



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Προσομοίωση Χύτευσης Κράματος Αλουμινίου AA5182

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καραμπίνης Ιωάννης

Επιβλέπων: Dr.-Ing. Σπυρίδων Παπαευθυμίου

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Προσομοίωση Χύτευσης Κράματος Αλουμινίου AA5182

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καραμπίνης Ιωάννης

Επιβλέπων: Dr.-Ing. Σπυρίδων Παπαευθυμίου

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις ... / ... / 2020

Γ. Φούρλαρης, Καθηγητής ..... (Υπογραφή)

Σ. Παπαευθυμίου, Αν. Καθηγητής ..... (Υπογραφή)

Π. Τσακιρίδης, Επίκ. Καθηγητής ..... (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2020

## Απόσπασμα

Η διεργασία “Direct Chill Casting” έχει εδραιωθεί τα τελευταία 60 χρόνια ως κύρια μέθοδος χύτευσης για την παραγωγή πλινθωμάτων και μπιγетών από κράματα αλουμινίου που θα οδηγηθούν σε μετέπειτα μεταλλοτεχνική διεργασία για την παραγωγή εξαρτημάτων κυρίως για την αεροναυπηγική και την αυτοκινητοβιομηχανία. Τα κύρια πλεονεκτήματα της διεργασίας αυτής περιλαμβάνουν τον έλεγχο της στερεοποίησης καθώς και την σχετικά υψηλή ποιότητα των χυτών προϊόντων. Υπό το πρίσμα των αυξανόμενων βιομηχανικών απαιτήσεων, εμφανίζεται η αναγκαιότητα για χύτευση νέων κραματικών συστάσεων με σκοπό την επίτευξη ανώτερων μηχανικών ιδιοτήτων για τα κράματα αλουμινίου. Αυτό επιβάλλει την ανάγκη της σε βάθος κατανόησης της διεργασίας και των μηχανισμών που ελέγχουν τον σχηματισμό της δομής αλλά και πιθανών ελαττωμάτων κατά την DC χύτευση. Οι προσομοιώσεις δίνουν περισσότερη πληροφορία στους ερευνητές σχετικά με την κατανόηση και τον έλεγχο των παραμέτρων της DC χύτευσης για την παραγωγή πλινθωμάτων και μπιγетών απαλλαγμένων κατά το δυνατόν από ελαττώματα και για την αύξηση της ποιότητας των χυτών περιορίζοντας παράλληλα το συνολικό κόστος που θα απαιτούνταν στην περίπτωση εφαρμογής μεθόδων δοκιμής και σφάλματος. Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει μια σύνοψη της διεργασίας DC χύτευσης για πλινθώματα από κράματα αλουμινίου καθώς και τους βασικούς μηχανισμούς που συμβάλλουν στον σχηματισμό ελαττωμάτων. Με βάση την θεωρία της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης της DC χύτευσης για το κράμα αλουμινίου AA5182 στα συμβατικά λογισμικά προσομοίωσης Comsol Multiphysics v5.5 και Ansys Fluent v19.2. Σκοπός του CFD μοντέλου είναι να καθορίσει τον βαθμό αλλά και τον τρόπο που οι παράμετροι χύτευσης (ταχύτητα χύτευσης, υπερθέρμανση τήγματος κ.α.) επηρεάζουν το μεταλλουργικό μήκος και τις διαστάσεις της ημίρρευστης ζώνης αλλά και πως αυτά σχετίζονται με το σχηματισμό ελαττωμάτων, βάσει στοιχείων από τη διεθνή βιβλιογραφία. Σε επόμενο στάδιο, επιχειρείται η σύγκριση μεταξύ των λογισμικών προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν με πρόθεση να υποβοηθηθούν μελλοντικές απόπειρες προσομοίωσης της DC χύτευσης.

## Abstract

For the past 60 years, Direct Chill Casting of wrought aluminum alloys is a well-developed technique for the production of ingots and round billets intended for further metal forming processes to produce parts basically for the aerospace and automotive industry. The main advantages of this procedure include the control of solidification pattern as well as the relatively high quality of cast alloys. As far as increasing industrial requirements are concerned, there is a need of casting for new alloying concentrations to achieve higher mechanical and service properties of wrought aluminum alloys. That imposes the necessity for deep understanding of the process and its mechanisms that control the structure and defect formation. Computer simulations are giving much better insight to the scientists in understanding and controlling the parameters of DC Casting to produce defect free ingots and billets and increase the quality of castings while reducing the overall cost that would be required by trial and error procedures. This thesis represents an overview of Direct Chill Casting of aluminum rectangular ingots and the basic mechanisms that lead to defect formation. Based on Computational Fluid Dynamics Theory, a DC Casting model for AA5182 is built in commercial modeling software Comsol Multiphysics v5.5 and Ansys Fluent v19.2. The scope of this CFD model is to determine the extent and the way that casting parameters (casting velocity, melt superheat etc.) affect the sump depth, the dimensions of the transition region and how it is related to defect formation based on literature evidence. In a latter part, a comparison between the two commercial software packages is achieved with the intention to help future implementations.

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με σκοπό την ολοκλήρωση των σπουδών μου στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Επιβλέπων καθηγητής της διπλωματικής εργασίας είναι ο Αναπληρωτής Καθηγητής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του ΕΜΠ Σπυρίδων Παπαευθυμίου, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την ανάθεση του θέματος και για την άμεση ανταπόκριση και υποστήριξη κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την κατανόηση και την στήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τον κ. Σπυρίδων Παπακωνσταντίνου, προϊστάμενο του Τμήματος Μη Καταστρεπτικών Ελέγχων του Κρατικού Εργοστασίου Αεροσκαφών στο οποίο εργάζομαι, για την ανιδιοτελή συμπαράσταση, την ηθική και επαγγελματική στήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα	
Απόσπασμα.....	I
Abstract.....	II
Ευχαριστίες.....	III
1 Εισαγωγή .....	1
2 Θεωρητικό Μέρος.....	2
2.1 Εισαγωγή στο αλουμίνιο και τα κράματά του .....	2
2.1.1 Αλουμίνιο.....	2
2.1.2 Κράματα Αλουμινίου.....	2
2.1.2.1 Κράματα Αλουμινίου σειράς 5XXX.....	3
2.1.2.2 Διάγραμμα Ισορροπίας Φάσεων για το Διμερές Σύστημα Al-Mg.....	4
2.2 Διεργασία “Direct Chill Casting” για κράματα Αλουμινίου.....	6
2.2.1 Εισαγωγικά στοιχεία της μεθόδου “Direct Chill Casting” .....	6
2.2.2 Διαφορά συνεχούς με ημι-συνεχή χύτευση – Κίνητρο ανάπτυξης της Direct Chill Χύτευσης.....	6
2.2.3 Περιγραφή ενός πλήρους κύκλου της διεργασίας Direct Chill Casting .....	7
2.2.4 Ζώνες Απόψυξης κατά την DC χύτευση .....	9
2.2.5 Μεταλλουργική προσέγγιση της Direct Chill Casting.....	10
2.2.5.1 Χαρακτηριστικά του μεταλλουργικού μήκους (sump) .....	10
2.3 Συνήθη προβλήματα σε χυτά μέσω Direct Chill Casting.....	12
2.3.1 Φαινόμενα ρηγματώσεων .....	12
2.3.1.1 Θερμή Ρηγμάτωση ή “Hot Tearing”.....	12
2.3.1.2 Ψυχρή Ρηγμάτωση ή Cold Cracking .....	15
2.3.2 Μακροδιαφορισμός.....	15
2.3.2.1 Ορισμός και αρνητικές επιδράσεις.....	15
2.3.2.2 Είδη Μακροδιαφορισμού .....	16
2.3.2.3 Μηχανισμός πρόκλησης μακροδιαφορισμού.....	16

2.3.2.4	Μακροδιαφορισμός οφειλόμενος σε συναγωγή.....	17
2.3.2.5	Μακροδιαφορισμός λόγω συρρίκνωσης κατά τη στερεοποίηση .....	18
2.3.2.6	Μακροδιαφορισμός μέσω επιπλεόντων κόκκων.....	19
2.3.3	Παραμόρφωση πλινθώματος (“Ingot Distortion”) .....	20
2.3.3.1	Butt Curl .....	20
2.3.3.2	“Butt Swell” .....	21
2.3.3.3	Inward Pull-In.....	22
3	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	23
3.1	Ανασκόπηση Θερμικών Παραγόντων – Οριακές Συνθήκες Προσομοίωσης.....	23
3.1.1	Εισαγωγή .....	23
3.1.2	Μεταφορά Θερμότητας κατά την DC χύτευση .....	23
3.1.2.1	Μεταφορά θερμότητας μεταξύ πλινθώματος και καλουπιού.....	24
3.1.2.2	Μεταφορά θερμότητας μεταξύ πλινθώματος και νερού στη ζώνη δευτερογενούς απόψυξης	24
3.1.3	Ανασκόπηση των θερμικών οριακών συνθηκών.....	27
3.1.4	Θερμικές Οριακές Συνθήκες που τίθενται στο λογισμικό προσομοίωσης.....	29
3.2	Ανασκόπηση Ιδιοτήτων Κράματος Αλουμινίου AA5182 .....	30
3.2.1	Θερμοκρασίες Solidus, Liquidus και Λανθάνουσα Θερμότητα Στερεοποίησης .....	30
3.2.2	Θερμική Αγωγιμότητα ( $\lambda$ ) .....	30
3.2.3	Πυκνότητα και Θερμοχωρητικότητα ( $\rho$ , $C_p$ ).....	31
3.2.4	Δυναμικό Ιξώδες.....	31
3.2.5	Εξαγωγή δεδομένων από τα διαγράμματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.....	32
3.2.5.1	Θερμική Αγωγιμότητα ( $\lambda$ ).....	32
3.2.5.2	Πυκνότητα ( $\rho$ ) .....	32
3.2.5.3	Θερμοχωρητικότητα ( $C_p$ ).....	33
3.2.5.4	Δυναμικό Ιξώδες.....	33
4	Μαθηματικό Μοντέλο .....	35

4.1	Εξίσωση Ενέργειας .....	35
4.2	Εξίσωση Αλλαγής Φάσης .....	35
4.3	Εξίσωση Ορμής και Συνέχειας.....	36
4.3.1	Μοντέλο Ενθαλπίας-Πορώδους (παράγοντας F στην εξίσωση ορμής).....	37
5	Προσομοίωση .....	38
5.1	Γεωμετρία.....	38
5.2	Εκχώρηση ιδιοτήτων Κράματος .....	39
5.3	Οριακές Συνθήκες .....	40
5.3.1	Οριακές Συνθήκες Ροής.....	40
5.3.2	Οριακές Συνθήκες Μεταφοράς Θερμότητας .....	40
5.4	Πλέγμα (Mesh).....	42
5.4.1	Δημιουργία Πλέγματος στο Comsol Multiphysics v5.5.....	42
5.4.2	Δημιουργία Πλέγματος στο Ansys Fluent v19.2.....	42
5.4.3	Διαδικασία Επίλυσης .....	43
5.4.3.1	Προβλήματα προσομοίωσης Direct Chill χύτευσης στο Comsol Multiphysics v5.5 43	
5.4.3.2	Προβλήματα προσομοίωσης Direct Chill χύτευσης στο Ansys Fluent v19.2.....	44
5.4.3.3	Αντιμετώπιση Προβλημάτων στο Ansys Fluent v19.2 .....	44
6	Αποτελέσματα Προσομοίωσης – Σχολιασμός.....	46
6.1	Φυσικά Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	46
6.1.1	Κατανομή Θερμοκρασιών (T) .....	46
6.1.2	Κατανομή Πυκνότητας .....	47
6.1.3	Κατανομή Φάσεων .....	48
6.1.4	Κατανομή Πεδίου Ταχύτητας.....	49
6.1.5	Κατανομή Θερμικής Αγωγιμότητας.....	49
6.2	Παραμετρική Ανάλυση στο Ansys Fluent 19.1 .....	51
6.2.1	Επιρροή της ταχύτητας χύτευσης στις διαστάσεις της ημίρρευστης ζώνης.....	51



6.2.1.1	Ημίρρευστη Ζώνη για Ταχύτητα Χύτευσης $v=50\text{mm/min}$ .....	51
6.2.1.2	Ημίρρευστη Ζώνη για Ταχύτητα Χύτευσης $v=60\text{mm/min}$ .....	52
6.2.1.3	Ημίρρευστη Ζώνη για Ταχύτητα Χύτευσης $v=70\text{mm/min}$ .....	53
6.2.1.4	Σύγκριση διαστάσεων ημίρρευστης ζώνης για διαφορετικές ταχύτητες χύτευσης	54
6.2.1.5	Σχολιασμός της επίδρασης της ταχύτητας χύτευσης στη διεργασία “Direct Chill Casting”	55
6.2.2	Επιρροή θερμοκρασίας του τήγματος στις διαστάσεις της ημίρρευστης ζώνης .....	57
6.2.2.1	Ημίρρευστη ζώνη για Θερμοκρασία Εισόδου 925K.....	57
6.2.2.2	Ημίρρευστη ζώνη για Θερμοκρασία Εισόδου 1025K.....	58
6.2.2.3	Σύγκριση διαστάσεων ημίρρευστης ζώνης για διαφορετικές θερμοκρασίες εισόδου τήγματος	59
6.2.2.4	Σχολιασμός της επίδρασης της θερμοκρασίας εισόδου του τήγματος (“melt superheat”) στη διεργασία “Direct Chill Casting”.....	60
6.3	Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο Comsol – Σύγκριση με το Ansys Fluent.....	62
6.3.1	Κατανομή πεδίου ταχύτητας στο Comsol Multiphysics v5.5.....	62
6.3.2	Κατανομή φάσεων .....	63
6.3.2.1	Ημίρρευστη Ζώνη για ταχύτητα χύτευσης $v = 50\text{mm/min}$ .....	64
7	Συμπεράσματα .....	66
8	Βιβλιογραφία .....	68

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Κατηγοριοποίηση των κραμάτων αλουμινίου διαμόρφωσης (“wrought aluminum alloys”). Πηγή:[2].....	2
Εικόνα 2: Σύσταση κατά βάρος του κράματος Αλουμινίου AA5182. Πηγή: [4].....	3
Εικόνα 3: Διμερές Διάγραμμα Ισορροπίας Φάσεων Al-Mg. Πηγή: [7] .....	4
Εικόνα 4: Αντιδράσεις που συμβαίνουν κατά τη στερεοποίηση κράματος AA5182 σε ρυθμούς απόψυξης 0,3K/s και 11K/s. Πηγή: [8].....	5
Εικόνα 5: Τυπική διάταξη της διεργασίας “Direct Chill Casting”. Πηγή: [2].....	7
Εικόνα 6: Πλίνθωμα προερχόμενο από την DC χύτευση τη χρονική στιγμή που αποσύρεται από τη διάταξη της DC χύτευσης. Πηγή: [11].....	8
Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση της μεταβατικής ζώνης: (α) απεικόνιση των ισόθερμων καμπυλών για τις θερμοκρασίες Liquidus και Solidus σε τυπικό πλίνθωμα αλουμινίου (αριστερά), (β) περιοχές στις οποίες συμβαίνουν διαφορετικά φαινόμενα μακροδιαφορισμού (δεξιά). Πηγή: [9] ....	10
Εικόνα 8: Τυπική μορφολογία των hot tears στο κεντρικό τμήμα μιγέτας κράματος Al-2Cu. Πηγή: [10].....	13
Εικόνα 9: Τυπική μορφολογία ψυχρής ρηγμάτωσης σε πλίνθωμα. Πηγή: [10].....	15
Εικόνα 10: Αναπαράσταση της ροής οφειλόμενης σε “thermo-solutal convection”. Πηγή: [8].....	17
Εικόνα 11: Αναπαράσταση της “shrinkage induced flow” που οδηγεί σε ανάστροφο μακροδιαφορισμό. Πηγή: [8] .....	18
Εικόνα 12: Παραμορφώσεις πλινθώματος κατά την DC χύτευση. Πηγή: [10].....	20
Εικόνα 13: Παραμόρφωση της διατομής ενός πλινθώματος κατά την DC χύτευση. (Μορφολογία οστού) Πηγή: [2].....	22
Εικόνα 14: Διάταξη πυθμένα εξοπλισμού DC χύτευσης στην οποία παρατηρείται η διαμόρφωση των πλάγιων πλευρών σε 2 ευθύγραμμα τμήματα με σκοπό την εξάλειψη του inward pull-in. Πηγή: [24] .....	22
Εικόνα 15: (a) Ζώνη Δευτερογενούς Απόψυξης κατά την DC χύτευση, (b) Απεικόνιση των διαφορετικών μηχανισμών απόψυξης του φιλμ νερού. Πηγή: [27] .....	24
Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση της καμπύλης heat flux σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία επιφανείας στην οποία διαφαίνονται οι διαφορετικές συνθήκες βρασμού του νερού λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας επιφανείας. Πηγή: [10].....	25
Εικόνα 17: Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εξαρτώμενος από την θερμοκρασία για την βάση ( $h_{base}$ ) και για την δευτερογενή απόψυξη ( $h_{sides}$ ). Πηγή: [29] .....	27
Εικόνα 18: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για την ζώνη πρωτογενούς απόψυξης βάσει των (α) Drezet et. al. (δεξιά) Πηγή: [4] και βάσει των A. K. Nallathambi et. al. (αριστερά) Πηγή: [30] ...	28

Εικόνα 19: Heat flux και συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στη ζώνη δευτερογενούς απόψυξης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας επιφανείας. Πηγή: [4] .....	28
Εικόνα 20: Υπολογισμένη Θερμική Αγωγιμότητα του κράματος αλουμινίου AA5182 με μεθόδους ανάστροφης προσομοίωσης. Πηγή: [4] .....	30
Εικόνα 21: Πυκνότητα( $\rho$ ) και Θερμοχωρητικότητα( $C_p$ ) για το κράμα αλουμινίου AA5182. Πηγή: [32] .....	31
Εικόνα 22: Δυναμικό Ιξώδες Κραμάτων Αλουμινίου-Μαγνησίου. Πηγή: [33].....	31
Εικόνα 23: Θερμική Αγωγιμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας του κράματος αλουμινίου AA5182. Πηγή: [4].....	32
Εικόνα 24: Πυκνότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας του κράματος αλουμινίου AA5182. Πηγή: [32] .....	32
Εικόνα 25: Θερμοχωρητικότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας του κράματος αλουμινίου AA5182. Πηγή: [32].....	33
Εικόνα 26: Δυναμικό ιξώδες συναρτήσει της θερμοκρασίας για κράμα Al-5Mg (μπλε καμπύλη) που προέκυψε με παρεμβολή μεταξύ των καμπυλών: Al-4Mg (πορτοκαλί καμπύλη) και Al-6Mg (γκρι καμπύλη). Πηγή: [33] .....	33
Εικόνα 27: Αναπαράσταση της στερεοποίησης μέσω της αλλαγής φάσης από την $\theta_2$ (τήγμα) στην φάση $\theta_1$ (στερεό) βάσει του λογισμικού Comsol Multiphysics. Πηγή: [37] .....	36
Εικόνα 28: Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε στα λογισμικά προσομοίωσης είναι το $\frac{1}{4}$ του πλινθώματος με σκοπό τον περιορισμό της υπολογιστικής δαπάνης. ....	38
Εικόνα 29: Πίνακας σταθερών τιμών για τις ιδιότητες του κράματος αλουμινίου AA5182 που εκχωρήθηκαν στο λογισμικό Comsol. ....	39
Εικόνα 30: Οριακές Συνθήκες Ροής για την προσομοίωση της Direct Chill χύτευσης του κράματος αλουμινίου AA5182.....	40
Εικόνα 31: Οριακές Συνθήκες για τη Μεταφορά Θερμότητας.....	41
Εικόνα 32: Πλέγμα που δημιουργήθηκε στο Comsol Multiphysics v5.5.....	42
Εικόνα 33: Πλέγμα που δημιουργήθηκε στο Ansys Fluent 19.2.....	43
Εικόνα 34: Κατανομή Θερμοκρασιών στο πλίνθωμα κράματος AA5182 κατά την κατάσταση μόνιμης ροής. ....	46
Εικόνα 35: Κατανομή Πυκνότητας στο πλίνθωμα κράματος αλουμινίου AA5182 κατά την κατάσταση μόνιμης ροής. ....	47
Εικόνα 36: Κατανομή κλάσματος όγκου υγρής φάσης στο $\frac{1}{4}$ του πλινθώματος κράματος αλουμινίου AA5182 κατά την κατάσταση μόνιμης ροής. ....	48

Εικόνα 37: Κατανομή κλάσματος όγκου υγρής φάσης στο επίπεδο xz του πλινθώματος κράματος αλουμινίου AA5182 κατά την κατάσταση μόνιμης ροής.....	48
Εικόνα 38: Κατανομή ταχυτήτων στο πλίνθωμα κράματος AA5182 κατά την κατάσταση μόνιμης ροής.....	49
Εικόνα 39: Κατανομή θερμικής αγωγιμότητας στο πλίνθωμα κράματος AA5182 κατά την κατάσταση μόνιμης ροής.....	50
Εικόνα 40: Ισόθερμες επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min.....	51
Εικόνα 41: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευστης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min.....	52
Εικόνα 42: Ισόθερμες επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 60mm/min.....	52
Εικόνα 43: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευστης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 60mm/min.....	53
Εικόνα 44: Ισόθερμες επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 70mm/min.....	53
Εικόνα 45: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευστης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 70mm/min.....	54
Εικόνα 46: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευστης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητες χύτευσης 50 mm/min (μπλε χρώμα), 60 mm/min (κίτρινο χρώμα), 70 mm/min (κόκκινο χρώμα).....	54
Εικόνα 47: Ύψος ημίρρευστης ζώνης στην τομή των επιπέδων συμμετρίας ανάλογα με την ταχύτητα χύτευσης.....	55
Εικόνα 48: Ισόθερμες επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min και θερμοκρασία εισόδου τήγματος 925K.....	57
Εικόνα 49: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευστης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 50 mm/min και θερμοκρασία εισόδου τήγματος 925K.....	58
Εικόνα 50: Ισόθερμες επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min και θερμοκρασία εισόδου τήγματος 925K.....	58
Εικόνα 51: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευστης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 50 mm/min και θερμοκρασία εισόδου τήγματος 1025K.....	59
Εικόνα 52: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευστης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 50 mm/min και θερμοκρασία τήγματος 925K (μπλε χρώμα), 975K (κίτρινο χρώμα), 1025K (κόκκινο χρώμα).....	59

Εικόνα 53: Ύψος ημίρρευστης ζώνης στην τομή των επιπέδων συμμετρίας ανάλογα με την θερμοκρασία εισόδου τήγματος.....	60
Εικόνα 54: Κατανομή ταχυτήτων στο πλίνθωμα κράματος αλουμινίου AA5182 βάσει του λογισμικού Comsol Multiphysics v5.5 χωρίς την εφαρμογή του μοντέλου ενθαλπίας-πορώδους για την ημίρρευστη ζώνη.....	62
Εικόνα 55: Κατανομή φάσεων στο πλίνθωμα κράματος αλουμινίου AA5182 βάσει του λογισμικού Comsol Multiphysics v5.5 χωρίς την εφαρμογή του μοντέλου ενθαλπίας-πορώδους για την ημίρρευστη ζώνη.....	63
Εικόνα 56: : Ισόθερμες επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min στο λογισμικό Comsol Multiphysics v5.5. Η κίτρινη “Isosurface” αντιστοιχεί στο άνω όριο για κλάσμα όγκου υγρής φάσης 0,9999 ενώ η πορτοκαλί επιφάνεια αντιστοιχεί στο κάτω όριο για κλάσμα όγκου υγρής φάσης 0,0001.....	64
Εικόνα 57: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευστης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min στο λογισμικό Comsol Multiphysics v5.5. ....	64
Εικόνα 58: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευστης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min και θερμοκρασία εισόδου τήγματος 975K (α) στο λογισμικό Comsol Multiphysics v5.5 (κίτρινο χρώμα) και (β) στο λογισμικό Ansys Fluent v19.2 (μπλε χρώμα). .....	65

## 1 Εισαγωγή

Το ενδιαφέρον βιομηχανικών τομέων όπως της αεροδιαστημικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας είναι εδώ και δεκαετίες στραμμένο στην κατασκευή ελαφρότερων δομών αλλά ταυτόχρονα με υψηλή μηχανική αντοχή για να εξασφαλιστούν οι μέγιστες επιδόσεις και η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, έτσι ώστε να αυξηθεί η γενικότερη απόδοση. Αυτό επιτυγχάνεται σε σημαντικό βαθμό με την αντικατάσταση των δομών χάλυβα από δομές αλουμινίου. Το αλουμίνιο έχει πυκνότητα κατά τρεις φορές μικρότερη από την πυκνότητα του χάλυβα ενώ παράλληλα δύναται να επιτευχθούν επίπεδα αντοχής παραπλήσια ή ακόμα και ανώτερα από το χάλυβα. Στα βασικά πλεονεκτήματα των κραμάτων αλουμινίου είναι και η ικανότητά τους να υπόκεινται σε έλαση ή εξώθηση γεγονός που τα καθιστούν κατάλληλα για μαζική παραγωγή. Η τυπική παραγωγική διαδικασία κραμάτων αλουμινίου περιλαμβάνει χύτευση, ομογενοποίηση, θερμή ή/και ψυχρή έλαση ώστε το πλίνθωμα να αποκτήσει τις επιθυμητές διαστάσεις και κατά περίπτωση μετέπειτα θερμικές κατεργασίες ώστε να εξασφαλιστούν τα προβλεπόμενα επίπεδα των μηχανικών ιδιοτήτων. Η χύτευση αποτελώντας το πρώτο στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας διαδραματίζει ίσως τον βασικότερο ρόλο στην ποιότητα των πλινθωμάτων που θα οδηγηθούν σε έλαση καθώς και στην αποδοτικότητα της παραγωγής. Στην ημι-συνεχή χύτευση που εφαρμόζεται στα κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου έχουν παρατηρηθεί αρκετά ελαττώματα όπως μακροδιαφορισμός, πορώδες, εγκλείσματα, θερμή και ψυχρή ρηγμάτωση που επιδρούν στην ποιότητα και παραγωγή των πλινθωμάτων καθώς τα περισσότερα από τα ελαττώματα είναι μη αναστρέψιμα και το πλίνθωμα πρέπει να επανα-τηχθεί. Επομένως είναι υψίστης σημασίας, η εκτεταμένη έρευνα όσων αφορά στην βελτιστοποίηση της διεργασίας χύτευσης για την παραγωγή υψηλής ποιότητας πλινθωμάτων στο ελάχιστο δυνατό κόστος.

Μια αρχική μέθοδος παρατήρησης και μεταβολής των βασικών παραμέτρων χύτευσης όπως της ταχύτητας χύτευσης, τις συνθήκες απόψυξης κ.α. θα μπορούσε να βασιστεί σε μεθόδους δοκιμής και σφάλματος, αυξάνοντας όμως δραματικά το κόστος. Για το λόγο αυτό το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στράφηκε στην ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης της ημι-συνεχούς χύτευσης αλουμινίου ώστε να γίνουν αντιληπτοί οι βασικοί μηχανισμοί της διεργασίας και να ερμηνευτούν αποτελέσματα από πειράματα χύτευσης. Με την ανάπτυξη και την εφαρμογή μεθόδων προσομοίωσης δύναται να ερμηνευθούν οι τάσεις εμφανιζόμενων πειραματικών μετρήσεων ανάλογα με τις εξισώσεις που διέπουν τη ροή και την μεταφορά θερμότητας. Η σε βάθος κατανόηση των φαινομένων αυτών οδηγεί στον εντοπισμό των γενεσιουργών αιτιών των ελαττωμάτων αλλά και στην εύρεση λύσεων επαρκών να εξαλείψουν κατά το δυνατόν τα ελαττώματα. Επομένως η προσομοίωση των διεργασιών χύτευσης αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την βελτίωση της παραγωγής.

## 2 Θεωρητικό Μέρος

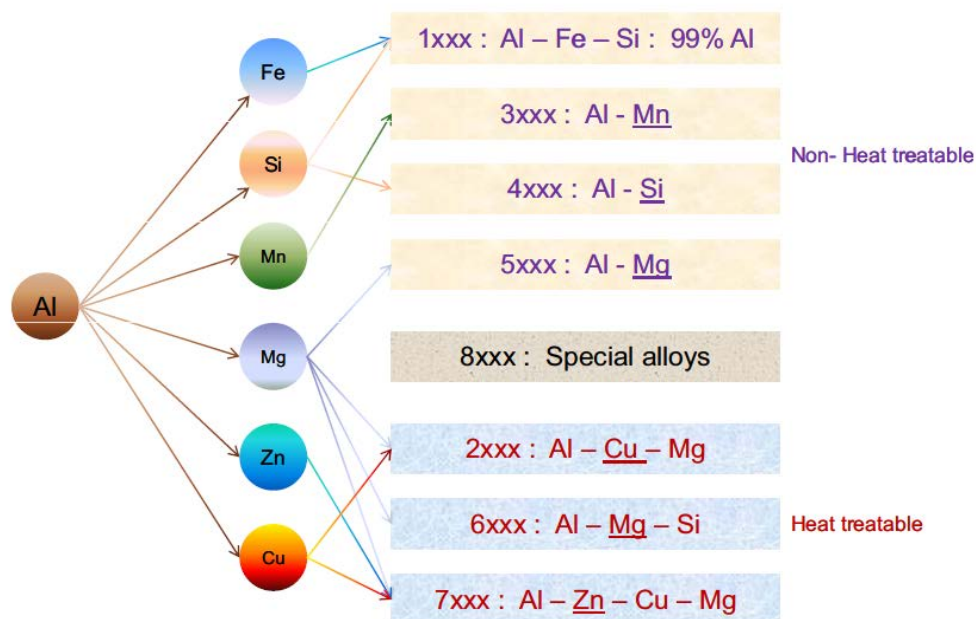
### 2.1 Εισαγωγή στο αλουμίνιο και τα κράματά του

#### 2.1.1 Αλουμίνιο

Το αλουμίνιο είναι το τρίτο πιο διαθέσιμο μέταλλο του στερεού φλοιού της γης (έως 8% κατά βάρος) μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Διαθέτει πυκνότητα περί τα  $2,7 \text{ gr/cm}^3$  που είναι κατά προσέγγιση τρεις φορές μικρότερη από την πυκνότητα του σιδήρου ( $7,83 \text{ gr/cm}^3$ ) [1]. Είναι μη μαγνητικό και μη-εύφλεκτο υλικό. Το όριο διαρροής του καθαρού αλουμινίου ανέρχεται σε 7-11 MPa ενώ τα κράματά του φθάνουν σε όριο διαρροής στο εύρος 200-600 MPa σε υψηλές θερμοκρασίες. Διαθέτει εξαιρετικές αντιδιαβρωτικές ιδιότητες καθώς σχηματίζεται μια λεπτή επιφανειακή στρώση  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , όταν το μέταλλο εκτίθεται σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, που προλαμβάνει την περαιτέρω οξείδωση. Είναι καλός αγωγός της θερμότητας και του ηλεκτρικού ρεύματος.[2]

#### 2.1.2 Κράματα Αλουμινίου

Αρχικά τα κράματα αλουμινίου δύνανται να διακριθούν σε εκείνα που αποκτούν το τελικό τους σχήμα άμεσα μετά την χύτευση (“as-cast alloys”) και σε κράματα διαμόρφωσης (“wrought alloys”) τα οποία χυτεύονται ως πλινθώματα ή μπιγέτες και οδηγούνται σε μετέπειτα μεταλλοτεχνική διεργασία έλασης, εξώθησης, σφυρηλάτησης κ.α. για απόδοση του επιθυμητού σχήματος. Τα κράματα διαμόρφωσης ταξινομούνται σε οκτώ κατηγορίες ανάλογα με τη σύστασή τους (Εικόνα 1) σύμφωνα με το Διεθνές Σύστημα Σχεδιασμού Κραμάτων (IADS) βασιζόμενο στην ταξινόμηση που επιτεύχθηκε από τον συνεταιρισμό αλουμινίου των ΗΠΑ [3].



Εικόνα 1: Κατηγοριοποίηση των κραμάτων αλουμινίου διαμόρφωσης (“wrought aluminum alloys”). Πηγή:[2]

Για κάθε κράμα υπάρχει και ο αντίστοιχος τετραψήφιος κωδικός που χαρακτηρίζει τη σύστασή του. Το πρώτο ψηφίο της κωδικής ονομασίας του κράματος υποδηλώνει την ομάδα στην οποία ανήκει με βάση την κύρια κραματική προσθήκη. Το δεύτερο ψηφίο υποδηλώνει κάποια μετατροπή του κράματος ή τα όρια ακαθαρσιών. Τα δύο τελευταία ψηφία σχετίζονται με την ταυτοποίηση συγκεκριμένου κράματος ή αποτελούν ένδειξη της καθαρότητας του αλουμινίου [3].

Τα κράματα αλουμινίου διακρίνονται περαιτέρω με βάση το εάν επιδέχονται ή όχι σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης ύστερα από την ανάλογη θερμική κατεργασία (“heat-treatable alloys” / “non heat-treatable alloys”). Συγκεκριμένα στην κατηγορία των κραμάτων διαμόρφωσης οι σειρές 2XXX, 6XXX, 7XXX και κάποια κράματα της σειράς 8XXX ανήκουν στην κατηγορία των heat-treatable κραμάτων που αποκτούν την τελική αντοχή τους με κατάλληλη θερμική κατεργασία γήρανσης στο τελικό στάδιο της παραγωγικής διεργασίας [1].

#### 2.1.2.1 Κράματα Αλουμινίου σειράς 5XXX

Κύρια κραματική προσθήκη της σειράς κραμάτων αλουμινίου 5XXX είναι το μαγνήσιο (Mg) το οποίο μπορεί να ευρίσκεται σε ποσοστό έως 5,6% και συμβάλλει στη σκλήρυνση μέσω στερεού διαλύματος. Τα κράματα αλουμινίου-μαγνησίου δεν επιδέχονται σκλήρυνση μέσω θερμικής κατεργασίας (non heat-treatable) αλλά η σκλήρυνση προκαλείται μέσω ενδοτράχυνσης από ψυχρή διαμόρφωση. Υψηλότερα ποσοστά μαγνησίου οδηγούν σε εντονότερη ενδοτράχυνση. [3]

Σε αυτή την κατηγορία ανήκει και το κράμα αλουμινίου AA5182 το οποίο περιέχει ποσοστό μαγνησίου περί τα 4-4,5% ως κύρια κραματική προσθήκη. Στον πίνακα της Εικόνας 2 παρατίθεται τυπική σύσταση του κράματος AA5182 [4]. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία για την κατασκευή των πάνελ του εξωτερικού σώματος των αυτοκινήτων καθώς και στην βιομηχανία παραγωγής δοχείων (αναψυκτικών, τροφών κ.α.) [5],[6].

