



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΜΕΛΕΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΕΝ ΚΕΝΩ»



Επιμέλεια: **Αθανάσιος Ατσαλάκης**

Επιβλέπων: **Δημ. Ι. Παντελής**
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα
Οκτώβριος 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας των σπουδαστικών του υποχρεώσεων στο Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ο γράφων οφείλει να ευχαριστήσει, ευγνωμών, όλους όσους τον γαλούχησαν καθ'οιονδήποτε τρόπο και τον στήριξαν μέχρι σήμερα στην πορεία του. Σε αυτούς συμπεριλαμβάνονται συγγενείς, σαρκικοί και πνευματικοί, φίλοι, δάσκαλοι, καθηγητές, ακόμα και απλοί γνώριμοι.

Ευχαριστίες οφείλονται στον καθηγητή κ. Δημήτρη Παντελή και την υποψήφια διδάκτορα διδα. Αναστασία Βασιλείου για την πολύτιμη βοήθεια τους, τις χρήσιμες συμβουλές, το γόνιμο αντίλογό τους και την υπομονή τους.

Επιπλέον, ευχαριστεί εκ των προτέρων τον καθηγητή κ. Β. Παπάζογλου και τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Ν. Τσούβαλη, για την ανάγνωση και αξιολόγηση της εργασίας.

Αφιερούται εξαιρετικά

στον π.Ιωάννη Σαρρή,

στους γονείς μου Δημήτριο και Αναστασία και

στον κουμπάρο μου Γιάννη Καραγεώργο.

Αθανάσιος Ατσαλάκης

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πίνακας Περιεχομένων.....	3
Περίληψη.....	6
Abstract.....	7
Εισαγωγή.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	13
1.1.1 Ορισμός.....	15
1.1.2 Ιστορική αναδρομή.....	15
1.1.3 Μεγέθη-Υλικά χυτών προϊόντων.....	16
1.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ.....	17
1.2.1 Διάφορες Μέθοδοι.....	19
1.2.2 Χύτευση ακριβείας ή χύτευση χαμένου κεριού.....	28
1.2.2.1 Ιστορία - Σύγκριση - Εφαρμογές.....	28
1.2.2.2 Περιγραφή.....	29
1.2.2.3 Υλικά κατασκευής ομοιωμάτων.....	31
1.2.3 Χύτευση με υποβοήθηση κενού.....	36
1.3 Φυσικά Φαινόμενα Κατά Τη Χύτευση.....	39
1.3.1 Τρόποι Μετάδοσης Θερμότητας.....	39
1.3.2 Οι μηχανισμοί στερεοποίησης.....	42
1.4 Σχολιασμός Παραμέτρων - Αποτελεσμάτων Χύτευσης.....	53
1.4.1 Παράμετροι.....	53
1.4.2 Ελαττώματα πλινθωμάτων.....	56
1.5 Ο Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας (ΣΜΘ).....	62
1.5.1 Κατανόηση της φυσικής σημασίας.....	62
1.5.2 Γενική ανάλυση των Ho και Pehlke.....	63
1.5.3 Αντίσταση καλουπιού.....	64
1.5.4 Συμπεράσματα.....	65
1.6 Σκοπιμότητα Προσδιορισμού ΣΜΘ.....	67
1.7 Αναφορές Στη Διεθνή Βιβλιογραφία.....	68
1.7.1 Μέθοδοι υπολογισμού ΣΜΘ.....	68
1.7.2 Εργασίες προσδιορισμού ΣΜΘ στη διεθνή βιβλιογραφία.....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	89
2.1 Χρησιμοποιούμενα Υλικά.....	91
2.1.1 Το υλικό χύτευσης.....	91
2.1.1.1 Γενικά.....	91
2.1.1.2 Ο αλπακάς διαμέσου των χρόνων.....	92
2.1.1.3 Χρήσεις.....	93
2.1.1.4 Ιδιότητες.....	95
2.1.2 Το υλικό καλουπιού.....	97
2.2 Λήψη τιμών θερμοκρασίας με χρήση θερμοστοιχείων.....	99
2.3 Εξοπλισμος και Πειραματικη Διαδικασια.....	103
2.3.1 Φωτογραφίες εξοπλισμού.....	103
2.3.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	105
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	115
3.1 Περιγραφή του φυσικού φαινομένου.....	117
3.2 Θερμική μελέτη.....	120
3.3 Ενθαλπία Αλπακά.....	129
3.4 Διαδικασία προσομοίωσης.....	131

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	135
4.1 Θερμοκρασιακές Καμπυλες, Πολυων. Προσεγγιση & Κυρια Στοιχεια.....	137
4.1.1 Πείραμα με καλούπι στους 740 °C.....	137
4.1.2 Πείραμα με καλούπι στους 620 °C.....	139
4.2 Σύγκριση θερμοκρασιακών καμπυλών των δύο πειραμάτων.....	141
4.3 Η θερμική συμπεριφορά του γύψου.....	146
4.4 Οι ΣΜΘ που Προσδιοριστηκαν για Κάθε Πειραμα.....	150
4.4.1 ΣΜΘ στους 740 °C.....	150
4.4.1 ΣΜΘ στους 620 °C.....	151
4.5 Σχολιασμός της μορφής του ΣΜΘ.....	152
4.5.1 Ερμηνεία του υπολογιζόμενου ΣΜΘ.....	152
4.5.2 Σύγκριση με άλλες εργασίες.....	154
4.6 Η θερμοροή στα δύο πειράματα.....	158
4.7 Υπόθεση για το εμβαδό κάτω από την καμπύλη του ΣΜΘ.....	160
4.8 Αποτελέσματα Προσομοίωσης με τους ευρεθέντες συντελεστές.....	163
4.9 Βελτιστοποίηση του συντελεστή.....	165
4.10 Μετρηση Διαστασεων Χυτων.....	167
4.10.1 Αποτελέσματα μετρήσεων.....	167
4.10.2 Βέλτιστος αρχικός σχεδιασμός.....	171
4.11 Αποτελεσματα Μεταλλογραφίας Και Πορώδους Λοιπων Πειραμάτων.....	172
4.11.1 Μακροσκοπική Παρατήρηση στο Στερεοσκόπιο.....	174
4.11.2 Μέτρηση Πορώδους.....	179
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ	
ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	187
5.1 Γενικά Συμπεράσματα.....	189
5.2 Προτάσεις Για Μελλοντική Διερεύνηση.....	192
Βιβλιογραφία.....	195

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το παρόν πόνημα έχει ως αντικείμενο μελέτης τον προσδιορισμό της μορφής του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας στη διεπιφάνεια χυτού – καλουπιού, κατά τη χύτευση ακριβείας, με γύψινο καλούπι και εφαρμογή διαφοράς πίεσης. Αυτός ο συντελεστής περιγράφει τον τρόπο και την ένταση απομάκρυνσης της θερμότητας από το χυτό μέσω του καλουπιού. Μέσω δε σωστά μοντελοποιημένης προσομοίωσης, όπου εισάγεται ως δεδομένο, μπορούν να προβλεφθούν ο χρόνος στερεοποίησης και οι προκύπτουσες μικροδομές και να ελαχιστοποιηθούν το πορώδες τυχούσες άλλες ατέλειες.

Αρχικά γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στη χύτευση και παράθεση εργασιών από τη διεθνή βιβλιογραφία που μελετούν παρόμοια θέματα με διάφορες μεθόδους.

Όσον αφορά στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιείται τριμερές κράμα χαλκού με σύσταση 64% Cu – 12% Ni – 24% Zn (Maillechorts), που φέρει την εμπειρική ονομασία αλπακάς, και συναντάται σε πολλές χρήσεις. Τα πειράματα πραγματοποιούνται σε χυτόπρεσσα κενού του E.N.T. τροποποιημένη έτσι ούτως ώστε να είναι δυνατή η λήψη θερμοκρασιών με θερμοστοιχεία.

Τα δύο πειράματα που επεξεργάζονται για τη λήψη αποτελεσμάτων έχουν ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας τήγματος, αλλά διαφορετική θερμοκρασία καλουπιού. Γίνεται προσπάθεια να μετρηθεί με ακρίβεια η θερμοκρασιακή πτώση εκατέρωθεν της διεπιφάνειας και στη συνέχεια με σχέσεις μεταφοράς θερμότητας να υπολογιστεί ο ζητούμενος συντελεστής.

Επικουρικά στη μελέτη χρησιμοποιείται το λογισμικό προσομοίωσης χύτευσης ProCast. Γίνεται μοντελοποίηση των δύο πειραμάτων με τους συντελεστές που υπολογίστηκαν και στη συνέχεια υπέρθεση αριθμητικών και πειραματικών καμπύλων.

Αποτυπώνονται οι διαστάσεις των χυτών κατόπιν ενδεδειγμένων μετρήσεων και ερμηνεύονται τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα και από τις αποκλίσεις των διαστάσεών τους από τις ονομαστικές.

Επίσης από άλλη σειρά πειραμάτων με διαφορετικές συνθήκες πιέσεων, αλλά ίδιες αρχικές θερμοκρασιακές συνθήκες και ίδιας γεωμετρίας δοκιμίων, γίνεται λείανση της μέσης τομής, παρατήρηση της μικροδομής και μέτρηση του πορώδους.

Τέλος, απαριθμούνται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις προαναφερθείσες έρευνες, αμφισβητήσεις πάνω σε κατεστημένες απόψεις και προτείνονται ενδιαφέροντα θέματα περαιτέρω έρευνας.

ABSTRACT

The present thesis is orientated to determine the form of heat transfer coefficient (HTC) at the metal/mold interface, during investment casting, using plaster as material for mold and using low pressure difference between melting and casting chambers and the environment. This coefficient describes the way and the burst in which heat is released from the casting and gets through the metal/mold interface. Using this coefficient as input in an appropriate modelled simulation, solidification time and owing microstructures can be predicted. In this way, porosity and other possible defects can be eliminated.

In the beginning a review from international literature for the phenomena that take place during the casting is conducted and parts and results of projects that have similar subject as this one, even if they approach the problem in the same or a different way, are presented.

As far as the experimental procedure is concerned, the alloy in question was 64% Cu - 12% Ni - 24% Zn (Maillechorts series), known with the empirical name German Silver or White Silver and which is met in many uses. The casting production was achieved using the specially modified vacuum casting machine of the Shipbuilding Technology Laboratory, able to plug on it thermocouples for temperature reading.

The two experiments that were used to export results have same pressural conditions and pouring temperature, but different mold initial temperature. The temperature drop through either side of the interface has been attempted to be measured. Using equations which describe the heat transfer, HTC in question has been calculated.

Additionally to thermal calculations, casting simulation software ProCast has been used. The two experiments have been simulated using the calculated HTCs as an input parameter. Plotting of the experimental and the simulated cooling curves permitted comparison between them.

Dimensions of castings are carefully measured. A result of this investigation is the shrinkage percentage as function of mold's temperature.

Furthermore, items coming from other experimental series with different pressural but same initial temperature conditions and of the same geometry have been cut towards the axial direction and the middle section of them has been metallographically prepared in order to reveal the microstructure and measure the porosity level.

Finally, the resulting values of the HTC are commented and compared to similar results from the literature. The difficulties of the whole procedure are highlighted and tasks for further investigation are proposed.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσομοίωση της στερεοποίησης αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας μεθόδων χύτευσης μόνιμου, αλλά και μη μόνιμου καλουπιού. Είναι ο τρόπος να προβλεφθούν τα διάφορα ελαττώματα χυτών με ακρίβεια, χωρίς απώλεια αναλωσίμων και σε ελάχιστο συγκριτικά χρόνο. Η μεγάλη πολυπλοκότητα πειραματικών δοκιμών σε χυτεύσεις υψηλής πίεσης και τα συνεπαγόμενα κόστη σε συνδυασμό με τους τεχνικούς περιορισμούς των διαδικασιών αυτών, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ανάπτυξη εργαλείων για την προσομοίωση των διαφόρων παραμέτρων της παραγωγικής διαδικασίας, όπως η πλήρωση της κοιλότητας, η στερεοποίηση, οι συνθήκες θερμότητας της κοιλότητας, αποτελούν βασική προτεραιότητα για τις βιομηχανίες.

Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της προσομοίωσης, κατά συνέπεια, είναι τα εξής: οικονομία ενέργειας, βελτίωση στην ποιότητα του προϊόντος, μείωση του χρόνου διαδικασίας, μείωση της επανειλημμένης χρήσης των ίδιων υλικών και αύξηση της παραγωγής.

Μια καλή μοντελοποίηση του προβλήματος απαιτεί ακριβείς οριακές συνθήκες διαδικασίας, καθώς και τις ακριβείς θερμικές ιδιότητες των υλικών και τις αρχικές συνθήκες καλουπιού και μετάλλου.

Μεταξύ των διαφόρων συνθηκών που ορίζονται, πρωτεύουσας θα λέγαμε σημασίας, είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στη διεπιφάνεια χυτού - καλουπιού κατά τη στερεοποίηση, λόγω της εξακριβωμένης επιρροής του στη μικροδομή των χυτών. Η ιδιαίτερη σημασία του συντελεστή και κατά συνέπεια ο λόγος που γίνονται εργασίες τέτοιου είδους, έγκειται στο γεγονός ότι αν δεν οριστεί σωστά, τα αποτελέσματα δεν έχουν καμία σχέση με την πραγματικότητα και οδηγούν σε λανθασμένα συμπεράσματα.

Κατά γενική ομολογία, ο ΣΜΘ δεν είναι μία σταθερά, αλλά μεταβάλλεται κατά τη στερεοποίηση και εξαρτάται από πλήθος παραγόντων, όπως τις θερμοφυσικές ιδιότητες των μετάλλων που έρχονται σε επαφή, τη γεωμετρία της χύτευσης, τη θερμοκρασία καλουπιού και έγχυσης, την τραχύτητα της επιφάνειας καλουπιού που έρχεται σε επαφή με το χυτό, τις επικαλύψεις κλπ.

Ο ΣΜΘ στη διεπιφάνεια καλουπιού και μετάλλου είναι η πιο σημαντική παράμετρος που επηρεάζει το ρυθμό στερεοποίησης και ως εκ τούτου το είδος των σχηματιζόμενων μικροδομών και συνακόλουθα τις μηχανικές ιδιότητες του στερεοποιημένου προϊόντος. Δεν υπάρχουν ακόμη στη βιβλιογραφία γενικευμένα και πλήρως αποδεκτά μοντέλα που να υπολογίζουν το ΣΜΘ μέσω βασικών αρχών, λόγω πρακτικών δυσκολιών. Δεν είναι δυνατό να ληφθούν θερμοκρασίες ακριβώς στα επιθυμητά σημεία και η φύση και τα όρια της διεπιφάνειας μεταβάλλονται. Η μετάδοση θερμότητας στη διεπιφάνεια καλουπιού και μετάλλου χαρακτηρίζεται από μία

μακροσκοπική προσέγγιση του εν λόγω συντελεστή, ο οποίος παίρνει υψηλές τιμές στο πρώτο στάδιο της χύτευσης, εξαιτίας της καλής επαφής του υγρού μετάλλου και της στερεής κοιλότητας. Καθώς συνεχίζεται η στερεοποίηση, το στερεό καλούπι διαστέλλεται λόγω απορρόφησης θερμότητας, ενώ το στερεοποιημένο πλέον μέταλλο συστέλλεται λόγω απόψυξης. Κατά συνέπεια αναπτύσσεται ένα κενό αέρος, εφόσον και η ασκούμενη πλέον πίεση δεν επαρκεί για να εξασφαλίσει την επαφή μεταξύ των δύο υλικών. Αυτό το χρονικά και χωρικά μεταβαλλόμενο κενό αέρος αποτελεί μία επιπλέον αντίσταση στη ροή θερμότητας μεταξύ καλουπιού και μετάλλου. Αυτή η θερμική αντίσταση έχει σημαντικό αντίκτυπο στο ρυθμό στερεοποίησης, καθώς επηρεάζει και το σχηματισμό της μικροδομής του χυτού. Από τη στιγμή που θα δημιουργηθεί αυτό το κενό, η μετάδοση θερμότητας στη διεπιφάνεια μειώνεται ταχύτατα και ο ΣΜΘ αποκτά μία σχετικά σταθερή τιμή.

Η μελέτη της παρούσας εργασία ξεκίνησε να προσεγγίσει το ΣΜΘ με τη μέθοδο trial and error με ένα σημείο μέτρησης θερμοκρασίας στο χυτό. Για τη σύγκλιση της αριθμητικής και της πειραματικής καμπύλης απόψυξης χρειάστηκε η εφαρμογή ιδιαίτερα μεγάλων συντελεστών και πάλι χωρίς επιτυχία. Στη χύτευση ακριβείας αναμένονται χαμηλοί ΣΜΘ λόγω της θερμομονωτικής φύσης των καλουπιών. Έτσι αποφασίστηκε η διερεύνηση με άλλη μέθοδο. Εν προκειμένω λοιπόν υπολογίζονται οι συντελεστές με μέθοδο σημειακού όγκου για 2 πειράματα, με διαφορετικές θερμοκρασίες καλουπιού.

Στην αρχή της εργασίας αυτής, αναλύεται ο μηχανισμός της στερεοποίησης και τα ελαττώματα που μπορεί να προκύψουν και η σημασία του υπολογισμού του ΣΜΘ. Στη συνέχεια, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις τιμές που λαμβάνει κυρίως στη χύτευση ακριβείας, για κράματα αλουμινίου και νικελίου, καθώς δεν υπάρχουν μελέτες για κράματα χαλκού. Στο πειραματικό μέρος αναλύεται διεξοδικά η πειραματική διαδικασία, περιγράφεται ο εξοπλισμός χύτευσης και μελέτης μικροδομής και δίνονται οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των υλικών που εμπλέκονται στη διαδικασία.

Στο κεφάλαιο της επεξεργασίας των μετρήσεων περιγράφεται το θερμικό μοντέλο με το οποίο έγιναν οι υπολογισμοί των ΣΜΘ και οι αρχικές και οριακές συνθήκες με τις οποίες έγιναν τα τρεξίματα της προσομοίωσης με βάση παλαιότερο μοντέλο.

Τέλος, στο κεφάλαιο αποτελεσμάτων, γίνεται σύγκριση των πειραματικών καμπυλών απόψυξης, των καμπυλών των ΣΜΘ που προέκυψαν και των θερμοροών. Με υποθετικό μοντέλο αποδεικνύεται η σχετική αδυναμία του trial and error ενός σημείου μέτρησης. Επίσης βρίσκονται οι αποκλίσεις των διαστάσεων των χυτών από το αρχικό δοκίμιο και γίνεται μια πρόβλεψη των διαστάσεων καλουπιού για αναπαραγωγή δοκιμίων με τις ονομαστικές διαστάσεις. Ακόμη, παρατίθενται αποτελέσματα της μεταλλογραφίας και διατυπώνονται σχετικά συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

1.1.1 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-διαμορφωμένη κοιλότητα υποδοχής (τύπος, καλούπι), όπου και στερεοποιείται.

1.1.2 Ιστορική αναδρομή

Η χύτευση πρωτοεμφανίστηκε γύρω στο 3,500 π.Χ. στη Μεσοποταμία και χρησιμοποιήθηκε για παραγωγή χάλκινων εξαρτημάτων, κυρίως επίπεδων, με καλούπια από πέτρα ή ψημένο πηλό. Γύρω στο 2,000 π.Χ. η χύτευση εξελίχθηκε περισσότερο. Για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκαν πυρήνες από ψημένο πηλό (αντίστοιχες με τις σημερινές «καρδιές»), για να φτιάχνονται εσωτερικές κοιλότητες μέσα στα χυτά.

Η τεχνολογία της χύτευσης εξελίχθηκε στη συνέχεια από τους Κινέζους γύρω στο 1,500 π.Χ.. Οι Κινέζοι, παρά το ότι δεν είχαν χρησιμοποιήσει μέχρι τότε τη χύτευση, την υιοθέτησαν και την ανέπτυξαν, ιδιαίτερα στον τομέα του καλουπιού. Η αρχαιολογική σκαπάνη έχει ανακαλύψει καλούπια κατασκευασμένα με ξεχωριστή τέχνη. Οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν διαιρετά καλούπια με πολλά εξαρτήματα που προσδένονταν μεταξύ τους (μέχρι και τριάντα). Εκτός από τους Κινέζους, ιδιαίτερη τέχνη στη χύτευση παρουσίασαν και οι Ινδοί, που χύτευαν χαλκό και μπρούντζο για εργαλεία, όπλα, σκεύη κ.λπ.. Τέλος, η χύτευση του σιδήρου πρωτοεμφανίστηκε γύρω στα 1000 π.Χ. στη Συρία και στην Περσία.

Στη Δύση παρόλο που σαν τεχνική η χύτευση ήταν γνωστή από παλιά, η χρήση της στη μορφοποίηση μεταλλικών αντικειμένων δεν ήταν διαδεδομένη. Στις αρχές του 13^{ου} αιώνα, το κύριο ενδιαφέρον των τεχνιτών περιοριζόταν στην εφαρμογή της μεθόδου για την παραγωγή καμπαρών. Το 1313 χυτεύεται το πρώτο κανόνι. Ο Vannoccio Biringuccio που έγινε επικεφαλής του παπικού χυτηρίου στη Ρώμη το 1538 και κατέγραψε λεπτομερώς την τεχνική της χύτευσης αναγορεύεται πατέρας της βιομηχανίας χυτηρίων. Στην Αμερική το πρώτο χυτήριο λειτούργησε το 1642.

Σήμερα η χύτευση είναι μία από τις σημαντικότερες κατεργασίες μορφοποίησης προϊόντων. Υπάρχουν ειδικές μονάδες για την παραγωγή χυτών αντικειμένων, που ονομάζονται **χυτήρια** και που παράγουν μεταλλικά προϊόντα, σχεδόν στην τελική τους μορφή.

1.1.3 Μεγέθη-Υλικά χυτών προϊόντων

Τα προϊόντα της χύτευσης ποικίλλουν σε υλικά, σε πολυπλοκότητα και διαστάσεις. Τα μεγέθη τους αρχίζουν από λίγα χιλιοστά και βάρους μερικά κλάσματα του γραμμαρίου, όπως είναι τα δοντάκια των φερμουάρ, και καταλήγουν σε τέτοια που πλησιάζουν τα 10m και βάρη μερικών τόνων, όπως είναι οι προπέλες των υπερωκεανίων.

Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μεταλλικά υλικά είναι ο χυτοσίδηρος, ο χάλυβας, το αλουμίνιο, ο μπρούντζος, ο ορείχαλκος, το μαγνήσιο και τα κράματα του ψευδαργύρου. Ωστόσο ως τεχνική μορφοποίησης, η χύτευση δε χρησιμοποιείται μόνο για μεταλλικές κατασκευές, αλλά και για μη μεταλλικά χυτά αντικείμενα όπως π.χ. πολυμερικά, γυάλινα, κεραμικά.

1.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

Οι τεχνικές χύτευσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ποικιλοτρόπως. Έτσι άλλες φορές κατηγοριοποιούνται με το είδος του καλουπιού, άλλες με τον τρόπο τροφοδοσίας του τήγματος, άλλες με τις εφαρμοζόμενες πιέσεις κ.ά.. Προφανώς ένα είδος μπορεί να ανήκει σε παραπάνω από μία κατηγορίες.

Με βάση το είδος καλουπιού διακρίνονται χυτεύσεις

- α) μόνιμου καλουπιού, όπου τα καλούπια χρησιμοποιούνται για πολλές συνεχόμενες χυτεύσεις και
- β) μη μόνιμου καλουπιού (άμμο, γύψο, κεραμικό καλούπι κλπ), όπου τα καλούπια σε αυτή την περίπτωση καταστρέφονται για να αποκαλυφθεί το χυτό.

Με βάση τον τρόπο έγχυσης διακρίνονται

- α) η εκ των άνω ή κατευθείαν χύτευση, όπου η απόθεση πραγματοποιείται από πάνω,
- β) η εν αναρροή ή πηγαία χύτευση, όπου η ελεύθερη επιφάνεια του τήγματος πραγματοποιεί ανοδική πορεία καθώς το τηγμένο μέταλλο διοχετεύεται από τη βάση του. Σε αυτή την περίπτωση προφανώς υπάρχει υποβοήθηση υπερπίεσης από κάτω ή υποπίεσης από πάνω,
- γ) φυγοκεντρική χύτευση, όπου λόγω της φυγοκέντρο δυνάμεως το τήγμα ρέει προς το καλούπι.

Επίσης ανάλογα με το ρυθμό απόχυσης του τήγματος γίνεται διάκριση σε

- α) συνεχείς και
- β) ασυνεχείς τεχνικές χύτευσης, οι οποίες πραγματοποιούνται σε μόνιμα (μεταλλικά) ή μη μόνιμα καλούπια (γύψινα, από άμμο κτλ).

Η εξέλιξη των τεχνικών χύτευσης επιτρέπει, ως κάποιο βαθμό, τη δημιουργία μορφών και επιφανειών, με σχετική άνεση, εξοικονόμηση υλικού και σε σύντομο χρονικό διάστημα. Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους παραγωγής αντικειμένων ωστόσο, υστερεί ενίοτε σε περιπτώσεις απαίτησης υψηλής ακρίβειας, ποιότητας εναλλαξιμότητας, λειτουργικότητας και συναρμογής. Στις περισσότερες εφαρμογές αποτελεί μια πολύπλοκη και δαπανηρή εργασία και για αυτό το λόγο η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής καθορίζεται σε συσχετισμό με τα παρακάτω :

- i. Το χρησιμοποιούμενο υλικό
- ii. Τη μορφή και το μέγεθος του τεμαχίου
- iii. Την ακρίβεια και την ποιότητα
- iv. Τον αριθμό των προς παραγωγή αντικειμένων
- v. Τις εγκαταστάσεις που διατίθενται

Για να είναι οικονομικά συμφέρουσα μια διαδικασία χύτευσης πρέπει αρχικά, το χυτό να είναι απλής γεωμετρίας, ώστε να μειωθούν τα έξοδα κατασκευής των μοντέλων, των πυρήνων και των καλουπιών. Έτσι η σχεδίαση και η διαμόρφωση του χυτού λαμβάνει υπ' όψιν τη χρησιμοποιούμενη τεχνική, τις συνθήκες χύτευσης και τα προβλήματα που προκαλούνται από αυτές (κακή ψύξη, πόροι, εσωτερικές τάσεις) καθώς και τη δυνατότητα εύκολης απομάκρυνσής του και καθαρισμού του.

Για την επίτευξη των παραπάνω απαιτήσεων και την ικανοποίηση όσο το δυνατόν περισσότερων εφαρμογών, έχουν αναπτυχθεί στις μέρες μας πολλές μέθοδοι χύτευσης που κάθε μια έχει διαφορετικά αποτελέσματα και διαφορετική φιλοσοφία παραγωγής.

Μία σύντομη αναφορά στις επικρατέστερες τεχνικές χύτευσης θα γίνει στη συνέχεια με βάση το είδος του καλουπιού. Δε δίνεται ιδιαίτερη έκταση καθώς σκοπός της παρούσας εργασίας δεν είναι να περιγράψει αυτές, ενώ υπάρχει πληθώρα πληροφοριών για κάποιον που θα θελήσει να ασχοληθεί με κάποια από τις υπάρχουσες στη διεθνή βιβλιογραφία και στο διαδίκτυο.

Θα δοθεί βάση στη χύτευση ακριβείας με τη μέθοδο του χαμένου κεριού και υποβοήθηση κενού.

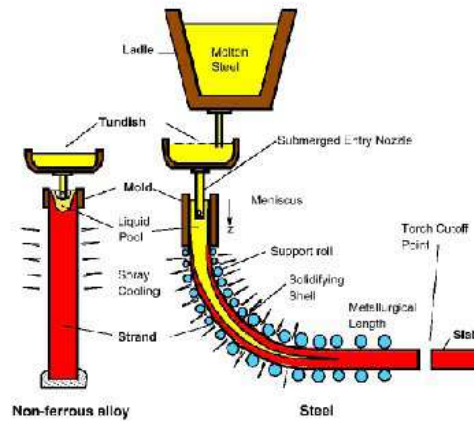
1.2.1 Διάφορες Μέθοδοι

α. Συνεχής χύτευση

Η μέθοδος αυτή συνίσταται στο σχηματισμό πλινθώματος κατά συνεχή παραγωγή και πραγματοποιείται υπό τη συνεχή απόχυση τηγμένου μετάλλου σε διάτρητο ψυχόμενο καλούπι, όπου στερεοποιείται και εξάγεται με τη μορφή συνεχούς ράβδου.

Η διατομή της ράβδου έχει τη μορφή της διατομής του καλουπιού, η οποία είναι συνήθως κυκλική, τετραγωνική ή παραλληλόγραμμη.

Μια εγκατάσταση συνεχούς απόχυσης παρουσιάζεται στην εικόνα 1.1.

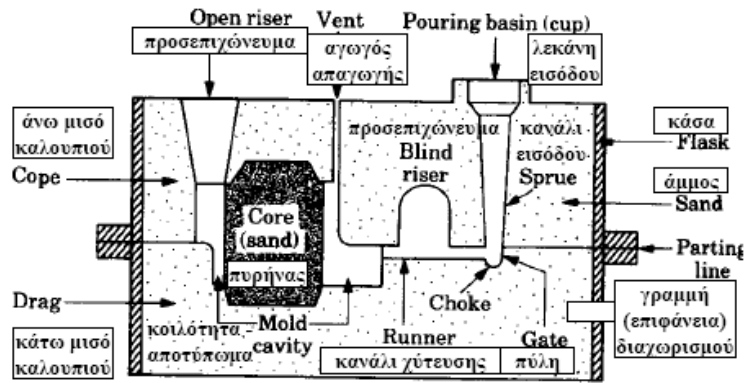


Εικ. 1.1 Διάταξη συνεχούς χύτευσης

Βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε κράματα χάλυβα, χαλκού και αλουμινίου.

β. Χύτευση σε άμμο (τύπωμα με το χέρι)

Μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές, είναι η χύτευση σε άμμο αφού επιτρέπει την παραγωγή τεμαχίων από οποιοδήποτε σχεδόν μέταλλο ανεξαρτήτως βάρους ή μεγέθους.



Εικ. 1.2 Καλούπι από άμμο (τύπωμα με το χέρι)

Η διαδικασία της μεθόδου είναι αρκετά σύνθετη και απαρτίζεται από τα ακόλουθα στάδια:

- i. Η τύπωση: δηλαδή η δημιουργία κοιλότητας στο καλούπι με τη χρήση μοντέλλου.
- ii. Προσθήκη πυρήνων, αφού αφαιρεθεί το μοντέλλο.
- iii. Σχεδιασμό του συστήματος εισαγωγής του τηγμένου μετάλλου με τρόπο που να επιτρέπει τη διάχυση του σε όλα τα μέρη των κοιλότητων.
- iv. Απόχυση του τήγματος
- v. Αφαίρεση της άμμου, μετά τη στερεοποίηση με χρήση υδροβολής, αμμοβολής, χειροκίνητα κτλ.
- vi. Κοπή των προσεπιγωνευμάτων και των αγωγών με χρήση φλόγας, τροχού, πρέσα κτλ.
- vii. Καθαρισμός από τα υπόλοιπα άμμου και περαιτέρω επεξεργασία του τελικού χυτού.

γ. Χύτευση σε άμμο (μηχανικό τύπωμα)

Στην προηγούμενη μέθοδο χύτευσης το παρασκευαζόμενο καλούπι είναι μιας χρήσεως. Απαιτείται δηλαδή η καταστροφή του προκειμένου να εξάγουμε το χυτό και επομένως όσα τεμάχια θέλουμε να κατασκευάσουμε, τόσα καλούπια πρέπει να διαθέτουμε. Για να αυξήσουμε το ρυθμό παραγωγής χρησιμοποιούμε τις μηχανές

τύπωσης, οι οποίες περισφίγγουν με δόνηση ή με πίεση το πλαίσιο που περιέχει ήδη την άμμο. Το αποτύπωμα του τεμαχίου δίνεται από ένα πρότυπο που στηρίζεται πάνω σε μια πλάκα και είναι είτε μεταλλικό είτε γύψινο.

Με αυτήν την τεχνική επιτυγχάνουμε αναπαραγωγή όμοιων αντικειμένων με σημαντικά μεγαλύτερη ταχύτητα και ποιότητα. Επιπλέον απαλείφουμε τον παράγοντα ανθρώπινου λάθους στην όλη διαδικασία και έχουμε τη δυνατότητα ταυτόχρονης χύτευσης και δημιουργίας του τύπου

δ. Τύπωμα με κελύφη (shell mold casting)

Η διαδικασία κατασκευής τυπώματος με κελύφη, ονομάζεται διαφορετικά και χύτευση Copping. Αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου και εφαρμόστηκε στις Η.Π.Α από το 1947. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την γρήγορη κατασκευή λεπτότοιχων και ανθεκτικών καλουπιών (κελύφη) με την προσθήκη θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης στο μίγμα της άμμου. Επιτυγχάνεται δηλαδή η στερεοποίηση ενός λεπτού στρώματος άμμου, μερικών χιλιοστών, το οποίο αγκαλιάζει το πρότυπο.



Εικ. 1.3 Τύπωμα κελύφους

Με τη μέθοδο αυτή μπορούμε να παρασκευάσουμε χυτά από 50 gr έως 100 kg. Τα πλεονεκτήματα που παρέχει είναι:

- Επίτευξη γεωμετρικής ακρίβειας και διαστάσεων μεγαλύτερη από αυτήν του τυπώματος με κοινή άμμο.
- Χύτευση ακέραιων τεμαχίων με λεία επιφάνεια και επομένως απλοποίηση της τελικής κατεργασίας

- Μεγάλη ταχύτητα παρασκευής και οικονομία υλικού
- Δυνατότητα χύτευσης όλων των κραμάτων χυτηρίου, σιδηρούχων ή μη.

Μειονέκτημα της μεθόδου είναι το σχετικά αυξημένο κόστος και ειδικά αυτό της ρητίνης.

ε. Χύτευση σε καλούπι γύψου

Το συγκεκριμένο είδος χύτευσης εμφανίζει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με τη μέθοδο Croning με τη διαφορά ότι το πρότυπο αλείφεται με πάστα γύψου η οποία στερεοποιείται σχετικά γρήγορα. Το υλικό του μοντέλλου δεν μπορεί να είναι από ξύλο αφού το πορώδες του επηρεάζει την τελική επιφάνεια του γύψου και κατ' επέκταση του χυτού.

Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το πολύ μικρό κόστος και η ομοιόμορφη μικροδομή του χυτού που επιτυγχάνεται με την αργή απόψυξη εξαιτίας της χαμηλής διαπερατότητας του γύψου.

Μειονέκτημα ωστόσο αποτελεί η αργή ξήρανση του, η οποία ολοκληρώνεται περίπου σε 16 ώρες σε θερμοκρασία φούρνου 120°C. Επιπλέον δε είναι δυνατή η χύτευση σιδηρούχων κραμάτων λόγω της ψαθυροποίησης του γύψου σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1200 °C.

Αργότερα γίνεται εκτενέστερη αναφορά.

στ. Χύτευση με κεραμικό καλούπι

Η διαδικασία της μεθόδου είναι όμοια με αυτή του γύψινου καλουπιού με πλεονέκτημα την αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και επομένως τη δυνατότητα χύτευσης σιδηρούχων κραμάτων. Η κεραμική πάστα αποτελείται από :

- $ZrSiO_4$
- Al_2O_3 (αλούμινα)
- Si (πυρίτιο) με συνδετικό υλικό

Η ποιότητα του χυτού είναι πολύ καλή, ωστόσο το κόστος του αρκετά μεγάλο.

ζ. Χύτευση σε μεταλλικά καλούπια (Μόνιμος τύπος)

Η ανάγκη για κατασκευή όμοιων αντικειμένων σε σχήμα και διαστάσεις, οδήγησε στην κατασκευή μεταλλικών καλουπιών. Έτσι επιτυγχάνεται μεγάλη αύξηση της παραγωγικότητας, βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των χυτών και οικονομία, αφού ο αριθμός των ελαττωματικών προϊόντων μειώνεται δραστικά. Σε αντίθεση με τα καλούπια άμμου, τα μεταλλικά είναι λειτουργικά ακόμα και μετά από μερικές εκατοντάδες χιλιάδες χυτά χαμηλού σημείου τήξης (αλουμίνιο, χαλκός). Είναι όμως αδύνατη η χύτευση κραμάτων υψηλού σημείου τήξης. Ο τρόπος έγχυσης του τηγμένου μετάλλου στον τύπο μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Υπό ατμοσφαιρική πίεση, όπου το ρευστό εισέρχεται απευθείας στο καλούπι που ονομάζεται όστρακο ή κοχύλι και
- Υπό πίεση, όπου το τήγμα εγχύεται από μηχανές με μεγάλη πίεση.

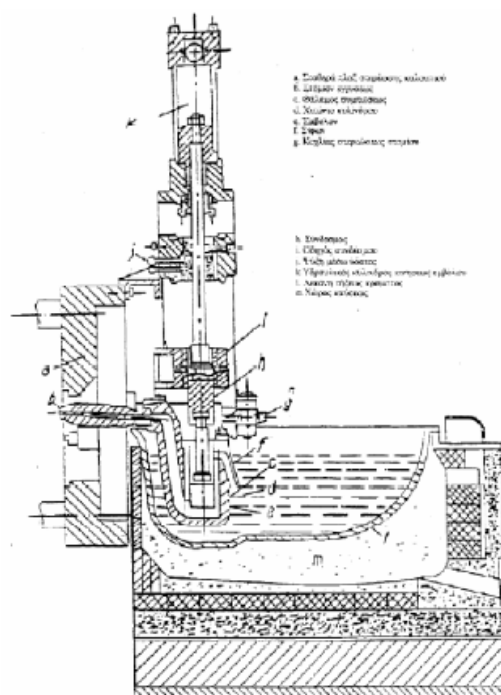
Στην πρώτη περίπτωση, το καλούπι που αποτελείται από δυο τουλάχιστον τμήματα, κλείνεται και το μέταλλο εγχύεται υπό την επίδραση της βαρύτητας. Αφού στερεοποιηθεί το ρευστό, αποσυναρμολογούμε το καλούπι και παραλαμβάνουμε το τεμάχιο. Τα μέρη από τα οποία αποτελείται το καλούπι είναι το κύριο σώμα που κατασκευάζεται από φαιό χυτοσίδηρο για να μην παραμορφώνεται στις υψηλές θερμοκρασίες και οι πυρήνες που είναι απαραίτητοι για την αποτύπωση κοιλωμάτων. Πριν την απόχυση του υλικού, ο τύπος θερμαίνεται στους 350 °C και κατά τη διάρκεια της έγχυσης συνεχίζεται η θέρμανση του με χρήση φλόγας αερίου.

Στην περίπτωση μηχανικής έγχυσης υπό πίεση, η στερεοποίηση πραγματοποιείται με ψύξη του καλουπιού μέσω κυκλοφορίας νερού, μειώνοντας σημαντικά το χρόνο που απαιτείται και επιτρέπεται η απευθείας χρήση των χυτών χωρίς επιπλέον επεξεργασία. Οι μηχανές έγχυσης υπό πίεση είναι δυο τύπων:

- Θερμού θαλάμου, με δυνατότητα χρήσης κραμάτων ψευδαργύρου με πίεση 70-120 kp/cm²
- Ψυχρού θαλάμου, όπου εγχέονται κράματα ορείχαλκου ή αλουμινίου υπό πίεση 400-1200 kp/cm²

Στις περιπτώσεις μηχανών ψυχρού θαλάμου το καλούπι αποτελείται από δυο μπλοκ, το ένα εκ των οποίων τοποθετείται από την πλευρά της τροφοδότησης του μετάλλου και έχει μικρότερο αποτύπωμα από ότι το άλλο που τοποθετείται επί του κινητού φορείου της μηχανής.

Σε αυτό βρίσκονται επίσης και οι μηχανισμοί ξεκαλουπώματος του χυτού, όπως εκτοξευτές πεπιεσμένου αέρα, κινητοί δακτύλιοι κτλ. Το υλικό κατασκευής τους είναι συνήθως κατεργασμένος χάλυβας για αντοχή σε θερμικά φορτία.



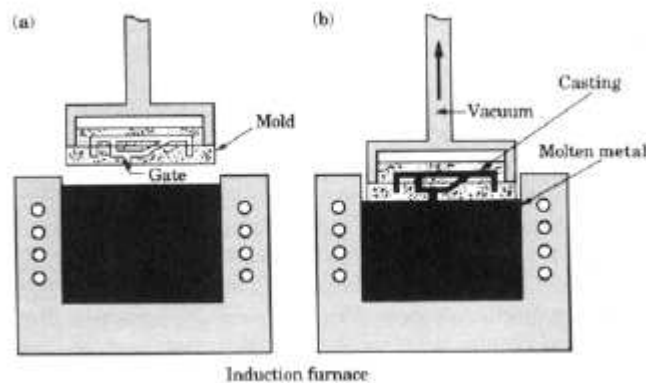
Εικ. 1.4 Μηχανή χύτευσης υπό πίεση ψυχρού θαλάμου

η. Χύτευση εν κενώ (vacuum casting)

Η χύτευση σε κενό απαιτεί τη χρήση μεταλλικής μήτρας για τη διαμόρφωση του καλουπιού, το οποίο αποτελείται από μίγμα ψιλής άμμου και ουρεθάνης. Ο τύπος

συγκρατείται από ρομποτικό βραχίονα που τον κατευθύνει πάνω από τον κάδο όπου βρίσκεται το τηγμένο μέταλλο και το βυθίζει μερικώς δημιουργώντας και συνθήκες υποπίεσης στην άνω πλευρά του. Έτσι από τη διαφορά πίεσης καλουπιού και κάδου, αναρροφάται το μέταλλο και γεμίζει τις κοιλότητες. Για να εξασφαλιστεί επαρκής ρευστότητα του τήγματος, βρίσκεται συνεχώς, περίπου 50°C πάνω από τη θερμοκρασία liquidus του μετάλλου. Η διαδικασία στερεοποίησης ξεκινά μόλις το καλούπι απομακρυνθεί από τον κάδο και ασφαλιστεί.

Η μέθοδος παρέχει πολύ καλή ποιότητα σε λεπτότοιχα κυρίως αντικείμενα με σύνθετη γεωμετρία. Η δυνατότητα παραγωγής είναι ευρεία περιλαμβάνοντας τεμάχια με πάχος 0.5mm μέχρι ογκώδη δεκάδων κιλών. Τέλος είναι δυνατή η αυτοματοποίηση της διαδικασίας αυξάνοντας την παραγωγικότητα και μειώνοντας το κόστος χύτευσης.



Εικ. 1.5 Διάταξη χύτευσης εν κενώ

θ. Χύτευση διογκούμενου μοντέλλου / Χαμένου αφρώδους υλικού

(Expandable pattern / Lost foam casting)

Αυτό το είδος χύτευσης χρησιμοποιεί μοντέλλο από πολυστυρένιο και καλούπι άμμου. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της είναι ότι δεν απαιτείται η εξαγωγή του προτύπου από το καλούπι πριν την απόχυση, αφού αυτό θα εξατμιστεί μόλις το τηγμένο μέταλλο έρθει σε επαφή μαζί του. Εφαρμόζεται κυρίως σε αυτοματοποιημένες γραμμές χύτευσης σιδηρούχων ή μη κραμάτων και τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα ακόλουθα:

- Το πολυστυρένιο αλείφεται με διαδοχικά στρώματα πυρίμαχης πάστας και μόλις ξηραθεί τοποθετείται σε πλαίσιο γεμισμένο με ψιλή άμμο για να το στηρίζει.
- Πραγματοποιείται η απόχυση του τήγματος χωρίς να απομακρύνουμε το πρότυπο, το οποίο εξατμίζεται από τη θερμότητα. Τα προϊόντα της καύσης απορροφούνται από το καλούπι.

Ο ρυθμός αποπολυμερισμού του πολυστυρενίου εξαρτάται από τον ρυθμό έγχυσης και ρυθμίζεται με τον κατάλληλο σχεδιασμό των αγωγών και των κοιλοτήτων. Εξαιτίας της απορρόφησης ενέργειας από το πολυμερές επιτυγχάνεται ταχεία ψύξη του χυτού και επομένως λεπτόκοκκη μικροδομή.

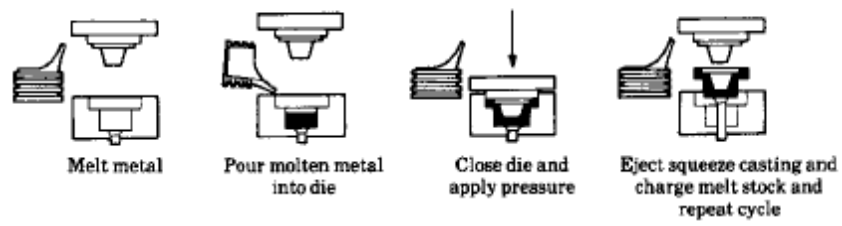
Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

- Απουσία διαχωριστικής γραμμής από το χυτό καθώς και των πυρήνων, προσεπιχωνευμάτων κτλ.
- Χαμηλό κόστος πολυστυρενίου
- Ικανοποιητική ακρίβεια και λεπτές διατομές
- Ελάχιστες εργασίες καθαρισμού των πλινθωμάτων

Βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε γραμμές παραγωγής εξαρτημάτων αυτοκινητοβιομηχανίας όπως εμβόλων, μπλοκ κινητήρων κτλ.

1. Squeeze casting

Η συγκεκριμένη τεχνική αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960 και αποτελεί το συνδυασμό χύτευσης και σφυρηλάτησης. Χρησιμοποιείται πρέσα για την πίεση του τήγματος στο καλούπι, διευκολύνοντας έτσι τη μεταφορά θερμότητας στη διεπιφάνεια μετάλλου και καλουπιού. Τα παραγόμενα χυτά διαθέτουν πολύ καλή δομή με μικρές διακενώσεις. Η ασκούμενη πίεση είναι μικρότερη από αυτή της χύτευσης υπό πίεση αλλά μικρότερη από αυτήν της σφυρηλάτησης.

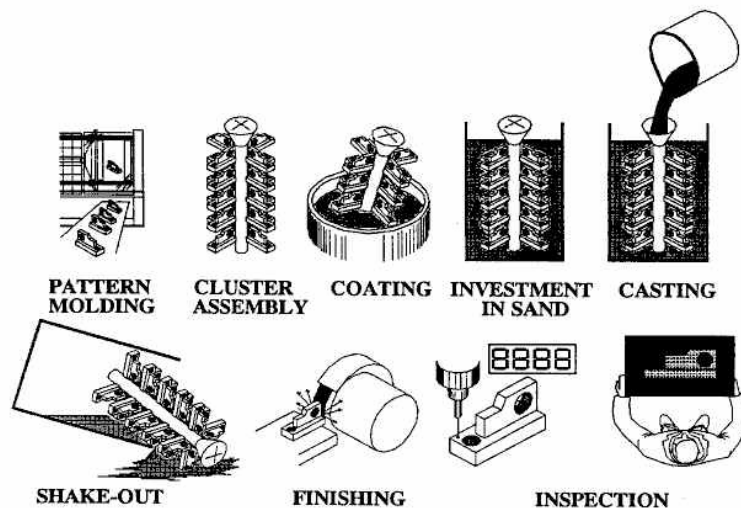


Εικ. 1.6 Διαδικασία της χύτευσης squeeze

1.2.2 Χύτευση ακριβείας ή χύτευση χαμένου κεριού

1.2.2.1 Ιστορία - Σύγκριση - Εφαρμογές

Η χύτευση ακριβείας είναι μια βιομηχανική μέθοδος βασισμένη στην και αποκαλούμενη χύτευση χαμένου κεριού και μια από τις παλαιότερα γνωστές τεχνικές μορφοποίησης μετάλλων. Σε διάρκεια 5000 ετών τα πρότυπα που φτιάχονταν με φυσικό κεριό μέλισσας εξελίχθηκαν και φτιάχνονται από υψηλής τεχνολογίας κεριά που σε συνδυασμό με τα πυρίμαχα υλικά και τα χρησιμοποιούμενα κράματα επιτρέπουν την παραγωγή εξαρτημάτων με ακρίβεια, επαναληψιμότητα, ποικιλία και ακρίβεια. Η μέθοδος χαμένου αφρού είναι μια μοντέρνα μέθοδος χύτευσης ακριβείας που αποφεύγει κάποια βήματα της κλασικής διαδικασίας, όπως η αποκέρωση.



Εικ. 1.7 Βήματα χύτευσης χαμένου αφρού

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για μικρά χυτά, αλλά έχει χρησιμοποιηθεί για κατασκευή εξ ολοκλήρου αεροπορικών διαχωριστικών θυρών, για χαλύβδινα χυτά και αλουμινίου βάρους μεγαλύτερου από 300 kg και 30 kg αντίστοιχα. Έχει υψηλότερο κόστος ανά μονάδα από χυτεύσεις σε μεταλλικό καλούπι ή καλούπι άμμου αλλά με μικρότερο κόστος εξοπλισμού. Μπορεί ωστόσο να αναπαράγει σχήματα και γεωμετρίες που είναι δύσκολο ή αδύνατο να αναπαραχθούν σε μεταλλικά καλούπια. Επίσης το χυτό εξάγόμενο έχει την τελική του σχεδόν μορφή και χρειάζεται ελάχιστη έως καθόλου επιπλέον επεξεργασία φινιρίσματος.

Η μέθοδος χύτευσης χαμένου κεριού, εφαρμόζεται από αρχαιοτάτων χρόνων, εμφανίστηκε μάλιστα το 3000 π.Χ.. Αφορά βάρη χυτών από 5 gr έως 25 kg, ενώ είναι κατάλληλη για πάχος τοιχώματος από 1 έως 75 mm. Εξαιτίας του ειδικού εξοπλισμού που απαιτεί η μέθοδος, λανθασμένα επικρατεί η άποψη ότι είναι μία πολύπλοκη διαδικασία.

Η μέθοδος αυτή χύτευσης ακριβείας, με χρήση κεριού, χρησιμοποιήθηκε αρχικά στην οδοντιατρική. Στη συνέχεια υιοθετήθηκε από τη βιομηχανία για χυτεύσεις τεμαχίων πολύπλοκης δομής και μεγάλων απαιτήσεων ακριβείας (πτερύγια στροβίλων, εξαρτήματα computer, αυτοκινήτων, radar κ.ά.) και αργότερα χρησιμοποιήθηκε ευρέως στην κατασκευή κοσμημάτων. Η σημαντικότερη διαφοροποίηση της μεθόδου από άλλες μεθόδους χύτευσης είναι το γεγονός ότι το καλούπι αποτελείται από ένα μόνο κομμάτι (δεν είναι διαιρετό), εξασφαλίζοντας μεγάλη ακρίβεια (έως και 0,07mm) και υψηλή ποιότητα χυτών.



