



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

**Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή
του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την
συνεχή χύτευση**

**Σύγκριση Βιομηχανικών Μεθόδων Συνεχούς-Ημισυνεχούς
Χύτευσης ως προς την μικροδομή για το κράμα Αλουμινίου
3003**

Διπλωματική Εργασία

Γρηγόριος Γαλερός

Επιβλέπων: Dr. – Ing. Σπύρος Παπαευθυμίου, Επίκουρος Καθηγητής



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση

Σύγκριση Βιομηχανικών Μεθόδων Συνεχούς-Ημισυνεχούς Χύτευσης ως προς την μικροδομή για το κράμα Αλουμινίου 3003

Διπλωματική Εργασία

Γρηγόριος Γαλερός

Επιβλέπων: Dr. – Ing. Σπύρος Παπαευθυμίου, Επίκουρος Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 23/10/2017

Γ. Φούρλαρης, Καθηγητής(Υπογραφή)

Δ. Πάνιας, Καθηγητής(Υπογραφή)

Σπ. Παπαευθυμίου, Επικ. Καθηγητής(Υπογραφή)

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Περιεχόμενα

| | |
|---|------------|
| Ευχαριστίες..... | 6 |
| Εισαγωγή..... | 7 |
| Σκοπός..... | 8 |
| Περίληψη | 9 |
| Abstract | 9 |
| Synopsis | 10 |
| Μέρος Πρώτο | 14 |
| Κεφάλαιο I – Αλουμίνιο..... | 14 |
| I.1. Αλουμίνιο..... | 14 |
| I.2. Κράματα Αλουμινίου | 15 |
| I.3. Κράματα Διαμόρφωσης 3xxx | 20 |
| Κεφάλαιο II: Χύτευση..... | 23 |
| II.1. Στεροποίηση | 23 |
| II.2. Συνεχής Χύτευση | 29 |
| II.3. Direct Chill Casting – Άμεση Χύτευση | 31 |
| II.4. Twin Roll Casting..... | 36 |
| Κεφάλαιο III: Έλαση | 41 |
| III. 1. Γενικά..... | 41 |
| III.2. Θερμή Έλαση..... | 44 |
| Κεφάλαιο 4: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση..... | 48 |
| Μέρος Δεύτερο | 51 |
| Κεφάλαιο IV: Πειραματικό..... | 51 |
| IV.1. Πειραματικές τεχνικές | 51 |
| IV.1.1. Μελετώμενο υλικό..... | 51 |
| IV.1.2. Μεταλλογραφική Προετοιμασία | 52 |
| IV.1.3. Οπτική μικροσκοπία | 53 |
| Μέρος Τρίτο..... | 56 |
| Κεφάλαιο V: Αποτελέσματα..... | 56 |
| V.1 Αποτελέσματα Μικροσκοπίας | 56 |
| V.1.1. Αποτελέσματα SDAS, Κόκκων και β' φάσεων μεταξύ δοκιμίου από DC και από TRC. | 56 |
| V.1.2. Αποτελέσματα Κόκκων και β' φάσεων μεταξύ δοκιμίου από Θερμή Έλαση. | 93 |
| V.1.3. Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Μικροσκοπίας | 102 |
| V.2 Αποτελέσματα Σκληρομέτρησης | 103 |
| Μέρος Τέταρτο | 105 |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

| | |
|---|------------|
| Κεφάλαιο VI: Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων | 105 |
| VI .1: Σύγκριση Αποτελεσμάτων TRC και DC | 105 |
| VI . 2: Σύγκριση Αποτελεσμάτων TRC και Θερμής Έλασης..... | 106 |
| VI .3: Σύγκριση Αποτελεσμάτων DC μεταξύ επιφάνειας και κέντρου πλάκας | 107 |
| VI .4: Σύγκριση Αποτελεσμάτων TRC μεταξύ επιφάνειας και κέντρου φύλλου | 108 |
| Κεφάλαιο VII: Συμπεράσματα..... | 109 |
| Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα | 110 |
| Βιβλιογραφία | 111 |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου κ. Dr. – Ing. Σπ. Παπαευθυμίου για την πολύτιμη καθοδήγησή του, την άψογη συνεργασία, την υποστήριξη της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας στις εταιρείες «ΕΛΒΑΛ Α.Ε.» και «ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε.».

Ευχαριστώ θερμά πρόσωπα της εταιρείας «ΕΛΒΑΛ Α.Ε.» και συγκεκριμένα τους κ.κ. Στ. Βολουδάκη, Γ. Κουιμτζόγλου, Επ. Ξένο, Σπ. Πίνη, Δ. Σπαθή, Α. Σταυρόπουλο που επέτρεψαν τη δειγματοληψία κατευθείαν από την παραγωγή στο πλαίσιο της εργασίας καθώς και για τις χρήσιμες συμβουλές τους.

Ευχαριστώ θερμά τη διοίκηση της εταιρείας «ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε.» και συγκεκριμένα τους κ.κ. Κ. Δανιηλίδη, Αθ. Μηλιώκα, Γ. Πανταζόπουλο, που επέτρεψαν τη διενέργεια εργαστηριακών δοκιμών στο πλαίσιο της εργασίας μου χρησιμοποιώντας τις εγκαταστάσεις της εταιρείας.

Ευχαριστώ, επίσης, τους κ.κ. Αθ. Βαζδερβανίδη και Α. Ρίκο για την τεχνική εκπαίδευση και την βοήθειά τους αντίστοιχα.

Ιδιαίτερα και κυρίως ευχαριστώ τον κ. Ε. Γαβαλά, την κα. Μ. Μπουζούνη υποψήφιους διδάκτορες ΕΜΠ, και τον κ. Π. Σταθόπουλο για την συνεργασία και την καθοδήγηση.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, η ανάγκη για την βέλτιστη αναλογία μεταξύ παραγωγικότητας και παραγωγικού κόστους, έχει οδηγήσει την βιομηχανία επεξεργασίας κραμάτων διαμόρφωσης Αλουμινίου στην αναζήτηση νέων μεθόδων μορφοποίησης και σύγκριση αυτών με τις υπάρχουσες.

Τέτοια μέθοδο αποτελεί και η Twin Roll Casting όπου πρόκειται για διεργασία που απλοποιεί σε ένα βήμα της διαδικασίες της Χύτευσης και της Θερμής Έλασης, γεγονός που προκαλεί την μείωση του χρόνου του παραγωγικού κύκλου και αυτομάτως την αύξηση της παραγωγικότητας.

Το 1995 οι P.Cook και άλλοι, μελέτησαν την εξέλιξη της μεθόδου του Twin Roll Casting. Αρχικά, παρατήρησαν ότι η μέθοδος είχε πολλούς περιορισμούς τόσο στην ποιότητα του προϊόντος της όσο και στην παραγωγικότητά της. Όμως βελτιώσεις στον μηχανολογικό εξοπλισμό της μεθόδου έδειξαν βελτίωση των περιορισμών καθώς και την ελπίδα της συνεχούς βελτίωσης της μεθόδου. [1]

Φυσικά, αναγκαία συνθήκη για την βιομηχανική εφαρμογή της μεθόδου είναι ικανοποιητική ποιότητα στα προϊόντα της τόσο σε μηχανικές ιδιότητες όσο και σε χαρακτηριστικά μικροδομής.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση προϊόντων της TRC και της συμβατικότερης και πιο διαδεδομένης μεθόδου του Direct Chill Casting μεμονωμένα, αλλά και της Direct Chill Casting και έπειτα της Θερμής Έλασης ως προς την μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα, τα συγκρινόμενα δοκίμια είναι κράματα διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Σκοπός

Σκοπό της παρούσας εργασίας αποτελεί η σύγκριση, των βιομηχανικών μεθόδων διαμόρφωσης Twin Roll Casting και Direct Chill Casting και έπειτα Θερμής Έλασης για το κράμα διαμόρφωσης αλουμινίου 3003, όσον αφορά τα αποτελέσματα κάθε μίας στην μικροδομή και την σκληρότητα.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η μικροδομή κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου προϊόντων Direct Chill Casting, Twin Roll Casting και Θερμής Έλασης ώστε να συγκριθούν και να διεξαχθούν αποτελέσματα σχετικά με την διαφορά των μεθόδων ως προς τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα καθέμιας. Για το σκοπό αυτό, μελετηθήκαν 8 δοκίμια 3 προϊόντα από Twin Roll Casting, 3 προϊόντα από Direct Chill Casting και 2 προϊόντα Θερμής Έλασης. Οι δύο πρώτες τριάδες δοκιμίων αναλύθηκαν μικροσκοπικά όσον αφορά το μέγεθος των κόκκων, το μέγεθος των αποστάσεων μεταξύ των δευτερογενών δενδριτικών κλάδων και το ποσοστό της επιφάνειας που καταλάμβαναν η ενδομεταλλικές ενώσεις. Για τα δύο δοκίμια της Θερμής Έλασης έγιναν οι ίδιες αναλύσεις με εξαίρεση αυτή των δενδριτών. Τα 3 δοκίμια του Twin Roll Casting και τα 2 της Θερμής Έλασης επιπλέον σκληρόμετρήθηκαν. Τα προϊόντα της Twin Roll Casting παρουσίασαν ελαφρώς καλύτερες τιμές σκληρότητας και πιο εκλεπτυσμένη μικροδομή. Αλλά παρουσίασαν επιπλέον έντονο μακροδιαφορισμό στο κέντρο του φύλλου. Τα προϊόντα της Θερμής Έλασης παρουσίασαν εξαιρετική ομοιογένεια στην μικροδομή με ελαφρύ το φαινόμενο του διαφορισμού.

Abstract

In this diploma thesis the Direct Chill Casting, Twin Roll Casting and Hot Rolled aluminum microstructure was studied to compare the results of the methods looking for the disadvantages and advantages of each. For this purpose, 8 sample was taken, 3 from Twin Roll Casting, 3 from Direct Chill Casting and 2 from Hot Rolling. The first two triplets were analyzed microscopically in terms of grain size, the size of the distances between the secondary dendritic branches and the percentage of the surface occupied by the intermetallic compounds. For both Heat Rolled samples, the same analysis were performed except for dendrites. The 3 specimens of Twin Roll Casting and 2 of the Hot Rolled were tested for hardness.

TRC products have slightly higher hardness than those of Hot Rolled but have greater heterogeneity at the center of the sheet due to macrosegregation. Thus, we can not say with certainty that either method is preferable, as it also depends on the requirements for product properties. The only sure thing is that the TRC method is now extremely competitive and saving production time it offers is tempting for any aluminum industry.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Synopsis

Comparison of Industrial Continuous, Semi-Continuous Casting Processes for Microstructure for Aluminum Alloy 3003.

In recent decades, the need for an optimal ratio between productivity and production costs has led the Aluminum Forming Alloy Processing Industry to look for new casting methods and compare them with existing ones. In this paper the comparison focus between Twin Roll Casting(as a new casting method) and Direct Chill Casting(as the conventional one).

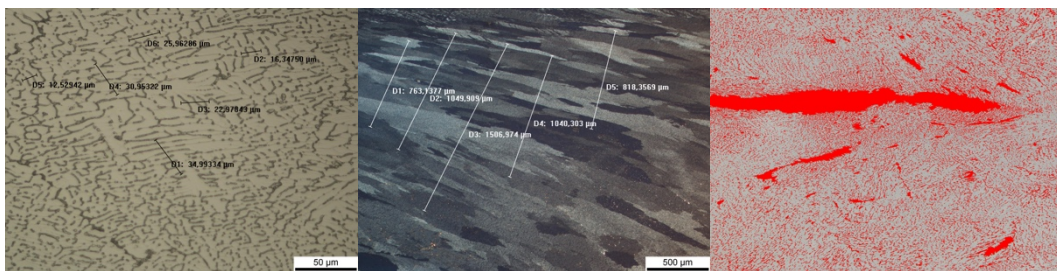


Figure 1: Pictures of measurements of SDAS, Grains and area percentage of intermetallics for TRC sample (sample 1)

Twin Roll Casting is a process that simplifies the Casting and Hot Rolling process, which reduces the production cycle time and automatically increases productivity. A TRC machine is essentially a 2-High roller in which the object to be rolled is the liquid metal-alloy and the product is a thin-film cast. Solidification begins when the liquid metal comes into contact with the water-cooled rolls of the roller, and due to the progressively decreasing distance of the rolls, the metal hardening is forced into continuous contact with the rollers. Its benefits are included, low investment costs, low operating costs, the good microstructure of the products of dense dendritic branches improves differentiation and therefore good mechanical properties.

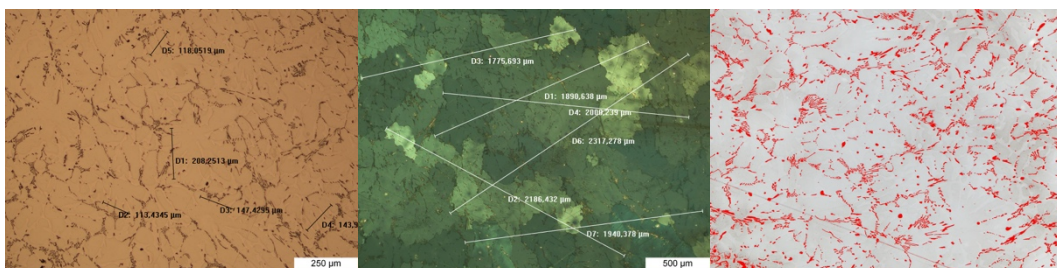


Figure 2: Pictures of measurements of SDAS, Grains and area percentage of intermetallics for DC sample (sample 2)

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

In Direct Chill Casting, the liquid metal is molded into the mold and forms an initial foot-plate, then the foot penetrates into the casting well (for vertical DC) or on a rolling casting table (in the horizontal DC). In the vertical DC the casting is completed when the mold reaches the bottom of the well. In the horizontal DC a flying saw can cut off the slab during casting which makes the process totally continuous.

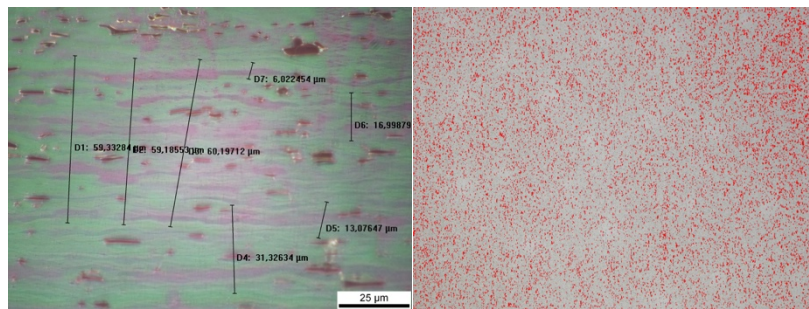


Figure 3: Pictures of measurements of Grains and area percentage of intermetallics for HR sample (sample 5)

In this diploma thesis the Direct Chill Casting, Twin Roll Casting and Hot Rolled aluminum microstructure was studied to compare the results of the methods looking for the disadvantages and advantages of each. For this purpose, 8 sample was taken, 3 from Twin Roll Casting, 3 from Direct Chill Casting and 2 from Hot Rolling. The first two triplets were analyzed microscopically in terms of grain size, the size of the distances between the secondary dendritic branches and the percentage of the surface occupied by the intermetallic compounds. For both Hot Rolled Tests, the same analysis were performed except for dendrites. The 3 specimens of Twin Roll Casting and 2 of the Hot Rolled were tested for hardness.

TRC products have slightly higher hardness than those of Hot Rolled but have greater heterogeneity at the center of the sheet due to macrosegregation. Thus, we can not say with certainty that either method is preferable, as it also depends on the requirements for product properties. The TRC method is now extremely competitive and saving production time it offers is tempting for any aluminum industry.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Μέρος Πρώτο

Κεφάλαιο Ι – Αλουμίνιο



Εικόνα 1: Κομμάτι καθαρού Αλουμινίου

Ι.1. Αλουμίνιο

Αποτελεί ένα μέταλλο με μοναδικές ιδιότητες όπως το χαμηλό του βάρος, την αντίσταση στην διάβρωση και τις καλές μηχανικές ιδιότητες. Για αυτούς τους λόγους βρίσκει πολλές εφαρμογές σε καθημερινά αλλά και τα πλέον εξεζητημένα προϊόντα.

Το αλουμίνιο είναι το τρίτο πιο συχνό στοιχείο του φλοιού της Γης. Ο ατομικός του αριθμός είναι 13 και το ατομικό του βάρος είναι 26,9815 (βάσει του ^{12}C). Το χρώμα του είναι ασημόλευκο.

Έχει χαμηλή πυκνότητα, 2.7 (αναφερόμαστε σε υπερκαθαρό Al 99,99995%), υψηλή ανακλαστικότητα, υψηλή αγωγιμότητα τόσο θερμική όσο και ηλεκτρική.

Πίνακας 1: Φυσικές Ιδιότητες Αλουμινίου

| Σημείο Τήξης ($^{\circ}\text{C}$) | Σημείο Βρασμού ($^{\circ}\text{C}$) | Ειδική Θερμότητα στους 100°C (cal/g) | Πυκνότητα στους 20°C (g/cm^3) | Ηλεκτρική Αντίσταση στους 20°C ($\mu\Omega\text{-cm}$) | Θερμικός Συντελεστής Αντίστασης | Συντελεστής θερμικής επιμήκυνσης $\times 10^6$ ($20\text{-}100^{\circ}\text{C}$) | Θερμική Αγωγιμότητα (100°C) | Μέτρο Ελαστικότητας ($\text{lb/in}^2 \times 10^{-6}$) |
|-------------------------------------|---------------------------------------|---|--|--|---------------------------------|--|---|---|
| | | | | | | | | |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

| | | | | | | | | |
|-------|------|--------|-----|------|--------|-------|------|-----|
| 660,2 | 2480 | 0,2226 | 2,7 | 2,63 | 0,0042 | 23,86 | 0,57 | 9,9 |
|-------|------|--------|-----|------|--------|-------|------|-----|

Δομή

Το αλουμίνιο έχει εδροκεντρωμένη κυβική κρυσταλλική δομή (fcc) σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος από το απόλυτο μηδέν (0 K) μέχρι και το σημείο τήξης του (660,2 °C – 933,2 K). Αυτή η κρυσταλλική δομή αποτελεί την πλέον πυκνή κυβική δομή. Η μικρότερη απόσταση μεταξύ δύο ατόμων αλουμινίου είναι 2,863Δ. Ο παράγοντας ατομικής στοιβαξης είναι 0,74. Η ατομική του ακτίνα είναι 1,43Δ.

Μηχανικές Ιδιότητες

Πίνακας 2: Τυπικές Μηχανικές Ιδιότητες Εμπορικού Καθαρού Al (οι μικρότερες τιμές είναι χωρίς ανόπτηση και οι μεγαλύτερες με H18)

| Κράμα | Ελκυστική Αντοχή ,psi | Όριο διαρροής ,psi | Αντοχή Διάτμησης ,psi | Όριο θραύσης | Σκληρότητα (Brunell) |
|-------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------|----------------------|
| 1199 | 6500-17000 | 1500-16000 | - | - | - |
| 1180 | 9000-18000 | 3000-17000 | - | - | - |
| 1060 | 10000-19000 | 4000-18000 | 7000-11000 | 3000-6500 | 19 - 35 |
| EC | 12000-27000 | 4000-24000 | 8000-15000 | - | - |
| 1145 | 11000-21000 | 5000-17000 | 8000-12000 | - | - |
| 1100 | 13000-24000 | 5000-22000 | 9000-13000 | 5000-9000 | 23 - 44 |

[2] [3]

I.2. Κράματα Αλουμινίου

Καθαρά μέταλλα σπανίως χρησιμοποιούνται για βιομηχανικές εφαρμογές εκτός εάν υπάρχουν απαιτήσεις για υψηλή αγωγιμότητα, υψηλή κατεργασιμότητα ή καλή αντίσταση στην διάβρωση. Αυτό συμβαίνει διότι τα καθαρά μέταλλα είναι πολύ πιο αδύναμα μηχανικά από ότι τα κράματα, χωρίς να έχουμε σημαντικές αρνητικές παράπλευρες απώλειες στους τομείς που τα καθαρά μέταλλα υπερτερούν. Το ίδιο συμβαίνει και με το αλουμίνιο.

Μηχανισμοί σκλήρωσης

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Στα περισσότερα κράματα δεν λειτουργεί μόνο ένας μηχανισμός σκλήρωσης, αλλά μπορεί να λειτουργούν ταυτόχρονα περισσότεροι μηχανισμοί.

Πίνακας 3: Μηχανισμοί Σκλήρωσης των Μετάλλων

| Μηχανισμός | Εμπόδια | Σκλήρωσης | Σχέση | Θερμοκρασιακή Εξάρτηση |
|--------------------------|--|--|---|------------------------|
| Σκλήρωση με ενδοτράχυνση | Άλλες διαταραχές | $\alpha m b \sqrt{r}$ | $\tau = \alpha m b \sqrt{r}$ | Μικρή |
| Σκλήρωση με κατακρήμνιση | Κατακρημνίσματα, σωματίδια β φάσης, ενδομεταλλικές ενώσεις | Διαπερατά σωματίδια Μη-διαπερατα σωματίδια | $\Delta t = k d^{m/n} f r^{1/2}$ $\Delta t = k f^{1/2} r^{-1}$ | Μεγάλη |

Όταν η ολίσθηση των διαταραχών κατά την πλαστική παραμόρφωση εμποδίζεται, τότε επέρχεται σκλήρωση του μετάλλου. Επομένως, αξιοποιούνται περισσότερα είδη εμποδίων στην ολίσθηση των διαταραχών. [4]

Το φαινόμενο της σκλήρυνσης μέσω κραμάτωσης καλείται σκλήρυνση μέσω στερεού διαλύματος. Η τεχνική αυτή χωρίζεται σε δύο κατηγορίες το στερεό διάλυμα αντικατάστασης και το στερεό διάλυμα παρεμβολής. Στην πρώτη περίπτωση η ατομική ακτίνα του κραματικού στοιχείου είναι παραπλήσια με αυτήν του κυρίως μετάλλου και έτσι τα άτομα του πρώτου απλά αντικαθιστούν αυτά του δεύτερου στο κρυσταλλικό πλέγμα. Ενώ, στην δεύτερη περίπτωση τα άτομα του διαλυμένου στοιχείου είναι πολύ μικρότερα και χωρούν-παρεμβάλλονται εντός των ατόμων του κυρίως στοιχείου στο κρυσταλλικό πλέγμα (τέτοια άτομα είναι αυτά του Άνθρακα, Αζώτου, Υδρογόνου και Βορίου). Έτσι, και στις δύο περιπτώσεις έχουμε σκλήρωσης λόγω των τάσεων που δημιουργούνται μεταξύ των ατόμων. Όσον αφορά το στερεό διάλυμα αντικατάστασης, όσο μεγαλύτερη η διαφορά μεγέθους των ατόμων της κραμάτωσης τόσο μεγαλύτερες οι τάσεις που προκύπτουν και κατ' επέκτασιν η σκλήρωση, βέβαια έτσι έχουμε και πτώση της δυνητικής διαλυτότητας. [5]

Τα κράματα του αλουμινίου χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες τα Χυτά κράματα και τα κράματα Διαμόρφωσης. Τα δεύτερα καλύπτουν τα δύο τρίτα της παραγωγής του Αλουμινίου και τα προϊόντα τους έχουν την μορφή φύλλων έλασης, προϊόντων διέλασης, προϊόντων σφυρηλασίας, καλωδίων και πλακών. Τα πρώτα τώρα

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των μηχανικών μερών της βιομηχανίας μεταφορών και κυρίως της αυτοκινητοβιομηχανίας (σε ποσοστό 59,4% και 49,4% αντιστοίχως), αλλά και σε επιμέρους εφαρμογές όπως Κλιματιστικά, Προϊόντα πληροφορικής και Ηλεκτρικά Εργαλεία. [6]

Τα κράματα διαμόρφωσης και τα χυτά κράματα χωρίζονται σε επιπλέον δύο κατηγορίες τα μη Θερμικώς Κατεργάσιμα και τα Θερμικώς Κατεργάσιμα.

Τα πρώτα είναι κράματα που σκληραίνουν μέσω διασποράς, στερεού διαλύματος και εργοσκλήρωσης όσο μεγαλύτερη η διαλυτότητα της κραμάτωσης στο Αλουμίνιο τόσο μεγαλύτερη η ικανότητα του κράματος να φτάσει σε μεγαλύτερες σκληρότητες και μηχανικές αντοχές. Η αντοχή αυξάνεται επιπλέον όταν η πυκνότητα των διαταραχών αυξάνεται από την παραμόρφωση, η αύξηση αυτή εξαρτάται από την σύσταση, το μέγεθος της παραμόρφωσης και την θερμοκρασία που αυτή λαμβάνει χώρα. Οι μέθοδοι σκλήρυνσης που προαναφέρθηκαν αναιρούνται από την θέρμανση και παραμονή σε θερμοκρασία για τα μη Θερμικώς Κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου, ο βαθμός της αναίρεσης αυτής εξαρτάται από τον βαθμό της ανακρυστάλλωσης που με την σειρά του εξαρτάται από το ύψος της θερμοκρασίας και των χρόνο παραμονής σε αυτήν, η αναίρεση φτάνει να είναι ολοκληρωτική όταν πλήρης ανόπτηση επιτευχθεί.

Όσον αφορά τα - Θερμικώς Κατεργάσιμα κράματα, η σκλήρυνση και μεγαλύτερη αντοχή εξαρτάται από την πιθανότητα υπερκορεσμένο στερεό διάλυμα να παρουσιάσει κατακρήμνιση και μέσω αυτής σκλήρυνση. Η βασική συνθήκη για να συμβεί το προηγούμενο και κατ' επέκτασιν να θεωρηθεί το κράμα Heat-Treatable είναι οι κραμάτωσης να έχουν υψηλή διαλυτότητα σε μεγάλες θερμοκρασία και χαμηλή σε μικρές (θερμοκρασία δωματίου). Έτσι κατά την φυσική τους ή και τεχνητή τους γήρανση σε υψηλές θερμοκρασίες κοντά στο σημείο τήξης έχουμε κατακρημνίσεις η και δημιουργία δεύτερων φάσεων του υπέρκορου στερεού διαλύματος με παράλληλη αύξηση στην σκληρότητα. Το καλύτερο παράδειγμα περιγραφής της σκλήρυνσης με κατακρήμνιση μέσω τεχνητής γήρανσης είναι αυτό των κραμάτων Αλουμινίου – Χαλκού (ο Χαλκός έχει 5,65% διαλυτότητα στους 548° C και 0,2% στους 250° C), έτσι κατά την θέρμανση του κράματος στους 500° C αρχικά αύξηση και έπειτα πτώση της σκληρότητας, η οποία και επηρεάζεται από τις ζώνες GP και τον μετασχηματισμό τους σε φάσεις θ' και θ. [7]

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Πίνακας 4: *Wrought Κράματα Αλουμινίου*

| Σειρές | Κύρια στοιχεία κραματικά | Heat Treatable |
|--------|----------------------------|----------------|
| 1xxx | Al>99% | OXI |
| 2xxx | Al-Cu(Mg) | NAI |
| 3xxx | Al-Mn | OXI |
| 4xxx | Al-Si | OXI |
| 5xxx | Al-Mg | OXI |
| 6xxx | Al-Mg-Si | NAI |
| 7xxx | Al-Zn | NAI |
| 8xxx | Al-(άλλα μέταλλα-στοιχεία) | Εξαρτάται |
| 9xxx | Μη-χρησιμοποιούμενη σειρά | - |

[6]

Πίνακας 5: *Cast Κράματα Αλουμινίου*

| Σειρές | Κύρια στοιχεία κραματικά | Heat Treatable |
|--------|----------------------------|----------------|
| 1xx.x | Al>99% | OXI |
| 2xx.x | Al-Cu | NAI |
| 3xx.x | Al-Si(+Cu ή Mg) | NAI |
| 4xx.x | Al-Si | OXI |
| 5xx.x | Al-Mg | OXI |
| 6xx.x | Μη-χρησιμοποιούμενη σειρά | - |
| 7xx.x | Al-Zn-(Mg)-(Cu) | NAI |
| 8xx.x | Al-Sn | OXI |
| 9xx.x | Al-(άλλα μέταλλα-στοιχεία) | Εξαρτάται |

[6]

Επίδραση Κραματώσεων στα Κράματα Αλουμινίου

- Σίδηρος – Fe: Αποτελεί την πλέον κοινή ακαθαρσία που συναντάται στο Αλουμίνιο. Η διαλυτότητα του στο υγρό αλουμίνιο είναι μεγάλη αλλά αυτό αλλάζει στο στερεό αλουμίνιο όπου η διαλυτότητά του είναι εξαιρετικά μικρή της τάξης του 0,05%. Έτσι για περιεκτικότητες Σιδήρου που υπερβαίνουν το παραπάνω όριο έχουμε σχηματισμό κατακρημνισμάτων στα όρια των κόκκων, με σύσταση Al₃Fe ή και

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Al₆Fe, Al₃Fe. Τα κατακρημνίσματα αυτά επιδρούν αρνητικά στην διαμορφωσιμότητα του κράματος και πρέπει να ελέγχονται από τον ρυθμό απόψυξης.

- Χαλκός – Cu: Ο ρόλος του Χαλκού στο Αλουμίνιο είναι κυρίως για αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων μέσω σκλήρυνσης στερεού διαλύματος. Όσο αυξάνει η περιεκτικότητα του χαλκού έχουμε και αύξηση την αντοχής του κράματος, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο που ο χαλκός διαμοιράζεται στο κράμα, για μεγαλύτερες περιεκτικότητες το κράμα δύναται να σκληρυνθεί μέσω σκλήρυνσης με κατακρήμνιση, ακολουθώντας την διαδοχή:

SS --> pre-precipitate stage --> GP Zones + S' --> S

- Μαγνήσιο – Mg: Το Μαγνήσιο διαμορφώνει ένα πολύπλοκο σύστημα με το Αλουμίνιο. Μειώνει την πυκνότητα του κράματος με σχεδόν γραμμικό ρυθμό, με αναλογία 0,5% μείωση πυκνότητας για κάθε 1% Μαγνήσιο σε στερεό διάλυμα. Έχει πολύ μεγάλη στερεή διαλυτότητα (14,9% στους 450 C) η οποία μειώνεται δραστικά σε θερμοκρασία δωματίου (1,7%), παρόλα αυτά παρουσιάζει σκλήρυνση με κατακρήμνιση σε μικρό βαθμό χωρίς σημαντική επίδραση στην αντοχή μέχρι περιεκτικότητες μικρότερες του 5%.

- Πυρίτιο – Si: Το πυρίτιο διαμορφώνει μικρούς συνεκτικά συμπλέγματα σε στερεό διάλυμα, η φύση και μορφολογία των οποίων εξαρτάται από το ποσοστό του Πυριτίου στο κράμα. Σε υποευτηκτικά και ευτηκτικά κράματα Al-Si το τα άτομα πυριτίου αλληλεπιδρούν με αυτά του Αλουμινίου διαμορφώνοντας συμπλέγματα Al-Si, ενώ για υπereυτηκτικά κράματα Al-Si διαμορφώνονται συμπλέγματα Si-Si. Τα δεύτερα έχουν μορφολογία λεπτών πλακιδίων ή τριγωνικών πλακών και ενδυναμώνουν κάθε επίπεδο ολίσθησης.

- Mg-Si: Με την συνδιαστική προσθήκη των δύο κραματώσεων έχουμε σχηματισμό ψευδο-δυσαικών Al-Mg₂Si(Mg/Si=1,73) και σκλήρυνση με δημιουργία κατακρημνισμάτων Mg₂Si.