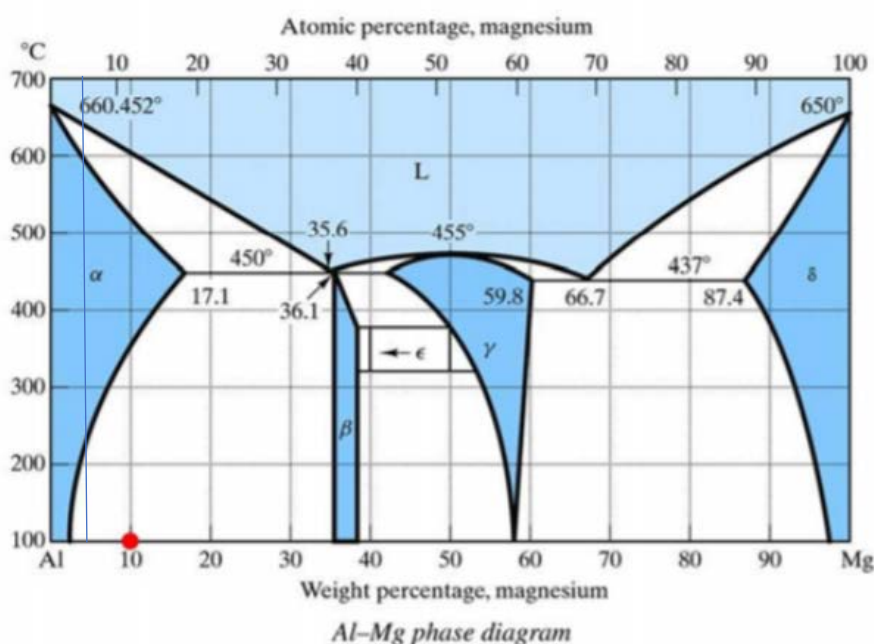
Si	Fe	Mg	Mn	Cu	Cr	Ti	Zn	Al
0.068	0.121	3.999	0.252	0.023	0.0038	0.0018	0.015	balance

Εικόνα 2: Σύσταση κατά βάρος του κράματος Αλουμινίου AA5182. Πηγή: [4]



### 2.1.2.2 Διάγραμμα Ισορροπίας Φάσεων για το Διμερές Σύστημα Al-Mg

Στην Εικόνα 3 παρατίθεται το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Al-Mg. Το σύστημα Al-Mg περιέχει μια ευτηκτική αντίδραση ( $L \rightarrow \alpha + \beta$ ) σε σημείο του διαγράμματος που αντιστοιχεί σε 35,6% κατά βάρος περιεκτικότητα σε Mg και σε θερμοκρασία περί τους 450°C. Κατά τη στερεοποίηση υποευτηκτικών κραμάτων με σύσταση Al-5%Mg (κράματα που περιέχουν χαμηλότερα ποσοστά από την ευτηκτική σύσταση η οποία ανέρχεται στο 35,6% Mg), η υγρή φάση περιέχει περισσότερο αλουμίνιο σχετικά με την ευτηκτική σύσταση, οπότε αρχικά σχηματίζεται μια πλούσια σε Al φάση ( $\alpha$ -aluminium) που συνυπάρχει με την υγρή φάση (L), δηλ. σχηματίζονται προ-ευτηκτικοί κόκκοι αλουμινίου. Αυτό έχει σαν συνέπεια να καταναλωθεί αλουμίνιο από την υγρή φάση μέχρι η σύσταση αυτής να φθάσει πλέον στην ευτηκτική σύσταση. Όταν η θερμοκρασία ελαττώνεται κάτω από την ευτηκτική θερμοκρασία (450 °C) η εναπομένουσα υγρή φάση (L) διαχωρίζεται σε  $\alpha$ -Al και σε μια ενδομεταλλική « $\beta$ -φάση». Έτσι σε θερμοκρασία δωματίου η μικροδομή θα αποτελείται από προ-ευτηκτικούς κόκκους αλουμινίου που περιβάλλονται από το ευτηκτικό μείγμα των δύο στερεών φάσεων  $\alpha + \beta$ .



Εικόνα 3: Διμερές Διάγραμμα Ισορροπίας Φάσεων Al-Mg. Πηγή: [7]

Η προηγούμενη διαδρομή στερεοποίησης περιγράφει την ισορροπία φάσεων και μπορεί δύσκολα να επιτευχθεί υπό τις πραγματικές συνθήκες χύτευσης όπου οι ρυθμοί απόψυξης είναι υψηλοί και οι διεργασίες διάχυσης, ιδίως στην στερεή φάση δεν μπορούν να επιτευχθούν σε τέτοιο βαθμό ώστε οι παραγόμενες φάσεις να συμφωνούν με το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων. Οι αντιδράσεις που

συμβαίνουν κατά την στερεοποίηση του κράματος AA5182 για δυο διαφορετικούς ρυθμούς απόψυξης δίνονται στον πίνακα της Εικόνας 4.

Reaction	Temperatures (°C) at a Cooling Rate	
	0.3 K/s	11 K/s
$L \Rightarrow (Al)$	632	632–623
$L \Rightarrow (Al) + Al_6(FeMn)$ and/or $L \Rightarrow (Al) + Al_3(FeMn)$	621–617	620
$L \Rightarrow (Al) + Al_3Fe + Mg_2Si$	586	583
$L \Rightarrow (Al) + Al_3Fe + Mg_2Si + Al_8Mg_5$	557–470	543–470
Solidus	470	470

Εικόνα 4: Αντιδράσεις που συμβαίνουν κατά τη στερεοποίηση κράματος AA5182 σε ρυθμούς απόψυξης 0,3K/s και 11K/s. Πηγή: [8]

## 2.2 Διεργασία “Direct Chill Casting” για κράματα Αλουμινίου

### 2.2.1 Εισαγωγικά στοιχεία της μεθόδου “Direct Chill Casting”

Η “Direct Chill” χύτευση αλουμινίου ανακαλύφθηκε το 1936-1938 σχεδόν ταυτόχρονα σε Αμερική και Γερμανία. Η διεργασία αυτή βασίστηκε σε υπάρχουσες μεθόδους χύτευσης κραμάτων χαλκού και αλουμινίου. Η μέθοδος απέκτησε ευρεία εφαρμογή και ανάπτυξη με σκοπό να καλύψει τις απαιτήσεις της αεροναυπηγικής βιομηχανίας σε μεγάλες μπιγέτες για χρήση στη δομή των αεροσκαφών. Οι απαιτήσεις εκείνη την περίοδο χαρακτηρίζονται από αυξανόμενη ζήτηση για μεταφορά επιβατών μέσω μεταγωγικών αεροσκαφών καθώς και η παραγωγή αεροσκαφών για την κάλυψη επιχειρησιακών αναγκών κατά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Μετά το πέρας του πολέμου, σχεδόν όλα τα κράματα αλουμινίου διαμόρφωσης παράγονται με την μέθοδο Direct Chill Casting στην Αμερική, στη Σοβιετική Ένωση και την Γερμανία. [9]

Το αλουμίνιο, από οικονομικής πλευράς είναι το δεύτερο σημαντικότερο μέταλλο μετά τον χάλυβα. Από τους 80 εκατομμύρια τόνους χυτού αλουμινίου που παράγονται ετησίως υπολογίζεται κατά προσέγγιση ότι η μισή ποσότητα προέρχεται από την διεργασία χύτευσης Direct Chill (DC). Τα προϊόντα της DC χύτευσης προέρχονται είτε από πρωτογενές μέταλλο είτε από δευτερογενή υλικά (“scrap”). Η ποιότητα των χυτών DC προϊόντων έχει άμεση σχέση με την ποιότητα, παραγωγικότητα και τις ιδιότητες των τελικών προϊόντων που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κτηρίων, στις μεταφορές και σε πολλές άλλες εφαρμογές. Επομένως ο έλεγχος των παραμέτρων της Direct Chill χύτευσης κρίνεται αναγκαίος για τον έλεγχο της ποιότητας των προϊόντων των μετέπειτα διεργασιών αλλά και του τελικού προϊόντος. [10]

### 2.2.2 Διαφορά συνεχούς με ημι-συνεχή χύτευση – Κίνητρο ανάπτυξης της Direct Chill Χύτευσης

Σε αντίθεση με την προαναφερθείσα διεργασία χύτευσης για το αλουμίνιο, στους χάλυβες χρησιμοποιείται η συνεχής χύτευση (“Continuous Casting”) για την παραγωγή πλινθωμάτων και μπιγέτων. Στη διεργασία συνεχούς χύτευσης χάλυβα, το στερεοποιούμενο πλίνθωμα κινείται αρχικά κάθετα για ορισμένη απόσταση και στη συνέχεια κάμπτεται, με κατάλληλη καμπυλότητα, λαμβάνοντας πλέον την οριζόντια διεύθυνση. Αυτό το είδος χύτευσης είναι κατάλληλο για κράματα χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας όπως ο χάλυβας, ενώ δεν είναι εφικτό σε κράματα υψηλότερης θερμικής αγωγιμότητας όπως το αλουμίνιο, διότι η στερεοποίηση στα τελευταία, ολοκληρώνεται σε σχετικά μικρότερη απόσταση. Ο περιορισμός της εφαρμογής της συνεχούς χύτευσης σε κράματα υψηλότερης θερμικής αγωγιμότητας οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης νέων μεθόδων χύτευσης, που ανήκουν στην κατηγορία της ημι-συνεχούς χύτευσης (“Semi-Continuous Casting”). Η τεχνική Direct Chill Casting είναι μια από τις μεθόδους ημι-συνεχούς χύτευσης για μέταλλα και κράματα που έχουν

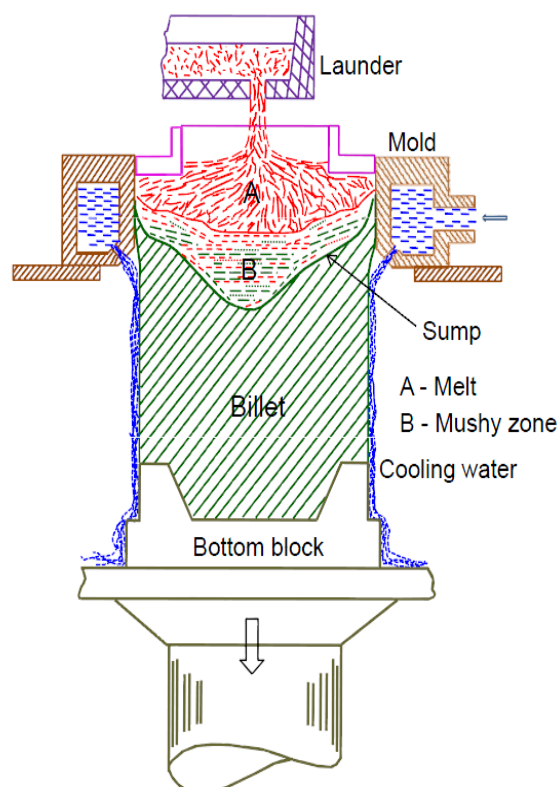
σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα και αποτέλεσε μια εξαιρετικά οικονομική τεχνική παραγωγής πλινθωμάτων μη σιδηρούχων κραμάτων όπως αλουμινίου, χαλκού, μαγνησίου και ψευδαργύρου. Στη συνέχεια, διενεργείται πλήρης παρουσίαση της παραγωγικής διεργασίας της DC χύτευσης με στόχο την κατανόηση των παραμέτρων που επιδρούν σε αυτή ώστε σε επόμενο στάδιο να διενεργηθεί η προσπάθεια ελέγχου τους. [10]

### 2.2.3 Περιγραφή ενός πλήρους κύκλου της διεργασίας Direct Chill Casting

Στη διεργασία της Direct Chill χύτευσης ο βασικός εξοπλισμός αποτελείται από το υδρόψυκτο καλούπι, τους εκτοξευτήρες νερού τοποθετημένους κάτω από το καλούπι και τη διάταξη πυθμένα (“starting block” ή “bottom block”). Τυπική διάταξη της διεργασίας DC χύτευσης αναπαρίσταται στην Εικόνα 5. Η διεργασία της DC χύτευσης μπορεί να χωριστεί σε τρία επιμέρους στάδια:

Το πρώτο στάδιο είναι η φάση εκκίνησης (“start-up phase”). Αρχικά η διάταξη πυθμένα είναι τοποθετημένη εντός του κάτω μέρους του καλουπιού και το τήγμα κράματος επιθυμητής σύστασης εγχέεται εντός του συγκροτήματος καλουπιού-διάταξης πυθμένα. Από τις προδιαγραφές

χύτευσης έχει οριστεί εκ των προτέρων ένα επιθυμητό ύψος στο οποίο πρέπει να φθάσει το τήγμα έτσι ώστε να ενεργοποιηθεί η επόμενη φάση της διεργασίας. Σε αυτό το σημείο το τήγμα ερχόμενο σε επαφή με το καλούπι και τη διάταξη πυθμένα στερεοποιείται και φθάνει σε ικανοποιητικά επίπεδα αντοχής ώστε να είναι σε θέση να συγκρατήσει το υπερκείμενο τήγμα. Μόλις αυτό συμβεί, η διάταξη πυθμένα μαζί με το πλίνθωμα κατέρχονται ενώ παράλληλα προστίθεται συνεχώς τήγμα αλουμινίου εντός του καλουπιού από το επάνω μέρος. Καθώς το πλίνθωμα αναδύεται μέσα από το καλούπι, εκτοξευτήρες νερού που είναι τοποθετημένοι κάτω από το καλούπι ψεκάζουν νερό στην επιφάνεια του πλινθώματος συμβάλλοντας στην περαιτέρω απαγωγή θερμότητας από το πλίνθωμα. Η φάση εκκίνησης αφορά το πρώτο 0,5-1m μήκος πλινθώματος. Μετά από αυτό το μήκος η διεργασία έχει περάσει στο δεύτερο στάδιο. [2], [8]–[10]



Εικόνα 5: Τυπική διάταξη της διεργασίας “Direct Chill Casting”.  
Πηγή: [2]

Το *δεύτερο στάδιο* της διεργασίας είναι προσεγγιστικά μια κατάσταση μόνιμης ροής (“steady-state”) στην οποία η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη. Σε αυτή τη φάση τα φαινόμενα μεταφοράς προσεγγίζουν την κατάσταση ισορροπίας και οι παράμετροι χύτευσης όπως η ροή του νερού και η ταχύτητα χύτευσης, διατηρούνται σταθερές. Συνήθως η φάση μόνιμης ροής αναπτύσσεται μετά από ένα μήκος 0,5-1m (δηλ. μετά την start-up phase) και είναι η πιο παραγωγική φάση της DC χύτευσης. [2], [8], [10], [11]

Τέλος το *τρίτο στάδιο* είναι η φάση ολοκλήρωσης (“end phase”) όπου η ταχύτητα χύτευσης σταδιακά μειώνεται με σκοπό την πλήρη ακινητοποίηση της διάταξης πυθμένα. Στο τέλος της φάσης αυτής το πλίνθωμα έχει αποκτήσει το επιθυμητό μήκος και στη συνέχεια εξέρχεται από τη διάταξη χύτευσης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6, κάνοντας τη παραγωγική διαδικασία μέσω της διακοπής αυτής ημι-συνεχή. [2], [8], [10], [11]

Η Direct Chill χύτευση τεχνικά διαφέρει από την συνεχή χύτευση σε δυο βασικά σημεία: α) σχετικά μικρότερο μήκος καλουπιού (στη συνεχή χύτευση χάλυβα τα καλούπια έχουν μήκος 700-1200mm ενώ στην DCC είναι περίπου 70-90mm) και β) σχετικά χαμηλότερη ταχύτητα χύτευσης (γενικά η ταχύτητα κατά την DCC είναι 10 φορές πιο χαμηλή από ότι στη συνεχή χύτευση). Η ταχύτητα χύτευσης κατά τη DCC συνήθως ποικίλει από 60mm/min σε 200mm/min. Τα πλινθώματα που προορίζονται για έλαση συνήθως έχουν πάχος από 400-600mm και πλάτος στο εύρος 1500-2200mm. Το μήκος του πλινθώματος ποικίλει συνήθως στο εύρος από 6500mm σε 8000mm. [2]



Εικόνα 6: Πλίνθωμα προερχόμενο από την DC χύτευση τη χρονική στιγμή που αποσύρεται από τη διάταξη της DC χύτευσης. Πηγή: [11]

#### 2.2.4 Ζώνες Απόψυξης κατά την DC χύτευση

Κατά την Direct Chill χύτευση, η θερμότητα απάγεται από το πλίνθωμα διαμέσου τριών διακριτών ζωνών απόψυξης: α) πρωτογενής ζώνη απόψυξης (“primary cooling zone”), β) δευτερογενής ζώνη απόψυξης (“secondary cooling zone”) και γ) ζώνη πυθμένα (“bottom block zone”). Στη συνέχεια αξίζει να γίνει αναφορά στις τρεις ζώνες απόψυξης ξεχωριστά διότι σε κάθε ζώνη ο μηχανισμός απαγωγής θερμότητας από το πλίνθωμα διαφέρει.

Στην ζώνη πρωτογενούς απόψυξης αναπτύσσεται αρχικά σχεδόν τέλεια επαφή μεταξύ του καλουπιού και του πλινθώματος. Η μεταφορά θερμότητας υποβοηθείται επομένως σε αυτό το στάδιο και το τήγμα αρχίζει να στερεοποιείται σχηματίζοντας εξωτερικά το πρώτο κελί στερεοποίησης. Κατά την στερεοποίηση, λόγω των θερμο-μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων αλουμινίου αναμένεται συρρίκνωση λόγω στερεοποίησης η οποία έχει ως συνέπεια το πλίνθωμα τοπικά να χάσει την τέλεια επαφή με το καλούπι. Στον κενό χώρο που δημιουργείται, σχηματίζεται κενό αέρος μεταξύ του πλινθώματος και του καλουπιού. Εξαιτίας του δημιουργηθέντος κενού αέρος, ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του καλουπιού και του πλινθώματος μειώνεται δραματικά, διότι ο αέρας, ως γνωστόν είναι μονωτής της θερμότητας. Υπολογίζεται ότι μόνο το 20% της θερμότητας απομακρύνεται από το πλίνθωμα μέσω της πρωτογενούς απόψυξης στο καλούπι. [2], [8]–[11]

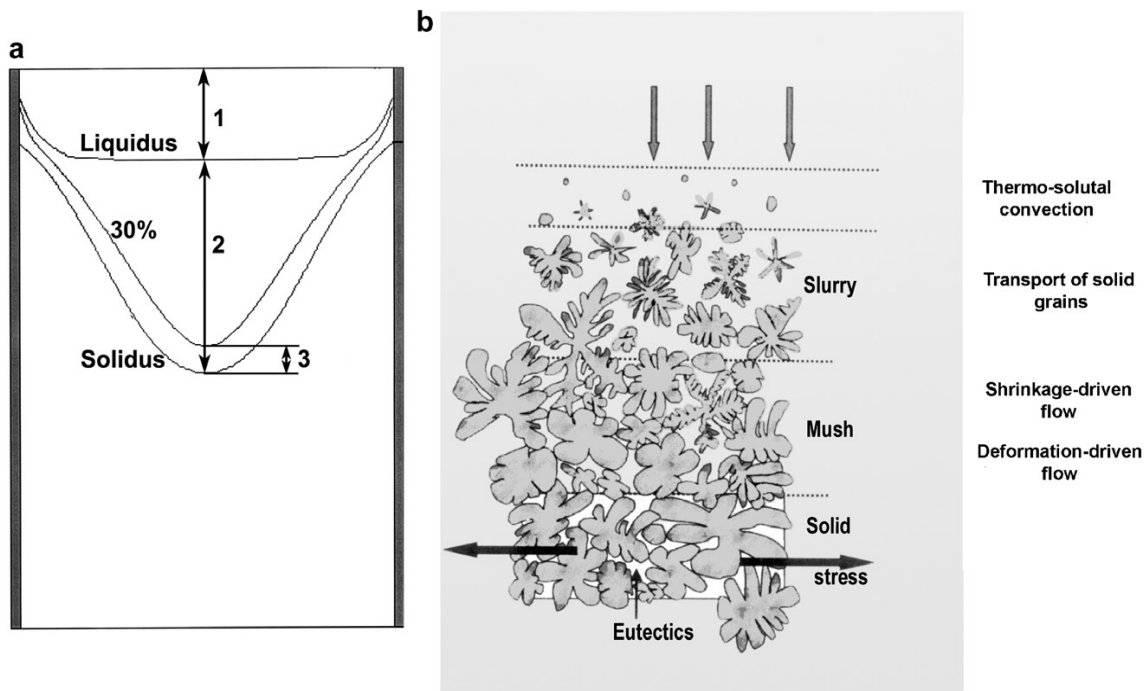
Εν συνεχεία, στη ζώνη δευτερογενούς απόψυξης το μέσο απαγωγής της θερμότητας είναι το νερό το οποίο εκτοξεύεται απευθείας στην επιφάνεια του πλινθώματος που αναδύεται από το καλούπι. Η ζώνη αυτή μπορεί να διαχωριστεί περαιτέρω σε δύο υπό-περιοχές: α) τη ζώνη πρόσκρουσης του νερού στην επιφάνεια του πλινθώματος (“impingement zone”) και β) την περιοχή ελεύθερης ροής του νερού κατά μήκος της επιφάνειας του πλινθώματος (“free water flow”). Περισσότερο από 75-80% της θερμότητας του πλινθώματος αποβάλλεται κατά την δευτερογενή απόψυξη. [2], [8]–[11]

Στην ζώνη πυθμένα, το υγρό μέταλλο αναπτύσσει τέλεια επαφή με τη διάταξη του πυθμένα (“bottom block”) πριν από την εκκίνηση της στερεοποίησης που είναι παρόμοια με την επαφή που αναπτύσσεται κατά τη ζώνη πρωτογενούς απόψυξης. Κατά την φάση εκκίνησης το κάτω μέρος του πλινθώματος ψύχεται και από τη διάταξη πυθμένα, από το καλούπι αλλά και από το νερό δευτερογενούς απόψυξης. Η επιβολή των έντονων συνθηκών απόψυξης κατά την φάση εκκίνησης του πλινθώματος οδηγεί σε σταδιακό σχηματισμό κενού μεταξύ της διάταξης πυθμένα και της εξωτερικής γωνίας του στερεοποιημένου πλινθώματος, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια. Ωστόσο, το κέντρο της διάταξης πυθμένα συνδέεται με το πλίνθωμα μέσω ειδικά σχεδιασμένων κοχλιών. Χωρίς αυτή τη σύνδεση, η διάταξη πυθμένα δεν θα μπορούσε να ωθεί κατακόρυφα συνεχώς το πλίνθωμα. [2], [8]–[11]

## 2.2.5 Μεταλλουργική προσέγγιση της Direct Chill Casting

### 2.2.5.1 Χαρακτηριστικά του μεταλλουργικού μήκους (*sump*)

Σε αυτό το σημείο αξίζει να δοθεί μια σύντομη περιγραφή των διαφορετικών ζωνών που παρατηρούνται ως προς την κατάσταση της ύλης του κράματος, μέσω μιας μεταλλουργικής προσέγγισης. Για τους λόγους της ενότητας αυτής πραγματοποιείται περιγραφή της Εικόνας 7 στην οποία διακρίνονται οι εξής περιοχές:



Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση της μεταβατικής ζώνης: (α) απεικόνιση των ισόθερμων καμπυλών για τις θερμοκρασίες Liquidus και Solidus σε τυπικό πλίνθωμα αλουμινίου (αριστερά), (β) περιοχές στις οποίες συμβαίνουν διαφορετικά φαινόμενα μακροδιαφορισμού (δεξιά). Πηγή: [9]

- Ζώνη 1: Πρόκειται για την ζώνη όπου βρίσκεται το λουτρό, επομένως σε θερμοκρασίες ανώτερες της ισόθερμης καμπύλης που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία liquidus. Το λουτρό τήγματος παρουσιάζει μικρές μεταβολές στη θερμοκρασία κατά τις συνθήκες μόνιμης ροής με αποτέλεσμα η ισόθερμη καμπύλη της liquidus στο μεγαλύτερο μέρος της να είναι επίπεδη [12].
- Ζώνη 2: Πρόκειται για την μεταβατική ζώνη η οποία οριοθετείται από τις ισόθερμες καμπύλες των θερμοκρασιών liquidus και solidus η οποία μπορεί να χωριστεί περαιτέρω σε δύο υπό-περιοχές: α) “slurry” ζώνη και β) “mushy” ζώνη. Το όριο μεταξύ αυτών των δύο υπό-περιοχών είναι η ισόθερμη καμπύλη η οποία αναπαριστά την θερμοκρασία συνεκτικότητας (“coherency temperature”). Ο όρος συνεκτικότητα συνδέεται με την αλλαγή στο ιξώδες [10] που συντελείται κατά την μετάβαση από την περιοχή “slurry” στην περιοχή “mushy” και η δομή γίνεται πλέον όπως στη “mush” περιοχή της Εικόνα 7β. Για

τα κράματα διαμόρφωσης που χυτεύονται μέσω της DC χύτευσης συνήθως η μετάβαση συμβαίνει σε κλάσμα όγκου στερεής φάσης μεταξύ 0,2 και 0,33 σύμφωνα με την πηγή: [9] ενώ υποστηρίζονται τιμές στο εύρος 0,25-0,6 σύμφωνα με την πηγή: [10] εξαρτώμενη από την μορφολογία των στερεών κόκκων. Με περαιτέρω πτώση της θερμοκρασίας οι στερεοί δενδρίτες αρχίζουν να έρχονται σε επαφή, σχηματίζουν συνδέσεις (γνωστές ως γέφυρες [10]) αυξάνοντας περαιτέρω τη συνεκτικότητα της δομής. Το κράμα ξεκινά να συμπεριφέρεται πλέον σαν στερεό, να αποκτά μηχανική απόκριση με αποτέλεσμα να προκαλείται συρρίκνωση. Η θερμοκρασία μηχανικής συνεκτικότητας αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως “coalescence temperature” [13], [14] ως “rigidity temperature” [10] αλλά και ως “mechanical coherency temperature” [15] και συνήθως αντιστοιχεί σε κλάσμα όγκου στερεής φάσης 85-95% [12].



### 2.3 Συνήθη ελαττώματα σε χυτά μέσω Direct Chill Casting

Η υψηλή ζήτηση κραμάτων αλουμινίου οδήγησε στο να αποκτήσει ευρεία εφαρμογή η DC χύτευση για κάλυψη των διαρκών αυξανόμενων απαιτήσεων. Συνεχώς η διεργασία DC χύτευσης εφαρμόζεται σε κράματα αλουμινίου νέων συστάσεων με σκοπό να παραχθούν πλινθώματα ή μπιγέτες βελτιωμένων μηχανικών ή αντιδιαβρωτικών ιδιοτήτων. Επομένως είναι επιτακτική ανάγκη η γνώση των παραμέτρων της διεργασίας και ο πλήρης έλεγχός τους, έτσι ώστε τα προϊόντα της DC χύτευσης να χαρακτηρίζονται κατά το δυνατόν από απουσία ελαττωμάτων. Τα συνήθη ελαττώματα που εμφανίζονται σε χυτά πλινθώματα ή μπιγέτες κραμάτων αλουμινίου μέσω της DC χύτευσης περιγράφονται στη συνέχεια.

#### 2.3.1 Φαινόμενα ρηγματώσεων

##### 2.3.1.1 Θερμή Ρηγμάτωση ή “Hot Tearing”

###### 2.3.1.1.1 Ορισμός

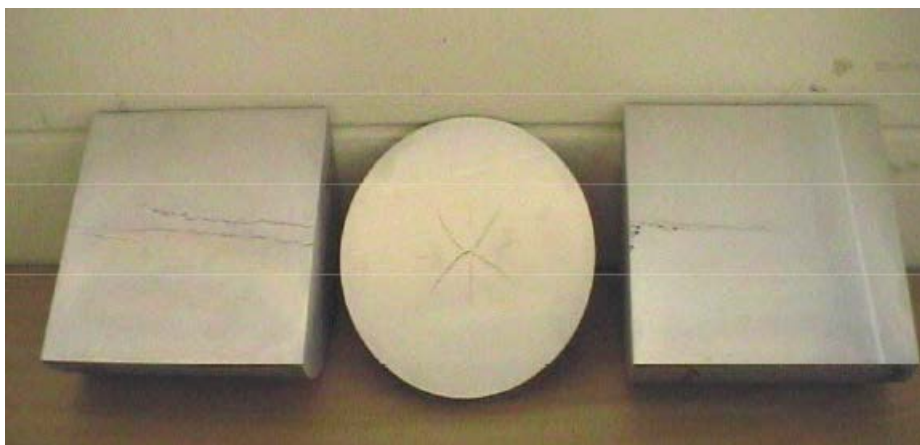
Η ρηγμάτωση που εκκινεί κατά την στερεοποίηση του κράματος λαμβάνει συχνά διάφορες ονομασίες στη διεθνή βιβλιογραφία όπως “hot crack”, “hot tear” ή “hot shortness”. Ο όρος “hot” υποδηλώνει ότι η ρηγμάτωση εκκινεί σε περιοχές υψηλών θερμοκρασιών (πάνω από τη θερμοκρασία solidus).

###### 2.3.1.1.2 Μηχανισμός Δημιουργίας των “hot tears”

Εξ’ ορισμού τα ελαττώματα τύπου “hot tears” εκκινούν σε θερμοκρασίες ανώτερες της θερμοκρασίας solidus εντός της ημίρρευστης ζώνης. Κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, η ροή του ρευστού τήγματος διαμέσου της ημίρρευστης ζώνης συνεχώς περιορίζεται, όσο αυξάνεται το κλάσμα όγκου στερεής φάσης. Ως αποτέλεσμα, κάποια στιγμή είναι ανέφικτο πλέον το τήγμα να εισχωρήσει στις κενές περιοχές που δημιουργούνται κατά την συρρίκνωση λόγω στερεοποίησης. Επομένως σε αυτές τις περιοχές δημιουργείται πορώδες. Οι πόροι αποτελούν σημεία συσσώρευσης τάσεων όπου κάτω από την επίδραση των υψηλών θερμικών τάσεων λόγω συρρίκνωσης κατά την στερεοποίηση οδηγούν σε εκκίνηση ρηγματώσεων. Συνήθως εμφανίζονται στο κέντρο του πλινθώματος όπου εκεί έχει βρεθεί ότι επικρατεί η κατάσταση του πιο έντονου εφελκυστικού τασικού πεδίου. Ερευνητικές μελέτες αποδεικνύουν ότι το φαινόμενο hot tearing συμβαίνει στα τελευταία στάδια της στερεοποίησης όπου το κλάσμα όγκου στερεής φάσης μπορεί να φθάσει την τιμή των 85-95% και η στερεή φάση έχει δομηθεί πλέον ως ένα δίκτυο συνδεδεμένων κόκκων ενώ η υγρή φάση είναι εγκλωβισμένη εντός ορισμένων κοιλοτήτων. [2], [10], [11], [16]

### 2.3.1.1.3 Μορφολογία και συνέπειες του hot tearing

Μορφολογικά τα hot tears διακρίνονται από την σχετικά ομαλή επιφάνεια θραύσης στην οποία μπορεί να βρεθούν και «γέφυρες» που να συνδέουν τα δύο τμήματα της ρηγμάτωσης μεταξύ τους [10]. Η ρηγμάτωση δύναται να διατρέχει ολόκληρο το



Εικόνα 8: Τυπική μορφολογία των hot tears στο κεντρικό τμήμα μπιγέτας κράματος Al-2Cu. Πηγή: [10]

πλίνθωμα κατά την αξονική διεύθυνση ή μπορεί να επεκτείνεται και στην διαμήκη διεύθυνση γεγονός που είναι ικανό να διαχωρίσει το πλίνθωμα σε δύο μέρη με αποτέλεσμα τη διαρροή τήγματος. Τυπικά hot tears φαίνονται στην Εικόνα 8. Η διεύρυνση των hot tears οδηγεί σε παύση της διεργασίας χύτευσης και κατά συνέπεια το πλίνθωμα πρέπει να επανα-τηχθεί.[2]

### 2.3.1.1.4 Επιρρέπεια σε hot tearing

Η επιρρέπεια σε hot tearing αυξάνεται όταν το κράμα παραμένει για μεγαλύτερο διάστημα εντός της μεταβατικής ζώνης δηλ. όταν το εύρος μεταξύ liquidus και solidus θερμοκρασιών διευρύνεται [17]. Ένα από τα πιο επιρρεπή κράματα σε hot tearing είναι το AA5182 λόγω της μεγάλης παραμονής σε ημίρρευστη κατάσταση [2] καθώς το θερμοκρασιακό εύρος ημίρρευστης φάσης αγγίζει περίπου τους 101 K [15]. Οι V. Schneider και E.K. Jensen [18] μελέτησαν την ρηγμάτωση στην χύτευση μπιγέτων και υποστήριξαν ότι το μεταλλουργικό μήκος αποτελεί κριτήριο για θερμή ρηγμάτωση. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο, η πιθανότητα για θερμή ρηγμάτωση αυξάνεται λόγω του αυξανόμενου μεταλλουργικού μήκους. Αυξάνοντας το μεταλλουργικό μήκος, αυξάνονται και οι διαστάσεις της ημίρρευστης ζώνης στο κέντρο του πλινθώματος. Ως αποτέλεσμα, αυξάνεται η πιθανότητα μείωσης της ροής του τήγματος σε δυσπρόσιτες περιοχές και επομένως και η επιρρέπεια σε hot tearing.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί αρκετές φορές διαφορετικά κριτήρια θερμής ρηγμάτωσης που όταν ικανοποιείται μια ορισμένη συνθήκη ανάλογα με τις παραμέτρους χύτευσης τότε αυξάνεται και η επιρρέπεια σε θερμή ρηγμάτωση. Αναφορικά με την επιρρέπεια σε hot tearing, στην έρευνα των Suyitno et. al. [19] συνοψίζονται 8 διαφορετικά κριτήρια για θερμή ρηγμάτωση και συγκρίνονται τα αποτελέσματά τους. Ακολούθως, διαπιστώθηκε ότι 6 από τα 8 κριτήρια υποστηρίζουν ότι η επιρρέπεια αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας χύτευσης και 5 από τα 8 κριτήρια υποστηρίζουν ότι η θερμή ρηγμάτωση αναμένεται να συμβεί στην κεντρική περιοχή του πλινθώματος.

#### 2.3.1.1.5 Πιθανές μέθοδοι εξάλειψης του φαινομένου

Το hot tearing έχει παρατηρηθεί ότι συμβαίνει στο κέντρο του πλινθώματος DC χύτευσης και η αιτία εμφάνισής του είναι το πορώδες σε συνδυασμό με την ανάπτυξη εκτεταμένων εφελκυστικών τάσεων. Κατά την φάση εκκίνησης, οι τιμές των εφελκυστικών τάσεων στο κέντρο του πλινθώματος φθάνουν τις μέγιστες και υποβοηθούν τον σχηματισμό “hot cracks”. Πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί για να μειώσουν την επιρρέπεια σε hot tearing. Για παράδειγμα η μεθοδολογία “ramping” που υπονοεί την σταδιακή αύξηση της ταχύτητας χύτευσης κατά τη φάση εκκίνησης [8], είναι πιθανόν να μειώσει την επιρρέπεια σε “hot tearing” [2].

Επιπροσθέτως, η εκτροπή-απόσπαση του νερού κατά την δευτερογενή απόψυξη συγκαταλέγεται στις μεθόδους που περιορίζουν την επιρρέπεια σε θερμή ρηγμάτωση. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι μέσω μιας διάταξης εκτροπής νερού δύναται να ελεγχθεί και να περιοριστεί ο ρυθμός απόψυξης στο κέντρο του πλινθώματος με αποτέλεσμα να μειώνονται τα αντίστοιχα “temperature gradients” και κατ’ επέκταση οι παραμένουσες τάσεις στο πλινθώμα. Για την υλοποίηση της παραπάνω προσέγγισης έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι στην διεθνή βιβλιογραφία όπως η χρήση air-jets τοποθετημένων σε ορισμένη απόσταση κάτω από το καλούπι που εμφυσούν αέρα στην αντίθετη κατεύθυνση της ροής του νερού με στόχο την εκτροπή του νερού από την επιφάνεια του πλινθώματος. Αυτό έχει σαν συνέπεια την μείωση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας διότι ο αέρας ως μονωτής της θερμότητας έχει πολύ μικρότερο συντελεστή σε σχέση με το νερό. Η απόσταση των air-jets μεταβάλλεται ανάλογα με την χημική σύσταση του πλινθώματος, τον ρυθμό απόψυξης κατά την δευτερογενή ζώνη και την ταχύτητα χύτευσης. [20] Ακόμη η εφαρμογή ενός εκτροπέα νερού (“wiper”) έχει αποδειχθεί ότι συμβάλλει επίσης στην μείωση των εφελκυστικών τάσεων στο κέντρο του πλινθώματος με αποτέλεσμα να μειώνει και την επιρρέπεια σε hot tearing [13], [14].

### 2.3.1.2 Ψυχρή Ρηγμάτωση ή Cold Cracking

Ο όρος “cold” υποδηλώνει ότι τα “cold cracks” αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες κατώτερες από τη θερμοκρασία solidus, στο πλήρως στερεοποιημένο κράμα. Στην πρόσφατη διεθνή βιβλιογραφία αποδείχθηκε ότι ο σχηματισμός cold cracks είναι πιο πιθανός σε κράματα αλουμινίου υψηλής αντοχής που μπορούν να υποστούν σκλήρυνση μέσω θερμικής



Εικόνα 9: Τυπική μορφολογία ψυχρής ρηγμάτωσης σε πλινθώμα. Πηγή: [10]

κατεργασίας όπως της σειράς 2000 ή 7000 στην κατάσταση μετά τη χύτευση κυρίως εξαιτίας υποβαθμισμένων θερμικών και μηχανικών ιδιοτήτων. Οι χαμηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας σε σύγκριση με άλλα κράματα αλουμινίου οδηγούν σε υψηλά “temperature gradients”, που με τη σειρά τους οδηγούν σε συσσώρευση θερμικών τάσεων σε διαφορετικά σημεία του πλινθώματος. Στην επιφάνεια και συγκεκριμένα στο σημείο όπου προσκρούει το νερό αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις οι οποίες όμως αναιρούνται κατά την μετέπειτα πορεία του πλινθώματος λόγω ανάπτυξης θλιπτικών τάσεων. Αυτό δεν μπορεί να συμβεί στο κέντρο του πλινθώματος όπου οι τάσεις είναι εφελκυστικές σε όλο το μήκος του πλινθώματος οπότε η επιρρέπεια σε cold cracks είναι πολύ υψηλή στο κέντρο του πλινθώματος. Παράδειγμα ενός cold crack στο κέντρο του πλινθώματος φαίνεται στην Εικόνα 9. [2], [21]

Ωστόσο, λόγω των ιδιοτήτων του κράματος AA5182 περισσότερη προσοχή και έλεγχος των παραμέτρων αξίζει να δοθεί με σκοπό την πρόληψη θερμής ρηγμάτωσης παρά ψυχρής ρηγμάτωσης μιας και η τελευταία φαίνεται να αποτελεί κυρίαρχο πρόβλημα σε “heat-treatable” κράματα αλουμινίου.