Εικ. 1.8 Χύτευση ακριβείας συμπίεστη

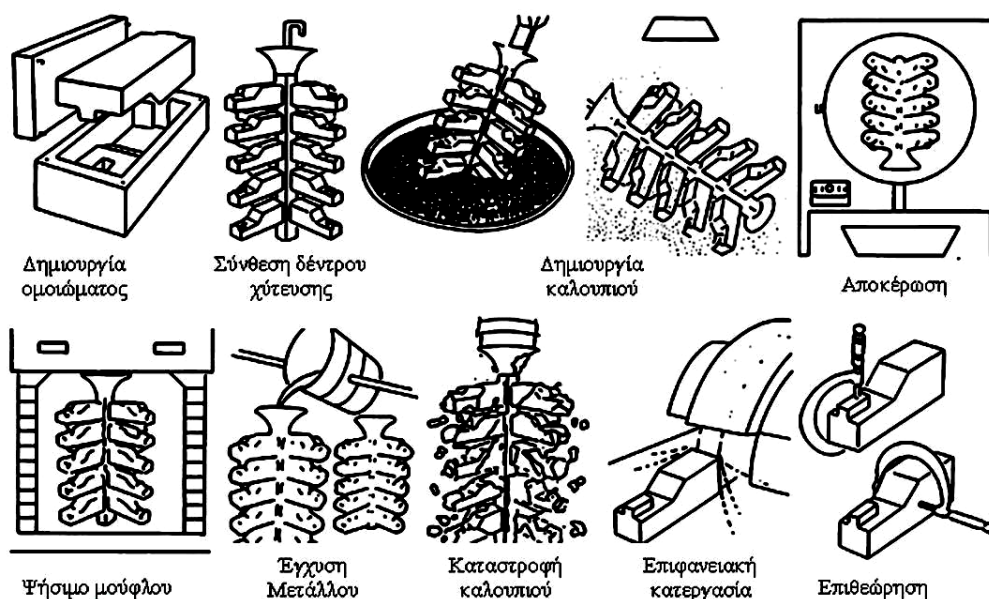
Η εκτέλεση του τυπώματος (investment) γίνεται με δυο τρόπους:

- Με δημιουργία κεραμικού κελύφους (ceramic shell process)
- Με στέρεο καλούπι (solid mold investment casting)

1.2.2.2 Περιγραφή

Τα βήματα που περιλαμβάνει η μέθοδος, είναι εν συντομία τα παρακάτω:

- i. Κατασκευή αρχικού προτύπου, συνήθως από μπρούντζο ή ορείχαλκο, με μικρή σκληρότητα, ώστε να είναι εύκολα επεξεργάσιμο. Κατά τον υπολογισμό των διαστάσεων, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η συστολή τόσο του κεριού, όσο και του μετάλλου κατά τη χύτευση.
 - ii. Δημιουργία καλουπιού του αρχικού προτύπου σε υλικό που:
 - Είναι ανθεκτικό σε υψηλές θερμοκρασίες
 - Μπορεί να αναπαράγει με ακρίβεια την κάθε λεπτομέρεια της δομής του αρχικού προτύπου
- Στις περισσότερες περιπτώσεις, όπως και στη δική μας, χρησιμοποιείται ειδικό λάστιχο.
- iii. Έγχυση κεριού στο δημιουργηθέν καλούπι και παραγωγή του κατάλληλου αριθμού αντιγράφων. Η έγχυση στην περίπτωση του κεριού, γίνεται σε διαιρετά καλούπια, με σχετικά χαμηλές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, με τη βοήθεια ειδικού εξοπλισμού. Στην περίπτωση χρήσης πλαστικών, οι συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που εφαρμόζονται είναι μεγαλύτερες. Σε περίπτωση μικρών τεμαχίων, η διαμόρφωση των ομοιωμάτων μπορεί να γίνει με το χέρι.
 - iv. Δημιουργία δένδρου χύτευσης, με ένωση των επιμέρους κέρινων ομοιωμάτων κατασκευάζοντας ταυτόχρονα και τους εγχυτήρες μετάλλου και τους αγωγούς που συνδέει το πρότυπο με τους εγχυτήρες.
 - v. Δημιουργία καλουπιού- κελύφους και αποκέρωση αυτού. Το καλούπι είναι από πυρίμαχη πάστα εφαρμοσμένη με διαδοχικές εμβαπτίσεις. Ακολουθεί ξήρανση στον αέρα και θέρμανση για 2 με 4 ώρες.
 - vi. Έγχυση μετάλλου στην δημιουργημένη κοιλότητα και τελική λήψη του χυτού με καταστροφή του καλουπιού
 - vii. Τελική επεξεργασία επιφάνειας (λείανση), καθώς και άλλες μικροκατεργασίες (κρούση, κόψιμο, κατεργασία εν θερμώ) και τέλος επιθεώρηση.



Εικ. 1.9 Βήματα χύτευσης χαμένου κεριού

1.2.2.3 Υλικά κατασκευής ομοιωμάτων.

Χρήση Κεριού

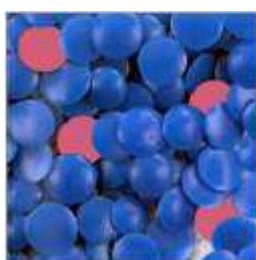
Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ομοιωμάτων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε κεριά και πλαστικό (πολυστερένιο).

Η χρήση του κεριού είναι σαφώς πιο διαδεδομένη για τέτοιου είδους χυτεύσεις, συνήθως με κάποιες προσμίξεις, όπως πλαστικό, ρητίνες, αντιοξειδωτικά και χρωστικές ουσίες. Τα πιο διαδομένα είδη κεριού είναι οι παραφίνες και τα μικροκρυσταλλικά κεριά και μάλιστα τα παραπάνω δύο υλικά είθισται να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό, γιατί οι ιδιότητές τους αλληλοσυμπληρώνονται. Ο λόγος της ευρύτατης χρήσης των παρακάτω υλικών είναι τα κατά γενική ομολογία καλά χαρακτηριστικά τους, δηλαδή το χαμηλό κόστος, η μεγάλη διαθεσιμότητα, η καλή λιπαντικότητα και το χαμηλό ιξώδες. Ωστόσο, η ψαθυρότητα και το μεγάλο ποσοστό συρρίκνωσης που εμφανίζουν, περιορίζουν σε ορισμένες περιπτώσεις τη χρήση τους. Υπάρχουν και άλλα είδη κεριών, φυσικά ή τεχνητά, που ανάλογα με τις ιδιότητές τους καλύπτουν ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τέτοια είναι ο οζοκηρίτης (ozocerite), το μελισσοκέρι (beeswax), και φυτικά κεριά όπως τα Candelilla και Carnauba.

Η σύσταση των κεριών της μεθόδου δίνεται κατά προσέγγιση στον πίνακα 1.1:

Πιν. 1.1 Σύσταση κεριών

Συστατικά	Περιεκτικότητα %
Κεριά (συνήθως περισσότερων του ενός είδους)	30 - 70
Ρητίνη (ενός ή δύο ειδών)	20 -60
Πλαστικό (ενός είδους)	0 - 20
Άλλα	0 - 5



Εικ. 1.10 Τύπος κεριού έγχυσης με ειδικές προσμίξεις

Χρήση fillers

Για τη μείωση της συρρίκνωσης του κεριού κατά τη στερεοποίηση, χρησιμοποιούνται στερεά υλικά σε μορφή σκόνης, τα λεγόμενα fillers. Τα υλικά αυτά δεν διαλύονται κατά τη θέρμανση του κεριού, αφού έχουν σημείο τήξης πολύ μεγαλύτερο από το σημείο τήξης του κεριού. Έτσι, μειώνουν τη διαστολή του κατά τη θέρμανση και αντίστοιχα τη συστολή του κατά την ψύξη.

Κριτήρια επιλογής του κατάλληλου κεριού

Κατά την κατασκευή ή επιλογή κεριού για τη μέθοδο αυτή θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω απαιτούμενες ιδιότητες:

- Ευκολία έγχυσης: Θα πρέπει να ελέγχονται οι ιδιότητες ρευστότητας, οι θερμοκρασίες τήξης και στερεοποίησης, ο χρόνος που απαιτείται για την προετοιμασία πριν την έγχυση, οι επιφανειακές ιδιότητες και η δυνατότητα αναπαραγωγής, με ακρίβεια, της γεωμετρίας του προτύπου.

- Εύκολη απομάκρυνση, επεξεργασία και εφαρμογή: Θα πρέπει να ελέγχεται η λιπαντικότητα, η αντοχή, η σκληρότητα, η σταθερότητα και η ευκολία τήξης του κεριού.
- Διαστασιολογική ακρίβεια: Επιθυμούμε όσο το δυνατόν μικρότερο ποσοστό συρρίκνωσης στερεοποίησης, πορώδους και τάσης διάβρωσης.
- Εύκολη αποκέρωση: Είναι επιθυμητή όσο το δυνατό μεγαλύτερη τιμή ιζώδους και διαλυτότητα σε υψηλές θερμοκρασίες
- Χαμηλό κόστος, διαθεσιμότητα, δυνατότητα ανακύκλωσης, μικρή τοξικότητα (προτιμούνται οικολογικά κεριά)

Χρήση πλαστικών

Μετά το κεριό, το πλαστικό είναι το αμέσως πιο διαδεδομένο υλικό που χρησιμοποιείται. Το πιο συνηθισμένο είδος πλαστικού για την κατασκευή ομοιωμάτων είναι το πολυστυρένιο γενικής χρήσης που πλεονεκτεί σε σχέση με το κεριό στο γεγονός ότι δίνει τη δυνατότητα αυτοματοποίησης της διαδικασίας προτυποποίησης σε διατάξεις με μεγάλο ρυθμό παραγωγής και στη εξαιρετική αντοχή του σε σημεία που η διατομή λεπταίνει πολύ. Κατά συνέπεια των παραπάνω, η αποθήκευση των προτύπων για μεγάλο χρονικό διάστημα πριν τη χρήση τους, δεν αλλοιώνει την ποιότητά τους.

Παρόλα αυτά, δεν εφαρμόζονται εξίσου ευρέως με τα κεριά, λόγω της τάσης που έχουν να προκαλούν ρωγμές στο καλούπι κατά την απομάκρυνσή τους. Ακόμη, ο εξοπλισμός επεξεργασίας και έγχυσης που απαιτείται για τη χρήση τους είναι ιδιαίτερα ακριβός. Λόγω των παραπάνω, πλαστικό χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις μεγάλου αριθμού μικρών τεμαχίων.

Εκτός του πολυστυρενίου συναντάμε πρότυπα και από άλλα υλικά, όπως νάιλον, πολυαιθυλένιο και αιθυλική κυτταρίνη. Τέλος έχουν αναπτυχθεί και άλλα υλικά, τα οποία είναι υδατοδιαλυτά και περιορίζουν την πιθανότητα καταστροφής του καλουπιού κατά την απομάκρυνσή τους. Τέτοια είναι διάφορα μίγματα αλάτων, ναφθαλίνης και αφροί πολυστυρενίου.



Εικ. 1.11 Ομοιώματα κατασκευασμένα με έγχυση πλαστικών

Πλεονεκτήματα της μεθόδου:

- 1.** Επίτευξη γεωμετρικής πολυπλοκότητας: με τη χύτευση ακριβείας είναι δυνατή η κατασκευή χυτών με οποιαδήποτε 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.
- 2.** Χυτευσιμότητα μεγάλης ποικιλίας κραμάτων: Είναι δυνατή η χύτευση οποιουδήποτε σχεδόν κράματος, ακόμα και αυτών που σφυρηλατούνται ή επεξεργάζονται δύσκολα.
- 3.** Εξαιρετική ακρίβεια διαστάσεων: Η απουσία διαχωριστικής γραμμής στο χυτό και ο περιορισμός που απαιτούν, οδηγούν στην παρασκευή χυτών μεγάλης ακρίβειας ειδικά συγκρινόμενη με αυτή συμβατικών μεθόδων.
- 4.** Διαθεσιμότητα προτύπων και εύκολη επεξεργασία τους: Η χρήση φθηνών υλικών για την κατασκευή προτύπων όπως το κερί και το πλαστικό, σε συνδυασμό με την εύκολη επεξεργασία τους καθιστά τη μέθοδο γρήγορη και σχετικά οικονομική, αφού δεν απαιτούνται ειδικές εγκαταστάσεις.
- 5.** Αξιοπιστία: Η χρήση της μεθόδου σε εφαρμογές πολύ υψηλών ποιοτικών απαιτήσεων αποδεικνύει την αξιοπιστία και την ποιότητα των παραγόμενων αντικειμένων.
- 6.** 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:

1. Απαιτούνται έμπειρα άτομα για την κατασκευή των καλουπιών και των ομοιωμάτων
2. Υψηλό σχετικά κόστος ανά παραγόμενη μονάδα (όχι κόστος εξοπλισμού)
3. Μεγάλο χρονικό διάστημα προετοιμασίας

1.2.3 Χύτευση με υποβοήθηση κενού

Η χύτευση με υποβοήθηση κενού είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος και αφορά τεμάχια σύνθετης γεωμετρίας, βάρους έως και 50 kg. Η τεχνική αυτή είναι το ίδιο εφαρμόσιμη για χύτευση μικρών τεμαχίων (κοσμήματα) και μεγάλων χυτών της βαριάς βιομηχανίας.

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.

Η αρχή λειτουργίας των μηχανών χύτευσης με υποβοήθηση κενού είναι η εξής:

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 ανάμεσα στο θάλαμο τήξης και το θάλαμο χύτευσης.

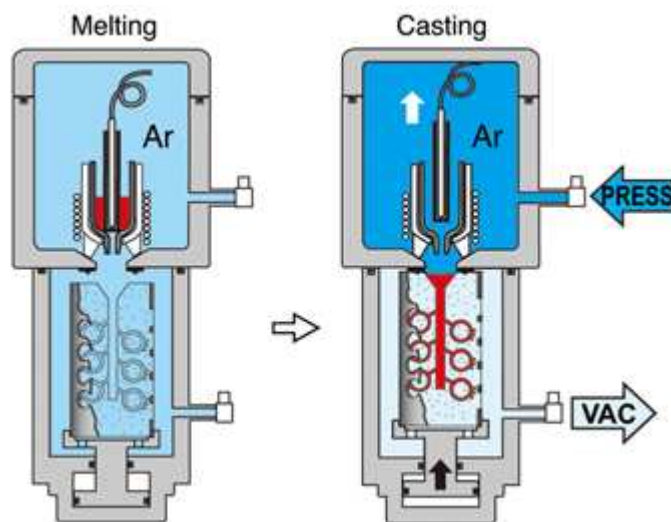
Η διάτρητη φλάσκα τοποθετείται ανάποδα, με το κάτω μέρος της να εφάπτεται στην έξοδο του τηγμένου μετάλλου. Η συσκευή αποτελείται από δύο κυλινδρικούς θαλάμους, το θάλαμο τήξης και το θάλαμο χύτευσης. Ο θάλαμος χύτευσης έχει μέγεθος τέτοιο ώστε να χωράει και τις μεγαλύτερες χρησιμοποιούμενες φλάσκες. Είναι επίσης κατάλληλα διαμορφωμένος ώστε να είναι στεγανά διαχωρισμένος από τον θάλαμο τήξης όλο το χρόνο, εκτός των λίγων δευτερολέπτων της έγχυσης.

Μερικό κενό δημιουργείται μέσα στο θάλαμο και γύρω από το καλούπι, αλλά όχι εντός του, και το μέταλλο εγγέεται στο εκτεθειμένο (στον αέρα) άνοιγμα του καλουπιού [11].

Το κενό διατηρείται μέχρι να συμβεί πλήρης στερεοποίηση των χυτών τεμαχίων. Με τον τρόπο αυτό, συν τοις άλλοις, απομακρύνονται και τυχόν εγκλωβισμένα αέρια,

που θα δημιουργούσαν ελαττώματα στο χυτό. 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 [11].

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 μεταλλοστατικής 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.



Εικ. 1.12 Εξοπλισμός χύτευσης ακριβείας με υποβοήθηση κενού και υπερπίεσης

Μετά το πέρας της στερεοποίησης γίνεται εκτόνωση, εισέρχεται ατμοσφαιρικός αέρας και στους δύο θαλάμους και η φλάσκα με το χυτό μπορούν πλέον να απομακρυνθούν από τη μηχανή.

Τα μειονεκτήματα των μηχανών αυτών είναι το κόστος των ειδικά σχεδιασμένων φλασκών και η δυσκολία της τοποθέτησης με ακρίβεια των φλασκών στη μηχανή, όταν βρίσκονται σε θερμοκρασία πάνω από 700°C. Μεγάλης σημασίας είναι η επίτευξη ταυτόχρονης έγχυσης μετάλλου και εφαρμογής κενού, γι' αυτό και οι περισσότερες μηχανές του είδους λειτουργούν αυτόματα, ώστε να δημιουργείται κενό στο θάλαμο

χύτευσης πριν την έγχυση του μετάλλου. Επίσης, οι μηχανές αυτές παρέχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης επιβολής υψηλής πίεσης και χρήσης αδρανούς αερίου στο θάλαμο τήξης.

1.3 ΦΥΣΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗ

Κατά τη χύτευση υλικά με διαφορετικό ενεργειακό περιεχόμενο, το τήγμα σε υψηλότερο απ'ότι το καλούπι, συναλλάσσουν ποσά ενέργειας με τη μορφή θερμότητας. Κρίνεται αναγκαία η αναφορά στη μετάδοση θερμότητος με την εξέλιξη της οποίας εξελίσσονται στη συνέχεια και τα υπόλοιπα φυσικά φαινόμενα.

Βασική προϋπόθεση για να έχουμε μετάδοση θερμότητας από ένα σημείο προς άλλο, είτε του ιδίου είτε διαφορετικού σώματος, είναι η ύπαρξη θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ τους και είναι βασική αρχή ότι η ροή θερμότητας πραγματοποιείται από το θερμότερο προς το ψυχρότερο.

Η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με τρεις τρόπους. Με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Θα περιγράψουμε τους τρεις αυτούς μηχανισμούς επιγραμματικά για να δούμε αν και πώς αυτοί συμμετέχουν στη μελέτη του φαινομένου με το οποίο ασχολείται η παρούσα εργασία.

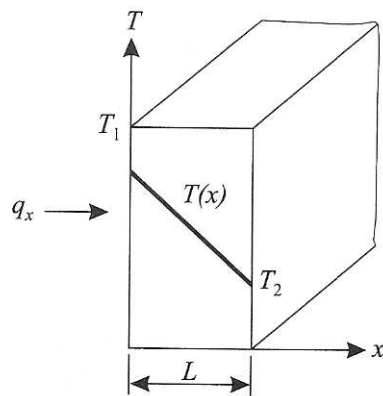
1.3.1 Τρόποι Μετάδοσης Θερμότητας [2]

Αγωγή

Η μεταφορά θερμότητος με αγωγή βασίζεται στη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των ατόμων ή των μορίων ενός σώματος ανάλογα με την κατάστασή του. Στα μέταλλα η ενέργεια μεταφέρεται μεταξύ των μικρών σωματιδίων με διάχυση των ηλεκτρονίων, ενώ στα αέρια σχεδόν αποκλειστικά με διάχυση των μορίων. Στα υγρά παρατηρείται ο ίδιος μηχανισμός μόνο που οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων είναι εντονότερες και συχνότερες απ'ότι στα αέρια.

Είναι γνωστή η σχέση του Fourier η οποία για επίπεδο σώμα και μονοδιάστατη αγωγή θερμότητος παίρνει τη μορφή :

$$q_x = -k \cdot \frac{dT}{dx}$$



Εικ. 1.13 Αγωγή θερμότητας σε επίπεδο σώμα

Η πυκνότητα παροχής θερμότητας είναι η θερμότητα η οποία μεταφέρεται με αγωγή παράλληλα προς τον x-άξονα στη μονάδα του χρόνου και της κάθετης στο x-άξονα επιφάνειας, προκύπτει σε $\text{kJ/m}^2\text{h}$ ή σε W/m^2 και εξαρτάται από την κλίση της καμπύλης dT/dx . Το πρόσημο - (πλήν) εμφανίζεται διότι με αυξανόμενη την απόσταση x ελαττώνεται η θερμοκρασία.

Ο παράγων \mathbf{k} [W/mK] γνωστός σαν **ειδική θερμική αγωγιμότητα**, εξαρτάται από τις ιδιότητες του σώματος.

Συναγωγή

Κατά τη συναγωγή θερμότητας εκτός από τις τυχαίες κινήσεις των μορίων, τη διάχυση, μεταφέρεται ενέργεια και με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, κατά την οποία μετακινείται συλλογικά μεγάλος αριθμός μορίων. Είναι ένας μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας ο οποίος οφείλεται στο συνδυασμό αγωγής και της κίνησης του ρευστού. Κατ' αυτόν μεταφέρεται η αισθητή θερμότητα. Υπάρχουν και περιπτώσεις συναγωγής με μεταφορά της λανθάνουσας θερμότητας, όταν εμφανίζεται αλλαγή της φάσης του υγρού σε ατμό κατά την ατμοποίηση ή του ατμού σε υγρό κατά τη συμπύκνωση.

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας παροχής θερμότητας q χρησιμοποιείται η σχέση του Newton :

$$q = h \cdot (T_s - T_\infty) \text{ σε } \text{W/m}^2.$$

Το μέγεθος q είναι ανάλογο της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και ρευστού. Ο συντελεστής h είναι η **ειδική συναγωγιμότητα** σε W/m^2K και περιλαμβάνει όλους τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη συναγωγή. Δηλαδή τις συνθήκες στο οριακό στρώμα το οποίο εξαρτάται από τη γεωμετρία της επιφάνειας, και από το είδος του ρευστού και της ροής του.

Ακτινοβολία

Κατά τη θερμική ακτινοβολία η θερμότητα μεταφέρεται με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα στερεά σώματα, τα περισσότερα υγρά και μερικά αέρια ακτινοβολούν θερμότητα καθώς μπορούν να απορροφήσουν μέρος της ακτινοβολίας άλλων σωμάτων. Στην ακτινοβολία δεν απαιτείται, όπως στην αγωγή και στη συναγωγή, η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου για τη μεταφορά θερμότητας, αλλά εμφανίζεται ακόμα και στο κενό και μάλιστα με εντονότερο ρυθμό.

Η πυκνότητα παροχής θερμότητας η οποία μπορεί να ακτινοβοληθεί από ένα σώμα υπολογίζεται με την τροποποιημένη για όλα τα σώματα σχέση των Stefan-Boltzmann.

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

όπου:

- ε ο συντελεστής **εκπομπής του πραγματικού σώματος** και παίρνει τιμές από 0 έως και 1 για το μέλαν σώμα
- σ η σταθερά **ακτινοβολίας του μέλανος σώματος ή σταθερά Stefan-Boltzmann** που ισούται με $5.6697 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$ και
- T_s η θερμοκρασία του σώματος σε βαθμούς Kelvin.

Για δύο σώματα που το ένα περιβάλλει το άλλο το ρεύμα θερμότητας το οποίο ακτινοβολείται από το μικρό σώμα προς εκείνο που το περιβάλλει προκύπτει

$$Q = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_{s1}^4 - T_{s2}^4) \text{ σε W}$$

όπου:

A η επιφάνεια του μικρού σώματος, T_{s1} η θερμοκρασία του και T_{s2} η θερμοκρασία της μεγάλης επιφάνειας.

1.3.2 Οι μηχανισμοί στερεοποίησης

Στερεοποίηση είναι το φαινόμενο που λαμβάνει χώρα, όταν ψυχθεί η διεπιφάνεια στερεάς- υγρής φάσης, σε θερμοκρασίες μικρότερες της θερμοκρασίας τήξης.

Για να ξεκινήσει η διαδικασία της στερεοποίησης, θα πρέπει να συγκεντρωθεί μία ομάδα ατόμων, για να δημιουργηθεί ένα σώμα ομοειδών (cluster), που θα είναι σταθερό και θα έχει τη δυνατότητα να αναπτυχθεί σε κρύσταλλο, όταν ενωθεί με γειτονικά του ίδια σώματα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **πυρηνοποίηση** και διακρίνεται σε ομογενή και ετερογενή.

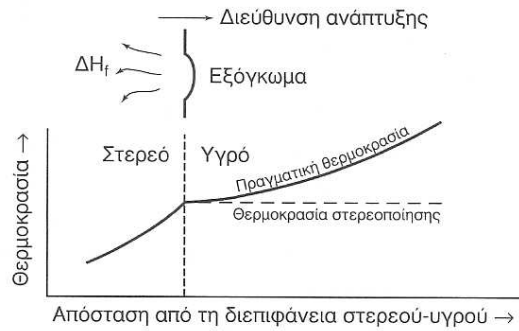
Η **ομογενής πυρηνοποίηση** είναι ο σχηματισμός ενός στερεού πυρήνα που περιβάλλεται από υγρή φάση.

Στην **ετερογενή πυρηνοποίηση**, ο πυρήνας στερεού μετάλλου σχηματίζεται γύρω από μία ξένη ουσία, είτε του καλουπιού, είτε του περιβάλλοντος τοιχώματος, είτε στην επιφάνεια κάποιας αδιάλυτης ακαθαρσίας.

Στερεοποίηση σε καθαρά μέταλλα

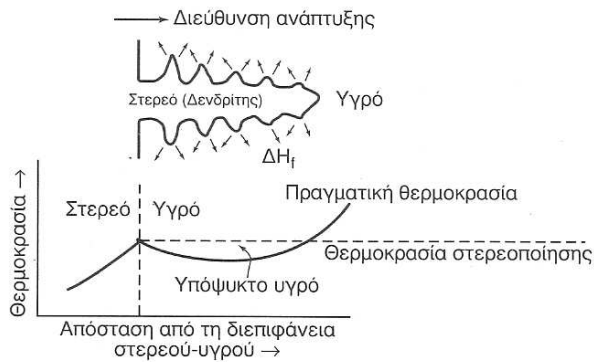
Ο τρόπος με τον οποίο θα εξελιχθεί η πυρηνοποίηση εξαρτάται από τη βαθμίδα (gradient, ∇T) της θερμοκρασίας, ακριβώς μπροστά από τη διεπιφάνεια στερεής και υγρής φάσης.

Αν η βαθμίδα είναι θετική ($\nabla T > 0$), δηλαδή η θερμοκρασία του υγρού είναι υψηλότερη από του στερεού στη διεπιφάνεια και επιτρέπεται έτσι η απόψυξη της, τότε η ανάπτυξη των πυρήνων θα γίνει με ομογενή τρόπο, μέσα στον όγκο του χυτού και θα έχουμε τη λεγόμενη **επίπεδη ανάπτυξη**.



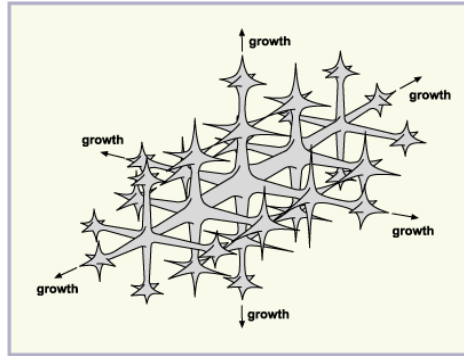
Εικ. 1.14 Θερμοκρασιακό προφίλ στη διεπιφάνεια στερεοποίησης για $V T > 0$

Παρόλα αυτά, η πιο συνήθης περίπτωση είναι να επικρατεί αρνητική βαθμίδα θερμοκρασίας ($V T < 0$), όπου το υγρό μπροστά από τη διεπιφάνεια αποψύχεται γρηγορότερα από αυτήν με αποτέλεσμα την παρουσία του λεγόμενου υπόψυκτου υγρού.



Εικ. 1.15 Θερμοκρασιακό προφίλ στη διεπιφάνεια στερεοποίησης για $V T < 0$

Το φαινόμενο αυτό της καθυστέρησης της στερεοποίησης ονομάζεται **υπέρτηξη** ή **υπόψυξη** και στα καθαρά μέταλλα οφείλεται καθαρά σε θερμικούς παράγοντες. Σε αυτές τις περιπτώσεις δημιουργούνται από τη διεπιφάνεια προεξοχές στα σημεία της πιο έντονης απόψυξης και έχουν την τάση να αναπτύσσονται προς το υγρό, δημιουργώντας αιχμές (spikes). Με τον ίδιο τρόπο σχηματίζονται δευτερεύουσες αιχμές ή βραχίονες που ξεκινούν από τις πρωτεύουσες και με τη σειρά τους οι δευτερεύουσες δημιουργούν τριτεύουσες κ.ο.κ. Ο κρύσταλλος που προκύπτει κατά αυτόν τον τρόπο ονομάζεται **δενδρίτης**, ενώ ο μηχανισμός ονομάζεται **δενδριτική ανάπτυξη**.



Εικ. 1.16 Πρωτεύων δένδριτης με δευτερεύοντες και τριτεύοντες κλάδους.

Οι βραχίονες των δένδριτών κανονικά αναπτύσσονται σε συγκεκριμένες κρυσταλλικές διευθύνσεις και κρυσταλλογραφικά επίπεδα και είναι αυτά που είναι πυκνότερα και χαμηλότερης ενέργειας. Όσο αναπτύσσονται οι δένδριτες και οι πυρήνες αντίστοιχα, τόσο περισσότερα άτομα μεταφέρονται από το τήγμα στους βραχίονες των δένδριτών, έτσι ώστε αυτοί να πυκνώσουν και τα διαστήματα μεταξύ τους να συμπληρωθούν. Κατά συνέπεια, ο κάθε αναπτυσσόμενος δένδριτης θα έρθει σε επαφή με τους γειτονικούς του και δε θα κινείται πια ελεύθερα μέσα στο υγρό που έχει απομείνει. Στη συνέχεια δημιουργούνται τα όρια μεταξύ των αναπτυσσόμενων δένδριτικών κρυστάλλων, ενώ οι τελευταίοι από αυτούς στερεοποιούνται στις συνοριακές περιοχές. Η κρυσταλλική δομή που προκύπτει ονομάζεται **πολυκρυσταλλική δομή**.

Κατά την ανάπτυξη ενός δένδριτη, η λανθάνουσα θερμότητα τήξης *απάγεται* προς το υποψυχόμενο υγρό, ανυψώνοντας έτσι τη θερμοκρασία του, η οποία τείνει προς την τιμή της θερμοκρασίας στερεοποίησης. Με την ανάπτυξη των δευτερευόντων, τριτευόντων κ.ο.κ. κλάδων αυξάνεται και η ταχύτητα απαγωγής της λανθάνουσας θερμότητας.

Στα καθαρά μέταλλα η δένδριτική ανάπτυξη αποτελεί, συνήθως, ένα μικρό ποσοστό της συνολικής ανάπτυξης. Το ποσοστό αυτό δίνεται από τη σχέση :

$$f = \frac{c \cdot \Delta T}{\Delta H_f}$$

όπου

c η ειδική θερμότητα υγρού,

ΔT η υπόψυξη

ΔH_f η λανθάνουσα θερμότητα που αποδίδεται κατά τη στερεοποίηση

$c \cdot \Delta T$ η θερμότητα την οποία είναι δυνατό να απορροφήσει το υποψυχόμενο υγρό

Γίνεται φανερό ότι όσο η υπόψυξη ΔT αυξάνεται, τόσο περισσότερο εντείνεται η δενδριτική ανάπτυξη.

Γενικά στην επίπεδη ανάπτυξη, το καλούπι χύευσης πρέπει να απορροφήσει τη λανθάνουσα θερμότητα, ενώ στη δενδριτική ανάπτυξη η λανθάνουσα θερμότητα τήξης απορροφάται από το υποψυχόμενο υγρό. [1]

Στερεοποίηση σε κράματα

Οι δενδρίτες στα κράματα μοιάζουν γενικά στη μορφή με αυτούς των καθαρών μετάλλων, εδώ όμως παρουσιάζουν μία κυτταρική υποδομή. Επίσης, ο ρυθμός ανάπτυξής τους είναι πιο αργός από ότι στα καθαρά μέταλλα.

Όταν ένα καθαρό μέταλλο στερεοποιείται, η δενδριτική δομή δεν είναι ορατή, ενώ φαίνονται μόνο η κρυσταλλική δομή και τα όρια των κόκκων. Αντιθέτως, η δενδριτική φύση της μικροδομής των κραμάτων, εύκολα διακρίνεται με χρήση μικροσκοπίου. Αυτό συμβαίνει επειδή συνήθως τα κράματα στερεοποιούνται σε ένα εύρος θερμοκρασιών, ανάλογα με τις θερμοκρασίες στερεοποίησης του κάθε στοιχείου κραμάτωσης. Λόγω αυτής της έλλειψης ισορροπίας και ομοιογένειας, παρατηρείται μικροδιαχωρισμός ανάμεσα στους βραχίονες των δενδριτών.

Δεν πρέπει να αμεληθεί βέβαια και το φαινόμενο του διαφορισμού που εντείνει τη δενδριτική ανάπτυξη.

Διαφορισμός ονομάζεται η ετερογένεια στην περιεκτικότητα του διαλυόμενου στοιχείου εντός των κόκκων και γίνεται εντονότερη

- α) όσο μεγαλύτερο γίνεται το εύρος μεταξύ των καμπυλών/επιφανειών liquidus και solidus
- β) όσο μεγαλύτερο γίνεται το μέγεθος των κρυστάλλων (δηλαδή όσο ελαττώνεται ο αριθμός των αρχικών πυρήνων κρυστάλλωσης και
- γ) όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία στερεοποίησης.

Το φαινόμενο του διαφορισμού εντείνει το φαινόμενο της υπέρτηξης πέραν από πιθανούς θερμικούς παράγοντες ($\nabla T < 0$) και οδηγεί στη λεγόμενη **δομική ή συστασιακή υπέρτηξη**.

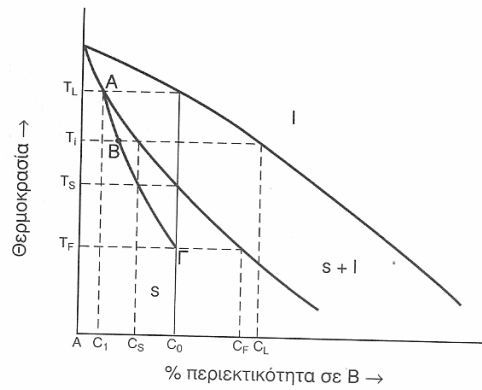
Στην περίπτωση των κραμάτων η στερεοποίηση συνοδεύεται από ανακατανομή του διαλυόμενου στοιχείου μεταξύ της στερεάς και της υγρής φάσης. Η στερεοποίηση μονοφασικού κράματος διεξάγεται, θεωρητικά, καθ'ολοκληρία σε κατάσταση ισορροπίας και σε θερμοκρασία T_i μεταξύ της T_L και T_S . Μετά το πέρας της στερεοποίησης το κράμα είναι ομογενές και η συγκέντρωσή του σε κάθε σημείο είναι σταθερή C_0 .

Στην πράξη όμως η διάχυση εντός της στερεάς φάσης κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης είναι πρακτικά αμελητέα.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες διακρίνουμε δύο περιπτώσεις :

- α) η σύσταση της υγρής φάσης είναι πάντα ομογενής και η κατανομή του διαλυόμενου στοιχείου πραγματοποιείται με διάχυση και φυσική ανάδευση και
- β) η σύσταση του υγρού μεταβάλλεται από τη διεπιφάνεια υγρού-στερεού και η κατανομή του διαλυόμενου στοιχείου πραγματοποιείται μόνο με διάχυση εντός του υγρού.

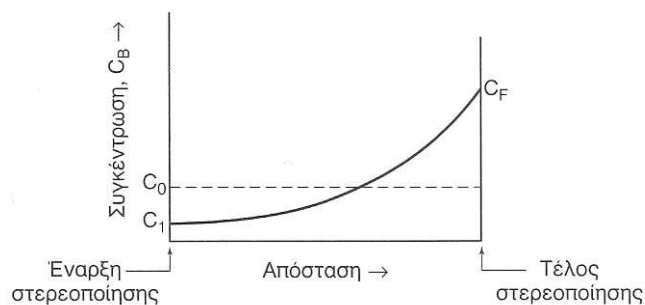
Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται διαφορισμός διαφορετικής φύσεως - εντάσεως, με αναφορά πάντα σε επίπεδο πόρων.



Σχ. 1.1 Πραγματική μεταβολή της μέσης σύστασης του στερεού, κατά τη διάρκεια στερεοποίησης (ΑΓ)

α) Διάχυση και φυσική ανάδευση εντός του υγρού

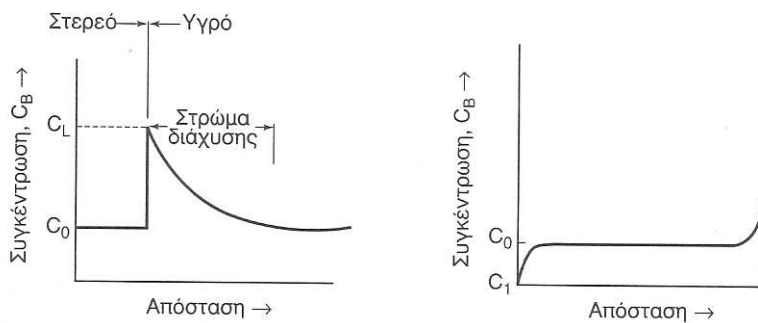
Οι πυρήνες κρυστάλλωσης, οι οποίοι σχηματίζονται κατά τη στερεοποίηση κράματος με συγκέντρωση C_0 έχουν συγκέντρωση C_1 σε θερμοκρασία T_L σχήμα 1.1. Σε θερμοκρασία T_i , η συγκέντρωση του στερεού στη διεπιφάνεια είναι C_s και εκείνη του συνόλου του υγρού που το περιβάλλει είναι C_L . Δεδομένου ότι μετά το σχηματισμό της στερεάς φάσης, η συγκέντρωση παραμένει πρακτικά αμετάβλητη, η μέση τιμή της θα πρέπει να περιλαμβάνεται μεταξύ των συγκεντρώσεων C_1 και C_s και παριστάνεται από το σημείο Β σχήμα 1.1. Η στερεοποίηση περατώνεται όταν η μέση συγκέντρωση του στερεού κράματος γίνει C_0 , δηλαδή στο σημείο Γ. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, παρατηρείται ότι η συγκέντρωση του στερεού μεταβάλλεται από την τιμή C_1 , η οποία επιτυγχάνεται στην αρχή της στερεοποίησης, στην τιμή C_F , που αντιστοιχεί στο τέλος της στερεοποίησης και σε θερμοκρασία $T_F < T_s$, όπως προβλέπεται από το διάγραμμα ισορροπίας.



Σχ. 1.2 Μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλυόμενου στοιχείου συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του κόκκου.

β) Διάχυση εντός του υγρού

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, η συγκέντρωση των πρώτων πυρήνων κρυστάλλωσης του στερεού ισούται με C_1 . Ωστόσο, η μέση συγκέντρωση του υγρού παραμένει στην τιμή της C_0 , με εξαίρεση ένα μικρό στρώμα, όπου πραγματοποιείται διάχυση και εντός του οποίου η συγκέντρωση είναι μεγαλύτερη. Η μέση συγκέντρωση του στερεού είναι επίσης C_0 .



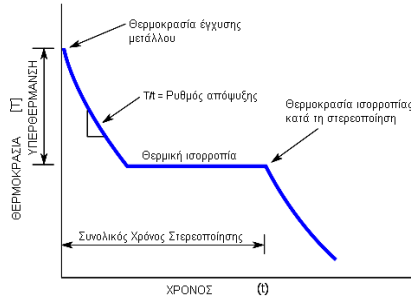
Σχ. 1.3 Μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλυμένου στοιχείου στην υγρή φάση μπροστά από το μέτωπο στερεοποίησης (αριστερά) και μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλυμένου στοιχείου συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του κόκκου (δεξιά).

Παρακολούθηση εξέλιξης στερεοποίησης στα κράματα

α. Για συγκεκριμένο σημείο

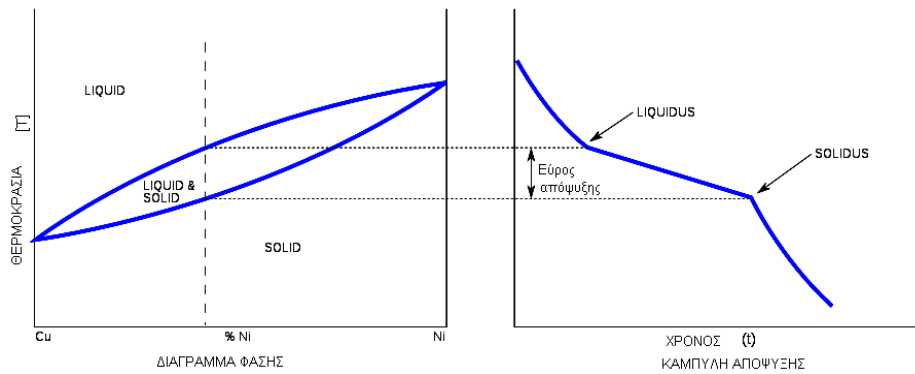
Άμεση εικόνα για τη χρονική εξέλιξη της στερεοποίησης έχουν οι καμπύλες απόψυξης που είναι ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για τη διαδικασία της χύτευσης, γιατί βοηθούν εν τέλει και στον έλεγχο της ποιότητας του χυτού. Σημαντικότερο χαρακτηριστικό αυτών είναι ο λεγόμενος «ρυθμός απόψυξης», που επηρεάζει τη μικροδομή, αλλά και τις ιδιότητες του χυτού.

Στο σχήμα 1.4 δίνεται ένα παράδειγμα καμπύλης απόψυξης καθαρού μετάλλου ή ευτηκτικού κράματος.



Σχ. 1.4 Καμπύλη απόψυξης καθαρού μετάλλου ή ευτηκτικού κράματος

Η παραπάνω καμπύλη απόψυξης αποτελεί τη γενική θεωρητική περίπτωση για καθαρό μέταλλο. Παρόλα αυτά, οι περισσότερες χυτεύσεις γίνονται με κράματα. Σε αυτή την περίπτωση η μορφή της καμπύλης απόψυξης φαίνεται παρακάτω:



Σχ. 1.5 Καμπύλη απόψυξης κράματος με εύρος στερεοποίησης

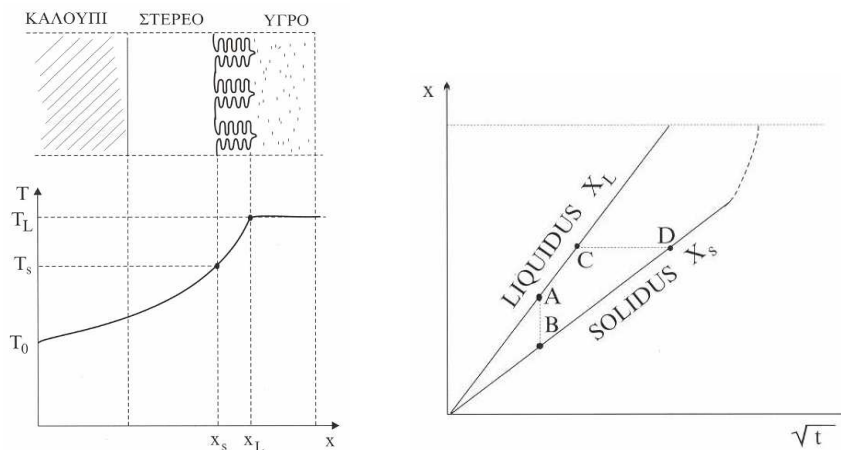
Στην περίπτωση αυτή, παρατηρεί κανείς ότι δεν υπάρχει πλέον περιοχή θερμικής ισορροπίας, αλλά υπάρχει πλέον το λεγόμενο «εύρος απόψυξης». Το εύρος αυτό αντιστοιχεί ακριβώς στη διαφασική περιοχή του διαγράμματος φάσεων.

Μία καμπύλη απόψυξης δίνει πληροφορία της εξέλιξης της στερεοποίησης στο σημείο που μετράται η θερμοκρασία.

β. Συνολική μάζα χυτού

Για όλη τη μάζα του χυτού η πληροφορία δίνεται από διαγράμματα που παρουσιάζουν την ταχύτητα κίνησης του μετώπου στερεοποίησης.

Βλέποντας το φαινόμενο μακροσκοπικά τότε η θερμοκρασιακή κατανομή στη διεπιφάνεια φαίνεται στο παρακάτω σχήμα αριστερά.



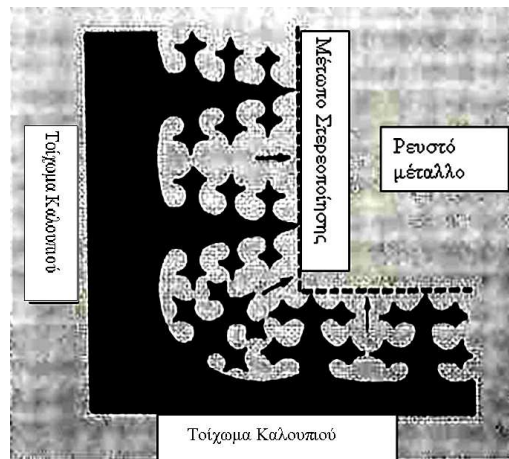
Σχ. 1.6 Μελέτη μετατόπισης του μετώπου στερεοποίησης.

Όπου T_L , T_S οι θερμοκρασίες liquidus και solidus αντίστοιχα και X_L , X_S οι αντίστοιχες θέσεις των ισοθέρμων.

Ο υπολογισμός της προόδου στερεοποίησης που γίνεται με αριθμητικές μεθόδους έχει δείξει ότι η μετατόπιση του μετώπου είναι γραμμική συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, γεγονός που φαίνεται στο σχήμα 1.6 (δεξιά). Η κατακόρυφη απόσταση AB αντιπροσωπεύει το εύρος της πολτώδους ζώνης, ενώ η οριζόντια απόσταση CD αντιπροσωπεύει τον τοπικό χρόνο στερεοποίησης σε μια συγκεκριμένη θέση. [15] Οι καμπύλες αποδεικνύουν ότι με την πάροδο του χρόνου η διαδικασία της στερεοποίησης επιβραδύνεται, παραμένοντας για μεγαλύτερο σχετικά χρονικό διάστημα σε πολτώδη κατάσταση.

Στερεοποίηση κατά τη χύτευση σε καλούπι

Όταν ένα τηγμένο μέταλλο ή κράμα εγχέεται στο καλούπι, η στερεοποίηση ξεκινά από έξω προς τα μέσα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα :

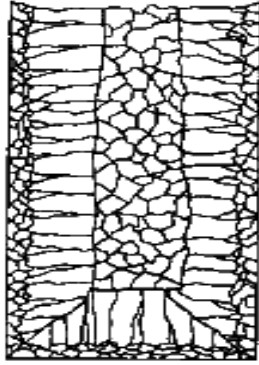


Εικ. 1.17 Το μέτωπο στερεοποίησης κατά τη χύτευση

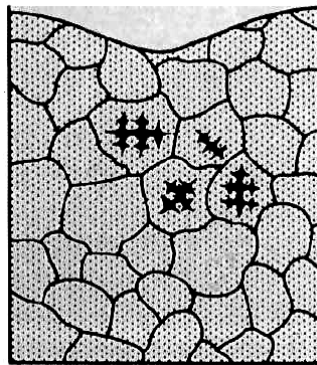
Αυτό φυσικά συμβαίνει αφού η θερμοκρασία των τοιχωμάτων του καλούπιού είναι πολύ μικρότερη από αυτή του τήγματος. Παρατηρείται ετερογενής πυρηνοποίηση στη διεπιφάνεια μετάλλου-καλούπιού. Εάν το καλούπι είναι ψυχρό και μεταλλικής σύστασης, τότε ο ρυθμός απαγωγής θερμότητας είναι μεγάλος, εξαιτίας της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας των μετάλλων κι έτσι αρχικά σχηματίζεται μία ζώνη μικροσκοπικών κρυστάλλων (**μικροκρυσταλλική ζώνη**).

Στη συνέχεια αναπτύσσονται ευμεγέθεις, κολονοειδούς μορφής, δενδριτικοί κρύσταλλοι, με επιμήκη ανάπτυξη, αντίθετα προς την κατεύθυνση της ροής θερμότητας (**βασαλτική ζώνη**). Οφείλονται στην επιλεκτική ανάπτυξη ορισμένων κρυστάλλων της μικροκρυσταλλικής ζώνης. Το μέγεθος ανάπτυξης των κολονοειδών κρυστάλλων, εξαρτάται από τη θερμοκρασία που είχε το τήγμα κατά την έγχυσή του στο καλούπι. Εάν η θερμοκρασία αυτή είναι αρκετά υψηλή, τότε η βασαλτική ζώνη θα εκτείνεται ως το κέντρο του χυτού, διαφορετικά στην κεντρική αυτή περιοχή θα λάβει χώρα πυρηνοποίηση (**κεντρική – ισοαξονική ζώνη**), πριν οι κολονοειδείς κρύσταλλοι προλάβουν να φτάσουν ως εκεί.

Όσον αφορά όμως στη μέθοδο χαμένου κεριού, η στερεοποίηση είναι αρκετά πιο πολύπλοκη, ενώ θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση διαφόρων παραγόντων. Εδώ, η θερμική αγωγιμότητα του καλούπιού είναι πολύ μικρότερη και γι' αυτό η απαγωγή της θερμότητας είναι πολύ πιο αργή. Κατά συνέπεια, συνήθως δεν παρατηρείται βασαλτική ζώνη (κολονοειδείς κρύσταλλοι) και τελικά προκύπτει εν γένει ισοαξονική δομή την κόκκων.



Εικ. 1.18 Οι τρεις ζώνες στερεοποίησης



Εικ. 1.19 Ισοζωνικοί κόκκοι κατά τη χύτευση ακριβείας

1.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

1.4.1 Παράμετροι

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 τιμή)
- Αρχική θερμοκρασία καλουπιού
- Υλικό καλουπιού
- Διαπερατότητα από αέρια του ομοιώματος (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 (Biot number)
- 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. Η ικανότητα του τήγατος να πληροί με ακρίβεια τον τύπο της χύτευσης, καλείται **εύροια** ή **χυτευσιμότητα** και πρέπει να εξασφαλίζεται βάσει των συνθηκών που επικρατούν στην εκάστοτε χύτευση.

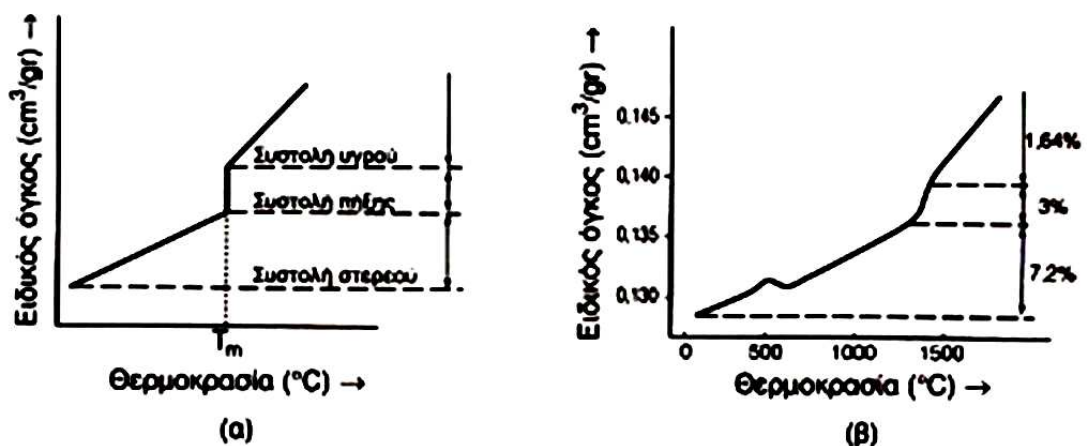
Προβλήματα ροής συναντά κανείς στις μικρές διατομές, όπου το μέταλλο ενδεχομένως στερεοποιείται απότομα στα τοιχώματα του αγωγού εισόδου, δημιουργώντας ένα επιφανειακό στρώμα. Στη συνέχεια το πάχος του στρώματος συνεχώς αυξάνεται και μετατρέπεται σε μηχανικό εμπόδιο, εμποδίζοντας τη ροή του υπόλοιπου 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 πληρωθούν, 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.

Συρρίκνωση

Τόσο τα μέταλλα όσο και τα κράματα παρουσιάζουν έντονη συρρίκνωση κατά τη στερεοποίηση, λόγω της μείωσης της απόστασης των πυρήνων των ατόμων κατά τη δημιουργία της κρυσταλλικής δομής. Η συρρίκνωση αυτή ονομάζεται «υποχώρηση εκ συστολής» και συντελείται σε τρία (3) στάδια:

- Πρώτο στάδιο: ενώ το μέταλλο ή το κράμα βρίσκεται σε υγρή κατάσταση
- Δεύτερο στάδιο: κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου ή του κράματος
- Τρίτο στάδιο: μετά το πέρας της στερεοποίησης



Σχ. 1.7 Καμπύλη συστολής α) καθαρού μετάλλου και β) κράματος, συναρτήσει της θερμοκρασίας

Η συρρίκνωση στο τρίτο στάδιο είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι στο δεύτερο, ενώ στο πρώτο είναι σχεδόν αμελητέα. Στον πίνακα 1.2 δίνονται τα ποσοστά συρρίκνωσης ανάλογα με το υλικό:

Πιν. 1.2 Ποσοστό συστολής χαρακτηριστικών μετάλλων και κραμάτων

ΧΑΛΥ- ΒΑΣ	ΧΥΤΟ- ΣΙΔΗΡΟΣ	ΧΑΛΚΟΣ	ΑΛΟΥ- ΜΙΝΙΟ	ΜΑΓΝΗ- ΣΙΟ	ΨΕΥΔΑΡ- ΓΥΡΟΣ	ΚΑΣΣΙ- ΤΕΡΟΣ	ΑΡΓΥΡΟΣ
2,3	3	2	1,7	1,8	1,6	0,48	2,1

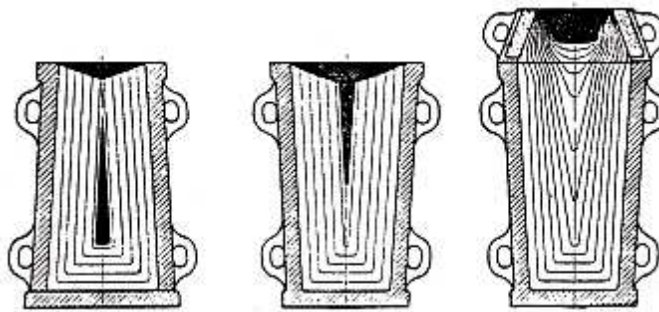
Η συστολή θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το αρχικό στάδιο σχεδιασμού της χύτευσης.

