

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 6061 ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΣΥΝΕΧΗ ΧΥΤΕΥΣΗ ΚΑΙ
ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία-Ελισσάβετ Κ. Σπηλιοπούλου

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος

ΒΟΛΟΣ 2004



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 3936/1
Ημερ. Εισ.: 30-09-2004
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2004
ΣΠΗ

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Πετρόπουλος
Επικ.Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Χασιώτης
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Handwritten signature

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας , Καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο, για την πολύτιμη βοήθειά του και την αμέριστη συμπαράσταση του καθ'όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον Υποψ.Διδάκτωρ Σπύρο Σαμαρά που μου έδωσε τις σωστές καθοδηγήσεις για την εκπόνηση της εργασίας μου αλλά και το υπόβαθρο των γνώσεων που έπρεπε να έχω για να κατανοήσω την πραγματική αξία των πειραμάτων της εργασίας μου. Τον καθηγητή μου κ. Νικόλαο Χασιώτη που ήταν πάντα στο εργαστήριο για χρήσιμες συμβουλές και συμπαράσταση για την δουλειά εκεί αλλά και για την ζωή. Όπως και την Διδάκτωρ Ελένη Καμούτση για τις πολύτιμες πρακτικές της συμβουλές για την χρήση του εργαστηρίου. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμον στην οικογένειά μου για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 6061 ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΣΥΝΕΧΗ ΧΥΤΕΥΣΗ ΚΑΙ
ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗΣ**

ΣΠΗΛΙΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΙΑ-ΕΛΙΣΣΑΒΕΤ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2004

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Καθηγητής Φυσικής
Μεταλλουργίας – Ανάπτυξης Κραμάτων & Σύγχρονων Κατεργασιών.

Περίληψη

Το Αλουμίνιο είναι ένα υλικό που όλο και περισσότερο χρησιμοποιείται στην σύγχρονη τεχνολογία, όπως ο χάλυβας. Το βασικό του χαρακτηριστικό, ότι είναι συγκριτικά ελαφρύτερο από άλλα υλικά, το κάνει να κερδίζει διαρκώς έδαφος στην βιομηχανία. Τελευταία έχει κάνει μία εντυπωσιακή είσοδο στην αυτοκινητοβιομηχανία με μοναδικό πρόβλημα την δυσκολία στην συγκόλληση, για τα περισσότερα κράματά του, που το κάνει και απαγορευτικό. Έτσι η έρευνά σ'αυτή την διπλωματική εργασία ασχολείται με ένα συγκολλησιμο κράμα αλουμινίου, το 6061, το οποίο μπορεί να είναι ανταγωνιστικό του χάλυβα σε αρκετές από τις μηχανικές του ιδιότητες. Σκοπός, λοιπόν, της εργασίας αυτής είναι αφ'ενός μεν να διερευνηθεί ο απαιτούμενος χρόνος ομογενοποίησής του (θερμική κατεργασία) μετά την χύτευσή του για καλύτερη μηχανική συμπεριφορά στις μετέπειτα κατεργασίες διαμόρφωσης, αφ'ετέρου να προσεγγίσουμε την συμπεριφορά του κράματος κατά την διαδικασία της γήρανσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ _____	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ _____	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ _____	x
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ _____	1
1.1 Γενικά _____	3
1.2 Κράματα Αλουμινίου _____	3
1.2.1 Μη θερμικώς κατεργαζόμενα κράματα _____	4
1.2.2 Θερμικώς κατεργαζόμενα κράματα _____	5
1.2.3 Ο ρόλος των κραματικών στοιχείων _____	8
1.3 Κατεργασίες κραμάτων Αλουμινίου _____	10
1.3.1 Καταστάσεις θερμικής κατεργασίας κραμάτων Αλουμινίου (tempers) _____	10
1.3.2 Κατεργασίες κραμάτων Αλουμινίου _____	11
2.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ _____	13
2.1 Χύτευση _____	13
2.2 Ομογενοποίηση _____	17
2.3 Θερμική Κατεργασία Ισχυροποίησης _____	23
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ _____	25
3.1 Προετοιμασία δοκιμών _____	25
3.2 Χύτευση _____	27
3.3 Ομογενοποίηση _____	33
3.3.1 Πρώτος Θερμικός Κύκλος _____	33
3.3.2 Δεύτερος Θερμικός Κύκλος _____	38
3.3.3 Τρίτος Θερμικός Κύκλος _____	42
3.4 Θερμική Κατεργασία Ισχυροποίησης _____	46
4.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ _____	50
5.ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑΣ _____	51
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ _____	52

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ

Φώτο. 2.1.1 : Εικόνες από χυτήριο όπου έχουμε παραγωγή κολώνων μετά από κάθετη χύτευση. (σελ.14)

Φώτο. 2.2.1 : Κράμα 2011 αμέσως μετά τη χύτευση. Στα όρια των κόκκων δομή CuAl_2 . (σελ.20)

Φώτο. 2.2.2 : Ομογενοποιημένο, το ίδιο κράμα, στους 525°C για 12hrs. Η δομή CuAl_2 έχει σχεδόν διαλυθεί. (σελ.20)

Φώτο. 3.2.1 : Χυτό 6061 στο κέντρο της μπιγιέτας, μεγέθυνση x50. (σελ.30)

Φώτο. 3.2.2 : Χυτό 6061 σε ακτίνα $R=5\text{cm}$ από το κέντρο της μπιγιέτας, μεγέθυνση x50. (σελ.30)

Φώτο. 3.2.3 : Χυτό 6061 στην άκρη της μπιγιέτας όπου διακρίνεται και η ψυχρή ζώνη, μεγέθυνση x50. (σελ.31)

Φώτο. 3.2.4 : Χυτό 6061, μεγέθυνση x200. (σελ.31)

Φώτο. 3.2.5 : Χυτό 6061, μεγέθυνση x500. (σελ.32)

Φώτο. 3.2.6 : Χυτό 6061, μεγέθυνση x1000. (σελ.32)

Φώτο. 3.3.1 : Χυτό 6061 του 1ου θερμικού κύκλου μετά από 37min στην άνοδο μέχρι να φτάσει ο φούρνος στους 580°C . Μετά βαφή. Μεγέθυνση x1000. (σελ.35)

Φώτο. 3.3.2 : Χυτό 6061 του 1ου θερμικού κύκλου μετά από 311min, μαζί με την άνοδο μέχρι να φτάσει ο φούρνος στους 580°C . Μετά βαφή. Μεγέθυνση x1000. (σελ.35)

Φώτο. 3.3.3 : Χυτό 6061 του 1ου θερμικού κύκλου μετά από 551min - μαζί με την άνοδο μέχρι να φτάσει ο φούρνος στους 580°C . Μετά βαφή. Μεγέθυνση x1000. (σελ.36)

Φώτο. 3.3.4 : Χυτό 6061 του πρώτου θερμικού κύκλου μετά από 1631min - μαζί με την άνοδο μέχρι να φτάσει ο φούρνος στους 580°C . Μετά τα 551min ο φούρνος κλείνει και το δοκίμιο μένει μέσα. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x1000. (σελ.36)

Φώτο. 3.3.5 : Χυτό 6061 του 2ου θερμικού κύκλου για 20min στους 580°C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x1000. (σελ.39)

Φώτο. 3.3.6 : Χυτό 6061 του 2ου θερμικού κύκλου για 255min στους 580°C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x500. (σελ.40)

Φώτο. 3.3.7 : Χυτό 6061 του 2ου θερμικού κύκλου για 480min στους 580°C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x1000. (σελ.40)

Φώτο. 3.3.8 : Χυτό 6061 του 2ου θερμικού κύκλου μετά από 1440min. Μετά τα 480min ο φούρνος κλείνει και το δοκίμιο μένει μέσα. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x1000. (σελ.41)

Φώτο. 3.3.9 : Χυτό 6061 του 4ου θερμικού κύκλου για 11ώρες στους 580°C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x500. (σελ.43)

Φώτο. 3.3.10 : Χυτό 6061 του 4ου θερμικού κύκλου για 12ώρες στους 580°C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x500. (σελ.43)

Φώτο. 3.3.11 : Χυτό 6061 του 4ου θερμικού κύκλου για 16ώρες στους 580°C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x500. (σελ.44)

Φώτο. 3.3.12 : Χυτό 6061 του 4ου θερμικού κύκλου για 3μέρες στους 580°C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x500. (σελ.44)

Φώτο. 3.3.13 : Χυτό 6061 του 4ου θερμικού κύκλου μετά από 4μέρες. Μετά τις 3 μέρες ο φούρνος κλείνει και το δοκίμιο μένει μέσα. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x500. (σελ.45)

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 3.2.1 : Χημική ανάλυση της μπιγιέτας από την EXALCO σε σύγκριση με τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές που δίνονται από την βιβλιογραφία για το 6061. (σελ.27)

Διάγραμμα 3.2.2 : Σκληρομετρήσεις κατά μήκος της ακτίνας της μπιγιέτας. Τα πειράματα είναι δύο γιατί είναι από την πάνω πλευρά(1) και από το πλάι(2). (σελ.28)

Διάγραμμα 3.2.3 Συγκεντρώσεις των βασικών στοιχείων Mg, Si, Fe, