχήμα 2.22	Τελικό προϊόν, υπολείμματα γύψου πάνω στο χυτό..... 112
Σχήμα 2.23	Χυτά προϊόντα από ορείχαλκο. 112
Σχήμα 2.24	Η μηχανή χύτευσης κενού-υπερπίεσης του εργαστηρίου: (α) κλειστή και (β) με ανοιχτό τον κάδο τήξης και τον κάδο χύτευσης. 113
Σχήμα 2.25	Σκαρίφημα μηχανής χύτευσης κενού - υπερπίεσης..... 114
Σχήμα 2.26	Ο θάλαμος χύτευσης της μηχανής χύτευσης κενού με την τροποποίηση για την τοποθέτηση θερμοστοιχείων..... 114
Σχήμα 2.27	Η μηχανή χύτευσης εν ώρα λειτουργίας. Εστιάζοντας στα μετρητικά όργανα, φαίνονται οι συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης κατά τη χύτευση υπερπίεσης-κενού του CuNi12Zn24..... 115

Σχήμα 2.28	Κατανομή της χρήσης του χαλκού στην Ευρώπη [Klassert & Tikana 2007].....117
Σχήμα 2.29	Το «Δέντρο του Χαλκού» [Klassert & Tikana 2007].....117
Σχήμα 2.30	Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς κράματος Cu-Zn.....119
Σχήμα 2.31	Μικροδομή ορείχαλκου 60%Cu-40%Zn (α) χωρίς και (β) μετά από θερμική κατεργασία.....120
Σχήμα 2.32	Cu 70, Zn 30 (wt%) καθαρός ορείχαλκος, δενδριτική στερεοποίηση [University of Cambridge 2001].....120
Σχήμα 2.33	Μεταβολή α) του ορίου διαρροής, β) της αντοχής σε εφελκυσμό και γ) της επιμήκυνσης θραύσης, των μονοφασικών ορειχάλκων, συναρτήσει της περιεκτικότητας τους σε ψευδάργυρο, για διάφορα ποσοστά ενδοτράχυνσης.....121
Σχήμα 2.34	Διάγραμμα φάσεων Cu-Ni.....122
Σχήμα 2.35	Cu-Ni-Zn liquidus projection [79Cha].....122
Σχήμα 2.36	Cu-Ni-Zn isotherman projection at 20°C [73Lev]122
Σχήμα 2.37	Δοκιμαστικά χυτά από (α) επιτυχημένη χύτευση ορείχαλκου και (β) από αποτυχημένη χύτευση αλπακά.....124
Σχήμα 2.38	Τρισδιάστατη γεωμετρική αναπαράσταση της μελετώμενης γεωμετρίας.....125
Σχήμα 2.39	Σχέδιο και διαστάσεις του χυτού και του καλουπιού που χρησιμοποιήθηκαν. δέντρου χύτευσης που χρησιμοποιήθηκε.....125
Σχήμα 2.40	Το χυτό κυλινδρικής γεωμετρίας που χυτεύθηκε για λήψη πειραματικών μετρήσεων για διεξαγωγή αναλυτικών υπολογισμών. (α) Σχηματική αναπαράσταση της κοιλότητας του καλουπιού. Επισημαίνεται η θέση τοποθέτησης θερμοστοιχείου. (β) το χυτό προϊόν.....126
Σχήμα 2.41.	Θερμοστοιχείο τύπου K.....128
Σχήμα 2.42	(α) Σύνδεση θερμοστοιχείων στο μετατροπέα, (β) Ο αναλογικο-ψηφιακός μετατροπέας που χρησιμοποιήθηκε, (γ) Η απευθείας απεικόνιση των μετρήσεων σε laptop.....129
Σχήμα 2.43	Αντιπαραβολή μετρήσεων θερμοκρασίας ανεπεξέργαστων (σκούρες αποχρώσεις) και φιλτραρισμένων (ανοιχτόχρωμες αποχρώσεις)...132
Σχήμα 2.44	(α) Φωτογραφία και (β) Σχηματική απεικόνιση της θέσης τοποθέτησης θερμοστοιχείου για την 1 ^η περίπτωση μελέτης136
Σχήμα 2.45	(α) Φωτογραφία και (β) Σχηματική απεικόνιση της θέσης τοποθέτησης θερμοστοιχείου για τη 2 ^η περίπτωση μελέτης136
Σχήμα 2.46	(α) Φωτογραφία και (β) Σχηματική απεικόνιση της θέσης τοποθέτησης θερμοστοιχείου για την 3 ^η περίπτωση μελέτης136
Σχήμα 2.47	(α) Φωτογραφία και (β) Σχηματική απεικόνιση της θέσης τοποθέτησης θερμοστοιχείου για την 4 ^η περίπτωση μελέτης137
Σχήμα 2.48	(α) Φωτογραφία και (β) Σχηματική απεικόνιση της θέσης τοποθέτησης θερμοστοιχείου για την 5 ^η περίπτωση μελέτης137
Σχήμα 2.49	(α) Φωτογραφία και (β) Σχηματική απεικόνιση της θέσης τοποθέτησης θερμοστοιχείου για την 6 ^η περίπτωση μελέτης137
Σχήμα 2.50	Το λειαντικό μηχάνημα του εργαστηρίου.....138
Σχήμα 2.51	Μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τα δείγματα που προετοιμάστηκαν για τη μεταλλογραφική μελέτη.....139
Σχήμα 2.52	Τα δοκίμια μετά τη χημική προσβολή.....139
Σχήμα 2.53	Εργαστηριακός Εξοπλισμός (α) Το Μικροσκόπιο και (β) Το Στερεοσκόπιο.....140

Σχήμα 2.54	Διαδικασία μέτρησης πορώδους με χρήση λογισμικού επεξεργασίας εικόνας Μικρογραφίες πριν τη χημική προσβολή (α) μετά την κατάλληλη προσαρμογή αντίθεσης και φωτεινότητας και (β) η επιλογή της περιοχής που θεωρείται πορώδες προς μέτρηση.	140
Σχήμα 2.55	Παραδείγματα τρόπου μέτρησης της SDAS με μέτρηση του συνολικού μήκους του δενδρίτη.	141
Σχήμα 3.1	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας Καλουπιού στις καμπύλες απόψυξης, για $T_{inlet}=960^{\circ}C$ και Χύτευση Βαρύτητας.....	151
Σχήμα 3.2	Οι τιμές της προτεινόμενης σταθεράς συσχέτισης C της προτεινόμενης εμπειρικής εξίσωσης (3.2), για διάφορες θερμοκρασίες καλουπιού.	153
Σχήμα 3.3	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για μελέτη της θερμοκρασίας Καλουπιού στις καμπύλες απόψυξης, για $T_{inlet}=960^{\circ}C$ και Χύτευση με Υπερπίεση	155
Σχήμα 3.4	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για μελέτη της θερμοκρασίας Καλουπιού στις καμπύλες απόψυξης, για $T_{inlet}=960^{\circ}C$ και Χύτευση Κενού	156
Σχήμα 3.5	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για μελέτη της θερμοκρασίας Καλουπιού στις καμπύλες απόψυξης, για Χύτευση με 50% Κενό και $T_{inlet}=960^{\circ}C$	158
Σχήμα 3.6	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για μελέτη της θερμοκρασίας Καλουπιού στις καμπύλες απόψυξης, για $T_{inlet}=960^{\circ}C$ και Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού	159
Σχήμα 3.7	Οι τιμές της προτεινόμενης σταθεράς συσχέτισης C της προτεινόμενης εμπειρικής εξίσωσης (3.2), για διάφορες θερμοκρασίες καλουπιού.	162
Σχήμα 3.8	Επίδραση της θερμοκρασίας Έγχυσης στις καμπύλες απόψυξης, για Χύτευση Κενού και $T_{mould}=730^{\circ}C$	164
Σχήμα 3.9	Επίδραση της θερμοκρασίας Έγχυσης στις καμπύλες απόψυξης, για Χύτευση Βαρύτητας και $T_{mould}=730^{\circ}C$	165
Σχήμα 3.10	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης που αποκτώνται από πέντε περιπτώσεις χύτευσης CuZn33 για διαφορετικές συνθήκες χύτευσης, με θερμοκρασία έγχυσης τους και $970^{\circ}C$ και θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού τους $600^{\circ}C$	169
Σχήμα 3.11	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης που αποκτώνται από πέντε περιπτώσεις χύτευσης CuZn33 για διαφορετικές συνθήκες χύτευσης, με θερμοκρασία έγχυσης τους και $960^{\circ}C$ και θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού τους $730^{\circ}C$	170
Σχήμα 3.12	Τα πρώτα 10sec των πειραματικών μετρήσεων θερμοκρασίας για πέντε περιπτώσεις χύτευσης για διαφορετικές συνθήκες χύτευσης, με θερμοκρασία έγχυσης τους και $960^{\circ}C$ και θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού τους $730^{\circ}C$	171
Σχήμα 3.13	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για χύτευση κράματος CuNi12Zn24, με διαφορετικές συνθήκες πίεσης (πειράματα 3-1, 3-2 & 3-3).	173
Σχήμα 3.14	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για χύτευση κράματος CuNi12Zn24, με διαφορετικές συνθήκες πίεσης (Πειράματα «4 ^{ης} Ομάδας ΔΡ»).	174

Σχήμα 3.15	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για χύτευση κράματος CuZn33, με διαφορετικές συνθήκες πίεσης (Πειράματα «5 ^{ης} Ομάδας ΔΡ»)..176
Σχήμα 3.16	Οι πειραματικές καμπύλες απόψυξης των πειραμάτων χύτευσης CuZn33 στα πλαίσια του σχεδιασμού πειραμάτων κατά Taguchi...179
Σχήμα 3.17	Τα ποσοστά συνεισφοράς των παραμέτρων της χύτευσης ακριβείας, στο χρόνο στερεοποίησης.....180
Σχήμα 3.18	Διαγράμματα κυρίων επιδράσεων στο χρόνο στερεοποίησης (α) της θερμοκρασίας του καλουπιού, (β) της θερμοκρασίας έγχυσης, (γ) της πίεσης στο θάλαμο τήξης και (δ) της πίεσης στο θάλαμο χύτευσης.....180
Σχήμα 3.19	Τα ποσοστά συνεισφοράς των παραμέτρων της χύτευσης ακριβείας, στο ρυθμό απόψυξης κατά το 1 ^ο στάδιο.181
Σχήμα 3.20	Διαγράμματα κυρίων επιδράσεων για το ρυθμό απόψυξης του 1 ^{ου} σταδίου (α) της θερμοκρασίας του καλουπιού, (β) της θερμοκρασίας έγχυσης, (γ) της πίεσης στο θάλαμο τήξης και (δ) της πίεσης στο θάλαμο χύτευσης.....182
Σχήμα 3.21	Τα ποσοστά συνεισφοράς των παραμέτρων της χύτευσης ακριβείας, στο ρυθμό απόψυξης κατά το 2 ^ο στάδιο.182
Σχήμα 3.22	Διαγράμματα κυρίων επιδράσεων για το ρυθμό απόψυξης του 2 ^{ου} σταδίου (α) της θερμοκρασίας του καλουπιού, (β) της θερμοκρασίας έγχυσης, (γ) της πίεσης στο θάλαμο τήξης και (δ) της πίεσης στο θάλαμο χύτευσης.....183
Σχήμα 3.23	Τα ποσοστά συνεισφοράς των παραμέτρων της χύτευσης ακριβείας, στο ρυθμό απόψυξης κατά το 3 ^ο στάδιο.183
Σχήμα 3.24	Διαγράμματα κυρίων επιδράσεων για το ρυθμό απόψυξης του 3 ^{ου} σταδίου (α) της θερμοκρασίας του καλουπιού, (β) της θερμοκρασίας έγχυσης, (γ) της πίεσης στο θάλαμο τήξης και (δ) της πίεσης στο θάλαμο χύτευσης.....184
Σχήμα 3.25	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης από χύτευση CuNi12Zn24, με τα θερμοστοιχεία να έχουν τοποθετηθεί σε ένα σημείο του χυτού και σε ένα σημείο του καλουπιού («Περίπτωση 2»)...186
Σχήμα 3.26	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης από χύτευση CuNi12Zn24, με τα θερμοστοιχεία να έχουν τοποθετηθεί σε ένα σημείο του χυτού και σε ένα σημείο του καλουπιού («Περίπτωση 3»)...186
Σχήμα 3.27	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης από χύτευση CuNi12Zn24, με τα θερμοστοιχεία να έχουν τοποθετηθεί σε τρία σημεία του χυτού («Περίπτωση 4»)...187
Σχήμα 3.28	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης από χύτευση CuNi12Zn24, με τα θερμοστοιχεία να έχουν τοποθετηθεί σε τρία σημεία του χυτού («Περίπτωση 5»)...187
Σχήμα 3.29	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης από χύτευση CuNi12Zn24, με τα θερμοστοιχεία να έχουν τοποθετηθεί σε τρία σημεία του χυτού («Περίπτωση 6»)...188
Σχήμα 3.30	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης από χύτευση CuZn33, με τα θερμοστοιχεία να έχουν τοποθετηθεί σε τρία σημεία του χυτού («Περίπτωση 6»)...189
Σχήμα 3.31	Η μικρή διατομή χυτού CuNi12Zn24, από (α) Χύτευση Βαρύτητας, (β) Χύτευση Κενού και (γ) Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού.....189

Σχήμα 3.32	Η μεσαία διατομή χυτού CuNi12Zn24, από (α) Χύτευση Βαρύτητας, (β) Χύτευση Κενού και (γ) Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού.	189
Σχήμα 3.33	Η μεγάλη διατομή χυτού CuNi12Zn24, από χύτευση Υπερπίεσης-Κενού.	190
Σχήμα 3.34	Η μικρή διατομή χυτού CuZn33, από χύτευση με Υπερπίεση (μεγέθυνση x16).	191
Σχήμα 3.35	Η μεσαία διατομή χυτού CuZn33, από (α) Χύτευση Βαρύτητας, (β) Χύτευση Κενού και (γ) Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού.....	191
Σχήμα 3.36	(α) Γραφική απεικόνιση των μετρήσεων της SDAS, σε πέντε θέσεις μέτρησης χυτών που κατασκευάστηκαν με χύτευση υπό τρεις διαφορετικές συνθήκες πίεσης και (β) οι 5 θέσεις μέτρησης.	192
Σχήμα 3.37	(α) Χύτευση Βαρύτητας και (β) Χύτευση Κενού, στη μικρή διατομή, x10.	192
Σχήμα 3.38	Χαρακτηριστικές δενδριτικές δομές σε χυτά CuNi12Zn24 (α) Χύτευση Κενού με Υπερπίεση, μεγάλη διατομή, x10, (β) Χύτευση Κενού, μεγάλη διατομή, x10, (γ) Χύτευση Βαρύτητας, μεγάλη διατομή, x10, (δ) Χύτευση Κενού με Βαρύτητα, μεσαία διατομή, x10, (ε) Χύτευση Κενού, μεσαία διατομή, x10, (στ) Χύτευση Κενού-Υπερπίεσης, μεσαία διατομή, x10.....	193
Σχήμα 3.39	Χυτό CuZ33, από Χύτευση Κενού, μεσαία διατομή (α) μεγέθυνση x1.0 και (β) μεγέθυνση x2.5, (γ) μεγάλη διατομή και (δ)μεσαία διατομή.	193
Σχήμα 3.40	Επίδραση (α) της θέσης μέτρησης και (β) της μεθόδου χύτευσης, στην SDAS. (Main Effect Plots (means) for SN ratios)	194
Σχήμα 3.41	Ποσοστά συνεισφοράς της θέσης μέτρησης και της μεθόδου χύτευσης στην SDAS.	194
Σχήμα 3.42	Σημεία πάνω στη διατομή του χυτού, από τα οποία ελήφθησαν φωτογραφίες και πραγματοποιήθηκε μέτρηση πορώδους.....	196
Σχήμα 3.43	Κατανομή πορώδους σε 5 σημεία της διατομής του χυτού, για τρία χυτά CuZn33, από 3 είδη χύτευσης (βαρύτητας, κενού και υπερπίεσης).	197
Σχήμα 3.44	Ιστόγραμμα κατανομής μεγέθους πόρων για χύτευση κενού.....	202
Σχήμα 3.45	Ιστόγραμμα κατανομής μεγέθους πόρων για χύτευση υπερπίεσης-κενού	203
Σχήμα 3.46	Πορώδες, δοκιμίων “καθαρού ορείχαλκου”, από χύτευση βαρύτητας, χύτευση κενού και χύτευση υπερπίεσης, σε 5 σημεία της διατομής του χυτού.	204
Σχήμα 3.47	Πορώδες στη μέση τομή χυτού, από χύτευση με Κενό, Tm=550oC, Ti=960oC (α) στη θέση 1, (β) στη θέση 2, (γ) στη θέση 3, (δ) στη θέση 4, (ε) χαρακτηριστική περιοχή στη θέση 5 και (στ) η χειρότερη περιοχή στη θέση 5.	206
Σχήμα 3.48	Πορώδες στη μέση τομή χυτού, από χύτευση με Υπερπίεση, Tm=550oC, Ti=950oC (α) στη θέση 1, (β) στη θέση 2, (γ) στη θέση 3, (δ) στη θέση 4, (ε) στη θέση 5.	207
Σχήμα 3.49	Πορώδες στη μέση τομή χυτού, από χύτευση με Βαρύτητα, Tm=550oC, Ti=980oC (α) στη θέση 1, (β) στη θέση 2, (γ) στη θέση 3, (δ) στη θέση 4, (ε) χαρακτηριστική περιοχή στη θέση 5 και (στ) η χειρότερη περιοχή στη θέση 5.....	208

Σχήμα 4.1	Σχηματική αναπαράσταση χυτού σε τομή. Διακρίνονται δύο περιοχές μετάλλου σε υγρή φάση. Η μία (Region A) είναι εκτεθειμένη στον αέρα, ενώ η άλλη (Region B) περιβάλλεται εξ' ολοκλήρου από στερεοποιημένο μέταλλο [ESI Group 2004]. ...228
Σχήμα 4.2	1 ^ο σενάριο: Υποχώρηση λόγω συρρίκνωσης στην ελεύθερη επιφάνεια (freesurface) του τήγματος. Η τιμή του πορώδους σε εκείνο το σημείο τίθεται ίση με 1 (δηλ. κενό) [ESI Group 2004].229
Σχήμα 4.3	2 ^ο σενάριο: Εμφάνιση μακροπορώδους σε σημείο κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, με ποσοστό στερεοποίησης μικρότερο από την RPF5[ESI Group 2004].229
Σχήμα 4.4	3 ^ο σενάριο: Η ύπαρξη μετάλλου με ποσοστό στερεοποίησης μικρότερο από RPF5γύρω από μία περιοχή, υπονοεί αδυναμία πλήρωσης της περιοχής με τήγμα και άρα δημιουργία μακροπορώδους [ESI Group 2004].230
Σχήμα 4.5	Σχηματική απεικόνιση των συνθηκών και των παραμέτρων σε μία περιοχή του χυτού, από τις οποίες εξαρτάται η εμφάνιση μικροπορώδους[ESI Group 2004].231
Σχήμα 4.6	Σχηματική αναπαράσταση της μηχανής χύτευσης και των διατομώνμεταξύ των οποίων εφαρμόστηκε η εξίσωση Bernoulliγια υπολογισμό της ταχύτητας έγχυσης.232
Σχήμα 4.7	Οι ιδιότητες του ορείχαλκου, συναρτήσεσι της θερμοκρασίας, που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της χύτευσης (A) θερμική αγωγιμότητα, (B) πυκνότητα, (C) ειδική θερμότητα, (D) ποσοστό στερεοποίησης και (E) ιξώδες.237
Σχήμα 4.8	Οι ιδιότητες του CuZn12Ni24, συναρτήσεσι της θερμοκρασίας, που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της χύτευσης (A) θερμική αγωγιμότητα, (B) πυκνότητα, (C) ειδική ενθαλπία (kJ/kg), (D) ποσοστό στερεοποίησης και (E) ιξώδες.238
Σχήμα 4.9	Ιδιότητες καθαρού αλουμινίου συναρτήσεσι της θερμοκρασίας. ...239
Σχήμα 4.10	Επίδραση της θερμοκρασίας προθέρμανσης του καλουπιού στις Αριθμητικές καμπύλες απόψυξης.242
Σχήμα 4.11	Επίδραση της παραμέτρου LVSURF (ποσοστό πλήρωσης του καλουπιού) στις αριθμητικές καμπύλες απόψυξης.248
Σχήμα 4.12	Επίδραση του h_1 (τιμή του ΣΜΘ κατά το 1 ^ο στάδιο)στις καμπύλες απόψυξης.249
Σχήμα 4.13	Επίδραση του t_1 στις καμπύλες απόψυξης.250
Σχήμα 4.14	Επίδραση του h_2 (τιμή του ΣΜΘ κατά το 2 ^ο στάδιο)στις καμπύλες απόψυξης.250
Σχήμα 4.15	Επίδραση του t_2 (χρονική στιγμή πέρατος 2 ^{ου} σταδίου)στις καμπύλες απόψυξης.251
Σχήμα 4.16	Επίδραση του h_3 (τιμή του ΣΜΘ κατά το 3 ^ο στάδιο)στις καμπύλες απόψυξης.251
Σχήμα 4.17	Η «Δοκιμαστική Γεωμετρία 1».253
Σχήμα 4.18	Επίδραση της μεταβλητής h_1 στην καμπύλη απόψυξης του χυτού. ..254
Σχήμα 4.19	Επίδραση της μεταβλητής h_2 στην καμπύλη απόψυξης του χυτού. ..254
Σχήμα 4.20	Επίδραση της μεταβλητής h_3 στην καμπύλη απόψυξης του χυτού. ..255
Σχήμα 4.21	Επίδραση της μεταβλητής t_1 στην καμπύλη απόψυξης του χυτού. ..255
Σχήμα 4.22	Επίδραση της μεταβλητής t_2 στην καμπύλη απόψυξης του χυτού. ..255
Σχήμα 4.23	Η «Δοκιμαστική Γεωμετρία 2».256

Σχήμα 4.24	Αριθμητικές καμπύλες απόψυξης που αποκτήθηκαν για τις πέντε εξεταζόμενες περιπτώσεις χύτευσης του Πίνακα 4.1, για τα πρώτα 10sec της στερεοποίησης.	260
Σχήμα 5.1	Θερμοκρασιακό προφίλ στο σύστημα χυτού-καλουπιού (α) σχηματική απεικόνιση κατά [Stefanescu 2008] και (β) σχηματική απεικόνιση σύμφωνα με τον [Campbell 1998].....	277
Σχήμα 5.2	Θερμοκρασιακό προφίλ στο καλούπι και τα χυτό, για τέσσερις διαφορετικές απλοποιητικές παραδοχές [Stefanescu 2008] (α)αντίσταση στο καλούπι, (β)αντίσταση στη διεπιφάνεια καλουπιού-χυτού, (γ) αντίσταση στο στερεοποιημένο χυτό και (δ) αντίσταση στο καλούπι και στο στερεοποιημένο χυτό.....	277
Σχήμα 5.3	Πειραματική και αριθμητική καμπύλη απόψυξης, για το ορειχάλκινο χυτό της γεωμετρίας με τις τρεις περιοχές (Περίπτωση Ι).....	282
Σχήμα 5.4	Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας που προέκυψε από αναλυτικό υπολογισμό, για το ορειχάλκινο χυτό της γεωμετρίας με τις τρεις περιοχές (Περίπτωση Ι).	283
Σχήμα 5.5	Η απλή γεωμετρία κυλινδρικού σχήματος που χυτεύθηκε (Περίπτωση ΙΙ).	284
Σχήμα 5.6	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης χυτού και καλουπιού, για το ορειχάλκινο χυτό απλής κυλινδρικής γεωμετρίας (Περίπτωση ΙΙ).	284
Σχήμα 5.7	Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας που προέκυψε από αναλυτικό υπολογισμό, για το ορειχάλκινο χυτό απλής κυλινδρικής γεωμετρίας (Περίπτωση ΙΙ).	285
Σχήμα 5.8	Οι αριθμητικές καμπύλες απόψυξης που προέκυψαν από το ΣΜΘ που υπολογίστηκε αναλυτικά για την περίπτωση ΙΙ (πράσινη καμπύλη) και από μία παραλλαγή του ΣΜΘ αυτού (ροζ καμπύλη)..	286
Σχήμα 5.9	Διάγραμμα ροής διαδικασίας αντίστροφου προσδιορισμού του ΣΜΘ [Dong et al. 2011]	287
Σχήμα 5.10	Αρχική εκτίμηση για τον ΣΜΘ.	291
Σχήμα 5.11	ο ΣΜΘ που προέκυψε ως αποτέλεσμα από τον αντίστροφο προσδιορισμό.	292
Σχήμα 5.12	Προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης από την αριθμητική αντίστοιχη, που προέκυψε από προσομοίωση της χύτευσης με το ΣΜΘ-αποτέλεσμα του αντίστροφου προβλήματος...	292
Σχήμα 5.13	Η αριθμητική καμπύλη απόψυξης που προκύπτει από προσομοίωση της χύτευσης με χρήση του ΣΜΘ που προέκυψε από αντίστροφο υπολογισμό.	293
Σχήμα 5.14	Προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης από την αριθμητική, που προέκυψε από προσομοίωση με το ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση Κενού ($\Delta P = 0.97 \text{ bar}$).	296
Σχήμα 5.15	Προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης από την αριθμητική, που προέκυψε από προσομοίωση με το ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση Υπερπίεσης ($\Delta P = 0.5 \text{ bar}$).	296
Σχήμα 5.16	Προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης από την αριθμητική, που προέκυψε από προσομοίωση με το ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση με 50% Κενό ($\Delta P = 0.5 \text{ bar}$).	297

Σχήμα 5.17	Προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης από την αριθμητική, που προέκυψε από προσομοίωση με το ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση Βαρύτητας ($\Delta P = 0 \text{ bar}$).....	297
Σχήμα 5.18	Ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση με Υπερπίεση-Κενό ($\Delta P = 1.47 \text{ bar}$).....	298
Σχήμα 5.19	Ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση Κενού ($\Delta P = 0.97 \text{ bar}$).....	298
Σχήμα 5.20	Ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση με Υπερπίεση ($\Delta P = 0.5 \text{ bar}$).....	299
Σχήμα 5.21	Ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση με 50% Κενό ($\Delta P = 0.5 \text{ bar}$).....	299
Σχήμα 5.22	Ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση Βαρύτητας ($\Delta P = 0 \text{ bar}$).....	299
Σχήμα 6.1	Ποιοτική απεικόνιση τα μορφής των τριών μορφών ΣΜΘ που μελετήθηκαν. (α) Βηματικός συναρτήσεως της θερμοκρασίας, (β) Βηματικός συναρτήσεως του χρόνου, (γ) Εκθετικός συναρτήσεως της θερμοκρασίας.....	311
Σχήμα 60.2	Η Δομή του Κεφαλαίου - Περιπτώσεις που μελετήθηκαν και συμπεράσματα εν συντομία.....	312
Σχήμα 6.3	Τα βασικά μέρη μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης [R. L. Haupt & S. E. Haupt 2004].....	313
Σχήμα 6.4	Τρισδιάστατη απεικόνιση του χώρου λύσεων της συνάρτησης του Rastrigin [R. L. Haupt & S. E. Haupt 2004].....	316
Σχήμα 6.5	Προβολή σε 2D των ισούψων της συνάρτησης του Rastrigin. $Ras(x) = 20 + x_1^2 + x_2^2 - 10(\cos 2\pi x_1 + \cos 2\pi x_2)$. (MATLAB User's Guide) ...	316
Σχήμα 6.6	Χρωμόσωμα και Γονίδιο - Διάνυσμα Σχεδίασης και Μεταβλητή Σχεδίασης.....	318
Σχήμα 6.7	Οπτική απεικόνιση της «διασποράς».....	318
Σχήμα 6.8	Γενικό Διάγραμμα Ροής ενός Γενετικού Αλγορίθμου.....	319
Σχήμα 6.9	Το σχήμα διασταύρωσης "single point crossover".....	323
Σχήμα 6.10	Διάγραμμα Ροής του ΓΑ που αναπτύχθηκε.....	329
Σχήμα 6.11	Διάγραμμα ροής της αντικειμενικής συνάρτησης του γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε.....	330
Σχήμα 6.12	Σχηματική απεικόνιση του τρόπου σύγκρισης καμπυλών με ανόμοιες x-συντεταγμένες.....	333
Σχήμα 6.13	Η «Δοκιμαστική Γεωμετρία 1».....	337
Σχήμα 6.14	Η «Δοκιμαστική Γεωμετρία 2».....	340
Σχήμα 6.15	Η εξέλιξη του ΓΑ για τη «Γεωμετρία 2», με 2ΣΜΘ και $\Sigma\Theta = f_{\text{step}}(t)$	342
Σχήμα 6.16	Πειραματικές καμπύλες απόψυξης.....	344
Σχήμα 6.17	Οι περιοχές της γεωμετρίας στις οποίες έχει αποδοθεί διαφορετικός ΣΜΘ.....	345
Σχήμα 6.18	Οι κόμβοι που αντιστοιχούν στα σημεία τοποθέτησης των θερμοστοιχείων κατά την πειραματική διαδικασία.....	345
Σχήμα 6.19	Ποιοτική απεικόνιση τα μορφής του ΣΜΘ, για κάθε τις τρεις που μελετήθηκαν. (α) Βηματικός συναρτήσεως της θερμοκρασίας, (β) Βηματικός συναρτήσεως του χρόνου, (γ) Εκθετικός συναρτήσεως της θερμοκρασίας.....	346

Σχήμα 6.20	Η εξέλιξη του ΓΑ για την περίπτωση ενιαίου ΣΜΘ στο χυτό. (Αντικ. Συνάρτηση: η προσέγγιση και των τριών πειραματικών καμπυλών)	347
Σχήμα 6.21	Υπέρθεση των τριών πειραματικών καμπυλών απόψυξης με τις αντίστοιχες αριθμητικές, που προκύπτουν για το βέλτιστο ΕΝΙΑΙΟ βηματικό ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου (1 ΣΜΘ σε όλο το χυτό).	348
Σχήμα 6.22	Η προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης σε σημείο της μεγάλης διατομής του χυτού, θεωρώντας μοντελοποίηση με ενιαίο ΣΜΘ σε όλο το χυτό,	352
Σχήμα 6.23	Η προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης σε σημείο της μεγάλης διατομής του χυτού, θεωρώντας μοντελοποίηση με ενιαίο ΣΜΘ σε όλο το χυτό, με περιορισμένο πεδίο ορισμού της h_3	352
Σχήμα 6.24	Η προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης σε σημείο της μεγάλης διατομής του χυτού, θεωρώντας μοντελοποίηση ενιαίου ΣΜΘ σε όλο το χυτό,	354
Σχήμα 6.25	Η προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης σε σημείο της μεσαίας διατομής του χυτού, θεωρώντας μοντελοποίηση με ενιαίο ΣΜΘ σε όλο το χυτό, με περιορισμένο πεδίο ορισμού της h_3	354
Σχήμα 6.26	Η προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης σε σημείο της μεγάλης διατομής του χυτού, θεωρώντας μοντελοποίηση με ενιαίο ΣΜΘ σε όλο το χυτό,	355
Σχήμα 6.27	Η προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης σε σημείο της μεγάλης διατομής του χυτού, θεωρώντας μοντελοποίηση με ενιαίο ΣΜΘ σε όλο το χυτό, με ευρύτερο πεδίο ορισμού της h_1	355
Σχήμα 6.28	Ποιοτική απεικόνιση τα μορφής του ΣΜΘ συναρτήσει της θερμοκρασίας. Διακρίνεται σε 3 περιοχές και μεταβάλλεται βηματικά.	359
Σχήμα 6.29	Η εξέλιξη του ΓΑ για τη «Γεωμετρία 3», με 3ΣΜΘ και $\Sigma\Theta=f_{\text{step}}(T)$	361
Σχήμα 6.30	Ο βέλτιστος ΣΜΘ όπως προέκυψε από το ΓΑ για τη «Γεωμετρία 3», με 3ΣΜΘ και $\Sigma\Theta=f_{\text{step}}(T)$	362
Σχήμα 6.31	Υπέρθεση των τριών πειραματικών καμπυλών απόψυξης με τις αντίστοιχες αριθμητικές, που προκύπτουν για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσει της θερμοκρασίας.	363
Σχήμα 6.32	Υπέρθεση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μεγάλη διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσει της θερμοκρασίας.	364
Σχήμα 6.33	Υπέρθεση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μεσαία διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσει της θερμοκρασίας.	365
Σχήμα 6.34	Υπέρθεση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μικρή διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσει της θερμοκρασίας.	366

Σχήμα 6.35	Ποιοτική απεικόνιση τα μορφής του ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου. Διακρίνεται σε 3 περιοχές και μεταβάλλεται βηματικά.....	367
Σχήμα 6.36	Η εξέλιξη του ΓΑ για τη «Γεωμετρία 3», με $3ΣΜΘ$ και $ΣΜΘ=f_{step}(t)$	370
Σχήμα 6.37	Βέλτιστος ΣΜΘ για τις τρεις περιοχές του χυτού, συναρτήσει του χρόνου, όπως προέκυψε από τον ΓΑ.....	371
Σχήμα 6.38	Υπέρθωση των τριών πειραματικών καμπυλών απόψυξης με τις αντίστοιχες αριθμητικές, που προκύπτουν για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου.....	373
Σχήμα 6.39	Υπέρθωση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μεγάλη διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου.....	374
Σχήμα 6.40	Υπέρθωση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μεσαία διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου.....	375
Σχήμα 6.41	Υπέρθωση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μικρή διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου.....	376
Σχήμα 6.42	Η πορεία του ΓΑ με πραγματικές μεταβλητές στο ομοιογενές διάστημα $[0,1]$	379
Σχήμα 6.43	Υπέρθωση των τριών πειραματικών καμπυλών απόψυξης με τις αντίστοιχες αριθμητικές, που προκύπτουν για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου, ο οποίος προέκυψε από ΓΑ με πραγματικές μεταβλητές.....	380
Σχήμα 6.44	Η πορεία του ΓΑ με πραγματικές μεταβλητές στο ομοιογενές διάστημα $[LB,UB]$	381
Σχήμα 6.45	Ποιοτική απεικόνιση τα μορφής του ΣΜΘ ως εκθετικής συνάρτησης του χρόνου.....	384
Σχήμα 6.46	Βέλτιστος ΣΜΘ για τις τρεις περιοχές του χυτού, συναρτήσει του χρόνου, όπως προέκυψε από τον ΓΑ.....	385
Σχήμα 6.47	Υπέρθωση των τριών πειραματικών καμπυλών απόψυξης με τις αντίστοιχες αριθμητικές, που προκύπτουν για το βέλτιστο εκθετικό ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου.....	386
Σχήμα 6.48	Υπέρθωση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μεγάλη διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο εκθετικό ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου.....	387
Σχήμα 6.49	Υπέρθωση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μεσαία διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο εκθετικό ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου.....	388
Σχήμα 6.50	Υπέρθωση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μικρή διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο εκθετικό ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου.....	389

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1	Κατηγοριοποίηση των μεθόδων χύτευσης μετάλλου σύμφωνα με [Kalpakjian 1997].	11
Πίνακας 1.2	Κατηγοριοποίηση των μεθόδων χύτευσης ως προς το είδος καλουπιού [ASM International 1992].	11
Πίνακας 1.3	Πλεονεκτήματα και περιορισμοί κυριότερων μεθόδων χύτευσης....	12
Πίνακας 1.4	Λίστα με τις συνηθέστερες μεθόδους χύτευσης: εύρος εφαρμογών, απαιτούμενος χρόνος, υλικά. [Mark Jolly 2002].....	13
Πίνακας 1.5	Ποσοστό συστολής χαρακτηριστικών μετάλλων και κραμάτων [Χρυσουλάκης & Παντελής 1996]	19
Πίνακας 1.6	Χρησιμοποιούμενα σύμβολα στην κωδικοποίηση των ατελειών [ASM International 1996], [American Foundry Society 1974], [Alagarsamy 2003].	22
Πίνακας 1.7	Ενδεικτικό Απόσπασμα από την Τυποποιημένη Κατηγοριοποίηση Ελαττωμάτων των Χυτών [ASM International 1996].....	22
Πίνακας 1.8	Χαρακτηριστικές τιμές κενού που χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα στη βιβλιογραφία, και τιμές ταχύτητας εισόδου τήγματος [Ji-qiang et al. 2007].	39
Πίνακας 1.9	Πίνακας πειραμάτων χύτευσης για διάφορες συνθήκες κενού και η μετρούμενη εύροια [Ott & Raub 1985].....	43
Πίνακας 1.10	Πίνακας με τις τιμές τωψ ν ΣΜΘ στο [Long et al. 2011].....	90
Πίνακας 2.1	Χαλκός και κράματα χαλκού σύμφωνα με το πρότυπο DIN EN 1412.	117
Πίνακας 2.2	Κράματα χαλκού για συμπυκνωτές και εναλλάκτες θερμότητες σε ναυπηγικές εφαρμογές, σύμφωνα με το DIN-EN 12451.....	118
Πίνακας 2.3	Τυποποιημένα χυτά κράματα χαλκού για ναυπηγικές εφαρμογές[CEN TC 133 2008].	118
Πίνακας 2.4	Συνήθειες ορθογώνιες διατάξεις για σχεδιασμό πειραμάτων κατά Taguchi	142
Πίνακας 2.5	Ο πίνακας σχεδιασμού πειραμάτων κατά Taguchi σύμφωνα με την ορθογώνια διάταξη L_9	142
Πίνακας 3.1	Πίνακας ομάδων συγκρινόμενων πειραμάτων, για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας του καλουπιού.....	150
Πίνακας 3.2	Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων βαρύτητας.	152
Πίνακας 3.3	Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων υπερπίεσης.	155
Πίνακας 3.4	Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων κενού.	157
Πίνακας 3.5	Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων κενού.	157
Πίνακας 3.6	Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο	

	χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων κενού.....	160
Πίνακας 3.7	Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων επίδρασης της θερμοκρασίας του καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και τους ρυθμούς απόψυξης.....	161
Πίνακας 3.8	Πίνακας ομάδων συγκρινόμενων πειραμάτων, για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας έγχυσης του τήγματος.....	163
Πίνακας 3.9	Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων κενού.....	164
Πίνακας 3.10	Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων βαρύτητας.....	165
Πίνακας 3.11	Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων επίδρασης της θερμοκρασίας έγχυσης τήγματος στο χρόνο στερεοποίησης και τους ρυθμούς απόψυξης.....	166
Πίνακας 3.12	Κατηγοριοποίηση των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν με βάση τις συνθήκες πίεσης στο θάλαμο τήξης και στο θάλαμο χύτευσης.....	167
Πίνακας 3.13	Πίνακας ομάδων συγκρινόμενων πειραμάτων, για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών πίεσης κατά τη χύτευση.....	168
Πίνακας 3.14	Πειράματα «1 ^{ης} Ομάδας ΔΡ», για τη διερεύνηση της επίδραση των συνθηκών χύτευσης στη χύτευση, με (ΔΡ;600;970).....	168
Πίνακας 3.15	Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών πίεσης στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων ορείχαλκου (CuZn33).....	169
Πίνακας 3.16	Πειράματα «2 ^{ης} Ομάδας ΔΡ», για τη διερεύνηση της επίδραση των συνθηκών χύτευσης στη χύτευση CuZn33, με (Ρ;730;960).....	170
Πίνακας 3.17	Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών πίεσης στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων ορείχαλκου CuZn33.....	172
Πίνακας 3.18	Πειράματα «3 ^{ης} Ομάδας ΔΡ», για τη διερεύνηση της επίδραση των συνθηκών χύτευσης στη χύτευση CuNi12Zn24, με (Ρ;1111;740).....	172
Πίνακας 3.19	Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών πίεσης κατά τη χύτευση στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων CuNi12Zn24.....	173
Πίνακας 3.20	Πειράματα «4 ^{ης} Ομάδας ΔΡ», για τη διερεύνηση της επίδραση των συνθηκών χύτευσης στη χύτευση CuNi12Zn24, με (Ρ;1130;550).....	174
Πίνακας 3.21	Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών πίεσης κατά τη χύτευση στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων CuNi12Zn24.....	174
Πίνακας 3.22	Πειράματα «5 ^{ης} Ομάδας ΔΡ», για τη διερεύνηση της επίδραση των συνθηκών χύτευσης στη χύτευση CuZn33, με (Ρ;970;500).....	175
Πίνακας 3.23	Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών πίεσης κατά τη	

	χύτευση στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων CuZn33, με (P;970;500).	176
Πίνακας 3.24	Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων επίδρασης των συνθηκών πίεσης κατά τη χύτευση στο χρόνο στερεοποίησης και τους ρυθμούς απόψυξης.	177
Πίνακας 3.25	Πίνακας σχεδιασμού πειραμάτων κατά Taguchi (L9), για διερεύνηση της επίδρασης παραμέτρων της χύτευσης στο χρόνο στερεοποίησης, με βάση τις πειραματικές καμπύλες απόψυξης... ..	178
Πίνακας 3.26	Αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) για τον χρόνο στερεοποίησης	179
Πίνακας 3.27	Αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) για το ρυθμό απόψυξης στο 1 ^ο στάδιο.....	181
Πίνακας 3.28	Αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) για το ρυθμό απόψυξης στο 2 ^ο στάδιο.....	182
Πίνακας 3.29	Αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) για το ρυθμό απόψυξης στο 3 ^ο στάδιο.....	183
Πίνακας 3.30	Πίνακας μετρήσεων της απόστασης δευτερευόντων δενδριτικών κλάδων (SDAS), σε πέντε θέσεις μέτρησης χυτών που κατασκευάστηκαν με χύτευση υπό τρεις διαφορετικές συνθήκες πίεσης.	192
Πίνακας 3.31	Αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) για την SDAS.	194
Πίνακας 3.32.	Μετρήσεις πορώδους για τα χυτά της 1 ^{ης} ομάδας πειραμάτων. ...	197
Πίνακας 3.33.	Αύξηση (%) πορώδους σε σχέση με το πορώδες στη χύτευση κενού.	198
Πίνακας 3.34	Στατιστικά στοιχεία πορώδους	199
Πίνακας 3.35	Πίνακας εικόνων πορώδους για τις 5 θέσεις μέτρησης, σε χυτά που κατασκευάστηκαν με $T_{mould}=730^{\circ}C$, $T_{inlet}=960^{\circ}C$, με 5 διαφορετικές μεθόδους χύτευσης	200
Πίνακας 3.36.	Μετρήσεις πορώδους.	203
Πίνακας 3.37.	Τυπική απόκλιση (Standard deviation) του εμβαδού των πόρων .	203
Πίνακας 3.38.	Μέση τιμή εμβαδού των πόρων (μm^2).....	203
Πίνακας 3.39.	Μέγιστο εμβαδό πόρου (μm^2).....	204
Πίνακας 3.40.	Μεταβολή (%) πορώδους σε σχέση με το πορώδες της χύτευσης κενού.	204
Πίνακας 3.41	Κενό; 550 ; 960	205
Πίνακας 3.42	Υπερπίεση; 550 ; 950	207
Πίνακας 3.43	Βαρύτητα; 550 ; 980	208
Πίνακας 4.1	Χαρακτηριστικές τιμές των κυριότερων παραμέτρων που καθορίζουν τους αλγόριθμους υπολογισμούς πορώδους.....	228
Πίνακας 4.2	Πίνακας τιμών των μεγεθών που υπολογίστηκαν από την εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli, για υπολογισμό της παροχής μάζας τήγματος.	233
Πίνακας 4.3	Ρυθμός έγχυσης τήγματος, ανάλογα με τις συνθήκες χύτευσης..	233
Πίνακας 4.4	Τα συστατικά του γύψου τύπου Argentum[Ransom & Randolph 2005]	240
Πίνακας 4.5	Ιδιότητες του γύψου τύπου Argentum[Beeley 2001].....	240
Πίνακας 4.6	Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων βαρύτητας.	242

Πίνακας 4.7	Ποσοστά μεταβολής των αποτελεσμάτων σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς.....	243
Πίνακας 4.8	Επίδραση της θερμοκρασίας προθέρμανσης καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης, στο πορώδες και στο σχηματιζόμενο κενό, με βάση τα αποτελέσματα της Αριθμητικής Προσομοίωσης της χύτευσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη μέση τομή του χυτού.....	244
Πίνακας 4.9	Επίδραση της εξωτερικής θερμοκρασίας του καλουπιού (οριακή συνθήκη, T_{bc}) στο χρόνο στερεοποίησης και στο πορώδες, με βάση τα αποτελέσματα της Αριθμητικής Προσομοίωσης της χύτευσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη μέση τομή του χυτού.....	246
Πίνακας 4.10	Οι τιμές των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση ευαισθησίας της τιμής του κόστους σε κάθε μία από τις μεταβλητές της «Γεωμετρίας 1».....	254
Πίνακας 4.11	Επίδραση των τιμών των ΣΜΘ στις αριθμητικές καμπύλες, για τη «Γεωμ.2».....	257
Πίνακας 4.12	Προσομοιώσεις «2 ^{nc} Ομάδας ΔΡ», για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών χύτευσης στη χύτευση CuZn33, με (P;730;960)....	258
Πίνακας 4.13	Πίνακας τιμών ΣΜΘ για τα διαφορετικά είδη χύτευσης.....	258
Πίνακας 4.14	Διάρκεια σταδίων 1,2 & 3, στα οποία αντιστοιχούν οι τιμές h_1, h_2 & h_3 του ΣΜΘ.....	259
Πίνακας 4.15	Αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων των περιπτώσεων χύτευσης του πίνακα 1.12. Απεικονίζεται ο χρόνος στερεοποίησης του χυτού με τη μορφή χρωματικής κλίμακας για ολόκληρο το χυτό και για τη μέση τομή.....	261
Πίνακας 4.16	Αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων των περιπτώσεων χύτευσης του πίνακα 1.12. Απεικονίζεται το πορώδες του χυτού με τη μορφή χρωματικής κλίμακας για ολόκληρο το χυτό και για τη μέση τομή.....	262
Πίνακας 4.17	Αποτελέσματα προσομοίωσης: χρόνος στερεοποίησης, πορώδες και ποιότητα πλήρωσης.....	263
Πίνακας 4.18.	Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για τις Περιπτώσεις χύτευσης.....	265
Πίνακας 4.19.	Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για τις Περιπτώσεις χύτευσης.....	267
Πίνακας 5.1	Τα μεγέθη που αντιπροσωπεύουν οι ποσότητες ϕ , Γ και S , ανάλογα με την εξίσωση στην οποία αναφέρονται [Stefanescu 2008].....	275
Πίνακας 5.2	Πίνακας τιμών αρχικής εκτίμησης και αποτελέσματος ΣΜΘ.....	291
Πίνακας 5.3	Πειράματα «1 ^{nc} Ομάδας ΔΡ», για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών χύτευσης στη χύτευση, με (ΔΡ;600;970).....	295
Πίνακας 5.4	Τιμές h_1 , h_2 & h_3 των προσδιορισθέντων ΣΜΘ για τις 5 περιπτώσεις χύτευσης, ανά χρονικό στάδιο.....	300
Πίνακας 5.5	Διάρκεια των χρονικών διαστημάτων t_1 , t_2 των χρονικά μεταβαλλόμενων προσδιορισθέντων ΣΜΘ, για τις 5 περιπτώσεις χύτευσης.....	300
Πίνακας 6.1	Κωδικοποίηση μεταβλητών για την δοκιμαστική περίπτωση της «Γεωμετρίας 1».....	338
Πίνακας 6.2	Διερεύνηση της επίδρασης του mutation rate στην ποιότητα της λύσης.....	339

Πίνακας 6.3	Αποτελέσματα από 11 ανεξάρτητες δοκιμές του ίδιου ΓΑ.....	339
Πίνακας 6.4	Κωδικοποίηση μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε στο ΓΑ για τη μικρή διατομή της «Γεωμετρίας 2».	341
Πίνακας 6.5	Κωδικοποίηση μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε στο ΓΑ για τη μεγάλη διατομή της «Γεωμετρίας 2».	341
Πίνακας 6.6	Η βέλτιστη λύση για την περίπτωση μοντελοποίησης του χυτού με Ενιαίο ΣΜΘ και κριτήριο βελτιστοποίησης την ταυτόχρονη προσέγγιση τριών πειραματικών καμπυλών.	348
Πίνακας 6.7	Κωδικοποίηση μεταβλητών για τις δοκιμαστικές διερευνήσεις με 1 ΣΜΘ.	350
Πίνακας 6.8	Διερεύνηση της επίδρασης των επιλογών του ΓΑ στην επίτευξη βέλτιστης λύσης.	351
Πίνακας 6.9	Κωδικοποίηση μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε στο ΓΑ για τη «Γεωμετρία 3», με 3ΣΜΘ και $\Sigma\Theta=f_{step}(T)$	360
Πίνακας 6.10	Πίνακας αποτελεσμάτων	366
Πίνακας 6.11	Κωδικοποίηση μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε στο ΓΑ για τη «Γεωμετρία 3», με 3ΣΜΘ και $\Sigma\Theta=f_{step}(t)$	369
Πίνακας 6.12	Πίνακας αποτελεσμάτων	372
Πίνακας 6.13	Κωδικοποίηση μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε στο ΓΑ με Πραγματικούς Αριθμούς, για τη «Γεωμετρία 3», με 3ΣΜΘ και $\Sigma\Theta=f_{step}(t)$	378
Πίνακας 6.14	Κωδικοποίηση μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε στο ΓΑ για τη «Γεωμετρία 3», με 3ΣΜΘ και $\Sigma\Theta=f_{exp}(t)$	385
Πίνακας 6.15	Πίνακας αποτελεσμάτων	387
Πίνακας 6.16	Συνοπτική παρουσίαση χρονικών στιγμών έναρξης και λήξης στερεοποίησης σύμφωνα με τις πειραματικές και τις αριθμητικές καμπύλες απόψυξης.	390
Πίνακας 6.17	Συνοπτική παρουσίαση των βέλτιστων τιμών αντικειμενικής συνάρτησης και των βέλτιστων χρωμοσωμάτων, όπως προέκυψε από βελτιστοποίηση με ΓΑ για τις κυριότερες περιπτώσεις.....	390

Η σελίδα αυτή έχει αφεθεί σκοπίμως κενή.

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής σχετίζεται με ένα πολύ σοβαρό επιστημονικό πρόβλημα: αυτό της υψηλής αβεβαιότητας της αριθμητικής προσομοίωσης της χύτευσης λόγω ασάφειας κάποιων δεδομένων εισόδου, μεταξύ των οποίων είναι ο Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας (ΣΜΘ) ή “Interfacial heat transfer coefficient-IHTC” ή απλώς “Heat Transfer Coefficient-HTC”. Η παράμετρος αυτή αντιπροσωπεύει τη μετάδοση θερμότητας διαμέσου της διεπιφάνειας χυτού/καλουπιού. Η παρούσα διατριβή εστιάζεται στον προσδιορισμό της συγκεκριμένης, πολύ κρίσιμης παραμέτρου εισόδου.

Ο προσδιορισμός του ΣΜΘ είναι ένα αντίστροφο, ελλιπώς-ορισμένο πρόβλημα που απαιτεί την ύπαρξη πειραματικών δεδομένων. Για το λόγο αυτό, διεξήχθη μία σειρά πειραμάτων χύτευσης ακριβείας, με χρήση μηχανής χύτευσης-υπερπίεσης, για λήψη μετρήσεων θερμοκρασίας κατά την απόψυξη του χυτού. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις της χύτευσης πραγματοποιήθηκαν με το εμπορικό λογισμικό ProCAST.

Η κύρια συνεισφορά της διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη της επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του χυτού στην τιμή του ΣΜΘ, ένα θέμα που επισημαίνεται έντονα, αλλά δεν έχει μελετηθεί εκτενώς και σε βάθος. Από τη μελέτη προκύπτει πως η μοντελοποίηση με χρήση μίας ενιαίας οριακής συνθήκης διεπιφάνειας δεν μπορεί να καταλήξει σε ρεαλιστικά αποτελέσματα. Έτσι, αναπτύχθηκε κώδικας Γενετικού Αλγορίθμου για τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνδυασμού τιμών του συντελεστή που θα πρέπει να ανατεθούν σε διαφορετικές περιοχές της γεωμετρίας του χυτού, ώστε να προκύψουν ρεαλιστικά αποτελέσματα από την προσομοίωση.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός του ΣΜΘ με τις βασικότερες μεθόδους που είναι γνωστές στη βιβλιογραφία: προσδιορισμός με χρήση αναλυτικών σχέσεων, προσδιορισμός με χρήση αντίστροφης μεθόδου και προσδιορισμός με τη μέθοδο «δοκιμής-και-σφάλματος». Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Τέλος, τα χυτά δοκίμια που παρήχθησαν από τα πειράματα μελετήθηκαν μεταλλογραφικά και μετρήθηκαν χαρακτηριστικά μεγέθη της μικροδομής τους. Ο σχεδιασμός των πειραμάτων που χρησιμοποιήθηκε επέτρεψε την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση των παραμέτρων της χύτευσης στο τελικό χυτό προϊόν.

Abstract

The present PhD Thesis is related to a well known scientific issue: that of the high uncertainty associated with the numerical simulation of the casting process because of certain input parameters, including a parameter called “Interfacial heat transfer coefficient-IHTC or HTC”. The HTC represents the heat transfer through the mould/casting interface. The present dissertation was focused on the determination of this very crucial input parameter.

This coefficient determination is an ill-posed, inverse problem that required experimental data. For this reason, a series of experiments were conducted, measuring temperature in real-time during vacuum-pressure investment casting. The numerical analyses were carried out using ProCAST.

The main contribution of my PhD was the study of the effect of geometrical aspects of the casting on the coefficient value, an issue that had not been studied before in great extent. It is highlighted that modelling using a uniform interfacial boundary condition does not result in realistic results. So, a Genetic Algorithm (GA) code was developed for the determination of the optimal combination of coefficient values that should be assigned to different regions of the casting model geometry, in order to achieve realistic results.

Furthermore, the heat transfer coefficient determination using the most common techniques in literature (determination using analytical equations, inverse calculation and “trial-and-error” determination) revealed the advantages and disadvantages of each technique.

Finally, the casting parts produced were metallographically investigated. The Design of Experiments (DoE) allowed the extraction of conclusions about the effect of casting parameters on part quality.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η χύτευση είναι μία κατεργασία μορφοποίησης μετάλλων με μεγάλο εύρος εφαρμογών. Στην πράξη, η παραγωγή χυτών επιθυμητής γεωμετρίας, με ελάχιστες ή καθόλου ατέλειες και ομοιόμορφες μηχανικές ιδιότητες, είναι το ζητούμενο. Η ποιότητα του χυτού εξαρτάται από την κατάλληλη επιλογή των συνθηκών της χύτευσης. Το πρόβλημα της χύτευσης είναι πολύπλοκο, μεταβατικό και περιλαμβάνει αλληλεπίδραση πολλών φαινομένων.

Η εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων για τη χύτευση, στην πράξη επιτυγχάνεται με δύο τρόπους: (α) με τη διεξαγωγή πλήθους πειραμάτων και (β) με τη χρήση αριθμητικής προσομοίωσης. Ο πρώτος τρόπος είναι ο παραδοσιακός, αξιόπιστος τρόπος, όμως το κόστος είναι υψηλό και σε πολλές περιπτώσεις απαγορευτικό για πλήρη διερεύνηση. Η χρήση της αριθμητικής προσομοίωσης της χύτευσης είναι ένα εργαλείο που έχει εισέλθει τις τελευταίες δεκαετίες στα μεγαλύτερα χυτήρια. Δίνει τη δυνατότητα στο μηχανικό να δοκιμάσει πλήθος διαφορετικών σεναρίων χύτευσης, προκειμένου να επιλέξει τις βέλτιστες συνθήκες της κατεργασίας.

Η «εικονική» (μέσω προσομοίωσης) χύτευση είναι ένα πολύτιμο εργαλείο, που όμως ενέχει ένα σημαντικό πρόβλημα: το μεγάλο ποσοστό αβεβαιότητας της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων λόγω ασάφειας κάποιων δεδομένων εισόδου. Εσφαλμένος ορισμός του προβλήματος αριθμητικής προσομοίωσης οδηγεί σε αναξιόπιστα αποτελέσματα. Μία σημαντική παράμετρος της προσομοίωσης, που ενσωματώνει όλα τα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας, είναι ο «Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας». Πρόκειται για οριακή συνθήκη διεπιφάνειας χυτού/καλουπιού και ο προσδιορισμός της απασχολεί ιδιαίτερα τους ερευνητές και τους μηχανικούς της βιομηχανίας. Οι υπάρχουσες τεχνικές προσδιορισμού (όπως ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος στη βιβλιογραφία αντίστροφος-ντετερμινιστικός προσδιορισμός ή ο σπανίως χρησιμοποιούμενος αναλυτικός προσδιορισμός) παρουσιάζουν ελλείψεις που τελικά οδηγούν σε ανυπαρξία συγκεκριμένης μεθοδολογίας εξαγωγής αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

Στην παρούσα διατριβή ακολουθούνται και οι δύο άξονες (i) χρήση πειραμάτων και (ii) χρήση προσομοίωσης για την επιλογή συνθηκών κατεργασίας. Σειρές πειραμάτων πραγματοποιούνται με βάση τις αρχές του Σχεδιασμού Πειραμάτων και εξάγονται συμπεράσματα για την επίδραση των παραμέτρων της χύτευσης ακριβείας στην ποιότητα του χυτού. Τα πειραματικά αποτελέσματα προσεγγίζονται με τη χρήση αριθμητικής προσομοίωσης. Για να είναι ρεαλιστικά τα αποτελέσματα προσομοίωσης, η μελέτη εστιάζεται στον προσδιορισμό του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας και πραγματοποιείται εκτενής μελέτη επ' αυτού. Μελετάται εκτενώς η χρήση γενετικών αλγορίθμων για προσδιορισμό του ΣΜΘ και αναπτύσσεται μεθοδολογία προσδιορισμού, που να παρακάμπτει τα συνήθη προβλήματα.

Επιπλέον, η χρήση ΓΑ επεκτείνεται και εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνδυασμού ΣΜΘ που πρέπει να αποδοθεί σε διαφορετικές περιοχές της γεωμετρίας, ώστε να προκύψουν ρεαλιστικά αποτελέσματα κατά την προσομοίωση.

Συνοπτικά, αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί η πειραματική διερεύνηση και η αριθμητική προσομοίωση της χύτευσης ακριβείας, με έμφαση στην ανάπτυξη διαδικασίας βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας.

Η διδακτορική διατριβή δομείται σε έξι κεφάλαια, μία σύντομη περιγραφή των οποίων ακολουθεί.

Στο *πρώτο κεφάλαιο* πραγματοποιείται μία ανασκόπηση της βιβλιογραφίας στις θεωρητικές περιοχές που άπτονται των θεμάτων της παρούσας διατριβής. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά γίνεται μία σύντομη αναφορά στις βασικές αρχές και τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη χύτευση και περιγράφονται οι τεχνικές χύτευσης εν κενώ. Στη συνέχεια, διερευνάται η επίδραση των παραμέτρων της χύτευσης ακριβείας στην ποιότητα των παραγόμενων χυτών. Αναδεικνύεται το θέμα της προσομοίωσης της χύτευσης, που αποτελεί πρόσφατη εξέλιξη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή και αναζητούνται οι απαιτήσεις για μία ρεαλιστική προσομοίωση. Στα πλαίσια αυτά επισημαίνεται ο «Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας (ΣΜΘ)» στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού, ως βασική παράμετρος αβεβαιότητας για την προσομοίωση. Παρουσιάζονται όλες οι μέθοδοι προσδιορισμού του ΣΜΘ σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και οριοθετείται το θέμα, καθώς αποτελεί βασικό πυλώνα μελέτης της παρούσας διατριβής.

Στο *δεύτερο κεφάλαιο* πραγματοποιείται παρουσίαση του πειραματικού εξοπλισμού και των τεχνικών μέσων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των χυτεύσεων και τη λήψη μετρήσεων. Δίνεται έμφαση στη μηχανή χύτευσης κενού-υπερπίεσης που χρησιμοποιήθηκε ώστε να είναι δυνατή η λήψη –σε πραγματικό χρόνο- πειραματικών μετρήσεων θερμοκρασίας από το στερεοποιούμενο χυτό. Περιγράφεται ο εξοπλισμός λήψης μετρήσεων και ψηφιακής επεξεργασίας σήματος. Τέλος, παρουσιάζεται ο εξοπλισμός και οι τεχνικές για τη μεταλλογραφική μελέτη των χυτών δοκιμών και τη λήψη μετρήσεων από τις μεταλλογραφίες, με χρήση λογισμικού ανάλυσης εικόνας.

Η πειραματική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε εξ' ολοκλήρου στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε μηχανή χύτευσης κενού-υπερπίεσης που τροποποιήθηκε ειδικά για τις ανάγκες έρευνας στα πλαίσια της παρούσας μελέτης. Για την κατασκευή των καλουπιών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του χαμένου κεριού (lost-wax method), για χύτευση ακριβείας.

Στο *τρίτο κεφάλαιο* παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα. Χρησιμοποιούνται δύο κράματα χαλκού (CuZn33 και CuNi12Zn24) και αλουμίνιο. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που μελετώνται είναι οι

μετρήσεις θερμοκρασίας του χυτού κατά τη διάρκεια της χύτευσης (πειραματικές καμπύλες απόψυξης), το δημιουργούμενο πορώδες, η απόσταση μεταξύ των δευτερογενών δενδριτικών κλάδων (SDAS) και οι ατέλειες από μακροσκοπική παρατήρηση των χυτών. Ο σχεδιασμός πειραμάτων που περιλαμβάνει (α) παραμετρικές μελέτες και (β) πειράματα κατά Taguchi, που επεξεργάστηκαν με ανάλυση διακύμανσης. Προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των παραμέτρων της χύτευσης στο χρόνο και την ταχύτητα απόψυξης, το πορώδες και την SDAS των χυτών. Πραγματοποιούνται, τέλος, πειράματα για διερεύνηση της επίδρασης της γεωμετρίας του χυτού στον τρόπο απόψυξης.

Το **τέταρτο κεφάλαιο** αφορά στην αριθμητική προσομοίωση της χύτευσης. Περιγράφεται το λογισμικό προσομοίωσης ProCAST 2004.1[®] που χρησιμοποιήθηκε και πραγματοποιείται εκτενής διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων της προσομοίωσης στο τελικό αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Το λογισμικό προσομοίωσης ProCAST 2004.1[®] είναι ένα εξειδικευμένο εμπορικό πακέτο προσομοίωσης της χύτευσης με Πεπερασμένα Στοιχεία, που χρησιμοποιείται από κορυφαίες βιομηχανικές μονάδες χύτευσης διεθνώς. Διακρίνονται οι παράμετροι της προσομοίωσης που έχουν ισχυρή από αυτές που έχουν ασθενή επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Για τις σημαντικές παραμέτρους προτείνεται τρόπος μέτρησης ή προσδιορισμού τους. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων για κάποια τυπικά σενάρια χύτευσης. Οι παράμετροι της κατεργασίας εισάγονται με βάση τα πειράματα (Κεφ. 3) και οι ΣΜΘ που χρησιμοποιούνται είναι αυτοί που προσδιορίζονται στο Κεφάλαιο 5. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά του Κεφαλαίου 3 ως προς τις καμπύλες απόψυξης και το πορώδες.

Το **πέμπτο κεφάλαιο** είναι εστιασμένο στο ζήτημα του προσδιορισμού του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας στη Διεπιφάνεια Χυτού-Καλουπιού (ΣΜΘ). Ο ΣΜΘ είναι μία παράμετρος που χρησιμοποιείται ως «οριακή συνθήκη διεπιφάνειας» για τη μοντελοποίηση της χύτευσης. Στο κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται προσδιορισμός του ΣΜΘ με τρεις τρόπους. Αρχικά αναπτύσσονται οι εξισώσεις μετάδοσης θερμότητας και πραγματοποιείται ένας αναλυτικός προσδιορισμός. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται αντίστροφος αριθμητικός προσδιορισμός του ΣΜΘ. Ο αντίστροφος προσδιορισμός βασίζεται σε προτεινόμενο από τη βιβλιογραφία αλγόριθμο και υλοποιείται σε MATLAB σε συνδυασμό με αποτελέσματα από προσομοίωση. Τέλος, με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος» και πλήθος προσομοιώσεων προσδιορίζονται και προτείνονται τιμές ΣΜΘ για χαρακτηριστικά σενάρια χύτευσης. Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται πειραματικά δεδομένα και μετρήσεις από το Κεφάλαιο 3.

Το **έκτο κεφάλαιο**, τέλος, πραγματεύεται το θέμα της ανάθεσης διαφορετικού ΣΜΘ σε σημεία της γεωμετρίας του χυτού με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Η γεωμετρία του χυτού χωρίζεται σε περιοχές με διαφορετικό “casting modulus” και επιχειρείται η αποτελεσματική

προσομοίωση, δηλαδή η πολύ καλή προσέγγιση των πειραματικών μετρήσεων του Κεφ. 3 από τα αριθμητικά αποτελέσματα. Αναπτύσσεται κώδικας Γενετικών Αλγορίθμων (ΓΑ) σε περιβάλλον MATLAB ο οποίος, σε συνδυασμό με αποτελέσματα από αριθμητική προσομοίωση από το ProCAST 2004.1®, εντοπίζει το βέλτιστο συνδυασμό ΣΜΘ. Γίνεται διεξοδική διερεύνηση των παραμέτρων του ΓΑ και αναπτύσσεται τεχνική για επιτάχυνση της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Η ίδια διερεύνηση πραγματοποιείται για τις τρεις διαφορετικές μορφές του ΣΜΘ που είναι γνωστές από τη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με βέλτιστο συνδυασμό ΣΜΘ σε διαφορετικά σημεία της γεωμετρίας συγκρίνονται με τα αποτελέσματα προσομοίωσης με χρήση ενιαίου ΣΜΘ σε όλη τη γεωμετρία και αναδεικνύεται η αναγκαιότητα μίας τέτοιας μοντελοποίησης.

Κεφάλαιο 1

Χύτευση - Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η σελίδα αυτή έχει αφιεθεί σκοπίμως κενή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΧΥΤΕΥΣΗ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 Γενικά περί Χύτευσης

Ορισμός

Η χύτευση αποτελεί κατεργασία διατήρησης της μάζας, κατά την οποία το υλικό, που βρίσκεται σε τετηκυία κατάσταση, διοχετεύεται (αποχέεται), μέσω αγωγών, σε κατάλληλα προετοιμασμένη κοιλότητα υποδοχής (τύπος, καλούπι), όπου και στερεοποιείται [Χρυσουλάκης & Παντελής 1996].

Η χύτευση επιτρέπει την κατασκευή αντικειμένων με μεγάλο εύρος γεωμετριών, διαστάσεων και βάρους. Καθίσταται εφικτή η κατασκευή τεμαχίων με σύνθετη γεωμετρία, με κοιλότητες και καμπυλότητες, των οποίων η κατασκευή με άλλη κατεργασία θα ήταν υπερβολικά δαπανηρή και ασύμφορη. Ως τεχνική μορφοποίησης, η χύτευση χρησιμοποιείται όχι μόνο για μεταλλικές αλλά και για μη-μεταλλικές κατασκευές.

Ιστορικά Στοιχεία

Η χύτευση είναι από τις παλαιότερες μεθόδους μορφοποίησης μεταλλικών αντικειμένων. Οι Αιγύπτιοι από το 4.000 π.Χ., περίπου, είχαν γνώση της τεχνικής χύτευσης μετάλλων. Τα πρώτα χυτά αντικείμενα ήταν χάλκινα και, εν συνεχεία, μπρούντζινα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο ναός του Σολομώντα στο Ισραήλ (Σχήμα 1.1). Η χύτευση, αρχικά, γινόταν σε τρύπες στο έδαφος και με την ανάπτυξη της τεχνικής, σε μόνιμα καλούπια.

Με τις μεταναστεύσεις των λαών ανατολικά, η γνώση της τεχνικής χύτευσης μετάλλων μεταφέρθηκε στην Άπω Ανατολή, όπου βρήκε ευρεία εφαρμογή και εξελίχθηκε. Οι Κινέζοι (600 π.Χ.), έφτιαξαν τα πρώτα χυτά από σίδηρο και οι Ινδοί (500 μ.Χ.), τα πρώτα χυτευτά χωνευτήρια από ασάλι, μέθοδος που συναντάται στην Αγγλία, πολύ αργότερα (περίπου το 1750 με τον Benjamin Huntsman). Παρόλο που η τεχνική ήταν γνωστή από παλιά και στη Δύση, η χρήση της στη μορφοποίηση μεταλλικών αντικειμένων δεν ήταν πολύ διαδεδομένη. Στις αρχές του 13ου αιώνα, το κύριο ενδιαφέρον των τεχνιτών περιοριζόταν στην εφαρμογή της μεθόδου για την παραγωγή των καμπάνων των καθεδρικών ναών. Το 1313, χυτεύεται το πρώτο κανόνι, στην πόλη Ghent. Το 1538, ο Vannoccio Biringuccio [Biringuccio 1540] γίνεται επικεφαλής του παπικού χυτηρίου στη Ρώμη και, καταγράφοντας την τεχνική της χύτευσης με πολλές λεπτομέρειες, αναγορεύεται σε πατέρα της βιομηχανίας των χυτηρίων. Το 1730, στην Αγγλία, ο Abraham Darby εισήγαγε τη χρήση του κωκ ως καυσίμου στα χυτήρια, μειώνοντας, με τον τρόπο αυτό κατά 1/3 το κόστος παραγωγής χυτοσιδηρών αντικειμένων. Στην Αμερική, το πρώτο χυτήριο άρχισε να λειτουργεί το 1642.

Βασικές έννοιες και Ορολογία

Η εγκατάσταση στην οποία γίνεται η χύτευση ονομάζεται χυτήριο (“foundry”). Τα καλούπια όπου στερεοποιείται το τηγμένο μέταλλο και τα οποία καθορίζουν το τελικό σχήμα του αντικειμένου καλούνται «τύποι» ή καλούπια (“mould” ή “mold”). Το μέταλλο στην υγρή του φάση, δηλαδή το λιωμένο μέταλλο, ονομάζεται «τήγμα» (“melt”).

Η χύτευση, δηλαδή η «απόχυση του μετάλλου σε τύπο» [Κονοφάγος 1965] μπορεί να αποσκοπεί:

- στη δημιουργία στερεών αντικειμένων απλής γεωμετρίας, τα οποία θα προορίζονται είτε για ανάτηξη, είτε ως πρώτη ύλη για τη διαμόρφωσή τους σε ημιτελικά και τελικά προϊόντα, μέσω άλλων κατεργασιών (σφυρηλάτηση, έλαση, διέλαση, ολκή, κλπ). Τα στερεοποιημένα τμήματα μετάλλων που λαμβάνονται με την απλή απόχυση του τήγματος λέγονται «πλινθώματα» ή «χελώνες» (“ingot”).
- Στην κατευθείαν μορφοποίηση για τη δημιουργία του τελικού χυτού αντικειμένου. Αυτή η περίπτωση ονομάζεται «χύτευση αντικειμένου» [Κονοφάγος 1965] και στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν όροι που χρησιμοποιούνται ευρέως όπως το “shape casting”.

Για τη «χύτευση αντικειμένου», το τήγμα αποχέεται μέσα σε τύπο κατάλληλα διαμορφωμένης εσωτερικής επιφάνειας. Στην περίπτωση της χύτευσης αντικειμένου, είναι συνήθης απαίτηση η παραλαβή χυτού που να χρειάζεται κατά το δυνατόν ελάχιστη κατεργασία αποπεράτωσης.

Κυρίαρχη έννοια στη χύτευση είναι αυτή της «εύροιας» ή «χυτευσιμότητας» (“fluidity”) και πρόκειται για την ικανότητα του τήγματος να πληροί με ακρίβεια τον τύπο της χύτευσης. Οι *ιδιότητες του τήγματος* που επηρεάζουν την εύροιά του, επομένως, και τη δυνατότητα καλής χύτευσης, είναι: το ιξώδες, η επιφανειακή τάση, η δημιουργία επιφανειακής μεμβράνης οξειδίων, τα διαλυμένα αέρια, οι αιωρούμενες σκουριές και τα μη μεταλλικά εγκλείσματα, και τέλος, ο τρόπος στερεοποίησης και κρυστάλλωσης. Οι *κύριες παράμετροι χύτευσης* που επηρεάζουν την εύροια είναι: το σχήμα του τεμαχίου, η πίεση υπό την οποία γίνεται η έγχυση του τήγματος, η κατάσταση των παρειών του αποτυπώματος, ο ρυθμός χύτευσης, καθώς κι ο βαθμός υπερθέρμανσης. [Χρυσουλάκης & Παντελής 1996].

Οι παράγοντες που αναφέρθηκαν επιδρούν στη μικροδομή του χυτού και στην ανάπτυξη του ιστού στερεοποίησης. Η εμφάνιση ατελειών σε μικρή η μεγάλη έκταση, η έκταση της συστολής του χυτού, η μηχανική αντοχή του παραγόμενου τεμαχίου, καθώς και το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων στο χυτό επηρεάζονται από όλες τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Η ποιότητα ενός χυτού εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του τήγματος, όσο και από τις συνθήκες χύτευσης.



Σχήμα 1.1 (α) Κολώνες του ναού του Σολομώντα (968π.Χ), από χυτό μπρούντζο, (β) Χυτό κανόνι 15^{ου} αι. στην πόλη Ghent, (γ) Ξυλογραφία, Vannoccio Biringuccio *Pyrotechnia*, Βενετία [Biringuccio 1540].

1.2 Τεχνικές Χύτευσης

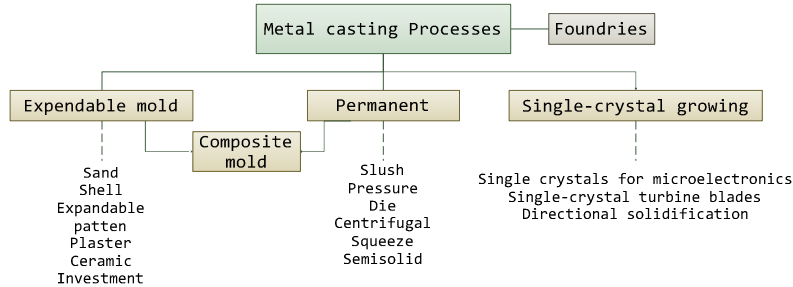
1.2.1 Ταξινόμηση Μεθόδων Χύτευσης

Ανάλογα με τις απαιτήσεις διαστάσεων, ανοχών, ποιότητας επιφάνειας, μηχανικών αντοχών και κόστους, μπορεί ο μηχανικός να επιλέξει από μία μεγάλη γκάμα μεθόδων χύτευσης. Πέρα από τις βασικές κατηγορίες των μεθόδων χύτευσης, υπάρχει μία πολύ μεγάλη ποικιλία παραλλαγών αυτών. Οι βασικές κατηγοριοποιήσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Η βασικότερη κατηγοριοποίηση, όπως προτείνεται από [Kalpakjian 1997] (Πίνακας 1.1), [ASM International 1992] (Πίνακας 1.2), είναι η: Ταξινόμηση ως προς το είδος Καλουπιού:

- Χύτευση με Αναλώσιμο καλούπι
- Χύτευση με Μόνιμο καλούπι
- Στερεοποίηση μονοκρυστάλλων

Πίνακας 1.1 Κατηγοριοποίηση των μεθόδων χύτευσης μετάλλου σύμφωνα με [Kalpakjian 1997].



Πίνακας 1.2 Κατηγοριοποίηση των μεθόδων χύτευσης ως προς το είδος καλουπιού [ASM International 1992].

Expendable Mold Processes		Permanent Mold Processes
Permanent patterns	Silicate and phosphate bonds	Die casting
Clay/water bonds (green sand molding)	Sodium silicate/CO ₂	High-pressure die casting
Silica sand	Shaw process (ceramic molding)	Low-pressure die casting
Olivine sand	Unicast process (ceramic molding)	Gravity die casting (permanent mold)
Chromite sand	Alumina phosphate	Centrifugal casting
Zircon sand	Plaster bonds	Vertical centrifugal casting
Heat-cures resin binder processes	Gypsum bond	Horizontal centrifugal casting
Shell process (Croning process)	No bond	Hybrid processes
Furan hot box	Magnetic molding	Squeeze casting
Phenolic hot box	Vacuum molding	Semisolid metal casting (rheocasting)
Warm box (furfuryl/catalyst)	Expendable patterns	Osprey process
Oven bake (core oil)	Foamed patterns	
Cold box resin binder processes	Lost foam casting	
Phenolic urethane	Replicast process	
Furan/SO ₂	Wax patterns (investment casting)	
Free radical cure (acrylic/epoxy)	Ethyl silicate bonded block molds	
Phenolic ester	Ethyl silicate bonded ceramic shell.	
No-bake resin binder processes		
Furan (acid catalyzed)	Molds	
Phenolic (acid catalyzed)	Colloidal silica bond	
Oil urethane	Plaster bond	
Phenolic urethane	Counter-gravity	
Polyol urethane	Low-pressure casting	

Κάποιες επιμέρους κατηγοριοποιήσεις είναι αυτές που ακολουθούν:

Ταξινόμηση ως προς τον τρόπο τροφοδοσίας του τήγματος στον τύπο:

- εκ των άνω ή κατευθείαν χύτευση: όταν η απόχυση πραγματοποιείται από πάνω κι η στερεοποίηση αρχίζει από το κατώτερο τμήμα του τύπου.
- εν αναρροή ή πηγαία χύτευση: η ελεύθερη επιφάνεια του τήγματος πραγματοποιεί ανοδική πορεία μέσα στον τύπο καθώς τηγμένο μέταλλο διοχετεύεται από τη βάση του.

Ταξινόμηση ως προς το ρυθμό απόχυσης του τήγματος:

- Τεχνικές συνεχούς χύτευσης
- Τεχνικές ασυνεχούς χύτευσης

Ταξινόμηση ως προς τον τρόπο πλήρωσης (άσκηση πίεσης):

- Χύτευση Βαρύτητας (gravity): πχ sand casting, gravity die casting
- Χύτευση υπό Πίεση (pressure): πχ low & high pressure die casting
- Χύτευση Κενού (vacuum): πχ vacuum investment casting

1.2.2 Σύγκριση Μεθόδων Χύτευσης

Η διαδικασία της χύτευσης ως μέσο παραγωγής αντικειμένων, εξελίχθηκε και παραλλάχθηκε ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Η ανάγκη για κατασκευή τεμαχίων με περίπλοκη μορφή, λεπτά τοιχώματα, μεγάλου εύρους διαστάσεις και βάρος, με τον πλέον οικονομικό τρόπο, οδήγησε στην ύπαρξη πλήθους τεχνικών χύτευσης.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου χύτευσης εξαρτάται από κριτήρια όπως το σχήμα του αντικειμένου, το υλικό, τον αριθμό των τεμαχίων που θέλουμε να κατασκευάσουμε, την απαιτούμενη ακρίβεια, το κόστος παραγωγής, τις διαθέσιμες εγκαταστάσεις και τα μέσα που διαθέτουμε. Ο Πίνακας 1.3 παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς των κυριότερων μεθόδων χύτευσης.

Πίνακας 1.3 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί κυριότερων μεθόδων χύτευσης.

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΟΡΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ
Χύτευση σε άμμο (sand casting)	Χυτεύεται σχεδόν οποιοδήποτε μέταλλο, χωρίς περιορισμό στο μέγεθος, το σχήμα και τα βάρος	Απαιτείται τελικό φινιρίσμα, το χυτό έχει τραχιά επιφάνεια και έχουμε σημαντικές ανοχές στις διαστάσεις
Χύτευση σε τύπο με κέλυφος άμμου (shell mold casting)	Καλή ακρίβεια στις διαστάσεις και λεία εξωτερική επιφάνεια. Δυνατότητα μαζικής παραγωγής	Περιορισμένα όρια μεγέθους. Τύποι που κοστίζουν ακριβά και απαίτηση ακριβού εξοπλισμού
Χύτευση σε τύπο από αφρώδες πολυμερές	Τα περισσότερα μέταλλα χυτεύονται με αυτή τη μέθοδο χωρίς περιορισμό στο μέγεθος. Σύνθετες μορφές	Οι τύποι έχουν χαμηλή αντοχή και υψηλό κόστος για μικρό μέγεθος παραγωγής
Χύτευση σε τύπο από πολυμερές υλικό (plaster mold)	Δημιουργία αντικειμένων με πολύπλοκο σχήμα και με καλή ακρίβεια διαστάσεων. Λεία εξωτερική επιφάνεια.	Περιορισμένη εφαρμογή σε μη σιδηρούχα μέταλλα, περιορισμό στις διαστάσεις του πλινθώματος και το μέγεθος της παραγωγής. Η κατασκευή του τύπου είναι χρονοβόρα
Χύτευση σε κεραμικό τύπο (ceramic mold)	Πολύπλοκα σχήματα, μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις και καλή τελική εξωτερική επιφάνεια	Περιορισμένο μέγεθος πλινθώματος
Χύτευση ακριβείας (investment casting)	Πολύπλοκα σχήματα, εξαιρετική ποιότητα εξωτερικής επιφάνειας και ακρίβεια διαστάσεων. Είναι σχεδόν δυνατή η χύτευση οποιοδήποτε μετάλλου	Περιορισμοί στο μέγεθος της παραγωγής. Ακριβά καλούπια-πλινθώματα και εργατικά
Χύτευση σε μεταλλικό τύπο (permanent mold)	Καλή εξωτερική επιφάνεια και ακρίβεια στις διαστάσεις. Χαμηλό πορώδες	Υψηλό κόστος κατασκευής τύπου, περιορισμοί στο σχήμα και την πολυπλοκότητα. Δεν είναι κατάλληλη μέθοδος για χύτευση μετάλλων με υψηλό σημείο τήξης.
Χύτευση με πίεση (die)	Εξαιρετική ακρίβεια στις διαστάσεις και την ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας. Δυνατότητα μαζικής παραγωγής	Ακριβή η κατασκευή του τύπου, περιορισμένο μέγεθος. Μεγάλη διάρκεια παραγωγής
Φυγόκεντρη χύτευση (centrifugal casting)	Μεγάλα κυλινδρικά κομμάτια με υψηλή ποιότητα	Ο εξοπλισμός είναι ακριβός, το σχήμα των πλινθωμάτων περιορισμένο

Στον Πίνακα 1.4 συνοψίζονται ποσοτικά στοιχεία σχετικά με το υλικό και το μέγεθος των χυτών που μπορούν να κατασκευαστούν με τις βασικότερες μεθόδους χύτευσης, καθώς και η χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της χύτευσης για την κάθε περίπτωση.

Πίνακας 1.4 Λίστα με τις συνηθέστερες μεθόδους χύτευσης: εύρος εφαρμογών, απαιτούμενος χρόνος, υλικά. [Mark Jolly 2002]

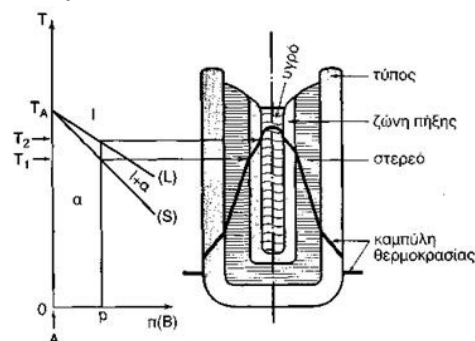
Process	Range of component mass	Time-scale of process	Material Cast
Sand	100g to 250 tonnes	seconds to days	All metals
Investment	10g to 100 kg	minutes to hours	All metals
Resin Shell	100g 100 kg	minutes to hours	Fe, Cu
Permanent Mould/ Gravity Die	2 kg to 50 kg	minutes	Primarily Al, Zn & Mg, some Cu
Low Pressure Die	5 kg to 25 kg	minutes	Primarily Al & Mg
High Pressure Die	10g to 20 kg	seconds	Al, Mg, Zn
Squeeze Casting	100g to 20 kg	minutes	Al

1.3 Φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη χύτευση

1.3.1 Στερεοποίηση κατά τη χύτευση - Μορφολογία Στερεοποιημένης Ζώνης

Κατά τη χύτευση, το μέταλλο εισέρχεται ως ρευστό (τήγμα) στον τύπο, αποβάλλει θερμότητα προς το περιβάλλον, κι έτσι μεταβαίνει από την υγρή στη στερεή φάση. Επειδή η θερμοκρασία της επιφάνειας των τοιχωμάτων του τύπου είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή του τήγματος, η στερεοποίηση ξεκινά από την επιφάνεια επαφής τήγματος-τύπου, σχηματίζοντας ένα λεπτό στρώμα στερεού. Η απόψυξη συνεχίζεται, με ροή θερμότητας διαμέσου του ήδη στερεοποιημένου τήγματος, προς τα τοιχώματα του τύπου και έπειτα προς το περιβάλλον. Έτσι, στερεοποιείται το αμέσως επόμενο στρώμα υλικού, κ.ο.κ.

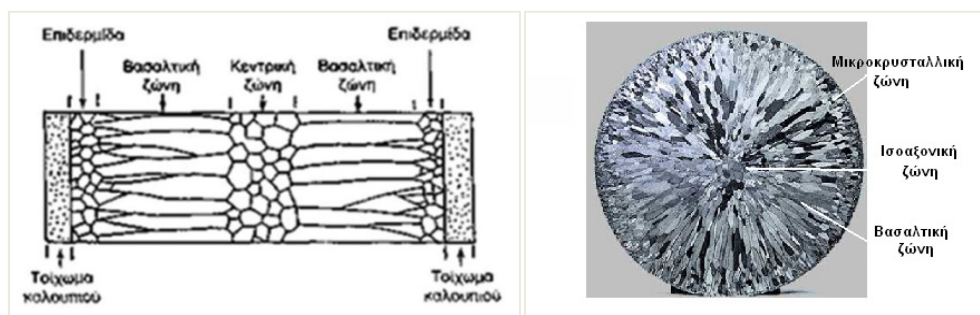
Η εξωτερική επιφάνεια της ζώνης στερεοποίησης έχει, τη θερμοκρασία του τέλους της στερεοποίησης, ενώ η εσωτερική της, τη θερμοκρασία της αρχής της στερεοποίησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2. Η περιοχή αυτή, ουσιαστικά διαχωρίζει την υγρή από τη στερεά φάση και ονομάζεται «ζώνη στερεοποίησης» ή «ζώνη πήξης» ή «μέτωπο στερεοποίησης». Το «μέτωπο στερεοποίησης» είναι ισοθερμοκρασιακό, δηλαδή είναι ισόθερμη επιφάνεια παράλληλη προς την επιφάνεια των τοιχωμάτων του τύπου, το οποίο προχωρά, συναρτήσει του χρόνου, προς το εσωτερικό του χυτού.



Σχήμα 1.2 Στερεοποίηση πλινθώματος διμερούς κράματος, σε καλούπι χύτευσης. Οι οριακές επιφάνειες της ζώνης στερεοποίησης έχουν θερμοκρασίες που αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες Liquidus (L) και Solidus (S), του διαγράμματος φάσεων, για τη δεδομένη περιεκτικότητα του κράματος [Κονοφάγος 1965].

Με τη διαδικασία της στερεοποίησης, αναπτύσσεται ένας ιστός στερεοποίησης. Η γενική περίπτωση είναι ο ιστός στερεοποίησης να αποτελείται από μια επιφανειακή **μικροκρυσταλλική ζώνη**, η οποία περιβάλλει τη **βασαλτική ζώνη** που με τη σειρά της περικλείει μια κεντρική ζώνη **ισοαξονικής ανάπτυξης**, όπως φαίνεται στην Σχήμα 1.3. Ακολουθεί αναλυτικότερη περιγραφή της κάθε ζώνης.

- **Μικροκρυσταλλική ζώνη:** Είναι η πρώτη ζώνη που σχηματίζεται μόλις το τήγμα έρθει σε επαφή με τα τοιχώματα του τύπου που βρίσκονται σε χαμηλή θερμοκρασία και ευνοούν την ετερογενή πυρηνοποίηση. Λόγω της απότομης ψύξης οι σχηματιζόμενοι πυρήνες κρυστάλλωσης είναι πολυπληθείς με αποτέλεσμα η ανάπτυξη των κόκκων να είναι ανταγωνιστική και έτσι περιορίζεται γρήγορα. Οι κρύσταλλοι είναι ισοαξονικοί, μικρού μεγέθους και τυχαίου προσανατολισμού. Ο σχηματισμός πυρήνων κρυστάλλωσης επηρεάζεται από τη θερμοκρασία τήγματος και τις θερμικές ιδιότητες του υλικού του τύπου.

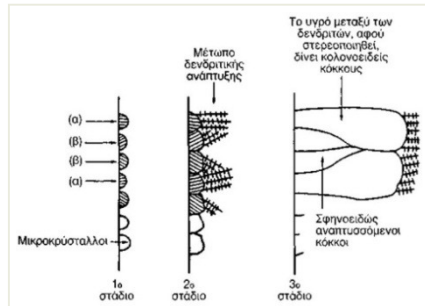


Σχήμα 1.3 Μορφολογία στερεοποιημένης ζώνης (α) σχηματική αναπαράσταση η σε εγκάρσια τομή του χυτού [Κονοφάγος 1965], (β) σε πραγματικό σε τομή κατά πλάτος [American Molybdenum Corp n.d.].

- **Βασαλτική ζώνη:** Στη ζώνη αυτή αναπτύσσονται ευμεγέθεις κολονοειδούς μορφής, δενδριτικοί κρύσταλλοι, με επιμήκη ανάπτυξη, κατά τη διεύθυνση της θερμοκρασιακής βάρμωσης και κάθετα στα τοιχώματα του τύπου. Οφείλονται στην επιλεκτική ανάπτυξη ορισμένων κρυστάλλων της μικροκρυσταλλικής ζώνης. (Σχήμα 1.4 και Σχήμα 1.5). Αν το πάχος του χυτού είναι μικρό, η βασαλτική ζώνη προχωρεί ως την καρδιά του χυτού.

- **Ισοαξονική ή κεντρική ζώνη:** Η ζώνη αυτή συναντάται στην καρδιά του πλινθώματος μεγάλου πάχους. Στο κέντρο του το τήγμα έχει σχεδόν την ίδια θερμοκρασία, με αποτέλεσμα η υπόψυξη να έχει μικρή τιμή και οι αναπτυσσόμενοι κόκκοι να είναι λίγοι. Η ισοαξονική ζώνη είναι αποτέλεσμα ύπαρξης συστασιακής υπόψυξης ή υπέρτηξης, η οποία προκαλεί νέα πυρηνοποίηση προς τυχαίες κατευθύνσεις, καθώς οι διεπιφάνειες στερεού-υγρού προσεγγίζουν η μια την άλλη, ενώ συγχρόνως ο ρυθμός της θερμοκρασίας ελαττώνεται. Η στερεοποίηση πραγματοποιείται πρακτικά με ισόθερμο τρόπο. Οι κρύσταλλοι αναπτύσσονται με τυχαίο τρόπο, μέχρι ο ένας να συναντήσει τον άλλο. Οι κόκκοι της κεντρικής ζώνης είναι περίπου ισομεγέθεις, κυτταροειδούς μορφής, χωρίς τη μικρογραφική μορφή ιστού. Στη ζώνη αυτή έχουμε συσσώρευση ακαθαρσιών. Στην περιοχή αυτή η στερεοποίηση γίνεται με πολύ αργούς ρυθμούς, που οφείλονται σε δύο λόγους: α) τη μεγάλη απόσταση από τα τοιχώματα του τύπου και β) τη

συστολή του ήδη στερεοποιημένου τήγματος που μπορεί να δημιουργήσει διάκενο μεταξύ στερεοποιημένου τμήματος του χυτού και των τοιχωμάτων του τύπου, το οποίο αποτελεί τον κακό αγωγό της θερμότητας.



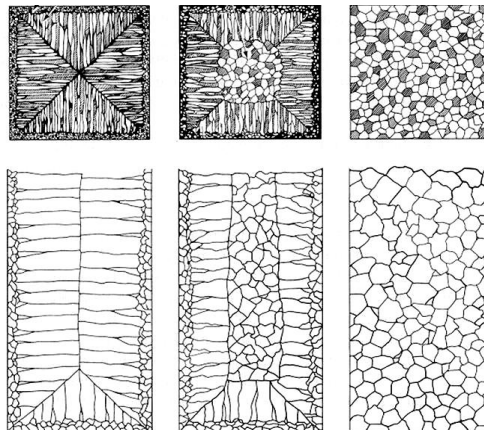
Σχήμα 1.4 Οι πρώτοι κρύσταλλοι πυρηνοποιούνται με τυχαίους κρυσταλλογραφικούς προσανατολισμούς. Αναπτύσσονται με δενδριτική μορφή, ακολουθώντας πάντοτε συγκεκριμένες κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις [Κονοφάγος 1965].



Σχήμα 1.5 Τρισδιάστατη απεικόνιση δενδριτών [M Jolly 2003].

Η μικροκρυσταλλική και η βασαλτική ζώνη αποτελούν το χαρακτηριστικό ιστό στερεοποίησης, ο οποίος ονομάζεται «διακρυστάλλωση».

Οι θερμικές συνθήκες πήξης που καθορίζουν τον τρόπο ανάπτυξης του ιστού στερεοποίησης εξαρτώνται από τη φύση του κράματος, την ειδική θερμότητα, τη θερμική του διαχυτότητα, τη λανθάνουσα θερμότητα στερεοποίησης, την τυχόν εκλυόμενη θερμότητα από διάφορους μηχανισμούς, καθώς και από το υλικό του τύπου, τις θερμικές του ιδιότητες, τη γεωμετρία και το πάχος των τοιχωμάτων του. Ανάλογα με τις θερμικές συνθήκες πήξης και απόψυξης του μετάλλου, ο ιστός στερεοποίησης μπορεί να αποτελείται από μια, δυο ή και τρεις ζώνες διαφορετικής μορφολογίας (Σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.6 Τρεις περιπτώσεις πλινθωμάτων με διαφορετικούς ιστούς στερεοποίησης: (α) μικροκρυσταλλική και βασαλτική ζώνη σε πλίνθωμα καθαρού μετάλλου, (β) μικροκρυσταλλική, βασαλτική και ισοαξονική σε ένα τυπικό κράμα, (γ) ύπαρξη ισοαξονικής ζώνης σε όλο το χυτό, λόγω παρουσίας παραγόντων πυρηνοποίησης [Kalpakjian 1997].

Η στερεοποίηση είναι η διαδικασία στην οποία η στοχαστικότητα της δομής της υγρής φάσης αντικαθίσταται με την αυστηρή δομή του κρυσταλλικού στερεού σώματος. Στερεοποίηση θα συμβεί μόνο όταν θερμοδυναμικά η αυστηρά διατεταγμένη δομή της στερεής φάσης θα είναι προτιμότερη από την αταξία της υγρής. Ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται για να καθορίσει

ποια κατάσταση της ύλης είναι προτιμότερη είναι η ελεύθερη ενέργεια Gibbs (Gibbs free energy). Η ελεύθερη ενέργεια Gibbs, που ορίζεται από την εξίσωση (1.1), είναι το μέτρο της ενέργειας που μπορεί να παράγει έργο:

$$G = H - TS \quad (1.1)$$

όπου: G : η συνολική ελεύθερη ενέργεια Gibbs
H : η ολική ενθαλπία του συστήματος
T : η θερμοκρασία
S : η ολική εντροπία του συστήματος

Στη θερμοκρασία πήξης ενός μετάλλου, η ελεύθερη ενέργεια του υγρού ισούται με την ελεύθερη ενέργεια του στερεού. Η εξίσωση (1.1) μπορεί να εξισωθεί για την υγρή και τη στερεή φάση. Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, η διαφορά ανάμεσα στην ενθαλπία του υγρού και την ενθαλπία του στερεού, μπορεί να λυθεί όπως στην εξίσωση (1.2):

$$L = T_E \Delta S \quad (1.2)$$

όπου: L : η λανθάνουσα θερμότητα τήξης
 T_E : η θερμοκρασία στερεοποίησης του μετάλλου

1.3.2 Θερμικά Φαινόμενα κατά τη Στερεοποίηση

Τα τρία είδη της μεταφοράς θερμότητας είναι η αγωγή (conduction), η συναγωγή (convection), και η ακτινοβολία (radiation). Και τα τρία αυτά είδη μεταφοράς θερμότητας συμβαίνουν στο σύστημα τήγμα-καλούπι και τα τρία παίζουν ρόλο στην απαγωγή θερμότητας από το λιωμένο μέταλλο, ώστε αυτό να στερεοποιηθεί.

Η **Αγωγή** θερμότητας περιγράφεται από την εξίσωση Fourier, η οποία για τρι-ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων στη γενική της μορφή δίνεται από την εξίσωση (1.3)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.3)$$

Για απλούς υπολογισμούς, είναι συνήθης η παραδοχή μονοδιάστατης μετάδοσης θερμότητας με αγωγή, οπότε η εξ (1.3) απλοποιείται στην (1.4)

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.4)$$

με τις οριακές συνθήκες: $T(0,t) = T_i$, $T(x,0) = T_0$, $T(\infty,t) = T_0$.

όπου: t : ο χρόνος

$\alpha = \frac{k}{\rho c}$: θερμική διαχυτότητα του υλικού του καλουπιού.

k : η θερμική αγωγιμότητα του υλικού του καλουπιού.

ρ : η πυκνότητα του υλικού του καλουπιού

c : η ειδική θερμότητα του καλουπιού

T : η θερμοκρασία σε απόσταση x από τη διεπιφάνεια, σε χρόνο t

T_0 : η θερμοκρασία πολύ μακριά από τη διεπιφάνεια του καλουπιού

T_i : η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια

Υπάρχουν πάρα πολλές αναλυτικές λύσεις, ανάλογα με το συγκεκριμένο πρόβλημα (είδος πηγής, διαστάσεις πλάκας κα), οι οποίες δίδονται σε όλα τα εγχειρίδια θερμότητας. Μία λύση για το θερμοκρασιακό προφίλ μέσα στο

καλούπι, με τις παραπάνω παραδοχές, δίνεται από την εξίσωση [Flemings 1974]:

$$T(x, t) = T_0 + (T_L - T_0) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) \quad (1.5)$$

όπου: T_0 = η αρχική θερμοκρασία του καλούπιού

T_L = η θερμοκρασία τήξης του μετάλλου

$T(x, t)$ = η θερμοκρασία στο σημείο x , τη χρονική στιγμή t

erfc = η συμπληρωματική της κατά Gauss συνάρτησης λάθους. Η τιμή της βρίσκεται, συνήθως, βάσει στατιστικών πινάκων.

Η **συναγωγή**, δηλαδή η μετάδοση θερμότητας σε κινούμενα ρευστά, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ροής και από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ρευστού και στερεής επιφάνειας. Η σχέση που περιγράφει τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι ο νόμος του Newton (εξ. (1.6))

$$q = -h A \Delta T \quad (1.6)$$

όπου

h : ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή, $\frac{W}{m^2K}$

ΔT : η διαφορά θερμοκρασίας στερεού σώματος και ρευστού

A : το εμβαδόν της επιφάνειας.

Η μετάδοση θερμότητας με **ακτινοβολία** βασίζεται στο ότι κάθε σώμα πεπερασμένης θερμοκρασίας εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Έτσι, μεταξύ δύο σωμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας θα υπάρχει μετάδοση θερμότητας χωρίς την ανάγκη παρουσίας κάποιου ενδιάμεσου σώματος, με την εφαρμογή του μηχανισμού της θερμικής ακτινοβολίας. Η ροή θερμότητας που μεταδίδεται με ακτινοβολία περιγράφεται από το νόμο Stefan-Boltzman (εξ. (1.7)):

$$q = \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.7)$$

όπου

ε : η ικανότητα εκπομπής (emissivity factor)

T_1, T_2 : οι θερμοκρασίες μεταξύ των δύο σωμάτων.

σ : η σταθερά Stefan-Boltzman, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$

Οι παραπάνω εξισώσεις παρουσιάστηκαν στην απλούστερή τους μορφή, καθώς αναφέρονται σε μόνιμη κατάσταση και σε περιπτώσεις μονοδιάστατης μετάδοσης θερμότητας χωρίς αλλαγή φάσεων.

Χρόνος στερεοποίησης (solidification time): Βασική παράμετρος του φαινομένου της στερεοποίησης του χυτού είναι ο χρόνος στερεοποίησης. Έχει άμεση σχέση με το ρυθμό απόψυξης και επηρεάζει την τελική δομή του χυτού και δίνεται από τη **σχέση Chvorinov**:

$$t = \lambda \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (1.8)$$

όπου: λ : σταθερά τύπου χύτευσης,

V : ο όγκος του στερεοποιούμενου ρευστού μετάλλου και

A : εμβαδό διεπιφάνειας μεταξύ ρευστού μετάλλου και τύπου.

Η **λανθάνουσα θερμότητα (Latent heat)** ενός υλικού είναι η ενέργεια που ελευθερώνεται προκειμένου το "εν δομική αταξία" υγρό να μετασχηματισθεί σε στερεό με δομική κρυσταλλική τάξη. Περιγράφεται, συνήθως, ως η ενθαλπία ανά μονάδα μάζας και η ολική λανθάνουσα θερμότητα της στερεοποίησης είναι το γινόμενο της μάζας του λιωμένου μετάλλου επί την λανθάνουσα ενθαλπία στερεοποίησης όπως φαίνεται στη σχέση (1.9).

$$Q = mH_L = \rho AH_L L \quad (1.9)$$

όπου: Q = η συνολική θερμότητα στερεοποίησης
 m = η μάζα του τήγματος
 H_L = η λανθάνουσα ενθαλπία στερεοποίησης
 ρ = η πυκνότητα του τήγματος
 A : εμβαδόν της επιφάνειας μέσω της οποίας γίνεται μεταφορά θερμότητας
 L = το πάχος του στερεοποιημένου τμήματος του χυτού

Οι αποκτούμενες δομές κατά τη στερεοποίηση εξαρτώνται από τον τρόπο κατά τον οποίο η ειδική θερμότητα και η λανθάνουσα θερμότητα απομακρύνονται από το σύστημα στερεού/υγρού.

Η **ειδική θερμότητα** απομακρύνεται είτε με ακτινοβολία προς το περιβάλλον, είτε με αγωγή προς τη μήτρα χύτευσης (τύπο, καλούπι), έως ότου το υγρό ψυχθεί στη θερμοκρασία στερεοποίησης του.

Η **λανθάνουσα θερμότητα**, απομακρύνεται από τη διεπιφάνεια στερεού-υγρού πριν περατωθεί η στερεοποίηση. Ο τρόπος με τον οποίο απομακρύνεται η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, προσδιορίζει το μηχανισμό της ανάπτυξης και της τελικής δομής.

Για μικρές διαφορές $T_m - T$, όπου T_m είναι η θερμοκρασία τήξης του καθαρού μετάλλου, ισχύει ότι:

$$\Delta G = \frac{\Delta H}{T_m} (T_m - T) \quad (1.10)$$

όπου ΔH η λανθάνουσα θερμότητα τήξης.

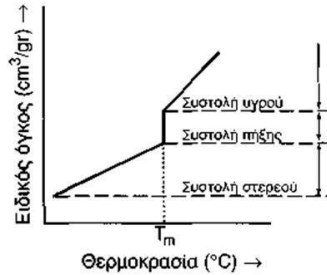
Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης (ΔH) ισούται με το γινόμενο $T_m \cdot \Delta S$, διότι στη θερμοκρασία τήξης ($T = T_m$), η διαφορά της ελεύθερης ενθαλπίας κατά Gibbs ισούται με μηδέν ($\Delta G = 0$). Εάν, δηλαδή, ένα μόριο περάσει από την υγρή στη στερεά φάση, τότε η διαφορά της ελεύθερης ενέργειας του Gibbs, ΔG , ισούται με μηδέν (καθεστώς δυναμικής ισορροπίας). Ωστόσο, για να πραγματοποιηθεί αυτή η μεταπήδηση από τη μια φάση στην άλλη, το μόριο θα πρέπει να υπερβεί ένα ενεργειακό εμπόδιο q .

1.3.3 Τάσεις / παραμορφώσεις

Υποχώρηση εκ συστολής: Η διαδικασία της χύτευσης συνοδεύεται από ελάττωση του ειδικού όγκου του υπο στερεοποίηση μετάλλου ή κράματος (Σχήμα 1.7). Η συστολή αυτή του μετάλλου μέσα στον τύπο ονομάζεται υποχώρηση εκ συστολής και συντελείται σε τρία στάδια: 1ο στάδιο: ενώ το μέταλλο ή το κράμα βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, 2ο στάδιο: κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου ή του κράματος και 3ο στάδιο: μετά το πέρας της στερεοποίησης. Ορισμένα μέταλλα όπως το Βί και το Sb, κατά τη στερεοποίηση τους εξογκώνονται (2ο στάδιο). Η συστολή τους όμως σε

στερεή κατάσταση (3ο στάδιο) είναι μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα τελικά τη συστολή μετά τη χύτευση (Πίνακας 1.5).

Παραμένουσες Τάσεις/ Μηχανικές τάσεις: Μετά το πέρας της στερεοποίησης του τήγματος, το στερεοποιημένο μέταλλο συστέλλεται σε στερεά κατάσταση. Η συστολή αυτή εξαρτάται από το συντελεστή συστολής σε στερεά κατάσταση, η τιμή του οποίου είναι διαφορετική για τα διάφορα μέταλλα και κράματα (Πίνακας 1.5).



Σχήμα 1.7 Χαρακτηριστική καμπύλη συστολής καθαρού μετάλλου, συναρτήσει της θερμοκρασίας [Κονοφάγος 1965].

Πίνακας 1.5 Ποσοστό συστολής χαρακτηριστικών μετάλλων και κραμάτων [Χρυσουλάκης & Παντελής 1996]

ΧΑΛΥΒΑΣ	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ
2.3	3
ΜΑΓΝΗΣΙΟ	ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΣ
1.8	1.6
ΧΑΛΚΟΣ	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ
2	1.7
ΚΑΣΣΙΤΕΡΟΣ	ΑΡΓΥΡΟΣ
0.48	2.1

Μετά το πέρας της στερεοποίησης, στη μάζα του χυτού επικρατεί ανισοθερμία, καθώς οι εξωτερικές ζώνες στερεοποίησης είναι ψυχρότερες από τις εσωτερικές. Ως εκ τούτου, η συστολή δεν πραγματοποιείται με τρόπο ομοιόμορφο. Έτσι, αναπτύσσονται εσωτερικές μηχανικές τάσεις, που δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού και θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως «αποθηκευμένη» ελαστική δυναμική ενέργεια. Τα τμήματα του χυτού που ψύχονται ταχύτερα από τα γειτονικά τους εμφανίζουν θλιπτικές τάσεις, ενώ τα δεύτερα εφελκυστικές. Οι μηχανικές τάσεις εξαρτώνται από την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του χυτού, εξαιτίας της αυξημένης ανισοθερμίας κατά την απόψυξη.

Οι παραμένουσες τάσεις στα χυτά μπορούν να προκαλέσουν πρώιμη αστοχία. Επηρεάζουν σημαντικά τα φαινόμενα εκείνα που συμβαίνουν υπό την επίδραση χαμηλών εξωτερικών τάσεων (ψαθυρή θραύση, ρωγμάτωση υπό τάση σε διαβρωτικό περιβάλλον κλπ). Η επίδρασή τους μειώνεται με αύξηση των εξωτερικά επιβαλλόμενων φορτίων. Με την πάροδο του χρόνου και υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων, οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να ανακατανεμηθούν και να μειωθούν οι αιχμές που αρχικά παρουσιάζονται στην κατανομή τους.

Σε ότι αφορά τον υπολογισμό τους, οι βασικές παράμετροι που παίζουν ρόλο στο μέγεθος και την κατανομή των παραμενουσών τάσεων είναι (α) η θερμοκρασιακή κατανομή στο χυτό, (β) τα χαρακτηριστικά θερμικής διαστολής του υλικού και (γ) οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες. Η άνιση και ανομοιόμορφη ψύξη σε κάποια περιοχή του χυτού μπορεί να προκαλέσει παραμένουσες τάσεις.

Ως προς των μέγεθός τους: υπάρχουν πολλές περιπτώσεις, που αφορούν σε χάλυβες και αλουμίνια, στις οποίες η μέγιστη τιμή εφελκυστικής παραμένουσας τάσης είναι ίση με το όριο διαρροής του υλικού. Ενώ σε αναλυτικούς υπολογισμούς οι μέγιστες τάσεις φαίνεται να πλησιάζουν το

όριο διαρροής, υπάρχουν πειραματικές μετρήσεις που δείχνουν ότι οι τιμές είναι σημαντικά χαμηλότερες του ορίου διαρροής.

1.3.4 Μηχανισμοί κατά τη στερεοποίηση

Αφού σχηματισθούν οι πρώτοι πυρήνες κρυστάλλωσης, η ανάπτυξη τους αρχίζει με τη στερεοποίηση του υλικού.

Η πλήρωση του καλουπιού, τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας, ο βαθμός πυρηνοποίησης, το μέγεθος των κόκκων και η μικροδομή και η έκταση του δενδριτικού σχηματισμού, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα παρακάτω:

- ✓ Μέθοδος χύτευσης (φυγοκεντρική κενού, βαρύτητας, υψηλής πίεσης)
- ✓ Θερμοκρασία έγχυσης και βαθμός υπερθέρμανσης (θέρμανση πάνω από τη liquidus)
- ✓ Αρχική θερμοκρασία καλουπιού
- ✓ Υλικό καλουπιού
- ✓ Διαπερατότητα της επένδυσης από αέρια (gas permeability of the investment)
- ✓ Περιβάλλον χύτευσης (ατμόσφαιρα, κενό, χρήση αδρανούς αερίου)
- ✓ Ενέργεια διεπιφάνειας και επιφανειακή τάση του τήγματος
- ✓ Λόγος επιφάνειας προς όγκο του χυτού
- ✓ Σχήμα και μέγεθος του χυτού

Μέγεθος κόκκων: Κατά γενική ομολογία τα λεπτόκοκκα χυτά έχουν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από τα χονδρόκοκκα. Έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και μεγαλύτερη ολκιμότητα. Αντιγράφουν καλύτερα τις επιφανειακές λεπτομέρειες και υπόκεινται πιο εύκολα σε επιφανειακή κατεργασία. Έχει αποδειχθεί ότι το μέγεθος των κόκκων επηρεάζεται από την πυρηνοποίηση που με τη σειρά της επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του τήγματος και το ρυθμό απαγωγής θερμότητας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η πυρηνοποίηση διευκολύνεται με την τοποθέτηση στο τήγμα ειδικών ουσιών, που έχουν τη δυνατότητα να αυξήσουν την ετερογενή αλλά και την ομογενή πυρηνοποίηση.

Έγχυση: Η μεταφορά του υγρού μετάλλου από το θάλαμο τήξης στο καλούπι, είναι ένα ιδιαίτερα κρίσιμο σημείο σε κάθε χύτευση. Το πιο πιθανό είναι ότι τα περισσότερα ελαττώματα των χυτών, προκύπτουν σε αυτά τα λίγα δευτερόλεπτα.

Η φύση της ροής του μετάλλου επηρεάζεται από τη δημιουργία ισοθερμοκρασιακών επιφανειακών στρωμάτων, καθώς και από το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας. Με διαφορετικούς αντίστοιχα τρόπους, οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν την απόσταση που μπορεί να διανύσει το μέταλλο, μέχρι να στερεοποιηθεί.

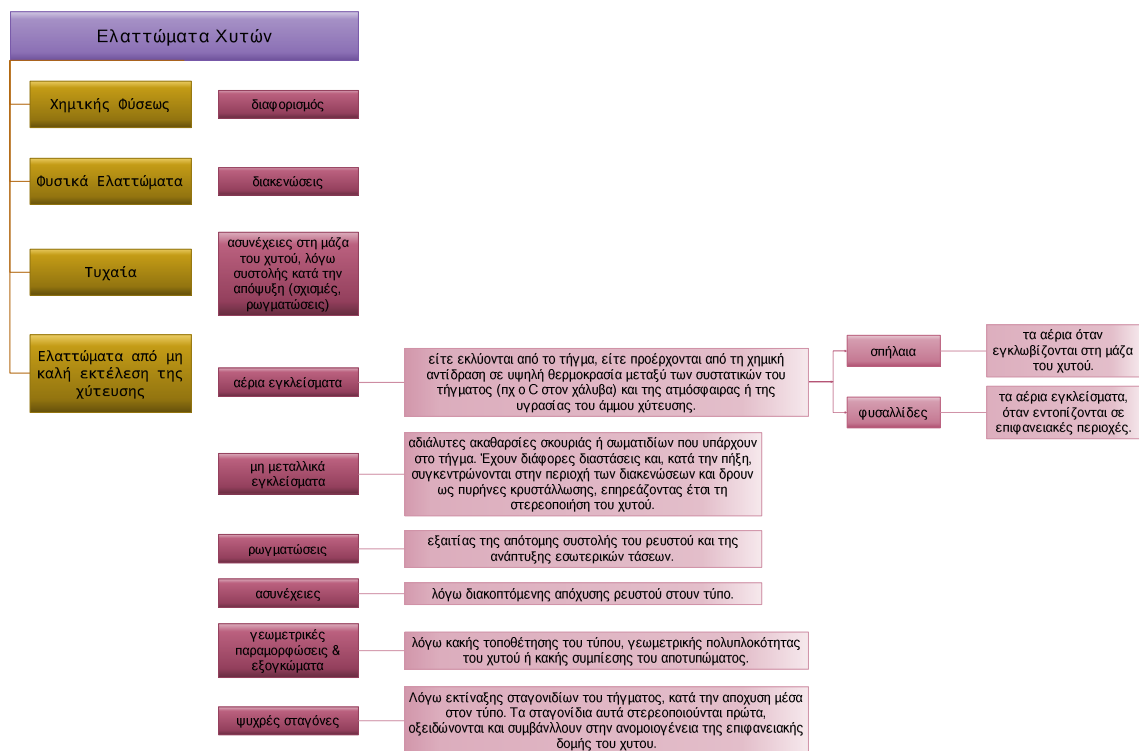
Προβλήματα ροής συναντά κανείς στις μικρές διατομές, όπου το μέταλλο ενδεχομένως στερεοποιείται απότομα στα τοιχώματα του αγωγού εισόδου, δημιουργώντας ένα επιφανειακό στρώμα. Στη συνέχεια το πάχος του στρώματος συνεχώς αυξάνεται και μετατρέπεται σε μηχανικό εμπόδιο, εμποδίζοντας τη ροή του υπόλοιπου υγρού. Κατά συνέπεια, το εισερχόμενο μέταλλο καλύπτει πρώτα τις μεγαλύτερες διατομές, όπου δεν υπάρχουν

αντίστοιχα εμπόδια. Ταυτόχρονα, στις εισόδους των λεπτότερων διατομών, το εν λόγω στρώμα μεγαλώνει συνεχώς. Όταν και οι μεγαλύτερες διατομές γεμίσουν, τότε το υγρό μέταλλο συμπιέζεται κι έτσι οι λεπτότερες διατομές χρειάζονται επιπλέον επιφανειακή τάση για να υπερνικήσουν τη δύναμη του στρώματος. Όταν πια αρχίσει και πάλι το υγρό μέταλλο να κινείται στη λεπτή διατομή, δημιουργείται συνεχώς νέα επιφάνεια, καθώς η παλιά επιφάνεια πιέζεται προς τα τοιχώματα του καλουπιού, μέχρις ότου ολοκληρωθεί η δημιουργία της εξωτερικής επιφάνειας του χυτού. Συνεπώς, από αυτό το σημείο και έπειτα, το δημιουργημένο στρώμα συνεχώς διαλύεται και αντικαθίσταται. Το παχύ στρώμα πλέον μετατρέπεται σε επιπλέοντα υπολείμματα στην επιφάνεια του χυτού.

Συχνά υπάρχουν αντικρουόμενες τάσεις: από τη μία, σε λεπτά τοιχώματα χυτού, η ροή πρέπει να είναι γρήγορη για να αποφευχθεί η πρόωρη στερεοποίηση. Από την άλλη υπερβολικά ταχεία ροή μπορεί να οδηγήσει σε τύρβη με συνεπακόλουθα ελαττώματα. Κατά τη διάρκεια της τυρβώδους πλήρωσης του καλουπιού, η θεώρηση δυναμικής επιφανειακής τάσης είναι η μόνη εφαρμόσιμη, δεδομένου ότι συνεχώς δημιουργείται νέα επιφάνεια χυτού, με πολύ μεγάλη ταχύτητα.

1.4 Ατέλειες Χυτών

Τα ελαττώματα των χυτών μπορεί να είναι χημικής φύσης, φυσικά ελαττώματα, τυχαία ελαττώματα ή να προκύπτουν από μη καλή εκτέλεση της χύτευσης. Το Σχήμα 1.8 παρουσιάζει συνοπτικά και ενδεικτικά κάποια συνήθως παρατηρούμενα ελαττώματα, με βάση την κατηγοριοποίηση που μόλις αναφέρθηκε.



Σχήμα 1.8 Γενική Κατηγοριοποίηση των Ελαττωμάτων των Χυτών (βασισμένο στο [Χρυσουλάκης & Παντελής 1996])

Τυποποιημένη Κατηγοριοποίηση και Κωδικοποίηση Ελαττωμάτων

Τα χυτήρια χρησιμοποιούν συχνά μεθόδους δοκιμής-και-σφάλματος για να επιλύσουν το πρόβλημα της δημιουργίας ατελειών στα χυτά. Σε κάθε περίπτωση, είναι σημαντική η χρήση μίας οργανωμένης και κατά το δυνατόν ολοκληρωμένης προσέγγισης, με θεωρητικό υπόβαθρο, ώστε να καθορίζονται τα αίτια της δημιουργίας των ατελειών.

Ο «Διεθνής Άτλας των Ατελειών των Χυτών» (“International Atlas of Casting Defects handbook”) [American Foundry Society 1974] συγκεντρώνει το σύνολο των ατελειών και τις διακρίνει σε 7 κύριες κατηγορίες. (Ο πίνακας με τις κατηγορίες φαίνεται στον Πίνακα 1.6). Σχετικά με την ονοματοδοσία των ατελειών, η κάθε ατέλεια χαρακτηρίζεται από έναν κωδικό. Ο κωδικός ξεκινάει από ένα γράμμα, από το Α μέχρι το Γ, για κάθε κύρια κατηγορία ατελειών. Στη συνέχεια ακολουθεί ένας τριψήφιος αριθμός. Το ψηφίο των εκατοντάδων του αριθμού αυτού αντιστοιχεί στην κάθε υποκατηγορία (100 για τη 1^η υποκατηγορία, 200 για τη 2^η, κλπ) (Πίνακας 1.7). Επιπλέον, η AFS Committee , [Alagarsamy 2003] έχει προσθέσει κωδικούς στο τέλος των υπάρχοντων τετραψήφιων κωδικών, οι οποίοι να υποδεικνύουν το υλικό του χυτού (χυτοσίδηρος, αλουμίνιο κλπ) καθώς και τη μέθοδο χύτευσης που χρησιμοποιήθηκε (βλ. Πίνακα 1.6).

Πίνακας 1.6 Χρησιμοποιούμενα σύμβολα στην κωδικοποίηση των ατελειών [ASM International 1996], [American Foundry Society 1974], [Alagarsamy 2003].

ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΑ ΚΥΡΙΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΑΤΕΛΕΙΩΝ (MAJOR DEFECT CODES)	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ (ALLOY CATEGORIES)	ΜΕΘΟΔΟΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ (PROCESS)	
A - Προεξοχές (Metallic projections)	GI - Grey iron	GS - Green sand	LF - Lost Foam
B - Κοιλότητες/διακενώσεις (Cavities)	DI - Ductile iron	BS - Baked sand	IV - Investment casting
C - Ασυνέχειες (Discontinuities)	CS - Carbon steel	NB - No bake	VP - ‘V’ Process
D - Ελαττωματική Επιφάνεια (Defective surface)	SS - Stainless steel	CB - Cold box	CN - Centrifugal
E - Ατελής Πλήρωση (Incomplete casting)	OF - Other ferrous	HB - Hot box/shell	IG - Ingot
F - Διαστασιακές αποκλίσεις και αποκλίσεις μορφής (Incorrect shape and dimension)	AL - Aluminum	PM - Permanent mold	CC - Continuous cast
	MG - Magnesium	DC - Die casting	OM - Other methods
	CU - Copper		
G - Εγκλείσματα (Inclusions and structure)	ZN - Zinc		
	OA - Other non ferrous		

Πίνακας 1.7 Ενδεικτικό Απόσπασμα από την Τυποποιημένη Κατηγοριοποίηση Ελαττωμάτων των Χυτών [ASM International 1996]

B. CAVITIES (Κοιλότητες/διακενώσεις)	
B 100 : Cavities with generally rounded smooth walls detectable to the naked eye	B 200 : Cavities with rough walls, shrinkage
B111 Blowholes, Pinholes	B211 Oper or External Shrinkage
B112 Blowholes near inserts, chills, chaplets	B213 Core Shrinkage
B113 Slag Blowholes	B214 Shrink at riser contact
B121 Surface or Subsurface Blowholes	B221 Internal or Blind Shrinkage
B122 Corner Blowholes, Draws	B222 Centerline or Axial Shrinkage Porosity
B123 Surface Pinholes	B223 Center line porosity at isolated hot spots
B124 Dispersed Shrinkage	B300 Porous structures caused by many small cavities
	B311 Macro, Micro, shrinkage porosity-leakers

Το κάθε χυτήριο είθισται να έχει τη δική του in-house κωδικοποίηση ατελειών, με βάση τη συσσωρευμένη εμπειρία. Η πληροφορία αυτή αποτελεί

μία βάση δεδομένων για το μηχανικό του χυτηρίου και για την εκπαίδευση νέου προσωπικού. Η χρήση της τυποποιημένης κωδικοποίησης που προτείνεται, παράλληλα με τις «εσωτερικές» κωδικοποιήσεις, μπορεί να παρέχει επιπρόσθετη και πιο οργανωμένη πληροφορία και διευκολύνει τη διασύνδεση και την επικοινωνία των χυτηρίων, χωρίς πρόβλημα.

[Kalpakjian 1997], [ASM International 2008], [Mane et al. 2010], [Dobrzański et al. 2006], [Βοσνιάκος 2004],

Έλεγχος και Αναγνώριση Ελαττωμάτων

Οι μέθοδοι ελέγχου είναι τριών κατηγοριών:

- Οπτικός έλεγχος: ο απλούστερος δυνατός που είναι ωστόσο και πολύ σημαντικός. Με τον οπτικό έλεγχο είναι δυνατή η ανίχνευση ασυνεχειών, ρωγμών, στρεβλώσεων κτλ.
- Έλεγχος των διαστάσεων του χυτού, που γίνεται με τα κατάλληλα μετρητικά όργανα όπως κουμπάσο, διαβήτες, μικρόμετρα και παχύμετρα.
- Μεταλλουργικός έλεγχος: είναι ο πιο λεπτομερής τρόπος εξέτασης και πραγματοποιείται σε εργαστήριο. Είναι δυνατός ο προσδιορισμός της χημικής σύστασης και των μηχανικών ιδιοτήτων του χυτού.

Με βάση την προαναφερθείσα κατηγοριοποίηση, η πλειοψηφία των ατελειών των χυτών μπορεί να αναγνωριστεί με βάση το όνομα και τον κωδικό. Επισημαίνεται, ωστόσο, πως υπάρχουν κάποιες ατέλειες που φαινομενικά είναι παρόμοιες, αλλά οφείλονται σε εντελώς διαφορετική αιτία και αποτελούν τελείως διαφορετικό τύπο ελαττώματος. Λάθος αναγνώριση κάποιας ατέλειας μπορεί να οδηγήσει σε προσπάθεια διόρθωσης παραμέτρων της χύτευσης, χωρίς να συντρέχει λόγος. Συνεπώς, μπορεί να είναι προτιμότερο να μην αποδοθεί συγκεκριμένος ειδικός χαρακτηρισμός σε κάποια ατέλεια. Για παράδειγμα, εάν δεν είναι δυνατή η διάκριση μεταξύ gas defect (αέριο έγκλεισμα) και shrinkage defect (πορώδες λόγω συρρίκνωσης), τότε θα πρέπει να χαρακτηριστεί η ατέλεια ως “porosity”, έως ότου ξεκαθαριστεί. Μεταξύ των αμφιλεγόμενων ατελειών είναι και τα εγκλείσματα (sand or slag).

Οι πηγές άντλησης πληροφορίας που είναι διαθέσιμες σχετικά με τα ελαττώματα των χυτών είναι αρκετές (εγχειρίδια, διαδίκτυο, βάση δεδομένων χυτηρίων). Υπάρχουν, βεβαίως, δύσκολες περιπτώσεις, στις οποίες η χρήση εξειδικευμένων τεχνικών και εργαλείων, όπως το SEM, είναι αναγκαία, για να αποκαλυφθεί η φύση και το αίτιο της ατέλειας.

Διαφορισμός

Το φαινόμενο της μη ομοιογενούς χημικής σύστασης σε ένα ρευστό μεταλλικό κράμα. Ο διαφορισμός διακρίνεται σε δύο τύπους: μικροδιαφορισμό και μακροδιαφορισμό. Κατά το μικροδιαφορισμό, οι μεταβολές της χημικής σύστασης του ρευστού κράματος εμφανίζονται σε μικροσκοπική κλίμακα και κυρίως μέσα στα όρια των κόκκων. Ο μικροδιαφορισμός μπορεί να επηρεάσει έμμεσα τις μηχανικές ιδιότητες ενός κράματος. Η εμφάνιση του μικροδιαφορισμού μπορεί να μειωθεί δραστικά με θερμική κατεργασία ομογενοποίησης.

Γνωστό είναι ότι το φαινόμενο της διάχυσης είναι πολύ αργή διαδικασία στη στερεή φάση οπότε και η επίδρασή του στο μακροδιαφορισμό καθίσταται μειωμένη. Ο μακροδιαφορισμός αναφέρεται στη μακροσκοπική μεταβολή της χημικής σύστασης μέσα σε ένα ρευστό κράμα. Υπό συνθήκες κανονικού μακροδιαφορισμού, το τελευταίο μέρος του κράματος που στερεοποιήθηκε είναι και το πλουσιότερο στη ποσότητα του κραματικού στοιχείου. Υπό συνθήκες όμως αντίστροφου μακροδιαφορισμού, το τελευταίο μέρος του κράματος που στερεοποιήθηκε περιέχει και το μικρότερο ποσοστό του κραματικού στοιχείου. Τέσσερις παράγοντες ευνοούν την εμφάνιση του φαινομένου του μακροδιαφορισμού: (α) συρρίκνωση λόγω στερεοποίησης και θερμικής συστολής, (β) διαφορές στην πυκνότητα ανάμεσα στους κλάδους των δενδριτών, (γ) διαφορά στην πυκνότητα μεταξύ υγρού και στερεού υλικού και (δ) επαγωγικά ρεύματα που επιταχύνονται από τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ υγρού και στερεού υλικού.

Δημιουργία Πορώδους (Διακενώσεις)

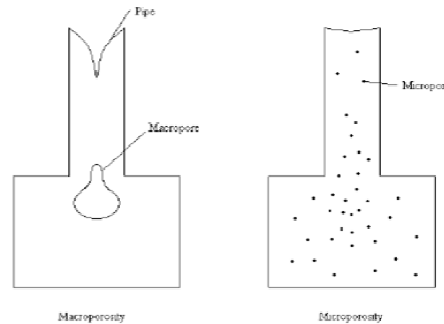
Κατά τη χύτευση μέσα σε τύπο δεν πραγματοποιείται ταυτόχρονη στερεοποίηση του συνόλου του ρευστού μετάλλου, αλλά η στερεοποίηση γίνεται σε διαδοχικά στρώματα από τα τοιχώματα προς το κέντρο του τύπου, σε καθένα από τα οποία παρατηρείται μείωση του ειδικού όγκου του υλικού. Κατά συνέπεια, το πορώδες λόγω συστολής προκαλείται ουσιαστικά λόγω της απώλειας πυκνότητας στην υγρή σε σχέση με τη στερεή μορφή. Κατά συνέπεια, κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου, η πυκνότητα αυξάνεται κατά πολύ.

Η θέση των εν λόγω διακενώσεων εξαρτάται από το σχήμα του τύπου χύτευσης, το οποίο καθορίζει τη μορφή της ζώνης τήξης. Το μέγεθος των διακενώσεων εξαρτάται από τη διαφορά των ειδικών όγκων υγρού - στερεού μετάλλου, αλλά και από την αρχική θέση του ρευστού.

Οι λόγοι που οδηγούν στη δημιουργία τέτοιου είδους διακενώσεων είναι είτε ο ανεπαρκής σχεδιασμός των αγωγών απόχυσης μετάλλου, είτε η κακή θέση προτύπου σε σχέση με τον κεντρικό αγωγό, είτε η ανεπαρκής τροφοδοσία τήγματος. Ακόμη, το πορώδες είναι πιο έντονο όταν έχουμε υψηλή αρχική θερμοκρασία τύπου ή όταν τα χυτά βρίσκονται σε μικρή απόσταση από το κάτω τμήμα του καλουπιού.

Το πορώδες μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικές κατηγορίες, το μακροπορώδες (μακροδιακενώσεις) και το μικροπορώδες (μικροδιακενώσεις). Μακροπορώδες συμβαίνει κυρίως σε κράματα που έχουν μικρό εύρος στερεοποίησης ή σε καθαρά μέταλλα και χαρακτηρίζεται από μεγάλες σπηλαιώσεις που σχηματίζονται εξαιτίας της συρρίκνωσης του στερεοποιούμενου μετάλλου. Μικροπορώδες συμβαίνει σε κράματα με μεγάλο εύρος στερεοποίησης και χαρακτηρίζεται από μικρές, και διασκορπισμένες κοιλότητες στο μέγεθος των κόκκων ή μικρότερες. Στο σχήμα είναι φανερή η διαφορά ανάμεσα στο μακροπορώδες και στο μικροπορώδες (στις μακροδιακενώσεις και στις μικροδιακενώσεις.)

Μακροπορώδες : Τα περισσότερα μέταλλα υφίστανται μια συρρίκνωση κατά τη στερεοποίηση. Για να γεμίσει ένα χυτό πλήρως το καλούπι, συνεχώς το τήγμα πρέπει να μπορεί να φτάνει στις στερεοποιούμενες περιοχές ώστε καθώς το μέταλλο στερεοποιείται και συρρικνώνεται, αυτό να έρχεται και να γεμίζει το κενό που δημιουργείται.



Σχήμα 1.9 Μακροπορώδες και Μικροπορώδες [McClain 2002].

Σχηματισμό μακροπορώδους έχουμε όταν σε κάποιο τμήμα του χυτού δεν υπάρχει σωστή παροχή τήγματος ώστε να γεμίζει πλήρως το καλούπι.

Η δημιουργία μακροπορώδους μπορεί να εξαλειφθεί με προσεκτικό σχεδιασμό του χυτού. Από τη σχέση Chvorinov είναι φανερό ότι ο χρόνος στερεοποίησης ενός τμήματος του χυτού είναι συνάρτηση του λόγου του όγκου του τμήματος αυτού προς την επιφάνεια. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος στερεοποίησης. Η σχεδίαση ενός καλού χυτού περιλαμβάνει τη διαίρεση του χυτού σε τμήματα και τη δημιουργία/ μελέτη διαδοχικής στερεοποίησης.

Η διαδοχική στερεοποίηση συνεπάγεται ότι στα τμήματα με τον μικρότερο λόγο παρέχεται μέταλλο από τα τμήματα με τον μεγαλύτερο λόγο. Επιτρέποντας τα τμήματα με μεγάλο λόγο όγκου/επιφάνεια να τροφοδοτούν τα τμήματα με μικρότερο λόγο, ο σχηματισμός μακροπορώδους μπορεί να εξαλειφθεί. Κάποιες φορές, χρειάζεται να προστεθούν τμήματα του χυτού για να εξασφαλιστεί ότι σε όλες οι χρήσιμες περιοχές του χυτού υπάρχει επαρκής παροχή τήγματος. Οι περιοχές που προστίθενται μόνο για να υπάρχει επαρκής παροχή τήγματος ονομάζονται προσεπιχωνεύματα και ψευδοκεφαλές (risers ή feeders). Τα προσεπιχωνεύματα τοποθετούνται ώστε οι χρήσιμες περιοχές του χυτού να είναι αυτές που θα στερεοποιηθούν τελευταίες. Σχεδιασμός για διαδοχική στερεοποίηση και προσθήκη προσεπιχωνευμάτων εξαλείφει το μακροπορώδες.

Μικροπορώδες: Ο σχηματισμός μικροπορώδους σε κράματα που χρειάζονται ώρα για να στερεοποιηθούν είναι μια σύνθετη διαδικασία. Οι περιορισμοί ροής, το διαλυμένο υδρογόνο και τα εγκλείσματα, όπως τα φιλμ οξειδίων, αλληλεπιδρούν και ελέγχουν το σχηματισμό πορώδους στο χυτό. Το βασικό μέλημα της τρέχουσας έρευνας είναι η κατανόηση των μηχανισμών που προκαλούν τη δημιουργία πορώδους (μικροπορώδους).

Στα κράματα, ο τρόπος στερεοποίησης είναι συνήθως ο δενδριτικός (δενδριτική ανάπτυξη). Το υγρό που πρέπει έρχεται να γεμίζει τα κενά που δημιουργούνται καθώς το μέταλλο στερεοποιείται και συρρικνώνεται πρέπει να ρέει γύρω από τους δενδρίτες. Η πτώση πίεσης που απαιτείται

για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί ροή γύρω από τους δενδρίτες μπορεί να είναι πολύ μεγάλη. Η πτώση πίεσης μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία κενών κοντά στο μέτωπο στερεοποίησης. Αέρια, όπως υδρογόνο, που είναι παρόντα στο τήγμα, επιταχύνουν τον σχηματισμό των κενών αυτών.

1.5 Η χύτευση ακριβείας (Χύτευση με τη μέθοδο του Χαμένου Κεριού)

1.5.1 Περιγραφή της Μεθόδου

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της ΔΔ για την κατασκευή των καλουπιών της χύτευσης είναι η μέθοδος του χαμένου κεριού (lost wax casting) ή χύτευση ακριβείας (investment casting, precision casting).

Από τα πρώτα χυτά ευρήματα που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο χύτευσης χαμένου κεριού είναι το αγαλματίδιο από μπρούντζο που φαίνεται στο Σχ.1.10, δείγμα της ινδικής μεταλλουργίας και χρονολογείται στο 3000π.Χ.



Σχήμα 1.10 Ένα από τα πρώτα δείγματα κατασκευής με τη μέθοδο χύτευσης του χαμένου κεριού, το αγαλματίδιο «η χορεύτρια του Mohenjo Daro» (“The dancing girl of Mohenjo Daro”) χρονολογείται από το 3000π.Χ. [Meier 1970].

Στις μέρες μας η χύτευση με τη μέθοδο του χαμένου κεριού απαντάται κατά κόρον σε καλλιτεχνικά χυτήρια, σε εργαστήρια οδοντικών προσθέτων, σε περιπτώσεις σύνθετων στρατιωτικών εφαρμογών, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην κατασκευή πτερυγίων για στροβίλους κ.α.. Στη μέθοδο αυτή, ο τύπος είναι μίας χρήσης και αποτελείται από ένα μόνο κομμάτι, δηλαδή δεν είναι διαιρετό. Εξαλείφεται, έτσι η πιθανότητα δημιουργίας διαχωριστικής γραμμής ή αλλοίωσης της γεωμετρίας, επιτρέποντας τη χύτευση τεμαχίων με ιδιαίτερα μεγάλη ακρίβεια.

Υπάρχουν παραλλαγές της μεθόδου: το καλούπι μπορεί να είναι είτε κελυφοειδές (shell casting), είτε συμπαγές (solid mould). Στην πρώτη περίπτωση, το πάχος του καλουπιού είναι ομοιόμορφο γύρω από όλη τη γεωμετρία του χυτού. Το κέρινο δέντρο εμβαπτίζεται σταδιακά στο υλικό του καλουπιού, το οποίο καλύπτει το δέντρο σε στρώσεις. Μάλιστα, συνήθως, σαν εσωτερική στρώση χρησιμοποιείται η λεγόμενη «επένδυση», ένα υλικό ανθεκτικό -για να υποδεχτεί το τήγμα και να μην αντιδρά χημικά με έντονο τρόπο με αυτό-και με κοκκομετρία τέτοια που να καταλήξει σε πολύ καλή ακρίβεια τελικής επιφάνειας. Στη δεύτερη περίπτωση, δηλ. στην περίπτωση του συμπαγούς καλουπιού (solid mould), το καλούπι έχει κυλινδρικό σχήμα συνήθως, με συγκεκριμένες διαστάσεις (εξαρτώνται από τις απαιτήσεις του χυτού ή από τους περιορισμούς που

επιβάλλει η μηχανή στην οποία θα γίνει η χύτευση). Ως εκ τούτου, το πάχος του τύπου γύρω από το χυτό, δεν είναι σταθερό.

Η τεχνική της χύτευσης ακριβείας (Σχήμα 1.11) περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1: Κατασκευάζουμε ένα κύριο πρότυπο (“master pattern”), συνήθως από μπρούντζο ή ορείχαλκο τον οποίο μπορούμε να επεξεργαστούμε εύκολα λόγω της μικρής σκληρότητάς του. Η διαστασιολόγησή του πρέπει να λαμβάνει υπ’ όψιν τη συστολή του κεριού και του μετάλλου.

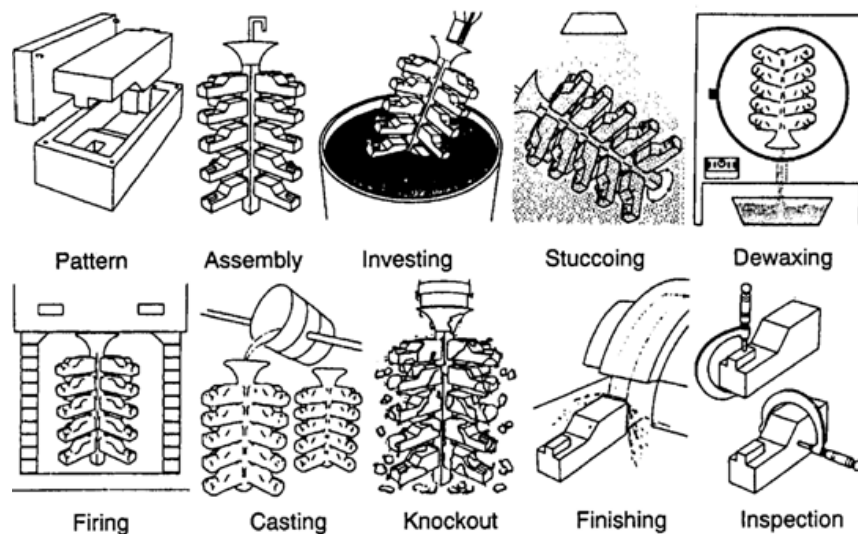
Βήμα 2: Δημιουργία καλουπιού από σιλικονούχο λάστιχο. Γύρω από το κύριο πρότυπο λιώνει και στερεοποιείται υπό πίεση λάστιχο. Το στερεοποιημένο λάστιχο κόβεται κατάλληλα ώστε να απομακρυνθεί το πρότυπο. Το λαστιχένιο καλούπι, στο οποίο έχει αναπαραχθεί με κάθε λεπτομέρεια η μορφή του ψυ ψ υ προτύπου, χρησιμοποιείται στο επόμενο βήμα.

Βήμα 3: Κερί εγχέεται στο λαστιχένιο καλούπι, προς δημιουργία κέρινου ομοιώματος. Από ένα και μόνο λαστιχένιο καλούπι παράγεται ο απαιτούμενος αριθμός κέρινων ομοιωμάτων.

Βήμα 4: Τα κέρνα ομοιώματα συναρμολογούνται σε δέντρο χύτευσης.

Βήμα 5: Δημιουργία καλουπιού. Στην περίπτωση του “solid mould”, γύρω από το συναρμολόγημα (κέρινο δέντρο) τοποθετείται μία μεταλλική στεφάνη (φλάσκα). Ο ειδικός γύψος εγχέεται εντός της φλάσκας, περιβάλλοντας το κέρινο συναρμολόγημα. (Ορολογία: το σύστημα του στερεοποιημένου γύψινου καλουπιού εντός της φλάσκας, ονομάζεται «μούφλο»). Στην περίπτωση του “shell casting”, το κέρινο δέντρο εμβαπτίζεται σταδιακά μέσα στα υλικά που του καλουπιού (πρώτα την επένδυση κι έπειτα το γύψο). Σε κάθε εμβάπτιση, μία στρώση υλικού περιβάλλει το κέρινο δέντρο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται τόσες φορές, ώστε να δημιουργηθεί το επιθυμητό πάχος καλουπιού.

Βήμα 6: Αποκέρωση: το καλούπι (μούφλο) τοποθετείται εντός ειδικού φούρνου, και ακολουθεί κατάλληλο κύκλο ψησίματος, ώστε να απομακρυνθεί το κερί από το καλούπι.



Σχήμα 1.11 Η τεχνική της χύτευσης χαμένου κεριού [Non-Ferrous Founders’ Society n.d.], [Prasad 2012].

Βήμα 7: Ψήσιμο του καλουπιού. Αμέσως μετά την αποκέρωση, ακολουθεί κύκλος ψησίματος του καλουπιού προκειμένου να αποκτήσει ο γύψος την κατάλληλη σκληρότητα, αντοχή και τελικά, την κατάλληλη θερμοκρασία, για να υποδεχτεί το λιωμένο μέταλλο.

Βήμα 8: Λιώσιμο του μετάλλου.

Βήμα 9: Έγχυση του ρευστού μετάλλου (τήγματος) στο θερμό καλούπι (εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο είδος χύτευσης).

Βήμα 10: Απομάκρυνση γύψου (συνηθέστερα με εμβάπτιση του μούφλου, η οποία προκαλεί θερμικό σοκ στο γύψο).

Βήμα 11: Τελική παραλαβή των χυτών.

Εργασίες μετά τη χύτευση:

- Κρούση: Εξαιτίας της προσκόλλησης ορισμένων συστατικών του καλουπιού στο χυτό είναι απαραίτητη η κρούση ή η δόνηση τους σε υδραυλικές μηχανές ή τα χυτά υποβάλλονται σε αμμοβολή ή υδροβολή.
- Κόψιμο: αποκοπή των κλάδων του δέντρου χύτευσης, ώστε να απομονωθούν τα χυτά προϊόντα και να απομακρυνθούν οι μπουκαδούρες (ο κύριος και οι δευτερεύοντες αγωγοί τροφοδοσίας).
- Λείανση: Εκτελείται για τον καθαρισμό των πλινθωμάτων με τη βοήθεια πνευματικών μηχανών και τη χρήση τόσο κεραμικών όσο και μεταλλικών στοιχείων

Πλεονεκτήματα της μεθόδου:

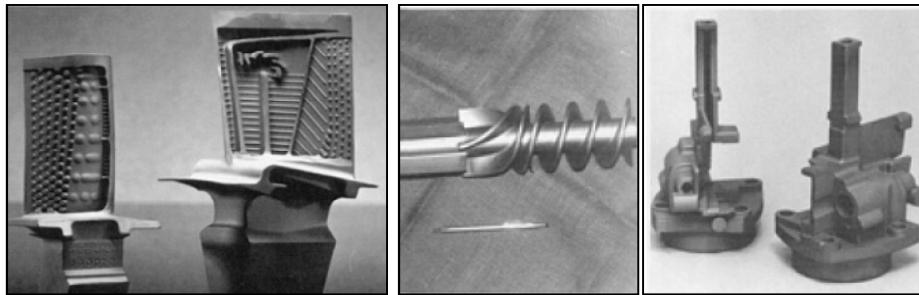
- Επίτευξη γεωμετρικής πολυπλοκότητας: με τη χύτευση ακριβείας είναι δυνατή η κατασκευή χυτών με οποιοδήποτε βαθμό εξωτερικής και εσωτερικής πολυπλοκότητας. Έτσι μπορεί να γίνει επανασχεδιασμός ενός χυτού με αποτέλεσμα τη μείωση του βάρους, του απαιτούμενου υλικού και τελικά του κόστους του.
- Χυτευσιμότητα μεγάλης ποικιλίας κραμάτων: Είναι δυνατή η χύτευση οποιουδήποτε σχεδόν κράματος, ακόμα και αυτών που επεξεργάζονται δύσκολα.
- Εξαιρετική ακρίβεια διαστάσεων: Η απουσία διαχωριστικής γραμμής στο χυτό και ο περιορισμός που απαιτούν, οδηγούν στην παρασκευή χυτών μεγάλης ακρίβειας, συγκρινόμενη με αυτή των συμβατικών μεθόδων.
- Διαθεσιμότητα προτύπων και εύκολη επεξεργασία τους: Η χρήση φθηνών υλικών για την κατασκευή προτύπων όπως το κεριά και το πλαστικό, σε συνδυασμό με την εύκολη επεξεργασία τους, καθιστά τη μέθοδο γρήγορη και σχετικά οικονομική, αφού δεν απαιτούνται ειδικές εγκαταστάσεις.
- Αξιοπιστία: Η χρήση της μεθόδου σε εφαρμογές πολύ υψηλών ποιοτικών απαιτήσεων αποδεικνύει την αξιοπιστία και την ποιότητα των παραγόμενων αντικειμένων.
- Μεγάλο εύρος εφαρμογής: Εκτός από χυτά μεγάλης ακρίβειας και πολυπλοκότητας, η χύτευση ακριβείας χρησιμοποιείται και για την κατασκευή πολύ απλών τεμαχίων σε ποικιλία διαστάσεων και βάρους από μερικά γραμμάρια έως 300 kg.

Μειονεκτήματα της μεθόδου:

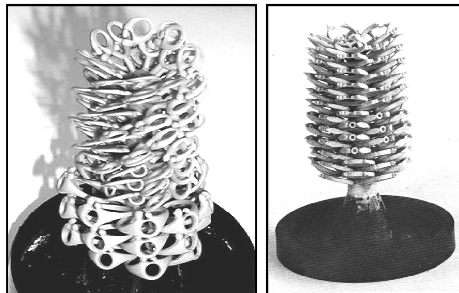
- Απαιτούνται έμπειρα άτομα για την κατασκευή των καλουπιών και των ομοιωμάτων
- Υψηλό σχετικά κόστος
- Μεγάλο χρονικό διάστημα προετοιμασίας

1.5.2 Εφαρμογές Χύτευσης Ακρίβειας (Χαμένου Κεριού)

Τα χυτά τεμάχια που μπορούν να κατασκευαστούν με χύτευση μπορεί να έχουν διαστάσεις από μερικά χιλιοστά και γραμμάρια, μέχρι πολλούς τόννους.



Σχήμα 1.12 Διάφορα τεμάχια υψηλών απαιτήσεων ακρίβειας [Horton 2008], [ASM International 1992].



Σχήμα 1.13 Τυπικά δέντρα στη χύτευση χαμένου κεριού για την κατασκευή κοσμημάτων [Hitesh Hansora n.d.], [Gainsbury 1979]



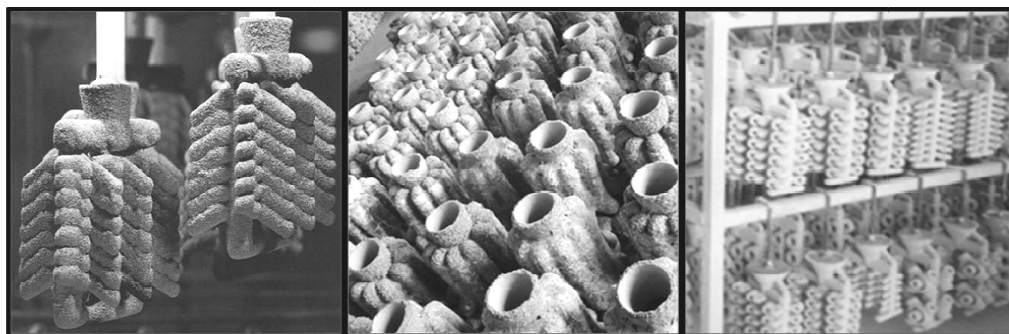
Σχήμα 1.14 Οδοντιατρικά χυτά (dental castings) [New Image Dental Laboratory n.d.].



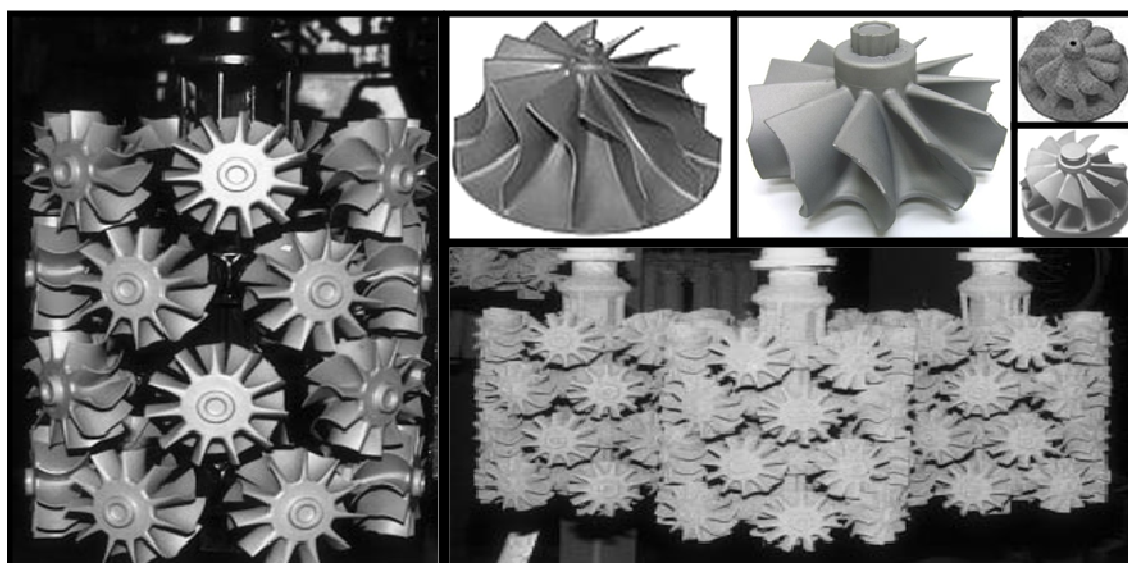
Σχήμα 1.15 Έλικες πλοίων: εφαρμογή στη ναυπηγική τεχνολογία [France Helices n.d.], [Chauncy Maples Malawi Trust 2913], [R2 Quality Castings n.d.], [R2 Quality Castings n.d.].



Σχήμα 1.16 Χυτά μηχανολογικά τεμάχια [Marshall Technocast Pvt. Ltd. n.d.].



Σχήμα 1.17 Κελυφοειδή καλούπια τυπικών βιομηχανικών δέντρων χύτευσης [Philip Bralsford Consultancy n.d.], [Ningbo Casting Machinery Industry Co. Ltd. n.d.], [Tracy Die Cast INC. n.d.].



Σχήμα 1.18 Δέντρα χύτευσης πτερωτών υπερσυμπιεστή (turbocharger hot wheels) [Chandley 1999], μετά τη χύτευση, πριν τη χύτευση (με κελυφοειδές καλούπι) και μεμονωμένα χυτά τεμάχια.

1.6 Τεχνικές χύτευσης κενού

Η χύτευση ακριβείας (χύτευση με τη μέθοδο του χαμένου κεριού) είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την πιστή αναπαραγωγή της μορφής του προτύπου, την καλή ποιότητα της τελικής επιφάνειας και τη δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων, περίτεχνων και μικρών αντικειμένων [J. Campbell 2003], Gainsbury 1979, [Groenewald 1980].

Για τις απαιτήσεις αυτές, η πλήρωση του τύπου με απλή έγχυση βαρύτητας δεν είναι αρκετή. Η τήξη του μετάλλου και η έγχυση του τήγματος στο καλούπι γίνεται συνήθως με τη χρήση μηχανών χύτευσης. Η βασική λειτουργία των μηχανών χύτευσης είναι να εφαρμόζουν στο τήγμα την κατάλληλη πίεση ώστε αυτό να εισχωρεί και να γεμίζει πλήρως την κοιλότητα του τύπου [H Hero 1990]. Στη φάση της παραγωγικής διαδικασίας, ο λόγος που υπάρχει ποικιλία στον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό είναι για να υπάρχει μεγάλο εύρος στη φύση και το μέγεθος των δυνάμεων που ασκούνται στο τήγμα κατά τη διάρκεια της χύτευσης. Η εφαρμογή πίεσης, κενού (ή συνδυασμός αυτών) είναι που επιφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα [H Hero 1990].

Στη συνέχεια, γίνεται μία παράθεση των συνήθως χρησιμοποιούμενων τεχνικών χύτευσης κενού. Αυτές είναι: η χύτευση με υποβοήθηση κενού, η χύτευση κενού και η χύτευση κενού - υπερπίεσης.

1.6.1 Η έννοια του κενού

Στη φυσική, ως κενό ορίζεται η απόλυτη απουσία ύλης σε μια περιοχή του χώρου. Το τέλειο κενό (ή απόλυτο κενό) είναι μια εξιδανίκευση που δεν μπορεί να υπάρξει στην πραγματικότητα. Ο όρος μερικό κενό χρησιμοποιείται για να περιγραφεί το ατελές κενό που παρατηρείται στον πραγματικό κόσμο.

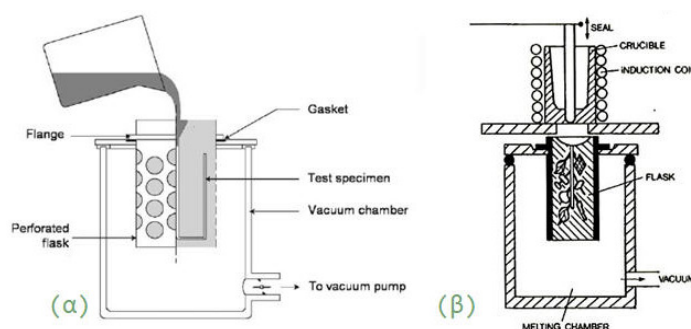
Στη μηχανολογία, κενό χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε περιοχή εντός της οποίας η πίεση ενός αερίου είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής πίεσης.

Οι μηχανικοί μετρούν τις διαβαθμίσεις του κενού με τις μονάδες πίεσης: το πασκάλ (pascal-Pa) (κατά SI), το torr (Τορρικέλι), ($1\text{ torr}=133.322\text{ Pa}$), σε χιλιοστόμετρα υδραργύρου (mmHg), ($759.96\text{ mmHg} \approx 760\text{ mmHg} = 76\text{ cmHg} = 30\text{ inHg} = 100\% \text{ κενό} = \text{απόλυτο κενό}$). Συχνά μετριέται κάνοντας χρήση της βαρομετρικής κλίμακας (bar).

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση πιέσεων χαμηλότερων της ατμοσφαιρικής ονομάζονται κενόμετρα, σε αντίθεση με αυτά που μετρούν μεγαλύτερες πιέσεις και λέγονται μανόμετρα ή θλιβόμετρα. Αν η μέτρηση μεγάλων πιέσεων αρχίζει από το τέλειο κενό τότε λέγεται πως εκφράζει «απόλυτη πίεση». Αν όμως αρχίζει από τη ατμοσφαιρική πίεση και προς τα άνω, τότε λέγεται πως εκφράζει «πραγματική πίεση» (μανομετρική πίεση). Η διαφορά μεταξύ των δύο παραπάνω πιέσεων είναι η βαρομετρική πίεση.

1.6.2 Χύτευση με Υποβοήθηση Κενού (Vacuum - assisted casting)

Όπως υποδηλώνει και το όνομα της συγκεκριμένης τεχνικής χύτευσης, η χύτευση γίνεται με υποβοήθηση κενού. Στο Σχήμα 1.19 φαίνεται ο εξοπλισμός για την πλήρωση του καλουπιού με την τεχνική αυτή.



Σχήμα 1.19 Εξοπλισμός χύτευσης με υποβοήθηση κενού (α) [Sin & Dubé 2004], (β) [Ott & Raub 1985].

Ένα ατσάλινο κολάρο έχει συγκολληθεί κοντά στο πάνω άκρο της διάτρητης φλάσκας. Η φλάσκα τοποθετείται μέσα στον θάλαμο κενού με τρόπο τέτοιο που το κολάρο να κρατά τη φλάσκα σε κατάλληλη θέση μέσα στο θάλαμο. Με τη χρήση κατάλληλων λαστιχένιων δακτυλίων (φλάντζες) κάτω από το κολάρο εξασφαλίζεται η στεγανότητα του θαλάμου.

Μερικό κενό δημιουργείται μέσα στο θάλαμο και γύρω από το καλούπι αλλά όχι εντός του, και το μέταλλο εγχέεται στο εκτεθειμένο (στον αέρα) άνοιγμα του καλουπιού [Faccenda 1998], [Groenewald 1980].

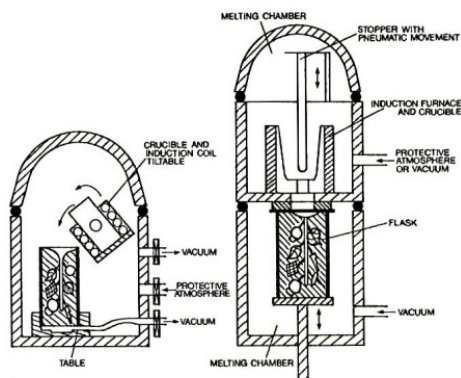
Το κενό διατηρείται μέχρι να συμβεί πλήρης στερεοποίηση των χυτών τεμαχίων. Λόγω του γεγονότος ότι η φλάσκα είναι διάτρητη, μία πολύ μεγαλύτερη περιοχή του μούφλου είναι εκτεθειμένη στο κενό, καταλήγοντας σε μία μεγαλύτερη και πιο όμορφα κατανεμημένη διαφορά πίεσης [Faccenda 1998].

Όταν το μέταλλο απελευθερώνεται μέσα στο καλούπι, ο αέρας που πρέπει να εκτοπιστεί από το μέταλλο από τις κοιλότητες του τύπου, διαφεύγει από τους πόρους του καλουπιού. Συνεπώς, η πίεση που ασκείται από το τήγμα στο καλούπι είναι το άθροισμα της υδροστατικής του πίεσης και της διαφοράς πίεσης ανάμεσα στην ατμοσφαιρική πίεση και τη μειωμένη πίεση μέσα στις κοιλότητες του τύπου. Μεταβάλλοντας το μέγεθος της πίεσης μέσα στο θάλαμο χύτευσης, η πίεση που “ενεργεί” στο μέταλλο καθώς γεμίζει το καλούπι μπορεί να ποικίλει [Sin & Dubé 2004].

Για να επιτευχθεί καλή πλήρωση των καλουπιών κατά τη χύτευση υπό ελεγχόμενη ατμόσφαιρα, μέσα στο αεροστεγές δοχείο έχει βρεθεί ότι είναι απαραίτητο να υπάρχει μεγάλη διαφορά πίεσης.

1.6.3 Χύτευση Κενού - Υπερπίεσης (Vacuum-Pressure Casting)

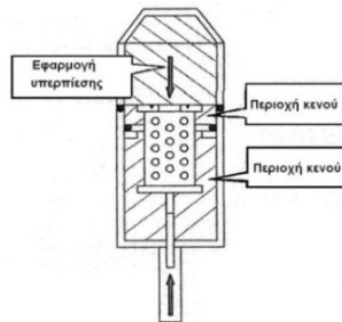
Η διάταξη της χύτευσης κενού μοιάζει πολύ με τη διάταξη της χύτευσης υποβοήθησης κενού, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή, το κενό εφαρμόζεται σε όλο το καλούπι. Με άλλα λόγια, η κοιλότητα του τύπου δεν είναι πλέον εκτεθειμένη στον ατμοσφαιρικό αέρα, αλλά συνθήκες κενού επικρατούν εντός αυτής (Σχήμα 1.20).



Σχήμα 1.20 Εξοπλισμός χύτευσης κενού [Ott & Raub 1985].

Μία χυτόπρεσα κενού αποτελείται συνήθως από δύο θαλάμους: το θάλαμο τήξης και το θάλαμο χύτευσης. Ο θάλαμος τήξης περιέχει το σκεύος τήξης στο οποίο τοποθετείται το μέταλλο και λιώνει. Ο θάλαμος αυτός κλείνει αεροστεγώς και συνήθως υπάρχει δυνατότητα παροχής αδρανούς αερίου (Ar, ή N) ώστε η τήξη να πραγματοποιηθεί σε προστατευμένη ατμόσφαιρα για την αποφυγή δημιουργίας οξειδίων. Στο θάλαμο χύτευσης τοποθετείται το μούφλο, με το άνοιγμα του αγωγού τροφοδοσίας του δέντρου προς τα πάνω. Ο θάλαμος χύτευσης είναι επίσης αεροστεγής, ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί κενό. Οι σύγχρονες μηχανές χύτευσης κενού είναι

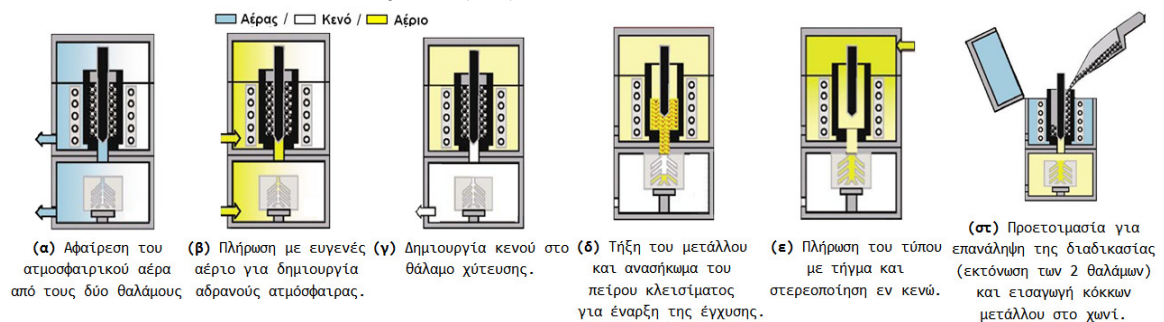
εξοπλισμένες με διακριτούς θαλάμους τήξης και πλήρωσης (Σχήμα 1.21). Έτσι, όταν ο ένας από τους δύο θαλάμους είναι ανοιχτός, ο άλλος μπορεί να παραμείνει κλειστός, σε προστατευμένη ατμόσφαιρα, επιταχύνοντας την κατεργασία.



Σχήμα 1.21 Σχηματικό διάγραμμα χυτόπρεσας κενού-υπερπίεσης. Διακρίνεται η δημιουργία κενού τόσο εντός της κοιλότητας του τύπου όσο και εξωτερικά του μούφλου [Prasad 2012].

Ένας τυπικός κύκλος χύτευσης κενού-υπερπίεσης (Σχήμα 1.22) περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια [S. Kumar et al. 2007], [Traini et al. 2003]:

1. Το προς τήξη μέταλλο τοποθετείται στο χωνί, στο θάλαμο τήξης, ο οποίος κλείνει ερμητικά (α).
2. Κενό δημιουργείται στο θάλαμο τήξης ή εγχέεται αδρανές αέριο, για δημιουργία προστατευτικής ατμόσφαιρας και το μέταλλο θερμαίνεται στην επιθυμητή θερμοκρασία (α).
3. Το προθερμασμένο καλούπι, που έχει κατασκευαστεί με τη μέθοδο του χαμένου κεριού, τοποθετείται στην κατάλληλη υποδοχή μέσα στον θάλαμο χύτευσης ο οποίος, εν συνεχεία, κλείνει αεροστεγώς (β).
4. Δημιουργείται κενό στο θάλαμο χύτευσης (γ).
5. Μόλις το μέταλλο φτάσει την επιθυμητή θερμοκρασία μπορεί να ξεκινήσει η χύτευση. Με πάτημα του διακόπτη έναρξης της διαδικασίας ανασηκώνεται ο πείρος κλεισίματος (αυτός χωρίζει τους δύο θαλάμους). Μέσω της διόδου που δημιουργείται το λιωμένο μέταλλο εισρέει στο καλούπι (δ).
6. Αμέσως μετά το πέρας της έγχυσης, ο θάλαμος τήξης γεμίζει με αδρανές αέριο υπό πίεση. Η υπερπίεση, αυτή που ασκείται στο τήγμα που έχει εισέλθει στον τύπο, βοηθάει στο να γεμίσουν με μέταλλο και οι πιο μικρές και δύσκολες περιοχές του δέντρου (ε).
7. Μετά το πέρας της στερεοποίησης γίνεται εκτόνωση, ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται και στους δύο θαλάμους και η φλάσκα με το χυτό μπορούν να απομακρυνθούν από τη μηχανή (στ).



Σχήμα 1.22 Τυπικός κύκλος χύτευσης , [TopCast Engineering 2010]

Τα τελευταία χρόνια, η πιο σημαντική πρόοδος στην εξέλιξη του εξοπλισμού επετεύχθη μέσω του προγραμματισμού και της αυτοματοποίησης της διαδικασίας δημιουργίας κενού και εφαρμογής υπερπίεσης.

1.6.4 Χύτευση Κενού με Αντιβαρύτητα (Counter-gravity Vacuum Casting)

Στη χύτευση εν κενώ με αντιβαρύτητα, η πλήρωση του καλούπιου θα γίνει λόγω του κενού και το καλούπι θα βρίσκεται τοποθετημένο ανάποδα, πάνω από λεκάνη τήγματος. Το καλούπι κλείνει αεροστεγώς με μια βαλβίδα στην άκρη του καναλιού τροφοδοσίας. Με τη χρήση μιας αντλίας κενού αδειάζει ο ατμοσφαιρικός αέρας και δημιουργούνται συνθήκες κενού ή πολύ μειωμένης πίεσης. Συνήθως, η πίεση μέσα στο καλούπι είναι περίπου στα 2/3 της ατμοσφαιρικής. Στη συνέχεια, μέρος του καναλιού τροφοδοσίας βυθίζεται στο τήγμα. Όταν οι συνθήκες είναι οι κατάλληλες (θερμοκρασία τήγματος, καλούπιου, πίεση) τότε η βαλβίδα που χωρίζει το καλούπι από το τήγμα ανοίγει, και λόγω της διαφοράς πίεσης που υπάρχει (στον θάλαμο τήξης επικρατεί η ατμοσφαιρική πίεση, στο καλούπι η πίεση είναι πολύ μικρότερη) το τήγμα κατακλύζει το καλούπι, γεμίζοντας το με κάθε λεπτομέρεια. Όταν ο τύπος γεμίσει αρχίζει η στερεοποίηση. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία, παύει η εφαρμογή κενού, το καλούπι απομακρύνεται από το σκεύος τήξης, και ακολουθεί η αφαίρεση του τύπου και η περαιτέρω επεξεργασία του δέντρου χύτευσης. Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι μία τεχνική που χρησιμοποιείται συνήθως στη χύτευση σε κενό όταν έχουμε δέντρο χύτευσης, είναι να παύει η εφαρμογή κενού αμέσως μόλις ολοκληρωθεί η στερεοποίηση στα χυτά (του ωφέλιμου χυτού) και πριν στερεοποιηθεί το σύστημα τροφοδοσίας (και ειδικά ο κεντρικός αγωγός). Έτσι, το λιωμένο μέταλλο που υπάρχει στο κανάλι τροφοδοσίας, όταν δεν υπάρχει πια κενό, επιστρέφει στο σκεύος τήξης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αφενός την εξοικονόμηση υλικού (στην περίπτωση χύτευσης πολύτιμων μετάλλων, το ποσοστό αξιοποίησης του μεγαλώνει πολύ) και αφετέρου μειώνει την ανάγκη για περαιτέρω κατεργασίες περάτωσης (αποκοπής των τεμαχίων από τον κεντρικό κορμό του δέντρου).

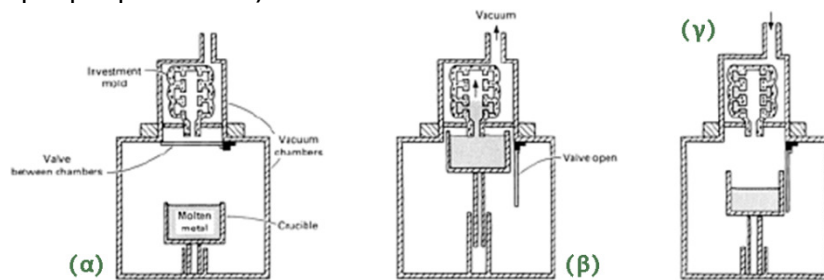
Αυτή ήταν η βασική αρχή λειτουργίας της τεχνικής. Υπάρχουν ωστόσο διάφορες παραλλαγές και αναλόγως υπάρχουν και διάφορες ονομασίες, οι οποίες θα αναφερθούν παρακάτω. Μία διαφοροποίηση έχει να κάνει με το περιβάλλον στο οποίο τήκεται το μέταλλο. Μπορεί το κράμα να τήκεται στον ατμοσφαιρικό αέρα, αλλά μπορεί να τήκεται και σε κενό, ή/και περιβαλλόμενο από αδρανές αέριο. Υπάρχουν, λοιπόν, οι CLA και η CLV.

- CLA: Counter-gravity low-pressure casting of air-melted alloys (μέθοδος αντι-βαρύτητας χαμηλής πίεσης χύτευσης κραμάτων λιωμένων σε συνθήκες ατμοσφαιρικού αέρα)
- CLV: Counter-gravity low-pressure casting of vacuum-melted alloys (μέθοδος αντι-βαρύτητας χαμηλής πίεσης χύτευσης κραμάτων λιωμένων σε συνθήκες κενού)

Από τις δύο παραπάνω παραλλαγές, η CLV είναι αυτή που μοιάζει περισσότερο με τη χύτευση κενού-υπερπίεσης που χρησιμοποιήθηκε στη ΔΔ, και για το λόγο αυτό αναφέρονται εκτενέστερα κάποια πλεονεκτήματα.

Η διαδικασία CLV: Η χύτευση CLV χρησιμοποιείται για χύτευση κραμάτων που περιέχουν αντιδρώντα μέταλλα, και ειδικά υπερκράματα που μπορεί να περιέχουν αλουμίνιο, τιτάνιο, ζirkόνιο και χάφνιο. Στο Σχήμα 1.23 φαίνονται τα στάδια της διαδικασίας.

Τα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά αυτής της διαδικασίας περιλαμβάνουν την ικανότητα πλήρωσης λεπτών τμημάτων, και την παραγωγή χυτών χωρίς οξειδία. Άλλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι πρόκειται για μια οικονομική κατεργασία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι από κάθε χύτευση παράγονται πολλά τεμάχια (δέντρο χύτευσης), στο ότι η αποδοτικότητα των καναλιών τροφοδοσίας είναι μεγάλη (αφού το περισσότερο μέταλλο που βρίσκεται στο σύστημα τροφοδοσίας επιστρέφει στην κάμινο), και υπάρχουν λιγότερες ατέλειες στα χυτά (ειδικά οι ατέλειες λόγω εγκλεισμάτων μειώνονται επειδή το κανάλι εισόδου είναι διαρκώς βυθισμένο σε λιωμένο μέταλλο). Τέλος, λεπτότοιχα τεμάχια κατασκευάζονται εύκολα σε μεγάλες ποσότητες, με μικρό κόστος.



Σχήμα 1.23 Σχηματική αναπαράσταση των βημάτων της διαδικασίας CLV: (α) τήξη εν κενώ και εισαγωγή καλούπιου σε ανεξάρτητο θάλαμο κενού, (β) παροχή αργού, άνοιγμα βαλβίδας επικοινωνίας άνω και κάτω θαλάμου και είσοδος του καναλιού τροφοδοσίας του καλούπιου στη λεκάνη τήγματος. Εφαρμογή επιπλέον κενού στον πάνω θάλαμο και εισχώρηση του τήγματος στο καλούπι, (γ) η εφαρμογή κενού διακόπτεται όταν ολοκληρωθεί η στερεοποίηση των χυτών τεμαχίων. Το τήγμα που έχει απομείνει στους αγωγούς τροφοδοσίας επιστρέφει στο δοχείο τήξης [Prasad 2012].

Ορολογίες που χρησιμοποιούνται στην βιβλιογραφία και στο διαδίκτυο και αναφέρονται στη χύτευση κενού και τις παραλλαγές της είναι:

- ✓ vacuum casting (χύτευση κενού)
- ✓ vacuum - pressure casting (χύτευση κενού - πίεσης)
- ✓ POV: pressure over vacuum (εφαρμογή πίεσης σε συνδυασμό με την ύπαρξη κενού)
- ✓ counter - gravity casting (χύτευση αντιβαρύτητας)
- ✓ bottom gating/filling (vacuum) casting (χύτευση κενού με πλήρωση από τον πάτο του καλούπιού)
- ✓ CLI: countergravity, low-pressure, inert atmosphere casting (χύτευση αντιβαρύτητας, χαμηλής πίεσης, σε αδρανή ατμόσφαιρα)
- ✓ Precision vacuum casting (χύτευση ακριβείας εν κενώ)
- ✓ CPV: countergravity positive pressure vacuum casting process (χύτευση αντιβαρύτητας εν κενώ, με εφαρμογή πίεσης)

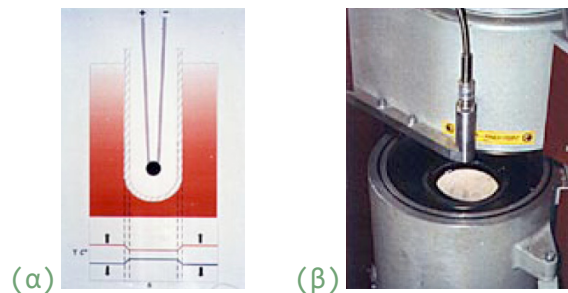
1.6.5 Ειδικότερα χαρακτηριστικά μηχανών κενού

Σχεδόν όλες οι μηχανές τήξης/χύτευσης λειτουργούν σε αδρανή ατμόσφαιρα. Σε κάποιες περιπτώσεις, εφαρμόζεται μια ελαφριά ελάττωση της ατμόσφαιρας, αλλά αυτή η επιλογή, σύμφωνα με τα αποτελέσματα ερευνών, δεν συνιστάται, καθώς συμβάλει στο διαχωρισμό του υλικού της επένδυσης, αυξάνοντας την πιθανότητα εμφάνισης πορώδους λόγω αερίων εγκλεισμάτων.

Υπάρχει μία τάση για αύξηση της πίεσης στο καλούπι όταν ολοκληρωθεί η έγχυση και ενώ το μέταλλο είναι ακόμα σε φάση στερεοποίησης. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται POV (Pressure Over Vacuum). Η αύξηση της πίεσης μπορεί να γίνει αυτόματα, μέσω ενός αισθητήρα υπερύθρων.

Στις μηχανές στατικής χύτευσης τελευταίας γενιάς, υπάρχει η τάση για πλήρη αυτοματοποίηση. Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένα είδος τεχνητής νοημοσύνης: το σύστημα αντικαθιστά τον χειριστή, ο οποίος β απλώς εισάγει το μέταλλο, και παίρνει όλες τις τεχνικές-μεταλλουργικές αποφάσεις. Οι πιο πρόσφατες στατικές μηχανές χύτευσης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: τις «υποβοηθούμενες από υπολογιστή», που έχουν τον παραδοσιακό έλεγχο από Η/Υ, και τις αυτοπρογραμματιζόμενες ή «ελεγχόμενες από υπολογιστή». Οι πιο σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις δύο αυτές κατηγορίες είναι ότι, στην περίπτωση των «υποβοηθούμενων από υπολογιστή» μηχανών, ο κύκλος λειτουργίας σχεδιάζεται από τον χρήστη/χειριστή, ο οποίος δίνει στον Η/Υ ένα σύνολο οδηγιών (πχ βάρος κράματος, θερμοκρασία τήξης, απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ εξόδου, καθυστέρηση στην εφαρμογή της πίεσης, κλπ). Η συλλογή δεδομένων πρέπει να γίνει από τον χρήστη, ο οποίος θα πρέπει να σημειώσει όλα τα δεδομένα των παραμέτρων λειτουργίας που έχουν καταγραφεί από τη μηχανή.

Στην περίπτωση των «ελεγχόμενων από υπολογιστή» μηχανών, οι μηχανές είναι αυτοπρογραμματιζόμενες, μπορούν αυτόματα να εκτιμήσουν το βάρος του μετάλλου και να διορθώσουν τις ενδείξεις θερμοκρασίας από τα θερμοστοιχεία σε πραγματικό χρόνο: αυτή η διόρθωση χρειάζεται επειδή τα θερμοστοιχεία περιβάλλονται πάντα από μία θήκη από δύστηκτο κεραμικό υλικό με αποτέλεσμα οι ενδείξεις να υπολείπονται σε σχέση με την πραγματική θερμοκρασία του λιωμένου μετάλλου (χαμηλότερες στη φάση πρόσδοσης θερμότητας και υψηλότερες στη φάση ψύξης) (Σχήμα 1.24).



Σχήμα 1.24 (α) Διάγραμμα της υστέρησης των μετρήσεων θερμοκρασίας με τη βύθιση θερμοστοιχείου. Εάν δεν διορθωθούν, οι μετρήσεις θα είναι χαμηλότερες από τις πραγματικές κατά τη θέρμανση (κόκκινη γραμμή), και μεγαλύτερες κατά την απόψυξη (μαύρη γραμμή). (β) Διάταξη μέτρησης θερμοκρασίας τήγματος ενσωματωμένη στη χυτόπρεσσα, [Faccenda 1998]

Υπάρχει τύπος μηχανής, ελεγχόμενης από Η/Υ, που χρησιμοποιεί ένα σύστημα που μετρά αυτόματα τη θερμοκρασία του καλουπιού αμέσως πριν την έγχυση του μετάλλου. Δεδομένου ότι η θερμοκρασία του μετάλλου και η θερμοκρασία καλουπιού αποτελούν το «θερμοκρασιακό σύστημα», η γνώση του είναι θεμελιώδης για την ομοιομορφία της ποιότητας. Η συλλογή δεδομένων διεξάγεται αυτόματα. Η συλλογή αξιόπιστων δεδομένων για κάθε διαδικασία είναι πολύ σημαντική, έτσι ώστε να διατηρηθεί η διαδικασία υπό έλεγχο και να εξηγηθούν τα αίτια των ατελειών που μπορεί να προκύψουν.

Σχετικά με την έγχυση του τήγματος, είναι προτιμότερο αυτή να λαμβάνει χώρα μέσω της βάσης του δοχείου τήξης της μηχανής, ώστε να ελαχιστοποιείται η διαδρομή του υγρού μετάλλου.

Ένα άλλο πάρα πολύ σημαντικό θέμα στη χύτευση ακριβείας είναι η ομοιογένεια της σύστασης του λιωμένου κράματος. Συχνά η παράμετρος αυτή υποεκτιμάται, και δίνεται έμφαση περισσότερο στην ανάδευση του τήγματος που παράγεται από τη θέρμανση με επαγωγή. Όμως, το φαινόμενο της ανάδευσης είναι πραγματικά αποτελεσματικό μόνο όταν η συχνότητα του ρεύματος είναι 10kHz ή λιγότερο.

Στα φυλλάδια των κατασκευαστών μηχανών χύτευσης, τα χαρακτηριστικά που δίνονται συνήθως είναι τα ακόλουθα: (1) Χαρακτηριστικά σκεύους τήξης (υλικό σκεύους τήξης, υλικά που μπορούν να λιώσουν), (2) Working Capacity (χωρητικότητα, σε kg μετάλλου), (3) Ισχύς (kW), (4) Αντλία κενού, (5) Πίεση, (6) Μέγιστη θερμοκρασία, (7) Διαστάσεις-μέγιστη χωρητικότητα φλάσκας (ύψος/διάμετρος φλάσκας), (8) Τύπος φλάσκας (διάτρηση ή όχι, με ή χωρίς φλάντζα).

1.7 Επίδραση παραμέτρων χύτευσης κενού στο χυτό προϊόν

Σκοπός της βιβλιογραφικής ανασκόπησης της παραγράφου αυτής είναι η διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων της χύτευσης κενού στην ποιότητα του χυτού.

Για τη χύτευση κενού, οι σχετικές παράμετροι της κατεργασίας και των σύγχρονων μηχανών είναι: το ποσοστό του εφαρμοζόμενου κενού, η εφαρμογή υπερπίεσης αμέσως μετά την έγχυση του τήγματος στο καλούπι, η παρουσία προστατευτικού αερίου (Ar ή N), η θερμοκρασία του τήγματος και η θερμοκρασία του καλουπιού.

Πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία, με στόχο την κατανόηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη χύτευση. Οι τεχνικές χύτευσης είναι πολλές [J. Campbell 2003], [Χρυσουλάκης & Παντελής 1996], και ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή και τα υλικά. Οι παράμετροι της κατεργασίας πολλές και αλληλοεπηρεαζόμενες [Gainsbury 1979], [Ott & Raub 1985]. Έτσι λοιπόν, οι προσπάθειες για συστηματική διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων της χύτευσης κενού στην ποιότητα του χυτού είναι εστιασμένες στην κάθε φορά μελετώμενη κατεργασία. Τα δεδομένα είναι περιορισμένα και κυρίως ποιοτικά. Τα αποτελέσματα της σχετικής έρευνας παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1.7.1 Παράμετροι Μηχανών Χύτευσης Κενού

Στις μηχανές χύτευσης κενού ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει και να ελέγχει τις συνθήκες που επιθυμεί να επικρατούν στην κατεργασία. Η δυνατότητα ελέγχου, με βάση την περιγραφή του εξοπλισμού που προηγήθηκε και με βάση τα όσα είναι γνωστά για τη χύτευση ακριβείας, συνοψίζεται στα ακόλουθα:

1. Εφαρμογή κενού ή προστατευτικής ατμόσφαιρας με χρήση αδρανούς αερίου στο θάλαμο τήξης.
2. Εφαρμογή κενού στο θάλαμο χύτευσης.
3. Άσκηση υπερπίεσης αμέσως μετά το πέρας της έγχυσης.
4. Έλεγχος της αρχικής θερμοκρασίας του τήγματος.
5. Έλεγχος της αρχικής θερμοκρασίας του καλουπιού.
6. Γεωμετρία του δέντρου χύτευσης.

Στην επόμενη παράγραφο περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο κάθε μία από τις παραπάνω παραμέτρους επηρεάζει την ποιότητα του χυτού. Ας σημειωθεί ότι οι πρώτες τρεις παράμετροι αφορούν άμεσα στην εφαρμογή του κενού. Αντιθέτως, οι τελευταίες τρεις, είναι παράμετροι που παίζουν σημαντικό ρόλο στη χύτευση ακριβείας γενικά. Ωστόσο, επειδή στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν ερευνητικές εργασίες που μελετούν την επίδραση των παραμέτρων αυτών στη χύτευση κενού, γίνεται ξεχωριστή αναφορά σε αυτές.

1.7.2 Επίδραση της προστατευτικής ατμόσφαιρας στο θάλαμο τήξης.

Το γεγονός ότι η τήξη του μετάλλου γίνεται σε αδρανή ατμόσφαιρα (Αργό, ήλιο ή άζωτο) συνεπάγεται ελαχιστοποίηση της δημιουργίας οξειδίων. Η μη ύπαρξη οξειδίων, τόσο κατά την τήξη του κράματος όσο και κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση κατά πολύ της διαδικασίας φινιρίσματος. Επιπλέον, η απουσία ατμοσφαιρικού αέρα κατά την τήξη συμβάλλει στο να μην υπάρχουν ακαθαρσίες και αέρια εγκλείσματα στο τήγμα, και στην αποφυγή θερμής ρωγμάτωσης και παραμορφώσεων [Traini et al. 2003].

Ο Theo Groenewald στην εργασία [Groenewald 1980] επισημαίνει ότι η φύση της ατμόσφαιρας πάνω από το τήγμα φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο. Όταν η τήξη γίνεται σε αέρα (περίπτωση της χύτευσης με υποβοήθηση κενού), μία σημαντική ποσότητα αερίων εγκλεισμάτων εγκλωβίζεται στο τήγμα, και μεταφέρεται μαζί του μέσα στον τύπο. Όταν χρησιμοποιείται αδρανές αέριο, οι πόροι είναι πολύ λιγότεροι και εμφανίζονται να είναι κατανομημένοι σε όλον τον όγκο του χυτού. Όταν η τήξη γίνεται υπό συνθήκες κενού, δεν παρατηρείται δημιουργία πόρων. Είναι, ωστόσο, πιθανή η εμφάνιση αυξημένης τραχύτητας επιφάνειας, λόγω της ανάπτυξης της δενδριτικής χονδρόκοκκης δομής του μετάλλου [Ott 1997].

1.7.3 Επίδραση του κενού

Ο ρυθμός της έγχυσης του τήγματος ρυθμίζεται από τη διαφορά πίεσης των δύο θαλάμων. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά πίεσης ανάμεσα στο θάλαμο τήξης και το θάλαμο χύτευσης, τόσο μεγαλώνει και η ταχύτητα πλήρωσης του τύπου. Η ταχύτητα εισόδου του μετάλλου μπορεί απλουστευτικά αλλά

αρκούντως ρεαλιστικά να υπολογιστεί με εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli, ανάμεσα στο κάτω μέρος του σκεύους τήξης, και στο πάνω μέρος του δέντρου χύτευσης. Ενδεικτικές τιμές, όπως προκύπτουν από τη βιβλιογραφία, φαίνονται στον Πίνακα 1.8.

Πίνακας 1.8 Χαρακτηριστικές τιμές κενού που χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα στη βιβλιογραφία, και τιμές ταχύτητας εισόδου τήγματος [Ji-qiang et al. 2007].

Pouring temperature/K	Vacuum/MPa	Filling velocity/(mm·s ⁻¹)
963	0.01	45
983	0.02	60
1 003	0.03	75
1 023	0.04	90
1 043	0.05	105
		140

Κοινό συμπέρασμα όλων των εργασιών που μελετούν τον τρόπο εισόδου του τήγματος στο καλούπι είναι ότι χαμηλή ταχύτητα πλήρωσης κατά τη στερεοποίηση σημαίνει εύκολη δημιουργία πορώδους στο χυτό και άρα, μεγάλο αριθμό απορριπτέων τεμαχίων όταν πρόκειται για πολύπλοκες γεωμετρίες [R. Minev et al. 2005].

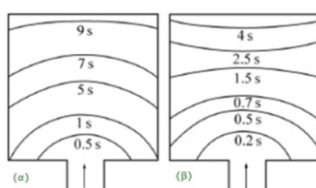
Οι Han et al. [J. Han et al. 2006] επισημαίνουν ακριβώς αυτό: το πλεονέκτημα στη χύτευση κενού είναι πως το μέταλλο εισέρχεται στο καλούπι ομαλά, χωρίς τη δημιουργία τύρβης. Η μη εμφάνιση τύρβης κατά την πλήρωση συνεπάγεται μείωση των αερίων εγκλεισμάτων και της εμφάνισης πορώδους.

Ο Theo Groenewald [Groenewald 1980] τονίζει ότι η επίδραση της πίεσης είναι σύνθετη. Τόσο η απόλυτη πίεση κατά τη χύτευση όσο και η διαφορά πίεσης εντός και εκτός του τύπου (η οποία εμφανίζεται έντονα στην περίπτωση της χύτευσης με υποβοήθηση κενού), επηρεάζουν το χυτό. Έχει βρεθεί ότι όσο πιο μικρή είναι η απόλυτη πίεση χύτευσης τόσο μικρότερη είναι η διαφορά πίεσης που απαιτείται για να γίνει σωστή πλήρωση.