1.4.2 Ελαττώματα πλινθωμάτων

Πόροι λόγω συστολής

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, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.20:



Εικ. 1.20 Πιθανές θέσεις εμφάνισης διακενώσεων

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 εφαρμόζεται υψηλή αρχική θερμοκρασία τύπου ή όταν τα χυτά βρίσκονται σε μικρή απόσταση από το κάτω τμήμα του καλουπιού [2]



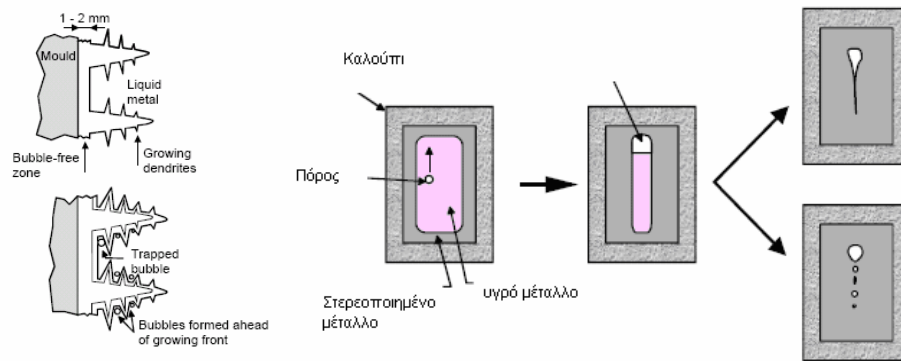
Εικ. 1.21 Εμφάνιση έντονου πορώδους στην επιφάνεια χυτού

Μακροπορώδες- μικροπορώδες. Το μακροπορώδες αποτελείται από διακενώσεις είτε λείες είτε σπογγώδεις (ανάλογα με τη διαφορά μεταξύ liquidus και solidus σε κάθε μέταλλο). Μπορεί να παρατηρηθεί είτε στα τοιχώματα ή στην ελεύθερη επιφάνεια του χυτού, είτε σε πλήρως απομονωμένη περιοχή, όχι απαραίτητα στο θερμικό κέντρο του χυτού, αλλά στο ανώτερο σημείο που θα μπορούσε να ανέλθει λόγω άνωσης.

Το μικροπορώδες είναι μια ομοιόμορφη ημίρρευστη ζώνη, που στη μέθοδο χαμένου κεριού και σε άλλες παρόμοιες μεθόδους χύτευσης μπορούν να εμφανιστούν, λόγω χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας καλουπιού και λόγω υψηλής αγωγιμότητας του μετάλλου. Η ύπαρξη αυτών των μικροδιακενώσεων στη μάζα του χυτού δεν αποτελεί σοβαρό ελάττωμα. (proCast manual)

Πόροι προερχόμενοι από έκλυση αερίων

Τα αέρια εγκλείσματα είτε εκλύονται από το τήγμα, είτε προέρχονται από τη χημική αντίδραση σε υψηλή θερμοκρασία μεταξύ των συστατικών του τήγματος και της ατμόσφαιρας του καλουπιού. Όταν τα αέρια εγκλωβίζονται στη μάζα του χυτού δημιουργούν τα σπήλαια, ενώ όταν εντοπίζονται στις επιφανειακές περιοχές χαρακτηρίζονται ως φυσαλίδες. Τα παραπάνω εγκλείσματα αποτελούνται συνήθως από υδρογόνο.



Εικ. 1.22 Φυσαλλίδες που δημιουργούνται μπροστά από το μέτωπο στερεοποίησης και πόροι στο εσωτερικό του χυτού

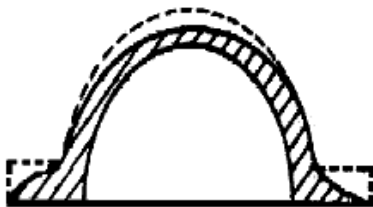
Πιθανές αιτίες για τη δημιουργία αέριων εγκλεισμάτων είναι η υπερθέρμανση του μετάλλου, η ανεπαρκής απομάκρυνση του κεριού και η ανεπαρκής ροή και έξοδος του ατμοσφαιρικού αέρα κατά τη χύτευση. Για την αποφυγή δημιουργίας αέριων πόρων συνιστάται γενικά να μην ανακυκλώνεται το ήδη χρησιμοποιημένο μέταλλο.



Εικ. 1.23 Αέρια εγκλείσματα στην επιφάνεια δακτυλιδιού

Γεωμετρικώς ατελή χυτά

Γεωμετρικές παραμορφώσεις και εξογκώματα μπορεί να δημιουργηθούν λόγω κακής τοποθέτησης του καλουπιού, γεωμετρικής πολυπλοκότητας του χυτού, χαμηλής θερμοκρασίας τήγματος ή τύπου ή ανεπιτυχούς αποκέρωσης. Επίσης στη γεωμετρική ομοιομορφία συμβάλει η καλή ποιότητα του υλικού του προτύπου και ο χρόνος και ρυθμός αποκέρωσης και ψησίματος. Τέλος, οι γεωμετρικές ατέλειες μπορεί να οφείλονται και σε λανθασμένη αναλογία σκόνης γύψου και νερού, ή σε στερεοποίηση του γύψου που δεν έχει γίνει με βάση τις απαιτούμενες προδιαγραφές (μη επαρκής απαέρωση, μετακίνηση καλουπιού πριν το πέρας της στερεοποίησης).



Εικ. 1.24 Παραμορφωμένο τελικό χυτό σε σχέση με το πρότυπο



Εικ. 1.25 Χυτό δακτυλίδι με παραμορφωμένο σχήμα

Εμφάνιση ρυτιδώσεων στην επιφάνεια των χυτών

Ρυτιδώσεις εμφανίζονται όταν η προετοιμασία του γύψου έχει πραγματοποιηθεί με γρήγορο ρυθμό ή σε περίπτωση που η ποσότητα του νερού κατά την ανάμιξη με το πυρόχωμα (γύψο) είναι υπερβολική.

“Μαυρισμένα” και οξειδωμένα χυτά

Τα χυτά οξειδώνονται σε περιπτώσεις που η θερμοκρασία προετοιμασίας του τύπου ή του τήγματος είναι πολύ υψηλή, ή όταν ανακυκλώνεται ήδη χρησιμοποιημένο μέταλλο.

Επικαλυμμένα με γύψο χυτά

Το ελάττωμα αυτό είναι το αποτέλεσμα της έντονης υπερθέρμανσης του μετάλλου. Σε αυτή όμως την περίπτωση ο γύψος απομακρύνεται εύκολα με χρήση περιστρεφόμενης βούρτσας.

Εύθραστες ακμές χυτών

Η χρήση ακατάλληλου υλικού για τη δημιουργία του κράματος, καθιστά εύθραστες τις ακμές του χυτού. Στην ατέλεια αυτή συντελούν και η χαμηλή σχετικά θερμοκρασία τύπου και μετάλλου.

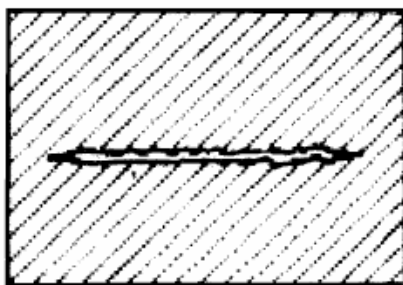
Μη μεταλλικά εγκλείσματα

Τα μη μεταλλικά εγκλείσματα αποτελούν αδιάλυτες ακαθαρσίες σκουριάς ή σωματιδίων που υπάρχουν στο τήγμα. Έχουν διάφορες διαστάσεις και, κατά τη στερεοποίηση, συγκεντρώνονται στην περιοχή των διακενώσεων και δρουν ως πυρήνες κρυστάλλωσης.

Στη δημιουργία τέτοιων εγκλεισμάτων, συντελούν ο λανθασμένος σχεδιασμός του συστήματος μεταφοράς του τήγματος, ή η ανάπτυξη οξειδίων στο χωνί λόγω φθοράς του γραφίτη, ή τέλος η χρήση 'παλαιού' μετάλλου. Τα εγκλείσματα αυτά είτε βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του χυτού εφόσον αυτή καθαριστεί, είτε βρίσκονται πιο κοντά στην επιφάνεια κάνοντας την ψαθυρή.

Ρωγματώσεις στα χυτά

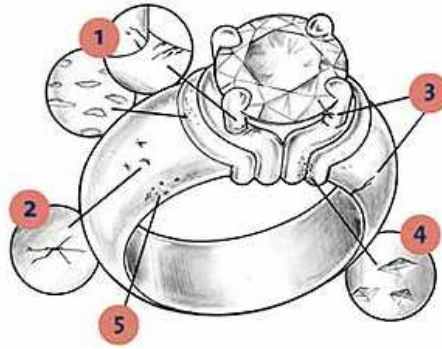
Ρωγματώσεις προκαλούνται εξαιτίας της απότομης συστολής του ρευστού και την συνεπακόλουθη ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι ρωγματώσεις οφείλονται στην ανάπτυξη οξειδίων στο μέτωπο της ροής του τήγματος.



Εικ. 1.26 Δημιουργία ρωγμής λόγω συστολής στο κέντρο του χυτού

Ψυχρές σταγόνες

Δημιουργούνται λόγω εκτίναξης σταγονιδίων του τήγματος, κατά την έγχυση μέσα στο καλούπι. Τα σταγονίδια αυτά στερεοποιούνται πρώτα, οξειδώνονται και συμβάλλουν στην ανομοιογένεια της επιφανειακής δομής του χυτού.



Εικ. 1.27 Συνδυασμών ελαττωμάτων σε χυτό δακτυλίδι

- 1. Αέρια εγκλείσματα*
- 2. Πορώδες λόγω συστολής*
- 3. Ρωγματώσεις*
- 4. Μη μεταλλικά εγκλείσματα*
- 5. Δημιουργία κενών*

1.5 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (ΣΜΘ)

1.5.1 Κατανόηση της φυσικής σημασίας

Ο ΣΜΘ σύμφωνα και με όσα έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής δεν είναι ένα υπαρκτό μέγεθος, μια υπαρκτή ιδιότητα της διεπιφάνειας, αλλά ένα εφευρεθέν μέγεθος για απλοποίηση των σχέσεων μετάδοσης θερμότητας οι οποίες διέπουν τα θερμικά φαινόμενα.

Εκφράζει την ευκολία που προβάλλει η διεπιφάνεια στη διέλευση της θερμότητας.

Είναι παρόμοιο μέγεθος με αυτά της θερμικής αγωγιμότητας(για τα στερεά) και θερμικής συναγωγιμότητας(για τα υγρά) και εκφράζεται σε μονάδες W/m^2K .

Η θερμική αγωγιμότητα σε κάποια υλικά όπως τα μέταλλα, αλλάζει αισθητά συναρτήσει της θερμοκρασίας, ενώ σε υλικά όπως ο γύψος παραμένει σχεδόν σταθερή και ουσιαστικά θεωρείται μέγεθος ανεξάρτητο της θερμοκρασίας.

Επίσης όπως αναφέρθηκε ο τρόπος μετάδοσης της θερμότητας στη διεπιφάνεια διαφέρει ανάλογα με τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν μέρος (ξεκινά με ακτινοβολία, συνεχίζει με αγωγή, μετά με συναγωγή κλπ) και μπορεί να διαφέρει από σημείο σε σημείο της διεπιφάνειας.

Τα στοιχεία αυτά λοιπόν οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο ΣΜΘ δεν μπορεί να έχει σταθερή τιμή

α) διότι η επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ως ένα υλικό που περιέχει μέταλλο και γύψο και ενίοτε αέρα, οπότε να είναι θερμοκρασιακά και ως εκ τούτου και χρονικά εξαρτώμενος, και

β) λόγω των διαφορετικών τρόπων μετάδοσης θερμότητας.

Ο ΣΜΘ γενικά εξαρτάται από διάφορες συνθήκες οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες :

α) Συνθήκες που σχετίζονται με το σύστημα, δηλαδή τη γεωμετρία, τα υλικά και τις θερμικές τους ιδιότητες κ.ά. και

β) Συνθήκες εξωτερικές του κυρίου συστήματος όπως η εφαρμοζόμενη πίεση, συνθήκες επαφής επιφανειών κ.ά.

Αλλά και η μέτρηση του διακένου(με ραδιογραφίες) όπως και ο προσδιορισμός της θερμικής συναγωγιμότητας, που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την ταχύτητα του αέρα είναι μάλλον δύσκολος και ενίοτε μη ακριβής.

1.5.2 Γενική ανάλυση των Ho και Pehlke

Η ανάλυση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας σύμφωνα με τη θεωρία των Ho και Pehlke έχει ως εξής:

Κατά την είσοδο του μετάλλου στο καλούπι υπάρχει πολύ καλή μακροσκοπική επαφή εξαιτίας της ρευστότητάς του, ενώ κενά υπάρχουν μόνο σε μικροσκοπική κλίμακα. Η αρχικά πολύ ισχυρή μεταφορά θερμότητας προκαλεί στα προεξέχοντα σημεία τοπική στερεοποίηση εξαιτίας της απότομης ψύξης τους, η οποία αρχίζει να μεταδίδεται στο μεγαλύτερο τμήμα του χυτού. Μέχρις αυτό το σημείο η συνοχή παραμένει ικανοποιητική, και αυτό έως ότου, το χυτό να αναπτύξει ισχυρό στερεοποιημένο μέτωπο, το οποίο λόγω της συνεχούς απόψυξης θα συσταλεί και θα αποκολληθεί από το τοίχωμα του καλουπιού. Επαφή έχουμε πλέον μόνο σε ελάχιστα σημεία που προεξέχουν και η ανάλυση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας έχει ως εξής:

Ο ΣΜΘ στη διεπιφάνεια μπορεί να γραφεί στην παρακάτω γενική μορφή :

$$HTC = h_s + h_c + h_r$$

όπου:

h_s είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στα σημεία επαφής (hot spots) όπου γίνεται με αγωγή

h_c είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μέσω του αέρα στις περιοχές που υπάρχουν κενά και γίνεται με συναγωγή και

h_r είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας όπου δεν υπάρχει επαφή

Για τα παραπάνω μεγέθη έχουν βρεθεί αναλυτικές εκφράσεις και έχουν ως εξής:

A) Εξαιτίας της αρχικής πολύ καλής επαφής, ο σημαντικότερος παράγοντας είναι η μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής. Ο ολικός συντελεστής HTC παίρνει αρχικά πολύ μεγάλες τιμές που σταδιακά μειώνονται σε φυσιολογικά επίπεδα καθώς χάνεται η συνοχή των δυο επιφανειών. Για παράδειγμα στη χύτευση αλουμινίου υπό υψηλή πίεση, έχουμε αρχική τιμή $h_i = 60.000 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$ και καταλήγει στα $100-1000 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$.

B) Καθώς στερεοποιείται το χυτό και το κενό μεγαλώνει, η μετάδοση θερμότητας μέσω επαφής γίνεται αμελητέα..

Γ) Μετά τη στερεοποίηση η μεταφορά θερμότητας επιτυγχάνεται μέσω του αέρα μεταξύ των δυο επιφανειών και ο αρμόδιος παράγοντας του ΣΜΘ υπολογίζεται ως εξής:

$$h_c = k/d$$

όπου:

k η θερμική αγωγιμότητα του αέρα που περιέχεται στο διάκενο

d το πάχος του διακένου

1.5.3 Αντίσταση καλούπιού

Σε περιπτώσεις όπως η χύτευση με άμμο, ο ρυθμός απόψυξης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το καλούπι, το οποίο ενεργεί σαν μόνωση, κρατώντας το χυτό σε υψηλή θερμοκρασία για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο σε καλούπια γύψου ή κεραμικού υλικού. Η υπερβολικά αργή απόψυξη επιδρά αρνητικά στις μηχανικές ιδιότητες του χυτού και για αυτό το λόγο στην

περίπτωση της χύτευσης ακριβείας εμβαπτίζουμε τον τύπο σε νερό για μεγαλύτερη αποβολή θερμότητας.

1.5.4 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα παραπάνω καταλήγουμε στα ακόλουθα για τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας:

1. Η τιμή του δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου. Επίσης αλλάζει από σημείο σε σημείο του χυτού και επηρεάζεται από το μέταλλο, το υλικό και τη μορφή του τύπου.

2. Η αρχικά μεγάλη τιμή του μειώνεται με το χρόνο σύμφωνα με τη σχέση:

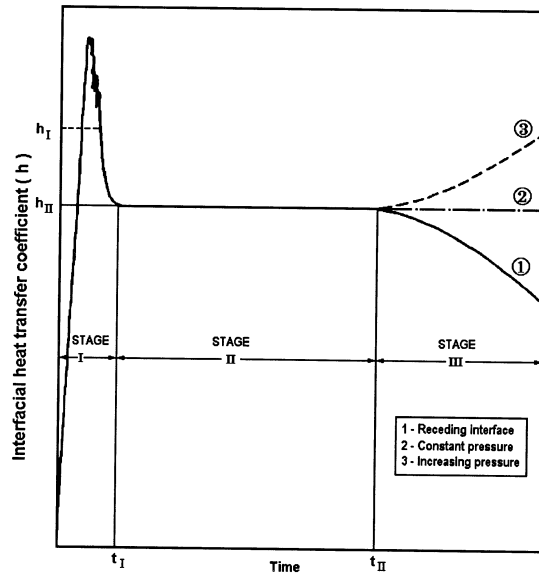
$$h = cf(t)^{-n}$$

όπου:

c, n σταθερές που εξαρτώνται από τη σύσταση του κράματος, το υλικό του καλουπιού και την υπερθέρμανση.

t ο χρόνος

3. στη συνέχεια παραμένει σταθερός εξαιτίας του δημιουργούμενου κενού και στο τέλος η τιμή του εξαρτάται από τις οριακές συνθήκες. Διακρίνονται λοιπόν και στο επόμενο διάγραμμα τα ακόλουθα στάδια:



Σχ. 1.8 Χρονική μεταβολή του ΣΜΘ κατά τη χύτευση

- 1ο στάδιο:** Υψηλή αρχική τιμή του συντελεστή h , η οποία μειώνεται πολύ γρήγορα.
- 2ο στάδιο:** Σταθερή τιμή του συντελεστή h για ορισμένο χρονικό διάστημα.
- 3ο στάδιο:** Ο συντελεστής είτε αυξάνεται (λόγω της αύξησης της πίεσης επαφής στη διεπιφάνεια μετάλλου-καλουπιού, είτε μειώνεται (λόγω αύξησης του κενού της διεπιφάνειας), είτε παραμένει σταθερός (για σταθερή πίεση)

1.6 ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΣΜΘ

Ένα πολύ σημαντικό εργαλείο που έχει αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες και στον τομέα της χύτευσης και βοηθάει στην πρόβλεψη των ελαττωμάτων των χυτών χωρίς απώλεια αναλωσίμων, είναι τα λογισμικά-προγράμματα προσομοίωσης που κάνουν χρήση πεπερασμένων στοιχείων (FEM), πεπερασμένων διαφορών (FDM) ή οριακών στοιχείων (BEM). Αυτά δεχόμενα ως δεδομένα εισαγωγής τις συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια ενός πειράματος και έχοντας εγκατεστημένες τις απαραίτητες δομές για διενέργεια υπολογισμών ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση, «πραγματοποιούν» εικονικά τη χύτευση, εξάγοντας ως αποτελέσματα χρήσιμες πληροφορίες όπως ο χρόνος στερεοποίησης, το ποσοστό πορώδους, το θερμοκρασιακό ιστορικό πληθώρας σημείων στον όγκο του χυτού και του καλουπιού κ.ά. Συνεπώς ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της προσομοίωσης είναι η βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων, μείωση του χρόνου και τυποποίηση της διαδικασίας, μείωση επανειλημμένης χρήσης ίδιων υλικών και αύξηση της παραγωγής.

Σήμερα είναι διαθέσιμα στην αγορά διάφορα πακέτα λογισμικού προσομοίωσης της τρισδιάστατης ροής του μετάλλου (FEM), όπως το Procast, το Mold Flow και το CMold. Υπάρχουν τουλάχιστον 15 με 20 πακέτα λογισμικών προσομοίωσης χύτευσης στην αγορά. Μεταξύ αυτών, όλα επιλύουν το θερμικό πρόβλημα, ενώ λίγα επιλύουν και το πρόβλημα ροής. Τα πιο εξελιγμένα πακέτα λογισμικών πραγματοποιούν ταυτόχρονη θερμική – ροϊκή – τασική ανάλυση του προβλήματος και στηρίζονται στη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Λόγω όμως του μεγάλου υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται και του μεγάλου κόστους, η χρήση τους είναι περιορισμένη σε ακαδημαϊκούς χώρους και μεγάλες βιομηχανικές εταιρίες.

Μια καλή μοντελοποίηση του προβλήματος απαιτεί ακριβείς οριακές συνθήκες διαδικασίας, καθώς και τις ακριβείς θερμικές ιδιότητες των υλικών και τις αρχικές συνθήκες καλουπιού και μετάλλου. Χρειάζεται όμως και η εισαγωγή του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού. Έτσι λοιπόν εξηγείται και το ακαδημαϊκό, και όχι μόνο, ενδιαφέρον για τον προσδιορισμό του ΣΜΘ τις τελευταίες δεκαετίες που οδηγεί σε μια πιο συστηματοποιημένη και σαφώς καθορισμένη διαδικασία με σκοπό βέλτιστα αποτελέσματα κατά την εκτέλεση της εκάστοτε χύτευσης.

1.7 ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΣΤΗ ΔΙΕΘΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1.7.1 Μέθοδοι υπολογισμού ΣΜΘ

Το πρόβλημα του προσδιορισμού του ΣΜΘ προσεγγίζεται με πολλούς τρόπους. Οι τέσσερις συναντούμενοι είναι :

Μέθοδος Δοκιμής και Λάθους (Trial and error)

Σε αυτή τη μέθοδο με τυχαίες τιμές του συντελεστή επιχειρείται μέσω προσομοίωσης η επίτευξη σύγκλισης της αριθμητικής και της πειραματικής καμπύλης απόψυξης. Για ρεαλιστικά αποτελέσματα χρειάζεται προφανώς πολύ καλός ορισμός οριακών και αρχικών συνθηκών και παραμέτρων που χρησιμοποιεί το εκάστοτε πρόγραμμα για τους υπολογισμούς. Μετα από αρκετές δοκιμές αποκτάται εμπειρία και μπορεί να προσεγγιστεί η καμπύλη. Ωστόσο η μορφή του συντελεστή μπορεί να ποικίλει επειδή δε γίνεται οι τιμές της προσομοίωσης να είναι ακριβώς ίδιες με αυτές του πειράματος. Επίσης πολλές φορές μπορεί τα θερμοστοιχεία να μη δίνουν ακριβείς τιμές θερμοκρασίας ή όπως συναντήθηκε και στη διενέργεια πειραμάτων της παρούσας εργασίας να δίνει σε μια περιοχή ένα εύρος θερμοκρασιών, που πολλές φορές δεν μπορεί κανείς να εξακριβώσει την πραγματική τιμή.

Μέθοδος μέτρησης διακένου (airgap)

Σε αυτή τη μέθοδο ή μετριέται το διάκενο με ραδιογραφίες ή υπολογίζεται από εξισώσεις (κατασταστική εξίσωση αερίων και αρχή διατήρησης της μάζας αυτών). Δεν αποφεύγεται η μέτρηση θερμοκρασίας καλουπιού και χυτού, διότι είναι αναγκαίες για τον προσεγγιστικό προσδιορισμό της θερμοκρασίας των εγκλωβισμένων αερίων και εξ' αυτής της θερμικής αγωγιμότητάς τους και επίσης πρέπει να είναι γνωστή η τραχύτητα του καλουπιού. Δεν υπολογίζει την αγωγή αλλά υπολογίζει υψηλό ΣΜΘ αρχικά λόγω έλλειψης διακένου. Χρησιμοποιείται κυρίως σε μόνιμα καλούπια με δυνατότητα ελέγχου της τραχύτητας της διεπιφάνειας.

Μέθοδος επίλυσης αντίστροφου προβλήματος (*Inverse Heat Conduction Problem*)

Ένα αντίστροφο πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας είναι εκείνο όπου μετρήσεις θερμοκρασίας στο εσωτερικό ενός σώματος, χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θερμορροής και της θερμοκρασίας στην επιφάνειά του. Με χρήση αυτών των πληροφοριών πλέον ο ΣΜΘ μπορεί να προσδιοριστεί.

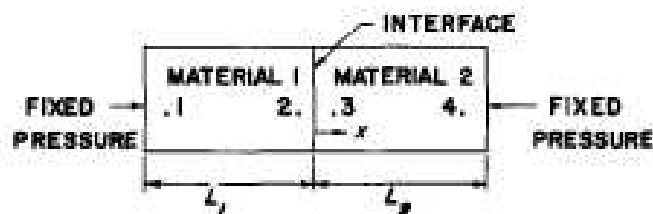
Τα αντίστροφα προβλήματα είναι πιο δύσκολο να επιλυθούν απ' ό,τι τα κλασσικά απ' ευθείας υπολογισμού, όπου οι οριακές συνθήκες είναι γνωστές. Αυτό επειδή σφάλματα στα μετρηθέντα δεδομένα ενισχύονται όταν οι μετρήσεις αυτές προβάλλονται στην επιφάνεια. Οι αντίστροφες μέθοδοι επιστρατεύονται για να προσδιορίσουν οριακές συνθήκες καθώς η παρουσία θερμοστοιχείου σε ένα όριο μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια μιας τέτοιας μέτρησης. Μπορεί να είναι αδύνατη η ακριβής τοποθέτηση θερμοστοιχείου σε κάποιο όριο ή το όριο να είναι όντως απροσπέλαστο. [3]

Κατά βάση ωστόσο μετρούνται, όταν είναι δυνατόν, θερμοκρασίες σε όρια, οι οποίες έπειτα συγκρίνονται με τις υπολογισθείσες και αν αυτές δε διαφέρουν αρκετά είναι ένδειξη τελικά ότι ο συντελεστής που υπολογίζεται είναι αρκούντως ακριβής.

Πιο χαρακτηριστική μέθοδος που είναι και η συχνότερα χρησιμοποιούμενη στην επίλυση του αντίστροφου υπολογισμού είναι αυτή του James Beck το 1968.

Ο Beck σταθεροποίησε τη μέθοδο υπολογισμού εισάγοντας στους υπολογισμούς τις μελλοντικές θερμοκρασίες για τον προσδιορισμό της θερμορροής της προηγούμενης χρονικής στιγμής.

Εκθέτει το πρόβλημα για μία επίπεδη διεπιφάνεια. Χρησιμοποιεί τη μαθηματική έκφραση μετάδοσης θερμότητας σε κάθε ένα από τα υλικά που έχουν ως εξής :



$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) = \rho_1 \cdot c_{p,1} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} , -L_1 < x < 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) = \rho_2 \cdot c_{p,2} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} , 0 < x < L_2$$

Στη διεπιφάνεια ισχύουν οι ισότητες :

$$k_1 \cdot \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=0} = h \cdot [T_1(0, t) - T_2(0, t)] = k_2 \cdot \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=0}$$

Υποθέτοντας τιμές για το h , προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τη συνάρτηση :

$$F(h) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [T_j^i(h) - Y_j^i]^2,$$

όπου :

T η υπολογιζόμενη αριθμητικά τιμή θερμοκρασίας τη χρονική στιγμή m , στη θέση n

Y η αντίστοιχη μετρηθείσα

Μέθοδος σημειακού όγκου (Lump Capacitance Method)

Η μέθοδος αυτή ίσως είναι η πιο απλή από τις τρεις που αναφέρονται. Με κατάλληλο αριθμό και όσο γίνεται ακριβέστερη τοποθέτηση θερμοστοιχείων, μετρούνται σε καιρία σημεία οι θερμοκρασίες με σημαντικότερες αυτές εκατέρωθεν της διεπιφάνειας, οι οποίες θα εισαχθούν στις μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφουν τη μετάδοση θερμότητας και από εκεί θα προκύψει μονοσήμαντα ο ΣΜΘ.

Όλη η μάζα του χυτού θεωρείται συγκεντρωμένη σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο όπου μετράται η θερμοκρασία.

Η μέθοδος αυτή σπάνια συναντάται στη βιβλιογραφία (Konrad et al, Sun & Chao) και συνίσταται για μικρά μεγέθη χυτών.

Επιλέχθηκε να υπολογιστεί ο ΣΜΘ με την τελευταία μέθοδο, διότι το δοκίμιο είναι μικρών διαστάσεων, το υπολογιστικό μέρος της μεθόδου είναι σχετικά απλό, ανεξάρτητο παραμέτρων που πρέπει να οριστούν στην προσομοίωση και θα ελεγχθεί κατά πόσον συγκλίνουν τα αποτελέσματα με αυτά της διαδικασίας της προσομοίωσης.

Στις περισσότερες περιπτώσεις που εντοπίστηκαν, μελετάται ο συντελεστής σε περιπτώσεις χυτεύσεων με μεταλλικό καλούπι και πολλές φορές με ύπαρξη ψυκτικού

μέσου εντός του καλουπιού. Στην παρούσα μελέτη δε φαίνεται να είναι παρόμοιοι οι συντελεστές, καθώς η αγωγιμότητα της διεπιφάνειας είναι σαφώς μεγαλύτερη μεταξύ μετάλλων απ'ό,τι μετάλλου με γύψο, ο οποίος βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία και μάλιστα εφόσον αυτός δεν ψύχεται επιπλέον.

Όπως χαρακτηριστικά λένε οι Browne και O'Mahoney μέχρι το 2001 τουλάχιστον, οι πληροφορίες για το ΣΜΘ κατά τη χύτευση ακριβείας ήταν ελάχιστες. Πολλώ μάλλον είναι ελάχιστη η πληροφορία για το υλικό που μελετήθηκε εν προκειμένω.

1.7.2 Εργασίες προσδιορισμού ΣΜΘ στη διεθνή βιβλιογραφία

i. Browne & O'Mahoney

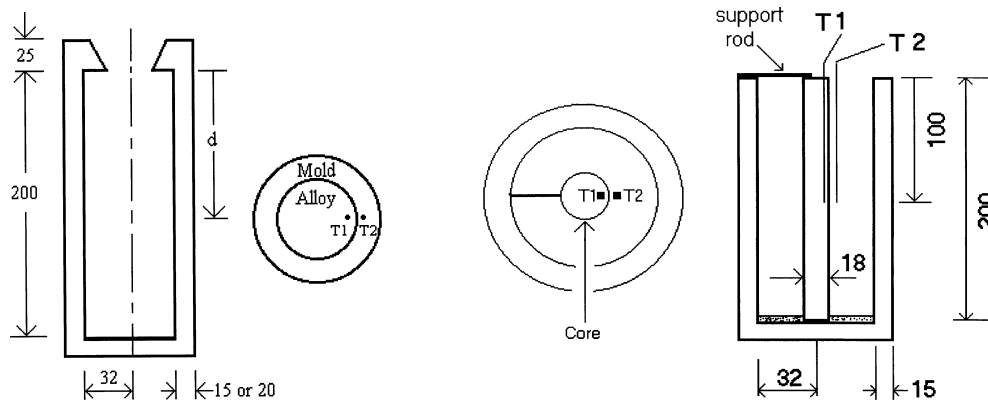
Μια πλήρης, αλλά και συνοπτική αναφορά πολύ βοηθητική, γίνεται από τους Browne και O'Mahoney. Ανακεφαλαιώνουν σημαντικά στοιχεία από προηγούμενες από αυτούς δημοσιεύσεις με επίκεντρο τη χύτευση ακριβείας και παραθέτουν και τα δικά τους στοιχεία.

Εκτελούν πειράματα χύτευσης ακριβείας με :

- υλικά χύτευσης κράματα αλουμινίου,
- καλούπια που η πρώτη και κύρια στρώση του καλουπιού αποτελείται από Ζιρκόνιο και η δεύτερη από Al_2SiO_5 , (alumino-silicate) με και χωρίς μεταλλικό πυρήνα (εικόνα 1.28)

και υπολογίζουν το ΣΜΘ στις διεπιφάνειες χυτού-καλουπιού και χυτού-πυρήνα, εξετάζοντας την επίδραση σε κάθε κράμα των εξής παραμέτρων:

- τη μεταλλοστατική πίεση ή αλλιώς το βάθος χύτευσης,
- τη θερμοκρασία προθέρμανσης και
- το πάχος τοιχώματος του καλουπιού.



Εικ. 1.28 Τα καλούπια που χρησιμοποιούν οι Browne και O'Mahoney

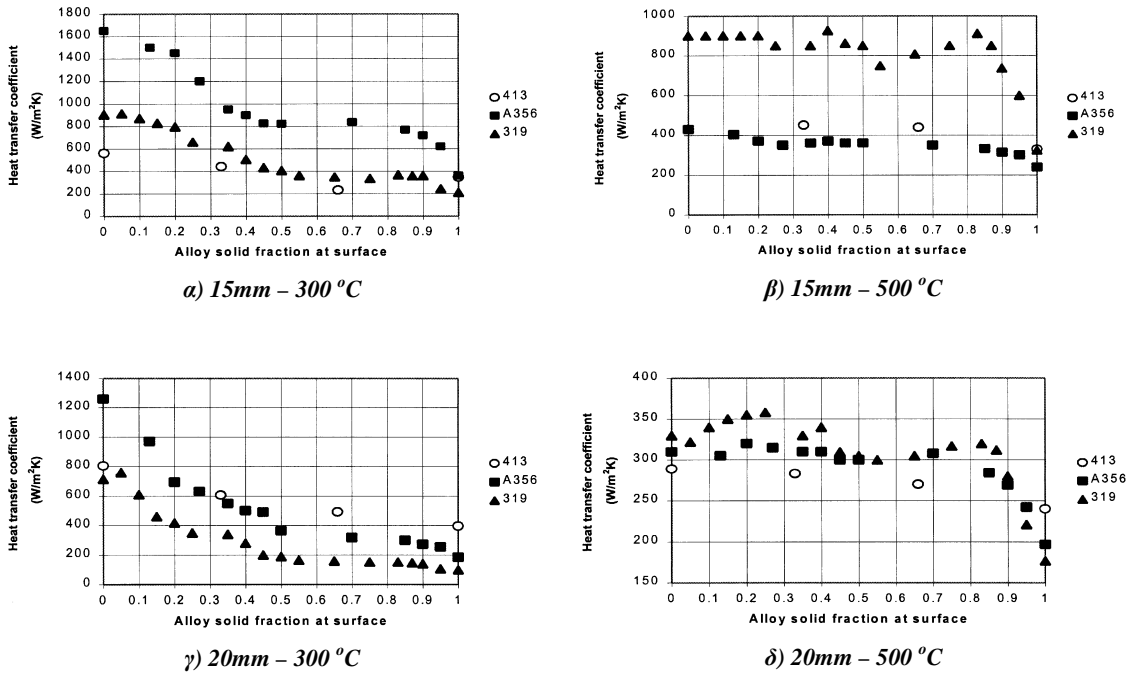
Η αρχική θερμοκρασία τήγματος ήταν 700 °C, καθώς σε υψηλότερες θερμοκρασίες υπάρχει πιθανότητα να καούν κραματικά στοιχεία όπως π.χ. Mg. Η θερμοκρασία αυτή είναι κοντά στη θερμοκρασία liquidus των επιλεγέντων κραμάτων. Δεν είναι ούτε πολύ υψηλή έτσι ώστε να οδηγούνται σε μεγάλες τιμές πορώδους και χρόνου στερεοποίησης, αλλά ούτε και πολύ χαμηλή με φόβο ελλιπούς πλήρωσης του καλουπιού.

Πιν. 1.3 Κράματα που μελέτησαν οι Browne και O'Mahoney και τα θερμοκρασιακά όρια της διφασικής τους περιοχής.

Alloy	Liquidus Temperature (°C)	Eutectic Temperature (°C)	Solidification Completion Temperature (°C)	Freezing Range (°C)
413	579	577	575	4
A356	612	570	548	64
319	610	561	490	120

Ασχολούνται μόνο με την περιοχή της στερεοποίησης που είναι και η πιο σημαντική βέβαια και παρουσιάζουν τα αποτελέσματά τους συναρτήσει του ποσοστού στερεοποίησης στην επιφάνεια, που έχει μονοσήμαντη σχέση και αντιστοιχία με τη θερμοκρασία του υλικού και η οποία με τη σειρά της μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του χρόνου σε κάθε πείραμα.

$$HTC (f_s(T(t)))$$



Εικ. 1.29 Συγκριτικά διαγράμματα ΣΜΘ για διαφορετικά πάχη τοιχώματος και θερμοκρασίες προθέρμανσης καλουπιού.

Διαπιστώνεται ότι:

α) Για υψηλότερη θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού εν γένει ο ΣΜΘ:

1. Έχει μικρότερη συνολική μεταβολή μέχρι και τις τελευταίες στιγμές πριν την ολική στερεοποίηση, διατηρείται δηλαδή σχεδόν σταθερός.
2. Παρουσιάζει μικρότερη ή το πολύ ίση μέγιστη τιμή

β) Για μεγαλύτερο πάχος καλουπιού ο ΣΜΘ παρουσιάζει μικρότερη μέγιστη τιμή

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής για το κάθε κράμα ξεχωριστά συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα.

Πιν. 1.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα. Πώς μεταβάλλεται ο ΣΜΘ σε συνάρτηση με:

Κράμα	Μεταλλοστατική Πίεση	Προθέρμανση Καλουπιού	Πάχος τοιχώματος καλουπιού
413	Δεν επηρεάζει σημαντικά	Μεγάλο εύρος τιμών σε χαμηλή θερμοκρασία καλουπιού	Δεν επηρεάζει σημαντικά
A356	Σημαντικός παράγοντας. Αυξάνεται με το βάθος	Όμοια με 413. Επίσης υψηλή θερμοκρασία καλουπιού οδηγεί σε σημαντική πτώση του μέσου ΣΜΘ	Παχύτερο καλούπι ρίχνει σημαντικά το ΣΜΘ
319	Όμοια με το A356 Σημαντικός στην υψηλή θερμοκρασία καλουπιού	Όμοια με 413. Για παχιά καλούπια δεν επηρεάζει η προθέρμανση. Υψηλή προθέρμανση αυξάνει την ευαισθησία του βάθους χύτευσης	Όμοια με A356 Επίσης για λεπτά καλούπια, υψηλή προθέρμανση οδηγεί σε αύξηση του ΣΜΘ

Στην εργασία τους γίνεται αναφορά και σε μια εργασία των Sahai και Overfelt (1995) οι οποίοι μελέτησαν το ΣΜΘ στο κράμα INCONEL 718 (κράμα με μέταλλο βάσης Ni) για κυλινδρική και επίπεδη χύτευση ακριβείας με χρήση του τότε υπάρχοντος λογισμικού ProCast.

Με προθέρμανση καλουπιού στους 745 °C δίνουν τις εξής τιμές για το ΣΜΘ :

Πιν. 1.5 Τιμές του ΣΜΘ (W/m^2K) για κυλινδρική και επίπεδη γεωμετρία χύτευσης των Sahai και Overfelt.

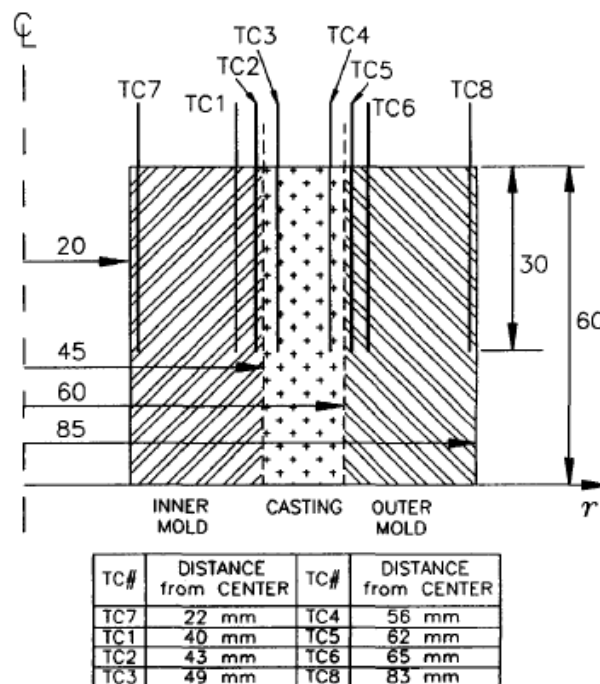
Θερμοκρασία °C \ Γεωμετρία χύτευσης	Κυλινδρική	Επίπεδη
1400		5000
1300	200	
1100		100
850	100	

Επομένως σε κυλινδρικές χυτεύσεις αναμένονται μικρότερες τιμές ΣΜΘ απ'ό,τι σε επίπεδες.

Το κενό μεταξύ χυτού-καλουπιού μετρήθηκε από ραδιογραφίες και ήταν της τάξης του 1mm και αυξανόταν από κάτω προς τα πάνω, γεγονός που σηματοδοτεί την επίδραση του παράγοντα της μεταλλοστατικής πίεσης.

ii. Tae-Gyu Kim & Zin-Hyoung Lee

Οι Kim και Lee εκτελούν πειράματα σε δακτυλιοειδές καλούπι από θερμικά κατεργασμένο χάλυβα (SKD61) με αρχική θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C. Τοποθετούν 8 θερμοστοιχεία τύπου K, σε σημεία καίρια για την πορεία των υπολογισμών τους, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.30, όπου και καταγράφονται οι συγκεκριμένες θέσεις τους από τον άξονα του καλουπιού. Οι υπολογισμοί τους βασίζονται σε επίλυση αντίστροφου προβλήματος.

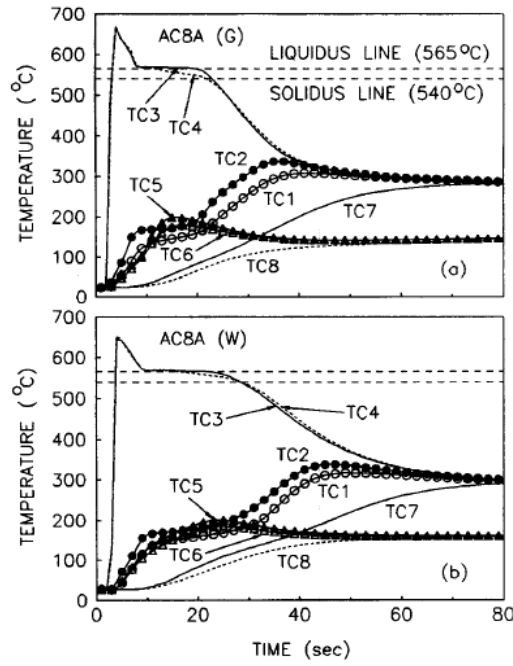


Εικ. 1.30 Κατακόρυφη ημιτομή με τις θέσεις των θερμοστοιχείων του καλουπιού που μελέτησαν οι Kim και Lee

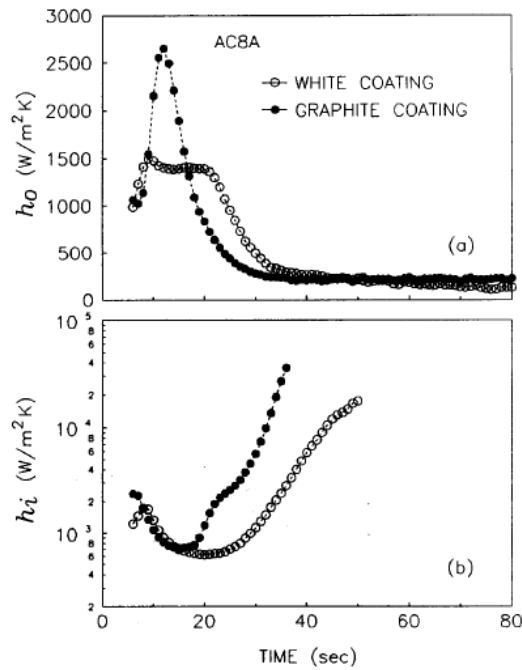
Στα αποτελέσματά της έρευνάς τους φαίνεται καθαρά πόσο σημαντικό ρόλο παίζει η σχετική διαστολή-συστολή χυτού-καλουπιού στο ΣΜΘ.

Στα πειράματά τους οι επιφάνειες του καλουπιού έχουν δύο διαφορετικές επικαλύψεις. Η μία με βασικό συστατικό γραφίτη και η άλλη με ένα άλλο λιγότερο αγώγιμο θερμικά υλικό(FOSECO DYCOTE 39), όπως φαίνεται και από τις καμπύλες απόψυξης που ακολουθούν. Το δεύτερο επίχρισμα προσομοιάζει περισσότερο με γύψο-κεραμικό υλικό, μοιάζει δηλαδή με το καλούπι της παρούσας εργασίας.

Οι υπολογισθέντες ΣΜΘ παρουσιάζονται αμέσως μετά.

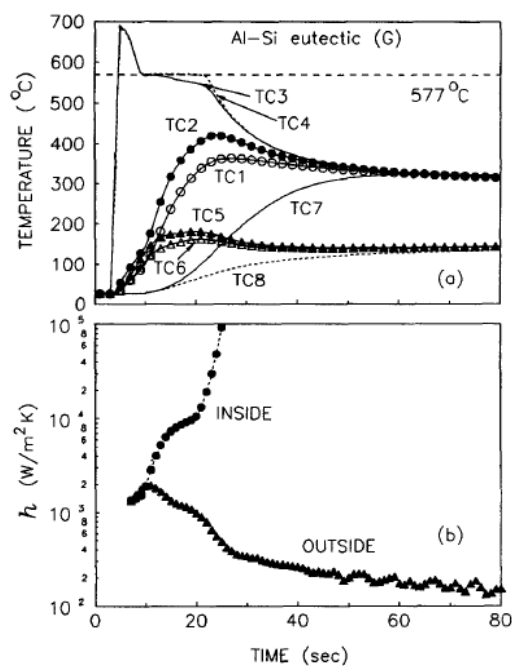


Εικ. 1.31 Θερμοκρασιακές καμπύλες που μέτρησαν οι Kim και Lee σε χύτευση κράματος AC8A, με διαφορετικά επιχρίσματα.



Εικ. 1.32 Οι ΣΜΘ εξωτερικής και εσωτερικής διεπιφάνειας που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων της εικόνας 1.31

Προτού όμως σχολιαστεί η συμπεριφορά αυτών των συντελεστών εξετάζεται ένα από τα πειράματα που έκαναν με ευθηκτικό κράμα Al-Si.



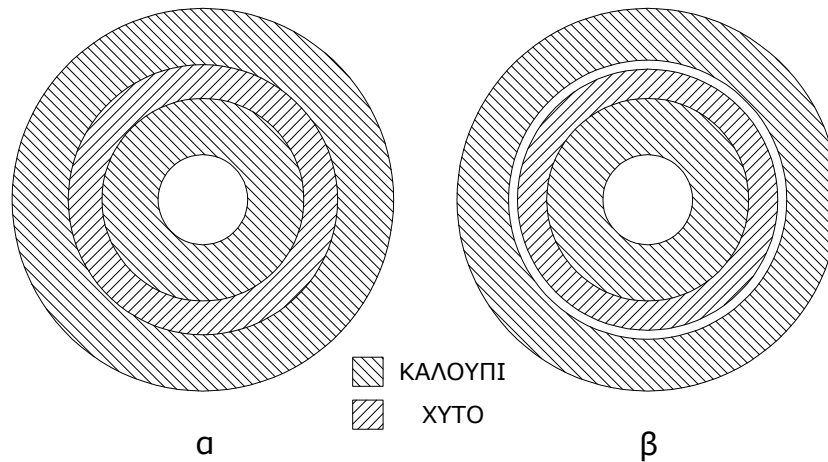
Εικ. 1.33 Μετρηθείσες Θερμοκρασίες και υπολογισθέντες ΣΜΘ για ευτηκτικό κράμα

Ο συντελεστής στην εξωτερική διεπιφάνεια λαμβάνει σε σύντομο διάστημα τη μέγιστη τιμή και στη συνέχεια κινείται πτωτικά, αρχικά πιο απότομα και εν συνεχεία ομαλότερα. Στην εσωτερική διεπιφάνεια έχει σημαντικά ανοδική πορεία και φτάνει σε τόσο υψηλές τιμές, που φτάνουν σε επίπεδα που φτάνει ο συντελεστής σε χυτεύσεις υψηλής πίεσης μεταλλικής μήτρας. Αυτά τα αποτελέσματα εξηγούνται με τη σχετική διαστολή και συστολή χυτού-καλουπιού.

Με την έγχυση λόγω του υψηλού ενεργειακού περιεχομένου του τήγματος και της χαμηλής θερμοκρασίας του καλουπιού ο συντελεστής έχει ίδιες τιμές εσωτερικά και εξωτερικά, διότι εξαρτάται αποκλειστικά από τη θερμοκρασιακή κατάσταση των επαπτόμενων υλικών.

Με την απόψυξη του χυτού επέρχεται συστολή του, που σημαίνει μείωση εσωτερικής και εξωτερικής διαμέτρου.

Με τη θέρμανση του καλουπιού επέρχεται διαστολή του, που σημαίνει αύξηση των διαμέτρων των αντίστοιχων διαμέτρων με πριν αλλά του καλουπιού.



Εικ. 1.34 Δημιουργούμενο κενό με σχετική συστολή-διαστολή χυτού-καλουπιού

Επομένως ενώ στην εξωτερική διάμετρο του χυτού οι επιφάνειες απομακρύνονται, αντιθέτως στην εσωτερική, όχι απλά μένουν σε επαφή, αλλά και συμπιέζονται.

Το χυτό με την πάροδο του χρόνου συνεχίζει να αποψύχεται. Όταν αρχίσει πλέον να αποψύχεται και το καλούπι, τότε και στην εσωτερική διάμετρο οι επιφάνειες πιθανό να τείνουν να απομακρυνθούν ενώ στην εξωτερική να πλησιάσουν αλλά

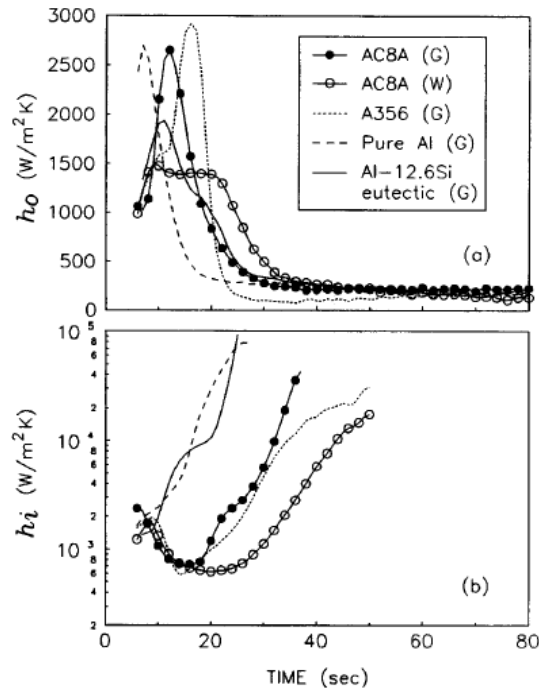
1. αν ναι με σαφώς μικρότερη ταχύτητα
2. αν όχι λόγω μεγαλύτερης ταχύτητας διαστολής-συστολής του υλικού του χυτού σε σχέση με αυτή του υλικού του καλουπιού.

Στην περίπτωση του κράματος AC8A με το επίχρισμα γραφίτη είναι σχεδόν παρόμοια η συμπεριφορά με τις εξής διαφορές :

- α) εκτίναξη και απότομη βύθιση στη συνέχεια και μετά διατήρηση μικρής τιμής στην εξωτερική διάμετρο
- β) μείωση αρχικά και εν συνεχεία σημαντική αύξηση στην εσωτερική διάμετρο.

Στην περίπτωση με το θερμομονωτικό επίχρισμα όπου η απόψυξη είναι πιο αργή, κάνει αισθητή την παρουσία του άλλο ένα σημαντικό φαινόμενο. Ο ΣΜΘ στην εξωτερική διάμετρο, μέχρι περίπου ακόμα και μετά το 50% της περιόδου στερεοποίησης παραμένει σχετικά σταθερός.

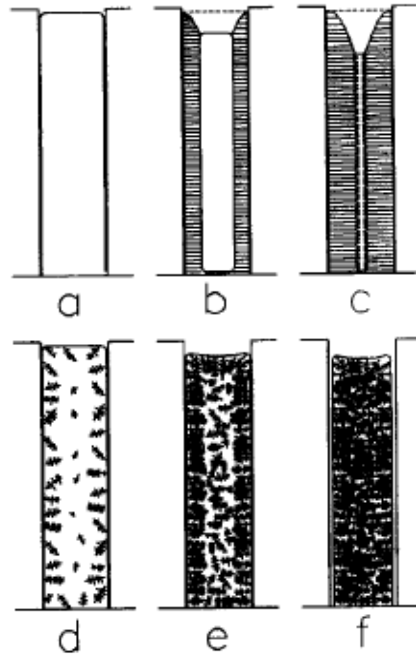
Οι Kim και Lee παρατήρησαν επομένως ότι στην εσωτερική διάμετρο ο ΣΜΘ για μέταλλα με συγκεκριμένο σημείο τήξης, ήτοι καθαρό Al και ευτηκτικό κράμα αυτού, συνεχώς αυξάνεται, ενώ σε εκείνα με θερμοκρασιακό εύρος στερεοποίησης, αρχικά μειώνεται και μετά αυξάνεται.