### 2.3.2 Μακροδιαφορισμός

#### 2.3.2.1 Ορισμός και αρνητικές επιδράσεις

Με τον όρο μακροδιαφορισμός εννοείται ο διαφορισμός ή η ανομοιογενής κατανομή κραματικών στοιχείων σε μακροσκοπική κλίμακα, δηλ. στην κλίμακα μεγέθους ολόκληρου του πλινθώματος (σε έκταση μερικών cm ακόμα και m). Η συγκέντρωση των κραματικών στοιχείων μπορεί να διαφέρει σημαντικά από μια περιοχή σε άλλη περιοχή του πλινθώματος. Σε ακραίες περιπτώσεις, η σύσταση σε συγκεκριμένες περιοχές του πλινθώματος μπορεί να βρίσκεται εκτός από τα προκαθορισμένα όρια

σύστασης του κράματος [9]. Αυτό, με τη σειρά του μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιομορφία μηχανικών ιδιοτήτων που επηρεάζουν την συμπεριφορά του πλινθώματος κατά την μετέπειτα διεργασία και επιδρούν στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Μια σημαντική παρατήρηση όσον αφορά στον μακροδιαφορισμό είναι το γεγονός ότι οι μεταβολές της σύστασης που παρατηρήθηκαν κυρίως στο κέντρο του πλινθώματος οδηγούν με τη σειρά τους σε υποβάθμιση της θερμοκρασίας solidus με αποτέλεσμα το να αυξάνεται η περιοχή που το κράμα ευρίσκεται στην ημίρρευστη κατάσταση και να αυξάνεται η επιρρέπεια σε hot tearing [5]. Ο μακροδιαφορισμός είναι ένα πραγματικά σοβαρό ζήτημα εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν μπορεί να εξαλειφθεί κατά την μετέπειτα επεξεργασία του πλινθώματος, σε αντιδιαστολή με τον μικροδιαφορισμό, που μπορεί να εξαλειφθεί σχετικά εύκολα μέσω θερμικής κατεργασίας.

#### 2.3.2.2 *Είδη Μακροδιαφορισμού*

Αρχικά διακρίνονται δύο περιπτώσεις εμφάνισης του μοντέλου μακροδιαφορισμού. Στην πρώτη περίπτωση, για κραματικά στοιχεία με συντελεστή κατανομής  $K < 1$  το μέτωπο στερεοποίησης ωθεί το υγρό τήγμα εμπλουτισμένο σε διαλύτη προς το θερμότερο μέρος του χυτού, δηλ. το κέντρο. Ως αποτέλεσμα, μετά τη στερεοποίηση παρατηρείται το κέντρο του χυτού να είναι εμπλουτισμένο σε διαλύτη σε σχέση με τις εξωτερικές περιοχές του χυτού. Αυτό το είδος μακροδιαφορισμού ονομάζεται κανονικός διαφορισμός (“normal segregation”). Ωστόσο, σε πλινθώματα ή μπιγέτες προερχόμενα από DC χύτευση συνήθως επικρατεί η αντίθετη κατάσταση. Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι η περιφέρεια του πλινθώματος/μπιγέτας είναι εμπλουτισμένη σε διαλύτη ενώ το κέντρο απεμπλουτίζεται. Αυτός ο τύπος μακροδιαφορισμού ονομάζεται ανάστροφος διαφορισμός (“inverse segregation”) και είναι χαρακτηριστικός των DC χυτών πλινθωμάτων από μη σιδηρούχα κράματα. Το φαινόμενο του ανάστροφου διαφορισμού στον ύψιστο βαθμό του οδηγεί είτε σε επανάτηξη και πιθανές διαρροές τήματος ή σε στρώμα διαφορετικής σύστασης (“exudation”) στην επιφάνεια του χυτού και δημιουργείται όταν το εμπλουτισμένο τήγμα διεισδύει και διαπερνά μέσα από το εξωτερικό κελί του πλινθώματος και στερεοποιείται στην επιφάνεια. [8]

Ανάλογα με τη συγκέντρωση ενός χημικού στοιχείου σε σχέση με τη μέση συγκέντρωση ο μακροδιαφορισμός διακρίνεται σε: (α) αρνητικό μακροδιαφορισμό (η συγκέντρωση ενός στοιχείου σε ένα σημείο του πλινθώματος είναι χαμηλότερη από τη μέση συγκέντρωση στο κράμα) και (β) θετικό μακροδιαφορισμό (το αντίθετο). [9]

#### 2.3.2.3 *Μηχανισμός πρόκλησης μακροδιαφορισμού*

Κινητήρια δύναμη του μακροδιαφορισμού είναι η σχετική κίνηση της υγρής και της στερεής φάσης η οποία συμβάλλει στο διαφορισμό κραματικών στοιχείων (μικροδιαφορισμό). Είναι μια άμεση

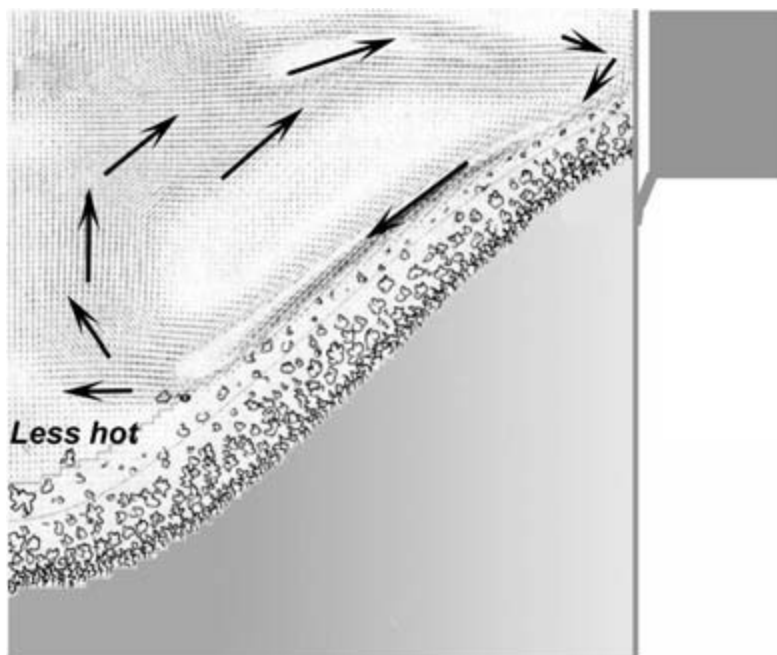
συνέπεια των φαινομένων μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεργασία της στερεοποίησης.[10] Κατά καιρούς έχουν προταθεί πολλοί διαφορετικοί μηχανισμοί που εμπλέκονται στη δημιουργία της σχετικής κίνησης μεταξύ υγρής και στερεής φάσης. Οι επικρατέστεροι από αυτούς είναι:

- Μακροδιαφορισμός οφειλόμενος σε συναγωγή
- Μακροδιαφορισμός λόγω συρρίκνωσης
- Μακροδιαφορισμός λόγω συσσώρευσης των επιπλεόντων κόκκων

Σε αυτό το σημείο αξίζει να δοθεί μια σύντομη περιγραφή για κάθε μηχανισμό ώστε σε επόμενο στάδιο να είναι κατανοητό το πώς επιδρούν οι παράμετροι χύτευσης σε αυτούς τους μηχανισμούς πρόκλησης του μακροδιαφορισμού.

#### 2.3.2.4 Μακροδιαφορισμός οφειλόμενος σε συναγωγή

Ως γνωστόν, κατά τη διεργασία της Direct Chill χύτευσης πλινθωμάτων κραμάτων αλουμινίου, η απόψυξη δεν δύναται να είναι ομοιόμορφη σε όλο τον όγκο του πλινθώματος. Σε κάθε περίπτωση, οι εξωτερικές πλευρές του πλινθώματος αποψύχονται πιο γρήγορα από το εσωτερικό τμήμα επομένως αναμένεται να υπάρχει σημαντική διαφορά στη θερμοκρασία του κεντρικού τμήματος σε σχέση με το εξωτερικό. Η διαφορά στις θερμοκρασίες οδηγεί προφανώς σε διαφορετικές πυκνότητες του υγρού



Εικόνα 10: Αναπαράσταση της ροής οφειλόμενης σε “thermo-solutal convection”. Πηγή: [8]

τήγματος<sup>1</sup>. Ως αποτέλεσμα προκαλείται θερμική συναγωγή με αποτέλεσμα το ψυχρότερο (και μεγαλύτερης πυκνότητας υγρό) να καταβυθίζεται από την περιφέρεια του τήγματος προκαλώντας ορμή που ωθεί το υγρό τήγμα, στο κέντρο του πλινθώματος, να ανυψώνεται (Εικόνα 10). Στην περιοχή όπου ευρίσκεται το υγρό τήγμα επικρατεί μόνο το φαινόμενο της θερμικής συναγωγής που προαναφέρθηκε. Ωστόσο, στην περιοχή κάτω ακριβώς από την ισόθερμη liquidus (“slurry” ζώνη)

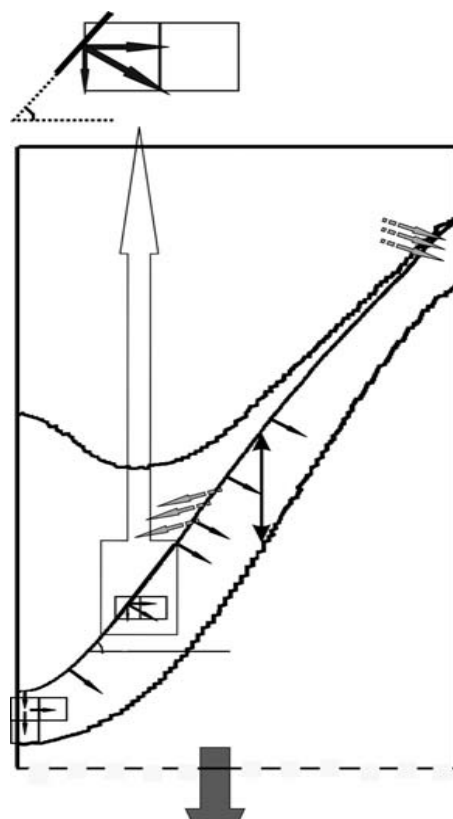
<sup>1</sup> Η σχέση μεταξύ πυκνότητα και θερμοκρασίας γίνεται αντιληπτή με τη βοήθεια του διαγράμματος πυκνότητας-θερμοκρασίας του κράματος αλουμινίου AA5182 που παρατίθεται στην ενότητα 3.2.5.2.

όπου εκκινεί η στερεοποίηση, εμφανίζονται φαινόμενα μικροδιαφορισμού κραματικών στοιχείων που σε συνδυασμό με τη ροή λόγω εύκολης διαπερατότητας της slurry ζώνης οδηγεί σε διαφορές στη συγκέντρωση. Η διαφορά στη συγκέντρωση οδηγεί με τη σειρά της σε διαφορετικές πυκνότητες του ρευστού προκαλώντας συναγωγή λόγω συγκέντρωσης. Αθροιστικά η συναγωγή οφειλόμενη σε διαφορές στη θερμοκρασία και σε διαφορές στη συγκέντρωση συνδυάζονται σε μια συνολική ροή και αποτελεί μηχανισμό πρόκλησης μακροδιαφορισμού που αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως “thermo-solutal convection driven macrosegregation”.

Η διείσδυση του υγρού μέσα στη slurry ζώνη συμβαίνει κοντά στην εξωτερική πλευρά του πλινθώματος. Έτσι, το εμπλουτισμένο σε διαλύτη υγρό τήγμα από το εξωτερικό μέρος αναμειγνύεται με το υπόλοιπο τήγμα και μεταφέρεται προς το κέντρο με αποτέλεσμα να οδηγεί σε θετικό διαφορισμό στο κέντρο. Για την εξωτερική πλευρά, η ροή κατευθύνεται κάθετα προς την επιφάνεια και το υγρό τήγμα ονομαστικής σύστασης διεισδύει στη mushy ζώνη αραιώνοντας το τήγμα σε εκείνο το σημείο που είχε εμπλουτιστεί από την στερεοποίηση. Έτσι, αναμένεται αρνητικός διαφορισμός στις εξωτερικές πλευρές του πλινθώματος. Συνοψίζοντας, η “thermo-solutal” συναγωγή σε DC χυτά πλινθώματα οδηγεί σε κανονικό διαφορισμό. [8]

#### 2.3.2.5 Μακροδιαφορισμός λόγω συρρίκνωσης κατά τη στερεοποίηση

Η συρρίκνωση λόγω στερεοποίησης είναι αποτέλεσμα της αλλαγής της πυκνότητας που λαμβάνει χώρα σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος στερεοποίησης (μεταβατική περιοχή). Ωστόσο, στην slurry ζώνη η συρρίκνωση λόγω στερεοποίησης αντισταθμίζεται εύκολα από την ροή του υγρού τήγματος. Δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή της πίεσης που θα οδηγήσει σε επιπρόσθετη ροή, επομένως στην slurry ζώνη ο βασικός μηχανισμός για τον μακροδιαφορισμό είναι η θερμική ή λόγω συγκέντρωσης συναγωγή που προαναφέρθηκε. Αντιθέτως βαθιά εντός της mushy ζώνης, όπου η διαπερατότητα είναι περιορισμένη η συρρίκνωση λόγω στερεοποίησης προκαλεί σημαντικές διαφορές στην πίεση πάνω από την στερεοποιούμενη στρώση (κοντά στην ισόθερμη solidus) δημιουργώντας την κινητήρια δύναμη για ανάπτυξη ροής οφειλόμενης σε συρρίκνωση, με κατεύθυνση από το κέντρο προς την περιφέρεια του πλινθώματος όπως φαίνεται στην Εικόνα 11. Έχει αποδειχθεί στην πηγή: [8] ότι η πιο σημαντική



Εικόνα 11: Αναπαράσταση της “shrinkage induced flow” που οδηγεί σε ανάστροφο μακροδιαφορισμό. Πηγή: [8]

συνιστώσα της ταχύτητας της ροής είναι η κάθετη η οποία οδηγεί σε μεταφορά τήγματος εμπλουτισμένου σε διαλύτη προς την επιφάνεια του πλινθώματος ενώ ταυτόχρονα δεν υπάρχει επάνω από αυτή τη ζώνη τήγμα εμπλουτισμένο σε διαλύτη για να αντισταθμίσει τις απώλειες. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί σε ανάστροφο μακροδιαφορισμό (“inverse macrosegregation”).

#### 2.3.2.6 Μακροδιαφορισμός μέσω επιπλεόντων κόκκων

Κατά την DC χύτευση πλινθωμάτων αλουμινίου, εντός της slurry ζώνης λαμβάνει χώρα πυρήνωση και ανάπτυξη νέων κόκκων της στερεής φάσης οι οποίοι λόγω της αυξημένης πυκνότητάς τους σε σχέση με την υγρή φάση τείνουν να συγκεντρώνονται στο κέντρο και να καταβυθίζονται. Επομένως, στο κεντρικό τμήμα του χυτού συγκεντρώνεται μεγαλύτερο κλάσμα όγκου στερεής φάσης από ότι θα έπρεπε να υπάρχει. Ακόμη, οι κόκκοι πρωτογενούς στερεής φάσης σε κράματα αλουμινίου υποευτηκτικής σύστασης είναι πάντοτε απεμπλουτισμένοι σε διαλύτη, επομένως αναμένεται στο κέντρο να προκληθεί το φαινόμενο του ανάστροφου διαφορισμού. Στη διεθνή βιβλιογραφία κατά καιρούς έχουν δημοσιευθεί αμφιλεγόμενα αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση των επιπλεόντων κόκκων στο είδος και στο βαθμό του διαφορισμού. Σε μια πρόσφατη προσπάθεια ο Dmitry Eskin υποστηρίζει ότι με την υπάρχουσα επιστημονική επίγνωση, το φαινόμενο των επιπλεόντων κόκκων και της συγκέντρωσής τους στο κεντρικό μέρος του πλινθώματος συμβάλλει στην ανάπτυξη του ανάστροφου διαφορισμού, ωστόσο ο βαθμός στον οποίο επηρεάζεται διαφέρει για κάθε περίπτωση και πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά. [8], [9]

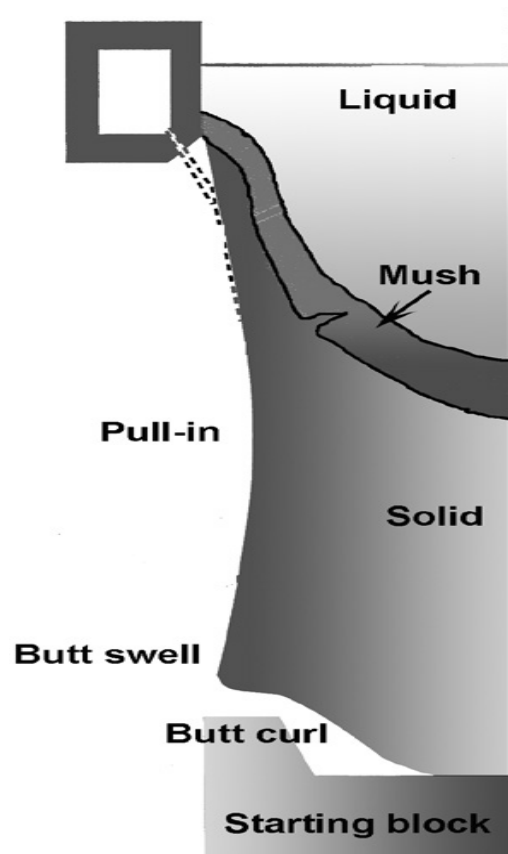
Πολλοί άλλοι δευτερεύοντες μηχανισμοί έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για να περιγράψουν το πολυσύνθετο φαινόμενο του μακροδιαφορισμού. Οι κύριοι μηχανισμοί που προαναφέρθηκαν αποσκοπούν στον να δοθεί μια αίσθηση του φαινομένου του μακροδιαφορισμού, ώστε σε μετέπειτα στάδιο να επιχειρηθεί ο συσχετισμός του με παραμέτρους χύτευσης. Η ανασκόπηση όλων των παραγόντων που συμβάλλουν στην εμφάνιση του φαινομένου ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσας εργασίας, ωστόσο προτείνονται για περαιτέρω έρευνα οι εξής βιβλιογραφικές αναφορές: [8], [9].



### 2.3.3 Παραμόρφωση πλινθώματος (“Ingot Distortion”)

Στην DC χύτευση αλουμινίου κατά την απόψυξη του πλινθώματος δημιουργούνται διαφορετικές θερμοκρασίες (“temperature gradients”) στο πλίνθωμα οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν στην ανάπτυξη έντονων θερμικών τάσεων και παραμορφώσεων του πλινθώματος. Οι πιο συχνές πλαστικές παραμορφώσεις στις οποίες υπόκειται ένα πλίνθωμα κατά την DC χύτευση (Εικόνα 12) είναι οι εξής:

- ✓ Butt curl
- ✓ Butt swell
- ✓ Inward pull-in



Εικόνα 12: Παραμορφώσεις πλινθώματος κατά την DC χύτευση. Πηγή: [10]

#### 2.3.3.1 Butt Curl

##### 2.3.3.1.1 Μηχανισμός πρόκλησης του φαινομένου

Κατά την φάση εκκίνησης (μέχρι το πρώτο μέτρο ανάσυρσης του πλινθώματος) συντελείται η μεταφορά θερμότητας από το πλίνθωμα προς το καλούπι, τη διάταξη πυθμένα καθώς και προς το νερό στη ζώνη δευτερογενούς απόψυξης μόλις το πλίνθωμα αναδύεται μέσα από το καλούπι. Επομένως σε αυτή τη φάση επικρατούν υψηλότεροι ρυθμοί απόψυξης από την μετέπειτα πορεία της διεργασίας. Οι πολύ υψηλοί ρυθμοί απόψυξης οδηγούν σε υψηλά επίπεδα θερμικών τάσεων που προκαλούν εκτεταμένη παραμόρφωση της βάσης του πλινθώματος (κύρτωση) που στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως “butt curl” (Εικόνα 12). [22]

##### 2.3.3.1.2 Συνέπειες του “butt curl”

Ο σχηματισμός του butt curl οδηγεί σε δύο βασικά προβλήματα κατά την διεργασία της χύτευσης. Αρχικά όταν κυρτώνονται οι γωνίες του κάτω μέρους του πλινθώματος, χάνεται η τέλεια επαφή που υπήρχε αρχικά με τη διάταξη πυθμένα και δημιουργείται κενό αέρος. Το κενό αέρος όπως και στο καλούπι έτσι και εδώ δυσχεραίνει την μεταφορά θερμότητας καθώς ο αέρας είναι μονωτής της θερμότητας με αποτέλεσμα η απόψυξη να συμβαίνει πολύ πιο αργά και σε ακραίες περιπτώσεις η

εσωτερική θερμότητα του πλινθώματος μπορεί να οδηγήσει σε επανάτηξη του στερεοποιημένου κελιού προκαλώντας διαρροές τήγματος. Το δεύτερο πρόβλημα που μπορεί να συμβεί είναι να εισχωρήσει νερό από την ζώνη δευτερογενούς απόψυξης (“water intrusion”) στο κενό μεταξύ πλινθώματος και διάταξης πυθμένα με αποτέλεσμα η ταχεία εξάτμισή του να δημιουργήσει κρουστικά φορτία στην κάτω επιφάνεια του πλινθώματος, προκαλώντας με την σειρά της και αυτή εκτεταμένη παραμόρφωση και αυξάνοντας τις πιθανότητες για επανάτηξη και διαρροές τήγματος. [2], [15], [22]

#### 2.3.3.1.3 Προτεινόμενες λύσεις για πρόληψη του “butt curl”

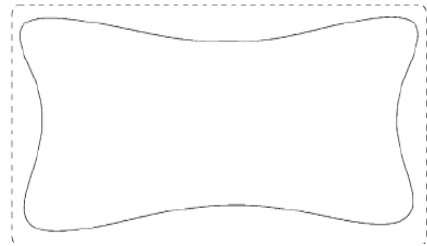
Μερικές από τις λύσεις που έχουν προταθεί κατά καιρούς για τον περιορισμό του φαινομένου του butt curl περιλαμβάνουν τον ψεκασμό υγρού CO<sub>2</sub> μέσα στο σύστημα κυκλοφορίας του νερού της δευτερογενούς απόψυξης. Η διάλυση υγρού CO<sub>2</sub> υπό υψηλή πίεση συμβάλλει στο σχηματισμό φυσαλίδων όταν το νερό έρχεται σε επαφή με το πλίνθωμα οδηγώντας στο σχηματισμό τελικά ενός φιλμ μόνωσης το οποίο θα επιβραδύνει το ρυθμό απόψυξης στην φάση εκκίνησης. [23] Άλλη μια μέθοδος είναι η παλμική εκτόξευση του νερού κατά την φάση εκκίνησης ώστε να μειωθεί ο ρυθμός απόψυξης και ακολούθως να μειωθούν οι θερμικές τάσεις [22].

#### 2.3.3.2 “Butt Swell”

Κατά την φάση εκκίνησης η μειωμένη ταχύτητα χύτευσης καθώς και η απόψυξη μέσω της διάταξης πυθμένα οδηγούν στο να περιορίζεται το μεταλλουργικό μήκος εντός του πλινθώματος με αποτέλεσμα να περιορίζεται η συστολή του πλινθώματος σε σχέση με την επόμενη φάση ψευδο-ισορροπίας της διεργασίας. Ως αποτέλεσμα το πρώτο τμήμα του πλινθώματος θα έχει σχεδόν τις ονομαστικές διαστάσεις του καλουπιού σαν να διενεργείται χύτευση μέσα σε ένα μόνιμο καλούπι (Εικόνα 12). Αυτό προφανώς δυσχεραίνει τις μετέπειτα μεταλλουργικές διεργασίες που θα επιβληθούν στο πλίνθωμα και πρέπει να αφαιρεθεί ένα μέρος του (“scalping”) αυξάνοντας τις απώλειες σε κράμα κατά την παραγωγική διαδικασία. Το ίδιο φαινόμενο αποδείχθηκε ότι συμβαίνει και κατά την φάση ολοκλήρωσης της διεργασίας, λόγω των παρόμοιων θερμικών συνθηκών που επικρατούν, με αποτέλεσμα το φαινόμενο του butt swell να παρατηρείται συχνά και στο ανώτερο τμήμα του πλινθώματος. [22]

### 2.3.3.3 Inward Pull-In

Κατά την φάση ισορροπίας της DC χύτευσης, το στερεοποιημένο κελί συστέλλεται προς το κέντρο ανομοιόμορφα υπό τη μορφή οστού όπως φαίνεται και στην Εικόνα 13. Με σκοπό την αντιμετώπιση του inward pull-in με μεθόδους δοκιμής και σφάλματος αποδείχθηκε ότι η καμπυλότητα των πλάγιων πλευρών του πλινθώματος (“end faces”) οδήγησε σε ικανοποιητικά αποτελέσματα.



Εικόνα 13: Παραμόρφωση της διατομής ενός πλινθώματος κατά την DC χύτευση. (Μορφολογία οστού) Πηγή: [2]

[22] Αυτό οδήγησε σε καλούπια τα οποία στις πλάγιες πλευρές διαμορφώνονται συνήθως με 2 ή 3 ευθύγραμμα τμήματα όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό και από τη γεωμετρία της διάταξης πυθμένα της Εικόνας 14.



Εικόνα 14: Διάταξη πυθμένα εξοπλισμού DC χύτευσης στην οποία παρατηρείται η διαμόρφωση των πλάγιων πλευρών σε 2 ευθύγραμμα τμήματα με σκοπό την εξάλειψη του inward pull-in. Πηγή: [24]

### 3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

#### 3.1 Ανασκόπηση Θερμικών Παραγόντων – Οριακές Συνθήκες Προσομοίωσης

##### 3.1.1 Εισαγωγή

Με σκοπό τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να είναι όσο το δυνατό πιο αξιόπιστα, θα πρέπει να εξασφαλισθούν ακριβείς είσοδοι στο μοντέλο όσων αφορά στις οριακές συνθήκες και στις ιδιότητες του υλικού υπό μελέτη [25]. Μια μέθοδος για να εξασφαλισθούν αυτά τα δεδομένα είναι η διενέργεια πολλαπλών πειραμάτων Direct Chill χύτευσης κατά τα οποία μετράται η θερμοκρασία μέσω θερμοηλεκτρικών ζευγών (“thermocouples”) και ακολούθως η εφαρμογή τεχνικών ανάστροφης προσομοίωσης (“inverse modeling”) όπου θα λαμβάνουν ως είσοδο τα αποτελέσματα των πειραμάτων και θα υπολογίζουν τις συνθήκες που τα προκάλεσαν. Συγκεκριμένα, στην DC χύτευση η ανάστροφη μοντελοποίηση έχει εφαρμοστεί, για παράδειγμα, για να ερευνηθούν οι οριακές συνθήκες των ζωνών απόψυξης και να καθοριστεί η θερμική αγωγιμότητα του κράματος σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Αξίζει σε αυτό το σημείο να διενεργηθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση ώστε να συλλεχθούν δεδομένα για τις οριακές τιμές και τις ιδιότητες του κράματος AA5182 που θα τεθούν στο λογισμικό προσομοίωσης για την κατά το δυνατόν μεγαλύτερη προσέγγιση των ρεαλιστικών συνθηκών. [17]

##### 3.1.2 Μεταφορά Θερμότητας κατά την DC χύτευση

Στην Direct Chill χύτευση, όπως προαναφέρθηκε, ένα μικρό κλάσμα της ολικής θερμότητας αποσπάται από το πλινθώμα μέσω του καλουπιού και της διάταξης πυθμένα. Ο κυρίαρχος μηχανισμός απαγωγής θερμότητας είναι η ζώνη δευτερογενούς απόψυξης με τη χρήση νερού όπου αποσπάται το 85-95% της θερμότητας του πλινθώματος. Ωστόσο η απόψυξη του πλινθώματος στο καλούπι και μέσω της διάταξης πυθμένα είναι καθοριστικοί παράγοντες για την ποιότητα της επιφάνειας του πλινθώματος καθώς και για την θερμοκρασία επιφάνειας η οποία καθορίζει τους μηχανισμούς της δευτερογενούς απόψυξης, διότι το νερό δεν αντιδρά με τον ίδιο τρόπο σε διαφορετικές θερμοκρασίες. [17]

Σύμφωνα με τον *D. Mortensen* [26] για λόγους απλοποίησης των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας στις διάφορες περιοχές κατά την DC χύτευση χρησιμοποιούνται μεικτές οριακές συνθήκες (“Robin Boundary Conditions”). Στην περίπτωση αυτή, η ροή θερμότητας από το όριο του πλινθώματος υπολογίζεται μέσω ενός συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι διαφορετικός σε κάθε περιοχή απόψυξης και παριστάνει μια γραμμική τάση (για λόγους απλοποίησης) της ροής θερμότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία μέσω της παρακάτω σχέσης :

$$q_b = h * (T_b - T_0)$$

$q_b$  : “Boundary Heat Flow Density”

$T_b$  : “Boundary Temperature”

$h$  : “Heat Transfer Coefficient (HTC)”

$T_0$  : “Ambient Temperature”

### 3.1.2.1 Μεταφορά θερμότητας μεταξύ πλινθώματος και καλουπιού

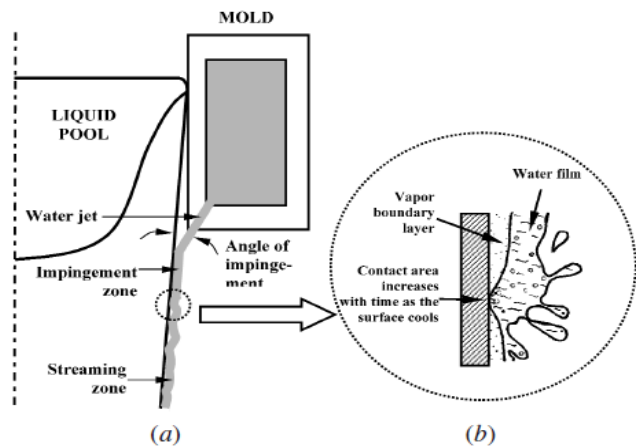
Στην περιοχή επαφής πλινθώματος – καλουπιού ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από την θερμική αγωγιμότητα του λιπαντικού φιλμ που παρεμβάλλεται καθώς και από το πάχος του. Στην περιοχή που το πλίνθωμα λόγω συστολής χάνει την επαφή του με το καλούπι και δημιουργείται κενό αέρος, υπολογίζεται ένας μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (HTC) για όλη την κατάσταση απόψυξης με σκοπό να απλοποιηθεί η προσομοίωση. Θεωρητικά οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας στο κενό αέρος είναι οι παρακάτω:

- Ακτινοβολία, που θεωρείται γραμμική μέσω του νόμου ακτινοβολίας του “Stefan-Boltzman”.
- Αγωγή στο κενό αέρος (η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή είναι αμελητέα για ένα τυπικό πάχος κενού αέρος).
- Αγωγή στο λιπαντικό φιλμ.

[26]

### 3.1.2.2 Μεταφορά θερμότητας μεταξύ πλινθώματος και νερού στη ζώνη δευτερογενούς απόψυξης

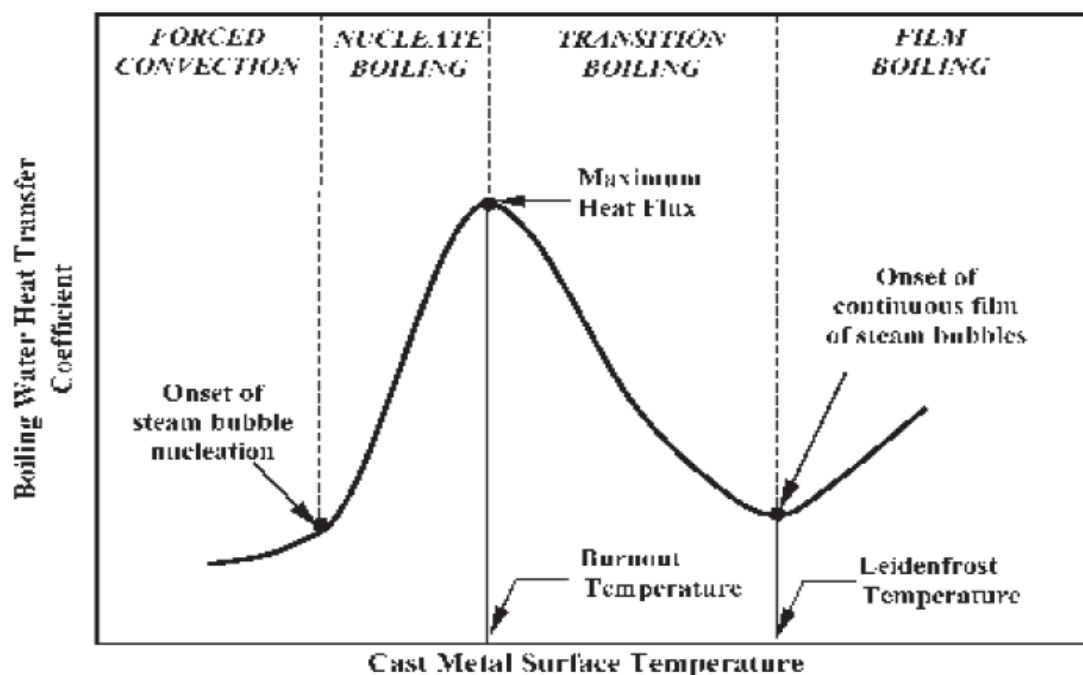
Στην Direct Chill χύτευση αλουμινίου, κάτω από το καλούπι υπάρχουν εκτοξευτήρες νερού οι οποίοι ρίπτουν νερό απευθείας στην επιφάνεια του πλινθώματος (Εικόνα 15 α). Όπως προαναφέρθηκε και στο Θεωρητικό Μέρος διακρίνονται δύο διαφορετικές περιοχές στην ζώνη δευτερογενούς απόψυξης: α) η ζώνη πρόσκρουσης (“impingement zone”) [17] του νερού στην επιφάνεια του πλινθώματος (με μήκος περί τα 10-15 mm συνήθως [27])



Εικόνα 15: (α) Ζώνη Δευτερογενούς Απόψυξης κατά την DC χύτευση, (β) Απεικόνιση των διαφορετικών μηχανισμών απόψυξης του φιλμ νερού. Πηγή: [27]

η οποία προκαλεί απότομη απόψυξη του πλινθώματος λόγω της άμεσης επαφής της επιφάνειας του με το νερό και β) η ζώνη ελεύθερης ροής (“streaming zone”) [17] του νερού ακριβώς από κάτω από την προηγούμενη ζώνη όπου η μεταφορά θερμότητας ελαττώνεται ραγδαία λόγω της απώλειας ορμής του φιλμ νερού όσο αυξάνεται η απόσταση από την ζώνη πρόσκρουσης. Το νερό ρέει γύρω από τις

επιφάνειες του πλινθώματος με ομοιόμορφη ταχύτητα σχηματίζοντας ένα φιλμ ατμού γύρω από αυτές λόγω των αρκετά υψηλών θερμοκρασιών. Καθώς η θερμοκρασία της επιφάνειας του πλινθώματος ελαττώνεται η στρώση ατμού καταστρέφεται και αναπτύσσεται επαφή του φιλμ νερού με την επιφάνεια του πλινθώματος. Η περιοχή επαφής του φιλμ νερού με την επιφάνεια του πλινθώματος αυξάνεται όσο η θερμοκρασία επιφάνειας μειώνεται και προφανώς συνοδεύεται από μια αύξηση της μεταφοράς θερμότητας. Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί καμπύλη της “heat flux” σε συνάρτηση με την θερμοκρασία επιφανείας για να αποδοθεί όσο το δυνατόν με σαφήνεια η εξέλιξη των φαινομένων μεταφοράς σε αυτό το στάδιο (Εικόνα 16).



Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση της καμπύλης heat flux σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία επιφανείας στην οποία διαφαίνονται οι διαφορετικές συνθήκες βρασμού του νερού λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας επιφανείας. Πηγή: [10]

Στο διάγραμμα παρατηρούνται οι εξής περιοχές:

- ✓ Συναγωγή - Convection: Πρόκειται για την περιοχή σε θερμοκρασίες κατώτερες έως και ελαφρώς ανώτερες από την θερμοκρασία βρασμού του νερού (100°C). Σε αυτή την περιοχή η μεταφορά θερμότητας διενεργείται μέσω φυσικής συναγωγής στο φιλμ νερού το οποίο είναι προσκολλημένο στην επιφάνεια του μετάλλου. Εδώ ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι χαμηλός καθώς οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές. [17]
- ✓ Περιοχή πυρήνωσης υδρατμού - “Nucleate Boiling”: Καθώς η θερμοκρασία επιφανείας αυξάνεται περαιτέρω, δημιουργούνται φυσαλίδες υδρατμού πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου οι οποίες αποκολλώνται, ρέουν μέσα στο φιλμ του νερού και τελικά διαφεύγουν από

την ελεύθερη επιφάνεια. Η εμφάνιση αυτού του φαινομένου αυξάνεται με αυξανόμενη θερμοκρασία επιφάνειας. Η φύση του φαινομένου αυτού υποβοηθά την ανά-κυκλοφορία του νερού στην επιφάνεια του πλινθώματος με αποτέλεσμα να αυξάνεται ραγδαία ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέχρι να φθάσει μια μέγιστη τιμή (“Burnout Point”). Η μέγιστη τιμή αυξάνεται με αύξηση της παροχής του νερού και για το αλουμίνιο κατά προσέγγιση βρίσκεται κοντά στους 200°C. [27]

- ✓ Μεταβατική περιοχή – “Transition Boiling”: Πέρα από το Burnout Point οι φυσαλίδες αρχίζουν να προσκολλώνται στην επιφάνεια του μετάλλου σχηματίζοντας μια στρώση ατμού η οποία προφανώς αποτελεί εμπόδιο στην κυκλοφορία της μεταφοράς θερμότητας από το πλίνθωμα (ο αέρας είναι μονωτής της θερμότητας όπως προειπώθηκε). Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μειώνεται ραγδαία με αυξανόμενη τη θερμοκρασία, καθώς το φιλμ ατμού συνεχίζει να καλύπτει περισσότερη από την επιφάνεια του μετάλλου. Όταν η επιφάνεια του μετάλλου καλύπτεται πλήρως από ένα σταθερό φιλμ ατμού, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας φθάνει σε ένα ελάχιστο. Το σημείο της καμπύλης στο οποίο συμβαίνει αυτό ονομάζεται διεθνώς “Leidenfrost Point” και είναι μεταξύ 300-500°C για το αλουμίνιο. [27]
- ✓ Περιοχή “Film Boiling”: Σε θερμοκρασίες ανώτερες από το σημείο Leidenfrost, η θερμότητα μεταφέρεται μέσω ακτινοβολίας [17] και αγωγής διαμέσου του σταθερού φιλμ ατμού. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δεν επιδεικνύει μεγάλες μεταβολές σε σχέση με τη θερμοκρασία και είναι πολύ χαμηλός σε σχέση με την μέγιστη τιμή στο burnout point. [27]

Η τάση της καμπύλης στο διάγραμμα της Εικόνας 16 επιβεβαιώνεται και μέσω πειραματικών μετρήσεων με θερμοηλεκτρικά ζεύγη και κατάλληλους υπολογισμούς στην έρευνα των *J.B. Wiske* και *S.L. Cockcroft* [28]. Σε αυτό το σημείο είναι εύκολο να αντιληφθεί κανείς την ισχυρή εξάρτηση μεταξύ του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στη ζώνη δευτερογενούς απόψυξης και της θερμοκρασίας επιφανείας. Οι υψηλοί ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας που συσχετίζονται με την περιοχή “nucleate boiling” προκαλούν ραγδαία πτώση της θερμοκρασίας επιφανείας. Αντίθετα οι χαμηλοί ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας που συσχετίζονται με “film boiling” μπορεί να προκαλέσουν την αύξηση της θερμοκρασίας επιφανείας, οδηγώντας σε πιθανή επανάτηξη. Για την βελτιστοποίηση της δευτερογενούς απόψυξης στην DC χύτευση είναι επιθυμητή η “nucleate boiling” στην επιφάνεια του πλινθώματος για να επιτευχθεί αρκετά υψηλή απαγωγή θερμότητας κάτω από συνθήκες ισορροπίας (μετά το 1m πλινθώματος) [17]. Στην φάση εκκίνησης της DC χύτευσης η “heat flux” πρέπει να βρίσκεται στην περιοχή “film boiling” εξαιτίας των αρκετά υψηλών αρχικών θερμοκρασιών. Σκοπός είναι να αποφευχθεί η έντονη απόψυξη του πρώτου κελιού στερεοποίησης και η επακόλουθη επιβολή τάσεων που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχίες τύπου butt curl και σε διαρροές τήγματος που

αναφέρθηκαν στο θεωρητικό μέρος. Αυτό επιτρέπει ελεγχόμενη μετάβαση στην περιοχή “nucleate boiling” μετά από το σχηματισμό του πρώτου κελιού στερεοποίησης.

### 3.1.3 Ανασκόπηση των θερμικών οριακών συνθηκών

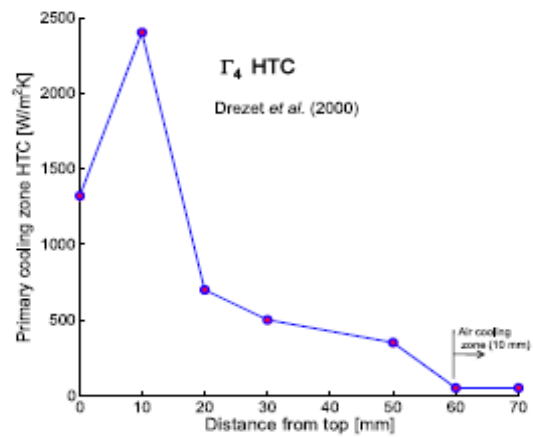
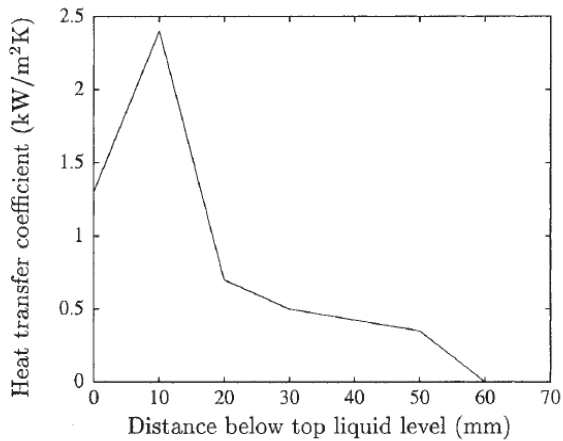
Στην έρευνα των *William et. al.* [29] λαμβάνονται οι αντιπροσωπευτικές τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για την ζώνη δευτερογενούς απόψυξης και για την επαφή πλινθώματος με τη διάταξη πυθμένα και παρατίθενται στον πίνακα της Εικόνας 17. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στη βάση του πλινθώματος ( $h_{base}$ ) έχει δομηθεί κατάλληλα ώστε να υπολογίζει και τη συνθήκη δημιουργίας κενού αέρος λόγω παραμόρφωσης butt curl καθώς και εισχώρησης νερού από την δευτερογενή απόψυξη. Στη ζώνη δευτερογενούς απόψυξης ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία επιφάνειας δίνεται στον ίδιο πίνακα. Και σε αυτή την περίπτωση λήφθηκαν υπόψη τα πολύπλοκα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας των διαφορετικών συνθηκών επαφής του νερού με το πλίνθωμα λόγω εξάτμισης.

$T(^{\circ}C)$	0	100	130	150	200	300	500	550	600	650
$h_{base}$ (W/m <sup>2</sup> K)	500	500	500	500	400	300	300	500	800	4000
$h_{sides}$ (W/m <sup>2</sup> K)	5000	8000	25,000	25,000	18,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000

Εικόνα 17: Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εξαρτώμενος από την θερμοκρασία για την βάση ( $h_{base}$ ) και για την δευτερογενή απόψυξη ( $h_{sides}$ ). Πηγή: [29]

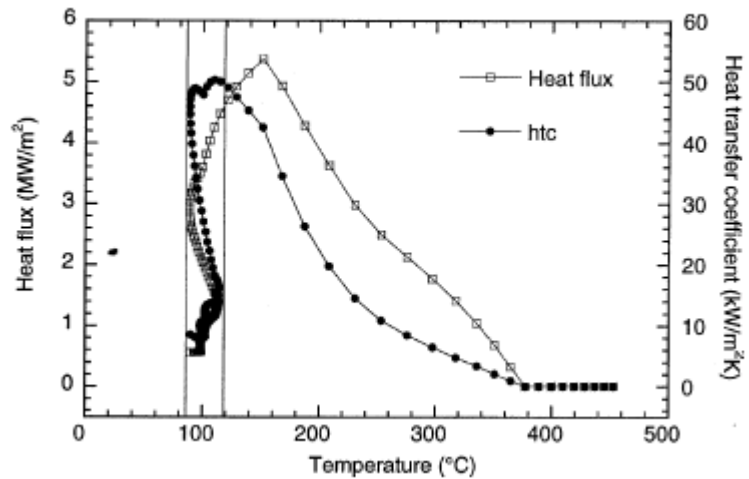
Η ζώνη πρωτογενούς απόψυξης λαμβάνεται σε αρκετές βιβλιογραφικές αναφορές από την έρευνα των *Drezet et. al.* [4] που κάνοντας πειράματα κατάφεραν να εξαγάγουν τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για την πρωτογενή απόψυξη ως συνάρτηση της θέσης από την κορυφή του καλουπιού που φαίνεται και στο γράφημα της Εικόνας 18α. Ωστόσο, στην έρευνα των *A. K. Nallathambi et. al.* [30] ένα μικρό τμήμα της τάξεως των 10mm προστίθεται στην οριακή συνθήκη του καλουπιού με σκοπό να αναπαραστήσει το κενό μεταξύ καλουπιού και εκτοξευτήρων νερού, γνωστή και ως “air cooling zone”. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για αυτό το διάστημα λήφθηκε ως 50W/m<sup>2</sup>K (Εικόνα 18β). Η θερμοκρασία του καλουπιού λήφθηκε ως 100°C στην έρευνα των *A. K. Nallathambi et. al.* [30] Στην έρευνα των *Williams et. al.* [29] στη δευτερογενή απόψυξη και στην διάταξη πυθμένα θεωρείται αρχικά θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C.





Εικόνα 18: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για την ζώνη πρωτογενούς απόψυξης βάσει των (α)Drezet et. al. (δεξιά) Πηγή: [4] και βάσει των A. K. Nallathambi et. al. (αριστερά) Πηγή: [30]

Στη συνέχεια, στην έρευνα των *Drezet et. al.* [4] καθορίζεται βάση ανάστροφης προσομοίωσης και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στη ζώνη δευτερογενούς απόψυξης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία επιφάνειας του πλινθώματος και παρατίθεται στο διάγραμμα της Εικόνας 19. Παρατηρείται αναντιστοιχία της τάσης της heat flux με το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας στο θερμοκρασιακό



Εικόνα 19: Heat flux και συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στη ζώνη δευτερογενούς απόψυξης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας επιφάνειας. Πηγή: [4]

εύρος 90-110°C . Αυτό οφείλεται πιθανώς στον ισχυρισμό ότι η θερμοκρασία του νερού παραμένει σταθερή στους 25°C πράγμα που δεν αντικατοπτρίζει τις πραγματικές συνθήκες. Το σφάλμα αυτό ίσως να μπορεί να εξαλειφθεί με τη χρήση πιο εκλεπτυσμένων μοντέλων στα οποία η ροή του νερού να μπορεί να επιβληθεί φυσικά (άμεσα) και όχι έμμεσα, καθώς έτσι δύναται να καταγραφούν φαινόμενα εξάτμισης του νερού στην επαφή με το πλίνθωμα και να γίνει μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας.

Ένας πιο απλοποιημένος ισχυρισμός παρουσιάζεται στην έρευνα των *A. Sabau et. al.* [31] όπου ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας με το καλούπι θεωρείται σταθερός και ίσος με 2000W/m<sup>2</sup>K για την περιοχή επαφής με το καλούπι και 200W/m<sup>2</sup>K στην περιοχή που σχηματίζεται το κενό αέρος

μεταξύ πλινθώματος και καλουπιού. Επίσης θεωρείται ότι το κενό αέρος σχηματίζεται περίπου στο κάτω ήμισυ του καλουπιού.

Στο βιβλίο της πηγής [17] αναφέρεται ότι οι τυπικές τιμές σχετικά με τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στην ζώνη επαφής μέσα στο καλούπι κυμαίνονται στο εύρος 1000-5000 W/m<sup>2</sup>K που εξαρτάται από το ποσό της λίπανσης, την ταχύτητα χύτευσης κ.α. Επιπλέον, το μήκος της ζώνης επαφής ανέρχεται κατά προσέγγιση σε 10-20mm. Κάτω από την ζώνη επαφής ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας τίθεται σε 200-600 W/m<sup>2</sup>K έτσι ώστε να συνυπολογίζεται και το κενό αέρος.

Μια απλοποιημένη έκδοση των συνθηκών μεταφοράς θερμότητας στην δευτερογενή ζώνη απόψυξης αποτυπώνεται στην έρευνα των Amirhossein Meysami et. al. [20]. Σε αυτή, η ζώνη δευτερογενούς απόψυξης διακρίνεται σε ζώνη πρόσκρουσης του νερού με συντελεστή μεταφοράς θερμότητας 20000 W/m<sup>2</sup>K και στη ζώνη ελεύθερης ροής του νερού με συντελεστή μεταφοράς θερμότητας 10000 W/m<sup>2</sup>K.

#### 3.1.4 Θερμικές Οριακές Συνθήκες που τίθενται στο λογισμικό προσομοίωσης

Στα πλαίσια της εργασίας όπως και στις περισσότερες περιπτώσεις σχεδιασμού μοντέλων προσομοίωσης θα επιλεγθούν αρχικά σταθερές τιμές των θερμικών οριακών συνθηκών με σκοπό να περιοριστούν κατά το δυνατόν οι παράγοντες μη-γραμμικότητας στο ελάχιστο οι οποίοι προκαλούν αρκετά προβλήματα σύγκλισης και αυξάνουν δραματικά τους χρόνους υπολογισμού.

Αρχικά όσον αφορά στη ζώνη πρωτογενούς απόψυξης στο καλούπι, σύμφωνα με το θεωρητικό μέρος της εργασίας τα συνήθη μήκη καλουπιών ανέρχονται σε 70-90mm. Επιλέγεται η υπόθεση ότι το καλούπι διαθέτει μήκος 90mm και χωρίζεται σε δύο υπό-περιοχές: (α) την ζώνη τέλειας επαφής του πλινθώματος με τα τοιχώματα του καλουπιού στην οποία τίθεται ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σε 2000 W/m<sup>2</sup>K και (β) την ζώνη όπου έχει σχηματιστεί το κενό αέρος όπου ο συντελεστής τίθεται σε 600 W/m<sup>2</sup>K [17].

Εν συνεχεία, στη ζώνη δευτερογενούς απόψυξης επιλέγεται ο διαχωρισμός σε δύο υπό-περιοχές, πρόσκρουσης και ελεύθερης ροής του νερού με συντελεστές μεταφοράς θερμότητας 20000 W/m<sup>2</sup>K και 10000 W/m<sup>2</sup>K [20]. Αυτή η συνθήκη αποτελεί μια αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση, ωστόσο ένα πιο εκλεπτυσμένο μοντέλο θα εμπεριέχει άμεσα την ροή νερού με ορισμένη παροχή εξωτερικά από το πλίνθωμα κάτι το οποίο κοστίζει υπολογιστικά και αυξάνει τον αριθμό των φυσικών φαινομένων που πρέπει να συζητηθούν καθώς δύναται να εμπεριέχει και την αλλαγή φάσης από την υγρή στην αέρια σύμφωνα με την καμπύλη βρασμού του νερού που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.1.2.2. Άλλη μια ικανή προσέγγιση των φαινομένων μεταφοράς θα εμπεριείχε το διάγραμμα της

Εικόνας 19 που παριστάνει την heat flux ως συνάρτηση της απόστασης από την κορυφή του πλινθώματος.

Στην επιφάνεια που παριστάνει την είσοδο του τήγματος κράματος αλουμινίου τίθεται θερμοκρασία 975 K. Ενώ στο κάτω όριο επιλέγεται απλώς η συνθήκη εξόδου ροής (“outflow”) όσον αφορά στο θερμικό πεδίο.

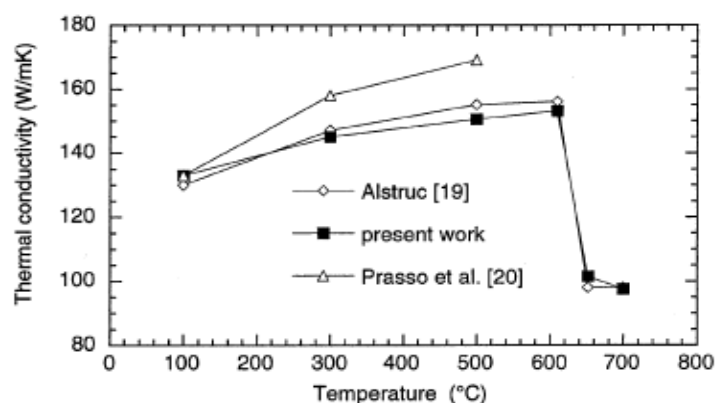
### 3.2 Ανασκόπηση Ιδιοτήτων Κράματος Αλουμινίου AA5182

#### 3.2.1 Θερμοκρασίες Solidus, Liquidus και Λανθάνουσα Θερμότητα Στερεοποίησης

Οι θερμοκρασίες Solidus και Liquidus για το κράμα αλουμινίου AA5182 λαμβάνονται ως 809K και 910K αντίστοιχα. Επομένως το θερμοκρασιακό εύρος στερεοποίησης ανέρχεται σε 101K. Η λανθάνουσα θερμότητα στερεοποίησης λαμβάνεται ως 397KJ/kg. [15]

#### 3.2.2 Θερμική Αγωγιμότητα ( $\lambda$ )

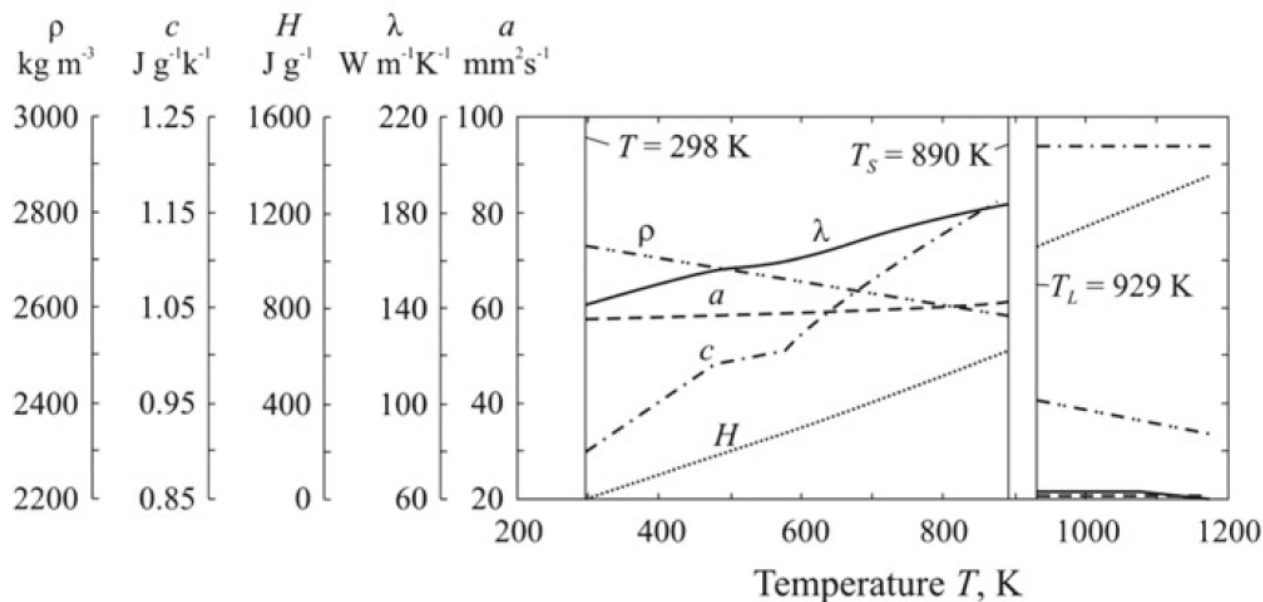
Η θερμική αγωγιμότητα των κραμάτων αλουμινίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα κραματικά στοιχεία, ακόμα και εάν αυτά ευρίσκονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις στη σύσταση του κράματος. Στην έρευνα των *Drezet et. al.* χρησιμοποιήθηκαν πειράματα με “thermocouples” τα οποία τροφοδοτήθηκαν σε ανάστροφο μοντέλο προσομοίωσης (“inverse modeling”) με σκοπό να ληφθούν οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το κράμα αλουμινίου AA5182 στην περιοχή ενδιαφέροντος 100-670°C. Τα αποτελέσματα της μεθόδου ανάστροφης προσομοίωσης βάσει του πειράματος που διενεργήθηκε, παρουσιάζονται στο διάγραμμα της Εικόνας 20, όπου παρατίθενται και αποτελέσματα παλαιότερων ερευνών για σύγκριση. Η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας στη στερεή φάση ενώ υποβαθμίζεται κατά 100 W/(m \* K) όταν μεταβαίνει στην υγρή φάση. [4]



Εικόνα 20: Υπολογισμένη Θερμική Αγωγιμότητα του κράματος αλουμινίου AA5182 με μεθόδους ανάστροφης προσομοίωσης. Πηγή: [4]

### 3.2.3 Πυκνότητα και Θερμοχωρητικότητα ( $\rho$ , $C_p$ )

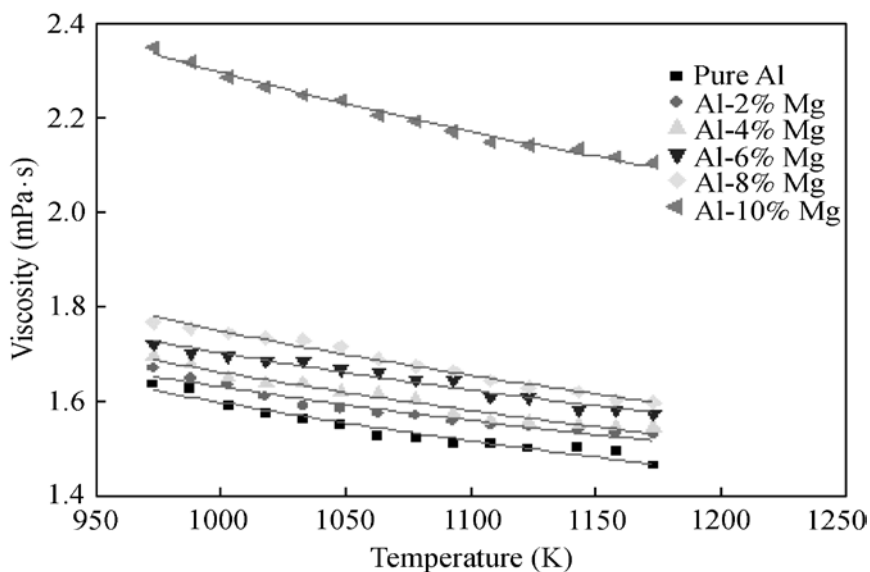
Τα δεδομένα σχετικά με την πυκνότητα και την θερμοχωρητικότητα για το κράμα αλουμινίου AA5182 λήφθηκαν από το βιβλίο της πηγής: [32] και παρατίθενται στην Εικόνα 21.



Εικόνα 21: Πυκνότητα( $\rho$ ) και Θερμοχωρητικότητα( $C_p$ ) για το κράμα αλουμινίου AA5182. Πηγή: [32]

### 3.2.4 Δυναμικό Ιξώδες

Το δυναμικό ιξώδες λήφθηκε από την έρευνα των *WANG YuQing et. al.* [33] στην οποία παρατίθεται το διάγραμμα της Εικόνας 22 όπου αντικατοπτρίζει το δυναμικό ιξώδες για κράματα αλουμινίου-μαγνησίου, με διαφορετικές περιεκτικότητες σε μαγνήσιο.

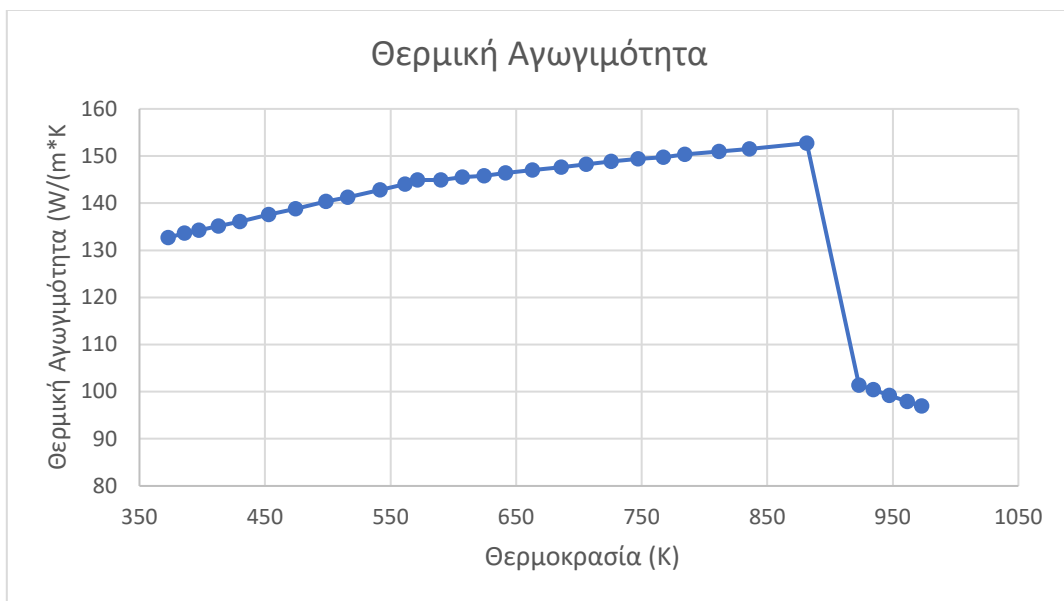


Εικόνα 22: Δυναμικό Ιξώδες Κραμάτων Αλουμινίου-Μαγνησίου. Πηγή: [33]

### 3.2.5 Εξαγωγή δεδομένων από τα διαγράμματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης

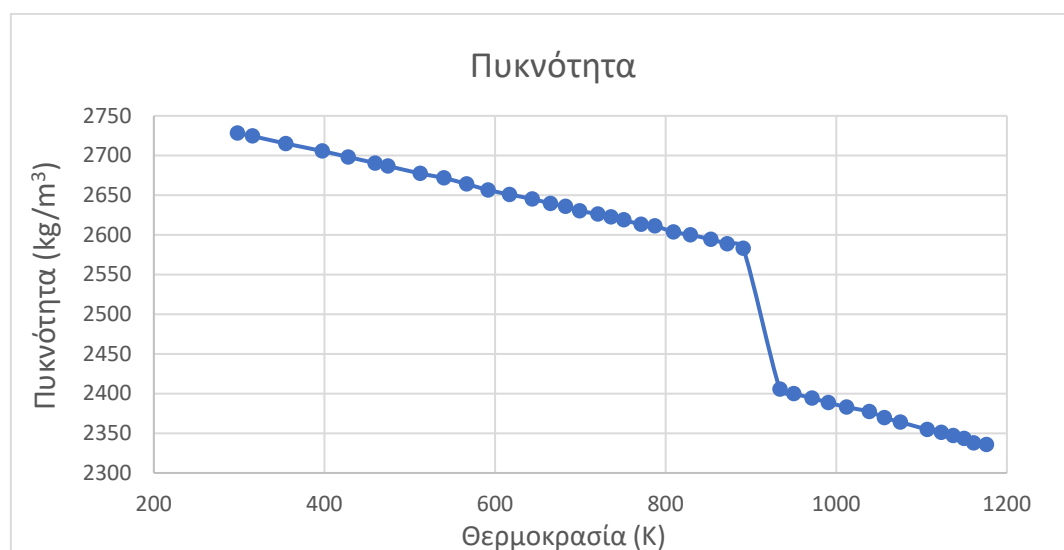
Με σκοπό να είναι χρήσιμα επεξεργασίας τα διαγράμματα που βρέθηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με τις θερμικές και φυσικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου AA5182 και να μπορέσουν να αποτελέσουν εισόδους για το μοντέλο προσομοίωσης, γίνεται χρήση λογισμικού κατάλληλου για μετατροπή των εικόνων σε δεδομένα που θα μπορούν να επεξεργαστούν από λογισμικά βάσεων δεδομένων (πχ. Excel). Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι το WebPlotDigitizer και στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του.

#### 3.2.5.1 Θερμική Αγωγιμότητα ( $\lambda$ )



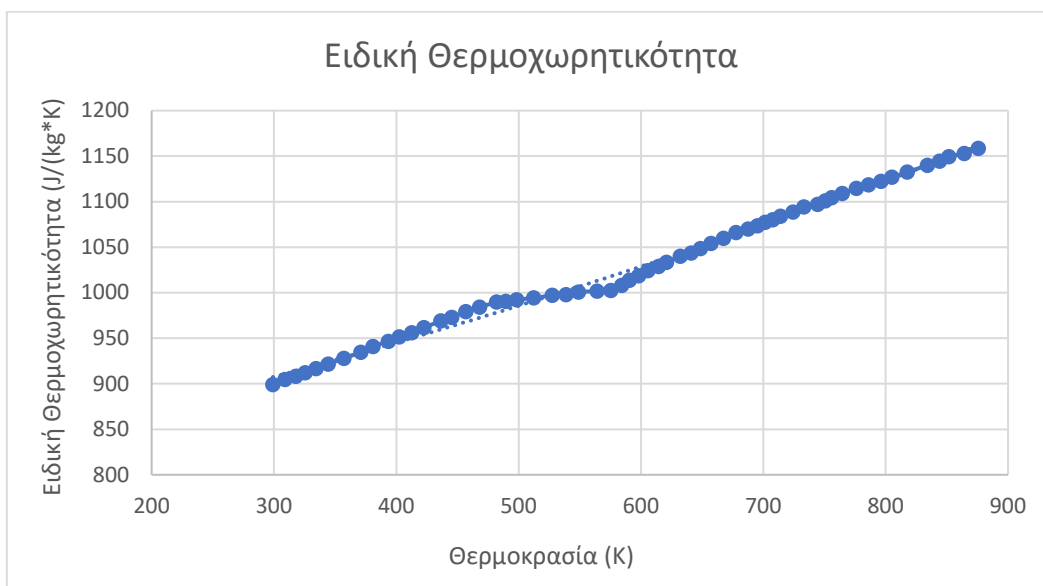
Εικόνα 23: Θερμική Αγωγιμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας του κράματος αλουμινίου AA5182. Πηγή: [4]

#### 3.2.5.2 Πυκνότητα ( $\rho$ )



Εικόνα 24: Πυκνότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας του κράματος αλουμινίου AA5182. Πηγή: [32]

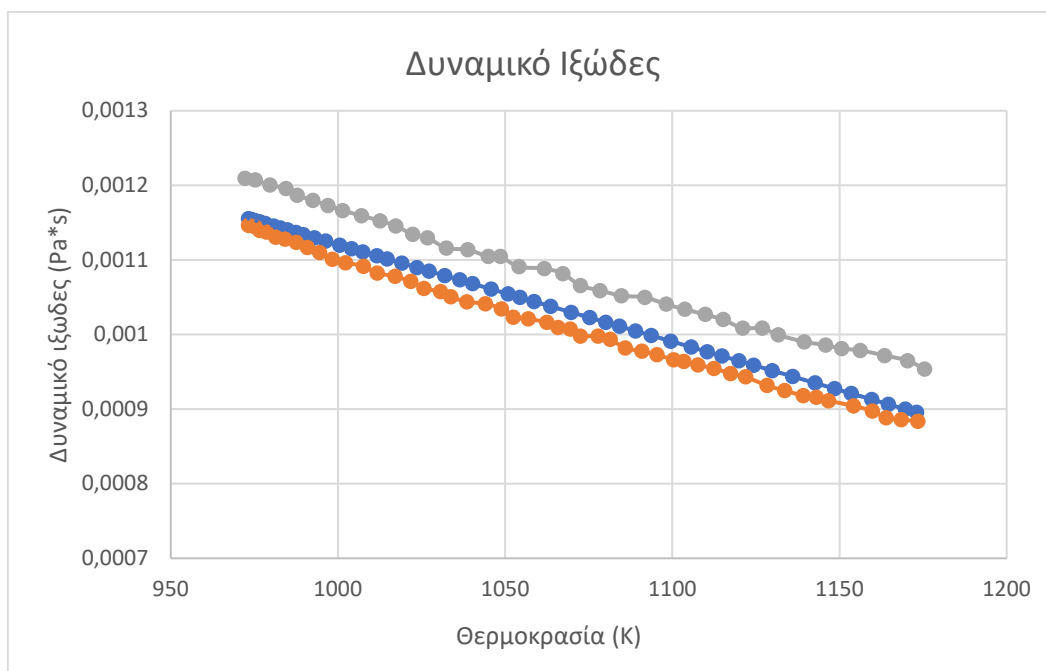
### 3.2.5.3 Θερμοχωρητικότητα ( $C_p$ )



Εικόνα 25: Θερμοχωρητικότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας του κράματος αλουμινίου AA5182. Πηγή: [32]

### 3.2.5.4 Δυναμικό Ιξώδες

Για την εξαγωγή του δυναμικού ιξώδους έγινε αρχικά εξαγωγή των τιμών για Al-(2/4/6/8)Mg και κατόπιν των συναρτήσεων τάσης για αυτές τις περιπτώσεις. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η συνάρτηση τάσης της μέσης τιμής των συναρτήσεων για 4% Mg και για 6% Mg και τα αποτελέσματα παρατίθενται στο γράφημα της Εικόνας 26.



Εικόνα 26: Δυναμικό ιξώδες συναρτήσει της θερμοκρασίας για κράμα Al-5Mg (μπλε καμπύλη) που προέκυψε με παρεμβολή μεταξύ των καμπυλών: Al-4Mg (πορτοκαλί καμπύλη) και Al-6Mg (γκρι καμπύλη). Πηγή: [33]

Οι τιμές του δυναμικού ιξώδους παρουσιάζουν μικρή απόκλιση από τις τιμές που έχουν προταθεί από την πηγή: [34] στην οποία αναφέρονται οι τιμές του παρακάτω πίνακα

<b>Viscosity Table 1-Mills 2002</b>	
<b>Temperature (K)</b>	<b><math>\eta</math> (mPas)</b>
906	1.2
973	1.1
1073	1

## 4 Μαθηματικό Μοντέλο

Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η διεργασία της “Direct Chill” χύτευσης του κράματος αλουμινίου AA5182 τόσο ως προς τον περιορισμό του μακροδιαφορισμού και της θερμής ρηγμάτωσης όσο και ως προς τις παραμένουσες τάσεις είναι χρήσιμο να προσομοιωθούν αρχικά τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, τα φαινόμενα ροής καθώς και η αλλαγή φάσης. Απώτερος σκοπός της προσομοίωσης των προαναφερθέντων φαινομένων είναι αρχικά να παρατηρηθεί η επίδραση των διαφορετικών παραμέτρων χύτευσης στο μεταλλουργικό μήκος, στις διαστάσεις της ημίρρευστης ζώνης καθώς και να ληφθεί μια ρεαλιστική απεικόνιση του θερμικού πεδίου που προκαλείται λόγω της ταυτόχρονης αλληλεπίδρασης των φαινομένων ροής, μεταφοράς θερμότητας και αλλαγής φάσης. Επομένως αρχικά επιχειρήθηκε η ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης (3D), στα λογισμικά Ansys Fluent v19.2 και Comsol Multiphysics v5.5, στο οποίο επιτυγχάνεται η σύζευξη όλων των προαναφερθέντων φαινομένων. Σε μελλοντική προσπάθεια τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου μπορούν να αποτελέσουν ικανές και αναγκαίες εισόδους για την ανάπτυξη ενός θερμό-μηχανικού μοντέλου προσομοίωσης για την πρόβλεψη των παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων του πλινθώματος.