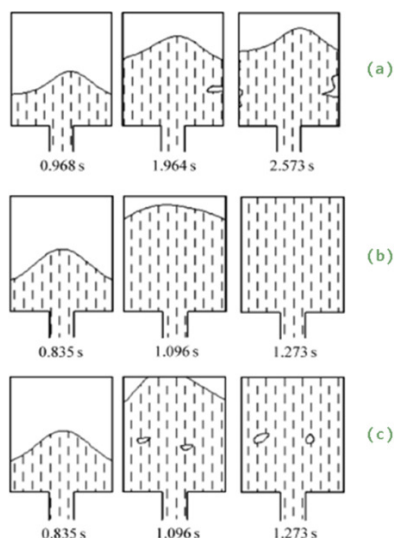
Οι Dieter Ott και Christoph Raub στην εργασία τους [Ott & Raub 1985] είναι πιο αναλυτικοί στην περιγραφή του φαινομένου της έγχυσης του τήγματος, και περιγράφουν πως η ροή του τήγματος από το σκεύος τήξης προς το καλούπι συναντά σαν «αντίσταση» το ιξώδες του τήγματος, την επιφανειακή και διεπιφανειακή τάση και την πίεση των αερίων που έχουν παγιδευτεί στο καλούπι και που πρέπει να δραπετεύσουν. Η πίεση των αερίων είναι πολύ μικρότερη από τη μέγιστη πίεση του τήγματος. Έτσι, καθώς το καλούπι είναι πορώδες, διαπερατό και όχι ερμητικά κλειστό, η διαφορά πιέσεων κάνει τον εγκλωβισμένο αέρα να διαφεύγει αρκετά γρήγορα μέσω των πόρων του υλικού του τύπου. Ο κρίσιμος παράγων της πλήρωσης του καλουπιού –μέχρι τη στιγμή, δηλαδή, που αρχίζει η στερεοποίηση του μετάλλου– είναι η συνισταμένη της πίεσης του τήγματος και της ανθιστάμενης πίεσης των εγκλωβισμένων αερίων. Στην εν λόγω εργασία παρατίθενται διαγράμματα της πίεσης που επικρατεί μέσα στην κοιλότητα του τύπου κατά τα πρώτα στάδια της χύτευσης. Τα αποτελέσματα, όμως, δεν

είναι πλήρη λόγω της αδυναμίας του εξοπλισμού να πάρει μετρήσεις από τη στιγμή που αρχίζει η στερεοποίηση.

Ενδιαφέροντα συμπεράσματα παραθέτουν και οι [J. Li et al. 2007] και οι [Z.-T. Fan & Ji 2005]. Οι συγκεκριμένοι αναφέρονται όχι στη χύτευση με τη μέθοδο του χαμένου κεριού, αλλά στη χύτευση με τη χρήση αφρώδους πολυμερούς. Η φύση των αποτελεσμάτων έχει ενδιαφέρον. Δείχνουν σχηματικά ότι η εφαρμογή μεγαλύτερου κενού στον θάλαμο χύτευσης μεταβάλλει το προφίλ του «μετώπου» του εισερχόμενου τήγματος από κυρτό σε κοίλο (Σχήμα 1.25 & Σχήμα 1.26), αλλάζοντας έτσι, την πιθανότητα και τη θέση εμφάνισης ατελειών λόγω αερίων εγκλεισμάτων.



Σχήμα 1.25 Το προφίλ του τήγματος καθώς εισέρχεται στο καλούπι (α) υπό χαμηλό κενό και (β) υπό υψηλό κενό, [Ji-qiang et al. 2007].

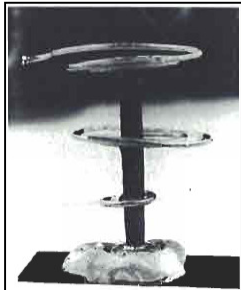


Σχήμα 1.26 Ο μηχανισμός δημιουργίας ατελειών και το προφίλ του τήγματος καθώς αυτό εισέρχεται στο καλούπι (a) με μικρή, (b) με μέτρια και (c) με μεγάλη ταχύτητα [Ji-qiang et al. 2007].

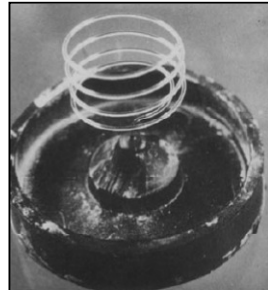
Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν, επιπλέον, πολλές εργασίες που είναι εστιασμένες στη μελέτη της επίδρασης του κενού στην εύροια του μετάλλου (βλ. §1.1). Η ποιότητα ενός χυτού εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του τήγματος, όσο και από τις συνθήκες χύτευσης [J. Campbell 2003], [Χρυσουλάκης & Παντελής 1996].

Στη διεθνή βιβλιογραφία, το θέμα της σωστής πλήρωσης του καλουπιού κατά τη χύτευση κενού έχει απασχολήσει σε μεγάλο βαθμό τους ερευνητές. Οι παράμετροι της χύτευσης κενού που επηρεάζουν την εύροια είναι το κενό που επικρατεί, η θερμοκρασία του τήγματος, η θερμοκρασία του καλουπιού, η απόσταση από τα τοιχώματα της φλάσκας, το πάχος του χυτού και το ύψος από το οποίο εγχέεται το μέταλλο, και παρουσιάζονται αναλυτικά στη

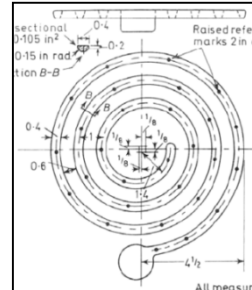
συνέχεια. Πειραματικά, η μέτρηση της εύροιας γίνεται ως εξής: το καλούπι που χρησιμοποιείται έχει τη μορφή σπείρας ή σπειροειδούς ελάσματος, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα 1.27, το Σχήμα 1.28, το Σχήμα 1.29 και το Σχήμα 1.30. Το μήκος της σπείρας (L_f) που θα γεμίσει το τήγμα ενός μετάλλου είναι ενδεικτικό της εύροιάς του.



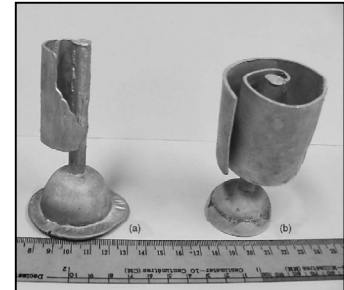
Σχήμα 1.27 Δέντρο χύτευσης με τρεις έλικες, για τον καθορισμό της ικανότητας πλήρωσης [Ott & Raub 1985]



Σχήμα 1.28 Χαρακτηριστικό μοντέλο ελικοειδούς μορφής για προσδιορισμό της εύροιας. [H Hero 1990]



Σχήμα 1.29 Σχηματική αναπαράσταση σπείρας για διεξαγωγή δοκιμής εύροιας. [J. Campbell 2003]



Σχήμα 1.30 Μοντέλα χύτευσης με τη μορφή σπειροειδούς ελάσματος (α) ατελής πλήρωση καλουπιού, (β) επιτυχής πλήρωση. [Sin & Dubé 2004]

Η εξίσωση (1.11) είναι η αναλυτική σχέση υπολογισμού της εύροιας.

$$L_f = \frac{\rho V_0 t (k H_f + C_p \Delta T_s)}{2h(T_c - T_m)} \left[1 + \frac{h}{2} \left(\frac{\pi \Delta X}{V_0 C_p' \rho' k'} \right)^{1/2} \right] \quad (1.11)$$

- όπου: ρ : η πυκνότητα του τήγματος
 V_0 : η ταχύτητα του λιωμένου τήγματος στην είσοδο του καλουπιού
 k : το ποσοστό στερεοποιημένου κράματος
 ΔT_s : η υπέρτηξη του κράματος = $(T_c - T_L)$
 T_L : η θερμοκρασία liquidus του κράματος (θερμοκρασία τήξης)
 T_c : η αρχική θερμοκρασία του τήγματος για τη μελετώμενη χύτευση
 T_m : η θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού
 h : συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στη διεπιφάνεια μετάλλου-καλουπιού
 ΔX : το μήκος της ζώνης στραγγαλισμού κατά τη στερεοποίηση
 C_p : η ειδική θερμότητα του τήγματος
 C_p' : η ειδική θερμότητα του καλουπιού
 ρ' : η πυκνότητα του καλουπιού
 k' : η θερμική αγωγιμότητα του καλουπιού
 H_f : η ενθαλπία τήξης
 t : ο χρόνος

Στην Σχήμα 1.30 φαίνεται η επίδραση της υποβοήθησης κενού στο χυτό που έχει σχήμα σπειροειδούς ελάσματος. Χωρίς υποβοήθηση κενού (Σχήμα 1.30(α)), το τήγμα δεν έχει εύροια αρκετή ώστε να γεμίσει τελείως το καλούπι, δημιουργώντας, έτσι, ατέλεια. Από την άλλη, η εύροια αυξάνεται πάρα πολύ με τη χρήση υποβοήθησης κενού, κάνοντας το σπειροειδές έλασμα να γεμίσει πλήρως (Σχήμα 1.30 (β)).

Για την πλήρωση των λεπτότοιχων διατομών, θα πρέπει η επιφανειακή τάση του τήγματος να υπερνικάται ώστε το τήγμα να εισχωρεί επιτυχώς στην

κοιλότητα του καλουπιού. Θεωρώντας πλάκα πάχους $2r$ και υποθέτοντας πως το τήγμα δε διαβρέχει το καλούπι, τότε η πλήρωση λαμβάνει χώρα όταν ισχύει η (1.12) [John Campbell 1993]:

$$P_i - P_e > \frac{\gamma}{r} \quad (1.12)$$

όπου: P_i : η τοπική πίεση του τήγματος
 P_e : η πίεση στην κοιλότητα του καλουπιού
 γ : η επιφανειακή τάση του τήγματος
 r : το μισό του πάχους της πλάκας

Η πίεση μέσα στο τήγμα είναι το άθροισμα της μεταλλοστατικής πίεσης (ρgh) και της ατμοσφαιρικής πίεσης (P_a). Η πίεση μέσα στην κοιλότητα είναι το άθροισμα της πίεσης στο καλούπι που οφείλεται στην ατμόσφαιρα (P_a) και της αντίθλιψης των υπολειμματικών αερίων που είναι παρόντα στην κοιλότητα του καλουπιού (P_m). Έτσι, η παραπάνω εξίσωση γράφεται:

$$(P_a + \rho gh) - (P_a + P_m) > \frac{\gamma}{r} \quad (1.13)$$

όπου: P_m : η πίεση λόγω των αερίων
 P_a : η πίεση της ατμόσφαιρας
 ρ : η πυκνότητα του τήγματος
 h : το ύψος της στήλης τήγματος πάνω από το σημείο υπολογισμού
 g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

Η εξίσωση (1.13) απλοποιείται στην (1.14), απαλείφοντας τους ίσους όρους:

$$\rho gh - P_m > \frac{\gamma}{r} \quad (1.14)$$

Η σχέση αυτή δείχνει πως η αντίθλιψη P_m , δηλαδή η αντίσταση στη ροή λόγω της πίεσης των αερίων μειώνει την ικανότητα πλήρωσης. Όταν τα αέρια δεν μπορούν να διαφύγουν από το καλούπι, η κανονική ροή εμποδίζεται περισσότερο από ότι εάν υπάρχουν έξοδοι διαφυγής των αερίων. Η διαπερατότητα του καλουπιού, λοιπόν, εξαλείφει τον εγκλεισμό αερίων και εξασφαλίζει καλή πλήρωση του καλουπιού.

Η εξ. (1.14) είναι η συνθήκη που «κυβερνά» την πλήρωση του καλουπιού όταν η χύτευση πραγματοποιείται στην ατμόσφαιρα.

Όταν η χύτευση γίνεται εν κενώ (με το καλούπι να βρίσκεται εν κενώ, ενώ στο χώρο του δοχείου έγχυσης να επικρατεί ατμοσφαιρική πίεση), τότε τα αέρια διαφεύγουν γρηγορότερα, αναρροφώμενα λόγω του κενού μέσω των πόρων του καλουπιού. και η ατμοσφαιρική πίεση ωθεί το τήγμα μέσα στην κοιλότητα. Εφόσον τα αέρια διαφεύγουν μέσω των πόρων του καλουπιού, δεν υπάρχει πλέον η πίεση λόγω αερίων κι έτσι, ο όρος $P_a - P_m$ στην εξ. (1.13) γίνεται αμελητέος και προκύπτει η (1.15):

$$P_a + \rho gh > \frac{\gamma}{r} \quad (1.15)$$

Αυτή η σχέση υποδεικνύει ότι η ατμοσφαιρική πίεση P_a επιτρέπεται να δράσει στο εισερχόμενο μέταλλο, με το κενό να αναρροφά αποτελεσματικά

το τήγμα μέσα στο καλούπι. Στην πράξη, ωστόσο, συνήθως επιτυγχάνεται μία πίεση ίση με το μισό της ατμοσφαιρικής ($0.5P_a$) [Sin & Dubé 2004].

Ποσοτικά αποτελέσματα δίνονται σε πίνακες όπως ο Πίνακας 1.9:

Πίνακας 1.9 Πίνακας πειραμάτων χύτευσης για διάφορες συνθήκες κενού και η μετρούμενη εύροια [Ott & Raub 1985].

Influence of Pressure Changes in the Casting Chamber upon the Gas Pressures in the Mould when Casting In a Sealed Chamber					
Pressure in chamber, mbar			Max.excess Pressure in the mould, mbar	Filling of Lattice, %	
Before casting	After casting	Difference		Above	Below
0	0	0	-	<5	100
133	133	0	61	<5	80
270	270	0	72,37	0	10
530	530	0	66,78,77	<5	30
800	800	0	70	<5	<5
270	530	260	83,58,72	80	80
530	800	270	50	75	80
670	930	260	66,96,60,60,88,90,73		
530	930	400	73,77,60	75	80
133	800	667	63	99	95

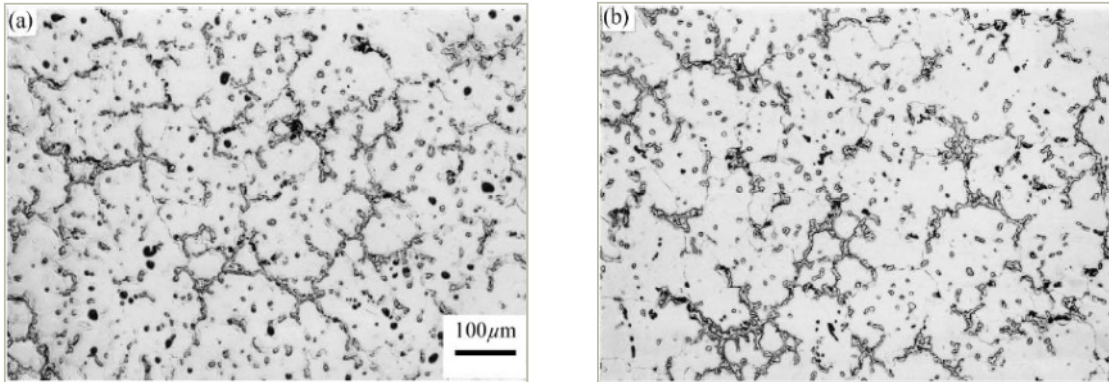
Οι συνθήκες πίεσης κατά τη διάρκεια της χύτευσης έχουν πολύ σημαντική επίδραση στην ποιότητα της επιφάνειας των χυτών και ιδιαιτέρως στην τραχύτητα (roughness) και στην ακρίβεια αναπαραγωγής των λεπτομερειών των επιφανειών των προτύπων. Εάν η πίεση στο τήγμα είναι πολύ μεγάλη, το χυτό θα καταλήξει να έχει τραχεία επιφάνεια. Το μέταλλο εισχωρεί στο υλικό του καλουπιού και ειδικά στην περίπτωση τεμαχίων μεγάλης διαμέτρου, ένα τραχύ επιφανειακό στρώμα σχηματίζεται, το οποίο προκύπτει από ανάμιξη του υλικού του καλουπιού και του μετάλλου, και το οποίο δεν μπορεί να αφαιρεθεί με τις συμβατικές μεθόδους καθαρισμού (υδροβολές ή μπάνια καθαρισμού). Εάν η πίεση είναι πολύ χαμηλή, τότε το καλούπι δε γεμίζει σωστά, σύμφωνα με τους [Ott & Raub 1985].

Το κενό, επιπλέον, μεταβάλλει έντονα τη μεταφορά θερμότητας. Το κενό όχι μόνο ελέγχει το προφίλ της επιφάνειας του μετάλλου, αλλά επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας (Σχήμα 1.31). Επικρατεί η μεταφορά με συναγωγή, πράγμα που επηρεάζει την κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου και τη διαδικασία στερεοποίησης [Zili Liu et al. 2002].

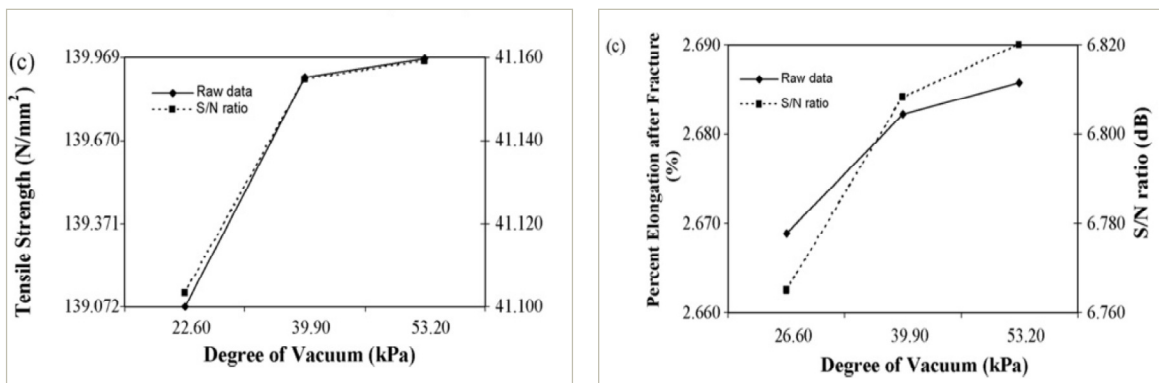
Επιπλέον, η συνεισφορά της ακτινοβολίας στη μεταφορά θερμότητας από το τήγμα στο καλούπι είναι αυξημένης σημασίας, σε σχέση με τη χύτευση απουσία κενού [J. Campbell 2003]. Οι μικροδομές των χυτών επιδεικνύουν πολύ λεπτόκοκκη μικροδομή και μικρή ποσότητα κατακρημνισμάτων (που ποικίλει ανάλογα με τη θέση).

Στην εργασία [Gjestland & Westengen 2007], αναφέρεται ότι το πορώδες και ένας μεγάλος αριθμός των ελαττωμάτων της πλήρωσης που συχνά απαντώνται σε μεθόδους χύτευσης υψηλής πίεσης, συνήθως έχουν να κάνουν με τον εγκλεισμό αερίων στην κοιλότητα και την αντίστροφη πίεση που

αναπτύσσεται κατά την έγχυση. Στη χύτευση αλουμινίου εφαρμόζεται συνήθως κενό για τη μείωση των ελαττωμάτων αυτών. Αντίθετα, στη χύτευση μαγνησίου, η εφαρμογή κενού δεν είναι τόσο συνήθης. Ακόμη, στη χύτευση κενού παρατηρούνται και σημαντικές βελτιώσεις στην ποιότητα της επιφάνειας του χυτού.



Σχήμα 1.31 Μικροδομές κράματος AZ91, από δοκίμια διατομής (30mmx6mm), τοποθετημένα σε δέντρο χύτευσης σε δύο διαφορετικές αποστάσεις από τον κεντρικό αγωγό τροφοδοσίας: (α) 2cm, (β) 36cm (Συνθήκες χύτευσης: $T_{inlet}=710^{\circ}C$, κενό: 0.05MPa) [Zili Liu et al. 2002].



Σχήμα 1.32 Επίδραση του κενού στις μηχανικές ιδιότητες [S. Kumar et al. 2007]

Οι Liu και Xu [Z. Liu et al. 2008] ασχολήθηκαν με την επίδραση του κενού στη διαδικασία στερεοποίησης και στη μικροδομή, σε κράμα μαγνησίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το κενό παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη μετάδοση θερμότητας κατά την πλήρωση του καλουπιού και κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης. Αυξάνει το ρυθμό απόψυξης του μετάλλου χύτευσης μετά την έγχυσή του, αλλά κυρίως μειώνει το ρυθμό απόψυξης του χυτού στο δεύτερο στάδιο της στερεοποίησης και κατά συνέπεια ο χρόνος απόψυξης είναι μεγαλύτερος, από ότι χωρίς κενό. Όσον αφορά στη μικροδομή, το τελικό χυτό στην περίπτωση αυτού του κράματος είναι γενικά χονδρόκοκκο. Σε σύγκριση με τη μικροδομή που αποκτάται χωρίς την εφαρμογή κενού, τώρα οι κόκκοι είναι λεπτότεροι και συναντάται μειωμένη ποσότητα της φάσης β (κατακρημνίσματα), που συνήθως δημιουργείται μεταξύ των ορίων των κόκκων.

Στην εργασία [Cox et al. 2007], γίνεται σύγκριση χύτευσης βαρύτητας και αντίστροφης χύτευσης κενού, για κράμα 2L99 (Al-7Si-0.4Mg). Χύτευσαν

ένα μεγάλο αριθμό μεταλλικών δοκών και στη συνέχεια υπέβαλαν τα δοκίμια σε κάμψη 4 σημείων και υπολόγισαν ανά περίπτωση τον αριθμό Weibull. Η χρήση κενού αποδείχτηκε ότι βελτιώνει την αξιοπιστία του χυτού, λόγω μεγαλύτερου αριθμού Weibull ($\lambda=29$ με εφαρμογή κενού, $\lambda=17$ χωρίς εφαρμογή κενού).

Στην εργασία [S. P. Kumar & H.S. Shan 2008] ερευνήθηκε η επίδραση των παραμέτρων χύτευσης κενού στις μηχανικές ιδιότητες του χυτού (αντοχή σε εφελκυσμό και επιμήκυνση) κράματος Al-7%Si με χρήση μεθόδου VAEP (χύτευση εν κενώ με εξατμιζόμενο μοντέλο) vacuum assisted evaporative pattern casting). Τελικά, αποδείχτηκε ότι η αντοχή του χυτού αυξάνεται, όσο αυξάνεται το ποσοστό του κενού που εφαρμόζεται (Σχήμα 1.32). Επιπλέον, λόγω αποβολής των αερίων εγκλεισμάτων, με χρήση κενού, μειώνεται το παραγόμενο πορώδες. Από τους ίδιους συγγραφείς, στην εργασία [S. P. Kumar & H.S. Shan 2008], προκύπτει αύξηση της αντοχής του χυτού σε κρούση, με αύξηση του επιβαλλόμενου κενού κατά τη χύτευση.

1.7.4 Επίδραση της υπερπίεσης.

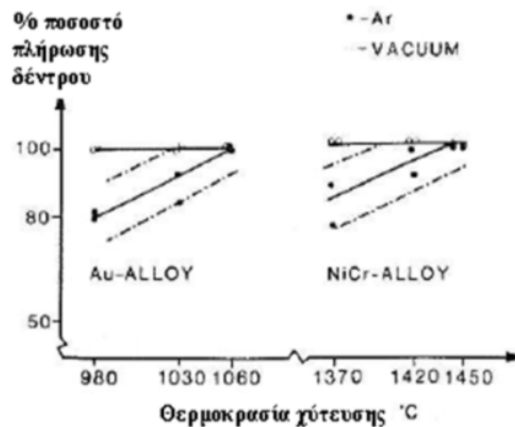
Μόλις ολοκληρωθεί η έγχυση -κι ενώ βρίσκεται σε εξέλιξη η στερεοποίηση του μετάλλου- εφαρμόζεται ισχυρή υπερπίεση στην είσοδο του δέντρου. Ο υψηλός βαθμός συμπίεσης εξασφαλίζει τη σωστή πλήρωση του καλουπιού και μεγάλη μείωση της εμφάνισης πορώδους λόγω συρρίκνωσης.

Στις [Z. Yang et al. 2006] και [J. Han et al. 2006] εντοπίζεται η αποφυγή δημιουργίας πορώδους όταν η στερεοποίηση συμβαίνει υπό πίεση. Επιπλέον, η χύτευση κενού-υπερπίεσης μειώνει σημαντικά τον αριθμό και το μέγεθος των ακαθαρσιών, οι οποίες κατανέμονται σε όλη τη μάζα του χυτού. Οι [R. Minev et al. 2005] επισημαίνουν ότι ακόμα και τα μέρη του χυτού με πολύ μικρή διατομή γεμίζουν και στερεοποιούνται σωστά. Επιπλέον, σύμφωνα με τη μελέτη των [Traini et al. 2003], η χύτευση με χρήση αργού υπό πίεση μειώνει σημαντικά την ποσότητα υλικού της επένδυσης που προσκολλάται στην επιφάνεια του μετάλλου, διευκολύνοντας τις διαδικασίες φινιρίσματος. Συνεπώς, η πιθανότητα καταστροφής των λεπτότοιχων τμημάτων του χυτού είναι μειωμένη.

1.7.5 Επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος

Είναι γνωστό από πλήθος ερευνών, αν και το υπαγορεύει η λογική και η συνήθης πρακτική, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του τήγματος τόσο πιο λεπτόρρευστο γίνεται το τήγμα, και γεμίζει καλύτερα το καλούπι. Ωστόσο, είναι επιθυμητό η χύτευση να πραγματοποιείται με την κατά το δυνατό μικρότερη υπέρτηξη καθώς, από μία υπέρτηξη και πάνω, η προστατευτική ατμόσφαιρα του ευγενούς αερίου παύει να είναι αρκετά αποτελεσματική. Η ποσοτικοποίηση της παραμέτρου αυτής έχει λοιπόν πρακτική σημασία. Επειδή, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, υπάρχει αλληλεξάρτηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη χύτευση, γίνονται μελέτες για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης της υπέρτηξης στη χύτευση κενού.

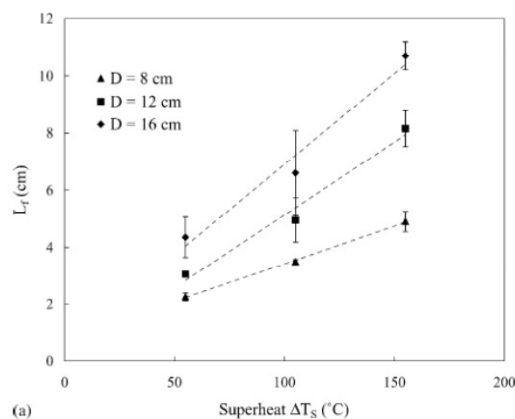
Χαρακτηριστικές εργασίες είναι αυτή της Sophie Lun Sin [Sin & Dubé 2004] και των H. Hero & M. Waarli [Hakon Hero & Waarli 1991] (Σχήμα 1.33) και τα αποτελέσματά τους παρατίθενται στη συνέχεια.



Σχήμα 1.33 Επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος και του κενού στην εύροια [Hakon Hero & Waarli 1991].

Στο Σχήμα 1.34 βλέπουμε την επίδραση της υπέρτηξης στην ικανότητα πλήρωσης του καλουπιού (εύροια), διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία του τύπου (T_{mould}). Σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες [J. Campbell 2003], [G. H. Lee & Z. H. Lee 2001], τα αποτελέσματα της S. L. Sin επιβεβαιώνουν ότι η ικανότητα πλήρωσης βελτιώνεται με τη μεγαλύτερη υπέρτηξη. Μέσα στο θερμοκρασιακό εύρος που θεωρήθηκε, η σχέση ανάμεσα στο μήκος του χυτού που γέμισε και την υπέρτηξη είναι σχεδόν γραμμική. Τα αποτελέσματα αυτά εξηγούνται από την αύξηση της ενθαλπίας του μετάλλου λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας έγχυσης. Το μέταλλο, δηλαδή, παραμένει σε υγρή μορφή για μεγαλύτερη χρονική περίοδο εξασφαλίζοντας συνεπώς καλύτερη πλήρωση του τύπου.

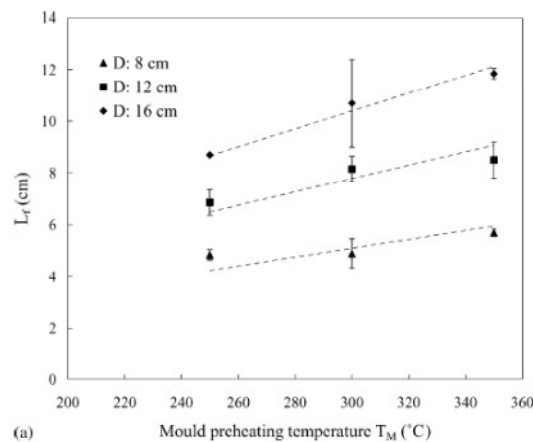
Τέλος, η εύροια δεν αναμένεται να είναι μηδενική σε μηδενική υπέρτηξη αλλά θα έπρεπε να μειώνεται ταχύτατα με τη θερμοκρασία καθώς ψύχεται κάτω από τη liquidus, καθώς το ιξώδες αυξάνει κατά τάξεις μεγέθους. Ωστόσο, αν κάνουμε γραμμική παρεμβολή στις καμπύλες στο Σχήμα 1.34 θα δούμε ότι η εύροια για μηδενική υπέρτηξη είναι κοντά στο μηδέν ή ελαφρώς αρνητική. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να εξηγηθεί από την επιλογή της θερμοκρασίας χύτευσης T_{inlet} σαν παράμετρο αναφοράς.



Σχήμα 1.34 Επίδραση της υπέρτηξης στην εύροια [Sin & Dubé 2004].

1.7.6 Επίδραση της θερμοκρασίας καλουπιού

Στο Σχήμα 1.35 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας προθέρμανσης του καλουπιού (T_{mould}) στην ικανότητα πλήρωσης καλουπιού. Όπως ήταν αναμενόμενο, αύξηση της θερμοκρασίας προθέρμανσης του καλουπιού T_{mould} βελτιώνει την πλήρωση του τύπου. Η εξίσωση (1.11), επίσης, δείχνει ότι ο χρόνος στερεοποίησης είναι αντιστρόφως ανάλογος της διαφοράς $T_{inlet} - T_{mould}$. Έτσι, αυξάνοντας το T_{mould} θα έπρεπε να μειώνεται ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, να καθυστερεί η στερεοποίηση και συνεπώς να αυξάνεται η εύροια. Ωστόσο, στην [Sin & Dubé 2004] επισημαίνεται ότι η επίδραση της T_{mould} στην πλήρωση είναι σχετικά μικρή.



Σχήμα 1.35 Επίδραση της θερμοκρασίας προθέρμανσης καλουπιού στην εύροια [Sin & Dubé 2004].

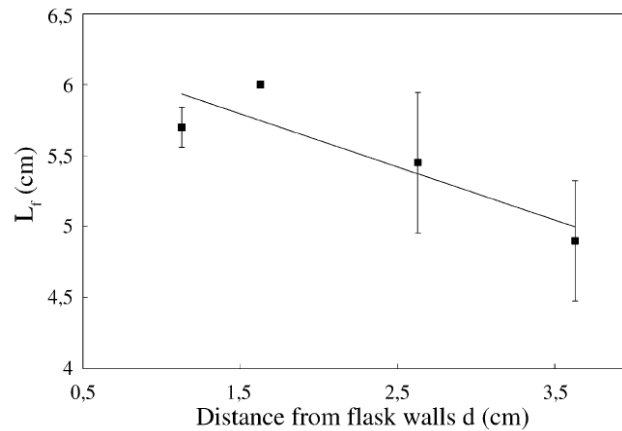
1.7.7 Επίδραση της γεωμετρίας του δέντρου

Η γεωμετρία του δέντρου χύτευσης είναι ένας καθοριστικός παράγων στη χύτευση ακριβείας. Ο σχεδιασμός του συστήματος τροφοδοσίας μπορεί να είναι από τα πιο δύσκολα θέματα.

1.7.8 Απόσταση από τα τοιχώματα της φλάσκας

Στην [Sin & Dubé 2004] μελετήθηκε η επίδραση της απόστασης του χυτού από το τοίχωμα της φλάσκας στην εύροια, για διαφορετικές συνθήκες χύτευσης. Το Σχήμα 1.36 δείχνει μία τυπική καμπύλη που αποκτάται για συγκεκριμένη αρχική θερμοκρασία τήγματος και θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού ($T_{inlet}=750^{\circ}\text{C}$ και $T_{mould}=350^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα, για το κράμα μαγνησίου AZ91D). Το δέντρο που χρησιμοποιήθηκε στα συγκεκριμένα πειράματα είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 1.37. Το πάχος του τεμαχίου ήταν 1.3mm και η απόσταση από το πάνω μέρος του οχετού έγχυσης έχει οριστεί στα 8mm. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι ο βαθμός πλήρωσης είναι μικρότερος όταν τα τεμάχια είναι τοποθετημένα κοντά στον κεντρικό άξονα της φλάσκας, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση ανάμεσα στην κοιλότητα του κεντρικού αγωγού και στο τεμάχιο, τόσο λιγότερο αποτελεσματική είναι η δράση του κενού. Αυτό επιβεβαιώνει ότι η ικανότητα πλήρωσης καλουπιού σχετίζεται με το βαθμό τοπικού κενού, όπως φαίνεται και από την εργασία των [Vainer και Lerner]. Η βελτίωση, ωστόσο, της εύροιας είναι μικρή από ένα σημείο και μετά. Καθώς, δηλαδή,

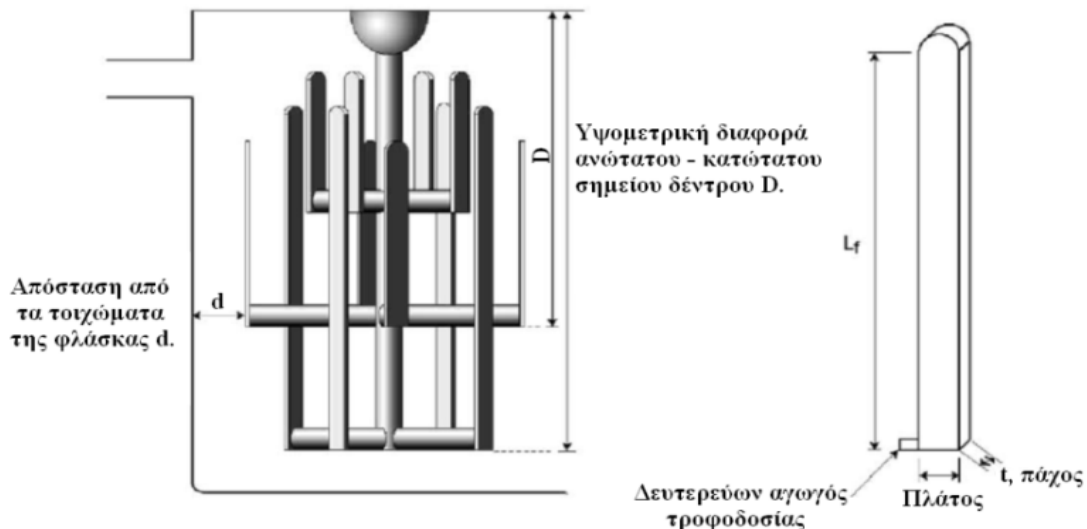
η απόσταση ανάμεσα στο τεμάχιο και τα τοιχώματα της φλάσκας ελαττώνεται, από μία απόσταση κι έπειτα δεν υπάρχει αντίστοιχη βελτίωση της εύροιας (L_f).



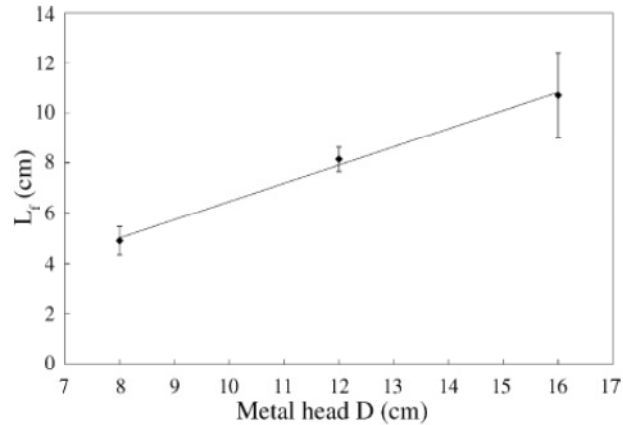
Σχήμα 1.36 Επίδραση της απόστασης του χυτού από τα τοιχώματα της φλάσκας στην εύροια.

1.7.9 Υψομετρική διαφορά ανώτατου - κατώτατου σημείου του χυτού

Στο Σχήμα 1.37, φαίνεται πως η υψομετρική διαφορά ανώτατου σημείου - κατώτατου σημείου του δέντρου είναι η διάσταση που συμβολίζεται με το γράμμα D. Προκύπτει ότι η σχέση ανάμεσα στην ικανότητα πλήρωσης καλουπιού και το D είναι γραμμική και βρίσκεται σε συμφωνία με προηγούμενες δημοσιεύσεις [J. Campbell 2003], [G. H. Lee & Z. H. Lee 2001], [Vainer & Lerner 1999].



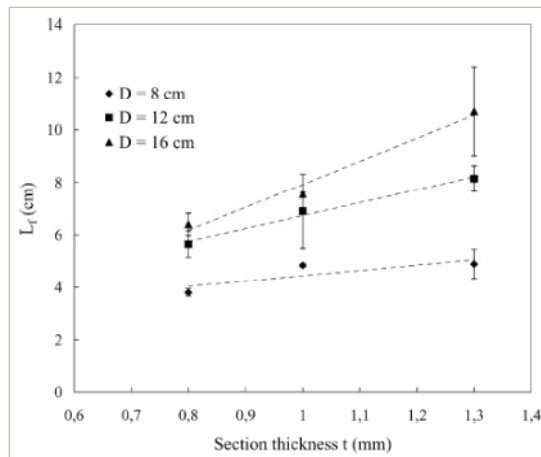
Σχήμα 1.37 Δέντρο χύτευσης για πειραματική διερεύνηση της επίδρασης γεωμετρικών στοιχείων στην εύροια [Sin & Dubé 2004].



Σχήμα 1.38 Επίδραση της υψομετρικής διαφοράς στην εύροια [Sin & Dubé 2004].

1.7.10 Πάχος χυτού

Από την ίδια σειρά περαμάτων (Σχήμα 1.37) προέκυψε η γραφική παράσταση που φαίνεται στην Σχήμα 1.39, η οποία δείχνει τη γραμμική εξάρτηση της ικανότητας πλήρωσης καλουπιού από το πάχος του χυτού (t) (Σχήμα 1.37), αν διατηρηθεί σταθερή η θερμοκρασία μούφλου (στους $T_{\text{mold}}=360^{\circ}\text{C}$, για κράμα μαγνησίου AZ91D). Αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με την εξ.(1.11), η οποία προβλέπει αναλογία ανάμεσα στο πάχος διατομής και την εύροια. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να εξηγηθούν με απλά λόγια από το γεγονός ότι οι λεπτότερες διατομές ευνοούν την ταχύτερη στερεοποίηση. Έτσι, για μια σταθερή τιμή του D και με όλους τους παράγοντες σταθερούς, βλέπουμε ότι όσο πιο λεπτή είναι η διατομή, τόσο πιο δύσκολα γεμίζει το καλούπι.



Σχήμα 1.39 Επίδραση του πάχους του χυτού t στην εύροια [Sin & Dubé 2004].

1.8 Προσομοίωση Χύτευσης

1.8.1 Η αναγκαιότητα της προσομοίωσης της χύτευσης

Ο λόγος για τον οποίο γίνεται προσομοίωση μιας οποιασδήποτε κατεργασίας είναι η μοντελοποίηση των φυσικών νόμων ώστε οι σημαντικές μεταβλητές της κατεργασίας να μπορούν να αναγνωρίζονται και να ελέγχονται, πράγμα που συνεπάγεται σημαντικά πλεονεκτήματα.

Η χύτευση, αρχαία κατεργασία μορφοποίησης μετάλλων, χρησιμοποιούταν αρχικά ως τέχνη, τα μυστικά της οποίας γνώριζαν ολίγοι. Οι εξελίξεις στο 2^ο μισό του προ-προηγούμενου αιώνα, αναβάθμισαν τη χύτευση από τέχνη, σε επιστήμη. Η χρήση Η/Υ στα βιομηχανικά χυτήρια αποτελεί πεδίο ενδιαφέροντος τα τελευταία 30 χρόνια [R W Lewis & Ravindran 2000]. Δεν υπάρχουν πολλές εξελίξεις τις τελευταίες δεκαετίες που να άλλαξαν την κατανόηση της κατεργασίας της χύτευσης μετάλλων όσο η προσομοίωση της χύτευσης [Heisser et al. 2011].

Ο απώτερος στόχος της προσομοίωσης της χύτευσης είναι να προταθούν κάποιες συγκεκριμένες τιμές για τις παραμέτρους της κατεργασίας, που θα έχουν σαν αποτέλεσμα τη βέλτιστη δυνατή ποιότητα χυτού, με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Με άλλα λόγια, η «εικονική χύτευση» (“virtual casting”, όρος που χρησιμοποιείται και από τον καθηγητή M.Jolly [Mark Jolly 2002]), διευκολύνει στην εύρεση του εκάστοτε βέλτιστου σεναρίου χύτευσης [Wannarumon & Grande 2009].

Τα χυτήρια χρησιμοποιούν ολοένα και περισσότερο προγράμματα αριθμητικής προσομοίωσης σε υπολογιστή σε διάφορα στάδια, οποιαδήποτε στιγμή, για να βελτιστοποιήσουν τη διαδικασία της χύτευσης. Τα τελευταία χρόνια η εφαρμογή και χρήση από τις βιομηχανίες εμπορικών πακέτων προσομοίωσης έχει γίνει αποδεκτή ευρέως, και έχει εγκαταλειφθεί πλέον η λογική ότι η χρήση τέτοιων εργαλείων είναι πολυτέλεια [Marques 2001]. Στο τρέχον ανταγωνιστικό περιβάλλον, τα χυτήρια πρέπει να παραμένουν στην αιχμή του δόρατος των νέων τεχνολογιών για να διατηρούνται στην ανταγωνιστική αγορά. Η ικανότητα παραγωγής χυτών υψηλής ποιότητας με τη μέθοδο της χύτευσης ακριβείας, αλλά ταυτόχρονα με χαμηλό κόστος και σε μικρούς χρόνους είναι η πρόκληση που αντιμετωπίζει η βιομηχανία χύτευσης σήμερα. [Calba & Lefebvre 2005]. Τεμάχια όλο και πιο σύνθετα, και από υλικά όλο και πιο δύσκολα στη χύτευση, παράγονται με τη χύτευση ακριβείας. Η προσομοίωσή της μειώνει το χρόνο ανάμεσα στο στάδιο σύλληψης και σχεδιασμού και στο στάδιο της παραγωγής, στον κύκλο παραγωγής του τεμαχίου. [Shamasundar et al. 2004].

Γίνεται φανερό πως η τεχνολογία προχωρά ώστε να εξασφαλίζει χυτά κατά το δυνατόν χωρίς ατέλειες και χαμηλού κόστους.

Οι λόγοι για τους οποίους εφαρμόζεται η μοντελοποίηση με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή τα τελευταία χρόνια είναι:

- ο σχεδιασμός νέων τεμαχίων όπου η προσομοίωση σε υπολογιστή χρησιμοποιείται σαν εικονική μονάδα χύτευσης για να ελεγχθεί η

εγκυρότητα του σχεδιασμού τροφοδοσίας και της διάταξης χύτευσης γενικότερα [Shamasundar et al. 2004]

- ο ανασχεδιασμός των υπαρχόντων προϊόντων και διαδικασιών χύτευσης με στόχο την εξάλειψη των ατελειών και του ποσοστού απόρριψης χυτών
- η βελτίωση της απόδοσης της κατεργασίας με μείωση του άχρηστου μετάλλου και μείωση των σκάρτων τεμαχίων [Shamasundar et al. 2004], [Calba & Lefebvre 2005].
- Σαν εργαλείο στο οποίο οι σχεδιαστές μπορούν να διεξάγουν μεγάλο αριθμό πειραμάτων χωρίς να χρειάζεται να χρησιμοποιούνται καινούρια εργαλεία, πρότυπα, να γίνεται κανονική έγχυση μετάλλου και να παράγονται αληθινά τεμάχια. Μπορούν, με άλλα λόγια, να δοκιμαστούν διάφοροι σχεδιασμοί συστημάτων τροφοδοσίας χωρίς να καταφύγουμε στην πραγματική παραγωγή, πράγμα δαπανηρό, χρονοβόρο και επίπονο.
- Σαν εργαλείο πιστοποίησης ποιότητας όπου οι ασφαλείς παράμετροι λειτουργίας μπορούν να καθοριστούν. Μπορεί να υπάρχει ένα παράθυρο με τις ασφαλείς παραμέτρους σταθερά καταγεγραμμένες για έλεγχο της ποιότητας.
- Για τη δυνατότητα ελέγχου και σχεδιασμού, και την κωδικοποίηση των βασικών θεωρητικών αρχών σε κανόνες που να «λειτουργούν» και να εφαρμόζονται για να δίνουν καλής ποιότητας χυτά.
- Σαν ένα εργαλείο διαχείρισης για την παροχή εκπαίδευσης και εκμάθησης στο προσωπικό των χυτηρίων.
- Για να διευκολύνονται οι επικοινωνίες τόσο μεταξύ των εταιρειών όσο και μεταξύ εταιρειών-πελατών. [Heisser et al. 2011]
- Για την ανάπτυξη μίας βάσης δεδομένων τεχνικών γνώσεων.

1.8.2 Ιστορική Εξέλιξη

Η περιγραφή της χύτευσης μετάλλων σε ένα φυσικο-μαθηματικό μοντέλο και η προσομοίωσή της σε Η/Υ απαιτεί την ποσοτικοποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας και των βημάτων της, καθώς αυτές είναι που έχουν άμεση επίδραση στην ποιότητα του χυτού.

Η ιδέα της χρήσης αριθμητικών μοντέλων για την πρόβλεψη της πλήρωσης και της στερεοποίησης των χυτών προήλθε από τους φυσικούς, τους μαθηματικούς και τους μηχανολόγους μηχανικούς. Για να μπορέσει να υλοποιηθεί, ήταν αναγκαία η ύπαρξη θεωρητικών μοντέλων για τη μετάδοση θερμότητας, τη ροή και τη μηχανική των ρευστών, τους μηχανισμούς στερεοποίησης και την ανάπτυξη της μικροδομής. Ακολουθεί μία σύντομη αναφορά των σημαντικότερων εξελίξεων, στις οποίες βασίστηκε η προσομοίωση της χύτευσης [Heisser et al. 2011].

Η θεωρητική θεμελίωση της αγωγής θερμότητας σε στερεά ύλη αναπτύχθηκε από τον Jean Baptiste Joseph Fourier στην “Ecole Polytechnique” στο Παρίσι. Η διατριβή του «Η Αναλυτική Θεωρία της Θερμότητας», απέσπασε βράβευση το 1822. Αυτή παρείχε τη βάση για όλους τους μετέπειτα/επακόλουθους υπολογισμούς μετάδοσης θερμότητας (με αγωγή) σε στερεά σώματα. Ο γάλλος φυσικός και μηχανικός Claude-Louis Navier και ο

Ιρλανδός μαθηματικός και φυσικός George Gabriel Stokes, ακολούθως, παρείχαν τις βάσεις της δυναμικής των ρευστών. Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή των ρευστών είναι γνωστές ως «εξισώσεις Navier-Stokes».

Οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν τη διάχυση (diffusion) αναπτύχθηκαν από τον Adolf Fick, ο οποίος δούλεψε κατά τον 19^ο αιώνα στο πανεπιστήμιο της Ζυρίχης και τις δημοσίευσε το 1855. Το 1950, ο Paschis χρησιμοποίησε αναλογικούς υπολογιστές για να προβλέψει την κίνηση ενός μετώπου στερεοποίησης σε μία ή σε δύο διαστάσεις.

Με την ανάπτυξη των πρώτων Η/Υ, ο Fursund ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε Η/Υ για να επιλύσει προβλήματα σχετιζόμενα με τη διαδικασία της χύτευσης (εισχώρηση του χάλυβα στο καλούπι από άμμο), στο 1962. Τρία χρόνια αργότερα, οι Hentzel και Keverian δημοσίευσαν την καινοτόμο εργασία τους σχετικά με την προσομοίωση σε 2D της στερεοποίησης ενός χυτού από χάλυβα. Χρησιμοποίησαν ένα πρόγραμμα που είχε αναπτυχθεί από την General Electric για την προσομοίωση μετάδοσης θερμότητας.

Το 1968, ο Vestby ανέπτυξε ένα 2D μοντέλο για την εκτίμηση της θερμοκρασιακής κατανομής κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, χρησιμοποιώντας για πρώτη φορά τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών.

Δύο χρόνια αργότερα, ο V.De Lange Davies χρησιμοποίησε το πρόγραμμα του Vestby για να προσομοιάσει τις αποστάσεις τροφοδοσίας σε πλακοειδή χυτά. Ο D.N.Hansen, το 1975 δημοσίευσε τη διατριβή του περιγράφοντας τη δουλειά του σχετικά με την πρόβλεψη θερμής ρωγμάτωσης (hot tearing) σε χυτά από χάλυβα. Στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής, ένα 3D μοντέλο αναπτύχθηκε για πρώτη φορά.

Ξεκινώντας από τις αρχές του 1980, η έρευνα και η ανάπτυξη γύρω από το θέμα της προσομοίωσης της χύτευσης αυξήθηκε εντυπωσιακά σε πολλές περιοχές. Πέρα από τις δραστηριότητες στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο της Δανίας γύρω από τον Hansen, ομάδες εργασίας δημιουργήθηκαν σε όλο τον κόσμο, όπως οι Berry & Pelke στις ΗΠΑ, ο Niyama στην Ιαπωνία και ο Kurz στη Λωζάνη, ο Durand στη Grenoble και ο Sahm στο Foundry Institute στο Άαχεν.

Ορόσημα αποτέλεσαν: (i) Η εισαγωγή του όρου “criteria function” (συνάρτηση κριτηρίων) από τους Hansen & Berry (1980), (ii) η εισαγωγή μίας “criteria function” για να απεικονιστεί το πορώδες της μέσης γραμμής (centerline porosities) από τον Niyama(1982) και (iii) η πρόταση για τον εντοπισμό hot tears σε χυτά από χάλυβα, από τους Flender & Hansen (1984).

Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 80, οι πρώτες λύσεις στο πρόβλημα της προσομοίωσης της πλήρωσης καλουπιού είχαν δοθεί. Στη δεκαετία του 90, οι έρευνες για την ανάπτυξη του θέματος εστιάστηκαν στην προσομοίωση τάσεων και παραμορφώσεων στα χυτά (Hattel and Hansen, 1990). Ξεκίνησαν, επίσης, τα πρώτα βήματα για την πρόβλεψη μικροδομών και μηχανικών ιδιοτήτων από τους Svensson και Wessen στη Σουηδία.

1.8.3 Φαινόμενα που μοντελοποιούνται

Αναφερόμενοι στην προσομοίωση της χύτευσης ουσιαστικά εξετάζουμε την μοντελοποίηση της πλήρωσης του τύπου με το τήγμα, και την μοντελοποίηση της στερεοποίησης του τήγματος.

Σκοπός της μοντελοποίησης της πλήρωσης και της στερεοποίησης είναι:

- πρόβλεψη του εγκλωβισμού οξειδίων και άλλων ατελειών σχετιζόμενων με τη ροή
- παροχή των θερμοκρασιακών προφίλ κατά τη διάρκεια αλλά και κατά το πέρας της πλήρωσης για πιο ακριβή ανάλυση στερεοποίησης
- πρόβλεψη του προτύπου της στερεοποίησης, υποδεικνύοντας τις θέσεις στις οποίες μπορούν να προκύψει πορώδες λόγω συρρίκνωσης και άλλες σχετικές ατέλειες
- πρόβλεψη άλλων ατελειών στερεοποίησης
- πρόβλεψη χρόνων στερεοποίησης
- πρόβλεψη της μικροδομής των διαφόρων τμημάτων του χυτού (όπως και του διαφορισμού)
- πρόβλεψη τάσεων - παραμορφώσεων
- η πρόβλεψη της επίδρασης του σχεδιασμού του συστήματος τροφοδοσίας στη δημιουργία τύρβης

Η πλήρωση του τύπου μπορεί να προβλεφθεί με τη χρήση ενός θεωρητικού προγράμματος. Μία προσέγγιση είναι η επίλυση των εξισώσεων ροής Navier - Stokes με ένα μοντέλο τύρβης 2-εξισώσεων. Αυτή η προσέγγιση ερμηνεύει όλα τα σχετικά χαρακτηριστικά της ροής (όπως το ιξώδες, τριβή, αριθμό Reynold's, κλπ) με χωρικούς βαθμούς ελευθερίας.

Οι εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης ορμής και εξισώσεις ενέργειας αποτελούν τη βάση αυτών των αλγορίθμων. Αυτή η προσέγγιση είναι ακριβής και έχει δοκιμαστεί για δεκαετίες στην αεροναυπηγική. Λέξεις-κλειδιά όπως "quiescent filling" (ήρεμη πλήρωση) και "laminar flow" (στρωτή ροή) χρησιμοποιούνται συχνά, αλλά από φυσικής απόψεως, όλες οι διαδικασίες πλήρωσης -από τη χύτευση σε άμμο μέχρι τη χύτευση υπό πίεση σε μόνιμο τύπο- είναι έντονα τυρβώδεις. Αυτό το γεγονός βασίζεται στις ρεολογικές ιδιότητες των μεταλλικών τηγμάτων. Η ενέργεια που δημιουργείται από το ρέον τήγμα είναι τόσο υψηλή που δεν έχει μπορέσει να εξαλειφθεί, παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις στα χυτήρια. Συνεπώς, ισχυρή τύρβη και δινορεύματα δημιουργούνται μέσα στο τήγμα ακόμα και όταν η επιφάνεια του τήγματος φαίνεται να αυξάνεται ήσυχα.

Αρκετές από τις ατέλειες των χυτών προκύπτουν από αυτές τις υπο-επιφανειακές κινήσεις, καθώς και από τις αντιδράσεις μεταξύ τήγματος και του υλικού του τύπου. Αυτές οι ατέλειες περιλαμβάνουν ατέλειες καλουπιού, αέρια εγκλείσματα, ατέλειες οξειδωσης, μη μεταλλικά εγκλείσματα.

Όταν είναι διαθέσιμη η 3D γεωμετρία του χυτού μία βασική προσομοίωση στερεοποίησης & απόψυξης μπορεί να διεξαχθεί μέσα σε μερικά λεπτά.

Η πρόβλεψη των ατελειών όχι μόνο βοηθά αλλά και υποστηρίζει τον σχεδιαστή-μηχανικό στην εκτίμηση των σχεδιασμών της κατεργασίας.

Η γνώση των θερμοκρασιών και της συμπεριφοράς στερεοποίησης οδηγεί σε ποιοτική πρόβλεψη του τοπικού θερμικού συντελεστή στο χυτό, καθώς και των χρόνων στερεοποίησης, ρυθμών απόψυξης, θερμοκρασιακής βάρμωσης και των ατελειών λόγω συρρίκνωσης.

ΤΟ ΒΑΣΙΚΟ ΕΡΩΤΗΜΑ: Η πρόβλεψη των προβλημάτων που σχετίζονται με την τέλεια τροφοδοσία του τύπου εξακολουθεί να είναι ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα και στόχος των λογισμικών προσομοίωσης της χύτευσης [Heisser et al. 2011]. Ανάλογα με το κράμα που εγχέεται, διαφορετικές συμπεριφορές τροφοδοσίας και ικανότητες αυτό-τροφοδοσίας χρειάζεται να ληφθούν υπ' όψιν προκειμένου να παραχθεί ένα χυτό χωρίς ατέλειες. Η προσομοίωση της χύτευσης πρέπει να συνδυαστεί με την πυκνότητα και υπολογισμούς μεταφοράς μάζας, ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση της στερεοποιούμενης μορφολογίας στη συμπεριφορά τροφοδοσίας/πλήρωσης καθώς και για να θεωρηθούν εύρη τροφοδοσίας εξαρτώμενα από το κράμα.

ΤΟ ΠΛΗΘΟΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ: Ακόμη και εάν οι νόμοι της Φυσικής για την πλήρωση, τη στερεοποίηση, την ανάπτυξη τάσεων και την απόψυξη είναι οι ίδιοι για όλα τα κράματα, η ειδική συμπεριφορά του υλικού κάνει τη διαφορά, εφόσον οι συνθήκες χύτευσης, η ονομαστική σύσταση και οι μεταλλουργικές παράμετροι (εκλέπτυνση κόκκων) ορίζονται. Βασισμένο σε αυτήν την πληροφορία, το πρόγραμμα υπολογίζει το πιθανό διάγραμμα φάσεων που υπαγορεύεται από τις συνθήκες επιταχυνόμενης απόψυξης που συμβαίνουν. Η ανομοιόμορφη διαλυτότητα των κραματικών στοιχείων στη στερεά και την υγρή φάση οδηγεί σε διαφορισμό και συνεπώς στην πιθανή δημιουργία νέων και μερικές φορές, ανεπιθύμητων φάσεων.

Μόνο στο τελικό βήμα, με βάση αυτήν την πληροφορία, η στερεοποίηση και οι συνεπακόλουθες θερμοκρασιακές κατανομές υπολογίζονται σε ένα βήμα. Αυτά τα βήματα επαναλαμβάνονται για κάθε θέση και για κάθε σημείο στο χρόνο πριν οι μικροδομές και οι μηχανικές ιδιότητες προβλεφθούν.

Το κλειδί για την εξέλιξη των μοντέλων προσομοίωσης ήταν η εκάστοτε συμπεριφορά τροφοδοσίας των κραμάτων και η ισχυρή εξάρτησή τους από τη μεταλλουργία. Ένας υπολογισμός της τροφοδοσίας βασισμένος μόνο στις θερμοκρασιακές κατανομές δεν είναι επαρκής.

ΤΑΣΕΙΣ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ: Οι εξελίξεις που αφορούν την πρόβλεψη θερμών ρωγμών, καθώς και η δημιουργία παραμενουσών τάσεων και συμπεριφορά σε παραμόρφωση ξεκαθάρισαν την κατάσταση. Επιπρόσθετα, η μηχανική προσομοίωση πρέπει να θεωρήσει και την επίδραση των καλουπιών και των καρδιών, καθώς αυτά είναι κυρίως υπεύθυνα για ατέλειες που σχετίζονται με ανάπτυξη τάσεων. Οι παραμένουσες τάσεις, οι θερμές ρωγμές, ο σχηματισμός ρωγμών, η συρρίκνωση ή η αναδίπλωση των χυτών, των μητρών και των μόνιμων καλουπιών έρχεται στο κέντρο του ενδιαφέροντος. Λόγω του υψηλού τους κόστους, η συντήρηση και η αποκατάσταση των ζημιών στα μόνιμα καλούπια, αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες.

Καθώς η θερμοκρασιακή συμπεριφορά επιδρά στις αναπτυσσόμενες τάσεις που μπορούν να προσομοιωθούν, η εφαρμογή προσομοίωσης παρέχει επιπρόσθετη αξία για τη μείωση του κόστους.

1.8.4 Κατηγορίες προγραμμάτων προσομοίωσης χύτευσης

Τα προγράμματα αριθμητικής προσομοίωσης αποτελούν μεν ένα σημαντικό εργαλείο, ωστόσο κάθε φορά υπάρχουν κρίσιμα ζητήματα που πρέπει να δρομολογούνται ώστε να επιτυγχάνονται ρεαλιστικά αποτελέσματα. Έτσι, δεν μπορεί κάποιος να βασιστεί εξαρχής αποκλειστικά στο πρόγραμμα για να πάρει σωστά αποτελέσματα με την πρώτη προσπάθεια. Προς το παρόν, αρχικά, η αριθμητική προσομοίωση της χύτευσης χρησιμοποιείται στη λογική της δοκιμής-και-απόρριψης (trial-and-error), ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα. Πρέπει, δηλαδή, να προηγείται μία φάση διερεύνησης του τρόπου σωστής προσομοίωσης του εκάστοτε φαινομένου, χρειάζεται δηλαδή πρώτα μία βαθμονόμηση [Krimpenis et al. 2005].

Συνοψίζοντας, λοιπόν, τα επαναλαμβανόμενα πειράματα που γίνονταν προκειμένου να βρεθούν οι «βέλτιστες» παράμετροι χύτευσης τώρα μειώνονται σημαντικά, και χρησιμοποιούνται μόνο στα αρχικά στάδια, για έλεγχο της αξιοπιστίας των μοντέλων προσομοίωσης.

Κάνοντας μία ανασκόπηση των διαθέσιμων εμπορικών πακέτων μοντελοποίησης της χύτευσης [Schmidt 1999], διαπιστώνουμε ότι υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι εργαλείων προσομοίωσης:

- τα εμπειρικά προγράμματα, που βασίζονται σε πειραματικά αποτελέσματα και την εμπειρία,
- τα ημι-εμπειρικά προγράμματα, που βασίζονται σε πειραματικά αποτελέσματα σε συνδυασμό, όμως, με βασικές αρχές της φυσικής, και
- τα θεωρητικά προγράμματα, που βασίζονται στις βασικές αρχές της φυσικής (first principles programs), και χρησιμοποιούν πολύπλοκα μαθηματικά και απαιτούν ακριβή θερμο-φυσικά δεδομένα για τα υλικά.

Τα εμπειρικά και τα ημι-εμπειρικά προγράμματα χρησιμοποιούν πίνακες από πειραματικά αποτελέσματα, κανόνες, κατευθυντήριες γραμμές και αλγεβρικές εξισώσεις Φυσικής για να μοντελοποιήσουν τη φυσική διαδικασία. Τυπικά, το πρόβλημα διαιρείται σε πολλούς μικρούς υπολογισμούς μέσω της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών.

Στα θεωρητικά προγράμματα, όπως ήδη αναφέρθηκε, χρησιμοποιούνται πολύπλοκες εξισώσεις φυσικής σε συνδυασμό με αναλυτικά δεδομένα για τα υλικά. Το πρόβλημα για να επιλυθεί πρέπει να διαιρεθεί σε πολλούς απλούστερους υπολογισμούς είτε μέσω της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών είτε μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό επιτρέπει υπολογισμούς της διαδικασίας με το χρόνο.

Ένα εμπειρικό πρόγραμμα χρησιμοποιείται για να εκτιμήσει τις απαιτήσεις της μεθόδου. Ένα ημι-εμπειρικό πρόγραμμα χρησιμοποιείται για γρήγορο έλεγχο της μεθόδου και βελτιστοποίηση της διαδικασίας. Τέλος, ένα θεωρητικό πρόγραμμα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να αποτιμήσει τα

χαρακτηριστικά πλήρωσης και να παρέχει μια πιο λεπτομερή ανάλυση της μεθόδου και της διαδικασίας χύτευσης. Επιπλέον, χρησιμοποιείται για να αποτιμήσει μία νέα διαδικασία ή ένα πολύ σύνθετο μοντέλο.

Η έρευνα στη μετάδοση θερμότητας, την τήξη και τη στερεοποίηση κατά τις τελευταίες δεκαετίες έχει καταλήξει σε καλύτερη κατανόηση και έλεγχο – πέρα από τη χύτευση – των σχετικών διαδικασιών όπως η συγκόλληση, η κρυσταλλική ανάπτυξη, τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας και απόψυξης. Όλα αυτά τα προβλήματα είναι γνωστά ως «προβλήματα κινούμενων οριακών συνθηκών» (“moving boundary problems”), λόγω της άγνωστης κινούμενης διεπιφάνειας στερεού-υγρού. Λόγω της μη-γραμμικότητάς τους, πολύ λίγες αναλυτικές λύσεις υπάρχουν. Ως εκ τούτου, οι αριθμητικές μέθοδοι είναι αναντικατάστατες για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων πολλών διαστάσεων [R W Lewis & Ravindran 2000].

Η μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (FDM) και η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων [Voller et al. 1990], [R.W. Lewis & Roberts 1987], [Rappaz 1989], [Viskanta 1988], [Uchibori & Ohshima 2010].

ΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η αριθμητική προσομοίωση είναι μία διαδικασία επίλυσης ενός φυσικού μοντέλου μέσω μαθηματικών (διαφορικών) εξισώσεων και η απεικόνιση της υπολογισθείσας περιοχής (του χυτού και του καλουπιού) μέσω διακριτών μεμονωμένων στοιχείων. Για να υπολογιστούν οι διαφορικές εξισώσεις, αρκετές μέθοδοι είχαν αναπτυχθεί (FEM, FDM, FVM, BM, MM, κα).

Το 1924, ο Schmidt ανέπτυξε μία γραφική μέθοδο επίλυσης μονοδιάστατων προβλημάτων αγωγής θερμότητας. Το 1949 και το 1959, ήταν σημαντικές οι συνεισφορές των Ingersol, Zobel και Ingersoll καθώς και από τους Carslaw και Jaeger, σχετικά με την αναλυτική λύση προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας.

Η μέθοδος ΠΣ (FEM) αναπτύχθηκε το 1945, για επίλυση ειδικών υπολογισμών αντοχής. Το 1956, οι πρώτες στατικές/δομοστατικές (structural) προσομοιώσεις διεξήχθησαν για τις πτέρυγες αεροσκάφους Boeing. Το 1967, το βιβλίο-αναφορά “The Finite Element Method” εκδόθηκε από τον Zienkiewicz. Ο Hansen εκτέλεσε υπολογισμούς στερεοποίησης για πρώτη φορά το 1975 χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων όγκων (FVM).

Η κάθε μέθοδος έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και μπορεί να αποφέρει καλά ποιοτικά αποτελέσματα, ανάλογα με την περιοχή εφαρμογής. Η μέθοδος ΠΣ έχει τις «ρίζες» της στους υπολογισμούς φορτίων. Η μέθοδος ΠΔ και η μέθοδος ΠΟ προέρχονται από προσομοιώσεις ροής ρευστών και πλεονεκτούν στην περιγραφή φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας.

Η επιλογή της αριθμητικής μεθόδου και του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί καθοδηγείται από την εύρεση του καλύτερου συμβιβασμού

μεταξύ ποιότητας (ακρίβειας) υπολογισμού, πιθανώς αυτοματοποιημένης επαναπλεγματοποίησης και υπολογιστικού κόστους.

Το βασικό κομμάτι ενός τέτοιου αλγορίθμου αριθμητικής προσομοίωσης που να υπολογίζει τη μετάδοση θερμότητας κατά την τήξη & τη στερεοποίηση, είναι η μοντελοποίηση της απορρόφησης ή της απελευθέρωσης της λανθάνουσας θερμότητας στη διεπιφάνεια στερεού-υγρού.

Πρόσφατες ερευνητικές εργασίες εστιάζουν στην υλοποίηση ολοκληρωμένης ανάλυσης ολόκληρης της διαδικασίας της χύτευσης και της βελτιστοποίησης. Αυτές οι προσπάθειες έχουν καταλήξει σε επαρκή μοντέλα ανάλυσης με ένα σημαντικό βαθμό σύζευξης του κάθε σταδίου της διαδικασίας. Για παράδειγμα, κατά το στάδιο της πλήρωσης του καλουπιού επιλύονται συζευγμένα το πρόβλημα της ροής του ρευστού μετάλλου, ο εντοπισμός της ελεύθερης επιφάνειας του μετάλλου (free surface tracking), η μετάδοση θερμότητας και η στερεοποίηση. Υπάρχει, επίσης, πολλές φορές η δυνατότητα υπολογισμού του τασικού πεδίου που αναπτύσσεται.

Κατά τη διάρκεια των υπολογισμών στερεοποίησης που ακολουθούν τους υπολογισμούς πλήρωσης, χρησιμοποιείται θερμο-μηχανικός αλγόριθμος συζευγμένου υπολογισμού για την πρόβλεψη του παραμορφωμένου σχήματος χυτού και του σχηματιζόμενου κενού αέρος.

Heat Conduction Analysis- Ανάλυση Αγωγής Θερμότητας

Από μία μακροσκοπική σκοπιά, η στερεοποίηση κυβερνάται από την εξίσωση αγωγής θερμότητας. Η κατανομή θερμοκρασίας (T) στο χωρίο υπολογισμού μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση διατήρησης ενέργειας [R W Lewis & Ravindran 2000]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T \quad (1.16)$$

όπου: ρ : η πυκνότητα,
 c : ειδική θερμότητα και
 k : η θερμική αγωγιμότητα.

Η οριακή συνθήκη Dirichlet μπορεί να περιγραφεί για τη συγκεκριμένη εξίσωση με τη μορφή συγκεκριμένων τιμών θερμοκρασίας στο σύνολο. Οι οριακές συνθήκες μπορούν να περιλαμβάνουν συγκεκριμένες τιμές εξωτερικής ροής θερμότητας (q_a) και μετάδοσης θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας με το περιβάλλον:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = q_a + h_a(T_a - T) + \varepsilon(T_a^4 - T^4) \quad (1.17)$$

όπου: h_a : είναι ο συντελεστής συναγωγής
 T_a : η θερμοκρασία περιβάλλοντος, και
 ε : η εκπεμπότητα (emissivity) της επιφάνειας.

Η εξίσωση (1.16) διακριτοποιείται από τη μέθοδο ΠΣ Galerkin & προσωρινά από το έμμεσο σχήμα προς τα πίσω διαφοράς. Οι προκύπτουσες ταυτόχρονες

εξισώσεις που σχετίζουν τις θερμοκρασίες στους κόμβους σε δύο διαδοχικά βήματα (T^{n+1} και T^n) μπορούν να γραφούν [R. W. Lewis et al. 1996]:

$$[\mathbf{C} + \mathbf{K}]\mathbf{T}^{n+1} = \Delta t \mathbf{f} + \mathbf{C}\mathbf{T}^n \quad (1.18)$$

όπου: \mathbf{C} : το capacitance matrix

\mathbf{K} : το μητρώο δυσκαμψίας, και

\mathbf{f} : το διάνυσμα ροής θερμότητας στους κόμβους.

Solidification Modelling - Μοντελοποίηση Στερεοποίησης

Η στερεοποίηση/τήξη συνοδεύεται από απελευθέρωση/απορρόφηση της λανθάνουσας θερμότητας από/στη διεπιφάνεια στερεού-ρευστού. Όταν ένα συμβατικό κράμα ή ένα μη καθαρό μέταλλο ψύχεται από την υγρή φάση, ξεκινά να στερεοποιείται στη θερμοκρασία Liquidus (L ή T_{liq}) και ολοκληρώνεται στη θερμοκρασία Solidus (S ή S_{liq}). Οι δύο φάσεις διαχωρίζονται από μία περιοχή διφασικού μίγματος (two-phase mixture), η οποία ονομάζεται mushy zone.

Τα καθαρά μέταλλα και τα ευτηκτικά κράματα υφίστανται αλλαγή φάσης ισόθερμα, πχ η στερεοποίηση συμβαίνει σε μία σταθερή θερμοκρασία T_m , που ονομάζεται σημείο τήξης/πήξης.

Ο λόγος της Sensible heat προς τη λανθάνουσα θερμότητα (Δh_f) ορίζεται από τον αριθμό Stefan (Ste):

$$Ste = \frac{c\Delta T}{\Delta h_f} \quad (1.19)$$

Ο αριθμός Stefan αποτελεί μέτρο της ταχύτητας της διεπιφάνειας στερεού-υγρού μετάλλου. Μικρή τιμή Ste υποδεικνύει πως η κίνηση του μετώπου στερεοποίησης θα είναι αργή λόγω της υψηλής ποσότητας λανθάνουσας θερμότητας.

Οι Zienkiewicz et al [Zienkiewicz et al. 1973] πρότειναν τον πρώτο αλγόριθμο ΠΣ για την επίλυση του ground freezing problem. Από τότε, σημειώθηκε η ανάπτυξη και χρήση πολλών αλγόριθμων ΠΣ.

Οι διάφορες μέθοδοι διαφέρουν στον τρόπο που διαχειρίζονται την απελευθέρωση της λανθάνουσας θερμότητας και μπορούν ευρέως να ταξινομηθούν ως front tracking methods και fixed grid methods. Αυτές οι δύο μέθοδοι αναπτύσσονται λεπτομερώς στη συνέχεια [R W Lewis & Ravindran 2000].

- **Front Tracking Methods:** Στις μεθόδους αυτές, το μέτωπο στερεοποίησης ανιχνεύεται (tracked) με συνεχή τρόπο. Η περιοχή υγρού μετάλλου και η περιοχή στερεού μετάλλου θεωρούνται ως δύο ξεχωριστές περιοχές και για το λόγο αυτό, η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και ως (two-domain method). Η λανθάνουσα θερμότητα απελευθερώνεται και θεωρείται ως μία ειδική οριακή συνθήκη μεταξύ των, που συσχετίζει τα δύο περιοχές (υγρή - στερεή).

Μία από τις απλούστερες επιλογές για front tracking είναι η διαδοχική/βηματική προσαρμογή της θέσης των κόμβων κοντά στο μέτωπο στερεοποίησης. Για επίπεδες διεπιφάνειες/μέτωπα, είναι δυνατό να προσαρμόζεται το χρονικό βήμα έτσι ώστε πάντα η διεπιφάνεια υγρού-στερεού να πέφτει πάντα πάνω στους κόμβους.

Οι Rubinsky και Cravalho [Rubinsky & Cravalho 1981] είχαν εισάγει έναν επιπρόσθετο κόμβο στη διεπιφάνεια κι έτσι χώριζαν ένα διφασικό στοιχείο σε δύο μονοφασικά στοιχεία. Καθώς ο νέο-δημιουργηθείς κόμβος έχει γνωστό θερμοστοιχείο (το σημείο τήξης), η αντίστοιχη μεταβολή δεν χρειάζεται να εμφανίζεται στο τελικό σύστημα εξισώσεων. Ο Askar [Askar 1987] έκανε επίλυση προβλημάτων απόψυξης χρησιμοποιώντας μονο-διάστατα τετραεδρικά (quadratic) στοιχεία. Στα στοιχεία που περιέχονται στις 2 φάσεις, η θέση του ενδιάμεσου κόμβου μεταβάλλεται, ώστε να πέσει ακριβώς πάνω στη διεπιφάνεια. Αυτές οι απλές μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε προβλήματα 1D.

Για 2D προβλήματα, η “front-tracking” απαιτεί ορισμένη ειδική προσέγγιση, όπως η αλλαγή του συστήματος αναφοράς, με συνεχή τρόπο αναμόρφωση και ανακατασκευή πλέγματος (τοπικά) και χρήση space-time ΠΣ.

Τα *πλεονεκτήματα* των μεθόδων “front tracking” είναι:

1. Ακριβής πρόβλεψη της θέσης της διεπιφάνειας
2. Ακριβής διαχείριση της απελευθέρωσης της λανθάνουσας θερμότητας.

Έχουν τα ακόλουθα *μειονεκτήματα*:

1. Χρειάζονται συνήθως ένα λογισμικό ειδικά για αυτό το σκοπό
 2. Δεν είναι κατάλληλο για κράματα με πεπερασμένο εύρος στερεοποίησης
 3. Εφαρμόζονται μόνο σε απλές γεωμετρίες και απλά σχήματα διεπιφάνειας μόνο. Τυχόν εμφανιζόμενες ή εξαφανιζόμενες φάσεις και πολλαπλές διεπιφάνειες δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν από τις περισσότερες μεθόδους front tracking.
- **Fixed Grid Methods:** Μεταχειρίζονται και την υγρή και τη στερεή φάση σαν μία συνεχή περιοχή και το όριο αλλαγής φάσης δεν καθορίζεται ποτέ πλήρως. Για το λόγο αυτό ονομάζονται και “single-domain methods”.
 1. Ευκολία υλοποίησης σε υπάρχοντα λογισμικά αγωγής θερμότητας
 2. Δεν υπάρχει ανάγκη ανίχνευσης της θέσης και τοπολογίας της διεπιφάνειας/μετώπου σε κάθε χρονικό βήμα.
 3. Δεν απαιτείται επανα-πλεγματοποίηση (remeshing)
 4. Τα κράματα με πεπερασμένο εύρος στερεοποίησης μοντελοποιούνται
 5. Σύνθετα προβλήματα πολλών διαστάσεων μπορούν να επιλυθούν. Εμφανιζόμενες ή εξαφανιζόμενες φάσεις μπορούν επίσης να μοντελοποιηθούν.

Πεπερασμένες Διαφορές (ΠΔ ή FDM) και Πεπερασμένοι Όγκοι (ΠΟ ή FVM)

ΠΔ και ΠΟ είναι ο τίτλος που δίνεται σε μία μαθηματική τεχνική όπου η λύση ενός σύνθετου προβλήματος αποκτάται διαιρώντας το πλήρες χωρίο (μία γνωστή γεωμετρία) σε πολλά μικρά κομμάτια, τους όγκους ελέγχου και εφαρμόζοντας τις εξισώσεις σε κάθε έναν από τους όγκους ελέγχου διαδοχικά. Για κάθε ένα μικρό όγκο, ο υπολογισμός υποθέτει ότι οι ιδιότητες του υλικού είναι οι ίδιες σε όλο τον όγκο. Συνεπώς, για να υπάρξει υψηλή ακρίβεια, η περιοχή υπολογισμού θα πρέπει να χωριστεί στο μεγαλύτερο δυνατό αριθμό κελιών (όγκοι ελέγχου, “CV”). Τα εμπορικά πακέτα λογισμικού συνήθως εφαρμόζουν αλγορίθμους ομαλοποίησης (smoothing algorithms) στα αποκτηθέντα αποτελέσματα, για να

εξομαλυνθούν οι ασυνέχειες που προκύπτουν μεταξύ γειτονικών όγκων ελέγχου [M Jolly 2003]. Έτσι, τα αποτελέσματα προσαρμόζονται σε ένα βήμα μετα-επεξεργασίας για να δώσουν/απεικονίσουν σε χρωματικές κλίμακες.

Οι υπολογισμοί με πεπερασμένες διαφορές, διεξάγονται για προκαθορισμένο αριθμό χρονικών βημάτων, με μία επαναληπτική διαδικασία. Τα αποτελέσματα μπορεί να αποθηκεύονται στο τέλος κάθε βήματος ή στο τέλος ορισμένου αριθμού βημάτων [M Jolly 2003]. Ένα από τα πιο σημαντικά λογισμικά προσομοίωσης της χύτευσης, το MAGMASoft, χρησιμοποιεί ΠΔ.

Ευριστικές Τεχνικές (Heuristic Techniques) [M Jolly 2003]

Αυτά τα πακέτα λογισμικού παρουσιάζουν ορισμένες δυσκολίες στη χρήση τους. Αυτού του είδους τα πακέτα λογισμικού είναι αυτό που ονομάζουμε «μαύρα κουτιά» (“black boxes”), καθώς, για εμπορικούς λόγους παράγουν αποτελέσματα χωρίς να εκθέτουν τη μεθοδολογία και τους αλγορίθμους που χρησιμοποιούν. Υπάρχει ένα πλήθος τέτοιου προγραμμάτων όπως το SOLSTAR, το SoftCAST και το CASCAT. Κάποια από αυτά, χρησιμοποιούν home-grown rules και κάποιες πολύ γνωστές συναρτήσεις “criteria functions” όπως η εφαρμογή του νόμου Chvorinov και υπολογισμούς modulus. Άλλοι κώδικες είναι περισσότερο σύνθετοι και λιγότερο καθοδηγούμενοι από τη γεωμετρία.

Πεπερασμένα Στοιχεία (ΠΣ ή FEM)

Τα ΠΣ διακριτοποιούν, επίσης, την περιοχή ενδιαφέροντας σε πολλά κομμάτια, τα οποία, αυτή τη φορά, αποκαλούνται «στοιχεία» (elements). Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για τους μαθηματικούς υπολογισμούς αποθηκεύονται στους «κόμβους» (nodes), δηλ. στις γωνίες του κάθε στοιχείου ή -κόμα- και σε συγκεκριμένα, προκαθορισμένα σημεία των πλευρών των ΠΣ, για μεγαλύτερη ακρίβεια.

1.8.5 Εργασίες στη διεθνή βιβλιογραφία που κάνουν χρήση της προσομοίωσης της χύτευσης

Η ακριβής προσομοίωση της χύτευσης ακριβείας [Upadhy et al. 1995] (συμπεριλαμβανομένων των υπολογισμών ακτινοβολίας) είναι μία διαδικασία που καταναλώνει αρκετό χρόνο. Κατά το αρχικό στάδιο προσομοίωσης, πρέπει κανείς να αναλύσει γρήγορα έναν μεγάλο αριθμό σχεδιασμών για να επιλέξει τον πιο πολλά υποσχόμενο για μια πιο λεπτομερή ανάλυση. Προς αυτή την κατεύθυνση, ένα νέο μοντέλο αναπτύχθηκε για την ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας κατά τη στερεοποίηση στη χύτευση ακριβείας.

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τόσο τις γεωμετρικές παραμέτρους, όσο και τις παραμέτρους στερεοποίησης που παίζουν πρωταρχικό ρόλο στη μεταφορά θερμότητας και στη στερεοποίηση. Το μοντέλο λαμβάνει επίσης υπόψη τις απώλειες θερμότητας με ακτινοβολία από την επιφάνεια του καλουπιού στο περιβάλλον. Αναπτύχθηκε, επίσης, ένα νέο και αποδοτικό πλάνο ενεργειών για τον υπολογισμό της κατανομής του παράγοντα ακτινοβολίας (view factor) στην επιφάνεια του καλουπιού. Αυτό το πλάνο εφαρμόζεται σε

μοντέλα πεπερασμένων διαφορών. Είναι κατάλληλο για την πρόβλεψη του χρόνου στερεοποίησης του χυτού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γρήγορη εκτίμηση των ατελειών, των hot spots, που μπορεί να οδηγήσουν σε δημιουργία μακροπορώδους. Αν και το προτεινόμενο μοντέλο είναι προσεγγιστικό, κάνει μια μικρή θυσία στην ακρίβεια αλλά με τεράστια εξοικονόμηση χρόνου. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα και με αναλυτικές λύσεις από τη βιβλιογραφία.

Στην εργασία [Z. Guo et al. 2005] οι θερμο-φυσικές και φυσικές ιδιότητες της υγρής και στερεής φάσης κατά τη στερεοποίηση είναι πολύ βασικά δεδομένα για την προσομοίωση της χύτευσης. Ωστόσο, ο αριθμός των κραμάτων για τον οποίο είναι διαθέσιμες οι πληροφορίες αυτές είναι περιορισμένος, κυρίως λόγω της δυσκολίας πειραματικού προσδιορισμού τους. Επιπλέον, επειδή ακόμα και μικρές διαφοροποιήσεις στη σύσταση ενός κράματος μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις, δεν είναι συνετό να εξαχθούν συμπεράσματα για ένα κράμα, από άλλα «παρόμοια». Η παρούσα εργασία περιγράφει την ανάπτυξη του λογισμικού JMatPro (βασισμένο σε Java) το οποίο με βάση τη σύσταση του κράματος και τα αντίστοιχα θεωρητικά μοντέλα στερεοποίησης (όπως το μοντέλο Scheil-Gulliver) υπολογίζει τις ιδιότητες του κράματος σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Είναι χρήσιμο για κράματα για τα οποία δεν υπάρχουν πειραματικές μετρήσεις, ή για ιδιότητες που είναι δύσκολο να μετρηθούν. Επισημαίνεται, τέλος, το κατά πόσο οι αλλαγές στη σύσταση ενός κράματος μπορούν να επηρεάσουν τις ιδιότητες κατά τη στερεοποίηση, και πώς οι ιδιότητες του υγρού μπορούν να ποικίλουν σημαντικά στη διφασική περιοχή.

Στα πλαίσια της εργασίας των Gebelin και Jolly [Gebelin & M. R. Jolly 2003] έγινε μοντελοποίηση της χύτευσης ακριβείας, με σκοπό τη διερεύνηση και καλύτερη κατανόηση των φυσικών φαινομένων που διέπουν την κατεργασία αυτή. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με πειραματικά αποτελέσματα. Η μελέτη αφορούσε τη μελέτη της διαδικασίας έγχυσης κεριού και σχηματισμού των κέρινων ομοιωμάτων, αλλά και την πλήρωση του τύπου με το μέταλλο.

Κατά το πείραμα: πραγματοποιήθηκε χύτευση αλουμινίου με τη μέθοδο του χαμένου κεριού. Η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας του κεριού μετρήθηκε με δοκιμές θερμιδομετρίας (scanning calorimeter tests). Δεν μπόρεσε να γίνει μελέτη της συρρίκνωσης του κεριού. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε διάφανο καλούπι, ώστε να συγκριθεί η πλήρωση του καλουπιού του πειράματος με την προσομοίωση. Οι μελετούμενες γεωμετρίες ήταν σχετικά απλές. Στη συνέχεια, έγινε προσομοίωση της έγχυσης του κεριού, και προέκυψε ότι μπορεί να γίνει πρόβλεψη της πλήρωσης του καλουπιού και πρόβλεψη της δημιουργίας ατελειών. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της πλήρωσης του καλουπιού με το μέταλλο. Στην εργασία τονίζονται ιδιαίτερα τα φαινόμενα που συμβαίνουν στην κάθε φάση της κατεργασίας (έγχυση κεριού, αποκέρωση, έγχυση μετάλλου, στερεοποίηση), και επισημαίνονται τα προς διερεύνηση φαινόμενα.

1.9 Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας

1.9.1 Εισαγωγή

Η επιλογή των συνθηκών της κατεργασίας, για την επίτευξη χυτών ικανοποιητικής ποιότητας, δεν αποτελεί μία εύκολη και τετριμμένη διαδικασία [Flemings 1974], [Pagratis et al. 2007]. Επιτυγχάνεται είτε με διεξαγωγή πειραμάτων, είτε με χρήση αριθμητικής προσομοίωσης [Kai Ho & Robert D Pehlke 1985].

Είναι προφανές πως για να είναι ρεαλιστικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, είναι αναγκαία η πληρέστερη δυνατή γνώση των παραμέτρων της χύτευσης. Πρόκειται για μία γενική αλήθεια, η οποία όπως ισχύει για κάθε είδος προσομοίωσης, ισχύει και για τα εμπορικά πακέτα προσομοίωσης της στερεοποίησης, προκειμένου να μπορούν να παράξουν αξιόπιστη πληροφορία [Alexandrou et al. 1999], [Y. Dong et al. 2011a].

Οι παράμετροι της χύτευσης που θα πρέπει να ορισθούν πλήρως κατά την αριθμητική προσομοίωση είναι οι ιδιότητες των υλικών, οι αρχικές συνθήκες, οι οριακές συνθήκες, συνθήκες που έχουν να κάνουν με το είδος της χύτευσης και οι ιδιότητες της διεπιφάνειας.

Διεπιφάνειες δημιουργούνται κατά τη δημιουργία της γεωμετρίας και του πλέγματος, όταν κατασκευάζονται με τρόπο τέτοιο, που να οριοθετούνται διαφορετικές «περιοχές» στη γεωμετρία. Οι διαφορετικές αυτές περιοχές μπορεί να υποδηλώνουν διαφορετικό τύπο υλικού (πχ. χυτό, καλούπι, καρδιές, φίλτρα, υλικό επένδυσης), ή να ανήκουν στον ίδιο τύπο υλικού (πχ στο χυτό), αλλά να δημιουργούνται είτε για να διευκολύνεται η πλεγματοποίηση, είτε με σκοπό να αποδοθούν διαφορετικές ιδιότητες.

Στην περίπτωση που πρόκειται για διεπιφάνεια ίδιου τύπου υλικού (χυτό με χυτό, καλούπι με καλούπι), θα πρέπει να οριστεί πως οι δύο περιοχές θα έχουν κοινό πλέγμα στη διεπιφάνεια. Στην περίπτωση, όμως που πρόκειται για διεπιφάνεια διαφορετικών τύπου υλικών (πχ χυτό με καλούπι ή χυτό με ψύχον σώμα), τότε εκ των πραγμάτων, θα πρέπει οι δύο περιοχές να έχουν διακριτό πλέγμα στη διεπιφάνεια. Συνήθως το πλέγμα αυτό είναι διαφορετικό, αλλά με ταυτιζόμενους κόμβους. Εφόσον, λοιπόν, οι δύο περιοχές που «συνορεύουν» αποτελούν διαφορετικές οντότητες, είναι λογικό να πρέπει να οριστούν κάποιοι «κανόνες» μετάδοσης της «πληροφορίας» από τον ένα κόμβο της διεπιφάνειας στον άλλο.

Στην περίπτωση της διεπιφάνειας χυτού-καλουπιού, για παράδειγμα, θα πρέπει να οριστεί με ποιόν τρόπο θα μεταφέρεται θερμότητα από τον κάθε κόμβο του χυτού στον αντίστοιχο κόμβο του καλουπιού. Επειδή πρόκειται για χύτευση, η μετάδοση θερμότητας είναι ένα δυναμικό φαινόμενο, μεταβαλλόμενο στο χρόνο και το χώρο. Τα φαινόμενα περιγράφονται αναλυτικότερα στη συνέχεια της παραγράφου. Συνοπτικά μπορεί να ειπωθεί

πως αρχικά υπάρχει καλή επαφή του τήγματος με το καλούπι, η οποία σταδιακά χάνεται όταν λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της στερεοποίησης (όχι ταυτόχρονα σε όλο το χυτό) και τελικά, στο πέρας της στερεοποίησης η επαφή αυτή άλλοτε είναι καλή άλλοτε όχι. Τέλος, είναι σαφές πως καθόλη τη διάρκεια της χύτευσης λαμβάνει χώρα και συρρίκνωση, είτε κατά την υγρή φάση του μετάλλου, είτε κατά την ημι-στερεή, είτε κατά τη στερεή φάση, καθώς το χυτό αποψύχεται, αλλού ταχύτερα, αλλού βραδύτερα.

Είναι, λοιπόν, σαφές πως το φαινόμενο είναι σύνθετο και εξαρτώμενο από πλήθος παραμέτρων.

Οι ιδιότητες της διεπιφάνειας έχουν να κάνουν με την επαφή του κάθε υλικού με το γειτονικό του και τον τρόπο μετάδοσης θερμότητας από το ένα υλικό στο άλλο.

Ο Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας (Σ.Μ.Θ.) στη διεπιφάνεια μετάλλου/καλουπιού είναι πολύ κρίσιμη παράμετρος.

Η ορολογία και οι συντομογραφίες που συνήθως χρησιμοποιούνται και ακολουθούνται στο κείμενο ή τα σχήματα για το Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας θα είναι ΣΜΘ ή “Heat Transfer Coefficient – ΣΜΘ” ή “Interfacial Heat Transfer Coefficient – ΙΗΤC”.

Θα πρέπει να τονιστεί πως ο ΣΜΘ δεν είναι ένα υπαρκτό μέγεθος, αλλά ένα εφευρεθέν («λογιστικό») μέγεθος.

Οι Μονάδες του ΣΜΘ είναι W/m^2K και εκφράζει την ευκολία που προβάλλει η διεπιφάνεια στη διέλευση της θερμότητας.

Διαφορετικοί ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας από το τήγμα στο καλούπι επηρεάζουν την εξέλιξη της στερεοποίησης και ως εκ τούτου τη μικροδομή και τις ιδιότητες του χυτού.

Κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, ο Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας (ΣΜΘ) μεταξύ του χυτού και του καλουπιού είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επιδρούν στη διαδικασία της στερεοποίησης, στη μικροδομή, στις μηχανικές ιδιότητες και την καλή ποιότητα του προκύπτοντος χυτού προϊόντος [Mahoney & Browne 2000; Y. Dong et al. 2011a]

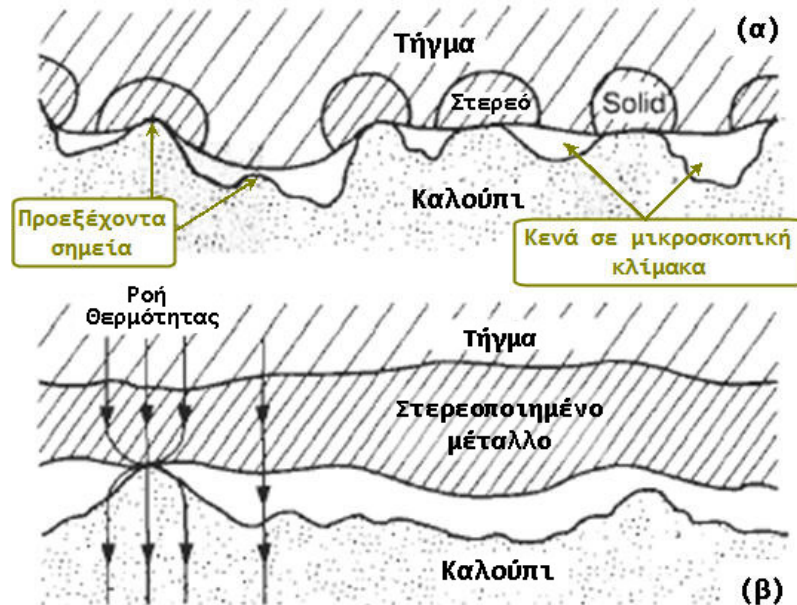
Οι παράγοντες που επηρεάζουν το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας είναι:

- Το είδος του προς χύτευση κράματος
- Το υλικό του καλουπιού
- Η θερμοκρασία του τύπου
- Η θερμοκρασία του τήγματος
- Η γεωμετρία του χυτού αντικειμένου.

Στη βιβλιογραφία, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια, ο ΣΜΘ είναι μεταβλητός και μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου ή της θερμοκρασίας.

Για να γίνει κατανοητός ο λόγος ύπαρξης του ΣΜΘ, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ολιστικά τα φαινόμενα κατά τη χύτευση. Χαρακτηριστική περιγραφή είναι αυτή των Ho και Pehlke, από το πανεπιστήμιο του Michigan.

Σύμφωνα με τους Ho και Pehlke [Καί Ho & Robert D Pehlke 1985], όταν το μέταλλο εισέρχεται στο καλούπι η μακροσκοπική επαφή του ρευστού μετάλλου με τα τοιχώματα του καλουπιού είναι πολύ καλή. Κενά υπάρχουν μόνο σε μικροσκοπική κλίμακα στα προεξέχοντα σημεία, όπως φαίνεται στο (Σχήμα 1.40(α)).



Σχήμα 1.40 (α) Η διεπιφάνεια μετάλλου-καλουπιού στο αρχικό στάδιο, που το ρευστό μέταλλο εισέρχεται στο καλούπι. Η μακροσκοπική επαφή μεταξύ μετάλλου και καλουπιού είναι πολύ καλή, ενώ κενά υπάρχουν σε μικροσκοπική κλίμακα, (β) Το ρευστό μέταλλο αρχίζει και στερεοποιείται, με αποτέλεσμα να συρρικνώνεται και να μειώνεται η επαφή του με τα τοιχώματα του καλουπιού, δημιουργώντας μεγαλύτερα κενά. [Καί Ho & Robert D Pehlke 1985], [John Campbell 1993]

Στα προεξέχοντα σημεία η αρχική πολύ μεγάλη ροή θερμότητας (heat flux), οδηγεί σε δημιουργία πυρήνων στερεοποίησης, λόγω τοπικής υπόψυξης. Έτσι, το ρευστό μέταλλο αρχίζει να στερεοποιείται δημιουργώντας ένα στρώμα στερεοποιημένου μετάλλου. Στη συνέχεια, η καλή επαφή του μετάλλου με τον τύπο χάνεται λόγω συρρίκνωσης και δημιουργούνται κενά μεταξύ του στερεοποιημένου μετάλλου και του τύπου. Επαφή υπάρχει μόνο σε μερικά σημεία που προεξέχουν περισσότερο (Σχήμα 1.40(β)).

Ο συντελεστής μετάδοσης της θερμότητας στη διεπιφάνεια μετάλλου-καλουπιού μπορεί να θεωρηθεί σαν άθροισμα τριών συνιστωσών:

$$h_t = h_s + h_c + h_r \quad (1.20)$$

όπου:

h_s = ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με αγωγή (ο δείκτης “s” προκύπτει από την έκφραση “solid-solid conduction” που χρησιμοποιείται για να περιγραφεί η συνεισφορά του συγκεκριμένου όρου)

h_c = ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή, πχ μέσω του αέρα του κενού μεταξύ τήγματος και τύπου

h_r = ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω ακτινοβολίας.

Ο προσδιορισμός του ΣΜΘ είναι μια δύσκολη διαδικασία και κατά κύριο λόγο, περιλαμβάνει πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασιών. Οι πειραματικές μετρήσεις συνδυάζονται με αριθμητικούς υπολογισμούς.

Οι μέθοδοι για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

- Η **πρώτη κατηγορία** μεθόδων περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του ΣΜΘ **με χρήση μετρήσεων θερμοκρασίας**. Οι πειραματικές μετρήσεις πρέπει να συνδυαστούν με αριθμητικούς υπολογισμούς προκειμένου να προκύψει ο ΣΜΘ. Στην κατηγορία αυτή έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές προσέγγισης, όπως η Μέθοδος Δοκιμής και Λάθους (Trial and error), η Μέθοδος επίλυσης αντίστροφου προβλήματος (Inverse Heat Conduction Problem), η Μέθοδος σημειακού όγκου (Lump Capacitance Method), ή μέθοδοι βελτιστοποίησης (Optimisation Methods). Είθισται να αναζητείται η εναρμόνιση/η συμφωνία μεταξύ πειραματικών παρατηρήσεων και προβλέψεων μέσω προσομοίωσης [Hines 2004] [Y. Dong et al. 2011b].
- Η **δεύτερη κατηγορία** περιλαμβάνει τη μέτρηση της μεταβολής του **μεγέθους του κενού** που δημιουργείται στη διεπιφάνεια μετάλλου-καλουπιού (Interfacial Gap).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέθοδοι προσδιορισμού του ΣΜΘ, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία.

1.9.2 Προσδιορισμός του ΣΜΘ στη διεθνή βιβλιογραφία με χρήση μετρήσεων θερμοκρασίας

Μια πρώτη προσέγγιση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας κατά τη στερεοποίηση των μετάλλων έκαναν οι Ho και Pehlke [K Ho & Robert D. Pehlke 1984].

Οι Ho και Pehlke πρότειναν τιμές και κάποιες αναλυτικές εκφράσεις για κάθε μια από τις παραπάνω συνιστώσες. Στην εργασία τους χρησιμοποίησαν και τις δύο κατηγορίες προσδιορισμού. Στην παράγραφο που ακολουθεί παρουσιάζεται το σύνολο των συμπερασμάτων:

1. Κατά την είσοδο του ρευστού μετάλλου που η επαφή μετάλλου-καλουπιού είναι σχεδόν τέλεια, ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας που επικρατεί είναι η μετάδοση θερμότητας με αγωγή. Στο αρχικό αυτό στάδιο και στις περιοχές όπου η επαφή είναι τέλεια, ο συντελεστής h_t της εξ.(1.20) είναι ιδιαίτερα υψηλός. Για παράδειγμα, στη χύτευση αλουμινίου που εφαρμόζονται υψηλές πιέσεις, η αρχική τιμή του συντελεστή είναι $h_t = 60000 \text{ W/m}^2\text{K}$. Οι υψηλές αυτές τιμές γρήγορα πέφτουν, καθώς το μέταλλο

στερεοποιείται και συρρικνώνεται, χάνοντας την τέλεια επαφή του με τα τοιχώματα του καλουπιού. Έτσι η τιμή του συντελεστή πέφτει στα επίπεδα των 100-1000 W/m²K. Σε όλες τις μεθόδους χύτευσης, λοιπόν, δικαιολογείται μια αρχική υψηλή τιμή του συντελεστή.

2. Καθώς η στερεοποίηση προχωράει, το κενό στη διεπιφάνεια μετάλλου-καλουπιού μεγαλώνει και η μετάδοση θερμότητας με αγωγή γίνεται αμελητέα. Το σημείο όπου αυτό συμβαίνει φαίνεται καθαρά από τα διαγράμματα της μεταβολής της θερμοκρασίας. Στο Σχήμα 1.40 είναι ευδιάκριτο το σημείο όπου η μετάδοση θερμότητας με αγωγή γίνεται αμελητέα (στο σημείο αυτό ο συντελεστής h_c έχει μειωθεί δραματικά σε σχέση με την αρχική τιμή του). Είναι το σημείο όπου η μεταβολή της θερμοκρασίας γίνεται σχεδόν μηδενική. Η θερμοκρασία παραμένει σταθερή για κάποιο χρονικό διάστημα και ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας που επικρατεί είναι η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή μέσω του αέρα που υπάρχει στο κενό της διεπιφάνειας στερεού μετάλλου-καλουπιού. Στο σημείο αυτό ο συντελεστής h_c υπολογίζεται από τη σχέση:

$$h_c = \frac{k}{d} \quad (1.21)$$

όπου:

k = η θερμική αγωγιμότητα του αέρα στο κενό

d = το πάχος του κενού της διεπιφάνειας μετάλλου-καλουπιού

Η μετάδοση θερμότητας στο σημείο αυτό είναι συνάρτηση του πάχους του κενού της διεπιφάνειας. Τέλος πρέπει να τονίσουμε, ότι για τα ελαφρά μέταλλα (αλουμίνιο, τιτάνιο, χαλκός κ.α) η συνεισφορά της ακτινοβολίας στη μετάδοση θερμότητας είναι πολύ μικρή (περίπου 1%).

Οι Ho και Pehlke [K Ho & Robert D. Pehlke 1984; Kai Ho & Robert D Pehlke 1985] έκαναν πειράματα για να διερευνήσουν τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας της διεπιφάνειας (IHTC: Interfacial Heat Transfer Coefficient) χυτού αλουμινίου και υδρόψυκτου χάλκινου ψύχοντος σώματος (chill), αλλά σε ένα παχύ τμήμα του χυτού.

Χρησιμοποιώντας μετρήσεις και από το στερεοποιούμενο τήγμα και από το καλούπι, και μία μέθοδο αντίστροφης θερμικής αγωγιμότητας (inverse heat conduction method), καθόρισαν τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας της διεπιφάνειας. Η αντίστροφη μέθοδος θερμικής αγωγιμότητας (inverse heat conduction method) είναι μία πλήρης μαθηματική περιγραφή των φυσικών φαινομένων της διαδικασίας. Με άλλα λόγια είναι η εξίσωση αγωγής θερμότητας, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση της στερεοποίησης στο μέταλλο. Οι πειραματικές μετρήσεις είναι οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν σε συγκεκριμένες θέσεις. Το αντίστροφο πρόβλημα λύνεται προσαρμόζοντας τις παραμέτρους στη μαθηματική περιγραφή ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά ανάμεσα στις τιμές που υπολογίστηκαν για το μοντέλο και τις μετρήσεις. Οι παράμετροι στην μαθηματική περιγραφή είναι οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας (ΣΜΘ) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Η μελέτη περιελάμβανε και τη διερεύνηση του σχηματισμού κενού (ανάμεσα στα δύο υλικά, λόγω συστολής του τήγματος), και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δοκιμαστικές διατάξεις που είχαν (α) την ψυχρότερη επιφάνεια πάνω από το τήγμα, και (β) την ψυχρότερη επιφάνεια κάτω από το τήγμα.

Τα αποτελέσματα για το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ήταν της τάξης των $1000\text{W/m}^2\text{C}$. Ας σημειωθεί ότι για την κάτω επιφάνεια του χυτού, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας της διεπιφάνειας παρουσιάζει μια σύντομη αρχική πτώση και μετά μένει σταθερός.

Οι Nishida, et al. [Nishida et al. 1986] έκαναν πειράματα παρόμοια με αυτά των Ho Pehlke, χρησιμοποιώντας απλά σχήματα: κυλίνδρους διαμέτρου 34mm και μήκους 75mm, και επίπεδες πλάκες πάχους 22mm και επιφάνειες 65x55 mm. Η θερμοκρασία μετρήθηκε και στο μέταλλο και στο καλούπι. Εφοδίασαν, επίσης, τα χυτά τους με μετατροπείς μετατόπισης (displacement transducers) με στόχο να μετρήσουν άμεσα τον σχηματισμό χάσματος γύρω από το χυτό.

Επίσης, διεξήχθησαν δύο διαφορετικές τεχνικές ανάλυσης. Η μία περιγράφεται ως “by simulation” («με προσομοίωση»), και φαίνεται ότι είναι ένα είδος «αντίστροφης διαδικασίας». Η δεύτερη τεχνική ονομάζεται “by approximate calculation” («υπολογισμός στο περίπου») και βασίζεται στην προσέγγιση της μεταβολής της θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια. Ο υπολογισμός της μεταβολής της θερμοκρασίας στηρίχθηκε στις ενδείξεις θερμοκρασίας δύο θερμοστοιχείων που τοποθετήθηκαν πολύ κοντά στην επιφάνεια. Τα αποτελέσματα είναι και πάλι της τάξης των $1000\text{W/m}^2\text{C}$, και γενικά μειώνονται με τον χρόνο μετά από ένα αρχικό μέγιστο.

Ο Stafford [Stafford et al. 1987] ενδιαφέρθηκε κυρίως για την προσομοίωση της χύτευσης ακριβείας με πεπερασμένα στοιχεία. Για να το πετύχει αυτό χρειάστηκε να καθορίσει το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας της διεπιφάνειας για την προσομοίωση. Στην εργασία του δίνονται μόνο λίγες λεπτομέρειες για το πείραμα, αλλά αναφέρεται ότι χρησιμοποίησαν μια αντίστροφη διαδικασία. Το μέγεθος του ΙΣΜΘ (συντελεστή μεταφοράς θερμότητας της διεπιφάνειας) που υπολογίστηκε ήταν πάλι της ίδιας τάξης ($1000\text{Wm}^2\text{C}$), όπως και στις προηγούμενες εργασίες, αλλά αντί να μειώνεται, αυξανόταν με τον χρόνο. Απουσίαζαν επίσης τα υψηλά ακρότατα στις αρχικές χρονικές στιγμές που εμφανίζονταν στους Ho & Pehlke, Nishida, κλπ.

Οι Gozlan και Bamberger [Gozlan & Bamberger 1987] έκαναν πειράματα σε χυτά τεμάχια σε μόνιμο χαλύβδινο καλούπι. Το χυτό στη δική τους έρευνα ήταν ένας δίσκος διαμέτρου 100mm και πάχους 15mm. Με χρήση θερμοστοιχείων ελήφθησαν μετρήσεις σε απόσταση 2mm από την επιφάνεια του χυτού, αλλά εντός του καλουπιού. Διεξήγαγαν μία αντίστροφη μέθοδο για να καθορίσουν τη ροή θερμότητας (ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας) από το χυτό. Μελέτησαν τις συνέπειες της

προθέρμανσης του καλουπιού και του πάχους της επένδυσης μεταβάλλοντας το καθένα από αυτά διαδοχικά. Βρήκαν ότι η ροή θερμότητας ήταν της τάξης των 1000Wm^2 και ότι υπήρχε ένα αρχικό μέγιστο που ακολουθήθηκε από μια πολύ γρήγορη πτώση.

Οι Kumar και Prabhu [T. Kumar & Prabhu 1991] έκαναν πειράματα για να μετρήσουν τη ροή θερμότητας από χυτά κράματα αλουμινίου σε διάφορα ψυχρότερα υλικά. Μετρήσεις θερμοκρασιών έγιναν με την τοποθέτηση θερμοστοιχείων μέσα στα ψυχρότερα σώματα, σε απόσταση 2 mm από το χυτό και κάθετα στη διεύθυνση της ροής θερμότητας. Το μέγεθος της ροής θερμότητας (heat flux) ήταν παρόμοιο με αυτό των Gozlan και Bamberger στα 1000Wm^2 περίπου και το αρχικό μέγιστο μειώνεται γρήγορα.

Οι Krishnan και Sharma [Krishnan & Sharma 1994] διεξήγαγαν πειράματα για να καθορίσουν το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας της διεπιφάνειας (ΙΣΜΘ) από κράματα αλουμινίου - λιθίου σε καλούπι από σίδηρο. Έβαλαν θερμοστοιχεία στο καλούπι σε απόσταση 3.5 και 4mm από το χυτό και τα συνδύασαν με μετρήσεις μέσα στο ίδιο το χυτό σε μια αντίστροφη διαδικασία για να καθορίσουν το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Οι τιμές που βρήκαν για τον ΙΣΜΘ ήταν της τάξης των $1000\text{W/m}^2\text{C}$ με ένα μέγιστο που ακολουθείται από σημαντική πτώση.

Η εργασία [J.-C. Hwang et al. 1994] αφορά στον καθορισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε χύτευση σε άμμο. Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένα επίπεδο χυτό διαστάσεων $150\times 150\times 30\text{mm}$ από αλουμίνιο A356. Έγιναν μετρήσεις και στο στερεοποιημένο μέταλλο και στο καλούπι από άμμο. Με χρήση αντίστροφης διαδικασίας υπολόγισαν τον ΙΣΜΘ (συντελεστή μεταφοράς θερμότητας της διεπιφάνειας). Η τιμή της κορυφής (του μέγιστου) ήταν περίπου $712\text{Wm}^2\text{C}$, και η ελάχιστη κατά τη στερεοποίηση ήταν περίπου $586\text{Wm}^2\text{C}$. Ας σημειωθεί ότι αυτές οι τιμές είναι περίπου το 0.25-0.5 αυτών που μετρήθηκαν για μόνιμα καλούπια.

Ο Muojekwu [Muojekwu, CA Samarasekera, IV Brimacombe 1995] έκανε δοκιμές με ψυχρές επιφάνειες που ψύχονται με νερό, βυθισμένες σε τήγμα κράματος Al-Si (αλουμινίου-πυριτίου). Οι θερμοκρασίες μετρήθηκαν σε αποστάσεις 1.6, 3.2 και 22mm από την ψυχρή επιφάνεια, και 12mm μέσα στο χυτό. Προέκυψε ότι η ροή θερμότητας και οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας ήταν της ίδιας τάξης με αυτούς για τα μεταλλικά καλούπια που εξετάστηκαν νωρίτερα. Στην εργασία τους ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ήταν σχεδόν σταθερός κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης (διάρκειας 20s) και μετά άρχισε να πέφτει.

Οι Kim και Lee στην [Kim & Z.-H. Lee 1997] εργάστηκαν με ένα σωληνοειδές χυτό. Εφοδίασαν με θερμοστοιχεία και το εξωτερικό καλούπι (το καλούπι που ήταν έξω από τον κύλινδρο) και το εσωτερικό καλούπι (που ήταν σαν πυρήνας). Χρησιμοποίησαν κράματα αλουμινίου και χαλύβδινα καλούπια, και πήραν μετρήσεις και για τα δύο. Βρήκαν ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας της εξωτερικής επιφάνειας πέφτει ή μένει σταθερός,

ανάλογα με την επένδυση (coating), ενώ το συντελεστής της εσωτερικής επιφάνειας μεγαλώνει. Αυτό αποδόθηκε στη διαστολή του εσωτερικού καλουπιού/πυρήνα και στη συστολή του κυλινδρικού σωληνοειδούς χυτού, που είχε σαν αποτέλεσμα την πολύ σφιχτή συναρμογή των δύο.

Ο στόχος της εργασίας των [Pagratis et al. 2007] ήταν να καθοριστούν οι παράμετροι προσομοίωσης της χύτευσης ώστε να μπορεί να χρησιμοποιείται η προσομοίωση σαν αξιόπιστο εργαλείο. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν τη σπουδαιότητα της παραμέτρου αυτής (ΣΜΘ) για την προσομοίωση της χύτευσης. Ο ΣΜΘ θεωρείται πως μεταβάλλεται συναρτησίως του χρόνου. Ο ΣΜΘ που υπολογίστηκε για την περίπτωση ελάχιστου πορώδους στο χυτό έχει την ακόλουθη μορφή: $h \sim 1000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (όσο το μέταλλο παραμένει στην υγρή φάση $0-2 \text{ sec}$), $h \sim 5-20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (κατά την στερεοποίηση), $h \sim 50-100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (μετά την στερεοποίηση). Επιπλέον προκύπτει ότι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας δεν είναι ίδιος σε όλο το δέντρο χύτευσης.

Αν το μέταλλο παραμένει στην υγρή φάση για περισσότερο από 2 sec , πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τον ΣΜΘ η εμπειρική εξίσωση $h = ct^{-n}$.

Ο υπολογισμός του (ΣΜΘ) ήταν βασισμένος στην εξέλιξη της θερμοκρασίας (μετρήσεις με θερμοστοιχεία) σε τέσσερα εσωτερικά σημεία της διεπιφάνειας χυτού-τήγματος.

Η θερμοκρασία στο καλούπι μετρήθηκε με τη χρήση τεσσάρων βαθμονομημένων θερμοστοιχείων τύπου K, που εισήχθησαν σε τέσσερις θέσεις σε διαφορετικές πλευρές του χυτού. Σε ότι αφορά στην εξέλιξη της θερμοκρασίας στο κύριο κανάλι εισόδου το υγρό μέταλλο ψύχεται αργά και η θερμοκρασιακή πτώση κατά τη φάση του μετασχηματισμού είναι περίπου 82°C σαν αποτέλεσμα στην «αντίσταση» στη ροή θερμότητας από το εσωτερικό του καλουπιού. Η θερμοκρασία του κράματος μειώθηκε στην υγρή φάση γρήγορα, 26°C σε 0.6 sec , ενώ κατά την φάση μετασχηματισμού αργά: ο χρόνος στερεοποίησης ήταν 24 sec .

Μετά έγινε προσομοίωση για να γίνει ποιοτική επικύρωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από μεταλλογραφική εξέταση ενός όμοιου χυτού που παρήχθη με τις ίδιες συνθήκες χύτευσης.

Στο πρόγραμμα, λοιπόν, για κάθε μία από τις τέσσερις περιοχές εισήχθησαν οι αρχικές και οριακές συνθήκες. Στη συνέχεια, η καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου που προέκυπτε κάθε φορά συγκρινόταν με την πειραματική, και γινόταν ανάλογη διόρθωση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, μέχρι που οι αριθμητικές και οι πειραματικές καμπύλες ήταν αποδεκτά κοντά.

Στην εργασία [Sun & Chao 2009] επιστρατεύεται ένας συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στην διεπιφάνεια για να εκτιμηθεί η ροή θερμότητας που μεταφέρεται μέσω των κενών. Αν και ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στη διεπιφάνεια είναι πάρα πολύ σημαντικός, η τιμή του δεν

είναι εύκολο ούτε να μετρηθεί απευθείας ούτε να εκτιμηθεί θεωρητικά. Με δεδομένες τις μετρούμενες θερμοκρασίες (πειραματικό δεδομένο), κάποιες αντίστροφες μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλεφθεί ο συντελεστής. Ωστόσο, η λανθάνουσα θερμότητα και η υπόψυξη κατά τη στερεοποίηση του τήγματος και η υγρασία της άμμου περιπλέκουν τους θερμοκρασιακούς υπολογισμούς. Για να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία, στην παρούσα μελέτη προτείνεται μία μέθοδος που ονομάζεται “lump capacitance method” (εντοπισμένης χωρητικότητας) για τον υπολογισμό του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας της χύτευσης σε άμμο. Χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία για να μετρηθούν οι θερμοκρασίες του καλουπιού και του μετάλλου. Τα χυτά ήταν κυλινδρικά. Με τους συντελεστές μετάδοσης που προβλέφθηκαν το θερμοκρασιακό πεδίο του μετάλλου επιλύθηκε αριθμητικά. Βασιζόμενοι στους χρόνους στερεοποίησης, τα αριθμητικά αποτελέσματα βρέθηκαν ότι είναι σε συμφωνία με τα πειραματικά.

Οι [Lau, W.B. Lee, et al. 1998] διεξήγαγαν διερεύνηση για να μελετήσουν πώς οι θερμικές παράμετροι του μετάλλου και της διεπιφάνειας μετάλλου-καλουπιού επηρεάζουν την ποιότητα του χυτού και πώς μπορεί αυτή να βελτιωθεί με καλύτερο έλεγχο της θερμοροής, μέσω της διεπιφάνειας μετάλλου-καλουπιού.

Το σχήμα του χυτού εξαρτάται σημαντικά από τη γεωμετρία της κοιλότητας του τύπου, στη χύτευση ακριβείας. Ένα ακριβές προφίλ μήτρας καλουπιού, που να λαμβάνει υπόψη του όλα τα είδη συστολής που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της χύτευσης, είναι σημαντικό για την παραγωγή ενός χυτού που θα αποτελεί τελικό προϊόν, δηλαδή θα έχει καλή ποιότητα και διαστασιολογική ακρίβεια, χωρίς να χρειάζεται περαιτέρω κατεργασία. [W. Zhang et al. 2010]

Οι [Anderson et al. 1997] διεξήγαγαν ένα συνδυασμό προσομοίωσης και πειραματικής διαδικασίας για να μελετήσουν τη θερμική συμπεριφορά ενός δι-διάστατου συμμετρικού χυτού από αλουμίνιο.

Οι [Sahai & Overfelt 1996] ολοκλήρωσαν μία μελέτη σχετικά με τον ΣΜΘ (ΙΣΜΘ) κατά τη χύτευση ακριβείας πλακών και κυλινδρικών χυτών από κράματα νικελίου. Η μέθοδος που χρησιμοποίησαν βασιζόταν στην τεχνική μη-γραμμικής εκτίμησης που περιγράφηκε παραπάνω. Για τη χύτευση των κυλινδρικών χυτών (το καλούπι ήταν προθερμασμένο στους 745°C), ο ΣΜΘ (ΙΣΜΘ) βρέθηκε πως ήταν γραμμικά μεταβαλλόμενος από 200W/m²K σε θερμοκρασία μετάλλου στους 1300°C και 100W/m²K στους 850°C. Για χυτό-πλάκα, το ΣΜΘ (ΙΣΜΘ) υπολογίστηκε να μεταβάλλεται μεταξύ 5000 W/m²K στους 1400°C και 100 W/m²K στους 1100°C. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως το σχήμα του χυτού έχει αξιοσημείωτη επίδραση στο ΣΜΘ κατά τη χύτευση ακριβείας.

Η συνεισφορά της εργασίας των [Y. Dong et al. 2011a] είναι να παρέχει, μέσω ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (ΠΣ, Finite Element Model -

FEM), μία ακριβή αποτίμηση των θερμοκρασιακών αλλαγών κατά τη στερεοποίηση.

Στόχος των εργασιών [Y. Dong et al. 2011a] και [X. P. Zhang et al. 2006] ήταν η εύρεση μίας απλής αλλά καθολικής αντίστροφης μεθοδολογίας, που να μπορεί να χρησιμοποιήσει υπάρχοντα λογισμικά αριθμητικής προσομοίωσης για να προσδιορίσει τον ΣΜΘ. Αυτή η μεθοδολογία αποτελεί πολύ χρήσιμο βοήθημα για έναν ερευνητή χυτηρίου που αναζητά αποτελεσματικές κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με το πώς να εφαρμόσει οριακές συνθήκες για την προσομοίωση μίας συγκεκριμένης διαδικασίας χύτευσης [Konrad et al. 2011]; [Schnur & Zabarvas 1992]. Στις εργασίες αυτές, σχεδιάζεται προσεκτικά ένα πείραμα για να μετρηθεί το θερμοκρασιακό πεδίο κατά τη χύτευση, και το οποίο συγκρίνεται με το θερμοκρασιακό πεδίο που προκύπτει από την προσομοίωση. Έπειτα, ο ΣΜΘ που προσδιορίζεται με την αντίστροφη μεθοδολογία, χρησιμοποιείται για να προσομοιωθεί η συγκεκριμένη χύτευση.

1.9.3 Επίδραση της παρουσίας των θερμοστοιχείων στην ακρίβεια των μετρήσεων

Όλες αυτές οι μεθοδολογίες βασίζονται σε μετρήσεις με θερμοστοιχεία που οδηγούν στον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας διεπιφανειών ή της ροής θερμότητας. Ένα ζήτημα, όμως, που προκύπτει είναι το πόσο ακριβείς είναι αυτές οι μετρήσεις, ή -πιο συγκεκριμένα- πώς επηρεάζονται οι θερμοκρασίες του καλουπιού και του χυτού από την παρουσία των θερμοστοιχείων [T.S Piwonka et al. 2000].

Ας θεωρήσουμε δύο διαφορετικές καταστάσεις: (i) ένα υλικό με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (όπως είναι η άμμος του καλουπιού), με ένα ενσωματωμένο υλικό υψηλής αγωγιμότητας (το θερμοστοιχείο και τα σύρματά του από μόλυβδο), και (ii) ένα υλικό με υψηλή θερμική αγωγιμότητα (όπως είναι ένα μεταλλικό καλούπι) να διαταράσσεται από ένα θερμοστοιχείο που το τρυπάει (δημιουργώντας ένα πέρασμα με χαμηλή αγωγιμότητα). Και στις δύο περιπτώσεις, το πρόβλημα προκαλείται εξ ολοκλήρου από την παρουσία του «ξένου υλικού» μέσα στο υλικό του καλουπιού. Καθώς το σύρμα ή το κενό έχουν διαφορετικές θερμικές αγωγιμότητες και ειδικές θερμότητες από το βασικό υλικό, θα υπάρχει σίγουρα μία διαταραχή του πραγματικού θερμοκρασιακού πεδίου. Όσο πιο κοντά είναι οι ιδιότητες του σύρματος του θερμοστοιχείου ή του κενού σε αυτές του υλικού του καλουπιού, τόσο μικρότερη θα είναι η «παραμόρφωση» του θερμοκρασιακού πεδίου.

Το πρόβλημα επιδεινώνεται όταν θερμοστοιχεία με σύρμα από μόλυβδο τοποθετούνται στην κατεύθυνση της μεταβολής της θερμοκρασίας. Για ελαχιστοποίηση αυτών των σφαλμάτων, τα θερμοστοιχεία πρέπει να τοποθετούνται παράλληλα στις ισόθερμες.

Ο Beck [J. Beck 1962] μελέτησε το πρόβλημα ενός αγωγίμου καλωδίου ενσωματωμένου παράλληλα στη διεύθυνση ροής θερμότητας σε ένα πεδίο

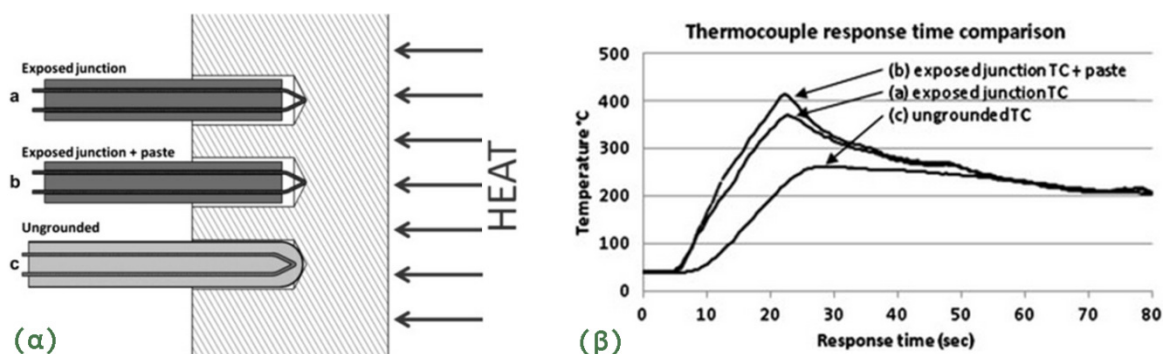
χαμηλής αγωγιμότητας. Τα αποτελέσματά του παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων και είναι δύσκολο να εφαρμοστούν σε μεταβατικά φαινόμενα με διαφορετικές παραμέτρους. Ωστόσο, ένα από τα συμπεράσματά του είναι ότι με σύρματα που η αγωγιμότητά τους είναι 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή του μετρούμενου υλικού, το σφάλμα του θερμοστοιχείου μπορεί να είναι της τάξης των 100F.

Επανερχόμαστε στην εργασία των [T.S Piwonka et al. 2000] Για να διερευνηθεί αυτό το φαινόμενο για μια τυπική άμμο χυτηρίου, διεξήχθη μία προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία ενός καλωδίου μέσα σε χώρο με άμμο που θερμαίνεται από ροή θερμότητας ίδια με αυτή στη χύτευση αλουμινίου. Η ροή θερμότητας αυτή προέκυψε σαν μέρος της διερεύνησης της μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα σε κράματα αλουμινίου και καλούπια από άμμο [K. A. Woodbury et al. 1998]. Το θερμοστοιχείο μοντελοποιήθηκε σαν ένα απλό στερεό σύρμα, που έχει το ίδιο εμβαδό διατομής με δύο πραγματικά σύρματα. Σφάλματα της τάξης των 80°C είναι δυνατό να υπάρχουν για αισθητήρες πάνω στην επιφάνεια.

Αξίζει να σημειωθεί η εργασία [Todoroki & Phinichka 2009], η οποία ασχολείται με τη μετάδοση θερμότητας κατά τα πρώτα 0.2sec της χύτευσης, καθώς θεωρείται πως το φαινόμενο είναι έντονα μεταβατικό και έντονα εξαρτόμενο από την ποιότητα των μετρήσεων.

Τέλος, στην εργασία [Long et al. 2011] πραγματοποιείται λήψη μετρήσεων θερμοκρασίας κατά τη χύτευση σε μόνιμο τύπο, υπό πίεση (HPDC). Οι θερμοκρασιακές μεταβολές είναι πάρα πολύ έντονες και ως εκ τούτου απαιτείται πολύ καλή απόκριση θερμοστοιχείων. Οι ερευνητές σύγκριναν την απόκριση τριών διαφορετικών ειδών θερμοστοιχείων τύπου-K, που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο. Τα τρία διαφορετικά είδη θερμοστοιχείων φαίνονται στο Σχήμα 1.41(α), και είναι:

(α) ένα θερμοστοιχείο εκτεθειμένης ένωσης (exposed junction), (β) ένα θερμοστοιχείο εκτεθειμένης ένωσης με ειδική πάστα (exposed junction with silver based thermal compound paste) και τέλος (γ) ένα κλασσικό θερμοστοιχείο χωρίς γείωση (ungrounded).



Σχήμα 1.41 (α) Σχηματική απεικόνιση τριών ειδών θερμοστοιχείων τύπου-K, (β) Οι αποκρίσεις των τριών ειδών θερμοστοιχείων [Long et al. 2011].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.41(β), είναι αξιοσημείωτα ταχύτερη η απόκριση των θερμοστοιχείων (α) και (β) από αυτήν του θερμοστοιχείου (γ). Επιπλέον, η μέγιστη μετρούμενη τιμή είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση και (γ) είναι πολύ χαμηλότερη από ότι στις άλλες δύο.

1.9.4 Προσδιορισμός ΣΜΘ στη διεθνή βιβλιογραφία με μέτρηση του μεγέθους του κενού (air gap)

Στη βιβλιογραφία που είναι μέχρι στιγμής διαθέσιμη παρατηρούνται διάφορες προσπάθειες προσδιορισμού του ΣΜΘ μέσω μέτρησης ή υπολογισμού του σχηματιζόμενου κενού αέρα μεταξύ χυτού και καλουπιού, που δημιουργείται λόγω της συρρίκνωσης του χυτού.

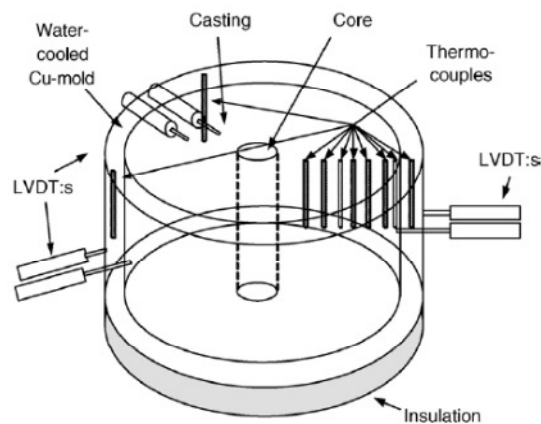
Η εργασία [Majumdar et al. 1977] περιγράφει μία τεχνική στην οποία ο χρόνος σχηματισμού του κενού και η μεταβολή του πάχους του κενού με την εξέλιξη της στερεοποίησης γίνεται με τη μέτρηση της χωρητικότητας πυκνωτή διαμέσου του κενού.

Σύμφωνα με τους [Taha & Hassan 2001], όλα τα χυτά έχουν περιοχές επαφής χυτού-καλουπιού, ανάλογα με τις επιφάνειες, και η πίεση επαφής σε αυτές μπορεί να ποικίλλει. Όταν αυτή η πίεση επαφής γίνει αρνητική, οδηγούμαστε στο σχηματισμό κενού. Αυτό το κενό αέρα και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταβάλλονται ανάλογα με τη θέση της διεπιφάνειας. Ωστόσο, μόνο λίγες εργασίες έχουν λάβει υπόψη τους αυτόν τον παράγοντα. Στη συγκεκριμένη εργασία ο σχηματισμός κενού υπολογίστηκε αριθμητικά με τη χρήση ενός αριθμητικού μοντέλου για τη στερεοποίηση, που λαμβάνει υπόψη τη συρρίκνωση και τη διαστολή του μετάλλου και του καλουπιού, τον σχηματισμό φιλμ (λεπτού στρώματος) αερίων, και τη μεταλλοστατική πίεση.

Στην εργασία [Lagerstedt et al. 2005], ο σχηματισμός κενού μελετήθηκε πειραματικά κατά τη στερεοποίηση. Μετρήθηκε το κενό και στη συνέχεια διεξήχθη μαθηματική μοντελοποίηση με σκοπό την κατανόηση του σχηματισμού κενού (και της διαδικασίας στερεοποίησης). Ο αντικειμενικός σκοπός της εργασίας αυτής ήταν να παρουσιαστούν τα πειραματικά ευρήματα της συμπεριφοράς των υλικών του μετάλλου που καταλήγουν σε σχηματισμό κενού αέρα κατά τη στερεοποίηση κάποιων σιδηρούχων κραμάτων διαφορετικής σύστασης και διαφορετικών ρυθμών στερεοποίησης. Η διαδικασία της στερεοποίησης και οι μετατοπίσεις συγκρίνονται με αριθμητικά μοντέλα και με μοντέλα που έχουν χρησιμοποιηθεί παλαιότερα για κράματα αλουμινίου και χαλκού.

Πιο αναλυτικά, στην εργασία [Lagerstedt et al. 2005] τοποθετήθηκαν όργανα μέτρησης μετατόπισης (LVDTs) για να μετρηθεί το δημιουργούμενο χάσμα μεταξύ του χυτού μετάλλου και του καλουπιού, στο ίδιο ύψος/ στα ίδια σημεία που έγιναν και οι μετρήσεις θερμοκρασίας στο χυτό, δίνοντας το μέγεθος του κενού σαν συνάρτηση του χρόνου από τις μετακινήσεις του μετάλλου και του καλουπιού. Οι μετατροπείς μετατόπισης ήταν τοποθετημένοι ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, ξεχωριστά απ' το καλούπι χωρίς να συνδέονται με την πειραματική διάταξη εκτός από τους σωλήνες

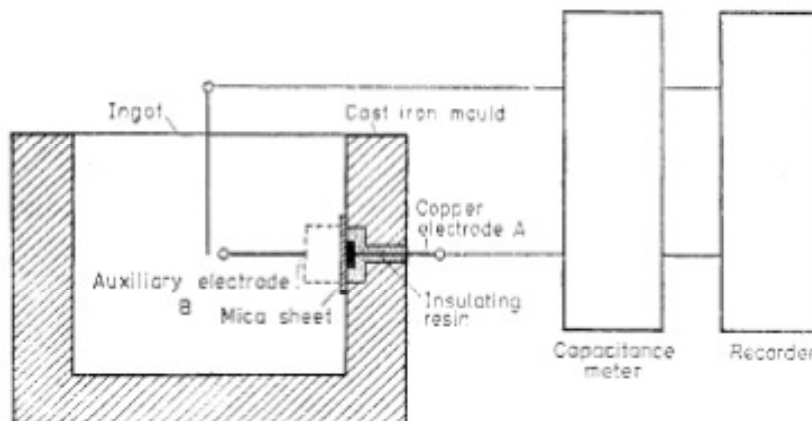
χαλαζία (quartz tubes). Για να ελέγχεται η συμμετρία, οι μετρήσεις έγιναν σε τρεις θέσεις της περιμέτρου του δαχτυλιδιού, ανά 120°. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο Σχ. 1.42.



Σχήμα 1.42 Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του σχηματιζόμενου κενού [Lagerstedt et al. 2005].

Στην εργασία [Majumdar et al. 1977], η βασική αρχή της μέτρησης της μεταβολής του σχηματιζόμενου κενού βασίζεται στη μεταβολή της ενεργούς χωρητικότητας πυκνωτή ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια. Το ένα είναι ενσωματωμένο στην επιφάνεια του καλουπιού και το άλλο στο στερεοποιούμενο και συστελλόμενο τοίχωμα του χυτού, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

Το μικρό κενό αέρα που σχηματίζεται ανάμεσα στο στερεοποιούμενο χυτό και την επιφάνεια του καλουπιού συνιστά μία ζώνη διηλεκτρικού, το πάχος της οποίας συνεχώς αυξάνει με τον χρόνο καθώς το χυτό ψύχεται και στερεοποιείται. Για την πρόληψη του βραχυκυκλώματος και κολλημάτων κατά την έγχυση του τήγματος, γίνεται επάλειψη μιας λεπτής στρώσης μονωτικού υλικού στην (κατεργασμένη με μεγάλη ακρίβεια) επιφάνεια του ηλεκτροδίου A (βλ. Σχήμα 1.43). Έτσι, το διηλεκτρικό για το οποίο μετράται η χωρητικότητα αποτελείται από μία στρώση μίκας με διορθωμένο πάχος δ_m και ένα μεταβλητό πάχος αέρα $\delta_{ag}(t)$. Τελικά, η έκφραση του σχηματιζόμενου κενού αέρα ($\delta_{ag}(t)$) συναρτήσει του χρόνου.

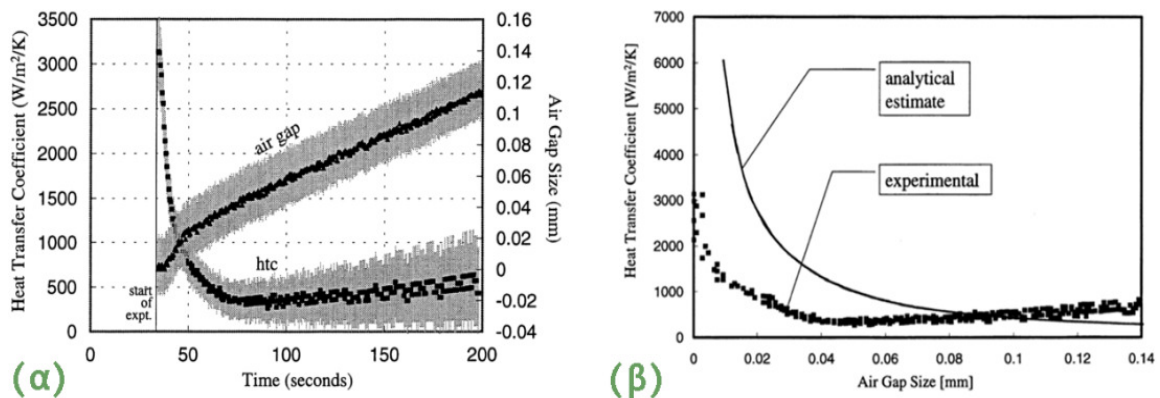


Σχήμα 1.43 Σχηματική παράσταση του κυκλώματος μέτρησης [Majumdar et al. 1977].

Αξίζει να αναφερθεί ακόμα μία δημοσιευμένη εργασία, αυτή των J. J. Shanley, et al. [Shanley et al. 1981]. Στην εργασία αυτό έγινε μια συγκριτική μελέτη για να διερευνηθεί η ακρίβεια δύο τεχνικών χύτευσης: φυγοκεντρικής και χύτευσης κενού-πίεσης για οδοντικές εφαρμογές. Χρησιμοποιήθηκε μία μεταλλική μήτρα αρχικά με 5 προκαθορισμένα σημεία αναφοράς στο οριζόντιο επίπεδο, τα οποία αναπαράχθηκαν στο υλικό επένδυσης. Τα χυτά παράχθηκαν με τις δύο τεχνικές. Και στα δύο χυτά αλλά και στα ομοιώματα μετρήθηκαν οι αποστάσεις των σημείων αναφοράς. Και με τις δύο μεθόδους, οι διαφορές ομοιωμάτων - χυτών ήταν σημαντικές, αλλά δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις δύο μεθόδους. Οι κατακόρυφες μετρήσεις σε τρία προκαθορισμένα σημεία έδειξαν επίσης ότι σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα χυτά. Άρα, η διαστασιακή ακρίβεια των δύο μεθόδων είναι παρόμοια.

Οι [Prates & Biloni 1972] και οι [Nishida et al. 1986] μέτρησαν τον ΣΜΘ (ΙΣΜΘs) βασιζόμενοι σε ποικιλία μεθόδων, όπως στη μέθοδο της βύθισης (immersion method), στη δοκιμή εύροιας (fluidity test), στη μονοκατευθυντική μέθοδο (unidirectional method) και στη διαδικασία μονοδιάστατης στερεοποίησης (one-dimensional solidification process) σε τύπο. Η διαδικασία σχηματισμού κενού (αέρος) και ο συνεπαγόμενος μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας διερευνήθηκαν με μέτρηση των μετατοπίσεων και των θερμοκρασιών για κυλινδρικά και επίπεδα χυτά από κράματα αλουμινίου.

Η συστηματική εργασία των [Trovant & Argyropoulos 2000] οδήγησε σε διαγράμματα ΣΜΘ συναρτήσεως του δημιουργούμενου κενού για χύτευση αρκετών διαφορετικών υλικών (κράματα αλουμινίου, κασσίτερο) σε μόνιμο καλούπι από χαλκό. Ο ΣΜΘ λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του όταν το χάσμα μεταξύ χυτού-καλούπιού είναι μηδενικό. Αύξηση του κενού προκαλεί πολύ έντονη πτώση της τιμής του ΣΜΘ. Παρατίθενται κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα στο Σχήμα 1.44. Προκύπτει πως είναι σημαντικότερη η διεξαγωγή πειραμάτων για την εκτίμηση του σχηματιζόμενου κενού και ως εκ τούτου και τον προσδιορισμό του ΣΜΘ, καθώς τα ευρήματα δείχνουν πως οι προβλέψεις από τα αναλυτικά μοντέλα απέχουν αρκετά από τα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 1.44 (α) ΣΜΘ και σχηματιζόμενο κενό συναρτήσεως του χρόνου και (β) ΣΜΘ συναρτήσεως του σχηματιζόμενου κενού [Trovant & Argyropoulos 2000].

Από μοντελοποίηση του σχηματισμού κενού με εμπορικά πακέτα λογισμικού έχει φανεί ότι τα μοντέλα αυτά έχουν δυσκολίες να αναπαράγουν τα πειραματικά ευρήματα, και ότι υπάρχει ανάγκη για επέκταση της περιγραφής της συρρίκνωσης κατά τη διαδικασία στερεοποίησης, όπως επισημαίνεται στην εργασία [Lagerstedt et al. 2005].

1.9.5 Επίδραση των Παραμέτρων της Χύτευσης στην Τιμή του ΣΜΘ

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας συναρτήσκει του χρόνου, μετά την έγχυση, είναι ο παράγων-κλειδί για τον έλεγχο της στερεοποίησης. Αρκετές μελέτες έχουν επιχειρήσει να ποσοτικοποιήσουν τον μεταβατικό ΣΜΘ της διεπιφάνειας, δίνοντας έμφαση σε διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή θερμότητας στη διεπιφάνεια κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης [Kai Ho & Robert D Pehlke 1985; C. Santos 2001]. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν τις θερμο-φυσικές ιδιότητες των υλικών που βρίσκονται σε επαφή, τη γεωμετρία του χυτού, τον προσανατολισμό της διεπιφάνειας σε σχέση με τη βαρύτητα (πίεση επαφής), τη θερμοκρασία του καλουπιού, τη θερμοκρασία έγχυσης, την τραχύτητα της επιφάνειας του καλουπιού που βρίσκεται σε επαφή και των επικαλύψεων του καλουπιού [C. A. Santos et al. 2004; W D Griffiths 1999; J.E. Spinelli et al. 2004; José E. Spinelli et al. 2004; Fardi Ilkhchy et al. 2012]

Στη διεθνή βιβλιογραφία, γίνεται συχνά λόγος για την επίδραση του πάχους και γενικότερα της γεωμετρίας του χυτού στον υπολογισμό του ΣΜΘ και πιο συγκεκριμένα για τη μεταβολή της μορφής της καμπύλης και του εύρους τιμών του ΣΜΘ ανάλογα με το σημείο τοποθέτησης του θερμοστοιχείου. Τα συνολικά αποτελέσματα της έρευνας σχετικά με την εξάρτηση του ΣΜΘ από το πάχος του χυτού, παρουσιάζονται στην εργασία [Zhi-peng et al. 2008].

Σε κάθε περίπτωση ο συντελεστής εμφανίζει μία απότομη αύξηση αμέσως μετά την έγχυση του μετάλλου μέχρι να φτάσει στη μέγιστη τιμή του και στη συνέχεια πέφτει σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα. Ωστόσο, απαιτείται περισσότερος χρόνος ώστε να πέσει σε χαμηλές τιμές, καθώς το πάχος του χυτού αυξάνεται. Γενικότερα το πάχος επηρεάζει κατά πολύ το προφίλ του συντελεστή.

Όσον αφορά τις υπόλοιπες παραμέτρους διαδικασίας, έγιναν οι εξής παρατηρήσεις: Η αρχική άνοδος της καμπύλης του συντελεστή θα πρέπει λογικά να επηρεάζεται από τον τρόπο πλήρωσης της κοιλότητας από το υγρό μέταλλο. Η επιρροή όμως αυτή, μειώνεται για μικρότερα πάχη. Η πίεση χύτευσης ελάχιστα επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης, επηρεάζει όμως τη μέγιστη τιμή του συντελεστή.

Γενικά, γίνεται σαφές ότι ο τρόπος μετάδοσης θερμότητας επηρεάζεται αρκετά από τη γεωμετρία, από τον τρόπο τοποθέτησης των τεμαχίων στο δέντρο, από το πάχος των τοιχωμάτων του χυτού και από τις επικαλύψεις του καλουπιού, αν χρησιμοποιούνται [Rafique & Iqbal 2009].

Οι θερμο-φυσικές ιδιότητες, το εύρος θερμοκρασιών στερεοποίησης και η ρευστότητα του μετάλλου χύτευσης, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το ΣΜΘ. Η ροή υγρού, όταν η απόσταση που διανύει το ρευστό δεν είναι αμελητέα, επηρεάζει τη μορφή των ισόθερμων καμπυλών της στερεοποίησης και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη [Cheung et al. 2009].

Ο [W D Griffiths 2000], μελέτησε τη διαφορετική τιμή του ΣΜΘ για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις στερεοποίησης μονής κατεύθυνσης. Προέκυψαν τρεις διαφορετικές μέγιστες τιμές ΣΜΘ για την κάθε περίπτωση: 7100W/m²K, 5000W/m²K και 3400W/m²K.

Από τη διερεύνηση της δημοσίευσης [Fardi Ilkhchy et al. 2012], προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα: Με αύξηση της πίεσης, άλλαξε η θέση των διακενώσεων στο χυτό. Αυτές σχηματίζονται πιο χαμηλά και εγκλωβίζονται μέσα στο χυτό τεμάχιο (που αποτελεί το τελικό προϊόν). Η μετάδοση θερμότητας από το χυτό προς το καλούπι βελτιώθηκε σημαντικά με την εφαρμογή πίεσης κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, η οποία εξασφαλίζει καλή επαφή μεταξύ καλουπιού και χυτού. Στην περίπτωση μη ύπαρξης/μη εφαρμογής πίεσης, ο ΣΜΘ μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και ο συσχετισμός τους είναι ο εξής: $h_i - 4559t^{-0.44}$. Καθώς η εξωτερική πίεση αυξάνει, ο ΣΜΘ αυξάνει επίσης. Εμπειρική σχέση που συσχετίζει τον ΣΜΘ με την εφαρμοζόμενη πίεση εξήχθη και είναι $h = 0.0011P^3 - 0.112P^2 + 6.605P + 2924.57$. Δεδομένα από τη βιβλιογραφία χρησιμοποιήθηκαν για να ελεγχθεί η αξιοπιστία της προτεινόμενης σχέσης. Οι Aweda and Adeyemi [Aweda & Adeyemi 2009] αποτίμησαν τον ΣΜΘ κατά τη διάρκεια του squeeze casting αλουμινίου. Τιμές δεδομένων από την προηγούμενη εργασία ελήφθησαν με χρήση του λογισμικού ψηφιοποίησης. Η προτεινόμενη σχέση εφαρμόστηκε στο εύρος της εργασίας τους και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα που διεξήχθησαν από αυτούς. Η εφαρμογή διαφορετικής πίεσης, μεταβάλλει τις μέγιστες τιμές του ΣΜΘ για το κράμα αλουμινίου από 2900W/m²K σε 3400W/m²K.

Η διερεύνηση της στερεοποίησης του κράματος αλουμινίου A356 κάτω από διαφορετικές περιπτώσεις άσκησης εξωτερικής πίεσης (άσκησης εξωτερικών φορτίων) δείχνει ότι η πίεση έχει αξιοσημείωτη επίδραση στις συνθήκες μετάδοσης θερμότητας στη διεπιφάνεια. Η κύρια επίδραση της πίεσης οφείλεται στη μεταβολή της επαφής μετάλλου-καλουπιού, η οποία ποικίλει από μία πλήρως ατελή επαφή σε μία τέλεια επαφή. Έτσι, καθώς η πίεση αυξάνει, αυξάνει και η πιθανότητα μίας τέλει επαφής και καταλήγει σε υψηλές ταχύτητες απόψυξης. Αυτά τα αποτελέσματα έχουν αποτυπωθεί σε αρκετές δημοσιεύσεις, ωστόσο ο συσχετισμός μεταξύ ΣΜΘ και εφαρμοζόμενης πίεσης δεν είχε προκύψει [Fardi Ilkhchy et al. 2012].

Τέλος, στη βραβευμένη μελέτη [R D Pehlke et al. 1998] της ομάδας του καθηγητή Pehlke υπολογίζεται -με χρήση πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικής προσομοίωσης- ο ΣΜΘ για αρκετά διαφορετικά σημεία ενός βιομηχανικού χυτού. Στα διαφορετικά σημεία της γεωμετρίας προκύπτει

διαφορετικός ΣΜΘ και ως προς τη μορφή και ως προς τις τιμές. Σε γενικές γραμμές, οι τιμές που προκύπτουν είναι συνάρτηση του χρόνου και έχουν μέγιστη τιμή τα $2000\text{W/m}^2\text{K}$ και φτάνουν μέχρι τα $300\text{W/m}^2\text{K}$.

1.9.6 Η μορφή του ΣΜΘ

Ο Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού είναι ένα μέγεθος που αποτυπώνει τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας καθόλη τη διάρκεια της στερεοποίησης και απόψυξης. Εφόσον, λοιπόν, περιγράφει ένα σύνθετο και μεταβατικό φαινόμενο, είναι λογικό ο ΣΜΘ να είναι μεταβλητός.

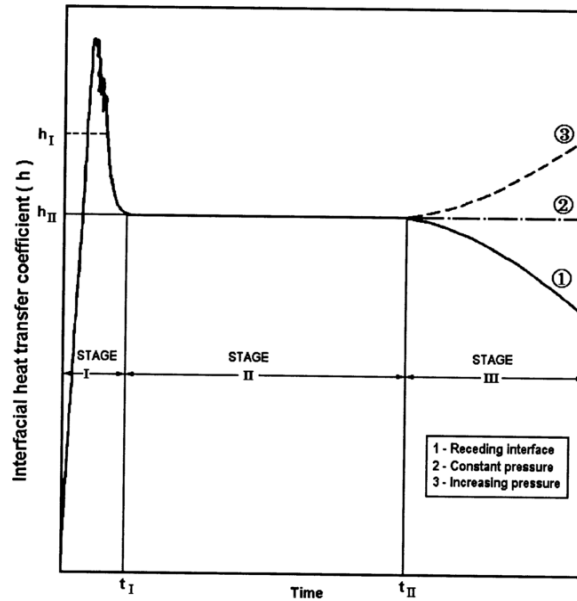
Τα λογισμικά προσομοίωσης της χύτευσης χρησιμοποιούν το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας ως οριακή συνθήκη διεπιφάνειας και δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει το συντελεστή ως σταθερή ποσότητα ή ως συνάρτηση του χρόνου ή ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Σε νεότερες εκδόσεις κάποιων προγραμμάτων υπάρχει δυνατότητα να ορίσει ο χρήστης το ΣΜΘ ως σύνθετη συνάρτηση θερμοκρασίας και πίεσης. Γενικά, είναι λίγες οι περιπτώσεις που οι εταιρείες λογισμικού προσομοίωσης της χύτευσης προτείνουν τιμές για το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας στη διεπιφάνεια. Αυτό που επισημαίνουν συνήθως είναι πως θα πρέπει να αλλάζει η τιμή του ΣΜΘ κατά την αλλαγή φάσης, δηλαδή κατά τη μετάβαση του μετάλλου από την υγρή στη στερεά φάση. Προτείνουν, βέβαια, τη διεξαγωγή ανεξάρτητων δοκιμαστικών πειραμάτων προκειμένου να προσδιοριστεί ο ΣΜΘ για την εκάστοτε μέθοδο χύτευσης και το κάθε κράμα.

Στις προηγούμενες παραγράφους έγινε αναφορά σε ερευνητικές εργασίες, εστιάζοντας στην ποιοτική επίδραση διαφόρων παραμέτρων στο ΣΜΘ. Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται ερευνητικές εργασίες που παρουσιάζουν με χαρακτηριστικό τρόπο τη μορφή του ΣΜΘ.

1.9.6.1 ΣΜΘ ως συνάρτηση του Χρόνου

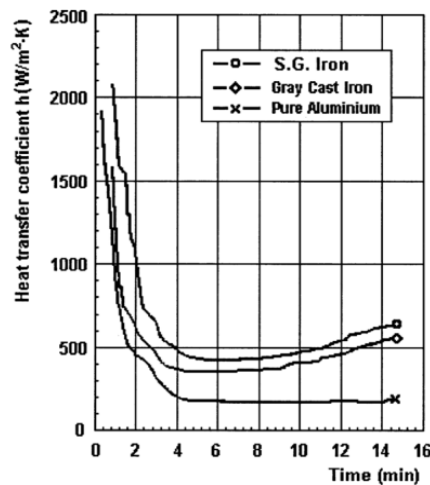
Η πιο χαρακτηριστική εργασία στην οποία προτείνεται και περιγράφεται η μορφή του ΣΜΘ είναι η εργασία [Lau, W B Lee, et al. 1998]. Οι συγγραφείς βασιζόμενοι στην προγενέστερη εργασία [Krishnan & Sharma 1994], προτείνουν για το συντελεστή τη μορφή του Σχήματος 1.45.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ο συντελεστής θεωρείται συνάρτηση του χρόνου και χωρίζεται σε τρία στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο (“Stage I”), που οριοθετείται από τις χρονικές στιγμές t_0 και t_I sec, ο συντελεστής λαμβάνει μία υψηλή κυμαινόμενη τιμή. Κατά το δεύτερο στάδιο (“Stage II”), δηλαδή για $t_I < t < t_{II}$, ο συντελεστής παραμένει σταθερός. Τέλος, κατά το τρίτο στάδιο (“Stage III”) ο συντελεστής μπορεί να αυξάνεται, να παραμένει σταθερός ή να μειώνεται. Αύξηση του ΣΜΘ κατά το τρίτο στάδιο υποδεικνύει αυξημένη πίεση επαφής στη διεπιφάνεια, ενώ μείωση της τιμής του ΣΜΘ υποδεικνύει αύξηση του δημιουργούμενου χάσματος (air gap) μεταξύ χυτού και καλουπιού.



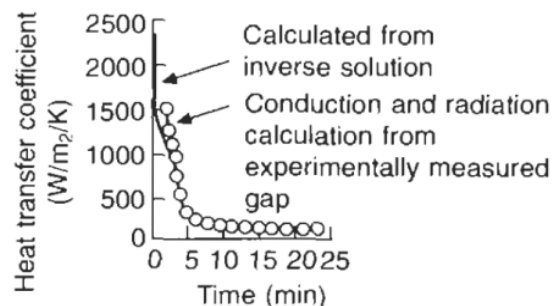
Σχήμα 1.45 Σχηματική αναπαράσταση του ΣΜΘ συναρτήσεϊ του χρόνου [Lau, W B Lee, et al. 1998].

Ο ΣΜΘ που υπολογίστηκε από τους συγγραφείς της συγκεκριμένης δημοσίευσης, με χρήση μετρήσεων θερμοκρασίας και μίας αντίστροφης διαδικασίας υπολογισμού, είναι αυτός που φαίνεται στο Σχήμα 1.46 και επιβεβαιώνει την προτεινόμενη από το Σχήμα 1.45 μορφή του συντελεστή.



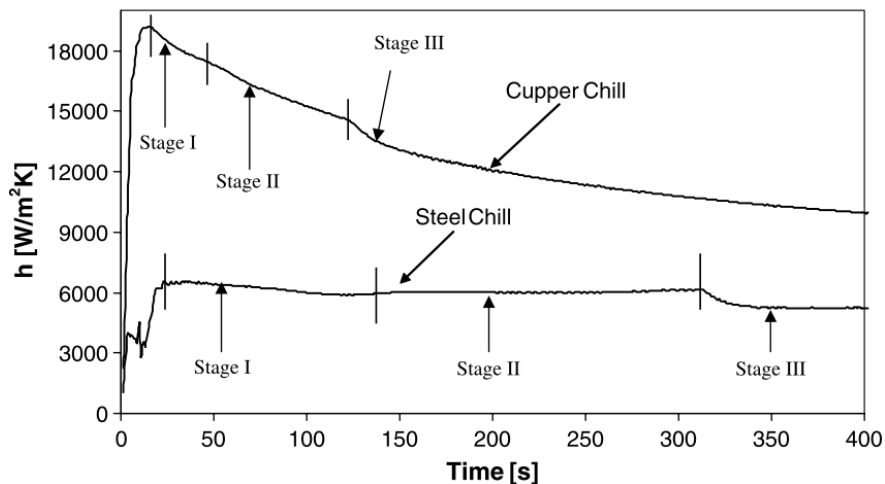
Σχήμα 1.46 Ο ΣΜΘ συναρτήσεϊ του χρόνου όπως υπολογίστηκε με βάση πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, από τους [Lau, W B Lee, et al. 1998].

Επίσης, ανατρέχοντας σε προγενέστερη εργασία [K Ho & Robert D. Pehlke 1984], επιβεβαιώνεται και πάλι η προαναφερθείσα μορφή.



Σχήμα 1.47 Ο ΣΜΘ για χύτευση αλουμινίου σε άμμο [K Ho & Robert D. Pehlke 1984].

Η ίδια μορφή για το ΣΜΘ αναφέρεται αναλυτικά και στην εργασία [Şahin et al. 2006], όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.48.



Σχήμα 1.48 Ο ΣΜΘ που υπολογίστηκε συναρτήσει του χρόνου στην [Şahin et al. 2006].

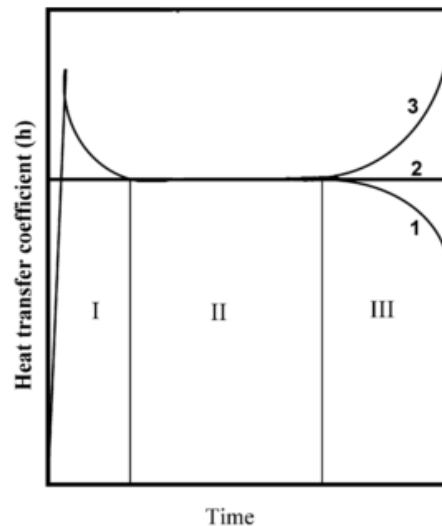
Στην εργασία αυτή, η οποία αναφέρεται σε στερεοποίηση αλουμινίου μονής κατεύθυνσης με χρήση ψύχοντος σώματος (chill) (α) από χαλκό και (β) από χάλυβα, φαίνεται και πάλι η διάκριση του ΣΜΘ σε τρία στάδια. Στην περίπτωση (α) είναι πολύ πιο εύκολη η διάκριση μεταξύ των σταδίων από ό,τι στην περίπτωση (β). Στο 1^ο στάδιο, το μέταλλο βρίσκεται σε υγρή φάση και έχει πάρα πολύ καλή πρόσφυση στην επιφάνεια του καλουπιού και του ψύχοντος σώματος. Η τιμή του ΣΜΘ στο 1^ο στάδιο λαμβάνει μέγιστη τιμή 19000 W/m²K στην περίπτωση (α) και 6500 W/m²K στην περίπτωση (β).

Το 1^ο στάδιο στην περίπτωση (α) διαρκεί 30sec λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας του χαλκού και στην περίπτωση (β) διαρκεί 120sec, λόγω της χαμηλότερης θερμικής αγωγιμότητας του χάλυβα. Τελικά, συμπεραίνεται πως το 1^ο στάδιο επηρεάζεται από αρκετές παραμέτρους, όπως από τη διαβροχή του καλουπιού από το τήγμα, από την αρχική θερμοκρασία του τήγματος, από την τραχύτητα του καλουπιού, τη θερμοκρασία του καλουπιού, την ορμή του τήγματος κατά την έγχυση, τη θερμική αγωγιμότητα του καλουπιού, την υδροστατική πίεση και την τύρβη του τήγματος.

Το 2^ο στάδιο, σύμφωνα πάντα με τους [Şahin et al. 2006], περιγράφει την κατάσταση στην οποία δεν υπάρχει πλέον καλή επαφή μεταξύ στερεοποιημένου χυτού και καλουπιού, λόγω της συστολής του χυτού. Επιπρόσθετα, η θερμική αγωγιμότητα του υγρού μετάλλου είναι μεγαλύτερη από αυτήν του στερεού. Γι αυτό και η τιμή του ΣΜΘ είναι πολύ μειωμένη σε σχέση με το 1^ο στάδιο. Παρατηρείται, ωστόσο, πως στην περίπτωση (α) υπάρχει μία πτωτική τάση της τιμής του συντελεστή, ενώ στην περίπτωση (β) ο συντελεστής παραμένει σταθερός. Αυτό υποδεικνύει πως στην περίπτωση (α) διατηρείται μία επαφή και μία εγγύτητα των υλικών που επιτρέπει την απαγωγή θερμότητας. Ο προσανατολισμός της στερεοποίησης, η θερμική αγωγιμότητα και η επιφανειακή τραχύτητα του ψύχοντος σώματος είναι οι σημαντικότερες παράμετροι που επηρεάζουν το 2^ο στάδιο.

Τέλος, το 3^ο στάδιο αφορά τη μετάδοση θερμότητας από το στερεοποιημένο χυτό προς το καλούπι. Ο ΣΜΘ συνεχίζει να μειώνεται στην περίπτωση (α), λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας του χαλκού. Από την άλλη μεριά, ο ΣΜΘ κατά το 3^ο στάδιο για την περίπτωση (β) παραμένει σταθερός. Γενικά, επισημαίνεται πως στο στάδιο αυτό, η επίδραση της συστολής του χυτού μπορεί να αντισταθμίζεται από τη διαστολή σωμάτων που έρχονται σε επαφή με το χυτό (καλούπι, ψύχοντα σώματα, καρδιές κλπ).

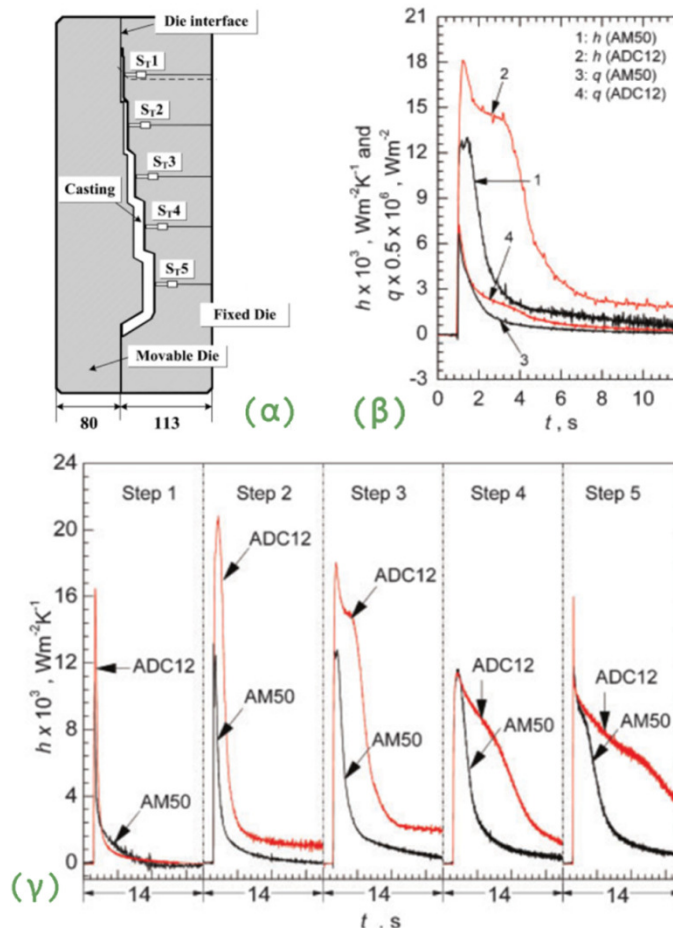
Η ίδια λογική για τη μορφή του ΣΜΘ ακολουθείται και από τους [Mirbagheri et al. 2007], όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.49. Από πλευράς φυσικών φαινομένων, αναφέρεται πως η πτώση του ΣΜΘ από το 1^ο στο 2^ο στάδιο οφείλεται στο σχηματισμό κενού αέρος μεταξύ χυτού και καλουπιού. Η διατήρηση σταθερής τιμής ΣΜΘ συμβαίνει, συνήθως, στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας και τέλος, αύξηση του ΣΜΘ κατά το 3^ο στάδιο συμβαίνει λόγω διαστολής του πυρήνα (καρδιάς) που έχει τοποθετηθεί στο χυτό.



Σχήμα 1.49 Η μορφή του ΣΜΘ όπως θεωρείται στην εργασία [Mirbagheri et al. 2007].

Στις εργασίες [Z.-P. Guo et al. 2009] και [Zhi-peng Guo et al. 2008] πραγματοποιήθηκε χύτευση υπό πίεση σε μόνιμο τύπο (HPDC) για την κατασκευή του βαθμιδωτού χυτού του Σχήματος 1.50α. Πιο συγκεκριμένα, το χυτό αποτελείται από πέντε περιοχές διαφορετικού πάχους (2, 5, 8, 11 mm και 14mm). Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά κράματα αλουμινίου, το ADC12 και το AM50. Το καλούπι ήταν από χάλυβα H13. Θερμοστοιχεία που ήταν τοποθετημένα εντός του καλουπιού, πολύ κοντά στο χυτό (στο 1mm και στα 6mm από τη διεπιφάνεια) κατέγραψαν τη θερμοκρασιακή εξέλιξη κατά τη χύτευση. Με χρήση της αντίστροφης μεθόδου του [J. V. Beck et al. 1985] πραγματοποιήθηκε αντίστροφος προσδιορισμός του ΣΜΘ για την κάθε περιοχή του χυτού. Προέκυψε πως το είδος του κράματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις τιμές του ΣΜΘ. Επιπλέον, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χυτού επηρεάζουν πολύ τόσο τη μορφή όσο και τις τιμές του ΣΜΘ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.50(β). Όσο λεπτότερο το τμήμα του χυτού, τόσο λεπτότερο και το προφίλ του ΣΜΘ. Για τις περιοχές μεγαλύτερου πάχους, η υψηλή τιμή του ΣΜΘ κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα διατηρείται περισσότερο. Σε κάθε περίπτωση, όπως δείχνουν τα Σχήματα 1.50(β) και 1.50(γ), ο συντελεστής

μετάδοσης θερμότητας στη διεπιφάνεια διατυπώνεται ως συνάρτηση του χρόνου και διακρίνεται σε 3 στάδια. Οι τιμές του ΣΜΘ είναι γενικά αυξημένες, δεδομένου ότι οι τιμές για το 1^ο στάδιο κυμαίνονται μεταξύ 12000 W/m²K (για το κράμα ADC12) και 22000 W/m²K (για το AM50) και οι τιμές του 2^{ου} και 3^{ου} σταδίου κυμαίνονται μεταξύ 1000-3500 W/m²K.

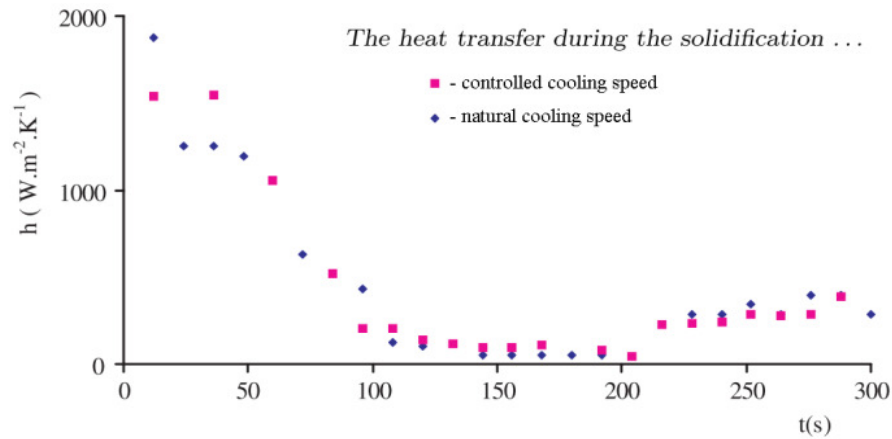


Σχήμα 1.50 (α) Η γεωμετρία χυτού, (β) ΣΜΘ και ροή θερμότητας που αντιστοιχούν στη μεσαία περιοχή του χυτού (μεγέθυνση) και (γ) Οι ΣΜΘ που υπολογίστηκαν για τις περιοχές διαφορετικής γεωμετρίας του χυτού, σύμφωνα με την εργασία [Z.-P. Guo et al. 2009].

Για τα δύο κράματα παρατηρήθηκε μία πολύ μεγάλη διαφορά μεταξύ των μέγιστων τιμών του ΣΜΘ. Η διαφορά αυτή είναι μεγαλύτερη για τις λεπτές διατομές του χυτού. Υψηλή τιμή ΣΜΘ υποδεικνύει καλή επαφή μεταξύ χυτού και καλουπιού και αυτή φαίνεται πως εξασφαλίζεται στις λεπτότερες περιοχές του χυτού.

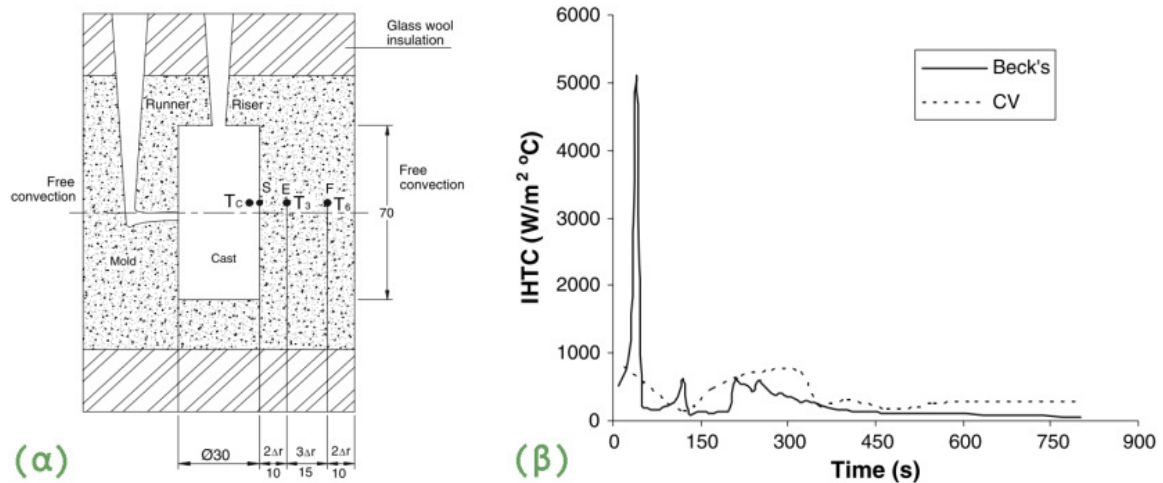
Στην εργασία [Moraru 2002] μελετάται η μονοκατευθυντική στερεοποίηση αλουμινίου (Al) ελάχιστης καθαρότητας 99.7%, σε κεραμικό καλούπι. Ο ΣΜΘ προσδιορίστηκε με βάση πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, για δύο περιπτώσεις ρυθμού απόψυξης. Επισημαίνεται η απώλεια πληροφορίας λόγω του αργού ρυθμού δειγματοληψίας. Παρόλα αυτά, παρατηρούνται ταλαντώσεις στις πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας κατά το 1^ο στάδιο, οι οποίες αποδίδονται στην τύρβη κατά την πλήρωση του καλουπιού με τήγμα. Ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.51. Φαίνεται καθαρά πως

και σε αυτήν την περίπτωση ο ΣΜΘ μεταβάλλεται με το χρόνο, διακρινόμενος σε 3 στάδια. Λαμβάνει μία υψηλή τιμή στα πρώτα δευτερόλεπτα ($1850 \text{ W/m}^2\text{K}$) που στη συνέχεια πέφτει στα $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$. Έπειτα η τιμή του ΣΜΘ πέφτει σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα τιμών ($130 \text{ W/m}^2\text{K}$) στα οποία παραμένει για περίπου 100 sec , μέχρι που τελικά αυξάνεται μέχρι τα $400 \text{ W/m}^2\text{K}$.



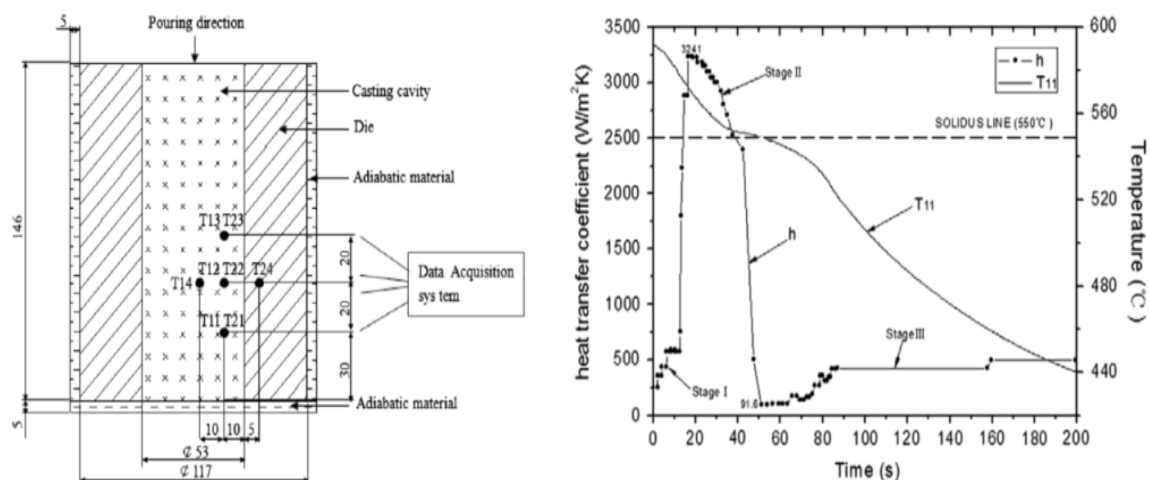
Σχήμα 1.51 Ο ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου κατά τη στερεοποίηση Al [Moraru 2002].

Στην εργασία [Rajaraman & Velraj 2007] πραγματοποιήθηκε χύτευση κράματος αλουμινίου σε άμμο και πραγματοποιήθηκε λήψη θερμοκρασιακών μετρήσεων εντός του χυτού και εντός του καλουπιού στις θέσεις που επισημαίνονται στο Σχήμα 1.52(α). Προσδιορίστηκε ο ΣΜΘ (Σχήμα 1.52(β)) με δύο διαφορετικές μεθόδους: την αντίστροφη μέθοδο του Beck και την τεχνική όγκων ελέγχου (“control volume technique”) που αναπτύσσεται αναλυτικά στη συγκεκριμένη δημοσίευση. Παρόλο που χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες πειραματικές μετρήσεις για τις δύο μεθόδους, φαίνεται πως η μορφή του ΣΜΘ εξαρτάται από τη μέθοδο υπολογισμού, ειδικά στο 1^ο στάδιο, με διαφορά της τάξης του 40-57%. Στην περίπτωση υπολογισμού του ΣΜΘ με τη μέθοδο του Beck εμφανίζεται μία υψηλή αρχική τιμή του ΣΜΘ, που ξεπερνά τα $5000 \text{ W/m}^2\text{K}$. Στην περίπτωση της τεχνικής των όγκων ελέγχου, η μέγιστη τιμή του συντελεστή φτάνει τα $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η τεχνική των όγκων ελέγχου θεωρείται ακριβέστερη, καθώς στη μέθοδο του Beck η εκτίμηση του ΣΜΘ βασίζεται στην υπόθεση σταθερής θερμορροής για μερικά βήματα της επαναληπτικής διαδικασίας. Έτσι, η μέγιστη τιμή στο Σχήμα 1.52(β) εξηγείται ως καθυστερημένη απόδοση της ροής θερμότητας των πρώτων δευτερολέπτων, σε ένα χρονικό βήμα. Αξιολογείται, δηλαδή, ως θέμα αριθμητικής φύσεως. Για τα επόμενα δευτερόλεπτα, οι τιμές του ΣΜΘ συμφωνούν περισσότερο μεταξύ τους. Παρόλα αυτά, στην πρώτη περίπτωση υπολογισμού, η μορφή του ΣΜΘ συμφωνεί περισσότερο με τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη χύτευση. Αυτό δε συμβαίνει για το συντελεστή που υπολογίστηκε με τη δεύτερη μέθοδο. Η ασυνέχεια που παρατηρείται στο 2^ο στάδιο της στερεοποίησης δε σχολιάζεται. Συμπερασματικά, και στις δύο περιπτώσεις, λοιπόν, μπορούν να διακριθούν τα τρία στάδια που αναφέρθηκαν νωρίτερα, απλά υπάρχει μία επιφύλαξη που προκύπτει από τη μέθοδο υπολογισμού.



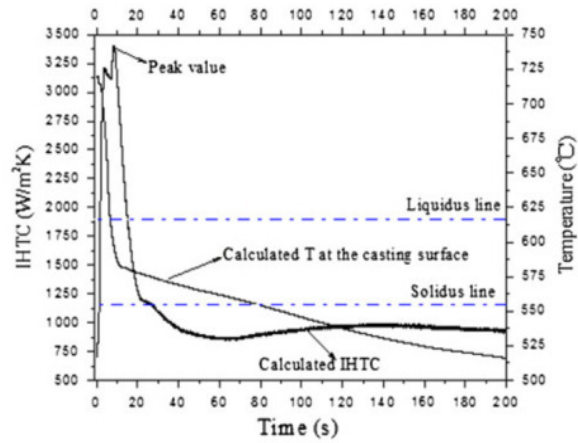
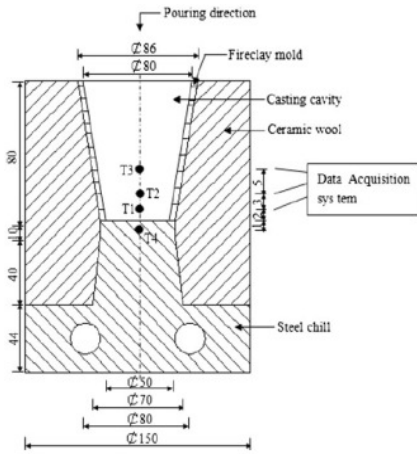
Σχήμα 1.52 (α) Η γεωμετρία χυτού και καλουπιού για χύτευση κράματος Al σε άμμο και (β) Ο ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου, στην εργασία [Rajaraman & Velraj 2007].

Στην πρόσφατη εργασία [L. Zhang et al. 2010], ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε για χύτευση της γεωμετρίας του Σχ. 1.53(α) είναι αυτός που φαίνεται στο Σχ. 1.53(β). Για άλλη μία φορά τα στάδια της μορφής του ΣΜΘ είναι τρία. Στο Σχ. 1.53(β) παρατηρείται μία μικρή διαφοροποίηση σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις: ως 1^ο στάδιο επισημαίνεται η αύξηση του ΣΜΘ μέχρι τη μέγιστη τιμή, ως 2^ο στάδιο θεωρείται η πτώση από τη μέγιστη τιμή και η διατήρηση σε μία χαμηλή τιμή και ως 3^ο στάδιο θεωρείται η αύξηση της τιμής του ΣΜΘ λόγω προσέγγισης χυτού-καλουπιού. Με άλλα λόγια, μπορεί να αλλάζει η ονοματοδοσία των σταδίων, αν και η ερμηνεία των σταδίων και των φυσικών φαινομένων είναι ακριβώς η ίδια. Η επιπρόσθετη πληροφορία που δίνει αυτή τη συγκεκριμένη εργασία είναι πως κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα υπάρχει μία υστέρηση στην επίτευξη της μέγιστης τιμής του ΣΜΘ, η οποία οφείλεται στη θερμική αντίσταση που προβάλλει το υλικό της επένδυσης που χρησιμοποιείται μεταξύ τήγματος και καλουπιού.



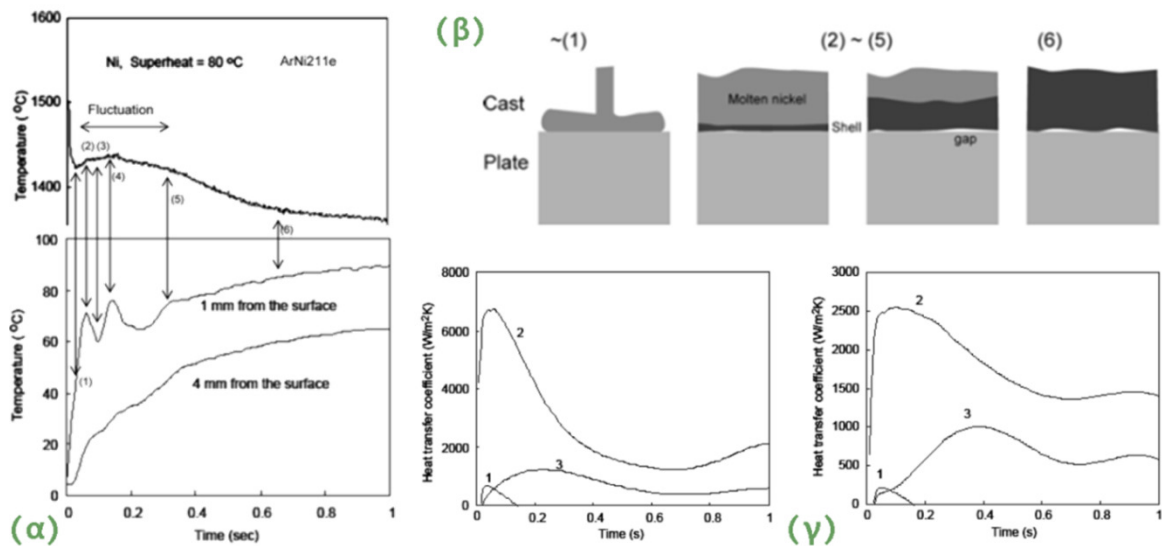
Σχήμα 1.53 (α) Η γεωμετρία του χυτού και (β) ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη θερμοκρασιακή κατανομή που ελήφθη από θερμοστοιχεία, στην [L. Zhang et al. 2010].

Από τους ίδιους συγγραφείς, στην εργασία [L. Zhang & L. Li 2013], προσδιορίζεται για το χυτό (βλ. Σχήμα 1.54(α)) ο ΣΜΘ (Σχήμα 1.54(β)).



Σχήμα 1.54 (α) Η γεωμετρία του χυτού και (β) ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη θερμοκρασιακή κατανομή που ελήφθη από θερμοστοιχεία, στην [L. Zhang & L. Li 2013].

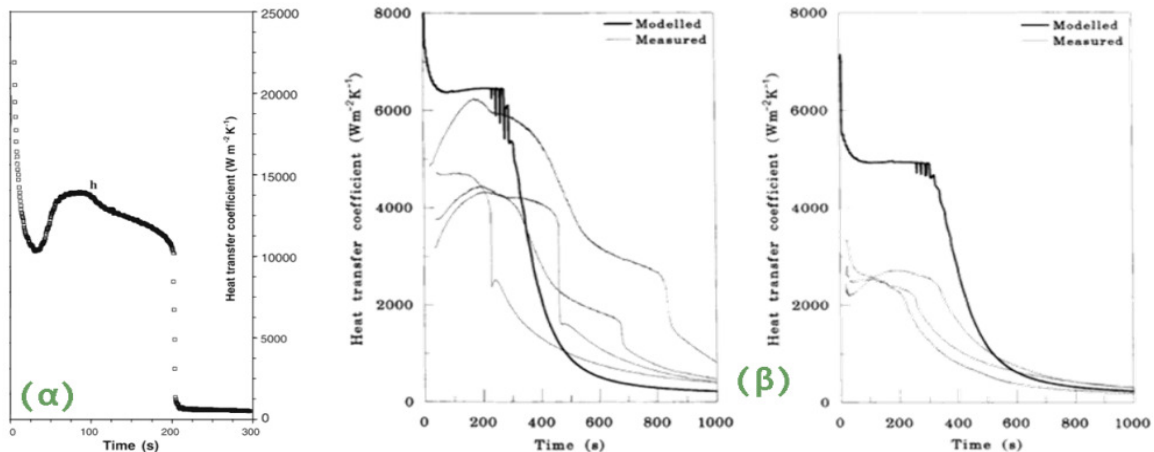
Στην εργασία [Todoroki & Phinichka 2009], με βάση τις μετρήσεις που φαίνονται στο Σχήμα 1.55(α), εκτιμήθηκε από τους συγγραφείς η ερμηνεία των φυσικών φαινομένων της στερεοποίησης (Σχήμα 1.55(β)) και προσδιορίστηκαν οι ΣΜΘ που φαίνονται στο Σχήμα 1.55(γ) (οι καμπύλες με την ένδειξη «2» είναι οι ΣΜΘ που μας ενδιαφέρουν). Επισημαίνεται πως παρόλο που πρόκειται για το ίδιο χυτό, επειδή αλλάζουν οι συνθήκες και άρα και ο τρόπος στερεοποίησης, ο ΣΜΘ -τόσο ως προς την τιμή του όσο και ως προς τη μορφή του- μεταβάλλεται έντονα.



Σχήμα 1.55 (α) Πειραματικές καμπύλες απόψυξης χυτού και καλουπιού, (β) Σχηματική απεικόνιση της εξέλιξης της στερεοποίησης και (γ) Τιμές ΣΜΘ [Todoroki & Phinichka 2009].

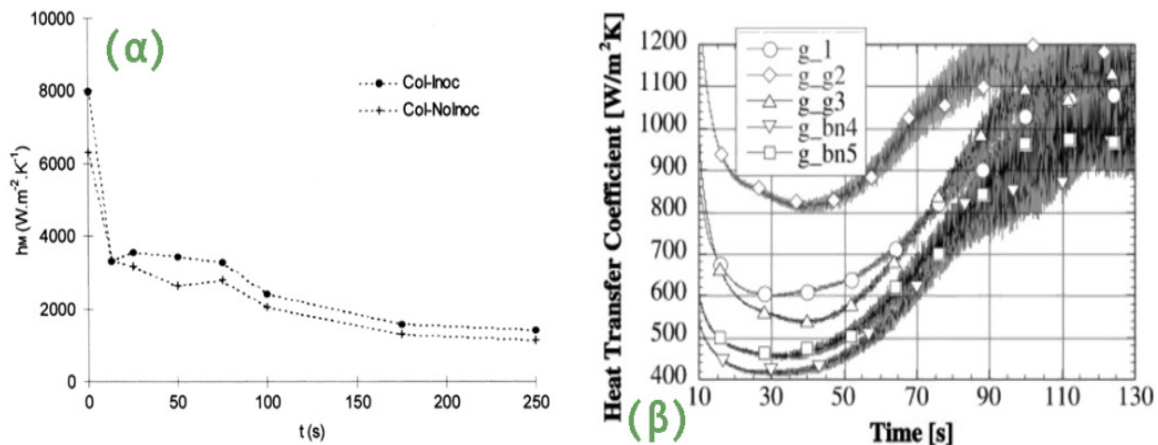
Στο ίδιο πνεύμα κινούνται και άλλες ερευνητικές εργασίες. Όπως έχει φανεί ήδη, σε όλες τις περιπτώσεις ο χρονικά μεταβαλλόμενος ΣΜΘ ακολουθεί τη μορφή των τριών σταδίων που περιγράφηκε. Ως προς τις τιμές, ωστόσο, φαίνεται πως υπάρχει ένα μεγάλο εύρος τιμών που χρησιμοποιείται. Η τιμή του συντελεστή εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων, που αφορούν άλλοτε το φυσικό πρόβλημα, άλλοτε τον τρόπο λήψης πειραματικών μετρήσεων και άλλοτε την αριθμητική μέθοδο προσδιορισμού του ΣΜΘ.

Κρίνεται σκόπιμο να παρατεθούν ακόμα μερικές περιπτώσεις προσδιορισθέντων ΣΜΘ, ώστε να υπάρχει όσο το δυνατόν πληρέστερη εικόνα ως προς το αποδεκτό εύρος τιμών. Στο Σχήμα 1.56 παρουσιάζονται ορισμένοι από τους προσδιορισθέντες συντελεστές μετάδοσης θερμότητας που υπολογίζονται ή χρησιμοποιούνται στις εργασίες [W. D. Griffiths & Kayıkcı 2007], [W D Griffiths 2000] και [W D Griffiths 1999]. Το διαφορετικό συγκεκριμένη περίπτωση είναι τα ιδιαίτερως αυξημένα επίπεδα τιμών, όχι μόνο κατά το 1^ο, αλλά και κατά το 2^ο στάδιο.



Σχήμα 1.56 Άποιοι από τους ΣΜΘ στις δημοσιεύσεις του καθ. W.D. Griffiths (α) [W. D. Griffiths & Kayıkcı 2007] και (β) [W D Griffiths 2000].

Παρομοίως και στην εργασία [Martorano 2000] (Σχ.1.57(α)), η τιμή του 1^{ου} σταδίου ανέρχεται στα 8000W/m²K, η τιμή στο 2^ο στάδιο είναι σαφώς μικρότερη, αλλά υψηλή (3800W/m²K) και τέλος, στο 3^ο στάδιο η τιμή του συντελεστή κυμαίνεται μεταξύ 1400-2000W/m²K. Στην εργασία [Sabau 2006] (Σχ.1.57(β)), παρατηρείται πως ο ΣΜΘ κατά το 3^ο στάδιο είναι ιδιαίτερως αυξημένος, με τιμές που ξεπερνούν αυτές του 1^{ου} σταδίου.



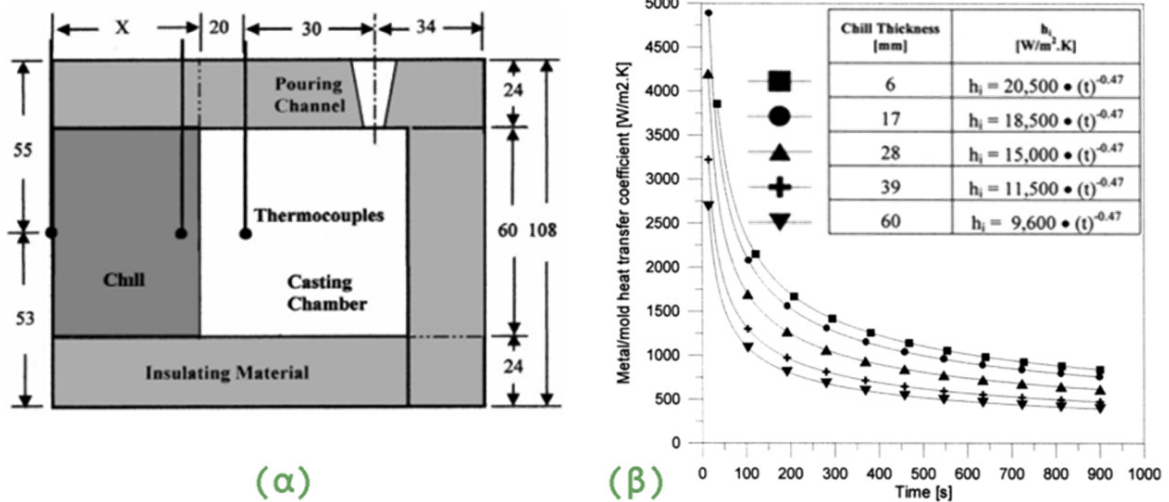
Σχήμα 1.57 Ο ΣΜΘ σύμφωνα με (α) [Martorano 2000] και (β).

Όλες οι εργασίες που αναφέρθηκαν μέχρι τώρα θεωρούσαν πως ο Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας στη διεπιφάνεια είναι συνάρτηση του χρόνου και ακολουθούσε τη μορφή των τριών σταδίων. Το πλεονέκτημα αυτής της θεώρησης είναι πως εμπεριέχει -στη γενική της έκφραση- τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη χύτευση. Στη συνέχεια, θα γίνει

αναφορά σε εργασίες που θεωρούν το ΣΜΘ συνάρτηση του χρόνου, αλλά πλέον η μορφή του είναι καθαρά εκθετική. Σε αυτήν την κατηγορία εργασιών, δε δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο συσχετισμό μορφής ΣΜΘ με τη φυσική του προβλήματος.

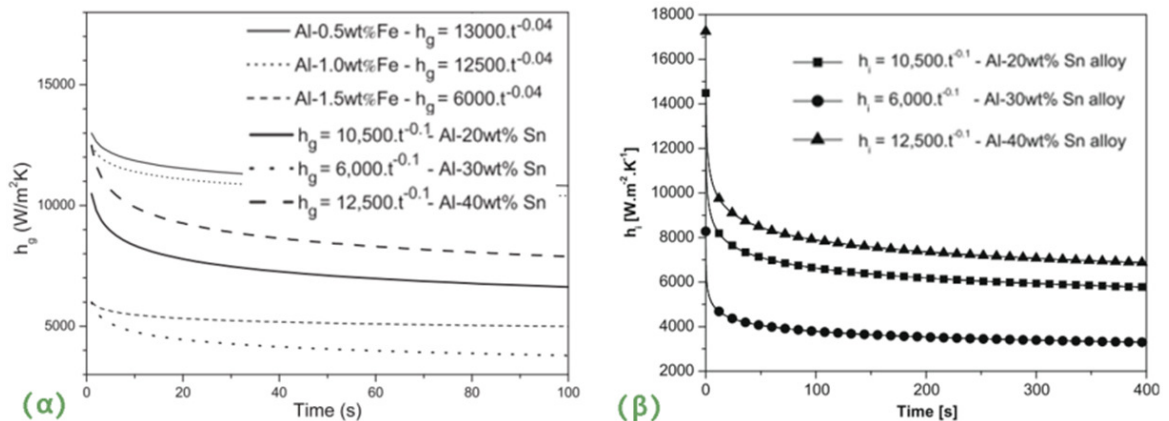
1.9.6.2 ΣΜΘ ως εκθετικός συντελεστής

Η θεώρηση, λοιπόν, του εκθετικού συντελεστή γίνεται στην εργασία [C. Santos et al. 2001]. Στη μονοκατευθυντική στερεοποίηση (unidirectional solidification) της εργασίας [C. Santos et al. 2001] που πραγματοποιήθηκε για κράματα Al-Cu και Sn-Pb, απλής γεωμετρίας (Σχήμα 1.58(α)) με ψύχοντα σώματα προέκυψε πως ο ΣΜΘ είναι εκθετική συνάρτηση του χρόνου της μορφής $h=at^{-\beta}$. Εξαρτάται έντονα από το υλικό, για παράδειγμα, για καθαρό αλουμίνιο $h=6800t^{-0.47}$, ενώ για το κράμα Sn5%Pb $h=18000t^{-0.47}$. Εξαρτάται, επίσης από το πάχος του ψύχοντος σώματος και από την αρχική θερμοκρασία του τήγματος (Σχήμα 1.58(β)).



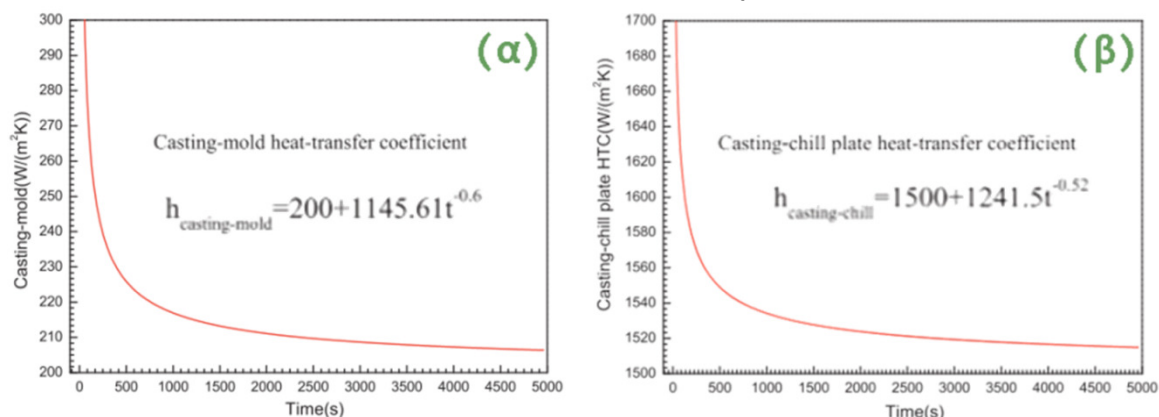
Σχήμα 1.58 (α) Η γεωμετρία του χυτού, (β) ο χρονικά μεταβαλλόμενος ΣΜΘ για διάφορες θερμοκρασίες έγχυσης τήγματος, σύμφωνα με την εργασία [C. Santos et al. 2001]

Ο ΣΜΘ έχει εκθετική μορφή σύμφωνα και με τις εργασίες [W. Zhang et al. 2010], [José E Spinelli et al. 2012] (βλ. Σχήμα 1.59(α)) και [Cheung et al. 2009], όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.59(β).



Σχήμα 1.59 Ο ΣΜΘ για χύτευση κράματος αλουμινίου σύμφωνα με την εργασία (α) [José E Spinelli et al. 2012] και (β) [Cheung et al. 2009].

Μία τελευταία εργασία που ανήκει στην κατηγορία δημοσιεύσεων με εκθετικής μορφής συντελεστή συναρτήσεως του χρόνου, είναι η [Y. Dong et al. 2011a] και οι συντελεστές φαίνονται στο Σχήμα 1.60.

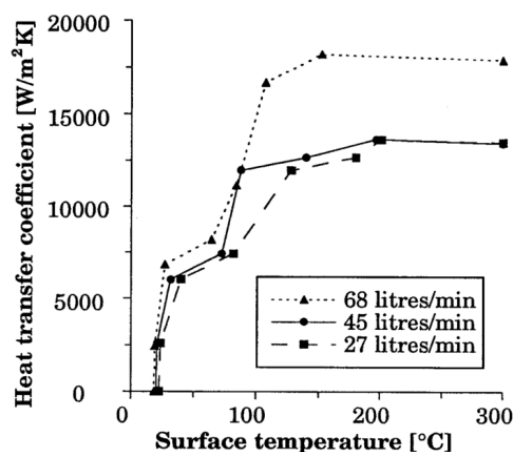


Σχήμα 1.60 Οι ΣΜΘ για χύτευση μονοκρυστάλλου κράματος DD6, (α) για τη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού και (β) για τη διεπιφάνεια χυτού-ψύχοντος σώματος [Y. Dong et al. 2011a].

1.9.6.3 ΣΜΘ ως συνάρτηση της θερμοκρασίας

Τέλος, υπάρχει η κατηγορία των δημοσιεύσεων που χρησιμοποιούν τη θεώρηση πως ο Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας στη διεπιφάνεια είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Ακολουθεί μία σύντομη αναφορά των ενδεικτικότερων σχετικών εργασιών, με κύριο στόχο τη συγκεντρωτική παρουσίαση της μορφής και των τιμών των προσδιορισθέντων ΣΜΘ.

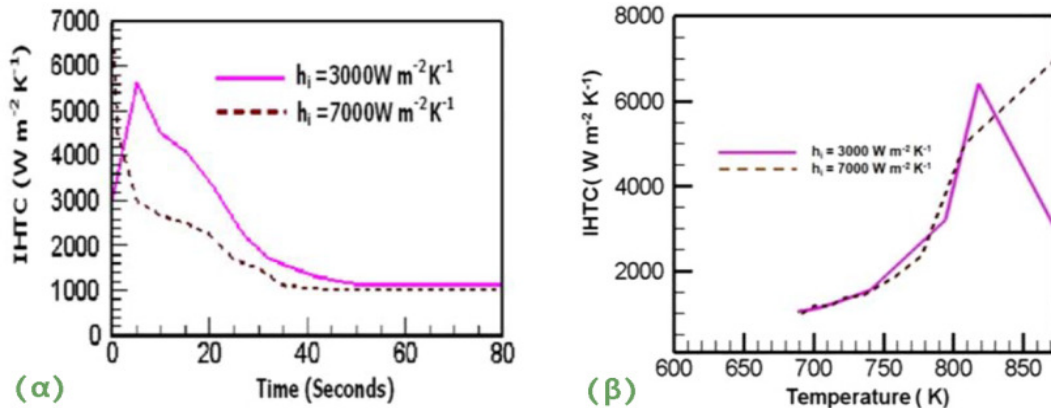
Στην πολύ σημαντική εργασία των [Rappaz et al. 1995], προτείνεται μία αντίστροφη μέθοδος προσδιορισμού του ΣΜΘ. Χρησιμοποιείται ο λεγόμενος “MAP algorithm - Maximum a Posteriori algorithm” και εφαρμόζεται σε έναν κώδικα ΠΣ για μετάδοση θερμότητας, προκειμένου να προσδιοριστεί ο ΣΜΘ. Η αριθμητική αυτή μέθοδος αναφέρεται και στο εγχειρίδιο χρήσης του ProCAST [ESI Group 2004]. Σκοπός της δημοσίευσης είναι η πρόταση της συγκεκριμένης αντίστροφης μεθόδου για προσδιορισμό άγνωστων θερμοφυσικών ιδιοτήτων γενικότερα (ΣΜΘ, θερμικής αγωγιμότητας κλπ). Στα πλαίσια αυτά, παρουσιάζεται ο ΣΜΘ μεταξύ καλουπιού και περιβάλλοντος, που φαίνεται στο Σχήμα 1.61.



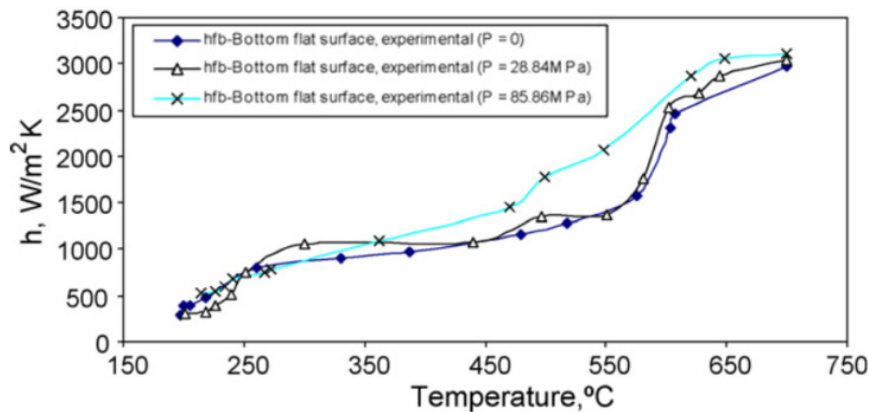
Σχήμα 1.61 Ο ΣΜΘ συναρτήσεως της θερμοκρασίας, για στερεοποίηση χάλυβα Ck45 εντός υδρόψυκτου κεραμικού καλουπιού, με διάφορους ρυθμούς απόψυξης [Rappaz et al. 1995].

Επισημαίνεται: (i) η βηματική μορφή του συντελεστή, που παραπέμπει στα φαινόμενα της χύτευσης που περιγράφηκαν νωρίτερα και (ii) οι υψηλές τιμές του συντελεστή, που φθάνουν τα $20000\text{W/m}^2\text{K}$.

Δύο ακόμα εργασίες στις οποίες ο ΣΜΘ θεωρείται συνάρτηση της θερμοκρασίας είναι η [Nayak & Sundarraaj 2009] και [Aweda & Adeyemi 2009], που παρουσιάζονται στα Σχήματα 1.62 και 1.63 αντίστοιχα.

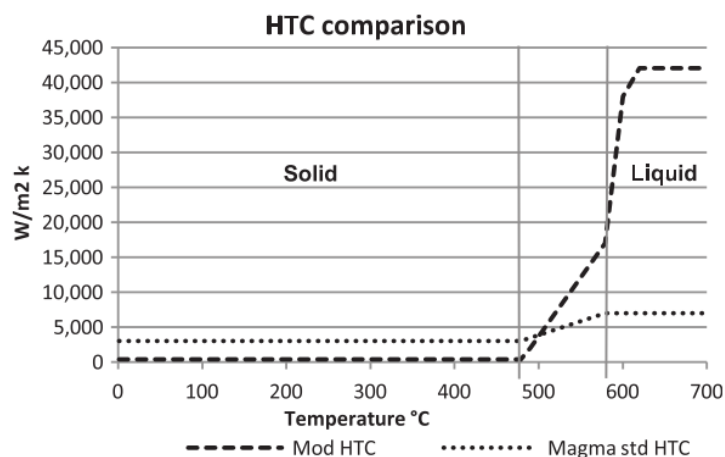


Σχήμα 1.62 Ο ΣΜΘ στην εργασία [Nayak & Sundarraaj 2009], αν θεωρηθεί (α) συνάρτηση του χρόνου και (β) συνάρτηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.63 Ο ΣΜΘ ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [Aweda & Adeyemi 2009].

Τέλος, μία χαρακτηριστική περίπτωση χρήσης ΣΜΘ συναρτήσει της θερμοκρασίας αποτελεί η εργασία [Long et al. 2011]. Για την αριθμητική προσομοίωση της χύτευσης χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό Magmasoft. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, χρησιμοποιήθηκε ο προτεινόμενος από το λογισμικό ΣΜΘ (απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 1.64 με τη διάστικτη γραμμή). Αναλυτικά οι τιμές του ΣΜΘ παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.10, στη στήλη “Std HTC”.



Σχήμα 1.64 Γραφική αναπαράσταση των ΣΜΘ που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία [Long et al. 2011].

Πίνακας 1.10 Πίνακας με τις τιμές τωψ ν ΣΜΘ στο [Long et al. 2011].

Temperature ($^{\circ}C$)	HTC $W/m^2 K$	
	Std HTC	Mod HTC
0	3000	400
479	3000	400
579	7000	17,000
600	7000	38,000
620	7000	42,000
700	7000	42,000

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης με τα αντίστοιχα πειραματικά, παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις. Για το λόγο αυτό, τροποποιήθηκε ο ΣΜΘ (βλ. διακεκομμένη γραμμή Σχήμα 1.64 και στήλη “Mod HTC” στον Πίνακα 1.10).

Σχετικά με τη μορφή του ΣΜΘ, εάν αυτός θεωρηθεί συνάρτηση της θερμοκρασίας, φαίνεται πως πρακτικά διακρίνεται σε τρεις περιοχές. Οι περιοχές αυτές οριοθετούνται από τις θερμοκρασίες Liquidus και Solidus. Υψηλή τιμή ΣΜΘ αποδίδεται στην περίπτωση που το μέταλλο βρίσκεται στην υγρή φάση και όταν στερεοποιείται, ο ΣΜΘ μειώνεται σημαντικά. Αξίζει να σημειωθεί πως ο προτεινόμενος ΣΜΘ (“Std HTC”) έχει αρκετά υψηλές τιμές, 7000 και 3000 $W/m^2 K$, που σημαίνει πως τόσο υψηλές τιμές θεωρούνται φυσιολογικές και προτείνονται για κάποιες μεθόδους χύτευσης. Ο τροποποιημένος ΣΜΘ, με τον οποίο επετεύχθη προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων, λαμβάνει ιδιαίτερως υψηλές τιμές (42000 $W/m^2 K$) στις υψηλές θερμοκρασίες, αλλά είναι πάρα πολύ μειωμένος (400 $W/m^2 K$) στις χαμηλές θερμοκρασίες.

1.10 Ελλιπώς Ορισμένα Αντίστροφα Προβλήματα

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μία αναφορά στα λεγόμενα «ελλιπώς ορισμένα αντίστροφα προβλήματα» ή “Ill-posed Inverse Problems”. Ανατρέχοντας στους ορισμούς των ελλιπώς ορισμένων προβλημάτων και των αντίστροφων προβλημάτων, προκύπτει πως το πρόβλημα του προσδιορισμού του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας κατά τη χύτευση, ανήκει στην κατηγορία αυτή.

1.10.1 Ελλιπώς ορισμένα προβλήματα (Ill-posed problems)

Σύμφωνα με τον J. Hadamard [Hadamard 1902], για να είναι ένα πρόβλημα αρχικών και συνοριακών τιμών «καλώς ορισμένο» ή «καλά τοποθετημένο» (“well-posed problem”), θα πρέπει:

1. Να υπάρχει λύση.
2. Η λύση να είναι μοναδική
3. Η λύση να είναι ευσταθής

Ένα «καλώς ορισμένο πρόβλημα» αρχικών τιμών έχει μία μοναδική λύση η οποία είναι συνεχής συνάρτηση των αρχικών συνθηκών.

Αν κάποια από τις συνθήκες αυτές δεν ισχύει, τότε το πρόβλημα είναι «ελλιπώς ορισμένο» ή «ελλιπώς τοποθετημένο» (“ill-posed problem”).

Τίθενται, σαφώς, ερωτήματα ως προς το κατά πόσο είναι κανείς σε θέση να γνωρίζει για κάποιο πρόβλημα την ύπαρξη λύσεων, τη μοναδικότητα της λύσης, την ευστάθεια και τον τρόπο εύρεσής της. Η απάντηση στα ερωτήματα αυτά πολλές φορές μπορεί να απαιτεί περίπλοκη διαδικασία. Αναφορικά με το πρόβλημα του προσδιορισμού του ΣΜΘ κατά τη χύτευση, απάντηση στα ερωτήματα αυτά δίνεται όχι μόνο από τη βιβλιογραφία, αλλά και από την πράξη (βλ. §6.6.5).

Στα ελλιπώς ορισμένα προβλήματα που δεν είναι ευσταθή, όπως είναι και το πρόβλημα προσδιορισμού του ΣΜΘ, μικρά επίπεδα θορύβου στην παράμετρο εισόδου μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες αποκλίσεις στη λύση [Mera et al. 2003]. Για το λόγο αυτό, για την αριθμητική λύση των συγκεκριμένων προβλημάτων, εφαρμόζονται οι λεγόμενες «μέθοδοι ομαλοποίησης» (“regularization methods”). Οι μέθοδοι ομαλοποίησης ποικίλουν. Συνήθως χρησιμοποιούνται στρατηγικές προσέγγισης μη-παραμετροποιημένες σε σχέση με διαταραχές στα δεδομένα και συγκλίνουν στη λύση του προβλήματος όταν τα επίπεδα θορύβου στα δεδομένα εισόδου είναι μηδενικά.

Οι μέθοδοι ομαλοποίησης για τον υπολογισμό ευσταθών λύσεων περιλαμβάνουν ένα ισοζύγιο μεταξύ ενός μέτρου ποιότητας της λύσης (για παράδειγμα, ομαλότητα της λύσης) και της ποιότητας της προσέγγισης στη δεδομένη απόκριση του προβλήματος [Tikhonov et al. 1995].

1.10.2 Αντίστροφα Προβλήματα

Ως «Αντίστροφο πρόβλημα» (“Inverse Problem”) χαρακτηρίζεται ένα πρόβλημα όταν δεν είναι πλήρως ορισμένα τα χαρακτηριστικά του προβλήματος αλλά είναι γνωστή η απόκριση σε ένα αίτιο.

Στην προκειμένη περίπτωση, ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός του ΣΜΘ που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της χύτευσης, ώστε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να ταιριάζουν με τις πειραματικές μετρήσεις. Με άλλα λόγια, είναι γνωστή η απόκριση του συστήματος (πειραματικές καμπύλες απόψυξης) και πρέπει να βρεθεί ο ΣΜΘ που οδηγεί στο αποτέλεσμα αυτό.

Τα αντίστροφα προβλήματα συνήθως χαρακτηρίζονται ως ελλιπώς ορισμένα προβλήματα. Η κλασική έννοια της επίλυσης ενός προβλήματος συνήθως παραπέμπει στην επίλυση ενός ευθέως προβλήματος [G. R. Liu & X. Han 2003]. Συνήθως τα αντίστροφα προβλήματα τοποθετούνται ως προβλήματα βελτιστοποίησης, όπου η συνάρτηση κόστους είναι το σφάλμα ως προς μία ποσότητα αναφοράς (που είναι ουσιαστικά η λύση του ευθέως προβλήματος) [Stavrulakis & Antes 1997].

Τα αντίστροφα προβλήματα αρχικά αντιμετωπιζόνταν εμπειρικά. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν αρκετές τεχνικές για την επίλυση τους. Για παράδειγμα, υπάρχουν μη-γραμμικές, επαναληπτικές διαδικασίες βελτιστοποίησης-κανονικοποίησης, που προσπαθούν να επιλέξουν μία από τις πολλές δυνατές λύσεις και να τη σταθεροποιήσουν, ώστε η διαφορά μεταξύ των αποκρίσεων (επιθυμητής-πειραματικής και τρέχουσας αριθμητικής) να ελαχιστοποιείται.

1.10.3 Χρήση Γενετικών Αλγορίθμων για την Επίλυση Ελλιπώς Ορισμένων Προβλημάτων

Στη δημοσίευση [Mera et al. 2003] διερευνήθηκε η χρήση γενετικών αλγορίθμων (ΓΑ) για επίλυση ελλιπώς ορισμένων προβλημάτων. Βρέθηκε πως, γενικά, οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν έχουν χαρακτήρα ομαλοποίησης και συνεπώς δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ομαλοποίηση ενός ελλιπώς ορισμένου προβλήματος, εάν ο κακός ορισμός του προβλήματος δεν αντιμετωπίζεται παράλληλα από μία άλλη μέθοδο. Με άλλα λόγια, αποκαλύφθηκε πως εάν δεν επιστρατευτεί κάποια επιπρόσθετη τεχνική ομαλοποίησης, τότε ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να παράξει -από τις πρώτες κιάλας γενιές- λύσεις με πολύ καλή προσαρμογή, αλλά που να είναι ασταθείς.

Οι ΓΑ μπορούν, λοιπόν, να συνδυαστούν επιτυχώς με άλλες μεθόδους, προκειμένου να ομαλοποιηθεί το ελλιπώς ορισμένο πρόβλημα, αλλά χρειάζεται προσοχή. Για παράδειγμα, υπάρχουν αλγόριθμοι ομαλοποίησης που παράγουν τόσο σταθερές όσο και ασταθείς λύσεις, και μεταξύ αυτών αναζητούν ένα καλό ισοζύγιο ευστάθειας και ακρίβειας. Ο ΓΑ δεν είναι αποδοτικός εάν συνδυαστεί με έναν τέτοιο αλγόριθμο. Αυτό συμβαίνει επειδή εάν ο ΓΑ εντοπίσει μία καλή αλλά ασταθή λύση, τότε είναι πιθανό

να εγκλωβιστεί εκεί μιας και θα είναι δύσκολο να δημιουργηθούν καλύτερα άτομα που να δίνουν σταθερή λύση.

Συνεπώς, οι ΓΑ θα πρέπει να εφαρμόζονται για την επίλυση ελλιπώς ορισμένων προβλημάτων, εάν είναι γνωστή επιπρόσθετη πληροφορία σχετικά με τη λύση. Αυτή η πληροφορία θα είναι ικανή να αποτρέψει το ΓΑ από το να εγκλωβιστεί σε ασταθή λύση. Αν και μια τέτοια πληροφορία δεν είναι πάντα διαθέσιμη, η μέθοδος είναι ιδιαίτερος χρήσιμη για αντίστροφα προβλήματα στα οποία η άγνωστη συνάρτηση μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά από τμηματικά γραμμικές συναρτήσεις ή υψηλόβαθμες πολυωνυμικές συναρτήσεις. Γενικά, η μέθοδος λειτουργεί αποτελεσματικά για συναρτήσεις που έχουν εκφράσεις μη-γραμμικές και περίπλοκες, και όπου οι κλασσικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης αποτυγχάνουν.

Η αναγκαία επιπρόσθετη πληροφορία που θα καταστήσει τον ΓΑ αποτελεσματικό για επίλυση ελλιπώς-ορισμένων προβλημάτων μπορεί να ξεκινήσει, για παράδειγμα, από τη γνώση κάποιων περιορισμών του προβλήματος. Κάθε επιπρόσθετη πληροφορία, ανάλογα με το πρόβλημα, μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί στο ΓΑ, δίνοντας ιδιαίτερη ευελιξία.

1.11 Γενετικοί Αλγόριθμοι για προσδιορισμό ΣΜΘ κατά τη χύτευση

Τα τελευταία λίγα χρόνια, αφού η χρήση της προσομοίωσης της χύτευσης καθιερώθηκε ως εργαλείο στα σύγχρονα χυτήρια, υπάρχει η τάση για χρήση βελτιστοποίησης. Η βελτιστοποίηση έχει ως στόχο την εύρεση βέλτιστων τιμών παραμέτρων χύτευσης, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Οι τελευταίες εκδόσεις των εμπορικών πακέτων προσομοίωσης της χύτευσης διαθέτουν τη δυνατότητα διασύνδεσης του λογισμικού προσομοίωσης με λογισμικά βελτιστοποίησης [Kokot & Bernbeck 2006], [Meneghetti et al. 1999].

Οι ερευνητικές εργασίες, ωστόσο, στη διεθνή βιβλιογραφία με χρήση βελτιστοποίησης είναι πολύ λίγες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εργασία [Meneghetti et al. 1999], κατά την οποία εφαρμόζεται γενετικός αλγόριθμος για εύρεση βέλτιστων συνθηκών χύτευσης προκειμένου να προκύψει χυτό με μέγιστη σκληρότητα σε συγκεκριμένα σημεία, ελάχιστο πορώδες σε άλλα και το μικρότερο δυνατό σύστημα τροφοδοσίας. Επειδή το υπολογιστικό κόστος είναι πολύ υψηλό, ο αριθμός των επαναλήψεων είναι σχετικά μικρός κι έτσι παρουσιάζονται αποτελέσματα μετά από 4 γενεές, με 16 άτομα ανά γενεά και μετά από 8 γενεές, με 16 άτομα ανά γενεά.

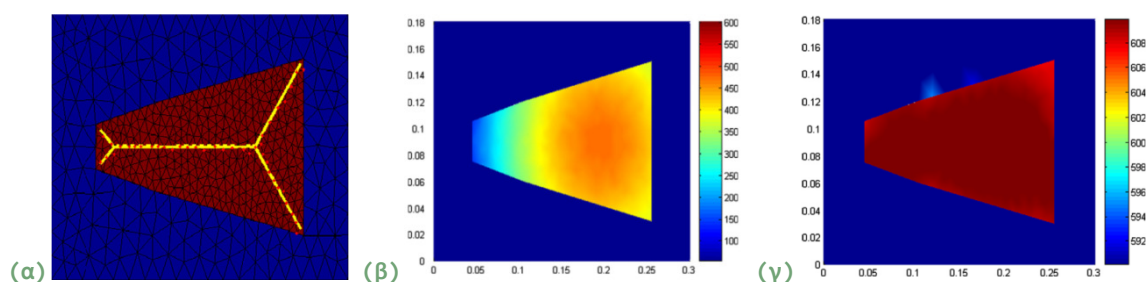
Η πιο συναφής εργασία με το αντικείμενο της παρούσας διατριβής, είναι η εργασία [Wong & Pao 2011]. Χρησιμοποιείται γενετικός αλγόριθμος για εύρεση βέλτιστου ΣΜΘ που πρέπει να επιβληθεί σε μία χύτευση βαρύτητας με μόνιμο καλούπι, για την επίτευξη κατευθυνόμενης στερεοποίησης.

Για τη συγκεκριμένη γεωμετρία (βλ. Σχήμα 1.65(α)) είναι αναμενόμενη η στερεοποίηση να ολοκληρωθεί ταχύτερα στην αριστερά πλευρά του χυτού, λόγω της μικρότερης της διάστασης (βλ. Σχήμα 1.65(β)). Το ζητούμενο της συγκεκριμένης μελέτης είναι να ευρεθεί πώς μπορεί να επηρεαστεί ο τρόπος στερεοποίησης με τεχνητό τρόπο, ώστε ολόκληρο το χυτό να έχει ίδιο χρόνο στερεοποίησης. Αναζητάται, συνεπώς, ο βέλτιστος συνδυασμός επιμέρους ΣΜΘ που αν επιβληθούν στις πλευρές του χυτού, θα υπάρξει ομοιόμορφη στερεοποίηση.

Η εργασία αυτή, μελετά τα αποτελέσματα για διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου, και για αρκετά μεγάλο πλήθος γενεών (100γενεές ανά περίπτωση βελτιστοποίησης). Ωστόσο, θα πρέπει να τονιστεί πως η χρησιμοποιούμενη προσομοίωση είναι δι-διάστατη (2D) και αφορά μία πολύ απλή γεωμετρία. Η απλοποίηση αυτή γίνεται επειδή έτσι μπορεί να υπολογιστεί η μετάδοση θερμότητας με αναλυτικό τρόπο.

Πρωτοτυπία της εργασίας αποτελεί η χρήση μίας τεχνικής που ονομάζεται «μετασχηματισμός ενδιάμεσου άξονα». Γίνεται η θεώρηση, δηλαδή, πως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επί του «ενδιάμεσου άξονα» (“Medial axis”) είναι ενδεικτικά των αποτελεσμάτων σε ολόκληρη τη γεωμετρία.

Τα αποτελέσματα επί του ενδιάμεσου άξονα χρησιμοποιούνται στην αντικειμενική συνάρτηση του ΓΑ, ως κριτήριο βελτιστοποίησης. Ο ΓΑ εκκινεί με τη θεώρηση ενιαίου ΣΜΘ σε όλη τη γεωμετρία (Σχήμα 1.65(β)), με σταθερή τιμή. Πρόκειται, δηλαδή, για μία ιδιαιτέρως απλουστευμένη θεώρηση. Το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης δίνει το βέλτιστο συνδυασμό σταθερών ΣΜΘ, που αν επιβληθούν στις πλευρές του χυτού, υπάρχει ομοιόμορφη στερεοποίηση σε όλη τη γεωμετρία (Σχήμα 1.65(γ)).



Σχήμα 1.65 Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία [Wong & Pao 2011]. (α) Με μπλε χρώμα απεικονίζεται το καλούπι, με καφέ το χυτό. Ο ενδιάμεσος άξονας της γεωμετρίας φαίνεται με κίτρινο χρώμα και με κόκκινες κουκίδες επισημαίνονται οι κόμβοι του πλέγματος που βρίσκονται πλησιέστερα στον ενδιάμεσο άξονα. (β) Η χρωματική απεικόνιση παρουσιάζει το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, με χρήση του βέλτιστου σταθερού ΣΜΘ. (γ) Αποτελέσματα προσομοίωσης με χρήση βέλτιστου συνδυασμού ΣΜΘ στην αριστερή και τη δεξιά πλευρά του χυτού.

Κεφάλαιο 2

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ - ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Η σελίδα αυτή έχει αφιεθεί σκοπίμως κενή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ - ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

2.1 Περιγραφή Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο 2 αναπτύσσεται το πειραματικό κομμάτι της διδακτορικής διατριβής, δηλαδή ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε και τα πειράματα που διεξήχθησαν.

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής ήταν πειράματα χύτευσης ακριβείας σε μηχανή χύτευσης κενού-υπερπίεσης.

Πιο συγκεκριμένα, η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των καλουπιών ήταν η τεχνική της χύτευσης χαμένου κεριού (lost wax casting, méthode de la cire perdue), με συμπαγή καλούπια (solid mould, moule en masse).

Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για την τήξη και την έγχυση του μετάλλου στο καλούπι ήταν μηχανή χύτευσης κενού-υπερπίεσης, με παροχή αδρανούς αερίου (Ar). Η μηχανή αυτή αποτελεί πρωτότυπη κατασκευή, ειδικά για τις ανάγκες της διατριβής και του εργαστηρίου.

Η ειδική τροποποίηση συνίσταται στην ειδική κατασκευή που παρέχει τη δυνατότητα χρήσης θερμοστοιχείων εντός της κοιλότητας του τύπου χύτευσης, με ταυτόχρονη εξασφάλιση του κενού εντός του θαλάμου χύτευσης. Επιπλέον, πέραν των βασικών, έχουν τοποθετηθεί στη μηχανή επιπλέον αισθητήρες κενού, αναλογικοί και ψηφιακοί, για παρακολούθηση των συνθηκών πίεσης κατά τη χύτευση.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα χύτευσης ήταν δύο κράματα χαλκού: ορείχαλκος 66.7%Cu+33.3%Zn και τριφασικό κράμα 64%Cu+24%Zn+12%Ni.

Πειράματα πραγματοποιήθηκαν με πλήθος συνδυασμών παραμέτρων χύτευσης. Οι παράμετροι χύτευσης που μελετήθηκαν ήταν η θερμοκρασία έγχυσης του τήγματος, η θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού, οι συνθήκες πίεσης στο θάλαμο τήξης μέσω παροχής αδρανούς αερίου και οι συνθήκες κενού στο θάλαμο της χύτευσης.

Σκοπός των πειραμάτων ήταν η εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων χύτευσης, η αναγνώριση των εμφανιζόμενων ατελειών και των αιτιών τους, η μελέτη της επίδρασης της κάθε μίας εκ των παραμέτρων χύτευσης στην ποιότητα του χυτού και η καταγραφή του θερμοκρασιακού πεδίου στο χυτό.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ως προς το πορώδες, τη συρρίκνωση και τις καμπύλες απόψυξης του χυτού συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης (Κεφάλαιο 3). Οι καμπύλες απόψυξης χρησιμοποιούνται στα Κεφάλαια 4 & 5 και αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας κατά τη χύτευση,

μεγέθους που χρησιμοποιείται για τη ρεαλιστική προσομοίωση της κατεργασίας.

Τα αποτελέσματα του πειραματικού μέρους παρουσιάζουν πρωτοτυπία, σε σχέση με τη συγκεκριμένη τεχνική χύτευσης, με τα συγκεκριμένα κράματα και γεωμετρία, αλλά και ως προς τη συστηματικότητα και το εύρος των συγκρινόμενων συνθηκών χύτευσης. Στη διεθνή βιβλιογραφία, οι σχετικές πληροφορίες είναι περιορισμένες και αναφέρονται σε διαφορετικά κράματα και τεχνικές. Ως εκ τούτου, αποτελούν μία συγκέντρωση πληροφοριών και γνώσεων, που μπορούν να αποτελέσουν εργαλείο για τη βελτίωση του σχεδιασμού και της εκτέλεσης της χύτευσης.

2.2 Χύτευση Ακριβείας: Εργαστηριακός Εξοπλισμός & Διαδικασία

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των καλουπιών ήταν η τεχνική της χύτευσης χαμένου κεριού (Lost Wax casting ή Investment Casting ή Precision Casting), με συμπαγή καλούπια (solid mould).

Η λογική στη χύτευση χαμένου κεριού είναι η κατασκευή ενός κέρινου ομοιώματος του τελικού χυτού, το οποίο θα αποδώσει το σχήμα της κοιλότητας στο υλικό (γύψος) του τύπου που θα το καλύψει. Ο τύπος ψήνεται, ακολουθώντας ειδικό κύκλο έψησης, ώστε (i) να λιώσει και να απομακρυνθεί πλήρως το κερί και (ii) να αποκτήσει ο γύψος επαρκή σκληρότητα, ώστε να αντέχει την υψηλή θερμοκρασία του λιωμένου μετάλλου που πρόκειται να εισέλθει σε αυτόν. Ο τύπος καταλήγει να έχει κατά το δυνατόν ομοιόμορφη θερμοκρασία, ίση με την επιθυμητή, για την εκτέλεση της χύτευσης. Έτσι, το καλούπι είναι έτοιμο για τη χύτευση.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα εργαλεία και τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο, στα πλαίσια της μεθόδου του χαμένου κεριού, καθώς επίσης και οι τεχνικές λεπτομέρειες για το κάθε στάδιο της διαδικασίας.

2.2.1 Εξοπλισμός χύτευσης - Χρησιμοποιούμενα μέσα

Για την εκτέλεση των πειραμάτων, ήταν απαραίτητα τα ακόλουθα μηχανήματα:

- Λαστιχέρα (Σχήμα 2.1(α))
- Κεριέρα (Σχήμα 2.1(β))
- Εξαερωτής (Σχήμα 2.1(γ))
- Αποκερωτής (Σχήμα 2.1(δ))
- Φούρνος ψησίματος (Σχήμα 2.1(ε))
- Μηχανή χύτευσης κενού (Σχήμα 2.1(στ))

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν και τα παρακάτω εργαλεία:

- Φλάσκα με λαστιχένια βάση και προστατευτικό κολάρο (Σχήμα 2.2(α))
- Κοπίδι ή Νυστέρι (Σχήμα 2.2(β))
- Κόφτης (Σχήμα 2.2(β))

- Ψαλίδι (Σχήμα 2.2(β))
- Μπολ ανάμιξης(Σχήμα 2.2(γ))
- Ηλεκτρικό κολλητήρι (Σχήμα 2.2(δ))



Σχήμα 2.1 (α) Λαστιχέρα, (β) Κεριέρα, (γ) Εξαερωτής, (δ) Φούρνος αποκέρωσης, (ε) Φούρνος ψησίματος, (στ) Μηχανή χύτευσης κενού-υπερπίεσης.



Σχήμα 2.2 (α) Η διάτρητη φλάσκα με τη λαστιχένια βάση και το λαστιχένιο κολάρο, (β) Νυστέρι, κόφτης και ψαλίδι, (γ) Μπολ ανάμιξης (δ) Κολλητήρι.

2.2.2 Εκτέλεση Πειραματικής διαδικασίας

Η περάτωση ενός πειράματος με τη μέθοδο της χύτευσης ακριβείας απαιτεί την εκτέλεση συγκεκριμένων βημάτων, δίνοντας προσοχή σε κάθε ένα αφού όλα είναι σημαντικά για το σωστό αποτέλεσμα. Τα βήματα της διαδικασίας, συνοπτικά (η εξειδικευμένη ορολογία εξηγείται στη συνέχεια), είναι:

Βήμα 1: Κατασκευή του αρχικού προτύπου

Βήμα 2: Κατασκευή του λαστιχένιου καλουπιού

Βήμα 3: Κατασκευή των κέρνων ομοιωμάτων

- Βήμα 4:** Συναρμολόγηση των κέρινων ομοιωμάτων για τη δημιουργία του δέντρου χύτευσης
- Βήμα 5:** Πλήρωση της «φλάσκας» με γύψο
- Βήμα 6:** Αποκέρωση
- Βήμα 7:** Ψήσιμο του «μούφλου» (καλουπιού)
- Βήμα 8:** Λιώσιμο του μετάλλου
- Βήμα 9:** Έγχυση του ρευστού μετάλλου στο θερμό καλούπι
- Βήμα 10:** Απομάκρυνση του γύψινου καλουπιού
- Βήμα 11:** Παραλαβή των χυτών

Στη συνέχεια, περιγράφεται το κάθε βήμα ξεχωριστά:

Βήμα 1: Κατασκευή του αρχικού προτύπου

Απαραίτητη είναι η κατασκευή ενός αρχικού προτύπου, ενός τεμαχίου όμοιου με το προς κατασκευή χυτό. Το πρότυπο πρέπει να κατασκευαστεί στο επιθυμητό σχήμα, με διαστάσεις τέτοιες που να περιλαμβάνουν τις προβλεπόμενες μεταβολές λόγω συρρίκνωσης του μετάλλου.

Η κατασκευή του προτύπου μπορεί να γίνει είτε με συμβατική κατεργασία αφαίρεσης υλικού (πχ τόννευση), είτε με ταχεία προτυποποίηση.

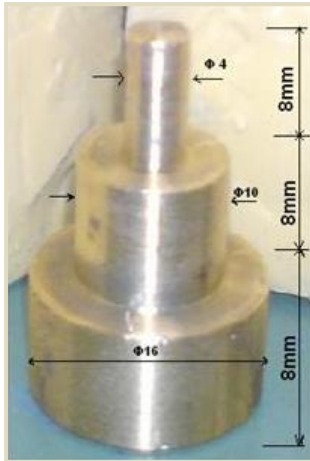
Το στάδιο αυτό είναι σημαντικό αφού επηρεάζει όλα τα επόμενα. Το υλικό που επιλέγεται είναι συνήθως κάποιο φθινό και εύκολα επεξεργάσιμο μέταλλο. Στην προκειμένη περίπτωση το πρότυπο κατασκευάστηκε από ορείχαλκο, στον τόρνο. Ο ορείχαλκος επιλέχθηκε επειδή είναι εύκολα κατεργάσιμος και μπορεί να αποκτήσει λεία επιφάνεια. Το σχήμα του ήταν αποτελούμενο από τρεις κυλινδρικές, ομοαξονικές διατομές, διαφορετικής ακτίνας, με διαστάσεις που φαίνονται στο Σχήμα 2.3.

Συνήθως, στο στάδιο αυτό κατασκευάζεται και ένα ομοίωμα της μπουκαδούρας, δηλαδή του οχετού έγχυσης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί (Σχήμα 2.4). Ο οχετός έγχυσης θα είναι χρήσιμος και για την έγχυση του κεριού στο λαστιχένιο καλούπι (Βήμα 3).

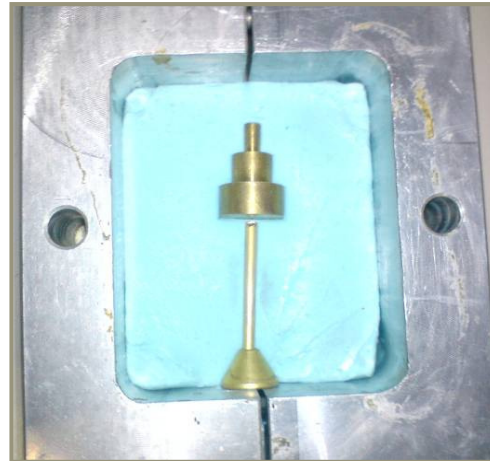
Βήμα 2: Κατασκευή λαστιχένιου καλουπιού

Η εκτέλεση του βήματος αυτού απαιτεί προσοχή. Το λαστιχένιο καλούπι κατασκευάζεται άπαξ και με βάση αυτό κατασκευάζονται μαζικά τα κέρινα ομοιώματα (βλ. Βήμα 3). Οποιαδήποτε ατέλεια του καλουπιού αναπαράγεται και στο κέρινο ομοίωμα και, συνεπώς, και στο τελικό αντικείμενο, το οποίο θα έχει τα ίδια ελαττώματα και επιφανειακές ιδιότητες.

Υπάρχουν πολλά είδη λάστιχων (ονομάζονται και «λάστιχα αποτύπωσης μοντέλου ή μοδέλου»), από φυσικά, μέχρι συνθετικά και λάστιχα σιλικόνης, με ποικιλία ιδιοτήτων. Οι χρήσεις τους ποικίλουν, ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής (πχ θερμοκρασία τήξης και απαιτούμενος χρόνος ψησίματος/βουλκανισμού), αλλά και ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε χύτευσης. Μερικά λάστιχα είναι περισσότερο εύκαμπτα και έχουν λιγότερες πιθανότητες να σπάσουν και να παραμορφώσουν το κέρι.



Σχήμα 2.3 Το πρότυπο και οι διαστάσεις του.



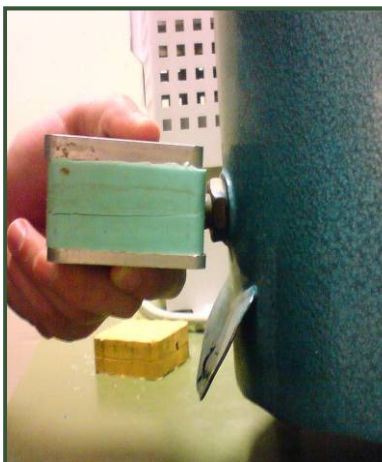
Σχήμα 2.4 Το πρότυπο και ο δευτερεύων αγωγός τροφοδοσίας, πάνω στις πρώτες στρώσεις λάστιχου.



Σχήμα 2.5 Τα δύο τμήματα του λαστιχένιου καλούπι, μετά το ψήσιμό του.



Σχήμα 2.6 Κερί σε μορφή σφαιριδίων, κατάλληλο για τήξη στην κεριέρα.



Σχήμα 2.7 Η έγχυση του κεριού στο λαστιχένιο καλούπι.



Σχήμα 2.8 Το σχηματιζόμενο κέρινο ομοίωμα, μαζί με τον δευτερεύοντα αγωγό τροφοδοσίας.

Άλλα κεριά είναι πιο σκληρά και παράγουν κέρινα ομοιώματα με καλύτερη επιφάνεια, αλλά είναι λιγότερο εύκαμπτα και έχουν περισσότερες πιθανότητες να σπάσουν. Ιδιαίτερα διαδεδομένο τα τελευταία χρόνια είναι και το υγρό λάστιχο σιλικόνης, που περιβάλλει το πρότυπο, στερεοποιείται και δεν απαιτεί ψήσιμο.

Υπάρχουν πολλά είδη λάστιχων (ονομάζονται και «λάστιχα αποτύπωσης μοντέλου ή μοδέλου»), από φυσικά, μέχρι συνθετικά και λάστιχα σιλικόνης, με ποικιλία ιδιοτήτων. Οι χρήσεις τους ποικίλουν, ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής (πχ θερμοκρασία τήξης και απαιτούμενος χρόνος ψησίματος/βουλκανισμού), αλλά και ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε χύτευσης. Μερικά λάστιχα είναι περισσότερο εύκαμπτα και έχουν λιγότερες πιθανότητες να σπάσουν και να παραμορφώσουν το κεριό. Άλλα είναι πιο σκληρά και παράγουν κέρινα ομοιώματα με καλύτερη επιφάνεια, αλλά είναι λιγότερο εύκαμπτα και έχουν περισσότερες πιθανότητες να σπάσουν. Ιδιαίτερα διαδεδομένο τα τελευταία χρόνια είναι και το υγρό λάστιχο σιλικόνης, που περιβάλλει το πρότυπο, στερεοποιείται και δεν απαιτεί ψήσιμο.

Από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους τύπους, είναι το λάστιχο σιλικόνης που παρέχει καλή ποιότητα κεριών, με καλή ποιότητα επιφάνειας και καθιστά εύκολη την απομάκρυνση των κεριών ομοιωμάτων από το καλούπι. Απαιτείται, ωστόσο, κάποια εμπειρία στη χρήση του, λόγω του ότι τα λάστιχα από σιλικόνη είναι πιο εύθραυστα. Για την κατασκευή των κεριών ομοιωμάτων του χυτού αντικειμένου του Σχήματος 2.3, το λάστιχο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το λάστιχο σιλικόνης VLT®, της εταιρείας CASTALDO. Πρόκειται για λάστιχο πολύ χαμηλής συρρίκνωσης (0.1%), θερμοκρασίας βουλκανισμού 71-82°C και επιμήκυνση 614% μέχρι τη θραύση. Αντικειμενικός στόχος είναι η αναπαραγωγή της μορφής του προτύπου (Βήμα 1) στο λάστιχο, ώστε αυτό να αποτελέσει το καλούπι για τη δημιουργία των κεριών ομοιωμάτων (Βήμα 3). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε, έχει ως ακολούθως.

Το πρότυπο τοποθετείται μεταξύ φύλλων λάστιχου, εντός μεταλλικού πλαισίου που το συγκρατεί. Το μεταλλικό πλαίσιο ονομάζεται «παντέφι». Το παντέφι αποτελείται από δύο αποσπώμενα μέρη, που προσφέρουν πλευρική συγκράτηση, και από μεταλλικές πλάκες, που τοποθετούνται πάνω και κάτω από τα λάστιχα. Τα λάστιχα, στην αρχική τους κατάσταση, είναι εύπλαστα. Συνεπώς, τοποθετούνται όσο πιο σταθερά γίνεται εντός του ειδικού μεταλλικού πλαισίου, ώστε να περιβάλλουν σταθερά το πρότυπο.

Στη συνέχεια, το παντέφι τοποθετείται στη λαστιχέρα, προκειμένου να εκκινήσει το ψήσιμο του λάστιχου. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται «βουλκανισμός».

Η λαστιχέρα (Σχήμα 2.1 (α)) αποτελείται από δύο παράλληλες μεταλλικές πλάκες. Οι πλάκες συμπιέζουν το παντέφι που τοποθετείται μεταξύ τους θερμαίνονται. Η θερμοκρασία των πλακών τις λαστιχέρας καθορίζεται,

ανάλογα με τις οδηγίες του κατασκευαστή του λάστιχου. Ένας τυπικός κύκλος βουλκανισμού μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον εξής κανόνα: 7.5min ψήσιματος για κάθε 3.2mm πάχους του λαστιχένιου καλουπιού. Προκύπτει ελάχιστος χρόνος ψήσιματος τα 30min και μέγιστος τα 75min. Τα βέλτιστα αποτελέσματα θα επιτευχθούν με ψήσιμο στους 152°C. Μετά την πάροδο του απαιτούμενου χρονικού διαστήματος, ακολουθεί απόψυξη και στερεοποίηση του λάστιχου.

Με τη διαδικασία του βουλκανισμού, το λάστιχο ρευστοποιείται και περιβάλλει πλήρως το πρότυπο. Έτσι, όταν στη συνέχεια στερεοποιείται, αποτυπώνεται σε αυτό με ακρίβεια οποιαδήποτε λεπτομέρεια του προτύπου.

Μόλις ολοκληρωθεί ο κύκλος θέρμανσης, απομακρύνεται το παντέφι που περικλείει το συμπαγές πλέον λάστιχο με το πρότυπο που πρέπει να αφαιρέσουμε. Για την εύκολη αποσυναρμολόγηση του πλαισίου γίνεται ο ψεκασμός του με λιπαντικό σπρέι πριν την τοποθέτηση του λάστιχου. Η αφαίρεση του μεταλλικού προτύπου γίνεται κόβοντας με ψαλίδι και κοπίδι το λάστιχο προσέχοντας να μην φθαρεί, για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες προτυποποιήσεις. Τα δύο τεμάχια λάστιχου που θα προκύψουν καλό είναι να διαθέτουν ίδιο πάχος για να έχουμε αργότερα καλύτερη πλήρωση της σχηματισμένης κοιλότητας με κερί. Αν χρειάζεται, στο σημείο αυτό γίνεται και διάνοιξη αγωγού τροφοδοσίας, όπως στο Σχήμα 2.5, που δεν είχε προβλεφθεί η τοποθέτηση μεταλλικής μπουκαδούρας.

Το στερεοποιημένο λάστιχο είναι ιδιαιτέρως ελαστικό και ανθεκτικό και η επιφάνειά του είναι εξαιρετικά λεία.

Βήμα 3: Κατασκευή κέρινων ομοιωμάτων

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την τήξη κεριού και την έγχυση του στην σχηματισμένη κοιλότητα του λαστιχένιου καλουπιού. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με την «κεριέρα» (Σχήμα 2.1(β)). Η κεριέρα του εργαστηρίου είναι μία κεριέρα λαδιού, χωρητικότητας 1Kg σε κερί, 300W-220V. Η κεριέρα είναι μία συσκευή αποτελούμενη από ένα κατακόρυφο κυλινδρικό δοχείο, το «δοχείο τήξης της κεριέρας», στο οποίο τοποθετείται το προς τήξη κερί. Αντιστάσεις θερμαίνουν εξωτερικά τη συσκευή. Τα τοιχώματα της κεριέρας έχουν υποδοχή, στην οποία εισάγεται το «λάδι κεριέρας», έλαιο που συντελεί στη διατήρηση σταθερής και ομοιόμορφης θερμοκρασίας εντός του δοχείου τήξης. Στο κάτω μέρος του δοχείου υπάρχει ειδικό ακροφύσιο, από το οποίο εξέρχεται κερί υπό πίεση. Υπάρχει η δυνατότητα για εφαρμογή πίεσης μέσα στο θάλαμο τήξης, πάνω από τη λεκάνη λιωμένου κεριού, ώστε να εξέρχεται το ρευστό κερί με μεγαλύτερη ταχύτητα. Η θερμοκρασία και η πίεση της κεριέρας ρυθμίζονται από τα ανάλογα όργανα.

Μόλις το κερί λιώσει, τοποθετείται το λαστιχένιο καλούπι μπροστά από το στόμιο έγχυσης και πιέζοντας το, εγχέεται το κερί που γεμίζει το αποτύπωμα του λαστιχένιου καλουπιού. Για ομοιόμορφη πλήρωση, καλό είναι το καλούπι να συγκρατείται με δυο μεταλλικές πλάκες στις δυο του

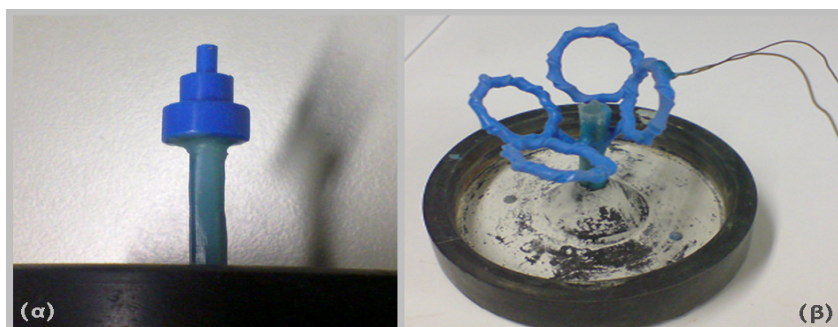
πλευρές. Μετά από μερικά λεπτά το κεριό στερεοποιείται. Ανοίγοντας το λαστιχένιο καλούπι και απομακρύνοντας προσεκτικά το κέρινο ομοίωμα, η διαδικασία ολοκληρώνεται. Το ίδιο λαστιχένιο καλούπι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή πολύ μεγάλου αριθμού κέρινων ομοιωμάτων. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στα υπολείμματα που αφήνουν τα κεριά κατά την απομάκρυνσή τους καθώς και στον καθαρισμό των λαστιχένιων καλουπιών, για την αποφυγή αναπαραγωγής ατελειών κατά την έγχυση του κεριού.

Το χρησιμοποιούμενο είδος κεριού πρέπει να διαθέτει την κατάλληλη σκληρότητα, ώστε να αναπαράγονται πιστά οι λεπτομέρειες του προτύπου, αλλά και μεγάλη ελαστικότητα ώστε να απομακρύνεται εύκολα από το λαστιχένιο καλούπι χωρίς να αλλοιώνεται ή να σπάει. Τέλος, το κεριό δεν πρέπει να αφήνει υπολείμματα πλούσια σε άνθρακα (carbonaceous residues), μετά την απομάκρυνσή του από το γύψινο καλούπι. Τα υπολείμματα αυτά μπορούν να επηρεάσουν τα χυτά αντικείμενα, δημιουργώντας ατέλειες ή πόρους.

Το κεριό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των κέρινων ομοιωμάτων ήταν το μπλε κεριό σε κόκκους (Σχήμα 2.6) “Royal Blue Wax” της εταιρείας SRS-Specialist Refractory Services Ltd, με θερμοκρασία τήξης τους 74°C. Πρόκειται για ένα κεριό πολύ εύκαμπτο, χαμηλής συρρίκνωσης, μέτριας εύροιας, με το οποίο κατασκευάζονται κέρινα ομοιώματα εξαιρετικά λείας επιφάνειας. Οι μπουκαδούρες, δηλαδή οι κεντρικοί αγωγοί έγχυσης, κατασκευάστηκαν με πράσινο κεριό γενικής χρήσης (Green Castaldo SuperCera Injection Wax) χαμηλότερου σημείου τήξης (θερμοκρασία τήξης στους 65°C). Κάτι τέτοιο συνιστάται από τους κατασκευαστές, ώστε να λιώνει και να απομακρύνεται ταχύτερα από ό,τι το κεριό των ομοιωμάτων, ώστε να αποφεύγεται η εμφάνιση τάσεων και, συνεπώς, η πιθανότητα σπασίματος του γύψου.

Βήμα 4: Συναρμολόγηση των κέρινων ομοιωμάτων για τη δημιουργία του δέντρου χύτευσης

Στο στάδιο αυτό, έχοντας έτοιμα τα κέρινα ομοιώματα, αυτά συναρμολογούνται για την κατασκευή του λεγόμενου «δέντρου χύτευσης» (“casting tree”). Πρόκειται για ένα συναρμολόγημα που αποτελείται από τη λεκάνη εισόδου και τον κεντρικό αγωγό έγχυσης (ή κύριος αγωγός τροφοδοσίας ή κύρια μπουκαδούρα), στον οποίο συγκολλούνται τα «κλαδιά» του δέντρου, δηλαδή τα κέρινα αντικείμενα, με τις δευτερεύουσες μπουκαδούρες τους (δευτερεύοντες αγωγοί έγχυσης). Ο τρόπος συναρμολόγησης του δέντρου, καθώς και το σχήμα και οι διαστάσεις αγωγών έγχυσης που αποτελούν το σύστημα τροφοδοσίας, χρήζουν ειδικής μελέτης. Για τη συναρμολόγηση του κέρινου δέντρου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάποια βοηθητικά εξαρτήματα, όπως η λαστιχένια βάση (Σχήμα 2.9), για τη στήριξη της κεντρικής μπουκαδούρας.



Σχήμα 2.9 Κέρινο δέντρο χύτευσης (α) με τη βασική χρησιμοποιούμενη γεωμετρία και (β) με τεμάχια που κατασκευάστηκαν για εξοικείωση με τη διαδικασία.

Βεβαίως, στη συγκεκριμένη περίπτωση, το δέντρο χύτευσης είναι πολύ απλό. Αποτελείται από έναν μόνο «κλάδο». Ο κεντρικός αγωγός έγχυσης καταλήγει στο τεμάχιο. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δέντρου χύτευσης επιλέχθηκαν με βάση τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς που επέβαλε ο διαθέσιμος εξοπλισμός.

Σε κάποια από τα πειράματα, η κέρινη κύρια μπουκαδούρα ήταν εκ κατασκευής ενωμένη με το κέρινο ομοίωμα του τελικού προϊόντος (Σχήμα 2.8 & 2.9). Σε κάποιες άλλες, περιπτώσεις, όμως, η κατασκευή της μπουκαδούρας και του αντικειμένου έγινε ανεξάρτητα (Σχήμα 2.4). (Σημείωση: είχαν κατασκευαστεί εξαρχής αρκετά λαστιχένια καλούπια για το ίδιο αντικείμενα, τόσο για επιτάχυνση της διαδικασίας, όσο και για δοκιμή διαφορετικών μεθόδων τροφοδοσίας). Στην περίπτωση ανεξάρτητης κατασκευής, τα δύο τεμάχια συγκολλήθηκαν με τοπική θέρμανση του κεριού στο σημείο ένωσης, με τη βοήθεια κολλητηριού (Σχήμα 2.2(δ)). Είναι σημαντικό η ένωση του δευτερεύοντος αγωγού στον κεντρικό αγωγό να είναι ομαλή και λεία χωρίς απότομες γωνίες και κενά.

Βήμα 5: Γέμισμα της φλάσκας με γύψο και Εξαέρωση

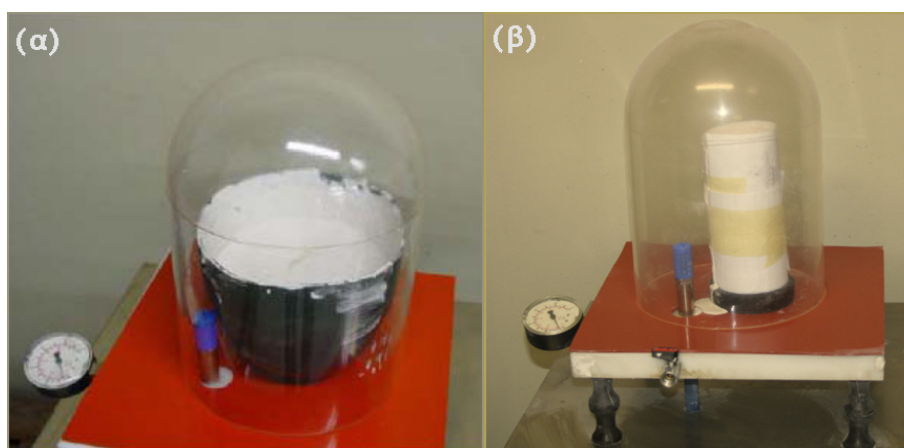
Αφού ετοιμαστεί το δέντρο χύτευσης πάνω στη λαστιχένια βάση (Σχήμα 2.9), είναι η ώρα το κέρινο δέντρο να περιβληθεί από το γύψο δηλαδή, το υλικό του καλούπιού. Επειδή πρόκειται για συμπαγές καλούπι (solid mould), τοποθετείται -πάνω στη λαστιχένια βάση και γύρω από το κέρινο δέντρο- ένα μεταλλικό κυλινδρικό πλαίσιο ώστε να οριοθετήσει το καλούπι και να συγκρατήσει το γύψο. Το μεταλλικό αυτό πλαίσιο ονομάζεται «μούφλο» ή «φλάσκα». Η φλάσκα συνήθως είναι διάτρητη, ώστε να διευκολύνεται η απομάκρυνση της υγρασίας από το γύψο. Γύρω από τη μεταλλική φλάσκα τοποθετείται ένα λαστιχένιο κολάρο το οποίο δεν επιτρέπει τη διαφυγή του υγρού γύψου από τις τρύπες της φλάσκας. Παρασκευάζεται το μίγμα γύψου και νερού σύμφωνα με τις οδηγίες των κατασκευαστών και εγχέεται μέσα στη φλάσκα. Ο υγρός γύψος καλύπτει πλήρως το κέρινο ομοίωμα και στερεοποιείται γύρω από αυτό.

Η προετοιμασία της φλάσκας (μούφλου) δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία και δεν απαιτεί μεγάλη εξειδίκευση. Εντούτοις πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στην προετοιμασία και στην παρασκευή του γύψου. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να ακολουθούνται οι οδηγίες του κατασκευαστή του γύψου. Τα βήματα για το γέμισμα είναι:

a. Παρασκευή του ρευστού γύψου: Η απαιτούμενη ποσότητα γύψου σε μορφή σκόνης και απιονισμένου νερού που απαιτούνται για το μίγμα, υπολογίζονται με βάση τις διαστάσεις του μούφλου, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Οι διαστάσεις και ο όγκος του μούφλου είναι: Διάμετρος: $d=72$ mm, Ύψος: $h=80$ mm, Όγκος: $V= 324227.3$ mm³.

Ο γύψος που χρησιμοποιήθηκε ήταν της εταιρείας “Ransom & Randolph” τύπου “R&R® Argentum™ Investment”. Σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή του γύψου η αναλογία για την παρασκευή του μίγματος είναι:

Μάζα γύψου= 413.65 gr
Όγκος απιονισμένου νερού= 160.15 ml.



Σχήμα 2.10 Η απαέρωση (α) του μίγματος γύψου και (β) του μούφλου.

Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάμιξη των δυο συστατικών στο ειδικό μπολ (Σχήμα 2.2(γ)). Ο γύψος προστίθεται σταδιακά στο νερό και αναμιγνύεται για 3-4 min μέχρι το μίγμα να γίνει ομοιογενές και ρευστό.

b. Εξαέρωση του μίγματος γύψου: Στο μίγμα γύψου υπάρχει ποσότητα εγκλωβισμένου αέρα, η οποία είναι επιθυμητό να απομακρύνεται. Εάν εγχυθεί ο γύψος γύρω από το κέρινο δέντρο χωρίς να εξαερωθεί, τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης φυσαλίδας αέρα στην επιφάνεια της κοιλότητας του καλουπιού και συνεπώς εμφάνιση ατέλειες στο χυτό.

Για την απαέρωση χρησιμοποιείται ειδικό μηχάνημα, ο «εξαερωτής». Ο εξαερωτής του εργαστηρίου φαίνεται στο Σχήμα 2.1(γ) και αποτελείται από τον πάγκο εξαέρωσης, τη γυάλα εξαέρωσης και την αντλία κενού. Στον πάγκο εξαέρωσης υπάρχει ειδική τράπεζα, με λαστιχένια βάση Πάνω στη λαστιχένια βάση και δίπλα στο σωλήνα της αντλίας κενού τοποθετείται το προς απαέρωση δοχείο. Η ειδική γυάλα καλύπτει το δοχείο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Όταν η αντλία κενού τίθεται σε λειτουργία, ο αέρας του χώρου εντός της γυάλας απομακρύνεται και ως εκ τούτου και ο αέρας που έχει εγκλωβιστεί στο γύψο. Η τράπεζα απαέρωσης έχει ελαστική στήριξη, ώστε να επιτρέπεται η χειροκίνητη ταλάντωσή της, ώστε να αναδεύεται ο γύψος και να διευκολύνεται η απομάκρυνση του εγκλωβισμένου αέρα. Η απαέρωση διαρκεί περίπου 1.5-2 min.

c. Γέμισμα του μούφλου: Το απαερωμένο μίγμα γύψου εγχέεται στη φλάσκα. Η διαδικασία είναι εύκολη, προσέχοντας μόνο να μην πέσει το μίγμα απευθείας πάνω στο δέντρο και αποκολληθεί κάποιο τμήμα του κέρινου

δέντρου. Κάποιες από τις φλάσκες διέθεταν προστατευτικό σταυρό, που επιβραδύνει τη ροή του και ομαλοποιούσε την πλήρωση.

d. Εξαέρωση του μούφλου: Κατά την απόχυση του γύψου από το μπολ ανάδευσης στη φλάσκα, εγκλωβίζεται ξανά αέρας. Συνεπώς, συνήθως επαναλαμβάνεται η απαέρωση όλου του μούφλου για 2 min.

e. Στερεοποίηση γύψου: Το μούφλο αφήνεται να στερεοποιηθεί σε δροσερό μέρος. Ο γύψος φθάνει στη μέγιστη σκληρότητά του σε περίπου 2 ώρες.

Τα επόμενα δύο βήματα, δηλαδή τα Βήματα 6 και 7, αποτελούν τον «κύκλο θέρμανσης του καλουπιού».

Βήμα 6: Αποκέρωση

Η διαδικασία της αποκέρωσης πραγματοποιείται στον ειδικό φούρνο που παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.1(δ) και 2.11(γ) και ονομάζεται «αποκερωτής». Ο αποκερωτής διαθέτει ειδική μεταλλική εσχάρα, πάνω στην οποία τοποθετούνται τα καλούπια, με το άνοιγμα προς τα κάτω, ώστε να λιώνει το κερί με τη θερμοκρασία και να απομακρύνεται. Κατά την αποκέρωση, εκτός από την απομάκρυνση του κεριού από το γύψο απομακρύνονται και τυχόν κατάλοιπα άνθρακα που εμφανίζονται κατά την τήξη του κεριού και ο γύψος έρχεται στην κατάλληλη θερμοκρασία, ώστε να εισέλθει στο φούρνο. Μόλις ολοκληρωθεί η αποκέρωση έχουν δημιουργηθεί τα επιθυμητά αποτυπώματα στο γύψινο καλούπι, το οποίο είναι έτοιμο να ψηθεί σε μεγαλύτερη θερμοκρασία. Για την αποκέρωση, το καλούπι παρέμεινε στους 150°C για 2 ώρες.



Σχήμα 2.11 (α) Καλούπι μετά τη στερεοποίηση του γύψου και την απομάκρυνση της λαστιχένιας βάσης, (β) Καλούπια πριν την αποκέρωση. Διακρίνονται τα καλώδια των θερμοστοιχείων, (γ) Καλούπια μέσα στον αποκερωτή.

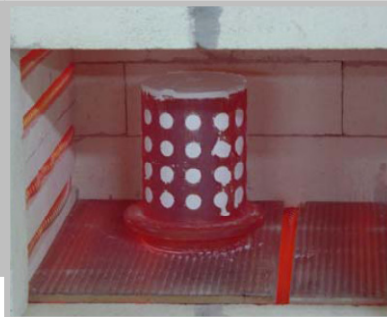
Βήμα 7: Ψήσιμο του γύψινου καλουπιού

Το ψήσιμο γίνεται στον ηλεκτρικό φούρνο των Σχημάτων 2.1(ε) και 2.14 (διαφορετικό από αυτόν της αποκέρωσης), ακολουθώντας ειδικό κύκλο θέρμανση μέσω ρυθμιστή (Σχήμα 2.12). Κάποιοι τυπικοί κύκλοι θέρμανσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.15, όπου φαίνεται ότι μπορεί να διαρκεί από 6 μέχρι 16 ώρες. Για την κατασκευή των καλουπιών στα πλαίσια των πειραμάτων της παρούσας μελέτης, ακολουθήθηκε ο κύκλος θέρμανσης των 12-14ωρών του Σχήματος 2.15(α). Μετά την παραμονή του καλουπιού στους 150°C για 2 ώρες κατά το στάδιο της αποκέρωσης, η θέρμανση του καλουπιού συνεχιζόταν στο φούρνο με σταδιακή αύξηση για 2.5hr της θερμοκρασίας

έως τους 370°C. Στη θερμοκρασία αυτή παρέμενε για περίπου 2h. Ακολουθούσε ανύψωση της θερμοκρασίας στους 730°C για τις επόμενες 3.5hr και παραμονή στους 730°C για ακόμα 3-4 hr (Σχήμα 2.13). Τέλος, ακολουθούσε μείωση στην επιθυμητή θερμοκρασία προθέρμανσης και παραμονή για 1ώρα πριν τη χύτευση.



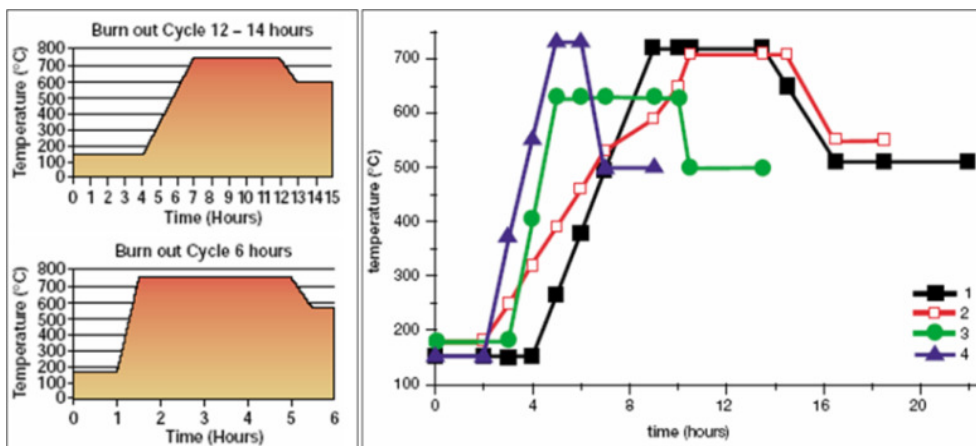
Σχήμα 2.12. Η ρύθμιση της θερμοκρασίας ψησίματος του καλούπιου



Σχήμα 2.13 Το καλούπι στο φούρνο ψησίματος, ακτινοβολεί τους 730°C.



Σχήμα 2.14 Τρία καλούπια στο φούρνο ψησίματος

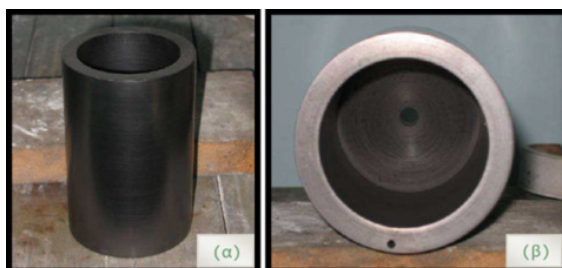


Σχήμα 2.15 (α) Τυπικοί κύκλοι έψησης(θέρμανσης) της φλάσκας και (β) Συνιστώμενοι κύκλοι έψησης από διάφορους κατασκευαστές γύψου (1.Ransom&Randolph, 2.Kerr, 3.Çoben, 4.Caster)

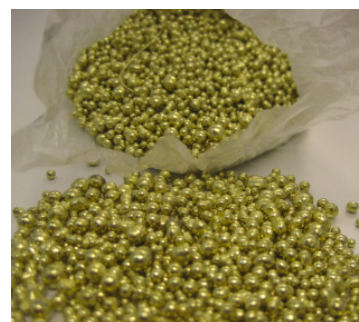
Βήμα 8: Τήξη μετάλλου

Το λιώσιμο του μετάλλου είναι καθοριστικής σημασίας παράγοντας για την επιτυχία της χύτευσης. Για να εξασφαλιστεί η επαρκής ροή του στις κοιλότητες του καλούπιου πρέπει να είναι σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας τήξης τόσο, ώστε να προλάβει να φτάσει στα πιο απομακρυσμένα σημεία πριν στερεοποιηθεί. Ωστόσο, πολύ μεγαλύτερη θερμοκρασία τήξης οδηγεί σε πληθώρα ελαττωμάτων στα χυτά, όπως πόρους, συρρίκνωση, κακή ποιότητα επιφάνειας κτλ. Επιπλέον, εάν δεν ληφθεί κατάλληλη μέριμνα, όπως η χρήση αδρανούς αερίου, κατά την τήξη μπορεί να συμβεί οξείδωση του τήγματος. Εάν, επίσης το χωνί δεν είναι καθαρό, θα αναμιχθούν με το τήγμα ακαθαρσίες ή προϊόντα καύσης από προηγούμενη τήξη. Και οι δυο αυτές περιπτώσεις θα καταλήξουν σε ύπαρξη μη μεταλλικών εγκλεισμάτων, ακαθαρσιών και σκουριών μέσα στο χυτό προϊόν. Η τήξη πραγματοποιείται σε χωνί που είναι κατασκευασμένο από γραφίτη (Σχήμα 2.16) και θερμαίνεται με ηλεκτρικές αντιστάσεις που βρίσκονται

περιμετρικά του. Το μέταλλο ήταν είτε σε μορφή σφαιριδίων (Σχήμα 2.17), είτε σε μορφή λεπτών ελασμάτων (οπότε και ήταν αναγκαία η κοπή τους σε μικρότερα τεμάχια για να χωρέσουν στο χωνί). Το μικρό μέγεθος σε συνδυασμό με τη μικρή ποσότητα που απαιτείται για τον κάθε τύπο, οδηγούσε σε αρκετά γρήγορη τήξη του μετάλλου. Ωστόσο, επειδή η τήξη δεν ήταν επαγωγική, πράγμα που θα σήμαινε ταυτόχρονη ανάδευση και καλύτερη ομογενοποίηση του υλικού, απαιτήθηκε μεγαλύτερος χρόνος παραμονής του υλικού σε υψηλότερη θερμοκρασία προκειμένου να είμαστε βέβαιοι για την ομοιόμορφη τήξη και την ομοιογενή θερμοκρασία του τήγματος (περίπου 8-10 min). Η θερμοκρασία του χωνιού ελέγχεται από θερμοστοιχείο που είναι τοποθετημένο σε ειδική οπή στο τοίχωμα (Σχήμα 2.16(β)).



Σχήμα 2.16 Το γραφιτένιο χωνί (σκεύος τήξης) της μηχανής χύτευσης (α) πλάγια όψη. (β) όπως φαίνεται από πάνω. Στο εσωτερικό του διακρίνεται η οπή έγχυσης του τήγματος. Στη μικρότερη οπή στο τοίχωμα του χωνιού τοποθετείται θερμοστοιχείο για την ένδειξη της θερμοκρασίας τήξης.



Σχήμα 2.17 Ορείχαλκος με τη μορφή σφαιριδίων, κατάλληλος για τήξη.

Βήμα 9: Απόχυση ρευστού μετάλλου.

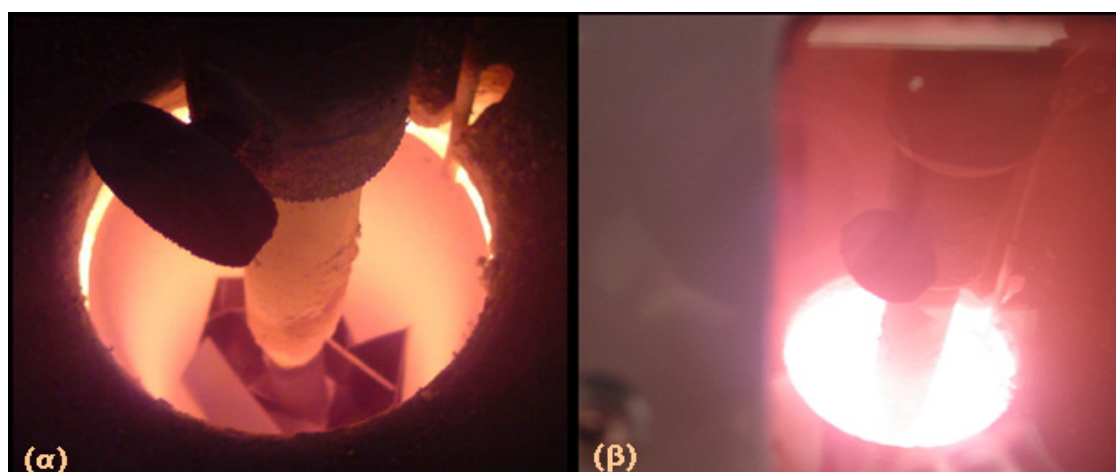
Όταν κριθεί πως το κράμα που έχει τοποθετηθεί στο χωνί έχει λιώσει σωστά στην επιθυμητή θερμοκρασία και το καλούπι βρίσκεται επίσης στην επιθυμητή θερμοκρασία, τότε μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία της χύτευσης.

Το καλούπι έχει τοποθετηθεί στο θάλαμο χύτευσης, ο οποίος με τη σειρά του έχει κλείσει ερμητικά ακριβώς κάτω από τον θάλαμο τήξης. Το σκεύος τήξης (χωνί) στο κέντρο της βάσης του έχει μία οπή (Σχήμα 2.16(β)), μέσω της οποίας θα πραγματοποιηθεί η απόχυση του λιωμένου μετάλλου στο καλούπι. Η οπή αυτή παραμένει κλειστή χάρη στον πείρο κλεισίματος (Σχήμα 2.18). Ο πείρος είναι στηριγμένος με τρόπο τέτοιο ώστε ο άξονάς του να διέρχεται από το κέντρο της οπής και διαμορφωμένος κατάλληλα στο άκρο του ώστε να ασφαρίζει στην οπή και να μην αφήνει το ρευστό μέταλλο να ρεύσει. Όταν οι συνθήκες πίεσης στο θάλαμο τήξης και στο θάλαμο χύτευσης είναι οι επιθυμητές, δε μένει παρά να γίνει η αποχυση του μετάλλου.

Πιέζοντας το ειδικό κουμπί της μηχανής που σημαίνει την πραγματοποίηση της χύτευσης, ο πείρος κλεισίματος ανασηκώνεται απασφαλίζοντας την οπή στον πάτο του χωνιού κι έτσι το λιωμένο μέταλλο ρέει λόγω της βαρύτητας και λόγω της διαφοράς πίεσης των δύο θαλάμων και γεμίζει το καλούπι. Η έγχυση του τήγματος διαρκεί μερικά ms. Μερικά λεπτά μετά την απόχυση του τήγματος, είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί άνοιγμα της μηχανής.

Όσο το μέταλλο βρίσκεται ακόμα σε υγρή κατάσταση ή τουλάχιστον πάνω από τη θερμοκρασία *Solidus*, πριν δηλαδή ολοκληρωθεί η στερεοποίηση σε ολόκληρο τον όγκο του δέντρου χύτευσης, η διαφορά πίεσης και ιδιαιτέρως η άσκηση υπερπίεσης αναγκάζει το μέταλλο να γεμίσει τέλεια όλες τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας του τύπου, και επηρεάζει τον τρόπο της στερεοποίησης, δημιουργώντας καλύτερη επαφή μετάλλου - καλουπιού. Μόλις περάσουν μερικά λεπτά, ο πείρος κλεισίματος επιστρέφει στη θέση του ασφαλίζοντας την οπή, γίνεται εκτόνωση των δύο θαλάμων (ώστε να αποκτήσουν την ατμοσφαιρική πίεση) και μόνο τότε υπάρχει δυνατότητα να ανοίξουν οι δύο θάλαμοι με ασφάλεια.

Στα Σχήματα 2.18 και 2.19 φαίνεται η μηχανή χύτευσης σε λειτουργία, κατά τη διαδικασία της τήξης του κράματος. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι πολύ υψηλές και η ακτινοβολία πολύ έντονη. Ειδικά μέτρα προστασίας είναι αναγκαίο να λαμβάνονται.

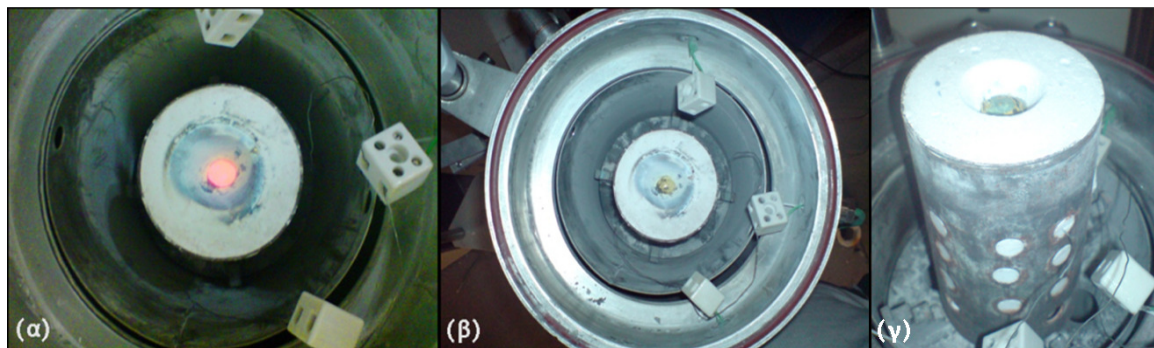


Σχήμα 2.18 Το κράμα (αλπακάς) μέσα στο χωνί (σκεύος τήξης), (α) λίγο πριν την τήξη του και (β) μετά την τήξη, όπως φαίνεται από το παράθυρο της χυτόπρεσας.



Σχήμα 2.19 Ο θάλαμος τήξης της μηχανής χύτευσης.

Στο Σχήμα 2.20 παρουσιάζονται εικόνες του καλουπιού λίγα λεπτά μετά την έγχυση του τήγματος στο καλούπι. Στο Σχήμα 2.20(α) φαίνεται το μέταλλο που ακτινοβολεί στην είσοδο του οχετού έγχυσης, ενώ στα Σχ.2.20(β)&(γ) το μέταλλο έχει στερεοποιηθεί πλήρως μετά από μερικά λεπτά.



Σχήμα 2.20 Το κράμα χύτευσης έχει γεμίσει πλήρως την κοιλότητα του τύπου. Διακρίνεται η είσοδος του οχετού έγχυσης (α) όσο το χυτό έχει υψηλή θερμοκρασία και ακτινοβολεί, (β) όταν το χυτό έχει αποψυχθεί αρκετά, (γ) Πλάγια όψη του καλουπιού με το ορειχάλκινο χυτό να διακρίνεται στην είσοδο του οχετού έγχυσης.

Βήμα 10: Απομάκρυνση του γύψινου καλουπιού

Η καταστροφή του καλουπιού γίνεται με εμβάπτισή του σε κρύο νερό, που οδηγεί σε θρυμματισμό του γύψου. Το καλούπι βρίσκεται περίπου στους 350-400°C με αποτέλεσμα μόλις εισέλθει στο κρύο νερό (20°C) να θρυμματίζεται από το θερμικό σοκ και να αποκαλύπτει το δέντρο χύτευσης.

Για να αποφύγουμε την ψαθυροποίηση των χυτών αποφεύγουμε να εμβαπτίζουμε το καλούπι αμέσως μόλις ολοκληρωθεί η χύτευση, αλλά περιμένουμε 5 min ώσπου να ψυχθεί περισσότερο. Αν όμως κρυώσει παραπάνω από όσο πρέπει τότε η απομάκρυνση του γύψου θα γίνει δύσκολη. Τα υπολείμματα πάνω στα αντικείμενα που θα πρέπει να απομακρυνθούν είτε με βούρτσες και χημικό καθαρισμό είτε με αμμοβολή, είτε με ψεκασμό με νερό υπό πίεση.

Βήμα 11: Παραλαβή των χυτών

Μετά την απομάκρυνση του γύψινου καλουπιού ακολουθεί η παραλαβή των χυτών που περιλαμβάνει την αποκοπή τους από το δέντρο και την επιφανειακή τους κατεργασία για να αποκτήσουν καλά επιφανειακά χαρακτηριστικά.

a. Η αποκοπή έγινε με μικρό κόφτη (Σχήμα 2.2(β)) και ήταν ιδιαίτερα απλή εξαιτίας της μικρής σκληρότητας του κράματος που χρησιμοποιήσαμε και της μικρής του διατομής. Η επιφανειακή επεξεργασία αρχικά περιλαμβάνει το βούρτσισμα των χυτών σε ηλεκτρικό τροχό, με βουρτσάκια και πανιά.

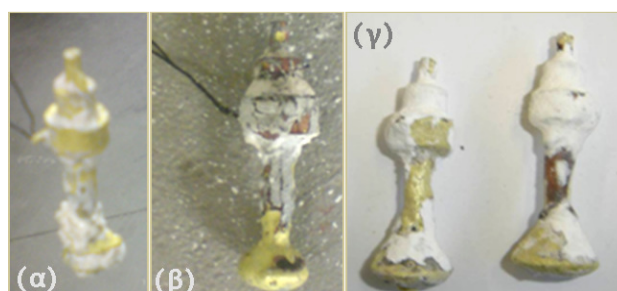
b. απομακρύνονται τα υπολείμματα γύψου και κάπνας από την επιφάνεια του μετάλλου και μείωση της τραχύτητάς της.

Για την πρόσδοση λάμψης στο χυτό χρησιμοποιήσαμε ειδικό διάλυμα άσπρισης που αποτελείται από 100gr σκόνης και 1lt νερού ή ειδικό διαβρωτικό διάλυμα («Πατίνα Τύπου Β», για τεχνητή παλαίωση των χυτών).

Στο Σχήμα 2.21 παρουσιάζεται η διαδικασία εμφάνισης σε νερό για καταστροφή και απομάκρυνση του καλουπιού. Στο Σχήμα 2.22 παρουσιάζονται κάποια από τα χυτά από ορείχαλκο, αμέσως μετά την απομάκρυνση του γύψου. Στο Σχ. 2.22(α) και το Σχ. 2.22(β) διακρίνεται το θερμοστοιχείο, του οποίου η άκρη έχει εγκλωβιστεί μέσα στο χυτό. Είναι, επίσης, φανερό πως υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες το χυτό προϊόν έχει, αμέσως μετά τη χύτευση του ορείχαλκου, ένα ανοιχτό κίτρινο χρώμα και άλλες περιπτώσεις στις οποίες η επιφάνεια του χυτού είναι οξειδωμένη. Επίσης, άλλοτε ο προσκολλημένος γύψος είναι περισσότερος και άλλοτε λιγότερος. Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν να κάνουν με τη θερμοκρασία έγχυσης του τήγματος, με το συσχετισμό θερμοκρασιών κράματος-καλουπιού και με την αντίδραση χυτού-καλουπιού που έχει να κάνει με τη θερμοκρασία ή την προετοιμασία του καλουπιού.



Σχήμα 2.21 Μέταλλο σε υψηλή θερμοκρασία στην είσοδο του κυρίως αγωγού τροφοδοσίας του δέντρου χύτευσης.



Σχήμα 2.22 Τελικό προϊόν, υπολείμματα γύψου πάνω στο χυτό.

Το Σχήμα 2.23 δείχνει δώδεκα από τα χυτά που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια των πειραμάτων της παρούσας διατριβής.



Σχήμα 2.23 Χυτά προϊόντα από ορείχαλκο.

2.3 Μηχανή Χύτευσης Κενού - Υπερπίεσης

2.3.1 Χαρακτηριστικά και πρωτοτυπία μηχανής χύτευσης

Για την εκτέλεση της χύτευσης κενού χρησιμοποιήθηκε η μηχανή χύτευσης-υπερπίεσης που φαίνεται στο Σχήμα 2.24 και περιγράφεται στη συνέχεια.

Η μηχανή χύτευσης κενού αποτελείται από δύο θαλάμους: τον θάλαμο τήξης και τον θάλαμο χύτευσης. Ο θάλαμος τήξης περιέχει το σκεύος τήξης στο οποίο τοποθετείται το μέταλλο και λιώνει. Ο θάλαμος αυτός κλείνει αεροστεγώς και υπάρχει δυνατότητα παροχής αδρανούς αερίου (Ar) ώστε η τήξη να πραγματοποιηθεί σε προστατευμένη ατμόσφαιρα για την αποφυγή δημιουργίας οξειδίων. Στο θάλαμο χύτευσης τοποθετείται το μούφλο, με το άνοιγμα του αγωγού τροφοδοσίας του δέντρου προς τα πάνω. Ο θάλαμος χύτευσης είναι επίσης αεροστεγής, ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί κενό.



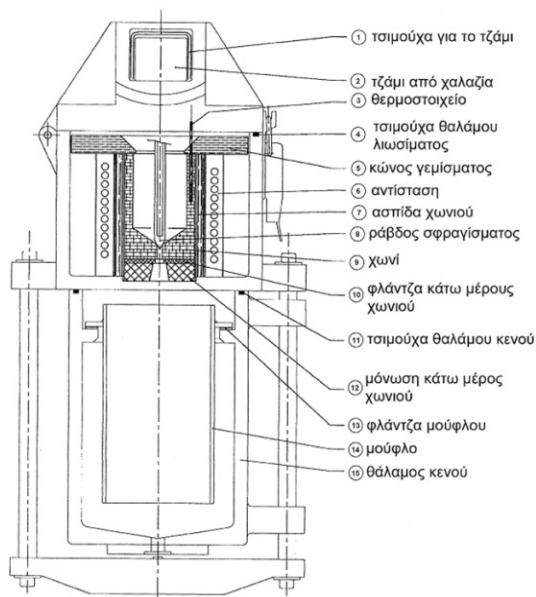
Σχήμα 2.24 Η μηχανή χύτευσης κενού-υπερπίεσης του εργαστηρίου: (α) κλειστή και (β) με ανοιχτό τον κάδο τήξης και τον κάδο χύτευσης.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί μία πρωτότυπη κατασκευή που έγινε στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, σε συνεργασία με την εταιρεία «ΝΕΙΛΑΣ ΒΕΚ-ΑΦΟΙ ΝΕΙΛΑ ΟΕ». Όπως θα γίνει φανερό σε επόμενο κεφάλαιο, ήταν αναγκαίο, για τον προσδιορισμό του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, να πραγματοποιηθεί μέτρηση της θερμοκρασίας του τήγματος στην κοιλότητα του καλουπιού κατά τη διάρκεια της χύτευσης, με τη χρήση θερμοστοιχείων. Ωστόσο, η τοποθέτηση θερμοστοιχείων σε μία τυπική

μηχανή χύτευσης δεν ήταν εφικτή λόγω της ανάγκης εξασφάλισης στεγανότητας στο θάλαμο χύτευσης. Με άλλα λόγια τα καλώδια των θερμοστοιχείων έπρεπε να εξέρχονται του θαλάμου χύτευσης με τέτοιο τρόπο ώστε αυτός να παραμένει ερμητικά κλειστός, για να καθίσταται εφικτή η δημιουργία κενού σε αυτόν.

Για το λόγο αυτό ήταν αναγκαία η τροποποίηση της μηχανής. Έγινε, λοιπόν, τροποποίηση αυτής με τη διάνοιξη τριών οπών στο τοίχωμα του θαλάμου χύτευσης. Στις οπές αυτές ήταν σταθερά τοποθετημένα τρία καλώδια - προεκτάσεις των καλωδίων των θερμοστοιχείων. Οι οπές είναι κατάλληλα διαμορφωμένες (με σπείρωμα και παξιμάδι) ώστε τα καλώδια, επενδεδυμένα με κατάλληλο πλαστικό, να εφαρμόζουν σφικτά, εξασφαλίζοντας στεγανότητα. Στα άκρα των σταθερά αυτών συνδεδεμένων στη μηχανή καλωδίων που βρίσκονται στο εσωτερικό του θαλάμου χύτευσης υπάρχουν ανοιχτές επαφές για τη σύνδεση των θερμοστοιχείων. Οι επαφές αυτές (κλέμες) είναι κεραμικές για να αντέχουν την υψηλή θερμοκρασία του μούφλου. Η κατασκευή αυτή διακρίνεται χαρακτηριστικά στα Σχήματα 2.25 & 2.26. Χωρίς την κατασκευή αυτή δεν θα ήταν δυνατό να προχωρήσει η μελέτη στα επόμενα στάδια.

Στην Σχήμα 2.24 φαίνονται τα κομβία ελέγχου και οι διακόπτες ρύθμισης παραμέτρων της μηχανής του εργαστηρίου. Οι αναλογικές και οι ψηφιακές ενδείξεις θερμοκρασίας και πίεσης δίνουν τη δυνατότητα στο χειριστή να παρακολουθεί την εξέλιξη των συνθηκών κατά τη χύτευση και να πραγματοποιεί real-time παρεμβάσεις, ώστε να ελέγξει το πείραμα.



Σχήμα 2.25 Σκαρίφημα μηχανής χύτευσης κενού - υπερπίεσης.



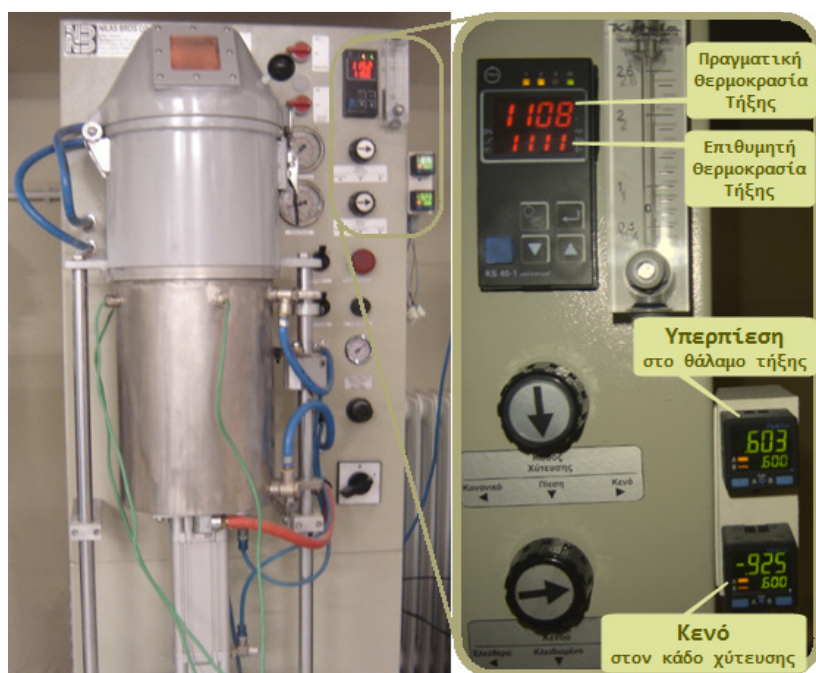
Σχήμα 2.26 Ο θάλαμος χύτευσης της μηχανής χύτευσης κενού με την τροποποίηση για την τοποθέτηση θερμοστοιχείων.

2.3.2 Είδη Χύτευσης

Ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης που θα επιλεγούν από το χειριστή της μηχανής, υπάρχει δυνατότητα πραγματοποίησης διαφορετικών μεθόδων χύτευσης. Ως εκ τούτου, μπορεί να πραγματοποιηθεί:

- Χύτευση Κενού - Υπερπίεσης
- Χύτευση Κενού
- Χύτευση Βαρύτητας
- Χύτευση Υπερπίεσης
- Χύτευση Μερικού Κενού
- Χύτευση Μερικής Υπερπίεσης
- Χύτευση Μερικού Κενού - Μερικής Υπερπίεσης

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν δοκιμάστηκαν όλες οι προαναφερθείσες συνθήκες χύτευσης, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση των παραμέτρων στο χυτό προϊόν.



Σχήμα 2.27 Η μηχανή χύτευσης εν ώρα λειτουργίας. Εστιάζοντας στα μετρητικά όργανα, φαίνονται οι συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης κατά τη χύτευση υπερπίεσης-κενού του CuNi12Zn24.

2.4 Υλικά που Χυτεύθηκαν

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής είναι κατά κύριο λόγο κράματα χαλκού. Για ένα μικρό κομμάτι της μελέτης χυτεύθηκε και αλουμίνιο.

Τα κράματα χαλκού που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο ορείχαλκος με σύσταση 66.7%Cu+33.3%Zn κι εμπορική ονομασία CuZn33 (UNS C26800) και το τριμερές κράμα χαλκού με σύσταση 64%Cu+12%Ni+24%Zn (σειράς Maillechorts), με την εμπορική ονομασία CuNi12Zn24 (UNS C75700) ή «αλπκάκς». Πειράματα χύτευσης πραγματοποιήθηκαν με τα κράματα χαλκού τόσο για λήψη θερμοκρασιών κατά τη χύτευση όσο και για μεταλλογραφική παρατήρηση του χυτού.

Το κράμα αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε ήταν της σειράς 1000, καθαρό αλουμίνιο. Η χύτευση του αλουμινίου πραγματοποιήθηκε για λήψη μετρήσεων θερμοκρασίας.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρατίθενται πληροφορίες από τη βιβλιογραφία σχετικά με τα κράματα που χρησιμοποιήθηκαν.

2.4.1 Κράματα Χαλκού

Ο χαλκός είναι το πρώτο μέταλλο που χρησιμοποιήθηκε από τον άνθρωπο και προσαρμόστηκε στις απαιτήσεις του. Το όνομά του ("Copper") ο χαλκός το πήρε από την «Κύπρο», η οποία τροφοδοτούσε με χαλκό, κατά την αρχαιότητα, την Ελλάδα, τη Ρώμη και άλλες χώρες της Μεσογείου. Οι Ρωμαίοι ονόμαζαν το χαλκό "aes cyprium", που σημαίνει "μετάλλευμα της Κύπρου", και η ονομασία αυτή είναι που μετέπειτα εξελίχθηκε στο "cuprum", δηλαδή "copper".

Ο χαλκός κατεργαζόταν από τη νεολιθική εποχή με απλή σφυριλάτηση. Επίσης, υπάρχει πλήθος αναφορών για εφαρμογές του μετάλλου από πολύ νωρίς. Ήδη, από τα πρώτα χρόνια, τα κράματα χαλκού με ένα περιεχόμενο σε κασσίτερο μεταξύ 20 και 50% χρησιμοποιούνταν για την κατασκευή καθρέπτη, λόγω της υψηλής ανακλαστικότητάς τους. Επίσης, αν και το νικέλιο σαν κραματικό στοιχείο είναι ένα στοιχείο που ανακαλύφθηκε σχετικά "πρόσφατα" βλέποντας το υπό μία ιστορική προοπτική, η εφαρμογή του στα κράματα - χωρίς καμία γνώση της σύστασης του κράματος- συνέβη τουλάχιστον τα τελευταία 2000 χρόνια. Το αρχαιότερο νόμισμα από κράμα χαλκού-νικελίου χρονολογείται στο 235π.Χ.. Μόνο γύρω στο 1800μ.Χ. το νικέλιο απομονώθηκε ως κραματικό στοιχείο. Άλλο ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης του χαλκού αποτελεί μία σωλήνα χαλκού με μήκος 400m παρείχε νερό στον τάφο του Sahure, ήδη από το 2500π.Χ. Ο ορείχαλκος ήταν μέταλλο ιδιαίτερα διαδεδομένο στην αρχαιότητα και αναφέρεται σε ορισμένα αρχαία ελληνικά κείμενα. Ο Ησίοδος αναφέρει ότι ο Ηρακλής φορούσε κνημίδες από ορείχαλκο. Σε έναν Ομηρικό ύμνο, αναφέρεται ότι η Αφροδίτη φορούσε σκουλαρίκια από ορείχαλκο και χρυσό. Ο Πλάτων στον Κριτία λέει πως οι κάτοικοι της μυθικής Ατλαντίδας γνώριζαν τον «εκ γης ορυττόμενον» ορείχαλκο, που έλαμπε σαν φωτιά («πυρώδης») και ήταν το πιο πολύτιμο μέταλλο μετά το χρυσό. Στο ίδιο κείμενο αναφέρεται πως τα τείχη της ακρόπολης και το εσωτερικό του ναού του Ποσειδώνα στην Ατλαντίδα ήταν επενδυμένα με ορείχαλκο. Ο Στράβων, που έζησε στα ελληνιστικά χρόνια, είναι ο πρώτος που αναφέρει τον ψευδάργυρο ως μέταλλο που παρασκευάζονταν με «απόσταξη» μεταλλεύματος στην περιοχή της ΒΔ Μικράς Ασίας κοντά στην Τροία, καθώς και τον ορείχαλκο ως κράμα χαλκού και ψευδάργυρου που παρασκευάζονταν με σύντηξη των δύο μετάλλων.

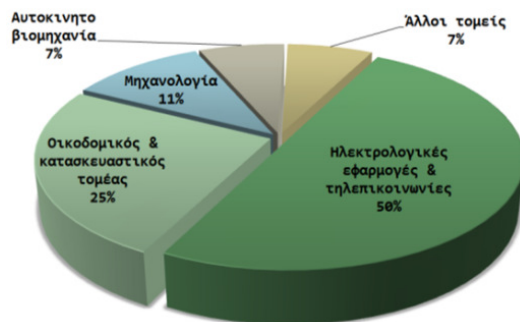
Στην Ευρώπη, ο χαλκός εμφανίστηκε στην νεολιθική εποχή. Με την προσθήκη κραματικών στοιχείων, έκανε την εμφάνισή του και ο μπρούντζος. Χρονολογείται γύρω στο 2500π.Χ. η χρήση του κασσίτερου ως κραματικού στοιχείου για πρώτη φορά.

Σήμερα, τα κράματα χαλκού καταλαμβάνουν μία σημαντική θέση μεταξύ των μεταλλικών υλικών, λόγω της μεγάλης ποικιλίας τεχνολογικών ιδιοτήτων και εφαρμογών που εξυπηρετούν. Υπάρχουν πάνω από 3000 τυποποιημένα κράματα. Ο χαλκός, μετά το χάλυβα και το αλουμίνιο, καταλαμβάνει την

τρίτη θέση μεταξύ των μετάλλων, με μία παγκόσμια κατανάλωση που υπερβαίνει τα 15 εκατομμυρίων τόνων ετησίως. Στην Ευρώπη μόνο, η συνολική ζήτηση για είναι περίπου 4.3 εκατ. τόνοι και η κατανομή της χρήσης του στις διάφορες εφαρμογές φαίνεται στο Σχ.2.28.

Το εύρος των εφαρμογών του χαλκού στη σύγχρονη βιομηχανία περιλαμβάνει την ηλεκτρο-τεχνολογία, τον οικοδομικό και κατασκευαστικό κλάδο, τη μηχανολογία, την αυτοκινητοβιομηχανία, τη χημεία, τις παράκτιες εφαρμογές, τη ναυπηγική, τις βιοϊατρικές εφαρμογές, κλπ.

Συγκεκριμένα, στη θαλάσσια και παραθαλάσσια τεχνολογία, τα κράματα χαλκού-νικελίου βρίσκουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στα συστήματα σωληνώσεων, τις βαλβίδες κλπ. Ο τέλειος συνδυασμός χαρακτηριστικών όπως η αντοχή σε διάβρωση, η σταθερότητα σε διάβρωση, και η αντίσταση σε βιολογική διάβρωση με τέλεια μηχανική αντοχή, είναι η βάση για την επιτυχία. Εμπειρία πολλών δεκαετιών υποστηρίζει τη χρήση κραμάτων χαλκού-νικελίου στις περισσότερες από τις ναυπηγικές εφαρμογές. Η εφαρμοσιμότητα του χαλκού και των κραμάτων χαλκού επηρεάζονται ισχυρά από τα κραματικά στοιχεία. Τα τυποποιημένα υλικά ονοματοδοτούνται με μία συντόμευση ή με ένα αριθμό υλικού. Σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα ("European Standards") (EN) τα υλικά ταξινομούνται σαν προϊόντα και η σύστασή τους περιγράφεται στα πρότυπα.

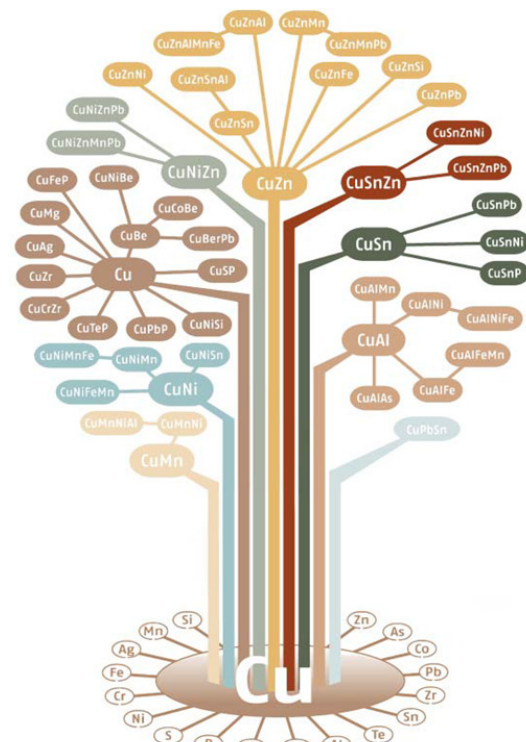


Σχήμα 2.28 Κατανομή της χρήσης του χαλκού στην Ευρώπη [Klassert & Tikana 2007].

Πίνακας 2.1 Χαλκός και κράματα χαλκού σύμφωνα με το πρότυπο DIN EN 1412.

Material group	Positions 3, 4 & 5	Position 6 (Designation of material group)
Copper	000 - 999	A or B
Low alloyed copper (alloy element less than 5%)	000 - 999	C or D
Special copper alloys (alloy element min. 5%)	000 - 999	E or F
Copper Aluminium alloys	000 - 999	G
Copper Nickel alloys	000 - 999	H
Copper Nickel Zink alloys	000 - 999	J
Copper Tin alloys	000 - 999	K
Copper Zink alloys, 2 elements	000 - 999	L or M
Copper Zink Lead alloys	000 - 999	N or P
Copper Zink alloys, more elements	000 - 999	R or S

Standardised alloys in the range 000-799. Not standardised alloys in the range 800-999



Σχήμα 2.29 Το «Δέντρο του Χαλκού» [Klassert & Tikana 2007].

Το Σχήμα 2.29 αναπαριστά το "δέντρο του χαλκού", σχηματική αναπαράσταση του συνόλου των κραμάτων χαλκού, με τις διακλαδώσεις του δέντρου να δημιουργούνται από τους συνδυασμούς των κύριων κραματικών στοιχείων.

Για καλύτερη εποπτεία, ο τεράστιος αριθμός υλικών από χαλκό υποδιαιρείται σε κατηγορίες/ομάδες (Πίνακας 2.1).

Τα κράματα χαλκού σε Ναυπηγικές Εφαρμογές

Ένας αρκετά μεγάλος αριθμός κραμάτων χαλκού βρήκαν τη θέση τους σε ναυπηγικές και υπεράκτιες εφαρμογές, επιδεικνύοντας πολύ καλή απόδοση. Τέτοια υλικά υπόκεινται σε αυστηρούς κανονισμούς από πρακτορεία ταξινόμησης (classifying agencies) όπως ο Αμερικάνικος Νηογνώμονας, ο Γερμανικός Lloyd, το "Bureau Veritas" και άλλα [CEN TC 133 2008].

Σφυρήλατα Κράματα (wrought alloys): Σωλήνες και κομμάτια/τεμάχια χαλκού και σφυρήλατων κραμάτων χαλκού τα οποία χρησιμοποιούνται σε επαφές υπό πίεση, συμπυκνωτές και εναλλάκτες θερμότητας (Πίνακας 2.2) παράγονται συνήθως χωρίς ραφές, πχ με θερμή έλαση και έπειτα με έλαση ή διαμόρφωση εν ψυχρώ (ολκή) (rolling and cold drawing). Για συγκολλητές σωλήνες και τεμάχια, απαιτούνται ειδικές εγγυήσεις από τους κατασκευαστές. Σωλήνες διαμόρφωσης και τεμάχια υφίστανται ανόπτηση για ανακρυστάλλωση. Εξαιρέση στον κανόνα αυτό αποτελούν οι σωλήνες χαλκού οι οποίες θα παραληφθούν ως "half-hard" or "hard" (ημίσκληρες ή σκληρές), που μπορούν να υποστούν ολκή, να διαμορφωθούν μετά την ανόπτηση.

Πίνακας 2.2 Κράματα χαλκού για συμπυκνωτές και εναλλάκτες θερμότητας σε ναυπηγικές εφαρμογές, σύμφωνα με το DIN-EN 12451.

Material designation	Material number		Chemical composition [Gew.-%]
	EN	DIN	
Cu-DHP	CW024A	2.0090	Cu min. 99.9, P 0.015-0.04
CuAl5As	CW300G	2.0918	Al 4.0-6.0, As 0.1-0.4, Rem. Cu
CuNi10Fe1Mn	CW352H	2.0872	Ni 9.0-11.0, Fe 1.0-2.0, Mn 0.5-1.0, Rem. Cu
CuNi30Fe2Mn2	CW353H	2.0883	Ni 29.0-32.0, Fe 1.5-2.5, Mn 1.5-2.5, Rem. Cu
CuNi30Mn1Fe	CW354H	2.0882	Ni 30.0-32.0, Mn 0.5-1.5, Fe 0.4-1.0, Rem. Cu
CuZn20Al2As	CW702R	2.0460	Cu 76-79, Al 1.8-2.3, As 0.02-0.06, Rem. Zn
CuZn28Sn1As	CW706R	2.0470	Cu 70-72.5, Sn 0.9-1.3, As 0.02-0.06, Rem. Zn
CuZn30As	CW707R	-	Cu 69-71, As 0.02-0.06, Rem. Zn

Χυτά κράματα (cast alloys): Για την παραγωγή εξαρτημάτων (fittings) και σωμάτων αντλιών (pump bodies), ρουλεμάν τριβής (friction bearings), άξονα τριβέα (bushings) και παρόμοιων μηχανολογικών τεμαχίων, χρησιμοποιούνται τα χυτά κράματα χαλκού που απαριθμούνται στον Πίνακα 2.3. Η διαδικασία χύτευσης (χύτευσης σε άμμο, σε μόνιμο τύπο, φυγοκεντρική ή συνεχής) επιλέγεται σύμφωνα με τη γεωμετρία του χυτού. Τα χυτά μπορούν να παραδοθούν και να διανεμηθούν όπως χυτεύθηκαν (as cast) ή ανοπτημένα. Αυτή είναι μία επιλογή του χυτηρίου, όσο δεν καθορίζονται οι λεπτομέρειες αυτές στο δελτίο παραγγελίας. Όλα τα χυτά τεμάχια πρέπει να είναι καθαρά, χωρίς κοιλότητες, πόρους, ρωγμές και εγκλείσματα. Τα καθιερωμένα κράματα χαλκού χρησιμοποιούνται ευρέως για προπέλες και μέρη αυτών υποδιαιρούνται σύμφωνα με οδηγίες του Γερμανικού Loyd [CEN TC 133 2008] σε κατηγορίες CU1, CU2, CU3 και CU4, ανάλογα με τη χημική τους σύσταση (Πίνακας 2.3).

Πίνακας 2.3 Τυποποιημένα χυτά κράματα χαλκού για ναυπηγικές εφαρμογές [CEN TC 133 2008].

Material designation	Material number		Application
	EN	DIN	
CuSn10-C	CC480K	2.1050.01	Fittings and pump bodies
CuSn7Zn4Pb7-C	CC493K	2.1090.01	bearings, bearing bushings
CuSn5Zn5Pb5-C	CC491K	2.1096.01	bearing bushings, valves, fittings
CuNi10Fe1Mn1-C	CC380H	2.0815.01	Fittings and pump bodies
CuNi30Fe1Mn1NbSi-C	CC383H	2.0835.01	bearings, Fittings and pump bodies

Σημαντικά χαρακτηριστικά για τη χρήση τους όπως η σκληρότητά τους και η αντοχή σε διάβρωση επηρεάζονται έντονα από το ποσοστό φάσης β. Για να διατηρηθεί επαρκής παραμορφωσιμότητα και αντοχή σε διάβρωση λόγω κόπωσης, η μικροδομή θα πρέπει να έχει ένα ποσοστό τουλάχιστον 25% φάσης α.

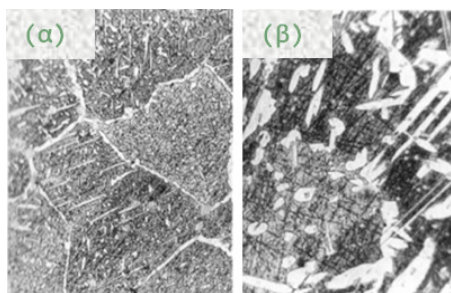
2.4.1.1 Ορείχαλκος

Κράματα Cu-Zn (Ορείχαλκοι): Οι ορείχαλκοι αποτελούν κράματα Cu-Zn, στα οποία το ποσοστό ψευδαργύρου, στην πράξη, δεν υπερβαίνει το 45% μπορεί, όμως, θεωρητικά να φθάσει και το 68%. Στο ακόλουθο σχήμα, παρουσιάζεται το διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων Cu-Zn Σχήμα 2.30.

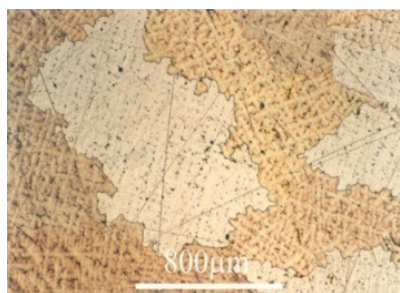


Σχήμα 2.30 Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς κράματος Cu-Zn.

Για ποσοστά ψευδαργύρου μέχρι 39% κ.β (μέγιστη διαλυτότητα στους 454°C), σχηματίζεται στερεό διάλυμα φάσης α. Η φάση α κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο σύστημα και ο μονοφασικός ορείχαλκος φάσης α παρουσιάζει καλή ολκιμότητα εν ψυχρώ. Για ποσοστά ψευδαργύρου 46-51% και θερμοκρασία υψηλότερη των 454°C, σχηματίζεται η φάση β, του κυβικού χωροκεντρωμένου συστήματος, η οποία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες μετασχηματίζεται σε φάση β'. Η φάση β έχει καλή ολκιμότητα εν θερμώ, ενώ η β' είναι σκληρή και εύθραυστη. Όταν το ποσοστό ψευδαργύρου κυμαίνεται μεταξύ 56% και 68%, σχηματίζεται η φάση γ, η οποία είναι εξαιρετικά εύθραυστη. Στα Σχήματα 2.31 και 2.32 φαίνεται η μικροδομή των ορείχαλκων CuZn40 και CuZn30. Πρακτική χρησιμότητα έχουν δυο είδη ορείχαλκου: ο μονοφασικός ορείχαλκος φάσης α (με 5-39%Zn) και ο διφασικός α+β' (με 40-50% Zn). Ορείχαλκοι αμιγούς φάσης β και διφασικοί β+γ δεν βρίσκουν εφαρμογές, λόγω της ευθραυστότητάς τους.



Σχήμα 2.31 Μικροδομή ορείχαλκου 60%Cu-40%Zn (α) χωρίς και (β) μετά από θερμική κατεργασία



Σχήμα 2.32 Cu 70, Zn 30 (wt%) καθαρός ορείχαλκος, δενδριτική στερεοποίηση [University of Cambridge 2001].

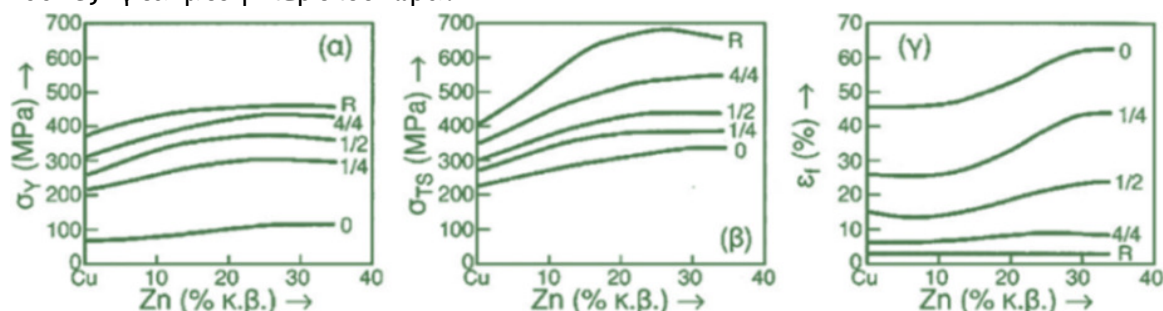
Γενικά, οι ιδιότητες των ορειχάλκων μεταβάλλονται κατά συνεχή τρόπο, με την αύξηση της περιεκτικότητας του Zn. Αυξανόμενου του ποσοστού σε Zn, το χρώμα των ορειχάλκων μεταβάλλεται από κόκκινο σε κίτρινο, ενώ η ηλεκτρική τους αγωγιμότητα ελαττώνεται, γεγονός που τους καθιστά ακατάλληλους για ηλεκτρικές εφαρμογές. Επίσης με την αύξηση της περιεκτικότητας σε Zn αυξάνεται η σκληρότητα και η ολκιμότητα, για ορείχαλκο με περιεκτικότητα σε Zn μέχρι 28-30%. Με περαιτέρω αύξηση της περιεκτικότητας σε ψευδάργυρο η σκληρότητα ελαττώνεται, ενώ η ολκιμότητα συνεχίζει αυξανόμενη. Γενικά, οι ορείχαλκοι παρουσιάζουν αντοχή σε διάβρωση, σε διάφορα είδη διαβρωτικού περιβάλλοντος. Η αντοχή σε διάβρωση των ορειχάλκων βελτιώνεται με την προσθήκη 1% Sn ή Al (π.χ το κράμα Cu-22% Zn-2% Al). Επιπλέον αντιδιαβρωτική προστασία τους επιτυγχάνεται με τη δημιουργία προστατευτικών ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων από Ni, Cr ή Au.

Οι ορείχαλκοι που περιέχουν ψευδάργυρο σε ποσοστό μεγαλύτερο από 10%, εμφανίζουν το φαινόμενο της εργοδιάβρωσης. Όταν ορείχαλκος βρίσκεται υπό καθεστώς τάσεων, διαβρώνονται τα όρια των κόκκων (περικρυσταλλική διάβρωση) από την υγρασία της ατμόσφαιρας, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι τάσεις αυτές μπορεί να προέρχονται είτε από εξωτερική καταπόνηση, είτε από ενδοτράχυνση του κράματος. Η διάβρωση είναι ταχύτερη στην περίπτωση αμμωνιακής ατμόσφαιρας ή ατμόσφαιρας αλάτων υδραργύρου. Ονομάζεται και εποχιακή ρωγμάτωση, διότι παρατηρείται σε εποχές μεγάλης υγρασίας. Η εργοδιάβρωση αντιμετωπίζεται εάν ο ορείχαλκος μετά την διαμόρφωση του ανοιχθεί σε θερμοκρασία 275°C, για μισή ώρα, ώστε να ελαττωθούν οι εσωτερικές τάσεις από ενδοτράχυνση, χωρίς ταυτόχρονη μείωση της σκληρότητας του κράματος.

Οι α-ορείχαλκοι διαμορφώνονται εύκολα εν ψυχρώ και δυσκολότερα εν θερμώ. Οι ορείχαλκοι α+β, διαμορφώνονται εύκολα εν θερμώ (700-750°C), διότι σε υψηλές θερμοκρασίες η εύθραυστη φάση β', μετασχηματίζεται στην όλκιμη φάση β. γενικά η μορφοποίηση των μονοφασικών ορειχάλκων γίνεται εν ψυχρώ, με ενδιάμεσες, ανοιπήσεις, ενώ των διφασικών γίνεται εν θερμώ. Στο Σχήμα 2.33, παρουσιάζονται οι μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων των μονοφασικών ορειχάλκων, για διάφορα ποσοστά ενδοτράχυνσης, συναρτήσει της περιεκτικότητας τους σε ψευδάργυρο. Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων εμφανίζονται

στον ορείχαλκο που περιέχει 30%Zn. Το κράμα αυτό διαθέτει άριστη συμπεριφορά κατά την κοίλανση.

Στην περίπτωση που ένα έλασμα ορείχαλκου πρόκειται να υποστεί βαθειά κοίλανση, θα πρέπει να ελεγχθεί το μέγεθος των κόκκων του. Πολύ λεπτόκοκκο κράμα διαμορφώνεται δύσκολα, ενώ χονδρόκοκκο κράμα, μετά από βαθειά κοίλανση, αποκτά ανώμαλη εξωτερική επιφάνεια, η οποία καλείται «δέρμα πορτοκαλιού». Η ρύθμιση του μεγέθους των κόκκων, μετά την εν ψυχρώ έλαση, γίνεται με ανακρυστάλλωση του κράματος σε θερμοκρασία 600-700°C, για μισή περίπου ώρα.



Σχήμα 2.33 Μεταβολή α) του ορίου διαρροής, β) της αντοχής σε εφελκυσμό και γ) της επιμήκυνσης θραύσης, των μονοφασικών ορειχάλκων, συναρτήσει της περιεκτικότητάς τους σε ψευδάργυρο, για διάφορα ποσοστά ενδοτράχυνσης.

2.4.1.2 Αλπακάς

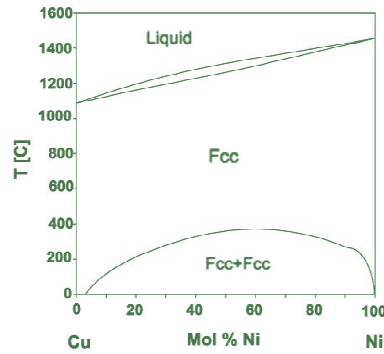
Πρόκειται για το κράμα χαλκού με βασικά κραματικά στοιχεία το χαλκό (Cu), τον ορείχαλκο (Zn) και το νικέλιο (Ni). Το συγκεκριμένο κράμα χαλκού στη βιβλιογραφία αναφέρεται σαν “Nickel Silver“, “Alpaca“, “German Silver“, “White metal“, αλλά πρέπει να τονιστεί πως δεν περιέχει άργυρο. Στην Ελλάδα, για τα κράματα αυτά χρησιμοποιούνται οι ονομασίες «αρζαντό», «αλπακάς» ή «νεάργυρος», αλλά και η πιο περιγραφική ονομασία «νικελιούχος ορείχαλκος».

Το τριμερές κράμα χαλκού «αλπακάς» ανήκει στην οικογένεια κραμάτων που είναι γνωστή και ως Maillerchorts. Είναι παρεμφερή κράματα με αυτά του χαλκονικελίου και γι’ αυτό αρχικά θα γίνει αναφορά σε αυτά.

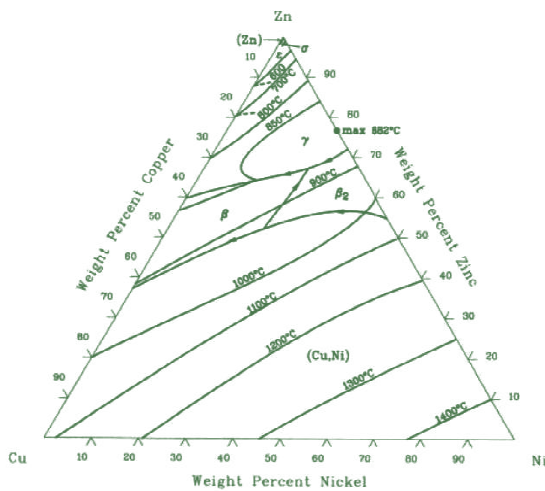
Τα κράματα Cu-Ni (Σχήμα 2.34) περιέχουν Ni, σε ποσοστό 10-30%. Ο χαλκός και το νικέλιο είναι μέταλλα πλήρως αναμίξιμα, στην υγρή και τη στερεά κατάσταση, και συνεπώς, τα κράματα αυτά είναι μονοφασικά. Το σχηματιζόμενο στερεό διάλυμα κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο σύστημα. Αύξηση της περιεκτικότητας σε νικέλιο, προκαλεί αύξηση της μηχανικής αντοχής σε θαλάσσια διάβρωση του κράματος [Χρυσουλάκης & Παντελής 1996].

Στα τριμερή κράματα Cu-Zn-Ni (Σχήμα 2.35 και Σχήμα 2.36), η περιεκτικότητα του Zn κυμαίνεται από 17% έως 27% και του Ni από 8% έως 18%. Τα κράματα αυτά είναι μονοφασικά. Η παρουσία του Ni προκαλεί μεταβολή του χρώματος του κράματος, από κίτρινο, που είναι το τυπικό χρώμα των κραμάτων Cu-Zn, σε λευκό (ασημί). Μπορεί κάποιες φορές να υπάρχουν επιπλέον κραματικά στοιχεία όπως αντιμόνιο, κασσίτερος,

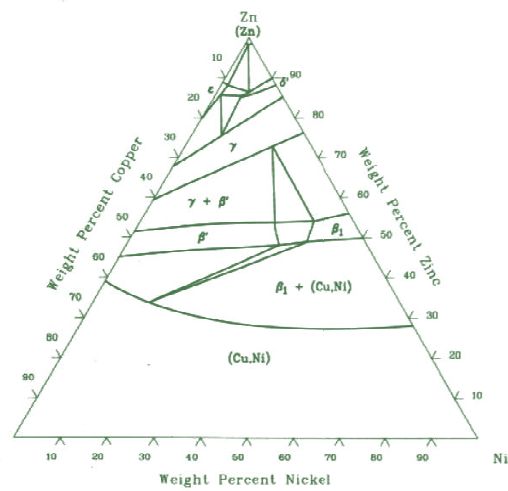
μόλυβδος ή κάδμιο. Μερικά κράματα αλπακά, ιδιαίτερα αυτά που περιέχουν σε μεγάλο ποσοστό ψευδάργυρο, είναι ανοξειδωτα.



Σχήμα 2.34 Διάγραμμα φάσεων Cu-Ni



Σχήμα 2.35 Cu-Ni-Zn liquidus projection [79Cha]



Σχήμα 2.36 Cu-Ni-Zn isotherman projection at 20°C [73Lev]

Μία αντιπροσωπευτική βιομηχανική σύσταση αλπακά είναι αυτή του κράματος CA752, που αποτελείται από 65% Χαλκό, 18% Νικέλιο, 17% Ψευδάργυρο κι έχει εμπορική ονομασία CuNi18Zn17. Άλλο ένα αντιπροσωπευτικό κράμα είναι αυτό που ονομαδοτείται κατά την ASM ως C75400 και συναντάται με εμπορικές ονομασίες “Nickel Silver 65-15” ή CuNi15Zn20, και αποτελείται από 65% Χαλκό, 15% Νικέλιο, 20% Ψευδάργυρο. Άλλες συνήθως χρησιμοποιούμενες συστάσεις αλπακά είναι ο αλπακάς CuNi18Zn20 (CW409J) και ο αλπακάς CuNi12Zn24 (CW403J). Ο τελευταίος είναι αυτός που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή πειραμάτων στα πλαίσια της παρούσας μελέτης.

2.4.2 Αλουμίνιο

Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 1000 περιέχουν τουλάχιστον 99% Al. Οι τιμές των μηχανικών τους ιδιοτήτων είναι χαμηλές, αλλά βελτιώνονται με ενδοτράχυνση. Είναι κατάλληλα για κατεργασία εν ψυχρώ και αντέχουν σημαντικά σε υγρή και θαλάσσια ατμόσφαιρα. Παρουσιάζουν θαυμάσια ηλεκτρική αγωγιμότητα, -χρησιμοποιούνται για την κατασκευή συρμάτων, καλωδίων, κλπ,- θερμική αγωγιμότητα, -χρησιμοποιούνται για την κατασκευή καλοριφέρ κλπ,- και καλή αντοχή σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

Οι κυριότερες ακαθαρσίες που περιέχονται σ'αυτά τα κράματα είναι ο σίδηρος και το πυρίτιο, σε συνολικό ποσοστό έως 1% (κράμα 1100) [Χρυσουλάκης & Παντελής 1996].

2.4.3 Κριτήρια επιλογής κραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν

Τα κράματα που χρησιμοποιήθηκαν για την πλειοψηφία των πειραμάτων στα πλαίσια της μελέτης της παρούσας διατριβής, ήταν ο ορείχαλκος CuZn33 και ο αλπακάς CuNi12Zn24.

Ο Ορείχαλκος CuZn33 ή CW506L ή C26800, έχει ονομαστική σύσταση 66% Χαλκό, 33% Ψευδάργυρο. Στην πραγματικότητα, ενδέχεται να περιέχει σε πολύ μικρό ποσοστό και άλλα κραματικά στοιχεία. Τα ποσοστά περιεκτικότητας των κραματικών στοιχείων, κυμαίνονται στα ακόλουθα επίπεδα τιμών: 66-68%Cu, 0-0.5%Fe, 0-0.3%Ni, 0-0.02%Al, 0-0.05%Pb, 0-0.1%Sn και το υπόλοιπο Zn. Αναλυτικά οι ιδιότητες του συγκεκριμένου ορείχαλκου παρουσιάζονται συναρτήσει της θερμοκρασίας, στην §3.5.1.

Το τριμερές κράμα CuNi12Zn24 ή CW403J ή C75700 που χρησιμοποιήθηκε, αποτελείται από 62-66% Χαλκό, 11-13% Νικέλιο και περίπου 24% Ψευδάργυρο και ενδέχεται να περιέχει 0-0.5% Μαγγάνιο (Mn). Συναντάται, επίσης, με τις εμπορικές ονομασίες "Nickel Silver 65-12" ή "12% Nickel Silver". Οι θερμικές, ροϊκές και μηχανικές του ιδιότητες παρουσιάζονται στην §3.5.2 του επόμενου κεφαλαίου.

Τα κράματα χαλκού αυτά επιλέχθηκαν επειδή -όπως αναφέρθηκε στην §2.4.1- χρησιμοποιούνται ευρέως στη μηχανολογία, την αυτοκινητοβιομηχανία, αλλά και τη θαλάσσια τεχνολογία και τη ναυπηγική. Από κράματα χαλκού κατασκευάζεται πλήθος μηχανολογικών εξαρτημάτων όπως μέρη συστημάτων σωληνώσεων, βαλβίδες, συστήματα αντλιών, ρουλεμάν τριβής κλπ. Οι ιδιότητες που διαθέτουν και είναι πολύτιμες στη ναυπηγική είναι η σταθερότητα σε διάβρωση, η αντίσταση στη βιολογική διάβρωση, συνδυαζόμενες με καλή μηχανική αντοχή.

Επιπλέον λόγος για την ενασχόληση με τα εν λόγω κράματα χαλκού αποτελεί η έλλειψη στοιχείων στη βιβλιογραφία σχετικά με τη χύτευσή τους. Κάτι τέτοιο δεν ξενίζει, λόγω του ότι η κάθε περίπτωση χύτευσης είναι διαφορετική. Πληροφορίες που υπάρχουν για χύτευση κραμάτων χαλκού, αφορούν σε διαφορετικές τεχνικές χύτευσης. Μελέτες για χύτευση ακριβείας δεν αφορούν σε αυτά τα κράματα. Επιπλέον, η γεωμετρία και οι πειραματικές μετρήσεις της παρούσας μελέτης είναι διαφορετικές. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προσομοίωση της χύτευσης και η διεξαγωγή πειραμάτων εστιασμένων στην αποτελεσματικότερη μοντελοποίηση αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια. Αποτελούν, δηλαδή, πεδίο έρευνας σχετικά πρόσφατο. Ως εκ τούτου, η συγκεκριμένη προσέγγιση έχει εφαρμοστεί κυρίως για λίγα κράματα που έχουν εξειδικευμένες εφαρμογές.

Η επιλογή του αλουμινίου ως υλικό προς χύτευση είχε γίνει αρχικά επειδή για το συγκεκριμένο υλικό υπάρχουν δεδομένα στη βιβλιογραφία

σχετικά με τις τιμές του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας για την προσομοίωση. Η επιλογή του καθαρού αλουμινίου έγινε με το σκεπτικό ότι η απλούστερη μορφή της καμπύλης απόψυξης του καθαρού μετάλλου ενδεχομένως απλοποιούσε τους μετέπειτα αριθμητικούς υπολογισμούς.

2.5 Γεωμετρίες που χυτεύθηκαν

Οι γεωμετρίες χυτών που επιλέχθηκαν και χυτεύθηκαν στα πλαίσια των πειραμάτων της παρούσας διατριβής περιγράφονται στη συνέχεια. Η επιλογή των γεωμετριών έγινε με βάση το ζητούμενο της κάθε διερεύνησης. Τρεις ήταν οι λόγοι διερεύνησης:

1. *Χυτά για εύρεση βέλτιστων παραμέτρων κατά τη χύτευση.* Κατά το αρχικό στάδιο των πειραμάτων, πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές χυτεύσεις για εκμάθηση των δυνατοτήτων της μηχανής και καλιμπράρισμα των μετρητικών οργάνων. Οι γεωμετρίες που χυτεύθηκαν ήταν αντικείμενα της καθημερινότητας (μικρά μηχανολογικά εξαρτήματα, κοσμήματα, κλειδιά). Βασικό κριτήριο ήταν να μη χρειαστεί να κατασκευαστεί το πρότυπο (υπήρχαν έτοιμα τα αντικείμενα, και πρακτικά, έγινε αναπαραγωγή αυτών). Επιπλέον, ήταν σημαντικό, να υπάρχει ένας βαθμός δυσκολίας ή λεπτομέρειας στις γεωμετρίες αυτές. Κριτήρια καλής χύτευσης ήταν η σωστή πλήρωση του τύπου, η απουσία έντονων ατελειών και το χρώμα του μετάλλου. Υπήρχαν περιπτώσεις που το χυτό είχε τηχθεί σε θερμοκρασία πολύ μεγαλύτερη από τη Liquidus, κι έτσι το χυτό προϊόν είχε έντονα οξειδωμένη επιφάνεια με πολλούς πόρους, τόσο λόγω ενδεχόμενης οξείδωσης κατά την τήξη, όσο και λόγω έντονης αντίδρασης του κράματος με το υλικό του τύπου, στην υψηλή αυτή θερμοκρασία. Εικόνες από επιτυχημένα και αποτυχημένα δοκιμαστικά χυτά φαίνονται στο Σχήμα 2.37. Στο Σχ.2.37(α) διακρίνεται η πολύ καλή αποτύπωση όλων των λεπτομερειών της γεωμετρίας. Πρόκειται για αναπαραγωγή αντικειμένων καθημερινής χρήσης, σύνθετης γεωμετρίας. Στο Σχ.2.37(β) είναι χαρακτηριστική η έντονη οξείδωση.



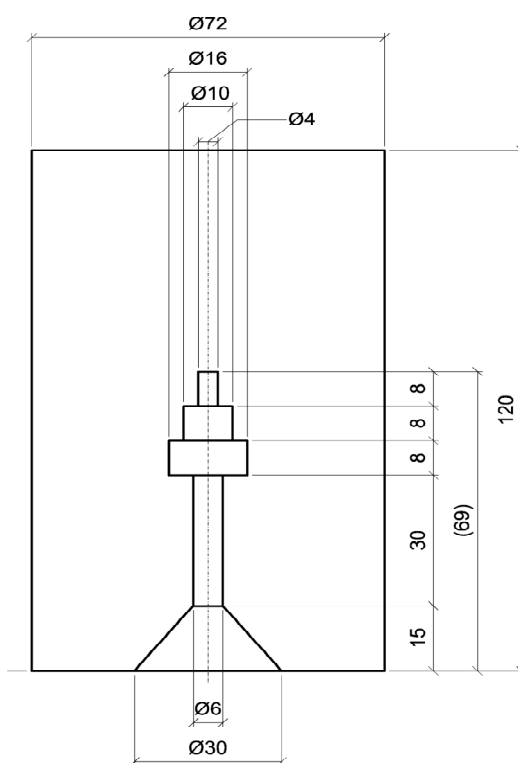
Σχήμα 2.37 Δοκιμαστικά χυτά από (α) επιτυχημένη χύτευση ορείχαλκου και (β) από αποτυχημένη χύτευση αλφακά.

2. *Χυτό που αποτέλεσε τη βασική γεωμετρία που μελετήθηκε.* Η βασική γεωμετρία χυτού που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής είναι το χυτό που φαίνεται στο Σχήμα 2.38 και το Σχήμα 2.39.



Σχήμα 2.38 Τρισδιάστατη γεωμετρική αναπαράσταση της μελετώμενης γεωμετρίας.

Το χυτό επιλέχθηκε να αποτελείται από τρεις ομοαξονικούς κύλινδρους, ίδιου ύψους αλλά διαφορετικών διατομών. Οι κύλινδροι είναι τοποθετημένοι κατά φθίνουσα σειρά διατομής: η βάση του χυτού αποτελείται από έναν κύλινδρο με διάμετρο $d=16\text{mm}$, ύψος $h=8\text{mm}$. Ακολουθεί ένας ομοαξονικός κύλινδρος με διάμετρο $d=10\text{mm}$, ύψος $h=8\text{mm}$ και αμέσως μετά, ένας λεπτότερος ομοαξονικός κύλινδρος διαμέτρου $d=4\text{mm}$, ύψος επίσης $h=8\text{mm}$. Η μπουκαδούρα του χυτού είναι κυλινδρική, διαμέτρου 5mm και μήκους 25mm . Ξεκινά από έναν κόλouro κώνο (μεγάλης διαμέτρου 30mm και μικρής διαμέτρου 6mm) και καταλήγει στη μεγάλη περιοχή του χυτού, ομοαξονικά. Οι διαστάσεις τόσο του δοκιμίου όσο και του καλουπιού, φαίνονται στο Σχήμα 2.39.



Σχήμα 2.39 Σχέδιο και διαστάσεις του χυτού και του καλουπιού που χρησιμοποιήθηκαν. δέντρου χύτευσης που χρησιμοποιήθηκε.

Το Casting Modulus (M ή M_c) είναι ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται ευρέως στη χύτευση. Ισούται με το λόγο του όγκου (V) του χυτού ή μίας περιοχής του χυτού προς την επιφάνεια (A) του αντίστοιχου χωρίου, δηλαδή

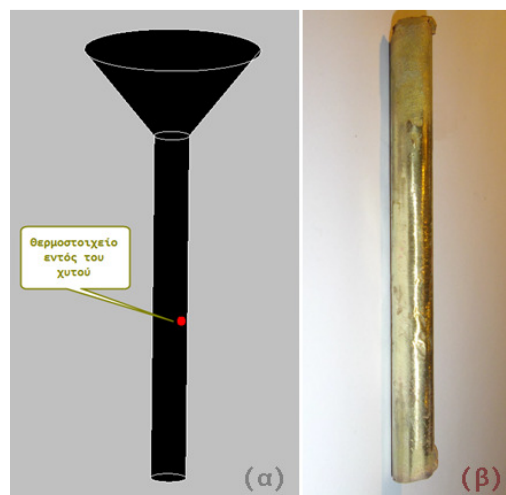
$$M_c = \frac{V}{A}$$

Το χυτό τεμάχιο που μελετήθηκε, αποτελείται από τρεις περιοχές με διαφορετικά casting moduli. Η περιοχή του κυλίνδρου με τη μεγάλη διατομή έχει $M_c=2$, η περιοχή με την ενδιάμεσου μεγέθους διατομή έχει $M_c=1.54$ και η περιοχή με τη μικρή διατομή έχει $M_c=0.8$.

Οι λόγοι για τους οποίους επελέγη η συγκεκριμένη γεωμετρία είναι:

- Το χυτό αποτελείται από περιοχές με διαβάθμιση διατομών. Παρόλο που είναι απλό, η έντονη διαβάθμιση προκαλεί μη ομαλή ροή. Συνεπώς, αναμένεται, να αποκαλυφθεί η αδυναμία ορισμένων συνθηκών χύτευσης να παράξουν ένα καλό χυτό. Με τον κατάλληλο σχεδιασμό πειραμάτων, αποκαλύπτεται η επίδραση των παραμέτρων της χύτευσης στο αποτέλεσμα (πλήρωση, πορώδες, ατέλειες).
- Ένας από τους στόχους της διερεύνησης είναι να μελετηθεί η επίδραση του διαφορετικού casting modulus στο θερμοκρασιακό πεδίο του χυτού, κατά τη στερεοποίηση, με τη χρήση θερμοστοιχείων.
- Τα δεδομένα θερμοκρασιών του πειράματος προκύπτουν διαφορετικά ανά διαφορετικό modulus και γίνεται προσπάθεια προσέγγισης αυτών από τα αντίστοιχα αριθμητικά.

3. *Χυτό δοκίμιο απλής γεωμετρίας, για περαιτέρω αναλυτικούς υπολογισμούς.* Κατά τη διάρκεια της μελέτης του κεφαλαίου 5 (§5.2), προέκυψε η ανάγκη χύτευσης κατάλληλης γεωμετρίας, προκειμένου να μπορεί να θεωρηθεί πως είναι σχετικά ρεαλιστικές οι παραδοχές για μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας. Το χυτό που προέκυψε φαίνεται στο Σχήμα 2.40.



Σχήμα 2.40 Το χυτό κυλινδρικής γεωμετρίας που χυτεύθηκε για λήψη πειραματικών μετρήσεων για διεξαγωγή αναλυτικών υπολογισμών. (α) Σχηματική αναπαράσταση της κοιλότητας του καλουπιού. Επισημαίνεται η θέση τοποθέτησης θερμοστοιχείου. (β) το χυτό προϊόν.

2.6 Περιγραφή Εξοπλισμού και Τεχνικών για Λήψη και Επεξεργασία Πειραματικών Αποτελεσμάτων και Δοκιμών

Για κάθε πείραμα χύτευσης, η ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε μέσω των ακόλουθων:

- Λήψη πειραματικών μετρήσεων θερμοκρασίας κατά τη χύτευση, με χρήση θερμοστοιχείων.
- Μεταλλογραφική προετοιμασία δοκιμών για:
 - Οπτική παρατήρηση στο στερεοσκόπιο και το μικροσκόπιο
 - Μέτρηση πορώδους
 - Μέτρηση απόστασης δενδριτικών κλάδων
 - Μέτρηση σκληρότητας
- Μέτρηση της συρρίκνωσης του χυτού κατά τη στερεοποίηση και απόψυξη.

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των εν λόγω μετρήσεων.

2.6.1 Λήψη Μετρήσεων Θερμοκρασίας με χρήση Θερμοστοιχείων

Θεμελιώδες κομμάτι της μελέτης αποτέλεσε η λήψη μετρήσεων θερμοκρασιών, κατά τη διάρκεια της χύτευσης. Θερμοστοιχεία τοποθετούνταν κατά τη διάρκεια κατασκευής των καλουπιών, στα σημεία ενδιαφέροντος. Τα σημεία ενδιαφέροντος ήταν θέσεις μέσα στο χυτό, στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού, θέσεις στο καλούπι, επίσης κοντά στη διεπιφάνεια και θέσεις κοντά στα εξωτερικά τοιχώματα του καλουπιού.

Για τη λήψη μετρήσεων θερμοκρασιών χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία που να αντέχουν και να μπορούν να λάβουν αξιόπιστες μετρήσεις στις υψηλές θερμοκρασίες. Ήταν αναγκαία η χρήση ειδικού εξοπλισμού και λογισμικού. Η λήψη των μετρήσεων αυτών, κατά τη χύτευση κενού, δεν θα ήταν εφικτή εάν δεν είχε πραγματοποιηθεί η ειδική τροποποίηση της μηχανής χύτευσης που περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο.

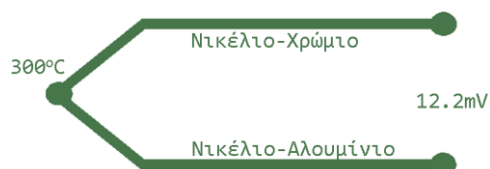
Ο εξοπλισμός λήψης μετρήσεων θερμοκρασίας και η τεχνική που ακολουθήθηκε παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.6.1.1 Data Acquisition Hardware

Ο εξοπλισμός (hardware) που χρησιμοποιήθηκε ήταν:

- (α) θερμοστοιχεία,
- (β) ψηφιο-αναλογικός μετατροπέας και
- (γ) ηλεκτρονικός υπολογιστής.

Θερμοστοιχεία: Τα θερμοστοιχεία είναι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια διαφορετικού μετάλλου που είναι ενωμένα μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα κοινό άκρο. Η λειτουργία τους βασίζεται στο φαινόμενο του Seebeck (θερμοηλεκτρικό φαινόμενο) κατά το οποίο όταν δυο ανόμοια μέταλλα έρθουν σε επαφή μεταξύ τους δημιουργείται διαφορά δυναμικού η οποία μεταβάλλεται με τη θερμοκρασιακή διαφορά (βλ. Σχήμα 2.41).



Σχήμα 2.41. Θερμοστοιχείο τύπου K

Τα θερμοστοιχεία δεν μετράνε απόλυτη θερμοκρασία αλλά θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα σε δυο σημεία. Έτσι θεωρούμε γνωστή τη θερμοκρασία του ενός άκρου (του ψυχρού) και το άλλο το τοποθετούμε στη περιοχή που επιθυμούμε να κάνουμε τη μέτρηση. Η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται είναι δυνατό να μετατραπεί σε θερμοκρασιακές μονάδες με δυο τρόπους

- Πίνακες αντιστοιχίας διαφοράς δυναμικού-θερμοκρασίας
- Πολυωνυμική παρεμβολή

Σύνδεση: Τα θερμοστοιχεία τοποθετούνται σε μετρητικό όργανο στο ένα άκρο τους και το άλλο στην περιοχή της μέτρησης. Συνήθως χρησιμοποιούνται προεκτάσεις των καλωδίων των θερμοστοιχείων, που πρέπει να είναι από το ίδιο υλικό, με την κατάλληλη μόνωση ώστε να επιτυγχάνονται ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Μετατροπή: Η σχέση που συνδέει τη διαφορά δυναμικού με τη θερμοκρασία είναι μη γραμμική και μπορεί να προσεγγιστεί με πολυωνυμικούς συντελεστές της ακόλουθης μορφής:

$$T = \sum_{n=0}^N a_n \cdot v^n$$

Τύποι θερμοστοιχείων: Ανάλογα με το εύρος της θερμοκρασιακής διαφοράς και την ακρίβεια που επιθυμούμε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διάφορους τύπους θερμοστοιχείων. Στην περίπτωση μας θα εξετάσουμε τον «τύπο K» ωστόσο υπάρχουν και άλλοι τύποι όπως οι E, J, N, B, R, S, T, C και M.

Τύπος K: Είναι από τους πιο συνηθισμένους τύπους και τα ηλεκτρόδια αποτελούνται από χρώμιο, νικέλιο και αλουμίνιο. Είναι σχετικά φθηνά και διατίθενται σε ποικιλία ενώσεων των άκρων. Μπορούν να μετρήσουν θερμοκρασίες από -200 ως 1250 βαθμούς Κελσίου. Έχουν όμως ένα βασικό μειονέκτημα που είναι η μαγνητικότητα του νικελίου που επηρεάζει την ακρίβεια της μέτρησης κοντά στη θερμοκρασία Curie του νικελίου (345°C). Η ευαισθησία αυτού του τύπου θερμοστοιχείων είναι περίπου 41μV/C.

Τοποθέτηση θερμοστοιχείων: Η μέτρηση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών, από τη στιγμή της απόχυσης έως τη στερεοποίηση του λιωμένου μετάλλου επιτεύχθηκε με τη χρήση θερμοστοιχείων τύπου K, τα οποία τοποθετήσαμε στο εκάστοτε δέντρο χύτευσης (με τοπική τήξη του κέρινου ομοιώματος και προσεκτική τοποθέτηση της άκρης του θερμοστοιχείου).

Ψηφιο-αναλογικός μετατροπέας και H/Y: Εξαιτίας του ότι το σήμα που μεταδίδουν τα θερμοστοιχεία είναι αναλογικό, απαιτείται η χρήση ενός μετατροπέα που παρεμβάλλεται πριν τον ηλεκτρονικό υπολογιστή για να το μετατρέψει σε ψηφιακό. Ο αναλογικο-ψηφιακός μετατροπέας (D/A converter) που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Personal Daq/55 (Σχήμα 2.42(β)), ο οποίος διαθέτει 5 κανάλια εισόδου. Για μεγαλύτερη ευκολία χρησιμοποιήσαμε φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή (laptop), που διέθετε το πρόγραμμα PDAQ

VIEW, ώστε να είναι εφικτή η επισκόπηση των μετρήσεων από τα θερμοστοιχεία (βλ. Σχήμα 2.42).



Σχήμα 2.42 (α) Σύνδεση θερμοστοιχείων στο μετατροπέα, (β) Ο αναλογικο-ψηφιακός μετατροπέας που χρησιμοποιήθηκε, (γ) Η απευθείας απεικόνιση των μετρήσεων σε laptop.

Συχνότητα δειγματοληψίας: Με τον ψηφιο-αναλογικό μετατροπέα που χρησιμοποιήθηκε, η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν 25Hz, δηλαδή 25μετρήσεις/sec. Με άλλα λόγια, η χρονική απόσταση από τη μία μέτρηση θερμοκρασίας στην επόμενη ήταν 0.039sec. Αυτή η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν η μέγιστη δυνατή υποστηριζόμενη από το συγκεκριμένο μετατροπέα και ήταν δυνατό να επιτευχθεί όταν γινόταν λήψη μετρήσεων θερμοκρασία με ένα θερμοστοιχείο. Στις περιπτώσεις που γινόταν μέτρηση με δύο θερμοστοιχεία ταυτόχρονα, η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν 18Hz, ενώ για λήψη μέτρησης από τρία θερμοστοιχεία ταυτόχρονα η συχνότητα ήταν 12.5Hz.

2.6.1.2 Λογισμικό Λήψης Μετρήσεων (Data Acquisition Software)

Για μεγαλύτερη ευκολία χρησιμοποιήσαμε φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή (laptop), που διαθέτετε το πρόγραμμα PDAQ VIEW, ώστε να είναι εφικτή η επισκόπηση των μετρήσεων από τα θερμοστοιχεία. Οι μετρήσεις αποθηκεύονταν είτε σε ASCII αρχείο είτε σε αρχείο κειμένου. Περαιτέρω επεξεργασία έγινε με χρήση του MATLAB.

2.6.1.3 Επεξεργασία ψηφιακού σήματος

Κατά τη λήψη μετρήσεων θερμοκρασιών από τα θερμοστοιχεία, το ψηφιακό σήμα που λαμβάνεται είναι συνήθως της μορφής του Σχήματος 2.43. Πρόκειται για σήμα με θόρυβο. Μία διακύμανση της τάξης των ± 1.5 είναι η συνηθισμένη για τα θερμοστοιχεία τύπου-K που χρησιμοποιήθηκαν. Υπάρχουν, ωστόσο και περιπτώσεις στις οποίες παρατηρούνται πολύ έντονες διακυμάνσεις, είτε τυχαίες είτε πιο συστηματικές. Αυτές μπορεί να οφείλονται είτε σε κάποιο τυχαίο γεγονός (πχ. απώλεια επαφής μεταξύ καλωδίων θερμοστοιχείων και μετατροπέα) είτε σε κάποιο φαινόμενο (πχ κατά τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή χυτού-αέρα, η απόκριση των θερμοστοιχείων μπορεί να είναι αργή ή να εμφανίζονται εντονότερες κυματώσεις (oscillations) του σήματος), οπότε χρειάζεται παρατήρηση και αξιολόγηση της μορφής και των χαρακτηριστικών της εκάστοτε καμπύλης. Σημειώνεται πως τα θερμοστοιχεία έχουν αξιόπιστη και γρήγορη απόκριση όταν η μετάδοση θερμότητας γίνεται με αγωγή ή με συναγωγή υγρού-στερεού, δηλ. όταν η άκρη του θερμοστοιχείου είναι εντελώς βυθισμένη στο μέταλλο.

Επειδή οι μετρήσεις θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για αριθμητική σύγκριση με τις αντίστοιχες καμπύλες που θα προκύψουν από προσομοίωση, κρίνεται χρήσιμη η εξομάλυνσή τους.

Για τις μετρήσεις που ελήφθησαν από τα θερμοστοιχεία, η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν δύο βημάτων:

i. Εξομάλυνση πειραματικών δεδομένων με το φίλτρο Savitzky - Golay

Το φίλτρο Savitzky-Golay (S-G smoothing filter) που χρησιμοποιήθηκε για την εξομάλυνση των πειραματικών δεδομένων, θεωρείται μία πολύ διαδεδομένη μέθοδος επεξεργασίας σήματος. Οι Savitzky και Golay, στη δημοσίευσή τους [Savitzky & Golay 1964], έδειξαν ότι μπορεί να υπολογιστεί μία ομάδα ακέραιων αριθμών ($A_{-n}, A_{-(n-1)}, \dots, A_{n-1}, A_n$), οι ακέραιοι συνέλιξης (convolution integers), που μπορούν να χρησιμεύσουν ως συντελεστές στατιστικού βάρους κατά τη διαδικασία εξομάλυνσης. Το εξομαλυμένο σημείο $(y_k)_s$ του αλγορίθμου S-G θα υπολογίζεται από τη σχέση
$$(y_k)_s = \frac{\sum_{i=-n}^n A_i y_{k+i}}{\sum_{i=-n}^n A_i}$$
 Το φίλτρο εξομάλυνσης Savitzky-Golay ουσιαστικά εκτελεί μία τοπική παλινδρόμηση (k βαθμού) σε μία σειρά τιμών (τουλάχιστον k+1 τιμών) τα οποία μεταχειρίζονται σαν να ήταν ισομερώς καταμερισμένα στο χρόνο για να καθορίσουν μία εξομαλυμένη τιμή για κάθε σημείο.

Το κύριο πλεονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι ότι τείνει να διατηρήσει τα χαρακτηριστικά της κατανομής, όπως τα τοπικά μέγιστα κι ελάχιστα και το πάχος του σήματος, τα οποία συνήθως «ισοπεδώνονται» από άλλες παρεμφερείς τεχνικές εύρεσης μέσου όρου. Επίσης, πρόκειται για μία μέθοδο αποτελεσματική, απλή και γρήγορη συγκριτικά με παρόμοιες μεθόδους. Το βασικό μειονέκτημα του S-G φίλτρου είναι ότι απαιτείται κάποιος πειραματισμός προκειμένου να ευρεθούν οι κατάλληλες τιμές παραμέτρων του φίλτρου, ώστε να προκύψει το βέλτιστο, για την εκάστοτε περίπτωση, σήμα.

Εφαρμόζοντας το φίλτρο, παρατηρήθηκε πολύ καλή αποτύπωση της μορφής της καμπύλης και στις περισσότερες περιπτώσεις, διατήρηση της μέγιστης τιμής θερμοκρασίας, που σημειώνεται κατά τα πρώτα λίγα ms. Σε ορισμένες περιπτώσεις αυτό δε συνέβαινε, γι αυτό χρειάστηκε τοπική επεξεργασία του σήματος, καθώς τα φαινόμενα κατά τα πρώτα πολύ λίγα δευτερόλεπτα της χύτευσης είναι έντονα, ταχύτατα και ως εκ τούτου η πληροφορία σε εκείνη την περιοχή είναι πολύ σημαντική.

Στο τέλος αυτού του βήματος, το σήμα, δηλαδή οι μετρήσεις από τα θερμοστοιχεία, διέθεταν πολύ λιγότερο θόρυβο και είχαν εξομαλυθεί αρκετά.

ii. Προσαρμογή (fitting), είτε με παρεμβολή με κυβικές splines, είτε με χρήση καμπυλών splines εξομάλυνσης (smoothing splines).

Στο φιλτραρισμένο και εξομαλυμένο σήμα, εφαρμόστηκε προσαρμογή η οποία υλοποιήθηκε σε κάποιες περιπτώσεις με παρεμβολή (interpolation) με

κυβικές splines και σε κάποιες άλλες με χρήση “smoothing splines”. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, οι πειραματικές μετρήσεις από τα θερμοστοιχεία πρόκειται να συγκριθούν σε επόμενο κεφάλαιο με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα. Συνεπώς, απαιτείται η εξάλειψη ακόμα και των μικρών εμφανιζόμενων κυματώσεων που εξακολουθούν και υπάρχουν στο σήμα μετά την εκτέλεση του πρώτου βήματος.

Η λογική που ακολουθήθηκε ήταν η παρεμβολή και η λήψη ορισμένων σημείων παρεμβολής, με χρονικό βήμα μικρό μεν, μεγαλύτερο δε από τα 0.039ms της δειγματοληψίας.

Αρχικά, χρειάστηκε να επιλεγεί μία μέθοδος παρεμβολής κατάλληλης, που να διατηρεί ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά της καμπύλης και να εφαρμόζεται με επιτυχία σε όλες τις περιπτώσεις. Διερευνήθηκαν οι περισσότερες από τις κλασικές μεθόδους παρεμβολής (γραμμική, πολυωνμική, nearest neighbor, shape preserving) και οι δύο μέθοδοι που τελικά χρησιμοποιήθηκαν ήταν αυτές που πληρούσαν τις προϋποθέσεις.

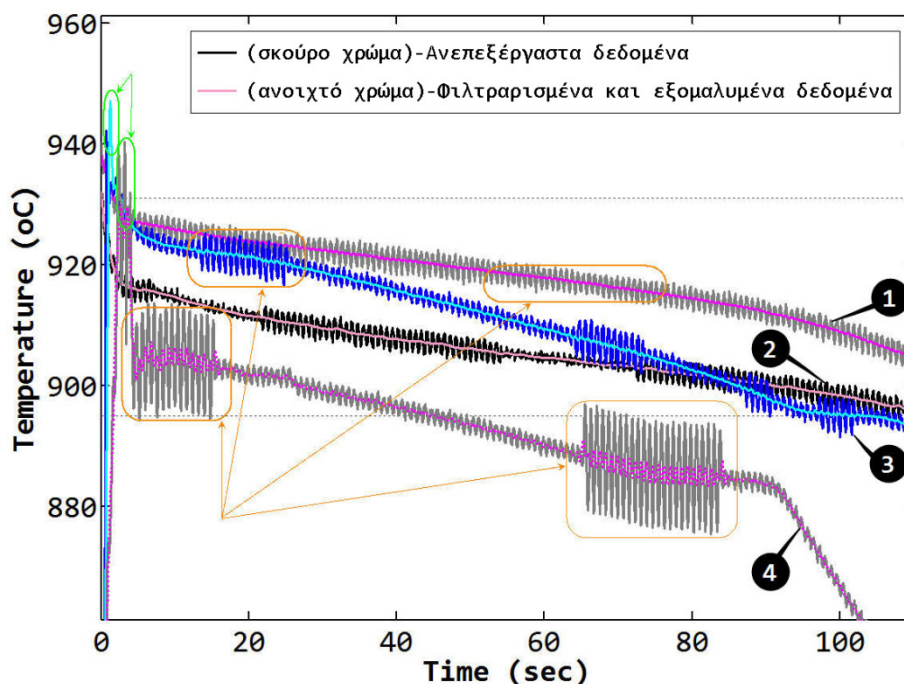
Συνοπτικά, αναφέρεται πως το πρόβλημα της παρεμβολής είναι να βρεθεί μία συνάρτηση η οποία να περνά από γνωστά σημεία t_0, t_1, \dots, t_n . Με γνωστά τα σημεία ή τη συνάρτηση αυτών ($x(t)$), το ζητούμενο είναι να βρεθεί ποια είναι η τιμή της $x(t)$ σε κάποιο άλλο σημείο t . Το πρόβλημα της παρεμβολής δεν είναι καλώς ορισμένο, καθώς είναι σαφές πως υπάρχει πλήθος συναρτήσεων που διέρχεται από τα δεδομένα σημεία. Για να επιλυθεί το πρόβλημα αυτό, είναι αναγκαίο να τεθούν κάποιες επιπρόσθετες προϋποθέσεις, οι οποίες θα δώσουν την αναγκαία επιπρόσθετη πληροφορία. Είναι συνήθης η απαίτηση για ομαλότητα της συνάρτησης, δηλαδή να υπάρχει συνέχεια παραγώγων.

Σχετικά με τις κυβικές splines, χρησιμοποιούνται κυβικά πολυώνυμα παρεμβάλλοντα σε δύο μόνον σημεία. Κάθε κομμάτι είναι ελεύθερο να ενωθεί με τα γειτονικά του ομαλά. Κάθε κυβικό πολυώνυμο έχει 4 παραμέτρους. Οι 2 από αυτές χρησιμοποιούνται για να υλοποιηθεί η παρεμβολή στα δύο σημεία. Περισεύουν 2 παράμετροι, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να καταστεί η παρεμβάλλουσα ομαλή. Ας υποθεθεί, για παράδειγμα ότι γίνεται παρεμβολή σε $n+1$ δεδομένα σημεία, με χρήση n κυβικών πολυωνύμων. Η πορεία που ακολουθείται είναι: το κάθε κομμάτι πρέπει να παρεμβάλλει τα δεδομένα σημεία που το αφορούν. Αυτό περιορίζει τις 2 παραμέτρους. Επίσης, πρέπει τα γειτονικά κομμάτια να έχουν ίδιες τιμές πρώτων παραγώγων στα κοινά τους σημεία, κι έτσι εισάγονται άλλοι $n-1$ περιορισμοί. Η απαίτηση για ίδια τιμή δευτέρων παραγώγων στα κοινά σημεία γειτονικών τμημάτων εισάγει άλλους $n-1$ περιορισμούς. Περισεύουν δύο παράμετροι, οι οποίες μπορούν να δεσμευτούν με την απαίτηση για μηδενικές τιμές δευτέρων παραγώγων στα άκρα. Η διαδικασία αυτή περιγράφει τις κυβικές splines.

Στις πειραματικές καμπύλες απόψυξης κατά τη χύτευση, υπάρχουν χρονικές περιοχές πολύ έντονου ενδιαφέροντος. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως,

είναι πολύ σημαντική η γνώση της ταχύτητας μετάδοσης θερμότητας κατά την έγχυση και αμέσως μετά την πλήρωση του καλουπιού με το τήγμα. Σε εκείνο το στάδιο, η μετάδοση θερμότητας από το υψηλής θερμοκρασίας τήγμα στο κατά πολύ ψυχρότερο καλούπι είναι πολύ έντονη. Είναι χαρακτηριστικό, ότι μέσα στο 1^ο δευτερόλεπτο η θερμοκρασιακή πτώση μπορεί να είναι πχ 40°C κι έτσι είναι πολύ σημαντική η λήψη της πληροφορίας. Υπάρχουν, όμως και άλλες περιπτώσεις, κατά τις οποίες μεσολαβούν 100sec για να πέσει η θερμοκρασία 20°C, κι έτσι η ακρίβεια της πληροφορίας δεν απασχολεί. Επισημαίνεται στη βιβλιογραφία [Todoroki & Rhinichka 2009] η ανάγκη για μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας προκειμένου να καταγραφεί η θερμοκρασιακή πτώση κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα της χύτευσης. Εφόσον, η συχνότητα δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν αρκετά ικανοποιητική, δεν θα ήταν καλό να χαθεί πληροφορία μόνο και μόνο λόγω του φιλτραρίσματος. Για το λόγο αυτό, η επεξεργασία σήματος δεν ήταν ίδια για όλες τις περιπτώσεις. Υπήρχαν καμπύλες απόψυξης στις οποίες η εμφανιζόμενη «κορυφή» (μέγιστη θερμοκρασία) δεν αλλοιώθηκε σχεδόν καθόλου κατά το φιλτράρισμα. Σε κάποιες άλλες περιπτώσεις, όμως, χανόταν σημαντική πληροφορία. Στις περιπτώσεις αυτές, τα πρώτα 1-10sec θεωρήθηκαν ξεχωριστό σήμα και εξομαλύνθηκαν διαφορετικά. Για παράδειγμα, η παρεμβολή σε εκείνη την περίπτωση ήταν ανά 0.1sec, ενώ στα επόμενα δευτερόλεπτα η παρεμβολή μπορεί να ήταν ανά 1sec ή ανά 10sec, τοπικά.

Στο Σχήμα 2.43 που ακολουθεί, παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες καμπύλες απόψυξης, με τα πειραματικά σημεία να είναι εντελώς ανεπεξέργαστα (καμπύλες σκούρου χρώματος). Απεικονίζονται, επιπλέον, οι πειραματικές καμπύλες απόψυξης που έχουν προκύψει αμέσως μετά το φιλτράρισμα (καμπύλες ανοιχτού χρώματος).



Σχήμα 2.43 Αντιπαραβολή μετρήσεων θερμοκρασίας ανεπεξέργαστων (σκούρες αποχρώσεις) και φιλτραρισμένων (ανοιχτόχρωμες αποχρώσεις)

Είναι εμφανές πως στο Σχήμα 2.43 παρουσιάζονται τέσσερις περιπτώσεις σημάτων, που διαφέρουν ως προς την ποιότητά τους. Η καμπύλη «1» είναι αρκετά ομοιόμορφη, με ομοιόμορφες διακυμάνσεις $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ σχεδόν σε όλη της τη διαδρομή. Η αδράνεια του θερμοστοιχείου είναι δεδομένη, κι έτσι η περίοδος των κυματώσεων είναι σταθερά μικρή. Υπάρχουν, ωστόσο, περιπτώσεις, στις οποίες το «πάχος» της ανεπεξέργαστης καμπύλης απόψυξης δεν είναι σταθερό. Στην καμπύλη «2», υπάρχουν περιοχές με πολύ μικρότερου εύρους διακύμανση ($\pm 0.7^{\circ}\text{C}$), αλλά και περιοχές με διακύμανση $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$. Στην καμπύλη «3», υπάρχουν 4 περιοχές στις οποίες το εύρος του σήματος είναι μεν σταθερό, αλλά πιο αυξημένο ($\pm 1.5^{\circ}\text{C}$). Το ίδιο συμβαίνει και με την καμπύλη «4», μόνο που αυτή τη φορά, στις δύο περιοχές που επισημαίνονται με το κίτρινο πλαίσιο στο σχήμα, η διακύμανση ανέρχεται στο ($\pm 15.0^{\circ}\text{C}$). Το σφάλμα είναι πολύ μεγάλο, είναι ωστόσο συστηματικό. Οι λόγοι εμφάνισης των περιοχών αυτών αναφέρεται στην αρχή της παραγράφου 2.6.1.3, στη σελίδα 129. Αξίζει να σημειωθεί πως το φιλτραρισμένο σήμα ακολουθεί πολύ καλά την πορεία της καμπύλης και αποτυπώνει την τάση της ακόμα και στις περιοχές έντονου θορύβου. Ειδικά στα πρώτα δευτερόλεπτα της καμπύλης «4», εμφανίζεται η αναμενόμενη «υπέρτηξη». Ως εκ τούτου, το σήμα κρίνεται αξιοποιήσιμο, αλλά απαιτεί επιπλέον επεξεργασία εξομάλυνσης σε σχέση με τα υπόλοιπα.

2.6.1.4 Θέσεις Τοποθέτησης Θερμοστοιχείων

Οι θέσεις τοποθέτησης θερμοστοιχείων για τη λήψη πειραματικών μετρήσεων θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της χύτευσης επελέγησαν με βάση τους τεχνικούς *περιορισμούς* και τους επιθυμητούς *στόχους*.

Οι *περιορισμοί* έχουν να κάνουν με τον αριθμό των θερμοστοιχείων. Δεδομένου ότι πρόκειται για χύτευση με αναλώσιμο καλούπι και όχι με μόνιμο καλούπι, δεν υπάρχει συγκεκριμένος περιορισμός στο πλήθος και τη θέση των θερμοστοιχείων που μπορούν να τοποθετηθούν. Είναι, ωστόσο, σημαντικό να λαμβάνεται υπ' όψιν ο όγκος που καταλαμβάνουν τα θερμοστοιχεία μέσα στο χυτό, καθώς δεν είναι επιθυμητή η αλλοίωση του θερμοκρασιακού πεδίου εξαιτίας της τοποθέτησής τους. Στη βιβλιογραφία (βλ. Σχήμα 1.41, σελ.72) αναφέρεται η έντονη αλλοίωση της θερμοκρασιακής κατανομής του χυτού, από θερμοστοιχεία που εισχωρούν αρκετά στο χυτό.

Ο δεύτερος περιορισμός είχε να κάνει με τη μηχανή χύτευσης κενού. Με την ειδική τροποποίηση για τις ανάγκες των πειραμάτων, δίνεται η δυνατότητα για τοποθέτηση τριών θερμοστοιχείων. Υπενθυμίζεται πως ο περιορισμός έχει να κάνει με τη διατήρηση της στεγανότητας του θαλάμου χύτευσης κατά τη χύτευση εν κενώ.

Ο τρίτος περιορισμός είχε να κάνει με το πλήθος των καναλιών του αναλογικο-ψηφιακού μετατροπέα και τη συχνότητα δειγματοληψίας. Η κάρτα λήψης μετρήσεων (data acquisition) διαθέτει 5 κανάλια. Χρήση και των 5 καναλιών μειώνει τη συχνότητα δειγματοληψίας από τα 25Hz στα 5Hz. Και τα 5 κανάλια χρησιμοποιήθηκαν σε μία δοκιμαστική χύτευση βαρύτητας του ίδιου δοκιμίου. Διαπιστώθηκε πως είναι σημαντικότερο να χρησιμοποιηθούν

λιγότερα θερμοστοιχεία, αλλά με μεγαλύτερη ταχύτητα απόκρισης, προκειμένου να αποτυπωθούν τα φαινόμενα των πρώτων στιγμών της χύτευσης, παρά περισσότερα θερμοστοιχεία, με χαμηλότερη απόκριση, σε ένα τόσο μικρό χυτό.

Οι **στόχοι** των πειραμάτων με τοποθέτηση θερμοστοιχείων για τη λήψη πειραματικών μετρήσεων θερμοκρασίας για διάφορα σενάρια χύτευσης ήταν τέσσερις που χωρίζονται σε δύο κατηγορίες.

1η κατηγορία. Θερμοστοιχεία για μέτρηση της θερμοκρασίας του κράματος κατά τη χύτευση. Το άκρο (tip) των θερμοστοιχείων βρίσκεται μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού. Όταν το τήγμα εισχωρεί και γεμίζει την κοιλότητα του τύπου, μοιραία αγκαλιάζει και το θερμοστοιχείο. Έτσι, πραγματοποιείται μέτρηση της θερμοκρασίας του μετάλλου κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης και της απόψυξης. Τελικά, το θερμοστοιχείο καταλήγει εγκλωβισμένο εντός του χυτού.

1^{ος} στόχος: Να αποκαλυφθεί -ποιοτικά και ποσοτικά- η διαφορετική θερμοκρασιακή απόκριση για τα διάφορα σενάρια χύτευσης και άρα η επίδραση των συνθηκών χύτευσης στην ταχύτητα στερεοποίησης. Οι συνθήκες χύτευσης περιλαμβάνουν: (α) τη θερμοκρασία του καλουπιού, (β) τη θερμοκρασία έγχυσης, (γ) την πίεση στο θάλαμο τήξης, (δ) το κενό στο θάλαμο χύτευσης και (ε) τη γεωμετρία του χυτού.

2^{ος} στόχος: Να χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις θερμοκρασίας (πειραματικές καμπύλες απόψυξης) στο Κεφάλαιο 4, για τον υπολογισμό ενός μεγέθους πολύ σημαντικού για την αριθμητική προσομοίωση της χύτευσης, του «συντελεστή μετάδοσης θερμότητας» (ΣΜΘ). Ο υπολογισμός του ΣΜΘ απαιτεί μετρήσεις θερμοκρασίας στο χυτό, στην περιοχή κοντά στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού.

2η κατηγορία. Θερμοστοιχεία για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του καλουπιού κατά τη διάρκεια της χύτευσης

3^{ος} στόχος: Να μετρηθεί η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του καλουπιού, πληροφορία που θα χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό των οριακών συνθηκών του προβλήματος προσομοίωσης της χύτευσης (κεφάλαιο 3).

4^{ος} στόχος: Να πραγματοποιηθεί λήψη μετρήσεων της θερμοκρασίας σε περιοχή του καλουπιού πολύ κοντά στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού. Τα πειραματικά δεδομένα αυτά, μαζί με τα πειραματικά δεδομένα του 2^{ου} στόχου από το ίδιο πείραμα χρησιμοποιούνται στο κεφάλαιο 4 για τον υπολογισμό του ΣΜΘ.

Η τοποθέτηση των θερμοστοιχείων για την 1^η κατηγορία πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με τοπική τήξη του κέρινου ομοιώματος, έτσι ώστε η άκρη του θερμοστοιχείου να βρίσκεται βυθισμένη μέσα στο κερί, αλλά να βρίσκεται πολύ κοντά στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού. Η διάμετρος της σφαιρικής άκρης του θερμοστοιχείου είναι περίπου 1mm. Η χρήση των

θερμοστοιχείων με τη μορφή καλωδίου είναι ιδανική για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, μιας και αρκεί η σφαιρική άκρη του θερμοστοιχείου να είναι οριακά βυθισμένη στο κερί ώστε να εξασφαλιστεί η επιτυχής λήψη μετρήσεων. Η απόσταση της θέσης λήψης μέτρησης από τη διεπιφάνεια επαφής είναι από τις μικρότερες (ίσως η μικρότερη) αναφερόμενες στη βιβλιογραφία, για αντίστοιχα πειράματα.

Η τοποθέτηση θερμοστοιχείων για τη 2^η κατηγορία βασίστηκε στο ότι τα καλώδια των θερμοστοιχείων είχαν τη δυνατότητα να καμφθούν και να διατηρήσουν το σχήμα τους. Η τοποθέτηση έπρεπε να γίνει στη φάση που το κέρινο δέντρο χύτευσης και το μούφλο ήταν στερεωμένα στη λαστιχένια βάση, αλλά πριν την έγχυση του γύψου. Σε πρώτη φάση, επιλεγόταν η επιθυμητή θέση μέτρησης, το καλώδιο του θερμοστοιχείου διαμορφωνόταν έτσι ώστε η άκρη του να στέκεται (αιωρείται) στην περιοχή μέτρησης. Για την καλύτερη στερέωση της άκρης στην επιθυμητή θέση, χρησιμοποιήθηκαν επικουρικά, μικρά σκοινιά που σταθεροποιούσαν τη θέση του θερμοστοιχείου ως προς το μούφλο. Μετά την ολοκλήρωση τη διαδικασίας αυτή γινόταν έγχυση του γύψου στο καλούπι.

Με γνώμονα τα όσα αναφέρθηκαν, λήψη μετρήσεων θερμοκρασίας πραγματοποιήθηκε για τις ακόλουθες περιπτώσεις ως προς τη θέση των θερμοστοιχείων:

1^η περίπτωση: Τοποθέτηση ενός θερμοστοιχείου εντός του χυτού, στην περιοχή της μεγάλης διατομής (1^η κατηγορία, 1^{ος} στόχος (α, β, γ) & 2^{ος} στόχος). (Σχήμα 2.44)

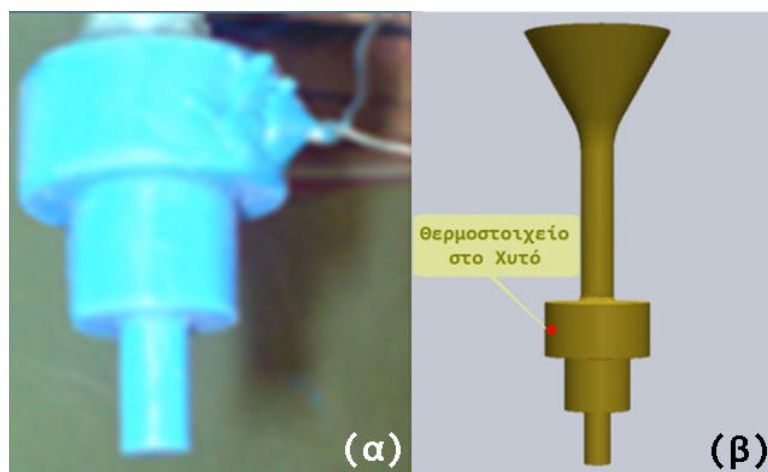
2^η περίπτωση: Τοποθέτηση ενός θερμοστοιχείου εντός του χυτού, στην περιοχή της μεγάλης διατομής (1^η κατηγορία, 1^{ος} & 2^{ος} στόχος) και ενός στην εξωτερική επιφάνεια του καλουπιού (2^η κατηγορία, 3^{ος} στόχος). (Σχήμα 2.45)

3^η περίπτωση: Τοποθέτηση ενός θερμοστοιχείου εντός του χυτού, στην περιοχή της μεγάλης διατομής (1^η κατηγορία, 2^{ος} στόχος), ενός δεύτερου στο καλούπι στην περιοχή κοντά στη διεπιφάνεια (2^η κατηγορία, 4^{ος} στόχος) και ενός τρίτου στην εξωτερική επιφάνεια του καλουπιού (2^η κατηγορία, 3^{ος} στόχος). (Σχήμα 2.46)

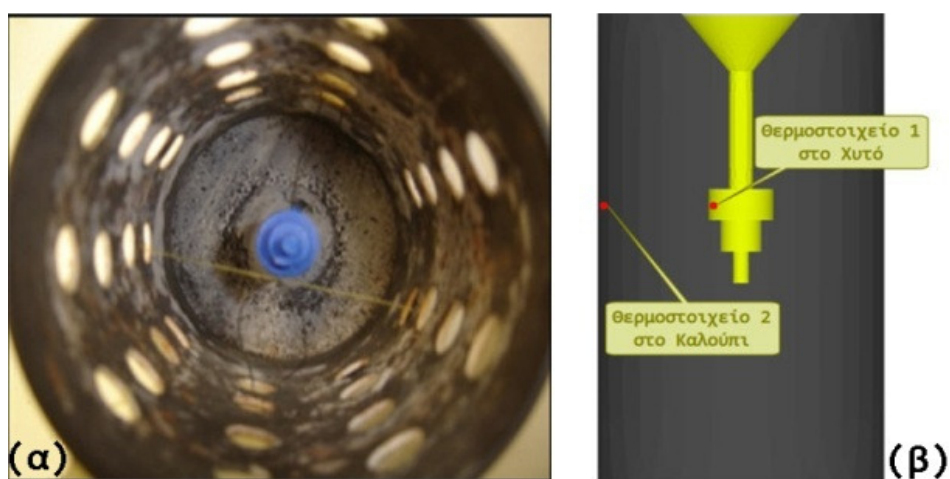
4^η περίπτωση: Τοποθέτηση δύο θερμοστοιχείων εντός του χυτού: ενός στην περιοχή της μεγάλης διατομής κι ενός στην αρχή της μπουκαδούρας (Σχ2.47)

5^η περίπτωση: Τοποθέτηση τριών θερμοστοιχείων εντός του χυτού: ενός στην περιοχή της μεγάλης διατομής, ενός στην αρχή της μπουκαδούρας κι ενός στο τέλος της μπουκαδούρας. (Σχήμα 2.48)

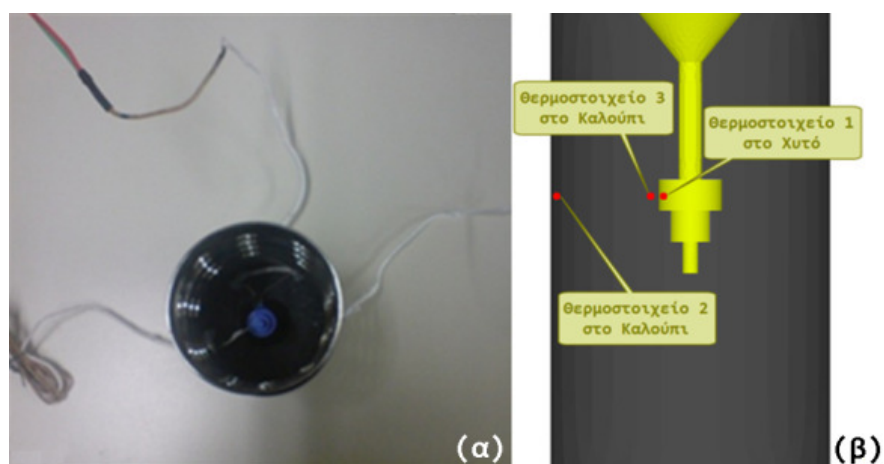
6^η περίπτωση: Τοποθέτηση τριών θερμοστοιχείων εντός του χυτού: ένα στην κάθε περιοχή διαφορετικής διατομής του χυτού, δηλαδή ένα στη μεγάλη, ένα στη μεσαία και ένα στη μικρή διατομή. (Σχήμα 2.49)



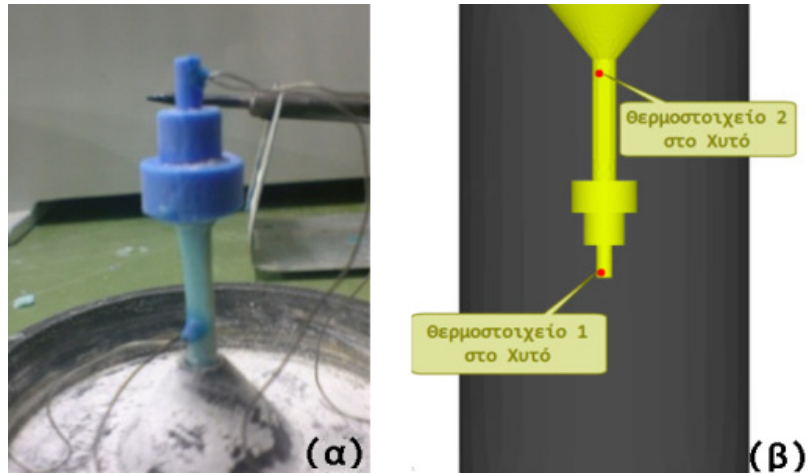
Σχήμα 2.44 (α) Φωτογραφία και (β) Σχηματική απεικόνιση της θέσης τοποθέτησης θερμοστοιχείου για την 1^η περίπτωση μελέτης



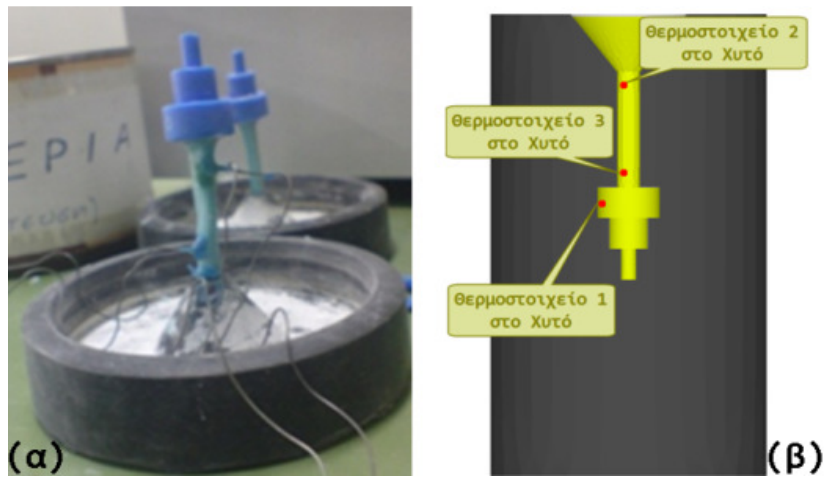
Σχήμα 2.45 (α) Φωτογραφία και (β) Σχηματική απεικόνιση της θέσης τοποθέτησης θερμοστοιχείου για τη 2^η περίπτωση μελέτης



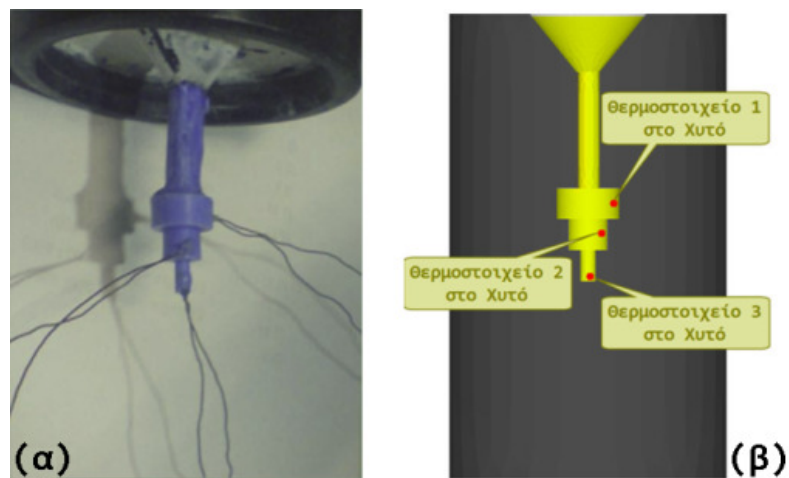
Σχήμα 2.46 (α) Φωτογραφία και (β) Σχηματική απεικόνιση της θέσης τοποθέτησης θερμοστοιχείου για την 3^η περίπτωση μελέτης



Σχήμα 2.47 (α) Φωτογραφία και (β) Σχηματική απεικόνιση της θέσης τοποθέτησης θερμοστοιχείου για την 4^η περίπτωση μελέτης



Σχήμα 2.48 (α) Φωτογραφία και (β) Σχηματική απεικόνιση της θέσης τοποθέτησης θερμοστοιχείου για την 5^η περίπτωση μελέτης



Σχήμα 2.49 (α) Φωτογραφία και (β) Σχηματική απεικόνιση της θέσης τοποθέτησης θερμοστοιχείου για την 6^η περίπτωση μελέτης

2.6.2 Μεταλλογραφική Εξέταση Χυτών Δοκιμίων

Το χυτό αντικείμενο που χρησιμοποιήθηκε είναι το τεμάχιο με τις τρεις κυλινδρικές διατομές. Αφού καθαρίστηκε από το γύψο και η θερμοκρασία του έφτασε τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, δεν υπέστη καμία περαιτέρω θερμική κατεργασία.

Καθαρισμός χυτών: Μετά το πέρας της χύτευσης, το κάθε δέντρο χύτευσης καθαριζόταν αρχικά, από τον προσκολλημένο γύψο, με νερό υπο πίεση και με ειδικά βουρτσάκια. Σε κάποιες περιπτώσεις πραγματοποιήθηκε αμμοβολή, για αφαίρεση του επιφανειακού στρώματος οξειδίων ή καθαρισμός με ειδικά χημικά, διαβρωτικά υγρά.

Για την πραγματοποίηση της μεταλλουργικής εξέτασης είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν τα παρακάτω βήματα.

Κοπή δοκιμίων: Για τη μεταλλογραφική εξέταση, είναι απαραίτητο να ληφθούν ενδεικτικές τομές του χυτού. Η επιφάνεια ενδιαφέροντος ήταν η μεσαία τομή του χυτού, κατά το διαμήκη άξονα. Το χυτό αρχικά αποκόπηκε από τη μπουκαδούρα (αγωγό τροφοδοσίας) και στη συνέχεια, το χυτό κόπηκε στο επίπεδο ενδιαφέροντος. Οι κοπές πραγματοποιήθηκαν με τοποθέτηση του χυτού στον τροχό, αφού καθορίστηκε ο αριθμός των στροφών με βάση τις οδηγίες του κατασκευαστή για κοπή μη σιδηρούχων μετάλλων.

Δειγματοληψία και εγκιβωτισμός: Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ρητίνη, ώστε να διευκολύνεται η λείανση και τη στίλβωσή τους. Το δείγμα τοποθετείται με τέτοιο τρόπο, ώστε η επιφάνεια μελέτης να είναι εκτεθειμένη για την εκτέλεση των μετρήσεων. Στην Σχήμα 2.51 παρουσιάζονται τα δείγματα εγκιβωτισμένα σε ρητίνη.

Λείανση: Το κάθε δείγμα τοποθετήθηκε σε λειαντικό μηχάνημα τύπου “Struers Laborol-5 Laboforce” (Σχήμα 2.50). Η λείανση των δειγμάτων έχει σκοπό τη δημιουργία επίπεδων επιφανειών μελέτης, απαλλαγμένες από τις εκδορές της κοπής. Η επίτευξη επίπεδης επιφάνειας είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή εξέταση του δείγματος στο οπτικό μικροσκόπιο. Η λείανση πραγματοποιείται σε στάδια, με τη χρήση λειαντικών χαρτιών SiC 500, 800, 1200, 2400 και 4000, σε 200 rpm για περίπου 1-2 min, με ταχύτητα περιστροφής 2500 rpm έως 3000 rpm. Ως λιπαντικό χρησιμοποιείται νερό.