Εικ. 1.35 Συγκριτικά διαγράμματα των ΣΜΘ εσωτερικής και εξωτερικής διαμέτρου για όλα τα μέταλλα που μελετήθηκαν από τους Kim και Lee

Στα μέταλλα με συγκεκριμένο σημείο τήξης τα αποτελέσματα είναι όπως αναμένονταν και η αύξηση εξηγείται με τη συστολή του πρώτου στερεού κελύφους του χυτού που σχηματίζεται, πάνω στο διαστελλόμενο εσωτερικό κομμάτι του καλουπιού. Η προσωρινή πτώση του ΣΜΘ στην εσωτερική διάμετρο στην περίπτωση κραμάτων με θερμοκρασιακό εύρος στερεοποίησης, πρέπει να είναι απότοκος της συστολής στερεοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, κράματα που στερεοποιούνται με πολτώδη τρόπο, σχηματίζουν συνεκτικό δενδριτικό δίκτυο στην αρχή της στερεοποίησης. Η χαμηλή πίεση του υγρού, που επήλθε από τη συστολή, «ρουφάει» το δενδριτικό δίκτυο προς το εσωτερικό του, δημιουργώντας ένα μικρό κενό. Το ρούφηγμα αυτό είναι εντονότερο στην εσωτερική διάμετρο λόγω της μικρότερης επιφάνειας και επομένως της μικρότερης μάζας του δενδριτικού σχηματισμού. Με την πάροδο του 50-60% του

χρόνου στερεοποίησης πλέον σχηματίζεται συνεκτική δομή στις δύο επιφάνειες και έχουμε φυσιολογική εξέλιξη του ΣΜΘ λόγω συστολής.



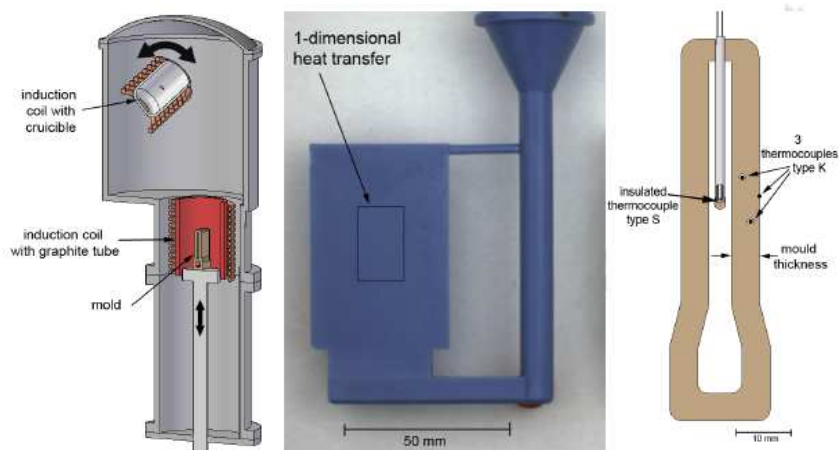
Εικ. 1.36 Απεικόνιση στερεοποίησης μετάλλων με συγκεκριμένο σημείο τήξης που σχηματίζουν διαδοχικά, στερεά κελύφη (a, b, c) και κραμάτων που στερεοποιούνται δια πολτώδους τρόπον, σχηματίζοντας συμπαγή δενδριτικά δίκτυα (d, e, f)

Η πολτώδης ζώνη θα μπορούσε να παρομοιαστεί σα νερό με παγάκια. Αντιλαμβάνεται επομένως κανείς ότι υπάρχει καλή επαφή υγρού μετάλλου και καλουπιού μέχρι και μετά το 50-60% του χρόνου στερεοποίησης.

iii. Konrad, M. Brunner, K. Kyrgyzbaev, R. Völkl, U. Glatzel

Η μελέτη αυτών των ερευνητών ήταν ο προσδιορισμός κάποιων θερμικών ιδιοτήτων αλλά και ακολούθησε μέθοδο σημειακού όγκου από μετρήσεις που πήραν σε χύτευση ακριβείας κράματος Νικελίου (IN738LC), σε χυτόπρεσσα κενού με τις εξής συνθήκες:

- Θερμοκρασία τήγματος : 1500 °C
- Πίεση : $3 \cdot 10^5$ mbar



Εικ. 1.37 Η μηχανή χύτευσης, το κέρινο ομοίωμα της γεωμετρίας που χυτεύθηκε και τομή του κακλονπιού με τις θέσεις των θερμοστοιχείων όπου έγιναν μετρήσεις

Πιν. 1.6 Η σειρά πειραμάτων

		mold preheat temperature			
		900°C	1000°C	1100°C	1235°C
number of layers	8		T1000 L8		
	6	T900 L6	T1000 L6	T1100 L6	T1235 L6
	4		T1000 L4		

Ακολούθησαν την απλή θερμική σχέση ότι ο ΣΜΘ θα ισούται με τη θερμορροή ανά μονάδα επιφανείας που διέρχεται από τη διεπιφάνεια προς τη θερμοκρασιακή διαφορά που επικρατεί στα άκρα της :

$$h = \frac{\dot{q}}{\Delta T} = \frac{\dot{q}_c + \dot{q}_s}{\Delta T}$$

Η αισθητή θερμορροή υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\dot{q}_c = \frac{\rho_s \cdot x \cdot c_p \cdot (T(t) - T(t + \Delta t))}{\Delta t}$$

Η λανθάνουσα θερμορροή υπολογίζεται από τη σχέση :

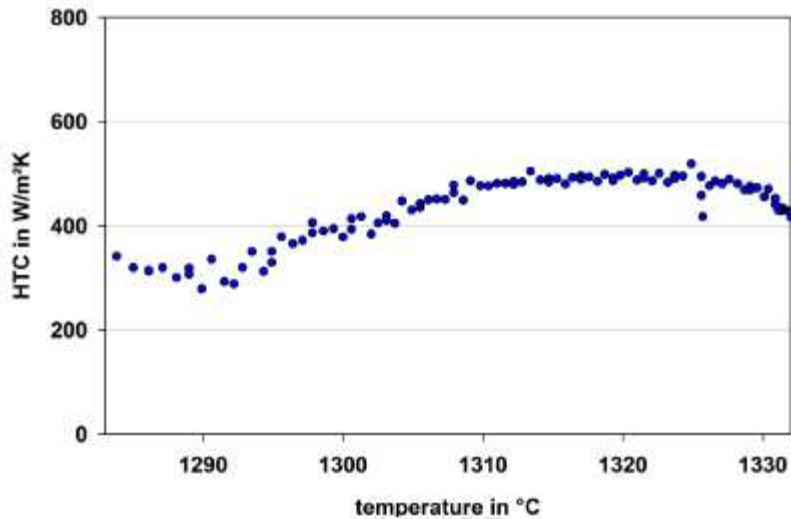
$$\dot{q}_s = \frac{2 \cdot \left(1 - \frac{t - t_{\text{liquid}}}{t_{\text{solid}} - t_{\text{liquid}}} \right) \cdot \rho_s \cdot x \cdot E_s}{\Delta t} \quad , \quad t_{\text{liquid}} \leq t \leq t_{\text{solid}}$$

Όπου, x το ημιπάχος της πλάκας, ρ_s , c_p , E_s , η πυκνότητα (kg/m^3), η ειδική θερμοχωρητικότητα (J/kg/K) και η ειδική λανθάνουσα θερμότητα (kJ/kg) του υλικού αντίστοιχα.

Η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια από τη μεριά του καλουπιού υπολογίστηκε από γραμμική παρεμβολή των τριών άλλων θερμοκρασιών που μετρήθηκαν σε συγκεκριμένες θέσεις του καλουπιού με θερμοστοιχεία τύπου K , ενώ η θερμοκρασία από την πλευρά του μετάλλου ήταν προφανώς αυτή που μετρήθηκε από το κεντρικό θερμοστοιχείο, τύπου S , θεωρώντας, και ρεαλιστικά, ότι δεν υφίσταται θερμοκρασιακή πτώση κατά το πάχος της πλάκας στη μελετούμενη περιοχή.

Υπάρχει πιθανότητα στον τύπο της λανθάνουσας θερμορροής, λανθασμένα να έχει πολλαπλασιαστεί η παράσταση στον αριθμητή επί δύο, διότι έτσι θεωρείται ότι η λανθάνουσα θερμότητα αποβάλλεται μονόπλευρα. Μπορεί ωστόσο να είναι απλά τυπογραφικό λάθος εκ παραδρομής.

Παρακάτω φαίνεται ο ΣΜΘ για ένα από τα πειράματα που πραγματοποιήσαν οι μελετητές.

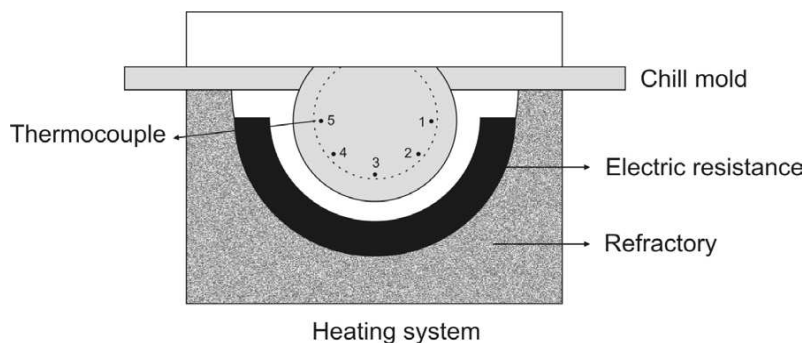


Εικ. 1.38 Ο ΣΜΘ που υπολογίστηκε για το πείραμα T1000 L6

Παρατηρεί κανείς ότι με θερμοκρασίες που είναι πολύ υψηλές, ο ΣΜΘ κινείται από 300 – 500 W/m²/K.

iv. Souza, Cheung, Santos, Garcia

Οι συγκεκριμένοι μελετητές μελετούν κυλινδρική χύτευση σε ψυχόμενο καλούπι από ανοξείδωτο χάλυβα με κράματα Κασσιτέρου(Sn) και κραματικό στοιχείο Μόλυβδο(Pb) σε περιεκτικότητες 5% και 15% (κανένα εκ των δύο δεν είναι ευτηκτικό). Ο άξονας του κυλίνδρου είναι οριζόντιος και όχι κατακόρυφος, όπως στην προκειμένη περίπτωση, για το λόγο ότι ο προσανατολισμός του χυτού έχει βασική επίδραση στην ασκούμενη σε διαφορετικά σημεία πίεση από το υπερκείμενο ρευστό μέταλλο (μεταλλοστατική πίεση), πράγμα που υποστηρίζουν ότι κανείς δεν έχει ασχοληθεί.



Εικ. 1.39 Τομή της πειραματικής διάταξης με τα σημεία που μελετήθηκαν

Χρησιμοποιούν την έκφραση της μεταφοράς θερμότητας σε κυλινδρικές συντεταγμένες για την απόψυξη :

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Ο παράγοντας \dot{q} κατά την απόψυξη παριστάνει ουσιαστικά τη λανθάνουσα θερμότητα η οποία εκλύεται από τη μάζα του υλικού που περιλαμβάνεται στον όγκο ελέγχου για τον οποίο γράφεται η εξίσωση. Επομένως ίσονται με :

$$\dot{q} = \rho \cdot L \cdot \frac{\partial f_s}{\partial t}$$

Θεωρώντας ότι κατά γωνία και καθ' ύψος η μεταβολή της θερμορροής είναι μηδενική, επομένως έχουμε διδιάστατη(στο επίπεδο) ροή θερμότητας κατά την ακτινική διάσταση της διατομής :

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q} = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \Rightarrow \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \rho \cdot L \cdot \frac{\partial f_s}{\partial t} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho \cdot c' \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

όπου:

$$c' = \left(c - L \cdot \frac{\partial f_s}{\partial T} \right)$$

Το c' ονομάζεται **συντελεστής ειδικής ψευδοθερμοχωρητικότητας** και εμπεριέχει την ποσότητα της λανθάνουσας θερμότητας. Το αρνητικό πρόσημο δεν πρέπει να προβληματίζει τον αναγνώστη. Η κλίση της μεταβολής του ποσοστού στερεοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας είναι αρνητική και ο ψευδοσυντελεστής προκύπτει τελικά προσαυξημένος κατά το ποσό της λανθάνουσας θερμότητας.

Ακολουθώντας πλέον τη λογική επίλυσης αντιστρόφου προβλήματος του Beck με εξισώσεις πεπερασμένων στοιχείων, καταλήγουν να υπολογίσουν ένα συνολικό ΣΜΘ h οποίος περιλαμβάνει το ΣΜΘ της διεπιφάνειας, την αγωγιμότητα του υπάρχοντος πάχους καλουπιού και τη συναγωγιμότητα του ψυκτικού υγρού, για τον οποίο ισχύει η σχέση :

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_i} + \frac{e}{k_m} + \frac{1}{h_w}$$

όπου :

h_i ο ΣΜΘ στη διεπιφάνεια

k_m ο συντελεστής αγωγιμότητας του καλουπιού

e το πάχος του καλουπιού και

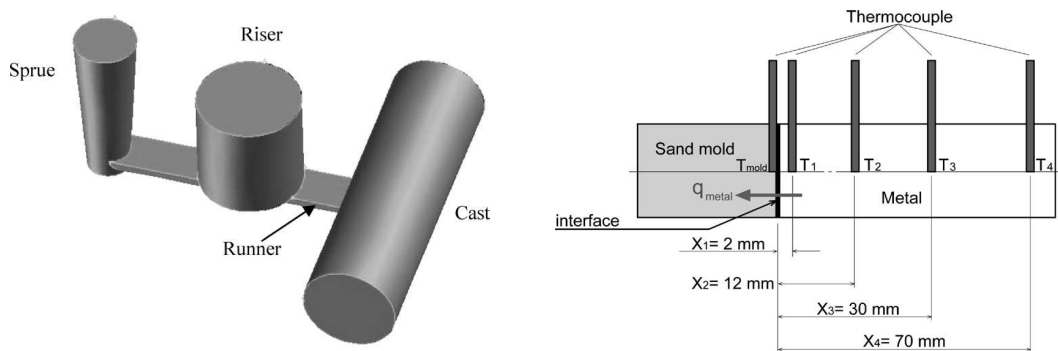
h_w ο συντελεστής συναγωγιμότητας του ψυκτικού

Οι ΣΜΘ που βρέθηκαν

1. δίνονται με τη μορφή : $h = a \cdot t^{-b}$
2. είναι μεγαλύτεροι πάντα στο σημείο 3, μικρότεροι στο σημείο 2 και ακόμα μικρότεροι στο σημείο 1, (λόγω μεταλλοστατικής πίεσης)
3. η μέγιστη αρχική τιμή που δίνουν είναι γύρω στις $5500 \text{ W/m}^2/\text{K}$ και
4. δεν πέφτουν κάτω από $500 \text{ W/m}^2/\text{K}$.

v. Sun & Chao

Μελετούν κυλινδρική χύτευση αλουμινίου σε καλούπι άμμου, με θερμοκρασία τήγματος περί τους $720 \text{ }^\circ\text{C}$. Γεωμετρικά στοιχεία φαίνονται στο επόμενο σχήμα.



Εικ. 1.40 Διάταξη χύτευσης και θέσεις των θερμοστοιχείων κατά τον άξονα του χυτού

Προσδιορίζουν το συντελεστή επιλύοντας αντίστροφο πρόβλημα με τη μέθοδο του Beck αλλά και με μία τροποποιημένη μέθοδο σημειακού όγκου έτσι ούτως ώστε να κάνουν πιο ρεαλιστική την απελευθέρωση της λανθάνουσας θερμότητας απ' όλη τη μάζα του χυτού.

Σημαντικό το γεγονός ότι προσεγγίζουν επίσης το ΣΜΘ με δύο σχέσεις :

$$1. h_1 = \frac{q_{\text{metal}}}{T_{\text{metal}} - T_{\text{mold}}}$$

όπου :

q_{metal} , η θερμορροή από το μέταλλο στη διεπιφάνεια και T_{metal} και T_{mold} οι θερμοκρασίες εκατέρωθεν της διεπιφάνειας. Συγκεκριμένα η T_{metal} είναι η T_1 .

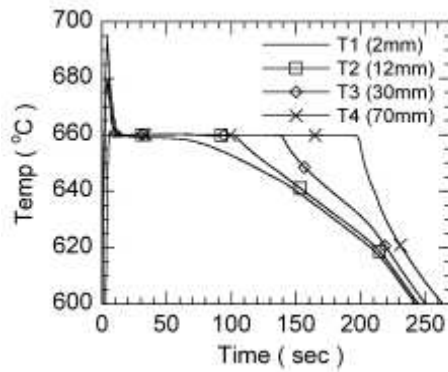
2. Λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του καλουπιού άμμου, η διαδικασία στερεοποίησης με την απόψυξη ενός σώματος υψηλής θερμοκρασίας στον αέρα και επομένως ο Νευτώνιος νόμος απόψυξης μπορεί να γραφεί ως :

$$h_2 = \frac{q_{\text{metal}}}{T_{\text{metal}} - T_{\infty}}$$

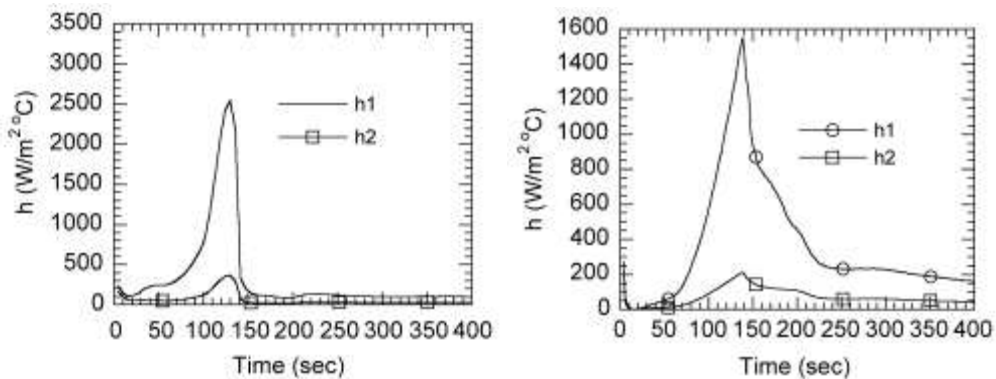
όπου :

T_{∞} η θερμοκρασία περιβάλλοντος που στην περίπτωση του ορίζεται στους 28°C.

Οι θερμοκρασιακές καμπύλες που προέκυψαν από τις μετρήσεις και οι ΣΜΘ με τις δύο προσεγγίσεις και με τις δύο μεθόδους φαίνονται στα παρακάτω σχήματα :



Εικ. 1.41 Καμπύλες θερμοκρασιών τα πρώτα 260sec της χύτευσης



Εικ. 1.42 Οι ΣΜΘ με την τροποποιημένη απευθείας μέθοδο συγκεντρωμένης μάζας(αριστερά) και με τη μέθοδο του Beck(δεξιά)

Για επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων τους με τους ΣΜΘ που προέκυψαν πραγματοποιούν προσομοιώσεις με το εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FIDAP και διαπιστώνουν μεγαλύτερη ακρίβεια των τιμών της απευθείας υπολογισμού μεθόδου. Καταλήγουν στα συμπεράσματα :

1. Η μέθοδος απ' ευθείας υπολογισμού είναι πιο εύχρηστη από την αντίστροφη και προσδιορίζει συγκλίνουσα λύση στο πρόβλημα.
2. Οι μορφές και στις δύο μεθόδους μοιάζουν αλλά αυτή του Beck προσδιορίζει χαμηλότερες τιμές ΣΜΘ και
3. Η απευθείας μέθοδος προτείνεται ανεπιφύλακτα για χυτά μικρού μεγέθους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

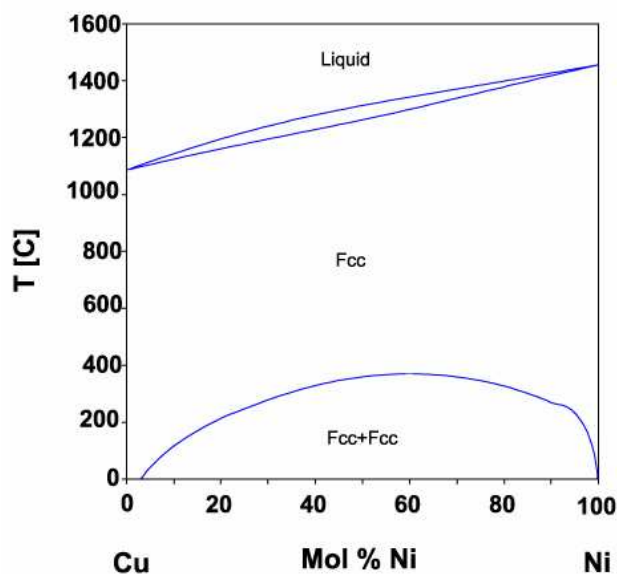
2.1 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ

2.1.1 Το υλικό χύτευσης

2.1.1.1 Γενικά

Με τη λέξη «αλπακάς» αναφερόμαστε στην οικογένεια κραμάτων γνωστή και ως Maillerchorts. Είναι παρεμφερή κράματα με αυτά του χαλκονικελίου και γι'αυτό αρχικά θα γίνει αναφορά σε αυτά.

Τα κράματα Cu-Ni 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. [1]



Εικ. 2.1 Διάγραμμα φάσεων Cu-Ni

Στα τριμερή κράματα Cu-Zn-Ni, 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).[1]

Μπορεί κάποιες φορές να υπάρχουν επιπλέον κραματικά στοιχεία όπως αντιμόνιο, κασσίτερος, μόλυβδος ή κάδμιο. Σε άλλες χώρες είναι περισσότερο γνωστά σαν

“Nickel Silver” ή “German Silver” ή “white metal”, χωρίς τονίζεται και πάλι να περιέχουν άργυρο. Στην Ελλάδα για τα κράματα αυτά χρησιμοποιείται και ο όρος «αρζαντό». Αντιπροσωπευτική βιομηχανική σύσταση (κράμα Νο. 752) αποτελείται από 65% Χαλκό, 18% Νικέλιο, 17% Ψευδάργυρο. Πάντως με βάση την επιστήμη των μετάλλων η πρόποσα ονομασία του υλικού είναι νικελιούχος ορείχαλκος.

Μερικά κράματα αλπακά, ιδιαίτερα αυτά που περιέχουν σε μεγάλο ποσοστό ψευδάργυρο, είναι ανοξειδωτά.

Είθισται να ονομάζονται αναφέροντας τα ποσοστά που περιέχουν σε χαλκό και νικέλιο. Επομένως «αλπακάς 55-18» θα περιέχει 55% χαλκό, 18% νικέλιο και 27% άλλα στοιχεία, αλλά πιθανότατα εξ’ ολοκλήρου μόνο ψευδάργυρο.

Η μεταλλουργία του αλπακά για την κατασκευή κοσμημάτων και διακοσμητικών είναι παρόμοια με του ασημιού όσον αφορά την συγκόλληση και τις οξειδώσεις. Είναι πίο δύσκαμπος όσον αφορά την εξέλαση και εξόλκηση και είναι αρκετά πίο σκληρός από το ασήμι για χαράξεις.

2.1.1.2 Ο αλπακάς διαμέσου των χρόνων

Ιστορικά τα κράματα αυτά ήταν γνωστά από αιώνες στην Ινδία με την ονομασία «Tutenag» και στην Κίνα με την ονομασία «Paktong» ή «Pakfong» (που θα πει λευκός χαλκός). Από εκεί τα έφεραν Ευρωπαίοι έμποροι στις αρχές του 18ου αιώνα.

Το 1770 η γερμανική μεταλλουργική βιομηχανία Suhl παρήγαγε ένα παρόμοιο κράμα και το 1823 ξεκίνησε ένας ανταγωνισμός για την τελειοποίηση της διαδικασίας παραγωγής κράματος που θα ήταν οπτικά όμοιο με ασήμι. Οι αδερφοί Henniger στο Βερολίνο και ο A. Geitner στο Schneeberg ανεξάρτητα, πέτυχαν αυτό το στόχο.

Η λέξη Αλπακάς προέρχεται από το όνομα της Αυστριακής εταιρίας του Berndfor, Alpacca Prima N.S που παρήγαγε αυτό το υλικό.

2.1.1.3 Χρήσεις

Χρησιμοποιήθηκε ευρέως μετά το 1840 με την ανάπτυξη του γαλβανισμού, καθώς δημιουργούσε ένα ιδανικό, σκληρό και λαμπερό υπόστρωμα στη διαδικασία επικάλυψης. Αλπακάς έχει χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς, πέραν από επιμεταλώσεις, σαν υποκατάστατο του ασημιού, για κατασκευή κοσμημάτων ή σκευών.

Είναι κατάλληλος για την κατασκευή μουσικών οργάνων όπως κύμβαλα, φλάουτα, σαξόφωνα και τρομπέτες, γιατί συντελεί στην παραγωγή ωραίου ήχου, για φερμουάρ, για κατασκευή νομισμάτων (Μάρκο Γερμανίας, Εσκούδο Πορτογαλίας) και σε βιομηχανικό επίπεδο για εξαρτήματα σε θαλάσσιες χρήσεις και στην υδραυλική λόγω της αντίστασής του σε διάβρωση, αλλά και σε στοιχεία θέρμανσης λόγω της μεγάλης του ηλεκτρικής αντίστασης. Επίσης χρησιμοποιείται στην ωρολογοποιία και στην οπτική.

Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται στην κατασκευή μαγειρικών σκευών γιατί υπάρχει κίνδυνος διάχυσης του χαλκού, και δηλητηρίασης.



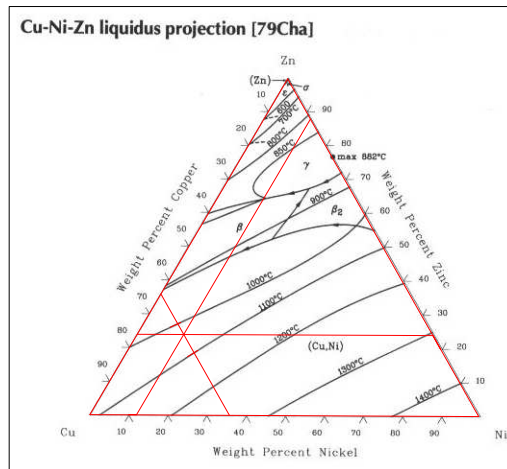
Εικ. 2.2 Χρήσεις αλπακά

Ο αλπακάς που αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στη μελέτη της παρούσας εργασίας είχε σύσταση :

64% Cu – 12% Ni – 24%Zn

Στη βιβλιογραφία, δυστυχώς, όπως ήταν αναμενόμενο δε βρέθηκαν πληροφορίες γι' αυτή καθ' αυτή τη σύσταση. Μόνο στο εγχειρίδιο της ASM [12] βρέθηκε το

τριμερές διάγραμμα για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας liquidus. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο τρόπος προσδιορισμού αυτής της θερμοκρασίας.

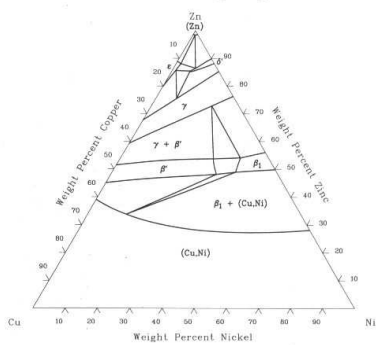


Εικ. 2.3 Ternary διάγραμμα - προβολή Liquidus

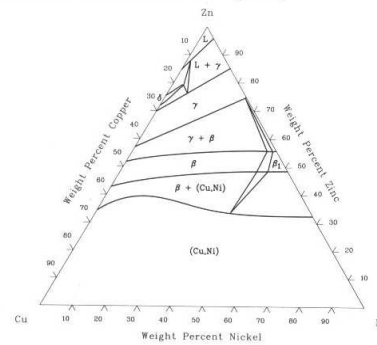
Φέροντας κάθετες στις εκατέρωθεν ισοθερμοκρασιακές καμπύλες και εφαρμόζοντας τον κανόνα του μοχλού υπολογίστηκε :

$$T_{\text{liquidus}} : 1036 \text{ } ^\circ\text{C}$$

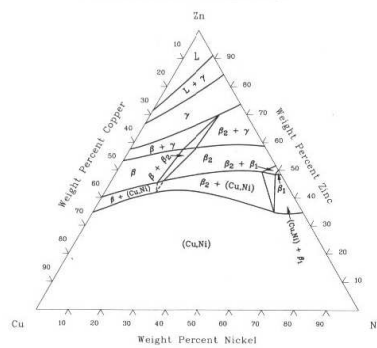
Cu-Ni-Zn isothermal section at 20 °C [73Lev]



Cu-Ni-Zn isothermal section at 650 °C [73Lev]



Cu-Ni-Zn isothermal section at 775 °C [79Cha]



Εικ. 2.4 Τομές του τριμερούς διαγράμματος ισορροπίας φάσεων σε τρεις θερμοκρασίες.

2.1.1.4 Ιδιότητες

Η σύσταση του κράματος που μελετάται αποτελεί στερεό διάλυμα φάσης α. Η φάση α κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο σύστημα και παρουσιάζει εξαιρετική κατεργασιμότητα εν ψυχρώ σε αντίθεση με εν θερμώ που είναι πολύ φτωχή.

Βρέθηκαν πληροφορίες ωστόσο από διαδικτυακή διεύθυνση τοποθεσίας [13] με αντικείμενο τη μελέτη γύρω από το χαλκό και τα κράματά του, για έναν αλπακά με σύσταση ελαφρώς διαφορετική αλλά πολύ κοντινή. Αυτό είναι το :

65% Cu – 12% Ni – 23%Zn (C75700)

Για αυτή τη σύσταση δίνονται τα εξής :

Πιν. 2.1 Βασικές φυσικές ιδιότητες του C75700

Θερμοκρασία Liquidus	1038 °C
Πυκνότητα	8.69 gm/cm ³ @ 20 °C
Ηλεκτρική Αντίσταση	21.61 microhm-cm @ 20 °C
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	0.047 MegaSiemens/cm @ 20 °C
Θερμική Αγωγιμότητα	39.8 W/m · °K at 20 °C
Συντελεστής Γραμ. Διαστολής	16.2 · 10 ⁻⁶ per °C (20-300 °C)
Ειδική Θερμοχωρητικότητα	377.1 J/(kg · °K) at 293 K
Σταθερά Young	124 MPa
Βαθμός κατεργασιμότητας	20

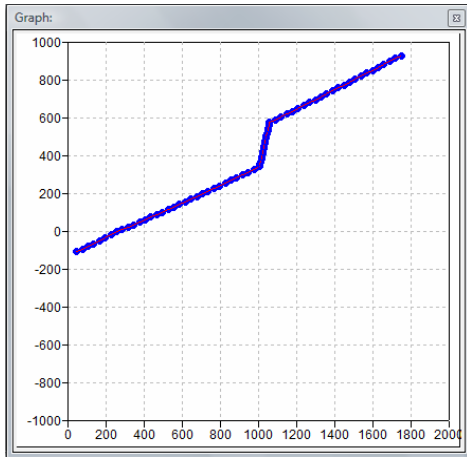
Δεν παρέχονται βασικές θερμικές ιδιότητες όπως η θερμοκρασία solidus, η ειδική λανθάνουσα θερμότητα, πιθανή μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας. Στη βιβλιοθήκη υλικών ωστόσο του ProCast υπάρχει το υλικό με ιδιότητες βέβαια που αποκλίνουν ελαφρώς από τις παραπάνω.

Έτσι το ProCast δίνει :

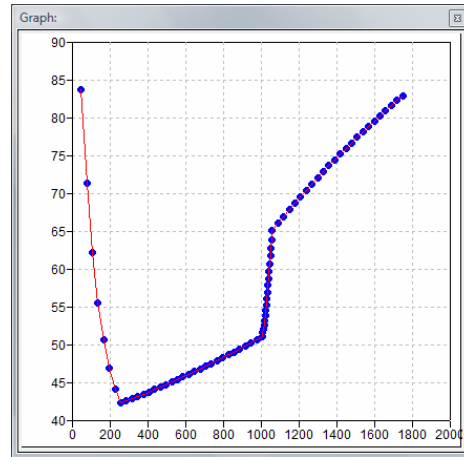
$$T_{\text{liquidus}} : 1059 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{solidus}} : 998 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

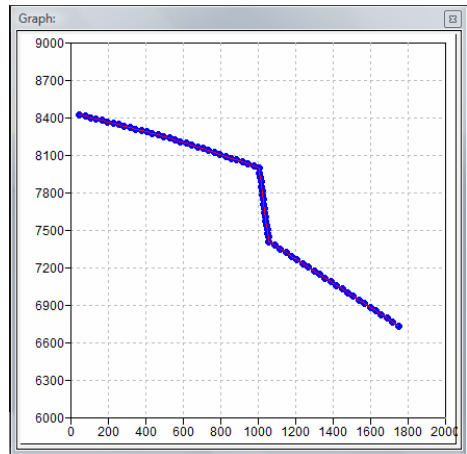
και επίσης συναρτήσει της θερμοκρασίας τις ιδιότητες της θερμικής αγωγιμότητας (W/mK), της πυκνότητας (kg/m³), της ειδικής ενθαλπίας(kJ/kg), του ποσοστού στερεοποίησης και του κινηματικού ιξώδους όπως φαίνονται στις επόμενες καμπύλες.



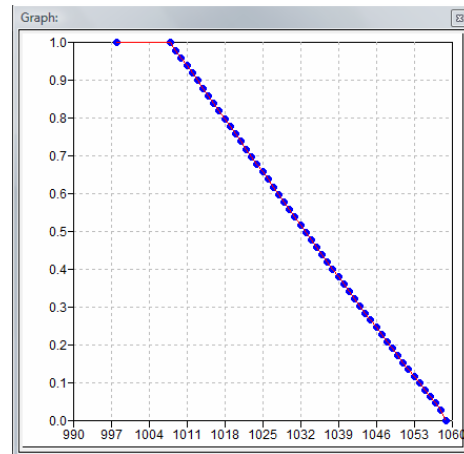
Εικ. 2.5 Ειδική ενθαλπία H (μονάδες kJ/kg)



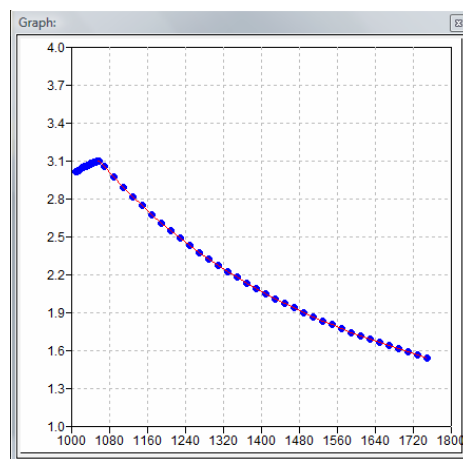
Εικ. 2.6 Θερμική αγωγιμότητα k (μονάδες W/mK)



Εικ. 2.7 Ποκνότητα ρ (μονάδες kg/m^3)



Εικ. 2.8 Ποσοτό στερεοποίησης f_s (αδιάστατο)



Εικ. 2.9 Ιξώδες ν (centipoise)

2.1.2 Το υλικό καλουπιού

Όπως αναφέρθηκε στη χύτευση ακριβείας τα καλούπια είναι γύψινα ή κεραμικά. Εν προκειμένω χρησιμοποιήθηκε γύψος.

Ο γύψος αποτελεί ένα διαδομένο υλικό, γνωστό για τις πυρρίμαχες και θερμονωτικές του ιδιότητες. Για το συγκεκριμένο είδος που χρησιμοποιήθηκε της εταιρίας Ransom & Randolph, τύπου Argentum Jewelry Investment, δεν υπάρχουν δεδομένες συγκεκριμένες θερμικές ιδιότητες, αλλά από γύψο σε γύψο αυτές δεν πρέπει να αλλάζουν πολύ. Τα συστατικά του και οι ιδιότητες που παρέχονται από την εταιρεία φαίνονται παρακάτω.

Πιν. 2.2 Τα συστατικά του γύψου τύπου Argentum

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

Πιν. 2.3 ιδιότητες του γύψου τύπου Argentum

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		

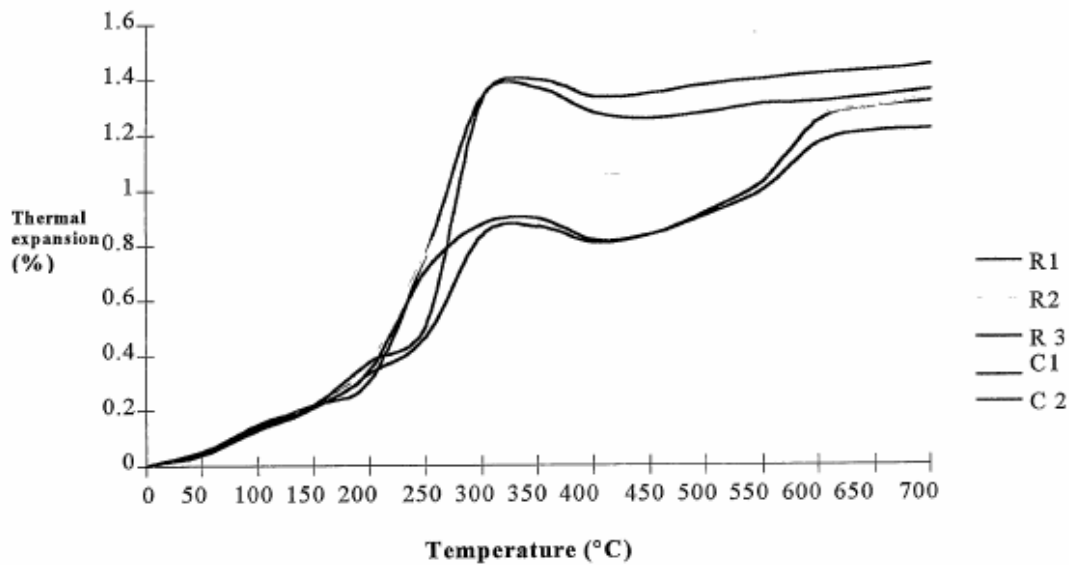
Στη βιβλιοθήκη υλικών του ProCast υπάρχει και γύψος και δίδονται οι παρακάτω θερμικές ιδιότητες :

Θερμική αγωγιμότητα: 0.2637 W/mK

Πυκνότητα: 1100 kg/m³

Ειδική θερμοχωρητικότητα: 0.83736 kJ/kgK

Μία ιδιότητα που χρησιμεύει στη μελέτη είναι και ο συντελεστής θερμικής διαστολής ο οποίος εντοπίστηκε για ονομασία υλικού “plaster” ίσος προς $16.4 \cdot 10^{-6}$ m/mK, τιμή κοντά σε αυτή του αλπακά όπως φαίνεται παραπάνω. Δε γίνεται να εξακριβωθεί κατά πόσον θερμική διαστολή συντελείται σε θερμοκρασίες τόσο υψηλές ή η διαστολή αποδίδεται σε μικρότερες θερμοκρασίες. Από σχετική εργασία [14] εντοπίστηκε για κάποια είδη γύψου το παρακάτω διάγραμμα που ίσως συνηγορεί ότι ο γύψος παραμένει μη διαστελλόμενος κατά τη διαδικασία αυτή καθ’αυτής της χύτευσης καθώς η θερμοκρασία του κινείται πάνω από τους 600 °C. Συνολικά στο εύρος 0 – 900 °C προφανώς και υπάρχει συστολή κατά περίπου 1.6%.



Εικ. 2.10 Θερμική διαστολή για 5 είδη γύψου

2.2 ΛΗΨΗ ΤΙΜΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για τη λήψη των πειραματικών καμπυλών απόψυξης χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου K, που τοποθετούνταν κατά τη δημιουργία του κέρινου ομοιώματος με τέτοιο τρόπο ώστε να λαμβάνουν με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, τιμές θερμοκρασιών στη διεπιφάνεια καλουπιού και μετάλλου. Στην παράγραφο αυτή, δίνονται κάποιες εισαγωγικές έννοιες που αφορούν τη λειτουργία και χρήση των θερμοστοιχείων.

Το θερμοστοιχείο αποτελεί τον ευρύτερα χρησιμοποιούμενο στην πράξη μεταλλάκτη θερμότητας. Εκτός από μετρήσεις θερμοκρασίας σε πειραματικό επίπεδο, τα θερμοστοιχεία χρησιμοποιούνται ευρέως στις μεταλλοβιομηχανίες για την επίβλεψη των θερμοκρασιών κατά την παρασκευή μετάλλων, καθώς και σε συσκευές πυρασφάλειας σε περίπτωση βλάβης του κεντρικού συστήματος πυρασφάλειας.

Αρχή λειτουργίας

Η λειτουργία των θερμοστοιχείων (thermocouples) βασίζεται στο φαινόμενο Seebeck. Σύμφωνα με αυτό, όταν δύο διαφορετικά μέταλλα ή κράματα έλθουν σε επαφή, τότε, λόγω του διαφορετικού έργου εξόδου τους, ελεύθερα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν από το μέταλλο με το μικρότερο έργο εξόδου προς το μέταλλο με το μεγαλύτερο έργο εξόδου, έστω και αν δεν εφαρμόζεται εξωτερική τάση σ' αυτά. Έτσι το πρώτο μέταλλο καθίσταται θετικότερο του δεύτερου με αποτέλεσμα στο σημείο επαφής να εμφανίζεται μια «τάση επαφής». Αν τώρα τα δύο ελεύθερα άκρα βρεθούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες, τότε αναπτύσσεται μια ΗΕΔ (ηλεκτρεγερτική δύναμη), της οποίας το μέγεθος εξαρτάται αφενός από το υλικό των δύο μεταλλικών αγωγών και αφετέρου από τη θερμοκρασία που επικρατεί στο σημείο επαφής τους.

Η παραπάνω παρατήρηση του Seebeck φέρει και την ονομασία θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, η δε αναπτυσσόμενη ΗΕΔ ονομάζεται θερμοηλεκτρική τάση. Έχει καταστεί ήδη προφανές ότι αν μετρηθεί η θερμοηλεκτρική τάση που παράγεται από ζεύγος διαφορετικών μεταλλικών αγωγών, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του σημείου επαφής τους, τότε η επαφή αυτή μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί απευθείας για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, δεδομένου ότι ισχύει:

$$e_i = k(T) \cdot T_i$$

όπου:

e_i : η θερμοηλεκτρική τάση

$k(T)$: συνάρτηση εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία και το ζεύγος μετάλλων των δύο αγωγών (δίνεται για κάθε περίπτωση σε μορφή πινάκων)

T_i : η θερμοκρασία στο σημείο επαφής

Για να μετρηθεί όμως η θερμοηλεκτρική τάση, η οποία παράγεται στο σημείο επαφής των δύο μεταλλικών αγωγών, θα πρέπει να συνδεθεί ένα βολτόμετρο.

Εξυπακούεται ότι το βολτόμετρο θα συνδεθεί μέσω επιπλέον μεταλλικών αγωγών όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11. Έτσι, σχηματίζεται ένα «θερμοηλεκτρικό κύκλωμα».

Για την ανάλυση ενός θερμοηλεκτρικού κυκλώματος έχει διατυπωθεί κανόνας, στηριζόμενος ουσιαστικά στο δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα, σύμφωνα με τον οποίο:

– Η ΗΕΔ που αναπτύσσεται από θερμοηλεκτρικό κύκλωμα προκύπτει ως αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους θερμοηλεκτρικών τάσεων που αναπτύσσονται στα σημεία επαφής του κυκλώματος των αγωγών.

– Αν όλα τα σημεία επαφής βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία, τότε η αναπτυσσόμενη από το θερμοηλεκτρικό κύκλωμα ΗΕΔ έχει τιμή ίση με 0.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ένδειξη e του βολτομέτρου, στο θερμοηλεκτρικό κύκλωμα του παρακάτω σχήματος, θα ισούται με:

$$e = (e_{AB})_{T_M} + (e_{BG})_{T_R} + (e_{GA})_{T_R} \quad (1)$$

όπου :

T_M η θερμοκρασία στο σημείο μετρήσεως, όπου τοποθετείται η επαφή των δύο αγωγών του θερμοστοιχείου (**Θερμοκρασία μετρήσεως**) T_R : η θερμοκρασία στην

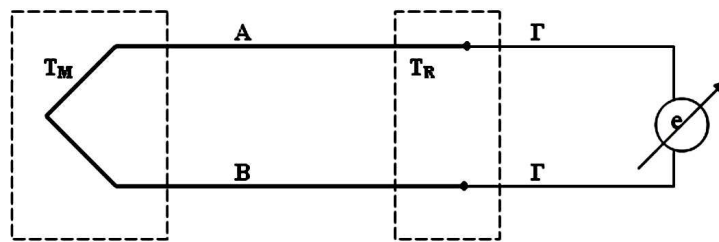
οποία βρίσκονται και οι δύο επαφές των αγωγών του θερμοστοιχείου με τους αγωγούς του μοναδικού τρίτου μετάλλου, με τους οποίους το θερμοστοιχείο συνδέεται με το όργανο μετρήσεως (**Θερμοκρασία αναφοράς**) Αν υποθεθεί ότι η ίδια θερμοκρασία (T_R) που επικρατεί στο σημείο αναφοράς, επικρατεί και στο σημείο μετρήσεως, δηλαδή όλα τα σημεία επαφής βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία (T_R), τότε θα ισχύει:

$$(e_{AB})_{T_R} + (e_{B\Gamma})_{T_R} + (e_{\Gamma A})_{T_R} = 0 \quad (2)$$

Συνδυάζοντας τα εξισώσεις (1) και (2) παίρνουμε:

$$e = (e_{AB})_{T_M} - (e_{AB})_{T_R} \quad (3)$$

Δηλαδή, ένδειξη του βολτομέτρου ισούται με τη διαφορά των θερμοηλεκτρικών τάσεων, που παράγονται από το ζεύγος των αγωγών του θερμοστοιχείου, που αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες του σημείου μετρήσεως και του σημείου αναφοράς.



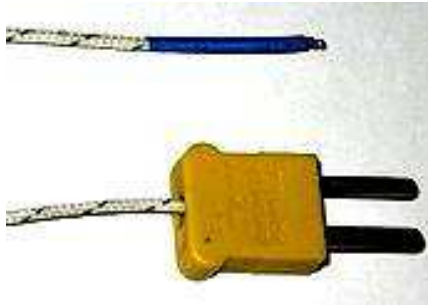
Εικ. 2.11 Σκαριφηματική Διάταξη λειτουργίας θερμοστοιχείου

Τύποι θερμοστοιχείων

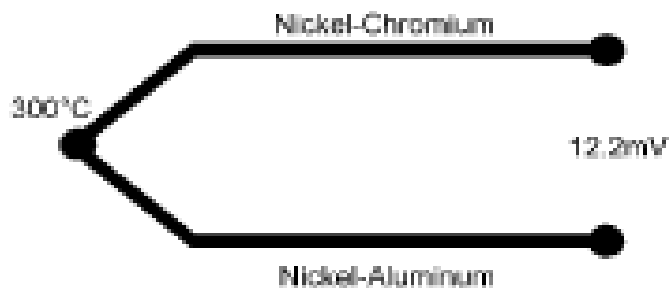
Στην αγορά είναι διαθέσιμη μεγάλη ποικιλία θερμοστοιχείων για διάφορες μετρητικές εφαρμογές (E, J, N, B, R, K, S, T, C και M). Η επιλογή θερμοστοιχείου γίνεται συνήθως με βάση το θερμοκρασιακό εύρος της μέτρησης καθώς και την ακρίβεια που απαιτείται. Τα θερμοστοιχεία με μικρότερη ευαισθησία (π.χ. τύπου B, R και S) παρέχουν κατά αναλογία μικρότερη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Άλλα κριτήρια επιλογής μπορεί να είναι, για παράδειγμα, το αν το υλικό τους είναι αδρανές ή μαγνητικό.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου K. Το θερμοστοιχείο τύπου K (chromel – alumel) είναι από τους πιο συνηθισμένους τύπους θερμοστοιχείων. Τα ηλεκτρόδια αποτελούνται από χρώμιο, νικέλιο και αλουμίνιο. Είναι

σχετικά φθηνά και διατίθενται σε ποικιλία ενώσεων των άκρων. Μπορούν να μετρήσουν θερμοκρασίες από -180 ως 1350°C . Έχουν, όμως, ένα βασικό μειονέκτημα που είναι η μαγνητικότητα του νικελίου που επηρεάζει την ακρίβεια της μέτρησης κοντά στη θερμοκρασία Curie του υλικού. Για θερμοστοιχεία τύπου K αυτό συμβαίνει κοντά στους 150°C . Η ευαισθησία αυτού του τύπου θερμοστοιχείων είναι περίπου $41 \mu\text{V}/\text{C}$.



Εικ. 2.12 Θερμοστοιχείο τύπου K



Εικ. 2.13 Σκαρίφημα θερμοστοιχείου τύπου K

Δυσκολίες στη χρήση των θερμοστοιχείων

Οι δυσκολίες που έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία (Zhi-peng κ.ά.) και διαπιστώθηκαν και στην πράξη είναι δύο.

1. Είναι πολύ δύσκολο να υπολογισθεί η ακριβής απόσταση μεταξύ του σημείου στο οποίο μετριέται η θερμοκρασία και της διεπιφάνειας καλουπιού και μετάλλου.

2. Είναι δύσκολο να επιβεβαιωθεί η σωστή τοποθέτηση του θερμοστοιχείου στο καλούπι.

Η παραπάνω αβεβαιότητα σχετικά μετά την τοποθεσία του θερμοστοιχείου μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά σφάλματα.

2.3 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.3.1 Φωτογραφίες εξοπλισμού

Για την προετοιμασία και τη διενέργεια των πειραμάτων χύτευσης χρησιμοποιήθηκαν οι εξής συσκευές του εργαστηρίου της σχολής των Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχανικών

- «Λαστιχέρα»
- Κεριέρα
- Απαερωτής
- Φούρνος Αποκέρωσης
- Φούρνος Ψησίματος
- Χυτόπρεσσα

Καθώς επίσης και:

- Μεταλλική φλάσκα με λαστιχένια βάση
- Μπολ ανάμειξης
- Νυστέρι, κόφτης και ψαλίδι
- Κολλητήρι



α)



β)



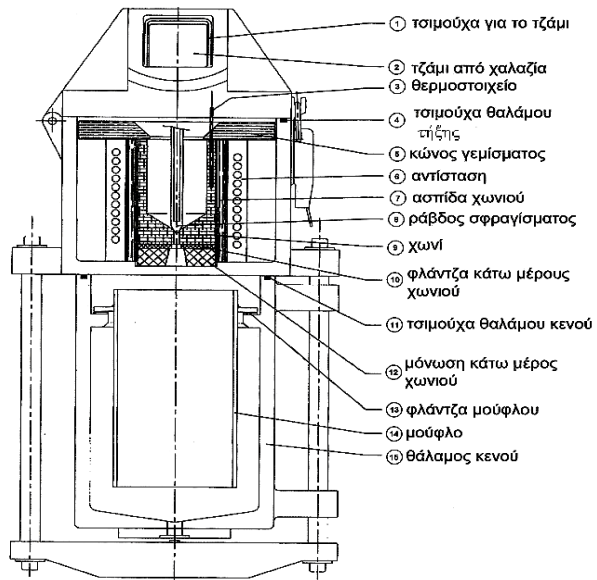
γ)



δ)



ε)



στ)

Εικ. 2.14 α) Λαστιγιέρα, β) Κεριέρα, γ) Απαερωτής, δ) Φούρνος Αποκέρωσης, ε) Φούρνος Ψησίματος, στ) Χυτόπρεσσα



Εικ. 2.15 Η φλάσκα και η λαστιχένια βάση



Εικ. 2.16 Το μπολ ανάμιξης



Εικ. 2.17 Το κοπίδι, ο κόφτης και το ψαλίδι



Εικ. 2.18 Το κολλητήρι

2.3.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Η πειραματική διαδικασία θα παρουσιαστεί σε σαφή βήματα που θα περιγράφουν τις ενέργειες που ακολουθούνται, για ευκολότερη κατανόηση ακόμα και του άπειρου αναγνώστη που έρχεται για πρώτη φορά σε επαφή με το αντικείμενο.

Κατασκευή δοκιμίου

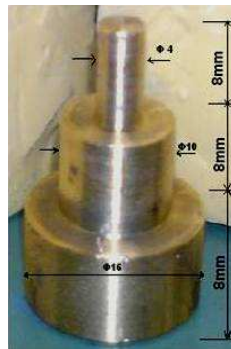
Για να ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία πρέπει να έχουμε καταλήξει στο σχήμα, το μέγεθος και προφανώς το υλικό που θα εξετάσουμε.