- Ψευδάργυρος – Zn: Η προσθήκη Ψευδαργύρου δίνει κράματα με μικρότερες πυκνότητας από τα Al-Cu και έχουν μεγάλη ειδική αντοχή σε συνδιασμό με βελτιωμένες αντιστάσεις σε Stress Corrosion Cracking και σε αντοχή στην κόπωση. Ο Ψευδάργυρος παρουσιάζει πολύ μεγάλη στερεή διαλυτότητα στο αλουμίνιο τόσο σε υψηλές θερμοκρασίες όσο και σε θερμοκρασίες δωματίου, για την μείωση της

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

διαλυτότητας σε θερμοκρασίες δωματίου χρησιμοποιείται προσθήκη Mg και έτσι δίνεται η δυνατότητα σκλήρυνσης με κατακρήμνιση. [2]

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά Διαγραμμάτων Ευτηκτικών Φάσεων με κύριες κραματώσεις

| Κραματώσεις | Μέγιστη Διαλυτότητα μέχρι την Ευτηκτική Θερμοκρασία (κατα βάρος)% | Μέγιστη Διαλυτότητα πάνω από την Ευτηκτική Θερμοκρασία (κατα βάρος)% | Ευτηκτική Θερμοκρασία (ο C) | Ζές Φάσεις σε Ισορροπία |
|-------------|--|---|--------------------------------|--|
| Cu | 5,7 | 33,2 | 547 | CuAl ₂ (52%Cu) |
| Mg | 17,4 | 35 | 450 | Mg ₅ Al ₈ (35%Mg) |
| Zn | 82 | 94,9 | 382 | Zn (99% Zn) |
| Si | 1,65 | 12 | 577 | Si (99,5%) |
| Fe | 0,05 | 1,8 | 655 | FeAl ₃ (40%) |
| Ni | 0,04 | 6 | 640 | NiAl ₃ (42%) |
| Ce | 0,05 | 12 | 650 | CeAl ₄ (57%Ce) |
| Mn | 1,8 | 1,9 | 658 | MnAl ₆ (25%Mn) |
| Sc | 0,3 | 0,6 | 655 | ScAl ₃ (36%Sc) |
| Ti | 1,3 | 0,12 | 661 | TiAl ₃ (37%) |
| Zr | 0,28 | 0,11 | 661 | ZrAl ₃ (53%) |
| Cr | 0,8 | 0,4 | 661 | CrAl ₇ (22%) |

[8]

1.3. Κράματα Διαμόρφωσης 3xxx

Επίδραση Μαγγανίου – Μηχανισμός Σκλήρωσης με Κατακρήμνιση

Τα κράματα της σειράς 3xxx, όπως προαναφέρθηκε, έχουν σαν κύρια κραματική προσθήκη το Μαγγάνιο. Το μαγγάνιο δημιουργεί ικανή σκλήρωση μέσω στερεού

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

διαλύματος αλλά η παρουσία του στο Αλουμίνιο έχει μεγαλύτερα οφέλη συνδυαστικά με την ψυχρά έλαση όπου ενισχύεται η εργοσκήρυση του κράματος. Στα περισσότερα εμπορικά κράματα το ποσοστό του μαγγανίου δεν ξεπερνά το 1,25% (ενώ έχει διαλυτότητα 1,82% στο Αλουμίνιο σε θερμοκρασία δωματίου), αυτό συμβαίνει καθώς η ύπαρξη σιδήρου στο κράμα μειώνει την διαλυτότητα του μαγγανίου με αποτέλεσμα την ενίσχυση της πιθανότητας σχηματισμού μεγάλων σωματιδίων $Al_6(Mn,Fe)$, με αρνητικές συνέπειες για την κατεργασιμότητα. Όλα τα κράματα 3xxx περιέχουν ελεγχόμενες ποσότητες Σιδήρου και Πυριτίου. Κατά την στερεοποίηση το μεγαλύτερο ποσοστό μαγγανίου παραμένει σε στερεό διάλυμα στο αλουμίνιο, το υπολειπόμενο είναι παρών στην μορφή σωματιδίων Al-Mn-Fe και Al-Mn-Fe-Si.

Κατά την ομογενοποίηση διασκορπισμένα σωματίδια $Al_{12}(Mn,Fe)_3Si$ ή $Al_6(Mn,Fe)$ κατακρημνίζονται από το υπέρκορο διάλυμα. Όταν η κραματική προσθήκη πυριτίου είναι μικρότερη από 0,7% τότε τα διασκορπισμένα σωματίδια είναι συνήθως $Al_6(Mn,Fe)$. Το μέγεθος των σωματιδίων αυτών εξαρτάται από τις θερμικές συνθήκες της ομογενοποίησης αλλά συνήθως δεν ξεπερνά το 1 μm σε διάμετρο.

Η κινητική της κατακρήμνισης του μαγγανίου μπορεί να επηρεαστεί από την σύσταση του κράματος. Για παράδειγμα, το πυρίτιο επιταχύνει την κατακρήμνιση με αποτέλεσμα πυκνότερη διασπορά $Al_{12}(Mn,Fe)_3Si$ και μείωση του ποσοστού του μαγγανίου που παραμένει σε στερεό διάλυμα με το αλουμίνιο.

Για κράματα Al-Mn με παραμόρφωση, η διαμόρφωση των κελιών ακολουθεί την αρχική αύξηση της πυκνότητας των διαταραχών, ανεξαρτήτως του ποσοστού της προσθήκης μαγγανίου που βρίσκεται σε στερεό διάλυμα ή διάσπαρτο στα προαναφερόμενα σωματίδια. Με αυξημένη έλαση η υπόκοκκη δομή γίνεται πιο λεπτομερής, με μεγάλη μείωση στην πυκνότητα των διαταραχών. [2]

Επιπλέον, υπάρχουν στοιχεία που υποστηρίζουν πως περιοχές με υψηλή πυκνότητα $MnAl_6$ για κράματα που περιέχουν περισσότερο από 0,5% Mn μπορεί να προκαλέσουν ωφέλεια στην εσωτερική ορθότητα. [9]

Το σχήμα, το μέγεθος και η κατανομή των κατακρημνισμάτων-διασκορπισμάτων έχουν μεγάλη επιρροή στην συμπεριφορά σε παραμόρφωση, σε ανακρυστάλλωση και τις μηχανικές ιδιότητες του non-heat treatable κράματος αλουμινίου 3xxx.

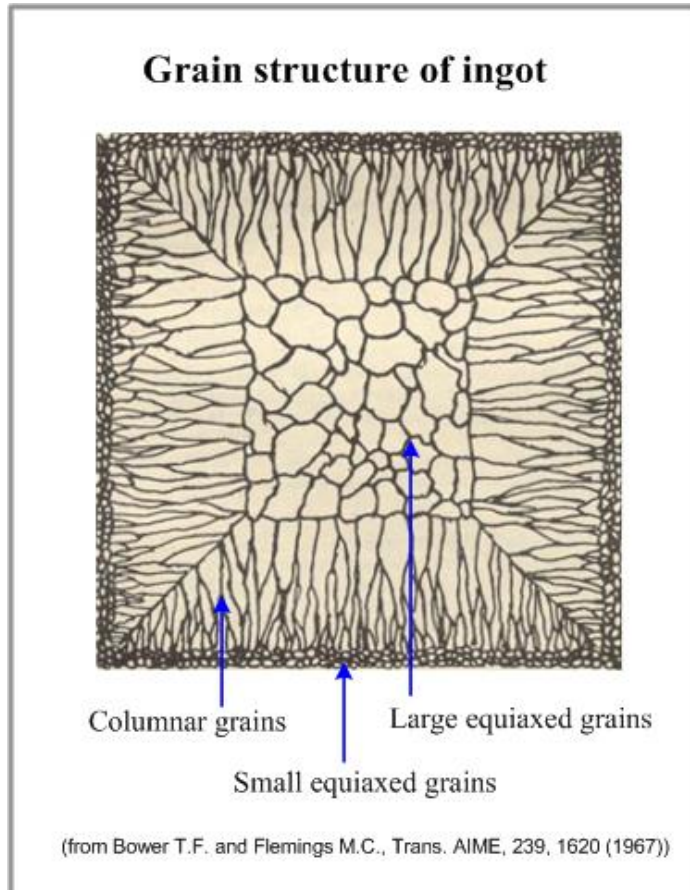
Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Μέσω της ραγδαίας στερεοποίησης έως και 0,6% Μαγγάνιο μπορεί να βρίσκεται σε στερεό διάλυμα σε διάδικό κράμα Al-Mn. Κατά την απόψηση στους 450°C δύο τύποι κατακρημνισμάτων δημιουργούνται στο κράμα, μια λεπτή επιμηκυμένη φάση $Al_{12}Mn$ με χωροκεντρωμένη κυβική δομή και μια Al_6Mn με ορθορομβική κρυσταλλική δομή. Τα εμπορικά κράματα της σειράς 3xxx εμπεριέχουν πάντα Fe και κάποια επίπεδα Si, έτσι τα κυρίαρχα κατακρημνίσματα των κραμάτων αυτών είναι τα κυβικά α - $Al_{12}(Mn,Fe)Si$ και τα ορθορομβικά $Al_6(Mn,Fe)$. Σε αυτές τις φάσεις το Μαγγάνιο μπορεί να αντικαταστήσει τον σίδηρο ελεύθερα και το αντίθετο. Με αύξηση του λόγου Fe/Mn στα κυβικά κατακρημνίσματα $Al(Mn,Fe)Si$, είναι δυνατή ο μετασχηματισμός φάσης από sc σε bcc. [10]

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Κεφάλαιο II: Χύτευση

II.1. Στεροποίηση



Εικόνα 2: Ανάπτυξη Κόκκων κατά την στερεοποίηση

Καλείται η διαδικασία της ρίψης υγροποιημένου μετάλλου εντός ψυχρού καλουπιού, κατά την οποία η μορφή του χυτού εξελίσσει συνοχή και δομικά χαρακτηριστικά.

Η μορφή και ο τύπος αυτής της διαδικασίας επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις τελικές ιδιότητες του χυτού. Η μεταλλογραφική δομή του καθορίζει πολλές από τις ιδιότητές του, ως μεταλλογραφική δομή εννοείται το μέγεθος των κόκκων, των δενδριτών, το σχήμα και ο προσανατολισμός τους, τον διασκορπισμό των κραματικών στοιχείων στο πλέγμα και φυσικά οι ατέλειες της δομής. Ακόμα και αν όλα αυτά μεταβάλλονται από διεργασίες που έπονται της στερεοποίησης, η τελευταία έχει κύρια σημασία για την τελική δομή.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Ένα επιπλέον στοιχείο που επηρεάζει δραστικά τις ιδιότητες του τελικού χυτού είναι η ακεραιότητά του ο βαθμός της μεταλλικής συνέχειας και συνοχής. Στοιχείο το οποίο και αυτό καθορίζεται κατά την στερεοποίηση. [11]

Ανάπτυξη και Μέγεθος των Κόκκων

Το μέγεθος των κόκκων είναι απόρροια πολλών παραμέτρων εκ των οποίων σημαντικότερο ρόλο παίζει οι εξής: ρυθμός πυρήνωσης και ο ρυθμός ανάπτυξης.

Ο ρυθμός πυρήνωσης, εξαρτάται από το μέγεθος της ενέργειας που απαιτείται για την δημιουργία μια νέας δομής-φάσης και μίας νέα περιοχής επιφάνειας. Για αυτό τον λόγο ο ρυθμός πυρήνωσης μπορεί να επηρεαστεί από την υπόψυξης του τήγματος κάτω από την θερμοκρασία Liquidus (που οδηγεί σε άμεσο θερμοδυναμικό ερέθισμα-κίνητρο για πυρήνωση, ταπεινώνοντας την κρίσιμη τιμή μεγέθους του στερεοποιημένου πυρήνα) και από την παρουσία μετώπων στερεοποίησης για ετερογενή πυρήνωση (ο μηχανισμός αυτός ενισχύεται αποτελεσματικά με προσθήκη εκλεπτυντών κόκκων).

Ο ρυθμός ανάπτυξης, είναι συνάρτηση της κρυσταλλογραφίας (η κινητική της ανάπτυξης διαφέρει για κάθε κρυσταλλογραφικό επίπεδο), της εξαγωγής θερμότητας και της μεταφοράς μάζας. Η υπόψυξη του υγρού είναι υψηλότερη για υψηλότερους ρυθμούς απόψυξης. Σαν αποτέλεσμα οι κόκκοι γενικά πυρηνώνονται και μεγαλώνουν ταχύτερα για υψηλότερους ρυθμούς απόψυξης, πάντα συναρτήσει του εκλεπτυντή.

Ο μαθηματικός τύπος που περιγράφει τα παραπάνω μπορεί να γραφεί:

$$Dgr = A\Delta T o^{0,25} V_s^{(-0,25)} G^{(-0,5)}, \quad (1)$$

όπου ΔT_o είναι το εύρος στερεοποίησης του κράματος, V_s είναι η ταχύτητα της διεπιφάνειας στερεού-υγρού (ρυθμός στερεοποίησης), G είναι διαφασική θερμοκρασιακή διαβάθμιση, και A είναι ο συντελεστής του κράματος που αφορά την ενέργεια της επιφάνειας της διεπιφάνειας, την διαχυσιμότητα της κραμάτωσης, τον συντελεστή διασποράς και την λανθάνουσα θερμότητα της σύντηξης. Όπως φαίνεται για ίδιο κράμα η πιο σημαντική παράμετρος για το μέγεθος των κόκκων είναι η θερμοκρασιακή διαβάθμιση.

Η εσωτερική ποιότητα της δομής των κόκκων εξαρτάται και χαρακτηρίζεται από το μέγεθος και τις αποστάσεις μεταξύ των δενδριτικών κλάδων.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

[3] [11]

Δενδριτική Ανάπτυξη

Όταν συμβεί υπόψυξη σε μια περιοχή υγρού μετάλλου με σύνδεση με στερεοποιημένη περιοχή, κάθε υπάρχουσα ανάδευση σε επαφή με το μέτωπο της στερεοποιημένης περιοχής τείνει να σταθεροποιηθεί και να λειτουργήσει σαν κέντρο για ανάπτυξη. Εάν η γενική ανάπτυξη του μετώπου της επιφάνειας υγρού -στερεού εμποδιστεί, αυτά τα κέντρα ανάπτυξης προχωρούν μέσα στην ζώνη της υπόψυξης.

Αυτές είναι η γενέτειρές συνθήκες για την δενδριτική ανάπτυξη, που εξελίσσεται με μορφή δέντρου. Αυτή είναι η μορφή ανάπτυξης που πολύ συχνά απαντάται στην στερεοποίηση εμπορικών κραμάτων στα οποία δημιουργούνται στερεά διαλύματα. Ο κύριος άξονας του δενδρίτη ξεκινάει την δημιουργία του στην άκρη ή την γωνία ενός υπάρχοντος κρυσταλλίτη. Η ανάπτυξη του άξονα ακολουθά την ροή της απαγωγής θερμότητας.

Η πλευρική ανάπτυξη του κυρίου άξονα (δευτερογενείς δενδρίτες) του δενδρίτη ακολουθεί με την σειρά της, την κύρια ροής θερμότητας στην νεοδημιουργηθείσα επιφάνεια στερεού υγρού που δημιουργεί ο κύριος άξονας και με την ίδιο τρόπο ανάπτυξης ως προς την διεύθυνση και την μορφολογία.

Κατά την συνέχιση της στερεοποίησης οι μικρότεροι δευτερογενείς κλάδοι τήκονται και εξαφανίζονται και οι γειτονικοί τους μεγαλύτεροι κλάδοι συνεχίζουν να αναπτύσσονται.

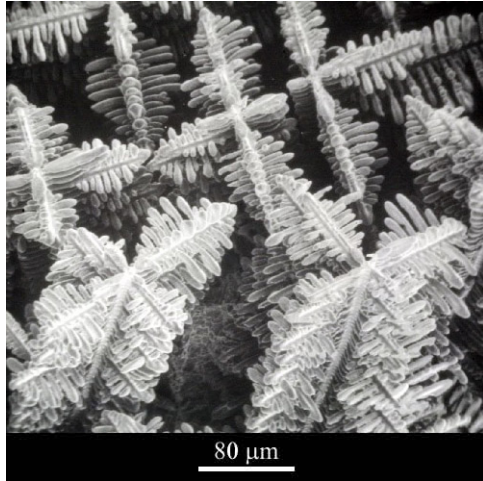
Η δενδριτική ανάπτυξη είναι πολύ δύσκολο να παρατηρηθεί για καθαρά μέταλλα αλλά είναι συχνή σε κράματα καθώς εκεί υπάρχει διαφορά στην σύσταση. Η δενδριτική ανάπτυξη καθορίζει και αποτελεί την κύρια δομή του χυτού. Η μεγάλη διαβάθμιση που προκαλεί στην δομή τείνει να μειωθεί με διαδικασίες θερμικής ομογενοποίησης, αφήνοντας ακόμα και σε αυτή την περίπτωση σημάδια που μαρτυρούν την δενδριτική ανάπτυξη, όπως ακαθαρσίες.

Η δενδριτική ανάπτυξη προηγείται της δημιουργίας των κόκκων. Καθώς οι δενδρίτες διαμορφώνονται απωθούν το τήγμα στα όρια τους.

[12] [11]

Μορφολογία Δενδριτών

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.



Εικόνα 3: Μορφολογία της δενδριτικής ανάπτυξης [11]

Η διαμόρφωση των δενδριτών ξεκινάει σε μια ασταθή επίπεδη διεπιφάνεια υγρού στερεού. Οι διαταραχές ενισχύονται και διευρύνονται μέχρι μία διαφορά στην δενδριτική ανάπτυξη και τις θλιπτικές δυνάμεις τις διεπιφάνειας των διαταραχών επιτευχθεί. Το άκρο της δενδριτικής ανάπτυξης δύναται να σπρώξει το υγρό διάλυμα και προς τις πλευρικές διευθύνσεις, στο οποίο και θα συσσωρευτούν οι διαταραχές. Και έτσι η μορφή των διαταραχών δεν είναι πλέον ημιτονοειδής αλλά προσαρμόζεται στην μορφολογία των κελιών. Αν οι συνθήκες είναι τέτοιες που να οδηγήσουν σε δενδριτική στερεοποίηση τα cells θα μετατραπούν ραγδαία σε δενδρίτες. Οι αποστάσεις μεταξύ των κορυφών των δενδριτών είναι πολύ μεγαλύτερες από το μήκος κύματος της αρχικής διαταραχής που ξεκινά την μορφολογία της ανάπτυξης.

Υπάρχουν διαφορές στην μορφολογία των cells, των δενδριτικών cells και των δενδριτών. Τα cells είναι συνήθως ελιπσοειδείς κρύσταλλοι που αναπτύσσονται αντίθετα με την ροή της θερμότητας. Αναπτύσσονται κάτω από συνθήκες κοντά στο όριο της συστηματικής υπόψυξης του σχετικού επιπέδου διεπαφής. Από την άλλη, οι δενδρίτες είναι κρυσταλλικές μορφολογίες που αναπτύσσονται πέρα από το όριο σταθερότητας του επιπέδου και υιοθετούν προσανατολισμό όσο δυνατόν πλησιέστερο στην ροή της θερμότητας ή στην αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν. Αν η επαγωγή θερμότητας είναι ισότροπη τότε ο δενδρίτης θα αναπτυχθεί ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις και θα είναι συμμετρικός σαν αποτέλεσμα.

Οι δενδρίτες χωρίζονται σε δυο μορφολογίες ανάλογα με την ανάπτυξή τους στους συμμετρικούς κατά των σχηματισμό των οποίων έχουμε απόρριψη θερμότητας και διαλύματος, έτσι οι δενδρίτες μπορούν να σχηματιστούν σε προσανατολισμό

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

ασχέτως με την θερμοκρασιακή διαβάθμιση αν η διεπιφάνεια υγρού στερεού είναι συστηματικά ασταθής. Η δεύτερη μορφολογία είναι η κιονοειδής κατά την οποία η ανάπτυξη ακολουθεί την θερμοκρασιακή διαβάθμιση προς μία κατεύθυνση και έτσι έχει συγκεκριμένο προσανατολισμό. [13]

Τώρα, όσον αφορά το μήκος του πυρήνα του δενδρίτη, αυτό ελέγχεται από την θερμοκρασιακή διαβάθμιση και το ρυθμού απόψυξης. Η θερμοκρασία της κορυφής του δενδρίτη είναι T_L και της βάσης του είναι T_S έτσι το θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ της Liquidus και της Solidus μπορεί να μας δώσει στοιχεία ώστε να προβλέψουμε το μήκος του δενδρίτη μέσω του τύπου

$$L = (TL - TS)/G \quad (2)$$

όπου G είναι η θερμοκρασιακή διαβάθμιση T/d .

[14]

Διαφορισμός

Ο διαφορισμός αποτελεί φαινόμενο που λαμβάνει χώρα κατά την στερεοποίηση, δυστυχώς η ολοκληρωτική του εξάλειψη είναι αδύνατη. Ο διαφορισμός μπορεί να προκαλέσει σοβαρές επιπτώσεις στις μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες ενός χυτού. Στον συμβατικό διαφορισμό άτομα διαφορετικά από αυτά που κρυσταλλώνονται απορρίπτονται μέσα στο τήγμα καθώς η διεπιφάνεια στερεού-υγρού προχωράει. Τα άτομα αυτά δύναται να είναι ακαθαρσίες ή σε περίπτωση στερεού διαλύματος, άτομα διαλυτού κραματικού στοιχείου.

Τελικά, μακροδιαφορισμός (διαφορισμός ικανός να παρατηρηθεί μακροσκοπικά) μπορεί να απαντηθεί στην περιοχή του χυτού που στερεοποιείται τελευταία, ιδιαίτερα αν ο όγκος του χυτού είναι μεγάλος.

Μικροδιαφορισμός, μπορεί να απαντηθεί διαδενδριτικά μεταξύ των κλάδων των δενδριτών τόσο για συμμετρικούς όσο και για κιονοειδής δενδρίτες και στην επιφάνεια των χαμηλών αλλά και υψηλών ορίων των κόκκων.

Στην άλλη κύρια μορφή διαχωρισμού, που είναι γνωστή ως αντίστροφος διαφορισμός, η θερμική συστολή του στερεοποιημένου εξωτερικού κελίου σπρώχνει το υπολειπόμενο τήγμα προς διακρυσταλλικά κανάλια έως ότου στερεοποιηθεί.

[14]

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Ευτηκτική Στερεοποίηση ($L=a+b$)

Η ευτηκτική αντίδραση αποτελεί ένα από τα παλιότερα μελετώμενα φαινόμενα της στερεοποίησης. Κράματα με σύσταση κοντά στην ευτηκτική έχουν χαμηλό σημείο τήξης και μικρό εύρος στερεοποίησης. Αυτά τα χαρακτηριστικά ενισχύουν την χυτευσιμότητα. [15]

Καθώς η πλούσια σε Α, α-φάση στερεοποιείται, περίσσεια Β διαχέεται σε μικρή απόσταση ώστε να συσσωματωθεί μέσα σε μία πλούσια σε Β, β-φάση. Αντιστοίχως, τα Α άτομα απομακρύνονται από την β-φάση προς την α-φάση, καθώς αναπτύσσονται. Ο ρυθμός της ανάπτυξης εξαρτάται από την διαχυσιμότητα του διαλύματος και τις αποστάσεις lamellae. [14]

Όπως συμβαίνει και με άλλες διαδικασίες κατά την στερεοποίηση η ευτηκτική αντίδραση προχωράει μέσω πυρήνωσης και ανάπτυξης. Η τάση της μελέτης γύρω από την ευτηκτική αντίδραση ήταν η χρήση κατευθυνόμενης στερεοποίησης για τον καθορισμό των ευτηκτικών αναπτυσσόμενων δομών. Η πυρήνωση φυσικά, επηρεάζει της δομή και της ιδιότητες. Η πρώτη φάση που θα διαμορφωθεί κατά την ευτηκτική στερεοποίηση θα είναι προϊόν συνήθως ετερογενούς πυρήνωσης. Η δεύτερη φάση πυρηνώνεται ετερογενώς και συνεχώς αλλά όχι αναγκαστικά επιταξιακά προς την πρώτη φάση ακόμα και σε ευτηκτικά που παρουσιάζουν συγκεκριμένη προτιμητέα διευθυνσιακή σχέση μεταξύ των δύο φάσεων. [15]

Οι ευτηκτικές φάσεις χωρίζονται σε κατηγορίες, ανάλογα με την μορφολογία της ανάπτυξής τους σε:

- Την *συνεργατική-ομαδική* ανάπτυξη, κατά την οποία οι δύο φάσεις αναπτύσσονται μαζί ως ένα ζευγάρι διάχυσης
- Την *διαχωρισμένη* ανάπτυξη, κατά την οποία οι δύο φάσεις αναπτύσσονται χωριστά και δεν υπάρχει απευθείας ανταλλαγή διαλυμένης ουσίας μεταξύ των δύο στερεών φάσεων.

Μια άλλη κατηγοριοποίηση των ευτηκτικών φάσεων γίνεται με βάση την κινητική της διεπιφάνειας των ευτηκτικών φάσεων, και αυτές είναι:

- Μη μετωπική / Μη μετωπική
- Μη μετωπική / Μετωπική

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

- Μετωπική / Μετωπική

Οι δυο πρώτες κατηγορίες συναντώνται συχνά σε εμπορικά προϊόντα. Αντίθετα οι τελευταία είναι λιγότερο μελετημένα.

Για την συνεργατική ανάπτυξη, κατά την στερεοποίηση ενός μονοφασικού κράματος, η διαλυμένη ουσία απωθείται από την κορυφή του δένδριτη και από της πλάγιες πλευρές του και καταλαμβάνει χώρο στις διαδενδριτικές περιοχές. Κατά την στερεοποίηση ενός διφασικού κράματος δύο διαλυμένες ουσίες απωθούνται. Η Α απωθείται μπροστά από την φάση β' και η Β μπροστά από την φάση α'. Η διαλυμένη ουσία αρκεί να διαχυθεί διαμέσου της διεπιφάνειας στερεού υγρού από την μια φάση στην άλλη. Κάθε μία από αυτές τις ουσίες είναι συσσωματωμένη με το αναπτυσσόμενο στερεό διάλυμα. Η πλευρική διάχυση είναι το αίτιο για την ευτηκτική στερεοποίηση. Έτσι η μορφολογία της ευτηκτικής φάσης είναι εναλλασσόμενη Lamella των φάσεων α και β. Όσο μικρότερες είναι η απόσταση της μορφολογίας Lamella τόσο μικρότερη είναι η συσσώρευση της διαλυμένης ουσίας. Αυτό συμβαίνει εντονότερα όταν έχουμε μεγαλύτερη διάχυση.

[16]

II.2. Συνεχής Χύτευση

Η πρώτη θεωρητική προσέγγιση της συνεχούς χύτευσης έγινε το 1840 και χρειάστηκαν 100 χρόνια ώστε η τεχνική να εφαρμοστεί σε βιομηχανικό επίπεδο. Μετά των δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο η ιδέα αναπτύχθηκε περαιτέρω από γερμανικές δημοσιεύσεις, με εφαρμογή στον Χαλκό και τον Σίδηρο.

Έτσι έγινε το πρώτο βήμα, από την τυπική χύτευση καλούπι σε καλούπι σε μία πιο συνεχή διαδικασία με πολλά πλεονεκτήματα όπως:

- πιο ογκώδη
- λιγότερη σκληρή εργασία
- καλύτερη ενεργειακή απόδοση
- μεγαλύτερη παραγωγικότητα χυτηρίων
- καλύτερα οικονομικά αποτελέσματα

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

[17]

- παράγει απευθείας ελατές χυτές πλάκες ή διελάτες χυτές μπιγιέτες
- καλύτερες αντοχές
- καλύτερη ποιότητα επιφάνειας
- καλύτερη εσωτερική δομή

[18]

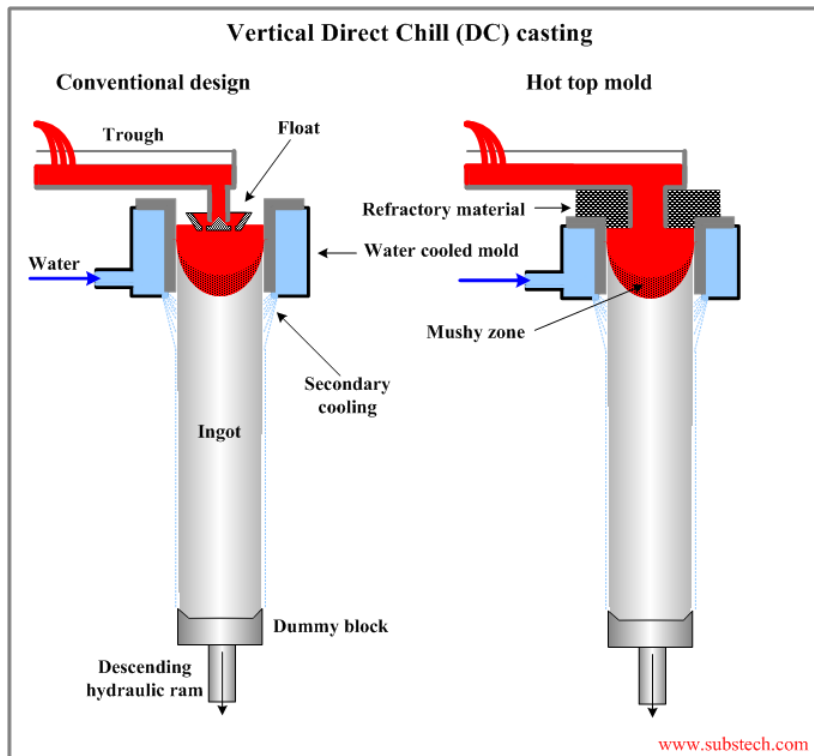
Στάδια τεχνικής:

- Ρίψη-Παράδοση τηγμένου μετάλλου σε καλούπι-σημείο χύτευσης
- Ροή μετάλλου μέσω ενός διανομέα στο καλούπι-σημείο χύτευσης
- Μορφοποίηση του χυτού εντός ενός υδρόψυκτου καλουπιού
- Ολοκληρωτική απομάκρυνση του χυτού από το καλούπι
- Τομή του χυτού για απομάκρυνση μη επιθυμητών περιοχών του

[18]

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

II.3. Direct Chill Casting – Άμεση Χύτευση



Εικόνα 4: Κάθετη Direct Chill Χύτευση

Στις αρχές της δεκαετίας του 30' η μέθοδος συνεχούς χύτευσης DC εφευρέθηκε στην Γερμανία από την εταιρία VAW και ταυτοχρόνως και ανεξαρτήτως στις Η.Π.Α. από την Alcoa. Σήμερα, αποτελεί την πρώτη μέθοδο για την παραγωγή προϊόντων αλουμινίου σχήματος τέτοιο ώστε στην συνέχεια να ελαθούν, διελαθούν και να ανατηκούν. Η μέθοδος εφαρμόζεται ως επί τω πλείστων στο αλουμίνιο (δέκα εκατομμύρια τόνοι ετήσιας παραγωγής αλουμινίου με DC Casting), αλλά και για άλλα μέταλλα όπως ο χαλκός, ο ψευδάργυρος και το μαγνήσιο.

Η DC Casting επέτρεψε την βελτίωση της μικροδομής των πλακών και μπιγιεπών μέσω της άμεσης ψύξης του χυτού από το νερό, μειώνοντας την ανομοιομορφία και τον διαφορισμό. [19]

Στάδια:

- Προετοιμασία του τήγματος για χύτευση

Η προετοιμασία του τήγματος είναι μια διαδικασία που απαιτεί έλεγχο και απαρτίζεται από επιμέρους διεργασίες. Πρώτη από αυτές είναι, η φόρτωση του φούρνου-καμίνου

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

η μορφή της οποίας εξαρτάται από τον τύπο του φούρνου, για παράδειγμα τους φούρνους δύο θαλάμων (μπαλκονάτους) η φόρτωση γίνεται είτε με αυτόματο καρότσι φόρτωσης είτε πολύ απλά με την χρήση κλάρκ. Έπειτα ακολουθεί προσέγγιση της επιθυμητής χημικής σύστασης του τηγμένου μετάλλου, στην πολύ συχνή περίπτωση που η φόρτωση του φούρνου έχει γίνει κυρίως με σκραπ η κραματωποίηση είναι αναπόφευκτη. Επόμενο, στάδιο είναι αυτό της απαέρωσης(του Υδρογόνου). Και τέλος, το φιλτράρισμα του μετάλλου μέσα από ειδικά φίλτρα.

- Χύτευση
- Απομάκρυνση του χυτού (πλάκας-μπιγιέτας) από το πηγάδι χύτευσης
- Προετοιμασία των καλουπιών και της τράπεζας έδρασής τους για την επόμενη χύτευση

[20]

Περιγραφή Λειτουργίας - Χύτευση:

Κατά την DC χύτευση παράγονται πλάκες ομοιόμορφης διατομής, αρχικά μέσω της ρίψης υγρού μετάλλου σε κρύο καλούπι και εν συνεχεία με την άμεση ψύξη του. Το μέσο ψύξης είναι σχεδόν πάντα το νερό τόσο για την ψύξη του καλουπιού όσο και για την άμεση ψύξη.

Το υγρό μέταλλο χυτεύεται μέσα στο καλούπι και διαμορφώνει ένα αρχικό πυθμένα-πόδι (της πλάκας), μετά το πόδι διεισδύει μέσα στο πηγάδι της χύτευσης(για την κάθετη DC) ή σε ένα κυλιόμενο τραπέζι χύτευσης (στην οριζόντια DC). Στην κάθετη DC η χύτευση ολοκληρώνεται όταν το καλούπι φτάσει στον πυθμένα του πηγαδιού. Στην οριζόντια DC ένα ιπτάμενο πριόνι δύναται να κόψει την πλάκα κατά την διάρκεια της χύτευσης πράγμα που καθιστά την διαδικασία εξ ολοκλήρου συνεχή.

Η διανομή του υγρού μετάλλου προς το καλούπι πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους. Ο διανομέας μπορεί να αποτελείται από ξεχωριστά ακροφύσια με ξεχωριστή παροχή υγρού πάνω από κάθε καλούπι ή από τράπεζα που πλημμυρίζεται και διανέμει το μέταλλο ομοιογενώς.

Το βάθος του υγρού λουτρού νερού εξαρτάται από το την ταχύτητα χύτευσης, τον τύπο του κράματος και το μέγεθος του χυτού. Η παροχή του νερού είναι τυπικά $2.000-4.000\text{mm}^3/\text{s}$ ανά κάθε mm περιμέτρου καλουπιού.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Μεταφορά Θερμότητας

Η μεταφορά συμβαίνει είτε convection-μεταγωγή είτε από conduction-μετάδοση (σε στερεό ή σε υγρό) με μικρή ακτινοβολία. Η διανομή θερμότητας στην πλάκα είναι συνάρτηση παραγόντων όπως η θερμότητα εισόδου και θερμότητα εξόδου.