### 4.1 Εξίσωση Ενέργειας

Η μεταφορά θερμότητας περιγράφεται μαθηματικά μέσω της εξίσωσης ενέργειας που παρατίθεται στη συνέχεια [35]:

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (1)$$

όπου  $k$ : θερμική αγωγιμότητα σε W/(m\*K)

$T$ : θερμοκρασία σε K

$\rho$ : πυκνότητα σε kg/m<sup>3</sup>

$u$ : ταχύτητα σε m/s

$C_p$ : ειδική θερμοχωρητικότητα σε J/(kg\*K)

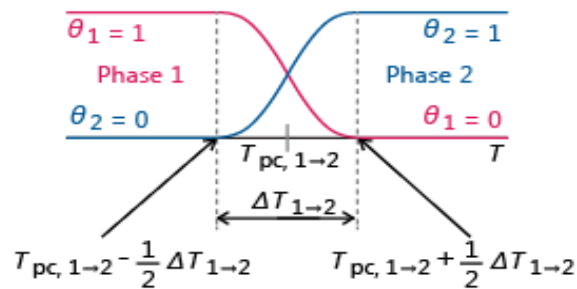
$Q$ : όρος πηγής θερμότητας

### 4.2 Εξίσωση Αλλαγής Φάσης

Για την προσομοίωση της αλλαγής φάσης συνήθως χρησιμοποιείται η μέθοδος φαινόμενης θερμοχωρητικότητας ή “*Apparent Heat Capacity Formulation*” [36]. Αντί να προστεθεί απλά ένας όρος για την λανθάνουσα θερμότητα στερεοποίησης (L) στην εξίσωση ενέργειας τη στιγμή που ένα



μέταλλο φθάνει στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης, ο μετασχηματισμός σε κράματα συμβαίνει σε ένα θερμοκρασιακό διάστημα μεταξύ  $T_{pc}-dT/2$  και  $T_{pc}+dT/2$ . Επομένως στην περίπτωση του κράματος αλουμινίου AA5182 η θερμοκρασία  $T_{pc}-dT/2$  αντιστοιχεί στην θερμοκρασία solidus ενώ η θερμοκρασία  $T_{pc}+dT/2$  αντιστοιχεί στην liquidus. Προφανώς η θερμοκρασία  $T_{pc}$  αντιστοιχεί στην μέση τιμή μεταξύ των θερμοκρασιών solidus και liquidus. Σε αυτό το διάστημα, η φάση του υλικού προσομοιώνεται μέσω μιας εξομαλυσμένης συνάρτησης  $\theta$ , που παριστάνει το κλάσμα της φάσης πριν την μετάβαση, που είναι ίσο με 1 πριν την solidus ( $T_{pc}-dT/2$ ) και 0 μετά την liquidus ( $T_{pc}+dT/2$ ).



Εικόνα 27: Αναπαράσταση της στερεοποίησης μέσω της αλλαγής φάσης από την  $\theta_2$  (τήγμα) στην φάση  $\theta_1$  (στερεό) βάσει του λογισμικού Comsol Multiphysics. Πηγή: [37]

Η φαινόμενη θερμοχωρητικότητα που χρησιμοποιείται στην εξίσωση ενέργειας για το διάστημα αλλαγής φάσης δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Cp = \frac{1}{\rho} (\theta_1 \rho_{ph1} C_{p,ph1} + \theta_2 \rho_{ph2} C_{p,ph2}) + C_L \quad (5)$$

όπου  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  αντιστοιχεί στο κλάσμα όγκου της αντίστοιχης φάσης 1 ή 2 και  $C_L$  αντιστοιχεί στην λανθάνουσα θερμότητα στερεοποίησης. [37] Αξίζει να αναφερθεί ότι στο λογισμικό Comsol θα πρέπει να δοθεί ως είσοδος η μέση τιμή των θερμοκρασιών solidus και liquidus ενώ στο Ansys Fluent εκχωρούνται οι τιμές  $T_l$  και  $T_s$  απευθείας στο μοντέλο “Solidification and Melting”.

#### 4.3 Εξίσωση Ορμής και Συνέχειας

Στο μοντέλο προσομοίωσης η ροή θεωρείται επίπεδη κατά στρώσεις (“laminar flow”) και σε συνθήκες μόνιμης ροής, δηλ. σε κατάσταση ψευδο-ισορροπίας. Η ροή ορίζεται από την ταχύτητα του υγρού ( $u$ ) και από την πίεση ( $p$ ) σύμφωνα με τις εξισώσεις ορμής και συνέχειας [35] που παρουσιάζονται ακολούθως:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u = \nabla \cdot \left[ -pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \left(\frac{2\mu}{3}\right)(\nabla u)I \right] + F \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3)$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα,  $\mu$  είναι το δυναμικό ιξώδες,  $F$  παράγοντας δύναμης κατά την στερεοποίηση και μεταβάλλονται με την θερμοκρασία σύμφωνα με τα διαγράμματα της ενότητας 3.2.5 της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

#### 4.3.1 Μοντέλο Ενθαλπίας-Πορώδους (παράγοντας $F$ στην εξίσωση ορμής)

Σε προβλήματα είτε συνεχούς χύτευσης είτε Direct Chill χύτευσης χρησιμοποιείται η προσέγγιση ενθαλπίας-πορώδους για την υπολογιστική διαχείριση της ημίρρευστης ζώνης. Η ημίρρευστη ζώνη παριστάνεται ως μια πορώδης ζώνη με πορώδες ίσο με το κλάσμα όγκου της υγρής φάσης και οι κατάλληλοι όροι απορρόφησης ορμής προστίθενται στις εξισώσεις ορμής για να ληφθεί υπόψη η πτώση πίεσης που προκαλείται από την παρουσία του στερεοποιημένου πλινθώματος. Οι όροι που προστίθενται για την πτώση πίεσης συχνά εμφανίζονται ως ένας παράγοντας  $F$  στην διαφορική εξίσωση της ορμής (1). Αναλυτικότερα ο παράγοντας  $F$  είναι μια δύναμη η οποία επιβάλλεται στο ρευστό κατά τη στιγμή που συμβαίνει η αλλαγή της φάσης όταν ξεκινά να αυξάνεται το κλάσμα όγκου της στερεής φάσης εντός του πλινθώματος. Ο λόγος που χρησιμοποιείται είναι αποκλειστικά η υποβάθμιση της ταχύτητας κατά την αλλαγή της φάσης επειδή φυσικά δεν θα μπορούσε η ταχύτητα του ρευστού τήγματος που εισέρχεται στη διεργασία να είναι η ίδια με την ταχύτητα του στερεού πλινθώματος που εξέρχεται λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων πυκνότητας και ιξώδους μεταξύ των δύο φάσεων. Ο ρόλος του παράγοντα  $F$  μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτός παραθέτοντας την μαθηματική έκφραση που τον ορίζει η οποία βασίζεται στην εξίσωση Cozeny – Karman [8]:

$$F = \frac{(1-a_m)^2}{(a_m^3 + \varepsilon)} A_{mush} (u - u_{cast}) \quad (4)$$

όπου:  $a_m$ : το κλάσμα όγκου υγρής φάσης

$\varepsilon$ : παράγοντας που προλαμβάνει την διαίρεση με το 0 και παίρνει πολύ μικρές τιμές (εδώ 0,001)

$A_{mush}$ : η σταθερά της ημίρρευστης κατάστασης με συνήθεις τιμές ( $10^4 - 10^7$ )

$u_{cast}$ : η ταχύτητα χύτευσης

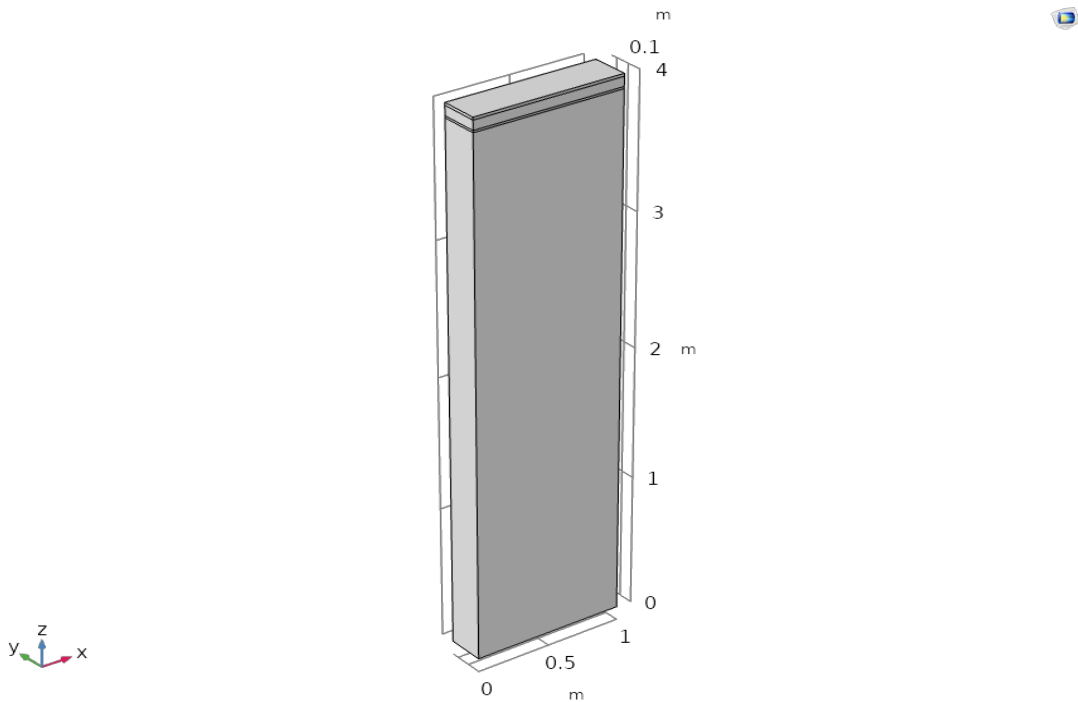
Υποβαθμίζοντας την ταχύτητα, το στερεοποιημένο πλέον πλινθώμα αποκτά ταχύτητα ίση με την ταχύτητα της χύτευσης ( $u_{cast}$ ). [35] Στο λογισμικό Comsol δεν υπάρχει ένθετο το μοντέλο ενθαλπίας πορώδους, έτσι πρέπει να προστεθεί μία δύναμη που ασκείται σε όλο τον όγκο του πλινθώματος διατυπώνοντας τις εξισώσεις Cozeny – Karman στην ενότητα “Volume Force”. Στο Ansys Fluent υπάρχει προ-εγκατεστημένο το μοντέλο ενθαλπίας-πορώδους απαιτώντας ως είσοδο τον παράγοντα  $A_{mush}$  για την διαπερατότητα της ημίρρευστης ζώνης.

## 5 Προσομοίωση

Για την προσομοίωση της διεργασίας “Direct Chill Casting”, όπως προαναφέρθηκε έγινε χρήση του λογισμικού προσομοιώσεων Comsol Multiphysics v5.5 καθώς και του Ansys Fluent v19.2 [38]. Ταυτόχρονα με την ανάλυση των παραγόντων που επιδρούν στην διεργασία χύτευσης διενεργείται και σύγκριση μεταξύ των λογισμικών προσομοίωσης με στόχο να παρουσιαστούν οι ιδιαιτερότητες τους ως προς την προσομοίωση της χύτευσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται η γεωμετρία, οι αρχικές και οριακές συνθήκες και το πλέγμα που τέθηκαν στα λογισμικά προσομοίωσης με σκοπό να ληφθούν τα αποτελέσματα της Direct Chill χύτευσης σε συνθήκες μόνιμης ροής.

### 5.1 Γεωμετρία

Το πρώτο βήμα για την δόμηση του μοντέλου προσομοίωσης αποτελεί ο σχεδιασμός της γεωμετρίας στην οποία θα επιλυθούν οι διαφορικές εξισώσεις που διέπουν το πρόβλημα. Τυπικές διαστάσεις πλινθωμάτων για την διεργασία DC χύτευσης κραμάτων αλουμινίου αναφέρονται στο θεωρητικό μέρος και συγκεκριμένα στην ενότητα 2.2.3 της εργασίας. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η διατομή του πλινθώματος ως  $2 \times 0.5 \text{ m}$  και μήκος πλινθώματος στα  $4 \text{ m}$  για την προσομοίωση σε συνθήκες μόνιμης ροής μιας και η στερεοποίηση αναμένεται να συντελείται νωρίτερα από αυτό το μήκος. Με σκοπό τον περιορισμό της κατανάλωσης υπολογιστικών πόρων και την μείωση των χρόνων υπολογισμού σχεδιάστηκε το  $\frac{1}{4}$  του πλινθώματος το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 28. Έτσι σε αυτό το τμήμα η διατομή έχει διαστάσεις  $1 \times 0.25 \text{ m}$  και το μήκος πλινθώματος  $4 \text{ m}$ .



Εικόνα 28: Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε στα λογισμικά προσομοίωσης είναι το  $\frac{1}{4}$  του πλινθώματος με σκοπό τον περιορισμό της υπολογιστικής δαπάνης.

Επίσης διενεργήθηκε τομή της γεωμετρίας στο επίπεδο xy σε αποστάσεις κατά τον άξονα z: 0.02m, 0.09m, 0.105m από την κορυφή του πλινθώματος για να εκχωρηθούν οι οριακές συνθήκες που αντιστοιχούν στις διαφορετικές ζώνες απόψυξης.

## 5.2 Εκχώρηση ιδιοτήτων Κράματος

Μετά τον ορισμό της γεωμετρίας εκχωρούνται οι ιδιότητες των υλικών σύμφωνα με τα διαγράμματα και τις ιδιότητες που παρατίθενται στην ενότητα 3.2 της εργασίας. Στο λογισμικό Comsol Multiphysics διενεργείται εκχώρηση σταθερών τιμών για τις ιδιότητες του κράματος, που παρουσιάζονται στον πίνακα της Εικόνας 29, λόγω αδυναμίας σύγκλισης του μοντέλου με ιδιότητες μεταβαλλόμενες ως προς τη θερμοκρασία. Αντίθετα στο λογισμικό Ansys Fluent διενεργείται εκχώρηση των ιδιοτήτων του κράματος ως συναρτήσεις της θερμοκρασίας, όπως στα διαγράμματα της ενότητας 3.2.5 υποθέτοντας γραμμική μεταβολή για λόγους απλοποίησης του προβλήματος και πιο εύκολης διαχείρισής του από τον αλγόριθμο επίλυσης.

*Ιδιότητες Κράματος Αλουμινίου AA5182 στο Comsol v5.5*

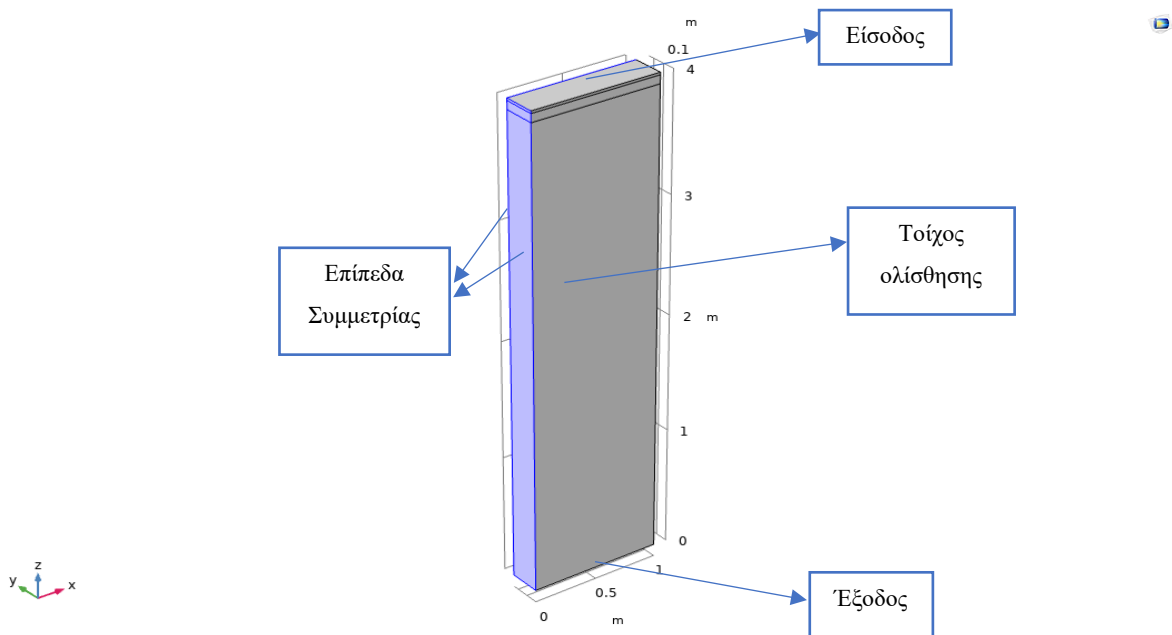
<b>Ιδιότητες Στερεής Φάσης</b>		
<b>Ιδιότητα</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδα Μέτρησης</b>
Δυναμικό Ιξώδες	0.001	Pa·s
Θερμική Αγωγιμότητα	144	W/(m·K)
Πυκνότητα	2655	kg/m <sup>3</sup>
Ειδική Θερμοχωρητικότητα	1025	J/(kg·K)
<b>Ιδιότητες Υγρής Φάσης</b>		
<b>Ιδιότητα</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδα Μέτρησης</b>
Δυναμικό Ιξώδες	0.001	Pa·s
Θερμική Αγωγιμότητα	100	W/(m·K)
Πυκνότητα	2395	kg/m <sup>3</sup>
Ειδική Θερμοχωρητικότητα	1156	J/(kg·K)

Εικόνα 29: Πίνακας σταθερών τιμών για τις ιδιότητες του κράματος αλουμινίου AA5182 που εκχωρήθηκαν στο λογισμικό Comsol.

### 5.3 Οριακές Συνθήκες

#### 5.3.1 Οριακές Συνθήκες Ροής

Οι οριακές συνθήκες που τέθηκαν στο λογισμικό προσομοίωσης Comsol περιλαμβάνουν τα δύο επίπεδα συμμετρίας του πλινθώματος, συνθήκη πίεσης στην είσοδο του ρευστού τήγματος, συνθήκη καθορισμένης ταχύτητας εξόδου του στερεοποιημένου πλινθώματος (ταχύτητα χύτευσης η οποία αποτελεί την παράμετρο  $v_{cast}$ ) ίσης με 50 mm/min και συνθήκες ολίσθησης στα τοιχώματα όπου το ρευστό ευρίσκεται στις ζώνες πρωτογενούς και δευτερογενούς απόψυξης. Ακόμη αρχική συνθήκη της ταχύτητας ορίστηκε ως ίση με την ταχύτητα χύτευσης σε όλο το εύρος του γεωμετρικού χώρου (Εικόνα 30). Ωστόσο, στο λογισμικό Ansys Fluent στην είσοδο του γεωμετρικού χώρου δύναται μόνο να εκχωρηθεί οριακή συνθήκη ταχύτητας εισόδου ενώ στην έξοδο οριακή συνθήκη πίεσης. Στην ενότητα 5.4.3.3.1 αναφέρεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε με σκοπό την εύρεση της ταχύτητας εισόδου του ρευστού τήγματος για εκχώρησή της στο Ansys Fluent.



Εικόνα 30: Οριακές Συνθήκες Ροής για την προσομοίωση της Direct Chill χύτευσης του κράματος αλουμινίου AA5182.

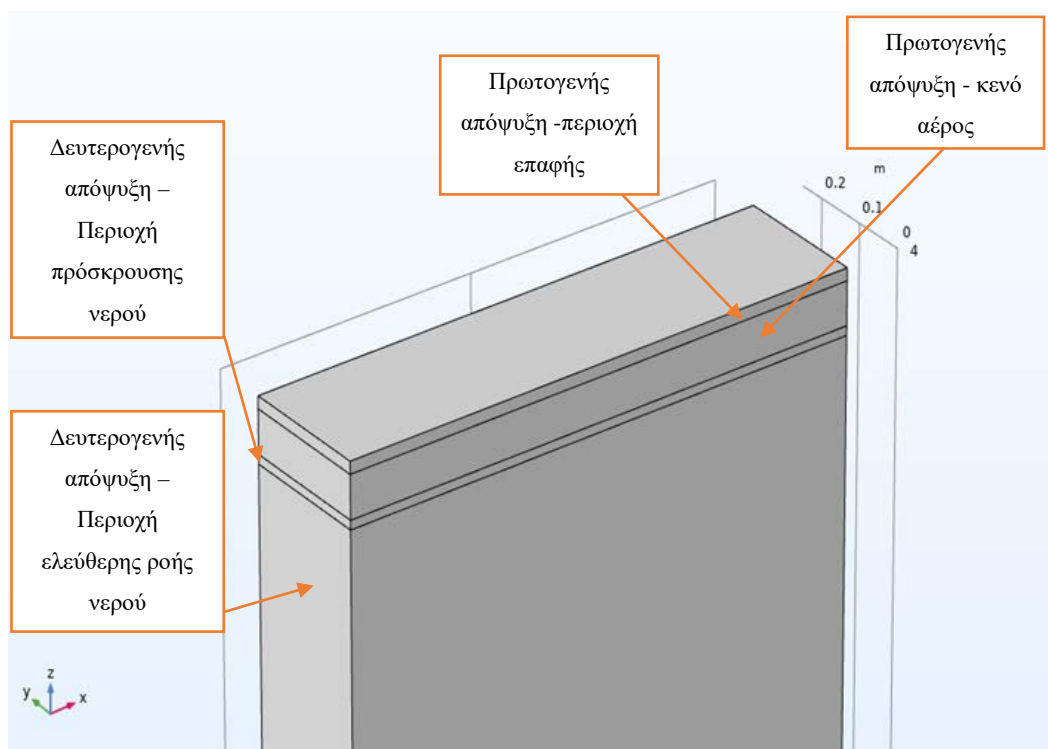
#### 5.3.2 Οριακές Συνθήκες Μεταφοράς Θερμότητας

Το πλινθώμα χωρίστηκε στις εξής περιοχές ανάλογα με τις διαφορετικές συνθήκες απόψυξης που επικρατούν (Εικόνα 31) και τέθηκαν οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση:

- ✓ Ζώνη πρωτογενούς απόψυξης – Περιοχή τέλειας επαφής καλουπιού πλινθώματος με συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $2000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

- ✓ Ζώνη πρωτογενούς απόψυξης – Περιοχή δημιουργίας κενού αέρος μεταξύ καλουπιού και πλινθώματος με συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $600 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .
- ✓ Ζώνη δευτερογενούς απόψυξης – Περιοχή πρόσκρουσης του νερού στην επιφάνεια του πλινθώματος με συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $20000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .
- ✓ Ζώνη δευτερογενούς απόψυξης – Περιοχή ελεύθερης ροής νερού στην επιφάνεια του πλινθώματος με συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $10000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Ακόμη τέθηκε η διπλή συμμετρία, η είσοδος και η έξοδος ροής θερμότητας σε πλήρη αντιστοιχία με τις οριακές συνθήκες ροής καθώς και αρχική τιμή θερμοκρασίας σε όλο τον γεωμετρικό χώρο ίση με την θερμοκρασία εισόδου του τήγματος ( $T_{in}$ ) όπου για την πρώτη προσομοίωση ανέρχεται σε  $975\text{K}$ . Τέλος, στην μεταφορά θερμότητας στον κόμβο “Fluid” προστίθεται και ο κόμβος του υλικού αλλαγής φάσης στον οποίο ορίζονται η μέση τιμή των θερμοκρασιών *solidus* και *liquidus* ίση με  $859\text{K}$  και εκχωρούνται το θερμοκρασιακό διάστημα στερεοποίησης ως  $100\text{K}$  και η λανθάνουσα θερμότητα στερεοποίησης  $397,1 \text{ KJ/kg}$  συμφώνως της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

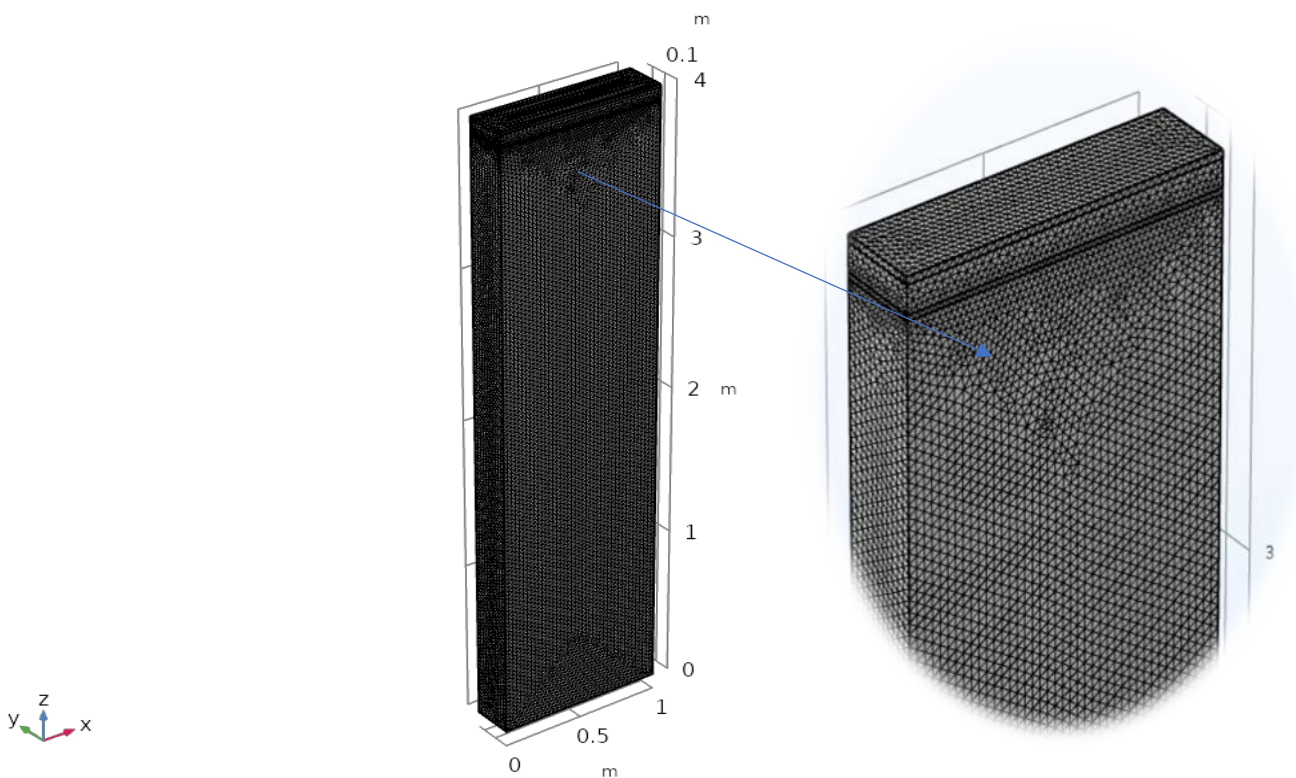


Εικόνα 31: Οριακές Συνθήκες για τη Μεταφορά Θερμότητας.

## 5.4 Πλέγμα (Mesh)

### 5.4.1 Δημιουργία Πλέγματος στο Comsol Multiphysics v5.5

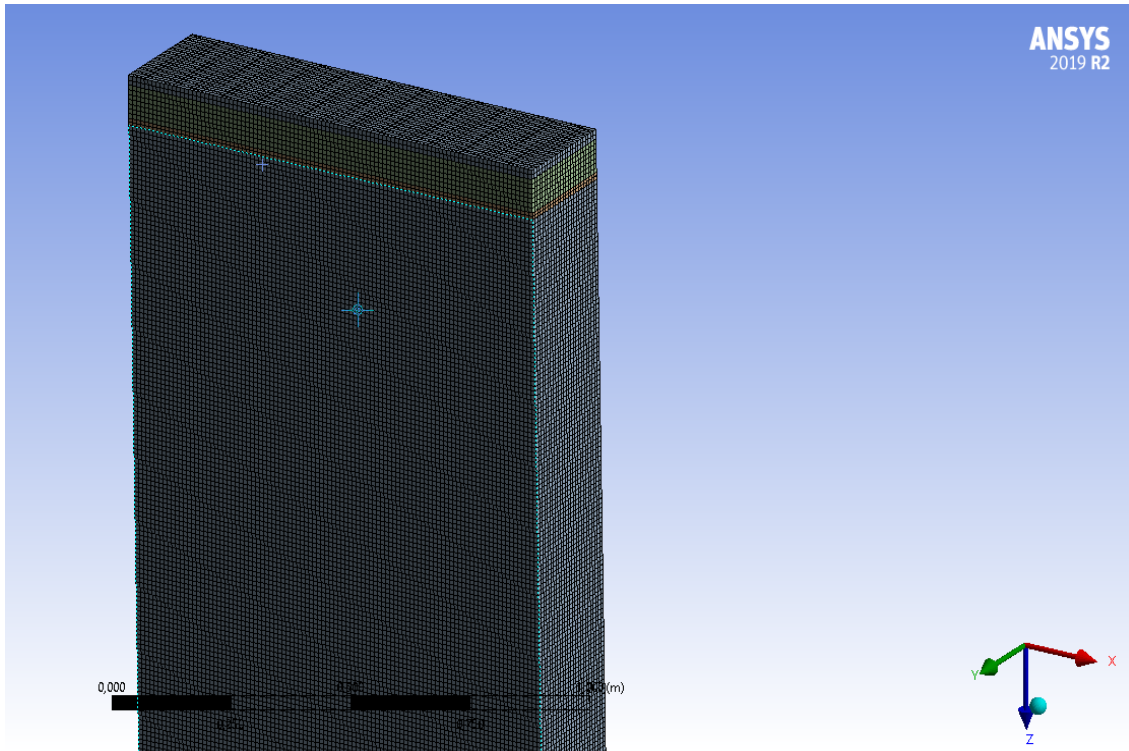
Η δημιουργία πλέγματος στο Comsol Multiphysics v5.5 αποτελεί εύκολη υπόθεση μιας και υπάρχει η δυνατότητα να οριστεί αυτόματα σε σχέση με τα εμπλεκόμενα φυσικά φαινόμενα που υπάρχουν στο μοντέλο. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στην εν λόγω προσομοίωση αποτελείται από 780133 στοιχεία με τη χρήση τριγώνων και τετράεδρων στοιχείων όπως φαίνεται και στην Εικόνα 32. Διενεργείται πύκνωση του πλέγματος στα σημεία όπου αναμένεται να συμβεί η αλλαγή της φάσης έτσι ώστε να υπάρχουν περισσότεροι κόμβοι για πιο λεπτομερή επίλυση των διαφορικών εξισώσεων ροής και μεταφοράς θερμότητας.



Εικόνα 32: Πλέγμα που δημιουργήθηκε στο Comsol Multiphysics v5.5.

### 5.4.2 Δημιουργία Πλέγματος στο Ansys Fluent v19.2

Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στο Ansys Fluent v19.2 απεικονίζεται στην Εικόνα 33, το οποίο αποτελείται από 1.002.500 στοιχεία για την ίδια ακριβώς γεωμετρία που εισήχθη και στο Comsol v5.5.



Εικόνα 33: Πλέγμα που δημιουργήθηκε στο Ansys Fluent 19.2.

### 5.4.3 Διαδικασία Επίλυσης

#### 5.4.3.1 Προβλήματα προσομοίωσης Direct Chill χύτευσης στο Comsol Multiphysics v5.5

Όπως προαναφέρθηκε και στην ενότητα 5.2 της εργασίας το λογισμικό Comsol Multiphysics v5.5 στις απόπειρες που διενεργήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας αδυνατεί να χειριστεί τις μεταβαλλόμενες ως προς την θερμοκρασία ιδιότητες του κράματος αλουμινίου, πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε με την εκχώρηση αντιπροσωπευτικών σταθερών τιμών για τις ιδιότητες της στερεής και υγρής φάσης.

Ακόμη ο παράγοντας  $F$  που εισάγεται αντιπροσωπεύοντας το μοντέλο ενθαλπίας – πορώδους για την αναπαράσταση πτώσης πίεσης στην ημίρρευστη ζώνη δημιουργεί προβλήματα σύγκλισης και αστάθειας του αλγορίθμου επίλυσης. Δεν υπήρξε επιτυχημένη προσπάθεια επίλυσης του προβλήματος χύτευσης με την εφαρμογή του μοντέλου ενθαλπίας - πορώδους. Ύστερα από εκτεταμένη βιβλιογραφική αναζήτηση δεν βρέθηκαν τιμές για την αυθαίρετη σταθερά  $A_{mush}$  που να αντιστοιχούν στην διαπερατότητα της ημίρρευστης ζώνης για το αλουμίνιο ή για κράματά του. Διενεργήθηκαν πολλαπλά πειράματα εκχωρώντας τιμές για την παράμετρο ημίρρευστης κατάστασης τόσο εντός όσο και εκτός του προτεινόμενου εύρους και σε όλες τις περιπτώσεις παρουσιάστηκε αδυναμία σύγκλισης του μοντέλου στο Comsol Multiphysics v5.5. Κατόπιν διενεργήθηκαν απόπειρες επίλυσης εξαλείφοντας τον παράγοντα  $F$  της διαφορικής εξίσωσης και παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο μπορούσε να διαχειριστεί πλήρως τα φαινόμενα ροής, μεταφοράς θερμότητας και αλλαγής φάσης.



#### 5.4.3.2 Προβλήματα προσομοίωσης Direct Chill χύτευσης στο Ansys Fluent v19.2

Στη συνέχεια επιχειρήθηκε η εισαγωγή του μοντέλου στο λογισμικό Ansys Fluent v19.2 όπου εκεί υπάρχει ως ένθετο το μοντέλο στερεοποίησης και τήξης που χρησιμοποιεί την προσέγγιση ενθαλπίας-πορώδους για την ημίρρευστη ζώνη και απαιτεί ως είσοδο τον παράγοντα  $A_{mush}$ . Τα πειράματα διενεργήθηκαν επιβάλλοντας ιδιότητες εξαρτώμενες από την θερμοκρασία θεωρώντας γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ των διαφόρων τιμών (piecewise linear).

Προβλήματα:

- ✓ Στο Ansys Fluent δεν υπάρχει η δυνατότητα εκχώρησης οριακής συνθήκης ταχύτητας εξόδου και συνθήκης πίεσης στην είσοδο.
- ✓ Ύστερα από εκτεταμένη βιβλιογραφική αναζήτηση δεν βρέθηκαν τιμές εισόδου του ρευστού τήγματος σε αντίστοιχο μοντέλο προσομοίωσης της Direct Chill χύτευσης.
- ✓ Στο Comsol δεν μπορεί να καταγραφεί η ταχύτητα εισόδου στο μοντέλο που δημιουργήθηκε καθώς η τιμή της είναι ίδια με την ταχύτητα εξόδου μιας και δεν εφαρμόστηκε η προσέγγιση ενθαλπίας πορώδους που οδηγεί σε υποβάθμιση της ταχύτητας κατά την αλλαγή της φάσης.