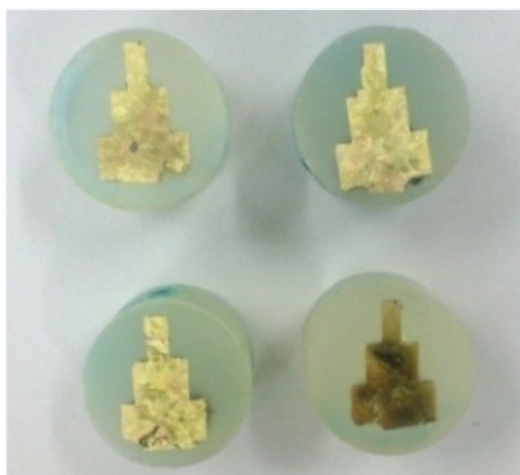
Σχήμα 2.50 Το λειαντικό μηχάνημα του εργαστηρίου.

Στίλβωση: Η στίλβωση είναι το επόμενο στάδιο μετά τη λείανση, και σκοπό έχει τη δημιουργία εξαιρετικά λείας επιφάνειας δείγματος, απαλλαγμένης από τις εκδορές της λείανσης. Η στίλβωση πραγματοποιήθηκε στο ίδιο μηχάνημα με τη λείανση, μόνο που σε αυτήν την περίπτωση τοποθετήθηκε στον τροχό ειδικό βελούδο. Ως μέσο στίλβωσης χρησιμοποιήθηκε διαδοχικά πάστα αλούμινας κοκκομετρίας 1 μ m και 0.1 μ m.



Σχήμα 2.51 Μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τα δείγματα που προετοιμάστηκαν για τη μεταλλογραφική μελέτη.

Χημική προσβολή: Η χημική προσβολή της επιφάνειας του δοκιμίου πραγματοποιείται για να εμφανιστεί η μικροδομή του κράματος κατά την παρατήρηση με οπτικό μικροσκόπιο. Επιπροσθέτως, η χημική προσβολή αφαιρεί και τη λεπτή στρώση ακαθαρσιών που παραμένει στην επιφάνεια του μετάλλου μετά τη στίλβωση. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ως αντιδραστήριο το διάλυμα 5gr FeCl₂, 100ml H₂O και 5ml HCl. Η χημική προσβολή με αυτό το αντιδραστήριο αποκαλύπτει κυρίως τη μικρογραφική δομή του μετάλλου και τα όρια των κόκκων (Σχήμα 2.52).

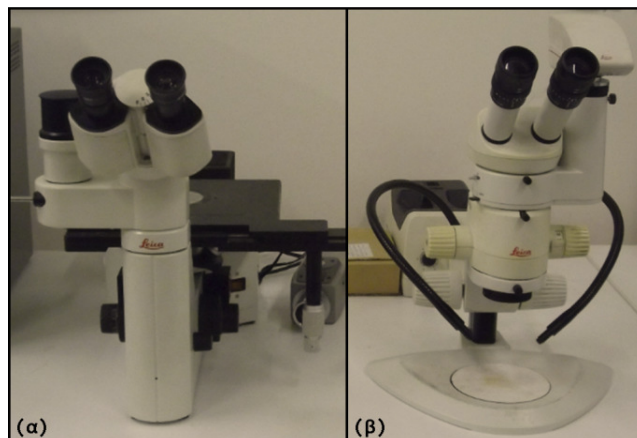


Σχήμα 2.52 Τα δοκίμια μετά τη χημική προσβολή.

Μακροσκοπική παρατήρηση στο Στερεοσκόπιο και Οπτική Μικροσκοπία: Για τη μεταλλογραφική εξέταση των χυτών δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε στερεοσκόπιο τύπου MZ6 του οίκου LEICA (Σχήμα 2.53(β)) και οπτικό μικροσκόπιο τύπου ARISTOMET του οίκου LEITZ (Σχήμα 2.53(α)). Τόσο το στερεοσκόπιο όσο και το μικροσκόπιο συνδέονταν μέσω κάμερας με Η/Υ εφοδιασμένο με ειδικό λογισμικό ανάλυσης εικόνας (Image-Pro Plus).

Ως γενική παρατήρηση μπορεί να αναφερθεί το γεγονός ότι στο οπτικό μικροσκόπιο δεν ήταν εύκολο να γίνουν παρατηρήσεις σε πρώτη φάση, λόγω του μεγάλου μεγέθους των κόκκων. Παρατηρούμε σε όλες τις εικόνες που

ακολουθούν, την ύπαρξη εξαιρετικά μεγάλων κόκκων, οι οποίοι σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης. Η χονδρόκοκκη μικροδομή αναπτύσσεται όταν η στερεοποίηση γίνεται με αργό ρυθμό. Πράγματι, κατά τη χύτευση επιτρέψαμε στο τήγμα να στερεοποιηθεί αργά.

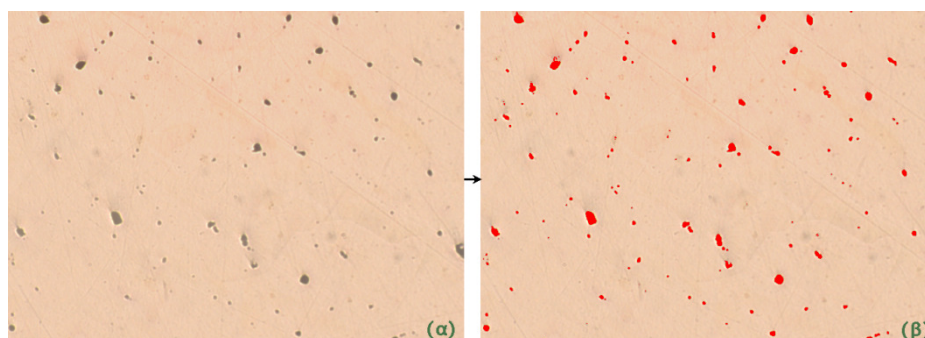


Σχήμα 2.53 Εργαστηριακός Εξοπλισμός (α) Το Μικροσκόπιο και (β) Το Στερεοσκόπιο.

2.6.3 Μέτρηση Πορώδους

Ένα χαρακτηριστικό που έχει ιδιαίτερη σημασία στην ποιότητα των χυτών είναι η παρουσία πόρων στο χυτό. Η ύπαρξη πόρων στην επιφάνεια ή κοντά σε αυτήν έχει προφανή δυσμενή αποτελέσματα στην ποιότητα του χυτού (τραχεία επιφάνεια, ατελής αναπαραγωγή γεωμετρίας και πιθανή μικρή φθορά), που μπορεί να καταλήξει σε μεγάλη ατέλεια, αν ο πόρος βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια. Πόροι στο εσωτερικό επηρεάζουν τη μηχανική αντοχή του χυτού.

Για τους λόγους αυτούς πραγματοποιήθηκε μέτρηση του πορώδους στη μεσαία διαμήκη τομή του χυτού, με παρατήρηση στο μικροσκόπιο, με το φακό μεγέθυνσης $\times 10$, χωρίς να έχει προηγηθεί χημική προσβολή. Μέσω του λογισμικού Image Pro Plus μετρήθηκε το πορώδες της ως ποσοστό επιφάνειας. Ήταν αναγκαία η χρήση λογισμικού για επεξεργασία εικόνας. Αρχικά, η εικόνα προσαρμόστηκε ώστε να είναι κατά το δυνατόν έντονη η διαφορά των φωτεινών από τις σκουρόχρωμες περιοχές (βλ. Σχήμα 2.54(α)). Στη συνέχεια, επιλεγόταν, είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα, η περιοχή των πόρων (βλ. Σχήμα 2.54(β)). Το αποτέλεσμα ήταν το εμβαδόν της επιφάνειας που κάλυπταν οι πόροι.

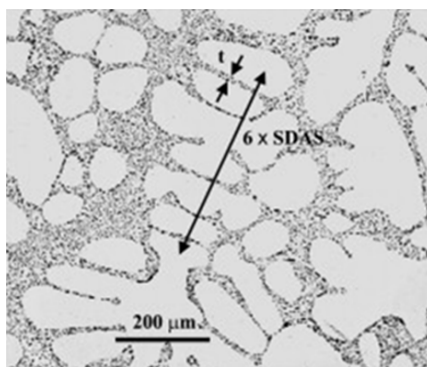


Σχήμα 2.54 Διαδικασία μέτρησης πορώδους με χρήση λογισμικού επεξεργασίας εικόνας. Μικρογραφίες πριν τη χημική προσβολή (α) μετά την κατάλληλη προσαρμογή αντίθεσης και φωτεινότητας και (β) η επιλογή της περιοχής που θεωρείται πορώδες προς μέτρηση.

2.6.4 Μέτρηση Απόστασης μεταξύ Δευτερογενών Δενδριτικών Κλάδων (SDAS)

Η απόσταση μεταξύ των δευτερογενών δενδριτικών κλάδων (Secondary Dendrite Arm Spacing, SDAS), αποτελεί χαρακτηριστικό της μικροδομής του χυτού και συνεπώς, αποτελεί ένδειξη των χαρακτηριστικών και των μηχανικών ιδιοτήτων του χυτού. Εξαρτάται από την ταχύτητα απόψυξης του χυτού στο σημείο που μετράται. Ο τοπικός χρόνος στερεοποίησης είναι αντιστρόφως ανάλογος του ρυθμού ψύξεως και επιδρά σημαντικά στα χαρακτηριστικά της μικροδομής, όπως η SDAS. Μικρός τοπικός χρόνος στερεοποίησης ευνοεί το σχηματισμό λεπτών μικροδομών μετά τη χύτευση.

Η μέτρηση SDAS έγινε, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.55, (α) με εντοπισμό ολόκληρων δενδριτών στην περιοχή μέτρησης, μέτρηση του ολικού μήκους του δενδρίτη και στη συνέχεια διαίρεση με τον αριθμό των δευτερογενών κλάδων του, είτε (β) με προσεκτική μέτρηση μεμονωμένων αποστάσεων μεταξύ δευτερευόντων δενδριτικών κλάδων. Σε κάθε περίπτωση, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των επιμέρους SDAS.



Σχήμα 2.55 Παραδείγματα τρόπου μέτρησης της SDAS με μέτρηση του συνολικού μήκους του δενδρίτη.

2.7 Μέθοδος Σχεδιασμού Πειραμάτων Taguchi

Μεταξύ των στόχων των πειραμάτων της παρούσας ΔΔ ήταν και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση των παραμέτρων χύτευσης στον τρόπο στερεοποίησης. Για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα, ήταν αναγκαίος ο κατάλληλος σχεδιασμός πειραμάτων (Design of Experiments-DOE). Το ιδανικό είναι η πραγματοποίηση πλήρους παραμετρικής μελέτης. Σε κάποιες περιπτώσεις, ωστόσο, κάτι τέτοιο είναι μη υλοποιήσιμο, λόγω υπερβολικού χρόνου και κόστους. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι DOE που προτείνουν τη διεξαγωγή ενός πολύ μικρότερου αριθμού πειραμάτων, με κατάλληλα επιλεγμένο συνδυασμό συνθηκών, που να οδηγούν σε αξιόπιστα συμπεράσματα. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην §3.3 της παρούσας ΔΔ είναι η δημοφιλής μέθοδος DOE κατά Taguchi.

Η προσέγγιση Taguchi στον πειραματικό σχεδιασμό αποτελεί μια τυποποιημένη μέθοδο κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού η οποία χρησιμοποιεί έτοιμες, ως επί το πλείστον, ορθογώνιες διατάξεις για την αντιμετώπιση ενός μεγάλου αριθμού πειραματικών αναγκών. Οι ορθογώνιες

διατάξεις συμβολίζονται ως: $L_r (n^k)$, όπου, το γράμμα «L» προέρχεται από το «Latin Squares», ο δείκτης «r» είναι αριθμός των γραμμών τους, «k» είναι ο αριθμός των παραμέτρων (ή παραγόντων) και «n» ο αριθμός των επιπέδων των παραγόντων. Οι στήλες αντιστοιχούν στους εξεταζόμενους παράγοντες (ή οι αλληλεπιδράσεις τους) και στις γραμμές τους οι συνθήκες, τα επίπεδα των παραγόντων, για κάθε δοκιμή. Στον Πίνακα 2.4 φαίνονται κάποιες χαρακτηριστικές ορθογώνιες διατάξεις και το πλήθος που απαιτούν.

Πίνακας 2.4 Σνήθειες ορθογώνιες διατάξεις για σχεδιασμό πειραμάτων κατά Taguchi

Ορθογώνια διάταξη	Αριθμός Δοκιμών	Αριθμός επιπέδων	Αριθμός παραγόντων	Δοκιμές του πλήρως παραγοντικού πειράματος
$L_4 (2^3)$	4	2	3	8
$L_8 (2^7)$	8	2	7	128
$L_{12} (2^{11})$	12	2	11	2048
$L_{16} (2^{15})$	16	2	15	32768
$L_{32} (2^{31})$	32	2	31	2147483648
$L_9 (3^4)$	9	3	4	81
$L_{18} (2^1, 3^7)$	18	Ένας παράγοντας δύο επιπέδων και 7 παράγοντες τριών		4374
$L_{27} (3^{13})$	27	3	13	1594323
$L_{16} (4^3)$	16	4	5	1024
$L_{32} (2^1, 4^9)$	32	Ένας παράγοντας δύο επιπέδων και 9 παράγοντες τεσσάρων		524288

Για παράδειγμα, εάν είναι επιθυμητό να μελετηθεί η επίδραση 4 παραμέτρων του προβλήματος και να διερευνηθούν 3 επίπεδα τιμών των παραμέτρων αυτών, τότε το πλήθος της πλήρους παραμετρικής μελέτης θα ήταν $3^4 = 81$ πειράματα. Εάν, όμως, η διεξαγωγή των 81 αυτών πειραμάτων είναι πρακτικά ανέφικτη, αντί αυτής, σύμφωνα με τον Πίνακα 2.4, μπορεί να επιλεγεί ένα πλήθος 9 δοκιμών (βλ. ορθογώνια διάταξη $L_9(3^4)$).

Η διαφορά στον αριθμό των απαιτούμενων πειραμάτων είναι τεράστια και σαφώς επιτρέπει να καταστεί εφικτό κάτι που μπορεί να ήταν ανέφικτο. Οι 9, όμως, δοκιμές που μπορούν να γίνουν για να υποκαταστήσουν τις 81, πρέπει να είναι συγκεκριμένες και όχι τυχαίες. Ο συνδυασμός τιμών των 4 εξεταζόμενων παραμέτρων καθορίζεται από πίνακες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Ο συνδυασμός πειραμάτων για την ορθογώνια διάταξη L_9 παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5 Ο πίνακας σχεδιασμού πειραμάτων κατά Taguchi σύμφωνα με την ορθογώνια διάταξη L_9 .

Πείραμα (Συνδυασμός παραμέτρων)	Παράμετρος Α (πιθανές τιμές: 1, 2 ή 3)	Παράμετρος Β (πιθ. τιμές: 1, 2 ή 3)	Παράμετρος Γ (πιθ. τιμές: 1, 2 ή 3)	Παράμετρος Δ (πιθ. τιμές: 1, 2 ή 3)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Υπάρχει δυνατότητα κατάλληλης τροποποίησης της εκάστοτε διάταξης, ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες της κάθε μελέτης.

Για τη διεξαγωγή της πειραματικής μελέτης πραγματοποιείται η ακόλουθη διαδικασία 8 βημάτων (τα δύο τελευταία αρκετές φορές παραλείπονται):

Βήμα 1: Ορισμός του προβλήματος. Καθορίζονται οι πληροφορίες που αποτελούν το στόχο της εκτέλεσης του πειράματος.

Βήμα 2: Αντικειμενικός σκοπός. Καθορισμός χαρακτηριστικών επιδόσεων που πρέπει να μελετηθούν, και με ποιο τρόπο θα γίνουν οι μετρήσεις.

Βήμα 3: Ορισμός παραγόντων και επιπέδων. Λαμβάνεται απόφαση για το ποιοι είναι οι παράγοντες που πιθανόν επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος και ποιο για το εύρος των τιμών των παραγόντων που θα μελετηθούν.

Βήμα 4: Σχεδιασμός πειράματος. Αφορά στην επιλογή ή κατάστρωση του καταλληλότερου σχεδιασμού (ορθογώνιας διάταξης) για την διεξαγωγή του πειράματος και στην τοποθέτηση των παραγόντων και αλληλεπιδράσεων προς μελέτη στις στήλες του.

Βήμα 5: Διεξαγωγή πειραμάτων και συλλογή μετρήσεων.

Βήμα 6: Ανάλυση δεδομένων. Χρησιμοποιούνται κατάλληλες στατιστικές τεχνικές για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Βήμα 7: Ερμηνεία αποτελεσμάτων και προσδιορισμός των παραγόντων ελέγχου της μεταβλητότητας και των παραγόντων ελέγχου του στόχου. Μπορεί, επίσης, να γίνει επιλογή βέλτιστων συνθηκών και προβλέψεις απόδοσης.

Βήμα 8: Επαλήθευση συμπερασμάτων. Στο σημείο αυτό, αν υπάρχει δυνατότητα, μπορεί να γίνει διεξαγωγή επιπρόσθετων δοκιμών προκειμένου να ελεγχθούν οι προβλέψεις και να επιβεβαιωθούν τα συμπεράσματα.

2.8 Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA)

Μετά τη συλλογή δεδομένων από τα πειράματα, είναι αναγκαία μία τυποποιημένη μέθοδος στατιστικής ανάλυσης δεδομένων. Σε αυτό το σημείο έγκειται η διαφορά ανάμεσα σε μία παραμετρική μελέτη και στα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διαδικασία του σχεδιασμού πειραμάτων (design of experiments - DOE). Η μέθοδος που εφαρμόστηκε στα αποτελέσματα των πειραμάτων κατά Taguchi, ήταν η λεγόμενη “ANOVA”.

Η ANOVA (Analysis of variance) είναι μία τεχνική στατιστικής επεξεργασίας πειραματικών αποτελεσμάτων, με σκοπό την εύρεση και ερμηνεία των συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων. Συνεπώς, μπορεί να αποκτηθεί πληροφορία σχετικά με το ποσοστό συνεισφοράς των διαφόρων παραμέτρων της κατεργασίας σε ένα σύνολο χαρακτηριστικών-αποτελεσμάτων ενδιαφέροντος [Vidal et al. 2010], [Nourani et al. 2011].

Η ANOVA που βασίζεται σε ανεπεξέργαστα πειραματικά δεδομένα αναγνωρίζει τους παράγοντες που επηρεάζουν τη μέση απόκριση, παρά αυτούς που μειώνουν τη μεταβλητότητα. Η βασική ιδέα είναι να διασπαστεί η ολική μεταβλητότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων, σε συστατικά διασποράς κι έπειτα να υπολογιστεί η σημαντικότητά τους [Ross 1995].

Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων περιλαμβάνει τους υπολογισμούς των σχέσεων (2.1)-(2.6).

Στην ANOVA, το συνολικό άθροισμα τετραγώνων (total sum of squares (SST)) υπολογίζεται με βάση τη σχέση [Vidal et al. 2010; W. H. Yang & Tarng 1998]:

$$SS_T = \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (2.1)$$

όπου N είναι ο αριθμός των πειραμάτων στην ορθογώνια διάταξη, Y_i είναι το πειραματικό αποτέλεσμα του i -πειράματος, και το \bar{Y} δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \quad (2.2)$$

Το συνολικό άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων SS_T αποτελείται από το άθροισμα τριών μεγεθών: το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων της κάθε παραμέτρου SS_p και το άθροισμα των τετραγώνων του σφάλματος SS_e . Το SS_p υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SS_p = \sum_{j=1}^t \frac{(SY_j)^2}{t} - \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N Y_i \right]^2 \quad (2.3)$$

όπου το p υποδηλώνει μία από τις παραμέτρου του πειράματος, j είναι το επίπεδο της παραμέτρου p , t η επανάληψη του κάθε επιπέδου της παραμέτρου p . SY_j είναι το άθροισμα των πειραματικών αποτελεσμάτων που περιλαμβάνουν την παράμετρο p και το επίπεδο j . Το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων είναι:

$$SS_e = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C \quad (2.4)$$

Οι συνολικοί βαθμοί ελευθερίας θα είναι $D_T = N - 1$ και οι βαθμοί ελευθερίας για την κάθε παράμετρο είναι $D_p = t - 1$. Η διασπορά της εξεταζόμενης παραμέτρου είναι $V_p = SS_p / D_p$. Η τιμή της F για την κάθε παράμετρο σχεδίασης είναι ο λόγος του μέσου όρου των τετραγωνικών αποκλίσεων προς το μέσο όρο των τετραγώνων των σφαλμάτων, δηλαδή

$$F_p = V_p / V_e \quad (2.5)$$

Το ποσοστό της συνεισφοράς ρ (ή του λόγου συμβολής) της κάθε παραμέτρου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\rho_p = \frac{SS_p}{SS_T} \quad (2.6)$$

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών συνήθως παρουσιάζονται με τη μορφή πίνακα, του λεγόμενου «πίνακα ANOVA», η εποπτεία του οποίου οδηγεί σε συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της κάθε παραμέτρου του πειράματος στο τελικό αποτέλεσμα.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν και αναλύθηκαν όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3.

Κεφάλαιο 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η σελίδα αυτή έχει αφεθεί σκοπίμως κενή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Εισαγωγή

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν είχαν δύο αντικειμενικούς στόχους. Ο ένας ήταν η μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση των παραγόμενων χυτών τεμαχίων, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την ποιότητά τους. Ο δεύτερος ήταν η λήψη μετρήσεων θερμοκρασίας κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου μέσα στο καλούπι. Οι καμπύλες απόψυξης που προκύπτουν από τη διαδικασία αυτή είναι ένα απαραίτητο εργαλείο για την εύρεση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας. Ο συντελεστής αυτός είναι αναγκαία παράμετρος εισόδου για την προσομοίωση της κατεργασίας. Η μελέτη στα επόμενα κεφάλαια της διδακτορικής διατριβής εστιάζεται στο βέλτιστο προσδιορισμό της παραμέτρου αυτής.

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα χύτευσης με διάφορες συνθήκες για τα δύο κράματα χαλκού «ορείχαλκος» και «αλπακάς». Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν ήταν οι συνθήκες πίεσης κατά την κατεργασία (ατμοσφαιρική πίεση, κενό, υπερπίεση), η θερμοκρασία του καλουπιού και η αρχική θερμοκρασία του τήγματος. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή συμπερασμάτων ήταν οι πειραματικές καμπύλες απόψυξης του χυτού από τις οποίες αποκαλύφθηκε ο ρυθμός απόψυξης και ο χρόνος στερεοποίησης, το πορώδες και η απόσταση των δευτερογενών δενδριτικών κλάδων. Τέλος, συνεκτιμήθηκαν ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως η αναπαραγωγή της μορφής και η ποιότητα επιφάνειας. Πραγματοποιήθηκε, επίσης, χύτευση αλουμινίου για λήψη μετρήσεων θερμοκρασίας.

Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης μελέτης χρειάστηκε να κατασκευαστεί μία ειδικά τροποποιημένη μηχανή χύτευσης κενού-υπερπίεσης. Οι τροποποιήσεις αυτές περιελάμβαναν:

1. τοποθέτηση θερμοστοιχείου στο τοίχωμα του χωνιού ώστε να υπάρχει δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο της θερμοκρασίας του τήγματος στο χωνί.
2. τοποθέτηση αισθητήρων κενού στο θάλαμο χύτευσης, ώστε να υπάρχει ψηφιακή ένδειξη της πίεσης που επικρατεί στο συγκεκριμένο θάλαμο
3. διάνοιξη τριών οπών στο θάλαμο χύτευσης (ειδική κατασκευή, ώστε να δύναται να κλείνει αεροστεγώς και να καθίσταται δυνατή η δημιουργία κενού) και τοποθέτηση αναμονών, με σκοπό να μπορεί να γίνει τοποθέτηση θερμοστοιχείων.

Τα πειράματα σχεδιάστηκαν, πραγματοποιήθηκαν και αξιολογήθηκαν (α) με τη μορφή παραμετρικής μελέτης, δηλαδή διατηρώντας σταθερές όλες τις παραμέτρους, εκτός από μία-την εκάστοτε μελετώμενη και (β) με χρήση της μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για ένα σύνολο σεναρίων χύτευσης, χωρίς να υλοποιηθούν, στην πραγματικότητα, όλα. Τέλος, πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση

των αποτελεσμάτων με ANOVA, και υπολογίστηκε το ποσοστό συνεισφοράς της κάθε παραμέτρου στο αποτέλεσμα.

Για τη μελέτη, επιλέχθηκε μία απλή σχετικά γεωμετρία δέντρου χύτευσης, η οποία όμως θεωρήθηκε ότι πληροί κάποια χαρακτηριστικά που οδηγούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων. Με άλλα λόγια, το χυτό ήταν κυλινδρικής μορφής, αποτελούμενο από τρεις διαφορετικές διατομές (μία μικρή διατομή, μία ενδιάμεση και μία μεγάλη). Με τον τρόπο αυτό καταδεικνύεται ο διαφορετικός τρόπος πλήρωσης και στερεοποίησης ανάλογα με το πάχος της διατομής. Θερμοστοιχεία ήταν τοποθετημένα σε διάφορες θέσεις της γεωμετρίας του χυτού, προσφέροντας μία συνολική εικόνα για τον τρόπο στερεοποίησης.

3.2 Μεθοδολογία πειραμάτων

Οι παράμετροι της χύτευσης είναι: το κράμα χύτευσης, η γεωμετρία, οι συνθήκες πίεσης στο θάλαμο τήξης, η θερμοκρασία τήξης, οι συνθήκες κενού στο θάλαμο χύτευσης, η θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού και ο τρόπος κατασκευής καλουπιού (υλικό & κύκλος θέρμανσης).

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων χύτευσης που πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή χύτευσης κενού-υπερπίεσης του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας (βλ. §2.2 και §2.3) σε κράματα (βλ. §2.4) συγκεκριμένης γεωμετρίας (§2.5) και επεξεργάστηκαν όπως περιγράφηκε στην §2.6.

Σκοπός των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν ήταν:

1. Ανεξάρτητη μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της χύτευσης στον τρόπο απόψυξης και τελικά στο χυτό προϊόν.
2. Χρήση των πειραματικών μετρήσεων για πιστοποίηση της ορθότητας του μοντέλου ΠΣ για την προσομοίωση της χύτευσης και σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων (βλ. Κεφ. 4, 5 & 6).

Δύο μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή συμπερασμάτων:

- M1.** Παραμετρική μελέτη: Για τη διεξαγωγή πειραματικής παραμετρικής μελέτης ήταν αναγκαία η διατήρηση των συνθηκών χύτευσης, κατά το δυνατόν, σταθερών, με μεταβαλλόμενη μόνο την εκάστοτε μελετώμενη παράμετρο.
- M2.** DOE-Taguchi-ANOVA: Σχεδιασμός πειραμάτων κατά Taguchi και επεξεργασία αποτελεσμάτων με ανάλυση διακύμανσης.

Για δεδομένο κράμα και δεδομένη γεωμετρία, οι παράμετροι που μελετούνταν ήταν:

- P1.** Θερμοκρασία καλουπιού (T_{mould})
- P2.** Θερμοκρασία έγχυσης τήγματος (T_{inlet})
- P3.** Συνθήκες πίεσης

- Π3α. Πίεση στο θάλαμο τήξης
 Π3β. Κενό στο θάλαμο χύτευσης

Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τα πειράματα ήταν:

- A1. Καμπύλες απόψυξης, δηλαδή οι μετρήσεις θερμοκρασίας από τα θερμοστοιχεία, για τα μελετώμενα σημεία του χυτού.
- A2. Πορώδες, σε σημεία δειγματοληψίας επί της μέσης τομής του χυτού προϊόντος. Η μέτρηση έγινε με χρήση λογισμικού ανάλυσης εικόνας, μετά από μεταλλογραφική προετοιμασία.
- A3. Απόσταση δευτερογενών δενδριτικών κλάδων (SDAS-Secondary Dendrite Arms Spacing): μέτρηση με χρήση λογισμικού ανάλυσης εικόνας, μετά από μεταλλογραφική προετοιμασία και χημική προσβολή
- A4. Το ίδιο το χυτό προϊόν, από το οποίο προκύπτουν παρατηρήσεις με οπτική μακροσκοπική παρατήρηση.

Από τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης, εξήχθησαν συμπεράσματα σχετικά με την:

- επίδραση των «Συνθηκών Πίεσης» κατά τη Χύτευση
- επίδραση της θερμοκρασίας Τήξης του κράματος
- επίδραση της θερμοκρασίας Προθέρμανσης του καλουπιού

στα αποτελέσματα A1-A4.

Τα κυρίως πειράματα πραγματοποιήθηκαν για δύο κράματα χαλκού:

- K1. Ορείχαλκος, CuZn33.
- K2. Αλπακάς, CuNi12Zn24.

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε για ένα μέρος της μελέτης (§4.4.4-4.4.5) και ένα τρίτο υλικό, το

- K3. Αλουμίνιο (σειρά 1000), για το οποίο υπήρχαν περισσότερα δεδομένα στη βιβλιογραφία.

Πρέπει να σημειωθεί πως, οι συνθήκες χύτευσης δεν εξαρτιόνταν μόνο από τις ρυθμίσεις στα κομβία της μηχανής. Χρειαζόταν πολύ προσοχή κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας σε όλα της τα στάδια, προκειμένου να καταστεί εφικτή η σταθερή και όμοια εφαρμογή των επιθυμητών συνθηκών χύτευσης.

Το κάθε σενάριο χύτευσης επαναλήφθηκε 3-5 φορές. Από την επανάληψη του κάθε πειράματος: (α) φάνηκε η δυνατότητα επαναληψιμότητας της διαδικασίας, (β) αποκαλύφθηκε η επαναληψιμότητα των λαμβανόμενων πειραματικών μετρήσεων και, (γ) επιλέχθηκε το πιο αντιπροσωπευτικό και επιτυχημένο πείραμα για το κάθε σενάριο. Το εκάστοτε αντιπροσωπευτικότερο πείραμα, χρησιμοποιήθηκε για σύγκριση με το αντίστοιχο αντιπροσωπευτικό πείραμα της παραμετρικής μελέτης.

3.3 Καμπύλες Απόψυξης – Παραμετρική Μελέτη

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου, για διάφορα σενάρια χύτευσης. Για το σύνολο των πειραμάτων της παραγράφου αυτής, το θερμοστοιχείο ήταν τοποθετημένο εντός του χυτού, στην περιοχή του χυτού με τη μεγάλη διατομή, δηλαδή πρόκειται για πειράματα που εμπίπτουν στην 1^η περίπτωση (βλ. σελ. 136, Σχήμα 2.44).

Για να αποκαλυφθεί εάν υπάρχει επίδραση των συνθηκών χύτευσης στον τρόπο απόψυξης του χυτού, πραγματοποιήθηκαν (α) παραμετρικές μελέτες και (β) σχεδιασμός πειραμάτων κατά Taguchi. Οι πειραματικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια.

3.3.1 Επίδραση «Θερμοκρασίας Προθέρμανσης Καλουπιού»

Για τη μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας προθέρμανσης του καλουπιού (T_{mould}) στη μορφή των καμπυλών απόψυξης του χυτού, πραγματοποιήθηκαν πέντε παραμετρικές μελέτες. Την κάθε παραμετρική μελέτη την αποτελεί μία ομάδα πειραμάτων που εκτελέστηκε με σταθερές συνθήκες πίεσης, σταθερή θερμοκρασία έγχυσης, αλλά μεταβλητή θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού. Οι 5 ομάδες στις οποίες είναι χωρισμένα τα πειράματα της παραγράφου αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Πίνακας ομάδων συγκρινόμενων πειραμάτων, για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας του καλουπιού.

Ομάδα	Υλικό	Μέθοδος Χύτευσης	T_{mould}	T_{inlet}
1 ^η Ομάδα T_{mould}	CuZn33	Χύτευση Βαρύτητας	500 °C	960 °C
			550 °C	
			600 °C	
			700 °C	
			730 °C	
2 ^η Ομάδα T_{mould}	CuZn33	Χύτευση Υπερπίεσης	500 °C	960°C
			600 °C	
			730 °C	
3 ^η Ομάδα T_{mould}	CuZn33	Χύτευση Κενού	600 °C	960 °C
			700 °C	
			740 °C	
4 ^η Ομάδα T_{mould}	CuZn33	Χύτευση Κενού 50%	600 °C	960 °C
			730 °C	
5 ^η Ομάδα T_{mould}	CuZn33	Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού	700 °C	960 °C
			730 °C	

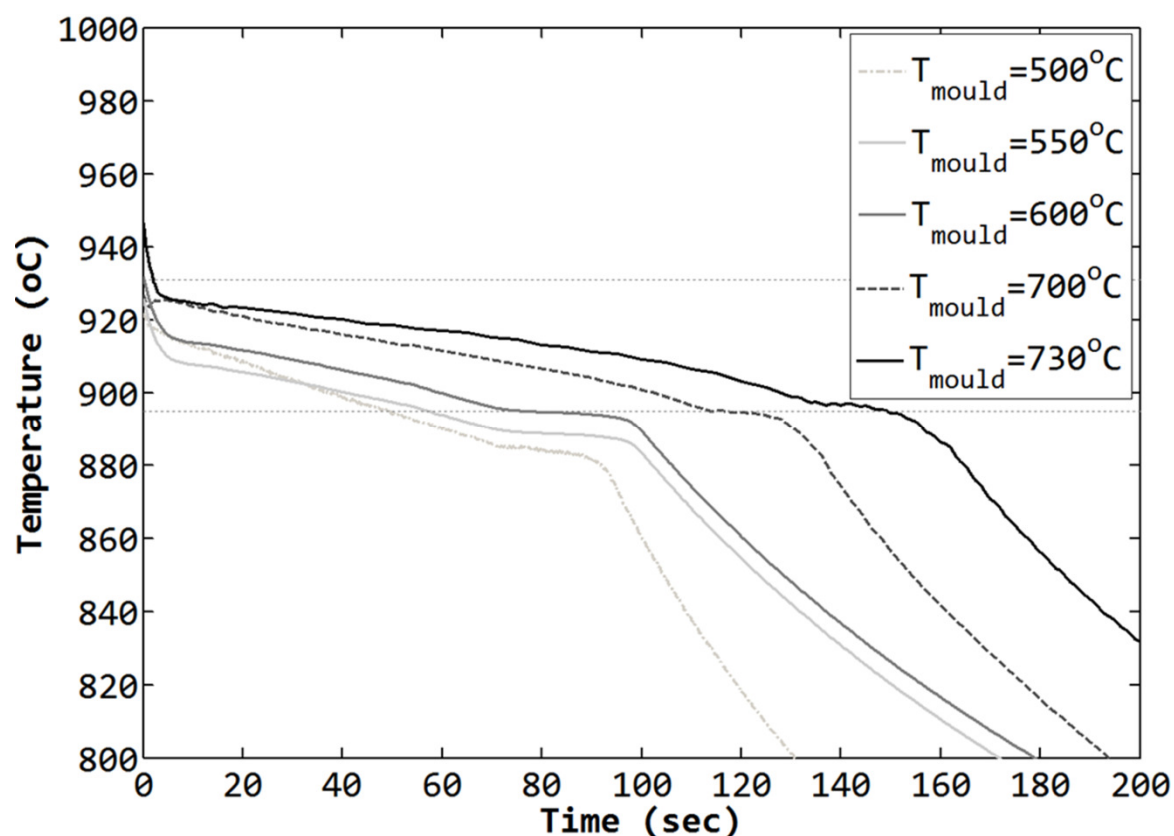
Η θερμοκρασία του καλουπιού, στο σύνολο των πειραμάτων, επιλέχθηκε να κυμαίνεται μεταξύ 500°C και 740°C. Η επιλογή του συγκεκριμένου εύρους τιμών πραγματοποιήθηκε με βάση τεχνικούς παράγοντες. Καταρχάς, ήταν επιθυμητή η κατά το δυνατόν μεγάλη διαφορά μέγιστης και ελάχιστης τιμής T_{mould} , ώστε να αναδειχθούν οι όποιες διαφορές υπάρχουν. Ελήφθησαν υπόψη οι συνήθως χρησιμοποιούμενες στην πράξη τιμές θερμοκρασίας καλουπιού, για τη χύτευση μη σιδηρούχων κραμάτων. Οι καθοριστικοί περιορισμοί,

όμως, τέθηκαν από τις τεχνικές προδιαγραφές του υλικού του καλουπιού. Πολύ χαμηλή θερμοκρασία καλουπιού θα έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση θερμικού σοκ στο γύψο κατά την έγχυση του πολύ θερμότερου μετάλλου. Υποχώρηση του γύψου ή ρωγμάτωση αυτού, είναι προφανώς ανεπιθύμητη. Θερμοκρασία του γύψου πολύ υψηλή (για την περίπτωση του γύψου που χρησιμοποιήθηκε, θερμοκρασία άνω των 740°C), έχει ως αποτέλεσμα την ψαθυροποίηση του υλικού του γύψου. Πειράματα πραγματοποιήθηκαν με θερμοκρασίες καλουπιού 500°C, 550°C, 600°C, 700°C, 730°C, 740°C.

Τέλος, όπως φαίνεται Πίνακα 3.1, ο αριθμός των πειραμάτων δεν είναι ο ίδιος σε όλες τις ομάδες. Αυτό συμβαίνει επειδή επιλέχθηκαν προς παρουσίαση τα πειράματα που ήταν αντιπροσωπευτικά της εκάστοτε συνθήκης χύτευσης. Αρκετές ήταν οι περιπτώσεις που η διεξαγωγή του πειράματος κατέληξε σε καμπύλες που δεν ήταν συγκρίσιμες με τις υπόλοιπες της ομάδας και γι αυτό απορρίφθηκαν.

3.3.1.1 1η Ομάδα Πειραμάτων T_{mould} - Χύτευση Βαρύτητας

Στο Σχήμα 3.1 φαίνονται οι καμπύλες απόψυξης για χύτευση Βαρύτητας, για πέντε περιπτώσεις θερμοκρασίας καλουπιού: $T_{mould}=500^{\circ}\text{C}$, 550°C, 600°C, 700°C και 730°C.



Σχήμα 3.1 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στις καμπύλες απόψυξης, για $T_{inlet}=960^{\circ}\text{C}$ και χύτευση Βαρύτητας

Είναι φανερό πως για μεγαλύτερη θερμοκρασία καλουπιού, είναι μεγαλύτερος και ο χρόνος στερεοποίησης. Με άλλα λόγια, μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ τήγματος και καλουπιού σημαίνει μικρότερο

χρόνο στερεοποίησης. Αυτό που είναι θεωρητικά αναμενόμενο ποσοτικοποιείται και από το πείραμα.

Στον Πίνακα 3.2 συνοψίζονται τέσσερα μεγέθη που προκύπτουν από τις πειραματικές καμπύλες απόψυξης και αυτά είναι: ο χρόνος στερεοποίησης (t_{sol}) του χυτού, ο ρυθμός απόψυξης κατά το 1^ο, το 2^ο και το 3^ο στάδιο της απόψυξης. Ως ρυθμός απόψυξης ορίστηκε η θερμοκρασιακή πτώση του χυτού στη μονάδα του χρόνου ($\Delta T/\Delta t$) και για την κάθε περιοχή σημειώνεται και παρουσιάζεται η μέση τιμή. Ως «1^ο στάδιο απόψυξης» αναφέρεται η απόψυξη του τήγματος, δηλαδή του μετάλλου όσο αυτό βρίσκεται στην υγρή φάση ($T > T_{liquidus}$). Το «2^ο στάδιο απόψυξης» αναφέρεται στην απόψυξη του χυτού κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, δηλαδή όσο το μέταλλο βρίσκεται σε θερμοκρασία μεταξύ $Liquidus$ & $Solidus$ ($Solidus < T < Liquidus$). Τέλος, ως «3^ο στάδιο απόψυξης» αναφέρεται η απόψυξη του στερεοποιημένου μετάλλου ($T < Solidus$).

Πίνακας 3.2 Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων βαρύτητας.

T_{mould} (°C)	t_{sol} (sec)	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{1ο} στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{2ο} στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{3ο} στάδιο
500	48.7	-3.06	-0.49	-2.29
550	57.2	-5.087	-0.248	-1.33
600	74.6	-5.4	-0.268	-1.31
700	114.0	-3.159	-0.234	-1.70
730	149.2	-8.425	-0.155	-1.48

Παρατηρώντας την κλίση των καμπυλών απόψυξης κατά το 1^ο και το 2^ο στάδιο, φαίνεται πως υπάρχει συστηματικά η ίδια συμπεριφορά για όλες τις περιπτώσεις, δηλαδή η ταχύτητα απόψυξης εξαρτάται ευθέως από τη θερμοκρασία του καλουπιού.

Για $T_{mould}=500^{\circ}\text{C}$, 700°C και 730°C , παρατηρείται πως μικρότερη θερμοκρασία καλουπιού συνεπάγεται μεγαλύτερη ταχύτητα απόψυξης. Για τα πειράματα με θερμοκρασία καλουπιού ίση με 550°C και 600°C , η συστηματική συμπεριφορά των υπολοίπων πειραμάτων αίρεται. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην κατάτι διαφορετική αρχική θερμοκρασία έγχυσης τήγματος των δύο αυτών πειραμάτων. Συγκεκριμένα, τα δύο αυτά πειράματα έχουν T_{inlet} $10-14^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη σε σχέση με των υπολοίπων πειραμάτων. Αρχικά η διαφορά αυτή είχε θεωρηθεί αμελητέα, στην προκειμένη περίπτωση, όμως, φαίνεται να υπάρχει επίδραση. Εξετάζοντας μόνο τα δύο αυτά πειράματα, για το 3^ο στάδιο απόψυξης, παρατηρείται πως στην περίπτωση με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία καλουπιού ο ρυθμός απόψυξης είναι μικρότερος, με πολύ μικρή όμως διαφορά στις τιμές.

Συνεπώς, συνολικά μπορεί να ειπωθεί πως κατά το 3^ο στάδιο απόψυξης, ο ρυθμός απόψυξης του στερεού είναι αντιστρόφως ανάλογος της θερμοκρασίας καλουπιού.

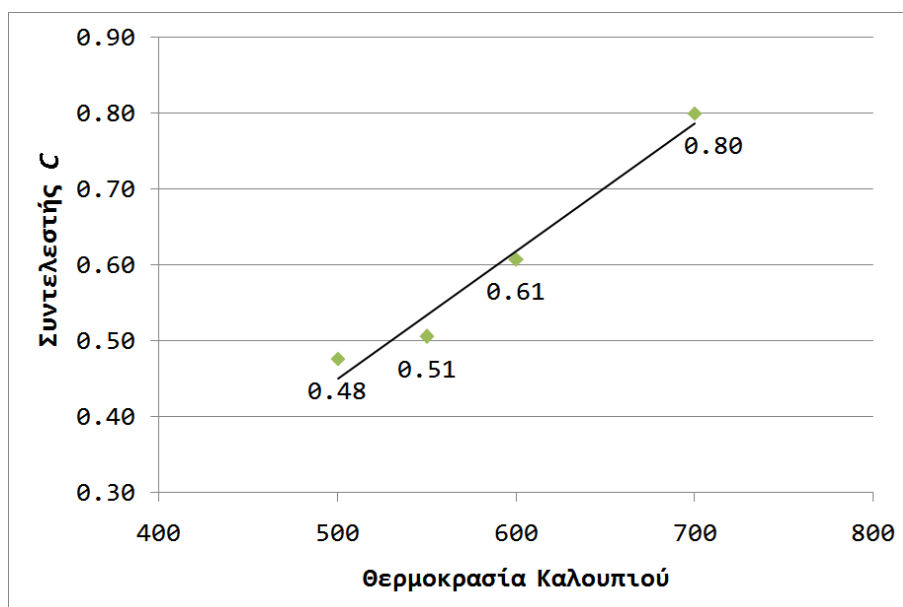
Σχετικά με το χρόνο στερεοποίησης των χυτών όπως προκύπτει από τα πειράματα, είναι ανάλογος της θερμοκρασίας του καλουπιού. Η εξάρτηση αυτή είναι έντονη, καθώς για $T_{mould}=500^{\circ}\text{C}$ ο χρόνος στερεοποίησης είναι 48,7sec, ενώ για $T_{mould}=730^{\circ}\text{C}$ ο χρόνος στερεοποίησης είναι περίπου 150sec, δηλαδή μία διαφορά 230°C δίνει διαφορά 100sec στο t_{sol} (165% αύξηση). Χαρακτηριστικά μπορεί να αναφερθεί πως ακόμα και 30°C διαφορά είναι αρκετή, ώστε να αλλάξει κατά 36sec ο χρόνος στερεοποίησης. Συνεπώς, η θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο, και θα πρέπει να μετράται σωστά και αξιόπιστα.

Οι γενικές παρατηρήσεις, είναι λογικές και κάποιες φορές αναμενόμενες. Αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία είναι να επισημανθεί η έντονη ποσοτική επίδραση της συγκεκριμένης παραμέτρου στην ταχύτητα στερεοποίησης και απόψυξης των χυτών.

Παρατηρώντας αναλυτικότερα τους χρόνους στερεοποίησης των χυτών, με βάση το Σχήμα 3.1, φαίνεται πως υπάρχει κάποια συσχέτιση. Για να ευρεθεί η συσχέτιση, υπολογίστηκαν οι λόγοι t_{sol}/T_{mould} για όλες τις περιπτώσεις. Θεωρώντας την περίπτωση $T_{mould}=730^{\circ}\text{C}$ ως περίπτωση αναφοράς, μπορεί να ειπωθεί πως ο λόγος t_{sol}/T_{mould} είναι ανάλογος του λόγου $t_{sol}^{730}/T_{mould}^{730}$, δηλαδή:

$$\frac{t_{sol}}{T_{mould}} = C \frac{t_{sol}^{730}}{T_{mould}^{730}} \quad (3.1)$$

όπου C είναι μία σταθερά, που υπολογίζεται ως γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας καλουπιού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Οι τιμές της προτεινόμενης σταθεράς συσχέτισης C της προτεινόμενης εμπειρικής εξίσωσης (3.2), για διάφορες θερμοκρασίες καλουπιού.

Έχοντας διαπιστώσει τα παραπάνω, από παρατήρηση των πειραματικών αποτελεσμάτων, το ερώτημα που τίθεται είναι εάν υπάρχει δυνατότητα

αξιοποίησης των ευρημάτων. Μία πρόταση για πρακτική εφαρμογή των παραπάνω είναι η ακόλουθη.

Εάν θεωρηθεί γνωστή η καμπύλη απόψυξης για $T_{mould}=730^{\circ}\text{C}$, και συνεπώς είναι γνωστός και ο χρόνος στερεοποίησης $t_{sol}^{730}=149\text{sec}$), τότε μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος στερεοποίησης για χύτευση με θερμοκρασία καλουπιού T_{mould} με βάση την εξίσωση (3.2):

$$t_{sol} = C \frac{t_{sol}^{730}}{T_{mould}^{730}} T_{mould} \quad (3.2)$$

όπου: $T_{mould}^{730}=730^{\circ}\text{C}$

$t_{sol}^{730}=149\text{sec}$, από την καμπύλη απόψυξης (δίδεται)

T_{mould} = η θερμοκρασία καλουπιού (γνωστή), η οποία εάν χρησιμοποιηθεί για χύτευση, θα έχει ως αποτέλεσμα χυτό με χρόνο στερεοποίησης t_{sol}

t_{sol} = ο ζητούμενος χρόνος στερεοποίησης.

C = σταθερά.

Η σταθερά C , δίνεται από το Σχήμα 3.2. Οι τιμές του Σχήματος 3.2 προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις του Σχήματος 3.1. Η σχέση μεταξύ C και T_{mould} φαίνεται πως είναι γραμμική (βλ. Σχήμα 3.2) και με γραμμική παρεμβολή προκύπτει η εξίσωση:

$$C = 0.0016 \cdot T_{mould} - 0.329 \quad (3.3)$$

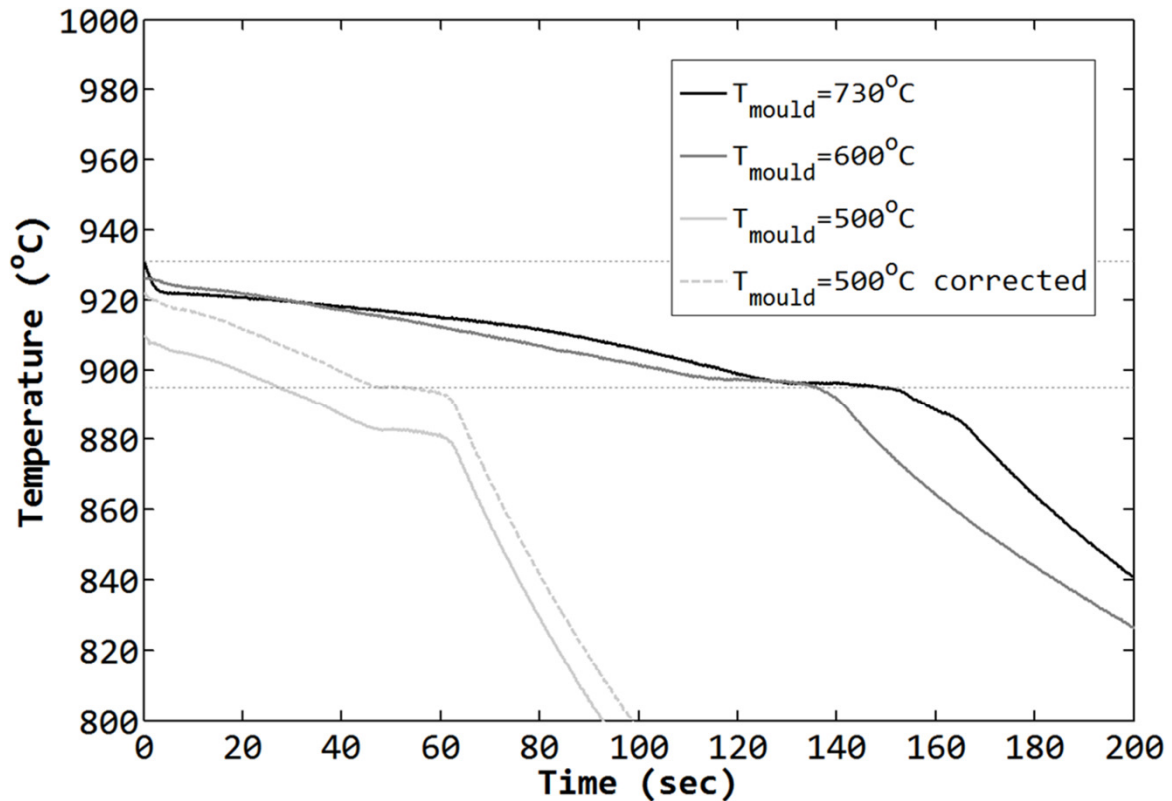
Η λογική πίσω από την προτεινόμενη εμπειρική σχέση (3.2) για τις χυτεύσεις βαρύτητας είναι να μπορεί να προβλεφθεί ο χρόνος στερεοποίησης ενός χυτού για διάφορες θερμοκρασίες προθέρμανσης καλουπιού, εάν είναι γνωστός ο χρόνος στερεοποίησης για μία περίπτωση θερμοκρασίας καλουπιού (εν προκειμένω, για τους 730°C), που έχει μετρηθεί άπαξ.

Για παράδειγμα, εάν έχει γίνει μόνο το πείραμα με $T_{mould}=730^{\circ}\text{C}$, μπορεί να εκτιμηθεί ο χρόνος στερεοποίησης ενός χυτού, για χύτευση ακριβείας με βαρύτητα και με $T_{mould}=500^{\circ}\text{C}$ ως εξής: με βάση την εξ. (3.3) ή το Σχ. 3.2 προκύπτει πως $C=0.476 \approx 0.48$. Από την εξίσωση (3.2), με αντικατάσταση:

$$t_{sol}^{500} = C^{500} \frac{t_{sol}^{730}}{T_{mould}^{730}} T_{mould}^{500} = 0.48 \frac{149.2\text{sec}}{730^{\circ}\text{C}} 500 \Rightarrow t_{sol}^{500} = 48.64\text{sec}$$

3.3.1.2 2η Ομάδα Πειραμάτων T_{mould} - Χύτευση με Υπερπίεση

Η δεύτερη ομάδα πειραμάτων για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού, περιλαμβάνει πειράματα χύτευσης ορείχαλκου με εφαρμογή υπερπίεσης. Η ονομαστική θερμοκρασία έγχυσης του τήγματος ήταν 970°C . Οι πειραματικές καμπύλες απόψυξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3 και αφορούν σε χυτεύσεις με $T_{mould}=500^{\circ}\text{C}$, 600°C και 730°C .



Σχήμα 3.3 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για μελέτη της θερμοκρασίας Καλουπιού στις καμπύλες απόψυξης, για $T_{inlet}=960^{\circ}\text{C}$ και χύτευση με Υπερπίεση

Ο Πίνακας 3.3 συνοψίζει τους χρόνους στερεοποίησης και τους ρυθμούς απόψυξης για την κάθε περίπτωση.

Πίνακας 3.3 Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων υπερπίεσης.

T_{mould} ($^{\circ}\text{C}$)	t_{sol} (sec)	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{1ο} στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{2ο} στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{3ο} στάδιο
500	47.7	-1.57	-0.56	-2.59
600	136	-	-0.22	-0.56
730	148.5	-3.44	-0.12	-1.14

Για τη μεγαλύτερη θερμοκρασία καλουπιού (730°C), ο χρόνος στερεοποίησης είναι 148.5sec , αυξημένος σε σχέση με τα 126sec της χύτευσης με $T_{mould}=700^{\circ}\text{C}$. Στην περίπτωση με $T_{mould}=500^{\circ}\text{C}$, ο χρόνος στερεοποίησης είναι 28.9sec . Επίσης, το χυτό φτάνει στη θερμοκρασία των 800°C στα 245sec στην πρώτη περίπτωση, στα 235.6sec στη δεύτερη και στα 92.5sec στην τρίτη. Επιβεβαιώνεται το αναμενόμενο, πως μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο καλούπι και το τήγμα προκαλεί ταχύτερη στερεοποίηση.

Παρατηρώντας το 1^ο Στάδιο της στερεοποίησης, προκύπτει πως η ταχύτητα απόψυξης είναι μεγαλύτερη για μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά καλουπιού-τήγματος. Η απόψυξη κατά το 2^ο Στάδιο είναι σαφώς ταχύτερη για $T_{mould}=500^{\circ}\text{C}$, αλλά στις άλλες δύο περιπτώσεις, οι καμπύλες ταυτίζονται. Για το 3^ο Στάδιο της απόψυξης, παρατηρείται πως η κλίση της καμπύλης εξαρτάται αντίστροφα με την T_{mould} .

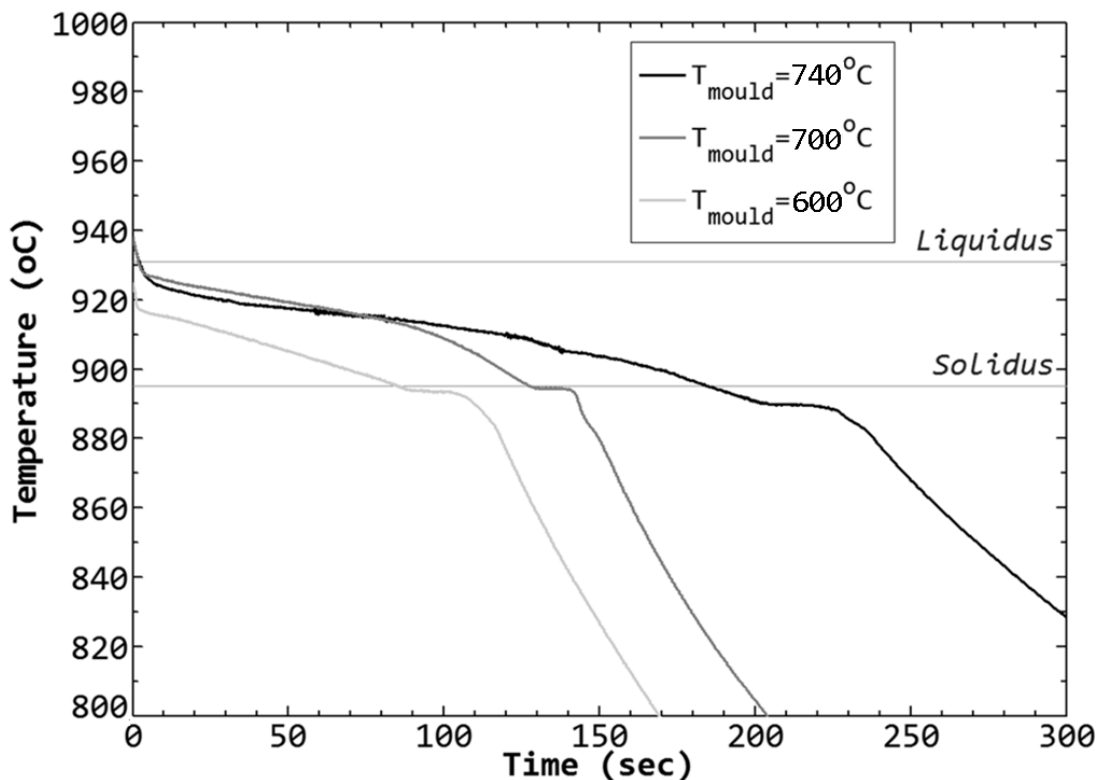
Αναφορικά με την εξίσωση (3.2) και τους συντελεστές του Σχήματος 3.2, εφαρμόζοντας τη λογική αυτή για την πρόβλεψη του χρόνου στερεοποίησης του χυτού (με τις τιμές C της πράσινης γραμμής του σχήματος) με $T_{mould}=700^{\circ}\text{C}$, προκύπτει χρόνος στερεοποίησης 112.5sec, αρκετά κοντά στα 126sec. Εφαρμόζοντας την ίδια λογική για την καμπύλη με $T_{mould}=500^{\circ}\text{C}$, προκύπτει χρόνος στερεοποίησης 48.5sec, ο οποίος απέχει αρκετά από τα 28.9sec του σχήματος. Παρατηρώντας, ωστόσο, καλύτερα την καμπύλη στο Σχήμα 3.3, διαπιστώνουμε ότι η αρχική θερμοκρασία τήγματος δεν είναι ακριβώς ίδια με των άλλων δύο καμπυλών. Εφαρμόζοντας διόρθωση, η οποία δικαιολογείται από το σχολιασμό της παραγράφου 3.3.2, προκύπτει η διακεκομμένη καμπύλη του σχήματος, η οποία είναι περισσότερο συγκρίσιμη με τις άλλες δύο καμπύλες. Η διορθωμένη καμπύλη, παρουσιάζει χρόνο στερεοποίησης τα 47.4sec, τιμή εξαιρετικά κοντά στην πρόβλεψη. Επιπλέον, αν θεωρηθούν δεδομένοι οι χρόνοι στερεοποίησης, επιλύοντας την εξίσωση (3.2) ως προς C, προκύπτει ο συσχετισμός που φαίνεται στο Σχήμα 3.7 με την κόκκινη γραμμή και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$C = 0.002 \cdot T_{mould} - 0.555 \quad (3.4)$$

η οποία διαφέρει ελαφρώς από την αντίστοιχη εξίσωση της περίπτωσης χύτευσης βαρύτητας.

3.3.1.3 3η Ομάδα Πειραμάτων T_{mould} - Χύτευση Κενού

Η 3^η Ομάδα Πειραμάτων και οι μετρήσεις που φαίνονται στο Σχήμα 3.4, αφορούν περιπτώσεις χύτευσης κενού για θερμοκρασίες καλουπιού $T_{mould}=600^{\circ}\text{C}$, $T_{mould}=700^{\circ}\text{C}$ και $T_{mould}=740^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 3.4 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για μελέτη της θερμοκρασίας Καλουπιού στις καμπύλες απόψυξης, για $T_{inlet}=960^{\circ}\text{C}$ και χύτευση κενού

Για άλλη μια φορά, τα συμπεράσματα των προηγούμενων ομάδων πειραμάτων επιβεβαιώνονται. Οι όποιες αποκλίσεις παρουσιάζονται στα αριθμητικά αποτελέσματα οφείλονται σε αποκλίσεις των αρχικών συνθηκών (μεταξύ ονομαστικών και πραγματικών) και -τοπικά- στην εξομάλυνση των καμπυλών. Από τον Πίνακα 3.4 φαίνεται πως αύξηση της θερμοκρασίας καλουπιού συνεπάγεται και αύξηση του χρόνου στερεοποίησης του χυτού. Διαφορά 130°C στη θερμοκρασία καλουπιού συνεπάγεται διαφορά 100sec στο χρόνο στερεοποίησης.

Πίνακας 3.4 Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων κενού.

T_{mould} (°C)	t_{sol} (sec)	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{1ο} στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{2ο} στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{3ο} στάδιο
600	85.8	-5.09	-0.26	-1.71
700	128.1	-4.08	-0.24	-1.54
740	185.2	-2.38	-0.13	-0.80

Οι ρυθμοί απόψυξης κατά το 1^ο, το 2^ο και το 3^ο στάδιο της απόψυξης είναι αντιστρόφως ανάλογοι της θερμοκρασίας καλουπιού. Ακολουθώντας, τέλος, τη λογική της «πρόβλεψης» του χρόνου απόψυξης των χυτών, ο συντελεστής C που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω της προτεινόμενης εμπειρικής εξίσωσης (3.2) για τη χύτευση κενού είναι:

$$C = 0.001 \cdot T_{mould} - 0.382 \quad (3.5)$$

σχέση που είναι εξαιρετικά κοντά στην εξίσωση (3.3).

3.3.1.4 4η Ομάδα Πειραμάτων T_{mould} - Χύτευση 0.5bar

Η 4^η Ομάδα Πειραμάτων αφορούν περιπτώσεις χύτευσης με κενό 50% (δηλαδή πίεση θαλάμου χύτευσης 0.5bar) για θερμοκρασίες καλουπιού $T_{mould}=730^{\circ}\text{C}$ και $T_{mould}=600^{\circ}\text{C}$.

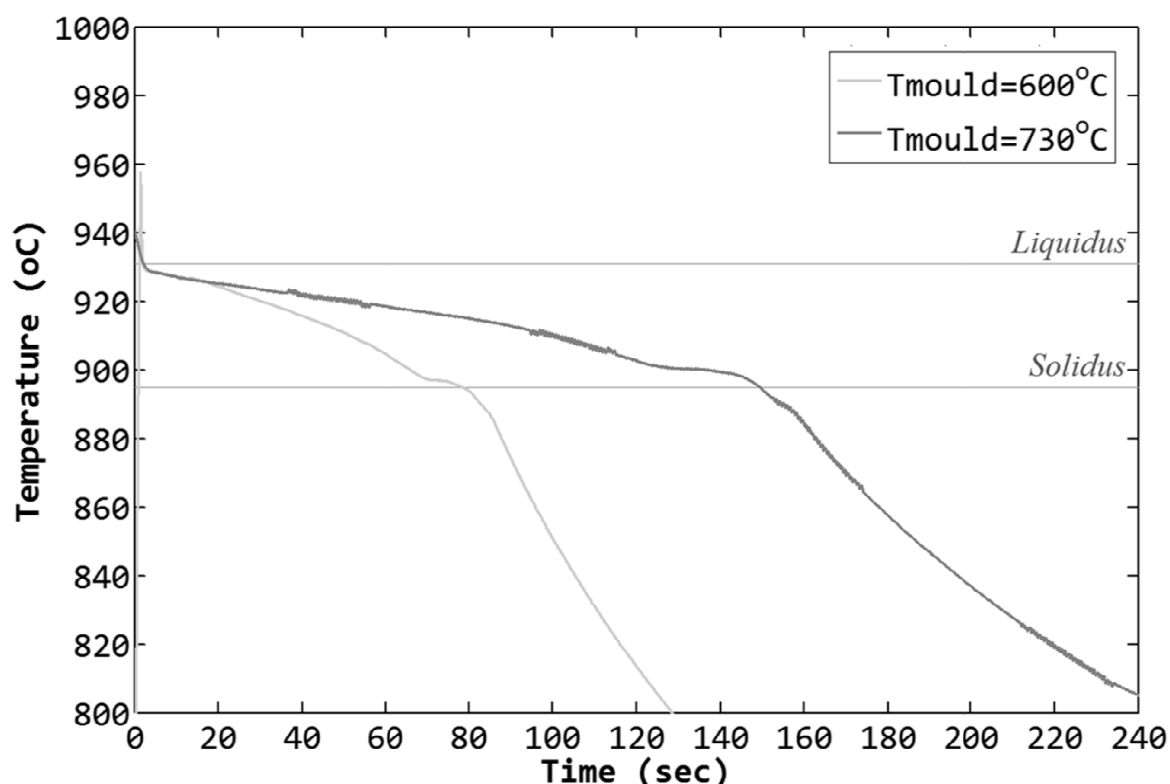
Ο Πίνακας 3.5 συνοψίζει τα ποσοτικά μεγέθη των πειραματικών μετρήσεων. Η διαφορά των τιμών στα δύο συγκρινόμενα πειράματα είναι αρκετά μεγάλη. Φαίνεται πως αύξηση της θερμοκρασίας καλουπιού συνεπάγεται αύξηση του χρόνου στερεοποίησης και μείωση του ρυθμού απόψυξης και στα τρία στάδια. Οι πειραματικές μετρήσεις φαίνονται στο Σχήμα 3.5.

Πίνακας 3.5 Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων κενού.

T_{mould} (°C)	t_{sol} (sec)	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{1ο} στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{2ο} στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{3ο} στάδιο
600	78.3	-75.28	-0.5	-2.19
730	149.5	-4.97	-0.18	-0.96

Με αφορμή την πολύ μεγάλη τιμή στο ρυθμό στερεοποίησης κατά το 1^ο στάδιο, του χυτού με $T_{mould}=600^{\circ}\text{C}$ και την πολύ μικρότερη τιμή του χυτού με $T_{mould}=730^{\circ}\text{C}$, μπορεί να γίνει ένα σχόλιο σχετικά με τα πρώτα δευτερόλεπτα της χύτευσης. Η θερμοκρασιακή πτώση για τα πρώτα λίγα ms ή sec είναι έντονη. Συνεπώς, στα πρώτα msec της απόψυξης απαιτείται πολύ

μεγάλη ταχύτητα δειγματοληψίας. Επιπλέον, παρατηρήθηκε πως το 1^ο στάδιο απόψυξης επηρεάζεται έντονα και από τη θερμοκρασία έγχυσης τήγματος. Ακόμα και διαφορά λίγων βαθμών μπορεί να επηρεάσει έντονα το 1^ο στάδιο. Αυτό σημαίνει πως τιμές T_{inlet} που θεωρήθηκαν ίδιες για τις ανάγκες της παραμετρικής μελέτης, τελικά έχουν κάποια επίδραση στο 1^ο στάδιο της απόψυξης. Συνεπώς, τα απόλυτα μεγέθη κατά το 1^ο στάδιο θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με επιφύλαξη και να λαμβάνονται υπόψη τα όσα αναφέρθηκαν για την εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων.



Σχήμα 3.5 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για μελέτη της θερμοκρασίας Καλουπιού στις καμπύλες απόψυξης, για χύτευση με 50% Κενό και $T_{inlet}=960^{\circ}\text{C}$

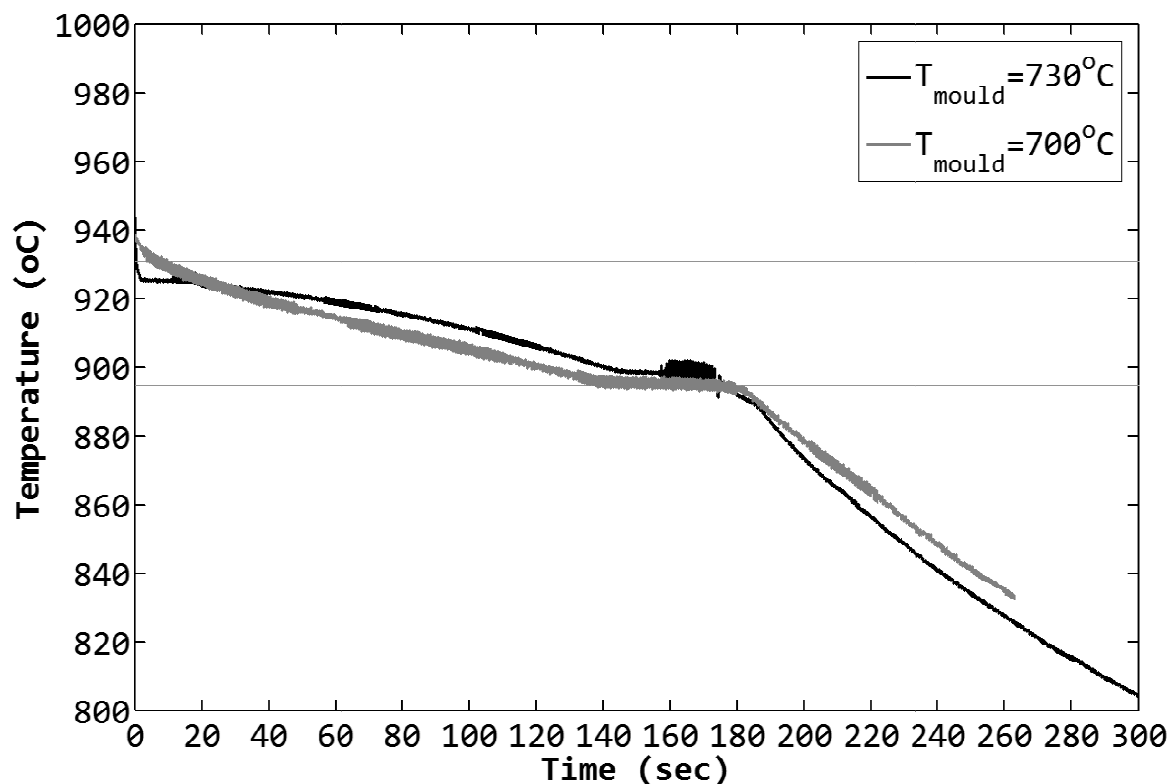
3.3.1.5 5η Ομάδα Πειραμάτων T_{mould} - Χύτευση Κενού-Υπερπίεσης

Η «5^η Ομάδα Πειραμάτων T_{mould} » περιλαμβάνει δύο πειράματα χύτευσης κενού-υπερπίεσης ορείχαλκου. Τα δύο αυτά πειράματα ήταν τα δύο πλέον συγκρίσιμα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με ίδιες όλες τις συνθήκες πλην της θερμοκρασίας καλουπιού.

Η πειραματική καμπύλη απόψυξης που στο Σχήμα 3.6 φαίνεται με το μαύρο χρώμα, αφορά σε χύτευση με θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού τους 730°C και η καμπύλη με το γκρι χρώμα αφορά σε χύτευση με θερμοκρασία καλουπιού στους 700°C . Τα πειράματα που παρουσιάζονται είναι μόνο δύο, καθώς τα υπόλοιπα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με στόχο να συμπληρώσουν τη συγκεκριμένη παραμετρική μελέτη κρίθηκαν ανεπιτυχή ως προς τις αρχικές συνθήκες, ως εκ τούτου αποπροσανατολιστικά και γι αυτό δεν παρατίθενται.

Αναφορικά με την αρχική θερμοκρασία του τήγματος, πρέπει να σημειωθεί πως παρόλο που η μηχανή χύτευσης ήταν ρυθμισμένη και στις δύο περιπτώσεις στους 960°C, από τη μέγιστη μετρηθείσα θερμοκρασία χυτού προκύπτει πως η θερμοκρασία του τήγματος για την περίπτωση $T_{\text{mould}}=730^{\circ}\text{C}$, ήταν 6.5°C πάνω από την άλλη περίπτωση. Αυτή η διαφορά θεωρητικά φαντάζει αμελητέα. Από τις προηγούμενες περιπτώσεις χύτευσης, παρόλα αυτά, φάνηκε πως είναι μάλλον σημαντική και για το λόγο αυτό αναφέρεται.

Παρατηρώντας τις καμπύλες απόψυξης, φαίνεται πως οι δύο καμπύλες βρίσκονται αρκετά κοντά. Αυτό είναι, βέβαια, λογικό, καθώς η θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού των δύο περιπτώσεων είναι αρκετά κοντά. Τόσο από το Σχήμα 3.6 όσο και από τον Πίνακα 3.6 φαίνεται πως υπάρχει διαφορά 36sec στο χρόνο στερεοποίησης των δύο χυτών. Ταχύτερη στερεοποίηση υφίσταται το χυτό με τη μικρότερη θερμοκρασία καλουπιού.



Σχήμα 3.6 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για μελέτη της θερμοκρασίας καλουπιού στις καμπύλες απόψυξης, για $T_{\text{inlet}}=960^{\circ}\text{C}$ και χύτευση Υπερπίεσης-Κενού

Ός προς τους ρυθμούς απόψυξης (βλ. Πίνακα 3.6), φαίνεται πως μεγαλύτερη θερμοκρασία καλουπιού συνεπάγεται μικρότερο ρυθμό απόψυξης στο 2^ο στάδιο απόψυξης και μεγαλύτερο ρυθμό απόψυξης στο 3^ο στάδιο. Όσο για το 1^ο στάδιο απόψυξης, παρατηρείται πως η θερμοκρασιακή πτώση είναι πολύ μεγαλύτερη για την περίπτωση που η θερμοκρασία καλουπιού είναι μεγαλύτερη. Αυτό δεν είναι λογικό, το αντίθετο θα ήταν αναμενόμενο. Συνεπώς, φαίνεται πως η διαφορά στη θερμοκρασία έγχυσης του τήγματος είναι αυτή που επιδρά εντονότερα στο ρυθμό απόψυξης κατά το 1^ο στάδιο.

Πίνακας 3.6 Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων κενού.

T_{mould} (°C)	t_{sol} (sec)	$(\Delta T/\Delta t)^{1\text{o}}$ στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)^{2\text{o}}$ στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)^{3\text{o}}$ στάδιο
700	137.6	-2.08	-0.25	-0.80
730	173.9	-23.33	-0.18	-0.88

3.3.1.6 Συμπεράσματα Πειραμάτων Μελέτης Επίδρασης της Θερμοκρασίας Καλουπιού

Στόχος των πέντε παραμετρικών μελετών που περιγράφηκαν στις προηγούμενες σελίδες ήταν να αναδειχθεί και να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας προθέρμανσης του καλουπιού, στον τρόπο στερεοποίησης και απόψυξης των χυτών. Πέντε διαφορετικές μέθοδοι χύτευσης μελετήθηκαν, οι οποίες μπορούν να υλοποιηθούν με χρήση μίας μηχανής χύτευσης κενού-υπερπίεσης.

Οι πειραματικές μετρήσεις που παρουσιάστηκαν ήταν οι καμπύλες απόψυξης, δηλαδή η θερμοκρασιακή εξέλιξη μίας χαρακτηριστικής περιοχής του χυτού. Από τις καμπύλες απόψυξης, πέρα από τα συμπεράσματα που προέκυψαν με απλή οπτική παρατήρηση, εξήχθησαν ποσοτικά συμπεράσματα: ο χρόνος στερεοποίησης και οι ρυθμοί απόψυξης σε κάθε ένα από τα τρία στάδια απόψυξης.

Το γενικό συμπέρασμα είναι πως η θερμοκρασία του καλουπιού αποτελεί μία πολύ βασική παράμετρο της χύτευσης. Εξετάζοντας μόνο τις πειραματικές καμπύλες απόψυξης και παραγνωρίζοντας -για την ώρα- τις ιδιότητες του χυτού προϊόντος (ιδιότητες επιφάνειας, μικροδομή, αντοχή), προκύπτει πως ακόμα και πολύ μικρές μεταβολές στη θερμοκρασία του καλουπιού μπορεί να έχουν έντονη επίδραση στο χρόνο στερεοποίησης και στο ρυθμό απόψυξης. Αυτό το γενικό συμπέρασμα είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διεξαγωγή αριθμητικής προσομοίωσης της χύτευσης (βλ. Κεφ. 4). Η θερμοκρασία καλουπιού αποτελεί αρχική και οριακή συνθήκη ενός προβλήματος προσομοίωσης και είναι σημαντικότερη η ακριβής γνώση (πχ μέσω πειραματικής μέτρησης) αυτής, προκειμένου να διεξαχθεί ρεαλιστική μοντελοποίηση.

Στον Πίνακα 3.7 συνοψίζονται με τη μορφή συμβόλων η ποιοτική επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας του καλουπιού. Για παράδειγμα, από την παραμετρική μελέτη για τις χυτεύσεις βαρύτητας προκύπτει πως αύξηση της θερμοκρασίας του καλουπιού συνεπάγεται αύξηση του χρόνου στερεοποίησης, αύξηση του ρυθμού απόψυξης κατά το 1^ο στάδιο απόψυξης, μείωση του ρυθμού απόψυξης κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης (2^ο στάδιο) και μείωση του ρυθμού απόψυξης του στερεοποιημένου χυτού (3^ο στάδιο). Τα βέλη που βρίσκονται εντός παρενθέσεων υποδηλώνουν τη γενική τάση που παρουσιάστηκε από τα πειράματα, η οποία ωστόσο δεν ήταν πλήρως συστηματική, λόγω επίδρασης άλλων παραγόντων.

Σε όλες τις περιπτώσεις αύξηση της θερμοκρασίας καλουπιού συνεπάγεται αύξηση του χρόνου στερεοποίησης, μείωση του ρυθμού απόψυξης κατά το 2^ο στάδιο και τάση μείωσης του ρυθμού απόψυξης κατά το 3^ο στάδιο.

Πίνακας 3.7 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων επίδρασης της θερμοκρασίας του καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και τους ρυθμούς απόψυξης.

Ομάδα T_{mould}	Υλικό	Μέθοδος Χύτευσης	T_{mould}	t_{sol}	$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)^{1o}$	$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)^{2o}$	$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)^{3o}$
1 ^η Ομάδα	CuZn33	Βαρύτητας	↑	↑	↑	↓	(↓)
2 ^η Ομάδα	CuZn33	Υπερπίεσης	↑	↑	↑	↓	(↓)
3 ^η Ομάδα	CuZn33	Κενού	↑	↑	↓	↓	↓
4 ^η Ομάδα	CuZn33	Κενού 50%	↑	↑	↓	↓	↓
5 ^η Ομάδα	CuZn33	Υπερπ.-Κενού	↑	↑	↑	↓	(↑) ή -

Διαφοροποίηση παρατηρείται κατά το 1^ο στάδιο απόψυξης, για το οποίο ο ρυθμός απόψυξης μεγαλώνει για μεγάλες θερμοκρασίες καλουπιού, για τις περιπτώσεις χύτευσης βαρύτητας και χύτευσης με εφαρμογή υπερπίεσης. Ο ρυθμός απόψυξης κατά το 1^ο στάδιο μειώνεται με την αύξηση του T_{mould} για τις περιπτώσεις εφαρμογής κενού (100% ή 50%) κατά τη χύτευση. Στην περίπτωση εφαρμογής κενού και υπερπίεσης, η επίδραση δεν είναι σαφής, καθώς υπάρχουν δύο αντικρουόμενες τάσεις.

Επιπλέον, στην παράγραφο αυτή, από τις παρατηρήσεις των πειραματικών μετρήσεων, προτείνεται η χρήση της εμπειρικής εξίσωσης (3.1):

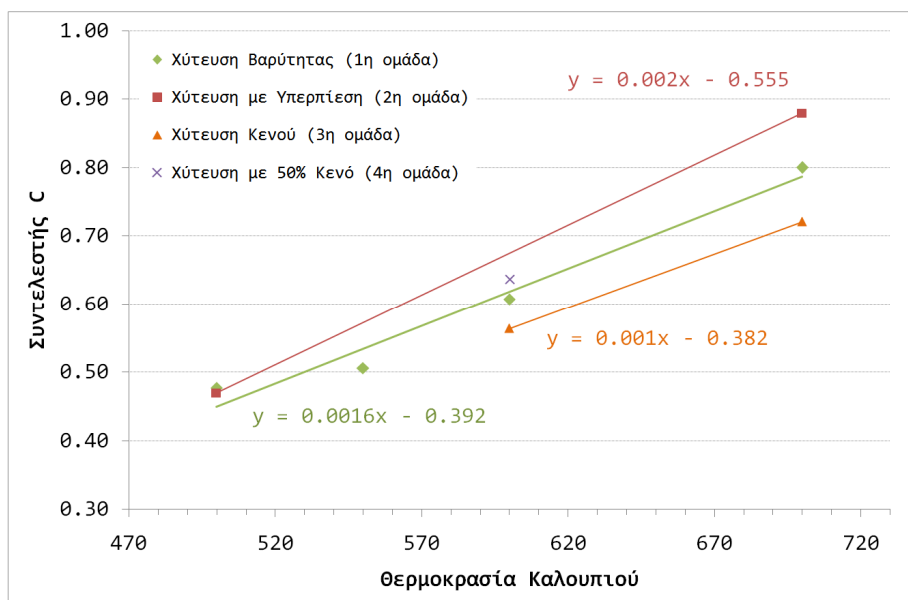
$$t_{sol} = C \frac{t_{sol}^{730}}{T_{mould}^{730}} T_{mould} \quad (3.6)$$

η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη του χρόνου στερεοποίησης του χυτού, για χύτευση ορείχαλκου με θερμοκρασίες 500-700°C, εάν είναι γνωστός ο χρόνος στερεοποίησης για χύτευση με $T_{mould}=730^\circ\text{C}$. Η σταθερά C , δίνεται από το διάγραμμα του Σχήματος 3.7 και είναι γραμμική εξάρτηση της θερμοκρασίας καλουπιού.

Στο Σχήμα 3.7, με πράσινο χρώμα απεικονίζονται οι προτεινόμενες τιμές C για χυτεύσεις βαρύτητας. Η κόκκινη και η πορτοκαλί γραμμές είναι οι προτεινόμενες τιμές για χύτευση με υπερπίεση και χύτευση εν κενώ, αντίστοιχα. Η πράσινη γραμμή (χύτευση βαρύτητας) προέκυψε από 5 πειραματικές μετρήσεις, ενώ οι δύο προηγούμενες γραμμές προέκυψαν μόνο από 2 πειράματα έκαστη και γι αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη με επιφύλαξη. Είναι αξιοσημείωτη η ομοιότητα των προτεινόμενων εξισώσεων για τη χύτευση βαρύτητας και τη χύτευση κενού.

Με μεγαλύτερο πλήθος δοκιμών θα πρέπει να διερευνηθεί το κατά πόσο η διαφορά τους μπορεί να θεωρηθεί πως βρίσκεται στα όρια του πειραματικού σφάλματος. Επιπλέον, το μωβ σημείο που αφορά στη χύτευση με 50% κενό βρίσκεται πολύ κοντά στα αντίστοιχα σημεία της πράσινης και της

πορτοκαλί γραμμής. Η κόκκινη γραμμή ενδεχομένως να εμπεριέχει αρκετά πειραματικά σφάλματα και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης το κατά πόσο η αλλαγή της κλίσης της ευθείας του “C” από 0.01 σε 0.02 οφείλεται στη χρήση υπερπίεσης, ή όχι. Η εξίσωση (3.5) προτείνεται, εφόσον φαίνεται να μπορεί να εφαρμοστεί με αρκετά καλό ποσοστό επιτυχίας, για τις περισσότερες περιπτώσεις.



Σχήμα 3.7 Οι τιμές της προτεινόμενης σταθεράς συσχέτισης C της προτεινόμενης εμπειρικής εξίσωσης (3.2), για διάφορες θερμοκρασίες καλουπιού.

3.3.2 Επίδραση της Αρχικής Θερμοκρασίας Τήγματος

Διατηρώντας σταθερές τις συνθήκες πίεσης στους δύο θαλάμους της μηχανής και τη θερμοκρασία καλουπιού, αλλά μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία του θαλάμου τήξης, διερευνάται η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος στις καμπύλες απόψυξης.

Η συγκεκριμένη διερεύνηση είχε την εξής δυσκολία: για να αναδειχθούν οι διαφορές μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων, θα ήταν επιθυμητό το εύρος των δοκιμαζόμενων αρχικών θερμοκρασιών τήγματος να ήταν σχετικά ευρύ. Ρύθμιση της μηχανής σε χαμηλή θερμοκρασία τήξης επιφέρει πολύ μεγάλη δυσκολία στην τήξη. Απαιτείται πολύ ώρα και προσπάθεια για επίτευξη οριακά χαμηλής θερμοκρασίας τήγματος, η οποία στη συνέχεια, έχει σαν αποτέλεσμα την κακή εύροια του τήγματος και ως εκ τούτου την ατελή πλήρωση, η οποία με τη σειρά της συνεπάγεται και ελλειπίες μετρήσεις θερμοκρασίας. Υψηλή θερμοκρασία έγχυσης, από την άλλη, καταστρέφει το τηκόμενο υλικό, προκαλώντας του πολύ έντονη οξειδωση. Το χυτό που προκύπτει από τέτοιο «καμένο» υλικό είναι γεμάτο ατέλειες, τεράστιους πόρους και η όποια μέτρηση αφενός μεν δεν έχει νόημα, αφετέρου δε δεν είναι αξιόπιστη. Συνεπώς, το εύρος τιμών που μπορούν να δοκιμαστούν περιορίζεται στο εύρος 950-990°C (σε λιγότερο από 40°C).

Επιπλέον, ένας ακόμα περιοριστικός παράγων είναι η αδυναμία ακριβούς ελέγχου της θερμοκρασίας τήξης. Η μηχανή χύτευσης διαθέτει μία ένδειξη

της θερμοκρασίας τήξης. Η ένδειξη αυτή, όμως, δεν είναι η πραγματική θερμοκρασία του τήγματος στο χωνί. Από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν φαίνεται πως η πραγματική θερμοκρασία μπορεί να είναι 10-14°C χαμηλότερη από αυτή της ένδειξης. Σε ένα εύρος μικρότερο των 40°C, η αβεβαιότητα των 10-14°C είναι σημαντική.

(Αναλυτικότερα, η ένδειξη για τη θερμοκρασία τήξης στη μηχανή χύτευσης προέρχεται από ένα θερμοστοιχείο που είναι τοποθετημένο μέσα στο τοίχωμα του γραφιτένιου χωνιού (σκεύος τήξης), σε ειδικά διαμορφωμένη οπή. Είναι φανερό, λοιπόν, πως η θερμοκρασία που μετρά το θερμοστοιχείο δεν είναι η πραγματική θερμοκρασία του τήγματος. Πρόκειται, βέβαια, για την πιο καλή δυνατή προσέγγιση. Δεν παύουν, όμως, να υπάρχουν απώλειες θερμότητας. Το σκεύος τήξης θερμαίνεται από ηλεκτρικές αντιστάσεις που το περιβάλλουν. Ο χειριστής της μηχανής ρυθμίζει τη θερμοκρασία του χωνιού στους 960°C. Όταν οι αντιστάσεις λειτουργούν, μεταδίδεται θερμότητα στο χωνί, και από το χωνί στο μέταλλο. Ένας θερμοστάτης χρησιμοποιείται για να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία του χωνιού. Έτσι, όταν το χωνί φθάσει να έχει πραγματικά τη θερμοκρασία των 960°C, η παροχή διακόπτεται και επανεκκινεί όταν η θερμοκρασία πέφτει. Με τον τρόπο αυτό «σταθεροποιείται» η θερμοκρασία του χωνιού. Μερικά λεπτά αργότερα, σταθεροποιείται και η θερμοκρασία της λεκάνης τήγματος. Η θερμοκρασία στην οποία σταθεροποιείται, όμως, είναι μικρότερη από αυτή του χωνιού, καθώς μεσολαβεί η αντίσταση του γραφιτένιου τοιχώματος.

Μετρήθηκε πως η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της ένδειξης και της πραγματικής θερμοκρασίας είναι 10-14°C. Συνεπώς, αν η μηχανή έχει ρυθμιστεί στους 960°C, τότε η θερμοκρασία του τήγματος είναι περίπου 946-950°C. Δεν θα πρέπει να αμελείται η αδράνεια του θερμοστοιχείου και το πειραματικό σφάλμα.

Τέλος, όταν το τήγμα εγχέεται στο καλούπι, μέχρι να φθάσει στο σημείο της κοιλότητας του καλουπιού που βρίσκεται τοποθετημένο το θερμοστοιχείο, μεσολαβεί κάποιο χρονικό διάστημα πολύ λίγων ms. Παρόλα αυτά, επειδή το τήγμα διανύει μία διαδρομή κατά την οποία είτε είναι εκτεθειμένο στον αέρα, είτε έρχεται σε επαφή με τοιχώματα καλουπιού, υπάρχει μία απώλεια λίγων °C.)

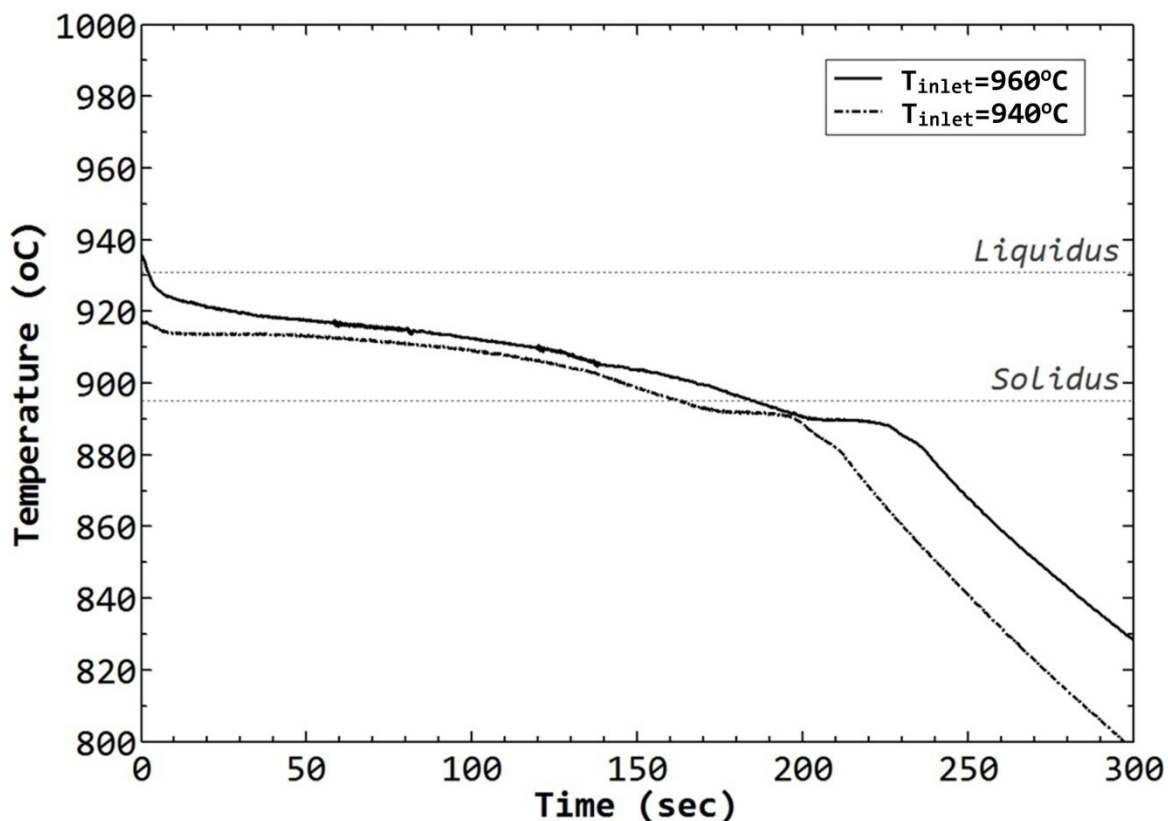
Ο Πίνακας 3.8 παρουσιάζει τις συνθήκες των δύο ομάδων πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν. Η 1^η ομάδα πειραμάτων περιλαμβάνει χυτεύσεις κενού, και η 2^η ομάδα πειραμάτων περιλαμβάνει χυτεύσεις βαρύτητας.

Πίνακας 3.8 Πίνακας ομάδων συγκρινόμενων πειραμάτων, για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας έγχυσης του τήγματος.

Ομάδα	Υλικό	Μέθοδος Χύτευσης	T _{mould}	T _{inlet}
1 ^η Ομάδα T _{inlet}	CuZn33	Χύτευση Κενού	730 °C	930 °C 960 °C
2 ^η Ομάδα T _{inlet}	CuZn33	Χύτευση Βαρύτητας	730 °C	960°C 970 °C

3.3.2.1 1η Ομάδα Πειραμάτων T_{inlet} - Χύτευση Κενού

Στο Σχήμα 3.8, η καμπύλη με το μαύρο χρώμα αντιστοιχεί σε χύτευση κενού με ονομαστική θερμοκρασία έγχυσης τους 960°C. Η γκρι καμπύλη σε χύτευση κενού με ονομαστική θερμοκρασία έγχυσης τους 932°C. Η καμπύλη με τη μικρότερη θερμοκρασία έγχυσης βρίσκεται χαμηλότερα. Στο 1^ο στάδιο απόψυξης η διαφορά των δύο καμπυλών είναι εμφανής. Ο ρυθμός απόψυξης, δηλαδή η κλίση της καμπύλης στο 1^ο στάδιο είναι μεγαλύτερος για το χυτό με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία έγχυσης. Λόγω της μεγαλύτερης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ τήγματος-καλουπιού, η απαγωγή θερμότητας, αρχικά είναι εντονότερη. Κατά το 2^ο στάδιο, ο ρυθμός απόψυξης των δύο χυτών είναι περίπου ο ίδιος. Ομοίως και στο 3^ο στάδιο, καθώς οι δύο καμπύλες είναι παράλληλες. Ωστόσο, το χυτό με τη χαμηλή θερμοκρασία έγχυσης στερεοποιείται ταχύτερα.



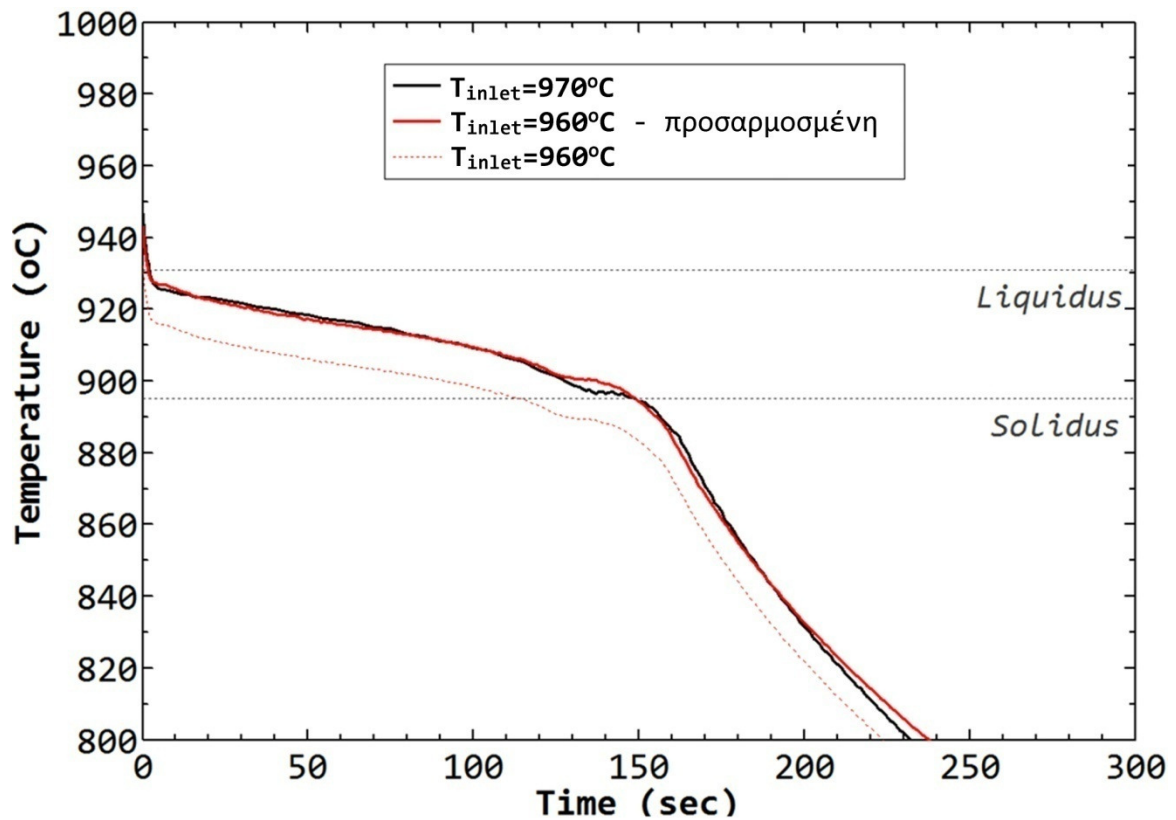
Σχήμα 3.8 Επίδραση της θερμοκρασίας Έγχυσης στις καμπύλες απόψυξης, για χύτευση Κενού και $T_{mould}=730^{\circ}\text{C}$

Πίνακας 3.9 Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων κενού.

T_{inlet} ($^{\circ}\text{C}$)	t_{sol} (sec)	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{1ο} στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{2ο} στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{3ο} στάδιο
940 $^{\circ}\text{C}$	163	-0.57	-0.11	-0.85
960 $^{\circ}\text{C}$	185.4	-2.38	-0.06	-0.99

3.3.2.2 2η Ομάδα Πειραμάτων T_{inlet} - Χύτευση Βαρύτητας

Στο Σχήμα 3.9, η καμπύλη με το μαύρο χρώμα αντιστοιχεί σε χύτευση βαρύτητας με ονομαστική θερμοκρασία έγχυσης τους 970°C και μέγιστη μετρηθείσα θερμοκρασία τους 947.69°C. Η κόκκινη διακεκομμένη καμπύλη αντιστοιχεί σε χύτευση βαρύτητας με ονομαστική θερμοκρασία έγχυσης τους 960°C και μέγιστη πραγματική θερμοκρασία τους 932.15°C. Η καμπύλη με τη μικρότερη θερμοκρασία έγχυσης βρίσκεται χαμηλότερα. Στο 1^ο στάδιο απόψυξης η διαφορά των δύο καμπυλών είναι εμφανής. Παρατηρείται πως, εάν μετακινηθεί η κόκκινη διακεκομμένη καμπύλη κατά 16°C προς τα πάνω (όσο είναι και η διαφορά των δύο μέγιστων πραγματικών τιμών), τότε θα προκύψει εντυπωσιακή ταύτιση της κόκκινης (συνεχούς πλέον) και της μαύρης καμπύλης. Συνεπώς, από το συγκεκριμένο παράδειγμα προκύπτει πως η μόνη επίδραση που έχει η θερμοκρασία έγχυσης είναι η μετατόπιση της καμπύλης προς τα πάνω ή προς τα κάτω.



Σχήμα 3.9 Επίδραση της θερμοκρασίας Έγχυσης στις καμπύλες απόψυξης, για Χύτευση Βαρύτητας και $T_{mould}=730^{\circ}\text{C}$

Πίνακας 3.10 Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων βαρύτητας.

T_{inlet} ($^{\circ}\text{C}$)	t_{sol} (sec)	$(\Delta T/\Delta t)^{1o}$ στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)^{2o}$ στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)^{3o}$ στάδιο
970	149.2	-8.25	-0.17	-1.46
960	114/(149.3*)	-8.42	-0.19	-1.35

* για την «προσαρμοσμένη» καμπύλη

3.3.2.3 Συμπεράσματα Πειραμάτων Μελέτης Επίδρασης της Θερμοκρασίας Έγχυσης του Τήγματος

Στόχος της §3.3.2 ήταν η διερεύνηση, μέσω παραμετρικής μελέτης, της επίδρασης της θερμοκρασίας έγχυσης του τήγματος στο χρόνο στερεοποίησης και την ταχύτητα απόψυξης του τήγματος.

Από τεχνικής απόψεως αποδείχτηκε δύσκολη η διεξαγωγή πειραμάτων με μεταβλητή τη θερμοκρασία έγχυσης του τήγματος. Για το λόγο αυτό, ο αριθμός των πειραμάτων που επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν δεν ήταν μεγάλος. Τα ποιοτικά αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.11 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων επίδρασης της θερμοκρασίας έγχυσης τήγματος στο χρόνο στερεοποίησης και τους ρυθμούς απόψυξης.

Ομάδα T_{inlet}	Υλικό	Μέθοδος Χύτευσης	T_{inlet}	t_{sol}	$\left \frac{\Delta T}{\Delta t}\right ^{1o}$	$\left \frac{\Delta T}{\Delta t}\right ^{2o}$	$\left \frac{\Delta T}{\Delta t}\right ^{3o}$
1^η Ομάδα	CuZn33	Κενού	↑	↑	↓	(↓) ≈ -	↑
2^η Ομάδα	CuZn33	Βαρύτητας	↑	↑/-*	↓ ≈ -	(↓) ≈ -	↑
* για την «προσαρμοσμένη» καμπύλη ↑ αύξηση τιμής			↓ -	μείωση τιμής σταθερή τιμή	(↓) ≈ -μείωση, ή ίσως σταθερή τιμή		

Στις δύο ομάδες πειραμάτων χύτευσης, δηλαδή και στη χύτευση κενού και στη χύτευση βαρύτητας, παρατηρείται περίπου η ίδια συμπεριφορά ως προς την επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας έγχυσης του τήγματος.

Με αύξηση της θερμοκρασίας έγχυσης του τήγματος, ο χρόνος στερεοποίησης του χυτού αυξάνεται και ο ρυθμός απόψυξης κατά το 3^ο στάδιο της απόψυξης αυξάνεται επίσης. Ο ρυθμός απόψυξης στο 1^ο στάδιο της απόψυξης της χύτευσης κενού μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας έγχυσης. Για τη χύτευση βαρύτητας, ως απόλυτο νόμωμο ομοίως μειώνεται, αλλά η μείωση είναι τόσο μικρή που πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί σταθερός.

Σχετικά με το 2^ο στάδιο της απόψυξης, και στις δύο ομάδες φαίνεται πως πρακτικά ο ρυθμός απόψυξης παραμένει ανεπηρέαστος από τη θερμοκρασία έγχυσης του τήγματος.

Τέλος, φαίνεται πως για διαφορά της τάξης των 10°C, η αύξηση της θερμοκρασίας έγχυσης του τήγματος μετατοπίζει ολόκληρη την καμπύλη απόψυξης προς τα πάνω κατά 10°C. Για μεγαλύτερες διαφορές στη θερμοκρασία έγχυσης, κάτι τέτοιο δεν φαίνεται να ισχύει.

3.3.3 Επίδραση «Συνθηκών Πίεσης» κατά τη Χύτευση

Όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 2.3.2, ανάλογα με τις ρυθμίσεις στη μηχανή χύτευσης κενού-υπερπίεσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί χύτευση με ποικιλία συνθηκών. Η πίεση στο θάλαμο τήξης και το κενό στο θάλαμο χύτευσης είναι οι «συνθήκες πίεσης» που καθορίζουν το «είδος της χύτευσης».

Υπάρχουν 7 διαφορετικοί συνδυασμοί «συνθηκών πίεσης», που συνεπάγονται 7 διαφορετικά «είδη χύτευσης», ως προς τα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά. Ανάλογα με τις τιμές πίεσης, οι περιπτώσεις αυξάνονται.

Τα 7 είδη χύτευσης που μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη μηχανή χύτευσης του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας είναι:

- Χύτευση Κενού - Υπερπίεσης
- Χύτευση Κενού
- Χύτευση Βαρύτητας
- Χύτευση Υπερπίεσης
- Χύτευση Μερικού Κενού
- Χύτευση Μερικής Υπερπίεσης
- Χύτευση Μερικού Κενού - Μερικής Υπερπίεσης

Στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης, εξετάστηκαν εννέα (9) διαφορετικά σενάρια χύτευσης, ως προς τις «συνθήκες πίεσης». Τα σενάρια αυτά περιγράφονται στον Πίνακα 2.6.

Πίνακας 3.12 Κατηγοριοποίηση των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν με βάση τις συνθήκες πίεσης στο θάλαμο τήξης και στο θάλαμο χύτευσης.

α/α	Πίεση στο θάλαμο Τήξης P_{up} (επάνω θάλαμος)	Πίεση στο θάλαμο Χύτευσης P_{down} (κάτω θάλαμος)	Χαρακτηρισμός είδους χύτευσης	ΔP	Κωδική Ονομα- σία
1	Υπερπίεση (+0.5bar)	Ατμοσφαιρική πίεση (0bar)	υπερπ-atm	0.50	P
2	Υπερπίεση (+0.5bar)	Κενό (-0.5bar)	υπερπ-κενό _{50%}	1.00	PV50
3	Υπερπίεση (+0.5bar)	Κενό (-0.05bar)	υπερπ-κενό	1.50	PV
4	Υπερπίεση (+0.25bar)	Ατμοσφαιρική πίεση (0bar)	υπερπ _{25%} -atm	0.25	P25V
5	Υπερπίεση (+0.25bar)	Κενό (-0.5bar)	υπερπ _{25%} -κενό _{50%}	1.00	P25V25
6	Υπερπίεση (+0.25bar)	Κενό (-0.05bar)	υπερπ _{25%} -κενό	1.25	P25V
7	Ατμοσφαιρική πίεση (0bar)	Ατμοσφαιρική πίεση (0bar)	βαρύτητας	0.00	G
8	Ατμοσφαιρική πίεση (0bar)	Κενό (-0.5bar)	atm-κενό _{50%}	0.50	V50
9	Ατμοσφαιρική πίεση (0bar)	Κενό (-0.05bar)	atm-κενό	1.00	V

Για τη μελέτη της επίδρασης των συνθηκών πίεσης κατά τη χύτευση, ήταν αναγκαία η -κατά το δυνατόν- διατήρηση σταθερών όλων των παραμέτρων της χύτευσης, πέραν της μελετούμενης. Μελετούμενη παράμετρος είναι ο συνδυασμός πιέσεων στο θάλαμο τήξης και το θάλαμο χύτευσης.

Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν και παρουσιάζονται οι πειραματικές καμπύλες απόψυξης για τα πειράματα με σταθερή θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού (T_{mould} (°C)) και αρχική θερμοκρασία έγχυσης τήγματος (T_{metal} (°C)), αλλά διαφορετικές συνθήκες πίεσης.

Στον Πίνακα 2.7 παρουσιάζονται οι ομάδες των συγκρινόμενων πειραμάτων.

Πίνακας 3.13 Πίνακας ομάδων συγκρινόμενων πειραμάτων, για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών πίεσης κατά τη χύτευση.

Ομάδα	Υλικό	Μέθοδος χύτευσης	T _{mould}	T _{inlet}
1 ^η Ομάδα ΔΡ	CuZn33	Χύτευση Κενού 50% Χύτευση Κενού Χύτευση 25% Υπερπ-Κενού Χύτευση 50% Υπερπ-Κενού50% Χύτευση Βαρύτητας	600 °C	970 °C
2 ^η Ομάδα ΔΡ	CuZn33	Χύτευση Κενού Χύτευση Υπερπίεσης Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού Χύτευση Κενού 50% Χύτευση Βαρύτητας	730 °C	960°C
3 ^η Ομάδα ΔΡ	CuNi12Zn24	Χύτευση Βαρύτητας Χύτευση Κενού Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού	740 °C	1111 °C
4 ^η Ομάδα ΔΡ	CuNi12Zn24	Χύτευση Βαρύτητας Χύτευση Υπερπίεσης	550 °C	1130 °C
5 ^η Ομάδα ΔΡ	CuZn33	Χύτευση Βαρύτητας Χύτευση Υπερπίεσης Χύτευση 25% Υπερπ-Κενού50%	500 °C	970 °C

3.3.3.1 1η Ομάδα πειραμάτων ΔΡ

Η 1^η ομάδα πειραμάτων έχει ονομαστικές τιμές σταθερών συνθηκών T_{mould}=600°C και T_{metal}=970°C. Ο Πίνακας 3.14 παρουσιάζει τις ακριβείς συνθήκες των πειραμάτων της συγκεκριμένης ομάδας συγκρινόμενων περιπτώσεων χύτευσης.

Πίνακας 3.14 Πειράματα «1^{ης} Ομάδας ΔΡ», για τη διερεύνηση της επίδραση των συνθηκών χύτευσης στη χύτευση, με (ΔΡ;600;970).

	Πείραμα #1 Χύτευση Υπερπίεσης- 50% Κενού	Πείραμα #2 Χύτευση Κενού	Πείραμα #3 Χύτευση 25% Υπερπ- Κενού	Πείραμα #4 Χύτευση 50% Κενού	Πείραμα #5 Χύτευση Βαρύτητας
T _{mould} (°C)	600				
T _{inlet} (°C)	970				
Πίεση στο θάλαμο τήξης (bar)	1.50	1.00	1.25	1.00	1.00
Πίεση στο θάλαμο χύτευσης (bar)	0.50	0.00*	0.00*	0.50	1.00

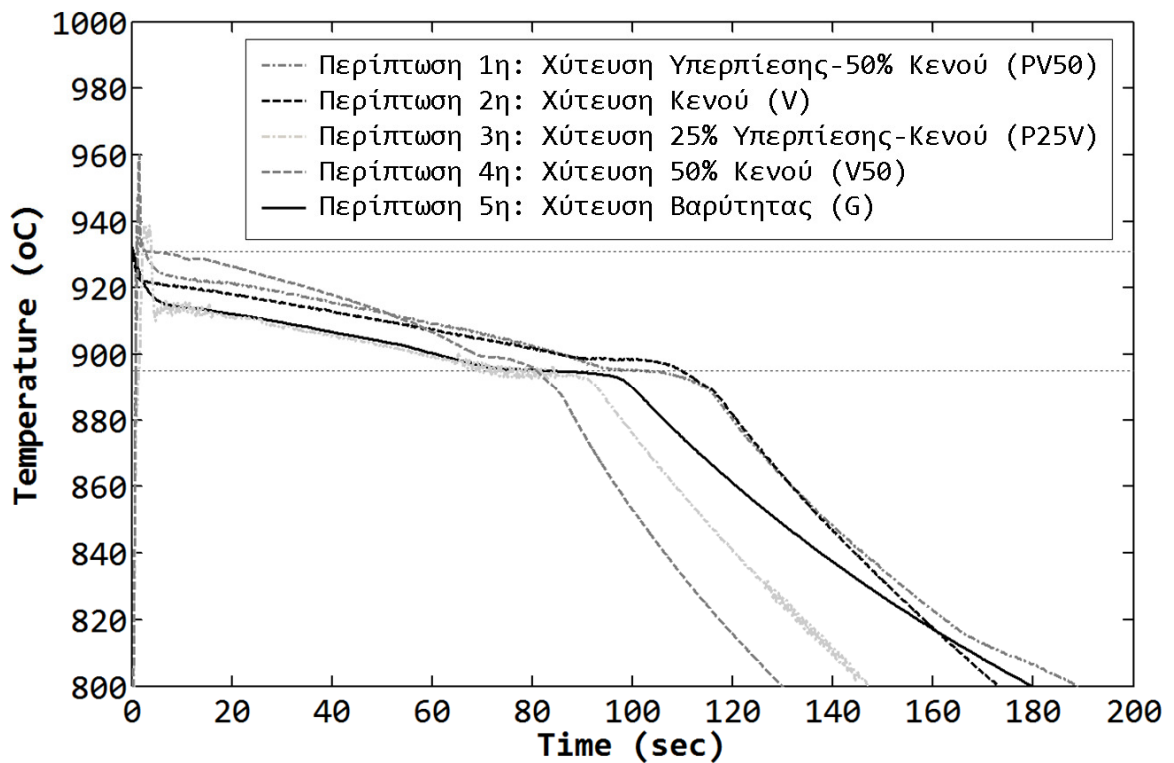
* Η τιμή «0.00» χρησιμοποιείται συμβολικά για να υποδηλώσει την ύπαρξη κενού στο θάλαμο χύτευσης. Η πραγματική πίεση ήταν 0.03bar και μετρήθηκε από αισθητήρα κενού που ήταν τοποθετημένος εντός του θαλάμου.

Στις εικόνες που ακολουθούν, πραγματοποιείται συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών απόψυξης για τις συγκρινόμενες περιπτώσεις.

Συγκρίνοντας τις δύο ακραίες περιπτώσεις ως προς το ΔΡ (Πίνακας 3.14), δηλαδή τη χύτευση βαρύτητας (ΔΡ=0.0) με τη χύτευση 25% Υπερπίεσης-Κενού (ΔΡ=1.25), παρατηρείται πως ο χρόνος στερεοποίησης για ΔΡ=1.25 είναι μικρότερος από το χρόνο περίπτωση στην περίπτωση της χύτευσης βαρύτητας κατά 7.5sec. Η Ταχύτητα απόψυξης κατά το «1^ο Στάδιο» είναι μεγαλύτερη

στην περίπτωση της μεγαλύτερης διαφοράς πιέσεων. Στο «2^ο Στάδιο» οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν εντυπωσιακή ταύτιση, υποδεικνύοντας ολόιδιο ρυθμό απόψυξης. Τέλος, κατά το «3^ο Στάδιο», το χυτό στην περίπτωση ($\Delta P=1.25$) αποψύχεται με μεγαλύτερο ρυθμό.

Σημείωση: Ως «1ο Στάδιο» απόψυξης αναφέρεται η χρονική διάρκεια κατά την οποία το κράμα βρίσκεται σε θερμοκρασία υψηλότερη από τη Liquidus και αποψύχεται ως τήγμα. Ως «2ο Στάδιο» απόψυξης αναφέρεται η χρονική διάρκεια κατά την οποία το κράμα βρίσκεται σε θερμοκρασία μεταξύ Liquidus και Solidus, δηλαδή στη λεγόμενη «πολτώδη περιοχή» ή ημιστερεά κατάσταση (“mushy zone”). Τέλος, ως «3ο Στάδιο» απόψυξης θα αναφέρεται το στάδιο απόψυξης του στερεοποιημένου κράματος.



Σχήμα 3.10 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης που αποκτώνται από πέντε περιπτώσεις χύτευσης CuZn33 για διαφορετικές συνθήκες χύτευσης, με θερμοκρασία έγχυσης τους και 970°C και θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού τους 600°C.

Πίνακας 3.15 Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών πίεσης στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων ορείχαλκου (CuZn33).

Συνθήκες Χύτευσης	t_{sol} (sec)	$(\Delta T/\Delta t)_{1o \text{ στάδιο}}$	$(\Delta T/\Delta t)_{2o \text{ στάδιο}}$	$(\Delta T/\Delta t)_{3o \text{ στάδιο}}$
P25V	72.5	-30.17	-0.26	-1.83
V50	81	-64.5	-0.48	-2.28
V	109.9	-5.48	-0.26	-1.69
PV50	101.2	-31.75	-0.28	-1.56
G	84.8	-4.00	-0.25	-1.29

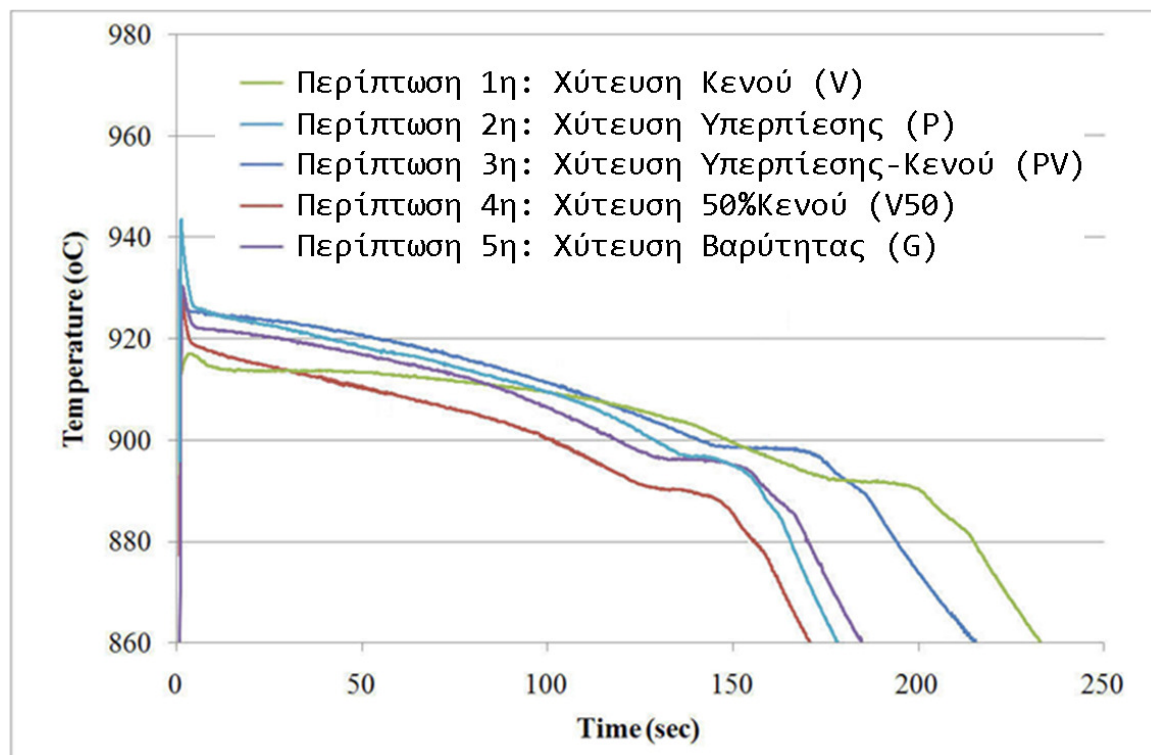
3.3.3.2 2η Ομάδα Πειραμάτων ΔΡ

Η 2^η ομάδα πειραμάτων έχει ονομαστικές τιμές σταθερών συνθηκών $T_{\text{mould}}=730^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{metal}}=960^{\circ}\text{C}$. Ο Πίνακας 3.16 παρουσιάζει τις ακριβείς συνθήκες των πειραμάτων της συγκεκριμένης ομάδας συγκρινόμενων περιπτώσεων χύτευσης.

Πίνακας 3.16 Πειράματα «2^{ης} Ομάδας ΔΡ», για τη διερεύνηση της επίδραση των συνθηκών χύτευσης στη χύτευση CuZn33, με (P;730;960).

	Πείραμα #1 Χύτευση Κενού	Πείραμα #2 Χύτευση Υπερπίεσης	Πείραμα #3 Χύτευση Υπερπίεσης- Κενού	Πείραμα #4 Χύτευση 50% Κενού	Πείραμα #5 Χύτευση Βαρύτητας
$T_{\text{mould}} (^{\circ}\text{C})$	730				
$T_{\text{inlet}} (^{\circ}\text{C})$	960				
Πίεση στο θάλαμο τήξης (bar)	1.00	1.50	1.50	1.00	1.00
Πίεση στο θάλαμο χύτευσης (bar)	0.00*	1.00	0.00*	0.50	1.00

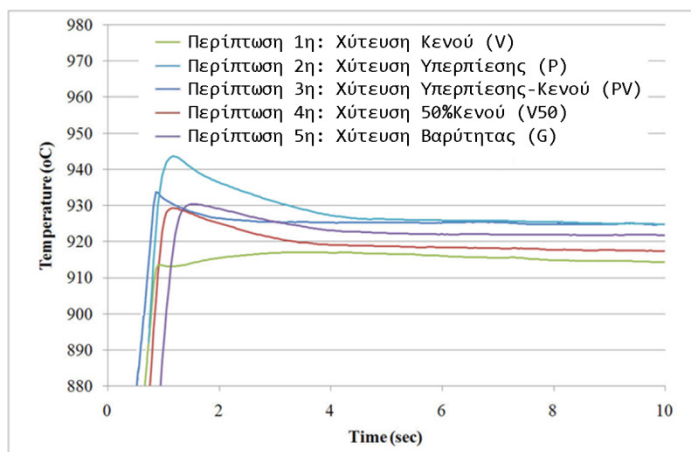
Οι πειραματικές καμπύλες απόψυξης για τις πέντε περιπτώσεις που εξετάζονται στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.11 και 3.12. Τα τρία στάδια απόψυξης του μετάλλου διακρίνονται ξεκάθαρα.



Σχήμα 3.11 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης που αποκτώνται από πέντε περιπτώσεις χύτευσης CuZn33 για διαφορετικές συνθήκες χύτευσης, με θερμοκρασία έγχυσης τους και 960°C και θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού τους 730°C .

Κατά το πρώτο στάδιο, βλ. Σχήμα 3.12, η μέγιστη μετρούμενη θερμοκρασία από το θερμοστοιχείο, σε όλες τις περιπτώσεις, ήταν τουλάχιστον 13°C χαμηλότερο από την ονομαστική θερμοκρασία έγχυσης (960°C), λόγω απωλειών θερμότητας κατά μήκος της κεντρικής μπουκαδούρας.

Επιπλέον, αν και η ονομαστική αρχική θερμοκρασία με βάση την ένδειξη της μηχανής ήταν (960°C), η τιμή αυτή δεν αποτυπώθηκε στις καμπύλες απόψυξης. Ειδικότερα, η μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε και παρατηρείται στα Σχήματα 3.11 και 3.12 είναι για την περίπτωση της χύτευσης βαρύτητας ($T=947.69^{\circ}\text{C}$ στα $t=0.585\text{sec}$ μετά την έγχυση). Η επόμενη παρατηρούμενη κορυφή είναι για τη χύτευση κενού-υπερπίεσης, ($T=945^{\circ}\text{C}$, $t=0.156\text{sec}$). Οι περιπτώσεις χύτευσης με 50% κενό και χύτευσης με υπερπίεση μόνο είναι πολύ παρόμοιες, με τη μέγιστη μετρηθείσα θερμοκρασία να είναι $T=932^{\circ}\text{C}$. Η χαμηλότερη παρατηρούμενη μέγιστη τιμή εμφανίζεται στη χύτευση κενού, όπου προφανώς συνέβη κάποια απώλεια πληροφορίας κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα, καθώς η τιμή 919°C δεν αναμενόταν.



Σχήμα 3.12 Τα πρώτα 10sec των πειραματικών μετρήσεων θερμοκρασίας για πέντε περιπτώσεις χύτευσης για διαφορετικές συνθήκες χύτευσης, με θερμοκρασία έγχυσης τους 960°C και θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού τους 730°C .

Η καθυστερημένη εμφάνιση των μέγιστων τιμών θερμοκρασίας ενδεχομένως οφείλεται σε μία πιο αργή πλήρωση, στην περιοχή του θερμοστοιχείου, υποδεικνύοντας έναν διαφορετικό τρόπο πλήρωσης της κοιλότητας του καλουπιού. Αυτό συμβαίνει όταν ένας από τους δύο θαλάμους -αλλά όχι και οι δύο- βρίσκονται υπό θετική ή αρνητική πίεση (σε σχέση με την ατμοσφαιρική). Κάθε προσπάθεια εξήγησης αυτών των διαφορών θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την αστάθεια στη θέση τοποθέτησης του θερμοστοιχείου λόγω της βύθισης της άκρης του. Υπενθυμίζεται πως τα θερμοστοιχεία μετρούν σωστά όταν το συγκολλημένο άκρο του θερμοστοιχείου βρίσκεται εξολοκλήρου βυθισμένο μέσα στο τήγμα. Η συναγωγή, στην περίπτωση σχηματισμού κενού αέρα, καταλήγει σε χαμηλότερη απόκριση του θερμοστοιχείου.

Σχετικά με το ρυθμό απόψυξης, στην περίπτωση της χύτευσης βαρύτητας, το χρονικό διάστημα ανάμεσα στη στιγμή που η θερμοκρασία φθάνει τη μέγιστη τιμή της και τη στιγμή που φθάνει τη Liquidus είναι 1.2sec , ενώ στην περίπτωση της χύτευσης υπερπίεσης-κενού, το αντίστοιχο χρονικό διάστημα είναι 0.5sec , υποδεικνύοντας ξεκάθαρα έναν υψηλότερο ρυθμό απόψυξης στη δεύτερη περίπτωση.

Αναφορικά με το 2^ο στάδιο απόψυξης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11 η διάρκεια παραμονής του μετάλλου στη mushy zone, στην περιοχή του θερμοστοιχείου, ήταν 202sec για την περίπτωση της χύτευσης κενού, τιμή αρκετά μεγαλύτερη από τη διάρκεια παραμονής του μετάλλου στη mushy zone για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις, που κατά μέσο όρο ήταν 153sec.

Στο Σχήμα 3.11, έχει ενδιαφέρον η σύγκριση ανάμεσα στις καμπύλες απόψυξης που αφορούν τη χύτευση υπερπίεσης και τη χύτευση με 50% κενό. Και στις δύο περιπτώσεις, η διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο θαλάμων είναι $\Delta P=0.5$ bar, αλλά υλοποιείται με διαφορετικό τρόπο. Παρατηρείται πως η εφαρμογή υπερπίεσης επιβάλλει/προκαλεί μία θετική μετατόπιση των θερμοκρασιών κατά 6°C για τα δύο πρώτα στάδια απόψυξης και 19°C στο τρίτο στάδιο, σε σχέση με τη χύτευση κενού.

Παρατηρώντας το τρίτο στάδιο απόψυξης, στο Σχήμα 3.11, παρατηρείται πως η κλίση των καμπυλών είναι η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις, δηλαδή ο ρυθμός απόψυξης είναι ο ίδιος μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης. Ωστόσο, το σημείο έναρξης του τρίτου σταδίου απόψυξης διαφέρει σημαντικά από τη μία περίπτωση στην άλλη.

Πίνακας 3.17 Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών πίεσης στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων ορείχαλκου CuZn33.

Συνθήκες Χύτευσης	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{1ο} στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{2ο} στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{3ο} στάδιο
P	-3.36	-0.19	-1.13
V50	-4.34	-0.18	-0.89
V	-2.50	-0.13	-0.87
PV	-25.50	-0.20	-0.82
G	-8.25	-0.16	-1.29

3.3.3.3 3η Ομάδα Πειραμάτων ΔP

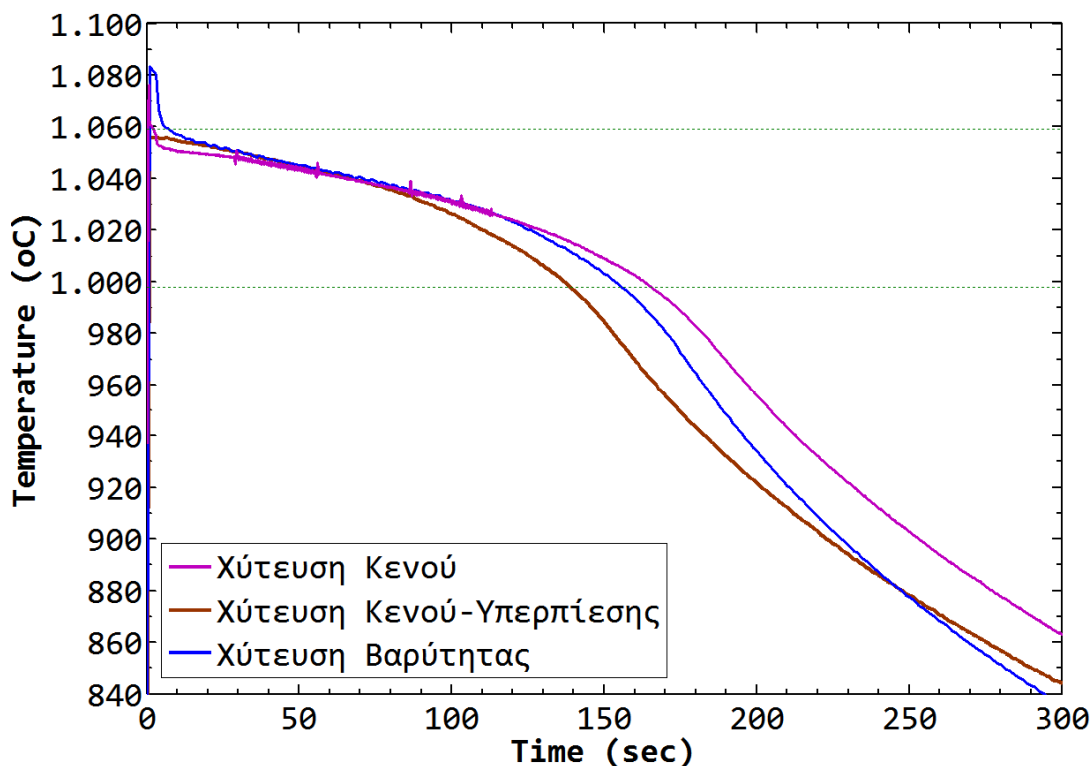
Η 3^η ομάδα πειραμάτων έχει ονομαστικές τιμές σταθερών συνθηκών $T_{\text{mould}}=740^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{metal}}=1111^{\circ}\text{C}$. Ο Πίνακας 3.18 παρουσιάζει τις ακριβείς συνθήκες των πειραμάτων της συγκεκριμένης ομάδας συγκρινόμενων περιπτώσεων χύτευσης.

Πίνακας 3.18 Πειράματα «3^{ης} Ομάδας ΔP », για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών χύτευσης στη χύτευση CuNi12Zn24, με (P;1111;740).

	Πείραμα #1 Χύτευση Βαρύτητας	Πείραμα #2 Χύτευση Κενού	Πείραμα #3 Χύτευση Υπερπίεσης- Κενού
T_{mould} (°C)	740		
T_{inlet} (°C)	1111		
Πίεση στο θάλαμο τήξης (bar)	1.00	1.00	1.50
Πίεση στο θάλαμο χύτευσης (bar)	1.00	0.00*	0.00*

Στα πειράματα 3-1, 3-2 και 3-3 (Πίνακας 3.18), η θερμοκρασία του καλουπιού και η θερμοκρασία του χωνιού διατηρούνται σταθερές (740°C και

1111°C αντίστοιχα) και αλλάζουν οι συνθήκες πίεσης στο θάλαμο τήξης και στο θάλαμο χύτευσης. Προκύπτει, λοιπόν, η δυνατότητα σύγκρισης μίας χύτευσης βαρύτητας με μία χύτευση κενού και με μία χύτευση κενού-υπερπίεσης.



Σχήμα 3.13 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για χύτευση κράματος CuNi12Zn24, με διαφορετικές συνθήκες πίεσης (πειράματα 3-1, 3-2 & 3-3).

Πίνακας 3.19 Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών πίεσης κατά τη χύτευση στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων CuNi12Zn24.

Συνθήκες Χύτευσης	t_{sol} (sec)	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{1ο} στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{2ο} στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)$ ^{3ο} στάδιο
Χ. Βαρύτητας	155.8	-14	-14.25	-
Χ. Κενού	165.7	-0.27	-0.21	-0.22
Χ. Κενού-Υπερπίεσης	138.8	-1.44	-1.22	-1.26

Παρατηρώντας τα πρώτα δευτερόλεπτα της χύτευσης, από τη στιγμή που ξεκινά η έγχυση μέχρι τη στιγμή που καταγράφεται η μέγιστη θερμοκρασία από το θερμοστοιχείο, μεσολαβεί κάποιο χρονικό διάστημα. Το διάστημα αυτό είναι μικρότερο στην περίπτωση της χύτευσης κενού, ίσο με 0.078sec. Ακολουθεί η περίπτωση χύτευσης κενού-υπερπίεσης, στην οποία χρειάστηκαν 0.234sec. Η περίπτωση της χύτευσης βαρύτητας είναι εκείνη στην οποία πέρασαν 1.365sec μέχρι τη λήψη μέγιστης τιμής θερμοκρασίας.

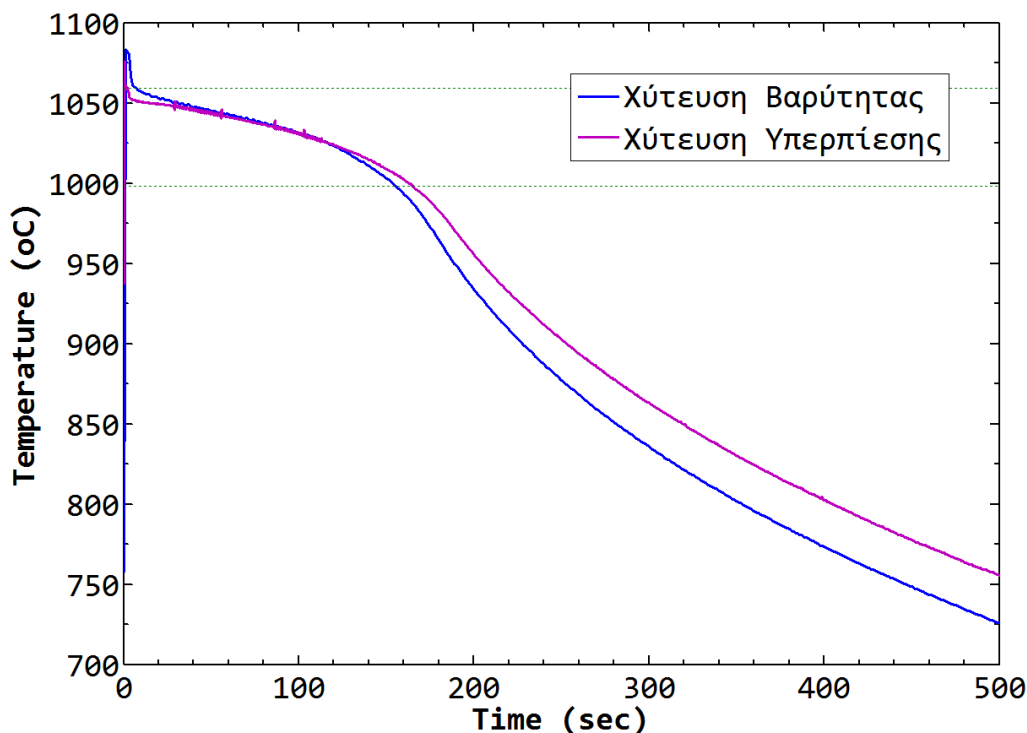
3.3.3.4 4η Ομάδα Πειραμάτων ΔΡ

Η «4^η ομάδα πειραμάτων ΔΡ» (Πίνακας 3.20) περιλαμβάνει δύο πειράματα χύτευσης του τριμερούς κράματος χαλκού CuNi12Zn24, με θερμοκρασία καλουπιού 500°C και θερμοκρασία έγχυσης τήγματος τους 1130°C. Η μέθοδος χύτευσης του 1^{ου} πειράματος ήταν η χύτευση βαρύτητας και του 2^{ου} πειράματος ήταν η χύτευση με χρήση υπερπίεσης.

Πίνακας 3.20 Πειράματα «4^{ης} Ομάδας ΔΡ», για τη διερεύνηση της επίδραση των συνθηκών χύτευσης στη χύτευση CuNi12Zn24, με (P;1130;550).

	Πείραμα #1 Χύτευση Βαρύτητας	Πείραμα #2 Χύτευση Υπερπίεσης
T _{mould} (°C)	550	
T _{inlet} (°C)	1130	
Πίεση στο θάλαμο τήξης (bar)	1.00	1.50
Πίεση στο θάλαμο χύτευσης (bar)	1.00	1.00

Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζονται οι πειραματικές καμπύλες απόψυξης. Η διαφορά μεταξύ των δύο πειραμάτων είναι μόνο η εφαρμογή υπερπίεσης 0.5bar. Η μέγιστη μετρηθείσα (πραγματική) θερμοκρασία τήγματος και αυτή του καλουπιού των δύο πειραμάτων είναι πολύ παρόμοιες, συνεπώς τα πειράματα είναι συγκρίσιμα. Φαίνεται, λοιπόν, πως η εφαρμογή υπερπίεσης επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης απόψυξης. Είναι σαφής η διαφορά που παρατηρείται στους ρυθμούς απόψυξης, ειδικά κατά τα πρώτα sec.



Σχήμα 3.14 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για χύτευση κράματος CuNi12Zn24, με διαφορετικές συνθήκες πίεσης (Πειράματα «4^{ης} Ομάδας ΔΡ»).

Στον Πίνακα 3.21 που ακολουθεί, συνοψίζονται τα μεγέθη που ποσοτικοποιούν τις καμπύλες απόψυξης, δηλαδή οι χρόνοι στερεοποίησης και οι ταχύτητες απόψυξης.

Πίνακας 3.21 Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών πίεσης κατά τη χύτευση στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων CuNi12Zn24.

T _{mould} (°C)	t _{so1} (sec)	(ΔT/Δt) ^{1ο} στάδιο	(ΔT/Δt) ^{2ο} στάδιο	(ΔT/Δt) ^{3ο} στάδιο
Χ.Βαρύτητας	156.2	-14	-0.27	-1.49
Χ.Υπερπίεσης	165.5	-3.93	-0.23	-1.26

Η παρατήρηση πως η ταχύτητα απόψυξης του τήγματος κατά τα πρώτα λίγα sec είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της χύτευσης με υπερπίεση, επιβεβαιώνεται από τις τιμές του πίνακα. Ο ρυθμός θερμοκρασιακής πτώσης 14°C/sec στην περίπτωση της υπερπίεσης έναντι των 4°C/sec, υποδεικνύει πολύ έντονη απαγωγή θερμότητας. Το τήγμα ούτως ή άλλως έχει πολύ καλή επαφή με τα τοιχώματα του καλουπιού. Η εφαρμογή υπερπίεσης κάνει την επαφή τήγματος-καλουπιού πολύ καλύτερη, με αποτέλεσμα την ταχύτερη μετάδοση θερμότητας.

Στη χύτευση βαρύτητας, το χυτό στερεοποιείται περίπου 10sec νωρίτερα από ότι το χυτό της 2^{ης} περίπτωσης.

Γίνεται, επίσης, φανερό πως η θερμοκρασία καλουπιού επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις καμπύλες απόψυξης, δηλαδή τον τρόπο στερεοποίησης του χυτού. Στις δύο περιπτώσεις που η θερμοκρασία καλουπιού είναι χαμηλή (550°C), οι καμπύλες είναι πολύ πιο απότομες από ό,τι στις άλλες περιπτώσεις. Ενδεικτικά, στις δύο αυτές περιπτώσεις στα 100sec η θερμοκρασία έχει πέσει στους 950°C, η θερμοκρασία στην οποία φθάνουν οι καμπύλες των άλλων πειραμάτων στα 240sec. Η μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά μετάλλου-καλουπιού οδηγεί σε πολύ γρήγορη στερεοποίηση.

3.3.3.5 5η Ομάδα Πειραμάτων ΔΡ

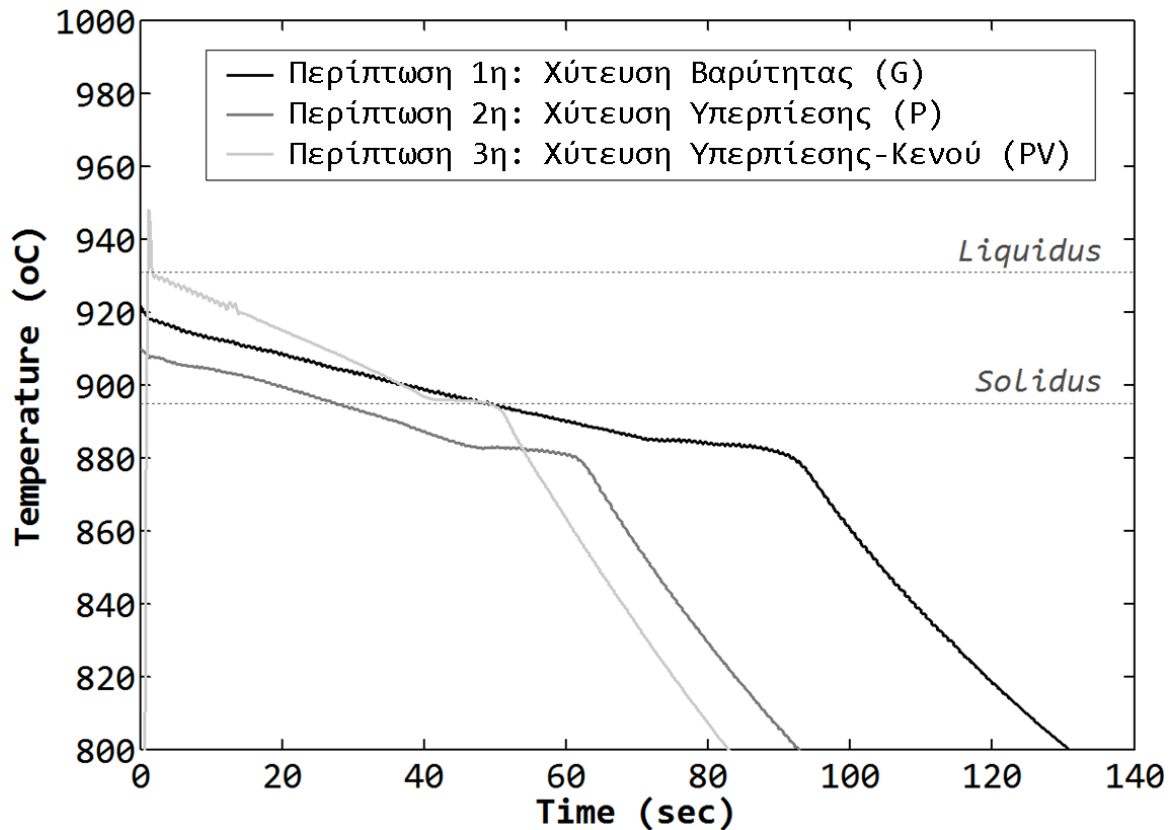
Η «5^η Ομάδα Πειραμάτων (Πίνακας 3.22) περιλαμβάνει τρία πειράματα χύτευσης ορείχαλκου CuZn33: μία χύτευση βαρύτητας, μία χύτευση υπερπίεσης και μία χύτευση με 25% υπερπίεση και 50% κενό. Η θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού ήταν 500°C και η θερμοκρασία έγχυσης του τήγματος ήταν 970°C.

Πίνακας 3.22 Πειράματα «5^{ης} Ομάδας ΔΡ», για τη διερεύνηση της επίδραση των συνθηκών χύτευσης στη χύτευση CuZn33, με (P;970;500).

	Πείραμα #1 Χύτευση Βαρύτητας	Πείραμα #2 Χύτευση Υπερπίεσης	Πείραμα #3 Χύτευση 25%Υπερπίεσης- 50%Κενού
Tmould (°C)	500		
Tinlet (°C)	970		
Πίεση στο θάλαμο τήξης (bar)	1.00	1.50	1.25
Πίεση στο θάλαμο χύτευσης (bar)	1.00	1.00	0.50

Στο Σχήμα 3.15 φαίνονται οι πειραματικές καμπύλες απόψυξης των πειραμάτων και στον Πίνακα 3.23 συγκεντρώνονται οι χρόνοι απόψυξης και οι ρυθμοί απόψυξης.

Η διαφορά πίεσης (ΔΡ) μεταξύ των δύο θαλάμων είναι ίση με 0bar για την περίπτωση χύτευσης βαρύτητας, 0.5bar για τη χύτευση με υπερπίεση και 0.75bar για την περίπτωση 25%υπερπίεσης-50%κενού. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, φαίνεται πως αύξηση της διαφοράς πίεσης (ΔΡ) συνεπάγεται αύξηση του ρυθμού απόψυξης κατά το 1^ο, το 2^ο και το 3^ο στάδιο της στερεοποίησης.



Σχήμα 3.15 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης για χύτευση κράματος CuZn33, με διαφορετικές συνθήκες πίεσης (Πειράματα «5^{ης} Ομάδας ΔΡ»).

Πίνακας 3.23 Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών πίεσης κατά τη χύτευση στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων CuZn33, με (P;970;500).

T_{mould} (°C)	t_{sol} (sec)	$(\Delta T / \Delta t)_{10 \text{ στάδιο}}$	$(\Delta T / \Delta t)_{20 \text{ στάδιο}}$	$(\Delta T / \Delta t)_{30 \text{ στάδιο}}$
G	49.05	-3.09	-0.45	-2.15
P	27.3	-11.56	-0.54	-2.71
P25V50	47.94	-41.25	-1.23	-3.22

3.3.3.6 Συμπεράσματα Πειραμάτων Μελέτης Επίδρασης των Συνθηκών Πίεσης κατά τη Χύτευση

Συνοψίζοντας, στην §3.3.3 παρουσιάστηκαν πειραματικές παραμετρικές μελέτη που είχε ως στόχο την εύρεση της επίδρασης των συνθηκών πίεσης κατά τη διάρκεια της χύτευσης, στον τρόπο απόψυξης του χυτού.

Στον Πίνακα 3.24 συνοψίζονται τα ποιοτικά αποτελέσματα όλων των παραμετρικών μελετών (5 ομάδες πειραμάτων), με χρήση συμβόλων, ώστε να υπάρχει εποπτεία της συνολικής κατάστασης.

Οι συνθήκες πίεσης κατά τη διάρκεια της χύτευσης φαίνεται πως επηρεάζουν την ταχύτητα απόψυξης των χυτών. Ο τρόπος επίδρασης, ωστόσο, δεν είναι σε όλες τις περιπτώσεις ξεκάθαρος. Στις δύο από τις πέντε ομάδες πειραμάτων, η αύξηση της διαφοράς πίεσης (ΔΡ) μεταξύ των δύο

θαλάμων της μηχανής χύτευσης προκαλεί αύξηση του χρόνου στερεοποίησης. Στις υπόλοιπες τρεις ομάδες πειραμάτων δεν παρατηρείται η ίδια συστηματική συμπεριφορά. Αύξηση της ΔΡ αυξάνει το ρυθμό απόψυξης κατά το 1^ο στάδιο. Το 2^ο στάδιο απόψυξης άλλοτε είναι ξεκάθαρα ανεπηρέαστο από τις συνθήκες πίεσης και άλλοτε επιταχύνεται με αύξηση της διαφοράς πίεσης. Το 3^ο στάδιο απόψυξης, στα 2/5 των περιπτώσεων επιβραδύνεται και στα 2/5 των περιπτώσεων επιταχύνεται με αύξηση του ΔΡ.

Η εφαρμογή υπερπίεσης επηρεάζει κατά κύριο λόγο το 3^ο στάδιο της καμπύλης απόψυξης.

Η παρουσία του κενού (V) στο θάλαμο χύτευσης μεγαλώνει το χρόνο στερεοποίησης και αυξάνει το ρυθμό απόψυξης κατά το 1^ο στάδιο και 3^ο στάδιο απόψυξης.

Πίνακας 3.24 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων επίδρασης των συνθηκών πίεσης κατά τη χύτευση στο χρόνο στερεοποίησης και τους ρυθμούς απόψυξης.

Ομάδα ΔΡ	Υλικό	T _{mould}	T _{inlet}	Συνθήκες Πίεσης	t _{sol}	$\left \frac{\Delta T}{\Delta t}\right ^{1o}$	$\left \frac{\Delta T}{\Delta t}\right ^{2o}$	$\left \frac{\Delta T}{\Delta t}\right ^{3o}$
1 ^η Ομάδα	CuZn33	600°C	970°C	↑ΔΡ			–	↑
				ΞΡ		↑	–	
				ΞV	↑	↑	–	↑
2 ^η Ομάδα	CuZn33	730°C	960°C	↑ΔΡ	↑			↓
				ΞΡ			↑	
				ΞV	↑			↓
3 ^η Ομάδα	CuNi12Zn24	740°C	1111°C	↑ΔΡ				
				ΞΡ	↓	↑	↑	↑
				ΞV	↑			
4 ^η Ομάδα	CuNi12Zn24	550°C	1130°C	↑ΔΡ	↑	↓	(↓) ≈ –	↓
				ΞΡ	↑	↓	(↓) ≈ –	↓
5 ^η Ομάδα	CuZn33	500°C	970°C	↑ΔΡ		↑	↑	↑
				ΞV			↑	↑
<p>Επεξήγηση συμβόλων</p> <p>↑ : αύξηση τιμής</p> <p>↓ : μείωση τιμής</p> <p>– : σταθερή τιμή</p> <p>Ξ : ύπαρξη συνθήκης (ΞΡ= ύπαρξη υπερπίεσης, ΞV= ύπαρξη κενού)</p> <p>∄ : μη ύπαρξη συνθήκης</p> <p>[κενό] : υπάρχει επίδραση, αλλά δεν είναι ξεκάθαρη</p>								

3.4 Καμπύλες Απόψυξης – Μέθοδος Taguchi

3.4.1 Αποτελέσματα Σχεδιασμού Πειραμάτων

Πέρα από τις πειραματικές-παραμετρικές μελέτες που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός πειραμάτων (Design-of-experiments, DOE) με τη μέθοδο Taguchi. Χρησιμοποιήθηκε η ορθογώνια διάταξη L9, με τον τρόπο που παρουσιάζει ο Πίνακας 3.25.

Αντικειμενικός σκοπός της μελέτης είναι να ευρεθεί η επίδραση των παραμέτρων της χύτευσης στον τρόπο στερεοποίησης και απόψυξης του χυτού. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν τέσσερις, με τρία επίπεδα τιμών η κάθε μία:

1. Η θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού T_{mould} (ή T_m), με τιμές 500, 600 και 730°C.
2. Η θερμοκρασία έγχυσης του τήγματος T_{inlet} (ή T_i), με τιμές 950, 970 και 990°C.
3. Η Πίεση στο Θάλαμο Τήξης (P_{up}), με τιμές 0.5, 0.25 ή 0.0bar.
4. Το κενό στο Θάλαμο Χύτευσης (P_{down}), με τιμές -1.0, -0.5 ή 0.0bar.

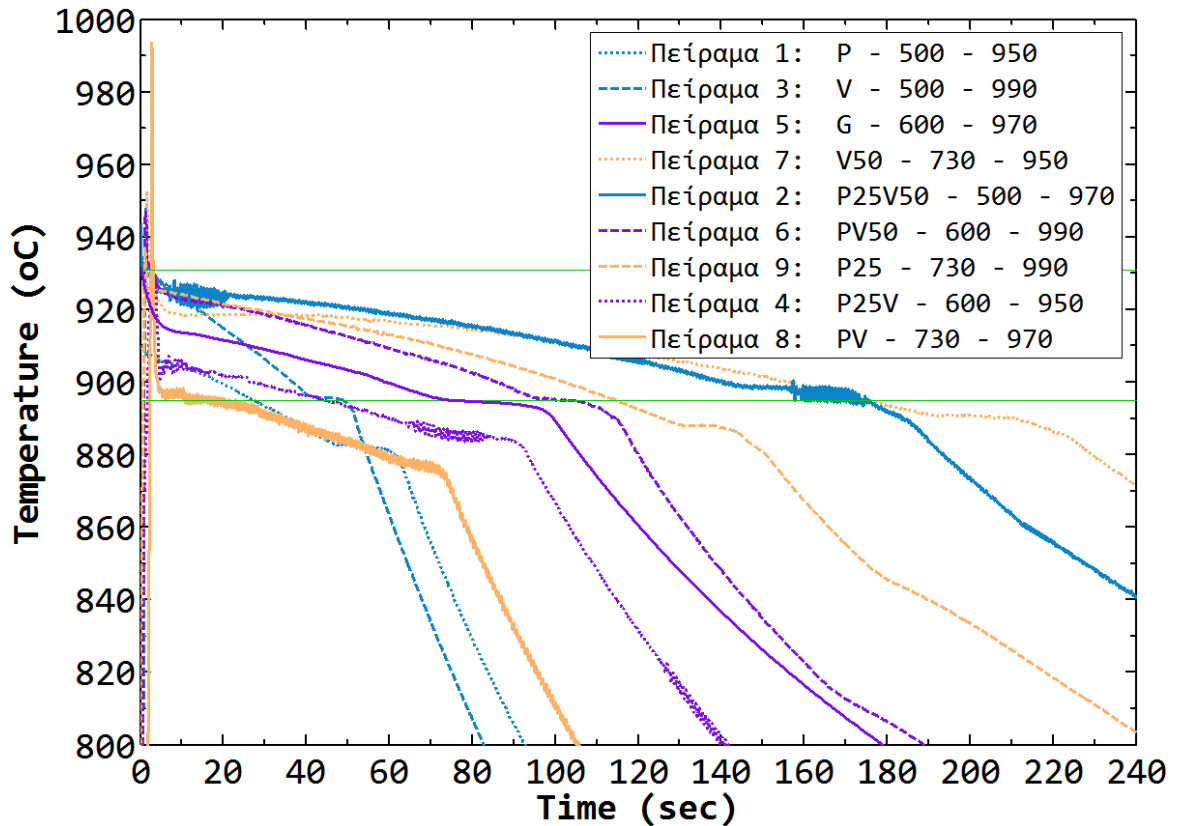
Πίνακας 3.25 Πίνακας σχεδιασμού πειραμάτων κατά Taguchi (L9), για διερεύνηση της επίδρασης παραμέτρων της χύτευσης στο χρόνο στερεοποίησης, με βάση τις πειραματικές καμπύλες απόψυξης.

Πείραμα	T_{mould}	T_{inlet}	P_{up}	P_{down}	t_{sol}	$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)^{1\sigma}$	$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)^{2\sigma}$	$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)^{3\sigma}$
1	500	950	0.5	0	28.4	-1.50	-0.50	-2.870
2	500	970	0.25	-0.5	10.88	-34.83	-0.17	-0.870
3	500	990	0	-1	49.02	-47.33	-0.88	-3.220
4	600	950	0.25	-1	44.5	-30.67	-0.30	-1.820
5	600	970	0	0	57.1	-4.76	-0.28	-1.340
6	600	990	0.5	-0.5	101.5	-24.50	-0.31	-1.720
7	730	950	0	-0.5	176.3	-25.75	-0.14	-0.490
8	730	970	0.5	-1	172.8	-228.2	-0.31	-2.670
9	730	990	0.25	0	114.7	-12.25	-0.25	-0.085

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που εξετάστηκαν ήταν τα μεγέθη που προκύπτουν από τις καμπύλες απόψυξης, δηλαδή ο χρόνος στερεοποίησης και ο ρυθμός απόψυξης στο 1^ο, το 2^ο και το 3^ο στάδιο της απόψυξης.

Για να δοκιμαστούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των παραπάνω παραμέτρων, θα απαιτούνταν ($4^3=$) 81 πειράματα. Η υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας 81 φορές κατ' ελάχιστο (δεδομένου ότι υπάρχει μεγάλο ποσοστό αποτυχημένων πειραμάτων), καθιστά την πλήρη παραγοντική μελέτη απαγορευτική. Αντί αυτής, πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός πειραμάτων κατά Taguchi (L9), κι έτσι ήταν αρκετή η υλοποίηση 9 ειδικά σχεδιασμένων πειραμάτων. Τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων συνδυασμών παραμέτρων θεωρούνται αντιπροσωπευτικά και επαρκή, για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο Σχήμα 3.16 έχουν σχεδιαστεί οι πειραματικές καμπύλες απόψυξης και των εννέα πειραμάτων Taguchi. Τόσο από τον Πίνακα, όσο και από το Σχήμα είναι φανερό πως το εύρος των διαφορετικών πειραμάτων και αποτελεσμάτων είναι μεγάλο.



Σχήμα 3.16 Οι πειραματικές καμπύλες απόψυξης των πειραμάτων χύτευσης CuZn33 στα πλαίσια του σχεδιασμού πειραμάτων κατά Taguchi.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων κατά Taguchi υπέστησαν στατιστική επεξεργασία. Η ANOVA (ανάλυση διακύμανσης), που υλοποιείται με τις σχέσεις 2.1-2.6, χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της συνεισφοράς της κάθε παραμέτρου.

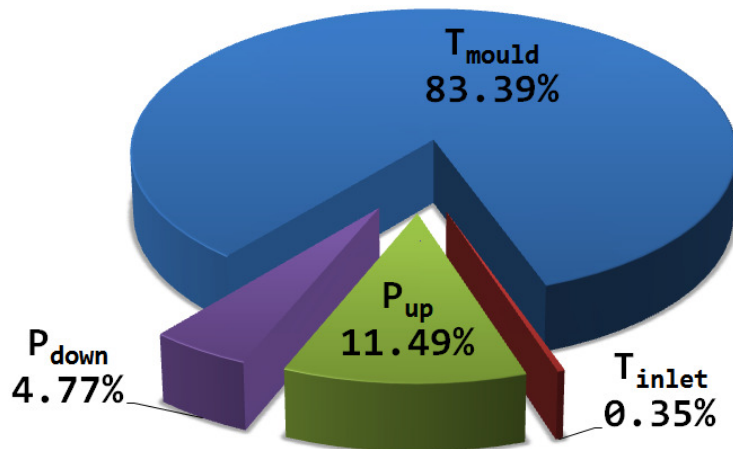
Ο πίνακας ANOVA είναι ο Πίνακας 3.26, στον οποίο φαίνονται τα υπολογισθέντα στατιστικά μεγέθη από τα οποία προέκυψαν τα διαγράμματα επίδρασης παραμέτρων (Σχήμα 3.18) και τα ποσοστά συνεισφοράς των παραμέτρων στο μετρούμενο αποτέλεσμα (Σχήμα 3.17).

Πίνακας 3.26 Αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) για τον χρόνο στερεοποίησης

Source	DOF	Sum of squares	Mean Square	F ratio	Συνεισφορά (%)
Θερμοκρασία Καλουπιού (T_{mould})	2	24683	12341	15.06	83.39%
Θερμοκρασία Έγχυσης (T_{inlet})	2	103	51	0.01	0.35%
Πίεση Θαλάμου Τήξης (P_{up})	2	3402	1701	0.39	11.49%
Πίεση Θαλάμου Χύτευσης (P_{down})	2	1411	706	0.15	4.77%
Σφάλμα		0.00			0.00
Σύνολο	8	29599			100.00%

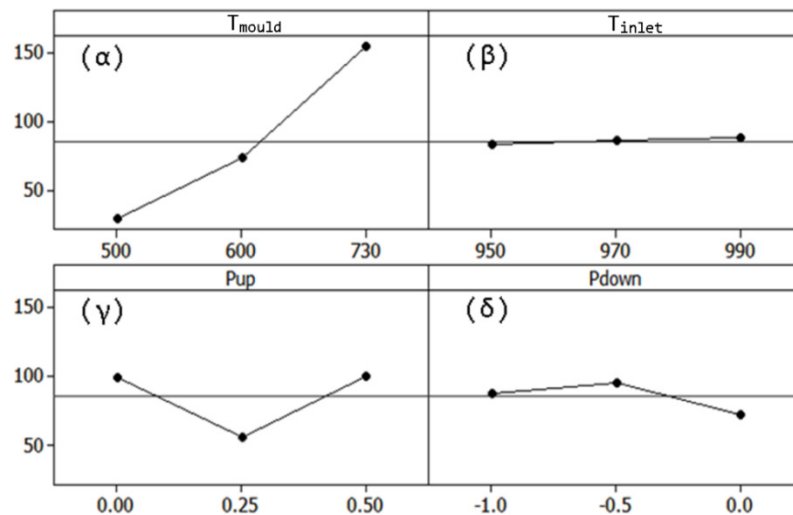
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17, ο χρόνος στερεοποίησης επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τη θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού. Το ποσοστό συνεισφοράς που ανέρχεται στο 83.39% είναι πολύ μεγάλο και καθιστά την T_{mould} κυρίαρχη παράμετρο χύτευσης. Η 2^η σημαντικότερη παράμετρος είναι

η εφαρμογή υπερπίεσης, δηλαδή η πίεση στο θάλαμο τήξης. Ακολουθεί η ύπαρξη κενού στο θάλαμο χύτευσης, με ποσοστό 4.77%. Τέλος, η θερμοκρασία έγχυσης του τήγματος φαίνεται πως δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στο χρόνο στερεοποίησης του χυτού.



Σχήμα 3.17 Τα ποσοστά συνεισφοράς των παραμέτρων της χύτευσης ακριβείας, στο χρόνο στερεοποίησης.

Από το προηγούμενο σχήμα αναδείχθηκε το ποσοστό επίδρασης. Δεν φάνηκε, όμως, ο τρόπος με τον οποίο το αποτέλεσμα επηρεάζεται από την κάθε παράμετρο. Γι αυτό το λόγο, δημιουργήθηκε το Σχήμα 3.18, με τα διαγράμματα των κυρίων επιδράσεων των τεσσάρων παραμέτρων στο χρόνο στερεοποίησης. Προκύπτει πως αύξηση της θερμοκρασίας καλουπιού συνεπάγεται αύξηση του χρόνου στερεοποίησης. Αύξηση της θερμοκρασίας έγχυσης προκαλεί πολύ μικρή αύξηση στο χρόνο στερεοποίησης. Η εφαρμογή υπερπίεσης όπως και η εφαρμογή κενού δεν έχουν συγκεκριμένη επίδραση, αλλά η τιμή της πίεσης παίζει ρόλο.



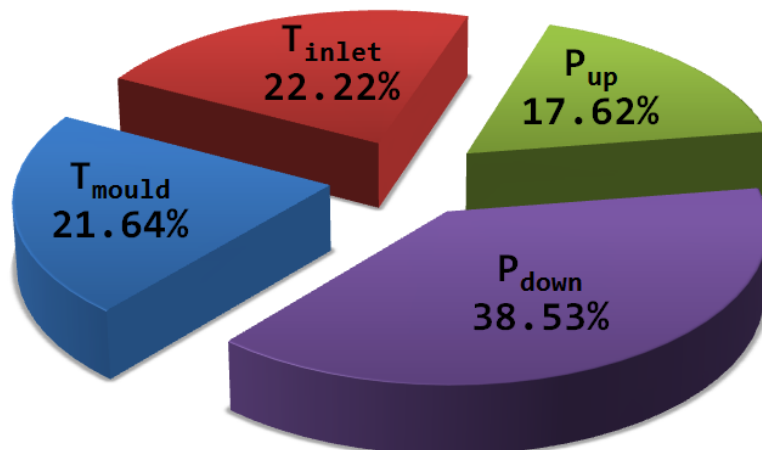
Σχήμα 3.18 Διαγράμματα κυρίων επιδράσεων στο χρόνο στερεοποίησης (α) της θερμοκρασίας του καλουπιού, (β) της θερμοκρασίας έγχυσης, (γ) της πίεσης στο θάλαμο τήξης και (δ) της πίεσης στο θάλαμο χύτευσης.

Ο Πίνακας 3.27 είναι ο πίνακας ANOVA για το ρυθμό απόψυξης στο 1ο στάδιο της απόψυξης του χυτού. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν διαφορετική επίδραση των παραμέτρων σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.

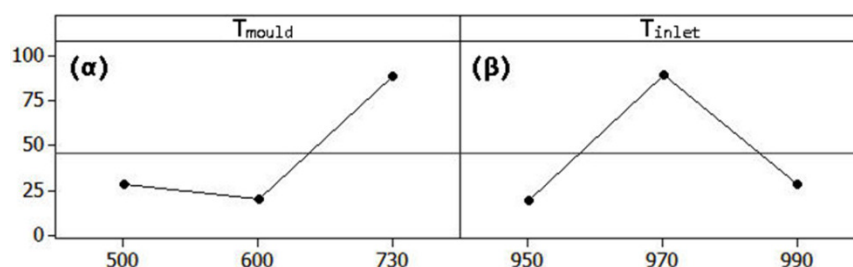
Πίνακας 3.27 Αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) για το ρυθμό απόψυξης στο 1^ο στάδιο.

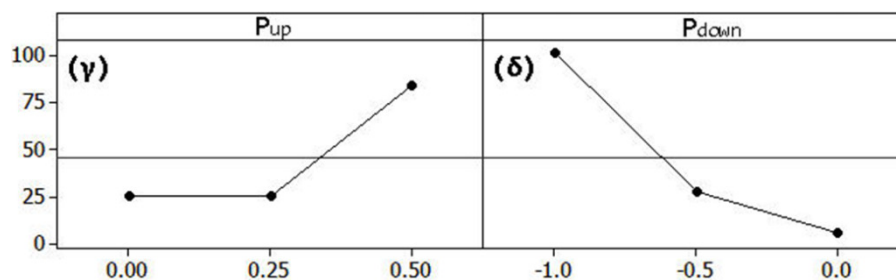
Source	DOF	Sum of squares	Mean Square	F ratio	Συνεισφορά (%)
Θερμοκρασία Καλουπιού (T_{mould})	2	8492	4246	0.83	21.64%
Θερμοκρασία Έγχυσης (T_{inlet})	2	8720	4360	0.86	22.22%
Πίεση Θαλάμου Τήξης (P_{up})	2	6915	3458	0.64	17.62%
Πίεση Θαλάμου Χύτευσης (P_{down})	2	1512	7861	1.88	38.53%
Σφάλμα		1			0%
Σύνολο	8	39249			100.00%

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.19, η παράμετρος της χύτευσης που επηρεάζει (με ποσοστό 38.53%) το ρυθμό απόψυξης κατά τα πρώτα λίγα δευτερόλεπτα της χύτευσης, είναι η εφαρμογή κενού στο θάλαμο χύτευσης της μηχανής. Οι υπόλοιπες τρεις παράμετροι παίζουν σημαντικό ρόλο, με σχεδόν ίσα ποσοστά συνεισφοράς, γύρω στο 20%. Η πληροφορία αυτή είναι σημαντική, καθώς σε εκείνο το χρονικό στάδιο καθορίζεται η έναρξη της στερεοποίησης, με ό,τι συνέπεια μπορεί να έχει αυτό στο σχεδιασμό της τροφοδοσίας του χυτού στην περίπτωση για παράδειγμα της εφαρμογής κενού ή της εφαρμογής υπερπίεσης, κ.ο.κ.

Σχήμα 3.19 Τα ποσοστά συνεισφοράς των παραμέτρων της χύτευσης ακριβείας, στο ρυθμό απόψυξης κατά το 1^ο στάδιο.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των κυρίων επιδράσεων στο Σχήμα 3.20, προκύπτει πως ο τρόπος επίδρασης της κάθε παραμέτρου στο ρυθμό απόψυξης, δεν είναι συστηματικός σε όλες τις περιπτώσεις. Η εφαρμογή κενού όπως και η εφαρμογή υπερπίεσης, αυξάνουν το ρυθμό απόψυξης του χυτού κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα της χύτευσης. Όσο για τη θερμοκρασία έγχυσης, φαίνεται πως ακραίες τιμές προκαλούν απότομη θερμοκρασιακή πτώση, ενώ μία μέση τιμή έγχυσης προκαλεί πιο ομαλή απόψυξη.



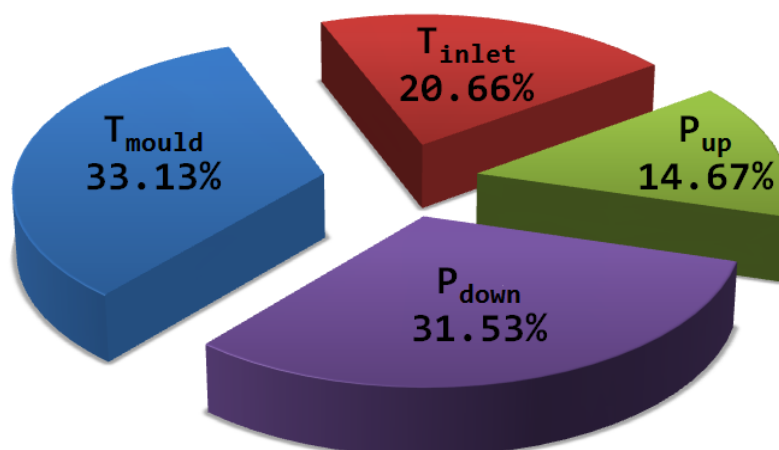


Σχήμα 3.20 Διαγράμματα κυρίων επιδράσεων για το ρυθμό απόψυξης του 1^{ου} σταδίου (α) της θερμοκρασίας του καλουπιού, (β) της θερμοκρασίας έγχυσης, (γ) της πίεσης στο θάλαμο τήξης και (δ) της πίεσης στο θάλαμο χύτευσης.

Όμοια με πριν, ο Πίνακας 3.28 παρουσιάζει τον πίνακα ANOVA για την επίδραση των τεσσάρων μελετώμενων παραμέτρων στο ρυθμό απόψυξης κατά το 2^ο στάδιο, δηλαδή κατά το διάστημα που το κράμα βρίσκεται σε κατάσταση στερεοποίησης. Τα αποτελέσματα οπτικοποιούνται στο Σχήμα 3.21.

Πίνακας 3.28 Αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) για το ρυθμό απόψυξης στο 2^ο στάδιο.

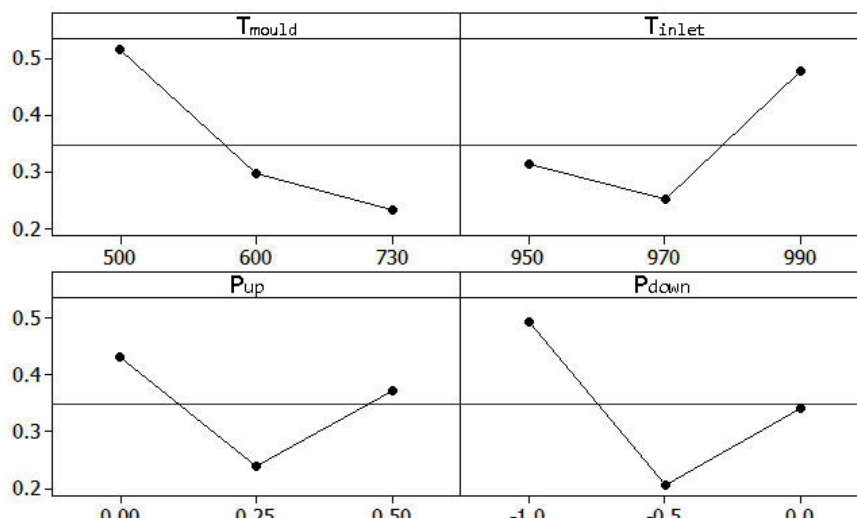
Source	DOF	Sum of squares	Mean Square	F ratio	Συνεισφορά (%)
Θερμοκρασία Καλουπιού (T_{mould})	2	0.1327	0.0663	1.49	33.13%
Θερμοκρασία Έγχυσης (T_{inlet})	2	0.0828	0.0414	0.78	20.66%
Πίεση Θαλάμου Τήξης (P_{up})	2	0.0388	0.0294	0.52	14.67%
Πίεση Θαλάμου Χύτευσης (P_{down})	2	0.1263	0.0631	1.38	31.53%
Σφάλμα	2	0.0199			0.01%
Σύνολο	8	0.4005			100.00%



Σχήμα 3.21 Τα ποσοστά συνεισφοράς των παραμέτρων της χύτευσης ακριβείας, στο ρυθμό απόψυξης κατά το 2^ο στάδιο.

Φαίνεται πως το 2^ο στάδιο της απόψυξης επηρεάζεται (με ποσοστό περίπου 33%) από τη θερμοκρασία καλουπιού και σε ποσοστό 31.5% από την πίεση στο θάλαμο χύτευσης, δηλαδή από την εφαρμογή κενού. Στη συνέχεια, με ποσοστό 21% επιδρά η θερμοκρασία έγχυσης. Τέλος, με ποσοστό 15% φαίνεται πως επιδρά η εφαρμογή υπερπίεσης.

Τέλος, από τα διαγράμματα επιδράσεων που φαίνονται στο Σχήμα 3.22, η μόνη ξεκάθαρη επίδραση είναι αυτή της θερμοκρασίας καλουπιού, αύξηση της οποίας επιβραδύνει την απόψυξη κατά το 2^ο στάδιο.



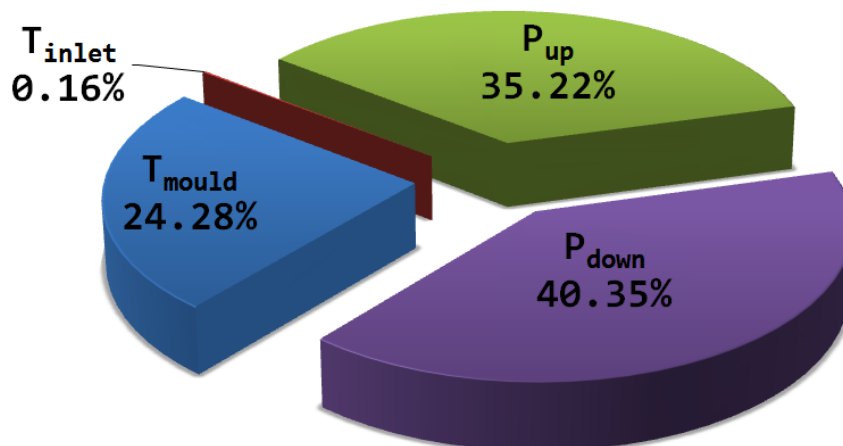
Σχήμα 3.22 Διαγράμματα κυρίων επιδράσεων για το ρυθμό απόψυξης του 2^{ου} σταδίου (α) της θερμοκρασίας του καλουπιού, (β) της θερμοκρασίας έγχυσης, (γ) της πίεσης στο θάλαμο τήξης και (δ) της πίεσης στο θάλαμο χύτευσης.

Ο Πίνακας 3.29 είναι ο τελευταίος πίνακας ANOVA και αφορά στο ρυθμό απόψυξης του στερεοποιημένου χυτού, κατά το 3^ο στάδιο της απόψυξης.

Πίνακας 3.29 Αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) για το ρυθμό απόψυξης στο 3^ο στάδιο.

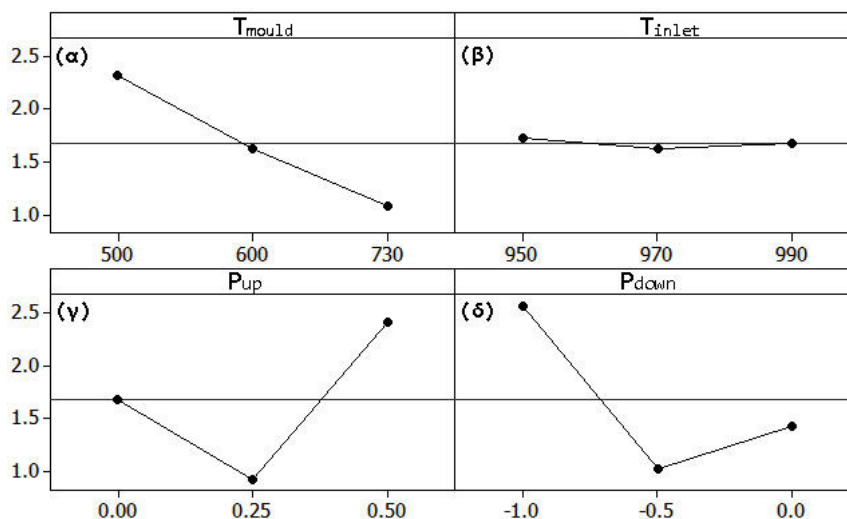
Source	DOF	Sum of squares	Mean Square	F ratio	Συνεισφορά (%)
Θερμοκρασία Καλουπιού (T_{mould})	2	2.31	1.16	0.26	24.28%
Θερμοκρασία Έγχυσης (T_{inlet})	2	0.02	0.01	0.00	0.16%
Πίεση Θαλάμου Τήξης (P_{up})	2	3.35	1.68	1.63	35.22%
Πίεση Θαλάμου Χύτευσης (P_{down})	2	3.84	1.921	2.03	40.35%
Σφάλμα	2	0.00			0.00%
Σύνολο	8	9.321			100.00%

Από το Σχήμα 3.21 προκύπτει πως με ποσοστό 40%, η ύπαρξη κενού στο θάλαμο της χύτευσης είναι η παράμετρος που έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στο ρυθμό απόψυξης κατά το 3^ο στάδιο. Με επίσης υψηλό ποσοστό φαίνεται πως σημαντικό ρόλο παίζει και η εφαρμογή υπερπίεσης. Ακολουθεί η θερμοκρασία του καλουπιού. Η μόνη παράμετρος που φαίνεται να μην επιδρά σημαντικά είναι η θερμοκρασία έγχυσης τήγματος.



Σχήμα 3.23 Τα ποσοστά συνεισφοράς των παραμέτρων της χύτευσης ακριβείας, στο ρυθμό απόψυξης κατά το 3^ο στάδιο.

Τέλος, από το Σχήμα 3.24, που αποτυπώνεται η ποιοτική συμπεριφορά των παραμέτρων προκύπτει πως αύξηση της θερμοκρασίας καλουπιού σημαίνει μείωση του ρυθμό απόψυξης. Συγκρίνοντας την κατάσταση ανυπαρξίας κενού με την ύπαρξη 100% κενού, φαίνεται πως η 2^η κατάσταση επιφέρει αύξηση του ρυθμού απόψυξης. Το αντίστροφο ισχύει για την εφαρμογή υπερπίεσης.



Σχήμα 3.24 Διαγράμματα κυρίων επιδράσεων για το ρυθμό απόψυξης του 3^{ου} σταδίου (α) της θερμοκρασίας του καλουπιού, (β) της θερμοκρασίας έγχυσης, (γ) της πίεσης στο θάλαμο τήξης και (δ) της πίεσης στο θάλαμο χύτευσης.

3.4.2 Συμπεράσματα

Από το σχεδιασμό πειραμάτων κατά Taguchi, τα κυριότερα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των παραμέτρων της χύτευσης στην απόψυξη του χυτού, είναι τα ακόλουθα.

A. Από το σχεδιασμό πειραμάτων κατά Taguchi, τα κυριότερα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των παραμέτρων της χύτευσης στην απόψυξη του χυτού, είναι τα ακόλουθα.

1. Ο χρόνος στερεοποίησης του χυτού εξαρτάται κατά 80% από τη θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού (T_{mould}).
2. Η ταχύτητα απόψυξης του χυτού και για τα τρία στάδια της απόψυξης επηρεάζεται κυρίως από την πίεση στο θάλαμο χύτευσης (P_{down}), σε ποσοστό περίπου 35%, αλλά και όλες οι άλλες παράμετροι συνειφέρουν. Αναλυτικότερα, το 1^ο στάδιο απόψυξης επηρεάζεται κατά περίπου 38% από την πίεση στο θάλαμο χύτευσης (P_{down}), δηλαδή από την ύπαρξή ή όχι κενού. Το 2^ο στάδιο απόψυξης επηρεάζεται κυρίως από τη θερμοκρασία του καλουπιού (T_{mould}), με ποσοστό συνεισφοράς 33%. Το 3^ο στάδιο επηρεάζεται κατά 40% από την πίεση στο θάλαμο χύτευσης (P_{down}).

B. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα κυρίων επιδράσεων αποτελέσματα του σχεδιασμού πειραμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την παραμετρική

μελέτη (§3.3), στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει συμφωνία αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα:

1. Ο χρόνος στερεοποίησης επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τη θερμοκρασία του καλουπιού. Η θερμοκρασία έγχυσης έχει μικρή επίδραση, ενώ σε ό,τι αφορά τις συνθήκες πίεσης, η παρουσία κενού στο θάλαμο χύτευσης φαίνεται πως αυξάνει το χρόνο στερεοποίησης.
2. Οι ταχύτητες απόψυξης επηρεάζονται από τις συνθήκες πίεσης. Ειδικά το 1^ο και το 3^ο στάδιο απόψυξης εξαρτώνται ανάλογα με την παρουσία υπερπίεσης ή τη δημιουργία κενού.

3.5 Καμπύλες Απόψυξης – Διαφοροποίηση Θέσης Θερμοστοιχείων

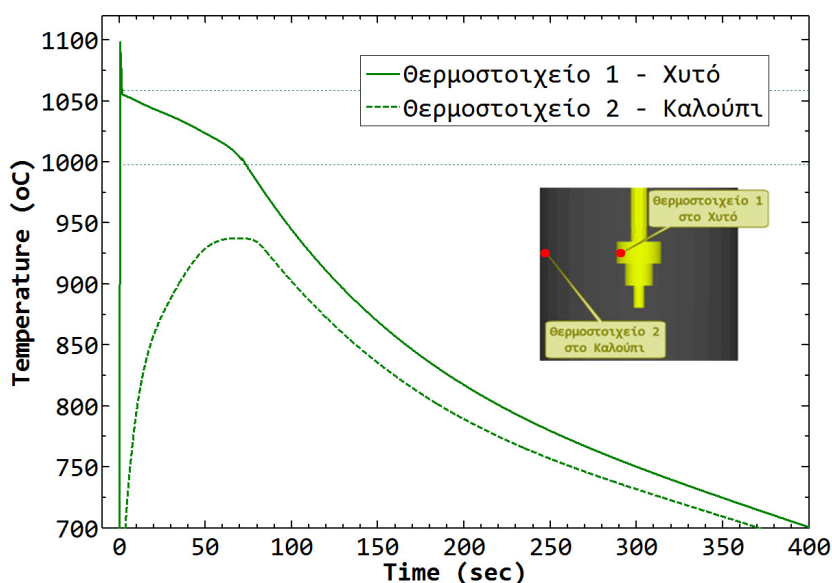
Όπως αναφέρθηκε στην §2.6.1.4, με γνώμονα τη θέση τοποθέτησης θερμοστοιχείων πραγματοποιήθηκαν 6 διαφορετικές περιπτώσεις πειραμάτων. Από τεχνικής απόψεως, υπήρχαν τρεις βασικοί περιορισμοί ως προς το πλήθος των χρησιμοποιούμενων θερμοστοιχείων:

1. Στη μηχανή χύτευσης κενού υπήρχε δυνατότητα τοποθέτησης μόνο τριών θερμοστοιχείων, ώστε να εξασφαλίζονται συνθήκες κενού.
2. Στο σύστημα λήψης μετρήσεων (data acquisition system), αύξηση του αριθμού των θερμοστοιχείων σημαίνει μείωση της συχνότητας δειγματοληψίας.
3. Μεγάλος αριθμός θερμοστοιχείων στο χυτό ενδεχομένως αλλοιώνει την κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου, δηλαδή τα αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων θερμοκρασίας με χρήση θερμοστοιχείων που παρουσιάστηκαν μέχρι στιγμής αναλυτικά στο κεφάλαιο αυτό (είτε στα πλαίσια των παραμετρικών μελετών, είτε στα πλαίσια DOE κατά Taguchi), έχουν ληφθεί με την «1^η περίπτωση» τοποθέτησης θερμοστοιχείων (βλ. Σχήμα 2.44, σελ. 136). Αναφέρονται στην περιοχή του χυτού με το μεγαλύτερο πάχος και η συχνότητα δειγματοληψίας είναι η μεγαλύτερη δυνατή.

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται τα αποτελέσματα και οι παρατηρήσεις από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που εμπίπτουν στις περιπτώσεις 2-6 (Σχ. 2.45-2.49, σελίδες 136-137). Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών χρησιμοποιούνται στα επόμενα κεφάλαια.

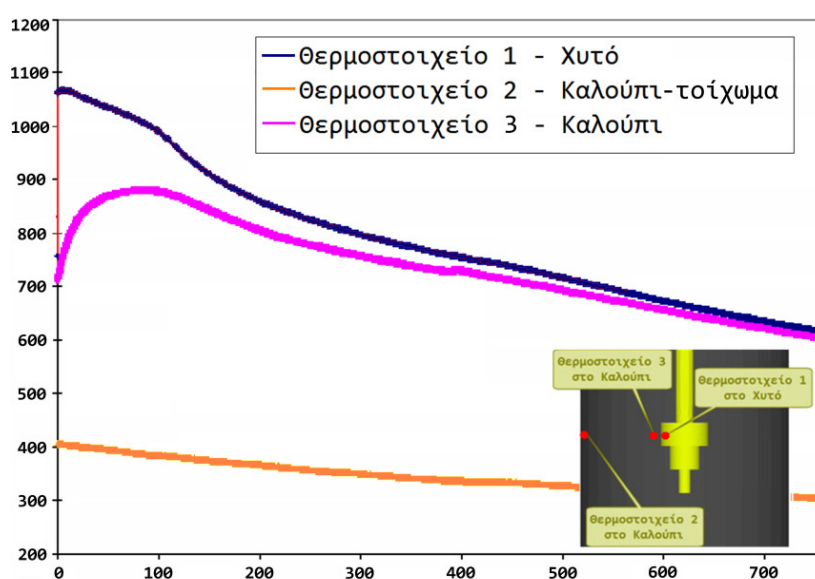
Στο Σχήμα 3.25 έχουν σχεδιαστεί οι πειραματικές καμπύλες απόψυξης από πείραμα χύτευσης Κενού του κράματος CuNi12Zn24, με θερμοκρασία καλουπιού 620°C. Οι μετρήσεις προήλθαν από δύο θερμοστοιχεία που ήταν τοποθετημένα εκατέρωθεν της διεπιφάνειας χυτού-καλουπιού, στο ύψος της περιοχής του χυτού με τη μεγαλύτερη διατομή («2^η Περίπτωση» τοποθέτησης θερμοστοιχείων, Σχήμα 2.45, σελίδα 136).



Σχήμα 3.25 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης από χύτευση CuNi12Zn24, με τα θερμοστοιχεία να έχουν τοποθετηθεί σε ένα σημείο του χυτού και σε ένα σημείο του καλούπιού («Περίπτωση 2»)

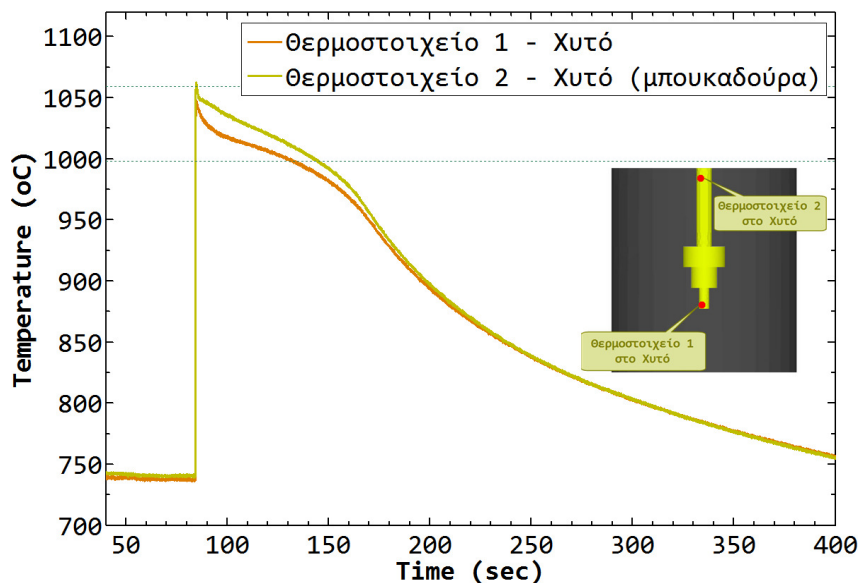
Επειδή το ένα θερμοστοιχείο ήταν τοποθετημένο εντός του χυτού και το άλλο εντός του καλούπιού, στο ίδιο ύψος, αποτυπώνεται η θερμότητα από το χυτό προς το καλούπι.

Στο Σχήμα 3.26 φαίνονται οι τρεις καμπύλες απόψυξης που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια πειράματος χύτευσης CuNi12Zn24, με θερμοκρασία καλούπιού 740°C. Τα θερμοστοιχεία ήταν τοποθετημένα σύμφωνα με την «3^η Περίπτωση» τοποθέτησης θερμοστοιχείων (βλ. Σχήμα 2.46, σελ.136): δύο θερμοστοιχεία εκατέρωθεν της διεπιφάνειας χυτού-καλούπιού και ένα τρίο θερμοστοιχείο στην εξωτερική επιφάνεια του καλούπιού, στο ίδιο ύψος. Η θερμοκρασιακή εξέλιξη από τη μέτρηση του θερμοστοιχείου της εξωτερικής επιφάνειας χρησιμοποιείται ως οριακή συνθήκη για τη μοντελοποίηση της χύτευσης.



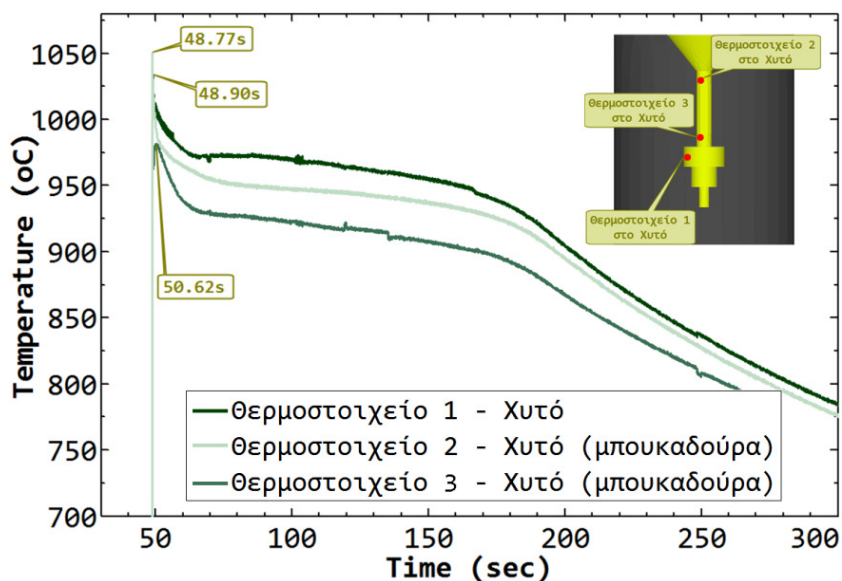
Σχήμα 3.26 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης από χύτευση CuNi12Zn24, με τα θερμοστοιχεία να έχουν τοποθετηθεί σε ένα σημείο του χυτού και σε ένα σημείο του καλούπιού («Περίπτωση 3»)

Στο Σχήμα 3.27, οι καμπύλες προήλθαν από θερμοστοιχεία τοποθετημένα εντός του χυτού, σύμφωνα με την «4^η Περίπτωση» (βλ. 2.47, σελίδα 137).