Το δοκίμιο δε γίνεται να προσαρμοστεί απευθείας στη λαστιχένια βάση της φλάσκας γι' αυτό με κάποιο τρόπο πρέπει να επιτευχθεί η σύνδεση των δύο μερών(δοκιμίου – βάσης φλάσκας). Αυτός είναι ένας πρακτικός λόγος που εξηγεί την

ύπαρξη του κορμού. Πολλώ μάλλον σε χυτεύσεις με πολύκλινα δέντρα, όπου παίρνουμε παραπάνω από ένα χυτά, ο κορμός είναι πολύ σημαντικός και οι διαστάσεις του πρέπει να υπολογίζονται πολύ προσεκτικά, αφού αποτελεί τον αγωγό μέσω του οποίου διοχετεύεται το τήγμα σε όλο το καλούπι. Επομένως η χρησιμότητα του κορμού έγκειται στην εξασφάλιση εύροιας και μην αμελούμε ότι εκεί έχουμε συγκέντρωση πολλών ατελειών κατά τη στερεοποίηση, οπότε αν δεν υπήρχε αυτός θα παρουσιάζονταν οι ατέλειες σε αυτό καθ'αυτό το χυτό που κατασκευάζουμε.

Ανάλογα με τη μελέτη που κάνουμε, το μήκος του κορμού μπορεί να διαφέρει και επειδή με τη συστολή του λιωμένου κεριού μπορεί να μην επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος κορμού, καλό είναι το δοκίμιο να μην φτιάχνεται με προσαρτημένο τον κορμό, ώστε αν χρειαστεί αυτός περαιτέρω επεξεργασία να γίνεται πιο εύκολα.

Εν προκειμένω το δοκίμιο που επιλέχθηκε ήταν κυλινδρικό με τρεις κυκλικές διατομές διαφορετικών διαμέτρων όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.19.



Εικ. 2.19 Η γεωμετρία του δοκιμίου

Η κατασκευή του είναι σχετικά απλή. Με τη χρήση του τόννου διαμορφώνουμε κλιμακωτά τις τρεις διαμέτρους σε ίσα μήκη.

Προφανώς το δοκίμιο αυτό δε χρειάζεται να είναι κατασκευασμένο από το ίδιο υλικό το οποίο θα μελετήσουμε. Συνήθως είναι από κάποιο μαλακό σχετικά μέταλλο ώστε να είναι πιο εύκολο στη διαμόρφωση.

Κατασκευή Λάστιχου – Καλουπιού για κέρνα ομοιώματα

Υπάρχουν τυποποιημένα κομμάτια ειδικού λάστιχου για την κατασκευή καλουπιών για κέρνα ομοιώματα. Λαμβάνουμε το διαμορφωμένο δοκίμιο και το τοποθετούμε ανάμεσα σε δύο παραλληλεπίπεδα κομμάτια λάστιχου. Στη συνέχεια τα

τοποθετούμε ανάμεσα στα φύλλα της λαστιχιέρας (μοιάζει στον τρόπο λειτουργίας με τοστιέρα) τα οποία ζεσταίνονται με ηλεκτρικές αντιστάσεις. Με την πίεση που επιβάλλεται, αλλά και με την αύξηση της θερμοκρασίας, το λάστιχο λιώνει ελαφρώς στη διεπιφάνεια των δύο κομματιών, όπου αυτά εφάπτονται, και περιβάλλει πλήρως το δοκίμιο με αποτέλεσμα να παίρνουμε ένα συμπαγές κομμάτι λάστιχου μετά την ολοκλήρωση του ψήσιματος. Έχουμε φροντίσει να έχουμε και μια δίοδο εισαγωγής του κεριού. Αν όχι τη διαμορφώνουμε στη συνέχεια μετά το ψήσιμο, αλλά είναι πιο δύσκολο. Τέλος για να χρησιμοποιήσουμε το καλούπι του ομοιώματος πρέπει να το καταστήσουμε διαιρέτο πραγματοποιώντας μία τομή. Συνήθως την τομή αυτή την κάνουμε έτσι ώστε εσκεμμένα να υπάρχουν συγκεκριμένες ανωμαλίες στα δύο μέρη, ώστε να είμαστε σίγουροι για την καλή επαφή τους κατά τη δημιουργία των κέρινων ομοιωμάτων.



Εικ. 2.20 Διαίρεση καλουπιού ομοιώματος

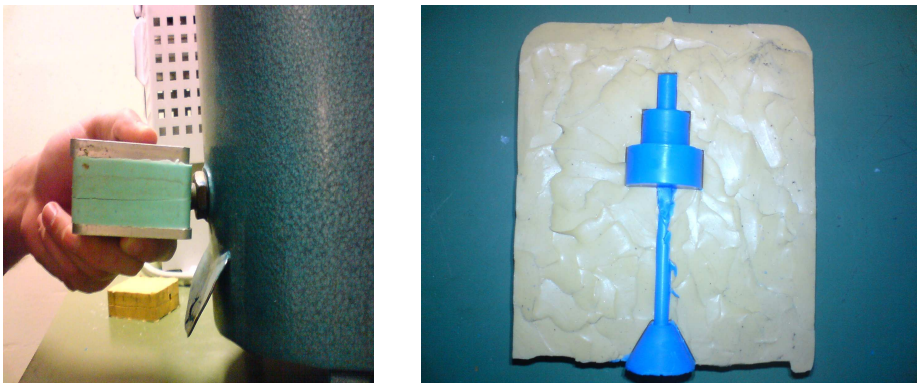
Δημιουργία κέρινων ομοιωμάτων

Προτού ξεκινήσουμε τη δημιουργία κέρινων ομοιωμάτων πρέπει να καθαρίσουμε την εσωτερική επιφάνεια του διαιρετού ελαστικού καλουπιού, ώστε τα κέρνα ομοιώματα να προκύπτουν με όσο το δυνατόν λιγότερες ανωμαλίες από τυχόν ακαθαρσίες που μπορεί να υπάρχουν. Ο καθαρισμός γίνεται με ειδικό σπρέυ το οποίο εφαρμόζουμε επί της εσωτερικής επιφάνειας και το αφήνουμε να στεγνώσει. Τοιουτοτρόπως εξασφαλίζεται λεία επιφάνεια, επιτυγχάνεται διευκόλυνση ροής και ευκολία αποκόλλησης του ομοιώματος.

Προχωρώντας στη διαδικασία ανάβουμε την κεριέρα και περιμένουμε να λιώσει καλά το κερί. Η θερμοκρασία που ήταν ρυθμισμένη η κεριέρα ήταν περίπου στους 95°C. Επίσης στο λέβητα-θάλαμο της κεριέρας επιβάλλαμε πίεση περί τα 0,4bar με εξωτερικό έμβολο που έχει ενσωματωμένο η κεριέρα από κατασκευής.

Ύστερα από περίπου 30 λεπτά που το λιώσιμο έχει ολοκληρωθεί, παίρνουμε το ελαστικό καλούπι, το τοποθετούμε ανάμεσα σε δύο μεταλλικά πλακίδια, ώστε όπως το κρατάμε να ασκείται ομοιόμορφη πίεση στις εξωτερικές επιφάνειες και να μην παραμορφώνεται τοπικά το εσωτερικό σχήμα του καλουπιού, και με προσοχή εφαρμόζουμε τη δίοδο που έχουμε δημιουργήσει για την είσοδο του κεριού στη βαλβίδα της κεριέρας. Ασκώντας πίεση σε αυτή, απελευθερώνεται κερί και ρέει εντός του καλουπιού. Καλό είναι να μην πιέζουμε το καλούπι όταν εγχύεται το κερί διότι παγιδεύεται εντός του καλουπιού ο αέρας, αποτρέποντας το κερί να καταλάβει τον όλο χώρο. Δέον θα ήταν, αν ήταν εφικτό, να δημιουργούμε οπή για τη διαφυγή του αέρα από κάποιο σημείο του καλουπιού προς το περιβάλλον, που θα λειτουργεί σαν υπερχειλίση, αλλά είναι μάλλον δύσκολη η διαμόρφωσή της.

Αφήνουμε για λίγο το καλούπι με το λιωμένο κερί ώστε αυτό να κρυσταλλώσει και στη συνέχεια ανοίγουμε το καλούπι και παίρνουμε το κέρινο ομοίωμα.



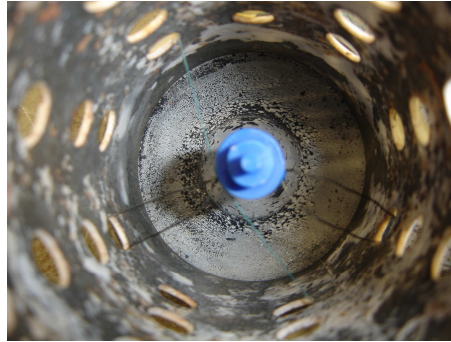
Εικ. 2.21 Έγχυση κεριού στο λαστιχένιο καλούπι

Επεξεργασία κέρινου ομοιώματος –Τοποθέτηση θερμοστοιχείων

Έχουμε μορφοποιήσει τη διάμετρο και το μήκος του κορμού που θα τοποθετήσουμε και πλέον πρέπει να γίνει η σύνδεση με το ομοίωμα. Λιώνουμε τοπικά με κολλητήρι το ομοίωμα ή την άκρη του κορμού και με γρήγορη κίνηση, που πρέπει να είναι και σχετικά ακριβής, κολλάμε τα δύο μέρη φέρνοντας στην ίδια ευθεία τα κέντρα τους.

Τέλος θα τοποθετήσουμε τα θερμοστοιχεία. Παίρνουμε θερμοστοιχείο του οποίου τα άκρα των μετάλλων-δεκτών έχουν κολληθεί με μικροφλόγα. Θερμαίνουμε με αναπτήρα το ακραίο σημείο, όπου είναι και η σύνδεση και πάλι με γρήγορη κίνηση το

ακουμπάμε πιέζοντας ελαφρά στο σημείο του ομοιώματος όπου θέλουμε να γίνει μέτρηση της θερμοκρασίας. Προφανώς όσα σημεία μελετάμε τόσα θερμοστοιχεία χρειαζόμαστε. Τα θερμοστοιχεία που τοποθετούνται στο εσωτερικό του γύψου πρέπει να είναι καλά στερεωμένα ώστε με την έγχυση του γύψου να μη μετακινηθούν. Στη χυτόπρεσσα του εργαστηρίου μπορούμε να κάνουμε μέχρι και τρεις μετρήσεις σημείων.



Εικ. 2.22 Τα θερμοστοιχεία εκατέρωθεν της διεπιφάνειας

Δημιουργία καλουπιού

Το καλούπι στα πειράματα που έγιναν ήταν από γύψο όπως προαναφέραμε. Τοποθετούμε το δοκίμιο στη λαστιχένια βάση της φλάσκας εισάγοντας τον κορμό στην ειδική υποδοχή. Εφαρμόζουμε το μεταλλικό περιφερειακό κομμάτι της φλάσκας στη λαστιχένια βάση και από τις τρύπες εξάγουμε τα άκρα των θερμοστοιχείων και πλέον ο κενός χώρος θα πληρωθεί με γύψο.

Ο γύψος φτιάχνεται αναμιγνύοντας τα υλικά νερό και γύψο σε σκόνη στην κατάλληλη αναλογία. Συγκεκριμένα για τη φλάσκα που χρησιμοποιήθηκε απαιτούνται :

228ml νερού - 583gr γύψος

Αναδεύουμε καλά τα υλικά μέχρι να δημιουργηθεί ένα ελαφρώς παχύρρευστο και ομοιογενές μίγμα. Επειδή ακριβώς το μίγμα είναι παχύρρευστο υπάρχει πιθανότητα να ενυπάρχουν μετά την ανάδευση παγιδευμένες φυσαλλίδες αέρα και γι' αυτό κάνουμε απαέρωση σε ειδική συσκευή, τον απαερωτή. Ο απαερωτής δημιουργώντας μικρού βαθμού κενό εξαναγκάζει τις φυσαλλίδες να έλθουν στην επιφάνεια και να εκτονωθούν.

Για να συγκρατήσουμε το γύψο να μη ρεύσει από τις υπάρχουσες τρύπες της φλάσκας τυλίγουμε όσο γίνεται με μεγαλύτερη στεγανότητα την περιφέρειά της με χοντρό χαρτί και τότε εγχύουμε το γύψο. Ο γύψος στερεοποιείται πλήρως σε περίπου 90 λεπτά, αλλά δεν είναι απόλυτα σαφές αυτό.

Αποκέρωση - Ψήσιμο

Τοποθετούμε τη φλάσκα-καλούπι στον αποκερωτή, ο οποίος είναι ένα είδος φούρνου με ειδικά διαμορφωμένη βάση για να ρεύσει το κερί. Το ρυθμίζουμε σε θερμοκρασία της τάξης των 200 °C, και αφήνουμε τη φλάσκα τοποθετημένη αντίστροφα απ'ό,τι στη διαδικασία χύτευσης για 90 λεπτά. Το κερί κάποια στιγμή λιώνει και το μεγαλύτερο μέρος αυτού, αφού ρεύσει στο κάτω μέρος του θαλάμου θέρμανσης, εξατμίζεται.

Μετά το πέρας της θέρμανσης στον αποκερωτή τοποθετούμε τη φλάσκα σε ειδικό φούρνο υψηλών θερμοκρασιών όπου ψήνεται για 6 ώρες στην οριακή θερμοκρασία των 750 °C. Το ψήσιμο κατ'αυτό το χρονικό διάστημα ισχυροποιεί το γύψο, καθιστώντας τον όσο σκληρότερο γίνεται, καθώς θα εισχωρήσει σε αυτόν υλικό ακόμα υψηλότερης θερμοκρασίας. Σε καμμία περίπτωση δε θερμαίνουμε το γύψο σε μεγαλύτερη θερμοκρασία, διότι μπορεί αυτός εσωτερικά να καταρρεύσει.

Σύνδεση θερμοστοιχείων

Για τη μεταφορά της τάσης που αναπτύσσεται στα άκρα ενός θερμοστοιχείου υπάρχουν ειδικά καλώδια προσαρμοσμένα σταθερά πάνω στο θάλαμο χύτευσης, στα οποία συνδέουμε τα άκρα του θερμοστοιχείου. Έτσι το ένα ζεύγος άκρων βρίσκεται εντός του θαλάμου και το άλλο εκτός και αυτό το δεύτερο συνδέεται στη συσκευή που παίρνει τις μετρήσεις. Η συσκευή αυτή ενισχύει και στη συνέχεια μετατρέπει την τάση που δέχεται στην ανάλογη διαφορά θερμοκρασίας. Πρέπει να σιγουρευτούμε ότι οι συνδέσεις έχουν γίνει με σωστή πολικότητα και πρέπει να δείχνει αρχικά το όργανο από όπου παρακολουθούμε τις θερμοκρασίες, περίπου τη θερμοκρασία καλουπιού εκείνη τη χρονική στιγμή. Αν δεν έχουν γίνει σωστά οι συνδέσεις το όργανο μας δείχνει μηδενική ή προφανώς λανθασμένη θερμοκρασία.

Εκτέλεση πειράματος

Πραγματοποιώντας το ψήσιμο του καλουπιού κάποια στιγμή, περίπου 45 λεπτά προτού πραγματοποιήσουμε το πείραμα, θέτουμε σε λειτουργία τη χυτόπρεσσα. Ρυθμίζουμε την τιμή στην οποία θα ανέλθει η θερμοκρασία του θαλάμου τήξης και ρίχνουμε μέσα το μέταλλο που θα χυτεύσουμε, αφού πρώτα με βάση τον όγκο της

μορφής, του κορμού και της διαμόρφωσης εισαγωγής που θέλουμε να παράγουμε, έχουμε υπολογίσει το βάρος του μετάλλου που αντιστοιχεί σε αυτόν.

Φέρνουμε σε επαφή το θάλαμο τήξης και χύτευσης οι οποίοι κλείνουν αεροστεγώς και δεν υπάρχει επικοινωνία με το εξωτερικό περιβάλλον.

Το μέταλλο λιώνει μετά από κάποιο χρονικό διάστημα πράγμα που μπορούμε να διαπιστώσουμε μερικώς, οπτικά, από θυρίδα που υπάρχει στο θάλαμο τήξης. Λίγο πριν πατήσουμε το κομβίο που σηκώνει τον πείρο που κρατά παγιδευμένο το λιωμένο μέταλλο ρίχνουμε στο θάλαμο βόρακα σε σκόνη ή ανοίγουμε την παροχή αερίου Αργού αν υπάρχει, στοιχεία που βοηθούν στον εξευγενισμό του μετάλλου(δηλαδή τη μετατροπή τυχόντων δημιουργηθέντων οξειδίων ξανά σε καθαρό μέταλλο).

Επίσης ρυθμίζουμε λοιπές παραμέτρους-απαιτήσεις που θέλουμε κατά τη διάρκεια της χύτευσης, δηλαδή την επιβολή κενού στον κάτω θάλαμο ή/και υπερπίεσης στον πάνω.

Πατάμε το κομβίο του πείρου και πραγματοποιείται η χύτευση αν δε συντρέχει κάποιος ανασταλτικός λόγος, παίρνοντας τις θερμοκρασίες που ζητούμε.

Με την πάροδο ικανού χρονικού διαστήματος κλείνουμε πάλι τον πείρο και πλέον απομακρύνουμε τους δύο θαλάμους και μπορούμε να εξάγουμε το καλούπι με το χυτό εντός αυτού, εφόσον αποθηκεύσουμε στον υπολογιστή, τις θερμοκρασίες για το χρονικό διάστημα που μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε, αποσυνδέοντας τα θερμοστοιχεία από τα καλώδια της χυτόπρεσσας.

Επειδή μας ενδιαφέρουν μόνο τα πρώτα λεπτά της διαδικασίας, μετά εμβαπτίζουμε τη φλάσκα με το γύψο και το χυτό, που βρίσκονται σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία, σε νερό θερμοκρασίας περιβάλλοντος, όπου ο γύψος υφίσταται θερμικό σοκ και παίρνουμε στα χέρια μας το χυτό.

Καθαρισμός χυτού

Προφανώς το παραγόμενο χυτό χρειάζεται καθαρισμό από εναπομείναντα κομμάτια γύψου. Ο καθαρισμός σε πρώτη φάση γίνεται με περιστρεφόμενο βουρτσάκι. Αν η ποιότητα καθαρισμού δεν είναι καλή με αυτόν τον τρόπο στη συνέχεια αμβολίζουμε σε ειδική συσκευή το χυτό, απομακρύνοντας και τις πιο δύσκολες

ακαθαρσίες. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ο καθαρισμός με το βουρτσάκι ήταν επαρκής εκτός από λίγα δύσκολα σημεία που ο γύψος αφαιρέθηκε με ματσακόνισμα.

Λείανση - Στίλβωση

Για να παρατηρηθεί το εσωτερικό του χυτού κόβεται με ειδικό κοπτικό στη μέση(κατά μία διάμετρο) και εισάγεται σε ρητίνη ώστε κατά τις διάφορες επεξεργασίες να είναι εύκολο στη συγκράτηση και να μην έρχεται σε επαφή με το δέρμα.



Εικ. 2.23 Εγκιβωτισμός δοκιμίων σε ρητίνη

Η λείανση είναι απαραίτητη για την παρατήρηση ατελειών κατά τη χύτευση και ως εκ τούτου απομάκρυνση ατελειών από την κοπή, καθώς και για να ακολουθήσει η χημική προσβολή και η παρατήρηση κόκκων και μικροδομών σε μοριακό επίπεδο. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο λειαντικό μηχάνημα του εργαστηρίου.



Εικ. 2.24 Το λειαντικό μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε

Τα δοκίμια σταδιακά λειάνθηκαν με χαρτιά μειούμενης τραχύτητας και τέλος στιλβώθηκαν με βελούδο όπου εφαρμόστηκε αλούμινα τραχύτητας 1μm και 0.1μm.

Μεταλλογραφία – Μελέτη μικροδομής

Η μελέτη της μικροδομής των χυτών που προέκυψαν από τα πειράματα, σκοπό έχει τον εντοπισμό του μακροπορώδους και του μικροπορώδους, καθώς και το

χαρακτηρισμό του υλικού που προέκυψε με βάση το μέγεθος των κόκκων. Η διαδικασία της μελέτης αυτής περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

1. Χημική προσβολή της επιφάνειας του δοκιμίου, ώστε να διαβρωθούν τα όρια των κόκκων και να εμφανιστεί έπειτα στο μικροσκόπιο η μικροδομή του χυτού. Ακόμη, με τη χημική προσβολή επιτυγχάνεται και η αφαίρεση του λεπτού «φίλμ» ακαθαρσιών, που προκαλεί η στίλβωση. Στην περίπτωση αυτή, το αντιδραστήριο που χρησιμοποιήθηκε είναι διάλυμα με σύσταση

5gr FeCl₃, 100mL H₂O, 5mL HCl

Ο χρόνος της προσβολής ήταν 90 sec.



Εικ. 2.25 Χημική προσβολή του δοκιμίου

2. Παρατήρηση των δοκιμίων σε ανάστροφο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο (inverted metallographic microscope) Leica DMICM μεγεθυντικής ικανότητας 100x και ψηφιακή βιντεοκάμερα Leica 541016., ενώ η λήψη εικόνων έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος επεξεργασίας εικόνας Image Pro Plus.

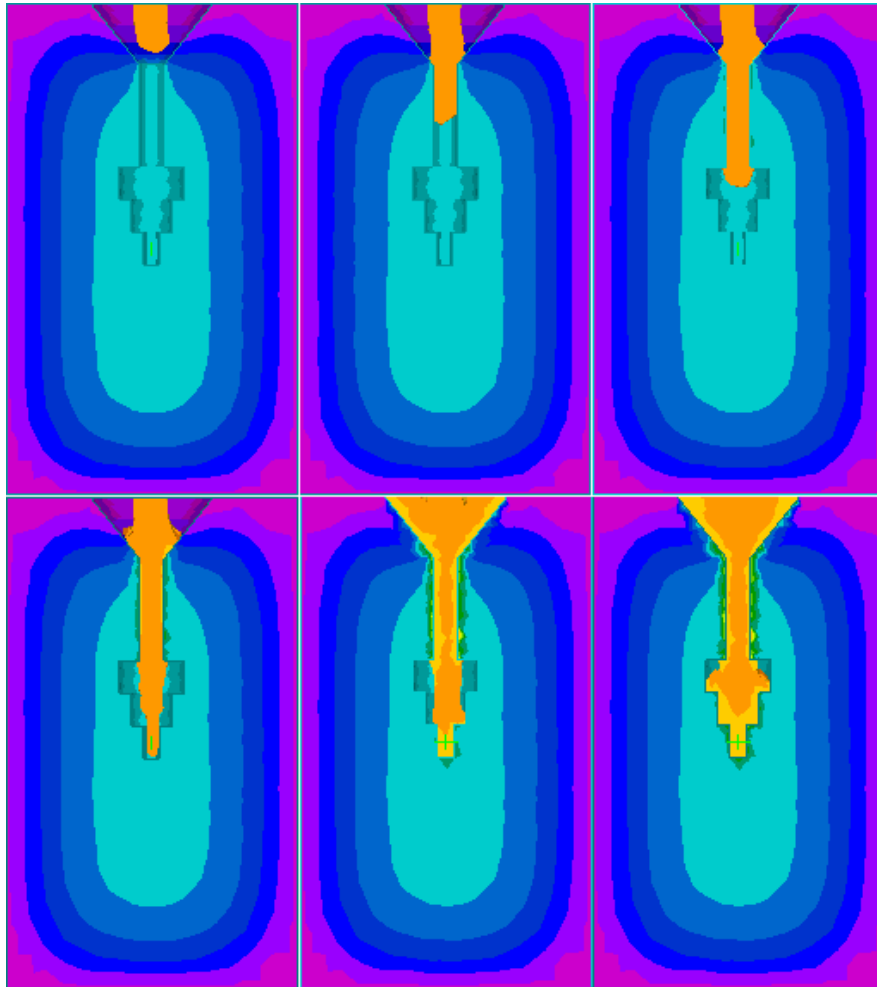


Εικ. 2.26 Οπτικό μικροσκόπιο τύπου Leica DMICM

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Σε αυτή την παράγραφο θα περιγραφούν πιο συσγκεκριμένα οι τρόποι μετάδοσης θερμότητας από το τήγμα-μέταλλο κατά τη χύτευση.



Εικ. 3.1 Ο τρόπος πλήρωσης της κοιλότητας του καλουπιού

i. Με το άνοιγμα του πείρου έχουμε την έναρξη της ροής του τηγμένου μετάλλου στο θάλαμο χύτευσης. Από την πρώτη κιόλας χρονική στιγμή που το τήγμα εξέρχεται του θαλάμου τήξης, όντας σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από τα υλικά του θαλάμου χύτευσης, αρχίζει να ακτινοβολεί προς τις περιβάλλουσες επιφάνειες.

Επίσης λόγω κίνησης ρευστού έχουμε μετάδοση θερμότητας με συναγωγή(εξαναγκασμένη) με τον αέρα που έρχεται σε επαφή (ρευστό με ρευστό).

ii. Στη συνέχεια διερχόμενο το τήγμα από τη διαμόρφωση του κορμού έχουμε μετάδοση θερμότητας με συναγωγή από την επαφή με τα τοιχώματα του καλουπιού(ρευστό με στερεό).

iii. Η πρώτη αύξηση θερμοκρασίας που θα «αισθανθεί» το θερμοστοιχείο οφείλεται στην ακτινοβολία της ροής του τήγματος κατά την είσοδο της στο χώρο του τεμαχίου που εξετάζουμε.

iv. Πληρώνεται ο χώρος των κυλίνδρων των δύο μικρότερων διαμέτρων και στη συνέχεια με κατεύθυνση της ροής από κάτω προς τα πάνω(ανοδική ροή με μικρή ταχύτητα) πληρώνεται τελικά και ο χώρος του κυλίνδρου της μεγάλης διαμέτρου οπότε το θερμοστοιχείο αρχίζει να παίρνει μέτρηση θερμοκρασίας δι'αγωγής.

v. Είναι ασαφές το χρονικό διάστημα εως ότου λόγω της συστολής του μετάλλου λόγω στερεοποίησης παραμένει σε επαφή το χυτό και το καλούπι. Το πιθανότερο είναι ότι καλή επαφή υπάρχει μέχρι και το πέρας της στερεοποίησης τουλάχιστον του πρώτου δημιουργούμενου εξωτερικού φλοιού, ιδιαίτερα δε στα πειράματα που υπάρχει επιβολή κενού στο θάλαμο χύτευσης.

Από εκείνο λοιπόν το χρονικό σημείο και μετά αρχίζει να δημιουργείται ένα διάκενο μεταξύ χυτού και καλουπιού, ακανόνιστου σχήματος, χωρίς να εκλείπουν και πάλι τα σημεία επαφής (hot spots) των δύο μερών, όπου η μετάδοση γίνεται και πάλι δι'αγωγής. Το διάκενο αυτό με την πάροδο του χρόνου μάλλον μεγαλώνει. Αρχικά σίγουρα έχει αυξητική πορεία από τη συστολή του μετάλλου λόγω απόψυξης και από τη διαστολή του καλουπιού λόγω θέρμανσης. Στη συνέχεια το μέταλλο έχει την ίδια συμπεριφορά, αλλά το καλούπι αρχίζοντας να αποψύχεται έχει την τάση να συστέλλεται και επομένως να οδηγεί σε μείωση του διακένου. Γίνεται αντιληπτό επομένως ότι το διάκενο εξαρτάται από την κατάσταση στην οποία βρίσκονται το χυτό και το καλούπι, θέρμανσης ή ψύξης, και από τους σχετικούς ρυθμούς θερμικής διαστολής που διέπονται.

Κατά μήκος του διακένου που δημιουργείται, έχουμε πάλι μετάδοση θερμότητας δια συναγωγής με τον υπάρχοντα αέρα και δι' ακτινοβολίας προς το καλούπι. Ο τρόπος μετάδοσης θερμότητας παραμένει έτσι εως ότου εμβαπτιστεί το μούφλο στο νερό για να υποστεί έτσι ο γύψος θερμικό σοκ, να διαλυθεί, και να πάρουμε στα χέρια μας το χυτό.

Πρακτικά κατά τη συστολή του μετάλλου το οποίο έχει εισχωρήσει με υγρή μορφή στο πορώδες του γύψου, μπορεί να πραγματοποιείται τοπική αποκόλληση μικρών κομματιών γύψου από τη μάζα του στην περιοχή της διεπιφάνειας, καθώς είναι ψαθυρό υλικό, και το διάκενο που προαναφέρθηκε να υφίσταται μεταξύ του φιλμ του γύψου που προσκολλήθηκε στη συστελλόμενη μάζα του πλινθώματος και της κύριας μάζας του γύψου και επίσης τα σημεία όπου υπάρχει επαφή και μετάδοση θερμότητας δι' αγωγής(hot spots) να είναι μεταξύ μαζών γύψου. Μπορεί βέβαια αυτή η προσκόλληση να γίνεται εντονότερα κατά τη στιγμή που εμβαπτίζουμε το μούφλο με το πλίνθωμα και ο γύψος υφίσταται θερμικό σοκ, αλλά δεν μπορεί να αποκλειστεί και το πρώτο ενδεχόμενο. Εν προκειμένω πάντως θα στηριχθούμε στη θεωρητική υπόθεση ότι παραμένει σαφώς διαχωρισμένη η διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού.

Οι Ho και Pehlke θεωρούν δικαίως ότι το ποσοστό της θερμότητας που μεταδίδεται με ακτινοβολία μέσω του δημιουργούμενου διακένου είναι της τάξης του 1%, δηλαδή σχεδόν αμελητέο. Η παραδοχή αυτή είναι αποδεκτή καθώς όντως οι θερμοκρασίες των εκατέρωθεν πλευρών της διεπιφάνειας πλέον έχουν πλησιάσει πολύ, και παρόλο που η διαφορά των τετάρτης τάξεως τιμών τους μπορεί να είναι ελαφρώς σημαντική, εκμηδενίζεται λόγω της μικρής τιμής της σταθεράς των Stefan-Boltzmann και του συντελεστή εκπομπής απορρόφησης.

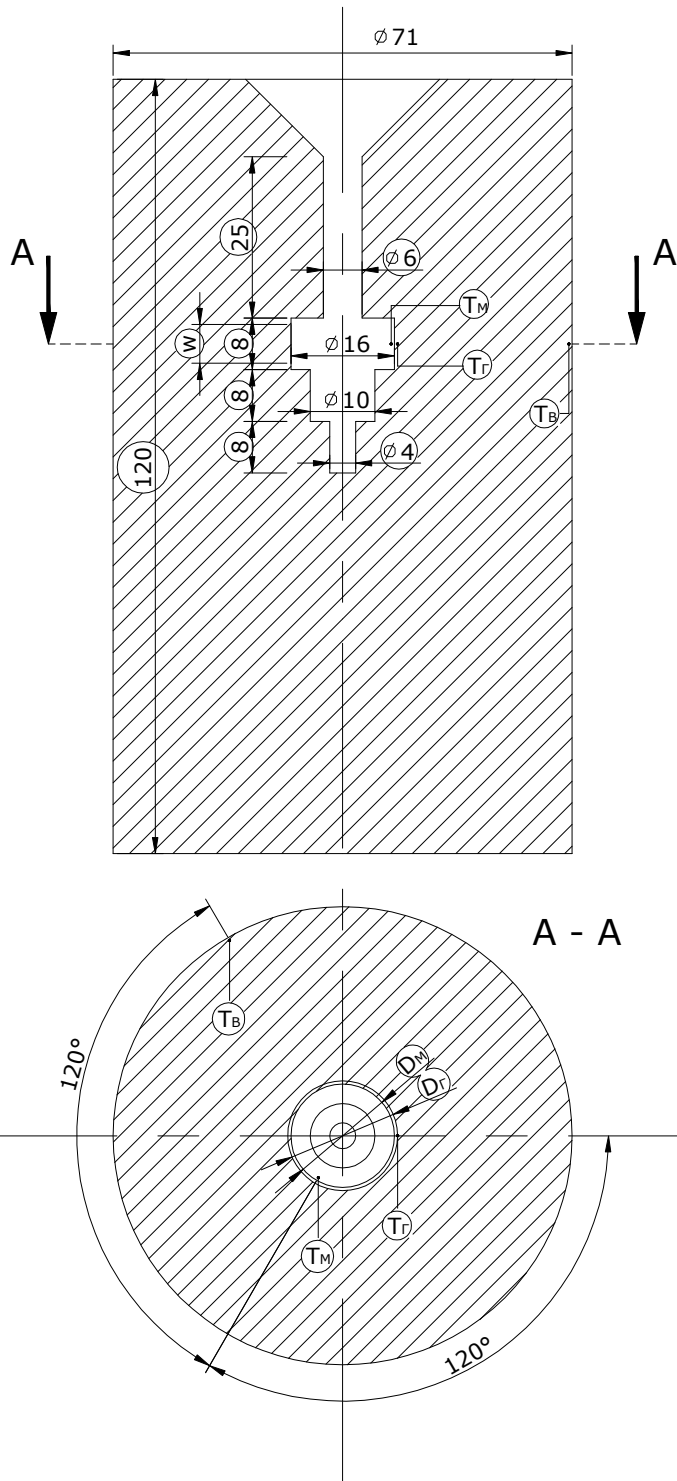
3.2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Τα δύο πειράματα που είχαν επιτυχία και επεξεργάστηκαν για την εξαγωγή αποτελεσμάτων με τον τρόπο που επιλέχθηκε, ήταν και τα δύο, πειράματα με ίδιες συνθήκες υπερπίεσης-κενού, θερμοκρασίας τήγματος αλλά διαφορετική θερμοκρασία καλουπιού. Στους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται παρακάτω χρησιμοποιούνται οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν από τα θερμοστοιχεία στη διεπιφάνεια.

Συνθήκες Πειραμάτων :

Υπερπίεση στο θάλαμο τήξης	: 1.5 bar
Κενό στο θάλαμο χύτευσης	: 0.03 bar
Θερμοκρασία τήματος κατά την έγχυση	: 1111 °C
Θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια του καλουπιού	: 740°C & 620°C

Τοποθετήθηκαν 3 θερμοστοιχεία. Το πρώτο εντός του χυτού, αλλά όσο γινόταν πιο κοντά στην εξωτερική επιφάνεια. Τα άλλα δύο στη μάζα του γύψου, το ένα όσο δυνατόν πιο κοντά στην εσωτερική διεπιφάνεια και το άλλο όσο δυνατόν πιο κοντά στην εξωτερική επιφάνεια. Οι μετρήσεις του τελευταίου θα φανούν χρήσιμες στη διαδικασία της προσομοίωσης. Οι θέσεις των θερμοστοιχείων καθ' ύψος, αλλά και σε ποιο σημείο της τομής σε κάτοψη, καθώς και οι σημαντικότερες διαστάσεις του καλουπιού φαίνονται σε σχήμα που ακολουθεί.



Σχ. 3.1 Απεικόνιση των γεωμετρικών στοιχείων του καλουπιού και των θέσεων των θερμοστοιχείων

Εν προκειμένω λοιπόν θα επιχειρηθεί να καταστρωθεί ο υπολογισμός του ΣΜΘ που θα έχει ως δεδομένα τις θερμοκρασίες που μετρήθηκαν με τα θερμοστοιχεία εντός του χυτού και του γύψου, κοντά στη διεπιφάνεια και τις λοιπές θερμικές ιδιότητες των σωμάτων.

Επειδή το φαινόμενο είναι πολύπλοκο γίνονται οι εξής παραδοχές :

1. Η θερμοκρασία που μετρά το εσωτερικό στο χυτό θερμοστοιχείο,
 - α) επειδή είναι κοντά στη διεπιφάνεια και
 - β) λόγω υψηλής θερμικής αγωγιμότητας του αλφακά είναι ίση με τη θερμοκρασία της διεπιφάνειας από τη μεριά του χυτού και γενικά το χυτό έχει μία και μοναδική θερμοκρασία.
2. Η ειδική αλλά και λανθάνουσα θερμότητα απορρίπτονται εξ' ολοκλήρου προς το καλούπι, κάθετα στη διεπιφάνεια.
3. Δεν αποθηκεύεται θερμότητα στη διεπιφάνεια και επομένως ποσότητα dQ_M διαπερνά τη διεπιφάνεια.
4. Το χυτό παραμένει σε κατακόρυφη θέση χωρίς να παρεκκλίνει από αυτήν και επομένως σε όλη την περιφέρεια της διεπιφάνειας έχουμε ίδια θερμορροή. Δεν έχουμε κάπου εντονότερη θερμορροή λόγω πλεονασμού hot spots καθ' ύψος.

Σύμβολα

HTC : ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στη διεπιφάνεια

dQ_M : διαφορικό θερμότητας που απορρίπτεται από το μέταλλο κατά την απόψυξη

dQ_G : διαφορικό θερμότητας που απορροφάται από το φιλμ του γύψου

A_M : το εμβαδό της διεπιφάνειας χυτού-καλουπιού(μετάλλου-γύψου)

$D_M \setminus R_M$: η διάμετρος \ ακτίνα της διεπιφάνειας στην οποία μελετάται το φαινόμενο

w : το εύρος της διεπιφάνειας στην οποία μελετάται το φαινόμενο

T_M : η θερμοκρασία που μετρά το εσωτερικό στο χυτό θερμοστοιχείο

$T_{\Delta I E \Pi}$: η θερμοκρασία που επικρατεί στη διεπιφάνεια από την πλευρά του γύψου ($\neq T_G$)

T_G : η θερμοκρασία που μετρά το εσωτερικό στο γύψο θερμοστοιχείο

$D_G \setminus R_G$: η διάμετρος \ ακτίνα της επιφάνειας στην εξωτερική πλευρά του φιλμ γύψου

k_G : η θερμική αγωγιμότητα του γύψου

H_M : η ειδική ενθαλπία του μετάλλου

Θερμικό Μοντέλο

Η θερμότητα που αποβάλλεται από το χυτό και διέρχεται εξ' ολοκλήρου, σύμφωνα με ανωτέρω παραδοχή, τη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού ισούται με :

$$dQ_M = HTC \cdot A_M \cdot (T_M - T_{\Delta IEP}) \cdot dt$$

Επιλύοντας τη σχέση ως προς τη θερμοκρασιακή διαφορά προκύπτει :

$$dQ_M = HTC \cdot A_M \cdot (T_M - T_{\Delta IEP}) \cdot dt \Rightarrow dQ_M = HTC \cdot \pi \cdot D_M \cdot w \cdot (T_M - T_{\Delta IEP}) \cdot dt \Rightarrow$$

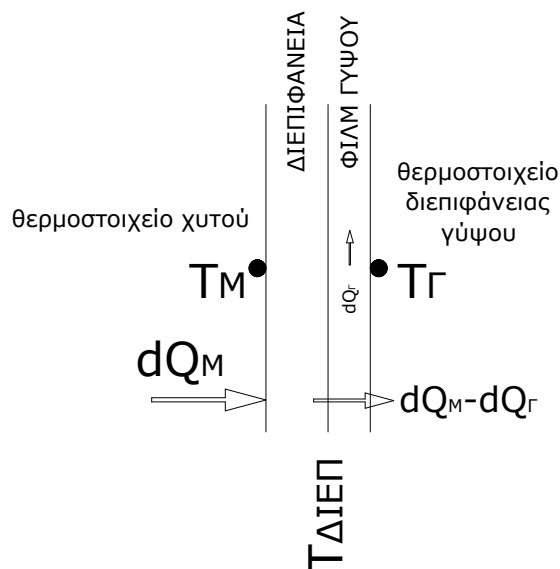
$$\Rightarrow T_M - T_{\Delta IEP} = \frac{dQ_M}{HTC \cdot \pi \cdot D_M \cdot w} \cdot \frac{1}{dt} \quad (1)$$

Μία πρώτη προσέγγιση του προβλήματος έγινε θεωρώντας τη θερμοκρασία που μετρείται από το θερμοστοιχείο στο γύψο και κοντά στη διεπιφάνεια ότι ταυτίζεται με αυτή της διεπιφάνειας από τη μεριά του γύψου.

Οπότε μπορεί να γίνει άμεσα ένας πρώτος υπολογισμός του ΣΜΘ από τη σχέση :

$$HTC = \frac{dQ_M}{(T_M - T_{\Delta IEP}) \cdot \pi \cdot D_M \cdot w} \cdot \frac{1}{dt}$$

Η θερμότητα που διέρχεται από το φίλμ γύψου ισούται με τη θερμότητα που εισέρχεται σε αυτό μειωμένη κατά τη θερμότητα που αποθηκεύεται σε αυτό λόγω της θερμοχωρητικότητάς του. Με τον τρόπο που έχει οριστεί η ποσότητα dQ_T θα είναι θετική όταν θερμότητα απορροφάται από το γύψο και επομένως αυξάνεται η θερμοκρασία του και αρνητική όταν θερμότητα απορρίπτεται από αυτόν, δηλαδή όταν μειώνεται η θερμοκρασία του.



Σχ. 3.2 Η αποβαλλόμενη από το χυτό θερμότητα διέρχεται εξ'ολοκλήρου τη διεπιφάνεια και μειωμένη κατά μία ποσότητα το φιλμ του γύψου

Επομένως λόγω κυλινδρικού προβλήματος για τη θερμότητα που διέρχεται τη διεπιφάνεια ισχύει :

$$dQ_M - dQ_\Gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_\Gamma \cdot w}{\ln\left(\frac{R_\Gamma}{R_M}\right)} \cdot (T_{\Delta\text{ΙΕΠ}} - T_\Gamma) \cdot dt$$

Επιλύοντας επίσης τη σχέση ως προς τη θερμοκρασιακή διαφορά προκύπτει :

$$dQ_M - dQ_\Gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_\Gamma \cdot w}{\ln\left(\frac{R_\Gamma}{R_M}\right)} \cdot (T_{\Delta\text{ΙΕΠ}} - T_\Gamma) \cdot dt \Rightarrow T_{\Delta\text{ΙΕΠ}} - T_\Gamma = \frac{dQ_M - dQ_\Gamma}{2 \cdot \pi \cdot k_\Gamma \cdot w} \cdot \frac{1}{dt} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_{\Delta\text{ΙΕΠ}} - T_\Gamma = \frac{dQ_M - dQ_\Gamma}{2 \cdot \pi \cdot k_\Gamma \cdot w} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{D_\Gamma}{D_M}\right)} \quad (2)$$

Αθροίζοντας κατά μέλη τις δύο προκύπτουσες σχέσεις, απαλείφεται από την τελική εξίσωση η θερμοκρασία της διεπιφάνειας, που δεν είναι γνωστή, και προκύπτει μία εξίσωση με μοναδικό άγνωστο το HTC. Έτσι :

$$(1)+(2) \Rightarrow T_M - T_\Gamma = \left[\frac{dQ_M}{HTC \cdot \pi \cdot D_M \cdot w} + \frac{dQ_M - dQ_\Gamma}{2 \cdot \pi \cdot k_\Gamma \cdot w \cdot \ln\left(\frac{D_\Gamma}{D_M}\right)} \right] \cdot \frac{1}{dt} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{dQ_M}{HTC \cdot \pi \cdot D_M \cdot w} = (T_M - T_\Gamma) \cdot dt - \frac{dQ_M - dQ_\Gamma}{\frac{2 \cdot \pi \cdot k_\Gamma \cdot w}{\ln\left(\frac{D_\Gamma}{D_M}\right)}}$$

Η θερμότητα που αποβάλλει το χυτό και η θερμότητα που απορροφά αρχικά και στη συνέχεια αποβάλλει και το φιλμ του γύψου δίνονται από τις σχέσεις :

$$dQ_M = m_M \cdot dH_M(t)$$

$$dQ_\Gamma = m_\Gamma \cdot c_{p\Gamma} \cdot dT_\Gamma(t)$$

Για τη θερμότητα του χυτού χρησιμοποιείται η ειδική ενθαλπία η οποία περιέχει στη φάση της στερεοποίησης και τη λανθάνουσα θερμότητα.

Ολοκληρώνοντας μεταξύ δύο χρονικών στιγμών t_0 και t_1 όπου θεωρείται ο συντελεστής HTC σταθερός έχουμε :

$$\frac{[dQ_M]_{t_0}^{t_1}}{HTC \cdot \pi \cdot D_M \cdot w} = \int_{t_0}^{t_1} (T_M - T_\Gamma) \cdot dt - \frac{[dQ_M - dQ_\Gamma]_{t_0}^{t_1}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot k_\Gamma \cdot w}{\ln\left(\frac{D_\Gamma}{D_M}\right)}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow HTC = \frac{[dQ_M]_{t_0}^{t_1}}{\pi \cdot D_M \cdot w \cdot \left[\int_{t_0}^{t_1} (T_M - T_\Gamma) \cdot dt - \frac{[dQ_M - dQ_\Gamma]_{t_0}^{t_1}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot k_\Gamma \cdot w}{\ln\left(\frac{D_\Gamma}{D_M}\right)}} \right]} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow HTC = \frac{[m_M \cdot dH_M(t)]_{t_0}^{t_1}}{\pi \cdot D_M \cdot w \cdot \left[\int_{t_0}^{t_1} (T_M - T_\Gamma) \cdot dt - \frac{[m_M \cdot dH_M(t) - m_\Gamma \cdot c_{p\Gamma} \cdot dT_\Gamma(t)]_{t_0}^{t_1}}{2 \cdot \pi \cdot k_\Gamma \cdot w} \cdot \ln\left(\frac{D_\Gamma}{D_M}\right) \right]} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow HTC = \frac{m_M \cdot [H_M(t_0) - H_M(t_1)]}{\pi \cdot D_M \cdot w \cdot \left[\int_{t_0}^{t_1} (T_M - T_\Gamma) \cdot dt - \frac{m_M \cdot [H_M(t_0) - H_M(t_1)] - m_\Gamma \cdot c_{p\Gamma} \cdot [T_\Gamma(t_1) - T_\Gamma(t_0)]}{2 \cdot \pi \cdot k_\Gamma \cdot w} \cdot \ln\left(\frac{D_\Gamma}{D_M}\right) \right]}$$

Το ολοκλήρωμα στον παρονομαστή προσδιορίζεται αλγεβρικά καθώς οι καμπύλες των θερμοκρασιών προσεγγίζονται με πολυώνυμα 6^{ου} βαθμού.

Οι μάζες χυτού και γύψου υπολογίζονται ως το γινόμενο του όγκου που καταλαμβάνουν επί την πυκνότητα του υλικού. Στην περίπτωση του χυτού ως πυκνότητα ελήφθη η πυκνότητα που έχει το μέταλλο στη θερμοκρασία που αντιλαμβάνεται το θερμοστοιχείο τη μέγιστη θερμοκρασία, διότι τότε πληρώνεται ο χώρος που θα καταλάβει το υγρό μέταλλο πληρέστερα. Επομένως στον υπολογισμό των μαζών και των επιφανειών υπεισέρχεται ο παράγοντας w που αναφέρθηκε παραπάνω.

Κάνοντας τους υπολογισμούς σε φύλλο εργασίας Excel, όπου ο υπολογισμός μαζών και επιφανειών γινόταν με τρόπο ώστε αλλάζοντας το w να γίνεται αναφορά σε σωλήνα απείρου μήκους ή μη. Δηλαδή, το πραγματικό και μέγιστο μήκος του σωλήνα (δηλαδή του τεμαχίου στη μέγιστη διάμετρο) είναι 8mm. Ωστόσο εκεί η θερμορροή δεν μπορεί να θεωρηθεί μονοδιάστατη, διότι παρατηρείται διαφυγή και από τους πυθμένες και τις γωνίες. Ενώ αν το w ληφθεί μικρότερο θα μπορούσε να θεωρηθεί σωλήνας απείρου μήκους.

Επόμενος προβληματισμός ήταν πόσο μικρό w να ληφθεί για να είναι τα αποτελέσματά πιο κοντά στην πραγματικότητα. Έχοντας φτιαχτεί το διάγραμμα του συντελεστή αρχικά για $w = 8\text{mm}$ και μεταβάλλοντας το στη συνέχεια, μεταβαλλόταν και η καμπύλη του συντελεστή. Όχι η μορφή της, αλλά οι τιμές.

Διερευνώντας λοιπόν και αυτές τις αλλαγές προέκυψε το συμπέρασμα ότι κανονικά δε θα έπρεπε να αλλάζει η καμπύλη του συντελεστή, καθώς το πρόγραμμα του Excel κάνει απλούς μαθηματικούς υπολογισμούς και προφανώς δεν έχει σχεδιασθεί για να κρίνει φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και ως εκ τούτου κατά πόσον ένας αγωγός θεωρείται απείρου μήκους ή όχι.

Έπειτα παρατηρώντας την τελευταία σχέση που παρατέθηκε, αν οι μάζες αντικατασταθούν από τα ισοδύναμα γινόμενα πυκνότητας επί όγκο και εν συνεχεία οι όγκοι από τα γινόμενα που τους εκφράζουν, η ποσότητα w απαλείφεται και εκλείπει τελείως από τη σχέση.

$$\begin{aligned}
 HTC &= \frac{\rho_M \cdot V_M \cdot [H_M(t_0) - H_M(t_1)]}{\pi \cdot D_M \cdot w \cdot \left[\int_{t_0}^{t_1} (T_M - T_\Gamma) \cdot dt - \frac{\rho_M \cdot V_M \cdot [H_M(t_0) - H_M(t_1)] - \rho_\Gamma \cdot V_\Gamma \cdot c_{p\Gamma} \cdot [T_\Gamma(t_1) - T_\Gamma(t_0)]}{\frac{2 \cdot \pi \cdot k_\Gamma \cdot w}{\ln\left(\frac{D_\Gamma}{D_M}\right)}} \right]} \Rightarrow \\
 \Rightarrow HTC &= \frac{\rho_M \pi \frac{D_M^2}{4} w \cdot [H_M(t_0) - H_M(t_1)]}{\pi D_M w \cdot \left[\int_{t_0}^{t_1} (T_M - T_\Gamma) dt - \frac{\rho_M \pi \frac{D_M^2}{4} w [H_M(t_0) - H_M(t_1)] - \rho_\Gamma \pi \frac{D_\Gamma^2 - D_M^2}{4} w c_{p\Gamma} [T_\Gamma(t_1) - T_\Gamma(t_0)]}{\frac{2\pi k_\Gamma w}{\ln\left(\frac{D_\Gamma}{D_M}\right)}} \right]} \Rightarrow \\
 \Rightarrow HTC &= \frac{\rho_M D_M \cdot [H_M(t_0) - H_M(t_1)]}{4 \int_{t_0}^{t_1} (T_M - T_\Gamma) dt - \frac{\rho_M D_M^2 \cdot [H_M(t_0) - H_M(t_1)] - \rho_\Gamma (D_\Gamma^2 - D_M^2) c_{p\Gamma} \cdot [T_\Gamma(t_1) - T_\Gamma(t_0)]}{\frac{2k_\Gamma}{\ln\left(\frac{D_\Gamma}{D_M}\right)}}}
 \end{aligned}$$

Η τελευταία αυτή σχέση είναι πιο γενική έκφραση του ΣΜΘ θεωρώντας τον σταθερό ανάμεσα σε δύο κοντινές χρονικές στιγμές.

Με μια μαθηματική παρατυπία θεωρώντας $D_\Gamma = D_M$, η ποσότητα $\ln(D_\Gamma/D_M)$ μηδενίζεται, άρα μηδενίζεται και ο αφαιρετέος όρος στον παρονομαστή και επομένως προσδιορίζεται και η περίπτωση όπου το θερμοστοιχείο του γύψου είναι ακριβώς πάνω

στη διεπιφάνεια. Αν δεν είχε εισαχθεί η έννοια του φιλμ γύψου και πάλι με ολοκλήρωση θα καταλήγαμε στη σχέση αυτή.

3.3 ΕΝΘΑΛΠΙΑ ΑΛΠΑΚΑ

Λόγω έλλειψης στοιχείων με σημαντικότερο τον υπολογισμό της ενθαλπίας του υλικού που εξετάζεται, η διαδικασία οδηγήθηκε στον προσδιορισμό μιας ρεαλιστικής προσέγγισης της τιμής της ενθαλπίας στο θερμοκρασιακό εύρος που κινείται το πείραμα.