#### 5.4.3.3 Αντιμετώπιση Προβλημάτων στο Ansys Fluent v19.2

Επισημάνθηκε προηγουμένως ότι το βασικό πρόβλημα στην εισαγωγή του μοντέλου στο Ansys Fluent είναι ότι θα πρέπει να καθοριστεί η ταχύτητα εισόδου του ρευστού τήγματος η οποία μέχρι στιγμής είναι άγνωστη. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να εξασφαλισθεί ένα ανώτατο όριο της ταχύτητας εισόδου του ρευστού τήγματος έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η συνθήκη της “laminar flow” σε όλες τις δοκιμές, μιας και στο μοντέλο δεν εξετάζεται η ανάπτυξη τυρβώδους ροής. Επομένως θα πρέπει να προσδιοριστεί αρχικά ο αριθμός Reynolds που διέπει την ροή σε αγωγό ορθογώνιας διατομής. Αυτός ο υπολογισμός διενεργείται μέσω της παρακάτω μαθηματικής έκφρασης:

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (5)$$

$\rho$ : πυκνότητα σε  $\text{kg/m}^3$

$V$ : ταχύτητα σε  $\text{m/s}$

$D_h$ : διάμετρος που θα είχε αντίστοιχος κυκλικός αγωγός και υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$D_h = \frac{4WH}{2(W+H)} \quad (6) \quad \text{όπου } W: \text{ πλάτος και } H: \text{ το ύψος του ορθογωνίου}$$

$\mu$ : δυναμικό ιξώδες του τήγματος

Η συνθήκη για να επιτυγχάνεται “laminar flow” είναι:  $Re < 2300$ . [39] Επιλύοντας την προηγούμενη ανίσωση για άγνωστη ταχύτητα του ρευστού τήγματος, πυκνότητα τήγματος  $2300 \text{ kg/m}^3$ ,  $D_h = 0,8 \text{ m}$  και δυναμικό ιξώδες  $\mu = 0,001 \text{ kg/(m*s)}$  λαμβάνεται η μέγιστη ταχύτητα τήγματος ως  $V = 0.00125 \text{ m/s}$  η οποία εξασφαλίζει συνθήκες “laminar” ροής. Για να ξεπεραστεί αυτή η ταχύτητα πρέπει να εισαχθεί μοντελοποίηση της τυρβώδους ροής που θα προκύψει.

#### 5.4.3.3.1 Αντιμετώπιση προβλημάτων σύγκλισης στο Comsol για προσδιορισμό της ταχύτητας εισόδου

Ο λογισμός για την αντιμετώπιση των προβλημάτων σύγκλισης λόγω της εφαρμογής του παράγοντα  $F$  εκκίνησε με την αρχή ότι οι εξισώσεις που προαναφέρθηκαν αναφέρονται σε ρευστά και το πρόβλημα είναι, σε αυτό το σημείο, πρόβλημα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Επομένως παρόλο που προσομοιώνεται η αλλαγή της φάσης, συνεχίζουν να διέπουν οι ίδιες εξισώσεις την ροή ακόμα και μετά την στερεοποίηση. Γι’ αυτό το λόγο επιβάλλεται η μεταβολή του ιξώδους κατά τέτοιο τρόπο που να αντιστοιχεί στο υποθετικό ιξώδες του στερεοποιημένου κράματος αλουμινίου. Παρόλο που φυσικά δεν ορίζεται ιξώδες στερεής φάσης, υπολογιστικά αποτέλεσε ικανή συνθήκη για να περιγράψει την υποβάθμιση της ταχύτητας. Στην έρευνα του Vahid Monfared [40] επιχειρήθηκε ο υπολογισμός του ιξώδους σε στερεά (όπως και μέταλλα) μέσω του μοντέλου “steady state creep” με τη χρήση της θεωρίας ρευστομηχανικής. Κατόπιν πειραμάτων υπολογίστηκε το ιξώδες σε στερεή κατάσταση στους  $300^\circ\text{C}$  για το κράμα αλουμινίου Al6061 και βρέθηκε να ισούται με την τιμή  $4.8 \times 10^{15} \text{ Pa.s}$  όπου  $\lambda$  είναι ένας θετικός μικρός αριθμός. Θέτοντας την τιμή για το  $\lambda$  ίση με 1 αυθαίρετα χρησιμοποιήθηκε αυτή η τιμή ως προσέγγιση του ιξώδους για το κράμα AA5182 της προσομοίωσης. Θεωρήθηκε γραμμική άνοδος του ιξώδους από την θερμοκρασία των  $970\text{K}$  που είναι και η τελευταία τιμή των διαγραμμάτων δυναμικού ιξώδους της βιβλιογραφικής ανασκόπησης μέχρι την τιμή των  $573\text{K}$  ( $300^\circ\text{C}$ ) ενώ σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η τιμή θεωρείται σταθερή. Διενεργώντας πειράματα στο λογισμικό Comsol εξήχθη το συμπέρασμα ότι η ταχύτητα εισόδου του ρευστού τήγματος είναι κατά έναν παράγοντα  $1e-4$  μεγαλύτερη από την ταχύτητα χύτευσης. Έτσι σε κάθε πείραμα στο Ansys η ταχύτητα εισόδου εκχωρείται κατά έναν παράγοντα  $1e-4$  μεγαλύτερη από την ταχύτητα χύτευσης του στερεοποιημένου πλινθώματος (pull velocity). Ωστόσο, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή αυτής της φιλοσοφίας επίλυσης στο Comsol δεν ήταν λογικά και άξια μελέτης, με συνέπεια η χρήση του μοντέλου να περιορίζεται μόνο στον εντοπισμό της διαφοράς της ταχύτητας εισόδου του ρευστού τήγματος με την ταχύτητα χύτευσης.

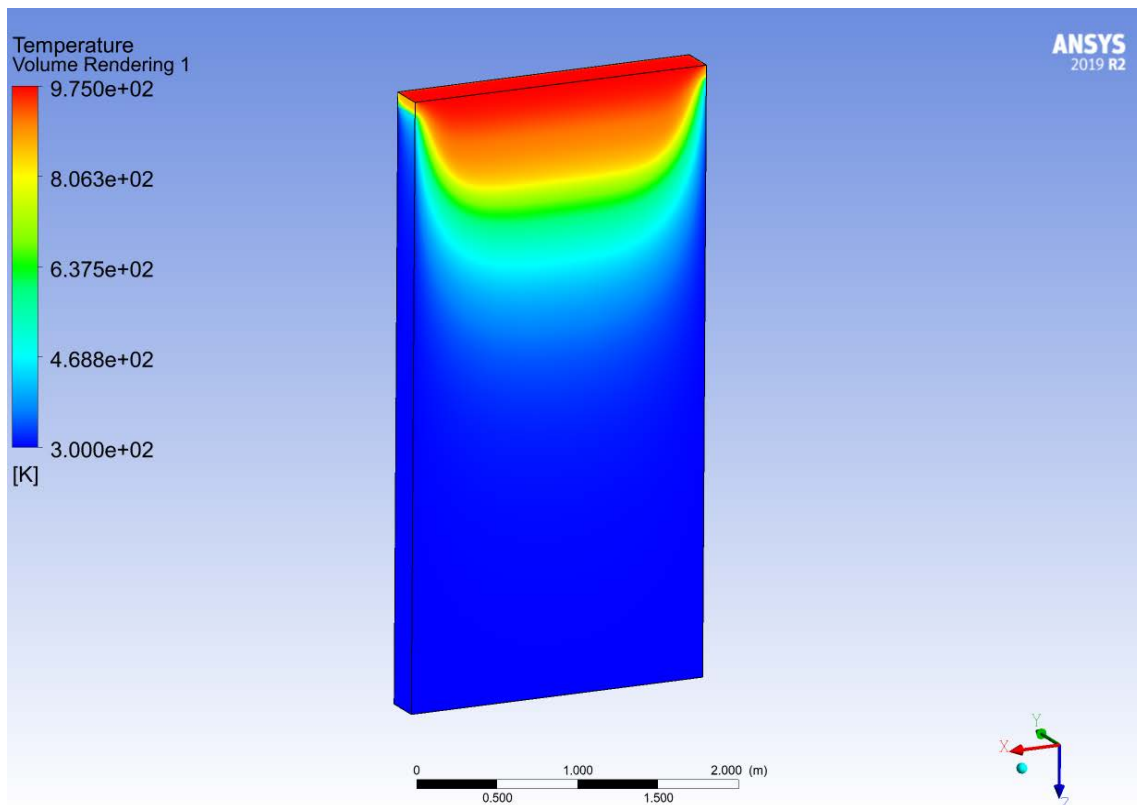
## 6 Αποτελέσματα Προσομοίωσης – Σχολιασμός

### 6.1 Φυσικά Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται διαγράμματα σχετικά με την κατανομή: θερμοκρασιών (T), πυκνότητας ( $\rho$ ), θερμικής αγωγιμότητας ( $\lambda$ ) καθώς και κατανομής των φάσεων. Αυτό αποτελεί έναν αρχικό έλεγχο της φυσικής ορθότητας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε σχέση με τις αναμενόμενες τιμές των ιδιοτήτων ανάλογα με τους φυσικούς νόμους που διέπουν την Direct Chill χύτευση αλουμινίου. Υπενθυμίζεται ότι η ταχύτητα χύτευσης σε αυτό το στάδιο είναι 50mm/min.

#### 6.1.1 Κατανομή Θερμοκρασιών (T)

Η κατανομή του πεδίου θερμοκρασιών στο επίπεδο -xz στην τομή του πλινθώματος αλουμινίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 34. Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας παρατηρείται στην είσοδο του ρευστού τήγματος στη διάταξη DC χύτευσης και αντιστοιχεί στην τιμή των 975K. Κατόπιν παρατηρείται σταδιακή πτώση της θερμοκρασίας καθώς λαμβάνουν χώρα οι συνθήκες απόψυξης κατά μήκος του πλινθώματος, όπου τελικά το κάτω μέρος λαμβάνει την τιμή των 300K με τις υπάρχουσες συνθήκες απόψυξης.



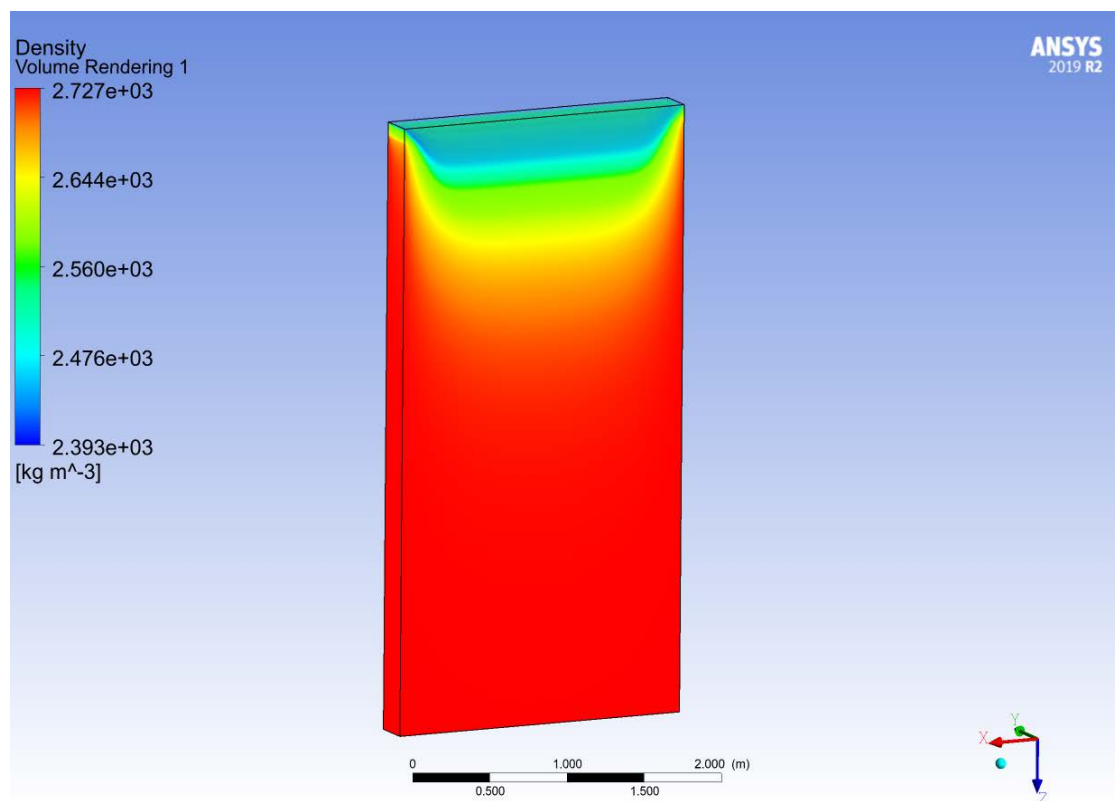
Εικόνα 34: Κατανομή Θερμοκρασιών στο πλινθώμα κράματος AA5182 κατά την κατάσταση μόνιμης ροής.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί ότι οι θερμοκρασίες στο κέντρο του πλινθώματος φαίνεται να διαφέρουν σημαντικά από τις αντίστοιχες στην επιφάνεια στο άνω μέρος του πλινθώματος κατά την

φάση μόνιμης ροής. Στην επιφάνεια ο ρυθμός απόψυξης είναι μεγάλος λόγω της πρωτογενούς απόψυξης με αποτέλεσμα την δημιουργία λεπτομερούς μικροδομής. Αυτό το φαινόμενο εξαλείφεται κατά την μετάβαση προς το κέντρο όπου η απόψυξη ορίζεται πλέον από την αγωγή διαμέσου του πλινθώματος. Επομένως αναμένεται το μέγιστο μέγεθος κόκκων να εμφανίζεται στο κέντρο του πλινθώματος και σταδιακά να μειώνεται κατά την μετάβαση προς την επιφάνεια. Από αντίστοιχες μετρήσεις μεγέθους κόκκων που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία το μέσο μέγεθος κόκκων στο κέντρο του πλινθώματος δύναται να είναι 4 φορές μεγαλύτερο από ότι στην επιφάνεια. [5] Η εισαγωγή κραματικών προσθηκών που προκαλούν κατακερματισμό της μικροδομής (grain refining) δύναται να προκαλέσει διαφορετικά αποτελέσματα.[8]

### 6.1.2 Κατανομή Πυκνότητας

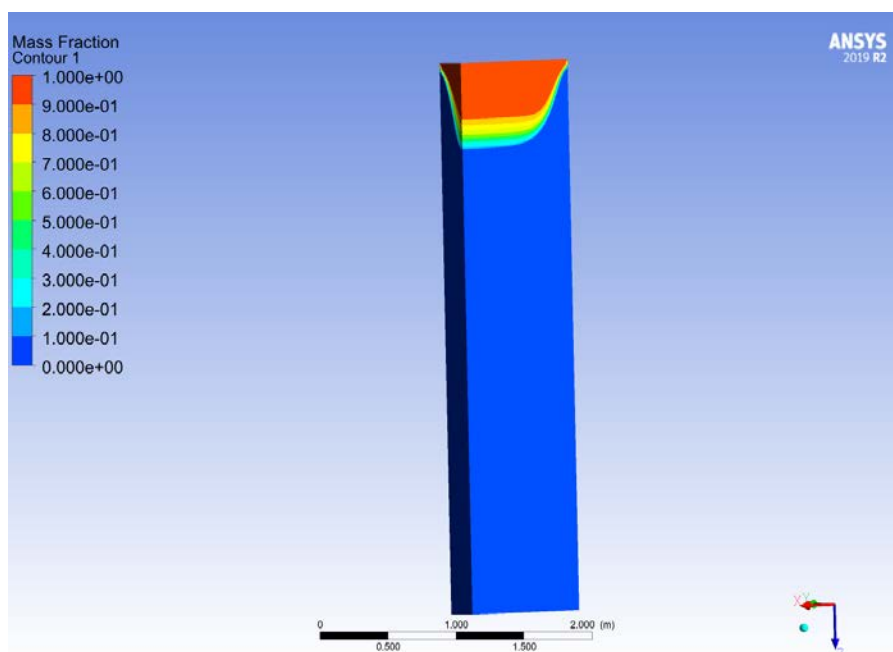
Η κατανομή της πυκνότητας παρουσιάζεται στην Εικόνα 35. Παρατηρείται ότι στο σημείο εισόδου εμφανίζεται τιμή πυκνότητας περί τα  $2400 \text{ kg/m}^3$  που αντιστοιχεί στο υγρό τήγμα που εισέρχεται στην διάταξη της DC χύτευσης ενώ στη συνέχεια λόγω των συνθηκών απόψυξης και της επακόλουθης στερεοποίησης η τιμή της πυκνότητας αυξάνεται στην ημίρρευστη ζώνη και τέλος λαμβάνει την τιμή κοντά στα  $2700 \text{ kg/m}^3$  που αντιστοιχεί και στην πυκνότητα της στερεής φάσης του κράματος AA5182. Η μεταβολή της πυκνότητας συντελείται λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας, καθώς η πυκνότητα έχει εισαχθεί στο Ansys Fluent ως πολυωνυμική συνάρτηση της θερμοκρασίας.



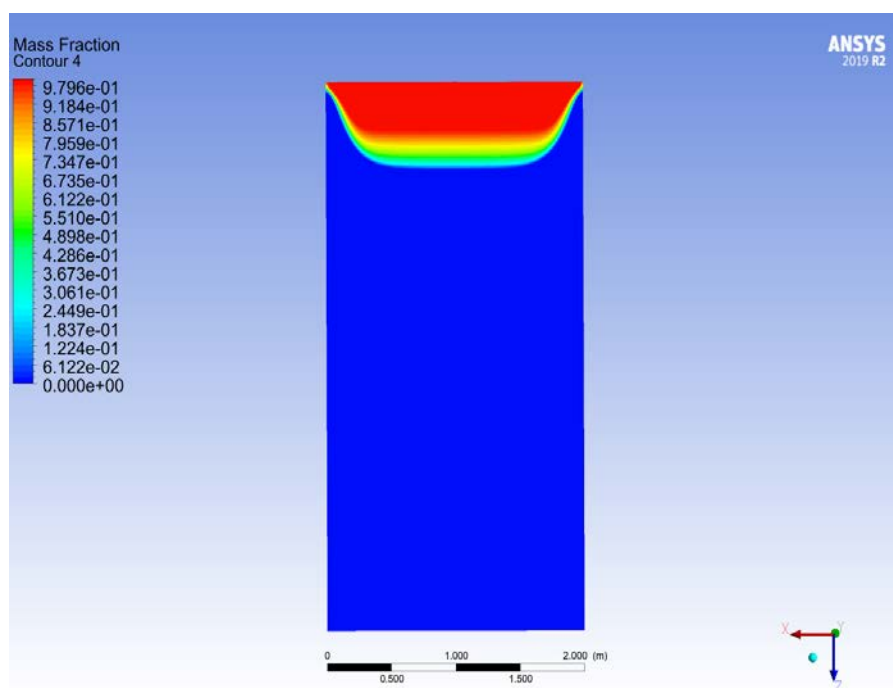
Εικόνα 35: Κατανομή Πυκνότητας στο πλίνθωμα κράματος αλουμινίου AA5182 κατά την κατάσταση μόνιμης ροής.

### 6.1.3 Κατανομή Φάσεων

Η κατανομή του κλάσματος όγκου φάσεων παρατίθεται στις Εικόνες 34 και 35. Η τιμή 1 αντιστοιχεί στο κλάσμα όγκου υγρής φάσης ενώ η τιμή 0 αντιστοιχεί στο κλάσμα όγκου στερεής φάσης. Οι ενδιάμεσες τιμές αντιστοιχούν στην ημίρρευστη κατάσταση, η μελέτη της οποίας παρουσιάζει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον λόγω της επιρρέπειάς της στη δημιουργία ελαττωμάτων. Παρατηρείται ότι στο κέντρο του χυτού αυξάνονται οι διαστάσεις της ημίρρευστη ζώνης σε σχέση με τα άκρα του πλινθώματος λόγω των εντονότερων συνθηκών απόψυξης στα άκρα τόσο στην πρωτογενή όσο και στη δευτερογενή ζώνη απόψυξης. Το μεταλλουργικό μήκος αντιστοιχεί στην τιμή των 0,6477 m.



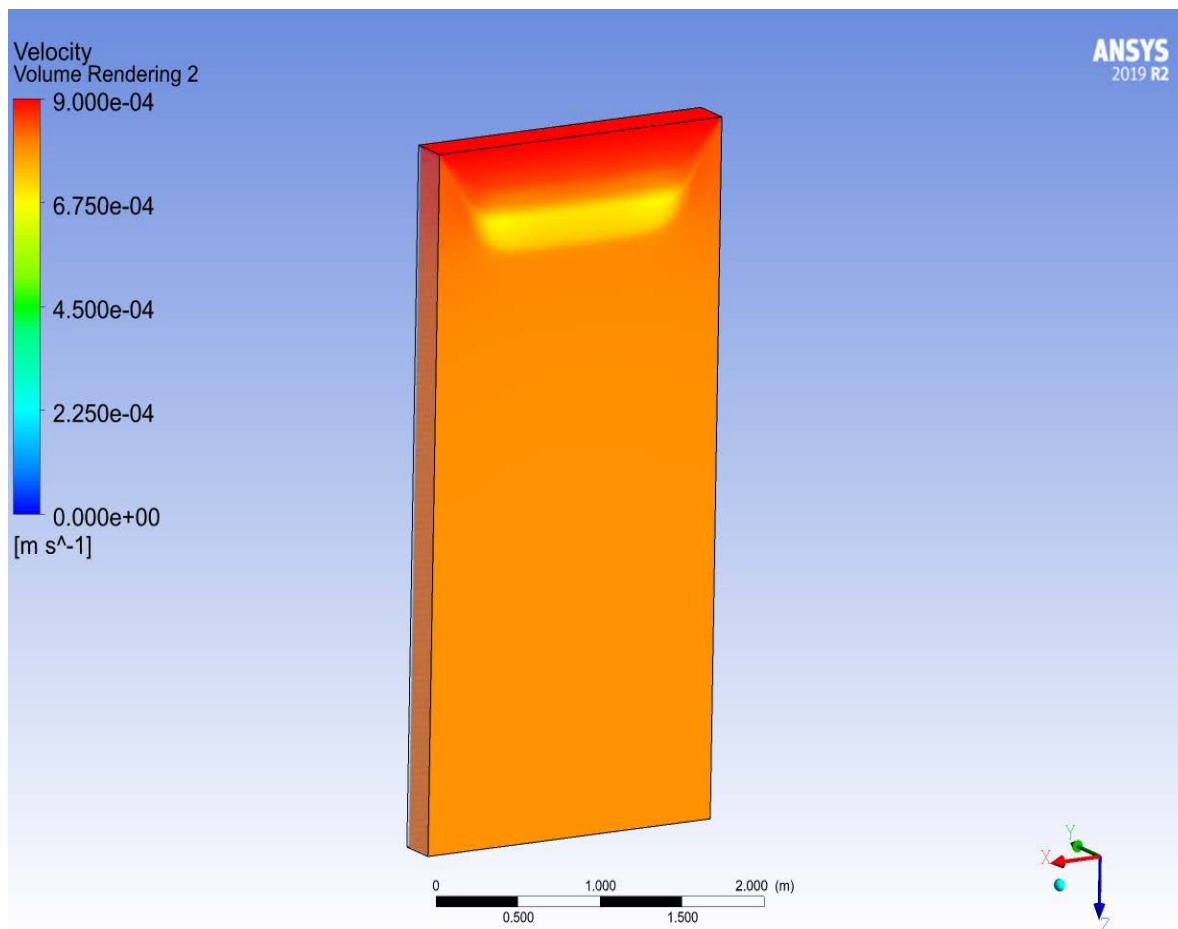
Εικόνα 36: Κατανομή κλάσματος όγκου υγρής φάσης στο  $\frac{1}{4}$  του πλινθώματος κράματος αλουμινίου AA5182 κατά την κατάσταση μόνιμης



Εικόνα 37: Κατανομή κλάσματος όγκου υγρής φάσης στο επίπεδο xz του πλινθώματος κράματος αλουμινίου AA5182 κατά την κατάσταση μόνιμης ροής.

#### 6.1.4 Κατανομή Πεδίου Ταχύτητας

Στην Εικόνα 38 παρατηρείται το πεδίο ταχυτήτων στο πλίνθωμα όπου στην είσοδο του ρευστού τήγματος οι ταχύτητα εισόδου έχει οριστεί σε 0,0009 m/s δηλ. κατά έναν παράγοντα  $1e-4$  μεγαλύτερη από την ταχύτητα χύτευσης, σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε στην ενότητα 5.4.3.2.1. Στην ημίρρευστη ζώνη παρατηρείται εμφανώς η υποβάθμιση της ταχύτητας λόγω της προσέγγισης ενθαλπίας πορώδους ενώ στη συνέχεια το στερεοποιημένο πλίνθωμα λαμβάνει την ταχύτητα των 50mm/min (ή 0,000834 m/s κατά προσέγγιση).

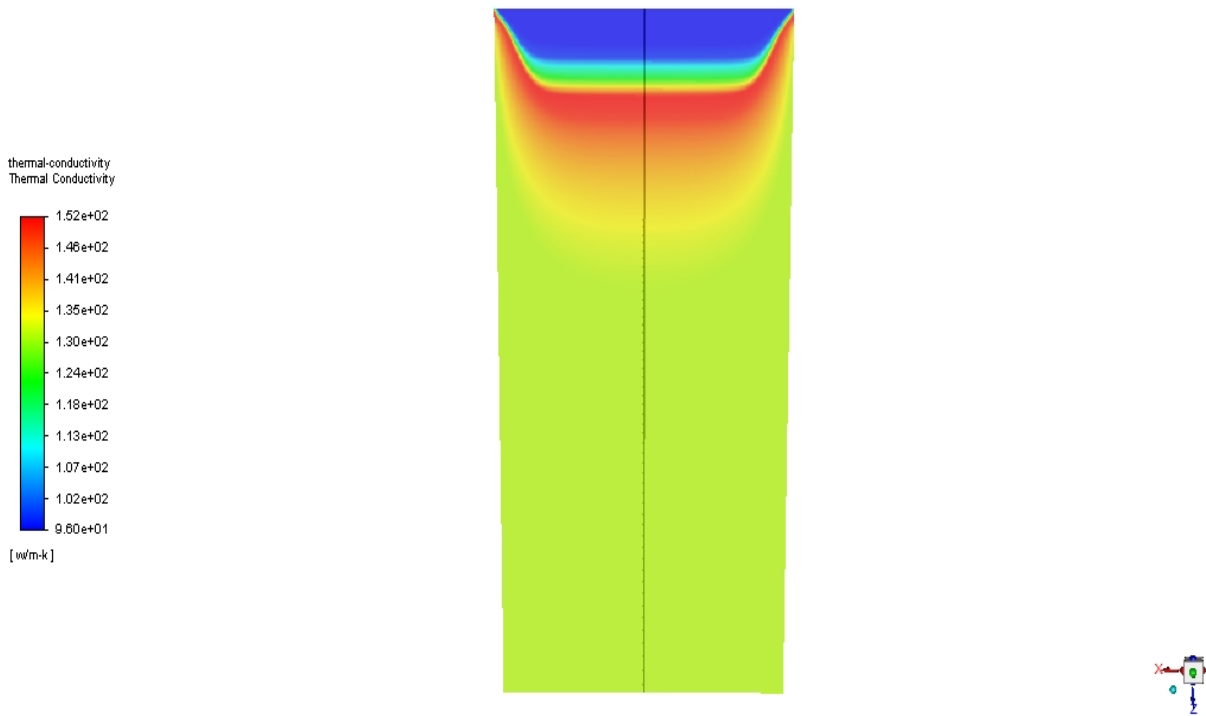


Εικόνα 38: Κατανομή ταχυτήτων στο πλίνθωμα κράματος AA5182 κατά την κατάσταση μόνιμης ροής.

#### 6.1.5 Κατανομή Θερμικής Αγωγιμότητας

Η κατανομή της θερμικής αγωγιμότητας παρατίθεται στην Εικόνα 39. Διαφαίνεται ότι στην είσοδο της διάταξης Direct Chill Casting το ρευστό τήγμα αντιστοιχεί σε τιμές θερμικής αγωγιμότητας της τάξεως των 95 W/(m\*K) ενώ στο στερεοποιημένο πλίνθωμα μετά την αλλαγή φάσης η τιμή ανέρχεται σε 130 W/( m\*K). Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στην ημίρρευστη ζώνη πράγμα το οποίο είναι

ορθό από φυσικής πλευράς σύμφωνα με το διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας της ενότητας 3.2.5.1 όπου παρατηρείται ότι περί τους 850K η τιμή της ξεπερνά τα 150 W/(m\*K).



Εικόνα 39: Κατανομή θερμικής αγωγιμότητας στο πλίνθωμα κράματος AA5182 κατά την κατάσταση μόνιμης ροής.

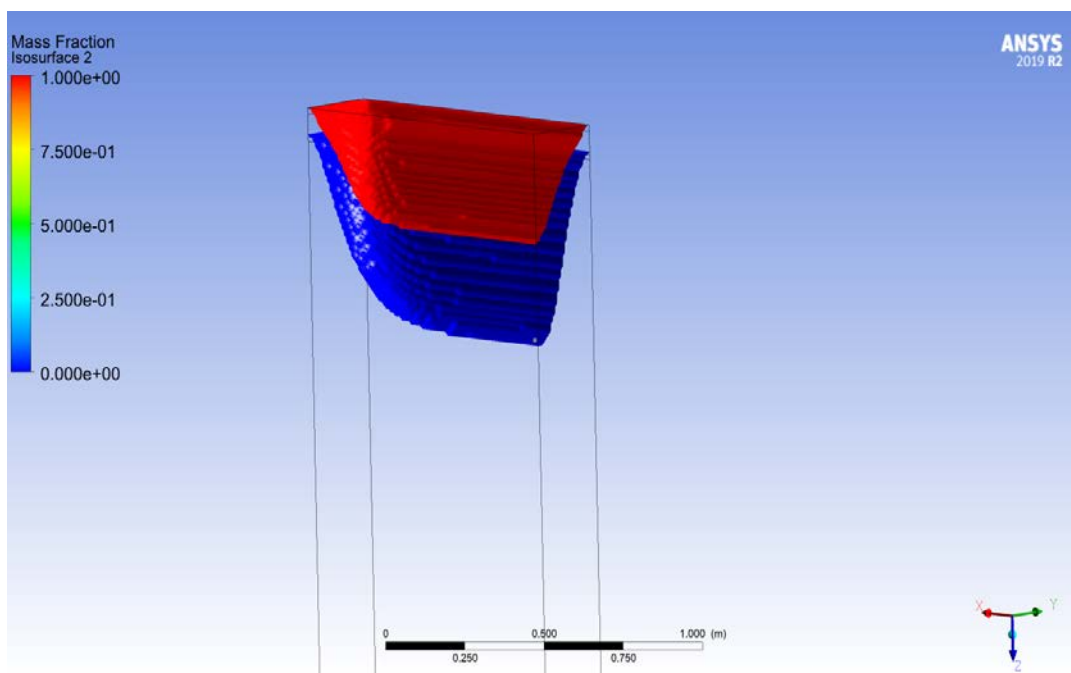
## 6.2 Παραμετρική Ανάλυση στο Ansys Fluent 19.1

### 6.2.1 Επιρροή της ταχύτητας χύτευσης στις διαστάσεις της ημίρρευστης ζώνης

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης που διενεργήθηκε με σκοπό να προσδιοριστεί η επιρροή της ταχύτητας χύτευσης και κατ' επέκταση της ταχύτητας εισόδου του ρευστού τήγματος στις διαστάσεις της ημίρρευστης ζώνης. Η παραμετρική ανάλυση διενεργείται στο λογισμικό Ansys Fluent v19.2 όπου για την ροή στην ημίρρευστη ζώνη εφαρμόζεται η προσέγγιση ενθαλπίας-πορώδους. Διενεργήθηκαν προσομοιώσεις σε ταχύτητες χύτευσης 50mm/min, 60mm/min και 70mm/min ενώ δεν επιχειρήθηκε περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας διότι η ροή θα μετατραπεί σε τυρβώδη. Με τη χρήση της εντολής Isosurface κατά την διεργασία “Post-Processing” στο Ansys Fluent δημιουργείται επιφάνεια κόκκινου χρώματος που αντιστοιχεί στο άνω όριο της ημίρρευστης ζώνης και κλάσμα όγκου υγρής φάσης: 0,9999 και επιφάνεια μπλε χρώματος που αντιστοιχεί στο κάτω όριο με κλάσμα όγκου υγρής φάσης: 0,0001. Ύστερα από κάθε προσομοίωση λαμβάνονται τα δεδομένα σχετικά με την θέση των καμπυλών που οριοθετούν την ημίρρευστη ζώνη στο επίπεδο -xz του ¼ του πλινθώματος και εκχωρούνται στο λογισμικό Excel για κατασκευή γραφημάτων προς ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται στη συνέχεια.

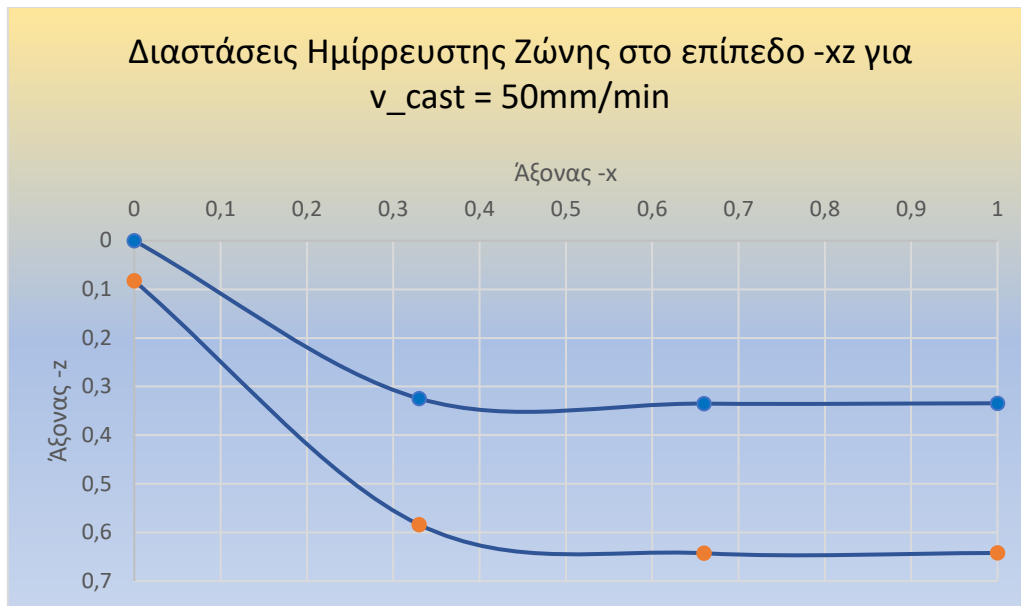
#### 6.2.1.1 Ημίρρευστη Ζώνη για Ταχύτητα Χύτευσης $v=50\text{mm/min}$

Στην Εικόνα 40 παρατίθενται οι επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min ενώ στο γράφημα της Εικόνας 41 η ακριβής θέση των καμπυλών στο επίπεδο -xz του πλινθώματος.



Εικόνα 40: Ισόθερμες επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min.