Η θερμότητα εισόδου είναι συνάρτηση της ενεργειακής περιεκτικότητας-πυκνότητας του υλικού και του ρυθμού χύτευσης. Η ενεργειακή περιεκτικότητα αποτελείται από την ειδική θερμότητα του υγρού κράματος, την λανθάνουσα θερμότητα στερεοποίησης και την ειδική θερμότητα του στερεού. Ο ρυθμός στερεοποίησης εξαρτάται από την πυκνότητα του υλικού, την ταχύτητα χύτευσης και το μέγεθος του χυτού.

Παράμετροι Διαδικασίας

Η παραπάνω ανάλυση δίνει στοιχεία με τα οποία μπορούμε να προβλέψουμε τα γενικά αποτελέσματα των παραμέτρων χύτευσης. Για παράδειγμα, η αύξηση της ταχύτητας χύτευσης προκαλεί αύξηση της θερμότητας εισόδου. Αυξημένη θερμοκρασιακή διαβάθμιση, οδηγεί σε μεγαλύτερη ροή θερμότητας διάχυσης που εξισορροπεί την αυξημένη θερμότητα εισόδου. Παρομοίως, η αύξηση του μεγέθους του χυτού οδηγεί σε αύξηση της θερμότητας εισόδου. Πρακτικά η ταχύτητα χύτευσης μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους του χυτού και το αντίστροφο ώστε να παραμένει σταθερή η θερμότητα εισόδου. Η θερμοκρασία χύτευσης έχει μικρή επίδραση στην ροή της θερμότητας καθώς η ειδική θερμότητα του υγρού είναι μόλις 4-5% της συνολικής θερμότητας εισόδου(η λανθάνουσα θερμότητα το 35% και το υπόλοιπο η ειδική θερμότητα του στερεού).

Καθώς, η ειδική και λανθάνουσα θερμότητα είναι πολύ παρόμοια για όλα τα εμπορικά κράματα του αλουμινίου, διαφοροποιήσεις στην διανομή θερμοκρασίας από κράμα σε κράμα οφείλονται σε διαφορές στην θερμική αγωγιμότητα. Όσο περισσότερες οι κραματώσεις του κράματος τόσο μικρότερη η θερμική αγωγιμότητά του και μεγαλύτερη η θερμοκρασιακή διαβάθμιση.

Η ποιότητα του νερού ψύξης έχει μικρή σημασία για την θερμική ροή. Η θερμική αγωγιμότητα και το μέγεθος του χυτού παίζουν τον κύριο ρόλο για την θερμική ροή σε μία δοσμένη ταχύτητα χύτευσης.

Στερεοποίηση

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Κάτω από την επίδραση της διανομής θερμότητας στερεό σχηματίζεται όταν η θερμοκρασία του υγρού περάσει κάτω από την Liquidus για ένα δοσμένο κράμα. Κατά την χύτευση DC χρησιμοποιείται εκλεπτυντής κόκκων TiB_2 για να καταλύσει την πυρήνωση για την στερεοποίηση στερεών α φάσεων κρυστάλλων αλουμινίου, δίδοντας καλή συμμετρική δομή. Αν η χύτευση πραγματοποιηθεί χωρίς εκλεπτυντή, η κλασική δομή κόκκων με κιονοειδή εξωτερικό και συμμετρικό εσωτερικό θα παρατηρηθεί. Το μικρή συμμετρική μορφολογία κόκκων αποτρέπει τις ρηγματώσεις σε κανονικές ταχύτητες χύτευσης.

Επιπλέον ο ρυθμός απόψυξης παίζει σημαντικό ρόλο για την ποιότητα της μικροδομής καθώς επηρεάζει ιδιότητες όπως το DAS(Αποστάσεις Κλάδων Δενδρίτη), το μέγεθος των κόκκων και το μέγεθος των ενδομεταλλικών ενώσεων. Ο ρυθμός απόψυξης μειώνεται ακτινικά από την επιφάνεια προς το κέντρο του χυτού καθώς το πέρασμα της διάχυσης από το ψεκασμό νερού αυξάνεται. Αυτό δίνει διαφοροποιήσεις στην μικροδομή ανάμεσα στο κέντρο και την επιφάνεια, οι οποίες είναι πιο έντονες για μεγαλύτερου μεγέθους χυτά. Στις περισσότερες περιπτώσεις η διαφοροποιήσεις δεν είναι σημαντικές, αλλά για κάποια κράματα αλουμινίου με σίδηρο προκαλεί αλλαγή φάσης σε ενδομεταλλικές ενώσεις.

Πολύ λίγα μπορούν να γίνουν για να εξαλειφθούν αυτές οι διαφοροποιήσεις. Για παράδειγμα, 50% ελάττωση της ταχύτητας χύτευσης δεν είχε καθόλου αποτελέσματα όσον αφορά την μικροδομή και την μορφολογία των ενδομεταλλικών φάσεων.

Η σύσταση είναι η βασική παράμετρος για την διαμόρφωση της μικροδομής. Για το ρυθμό απόψυξης οι βασικές παράμετροι είναι η σύσταση, οι διαστάσεις του χυτού και η θερμική αγωγιμότητα του κράματος.

[19]

Διαφορισμός

Σε μεγάλες πλάκες και λοιπά προϊόντα της DC Χύτευσης, παρατηρείται σημαντική διακύμανση στην σύσταση. Τα στοιχεία που διαμορφώνουν ευτηκτικά με το αλουμίνιο αυξάνονται σε συγκέντρωση μακριά από την επιφάνεια της πλάκας-χυτού και το κέντρο μένει ελαφρυμένο. Αυτή η διαφορά στην σύσταση είναι πιθανόν να προκαλέσει διαφοροποιήσεις και στις ιδιότητες του χυτού καθώς ελάσσεται σε φύλλο.

Η κεντρική περιοχή του χυτού είναι ένα σύνολο μεγαλύτερων και μικρότερων κόκκων και δενδριτικών αποστάσεων αντίστοιχα. Ο μηχανισμός του διαφορισμού, είναι η

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

κίνηση του στερεού (γενικώς καθαρότερο σε αλουμίνιο από το υγρό) ή του τήγματος κατά την στερεοποίηση. Η ισχυρή ροή του μετώπου στερεοποίησης δύναται να μετακινήσει κόκκους προς το κέντρο του χυτού και επίσης προκαλεί την συγκέντρωση υγρού-τήγματος στο κέντρο του χυτού με αποτέλεσμα την αργή απόψυξή του και κατ' επέκταση χονδρότερους κρυστάλλους. Όσο το μέγεθος της πλάκας-χυτού αυξάνεται τόσο εντονότερο είναι το φαινόμενο.

[19]

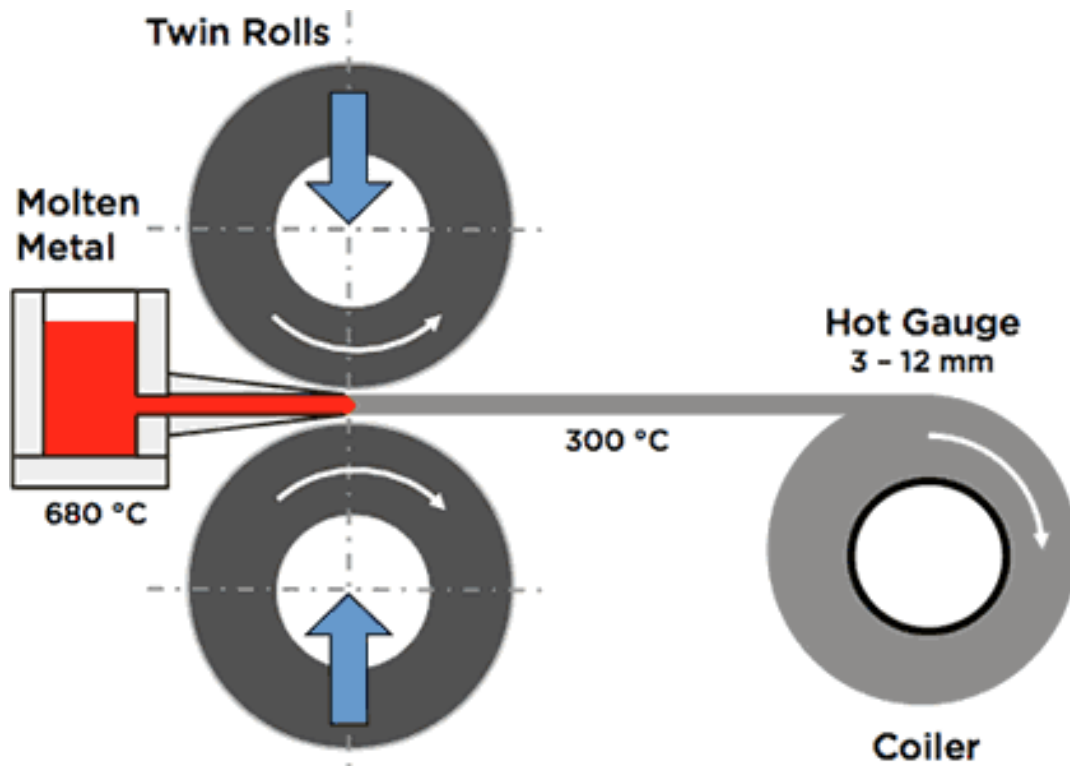
Η απάντηση των επιπρόσθετων αντιδράσεων κατά την στερεοποίηση και τον σχηματισμό των επιπλέον φάσεων κατά την διάρκεια της στερεοποίησης μη-ισορροπίας στην Χύτευση DC προκαλείται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων από το φαινόμενο που καλείται διαφορισμός-μικροδιαφορισμός. Μικροδιαφορισμός είναι η ανομοιογένεια της χημικής σύστασης στην κλίμακα του μεγέθους ενός κόκκου. Όλοι οι μετασχηματισμοί φάσεων κατά την στερεοποίηση συμβαίνουν λόγω διάχυσης και γι' αυτό τον λόγο απαιτούν κάποιο χρόνο για να ολοκληρωθούν. Ο βαθμός ολοκλήρωσής τους ελέγχεται από της παρακάτω τρεις διαδικασίες διάχυσης:

- Διάχυση των κραματικών στοιχείων προς το τήγμα και από την διεπιφάνεια υγρού-στερεού ώστε να δημιουργηθεί διαφορά στην ισορροπία των συγκεντρώσεων σύμφωνα με την διαφορά στις συγκεντρώσεις των στερεών και υγρών φάσεων που αντικατοπτρίζονται από την γραμμές Solidus και Liquidus στο διάγραμμα ισορροπίας φάσεων.
- Διάχυση στο τήγμα κοντά στην διεπιφάνεια υγρού-στερεού ώστε να απωθήσει το διάλυμα ή το διαλυτικό μέσο και αυτό να συσσωρευτεί στο μέτωπο της στερεοποίησης.
- Διάχυση στην στερεή φάση ώστε να εξισορροπιστεί το συγκέντρωση του διαλύματος μέσα στον στερεοποιημένο κόκκο.

[3]

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

II.4. Twin Roll Casting



Εικόνα 5: Σχεδιάγραμμα αναπαράστασης της λειτουργίας της TRC

Η πρώτες ευρεσιτεχνίες σχετικά με το TRC σαν μια μέθοδο παραγωγής λεπτών υμένων-φύλλων απευθείας από το τήγμα, χρονολογείται από το τα μέσα του 19^{ου} αιώνα. Χρειάστηκα περισσότερα από 100 χρόνια για να έχουμε εμπορική-βιομηχανική εφαρμογή της μεθόδου. Στις αρχές τις δεκαετίας του 1950' η εταιρία Hunter Engineering κατασκεύασε ένα μηχάνημα Twin Roll για προϊόντα φύλλα αλουμινίου.

Από το παραπάνω μηχάνημα μέχρι σήμερα τόσο ο εξοπλισμό όσο και οι τεχνικές χύτευσης εξελίχθηκαν βαθμωτά αλλά δεν υπήρξε μεγάλη εξέλιξη στο κομμάτι της βαθύτερης λειτουργίας της μεθόδου. [1]

Περιγραφή Λειτουργίας

Ένα μηχάνημα TRC είναι ουσιαστικά ένα 2-High έλαστρο στο οποίο το αντικείμενο προς έλαση είναι το υγρό μέταλλο-κράμα και το προϊόν ένα χυτό φύλλο λεπτού πάχους.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Πριν το μέταλλο φτάσει στο στάδιο της χύτευσης ακολουθεί διαδικασία τήξης του και έπειτα μεταφοράς του. Στην πρώτη είναι πολύ πιθανή η ανάγκη προσθήκης κραματικών στοιχείων για το επιθυμητό κράμα-προϊόν. Ενώ κατά την διάρκεια της δεύτερης διενεργούνται διεργασίες απαέρωσης, φιλτραρίσματος και προσθήκης εκλεπτυντή όπου αυτές είναι απαραίτητες.

Έπειτα το τήγμα διανέμεται εντός των ραούλων μέσω ενός κεραμικού tip διαφορετικής γεωμετρίας αναλόγως του κράματος.

Η στερεοποίηση ξεκινάει όταν το υγρό μέταλλο έρχεται σε επαφή με τα υδρόψυκτα ράουλα του ελάστρου, και λόγω της προοδευτικά μειούμενης απόστασης των ραούλων (roll bite) το υπό στερεοποίηση μέταλλο εξαναγκάζεται σε συνεχή επαφή με τα ράουλα. Από την στιγμή της πλήρους στερεοποίησης, το υλικό υπομένει μία ελαφριά εν θερμώ μεταλλοτεχνική διεργασία πριν εξέλθει από το άνοιγμα των ραούλων. [1]

Κατά την TRC του κράματος υπάρχει ο κίνδυνος της προσκόλλησης μέρος του χυτού στα ράουλα, ειδικά σε περιπτώση που το υλικό των ραούλων είναι τέτοιο που επιδεινώνει την προσκολλησιμότητα, για τον λόγο αυτό τα περισσότερα μηχανήματα TRC χρησιμοποιούν λιπαντικά που αποκλείουν τετοια ενδεχόμενα. Με τον τρόπο αυτό βέβαια έχουμε επιπτώσεις στην θερμική αγωγιμότητα μεταξύ των ραούλων και του χυτού καθώς το λιπαντικό μέσο λειτουργεί θερμομονωτικά. Έτσι, θεωρείται βέλτιστη κατάσταση αυτή κατά την οποία δεν γίνεται χρήση λιπαντικού και επίσης δεν έχουμε προσκόλληση χυτού στα ράουλα κατάσταση που για να επιτευχθεί γίνεται χρήση ειδικών υλικών για την κατασκευή των ραούλων.

Χρήση κραμάτων με μεγάλο εύρος στερεοποίησης αποφεύγονται για χύτευση με TRC καθώς το υγρό δεν δύναται να στερεοποιηθεί πρώτου αφήσει την περιοχή μεταξύ των ραούλων(roll bite).

Τα προϊόντα της TRC είναι συνήθως κιονοειδούς μικρόδομής και δενδριτικής ανάπτυξης. Προσπάθειες γίνονται για την κατασκευή μηχανημάτων TRC που θα δίνουν προϊόντα συμμετρικής μικροδομής που παρουσιάζουν καλύτερες ιδιότητες.

[21]

Παράμετροι Διαδικασίας

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Οι κύριες παράμετροι του TRC είναι η ταχύτητα της έλασης-χύτευσης, η απόσταση και τοποθέτηση του *tip* σχετικά με τα ράουλα (*roll bite*), η διαφορετική ταχύτητα περιστροφής των ραούλων, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και η θερμοκρασία του τήγματος.

Οι παραπάνω παράμετροι συντελούν και στον καθορισμό του βαθμού ψύξης που για την TRC κυμαίνεται από 100-1000° C.

[22]

- *Ταχύτητα Έλασης:* Αν οι υπόλοιπες παράμετροι θεωρηθούν σταθερές τότε η ταχύτητα έλασης έχει άμεση επίδραση στην στερεοποίηση του τήγματος. Όσο η ταχύτητα αυξάνεται η απώλεια θερμότητας του χυτού με τα ράουλα μειώνεται, καθώς μειώνεται ο χρόνος επαφής των δύο. Η ταχύτητα επιπλέον επηρεάζει την δύναμη διαχωρισμού των ραούλων, η οποία μειώνεται δραματικά με την αύξηση της ταχύτητας.
- *Θέση tip ως προς roll bite:* Εάν το *tip* τοποθετηθεί με τρόπο τέτοιο που να έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη διάρκεια επαφής του τήγματος με ένα από τα δύο ράουλα τότε η πλευρά αυτή θα παρουσιάζει διαφορετική μικροδομή από την άλλη χάρη στην μεγαλύτερη απώλεια θερμότητας και γρηγορότερη ελάττωση της θερμοκρασίας.
- *Η διαφορετική ταχύτητας περιστροφής των ραούλων:* Εάν ένα από τα δύο ράουλα περιστρέφεται με μικρότερη(διαφορετική) ταχύτητα από το άλλο τότε η πλευρά του χυτού που θα έρθει σε επαφή με αυτό θα εξέλθει από το *roll bite* με μικρότερη θερμοκρασία από την άλλη.

(Η δύο παραπάνω παράμετροι συνήθως ρυθμίζονται ανάλογα η μία της άλλης ώστε να έχουμε τελικά προϊόν με μεγαλύτερη αρμονία και ομοιομορφία στην μικροδομή του και τις ιδιότητές του)

- *Συντελεστής μεταφοράς Θερμότητας:* Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες σχετικούς με την θερμοκρασία και την τραχύτητα των επιφανειών επαφής. Μπορεί να θεωρηθεί πως για ελαφρώς υπέρθερμο τήγμα ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παραμένει σταθερός κατά την διάρκεια της TRC. Μεγαλύτεροι συντελεστές έχουν σαν αποτέλεσμα ταχύτερη απαγωγή της θερμότητας και κατ' επέκταση μικρότερες ταχύτητες έλασης, μικρότερης πίεσης των ραούλων καθώς και καλύτερη μικροδομή.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

- *Θερμοκρασία Τήγματος:* Η αρχική θερμοκρασία του τήγματος επηρεάζει την δύναμη διαχωρισμού των ραούλων, η αύξηση της πρώτης έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της δεύτερης(παρόλα αυτά όχι στον βαθμό που αυτή μειώνεται από την με της διαφοράς ραούλων - τήγματος) αύξηση της θερμοκρασιακή. Η υψηλή θερμοκρασία τήγματος οδηγεί σε μεγάλη οξειδωση της επιφάνειας του χυτού λόγω μεγάλης θερμοκρασίας εξόδου από το roll bite.

[21]

Πλεονεκτήματα Μεθόδου

Η μέθοδος του Twin Roll Casting συνδυάζει σε μία συνεχή διαδικασία την στερεοποίηση με την εν θερμώ έλαση για την παραγωγή λεπτών φύλλων που είναι απευθείας ικανά να τυλιχθούν σε ρόλους.

Στα πλεονεκτήματά της συγκαταλέγονται

- το χαμηλό κόστος επένδυσης,
- το χαμηλό κόστος λειτουργίας
- η καλή μικροδομή των προϊόντων της πυκνές δενδριτικές διακλαδώσεις βελτιωμένο διαφορισμό και κατ' επέκτασιν καλές μηχανικές ιδιότητες. [23]

Centerline Segregation (CLS)

Αποτελεί έντονο φαινόμενο διαφορισμού των κραματικών στοιχείων στο κεντρικό κομμάτι του φύλλου κατά την χύτευση. Η ένταση αυτή εξαρτάται από πολλές παραμέτρους σχετικές με την χύτευση, με τις κυριότερες να είναι η σύστασή του κράματος και η ταχύτητα της χύτευσης-έλασης. Όσον αφορά την δεύτερη όσο μειώνεται τόσο εντονότερο είναι το φαινόμενο. [24]

Ο μηχανισμός του φαινομένου είναι ο εξής. Η στερεοποίηση λαμβάνει χώρα από το εξωτερικό του φύλλου προς το εσωτερικό, σχηματίζοντας προϊόν φύλλο με σκληρό εξωτερικό στρώμα και μαλακότερο κέντρο. Ορισμένα στοιχεία είναι επιρρεπή στο διαχωρισμό. Καθώς η στερεοποίηση εξελίσσεται, ίχνη αυτών των στοιχείων παραμένουν στη ζώνη liquidus και στερεοποιούνται τελευταία. Δεδομένου ότι η κεντρική γραμμή της πλάκας είναι η τελευταία ζώνη που στερεοποιείται, αυτή η περιοχή τείνει να εμπλουτίζεται στα στοιχεία αυτά. Και έτσι έχουμε ζώνες στο κέντρο του φύλλου με έντονο μακροδιαφορισμό.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

[25]

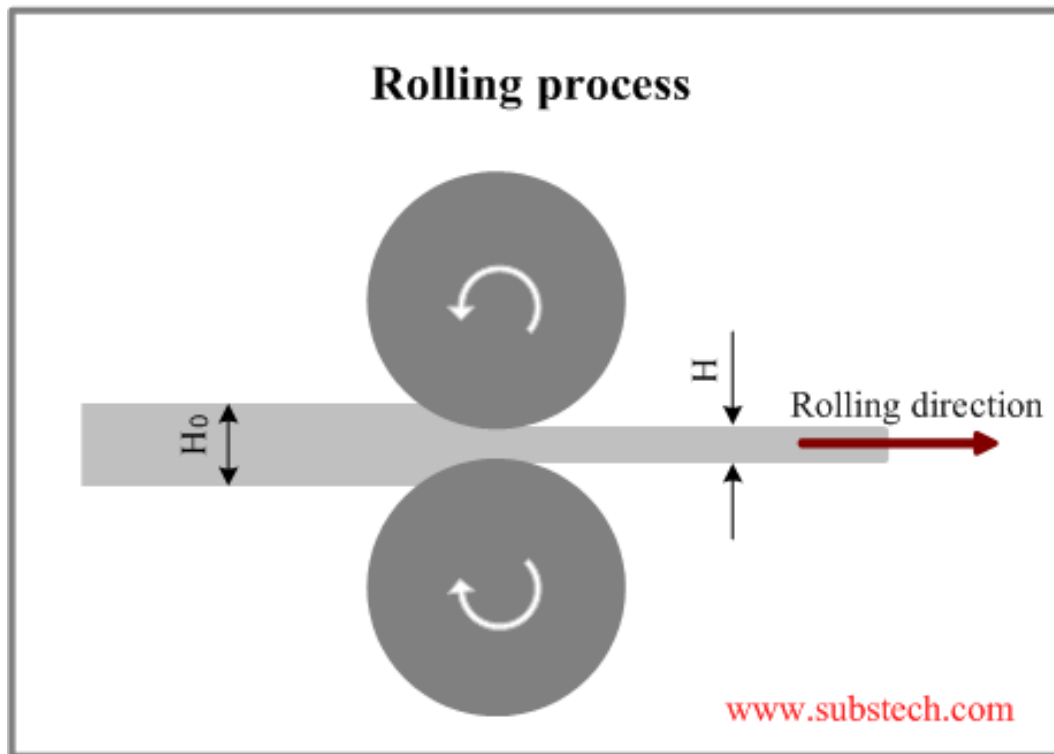
Εφαρμογές Κραμάτων Αλουμινίου – Προϊόντων TRC

- Φύλλα (αλουμινόχαρτο οικιακής χρήσης, επιφάνεια σφράγισης γιαουρτιού, φύλλα για εναλλάκτες, περιτυλίγματα καλωδίων, εύκαμπτους κυλίνδρους)
- Βαμμένα Φύλλα
- Πτερύγια θερμικού εναλλάκτη.
- Σκεύη και συσκευασίες που εμπεριέχουν τροφές.
- Λιθογραφικά φύλλα.

[22]

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Κεφάλαιο III: Έλαση



Εικόνα 6: Διαδικασία της Έλασης

III. 1. Γενικά

Η διαδικασία της πλαστικής παραμόρφωσης μετάλλων μέσω του περάσματος τους διαμέσου ραούλων είναι γνωστή σαν έλαση. Είναι η πλέον διαδεδομένη μεταλλοτεχνική μέθοδος καθώς χαρακτηρίζεται από υψηλή παραγωγικότητα και ακριβή έλεγχο των διαστάσεων και ιδιοτήτων του τελικού της προϊόντος. Η παραμόρφωση μετάλλων και κραμάτων διαμέσου ραούλων, χαρακτηρίζεται από από υψηλές θλιπτικές πιέσεις και συμπίεση που προκαλούν τα ράουλα και από διατμητικές τάσεις στην επιφάνεια επαφής μετάλλου-ραούλων ως αποτέλεσμα της τριβής μεταξύ της τριβής τους. Οι δυνάμεις αυτές είναι και υπεύθυνες για το τράβηγμα του μετάλλου μέσα στα ράουλα.

Ο αρχικός υποβιβασμός των πλακών συμβαίνει συνήθως μέσω Θερμής Έλασης. Με επιπλέον βήματα και περάσματα διάμεσο ραούλων μικρότερων αποστάσεων με την διαδικασία της θερμής έλασης έχουν σαν αποτέλεσμα τελικά προϊόντα με επιπλέον υποβιβασμό πάχους όπως φύλλα και λεπτά πλακίδια. Η Ψυχρά Έλαση αποτελεί πλέον μια διαδικασία μεγάλης σημασίας για την βιομηχανία. Η ψυχρά έλαση δίνει

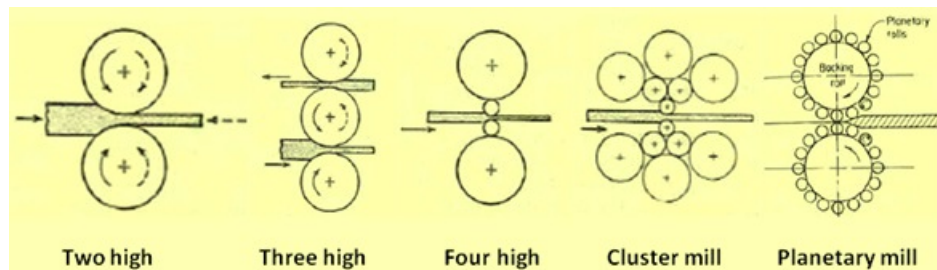
Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

τελικά προϊόντα όπως φύλλα, foil, strips με πολύ καλές επιφάνειες και αυξημένες μηχανικές αντοχές ενώ ταυτόχρονα διατηρείται η ικανότητά της να έχει υψηλό έλεγχο των διαστάσεων των προϊόντων.

Σε γενικές γραμμές, η έλαση ξεκινά με μία χυτή πλάκα ή μια ηλεκτροεπιμεταλλομένη πλάκα. Παρόλα αυτά υψηλής πυκνότητα φύλλα δύνανται να παραχθούν μέσω έλασης κατευθείαν από σκόνη, η μέθοδος αυτή ονομάζεται έλαση κόνεως. Κατά την μέθοδο αυτή μεταλλική σκόνη εισάγεται μεταξύ των ραούλων και συμπιέζεται σε μία λωρίδα-strip, η οποία είναι στην συνέχεια υπόκειται επιπλέον εν θερμώ ή εν ψυχρό κατεργασία και κύκλους ανόπτησης. Το μεγάλο της πλεονέκτημα είναι ή εξάλειψη των αρχικών βηματικών υποβιβασμών με την αντίστοιχη οικονομία που επιφέρει αυτό σε κόστος εξοπλισμού. Επιπλέον πλεονεκτήματα είναι στους τομείς την μηχανικών ιδιοτήτων και της βελτιωμένης μικροδομής.

Στην συμβατική θερμής και ψυχρά έλαση ο στόχος είναι η μείωση του πάχους του μετάλλου. Συνήθως, εξαιρετικά μικρή είναι η αύξηση του πλάτους, και έτσι η ελάττωση του πάχους οδηγεί σε αύξηση του μήκους.

Τύποι Ελάστρων



Εικόνα 7: Τύποι Ελάστρων

Ένα έλαστρο αποτελείται βασικά από τα ράουλα, τα ρουλεμάν και την στέγαση που εμπεριέχει τα μέρη αυτά και μια κινητήριο δύναμη-κινητήρα που προκαλεί την ισχύ στα ράουλα και ελέγχει την ταχύτητα περιστροφής τους. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στα ράουλα είναι εξαιρετικά υψηλές και έτσι η κατασκευή τους πρέπει να είναι υψηλών απαιτήσεων και η κινητήρες τους υψηλών ισχύων.

Τα έλαστρα διαχωρίζονται ανάλογα με τον αριθμό και την διάταξη των ραούλων που τα αποτελούν. Η απλούστερη και συχνότερα απαντώμενη διάταξη είναι αυτή του two-high roll δύο δηλαδή αντικρυστών ραούλων ίδιου μεγέθους και ίδιας ταχύτητας περιστροφής τόσο σε διεύθυνση όσο και σε μέτρο. Σημαντική βελτίωση της

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

παραγωγικότητας αυτής της διάταξης επέφερε το two high reversing mill όπου δίνει την δυνατότητα η έλαση να συμβαίνει εμπρός πίσω διαμέσου του ελάστρου με την εναλλαγή της διεύθυνσης περιστροφής των ραούλων. Ένας άλλος τύπος ελάστρου είναι το three-high mill, όπου αποτελείται από ένα πάνω και ένα κάτω ράουλα και ένα ενδιάμεσο που κινητοποιείται μέσω τριβής.

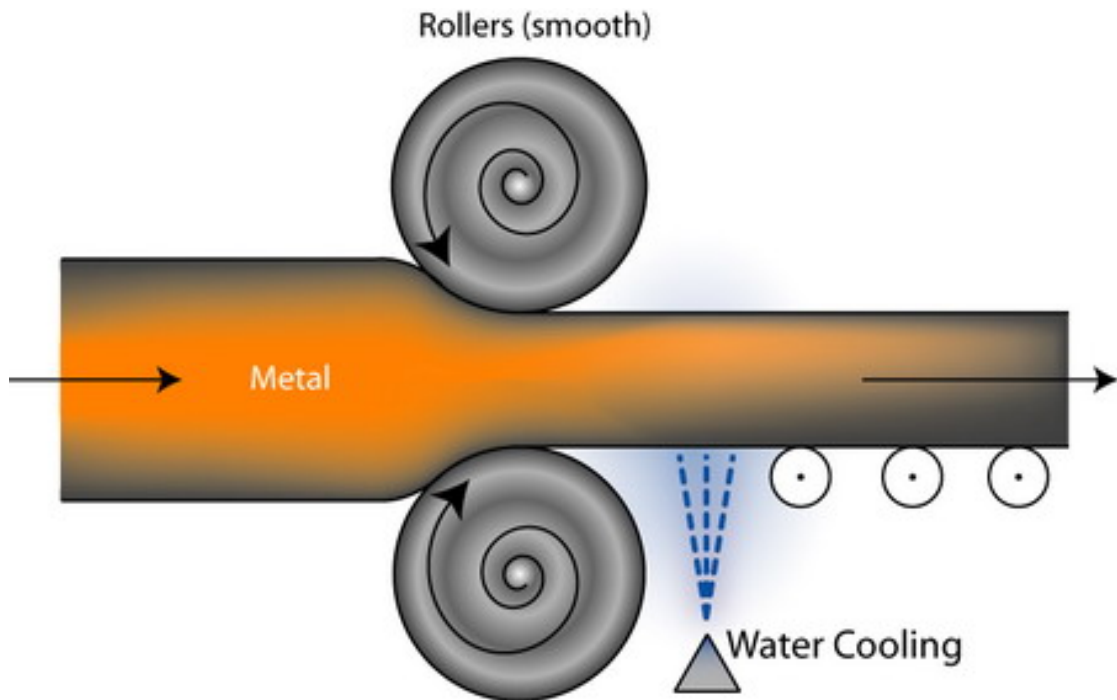
Μεγάλη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για την έλαση επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ραούλων μικρών διαμέτρων. Φυσικά, τα μικρά ράουλα έχουν μικρότερη αντοχή και ακαμψία απ' ότι τα μεγαλύτερα. Γι' αυτό και πρέπει να υποστηρίζονται από ράουλα μεγαλύτερης διαμέτρου. Το απλούστερο τέτοιο έλαστρο είναι το four-high mill, αποτελούμενο από δύο μικρά ράουλα για την έλαση και δύο μεγαλύτερα υποστηρικτικά. Τα cluster έλαστρα είναι τέτοιοι τύποι ελάστρων όπου τα μικρά ράουλα έλασης υποστηρίζονται από δύο μεγαλύτερα έλαστρα υποστήριξης.

Για υψηλή παραγωγικότητα είναι συχνό φαινόμενο η εγκατάσταση μία σειράς ελάστρων του ενός μετά το άλλο σε συνέχεια. Καθώς ένας διαφορετικός υποβιβασμός συμβαίνει σε κάθε έλαστρο, η ταχύτητα του προϊόντος θα έχει διαφορετικές ταχύτητες για κάθε στάδιο της έλασης. Κάθε σετ ραούλων κάθε ελάστρου πρέπει να περιστρέφεται με ταχύτητα ίδια με αυτήν που το προϊόν κινείται από την προηγούμενη έλαση.