Έτσι από το manual του πακέτου ProCast δίνεται ο τύπος υπολογισμού της ενθαλπίας ως εξής :

$$H = \int_0^T c_p dT + L \cdot [1 - f_s(T)]$$

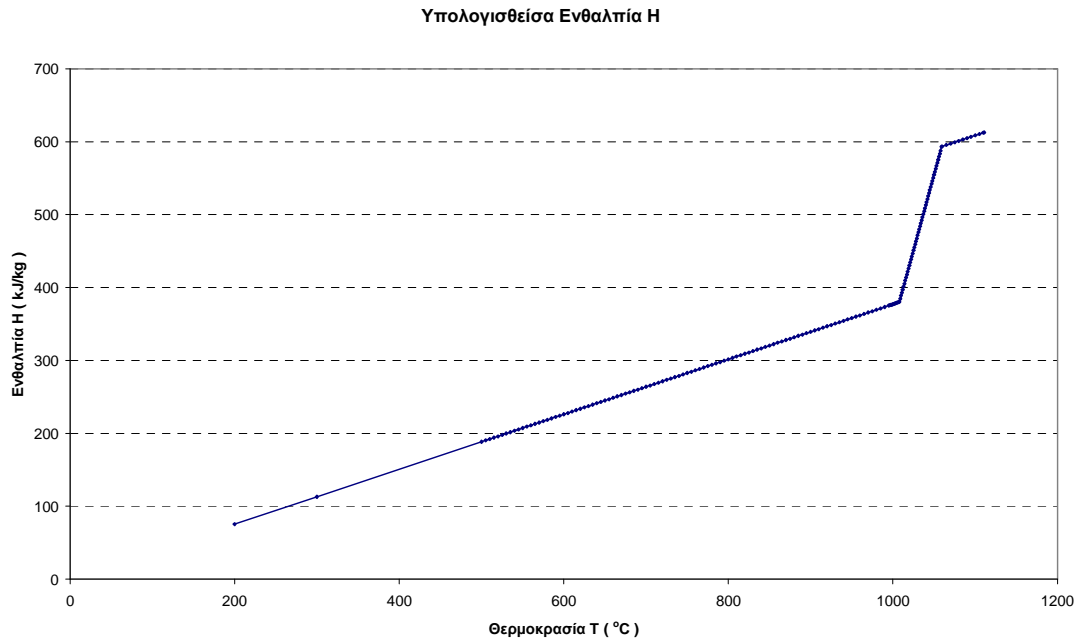
Από την ηλεκτρονική τοποθεσία www.copper.org δίνεται μία τιμή για την ειδική θερμοχωρητικότητα στους 20 °C. Θεωρώντας σταθερή την τιμή της θερμοχωρητικότητας και ίση με $c_p=0.3771\text{kJ/kgK}$, μένει ο προσδιορισμός του μέρους της λανθάνουσας ειδικής θερμότητας. Βρέθηκαν οι τιμές ειδικής λανθάνουσας θερμότητας για τα καθαρά μέταλλα από τα οποία αποτελείται το εν λόγω κράμα όπως παρουσιάζονται παρακάτω :

Χαλκός :	205 kJ/kg
Νικέλιο :	297 kJ/kg
Ψευδάργυρος :	113 kJ/kg

Από τις περιεκτικότητες των στοιχείων βγήκε ο μέσος όρος της λανθάνουσας θερμότητας του κράματος από τη σχέση :

$$L_{G.S.} = \frac{64 \cdot L_{Cu} + 12 \cdot L_{Ni} + 24 \cdot L_{Zn}}{100} = \frac{64 \cdot 205 + 12 \cdot 297 + 24 \cdot 113}{100} \Rightarrow L_{G.S.} = 193.96 \text{ kJ/kg}$$

Έτσι προέκυψε η καμπύλη του επόμενου σχήματος.



Σχ. 3.3 Υπολογισθείσα ενθαλπία

Η μορφή της καμπύλης που δίνει το ProCast είναι παρόμοια, αλλά θεωρήθηκε λάθος στη θερμοκρασία των 270 °C περίπου η ενθαλπία να είναι μηδενική. Είθισται να θεωρείται μηδενική η ενθαλπία στη θερμοκρασία των 0 °C. Πάντως οι τιμές στην περιοχή που μελετείται είναι πολύ κοντινές αν όχι ίδιες.

3.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ

Στην παράγραφο αυτή δε θα αναλύσουμε τον τρόπο που δομείται και λειτουργεί το λογισμικό πρόγραμμα ProCast. Αυτό είναι κάτι που έχει γίνει σε προηγούμενες διπλωματικές εργασίες και οποιοσδήποτε ενδιαφερόμενος μπορεί να βρει το εγχειρίδιο και να κατατοπιστεί. Συγκεκριμένα η ίδια γεωμετρία έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν και έγινε χρήση του ίδιου μοντέλου.

Επίσης πέραν των οριακών και αρχικών συνθηκών που ορίστηκαν βάσει των μετρούμενων ποσοτήτων, για τις παραμέτρους τρεξίματος χρησιμοποιήθηκαν αυτές που προτείνονται από το λογισμικό.

Από τα θερμοστοιχεία κοντά στη διεπιφάνεια προκύπτει η θερμοκρασιακή πτώση που συμβαίνει κατά το πάχος της, ενώ από αυτό της εξωτερικής επιφάνειας οι θερμοκρασίες θα εισαχθούν ως οριακή συνθήκη κατά τη διάρκεια της χύτευσης στην προσομοίωση και πλέον δε θα χρειάζεται να ορίσουμε και τη θερμορροή που αποβάλλεται από την εξωτερική επιφάνεια. Είναι ίσως μη ακριβής ακόμα και αυτή η οριακή συνθήκη, αφού διαφορετικές θερμοκρασίες επικρατούν σε διαφορετικά ύψη στην εξωτερική επιφάνεια, αλλά είναι μια καλή προσέγγιση από τη στιγμή που δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί τέτοιο πλήθος θερμοκρασιών.

Από τη στιγμή που εξάγεται το καλούπι από το φούρνο σε θερμοκρασία 750 °C, μέχρι να γίνουν οι συνδέσεις των θερμοστοιχείων, να κλείσει ο θάλαμος τήξης και να αρχίσει η έγχυση, περνά ένα εύλογο χρονικό διάστημα κατά το οποίο το καλούπι αρχίζει να αποψύχεται.

Στην εσωτερική επιφάνεια όπως είχε παρατηρηθεί και από προηγούμενες εργασίες η θερμοκρασία πέφτει με αργούς ρυθμούς. Αυτό συμβαίνει επειδή :

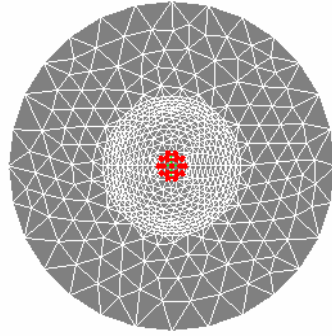
1. ίσως η στένωση του κορμού εμποδίζει την κυκλοφορία αέρα και τη συναλλαγή θερμότητας με τον περιβάλλοντα αέρα,
2. επειδή το μεγάλο πάχος του καλουπιού την κρατάει μονωμένη, αλλά και επειδή
3. η εσωτερική επιφάνεια βρίσκεται όλη στην ίδια θερμοκρασία και δεν έχουμε απώλεια θερμότητας λόγω ακτινοβολίας.

Αντιθέτως η εξωτερική επιφάνεια με την εξαγωγή από το φούρνο αρχίζει να ακτινοβολεί. Η ακτινοβολία αυτή γίνεται έντονα αισθητή σε όποιον πραγματοποιεί το πείραμα. Σίγουρα μια θερμοκρασιακή πτώση ήταν αναμενόμενη, αλλά όχι τόσο έντονη όσο τελικά αποδείχθηκε, της τάξεως δηλαδή των 340 °C μέσα σε πέντε λεπτά.

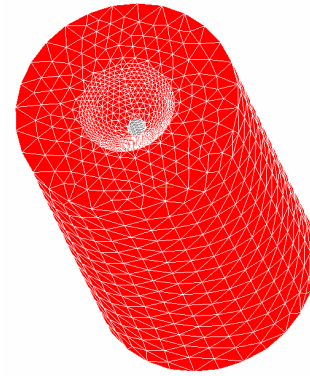
Οι αρχικές συνθήκες που θα ορίσουμε στην προσομοίωση είναι μόνο θερμοκρασιακές και είναι οι θερμοκρασίες καλουπιού και τήγματος. Ως θερμοκρασία τήγματος ορίστηκε αυτή που αναγραφόταν και που ουσιαστικά οι μελετητές είχαμε επιβάλλει στη χυτόπρεσσα. Τι γίνεται όμως όσον αφορά στο γύψο που δεν έχει κοινή θερμοκρασία σε όλη του τη μάζα;

Το λογισμικό ProCast έχει τη δυνατότητα να εισάγει αρχικές συνθήκες θερμοκρασίας από αποτελέσματα άλλης διαδικασίας προσομοίωσης με ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ίδια χαρακτηριστικά πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι αρχικά πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της παραμονής του καλουπιού στις συνθήκες περιβάλλοντος του εργαστηρίου.

Στην βοηθητική αυτή προσομοίωση επιβλήθηκε στους κόμβους της εσωτερικής διεπιφάνειας(κορμό και τεμάχιο. Όχι στον κώνο εισόδου) μια γραμμική θερμοκρασιακή πτώση από τους 750 °C μέχρι τη θερμοκρασία που επικρατεί αμέσως πριν τη χύτευση. Έπειτα θέτοντας ένα συντελεστή μετάδοσης θερμότητας στην εξωτερική επιφάνεια έγινε προσπάθεια να επιτευχθεί σε χρονικό διάστημα από το άνοιγμα του φούρνου μέχρι την έναρξη της χύτευσης, το οποίο είχε μετρηθεί, η θερμοκρασία που έδινε το θερμοστοιχείο για εκείνη τη στιγμή.



Εικ. 3.2 Οριακή συνθήκη εσωτερικής επιφάνειας

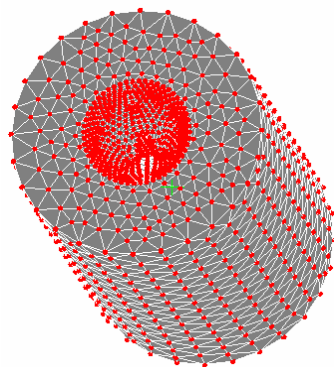


Εικ. 3.3 Επιφάνεια επιβολής ΣΜΘ με περιβάλλον στην εξωτερική επιφάνεια

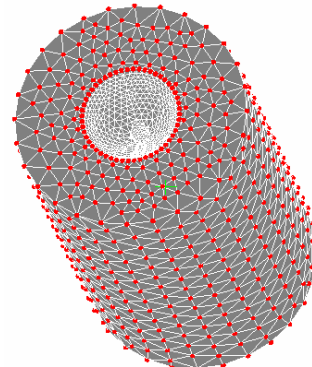
Επιτυγχάνοντας αυτό το στόχο, είναι δεδομένη πλέον η θερμοκρασιακή κατάσταση του καλουπιού σε όλη τη μάζα του την οποία μπορούμε να εισάγουμε ως αρχική συνθήκη στην προσομοίωση της χύτευσης.

Να τονιστεί ότι για να πραγματοποιήσει προσομοίωση το ProCast πρέπει οπωσδήποτε να ρεύσει υλικό εντός του καλουπιού. Ορίστηκε να πληρωθεί ένα μηδαμινό ποσοστό του χώρου που καταλαμβάνει το χυτό, ενώ ο ΣΜΘ στη διεπιφάνεια ορίστηκε μηδενικός.

Πλέον ως οριακές συνθήκες εισήχθησαν και στα δύο πειράματα το κενό στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια του καλουπιού με μία τιμή 0.03bar και η υπερπίεση που επικρατεί στο θάλαμο τήξης ως επιφανειακό φορτίο επί της επιφάνειας από την οποία εισάγεται το τήγμα με τιμή 1.5bar. Αυτή η διαφορά των πιέσεων επιδρά και στην παροχή μάζας του τήγατος, συνθήκη την οποία επίσης μπορούμε και εισάγουμε.



Εικ. 3.4 Επιφάνειες με οριακή συνθήκη την πίεση κενού 0.03bar

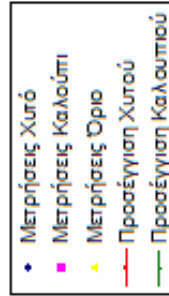
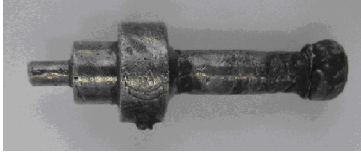


Εικ. 3.5 Εξωτερική επιφάνεια όπου θα εφαρμοσθεί η θερμοκρασία που μετρά το εξωτερικό θερμοστοιχείο ως οριακή συνθήκη

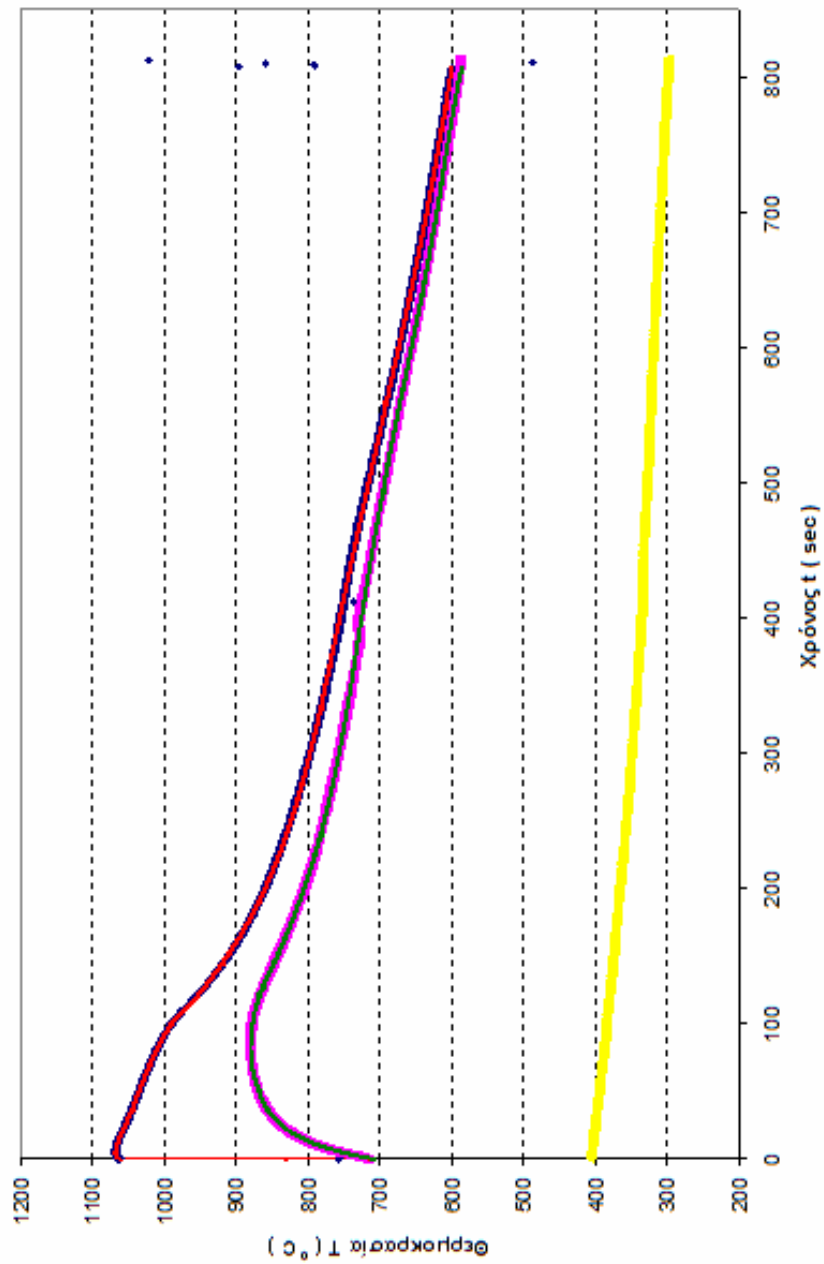
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ, ΠΟΛΥΩΝ. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ & ΚΥΡΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

4.1.1 Πείραμα με καλούπι στους 740 °C



Πειραματικές Μετρήσεις και Προσεγγίσεις αυτών
Θερμοκρασία Καλούπιού 740 °C



ΠΟΛΥΩΝΥΜΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΚΑΤΑ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

ΧΥΤΟ

ΚΑΛΟΥΠΙ

1^η περιοχή (0 – 0.178 sec)

$$T = 1298.962 \quad x$$

$$+ 714.0802$$

2^η περιοχή (0.267 - 3.827 sec)

$$T = - 0.2665 \quad x^2$$

$$+ 2.2586 \quad x$$

$$+ 1062.7$$

3^η περιοχή (3.916 – 109.025 sec)

$$T = -0.00000000065823918820 \quad x^6$$

$$+ 0.00000023138149044317 \quad x^5$$

$$- 0.0000323202211568604 \quad x^4$$

$$+ 0.00221966091848414 \quad x^3$$

$$- 0.0761421260639574 \quad x^2$$

$$+ 0.40637366267304 \quad x$$

$$+ 1067.2442567212$$

4^η περιοχή (109.114 sec - τέλος)

$$T = -0.00000000000000268657 \quad x^6$$

$$- 0.00000000000021913833 \quad x^5$$

$$+ 0.00000001423947857328 \quad x^4$$

$$- 0.000020622743012495 \quad x^3$$

$$+ 0.0122328360362164 \quad x^2$$

$$- 3.72919067153237 \quad x$$

$$+ 258.66228754191$$

1^η περιοχή (0 – 128.16 sec)

$$T = -0.00000000054564378222 \quad x^6$$

$$+ 0.00000025554173639641 \quad x^5$$

$$- 0.0000488751943343857 \quad x^4$$

$$+ 0.00491072067529785 \quad x^3$$

$$- 0.284893856245617 \quad x^2$$

$$+ 9.83952775754733 \quad x$$

$$+ 708.962851640768$$

2^η περιοχή (128.249 sec – τέλος)

$$T = -0.00000000000002509946 \quad x^6$$

$$+ 0.00000000006646393615 \quad x^5$$

$$- 0.0000006552664181215 \quad x^4$$

$$+ 0.0000283548584655689 \quad x^3$$

$$- 0.00413421884764182 \quad x^2$$

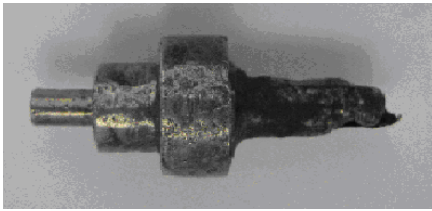
$$- 0.785782888531617 \quad x$$

$$+ 986.226594285103$$

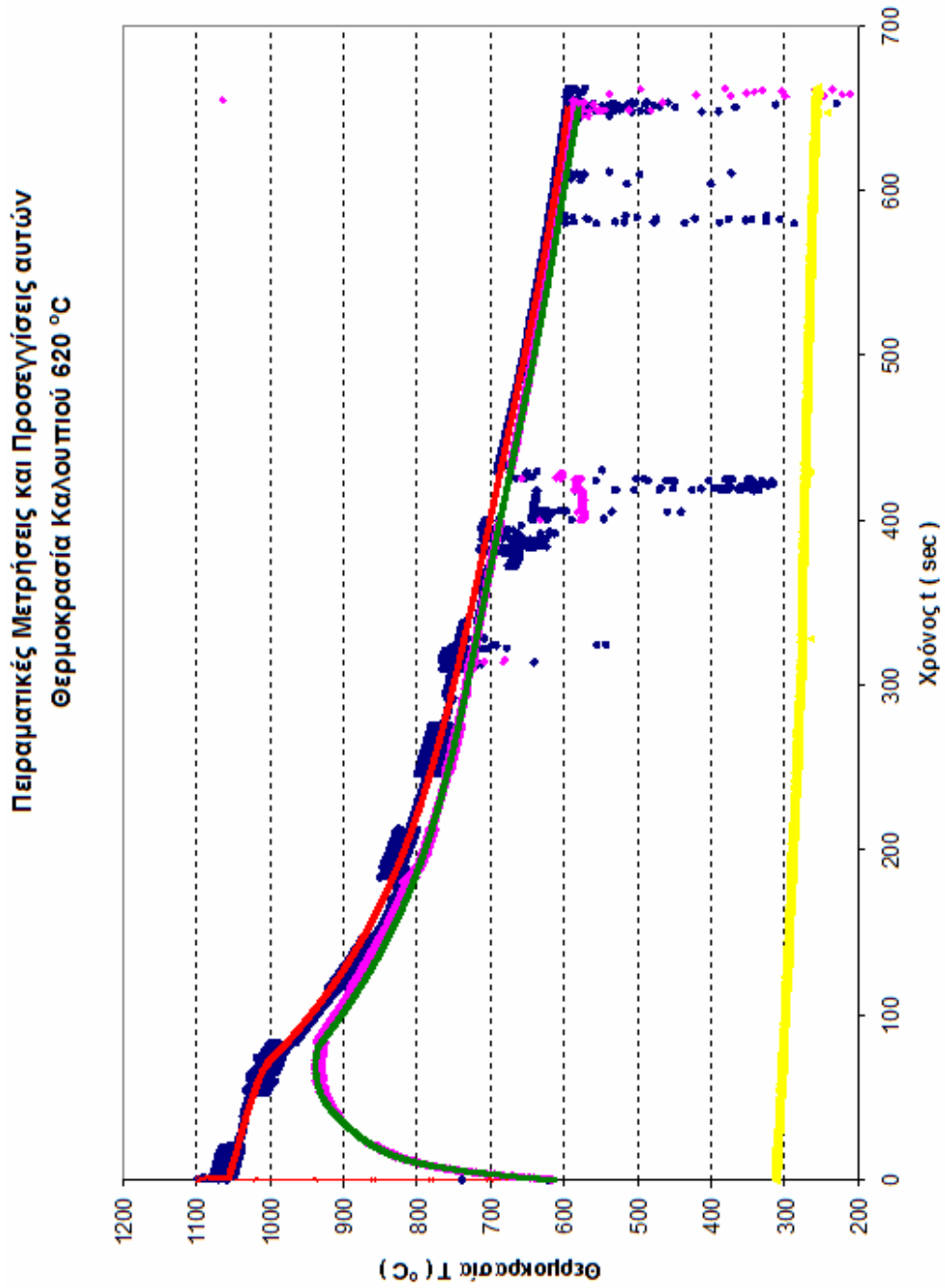
Στοιχεία :

Μέγιστη μέτρηση χυτού	:	1067.8 °C
πραγματοποιείται στα	:	3.916 sec
Θερμοκρασία Solidus	:	976 °C
Μέγιστη μέτρηση καλουπιού	:	879.6 °C
πραγματοποιείται στα	:	73.2 sec
Σημείο Καμψής Καμπύλης Χυτού στα	:	108.9 sec
Σημείο Καμψής Καμπύλης Τύπου στα	:	128.2 sec
Διάρκεια απόψυξης μέχρι τους 600 °C	:	805.8 sec
Θερμοκρασία καλουπιού στα 805.8 sec	:	586.6 °C

4.1.2 Πείραμα με καλούπι στους 620 °C



- Μετρήσεις Χυτού
- Μετρήσεις Καλούπι
- Μετρήσεις Όριο
- Προσέγγιση Χυτού
- Προσέγγιση Καλούπι



ΠΟΛΥΩΝΥΜΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΚΑΤΑ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

ΧΥΤΟ

1^η περιοχή (0 - 0.534 sec)

$$T = 893.715 \quad x$$

$$+ 621.207$$

2^η περιοχή (0.534 - 1.691 sec)

$$T = -37.1207 \quad x$$

$$+ 1098.451$$

3^η περιοχή (1.691 - 71.2 sec)

$$T = -0.000000063923000 \quad x^6$$

$$+ 0.0000013050691104 \quad x^5$$

$$- 0.0001013352586905 \quad x^4$$

$$+ 0.0036584394660045 \quad x^3$$

$$- 0.0610278733705784 \quad x^2$$

$$- 0.2316362120238130 \quad x$$

$$+ 1056.05166769818$$

4^η περιοχή (71.2 sec - τέλος)

$$T = -0.0000000000000002 \quad x^6$$

$$- 0.00000000000087334 \quad x^5$$

$$+ 0.0000000249943967 \quad x^4$$

$$- 0.0000263713676313 \quad x^3$$

$$+ 0.0133806056345776 \quad x^2$$

$$- 3.7899623984022700 \quad x$$

$$+ 1214.02801212599$$

ΚΑΛΟΥΠΙ

1^η περιοχή (0 - 84.995 sec)

$$T = -0.0000000208142140 \quad x^6$$

$$+ 0.0000062716932503 \quad x^5$$

$$- 0.0007539202195588 \quad x^4$$

$$+ 0.0460917051800607 \quad x^3$$

$$- 1.5426577908801800 \quad x^2$$

$$+ 29.77149816293970 \quad x$$

$$+ 612.745343310525$$

2^η περιοχή (84.995 sec - τέλος)

$$T = -0.00000000000000519 \quad x^6$$

$$+ 0.0000000001020794 \quad x^5$$

$$- 0.0000000680826668 \quad x^4$$

$$+ 0.0000127476361250 \quad x^3$$

$$+ 0.0045315469888906 \quad x^2$$

$$- 2.6455417130539700 \quad x$$

$$+ 1114.87430333831$$

Στοιχεία :

Μέγιστη μέτρηση χυτού	:	1098 °C
πραγματοποιείται στα	:	0.534 sec
Θερμοκρασία Solidus	:	1000 °C
Μέγιστη μέτρηση καλουπιού	:	938 °C
πραγματοποιείται στα	:	69.7 sec
Σημείο Καμψής Καμπύλης Χυτού στα	:	71.2 sec
Σημείο Καμψής Καμπύλης Τύπου στα	:	85.0 sec
Διάρκεια απόψυξης μέχρι τους 600 °C	:	633.5 sec
Θερμοκρασία καλουπιού στα 633.5 sec	:	587.2 °C

4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Ομοιότητες

1. Οι μορφές των καμπυλών είναι παρόμοιες όπως ήταν αναμενόμενο. Διακρίνεται η διφασική περιοχή, η σχετικά απότομη αλλαγή της κλίσης στο τέλος της και η
2. Η θερμοκρασιακή διαφορά στη διεπιφάνεια φτάνοντας το χυτό στους 600 °C είναι ίδια και της τάξεως των 13°C.
3. Οι πρώτες περιοχές της απόψυξης, στη διφασική περιοχή έχουν μια σχετική παραλληλία.

Διαφορές

A. Στις καμπύλες χυτών

Πιν. 4.1 Συγκριτικός πίνακας των τιμών των δύο πειραμάτων

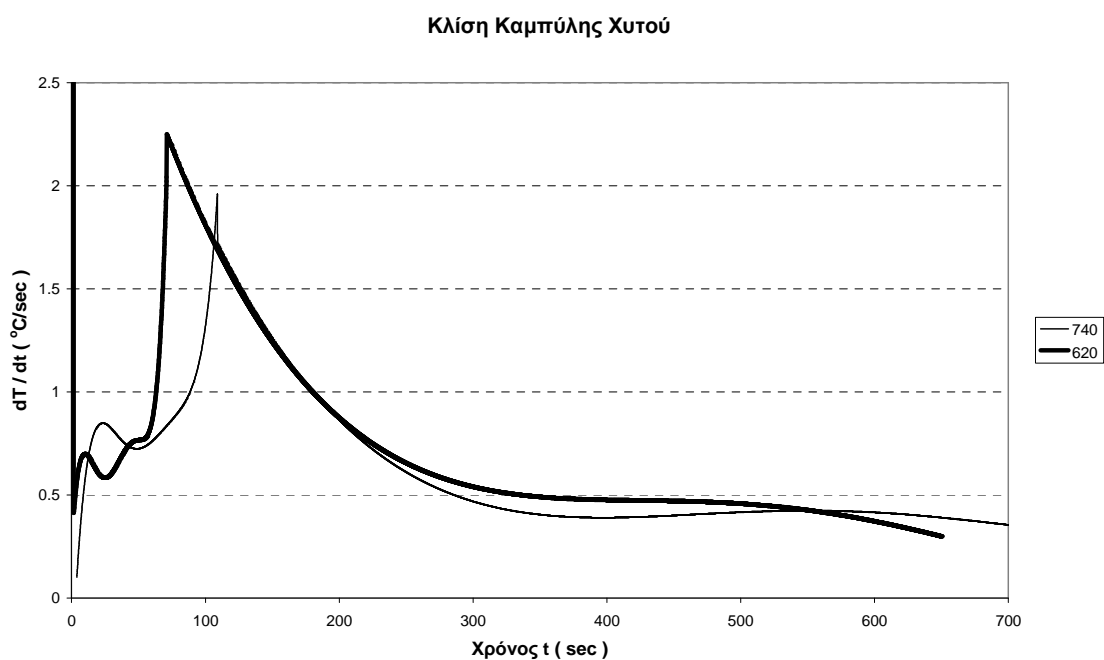
Παράμετρος \ Καλούπι	740°C	620°C	
Μέγιστη μετρηθείσα θερμοκρασία	1067.8	1098.5	°C
πραγματοποιείται στα	3.916	0.534	sec
Κλίση της καμπύλης στη μέγιστη θερμοκρασία	0.1	37.1	
Πρώτη θερμοκρασία διφασικής	1067.8	1058.8	°C
πραγματοποιείται στα	3.916	1.602	sec
Θερμοκρασία Solidus	976	1000	°C
πραγματοποιείται στα	108.4	71.2	sec
Χρονική διάρκεια διφασικής περιοχής	104.8	69.6	sec
Χρονική διάρκεια απόψυξης μέχρι τους 600 °C	805.8	633.5	sec

Μία άμεσα εμφανής διαφορά μεταξύ των καμπυλών απόψυξης των χυτών είναι η κλίσεις τους που φαίνονται στο σχήμα 4.1. Με τη χαμηλότερη θερμοκρασία καλουπιού έχουμε υπερβολικά μεγάλη κλίση απόψυξης κατά την έγχυση (προβάλλεται στο διάγραμμα η περιοχή μέχρι κλίση 2.5, αλλά για τις πρώτες τιμές είναι όπως αναφέρεται και στον πίνακα 4.1, 37.1), μετά κινείται περίπου στα ίδια επίπεδα με την κλίση του

καλούπιού των 740°C, αλλά αυξάνεται ταχέως σε μεγαλύτερες τιμές, επιτυγχάνεται πιο γρήγορα η στερεοποίηση και αρχίζει πλέον να μειώνεται.

Ας μην μπερδεύουν τον παρατηρητή οι μικρές τιμές που έχουν οι κλίσεις (μέχρι 2.25 περίπου). Η συνεισφορά τους στη μετάδοση θερμότητας είναι λίαν σημαντική διότι πολλαπλασιαζόμενες με την ειδική θερμοχωρητικότητα μεγενθύνονται και δίνουν την αποβολή θερμότητας ανά μονάδα μάζας χυτού. Η κλίση δίνει τη βασική εικόνα της εξέλιξης της απόψυξης.

Η κλίση της καμπύλης έχει άμεση σχέση με την αποβολή αισθητής θερμότητας από το χυτό.



Σχ. 4.1 Κλίση καμπύλης θερμοκρασίας Χυτού

Επίσης ένα σημαντικό θέμα είναι η αργοπορία να ληφθεί η μέγιστη θερμοκρασία στο καλούπι των 740°C. Η θερμοκρασία αυξάνεται απότομα μέχρι το επίπεδο των 1063°C αλλά εκεί μένει για λίγο σταθερή και ανεβαίνει στους 1068°C. Ίσως να μη λαμβάνει καλή μέτρηση το θερμοστοιχείο, αν και καθ'όλη τη διάρκεια του πειράματος δείχνει σταθερότητα στις μετρήσεις.

Σε συνέχεια της προηγούμενης παρατήρησης σχετικά με τη μέγιστη θερμοκρασία στο καλούπι των 740 °C, είναι το γεγονός ότι αυτή η θερμοκρασία στους 1068 °C

δείχνει να είναι εντός της διφασικής περιοχής. Η θερμοκρασία liquidus για παρεμφερή σύσταση (+1% Cu, -1%Zn) δίνεται στους 1038°C, αλλά και από το ProCast για το ακριβές μας κράμα είναι 1059°C.

Επειδή ποτέ δεν μπορεί να είναι κάποιος απόλυτα σίγουρος ότι έχει προμηθευθεί ακριβώς το σωστό κράμα, είτε από λάθος κατά την παρασκευή του κράματος που να μην εντόπισε ο ποιοτικός έλεγχος, είτε από άγνοια των εμπορευομένων, είτε από δικιά του παραδρομή, αλλά και λόγω του ότι οι ιδιότητες του κράματος δεν είναι συγκεκριμένες καθώς δεν είναι συνηθισμένο υλικό, υπάρχει πιθανότητα εκεί να οφείλεται η διαφορετική θερμοκρασία liquidus που δίνει η καμπύλη απόψυξης.

Στη βιβλιογραφία συναντάται επίσης :

$$T_{\text{solidus}} \approx 1000^{\circ}\text{C}$$

Παρατηρείται ότι στο πείραμα με καλούπι στους 740°C, το οποίο πλέον θα αναφέρεται ως πείραμα “1” (και αυτό των 620°C ως “2”) για συντομία στην έκφραση, εκτός από την ανεβασμένη T_{liquidus} έχει $T_{\text{solidus}} = 976^{\circ}\text{C}$, που απέχει σημαντικά από τους 998°C, που δίνεται και από το ProCast.

Αντιθέτως το πείραμα 2 επιτυγχάνει αμφοτέρως τις θερμοκρασίες που χρησιμοποιεί στα δεδομένα του το ProCast (998°C και 1059°C).

Σε τέτοιες μεταβολές σε μεγέθη που χαρακτηρίζονται καταστατικά, αφού υποδηλώνουν την κατάσταση του χυτού, και πάλι βασική επίδραση μπορεί να έχουν φαινόμενα μακροδιαφορισμού ή μικροδιαφορισμού. Αυτά τα φαινόμενα επηρεάζουν τις θερμοκρασίες liquidus και solidus καθώς αναφέρονται σε αλλαγές σύστασης λόγω των φαινομένων στερεοποίησης. Η επιρροή αυτή όμως είναι αισθητή κυρίως στις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Στις υψηλότερες είναι λιγότερο έντονα, αλλά η έντασή τους αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Επομένως αναμενόμενο να έχουμε μεγάλο εύρος τιμών για τη θερμοκρασία solidus. Δεν είναι τυχαίο πάντως που ακόμα και εξειδικευμένοι οργανισμοί δεν αποφαινούνται για τη θερμοκρασία solidus. Ίσως είναι

δύσκολος ο πειραματικός προσδιορισμός τους, μιλώντας τουλάχιστον για τριφασικά κράματα.

B. Στις καμπύλες τύπων

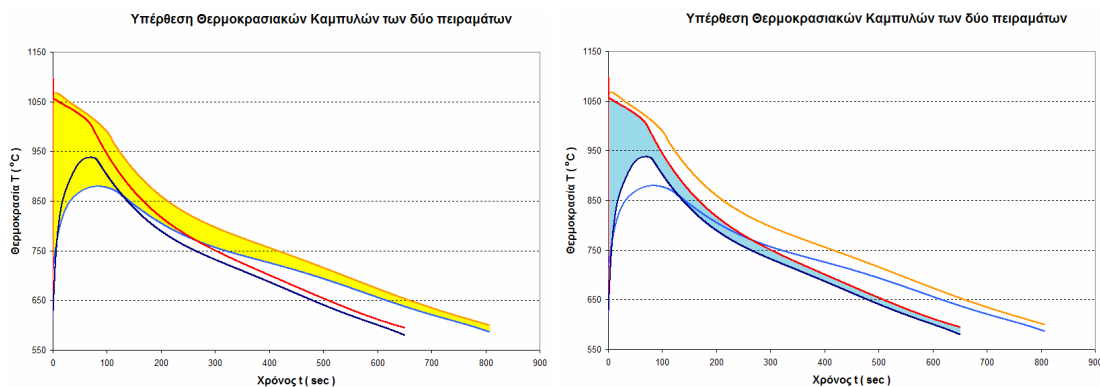
Παράμετρος \ Θερμοκρασία Καλουπιού	740°C	620°C	
Μέγιστη μετρηθείσα θερμοκρασία	879.6	938	°C
πραγματοποιείται στα	73.2	69.7	sec
Χρονική διάρκεια απόψυξης μέχρι τους 600 °C	805.8	633.5	sec

Από τον παραπάνω πίνακα βλέπει κανείς ότι το ψυχρό καλούπι ανέρχεται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία και σε συντομότερο χρονικό διάστημα. Αυτό μπορεί να έχει σχέση και με το επιτευχθέν βάθος του θερμοστοιχείου. Αλλά επειδή το αίτιο της θερμοροής είναι η θερμοκρασιακή διαφορά, γι'αυτό μπορεί η θερμοροή να έχει μεγαλύτερη τιμή η οποία θερμαίνει το γύψο και λόγω χαμηλής θερμοχωρητικότητας αυξάνεται γρήγορα η θερμοκρασία του.

Γ. Ανά πείραμα

Κρίνοντας παράλληλα τα δύο πειράματα διαπιστώνονται τα εξής :

1. Είναι εμφανώς μεγαλύτερο το εμβαδό ανάμεσα στις καμπύλες χυτού - καλουπιού που όπως έχει αναφερθεί και στη θερμική μελέτη επηρεάζει την τιμή του ΣΜΘ.

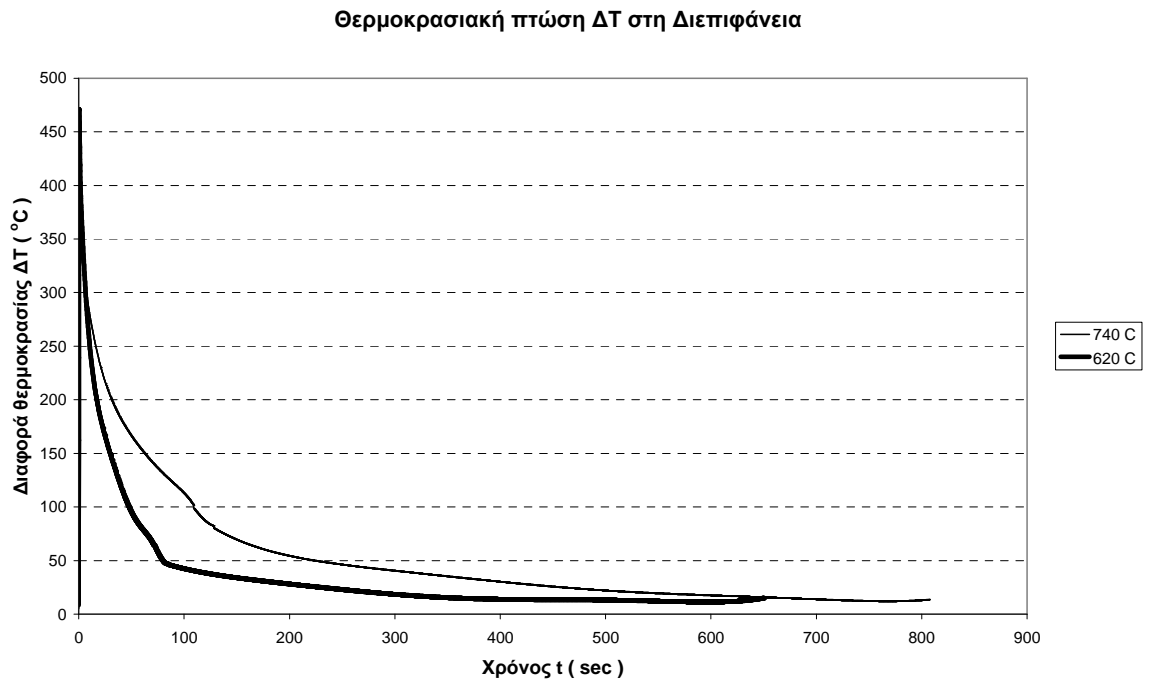


Σχ. 4.2 Εμβαδό μεταξύ των καμπύλων απόψυξης χυτού - καλουπιού στα πειράματα

Επειδή η αρχική και τελική θερμοκρασία του τήγατος-χυτού είναι η ίδια, από αυτό εκλύεται το ίδιο ποσό θερμότητας. Επομένως για αυτό το εύρος θερμοκρασιών

και με την παραδοχή ότι η θερμότητα διέρχεται εξολοκλήρου από τη διεπιφάνεια, ο μέσος ΣΜΘ θα είναι μεγαλύτερος στο πείραμα 2.

2. Στο πείραμα 2 η θερμοκρασιακή πτώση στη διεπιφάνεια πολύ σύντομα μειώνεται.



Σχ. 4.3 Θερμοκρασιακή πτώση στη διεπιφάνεια

Γενικά και στα δύο πειράματα έχουμε παρόμοια συμπεριφορά στις θερμοκρασιακές αλλαγές, με τη διαφορά ότι στο πείραμα 2, δηλαδή του ψυχρότερου καλουπιού, όλα συμβαίνουν σε μικρότερα χρονικά διαστήματα και με μεγαλύτερη ένταση (πιο απότομες καμπύλες).

4.3 Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΓΥΨΟΥ

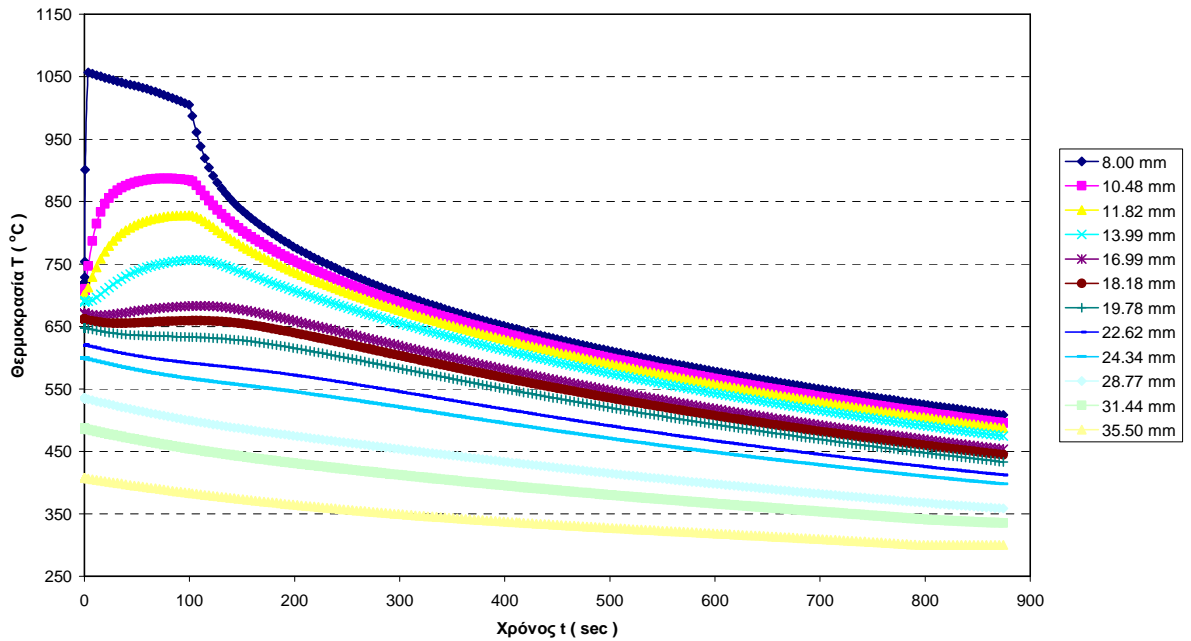
Πολύ σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του φαινομένου παίζει το υλικό του καλουπιού. Οι δύο σημαντικότερες ιδιότητές του, που συνεισφέρουν είναι η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα που διαθέτει. Η πρώτη δείχνει το ρυθμό με τον οποίο μπορεί να απάγει θερμότητα δια της μάζας του και η δεύτερη τη θερμότητα που μπορεί να αποθηκεύει εντός της μάζας του.

Ο γύψος όπως αναφέρθηκε έχει θερμική αγωγιμότητα 0.2637 W/m/K και θερμοχωρητικότητα 0.83736 kJ/kg/K (σύμφωνα με ProCast). Η μικρή λοιπόν θερμική αγωγιμότητα σημαίνει ότι δύσκολα απάγεται θερμότητα δια της μάζας του καλουπιού, ενώ η μικρή ειδική θερμοχωρητικότητα σημαίνει ότι δεν αποθηκεύεται μεγάλο ποσό θερμότητας στη μάζα του και επομένως σε μικρό χρονικό διάστημα συμβαίνουν σημαντικές θερμοκρασιακές αλλαγές.

Στην προκειμένη περίπτωση η σχετικά μεγάλη μάζα του καλουπιού σε σχέση με το μέγεθος του χυτού, οδηγεί σε αποθήκευση σεβαστού ποσού θερμότητας παρά τη μικρή θερμοχωρητικότητα.

Με μία τυχαία τιμή, αρκετά μεγάλη, ΣΜΘ έγινε προσομοίωση για να παρατηρηθεί η θερμική συμπεριφορά του γύψου.

Θερμοκρασιακό ιστορικό σημείων του καλουπιού σε διαφορετικές αποστάσεις από τον άξονά του



Σχ. 4.4 Θερμοκρασιακό ιστορικό σημείων του καλουπιού

Έτσι λοιπόν και από τις μετρήσεις αλλά και από παρατήρηση του προγράμματος προσομοίωσης και αποτυπώνοντας την εξέλιξη του θερμοκρασιακού ιστορικού σημείων που βρίσκονται στο ίδιο ύψος του μούφλου, αλλά σε διαφορετική ακτίνα, να σημειωθούν τα ακόλουθα :

1. Λόγω της θερμοχωρητικότητας το ποσό θερμότητας που θα διέλθει ανά μονάδα επιφάνειας από τα πιο απομακρυσμένα στρώματα του καλουπιού θα είναι ανάλογα με την απόσταση μικρότερο και θα διέλθει με σημαντική χρονική υστέρηση.

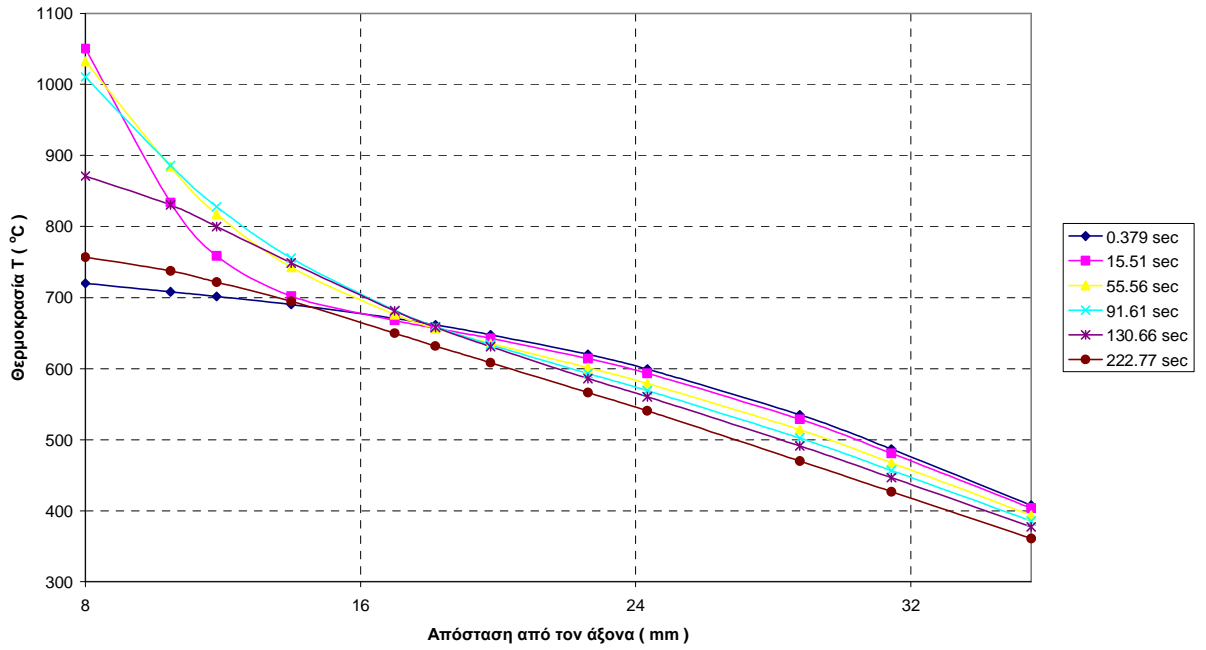
2. Είναι εμφανής η χρονική υστέρηση σε σχέση με τις πρώτες στιγμές της έγχυσης με την οποία παρουσιάζεται η ανώτατη θερμοκρασιακή τιμή στα εγγύτερα στρώματα γύψου που έχουν την τάση να αυξήσουν τη θερμοκρασία τους. Επιπλέον ακόμα και στα πολύ κοντινά, αρχικά η θερμοκρασία πάει να κινηθεί πτωτικά και στη συνέχεια αυξάνεται, ένδειξη και πάλι της ταχύτητας που χαρακτηρίζει το φαινόμενο η οποία είναι πεπερασμένη. Όχι ακαριαία.

3. Παρατηρείται ότι τα εξωτερικά στρώματα γύψου φαινομενικά δε θερμαίνονται γιατί συνεχώς αποψύχονται. Με αυτή την ένδειξη κάποιος θα μπορούσε να παρερμηνεύσει και να πει ότι θερμότητα που απελευθερώνεται από το χυτό δε φτάνει στα εξωτερικά στρώματα του καλουπιού. Αν όμως η χύτευση δεν πραγματοποιούνταν ο ρυθμός απόψυξης θα ήταν πολύ μεγαλύτερος στα εν λόγω στρώματα. Έπειτα τα εξωτερικά στρώματα είναι εκτεθειμένα στο περιβάλλον κι έτσι μπορεί να έχουμε συναγωγή με τυχόν υπάρχοντα αέρα και ακτινοβολία προς τα τοιχώματα του κάδου χύτευσης.

4. Βλέποντας τις ισοθερμοκρασιακές κατά την απόψυξη στην προσομοίωση, αυτές έχουν σχήμα ελλειψοειδές με τη μεγάλη διάσταση κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Το σχήμα λοιπόν των ισοθερμοκρασιακών και η ταχύτητα κίνησής τους, δείχνει ότι η ροή θερμότητας εμποδίζεται κατά τον οριζόντιο άξονα και διευκολύνεται κατά τον κατακόρυφο. Άρα μεγάλα ποσά θερμότητας διαφεύγουν κατά πάσα πιθανότητα και ανοδικά.

Στο σχήμα 4.5 αποτυπώθηκε και το θερμοκρασιακό προφίλ του γύψου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Φαίνεται εντονότερα ότι τα εγγύτερα στο χυτό στρώματα έχουν μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις (κυρίως στα πρώτα δευτερόλεπτα της χύτευσης), ενώ τα πιο απομακρυσμένα όχι. Το γεγονός αυτό, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, οδηγεί σε μία απότομη θερμοκρασιακή πτώση. Από εκεί που η θερμοκρασιακή πτώση ακτινικά έχει τα κοίλα προς τα κάτω, δημιουργείται μια περιοχή κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα του γύψου όπου τα κοίλα είναι προς τα πάνω. Η μορφή της καμπύλης σε αυτά τα δευτερόλεπτα είναι πολύ σημαντική για την εξέλιξη του φαινομένου και τον υπολογισμό της διερχόμενης από τη διεπιφάνεια θερμοροής.