Σχήμα 3.27 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης από χύτευση CuNi12Zn24, με τα θερμοστοιχεία να έχουν τοποθετηθεί σε τρία σημεία του χυτού («Περίπτωση 4»)

Στο Σχήμα 3.28, φαίνεται η μέτρηση από την «5^η Περίπτωση» τοποθέτησης θερμοστοιχείων (βλ. Σχ. 2.48, σελ. 137).



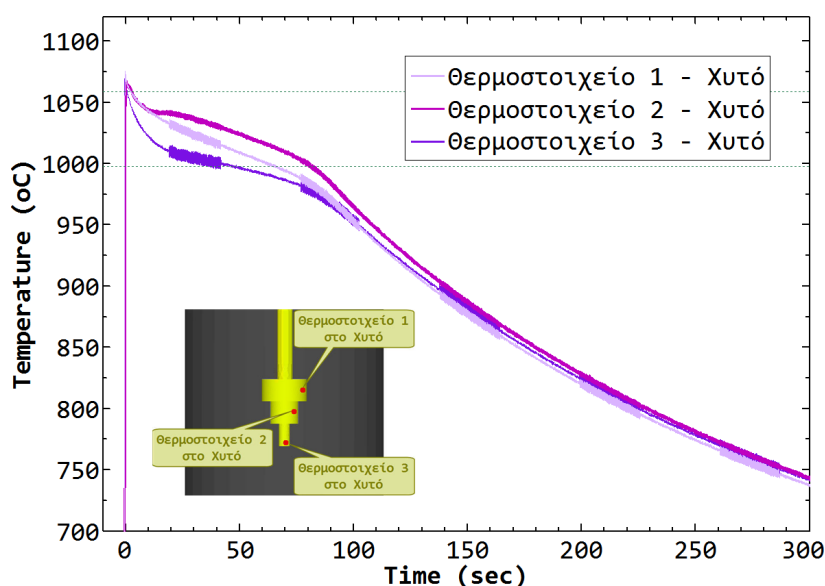
Σχήμα 3.28 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης από χύτευση CuNi12Zn24, με τα θερμοστοιχεία να έχουν τοποθετηθεί σε τρία σημεία του χυτού («Περίπτωση 5»).

Από τα πειράματα των περιπτώσεων 4 και 5, στα οποία είχαν τοποθετηθεί θερμοστοιχεία και στην κυρίως γεωμετρία και στη μπουκαδούρα, επιχειρήθηκε να εξαχθεί συμπέρασμα σχετικά με την ταχύτητα πλήρωσης του καλουπιού. Πρόκειται για ένα μέγεθος που είναι απαραίτητη παράμετρος εισόδου για την προσομοίωση και εξαρτάται από το συσχετισμό πιέσεων στους δύο θαλάμους της μηχανής. Το σκεπτικό ήταν να αποτυπωθεί η χρονική στιγμή που θα σημειωνόταν η μέγιστη τιμή θερμοκρασίας για το

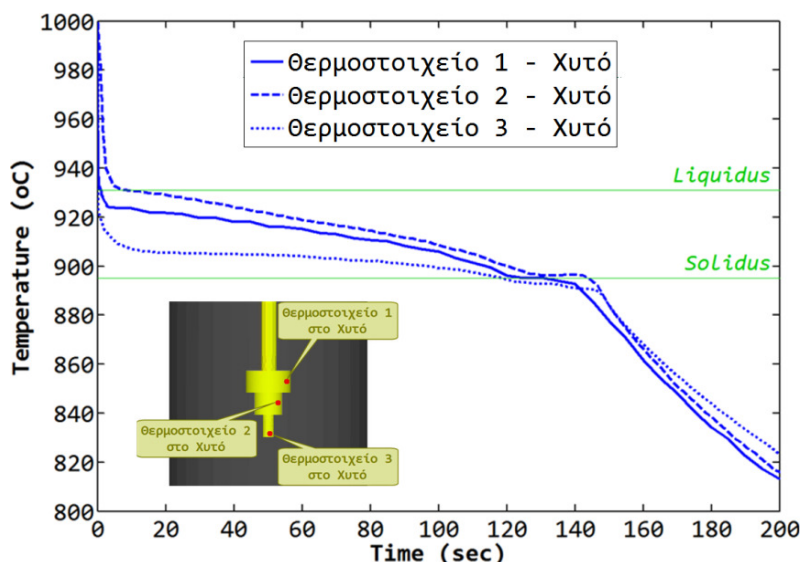
θερμοστοιχείο της μπουκαδούρας καθώς και η στιγμή επίτευξης της μέγιστης θερμοκρασίας στην άκρη του χυτού. Η διαφορά των δύο χρονικών στιγμών θα αποτελούσε ένδειξη της ταχύτητας πλήρωσης.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, υπάρχει χρονική διαφορά μεταξύ της επίτευξης της μέγιστης τιμής για το κάθε θερμοστοιχείο. Συγκεκριμένα, η 1^η με τη 2^η μέτρηση έχουν διαφορά 0.13sec, ενώ η 3^η καμπύλη φθάνει στη μέγιστή της τιμή 1.85sec αργότερα από ό,τι η 1^η. Αυτό σίγουρα οδηγεί σε συμπεράσματα σχετικά με τη διαφορά μεταξύ διαφορετικών περιοχών του ίδιου χυτού. Από αντίστοιχο πείραμα που πραγματοποιήθηκε για διαφορετική μέθοδο χύτευσης διαπιστώθηκε πως, στην πράξη, αυτή η πρακτική δεν είναι αξιόπιστη για τη συγκεκριμένη γεωμετρία. Οι διαστάσεις του χυτού είναι πολύ μικρές κι έτσι, η πλήρωση λαμβάνει χώρα σε μικρό χρονικό διάστημα. Για να διαπιστωθεί διαφορά στο χρόνο πλήρωσης ανάμεσα πχ στη χύτευση βαρύτητας και τη χύτευση κενού-υπερπίεσης, χρειάζεται όχι απλώς μία εκτίμηση, αλλά μία πολύ ακριβής μέτρηση. Συνεπώς το πείραμα αυτό αποτέλεσε οδηγό για τον υπολογισμό της ταχύτητας έγχυσης, αλλά όχι τη λύση του προβλήματος.

Στο Σχήμα 3.29 και το Σχήμα 3.30, τέλος, απεικονίζονται οι καμπύλες απόψυξης από πειράματα με την «6^η περίπτωση» τοποθέτησης θερμοστοιχείων (βλ. Σχ. 2.49, σελ. 137). Στόχος των πειραμάτων αυτών ήταν να αποκαλυφθεί το κατά πόσο υπάρχει διαφορά στον τρόπο απόψυξης των διαφορετικών περιοχών του ίδιου χυτού. Διαπιστώνεται πως ακόμα και στη μικρή γεωμετρία που μελετάται υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των μετρήσεων. Το κάθε θερμοστοιχείο ήταν τοποθετημένο σε κάθε μία από τις τρεις περιοχές διαφορετικού casting modulus του χυτού. Σε επόμενο κεφάλαιο εξετάζεται το κατά πόσο είναι σημαντικό να προσαρμοστεί η μοντελοποίηση με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χυτού ή το εάν αρκεί μία «απλουστευμένη» προσέγγιση.



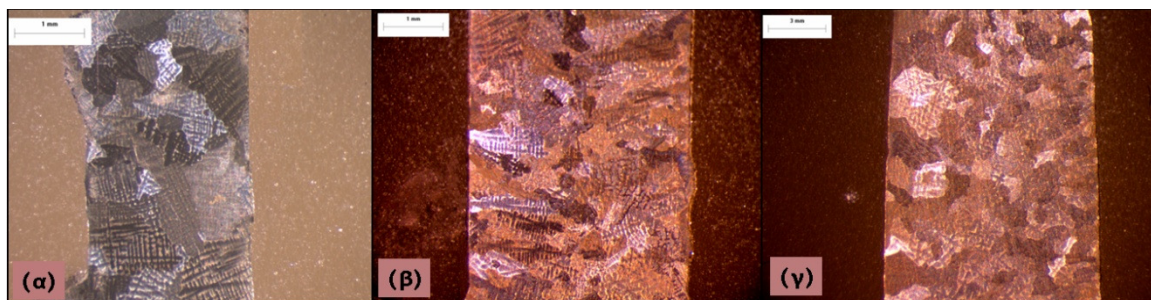
Σχήμα 3.29 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης από χύτευση CuNi12Zn24, με τα θερμοστοιχεία να έχουν τοποθετηθεί σε τρία σημεία του χυτού («Περίπτωση 6»)



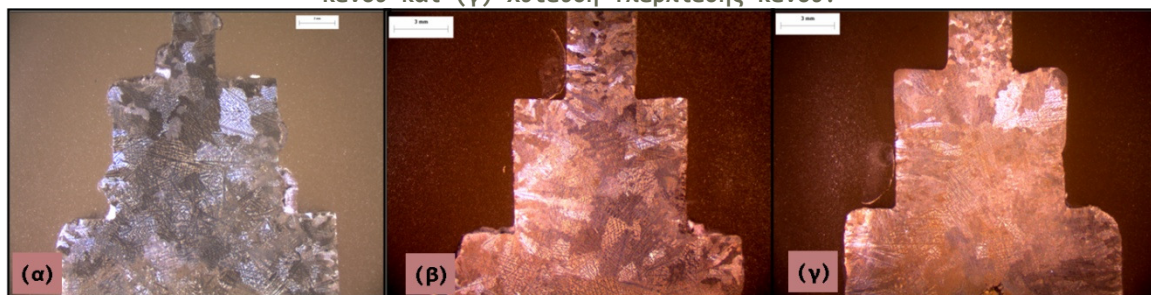
Σχήμα 3.30 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης από χύτευση CuZn33, με τα θερμοστοιχεία να έχουν τοποθετηθεί σε τρία σημεία του χυτού («Περίπτωση 6»)

3.6 Μακροσκοπικές Παρατηρήσεις Χυτών

Στα Σχήματα 3.31 και 3.32 παρουσιάζεται η μικροδομή του CuNi12Zn24, όπως προκύπτει από μακροσκοπική παρατήρηση των τριών εξεταζόμενων χαρακτηριστικών δοκιμίων (χύτευση βαρύτητας, χύτευση κενού, χύτευση κενού με υπερπίεση) μετά από χημική προσβολή με το αντιδραστήριο 5gr FeCl₂, 100ml H₂O, 5ml HCl. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.31 φαίνεται η μικροδομή των χυτών στη μικρή διατομή και στο Σχήμα 3.31 φαίνεται η μικροδομή στη μεσαία διατομή και στο πάνω μέρος της μεγάλης διατομής των χυτών. Ο φακός που χρησιμοποιήθηκε στο στερεοσκόπιο για να ληφθούν οι φωτογραφίες παρουσιάζει τα αντικείμενα 10 φορές το πραγματικό τους μέγεθος.



Σχήμα 3.31 Η μικρή διατομή χυτού CuNi12Zn24, από (α) Χύτευση Βαρύτητας, (β) Χύτευση Κενού και (γ) Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού.

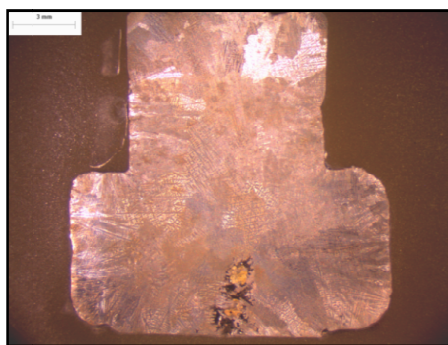


Σχήμα 3.32 Η μεσαία διατομή χυτού CuNi12Zn24, από (α) Χύτευση Βαρύτητας, (β) Χύτευση Κενού και (γ) Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού.

Στην περίπτωση χύτευσης του CuNi12Zn24, όπως και στον ορείχαλκο, παρατηρούνται ευμεγέθεις κόκκοι. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, χονδρόκοκκη μικροδομή αναπτύσσεται όταν η στερεοποίηση γίνεται με αργό ρυθμό.

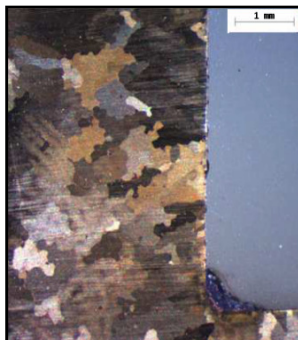
Σε όλες τις περιπτώσεις διακρίνεται πολύ χαρακτηριστικά η δενδριτική ανάπτυξη. Οι δευτερογενείς και τριτογενείς κλάδοι των δενδριτών φαίνονται ακόμα και με μακροσκοπική παρατήρηση λόγω του μεγέθους των κόκκων, που σημαίνει αργή στερεοποίηση. Συγκρίνοντας τους κόκκους στη μικρή, τη μεσαία και τη μεγάλη διατομή οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως η στερεοποίηση αργεί πολύ περισσότερο στην περίπτωση της μεγάλης διατομής, λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας μάζας του μετάλλου. Η κατεύθυνση ανάπτυξης των κόκκων καταδεικνύει την κατεύθυνση απαγωγής θερμότητας κατά τη στερεοποίηση.

Μία τελευταία παρατήρηση που θα μπορούσε να γίνει, αφορά στη δημιουργία μακροδιακένωσης στη μεγάλη διατομή. Λόγω σχεδιασμού τροφοδοσίας μετάλλου (τροφοδοσία γίνεται από τη βάση της μεγάλης διαμέτρου), στα περισσότερα δοκίμια (και αυτά του αλπακά και αυτά του ορείχαλκου) παρατηρείται μακροδιακένωση στη βάση της μεγάλης διατομής, λίγο πάνω από το σημείο ένωσής της με τη μπουκαδούρα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα του συγκεκριμένου είδους ατέλειας φαίνεται στο Σχήμα 3.33. Από μακροσκοπική παρατήρηση όλων των δοκιμίων, προκύπτει πως η μακροδιακένωση αυτή δεν παρατηρείται στην περίπτωση της χύτευσης κενού. Στη χύτευση βαρύτητας υπάρχει η ατέλεια αυτή, αλλά είναι περιορισμένη σε σχέση με την περίπτωση υπερπίεσης-κενού. Στην πρώτη περίπτωση, μάλιστα, η ατέλεια έχει αναπτυχθεί παράλληλα με το τοίχωμα της βάσης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η ατέλεια έχει αναπτυχθεί κάθετα σε αυτό.



Σχήμα 3.33 Η μεγάλη διατομή χυτού CuNi12Zn24, από χύτευση Υπερπίεσης-Κενού.

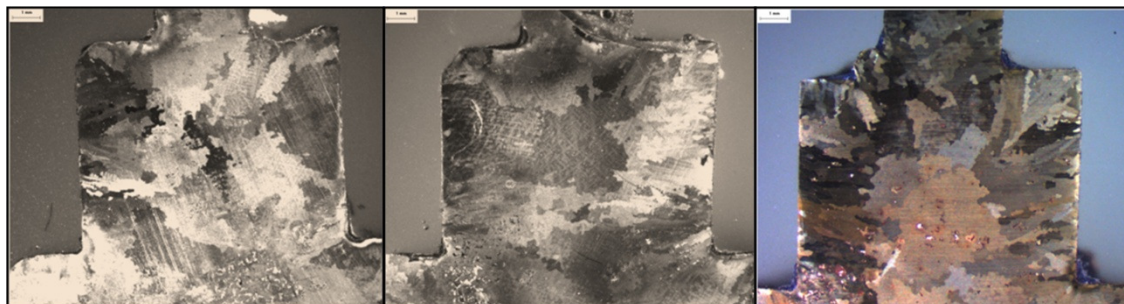
Σχετικά με τα δοκίμια Ορείχαλκου CuZn33, με το αντιδραστήριο που χρησιμοποιήθηκε για τη χημική προσβολή (διάλυμα 5gr FeCl₂, 100ml H₂O, 5ml HCl) αποκαλύφθηκαν τα όρια των κόκκων και η μικροδομή του υλικού παρατηρείται η ύπαρξη εξαιρετικά μεγάλων κόκκων, οι οποίοι σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης. Η χονδρόκοκκη μικροδομή αναπτύσσεται όταν η στερεοποίηση γίνεται με αργό ρυθμό.



Σχήμα 3.34 Η μικρή διατομή χυτού CuZn33, από χύτευση με Υπερπίεση (μεγέθυνση x16).

Το Σχήμα 3.35 αφορά στη μεσαία διάμετρο του χυτού. Με προσεκτική παρατήρηση στα άκρα των χυτών, κατά μήκος των τοιχωμάτων, μπορεί να διακριθεί η επιδερμίδα, μία λεπτή επιφανειακή ζώνη λεπτόκοκκης δομής (μικροκρυσταλλική ζώνη). Λόγω της υψηλής υπόψυξης οι σχηματιζόμενοι πυρήνες κρυστάλλωσης είναι πολυπληθείς, με αποτέλεσμα η ανάπτυξη των κόκκων να είναι ανταγωνιστική και, κατά συνέπεια, να περιορίζεται γρήγορα.

Διακρίνεται, επίσης, η βασαλτική ζώνη. Πρόκειται για ευμεγέθεις κολονοειδούς μορφής, δενδριτικούς κρυστάλλους με επιμήκη ανάπτυξη, κατά τη διεύθυνση της θερμοκρασιακής βάρμωσης, και κάθετα στα τοιχώματα του τύπου. Στα συγκεκριμένα δοκίμια φαίνεται χαρακτηριστικά η διεύθυνση ανάπτυξης των κόκκων στις γωνίες (σημεία έντονης αλλαγής γεωμετρίας) του χυτού. Μεταβάλλεται ο τρόπος απαγωγής θερμότητας από το τήγμα προς το περιβάλλον, και ανάλογη είναι και η ανάπτυξη των κόκκων. Για χυτά μικρού πάχους η βασαλτική ζώνη προχωρεί ως την καρδιά του χυτού.



Σχήμα 3.35 Η μεσαία διατομή χυτού CuZn33, από (α) χύτευση Βαρύτητας, (β) χύτευση Κενού και (γ) χύτευση Υπερπίεσης-Κενού.

3.7 Μέτρηση Απόστασης Δευτερογενών Δενδριτικών Κλάδων (SDAS)

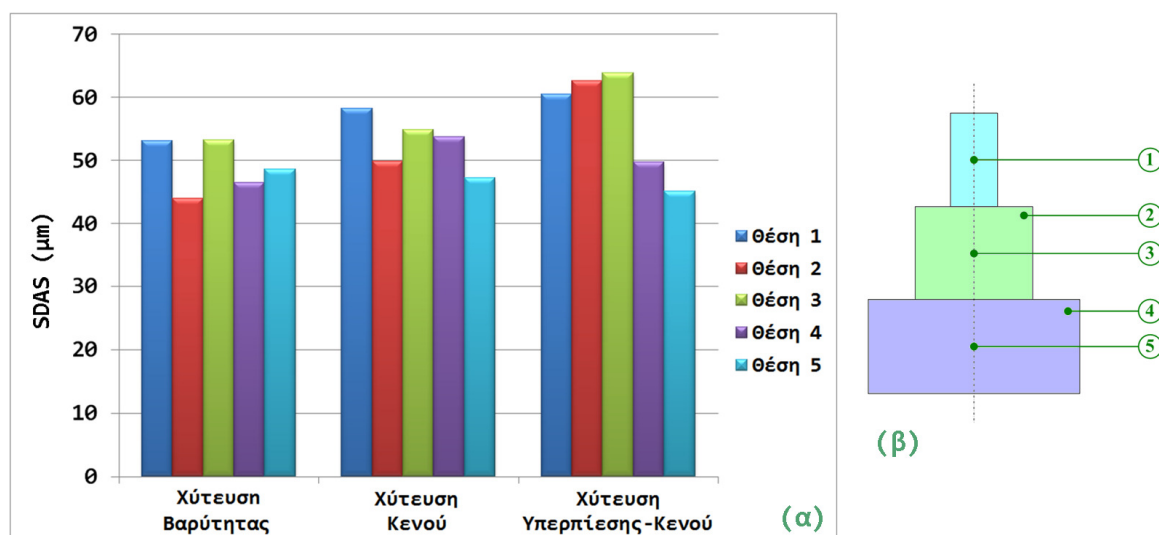
Για τρία δοκίμια του τριμερούς κράματος CuNi12Zn24, που χυτεύθηκαν με ίδιες αρχικές συνθήκες καλουπιού και τήγματος, αλλά διαφορετικές συνθήκες χύτευσης, πραγματοποιήθηκε μέτρηση και σύγκριση των δευτερογενών δενδριτικών κλάδων τους (Secondary Dendrite Arm Spacing). Οι συνθήκες χύτευσης ήταν (α) χύτευση βαρύτητας, (β) χύτευση κενού και (γ) χύτευση υπερπίεσης-κενού. Η μέτρηση της SDAS πραγματοποιήθηκε στη μεσαία, διαμήκη τομή του χυτού και οι θέσεις μέτρησης ήταν οι 5 θέσεις που χρησιμοποιήθηκαν και για τη μέτρηση πορώδους (βλ. Σχήμα 3.42).

3.7.1 Αποτελέσματα Μετρήσεων

Οι μετρήσεις παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.3, και στο Σχ.3.36.

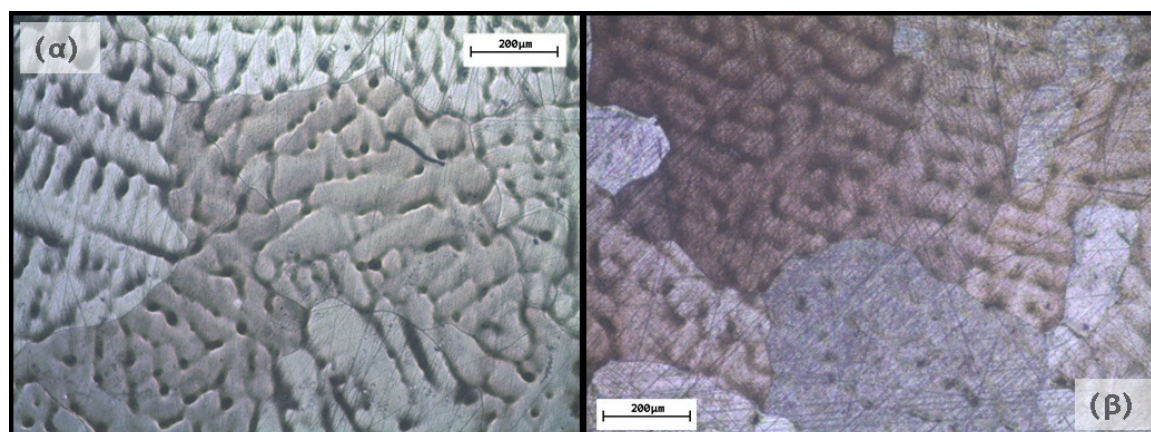
Πίνακας 3.30 Πίνακας μετρήσεων της απόστασης δευτερευόντων δενδριτικών κλάδων (SDAS), σε πέντε θέσεις μέτρησης χυτών που κατασκευάστηκαν με χύτευση υπό τρεις διαφορετικές συνθήκες πίεσης.

	Χύτευση Βαρύτητας (μm)	Χύτευση Κενού (μm)	Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού (μm)
1	53.06	58.24	60.53
2	44.02	49.89	62.66
3	53.26	54.88	63.88
4	46.44	53.75	49.73
5	48.55	47.27	45.13
Μέσος όρος Τυπική απόκλιση	49.066 4.067	52.806 4.297	56.386 8.422

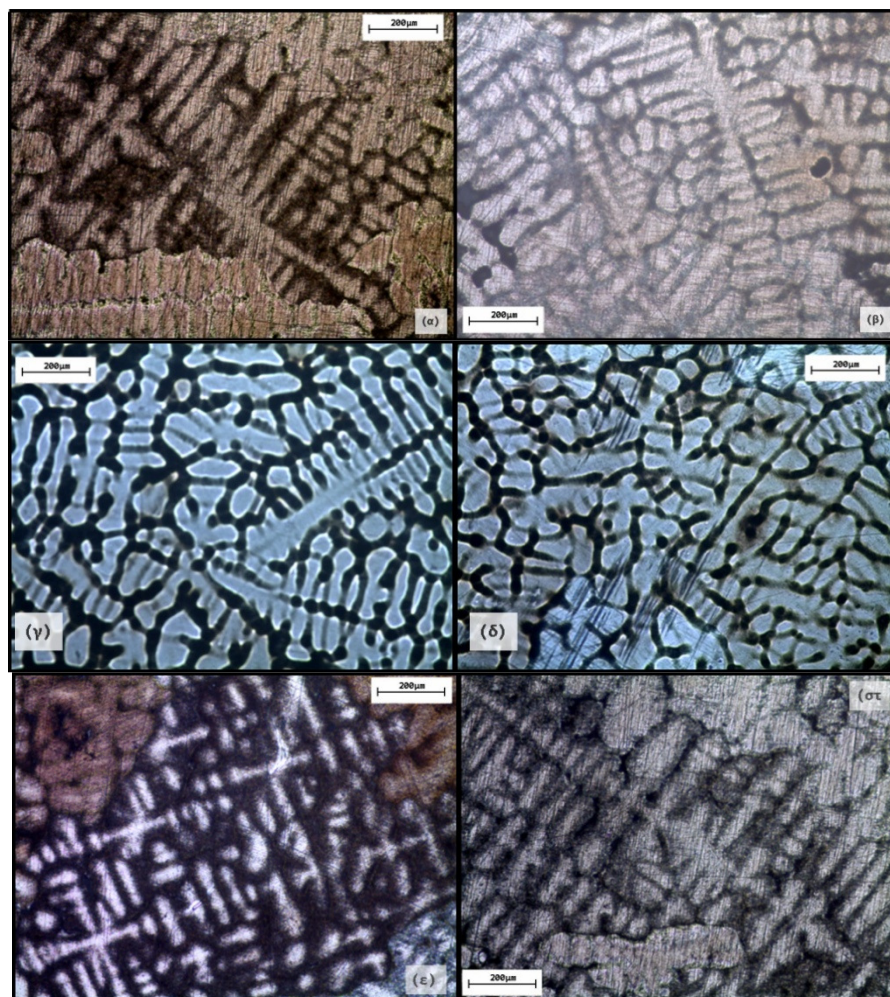


Σχήμα 3.36 (α) Γραφική απεικόνιση των μετρήσεων της SDAS, σε πέντε θέσεις μέτρησης χυτών που κατασκευάστηκαν με χύτευση υπό τρεις διαφορετικές συνθήκες πίεσης και (β) οι 5 θέσεις μέτρησης.

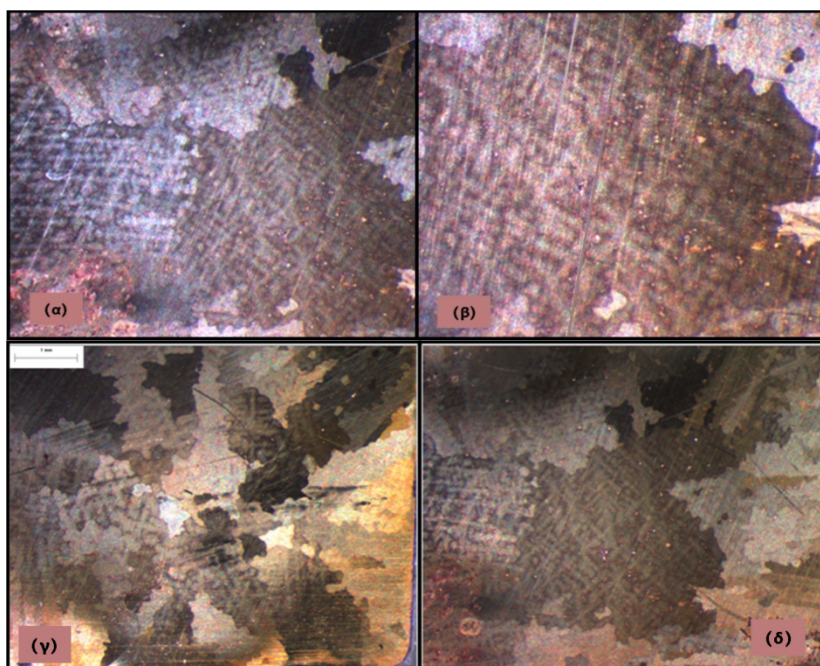
Τα Σχήματα που ακολουθούν είναι κάποιες χαρακτηριστικές οπτικές μικρογραφίες της δενδριτικής δομής του τριμερούς κράματος χαλκού, με βάση τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.



Σχήμα 3.37 (α) Χύτευση Βαρύτητας και (β) Χύτευση Κενού, στη μικρή διατομή, $\times 10$.



Σχήμα 3.38 Χαρακτηριστικές δενδριτικές δομές σε χυτά CuNi12Zn24 (α) Χύτευση Κενού με Υπερπίεση, μεγάλη διατομή, $\times 10$, (β) Χύτευση Κενού, μεγάλη διατομή, $\times 10$, (γ) Χύτευση Βαρύτητας, μεγάλη διατομή, $\times 10$, (δ) Χύτευση Κενού με Βαρύτητα, μεσαία διατομή, $\times 10$, (ε) Χύτευση Κενού, μεσαία διατομή, $\times 10$, (στ) Χύτευση Κενού-Υπερπίεσης, μεσαία διατομή, $\times 10$.



Σχήμα 3.39 Χυτό CuZ33, από Χύτευση Κενού, μεσαία διατομή (α) μεγέθυνση $\times 1.0$ και (β) μεγέθυνση $\times 2.5$, (γ) μεγάλη διατομή και (δ) μεσαία διατομή.

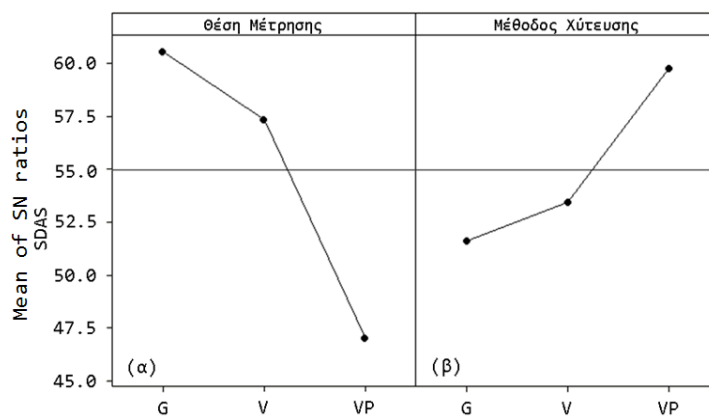
Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις SDAS για τα σημεία 1, 3 και 5 για τις τρεις μεθόδους χύτευσης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση διακύμανσης ώστε να υπολογιστούν τα ποσοστά συνεισφοράς της μεθόδου χύτευσης και της θέσης στο χυτό κατά τον κατακόρυφο άξονα, στο μέγεθος της SDAS.

Ο πίνακας ANOVA είναι ο Πίνακας 3.31, στον οποίο φαίνονται τα υπολογισθέντα στατιστικά μεγέθη από τα οποία προέκυψαν τα διαγράμματα επίδρασης παραμέτρων (Σχήμα 3.40) και τα ποσοστά συνεισφοράς των παραμέτρων στο μετρούμενο αποτέλεσμα (Σχήμα 3.41).

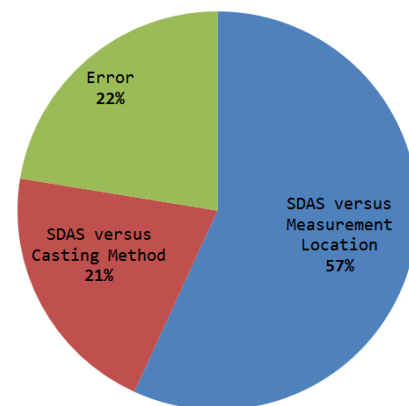
Πίνακας 3.31 Αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) για την SDAS

Source	DOF	Sum of squares	Mean Square	F ratio	Συνεισφορά (%)
Θέση Μέτρησης	2	301.8	150.9	2.532	56.83
Μέθοδος Χύτευσης	2	110.2	55.1	0.924	20.75
Σφάλμα	2	119.2	59.6		22.42
Σύνολο	8	531.2			

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει πως η απόσταση των δευτερευόντων δενδριτικών κλάδων (SDAS) εξαρτάται από τη μέθοδο χύτευσης (δηλαδή από την εφαρμογή ή τη μη εφαρμογή υπερπίεσης και κενού) σε ποσοστό 21%, από τη θέση στη γεωμετρία του χυτού, σε ποσοστό 57%. Εμπεριέχεται ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό σφάλματος.



Σχήμα 3.40 Επίδραση (α) της θέσης μέτρησης και (β) της μεθόδου χύτευσης, στην SDAS.
(Main Effect Plots (means) for SN ratios)



Σχήμα 3.41 Ποσοστά συνεισφοράς της θέσης μέτρησης και της μεθόδου χύτευσης στην SDAS.

3.7.2 Συμπεράσματα

Από τη μέτρηση της απόστασης δευτερογενών δενδριτικών κλάδων (SDAS) για τα τρία χυτά, φαίνεται πως υπάρχει διαφορά στο μέγεθος των δενδριτικών κλάδων ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενο μέθοδο χύτευσης.

Μικρότερου μεγέθους SDAS κατά μέσο όρο έχει το χυτό από χύτευση βαρύτητας, ακολουθεί αυτό της χύτευσης κενού και τέλος, μεγαλύτερη SDAS έχει αυτό της χύτευσης υπερπίεσης-κενού. Τα χυτά με τη χύτευση βαρύτητας και τη χύτευση κενού, καταλήγουν σε συγκρίσιμες SDAS κατά μέσο όρο (περίπου 50 μ m) και με ίδια τυπική απόκλιση (της τάξης του 4%)

σε όλη την επιφάνεια του χυτού. Αντίθετα, το χυτό από τη χύτευση υπερπίεσης-κενού έχει SDAS της τάξης των 60μm, με διπλάσια τυπική απόκλιση (8%). Η μέθοδος χύτευσης όχι μόνο επηρεάζει την τιμή της SDAS, αλλά επηρεάζει και τις θέσεις εμφάνισης μεγαλύτερων ή μικρότερων δενδριτών. Παρατηρείται πως στη μεσαία περιοχή του χυτού η χύτευση υπερπίεσης-κενού καταλήγει σε μεγαλύτερους δενδρίτες, ενώ στην περιοχή μεγάλης διατομής του χυτού, η χύτευση υπερπίεσης-κενού δίνει μικρότερους δενδρίτες σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις.

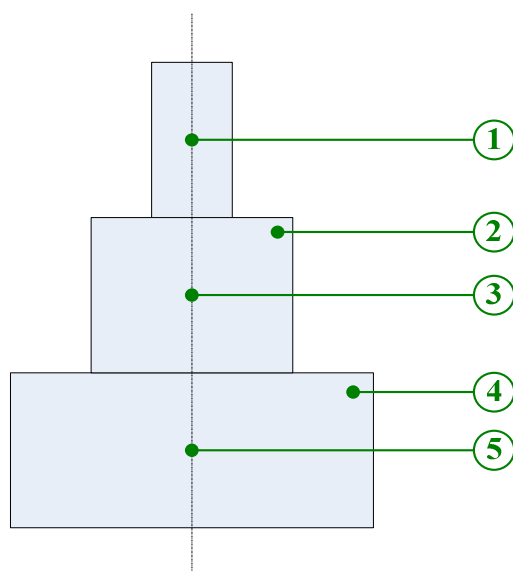
Μεγάλη τιμή SDAS υποδεικνύει ύπαρξη μεγάλων δενδριτών, που έχουν αναπτυχθεί επειδή ο χρόνος στερεοποίησης στο σημείο εκείνο είναι αρκετά υψηλός. Αντίθετα, μικρή τιμή SDAS υπονοεί μικρό τοπικό χρόνο στερεοποίησης. Από τις §3.3.3 και 3.4 φαίνεται πως μεγαλύτερος χρόνος στερεοποίησης παρατηρείται στη χύτευση κενού, μετά στη χύτευση υπερπίεσης-κενού και τέλος στη χύτευση βαρύτητας. Οι μετρήσεις θερμοκρασίας των παραγράφων αυτών αφορούν στην περιοχή του χυτού με τη μεγάλη διατομή. Συνεπώς, συγκρίνοντας τις τιμές SDAS στη θέση 4, προκύπτει η ίδια πληροφορία, σχετικά με τον τοπικό χρόνο στερεοποίησης.

Τέλος, η γεωμετρία του χυτού έχει έντονη επίδραση στο μέγεθος της απόστασης των δευτερογενών δενδριτικών κλάδων. Μιλώντας για απόλυτα μεγέθη, η επίδραση της γεωμετρίας του χυτού του μέγεθος της SDAS είναι αρκετά μεγαλύτερη από την επίδραση της μεθόδου χύτευσης.

3.8 Μέτρηση Πορώδους

Μετά τη μεταλλογραφική προετοιμασία των δοκιμίων και χωρίς χημική προσβολή, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για ποσοτικοποίηση του πορώδους, με το λογισμικό ανάλυσης εικόνας Image-Pro Plus. Οι μετρήσεις πορώδους έγιναν στη μεσαία διαμήκη τομή του κάθε χυτού, τομή που αποτελεί επίπεδο συμμετρίας του χυτού.

Η μέτρηση του πορώδους πραγματοποιήθηκε για πέντε χαρακτηριστικές περιοχές της τομής του χυτού. Οι πέντε περιοχές μέτρησης είναι αυτές που φαίνονται στο Σχήμα 3.42. Οι περιοχές (θέσεις) 1, 3 και 5 βρίσκονται επί του άξονα συμμετρίας της τομής, ενώ οι θέσεις 2 και 4 βρίσκονται στις γωνίες της μεσαίας και της μεγάλης περιοχής του χυτού.



Σχήμα 3.42 Σημεία πάνω στη διατομή του χυτού, από τα οποία ελήφθησαν φωτογραφίες και πραγματοποιήθηκε μέτρηση πορώδους.

Οι εικόνες που παρατίθενται στον Πίνακα 3.35 και στα Σχήματα 3.47-3.49 είναι φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο, με το φακό μεγέθυνσης $\times 10$, διαμήκους τομής του χυτού. Δεν έχει προηγηθεί χημική προσβολή. Με άσπρο χρώμα διακρίνεται το μέταλλο βάσης, με μαύρο το πορώδες, οι ατέλειες ή/και κάποια εγκλείσματα.

Το πορώδες είναι το εμβαδό της επιφάνειας που καταλαμβάνουν οι πόροι σε μία εικόνα από μικροσκόπιο και εκφράζεται ως το ποσοστό (%) επί της συνολικής επιφάνειας της εικόνας.

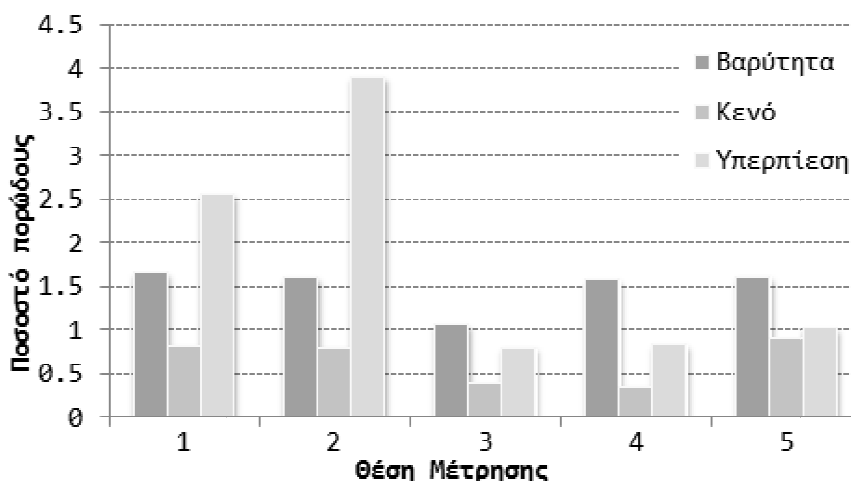
3.8.1 1η Ομάδα Πειραμάτων ΔΡ

Πραγματοποιήθηκε μέτρηση πορώδους στα χυτά της 1^{ης} ομάδας πειραμάτων ΔΡ (βλ. Πίνακας 3.14, σελ.168), δηλαδή σε χυτά που έχουν χυτευθεί με διαφορετικές συνθήκες χύτευσης, αλλά ίδια αρχική θερμοκρασία τήγματος (960°C) και ίδια θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού 600°C .

Ο Πίνακας 3.32 και το Σχήμα 3.43 παρουσιάζουν τις τιμές πορώδους για τις πέντε θέσεις μέτρησης και τις τρεις διαφορετικές συνθήκες χύτευσης: κενού, βαρύτητας, υπερπίεσης. Όπως φαίνεται, υπάρχουν διαφορές στο πορώδες λόγω των διαφορετικών συνθηκών πίεσης κατά τη χύτευση. Υπάρχουν, επίσης, διαφορές στο πορώδες και λόγω της γεωμετρίας.

Πίνακας 3.32. Μετρήσεις πορώδους για τα χυτά της 1^{ης} ομάδας πειραμάτων.

α/α	Χ. Βαρύτητας Πορώδες (%)	Χ. Κενό Πορώδες (%)	Χ. Υπερπίεσης Πορώδες (%)
1	1.66	0.83	2.57
2	1.61	0.81	3.92
3	1.07	0.39	0.81
4	1.58	0.35	0.68
5	1.62	0.91	0.38



Σχήμα 3.43 Κατανομή πορώδους σε 5 σημεία της διατομής του χυτού, για τρία χυτά CuZn33, από 3 είδη χύτευσης (βαρύτητας, κενού και υπερπίεσης).

Συγκρίνοντας τις μετρήσεις πορώδους στις πέντε διαφορετικές θέσεις του ίδιου χυτού, προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα. Στο χυτό από τη χύτευση βαρύτητας, το πορώδες έχει σχεδόν την ίδια τιμή σε όλη την έκταση του χυτού. Η ομοιομορφία της κατανομής των πόρων στη μάζα του χυτού είναι χαρακτηριστική. Στη χύτευση κενού, τα ποσοστά πορώδους είναι μικρότερα του 1% σε όλες τις περιπτώσεις, με δυσμενέστερες θέσεις εμφάνισης πόρων τις θέσεις 1, 2 και 5. Τέλος, στο χυτό από τη χύτευση με υπερπίεση, είναι έντονη η διασπορά του μεγέθους των πόρων. Οι περιοχές 1 και 2 είναι οι θέσεις εμφάνισης πόρων σε μεγαλύτερη έκταση.

Σχετικά με την επίδραση της μεθόδου χύτευσης στο εμφανιζόμενο πορώδες, συμπληρωματικά συμπληρώθηκε ο Πίνακας 3.33 χρησιμοποιώντας ως περίπτωση αναφοράς την περίπτωση χύτευσης με κενό. Παρουσιάζει τη

διαφορά των χυτών από χύτευση βαρύτητας και υπερπίεσης, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς.

Πίνακας 3.33. Αύξηση (%) πορώδους σε σχέση με το πορώδες στη χύτευση κενού.

α/α	Βαρύτητα	Υπερπίεση
1	50.32%	67.82%
2	49.97%	79.37%
3	63.75%	51.98%
4	77.57%	57.86%
5	44.05%	11.97%

Στη χύτευση κενού το πορώδες είναι λιγότερο από ότι σε όλες τις άλλες περιπτώσεις. Στη χύτευση κενού υπάρχει σχετικά ομοιόμορφη κατανομή πορώδους στη μάζα του χυτού. Στη χύτευση βαρύτητας στα ποσοστά πορώδους είναι μεγαλύτερα από ότι στη χύτευση κενού, αλλά είναι επίσης ομοιόμορφα κατανεμημένα στη μάζα του χυτού. Στη χύτευση με υπερπίεση έχουμε αρκετά μικρότερα ποσοστά πορώδους από ότι στη χύτευση βαρύτητας στη μεσαία και τη μεγάλη διάμετρο. Παρατηρείται, όμως, έντονο πρόβλημα πορώδους στη μικρή διάμετρο, πράγμα που δικαιολογείται από τη μεγάλη ταχύτητα πλήρωσης λόγω της υπερπίεσης, που προκαλεί τύρβη και ως εκ τούτου, αέρια εγκλείσματα. Τέλος, η χύτευση κενού-υπερπίεσης μειώνει σημαντικά τον αριθμό και το μέγεθος των ακαθαρσιών που είναι κατανεμημένες σε όλη τη μάζα του χυτού, αλλά υπάρχουν κάποιες, εντοπισμένες σε συγκεκριμένα σημεία.

3.8.2 2η Ομάδα Πειραμάτων ΔΡ

Η 2^η ομάδα πειραμάτων ΔΡ (βλ. Πίνακα 3.16, σελ.170) αφορούσε πειράματα χύτευσης με σταθερή θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού στους 730°C, σταθερή θερμοκρασία έγχυσης τήγματος στους 960°C, αλλά διαφορετικές συνθήκες πίεσης. Είναι η ομάδα πειραμάτων που περιλαμβάνει τις πέντε πιο χαρακτηριστικές μεθόδους χύτευσης: χύτευση κενού, χύτευση με υπερπίεση, χύτευση με υπερπίεση-κενό, χύτευση με 50% κενό και χύτευση βαρύτητας.

Τα στατιστικά των μετρήσεων πορώδους των χυτών της 2^η ομάδας πειραμάτων ΔΡ, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.34. Αρχικά παρουσιάζεται η απόλυτη τιμή του πορώδους, δηλαδή το ποσοστό % της επιφάνειας που καταλαμβάνουν οι πόροι ως προς το εμβαδόν της περιοχής μέτρησης. Στη συνέχεια, ο πίνακας περιλαμβάνει τη μέση τιμή εμβαδού πόρων σε μμ², την τυπική απόκλιση εμβαδού πόρων και τη μέγιστη τιμή εμβαδού εμφανιζόμενου πόρου. Με τον τρόπο αυτό φαίνεται κατά πόσο μία υψηλή τιμή πορώδους οφείλεται, για παράδειγμα, στην ύπαρξη λίγων μεγάλων πόρων ή πολλών μικρών.

Η χύτευση κενού είναι η περίπτωση στην οποία παρατηρούνται τα χαμηλότερα ποσοστά πορώδους. Αυξημένα ποσοστά πορώδους στο σύνολο της γεωμετρίας παρουσιάζονται στην περίπτωση χύτευσης βαρύτητας.

Δυσμενέστερη περίπτωση χύτευσης, όμως, είναι η χύτευση με υπερπίεση, καθώς στην περιοχή 3, δηλ. στη μεσαία περιοχή του χυτού παρουσιάζεται ατέλεια. Παρατηρώντας το δοκίμιο από χύτευση υπερπίεσης-κενού στην ίδια περιοχή, δεν παρατηρείται ατέλεια μεν, παρατηρούνται, όμως αυξημένα ποσοστά πορώδους και μέγιστες τιμές πόρων, σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία της γεωμετρίας. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως η χρήση υπερπίεσης για τη συγκεκριμένη γεωμετρία, προκαλεί πόρους και ατέλειες στην περιοχή μεσαίας διατομής του χυτού, πιθανότατα λόγω απότομης πλήρωσης.

Πίνακας 3.34 Στατιστικά στοιχεία πορώδους

Θέση	Πορώδες % Επιφάνειας	Μέση Τιμή Πόρου(μm ²)	Τυπική Απόκλιση (μm ²)	Μέγιστη Τιμή πόρου(μm ²)
Χύτευση Βαρύτητας				
1	1.74	14	31	709
2	1.99	19	25	460
3	3.34	17	30	756
4	1.64	23	23	217
5	1.78	19	23	178
Χύτευση Υπερπίεσης				
1	0.56	11	16	187
2	0.09	12	15	70
3	25.51	3754	15386	103094
4	0.31	45	87	454
5	0.75	51	255	2773
Χύτευση 50% Κενού				
1	0.10	16	12	46
2	0.17	24	45	278
3	1.20	192	426	2306
4	1.12	12	34	532
5	1.74	185	355	2364
Χύτευση Κενού				
1	0.09	13	12	54
2	0.49	19	45	438
3	0.27	31	40	249
4	0.45	19	27	167
5	0.56	30	44	354
Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού				
1	0.87	28	38	241
2	1.45	11	24	692
3	1.95	37	61	626
4	1.20	26	26	234
5	0.69	38	38	298

Στον Πίνακα 3.35 παρουσιάζονται συγκεντρωμένες όλες οι φωτογραφίες από τις αντίστοιχες μεταλλογραφίες. Διαβάζοντας τον Πίνακα 3.35 οριζοντίως, δηλαδή ανά σειρά, συγκρίνεται η κατανομή των πόρων σε διαφορετικές θέσεις του ίδιου χυτού. Διαβάζοντας τον πίνακα καθέτως,

δηλαδή ανά στήλη, καθίσταται δυνατή η σύγκριση της κατανομής πορώδους στην ίδια θέση μέτρησης, για χυτά που παράχθηκαν με διαφορετικές συνθήκες χύτευσης. Συγκρίνοντας τις μεταλλογραφίες και τα αποτελέσματα, μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις.

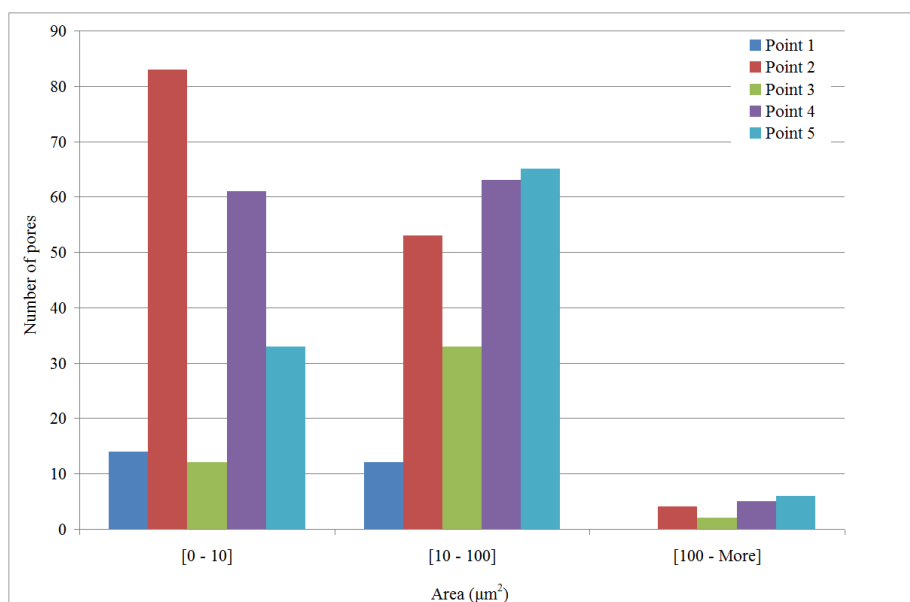
Πίνακας 3.35 Πίνακας εικόνων πορώδους για τις 5 θέσεις μέτρησης, σε χυτά που κατασκευάστηκαν με $T_{mould}=730^{\circ}C$, $T_{inlet}=960^{\circ}C$, με 5 διαφορετικές μεθόδους χύτευσης

	Χύτευση Βαρύτητας ($\Delta P=0bar$)	Χύτευση Υπερπίεσης ($\Delta P=0.5bar$)	Χύτευση 50% Κενού ($\Delta P=0.5bar$)	Χύτευση Κενού ($\Delta P=0.97bar$)	Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού ($\Delta P=1.47bar$)
Θέση 5					
Θέση 4					
Θέση 3					
Θέση 2					
Θέση 1					

- Η **χύτευση βαρύτητας** κρίνεται ικανοποιητική, ως προς το μέγεθος του μέγιστου εμφανιζόμενου πόρου. Υπάρχει, όμως, ένας μεγάλος αριθμός πόρων ανά εικόνα, ανομοιόμορφα κατανεμημένων. Η περισσότερο «επιβαρυσμένη» θέση είναι η θέση 3, δηλαδή στη μεσαία διατομή του χυτού, περί του άξονα συμμετρίας. Είναι η περιοχή που περιβάλλεται από μεγάλη ποσότητα υλικού από όλες τις μεριές (σε σχέση με τις υπόλοιπες θέσεις) κι έτσι, η θερμότητα απάγεται με αργούς ρυθμούς.
- Στην περίπτωση της **χύτευσης με υπερπίεση** μόνο, η παρουσία πόρων μειώνεται έντονα στις θέσεις 2 και 4, όπως φαίνεται στις αντίστοιχες εικόνες του Πίνακα 3.35, δηλαδή στις γωνίες της γεωμετρίας του χυτού, με μερικούς μεγάλους πόρους να εξακολουθούν να υπάρχουν. Μία τεράστια ατέλεια εμφανίζεται στο μέσω του χυτού (θέση 3), οδηγώντας στο συμπέρασμα πως η εφαρμογή υπερπίεσης έχει μία πολύ έντονη επίδραση στη ροή του τήγματος.
- Στη **χύτευση με εφαρμογή 50% κενού**, όπου η διαφορά πίεσης των δύο θαλάμων είναι η ίδια με της προηγούμενης περίπτωσης, η δημιουργία πορώδους είναι ξεκάθαρα μειωμένη. Στις θέσεις 3 και 5, δηλαδή στο μέσο του χυτού και στο μέσον της μεγάλης διατομής του χυτού, αν και εμφανίζονται κάποιοι μεγάλοι πόροι, ο αριθμός των μικρών, ομοιογενώς κατανεμημένων πόρων έχει εξαλειφθεί. Φαίνεται πως η παρουσία του κενού δημιουργεί μία περισσότερο ομαλή ροή του τήγματος, εξαλείφοντας τη δημιουργία μεγάλων ατελειών. Επιπλέον, το κενό μειώνει το σχηματισμό μικρών πόρων. Συγκρίνοντας την περίπτωση αυτή, με τη χύτευση βαρύτητας, το πορώδες στη θέση 1 είναι εμφανώς βελτιωμένο, αλλά το μέγεθος του μεγαλύτερου πόρου στις θέσεις 3 και 4 παραμένει πολύ μεγάλο, για την περίπτωση χύτευσης με 50% κενό.
- Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της **χύτευσης κενού**, προκύπτει ότι αποτελεί την πιο ευνοϊκή συνθήκη χύτευσης, καθώς αποδεικνύεται ότι είναι η περίπτωση με το λιγότερο πορώδες. Είναι αξιοσημείωτο ότι στα λεπτότερα κομμάτια του χυτού (θέση 1) το πορώδες είναι δραματικά μειωμένο. Η κατανομή του πορώδους είναι παρόμοια στο κέντρο του χυτού και στις άκρες του χυτού, πράγμα που σημαίνει ομοιογένεια στην ποιότητα του χυτού σε όλη τη μάζα του. Επιπλέον, το μέγεθος του μεγαλύτερου πόρου, για τη χειρότερη θέση, είναι το μικρότερο εμφανιζόμενο σε σχέση με τα χυτά όλων των υπολοίπων περιπτώσεων.
- Τέλος, στη **χύτευση υπερπίεσης-κενού**, οι ατέλειες στις πιο παχιές περιοχές του χυτού έχουν εξαλειφθεί ενώ, αντίθετα, το πορώδες στις λεπτότερες διατομές φαίνεται να έχουν υψηλές τιμές, μία ένδειξη ότι ίσως τα λεπτότερα τμήματα του χυτού γεμίζουν ταχύτερα από ότι θα έπρεπε, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολύ έντονης τύρβης. Η παρουσία του κενού είναι ξεκάθαρη μέσω του γεγονότος ότι πέραν κάποιων συγκεκριμένων μεγάλων πόρων, στο υπόλοιπο χυτό, πρακτικά δεν υπάρχει πορώδες. Επιπλέον, οι ατέλειες στο παχύτερο τμήμα του χυτού είναι μειωμένες.

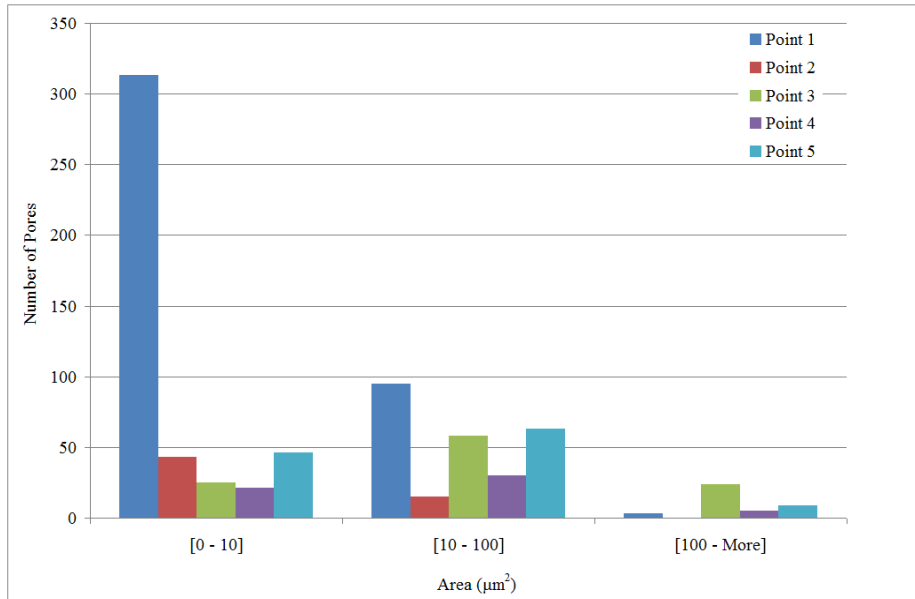
Με βάση όλες τις προηγούμενες παρατηρήσεις, προκύπτει πως το καλύτερο και το χειρότερο σενάριο είναι η χύτευση κενού και η χύτευση υπερπίεσης-κενού, αντίστοιχα.

Το Σχήμα 3.44 και το Σχήμα 3.45 είναι ιστογράμματα της κατανομής των πόρων για τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις, με μεγέθη καταναμημένα σε τρεις κλάσεις, τις [0-10], [10-100] και [100-more] μm^2 . Οι κλάσεις αυτές αντιστοιχούν σε πόρους που μπορούν να χαρακτηριστούν ως «μικροί», «μεσαίοι» και «μεγάλοι» αντίστοιχα. Στη χύτευση κενού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.44, στην περιοχή γύρω από τη θέση 1 δεν υπάρχουν μεγάλοι πόροι. Στη θέση 2, ο αριθμός των πόρων είναι αρκετά μεγάλος, ενώ υπάρχουν πολύ λιγότεροι μεσαίοι πόροι και ακόμα λιγότεροι μεγάλοι πόροι. Στις θέσεις 3 και 5, οι μεσαίοι πόροι είναι πολύ περισσότεροι από τους μικρούς. Στη θέση 4, ο αριθμός των μικρών πόρων είναι σχεδόν ίσος με τον αριθμό των μεσαίων πόρων. Οι μεγαλύτεροι πόροι στο συγκεκριμένο χυτό εμφανίζονται στις θέσεις 4 και 5.



Σχήμα 3.44 Ιστογράμμα κατανομής μεγέθους πόρων για χύτευση κενού

Αναφορικά με τη χύτευση υπερπίεσης-κενού, όπως προκύπτει από το Σχήμα 3.45, η θέση 1 κατακλύζεται από πόρους μικρού μεγέθους. Στη θέση 2, δεν υπάρχουν μεγάλοι πόροι. Η θέση 3 είναι η περιοχή στην οποία παρατηρούνται οι μεγαλύτεροι πόροι. Στη θέση 4 υπάρχουν μερικοί μικρού και μεσαίου μεγέθους πόροι. Στη θέση 5, υπάρχουν σημαντικά περισσότεροι μεσαίοι από ό,τι μικροί πόροι. Συγκρίνοντας τα δύο ιστογράμματα, σημειώνεται πως η πλειονότητα των μικρών πόρων του χυτού υπερπίεσης-κενού είναι συγκεντρωμένα σε μία θέση (τη θέση 1), ενώ στην περίπτωση χύτευσης κενού παρατηρείται μία περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή των μικρών πόρων.



Σχήμα 3.45 Ιστόγραμμα κατανομής μεγέθους πόρων για χύτευση υπερπίεσης-κενού

3.8.3 3η Ομάδα Πειραμάτων ΔΡ

Η 3^η ομάδα πειραμάτων, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.18, σελ.172, είναι χυτά από το τριμερές κράμα CuZn1724, από διαφορετικές συνθήκες πίεσης κατά τη χύτευση, με σταθερή θερμοκρασία έγχυσης (1110°C) και προθέρμανσης καλουπιού (740 °C), ώστε να καθίσταται δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της πίεσης (χύτευση βαρύτητας - χύτευση κενού - χύτευση κενού με υπερπίεση) στην εμφάνιση του πορώδους (βλ. Πίνακες 3.36-3.40 και Σχήμα 3.46).

Πίνακας 3.36. Μετρήσεις πορώδους.

α/α	Χ. Βαρύτητας Πορώδες (%)	Χ. Κενού Πορώδες (%)	Χ. Υπερπίεσης Πορώδες (%)
1	0.24	0.28	0.91
2	0.10	0.28	0.08
3	0.13	0.12	0.21
4	0.69	0.07	0.09
5	0.39	0.24	0.09

Πίνακας 3.37. Τυπική απόκλιση (Standard deviation) του εμβαδού των πόρων

α/α	Βαρύτητα	Κενό	Υπερπίεση
1	157.95	51.19	380.72
2	60.24	106.65	66.57
3	19.06	35.83	34.41
4	227.55	7.92	
5	57.82	830.24	

Πίνακας 3.38. Μέση τιμή εμβαδού των πόρων (μm²).

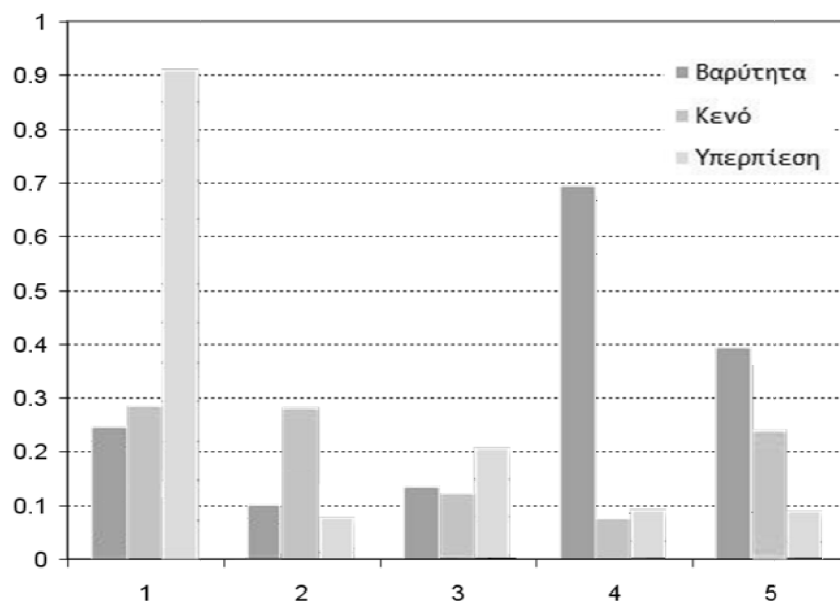
α/α	Βαρύτητα	Κενό	Υπερπίεση
1	74.15	40.63	91.78
2	46.12	36.50	38.14
3	18.83	20.23	26.59
4	109.42	11.19	24.70
5	30.39	31.15	40.32

Πίνακας 3.39. Μέγιστο εμβαδό πόρου (μm^2).

α/α	Βαρύτητα	Κενό	Υπερπίεση
1	823.91	304.43	4322.39
2	297.26	949.99	327.20
3	138.72	240.76	195.22
4	1690.84	45.96	
5	594.11	830.24	231.06

Πίνακας 3.40. Μεταβολή (%) πορώδους σε σχέση με το πορώδες της χύτευσης κενού.

α/α	Βαρύτητα	Υπερπίεση
1	-13.86%	222.4%
2	-64.98%	-73.10%
3	7.166%	69.58%
4	854.5%	22.53%
5	62.26%	-63.11%



Σχήμα 3.46 Πορώδες, δοκιμίων “καθαρού ορείχαλκου”, από χύτευση βαρύτητας, χύτευση κενού και χύτευση υπερπίεσης, σε 5 σημεία της διατομής του χυτού.

Συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μέτρηση του πορώδους για τα τρία χυτά που έχουν κατασκευαστεί με την ίδια αρχική θερμοκρασία τήγματος και την ίδια θερμοκρασία καλουπιού, αλλά με διαφορετικές συνθήκες πίεσης, είναι τα παρακάτω:

1. Η χύτευση βαρύτητας είναι συνολικά η δυσμενέστερη περίπτωση χύτευσης όσον αφορά στην εμφάνιση πόρων. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει αν συγκρίνουμε το ποσοστό επιφάνειας που καλύπτεται από πόρους, κατά μέσο όρο, αλλά και τον αριθμό των εμφανιζόμενων κόκκων, σε όλες τις εικόνες, με τα αντίστοιχα νούμερα των άλλων δύο μεθόδων χύτευσης.
2. Παρατηρείται, ωστόσο, έντονο πρόβλημα εμφάνισης πόρων, στη μικρή διάμετρο των χυτών κατά τη χύτευση κενού με χρήση υπερπίεσης. Στο συγκεκριμένο σημείο, είναι η μόνη περίπτωση που η χύτευση βαρύτητας φαίνεται να έχει καλύτερα αποτελέσματα. Η εφαρμογή υπερπίεσης καταλήγει σε δημιουργία πόρων ομοιόμορφα κατανομημένων, σχετικά μεγάλου μεγέθους.
3. Η χύτευση κενού είναι αυτή που έχει τη μικρότερη μέση τιμή μεγέθους πόρων αλλά και τη μικρότερη μέγιστη τιμή πόρου, σε μικρές διαμέτρους.

4. Στις μεγάλες διαμέτρους η εικόνα είναι διαφορετική. Η καλύτερη περίπτωση ως προς την κατά μέσο όρο εμφάνιση πόρων είναι η περίπτωση της χύτευσης με χρήση υπερπίεσης. Το ποσοστό επιφάνειας που καλύπτουν οι πόροι είναι πολύ μικρό, περίπου 8-9%, έναντι της βαρύτητας, στην οποία οι πόροι καλύπτουν το 38%. Ο μεγαλύτερος εμφανιζόμενος είναι ομοίως κατά πολύ μικρότερος αυτού της βαρύτητας.
5. Σχετικά με τις περιοχές 3 και 4, που βρίσκονται στις ακμές της μεσαίας και μεγάλης διαμέτρου, παρατηρείται η πιο έντονη εμφάνιση πόρων στη χύτευση με υπερπίεση, έναντι της χύτευσης κενού.
6. Αντιθέτως, στις περιοχές 2 και 5, δηλαδή στα κέντρα των διαμέτρων αυτών, η χύτευση υπερπίεσης υπερτερεί σημαντικά της χύτευσης κενού.
7. Συνολικά, εξετάζοντας το τεμάχιο και στα πέντε σημεία του που μελετήθηκαν, τις λιγότερες αυξομειώσεις ποσοστού πορώδους τις έχει η χύτευση κενού. Υπερτερεί έναντι των άλλων δύο μεθόδων στις περιοχές που είναι επίφοβες (ακμές και μικρές διαμέτρους).
8. Η χύτευση κενού με χρήση υπερπίεσης μειώνει σημαντικά τα ποσοστά πορώδους στα κέντρα των διαμέτρων που έχουν μεγάλη ποσότητα μετάλλου (μεσαία και μεγάλη διάμετρος). Παρουσιάζει, όμως, έντονο πρόβλημα στη μικρή διάμετρο.

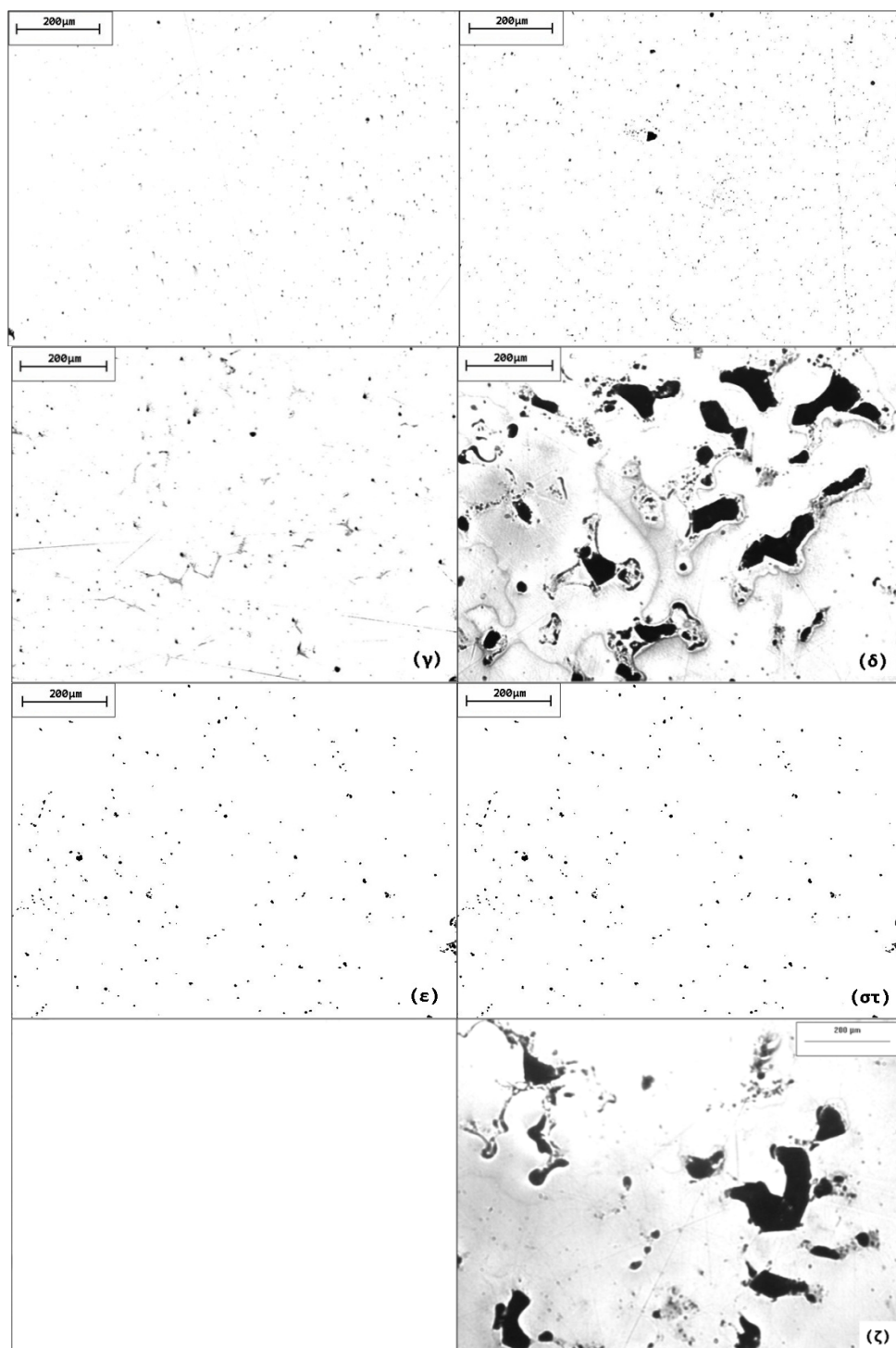
3.8.4 5η Ομάδα Πειραμάτων ΔΡ

Η 5^η ομάδα πειραμάτων σύμφωνα με τον Πίνακα 3.22, σελ.175, περιλαμβάνει μία χύτευση κενού, μία χύτευση υπερπίεσης και μία χύτευση βαρύτητας, που πραγματοποιήθηκαν με θερμοκρασία έγχυσης τήγματος τους 906°C και θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού τους 500°C.

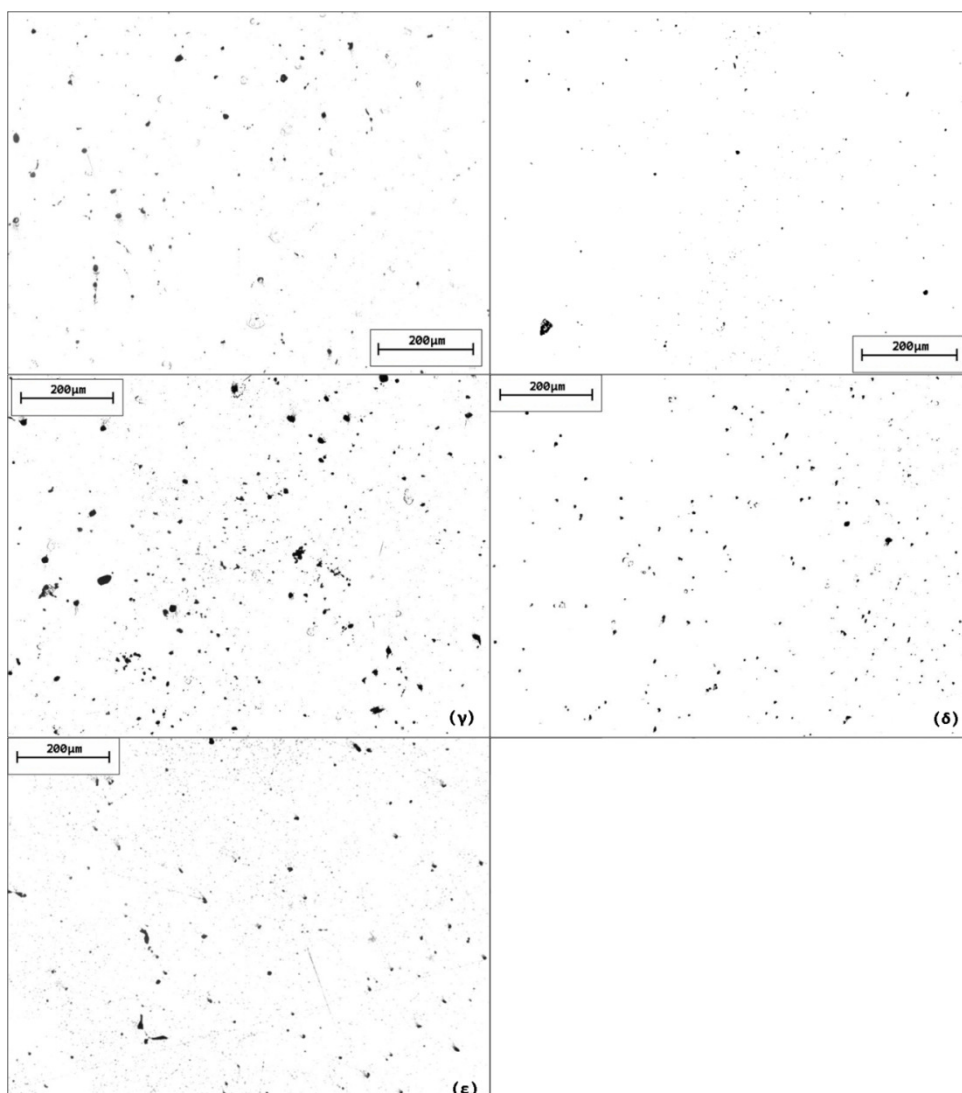
Οι τρεις επόμενοι πίνακες (Πιν.3.41-3.43) και τα τρία επόμενα σχήματα (Σχ.3.47-3.49) παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων του πορώδους για κάθε περίπτωση.

Πίνακας 3.41 Κενό; 550 ; 960

Υπερπίεση; 550 ; 950					
α/α	% Αρεα	Τυπική Απόκλιση	Μέση Τιμή	Εμβαδόν Μικρότερου Πόρου	Εμβαδόν Μεγαλύτερου Πόρου
1	0.38	16.70	13.67	16.70	225.16
2	0.64	20.76	11.30	20.76	414.07
3	0.43	26.89	23.00	26.89	183.00
4	11.63	1025.61	257.63	1025.61	9630.63
5	1.29	37.34	15.91	37.34	874.94
5d	0.08	13.99	17.39	13.99	64.94



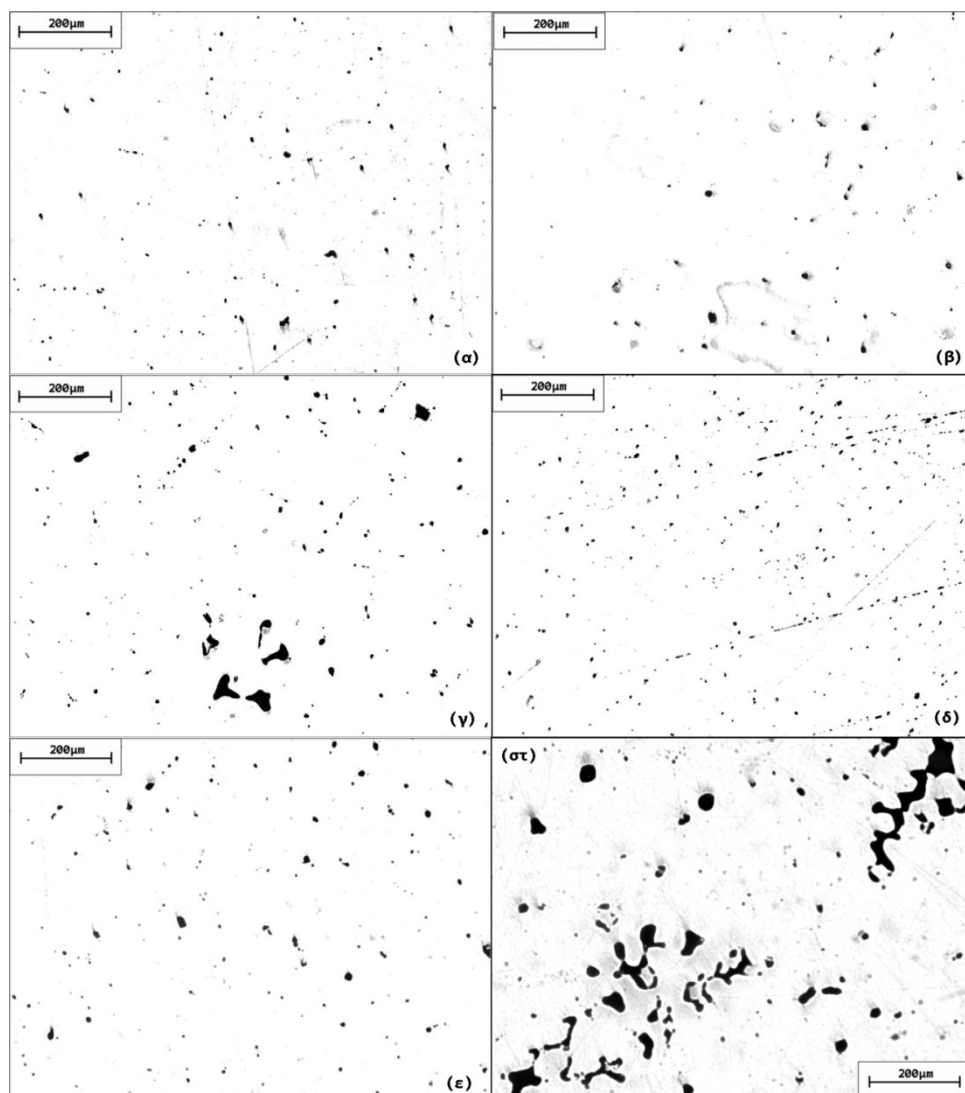
Σχήμα 3.47 Πορώδες στη μέση τομή χυτού, από χύτευση με Κενό, $T_m=550^{\circ}\text{C}$, $T_i=960^{\circ}\text{C}$ (α) στη θέση 1, (β) στη θέση 2, (γ) στη θέση 3, (δ) στη θέση 4, (ε) χαρακτηριστική περιοχή στη θέση 5 και (στ) η χειρότερη περιοχή στη θέση 5.



Σχήμα 3.48 Πορώδες στη μέση τομή χυτού, από χύτευση με Υπερπίεση, $T_m=550^{\circ}\text{C}$, $T_i=950^{\circ}\text{C}$ (α) στη θέση 1, (β) στη θέση 2, (γ) στη θέση 3, (δ) στη θέση 4, (ε) στη θέση 5.

Πίνακας 3.42 Υπερπίεση; 550 ; 950

Υπερπίεση; 550 ; 950					
α/α	% Area	Τυπική Απόκλιση	Μέση Τιμή	Εμβαδόν Μικρότερου Πόρου	Εμβαδόν Μεγαλύτερου Πόρου
1	0.87	38.42	28.41	4.64	240.77
2	1.45	23.98	10.84	4.64	692.36
3	1.95	61.41	36.52	4.64	625.74
4	1.20	26.31	26.03	4.64	234.44
5	0.69	38.26	38.26	4.64	297.69
5d	0.87	38.42	28.41	4.64	240.77



Σχήμα 3.49 Πορώδες στη μέση τομή χυτού, από χύτευση με Βαρύτητα, $T_m=550^{\circ}C$, $T_i=980^{\circ}C$ (α) στη θέση 1, (β) στη θέση 2, (γ) στη θέση 3, (δ) στη θέση 4, (ε) χαρακτηριστική περιοχή στη θέση 5 και (στ) η χειρότερη περιοχή στη θέση 5.

Πίνακας 3.43 Βαρύτητα; 550 ; 980

Βαρύτητα; 550 ; 980					
α/α	% Area	Τυπική Απόκλιση	Μέση Τιμή	Εμβαδόν Μικρότερου Πόρου	Εμβαδόν Μεγαλύτερου Πόρου
1	0.57	39.44	33.51	4.64	285.88
2	0.68	56.42	37.15	4.64	359.25
3	1.55	175.96	58.74	4.64	1520.07
4	0.65	16.98	21.49	4.64	106.68
5	0.85	68.02	60.42	4.64	360.94
5d	6.36	990.24	353.85	5.06	10260.16

3.9 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη (πειραματικές καμπύλες απόψυξης, χρόνος στερεοποίησης και ταχύτητα απόψυξης, μακροσκοπική παρατήρηση δοκιμίων, μέτρηση πορώδους και μέτρηση απόστασης δευτερογενών δενδριτικών κλάδων) παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Από τις **πειραματικές καμπύλες απόψυξης** προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

1. Ο χρόνος στερεοποίησης εξαρτάται έντονα από τη θερμοκρασία καλουπιού, με τρόπο ανάλογο. Έτσι, για παράδειγμα, μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά τήγματος-καλουπιού σημαίνει μικρότερο χρόνο στερεοποίησης.
2. Η ταχύτητα απόψυξης του χυτού κατά το 1^ο στάδιο απόψυξης εξαρτάται ευθέως από τη θερμοκρασία του καλουπιού.
3. Η ταχύτητα απόψυξης του χυτού κατά το 2^ο στάδιο απόψυξης είναι ανάλογη της θερμοκρασίας καλουπιού για τη χύτευση βαρύτητας και αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας καλουπιού για τη χύτευση υπερπίεσης.
4. Η ταχύτητα απόψυξης του χυτού κατά το 3^ο στάδιο εξαρτάται από παρουσία υπερπίεσης ή την ύπαρξη κενού.
5. Προτείνεται μία σχέση και ένας συντελεστής συσχέτισης ώστε με γνωστό το χρόνο στερεοποίησης για μία περίπτωση χύτευσης να μπορεί να εκτιμηθεί ο χρόνος στερεοποίησης για χύτευση με διαφορετική θερμοκρασία καλουπιού. Η χρήση του συντελεστή συσχέτισης εφαρμόζεται επιτυχώς για τις περιπτώσεις χύτευσης βαρύτητας και χύτευσης με υπερπίεση.

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα από το **σχεδιασμό πειραμάτων κατά Taguchi**, είναι:

1. Ο χρόνος στερεοποίησης του χυτού εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού (T_{mould}), με σχετική βαρύτητα επίδρασης 80%.
2. Η ταχύτητα απόψυξης του χυτού και για τα τρία στάδια της απόψυξης επηρεάζεται κυρίως από την πίεση στο θάλαμο χύτευσης (P_{down}), με σχετική βαρύτητα επίδρασης περίπου 35%, αλλά και όλες οι άλλες παράμετροι συνεισφέρουν. Αναλυτικότερα, το 1^ο στάδιο απόψυξης επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από την πίεση στο θάλαμο χύτευσης (P_{down}), δηλαδή από την ύπαρξή ή όχι κενού. Το 2^ο στάδιο απόψυξης επηρεάζεται κυρίως από τη θερμοκρασία του καλουπιού (T_{mould}). Το 3^ο στάδιο επηρεάζεται κυρίως από την πίεση στο θάλαμο χύτευσης (P_{down}).

3. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα κυρίων επιδράσεων αποτελέσματα του σχεδιασμού πειραμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την παραμετρική μελέτη υπάρχει συμφωνία αποτελεσμάτων.

Από τη μέτρηση της **απόστασης των δευτερογενών δενδριτικών κλάδων (SDAS)** του χυτού:

1. φαίνεται πως υπάρχει διαφορά στο μέγεθος των δενδριτικών κλάδων ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο χύτευσης. Πέραν αυτού, η SDAS διαφέρει σημαντικά στα διάφορα σημεία της γεωμετρίας του χυτού.
2. Η SDAS είναι ενδεικτική του τοπικού χρόνου στερεοποίησης. Παρατηρείται πως στην περιοχή της μεγάλης διατομής του χυτού, μεγαλύτερη SDAS παρουσιάζει το τεμάχιο από χύτευση κενού, υποδηλώνοντας αυξημένο τοπικό χρόνο στερεοποίησης. Ακολουθεί το τεμάχιο από χύτευση υπερπίεσης-κενού κι έπειτα αυτό της χύτευσης βαρύτητας. Από σύγκριση με τις αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες απόψυξης, υπάρχει συμφωνία αποτελεσμάτων.

Από την **τοποθέτηση θερμοστοιχείων σε διάφορες θέσεις του χυτού:**

1. προκύπτει ξεκάθαρα πως οι καμπύλες απόψυξης στα διάφορα σημεία του χυτού διαφέρουν σημαντικά. Παρόλο που η μελετούμενη γεωμετρία είναι μικρών διαστάσεων, τα ανομοιόμορφα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χυτού είναι ικανά να προκαλέσουν διαφορές στον τρόπο στερεοποίησης.
2. Πέρα από τις καμπύλες απόψυξης εντός του χυτού, οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας στη μάζα του καλουπιού είναι μία πληροφορία απαραίτητη για την αριθμητική προσομοίωση.

Σχετικά με τη **μέτρηση του πορώδους** για χυτά που έχουν χυτευθεί με την ίδια αρχική θερμοκρασία μετάλλου και την ίδια θερμοκρασία καλουπιού, αλλά κάτω από διαφορετικές συνθήκες πίεσης, προέκυψε ότι:

1. Στη χύτευση κενού, υπάρχει σχετικά ομοιόμορφη κατανομή πορώδους στη μάζα του χυτού και το πορώδες είναι λιγότερο από ότι σε όλες τις άλλες περιπτώσεις
2. Η χύτευση βαρύτητας είναι συνολικά η δυσμενέστερη περίπτωση χύτευσης όσον αφορά στην εμφάνιση πόρων, αλλά το πορώδες είναι επίσης ομοιόμορφα κατανεμημένο στη μάζα του χυτού
3. Στη χύτευση με υπερπίεση έχουμε αρκετά μικρότερα ποσοστά πορώδους από ότι στη χύτευση βαρύτητας στη μεσαία και τη μεγάλη διάμετρο. Παρατηρείται, όμως, έντονο πρόβλημα πορώδους στη μικρή διάμετρο, πράγμα που δικαιολογείται από τη μεγάλη ταχύτητα πλήρωσης λόγω της υπερπίεσης, που προκαλεί τύρβη και ως εκ τούτου, αέρια εγκλείσματα.

4. Η χύτευση κενού-υπερπίεσης μειώνει σημαντικά τον αριθμό και το μέγεθος των ακαθαρσιών που είναι κατανομημένες σε όλη τη μάζα του χυτού, αλλά υπάρχουν κάποιες ακαθαρσίες, εντοπισμένες σε συγκεκριμένα σημεία.
5. Στις μικρές διατομές των χυτών, παρατηρείται έντονο πρόβλημα εμφάνισης πόρων κατά τη χύτευση κενού με χρήση υπερπίεσης. Στο συγκεκριμένο σημείο, είναι η μόνη περίπτωση που η χύτευση βαρύτητας φαίνεται να έχει καλύτερα αποτελέσματα. Η εφαρμογή υπερπίεσης καταλήγει σε δημιουργία πόρων ομοιόμορφα κατανομημένων, σχετικά μεγάλου μεγέθους. Η χύτευση κενού είναι αυτή που έχει τη μικρότερη μέση τιμή μεγέθους πόρων αλλά και τη μικρότερη μέγιστη τιμή πόρου, σε μικρές διατομές.
6. Στις μεγάλες διατομές η εικόνα είναι διαφορετική. Η καλύτερη περίπτωση ως προς την κατά μέσο όρο εμφάνιση πόρων είναι η περίπτωση της χύτευσης με χρήση υπερπίεσης.
7. Στις ακμές της μεσαίας και μεγάλης διατομής, παρατηρείται η πιο έντονη εμφάνιση πόρων στη χύτευση με υπερπίεση, έναντι της χύτευσης κενού. Αντίθετα, στα κέντρα των διατομών αυτών, η χύτευση υπερπίεσης υπερτερεί σημαντικά της χύτευσης κενού.
8. Γενικά, συνολικά εξετάζοντας το τεμάχιο και στα πέντε σημεία που μελετήθηκαν, τις λιγότερες αυξομειώσεις ποσοστού πορώδους τις έχει η χύτευση κενού. Υπερτερεί έναντι των άλλων δύο μεθόδων στις περιοχές που είναι επίφοβες (ακμές και μικρές διατομές).

Η σελίδα αυτή έχει αφεθεί σκοπίμως κενή.

Κεφάλαιο 4^ο

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η σελίδα αυτή έχει αφεθεί σκοπίμως κενή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Περιγραφή Κεφαλαίου

Η αριθμητική προσομοίωση της χύτευσης αποτελεί αναγκαίο εργαλείο για την πρόβλεψη της ποιότητας του παραγόμενου χυτού. Με χρήση αριθμητικής προσομοίωσης, μπορεί να δοκιμαστεί πλήθος σεναρίων χύτευσης που αφορούν το σχεδιασμό τροφοδοσίας, το συνδυασμό των παραμέτρων κατεργασίας και τα υλικά τήγματος και καλουπιού για την πρόβλεψη ατελειών ή και τη βελτίωση της αποδοτικότητας της μεθόδου, με αποφυγή διεξαγωγής μεγάλου πλήθους πειραμάτων.

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία αριθμητικής προσομοίωσης της χύτευσης με χρήση του εμπορικά διαθέσιμου πακέτου προσομοίωσης χύτευσης ProCAST 2004.1[®], το οποίο βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Αρχικά, παρουσιάζεται το λογισμικό προσομοίωσης και τα φαινόμενα που μοντελοποιούνται. Στη συνέχεια, παρατίθενται οι απαιτούμενες παράμετροι εισόδου.

Κατόπιν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διερεύνησης της επίδρασης των βασικότερων παραμέτρων εισόδου της προσομοίωσης, στα αποτελέσματα της προσομοίωσης (καμπύλες απόψυξης, πορώδες, σχηματιζόμενο κενό).

Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιήθηκε για το χυτό που αποτέλεσε τη βασική γεωμετρία που μελετήθηκε (Σχήμα 2.38, σελ. 116). Πρακτικά, γίνεται πειραματισμός με το μοντέλο για ακραίες ή χαρακτηριστικές τιμές των παραμέτρων. Από παρατήρηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, δίνεται απάντηση στο ερώτημα του κατά πόσο κρίσιμη είναι η ακριβής γνώση μίας παραμέτρου.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται αντίστοιχης φιλοσοφίας διερεύνηση για την επίδραση της τιμής του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας (ΣΜΘ) στις καμπύλες απόψυξης δύο χυτών απλής γεωμετρίας. Στη μία περίπτωση χρησιμοποιείται μοντελοποίηση με χρήση ενιαίου ΣΜΘ σε όλο το χυτό, ενώ στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται μοντελοποίηση με διαφορετικό ΣΜΘ στις περιοχές διαφορετικής γεωμετρίας.

Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης για σενάρια χύτευσης με συνθήκες ίδιες με κάποιες εκ των πειραμάτων του Κεφαλαίου 3.

Κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων, ελήφθησαν μετρήσεις θερμοκρασίας. Οι μετρήσεις (Κεφάλαιο 3) έδωσαν πληροφορίες σχετικά με τις οριακές και τις αρχικές συνθήκες της κάθε περίπτωσης προσομοίωσης. Ειδικά για τις

τιμές του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας (ΣΜΘ), οι τιμές που χρησιμοποιούνται είναι αυτές που υπολογίζονται στο Κεφάλαιο 5, με βάση συνδυασμό πειραματικών μετρήσεων και προσομοιώσεων.

Από τις προσομοιώσεις αυτές προκύπτουν αποτελέσματα που συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά. Επιπλέον, φαίνεται η επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας στο χυτό προϊόν, με βάση την αριθμητική προσομοίωση.

4.2 Εισαγωγή - Προσομοίωση της Χύτευσης

Ο λόγος για τον οποίο γίνεται προσομοίωση μιας οποιασδήποτε κατεργασίας είναι η μοντελοποίηση των φυσικών νόμων ώστε οι σημαντικές μεταβλητές της κατεργασίας να μπορούν να αναγνωρίζονται και να ελέγχονται, πράγμα που συνεπάγεται σημαντικά πλεονεκτήματα. Ο απώτερος στόχος της προσομοίωσης της χύτευσης είναι να προταθούν κάποιες συγκεκριμένες τιμές για τις παραμέτρους της κατεργασίας, που θα έχουν σαν αποτέλεσμα την βέλτιστη δυνατή ποιότητα χυτού, με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Τα χυτήρια χρησιμοποιούν ολοένα και περισσότερο προγράμματα αριθμητικής προσομοίωσης σε υπολογιστή για να βελτιώσουν τη διαδικασία της χύτευσης. Τα τελευταία χρόνια η εφαρμογή και χρήση από τις βιομηχανίες εμπορικά διαθέσιμων πακέτων προσομοίωσης έχει γίνει αποδεκτή ευρέως, και έχει εγκαταλειφθεί πλέον η λογική ότι η χρήση τέτοιων εργαλείων είναι πολυτέλεια [Marques 2001]. Η προσομοίωση της χύτευσης μειώνει τον χρόνο ανάμεσα στο στάδιο σύλληψης και σχεδιασμού και στο στάδιο της παραγωγής, στον κύκλο παραγωγής του τεμαχίου [Shamasundar et al. 2004]. Η ικανότητα παραγωγής χυτών υψηλής ποιότητας με τη μέθοδο της χύτευσης ακριβείας, αλλά ταυτόχρονα με χαμηλό κόστος και σε μικρούς χρόνους είναι η πρόκληση που αντιμετωπίζει η βιομηχανία χύτευσης σήμερα [Calba & Lefebvre 2005]. Τεμάχια όλο και πιο σύνθετα, και από υλικά όλο και πιο δύσκολα στη χύτευση, παράγονται με την χύτευση ακριβείας.

Τα πεδία στα οποία εφαρμόζεται η προσομοίωση με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή τα τελευταία χρόνια είναι [Shamasundar et al. 2004]:

- ο σχεδιασμός νέων τεμαχίων, όπου η προσομοίωση σε υπολογιστή χρησιμοποιείται σαν εικονική μονάδα χύτευσης για να ελεγχθεί η εγκυρότητα του σχεδιασμού τροφοδοσίας και της διάταξης χύτευσης γενικότερα
- ο ανασχεδιασμός των υπάρχοντων προϊόντων και διαδικασιών χύτευσης με στόχο την εξάλειψη των ατελειών και του ποσοστού απόρριψης χυτών
- η βελτίωση της απόδοσης της κατεργασίας με μείωση του άχρηστου μετάλλου και των σκάρτων τεμαχίων [Shamasundar et al. 2004; Calba & Lefebvre 2005]. Ειδικότερα, η προσομοίωση χρησιμοποιείται σαν εργαλείο για
 - διεξαγωγή μεγάλου αριθμού πειραμάτων χωρίς να χρειάζεται να χρησιμοποιούνται καινούρια εργαλεία, πρότυπα, να γίνεται κανονική έγχυση μετάλλου και να παράγονται αληθινά τεμάχια.
 - καθορισμό των ασφαλών παραμέτρων λειτουργίας για επίτευξη της επιθυμητής ποιότητας.

Τα προγράμματα αριθμητικής προσομοίωσης αποτελούν μεν ένα σημαντικό εργαλείο, ωστόσο κάθε φορά υπάρχουν κρίσιμα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπίζονται ώστε να επιτυγχάνονται ρεαλιστικά αποτελέσματα. Αρχικά, η αριθμητική προσομοίωση της χύτευσης χρησιμοποιείται στη λογική της δοκιμής-και-σφάλματος (trial-and-error), συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα.

Συνοψίζοντας, τα επαναλαμβανόμενα πειράματα που γίνονταν προκειμένου να βρεθούν καλές ή και «βέλτιστες» τιμές των παραμέτρων χύτευσης τώρα μειώνονται σημαντικά, και χρησιμοποιούνται μόνο στα αρχικά στάδια, για έλεγχο της αξιοπιστίας των μοντέλων προσομοίωσης.

4.3 Προσομοίωση της Χύτευσης με το ProCAST

4.3.1 Τι είναι το ProCAST

Το λογισμικό προσομοίωσης της χύτευσης που χρησιμοποιήθηκε είναι το ProCAST 2004.1[®].

Το ProCAST είναι λογισμικό που αναπτύσσεται συνεχώς τα τελευταία 20 χρόνια περίπου και χρησιμοποιεί τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων για τη μοντελοποίηση διαδικασιών χύτευσης και των φαινομένων που τις καθορίζουν. Πιο συγκεκριμένα είναι δυνατή η προσομοίωση του μηχανισμού μετάδοσης θερμότητας, της ροής του ρευστού, του τρόπου πλήρωσης του καλουπιού καθώς και στοιχείων της μικροδομής του χυτού, όπως το πορώδες και οι εσωτερικές (παραμένουσες) τάσεις.

Η δομή του προγράμματος είναι αρθρωτή και περιλαμβάνει τα ακόλουθα τμήματα (modules):

- MeshCast: Σχεδιαστικό περιβάλλον. Δημιουργία γεωμετρίας και πλέγματος.
- PreCast: Προ-επεξεργαστής. Ορισμός υλικών, οριακές και συνοριακές συνθήκες, επιλογή παραμέτρων και αλγορίθμων επίλυσης.
- DataCast: Έλεγχος της ορθότητας του μοντέλου.
- ProCast: Επιλύτης. Διεξαγωγή προσομοίωσης.
- ViewCast: Μετα-επεξεργαστής. Εποπτεία αποτελεσμάτων.

Πιο αναλυτικά για την έκδοση 2004.1 του ProCAST που χρησιμοποιήθηκε, τα τμήματα περιγράφονται ως εξής:

MeshCast: Στο module αυτό γίνεται ορισμός της γεωμετρίας του χυτού καθώς και του καλουπιού του. Σε εφαρμογές απλής γεωμετρίας συνηθίζεται η σχεδίαση στο MeshCast ενώ για πιο σύνθετες μορφές η σχεδίαση ενδείκνυται να γίνεται σε εξωτερικό πρόγραμμα CAD και τα σχετικά αρχεία να εισάγονται στο MeshCast για διορθώσεις και πλεγματοποίηση. Σε κάθε περίπτωση, το μοντέλο ελέγχεται για την ύπαρξη σφαλμάτων στο πλήθος των σχηματισμένων επιφανειών και ακμών σύμφωνα με την προκαθορισμένη ακρίβεια.

Αφού ολοκληρωθούν τα παραπάνω βήματα ορίζονται τα επιφανειακά πλέγματα με την επιθυμητή πυκνότητα καθώς και τα ογκικά πλέγματα σε άλλη λειτουργία του MeshCast. Πρέπει να σημειωθεί πως ο αριθμός των τετράεδρων που ορίζουν ένα πλέγμα δεν πρέπει να είναι υπερβολικά μεγάλος καθώς επηρεάζει την ταχύτητα και την ακρίβεια των υπολογισμών.

PreCast: Στο υποπρόγραμμα PreCast ορίζονται τα υλικά χυτού και καλουπιού, οι αρχικές συνθήκες, οι συνοριακές συνθήκες και οι παράμετροι εκτέλεσης. Όλα αυτά τα στοιχεία προέρχονται από τις βάσεις δεδομένων του ProCAST που έχουν δημιουργηθεί βάσει πειραματικών διαδικασιών.

Η διαδικασία της προ-επεξεργασία έχει ως εξής:

Αρχικά γίνεται επανέλεγχος της γεωμετρίας του μοντέλου και ορίζεται το κατάλληλο υλικό για το χυτό (χάλυβας, αλουμίνιο, μπρούντζος κτλ) και το καλούπι (άμμος, γύψος κτλ). Για κάθε υλικό που επιλέγεται από τη βάση δεδομένων προσδιορίζονται αναλυτικά με πίνακες και βαθμωτά μεγέθη οι θερμικές, χημικές και μηχανικές του ιδιότητες. Επιπλέον μπορεί ο χρήστης να ορίσει νέο υλικό με τις επιθυμητές ιδιότητες.

Ακολουθεί ο ορισμός του διανύσματος βαρύτητας σε οποιονδήποτε από τους τρεις κύριους άξονες και η εισαγωγή των αρχικών και συνοριακών συνθηκών, πχ πίεση χυτού, καλουπιού, διεπιφάνειας, θερμοκρασία. Έπειτα καθορίζονται οι παραμέτροι εκτέλεσης οι οποίες καθορίζουν το συνολικό χρόνο προσομοίωσης, τον αριθμό των βημάτων, τον υπολογισμό πορώδους καθώς και τον τρόπο πλήρωσης του καλουπιού και τον τρόπο επίλυσης του ροϊκού προβλήματος. Στη συνέχεια εκτελείται το τμήμα DataCast.

DataCast: Σκοπός του DataCast είναι η συνολική επισκόπηση του μοντέλου, ο εκτεταμένος έλεγχος σφαλμάτων και η μετατροπή όλων των μονάδων στο πρότυπο CGS. Κατά την εκτέλεση του εμφανίζει στο παράθυρο ελέγχου την πιθανή ύπαρξη ελαττωμάτων, τα οποία πρέπει να διορθωθούν για να συνεχιστεί η διαδικασία της προσομοίωσης. Μια ακόμα λειτουργία του DataCast είναι η δημιουργία αρχείων που περιέχουν την περίληψη του προβλήματος και τη γεωμετρία με τις ιδιότητες του μοντέλου.

ProCast: Στο τμήμα αυτό γίνονται όλοι οι υπολογισμοί της διαδικασίας της προσομοίωσης, σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουν ορισθεί στα προηγούμενα τμήματα. Επίσης γίνεται η επίλυση του θερμικού και ροϊκού προβλήματος και δημιουργούνται αρχεία αναγνωρίσιμα από το ViewCast. Στο παράθυρο ελέγχου που ανοίγεται φαίνεται αν εκτελείται η διαδικασία και μόλις ολοκληρωθεί εμφανίζει το ανάλογο μήνυμα.

ViewCast: Στο ViewCast πραγματοποιείται η απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων γίνεται είτε με εικόνες, σταδιακά, ανάλογα με τον αριθμό των εκτελεσμένων βημάτων, είτε με γραφικές παραστάσεις. Οι υπολογισμοί αφορούν τα εξής μεγέθη:

- θερμοκρασία
- ποσοστό στερεοποίησης
- χρόνο στερεοποίησης
- ποσοστό πορώδους
- συνισταμένη ταχύτητα του ρευστού μετάλλου

Status: Υπάρχει δυνατότητα παρακολούθησης της εξέλιξης της πλήρωσης και της στερεοποίησης, με το χρόνο και τον αριθμό των βημάτων προσομοίωσης.

4.3.2 Παράμετροι Εισόδου (Inputs)

Αφού κατασκευαστεί η γεωμετρία και το πλέγμα των αντικειμένων που συμμετέχουν στη χύτευση, ο χρήστης θα πρέπει να ορίσει το πρόβλημα. Ο ορισμός του προβλήματος χύτευσης γίνεται με τον ορισμό των Παραμέτρων Εισόδου (Inputs) στον προ-επεξεργαστή του λογισμικού προσομοίωσης, το ProCAST. Ο τρόπος που θα μοντελοποιηθεί το πρόβλημα είναι καθοριστικός για το αποτέλεσμα. Είναι προφανές πως ορθός ορισμός του προβλήματος χύτευσης θα καταλήξει σε ρεαλιστικά αποτελέσματα, ενώ ατυχής ορισμός του προβλήματος θα καταλήξει σε μοντελοποίηση λάθος φαινομένων και συνεπώς, σε αποτυχία.

Το ProCAST, όπως και τα παρόμοια λογισμικά προσομοίωσης της χύτευσης, δίνουν ένα μεγάλο πλήθος δυνατοτήτων στο χρήστη, προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες των πολλών και διαφορετικών προβλημάτων χύτευσης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότερες από τις παραμέτρους εισόδου. Οι παράμετροι αυτές είναι που χρησιμοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο στις μοντελοποιήσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή.

1. ΥΛΙΚΑ – ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ (MATERIAL PROPERTIES)

Οι ιδιότητες των υλικών που πρέπει (ή μπορούν) να οριστούν για την προσομοίωση της χύτευσης είναι οι ακόλουθες:

A. Τύπος Υλικού

Ο αριθμός των διαφορετικών υλικών που θα αναγνωρίσει το ProCAST εξαρτάται από τον τρόπο που θα κατασκευαστεί η γεωμετρία και το πλέγμα. Ένα πρώτο βήμα είναι να οριστεί από το χρήστη ο τύπος του υλικού που αντιπροσωπεύει η κάθε ξεχωριστή γεωμετρική οντότητα. Οι επιλογές που υπάρχουν είναι: καλούπι, χυτό, φίλτρο, αφρώδες πολυμερές, μόνωση, πυρήνας, προσεπιχώνευμα ή εξώθερμο περίβλημα.

Στη συνέχεια, θα πρέπει να οριστεί εάν η περιοχή που καταλαμβάνει το κάθε υλικό είναι (τουλάχιστον κατά την έναρξη της χύτευσης) άδεια ή όχι. Για παράδειγμα, η περιοχή που περιγράφει ένα καλούπι είναι προφανώς γεμάτη, ενώ η περιοχή του χυτού θα πρέπει να οριστεί ως άδεια εάν πρόκειται να επιλυθεί το πρόβλημα πλήρωσης του τύπου (ροϊκό πρόβλημα).

B. Θερμικές Ιδιότητες:

- *Θερμική Αγωγιμότητα (thermal conductivity)*

Η θερμική αγωγιμότητα, k , είναι η ιδιότητα ενός υλικού που δείχνει την ικανότητά του να άγει θερμότητα. Οι μονάδες της είναι: W/mK . Στο ProCAST, η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να οριστεί είτε ως σταθερά, είτε συναρτήσει της θερμοκρασίας. Παρατηρώντας τα υλικά της βάσης δεδομένων του ProCAST, φαίνεται πως η θερμική αγωγιμότητα είναι ένα μέγεθος που

παίρνει σημαντικά διαφορετικές τιμές σε υψηλές θερμοκρασίες από ό,τι στις χαμηλές. Η μετάβαση από την περιοχή χαμηλών τιμών στην περιοχή υψηλών τιμών γίνεται κατά τη στερεοποίηση, δηλαδή σε θερμοκρασίες μεταξύ Liquidus και Solidus.

- Πυκνότητα (*density*)

Ο ορισμός της πυκνότητας $\rho(1\text{kg}/\text{m}^3)$ είναι απαραίτητος για την προσομοίωση. Όμοια με πριν, το ProCAST δίνει τη δυνατότητα ορισμού της πυκνότητας ως σταθεράς ποσότητας, αλλά είναι ρεαλιστικότερος ο ορισμός της πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας.

- Ειδική θερμότητα (*specific heat*)

Η ειδική θερμότητα (c_p), με μονάδες, $\text{kJ}/\text{kg}/\text{K}$ είναι το ποσό θερμότητας ανά μονάδα μάζας που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία κατά έναν βαθμό Κελσίου. Η σχέση αυτή παύει να ισχύει στην περίπτωση αλλαγής φάσης, αφού κατά τη διαδικασία αυτή, η θερμότητα που προστίθεται ή αφαιρείται δεν μεταβάλλει τη θερμοκρασία.

Στο ProCAST υπάρχουν δύο τρόποι εισαγωγής των δεδομένων των υλικών, ώστε να ορίζεται πλήρως η αλλαγή της φάσης:

1ος τρόπος: Πρέπει να ορίζεται η ειδική θερμότητα (c_p) και η λανθάνουσα θερμότητα (L) του υλικού.

2ος τρόπος: Πρέπει να ορίζεται η ενθαλπία (H) του υλικού.

Τα αναφερθέντα μεγέθη συνδέονται μεταξύ τους μέσω της εξίσωσης:

$$H(T) = \int_0^T c_p(T) dT + L(1 - f_s) \quad (4.1)$$

με T και f_s να είναι η θερμοκρασία και το ποσοστό στερεοποίησης, τη δεδομένη χρονική στιγμή του υπολογισμού.

Το ProCAST εκτελεί έλεγχο συμβατότητας των δεδομένων που εισάγει ο χρήστης. Συνεπώς, η γνώση της ειδικής θερμότητας δεν είναι απαραίτητη για τη διεξαγωγή προσομοίωσης, παρά μόνο στην περίπτωση που δεν έχει οριστεί η ενθαλπία. Η ειδική θερμότητα μπορεί να οριστεί είτε ως σταθερά είτε ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.

- Λανθάνουσα θερμότητα (*Latent heat*)

Η λανθάνουσα θερμότητα πρέπει να οριστεί απαιτητικώς σε συνδυασμό με την ειδική θερμότητα, στην περίπτωση που δεν ορίζεται η ενθαλπία του υλικού. Οι μονάδες της είναι kJ/kg και είναι σταθερό μέγεθος.

- Ενθαλπία (*enthalpy*)

Η ενθαλπία ενός υλικού ορίζεται στο ProCAST ως συνάρτηση της θερμοκρασίας $H(T)$. Είναι απαραίτητη για τη μοντελοποίηση της αλλαγής

φάσης του υλικού, στην περίπτωση που δεν είναι γνωστά τα c_p και L , όπως ήδη αναφέρθηκε. Μονάδες της ενθαλπίας είναι kJ/kg.

- *Θερμοκρασίες Liquidus - Solidus*

Οι περιοχές διαχωρισμού των φάσεων οριοθετούνται από τις θερμοκρασίες Liquidus και Solidus.

C. Ροϊκές Ιδιότητες:

- *Ιξώδες (viscosity)*

Λόγω του ιξώδους δημιουργούνται διατμητικές τάσεις σε ένα κινούμενο ρευστό και αναπτύσσονται απώλειες. Μονάδες του ιξώδους: centipoises (1cP). Το ιξώδες δίνεται συναρτήσει της θερμοκρασίας, αλλά υπάρχει δυνατότητα να θεωρηθεί σταθερό.

- *Διαπερατότητα (permeability)*

Η διαπερατότητα μπορεί να οριστεί για το υλικό του καλουπιού (για χυτεύσεις όπως η lost foam casting), αλλά και για το υλικό του χυτού (για θερμοκρασίες μόνο ανάμεσα στη Liquidus και τη Solidus).

D. Μηχανικές Ιδιότητες:

Στην περίπτωση επίλυσης του μηχανικού προβλήματος των μοντελοποιήσεων της παρούσας διατριβής, οι ιδιότητες που ορίστηκαν ήταν το *Young's Modulus*, ο *Λόγος Poisson* και ο *Συντελεστής Θερμικής Διαστολής*. Οι ιδιότητες αυτές ορίστηκαν ως συναρτήσεις της θερμοκρασίας.

2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ (INTERFACES)

Όταν υπάρχουν στο μοντέλο διαφορετικές γεωμετρικές περιοχές, θα πρέπει να ορίζεται από το χρήστη ο τρόπος που η πληροφορία θα μεταδίδεται από τη μία περιοχή στην άλλη.

Υπάρχουν τρεις επιλογές:

- *Θεώρηση Κοινού Πλέγματος (Equivalent Mesh)*

Σύμφωνα με τη θεώρηση αυτή, οι δύο περιοχές μοιράζονται τους κόμβους της διεπιφάνειας, πράγμα που σημαίνει πως δεν υπάρχει ουσιαστική διάκριση μεταξύ των δύο περιοχών. Με ένα τέτοιο πλέγμα εξασφαλίζεται συνέχεια του θερμοκρασιακού προφίλ στη διεπιφάνεια των δύο περιοχών και συνέχεια στο πεδίο των ταχυτήτων.

Ένα παράδειγμα χρήσης της συγκεκριμένης επιλογής είναι για τον ορισμό της συνθήκης διεπιφάνειας μεταξύ δύο περιοχών του ίδιου χυτού. Οι λόγοι για τους οποίους ένα χυτό μπορεί να αποτελείται από περισσότερες περιοχές, είναι διάφοροι, όπως: (α) να έχει πραγματοποιηθεί κατασκευή περιοχών με διαφορετική πυκνότητα πλέγματος, (β) να είναι επιθυμητή η απόδοση διαφορετικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας μεταξύ της 1^{ης} περιοχής και του καλουπιού, από ό,τι μεταξύ της 2^{ης} περιοχής και του καλουπιού (βλ. επόμενη θεώρηση) και (γ) καθαρά τεχνικοί λόγοι κατά την

κατασκευή της γεωμετρίας, όπως γεωμετρίες που κατασκευάζονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ή με διαφορετικά λογισμικά σχεδίασης.

- *Θεώρηση Συμπίπτοντος Πλέγματος (Coincident Mesh)*

Στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο διαφορετικών υλικών, όπως είναι η διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού, υπάρχει συνήθως μία θερμοκρασιακή πτώση. Σε αυτή την περίπτωση, οι κόμβοι στη διεπιφάνεια θα πρέπει να διπλασιάζονται προς δημιουργία ανεξάρτητου αλλά συμπίπτοντος πλέγματος, ώστε να υπάρχει διάκριση της τιμής της θερμοκρασίας

Ο τρόπος που μεταδίδεται η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια (εν προκειμένω, από το χυτό στο καλούπι) ορίζεται από το λεγόμενο «Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας στη Διεπιφάνεια» (ΣΜΘ) (Interfacial Heat Transfer Coefficient). Το μέγεθος αυτό περιγράφηκε στην §1.9, σελ. 55. Το PreCAST δίνει τη δυνατότητα να οριστεί ο ΣΜΘ ως σταθερή τιμή ή ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ή ως συνάρτηση του χρόνου.

- *Θεώρηση Μη-Συμπίπτοντος Πλέγματος (Non-Coincident Mesh)*

Τέλος, υπάρχει περίπτωση δύο διαφορετικές περιοχές να γειτνιάζουν γεωμετρικά, αλλά να μην επικοινωνούν. Σε αυτή την περίπτωση είναι επιθυμητό οι δύο περιοχές να μην μοιράζονται τους ίδιους κόμβους και να έχουν ανεξάρτητα και μη συμπίπτοντα πλέγματα.

3. ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (BOUNDARY CONDITIONS)

- *Θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού*, δηλαδή θερμοκρασία καλουπιού κατά την είσοδο του τήγματος. Η σημασία ορισμού της είναι προφανής. Χρειάζεται ωστόσο προσοχή στον τρόπο ορισμού. Για παράδειγμα, αν δεν οριστεί σαν οριακή συνθήκη, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι δίνεται η θερμοκρασία του καλουπιού μόνο στην εξωτερική επιφάνεια και όχι σε όλο τον όγκο του καλουπιού. Αντίθετα, αν ορισθεί σαν αρχική συνθήκη θεωρείται ότι όλος ο όγκος του καλουπιού έχει αυτή την θερμοκρασία, όπως είναι επιθυμητό.
- *Αρχική θερμοκρασία του τήγματος* είναι η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται ο θάλαμος τήξης της μηχανής χύτευσης.
- *Πίεση στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική κοιλότητα του καλουπιού*: Είναι τιμή που αναγράφεται στο μανόμετρο της χυτόπρεσας κατά το άνοιγμα της θάλας κενού (αν πρόκειται για χύτευση κενού).
- *Παροχή μάζας ρευστού μετάλλου (Inlet, Flow rate)*: Ορίζεται προσεγγιστικά και βασίζεται στη μάζα [kg] του μετάλλου που εισάγεται (γνωστό) και στο χρόνο (sec) που απαιτείται για να γεμίσει το καλούπι, και ο οποίος μετράται.

4. ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (INITIAL CONDITIONS)

Για το κάθε υλικό του χυτού πρέπει να ορίζεται η αρχική του θερμοκρασία.

Για το καλούπι, η αρχική θερμοκρασία ορίζεται για ολόκληρη τη μάζα του καλουπιού και μπορεί να θεωρηθεί η ίδια σε όλη τη μάζα του, εάν η προθέρμανσή του έχει διαρκέσει επαρκή ώρα για επίτευξη ομοιογενούς θερμοκρασίας και δεν έχει μεσολαβήσει χρόνος μέχρι την έναρξη της χύτευσης. Εναλλακτικά, υπάρχει δυνατότητα να οριστεί η αρχική συνθήκη ως κατανομή θερμοκρασιών στη μάζα του καλουπιού.

Για το χυτό, εάν έχει μετρηθεί η θερμοκρασία του χυτού, η πρώτη μέγιστη μέτρηση μπορεί να οριστεί ως αρχική συνθήκη, στην περίπτωση που η επίλυση του προβλήματος ξεκινά με το καλούπι γεμάτο με τήγμα. Εάν, όμως, η προσομοίωση πρόκειται να περιλαμβάνει επίλυση του ροϊκού προβλήματος (πλήρωση καλουπιού), η αρχική συνθήκη είναι ορθότερο να μην οριστεί καθόλου, καθώς θεωρείται πως το καλούπι είναι άδειο κατά την έναρξη της επίλυσης.

5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στη συνέχεια, πρέπει να οριστούν κάποιες παράμετροι που αφορούν στην κατεργασία και δεν είχαν αναφερθεί νωρίτερα (όπως πχ η ταχύτητα περιστροφής στην περίπτωση φυγοκεντρικής χύτευσης). Στην περίπτωση που μελετάται, η μόνη παράμετρος που ορίζεται μέσω του συγκεκριμένου περιβάλλοντος είναι η κατεύθυνση του διανύσματος βαρύτητας. Αυτό είναι αναγκαίο, ώστε να αντιληφθεί το λογισμικό την κατεύθυνση της βαρύτητας σε σχέση με τη γεωμετρία και να μπορεί να γίνει επιτυχώς η επίλυση του θερμικού και του ροϊκού προβλήματος.

6. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (Run Parameters)

Τέλος, είναι αναγκαίο να οριστούν κάποιες επιπρόσθετες επιλογές της προσομοίωσης. Τα κριτήρια τερματισμού της προσομοίωσης ορίζονται στο σημείο αυτό και αυτά μπορεί να είναι ο αριθμός των βημάτων, η χρονική διάρκεια της χύτευσης ή η επίτευξη κάποιας θερμοκρασίας. Επίσης, υπάρχουν παράμετροι που έχουν να κάνουν με τους αλγόριθμους που θα χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του προβλήματος χύτευσης. Για παράδειγμα, η ενεργοποίηση του μηχανικού προβλήματος γίνεται σε αυτό το σημείο. Επίσης, για παράδειγμα, μπορεί να ενεργοποιηθεί ο αλγόριθμος που λαμβάνει υπόψη του τα εγκλωβισμένα στο τήγμα αέρια (entrapped gases). Τέλος, υπάρχουν παράμετροι όπως το ποσοστό πλήρωσης του καλουπιού (LVSURF), η τριβή μεταξύ τήγματος και τοιχώματος, η παράμετρος της προσομοίωσης COURANT κλπ.

4.3.3 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης

Στη συνέχεια, εξετάζονται τα μεγέθη που προκύπτουν από το λογισμικό προσομοίωσης της χύτευσης, τα οποία και καλείται ο μελετητής να αξιολογήσει, συγκρίνοντας τα με τα πειραματικά αποτελέσματα, καθώς και να τα αξιοποιήσει. Τα μεγέθη αυτά είναι:

1. Θερμοκρασία, και συγκεκριμένα, η μεταβολή της θερμοκρασίας χυτού από την είσοδο του τήγματος μέχρι τη χρονική στιγμή που επιλέγεται σαν τελική. Χαράσσονται διαγράμματα θερμοκρασίας - χρόνου ($T - t$), που ονομάζονται καμπύλες απόψυξης (cooling curves).

Οι καμπύλες αυτές είναι σημαντικές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή αρκετών συμπερασμάτων.

- Συγκρίνοντας τις καμπύλες ψύξης που προκύπτουν από αριθμητική προσομοίωση με τις αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες, μπορεί κανείς να αποφανθεί για την επιτυχία ή μη της προσομοίωσης.
 - Συγκρίνοντας τις καμπύλες στα διαφορετικά σημεία του χυτού μεταξύ τους, μπορούν να βγουν συμπεράσματα, λαμβάνοντας υπόψη ότι: μεγαλύτερη κλίση της καμπύλης σημαίνει μεγαλύτερο ρυθμό απόψυξης, το οποίο συνεπάγεται πιο λεπτόκοκκη δομή.
2. Στερεοποίηση (Χρόνος Στερεοποίησης) Ένας πρώτος έλεγχος των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει στη βάση του ότι ο χρόνος στερεοποίησης αναμένεται να είναι μεγαλύτερος στο χυτό και μικρότερος πλησιάζοντας στη βάση του δέντρου. Η στερεοποίηση ξεκινάει από τις λεπτότερες διατομές και συνεχίζει στις μεγαλύτερες. Από εκεί και πέρα η τιμή του χρόνου στερεοποίησης είναι βασική παράμετρος που μελετάται.
 3. Πορώδες λόγω συρρίκνωσης (Shrinkage Porosity) Γίνεται σύγκριση της προσομοίωσης με τα αποτελέσματα της μεταλλογραφικής εξέτασης.
 4. Μέτρο ταχύτητας τήγματος καθώς αυτό εισέρχεται στο καλούπι. Ελέγχεται το κατά πόσο αυτή είναι ομαλή. Μπορούν να ληφθούν γραφικές παραστάσεις του μέτρου της ταχύτητας σε συγκεκριμένο σημείο (velocity - time), και να ελεγχθεί αν οι τιμές αυτές μπορούν να προκαλέσουν τύρβη (αν εμφανίζεται μεγάλος αριθμός Reynolds).
 5. Ποσοστό στερεοποίησης (Fraction Solid) σε κάθε χρονικό βήμα. Χρησιμεύει για την παρακολούθηση της εξέλιξης της στερεοποίησης σε κάθε σημείο του χυτού.
 6. Κατανομή Πίεσης. Παρατηρώντας την κατανομή της πίεσης εντοπίζονται οι περιοχές στις οποίες υπάρχει καλή επαφή μεταξύ χυτού-καλουπιού και οι περιοχές στις οποίες χάνεται η επαφή κι έτσι απάγεται θερμότητα λιγότερο έντονα και επιτρέπεται μεγαλύτερη συστολή.
 7. Τάσεις - Παραμορφώσεις. Από την επίλυση του μηχανικού μοντέλου παράλληλα με το θερμικό και το ροϊκό, προκύπτει το δημιουργούμενο χάσμα μεταξύ χυτού-καλουπιού και αποκαλύπτονται, έτσι, οι περιοχές στις οποίες παρατηρείται έντονη συστολή. Η γνώση του μεγέθους των παραμενουσών τάσεων είναι χρήσιμη για τον προσδιορισμό μηχανικών

ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος, αλλά και για την αποφυγή εμφάνισης ρωγματώσεων κατά τη στερεοποίηση.

4.3.4 Πορώδες

Η εμφάνιση πορώδους οφείλεται κατά κύριο λόγο σε εγκλωβισμένες κοιλότητες ρευστού μετάλλου, που μπορεί κανείς εύκολα να εντοπίσει παρατηρώντας την κατανομή θερμοκρασίας ή το ποσοστό στερεοποίησης σε κάθε σημείο του εσωτερικού του χυτού.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να δοθούν μερικές πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο το Procast διαχειρίζεται/υπολογίζει το πορώδες.

Πορώδες συστολής: Μακροπορώδες - μικροπορώδες

- Το μακροπορώδες αποτελείται από διακενώσεις είτε λείες είτε σπογγώδεις (ανάλογα με τη διαφορά μεταξύ Liquidus και Solidus σε κάθε μέταλλο)[McClain 2002]. Μπορεί να παρατηρηθεί είτε στα τοιχώματα ή την ελεύθερη επιφάνεια του χυτού, είτε σε πλήρως απομονωμένη περιοχή, όχι απαραίτητα στο θερμικό κέντρο του χυτού (“hot spot”) αλλά στα ανώτερο σημείο που θα μπορούσε να ανέλθει λόγω άνωσης.
- Το μικροπορώδες αφορά μια ομοιόμορφη ημίρρευστη ζώνη, που στη μέθοδο χαμένου κεριού και σε άλλες παρόμοιες μεθόδους χύτευσης μπορεί να εμφανιστεί λόγω χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας καλουπιού και λόγω υψηλής αγωγιμότητας του μετάλλου. Η ύπαρξη αυτών των μικροδιακενώσεων στη μάζα του χυτού δεν αποτελεί τόσο σοβαρό ελάττωμα.

Για την ανάλυση του πορώδους σε ένα χυτό, υπάρχουν διάφορες επιλογές:

- Ανάλυση με βάση την κατανομή θερμοκρασίας στο χυτό, διερευνώντας με τομές το εσωτερικό του
- Ανάλυση με βάση το ποσοστό στερεοποίησης σε κάθε σημείο του χυτού, διερευνώντας με τομές το εσωτερικό του
- Ανάλυση με βάση την κατανομή πορώδους (επιλογή “shrinkage porosity”)

Ανάλυση πορώδους

Όταν η παράμετρος POROS έχει τιμή μεγαλύτερη του μηδενός, τότε ενεργοποιείται ο αλγόριθμος υπολογισμού πορώδους. Κατά την επίλυση, ανάλογα με τη θερμοκρασία και το ποσοστό στερεοποίησης σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο, υπολογίζεται η δημιουργία ή μη του πορώδους.

Το αποτέλεσμα του συγκεκριμένου υπολογισμού εμφανίζεται με τη μορφή χρωματικής απεικόνισης, κι έτσι προκύπτει η κατανομή πορώδους στο χυτό. Όταν οι τιμές του υπολογισθέντος πορώδους σε μία περιοχή είναι μικρότερες από την τιμή 0.01 σημαίνει δημιουργία μικροπορώδους, ενώ αν είναι μεγαλύτερες από 0.01 υποδεικνύεται δημιουργία μακροπορώδους.

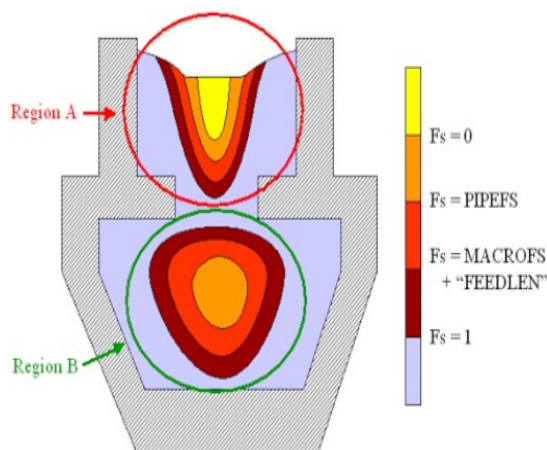
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αναλυτικά η λογική του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία πορώδους.

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί κάποιες παραμέτρους. Στον πίνακα 4.1 δίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις. Οι τιμές των παραμέτρων υποδεικνύονται από το εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού [ESI Group 2004] και έχουν προκύψει από σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με πειραματικά αντίστοιχα, όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία [Couturier & Rappaz 2006], [Couturier 2009].

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικές τιμές των κυριότερων παραμέτρων που καθορίζουν τους αλγόριθμους υπολογισμούς πορώδους.

MACROFS=0.7	κρίσιμη τιμή ποσοστού στερεοποίησης για την έναρξη δημιουργίας πορώδους
PIPEFS=0.3 (για χύτευση βαρύτητας) PIPEFS=0.0 (για LPDC-Low pressure die casting)	κρίσιμη τιμή ποσοστού στερεοποίησης για τη διοχέτευση μετάλλου
FEEDLEN=5.0e-3	η απόσταση στην οποία μπορεί να εμφανιστεί μακροπορώδες πέραν της διεπιφάνειας MACROFS

Όταν το υγρό μέταλλο στερεοποιείται, δημιουργούνται στο χυτό κοιλότητες τήγματος (Σχήμα 4.1), που περικλείονται από περιοχές ημιστερεάς κατάστασης και στη συνέχεια από στερεά περιβλήματα. Συνεπώς, το χυτό χωρίζεται σε «περιοχές» με διαφορετικό ποσοστό στερεοποίησης (fraction solid). Καθώς εξελίσσεται η στερεοποίηση, και ανάλογα πάντα με τη γεωμετρία του χυτού, ο αριθμός των περιοχών με ποσοστό στερεοποίησης κάτω από 1 μπορεί να αυξάνεται ανάλογα με το χρόνο. Μία τέτοια περιοχή είναι δυνατόν να χωριστεί σε περισσότερες, ενώ θα εξαφανιστεί όταν πλέον όλοι οι 'κόμβοι' της θα έχουν στερεοποιηθεί.

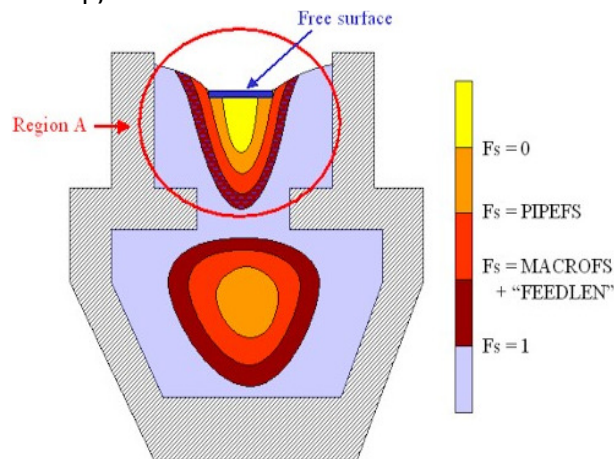


Σχήμα 4.1 Σχηματική αναπαράσταση χυτού σε τομή. Διακρίνονται δύο περιοχές μετάλλου σε υγρή φάση. Η μία (Region A) είναι εκτεθειμένη στον αέρα, ενώ η άλλη (Region B) περιβάλλεται εξ' ολοκλήρου από στερεοποιημένο μέταλλο [ESI Group 2004].

Όταν μια τέτοια περιοχή αποψύχεται, αν η πυκνότητα της αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας (όπως δηλαδή συμβαίνει στα περισσότερα μέταλλα

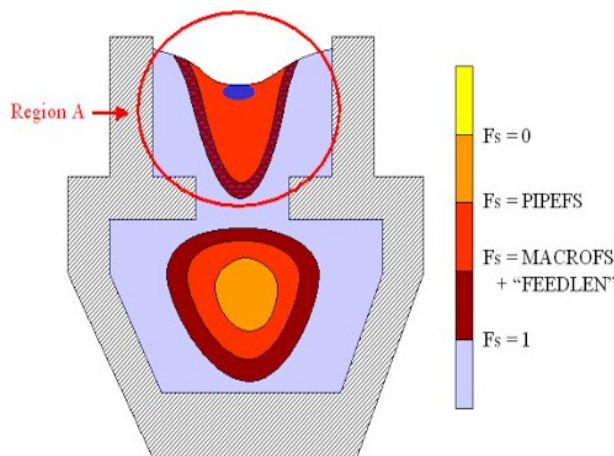
και κράματα), τότε θα παρουσιαστεί κάποια συρρίκνωση. Σε κάθε επόμενο χρονικό βήμα, υπολογίζεται η συσσωρευμένη αυτή συρρίκνωση που παρουσιάζεται σε όλους τους κόμβους με ποσοστό στερεοποίησης ίσο ή μικρότερο του MACROFS, και σε αυτούς που βρίσκονται στη διεπιφάνεια μεταξύ MACROFS και FEEDLEN. Η συρρίκνωση αυτή οφείλεται σε ένα από τα παρακάτω σενάρια:

- Εύρεση της υψηλότερης περιοχής του χυτού στην οποία θα υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια με τιμή του ποσοστού στερεοποίησης μικρότερη από την τιμή της παραμέτρου PIPEFS (Σχήμα 4.2). Στην περίπτωση αυτή το μέταλλο διοχετεύεται και η ελεύθερη επιφάνεια του χυτού υποχωρεί λόγω της συρρίκνωσης.



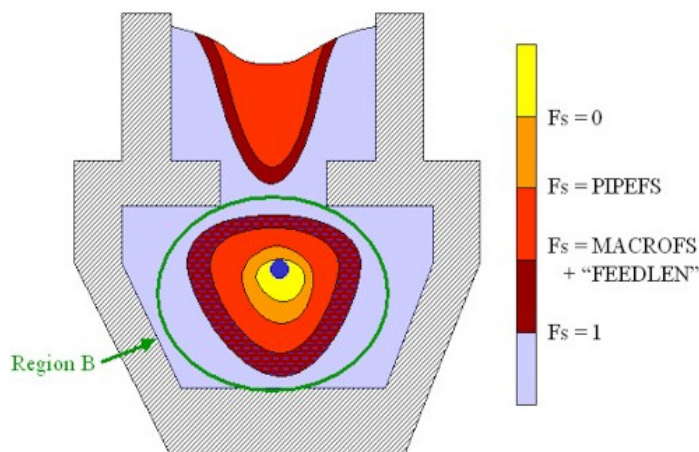
Σχήμα 4.2 1^ο σενάριο: Υποχώρηση λόγω συρρίκνωσης στην ελεύθερη επιφάνεια (freesurface) του τήγματος. Η τιμή του πορώδους σε εκείνο το σημείο τίθεται ίση με 1 (δηλ. κενό) [ESI Group 2004].

- Υπαρξη σημείου που έχει χαμηλότερο ποσοστό στερεοποίησης από την τιμή PIPEFS, στην περιοχή κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια (Σχήμα 4.3). Στην περίπτωση αυτή εμφανίζεται μακροδιακένωση στο σημείο αυτό. Και πάλι θα έχουμε διοχέτευση μετάλλου με ίδια αποτελέσματα όπως προηγουμένως. Στην περίπτωση αυτή το πρόγραμμα δεν εμφανίζει έναν κενό όγκο, αλλά δίνει τιμή πορώδους ίση με 1.



Σχήμα 4.3 2^ο σενάριο: Εμφάνιση μακροπορώδους σε σημείο κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, με ποσοστό στερεοποίησης μικρότερο από την PIPEFS [ESI Group 2004].

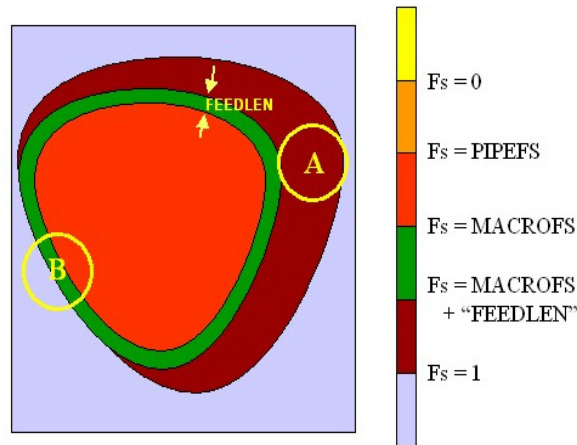
- Υπαρξη στην περιοχή γύρω από την ελεύθερη επιφάνεια σημείου που έχει χαμηλότερο ποσοστό στερεοποίησης από την τιμή PIPEFS. Στην περίπτωση αυτή δεν διοχετεύεται πλέον τήγμα και εμφανίζεται μακροπορώδες μέσα στο σώμα του χυτού. Το μακροπορώδες αρχικά θα εμφανιστεί και θα έχει την μεγαλύτερη τιμή στο πιο «υγρό» σημείο της περιοχής.



Σχήμα 4.4 3^ο σενάριο: Η ύπαρξη μετάλλου με ποσοστό στερεοποίησης μικρότερο από PIPEFS γύρω από μία περιοχή, υπονοεί αδυναμία πλήρωσης της περιοχής με τήγμα και άρα δημιουργία μακροπορώδους [ESI Group 2004].

Το μικροπορώδες υπολογίζεται με τον ακόλουθο τρόπο:

- Μικροπορώδες μπορεί να εμφανιστεί σε μία ζώνη όπου το ποσοστό στερεοποίησης έχει τιμή μεταξύ της τιμής τα παραμέτρου MACROFS και 1.
- Μέσα στη ζώνη αυτή, μπορεί να συμβεί ένα από τα δύο:
 - Να υπάρχει ακόμα ημι-ρευστη ζώνη (mushy zone) με τιμή κάτω από MACROFS. Στην περίπτωση αυτή το μικροπορώδες θα δημιουργηθεί μόνο σε απόσταση υψηλότερη από την τιμή FEEDLEN από την ισοϋπή επιφάνεια MACROFS (Σχήμα 1.5). Η τιμή του μικροπορώδους θα ισούται με τη μεταβολή της πυκνότητας του μετάλλου όταν μεταβαίνει από τιμή τοπικού F_s (ποσοστού στερεοποίησης) στο 1.
 - Να μην υπάρχει ημί-ρευστη ζώνη (mushy zone) με τιμή κάτω από MACROFS. Στην περίπτωση αυτή η παράμετρος FEEDLEN απενεργοποιείται και μικροπορώδες μπορεί να δημιουργηθεί σε ολόκληρη την περιοχή μεταξύ MACROFS και 1. Η φυσική σημασία αυτού είναι πως δεν υπάρχει πλέον διαθέσιμο υγρό γύρω από μία περιοχή, που να μπορεί να την τροφοδοτήσει με τήγμα και να τη γεμίσει, κι έτσι η περιοχή αυτή καταλήγει σε δημιουργία πόρου.



Σχήμα 4.5 Σχηματική απεικόνιση των συνθηκών και των παραμέτρων σε μία περιοχή του χυτού, από τις οποίες εξαρτάται η εμφάνιση μικροπορώδους [ESI Group 2004].

- Εάν η παράμετρος FEEDLEN οριστεί σε μία υψηλή τιμή, τότε θα εξαλειφθεί η περιοχή MACROFS+FEEDNEL. Έτσι, το μικροπορώδες θα δημιουργείται όταν ολόκληρη η κοιλότητα βρίσκεται σε ποσοστό στερεοποίησης πάνω από το MACROFS.
- Όταν FEEDLEN=0, η ποσότητα μικροπορώδους είναι η ίδια σε ολόκληρο το χυτό, με εξαίρεση τις περιοχές όπου υπάρχει μακροπορώδες. Στην περίπτωση αυτή, η τιμή του πορώδους ισοδυναμεί παντού με τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ $F_s = \text{MACROFS}$ και $F_s = 1$ ($F_s = \text{το ποσοστό στερεοποίησης}$).

4.4 Είδη Χύτευσης που μοντελοποιήθηκαν

Όπως αναφέρθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο υπάρχουν 7 διαφορετικοί συνδυασμοί συνθηκών πίεσης (§3.3.3, σελ. 159) και 9 ονομαστικές κατηγορίες μεθόδων χύτευσης (Πίνακας 3.12, σελ. 159) που μπορούν να υλοποιηθούν με τη διαθέσιμη μηχανή του εργαστηρίου και οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή πειραμάτων.

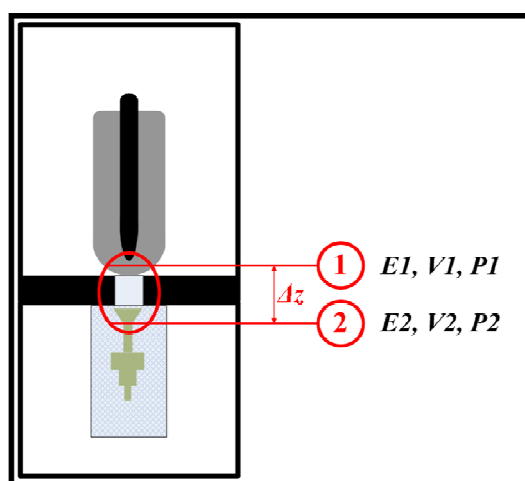
Από τους δυνατούς συνδυασμούς, αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν και για τη διεξαγωγή αριθμητικών προσομοιώσεων είναι οι:

- Χύτευση Κενού-Υπερπίεσης
- Χύτευση Κενού
- Χύτευση Βαρύτητας
- Χύτευση Υπερπίεσης
- Χύτευση Μερικού Κενού

Για τη μοντελοποίηση της κάθε μεθόδου χύτευσης είναι σαφές πως αλλάζουν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος, καθώς και κάποιες παράμετροι του λογισμικού που καθορίζουν τους αλγορίθμους επίλυσης που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν.

4.4.1 Ταχύτητα έγχυσης

Η ταχύτητα έγχυσης εξαρτάται από τη διαφορά πιέσεων μεταξύ του θαλάμου τήξης (άνω θάλαμος) και του θαλάμου χύτευσης (κάτω θάλαμος) της μηχανής. Εξαρτάται επίσης, από τη γεωμετρία του σκεύους έγχυσης και από την πυκνότητα του τήγματος. Μία απλοποιητική παραδοχή, η οποία όμως χρησιμοποιείται για υπολογισμούς στη συγκεκριμένη εφαρμογή [Reikher & Barkhudarov 2007], είναι η χρήση της εξίσωσης Bernoulli για τον υπολογισμό της ταχύτητας έγχυσης μεταξύ των διατομών 1 και 2 του Σχήματος 4.6.



Σχήμα 4.6 Σχηματική αναπαράσταση της μηχανής χύτευσης και των διατομών μεταξύ των οποίων εφαρμόστηκε η εξίσωση Bernoulli για υπολογισμό της ταχύτητας έγχυσης.

$$\dot{m} = Q \rho$$

όπου:

\dot{m} : η παροχή μάζας μετάλλου (kg/sec)

$Q = v_2 A$: ογκομετρική παροχή τήγματος (m³ /sec)

v_2 : ταχύτητα έγχυσης (εισόδου στο καλούπι) (m/sec)

A : εμβαδόν επιφάνειας εισόδου τήγματος (m²)

ρ : πυκνότητα τήγματος (kg/ m³)

Η ταχύτητα στο σημείο 1 είναι $v_1=0$ και στο σημείο 2 προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\gamma} g + 2g\Delta z} \left(\frac{m}{s} \right) \quad (4.2)$$

όπου:

p_1 : η πίεση στο θάλαμο τήξης

p_2 : η πίεση στο θάλαμο χύτευσης

Δz : υψομετρική διαφορά μεταξύ σημείου 1 και 2

γ : ειδικό βάρος τήγματος ($\gamma = \rho g$, g : η επιτάχυνση της βαρύτητας)

Πίνακας 4.2 Πίνακας τιμών των μεγεθών που υπολογίστηκαν από την εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli, για υπολογισμό της παροχής μάζας τήγματος.

	P_1 (atm)	P_2 (atm)	ΔP (atm)	u_2 (m/s)	\dot{Q} (m ³ /s)	\dot{m} (kg/s)
Βαρύτητα	0	0	0	0.99	2.8004E-05	0.21450
Υπερπίεση-Ατμόσφαιρα	1.5	1	0.5	3.76	1.0658E-04	0.81636
Υπερπίεση-Κενό	1.5	0	1.5	6.37	1.8031E-04	1.38105
Ατμόσφαιρα-Κενό	1.5	1	0.5	3.7	1.0658E-04	1.13441
Ατμ-Κενό 50%	1	0.5	0.5	3.7	1.0658E-04	0.81636

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές που φαίνονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 4.3 Ρυθμός έγχυσης τήγματος, ανάλογα με τις συνθήκες χύτευσης.

	Πείραμα #1 Κενό	Πείραμα #2 Υπερπίεση	Πείραμα #3 Υπερπίεση- Κενό	Πείραμα #4 50%Κενό	Πείραμα #5 Βαρύτητα
Πίεση θαλάμου τήξης (bar)	1.00	1.50	1.50	1.00	1.00
Πίεση θαλάμου χύτευσης (bar)	0.03	1.00	0.03	0.50	1.00
Ρυθμός έγχυσης (kg/sec)	1.134	0.816	1.381	0.816	0.214

4.4.2 Ιδιότητες Διεπιφάνειας

Η συμπεριφορά της διεπιφάνειας χυτού-καλουπιού, θα πρέπει να μοντελοποιηθεί εισάγοντας την κατάλληλη τιμή για τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας (ΣΜΘ). Ο ΣΜΘ, έχει ήδη αναφερθεί πως εξαρτάται από πλήθος παραγόντων, μεταξύ των οποίων και το είδος χύτευσης. Συνεπώς, για κάθε μέθοδο θα πρέπει να εφαρμοστεί για διαφορετική τιμή ΣΜΘ. Ο υπολογισμός των τιμών ΣΜΘ που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πιν. 3.5.

4.4.3 Παράμετροι εκτέλεσης της προσομοίωσης

Το λογισμικό προσομοίωσης της χύτευσης χρησιμοποιεί κάποιες παραμέτρους που υποδεικνύουν τον αλγόριθμο επίλυσης που θα χρησιμοποιηθεί για την εκάστοτε προσομοίωση. Με άλλα λόγια, η τιμή των παραμέτρων αυτών δεν αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο φυσικό μέγεθος, αλλά σε ένα κομμάτι κώδικα που ενεργοποιείται ή όχι, ώστε να ληφθεί ή να μη ληφθεί υπόψη ένα φυσικό φαινόμενο. Για παράδειγμα, εάν η τιμή μιας τέτοιας παραμέτρου είναι ίση με ένα (1) σημαίνει ενεργοποίηση του αλγορίθμου υπολογισμού ενός φαινομένου ή ενός μεγέθους, τιμή ίδη με δύο (2) σημαίνει ενεργοποίηση του ίδιου αλγορίθμου αλλά με κάποιον περιορισμό και τιμή μηδέν (0) σημαίνει πλήρης απενεργοποίηση του αλγορίθμου.

Η δυνατότητα απενεργοποίησης ενός αλγορίθμου μπορεί να είναι προεραϊκή, ώστε να έχει τη δυνατότητα ο χρήσης να επιταχύνει τη διαδικασία επίλυσης. Σε κάποιες περιπτώσεις, όμως, η επιλογή ενεργοποίησης αλγορίθμου είναι μονοσήμαντα εξαρτώμενη από τη μέθοδο χύτευσης που επιλέγεται προς επίλυση. Στην περίπτωση αυτή, η τιμή της παραμέτρου υποδεικνύεται από το εγχειρίδιο του λογισμικού και επισημαίνεται πως εσφαλμένη απόδοση τιμής μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στη συνολική επίλυση του προβλήματος.

Στη συνέχεια αναφέρονται οι σημαντικότερες παράμετροι προσομοίωσης που ανήκουν στην κατηγορία αυτή, καθώς κάποιες από αυτές έπρεπε να λάβουν διαφορετικές τιμές στην περίπτωση της απλής έγχυσης βαρύτητας και διαφορετικές στις περιπτώσεις που η πλήρωση επηρεάζονταν από τη διαφορά πίεσης ανάμεσα στους δύο θαλάμους της μηχανής. Εσφαλμένη τιμή, πολλές φορές απέτρεπε ακόμα και την εκτέλεση της προσομοίωσης.

WALLF: Η παράμετρος WALLF χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας της ελεύθερης επιφάνειας του τήγματος στην επαφή του με το τοίχωμα του καλουπιού (δεν χρησιμοποιείται μακριά από την ελεύθερη επιφάνεια). Για να υπολογιστεί η ταχύτητα αυτή, λαμβάνεται η ταχύτητα του πλησιέστερου κόμβου του πλησιέστερου πεπερασμένου στοιχείου που ανήκει στην ελεύθερη επιφάνεια. Η ταχύτητα του κόμβου αυτού πολλαπλασιάζεται με την παράμετρο WALLF. Αυτή η θεώρηση γίνεται για τους υπολογισμούς που αφορούν στον υπολογισμό των διατμητικών τάσεων στα τοιχώματα. Τιμή του WALLF ίση με 0.99 αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη

ολίσθηση του τήγματος στο τοίχωμα, ενώ τιμή 0.8 σημαίνει τραχύτερη επιφάνεια του καλουπιού και άρα εμφάνιση μεγαλύτερης τριβής.

Για τις προσομοιώσεις της χύτευσης βαρύτητας η τιμή της WALLF ήταν 0.9, ενώ για τις χυτεύσεις κενού χρησιμοποιήθηκε η τιμή που προτείνεται από το πρόγραμμα για χυτεύσεις χαμηλής πίεσης, δηλαδή 0.8.

WSHEAR: Η παράμετρος WSHEAR ρυθμίζει τον αλγόριθμο της διάτμησης στο τοίχωμα του καλουπιού στην επαφή του με το τήγμα. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επιτρέπει τη θεώρηση μη-μηδενικής ταχύτητας του τήγματος στο τοίχωμα, δηλαδή ύπαρξη ολίσθησης του τήγματος σε σχέση με το καλούπι, συνθήκη που είναι αντιπροσωπευτική της πραγματικότητας. Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται σε όλα τα σημεία επαφής του τήγματος με το καλούπι (και όχι μόνο στην ελεύθερη επιφάνεια). Η τιμή για το WSHEAR για τη χύτευση βαρύτητας είναι WSHEAR=2. Για τη χύτευση κενού, όμως, θα πρέπει να θεωρηθεί WSHEAR=0.

STRESS: Η παράμετρος αυτή μπορεί να λαμβάνει τιμή 0 ή 1, που ερμηνεύονται ως απενεργοποίηση και ενεργοποίηση της επίλυσης του μηχανικού προβλήματος.

GAS: Η ροϊκή παράμετρος GAS αφορά στην ενεργοποίηση του αλγορίθμου που υπολογίζει τον εγκλωβισμό αερίων εντός του τήγματος και των επιδράσεών τους.

Τέλος, αναφορικά με τον αριθμό των βημάτων της προσομοίωσης, το ProCAST δίνει τη δυνατότητα ορισμού ενός ελάχιστου χρονικού βήματος (timestep) για την επίλυση του ροϊκού προβλήματος, ενός ελάχιστου χρονικού βήματος για την επίλυση μετά το πέρας της πλήρωσης του καλουπιού με τήγμα κι ενός μέγιστου χρονικού βήματος. Για τις προσομοιώσεις χύτευση βαρύτητας τα χρονικά βήματα έλαβαν τις τιμές 0.05, 0.1 και 1 αντίστοιχα, ενώ για τις προσομοιώσεις της χύτευσης εν κενώ οι τιμές ήταν 0.01, 0.05 και 0.5 αντίστοιχα. Θα πρέπει να σημειωθεί πως εάν προκύψει αστάθεια λύσης κατά τον υπολογισμό του επόμενου χρονικού βήματος, το ProCAST αναπροσαρμόζει αυτόματα την τιμή του χρονικού βήματος, δίνοντας μία πολύ μικρή τιμή ($dt=0.0001\text{sec}$), προκειμένου να πραγματοποιηθεί επιτυχώς ο υπολογισμός. Για το λόγο αυτό, χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί πλήθος δοκιμών, ώστε να επιλεγούν οι τιμές των χρονικών βημάτων που αναφέρθηκαν. Με την επιλογή αυτή, η ακρίβεια της λύσης είναι η βέλτιστη, ενώ το κόστος επίλυσης δεν επιβαρύνεται δραματικά.

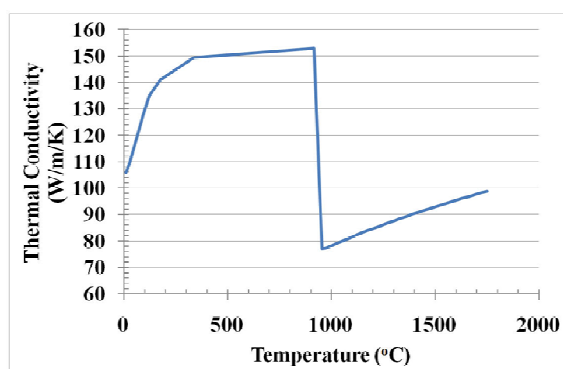
4.5 Υλικά – Ιδιότητες Υλικών

4.5.1 Διμερές κράμα χαλκού (Ορείχαλκος CuZn33)

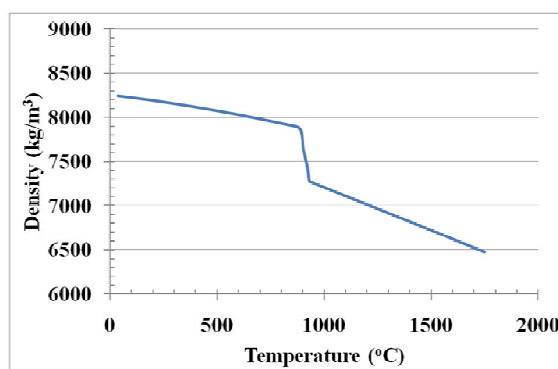
Οι ιδιότητες του ορείχαλκου που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές που περιγράφονται στη συνέχεια και δίνονται συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η

πληροφορία αυτή δεν υπάρχει και δεν μπορεί να ευρεθεί εύκολα στη βιβλιογραφία. Χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τους πίνακες της ASM [ASMInternational 1992] για το συγκεκριμένο κράμα χαλκού και στοιχεία από τη βάση δεδομένων του ProCAST, που συνδυάστηκαν για να δώσουν τις ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιήθηκαν. Το ProCAST περιείχε στη βάση δεδομένων του στοιχεία για τα καθαρά μέταλλα Cu και Zn. Με χρήση σταθμισμένου μέσου όρου για την κάθε θερμοκρασία, υπολογίστηκε η κάθε ιδιότητα του κράματος συναρτήσει της θερμοκρασίας («στάδιο α' επεξεργασίας»). Οι ιδιότητες των, συναρτήσει της θερμοκρασίας παρουσιάζουν ασυνεχή συμπεριφορά στην περιοχή θερμοκρασιών μεταξύ Liquidus και Solidus. Με βάση τις Liquidus και Solidus από τους πίνακες της ASM για το κράμα CuZn33 προσαρμόστηκαν οι καμπύλες του «σταδίου α' επεξεργασίας», ώστε να παρουσιάζουν την ασυνέχειά τους στο σωστό θερμοκρασιακό εύρος. Αυτό έγινε άλλοτε με αποκοπή ορισμένων δεδομένων και άλλοτε με παρεμβολή.

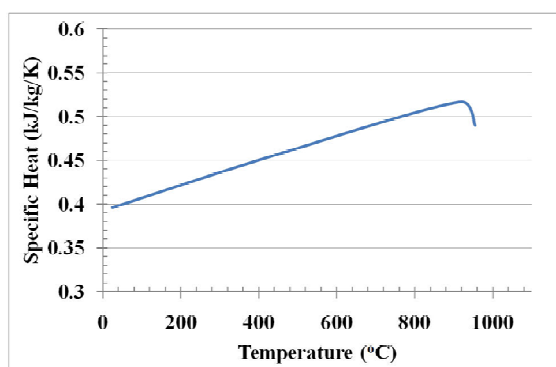
Οι θερμοκρασίες Liquidus και Solidus που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 931°C και 886°C. Η λανθάνουσα θερμότητα ήταν 205KJ/kg. Η θερμική αγωγιμότητα, η ενθαλπία, η πυκνότητα και το ιξώδες ορίστηκαν συναρτήσει της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7.



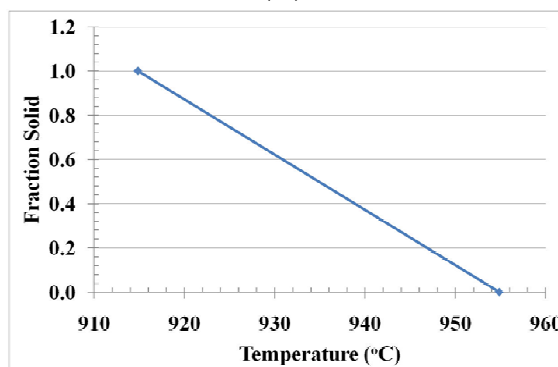
(A)



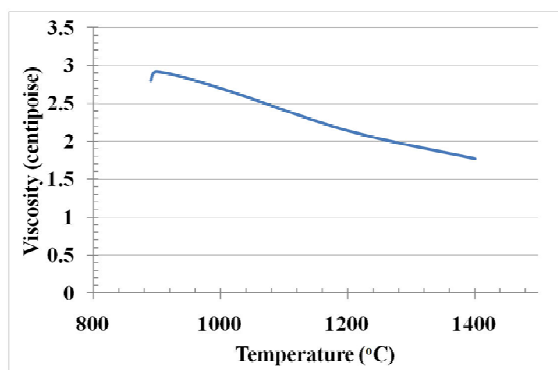
(B)



(C)



(D)



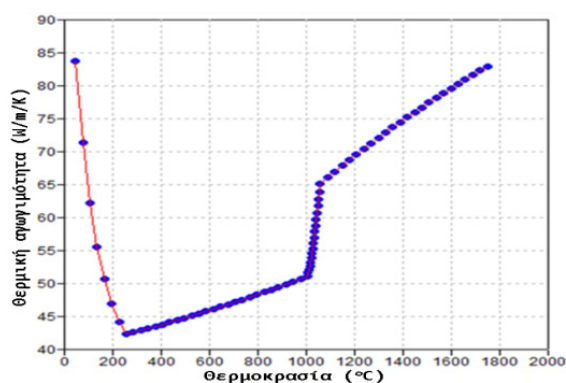
(E)

Σχήμα 4.7 Οι ιδιότητες του ορείχαλκου, συναρτήσει της θερμοκρασίας, που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της χύτευσης (A) θερμική αγωγιμότητα, (B) πυκνότητα, (C) ειδική θερμότητα, (D) ποσοστό στερεοποίησης και (E) ιξώδες.

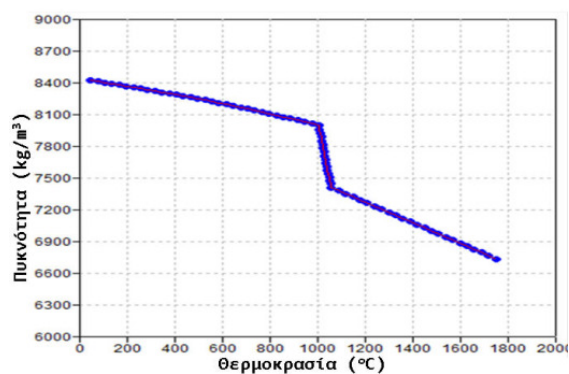
Επισημαίνεται πως οι Liquidus και Solidus προκύπτουν και από τις πειραματικές καμπύλες απόψυξης του χρησιμοποιούμενου κράματος.

4.5.2 Τριμερές κράμα χαλκού (CuZn12Ni24)

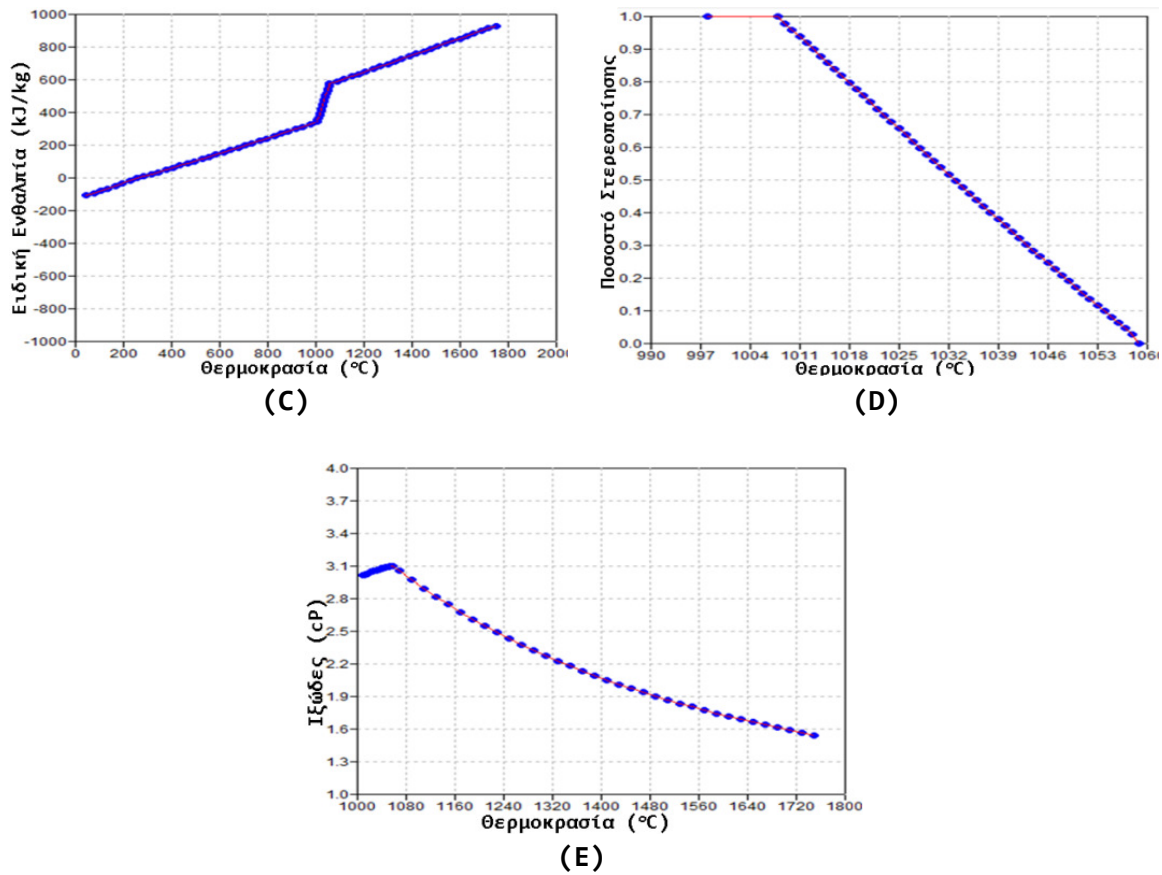
Δεν παρέχονται βασικά στοιχεία όπως η θερμοκρασία Solidus, η ειδική λανθάνουσα θερμότητα, πιθανή μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας. Για αυτό το λόγο, με βάση τις ιδιότητες του Cu, Zn και Ni από τη βιβλιοθήκη υλικών του ProCast, αλλά και τους πίνακες ιδιοτήτων των υλικών στα εγχειρίδια [ASM International 1992], χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες ιδιότητες: Liquidus = 1059 °C, Solidus = 998 °C και επίσης συναρτήσει της θερμοκρασίας τις ιδιότητες της θερμικής αγωγιμότητας (W/mK), της πυκνότητας (kg/m³), της ειδικής ενθαλπίας (kJ/kg), του ποσοστού στερεοποίησης και του κινηματικού ιξώδους όπως φαίνονται στις επόμενες καμπύλες (Σχήμα 4.8).



(A)



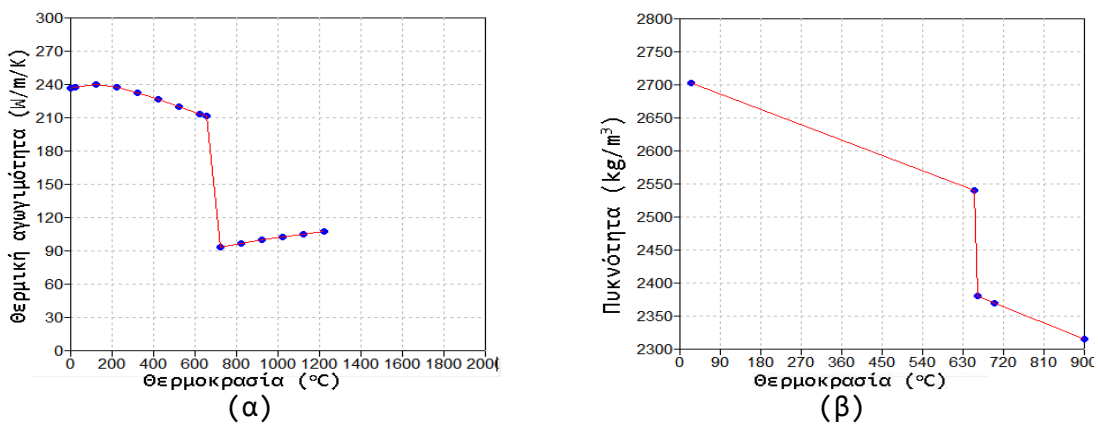
(B)

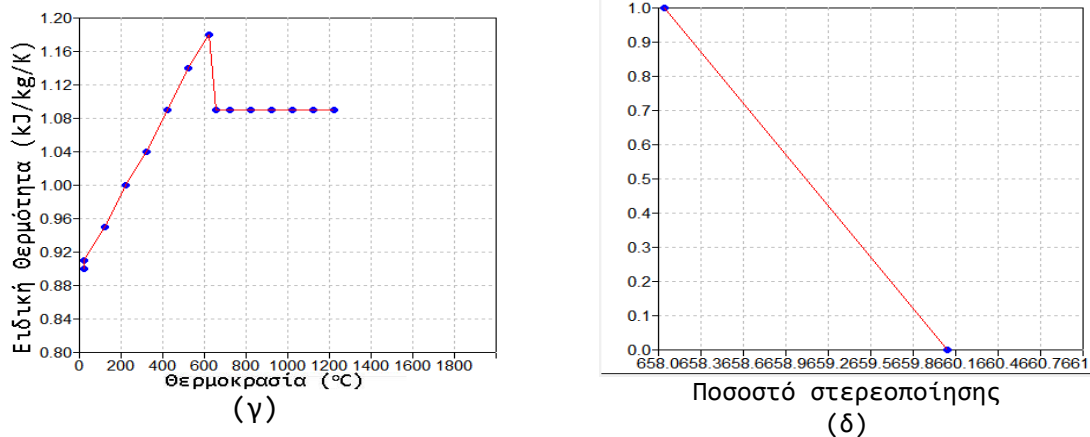


Σχήμα 4.8 Οι ιδιότητες του CuZn12Ni24, συναρτήσει της θερμοκρασίας, που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της χύτευσης (A) θερμική αγωγιμότητα, (B) πυκνότητα, (C) ειδική ενθαλπία (kJ/kg), (D) ποσοστό στερεοποίησης και (E) ιξώδες.

4.5.3 Αλουμίνιο

Για την προσομοίωση της χύτευσης του καθαρού αλουμινίου χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες από τη βάση δεδομένων του ProCAST (Σχήμα 4.9).





Σχήμα 4.9 Ιδιότητες καθαρού αλουμινίου συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Οι υπόλοιπες ιδιότητες που ορίστηκαν ως σταθερές ποσότητες ήταν:

Liquidus: 660°C

Solidus: 658°C

Λανθάνουσα θερμότητα: 3.975 kJ/kg

Ιξώδες: 2cP

4.5.4 Το υλικό καλουπιού

Στη χύτευση ακριβείας τα καλούπια είναι γύψινα ή κεραμικά. Εν προκειμένω χρησιμοποιήθηκε γύψος.

Ο γύψος αποτελεί ένα διαδομένο υλικό, γνωστό για τις πυρίμαχες και θερμομονωτικές του ιδιότητες. Για το συγκεκριμένο είδος που χρησιμοποιήθηκε της εταιρίας “Ransom & Randolph”, τύπου Argentinum Jewelry Investment, δεν υπάρχουν δεδομένες συγκεκριμένες θερμικές ιδιότητες, αλλά από γύψο σε γύψο αυτές δεν πρέπει να αλλάζουν πολύ.

Οι κυριότερες ιδιότητες του υλικού του καλουπιού, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [Ransom & Randolph 2005], [Carter n.d.], [Davies 1973], [Park 2010] είναι: ειδική θερμότητα: 0.84 kJ/kg/K, θερμική αγωγιμότητα: 0.5 W/m/K, πυκνότητα: 1100 kg/m³.

Ως ροϊκή ιδιότητα ορίστηκε η διαπερατότητα του γύψου στα 1.02e-07 m². Αναλυτικότερα, τα συστατικά του γύψου φαίνονται στον Πίνακα 4.4 και οι ιδιότητες που παρέχονται από την εταιρεία φαίνονται παρακάτω, στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.4 Τα συστατικά του γύψου τύπου Argentum[Ransom & Randolph 2005]

Chemical Name (Ingredients)	CAS #	%	TLV mg/m ³	OSHA PEL mg/m ³
Silica (quartz)	14808-60-7	<50	0.05** 10.0**	0.10* 0.30**
Silica (cristobalite)	14464-46-1	<50	0.05* 5.0**	0.05* 0.15**
Calcium Sulfate	7778-18-9	<50	10.0**	5.0* 15.0**

* Respirable Dust
**Total Dust

Πίνακας 4.5 Ιδιότητες του γύψου τύπου Argentum[Beeley 2001]

Boiling Point	N/A	Specific Gravity	2.5
Vapor Pressure	N/A	pH	6-8
Vapor Density	N/A	Evaporation Rate	N/A
Critical Temperature	N/A	Viscosity	N/A
Decomposition Temperature	N/A	% Volatile by Volume	None
Melting/Freezing Point	N/A	Magnetism	N/A
Solubility in Water	1.5% by wt.	Autoignition Temperature	N/A
Critical Pressure	N/A	Corrosion Rate	N/A
Permeable Exposure Limit	N/A	Molecular Weight	Mixture
Appearance and Odor	White powder, no odor		

4.6 Πειραματισμός με το Μοντέλο

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειραματισμού με τις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου χύτευσης. Στόχος του πειραματισμού ήταν να αποκαλυφθούν οι παράμετροι που έχουν εντονότερη και οι παράμετροι που έχουν ασθενέστερη επίδραση στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Εάν μία παράμετρος κριθεί σημαντική, τότε θα χρειαστεί ιδιαίτερη προσοχή στον προσδιορισμό της. Εάν, πάλι, η επίδραση μίας παραμέτρου κριθεί λιγότερο σημαντική, τότε και η γνώση της συγκεκριμένης παραμέτρου εισόδου δεν χρειάζεται να είναι ακριβής, ώστε να προκύψουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται κάποιες από τις πιο χαρακτηριστικές διερευνήσεις που έγιναν στο πλαίσιο αυτό.

Για τη διερεύνηση, χρησιμοποιήθηκε μία περίπτωση χύτευσης ως «περίπτωση αναφοράς», για να διευκολύνεται η σύγκριση.

Ως περίπτωση αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο χύτευσης κενού, με θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού τους (T_{mould}) 600°C , με θερμοκρασία έγχυσης τήγματος (T_{inlet}) τους 900°C . Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας (ΣΜΘ) που χρησιμοποιήθηκε ως συνθήκη διεπιφάνειας είχε τιμές βασισμένες στη δημοσίευση των [Lau, W B Lee, et al. 1998].

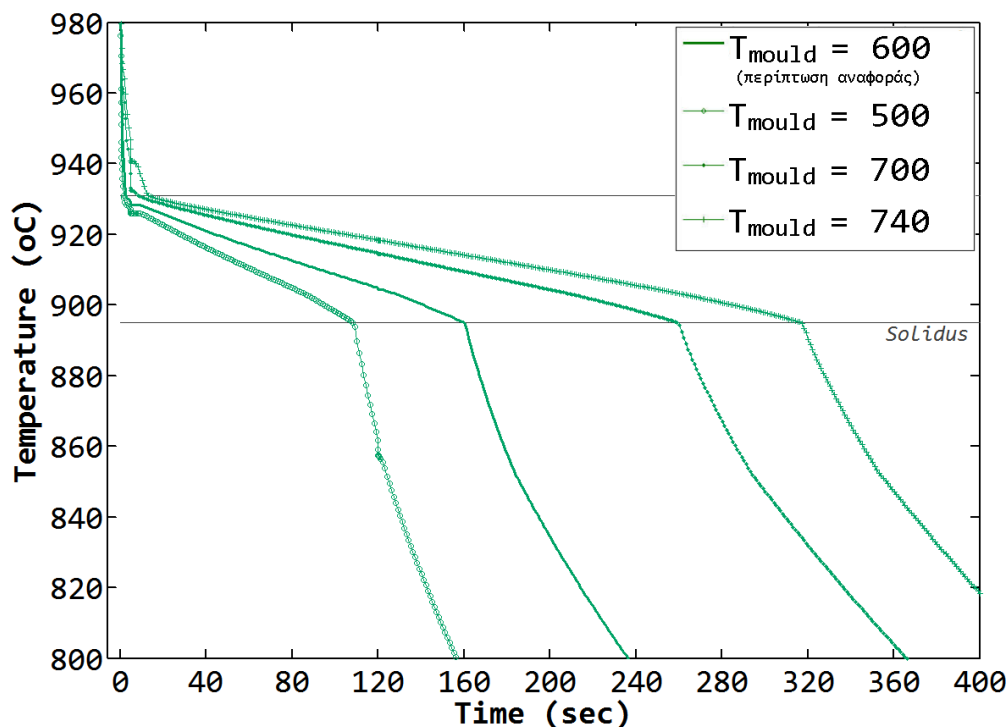
4.6.1 Επίδραση της θερμοκρασίας προθέρμανσης του καλουπιού (αρχική συνθήκη)

Η θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού ορίζεται στο ProCAST ως αρχική συνθήκη (Initial Condition). Η οριακή, αυτή, συνθήκη αποδίδεται σε όλους τους κόμβους του καλουπιού και μπορεί να έχει μία σταθερή τιμή σε όλη τη μάζα του καλουπιού ή να ακολουθεί μία χωρική κατανομή.

Στην περίπτωση που το καλούπι έχει παραμείνει για 1-1.5ώρα πριν τη χύτευση σε σταθερή θερμοκρασία, και εφόσον η χύτευση ξεκινήσει σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα από τη στιγμή εξαγωγής του καλουπιού από το φούρνο, τότε μπορεί να θεωρηθεί πως η παραδοχή σταθερής θερμοκρασίας προθέρμανσης όλη τη μάζα του καλουπιού είναι επαρκής. Αυτό έχει διαπιστωθεί από δοκιμαστικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με χρήση θερμοστοιχείων. Στην περίπτωση, όμως, που το καλούπι παραμείνει για αρκετά λεπτά εκτός του φούρνου μέχρι την έναρξη της χύτευσης, τότε η προηγούμενη θεώρηση δεν ισχύει. Στην περίπτωση αυτή, προτείνεται η διεξαγωγή προσομοίωσης μόνο για το φαινόμενο της απόψυξης του καλουπιού στον αέρα, για όσα λεπτά χρειάζεται. Η θερμοκρασιακή κατανομή που θα

προκύπτει ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης αυτής, είναι η αρχική συνθήκη που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της χύτευσης.

Στην παρούσα διερεύνηση θεωρείται ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλο το καλούπι. Στην περίπτωση αναφοράς η θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού ήταν $T_{\text{mould}} = 600^{\circ}\text{C}$. Δοκιμάστηκαν, επιπρόσθετα, οι τιμές $T_{\text{mould}} = 500, 700$ και 740°C . Το συγκεκριμένο εύρος τιμών καλύπτει το εύρος των τιμών που χρησιμοποιούνται στην πράξη για χύτευση ακριβείας με συμπαγή τύπο. Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζονται οι καμπύλες απόψυξης που προέκυψαν ως αποτέλεσμα της αριθμητικής προσομοίωσης για τις τέσσερις περιπτώσεις T_{mould} . Οι καμπύλες απόψυξης αντιστοιχούν σε κόμβο που βρίσκεται στο σημείο που επισημαίνεται με κόκκινο χρώμα στο Σχήμα 2.44β, σελ.128.



Σχήμα 4.10 Επίδραση της θερμοκρασίας προθέρμανσης του καλουπιού στις Αριθμητικές καμπύλες απόψυξης.

Ο Πίνακας 4.6 παρουσιάζει ποσοτικοποιημένα τα αποτελέσματα του προηγούμενου σχήματος. Τα μεγέθη που προκύπτουν από τις καμπύλες απόψυξης και προσφέρουν ποσοτικοποίηση είναι ο χρόνος στερεοποίησης και οι ρυθμοί απόψυξης στα τρία στάδια της απόψυξης.

Πίνακας 4.6 Πίνακας αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης και στην ταχύτητα απόψυξης των χυτεύσεων βαρύτητας.

T_{mould} ($^{\circ}\text{C}$)	t_{sol} (sec)	$(\Delta T/\Delta t)^{1\text{o}}$ στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)^{2\text{o}}$ στάδιο	$(\Delta T/\Delta t)^{3\text{o}}$ στάδιο
500	108.3	-86.302	-0.297	-2.378
600	160.3	-58.048	-0.217	-1.760
700	259.3	-19.098	-0.140	-1.144
740	317.3	-18.962	-0.110	-1.037

Γίνεται φανερό από τα προηγούμενα, πως η θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού είναι μία παράμετρος που επηρεάζει πολύ έντονα το αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.7, απόκλιση 100°C σε αυτή την αρχική συνθήκη, έχει ως αποτέλεσμα περίπου 40% του αποτελέσματος της προσομοίωσης.

Πίνακας 4.7 Ποσοστά μεταβολής των αποτελεσμάτων σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς.

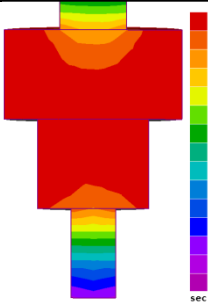
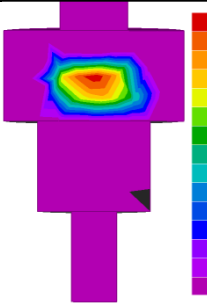

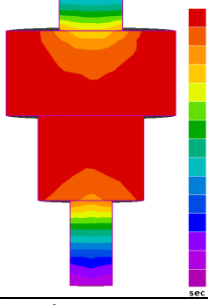
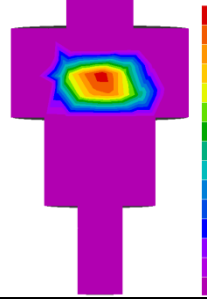
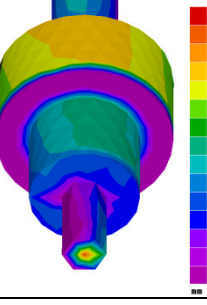
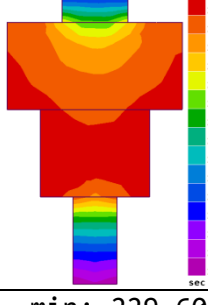
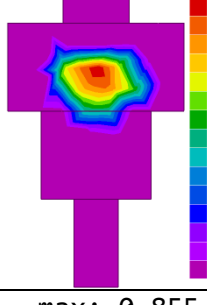
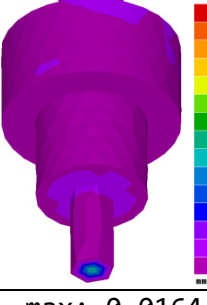
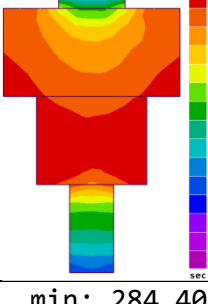
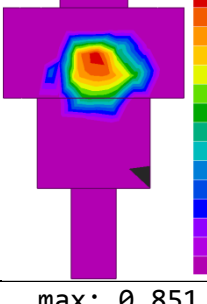
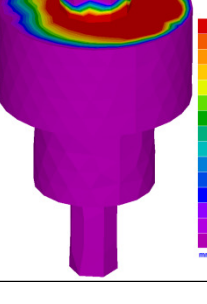
T_{mould} (°C)	t_{sol} σε κόμβο της μεγάλης περιοχής (sec)	min t_{sol} στο χυτό (sec)	max t_{sol} στο χυτό (sec)	$(\Delta T / \Delta t)^{1\text{o}}$ στάδιο	$(\Delta T / \Delta t)^{2\text{o}}$ στάδιο	$(\Delta T / \Delta t)^{3\text{o}}$ στάδιο
500	-32%	-48%	-32%	49%	37%	35%
600	0%	0%	0%	0%	0%	0%
700	62%	88%	61%	-67%	-35%	-35%
740	98%	133%	94%	-67%	-49%	-41%

Επιπρόσθετα, στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τη μορφή χρωματικής απεικόνισης. Οι εικόνες όλες αναφέρονται στη μέση τομή του χυτού. Η στήλη που παρουσιάζει το χρόνο στερεοποίησης δίνει εποπτεία για την κατανομή του συγκεκριμένου μεγέθους σε όλο το χυτό. Παρατηρώντας τον ελάχιστο και το μέγιστο χρόνο στερεοποίησης στο χυτό, φαίνεται πως τα ποσοστά μεταβολής είναι επίσης μεγάλα, με πιο χαρακτηριστική την αύξηση του ελάχιστου χρόνου στερεοποίησης κατά 133% για αύξηση της θερμοκρασίας του καλουπιού κατά 140°C. Τέλος, παρατηρείται περισσότερο ομοιόμορφη στερεοποίηση στο χυτό στην περίπτωση υψηλής θερμοκρασίας προθέρμανσης, ενώ η ανομοιομορφία του χρόνου στερεοποίησης του χυτού είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση χαμηλής θερμοκρασίας καλουπιού.

Ομοίως, ο Πίνακας 4.8 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το πορώδες. Παρατηρείται εμφάνιση μακροπορώδους σε όλες τις περιπτώσεις, με τη μέγιστη τιμή να εμφανίζεται στο κέντρο της μεγάλης περιοχής του χυτού. Η μέγιστη τιμή μεταβάλλεται με μεταβολή της T_{mould} . Οι τιμές του μέγιστου εμφανιζόμενου πορώδους ποικίλουν από 0.706 μέχρι 0.851. Στις περιπτώσεις $T_{\text{mould}}=700$ και 740°C, το μακροπορώδες εκτείνεται και στη μεσαία περιοχή του χυτού.

Τέλος, το ποσοστό του δημιουργούμενου κενού μεταξύ χυτού και καλουπιού, που προκύπτει λόγω συρρίκνωσης κατά την απόψυξη, επηρεάζεται επίσης. Παρόλο που το μέγεθος (garwidth) του δημιουργούμενου χάσματος (airgap) είναι μικρό, ωστόσο η επίδραση είναι σαφής: αύξηση της θερμοκρασίας του καλουπιού καταλήγει σε μικρότερο σχηματιζόμενο κενό.

Πίνακας 4.8 Επίδραση της θερμοκρασίας προθέρμανσης καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης, στο πορώδες και στο σχηματιζόμενο κενό, με βάση τα αποτελέσματα της Αριθμητικής Προσομοίωσης της χύτευσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη μέση τομή του χυτού.

	Χρόνος Στερεοποίησης (sec)	Πορώδες	Σχηματιζόμενο Κενό (mm)
$T_{mould} = 500^{\circ}C$			
	min: 63.50 max: 105.80	max: 0.712	max: 0.0541
$T_{mould} = 600^{\circ}C$ (περίπτωση αναφοράς)			
	min: 121.83 max: 156.70	max: 0.706	max: 0.0312
$T_{mould} = 700^{\circ}C$			
	min: 229.60 max: 252.00	max: 0.855	max: 0.0164
$T_{mould} = 740^{\circ}C$			
	min: 284.40 max: 304.70	max: 0.851	

Συνεπώς, η θεοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος για την προσομοίωση της χύτευσης, καθώς επηρεάζει πολύ έντονα το αποτέλεσμα. Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην απόδοση τιμής για την αρχική, αυτή, συνθήκη. Ο πιο αξιόπιστος τρόπος για αυτό είναι η πειραματική μέτρηση της θερμοκρασίας.

4.6.2 Επίδραση της θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του καλουπιού (οριακή συνθήκη)

Πέρα από τον ορισμό της θερμοκρασίας προθέρμανσης του καλουπιού, που πρόκειται για μία αρχική συνθήκη του προβλήματος, είναι σημαντικός και ο ορισμός της οριακής συνθήκης (boundary condition) που αναφέρεται στη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του καλουπιού. Πρέπει, δηλαδή, να οριστεί ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρεται θερμότητα από το καλούπι προς το περιβάλλον. Το περιβάλλον του καλουπιού για τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ο αέρας εντός της μηχανής χύτευσης.

Υπάρχουν δύο τρόποι να οριστεί η συγκεκριμένη οριακή συνθήκη.

Ο πρώτος τρόπος είναι να οριστεί ως οριακή συνθήκη “Heat”, που περιλαμβάνει τον ορισμό παραμέτρων όπως ο “filmcoefficient”, η εκπεμπότητα (“emissivity”), η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (“ambient temperature”), η ροή θερμότητας (“heat flux”) και η ενεργοποίηση ειδικού αλγορίθμου για μετάδοση με ακτινοβολία, εάν κρίνεται σκόπιμο.

Από προσομοίωση της χύτευσης με αυτή τη δυνατότητα και συγκρίνοντας την αριθμητική καμπύλη απόψυξης που προέκυπτε με κάποια αντίστοιχη πειραματική, το συμπέρασμα ήταν το ακόλουθο: με τις τιμές που προτείνονται από τη βιβλιογραφία και το εγχειρίδιο του προγράμματος για την οριακή συνθήκη “Heat”, η αριθμητική καμπύλη απόψυξης απέχει πάρα πολύ από την πειραματική. Συγκριτικά, στο πείραμα η απόψυξη είναι πολύ πιο απότομη από ό,τι στην προσομοίωση. Για να υπάρξει προσέγγιση, θα πρέπει να αυξηθούν πολύ οι τιμές των παραμέτρων της οριακής συνθήκης. Οι τιμές που θα ήταν ‘αποδεκτές’, όμως, προκύπτουν μόνο κατ’ εκτίμηση και όχι με ασφάλεια.

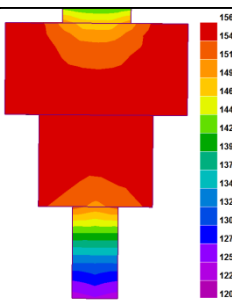
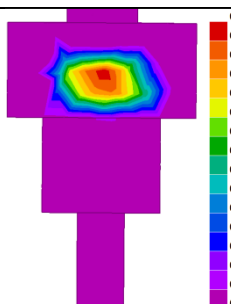
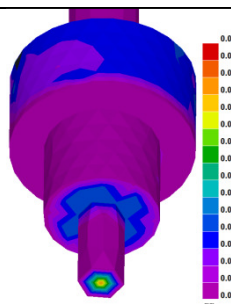
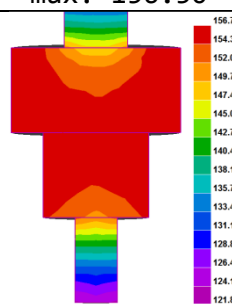
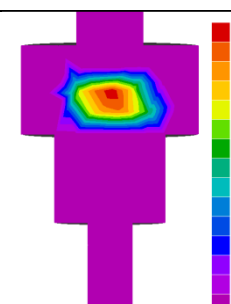
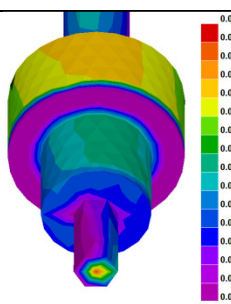
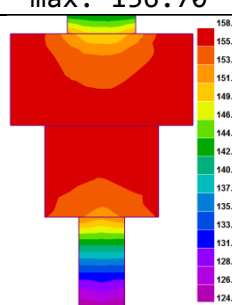
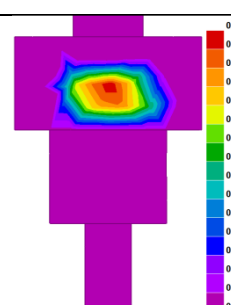
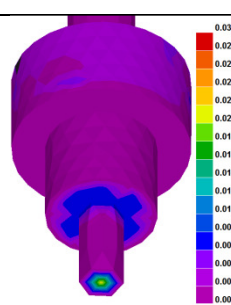
Για να αρθεί αυτή η αμφιβολία, χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα από πείραμα με χρήση θερμοστοιχείων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.45, σελ. 128. Από πειράματα αυτής της κατηγορίας προκύπτει η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του καλουπιού κατά τη διάρκεια της χύτευσης. Συμπεραίνεται πως η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας παραμένει πρακτικά σταθερή (τουλάχιστον για τα πρώτα 300sec της χύτευσης). Συνεπώς, επιχειρήθηκε ο δεύτερος τρόπος ορισμού της οριακής συνθήκης.

Ο δεύτερος τρόπος ορισμού της οριακής συνθήκης ήταν η χρήση της οριακής συνθήκης “Temperature”, δηλαδή η διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας για όλη την προσομοίωση, σε όλους τους κόμβους της εξωτερικής επιφάνειας του χυτού. Η περίπτωση αυτή επέφερε πολύ καλή προσέγγιση μεταξύ

αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Συνεπώς, για τη συγκεκριμένη περίπτωση χύτευσης, η θεώρηση αυτή είναι αναγκαία για την επίτευξη αποτελεσμάτων που να πλησιάζουν τα πειραματικά.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της ευαισθησίας του αποτελέσματος στην τιμή της συγκεκριμένης οριακής συνθήκης (T_{BC}). Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν ήταν τρεις: $T_{BC} = 200^{\circ}\text{C}$, $T_{BC} = 300^{\circ}\text{C}$ (ήταν η συνθήκη που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση αναφοράς) και $T_{BC} = 600^{\circ}\text{C}$. Τα αποτελέσματα παρουσιάζει ο Πίνακας 4.9.

Πίνακας 4.9 Επίδραση της εξωτερικής θερμοκρασίας του καλουπιού (οριακή συνθήκη, T_{BC}) στο χρόνο στερεοποίησης και στο πορώδες, με βάση τα αποτελέσματα της Αριθμητικής Προσομοίωσης της χύτευσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη μέση τομή του χυτού.

	Χρόνος Στερεοποίησης (sec)	Πορώδες	Σχηματιζόμενο Κενό (mm)
$T_{BC} = 200^{\circ}\text{C}$			
	min: 122.77 max: 156.50	max: 0.706	max: 0.0401
$T_{BC} = 300^{\circ}\text{C}$ (περίπτωση αναφοράς)			
	min: 121.83 max: 156.70	max: 0.706	max: 0.0312
$T_{BC} = 600^{\circ}\text{C}$			
	min: 124.32 max: 158.00	max: 0.706	max: 0.314

Από τη διερεύνηση προκύπτει πως η συγκεκριμένη παράμετρος έχει επίδραση στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, που όμως δεν είναι τόσο σημαντικά

όσο αυτά της προηγούμενης διερεύνησης. Ο μέγιστος και ο ελάχιστος χρόνος στερεοποίησης του χυτού παραμένουν σταθεροί, αλλάζει, όμως, η κατανομή του χρόνου στερεοποίησης στο χυτό. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με το μέγεθος του σχηματιζόμενου κενού. Ενώ στις περιπτώσεις $T_{BC} = 300^{\circ}\text{C}$ και $T_{BC} = 600^{\circ}\text{C}$ η τιμή του κενού είναι πρακτικά η ίδια, η εμφάνιση της μέγιστης τιμής στην 1^η περίπτωση γίνεται στη μεγάλη διατομή, ενώ στη 2^η περίπτωση η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στη μικρή πλευρά της μικρής διατομής του χυτού.

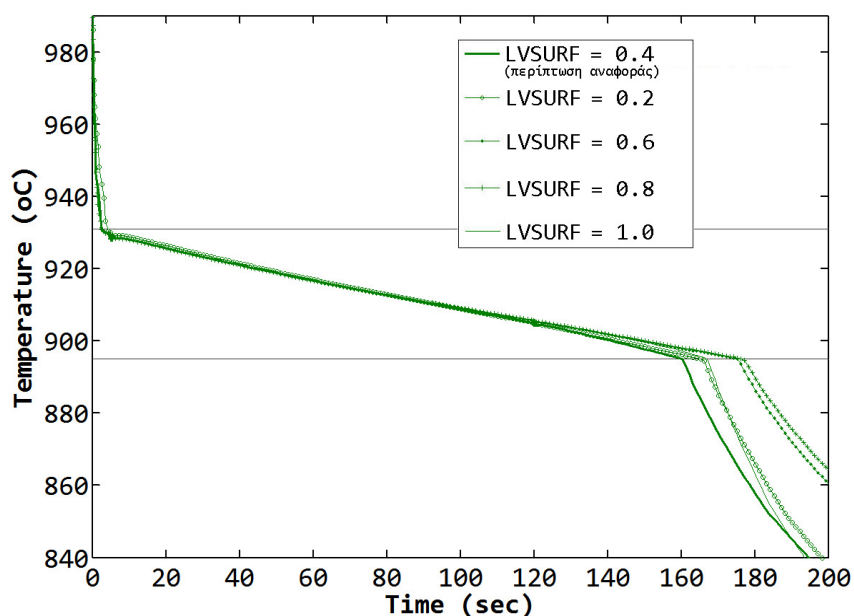
Άρα, η παράμετρος αυτή έχει επίδραση στο αποτέλεσμα, ωστόσο μπορεί αρκετά εύκολα να μετρηθεί πειραματικά και η μέτρηση αυτή να χρησιμοποιηθεί για μία ‘απλουστευμένη’ εκδοχή ορισμού της οριακής αυτής συνθήκης.

4.6.3 Επίδραση του ποσοστού πλήρωσης του καλουπιού

Μία από τις παραμέτρους της προσομοίωσης είναι η παράμετρος LVSURF που καθορίζει το ποσοστό πλήρωσης του καλουπιού. Το ποσοστό αυτό υπολογίζεται σε σχέση με το συνολικό όγκο της περιοχής που καταλαμβάνει η οντότητα ‘χυτό’ στο μοντέλο. Το ποσοστό πλήρωσης στην πράξη, είναι ένα μέγεθος γνωστό. Προκύπτει είτε από τη μάζα μετάλλου που τήκεται και εγχέεται στο καλούπι, είτε εκ του αποτελέσματος (συγκρίνοντας το τελικό χυτό προϊόν με τον όγκο του καλουπιού που είχε κατασκευαστεί).

Από το λογισμικό, μία τυπική τιμή που προτείνεται για την παράμετρο LVSURF είναι το 0.98. Τιμή ίση με 0.98 σημαίνει πως επιλύεται το ροϊκό πρόβλημα (συζευγμένα με το θερμικό και το μηχανικό πρόβλημα) έως ότου το ποσοστό πλήρωσης του καλουπιού φτάσει το 98% και από εκεί και έπειτα, στο επόμενο χρονικό βήμα το τήγμα ‘πέφτει’ σύμφωνα με την κατεύθυνση που επιβάλλεται από τη βαρύτητα και γεμίζει το καλούπι. Εν συνεχεία, σταματάει η επίλυση του ροϊκού προβλήματος και συνεχίζεται η προσομοίωση.

Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται πως η τιμή της παραμέτρου LVSURF, εάν θεωρηθεί πως όλες οι υπόλοιπες παράμετροι της χύτευσης παραμένουν σταθερές, επηρεάζει το χρόνο στερεοποίησης του χυτού από 10 έως 30sec.



Σχήμα 4.11 Επίδραση της παραμέτρου LVSURF (ποσοστό πλήρωσης του καλουπιού) στις αριθμητικές καμπύλες απόψυξης.

4.6.4 Επίδραση του ΣΜΘ (οριακή συνθήκη διεπιφάνειας)

Η συνθήκη διεπιφάνειας (ΣΜΘ), όπως περιγράφηκε εκτενώς στις παραγράφους 1.9 και 1.10, εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων και προσδιορίζεται για την κάθε περίπτωση χύτευσης ξεχωριστά.

Κατά τον πειραματισμό με το μοντέλο κρίθηκε σκόπιμο να δοκιμαστούν διάφορες τυχαίες τιμές ΣΜΘ, με τρόπο, όμως συστηματικό, ώστε να αποκαλυφθεί η σημασία της συγκεκριμένης παραμέτρου.

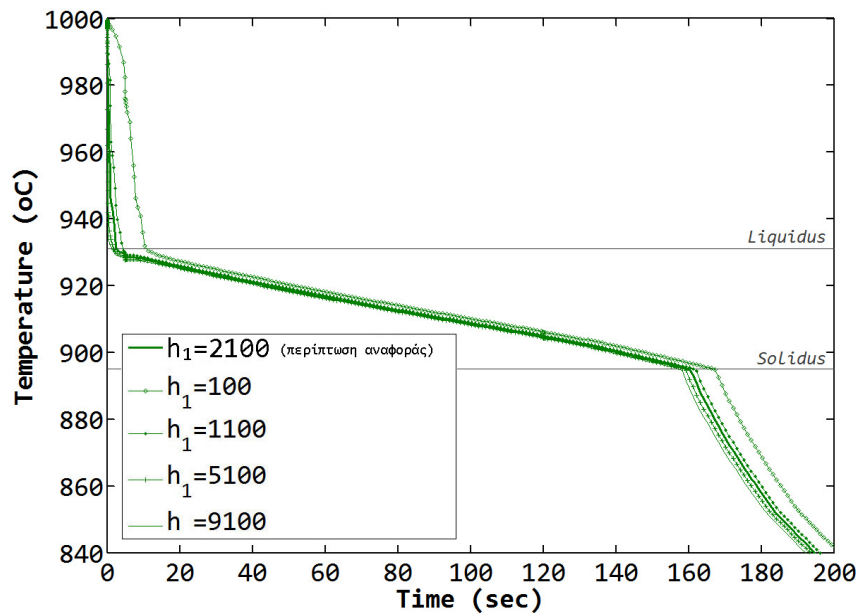
Ο ΣΜΘ που χρησιμοποιήθηκε για την «περίπτωση αναφοράς» είναι βασισμένος στην τιμή του ΣΜΘ που προτείνεται στη δημοσίευση [Lau, W B Lee, et al. 1998]. Ο συντελεστής, στη συγκεκριμένη δημοσίευση (βλ. Σχ. 1.46, σελ. 72) είναι συνάρτηση του χρόνου και διακρίνεται σε τρεις περιοχές. Στα πλαίσια της διερεύνησης χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του ΣΜΘ, αλλά θεωρήθηκε πως η χρονική διάρκεια του κάθε σταδίου διαρκούσε λιγότερο (στο πείραμα της εργασίας [Lau, W B Lee, et al. 1998], η χύτευση διαρκούσε 16min, ενώ σε όλα τα πειράματα της παρούσας ΔΔ η στερεοποίηση ολοκληρωνόταν στα πρώτα 100-300sec).

Συνεπώς, για την παρούσα διερεύνηση θεωρήθηκε πως ο ΣΜΘ χωρίζεται σε 3 στάδια: κατά το 1^ο στάδιο ($0 < t < t_1$) λαμβάνει τιμή h_1 , κατά το 2^ο στάδιο ($t_1 < t < t_2$) λαμβάνει τιμή h_2 , και κατά το 3^ο στάδιο ($t > t_2$) λαμβάνει τιμή h_3 .

Για την περίπτωση αναφοράς θεωρήθηκε: $[h_1 t_1 h_2 t_2 h_3] = [2100 \ 5 \ 480 \ 120 \ 700]$.

4.6.4.1 Επίδραση της τιμής του h_1

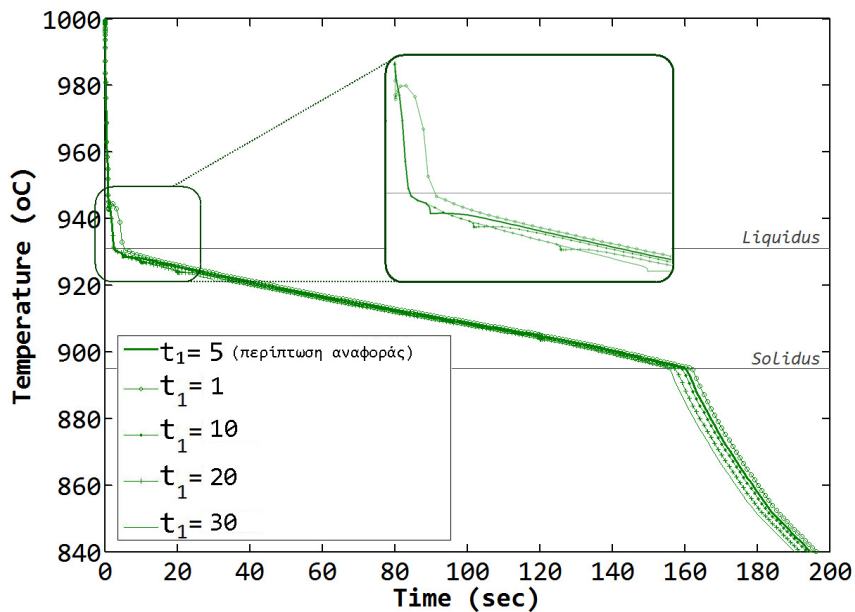
Στο Σχήμα 4.12 φαίνεται ο τρόπος που επιδρά η τιμή του ΣΜΘ κατά το 1^ο στάδιο. Εκ πρώτης όψews μπορεί η επίδραση να φαίνεται μικρή. Εάν αναλογιστεί κανείς, όμως, πως η παράμετρος h_1 είναι ενεργή μόνο για τα 5 πρώτα δευτερόλεπτα της χύτευσης, τότε η μετατόπιση της χρονικής στιγμής της έναρξης της στερεοποίησης κατά 18sec και η μετατόπιση του χρόνου στερεοποίησης κατά 25sec, τελικά είναι μάλλον σημαντικά. Συνοπτικά, η h_1 επηρεάζει τη χρονική διάρκεια και το ρυθμό απόψυξης στο 1^ο στάδιο της στερεοποίησης και συνεπώς και το χρόνο στερεοποίησης. Ο ρυθμός απόψυξης στο 2^ο και το 3^ο στάδιο μένουν σταθεροί.



Σχήμα 4.12 Επίδραση του h_1 (τιμή του ΣΜΘ κατά το 1^ο στάδιο) στις καμπύλες απόψυξης.

4.6.4.2 Επίδραση της τιμής του t_1

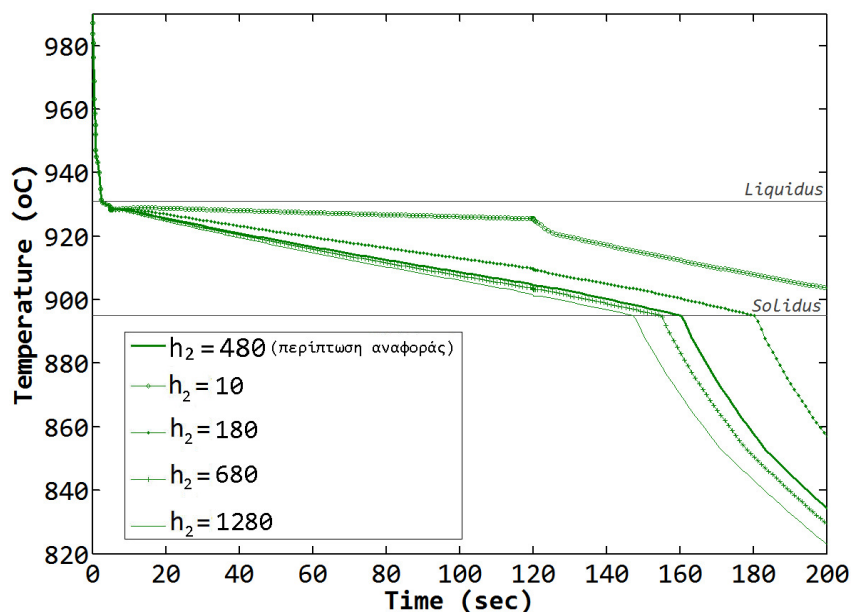
Στο Σχήμα 4.13 φαίνεται η επίδραση της τιμής της t_1 . Η t_1 οριοθετεί τη μετάβαση από το 1^ο στο 2^ο στάδιο. Η καμπύλη απόψυξης πολύ λίγο επηρεάζεται από την τιμή της παραμέτρου αυτής. Γίνεται, ωστόσο, φανερή η ασυνέχεια στην καμπύλη απόψυξης στο σημείο αλλαγής της τιμής του ΣΜΘ, πράγμα που σημαίνει πως ενδεχομένως η τιμή του t_1 παίζει μεγαλύτερο ρόλο σε περίπτωση που υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά μεταξύ h_1 και h_2 .



Σχήμα 4.13 Επίδραση του t_1 στις καμπύλες απόψυξης.

4.6.4.3 Επίδραση της τιμής του h_2

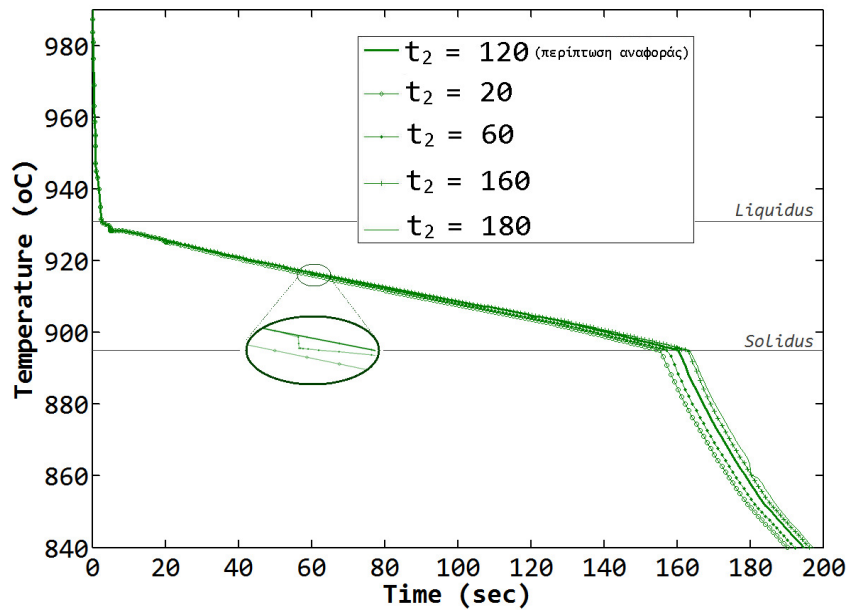
Από το Σχήμα 4.14 προκύπτει πως η μεταβολή της τιμής του ΣΜΘ κατά το 2^ο στάδιο επηρεάζει πολύ σημαντικά τον τρόπο απόψυξης του χυτού. Μία σχετικά μεγάλη τιμή h_2 επιταχύνει την απόψυξη και καταλήγει σε χρόνο στερεοποίησης τα 150sec, ενώ μία μικρή τιμή h_2 μετατοπίζει το χρόνο στερεοποίησης σε χρόνους μετά τα 220sec.



Σχήμα 4.14 Επίδραση του h_2 (τιμή του ΣΜΘ κατά το 2^ο στάδιο) στις καμπύλες απόψυξης.

4.6.4.4 Επίδραση της τιμής του t_2

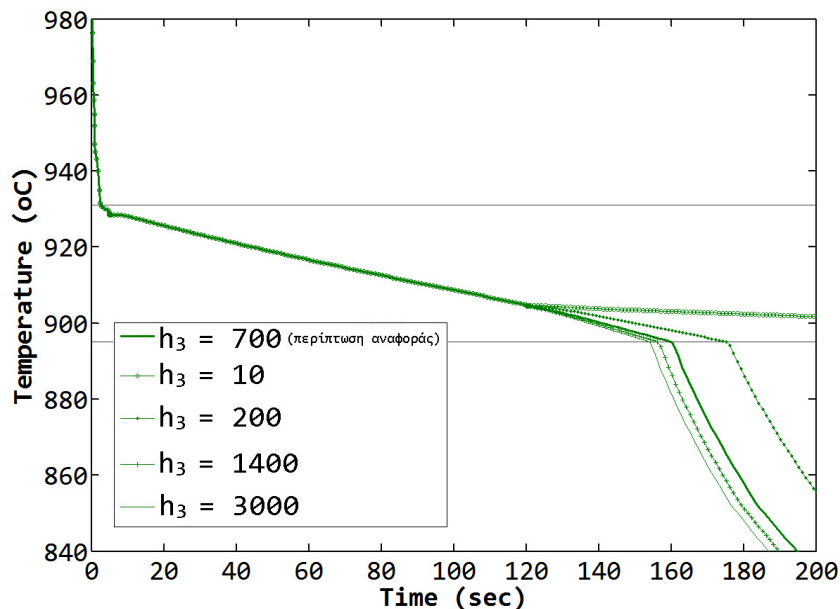
Η τιμή του t_2 , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.15 επιδρά στο χρόνο στερεοποίησης. Αύξηση του t_2 κατά 160sec μετατοπίζει το χρόνο απόψυξης κατά 10sec, δηλαδή όχι σημαντικά.



Σχήμα 4.15 Επίδραση του t_2 (χρονική στιγμή πέρατος 2^{ου} σταδίου) στις καμπύλες απόψυξης.

4.6.4.5 Επίδραση της τιμής του h_3

Τέλος, στο Σχήμα 4.16 φαίνεται ο τρόπος που η παράμετρος h_3 επηρεάζει την αριθμητική καμπύλη απόψυξης του χυτού. Η παράμετρος αυτή ενεργοποιείται μετά το 120^οsec. Φαίνεται, ωστόσο, πως επηρεάζει καθοριστικά το 3^ο στάδιο της απόψυξης. Ο ρυθμός απόψυξης στην περίπτωση που $h_3=10\text{W/m}^2/\text{K}$ διαφέρει σημαντικότητα από ό,τι στην περίπτωση $h_3=3000\text{W/m}^2/\text{K}$



Σχήμα 4.16 Επίδραση του h_3 (τιμή του ΣΜΘ κατά το 3^ο στάδιο) στις καμπύλες απόψυξης.

4.6.5 Επίδραση λοιπών παραμέτρων

Όλες οι παράμετροι της προσομοίωσης δοκιμάστηκαν και ελέγχθηκαν ως προς την επίδρασή τους στα αποτελέσματα. Οι παράμετροι που αναφέρθηκαν νωρίτερα ήταν οι περισσότερο σημαντικές. Στην παράγραφο αυτή, αναφέρονται οι σημαντικότερες από τις υπόλοιπες παραμέτρους που εξετάστηκαν, που όμως δεν είχαν σημαντική επίδραση στο αποτέλεσμα, για αυτό δεν κρίθηκε σκόπιμη η εκτενής παρουσίαση αποτελεσμάτων.

Αρχικά, μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας έγχυσης του τήγματος. Η θερμοκρασία έγχυσης του τήγματος ορίζεται μέσω της οριακής συνθήκης “Inlet”, που περιλαμβάνει ορισμού της θερμοκρασίας έγχυσης και της παροχής μάζας τήγματος (flowrate).

Από μελέτη ακραίων τιμών θερμοκρασίας έγχυσης, προκύπτει πως υπάρχει έντονη επίδραση στο ρυθμό απόψυξης κατά το 1^ο στάδιο και επίσης, παρατηρείται έντονη εμφάνιση πορώδους σε περιπτώσεις υψηλής θερμοκρασίας έγχυσης. Στις μικρότερες θερμοκρασίες έγχυσης, η ευαισθησία του πορώδους στην παράμετρο αυτή είναι πολύ μικρότερη. Επισημαίνεται, επίσης, πως δεν υπάρχει άμεση και ακριβής πειραματική μέτρηση για τη θερμοκρασία έγχυσης. Υπάρχει η ένδειξη του θερμοστοιχείου του θαλάμου τήξης και μπορεί να υπάρχει μέτρηση της θερμοκρασίας του μετάλλου μετά την είσοδό του στο καλούπι. Υπάρχει και στις δύο περιπτώσεις μία απώλεια πληροφορίας. Με κατάλληλη προσαρμογή, ωστόσο, η συγκεκριμένη οριακή συνθήκη μπορεί να οριστεί επαρκώς.

Η παροχή μάζας τήγματος, επίσης, είναι μία παράμετρος που δύσκολα μπορεί να μετρηθεί, μπορεί, όμως να υπολογιστεί με χρήση αναλυτικών σχέσεων. Παίζει ρόλο στον τρόπο πλήρωσης του χυτού. Τα υπόλοιπα αποτελέσματα, όμως, για μία τόσο μικρή γεωμετρία όπως αυτή που μελετάται στη ΔΔ, δεν επηρεάζονται σημαντικά.

Μία ακόμα επιλογή που ελέγχθηκε ήταν η χρήση της οριακής συνθήκης “Vent”, η οποία χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις χύτευσης που υπάρχουν αγωγοί απαγωγής αερίων. Αυτή η οριακή συνθήκη σε συνδυασμό με την παράμετρο “GAS” της προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για να λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις των εγκλωβισμένων αερίων στη μάζα του τήγματος. Το σκεπτικό ήταν να ελεγχθεί εάν με την εφαρμογή τα φαινόμενα αυτά διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Το καλούπι από γύψο που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη μέθοδο διαθέτει πόρους, μέσω των οποίων στην πράξη υπάρχει δυνατότητα να βρουν διέξοδο τα εγκλωβισμένα αέρια. Στην προσομοίωση, όμως, η ενεργοποίηση του αλγορίθμου για την κίνηση των αερίων δεν κατέληγε σε διαφορετικό αποτέλεσμα.

4.6.6 Επιπρόσθετη Διερεύνηση για την Επίδραση του ΣΜΘ σε Δοκιμαστικές Γεωμετρίες

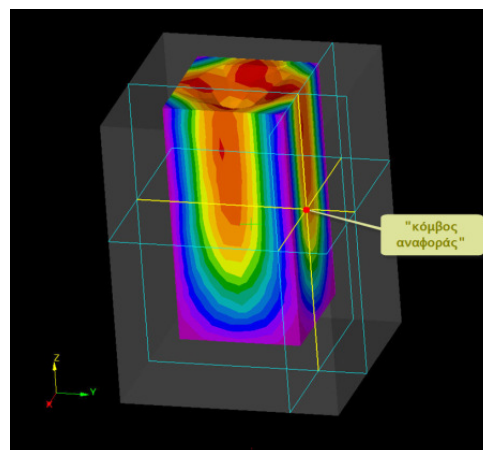
Από τη διερεύνηση που προηγήθηκε φάνηκε πως από τις παραμέτρους της προσομοίωσης της χύτευσης κάποιες παράμετροι παίζουν σημαντικό ρόλο αλλά είναι γνωστές από τη διεξαγωγή του πειράματος, άλλες παράμετροι παίζουν πολύ μικρό ρόλο, οπότε η γνώση τους δεν επηρεάζει και υπάρχει και μία παράμετρος που επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό, χωρίς να είναι γνωστή. Η παράμετρος αυτή είναι ο ΣΜΘ. Επειδή ο προσδιορισμός του ΣΜΘ αποτελεί το αντικείμενο διερεύνησης των επόμενων κεφαλαίων, στο σημείο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα κάποιων επιπρόσθετων δοκιμών. Θεωρήθηκαν δύο πολύ απλές γεωμετρίες χυτών και πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της χύτευσης για διαφορετικά υλικά και για διαφορετική μέθοδο χύτευσης από ό,τι στις προηγούμενες παραγράφους.

4.6.6.1 Διερεύνηση Επίδρασης ΣΜΘ για τη Δοκιμαστική Γεωμετρία 1

Η «Γεωμετρία 1» που επιλέχθηκε είναι η γεωμετρία που φαίνεται στο Σχήμα 4.17. Ο κόμβος που επισημαίνεται με κόκκινο χρώμα είναι ο κόμβος που επιλέχθηκε ως «κόμβος αναφοράς». Το είδος χύτευσης που μοντελοποιήθηκε είναι χύτευση αλουμινίου σε μεταλλική μήτρα (Χάλυβας H13), με αρχική θερμοκρασία τήγματος 700°C , ταχύτητα παροχής τήγματος 1kg/s και οριακές συνθήκες: απόψυξη στον αέρα (με θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και $\text{film coefficient}=10\text{W/m}^2\text{K}$).

Ο ΣΜΘ που χρησιμοποιήθηκε για την «περίπτωση αναφοράς» είχε τιμή:

$$[h_1 \ t_1 \ h_2 \ t_2 \ h_3] = [1000.00 \ 2.10 \ 200.00 \ 25.60 \ 800.00].$$



Σχήμα 4.17 Η «Δοκιμαστική Γεωμετρία 1».

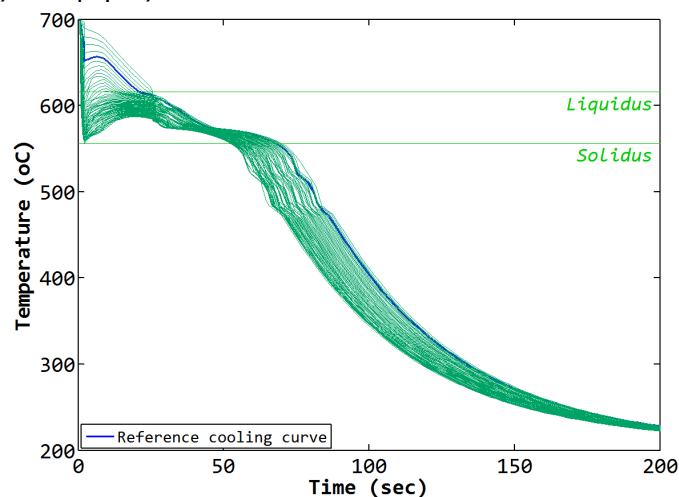
Η μοντελοποίηση είναι βασισμένη σε μία περίπτωση προτείνεται που προτείνεται από την εταιρεία του λογισμικού προσομοίωσης της χύτευσης σαν “test case”.

Ο Πίνακας 4.10 παρουσιάζει το σύνολο των τιμών της κάθε μεταβλητής που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση.

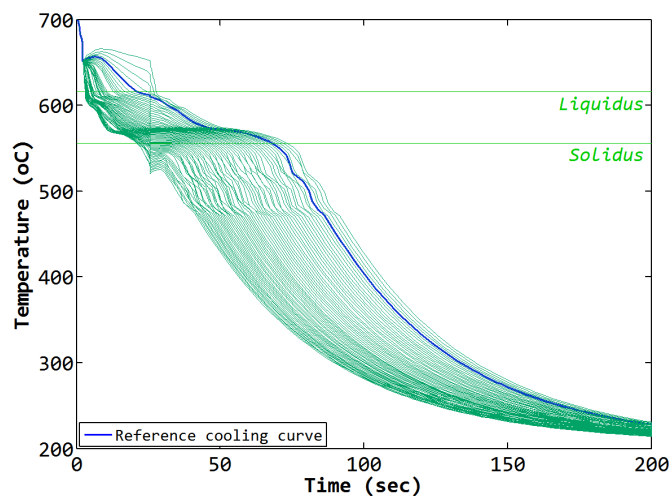
Πίνακας 4.10 Οι τιμές των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση ευαισθησίας της τιμής του κόστους σε κάθε μία από τις μεταβλητές της «Γεωμετρίας 1».

	h1	t1	h2	t2	h3
-80%	200	0.42	40	5.12	160
-60%	400	0.84	80	10.24	320
-40%	600	1.26	120	15.36	480
-20%	800	1.68	160	20.48	640
0%	1000	2.1	200	25.6	800
20%	1200	2.52	240	30.72	960
40%	1400	2.94	280	35.84	1120
60%	1600	3.36	320	40.96	1280
80%	1800	3.78	360	46.08	1440
100%	2000	4.2	400	51.2	1600
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1100.0%	12000	25.2	2400	307.2	9600

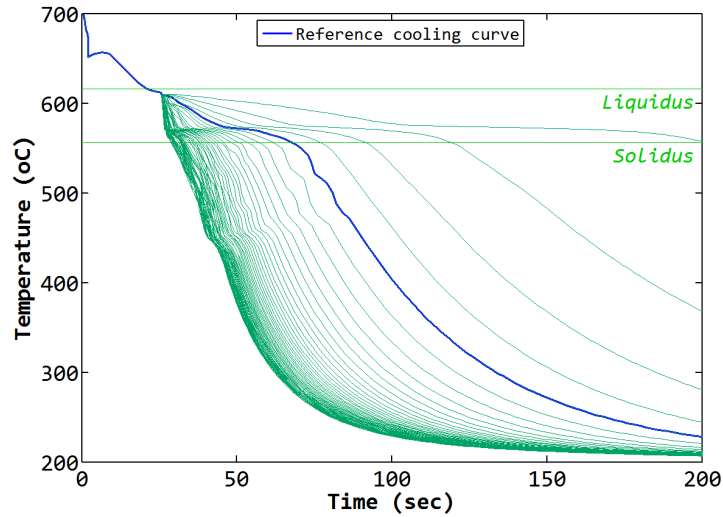
Τα Σχήματα 1.18-1.22 παρουσιάζεται η επίδραση των τιμών του ΣΜΘ στις αριθμητικές καμπύλες απόψυξης. Επισημαίνεται με μπλε χρώμα η καμπύλη της «περίπτωσης αναφοράς».



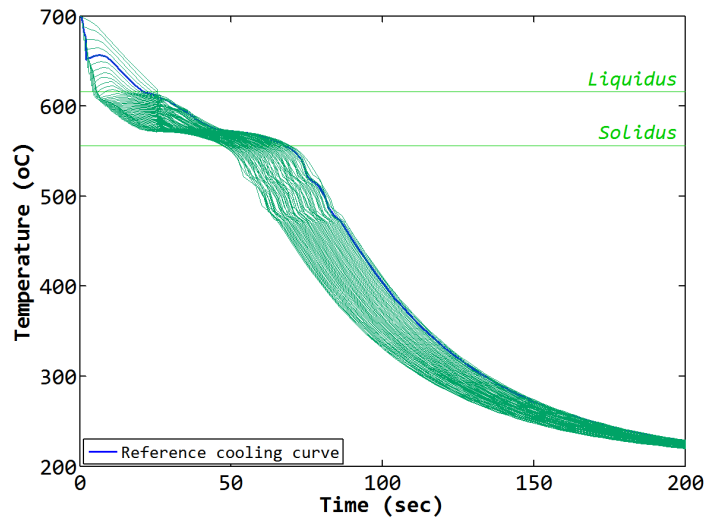
Σχήμα 4.18 Επίδραση της μεταβλητής h_1 στην καμπύλη απόψυξης του χυτού.



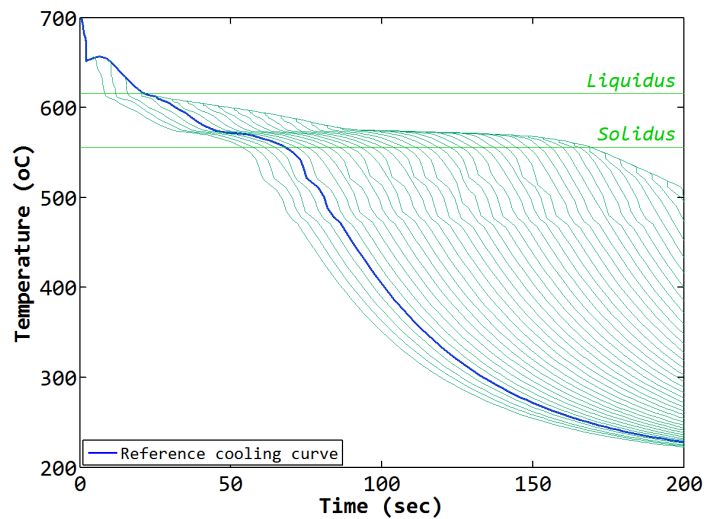
Σχήμα 4.19 Επίδραση της μεταβλητής h_2 στην καμπύλη απόψυξης του χυτού.



Σχήμα 4.20 Επίδραση της μεταβλητής h_3 στην καμπύλη απόψυξης του χυτού.



Σχήμα 4.21 Επίδραση της μεταβλητής t_1 στην καμπύλη απόψυξης του χυτού.



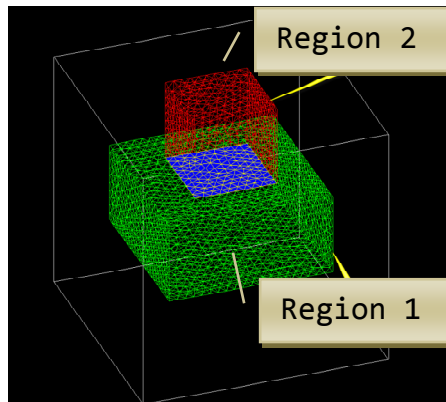
Σχήμα 4.22 Επίδραση της μεταβλητής t_2 στην καμπύλη απόψυξης του χυτού.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται η έντονη επίδραση των τιμών του ΣΜΘ στις αριθμητικές καμπύλες απόψυξης. Συνεπώς, η τιμή του ΣΜΘ θα

πρέπει να προσδιορίζεται προκειμένου να έχει νόημα το αποτέλεσμα της προσομοίωσης.

4.6.6.2 Διερεύνηση Επίδρασης ΣΜΘ για τη Δοκιμαστική Γεωμετρία 2

Έχοντας ολοκληρώσει τις δοκιμές στη δοκιμαστική περίπτωση με την 1^η γεωμετρία, το επόμενο βήμα είναι να πραγματοποιηθεί μία δεύτερη δοκιμή με δοκιμαστικό τεμάχιο (Σχήμα 4.23). Αυτή τη φορά, το χυτό αποτελείται από δύο περιοχές: μία περιοχή μεγαλύτερης ορθογωνικής διατομής και μία περιοχή μικρότερης ορθογωνικής διατομής.



Σχήμα 4.23 Η «Δοκιμαστική Γεωμετρία 2».

Στην κάθε περιοχή θεωρείται πως ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι διαφορετικός. Επιλέγονται αυθαίρετα δύο ΣΜΘ και ανατίθενται στην κάθε περιοχή, σαν οριακή συνθήκη διεπιφάνειας. Διεξάγεται προσομοίωση της χύτευσης και λαμβάνεται σαν output η καμπύλη απόψυξης σε δύο σημεία: σε έναν χαρακτηριστικό κόμβο της επιφάνειας της μεγάλης διατομής και σε έναν κόμβο της επιφάνειας της μικρής διατομής. Θεωρούμε πως η προσομοίωση αυτή είναι η «περίπτωση αναφοράς». Οι δύο ΣΜΘ που χρησιμοποιήθηκαν θα αποτελούν τη «λύση» του προβλήματος.

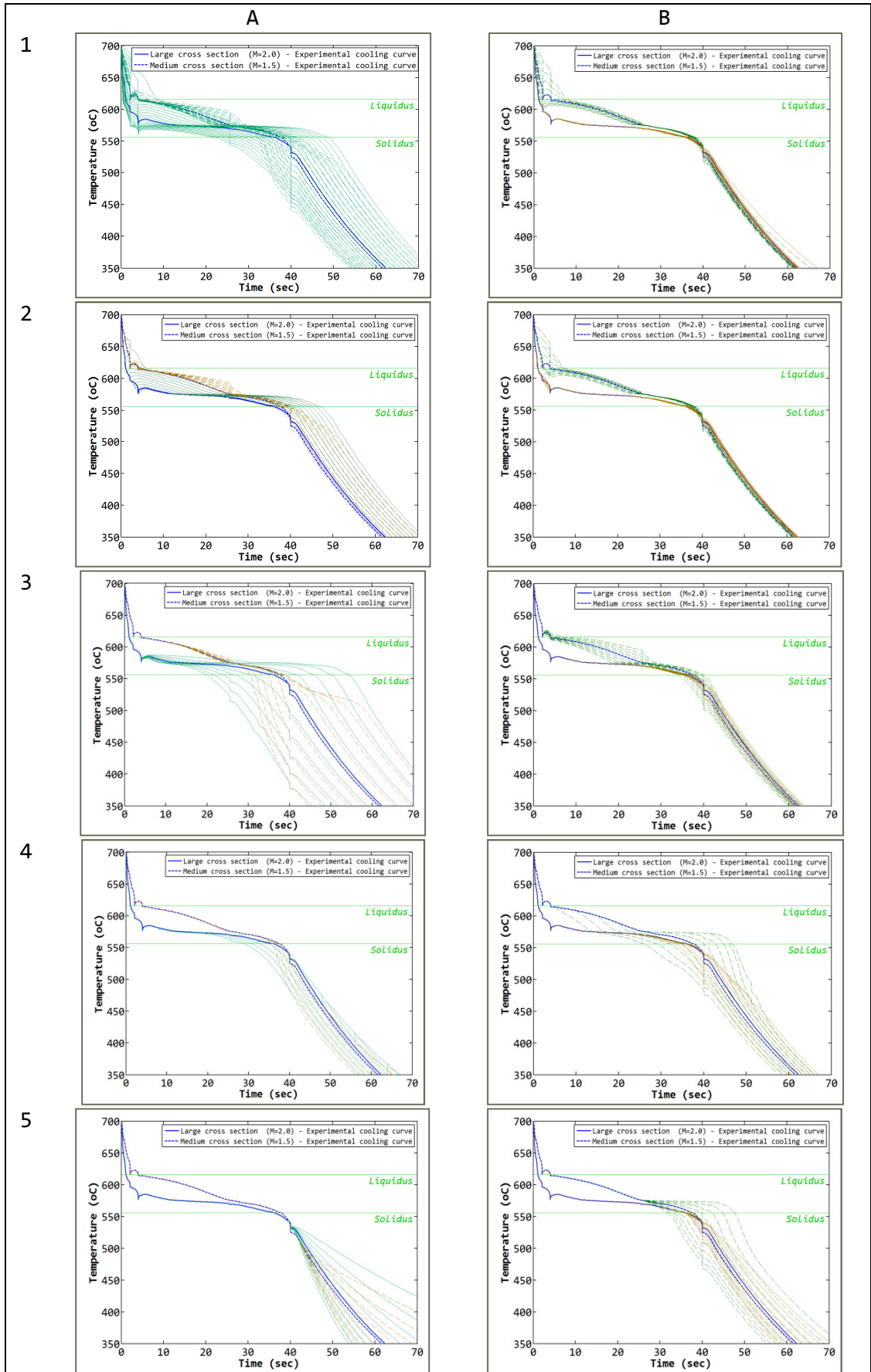
Με την ίδια γεωμετρία και συνθήκες χύτευσης, θεωρώντας γνωστές τις καμπύλες απόψυξης στα δύο σημεία του «πειράματος» και θεωρώντας άγνωστους τους ΣΜΘ στις δύο περιοχές, θα επιχειρηθεί ο προσδιορισμός των δύο ΣΜΘ, με χρήση βελτιστοποίησης (Γ.Α.). Η λογική για τη δοκιμή αυτή, είναι να παρατηρηθεί η εξέλιξη του γενετικού αλγορίθμου και να διαπιστωθεί η ικανότητά του να εντοπίσει την «πραγματική λύση» του προβλήματος.

Η μορφή του ΣΜΘ στην περίπτωση αυτή είναι:

$$X = [h1_{region1} \ t1_{region1} \ h2_{region1} \ t2_{region1} \ h3_{region1} \ h1_{region2} \ t1_{region2} \ h2_{region2} \ t2_{region2} \ h3_{region2}] \quad (1 \times 10)$$

Στον Πίνακα 1.11 συνοψίζονται τα αποτελέσματα του πειραματισμού για διάφορες τιμές ΣΜΘ. Η «Στήλη Α» αφορά σε πειραματισμό με το ΣΜΘ για τη μικρή περιοχή του χυτού, ενώ η «Στήλη Β» αφορά στη μεγάλη περιοχή. Οι γραμμές 1, 2, 3, 4 & 5 αντιστοιχούν στα h_1 , t_1 , h_2 , t_2 και h_3 .

Πίνακας 4.11 Επίδραση των τιμών των ΣΜΘ στις αριθμητικές καμπύλες, για τη «Γεωμ.2».



4.7 Προσομοίωση Πραγματικών Περιπτώσεων Χύτευσης

Από τα πειράματα που έχουν διεξαχθεί έγινε επιλογή εκείνων που η αρχική θερμοκρασία του τήγματος και η θερμοκρασία καλουπιού ήταν κατά το δυνατόν ίδιες, και άλλαζαν οι συνθήκες πίεσης στον πάνω και στον κάτω θάλαμο της μηχανής χύτευσης. Από τις πειραματικές καμπύλες απόψυξης των συγκεκριμένων περιπτώσεων προέκυψαν - με τη διαδικασία της δοκιμής - και - σφάλματος (trial-and-error) - οι αντίστοιχοι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας για ορείχαλκο, υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες. Χρησιμοποιώντας αυτούς τους συντελεστές και τις αρχικές και οριακές συνθήκες των προαναφερθέντων πειραμάτων, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της χύτευσης για διάφορα δέντρα χύτευσης.

4.7.1 Χυτεύσεις με Διαφορετικές «Συνθήκες Πίεσης»

Από τα πειράματα που έχουν διεξαχθεί, επιλέχθηκαν εκείνα οι συνθήκες χύτευσης ήταν τέτοιες ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των συνθηκών πίεσης. Η επαναληψιμότητα των πειραμάτων λόγω της φύσης της χύτευσης δεν είναι ιδιαίτερα πολύ καλή. Τα πειράματα που ήταν περισσότερο συγκρίσιμα είναι αυτά που ακολουθούν.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για 9 περιπτώσεις χύτευσης του συγκεκριμένου χυτού που μελετήσαμε. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται και αναλύονται είναι ο τρόπος πλήρωσης, ο χρόνος πλήρωσης, το ποσοστό στερεοποίησης σε διάφορες χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές, ο χρόνος στερεοποίησης και το πορώδες λόγω συρρίκνωσης.

Πίνακας 4.12 Προσομοιώσεις «2^{ης} Ομάδας ΔΡ», για τη διερεύνηση της επίδραση των συνθηκών χύτευσης στη χύτευση CuZn33, με (P;730;960).

	Πείραμα#1 Χύτευση Κενού	Πείραμα#2 Χύτευση Υπερπίεσης	Πείραμα#3 Χύτευση Υπερπίεσης- Κενού	Πείραμα#4 Χύτευση 50% Κενού	Πείραμα#5 Χύτευση Βαρύτητας
Tmould (°C)	730				
Tmetal (°C)	960				
Πίεση στο θάλαμο τήξης (bar)	1.00	1.50	1.50	1.00	1.00
Πίεση στο θάλαμο χύτευσης (bar)	0.03	1.00	0.03	0.50	1.00

Πίνακας 4.13 Πίνακας τιμών ΣΜΘ για τα διαφορετικά είδη χύτευσης

ΣΜΘ W/m ² /K	Πείραμα. #1 Χύτευση Κενού	Πείραμα#2 Χύτευση με Υπερπίεση	Πείραμα#3 Χύτευση Υπερπίεσης- Κενού	Πείραμα#4 Χύτευση με 50%Κενό	Πείραμα#5 Χύτευση Βαρύτητας
h1	10000	5000	12000	7000	1500
h2	500	100	300	200	50
h3	2000	2000	850	1800	2500

Πίνακας 4.14 Διάρκεια σταδίων 1,2 & 3, στα οποία αντιστοιχούν οι τιμές h1,h2&h3 του ΣΜΘ

	Πείραμα. #1 Χύτευση Κενού	Πείραμα#2 Χύτευση με Υπερπίεση	Πείραμα#3 Χύτευση Υπερπίεσης- Κενού	Πείραμα #4 Χύτευση με 50%Κενό	Πείραμα #5 Χύτευση Βαρύτητας
t1(sec)	8.0	10.0	5.4	10.0	2.5
t2 (sec)	118.0	30.0	28.0	30.0	20.0

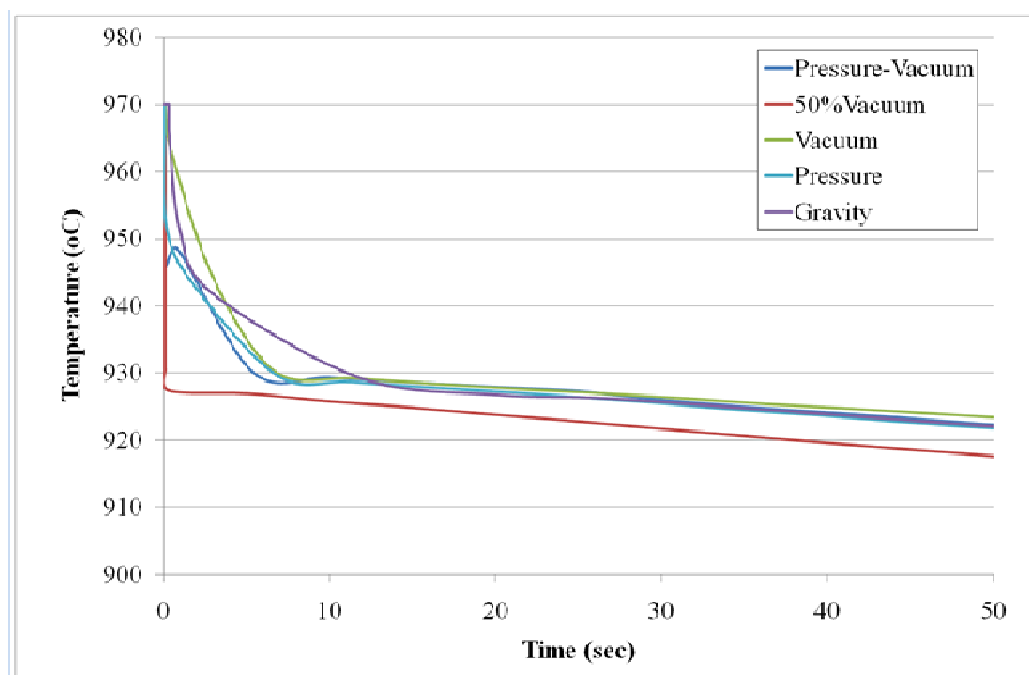
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις πέντε περιπτώσεις χύτευσης που περιγράφονται στον πίνακα. Για την προσομοίωση της χύτευσης για την κάθε περίπτωση, χρησιμοποιήθηκαν τιμές του ΣΜΘ που υπολογίστηκαν στα πλαίσια της ΔΔ στο κεφάλαιο 5. Ήταν αναγκαία η χρήση ξεχωριστού ΣΜΘ για την κάθε περίπτωση, καθώς το ΣΜΘ εξαρτάται και από τις συνθήκες χύτευσης, βλ. §1.9, σελ.56.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στη συνέχεια και είναι (α) ο χρόνος στερεοποίησης, όπως αυτός προκύπτει τόσο από τη χρωματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, όσο και από το σχεδιασμό των καμπυλών απόψυξης του χυτού, (β) το πορώδες και (γ) η ποιότητα πλήρωσης.

Στο Σχήμα 4.24 παρουσιάζονται οι καμπύλες απόψυξης που προέκυψαν για τα 5 σενάρια χύτευσης του Πίνακα 4.1. Αφορούν σε σημείο που αντιστοιχεί στο σημείο τοποθέτησης του θερμοστοιχείου κατά το πείραμα. Οι διαφορετικών χρωμάτων καμπύλες αναφέρονται σε διαφορετικές συνθήκες χύτευσης

Αρχικά, παρατηρείται πως η καμπύλη απόψυξης για χύτευση με 50% κενό ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες. Αυτή η συμπεριφορά συνέβαινε και στο πείραμα (βλ. Σχήμα 3.11, σελ. 162) και ακολουθείται και στην προσομοίωση. Υπάρχει μία πολύ έντονη πτώση της συγκεκριμένης καμπύλης στα πρώτα ms της χύτευσης κι έτσι η έναρξη της στερεοποίησης ξεκινά 6-7sec νωρίτερα από τις υπόλοιπες καμπύλες. Αυτό κατά πάσα πιθανότητα δεν οφείλεται στις συνθήκες πίεσης μόνο, αλλά στο συνδυασμό της συνθήκης πίεσης με διαφορές και στις υπόλοιπες συνθήκες χύτευσης. Γι αυτό στη συνέχεια των συγκρίσεων, η περίπτωση αυτή αγνοείται.

Αναφορικά με τις υπόλοιπες τέσσερις καμπύλες, η καμπύλη που αντιστοιχεί στη χύτευση βαρύτητας φαίνεται να διαφέρει από τις υπόλοιπες τρεις κατά τα πρώτα λίγα δευτερόλεπτα της στερεοποίησης. Φαίνεται πως για τα πρώτα, αυτά, δευτερόλεπτα, ο ρυθμός απόψυξης εξαρτάται από τις συνθήκες πίεσης μεταξύ των δύο θαλάμων, ως εξής (με φθίνουσα σειρά): εφαρμογή υπερπίεσης-κενού, εφαρμογή μόνο υπερπίεσης, χύτευση βαρύτητας και χύτευση κενού.



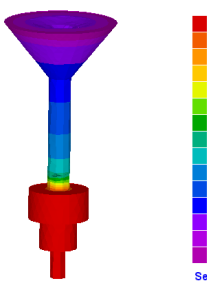
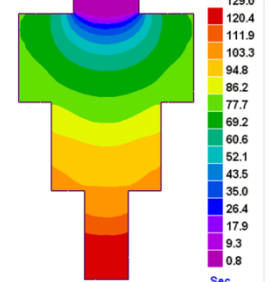
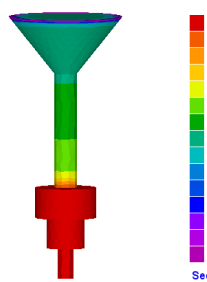
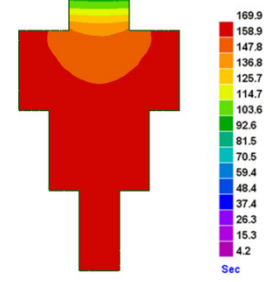
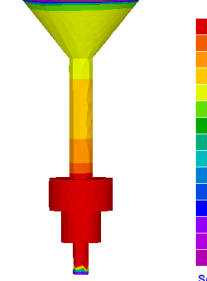
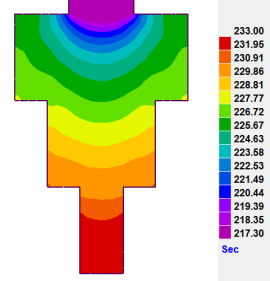
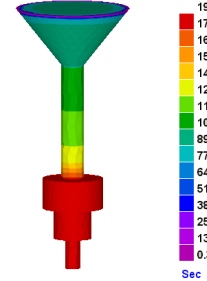
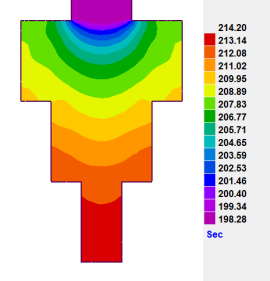
Σχήμα 4.24 Αριθμητικές καμπύλες απόψυξης που αποκτήθηκαν για τις πέντε εξεταζόμενες περιπτώσεις χύτευσης του Πίνακα 4.1, για τα πρώτα 10sec της στερεοποίησης.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στους επόμενους δύο πίνακες. Τα αποτελέσματα που μελετώνται είναι ο χρόνος στερεοποίησης, το πορώδες και η ποιότητα πλήρωσης του καλουπιού. Είναι εμφανές πως η ποιότητα πλήρωσης σε όλες τις περιπτώσεις είναι ικανοποιητική, δεδομένου ότι δεν παρατηρούνται κενά. Αναφέροντας τις μεθόδους χύτευσης με φθίνουσα σειρά ως προς το χρόνο στερεοποίησης, αυτές είναι: χύτευση κενού, υπερπίεση-κενού, χύτευση με υπερπίεση και χύτευση βαρύτητας.

Ο Πίνακας 4.15 παρουσιάζει με τη μορφή χρωματικής απεικόνισης τα αποτελέσματα για το χρόνο στερεοποίησης των χυτών. Η χρωματική κλίματα στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων στην τομή του χυτού διαφέρει από την κλίματα για ολόκληρο το χυτό. Στόχος είναι να αναδειχθούν λεπτομερέστερα τα χαρακτηριστικά της χύτευσης.

Παρατηρείται πως η χύτευση κενού είναι η περίπτωση χύτευσης με την πλέον ομοιόμορφη στερεοποίηση στο χυτό. Ο ελάχιστος και ο μέγιστος χρόνος στερεοποίησης του χυτού διαφέρουν πολύ λίγα δευτερόλεπτα. Αντίθετα, οι χυτεύσεις με υπερπίεση παρουσιάζουν έντονη ανομοιομορφία. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί και τα αποτελέσματα για το πορώδες (Πίνακας 4.16).

Πίνακας 4.15 Αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων των περιπτώσεων χύτευσης του πίνακα 1.12. Απεικονίζεται ο χρόνος στερεοποίησης του χυτού με τη μορφή χρωματικής κλίμακας για ολόκληρο το χυτό και για τη μέση τομή.

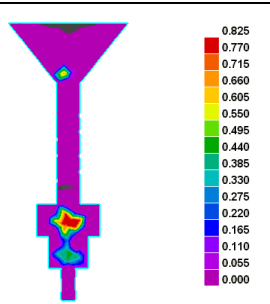
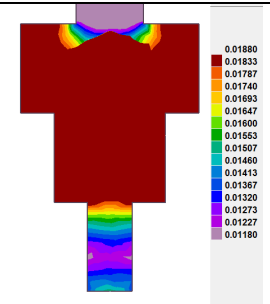
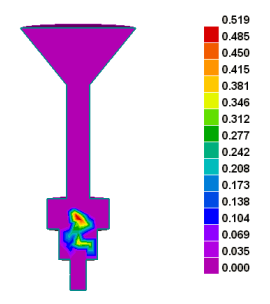
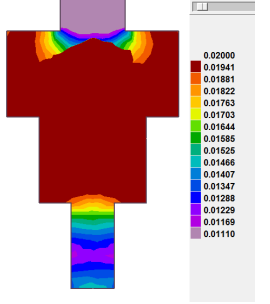
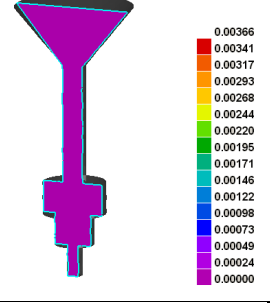
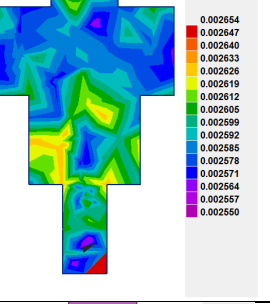
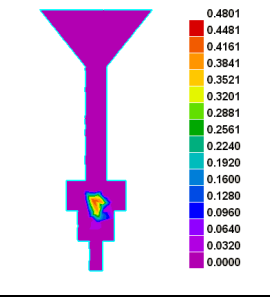
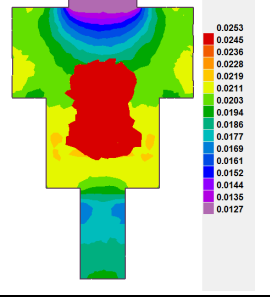
Είδος Χύτευσης	ΔΡ	Χρόνος Στερεοποίησης	
		Σε ολόκληρο το δέντρο χύτευσης	Στη μέση τομή του χυτού
Χύτευση Βαρύτητας	0		
Χύτευση Υπερπίεσης	0.5		
Χύτευση Κενού	1		
Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού	1.5		

Μία παρατήρηση που μπορεί να γίνει σχετικά με τα αποτελέσματα είναι πως κριτήριο της ποιότητας της προσομοίωσης ήταν η προσέγγιση της αριθμητικής καμπύλης απόψυξης στις επιφάνεια της μεγάλης περιοχής του χυτού με τα πειραματικά δεδομένα. Θεωρήθηκε ενιαίος ΣΜΘ σε όλη τη μάζα του χυτού. Με άλλα λόγια, θεωρήθηκε απαγόταν θερμότητα με ίδιο ρυθμό από όλα τα σημεία του χυτού. Ίσως αυτός είναι ο λόγος που προκύπτει πως το λεπτότερο τμήμα του χυτού που στερεοποιείται πολύ αργά. Το αποτέλεσμα αυτό δεν είναι αναμενόμενο. Φαίνεται πως θα έπρεπε να

αποδοθεί στη συγκεκριμένη περιοχή κάποιος ΣΜΘ που να υποδεικνύει ταχύτερη απόψυξη.

Ο Πίνακας 4.16 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για το πορώδες.

Πίνακας 4.16 Αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων των περιπτώσεων χύτευσης του πίνακα 1.12. Απεικονίζεται το πορώδες του χυτού με τη μορφή χρωματικής κλίμακας για ολόκληρο το χυτό και για τη μέση τομή.

Είδος Χύτευσης	ΔΡ	Πορώδες	
		Σε ολόκληρο το δέντρο χύτευσης	Στη μέση τομή του χυτού
Χύτευση Βαρύτητας	0		
Χύτευση Υπερπίεσης	0.5		
Χύτευση Κενού	1		
Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού	1.5		

Η αντίστοιχη σειρά για το πορώδες είναι: χύτευση κενού, χύτευση υπερπίεσης-κενού, χύτευση υπερπίεσης και χύτευση βαρύτητας.

Παρατηρείται πως, όταν ο χρόνος στερεοποίησης είναι μεγάλος, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της χύτευσης κενού, τότε το πορώδες παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα και χαρακτηρίζεται ως μικροπορώδες. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις χύτευσης του Πίνακα 4.1, το εμφανιζόμενο πορώδες χαρακτηρίζεται ως μακροπορώδες.

Πίνακας 4.17 Αποτελέσματα προσομοίωσης: χρόνος στερεοποίησης, πορώδες και ποιότητα πλήρωσης.

ΔΡ	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΧΥΤΕΥΣΗΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ		ΠΟΡΩΔΕΣ		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ
		min	max	max	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	
0	Χύτευση Βαρύτητας	120.4	129.0	0.825	Μακροπορώδες	Καλή
1.00	Χύτευση Κενού P=0.00bar	234.2	250.8	0.00366	Μικροπορώδες	Καλή
1.50	Χύτευση Υπερπίεσης (P=0.5bar) - Κενού (P=0.00bar)	179.3	192.1	0.4801	Μακροπορώδες	Καλή
0.5	Χύτευση Υπερπίεσης (P=0.5bar)	158.9	169.9	0.519	μακροπορώδες	Καλή

Ο Πίνακας 4.17 περιέχει συγκεντρωτικά εικόνες από τα αποτελέσματα των τεσσάρων προσομοιώσεων του Πίνακα 4.1 (χρόνο στερεοποίησης και πορώδες) με απεικόνιση σε χρωματική κλίμακα όπου φαίνονται η εξέλιξη της στερεοποίησης στο δέντρο χύτευσης και η ομοιομορφία της στερεοποίησης στο χυτό. Επιπρόσθετα, φαίνονται ξεκάθαρα οι ακριβείς θέσεις εμφάνισης πορώδους.

Στη χύτευση βαρύτητας, το πορώδες εμφανίζεται στη βάση του δέντρου χύτευσης, στα σημεία 3 και 5 (βλ. Σχήμα 3.42). Η εφαρμογή υπερπίεσης και μόνο κατά τη χύτευση, αποτελεί τη χειρότερη περίπτωση ως προς το πορώδες, καθώς εμφανίζεται στα σημεία 2, 3 και 5. Ακολουθεί η περίπτωση χύτευσης υπερπίεσης-κενού, στην οποία πορώδες εμφανίζεται στα σημεία 3 και 5. Τέλος, στην περίπτωση της χύτευσης κενού, τα επίπεδα πορώδους είναι μηδενικά.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του πορώδους που προέκυψαν από την προσομοίωση, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα πορώδους από τα πειράματα (κεφάλαιο 3), μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα. Καταρχάς, τα πειραματικά αποτελέσματα αφορούν σε μεγέθη που προέκυψαν από ανάλυση εικόνας και συνεπώς, πρόκειται για πορώδες σε δύο διαστάσεις (επίπεδες τομές). Αντιθέτως, τα αποτελέσματα πορώδους από την προσομοίωση είναι αποτέλεσμα ογκομετρικών υπολογισμών, που αναφέρονται στο ποσοστό

στερεοποίησης και την πυκνότητα στο κάθε μοναδιαίο όγκο του χυτού. Συνεπώς, τα αποτελέσματα δεν μπορούν να συγκριθούν σαν αριθμητικές τιμές. Μπορεί, ωστόσο, να γίνει μία ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Και στις δύο περιπτώσεις (πείραμα και προσομοίωση), η χύτευση κενού αποτελεί το καλύτερο σενάριο, εφόσον εμφανίζεται μόνο μικροπορώδες, και αυτό σε πολύ χαμηλά επίπεδα τιμών. Στη χύτευση με υπερπίεση, τόσο η προσομοίωση όσο και το πείραμα δείχνουν πως εμφανίζεται πορώδες στα σημεία 3 και 5, σε συγκρίσιμη έκταση.

Με αναφορά το σημείο 3, οι μέθοδοι χύτευσης με σειρά αυξανόμενου πορώδους βάσει προσομοίωσης είναι: χύτευση κενού, χύτευση υπερπίεσης-κενού, χύτευση βαρύτητας και χύτευση με υπερπίεση.

Με αναφορά το σημείο 4, τα πειράματα έδειξαν πως τα επίπεδα πορώδους είναι χαμηλά σε όλες τις περιπτώσεις, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από την προσομοίωση.

Με αναφορά τα σημεία 1 και 2, μόνον η χύτευση υπερπίεσης-κενού καταλήγει σε υψηλά επίπεδα πορώδους με βάση τις πειραματικές παρατηρήσεις. Κάτι τέτοιο δεν είναι εμφανές από την προσομοίωση. Αντιθέτως, η προσομοίωση έδειξε πως τα αποτελέσματα πορώδους, για τα σημεία 1 και 2 για όλες τις περιπτώσεις, βρίσκονται κάτω από την τιμή 0.032 και έτσι χαρακτηρίζονται ως μικροπορώδες.

4.7.2 Άλλα Σενάρια Χύτευσης

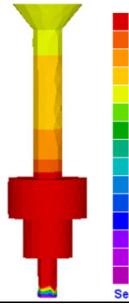

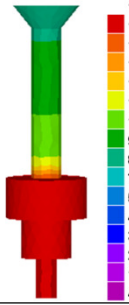
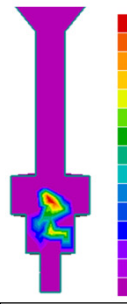
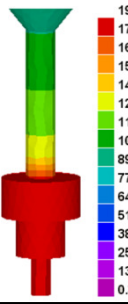
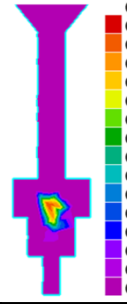
Μέχρι στιγμής παρουσιάστηκαν συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από προσομοιώσεις που αντιστοιχούσαν σε σενάρια χύτευσης με ίδια αρχική θερμοκρασία καλουπιού, ίδια θερμοκρασία έγχυσης τήγματος, με διαφορά στη μέθοδο χύτευσης (διαφορά πιέσεων μεταξύ θαλάμων). Αυτά ήταν τα πιο αντιπροσωπευτικά συγκρίσιμα σενάρια χύτευσης και η σύγκριση των αριθμητικών με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα είναι σε γενικές γραμμές ικανοποιητική.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μεμονωμένα αποτελέσματα προσομοιώσεων από περιπτώσεις χύτευσης που αντιστοιχούν σε αυτές που παρουσιάστηκαν στο πειραματικό μέρος. Παρατίθενται τα αποτελέσματα με τη μορφή εικόνων σε χρωματική κλίματα. Στο τέλος της ενότητας πραγματοποιείται συγκριτικός σχολιασμός και εξαγωγή συμπερασμάτων.

Σημειώνεται πως, για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται, χρησιμοποιήθηκαν οι ΣΜΘ που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5 και υπολογίστηκαν με βάσει πειραματικές μετρήσεις από τα θερμοστοιχεία.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι ο τρόπος και η ταχύτητα πλήρωσης της κοιλότητας του καλουπιού, το ποσοστό στερεοποίησης του χυτού σε κάποιες χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές, ο χρόνος στερεοποίησης του χυτού και το πορώδες που εμφανίζεται κάθε περίπτωση, αναφέρονται αναλυτικά οι συνθήκες χύτευσης που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.

Πίνακας 4.18. Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για τις Περιπτώσεις χύτευσης.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ						ΧΡΟΝΟΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ (sec)	ΠΟΡΩΔΕΣ (Ποσοστό %)
Όνομασία (α/α)	Συνθήκες Κενού (πίεσης)			Θερμοκρασία Καλουπιού (οC)	Αρχική Θερμοκρασία Τήγματος (οC)		
	Θάλαμος Τήξης (Pup)	Θάλαμος Χύτευσης (Pdown)	Χαρακτηρισμός				
1	0	-1.00	V	730	960		
2	+0.5	0	P	730	960		
3	+0.5	-1.00	PV	730	960		

4	0	0	G	730	970		
5	0	-1.00	V	700	960		
6	0	-1.00	V	700	950		
7	0	-1.00	V	700	990		
8	0	-1.00	V	550	960		
9	0	-1.00	V	730	970		

Στον Πίνακα 4.18 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα σενάρια χύτευσης #1-9 με τη μορφή χρωματικής απεικόνισης. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται σαφές πως οι συνθήκες της χύτευσης παίζουν καθοριστικό ρόλο τόσο στο μέγεθος του εμφανιζόμενου πορώδους, όσο και στη θέση εμφάνισης. Έτσι, για παράδειγμα, στο σενάριο χύτευσης #9 φαίνεται να εμφανίζονται πόροι σε μεγάλη έκταση, είναι ωστόσο εντοπισμένοι στο σύστημα τροφοδοσίας του δέντρου χύτευσης. Αυτή είναι μία επιθυμητή κατάσταση, καθώς το δέντρο αποκόπτεται, απορρίπτεται και διατηρείται το χρήσιμο μέρος του χυτού. Αντιθέτως, το σενάριο χύτευσης #2 εμφανίζει πορώδες σε πολύ μικρότερη έκταση. Είναι, όμως, εντοπισμένο σε θέση ενδιαφέροντος, καθιστώντας το χυτό αποτυχημένο.

Στον Πίνακα 4.19 παρουσιάζονται ποσοτικοποιημένα τα αποτελέσματα.

Πίνακας 4.19. Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για τις Περιπτώσεις χύτευσης.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ				ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ (στο χυτό)		ΠΟΡΩΔΕΣ (Ποσοστό πορώδους %)				
Όνομασία (α/α)	Συνθήκες Κενού (πίεσης)			Θερμοκρασία Καλουπιού (οC)	Αρχική Θερμοκρασία Τήγματος(οC)	Χρόνος Στερεοποίησης (στο χυτό)		Ποιότητα στερεοποίησης [1: ομοιογενής, / 2: Μη ομοιογενής]	max	Χαρακτηρισμός [1: μικροπορώδες, / 2: μακροπορώδες]
	Θάλαμος Τήξης (Pup)	Θάλαμος Χύτευσης (Pdown)	Χαρακτηρι- σμός			min	max			
1	0	-1.00	V	730	960	234.2	250.8	1	0.00366	1
2	+0.5	0	P	730	960	158.9	169.9	1	0.519	2
3	+0.5	-1.00	PV	730	960	179.3	192.1	1	0.4801	2
4	0	0	G	730	970	120.4	129.0	1	0.825	2
5	0	-1.00	V	700	960	151.18	161.59	2	0.0489	1
6	0	-1.00	V	700	950	176.33	185.66	2	0.00966	1
7	0	-1.00	V	700	990	169.6	181.7	1	0.1000	1
8	0	-1.00	V	550	960	102.5	123.0	2	0.0364	1
9	0	-1.00	V	730	970	184.4	250.8	2	0.00301	1

*Τιμές πορώδους πάνω από 0.01 θεωρούνται μακροπορώδες.

Από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για επιλεγμένες συνθήκες, με χρήση των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας που προέκυψαν με τον τρόπο που περιγράφηκε στην ενότητα 5.4, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. η δημιουργία πορώδους στις περιπτώσεις χύτευσης βαρύτητας είναι πολύ πιο έντονη από ό,τι στις άλλες περιπτώσεις χύτευσης (περίπτωση 4).
2. Η εφαρμογή υπερπίεσης δημιουργεί πορώδες στο κέντρο της μεγάλης διαμέτρου, μεγάλης έκτασης, υψηλής τιμής (μακροπορώδες) αλλά μικρότερο από την περίπτωση της χύτευσης βαρύτητας.
3. Σε όλες τις περιπτώσεις χύτευσης κενού παρουσιάζεται μικροπορώδες.
4. Συγκρίνοντας τις περιπτώσεις 1 και 8, οι οποίες έχουν ίδια αρχική θερμοκρασία τήγματος, είναι χυτεύσεις κενού, αλλά έχουν διαφορετική θερμοκρασία καλουπιού, προκύπτει ότι η ταχεία στερεοποίηση που προκαλεί η χαμηλή θερμοκρασία καλουπιού έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του πορώδους κατά μία τάξη μεγέθους (από 0.003 σε 0.03). Πρόκειται ωστόσο για μικροπορώδες.
5. Συγκρίνοντας περιπτώσεις με σχετικά παρόμοιες συνθήκες (περιπτώσεις 1 και 9), στις οποίες αλλάζει σχετικά λίγο η θερμοκρασία του τήγματος, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι πολύ παρόμοια. Μπορεί να φανεί μία τάση μείωσης του πορώδους λόγω αύξησης της θερμοκρασίας τήγματος.

Κεφάλαιο 5^ο

Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας κατά τη Χύτευση:
Αναλυτικός, Αντίστροφος και «trial-and-error»
Προσδιορισμός

Η σελίδα αυτή έχει αφεθεί σκοπίμως κενή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗ

5.1 Περιγραφή του Κεφαλαίου

Ο Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας κατά τη Χύτευση (ΣΜΘ), όπως περιγράφηκε αναλυτικότερα σε προηγούμενα κεφάλαια, αποτελεί μία πολύ σημαντική συνθήκη διεπιφάνειας. Πρόκειται για ένα μέγεθος που περιγράφει τον τρόπο απαγωγής θερμότητας από το χυτό προς το καλούπι και περιλαμβάνει όλους τους μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας.

Η τιμή του ΣΜΘ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αριθμητική προσομοίωση μίας διαδικασίας χύτευσης, αποτελεί ένα ζήτημα που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα. Αυτό, διότι ο ΣΜΘ εξαρτάται από τις συνθήκες της κάθε διαδικασίας χύτευσης, δηλαδή τη φύση της μεθόδου, τη σύσταση του χυτευόμενου κράματος, τη θερμοκρασία έγχυσης του τήγματος, τη θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού και τη γεωμετρία του χυτού.

Στο παρόν κεφάλαιο χρησιμοποιούνται οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια χυτεύσεων (βλ. §2.6.1.42.6, σελ.126127), για τον προσδιορισμό του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας με τρεις διαφορετικές μεθόδους:

1. Αναλυτικό προσδιορισμό
2. Αντίστροφο προσδιορισμό
3. Προσδιορισμό με τη διαδικασία δοκιμής-και-σφάλματος.

Οι τρεις αυτές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στη διεθνή βιβλιογραφία, αλλά και στην πράξη.

Για τον αναλυτικό προσδιορισμό του ΣΜΘ μελετήθηκαν τα θερμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη στερεοποίηση και την απόψυξη ενός χυτού. Στην πραγματικότητα, γενική και ακριβής αναλυτική λύση δεν υπάρχει. Οι εξισώσεις ενέργειας για το πραγματικό μεταβατικό, τρισδιάστατο φαινόμενο έχουν μόνο αριθμητική λύση. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις μετάδοσης θερμότητας, με όσες παραδοχές ήταν δυνατό να γίνουν για απλοποίηση του φαινομένου, και διατυπώθηκε μία αναλυτική, έκφραση για το ΣΜΘ, με τη μορφή χρονικών βημάτων. Δεδομένα εισόδου για την αναλυτική έκφραση ήταν οι ιδιότητες των υλικών και οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας κατά τη χύτευση. Η υλοποίηση του αναλυτικού υπολογισμού του ΣΜΘ έγινε στο MATLAB και στο Excel.

Για τον αντίστροφο προσδιορισμό του ΣΜΘ χρησιμοποιήθηκε μία αντίστροφη διαδικασία που προτείνεται στη διεθνή βιβλιογραφία. Για την υλοποίηση, αναπτύχθηκε αλγόριθμος σε MATLAB, ο οποίος χρησιμοποιεί αποτελέσματα από τρισδιάστατη προσομοίωση της χύτευσης με το ProCAST 2004.1[®]. Ο αλγόριθμος ξεκινά με μία αρχική εκτίμηση του ΣΜΘ και μέσω μίας

διαδικασίας ελαχιστοποίησης του σφάλματος μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών απόψυξης, προτείνει το βέλτιστο ΣΜΘ.

Τέλος, χρησιμοποιήθηκε μία διαδικασία βελτιστοποίησης ([R. L. Haupt & S. E. Haupt 2004]) «δοκιμής-και-σφάλματος». Η λογική είναι όμοια με αυτή του αντίστροφου προσδιορισμού, δηλαδή ζητούμενο είναι να βρεθεί ο ΣΜΘ που όταν χρησιμοποιηθεί για αριθμητική προσομοίωση της χύτευσης, θα δώσει αριθμητικά αποτελέσματα που θα προσεγγίζουν πολύ καλά τα αντίστοιχα πειραματικά. Η διαφορά είναι πως σε αυτή την περίπτωση οι τιμές του ΣΜΘ που δοκιμάζονται δεν προκύπτουν από κάποια αριθμητική διαδικασία, αλλά από την κρίση του ανθρώπου που εκτελεί τη διαδικασία. Συνεπώς, για την υλοποίηση πραγματοποιήθηκε πολύ μεγάλο πλήθος προσομοιώσεων της χύτευσης με το ProCAST 2004.1®.

Από την κάθε διαδικασία προσδιορισμού του ΣΜΘ αναδεικνύονται οι παραδοχές που χρειάζεται να ληφθούν υπόψη, τα όρια και οι δυσκολίες εφαρμογής της κάθε μεθόδου.

Τέλος, από την κάθε διαδικασία προκύπτουν τιμές του ΣΜΘ για την κάθε εξεταζόμενη περίπτωση χύτευσης. Η παροχή της πληροφορίας αυτής είναι αναγκαία για τη διεξαγωγή ρεαλιστικής προσομοίωσης. Οι τιμές των ΣΜΘ που προκύπτουν από το Κεφάλαιο αυτό είναι αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 4 για την προσομοίωση της χύτευσης.

5.2 Αναλυτικός υπολογισμός

Στην παράγραφο αυτή, επιχειρείται προσδιορισμός του ΣΜΘ με αναλυτικούς υπολογισμούς. Όπως έχει καταστεί σαφές, ο ΣΜΘ που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των αριθμητικών υπολογισμών κατά τη χύτευση, δεν αποτελεί ένα φυσικό μέγεθος. Αποτελείται από το άθροισμα τριών συνιστωσών (βλ. §1.9.1), με κάθε μία να αντιστοιχεί σε διαφορετικό μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας.

Το θεωρητικό υπόβαθρο για τη διερεύνηση που ακολουθεί βασίζεται στο βιβλίο [Stefanescu 2008] και σε δημοσιεύσεις όπως [Konrad et al. 2011], [Sun & Chao 2009], [Browne & O' Mahoney 2000].

5.2.1 Μακροσκοπικά Φαινόμενα Μετάδοσης Θερμότητας κατά τη Χύτευση

5.2.1.1 Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας

Μετάδοση θερμότητας είναι η μεταφορά ενέργειας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ δύο σωμάτων. Η θερμότητα μεταδίδεται από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σώμα.

Τρεις είναι οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας (βλ. και §1.3.2):

- **Αγωγή (conduction):** Αναφέρεται σε μακροσκοπικά ακίνητα μέσα (στερεά ή ρευστά). Η μετάδοση της ενέργειας γίνεται μέσω των τυχαίων

συγκρούσεων των μορίων και ονομάζεται διάχυση ενέργειας (diffusion ή diffusive transport). Στην περίπτωση των υγρών, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων είναι ισχυρές (παρουσία ισχυρών διαμοριακών δυνάμεων εκτός των συγκρούσεων), και έτσι, αναμένεται το φαινόμενο της διάχυσης μέσω της αλληλεπίδρασης των μορίων να είναι πιο έντονο. Η μετάδοση της θερμότητας με αγωγή περιγράφεται από το νόμο Fourier, σύμφωνα με τον οποίο η ροή θερμότητας δίνεται από την εξίσωση (5.1).

$$q_{cond} = -k\nabla T \quad (5.1)$$

όπου

q_{cond} : η ροή θερμότητας λόγω αγωγής, δηλαδή η ποσότητα θερμότητας που μεταδίδεται στη μονάδα του χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας

k : η θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity), $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$

∇T : η θερμοκρασιακή βάρθρωση.

η οποία, λόγω του ότι $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$, γράφεται:

$$q_{cond} = -\alpha \frac{d(\rho c_p T)}{dx} \quad (5.2)$$

όπου

α : η θερμική διαχυτότητα (thermal diffusivity), $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

c_p : ειδική θερμοχωρητικότητα (specific heat), $\left(\frac{kJ}{kgK}\right)$

ρ : πυκνότητα $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

▪ **Συναγωγή (convection)**: Πρόκειται για τη θερμότητα που μεταδίδεται λόγω της μηχανικής κίνησης των ρευστών. Αναφέρεται, δηλαδή, στη μετάδοση θερμότητας σε κινούμενα ρευστά. Η συναγωγή εξαρτάται από τη ροή του ρευστού και τα χαρακτηριστικά της, και από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ρευστού και στερεάς επιφάνειας. Η σχέση που περιγράφει τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι ο νόμος του Newton (εξ.(5.3))

$$q_{conv} = -h(T(t) - T(0)) \quad (5.3)$$

όπου

h : ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή, $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$

$T(t)$: η θερμοκρασία του ρευστού

$T(0)$: η θερμοκρασία της επιφάνειας

▪ **Ακτινοβολία (radiation)**: Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία βασίζεται στο ότι κάθε σώμα πεπερασμένης θερμοκρασίας εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Έτσι, μεταξύ δύο σωμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας θα υπάρχει μετάδοση θερμότητας χωρίς την ανάγκη παρουσίας κάποιου ενδιάμεσου σώματος, με την εφαρμογή του μηχανισμού της θερμικής ακτινοβολίας. Η ροή θερμότητας που μεταδίδεται με ακτινοβολία περιγράφεται από το νόμο Stefan-Boltzmann (εξ.(5.4)):

$$q_r = \varepsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (5.4)$$

όπου

ε : η ικανότητα εκπομπής (emissivity factor)

σ : η σταθερά Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 K^4} \right)$

T_1 : η θερμοκρασία του σώματος που ακτινοβολεί

T_2 : η θερμοκρασία του σώματος που περιβάλλει το σώμα που ακτινοβολεί.

5.2.1.2 Εξισώσεις μετάδοσης θερμότητας σε σύστημα με αλλαγή φάσεων

Οι εξισώσεις μόνιμης κατάστασης (steady state) που περιγράφηκαν παραπάνω αναφέρονται στις περιπτώσεις μονοδιάστατης μετάδοσης θερμότητας χωρίς αλλαγή φάσεων.

Η στερεοποίηση των χυτών, ωστόσο, είναι μία διαδικασία που περιλαμβάνει μετασχηματισμό φάσεων. Πρόκειται, δηλαδή, για ένα μεταβατικό φαινόμενο που περιλαμβάνει μερικές διαφορικές εξισώσεις. Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις επιλύονται είτε μέσω αναλυτικών είτε μέσω αριθμητικών μεθόδων. Συγκεκριμένες οριακές συνθήκες θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της εκάστοτε μεθόδου χύτευσης.

Σε μακροσκοπική κλίμακα, το χυτό είναι ένα δι-φασικό σύστημα, αποτελούμενο από υγρή και στερεά φάση. Η στερεοποίηση θεωρείται μία θερμοδυναμική διαδικασία οδηγούμενη από διάχυση (diffusion) και συναγωγή (convection) μάζας και ενέργειας. Στη συνέχεια αναφέρονται οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν τα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας, μαζί με τον όρο της πηγής θερμότητας, καθώς και οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες οριακές συνθήκες. Για τη συγκεκριμένη θεώρηση τα φαινόμενα της πυρηνοποίησης και της ανάπτυξης των φάσεων αγνοούνται.

Το μαθηματικό πρόβλημα στη χύτευση είναι η επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς μάζας, ενέργειας και ορμής για τη συγκεκριμένη γεωμετρία και το υλικό του χυτού. Η γενική εξίσωση μεταφοράς, εκφρασμένη με την τυπική μορφή της ως «εξίσωση μεταφοράς - διάχυσης» (“advection - diffusion equation”, [Λιακόπουλος et al. 2005]), γράφεται:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \varphi) + \nabla(\rho \cdot \mathbf{V} \cdot \varphi) = \nabla(\rho \cdot \Gamma \cdot \nabla \varphi) + S \quad (5.5)$$

όπου

ρ : η πυκνότητα

φ : η εκάστοτε μελετώμενη ποσότητα

\mathbf{V} : το διάνυσμα της ταχύτητας

Γ : ο γενικός συντελεστής διάχυσης

S : ο γενικός όρος πηγής.

∇ : ανάδελτα, $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{z}$

Ο πρώτος όρος στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (5.5) είναι ο όρος της χρονικής μεταβολής της ποσότητας “ φ ”, ο δεύτερος όρος του αριστερού

μέλους είναι ο όρος της συναγωγής, ο πρώτος όρος στο δεξί μέλος είναι ο όρος της διάχυσης και ο δεύτερος όρος στα δεξιά είναι ο όρος πηγής.

Η εξίσωση (5.5), ανάλογα την υπόσταση που θα πάρει η ποσότητα “φ”, μετασχηματίζεται στην εξίσωση μεταφοράς μάζας ή την εξίσωση μεταφοράς ενέργειας ή ορμής (βλ. Πίνακα 5.10).

Πίνακας 5.1 Τα μεγέθη που αντιπροσωπεύουν οι ποσότητες φ, Γ και S, ανάλογα με την εξίσωση στην οποία αναφέρονται [Stefanescu 2008].

Quantity	Mass	Energy	Species	Momentum
ϕ	I	H	C	\mathbf{V}
Γ	θ	$\alpha = k/(\rho c)$	D	$\nu = \mu/\rho$
S	- phase motion	- phase transformation - phase motion	- phase transformation - phase motion	- phase motion - S/L interaction - natural convection - shrinkage

Κυρίαρχη εξίσωση που περιγράφει τη στερεοποίηση ενός χυτού είναι η εξίσωση διατήρησης ενέργειας. Η εξίσωση ενέργειας προκύπτει από την εξ. (5.5) αν ως ποσότητα “φ” χρησιμοποιηθεί η ενθαλπία H:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla(\rho \mathbf{V}H) = \nabla \left(\frac{k}{c} \nabla H \right) + S \quad (5.6)$$

όπου

- ρ : η πυκνότητα
- H : η ενθαλπία
- S : ο όρος πηγής θερμότητας
- k : η θερμική αγωγιμότητα
- c : η ειδική θερμότητα

Ο όρος πηγής θερμότητας για ένα διφασικό σύστημα περιγράφεται σύμφωνα με τους [Benon & Incropera 1987] ως εξής:

$$S = \nabla \left[\frac{k_S}{c_S} \nabla (H_S - H) \right] - \nabla [\rho f_S (\mathbf{V} - \mathbf{V}_S)(H_L - H_S)] \quad (5.7)$$

όπου

- δείκτης S: αναφέρεται στη στερεά φάση
- δείκτης L: αναφέρεται στην υγρή φάση
- H: η συνολική ενθαλπία του συστήματος
- H_S : η ενθαλπία της στερεάς φάσης
- H_L : η ενθαλπία της υγρής φάσης
- f_S : το ποσοστό της μάζας του χυτού που βρίσκεται σε στερεά φάση (ποσοστό στερεοποίησης ή solid(mass)fraction)
- k_S : η θερμική αγωγιμότητα της στερεάς φάσης
- c_S : η ειδική θερμότητα της στερεάς φάσης
- \mathbf{V} : η ταχύτητα του μετώπου στερεοποίησης, $\mathbf{V} = f_S \mathbf{V}_S + f_L \mathbf{V}_L$

V_s : η ταχύτητα της σχετικής κίνησης της στερεάς φάσης κατά τη στερεοποίηση.

V_L : η ταχύτητα της σχετικής κίνησης της υγρής φάσης κατά τη στερεοποίηση.

Ο πρώτος όρος στο δεξί μέλος της εξίσωσης (5.6) περιγράφει τη λανθάνουσα θερμότητα στερεοποίησης, δηλαδή τη θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη δημιουργία της στερεάς φάσης και ο δεύτερος όρος περιγράφει τη ροή ενέργειας που σχετίζεται με την κίνηση των φάσεων. Με άλλα λόγια, ο πρώτος όρος σχετίζεται με το μετασχηματισμό των φάσεων και ο δεύτερος με την κίνηση των φάσεων.

Η εξίσωση ενέργειας για ένα διφασικό σύστημα μπορεί να εκφραστεί με όρους θερμοκρασίας, αντί για όρους ενθαλπίας, με βάση τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} H &= g_L H_L - g_S H_S \\ H_S &= c_S T \\ H_L &= c_L T + (c_S - c_L) T_e + \Delta H_f \end{aligned} \quad (5.8)$$

όπου

T : η θερμοκρασία

ΔH_f : η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του κράματος

T_e : η θερμοκρασία ισορροπίας (equilibrium temperature). Σε θερμοκρασίες μικρότερες της T_e , η στερεά φάση αυξάνεται εις βάρος της υγρής, ενώ για θερμοκρασίες μεγαλύτερες της T_e , η υγρή φάση αυξάνεται εις βάρος της στερεάς.

g_s : το ποσοστό του όγκου του χυτού που βρίσκεται σε στερεά φάση (ποσοστό στερεοποίησης ή solid volume fraction)

g_L : το ποσοστό του όγκου του χυτού που βρίσκεται σε υγρή φάση
 Tag_s και g_L είναι συναρτήσεις του χρόνου και της θερμοκρασίας.

Με τη θεώρηση ότι η ειδική θερμοχωρητικότητα του υγρού είναι ίδια με αυτή του στερεού, δηλαδή $c_S = c_L = c_P$, τότε η εξίσωση διατήρησης ενέργειας (5.5) γράφεται:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_P T) + \nabla(\rho c_P \mathbf{V} T) = \nabla(k \nabla T) + S \quad (5.9)$$

όπου

$$S = -\frac{\partial}{\partial t}(\Delta H_f \rho_L g_L) - \nabla[\Delta H_f \rho g_L (\mathbf{V} - \mathbf{V}_S)] - \nabla(\Delta H_f \rho_L g_L \mathbf{V})$$

Όταν οι όροι μεταφοράς αμεληθούν, τότε η εξίσωση (5.9) μειώνεται στην:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_P T) = \nabla(k \nabla T) - \frac{\partial}{\partial t}(\Delta H_f \rho_L g_L) \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(a \nabla T) + \frac{\Delta H_f}{\rho c_P} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_s g_s - \rho) \quad (5.10)$$

Οι εξισώσεις ενέργειας (5.9) ή (5.10) είναι μερικές διαφορικές εξισώσεις 2^{ης} τάξης. Αναλυτική λύση δεν μπορεί να υπάρχει, παρά μόνο εάν

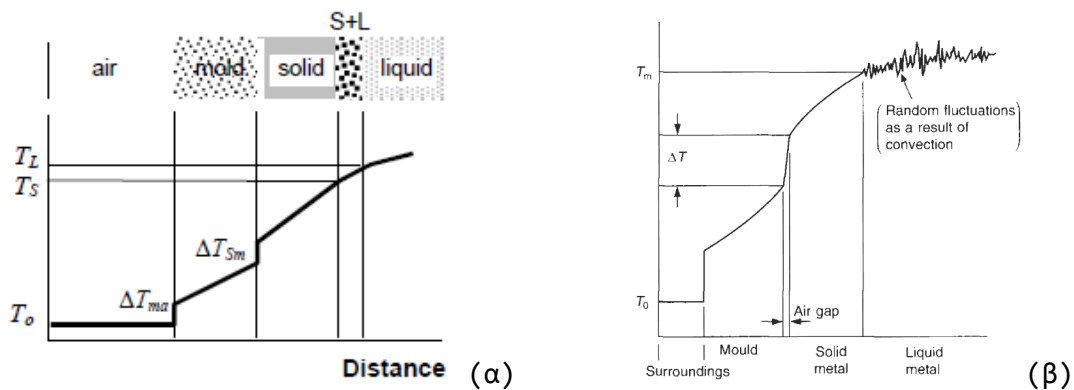
γίνουν περαιτέρω απλοποιητικές παραδοχές. Εναλλακτικά, χρειάζεται να επιστρατευτούν αριθμητικές μέθοδοι που προτείνονται από τη βιβλιογραφία.

5.2.2 Αντίσταση στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού

Στη γενική περίπτωση, η θερμότητα καθώς απάγεται από το θερμό τήγμα προς το περιβάλλον, συναντάει 5 «αντιστάσεις», οι οποίες προκαλούν θερμοκρασιακή πτώση:

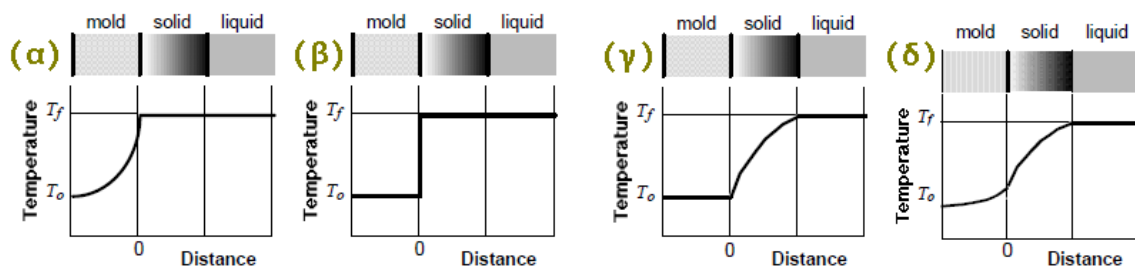
- Το υγρό μέταλλο (θερμοκρασιακή πτώση εντός του τήγματος)
- Το ημι-στερεοποιημένο μέταλλο
- Το στερεοποιημένο μέταλλο
- Τη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού
- Το καλούπι
- Τα τοιχώματα του καλουπιού, εάν υπάρχουν (όπως πχ. το μεταλλικό πλαίσιο που συγκρατεί ένα καλούπι από άμμο).

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται το προφίλ της θερμοκρασίας σε μία τομή του συστήματος χυτού-καλουπιού.



Σχήμα 5.1 Θερμοκρασιακό προφίλ στο σύστημα χυτού-καλουπιού (α) σχηματική απεικόνιση κατά [Stefanescu 2008] και (β) σχηματική απεικόνιση σύμφωνα με τον [Campbell 1998].

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2, αντί του σύνθετου και καθολικού προβλήματος που περιγράφηκε νωρίτερα, υπάρχουν διάφορες παραδοχές που μπορούν να γίνουν, προκειμένου να επιλυθεί ένα απλούστερο πρόβλημα. Οι παραδοχές αυτές, συνδέονται με το στάδιο στο οποίο θεωρείται πως συμβαίνει η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή πτώση, δηλαδή το στάδιο στο οποίο συναντάται η μέγιστη αντίσταση στη ροή της θερμότητας.



Σχήμα 5.2 Θερμοκρασιακό προφίλ στο καλούπι και τα χυτά, για τέσσερις διαφορετικές απλοποιητικές παραδοχές [Stefanescu 2008] (α) αντίσταση στο καλούπι, (β) αντίσταση στη διεπιφάνεια καλουπιού-χυτού, (γ) αντίσταση στο στερεοποιημένο χυτό και (δ) αντίσταση στο καλούπι και στο στερεοποιημένο χυτό.

Μία σχετικά απλή περίπτωση είναι όταν η αντίσταση συναντάται στη διεπιφάνεια χυτού-καλούπιού (Σχήμα 5.2β). Η βασική υπόθεση είναι ότι η μετάδοση θερμότητας από το στερεό προς το καλούπι γίνεται με συναγωγή. Αυτό ισχύει κυρίως όταν σχηματίζεται κενό λόγω της συστολής του χυτού και συμβαίνει κυρίως σε είδη όπως η χύτευση σε μόνιμο καλούπι.

Μία προσέγγιση είναι η λεγόμενη «ανάλυση κατ 'αποκοπή» (“lump analysis”). Εάν ο αριθμός Biot ($Bi = \frac{\bar{h}L}{k}$, όπου \bar{h} είναι ο μέσος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή για ολόκληρη την επιφάνεια και L το μήκος αγωγής) είναι μικρός, για παράδειγμα $Bi < 0.1$, τα εσωτερικά θερμοκρασιακά gradients είναι επίσης μικρά. Το αντικείμενο της ανάλυσης τότε θεωρείται ότι είναι σαν να έχουμε μία ενιαία μάζα μέσης θερμοκρασίας και το μεταβατικό αυτό πρόβλημα το χειριζόμαστε ως ακολούθως.

Θεωρείται ένας όγκος αναφοράς V και επιφάνειας A . Το ισοζύγιο θερμότητας γι αυτό το στοιχείο όγκου είναι:

$$\bar{h}A[T(t) - T_o] = V\dot{Q}_{gen} - V\rho c \frac{dT}{dt} \quad (5.11)$$

όπου

\bar{h} : ο μέσος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή για ολόκληρη την επιφάνεια

$T(t)$: η θερμοκρασία τη χρονική στιγμή t

T_o : η θερμοκρασία περιβάλλοντος του όγκου αναφοράς

\dot{Q}_{gen} : ο όρος πηγής θερμότητας, όταν η θερμότητα προκύπτει από την αποβολή της λανθάνουσας θερμότητας στερεοποίησης.

Με την παραδοχή ότι $\rho_s = \rho_L = \rho$, η οποία μπορεί να θεωρηθεί επαρκής για τον εξεταζόμενο όγκο ελέγχου, τότε $g_s = f_s$, $\partial\rho/\partial t = 0$ κι έτσι ο όρος πηγής θερμότητας \dot{Q}_{gen} θα δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{gen} = \rho\Delta H_f(df_s/dt) \quad (5.12)$$

Με αντικατάσταση της (5.12) στην(5.11):

$$\bar{h}A[T(t) - T_o] = V\rho\Delta H_f\left(\frac{df_s}{dt}\right) - V\rho c \frac{dT}{dt} \quad (5.13)$$

Αυτή η εξίσωση ολοκληρώνεται μόνο εάν η f_s είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, δηλαδή $f_s(T) = \alpha + bT$. Αναδιατάσσοντας:

$$\frac{dT - (\Delta H_f/c)df_s}{T(t) - T_o} = -\frac{\bar{h}A}{V\rho c} dt \quad (5.14)$$

Ολοκληρώνοντας και εφαρμόζοντας την αρχική συνθήκη, προκύπτει:

$$T(t) = T_o + (T_i - T_o) \exp\left(-\frac{\bar{h}At}{V\rho c(1 - (b/c)\Delta H_f)}\right) \quad (5.15)$$

Από αυτήν την εξίσωση, προκύπτει πως ο χρόνος στερεοποίησης για χυτό όγκου V είναι:

$$t_f = -\frac{\rho c V}{\bar{h} A} \left(1 - \frac{b}{c} \Delta H_f\right) \ln\left(\frac{T_f - T_o}{T_i - T_o}\right) \quad (5.16)$$

όπου

T_i : η αρχική θερμοκρασία του μετάλλου.

Η εξίσωση (5.16) ισχύει μόνο εντός του θερμοκρασιακού εύρους στερεοποίησης, δηλαδή για θερμοκρασίες πάνω από τη Liquidus και κάτω από τη Solidus ισχύει: $\Delta H_f = 0$.

Η εξίσωση(5.13) μπορεί να ξαναγραφτεί ώστε να περιγράψει το ρυθμό απόψυξης του χυτού, ο οποίος, πρακτικά είναι η καμπύλη απόψυξης:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\bar{h}A[T(t) - T_o]}{V\rho c} + \frac{\Delta H_f}{c} \frac{df_s}{dt} \quad (5.17)$$

Εάν το δεξί μέλος της εξίσωσης είναι μεγαλύτερο από το αριστερό, τότε συμβαίνει θέρμανση του κράματος (αντί για απόψυξη), η οποία αποτυπώνεται στην καμπύλη απόψυξης ως υπόψυξη (ή υπέρτηξη, *recallescence*). Υπόψυξη ή υπέρτηξη λέγεται το φαινόμενο κατά το οποίο η έναρξη της στερεοποίησης συμβαίνει με κάποια καθυστέρηση και συμβαίνει όταν στη θερμοκρασία τήξης οι σχηματιζόμενοι πυρήνες βρίσκονται σε μετασταθή κατάσταση.

Για να περιγραφεί η στερεοποίηση ενός κράματος, η εξίσωση (5.17) μπορεί να γραφεί με τη θεώρηση ότι:

$$\frac{df_s}{dt} = \frac{df_s}{dT} \frac{dT}{dt} \quad (5.18)$$

και ο ρυθμός απόψυξης είναι:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\bar{h}A}{V\rho c} [T(t) - T_o] \left(1 - \frac{\Delta H_f}{c} \frac{df_s}{dt}\right) \quad (5.19)$$

Από την εξίσωση (5.19) φαίνεται πως η στερεοποίηση μειώνει το ρυθμό απόψυξης εφόσον $\frac{df_s}{dT} < 0$. Εάν η “lump analysis” δεν είναι αποδεκτή, ή εάν η f_s ως συνάρτηση της θερμοκρασίας δεν είναι αποδεκτή, τότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν αριθμητικές μέθοδοι.

5.2.3 Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας - Αναλυτική Σχέση

Το πρόβλημα της στερεοποίησης όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο βασιζόταν στην υπόθεση ότι η μετάδοση θερμότητας είναι είτε σταθερή είτε συνεχής συνάρτηση του αντιστρόφου του χρόνου.

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, ωστόσο, στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού μπορεί να ποικίλει με μεγάλο εύρος τιμών, εξαρτώμενος από το σχηματιζόμενο κενό λόγω συστολής.

Το θέμα των τιμών που πρέπει να παίρνει κάθε φορά ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι ανοιχτό, καθώς εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων όπως η θερμοκρασία, η γεωμετρία του χυτού και η γεωμετρία του κενού. Επί της αρχής, η τιμή του ΣΜΘ εξαρτάται από το μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού, η οποία με τη σειρά της είναι συνάρτηση της επαφής χυτού-καλουπιού. Τα τρία στάδια στα οποία μπορεί να διακριθεί ο ΣΜΘ, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, έχουν εξηγηθεί (βλ. §1.9.6.1, σελ.71).

Για τον αναλυτικό υπολογισμό του ΣΜΘ χρησιμοποιήθηκε μία χρονικά βηματική διαδικασία (time-stepping procedure) σε συνδυασμό με την “lump analysis”.

Το ισοζύγιο ενέργειας στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού, όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο, περιγράφεται από τη σχέση (5.13)

$$\bar{h}A[T(t) - T_o] = V\rho\Delta H_f \left(\frac{df_s}{dt}\right) - V\rho c \frac{dT}{dt} \quad (5.13)$$

η οποία, εάν γραφεί με τη μορφή time-stepping γίνεται

$$hA(T^n - T_o)\Delta t = -\rho cV(T^{n+1} - T^n) + \rho\Delta H_f V\Delta f_s \quad (5.20)$$

όπου

T^n : η θερμοκρασία του χυτού στο χρονικό βήμα n

T^{n+1} : η θερμοκρασία του χυτού στο χρονικό βήμα $n+1$

T_o : η θερμοκρασία περιβάλλοντος

h : ο ΣΜΘ στο χρονικό βήμα $n+1$

V : ο όγκος του χυτού

A : η επιφάνεια του χυτού.

Θεωρείται πως το ποσοστό στερεοποίησης (fraction solid) είναι γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας, δηλαδή $\Delta f_s = (T^n - T^{n+1})/\Delta T_o$. Συνεπώς, η προηγούμενη σχέση γράφεται:

$$T^{n+1} = T^n - \frac{hA}{\rho V \frac{\Delta H_f}{T_o} + c} (T^n - T_o) \Delta t \quad (5.21)$$

Η παραπάνω σχέση, με τη συγκεκριμένη διατύπωση, προβλέπει τη θερμοκρασία του χυτού στο επόμενο χρονικό βήμα, εάν όλες οι υπόλοιπες παράμετροι είναι γνωστές (συμπεριλαμβανομένου και του ΣΜΘ εάν $p\chi$ είναι γνωστός από πίνακες ή από δημοσιεύσεις). Με άλλα λόγια, η εξίσωση (5.21) είναι η σχέση υπολογισμού της καμπύλης απόψυξης του χυτού, εάν είναι γνωστή η θερμοκρασία έγχυσης του τήγματος, οι ιδιότητες του χυτού, τα γεωμετρικά στοιχεία του χυτού και ο ΣΜΘ.

Αν η σχέση (5.21) επιλυθεί ως προς h , τότε προκύπτει η σχέση (5.22):

$$h = \frac{(T^n - T^{n+1})\rho V \left(\frac{\Delta H_f}{T_o} + c \right)}{A(T^n - T_o)\Delta t} \quad (5.22)$$

όπου

- h : ο ΣΜΘ στο χρονικό βήμα $n+1$
- T^n : η θερμοκρασία στο χρονικό βήμα n
- T^{n+1} : η θερμοκρασία στο χρονικό βήμα $n+1$
- T_o : η θερμοκρασία περιβάλλοντος
- V : ο όγκος του χυτού
- A : η επιφάνεια του χυτού
- c : η ειδική θερμότητα
- ρ : η πυκνότητα του χυτού.

Η εξίσωση (5.22) εκφράζει το ΣΜΘ στο χρονικό βήμα $n+1$, εάν είναι γνωστή η θερμοκρασία του χυτού.

Αυτή η εξίσωση χρησιμοποιήθηκε για τον αναλυτικό προσδιορισμό του ΣΜΘ στην §5.2.4, για δύο περιπτώσεις χύτευσης. Προϋπόθεση για τη χρήση της εξίσωσης (5.22) ήταν η γνώση των ιδιοτήτων του υλικού και η γνώση των θερμοκρασιών T^n και T^{n+1} , δηλαδή της θερμοκρασιακής εξέλιξης του χυτού κατά τη χύτευση. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις θερμοκρασιών που ελήφθησαν με χρήση θερμοστοιχείων, όπως περιγράφηκε στην §2.6, σελ.127. Τα υπόλοιπα δεδομένα που ήταν απαραίτητα για την υλοποίηση (5.22) ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων του ProCAST και από τη βιβλιογραφία.

Η υλοποίηση της εξίσωσης (5.22) πραγματοποιήθηκε στο Matlab (υλοποιείται και στο excel, με χρήση “if statements” για την τιμή της λανθάνουσας θερμότητας).

5.2.4 Περιπτώσεις που μελετήθηκαν και αποτελέσματα

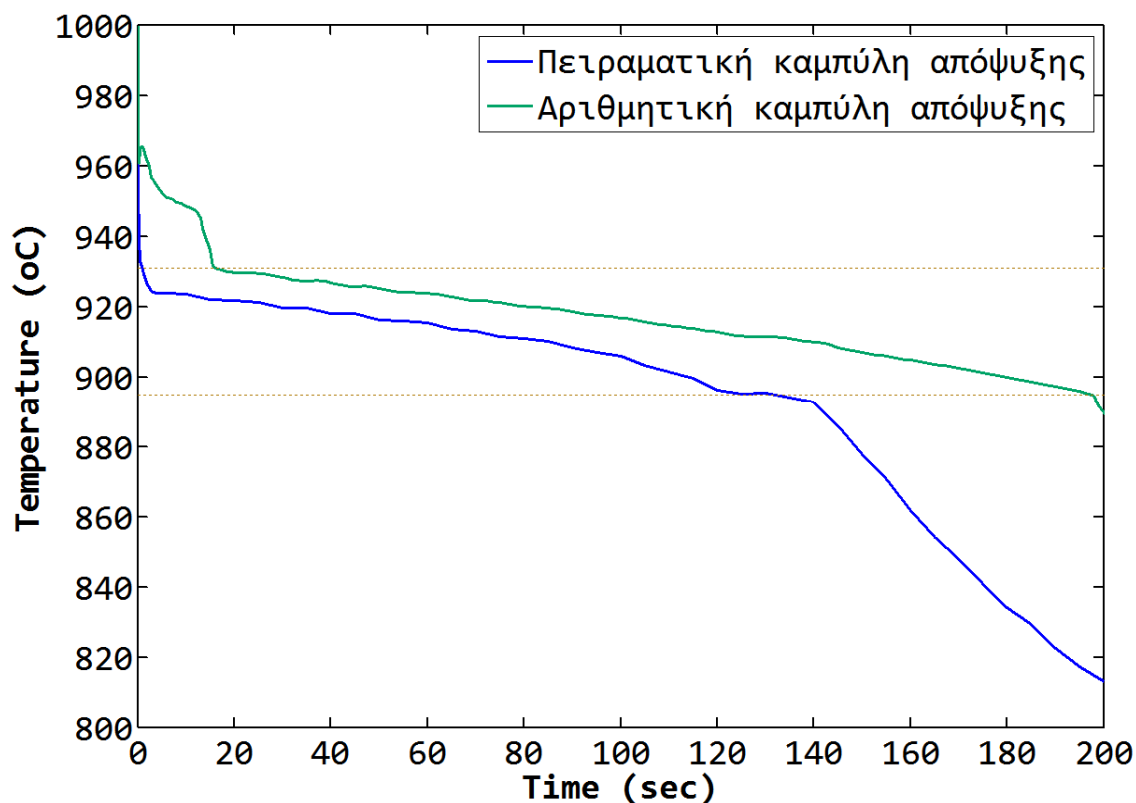
Με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο που αναπτύχθηκε παραπάνω και με τη χρήση της σχέσης (5.22), υπολογίστηκε ο ΣΜΘ για δύο περιπτώσεις χύτευσης:

Περίπτωση I: Πρόκειται για το χυτό της γεωμετρίας που περιγράφηκε στα κεφάλαια 2 και 3 (βλ. Σχήμα 2.38, σελ.125) και για την περίπτωση τοποθέτησης θερμοστοιχείων που ονομάστηκε «3η περίπτωση» (βλ. Κεφ.2., σελ.136). Χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα από την τοποθέτηση ενός θερμοστοιχείου εντός του χυτού, στην περιοχή της μεγάλης διατομής, ενός δεύτερου στο καλούπι στην περιοχή κοντά στη διεπιφάνεια και ενός τρίτου στην εξωτερική επιφάνεια του καλουπιού (Σχήμα 2.46).

Περίπτωση II: Πρόκειται για ένα χυτό πολύ απλής γεωμετρίας, κυλινδρικού σχήματος, μεγάλου μήκους ($L=100\text{mm}$) σε σχέση με τη διατομή του ($D=10\text{mm}$). Ένα θερμοστοιχείο ήταν τοποθετημένο εντός του χυτού, στο μέσον -καθ' ύψος- του κυλίνδρου και ένα θερμοστοιχείο βρισκόταν τοποθετημένο εντός του καλουπιού, στο ίδιο ύψος (βλ. §2.5 και Σχήμα 2.40, σελ.126). Ο λόγος που πραγματοποιήθηκε το πείραμα αυτό ήταν για να μελετηθεί ένα σενάριο χύτευσης όσο το δυνατόν πιο απλό και βασικό, ώστε να έχουν υπόσταση οι παραδοχές που χρησιμοποιούνται για την αναλυτική προσέγγιση, όπως πχ. παραδοχή της μονοδιάστατης θερμικής ανάλυσης.

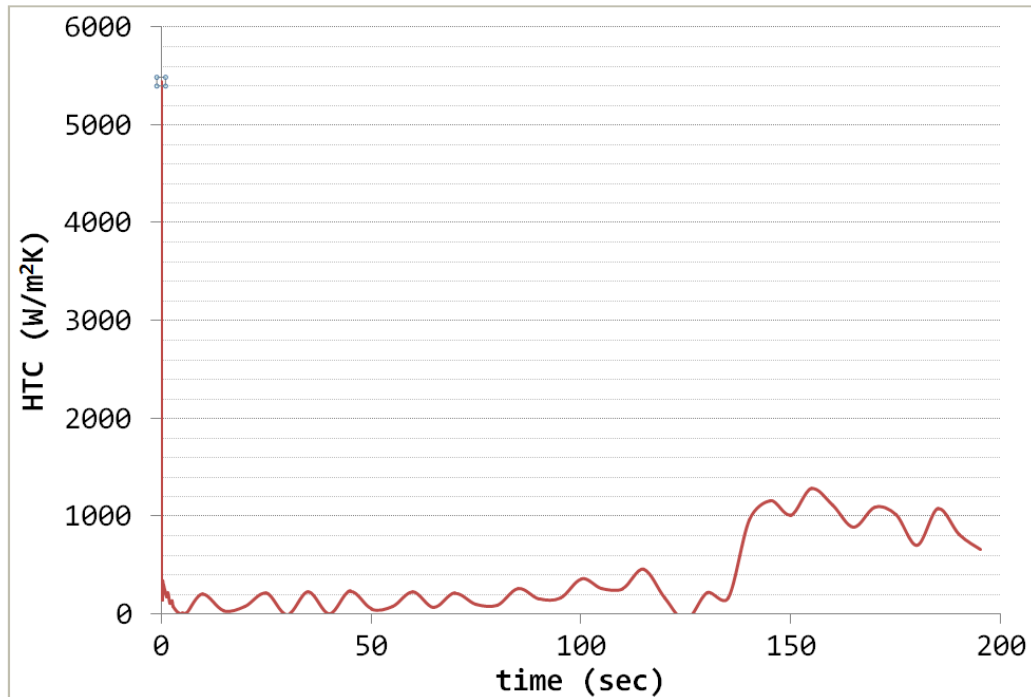
5.2.4.1 Περίπτωση I - Αποτελέσματα

Για την περίπτωση I, οι πειραματικές μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για τον αναλυτικό υπολογισμό του ΣΜΘ, φαίνονται στο Σχήμα 5.3 και ελήφθησαν με χρήση θερμοστοιχείων τύπο-K κατά τη χύτευση.



Σχήμα 5.3 Πειραματική και αριθμητική καμπύλη απόψυξης, για το ορειχάλκινο χυτό της γεωμετρίας με τις τρεις περιοχές (Περίπτωση I).

Ο ΣΜΘ που προέκυψε από τον αναλυτικό υπολογισμό, για την απλή γεωμετρία φαίνεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4 Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας που προέκυψε από αναλυτικό υπολογισμό, για το ορειχάλκινο χυτό της γεωμετρίας με τις τρεις περιοχές (Περίπτωση Ι).

Διακρίνονται τρεις περιοχές στη μορφή του ΣΜΘ, όπως αναμένεται. Η πρώτη περιοχή, που αντιστοιχεί στο 1^ο στάδιο απόψυξης, ξεκινά από μία μέγιστη τιμή $5442.2\text{W/m}^2\text{K}$, μία αρκετά υψηλή τιμή και ακολουθεί εκθετική πτώση, μέχρι τη σταθεροποίηση στα $292\text{W/m}^2\text{K}$ κατά μέσο όρο. Στο 2^ο στάδιο παραμένει για περίπου 120sec. Η τιμή του ΣΜΘ αυξάνεται βηματικά στα $1282\text{W/m}^2\text{K}$ που αντιστοιχεί στο 3^ο στάδιο απόψυξης του χυτού. Κατά το 3^ο στάδιο παρατηρείται μία μικρή πτωτική τάση.

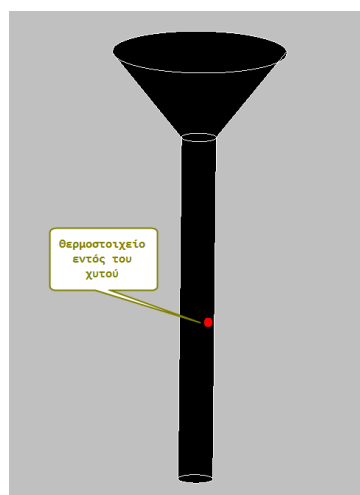
Η κυματοειδής μορφή οφείλεται στο θόρυβο των πειραματικών αποτελεσμάτων στα οποία βασίζεται ο αναλυτικός προσδιορισμός.

Στη συνέχεια, με την τιμή του ΣΜΘ που προέκυψε από τον αναλυτικό υπολογισμό, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της χύτευσης με το ProCAST. Αυτό έγινε για να ελεγχθεί κατά πόσο η αριθμητική προσομοίωση με χρήση του ΣΜΘ που υπολογίστηκε αναλυτικά μπορεί να καταλήξει σε αριθμητικές καμπύλες απόψυξης που προσεγγίζουν τις πειραματικές.

Η αριθμητική καμπύλη απόψυξης που αντιστοιχεί στον υπολογισθέντα ΣΜΘ απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3 με πράσινο χρώμα. Είναι φανερό πως υπάρχει αρκετά μεγάλη διαφορά

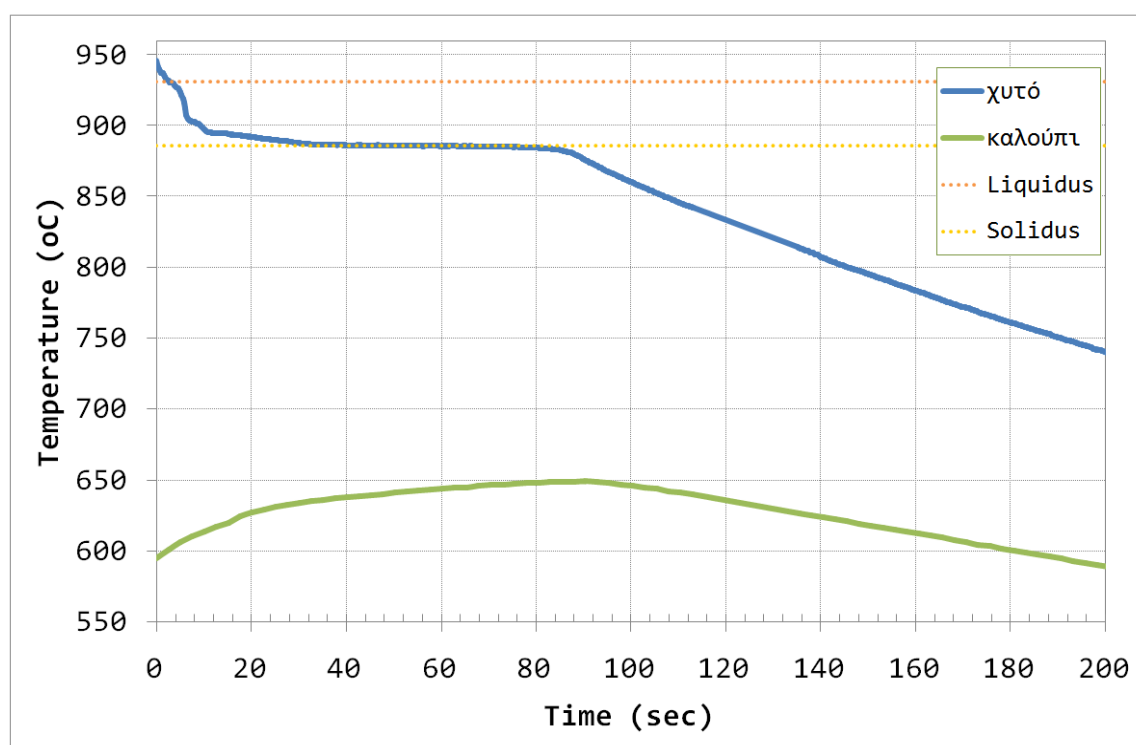
5.2.4.2 Περίπτωση ΙΙ - Αποτελέσματα

Για την περίπτωση ΙΙ, η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή του Σχήματος Σχήμα 5.5



Σχήμα 5.5 Η απλή γεωμετρία κυλινδρικού σχήματος που χυτεύθηκε (Περίπτωση ΙΙ).

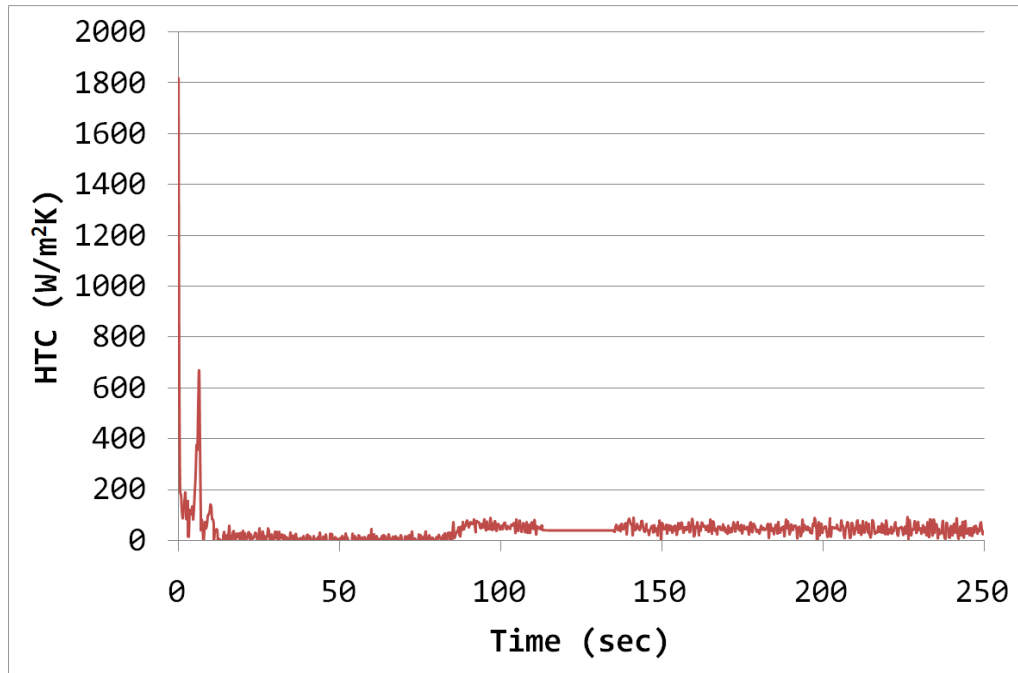
Οι συνθήκες χύτευσης είναι χύτευση κενού με θερμοκρασία προθέρμανσης καλούπιου τους 570°C και αρχική θερμοκρασία τήγματος τους 960°C . Οι πειραματικές μετρήσεις φαίνονται στο Σχήμα 5.6 και ελήφθησαν με χρήση θερμοστοιχείων τύπου-K κατά τη χύτευση.



Σχήμα 5.6 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης χυτού και καλούπιου, για το ορειχάλκινο χυτό απλής κυλινδρικής γεωμετρίας (Περίπτωση ΙΙ).

θα πρέπει να σημειωθεί πως στην περίπτωση του αναλυτικού υπολογισμού του ΣΜΘ είναι σημαντική η γνώση (από πειραματικές μετρήσεις) της θερμοκρασιακής κατανομής στο καλούπι, συνεπώς είναι απαραίτητη η χρήση αρκετών θερμοστοιχείων και χρήση εξοπλισμού κατάλληλου, ώστε να μην υπάρχει απώλεια πληροφορίας

Ο ΣΜΘ που προέκυψε από τον αναλυτικό υπολογισμό, για την απλή γεωμετρία φαίνεται στο Σχήμα 5.7. Διακρίνονται τρεις περιοχές στη μορφή του ΣΜΘ, όπως αναμένεται. Η πρώτη περιοχή, που αντιστοιχεί στο 1^ο στάδιο απόψυξης, ξεκινά από μία μέγιστη τιμή 1817.9W/m²K και ακολουθεί εκθετική πτώση, μέχρι τη σταθεροποίηση στα 40-50W/m²K, για 74sec, κατά το 2^ο στάδιο. Ακολουθεί μία βηματική αύξηση του ΣΜΘ, στο 86^ο sec, στην τιμή των 90-100W/m²K που αντιστοιχεί στο 3^ο στάδιο απόψυξης του χυτού.

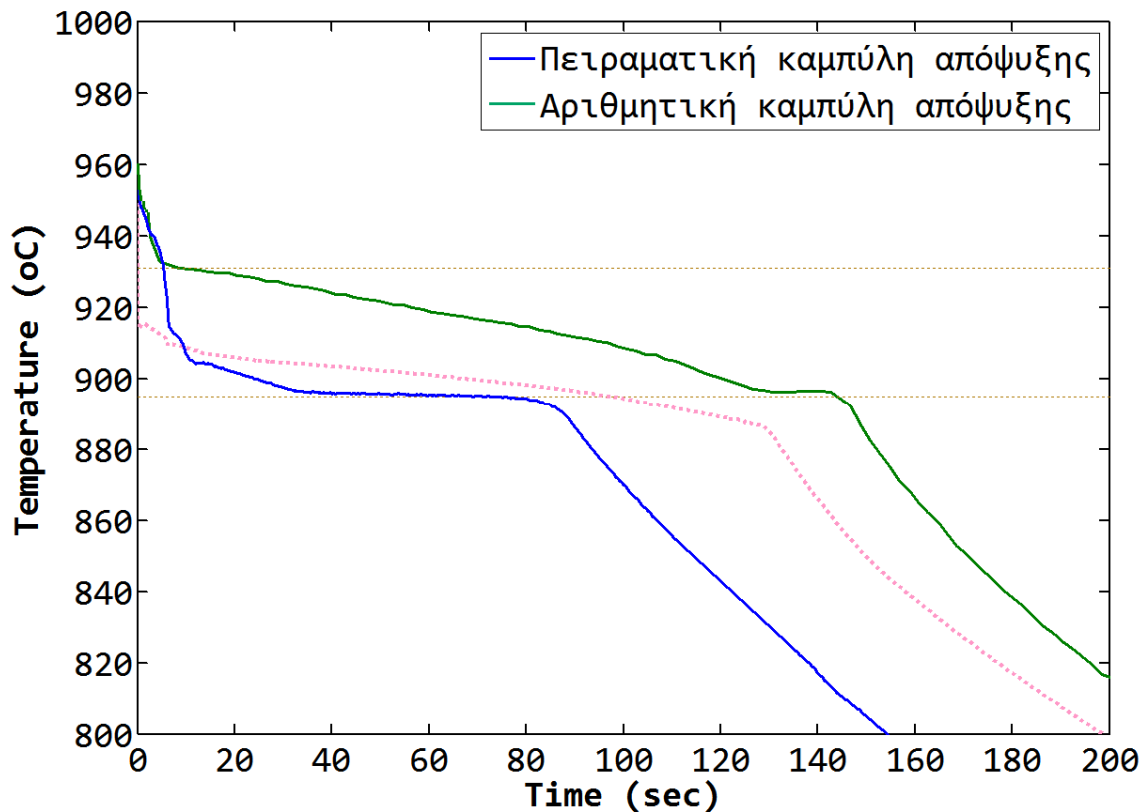


Σχήμα 5.7 Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας που προέκυψε από αναλυτικό υπολογισμό, για το ορειχάλκινο χυτό απλής κυλινδρικής γεωμετρίας (Περίπτωση II).

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως κατά το πείραμα που έγινε για τη λήψη των πειραματικών μετρήσεων των Περιπτώσεων I και II, επειδή χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία τόσο για τη μέτρηση των θερμοκρασιών εντός του χυτού, όσο και σε δύο σημεία στο καλούπι (ένα στη διεπιφάνεια και ένα στην εξωτερική επιφάνεια του καλουπιού), η συχνότητα δειγματοληψίας δεν ήταν η μέγιστη δυνατή. Έτσι, η μέγιστη τιμή του ΣΜΘ, που ήταν 5442.2W/m²K για την περίπτωση I και 1282W/m²K για την περίπτωση II, προέκυψε με βάση μετρήσεις που αντιστοιχούν σε χρόνο 0.1s 0.25sec αντίστοιχα. Δεδομένου ότι σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [Todoroki and Rhinichka 2009] η γνώση της θερμοκρασίας κατά τα πρώτα 0.2sec της χύτευσης είναι σημαντική, είναι σαφές πως η πληροφορία αυτή απουσιάζει. Το γεγονός αυτό έχει επίδραση στην απόλυτη τιμή του ΣΜΘ για τα πρώτα sec. Μπορεί, ωστόσο να πραγματοποιηθεί εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων τόσο ως προς τη μορφή όσο και ως προς την τιμή των ΣΜΘ.

Παρατηρείται πως η μορφή του ΣΜΘ και στις δύο περιπτώσεις ακολουθεί την αναφερόμενη στη βιβλιογραφία μορφή [Lau et al. 1998]. Στην περίπτωση της «πραγματικής» γεωμετρίας σημειώνεται πολύ πιο έντονη μετάδοση θερμότητας από το χυτό προς το καλούπι.

Στη συνέχεια, με την τιμή του ΣΜΘ που προέκυψε από τον αναλυτικό υπολογισμό, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της χύτευσης με το ProCAST. Η αριθμητική καμπύλη απόψυξης που αντιστοιχεί στον υπολογισθέντα ΣΜΘ απεικονίζεται στο Σχήμα 5.8 με πράσινο χρώμα. Είναι φανερό πως η πράσινη καμπύλη που αντιπροσωπεύει την αριθμητική καμπύλη απόψυξης από τον ΣΜΘ του Σήματος 4.7 απέχει αρκετά από την πειραματική. Η κλίση των καμπυλών, ωστόσο, σε κάποια σημεία είναι παρόμοια, υποδεικνύοντας παρόμοιο ρυθμό απόψυξης.



Σχήμα 5.8 Οι αριθμητικές καμπύλες απόψυξης που προέκυψαν από το ΣΜΘ που υπολογίστηκε αναλυτικά για την περίπτωση ΙΙ (πράσινη καμπύλη) και από μία παραλλαγή του ΣΜΘ αυτού (ροζ καμπύλη).

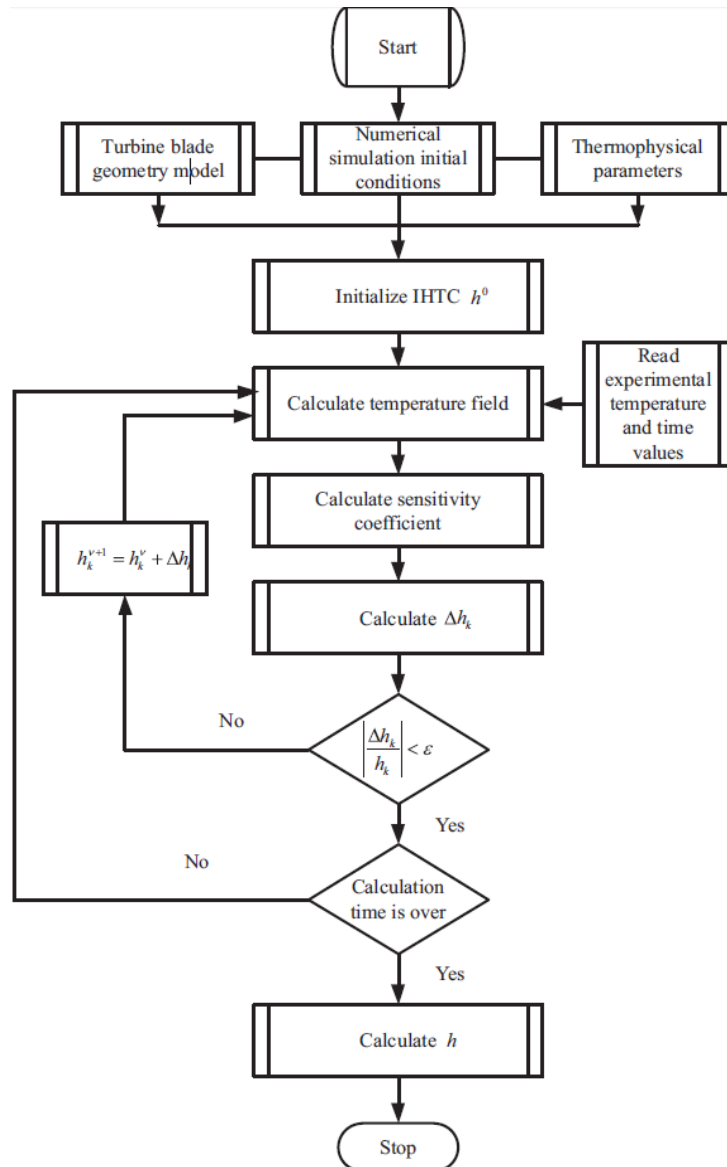
Συνεπώς, ο αναλυτικός προσδιορισμός του ΣΜΘ που εμπεριέχει πλήθος απλοποιητικών παραδοχών, δεν δίνει αριθμητικά αποτελέσματα που να προσεγγίζουν πολύ ικανοποιητικά τις πειραματικές μετρήσεις. Ακόμα και στην περίπτωση της απλής γεωμετρίας, παρατηρείται διαφορά μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών τιμών. Παρόλα αυτά, ο αναλυτικός υπολογισμός σε κάθε περίπτωση, μπορεί να αποτελεί μία καλή βάση εκκίνησης για μία περαιτέρω διερεύνηση βέλτιστου προσδιορισμού του ΣΜΘ. Αντίστροφος υπολογισμός του ΣΜΘ

5.2.5 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στην §1.10.2, σελ.83,. «αντίστροφο» είναι ένα πρόβλημα στο οποίο είναι γνωστά τα αποτελέσματα και με τη βοήθεια αυτών αποτελεί ζητούμενο ο προσδιορισμός μίας ή περισσότερων παραμέτρων του συστήματος.

Στη διερεύνηση της παραγράφου αυτής, χρησιμοποιείται η μέθοδος αντίστροφου προσδιορισμού του ΣΜΘ που περιγράφεται στις δημοσιεύσεις [Rappaz et al. 1995] -η οποία έχει αποτελέσει τη βάση για ένα σύνολο άλλων σχετικών δημοσιεύσεων- και [Dong et al. 2011].

Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9 Διάγραμμα ροής διαδικασίας αντίστροφου προσδιορισμού του ΣΜΘ [Dong et al. 2011]

Η διαδικασία χρειάζεται απαραίτητως ως δεδομένα εισόδου ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, από κάποιο (ή κάποια) σημεία του χυτού. Χρειάζεται, επίσης, να δοθεί μία αρχική εκτίμηση για τον ΣΜΘ. Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (ΠΣ), στην έκδοση που χρησιμοποιήθηκε, δεχόταν τις τιμές του ΣΜΘ με τη μορφή πίνακα. Συνεπώς, ήταν αναγκαία η θεώρηση μίας πινακοποιημένης εκτίμησης του συντελεστή. Τέλος, κάποιες παράμετροι της αντίστροφης διαδικασίας

που περιγράφονται στη συνέχεια (όπως πχ το κριτήριο σύγκλισης) ορίζονται άπαξ, στην αρχή της διαδικασίας.

Μετά τον ορισμό των παραμέτρων του προβλήματος, εκτελείται αριθμητική προσομοίωση για το αρχικό μοντέλο, με την αρχική εκτίμηση του ΣΜΘ και λαμβάνεται ως αποτέλεσμα η αριθμητική καμπύλη απόψυξης που αντιστοιχεί στο σημείο που ήταν τοποθετημένο το θερμοστοιχείο κατά το πείραμα.

Για την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης χρησιμοποιείται ο λεγόμενος συντελεστής ευαισθησίας. Ο συντελεστής ευαισθησίας, υπολογίζεται μετά από συγκεκριμένη διαδικασία. Ο ΣΜΘ του προηγούμενου χρονικού βήματος υφίσταται αλλοίωση σε συγκεκριμένη θέση του πίνακα τιμών, με προκαθορισμένο τρόπο. Για την «αλλοιωμένη» τιμή του ΣΜΘ εκτελείται αριθμητική προσομοίωση και λαμβάνεται μία καμπύλη απόψυξης. Μετά από μεμονωμένη αλλοίωση της τιμής του ΣΜΘ σε κάθε γραμμή του πίνακα τιμών, υπολογίζεται ο συντελεστής ευαισθησίας. Με βάση αυτόν το συντελεστή υπολογίζεται η τιμή του ΣΜΘ για την επόμενη επανάληψη της διαδικασίας. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν η σύγκλιση θεωρηθεί ικανοποιητική με βάση το κριτήριο σύγκλισης.

5.2.6 Περιορισμοί

Με βάση την παραπάνω σύντομη περιγραφή, γίνεται φανερό πως ο **αντίστροφος υπολογισμός περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό επιλύσεων του ευθέως προβλήματος**. Εάν το πρόβλημα έχει N αγνώστους προς υπολογισμό και χρειάζονται M επαναλήψεις για να επιτευχθεί η σύγκλιση, τότε θα εκτελεστούν $(N+1) \times M$ υπολογισμοί.

Στην προκειμένη περίπτωση, οι αγνώστοι ήταν δέκα: οι τιμές του ΣΜΘ σε δέκα προκαθορισμένες χρονιές στιγμές. Εκτελέστηκαν 15 επαναλήψεις. Συνεπώς, συνολικά εκτελέστηκαν: $(10+1) \times 15 = 165$ υπολογισμοί.

Προκειμένου, λοιπόν, να τηρηθούν λογικοί υπολογιστικοί χρόνοι, είναι απαραίτητο ο κάθε ευθύς υπολογισμός να είναι σύντομος. Η επίλυση του μοντέλου χύτευσης που χρησιμοποιήθηκε για τον αντίστροφο προσδιορισμό του ΣΜΘ είχε διάρκεια 1 λεπτό (επίλυση του ευθέως προβλήματος).

Αυτός είναι και ο λόγος που στην πράξη, είθισται να εκτελείται ο αντίστροφος υπολογισμός σε απλές γεωμετρίες. Από εταιρείες που διαθέτουν εμπορικά πακέτα λογισμικού που εκτελούν τέτοιου είδους υπολογισμούς, συνιστάται έντονα η χρήση γεωμετριών 2D. Συνεπώς, η αντίστροφη μοντελοποίηση περιλαμβάνει και το σχεδιασμό ειδικών πειραμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό και μόνο. Αυτή η απαίτηση είναι λογική, καθώς συνήθως οι αγνώστοι (πχ. οι οριακές συνθήκες ή οι ιδιότητες των υλικών) δεν εξαρτώνται συνήθως από τις μικρές γεωμετρικές λεπτομέρειες ή από τα σύνθετα σχήματα. Θα πρέπει, ωστόσο, να είναι κανείς προσεκτικός και να σχεδιάσει ένα πείραμα το οποίο να είναι αντιπροσωπευτικό της συμπεριφοράς του πραγματικού αντικειμένου.

Επιπλέον, επειδή η διαδικασία περιλαμβάνει σύγκριση πειραματικών δεδομένων με αριθμητικά αποτελέσματα, δεν είναι επιθυμητές ταλαντωτικές συμπεριφορές και σφάλματα μετρήσεων. Συνεπώς, διαδικασίες φιλτραρίσματος όπως αυτές που περιγράφηκαν στην §2.6.1.3, σελ.129, είναι απαραίτητες για την εκτέλεση της διαδικασίας.

5.2.7 Εξισώσεις

Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος με βάση τη βιβλιογραφία φαίνεται [Rappaz et al. 1995] στη Σχέση (5.23)

$$s(h) = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_m} \frac{1}{\sigma_T^2} [T_{ij}^m - T_{ij}^c(h)]^2 + \sum_{k=1}^{N_h} \frac{1}{\sigma_k^2} [h_k - h_k^0]^2 \quad (5.23)$$

όπου T_{ij}^m είναι η θερμοκρασία που μετράται στα σημεία μέτρησης $x_j = (j = 1, \dots, N_m)$ η οποία μεταβάλλεται με το χρόνο $t_i = (i = 1, \dots, N_t)$. $T_{ij}^c(h)$ είναι η θερμοκρασία που υπολογίζεται. h είναι ο άγνωστος ΣΜΘ (IHTC) $h = \{h_1, h_2, \dots, h_{N_h}\}$. N_h είναι ο αριθμός των ΣΜΘ στη λύση. Το σ_T είναι το σφάλμα της μετρηθείσας θερμοκρασίας. Το σ_k είναι η επιτρεπόμενη τιμή του h σε κάθε επαναληπτική διαδικασία. Τέλος, h_k^0 είναι η αρχική εκτίμηση για τον ΣΜΘ.

Για να υπολογισθεί ο ΣΜΘ h , θα πρέπει η συνάρτηση $S(h)$ να γίνει ελάχιστη, και συνεπώς, πρέπει να υπολογιστεί η πρώτη παράγωγος:

$$\frac{\partial S}{\partial h_l} = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_m} \frac{(-2)}{\sigma_T^2} [T_{ij}^m - T_{ij}^c(h)] X_{ijl} + \sum_{k=1}^{N_h} \frac{2}{\sigma_k^2} [h_k - h_k^0] \quad (5.24)$$

όπου X_{ijl} είναι ο συντελεστής ευαισθησίας (sensitivity coefficient).

Χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα κατά Taylor στο σημείο h_l του ΣΜΘ:

$$X_{ijl} = \frac{\partial T_{ij}^c(h)}{\partial h_l} \approx \frac{T_{ij}^c(h_1, \dots, h_l + \delta h_l, \dots, h_{N_h}) - T_{ij}^c(h_1, \dots, h_l, \dots, h_{N_h})}{\delta h_l} \quad (5.25)$$

όπου δh_l είναι η «αλλοίωση» της τιμής του h_l κατά την προηγούμενη επανάληψη, που χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί ο συντελεστής ευαισθησίας.

Στη διαδικασία υπολογισμού του θερμοκρασιακού πεδίου, η θερμοκρασία $T_{ij}^c(h^{v+1})$ της επόμενης επανάληψης μπορεί να γραμματικοποιηθεί ως εξής:

$$T_{ij}^c(h^{v+1}) \approx T_{ij}^c(h^v) + \sum_{k=1}^{N_h} X_{ijk}^v \cdot \Delta h_k \quad (5.26)$$

Η μεταβολή του ΣΜΘ για το επόμενο βήμα ($\Delta \mathbf{h}_k$), προσδιορίζεται με επίλυση του συστήματος εξισώσεων:

$$A_{lk} = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_m} \frac{X_{ijk} X_{ijl}}{\sigma_T^2} + \frac{\delta_{lk}}{\sigma_l^2} \quad (5.27)$$

και

$$f_l = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_m} \frac{1}{\sigma_T^2} [T_{ij}^m - T_{ij}^c(h^v)] X_{ijl} - \frac{1}{\sigma_l^2} [h_l^v - h_l^0] \quad (5.28)$$

Κριτήριο σύγκλισης αποτελεί ο λόγος $\Delta \mathbf{h}_k / \mathbf{h}_k$, ο οποίος εάν είναι μικρότερος από μία προεπιλεγμένη τιμή, η διαδικασία σταματάει.

5.2.8 Περίπτωση που μελετήθηκε

Στα πλαίσια της μελέτης του παρόντος κεφαλαίου πραγματοποιήθηκε μία προσπάθεια προσδιορισμού του ΣΜΘ με χρήση αντίστροφης μεθόδου. Στόχος ήταν να αναδειχθούν οι τεχνικές δυσκολίες μίας τέτοιας διαδικασίας.

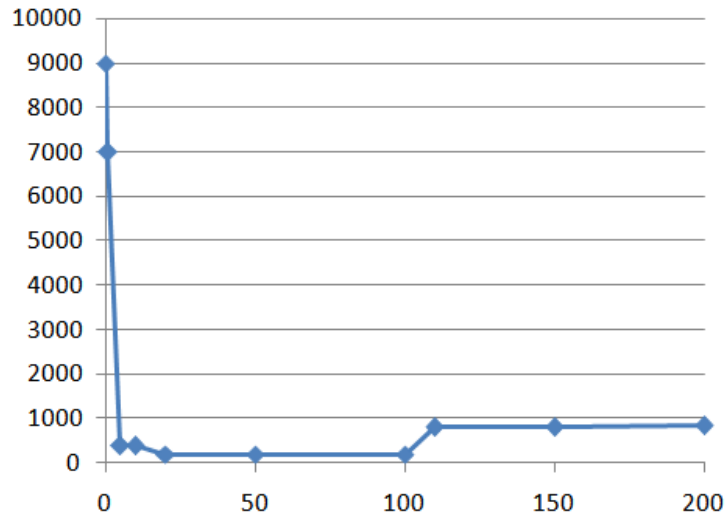
Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε ήταν το τεμάχιο με τις τρεις κυλινδρικές περιοχές. Οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας που χρησιμοποιήθηκαν, ελήφθησαν από την κατηγορία πειραμάτων που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2 ως «δοκιμαστικά πειράματα».

Χρησιμοποιήθηκε πείραμα χύτευσης αλουμινίου της σειράς 1000 για το οποίο είναι διαθέσιμες οι περισσότερες ιδιότητες συναρτήσει της θερμοκρασίας, τόσο στη βάση δεδομένων του ProCAST όσο και σε πολλές δημοσιεύσεις ή πηγές από το διαδίκτυο. Κατά τη διάρκεια της χύτευσης αλουμινίου είχαν τοποθετηθεί θερμοστοιχεία κι έτσι προέκυψαν οι πειραματικές καμπύλες απόψυξης.

Η εκτέλεση της διαδικασίας δεν ήταν αυτοματοποιημένη, κι έτσι εκτελέστηκε σταδιακά. Για τις προσομοιώσεις της χύτευσης χρησιμοποιήθηκε το ProCASTT και για την εκτέλεση των υπολογισμών για την επιλογή των τιμών ΣΜΘ που έπρεπε να χρησιμοποιηθούν για την εκτέλεση των νέων προσομοιώσεων, χρησιμοποιήθηκε το MATLAB. Η χρονική διάρκεια εκτέλεσης της κάθε προσομοίωσης ήταν 50-60sec.

5.2.9 Αποτελέσματα

Η αρχική εκτίμηση για τον ΣΜΘ έγινε τυχαία και η τιμή που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 5.10 και τον Πίν5.2.



Σχήμα 5.10 Αρχική εκτίμηση για τον ΣΜΘ.

Πίνακας 5.2 Πίνακας τιμών αρχικής εκτίμησης και αποτελέσματος ΣΜΘ

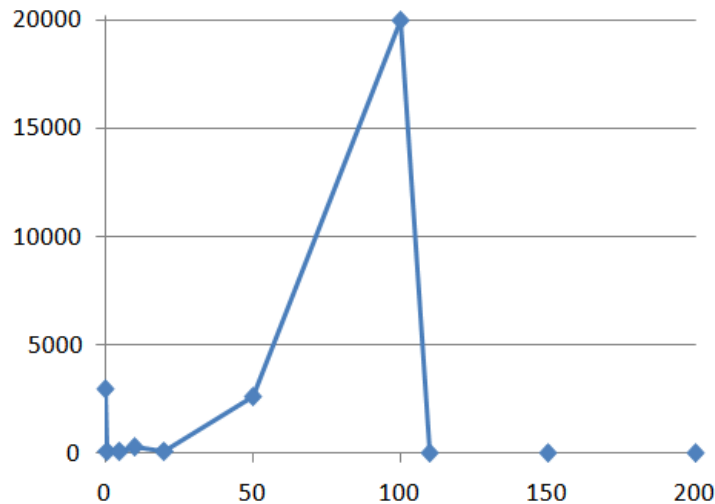
Χρόνος (sec)	Αρχική Εκτίμηση ΣΜΘ (W/m²K)	Αποτέλεσμα ΣΜΘ (W/m²K)
0	9000	2958
1	7000	70
5	400	63
10	380	298
20	200	80
50	200	2635
100	200	20000
110	800	25
150	800	8
200	850	18

Ο αριθμός επαναλήψεων που εκτελέστηκε ήταν 15. Ο αριθμός των γραμμών στον πίνακα τιμών του ΣΜΘ όπως φαίνεται στον πίνακα είναι 10.

Συνεπώς, ο αριθμός των προσομοιώσεων που απαιτήθηκαν ήταν $(10+1) \times 15 = 165$ υπολογισμοί. Ο χρόνος εκτέλεσης της διαδικασίας θα ήταν αρκετά ικανοποιητικός εάν η διαδικασία ήταν αυτοματοποιημένη. Δεδομένης της ανεξάρτητης εκτέλεσης προσομοιώσεων, η διαδικασία ήταν επίπονη και χρονοβόρα.

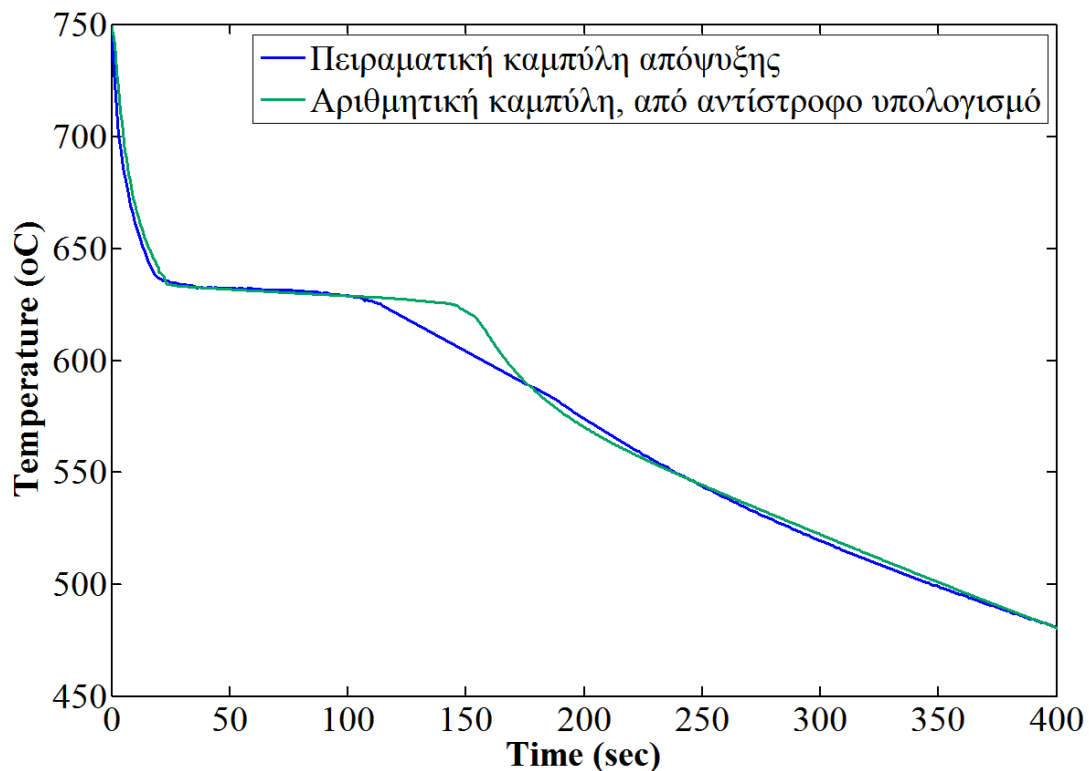
Η μορφή του ΣΜΘ που επελέγη ως αρχική εκτίμηση, ακολουθούσε τη μορφή των τριών σταδίων, που αναφέρθηκε νωρίτερα πως είναι επιθυμητή, με βάση τη βιβλιογραφία.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.11, ο ΣΜΘ που προέκυψε από τον αντίστροφο υπολογισμό τείνει να ακολουθεί την επιθυμητή μορφή κατά το 1^ο και το 2^ο στάδιο, αλλά κάποια στιγμή στο 50^οsec παρατηρείται μία αύξηση της τιμής η οποία γίνεται εξαιρετικά έντονη στο 100^οsec, φθάνοντας 20000W/m²K.



Σχήμα 5.11 ο ΣΜΘ που προέκυψε ως αποτέλεσμα από τον αντίστροφο προσδιορισμό.

Στο Σχήμα 5.12 έχουν σχεδιαστεί σε αντιπαραβολή η πειραματική καμπύλη απόψυξης, με την αριθμητική αντίστοιχη που προέκυψε μετά από εκτέλεση προσομοίωσης της χύτευσης με χρήση του ΣΜΘ του Σχήματος 5.11. Η πράσινη καμπύλη πρακτικά αποτελεί το αποτέλεσμα της αντίστροφης διαδικασίας.



Σχήμα 5.12 Προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης από την αριθμητική αντίστοιχη, που προέκυψε από προσομοίωση της χύτευσης με το ΣΜΘ-αποτέλεσμα του αντίστροφου προβλήματος.

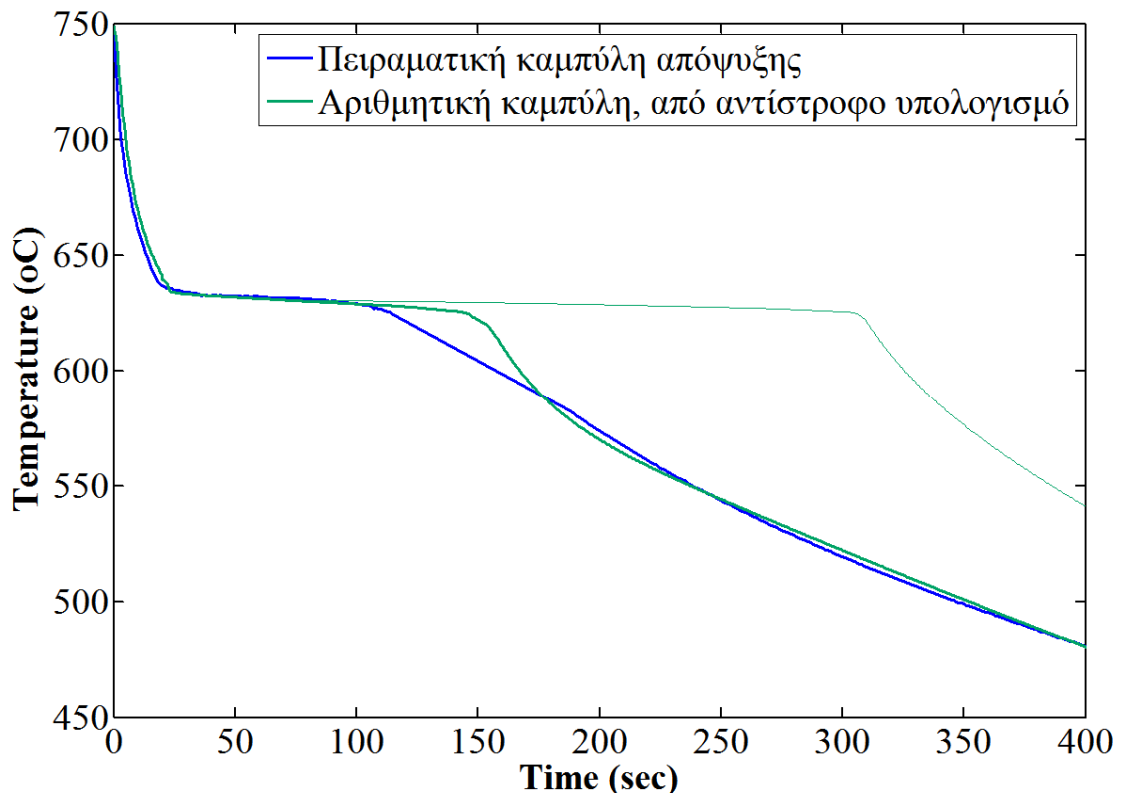
Διαπιστώνεται εύκολα πως η προσέγγιση των δύο καμπυλών είναι πολύ καλή. Η αριθμητική καμπύλη απόψυξης ταυτίζεται με την πειραματική στο μεγαλύτερο μέρος της. Το μόνο σημείο στο οποίο διαφέρουν είναι μία περιοχή που αποτελεί «ζητούμενο», και η οποία είναι το πέρας της

στερεοποίησης. Έτσι, το πέρας της στερεοποίησης με βάση την προσομοίωση συμβαίνει 47sec αργότερα από ό,τι στο πείραμα. Η απόκλιση στο συγκεκριμένο μέγεθος είναι σημαντική.

Εάν αγνοηθεί προς στιγμήν η απόκλιση στους χρόνους στερεοποίησης, η πολύ εντυπωσιακή προσέγγιση των καμπυλών συμβαίνει λόγω της «βίαιης» αύξησης της τιμής του ΣΜΘ στο 100^οsec.

Πέρα από την εκτέλεση του αντίστροφου υπολογισμού, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση με τη μέθοδο δοκιμής-και-σφάλματος για τιμές γύρω από την τιμή-αποτέλεσμα του ΣΜΘ. Μεταβάλλοντας την υπερβολικά μεγάλη και μη αποδεκτή τιμή των 20000W/m²K, διαπιστώθηκε πως δεν ήταν δυνατή η επίτευξη τόσο καλής προσέγγισης με πιο «ομαλές» τιμές. Μείωση της τιμής του ΣΜΘ στο 100 secαπομακρύνει την καμπύλη απόψυξης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.13.

Συνεπώς, καλύτερη λύση δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί με αποκλειστική βελτίωση μίας τιμής του πίνακα τιμών του ΣΜΘ, αλλά θα έπρεπε να αλλάξει ολόκληρη η κατανομή τιμών ΣΜΘ.



Σχήμα 5.13 Η αριθμητική καμπύλη απόψυξης που προκύπτει από προσομοίωση της χύτευσης με χρήση του ΣΜΘ που προέκυψε από αντίστροφο υπολογισμό.

Συμπερασματικά, η μέθοδος αντίστροφου υπολογισμού δίνει αριθμητικά καλό αποτέλεσμα αρκετά γρήγορα. Δεν εξασφαλίζει, ωστόσο, τη διατήρηση της μορφής του ΣΜΘ που δίδεται ως αρχική εκτίμηση. Μόνο με επιπρόσθετους περιορισμούς θα μπορούσε να εξασφαλιστεί ένα αποτέλεσμα ποιοτικά

στιβαρότερο, που θα ήταν αποδεκτό από πλευράς φυσικής σημασίας και όχι μόνο από αριθμητικής απόψεως.

5.3 Προσδιορισμός με τη διαδικασία δοκιμής-και-σφάλματος

Όπως έχει αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος της μελέτης, ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας (Σ.Μ.Θ), εξαρτάται τόσο από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του κράματος και του καλουπιού, όσο και από τη γεωμετρία του χυτού. Επιπλέον, δεν έχει σταθερή τιμή, αλλά μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου σε τρία στάδια. Αρχικά, όταν η αποβολή θερμότητας από το τήγμα στο καλούπι είναι πολύ μεγάλη, έχουμε υψηλές τιμές, οι οποίες όμως μειώνονται σημαντικά μετά από σύντομο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια, στο δεύτερο στάδιο, η τιμή του σταθεροποιείται και στο τρίτο στάδιο είτε αυξάνεται, είτε μειώνεται είτε παραμένει σταθερός. Στην περίπτωση της χύτευσης κενού ή κενού-υπερπίεσης, επειδή στο τρίτο στάδιο έχουμε αύξηση της πίεσης και άρα καλύτερη επαφή του καλουπιού και του χυτού αναμένεται αύξηση του συντελεστή μετάδοσης.

Ο προσδιορισμός του ΣΜΘ με τη διαδικασία δοκιμής-και-σφάλματος (trial-and-error), προϋποθέτει εκτέλεση πειραμάτων χύτευσης για λήψη πειραματικών μετρήσεων της θερμοκρασίας του τήγματος σε σημείο κοντά στη διεπιφάνεια (πειραματική καμπύλη απόψυξης). Εν συνεχεία, πραγματοποιείται προσομοίωση της χύτευσης (εν προκειμένω, με το ProCAST 2004.1®), με παραμέτρους εισόδου του μοντέλου τις συνθήκες του πειράματος και ΣΜΘ κατ' εκτίμηση. Ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης λαμβάνεται η αριθμητική καμπύλη απόψυξης σε σημείο αντίστοιχο με τη θέση μέτρησης του πειράματος. Η αριθμητική καμπύλη απόψυξης συγκρίνεται με την πειραματική και αξιολογείται η προσέγγιση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για διάφορες τιμές του ΣΜΘ, έως ότου η προσέγγιση των δύο καμπυλών αξιολογηθεί ως ικανοποιητική.

Η διαδικασία δοκιμής-και-σφάλματος (trial-and-error) που ακολουθήθηκε δεν είναι μία αυτοματοποιημένη διαδικασία. Αποτελεί ωστόσο μία διαδικασία βελτιστοποίησης [Haupt and Haupt 2004] και τα αποτελέσματα κρίνονται ιδιαιτέρως χρήσιμα, επειδή: (α) παρέχουν την ποσοτική πληροφορία που είναι απαραίτητη για τη διεξαγωγή αξιόπιστης αριθμητικής προσομοίωσης της χύτευσης (βλ. Κεφάλαιο 3) και (β) παρέχουν χρήσιμη εμπειρία, η οποία αξιοποιούμενη μπορεί να χρησιμεύσει στο στάδιο της «αυτοματοποίησης» της διαδικασίας.

Για τα αποτελέσματα της παραγράφου αυτής, χρησιμοποιήθηκαν πειραματικές καμπύλες απόψυξης που ελήφθησαν από θερμοστοιχεία τοποθετημένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.44 (σελ.136), για τους σκοπούς της «1ης περίπτωσης» πειραμάτων (βλ. §2.6.1.4, σελ.133).

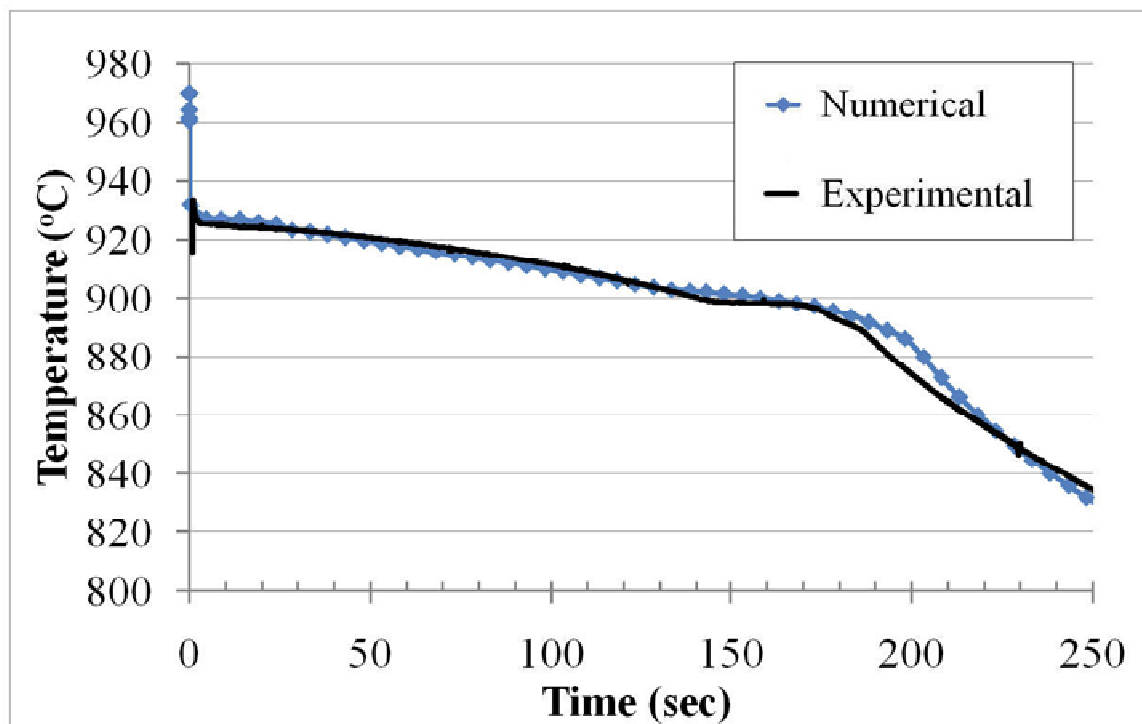
Στα πλαίσια της διαδικασίας αυτής, διεξήχθη ένας μεγάλος αριθμός ανεξάρτητων προσομοιώσεων, για ένα πλήθος περιπτώσεων ΣΜΘ. Η διαδικασία κατέληξε σε αποτελέσματα που δίνουν πολύ καλή προσέγγιση των αριθμητικών και των πειραματικών δεδομένων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών που προέκυψαν για τα σενάρια χύτευσης που περιγράφονται στον Πίνακα 5.3.

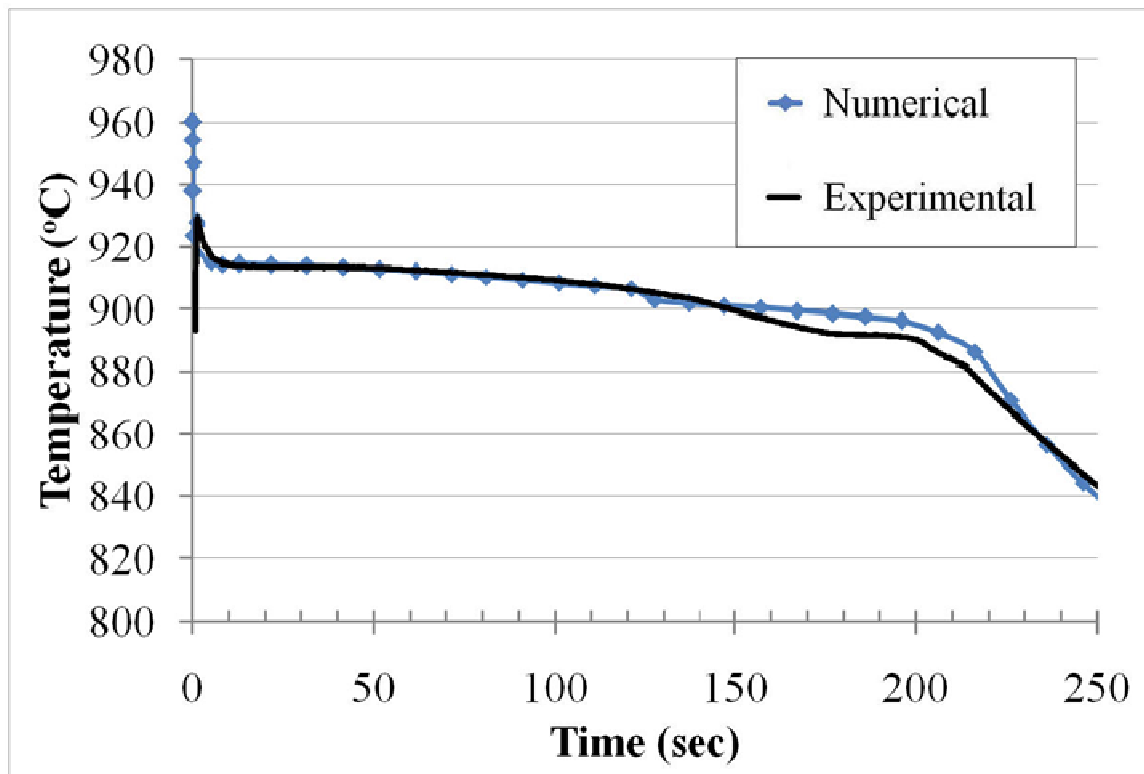
Πίνακας 5.3 Πειράματα «1^{ης} Ομάδας ΔΡ», για τη διερεύνηση της επίδραση των συνθηκών χύτευσης στη χύτευση, με (ΔΡ;600;970).

	Πείραμα#1 Χύτευση Υπερπίεσης- Κενού	Πείραμα#2 Χύτευση Κενού	Πείραμα#3 Χύτευση Υπερπίεσης	Πείραμα#4 Χύτευση 50% Κενού	Πείραμα#5 Χύτευση Βαρύτητας
T _{mould} (°C)	600				
T _{metal} (°C)	970				
Πίεση στο θάλαμο τήξης (bar)	1.50	1.00	1.50	1.00	1.00
Πίεση στο θάλαμο χύτευσης (bar)	0.03	0.03	1.00	0.50	1.00

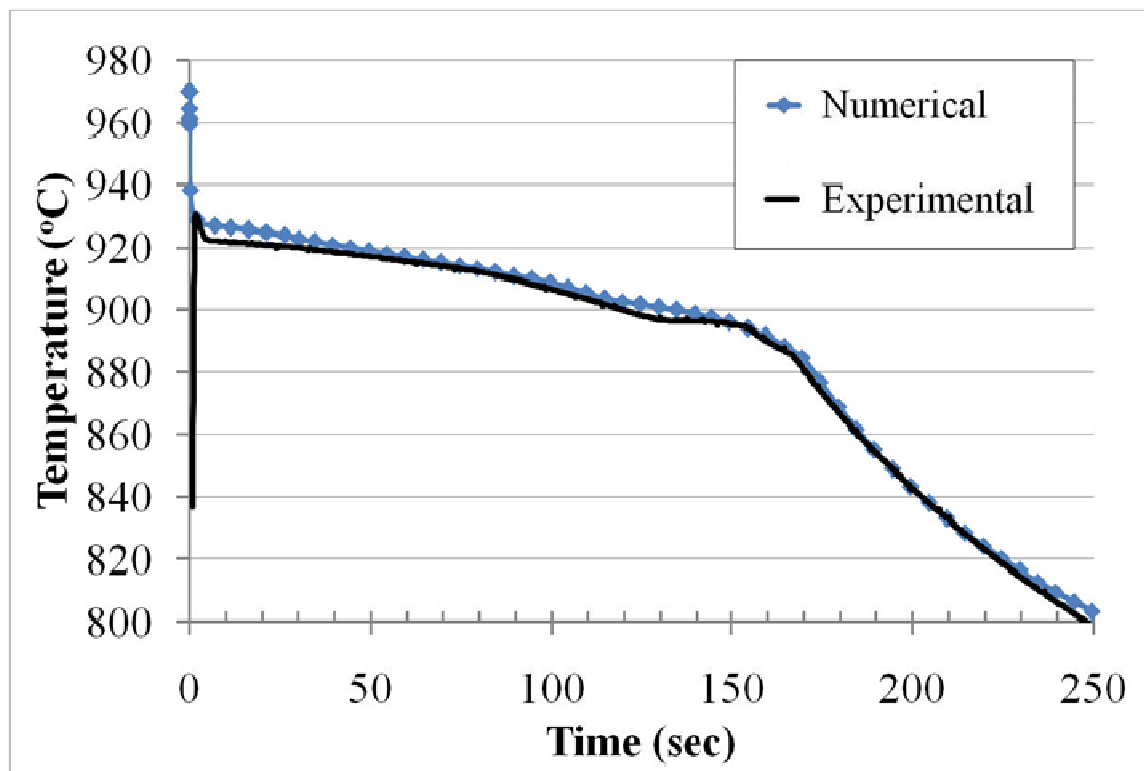
Στα Σχήματα 0.14-5.17, με μαύρο χρώμα έχουν σχεδιαστεί οι πειραματικές καμπύλες απόψυξης και με μπλε χρώμα οι αριθμητικές αντίστοιχες, για 5 διαφορετικές χυτεύσεις. Παρατηρείται πάρα πολύ καλή προσέγγιση των αποτελεσμάτων σε όλες τις περιπτώσεις. Η προσέγγιση των καμπυλών αποτελούσε κριτήριο κατά τη διαδικασία δοκιμής-και-σφάλματος.



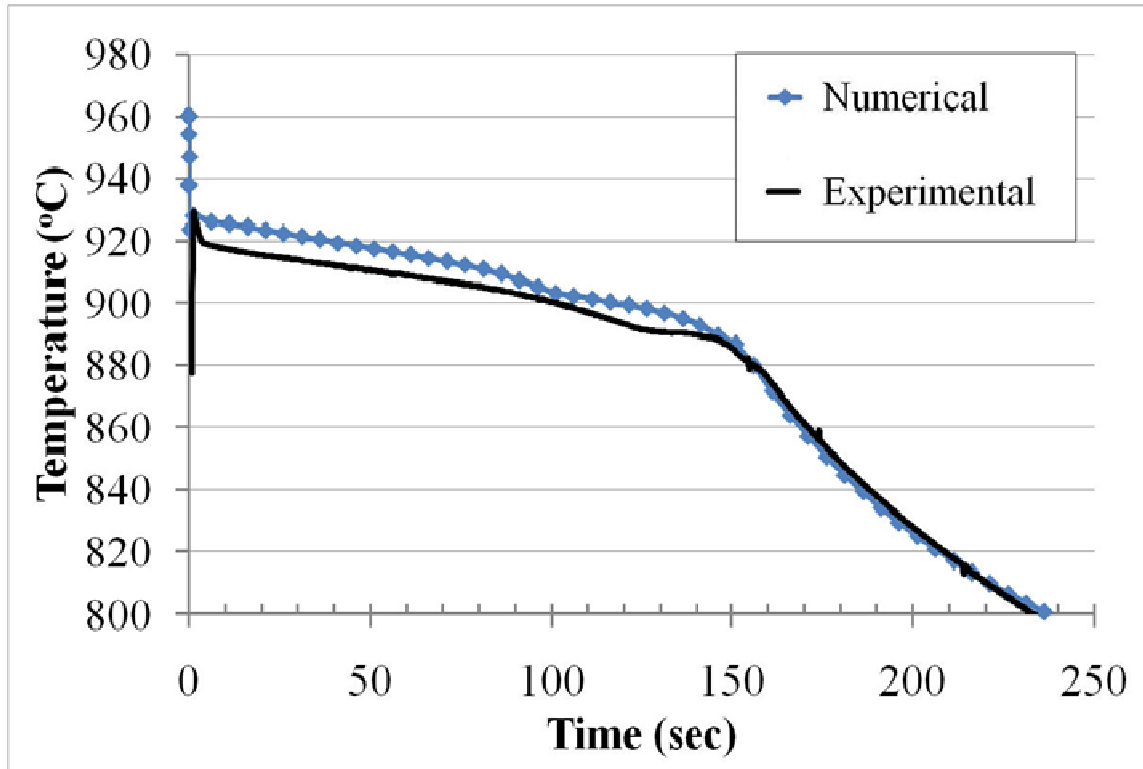
Σχήμα 5.14 Προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης από την αριθμητική, που προέκυψε από προσομοίωση με το ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για χύτευση Υπερπίεσης-Κενού (ΔΡ= 1.47bar).



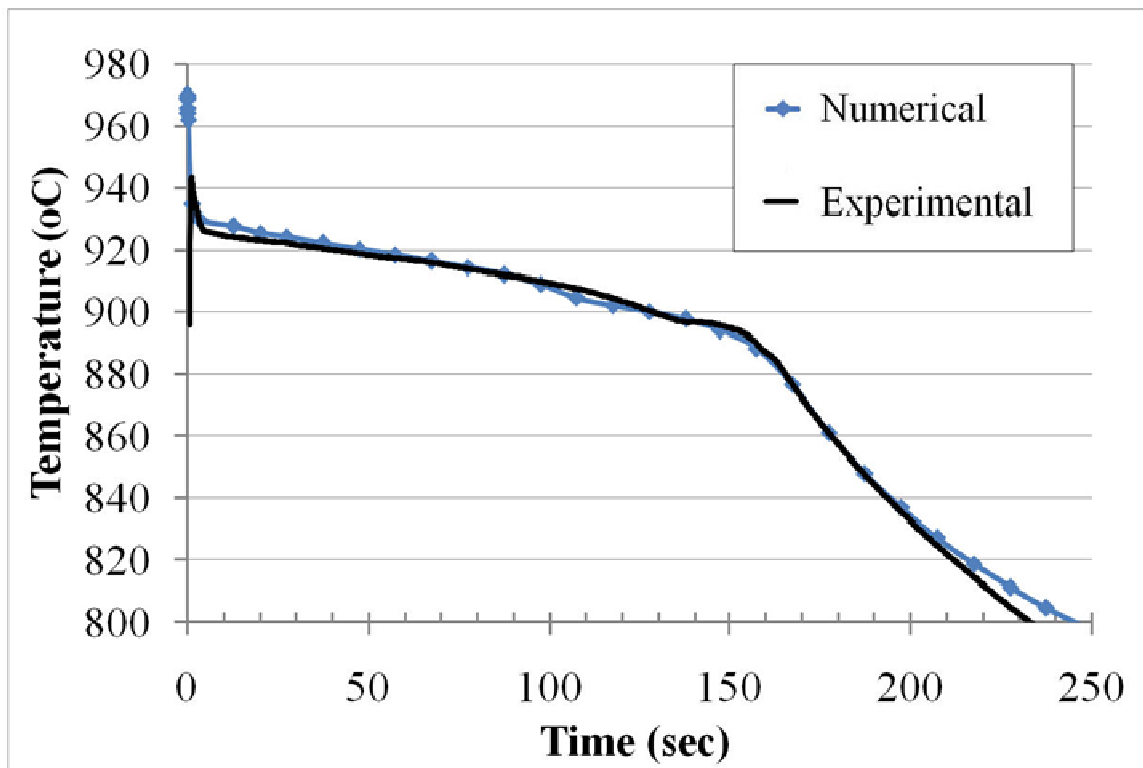
Σχήμα 5.14 Προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης από την αριθμητική, που προέκυψε από προσομοίωση με το ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση Κενού ($\Delta P = 0.97 \text{ bar}$).



Σχήμα 5.15 Προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης από την αριθμητική, που προέκυψε από προσομοίωση με το ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση Υπερπίεσης ($\Delta P = 0.5 \text{ bar}$).



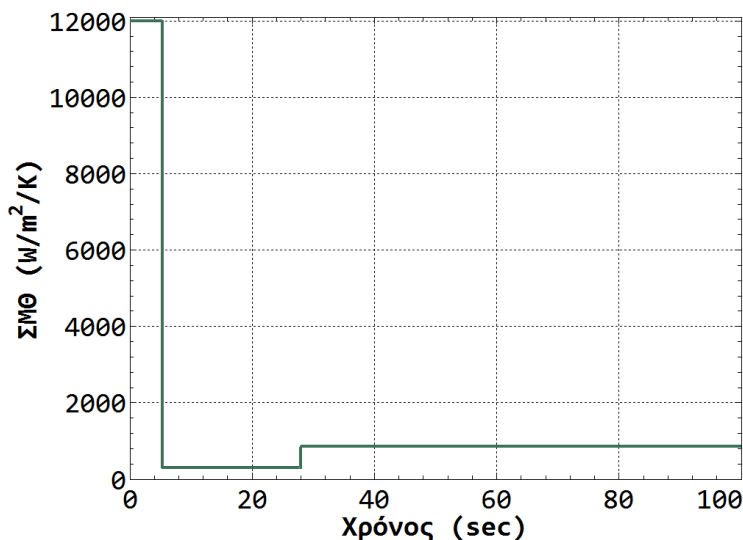
Σχήμα 5.16 Προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης από την αριθμητική, που προέκυψε από προσομοίωση με το ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση με 50% Κενό ($\Delta P = 0.5 \text{ bar}$).



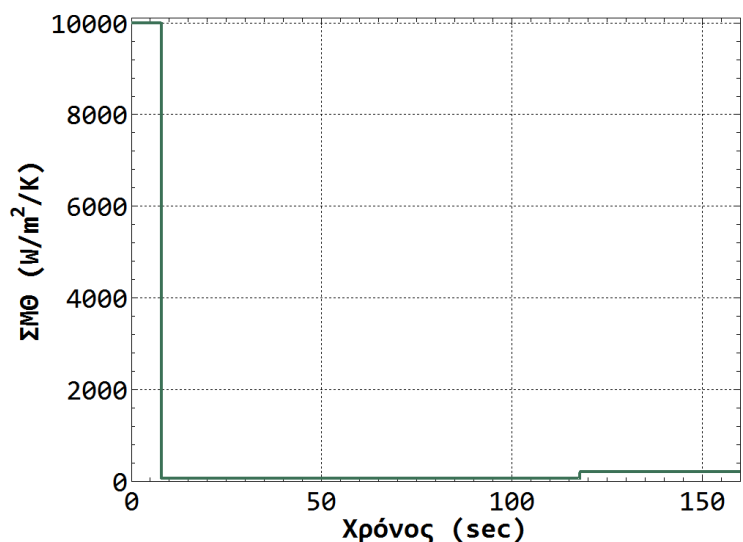
Σχήμα 5.17 Προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης από την αριθμητική, που προέκυψε από προσομοίωση με το ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση Βαρύτητας ($\Delta P = 0 \text{ bar}$).

Στα Σχήματα 5.18-5.22 παρουσιάζονται οι τιμές των ΣΜΘ που οδήγησαν σε πολύ καλές προσεγγίσεις των καμπυλών απόψυξης, για τις 5 διαφορετικές τεχνικές χύτευσης (Σχήματα 5.14-5.17).

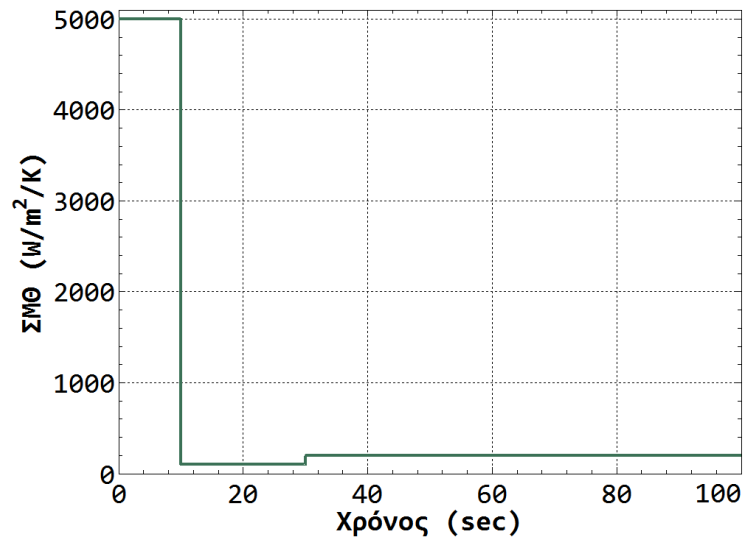
Παρατηρείται πως οι ΣΜΘ ακολουθούν τη μορφή των τριών σταδίων που αναμένεται από τη βιβλιογραφία. Παρατηρείται, ωστόσο, πως η τιμή της 3^{ης} περιοχής είναι πολύ μεγαλύτερη από την τιμή της 1^{ης} περιοχής, πράγμα που οφείλεται: (α) σε κακή εκτίμηση της θερμοκρασίας του καλουπιού και (β) στην παρουσία καλής επαφής που οδήγησε σε έντονη απαγωγή θερμότητας.



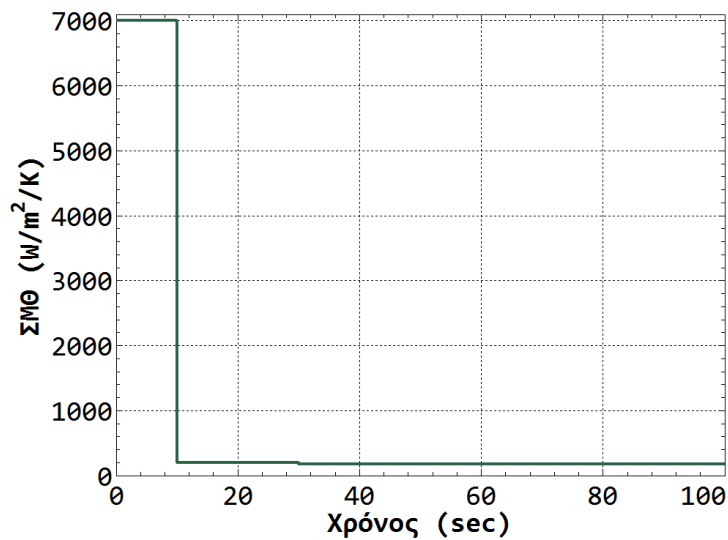
Σχήμα 5.18 Ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για χύτευση με Υπερπίεση-Κενό ($\Delta P= 1.47\text{bar}$).



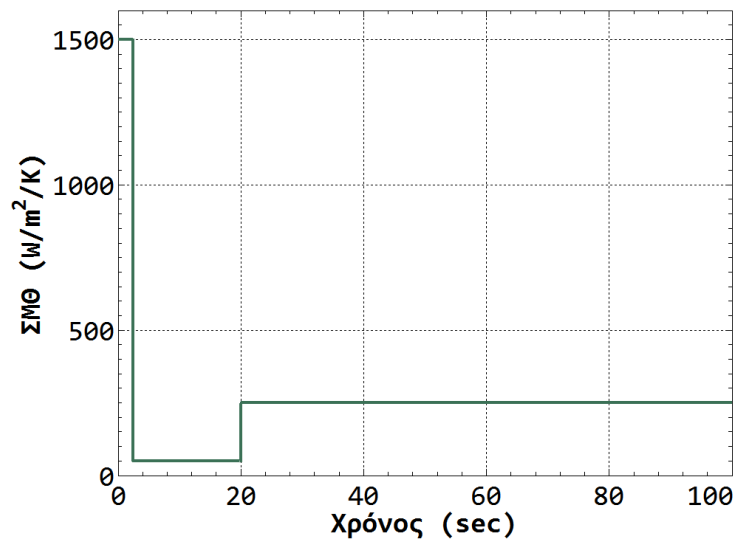
Σχήμα 5.19 Ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για χύτευση Κενού ($\Delta P= 0.97\text{bar}$).



Σχήμα 5.20 Ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση με Υπερπίεση ($\Delta P= 0.5\text{bar}$).



Σχήμα 5.21 Ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση με 50% Κενό ($\Delta P= 0.5\text{bar}$).



Σχήμα 5.22 Ο ΣΜΘ που προσδιορίστηκε με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος», για Χύτευση Βαρύτητας ($\Delta P= 0\text{bar}$).

Στους Πίνακες 5.4 και 5.5, αποτυπώνεται η επίδραση της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δύο θαλάμων, στις τιμές του πρώτου, του δεύτερου και του τρίτου σταδίου του ΣΜΘ (h_1 , h_2 , h_3) και στις χρονικές στιγμές στις οποίες τελειώνει η πρώτη και η δεύτερη περιοχή αντίστοιχα (t_1 , t_2). Η τιμή του ΣΜΘ κατά την 1^η περιοχή γενικά αυξάνει, με αύξηση της διαφοράς πίεσης. Στη χύτευση Υπερπίεσης-Κενού, η διαφορά πίεσης των 1.5bar ωθεί το τήγμα έντονα προς τα τοιχώματα του καλουπιού, εξασφαλίζοντας μία αρκετά καλή επαφή των δύο υλικών, η οποία καταλήγει σε υψηλό ρυθμό μετάδοσης θερμότητας. Αυτός είναι ο λόγος που, κατά το 1^ο στάδιο της χρονικής κατανομής του ΣΜΘ, η τιμή της χύτευσης υπερπίεσης-κενού είναι υψηλότερη, σε σύγκριση με την περίπτωση της χύτευσης βαρύτητας. Στις περιπτώσεις χύτευσης υπερπίεσης και χύτευσης κενού 50%, όπου $\Delta P=0.5\text{bar}$, οι τιμές των h_1 δεν είναι οι ίδιες, όπως θα περίμενε κανείς. Όταν η πίεση των $\Delta P=0.5\text{bar}$ εφαρμόζεται μέσω της δημιουργίας κενού, η υψηλότερη τιμή του h_1 υποδεικνύει μία βελτιωμένη επαφή μεταξύ τήγματος και καλουπιού, σε σχέση με την περίπτωση που η ίδια διαφορά πίεσης δημιουργείται μέσω της εφαρμογής υπερπίεσης και μόνο.

Από τον Πίνακα 5.4, είναι φανερό πως η τιμή του h_2 κυμαίνεται μεταξύ 50-200W/m²/K, με μέγιστη τιμή τα 300W/m²/K για την περίπτωση χύτευσης υπερπίεσης-κενού. Είναι, επίσης, εμφανές πως στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται και η μεγαλύτερη τιμή h_3 . (850W/m²/K). Ο λόγος για την αυξημένη τιμή h_3 είναι η καλή επαφή μεταξύ του στερεοποιημένου εξωτερικού στρώματος μετάλλου και του καλουπιού. Περίπου ίδιο h_3 (γύρω στα 200W/m²/K) σημειώνεται για τις περιπτώσεις χύτευσης με $\Delta P=0.5-1.0\text{bar}$. Για τη χύτευση βαρύτητας, η τιμή του h_3 είναι 250W/m²/K, αρκετά αυξημένη σχετικά με τις υπόλοιπες τρεις περιπτώσεις.

Πίνακας 5.4 Τιμές h_1 , h_2 & h_3 των προσδιορισθέντων ΣΜΘ για τις 5 περιπτώσεις χύτευσης, ανά χρονικό στάδιο.

HTC (W/m ² /K)	Πείραμα#1 Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού	Πείραμα#2 Χύτευση Κενού	Πείραμα#3 Χύτευση με Υπερπίεση	Πείραμα#4 Χύτευση με 50% Κενό	Πείραμα#5 Χύτευση Βαρύτητας
h_1	12000	10000	5000	7000	1500
h_2	300	50	100	200	50
h_3	850	200	200	180	250

Πίνακας 5.5 Διάρκεια των χρονικών διαστημάτων t_1 , t_2 των χρονικά μεταβαλλόμενων προσδιορισθέντων ΣΜΘ, για τις 5 περιπτώσεις χύτευσης.

	Πείραμα#1 Χύτευση Υπερπίεσης-Κενού	Πείραμα#2 Χύτευση Κενού	Πείραμα#3 Χύτευση με Υπερπίεση	Πείραμα#4 Χύτευση με 50% Κενό	Πείραμα#5 Χύτευση Βαρύτητας
$t_1(\text{sec})$	8.0	10.0	5.4	10.0	2.5
$t_2(\text{sec})$	118.0	30.0	28.0	30.0	20.0

Πρέπει να σημειωθεί πως στην παράγραφο αυτή, θεωρήθηκε ότι ο ΣΜΘ έχει ενιαία τιμή σε ολόκληρο το χυτό. Η θεώρηση ενιαίου ΣΜΘ πρακτικά αποτελεί μία «μέση» κατάσταση και θεωρείται επαρκής παραδοχή για μία πρώτη προσέγγιση.

Τα λογισμικά προσομοίωσης της χύτευσης συνήθως προσφέρουν τη δυνατότητα να οριστούν διαφορετικές τιμές ΣΜΘ στις διαφορετικές διεπιφάνειες. Μία τέτοια υπόθεση, ειδικά στα πλαίσια της έρευνας και με το δεδομένο ότι δεν υπάρχουν σχετικά βιβλιογραφικά δεδομένα, θα δημιουργούσε σωρεία ζητημάτων. Πρώτα από όλα, τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία θα πρέπει η αρχική ενιαία κοιλότητα του καλουπιού να διαιρεθεί σε υπο-περιοχές, στις οποίες θα οριστούν διαφορετικές τιμές ΣΜΘ. Δεν υπάρχει κριτήριο που να καθορίζει την απάντηση σε αυτό το ερώτημα. Τέτοιου είδους κριτήρια θα πρέπει να περιλαμβάνουν -μεταξύ άλλων- έννοιες όπως το casting modulus, αλλά απαιτείται εκτενέστατος πειραματισμός. Έτσι, οποιαδήποτε παραμετρική μελέτη πάνω στις συνθήκες χύτευσης είναι εξαρτώμενη από τον τρόπο που θα χωριστεί το χυτό τεμάχιο σε μικρότερες περιοχές, στις οποίες θα ανατεθεί διαφορετικός ΣΜΘ ανά διεπιφάνεια.

Κάτι που θα πρέπει να τονιστεί, σχετικά με τα δεδομένα από τη βιβλιογραφία, είναι πως υπάρχουν δημοσιεύσεις που χρησιμοποιούν περισσότερους του ενός ΣΜΘ, αλλά η διαφορά στο ΣΜΘ έγκειται στη διαφορά των σωμάτων που έρχονται σε επαφή. Δηλαδή, συνηθέστερη περίπτωση βιβλιογραφικά είναι η περίπτωση ανάθεσης ενός ΣΜΘ στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού και ενός δεύτερου ΣΜΘ στη διεπιφάνεια χυτού-ψύχοντος σώματος. Η διαφορετικότητα, δηλαδή, προκύπτει λόγω ψυκτικού μέσου και όχι λόγω γεωμετρίας. Η μόνη περίπτωση που η γεωμετρία φαίνεται να απασχολεί, είναι στην πρόσφατη δημοσίευση των [Wong & Pao 2011], που όμως χρησιμοποιείται 2D μοντελοποίηση.

Σε κάθε περίπτωση, η αλγοριθμική πολυπλοκότητα είναι μάλλον μεγάλη για διερεύνηση μη ενιαίου ΣΜΘ με τη μέθοδο δοκιμής-σφάλματος. Συνεπώς, αυτό το θέμα απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση με άλλη προσέγγιση. Σε αυτήν την κατεύθυνση κινείται η μελέτη του επόμενου κεφαλαίου.

5.4 Συζήτηση επί των Αποτελεσμάτων

Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας (ΣΜΘ) κατά τη χύτευση με τρεις διαφορετικές μεθόδους: αναλυτικός προσδιορισμός, αντίστροφος προσδιορισμός και προσδιορισμός με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος». Όλες οι μέθοδοι υπολογισμού βασίστηκαν στην ύπαρξη πειραματικών μετρήσεων θερμοκρασίας κατά τη χύτευση. Η διερεύνηση αυτή ανέδειξε τα πλεονεκτήματα και τις δυσκολίες που παρουσιάζει η κάθε μέθοδος, καθώς και τα όρια εφαρμογής της.

Ο **αναλυτικός υπολογισμός** του ΣΜΘ είναι η πλέον γρήγορη μέθοδος. Με γνωστή την εξίσωση υπολογισμού, τις ιδιότητες των υλικών του μετάλλου και του καλουπιού και με την ύπαρξη πειραματικών δεδομένων, ο υπολογισμός του ΣΜΘ είναι άμεσος. Δεν υπάρχουν, δηλαδή, απαιτήσεις σε υπολογιστικό κόστος. Από τα αποτελέσματα φάνηκε πως οι ΣΜΘ που υπολογίζονται ακολουθούν την αναμενόμενη από τη βιβλιογραφία μορφή των «τριών σταδίων» (βλ. §1.9.6.1).

Παρόλα αυτά, θα πρέπει να τονιστεί πως ο αναλυτικός προσδιορισμός εμπεριέχει ένα σημαντικό μειονέκτημα: εξ' ορισμού, πρακτικά, επιλύει ένα διαφορετικό πρόβλημα και όχι την πραγματική περίπτωση χύτευσης. Είναι δεδομένο, όπως περιγράφηκε στη σελίδα 276, πως οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη μετάδοση θερμότητας κατά τη χύτευση επιλύονται μόνο αριθμητικά. Αναλυτική λύση υπάρχει μόνο εάν γίνουν κάποιες παραδοχές. Οι δύο βασικότερες παραδοχές στην περίπτωση που μελετήθηκε -η οποία βασίστηκε ως προς την κατάσταση των εξισώσεων στη διεθνή βιβλιογραφία- ήταν πως (α) θεωρήθηκε μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας και (β) θεωρήθηκε πως η μετάδοση θερμότητας στη διεπιφάνεια γίνεται εξ' ολοκλήρου με συναγωγή. Η παραδοχή(α) δεν ισχύει για χυτά σύνθετης γεωμετρίας, καθώς είναι προφανές πως σε ένα πραγματικό (τρισδιάστατο) χυτό η θερμότητα απάγεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Η παραδοχή(β) είναι γενικά μακριά από την πραγματικότητα διότι, όπως έγινε σαφές στην §1.9, ο ΣΜΘ περιγράφει το σύνολο των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα, καθ' όλη τη διάρκεια της χύτευσης. Άλλες παραδοχές, όπως η θεώρηση σταθερής πυκνότητας του μετάλλου με τη θερμοκρασία ή η θεώρηση σταθερής θερμοκρασίας καλουπιού είναι αμελητέες σε σχέση με τα προηγούμενα.

Από την αριθμητική προσομοίωση με χρήση του αναλυτικά υπολογισθέντα ΣΜΘ προκύπτει πως οι αριθμητικές καμπύλες απόψυξης απέχουν πολύ από τις αντίστοιχες πειραματικές. Ενδεχομένως, όμως, ο αναλυτικός προσδιορισμός είναι μία καλή αρχική εκτίμηση για τον προσδιορισμό με κάποια άλλη, αριθμητική μέθοδο.

Ο **αντίστροφος προσδιορισμός** του ΣΜΘ είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος προσδιορισμού του ΣΜΘ και εφαρμόζεται στην έρευνα και τη βιομηχανία.

Στόχος της χρήσης αντίστροφης μεθόδου στα πλαίσια της παρούσας μελέτης ήταν η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τον τρόπο υπολογισμού και η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων, αλλά και των δυσκολιών.

Ο αντίστροφος προσδιορισμός ξεκινά από την ύπαρξη μίας αρχικής εκτίμησης για το ΣΜΘ. Πραγματοποιείται προσομοίωση της χύτευσης με χρήση του συντελεστή αυτού, προκύπτει η αριθμητική καμπύλη απόψυξης για το σημείο ενδιαφέροντος και συγκρίνεται με την πειραματική καμπύλη απόψυξης. Εάν η προσέγγιση δεν είναι «καλή», αλλοιώνεται η τιμή του ΣΜΘ που προτάθηκε με βάση συγκεκριμένη αλγοριθμική διαδικασία και προτείνεται ένας νέος συντελεστής, μέχρι την εύρεση ενός ΣΜΘ που να προσεγγίζει ικανοποιητικά. Θετικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός ότι δοκιμάζονται τιμές του ΣΜΘ πολύ διαφορετικές από αυτές της αρχικής εκτίμησης, πράγμα που αυξάνει τις πιθανότητες επίτευξης μίας καλής λύσης.

Από την εκτέλεση της αντίστροφης διαδικασίας προέκυψε ένας συντελεστής που έδινε πάρα πολύ καλή προσέγγιση των πειραματικών μετρήσεων από τα αριθμητικά αποτελέσματα. Η διαδικασία αυτή, παρόλο που είχε κάποιο σημαντικό υπολογιστικό κόστος -δεδομένου ότι περιελάμβανε ένα πλήθος προσομοιώσεων- ολοκληρώθηκε σε σχετικά μικρό αριθμό επαναλήψεων.

Παρόλα αυτά, ο βέλτιστος ΣΜΘ, δηλαδή αυτός που έδωσε την καλύτερη προσέγγιση, είναι ένας συντελεστής που δεν έχει φυσική σημασία. Παρουσιάζει μία έντονη ασυνέχεια στη μορφή του, μία πολύ υψηλή τιμή στο τέλος του 2^{ου} σταδίου απόψυξης. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη φύση του προβλήματος, που είναι ελλιπώς ορισμένο. Αυτή η συμπεριφορά δικαιολογεί και το πλήθος των δημοσιεύσεων που γίνονται στην προσπάθεια εύρεσης αποτελεσματικού αλγορίθμου ομαλοποίησης.

Μία ακόμα επισήμανση που μπορεί να γίνει είναι πως ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί ως δεδομένου εισόδου ένα διάνυσμα τιμών του ΣΜΘ, για δεδομένες χρονικές στιγμές. Οι χρονικές στιγμές ορίζονται από το χρήστη, στην αρχή του προβλήματος. Ο αλγόριθμος αναζητά τις τιμές που θα λαμβάνει ο συντελεστής αυτές τις χρονικές στιγμές. Αυτό σημαίνει, όμως, πως ο χρήστης θα πρέπει να γνωρίζει ή να εκτιμήσει σωστά το πλήθος των χρονικών βημάτων που θα επιλέξει. Μία επιλογή θα ήταν η επιλογή μεγάλου αριθμού χρονικών βημάτων. Κάτι τέτοιο, όμως, αυξάνει κατακόρυφα το υπολογιστικό κόστος, καθώς, όπως αναφέρθηκε στη σελ. 291, σε κάθε επανάληψη εκτελούνται $n+1$ προσομοιώσεις, όπου n το πλήθος των μεταβλητών στο διάνυσμα του ΣΜΘ.

Επειδή απαιτείται μεγάλο, τελικά, πλήθος προσομοιώσεων, στην πράξη εκτελείται αντίστροφη διαδικασία προσδιορισμού του ΣΜΘ με επιτυχία, αλλά σε 2D προβλήματα, για μείωση του υπολογιστικού κόστους.

Ο προσδιορισμός με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος» του ΣΜΘ πραγματοποιήθηκε προκειμένου να υπάρχει απόλυτη ευελιξία στην επιλογή των δοκιμαζόμενων τιμών ΣΜΘ. Πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα και δοκιμάστηκε ένα μεγάλο πλήθος τιμών ΣΜΘ. Στόχος ήταν η εύρεση συντελεστών που οδηγούν σε καλή προσέγγιση πειραματικών και αριθμητικών τιμών. Το υπολογιστικό κόστος ήταν και πάλι μεγάλο. Μειωνόταν με την «εκπαίδευση» του χρήστη και της απόκτηση εμπειρίας και καλύτερου κριτηρίου. Είναι σαφές ότι δεν πρόκειται για μία έξυπνη, αυτοματοποιημένη διαδικασία που θα μπορούσε να εφαρμοστεί στην πράξη. Παρόλα αυτά, για ερευνητικούς λόγους, ήταν ιδιαίτερος χρήσιμη. Δεν προέκυψαν καθολικοί εμπειρικοί κανόνες δοκιμών προκειμένου να προταθεί συγκεκριμένος «εμπειρικός» αλγόριθμος για αυτοματοποιημένη αναζήτηση του βέλτιστου ΣΜΘ.

5.5 Συμπεράσματα

Συνεπώς, με βάση τα όσα αναφέρθηκαν προκύπτει πως:

- Ο αναλυτικός προσδιορισμός είναι μία διαδικασία γρήγορη που εμπεριέχει πλήθος απλουστευτικών παραδοχών και για το λόγο αυτό δεν οδηγεί σε ρεαλιστική προσομοίωση της χύτευσης. Ενδεχομένως, όμως, η τιμή του ΣΜΘ που προτείνεται να αποτελεί μία καλή αρχική εκτίμηση για μία αντίστροφη διαδικασία προσδιορισμού.
- Ο αντίστροφος προσδιορισμός το ΣΜΘ είναι μία αριθμητική μέθοδος που καταλήγει σε πολύ καλά αποτελέσματα ως προς την προσέγγιση των αριθμητικών με τα πειραματικά αποτελέσματα. Εμπεριέχει, όμως, την πιθανότητα επίτευξης βέλτιστης τιμής χωρίς φυσική σημασία. Τέλος, με τη συγκεκριμένη διατύπωση, δεν δίνει την ευελιξία στο χρήστη να παρέμβει ή να προκαθορίσει τη μορφή του ΣΜΘ, εάν έχει κάποια αίσθηση της φυσικής σημασίας του προβλήματος.
- Η διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος» είναι μία μέθοδος που καταλήγει σε πολύ καλή προσέγγιση πειραματικών και αριθμητικών καμπυλών απόψυξης. Πρόκειται, όμως για μία ‘χειροκίνητη’ και μη αυτοματοποιημένη διαδικασία και ως εκ τούτου ακριβή και επίπονη. Πλεονέκτημά της αποτελεί η ευελιξία του χρήστη να δοκιμάσει τιμές ΣΜΘ σύμφωνα με την κρίση του, σύμφωνα με την εμπειρία που έχει αποκτήσει. Προτείνεται μόνο για συγκεκριμένους λόγους και περιορισμένη εφαρμογή, όπως πχ. για τον έλεγχο ορισμένων τιμών ΣΜΘ, μετά το πέρας κάποιας αριθμητικής διαδικασίας.

Κεφάλαιο 6

*Βέλτιστος Προσδιορισμός ΣΜΘ με χρήση Γενετικού Αλγορίθμου,
για περιοχές του χυτού με διαφορετικό casting modulus.*

Η σελίδα αυτή έχει αφεθεί σκοπίμως κενή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΜΘ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ, ΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΥ ΧΥΤΟΥ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ CASTING MODULUS.

6.1 Περιγραφή του Κεφαλαίου

6.1.1 Στόχος του Κεφαλαίου

Στη διεθνή βιβλιογραφία, ο προσδιορισμός του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας (ΣΜΘ) κατά τη χύτευση πραγματοποιείται με χρήση πειραματικών δεδομένων και αριθμητικών μεθόδων, όπως περιγράφεται αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Όπως έχει επίσης αναφερθεί, ο ΣΜΘ εξαρτάται από το υλικό, από τις συνθήκες χύτευσης (θερμοκρασίες μετάλλου/καλουπιού, επικαλύψεις, πίεση, κλπ) και από τη γεωμετρία.

Τα δεδομένα στη βιβλιογραφία σχετικά με τις τιμές του ΣΜΘ είναι πολύ περιορισμένα. Στη βιομηχανική πρακτική, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς η αριθμητική προσομοίωση της χύτευσης με κάποιο εμπορικά διαθέσιμο λογισμικό, συνήθως προηγείται κατάλληλα σχεδιασμένο πείραμα για μέτρηση θερμοκρασιών στη διεπιφάνεια μετάλλου-καλουπιού. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται, προκειμένου να είναι το πείραμα κατά το δυνατό αντιπροσωπευτικότερο της συμπεριφοράς του πραγματικού αντικειμένου κατά την πραγματική διαδικασία χύτευσης που θα χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ.

Ο αντίστροφος υπολογισμός του ΣΜΘ είναι μία επαναληπτική διαδικασία που συνδυάζει μία αριθμητική μέθοδο με την προσομοίωση της χύτευσης και ως εκ τούτου απαιτεί υπολογιστικό κόστος. Προκειμένου να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος, στη συνήθη πρακτική, μοιραία γίνεται πλήθος απλοποιητικών παραδοχών. Η βασική αρχή που ακολουθείται είναι να διατηρηθεί το πρόβλημα "όσο πιο απλό γίνεται". Γενικά, συνιστάται έντονα η χρήση γεωμετριών 2D. Επιπλέον, αυτό που γίνεται στην πράξη είναι να επιχειρείται να καθοριστεί – εάν είναι δυνατόν – ένας μόνο άγνωστος κάθε φορά, παρά το γεγονός ότι, επί της αρχής, δεν υπάρχει περιορισμός στην αντίστροφη μοντελοποίηση ως προς το πλήθος των αγνώστων που είναι επιθυμητό να προσδιοριστούν.

Για παράδειγμα, έστω ότι μελετάται μία περίπτωση χύτευσης σε γύψινο καλούπι, η προσομοίωση της οποίας απαιτεί τον προσδιορισμό ΣΜΘ μεταξύ χυτού-καλουπιού, αλλά και του ΣΜΘ μεταξύ χυτού-σωμάτων ψύξης. Αν και είναι δυνατό να προσδιοριστούν και οι δύο ΣΜΘ ταυτόχρονα, η συμβουλή είναι να απλοποιηθεί το πρόβλημα και να αποσυντεθεί σε δύο επιμέρους απλούστερα προβλήματα, ανεξάρτητου προσδιορισμού του ΣΜΘ.

Είναι προφανές, ότι είναι στη διακριτική ευχέρεια του κάθε μηχανικού να κρίνει ποιες είναι οι βασικότερες παράμετροι που επιδρούν στην τιμή του ΣΜΘ και να εστιάσει τη μελέτη του σε αυτές.

Το ερώτημα που ανακύπτει είναι το κατά πόσο είναι μία τέτοιου είδους προσέγγιση επαρκής.

Ειδικότερα για το θέμα της εξάρτησης του ΣΜΘ από τη γεωμετρία του χυτού, δεν υπάρχουν ποσοτικά στοιχεία στη βιβλιογραφία. Συνήθως, τα χυτά (δέντρα χύτευσης) αποτελούνται από περιοχές με μεγάλο casting modulus (βλ. §2.5, σελ.117) και από περιοχές με μικρότερο casting modulus. Ακόμα και εάν το ίδιο το χυτό δεν έχει σημαντικές μεταβολές διατομής, οι αγωγοί τροφοδοσίας, τα κανάλια ψύξης, η λεκάνη έγχυσης, τα κανάλια εισόδου κλπ θα διαφέρουν σημαντικά σε σχέση με τη βασική διατομή του χυτού τεμαχίου. Ένας μηχανικός της πράξης, θα οδηγηθεί εύκολα στο συμπέρασμα πως η κάθε «ξεχωριστή περιοχή» του χυτού θα πρέπει να μοντελοποιηθεί με χρήση διαφορετικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας. Ένα ζήτημα όμως είναι με βάση ποιο κριτήριο θα εκτιμηθεί η τιμή που θα έχει ο ΣΜΘ σε κάθε περιοχή Εάν υπολογιστεί ανεξάρτητα για την κάθε περιοχή - με τα προηγούμενα - θα είναι αρκετό; Αξίζει να σημειωθεί, στο σημείο αυτό, πως ενώ σε θεωρητικά βιβλία (Campbell; Jolly) το casting modulus επισημαίνεται ως σημαντική παράμετρος επίδρασης στο ΣΜΘ, σε εγχειρίδια χρήσης λογισμικών προσομοίωσης προτείνεται να αγνοηθεί [ProCAST Release Notes 20091].

Δεδομένου όμως ότι η επιστήμη των Η/Υ διευρύνεται και ενισχύεται με χρήση υπολογιστικά ισχυρότερων συστημάτων (παράλληλη επεξεργασία, clouds, clusters) κλπ, δυσκολίες του παρελθόντος αίρονται και ενδεχομένως, πιο σύνθετες αλλά ρεαλιστικότερες διερευνήσεις αποκτούν νόημα.

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι να διερευνηθούν και να απαντηθούν τα ερωτήματα που παρουσιάστηκαν. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός της πορείας μελέτης που περιγράφεται στην επόμενη υποενότητα. Η μελέτη περιλαμβάνει διεξαγωγή κατάλληλα σχεδιασμένου πειράματος και πλήθος αριθμητικών προσομοιώσεων. Τελικά, προτείνεται μία διαδικασία βελτιστοποίησης με χρήση γενετικού αλγορίθμου, για τον ταυτόχρονο προσδιορισμό των ΣΜΘ σε περιοχές του χυτού με διαφορετικά casting moduli.

6.1.2 Δομή του Κεφαλαίου - Περιπτώσεις που Εξετάστηκαν

6.1.2.1 Εισαγωγή

Στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου, η τεχνική χύτευσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν η χύτευση ακριβείας, δηλ. χύτευση με τη μέθοδο του χαμένου κεριού, με συμπαγές καλούπι (solid mold) και πραγματοποιήθηκε σε μηχανή χύτευσης κενού - υπερπίεσης. Το μέταλλο που χυτεύθηκε ήταν ορείχαλκος (66.7% Cu, 33.3%Zn). Η γεωμετρία

του χυτού ήταν αυτή που χρησιμοποιήθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, με βάρθρωση διατομής: μία μεγάλη, μία μεσαία και μία μικρή. Ο λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη γεωμετρία ήταν για να μελετηθεί ο τρόπος στερεοποίησης του μετάλλου σε περιοχές του χυτού με διαφορετικό casting modulus.

Για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ πραγματοποιήθηκε χύτευση από την οποία έγινε λήψη πειραματικών μετρήσεων και στη συνέχεια, αριθμητική προσομοίωση με συνθήκες ίδιες με αυτές του πειράματος. Θερμοστοιχεία τύπου K ήταν τοποθετημένα μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού, πολύ κοντά στη διεπιφάνεια μετάλλου - καλουπιού, έτσι ώστε να μετράται η θερμοκρασία του μετάλλου καθ' όλη τη διάρκεια της χύτευσης. Πέρα από τη λήψη των πειραματικών καμπυλών απόψυξης σε κάθε μία από τις τρεις διατομές του χυτού, μετρήθηκε η αρχική θερμοκρασία του τήγματος, η αρχική θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού και η πίεση στο θάλαμο του τήγματος και στο θάλαμο της χύτευσης (με χρήση αναλογικού και ψηφιακού αισθητήρα πίεσης).

Για την υλοποίηση της αριθμητικής προσομοίωσης, ήταν αναγκαίος ο όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστος ορισμός του προβλήματος. Αυτό, ειδικά στη μοντελοποίηση της χύτευσης, δεν είναι μία εύκολη διαδικασία, καθώς οι αναγκαίες πληροφορίες από τη βιβλιογραφία είναι περιορισμένες και λήψη μετρήσεων από την εκάστοτε διάταξη δεν είναι πάντα εύκολες. Συγκεκριμένα, απαιτείται η γνώση των ιδιοτήτων των υλικών του μετάλλου και του καλουπιού, συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η συγκεκριμένη πληροφορία στη βιβλιογραφία είναι πολύ περιορισμένη. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου κράματος ορείχαλκου, χρησιμοποιήθηκε πληροφορία από τη βιβλιογραφία και πληροφορία από τη βάση δεδομένων του λογισμικού προσομοίωσης για κράμα χαλκού διαφορετικής σύστασης, μετά από προσαρμογές και αναγωγές στις ιδιότητες του κράματος χαλκού που μελετήθηκε. Επιπλέον, είναι αναγκαίο να οριστούν οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες του προβλήματος. Οι αρχικές συνθήκες είναι οι συνθήκες που μετρήθηκαν κατά την εκτέλεση του πειράματος. Οι οριακές συνθήκες επίσης. Ο μόνος περιορισμός ήταν ότι δεν υπήρχε τεχνικά η δυνατότητα ταυτόχρονης λήψης μέτρησης θερμοκρασίας στο θάλαμο κενού για πάνω από 3 θερμοστοιχεία. Τα τρία αυτά θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν στο χυτό. Ήταν, όμως, αναγκαία η γνώση της θερμοκρασιακής ιστορίας στη λεκάνη έγχυσης και στο καλούπι. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις από προηγούμενα πειράματα που είχαν εκτελεστεί ακριβώς με το ίδιο κράμα και την ίδια διαδικασία.

Όπως περιγράφεται στην ενότητα 5.4, για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ χρησιμοποιείτο η πειραματικά προσδιορισμένη καμπύλη απόψυξης σε ένα σημείο του χυτού. Με τη διαδικασία «δοκιμής - και -σφάλματος» (“trial-and-error”) δοκιμάζονταν τιμές του ΣΜΘ στην προσομοίωση, έως ότου η αριθμητική καμπύλη απόψυξης πλησίαζε την πειραματική όσο το δυνατόν

περισσότερο. Αυτό το ίδιο κριτήριο χρησιμοποιείται και στην προσέγγιση που προτείνεται στο κεφάλαιο αυτό.

6.1.2.2 Δομή

Αρχικά, το πρώτο στάδιο της μελέτης είναι εστιασμένο στη δημιουργία κώδικα που να υλοποιεί βελτιστοποίηση με γενετικό αλγόριθμο. Σε ένα πραγματικό πρόβλημα χύτευσης, η πραγματική «βέλτιστη» λύση για το ΣΜΘ δεν είναι ποτέ μονοσήμαντα γνωστή. Ως εκ τούτου δεν καθίσταται δυνατό να ελέγξουμε την ορθότητα της λύσης στην οποία καταλήγει ο ΓΑ. Για να παρακαμφθεί ο περιορισμός αυτός, χρησιμοποιούνται οι «Δοκιμαστικές Γεωμετρίες» («Γεωμετρία 1» και «Γεωμετρία 2»).

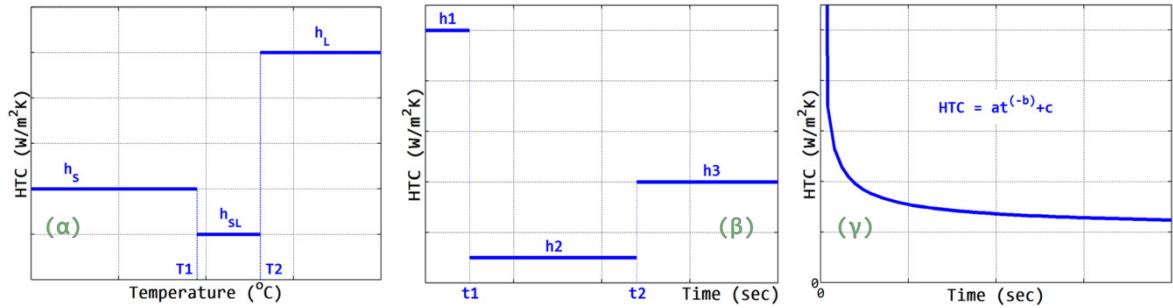
Στην περίπτωση χύτευσης της «Γεωμετρίας 1» (Σχήμα 4.17), επιλέχθηκε αυθαίρετα μία τιμή ΣΜΘ ως «λύση» του προβλήματος. Ξεκινώντας τον ΓΑ που αναπτύχθηκε από διάφορους αρχικούς πληθυσμούς και δοκιμάζοντας διάφορες περιπτώσεις τιμών παραμέτρων του ΓΑ, προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητά του και τις επιλογές που τον καθιστούν κατάλληλο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Επιπρόσθετα, εκτός από το ΓΑ, στη «Γεωμετρία 1» πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας της λύσης για τιμές των μεταβλητών σχεδίασης γύρω από τη λύση, καθώς και εξαντλητική διερεύνηση για παρατήρηση του πεδίου λύσεων και εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη δυνατότητα χρήσης του ΓΑ.

Στη συνέχεια έγινε παρόμοια διερεύνηση για την περίπτωση ενός χυτού που μοντελοποιείται με δύο διαφορετικούς ΣΜΘ, ανάλογα με το πάχος της διατομής. Για τη διερεύνηση αυτή επιστρατεύτηκε η «Γεωμετρία 2» (Σχήμα 4.23). Από την ανάλυση ευαισθησίας της λύσης ως προς κάθε μία από τις μεταβλητές σχεδίασης αποκαλύπτεται η αναγκαιότητα ορθού προσδιορισμού της κάθε παραμέτρου.

Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος προσδιορισμού του ΣΜΘ με ΓΑ εφαρμόζεται για την πραγματική περίπτωση χύτευσης (Σχήμα 2.38, σελ.116). Το χυτό αποτελείται από περιοχές με τρία διαφορετικά casting moduli και σε καθεμιά τους θεωρείται διαφορετικός ΣΜΘ. Κριτήριο για τη βελτιστοποίηση αποτελεί η προσέγγιση του αποτελέσματος της αριθμητικής προσομοίωσης στις τρεις πειραματικές καμπύλες απόψυξης, μιας για κάθε περιοχή.

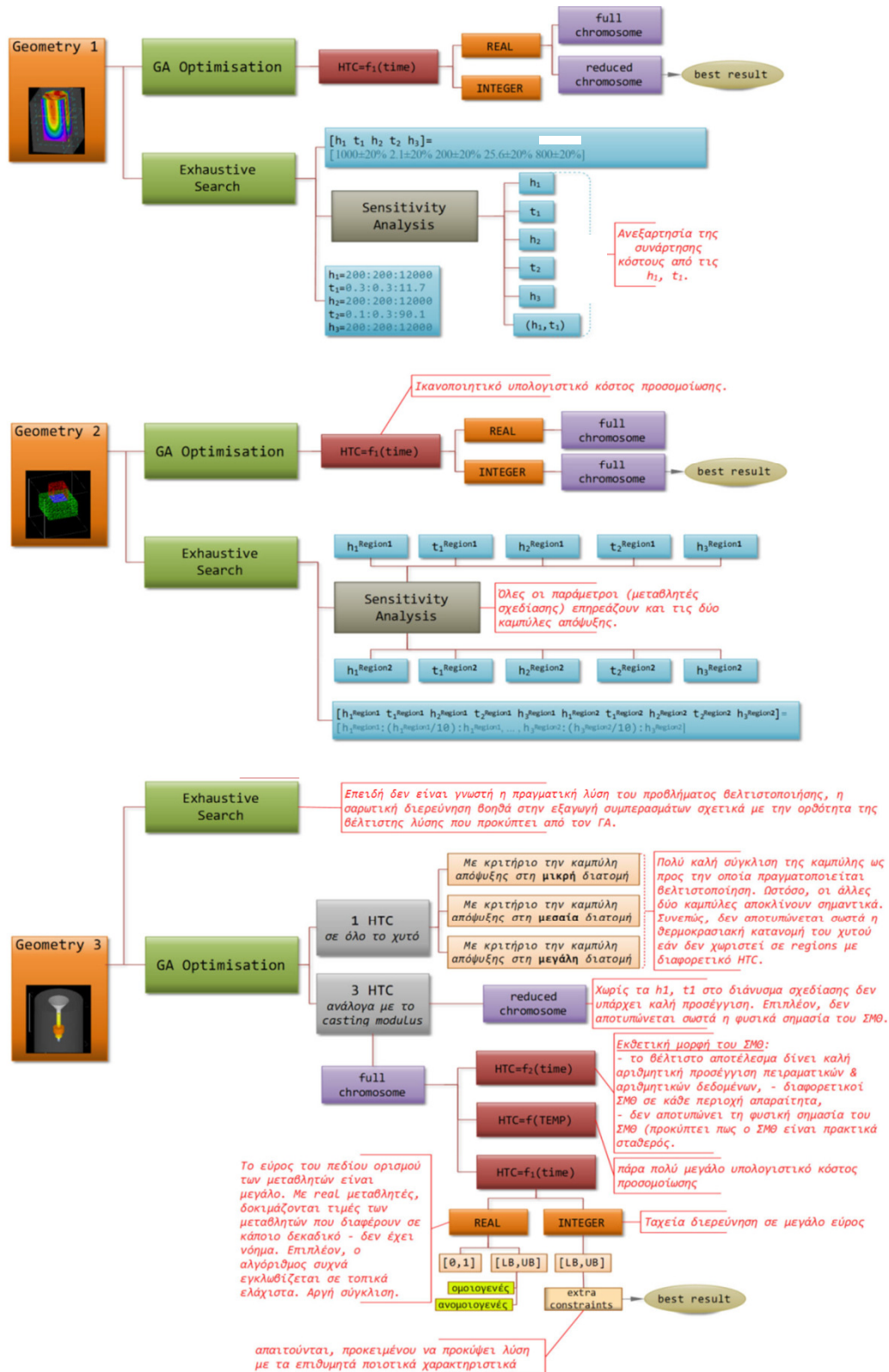
Δοκιμάζεται ποικιλία επιλογών για τις παραμέτρους του ΓΑ καθώς επίσης και διαφορετικοί τρόποι κωδικοποίησης των μεταβλητών σχεδίασης. Επιπλέον, δοκιμάζεται η χρησιμοποίηση τριών διαφορετικών μορφών για το Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας (Σχήμα 6.1): (i) ΣΜΘ συναρτήσει της θερμοκρασίας, βηματικά μεταβαλλόμενος, (ii) ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου, βηματικά μεταβαλλόμενος και (iii) ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου, εκθετικά μεταβαλλόμενος. Ζητούμενο αποτελεί η επιλογή ενός ΣΜΘ με μορφή που να διευκολύνει τη διαδικασία υπό την έννοια του υπολογιστικού κόστους, αλλά να αποτυπώνει επιτυχώς τη φυσική σημασία του ΣΜΘ.

Ένα ακόμη ζήτημα που εξετάζεται είναι η επίδραση της μοντελοποίησης του χυτού με λιγότερες περιοχές από όσες «απαιτεί» το πρόβλημα. Προς αυτή την κατεύθυνση εστιάζει το τελευταίο μέρος της διερεύνησης του κεφαλαίου 5.



Σχήμα 6.1 Ποιοτική απεικόνιση τα μορφές των τριών μορφών ΣΜΘ που μελετήθηκαν. (α) Βηματικός συναρτήσει της θερμοκρασίας, (β) Βηματικός συναρτήσει του χρόνου, (γ) Εκθετικός συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Στην Σχήμα 60.2 παρουσιάζεται με τη μορφή διαγράμματος η πορεία μελέτης του παρόντος κεφαλαίου.



Σχήμα 60.2 Η Δομή του Κεφαλαίου – Περιπτώσεις που μελετήθηκαν και συμπεράσματα εν συντομία.

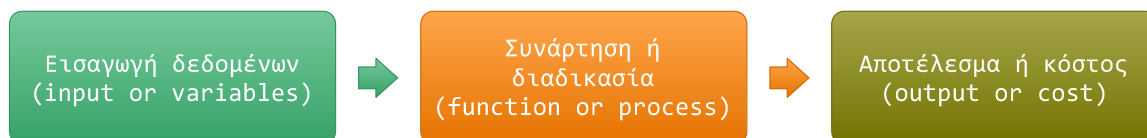
6.2 Βελτιστοποίηση

6.2.1 Γενικά περί βελτιστοποίησης

Το βασικό πρόβλημα με τις μεθόδους βελτιστοποίησης είναι πως δεν υπάρχει μία μέθοδος που να δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα σε όλες τις περιπτώσεις προβλημάτων και με το μικρότερο αριθμό δοκιμών. Υπάρχει πλήθος μεθόδων, οι οποίες, υπό προϋποθέσεις, μπορούν να αποτελέσουν ικανοποιητική προσέγγιση για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Έτσι, η εφαρμογή πολλών εκ των μεθόδων περιορίζεται συγκεκριμένες κατηγορίες προβλημάτων. Η επάρκεια μίας μεθόδου για εφαρμογή σε συγκεκριμένο πρόβλημα αποτελεί πεδίο μελέτης. Επίσης, χρειάζεται διερεύνηση το κατά πόσο το αποτέλεσμα που δίνει η εκάστοτε μέθοδος βελτιστοποίησης αποτελεί και το βέλτιστο.

Γενικά μια διαδικασία βελτιστοποίησης περιλαμβάνει την εισαγωγή δεδομένων (*input*), τη συνάρτηση που περιγράφει το προς βελτιστοποίηση μέγεθος και χαρακτηρίζεται ως **συνάρτηση κόστους** (*cost function*) ή **αντικειμενική συνάρτηση** (*objective function*) ή συνάρτηση καταλληλότητας (*fitness function*) και τα αποτελέσματα τα οποία χαρακτηρίζονται ως **κόστος** (*cost*) ή **καταλληλότητα** (*fitness*), βλέπε Σχήμα 6.3.

Το κόστος είναι αυτό που τίθεται προς έρευνα και είναι επιθυμητό να ελαχιστοποιηθεί, οπότε η βελτιστοποίηση καλείται ελαχιστοποίηση.



Σχήμα 6.3 Τα βασικά μέρη μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης[R. L. Haupt & S. E. Haupt 2004].

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορους τρόπους, ανάλογα με κάποια επιμέρους χαρακτηριστικά τους.

Μία πολύ βασική κατηγοριοποίηση είναι η διάκριση σε δύο βασικές κατηγορίες: τις αιτιοκρατικές (ή ντετερμινιστικές) και τις στοχαστικές. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται ανάλογα με τον τρόπο που επιλέγεται μία πιθανή λύση. Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι στηρίζονται στη βαθμιαία ολίσηση μιας αρχικής λύσης μέσω βηματικών διορθώσεων. Οι στοχαστικές μέθοδοι βασίζονται στην τυχαία αναζήτηση νέων λύσεων, καλύτερων από τις προηγούμενες, που τελικά θα οδηγήσουν στη βέλτιστη λύση.

Σύγχρονη τάση αποτελεί ο συνδυασμός διαφορετικών μεθόδων βελτιστοποίησης, προς δημιουργία υβριδικών σχημάτων βελτιστοποίησης. Η λογική είναι να συνδυάζονται τα καλύτερα χαρακτηριστικά της κάθε

μεθόδου, ώστε να επιτευχθεί σε συντομότερο χρονικό διάστημα η καλύτερη λύση.

Στο σημείο αυτό, θα αναφερθούν πολύ σύντομα δύο από τις μεθόδους αναζήτησης της βέλτιστης λύσης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή, πέρα από τους ΓΑ, που αναπτύσσονται εκτενώς στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Δύο διαδικασίες εύρεσης βέλτιστης λύσης, οι οποίες, όμως, χρησιμοποιούνται στην προκειμένη περίπτωση είτε για πληρότητα είτε για ευελιξία στον έλεγχο των λύσεων που προέκυψαν από τον ΓΑ, είναι η λεγόμενη «Εξαντλητική Αναζήτηση» (“Exhaustive Search”) και η διαδικασία «Δοκιμής - και - σφάλματος» (“Trial-and-error optimization”).

Στη «Εξαντλητική Αναζήτηση» (“Exhaustive Search”), ο αλγόριθμος ανατρέχει σε κάθε πτυχή της επιφάνειας αναζήτησης. Εξετάζεται το σύνολο των λύσεων και από το πλήθος των αποτελεσμάτων της αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει το καλύτερο αποτέλεσμα. Η αναζήτηση αυτή έχει τεράστιο υπολογιστικό κόστος και για αυτό το λόγο είναι επιθυμητό να αποφεύγεται. Έχει νόημα είτε στην περίπτωση που δεν είναι γνωστό το πεδίο λύσεων και η τοπολογία του και επιθυμείται η απόκτηση αυτής της γνώσης, είτε στην περίπτωση που συμβεί τοπικά, στην περιοχή του ολικού ακρότατου, για εύρεση αυτού.

Στη διαδικασία «Δοκιμής-και-σφάλματος» (“Trial-and-error optimisation”) παραμετροποιούνται τα δεδομένα εισόδου του συστήματος και δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές μέχρι να προκύψει μία βέλτιστη λύση. Ο τρόπος που μεταβάλλονται τα δεδομένα εισόδου δεν ακολουθεί συγκεκριμένη αλγοριθμική διαδικασία. Είναι το αντίθετο από τις μαθηματικές μεθόδους, που στηρίζονται στη γνώση της διαδικασίας εξαγωγής αποτελεσμάτων με βάση κάποια μαθηματική φόρμουλα.

6.3 Γενετικοί Αλγόριθμοι

6.3.1 Φιλοσοφία των Γενετικών Αλγορίθμων

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ) (“Genetic Algorithms”) είναι μία τεχνική βελτιστοποίησης που μιμείται τη θεωρία της εξέλιξης.

Ανήκουν στην κατηγορία συστημάτων επίλυσης που είναι γνωστά με τον όρο «Εξελικτικοί Αλγόριθμοι» (“Evolutionary Algorithms”). Μπορούν να χαρακτηριστούν ως μία «βιολογική» προσέγγιση (σε αντιδιαστολή πχ. με τις λεγόμενες «κοινωνιολογικές προσεγγίσεις», που μιμούνται την κοινωνική συμπεριφορά συνόλων), αφού βασίζονται στους βιολογικούς μηχανισμούς εξέλιξης που συναντώνται στη φύση. Οι ζώντες οργανισμοί, προκειμένου να επιβιώσουν, προσαρμόζονται στις συνθήκες του περιβάλλοντος εξελίσσοντάς τα χαρακτηριστικά τους ανά τις γενεές.

Στο βιβλίο [Michalewicz 1996] αναφέρεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, δανεισμένο από τη φύση: θεωρείται ένας πληθυσμός από λαγούς. Οι λαγοί έχουν ορισμένα χαρακτηριστικά όπως η ταχύτητα και η εξυπνάδα. Όσοι δεν είναι αρκετά γρήγοροι και έξυπνοι, στην πλειοψηφία τους, δεν μπορούν να ξεφύγουν από τις αλεπούδες που τους κυνηγούν. Τα καλύτερα άτομα του πληθυσμού των λαγών επιβιώνουν επειδή ξεφεύγουν και επειδή είναι ικανοί για εύρεση τροφής. Υπάρχει πάντα ένα ποσοστό αδύναμων ατόμων που επιβιώνουν λόγω τυχαιότητας. Τα άτομα αναμιγνύονται, ζευγαρώνουν και αναπαράγονται σε διάφορους συνδυασμούς. Σταδιακά, δημιουργείται ένας πληθυσμός λαγών που είναι βελτιωμένος σε χαρακτηριστικά από τον πληθυσμό των προγόνων τους. (Βέβαια, στη φύση, την ίδια διαδικασία φυσικής εξέλιξης υφίσταται και ο πληθυσμός των αλεπούδων και γι αυτό διατηρείται η ισορροπία.) Η κεντρική ιδέα είναι πως η φύση όταν συνδυάζει τα καλύτερα χαρακτηριστικά του DNA των ζωντανών οργανισμών αυτά επιβιώνουν και επικρατούν, δίνοντας έναν εξελιγμένο και βελτιωμένο πληθυσμό.

Το αλγοριθμικό αντίστοιχο υλοποιείται με τους Γενετικούς Αλγόριθμους. Με άλλα λόγια, οι πιθανές λύσεις ενός προβλήματος βελτιστοποίησης κωδικοποιούνται με έναν συγκεκριμένο τρόπο. Ένα σύνολο λύσεων επιλέγεται τυχαία και αποτελεί έναν πληθυσμό. Στον πληθυσμό αυτό εφαρμόζονται τελεστές αναπαραγωγής, δηλαδή διαδικασίες εμπνευσμένες από τη φύση, δημιουργώντας έναν νέο πληθυσμό. Αν συνδυαστούν τα «καλά» κομμάτια πιθανών λύσεων, τότε πιθανότατα θα προκύψει μία βελτιωμένη λύση. Η διαδικασία αυτή χρειάζεται αρκετές γενεές για να ολοκληρωθεί επιτυχώς.

Η μέθοδος διαμορφώθηκε από τον John Holland το 1975 [Holland 1992], με βάση μελέτες της δεκαετίας του '60 και του '70. Δημοσιεύτηκε από έναν εκ των μαθητών του, τον Goldberg [Goldberg 1989], ο οποίος κατάφερε να επιλύσει ένα δύσκολο πρόβλημα πάνω στον έλεγχο σωληνώσεων μεταφοράς αερίου.

Σύμφωνα με τον Goldberg, τα χαρακτηριστικά των γενετικών αλγορίθμων που αποτελούν τα βασικότερά τους πλεονεκτήματα είναι τα ακόλουθα:

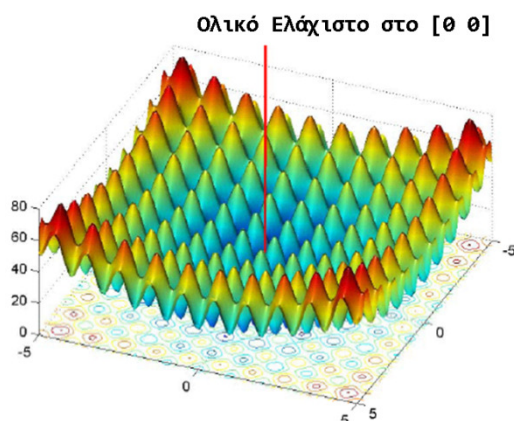
- Οι ΓΑ έχουν την ικανότητα ταυτόχρονης σάρωσης μίας ευρύτατης περιοχής του χώρου λύσεων. Πραγματοποιούν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα, ικανότητα που περιορίζει την πιθανότητα εγκλωβισμού σε περιοχή τοπικού ακρότατου.

Το παραπάνω μπορεί να οπτικοποιηθεί χρησιμοποιώντας το κλασσικό παράδειγμα της συνάρτησης του Rastrigin. Το πεδίο λύσεων είναι αυτό που φαίνεται σε 3D στο Σχήμα 6.4 και σε δι-διάστατη προβολή στο Σχήμα 6.5, δηλ. με πολλά τοπικά ακρότατα, αλλά ένα μόνο ολικό ακρότατο (“global optimum”), τότε θα μπορούσε να ειπωθεί πως ο ΓΑ «ανεβαίνει» πολλούς λόφους ταυτόχρονα (“hill climbing”).

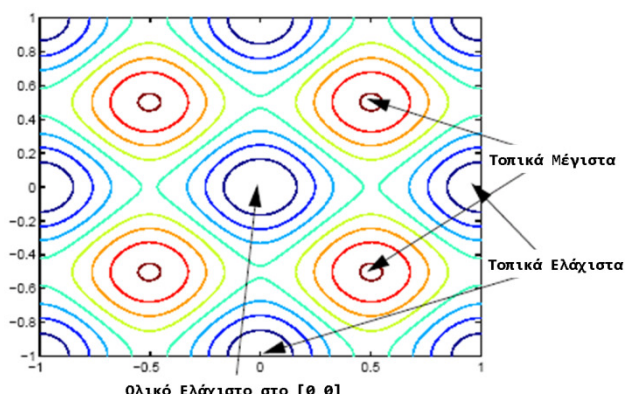
- Οι ΓΑ δουλεύουν στο «χώρο λύσεων», αντί να αναζητούν μία λύση για το πρόβλημα στο πεδίο ορισμού (“state space”). Δημιουργούν νέες, βελτιωμένες λύσεις βασιζόμενοι στις υπάρχουσες καλές λύσεις, χωρίς να χρησιμοποιούν καμία επιπρόσθετη πληροφορία πέρα από την αντικειμενική συνάρτηση.

- Οι ΓΑ λειτουργούν με κωδικοποίηση των μεταβλητών σχεδίασης και όχι με τις ίδιες τις μεταβλητές. Το στοιχείο της κωδικοποίησης επιτρέπει στο ΓΑ να κάνει παράλληλη επεξεργασία δεδομένων. Επιπλέον, δίνει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης τόσο συνεχών όσο και διακριτών παραμέτρων, πχ. αριθμητικών δεδομένων, μαθηματικών συναρτήσεων, πειραματικών δεδομένων κλπ.

- Οι ΓΑ είναι στοχαστική μέθοδος, όχι ντετερμινιστική. Ο ΓΑ περιλαμβάνει το στοιχείο της τυχαιότητας, χωρίς, όμως, αυτό να σημαίνει πως η διαδικασία εξελίσσεται στην τύχη. Η στοχαστική φύση των γενετικών αλγορίθμων καθιστά τη δυνατότητα εξερεύνησής τους ιδιαίτερως αποτελεσματική. (Αντίθετα, οι Αιτιοκρατικές ή «ντετερμινιστικές» διαδικασίες βελτιστοποίησης ξεκινούν πάντα από ένα σημείο εκκίνησης και καταλήγουν μέσω συγκεκριμένων διαδικασιών σε συγκεκριμένη θέση).



Σχήμα 6.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση του χώρου λύσεων της συνάρτησης του Rastrigin [R. L. Haupt & S. E. Haupt 2004]



Σχήμα 6.5 Προβολή σε 2D των ισοϋψών της συνάρτησης του Rastrigin.
 $Ras(x) = 20 + x_1^2 + x_2^2 - 10(\cos 2\pi x_1 + \cos 2\pi x_2)$. (MATLAB User's Guide)

Επιπλέον, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι:

- Μπορούν να χειριστούν πολλές διαφορετικές παραμέτρους.
- Είναι κατάλληλοι για προβλήματα με πολύπλοκες αντικειμενικές συναρτήσεις και επιφάνειες αναζήτησης.
- Απεγκλωβίζονται εύκολα από τοπικά ακρότατα.
- Δεν απαιτούν τη χρήση διαφορικού λογισμού.

Όλα τα παραπάνω έχουν καταστήσει τους γενετικούς αλγορίθμους μία από τις ισχυρότερες και ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους βελτιστοποίησης.

Ένα ερώτημα που ανακύπτει από τη λογική των ΓΑ είναι το θέμα του απαιτούμενου υπολογιστικού κόστους. Εφόσον πρόκειται για μία βιολογική θεωρία, απαιτείται η πάροδος πλήθους γενεών προκειμένου να επιτευχθεί η «βέλτιστη» λύση. Η υλοποίηση, ωστόσο, της διαδικασίας εξέλιξης περιγράφεται από πολύ απλές μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες δεν επιβαρύνουν ιδιαίτερα τον ΓΑ, σε σύγκριση με αντίστοιχες μεθόδους. Επιπλέον, μπορεί να θεωρηθεί πως ο ΓΑ επιτυγχάνει υψηλές ταχύτητες, ακόμα και αν ο χώρος που καλείται να ερευνηθεί είναι πολύ μεγάλος.

Τέλος, οι ΓΑ είναι αλγόριθμοι αναζήτησης που στοχεύουν στο “near-global optimum”, δηλαδή, σε μία περιοχή λύσεων που βρίσκεται κοντά στην περιοχή του «ολικού ακρότατου». Υπάρχει δυνατότητα να συνδυαστούν οι γενετικοί αλγόριθμοι με αλγορίθμους τοπικής αναζήτησης (“local searching”) για την εύρεση του ολικού ακρότατου.

6.3.2 Ορολογία

Στους ΓΑ χρησιμοποιείται ένα σύνολο όρων για να περιγράψει τα δομικά στοιχεία τους καθώς και τις λειτουργίες τους. Μεγάλο μέρος της ορολογίας προέρχεται από την επιστήμη της Γενετικής, εφόσον πρόκειται για μίμηση μίας βιολογικής θεωρίας. Για τον κάθε όρο, ωστόσο, υπάρχει και το μαθηματικό αντίστοιχο. Στη συνέχεια συνοψίζεται η ορολογία που χρησιμοποιείται συνηθέστερα στους ΓΑ.

Αντικειμενική Συνάρτηση ή Συνάρτηση Κόστους ή Συνάρτηση Καταλληλότητας (Objective Function or Fitness Function or Cost Function): Πρόκειται για τη μαθηματική έκφραση που ποσοτικοποιεί το μέγεθος που είναι επιθυμητό να βελτιστοποιηθεί. Με άλλα λόγια, είναι η συνάρτηση ή η έκφραση η οποία ερευνάται ως προς το τοπικό της ακρότατο.

Μεταβλητή Σχεδίασης ή Ανεξάρτητη Μεταβλητή (Independent variable) ή γονίδιο: Η μεταβλητή που ελέγχει ο ερευνητής. Ζητούμενο είναι να προσδιορισθούν οι τιμές των μεταβλητών σχεδίασης που δίνουν τη βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Η κάθε μεταβλητή σχεδίασης έχει πεδίο

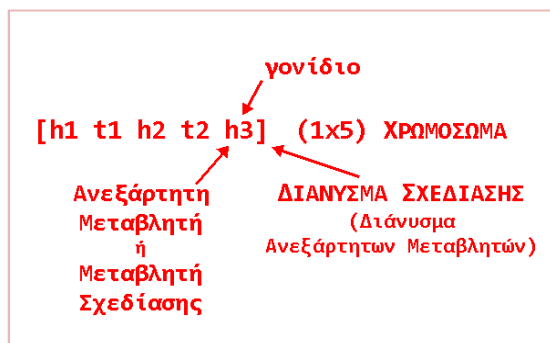
ορισμού, μπορεί να τεθεί ένα άνω και κάτω όριο, ανάλογα με το πού έχει φυσική σημασία η κάθε μεταβλητή.

Διάνυσμα Σχεδίασης ή Διάνυσμα Ανεξάρτητων Μεταβλητών ή Άτομο (Individual) ή Χρωμόσωμα (Chromosome): Ένα διάνυσμα το οποίο φέρει το πλήθος των μεταβλητών σχεδίασης, διατεταγμένων σε γραμμική ακολουθία. Το κάθε άτομο αποτελεί πιθανή λύση του προβλήματος, δηλ. - από μία μαθηματική σκοπιά - ένα σημείο του χώρου αναζήτησης.

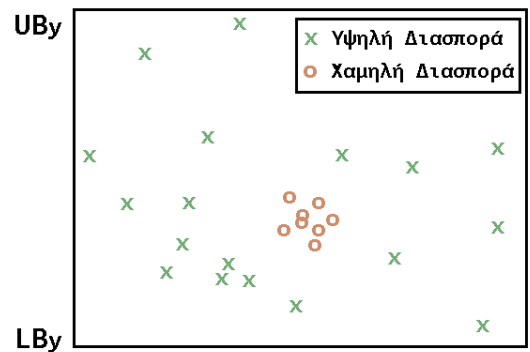
Πληθυσμός και Γενεά (Populations and Generations): Πληθυσμός είναι ο πίνακας που αποτελείται από τα άτομα, ο πίνακας των χρωμοσωμάτων, ένα μητρώο (popsize x npar), όπου “popsize” είναι το μέγεθος του πληθυσμού και “npar” ο αριθμός των μεταβλητών σχεδίασης. Σε κάθε επανάληψη με την βοήθεια του αλγορίθμου δημιουργείται ένας πληθυσμός ο οποίος καλείται generation (γενεά).

Γονείς και Απόγονοι (Parents and Children): Για τη δημιουργία της επόμενης γενεάς, ο γενετικός αλγόριθμος επιλέγει κάποια από τα χρωμοσώματα, ονομαζόμενα parents (γονείς) και τα χρησιμοποιεί για την κατασκευή των νέων χρωμοσωμάτων, τα children ή offspring (παιδιά ή απόγονοι).

Population diversity (διασπορά): η μέση απόσταση μεταξύ των χρωμοσωμάτων, τα οποία απαρτίζουν τον πληθυσμό (Σχήμα 6.7). Ένας πληθυσμός με μεγάλη διασπορά εμφανίζει μεγάλη μέση απόσταση και το αντίθετο. Η διασπορά παίζει καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη του ΓΑ, διότι δίνει τη δυνατότητα στον αλγόριθμο να επεκτείνει την έρευνά του σε μεγαλύτερη περιοχή.



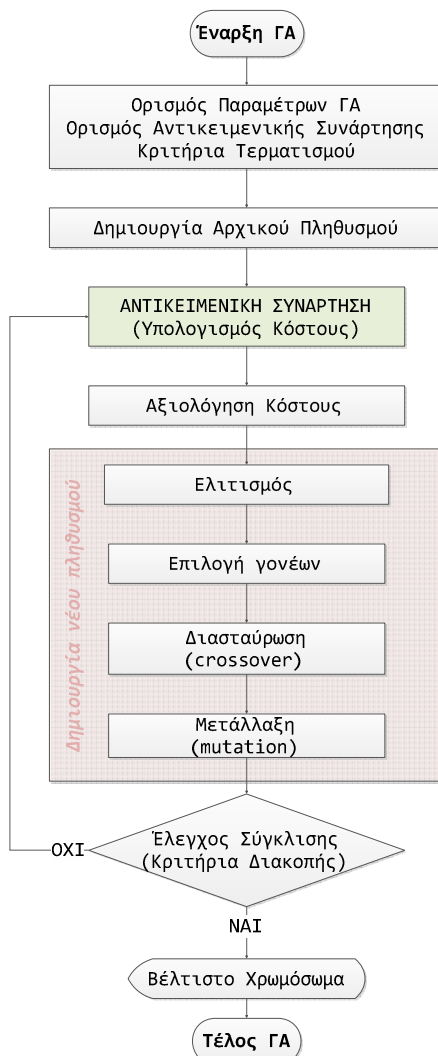
Σχήμα 6.6 Χρωμόσωμα και Γονίδιο - Διάνυσμα Σχεδίασης και Μεταβλητή Σχεδίασης.



Σχήμα 6.7 Οπτική απεικόνιση της «διασποράς».

6.3.3 Στάδια ενός ΓΑ - Διάγραμμα ροής

Όπως έχει ήδη γίνει κατανοητό, η λειτουργία του Γενετικού Αλγορίθμου βασίζεται στη δημιουργία μιας αλληλουχίας από πληθυσμούς, τις λεγόμενες γενεές. Από γενεά σε γενεά ο πληθυσμός ολοένα εξελίσσεται, καλύτερεύει, μέχρις ότου η αντικειμενική συνάρτηση λάβει την βέλτιστη (ελάχιστη ή μέγιστη) τιμή της.



Σχήμα 6.8 Γενικό Διάγραμμα Ροής ενός Γενετικού Αλγορίθμου

Η λειτουργία του Γενετικού Αλγορίθμου αποτυπώνεται στο διάγραμμα ροής στην Σχήμα 6.8.

1. Η έναρξη του Γενετικού Αλγορίθμου γίνεται με τη δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού (Initial Population) (συνήθως τυχαίου).
2. Επαναληπτικό μέρος του ΓΑ (δημιουργία νέων γενεών βάσει των προηγούμενων)
 - a. Υπολογισμός τιμής αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού (γενεάς).

- b. Αξιολόγηση του κόστους των χρωμοσωμάτων και διαβάθμιση αυτών.
 - c. Επιλογή των καλύτερων χρωμοσωμάτων (ατόμων) για διατήρησή τους στην επόμενη γενεά (ελιτισμός).
 - d. Επιλογή γονέων για αναπαραγωγή (selection & pairing).
 - e. Αναπαραγωγή
 - i. Διασταύρωση γονέων για παραγωγή απογόνων (Crossover).
 - ii. Μετάλλαξη επιλεγμένων ατόμων (Mutation).
 - f. Αντικατάσταση του παλαιού πληθυσμού από τον νέο.
3. Ο αλγόριθμος ολοκληρώνεται όταν τα κριτήρια διακοπής ικανοποιηθούν. Το βέλτιστο χρωμόσωμα είναι το καλύτερο άτομο του τελικού πληθυσμού.

6.3.4 Χαρακτηριστικά και Τελεστές ενός ΓΑ

Οι βασικές λειτουργίες ενός γενετικού αλγορίθμου που παρουσιάστηκαν εν συντομία με το διάγραμμα ροής που προηγήθηκε, παρουσιάζονται αναλυτικότερα στην παράγραφο αυτή. Οι περισσότερες από τις επιλογές που αναφέρονται εκτενώς, δοκιμάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης του παρόντος κεφαλαίου της διατριβής.

6.3.4.1 Κωδικοποίηση Μεταβλητών

Υπάρχει δυνατότητα χρησιμοποίησης ποικίλων αναπαραστάσεων των γονιδίων του χρωμοσώματος, δηλ. οι μεταβλητές σχεδίασης μπορούν να είναι: δυαδικοί αριθμοί (binary), πραγματικοί αριθμοί (reals/double), ακέραιοι αριθμοί (integers), ακέραιοι αριθμοί που υπάρχουν μόνο μία φορά σε κάθε χρωμόσωμα (permutation), κλπ. Οι πρώτες δύο περιπτώσεις είναι οι συνηθέστερες.

6.3.4.2 Φυσική Επιλογή (Natural Selection)

Η «φυσική επιλογή» είναι η διαδικασία με την οποία ο γενετικός αλγόριθμος αποφασίζει ποια άτομα του πληθυσμού είναι αρκετά ικανά ώστε να επιβιώσουν και πιθανότατα να αναπαραχθούν και να δημιουργήσουν απογόνους για την επόμενη γενεά.

Ο ΓΑ κατατάσσει τα χρωμοσώματα με βάση το κόστος τους. Με βάση αυτό, τα χρωμοσώματα του πληθυσμού αξιολογούνται και έτσι, κάποια απορρίπτονται και δίνουν τη θέση τους σε νέα άτομα που δημιουργούνται. Αν, λοιπόν, ο αριθμός των χρωμοσωμάτων του κάθε πληθυσμού είναι $N_{pop}=popsize$, μόνο τα καλύτερα N_{keep} χρωμοσώματα διατηρούνται για το ζευγάρι και τα υπόλοιπα $N_{pop}-N_{keep}$ απορρίπτονται.

Τα N_{keep} χρωμοσώματα που διατηρούνται αποτελούν τη λεγόμενη “mating pool” («δεξαμενή ζευγαρώματος»). Τα χρωμοσώματα της “mating pool” είναι υποψήφιοι γονείς.

Η διαδικασία αυτή της φυσικής επιλογής πρέπει να συμβαίνει σε κάθε γενεά-επανάληψη του ΓΑ, ώστε να εξελίσσεται ο πληθυσμός των χρωμοσωμάτων ανά τις γενεές.

6.3.4.3 Ζευγάρισμα (Pairing)

Από τα N_{keep} χρωμοσώματα που έχουν επιλεγεί από τη διαδικασία της φυσικής επιλογής και αποτελούν τη λεγόμενη “mating pool”, με τη διαδικασία του ζευγαρώματος επιλέγονται ζεύγη χρωμοσωμάτων («γονείς») τα οποία συνδυάζονται για να παραχθούν δύο νέα χρωμοσώματα («απόγονοι»).

Υπάρχουν πολλοί τρόποι να γίνει η επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα παίξουν το ρόλο γονέων. Πρόκειται για ενδιαφέρουσα διαδικασία, η οποία μπορεί να γίνει όσο πολύπλοκη είναι η αντίστοιχη διαδικασία ζευγαρώματος μεταξύ των ζωντανών οργανισμών.

Οι βασικότεροι αλγόριθμοι pairing που χρησιμοποιούνται συνήθως, παρατίθενται στη συνέχεια:

- “Pairing from top to bottom”: «Ζευγάρισμα από το καλύτερο στοιχείο μέχρι το χειρότερο», ή - σχηματικά - από πάνω προς τα κάτω, ανά δύο χρωμοσώματα, στον πίνακα του πληθυσμού. Ο αλγόριθμος ταιριάζει τις ζυγές γραμμές του πληθυσμού με τις μονές. Έτσι, «μητέρες» (“ma”) θα είναι τα χρωμοσώματα των γραμμών 1, 3, 5, ... και «πατέρες» (“pa) θα είναι τα χρωμοσώματα των γραμμών 2, 4, 6, ...
- “Random pairing”: «Τυχαίο ζευγάρισμα». Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιεί μία γεννήτρια ομοιόμορφα τυχαίων αριθμών για την επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα αποτελέσουν τους γονείς. Οι αριθμός των γραμμών των χρωμοσωμάτων που θα αποτελέσουν τους γονείς υλοποιείται μέσω των ακόλουθων απλών σχέσεων: $ma = \text{ceil}(N_{keep} \cdot \text{rand}(1, N_{keep}))$ και $pa = \text{ceil}(N_{keep} \cdot \text{rand}(1, N_{keep}))$, όπου ceil σημαίνει στρογγυλοποίηση στο μεγαλύτερο ακέραιο και rand σημαίνει δημιουργία τυχαίου αριθμού.
- “Weighted Random pairing” ή “Roulette wheel weighting”: «Σταθμισμένα Τυχαίο ζευγάρισμα». Σε κάθε χρωμόσωμα της «δεξαμενής ζευγαρώματος» ανατίθεται μία πιθανότητα ζευγαρώματος. Η πιθανότητα αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη του κόστους του. Ένα χρωμόσωμα με χαμηλότερο κόστος έχει τη μεγαλύτερη πιθανότητα να ζευγαρώσει, ενώ ένα χρωμόσωμα με υψηλή τιμή κόστους έχει μικρή πιθανότητα να ζευγαρώσει. Ένας τυχαίος αριθμός καθορίζει ποιο χρωμόσωμα επιλέγεται.

- “Rank Weighting”: Η προσέγγιση αυτή είναι ανεξάρτητη και υπολογίζει την πιθανότητα επιλογής χρωμοσώματος με βάση τη σειρά ‘n’. Η πιθανότητα επιλογής υπολογίζεται από τη σχέση

$$P_n = \frac{N_{keep} - n + 1}{\sum_{n=1}^{N_{keep}} n}$$

Επειτα, υπολογίζονται οι αθροιστικές πιθανότητες και

αυτές χρησιμοποιούνται για την επιλογή χρωμοσώματος. Ξεκινώντας από την κορυφή της λίστας των χρωμοσωμάτων, το πρώτο χρωμόσωμα που η αθροιστική του πιθανότητα θα είναι μεγαλύτερη από την τιμή ενός τυχαίου αριθμού, επιλέγεται από τη δεξαμενή ζευγαρώματος.

- “Cost weighting”: Η πιθανότητα επιλογής υπολογίζεται με βάση το κόστος του χρωμοσώματος. Ένα κανονικοποιημένο κόστος υπολογίζεται για το κάθε χρωμόσωμα, εξάγοντας το χαμηλότερο από τα κόστη ($C_{N_{keep}+1}$) των χρωμοσωμάτων που είχαν απορριφθεί από τη διαδικασία φυσικής επιλογής.
- “Tournament Selection”: Η συγκεκριμένη προσέγγιση μιμείται αρκετά ικανοποιητικά την αντίστοιχη διαδικασία που συμβαίνει στη φύση. Επιλέγεται τυχαία ένα υποσύνολο χρωμοσωμάτων (συνήθως δύο ή τρία) από τη «δεξαμενή ζευγαρώματος» (“mating pool”) και το χρωμόσωμα με το χαμηλότερο κόστος σε αυτό το υποσύνολο γίνεται γονέας.

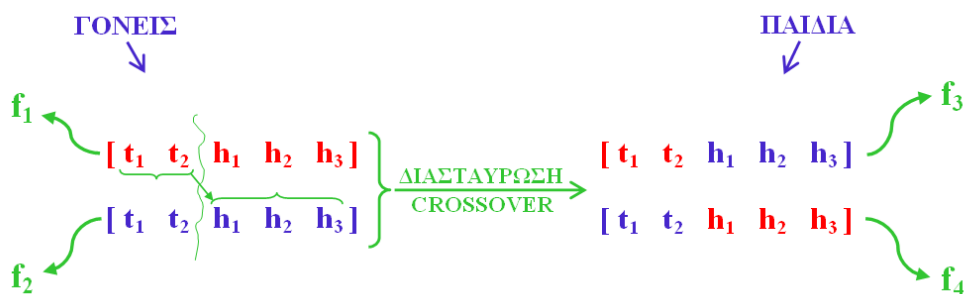
6.3.4.4 Αναπαραγωγή (Mating) - Διασταύρωση (Crossover)

Εφόσον έχουν επιλεγεί τα άτομα του πληθυσμού που θα ζευγαρώσουν, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η διασταύρωση (crossover). Το στάδιο αυτό είναι η πρώτη προσπάθεια ανίχνευσης της επιφάνειας κόστους από τον ΓΑ ως προς την εύρεση του ολικού ακρότατου, το οποίο και αναζητεί. Το στάδιο αυτό καλείται εξερεύνηση διότι ο Γενετικός Αλγόριθμος κάνει χρήση των συνδυασμών των στοιχείων του πληθυσμού για τη δημιουργία δύο νέων απογόνων.

Η υλοποίηση γίνεται με τους λεγόμενους «τελεστές διασταύρωσης». Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι τελεστές διασταύρωσης ή συναρτήσεις διασταύρωσης (“crossover functions”) παρατίθενται στη συνέχεια. Αρκετοί από αυτούς χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

- «Scattered Crossover»: Δημιουργείται ένα τυχαίο δυαδικό διάνυσμα. Με βάση αυτό επιλέγονται από τον πρώτο γονέα τα γονίδια που βρίσκονται στις θέσεις που αντιστοιχούν στις θέσεις του 1 του δυαδικού διανύσματος και από το δεύτερο γονέα οι υπόλοιπες θέσεις. Έτσι, αν p_1 και p_2 , οι δύο γονείς $p_1=[a\ b\ c\ d\ e\ f\ g\ h]$ και $p_2=[1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8]$ και έστω το δυαδικό διάνυσμα $[1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0]$, τότε προκύπτουν οι απόγονοι $child_1=[a\ b\ 3\ 4\ e\ 6\ 7\ 8]$ και $child_2=[1\ 2\ c\ d\ 5\ f\ g\ h]$.
- «Κυκλική διασταύρωση» (“Cyclic Crossover (CX)”): Η τεχνική αυτή προτείνεται από τον [Goldberg 1989] και χρησιμοποιείται ευρέως στην κατηγορία προβλημάτων που ονομάζονται “permutation problems”, με πιο κλασσικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας προβλημάτων είναι το «πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή» (“Traveling salesman problem”). Στα προβλήματα αυτά, το χρωμόσωμα αποτελείται από μία αλληλουχία αριθμών (συνθη. ακεραίων) στην οποία ο κάθε ακεραίος δεν μπορεί να υπάρχει περισσότερες από μία φορές.

- “Single Point Crossover” («Μέθοδος Διασταύρωσης Μονού Σημείου»): Επιλέγεται με ομοιόμορφη κατανομή ένας ακέραιος αριθμός από το 1 μέχρι και το μέγεθος (μήκος) του χρωμοσώματος και τα τμήματα των δύο διασταυρούμενων χρωμοσωμάτων από τη θέση αυτή και προς τα δεξιά εναλλάσσονται ανάμεσα στα δύο χρωμοσώματα (βλ. Σχήμα 6.9).
- “Two-Point Crossover”: Αντίστοιχη με την προηγούμενη, μόνο που αυτή τη φορά επιλέγονται δύο σημεία διασταύρωσης.



Σχήμα 6.9 Το σχήμα διασταύρωσης “single point crossover”.

- “Heuristic Crossover”: Το πρόβλημα με τις προαναφερθείσες μεθόδους διασταύρωσης είναι πως δεν εισάγεται καινούρια πληροφορία. Η πληροφορία, δηλ. οι τιμές που δημιουργήθηκαν στον αρχικό πληθυσμό είναι αυτές που διαδίδονται στις επόμενες γενεές, απλά με διαφορετικό συνδυασμό. Αυτές οι τεχνικές λειτουργούν άψογα για δυαδικούς ΓΑ (καθώς, σε αυτή την περίπτωση δεν δημιουργείται το πρόβλημα που μόλις αναφέρθηκε). Στους ΓΑ με πραγματικούς αριθμούς ή με κάποιου άλλου είδους αναπαράσταση/κωδικοποίηση, όμως, επαφίεται κυρίως στη διαδικασία της μετάλλαξης να εισάγει νέα πληροφορία στον πληθυσμό.

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό, έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που ονομάζονται “blending methods” (τεχνικές ανάδευσης). Οι τεχνικές αυτές βρίσκουν τρόπους να συνδυάζουν τιμές μεταβλητών από δύο γονείς σε μία νέα τιμή μεταβλητής στον απόγονο.

Στην περίπτωση του “Heuristic Crossover” («ευρετική διασταύρωση»), θεωρείται πως ο δημιουργούμενος απόγονος ανήκει σε μία γραμμή, η οποία περιέχει και τους δύο γονείς. Ο απόγονος βρίσκεται κάπου ανάμεσά τους, σε μικρότερη απόσταση από το γονέα με τη χειρότερη τιμή κόστους.

Δίνεται η δυνατότητα να καθοριστεί η απόσταση του απογόνου από το γονέα με την καλύτερη τιμή κόστους μέσα από μία παράμετρο “R”. Εάν οι γονείς ονομάζονται “parent₁” και “parent₂”, τότε η συνάρτηση διασταύρωσης δημιουργεί τον απόγονο “offspring” με βάση τη συνάρτηση:

$$\text{offspring} = \text{parent}_2 + R * (\text{parent}_1 - \text{parent}_2).$$

6.3.4.5 Μετάλλαξη (Mutation)

Το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας δημιουργίας νέου πληθυσμού είναι το στάδιο της μετάλλαξης (mutation). Στη φύση, σε ένα μικρό ποσοστό

συμβαίνουν γονιδιακές μεταλλάξεις και χρωμοσωμικές ανωμαλίες. Από τις μεταλλάξεις αυτές, μπορεί να προκύψει ένα καλύτερο άτομο, το οποίο θα επιβιώσει και μπορεί ακόμα και να επικρατήσει, ή ένα όχι καλό άτομο, που θα απορριφθεί από τη διαδικασία εξέλιξης.

Η λειτουργία αυτή, στο περιβάλλον του ΓΑ, υλοποιείται μέσω κάποιου τελεστή μετάλλαξης, βάσει του οποίου ένα μικρό ποσοστό γονιδίων (μεταβλητών σχεδίασης, ανεξάρτητων μεταβλητών) αποκτά νέα τιμή. Έτσι, λοιπόν, με εντελώς τυχαίο τρόπο, η ανεξάρτητη μεταβλητή που επιλέγεται, μεταλλάσσεται: $h_i \rightarrow h'_i$.

Ο λόγος που είναι σημαντικό να υλοποιείται η λειτουργία της μετάλλαξης είναι πως, εάν δεν προβλεφθεί, ο ΓΑ μπορεί να συγκλίνει πολύ γρήγορα σε μία περιοχή του χώρου λύσεων. Υπάρχει περίπτωση, αυτή η περιοχή να είναι η περιοχή του ολικού ακρότατου, δηλ. η περιοχή της λύσης. Είναι, όμως, πολύ πιθανό η περιοχή αυτή να είναι περιοχή κάποιου τοπικού ακρότατου. Τότε, μπορεί ο αλγόριθμος να εγκλωβιστεί στην περιοχή αυτή και να απέχει από την πραγματική λύση του προβλήματος. Δεδομένου ότι η πλειοψηφία των προβλημάτων εμφανίζουν πολλά τοπικά ακρότατα, η απουσία της μετάλλαξης αυξάνει την πιθανότητα σύγκλισης του αλγορίθμου σε εσφαλμένο αποτέλεσμα.

Με τη μετάλλαξη, εισάγοντας δηλ. νέες, τυχαίες τιμές σε κάποιες από τις ανεξάρτητες παραμέτρους, πρακτικά αναγκάζεται ο αλγόριθμος να εξερευνήσει καινούριες περιοχές. Με άλλα λόγια, η μετάλλαξη αποτελεί, μετά την αναπαραγωγή, ένα δεύτερο τρόπο ανίχνευσης του χώρου λύσεων. Επιπλέον, λειτουργεί ως ασφαλιστική δικλείδα για τις περιπτώσεις που χαθεί πολύτιμη γενετική πληροφορία στο στάδιο της επιλογής και διασταύρωσης. Η μετάλλαξη, όταν συμβαίνει, επιφέρει ποικιλία στον πληθυσμό, ανακατευθύνει την αναζήτηση και εξασφαλίζει ότι κανένα σημείο του χώρου αναζήτησης δεν αποκλείεται από τη διαδικασία της έρευνας.

Κατάλληλη μέριμνα θα πρέπει να ληφθεί προκειμένου να μην πραγματοποιηθεί μετάλλαξη στα καλύτερα άτομα (χρωμοσώματα) του πληθυσμού. Δεν είναι επιθυμητό να χαθούν τα άτομα που δίνουν την καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Γι αυτό, τα άτομα “elite” διατηρούνται κατά τις επαναλήψεις του ΓΑ και δεν υφίστανται μετάλλαξη.

Μία ποικιλία συναρτήσεων μετάλλαξης (mutation functions) απαντάται στη βιβλιογραφία. Άλλες είναι απλούστερες και άλλες πιο περίπλοκες [Michalewicz 1996]. Ενδεικτικά αναφέρονται δύο από τις πιο γνωστές μεθόδους μετάλλαξης:

- *Gaussian*: Σε κάθε γονίδιο ενός επιλεγμένου ατόμου προστίθεται ένας τυχαίος αριθμός που προκύπτει από μια κατανομή Gauss. Η κατανομή αυτή έχει κεντρική τιμή το θ και τυπική απόκλιση που καθορίζεται από το χρήστη και φθίνει ανά γενεά με ρυθμό που ορίζεται επίσης από το χρήστη.

- *Uniform*: Κάθε γονίδιο σε ένα άτομο έχει συγκεκριμένη (μικρή) πιθανότητα να επιλεγεί. Στα επιλεγμένα γονίδια, δίνεται μία τυχαία τιμή από το πεδίο ορισμού τους.

6.3.4.6 Η Επόμενη Γενεά

Σύνθεση πληθυσμού: Ο νέος πληθυσμός, σύμφωνα με τα προηγούμενα, θα αποτελούνται από τα πιο επιτυχημένα άτομα της προηγούμενης γενεάς (άτομα ελιτισμού), από τα άτομα που προκύπτουν από τη διασταύρωση των μελών της προηγούμενης γενεάς και από άτομα που έχουν μεταλλαχθεί.

Η σύνθεση του πληθυσμού μπορεί να καθοριστεί από τους παράγοντες “elite count” («αριθμός ατόμων ‘ελίτ’») και “crossover fraction” («ποσοστό διασταύρωσης»).

Όταν έχουν προκύψει όλα τα χρωμοσώματα της νέας γενεάς από τις διαδικασίες που περιγράφηκαν, υπολογίζεται το κόστος για τους νέους απογόνους καθώς και για τα μεταλλαγμένα χρωμοσώματα. Όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται, με τη νέα γενεά να αποτελεί τον αρχικό πληθυσμό. Τα χρωμοσώματα βαθμονομούνται, επιλέγονται αυτά που θα ζευγαρώσουν, αναπαράγονται, μέρος αυτών μεταλλάσσεται, κ.ο.κ.. συστήνοντας έτσι την επόμενη γενεά. Παρατηρώντας την καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της κάθε γενεάς, μετά το πέρας κάποιων γενεών θα διαπιστωθεί εξέλιξη του αλγορίθμου, με λύσεις που προσεγγίζουν το στόχο, που είναι η εύρεση του ολικού ακρότατου.

6.3.4.7 Τερματισμός

Όπως σε κάθε αλγόριθμο, πρέπει να οριστούν κριτήρια για τον τερματισμό του ΓΑ. Τα κριτήρια τερματισμού μπορεί να είναι, για παράδειγμα, κάποια από τα ακόλουθα: (i) ο μέγιστος αριθμός γενεών στη διάρκεια των οποίων είναι επιθυμητό να εξελιχθεί ο ΓΑ, (ii) μία τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (κόστος) που εάν επιτευχθεί, δεν υπάρχει λόγος να συνεχίσει ο ΓΑ, (iii) χρονικό όριο (σε sec ή min), πέρα από το οποίο δεν είναι επιθυμητή η συνέχιση του ΓΑ, (iv) μέγιστος αριθμός γενεών που μπορεί να έχουν το ίδιο βέλτιστο χρωμόσωμα, δηλ. για πόσες γενεές είναι αποδεκτό να μην έχει εξέλιξη ο ΓΑ (stall generations), (v) χρονικό διάστημα (σε sec ή min) χωρίς εξέλιξη του ΓΑ, (vi) το ποσοστό εξέλιξης του ΓΑ (εάν η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μικρότερη από μία ανοχή, τότε δεν έχει νόημα να συνεχίζεται ο ΓΑ), (vii) ποσοστό ανοχής καταπάτησης των περιορισμών, κλπ

6.4 Ο Γενετικός Αλγόριθμος που αναπτύχθηκε

6.4.1 Περιγραφή των χαρακτηριστικών του ΓΑ που αναπτύχθηκε

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά του Γενετικού Αλγορίθμου (ΓΑ) που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό του βέλτιστου Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας (ΣΜΘ) ανάλογα με το casting modulus ενός χυτού από ορείχαλκο, που παράγεται με χύτευση ακριβείας εν κενώ.

Στις υποενότητες που ακολουθούν παρουσιάζεται η κωδικοποίηση των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε, το διάγραμμα ροής (flowchart) του γενετικού αλγορίθμου, η αντικειμενική συνάρτηση, η συνάρτηση δημιουργίας νέου πληθυσμού, ο τελεστής διασταύρωσης και ο τελεστής μετάλλαξης.

6.4.2 Κωδικοποίηση Μεταβλητών

Ο γενετικός αλγόριθμος ξεκινάει ορίζοντας τα χρωμοσώματα, δηλαδή έναν πίνακα από μεταβλητές σχεδίασης, οι οποίες και είναι επιθυμητό να βελτιστοποιηθούν. Υπάρχει δυνατότητα χρησιμοποίησης διαφόρων αναπαραστάσεων των μεταβλητών αυτών.

Στα πλαίσια του ΓΑ που αναπτύχθηκε, οι αναπαραστάσεις - κωδικοποιήσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο: κωδικοποίηση με πραγματικούς αριθμούς και κωδικοποίηση με ακέραιους αριθμούς.

Αρχικά, στο πρώτο στάδιο της ανάπτυξης του ΓΑ χρησιμοποιήθηκαν πραγματικοί αριθμοί (reals) (και άρα “Continuous GA”). Στη συνέχεια, όμως, κρίθηκε σκόπιμη η κωδικοποίηση με ακέραιους αριθμούς (integers), για να επιταχυνθεί ο ΓΑ και να μην αναλώνεται στην αναζήτηση γονιδίων που διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους.

Με άλλα λόγια, χρησιμοποιήθηκε εκτενώς η κβαντοποίηση, η διακριτοποίηση του πεδίου ορισμού το προβλήματος σε όσες ακέραιες τιμές κρινόταν ότι είχε νόημα. Έτσι, θα παρουσιαστούν περιπτώσεις στις οποίες η κάθε μεταβλητή μπορεί να λάβει ένα σύνολο τριών, πέντε, δέκα ή εκατόν πενήντα τιμών. Με τον τρόπο αυτό, υπήρχε δυνατότητα το πεδίο τιμών να είναι πολύ ευρύ, αλλά αρκετά σύντομα να μπορεί να εντοπίζεται η περιοχή της λύσης.

6.4.3 Διάγραμμα Ροής του ΓΑ

Το διάγραμμα ροής του ΓΑ παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.10 και περιγράφεται αμέσως με τη μορφή των δεκατεσσάρων βημάτων:

Βήμα 1: Ο Γενετικός Αλγόριθμος που αναπτύχθηκε ξεκινά με την εισαγωγή των πειραματικών δεδομένων. Τρεις είναι οι πειραματικές καμπύλες απόψυξης: μία για κάθε περιοχή του χυτού με διαφορετικό casting modulus. Για καλύτερη εποπτεία, οι καμπύλες απόψυξης σχεδιάζονται και αποθηκεύονται με τη μορφή “figure”.

Βήμα 2: Στη συνέχεια, ορίζονται τα πιο βασικά χαρακτηριστικά του ΓΑ: το όνομα της αντικειμενικής συνάρτησης που θα κληθεί από τον ΓΑ και ο αριθμός των μεταβλητών σχεδίασης που θα αποτελούν το χρωμόσωμα (npnr). Το κάθε χρωμόσωμα γράφεται με τη μορφή διανύσματος (1xnpnr). Ορίζονται επίσης τα κριτήρια τερματισμού του ΓΑ. Στην προκειμένη περίπτωση, το μόνο κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο αριθμός των γενεών.

Βήμα 3: Ορισμός παραμέτρων του ΓΑ. Αρχικά, ορίζεται το μέγεθος του πληθυσμού (popsize), δηλ. το πλήθος των χρωμοσωμάτων. Έτσι, ο πληθυσμός είναι ένας πίνακας (popsize x npnr). Έπειτα, ορίζονται τα ποσοστά διασταύρωσης και μετάλλαξης, καθώς και ο αριθμός των ατόμων ελιτισμού.

Βήμα 4: Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο ΓΑ, έχει εκ των πραγμάτων υψηλό υπολογιστικό κόστος, εφόσον εμπεριέχει τη διεξαγωγή προσομοίωσης της χύτευσης. Εν τω μεταξύ, υπάρχουν χρωμοσώματα που μοιραία εμφανίζονται και σε επόμενες γενεές. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους: υπάρχουν, αφενός, τα άτομα ελιτισμού, τα οποία παραμένουν αναλλοίωτα και προχωρούν από γενεά σε γενεά. Πέραν αυτού, υπάρχει πάντα η πιθανότητα να προκύψει χρωμόσωμα ίδιο με κάποιο άλλο, είτε λόγω διασταύρωσης είτε λόγω μετάλλαξης. Ο επαν-υπολογισμός του κόστους για τις περιπτώσεις που αυτό είναι ήδη γνωστό, είναι καλό να αποφευχθεί. Για το λόγο αυτό, περιλαμβάνεται στον κώδικα διαδικασία ελέγχου για όμοια χρωμοσώματα με ήδη υπολογισμένο κόστος, ώστε να παρακάμπτεται η προσομοίωση, όπου είναι περιττό. Για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος αυτός, προαπαιτείται η ύπαρξη μίας βάσης δεδομένων

Βήμα 5: Οι μεταβλητές του ΓΑ για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ ήταν είτε ακέραιοι είτε πραγματικοί αριθμοί. Επειδή η κάθε μεταβλητή είχε διαφορετικό πεδίο ορισμού, χρησιμοποιήθηκε κωδικοποίηση. Στην περίπτωση των πραγματικών αριθμών, η κωδικοποίηση είχε ως στόχο την ομογενοποίηση του πεδίου ορισμού. Στην περίπτωση των ακεραίων, η κωδικοποίηση ήταν αναγκαία ώστε το πεδίο ορισμού της κάθε μεταβλητής να διακριτοποιηθεί, προκειμένου να διερευνηθεί αποτελεσματικότερα ο χώρος λύσεων. Η κωδικοποίηση, λοιπόν, ήταν ο τρόπος αντιστοίχισης του κάθε ακεραίου με την εκάστοτε πραγματική τιμή μεταβλητής και ορίζεται άπαξ, στο σημείο αυτό. Η κωδικοποίηση ήταν διαφορετική για την κάθε περίπτωση μελέτης και περιγράφεται στην αντίστοιχη παράγραφο.

Βήμα 6: Μετά την προεργασία και τον ορισμό όλων των απαραίτητων παραμέτρων και τελεστών, ξεκινάει ο ΓΑ με τη δημιουργία του αρχικού πληθυσμού. Ο αρχικός πληθυσμός μπορεί να είναι είτε τυχαίος, είτε να ορίζεται από το χρήστη είτε να αποτελεί συνδυασμό των δύο αυτών δυνατοτήτων.

Βήμα 7: Κλήση Αντικειμενικής Συνάρτησης. Στο τέλος του βήματος 7, έχει ανατεθεί μία τιμή κόστους στο κάθε χρωμόσωμα και έχει δημιουργηθεί ένας πίνακας (popsize \times 1) που περιέχει όλα τα χρωμοσώματα με τα κόστη τους.

Βήμα 8: Αξιολόγηση Κόστους. Τα χρωμοσώματα του πληθυσμού στον πίνακα κόστους που προέκυψε στο Βήμα 7 ταξινομούνται με αύξουσα σειρά κόστους. Με βάση την κατάταξη του πίνακα αυτού, αναδιατάσσονται οι γραμμές του πίνακα πληθυσμού. (Αυτό υλοποιείται με χρήση ενός δείκτη που συνδέει το χρωμόσωμα με το κόστος του). Εφόσον τα χρωμοσώματα είναι πλέον τοποθετημένα με αύξουσα σειρά κόστους, είναι εύκολη η διάκριση και διαχείριση ατόμων του πληθυσμού.

Βήμα 9: Ελιτισμός. Τα καλύτερα μέλη του πληθυσμού επιλέγονται για να διατηρηθούν αναλλοίωτα στην επόμενη γενεά.

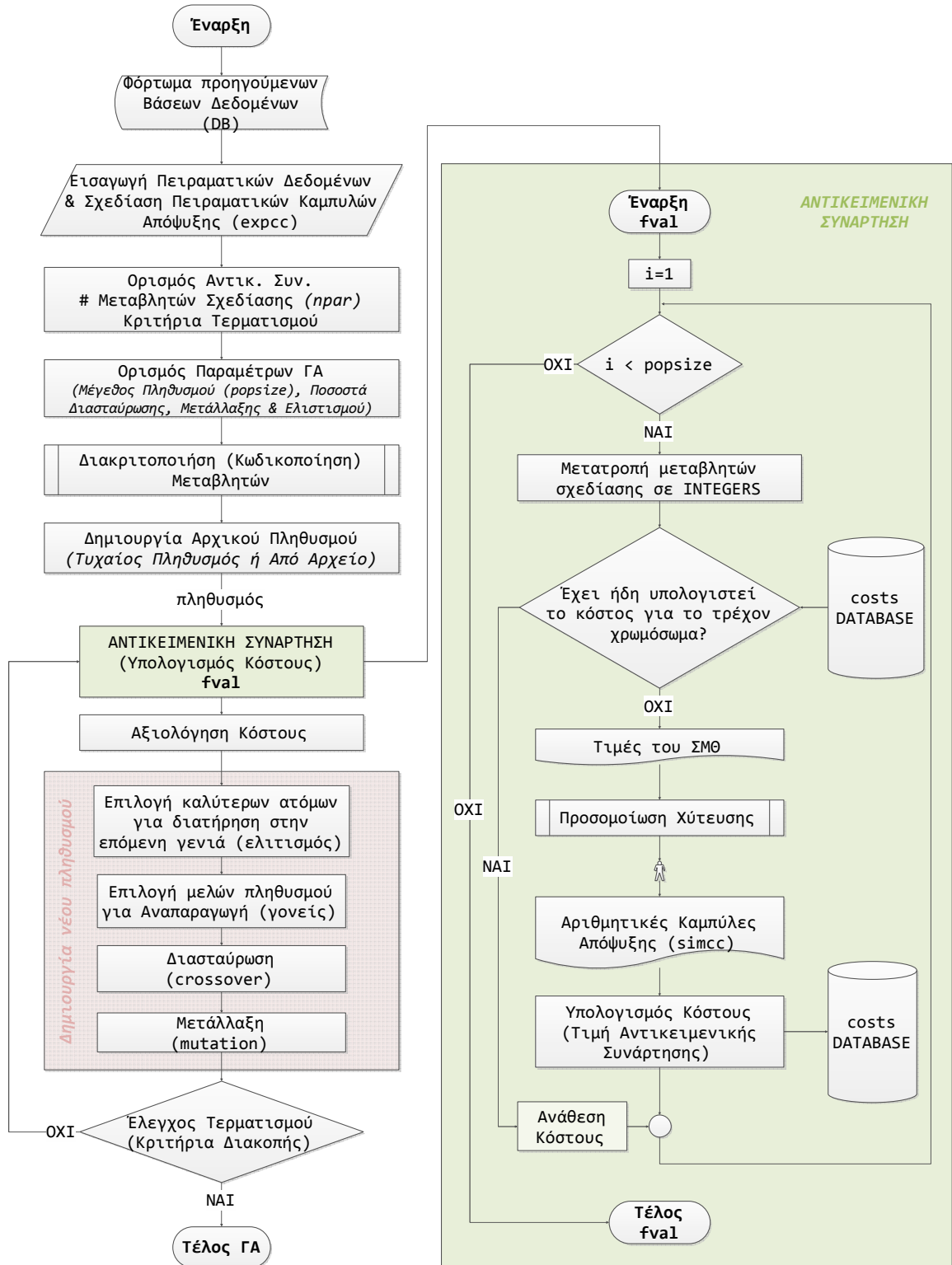
Βήμα 10: Επιλογή μελών πληθυσμού για αναπαραγωγή. Επιλέγονται τα μέλη που θα αποτελέσουν τους γονείς.

Βήμα 11: Πραγματοποιείται η διασταύρωση (crossover) των γονέων, (με τις μεθόδους που περιγράφονται στην αντίστοιχη παράγραφο, ανάλογα με την περίπτωση).

Βήμα 12: Ένα μικρό ποσοστό των μελών του πληθυσμού για αναπαραγωγή (που ορίζεται στο Βήμα 3) υφίσταται μετάλλαξη.

Βήμα 13: Στα βήματα 9-13 συμβαίνει η «Δημιουργία νέου πληθυσμού». Γίνεται έλεγχος μήπως πληρείται κάποιο από τα κριτήρια διακοπής του ΓΑ. Εάν δεν ισχύει κάτι τέτοιο, ο αλγόριθμος συνεχίζεται. Με το νέο πληθυσμός, πλέον, γίνεται κλήση της αντικειμενικής συνάρτησης (Βήμα 7) για να υπολογιστεί το κόστος των νέων ατόμων, κοκ.

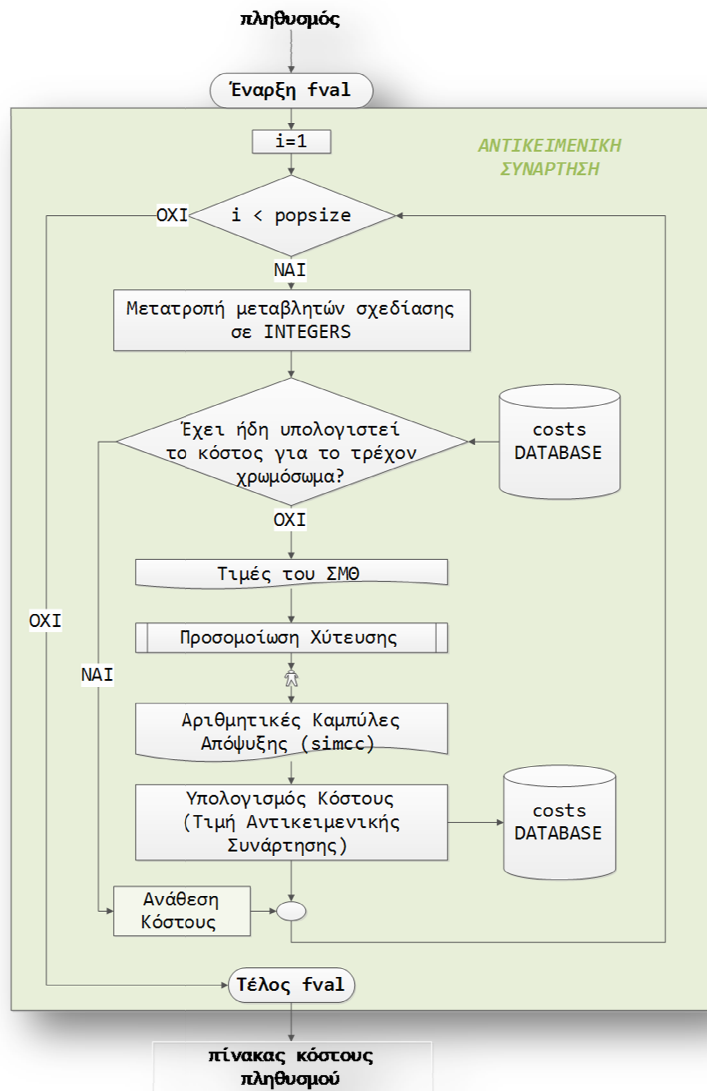
Βήμα 14: Όταν κάποιο από τα κριτήρια τερματισμού πληροίται, τότε ο ΓΑ τερματίζεται και εμφανίζεται το βέλτιστο χρωμόσωμα που έχει προκύψει από τη διαδικασία βελτιστοποίησης.



Σχήμα 6.10 Διάγραμμα Ροής του ΓΑ που αναπτύχθηκε.

6.4.4 Αντικειμενική Συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση (fval) του ΓΑ που αναπτύχθηκε είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να δέχεται σαν όρισμα εισόδου (input) ολόκληρο τον πίνακα του πληθυσμού. Η έξοδος (output) της fval είναι ένας πίνακας -στήλη (popsize x 1) που περιέχει το κόστος που αντιστοιχεί στο κάθε χρωμόσωμα.



Σχήμα 6.11 Διάγραμμα ροής της αντικειμενικής συνάρτησης του γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε.

Με την έναρξη της fval, ξεκινάει ένας μετρητής (counter). Η διαδικασία υπολογισμού κόστους θα εφαρμοστεί τόσες φορές όσο είναι το πλήθος των χρωμοσωμάτων του πληθυσμού (μέγεθος πληθυσμού, popsize). Άρα, όταν ο μετρητής γίνει popsize+1, η επαναληπτική διαδικασία σταματάει.

Για το κάθε χρωμόσωμα, συνεπώς, εφαρμόζονται τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα ΑΣ1: Μετατροπή των μεταβλητών σχεδίασης από INTEGERS με εύρος [0-150] σε INTEGERS με εύρος [LB-UB], όπου LB (LowerBound) το κάτω όριο του πεδίου ορισμού και UB (UpperBound) το άνω όριο του πεδίου ορισμού της κάθε μεταβλητής.

Βήμα ΑΣ2: Έλεγχος εάν έχει υπολογιστεί προηγουμένως το κόστος για χρωμόσωμα ίδιο με το τρέχον. Πραγματοποιείται αναζήτηση στη Βάση Δεδομένων με παλαιότερα αποτελέσματα.

a. Εάν το κόστος για το τρέχον χρωμόσωμα έχει υπολογιστεί ξανά προηγουμένως, τότε του ανατίθεται απευθείας. Η επαναληπτική διαδικασία της αντικ. συνάρτησης συνεχίζεται για το επόμενο χρωμόσωμα.

b. Εάν το κόστος για το τρέχον χρωμόσωμα δεν έχει υπολογιστεί ξανά προηγουμένως, τότε η διαδικασία συνεχίζεται με το Βήμα ΑΣ3.

Βήμα ΑΣ3: Οι αποκωδικοποιημένες τιμές του χρωμοσώματος χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του πίνακα τιμών του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας. (Υπενθυμίζεται, πως το χρωμόσωμα αποτελείται από τιμές - κλειδιά από τις οποίες μπορεί να αναπαραχθεί η μορφή του ΣΜΘ).

Βήμα ΑΣ4: Πραγματοποιείται προσομοίωση της χύτευσης για τον ΣΜΘ που υπαγορεύεται από το τρέχον χρωμόσωμα.

Βήμα ΑΣ5: Μετά το πέρας της προσομοίωσης, λαμβάνονται οι αριθμητικές καμπύλες απόψυξης. Υπάρχει μία ξεχωριστή καμπύλη για κάθε περιοχή του χυτού με διαφορετικό casting modulus. Οι κόμβοι του πλέγματος, η θερμική ιστορία των οποίων παραλαμβάνεται κάθε φορά, έχουν επιλεγεί ώστε να αντιστοιχούν στα σημεία τοποθέτησης των τριών θερμοστοιχείων κατά το πείραμα χύτευσης.

Βήμα ΑΣ6: Υπολογισμός Κόστους. Αντικειμενικός στόχος είναι οι αριθμητικά προσδιορισμένες καμπύλες απόψυξης να απέχουν όσο το δυνατόν λιγότερο από τις αντίστοιχες πειραματικές. Η μέθοδος αξιολόγησης της προσέγγισης των καμπυλών είναι ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης του σφάλματος προσέγγισης μεταξύ τους.

Αναλυτικότερα (βλ. Σχήμα 6.12): επιλέγονται κάποια σημεία σύγκρισης - συντεταγμένες του άξονα των χρόνων (εν προκειμένω 200 σημεία - επιλέχθηκαν με βάση τον αριθμό των χρονικών βημάτων της προσομοίωσης). Για τις χρονικές αυτές στιγμές, υπολογίζεται η κατακόρυφη απόσταση των δύο συγκρινόμενων καμπυλών. Η ιδιαιτερότητα που υπάρχει και χρήζει ιδιαίτερης προσοχής είναι πως η πειραματική καμπύλη με την αντίστοιχη αριθμητική, δεν έχουν την ίδια διακριτοποίηση ως προς το χρόνο (το χρονικό βήμα δεν είναι το ίδιο*). Αν, για παράδειγμα, έχει επιλεγεί ως σημείο σύγκρισης η χρονική στιγμή $t=10\text{sec}$ για την οποία είναι γνωστή η τιμή θερμοκρασίας στο πείραμα, θα πρέπει να είναι γνωστή η τιμή της θερμοκρασίας για την καμπύλη προσομοίωσης στην ίδια χρονική στιγμή ($t=10\text{sec}$). Η πληροφορία αυτή, στο πλείστον των περιπτώσεων

δεν είναι γνωστή. Αντί αυτής, υπάρχει η θερμοκρασία, πχ., στις χρονικές στιγμές $t=9.803\text{sec}$ και 10.23sec . Πραγματοποιείται, συνεπώς, γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων αυτών, για να ληφθεί η επιθυμητή πληροφορία.

Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κόστους είναι

$$fval = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n (Y_{exp_i}^L - Y_{sim_i}^L)\right)^2}{n}} + \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n (Y_{exp_i}^M - Y_{sim_i}^M)\right)^2}{n}} + \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n (Y_{exp_i}^S - Y_{sim_i}^S)\right)^2}{n}}$$

όπου: Y_{exp_i} : Η τεταγμένη (δηλ. η θερμοκρασία) της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη χρονική στιγμή i .

Y_{sim_i} : Η τεταγμένη (δηλ. η θερμοκρασία) της αριθμητικής καμπύλης απόψυξης για τη χρονική στιγμή i .

L : εκθέτης που υποδηλώνει τη μεγάλη διατομή

M : εκθέτης που υποδηλώνει τη μεσαία διατομή

S : εκθέτης που υποδηλώνει τη μικρή διατομή

n : ο αριθμός των συγκρινόμενων σημείων.

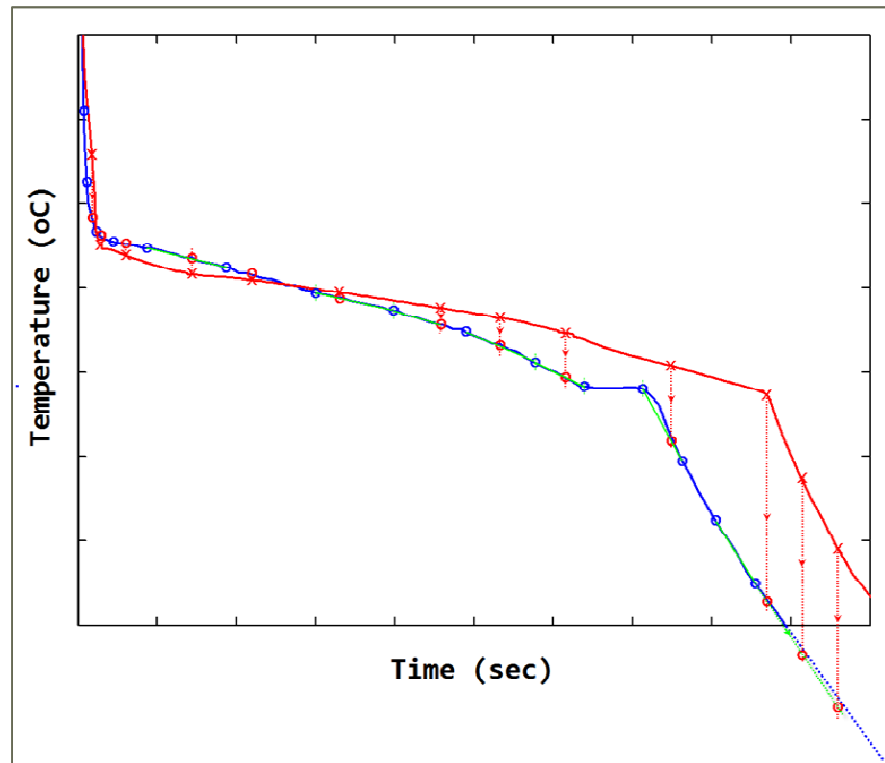
Η τιμή του κόστους ανατίθεται και εγγράφεται στον πίνακα - outputτης `fval`.

Βήμα ΑΣ7: Η τιμή του κόστους που υπολογίστηκε προστίθεται κι αποθηκεύεται στη Βάση Δεδομένων.

Βήμα ΑΣ8: Ελέγχεται αν ο μετρητής (counter) έχει τιμή μικρότερη από το μέγεθος του πληθυσμού. Εάν ναι, η διαδικασία συνεχίζεται για το επόμενο χρωμόσωμα. Εάν όχι, τότε αυτό σημαίνει τον τερματισμό της επαναληπτικής διαδικασίας και την επιστροφή στον ΓΑ.

* Θα μπορούσε να ισχυρισθεί κανείς πως μία καλή ιδέα θα ήταν να φιλτραριστούν τα πειραματικά δεδομένα με τρόπο τέτοιο που το χρονικό βήμα των πειραματικών μετρήσεων να ταυτίζεται με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Μία τέτοια προσέγγιση, είναι λογική, σωστή και θα επιτάχυνε τη διαδικασία. Ενέχει, ωστόσο, ένα ρίσκο: κατά την

προσομοίωση της χύτευσης, είναι δυνατόν το χρονικό βήμα να μεταβληθεί. Ο χρήστης ορίζει ένα μέγιστο timestep. Εάν, ωστόσο, κατά την επίλυση του προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζεται δυσκολία υπολογισμού κάποιου μεγέθους, τότε το timestep αναπροσαρμόζεται με τρόπο μη ελεγχόμενο, ανάλογα με τις απαιτήσεις. Αυτό συμβαίνει κατά κόρον στην περίπτωση που ο ΣΜΘ είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα 6.12 Σχηματική απεικόνιση του τρόπου σύγκρισης καμπυλών με ανόμοιες x-συντεταγμένες.

6.4.5 Ταχύτητα του ΓΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο ΓΑ για την εφαρμογή που πραγματεύεται η παρούσα διατριβή, περιλαμβάνει την κλήση μίας δαπανηρής υπολογιστικά αντικειμενικής συνάρτησης.

Σε περιπτώσεις ΓΑ που η αντικειμενική συνάρτηση δεν στοιχίζει υπολογιστικά, είναι πολύ σημαντικό ο ίδιος ο ΓΑ (αξιολόγηση κόστους, δημιουργία πληθυσμού κλπ) να μην καθυστερεί. Ακόμα και μερικά ms ταχύτητας, μπορούν να δώσουν σημαντικό συγκριτικό πλεονέκτημα ενός ΓΑ έναντι κάποιου άλλου.

Στην προκειμένη περίπτωση, όμως, κάτι τέτοιο αποδεικνύεται πως δεν παίζει, γενικά, πρωτεύοντα ρόλο.

Ενδεικτικά, αναφέρονται οι εξής χρόνοι (αναφέρονται σε Η/Υ με επεξεργαστή 2GHz και μνήμη 2GB):

Υπολογιστικό Κόστος Αντικειμενικής Συνάρτησης (συμπεριλαμβανομένης της προσομοίωσης):

- Μοντελοποίηση με ΣΜΘ συναρτήσεως του χρόνου: 70-90sec.
- Μοντελοποίηση με ΣΜΘ συναρτήσεως της θερμοκρασίας: 202-238sec.

Υπολογιστικό Κόστος Αντικειμενικής Συνάρτησης (εξαιρουμένης της προσομοίωσης): 0.1034sec.

Υπολογιστικό Κόστος ΓΑ (βήματα 1-6 και 13): Υπάρχουν δύο εκδοχές του ΓΑ:

- ✓ Γρήγορη εκδοχή: παραλείπονται τα περιττά βήματα (αποθήκευση όλων των μεταβλητών και με μορφή αρχείων κειμένου '.txt', πέρα από την αποθήκευση των μεταβλητών '.mat'). Μένει μόνο η ουσία του αλγορίθμου και στο τέλος του ΓΑ εμφανίζεται το βέλτιστο αποτέλεσμα. (0.00137sec/επανάληψη).
- ✓ Διαγνωστική εκδοχή: σε κάθε στάδιο του ΓΑ αποθηκεύονται όλες οι πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παρακολούθηση της πορείας του ΓΑ ανά πάσα στιγμή, οι πληροφορίες που απαιτούνται για επανεκκίνηση του ΓΑ από το σημείο που σταμάτησε (αν για κάποιο λόγο διακοπεί) και δημιουργούνται γραφικές παραστάσεις για το κάθε χρωμόσωμα (αριθμητικές καμπύλες απόψυξης), (0.022667sec/επανάληψη).

Παρατηρείται πως το υπολογιστικό κόστος της αντικειμενικής συνάρτησης αποτελεί πολλαπλάσιο (τουλάχιστον 660%) του υπολογιστικού κόστους του υπόλοιπου ΓΑ αυτού καθαυτού. Συνεπώς, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [R. L. Haupt & S. E. Haupt 2004] δικαιολογείται απόλυτα η χρήση τεχνικών για το χειρισμό των «ακριβών υπολογιστικά» συναρτήσεων κόστους.

Αξιολόγηση της χρήσης της Βάσης Δεδομένων: Παρατηρώντας, ενδεικτικά, την εξέλιξη ενός από τους ΓΑ που εκτελέστηκαν, διαπιστώνεται πως: Σε σύνολο 70 γενεών, με μέγεθος πληθυσμού 60, το πλήθος των ατόμων που εμφανίστηκαν παραπάνω από 1 φορές ήταν 125. Το κόστος αναζήτησης στη βάση δεδομένων είναι 0.0008sec. Αν αντί για αναζήτηση στη βάση δεδομένων πραγματοποιούταν προσομοίωση, τότε το κόστος θα ήταν 11250sec=187.5min. Συνεπώς, το όφελος σε υπολογιστικό κόστος είναι 3.06%. Το όφελος αυξάνεται όσο μεγαλώνει το πλήθος των καταχωρήσεων στη βάση δεδομένων, δηλαδή όσο αυξάνονται οι γενεές του ΓΑ ή όσο συσσωρεύονται αποτελέσματα από ανεξάρτητους ΓΑ για το ίδιο πρόβλημα.

6.4.6 Δημιουργία Αρχικού Πληθυσμού

(Τυχαίος Πληθυσμός ή Ορίζεται από τον ερευνητή είτε ολόκληρος είτε μέρος του πληθυσμού)

Περίπτωση 1η: Τυχαία δημιουργία Πληθυσμού

Περίπτωση 2η: Ολόκληρος ο αρχικός πληθυσμός διαβάζεται από αρχείο (δίνεται από τον χρήστη). Το κόστος για το κάθε χρωμόσωμα δεν δίνεται.

Περίπτωση 3η: Ολόκληρος ο αρχικός πληθυσμός διαβάζεται από αρχείο (δίνεται από τον χρήστη). Το κόστος για το κάθε χρωμόσωμα δίνεται.

Περίπτωση 4η: Μέρος του πληθυσμού διαβάζεται από αρχείο. Το κόστος για τα χρωμοσώματα αυτά δεν παρέχεται. Ο υπόλοιπος πληθυσμός δημιουργείται τυχαία.

Περίπτωση 5η: Μέρος του πληθυσμού διαβάζεται από αρχείο. Το κόστος για τα χρωμοσώματα αυτά διαβάζεται από αρχείο, επίσης. Ο υπόλοιπος πληθυσμός δημιουργείται τυχαία.

6.4.7 Επιλογές ΓΑ (ga Options)

Οι επιλογές του ΓΑ που χρησιμοποιήθηκαν για την κάθε διερεύνηση, περιγράφονται στην αντίστοιχη παράγραφο.

Στις περιπτώσεις που οι μεταβλητές σχεδίασης του ΓΑ ήταν ακέραιοι χρησιμοποιήθηκε εξολοκλήρου κώδικας ΓΑ που αναπτύχθηκε ειδικά για τις ανάγκες της διατριβής (γράφηκε στο περιβάλλον MATLAB). Αναπτύχθηκαν 2-3 διαφορετικές συναρτήσεις για φυσική επιλογή (“selection”), ζευγάρωμα (“pairing”), διασταύρωση (“crossover”) και μετάλλαξη (“mutation”). Για την ενότητα που αφορά σε οι μεταβλητές σχεδίασης ΓΑ πραγματικούς αριθμούς, χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις “selection”, “mutation” και “crossover” που υπάρχουν έτοιμες στο MATLAB.

6.5 Προσδιορισμός ΣΜΘ με ΓΑ για Δοκιμαστικές Περιπτώσεις Χύτευσης

6.5.1 Σκοπός Διερεύνησης

Σε ένα πραγματικό πρόβλημα χύτευσης, ο πραγματικός «βέλτιστος» ΣΜΘ δεν είναι γνωστός. Ως εκ τούτου δεν καθίσταται δυνατό να ελεγχθεί η ορθότητα της λύσης στην οποία καταλήγει ο ΓΑ.

Επιπλέον, επειδή η διαδικασία περιλαμβάνει τη χρήση πλήθους προσομοιώσεων της χύτευσης, είναι χρήσιμο να πραγματοποιηθούν δοκιμές (πχ. για διάφορες επιλογές τιμών παραμέτρων του ΓΑ) για μία περίπτωση χύτευσης με μικρό υπολογιστικό κόστος. Από το πλήθος δοκιμών θα προκύψουν τα χαρακτηριστικά του ΓΑ που γενικά οδηγούν ταχύτερα τον ΓΑ στην περιοχή της βέλτιστης λύσης.

Για να παρακαμφθούν/περιοριστούν οι περιορισμοί αυτοί, επιλέχθηκαν οι «Δοκιμαστικές Γεωμετρίες» - που στη συνέχεια αναφέρονται ως «Γεωμετρία 1» και «Γεωμετρία 2» - για να αποτελέσουν το πρώτο μέρος της μελέτης.

Οι γεωμετρίες είναι απλές και το υπολογιστικό κόστος για την προσομοίωση μικρό. Επιλέγονται κάποιοι κόμβοι, για να χρησιμοποιηθούν ως κόμβοι αναφοράς. Επιλέγεται, επίσης, αυθαίρετα ένας (για τη «Γεωμετρία 1») - ή ένας συνδυασμός (για τη «Γεωμετρία 2») - Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας ως ΣΜΘ αναφοράς. Διεξάγεται προσομοίωση της χύτευσης για την περίπτωση αναφοράς και το αποτέλεσμα που θα προκύψει - δηλ. η αριθμητική καμπύλη απόψυξης στον κόμβο αναφοράς - θα αποτελέσει την καμπύλη απόψυξη αναφοράς. Ο «ΣΜΘ αναφοράς» θα είναι η βέλτιστη λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης και η προσέγγιση της «καμπύλης αναφοράς» θα είναι η αντικειμενική συνάρτηση, με βάση την οποία θα αξιολογηθούν οι διάφορες πιθανές λύσεις. Η «καμπύλη αναφοράς» παίζει το ρόλο της «πειραματική καμπύλη απόψυξης» στην περίπτωση πραγματικής χύτευσης με γνωστό ΣΜΘ.

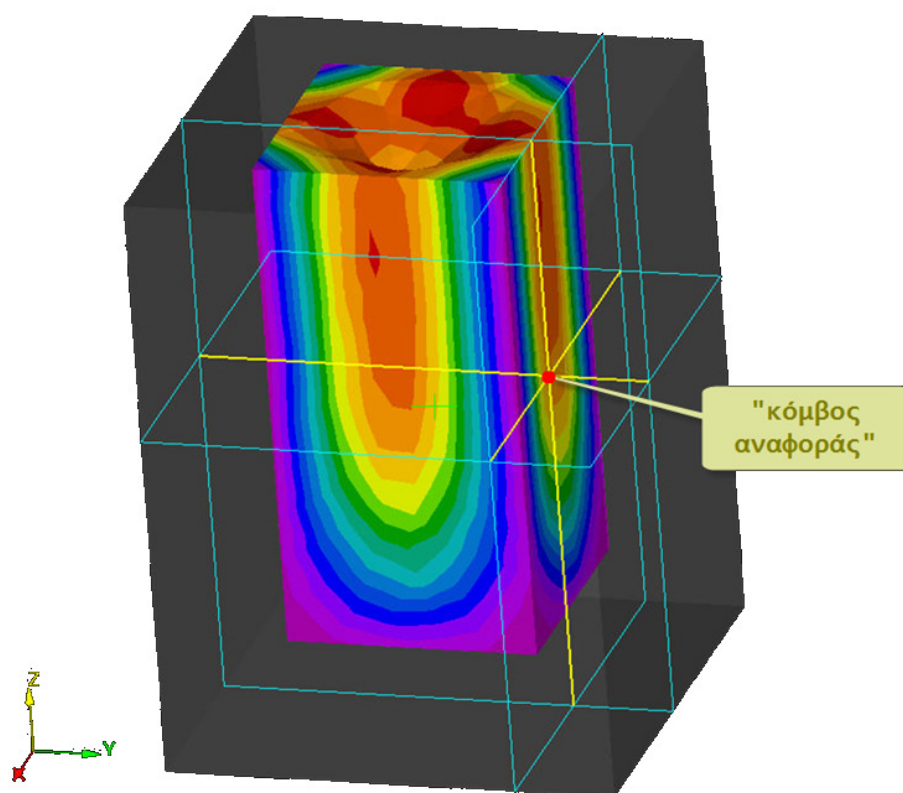
6.5.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 1η: Χρήση Ενιαίου ΣΜΘ στο Χυτό

6.5.2.1 Περιγραφή Γεωμετρίας - Είδος Χύτευσης

Η «Γεωμετρία 1» που επιλέχθηκε για το πρώτο στάδιο της μελέτης στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου, είναι η γεωμετρία που φαίνεται στην Σχήμα 6.13. Ο κόμβος που επισημαίνεται με κόκκινο χρώμα είναι ο κόμβος που επιλέχθηκε ως «κόμβος αναφοράς». Το είδος* χύτευσης που μοντελοποιήθηκε είναι χύτευση αλουμινίου σε μεταλλική μήτρα (Χάλυβας H13), με αρχική θερμοκρασία τήγματος 700°C, ταχύτητα παροχής τήγματος 1kg/s και οριακές συνθήκες: απόψυξη στον αέρα (με θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και $film\ coefficient=10W/m^2K$ (βλ. §4.6.2, σελ.234)).

Ο ΣΜΘ που θεωρείται η «βέλτιστη λύση» και ορίστηκε ως οριακή συνθήκη διεπιφάνειας κατά την προσομοίωση της περίπτωσης αναφοράς έχει τη μορφή που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1 (β) και γράφεται με τη μορφή διανύσματος σχεδίασης ως ακολούθως, με τις τιμές που αυθαίρετα επιλέχθηκαν:

$$[h_1 \ t_1 \ h_2 \ t_2 \ h_3] = [1000.00 \ 2.10 \ 200.00 \ 25.60 \ 800.00].$$



Σχήμα 6.13 Η «Δοκιμαστική Γεωμετρία 1».

* Η μοντελοποίηση είναι βασισμένη σε μία περίπτωση που προτείνεται από το λογισμικό ProCast "Mtrate".

Η κωδικοποίηση των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή που παρουσιάζει ο Πίνακας 6.1. Η κάθε μεταβλητή σχεδίασης μπορεί να πάρει 5 ακέραιες τιμές [1-5]. Η κάθε τιμή αντιστοιχεί σε μία αριθμητική τιμή. Εάν πρόκειται για τις μεταβλητές h_1 , h_2 , h_3 , οι μονάδες είναι W/m^2K , ενώ εάν πρόκειται για τις t_1, t_2 , οι μονάδες είναι sec. Ο ακέραιος «1» έχει επιλεγεί να αντιστοιχεί στο 20% της τιμής αναφοράς (x_i) της εκάστοτε μεταβλητής, ο ακέραιος «2» στο 60% της x_i , ο ακέραιος «3» στο 100% της x_i , ο ακέραιος «4» στο 140% της x_i , και ο ακέραιος «5» στο 180% της x_i .

Πίνακας 6.1 Κωδικοποίηση μεταβλητών για την δοκιμαστική περίπτωση της «Γεωμετρίας 1».

	h1	t1	h2	t2	h3
1	200	0.42	40	5.12	160
2	600	1.26	120	15.36	480
3	1000	2.1	200	25.6	800
4	1400	2.94	280	35.84	1120
5	1800	3.78	360	46.08	1440

6.5.2.2 Εξαντλητική Διερεύνηση

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, εφόσον οι μεταβλητές σχεδίασης είναι 5 και μπορεί η κάθε μία να πάρει 5 τιμές, το σύνολο των πιθανών διαφορετικών συνδυασμών είναι 3125.

Οι προσομοιώσεις με όλους τους πιθανούς συνδυασμούς διεξήχθησαν ανεξάρτητα. Για την κάθε περίπτωση έγινε μετα-επεξεργασία και η καμπύλη απόψυξης αποθηκεύονταν σε .txt αρχείο. Έτσι, λοιπόν, για τη εξαντλητική διερεύνηση γράφτηκε κώδικας με εμφωλευμένα loops ο οποίος 'διάβαζε' τις καμπύλες απόψυξης από τα .txt αρχεία και υπολόγιζε την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για την κάθε περίπτωση. Η αντικειμενική συνάρτηση, δηλ. το κόστος του κάθε διανύσματος σχεδίασης (υπενθυμίζεται πως υπολογίζεται από τη σχέση $fval = \sqrt{\sum(Y_{exp} - Y_{sim})^2/n}$) μετά το πέρας της διερεύνησης φαίνεται πως λαμβάνει τιμές από 0 (για το διάνυσμα που αποτελεί τη «λύση») μέχρι 1090.

Το σύνολο των διανυσμάτων με τα αντίστοιχα κόστη αποθηκεύτηκαν με τη μορφή πίνακα, ώστε να αποτελούν μία «βάση δεδομένων» από την οποία θα «αντλείται» πληροφορία κάθε φορά που θα πρέπει ο ΓΑ να υπολογίζει το κόστος της αντικειμενικής συνάρτησης.

6.5.2.2.1 Διαφορετικές Επιλογές

Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της επίδρασης των επιλογών του ΓΑ στην ποιότητα της λύσης και την ταχύτητα επίτευξης. Ο Πίνακας 6.2 συνοψίζει τα αποτελέσματα. Ο κάθε συνδυασμός επιλογών ΓΑ δοκιμάστηκε να τρέξει τουλάχιστον 5 ανεξάρτητες φορές και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 6.2 Διερεύνηση της επίδρασης του mutation rate στην ποιότητα της λύσης.

Single Point Crossover - σε τυχαίο σημείο								
ga	Maxit	Popsiz	Elite	Mutrate	Selection	Best cost	Best chromosome	# of Gens needed
1	1000	21	0	0.2	0.5	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	296
2	1000	21	0	0.8	0.5	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	267
3	1000	21	0	0.4	0.5	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	63
4	1000	61	0	0.2	0.5	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	1
5	1000	61	0	0.4	0.5	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	1
6	1000	61	0	0.8	0.5	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	1
7	1000	41	0	0.2	0.5	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	83
8	1000	41	0	0.4	0.5	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	37
9	1000	41	0	0.8	0.5	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	462
10	1000	101	0	0.2	0.5	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	2
11	1000	101	0	0.4	0.5	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	20
12	1000	101	0	0.8	0.5	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	4

6.5.2.2.2 Ίδιος ΓΑ - διαφορετικά runs

Ο Πίνακας 6.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα 11 ανεξάρτητων δοκιμών του ίδιου ΓΑ. όπως φαίνεται, η εξέλιξη του είναι διαφορετική σε κάθε περίπτωση.

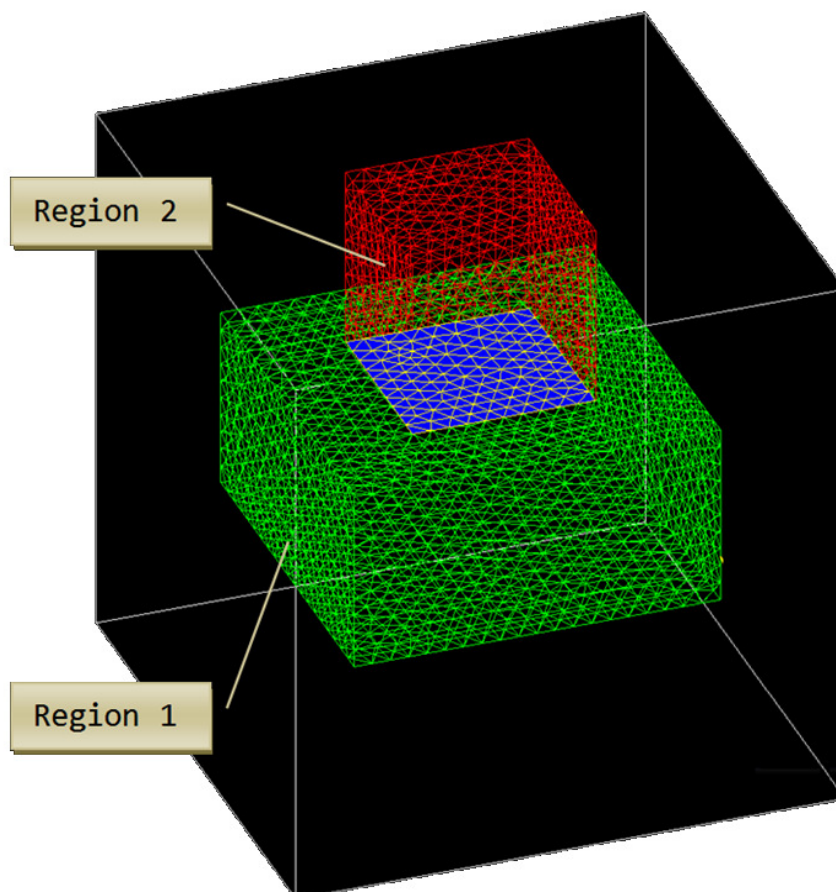
Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα από 11 ανεξάρτητες δοκιμές του ίδιου ΓΑ.

Single Point Crossover - σε τυχαίο σημείο								Ίδιος Initial Population					
Ga	Maxit	Popsiz	Mutrate	Selection	Crossover fraction	Best cost	Best chromosome	Generations Needed		Fval after # Generations			
								for Best result	for 2 nd best result	50	100	200	300
1	1000	61	0.2	0.5	1.0	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	1	-	0	0	0	0
2	1000	61	0.2	0.5	1.0	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	33	-	0	0	0	0
3	1000	61	0.2	0.5	1.0	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	53	8	0.079	0	0	0
4	1000	61	0.2	0.5	1.0	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	44	-	0	0	0	0
5	1000	61	0.2	0.5	1.0	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	2	-	0	0	0	0
6	1000	61	0.2	0.5	1.0	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	123	7	0.079	0.079	0	0
7	1000	61	0.2	0.5	1.0	0.0	[1000 2.1 200 25.6 800]	110	25	0.079	0.079	0	0
8	1000	61	0.2	0.5	1.0	0.0	1000 2.1 200 25.6 800	1	-	0	0	0	0
9	1000	61	0.2	0.5	1.0	0.0	1000 2.1 200 25.6 800	49	35	0	0	0	0
10	1000	61	0.2	0.5	1.0	0.079	1000 2.1 200 25.6 800	33	-	0	0	0	0
11	1000	61	0.2	0.5	1.0	0.0	1000 2.1 200 25.6 800						

6.5.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 2η: Χρήση Διακριτών ΣΜΘ στο Χυτό

6.5.3.1 Περιγραφή Γεωμετρίας - Είδος Χύτευσης

Αυτή τη φορά, το χυτό αποτελείται από δύο περιοχές: μία περιοχή μεγαλύτερης ορθογωνικής διατομής, με *casting modulus* =3.33, και μία περιοχή μικρότερης ορθογωνικής διατομής, με *casting modulus* =6.67. (Σχήμα 6.14).



Σχήμα 6.14 Η «Δοκιμαστική Γεωμετρία 2».

Στην κάθε περιοχή θεωρείται πως ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι διαφορετικός. Επιλέγονται αυθαίρετα δύο ΣΜΘ : για τη μεγάλη περιοχή (region 1) θεωρείται ο συντελεστής [2000 4 300 40 400] και για τη μικρή περιοχή (region 2) ο συντελεστής [1000 2.1 200 25.6 800]. Οι ΣΜΘ αυτοί ανατίθενται στην κάθε περιοχή ως οριακή συνθήκη διεπιφάνειας. Διεξάγεται προσομοίωση της χύτευσης και λαμβάνεται ως output η καμπύλη απόψυξης σε δύο σημεία: σε έναν χαρακτηριστικό κόμβο της επιφάνειας της μεγάλης διατομής και σε έναν κόμβο της επιφάνειας της μικρής διατομής. Θεωρείται πως η προσομοίωση αυτή είναι το «πείραμα», δηλ. η χύτευση αναφοράς. Οι δύο ΣΜΘ που χρησιμοποιήθηκαν θα αποτελούν τη «λύση» του προβλήματος.

Με την ίδια γεωμετρία και συνθήκες χύτευσης, θεωρώντας γνωστές τις καμπύλες απόψυξης στα δύο σημεία του «πειράματος» και θεωρώντας άγνωστους τους ΣΜΘ στις δύο περιοχές, θα επιχειρηθεί ο προσδιορισμός των δύο ΣΜΘ, με χρήση βελτιστοποίησης (Γ.Α.). Η λογική για τη δοκιμή αυτή, είναι να παρατηρηθεί η εξέλιξη του γενετικού αλγορίθμου και να διαπιστωθεί η ικανότητά του να εντοπίσει την «πραγματική λύση» του προβλήματος.

6.5.3.2 Η μορφή του ΣΜΘ και το Χρωμόσωμα

Το διάνυσμα σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκε για το συγκεκριμένο ΓΑ ήταν ένα διάνυσμα-γραμμή, που περιείχε πρώτα τις 5 μεταβλητές σχεδίασης που αντιστοιχούν στο ΣΜΘ της 1^η περιοχής κι έπειτα τις αντίστοιχες μεταβλητές για τη 2^η περιοχή:

$$x = \begin{bmatrix} h1_{\text{region1}} & t1_{\text{region1}} & h2_{\text{region1}} & t2_{\text{region1}} & h3_{\text{region1}} & h1_{\text{region2}} \\ & t1_{\text{region2}} & h2_{\text{region2}} & t2_{\text{region2}} & h3_{\text{region2}} & \end{bmatrix} \quad (1 \times 10)$$

6.5.3.2.1 Κωδικοποίηση Μεταβλητών

Οι μεταβλητές είναι ακέραιοι αριθμοί – διακριτοποίηση 10 τιμών, όπως φαίνεται στους Πίνακες 6.4 και 6.5. Το πεδίο ορισμού των μεταβλητών σχεδίασης είναι ανομοιόμορφο ούτως ή άλλως. Επιπροσθέτως, στην περίπτωση αυτή θεωρήθηκε πως ο ΣΜΘ για τη μικρή περιοχή μπορεί να πάρει διαφορετικές τιμές από ό,τι ο ΣΜΘ της μεγάλης περιοχής. Εισάγεται, με τον τρόπο αυτό, η εκτίμηση του χρήστη για τη φυσική του προβλήματος. Για παράδειγμα, εδώ θεωρείται πως η θερμότητα θα απαγάγεται εντονότερα από τη μικρή περιοχή του χυτού.

Πίνακας 6.4 Κωδικοποίηση μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε στο ΓΑ για τη μικρή διατομή της «Γεωμετρίας 2».

$h1_{\text{Region1}}$	$t1_{\text{Region1}}$	$h2_{\text{Region1}}$	$t2_{\text{Region1}}$	$h3_{\text{Region1}}$
1 = 400	1 = 0.8	1 = 60	1 = 8	1 = 80
2 = 800	2 = 1.6	2 = 120	2 = 16	2 = 160
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$i = i \cdot 400$	$i = i \cdot 0.8$	$i = i \cdot 60$	$i = i \cdot 8$	$i = i \cdot 80$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10 = 4000	10 = 8	10 = 600	10 = 80	10 = 800

Πίνακας 6.5 Κωδικοποίηση μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε στο ΓΑ για τη μεγάλη διατομή της «Γεωμετρίας 2».

$h1_{\text{Region2}}$	$t1_{\text{Region2}}$	$h2_{\text{Region2}}$	$t2_{\text{Region2}}$	$h3_{\text{Region2}}$
1 = 200	1 = 0.42	1 = 40	1 = 5.12	1 = 160
2 = 400	2 = 0.84	2 = 80	2 = 10.24	2 = 320
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$i = i \cdot 200$	$i = i \cdot 0.42$	$i = i \cdot 40$	$i = i \cdot 5.12$	$i = i \cdot 160$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10 = 2000	10 = 4.2	10 = 400	10 = 51.2	10 = 1600

6.5.3.3 Προσδιορισμός ΣΜΘ με ΓΑ

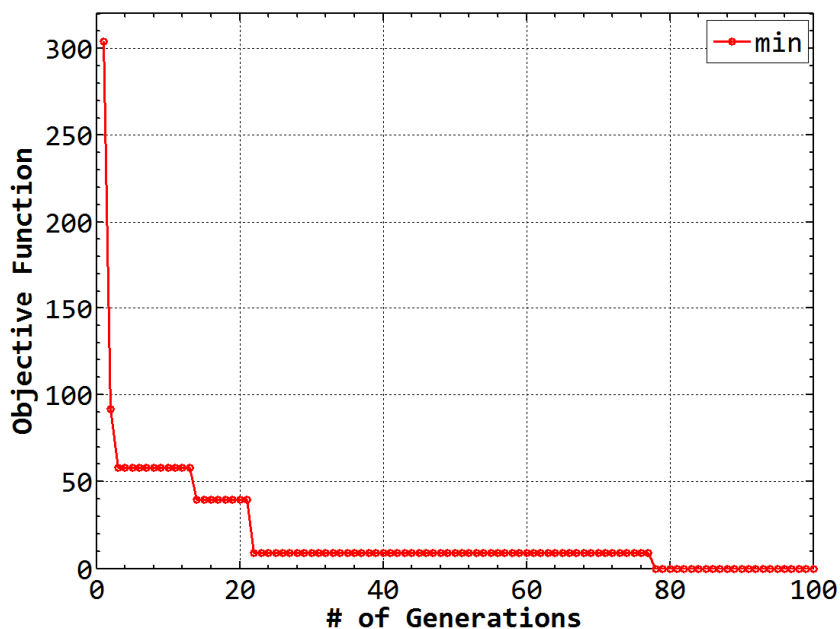
Η «Λύση» του Προβλήματος είναι το διάνυσμα:

$$xx(ic,:) = [2000 \ 4 \ 300 \ 40 \ 400 \ 1000 \ 2.1 \ 200 \ 25.6 \ 800].$$

Ο ΓΑ κατάφερε να εντοπίσει τους ΣΜΘ που υποτέθηκαν στην αρχή ως «λύσεις» του προβλήματος (βλ. §6.5.3.1).

Με τον ίδιο ΓΑ που χρησιμοποιήθηκε για τη «Γεωμετρία 1», προσδιορίστηκε ο βέλτιστος συνδυασμός ΣΜΘ στην 78^η γενεά. Ωστόσο, αρκετά γρήγορα (στην 21^η γενεά) ο αλγόριθμος είχε εντοπίσει τη 2^η καλύτερη λύση, με την οποία θα ήμαστε ικανοποιημένοι εάν επρόκειτο για πραγματική περίπτωση.

Η εξέλιξη του ΓΑ φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα.



Σχήμα 6.15 Η εξέλιξη του ΓΑ για τη «Γεωμετρία 2», με 2ΣΜΘ και ΣΜΘ=f_{step}(t).

6.6 Προσδιορισμός ΣΜΘ με ΓΑ για Πραγματική Περίπτωση Χύτευσης

6.6.1 Περιγραφή Προβλήματος

Αφού δοκιμάστηκε η χρήση του ΓΑ για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ για τις «δοκιμαστικές» περιπτώσεις χύτευσης, εφαρμόζεται η μεθοδολογία σε μία πραγματική περίπτωση χύτευσης, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα και να αποκαλυφθούν οι δυσκολίες.

Τη βάση για τη διερεύνηση αυτή αποτελεί ένα ειδικά σχεδιασμένο πείραμα. Η γεωμετρία έχει επιλεγθεί έτσι, ώστε να αποτελείται το χυτό από 3 περιοχές με διαφορετικά castingmoduli. Πέραν της βελτιστοποίησης, μελετάται η επίδραση της γεωμετρίας του χυτού στην τιμή του ΣΜΘ.

6.6.2 Πείραμα

Στο Σχήμα 6.16 παρατίθενται οι μετρήσεις από τα θερμοστοιχεία τύπου-K της χύτευσης εν κενώ ορείχαλκου (66.%Cu και 33.3%Zn). Στο συγκεκριμένο πείραμα στηρίχθηκε η διερεύνηση του παρόντος κεφαλαίου.

Όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία, ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας κατά τη χύτευση εξαρτάται από πλήθος παραγόντων, μεταξύ των οποίων και η γεωμετρία του χυτού. Αναμένεται περιοχές του χυτού που έχουν διαφορετικό casting modulus να χρειάζεται να έχουν διαφορετικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας κατά την προσομοίωση της χύτευσης. Ξεκάθαρη ποσοτικοποίηση της διατύπωσης αυτής δεν υπάρχει στη διεθνή βιβλιογραφία.

Το χυτό που επιλέχθηκε έχει τρεις διακριτές περιοχές: η βάση του χυτού αποτελείται από έναν κύλινδρο με διάμετροd=16mm, ύψος h=8mm και casting modulus = 2 (αναφέρεται στο κείμενο και ως «μεγάλη διατομή του χυτού»). Ακολουθεί ένας ομοαξονικός κύλινδρος με διάμετροd=10mm, ύψος h=8mm και casting modulus = 1.54 («μεσαία διατομή του χυτού»). Αμέσως μετά, ένας λεπτότερος ομοαξονικός κύλινδρος διαμέτρουd=4mm, ύψος h=8mm και casting modulus = 0.8 («μικρή διατομή του χυτού») αποτελεί την άκρη του χυτού.

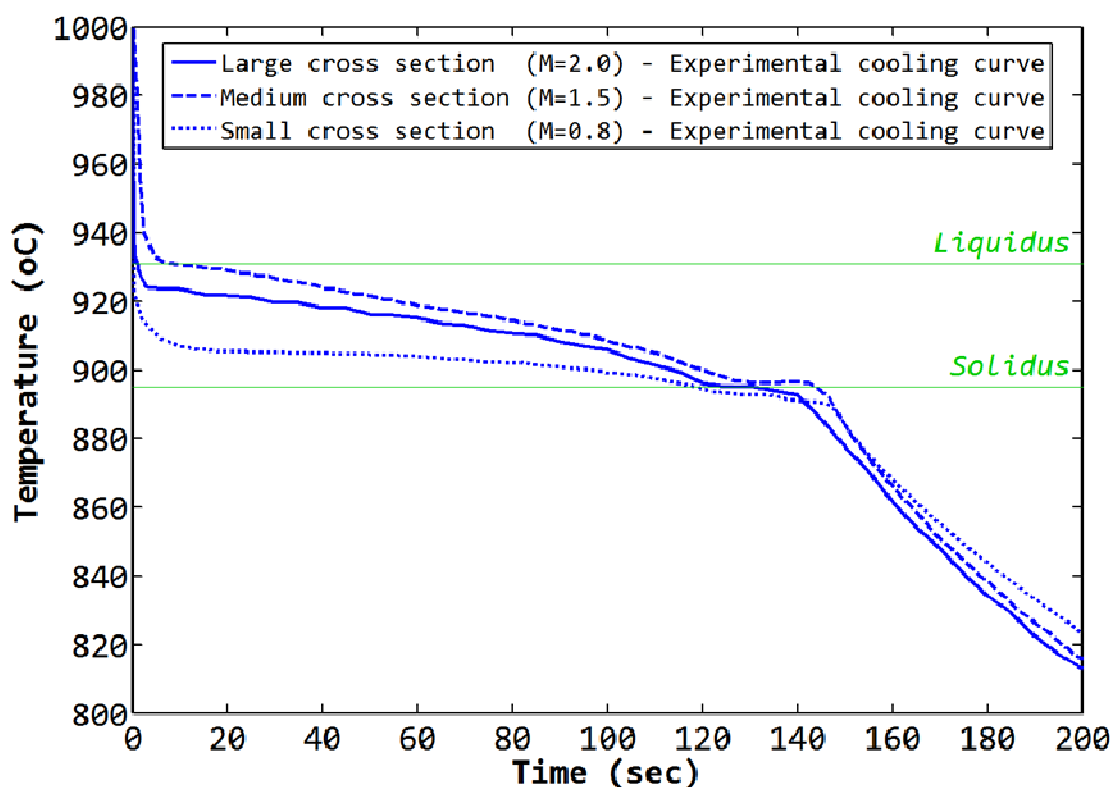
Αναμένεται ο τρόπος στερεοποίησης του χυτού στις τρεις αυτές περιοχές να διαφέρει. Προκειμένου να διαπιστωθεί αυτό, τοποθετήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου-K σε κάθε μία από τις διατομές. Η κεφαλή των θερμοστοιχείων ήταν τοποθετημένη μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού, πάρα πολύ κοντά στη διεπιφάνεια. Στο τέλος του πειράματος, η κεφαλή του θερμοστοιχείου ήταν οριακά εγκλωβισμένη μέσα στο στερεοποιημένο μέταλλο, πιστοποιώντας πως η μέτρηση θερμοκρασιών ήταν σωστή (βλ. Σχ. 2.22-2.23, σελ.104).

Στο Σχήμα 6.16 παρουσιάζονται οι μετρήσεις θερμοκρασιών του εν λόγω πειράματος.

Πρέπει να σημειωθεί πως επειδή στόχος ήταν να χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις αυτές για αριθμητική σύγκριση με άλλες καμπύλες, μέσω επαναληπτικής διαδικασίας, ήταν ιδιαίτερως σημαντική η επεξεργασία αυτών. Η διαδικασία επεξεργασίας των πειραματικών μετρήσεων που ακολουθήθηκε είναι αυτή που περιγράφεται στην παράγραφο 2.6.1.3.

Επιπλέον, το κομμάτι της μέτρησης που έχει επιλεγεί για τη μελέτη είναι η απόψυξη του μετάλλου τα πρώτα 200sec της απόψυξης. Αυτά τα 200sec επιλέχθηκαν επειδή σε εκείνο το στάδιο παρατηρούνται οι σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των τριών διατομών, ολοκληρώνεται η στερεοποίηση του χυτού και επειδή - με βάση τη μελέτη που αναπτύσσεται στο κεφάλαιο 4.6.1 - μπορεί να υποτεθεί με ασφάλεια πως οι οριακές συνθήκες για την προσομοίωση της χύτευσης μπορούν να θεωρηθούν σταθερές.

Παρατηρώντας την Σχήμα 6.16, εξάγονται συμπεράσματα και παρατηρήσεις σχετικά με τον τρόπο απόψυξης του μετάλλου στις τρεις διαφορετικές περιοχές του χυτού.



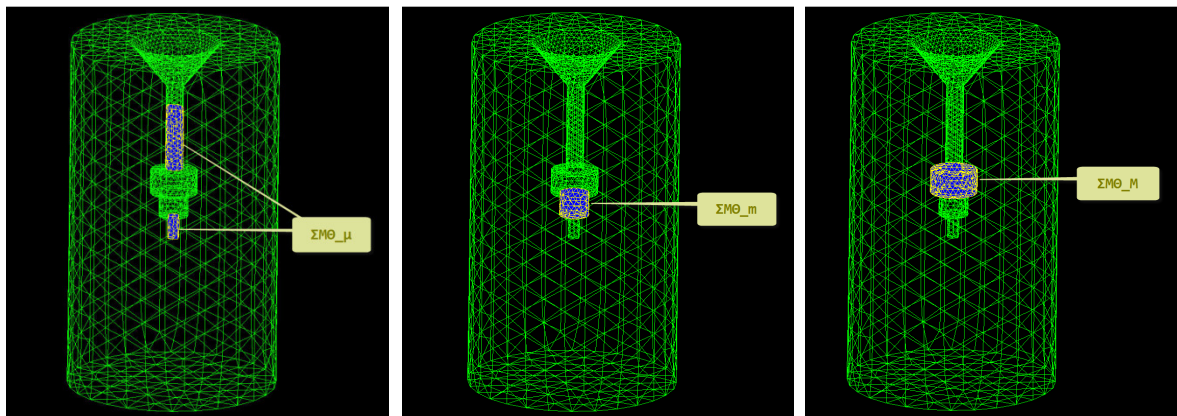
Σχήμα 6.16 Πειραματικές καμπύλες απόψυξης

Συγκρίνοντας τις πειραματικές καμπύλες των τριών διατομών του χυτού, φαίνεται πως η έναρξη της στερεοποίησης του σημείου μέτρησης της μικρής διατομής γίνεται στα 0.2sec, της μεγάλης διατομής στα 0.97sec και της μεσαίας στα 8.527sec. Αναφορικά με τη χρονική στιγμή λήξης της στερεοποίησης του πειράματος, το σημείο μέτρησης της μικρής διατομής στερεοποιείται στα 120.1sec, της μεσαίας στα 146.7sec και της μεγάλης στα 138.6sec. Συγκριτικά, η χρονική στιγμή του πέρατος της

στερεοποίησης στα τρία σημεία δεν διαφέρει πολύ στις τρεις διατομές, ενώ η χρονική στιγμή έναρξης της στερεοποίησης διαφέρει ιδιαίτερα.

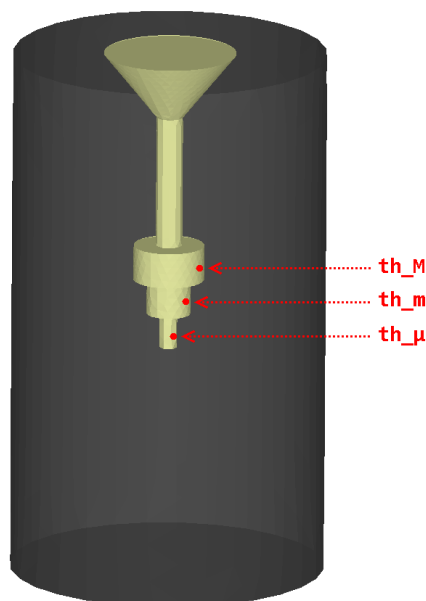
6.6.3 Μοντελοποίηση

Για τη μελέτη του κεφαλαίου αυτού, πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση με απόδοση διαφορετικών HTC σε διαφορετικές περιοχές της γεωμετρίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.17. Για τη μοντελοποίηση με χρήση διαφορετικών ΣΜΘ ανά περιοχή, θα πρέπει να ληφθεί ειδική μέριμνα στο στάδιο της κατασκευής του γεωμετρικού μοντέλου (§4.3.2, σελ.213).



Σχήμα 6.17 Οι περιοχές της γεωμετρίας στις οποίες έχει αποδοθεί διαφορετικός ΣΜΘ.

Στόχος της μοντελοποίησης με διαφορετικό ΣΜΘ ανά περιοχή είναι τα αριθμητικά αποτελέσματα της θερμοκρασιακής εξέλιξης του χυτού στα τρία σημεία που επισημαίνονται στο Σχήμα 6.18, να προσεγγίζουν τις πειραματικές μετρήσεις.



Σχήμα 6.18 Οι κόμβοι που αντιστοιχούν στα σημεία τοποθέτησης των θερμοστοιχείων κατά την πειραματική διαδικασία.

6.6.4 Η μορφή του ΣΜΘ

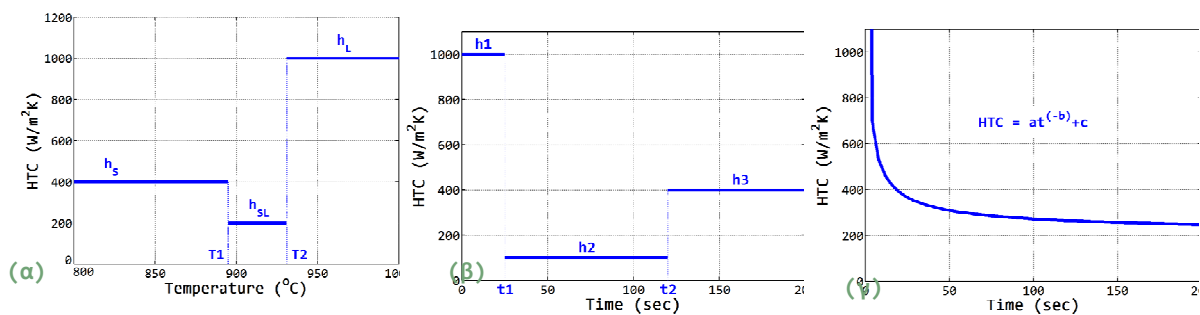
Χρήση Γενετικού Αλγορίθμου για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ, για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις μορφής ΣΜΘ

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζεται αναλυτικά η προτεινόμενη μέθοδος προσδιορισμού του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας (ΣΜΘ) με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων. Οι περιπτώσεις που παρουσιάζονται είναι τρεις, και διαφέρουν ως προς τη μορφή του ΣΜΘ:

1^η Περίπτωση: Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας συναρτήσει του χρόνου, μεταβαλλόμενος βηματικά και διακρινόμενος σε 3 περιοχές.

2^η Περίπτωση: Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας συναρτήσει του χρόνου, εκθετικά μεταβαλλόμενος.

3^η Περίπτωση: Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, βηματικά μεταβαλλόμενος και διακρινόμενος σε 3 περιοχές.



Σχήμα 6.19 Ποιοτική απεικόνιση τα μορφής του ΣΜΘ, για κάθε τις τρεις που μελετήθηκαν. (α) Βηματικός συναρτήσει της θερμοκρασίας, (β) Βηματικός συναρτήσει του χρόνου, (γ) Εκθετικός συναρτήσει της θερμοκρασίας.

6.6.5 Θεώρηση ΕΝΙΑΙΟΥ ΣΜΘ σε ολόκληρο το χυτό: Αποτέλεσμα ΓΑ (με Integers) και ΣΜΘ = βηματική συνάρτηση του χρόνου.

6.6.5.1 Ενιαίος ΣΜΘ - Κριτήριο η ταυτόχρονη προσέγγιση των Πειραματικών Μετρήσεων και στις 3 Διατομές

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο Γενετικός Αλγόριθμος που εκτελέστηκε για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ για την περίπτωση χύτευσης της «Γεωμετρίας 3», με τη θεώρηση ότι σε ολόκληρο το χυτό αποδίδεται ένας ενιαίος ΣΜΘ.

Η μορφή του ΣΜΘ είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 6.19 (β), δηλαδή θεωρείται βηματική συνάρτηση του χρόνου, διακρινόμενη σε 3 στάδια.

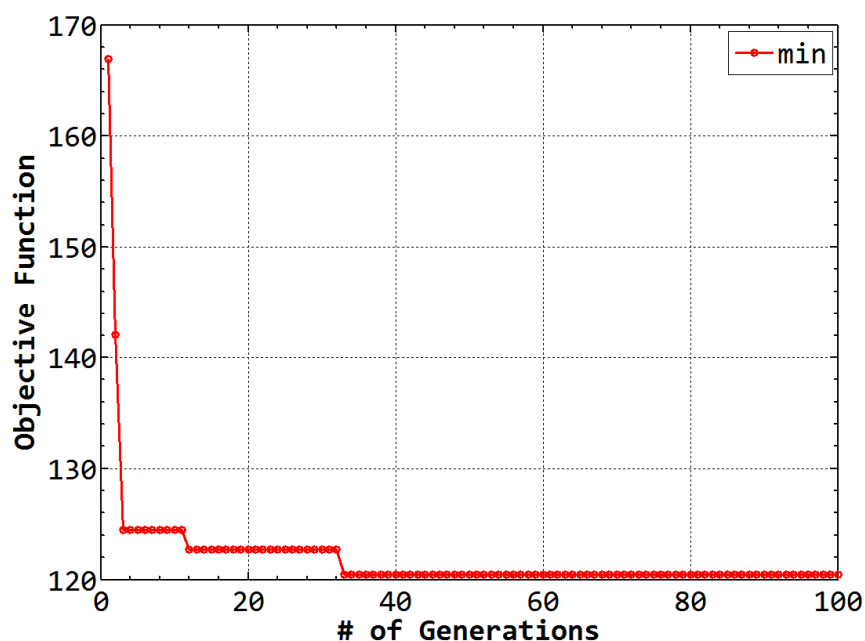
Το διάνυσμα σχεδίασης έχει τη μορφή:

$$x=[h1_{\text{uniform}} \ t1_{\text{uniform}} \ h2_{\text{uniform}} \ t2_{\text{uniform}} \ h3_{\text{uniform}}]$$

Η κωδικοποίηση των μεταβλητών γίνεται με integers και βασίζεται στη διακριτοποίηση του πεδίου ορισμού σε 150 τιμές για την κάθε μεταβλητή, με τον τρόπο που περιγράφει ο Πίνακας 6.11. Η αντιμετώπιση του προβλήματος είναι αντίστοιχη με αυτή της παραγράφου 6.6.7, ώστε η διαδικασία και τα αποτελέσματα να είναι, κατά το δυνατόν, συγκρίσιμα.

Τα χαρακτηριστικά του ΓΑ που χρησιμοποιήθηκαν είναι: mutation rate=0.1, population size = 20 , crossover rate = 0.8, max iterations=100. Η διαδικασία επιλογής των επιλογών αυτών περιγράφεται στην παράγραφο .

Στην Σχήμα 6.20 απεικονίζεται η εξέλιξη του ΓΑ ανά τις γενεές. Η κάθε κουκκίδα είναι η ελάχιστη τιμή κόστους στο τέλος κάθε γενεάς.



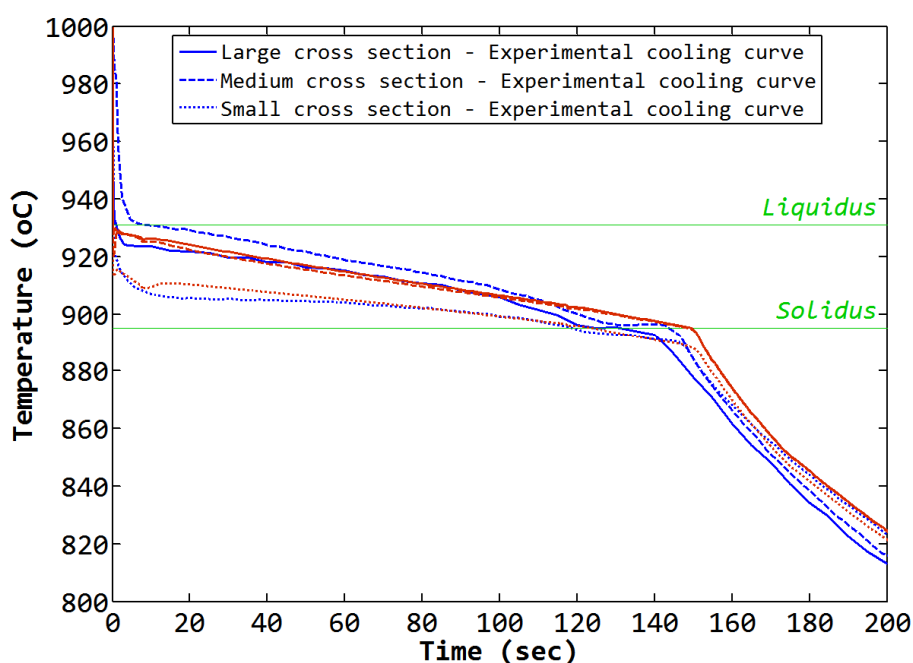
Σχήμα 6.20 Η εξέλιξη του ΓΑ για την περίπτωση ενιαίου ΣΜΘ στο χυτό. (Αντικ. Συνάρτηση: η προσέγγιση και των τριών πειραματικών καμπυλών)

Η βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης είναι αυτή που φαίνεται στον Πίνακα 6.6:

Πίνακας 6.6 Η βέλτιστη λύση για την περίπτωση μοντελοποίησης του χυτού με Ενιαίο ΣΜΘ και κριτήριο βελτιστοποίησης την ταυτόχρονη προσέγγιση τριών πειραματικών καμπυλών.

	h_1	t_1	h_2	t_2	h_3
Βέλτιστο διάνυσμα σχεδίασης σε Κωδικοποιημένη μορφή x_{INTEGER}	102	38	70	30	35
Βέλτιστο διάνυσμα σχεδίασης με Πραγματικές τιμές για το ΣΜΘ $x_{\text{ΣΜΘ}}$	20400	7	6	117	700
Βέλτιστη τιμή Αντικ. Συνάρτησης $f_{\text{val}}_{\text{best}}$	120.4				

Στο Σχήμα 6.47 με κόκκινο χρώμα έχουν σχεδιαστεί οι αριθμητικές καμπύλες απόψυξης που προκύπτουν εάν ανατεθεί σε όλο το χυτό ο βέλτιστος ΣΜΘ που προέκυψε.



Σχήμα 6.21 Υπέρθωση των τριών πειραματικών καμπυλών απόψυξης με τις αντίστοιχες αριθμητικές, που προκύπτουν για το βέλτιστο ΕΝΙΑΙΟ βηματικό ΣΜΘ συναρτήσεως του χρόνου (1 ΣΜΘ σε όλο το χυτό).

Συγκρίνοντάς τις με τις αντίστοιχες πειραματικές, παρατηρείται πως η γενική εικόνα είναι αρκετά ικανοποιητική. Η κλίση των καμπυλών απόψυξης στο 2^ο (κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης), αλλά ειδικά στο 3^ο στάδιο (μετά το πέρας της στερεοποίησης) είναι παρόμοιες. Το πέρας της στερεοποίησης σε όλα τα σημεία, σύμφωνα με την προσομοίωση, δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα.

Αντίθετα, η προσέγγιση της έναρξης της στερεοποίησης δεν είναι καλή. Οι αριθμητικές καμπύλες απόψυξης, και των τριών διατομών, σχεδόν ταυτίζονται στην 1^η χρονική περιοχή. Σύμφωνα με την προσομοίωση, η έναρξη της στερεοποίησης για όλο το χυτό ξεκινά την ίδια χρονική στιγμή που ξεκινά η στερεοποίηση της μικρής διατομής σύμφωνα με το πείραμα.

Τα πρώτα δευτερόλεπτα, όμως, τις χύτευσης είναι ιδιαίτέρως σημαντικά. Η ταχύτητα της στερεοποίησης και η ταχύτητα της έναρξής τους έχουν σημαντική επίδραση στη μικροδομή του χυτού και άρα και στις μηχανικές του ιδιότητες.

Άρα, με τη χρήση ενιαίου ΣΜΘ δεν αποτυπώνεται ποιοτικά η διαφορά στον τρόπο έναρξης της στερεοποίησης στις 3 διατομές.

Η πειραματική καμπύλη της μικρής διατομής προσεγγίζεται αρκετά καλά. Η πειραματική καμπύλη της μεγάλης διατομής προσεγγίζεται πολύ καλά κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης και όχι πολύ καλά στο 3^ο στάδιο. Τέλος, η αριθμητική καμπύλη απόψυξης της μεσαίας διατομής απέχει πολύ από την αντίστοιχη πειραματική στο 1^ο και το 2^ο στάδιο. Η χρονική υστέρηση της απόψυξης της μεσαίας διατομής σε σχέση με τις άλλες δύο διατομές δεν αποτυπώνεται καθόλου από το αριθμητικό αποτέλεσμα. Μόνο στο 3^ο στάδιο το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό.

Συνεπώς, η θεώρηση ενός ενιαίου ΣΜΘ για όλο το χυτό δεν είναι επαρκής για να αποτυπώσει ικανοποιητικά την πραγματικότητα.

Το αριθμητικό αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό ως προς την τάξη μεγέθους του χρόνου στερεοποίησης του χυτού. Ωστόσο, δεν είναι ικανό να αποτυπώσει ποιοτικά χαρακτηριστικά που είναι σημαντικά για τη μικροδομή και την αντοχή του τελικού χυτού. Η αδυναμία προσέγγισης του διαφορετικού τρόπου έναρξης της στερεοποίησης στα διαφορετικά σημεία του χυτού είναι χαρακτηριστική.

Ο ΓΑ, παρόλα αυτά, φάνηκε ικανός να φτάσει σε ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα σε σχετικά σύντομο διάστημα. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως μετά το πέρας των επαναλήψεων του ΓΑ, διεξήχθη διερεύνηση με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος» (με βάση το τελικό «βέλτιστο» διάλυμα σχεδίασης). Παρόλα αυτά, δεν προέκυψε κάποια λύση καλύτερη από τη λύση του ΓΑ. Ως εκ τούτου, μπορεί να θεωρηθεί πως η λύση του ΓΑ δεν είναι απλά μια ‘καλή’ λύση, αλλά φαίνεται να είναι μία λύση κοντά στην περιοχή του ολικού ακρότατου.

Επιλογή παραμέτρων ΓΑ - διερεύνηση επίδρασης παραμέτρων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι διάφοροι συνδυασμοί παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου που εξετάστηκαν. Καταγράφεται η ποιότητα της λύσης και η ταχύτητα επίτευξης αυτής.

Η περίπτωση χύτευσης που εξετάστηκε είναι η χύτευση της «Γεωμετρίας 3», με ενιαίο ΣΜΘ σε όλη το χυτό. Η κωδικοποίηση των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή που δείχνει ο Πίνακας 6.7. Η κάθε μεταβλητή μπορεί να πάρει ακέραιες τιμές που να ανήκουν στο διάστημα [1,3]. Ο κάθε ακέραιος αριθμός αντιστοιχεί σε μία τιμή για την κάθε μεταβλητή. Η επιλογή των τιμών έγινε αυθαίρετα.

Πίνακας 6.7 Κωδικοποίηση μεταβλητών για τις δοκιμαστικές διερευνήσεις με 1 ΣΜΘ.

	h1	t1	h2	t2	h3
1	800	1.00	300	110.0	40
2	9600	10.00	600	140.0	400
3	25000	20.0	1300	160.0	2000

Οι επιλογές του ΓΑ που δοκιμάστηκαν ήταν:

- “Mutation rate” ή “mutrate”: {0.1, 0.4, 0.7}
- “Crossover Fraction” ή “% selection” ή “X_{rate}”: {0.2, 0.4, 0.5, 0.8}
- “Population Size” ή “npar”: {4, 8, 20}
- “Maxit” ή “maximum iterations”: {10, 100}
- “Crossover Function”: {“SP”=Single Point, “sc” = Scattered}
- “Selection Function”: {“r”=Rank, “R”=Roulette (Weighted Cost)}

Όπου “mutation rate” είναι το ποσοστό της μετάλλαξης, το “X_{rate}” καθορίζει το ποσοστό των ατόμων του πληθυσμού που θα απορριφθούν για να αφήσουν χώρο για απογόνους ή αλλιώς το ποσοστό των ατόμων του πληθυσμού που θα διατηρηθεί για να περάσει στην επόμενη γενεά, το “population size” είναι το μέγεθος του πληθυσμού και το “maxit” είναι ο μέγιστος αριθμός γενεών που αφήνεται να εξελιχθεί ο ΓΑ. Δοκιμάστηκαν, τέλος, δύο περιπτώσεις συναρτήσεων για διασταύρωση (“Crossover Function”) και δύο περιπτώσεις συναρτήσεων για φυσική επιλογή (“Selection Function”).

Στον Πίνακα 6.8 παρουσιάζεται το βέλτιστο χρωμόσωμα στο οποίο κατέληξε ο ΓΑ (“best chromosome”) και το βέλτιστο κόστος (“best cost”) που προέκυψε απ’ την κάθε περίπτωση.

Πίνακας 6.8 Διερεύνηση της επίδρασης των επιλογών του ΓΑ στην επίτευξη βέλτιστης λύσης.

ga case	Maxit	Mutate	Popsiz	Selection	Selection function	Crossover function	Best cost	Best Solution Achieved?	Generation achieved	Best chromosome
1	10	0.1	8	0.8	R	SP	133.82	x	X	3 3 1 2 3
2	10	0.4	8	0.8	R	SP	132.03	x	X	2 2 2 1 3
3	10	0.7	8	0.8	R	SP	132.03	x	X	2 2 2 1 3
4	20	0.1	8	0.8	R	SP	133.8	x	X	3 3 1 2 3
5	40	0.1	8	0.8	R	SP	133.8	x	X	3 3 1 2 3
6	100	0.1	8	0.8	R	SP	133.8	x	X	3 3 1 2 3
7	100	0.1	20	0.5	R	SP	129.96	✓	✓	2 2 3 1 2
8	100	0.1	20	0.5	R	Sc	129.96	✓	✓	2 2 3 1 2
9	100	0.1	20	0.5	R	SP	129.96	✓	✓	2 2 3 1 2
10	100	0.1	20	0.5	r	SP	129.96	✓	✓	2 2 3 1 2
11	100	0.1	20	0.5	R	Sc	129.96	✓	✓	2 2 3 1 2
12	100	0.1	20	0.5	r	Sc	129.96	✓	✓	2 2 3 1 2
13	100	0.4	20	0.5	R	Sc	129.96	✓	✓	2 2 3 1 2
14	100	0.1	10	0.5	R	Sc	129.96	✓	✓	2 2 3 1 2
15	100	0.4	100	0.8	R	Sc	129.96	✓	✓	2 2 3 1 2
16	100	0.4	100	0.8	R	Sc	129.96	✓	✓	2 2 3 1 2
17	100	0.1	4	0.8	r	SP	129.96	✓	✓	2 2 3 1 2
18	100	0.1	4	0.4	r	Sc	133.83	✓	✓	2 2 3 1 2
19	100	0.4	4	0.4	R	SP	129.96	✓	✓	2 3 3 1 2
20	100	0.4	4	0.4	R	sc	134.32	x	x	2 3 3 1 2
21	100	0.1	4	0.2	r	sc	134.32	x	x	2 3 3 1 2

6.6.5.2 Ενιαίος ΣΜΘ - Με Κριτήριο την Πειραματική Μέτρηση στη Μεγάλη Διατομή

Στην § 6.6.5.1 η μοντελοποίηση είχε γίνει θεωρώντας ενιαίο ΣΜΘ σε ολόκληρο το χυτό και το κριτήριο βελτιστοποίησης για την εύρεση του βέλτιστου ΣΜΘ ήταν η ταυτόχρονη προσέγγιση των πειραματικών καμπυλών από τρία σημεία του χυτού. Το αποτέλεσμα ήταν πως δεν είναι δυνατόν να προσεγγιστούν ταυτόχρονα και οι τρεις πειραματικές καμπύλες με χρήση ενιαίου ΣΜΘ. Πρόκειται, παρόλα αυτά, για ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η περίπτωση μοντελοποίησης επίσης με ενιαίο ΣΜΘ, αλλά αυτή τη φορά ως κριτήριο βελτιστοποίησης τίθεται η βέλτιστη προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης που αντιστοιχεί σε ένα μόνο σημείο του χυτού.

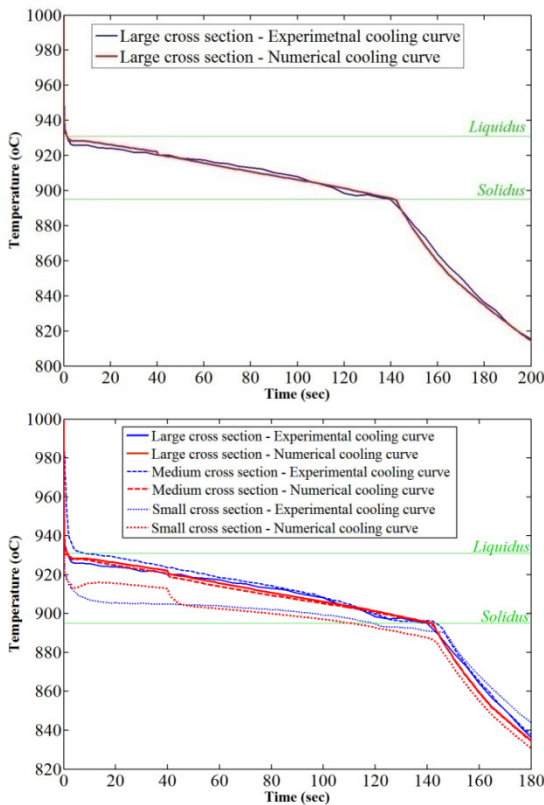
Στόχος της διερεύνησης είναι να φανεί εάν είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί ένας ενιαίος ΣΜΘ που θα εξασφαλίζει ‘καλά’ αποτελέσματα, με προαπαιτούμενο τον ελάχιστο δυνατό αριθμό πειραματικών καμπυλών, δηλαδή μίας. Εάν μπορεί να γίνει αυτή η απλοποιητική παραδοχή, τότε ποιο είναι το αντιπροσωπευτικότερο σημείο στο χυτό για λήψη μέτρησης;

Στην παρούσα παράγραφο (§6.6.5.2) εξετάζεται η περίπτωση της χρήσης της μέτρησης στη διεπιφάνεια της μεγάλης περιοχής του χυτού. Στις επόμενες παραγράφους (§6.6.5.3 και §6.6.5.4) εξετάζονται οι περιπτώσεις χρήσης καμπυλών από τη διεπιφάνεια της μεσαίας και της μικρής διατομής αντίστοιχα.

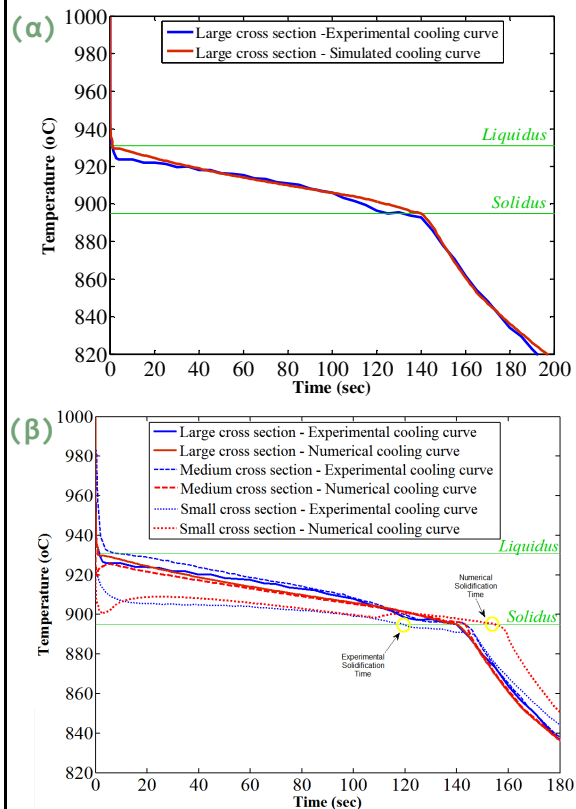
Εκτελέστηκε ΓΑ για την περίπτωση αυτή και το βέλτιστο αποτέλεσμα είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 6.22. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.22(α) ο ΓΑ καταλήγει σε μία πάρα εξαιρετικά καλή προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης, με τιμή αντικειμενικής συνάρτησης $fval_{large}=0.9$. Στο Σχήμα 6.22(β), όμως, φαίνεται πως δεν επιτυγχάνεται καλή προσέγγιση των υπολοίπων δύο πειραματικών καμπυλών. Παρατηρούνται έντονες ασυνέχειες της θερμοκρασίας οι οποίες στερούνται φυσικής έννοιας. Παρόλα αυτά, οι χρόνοι στερεοποίησης προσεγγίζονται αρκετά καλά.

$x = [9200 \ 3 \ 240 \ 40 \ 6000]$
 $fval_large = 0.9 / (fval = 323)$

$x = [9200 \ 3 \ 380 \ 12290]$
 $fval_large = 7.9$



Σχήμα 6.22 Η προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης σε σημείο της μεγάλης διατομής του χυτού, θεωρώντας μοντελοποίηση με ενιαίο ΣΜΘ σε όλο το χυτό,
 (α) Απεικονίζονται οι καμπύλες που αντιστοιχούν στη Μεγάλη διατομή του χυτού,
 (β) Απεικονίζονται οι καμπύλες που αντιστοιχούν και στις τρεις περιοχές του χυτού.



Σχήμα 6.23 Η προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης σε σημείο της μεγάλης διατομής του χυτού, θεωρώντας μοντελοποίηση με ενιαίο ΣΜΘ σε όλο το χυτό, με περιορισμένο πεδίο ορισμού της h_3
 (α) Απεικονίζονται οι καμπύλες που αντιστοιχούν στη Μεγάλη διατομή του χυτού,
 (β) Απεικονίζονται οι καμπύλες που αντιστοιχούν και στις τρεις περιοχές του χυτού.

Ο βέλτιστος ΣΜΘ, με χρήση του οποίου προέκυψαν οι καμπύλες του σχήματος, λαμβάνει μία πολύ υψηλή τιμή ($6000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) κατά το 3^ο στάδιο του ΣΜΘ. Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση (§1.9.6) φάνηκε πως υπάρχει μεν περίπτωση το 3^ο στάδιο να λαμβάνει τόσο υψηλές τιμές, αρκεί να δικαιολογείται από τις τοπικά αναπτυσσόμενες πιέσεις, λόγω των συνθηκών χύτευσης. Δεδομένου ότι η συγκεκριμένη χύτευση δεν είναι υψηλής πίεσης και πως τα σημεία ενδιαφέροντος αναφέρονται στις πλευρικές επιφάνειες του χυτού, η τιμή των $6000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ κρίνεται υψηλή.

Για το λόγο αυτό εκτελέστηκε μία δεύτερη διαδικασία βέλτιστου προσδιορισμού του ΣΜΘ. Αυτή τη φορά, το πεδίο ορισμού της μεταβλητής σχεδίασης h_3 που αφορά στο 3^ο στάδιο της χύτευσης περιορίστηκε, ώστε να αποκλειστούν τιμές ‘μη-αποδεκτές’. Το βέλτιστο αποτέλεσμα είναι αυτό που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.23.

Στο Σχήμα 6.23(α) φαίνεται πως η προσέγγιση της καμπύλης της μεγάλης περιοχής είναι πολύ καλή. Η τιμή της βέλτιστης αντικειμενικής συνάρτησης είναι $f_{val_large}=7.9$ (έναντι του προηγούμενου 0.9). Η καμπύλη που αντιστοιχεί στη μικρή περιοχή του χυτού είναι αυτή που αποκλίνει περισσότερο, παρουσιάζει, όμως, μεγαλύτερη ομαλότητα στο 1^ο στάδιο από ό,τι στο Σχήμα 6.22(β). Στο 3^ο στάδιο, όμως, η έντονη ασυνέχεια που παρουσιάζεται καθιστά το χρόνο στερεοποίησης πολύ μεγαλύτερος από ό,τι στο πείραμα και αλλοιώνει τη συνολική ποιοτική εικόνα. Με άλλα λόγια, ενώ στο πείραμα στερεοποιείται πρώτα η επιφάνεια της μικρής περιοχής, έπειτα η επιφάνεια της μεγάλης και τέλος της μεσαίας περιοχής, σύμφωνα με τη συγκεκριμένη προσομοίωση στερεοποιείται πρώτα η μεγάλη, μετά η μεσαία και τελευταία η μικρή περιοχή. Αυτό το αποτέλεσμα κρίνεται ιδιαιτέρως ανεπαρκές.

6.6.5.3 Ενιαίος ΣΜΘ - Με Κριτήριο την Πειραματική Μέτρηση στη Μεσαία Διατομή

Αντίστοιχα με την § 6.6.5.2 η μοντελοποίηση στην παράγραφο αυτή έγινε θεωρώντας ενιαίο ΣΜΘ σε ολόκληρο το χυτό και το κριτήριο βελτιστοποίησης για την εύρεση του βέλτιστου ΣΜΘ ήταν η βέλτιστη προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης που αντιστοιχεί στη μεσαία περιοχή του χυτού. Η διερεύνηση γίνεται για να φανεί εάν αυτή η απλούστευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποκαταστήσει ικανοποιητικά μία πιο ρεαλιστική αλλά περίπλοκη μοντελοποίηση.

Ο βέλτιστος ΣΜΘ από το ΓΑ είναι αυτός που φαίνεται στο Σχήμα 6.24. Είναι ένας συντελεστής με σχετικά όχι πολύ υψηλή τιμή στο 1^ο στάδιο, αλλά αρκετά υψηλή τιμή στο 3^ο στάδιο. Η βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης ήταν 59, αρκετά μεγαλύτερη από ό,τι στις προηγούμενες περιπτώσεις. Ενώ στο χρονικό διάστημα 0-100sec επιτυγχάνεται ταύτιση των καμπυλών (Σχήμα 6.24(α)), μετά οι δύο καμπύλες απομακρύνονται και σχεδόν ισαπέχουν κατά το 3^ο στάδιο της απόψυξης. Αυτό, βέβαια, σημαίνει

πως επιτυγχάνεται αριθμητική καμπύλη με ίδιο ρυθμό απόψυξης σε σχέση με την πειραματική. Ο χρόνος στερεοποίησης, όμως, διαφέρει. Επιπλέον, παρατηρώντας το Σχήμα 6.24(β), ο συνολικός χρόνος στερεοποίησης φαίνεται μεγαλύτερος από ό,τι στο πείραμα. Επιπλέον, παρατηρείται και πάλι ασυνεχής συμπεριφορά της καμπύλης της μικρής περιοχής. Αυτή τη φορά, μάλιστα, η συγκεκριμένη καμπύλη δεν ακολουθεί καθόλου την πορεία της πειραματικής κατά τα πρώτα 40sec.

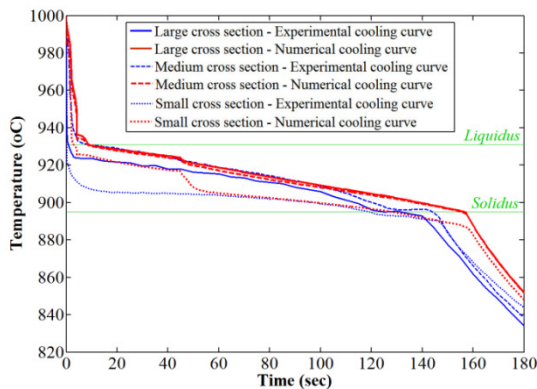
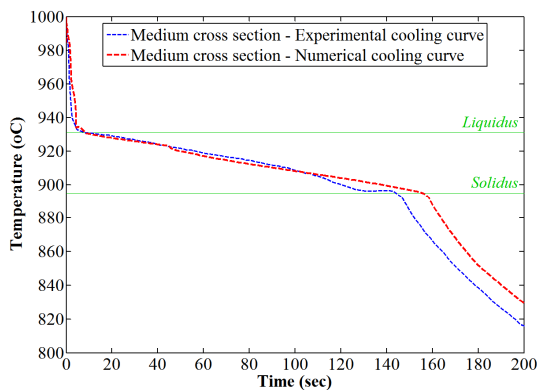
Πέραν αυτών, η τιμή $2000W/m^2K$ είναι αρκετά υψηλή σε σχέση με τα $580W/m^2K$ και για το λόγο αυτό δοκιμάστηκε και μία 2^η βελτιστοποίηση με ΓΑ. Τα αποτελέσματα της 2^{ης} βελτιστοποίησης φαίνονται στο Σχήμα 6.25 και προέκυψαν με περιορισμό του πεδίου ορισμού της μεταβλητής h_3 σε τιμές κάτω από $1000W/m^2K$.

$$x = [580 \ 4.24 \ 145 \ 45 \ 2000]$$

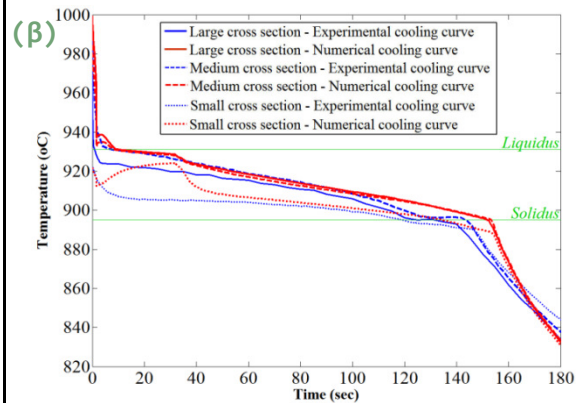
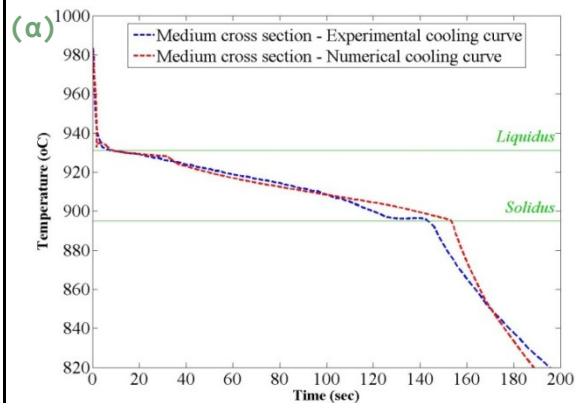
$$fval_medium = 59 / (fval = 875)$$

$$x = [1120 \ 1.7 \ 30 \ 32 \ 722]$$

$$fval_medium = 6$$



Σχήμα 6.24 Η προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης σε σημείο της μεγάλης διατομής του χυτού, θεωρώντας μοντελοποίηση ενιαίου ΣΜΘ σε όλο το χυτό, (α) Απεικονίζονται οι καμπύλες που αντιστοιχούν στη μεσαία διατομή του χυτού, (β) Απεικονίζονται οι καμπύλες που αντιστοιχούν και στις τρεις περιοχές του χυτού.



Σχήμα 6.25 Η προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης σε σημείο της μεσαίας διατομής του χυτού, θεωρώντας μοντελοποίηση με ενιαίο ΣΜΘ σε όλο το χυτό, με περιορισμένο πεδίο ορισμού της h_3 (α) Απεικονίζονται οι καμπύλες που αντιστοιχούν στη μεσαία διατομή του χυτού, (β) Απεικονίζονται οι καμπύλες που αντιστοιχούν και στις τρεις περιοχές του χυτού.

Ο 2^{ος} ΓΑ καταλήγει στα αποτελέσματα που δείχνει το Σχήμα 6.25. Ο ΣΜΘ έχει μία μορφή περισσότερο αναμενόμενη, με την τιμή του στο 1^ο στάδιο να

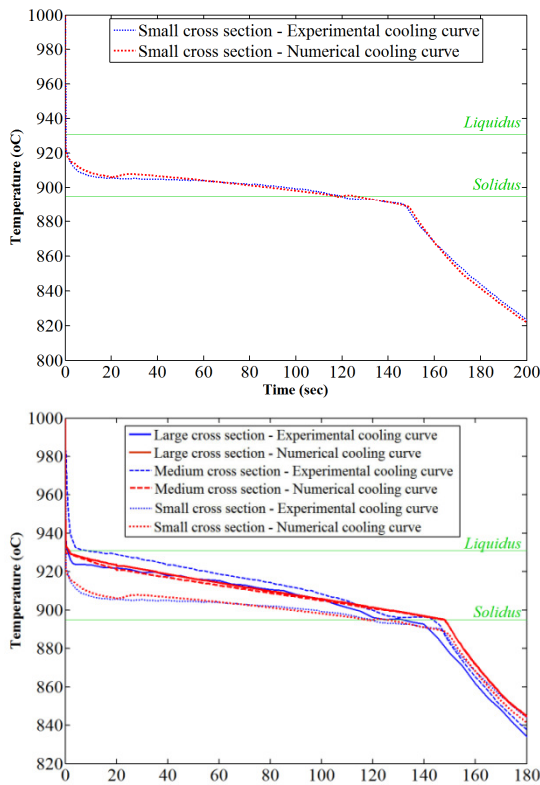
είναι υψηλότερη, μετά πολύ χαμηλή και μετά αυξημένη (αλλά χαμηλότερη από την τιμή του 1^{ου} σταδίου). Η προσέγγιση των καμπυλών καλύτερη. Χάνεται η παραλληλότητα του 3^{ου} σταδίου, που υποδήλωνε ίδιο ρυθμό απόψυξης, ο χρόνος στερεοποίησης, όμως, προσεγγίζεται καλύτερα. Τέλος, παρατηρείται ασυνέχεια των καμπυλών που δεν συμμετέχουν στην αντικειμενική συνάρτηση, με την καμπύλη της μικρής περιοχής να παρουσιάζει και πάλι ιδιαιτέρως έντονη ασυνέχεια.

6.6.5.4 Ενιαίος ΣΜΘ - Με Κριτήριο την Πειραματική Μέτρηση στη Μικρή Διατομή

Τέλος, στην § 6.6.5.4 η μοντελοποίηση έγινε θεωρώντας ενιαίο ΣΜΘ σε ολόκληρο το χυτό με κριτήριο βελτιστοποίησης τη βέλτιστη προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης που αντιστοιχεί στη μικρή περιοχή του χυτού. Η επιφάνεια της μικρής περιοχής του χυτού είναι αυτή που στερεοποιείται ταχύτερα. Όχι μόνο έχει μικρότερο χρόνο στερεοποίησης, αλλά τα πρώτα msec παρουσιάζει μία εντονότατη θερμοκρασιακή πτώση που οδηγεί σε ταχεία έναρξη της στερεοποίησης.

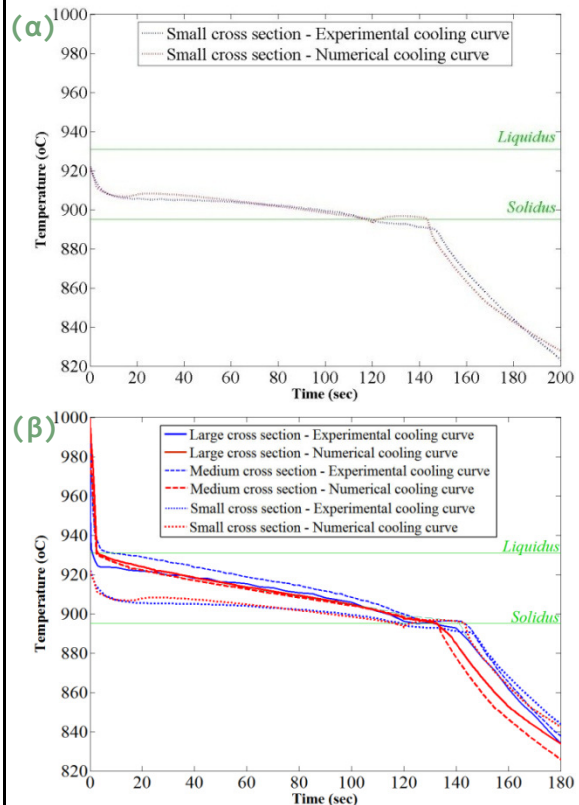
$x = [9200 \ 20 \ 980 \ 118480]$
 $fval_small = 2. / (fval = 461)$

$x = [12000 \ 15 \ 600 \ 120 \ 300]$
 $fval_small = 4$



Σχήμα 6.26 Η προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης σε σημείο της μεγάλης διατομής του χυτού, θεωρώντας μοντελοποίηση με ενιαίο ΣΜΘ σε όλο το χυτό,

(α) Απεικονίζονται οι καμπύλες που αντιστοιχούν στη μικρή διατομή του χυτού,
 (β) Απεικονίζονται οι καμπύλες που αντιστοιχούν και στις τρεις περιοχές.



Σχήμα 6.27 Η προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης σε σημείο της μεγάλης διατομής του χυτού, θεωρώντας μοντελοποίηση με ενιαίο ΣΜΘ σε όλο το χυτό, με ευρύτερο πεδίο ορισμού της h_1

(α) Απεικονίζονται οι καμπύλες που αντιστοιχούν στη μικρή διατομή του χυτού,
 (β) Απεικονίζονται οι καμπύλες που αντιστοιχούν και στις τρεις περιοχές.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.26, η πειραματική καμπύλη απόψυξης προσεγγίζεται πάρα πολύ ικανοποιητικά, με χρήση ενός ΣΜΘ με τιμή αποδεκτές. Παρατηρείται πως ο βέλτιστος ΣΜΘ έχει υψηλότερη τιμή για το 1^ο στάδιο, χαμηλότερη στη 2^η περιοχή και ακόμα χαμηλότερη στην 3^η. Αυτό συνήθως υποδεικνύει πολύ καλή επαφή χυτού-καλουπιού κατά το στάδιο της στερεοποίησης και μειωμένη πίεση επαφής κατά το 3^ο στάδιο της απόψυξης.