Ένας άλλος τύπος ελάστρου είναι το Πλανητικό, η διάταξη αυτή αποτελείται από ένα ζεύγος βαρειών υποστηρικτικών ραούλων που περιβάλλονται από έναν μεγάλο αριθμό μικρών πλανητικών ραούλων. Το μεγάλο πλεονέκτημα της διάταξης αυτής είναι ότι κατά την θερμή έλαση δίνει την δυνατότητα μεγάλης μείωσης του πάχους σε μόνο έναν υποβιβασμό. Στην διάταξη αυτή είναι αναγκαία η τοποθέτηση ραούλων τροφοδοσίας που θα προωθούν την πλάκα στο κυρίων Πλανητικό έλαστρο, και ραούλων μετά για βελτιωμένες ιδιότητες επιφάνειας. [26]

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

III.2. Θερμή Έλαση



Εικόνα 8: Διαδικασία Θερμής Έλασης

Η πρώτη εν θερμώ κατεργασία για τα περισσότερα μεταλλικά προϊόντα είναι η θερμή έλαση. Τα έλαστρά αυτής είναι συνήθως τύπου αντιστρεφόμενου two-high. Ο σκοπός της κατεργασίας είναι ο υποβιβασμός της αρχικής πλάκας σε μικρότερο πάχος μέχρι αυτό να μειωθεί σε βαθμό που θα έχουμε φύλλο. Τα αρχικά πάσα της έλασης συνήθως αφορούν μικρούς υποβιβασμούς. Για την διατήρηση του πλάτους του φύλλου και της γεωμετρίας του η πλάκα περιστρέφεται 90 μοίρες κάθε φορά πριν περάσει στο επόμενο πάσο. Ένα αντιστρεφόμενο έλαστρο έχει σχετικά μικρό ρυθμό παραγωγικότητας για τον λόγο ότι η πλάκα μπορεί να περάσει εμπρός πίσω το πάσο 10 με 20 φορές. Όταν το ζητούμενο είναι η υψηλή παραγωγικότητα πίο εύστοχη είναι η επιλογή ενός universal ελάστρου. Αυτός ο τύπος ελάστρου είναι ουσιαστικά ένα διπλό έλαστρο αποτελούμενο από δυο μεγάλα ράουλα που προκαλούν τον υποβιβασμό του πάχους και άλλα κάθετα που ελέγχουν το πλάτος κατά τον υποβιβασμό του πάχους.

Τα προϊόντα της Θερμής Έλασης παράγονται απευθείας από πλάκες είτε από αναθερμασμένες πλάκες. Ψαλιδισμένες-κομμένες πλάκες από την έλαση σε οριζόντια διεύθυνση και έπειτα απόξεσης τον πλευρικών γωνιακών επιφανειών. Τα άκρα έλασης είναι οι κανονικές άκρες που παράγονται κατά την θερμή έλαση μεταξύ

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

των οριζόντιων τελικών ραούλων. Κάθε πλάκα που προκύπτει από θερμή έλαση έχει δύο άκρα έλασης και δύο αποξασμένες και λείες άκρες. Στα universal έλαστρα οι πλάκες αποξαινούνται στο τέλος και μόνο στις άκρες.

Τα προϊόντα της θερμής έλασης χωρίζονται σε φύλλα και λωρίδες με μόνη ουσιαστικά διαφορά το πάχος που στην περίπτωση της λωρίδας δεν ξεπερνά τα 600mm. Στα μοντέρνα έλαστρα που παράγουν πλατιά φύλλα μέσω θερμής έλασης, η συστοιχία έχει ως εξής, οι πλάκες αρχικά περνούν από ένα υποβιβαστικό έλαστρο έπειτα από μία διάταξη 4 four-high ελάστρων, ακολουθεί μία διάταξη 6 four-high ελάστρων. Το τελικό προϊόν είναι πλατύτερο της πλάκας, τότε το τελευταίο πάσο λειτουργεί σαν παράπλευρο έλαστρο, το οποίο αυξάνει το μήκος της πλάκας μέσω cross rolling. Τα τραχιά ράουλα (με εγκοπές, σχέδια κτλ.) συνήθως συνδυάζονται με κάθετα ράουλα υπεύθυνα για τον έλεγχο του πλάτους. Νερό ψεκάζεται με μεγάλη πίεση στα φύλλα ώστε να αφαιρεθούν ατέλειες. Τέλος, υπάρχει είτε ένα ιπτάμενο πριόνι που θα κόψει το φύλλο είτε ένα μηχάνημα τύλιξης που θα συλλέγει το φύλλο σε μορφή ρολού.

Στα βιομηχανία μη-σιδηρούχων κραμάτων και μετάλλων τα μηχανήματα-έλαστρα που χρησιμοποιούνται για να εκτελέσουν την θερμή έλαση είναι συνήθως λιγότερο εξειδικευμένα από αυτά για την θερμή έλαση σιδηρούχων. Επιπλέον, το μικρό μέγεθος των πλακών και η χαμηλότερες πιέσεις ροής επιτρέπουν την χρήση μικρότερων ραούλων. Two-high και three-high χρησιμοποιούνται συνήθως για την θερμή έλαση μη σιδηρούχων μετάλλων παρόλο που four-high έλαστρα χρησιμοποιούνται συχνά για την θερμή έλαση αλουμινίου. [26]

Παράμετροι Διαδικασίας

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την μικροδομή και της ιδιότητες των προϊόντων της θερμής έλασης είναι:

- η θερμοκρασία εισόδου της πλάκας
- η ταχύτητα της έλασης
- η θερμοκρασία των ραούλων
- ο λόγος της μέσου πάχους προς το μήκος επαφής στο διάκενο των ραούλων

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Όταν η θερμοκρασία εισόδου της πλάκας είναι μικρή τότε η

διασπορά στο μέγεθος των κόκκων είναι πολύ πιο ομοιόμορφη. Αυτό οφείλεται στην θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ την επιφάνειες και του κέντρου της πλάκας η οποία είναι μικρότερη για μικρότερες θερμοκρασίες έλασης. Επιπλέον η μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας είναι πολύ μικρότερη για χαμηλότερη θερμοκρασία έλασης. [27]

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την μηχανική της διαδικασία της θερμής έλασης είναι:

- Η διάμετρος του ραούλου
- Η αντίσταση στην παραμόρφωση του μετάλλου όπως διαμορφώνεται από την μεταλλουργία του, την θερμοκρασία του και τον βαθμό της έντασης
- Η τριβή μεταξύ του μετάλλου και του ραούλου
- Η ύπαρξη εμπρόσθιας και οπίσθιας τάσης στην επιπεδοποίηση του φύλλου

Η αύξηση της διαμέτρου του ραούλου αυξάνει το φορτίο της έλασης, το οποίο επίσης αυξάνεται αν το φύλλο που μπαίνει προς έλαση γίνει λεπτότερο. Αναπόφευκτα φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι σε κάποιο πάχος η αντίσταση στην παραμόρφωση του μετάλλου θα φτάσει και θα ξεπεράσει το φορτίο της έλασης γεγονός που θα απαγορεύσει τον παραπάνω υποβιβασμό του πάχους. Έτσι, η διάμετρος του ραούλου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο να καθορίζει το ελάχιστο δυνατό πάχος που μπορεί να επιτευχθεί για συγκεκριμένο έλαστρο. Τόσο το φορτίο όσο και το τόξο επαφής της έλασης μειώνονται με την αύξηση των ραούλων. Γι' αυτό τον λόγο για μικρά σε διάμετρο ράουλα, που έχουν σκληραθεί ώστε να αντέχουν την πίεση που τους ασκούν τα υποστηρικτικά τους, είναι δυνατόν να υποβιβάσουν το πάχος σε μικρότερο βαθμό μέχρι η επιπεδοποίηση του ραούλου να γίνει σημαντική.

Η τριβή μεταξύ μετάλλου και ραούλου είναι μεγάλης σημασίας παράμετρος της Θερμής Έλασης. Η δύναμη της τριβής είναι υπεύθυνη για την προώθηση του μετάλλου ενδιάμεσω των ραούλων. Επίσης, ένα μεγάλο μέρος του φορτίου της έλασης μπορεί να χρεωθεί στις δυνάμεις της τριβής. Έτσι, υψηλή τριβή οδηγεί σε υψηλό φορτίο έλασης και μεγάλη ανοχή σε σπασίματα στις άκρες της πλάκας. Η τριβή δεν είναι ομοιόμορφη σε όλη την πλάκα. Και διότι η ακριβή μέτρηση του

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

μεγέθους των δυνάμεων της τριβής σε κάθε σημείο της πλάκας είναι αδύνατη,
οδηγούμεστε να θεωρήσουμε μια σταθερά τριβής. Στην θερμή έλαση η σταθερά αυτή
κυμαίνεται από 0,2 και περισσότερο ανάλογα και με το λιπαντικό μέσο. [26]

Κεφάλαιο 4: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Οι σημερινές απαιτήσεις της αγοράς των κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου έχουν οδηγήσει σε συνεχή πίεση για εξέλιξη των μεθόδων παραγωγής με στόχο την αύξηση της παραγωγικότητας, την βελτίωση της ποιότητας και την μείωση του κόστους παραγωγής.

Έτσι, γίνονται συγκρίσεις διαφόρων μεθόδων παραγωγικής διαδικασίας ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη ανά περίπτωση. Δύο από αυτές της μεθόδους και μάλιστα αυτές που απαντώνται συχνότερα στην σύγχρονη βιομηχανία είναι αυτή της χύτευσης με την μέθοδο του Direct Chill Casting σε μεγάλες πλάκες και έπειτα η θερμή έλαση αυτών και αυτή της μεθόδου χύτευσης-έλασης του Twin Roll Casting απευθείας σε φύλλο-έλασμα.

Το 1995 ο P.Cook μελέτησε την εξέλιξη της μεθόδου του Twin Roll Casting. Αρχικά, παρατήρησαν ότι η μέθοδος είχε πολλούς περιορισμούς τόσο στην ποιότητα του προϊόντος της όσο και στην παραγωγικότητά της. Όμως βελτιώσεις στον μηχανολογικό εξοπλισμό της μεθόδου έδειξαν βελτίωση των περιορισμών καθώς και την ελπίδα της συνεχούς βελτίωσης της μεθόδου. [1]

Το 2000 ο M.Yun ανέλυσε την διαδικασία του Twin Roll Casting για κράματα Αλουμινίου εστιάζοντας στα ελαττώματα των προϊόντων της καταλήγοντας ότι τα κυριότερα είναι τα επιφανειακά ελαττώματα – ρήγματα, τα εσωτερικά ελαττώματα, η τραχύτητα της επιφάνειας. [28]

Το 2001 ο P.D.Lee μελέτησε την εμφάνιση πόρων κατά την Direct Casting κραμάτων αλουμινίου και κατέληξαν ότι ο μηχανισμός του φαινομένου ελέγχεται από την απόσταση του σημείου του χυτού από την επιφάνεια της ψύξης, όσο μεγαλύτερη η απόσταση τόσο μεγαλύτερη και η εμφάνιση του πορώδους. [29]

Τον Οκτώβριο του 2007 ο R.Nadella μελέτησε το φαινόμενο του μακροδιαφορισμού για κράματα αλουμινίου και κατέληξαν ότι ο μηχανισμός του φαινομένου ελέγχεται από δύο ουσιώδης συνθήκες, την σχετική κίνηση μεταξύ στερεού και υγρού και τον πλούτο της υγρής φάσης σε κραματώσεις. [30]

Το 2009 ο J. P. Martins παρουσίασε άρθρο με σκοπό την σύγκριση του κράματος διαμόρφωσης αλουμινίου 3003 ανάλογα με την μέθοδο παραγωγικής διαδικασίας

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

(συνεχής ή ημισυνεχής). Κατέληξαν ότι κατά την διαδικασία του TRC υπήρξε πλαστική παραμόρφωση με αποτέλεσμα διαμόρφωσης μικρών κόκκων και ασυνεχειών. Επίσης, κατέληξαν ότι οι διαφορετικές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων οφείλονται σε σκλήρυνση από παραμόρφωση, σκλήρυνση μέσω εκλέπτυνσης κόκκων και σκλήρυνση με κατακρήμνιση διασκορπισμάτων - dispersoids. [31]

Το 2012 σε συνέδριο του TMS ο H.P.Otoman παρουσίασε άρθρο με σκοπό την σύγκριση του κράματος διαμόρφωσης αλουμινίου 1050 ανάλογα με την μέθοδο χύτευσης (DC ή TRC). Κατέληξαν ότι η μέθοδος του DC παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιογένεια ενώ η μέθοδος του TRC ελαφρώς καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και έντονο μακροδιαφορισμό με αποτέλεσμα εμφάνιση ζώνης CLS. [32]

Άρθρο του Total Materia του 2014 συγκρίνει τις μηχανικές ιδιότητες κραμάτων διαμόρφωσης της σειράς 5xxx ανάλογα με τις μεθόδους χύτευσης (DC ή TRC). Καταλήγει ότι οι μέθοδος TRC προσδίδει ελαφρώς καλύτερες μηχανικές ιδιότητες-αντοχές με την εξαίρεση του 5052 όπου η αντοχή του προϊόντος της DC είναι μεγαλύτερη. [33]

Το 2014 N.S.Barekar με άρθρο τους στο Materials and Manufacturing Processes μελέτησαν την επίδραση του TRC στην μικροδομή των κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου. Κατέληξαν ότι η μικροδομή ελέγχεται από την φύση του τήγματος μετάλλου που τροφοδοτεί την μηχανή-caster, στην απόσταση των ραούλων και το εύρος στερεοποίησης του κράματος. Προτείνουν περαιτέρω έρευνα για μεγαλύτερο αριθμό κραμάτων και παρατηρούν εσωτερικά ελαττώματα με κυριότερο αυτό του κεντρικό μακροδιαφορισμού (CLS). [34]

Το 1999 σε άρθρο του στο European Aluminium Association ο Dr. -Ing. Catrin Kammer συζητάει και συγκρίνει της μεθόδους συνεχούς χύτευσης TRC και DC καταλήγει ότι η μέθοδος του TRC πλεονεκτεί της συμβατικής μεθόδου DC και θερμής έλασης μέσω της εξοικονόμησης παραγωγικών σταδίων:

Conventional technology: Melting-> DC-casting -> hot rolling -> coiling -> cold rolling (possibly including several thermal treatments) -> foil

Continuous technology: Melting -> strip casting -> coiling -> cold rolling (possibly including several thermal treatments) -> foil

Γεγονός που όπως σημειώνει οδηγεί σε μείωση του κόστους παραγωγής, μείωση του χρόνου παραγωγής, ελαφριά μείωση της κατανάλωση-οξειδωσης μετάλλου. Στα,

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

αρνητικά της μεθόδου σημειώνει ότι για κράματα με μεγάλα εύρη στερεοποίησης παρατηρείται μεγάλη πιθανότητα επιφανειακών σφαλμάτων και ρηγματώσεων. [35]

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση και η σύγκριση των μικροδομών του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 ανάλογα με την παραγωγική του διαδικασία, συνεχή μέσω της μεθόδου του TRC ή ημισυνεχή μέσω της μεθόδου DCC και έπειτα θερμής έλασης.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Μέρος Δεύτερο

Κεφάλαιο IV: Πειραματικό

IV.1. Πειραματικές τεχνικές

IV.1.1. Μελετώμενο υλικό

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι το κράμα διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 που έχει παραχθεί από την Ελ.Β.Αλ., με χημική σύσταση Al 97,5%, Mn 1,2%, Si 0,41%, Fe 0,54.

Τα δοκίμια ήταν 8 σε αριθμό, τα 1, 1' και 1'' πάρθηκαν από φύλλο προϊόν TRC και κόπηκαν σε διαφορετικές διεύθυνσης, το 1 παράλληλα προς την χύτευση-έλαση το 1' κάθετα προς την χύτευση-έλαση, το 1'' παράλληλα προς την χύτευση-έλαση αλλά σε διαφορετικό επίπεδο από το 1 και το 1'' κάθετα προς την χύτευση-έλαση, αυτό συνέβη ώστε να εξαιρεθεί η υποψία για διαφορετικά αποτελέσματα στην μέτρηση των δενδριτών ανάλογα με την διεύθυνση της κοπής. Τα δοκίμια 2, 3 και 4 πάρθηκαν από πλάκα προϊόν χύτευσης DC, το 2 είναι από το κέντρο της πλάκας, το 3 από την επιφάνεια της και το 4 από ένα ενδιάμεσο σημείο της, αυτό συνέβη για να συνδεθεί ο ρυθμός απόψυξης με το μέγεθος των δενδριτικών αποστάσεων, για παράδειγμα ο ρυθμός αυτός είναι πολύ μικρότερος στο κέντρο της πλάκας σε σύγκριση με την επιφάνεια της. Τα δοκίμια 5 και 6 πάρθηκαν από φύλλο προϊόν Θερμής Έλασης, το 5 παράλληλα προς την έλαση και το 6 κάθετα.

Πίνακας 7: Πίνακας Δοκιμίων

| Δοκίμια | Μέθοδος | Κοπή |
|---------|-------------------|-------------------------------------|
| 1 | Twin Roll Casting | Παράλληλα στην διεύθυνση της Έλασης |
| 1' | Twin Roll Casting | Παράλληλα στην διεύθυνση της Έλασης |
| 1'' | Twin Roll Casting | Κάθετα στην διεύθυνση της Έλασης |
| 2 | Direct Casting | Στο κέντρο της πλάκας |
| 3 | Direct Casting | Στην επιφάνεια της πλάκας |
| 4 | Direct Casting | Σε ενδιάμεσο σημείο της πλάκας |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

| | | |
|---|-------------|-------------------------------------|
| 5 | Hot Rolling | Παράλληλα στην διεύθυνση της Έλασης |
| 6 | Hot Rolling | Κάθετα στην διεύθυνση της Έλασης |

IV.1.2. Μεταλλογραφική Προετοιμασία

Αποτελείται από τα εξής στάδια:

- Κοπή, η διαδικασία αυτή είχε πραγματοποιηθεί πριν ξεκινήσουν τα εργαστήρια. Πρόκειται για το προφανές, κόψιμο του υλικού σε κατάλληλα τεμάχια ώστε να χρησιμοποιηθούν ως δοκίμια.
- Εγκιβωτισμός, το κομμένο τεμάχιο-δοκίμιο εσωκλείεται σε ρυτίνη σε σχήμα κυλίνδρου ώστε να έχουμε βελτιωμένη πρόσφυση στο δοκίμιο για το υπόλοιπο της διαδικασίας. Ο εγκιβωτισμός είναι χρονοβόρος καθώς για την σωστή ολοκλήρωσή του απαιτείται συνολική πήξη της ρητίνης. Η ρυτίνη περιέχει κάποιες επιπλέον σταγόνες διαλυτικού υλικού.
- Λείανση, διαδικασία που στοχεύει στην εξομάλυνση της επιφάνειάς του δοκιμίου που θα οδηγηθεί σε επισκόπηση. Αυτό συμβαίνει με την γραμμική μείωση των γραμμών λείανσης με την χρήση ειδικών βαθμονομημένων χαρτιών λείανσης (επιφάνειά με κόκκους καρβιδίων ή άλλων πολύ σκληρών υλικών) 220, 400, 800, 1200, 2000 κόκκων / τετραγωνική ίντσα. Τα χαρτιά λείανσης τοποθετούνται σε περιστροφικό πλατό ειδικού μηχανήματος όπου περιστρέφονται με μεγάλες ταχύτητες (250 rpm) διοχετεύοντας ταυτόχρονα νερό και έτσι ερχόμενα σε επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου την παραμορφώνουν κατάλληλα. Όταν η γραμμές λείανσης είναι όλες παράλληλες μεταξύ τους, αλλάζουμε χαρτί προχωρώντας στο αμέσως πιο λεπτόκοκκο, και αλλάζουμε την διεύθυνση που κρατούσαμε το δοκίμιο κατά 90ο ώστε να αναιρεθούν η προηγούμενες γραμμές λείανσης από την λεπτότερες καθετές τους.
- Στίλβωση, σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η ολοκληρωτική απομάκρυνση των γραμμών λείανσης, του προηγούμενου βήματος, έχοντας έτσι αποτέλεσμα επιφάνειας καθρέπτη στο δοκίμιο. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση χαρτιού στίλβωσης (βελούδινη επιφάνεια) και αδαμαντόπαστας (6μm και 1μm). Η λειτουργία είναι ακριβώς η ίδια με αυτήν της λείανσης με την διαφορά ότι έχουμε μειωμένη ταχύτητα περιστροφής (150 rpm).

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

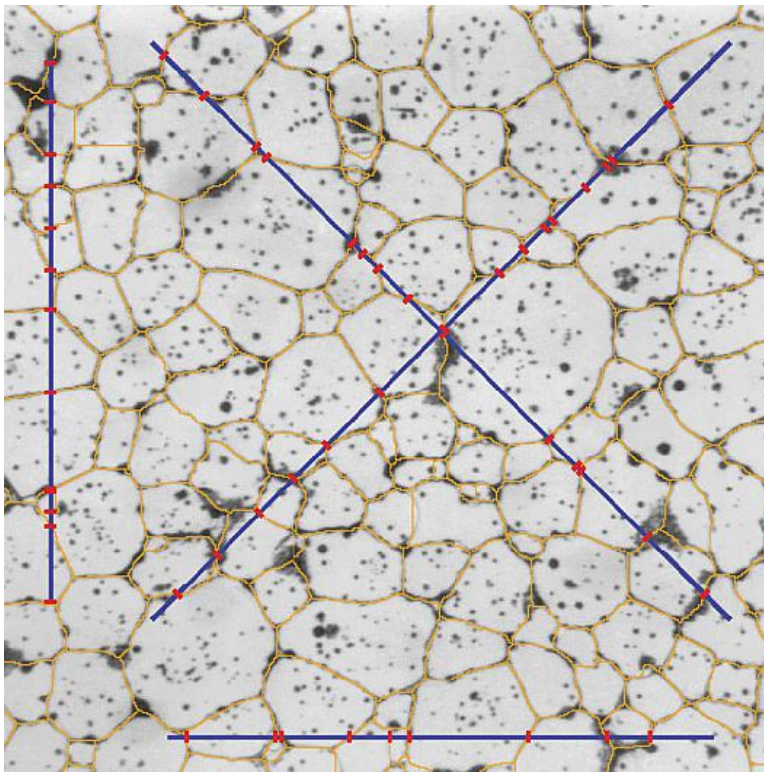
- Προσβολή, χωρίζεται σε δύο κατηγορίες την Χημική και την Ηλεκτροχημική. Σκοπός της είναι να εκμεταλλευτεί την διάβρωση που συμβαίνει στα όρια των κόκκων των μετάλλων ώστε να τα κάνει ορατά για την μικροσκοπική επισκόπηση.

IV.1.3. Οπτική μικροσκοπία

Η μεταλλογραφική εξέταση του δείγματος έγινε σε ανάστροφο μικροσκόπιο Nikon Epihot 300. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των φωτογραφιών είναι το Image Analysis. Για να αποκαλυφθεί η μικροδομή, τα δοκίμια βυθίζονται σε διάλυμα Kellers για προσβολή που σκοπό έχει την αποκάλυψη των δενδριτών, και προσβάλλονται ηλεκτροχημικά σε διάλυμα Barkers ώστε να αποκαλυφθούν τα όρια των κόκκων, για 80 και 120 δευτερόλεπτα αντίστοιχα.

Η ανάλυση των φωτογραφιών αφορούσε τις μετρήσεις:

- Των αποστάσεων των δενδριτικών κλάδων με την πρότυπη μέθοδο του ASTM Linear Intercept Method. Μετά από την προσβολή με Kellers. Στα δοκίμια από DC και TRC.



Εικόνα 9: ASTM LIM για μέτρηση κόκκων [5]

Η μέθοδος ASTM Linear Intercept Method λειτουργεί ως εξής:

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

- ευθύγραμμο τμήμα χαράσσεται σε φωτογραφία μικροδομής έχοντας αρχή το μέσο ενός δευτερογενούς δενδριτικού κλάδου και τέλος ένα άλλο μέσο δενδριτικού κλάδου.
- Έπειτα διαιρώντας το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος με τον αριθμό των δενδριτικών κλάδων μείον ένα (καθώς ξεκινώντας από το μέσο και τελειώνοντας στο μέσο το ευθύγραμμο τμήμα τέμνει ένα επιπλέον κλάδο ο οποίος δεν μετράτε) έχουμε το μέσο μέγεθος δευτερογενών δενδριτικών κλάδων – SDAS.
- Το μέγεθος των κόκκων με την πρότυπη μέθοδο του ASTM Linear Intercept Method διαδικασία όμοια με την προηγούμενη. Μετά από την προσβολή με Barkers. Σε όλα τα δοκίμια.
- Το ποσοστό των δεύτερων φάσεων σε κάθε δοκίμιο υπολογίστηκε με την χρήση του Image Analysis μέσω υποπρόγραμματος το οποίο διαχωρίζει βάσει χρώματος, όπου και οι β φάσεις εμφανίζονται σκουρότερες της κύριας μήτρας του Αλουμινίου.
Η μέθοδος αυτή λειτουργεί ως εξής:
- Φωτογραφία της μικροδομής επεξεργάζεται από υποπρόγραμμα του Image Analysis μέσω του οποίου μετρούνται τα σκουρότερα pixels της φωτογραφίας τα οποία και είναι οι ενδομεταλλικές φάσεις που παρουσιάζονται στο κράμα.
- Έπειτα μετράτε το σύνολο των pixels της φωτογραφίας, και με την διαίρεση των δύο προκύπτει το ποσοστό που η ενδομεταλλική φάση καλύπτει στην μικροδομή.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Μέρος Τρίτο

Κεφάλαιο V: Αποτελέσματα

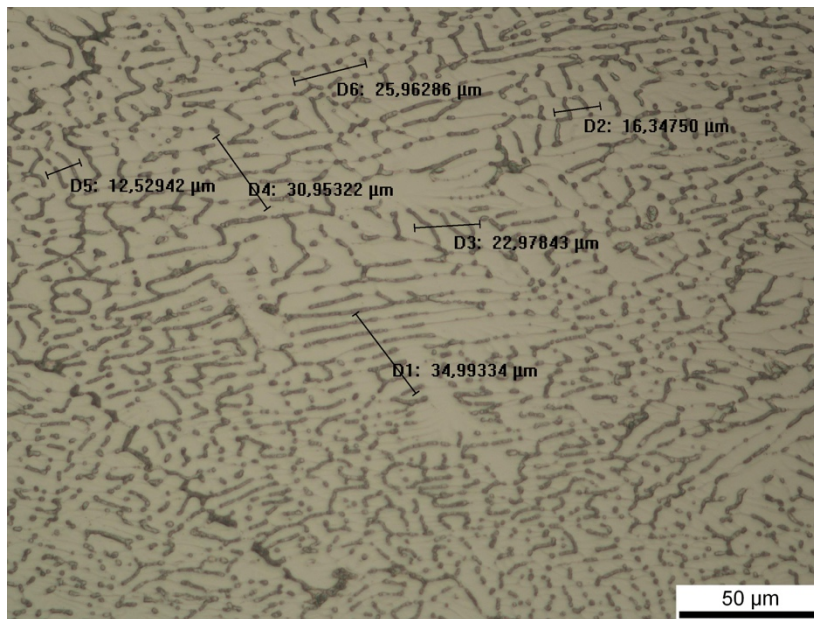
V.1 Αποτελέσματα Μικροσκοπίας

V.1.1. Αποτελέσματα SDAS, Κόκκων και β' φάσεων μεταξύ δοκιμίου από DC και από TRC.

Αποτελέσματα SDAS

Η σύγκριση των δενδριτικών αποστάσεων έγινε μέσω της Linear Intercept μεθόδου μετά από προσβολή με αντιδραστήριο Kellers. Μέσω της μεθόδου αυτής φέρουμε ευθεία γραμμή πάνω στην επιλεγμένη φωτογραφία με τέτοιο τρόπο ώστε αυτή να είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης των δευτερογενών Δενδριτών.

- Δοκιμιο 1:



Εικόνα 10: 1η φωτογραφία με μετρήσεις DAS

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.



Εικόνα 11: 3^η φωτογραφία με μετρήσεων DAS

Η παραπάνω μετρήσεις αφορούν το πρώτο δοκίμιο από TRC. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι φωτογραφίες είναι παρμένες από το Οπτικό Μικροσκόπιο με x50 μεγέθυνση.

Πίνακας 8: Πίνακας Αποτελεσμάτων SDAS για το δοκίμιο 1

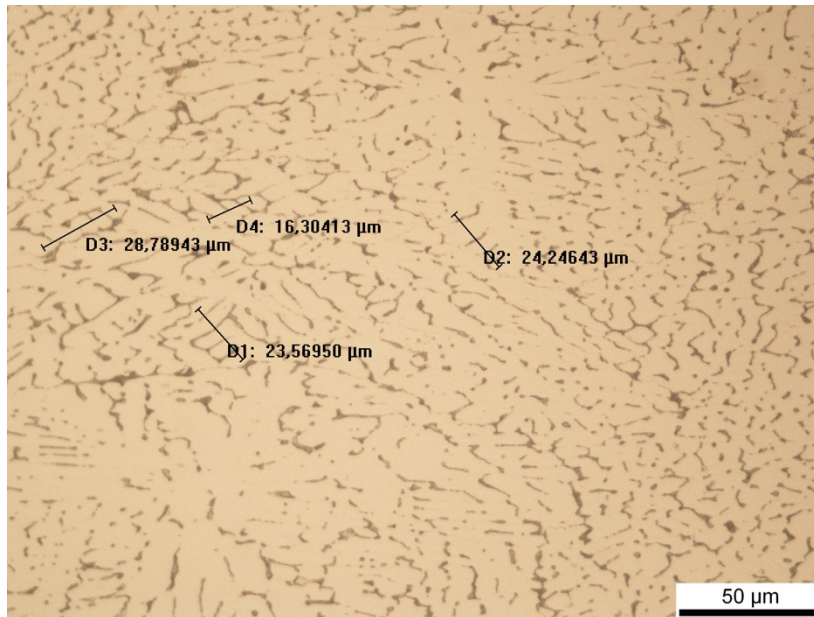
| Sample 1 : 3003 TRC | Kellers Etch 110 sec | DAS measurements x50 | |
|---------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Μετρήσεις | Αποστάσεις-Μετρήσεις (μm) | Αριθμός Δενδριτικών Κλάδων-Arm | DAS μετρήσεις(μm) |
| x50(1)-D1 | 34,99 | 8 | 4,99 |
| x50(1)-D2 | 16,34 | 3 | 8,17 |
| x50(1)-D3 | 22,97 | 4 | 7,65 |
| x50(1)-D4 | 30,95 | 5 | 7,73 |
| x50(1)-D5 | 12,52 | 3 | 6,26 |
| x50(1)-D6 | 25,96 | 4 | 8,65 |
| x50(2)-D1 | 18,83 | 4 | 6,27 |
| x50(2)-D2 | 25,64 | 6 | 5,12 |
| x50(2)-D3 | 14,11 | 3 | 7,05 |
| x50(2)-D4 | 14,35 | 3 | 7,17 |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

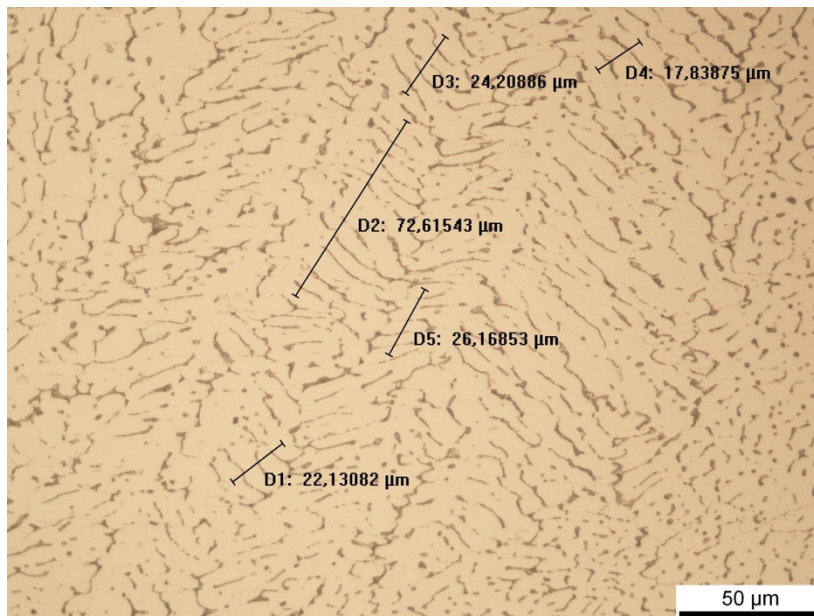
| | | | |
|-----------|-------|---|---------|
| x50(2)-D5 | 13,49 | 3 | 6,74 |
| x50(2)-D6 | 8,99 | 3 | 4,49 |
| x50(3)-D1 | 32,38 | 5 | 8,09 |
| x50(3)-D2 | 17,02 | 4 | 5,67 |
| x50(3)-D3 | 17,99 | 4 | 5,99 |
| x50(3)-D4 | 22,33 | 4 | 7,44 |
| x50(3)-D5 | 12,78 | 3 | 6,39 |
| X50(4)-D2 | 19,31 | 5 | 4,82 |
| X50(4)-D3 | 10,8 | 3 | 5,4 |
| X50(4)-D4 | 14,35 | 3 | 7,17 |
| X50(4)-D5 | 12,14 | 3 | 6,07 |
| X50(5)-D1 | 50,51 | 6 | 10,1 |
| X50(5)-D2 | 32,83 | 5 | 8,2 |
| X50(5)-D3 | 15,38 | 4 | 5,12 |
| X50(5)-D4 | 13 | 3 | 6,5 |
| X50(5)-D5 | 21,77 | 5 | 5,44 |
| X50(5)-D6 | 34,15 | 4 | 11,38 |
| X50(5)-D7 | 12,72 | 3 | 6,36 |
| | | | Average |
| | | | 6,8 |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