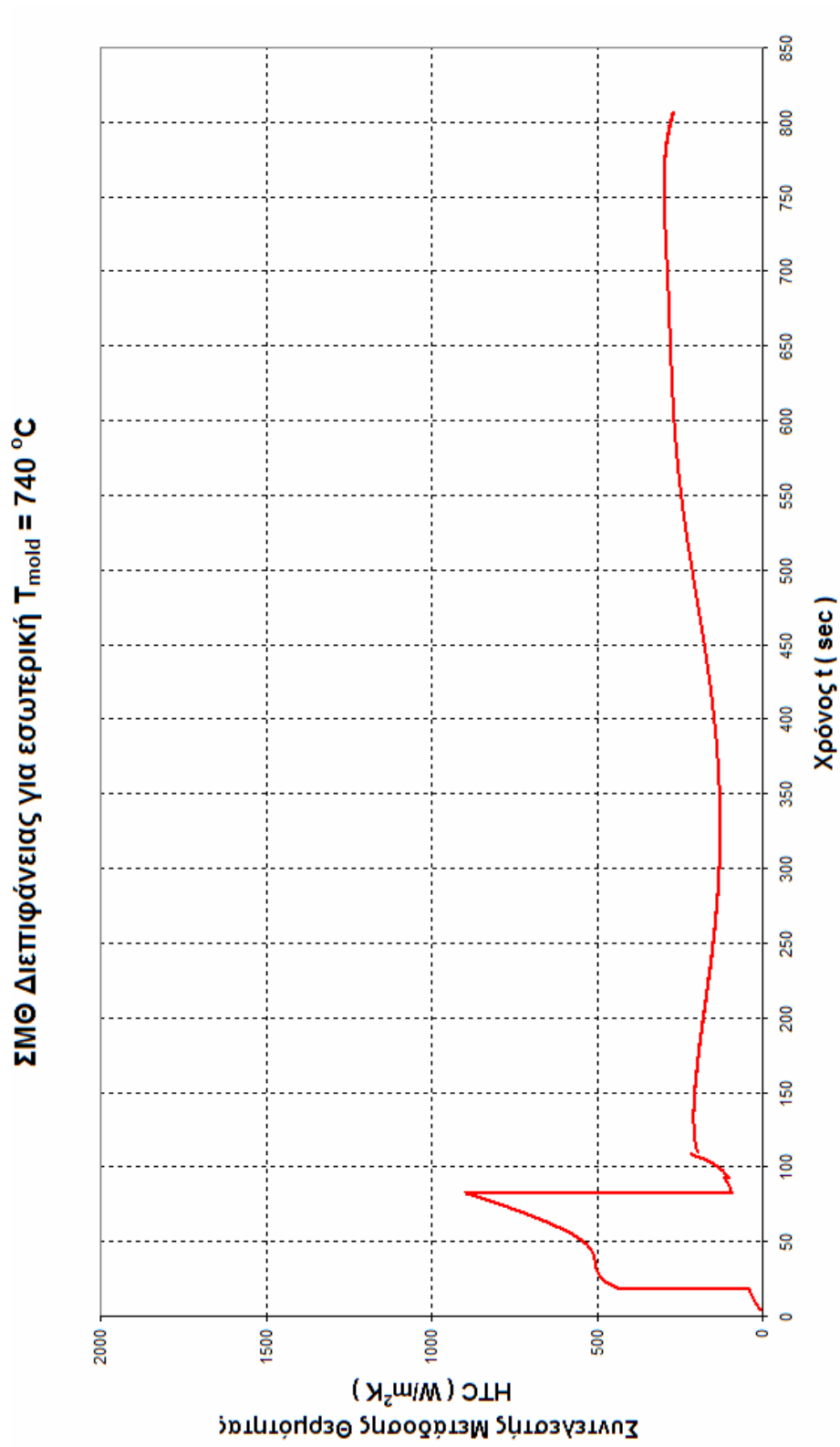
Θερμοκρασιακή κατανομή κατά το πάχος του γύψου σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές



Σχ. 4.5 Θερμοκρασιακό προφίλ του γύψου σε διάφορες χρονικές στιγμές

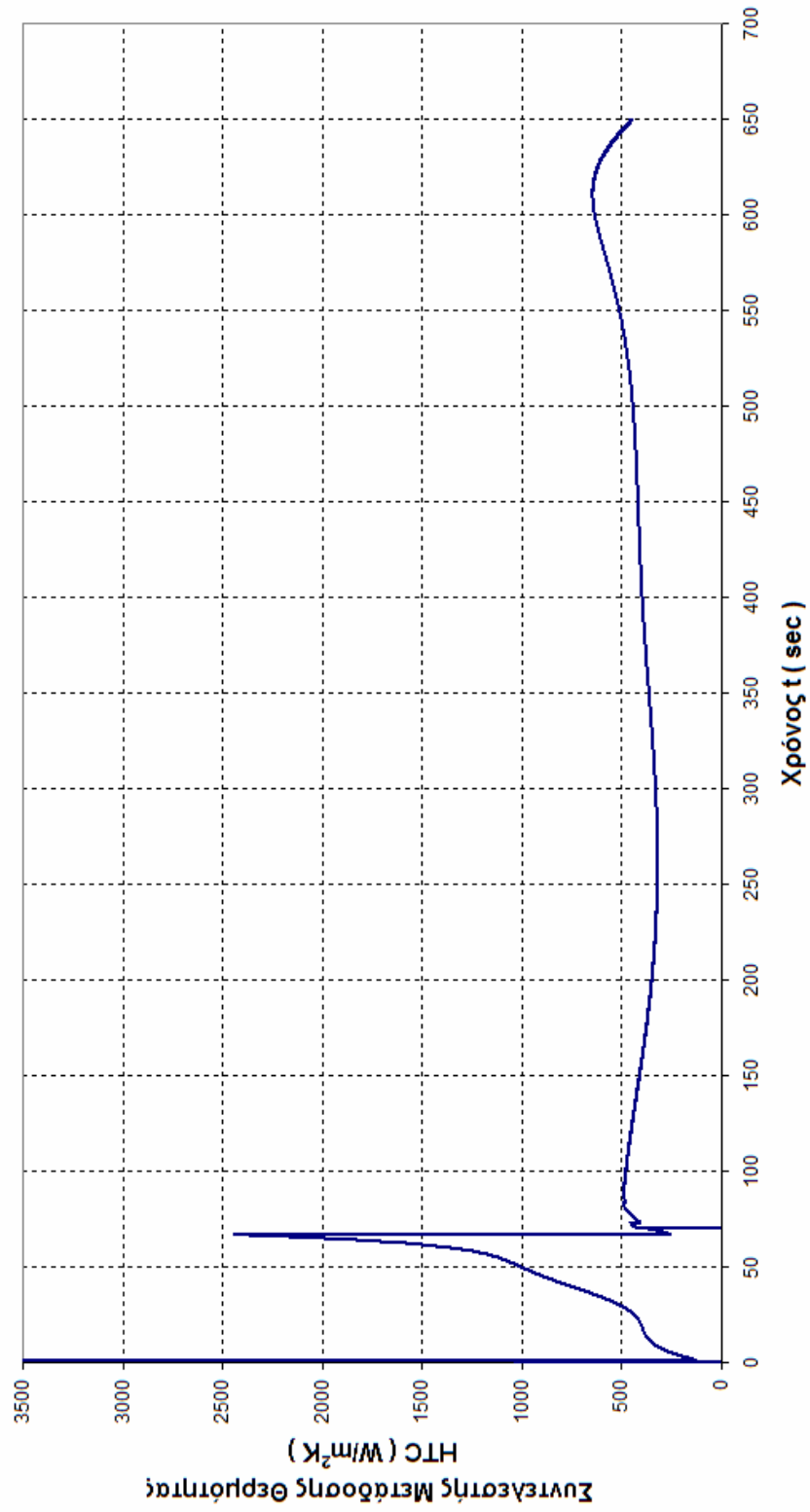
4.4 ΟΙ ΣΜΘ ΠΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΤΗΚΑΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΙΡΑΜΑ

4.4.1 ΣΜΘ στους 740 °C



4.4.1 ΣΜΘ στους 620 °C

ΣΜΘ Διεπιφάνειας για εσωτερική $T_{\text{mold}} = 620 \text{ } ^\circ\text{C}$



4.5 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΤΟΥ ΣΜΘ

Η μορφή των ΣΜΘ που προσδιορίστηκαν είναι ικανοποιητική από πλευράς ομοιότητας με προϋπάρχουσες μελέτες. Μπορεί να ειπωθεί ότι πληρούν χονδρικά τη γενική μορφή που ανεφέρθηκε για το ΣΜΘ. Παρουσιάζουν μία πρώτη περιοχή όπου ο ΣΜΘ αυξάνεται και φτάνει σε μέγιστη τιμή. Βέβαια η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται κατά το πέρας της στερεοποίησης, ενώ σε περισσότερες έρευνες η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται στην αρχή. Στη συνέχεια πέφτουν σε χαμηλές τιμές λόγω του κενού εκ συστολής και γενικά διατηρούνται σε αυτές τις χαμηλές τιμές αρχικά με καθοδική πορεία και μετά από ένα χρονικό διάστημα με ανοδική. Στο πείραμα που λήφθηκαν τιμές πάνω από τη liquidus βέβαια, έχουμε μέγιστη τιμή κατά την έγχυση από τη θερμοκρασία υπερθέρμανσης μέχρι την είσοδο στη διφασική περιοχή που ακαριαία αυξάνεται και ακαριαία πέφτει και ο ΣΜΘ πάλι ξεκινά να ανεβαίνει από χαμηλές τιμές. Αυτή θα μπορούσε να αποτελέσει μία ακόμα περιοχή της καμπύλης του ΣΜΘ.

Επομένως μιλάμε για 3 περιοχές του ΣΜΘ όπου η 3^η περιοχή μπορεί να χωριστεί σε δύο υποκατηγορίες :

1^η περιοχή : Κατά την έγχυση

2^η περιοχή : Κατά τη στερεοποίηση που εκλύεται λανθάνουσα θερμότητα

3^η περιοχή : Κατά την υπόλοιπη απόψυξη

A) καθοδική πορεία

B) ανοδική πορεία

4.5.1 Ερμηνεία του υπολογιζόμενου ΣΜΘ

Αρχικά το τήγμα πληροί όλη την κοιλότητα κι έχει διαστάσεις αυτές που έχει και το καλούπι μέχρι και τη στιγμή που πραγματοποιείται η στερεοποίηση του εξωτερικού φλοιού αυτού και σε βάθος ικανό να αντέξει στις επικρατούσες πιέσεις (θετικές ή αρνητικές, εσωτερικές ή εξωτερικές) του τήγματος . Μέχρι αυτό το σημείο, η επαφή του δοκιμίου (τήγματος) με το καλούπι είναι αδιαμφισβήτητη. Ο τρόπος μετάδοσης της θερμότητας μέσω της διεπιφάνειας, σ' αυτή την περίπτωση, γίνεται

κύρια με συναγωγιμότητα λόγω κίνησης των μορίων του τήγματος. Η βαθμιαία αύξηση του ΣΜΘ μέχρι τη στιγμή αυτή μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση της κινητικότητας των μορίων του τήγματος για δύο κυρίως λόγους:

A) Λόγω αύξησης της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του τήγματος και του στερεοποιημένου φλοιού του δοκιμίου και

B) Λόγω αλλαγής της πίεσης του τήγματος που οφείλεται στο διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής μεταξύ τήγματος και στερεοποιημένου φλοιού με την προϋπόθεση βέβαια ότι το θερμοστοιχείο του μετάλλου βρίσκεται ακόμη εντός του τήγματος και άρα ο φλοιός εντός της διεπιφάνειας (η διεπιφάνεια έχει πάντα ένα πεπερασμένο πάχος).

Όταν το θερμοστοιχείο του μετάλλου καλυφθεί από στερεοποιημένο μέταλλο παύει η συναγωγιμότητα των μορίων του τήγματος να συμμετέχει στο ΣΜΘ της διεπιφάνειας χυτού-καλουπιού (όπως γινόταν μέχρι εκείνη τη στιγμή) με αποτέλεσμα την απότομη πτώση του ΣΜΘ. Η συναγωγιμότητα βέβαια στη διεπιφάνεια τήγματος και στερεοποιημένου φλοιού συνεχίζει να υφίσταται χωρίς όμως να επηρεάζει τον ΣΜΘ της διεπιφάνειας χυτού-καλουπιού.

Από εκεί και πέρα, επειδή ο συντελεστής θερμικής διαστολής του μετάλλου είναι μεγαλύτερος του συντελεστή θερμικής διαστολής του καλουπιού, δηλαδή η συστολή του δοκιμίου είναι μεγαλύτερη αυτής του καλουπιού, έχει ως αποτέλεσμα να αποκολλάται το δοκίμιο από το καλούπι και να δημιουργείται διάκενο στη διεπιφάνεια, πράγμα που δικαιολογεί σχετικά μικρό και περίπου σταθερό ΣΜΘ. Ο τρόπος μετάδοσης της θερμότητας μέσω της διεπιφάνειας (δημιουργηθέν διάκενο) σ' αυτή τη φάση, γίνεται κύρια με ακτινοβολία αλλά και με συναγωγιμότητα λόγω των κινούμενων, εντός του διακένου, μορίων του αέρα που κατέλαβε το διάκενο μετά την αποκόλληση του χυτού από το καλούπι. Ο ΣΜΘ είναι μικρός σ' αυτή τη φάση διότι και η συναγωγιμότητα είναι μικρή, λόγω του πολύ μικρού πάχους του διακένου και επομένως της πολύ μικρής φυσικής κυκλοφορίας των λιγοστών (λόγω κενού) μορίων του αέρος εντός αυτού, αλλά και η ακτινοβολία δεν είναι μεγάλη λόγω της μικρής πλέον θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ αποκολληθείσας επιφάνειας χυτού και εσωτερικής επιφάνειας καλουπιού.

Επομένως ο προσδιορισμός του ΣΜΘ στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού κατά την περίοδο της στερεοποίησης και μέχρι αυτή να ολοκληρωθεί πλήρως, προσεγγίζεται,

αλλά δεν μπορεί να υπολογισθεί με ακρίβεια αν δε γνωρίζουμε το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του τριμερούς κράματος και ιδιαίτερα τις ισοθερμοκρασιακές Solidus. Τούτο αποδίδεται στο γεγονός ότι λόγω απόψυξης χωρίς ανάδευση, μέσω της εξωτερικής επιφάνειας του χυτού και διά του, χαμηλότερης θερμοκρασίας, καλουπιού, έχουμε έντονο το φαινόμενο του μακροδιαφορισμού με άγνωστη τη συγκέντρωση και επομένως τη θερμοκρασία πέρατος της στερεοποίησης στο εσωτερικό του δοκιμίου. Έτσι η θερμοροή που διέρχεται τη διεπιφάνεια, που εμπεριέχει και τη λανθάνουσα θερμότητα στερεοποίησης και βάσει της οποίας υπολογίζεται ο ΣΜΘ, δεν μπορεί να υπολογισθεί ικανοποιητικά ούτε να προσδιοριστεί η χρονική στιγμή πέρατος της στερεοποίησης του όλου χυτού.

4.5.2 Συγκριση με άλλες εργασίες

Η μορφή μοιάζει με τη μορφή στην οποία καταλήγουν οι Sun & Chao, οι οποίοι χρησιμοποίησαν ίδια μέθοδο υπολογισμού. Εκείνοι προσδιόρισαν το ΣΜΘ στη συνέχεια με αντίστροφη μέθοδο του Beck καταλήγοντας πάλι στην ίδια μορφή.

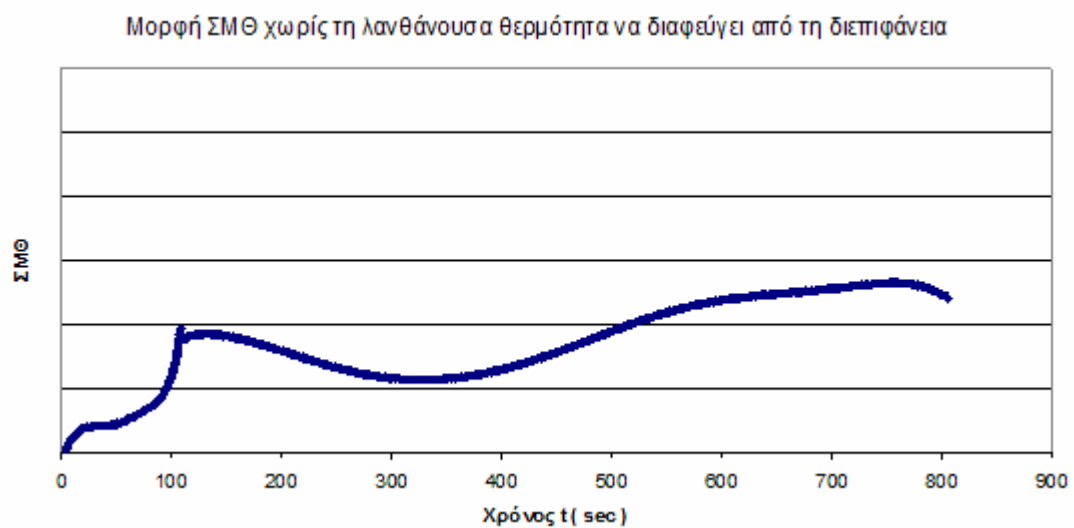
Με τη μελέτη που έκαναν κατάφεραν να μοντελοποιήσουν να αποδοθεί η λανθάνουσα θερμότητα καθ' όλη τη διάρκεια της στερεοποίησης όλης της μάζας του χυτού. Στην παρούσα μελέτη λόγω των παραδοχών η λανθάνουσα θερμότητα όλης της μάζας αποδίδεται με τη στερεοποίηση του φλοιού στον οποίο βρίσκεται το θερμοστοιχείο. Βέβαια δε γινόταν να τοποθετηθούν περαιτέρω θερμοστοιχεία σε τόσο μικρό δοκίμιο, διότι αυτά θα επηρέαζαν πλέον ακόμα περισσότερο το θερμοκρασιακό πεδίο και το ροή θερμότητας γύρω από την περιοχή τοποθέτησής τους. Με τα επιπλέον θερμοστοιχεία θα μπορούσε να γίνει η μελέτη της ταχύτητας κίνησης του μετώπου στερεοποίησης και να κατανεμηθεί χρονικά με ορθότερο τρόπο η λανθάνουσα θερμότητα. Τα αποτελέσματα που αναμένονταν κάνοντας αυτή τη μελέτη θα ήταν απάλειψη της απότομης γεωμετρίας του ΣΜΘ στο τέλος της στερεοποίησης και μικρότερη μέγιστη τιμή.

Η μέγιστη τιμή που πήραν για το ΣΜΘ πειράματος αλουμινίου 700°C σε άμμο ήταν 2500 W/m² °C.

Αναλογικά στην παρούσα μελέτη οι μέγιστες τιμές είναι αποδεκτές και ίσως και υπερτιμημένες, αλλά σε καμμία περίπτωση υποτιμημένες. Και άλλες εργασίες που

παρατέθηκαν στο θεωρητικό μέρος, για παρόμοια πειράματα χύτευσης ακριβείας δίνουν τιμές για αλουμίνιο και κράματά του ή για κράματα νικελίου περίπου σε αυτά τα επίπεδα ή μικρότερες. Συγκεκριμένα οι Konrad κ.ά. προσδιορίζουν μέγιστη τιμή ΣΜΘ περίπου στους 1400°C σε χύτευση ακριβείας στα 500 W/m²K.

Αρχικά στη μελέτη η λανθάνουσα θερμότητα είχε αγνοηθεί λόγω του ισχυρισμού ότι αυτή κατά τη στερεοποίηση κράματος, απορροφάται κατά μεγάλο ποσοστό από το υπόψυκτο υγρό. Η μορφή του ΣΜΘ προέκυψε όπως στο παρακάτω σχήμα.



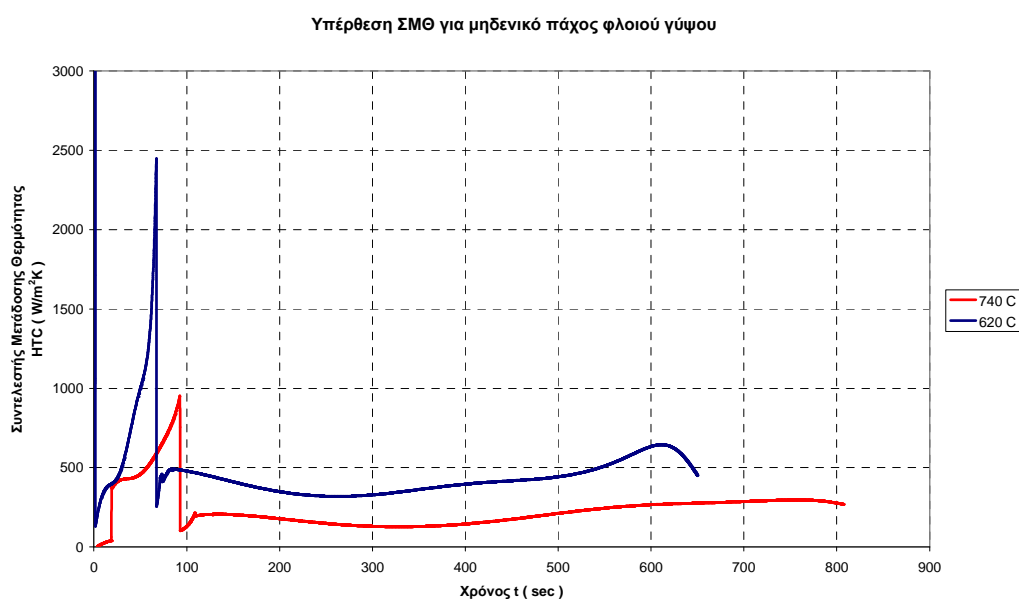
Η απότομη αύξηση του ΣΜΘ εντοπίζεται στο πέρας της στερεοποίησης του φλοιού που βρίσκεται το θερμοστοιχείο, διότι όπως προεγράφη, η κλίση της θερμοκρασιακής πτώσης του τήγματος σε εκείνο το σημείο αυξάνεται από τη σχετικά σταθερά μικρή κλίση του μεγαλύτερου χρονικού διαστήματος της στερεοποίησης πολύ έντονα.

Επιβάλλοντας στο μαθηματικό μοντέλο την έκλυση της λανθάνουσας θερμότητας, αυξήθηκε η πρώτη περιοχή που βρισκόταν πολύ χαμηλά και ο ΣΜΘ πήρε τη μορφή στην οποία και κατέληξε.

Όσον αφορά στην 3^η περιοχή η αυξομείωση του ΣΜΘ μπορεί να εξηγηθεί με τη συστολή – διαστολή χυτού καλουπιού και την κυκλοφορία του αέρα.

Σύγκριση ΣΜΘ των δύο πειραμάτων

Επιβλέποντας τους ΣΜΘ για άλλη μια φορά διαπιστώνουμε την ταχύτερη εξέλιξη των φαινομένων στο ψυχρότερο καλούπι. Η καμπύλη του πειράματος 2 σε σχέση με αυτή του 1 θα την χαρακτήριζε κανείς “κοντόχοντρη” κατά τον οριζόντιο άξονα των χρόνων, διότι εκτείνεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα και λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές. Ωστόσο η μορφή τους μοιάζει εξαιρετικά, γι’ αυτό και έγινε αυτή η παρομοίωση.



Σχ. 4.6 Συγκριτικό διάγραμμα ΣΜΘ

Το πείραμα 1 δεν παρουσιάζει την 1^η περιοχή (δηλ. της έγχυσης) και η μικρή αύξηση του ΣΜΘ μέχρι τα 18 sec περίπου, οφείλεται στην παρατήρηση που έγινε και στο σχολιασμό των καμπυλών απόψυξης ότι φαίνεται νωρίτερα το υλικό να μπαίνει στη διαφασική περιοχή. Η αύξηση επέρχεται με την επιβολή της λανθάνουσας θερμότητας στο χρονικό διάστημα που καθορίζεται από τις χρονικές στιγμές στις οποίες επιτυγχάνονται οι θερμοκρασίες Liquidus και Solidus.

Το πείραμα 2 παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές. Αυτό ίσως που προβληματίζει τον αναγνώστη είναι γιατί στην 3^η περιοχή έχουν τόσο διαφορά οι τιμές. Πέραν της πορείας απομάκρυνσης λόγω συστολής-διαστολής των σωμάτων, που θα αναπτυχθεί σε επόμενη παράγραφο, υπάρχει και η παράμετρος της διαφοράς θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια η οποία ποσοτικοποιείται μαθηματικά .

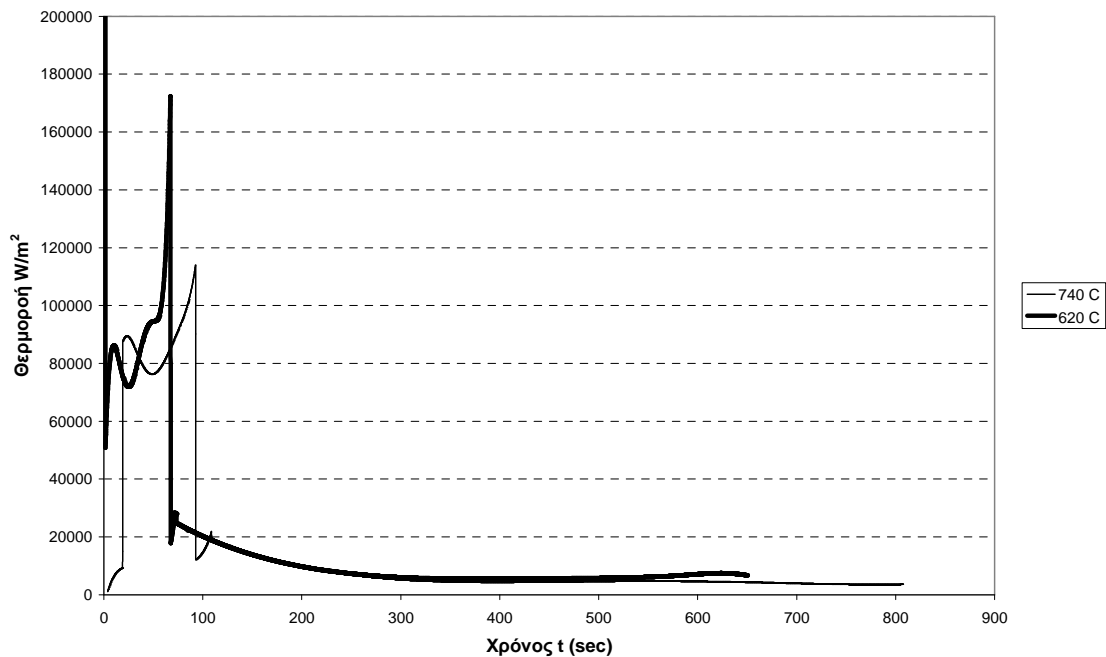
Όπως φαίνεται στην απλοποιημένη σχέση (χωρίς φιλμ γύψου),

$$HTC = \frac{\rho_M D_M \cdot [H_M(t_0) - H_M(t_1)]}{4 \int_{t_0}^{t_1} (T_M - T_\Gamma) dt}$$

Οι τιμές του ΣΜΘ εξαρτώνται άμεσα από την τιμή του ολοκληρώματος στον παρονομαστή, που στο πείραμα 1 εν γένει είναι μεγαλύτερο απ'ότι στο πείραμα 2, με αποτέλεσμα τη μείωση της τιμής του κλάσματος και άρα του ΣΜΘ.

4.6 Η ΘΕΡΜΟΡΟΗ ΣΤΑ ΔΥΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι θερμοροές που προκύπτουν ως το γινόμενο του ΣΜΘ με τη θερμοκρασιακή διαφορά στη διεπιφάνεια.



Σχ. 4.7 Η θερμοροή των δύο πειραμάτων συναρτήσει του χρόνου

Για να φτάσει το χυτό από τη θερμοκρασία των 1111°C σε αυτή των 600°C αποβάλλει προφανώς ίδιο ποσο θερμότητας αφού αυτό εξαρτάται από τη διαφορά της ενθαλπίας στις δύο αυτές θερμοκρασίες. Έτσι το εμβαδό κάτω από τις καμπύλες θερμοροής που εκφράζει τη θερμότητα που αποβάλλεται ανά μονάδα επιφάνειας θα πρέπει να είναι το ίδιο, αφού η θερμοκρασίες έγχυσης και πέρατος λήψης θερμοκρασιών είναι ίδιες.

$$Q = \int \dot{Q} \cdot dt$$

Πάλι από εφαρμογή στο πρόγραμμα Excel γίνεται αυτός ο υπολογισμός του εμβαδού.

Για το πείραμα 1 προκύπτει η τιμή 123011275 J/m²

Για το πείραμα 2 προκύπτει η τιμή 132577215 J/m²

Η διαφορά τους είναι 9565940 J/m^2 και η απόκλισή τους σαν σφάλμα βάσει του μέσου όρου τους είναι :

$$\frac{9565940}{\frac{123011275 + 132577215}{2}} = 0.0749 = 7.49\%$$

Στην απόκλιση αυτή περιλαμβάνονται :

- α) Διαφορετική μέγιστη θερμοκρασία και ουσιαστικά διαφορετικές απώλειες κατά την επαφή με τα τοιχώματα στον κορμό
- β) Αφαίρεση ακραίων τιμών λόγω της ελαφρώς μη συνεχούς προσέγγισης των θερμοκρασιακών καμπυλών

4.7 ΥΠΟΘΕΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΕΜΒΑΔΟ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΟΥ ΣΜΘ

Κατά τη διερεύνηση με τη μέθοδο trial and error παρατηρήθηκαν για συντελεστές ίδιας τάξης μεγέθους πάρα πολύ μικρές απόκλισεις στις καμπύλες απόψυξης μεταξύ τους (όχι με την πειραματική). Επίσης εξετάστηκε αν επιβληθεί αρχικά μικρός ΣΜΘ και αργότερα μεγαλύτερος αν θα καλύψει το έλλειμμα απαγωγής θερμότητας των πρώτων χρονικών στιγμών. Συνακόλουθα οι διάφοροι μελετητές, που έγινε αναφορά και στο θεωρητικό μέρος, δίνουν πολλές φορές στα αποτελέσματά τους διαφορετικές μορφές συντελεστή μεταξύ τους. Οι περισσότεροι παρουσιάζουν μια μέγιστη τιμή στην έγχυση και μετά ο ΣΜΘ κινείται πτωτικά με διαφορετικούς τρόπους. Σε άλλους διατηρείται σε μικρότερη τιμή από τους προηγούμενους για ένα μεγάλο μέρος της στερεοποίησης και μετά πάλι πέφτει. Και τέλος όπως και στην παρούσα εργασία παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή στο πέρας της στερεοποίησης. Μπορεί να αποκλείσουν κάποιες από αυτές; Μπορούν να θεωρούνται όλες σωστές;

Οι προβληματισμοί αυτοί σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου, οδήγησαν στη διερεύνηση του εμβαδού κάτω από την καμπύλη του ΣΜΘ με χρήση του προγράμματος προσομοίωσης. Οι συνθήκες ήταν οι ίδιες του πειράματος 2.

Η ποσότητα

$$\int_0^{t_s} HTC \cdot dt$$

έχει μονάδες J/m^2K .

όπου : χρόνος 0 θεωρείται η έναρξη της έγχυσης

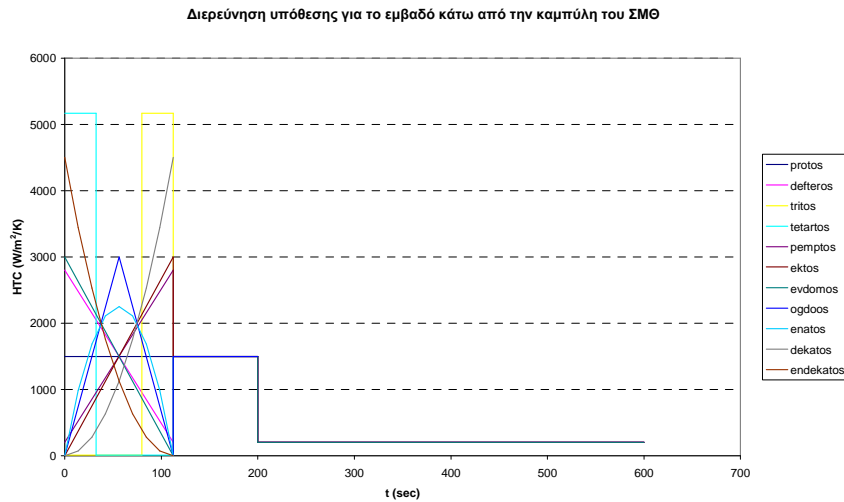
Εκφράζει τη θερμότητα που διαπερνά τη διεπιφάνεια στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο και με τη δεδομένη θερμική αντίσταση θεωρώντας 1 βαθμό K θερμοκρασιακή διαφορά εκατέρωθεν της διεπιφάνειας.

Επιλέχθηκε το πείραμα 2 (καλούπι 620 °C) και επεβλήθη μια μορφή συντελεστή με δύο περιοχές τιμών.

Από 0-200sec : 1500 W/m^2K και

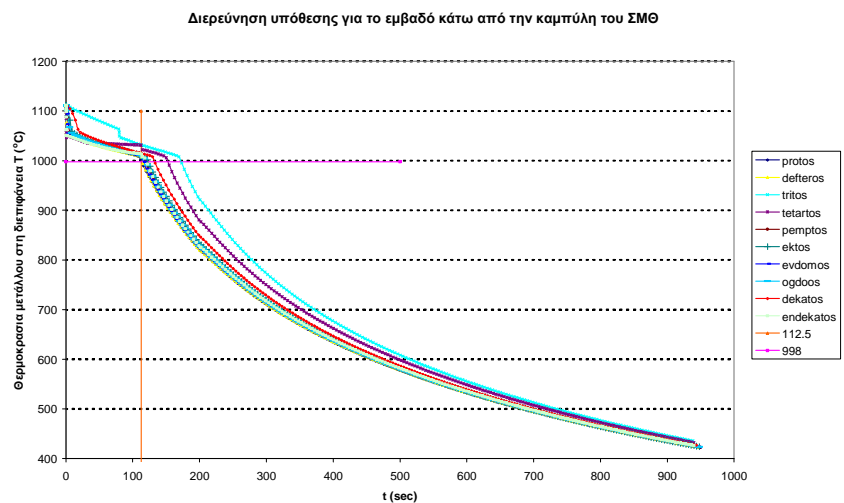
Από 200-600sec : 200 W/m^2K .

Έγινε προσομοίωση και εντοπίστηκε ο χρόνος περάτωσης της στερεοποίησης στα 112.5sec. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν συντελεστες που άλλαζαν μορφή μέχρι τα 112.5sec διατηρώντας ίδιο εμβαδό με τον αρχικό κάτω από την καμπύλη και από εκεί και πέρα ακολουθούσαν ακριβώς τη μορφή αυτού (σχήμα 4.8).



Σχ. 4.8 ΣΜΘ διαφορετικής μορφής αλλά ίδιου εμβαδού

Οι καμπύλες απόψυξης ενός σημείου στη διεπιφάνεια παρουσιάζονται στο σχήμα 4.9. Παρατηρείται ότι εκτός από τρεις ΣΜΘ, οι υπόλοιποι επιτυγχάνουν το πέρας στερεοποίησης σε ένα εύρος 10 sec. Από 112.5 – 122 sec. Οι τρεις που ξεφεύγουν από αυτό το χρονικό εύρος είναι αυτοί που έχουν αρχικά πολύ μικρή τιμή και απότομα ανεβαίνουν σε πολύ υψηλή τιμή ή αντιστρόφως και ένας που ξεκινά από μηδενική τιμή, αυξάνεται ομαλά, αλλά σχετικά αργά.

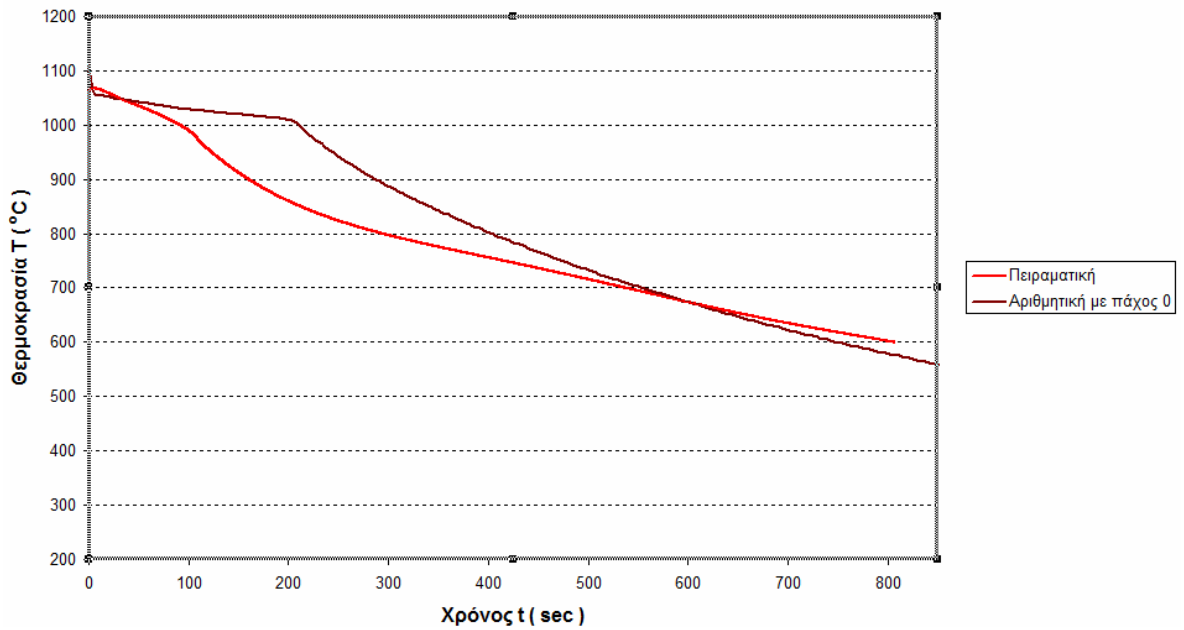


Σχ. 4.9 Αποψύξεις βάσει των επιβληθέντων ΣΜΘ

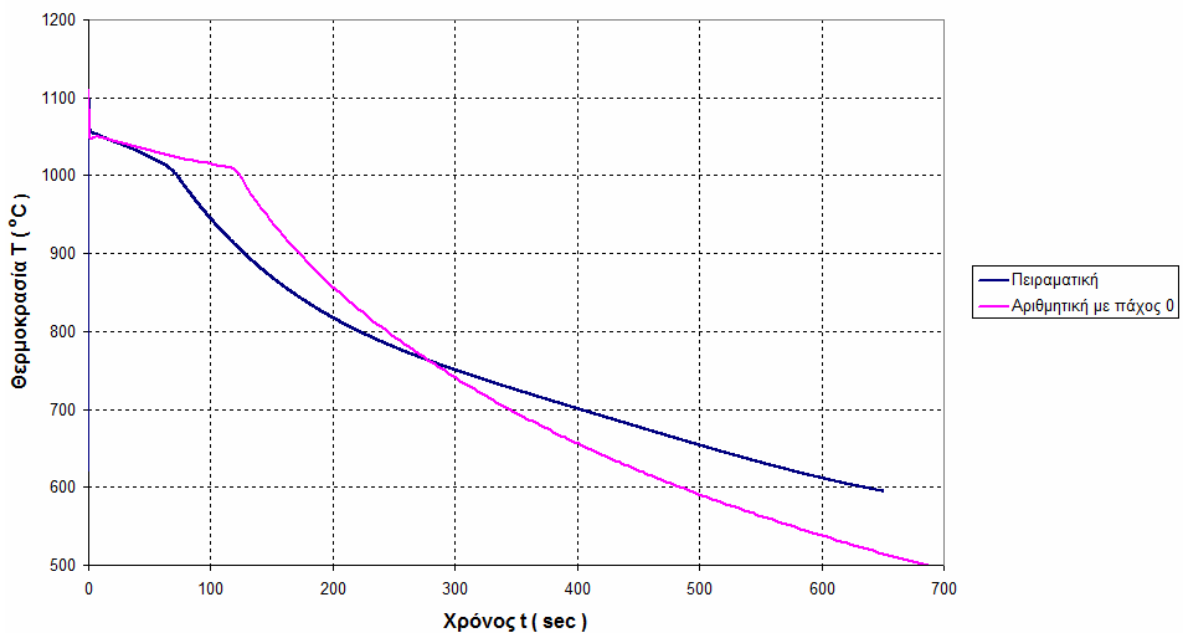
Ακόμα βέβαια και οι ΣΜΘ που συγκλίνουν στο χρόνο στερεοποίησης, του χυτού έχουν διαφορετικό αποτέλεσμα στη μορφή της θερμοκρασιακής καμπύλης στη διεπιφάνεια από τη μεριά του γύψου. Σκοπός επομένως είναι να επιτυγχάνεται σύγκλιση αποτελεσμάτων και στις δύο καμπύλες αν θέλουμε να καταλήξουμε στην εγκυρότητα κάποιου συντελεστή, από τη στιγμή που υπάρχει εμπιστοσύνη ότι το λογισμικό μπορεί να αναπαράγει πιστά το πείραμα που μελετάται.

4.8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟΥΣ ΕΥΡΕΘΕΝΤΕΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

Προσομοίωση 740 °C



Προσομοίωση 620°C



Δυστυχώς όπως διαπιστώνουμε οι αριθμητικές καμπύλες απέχουν αρκετά από τις πειραματικές. Δεν επιβεβαιώνονται επομένως τα αποτελέσματα από το λογισμικό προσομοίωσης. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο παλαιότερης εργασίας το οποίο είχε κριθεί ορθό. Δε σημαίνει ότι οι συντελεστές είναι λανθασμένοι απαραίτητα, αφού όπως

ειπώθηκε η μορφή τους είναι αποδεκτή. Όσον αφορά στο θέμα των τιμών δεν μπορεί να ειπωθεί κάτι με σιγουριά. Η αλήθεια είναι ότι επιχειρήθηκαν αυτές οι προσομοιώσεις με αρκετά μεγάλους συντελεστές και η περιοχή στερεοποίησης δεν συνέκλινε. Συγκεκριμένα με ΣΜΘ τάξεως εκατομμυρίου W/m^2K η αριθμητική καμπύλη παρουσίαζε τέλος στερεοποίησης 20 δευτερόλεπτα αργότερα από την πειραματική.

Για την απόκλιση των αποτελεσμάτων μπορεί να ευθύνονται διαφορές στις πραγματικές ιδιότητες των υλικών και σε αυτές που χρησιμοποιούνται είτε για την επίλυση της θερμικής μελέτης που καταστρώθηκε είτε του θερμικού μοντέλου του ProCast.

4.9 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ

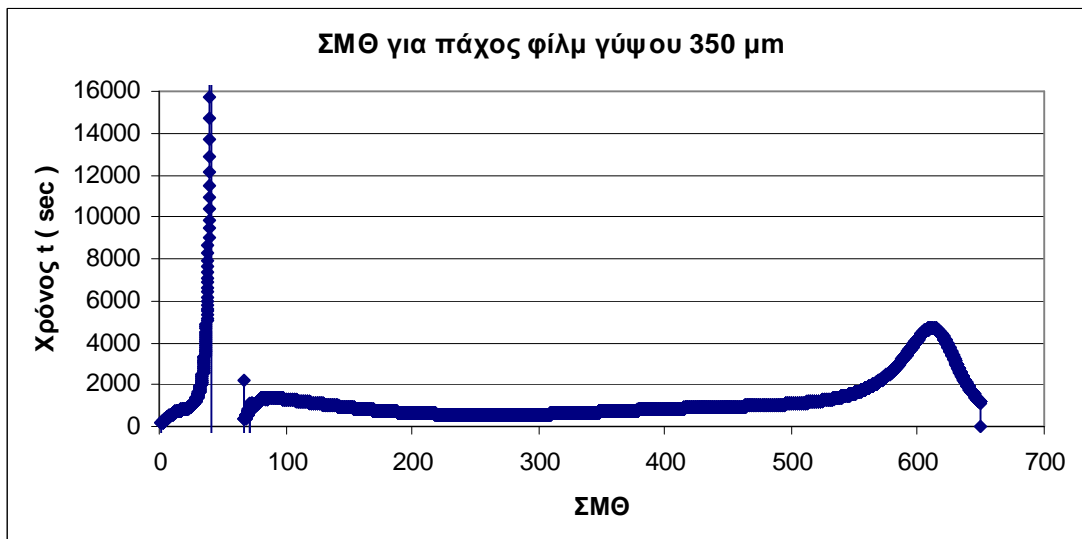
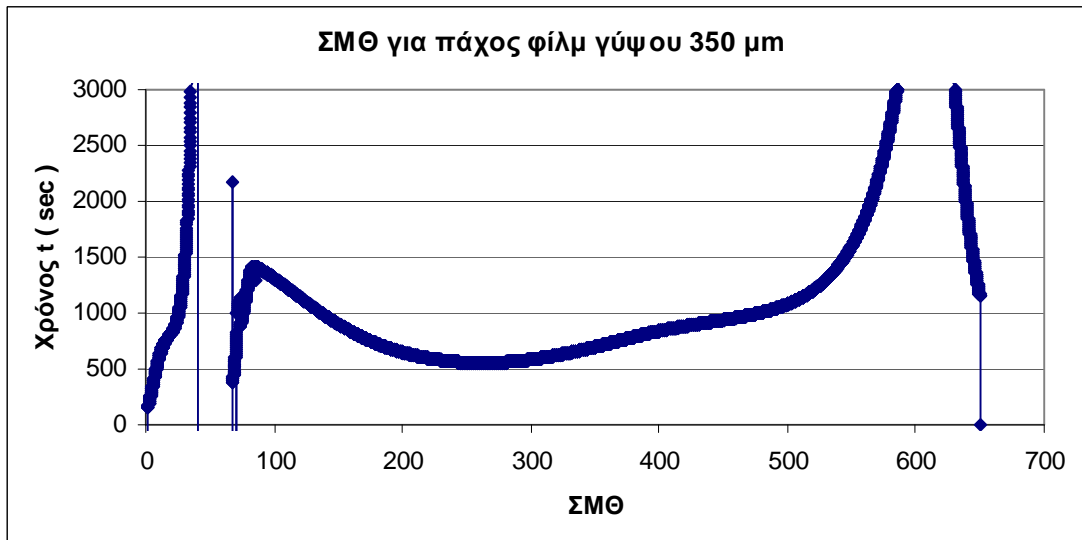
Στο μαθηματικό μοντέλο εισήχθη η έννοια του φίλμ του γύψου. Και αυτό διότι ο ΣΜΘ όπως αποδείχθηκε και από τα προαναφερθέντα εξαρτάται από τη θερμοκρασιακή πτώση στη διεπιφάνεια. Επίσης στην παράγραφο τη σχετική με τη θερμική συμπεριφορά του γύψου που γίνεται με τυχαία προσομοίωση αποδεικνύεται πόσο έντονα αλλάζει η θερμοκρασία στα εγγύτερα στη διεπιφάνεια στρώματα γύψου. Τοιουτοτρόπως αναμενόταν να γίνει εφικτό να συνυπολογιστεί η θερμοκρασιακή πτώση από τη διεπιφάνεια μέχρι το στρώμα στο οποίο βρισκόταν το θερμοστοιχείο.

Στους υπολογισμούς που γίνονται στο Excel καταφέρνουμε μεταβάλλοντας το πάχος του φίλμ γύψου να αλλάζουν οι τιμές του ΣΜΘ. Τελικά όμως δεν είναι αποδοτικό το τέχνασμα.

Γίνεται ο υπολογισμός αρχικά για μηδενικό πάχος γύψου. Μεταβάλλοντας το πάχος του γύψου σε εύρος από 0 – 0.9mm, ναι μεν οι τιμές του ΣΜΘ αλλάζουν, αλλά όχι ανάλογα σε όλη την έκτασή του. Οι αλλαγές προσδιορίζονται στο πέρας της στερεοποίησης και στο πέρας του πειράματος. Για μικρές τιμές πάχους αλλάζει κυρίως η μέγιστη τιμή του ΣΜΘ στο τέλος της στερεοποίησης και αμβλύνεται η καμπυλότητα στο τέλος του πειράματος. Αυξάνοντας περισσότερο το πάχος, η καμπύλη πέφτει σε αρνητικές τιμές προς το τέλος της στερεοποίησης και η άμβλυνση στο τέλος του πειράματος είναι εντονότερη. Αυτό διότι κάποια ποσά ενέργειας μεγαλώνουν σε σχέση με άλλα.

Η επιθυμητή αλλαγή που αναμενόταν θα ήταν αύξηση των τιμών στην πρώτη περιοχή και αμυδρή αύξηση των τιμών μετά τη στερεοποίηση. Το διάκενο που δημιουργείται μετά τη στερεοποίηση ναι μεν αλλάζει με την πάροδο του χρόνου αλλά όχι τόσο ώστε να επιφέρει τόσο σημαντικές αλλαγές στη μορφή του ΣΜΘ.

Παρατίθεται τυπικό παράδειγμα της καμπύλης για το πείραμα 2 σε πάχος φίλμ γύψου 350μm :



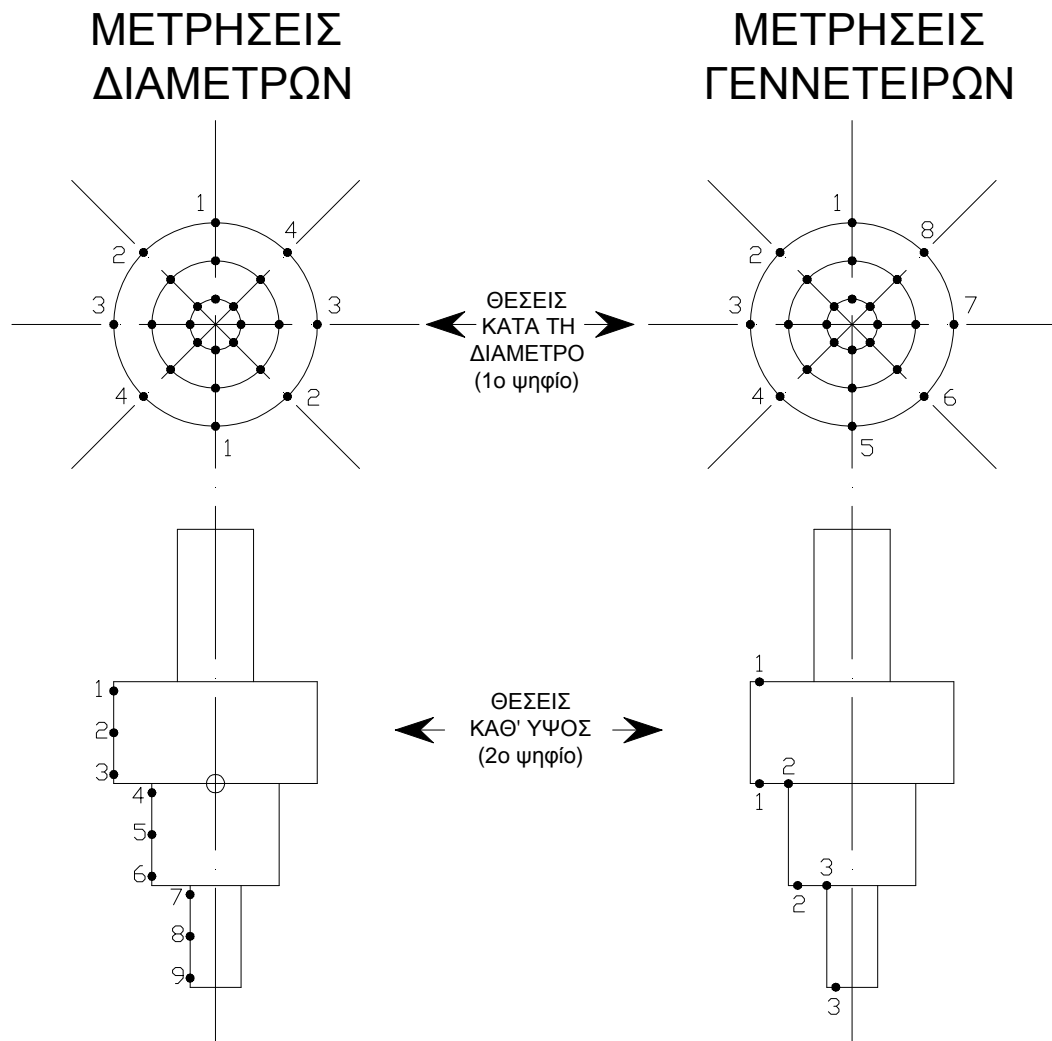
Σχ. 4.10 Μεταβολή του ΣΜΘ με πάχος φίλμ γύψου 350μm σε δύο κλίμακες μεγέθους

Μπορεί να μην ευθύνεται αυτή καθ' αυτή η κατάστροση των εξισώσεων, αλλά να έχει σημαντική επίδραση επ' αυτής κάποια από τις παραδοχές που έγιναν στους υπολογισμούς. Πάντως η επιθυμητή βελτιστοποίηση που αναμενόταν δεν κατέστη επιτυχής.

4.10 ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΧΥΤΩΝ

4.10.1 Αποτελέσματα μετρήσεων

Μετρήθηκαν οι διάμετροι του δοκιμίου σε τέσσερα διαφορετικά σημεία διαφέροντα κατά 45° μεταξύ τους και σε τρία διαφορετικά ύψη (εγκάρσιες τομές) καθεμιάς από τις τρεις χαρακτηριστικές κυλινδρικές του επιφάνειες καθώς και τα μέσα ύψη (γενέτειρες) καθεμιάς απ' αυτές τις κυλινδρικές επιφάνειες. (βλέπε σχήμα και αντίστοιχους πίνακες τιμών) για να εξεταστούν οι αποκλίσεις από τις ονομαστικές διαστάσεις. Έτσι προσδιορίστηκε το ποσοστό απόκλισής τους για να δοθεί η δυνατότητα προσδιορισμού των ακριβών διαστάσεων του καλουπιού προκειμένου το χυτό να έχει, με μεγάλη σχετικά ακρίβεια, τις απαιτούμενες διαστάσεις μετά την απόψυξή του σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (βέλτιστος σχεδιασμός).