Πραγματοποιήθηκε μία 2^η βελτιστοποίηση με ΓΑ, αυτή τη φορά με ευρύτερο πεδίο ορισμού για την 1^η μεταβλητή σχεδίασης. Ήταν επιθυμητό να ελέγχει εάν αυξάνοντας την τιμή της h_1 υπήρχε περίπτωση να προκύψει ΣΜΘ με το 2^ο στάδιο να έχει τιμή μικρότερη από ό,τι στο 3^ο. Το βέλτιστο αποτέλεσμα (Σχήμα 6.27) παρουσιάζει μειωμένη τιμή στο 2^ο στάδιο (600 αντί για 930W/m²K), αλλά και πάλι η τιμή στο 3^ο στάδιο είναι μικρότερη.

Η προσέγγιση των καμπυλών είναι επίσης καλή, αλλά δεν παρατηρείται η απόλυτη ταύτιση της προηγούμενης περίπτωσης.

Τέλος, μία γενική παρατήρηση που μπορεί να γίνει αναφορικά με τις καμπύλες απόψυξης στη διεπιφάνεια της μεσαίας και της μεγάλης περιοχής, είναι πως οι χρόνοι στερεοποίησης προσεγγίζονται αρκετά ικανοποιητικά. Παρόλα αυτά, ποιοτικά οι αριθμητικές καμπύλες δεν μπορούν να ακολουθήσουν τις πειραματικές. Πιο συγκεκριμένα, από το πείραμα προκύπτει πως υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ τους κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα, με το ρυθμό απόψυξης στην επιφάνεια της μεσαίας περιοχής να είναι πολύ αργός. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι δύο καμπύλες να είναι σε απόσταση μέχρι το 100^οsec, οπότε και τέμνονται. Αυτή η συμπεριφορά δεν αποτυπώνεται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Αυτό, στο συγκεκριμένο παράδειγμα μπορεί πρακτικά να έχει πολύ μικρή σημασία. Λόγω των μικρών διαστάσεων του χυτού, οι διαφορές στους χρόνους στερεοποίησης των τριών περιοχών είναι μικρές. Εάν, όμως, μία διαδικασία βελτιστοποίησης δεν μπορεί να αποτυπώσει τα βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά της απόψυξης του χυτού, τότε σε ένα μεγαλύτερο χυτό, που οι διαφορές από περιοχή σε περιοχή θα είναι μεγαλύτερες, δεν πρόκειται να είναι αποδοτική.

6.6.5.5 Συμπεράσματα

Στις παραγράφους που προηγήθηκαν διερευνήθηκε η επάρκεια μίας μοντελοποίησης της χύτευσης με χρήση ενιαίου ΣΜΘ σε όλη τη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού. Για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ χρησιμοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις και μία διαδικασία βελτιστοποίησης με ΓΑ. Ο ΓΑ χρησιμοποιούσε ακέραιες μεταβλητές (integers). Η μορφή του ΣΜΘ θεωρήθηκε βηματική συνάρτηση του χρόνου.

Το βασικό συμπέρασμα είναι πως η χρήση ενιαίου ΣΜΘ σε ολόκληρο το χυτό δεν επαρκεί για να μοντελοποιηθεί ρεαλιστικά η χύτευση. Σε ένα μικρών

διαστάσεων χυτού, όπως αυτό που μελετήθηκε, οι χρόνοι στερεοποίησης προσεγγίζονται ικανοποιητικά. Το γεγονός, όμως, ότι δεν αναπαράγονται, με την αριθμητική προσομοίωση, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της απόψυξης στις περιοχές του χυτού με διαφορετικό casting modulus, δεν αφήνει περιθώρια να θεωρηθεί η συγκεκριμένη προσέγγιση επαρκής.

Στην περίπτωση χρήσης ΣΜΘ, που προσδιορίζεται με κριτήριο βελτιστοποίησης την ταυτόχρονη προσέγγιση και των τριών πειραματικών καμπυλών απόψυξης, το αποτέλεσμα είναι το καλύτερο από ό,τι εάν χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο η βέλτιστη προσέγγιση μίας μόνο πειραματικής καμπύλης.

Προκύπτει το ερώτημα: η χρήση τριών διαφορετικών ΣΜΘ -ενός σε κάθε περιοχή του χυτού με διαφορετικό casting modulus- είναι επαρκής για την επίτευξη μίας βέλτιστης προσέγγισης του φυσικού φαινομένου; Με άλλα λόγια, είναι δυνατό να προσεγγιστούν ταυτόχρονα και οι τρεις πειραματικές καμπύλες απόψυξης με χρήση τριών διαφορετικών ΣΜΘ;

Απάντηση στο ερώτημα αυτό επιχειρεί να δώσει η ενότητα που ακολουθεί.

6.6.6 Θεώρηση ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΜΘ στις 3 περιοχές του χυτού: Αποτέλεσμα ΓΑ (με Integers) και ΣΜΘ=βηματική συνάρτηση της θερμοκρασίας

Στις παραγράφους που προηγήθηκε παρουσιάστηκαν πραγματοποιήθηκε εκτενής διερεύνηση με βάση τη θεώρηση ότι ο ΣΜΘ είναι ο ίδιος σε ολόκληρο το χυτό. Όπως φάνηκε, η προσέγγιση αυτή ανάλογα με τη γεωμετρία και τις συνθήκες της χύτευσης, μπορεί να καταλήξει σε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, όμως σε καμία περίπτωση δεν επιτυγχάνεται απόλυτα ρεαλιστική αποτύπωση.

Για το λόγο αυτό, εξετάζεται η περίπτωση απόδοσης διαφορετικής τιμής ΣΜΘ σε διαφορετικές περιοχές της γεωμετρίας του χυτού.

Ο διαχωρισμός του χυτού σε τρεις περιοχές (και όχι λόγω χάρη σε 6, σε 2 ή σε 1) οφείλεται (α) στο γεγονός ότι υπάρχουν τρεις περιοχές με αρκετά «διαφορετικά» casting modulus, μας ενδιέφερε να μελετηθούν και (β) στο γεγονός ότι για αυτές τις περιοχές ενδιαφέροντος υπήρχαν διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές αφενός μεν επιβεβαίωσαν τη διαφορετική συμπεριφορά ανά διατομή, αφετέρου δε ήταν «εργαλείο» προς μελέτη.

Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα των ΓΑ, οι ΣΜΘ που προέκυψαν για κάθε μια από τις διατομές ήταν σημαντικά διαφορετικοί μεταξύ τους. Η χρήση τους οδήγησε σε πολύ ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών καμπυλών απόψυξης.

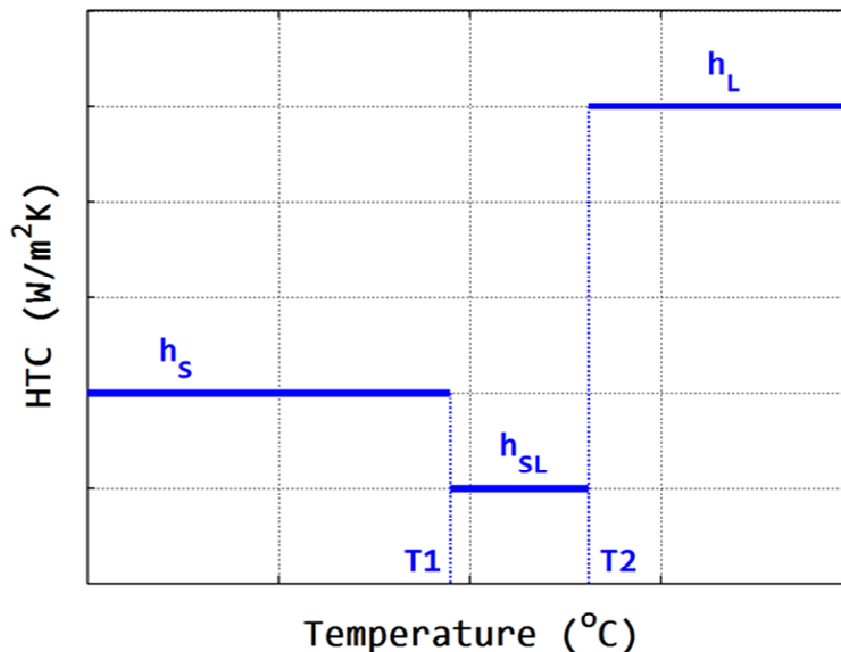
6.6.6.1 Η μορφή του ΣΜΘ και το Χρωμόσωμα

Για τη συγκεκριμένη διερεύνηση ο ΣΜΘ έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.28. Υπάρχουν πέντε παράμετροι που τον ορίζουν: τρεις τιμές του συντελεστή (h_S , h_{SL} , h_L) και δύο θερμοκρασίες μεταβολής του (T_1 , T_2), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.28.

Ο συμβολισμός h_S χρησιμοποιείται για την τιμή που λαμβάνει ο ΣΜΘ σε θερμοκρασίες μικρότερες από τη Solidus, το h_{SL} υποδηλώνει την τιμή του ΣΜΘ σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τη Solidus και μικρότερες από τη Liquidus και το h_L είναι η τιμή του ΣΜΘ σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τη Liquidus.

Τρεις είναι οι ΣΜΘ που είναι επιθυμητό να προσδιορισθούν (ένας για κάθε περιοχή του χυτού) και άρα, δεκαπέντε (δηλ. 3x5) θα είναι οι διαφορετικές παράμετροι που αποτελούν το διάνυσμα σχεδίασης:

$$x = [h_{Sregion1} \ h_{SLregion1} \ h_{Lregion1} \ h_{Sregion2} \ h_{SLregion2} \ h_{Lregion2} \ h_{Sregion3} \ h_{SLregion3} \ h_{Lregion3}] \quad (1 \times 9)$$



Σχήμα 6.28 Ποιοτική απεικόνιση τα μορφές του ΣΜΘ συναρτήσει της θερμοκρασίας. Διακρίνεται σε 3 περιοχές και μεταβάλλεται βηματικά.

Συγκεκριμένα, η τιμή της μεταβλητής h_L για την κάθε περιοχή του χυτού (δηλ. η τιμή των $h_{L\text{region}1}$, $h_{L\text{region}2}$, $h_{L\text{region}3}$) είναι επιθυμητό να κυμαίνεται από τα $200\text{W/m}^2\text{K}$ μέχρι τα $30000\text{W/m}^2\text{K}$. Αυτή η τιμή του ΣΜΘ, η h_L , αντιστοιχεί στη χρονική διάρκεια κατά την οποία ο μέταλλο βρίσκεται στη μορφή τήγματος. Επειδή το μέταλλο βρίσκεται σε υγρή μορφή, η πρόσφυση στα τοιχώματα του καλουπιού είναι πολύ καλή, η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο επιφανειών αρκετά μεγάλη και ως εκ τούτου, αναμένεται ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας να λαμβάνει υψηλή τιμή σε αυτά τα λίγα πρώτα δευτερόλεπτα της χύτευσης.

Η τιμή του ΣΜΘ στη θερμοκρασιακή περιοχή μεταξύ των θερμοκρασιών $T1$ και $T2$, συμβολίζεται ως h_{SL} . Αντιστοιχεί στο διάστημα κατά το οποίο λαμβάνει χώρα η στερεοποίηση του μετάλλου. Λόγω της συστολής του μετάλλου δημιουργείται χάσμα ανάμεσα στις δύο επιφάνειες (§1.9.4, σελ.66-68) και δυσχεραίνεται η μετάδοση θερμότητας από το χυτό στο καλούπι. Για το λόγο αυτό, αναμένεται χαμηλή τιμή για τον ΣΜΘ. Στην προκειμένη περίπτωση, εκτιμάται πως η τιμή του ΣΜΘ(δηλαδή η τιμή των $h_{SL\text{region}1}$, $h_{SL\text{region}2}$, $h_{SL\text{region}3}$) στις θερμοκρασίες αυτές αναμένεται να λαμβάνει τιμές από $10\text{W/m}^2\text{K}$ μέχρι $1500\text{W/m}^2\text{K}$.

Τέλος, τη τιμή h_s του ΣΜΘ αντιστοιχεί στο πέρας της στερεοποίησης και αποτυπώνει την απαγωγή θερμότητας από το (τουλάχιστον επιφανειακά) στερεοποιημένο μέταλλο, προς το καλούπι. Η επιφάνεια έχει μία τραχύτητα η οποία, σε γενικές γραμμές, αποτρέπει την καλή πρόσφυση των δύο

επιφανειών. Υπάρχουν όμως και κάποιες-ενδεχομένως αρκετές- περιοχές καλής επαφής των δύο επιφανειών, από τις οποίες απάγεται έντονα θερμότητα. Σε περίπτωση που η πίεση επαφής είναι μεγάλη, ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας θα έχει σχετικά αυξημένη τιμή. Αντιθέτως, σε περίπτωση που η πίεση επαφής είναι μικρή, η μετάδοση θερμότητας θα είναι μειωμένη. Η πίεση επαφής εξαρτάται από τη γεωμετρία του χυτού (κάποιες περιοχές δέχονται μεγαλύτερη πίεση λόγω του προσανατολισμού τους στο δέντρο χύτευσης ως προς το διάνυσμα της βαρύτητας, κάποιες περιοχές δέχονται πίεση λόγω της περίπλοκης γεωμετρίας/γεωμετρικής διαμόρφωσης, ανεξαρτήτως προσανατολισμού) και από τις συνθήκες του πειράματος (πχ χύτευση εν κενώ, χύτευση υπό πίεση, φυγοκεντρική χύτευση). Συνεπώς, ο ΣΜΘ κάτω από τη Solidus(δηλ. ο h_S) αναμένεται να είναι είτε αυξημένος σε σχέση με την h_{SL} , είτε μικρότερος είτε περίπου ίδιος. Με βάση αυτά, δικαιολογείται η επιλογή των ορίων για την τιμή των μεταβλητών $h_{Sregion1}$, $h_{Sregion2}$, $h_{Sregion3}$ μεταξύ των $20W/m^2K$ και των $3000W/m^2K$.

6.6.6.2 Κωδικοποίηση Μεταβλητών

Για το ΓΑ της διερεύνησης αυτής χρησιμοποιήθηκαν ακέραιες μεταβλητές (integers), με στόχο επιτευχθεί ταχεία αναζήτηση ενός μεγάλου εύρους πεδίου ορισμού.

Χρησιμοποιήθηκε η κωδικοποίηση των μεταβλητών σχεδίασης που παρουσιάζει ο Πίνακας 6.9. Όλες οι μεταβλητές σχεδίασης έχουν τη δυνατότητα να λάβουν ως τιμή κάποιο ακέραιο αριθμό από 1 έως 150. Ο κάθε ακέραιος αντιστοιχεί σε μία πραγματική τιμή της σύμφωνα με την κωδικοποίηση του πίνακα.

Πίνακας 6.9 Κωδικοποίηση μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε στο ΓΑ για τη «Γεωμετρία 3», με $3ΣΜΘ$ και $ΣΜΘ=f_{step}(T)$.

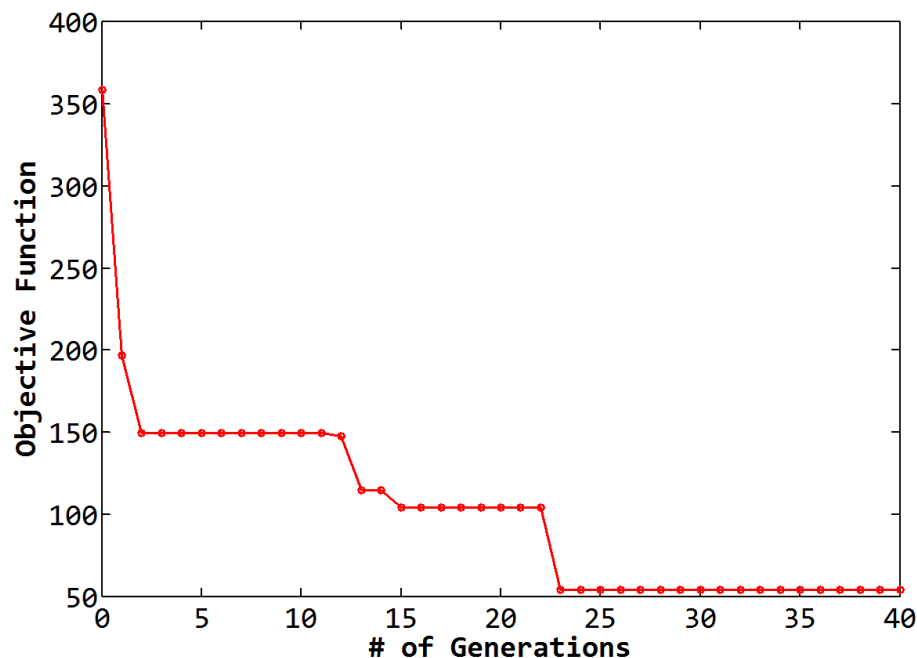
h_S	h_{SL}	h_L
$h_{Sregion1}, h_{Sregion2}, h_{Sregion3}$	$h_{SLregion1}, h_{SLregion2}, h_{SLregion3}$	$h_{Lregion1}, h_{Lregion2}, h_{Lregion3}$
1 = 20	1 = 10	1 = 200
2 = 40	2 = 20	2 = 400
⋮	⋮	⋮
i = i*20	i = i*10	i = i*200
⋮	⋮	⋮
150 = 3000	150 = 150	150 = 3000

6.6.6.3 Χαρακτηριστικά Γενετικού Αλγορίθμου

Για το συγκεκριμένο γενετικό αλγόριθμο, το μέγεθος του πληθυσμού ήταν 200 άτομα και ο αριθμός των γενεών ήταν 40. Ο αρχικός πληθυσμός δημιουργήθηκε με τυχαία επιλογή ακεραίων αριθμών, που ανήκουν στο διάστημα [1, 150]. Τα άτομα ελιτισμού, δηλ. τα καλύτερα άτομα της κάθε γενεάς που προχωρούσαν στις επόμενες γενεές ήταν 1. Το ποσοστό διασταύρωσης ήταν 50% και η συνάρτηση διασταύρωσης που ήταν το single-point crossover, με τυχαία επιλογή του σημείου διασταύρωσης. Η αξιολόγηση του κόστους γίνεται με βάση την κατάταξη με αύξουσα σειρά. Η επιλογή των ατόμων για διασταύρωση γίνεται με τη συνάρτηση roulette. Το ποσοστό μετάλλαξης είναι 0.4.

6.6.6.4 Πορεία / Εξέλιξη του Γενετικού Αλγορίθμου

Στο Σχήμα 6.29 απεικονίζεται η πορεία του ΓΑ. Η βέλτιστη λύση ($f_{val}=52.97$) επιτυγχάνεται μετά την 23^η γενεά.



Σχήμα 6.29 Η εξέλιξη του ΓΑ για τη «Γεωμετρία 3», με 3ΣΜΘ και ΣΜΘ= $f_{step}(T)$.

6.6.6.5 Αποτέλεσμα του Γενετικού Αλγορίθμου – Βέλτιστη Λύση

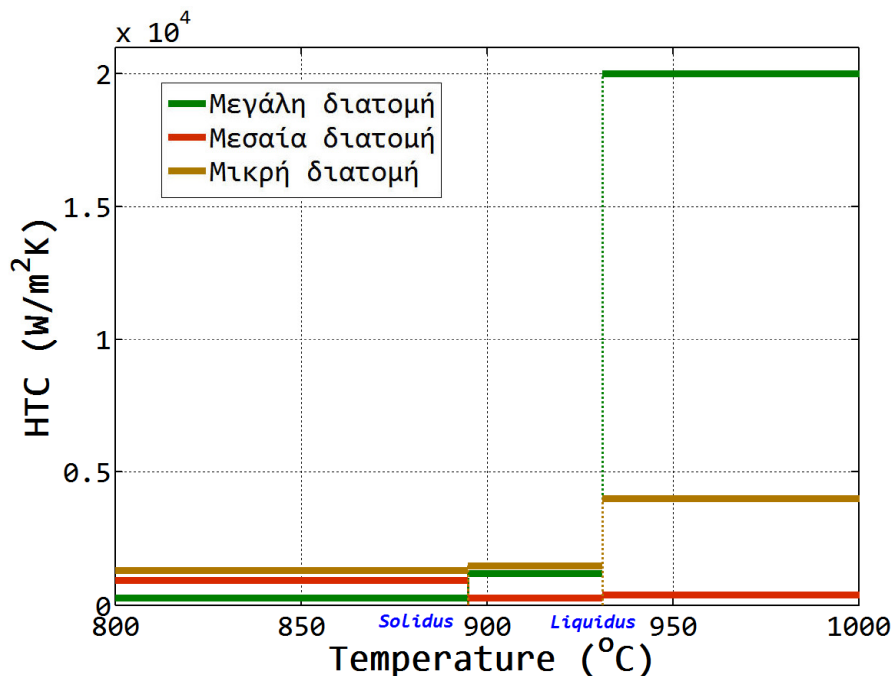
Το βέλτιστο διάνυσμα σχεδίασης από το ΓΑ είναι το ακόλουθο:

$$\mathbf{x}_{best} = [20000 \ 1200 \ 260 \ 400 \ 270940 \ 4000 \ 1490 \ 1300]$$

Η σχηματική αναπαράσταση του βέλτιστου ΣΜΘ φαίνεται στο Σχήμα 6.30. Η μεγαλύτερη τιμή του ΣΜΘ εμφανίζεται για τη μεγάλη περιοχή του χυτού, για θερμοκρασίες πάνω από τη Liquidus. Ο ΣΜΘ της μεγάλης περιοχής του χυτού εμφανίζει υψηλή τιμή όσο το μέταλλο βρίσκεται υπό τη μορφή τήγματος, μία τιμή πολύ μειωμένη, αλλά αρκετά υψηλή, όσο διαρκεί η

στερεοποίηση και καταλήξει να έχει μία αρκετά μειωμένη τιμή. Η τιμή των $260\text{W/m}^2/\text{K}$ υποδηλώνει δημιουργία κενού μεταξύ χυτού-καλούπι.

Ο βέλτιστος ΣΜΘ που αντιστοιχεί στη διεπιφάνεια της μεσαίας περιοχής του χυτού με το καλούπι παρουσιάζει την τιμή των $400\text{W/m}^2/\text{K}$ για το 1^ο στάδιο της απόψυξης, η οποία πέφτει στα $270\text{W/m}^2/\text{K}$ κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης. Η τιμή του ΣΜΘ αυξάνεται αρκετά μετά το πέρας της στερεοποίησης. Η μορφή αυτή του ΣΜΘ φαίνεται λογική, δεδομένης της μορφής της πειραματικής καμπύλης απόψυξης. Η πειραματική καμπύλη απόψυξης στο συγκεκριμένο σημείο της μεσαίας περιοχής παρουσιάζει μία αργοπορημένη θερμοκρασιακή πτώση κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα της στερεοποίησης, αλλά στο τέλος καταλήγει να έχει χρόνο στερεοποίησης πολύ κοντινό με αυτόν των άλλων δύο περιοχών. Αυτό σημαίνει πως συμβαίνει μία έντονη απαγωγή θερμότητας προς το καλούπι, αλλά σε μεταγενέστερο χρόνο και όχι κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα.



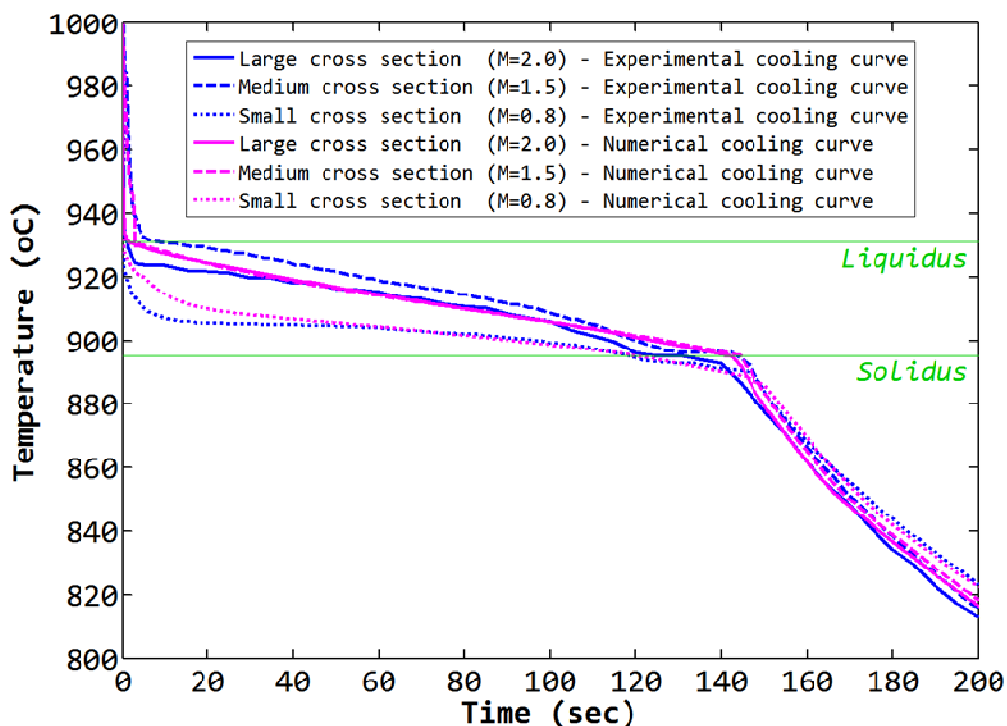
Σχήμα 6.30 Ο βέλτιστος ΣΜΘ όπως προέκυψε από το ΓΑ για τη «Γεωμετρία 3», με 3ΣΜΘ και $\Sigma\text{ΜΘ} = f_{\text{step}}(T)$.

Τέλος, η μορφή του ΣΜΘ για τη μικρή περιοχή του χυτού είναι: υψηλή τιμή ΣΜΘ σε υψηλές θερμοκρασίες, μείωση κατά τη στερεοποίηση και μικρή μείωση μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης. Σαν γενική εικόνα φαίνεται πως υπάρχει έντονη απαγωγή θερμότητας από τη μικρή περιοχή του χυτού προς το καλούπι καθόλη τη διάρκεια της απόψυξης.

Χρησιμοποιώντας στην προσομοίωση της χύτευσης το βέλτιστο ΣΜΘ που προέκυψε από το γενετικό αλγόριθμο, θα προκύψουν οι καμπύλες απόψυξης που απεικονίζονται στο Σχήμα 6.31.

Αυτές οι καμπύλες απόψυξης αντιστοιχούν σε κόμβους που βρίσκονται στην περιοχή του χυτού που ήταν τοποθετημένα τα θερμοστοιχεία κατά το πείραμα.

Η τυπική απόκλιση του σφάλματος προσέγγισης των δύο καμπυλών, δηλ. η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, είναι $f_{val} = 52.972838$.



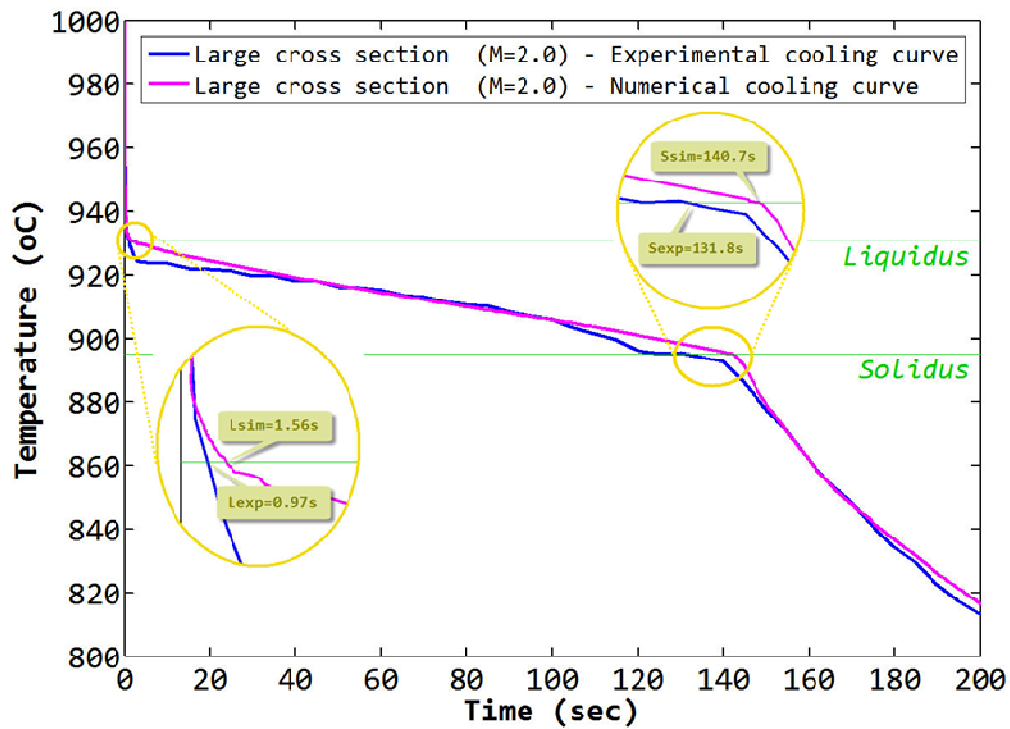
Σχήμα 6.31 Υπέρθυση των τριών πειραματικών καμπυλών απόψυξης με τις αντίστοιχες αριθμητικές, που προκύπτουν για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσεϊ της θερμοκρασίας.

Παρατηρείται ικανοποιητική προσέγγιση των αριθμητικών με τις πειραματικές καμπύλες. Ποιοτικά, η μορφή των αριθμητικών καμπυλών είναι ίδια με τη μορφή των πειραματικών, στην πρώτη και στη δεύτερη χρονική περίοδο, δηλαδή μέχρι και τη λήξη της στερεοποίησης. Η επιφάνεια της μεσαίας περιοχής –ή τουλάχιστον το σημείο στο οποίο ελήφθη η μέτρηση– είναι η περιοχή του χυτού που για τα πρώτα δευτερόλεπτα αποψύχεται και τελικά στερεοποιείται πιο αργά από τις υπόλοιπες. Έπειτα, ακολουθεί το εξωτερικό της μεγάλης περιοχής. Η εξωτερική επιφάνεια της μικρής περιοχής του χυτού είναι αυτή που αποψύχεται ταχύτερα από τις υπόλοιπες.

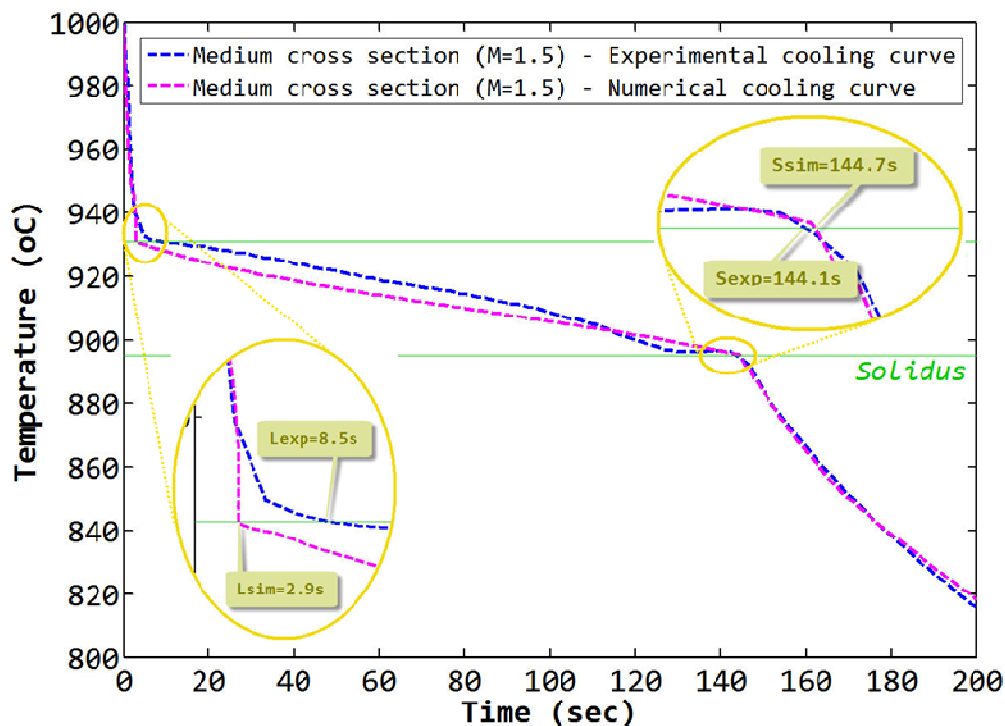
Η έναρξη της στερεοποίησης σύμφωνα με την προσομοίωση, πραγματοποιείται πρώτα για το σημείο στη μικρή διατομή, μετά για αυτό στη μεγάλη και στη συνέχεια για αυτό στη μεσαία. Οι χρονικές στιγμές της έναρξης της στερεοποίησης είναι 0.2335sec, 1.56sec και 2.9sec αντίστοιχα. Το πέρας της στερεοποίησης συμβαίνει πρώτα για τη μικρή διατομή, έπειτα για τη μεγάλη και τελευταία για τη μεσαία διατομή, στα 121.0sec, 140.7sec και 144.7sec αντίστοιχα.

Η Σχήμα 6.31 παρέχει εποπτικά το σύνολο της πληροφορίας. Στο Σχήμα 6.32, το Σχήμα 6.33 και το Σχήμα 6.34 παρουσιάζονται λεπτομερώς τα

χαρακτηριστικά του κάθε ζεύγους αποτελεσμάτων, δηλ. της εκάστοτε πειραματικής με την αντίστοιχη αριθμητική καμπύλη. Με τον τρόπο αυτό, παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες της σύγκλισης που επιτεύχθηκε, ώστε να είναι δυνατό να εκτιμηθεί η ποιότητα του αποτελέσματος και να είναι ευκολότερη η σύγκριση με τα αποτελέσματα των υπόλοιπων περιπτώσεων.



Σχήμα 6.32 Υπέρθυση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μεγάλη διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσεως της θερμοκρασίας.



Σχήμα 6.33 Υπέρθυση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μεσαία διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσε της θερμοκρασίας.

Παρατηρώντας σε αντιπαράβολή την αριθμητική καμπύλη που αντιστοιχεί στη μεγάλη διατομή με την αντίστοιχη πειραματική (Σχήμα 6.32), φαίνεται πως η αριθμητική καμπύλη ακολουθεί αρκετά καλά τη μορφή της πειραματικής σε όλο της το μήκος. Η τυπική απόκλιση του σφάλματος προσέγγισης των δύο καμπυλών, δηλαδή το μέρος της αντικειμενικής συνάρτησης που αναφέρεται στη μεγάλη διατομή, έχει την τιμή $fval_MegE = 11.30936$, μία αρκετά χαμηλή τιμή.

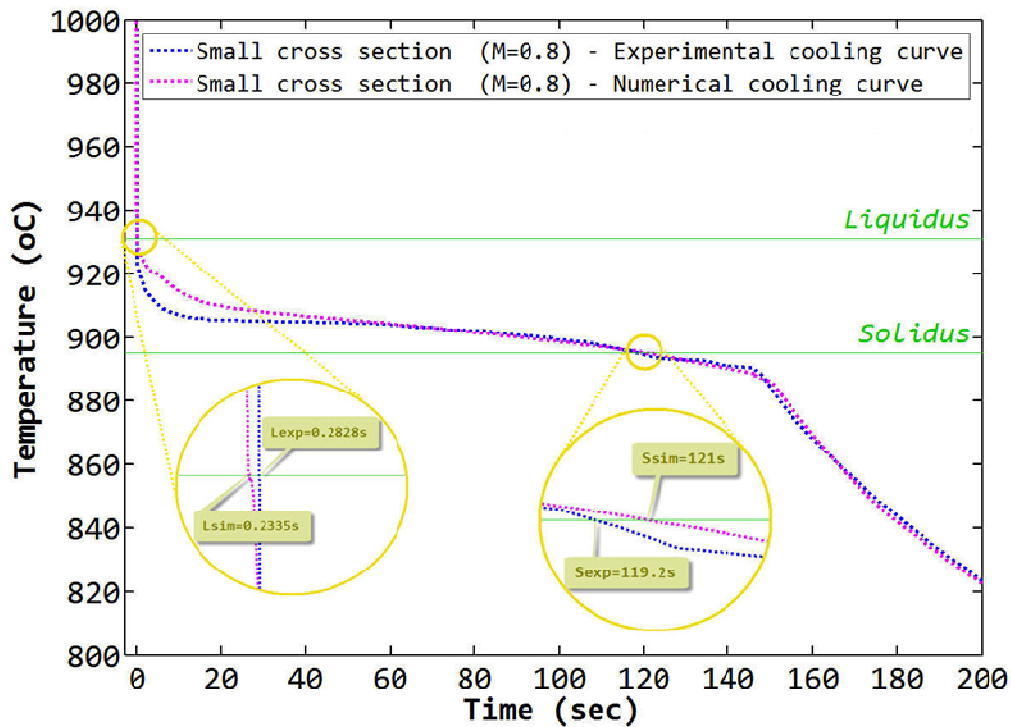
Ο Πίνακας 6.10 συνοψίζει τα βασικότερα μεγέθη που ποσοτικοποιούν τις καμπύλες απόψυξης, ώστε να μπορεί να γίνει μία εποπτική σύγκριση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Απομονώνοντας την αριθμητική καμπύλη που αντιστοιχεί στη μεσαία διατομή και την αντίστοιχη πειραματική (Σχήμα 6.33), φαίνεται πως η αυτές σχεδόν ταυτίζονται στην 1^η περιοχή. Στη 2^η περιοχή, από το 9^οsec μέχρι το 100^οsec οι δύο καμπύλες βρίσκονται σε απόσταση. Μέχρι το 40^οsec αποκλίνουν ελαφρά, έπειτα συγκλίνουν και τέμνονται στο 110^οsec. Στην 3^η περιοχή, η ταύτιση των καμπυλών είναι σχεδόν τέλεια. Η τυπική απόκλιση του σφάλματος προσέγγισης των δύο καμπυλών, δηλαδή το μέρος της αντικειμενικής συνάρτησης που αναφέρεται στη μεσαία διατομή, έχει την τιμή $fval_mesE = 40.12898$.

Στο Σχήμα 6.34 φαίνεται πως η αριθμητική καμπύλη ακολουθεί αρκετά καλά τη μορφή της πειραματικής. Οι δύο καμπύλες ταυτίζονται εντυπωσιακά μέχρι τα 0.2sec κι έπειτα από το 45^οsec και μέχρι το τέλος της περιοχής

παρατήρησης

($t=200\text{sec}$).



Σχήμα 6.34 Υπέρθυση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μικρή διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσει της θερμοκρασίας.

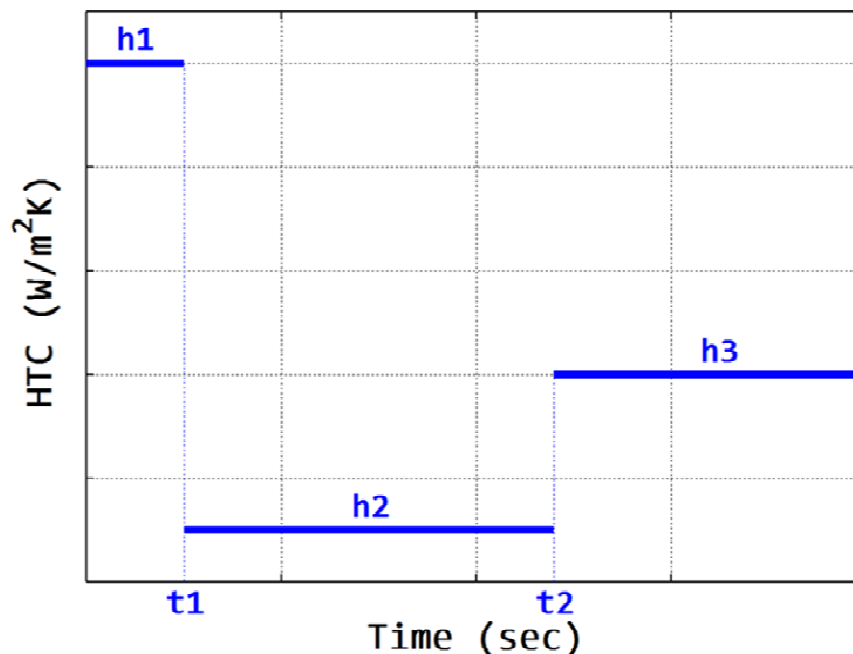
Από τον πίνακα των αποτελεσμάτων, φαίνεται πως σε όλες τις περιπτώσεις, ο χρόνος στερεοποίησης προσεγγίζεται πολύ ικανοποιητικά, ειδικά στην επιφάνεια της μεσαίας και της μικρής περιοχής.

Πίνακας 6.10 Πίνακας αποτελεσμάτων Έναρξη Πέρασ Στερεοποίησης Στερεοποίησης fval

		Έναρξη Στερεοποίησης (sec)	Πέρασ Στερεοποίησης t_{sol} (sec)	fval
M=2.0	Πείραμα M	0.97	131.8	11.30936
	Αρ.Προσ.M	1.56	140.7	
	Απόκλιση	60.8%	6.8%	
M=1.5	Πείραμα m	8.5	144.1	40.12898
	Αρ.Προσ.m	2.9	144.7	
	Απόκλιση	-65.9%	0.4%	
M=0.8	Πείραμα μ	0.2828	119.9	1.5345
	Αρ.Προσ μ	0.2335	121.0	
	Απόκλιση	-17.4%	1.5%	

6.6.7 Θεώρηση ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΜΘ στις 3 περιοχές του χυτού: Αποτέλεσμα ΓΑ (με Integers) και ΣΜΘ=βηματική συνάρτηση του χρόνου

6.6.7.1 Η μορφή του ΣΜΘ και το Χρωμόσωμα



Σχήμα 6.35 Ποιοτική απεικόνιση τα μορφής του ΣΜΘ συναρτήσεως του χρόνου. Διακρίνεται σε 3 περιοχές και μεταβάλλεται βηματικά.

Για τη συγκεκριμένη διερεύνηση ο ΣΜΘ έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στην Σχήμα 6.35. Υπάρχουν πέντε παράμετροι που τον ορίζουν: τρεις τιμές του συντελεστή (h_1 , h_2 , h_3) και δύο χρονικές στιγμές μεταβολής του (t_1 , t_2).

Τρεις είναι οι ΣΜΘ που είναι επιθυμητό να προσδιορισθούν (ένας για κάθε περιοχή του χυτού) και άρα, δεκαπέντε (δηλ. 3×5) θα είναι οι διαφορετικές παράμετροι που θα αποτελούν το διάνυσμα σχεδίασης ως εξής

$$x = [h_{1_{\text{region1}}} \quad t_{1_{\text{region1}}} \quad h_{2_{\text{region1}}} \quad t_{2_{\text{region1}}} \quad h_{3_{\text{region1}}} \quad h_{1_{\text{region2}}} \quad t_{1_{\text{region2}}} \quad h_{2_{\text{region2}}} \quad t_{2_{\text{region2}}} \quad h_{3_{\text{region2}}} \quad h_{1_{\text{region3}}} \quad t_{1_{\text{region3}}} \quad h_{2_{\text{region3}}} \quad t_{2_{\text{region3}}} \quad h_{3_{\text{region3}}}] \quad (1 \times 15)$$

Σημείωση: Η σειρά των παραμέτρων στο διάνυσμα επιλέχθηκε καθαρά για λόγους ευκολίας. Ο μνημονικός κανόνας είναι πως η σειρά των περιοχών είναι από τη μεγαλύτερη διατομή στη μικρότερη, και για τον κάθε συντελεστή, οι παράμετροι εμφανίζονται με τη σειρά που εμφανίζονται και στο σχηματικό διάγραμμα (Σχήμα 6.35) από τα αριστερά προς τα δεξιά.

6.6.7.2 Κωδικοποίηση Μεταβλητών

Το πεδίο ορισμού της κάθε μεταβλητής είναι πολύ ευρύ. Επιπροσθέτως, δεν υπάρχει ομοιομορφία μεταξύ των πεδίων ορισμού της κάθε μεταβλητής.

Συγκεκριμένα, η τιμή της μεταβλητής h_1 για τον κάθε ΣΜΘ (δηλ. η τιμή των $h_{1_{region1}}$, $h_{1_{region2}}$, $h_{1_{region3}}$) είναι επιθυμητό να κυμαίνεται από $200W/m^2K$ έως $3000W/m^2K$.

Η τιμή του συντελεστή στη δεύτερη περιοχή, δηλαδή στη χρονική περιοχή μεταξύ των χρονικών στιγμών t_1 και t_2 ονομάζεται h_2 . Αντιστοιχεί στη χρονική διάρκεια κατά την οποία λαμβάνει χώρα η στερεοποίηση του μετάλλου. Στην προκειμένη περίπτωση, εκτιμάται πως η τιμή στη δεύτερη χρονική περιοχή (και ως εκ τούτου, η τιμή των $h_{2_{region1}}$, $h_{2_{region2}}$, $h_{2_{region3}}$) είναι πιθανό να λαμβάνει τιμές από $10W/m^2K$ μέχρι $1500W/m^2K$.

Η τρίτη περιοχή του συντελεστή ΣΜΘ αντιστοιχεί στο πέρας της στερεοποίησης και αποτυπώνει την απαγωγή θερμότητας από το (τουλάχιστον επιφανειακά) στερεοποιημένο μέταλλο, προς το καλούπι. Συνεπώς, ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στην τρίτη περιοχή (δηλ. ο h_3) αναμένεται να είναι είτε αυξημένος σε σχέση με τη δεύτερη χρονική περιοχή, είτε μικρότερος είτε περίπου ίδιος. Με βάση αυτά, δικαιολογείται η επιλογή των ορίων για την τιμή των μεταβλητών $h_{3_{region1}}$, $h_{3_{region2}}$, $h_{3_{region3}}$ μεταξύ των $20W/m^2K$ και των $3000W/m^2K$.

Υπάρχουν, επιπρόσθετα, και άλλες δύο παράμετροι, t_1 και t_2 , που είναι οι χρονικές στιγμές στις οποίες πραγματοποιείται μεταβολή της τιμής του συντελεστή. Τη χρονική στιγμή t_1 ο ΣΜΘ μεταβαίνει από την τιμή h_1 , στην τιμή h_2 . Αντίστοιχα, η χρονική στιγμή t_2 οριοθετεί τη 2^η και την 3^η χρονική περιοχή. Μία πρώτη εκτίμηση για την τιμή των t_1 και t_2 αποκτάται έπειτα από προσεκτική παρατήρηση των πειραματικών καμπυλών απόψυξης, βλ. Σχήμα 6.16. Τα t_1 και t_2 αναμένεται να προσεγγίζουν τις χρονικές στιγμές που η θερμοκρασία του μετάλλου πέφτει κάτω από τη *Liquidus* και κάτω από τη *Solidus*, αντίστοιχα, δηλαδή τις χρονικές στιγμές αλλαγής κλίσης της καμπύλης απόψυξης. Τα όρια (πεδία ορισμού) προκύπτουν από την προαναφερθείσα παρατήρηση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, εκτιμάται πως η παράμετρος t_1 μπορεί να λάβει τιμές μεταξύ 0.2-30sec, ενώ η t_2 , μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 105sec και 165sec.

Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη για τον προσδιορισμό του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας κατά τη χύτευση, ήταν η διακριτοποίηση του πεδίου ορισμού της κάθε μεταβλητής σχεδίασης σε N το πλήθος διαστήματα, και εν προκειμένω σε 150 διαφορετικές τιμές ακεραίων αριθμών. Θεωρείται, δηλαδή, πως η κάθε μεταβλητή είναι ακέραιος αριθμός

και μπορεί να λάβει τιμές μεταξύ 1 και 150. Είναι αυτονόητο, πως σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να γίνεται αναγωγή από το διάστημα [1, 150] στο πεδίο ορισμού της κάθε μεταβλητής σχεδίασης (πχ στο [0,30000]). Στον Πίνακα 6.11 φαίνεται η διακριτοποίηση που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο γενετικό αλγόριθμο. Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής ήταν αναγκαία η ανάπτυξη κώδικα που υλοποιεί τη δημιουργία νέου πληθυσμού ακεραίων με το πεδίο ορισμού [1-150] και έπειτα, την αναγωγή των τιμών των μεταβλητών στο πραγματικό πεδίο ορισμού.

Η επιλογή του εύρους τιμών των ακεραίων γίνεται κατ' εκτίμηση. Σε περίπτωση που η διακριτοποίηση του πεδίου ορισμού είναι ανεπαρκής, τότε κατά την εξέλιξη του ΓΑ αναμένεται να θα παρουσιαστούν έντονες ασυνέχειες στη συμπεριφορά της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

Πίνακας 6.11 Κωδικοποίηση μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε στο ΓΑ για τη «Γεωμετρία 3», με $3ΣΜΘ$ και $ΣΜΘ=f_{step}(t)$.

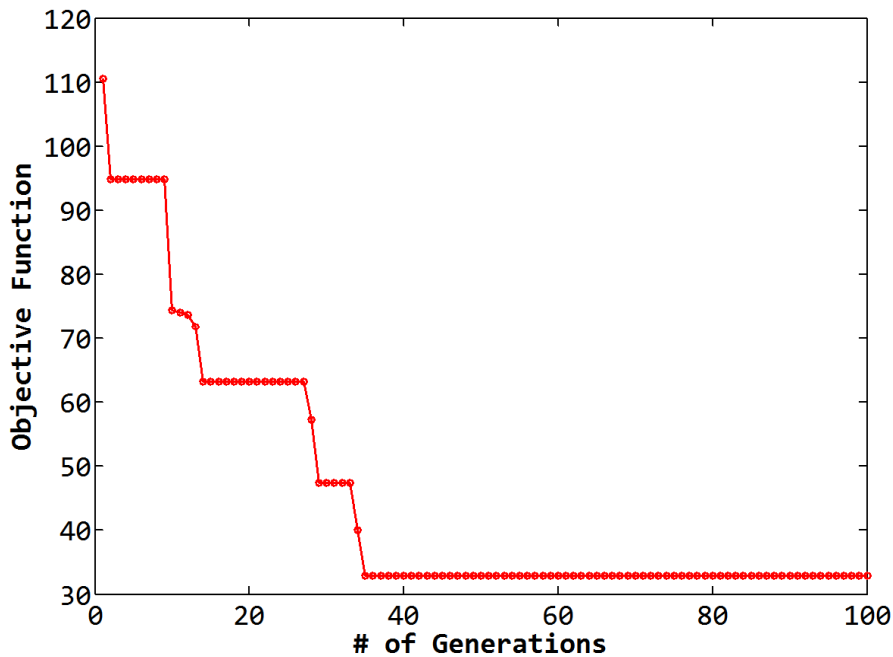
h1	t1	h2	t2	h3
$h1_{region1},$ $h1_{region2},$ $h1_{region3}$	$t1_{region1},$ $t1_{region2},$ $t1_{region3}$	$h2_{region1},$ $h2_{region2},$ $h2_{region3}$	$t2_{region1},$ $t2_{region2},$ $t2_{region3}$	$h3_{region1},$ $h3_{region2},$ $h3_{region3}$
1 = 200	1 = 0.2	1 = 10	1 = 105.4	1 = 20
2 = 400	2 = 0.4	2 = 20	2 = 105.8	2 = 40
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$i = i*200$	$i = i*0.2$	$i = i*10$	$i = i*0.4+105$	$i = i*20$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
150 = 30000	150 = 30	150 = 1500	150 = 165	150 = 3000

6.6.7.3 Χαρακτηριστικά Γενετικού Αλγορίθμου

Για το συγκεκριμένο γενετικό αλγόριθμο, το μέγεθος του πληθυσμού ήταν 100 άτομα και ο αριθμός των γενεών ήταν 100. Ο αρχικός πληθυσμός δημιουργήθηκε με τυχαία επιλογή ακεραίων αριθμών, που ανήκουν στο διάστημα [1, 150]. Τα άτομα ελιτισμού, δηλ. τα καλύτερα άτομα της κάθε γενεάς που προχωρούσαν στις επόμενες γενεές ήταν 1. Το ποσοστό διασταύρωσης ήταν 80% και η συνάρτηση διασταύρωσης ήταν το single-point crossover, με τυχαία επιλογή του σημείου διασταύρωσης. Η αξιολόγηση του κόστους γίνεται με βάση την κατάταξη με αύξουσα σειρά. Η επιλογή των ατόμων για διασταύρωση γίνεται με τη συνάρτηση tournament. Το ποσοστό μετάλλαξης είναι 0.1

6.6.7.4 Η Εξέλιξη του Γενετικού Αλγορίθμου

Στην Σχήμα 6.36 παρουσιάζεται η εξέλιξη του γενετικού αλγορίθμου ανά τις γενεές. Η κάθε κουκκίδα αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή κόστους ανά γενεά.



Σχήμα 6.36 Η εξέλιξη του ΓΑ για τη «Γεωμετρία 3», με 3ΣΜΘ και ΣΜΘ=f_{step}(t).

6.6.7.5 Αποτέλεσμα του Γενετικού Αλγορίθμου - Βέλτιστη Λύση

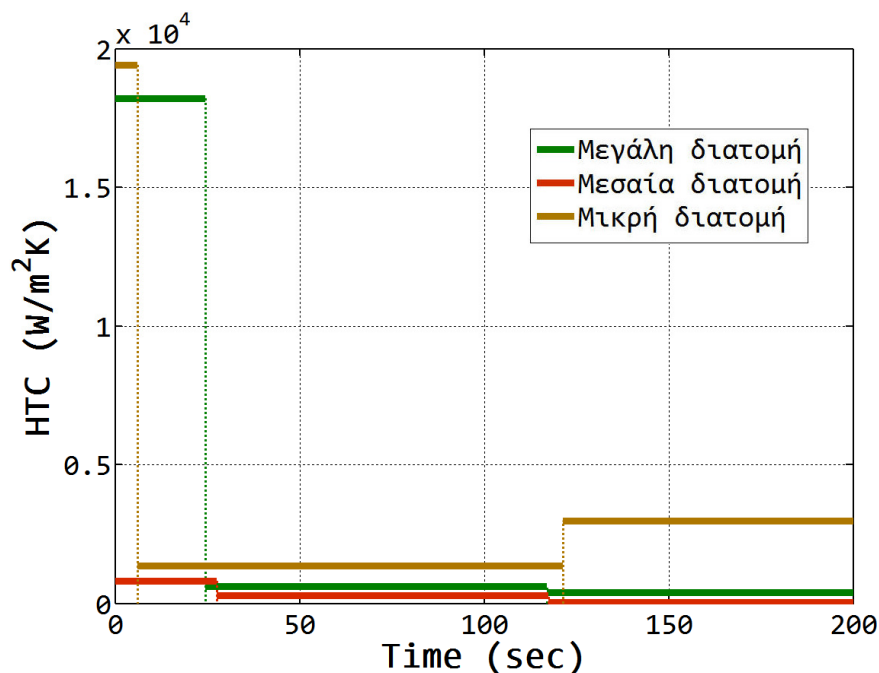
Η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που προέκυψε από τον Γενετικό Αλγόριθμο, είναι:

$$fval_{best} = 32.89007359.$$

Το βέλτιστο διάνυσμα σχεδίασης, είναι:

$$x_{best} = [18200 \ 24.4 \ 610 \ 117 \ 420 \ 800 \ 27.6 \ 300 \ 117.4 \ 40 \ 19400 \ 6 \ 1350 \ 121.4 \ 2960]$$

Το βέλτιστο αποτέλεσμα είναι αυτό που απεικονίζεται στην Σχήμα 6.37. Είναι σαφές πως οι τρεις ΣΜΘ είναι διαφορετικοί μεταξύ τους, τόσο ως προς τις τιμές όσο και ως προς τη μορφή. Η αναγκαιότητα για ύπαρξη τόσο διαφορετικών ΣΜΘ προκειμένου να αποτυπωθεί σωστά η χύτευση του συγκεκριμένου τεμαχίου, σημαίνει πως έχει νόημα η διακριτοποίηση του χυτού σε περιοχές διαφορετικού ΣΜΘ, με βάση το casting modulus.



Σχήμα 6.37 Βέλτιστος ΣΜΘ για τις τρεις περιοχές του χυτού, συναρτήσει του χρόνου, όπως προέκυψε από τον ΓΑ.

Αναλυτικότερα, από την Σχήμα 6.37, παρατηρείται πως ο ΣΜΘ της **μικρής διατομής** του χυτού ($M=0.8$), λαμβάνει μία υψηλή τιμή ($19400 \text{ W/m}^2\text{K}$) για τα πρώτα 6sec. Στη συνέχεια, για το χρονικό διάστημα 6-121.4sec ο ΣΜΘ της μικρής διατομής έχει μία μικρότερη τιμή ($1350 \text{ W/m}^2\text{K}$), και μετά τα 121.4sec, η τιμή του ΣΜΘ αυξάνεται στα $2960 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Από πλευράς φυσικής σημασίας, η συγκεκριμένη τιμή και μορφή του ΣΜΘ της μικρής διατομής του χυτού αποτυπώνει μία πολύ έντονη μετάδοση θερμότητας για τα πρώτα δευτερόλεπτα. Το μέταλλο σε εκείνη τη φάση βρίσκεται σε μορφή τήγματος, πράγμα που συνεπάγεται πολύ καλή επαφή με την επιφάνεια του καλούπι. Επιπλέον, η θερμοκρασιακή διαφορά του τήγματος με το καλούπι είναι μεγάλη. Η μικρή διατομή βρίσκεται στο κάτω μέρος δέντρου χύτευσης, είναι η περιοχή που χυτού που γεμίζει πρώτη με μέταλλο και βρίσκεται σε επαφή με μία μεγάλη μάζα γύψου πολύ χαμηλότερης θερμοκρασίας. Συνεπώς, είναι λογικό ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας να είναι υψηλός. Το γεγονός ότι μετά από 6sec η τιμή του ΣΜΘ πέφτει έντονα, υπονοεί και την ταχεία έναρξη της στερεοποίησης του μετάλλου. Λόγω της συστολής κατά τη στερεοποίηση χάνεται η καλή πρόσφυση του μετάλλου στο καλούπι, δημιουργείται ένα χάσμα μεταξύ των δύο επιφανειών, το οποίο δυσχεραίνει την απαγωγή θερμότητας. Τέλος, με την ολοκλήρωση της στερεοποίησης, το στερεοποιημένο χυτό αποκτά ξανά καλή επαφή με το καλούπι λόγω (α) του ίδιου βάρους του χυτού, (β) λόγω της θέσης στο δέντρο χύτευσης, (γ) λόγω της ύπαρξης κενού, που προκαλεί αυξημένη πίεση και (δ) λόγω των μικρών διαστάσεων της διατομής που συνεπάγονται μικρό ποσοστό συστολής και άρα ύπαρξη μικρού χάσματος. Όλα

τα παραπάνω δικαιολογούν την αυξημένη μετάδοση θερμότητας κατά την τρίτη χρονική περιοχή.

Αναφορικά με τη **μεσαία διατομή** του χυτού ($M=1.5$), από την Σχήμα 6.37, παρατηρείται πως ο ΣΜΘ λαμβάνει την τιμή $800 \text{ W/m}^2\text{K}$ για τα πρώτα 27.6sec. Στη συνέχεια, για το χρονικό διάστημα 27.6-117.4sec, ο ΣΜΘ έχει μία μικρότερη τιμή ($300\text{W/m}^2\text{K}$) κι έπειτα, μετά τα 117.4sec, η τιμή του ΣΜΘ μειώνεται στα $40\text{W/m}^2\text{K}$, μία πολύ χαμηλή τιμή.

Η μορφή του ΣΜΘ της μεσαίας διατομής υποδηλώνει μία διαφορετική συμπεριφορά από πλευράς φυσικής σημασίας, η οποία όμως, μπορεί να θεωρηθεί δικαιολογημένη. Η πρώτη χρονική περιοχή είναι αυτή που έχει και πάλι τη μεγαλύτερη τιμή.

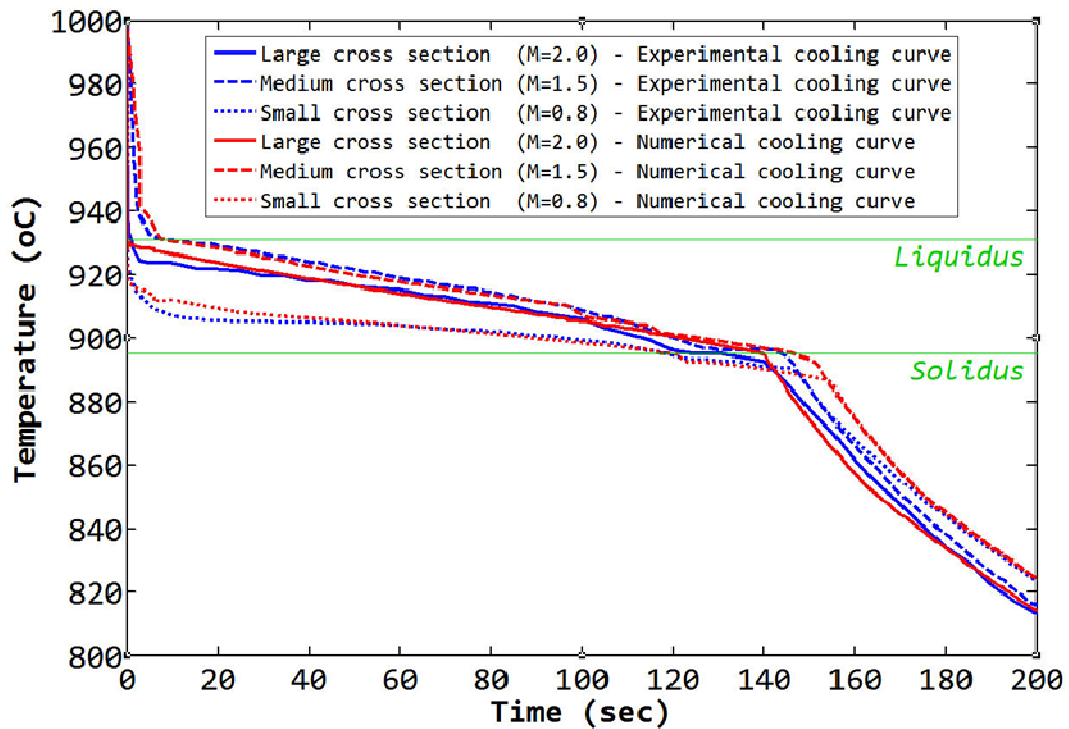
Τέλος στη **μεγάλη διατομή** του χυτού ($M=2.0$), παρατηρείται από την Σχήμα 6.37 πως ο ΣΜΘ λαμβάνει την υψηλή τιμή $18200 \text{ W/m}^2\text{K}$ για τα πρώτα 24.4sec. Στη συνέχεια, για το χρονικό διάστημα 24.4-117.0sec, ο ΣΜΘ παίρνει τη μικρότερη τιμή των $610\text{W/m}^2\text{K}$ κι έπειτα, μετά τα 117.0sec, η τιμή του ΣΜΘ μειώνεται στα $420\text{W/m}^2\text{K}$.

Ποιοτικά φαίνεται πως οι παράμετροι που επηρεάζονται εντονότερα από το casting modulus είναι οι h_1 και h_3 , δηλαδή, οι μεταβλητές που αντιστοιχούν στις χρονικές περιόδους έντονης απαγωγής θερμότητας από το χυτό. Αναφορικά με τις τιμές των t , αυξάνοντας του casting modulus αυξάνεται σχεδόν γραμμικά και η τιμή των t_1 , t_2 .

Ο Πίνακας 6.12 συγκεντρώνει τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών καμπυλών απόψυξης. Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων αυτών γίνεται στα σχήματα που ακολουθούν.

Πίνακας 6.12 Πίνακας αποτελεσμάτων
Έναρξη Πέρας
Στερεοποίησης Στερεοποίησης f_{val}
(sec) t_{sol} (sec)

M=2.0	Πείραμα M	0.97	131.8	19.56084
	Αρ.Προσ.M	0.34	138.6	
	<i>Απόκλιση</i>	<i>-64.5%</i>	<i>5%</i>	
M=1.5	Πείραμα m	8.5	144.1	7.19576
	Αρ.Προσ.m	8.6	146.7	
	<i>Απόκλιση</i>	<i>1.2%</i>	<i>1.8%</i>	
M=0.8	Πείραμα μ	0.2828	119.9	6.13346
	Αρ.Προσ μ	0.183	120.1	
	<i>Απόκλιση</i>	<i>-8.5%</i>	<i>0.76%</i>	



Σχήμα 6.38 Υπέρθυση των τριών πειραματικών καμπυλών απόψυξης με τις αντίστοιχες αριθμητικές, που προκύπτουν για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσεως του χρόνου.

Ο βέλτιστος ΣΜΘ που προέκυψε από το γενετικό αλγόριθμο χρησιμοποιήθηκε για προσομοίωση της χύτευσης και προέκυψαν οι καμπύλες απόψυξης που απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα στην Σχήμα 6.38.

Παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση των αριθμητικών με τις πειραματικές καμπύλες. Ποιοτικά, η μορφή των αριθμητικών καμπυλών είναι ίδια με τη μορφή των πειραματικών, στην πρώτη και στη δεύτερη χρονική περίοδο, δηλαδή μέχρι και τη λήξη της στερεοποίησης. Η μεσαία διατομή είναι η περιοχή του χυτού που για τα πρώτα δευτερόλεπτα αποψύχεται και τελικά στερεοποιείται πιο αργά από τις υπόλοιπες. Έπειτα, ακολουθεί η μεγάλη διατομή, καθώς είναι εμφανές πως καμπύλες απόψυξης της μεγάλης διατομής βρίσκονται μεταξύ των καμπυλών των άλλων δύο περιοχών. Η μικρή διατομή είναι αυτή που αποψύχεται ταχύτερα από τις υπόλοιπες.

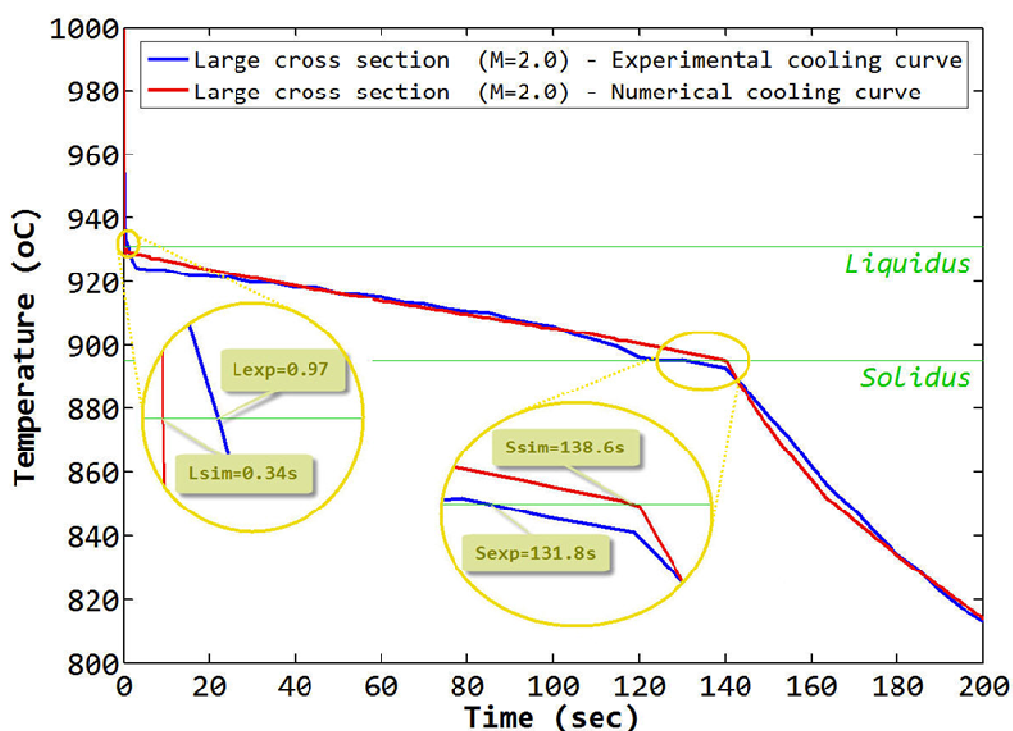
Συγκρίνοντας τις πειραματικές καμπύλες των τριών διατομών του χυτού, φαίνεται πως η έναρξη της στερεοποίησης της μικρής διατομής γίνεται στα 0.2sec, της μεγάλης διατομής στα 0.97sec και της μεσαίας στα 8.527sec. Αναφορικά με τη χρονική στιγμή λήξης της στερεοποίησης του πειράματος, η επιφάνεια της μικρής διατομής στερεοποιείται στα 120.1sec, της μεσαίας στα 146.7sec και της μεγάλης στα 138.6sec.

Εξετάζοντας τα αντίστοιχα μεγέθη για τις αριθμητικές καμπύλες απόψυξης, παρατηρείται ποιοτικά η ίδια συμπεριφορά. Η σειρά με την οποία πραγματοποιείται η έναρξη και η λήξη της στερεοποίησης, σύμφωνα με την αριθμητική προσομοίωση, είναι η ίδια με αυτή του πειράματος.

Αναλυτικότερα, η έναρξη της στερεοποίησης σύμφωνα με την προσομοίωση, πραγματοποιείται πρώτα για τη μικρή διατομή, μετά για τη μεγάλη και στη συνέχεια για τη μεσαία. Οι χρονικές στιγμές της έναρξης της στερεοποίησης είναι 0.183sec 0.34sec και 8.633sec αντίστοιχα. Το πέρας της στερεοποίησης συμβαίνει πρώτα για τη μικρή διατομή, έπειτα για τη μεγάλη και τελευταία για τη μεσαία διατομή, στα 120.1sec, 138.6sec και 146.7sec αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 6.39, Σχήμα 6.40 και το Σχήμα 6.41 έχουν απομονωθεί οι καμπύλες που αντιστοιχούν στην κάθε περιοχή του χυτού. Η ίδια πληροφορία υπάρχει και στην Σχήμα 6.38, απλά με τον τρόπο αυτό, μπορούν να παρουσιαστούν ανεξάρτητα οι λεπτομέρειες της σύγκλισης της κάθε αριθμητικής καμπύλης με την αντίστοιχη πειραματική.

Παρατηρώντας σε αντιπαραβολή την αριθμητική καμπύλη που αντιστοιχεί στη **μεγάλη διατομή** με την αντίστοιχη πειραματική (Σχήμα 6.39), φαίνεται πως η αριθμητική καμπύλη ακολουθεί πολύ καλά τη μορφή της πειραματικής σε όλο της το μήκος.

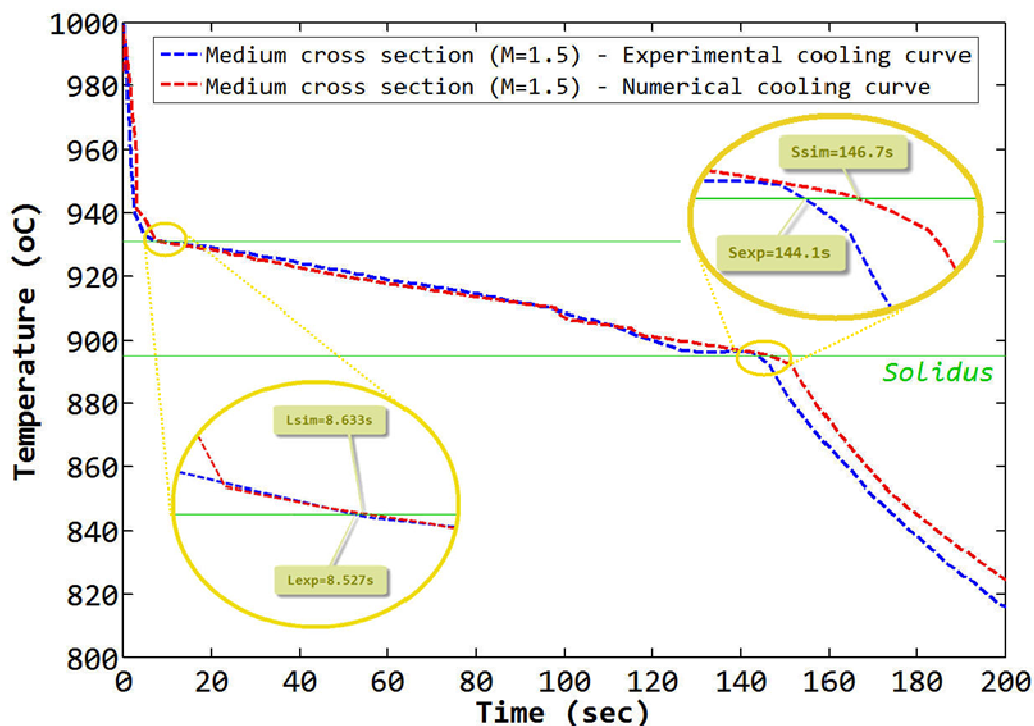


Σχήμα 6.39 Υπέρθυση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μεγάλη διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσεως του χρόνου.

Επιπλέον, επισημαίνεται πως παρατηρώντας τα αποτελέσματα από όλες τις περιπτώσεις που διερευνήθηκαν, προκύπτει πως υπήρχε ιδιαίτερη δυσκολία να βρεθεί συνδυασμός τιμών ΣΜΘ που να κατεβάζουν την αριθμητική καμπύλη απόψυξης αρκετά χαμηλά, ώστε να προσεγγίζει την πειραματική αντίστοιχη. Η συγκεκριμένη λύση αποτελεί μία καλή περίπτωση ανάμεσα στις εναλλακτικές. Δεν ήταν εφικτό να συνδυαστεί μικρό ποσοστό σφάλματος στη

χρονική στιγμή έναρξης στερεοποίησης με την ταύτιση των καμπυλών κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης.

Το πέρας της στερεοποίησης σύμφωνα με το πείραμα συμβαίνει στο 131.8sec και σύμφωνα με την προσομοίωση στο 138.6sec. Αξιοσημείωτο είναι πως η αλλαγή της κλίσης της καμπύλης (μετάβαση από τη 2^η στην 3^η «περιοχή») συμβαίνει στα 140sec στο πείραμα και στα 140.3sec στην προσομοίωση.

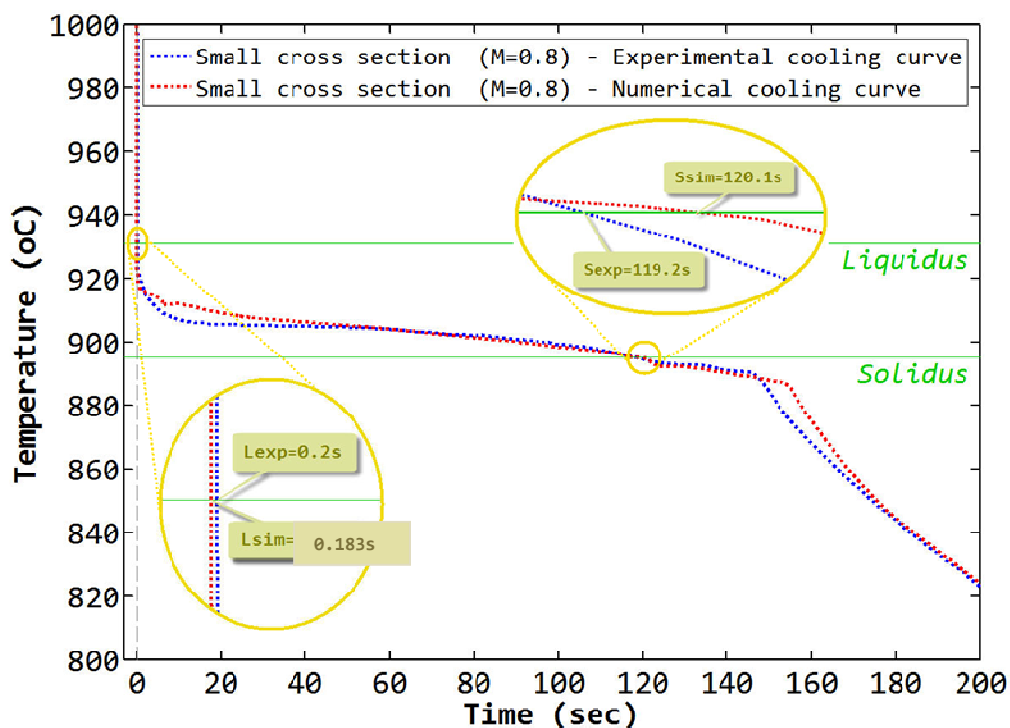


Σχήμα 6.40 Υπέρθεση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μεσαία διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσε του χρόνου.

Αντιπαραβάλλοντας την αριθμητική καμπύλη που αντιστοιχεί στη **μεσαία διατομή** με την αντίστοιχη πειραματική (Σχήμα 6.40), φαίνεται πως η αριθμητική καμπύλη ακολουθεί αρκετά καλά τη μορφή της πειραματικής. Οι δύο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται μέχρι το 120sec, δηλ. από την αρχή μέχρι και το μεγαλύτερο στάδιο της στερεοποίησης. Η ταύτιση των δύο καμπυλών ειδικά στην 1^η περιοχή και στην αρχή της δεύτερης είναι σημαντική, καθώς διαφοροποιεί την καμπύλη της μεσαίας από αυτή της μεγάλης διατομής. Στην 3^η περιοχή, οι καμπύλες απέχουν. Η απόστασή τους, όμως, είναι σταθερή, δηλ. είναι σχεδόν παράλληλες. Η ομοιότητα στην κλίση σημαίνει ίδιο ρυθμό απόψυξης και ως προς αυτό η προσέγγιση κρίνεται ικανοποιητική. Η τυπική απόκλιση του σφάλματος προσέγγισης των δύο καμπυλών, ή αλλιώς, το μέρος της αντικειμενικής συνάρτησης που αναφέρεται στη μεσαία διατομή, έχει την τιμή $fval_mesE = 7.19576$, μία πολύ χαμηλή τιμή.

Εστιάζοντας στις λεπτομέρειες, η έναρξη της στερεοποίησης σύμφωνα με το πείραμα συμβαίνει στο 8.527sec και σύμφωνα με την προσομοίωση στο 8.633sec.

Το πέρας της στερεοποίησης σύμφωνα με το πείραμα συμβαίνει στο 144.1sec και σύμφωνα με την προσομοίωση στο 146.7sec.



Σχήμα 6.41 Υπέρθυση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μικρή διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσε του χρόνου.

Τέλος, στην Σχήμα 6.41 παρουσιάζεται ο τρόπος στερεοποίησης της **μικρής διατομής** του χυτού, όπως προκύπτει από το πείραμα αλλά και από την αριθμητική προσομοίωση.

Αρχικά, με οπτική παρατήρηση προκύπτει πως στην 1^η περιοχή οι δύο καμπύλες προσεγγίζουν πολύ. Πολύ καλή προσέγγιση παρατηρείται, επίσης, στη χρονική διάρκεια 40-120sec, καθώς επίσης και στα τελευταία 25sec.

Η τυπική απόκλιση του σφάλματος προσέγγισης των δύο καμπυλών, ή αλλιώς, το μέρος της αντικειμενικής συνάρτησης που αναφέρεται στη μικρή διατομή, έχει την τιμή $f_{val_mikrE} = 6.13346$. Πρόκειται για μία αρκετά χαμηλή τιμή, που αποκαλύπτει την πολύ καλή προσέγγιση των καμπυλών.

Με έμφαση στις περιοχές ενδιαφέροντος, βλέπουμε πως η έναρξη της στερεοποίησης γίνεται στο πείραμα στο 0.2sec, ενώ στην προσομοίωση στο 0.183sec.

Το πέρας της στερεοποίησης σύμφωνα με το πείραμα συμβαίνει στο 119.2sec και σύμφωνα με την προσομοίωση στο 120.1sec.

Συμπερασματικά, η συγκεκριμένη προσέγγιση για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ με χρήση ΓΑ καταλήγει σε ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Η κωδικοποίηση των μεταβλητών με ακέραιους αριθμούς δίνει τη δυνατότητα αποτελεσματικής εξερεύνησης ενός πολύ ευρέως πεδίου αναζήτησης.

Η μορφή του ΣΜΘ που χρησιμοποιήθηκε ήταν: βηματική συνάρτηση του χρόνου. Η μορφή αυτή αποτυπώνει τη 'φυσική σημασία' των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη χύτευση. Το υπολογιστικό κόστος της κάθε προσομοίωσης είναι σημαντικά μικρότερο από το υπολογιστικό κόστος μίας προσομοίωσης με $\Sigma\Theta=f(T)$, δίνοντας τη δυνατότητα για ευκολότερη διεξαγωγή του μεγάλου πλήθους προσομοιώσεων που απαιτεί η διαδικασία βελτιστοποίησης.

Κριτήριο για την ποιότητα του αποτελέσματος ήταν η ταυτόχρονη προσέγγιση των αριθμητικών με πειραματικές καμπύλες απόψυξης και στα τρία σημεία αναφοράς.

Ο συνδυασμός των ΣΜΘ που οδηγεί στο βέλτιστο αποτέλεσμα είναι ένας συνδυασμός τριών συντελεστών σημαντικά διαφορετικών μεταξύ τους. Η μορφή και των τριών ΣΜΘ δικαιολογείται από τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Οι τιμές των h_i , t_i συμφωνούν με αντίστοιχα δεδομένα από τη βιβλιογραφία. Ο διαχωρισμός του χυτού σε τρεις περιοχές, ανάλογα με τη γεωμετρία, φάνηκε πως οδηγεί σε πολύ ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

6.6.8 Θεώρηση ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΜΘ στις 3 περιοχές του χυτού: Αποτέλεσμα ΓΑ (με Πραγματικούς αριθμούς - Continuous GA) και ΣΜΘ=βηματική συνάρτηση του χρόνου

Τα αποτελέσματα που έχουν παρουσιαστεί μέχρι τώρα βασίζονταν στη λογική της κωδικοποίησης των μεταβλητών με ακέραιους αριθμούς.

Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δύο βελτιστοποιήσεων με ΓΑ με πραγματικούς αριθμούς (real numbers). Σε αυτού του είδους τους γενετικούς αλγορίθμους, οι μεταβλητές σχεδίασης μπορούν να λάβουν οποιαδήποτε πραγματική τιμή εντός του πεδίου ορισμού που ο χρήστης ορίζει. (Για το λόγο αυτό ονομάζονται και “continuous genetic algorithms”). Ο γενετικός αλγόριθμος υλοποιήθηκε με τη χρήση των έτοιμων ρουτινών του MATLAB.

6.6.8.1 ΓΑ με Πραγματικές Μεταβλητές - Προσέγγιση 1η

Το διάνυσμα σχεδίασης είναι το ακόλουθο:

$$x = [h1_{region1} \ t1_{region1} \ h2_{region1} \ t2_{region1} \ h3_{region1} \ h1_{region2} \ t1_{region2} \ h2_{region2} \ t2_{region2} \ h3_{region2} \ h1_{region3} \ t1_{region3} \ h2_{region3} \ t2_{region3} \ h3_{region3}] \quad (1 \times 15)$$

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πραγματικοί αριθμοί. Τα όρια τους ορίστηκαν να είναι ίδια για όλες τις μεταβλητές. Το πεδίο ορισμού της κάθε μεταβλητής ήταν το διάστημα [0, 1].

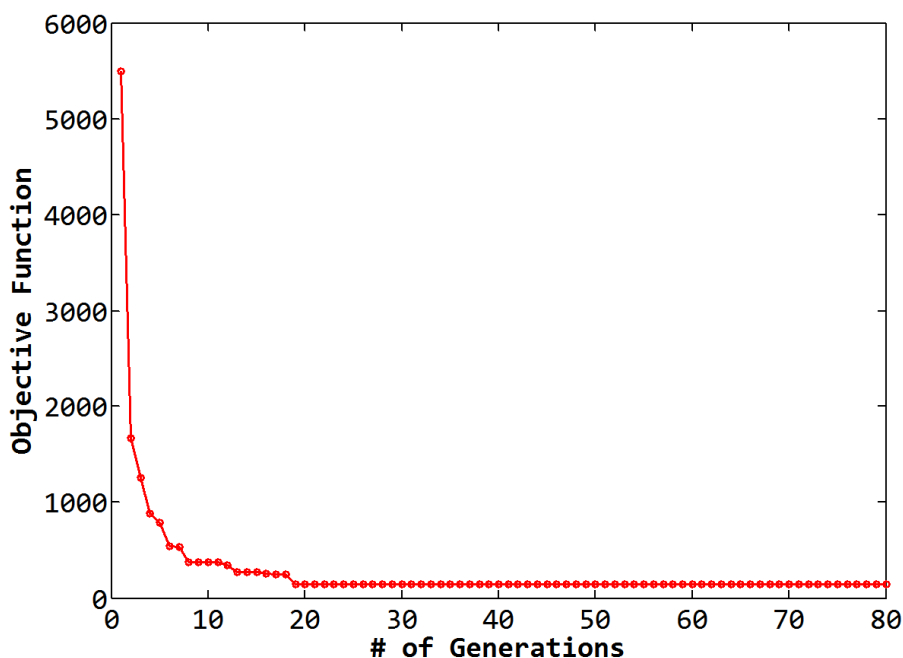
Η ιδιαιτερότητα στη συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι το έντονα ανομοιόμορφο πεδίο ορισμού των μεταβλητών. Κάτι τέτοιο, ενέχει αντικειμενικές δυσκολίες περιορίζει τη χρήση ορισμένων γενετικών τελεστών (πχ στην περίπτωση ΓΑ με πραγματικές μεταβλητές). Ένας τρόπος για να αρθεί η δυσκολία αυτή είναι να κανονικοποιηθούν όλες οι μεταβλητές σχεδίασης ώστε να έχουν ίδιο πεδίου ορισμού. Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης ιδέας χρησιμοποιήθηκε η κωδικοποίηση του Πίνακας 6.13.

Πίνακας 6.13 Κωδικοποίηση μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε στο ΓΑ με Πραγματικούς Αριθμούς, για τη «Γεωμετρία 3», με 3ΣΜΘ και ΣΜΘ=f_{step}(t).

h2	t2	h3
h2 _{region1} , h2 _{region2} , h2 _{region3}	t2 _{region1} , t2 _{region2} , t2 _{region3}	h3 _{region1} , h3 _{region2} , h3 _{region3}
x*1200	x*200	x*2000

Ο ορισμός του πεδίου ορισμού σημαίνει ταυτόχρονα και επιβολή περιορισμών στις τιμές και ως εκ τούτου στη μορφή του ΣΜΘ. Εν προκειμένω, επιλέχθηκε, για παράδειγμα, η τιμή του h2 να έχει μικρότερο εύρος από την τιμή του h3, κάτι που θα μπορούσε να θεωρηθεί ρεαλιστικότερο.

Για το συγκεκριμένο γενετικό αλγόριθμο, το μέγεθος του πληθυσμού ήταν 140 άτομα και ο αριθμός των γενεών ήταν 80. Ο αρχικός πληθυσμός δημιουργείται τυχαία, με ομοιόμορφη κατανομή εντός του πεδίου ορισμού. Τα άτομα ελιτισμού, δηλ. τα καλύτερα άτομα της κάθε γενεάς που προχωρούσαν στις επόμενες γενεές ήταν 2. Το ποσοστό διασταύρωσης ήταν 40% και η συνάρτηση διασταύρωσης ήταν η “crossover heuristic” (βλ. §6.3.4.4). Η αξιολόγηση του κόστους γίνεται με βάση την κατάταξη με αύξουσα σειρά (υλοποιείται με τη συνάρτηση “fitscalingshiftlinear”). Η επιλογή των ατόμων για διασταύρωση γίνεται με τη “selectionroulette”. Πραγματοποιείται, επίσης, μετάλλαξη, σε κάθε γενεά, σε ποσοστό 45%. Τέλος, μετά το πέρας του ΓΑ, με εκκίνηση τον πληθυσμό της τελευταίας γενεάς, εφαρμόζεται ο ντετερμινιστικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης “fmincon”.



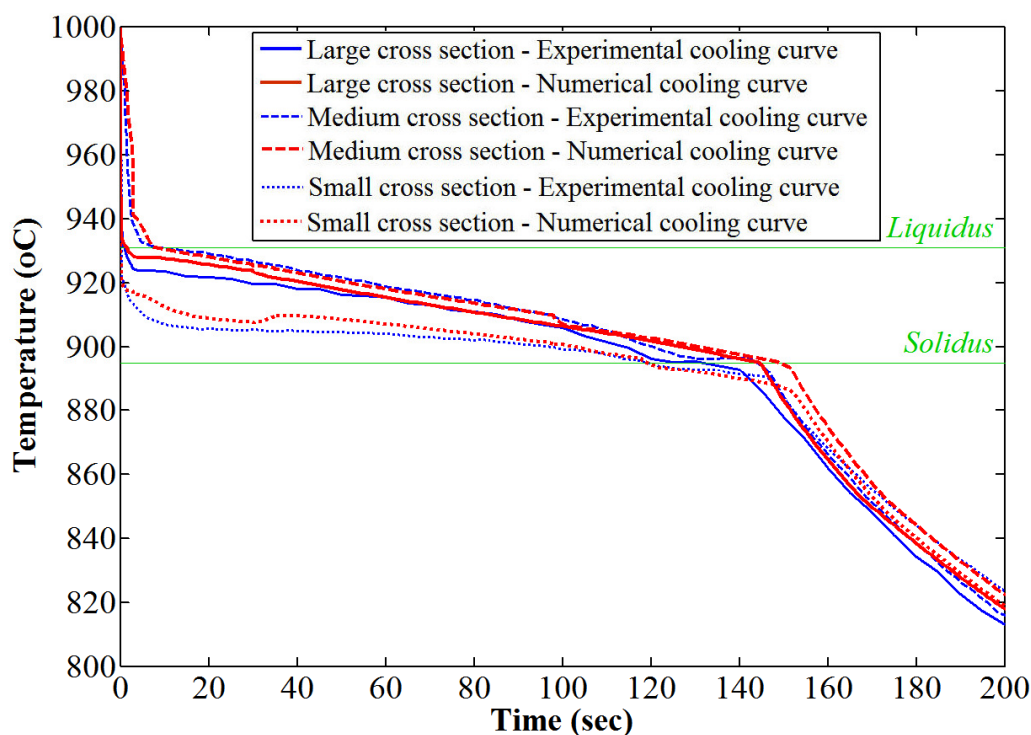
Σχήμα 6.42 Η πορεία του ΓΑ με πραγματικές μεταβλητές στο ομοιογενές διάστημα $[0,1]$.

Στην Σχήμα 6.42 παρουσιάζεται η εξέλιξη του γενετικού αλγορίθμου ανά τις γενεές.

Το χρωμόσωμα που καταλήγει στη βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης $fval_{best} = 146.87$ είναι το (στρογγυλοποιημένο):

$$x = [9200 \ 30 \ 980 \ 118 \ 882 \ 8 \ 24 \ 24 \ 98 \ 2000 \ 9700 \ 3 \ 240 \ 30 \ 2000]$$

και η προσέγγιση των καμπυλών απόψυξης φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 6.43 Υπέρθυση των τριών πειραματικών καμπυλών απόψυξης με τις αντίστοιχες αριθμητικές, που προκύπτουν για το βέλτιστο βηματικό ΣΜΘ συναρτήσεσι του χρόνου, ο οποίος προέκυψε από ΓΑ με πραγματικές μεταβλητές.

6.6.8.2 ΓΑ με Πραγματικές Μεταβλητές - Προσέγγιση 2η

Στη 2^η προσέγγιση, οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν και πάλι πραγματικοί αριθμοί. Αυτή τη φορά, χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα του MATLAB για ανεξάρτητο πεδίο ορισμού της κάθε μεταβλητής στο διάστημα $[LB_i, UB_i]$.

Επειδή, όπως αποκαλύφθηκε από την περίπτωση της «1^{ης} Προσέγγισης», ο ΓΑ με πραγματικούς αριθμούς εξελίσσεται αργά, στη «2^η προσέγγιση» δοκιμάζεται η περίπτωση του «μειωμένου» χρωμοσώματος». Αντί, λοιπόν, το χρωμόσωμα να είναι ένα διάνυσμα (1x15), με την παραδοχή ότι είναι σταθερές οι μεταβλητές t_1 και t_2 για τους ΣΜΘ, το χρωμόσωμα μειώνεται σε ένα διάνυσμα (1x9). Οι χρόνοι μεταβολής της τιμής του ΣΜΘ λαμβάνονται κατ' εκτίμηση από την καμπύλη απόψυξης, κοντά στις χρονικές στιγμές αλλαγής κλίσης των καμπυλών απόψυξης.

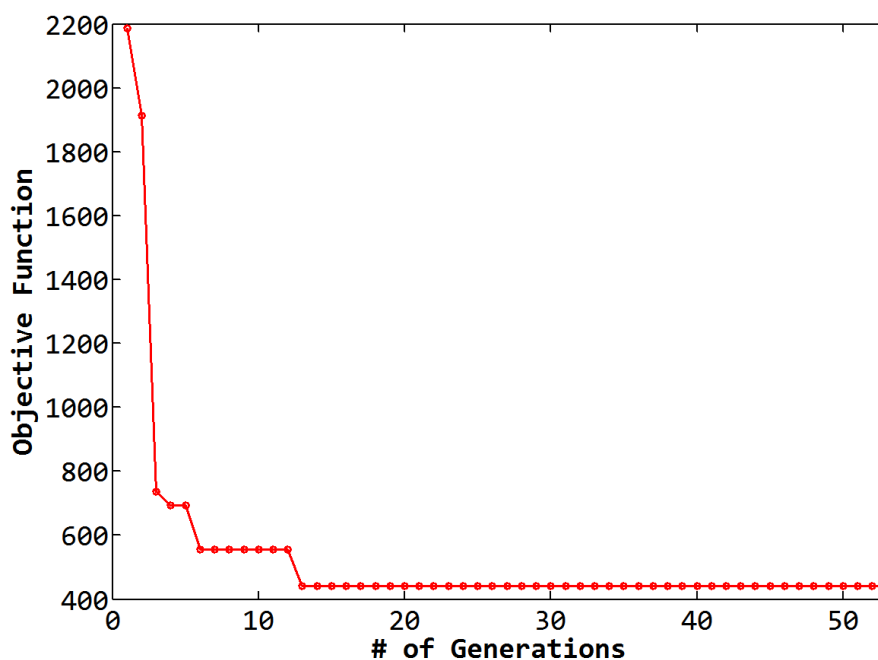
Το διάνυσμα σχεδίασης είναι το ακόλουθο:

$$x = [h_{1\text{region}1} \ h_{2\text{region}1} \ h_{3\text{region}1} \ h_{1\text{region}2} \ h_{2\text{region}2} \ h_{3\text{region}2} \ h_{1\text{region}3} \ h_{2\text{region}3} \ h_{3\text{region}3}] \quad (1 \times 9)$$

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πραγματικοί αριθμοί. Τα όριά τους ορίστηκαν να είναι ίδια για όλες τις μεταβλητές. Το πεδίο ορισμού της για τις μεταβλητές h_1, h_3 ήταν το διάστημα $[10, 20000]$, ενώ για τις μεταβλητές h_2 το διάστημα $[10, 1000]$.

Για το συγκεκριμένο γενετικό αλγόριθμο, το μέγεθος του πληθυσμού ήταν 200 άτομα και ο αριθμός των γενεών ήταν 60. Η συνάρτηση δημιουργίας νέου πληθυσμού ήταν η “ga creation linear feasible”. Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται στην περίπτωση γραμμικών περιορισμών – στην προκειμένου περίπτωση, το ανομοιόμορφο πεδίο ορισμού των μεταβλητών του χρωμοσώματος. Τα άτομα ελιτισμού, δηλ. τα καλύτερα άτομα της κάθε γενεάς που προχωρούσαν στις επόμενες γενεές ήταν 4. Το ποσοστό διασταύρωσης ήταν 50% και η συνάρτηση διασταύρωσης ήταν η “crossover heuristic”. Η αξιολόγηση του κόστους γίνεται με βάση την κατάταξη με αύξουσα σειρά (συνάρτηση “fit scaling rank”). Η επιλογή των ατόμων για διασταύρωση γίνεται με “selection tournament”. Ο τελεστής μετάλλαξης είναι ο “mutation adapt feasible. Πραγματοποιείται, επίσης, μετανάστευση, σε κάθε γενεά, σε ποσοστό 10%. Τέλος, ενεργοποιείται η δυνατότητα του MATLAB 'HybridFcn', για υβριδική βελτιστοποίηση (επιλέγεται η συνάρτηση “fmincon”).

Στο Σχήμα 6.44 που ακολουθεί φαίνεται η πορεία του ΓΑ.



Σχήμα 6.44 Πορεία του ΓΑ με πραγματικές μεταβλητές στο ομοιογενές διάστημα [LB,UB].

Η βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης που προέκυψε από τον ΓΑ ήταν **441.0017** και αντιστοιχεί στο διάνυσμα σχεδίασης:

$$x = [3123.839 \ 197.0488 \ 15780.94 \ 1386.275 \ 185.0948 \ 17255.82 \\ 7500.476 \ 146.447411675.25].$$

6.6.8.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων ΓΑ με Πραγματικές Μεταβλητές

Στην §6.6.8 μελετήθηκε η περίπτωση της βελτιστοποίησης με ΓΑ με πραγματικές μεταβλητές, για τον βέλτιστο προσδιορισμό του ΣΜΘ κατά τη χύτευση.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η βελτιστοποίηση με “continuous GA” δοκιμάστηκε αρκετές φορές, για διάφορους αρχικούς πληθυσμούς και μέγεθος πληθυσμού. Αυτό που συνέβαινε, ήταν να εμφανίζεται μία τιμή αντικειμενικής συνάρτησης μετά από τις πρώτες λίγες γενεές, η οποία παρέμενε. Παρατηρώντας τα άτομα των πληθυσμών, οι μεταβολές στα χρωμοσώματα ήταν μικρές. Λόγω της χρήσης πραγματικών αριθμών, ο αλγόριθμος επέλεγε να δοκιμάσει μεταβλητές σχεδίασης που στην πραγματικότητα βρίσκονταν αρκετά κοντά μεταξύ τους. Για παράδειγμα, η τιμή 17845.444 και η τιμή 17452.457 είναι πρακτικά οι ίδιες για τη μεταβλητή h , για τον ΓΑ είναι διαφορετική. Στην πραγματικότητα, όμως, η κλήση της αντικειμενικής συνάρτησης στερείται νοήματος. Η ακρίβεια που παρέχει η χρήση πραγματικών μεταβλητών μόνο επιβαρυντική μπορεί να είναι, όσον αφορά το υπολογιστικό κόστος.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν ήταν τα καλύτερα που προέκυψαν. Για να συμβεί αυτό, από όλες τις ‘δοκιμαστικές εκτελέσεις’ του ΓΑ (που δεν κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν) κρατήθηκαν τα καλύτερα χρωμοσώματα και εισήχθησαν είτε στον αρχικό πληθυσμό είτε σε κάποια μεταγενέστερη γενεά για να βοηθηθεί «τεχνηέντως» η επιτάχυνση της εξέλιξης του ΓΑ.

Αυτό που γίνεται φανερό σε όλες τις προσεγγίσεις είναι πως ο ΓΑ ως μέθοδος στοχαστικής βελτιστοποίησης έχει πάντα το πλεονέκτημα της γρήγορης εξερεύνησης μίας τεράστιας περιοχής αναζήτησης καταλήγοντας σχετικά σύντομα σε μία βελτιωμένη λύση. Έτσι, λοιπόν, στις προσεγγίσεις 1 και 2 η ‘βέλτιστη’ λύση επετεύχθη στη 19^η και τη 12^η γενεά αντίστοιχα. Βεβαίως, οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης είναι αυξημένες σε σχέση με τις ‘βέλτιστες λύσεις’ των υπόλοιπων αποτελεσμάτων του παρόντος κεφαλαίου. Είναι σαφές ότι η τιμή κόστους «441» είναι πολύ βελτιωμένη σε σχέση με την καλύτερη τιμή των τυχαίων δοκιμών του αρχικού πληθυσμού, αλλά απέχει αρκετά από την ιδανική τιμή «0».

Παρατηρώντας τα καλύτερα διανύσματα σχεδίασης που εμφανίστηκαν μέχρι τη στιγμή που τερματίστηκαν οι ΓΑ στις προσεγγίσεις 1&2, προκύπτει πως οι ΣΜΘ για την κάθε μία περιοχή είναι σημαντικά διαφορετικοί μεταξύ τους. Και στις δύο περιπτώσεις, η μικρή διατομή είναι αυτή που έχει τη μεγαλύτερη τιμή ΣΜΘ για τα πρώτα δευτερόλεπτα, την οποία διατηρεί για μικρή χρονική διάρκεια. Ακολουθεί η μεγάλη διατομή, η οποία έχει μία υψηλή τιμή ΣΜΘ – αλλά μικρότερη από αυτή της μικρής διατομής – την οποία διατηρεί για αρκετά δευτερόλεπτα. Η μεσαία διατομή είναι αυτή με τον μικρότερο ρυθμό απαγωγής θερμότητας. Στην προσέγγιση 1, βέβαια η τιμή του $h_{1_{region2}}$ είναι 8, δηλαδή πρακτικά δεν υπάρχει καλή πρόσφυση για τα πρώτα 24 δευτερόλεπτα, το οποίο δεν μπορούμε να το ισχυριστούμε μετά

βεβαιότητας. Επίσης, η τιμή για τις h_2 είναι χαμηλή σε όλες τις περιπτώσεις, όπως είναι αναμενόμενο. Τέλος, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, η τιμή των h_3 είναι αυξημένη. Αυτό, όπως έχουμε αναφέρει, είναι πιθανό να συμβαίνει σε περιπτώσεις αυξημένης πίεσης επαφής μεταξύ μετάλλου-καλουπιού. Η συστηματικότητα, όμως, και η ένταση (τάξη μεγέθους πάνω από την τιμή της h_1) στην οποία εμφανίζεται αυτή η «συμπεριφορά», οδηγεί στο συμπέρασμα ότι θα έπρεπε το πεδίο ορισμού να είναι μικρότερο

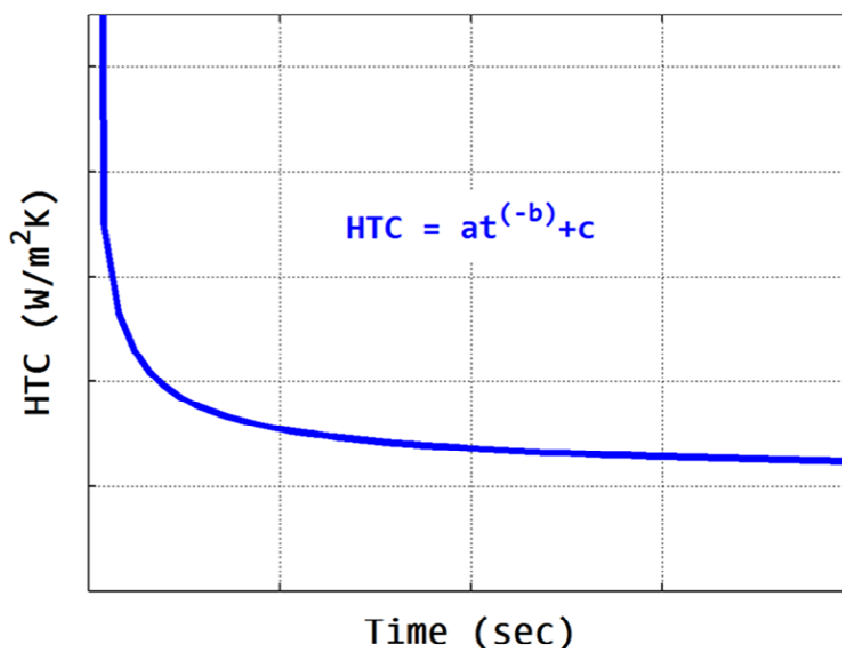
Βεβαίως, είναι πιθανό, εάν ο ΓΑ αφηνόταν να εξελιχθεί περισσότερο, κάποια στιγμή η τιμή του κόστους να κατακρημνιζόταν σε μία πολύ καλή τιμή.

Παρόλα αυτά, στη συγκεκριμένη εφαρμογή, στην οποία η αντικειμενική συνάρτηση είναι «υπολογιστικά ακριβή», υπάρχει η απαίτηση για μία πιο «έξυπνη» λύση, που να παρακάμπτει τις περιττές δοκιμές και να εντοπίζει γρήγορα μία λύση που να είναι στην περιοχή της βέλτιστης. Η προσέγγιση με τις αέριες μεταβλητές σχεδίασης φαίνεται πως καλώς επιλέχθηκε, καθώς προσπερνά τα μειονεκτήματα του ΓΑ πραγματικών μεταβλητών.

6.6.9 Θεώρηση ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΜΘ στις 3 περιοχές του χυτού: Αποτέλεσμα ΓΑ (με Integers) και ΣΜΘ=εκθετική συνάρτηση της θερμοκρασίας

6.6.9.1 Η μορφή του ΣΜΘ και το Χρωμόσωμα

Σε κάποιες περιπτώσεις της βιβλιογραφίας (βλ. Κεφάλαιο 4), θεωρείται πως ο ΣΜΘ είναι εκθετική συνάρτηση του χρόνου, όπως απεικονίζεται στην Σχήμα6.45. Στην περίπτωση αυτή, η μορφή του συντελεστή καθορίζεται από την τιμή των μεταβλητών a (ο συντελεστής του χρόνου, t), b (απόλυτη τιμή του εκθέτη) και της σταθεράς.



Σχήμα6.45 Ποιοτική απεικόνιση τα μορφής του ΣΜΘ ως εκθετικής συνάρτησης του χρόνου.

Θεωρώντας, λοιπόν, ξεχωριστή τιμή του ΣΜΘ για κάθε μία από τις τρεις περιοχές του χυτού, το διάνυσμα σχεδίασης θα είναι το:

$$x = [a_{\text{region1}} \ b_{\text{region1}} \ c_{\text{region1}} \ a_{\text{region2}} \ b_{\text{region2}} \ c_{\text{region2}} \ a_{\text{region3}} \ b_{\text{region3}} \ c_{\text{region3}}] \quad (1 \times 9)$$

6.6.9.2 Κωδικοποίηση Μεταβλητών

Το πεδίο ορισμού για την κάθε μεταβλητή επιλέγεται αυθαίρετα. Έχοντας ως βάση τις τιμές που προτείνονται από τη βιβλιογραφία (για άλλα κράματα και για άλλα είδη χύτευσης), το πεδίο ορισμού επιλέγεται να είναι ένα εύρος τιμών γύρω από τις τιμές αυτές. Πχ. στην πρόσφατη δημοσίευση του (2011, Dong), προτείνονται οι τιμές 1145 και 1240 για το a , 0.52 και 0.6 για το b και 200 και 1500 για το c .

Πίνακας 6.14 Κωδικοποίηση μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε στο ΓΑ για τη «Γεωμετρία 3», με $\Sigma\text{SM}\Theta$ και $\Sigma\text{M}\Theta=f_{\text{exp}}(t)$.

a	b	c
$a_{\text{region1}}, a_{\text{region2}}, a_{\text{region3}}$	$b_{\text{region1}}, b_{\text{region2}}, b_{\text{region3}}$	$C_{\text{region1}}, C_{\text{region2}}, C_{\text{region3}}$
1 = 40	1 = 0.02	1 = 40
2 = 80	2 = 0.04	2 = 80
⋮	⋮	⋮
i = i*40	i = i*0.02	i = i*40
⋮	⋮	⋮
150 = 6000	150 = 1.5	150 = 6000

6.6.9.3 Χαρακτηριστικά Γενετικού Αλγορίθμου

Για το συγκεκριμένο γενετικό αλγόριθμο, το μέγεθος του πληθυσμού ήταν 60 άτομα και ο αριθμός των γενεών ήταν 100. Ο αρχικός πληθυσμός δημιουργήθηκε με τυχαία επιλογή ακεραίων αριθμών, που ανήκουν στο διάστημα [1, 150]. Τα άτομα ελιτισμού, δηλ. τα καλύτερα άτομα της κάθε γενεάς που προχωρούσαν στις επόμενες γενεές ήταν 1. Το ποσοστό διασταύρωσης ήταν 80% και η συνάρτηση διασταύρωσης που ήταν το single-point crossover, με τυχαία επιλογή του σημείου διασταύρωσης. Η αξιολόγηση του κόστους γίνεται με βάση την κατάταξη με αύξουσα σειρά. Η επιλογή των ατόμων για διασταύρωση γίνεται με τη συνάρτηση tournament. Το ποσοστό μετάλλαξης είναι 0.1

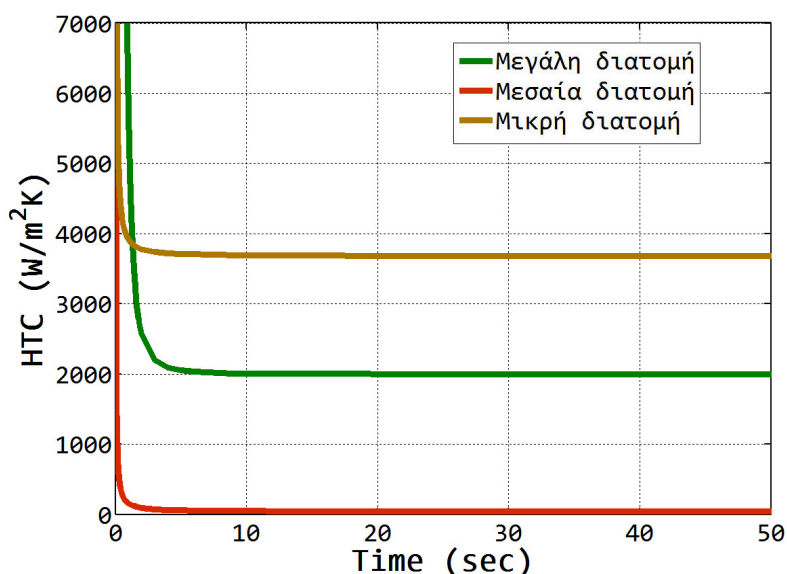
6.6.9.4 Πορεία / Εξέλιξη του Γενετικού Αλγορίθμου

Η εξέλιξη του ΓΑ για τη «Γεωμετρία 3», με $\Sigma\text{SM}\Theta$ και $\Sigma\text{M}\Theta=f_{\text{exp}}(t)$.

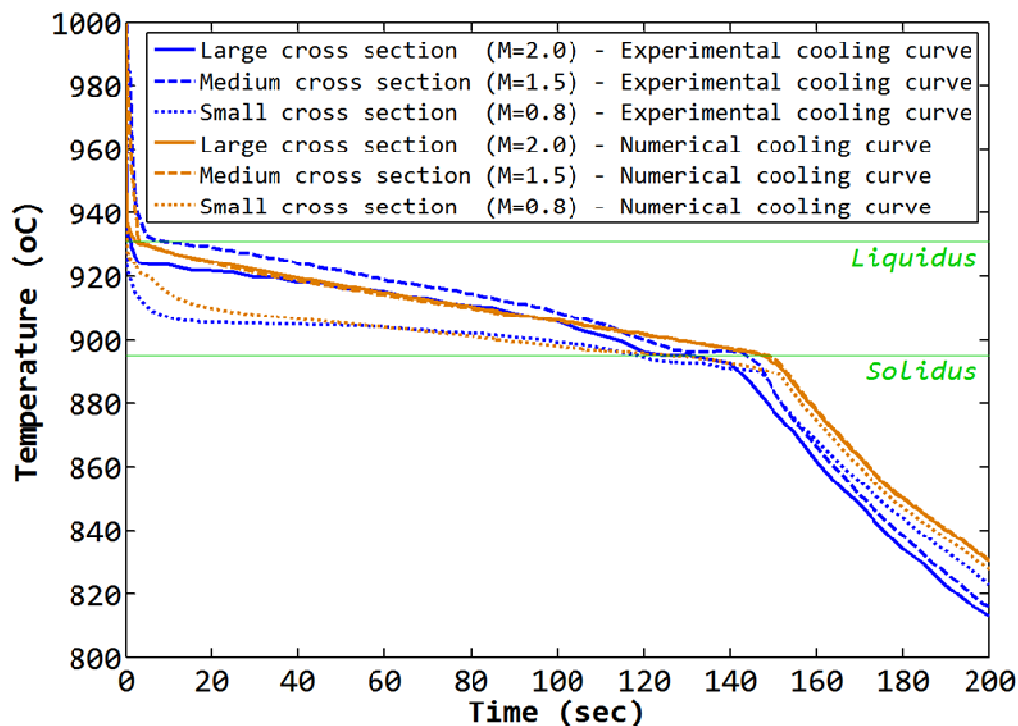
6.6.9.5 Αποτέλεσμα του Γενετικού Αλγορίθμου - Βέλτιστη Λύση

Το βέλτιστο διάνυσμα σχεδίασης στο οποίο κατέληξε ο ΓΑ είναι:

$$x = [2000 \ 3680 \ 2.66 \ 40 \ 120 \ 1.1236802401.24].$$



Σχήμα 6.46 Βέλτιστος ΣΜΘ για τις τρεις περιοχές του χυτού, συναρτήσει του χρόνου, όπως προέκυψε από τον ΓΑ.



Σχήμα 6.47 Υπέρθωση των τριών πειραματικών καμπυλών απόψυξης με τις αντίστοιχες αριθμητικές, που προκύπτουν για το βέλτιστο εκθετικό ΣΜΘ συναρτήσεϊ του χρόνου.

Χρησιμοποιώντας στην προσομοίωση της χύτευσης το βέλτιστος ΣΜΘ που προέκυψε από το γενετικό αλγόριθμο, θα προκύψουν οι καμπύλες απόψυξης που απεικονίζονται με χρώμα στην Σχήμα 6.47.

Η τυπική απόκλιση του σφάλματος προσέγγισης των δύο καμπυλών, δηλ. η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, είναι $f_{val} = 38.50140$.

Η σειρά με την οποία πραγματοποιείται η έναρξη και η λήξη της στερεοποίησης, σύμφωνα με την αριθμητική προσομοίωση, είναι η ίδια με αυτή του πειράματος.

Το Σχήμα 6.47 παρέχει εποπτικά το σύνολο της πληροφορίας. Στο Σχήμα 6.48, το Σχήμα 6.49 και το Σχήμα 6.50 Σχήμα 6.32 παρουσιάζονται λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά του κάθε ζεύγους αποτελεσμάτων, δηλ. της εκάστοτε πειραματικής με την αντίστοιχη αριθμητική καμπύλη.

Παρατηρώντας σε αντιπαραβολή την αριθμητική καμπύλη που αντιστοιχεί στη μεγάλη διατομή με την αντίστοιχη πειραματική (Σχήμα 6.48), φαίνεται πως η αριθμητική καμπύλη ακολουθεί αρκετά καλά τη μορφή της πειραματικής σε όλο της το μήκος.

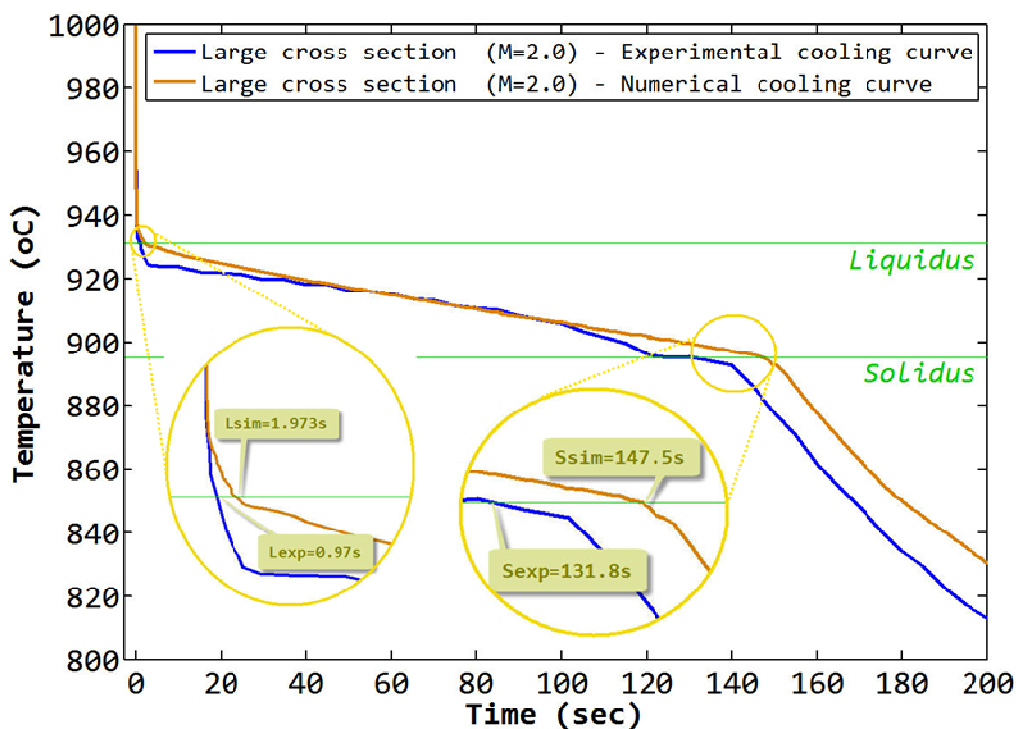
Αντιπαραβάλλοντας την αριθμητική καμπύλη που αντιστοιχεί στη μεσαία διατομή με την αντίστοιχη πειραματική (Σχήμα 6.49), φαίνεται πως η αριθμητική καμπύλη ακολουθεί τη μορφή της πειραματικής. Οι δύο καμπύλες γενικά δεν ταυτίζονται. Σε όλη τη δεύτερη και την τρίτη περιοχή οι δύο

καμπύλες απέχουν. Παρόλα αυτά, η αλλαγή κλίσης συμβαίνει με πολύ μικρή χρονική υστέρηση, πράγμα που υποδηλώνει παρόμοια συμπεριφορά ως προς την απόψυξη. Αυτό καθιστά την προσέγγιση ικανοποιητική. Η τυπική απόκλιση του σφάλματος προσέγγισης των δύο καμπυλών, ή αλλιώς, το μέρος της αντικειμενικής συνάρτησης που αναφέρεται στη μεσαία διατομή, έχει την τιμή $fval_mesE = 29.37928$, μία ικανοποιητική αλλά όχι πολύ χαμηλή τιμή.

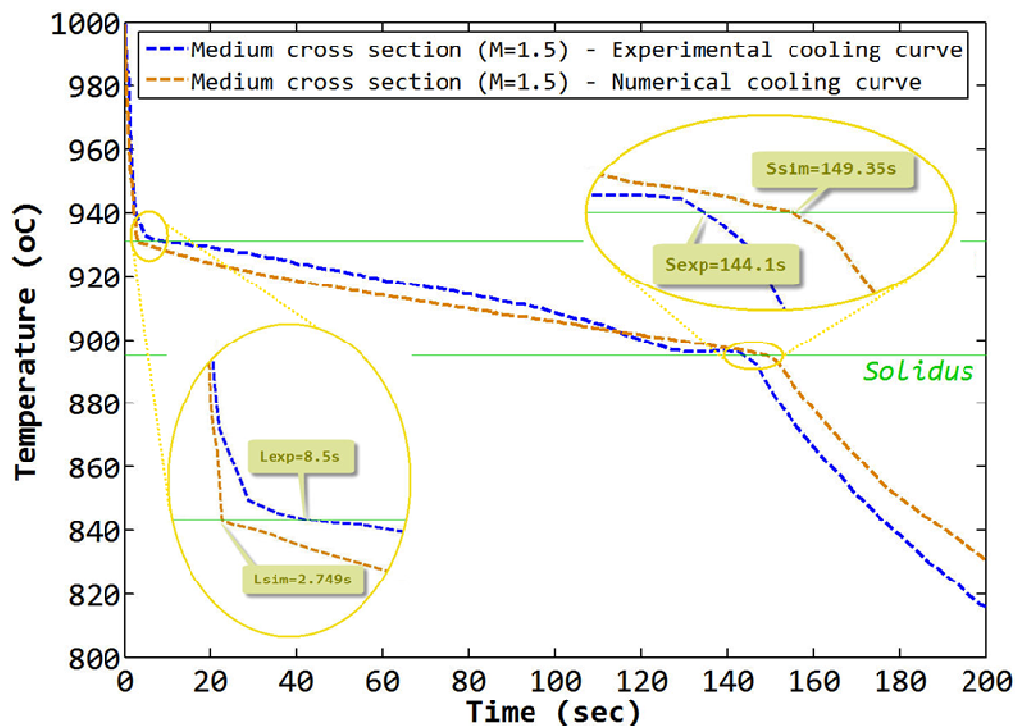
Η έναρξη της στερεοποίησης σύμφωνα με το πείραμα συμβαίνει στο 8.527sec και σύμφωνα με την προσομοίωση στο 2.749sec. .

Πίνακας 6.15 Πίνακας αποτελεσμάτων
Έναρξη Πέρασ
Στερεοποίησης Στερεοποίησης
(sec) t_{sol} (sec)

		Έναρξη Στερεοποίησης (sec)	Πέρασ Στερεοποίησης t_{sol} (sec)	$fval$
M=2.0	Πείραμα M	0.97	131.8	5.131519
	Αρ.Προσ.M	1.973	147.5	
	Απόκλιση	103.4%	11.9%	
M=1.5	Πείραμα m	8.5	144.1	29.37928
	Αρ.Προσ m	2.744	149.35	
	Απόκλιση	%	%	
M=0.8	Πείραμα μ	0.2828	119.9	3.99060
	Αρ.Προσ μ	2.449	126.8	
	Απόκλιση	67.7%	3.6%	



Σχήμα 6.48 Υπέρθεση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μεγάλη διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο εκθετικό ΣΜΘ συναρτήσε του χρόνου.



Σχήμα 6.49 Υπέρθυση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μεσαία διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο εκθετικό ΣΜΘ συναρτήσεως του χρόνου.

Το πέρας της στερεοποίησης σύμφωνα με το πείραμα συμβαίνει στο 144.1sec και σύμφωνα με την προσομοίωση στο 149.35sec. .

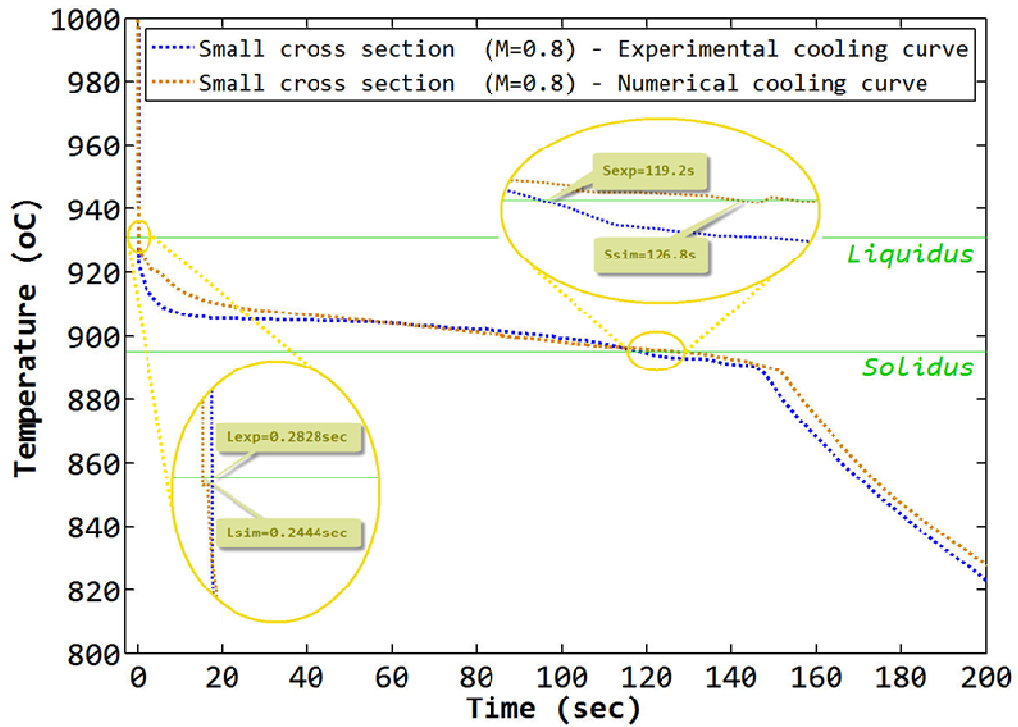
Στην Σχήμα 6.50 φαίνεται πως η αριθμητική καμπύλη ακολουθεί αρκετά καλά τη μορφή της πειραματικής. Οι δύο καμπύλες ταυτίζονται εντυπωσιακά μέχρι τα 0.2sec κι έπειτα από το 50^οsec και μέχρι το 80^οsec. Η προσέγγιση των καμπυλών στην 3^η περιοχή είναι πολύ καλή.

Η τυπική απόκλιση του σφάλματος προσέγγισης των δύο καμπυλών, ή αλλιώς, το μέρος της αντικειμενικής συνάρτησης που αναφέρεται στη μικρή διατομή, έχει την τιμή $f_{val_mikrE} = 3.99060$, μία πολύ χαμηλή τιμή.

Εστιάζοντας στις λεπτομέρειες, η έναρξη της στερεοποίησης γίνεται στο πείραμα στο 0.2828sec, ενώ στην προσομοίωση στο 0.2444sec.

Το πέρας της στερεοποίησης σύμφωνα με το πείραμα συμβαίνει στο 119.2sec και σύμφωνα με την προσομοίωση στο 126.8sec.

Παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση των αριθμητικών με τις πειραματικές καμπύλες.



Σχήμα 6.50 Υπέρθεση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης για τη μικρή διατομή του χυτού με την αντίστοιχη αριθμητική, που προκύπτει για το βέλτιστο εκθετικό ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου.

6.7 Συνοπτική Παρουσίαση και Σχολιασμός των Κυριότερων Αποτελεσμάτων από τη χρήση των ΓΑ

Στους πίνακες που ακολουθούν συνοψίζονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα, για λόγους εποπτείας.

Ο Πίνακας 6.16 περιέχει πληροφορία που προκύπτει από τις καμπύλες απόψυξης. Με “L” και “S” συμβολίζονται οι χρονικές στιγμές έναρξης και λήξης της στερεοποίησης, δηλαδή τα σημεία τομής της εκάστοτε καμπύλης με τις θερμοκρασίες Liquidus και Solidus του κράματος. Οι δείκτες υποδεικνύουν την καμπύλη στην οποία αναφέρονται οι τιμές. “M” σημαίνει πως το μέγεθος αναφέρεται στην καμπύλη απόψυξης της μεγάλης διατομής, “m” της μεσαίας και “μ” της μικρής διατομής.

Πίνακας 6.16 Συνοπτική παρουσίαση χρονικών στιγμών έναρξης και λήξης στερεοποίησης σύμφωνα με τις πειραματικές και τις αριθμητικές καμπύλες απόψυξης.

	ΠΕΙΡΑΜΑ	3HTC 3fval f _{step} (T)			3HTC 3fval f _{exp} (t)		3HTC 3fval f _{step} (t)		1HTC 3fval f _{step} (t)	
		(sec) τιμή	(sec) τιμή	% σφάλμα	(sec) τιμή	% σφάλμα	(sec) τιμή	% σφάλμα	(sec) τιμή	% σφάλμα
L _M	0.97	1.56	+60.8	0.34	+64.5	1.973	103.4	0.1322	-86.4	
S _M	131.8	140.7	+6.8	138.6	+5.0	147.5	+11.9	149.7	+13.5	
L _m	8.5	2.9	-65.1	8.633	+1.2	2.749	-67.7	0.1212	-98.6	
S _m	144.1	144.7	+0.4	146.7	+1.8	149.35	+3.6	148.7	+3.19	
L _μ	0.2828	0.2335	+17.4	0.183	+8.5	0.2444	136	0.0885	+68.7	
S _μ	119.2	121.0	+1.5	120.1	+0.76	119.2	+6.4	124.1	+4.11	

Πίνακας 6.17 Συνοπτική παρουσίαση των βέλτιστων τιμών αντικειμενικής συνάρτησης και των βέλτιστων χρωσομμάτων, όπως προέκυψε από βελτιστοποίηση με ΓΑ για τις κυριότερες περιπτώσεις.

	3HTC 3fval f _{step} (T)	3HTC 3fval f _{exp} (t)	3HTC 3fval f _{step} (t)	1HTC 3fval f _{step} (t)
Best Cost	52.97	32.89	38.50	120.4
Best Chrom	[20000 1200260400 270940 4000 1490 1300]	[18200 24.4 610 117 420 800 27.6 300 117.4 40 19400 6 1350 121.42960]	[2000 3680 2.66 40 120 1.1236802401.24]	[20400 7.6 700 117 700]

Ο Πίνακας 6.17 παρουσιάζει εποπτικά τις βέλτιστες λύσεις που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση των βασικότερων περιπτώσεων που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο αυτό.

Η βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης επιτυγχάνεται στην περίπτωση που στο χυτό ανατίθενται 3 διαφορετικοί ΣΜΘ, ανάλογα με το casting modulus, με τη μορφή του ΣΜΘ να είναι βηματική συνάρτηση του χρόνου. Πέρα από την ταυτόχρονη εγγύτητα και των τριών αριθμητικών καμπυλών απόψυξης με την αντίστοιχες πειραματικές, προσεγγίζονται πολύ ικανοποιητικά και οι χρονικές στιγμές ενδιαφέροντος: χρονική στιγμή έναρξης και πέρατος της στερεοποίησης.

Η προσέγγιση με την παραδοχή ενιαίου ΣΜΘ σε όλο το χυτό είναι αυτή που δίνει τη χειρότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Η βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης που επετεύχθη είναι 50-68% αυξημένη σε σχέση με τα αποτελέσματα της θεώρησης τριών ξεχωριστών ΣΜΘ, ανάλογα με τη γεωμετρία. Η χρήση ενιαίου ΣΜΘ δίνει μία καλή γενική εικόνα για το σύνολο του χυτού. Δεν μπορεί, ωστόσο, να αποτυπώσει τις σημαντικές ποιοτικές διαφορές που παρατηρούνται στις διαφορετικές διατομές του χυτού, πληροφορία που γενικά είναι σημαντική. Είναι στην ευχέρεια του μηχανικού να αποφασίσει κατά πόσο αυτή η προσέγγιση είναι ικανοποιητική.

6.8 Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο 6 μελετήθηκε η δυνατότητα προσδιορισμού του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας (ΣΜΘ) κατά τη χύτευση, μέσω βελτιστοποίησης με Γενετικό Αλγόριθμο.

Η μελέτη ήταν χωρισμένη σε 2 μέρη:

1^ο μέρος: χρήση δοκιμαστικών περιπτώσεων χύτευσης, με γνωστή «λύση» του προβλήματος, προκειμένου να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα της επίτευξης λύσης καθώς και η επίδραση των επιλογών του ΓΑ στην ποιότητα της λύσης.

2^ο μέρος: εφαρμογή της μεθόδου σε πραγματική περίπτωση χύτευσης. Η διαδικασία στην περίπτωση αυτή ήταν βασισμένη σε πειραματικές μετρήσεις καμπυλών απόψυξης, όπως προέκυψαν από χύτευση ακριβείας ορείχαλκου εν κενώ.

Βασικό πλεονέκτημα της χρήσης ΓΑ για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ κατά τη χύτευση είναι το γεγονός ότι οι μεταβλητές σχεδίασης σε έναν ΓΑ μπορεί να αντιπροσωπεύουν οποιασδήποτε φυσικής σημασίας μέγεθος. Συνεπώς, υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου για ποικιλία μορφών ΣΜΘ: ο ΣΜΘ μπορεί να θεωρηθεί συνάρτηση της θερμοκρασίας ή του χρόνου, βηματική ή εκθετική συνάρτηση, γραμμική συνάρτηση κατά περιοχές, συνδυασμός μορφών ή -ακόμα- πίνακας τιμών (πχ. (t, h_{tc})). Έγκειται στον μελετητή να αποφασίσει ποια μορφή ΣΜΘ θα χρησιμοποιήσει, και μπορεί να επιλέγει ένα χρωμόσωμα με πολύ λίγες μεταβλητές. Η προσέγγιση αυτή υπερέχει έναντι των προσεγγίσεων με 'αντίστροφες μεθόδους υπολογισμού', στις οποίες ο ΣΜΘ είναι ένα σύνολο ζευγών (t, h_{tc}) ή (T, h_{tc}) και άρα, για να επιτευχθεί ικανοποιητικό αποτέλεσμα, απαιτείται μεγάλο πλήθος σημείων.

Ως προς τη μορφή του ΣΜΘ: δοκιμάστηκαν τρεις περιπτώσεις μορφής ΣΜΘ και μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς την αποτελεσματικότητα της κάθε μίας:

- ΣΜΘ=f(T): είναι σαφής η φυσική σημασία μίας τέτοιας θεώρησης. Ωστόσο, το υπολογιστικό κόστος της προσομοίωσης με έναν τέτοιο ΣΜΘ είναι πολύ μεγάλο - πολλαπλάσιο σε σχέση με αυτό των εναλλακτικών επιλογών.
- ΣΜΘ=fstep(t):σημαντικά μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Σαφέστατα και το γεγονός ότι η συνάρτηση είναι βηματική αποτελεί απλοποιητική παραδοχή, παρόλα αυτά, επιτυγχάνεται πολύ καλή προσέγγιση.
- ΣΜΘ=fexp(t):πλεονεκτεί ως προς το ότι απαιτείται μικρός αριθμός ανεξάρτητων μεταβλητών. Παρόλα αυτά, τα βέλτιστα αποτελέσματα στα οποία κατέληξε η διερεύνηση, δεν κρίθηκαν αποδεκτά από πλευράς φυσικής σημασίας.

Είναι σημαντικό να οριστούν όρια για την κάθε μεταβλητή σχεδίασης που να αντανakλούν τη φυσική σημασία του ΣΜΘ. Είναι σύνηθες στις μεθόδους προσδιορισμού ΣΜΘ, οι αριθμητικές διαδικασίες να καταλήγουν σε αποτέλεσμα που στερείται φυσικού νοήματος. Η εισαγωγή κατάλληλων περιορισμών αποτρέπει λύσεις που θα αποδειχθούν ‘μη-αποδεκτές’.

Προτείνεται η κωδικοποίηση των μεταβλητών σχεδίασης με ακεραίους, για τους παρακάτω λόγους:

- η ανομοιομορφία του χρωμοσώματος, που εκ των πραγμάτων υπάρχει στη συγκεκριμένη εφαρμογή, δεν αποτελεί εμπόδιο
- μπορεί να διερευνηθεί ένα πολύ μεγάλο πεδίο αναζήτησης
- με ανάπτυξη κατάλληλου κώδικα που να διαχειρίζεται integers, υπάρχει δυνατότητα να υλοποιηθούν οι αποτελεσματικότεροι γενετικοί τελεστές του ΓΑ χωρίς πρόβλημα
- καθίσταται εύκολη η διαδικασία ενσωμάτωσης περιορισμών των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης.

Για την προσομοίωση της χύτευσης, η θεώρηση ενιαίου ΣΜΘ σε όλο το χυτό δεν είναι επαρκής. Η χρήση διαφορετικών ΣΜΘ σε περιοχές με διαφορετικό casting modulus υπερτερεί σαφώς, καθώς ακολουθεί τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τρόπου στερεοποίησης σε διαφορετικά σημεία του χυτού.

Για την αριθμητική σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών καμπυλών απόψυξης είναι απαραίτητη η κατάλληλη επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων.

Η χρήση του κριτηρίου του σφάλματος προσέγγισης των δύο καμπυλών, σε ένα μεγάλο πλήθος σημείων, κρίνεται επαρκής για τη σύγκρισή τους.

Επειδή ο ΓΑ για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ χρησιμοποιεί, εκ των πραγμάτων, υπολογιστικά ακριβή αντικειμενική συνάρτηση (περιλαμβάνει διεξαγωγή προσομοίωσης της χύτευσης, προτείνεται η αποθήκευση των χρωμοσωμάτων με τα αντίστοιχα κόστη τους σε μία βάση δεδομένων, ώστε να αποφεύγονται οι άσκοπες κλήσεις της αριθμητικής προσομοίωσης.

Ως προς τις επιλογές παραμέτρων του ΓΑ, οι συναρτήσεις που έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα ήταν: το single point crossover με τυχαία επιλογή του σημείου διασταύρωσης, η roulette ή tournament συνάρτηση επιλογής, ταξινόμηση των χρωμοσωμάτων του πληθυσμού ως προς το κόστος, 1 άτομο elite και μέγεθος πληθυσμού περίπου ίσο με 12npar (npar=το πλήθος των μεταβλητών σχεδίασης).

Όπως σε όλα τα προβλήματα βελτιστοποίησης, έτσι και σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει απόλυτη βεβαιότητα όσον αφορά την «ορθότητα» των

αποτελεσμάτων. Αυτό που φαίνεται, όμως, τόσο από την τιμή των βέλτιστων αντικειμενικών συναρτήσεων όσο και από τις δοκιμαστικές περιπτώσεις (στις οποίες το αποτέλεσμα ήταν γνωστό), η «βέλτιστη λύση» συνήθως ανήκει σε μία περιοχή κοντά στο απόλυτα βέλτιστο. Από εκεί και πέρα, μπορεί να γίνει εφαρμοστεί μία ντετερμινιστική διαδικασία βελτιστοποίησης ή - καλύτερα - , διερεύνηση τιμών στην περιοχή αυτή με τη μέθοδο δοκιμής-και-σφάλματος

Με τα σύγχρονα υπολογιστικά μέσα (ειδικά με συστήματα παράλληλης επεξεργασίας κλπ), η βελτίωση των μεθόδων προσδιορισμού του ΣΜΘ για πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα γίνεται εφικτή.

Η μελέτη που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 6, έχει δύο συνεισφορές:

1. Παρέχει πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο στερεοποίησης και τους ΣΜΘ για το συγκεκριμένο κράμα (ορείχαλκο) και το συγκεκριμένο είδος χύτευσης (χύτευση ακριβείας εν κενώ), δεδομένου ότι οι πληροφορίες για αυτές τις συνθήκες είναι λιγοστές στη διεθνή βιβλιογραφία.
2. Αναπτύσσει μία μεθοδολογία βέλτιστου προσδιορισμού ΣΜΘ με χρήση γενετικού αλγορίθμου, και μάλιστα ταυτόχρονα για περιοχές του χυτού με διαφορετικό ΣΜΘ λόγω διαφορετικής γεωμετρίας. Η προτεινόμενη προσέγγιση έχει καθολική εφαρμογή για οποιοδήποτε είδος χύτευσης.

Κεφάλαιο 7^ο

Γενικά Συμπεράσματα

Η σελίδα αυτή έχει αφεθεί σκοπίμως κενή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη του θέματος της διδακτορικής διατριβής, προέκυψαν τα εξής γενικά συμπεράσματα:

A. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

Με πειράματα χύτευσης ακριβείας που πραγματοποιήθηκαν σε ειδικά τροποποιημένη μηχανή χύτευσης κενού-υπερπίεσης μελετήθηκε η επίδραση των εξής παραμέτρων της χύτευσης: θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού, θερμοκρασίας έγχυσης τήγματος, εφαρμοζόμενη υπερπίεση (δηλ. πίεση στον πάνω θάλαμο της μηχανής), δημιουργούμενο κενό (δηλ. πίεση στον κάτω θάλαμο της μηχανής) και γεωμετρία του χυτού.

Διαπιστώθηκε επίδραση των παραμέτρων της χύτευσης:

I. ΣΤΙΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΠΟΨΥΞΗΣ ΤΩΝ ΧΥΤΩΝ, που προέκυψαν με χρήση θερμοστοιχείων, σε προκαθορισμένα σημεία εντός του χυτού, κατά τη διάρκεια της χύτευσης.

- Ο χρόνος στερεοποίησης του χυτού εξαρτάται κατά 80% από τη θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού.
- Η ταχύτητα απόψυξης του χυτού και για τα τρία στάδια της απόψυξης επηρεάζεται κυρίως από την πίεση στο θάλαμο χύτευσης, σε ποσοστό περίπου 35%, αλλά και όλες οι άλλες παράμετροι συνεισφέρουν.
- Η απόψυξη του τήγματος επηρεάζεται κατά περίπου 38% από την πίεση στο θάλαμο χύτευσης, δηλαδή από την ύπαρξή ή όχι κενού.
- Ο ρυθμός απόψυξης κατά τη στερεοποίηση επηρεάζεται κυρίως από τη θερμοκρασία του καλουπιού, με ποσοστό συνεισφοράς 33%.
- Η απόψυξη του στερεοποιημένου χυτού επηρεάζεται κατά 40% από την πίεση στο θάλαμο χύτευσης.
- Προτείνεται μία εμπειρική σχέση και ένας συντελεστής συσχέτισης ώστε με γνωστό το χρόνο στερεοποίησης για μία περίπτωση χύτευσης να μπορεί να εκτιμηθεί ο χρόνος στερεοποίησης για χύτευση με διαφορετική θερμοκρασία καλουπιού. Η χρήση του συντελεστή συσχέτισης εφαρμόζεται επιτυχώς για τις περιπτώσεις χύτευσης βαρύτητας και χύτευσης με υπερπίεση.
- Οι καμπύλες απόψυξης στα διαφορετικά σημεία του χυτού διαφέρουν σημαντικά. Παρόλο που η μελετώμενη γεωμετρία είναι μικρών διαστάσεων, τα ανομοιόμορφα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χυτού είναι ικανά να προκαλέσουν διαφορές στον τρόπο στερεοποίησης.

II. ΣΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΔΕΝΔΡΙΤΙΚΩΝ ΚΛΑΔΩΝ (SDAS)

- Υπάρχει διαφορά στο μέγεθος των δενδριτικών κλάδων ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενο μέθοδο χύτευσης.
- Η SDAS διαφέρει σημαντικά στα διάφορα σημεία της γεωμετρίας του χυτού.
- Η SDAS, που είναι ενδεικτική του τοπικού χρόνου στερεοποίησης, στην περιοχή της μεγάλης διατομής του χυτού είναι μεγαλύτερη στο

τεμάχιο από χύτευση κενού, ακολουθεί το τεμάχιο από χύτευση υπερπίεσης-κενού κι έπειτα αυτό της χύτευσης βαρύτητας.

III. ΣΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ

- Γενικά, συνολικά εξετάζοντας το τεμάχιο και στα πέντε σημεία που μελετήθηκαν, τις λιγότερες αυξομειώσεις ποσοστού πορώδους τις έχει η χύτευση κενού. Υπερτερεί έναντι των άλλων δύο μεθόδων στις περιοχές που είναι επίφοβες (ακμές και μικρές διατομές).
- Στη χύτευση κενού υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή πορώδους στη μάζα του χυτού
- Η χύτευση βαρύτητας είναι συνολικά η δυσμενέστερη περίπτωση χύτευσης όσον αφορά στην εμφάνιση πόρων, αλλά το πορώδες είναι επίσης ομοιόμορφα κατανεμημένο στη μάζα του χυτού
- Η χύτευση κενού-υπερπίεσης μειώνει σημαντικά τον αριθμό και το μέγεθος των ακαθαρσιών που είναι κατανεμημένες στο χυτό, αλλά υπάρχουν ακαθαρσίες εντοπισμένες σε συγκεκριμένα σημεία.
- Στις μικρές διατομές των χυτών, παρατηρείται έντονο πρόβλημα εμφάνισης πόρων κατά τη χύτευση κενού με χρήση υπερπίεσης. Η εφαρμογή υπερπίεσης καταλήγει σε δημιουργία πόρων ομοιόμορφα κατανεμημένων, σχετικά μεγάλου μεγέθους. Η χύτευση κενού είναι αυτή που έχει τη μικρότερη μέση τιμή μεγέθους πόρων αλλά και τη μικρότερη μέγιστη τιμή πόρου, σε μικρές διατομές.
- Στις μεγάλες διατομές η καλύτερη περίπτωση ως προς την κατά μέσο όρο εμφάνιση πόρων είναι η περίπτωση της χύτευσης με χρήση υπερπίεσης.
- Στις ακμές της μεσαίας και μεγάλης διατομής, παρατηρείται η πιο έντονη εμφάνιση πόρων στη χύτευση με υπερπίεση, έναντι της χύτευσης κενού. Αντίθετα, στα κέντρα των διατομών αυτών, η χύτευση υπερπίεσης υπερτερεί σημαντικά της χύτευσης κενού.

B. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

Η χύτευση είναι η πιο περίπλοκη από της κατεργασίας από πλευράς φυσικών φαινομένων. Η εξέλιξη των Η/Υ έχει δώσει τη δυνατότητα για χρήση της αριθμητικής προσομοίωσης ως εργαλείο για την καλύτερη σχεδίαση της κατεργασίας.

Γ. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

Πάρα πολύ σημαντικές παράμετροι για την προσομοίωση της χύτευσης είναι η θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού και το ποσοστό πλήρωσης της κοιλότητας του καλουπιού. Αυτές, ωστόσο, είναι πληροφορίες που προκύπτουν από πειραματικές μετρήσεις. Η παράμετρος μεγαλύτερης αβεβαιότητας, που επηρεάζει έντονα τον τρόπο στερεοποίησης είναι ο Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας (ΣΜΘ) στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού. Η τιμή του ΣΜΘ εξαρτάται από πλήθος παραμέτρων. Ο προσδιορισμός του απαιτεί μετρήσεις από ειδικά σχεδιασμένα πειράματα, σε συνδυασμό με κάποια αριθμητική διαδικασία. Με τα σύγχρονα μέσα και τη ραγδαία ανάπτυξη των η/υ (ειδικά με συστήματα παράλληλης επεξεργασίας κλπ),

αξίζει τον κόπο η βελτίωση των μεθόδων προσδιορισμού του ΣΜΘ για πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης της χύτευσης που προκύπτουν για χαρακτηριστικά σενάρια χύτευσης, βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Για την κάθε περίπτωση αριθμητικής προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν οι ΣΜΘ που προσδιορίστηκαν με βέλτιστο τρόπο.

Δ. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (ΣΜΘ) ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗ

I. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ

Ο αναλυτικός προσδιορισμός είναι μία διαδικασία γρήγορη που εμπειριέχει πλήθος απλουστευτικών παραδοχών και για το λόγο αυτό δεν οδηγεί ρεαλιστική προσομοίωση της χύτευσης. Ενδεχομένως, όμως, η τιμή του ΣΜΘ που προτείνεται να αποτελεί μία καλή αρχική εκτίμηση για μία αντίστροφη διαδικασία προσδιορισμού.

II. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ

Ο αντίστροφος προσδιορισμός το ΣΜΘ είναι μία αριθμητική μέθοδος που καταλήγει σε πολύ καλά αποτελέσματα ως προς την προσέγγιση των αριθμητικών με τα πειραματικά αποτελέσματα. Εμπειριέχει, όμως, την πιθανότητα επίτευξης βέλτιστης τιμής χωρίς φυσική έννοια. Χρειάζονται επιπλέον αλγόριθμοι για την επίτευξη αποδεκτών βέλτιστων τιμών. Τέλος, με τη συγκεκριμένη διατύπωση, δε δίνει την ευελιξία στο χρήστη να παρέμβει ή να προκαθορίσει τη μορφή του ΣΜΘ, εάν έχει κάποια αίσθηση της φυσικής σημασίας του προβλήματος.

III. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ «ΔΟΚΙΜΗΣ-ΚΑΙ-ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ»

Η διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος» είναι μία μέθοδος που καταλήγει σε πολύ καλή προσέγγιση πειραματικών και αριθμητικών καμπυλών απόψυξης. Πρόκειται, όμως για μία χειροκίνητη και μη αυτοματοποιημένη διαδικασία και ως εκ τούτου χρονοβόρα και επίπονη. Πλεονέκτημά της αποτελεί η ευελιξία του χρήστη να δοκιμάσει τιμές ΣΜΘ σύμφωνα με την κρίση του και σύμφωνα με την εμπειρία που έχει αποκτήσει. Προτείνεται μόνο για συγκεκριμένους λόγους και περιορισμένη εφαρμογή, όπως πχ. για τον έλεγχο ορισμένων τιμών ΣΜΘ, μετά το πέρας κάποιας αριθμητικής διαδικασίας.

IV. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Από τη συγκεκριμένη διατριβή προτάθηκε και διερευνήθηκε η δυνατότητα προσδιορισμού του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας (ΣΜΘ) κατά τη χύτευση, μέσω βελτιστοποίησης με Γενετικό Αλγόριθμο.

Βασικό πλεονέκτημα της χρήσης ΓΑ για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ κατά τη χύτευση είναι το γεγονός ότι οι μεταβλητές σχεδίασης σε έναν ΓΑ μπορεί να αντιπροσωπεύουν οποιασδήποτε φυσικής σημασίας μέγεθος.

Συνεπώς, υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου για ποικιλία μορφών ΣΜΘ: ο ΣΜΘ μπορεί να θεωρηθεί συνάρτηση της θερμοκρασίας ή του χρόνου, βηματική ή εκθετική συνάρτηση, γραμμική συνάρτηση κατά περιοχές, συνδυασμός μορφών ή -ακόμα- πίνακας τιμών (πχ. (t, h_{tc})). Είναι στο χέρι του μελετητή να αποφασίσει ποια μορφή ΣΜΘ θα χρησιμοποιήσει, και μπορεί να επιλέγει ένα χρωμόσωμα με πολύ λίγες μεταβλητές. Η προσέγγιση αυτή υπερέχει έναντι των προσεγγίσεων με «αντίστροφες μεθόδους προσδιορισμού», στις οποίες ο ΣΜΘ είναι ένα σύνολο ζευγών (t, h_{tc}) ή (T, h_{tc}) και άρα, για να επιτευχθεί ικανοποιητικό αποτέλεσμα, απαιτείται μεγάλο πλήθος σημείων.

Προτείνεται η κωδικοποίηση των μεταβλητών σχεδίασης με ακεραίους, για τους παρακάτω λόγους:

- η ανομοιομορφία του χρωμοσώματος, που εκ των πραγμάτων υπάρχει στη συγκεκριμένη εφαρμογή, δεν αποτελεί εμπόδιο
- μπορεί να διερευνηθεί ένα πολύ μεγάλο πεδίο αναζήτησης
- με ανάπτυξη κατάλληλου κώδικα που να διαχειρίζεται integers, υπάρχει δυνατότητα να υλοποιηθούν οι αποτελεσματικότεροι γενετικοί τελεστές του ΓΑ χωρίς πρόβλημα
- καθίσταται εύκολη η διαδικασία ενσωμάτωσης περιορισμών των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης.

Για την αριθμητική σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών καμπυλών απόψυξης είναι απαραίτητη η κατάλληλη επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων.

Η χρήση του κριτηρίου της κατακόρυφης απόστασης των δύο καμπυλών, σε ένα μεγάλο πλήθος σημείων, κρίνεται επαρκής για τη σύγκρισή τους.

Επειδή ο ΓΑ για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ χρησιμοποιεί, εκ των πραγμάτων, υπολογιστικά ακριβή αντικειμενική συνάρτηση (περιλαμβάνει διεξαγωγή προσομοίωση της χύτευσης, προτείνεται η αποθήκευση των χρωμοσωμάτων με τα αντίστοιχα κόστη τους σε μία βάση δεδομένων, ώστε να αποφεύγονται οι άσκοπες κλήσεις της αριθμητικής προσομοίωσης.

Φαίνεται πως μπορεί να γίνει εφαρμοστεί μία ντετερμινιστική διαδικασία βελτιστοποίησης για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος.

Ε. ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΤΟΥ ΣΜΘ

Ως προς τη μορφή του ΣΜΘ: δοκιμάστηκαν τρεις περιπτώσεις μορφής ΣΜΘ και μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς την αποτελεσματικότητα της κάθε μίας:

- ΣΜΘ=f(T): είναι σαφής η φυσική σημασία μίας τέτοιας θεώρησης. Ωστόσο, το υπολογιστικό κόστος της προσομοίωσης είναι πολύ μεγάλο - πολλαπλάσιο σε σχέση με των εναλλακτικών επιλογών.

- $\Sigma\text{Μ}\Theta=f_{\text{step}}(t)$: σημαντικά μικρότερο υπολογιστικό κόστος, με αποτύπωση των φυσικών φαινομένων. Ακόμα και η απλοποιητική θεώρηση βηματικής συνάρτησης του $\Sigma\text{Μ}\Theta$ ως προς το χρόνο κρίνεται ικανοποιητική.
- $\Sigma\text{Μ}\Theta=f_{\text{exp}}(t)$: πλεονεκτεί ως προς το ότι απαιτείται μικρός αριθμός ανεξάρτητων μεταβλητών. Παρόλα αυτά, τα βέλτιστα αποτελέσματα στα οποία κατέληξε η διερεύνηση, δεν κρίνονται αποδεκτά από πλευράς φυσικής σημασίας.

Είναι σημαντικό να οριστούν όρια για την κάθε μεταβλητή σχεδίασης που να υποδεικνύουν τη φυσική σημασία του $\Sigma\text{Μ}\Theta$. Είναι σύνηθες στις μεθόδους προσδιορισμού $\Sigma\text{Μ}\Theta$, οι αριθμητικές διαδικασίες να καταλήγουν σε αποτέλεσμα που στερείται φυσικού νοήματος. Η εισαγωγή κατάλληλων περιορισμών αποτρέπει εμφάνιση μη επιθυμητών λύσεων.

ΣΤ. ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ $\Sigma\text{Μ}\Theta$ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΑ, ΓΙΑ ΧΥΤΟ ΜΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ CASTING MODULUS

Για την προσομοίωση της χύτευσης, η θεώρηση ενιαίου $\Sigma\text{Μ}\Theta$ σε όλο το χυτό δεν είναι επαρκής. Η χρήση διαφορετικών $\Sigma\text{Μ}\Theta$ σε περιοχές με διαφορετικό casting modulus υπερτερεί σαφώς, καθώς ακολουθεί τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τρόπου στερεοποίησης σε διαφορετικά σημεία του χυτού.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για ταυτόχρονο προσδιορισμό των $\Sigma\text{Μ}\Theta$ σε περιοχές του χυτού με διαφορετικό casting modulus κρίνεται ιδιαίτερα αποτελεσματική. Οι πειραματικές καμπύλες απόψυξης στις διαφορετικές περιοχές του χυτού προσεγγίζονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά από τις αντίστοιχες αριθμητικές, καθώς ακολουθούνται τόσο τα ποιοτικά, όσο και τα ποσοτικά χαρακτηριστικά της απόψυξης σε όλη τη μάζα του χυτού.

Τέλος, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για βέλτιστο προσδιορισμό $\Sigma\text{Μ}\Theta$ με χρήση ΓΑ, ταυτόχρονα για περιοχές του χυτού με διαφορετικό $\Sigma\text{Μ}\Theta$, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε είδος χύτευσης.

ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ

Τα σημαντικότερα σημεία καινοτομίας της παρούσας διδακτορικής διατριβής συνοψίζονται στα ακόλουθα:

A. ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Η λήψη μετρήσεων θερμοκρασίας με χρήση θερμοστοιχείων εντός του χυτού, κατά τη χύτευση ακριβείας κραμάτων χαλκού (CuZn33 και CuNi12Zn24), αποτελεί στοιχείο καινοτομίας. Καθοριστικό ρόλο διαδραμάτισε η πρωτότυπη κατασκευή μηχανής χύτευσης που επιτρέπει την τοποθέτηση θερμοστοιχείων εντός του χυτού, με ταυτόχρονη διατήρηση των συνθηκών κενού και πίεσης κατά την κατεργασία.
2. Η πειραματική παραμετρική μελέτη για την αποτύπωση της επίδρασης των παραμέτρων χύτευσης στον τρόπο απόψυξης και την ποιότητα του χυτού προϊόντος και η εκτέλεση πειραμάτων με βάση το σχεδιασμό κατά Taguchi και η μετέπειτα στατιστική επεξεργασία με ANOVA συνέβαλλαν στην ποσοτικοποίηση της επίδρασης των παραμέτρων χύτευσης (πίεση κατά τη χύτευση, εφαρμογή κενού, θερμοκρασία έγχυσης τήγματος, θερμοκρασία καλουπιού και γεωμετρία του χυτού) στο τελικό αποτέλεσμα (πορώδες, SDAS, καμπύλες απόψυξης). Αυτού του είδους η πληροφορία δεν συναντάται συνήθως στη διεθνή βιβλιογραφία.
3. Από τα συμπεράσματα της πειραματικής διερεύνησης, τα πλέον καινοτόμα στοιχεία ήταν (α) η ποσοτικοποιημένη παρουσίαση της επίδρασης των συνθηκών πίεσης κατά τη χύτευση στο πορώδες, σε διαφορετικά σημεία του χυτού και (β) η εμπειρική σχέση που προτείνεται για εκτίμηση του χρόνου στερεοποίησης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας προθέρμανσης του καλουπιού.

B. ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

4. Σε ό,τι αφορά την προσομοίωση της χύτευσης, η παρουσίαση της επίδρασης των παραμέτρων εισόδου της χύτευσης στον τρόπο απόψυξης του μετάλλου είχε ως στόχο την αποκάλυψη των σημαντικών και των λιγότερο σημαντικών παραμέτρων, αποτελεί επίσης στοιχείο καινοτομίας. Η προσομοίωση της χύτευσης αποτελεί πρόσφατο εργαλείο στα χέρια των μηχανικών της βιομηχανίας. Το πλήθος των δημοσιευμένων εργασιών που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα τρισδιάστατης μοντελοποίησης και προσομοίωσης της χύτευσης, είναι μικρό. Οι δημοσιευμένες εργασίες παρουσιάζουν συνήθως την εφαρμογή του συγκεκριμένου υπολογιστικού εργαλείου σε συγκεκριμένη βιομηχανική εφαρμογή, χωρίς να εστιάζουν στη μελέτη των παραμέτρων εισόδου της προσομοίωσης.

Γ. ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΜΘ

5. Στην παρούσα διατριβή, πραγματοποιείται άμεση σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων προσδιορισμού του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας (ΣΜΘ), καθώς εφαρμόζονται για την ίδια γεωμετρία. Οι μέθοδοι που μελετήθηκαν για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ ήταν ο αναλυτικός προσδιορισμός, ο αντίστροφος προσδιορισμός, ο προσδιορισμός με τη διαδικασία «δοκιμής-και-σφάλματος» και ο προτεινόμενος προσδιορισμός με χρήση γενετικών αλγορίθμων. Με τον τρόπο αυτό αποκαλύπτεται η αποτελεσματικότητα της κάθε μεθόδου.
6. Αναπτύχθηκε Γενετικός Αλγόριθμος (ΓΑ) για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ. Ο ΓΑ χρησιμοποιεί και αξιολογεί τα αποτελέσματα προσομοιώσεων για να προτείνει βελτιωμένες τιμές ΣΜΘ, μέχρι να καταλήξει σε βέλτιστο αποτέλεσμα. Επειδή η διαδικασία εμπεριέχει υψηλό υπολογιστικό κόστος λόγω της ανάγκης εκτέλεσης προσομοιώσεων, αναπτύχθηκαν τεχνικές για μείωση του υπολογιστικού κόστους. Η λογική της δημιουργίας βάσης δεδομένων για γρήγορη πρόσβαση στα υπάρχοντα αποτελέσματα ήταν καθοριστική.
7. Η χρήση ακέραιων μεταβλητών (integers) ως χρωμοσώματα, για το ΓΑ αποδείχτηκε καίριας σημασίας, καθώς επιτρέπει στον προτεινόμενο αλγόριθμο να διερευνήσει αποτελεσματικά ένα πολύ μεγάλο πεδίο ορισμού. Η κωδικοποίηση των μεταβλητών σχεδίασης με ακεραίους για τη συγκεκριμένη εφαρμογή αποτελεί σημαντική πρωτοτυπία.
8. Αποκαλύπτεται πως για την προσομοίωση της χύτευσης, η θεώρηση ενιαίου ΣΜΘ σε όλο το χυτό δεν είναι επαρκής. Η χρήση διαφορετικών ΣΜΘ σε περιοχές με διαφορετικό casting modulus υπερτερεί σαφώς. Ποσοτικοποιημένα, η συγκεκριμένη διατύπωση παρουσιάζεται για πρώτη φορά.
9. Αναπτύχθηκε μεθοδολογία για ταυτόχρονο προσδιορισμό των ΣΜΘ σε περιοχές του χυτού με διαφορετικό casting modulus. Η χρήση του ΓΑ κρίνεται για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού ΣΜΘ κρίνεται ιδιαίτερα αποτελεσματική.

Βιβλιογραφία

- Alagarsamy, A., 2003. Casting Defect Analysis Procedure and a Case History. In *Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron*.
- Alexandrou, A., Bardinet, F. & Loué, W., 1999. Mathematical and computational modeling of die filling in semisolid metal processing. *Journal of Materials Processing Technology*, 96, pp.59-72.
- American Foundry Society, 1974. *International Atlas of Casting Defects* M. T. Rowley, ed., American Foundry Society.
- American Molybdenum Corp, Molybdenum. Available at: <http://www.americanmoly.com/cms/>.
- Anderson, J.T. et al., 1997. Experimental investigation and finite element modelling in gravity die casting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 211(2), pp.93-107.
- Askar, H.G., 1987. The front-tracking scheme for the one-dimensional freezing problem. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 24, pp.859-869.
- ASM International, 1992. *ASM Handbook: Casting* Volume Chairman: D.M. Stefanescu, ed., ASM International.
- ASM International, 1996. *ASM Specialty Handbook: Cast Irons* J. R. Davis, ed., ASM International.
- ASM International, 2008. *Casting Design and Performance*, ASM International.
- Aweda, J.O. & Adeyemi, M.B., 2009. Experimental determination of heat transfer coefficients during squeeze casting of aluminium. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3), pp.1477-1483. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013608003166> [Accessed June 22, 2012].
- Beck, J., 1962. Thermocouple temperature disturbances in low conductivity molds. *Trans ASME*, p.124.
- Beck, J.V., Blackwell, B. & Clair, C.R. St., 1985. *Inverse heat conduction: ill-posed problems*, New York: Wiley - Interscience, John Wiley & Sons.
- Beeley, P., 2001. *Foundry Technology* Second., Butterworth-Heinemann.
- Biringuccio, V., 1540. *The Pirotechnia of Vannoccio Biringuccio: The Classic Sixteenth-century Treatise on Metals And Metallurgy*,

- Translated by Smith, Cyril Stanley and Gnudi, Martha Teach* 1990th ed. American Institute of of Mining and Metallurgical Engineers, ed., New York: Dover.
- Calba, L. & Lefebvre, D., 2005. Modelling the Investment Casting Process. *Hommes et Fonderie*, 355, pp.38-42.
- Campbell, J., 2003. *Castings - The New Metallurgy Of Cast Metals (2Nd Ed)* Butterworth Heinemann, ed.,
- Campbell, John, 1993. *Castings*, Butterworth-Heinemann Limited.
- Carter, R., Effects of changing the water-to-powder ratio on jewelry investments.
- CEN TC 133, 2008. (prCR 13388): *Copper and copper alloys-Compendium of compositions and products*,
- Chandley, G.D., 1999. Use of vacuum for counter-gravity casting of metals. *Materials Research Innovation*, 3(1), pp.14-23.
- Chauncy Maples Malawi Trust, 2913. NEW PROPELLER CAST. Available at: <http://www.chauncymaples.org/newsletter/default.php?s=2&p=12>.
- Cheung, N. et al., 2009. Melt characteristics and solidification growth direction with respect to gravity affecting the interfacial heat transfer coefficient of chill castings. *Materials and Design*, 30(9), pp.3592-3601.
- Couturier, G., 2009. Influences de l'étendue de la zone pâteuse et de la phase d'intensification de la pression sur la microporosité de gaz dans les pièces de fonderie. *Hommes et Fonderie*, 394.
- Couturier, G. & Rappaz, M., 2006. A porosity model for multi-gas systems in multi-component alloys. *MCWASP 2006, Edited by TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)*, (1).
- Cox, M. et al., 2007. Influence of vacuum counter gravity filling on reliability of 2L99 aluminium investment. *Materials Science and Technology*, 23(9).
- Davies, G.J., 1973. *SOLIDIFICATION AND CASTING*, London: Applied Science Publishers LTD.
- Dobrzański, L.A. et al., 2006. Methodology of analysis of casting defects. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 18(1), pp.267-270.
- Dong, Y. et al., 2011a. Determination of interfacial heat-transfer coefficient during investment-casting process of single-crystal blades. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(12), pp.2123-2131.

- Dong, Y. et al., 2011b. Determination of interfacial heat-transfer coefficient during investment-casting process of single-crystal blades. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(12), pp.2123–2131.
- ESI Group, 2004. ProCAST 2004.1: Release notes and installation guide.
- Faccenda, V., 1998. Investment casting: Centrifugal or static vacuum assist? *Gold Technology*, 23, pp.21–26.
- Fan, Z.-T. & Ji, S., 2005. Low pressure lost foam process for casting magnesium alloys. *Materials Science and Technology*, 21(6), pp.727–734.
- Fardi Ilkhchy, A., Jabbari, M. & Davami, P., 2012. Effect of pressure on heat transfer coefficient at the metal/mold interface of A356 aluminum alloy. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(5), pp.705–712.
- Flemings, M., 1974. *Solidification Processing*, New York: McGraw-Hill.
- France Helices, Propeller cast and mould. Available at: <http://speedafloat.com/wiki/marine-propulsion-wiki/>.
- Gainsbury, P.E., 1979. Jewellery Investment Casting Machines. *Gold Technology*, 12(1), pp.2–8.
- Gebelin, J.-C. & Jolly, M.R., 2003. Modelling of the investment casting process. *Journal of Materials Processing Technology*, 135(2–3), pp.291–300.
- Gjestland, H. & Westengen, H., 2007. Advancements in High Pressure Die Casting of Magnesium. *Advanced Engineering Materials*, 9(9), pp.769–776. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/adem.200700168>.
- Goldberg, D.E., 1989. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. , p.412.
- Griffiths, W D, 2000. Modelled heat transfer coefficients for Al - 7 wt- % Si alloy castings unidirectionally solidified horizontally and vertically downwards. *Materials Science and Technology*, 16(March), pp.255–260.
- Griffiths, W D, 1999. The Heat-Transfer Coefficient during the Unidirectional Solidification of an Al-Si Alloy Casting. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 30(June), pp.473–482.
- Griffiths, W. D. & Kayikci, R., 2007. The effect of varying chill surface roughness on interfacial heat transfer during casting solidification. *Journal of Materials Science*, 42(11), pp.4036–4043. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-006-0388-x> [Accessed May 30, 2013].

- Groenewald, T., 1980. Gold Jewellery Investment Casting - Current research reported upon a recent colloquium. *Gold Bulletin*, 13(2), pp.80-81.
- Guo, Z. et al., 2005. Modelling of materials properties and behaviour critical to casting simulation. *Materials Science and Engineering: A*, 413, pp.465-469.
- Guo, Z.-P. et al., 2009. Determination of the metal/die interfacial heat transfer coefficient and its application in evaluating the pressure distribution inside the casting during the high pressure die casting process. *International Journal of Cast Metals Research*, 22(1), pp.327-330.
- Guo, Zhi-peng et al., 2008. Determination of the heat transfer coefficient at metal-die interface of high pressure die casting process of AM50 alloy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(25-26), pp.6032-6038.
- Hadamard, J., 1902. Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique. *Princeton University Bulletin*, pp.49-52.
- Han, J. et al., 2006. Research on the method for producing complex SiCP/Al composite disk brake castings. *Journal of Ceramic Processing Research*, 7(4), pp.339-342.
- Haupt, R.L. & Haupt, S.E., 2004. *PRACTICAL GENETIC ALGORITHMS* Second Edi., Wiley - Interscience, John Wiley & Sons.
- Heisser, C., Flender, E. & Sturm, J.C., 2011. The History of Casting Process Simulation. In M. Tiryakioğlu, John Campbell, & P. N. Crepeau, eds. *Shape Casting: Fourth International Symposium 2011 (in honor of Prof. John T. Berry)*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Hero, H, 1990. The mould-filling capacity of two casting alloys. *Journal of materials science*: *Materials in Medicine I*, pp.94-99.
- Hero, Hakon & Waarli, M., 1991. Effect of vacuum and supertemperature on mold filling during casting. *European Journal of Oral Sciences*, 99(1), pp.55-59.
- Hines, J.A., 2004. Determination of Interfacial Heat-Transfer Boundary Conditions in an Aluminum Low-Pressure Permanent Mold Test Casting. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 35(B), pp.299-311.
- Hitesh Hansora, Gold casting machine. Available at: <http://www.flickr.com/photos/32178226@N05/3011922153/>.
- Ho, K & Pehlke, Robert D., 1984. Mechanisms of heat Transfer at a Metal-Mold Interface. In *AFS Trans.* 92. pp. 585-594.

- Ho, Kai & Pehlke, Robert D, 1985. Metal-Mold Interfacial Heat Transfer. , 16(September), pp.585-594.
- Holland, J.H., 1992. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*,
- Horton, R.A., 2008. Investment Casting. In *Casting, ASM Handbook, vol.15*.
- Hwang, J.-C. et al., 1994. Measurement of Heat Transfer Coefficient at Metal/Mold Interface During Casting. *ransactions of the American Foundrymen's Society*, 102, pp.94-144.
- Ji-qiang, L.I., Zi-tian, F.A.N. & Xuan-pu, D., 2007. Effect of process parameters on density of magnesium alloy parts by low-pressure expendable pattern casting. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17, pp.358-3626.
- Jolly, M, 2003. Castings. In I. Milne, R. O. Ritchie, & B. Karihaloo, eds. *Comprehensive Structural Integrity, Volume1: Structural Integrity Assessment-Examples and Case Studies*. Elsevier, pp. 377-466.
- Jolly, Mark, 2002. Casting simulation: How well do reality and virtual casting match? State of the art review. *International Journal of Cast Metals Research*, 14, pp.303-313.
- Kalpajian, S., 1997. *Manufacturing Engineering and Technology* 3rd ed., Addison-Wesley.
- Kim, T.-G. & Lee, Z.-H., 1997. Time-varying heat transfer coefficients between tube-shaped casting and metal mold. *Int J Heat Mass Transfer*.
- Klassert, A. & Tikana, L., 2007. Copper and Copper-Nickel-Alloys - An Overview. *European Federation of Corrosion Publications*, 50, pp.47-61.
- Kokot, V. & Bernbeck, P., 2006. Application of a Genetic Algorithm in Casting Process Simulation. In *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO) Proceedings*.
- Konrad, C.H. et al., 2011. Determination of heat transfer coefficient and ceramic mold material parameters for alloy IN738LC investment castings. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2), pp.181-186.
- Krimpenis, A. et al., 2005. Simulation-based selection of optimum pressure die-casting process parameters using neural nets and genetic algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(5-6), pp.509-517. Available at:

<http://www.springerlink.com/index/10.1007/s00170-004-2218-0>
[Accessed March 20, 2012].

- Krishnan, M. & Sharma, D., 1994. Determination of heat transfer coefficient between casting and chill in unidirectional heat flow. *AFS Trans*, p.102:769.
- Kumar, S., Kumar, P. & Shan, H S, 2007. Optimization of tensile properties of evaporative pattern casting process through Taguchi 's method. *Journal of Materials Processing Technology*, 204, pp.59-69.
- Kumar, S.P. & Shan, H.S., 2008. Effect of process parameters on the solidification time of Al-7%Si alloy castings produced by VAEPD process. *Int J Adv Manuf Technol*, 22(7-8).
- Kumar, T. & Prabhu, K., 1991. Heat flux transients at the casting chill interface during solidification of aluminum base alloys. *Metall Trans B*, 22B, p.717.
- Lagerstedt, A. et al., 2005. Measurements and modelling of air gap formation in iron - based alloy. *Materials Science and Engineering A*, 413 - 414, pp.44-51.
- Lau, F., Lee, W.B., et al., 1998. A study of the interfacial heat transfer between an iron casting and a metallic mould. *Journal of Materials Processing Technology*, 79(1-3), pp.25-29.
- Lau, F., Lee, W B, et al., 1998. A study of the interfacial heat transfer between an iron casting and a metallic mould. *Journal of Materials Processing Technology*, 79(1-3), pp.25-29.
- Lee, G.H. & Lee, Z.H., 2001. Fabrication of polycrystalline Si wafer by vacuum casting and the effect of mold coating materials. *Journal of Crystal Growth*, 233, pp.45-51.
- Lewis, R W & Ravindran, K., 2000. Finite element simulation of metal casting. *International journal for numerical methods in engineering*, 59(April 1999), pp.29-59.
- Lewis, R. W. et al., 1996. *The Finite Element Method in Heat Transfer Analysis* 1st ed., John Wiley & Sons.
- Lewis, R.W. & Roberts, P., 1987. Finite element simulation of solidification problems. *Applied Scientific Research*, 44(1-2), pp.61-92.
- Li, J., Fan, Z. & Dong, X., 2007. Effect of process parameters on density of magnesium alloy parts by low-pressure expendable pattern casting. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17, pp.358-362.

- Liu, G.R. & Han, X., 2003. *Computational Inverse Techniques in Nondestructive Evaluation* 1st ed., CRC Press.
- Liu, Z. et al., 2008. Thermal transfer between metal mold interfaces for magnesium alloy LFC process under vacuum. *Journal of Nanjing University of aeronautics and Astronautics*, 40(3).
- Liu, Zili et al., 2002. Evaluation of the effect of vacuum on mold filling in the magnesium EPC process. *Journal of Materials Processing Technology*, 120, pp.94-100.
- Long, A. et al., 2011. Determination of the heat transfer coefficient at the metal-die interface for high pressure die cast AlSi9Cu3Fe. *Applied Thermal Engineering*, 31(17-18), pp.3996-4006.
- Mahoney, D.O. & Browne, D.J., 2000. Use of experiment and an inverse method to study interface heat transfer during solidification in the investment casting process. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 22, pp.111-122.
- Majumdar, J., Dasgupta, S. & Raychaudhuri, B., 1977. An experimental method for measuring mould/metal gap variation with time in a metal casting process. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 10.
- MALTB User's Guide, Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox.
- Mane, V. V, Sata, A. & Khire, M.Y., 2010. New Approach to Casting Defects Classification and Analysis Supported by Simulation. In *59th Indian foundry congress*. Chandigarh.
- Marques, M.J., 2001. CAE Techniques for Casting Optimization. *INEGI - Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial*, pp.3-6.
- Marshall Technocast Pvt. Ltd., Industrial Casting. Available at: <http://www.indiamart.com/marshalltechnocast/industrial-casting.html>.
- Martorano, M., 2000. Heat transfer coefficient at the metal-mould interface in the unidirectional solidification of Cu-8%Sn alloys. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(14), pp.2541-2552. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931099002987>.
- McClain, S., 2002. Thesis. Available at: <http://www.eng.uab.edu/me/faculty/smclain/Thesis.pdf>.
- Meier, J.W., 1970. *Non-ferrous Metals Casting, History and Forecast: A Contribution to the History of Metals Casting*, Department of Energy, Mines and Resources.
- Meneghetti, G., Pediroda, V. & Poloni, C., 1999. Application of a Multi Objective Genetic Algorithm and a Neural Network to the

- optimisation of foundry processes . *Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science*, pp.457-470.
- Mera, N.S., Elliott, L. & Ingham, D.B., 2003. On the use of Genetic Algorithms for Solving Ill-Posed Problems. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 11(2), pp.105-121. Available at: <http://www.informaworld.com/openurl?genre=article&doi=10.1080/1068276021000058473&magic=crossref||D404A21C5BB053405B1A640AFFD44AE3> [Accessed June 30, 2011].
- Michalewicz, Z., 1996. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs* 3rd ed., Springer-Verlag.
- Minev, R. et al., 2005. Capability study of the vacuum investment casting for rapid prototyping and micro - manufacturing. *Proc. Advances Manufacturing Technology*, 44(series 2), pp.138-143.
- Mirbagheri, S.M.H., Shrinparvar, M. & Chirazi, A., 2007. Modeling of metallo-static pressure on the metal-mould interface thermal resistance in the casting process. *Materials & Design*, 28(7), pp.2106-2112.
- Moraru, L., 2002. The heat transfer coefficient during the solidification of aluminum. *Czechoslovak Journal of Physics*, 52(3), pp.387-393.
- Muojekwu, CA Samarasekera, IV Brimacombe, J., 1995. Heat transfer and microstructure during the early stages of metal solidification. *Metall Trans B*, 26(B), p.361.
- Nayak, R.K. & Sundarraaj, S., 2009. Selection of Initial Mold-Metal Interface Heat Transfer Coefficient Values in Casting Simulations—a Sensitivity Analysis. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 41(1), pp.151-160.
- New Image Dental Laboratory, Full Cast Gold Restorations. Available at: <http://www.newimagedl.com/fullcast.php>.
- Ningbo Casting Machinery Industry Co. Ltd., Steel investment casting. Available at: <http://www.casting-investment.com/>.
- Nishida, Y., Droste, W. & Engler, S., 1986. The air-gap formation process at the casting-mold interface and the heat transfer mechanism through the gap. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 17(4), pp.833-844.
- Non-Ferrous Founders' Society, Casting Processes and Tooling. Available at: <http://www.defensecastingsuppliers.com/defense-contractors-toolkit-home/casting-processes-tooling.aspx>.
- Nourani, M., Milani, A.S. & Yannacopoulos, S., 2011. Taguchi Optimization of Process Parameters in Friction Stir Welding of 6061

- Aluminum Alloy: A Review and Case Study. *Engineering*, 03(02), pp.144–155.
- Ott, D., 1997. *Handbook on casting and other defects In Gold Jewellery Manufacture* C. W. Corti, ed., London: World Gold Council, Industrial Division.
- Ott, D. & Raub, C.J., 1985. Investment Casting of Gold Jewellery – Gas pressures in moulds during casting: their measurement and their effects. *Gold Technology*, 18(2), pp.58–68.
- Pagratis, N. et al., 2007. A holistic approach to the exploitation of simulation in solid investment casting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(6), pp.967–979.
- Park, M., 2010. *ASM Handbook*,
- Pehlke, R D et al., 1998. *Heat Transfer at the Mold Metal Interface in Permanent MoLd Casting of Aluminum Alloys Project*,
- Philip Bralsford Consultancy, Manufacturing Audits. Available at: <http://www.philipbralsford.co.uk/manufacturing-audits>.
- Piwonka, T.S, Woodbury, K.. & Wiest, J., 2000. Modeling casting dimensions: effect of wax rheology and interfacial heat transfer. *Materials & Design*, 21(4), pp.365–372.
- Prasad, R., 2012. Progress in Investment Castings. In M. Srinivasan, ed. *Science and Technology of Casting Processes*. pp. 25–72.
- Prates, M. & Biloni, H., 1972. Variables affecting the nature of the chill zone. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 3(6), pp.1501–1510.
- R2 Quality Castings, Boat Propeller Casting By Precision Investment Casting Foundry. Available at: <http://www.qualitycastingswi.com/precision-investment-casting-successes/boatPropellerPouring>.
- R2 Quality Castings, Industrial Propeller Manufacturing: 3-Blade MP Style. Available at: <http://www.qualitycastingswi.com/investment-casting/propellers>.
- Rafique, M.M. a. & Iqbal, J., 2009. Modeling and simulation of heat transfer phenomena during investment casting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(7-8), pp.2132–2139.
- Rajaraman, R. & Velraj, R., 2007. Comparison of interfacial heat transfer coefficient estimated by two different techniques during solidification of cylindrical aluminum alloy casting. *Heat and Mass Transfer*, 44(9), pp.1025–1034. Available at:

<http://www.springerlink.com/index/10.1007/s00231-007-0335-7>
[Accessed December 18, 2011].

- Ransom & Randolph, 2005. Application Instructions R & R[®] Argentum Jewelry Investment. , (800), pp.1-4.
- Rappaz, M., 1989. Modelling of microstructure formation in solidification processes. *International Materials Reviews*, 34(3).
- Rappaz, M., Desbiolles, J.-L. & Drezet, J.-M., 1995. Application of Inverse Methods to the Estimation of Boundary Condition and Properties. In M. Cross & J. Campbell, eds. *Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VII*. London.
- Reikher, A. & Barkhudarov, M.R., 2007. *Casting: An Analytical Approach - (Engineering Materials and Processes)* Springer-Verlag, ed., London: Springer.
- Ross, P.J., 1995. *Taguchi Techniques for Quality Engineering* 2nd ed., McGraw-Hill Professional.
- Rubinsky, B. & Cravalho, E.G., 1981. A Finite Element Method for the Solution of One-Dimensional Phase Change Problems. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 24, pp.1987-1989.
- Sabau, a. S., 2006. Measurement of heat flux at metal/mould interface during casting solidification. *International Journal of Cast Metals Research*, 19(3), pp.188-194.
- Sahai, V. & Overfelt, R.A., 1996. Contact conductance simulation for alloy 718 investment castings of various geometries. *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 103, pp.627-632.
- Şahin, H.M. et al., 2006. Determination of unidirectional heat transfer coefficient during unsteady-state solidification at metal casting-chill interface. *Energy Conversion and Management*, 47(1), pp.19-34. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890405000816> [Accessed June 30, 2011].
- Santos, C., 2001. Determination of transient interfacial heat transfer coefficients in chill mold castings. *Journal of Alloys and Compounds*, 3A(1-2), pp.1501-186.
- Santos, C., Quaresma, J.M.. & Garcia, A, 2001. Determination of transient interfacial heat transfer coefficients in chill mold castings. *Journal of Alloys and Compounds*, 319(1-2), pp.174-186.
- Santos, C.A., Siqueira, C.A. & Garcia, Amauri, 2004. Inverse Problems in Science and Engineering Metal - mold heat transfer coefficients during horizontal and vertical Unsteady- State solidification of Al - Cu and Sn - Pb Alloys. , (June 2012), pp.37-41.

- Savitzky, A. & Golay, M.J.E., 1964. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical chemistry*, 36(8), pp.1627-1639.
- Schmidt, D., 1999. Casting simulation software. *Modern Casting*, (May 1).
- Schnur, D.S. & Zabarar, N., 1992. An inverse method for determining elastic material properties and a material interface. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 33(10), pp.2039-2057.
- Shamasundar, S., Ramachandran, D. & Shrinivasan, N.S., 2004. Computer simulation and analysis of investment casting process. *Foundry*, March/Apri, pp.29-44.
- Shanley, J.J. et al., 1981. A comparative study of the centrifugal and vacuum - casting techniques of casting removable partial denture frameworks. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 45(1).
- Sin, S.L. & Dubé, D., 2004. Influence of process parameters on fluidity of investment-cast AZ91D magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A*, 386, pp.34-42.
- Spinelli, J.E., Ferreira, I.L. & Garcia, A., 2004. Influence of melt convection on the columnar to equiaxed transition and microstructure of downward unsteady-state directionally solidified Sn-Pb alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 384(1-2), pp.217-226.
- Spinelli, José E et al., 2012. International Journal of Thermal Sciences Design of mechanical properties of Al-alloys chill castings based on the metal/mold interfacial heat transfer coefficient. *International Journal of Thermal Sciences*, 51, pp.145-154.
- Spinelli, José E. et al., 2004. Influence of melt convection on dendritic spacings of downward unsteady-state directionally solidified Al-Cu alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 383(2), pp.271-282.
- Stafford, R.O., Rice, A.B. & Pinella, D.F., 1987. Investment Casting Process Design - part 2: solidification simulation. *ASME Int Conf Comp Eng 1987*; 2:437., 2, p.437.
- Stavroulakis, G.E. & Antes, H., 1997. Nondestructive elastostatic identification of unilateral cracks through BEM and neural networks. *Computational Mechanics*, 20(5), pp.439-451.
- Sun, H.-C. & Chao, L.-S., 2009. Analysis of Interfacial Heat Transfer Coefficient of Green Sand Mold Casting for Aluminum and Tin-Lead Alloys by Using a Lump Capacitance Method. *Journal of Heat Transfer*, 129, pp.595-600.

- Taha, M.A. & Hassan, A.A., 2001. Estimation of air gap and heat transfer coefficient at different faces of Al and Al - Si castings solidifying in permanent mould Mathematical model. *Materials Science and Technology*, 17(September), pp.1093-1101.
- Tikhonov, A.N. et al., 1995. Numerical Methods for the Solution of Ill-Posed Problems. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*.
- Todoroki, H. & Phinichka, N., 2009. Heat Transfer Behavior of Molten Iron and Nickel during the First 0.2 Seconds of Solidification. , 49(9), pp.1347-1355.
- TopCast Engineering, 2010. Topcast Engineering Catalogue - TVC The Ultimate Vacuum/Pressure Casting Machine. , pp.1-4. Available at: www.topcast.it.
- Tracy Die Cast INC., Aluminum investment casting. Available at: <http://www.tracydiecasting.com/>.
- Traini, T. et al., 2003. Adherence of investment to Au - Pd - Ag alloy using a vacuum - argon pressure casting machine. *Dental materials*: official publication of the Academy of Dental Materials, 19, pp.732-738.
- Trovant, M. & Argyropoulos, S., 2000. Finding Boundary Conditions: A Coupling Strategy for the Modeling of Metal Casting Processes: Part I . Experimental Study and Correlation Development. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 31(February).
- Uchibori, A. & Ohshima, H., 2010. Numerical Analysis of Melting / Solidification Phenomena Using a Moving Boundary Analysis Method X-FEM. In S. T. Revankar, ed. *Advances in Nuclear Fuel*. pp. 53-72.
- University of Cambridge, 2001. Cu 70Zn 30 brass, dendritic solidification. *The DoITPoMS Micrograph Library*. Available at: <http://core.materials.ac.uk/search/detail.php?id=1462>.
- Upadhyaya, G.K. et al., 1995. Modelling the investment casting process: a novel approach for view factor calculations and defect prediction. *Applied Mathematical Modelling*, 19(6), pp.354-362.
- Vainer, M.I. & Lerner, Y.S., 1999. Vacuum-assisted investment casting of Al-Ni-bronze. *AFS Trans.*, (107), pp.35-42.
- Vidal, C., Infante, V. & Vilaça, P., 2010. Assessment of improvement techniques effect on fatigue behaviour of friction stir welded aerospace aluminium alloys. *Procedia Engineering*, 2(1), pp.1605-1616.
- Viskanta, R., 1988. Heat Transfer During Melting and Solidification of Metals. *Journal of Heat Transfer*, 110(4b), pp.1205-1219.

- Voller, V.R., Swaminathan, C.R. & Thomas, B.G., 1990. Fixed grid techniques for phase change problems: A review. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 30(4), pp.875-898.
- Wannarumon, S. & Grande, M.A., 2009. Comparisons of Computer Fluid Dynamic Software Programs applied to Jewelry Investment Casting Process. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 31, pp.88-94.
- Wong, M.L.D. & Pao, W.K.S., 2011. A genetic algorithm for optimizing gravity die casting's heat transfer coefficients. *Expert Systems with Applications*, 38(6), pp.7076-7080.
- Woodbury, K.A. et al., 1998. Measurement of interfacial heat transfer coefficients between aluminium castings and resin-bonded sand molds. *AFS Trans*, 106, p.705.
- Yang, W.H. & Tarng, Y.S., 1998. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 84, pp.122-129.
- Yang, Z. et al., 2006. Processing Research Solidification simulation of a SiCp / Al disk brake casting. *Journal of Ceramic Processing Research*, 7(4), pp.363-366.
- Zhang, L. et al., 2010. Inverse identification of interfacial heat transfer coefficient between the casting and metal mold using neural network. *Energy Conversion and Management*, 51(10), pp.1898-1904. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890410000865> [Accessed April 18, 2012].
- Zhang, L. & Li, L., 2013. Determination of heat transfer coefficients at metal/chill interface in the casting solidification process. *Heat and Mass Transfer*.
- Zhang, W., Xie, G. & Zhang, Dan, 2010. Application of an optimization method and experiment in inverse determination of interfacial heat transfer coefficients in the blade casting process. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(8), pp.1068-1076.
- Zhang, X.P., Xiong, S.M. & Xu, Q.Y., 2006. Numerical methods to improve the computational efficiency of solidification simulation for the investment casting process. *Journal of Materials Processing Technology*, 173(1), pp.70-74.
- Zhi-peng, G. et al., 2008. Determination of the heat transfer coefficient at metal die interface of high pressure die casting process of AM50 alloy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.

Zienkiewicz, O.C., Parekh, C.J. & Wills, A.J., 1973. The application of finite elements to heat conduction problems involving latent heat. *Rock mechanics*, 5(2), pp.65–76.

Βοσνιάκος, Γ.-Χ., 2004. Ελαττώματα χυτών Χύτευση Ελαττώματα και κανόνες σχεδιασμού χυτών. (Πανεπιστημιακές σημειώσεις σε μορφή pdf), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κονοφάγος, Κωνσταντίνος, 1965. *ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑ, Τόμος ΙΙ: Τα Κράματα* 1η ed., Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιον Πολυτεχνείον.

Λιακόπουλος, Α, Θεσσαλιασ, Πανεπιστημιο & Μηχανικων, Τμημα Πολιτικων, 2005. Αγγλική Ορολογία Τεύχος Ι - Ρευστομηχανική. , pp.1–13.

Χρυσουλάκης, Ι. Δ. & Παντελής, Δ. Ι., 1996. *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, Εκδ. Παπασωτηρίου.