- Δοκίμιο 1':



Εικόνα 12: 1η φωτογραφία με μετρήσεις SDAS



Εικόνα 13: 3^η φωτογραφία με μετρήσεις SDAS

Η παραπάνω μετρήσεις αφορούν το δεύτερο(1') δοκίμιο από TRC. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι φωτογραφίες είναι παρμένες από το Οπτικό Μικροσκόπιο με x50 μεγέθυνση.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

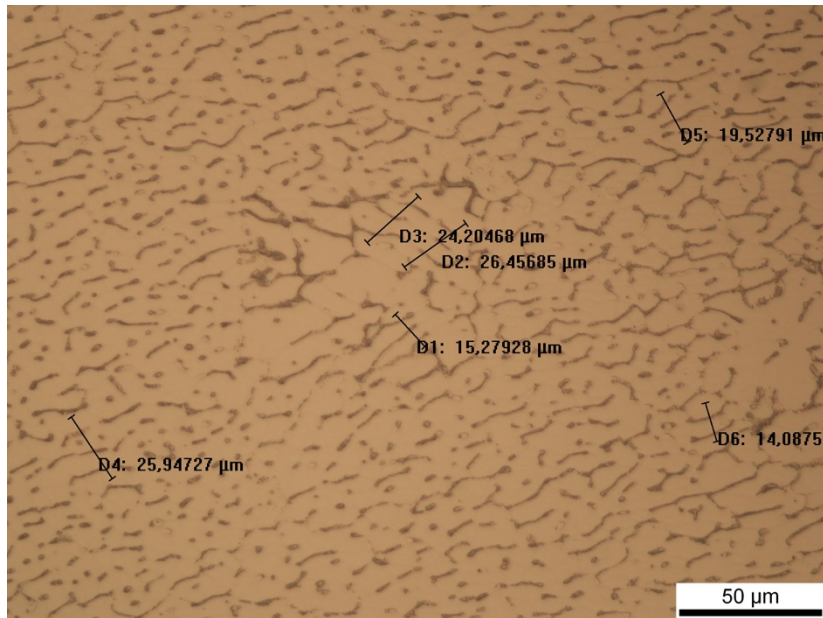
Πίνακας 9: Πίνακας Αποτελεσμάτων SDAS για το δοκίμιο 1'

| Sample 1' : 3003 TRC | Kellers Etch 110 sec | DAS measurements x50 | |
|-------------------------|---------------------------------------|---|--------------------------|
| <i>Μετρήσεις</i> | <i>Αποστάσεις- Μετρήσεις (μm)</i> | <i>Αριθμός Δενδριτικών Κλάδων-Arm</i> | <i>DAS μετρήσεις(μm)</i> |
| x50(1)-D1 | 23,56 | 5 | 5,89 |
| x50(1)-D2 | 24,24 | 5 | 6,06 |
| x50(1)-D3 | 28,78 | 5 | 7,19 |
| x50(1)-D4 | 16,3 | 4 | 5,43 |
| x50(2)-D1 | 39,72 | 7 | 6,62 |
| x50(2)-D2 | 21,98 | 4 | 7,33 |
| x50(2)-D3 | 16,01 | 4 | 5,33 |
| x50(2)-D4 | 13,13 | 4 | 4,37 |
| x50(2)-D5 | 13,11 | 3 | 6,55 |
| x50(3)-D1 | 22,13 | 4 | 7,37 |
| x50(3)-D2 | 72,61 | 13 | 6,05 |
| x50(3)-D3 | 24,2 | 5 | 6,05 |
| x50(3)-D4 | 17,83 | 3 | 8,91 |
| x50(3)-D5 | 26,16 | 6 | 5,23 |
| X50(4)-D1 | 14,97 | 4 | 4,99 |
| X50(4)-D2 | 18,96 | 4 | 6,32 |
| X50(4)-D3 | 21,9 | 5 | 5,47 |
| X50(4)-D4 | 29,23 | 5 | 7,3 |
| X50(5)-D1 | 13,67 | 4 | 4,55 |
| X50(5)-D2 | 8,87 | 3 | 4,43 |
| X50(5)-D3 | 12,72 | 4 | 4,24 |
| X50(5)-D4 | 14,31 | 5 | 3,57 |
| X50(6)-D1 | 14,22 | 4 | 4,74 |
| X50(6)-D2 | 9,93 | 3 | 4,96 |
| | | | |
| Centre | <i>Av. Centre</i> | <i>Av. Surface</i> | <i>Average</i> |

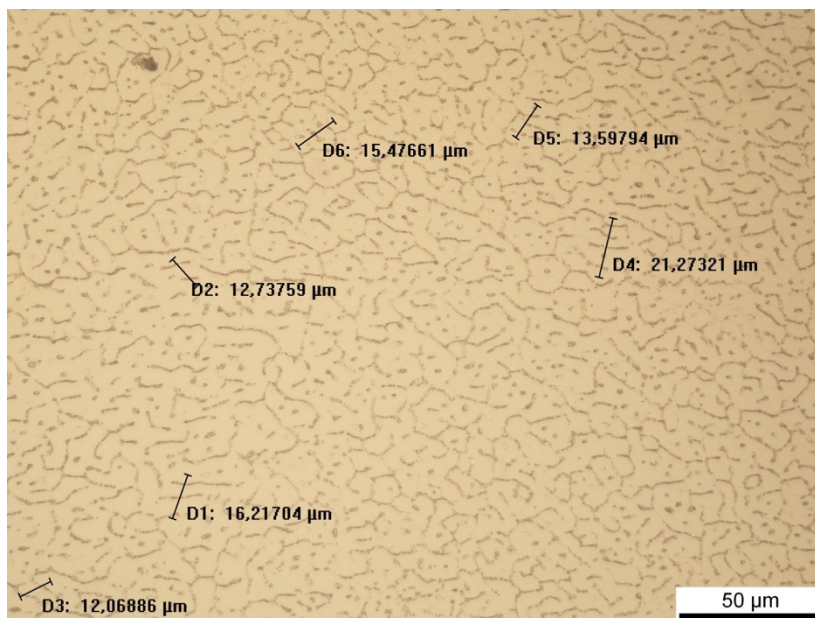
Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

| | | | |
|---------|------|------|------|
| Surface | 6,25 | 4,42 | 5,79 |
|---------|------|------|------|

- Δοκίμιο 1^ο:



Εικόνα 14: 1η φωτογραφία μετρήσεων SDAS



Εικόνα 15: 3^η φωτογραφία με μετρήσεων SDAS

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Η παραπάνω μετρήσεις αφορούν το δεύτερο(1'') δοκίμιο από TRC. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι φωτογραφίες είναι παρμένες από το Οπτικό Μικροσκόπιο με x50 μεγέθυνση.

Πίνακας 10: Πίνακας Αποτελεσμάτων SDAS για το δοκίμιο 1''

| Sample 1'' : 3003 TRC | Kellers Etch 110 sec | DAS measurements x50 | |
|-----------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| <i>Μετρήσεις</i> | <i>Αποστάσεις-Μετρήσεις (μm)</i> | <i>Αριθμός Δενδριτικών Κλάδων-Arm</i> | <i>DAS μετρήσεις(μm)</i> |
| x50(1)-D1 | 15,27 | 4 | 5,09 |
| x50(1)-D2 | 26,45 | 5 | 6,61 |
| x50(1)-D3 | 24,2 | 4 | 8,06 |
| x50(1)-D4 | 25,94 | 4 | 8,64 |
| x50(1)-D5 | 19,52 | 4 | 6,5 |
| x50(1)-D6 | 14,08 | 3 | 7,04 |
| x50(2)-D1 | 24,99 | 4 | 8,33 |
| x50(2)-D2 | 28,32 | 5 | 7,08 |
| x50(2)-D3 | 31,33 | 4 | 10,44 |
| x50(2)-D4 | 33,07 | 5 | 8,26 |
| x50(2)-D5 | 27 | 4 | 9 |
| x50(2)-D6 | 18,76 | 4 | 6,25 |
| x50(3)-D1 | 16,21 | 4 | 5,4 |
| x50(3)-D2 | 12,73 | 3 | 6,36 |
| x50(3)-D3 | 12,06 | 3 | 6,03 |
| x50(3)-D4 | 21,27 | 5 | 5,31 |
| x50(3)-D5 | 13,59 | 4 | 4,53 |
| x50(3)-D6 | 15,47 | 4 | 5,15 |
| X50(4)-D1 | 22,75 | 6 | 4,55 |
| X50(4)-D2 | 23 | 6 | 4,6 |
| X50(4)-D3 | 15,66 | 5 | 3,91 |
| X50(5)-D1 | 13,61 | 3 | 6,8 |
| X50(5)-D2 | 36,88 | 7 | 6,14 |

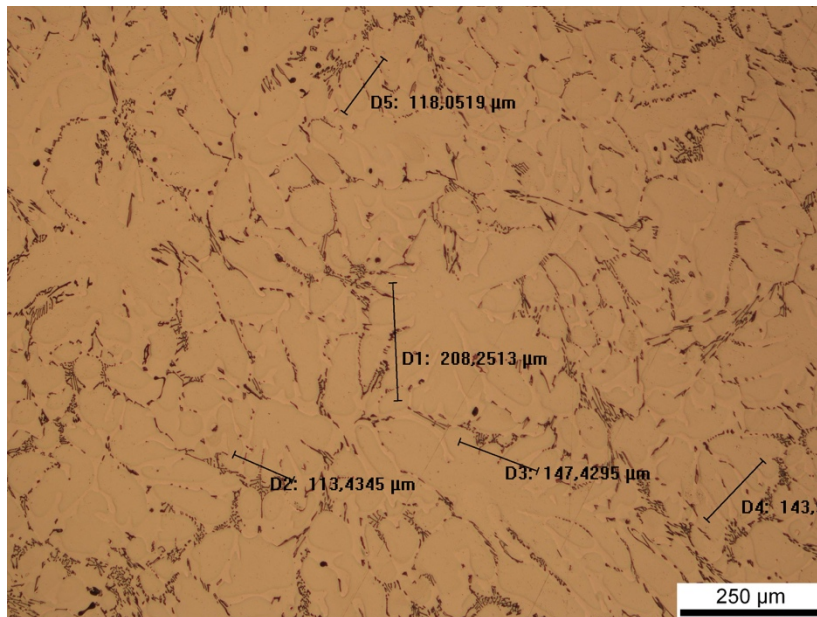
Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

| | | | |
|-----------|-------|---|----------------|
| X50(5)-D3 | 15,84 | 3 | 7,92 |
| X50(5)-D4 | 16,37 | 3 | 8,18 |
| X50(5)-D5 | 10,27 | 3 | 5,13 |
| X50(5)-D6 | 12,15 | 3 | 6,07 |
| X50(5)-D7 | 21,96 | 4 | 7,32 |
| X50(6)-D1 | 16,9 | 4 | 5,63 |
| X50(6)-D2 | 16,24 | 3 | 8,12 |
| X50(6)-D3 | 10,83 | 3 | 5,41 |
| X50(6)-D4 | 18,54 | 4 | 6,18 |
| X50(6)-D5 | 19,21 | 5 | 4,8 |
| X50(6)-D6 | 12,15 | 3 | 6,07 |
| X50(6)-D7 | 13,67 | 3 | 6,83 |
| X50(6)-D8 | 20,21 | 4 | 6,73 |
| | | | <i>Average</i> |
| | | | 6,51 |

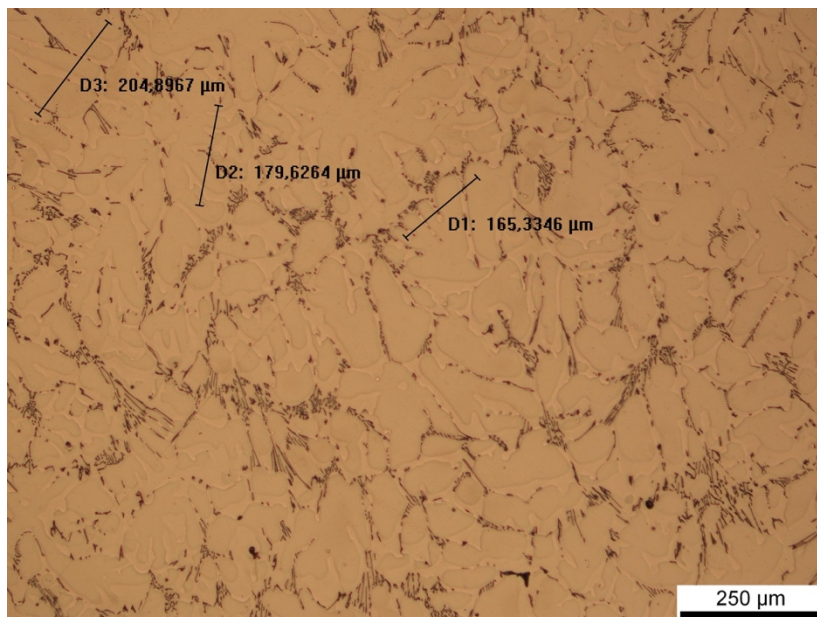
Ο μέσος όρος DAS των δοκιμών από TRC, είναι **6,3731393μm**. Από τους επιμέρους μέσο όρους των δοκιμών ανάλογα με την διεύθυνση της κοπής συμπεραίνουμε ότι η υποψία που ανέφερα προηγουμένως δεν επιβεβαιώνεται καθώς οι τιμές τους είναι εξαιρετικά κοντά.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

- Δοκίμιο 2:



Εικόνα 16:1η φωτογραφία μετρήσεων SDAS



Εικόνα 17:3η φωτογραφία με μετρήσεις SDAS

Η παραπάνω μετρήσεις αφορούν το δεύτερο(2) δοκίμιο από DC. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι φωτογραφίες είναι παρμένες από το Οπτικό Μικροσκόπιο με x5 μεγέθυνση η πρώτη και x10 οι υπόλοιπες.

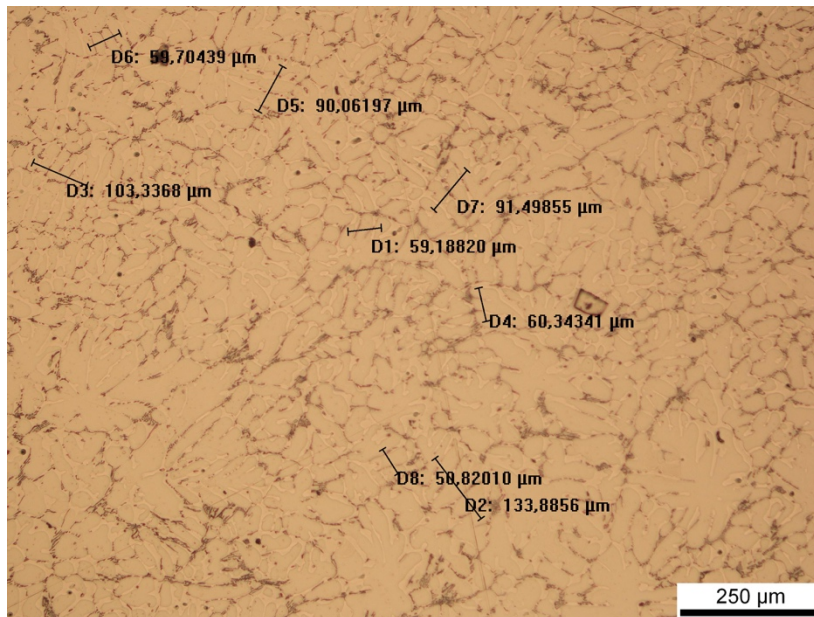
Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Πίνακας 11: Πίνακας Αποτελεσμάτων SDAS για το δοκίμιο 2

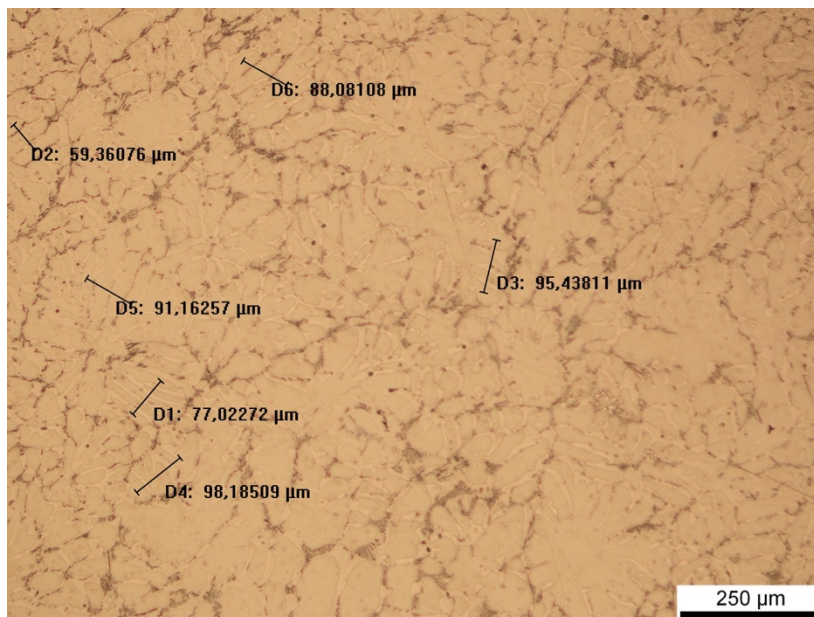
| Sample 2 : 3003 DC Centre | Kellers Etch 110 sec | DAS measurements x50 | |
|---------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| <i>Μετρήσεις</i> | <i>Αποστάσεις-Μετρήσεις (μm)</i> | <i>Αριθμός Δενδριτικών Κλάδων-Arm</i> | <i>DAS μετρήσεις(μm)</i> |
| x5(1)-D1 | 120,17 | 4 | 40,05 |
| x10(1)-D1 | 208,25 | 5 | 52,06 |
| x10(1)-D2 | 113,43 | 4 | 37,81 |
| x10(1)-D3 | 147,42 | 4 | 49,14 |
| x10(1)-D4 | 143,9 | 5 | 35,97 |
| x10(1)-D5 | 118,05 | 4 | 39,35 |
| X10(2)-D1 | 165,33 | 5 | 41,33 |
| X50(2)-D2 | 179,62 | 5 | 44,9 |
| X50(2)-D3 | 204,89 | 5 | 51,22 |
| X10(3)-D1 | 126,82 | 4 | 42,27 |
| X10(3)-D2 | 107,22 | 5 | 26,8 |
| X10(3)-D3 | 93,48 | 3 | 46,74 |
| X10(3)-D4 | 172,96 | 5 | 43,24 |
| X10(3)-D5 | 95,41 | 3 | 47,7 |
| X10(3)-D6 | 100,45 | 3 | 50,22 |
| X10(4)-D1 | 92,96 | 3 | 46,48 |
| X10(4)-D3 | 113,63 | 4 | 37,87 |
| X50(4)-D4 | 167,68 | 4 | 55,89 |
| X50(4)-D5 | 131,7 | 4 | 43,9 |
| X50(4)-D6 | 118,37 | 3 | 59,18 |
| | | | M.O. |
| | | | 44,61 |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

- Δοκίμιο 3:



Εικόνα 18: 1η φωτογραφία μετρήσεων SDAS



Εικόνα 19: 3η φωτογραφία με μετρήσεις SDAS

Η παραπάνω μετρήσεις αφορούν το δεύτερο(3) δοκίμιο από DC. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι φωτογραφίες είναι παρμένες από το Οπτικό Μικροσκόπιο με x10 μεγέθυνση εκτός της τελευταίας όπου έχει μεγέθυνση x20.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

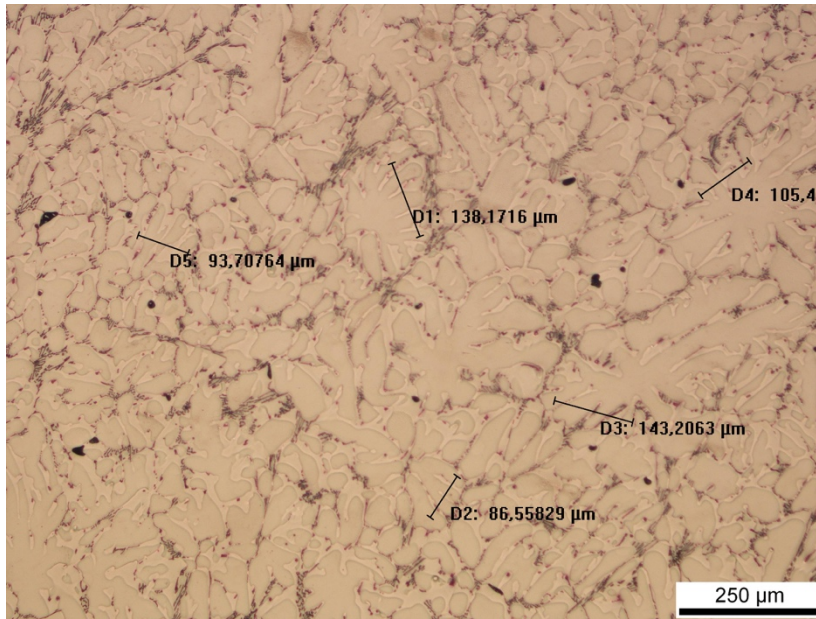
Πίνακας 12: Πίνακας Αποτελεσμάτων SDAS για το δοκίμιο 3

| Sample 3 : 3003 DC Surface | Kellers Etch 110 sec | DAS measurements x50 | |
|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| <i>Μετρήσεις</i> | <i>Αποστάσεις-Μετρήσεις (μm)</i> | <i>Αριθμός Δενδριτικών Κλάδων-Arm</i> | <i>DAS μετρήσεις(μm)</i> |
| x10(1)-D1 | 59,18 | 3 | 29,59 |
| x10(1)-D2 | 133,88 | 5 | 33,47 |
| x10(1)-D3 | 103,33 | 6 | 20,66 |
| x10(1)-D4 | 60,34 | 3 | 30,17 |
| x10(1)-D5 | 90,06 | 4 | 30,02 |
| x10(1)-D6 | 59,7 | 4 | 19,9 |
| x10(1)-D7 | 91,49 | 4 | 30,49 |
| x10(1)-D8 | 50,82 | 3 | 25,41 |
| X10(2)-D1 | 77,02 | 5 | 19,25 |
| X10(2)-D2 | 59,36 | 3 | 29,68 |
| X10(2)-D3 | 95,43 | 4 | 31,81 |
| X10(2)-D4 | 98,18 | 4 | 32,72 |
| X10(2)-D5 | 91,16 | 4 | 30,38 |
| X10(2)-D6 | 88,08 | 3 | 44,04 |
| X10(3)-D1 | 81,44 | 4 | 27,14 |
| X10(3)-D2 | 103,33 | 4 | 34,44 |
| X10(3)-D3 | 84,76 | 4 | 28,25 |
| X10(3)-D4 | 71,87 | 3 | 35,93 |
| X10(3)-D5 | 58,97 | 3 | 29,48 |
| X10(3)-D6 | 91,83 | 4 | 30,61 |
| X10(3)-D7 | 70,97 | 4 | 23,65 |
| x20(1)-D1 | 44,96 | 3 | 22,48 |
| x20(1)-D2 | 34,16 | 3 | 17,08 |
| x20(1)-D3 | 47,4 | 3 | 23,7 |
| x20(1)-D4 | 53,22 | 3 | 26,61 |
| x20(1)-D5 | 66,46 | 3 | 33,23 |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

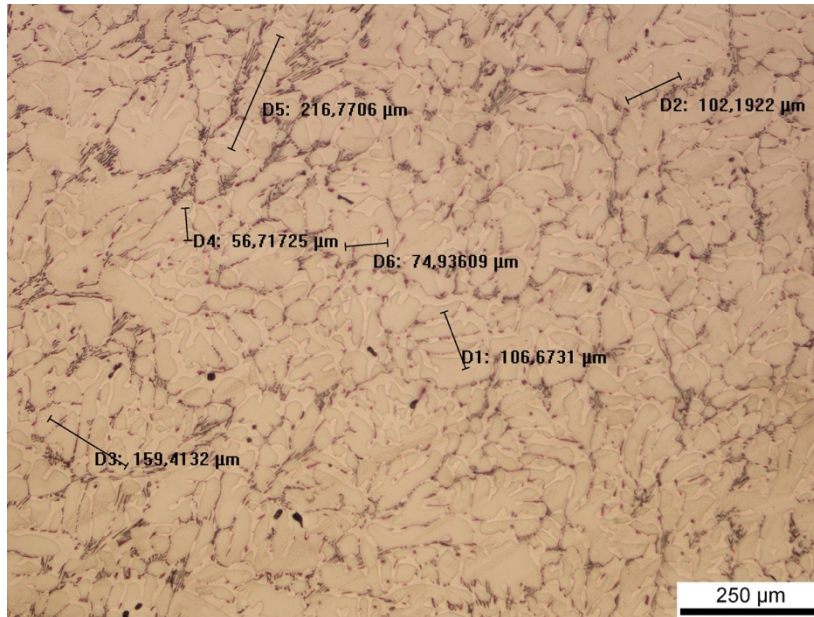
| | | | |
|-----------|-------|---|----------------|
| x20(1)-D6 | 59,31 | 3 | 29,65 |
| x20(1)-D7 | 61,58 | 3 | 30,79 |
| | | | Average |
| | | | 28,59 |

Δοκίμιο 4:



Εικόνα 20:1η φωτογραφία μετρήσεων SDAS

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.



Εικόνα 21:3η φωτογραφία με μετρήσεις SDAS

Η παραπάνω μετρήσεις αφορούν το δεύτερο(4) δοκίμιο από DC. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι φωτογραφίες είναι παρμένες από το Οπτικό Μικροσκόπιο με x10 μεγέθυνση.

Πίνακας 13: Πίνακας Αποτελεσμάτων SDAS για το δοκίμιο 4

| Sample 4 : 3003 DC Medium | Kellers Etch 110 sec | DAS measurements x50 | |
|---------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| <i>Μετρήσεις</i> | <i>Αποστάσεις-Μετρήσεις (μm)</i> | <i>Αριθμός Δενδριτικών Κλάδων-Arm</i> | <i>DAS μετρήσεις(μm)</i> |
| x10(1)-D1 | 138,17 | 5 | 34,54 |
| x10(1)-D2 | 86,55 | 4 | 28,85 |
| x10(1)-D3 | 143,2 | 4 | 47,73 |
| x10(1)-D4 | 105,41 | 4 | 35,13 |
| x10(1)-D5 | 93,7 | 4 | 31,23 |
| x10(2)-D1 | 143,74 | 5 | 35,93 |
| x10(2)-D2 | 68,66 | 3 | 34,33 |
| x10(2)-D3 | 57,65 | 3 | 28,82 |
| x10(2)-D4 | 68,44 | 3 | 34,22 |
| x10(2)-D5 | 124,38 | 4 | 41,46 |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

| | | | |
|-----------|--------|---|----------------|
| x10(2)-D6 | 69,81 | 3 | 34,9 |
| x10(2)-D7 | 162,14 | 6 | 32,42 |
| X10(3)-D1 | 106,67 | 4 | 35,55 |
| X10(3)-D2 | 102,19 | 4 | 34,06 |
| X10(3)-D3 | 159,41 | 5 | 39,85 |
| X10(3)-D4 | 56,71 | 3 | 28,35 |
| X10(3)-D5 | 216,77 | 8 | 30,96 |
| X10(3)-D6 | 74,93 | 3 | 37,46 |
| X50(4)-D1 | 139,57 | 5 | 34,89 |
| X50(4)-D2 | 53,94 | 3 | 26,97 |
| X50(4)-D3 | 100,45 | 5 | 25,11 |
| X50(4)-D4 | 114,51 | 5 | 28,62 |
| X50(4)-D5 | 65,11 | 3 | 32,55 |
| X50(4)-D6 | 61,72 | 3 | 30,86 |
| X50(5)-D1 | 135,32 | 5 | 33,83 |
| X50(5)-D2 | 78,89 | 3 | 39,44 |
| X50(5)-D3 | 112,55 | 3 | 56,27 |
| X50(5)-D4 | 116,24 | 4 | 38,74 |
| X50(5)-D5 | 58,71 | 3 | 29,35 |
| X50(5)-D6 | 242,13 | 8 | 34,59 |
| | | | <i>Average</i> |
| | | | 34,57 |

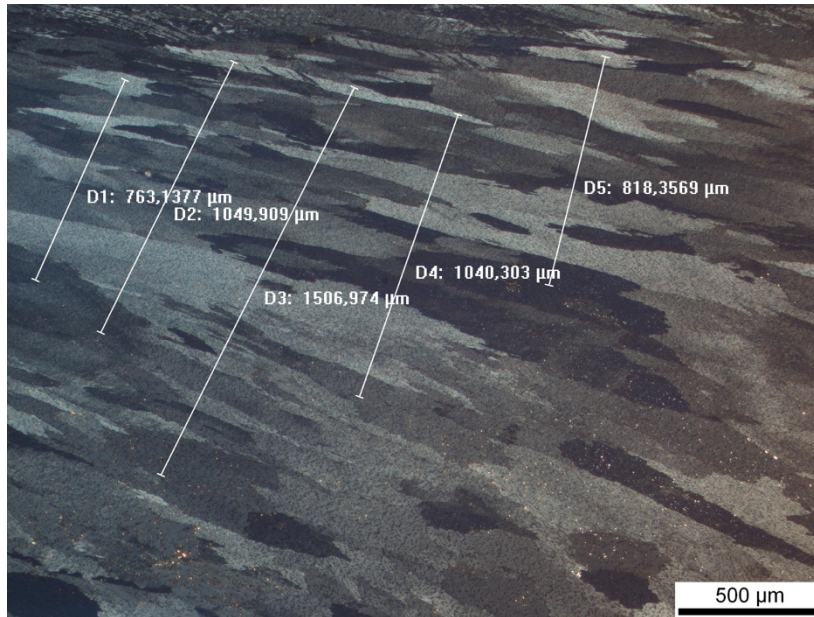
Ο μέσος όρος DAS των δοκιμών από DC, είναι **35,92μm**.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Αποτελέσματα κόκκων – Κοκκομετρίας

Η μέτρηση του μεγέθους των κόκκων έγινε μέσω χρήσης της Linear Intercept μεθόδου μετά από προσβολή με αντιδραστήριο Barkers και εξέταση στο μικροσκόπιο με πολωμένο φως.

- Δοκίμιο 1:



Εικόνα 22:1^η προς μέτρηση κόκκων

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.



Εικόνα 23:2η με μέτρηση κόκκων

Η παραπάνω μετρήσεις αφορούν το πρώτο δοκίμιο από TRC το οποίο εξετάζεται παράλληλα στην Έλαση-Χύτευση. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι φωτογραφίες είναι παρμένες από το Οπτικό Μικροσκόπιο με πολωμένο φώς σε μεγέθυνση x5.