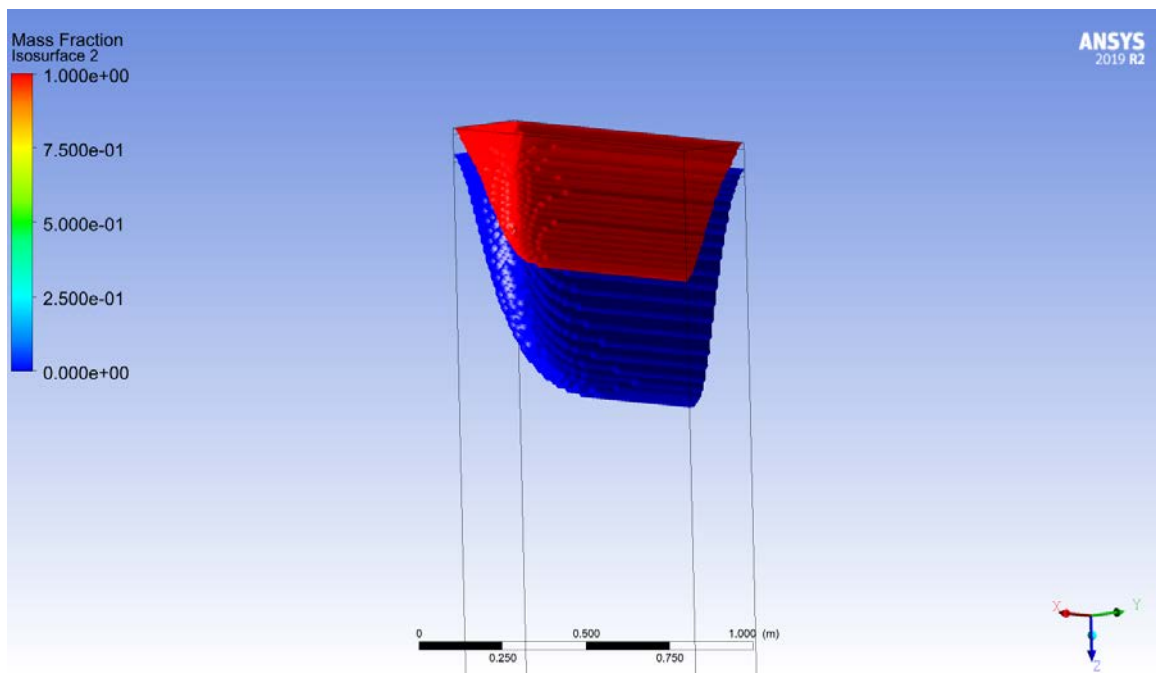




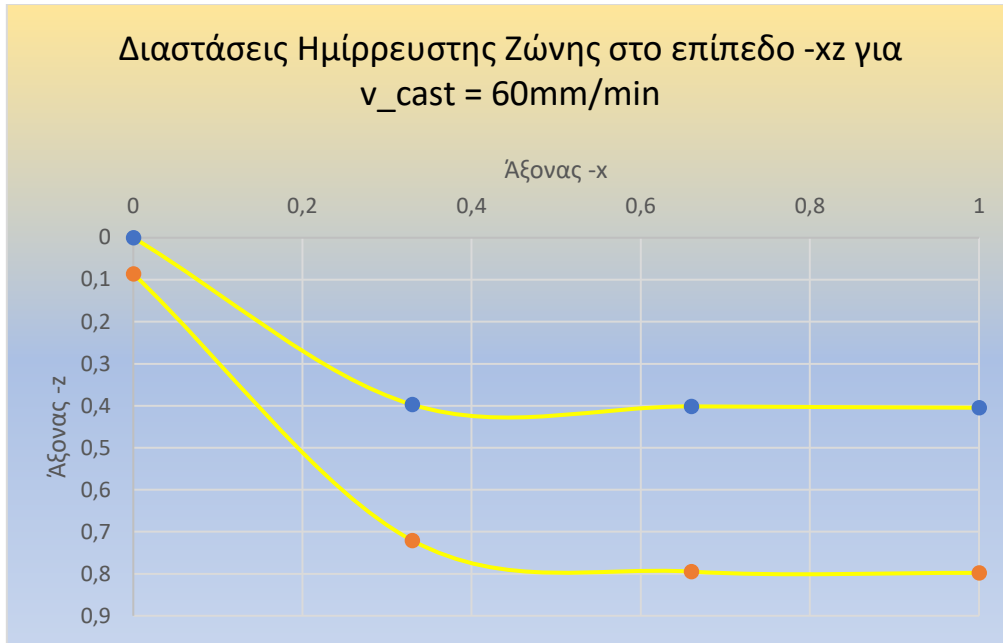
Εικόνα 41: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευστης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min.

### 6.2.1.2 Ημίρρευση Ζώνη για Ταχύτητα Χύτευσης $v=60\text{mm/min}$

Στην Εικόνα 42 παρατίθενται οι επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 60mm/min ενώ στο γράφημα της Εικόνας 43 η ακριβής θέση των καμπυλών στο επίπεδο -xz του πλινθώματος.



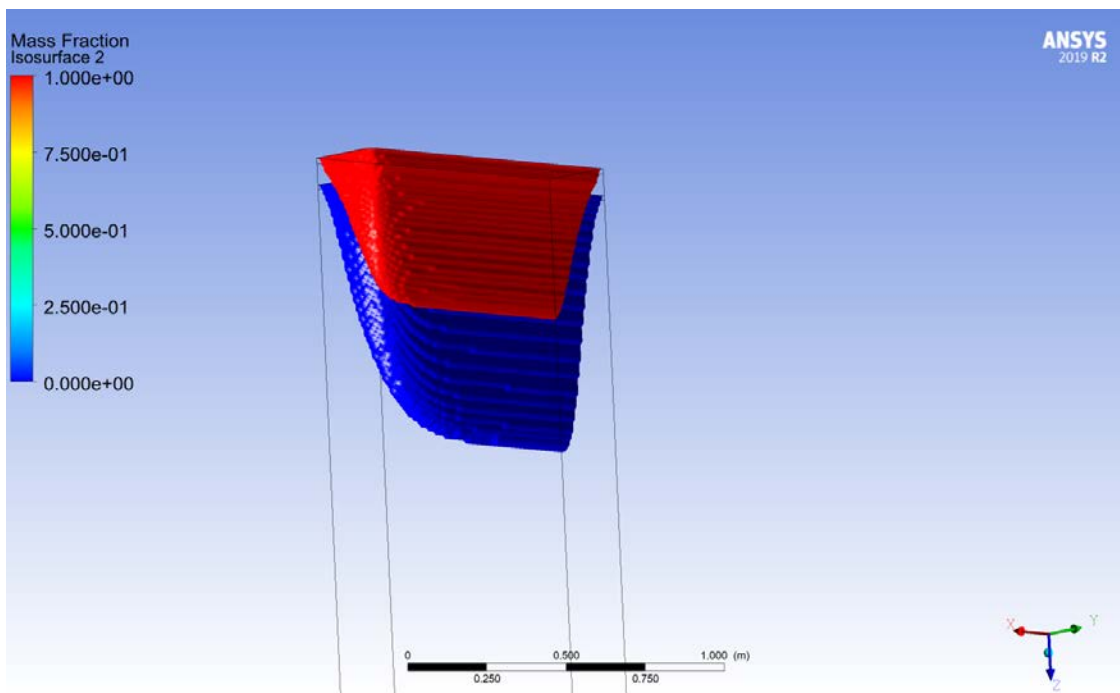
Εικόνα 42: Ισόθερμες επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 60mm/min.



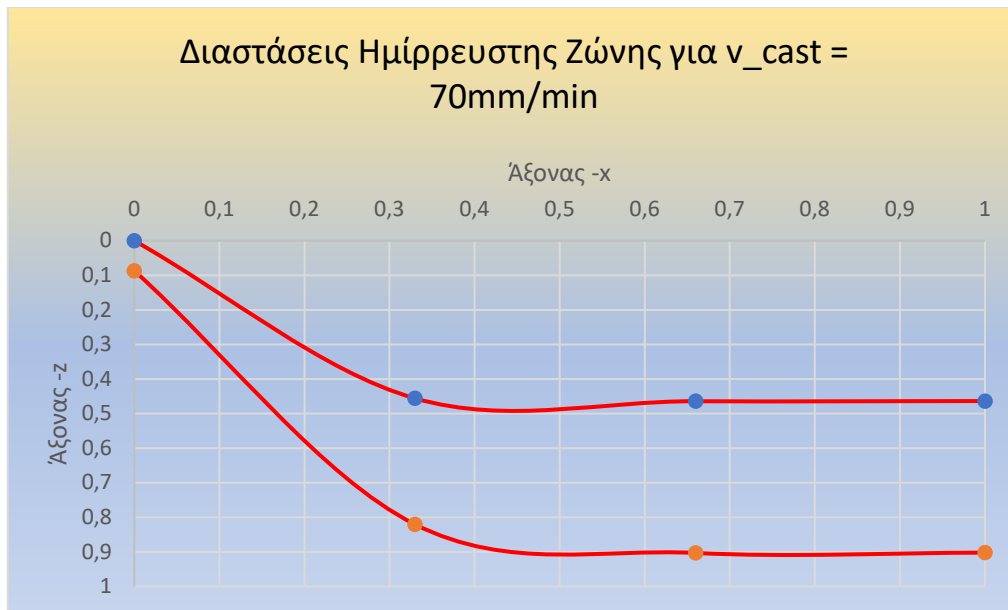
Εικόνα 43: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευστης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 60mm/min.

### 6.2.1.3 Ημίρρευση Ζώνη για Ταχύτητα Χύτευσης $v=70\text{mm/min}$

Στην Εικόνα 44 παρατίθενται οι επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 70mm/min ενώ στο γράφημα της Εικόνας 45 η ακριβής θέση των καμπυλών στο επίπεδο -xz του πλινθώματος.



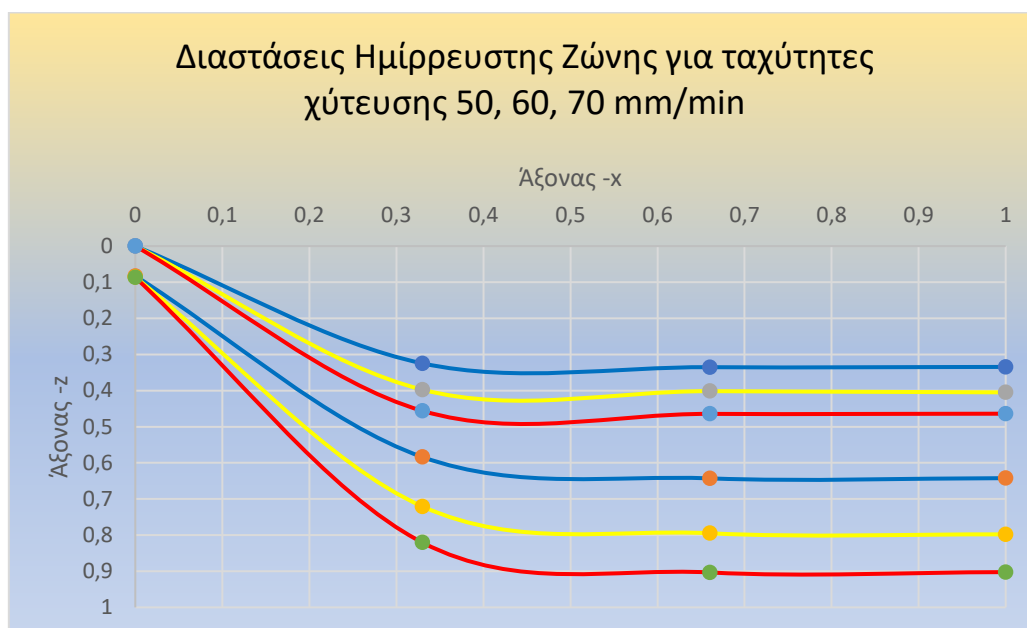
Εικόνα 44: Ισόθερμες επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 70mm/min.



Εικόνα 45: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευστης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 70mm/min.

#### 6.2.1.4 Σύγκριση διαστάσεων ημίρρευστης ζώνης για διαφορετικές ταχύτητες χύτευσης

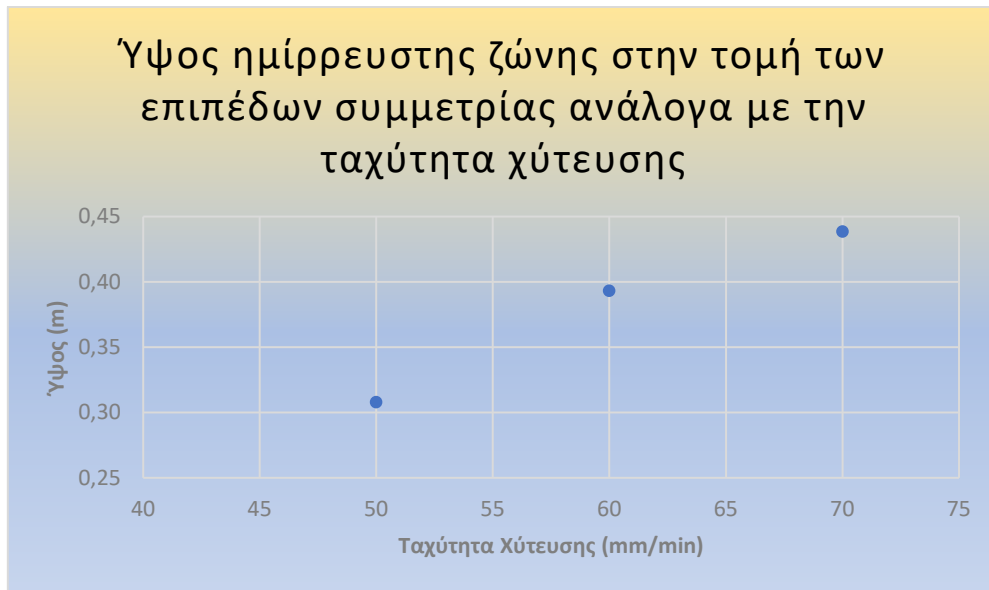
Στο ακόλουθο γράφημα της Εικόνας 46 παρατίθενται συνοπτικά τα παραπάνω αποτελέσματα για σύγκριση των διαστάσεων της ημίρρευστης ζώνης με μεταβολή της ταχύτητας χύτευσης. Ακόμη, στο γράφημα της Εικόνας 47 διενεργείται σύγκριση του εύρους της ημίρρευστης ζώνης κατά τον κεντρικό άξονα z του πλινθώματος (τομή των επιπέδων συμμετρίας του πλινθώματος).



Εικόνα 46: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευστης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητες χύτευσης 50 mm/min (μπλε χρώμα), 60 mm/min (κίτρινο χρώμα), 70 mm/min (κόκκινο χρώμα).

### Συγκριτικός Πίνακας

Ταχύτητα χύτευσης	Μήκος ημίρρευστης ζώνης στην τομή των επιπέδων συμμετρίας		
50	mm/min	0.30792	m
60	mm/min	0.39313	m
70	mm/min	0.43852	m



Εικόνα 47: Ύψος ημίρρευστης ζώνης στην τομή των επιπέδων συμμετρίας ανάλογα με την ταχύτητα χύτευσης

#### 6.2.1.5 Σχολιασμός της επίδρασης της ταχύτητας χύτευσης στη διεργασία “Direct Chill Casting”

Τα ως άνω στοιχεία αποδεικνύουν ότι η ταχύτητα χύτευσης παρουσιάζει άμεση επιρροή στο μεταλλουργικό μήκος καθώς και στις διαστάσεις της ημίρρευστης ζώνης. Συγκεκριμένα για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min το ύψος της ημίρρευστης ζώνης στον κεντρικό άξονα που διατρέχει το πλίνθωμα αντιστοιχεί σε 30 cm ενώ για ταχύτητα 70mm/min αυξάνεται κατά προσέγγιση στα 44 cm.

Συμφώνως της πηγής [8] έχει παρατηρηθεί ότι αυξάνοντας την ταχύτητα χύτευσης, αυξάνεται ο μακροδιαφορισμός στο κέντρο του πλινθώματος. Το συμπέρασμα αυτό σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης οδηγεί σε πιθανό συσχετισμό του μακροδιαφορισμού με τις διαστάσεις της μεταβατικής ζώνης. Υπάρχουν δύο κύριες γεωμετρικές παράμετροι της μεταβατικής ζώνης που επηρεάζουν τον βαθμό του ανάστροφου διαφορισμού κατά την DC χύτευση: (α) το μέγεθος της μεταβατικής περιοχής και (β) την κλίση του μετώπου στερεοποίησης. [8]

Έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση του μεταλλουργικού μήκους και η επακόλουθη διεύρυνση της μεταβατικής περιοχής επηρεάζουν κυρίως τις διαστάσεις της “slurry” ζώνης όπου οι κύριοι

μηχανισμοί του διαφορισμού είναι η θερμική ή λόγω συγκέντρωσης συναγωγή και οι επιπλέοντες κόκκοι. Αυτοί οι δύο μηχανισμοί δρουν σε αντίθετες κατευθύνσεις, όπως επισημάνθηκε και στο Θεωρητικό Μέρος της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, από τη μια πλευρά, η μεγαλύτερη “slurry” ζώνη οδηγεί σε μεγαλύτερη πιθανότητα για την ροή οφειλόμενη σε συναγωγή να διεισδύσει πιο βαθιά στην μεταβατική ζώνη και να συγκεντρώσει μεγαλύτερη ποσότητα διαλύτη την οποία οδηγεί στο κέντρο του πλινθώματος, συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στον θετικό διαφορισμό. Από την άλλη πλευρά αυξάνεται και η πιθανότητα να συγκεντρωθούν περισσότεροι επιπλέοντες κόκκοι της νεοσύστατης στερεής φάσης και να συσσωρευθούν στο κέντρο συμβάλλοντας σε αρνητικό διαφορισμό, μιας και οι νεοσύστατοι κόκκοι σε υπό-ευτηκτικά κράματα χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες συγκεντρώσεις διαλύτη. Ακόμη, καθώς αυξάνεται η ταχύτητα χύτευσης αυξάνεται και το μεταλλουργικό μήκος ενώ παράλληλα αλλάζει η γεωμετρία του μετώπου στερεοποίησης του οποίου μεταβάλλεται η κλίση. Αυτό επιδρά στο φαινόμενο ροής οφειλόμενης σε συρρίκνωση (“shrinkage induced flow”) στην “mushy” ζώνη που όπως επισημάνθηκε στο Θεωρητικό Μέρος οδηγεί σε ανάστροφο διαφορισμό στο πλίνθωμα.

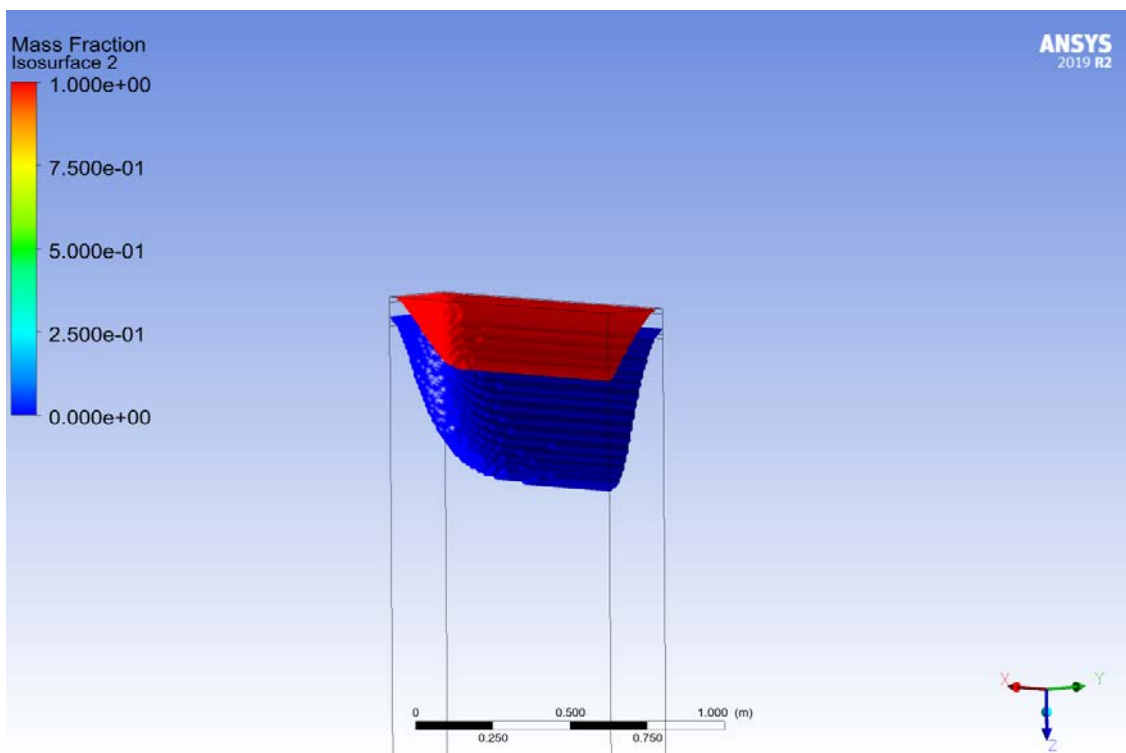
Επιπλέον, η αύξηση της ταχύτητας χύτευσης και η επακόλουθη αύξηση των διαστάσεων της ημίρρευστης ζώνης έχει σαν συνέπεια το κράμα να βρίσκεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα εντός της ευάλωτης περιοχής οδηγώντας σε αύξηση της πιθανότητας να εμφανιστούν περισσότερες δυσπρόσιτες περιοχές για την ροή του τήγματος με άμεση συνέπεια την εμφάνιση πορώδους στις περιοχές που δεν δύναται να διεισδύσει το ρευστό τήγμα. Το πορώδες με τη σειρά του κάτω από την επίδραση υψηλών θερμικών τάσεων κατά τη στερεοποίηση θα οδηγήσει πιθανώς στο σχηματισμό θερμής ρηγμάτωσης ή hot tearing όπως αναφέρθηκε στο Θεωρητικό Μέρος.

### 6.2.2 Επιρροή θερμοκρασίας του τήγματος στις διαστάσεις της ημίρρευστης ζώνης

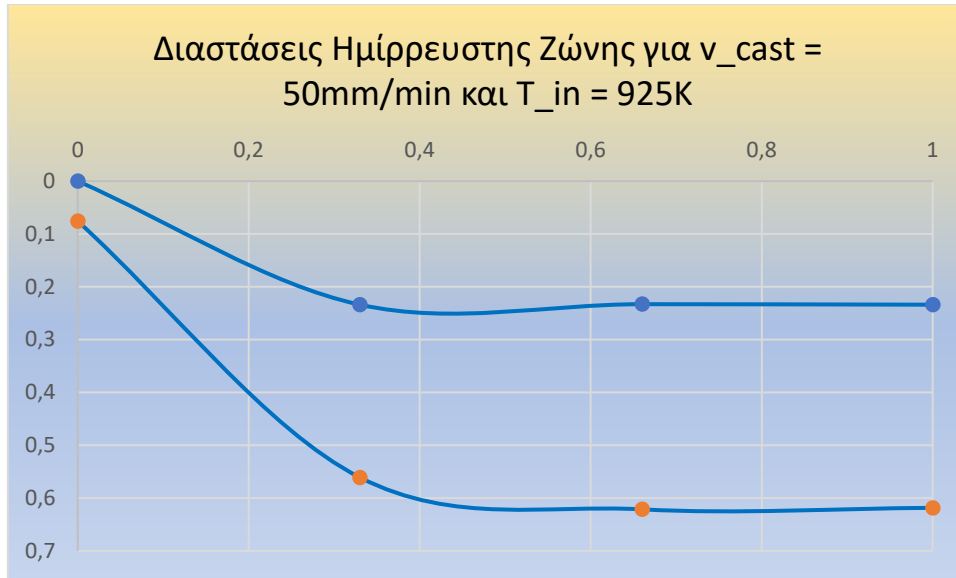
Στην ενότητα αυτή παρατίθενται τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης που διενεργήθηκε με σκοπό να προσδιοριστεί η επιρροή της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού τήγματος στις διαστάσεις της ημίρρευστης ζώνης. Η παραμετρική ανάλυση διενεργείται στο λογισμικό Ansys Fluent v19.2. Διενεργήθηκαν προσομοιώσεις για σταθερή ταχύτητα χύτευσης  $v=50\text{mm/min}$  και θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού τήγματος: 925K, 975K (βλ. Ενότητα 6.2.1) και 1025K. Και σε αυτή την περίπτωση με τη χρήση της εντολής Isosurface κατά την διεργασία “Post-Processing” στο Ansys Fluent δημιουργείται επιφάνεια κόκκινου χρώματος που αντιστοιχεί στο άνω όριο της ημίρρευστης ζώνης και κλάσμα όγκου υγρής φάσης: 0,9999 και επιφάνεια μπλε χρώματος που αντιστοιχεί στο κάτω όριο με κλάσμα όγκου υγρής φάσης: 0,0001. Ύστερα από κάθε προσομοίωση λαμβάνονται τα δεδομένα σχετικά με την θέση των καμπυλών που οριοθετούν την ημίρρευστη ζώνη στο επίπεδο -xz του  $\frac{1}{4}$  του πλινθώματος και εκχωρούνται στο λογισμικό Excel για κατασκευή γραφημάτων προς ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται στη συνέχεια.

#### 6.2.2.1 Ημίρρευστη ζώνη για Θερμοκρασία Εισόδου 925K

Στην Εικόνα 48 παρατίθενται οι επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min και θερμοκρασία εισόδου του τήγματος 925K ενώ στο γράφημα της Εικόνας 49 η ακριβής θέση των καμπυλών στο επίπεδο -xz.



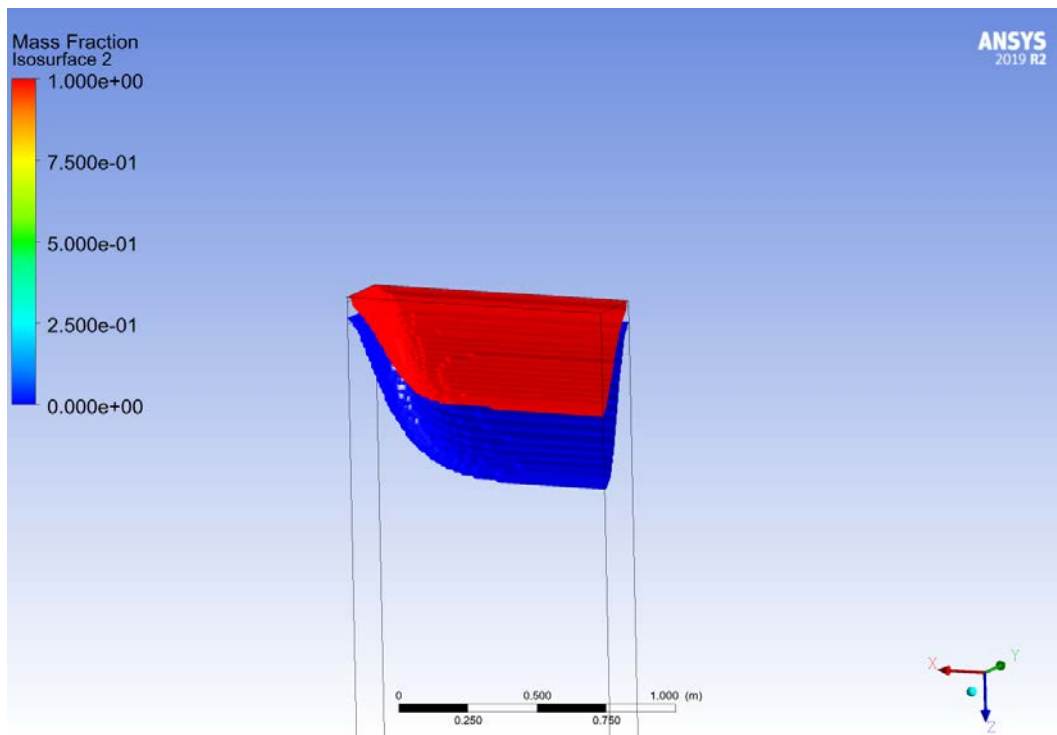
Εικόνα 48: Ισόθερμες επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min και θερμοκρασία εισόδου τήγματος 925K.



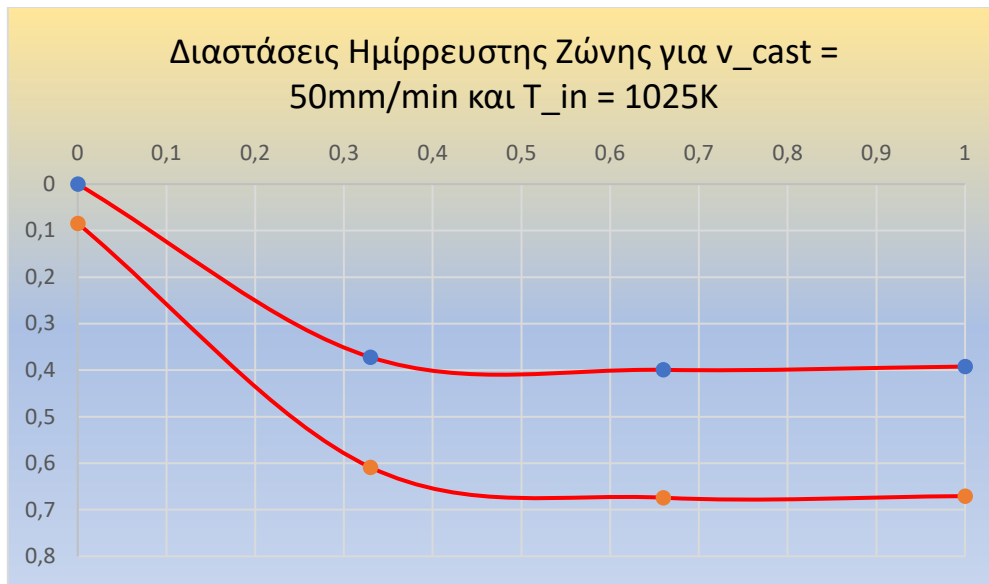
Εικόνα 49: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευσης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 50 mm/min και θερμοκρασία εισόδου τήγματος 925K

#### 6.2.2.2 Ημίρρευση ζώνη για Θερμοκρασία Εισόδου 1025K

Στην Εικόνα 50 παρατίθενται οι επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευσης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min και θερμοκρασία εισόδου του τήγματος 1025K ενώ στο γράφημα της Εικόνας 51 η ακριβής θέση των καμπυλών στο επίπεδο -xz του πλινθώματος.

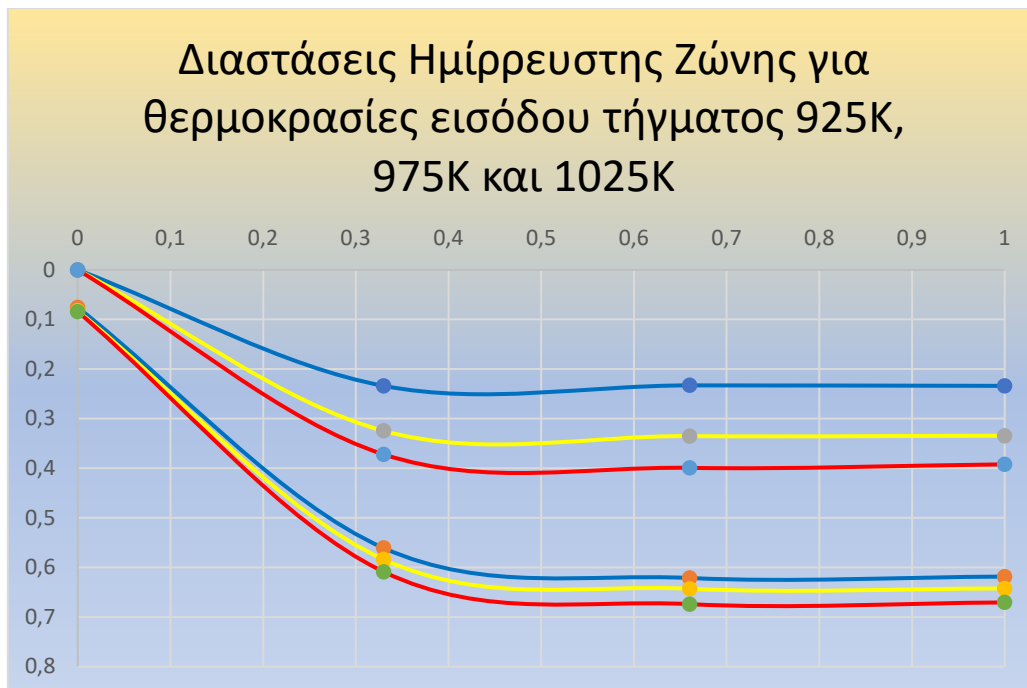


Εικόνα 50: Ισόθερμες επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευσης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min και θερμοκρασία εισόδου τήγματος 1025K.



Εικόνα 51: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευσης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 50 mm/min και θερμοκρασία εισόδου τήγματος 1025K

6.2.2.3 Σύγκριση διαστάσεων ημίρρευσης ζώνης για διαφορετικές θερμοκρασίες εισόδου τήγματος  
 Στο ακόλουθο γράφημα της Εικόνας 52 παρατίθενται συνοπτικά τα παραπάνω αποτελέσματα για σύγκριση των διαστάσεων της ημίρρευσης ζώνης με μεταβολή της θερμοκρασίας εισόδου του τήγματος ενώ η ταχύτητα χύτευσης διατηρείται σταθερή και ίση με 50mm/min. Ακόμη, στο γράφημα της Εικόνας 53 διενεργείται σύγκριση του εύρους της ημίρρευσης ζώνης κατά τον κεντρικό άξονα z του πλινθώματος (τομή των επιπέδων συμμετρίας του πλινθώματος).

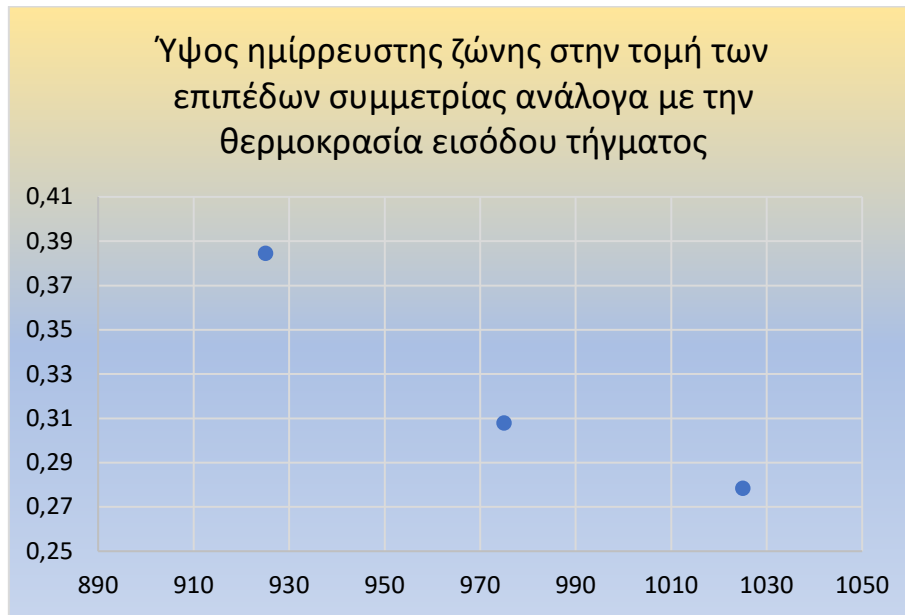


Εικόνα 52: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευσης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 50 mm/min και θερμοκρασία τήγματος 925K (μπλε χρώμα), 975K (κίτρινο χρώμα), 1025K (κόκκινο χρώμα).



Συγκριτικός Πίνακας

Ταχύτητα χύτευσης		Μήκος ημίρρευστης ζώνης στην τομή των επιπέδων συμμετρίας	
925	K	0.38455	m
975	K	0.30792	m
1025	K	0.27847	m



Εικόνα 53: Ύψος ημίρρευστης ζώνης στην τομή των επιπέδων συμμετρίας ανάλογα με την θερμοκρασία εισόδου τήγματος

#### 6.2.2.4 Σχολιασμός της επίδρασης της θερμοκρασίας εισόδου του τήγματος (“melt superheat”) στη διεργασία “Direct Chill Casting”

Τα ως άνω στοιχεία αποδεικνύουν κατά γενική ομολογία ότι η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του τήγματος (melt superheat) στη διάταξη της Direct Chill χύτευσης, οδηγεί σε μείωση των διαστάσεων της ημίρρευστης ζώνης. Ωστόσο μεταβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό την θερμοκρασία εισόδου παρουσιάζεται σχετικά μικρότερη επιρροή στις διαστάσεις της ημίρρευστης ζώνης σε σύγκριση με την επιρροή που ασκεί η μεταβολή της ταχύτητα χύτευσης. Συγκεκριμένα για σταθερή ταχύτητα χύτευσης 50mm/min και θερμοκρασία εισόδου τήγματος 925K (θερμοκρασία ελαφρώς ανώτερη από την θερμοκρασία liquidus) το εύρος της ημίρρευστης ζώνης στον κεντρικό άξονα που διατρέχει το πλίνθωμα αντιστοιχεί σε 39 cm ενώ για θερμοκρασία εισόδου 1025K μειώνεται κατά προσέγγιση στα 28cm. Παρατηρείται ότι με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού τήγματος επιτυγχάνεται αξιοσημείωτη μετακίνηση της liquidus ισόθερμης καμπύλης προς την διεύθυνση χύτευσης ενώ η ισόθερμη καμπύλη που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία solidus δεν παρουσιάζει σημαντική μεταβολή

της θέσης της. Τα προαναφερθέντα επιβεβαιώνονται και από αντίστοιχες έρευνες στη διεθνή βιβλιογραφία: [30], [41], [8]. Όσων αφορά στη δημιουργία ελαττωμάτων εξάγεται και εδώ το συμπέρασμα ότι γενικώς μειώνεται η επιρρέπεια σε hot tearing λόγω του περιορισμού της έκτασης της ευάλωτης περιοχής. Ακόμη έχει αποδειχθεί ότι η υψηλότερη θερμοκρασία τήγματος αυξάνει το κλάσμα όγκου των “eutectics” με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη διαθέσιμη εναπομείνουσα ποσότητα ρευστού τήγματος για να διεισδύσει στις δυσπρόσιτες περιοχές και να εξαλείψει πορώδες μεταξύ των αναπτυγμένων δενδριτών [12]. Αυτό αποτελεί επιπλέον πειστήριο ότι η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του τήγματος μειώνει την επιρρέπεια σε hot tearing.