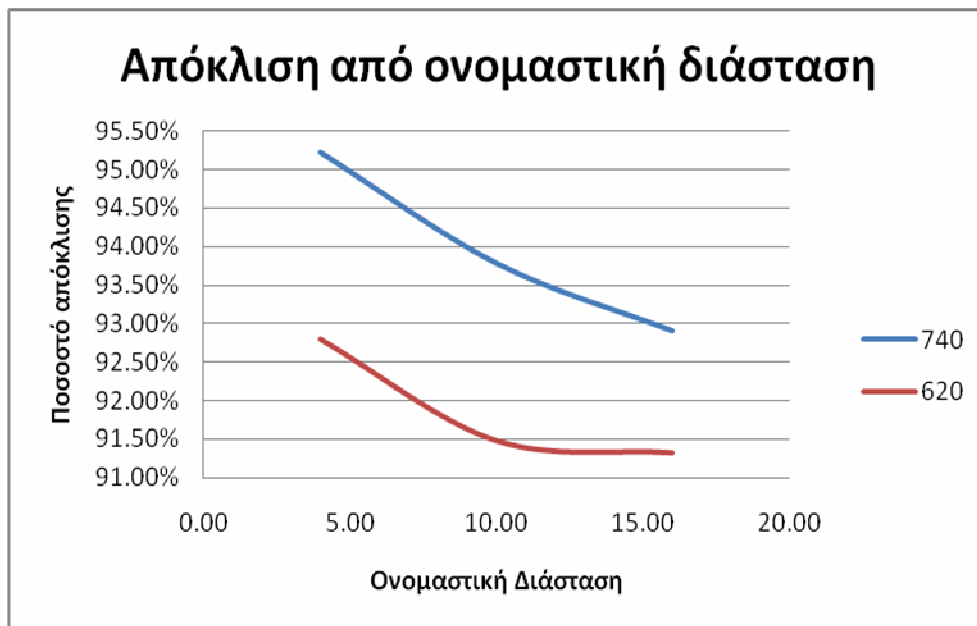
Σχ. 4.11 Σημεία που έγιναν οι μετρήσεις διαστάσεων και αρίθμηση τους

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΑΜΕΤΡΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

ΘΕΣΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΙΜΗ	ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ 740 °C			ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ 620 °C		
		ΜΕΤΡΗΣΙΑ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΙΜΩΝ	ΜΕΤΡΗΣΙΑ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΙΜΩΝ
11	16.00	14.76	14.79	92.45%	14.61	14.53	90.83%
21	16.00	14.80			14.56		
31	16.00	14.89			14.66		
41	16.00	14.72			14.30		
12	16.00	14.74	14.93	93.31%	14.61	14.65	91.53%
22	16.00	15.00			14.61		
32	16.00	14.99			14.76		
42	16.00	14.99			14.60		
13	16.00	14.72	14.87	92.94%	14.63	14.66	91.59%
23	16.00	14.89			14.46		
33	16.00	14.97			14.82		
43	16.00	14.90			14.71		
14	10.00	9.55	9.47	94.65%	9.00	9.13	91.28%
24	10.00	9.49			9.20		
34	10.00	9.52			9.20		
44	10.00	9.30			9.11		
15	10.00	9.18	9.28	92.80%	9.01	9.17	91.73%
25	10.00	9.27			9.16		
35	10.00	9.34			9.32		
45	10.00	9.33			9.20		
16	10.00	9.36	9.39	93.90%	9.05	9.14	91.43%
26	10.00	9.46			9.14		
36	10.00	9.40			9.26		
46	10.00	9.34			9.12		
17	4.00	3.86	3.88	96.94%	3.65	3.69	92.19%
27	4.00	4.00			3.72		
37	4.00	3.81			3.69		
47	4.00	3.84			3.69		
18	4.00	3.67	3.73	93.31%	3.66	3.70	92.56%
28	4.00	3.80			3.74		
38	4.00	3.77			3.72		
48	4.00	3.69			3.69		
19	4.00	3.80	3.82	95.44%	3.72	3.75	93.63%
29	4.00	3.91			3.77		
39	4.00	3.83			3.74		
49	4.00	3.73			3.75		

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΕΝΝΕΤΕΙΡΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

ΘΕΣΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΙΜΗ	ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ 740 °C			ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ 620 °C		
		ΜΕΤΡΗΣΙΜΑ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΙΜΩΝ	ΜΕΤΡΗΣΙΜΑ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΙΜΩΝ
11	8.00	7.59	7.49	93.64%	7.71	7.64	95.44%
21	8.00	7.59			7.59		
31	8.00	7.35			7.80		
41	8.00	7.38			7.97		
51	8.00	7.35			7.37		
61	8.00	7.59			7.52		
71	8.00	7.53			7.53		
81	8.00	7.55			7.59		
12	8.00	7.20	7.32	91.50%	7.11	7.11	88.88%
22	8.00	7.37			7.05		
32	8.00	7.17			7.05		
42	8.00	7.41			7.11		
52	8.00	7.35			7.08		
62	8.00	7.46			7.02		
72	8.00	7.25			7.11		
82	8.00	7.35			7.35		
13	8.00	7.13	7.19	89.81%	7.50	7.39	92.33%
23	8.00	7.20			7.44		
33	8.00	7.20			7.25		
43	8.00	7.17			7.35		
53	8.00	7.16			7.30		
63	8.00	7.09			7.38		
73	8.00	7.27			7.38		
83	8.00	7.26			7.49		



Σχ. 4.12 Ποσοστό απόκλισης από την ονομαστική διάσταση για τις μετρήσεις διαμέτρων

Αναμενόμενο ήταν ότι η θερμοκρασία του καλουπιού επηρέασε σημαντικά τις διαστάσεις του δοκιμίου και ιδιαίτερα τις διαμέτρους του. Τα ύψη των κυλινδρικών επιφανειών επηρεάστηκαν και αυτά, αλλά οι μετρήσεις δεν είναι ποσοτικά αντιπροσωπευτικές, επειδή η μέτρησή τους είναι δυσκολότερη λόγω των σφαλμάτων μέτρησης που οφείλονται στις μικρές διαστάσεις των δοκιμίων σε συνδυασμό με τον τρόπο που μετρήθηκαν αυτές (χρήση της ουράς του παχυμέτρου).

Οι πίνακες και το διάγραμμα φανερώνουν ότι η απόκλιση είναι μεγαλύτερη στο πείραμα με θερμοκρασία καλουπιού τους 620 °C. Η ποσοστιαία απόκλιση των μετρηθέντων διαστάσεων συναρτήσει των ονομαστικών και αρχικών διαστάσεων, για κάθε πείραμα ξεχωριστά, δεν παρουσίασε μεγάλες διαφορές, όπως αυτή παρουσίασε σε σύγκριση των δύο πειραμάτων μαζί, συναρτήσει της θερμοκρασίας προθέρμανσης του καλουπιού, πράγμα που δικαιολογείται απόλυτα με το φαινόμενο της συστολής του δοκιμίου.

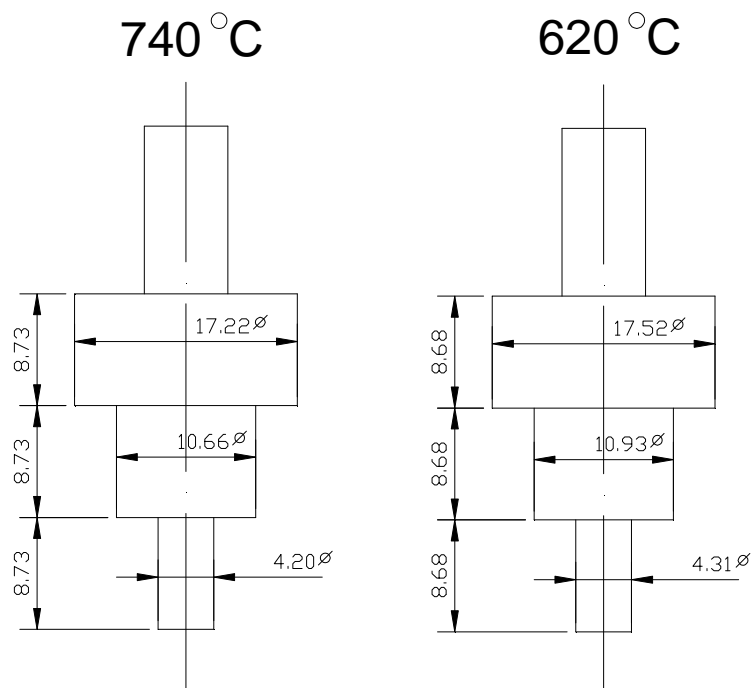
Συγκεκριμένα, η συστολή του δοκιμίου, κατά διεύθυνση παράλληλη προς κάθε άξονα, είναι ανάλογη προς τις αρχικές διαστάσεις του (παράλληλες αυτού του άξονα) και της θερμοκρασιακής μείωσης. Η θερμοκρασιακή μείωση είναι βασικά συνάρτηση της αρχικής (μετά τη στερεοποίηση) θερμοκρασίας του δοκιμίου, αφού η τελική θερμοκρασία είναι σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Όσον αφορά στις τελικές διαστάσεις του δοκιμίου, αυτές θα είναι τόσο μεγαλύτερες όσο μεγαλύτερες είναι οι αρχικές του διαστάσεις κατά τη στιγμή της στερεοποίησης του εξωτερικού φλοιού που γίνεται στην ίδια περίπου θερμοκρασία μετάλλου σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά σε διαφορετική θερμοκρασία καλουπιού. Αυτό συνεπάγεται και διαφορετικές διαστάσεις καλουπιού (λόγω διαστολής του), ανάλογα με τη θερμοκρασία προθέρμανσής του. Έτσι δικαιολογούνται οι μεγαλύτερες διαστάσεις (άρα και οι μικρότερες αποκλίσεις από τις ονομαστικές) του δοκιμίου στο πείραμα με την προθέρμανση του καλουπιού στη θερμοκρασία των 740 °C έναντι αυτών που μετρήθηκαν στο πείραμα με την προθέρμανση του καλουπιού στη θερμοκρασία των 620 °C. Τα δύο καλούπια ήταν κατασκευασμένα με τις ίδιες αρχικές διαστάσεις.

4.10.2 Βέλτιστος αρχικός σχεδιασμός

Τα στοιχεία των ανωτέρω πινάκων με τις ποσοστιαίες αποκλίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντίστροφα για τον υπολογισμό των ακριβών διαστάσεων του καλουπιού προκειμένου το χυτό να έχει με μεγάλη σχετικά ακρίβεια τις διαστάσεις του αρχικού προτύπου.

Έτσι για προθέρμανση καλουπιού στους 740 °C και στους 620 °C το καλούπι πρέπει να κατασκευασθεί με τις αναγραφόμενες στο παρακάτω σχήμα διαστάσεις.



Σχ. 4.13 Αρχικές διαστάσεις καλουπιού σε mm για επίτευξη των ονομαστικών διαστάσεων του προτύπου

4.11 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΛΟΙΠΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Πέραν των πειραμάτων τα οποία παρουσιάστηκαν ως εδώ να σημειωθεί ότι πραγματοποιήθηκε μεγάλος αριθμός πειραμάτων, άλλα εκ των οποίων δεν κατέστησαν επιτυχή και άλλα εκ των οποίων τελικά κρίθηκαν αδύνατα επεξεργάσιμα με τον τρόπο που παρουσιάστηκε.

Σε τρία εκ των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν με διαφορετικές συνθήκες [βαρύτητα, κενό(0.03bar), υπερπίεση – κενό(1.5bar -0.03bar)] έγινε λείανση και στίλβωση και παρατήρηση στο στερεοσκόπιο. Εκτός των πιέσεων οι αρχικές θερμοκρασιακές συνθήκες ήταν ίδιες, ήτοι θερμοκρασία τήγματος 1110°C και θερμοκρασία καλουπιού 730°C.

Το αντιδραστήριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν διάλυμα τριχλωριούχου σιδήρου με σύσταση που αναφέρθηκε και στο πειραματικό μέρος :

5gr FeCl₃, 100ml H₂O, 5ml HCl

Φωτογραφίες Χυτών Τεμαχίων

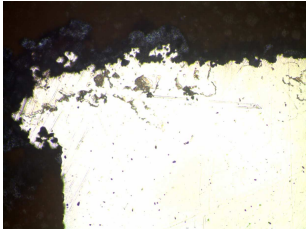


Εικ. 4.1 Χυτό δοκίμιο αλπακά, μετά από χύτευση κενού

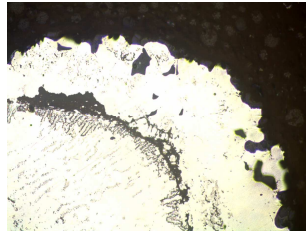


Εικ. 4.2 Χυτό δοκίμιο αλπακά, μετά από χύτευση κενού με υπερπίεση

Ατέλειες



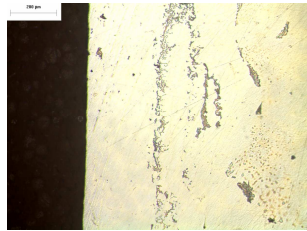
Εικ. 4.3 Ατέλεια στο χυτό από χύτευση βαρύτητας, στο πάνω άκρο της μικρής διαμέτρου.



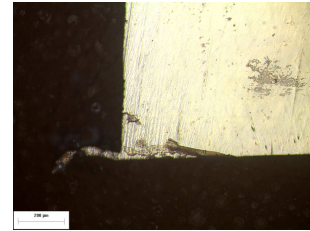
Εικ. 4.4 Ατέλεια στο χυτό από χύτευση βαρύτητας στην ακμή της μεσαίας διαμέτρου. Πολύ άσχημη ποιότητα επιφάνειας.



Εικ. 4.5 Μία επιφανειακή και μία εσωτερική ατέλεια στην ακμή της μεγάλης διαμέτρου του χυτού βαρύτητας.



Εικ. 4.6 Μακροδιακενώσεις κάτω από την επιφάνεια του χυτού, στο κατακόρυφο τοίχωμα της μεγάλης διαμέτρου.

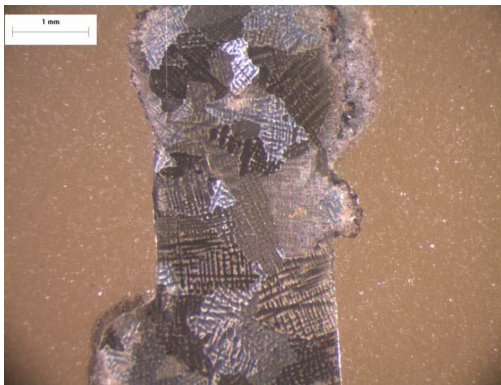


Εικ. 4.7 Το τήγμα έχει αναγκάσει το γύψο να υποχωρήσει. Υποδεικνύει ατελή κύκλο ψησίματος του καλουπιού ή λάθος θερμοκρασία.

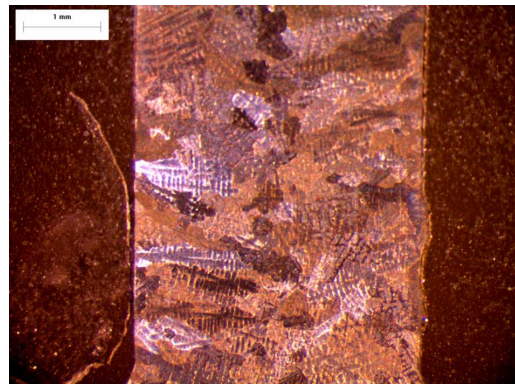
4.11.1 Μακροσκοπική Παρατήρηση στο Στερεοσκόπιο

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται εικόνες από τη μακροσκοπική παρατήρηση τριών χαρακτηριστικών δοκιμίων στο στερεοσκόπιο. Τα δοκίμια αυτά έχουν προκύψει από χύτευση με την ίδια θερμοκρασία καλουπιού (730°C) και την ίδια αρχική θερμοκρασία τήγματος (1110°C). Αυτό που είναι διαφορετικό στις τρεις περιπτώσεις είναι οι συνθήκες πίεσης. Μελετάται ένα δοκίμιο που κατασκευάστηκε με χύτευση βαρύτητας, ένα δοκίμιο που χυτεύθηκε εν κενώ, και ένα δοκίμιο που κατασκευάστηκε με χύτευση κενού με χρήση υπερπίεσης (+0.5bar) αμέσως μετά την έγχυση του τήγματος.

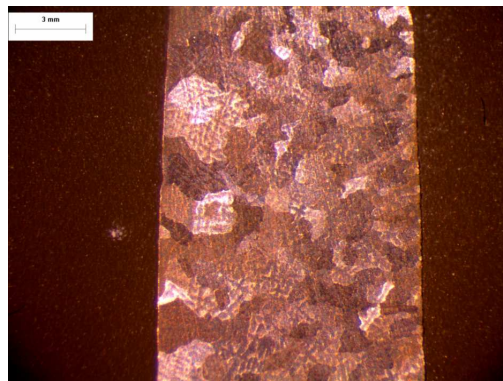
Στην περίπτωση χύτευσης του αλπακά σε γύψινο καλούπι παρατηρούνται ευμεγέθεις κόκκοι. Αυτό σημαίνει χονδρόκοκκη μικροδομή που αναπτύσσεται όταν η στερεοποίηση γίνεται με αργό ρυθμό και επιφέρει μειωμένες μηχανικές ιδιότητες.



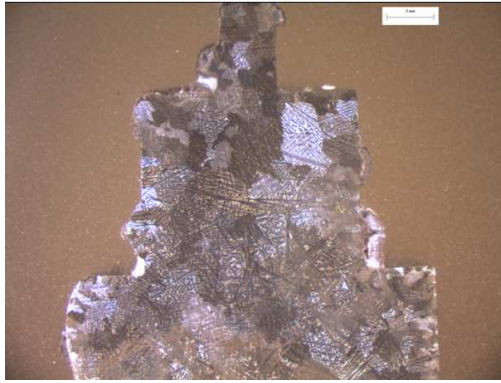
Εικ. 4.8. Χύτευση Βαρύτητας, μικρή διατομή.



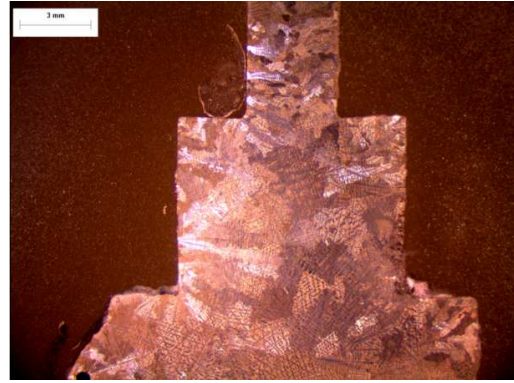
Εικ. 4.9. Χύτευση Κενού, μικρή διατομή.



Εικ. 4.10. Χύτευση Κενού με Υπερπίεση, μικρή διατομή.



Εικ. 4.11. Χύτευση Βαρύτητας, μεσαία διατομή.



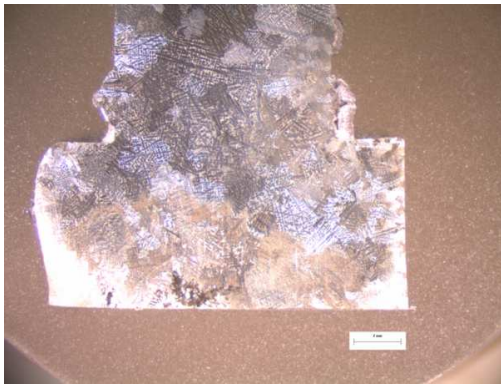
Εικ. 4.12. Χύτευση Κενού, μεσαία διατομή.



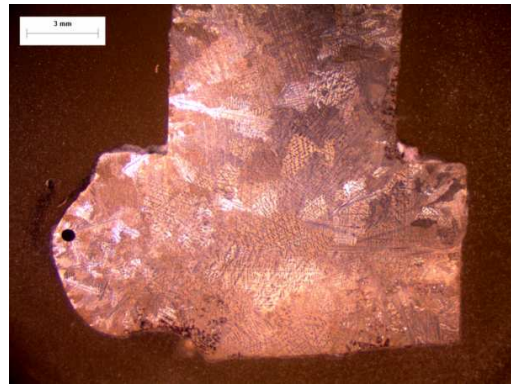
Εικ. 4.13. Χύτευση Κενού με Υπερπίεση, μεσαία διατομή.

Στις εικόνες 4.8 - 4.16 παρουσιάζεται η μικροδομή του αλακά, όπως προκύπτει από μακροσκοπική παρατήρηση των τριών εξεταζόμενων χαρακτηριστικών δοκιμίων (χύτευση βαρύτητας, χύτευση κενού, χύτευση κενού με υπερπίεση). Πιο συγκεκριμένα, στις εικόνες 4.8 - 4.10 φαίνεται η μικροδομή των χυτών στη μικρή διατομή, στις εικόνες 4.11 - 4.13 φαίνεται η μικροδομή στη μεσαία διατομή και οι εικόνες 4.14 - 4.16 αφορούν στη μεγάλη διατομή των χυτών. Ο φακός που χρησιμοποιήθηκε στο στερεοσκόπιο για να ληφθούν οι φωτογραφίες παρουσιάζει τα αντικείμενα 0.63 φορές το πραγματικό τους μέγεθος. 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, γεγονός που δηλώνει 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.

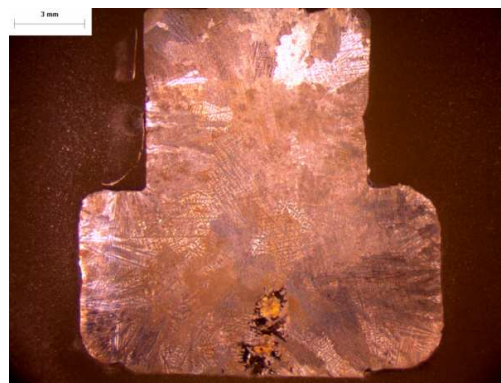
Μία τελευταία παρατήρηση που θα μπορούσε να γίνει από τις εικόνες που έχουν ληφθεί από το στερεοσκόπιο, αφορά στην δημιουργία μακροδιακένωσης στη μεγάλη διατομή. Λόγω κακού σχεδιασμού τροφοδοσίας μετάλλου (τροφοδοσία γίνεται από τη βάση της μεγάλης διαμέτρου), και σε άλλες μελέτες παρατηρείται μακροδιακένωση στη βάση της μεγάλης διατομής, λίγο πάνω από το σημείο ένωσής της με τον κορμό. Προκύπτει από τις εικόνες 4.14-4.16 ότι στη χύτευση κενού η μακροδιακένωση αυτή δεν υπάρχει. Στη χύτευση βαρύτητας υπάρχει η ατέλεια αυτή, αλλά είναι περιορισμένη σε σχέση με την περίπτωση κενού με υπερπίεση. Στην πρώτη περίπτωση έχει αναπτυχθεί παράλληλα με το τοίχωμα της βάσης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η ατέλεια έχει αναπτυχθεί κάθετα σε αυτό.



Εικ. 4.14. Χύτευση Βαρύτητας, μεγάλη διατομή.



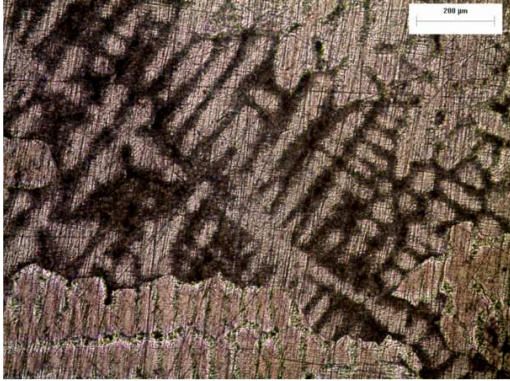
Εικ. 4.15. Χύτευση Κενού, μεγάλη διατομή.



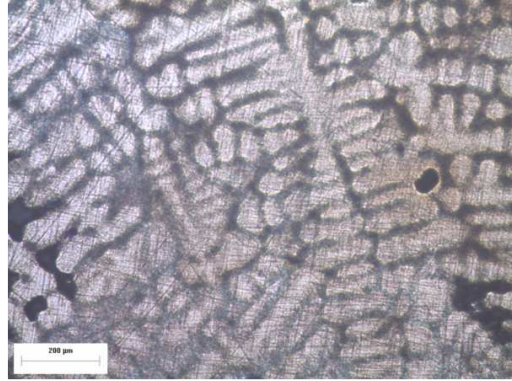
Εικ. 4.16. Χύτευση Κενού με Υπερπίεση, μεγάλη διατομή.

Τέλος, στις εικόνες 4.17-4.25 παρουσιάζεται η μικροδομή των δοκιμίων αλπακά, όπως αυτή προκύπτει από παρατήρηση σε μικροσκόπιο. Η ανάπτυξη των δενδριτών φαίνεται

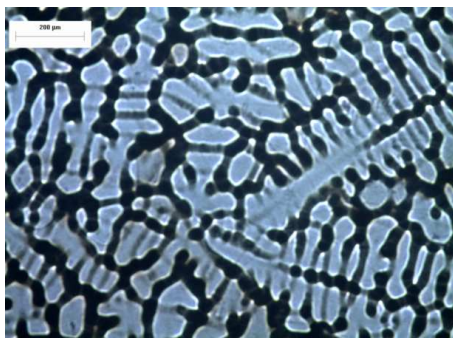
ξεκάθαρα. Παρατηρούμε ότι η ανάπτυξη των κλάδων σταματά στη γειτονιά των ορίων των κόκκων.



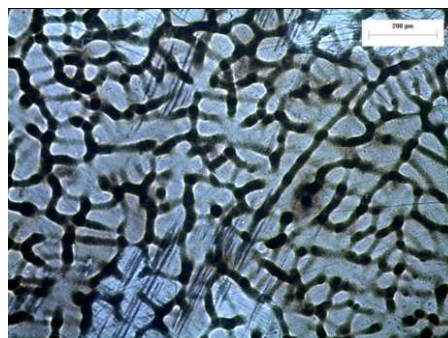
Εικ. 4.17. Χύτευση Κενού με Υπερπίεση, μεγάλη διατομή, x10.



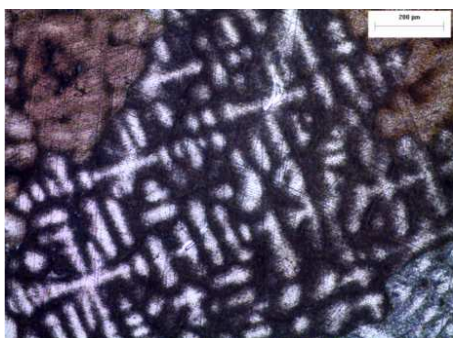
Εικ. 4.18. Χύτευση Κενού, μεγάλη διατομή, x10.



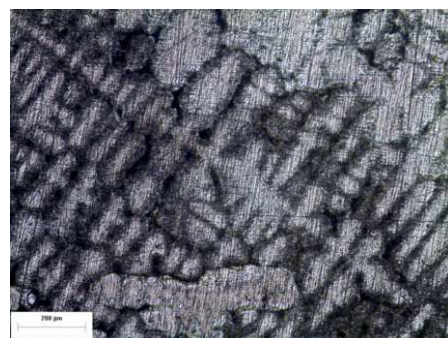
Εικ. 4.19. Χύτευση Βαρύτητας, μεγάλη διατομή, x10.



Εικ. 4.20. Χύτευση Κενού με Βαρύτητα, μεσαία διατομή, x10.



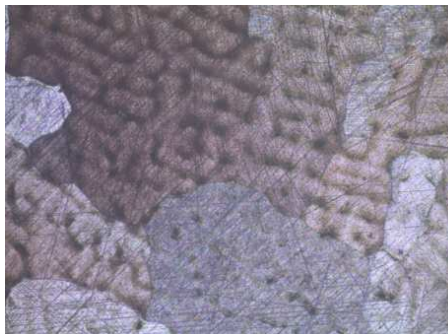
Εικ. 4.21. Χύτευση Κενού, μεσαία διατομή, x10.



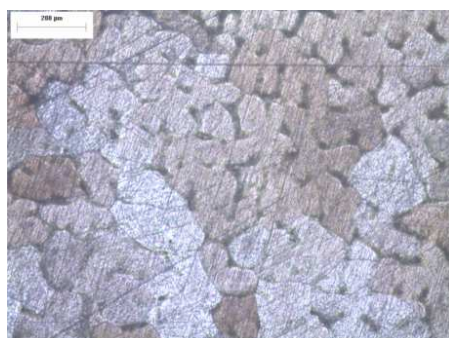
Εικ. 4.22. Χύτευση Κενού με Υπερπίεση, μεσαία διατομή, x10.



Εικ. 4.23. Χύτευση Βαρύτητας, μικρή διατομή, x10.



Εικ. 4.24. Χύτευση Κενού, μικρή διατομή, x10.



Εικ. 4.25. Χύτευση Κενού με Υπερπίεση, μικρή διατομή, x10.

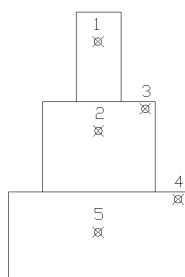
4.11.2 Μέτρηση Πορώδους

Η ύπαρξη πόρων είναι χαρακτηριστικό με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην κατασκευή κοσμημάτων, λόγω της επίδρασής του στην εμφάνιση αλλά και την αντοχή των παραγόμενων τεμαχίων.

Η μέτρηση του πορώδους πραγματοποιήθηκε για τρία χαρακτηριστικά χυτά τεμάχια. Η χύτευση των τριών αυτών τεμαχίων πραγματοποιήθηκε με την ίδια αρχική θερμοκρασία τήγματος (1110°C) και την ίδια θερμοκρασία καλουπιού (740°C), ώστε να καθίσταται δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της πίεσης (χύτευση βαρύτητας – χύτευση κενού – χύτευση κενού με υπερπίεση) κατά τη χύτευση στην εμφάνιση πορώδους.

Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του πορώδους είναι φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο, με φακό μεγέθυνσης x10, κατόπιν προετοιμασίας του δοκιμίου με λείανση και στίλβωση, αλλά χωρίς χημική προσβολή. Το άσπρο χρώμα είναι το μέταλλο βάσης και με μαύρο χρώμα το πορώδες. Οι εικόνες αυτές ελήφθησαν για πέντε σημεία του κάθε χυτού, αυτά που φαίνονται στο σχήμα 4.14.

Χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί ανάλυση εικόνας με το πρόγραμμα “Image Pro Plus” ώστε να ποσοτικοποιηθεί η ύπαρξη πόρων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ήταν το ποσοστό του εμβαδού που καλύπτουν οι πόροι ως προς το συνολικό εμβαδόν της εικόνας, η τιμή του εμβαδού του μεγαλύτερου εμφανιζόμενου πόρου σε κάθε εικόνα, η μέση τιμή του εμβαδού των πόρων της εικόνας και η τυπική απόκλιση. Αξίζει να σημειωθεί, στο σημείο αυτό, ότι οι εικόνες που ελήφθησαν ήταν χαρακτηριστικές της εκάστοτε μελετώμενης περιοχής.



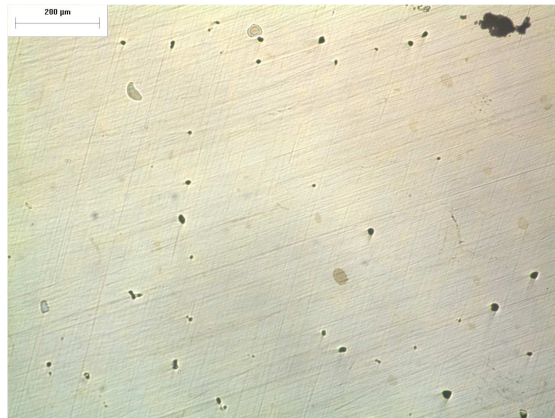
Σχ. 4.14. Σημεία πάνω στη διατομή του χυτού, από τα οποία ελήφθησαν φωτογραφίες και πραγματοποιήθηκε μέτρηση πορώδους.



Εικ. 4.26. Χύτευση Βαρύτητας, σημείο 1.



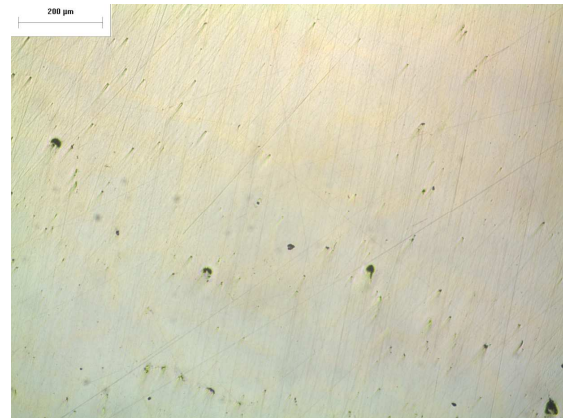
Εικ. 4.27. Χύτευση Κενού, σημείο 1.



Εικ. 4.28. Χύτευση με Υπερπίεση, σημείο 1.



Εικ. 4.29. Χύτευση Βαρύτητας, σημείο 2.



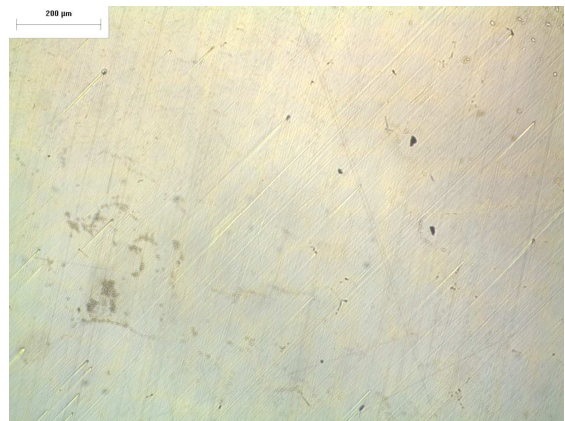
Εικ. 4.30. Χύτευση Κενού, σημείο 2.



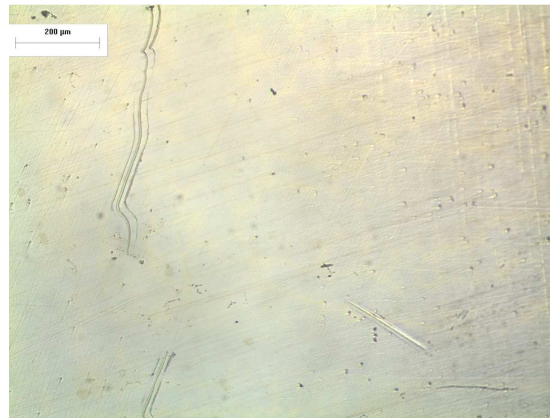
Εικ. 4.311. Χύτευση με Υπερπίεση, σημείο 2.



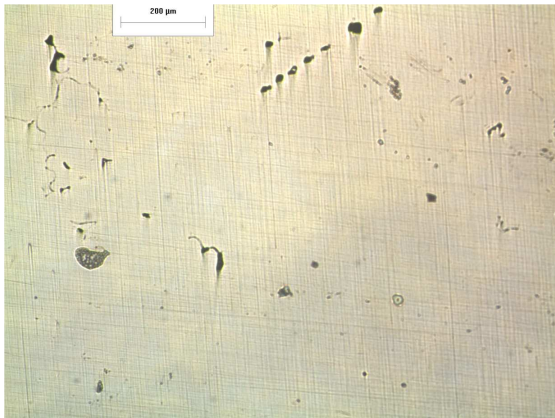
Εικ. 4.32. Χύτευση Βαρύτητας, σημείο 3.



Εικ. 4.33. Χύτευση Κενού, σημείο 3.



Εικ. 4.34. Χύτευση Κενού με Υπερπίεση, σημείο 3.



Εικ. 4.35. Χύτευση Βαρύτητας, σημείο 4.



Εικ. 4.36. Χύτευση Κενού, σημείο 4.



Εικ. 4.37. Χύτευση Κενού με Υπερπίεση, σημείο 4.



Εικ. 4.38. Χύτευση Βαρύτητας, σημείο 5.



Εικ. 4.39. Χύτευση Κενού, σημείο 5.



Εικ. 4.40. Χύτευση Κενού με Υπερπίεση, σημείο 5.

Πιν. 4.2. Μετρήσεις πορώδους.

α/α	Βαρύτητα	Κενό	Υπερπίεση
1	0.24289620	0.28199288	0.90923202
2	0.098338115	0.28085250	0.07554457
3	0.13054520	0.12181532	0.20658498
4	0.69184619	0.07248220	0.08881625
5	0.38916433	0.23983465	0.08846584

Πιν. 4.3. Τυπική απόκλιση (Standard deviation) του εμβαδού των πόρων ως προς το εμβαδό της εξεταζόμενης εικόνας.

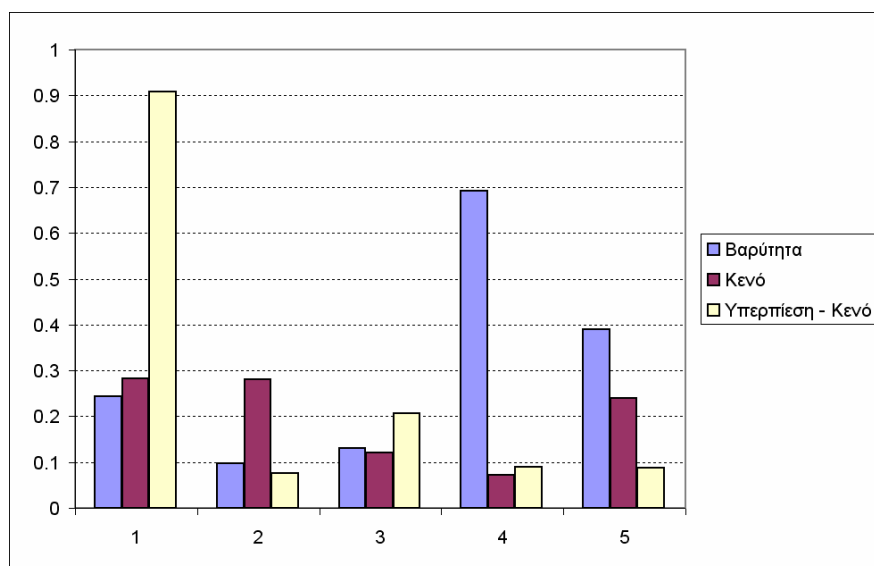
α/α	Βαρύτητα	Κενό	Υπερπίεση
1	157.95209	51.188789	380.71817
2	60.238934	106.64194	66.570061
3	19.064489	35.827435	34.405563
4	227.55266	7.9214234	21.588657
5	57.820618	830.24115	450.90833

Πιν. 4.4. Μέση τιμή εμβαδού των πόρων ως προς στην εξεταζόμενη εικόνα.

α/α	Βαρύτητα	Κενό	Υπερπίεση
1	74.152664	40.634830	91.788078
2	46.126183	36.500401	38.143673
3	18.830891	20.23950	26.5930
4	109.42234	11.191253	24.707262
5	30.399408	31.152466	40.321194

Πιν. 4.5. Μέγιστο εμβαδό πόρου στην εξεταζόμενη εικόνα από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x10).

α/α	Βαρύτητα	Κενό	Υπερπίεση
1	823.91632	304.43582	4322.3984
2	297.26767	949.99152	327.20526
3	138.72490	240.76572	195.22684
4	1690.8416	45.960533	124.81025
5	594.11365	830.24115	231.06763



Σχ. 4.15. Ποράδες, όπως αυτό μετρήθηκε από μεταλλογραφική εξέταση δοκιμίων "αλπακά", από χύτευση βαρύτητας, χύτευση κενού και χύτευση υπερπίεσης, σε 5 σημεία της διατομής του χυτού.

Πιν. 4.6. Μεταβολή (%) πορώδους σε σχέση με το πορώδες στη χύτευση 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%

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:

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 πόρων, σε όλες τις εικόνες, με τα αντίστοιχα νούμερα των άλλων δύο μεθόδων χύτευσης.

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 καταναμημένων, 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 διαμέτρους.

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.

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.

Αντιθέτως, στις περιοχές 2 και 5, δηλαδή στα κέντρα των διαμέτρων αυτών, η χύτευση υπερπίεσης υπερτερεί σημαντικά της χύτευσης κενού.

Γενικά, συνολικά εξετάζοντας το τεμάχιο και στα πέντα σημεία που μελετήθηκαν, τις λιγότερες αυξομειώσεις ποσοστού πορώδους παρουσιάζει η χύτευση κενού. Υπερτερεί έναντι των άλλων δύο μεθόδων στις περιοχές που είναι επίφοβες (ακμές και μικρές διαμέτρους).

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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο
ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

—

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας (ΣΜΘ) στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού είναι παράμετρος μείζονος σημασίας διότι δίνει την πληροφορία με τί ρυθμό και ένταση απάγεται θερμότητα από τη διεπιφάνεια, οπότε μπορούν να προβλεφθούν κρίσιμα στοιχεία της διαδικασίας και ως εκ τούτου αποτελεί απαραίτητο δεδομένο στο εργαλείο της προσομοίωσης για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας της χύτευσης.

Από τις τέσσερις διαφορετικές μεθόδους προσέγγισης του ΣΜΘ επιλέχθηκε αυτή του σημειακού όγκου για την απλότητα της, το πιο συγκεκριμένο τρόπο υπολογισμού, την ανεξαρτησία της από παραμέτρους που επηρεάζουν τη διαδικασία προσομοίωσης. Στη συνέχεια ωστόσο πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με το λογισμικό ProCast και με δεδομένο εισαγωγής, τους υπολογισθέντες συντελεστές.

Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του ΣΜΘ, θεωρώντας μονοδιάστατη (ουσιαστικά διδιάστατη λόγω συμμετρίας του δοκιμίου) θερμορροή, είναι η :

$$HTC = \frac{\rho_M D_M \cdot [H_M(t_0) - H_M(t_1)]}{4 \int_{t_0}^{t_1} (T_M - T_\Gamma) dt}$$

Με δεδομένες τις θερμοκρασίες που λήφθηκαν από τα πειράματα και προσδιορίζοντας από τη θερμοκρασία του μετάλλου την ενθαλπία, όλα τα μεγέθη στο δεξί μέλος είναι γνωστά.

Βάσει της βιβλιογραφίας παρατηρείται το γεγονός ότι πέραν της τυπικής μορφής του ΣΜΘ, που σε κάποια χρονική στιγμή από την έγχυση έως το τέλος της στερεοποίησης παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται σε χαμηλές τιμές, δεν υπάρχει διασαφήνιση για το πότε και για πόσο χρόνο τελικά παρουσιάζει τις μεγάλες τιμές. Αυτό εξαρτάται κυρίως από το χρόνο κατά τον οποίο υπάρχει καλή επαφή χυτού καλουπιού και επομένως από το χρόνο στερεοποίησης του πρώτου σχηματιζόμενου εξωτερικού στερεού φλοιού. Στα κράματα με θερμοκρασιακό εύρος στερεοποίησης ο χρόνος στερεοποίησης του εξωτερικού φλοιού είναι μεγαλύτερος, αλλά αρκετά κοντά στον αντίστοιχο όλης της μάζας του χυτού, ιδιαίτερα δε σε μικρές σε μέγεθος γεωμετρίες.

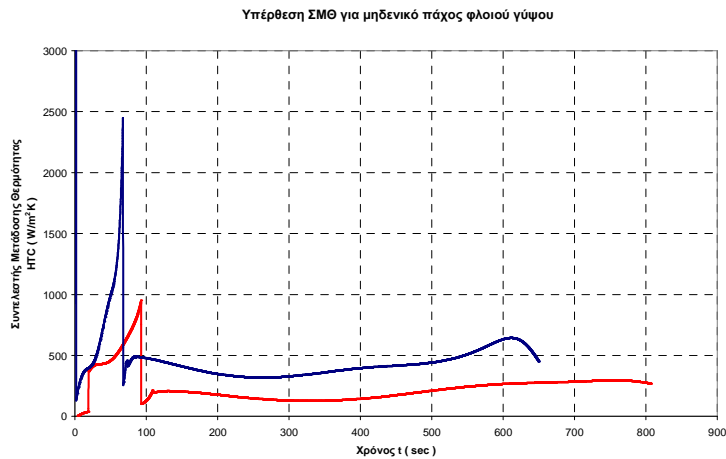
Τα δύο πειράματα των οποίων επεξεργάστηκαν οι μετρήσεις είχαν ίδιες συνθήκες, αλλά διαφορετική θερμοκρασία καλουπιού.

Οι ΣΜΘ που προέκυψαν παρουσιάζουν ουσιαστικά τις εξής περιοχές:

1^η περιοχή : Κατά την έγχυση

2^η περιοχή : Κατά τη στερεοποίηση (που εκλύεται η λανθάνουσα θερμότητα)

3^η περιοχή : Κατά την υπόλοιπη απόψυξη με ελαφρώς καθοδική πορεία αρχικά και ανοδική στη συνέχεια



Σχ. 5.1 Οι ΣΜΘ που υπολογίστηκαν για τα δύο πειράματα

Η 1^η και 2^η περιοχή έχουν υψηλές τιμές καθώς το ενεργειακό περιεχόμενο του τήγματος είναι μεγάλο και υπάρχει καλή επαφή χυτού/καλούπιού λόγω της υγρής φύσης του τήγματος. Η αύξηση στη 2^η περιοχή οφείλεται καθαρά στη λανθάνουσα θερμότητα που εκλύεται.

Η 3^η περιοχή έχει χαμηλές τιμές λόγω του διακένου που δημιουργείται εκ συστολής και “μονώνει” το χυτό από το καλούπι. Όσο αυτό είναι μικρό, επιφέρει δραματική μείωση του ΣΜΘ, αλλά αν στη συνέχεια αυξηθεί περαιτέρω, οδηγεί σε μικρή αύξηση του ΣΜΘ, λόγω της αυξημένης κυκλοφορίας τυχόντων αερίων στη διεπιφάνεια (δεν επικρατεί απόλυτο κενό).

Οι υπολογισθέντες ΣΜΘ συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τη μορφή και τις τιμές των Sun & Chao οι οποίοι ακολούθησαν ίδια διαδικασία υπολογισμού και επιβεβαίωσαν τη μορφή με υπολογισμό με αντίστροφη μέθοδο και με επιτυχή προσομοίωση βάσει του υπολογισθέντος ΣΜΘ.

Το ψυχρότερο καλούπι επιφέρει ταχύτερη απόψυξη γι’ αυτό και οι κλίσεις των καμπυλών θερμοκρασίας είναι πιο απότομες, έχουν δηλαδή μεγαλύτερες κλίσεις σε όλες τις περιοχές. Ταχύτερες θερμοκρασιακές μεταβολές στο χυτό έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο ΣΜΘ σε μικρότερο χρόνο. Οι τιμές του ΣΜΘ στο ψυχρότερο καλούπι είναι εν γένει 2-2.5 φορές μεγαλύτερες από του θερμότερου στις χρονικές περιόδους που αντιστοιχούν ίδια φαινόμενα. Επίσης το ψυχρότερο καλούπι οδηγεί σε χυτό με μικρότερες διαστάσεις.

Οι παραδοχές που γίνονται ότι όλη η θερμότητα απάγεται μέσω της διεπιφάνειας και ότι το χυτό παραμένει σε κατακόρυφη θέση, σαφώς και οδηγούν σε υπερεκτιμημένους ΣΜΘ. Η θερμοκρασιακή διαφορά στη διεπιφάνεια αφορά μόνο στο ποσό θερμότητας που απομακρύνεται από το καλούπι. Άρα έχουμε μια μεγάλη θερμοροή για μια μικρή θερμοκρασιακή διαφορά. Αυτό αποδεικνύεται και από τα αποτελέσματα των πρναφερθέντων μελετητών με τις μεθόδους σημειακού όγκου και αντίστροφη.

Για το φαινόμενο του διαφορισμού όπου είναι ασαφές τι γίνεται με τη λανθάνουσα θερμότητα, σημειώνεται ότι η ορθότερη έκλυση της λανθάνουσας θερμότητας καθ' όλη τη διάρκεια στερεοποίησης οδηγεί σε μείωση της τιμής και χρονική παράταση των μέγιστων τιμών ΣΜΘ.

Η διαδικασία της προσομοίωσης δεν οδήγησε σε σύγκλιση της αριθμητικής και της πειραματικής καμπύλης απόψυξης. Πιθανότερη αιτιολογία είναι λάθος ρυθμισμό παραμέτρων κατά την προσομοίωση.

Έγινε διερεύνηση για το εμβαδό κάτω από την καμπύλη του ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου, το οποίο εκφράζει τη θερμότητα που διαπερνά τη διεπιφάνεια στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο και με τη δεδομένη θερμική αντίσταση θεωρώντας 1 βαθμό Κ θερμοκρασιακή διαφορά εκατέρωθεν της διεπιφάνειας, για να διαπιστωθεί πόσο επηρεάζει η μορφή του τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αποδείχθηκε ότι για ομαλές αλλαγές στη μορφή του και διατηρώντας το εμβαδό ίδιο, η στερεοποίηση επιτυγχάνεται με διαφορά ελάχιστων δευτερολέπτων καθώς και η περαιτέρω απόψυξη.

Τέλος από τη μεταλλογραφία διακρίνεται σαφέστατα ότι με την αύξηση της διαμέτρου αυξάνεται και το μέγεθος των κόκκων στο κέντρο της διατομής καθώς επίσης, ότι λόγω της αργής απόψυξης γενικά έχουμε εκτεταμένη ισοαξονική περιοχή. Όσον αφορά στο πορώδες για πειράματα με ίδιες θερμοκρασιακές συνθήκες αλλά διαφορετικές συνθήκες πίεσης, η χύτευση κενού επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα με μικρότερη αυξομείωση πορώδους σε όλη την έκταση του τεμαχίου και μικρό ποσοστό σε επίφοβες περιοχές όπως οι ακμές και η μικρή διάμετρος.

5.2 ΠΡΟΤΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

- Η μελέτη του ΣΜΘ σε απλή κυλινδρική γεωμετρία και σε περίπτωση που η μελέτη δεν περιλαμβάνει προσομοίωση, μεταφορά του θερμοστοιχείου από την εξωτερική επιφάνεια του καλούπιού, σε άλλο σημείο του άξονα του δοκιμίου για προσδιορισμό της θερμορροής κατά τον κατακόρυφο άξονα με καθαρό μέταλλο ή διμερές κράμα
- Πειράματα προσδιορισμού των ακριβών ιδιοτήτων του κράματος που χρησιμοποιήθηκε.
- Διερεύνηση κατά πόσον ο ΣΜΘ είναι πιο ρεαλιστικός όταν το καλούπι βρίσκεται σε ίδια θερμοκρασία με αυτή του τήγματος.

ΤΕΛΟΣ ΚΑΙ ΤΩ ΘΕΩ ΔΟΞΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ιωάννης Δ. Χρυσουλάκης, Δημήτριος Ι. Παντελής,
Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1996
ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
- [2]. Ξενοφών Κ. Κακάτσιος,
Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα 2002,
ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΟΣ
- [3]. David J. Browne, Denis O'Mahoney,
Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 32A, pp. 3055-3063, 2001
INTERFACE HEAT TRANSFER IN INVESTMENT CASTING OF ALUMINUM ALLOYS
- [4] Eduardo N. Souza, Noé Cheung, Carlos A. Santos, Amauri Garcia,
Inverse Problems in Science & Engineering, Vol. 4, No. 5, pp. 467-481, 2005
THE VARIATION OF THE METAL/MOLD HEAT TRANSFER COEFFICIENT ALONG THE
CROSS SECTION OF CYLINDRICAL SHAPED CASTINGS
- [5] James V. Beck,
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 12, pp. 621-633, 1969
DETERMINATION OF OPTIMUM, TRANSIENT EXPERIMENTS FOR THERMAL CONTACT
CONDUCTANCE,
- [6] C.H. Konrad, M. Brunner, K. Kyrgyzbaev, R. Völkl, U. Glatzel,
Journal of Materials Processing Technology, 2010
DETERMINATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT AND CERAMIC MOLD
MATERIAL PARAMETERS FOR ALLOY IN738LC INVESTMENT CASTINGS,
- [7] Ivaldo L. Ferreira, José E. Spinelli, José C. Pires, Amauri Garcia,
Materials Science and Engineering A, Vol. 408, pp. 317-325, 2005
THE EFFECT OF MELT TEMPERATURE PROFILE ON THE TRANSIENT METAL/MOLD
HEAT TRANSFER COEFFICIENT DURING SOLIDIFICATION

- [8] F. Lau, W.B. Lee, S.M. Xiong, B.C. Liu,
Journal of Materials Processing Technology, Vol. 79, pp. 25–29, 1998
A STUDY OF THE INTERFACIAL HEAT TRANSFER BETWEEN AN IRON CASTING AND A
METALLIC MOULD
- [9] Tae-Gyu Kim & Zin-Hyoung Lee†,
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 15, pp. 3513-3525, 1997
TIME-VARYING HEAT TRANSFER COEFFICIENTS BETWEEN TUBE-SHAPED CASTING
AND METAL MOLD
- [10] Hsien-Chi Sun, Long-Sun Chao,
ISIJ International, Vol. 47, No. 12, pp. 1753–1758, 2007
PREDICTION OF INTERFACIAL HEAT TRANSFER COEFFICIENTS BY USING A
MODIFIED LUMP CAPACITANCE METHOD FOR ALUMINUM CASTING IN A GREEN
SAND MOLD
- [11] D. Ott, C. J. Raub,
Gold Technology, 18 (2), 1985
INVESTMENT CASTING OF GOLD JEWELLERY – GAS PRESSURES IN MOULDS
DURING CASTING: THEIR MEASUREMENT AND THEIR EFFECTS
- [12] ASM Handbook Vols. 2,3,9
- [13] www.copper.org
- [14] Farzaneh Aghajani,
Thesis for the degree of Master of Science in Dentistry,
Faculty of Dentistry, University of Sydney, Australia, 1998
ADDITIONAL THERMAL EXPANSION OF GYPSUM-BONDED INVESTMENT BY RAPID
HEATING

- [15] Γ. Ν. Χαΐδεμενόπουλος,
Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, 2000
ΦΥΣΙΚΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ - ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΡΧΕΣ
- [16] Αρβανιτάκη Ειρήνη,
Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχανικών,
Τομέας Θαλασσιών Κατασκευών, 2010
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΩ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ, ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΠΙΕΣΗΣ