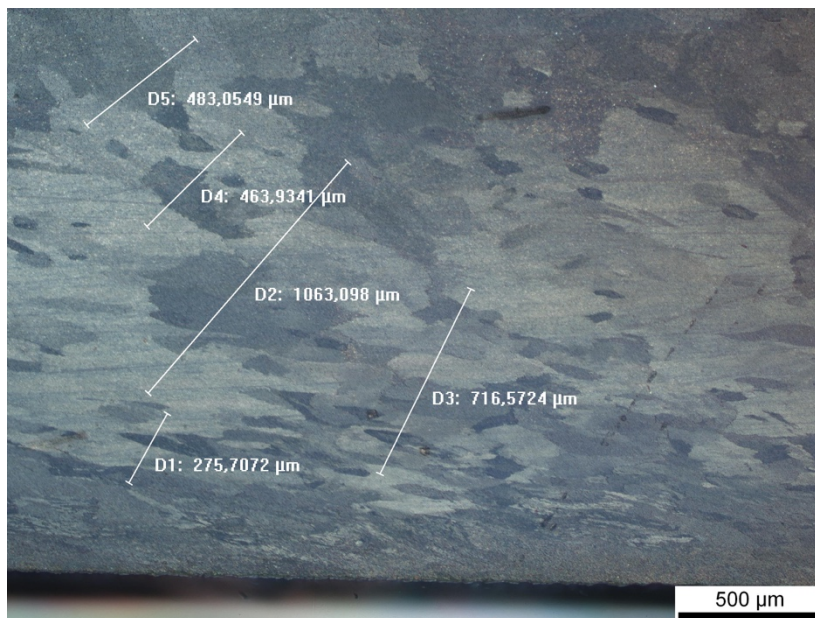
Πίνακας 14: Πίνακας Αποτελεσμάτων Κόκκων για το δοκίμιο 1

| Sample 1: 3003 TRC | Barkers Etch 120 sec | Grain Measurements | |
|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Μετρήσεις | Αποστάσεις- Μετρήσεις (μm) | Αριθμός κόκκων | Μετρήσεις κόκκων(μm) |
| x5(1)-D1 | 763,13 | 8 | 95,39 |
| x5(1)-D2 | 1049,9 | 11 | 95,44 |
| x5(1)-D3 | 1506,97 | 15 | 100,46 |
| x5(1)-D4 | 1040,3 | 9 | 115,58 |
| x5(1)-D5 | 818,35 | 9 | 90,92 |
| x5(2)-D1 | 763,13 | 8 | 95,39 |
| x5(2)-D2 | 1049,9 | 12 | 87,49 |
| x5(2)-D3 | 1506,97 | 16 | 94,18 |
| x5(2)-D4 | 1040,3 | 9 | 115,58 |
| x5(2)-D5 | 818,35 | 9 | 90,92 |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

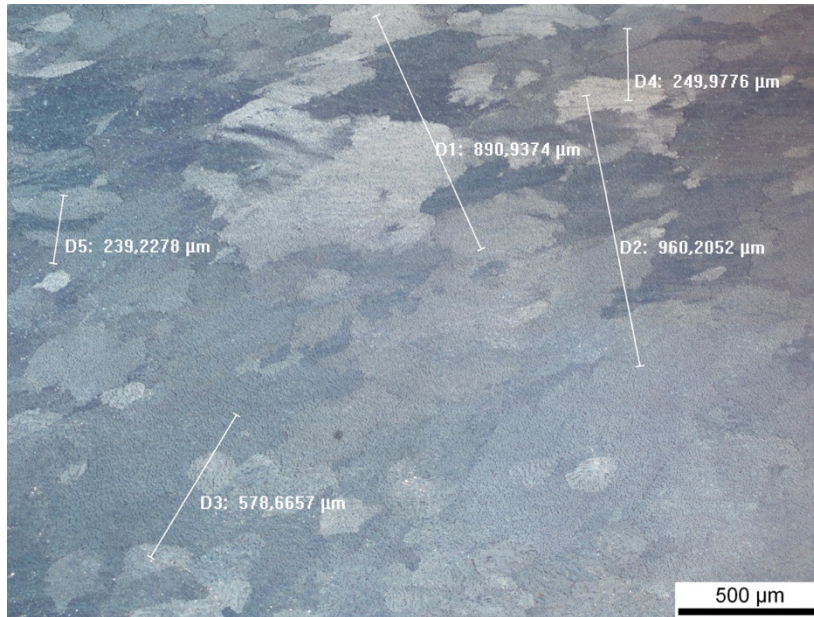
| | | | |
|----------------|------------------------|-----------------------|----------------|
| X5(3)-D1 | 871,13 | 6 | 145,18 |
| X5(3)-D2 | 1104,24 | 9 | 122,69 |
| X5(3)-D3 | 761,64 | 6 | 126,94 |
| X5(3)-D4 | 642 | 4 | 160,37 |
| X5(3)-D5 | 511,88 | 4 | 127,97 |
| X5(3)-D6 | 275,45 | 3 | 91,81 |
| X5(4)-D1 | 604,44 | 4 | 151,11 |
| X5(4)-D2 | 1013 | 7 | 144,71 |
| X5(4)-D3 | 1260,64 | 8 | 157,58 |
| X5(4)-D4 | 909,89 | 6 | 151,64 |
| X5(4)-D5 | 876,47 | 7 | 125,21 |
| Surface | Average Surface | Average Centre | Average |
| Centre | 98,14 | 136,84 | 118,41 |

- Δοκίμιο 1':



Εικόνα 24: 1η προς μέτρηση κόκκων

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.



Εικόνα 25:3η με μέτρηση κόκκων

Η παραπάνω μετρήσεις αφορούν το 1' δοκίμιο από TRC το οποίο εξετάζεται παράλληλα στην Έλαση-Χύτευση. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι φωτογραφίες είναι παρμένες από το Οπτικό Μικροσκόπιο με πολωμένο φώς σε μεγέθυνση x5.

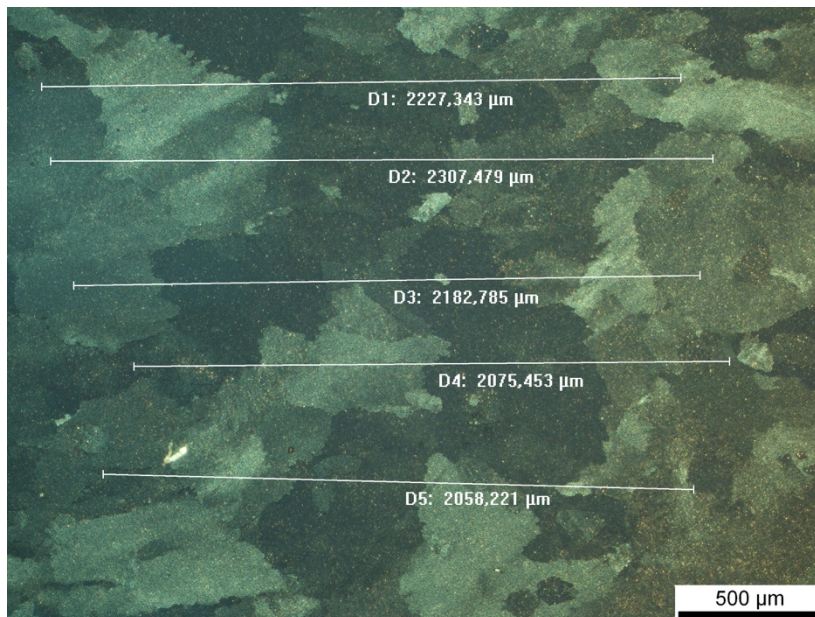
Πίνακας 15: Πίνακας Αποτελεσμάτων Κόκκων για το δοκίμιο 1'

| Sample 1': 3003 TRC | Barkers Etch 120 sec | Grain Measurements | |
|---------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|
| Μετρήσεις | Αποστάσεις-Μετρήσεις (μm) | Αριθμός κόκκων | Μετρήσεις κόκκων(μm) |
| x5(1)-D1 | 275,70 | 4 | 68,92 |
| x5(1)-D2 | 1063,09 | 9 | 118,12 |
| x5(1)-D3 | 716,57 | 10 | 71,65 |
| x5(1)-D4 | 463,93 | 4 | 115,98 |
| x5(1)-D5 | 483,05 | 3 | 161,01 |
| x5(2)-D1 | 417,77 | 6 | 69,69 |
| x5(2)-D2 | 607,05 | 8 | 75,88 |
| x5(2)-D3 | 284,84 | 3 | 94,94 |
| x5(2)-D4 | 355,76 | 5 | 71,15 |
| x5(3)-D1 | 890,93 | 5 | 178,18 |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

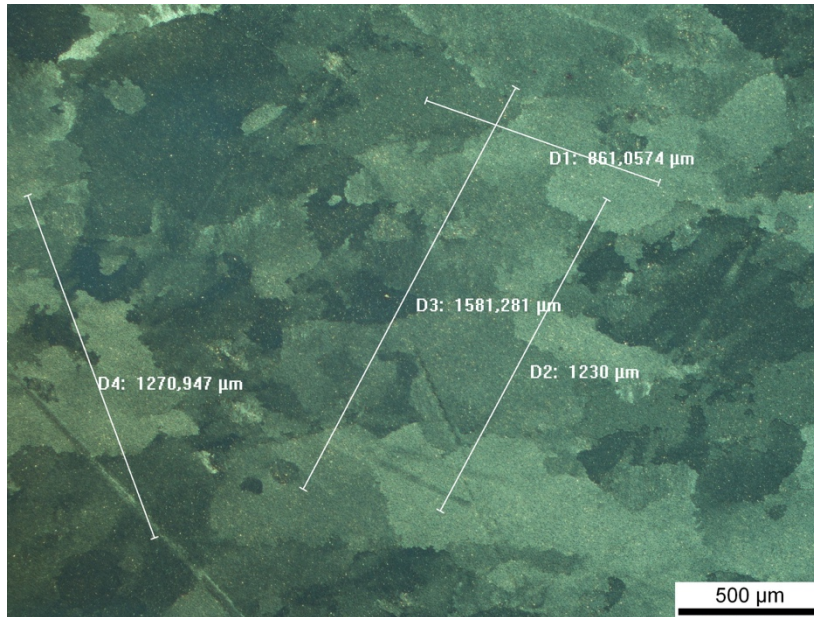
| | | | |
|----------|-----------------|----------------|---------|
| x5(3)-D2 | 960,2 | 7 | 137,17 |
| x5(3)-D3 | 578,66 | 4 | 144,66 |
| x5(3)-D4 | 249,97 | 3 | 83,32 |
| x5(3)-D5 | 239 | 3 | 79,74 |
| X5(4)-D1 | 1074,87 | 6 | 179,14 |
| X5(4)-D2 | 1162,67 | 8 | 145,33 |
| X5(4)-D3 | 402,89 | 3 | 134,29 |
| X5(4)-D4 | 290,24 | 3 | 96,74 |
| X5(4)-D5 | 326,54 | 4 | 81,63 |
| Surface | Average Surface | Average Centre | Average |
| Centre | 94,14 | 126,02 | 110,92 |

- Δοκίμιο 1”:



Εικόνα 26: 1η προς μέτρηση κόκκων

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.



Εικόνα 27:2η με μέτρηση κόκκων

Η παραπάνω μετρήσεις αφορούν το 1'' δοκίμιο από TRC το οποίο εξετάζεται κ στην Έλαση-Χύτευση. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι φωτογραφίες είναι παρμένες από το Οπτικό Μικροσκόπιο με πολωμένο φώς σε μεγέθυνση x5.

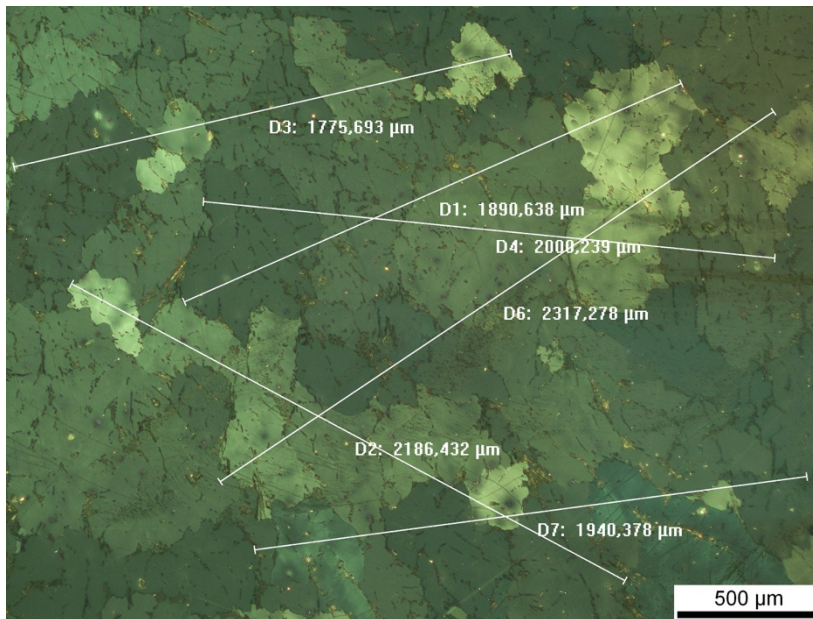
Πίνακας 16: Πίνακας Αποτελεσμάτων Κόκκων για το δοκίμιο 1''

| Sample 1": 3003 TRC | Barkers Etch 120 sec | Grain Measurements | |
|---------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|
| Μετρήσεις | Αποστάσεις-Μετρήσεις (μm) | Αριθμός κόκκων | Μετρήσεις κόκκων(μm) |
| x5(1)-D1 | 2227,34 | 9 | 247,48 |
| x5(1)-D2 | 2307,47 | 5 | 461,49 |
| x5(1)-D3 | 2182,78 | 7 | 311,82 |
| x5(1)-D4 | 2075,45 | 6 | 345,9 |
| x5(1)-D5 | 2058,22 | 8 | 257,27 |
| x5(2)-D1 | 861,057 | 3 | 287,01 |
| x5(2)-D2 | 1230 | 6 | 205 |
| x5(2)-D3 | 1581,28 | 9 | 175,69 |
| x5(2)-D4 | 1270,94 | 6 | 211,82 |
| x5(3)-D1 | 1730,43 | 7 | 247,2 |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

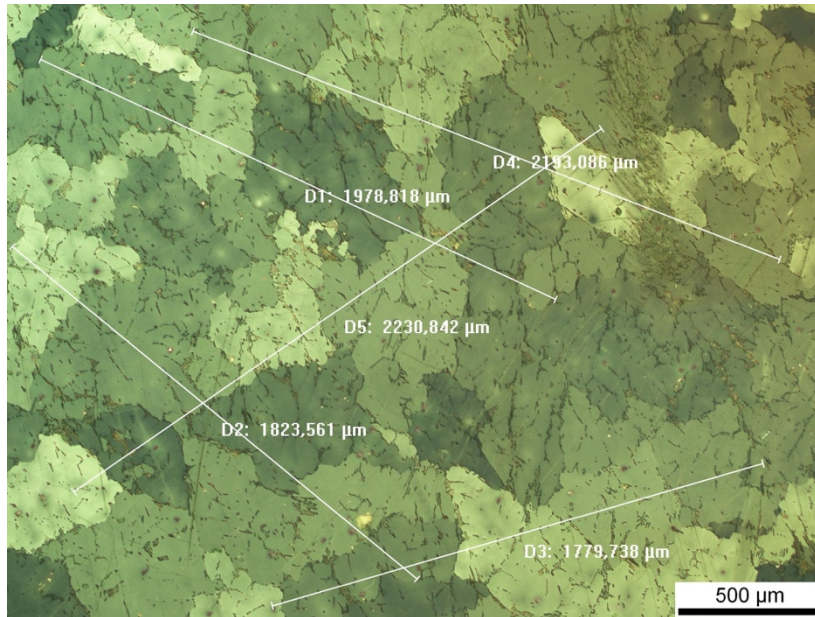
| | | | |
|----------|---------|----|---------|
| x5(3)-D2 | 2374,16 | 10 | 237,41 |
| x5(3)-D3 | 2053,86 | 7 | 293,4 |
| x5(3)-D4 | 1657,37 | 6 | 276,22 |
| x5(4)-D2 | 1.718 | 6 | 286,4 |
| x5(4)-D3 | 1585,69 | 6 | 264,28 |
| x5(4)-D4 | 1987,92 | 7 | 283,98 |
| x5(4)-D5 | 1875,4 | 6 | 312,56 |
| x5(4)-D6 | 1339,55 | 6 | 223,25 |
| x5(4)-D7 | 1477,42 | 5 | 295,48 |
| | | | Average |
| | | | 274,93 |

- Δοκίμιο 2:



Εικόνα 28: 1^η προς μέτρηση κόκκων

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.



Εικόνα 29: 3^η με μετρήσεις κόκκων

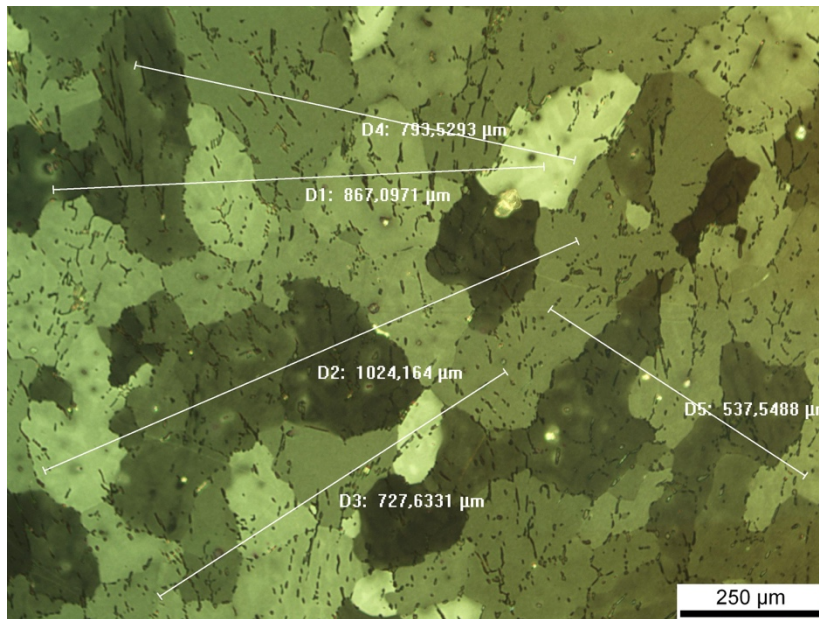
Πίνακας 17: Πίνακας Αποτελεσμάτων Κόκκων για το δοκίμιο 2

| Μετρήσεις | Αποστάσεις-Μετρήσεις (μm) | Αριθμός κόκκων | Μετρήσεις κόκκων(μm) |
|-----------|---------------------------|----------------|----------------------|
| x5(1)-D1 | 1890,63 | 5 | 378,12 |
| x5(1)-D2 | 2186,43 | 7 | 312,34 |
| x5(1)-D3 | 1775,69 | 5 | 355,13 |
| x5(1)-D4 | 2000,23 | 7 | 285,74 |
| x5(1)-D6 | 2317,27 | 10 | 231,72 |
| x5(1)-D7 | 1940,37 | 8 | 242,54 |
| X5(2)-D1 | 2534,85 | 9 | 281,65 |
| X5(2)-D2 | 953,61 | 4 | 238,4 |
| X5(2)-D3 | 1635,37 | 5 | 327,07 |
| X5(2)-D4 | 1591,85 | 6 | 265,3 |
| X5(2)-D5 | 1518,38 | 6 | 253,064 |
| X5(3)-D1 | 1978,81 | 6 | 329,8 |
| X5(3)-D2 | 1823,56 | 8 | 227,94 |
| X5(3)-D3 | 1.780 | 6 | 296,62 |
| X5(3)-D4 | 2193,08 | 6 | 365,51 |

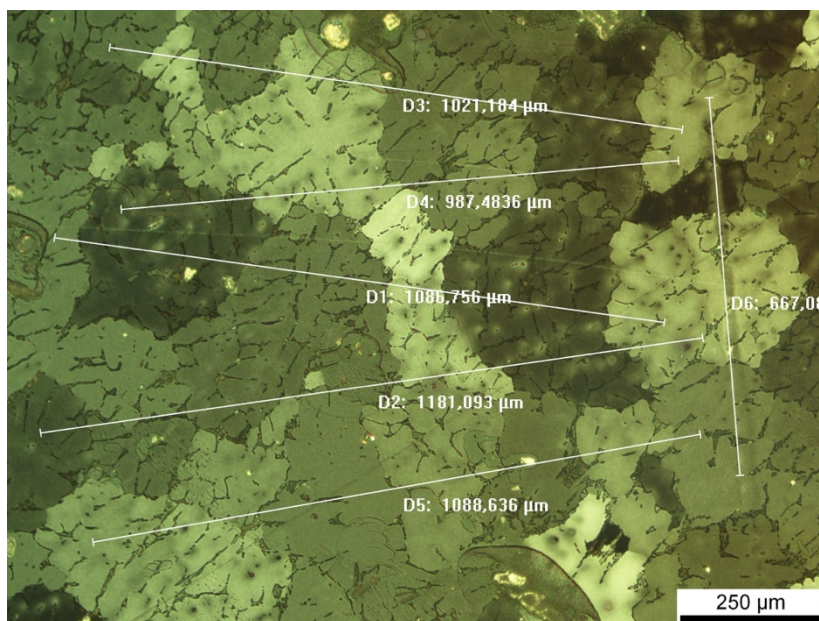
Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

| | | | |
|----------|---------|---|--------|
| X5(3)-D5 | 2230,84 | 8 | 278,85 |
| | | | M.O. |
| | | | 291,86 |

- Δοκίμιο 3:



Εικόνα 30: 1η προς μέτρηση κόκκων



Εικόνα 31: 3^η με μετρήσεις κόκκων

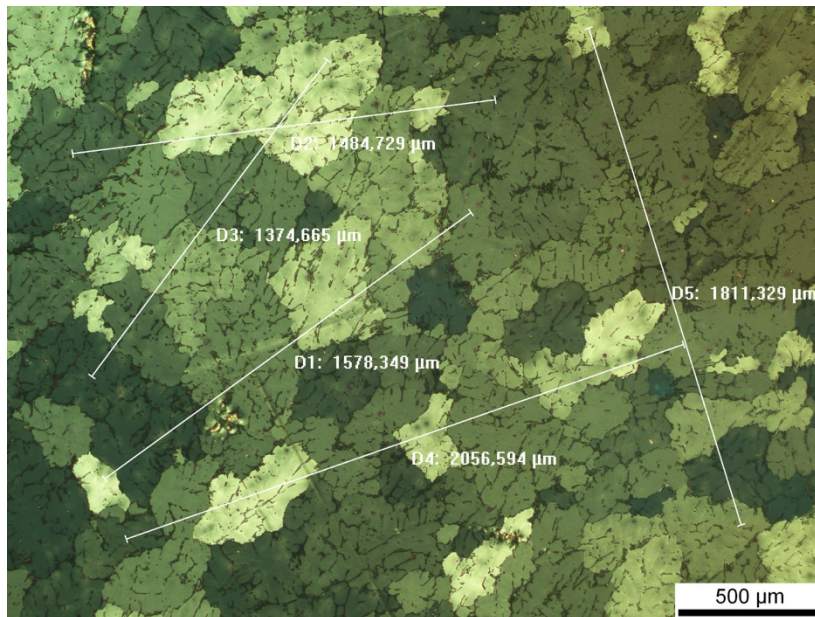
Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Πίνακας 18: Πίνακας Αποτελεσμάτων Κόκκων για το δοκίμιο 3

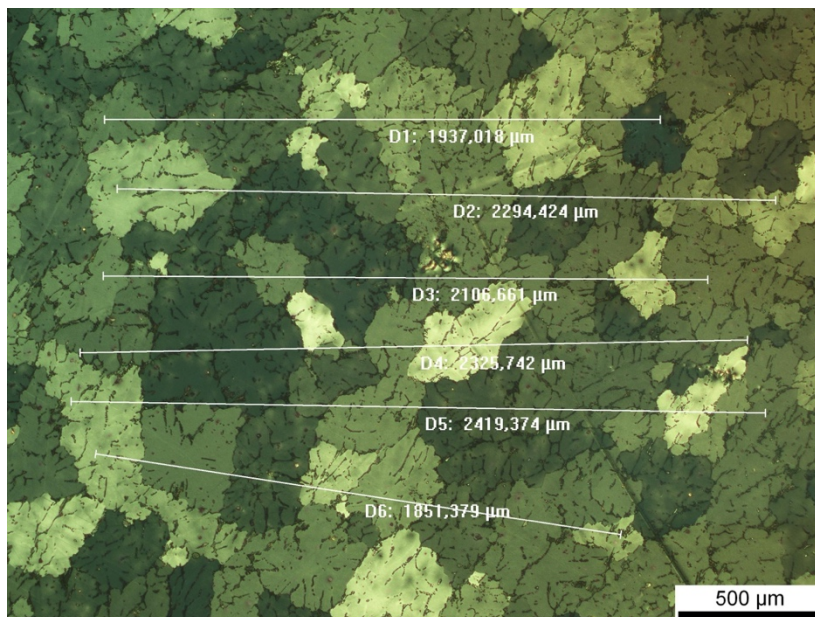
| Μετρήσεις | Αποστάσεις- Μετρήσεις (μm) | Αριθμός κόκκων | Μετρήσεις κόκκων(μm) |
|-----------|-------------------------------|----------------|-------------------------|
| x10(1)-D1 | 867,09 | 7 | 123,87 |
| x10(1)-D2 | 1024,16 | 7 | 146,30 |
| x10(1)-D3 | 727,63 | 6 | 121,27 |
| x10(1)-D4 | 793,52 | 5 | 158,70 |
| x10(1)-D5 | 537,54 | 5 | 107,50 |
| x10(2)-D1 | 1040,68 | 7 | 148,67 |
| x10(2)-D2 | 1040,48 | 5 | 208,09 |
| x10(2)-D3 | 1349,38 | 10 | 134,94 |
| x10(2)-D4 | 1120,64 | 8 | 140,08 |
| x10(2)-D5 | 1075,25 | 7 | 153,6 |
| x10(2)-D6 | 678,89 | 4 | 169,72 |
| X10(3)-D1 | 1086,75 | 6 | 181,12 |
| X10(3)-D2 | 1181,09 | 7 | 168,72 |
| X10(3)-D3 | 1.021 | 7 | 145,87 |
| X10(3)-D4 | 987,48 | 6 | 164,58 |
| X10(3)-D5 | 1088,63 | 7 | 155,52 |
| X10(3)-D6 | 667,08 | 4 | 166,77 |
| | | | Average |
| | | | 152,66 |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

- Δοκίμιο 4



Εικόνα 32: 1η προς μέτρηση κόκκων



Εικόνα 33: 3^η με μετρήσεις κόκκων

Πίνακας 19: Πίνακας Αποτελεσμάτων Κόκκων για το δοκίμιο 4

| Μετρήσεις | Αποστάσεις-Μετρήσεις (μm) | Αριθμός κόκκων | Μετρήσεις κόκκων(μm) |
|-----------|---------------------------|----------------|----------------------|
| x5(1)-D1 | 1578,34 | 7 | 225,47 |
| x5(1)-D2 | 1484,72 | 6 | 247,45 |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

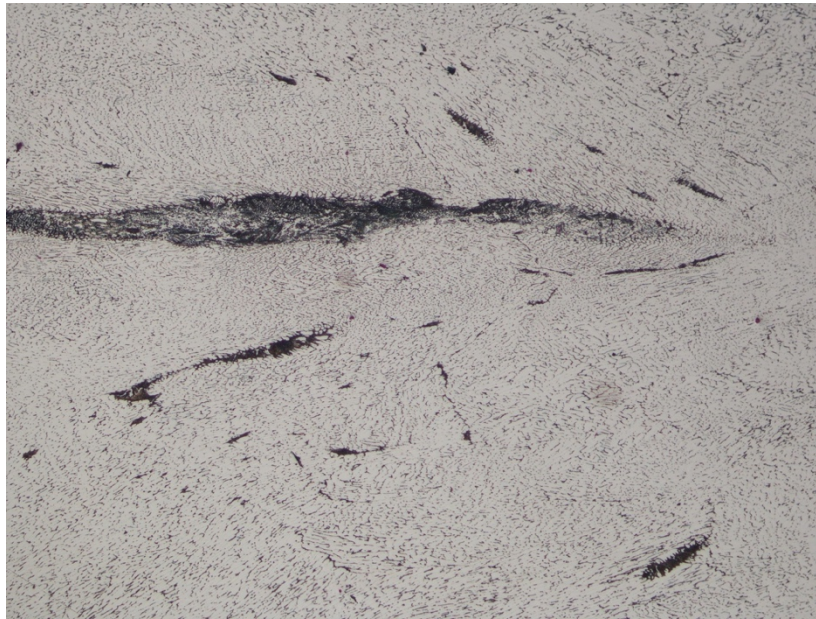
| | | | |
|----------|---------|----|---------|
| x5(1)-D3 | 1374,66 | 6 | 229,11 |
| x5(1)-D4 | 2056,59 | 10 | 205,65 |
| x5(1)-D5 | 1811,32 | 9 | 201,25 |
| x5(2)-D1 | 1999,52 | 10 | 199,95 |
| x5(2)-D2 | 2075,54 | 8 | 259,44 |
| x5(2)-D3 | 2187,32 | 11 | 198,85 |
| x5(2)-D4 | 2080,64 | 9 | 231,18 |
| x5(2)-D5 | 2188,59 | 9 | 243,17 |
| x5(2)-D6 | 2191,96 | 10 | 219,19 |
| x5(2)-D7 | 1758 | 8 | 219,75 |
| X5(3)-D1 | 1937,01 | 10 | 193,70 |
| X5(3)-D2 | 2.294 | 9 | 254,93 |
| X5(3)-D3 | 2106,66 | 10 | 210,66 |
| X5(3)-D4 | 2325,74 | 9 | 258,41 |
| X5(3)-D5 | 2419,37 | 11 | 219,94 |
| X5(3)-D6 | 1851,37 | 8 | 231,42 |
| | | | Average |
| | | | 224,97 |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Αποτελέσματα Ποσοστού Επιφάνειας Κατακρημνισμάτων

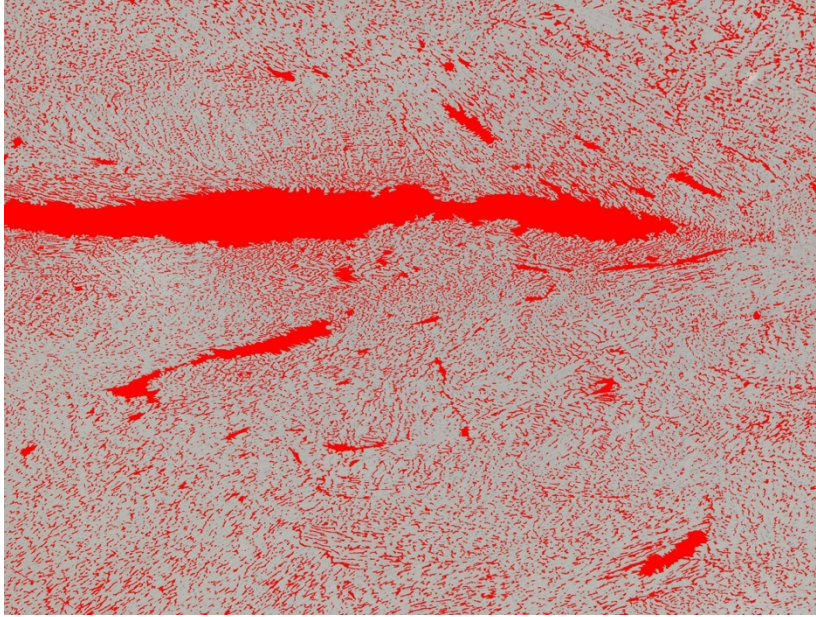
Η μέτρηση του ποσοστού καταλαμβανόμενης επιφάνειας από κατακρημνίσματα έγινε μέσω χρήσης υπογράμματος του Image Analysis που επεξεργάζεται της φωτογραφίες βάσει χρωματικής διαφοράς μετά από προσβολή με αντιδραστήριο Kellers.

- Δοκίμιο 1:



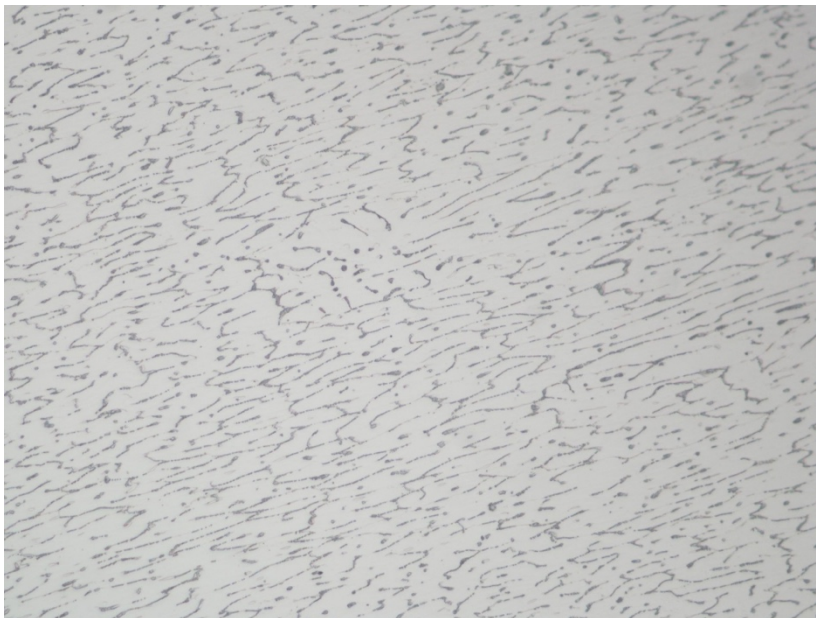
Εικόνα 34: 1η φωτογραφία προς μέτρηση επιφάνειας ενδομεταλλικών για το 1ο δοκίμιο – TRC στην περιοχή του CLS

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.



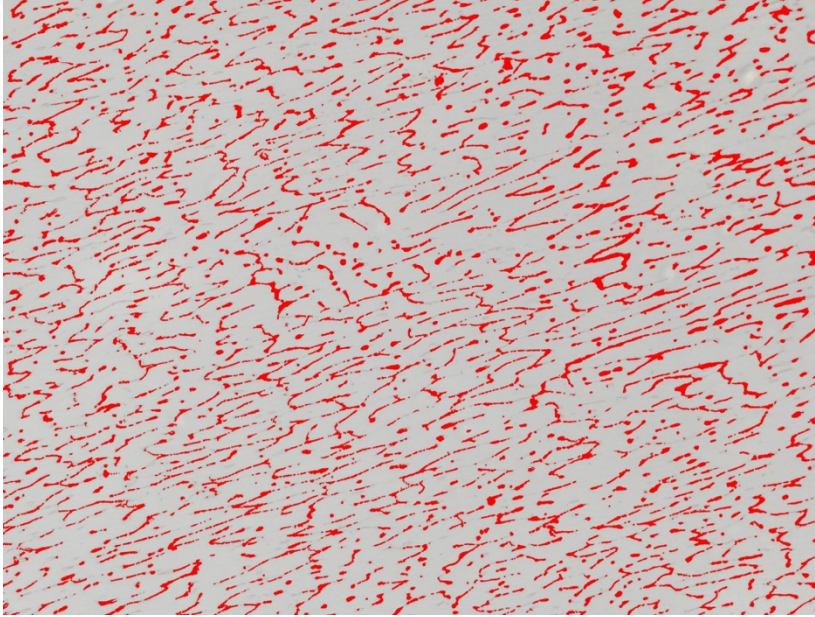
Εικόνα 35: 1η φωτογραφία με μέτρηση επιφάνειας ενδομεταλλικών για το 1ο δοκίμιο – TRC στην περιοχή του CLS

Ο μέσος όρος του ποσοστού επιφάνειας που καταλαμβάνουν η ενδομεταλλικές φάσεις στο δοκίμιο 1 και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή που εμφανίζεται Centerline Segregation είναι 16,7773641%.



Εικόνα 36: 2η φωτογραφία προς μέτρηση επιφάνειας ενδομεταλλικών για το 1ο δοκίμιο – TRC στην περιοχή της επιφάνειας

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.



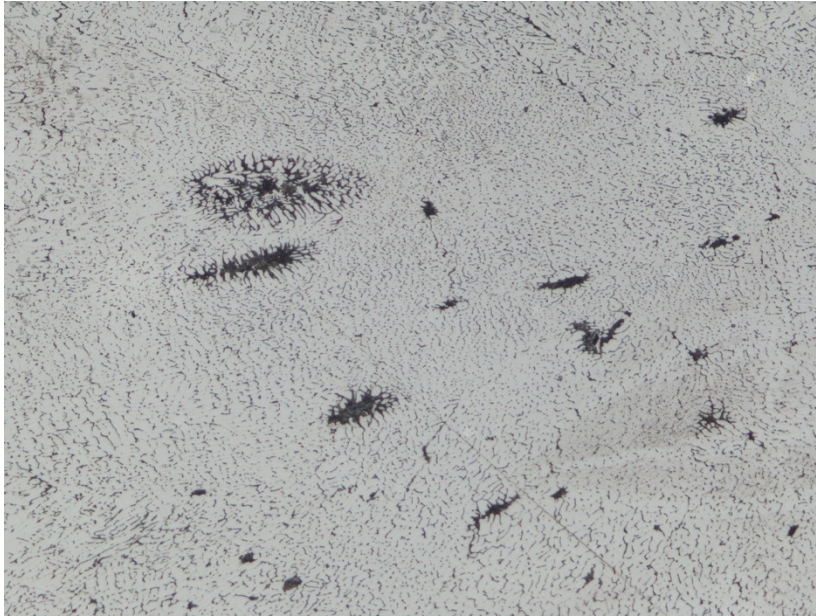
Εικόνα 37: 2η φωτογραφία με μέτρηση επιφάνειας ενδομεταλλικών για το 1ο δοκίμιο – TRC στην περιοχή της επιφάνειας

Ο μέσος όρος του ποσοστού επιφάνεια που καταλαμβάνουν οι ενδομεταλλικές φάσεις στο δοκίμιο 1 και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή της επιφάνειας του φύλλου είναι 11,18358358.

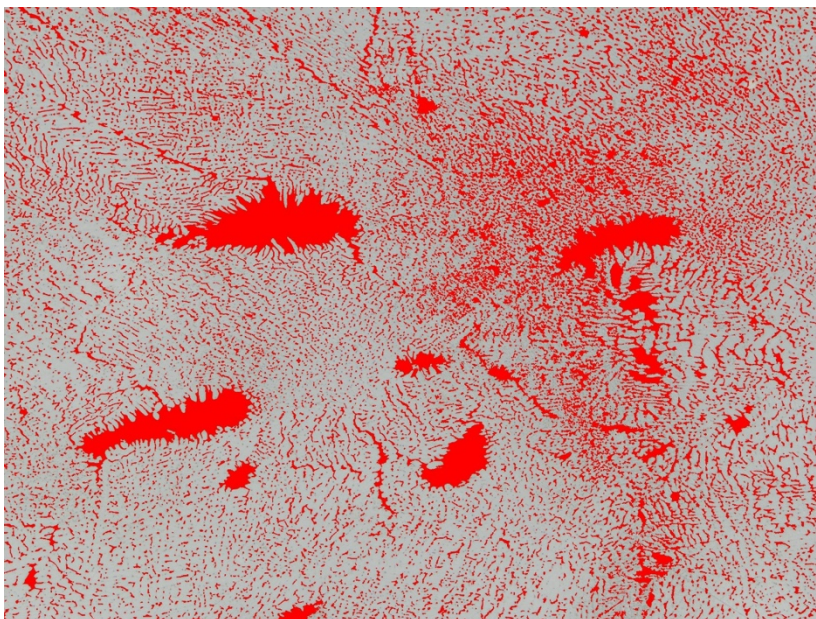
Η παραπάνω μετρήσεις αφορούν το πρώτο(1) δοκίμιο από TRC. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι φωτογραφίες είναι παρμένες από το Οπτικό Μικροσκόπιο με μεγέθυνση x10.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

- Δοκίμιο 1':



Εικόνα 38:1η φωτογραφία προς μέτρηση του ποσοστού επιφάνειας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 1' στην περιοχή του CLS



Εικόνα 39:2η φωτογραφία με μέτρηση ποσοστού επιφάνειας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 1' στην περιοχή του CLS

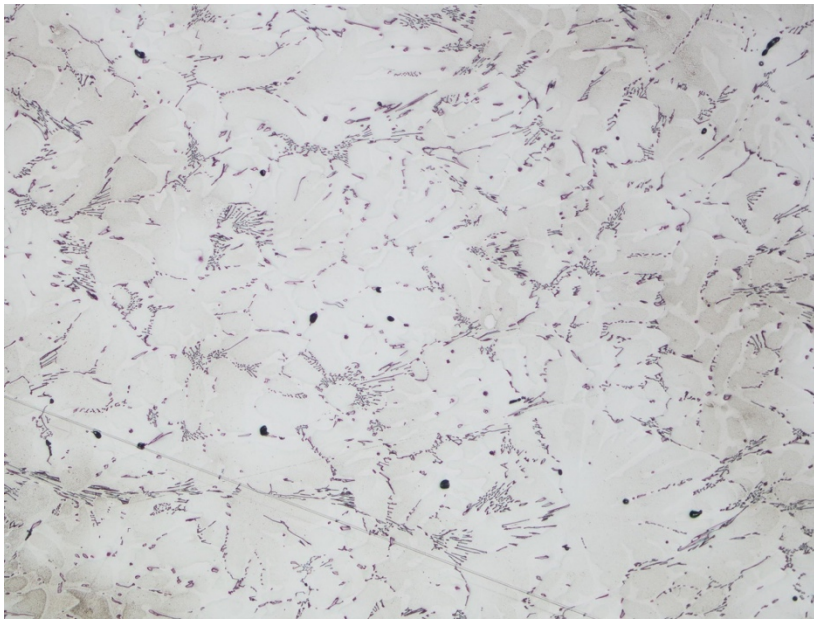
Ο μέσος όρος του ποσοστού επιφάνειας που καταλαμβάνουν οι ενδομεταλλικές φάσεις στο δοκίμιο 1' και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή που εμφανίζεται το φαινόμενο του CLS είναι 16,18951416.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Ο μέσος όρος του ποσοστού επιφάνειας που καταλαμβάνουν οι ενδομεταλλικές φάσεις στο δοκίμιο 1' και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή της επιφάνειας του είναι 9,15733846.

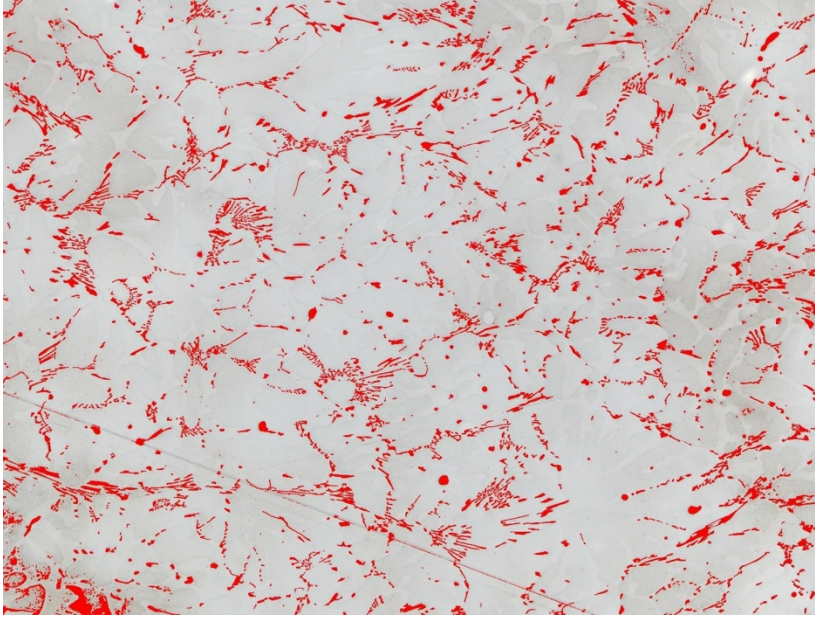
Οπότε για τα δοκίμια του TRC το ποσοστό επιφάνειας των ενδομεταλλικών είναι 16,483439 για την περιοχή του CSL και 10,170461 για την περιοχή της επιφάνειας.

- Δοκίμιο 2:



Εικόνα 40: 5^η φωτογραφία προς μέτρηση ποσοστού επιφάνειας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 2

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.



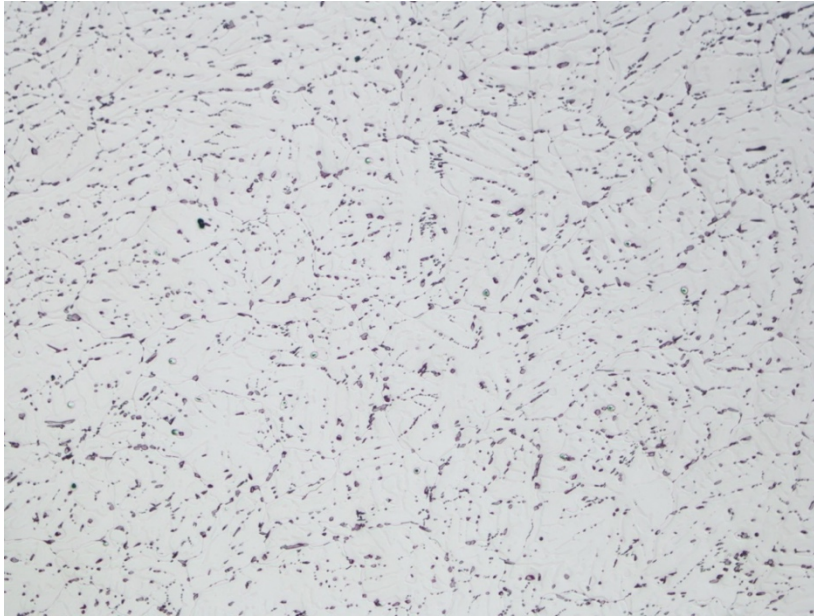
Εικόνα 41:5η φωτογραφία με μέτρηση ποσοστού επιφανείας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 2

Ο μέσος όρος ποσοστού επιφανείας ενδομεταλλικών φάσεων για το δοκίμιο 2 είναι 6,819095866.

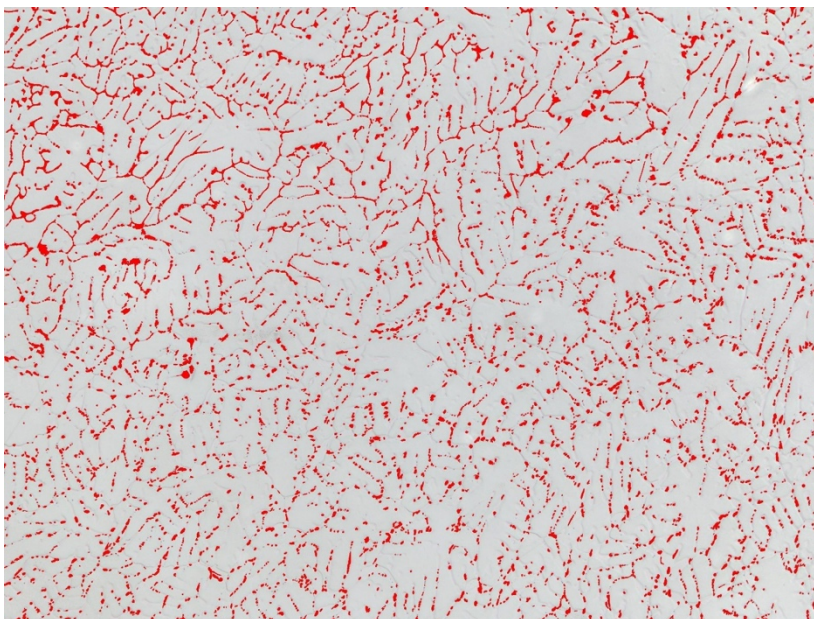
Οι παραπάνω φωτογραφίες είναι παρμένες από το δοκίμιο 2 σε μεγέθυνση x10 μετά από προσβολή από Kellers.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

- Δοκίμιο 3:



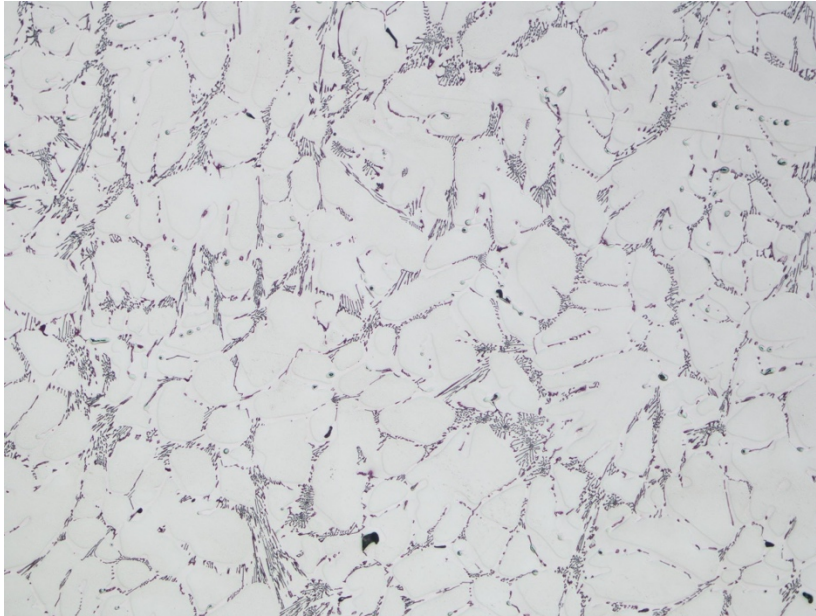
Εικόνα 42: 3η φωτογραφία προς μέτρηση ποσοστού επιφάνειας για το δοκίμιο 3 στην περιοχή της επαφής



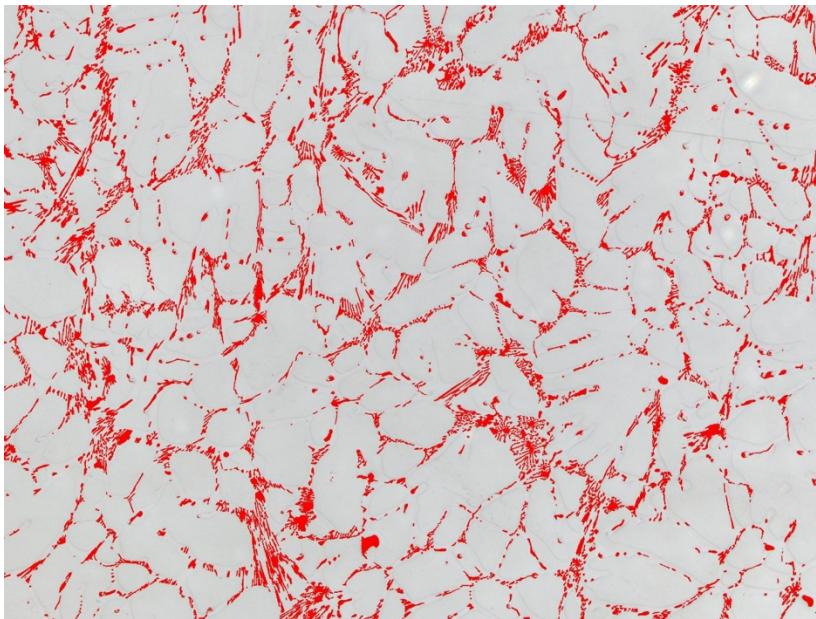
Εικόνα 43: 3η φωτογραφία με μέτρηση ποσοστού επιφάνειας για το δοκίμιο 3 στην περιοχή της επαφής

Ο μέσος όρος του ποσοστού επιφάνειας ενδομεταλλικών φάσεων για το δοκίμιο 3 και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή της επαφής του με το ψυκτικό μέσο της μεθόδου – νερό, είναι 6,473103841.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.



Εικόνα 44: 5η φωτογραφία προς μέτρηση ποσοστού επιφανείας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 3



Εικόνα 45: 5η φωτογραφία με μέτρηση ποσοστού επιφάνειας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 3

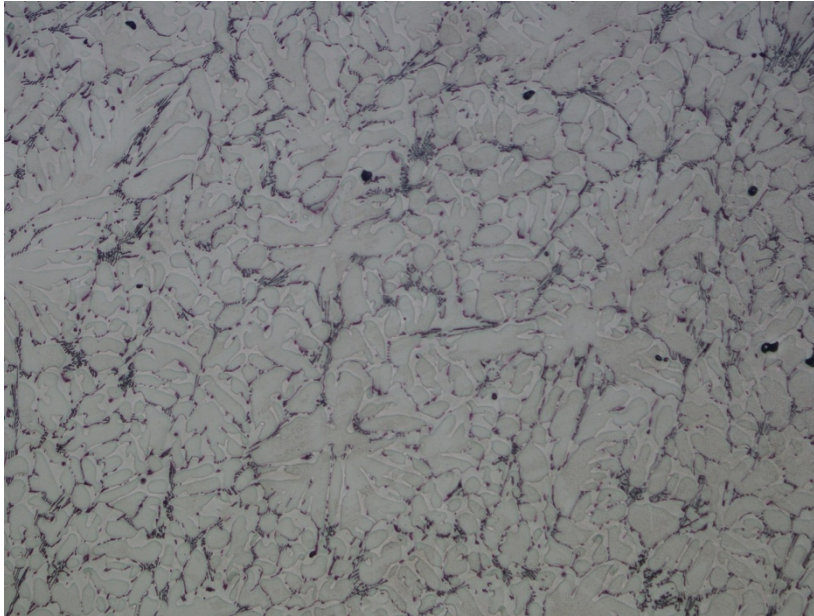
Ο μέσος όρος του ποσοστού επιφανείας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 3 είναι 8,77405599.

Ο μέσος όρος του ποσοστού επιφάνειας ενδομεταλλικών συνολικά για το δοκίμιο 3 είναι 7,62357992.

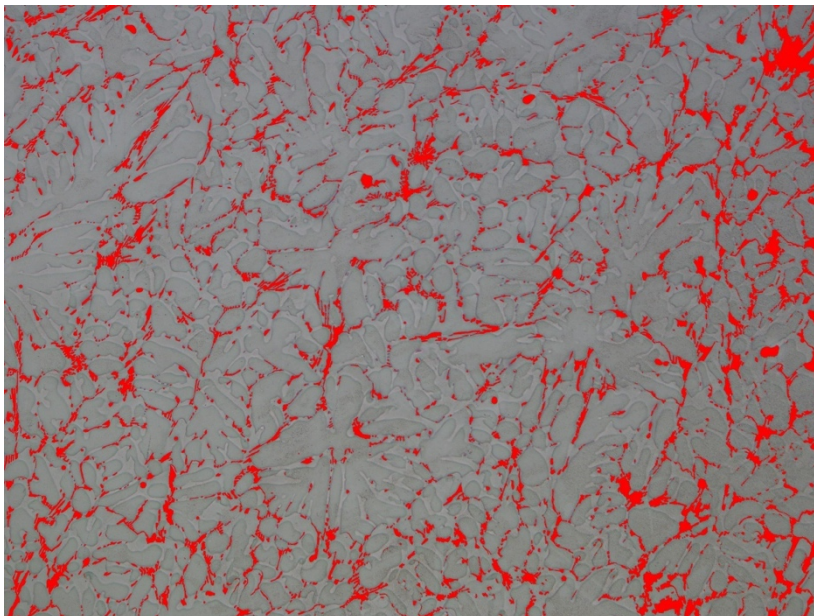
Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Όλες οι φωτογραφίες για το μέτρηση του ποσοστού ενδομεταλλικών φάσεων στο
δοκίμιο 3 πάρθηκαν με μεγέθυνση x10 μετά από προσβολή με Kellers.

- Δοκίμιο 4:



Εικόνα 46: 4η φωτογραφία προς μέτρηση ποσοστού επιφανείας ενδομεταλλικών για
το δοκίμιο 4



Εικόνα 47: 4η φωτογραφία με μέτρηση ποσοστού επιφανείας ενδομεταλλικών για το
δοκίμιο 4

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Ο μέσος όρος του ποσοστού επιφανείας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 4 είναι
9,975626628.

Όλες οι φωτογραφίες για το μέτρηση του ποσοστού ενδομεταλλικών φάσεων στο
δοκίμιο 3 πάρθηκαν με μεγέθυνση x10 μετά από προσβολή με Kellers.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

V.1.2. Αποτελέσματα Κόκκων και β' φάσεων μεταξύ δοκιμίου από Θερμή Έλαση.

Αποτελέσματα κόκκομετρίας

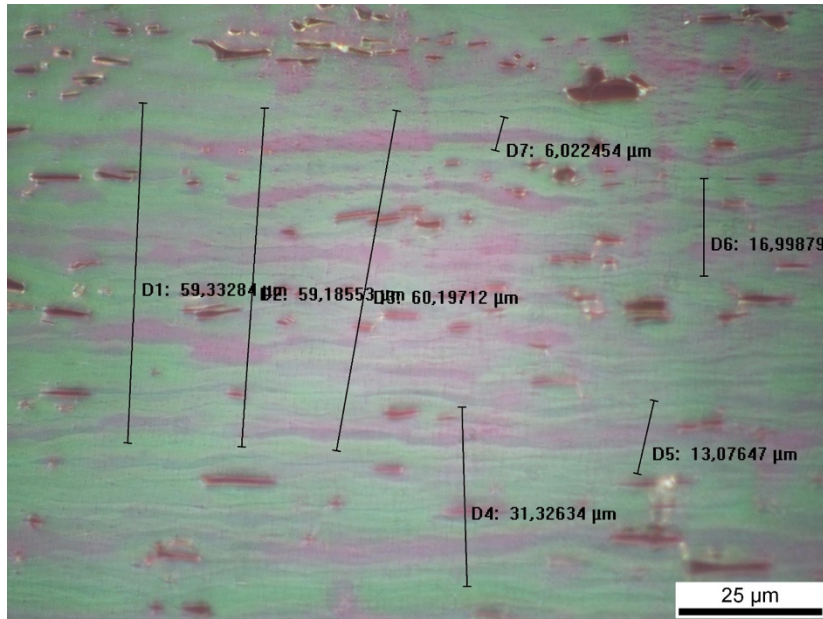
Η μέτρηση του μεγέθους των κόκκων έγινε μέσω χρήσης της Linear Intercept μεθόδου μετά από προσβολή με αντιδραστήριο Barkers και εξέταση στο μικροσκόπιο με πολωμένο φως.

- Δοκίμιο 5:

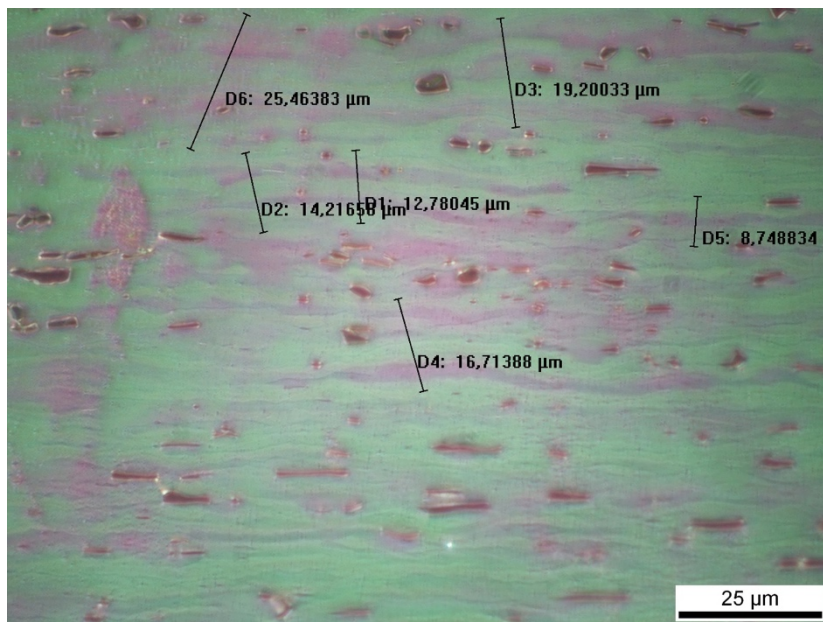


Εικόνα 48:1η φωτογραφία προς μετρήση κόκκομετρίας για το δοκίμιο 5 με μεγένθυση x10

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.



Εικόνα 49:1η φωτογραφία με μετρήσεις κοκκομετρίας για το δοκίμιο 5 με μεγένθυση x100



Εικόνα 50:2η φωτογραφία με μετρήσεις κοκκομετρίας για το δοκίμιο 5 με μεγένθυση x100

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

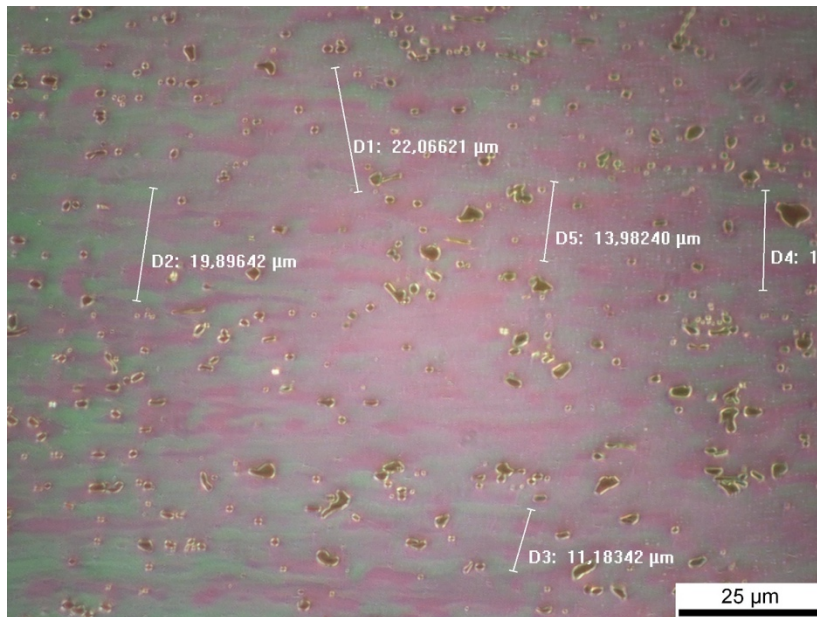
Οι παραπάνω φωτογραφίες αφορούν το δοκίμιο 5, προϊόν θερμής έλασης το οποίο
εξετάζεται παράλληλα προς την έλαση.

Πίνακας 20: Πίνακας Αποτελεσμάτων Κόκκων για το δοκίμιο 5

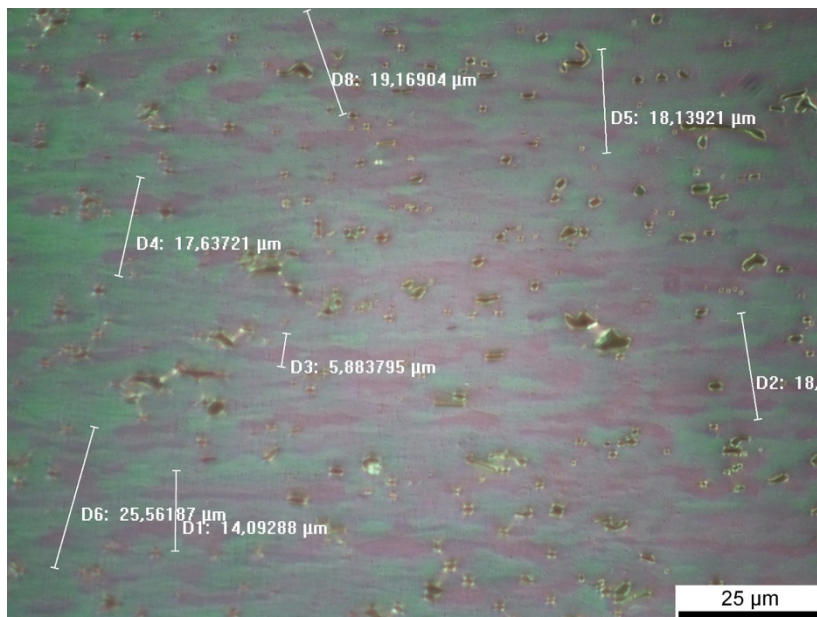
| Sample 5 | | | |
|-----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------|
| Μετρήσεις | Αποστάσεις- Μετρήσεις (μm) | Αριθμός κόκκων | Μετρήσεις κόκκων(μm) |
| x100(1)-D1 | 59,33 | 12 | 4,94 |
| x100(1)-D2 | 59,18 | 11 | 5,38 |
| x100(1)-D3 | 60,19 | 13 | 4,63 |
| x100(1)-D4 | 31,32 | 7 | 4,47 |
| x100(1)-D5 | 13,07 | 3 | 4,35 |
| x100(1)-D6 | 16,99 | 5 | 3,39 |
| x100(1)-D7 | 6,02 | 3 | 2 |
| x100(2)-D1 | 12,78 | 4 | 3,19 |
| x100(2)-D2 | 14,21 | 5 | 2,84 |
| x100(2)-D3 | 19,2 | 6 | 3,2 |
| x100(2)-D4 | 16,71 | 7 | 2,38 |
| x100(2)-D5 | 8,74 | 3 | 2,91 |
| x100(2)-D6 | 25,46 | 5 | 5,09 |
| X100(3)-D1 | 20 | 5 | 4 |
| X100(3)-D2 | 6,51 | 3 | 2,17 |
| X100(3)-D3 | 13,95 | 3 | 4,65 |
| X100(3)-D4 | 9,063 | 3 | 3,02 |
| X100(3)-D5 | 17,22 | 5 | 3,44 |
| | | Average | 3,67 |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

- Δοκίμιο 6:



Εικόνα 51:1η φωτογραφία με μέτρηση κοκκομετρίας για το δοκίμιο 6



Εικόνα 52:2η φωτογραφία με μέτρησεις κοκκομετρίας για το δοκίμιο 6

Οι παραπάνω φωτογραφίες αφορούν το δοκίμιο 6, προϊόν θερμής έλασης το οποίο εξετάζεται κάθετα προς την έλαση.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

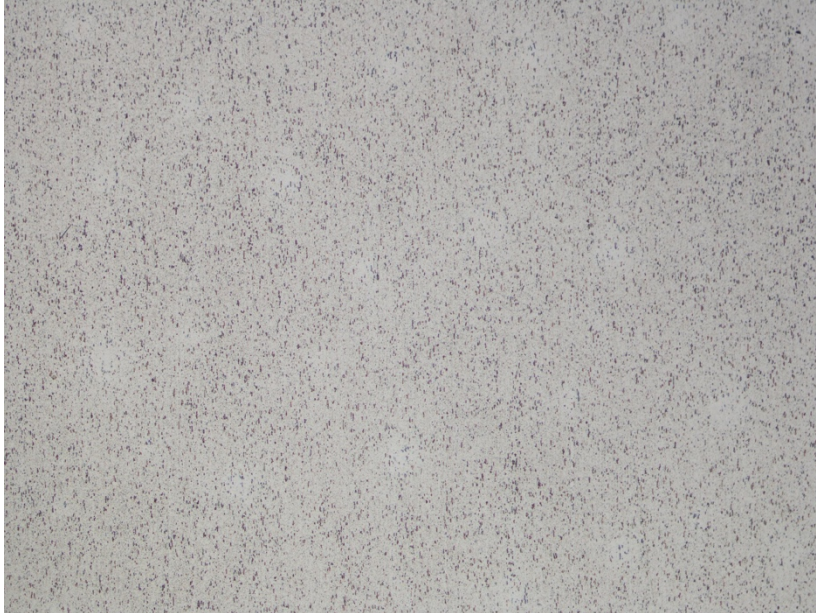
Πίνακας 21: Πίνακας Αποτελεσμάτων Κόκκων για το δοκίμιο 6

| Sample 6 | | | |
|-----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------|
| Μετρήσεις | Αποστάσεις- Μετρήσεις (μm) | Αριθμός κόκκων | Μετρήσεις κόκκων(μm) |
| x100(1)-D1 | 22,06 | 9 | 2,47 |
| x100(1)-D2 | 19,89 | 5 | 3,97 |
| x100(1)-D3 | 17 | 5 | 3,4 |
| x100(1)-D4 | 11,18 | 5 | 2,23 |
| x100(1)-D5 | 13,98 | 5 | 2,79 |
| x100(2)-D1 | 14,09 | 5 | 2,82 |
| x100(2)-D2 | 18,7 | 7 | 2,67 |
| x100(2)-D3 | 5,88 | 3 | 1,96 |
| x100(2)-D4 | 17,63 | 5 | 3,52 |
| x100(2)-D5 | 18,13 | 7 | 2,59 |
| x100(2)-D6 | 25,56 | 7 | 3,65 |
| x100(2)-D8 | 19,16 | 6 | 3,19 |
| x100(3)-D1 | 15,04 | 5 | 3 |
| x100(3)-D2 | 20,88 | 7 | 2,98 |
| x100(3)-D3 | 11,66 | 3 | 3,88 |
| x100(3)-D4 | 25,81 | 7 | 3,68 |
| x100(3)-D5 | 15 | 5 | 3 |
| x100(3)-D6 | 22,56 | 6 | 3,76 |
| | | Average | <u>3,09</u> |