Από πρακτικής άποψης, η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του τήγματος δεν πρέπει να αυξάνεται σε υπερβολικά μεγάλες τιμές καθώς συντρέχει κίνδυνος διαρροής τήγματος σε σημεία του πλινθώματος όπου ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μειώνεται αισθητά. Τέτοια σημεία είναι για παράδειγμα στην περιοχή σχηματισμού του κενού αέρος μεταξύ πλινθώματος και καλουπιού όπως επίσης και στην περιοχή σχηματισμού του “butt curl” κατά την φάση εκκίνησης. Εκεί η εσωτερική θερμότητα του πλινθώματος δύναται να οδηγήσει σε επανάτηξη λόγω του μειωμένου ρυθμού απόψυξης. Γι’ αυτό και τα εν λόγω φαινόμενα αποτελούν αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας στη διεθνή βιβλιογραφία και η πρόβλεψή τους επιτυγχάνεται με την εισαγωγή θερμο-μηχανικών μοντέλων προσομοίωσης.

Σύμφωνα με πρόσφατες δημοσιευμένες μελέτες όπως αυτή των C. Zhang et. al. [42] οι συνέπειες της αύξησης της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού τήγματος στο φαινόμενο του μακροδιαφορισμού είναι ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα. Σύμφωνα με τον Dmitry Eskin [8] η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του τήγματος οδηγεί σε ισχυρότερη ροή τήγματος προς την επιφάνεια του πλινθώματος και εντονότερη διείσδυση εντός της slurry και mushy ζώνης. Αυτό οδηγεί στην εμφάνιση θετικού διαφορισμού στην περιοχή κοντά στην επιφάνεια του πλινθώματος καθώς και στο κέντρο. Η συγκέντρωση επιπλεόντων κόκκων της νεοσύστατης στερεής φάσης στο κέντρο του πλινθώματος (που εξ’ ορισμού είναι από-εμπλουτισμένοι σε διαλύτη) αυξάνεται σε υψηλές ταχύτητες χύτευσης ενώ μειώνεται σε χαμηλότερες ταχύτητες, αλλά σε κάθε περίπτωση οδηγεί σε αρνητικό διαφορισμό στο κέντρο που εναντιώνεται στον θετικό διαφορισμό που αναφέρθηκε προηγουμένως. Τέλος η συνεισφορά της ροής οφειλόμενης σε συρρίκνωση κατά τη στερεοποίηση πιθανώς δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία τήγματος καθώς οι διαστάσεις της mushy ζώνης όπως και η κλίση του μετώπου στερεοποίησης δεν επηρεάζονται από την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του τήγματος.

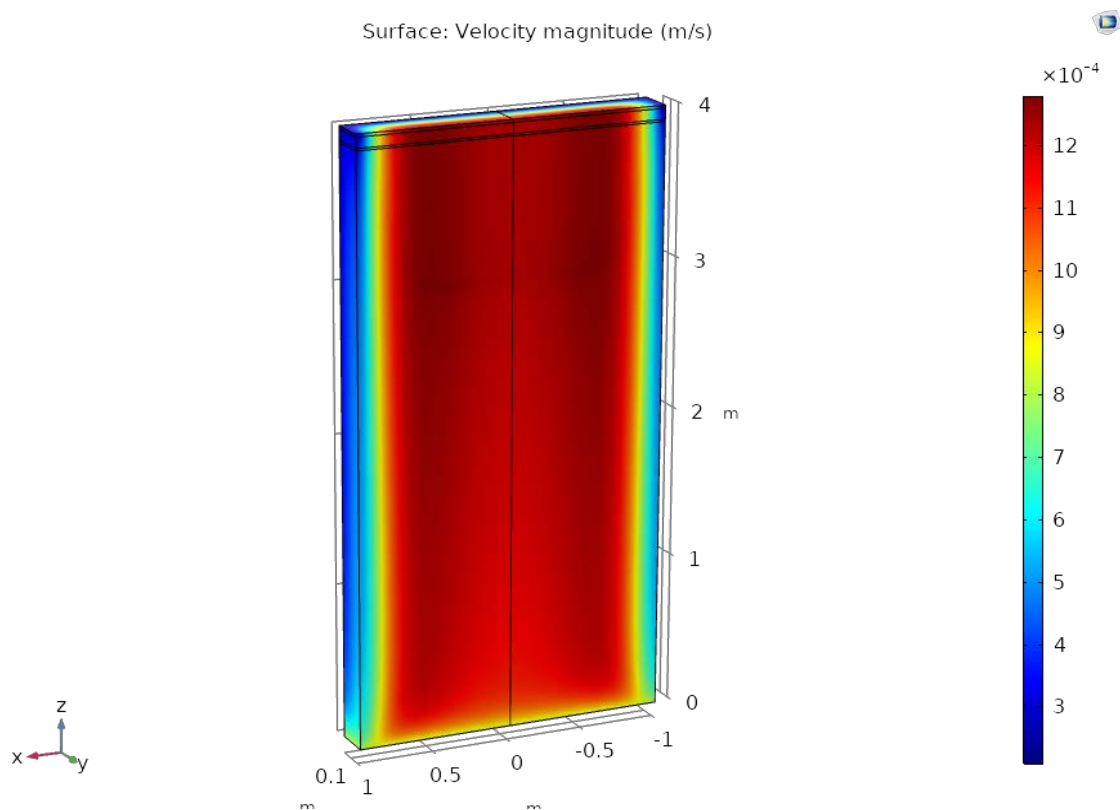
Συνοψίζοντας, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου του τήγματος, έχει παρατηρηθεί ότι αναμένεται αύξηση του μακροδιαφορισμού στην επιφάνεια του πλινθώματος και ασήμαντες μεταβολές στη

συγκέντρωση σε οποιαδήποτε άλλη περιοχή του πλινθώματος [8], [41]. Εξετάζοντας την συνολική εικόνα του πλινθώματος ο μακροδιαφορισμός, έχει αποδειχθεί ότι μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού τήγματος.

### 6.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο Comsol – Σύγκριση με το Ansys Fluent

#### 6.3.1 Κατανομή πεδίου ταχύτητας στο Comsol Multiphysics v5.5

Στην Εικόνα 54 παρατίθεται το πεδίο κατανομής ταχυτήτων στο πλινθώμα, όπου παρατηρείται ότι η ταχύτητα του ρευστού τήγματος αλλά και του στερεοποιημένου πλινθώματος διατηρείται στο μεγαλύτερο μέρος του πλινθώματος σταθερή και ίση με 0,0011 m/s ενώ η ταχύτητα χύτευσης του είναι ορισμένη σε 0,000834 m/s (50mm/min). Στα άκρα του πλινθώματος η ταχύτητα περιορίζεται σε 0,0004 m/s λόγω της εφαρμογής συνθηκών ολίσθησης σε αυτά τα όρια. Αυτό συμβαίνει διότι, όπως προαναφέρθηκε, στο λογισμικό Comsol, λόγω προβλημάτων σύγκλισης δεν εφαρμόστηκε η προσέγγιση ενθαλπίας πορώδους στην ημίρρευστη ζώνη, η οποία συμβάλει στο να αντιμετωπίζεται η ημίρρευστη ζώνη ως μια πορώδης περιοχή που σκοπό έχει την υποβάθμιση της ταχύτητας του υγρού τήγματος που αναπαριστά την στερεοποίηση και η ταχύτητα του στερεοποιημένου πλινθώματος πλέον να αντιστοιχεί στην ταχύτητα χύτευσης. Η διαφορά γίνεται εύκολα αντιληπτή με σύγκριση του παρόντος πεδίου ταχυτήτων με εκείνο της Εικόνας 38.

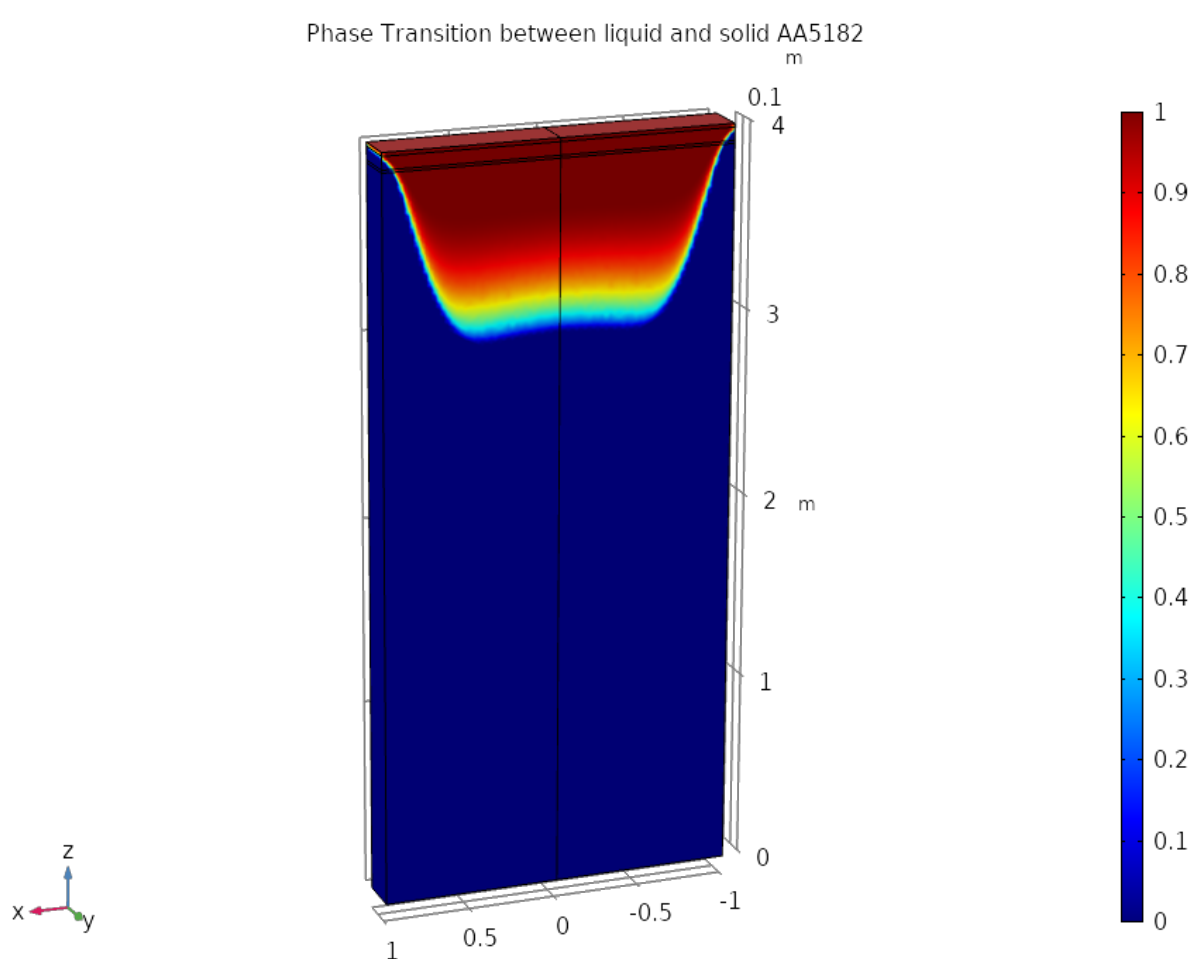


Εικόνα 54: Κατανομή ταχυτήτων στο πλινθώμα κράματος αλουμινίου AA5182 βάσει του λογισμικού Comsol Multiphysics v5.5 χωρίς την εφαρμογή του μοντέλου ενθαλπίας-πορώδους για την ημίρρευστη ζώνη.

Αναμένεται ωστόσο να επισημανθεί ο βαθμός στον οποίο η εφαρμογή ή μη της προσέγγισης ενθαλπίας πορώδους θα επηρεάσει τα λοιπά αποτελέσματα του μοντέλου όπως η κατανομή των φάσεων, το μεταλλουργικό μήκος και οι διαστάσεις της ημίρρευστης ζώνης για τις ίδιες συνθήκες χύτευσης που εφαρμόστηκαν προηγουμένως στο Ansys Fluent v19.2.

### 6.3.2 Κατανομή φάσεων

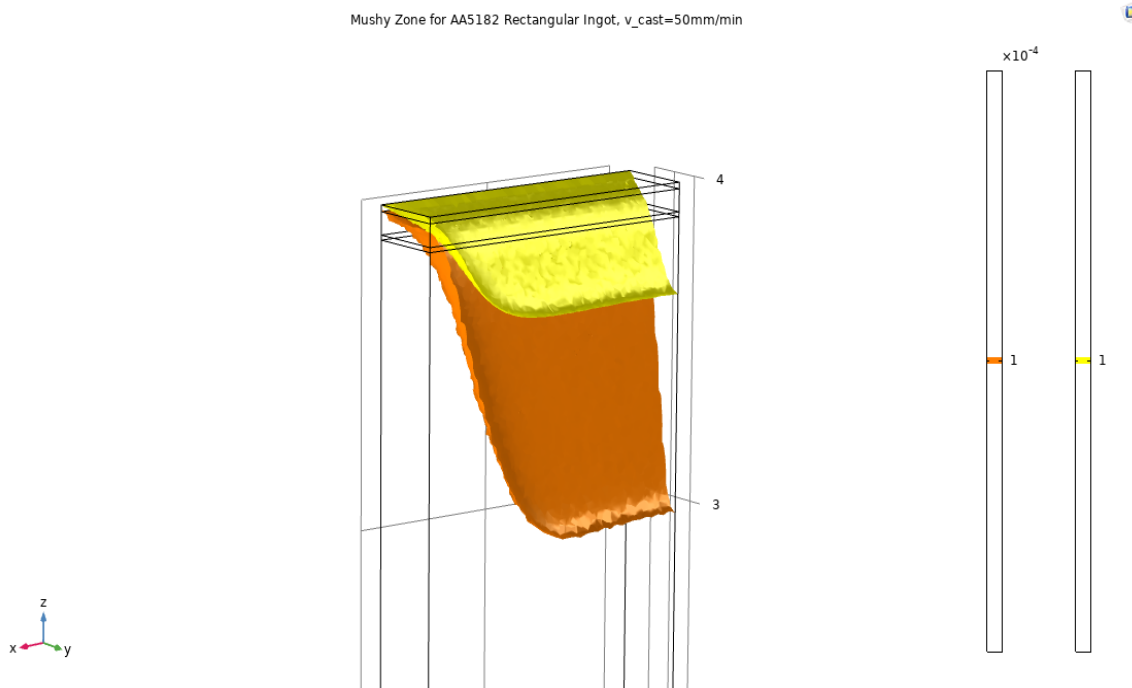
Στην Εικόνα 55 παρατίθεται η κατανομή φάσεων για το πλίνθωμα κράματος αλουμινίου AA5182. Το κλάσμα όγκου με τιμή ίση με 1 αντιστοιχεί στο υγρό τήγμα ενώ με την τιμή 0 στο στερεοποιημένο πλίνθωμα. Κάθε ενδιάμεση τιμή αντιστοιχεί στην ημίρρευστη ζώνη στο στερεοποιημένο πλίνθωμα. Το μεταλλουργικό μήκος στο σημείο τομής των αξόνων συμμετρίας αντιστοιχεί σε 0,9274m το οποίο υπερβαίνει κατά πολύ την τιμή των 0,6477m που υπολογίστηκε με το λογισμικό Ansys Fluent v19.2.



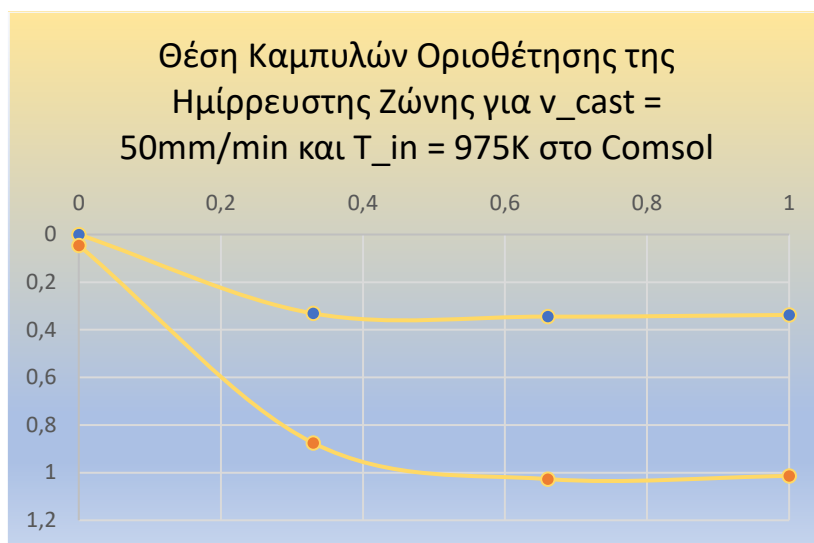
Εικόνα 55: Κατανομή φάσεων στο πλίνθωμα κράματος αλουμινίου AA5182 βάσει του λογισμικού Comsol Multiphysics v5.5 χωρίς την εφαρμογή του μοντέλου ενθαλπίας-πορώδους για την ημίρρευστη ζώνη.

### 6.3.2.1 Ημίρρευστη Ζώνη για ταχύτητα χύτευσης $v = 50\text{mm/min}$

Στην Εικόνα 56 παρατίθενται τα όρια της ημίρρευστης ζώνης και συγκεκριμένα η κίτρινη ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια αντιστοιχεί σε κλάσμα όγκου υγρής φάσης 0,9999 ενώ η πορτοκαλί στην τιμή 0,0001. Στη συνέχεια, τα δεδομένα για τα όρια της ημίρρευστης ζώνης στο  $\frac{1}{4}$  του πλινθώματος και στο επίπεδο  $-xz$  εκχωρούνται στο λογισμικό Excel για ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων (Εικόνα 57).

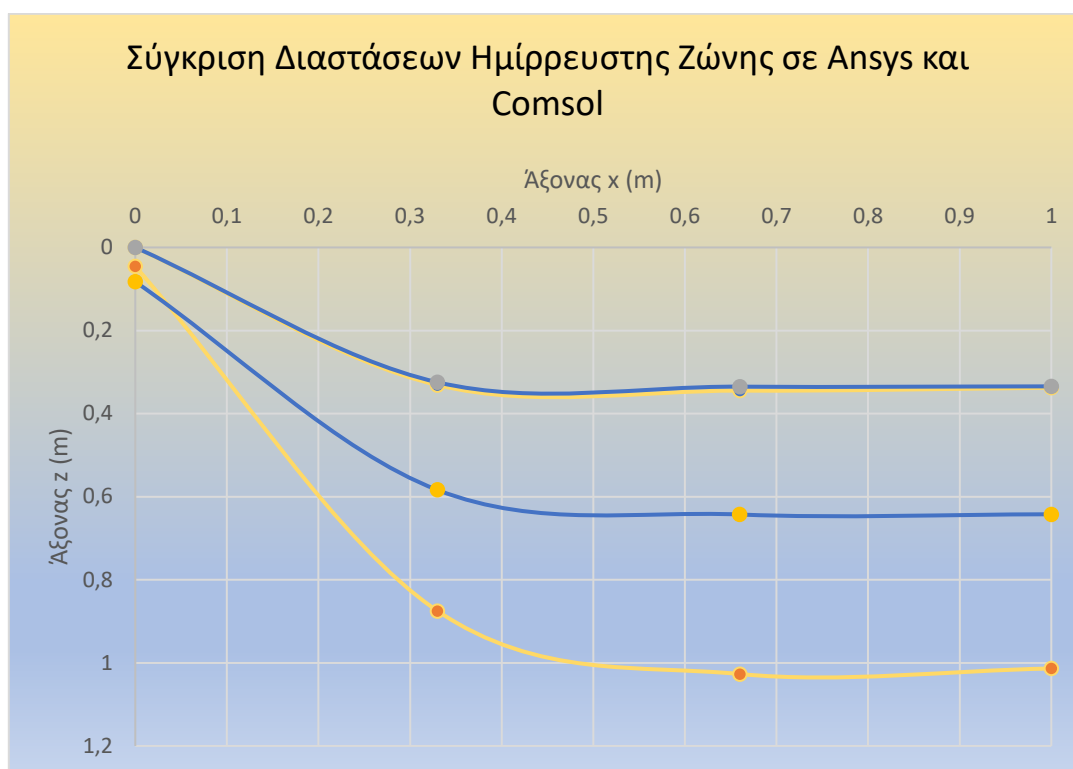


Εικόνα 56: : Ισόθερμες επιφάνειες οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min στο λογισμικό Comsol Multiphysics v5.5. Η κίτρινη “Isosurface” αντιστοιχεί στο άνω όριο για κλάσμα όγκου υγρής φάσης 0,9999 ενώ η πορτοκαλί επιφάνεια αντιστοιχεί στο κάτω όριο για κλάσμα όγκου υγρής φάσης 0,0001.



Εικόνα 57: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευστης Ζώνης στο επίπεδο  $-xz$  του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min στο λογισμικό Comsol Multiphysics v5.5.

Κατόπιν, διενεργείται ταυτόχρονη απεικόνιση των αποτελεσμάτων σχετικά με τις θέσεις των καμπυλών οριοθέτησης της ημίρρευστης ζώνης που λήφθηκαν από τα λογισμικά προσομοίωσης Comsol Multiphysics v5.5 και Ansys Fluent v19.2 για σύγκριση (Εικόνα 58). Στο συγκριτικό διάγραμμα της Εικόνας 58 παρατηρείται ότι το άνω όριο της ημίρρευστης ζώνης σχεδόν συμπίπτει και στα δύο λογισμικά προσομοίωσης. Ωστόσο, σχετικά με την καμπύλη που αποτελεί το κάτω όριο της ημίρρευστης ζώνης παρατηρείται σημαντική διαφορά στη θέση της που αγγίζει και τα 0,4m με τα αποτελέσματα στο Comsol να παρουσιάζουν την πιο διευρυμένη ημίρρευστη ζώνη. Αυτό πιθανώς οφείλεται στην αδυναμία εφαρμογής του μοντέλου ενθαλπίας πορώδους εντός της ημίρρευστης ζώνης στο λογισμικό Comsol όπου δεν κατάφερε να υποβαθμίσει την ταχύτητα κατά την αλλαγή της φάσης ώστε να προσομοιωθεί από την πλευρά της ροής το φαινόμενο στερεοποίησης. Γι' αυτό το λόγο τα αποτελέσματα στο Ansys Fluent πιθανώς να κρίνονται ως πιο αξιόπιστα. Ωστόσο, απαιτείται επαλήθευση των αποτελεσμάτων με τη χρήση δεδομένων από αντίστοιχες βιομηχανικές εφαρμογές ώστε να εξακριβωθεί η εγκυρότητα του μοντέλου.



Εικόνα 58: Θέση Καμπυλών Οριοθέτησης της Ημίρρευστης Ζώνης στο επίπεδο -xz του πλινθώματος για ταχύτητα χύτευσης 50mm/min και θερμοκρασία εισόδου τήγματος 975K (α) στο λογισμικό Comsol Multiphysics v5.5 (κίτρινο χρώμα) και (β) στο λογισμικό Ansys Fluent v19.2 (μπλε χρώμα).

## 7 Συμπεράσματα

Η ανάπτυξη ενός συζευγμένου μοντέλου ροής και μεταφοράς θερμότητας αποτελεί ικανό μέσο για την περιγραφή και κατανόηση των μεταλλουργικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την διεργασία παραγωγής πλινθωμάτων αλουμινίου “Direct Chill Casting”. Μέσω της εφαρμογής του μοντέλου επιτεύχθηκε συσχετισμός μεταξύ των παραμέτρων χύτευσης (ταχύτητα χύτευσης, υπερθέρμανση τήγματος) με την επιρρέπεια σε μακροδιαφορισμό αλλά και σε θερμή ρηγμάτωση, μέσω συμπερασμάτων από τη διεθνή βιβλιογραφία. Ακολουθώς, επισημαίνονται συνοπτικά οι παρατηρήσεις που καταγράφηκαν:

- Η αύξηση της ταχύτητας χύτευσης οδηγεί σε αύξηση του μεταλλουργικού μήκους καθώς και σε διεύρυνση των διαστάσεων της ημίρρευστης ζώνης. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της θερμικής ή λόγω συγκέντρωσης συναγωγής που οδηγεί σε κανονικό διαφορισμό. Ακόμη αναμένεται πιθανώς αύξηση του φαινομένου των επιπλεόντων προευτηκτικών κόκκων αλουμινίου (απεμπλουτισμένων σε διαλύτη) στο κέντρο του πλινθώματος καθώς και αύξηση της κλίσης του μετώπου στερεοποίησης που συμβάλλει σε ενίσχυση της ροής λόγω συρρίκνωσης, φαινόμενα που οδηγούν σε εμφάνιση ανάστροφου διαφορισμού. Η συνολική συνεισφορά των ως άνω μηχανισμών φαίνεται να οδηγεί αθροιστικά σε ανάστροφο διαφορισμό σε πλινθώματα μέσω DC χύτευσης.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού τήγματος δεν επηρεάζει σημαντικά το μεταλλουργικό μήκος και την ισόθερμη καμπύλη της solidus ενώ οδηγεί σε μετακίνηση προς την κατεύθυνση χύτευσης της ισόθερμης καμπύλης liquidus και σε επακόλουθο περιορισμό των διαστάσεων της ημίρρευστης ζώνης. Ως προς τα φαινόμενα μακροδιαφορισμού έχει αποδειχθεί στη διεθνή βιβλιογραφία ότι η συνολική συνεισφορά των μηχανισμών αυτού με αυξανόμενη τη θερμοκρασία τήγματος οδηγεί σε περιορισμό του μακροδιαφορισμού.
- Η διεύρυνση των διαστάσεων της ημίρρευστης ζώνης οδηγεί σε αύξηση των δυσπρόσιτων περιοχών που αναπτύσσονται σε κλάσμα όγκου στερεής φάσης >85-95% που με τη σειρά της οδηγεί σε αύξηση των πιθανοτήτων εμφάνισης πορώδους. Το πορώδες κάτω από την επίδραση των εφελκυστικών τάσεων στο κέντρο του πλινθώματος οδηγεί σε φαινόμενα θερμής ρηγμάτωσης. Αντιθέτως, ο περιορισμός των διαστάσεων της ημίρρευστης ζώνης που υπολογίστηκε μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας τήγματος οδηγεί σε μείωση της επιρρέπειας σε θερμή ρηγμάτωση, λόγω της μείωσης των πιθανοτήτων ύπαρξης δυσπρόσιτων περιοχών.

Ωστόσο, για την ποσοτική απεικόνιση της επιρρέπειας σε μακροδιαφορισμό και την ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων απαιτείται η προσθήκη των κατάλληλων μοντέλων όπως του “Species Transport” στο Ansys Fluent και ειδικών “User Defined Functions” (UDF) που περιγράφουν την κίνηση των κραματικών στοιχείων ανάλογα με τις θερμοδυναμικές τους ιδιότητες. Επίσης, για την ποσοτικοποίηση της επιρρέπειας σε hot tearing θα πρέπει να επιβληθεί ανάλογη UDF στο Ansys Fluent που βασίζεται σε υπάρχοντα κριτήρια θερμής ρηγματώσης. Τέλος, για την πρόβλεψη των παραμορφώσεων του πλινθώματος όπως και για το φαινόμενο της θερμής συρρίκνωσης προτείνεται η ανάπτυξη θέρμο-μηχανικού μοντέλου προσομοίωσης το οποίο θα χρησιμοποιεί ως είσοδο, τα αποτελέσματα του θερμικού πεδίου που προέκυψαν από την παρούσα εργασία.



## 8 Βιβλιογραφία

- [1] J. R. Davis, “Light Metals and Alloys-Aluminum and Aluminum Alloys,” *Alloy. Underst. Basics*, pp. 351–416, 2001, doi: 10.1361/autb2001p351.
- [2] A. K. Nallathambi, “Thermo-Mechanical Simulation of Direct Chill Casting,” Otto von Guericke University, Magdeburg, 2016.
- [3] D. D. Kopeliovich, “Classification of Aluminum Alloys.” [https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=classification\\_of\\_aluminum\\_alloys#classification\\_of\\_wrought\\_aluminum\\_alloys](https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=classification_of_aluminum_alloys#classification_of_wrought_aluminum_alloys).
- [4] J. M. Drezet, M. Rappaz, G. U. Grün, and M. Gremaud, “Determination of thermophysical properties and boundary conditions of direct chill-cast aluminum alloys using inverse methods,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 31, no. 6, pp. 1627–1634, 2000, doi: 10.1007/s11661-000-0172-5.
- [5] N. Jamaly, N. Haghdam, and A. B. Phillion, “Microstructure, Macrosegregation, and Thermal Analysis of Direct Chill Cast AA5182 Aluminum Alloy,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 24, no. 5, pp. 2067–2073, 2015, doi: 10.1007/s11665-015-1480-7.
- [6] A. Association, “Aluminum Alloys.” .
- [7] “Chegg Study.” <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/2-al-mg-phase-diagram-shown-describe-would-precipitation-harden-phase-starting-90-wt-al-10-q36470198> (accessed Jun. 19, 2020).
- [8] B. Maschinen, A. Investition, G. Beschaffungen, B. Ersatzbeschaffungen, and S. Mittelherkunft, *Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys*. CRC Press, 2008.
- [9] R. Nadella, D. G. Eskin, Q. Du, and L. Katgerman, “Macrosegregation in direct-chill casting of aluminium alloys,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 53, no. 3, pp. 421–480, 2008, doi: 10.1016/j.pmatsci.2007.10.001.
- [10] J. F. Grandfield, D. G. Eskin, and I. F. Bainbridge, *Direct-Chill Casting of Light Alloys*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.
- [11] I. Aurangabad, “Local Heat Transfer and Stress Analysis of Direct Chill Casting Process Dissertation Doktoringenieur In Aurangabad , India Genehmigt durch die Der Fakultät für

Verfahrens-und Systemtechnik,” Otto von Guericke University, Magdeburg, 1989.

- [12] D. G. Eskin, “Structure and casting defects of aluminum billets produced by direct-chill casting,” *TMS Annu. Meet.*, vol. 2015-March, pp. 73–80, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-48117-3\_10.
- [13] Y. Wang, M. J. M. Krane, and K. P. Trumble, “Thermal Stress Prediction in AA5182 Rectangular Ingots,” *Light Met. 2015*, pp. 865–870, 2015, doi: 10.1002/9781119093435.ch145.
- [14] Y. Wang, M. J. M. Krane, and K. P. Trumble, “Transient thermal stress development in direct chill cast ingots with application of a wiper,” *Int. J. Cast Met. Res.*, vol. 31, no. 4, pp. 193–208, 2018, doi: 10.1080/13640461.2017.1408196.
- [15] J. Sengupta, S. L. Cockcroft, D. M. Maijer, and A. Larouche, “Quantification of temperature, stress, and strain fields during the start-up phase of direct chill casting process by using a 3D fully coupled thermal and stress model for AA5182 ingots,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 397, no. 1–2, pp. 157–177, 2005, doi: 10.1016/j.msea.2005.02.011.
- [16] “Casting Defects: Hot Tearing :: Total Materia Article.” <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=204> (accessed Apr. 15, 2020).
- [17] Y. Kuang-O (Oscar), *Modeling for Casting and Solidification Processing*. Niles, Ohio: Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [18] W. Schneider and E. K. Jensen, “Investigations about Starting Cracks in DC Casting of 6063 Type Billets. Part I: Experimental Results,” *Essent. Readings Light Met.*, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-48228-6\_94.
- [19] Suyitno, W. H. Kool, and L. Katgerman, “Hot tearing criteria evaluation for direct-chill casting of an Al-4.5 pct Cu alloy,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 36, no. 6, pp. 1537–1546, 2005, doi: 10.1007/s11661-005-0245-6.
- [20] A. Meysami, S. Mahmoudi, and M. Hajisafari, “Modeling of water removal in direct-chill casting of aluminum-alloy billets,” *Mater. Tehnol.*, vol. 51, no. 6, pp. 1011–1017, 2017, doi: 10.17222/mit.2017.054.
- [21] M. Lalpoor, D. G. Eskin, and L. Katgerman, “Cold-cracking assessment in AA7050 billets during direct-chill casting by thermomechanical simulation of residual thermal stresses and application of fracture mechanics,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 40,

- no. 13, pp. 3304–3313, 2009, doi: 10.1007/s11661-009-0031-y.
- [22] J. M. Drezet and M. Rappaz, “Modeling of ingot distortions during direct chill casting of aluminum alloys,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 27, no. 10, pp. 3214–3225, 1996, doi: 10.1007/BF02663872.
- [23] H. Yu, “Process To Reduce Dc Ingot Butt Curl and Swell.,” *J. Met.*, vol. 32, no. 11, pp. 23–27, 1980.
- [24] Novelis Pae, “DC Casting Tools.” <https://novelispae.com/dc-casting-tools-novelis-pae/#>.
- [25] J. B. Wiskel and S. L. Cockcroft, “Heat-flow-based analysis of surface crack formation during the start-up of the direct chill casting process: Part I. Development of the inverse heat-transfer model,” *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.*, vol. 27, no. 1, pp. 119–127, 1996, doi: 10.1007/BF02915083.
- [26] D. Mortensen, “A mathematical model of the heat and fluid flows in directchill casting of aluminum sheet ingots and billets,” *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.*, vol. 30, no. 1, pp. 119–133, 1999, doi: 10.1007/s11663-999-0012-y.
- [27] B. G. Thomas, J. M. Wells, and J. Sengupta, “The use of water cooling during the continuous casting of steel and aluminum alloys,” *Metall. Mater. Trans. A, Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 36A(1), no. January, p. 187- 204, 2005.
- [28] J. B. Wiskel and S. L. Cockcroft, “Heat-flow-based analysis of surface crack formation during the start-up of the direct chill casting process: Part II. Experimental study of an AA5182 rolling ingot,” *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.*, vol. 27, no. 1, pp. 129–137, 1996, doi: 10.1007/BF02915084.
- [29] A. J. Williams, T. N. Croft, and M. Cross, “Modeling of Ingot Development during the Start-Up Phase of Direct Chill Casting,” *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.*, vol. 34, no. 5, pp. 727–734, 2003, doi: 10.1007/s11663-003-0042-9.
- [30] A. K. Nallathambi, M. Tyagi, E. Specht, and A. Bertram, “Thermal analysis of direct chill casting,” *ASME/JSME 2011 8th Therm. Eng. Jt. Conf. AJTEC 2011*, no. August 2015, 2011, doi: 10.1115/ajtec2011-44392.
- [31] A. Sabau *et al.*, “Heat Transfer Boundary Conditions for the Numerical Simulation of the DC Casting Process,” no. 1998, 2008.

- [32] V. A. Karkhin, *Thermal Processes in Welding*, 1st ed. Springer Singapore, 2019.
- [33] Y. Wang, Y. Wu, and X. Bian, “Composition dependence of viscosity for Al(1-x)Mg<sub>x</sub>(0≤x≤0.10) alloys,” *Chinese Science Bulletin*, vol. 52, no. 11. pp. 1441–1445, 2007, doi: 10.1007/s11434-007-0214-0.
- [34] K. C. Mills, *Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys*. England and Ohio USA: Woodhead Publishing Ltd and ASM International, 2002.
- [35] M. Vynnycky, “Continuous casting,” *Metals (Basel)*., vol. 9, no. 6, 2019, doi: 10.3390/met9060643.
- [36] R. Dyja, E. Gawronska, A. Grosser, P. Jeruszka, and N. Sczygiol, “Comparison of different heat capacity approximation in solidification modeling,” *Lect. Notes Eng. Comput. Sci.*, vol. 2220, pp. 875–879, 2015.
- [37] COMSOL Multiphysics, “Heat Transfer Module,” *Manual*, pp. 1–222, 2015.
- [38] “Comsol Multiphysics Web Page.” <https://www.comsol.com>.
- [39] “The Engineering ToolBox.” [https://www.engineeringtoolbox.com/reynolds-number-d\\_237.html](https://www.engineeringtoolbox.com/reynolds-number-d_237.html) (accessed Jun. 07, 2020).
- [40] V. Monfared, “Predicting the viscosity of solids using steady-state creep behavior of the fibrous composites semi-theoretically,” *Results Phys.*, vol. 7, pp. 1433–1436, 2017, doi: 10.1016/j.rinp.2017.03.031.
- [41] D. G. Eskin, V. I. Savran, and L. Katgerman, “Effects of melt temperature and casting speed on the structure and defect formation during direct-chill casting of an Al-Cu alloy,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 36, no. 7, pp. 1965–1976, 2005, doi: 10.1007/s11661-005-0059-6.
- [42] C. Zhang, M. Jahazi, and R. Tremblay, “Simulation and experimental validation of the effect of superheat on macrosegregation in large-size steel ingots,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 107, no. 1–2, pp. 167–175, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05044-z.