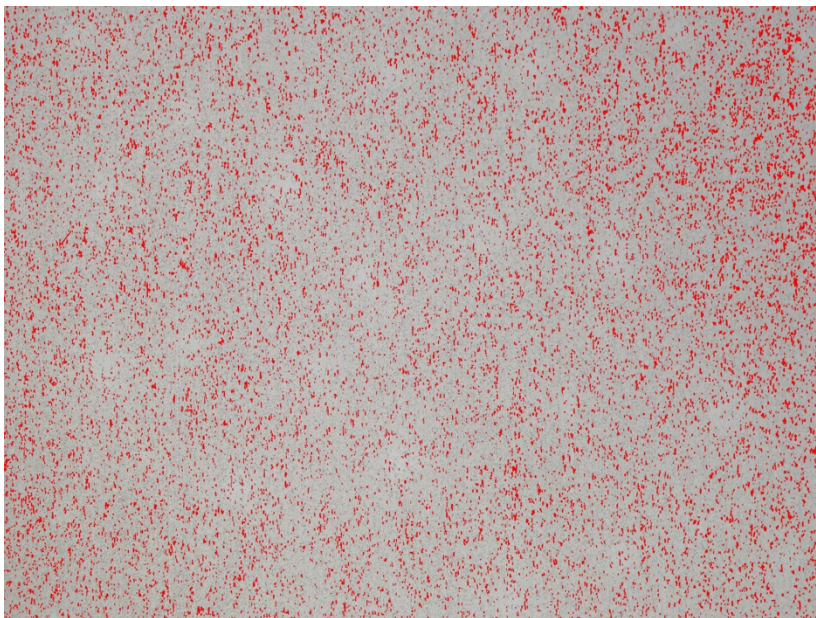
Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Αποτελέσματα ποσοστού επιφανείας ενδομεταλλικών

- Δοκίμιο 5:

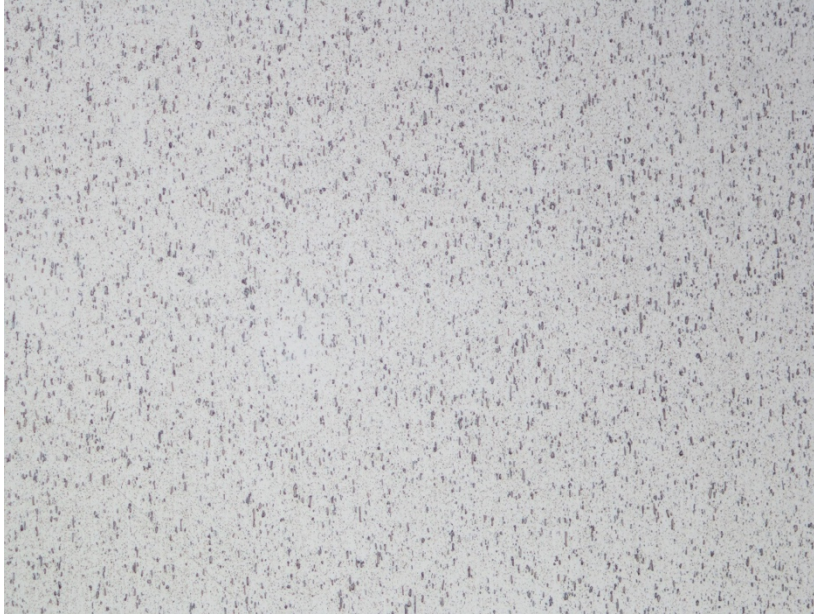


Εικόνα 53:3η φωτογραφία προς μέτρηση ποσοστού επιφανείας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 5(x10)

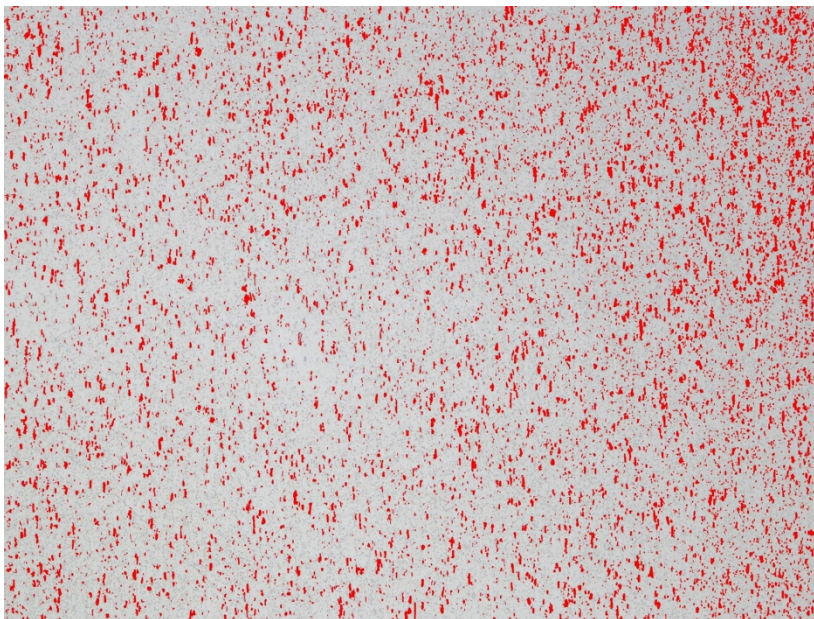


Εικόνα 54:3η φωτογραφία με μέτρηση ποσοστού επιφάνεια ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 5 (x10)

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.



Εικόνα 55: 3η φωτογραφία προς μέτρηση ποσοστού επιφάνειας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 5(x20)

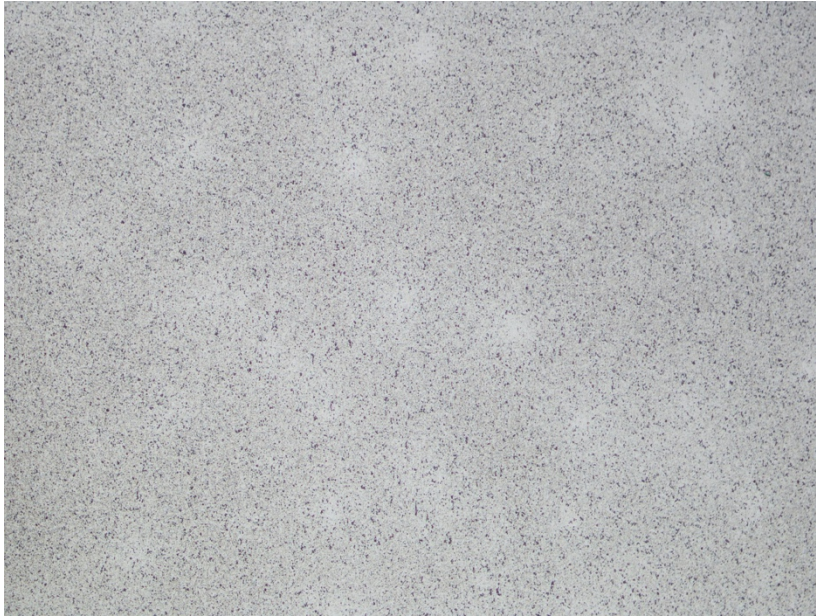


Εικόνα 56: 3η φωτογραφία με μέτρηση ποσοστού επιφάνειας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 5(x20)

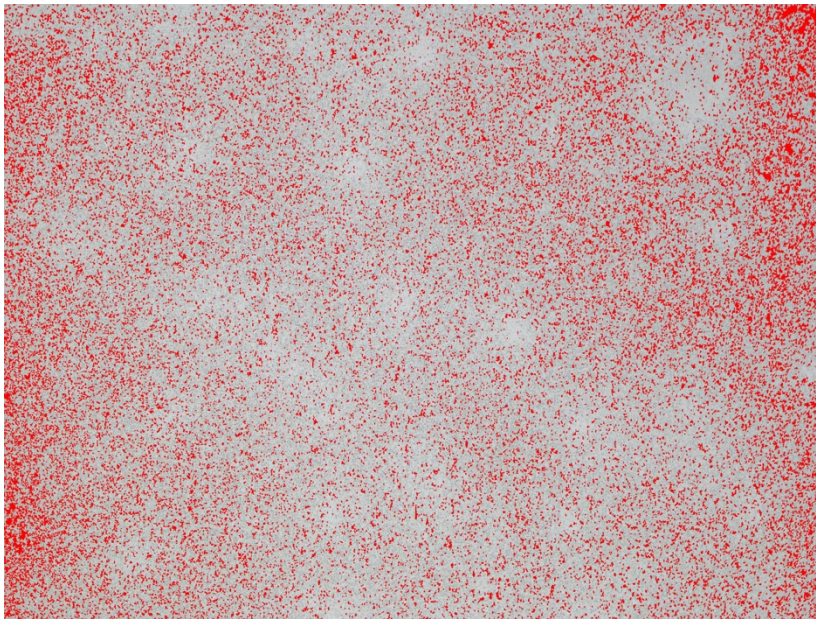
Ο μέσος όρος του ποσοστού επιφάνειας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 5 είναι 7,789%.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

- Δοκίμιο 6:

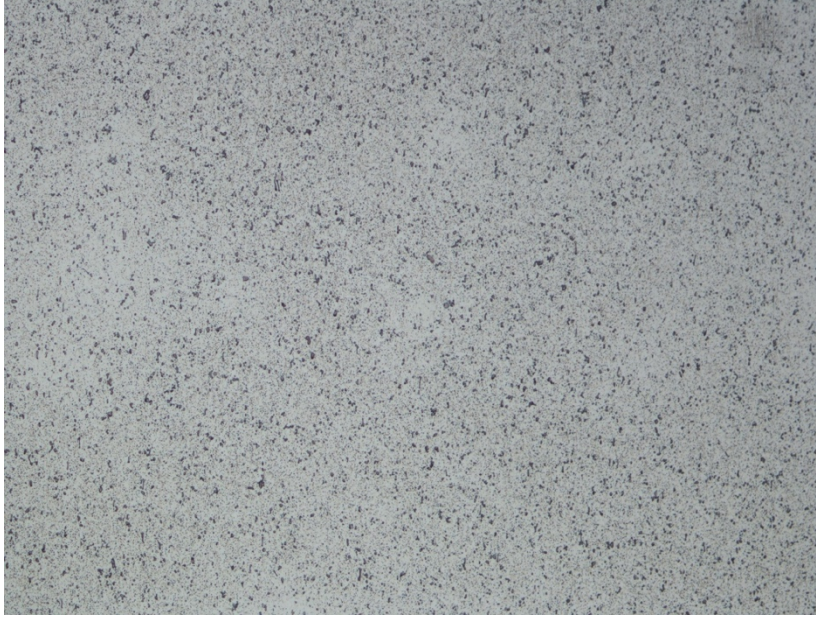


Εικόνα 57: 3η φωτογραφία προς μέτρηση ποσοστού επιφάνειας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 6(x10)

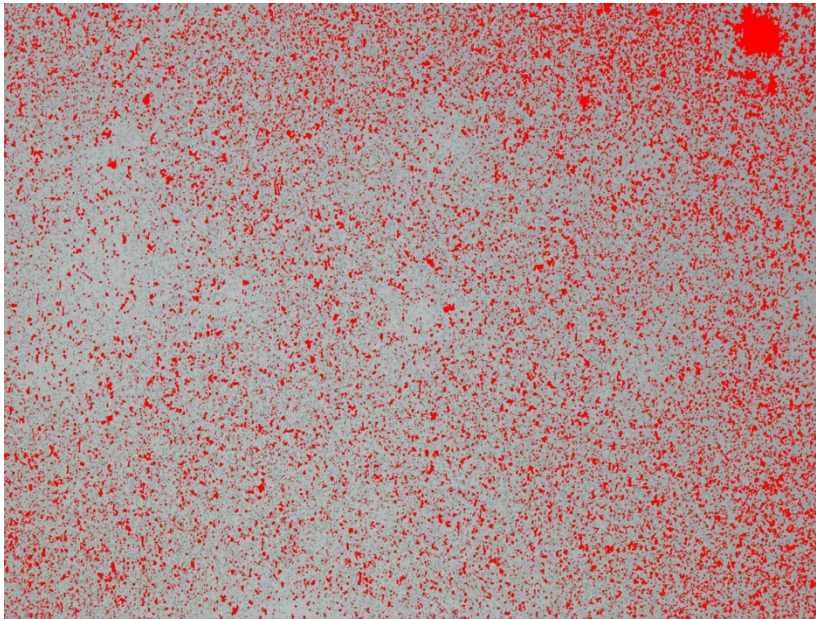


Εικόνα 58: 3η φωτογραφία με μέτρηση ποσοστού επιφάνειας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 6(x10)

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.



Εικόνα 59: 6η φωτογραφία προς μέτρηση ποσοστού επιφάνειας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 6(x20)



Εικόνα 60: 6η φωτογραφία με μέτρηση ποσοστού επιφάνειας ενδομεταλλικών για το δοκίμιο 6(x20)

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

V.1.3. Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Μικροσκοπίας

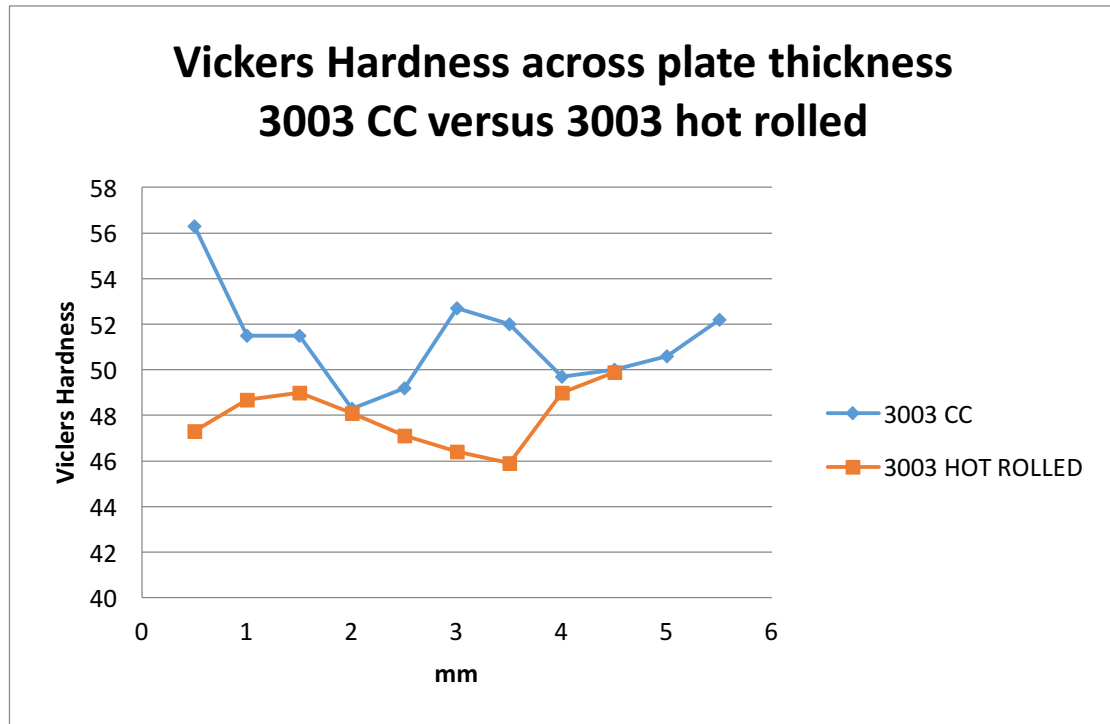
Πίνακας 22: Συγκεντρωτικά Στοιχεία Αποτελεσμάτων για όλα τα δοκίμια

| Δοκίμια | SDAS(mm) | Μέγεθος Κόκκων(mm) | Ποσοστό Επιφάνειας Ενδομεταλλικών(%) |
|---------|----------|--------------------|--------------------------------------|
| 1 | 6,8 | 118,41 | 13,97 |
| 1' | 5,79 | 110,92 | 12,67 |
| 1'' | 6,52 | 274,94 | 7,79 |
| 2 | 44,61 | 291,87 | 6,82 |
| 3 | 28,59 | 152,66 | 8,77 |
| 4 | 34,57 | 224,97 | 9,97 |
| 5 | - | 3,67 | 7,79 |
| 6 | - | 3,09 | 12,78 |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

V.2 Αποτελέσματα Σκληρομέτρησης

Έγινε δοκιμή σκληρομέτρησης για δοκίμια της μεθόδου TRC και Θερμής Έλασης με τα παρακάτω αποτελέσματα:



Πίνακας 23: Αποτελέσματα δοκιμής σκληρομέτρησης

| | 3003 CC | 3003 HOT ROLLED |
|-----|---------------|-----------------|
| | Vickers 100 g | Vickers 100 g |
| 0,5 | 56,3 | 47,3 |
| 1 | 51,5 | 48,7 |
| 1,5 | 51,5 | 49 |
| 2 | 48,3 | 48,1 |
| 2,5 | 49,2 | 47,1 |
| 3 | 52,7 | 46,4 |
| 3,5 | 52 | 45,9 |
| 4 | 49,7 | 49 |
| 4,5 | 50 | 49,9 |
| 5 | 50,6 | |
| 5,5 | 52,2 | |

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Οι μέσοι όροι των δοκιμών είναι 51,272Vickers και 47,933Vickers για την TRC και
την Θερμή Έλαση αντίστοιχα.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Μέρος Τέταρτο

Κεφάλαιο VI: Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων

VI .1: Σύγκριση Αποτελεσμάτων TRC και DC

Ο μέσος όρος του μεγέθους των SDAS των δοκιμίων της μεθόδου TRC είναι 6,37 μm ενώ της μεθόδου του DC είναι 35,92μm. Τα νούμερα αυτά μαρτυρούν πως η μικροδομή για την περίπτωση του TRC είναι πιο λεπτομερής με πιθανά θετικά αποτελέσματα για τις μηχανικές ιδιότητες. Επίσης, είναι ασφαλές να συσχετίσουμε την μεγάλη αυτή διαφορά των SDAS με τους πρότυπους ρυθμούς απόψυξης των δύο μεθόδων, πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση της TRC αυτός είναι 100-1000°C/s ενώ για την DC το νούμερο αυτό διαμορφώνεται 1-10°C/s.

Ο μέσος όρος του μεγέθους των κόκκων για την μέθοδο του TRC είναι 168,08μm ενώ της μεθόδου DC είναι 223,17μm. Τα αποτελέσματα αυτά συνάδουν με τα προηγούμενα ως προς το γεγονός ότι η μικροδομή του TRC παρουσιάζεται πιο λεπτομερής. Παρατηρούμε ότι το μέσο μέγεθος κόκκων στην περίπτωση του TRC είναι μικρότερο του DC αλλά όχι όσο την περίπτωση των SDAS. Αυτό, οφείλεται στο γεγονός πως ο καθοριστικός ελεγκτής του μεγέθους των κόκκων είναι η πυκνότητα των κέντρων πυρήνωσης και σε δευτερεύοντα βαθμό ο ρυθμός απόψυξης.

Ο μέσος όρος του ποσοστού της επιφάνειας που καταλαμβάνουν οι ενδομεταλλικές ενώσεις στις φωτογραφίες των μικροδομών είναι 8,136% και 13,32% για την DC και TRC αντιστοίχως. Φαινόμενο που σχετίζεται με το διαφορισμό που εμφανίζεται εντονότερος στο TRC κυρίως λόγω του μακροδιαφορισμού (CLS) που παρατηρείται στο κεντρικό μέρος του προϊόντος φύλλου της TRC όπου τα κατακρημνίσματα εμφανίζονται πιο ογκώδη λόγω της μεγαλύτερης συγκέντρωσης κραματικών στοιχείων στο κέντρο από την πίεση που ασκούν τα ράουλα της έλασης.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

VI . 2: Σύγκριση Αποτελεσμάτων TRC και Θερμής Έλασης

Ο μέσος όρος του μεγέθους των κόκκων για την μέθοδο TRC είναι 168,08μm ενώ για την Θερμή Έλαση είναι 3,38μm. Η μικροδομή της Θερμής Έλασης παρατηρείται κατά πολύ λεπτομερέστερη. Βεβαίως, οι κόκκοι είναι εξαιρετικά πεπλατυσμένοι και οι μέτρήσεις πάθθηκαν μετρώντας τους εγκάρσια και όχι κατά μήκος.

Ο μέσος όρος του ποσοστού της επιφάνειας που καταλαμβάνουν τα κατακρημνίσματα στις φωτογραφίες της μικροδομής είναι 13,32% και 10,285% για την TRC και την Θερμή Έλαση αντίστοιχα. Γεγονός που οφείλεται και πάλι στην ένταση του μακροδιαφορισμού που εμφανίζεται στο κεντρικό μέρος του φύλλου της TRC.

Τα δοκίμια της TRC παρουσίασαν ελαφρώς μικρότερη σκληρότητα από αυτά της Θερμής Έλασης.

Αναμένουμε τα δοκίμια της TRC να παρουσιάζουν ελαφρώς καλύτερες μηχανικές αντοχές και καλύτερες τιμές ολκιμότητας. Καθώς και καλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω του υψηλότερου ποσοστού ενδομεταλλικών ενώσεων.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

VI .3: Σύγκριση Αποτελεσμάτων DC μεταξύ επιφάνειας και κέντρου πλάκας

Η πλάκα-προϊόν της DC δεν χαρακτηρίζεται από κοινή μικροδομή καθ' όλο το φάσμα του όγκου της, με διαφορές σε χαρακτηριστικά της μικροδομής να εμφανίζονται.

Το SDAS στην επιφάνεια της πλάκας, όπου βρίσκεται σε επαφή με το ψυκτικό μέσο, είναι 28,59μm κατά μέσο όρο ενώ στο κέντρο της πλάκας 44,61μm. Γεγονός που μαρτυρά την διαφοροποίηση της διαφοράς θερμοκρασιακής επαγωγής μεταξύ επιφανείας και κέντρου της πλάκας, και κατ' επέκτασιν την διαφορά του ρυθμού απόψυξης ο οποίος είναι μεγαλύτερος στην επιφάνεια της πλάκας.

Το μέγεθος των κόκκων στην επιφάνεια τη πλάκας είναι 152,67μm και 291,86μm στο κέντρο της. Εδώ, φαίνεται ότι ο ρυθμός απόψυξης είναι υπεύθυνος για την διαφορά του μεγέθους των κόκκων μεταξύ επιφάνεια και κέντρου πλάκας. Προηγουμένως, είχαμε αναφέρει ότι η πυκνότητα των κέντρων πυρήνωσης είναι ο κύριος ελεγκτής του μεγέθους των κόκκων. Έτσι, μπορούμε να υποθέσουμε ότι τα κέντρα πυρήνωσης είναι ομοιογενώς διασκορπισμένα σε όλον τον όγκο της πλάκας και έτσι δεν επηρεάζουν την ανάπτυξη των κόκκων.

Το ποσοστό της επιφάνειας που καταλαμβάνουν τα κατακρημνίσματα στις φωτογραφίες της μικροδομής είναι 7,62% και 6,819% για της επιφάνεια και το κέντρο της πλάκας αντίστοιχα. Τιμές εξαιρετικά κοντινές που μαρτυρούν ότι η κατακρήμνιση δεύτερων φάσεων είναι ομοιογενής σε ολόκληρη την πλάκα.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

VI .4: Σύγκριση Αποτελεσμάτων TRC μεταξύ επιφάνειας και κέντρου φύλλου

Το φύλλο-προϊόν της TRC δεν χαρακτηρίζεται από κοινή μικροδομή καθ' όλο το φάσμα του όγκου του, με διαφορές σε χαρακτηριστικά της μικροδομής να εμφανίζονται.

Το SDAS στην επιφάνεια του φύλλου, όπου βρίσκεται σε επαφή με το ράουλο(εκατέρωθεν), είναι 4,42μm κατά μέσο όρο ενώ στο κέντρο του φύλλου 6,25μm. Γεγονός που μαρτυρά την διαφοροποίηση της διαφοράς θερμοκρασιακής επαγωγής μεταξύ του κέντρου και της επιφάνειας του φύλλου, και κατ' επέκτασιν την διαφορά του ρυθμού απόψυξης ο οποίος είναι μεγαλύτερος στην επιφάνεια του φύλλου.

Το μέγεθος των κόκκων στην επιφάνεια του φύλλου είναι 96,14μm και 131,43μm στο κέντρο της. Αποτελέσματα σχεδόν ανάλογα με αυτά του SDAS γεγονός που μαρτυρά πως στην συγκεκριμένη περίπτωση ο ρυθμός απόψυξης είναι ο κύριος ελεγκτής του μεγέθους των κόκκων. Οπότε είναι ασφαλές να θεωρήσουμε πως τα κέντρα πυρήνωσης είναι ομοιογενώς διασκορπισμένα σε όλων των όγκο της πλάκας και ότι ο έντονος μακροδιαφορισμός στο κέντρο της πλάκας δεν τα επηρεάζει.

Το ποσοστό της επιφάνειας που καταλαμβάνουν τα κατακρημνίσματα στις φωτογραφίες της μικροδομής είναι 10,165% και 16,48 % για την επιφάνεια και το κέντρο της πλάκας αντίστοιχα. Αποτελέσματα τον οποίων η διαφορά προκύπτει από τον έντονο μακροδιαφορισμό στο κέντρο του φύλλου και τα ευμεγέθη κατακρημνίσματα.

Κεφάλαιο VII: Συμπεράσματα

- Τα προϊόντα της DC χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ομοιογένεια στην μικροδομή τους κυρίως λόγω της παρόμοιας έντασης-εμφάνισης του φαινομένου του μακροδιαφορισμού σε όλο τον όγκο του προϊόντος.
- Τα προϊόντα της TRC χαρακτηρίζονται από πιο εκλεπτυσμένη μικροδομή και πιθανώς καλύτερες μηχανικές ιδιότητες αν κρίνουμε από την μικροδομή και καλύτερη σκληρότητα. Αλλά παρουσιάζουν έντονο μακροδιαφορισμό στο κέντρο τους που οδηγεί σε έντονη ανομοιογένεια της μικροδομής του κέντρου με αυτής της επιφάνειας.
- Τα προϊόντα της Θερμής Έλασης χαρακτηρίζονται από μεγάλη ομοιογένεια στην μικροδομή τους, εξαιρετικά πεπλατυσμένους κόκκους. Εδώ, ο υπερκορεσμός είναι πολύ μικρότερος, ειδικά του στερεού διαλύματος μαγγανίου.
- Ο ρυθμός απόψυξης αποτελεί κύριο ελεγκτή του μεγέθους του SDAS και σε δευτερεύοντα βαθμό η πυκνότητα των κέντρων πυρήνωσης. Ενώ, στην περίπτωση του μέσου μεγέθους κόκκων ισχύει το αντίστροφο. Στην περίπτωση βέβαια, όπως είδαμε στην διαφορά μέσου μεγέθους κόκκων μεταξύ επιφάνειας και κέντρου στα δοκίμια της DC, που ο κύριος ελεγκτής(πυκνότητα κέντρων πυρήνωσης) δεν προκαλεί σημαντικά αποτελέσματα ο δευτερεύων ελεγκτής (ρυθμός απόψυξης) είναι αυτός που επιδρά καθοριστικά.
- Τα παραπάνω αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι τα προϊόντα της μοντέρνας μεθόδου της TRC έχουν πλεονεκτήματα (πιο εκλεπτυσμένη μικροδομή) αλλά και μειονεκτήματα (έντονη εμφάνιση μακροδιαφορισμού) έναντι της συμβατικής μεθόδου του DC.
- Επίσης και κυριότερα, τα προϊόντα της TRC έχουν ελαφρώς μεγαλύτερες σκληρότητες με αυτά της Θερμής Έλασης αλλά παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανομοιογένεια στο κέντρο του φύλλου λόγω του μακροδιαφορισμού. Έτσι, δεν μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι κάποια από της δύο μεθόδους είναι προτιμητέα, καθώς αυτό εξαρτάται και από τις απαιτήσεις για ιδιότητες των προϊόντων. Το μόνο σίγουρο είναι ότι η μέθοδος της TRC είναι πλέον εξαιρετικά ανταγωνιστική και εξοικονόμηση χρόνου παραγωγής που προσφέρει είναι δελεαστική για οποιαδήποτε βιομηχανία Αλουμινίου.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Προκειμένου να έχουμε πιο ολοκληρωμένη εικόνα όσον αφορά την σύγκριση των δύο τεχνικών θα ήταν σκόπιμο να γίνουν οι αντίστοιχες συγκρίσεις για επιπλέον κράματα διαμόρφωσης Αλουμινίου.

Επίσης, εξαιρετικά σημαντική θα ήταν μια οικονομικό-τεχνική ανάλυση με σκοπό την σύγκριση των παραγωγικών κύκλων των δύο μεθόδων.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

Βιβλιογραφία

- [1] P. P. D. J. P. Cook, «Development of the twin-roll casting process».
- [2] D. S. M. George E. Totten, Handbook of Aluminium, Vol 1 Physical Metallurgy and Processes, τόμ. 1, New York, New York: Marcel Dekker Inc., 2003.
- [3] D. G. ESKIN, Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminium Alloys, CRC Press.
- [4] Π. Αλέξανδρος, «ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΧΑΛΥΒΑ ΤΥΠΟΥ AISI 310 ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΤΟΥ,» 2013.
- [5] ASM, Elements of Metallurgy and Engineering Alloys, 2008, pp. 41-48.
- [6] R. Lumley, Fundamentals of Aluminium Metallurgy, Great Abington, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [7] F. Hashabi, Alloys Preparation, Properties, Applications, Toronto: WILEY-VCH, 1998.
- [8] V. Zolotarevsky, Casting Aluminium Alloys, Moscow, Pittsburgh: Elsevier, 2007.
- [9] G. Kaufman, Aluminium Alloy Castings, Properties, Processes and Applications, Ohio: ASM International, 2004.
- [10] J. Li, «Precipitation of partially coherent α -Al(Mn,Fe)Si dispersoids and their strengthening effect in AA3003 Alloy».
- [11] K. B. Cantor, Solidification and Casting, Bristol: Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2003.

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

- [12] P. Beeley, Foundry Tenchology, Oxford, MA: Butterworth Heinemann, 1972.
- [13] D. W.Kurtz, Fundamentals of Solidification, Lausanne, 1984.
- [14] A. H. W. N. R. E. Smallman, Modern Physical Metallurgy, Waltham, MA: Elvieser, 2014.
- [15] R.Elliot, «Eutectic Solidification,» σε *Material Science and Engineering*, Manchester, 1984.
- [16] D. M. Stefanescu, Science and Engineering of Casting Solidification, Columbus, Ohaio: Springer, 2009.
- [17] H.R.Muller, Continious Casting, Ulm: DGM, 2006.
- [18] ASM, Handbook of Metals.
- [19] J. P.T.McGlade, «DC Casting of Aluminium: Process Behaviour and Technology».
- [20] D. I. J.F.Grandfield, DIRECT-CHILL CASTING OF LIGHT ALLOYS, TMS, Wiley, 2013.
- [21] H.-W. K. J.-H. C. Yun-Soo Lee, «Process parameters and roll seperation force in horizontal twin roll casting of aluminium alloys».
- [22] J. T. Dionysios Spathis, «The influence of Casting Speed in the as-cast Strip Mechanical Properties of 8079 and 8006 Alloys,» 2013.
- [23] J. A. C.A.Santos, «Modeling of solidification in twin roll strip casting,» *Journal of Materials Processing Tenchology*, 2000.
- [24] J. L.R.Morris, «Centerline Segregation in Twin Roll Cast Aluminium Alloy Slab,» *Journal of Metals*.
- [25] M. C. S. S. a. E. J. Andrew McCormick, «Sour service high t/D UOE linepipe,»

Επίδραση του αργού ρυθμού στερεοποίησης στη μικροδομή του κράματος
διαμόρφωσης Αλουμινίου 3003 κατά την συνεχή χύτευση.

2009.

- [26] G. Dieter, «Mechanical Metallurgy,» 1998.
- [27] T. X.Duan, «Influence of forming parameters on the final subgrain size during hot rolling of aluminium alloy strips».
- [28] S. J. M.Yun, «Twin roll casting of aluminium alloys,» 2000.
- [29] A. R. H. P.D.Lee, «Modeling of porosity formation in direct chill cast aluminum alloys,» σε *Material Science and Engineering*, τόμ. 328, London, Elsevier, 2001, pp. 213-222.
- [30] D. Q. L. K. R.Nadella, «Macrosegregation in direct-chill casting of aluminium alloys,» σε *Progress in Material Science*, τόμ. 53, Delft, Elsevier, pp. 421-480.
- [31] A. L. M. C. A. F. P. J. P. Martins, «Microstructure and texture assessment of Al–Mn–Fe–Si (3003) aluminum alloy produced by continuous and semicontinuous casting processes,» 2009.
- [32] R. H.P.Otomar, Comparison of the microstructure and texture evolution in AA1050 aluminium alloy sheets produced by the DC and CC methods, Sao Paolo: TMS, 2012.
- [33] Total Materia, «Twin Roll Casting Aluminium Alloys: Part 1,» *Total Materia*, April 2014.
- [34] B. N.S.Barekar, «Twin-Roll Casting of Aluminum Alloys – An Overview,» *Materials and Manufacturing Processes*, 2014.
- [35] D.-I. C.Krammer, «Continuous casting of aluminium,» *European Aluminium Association*, 1999.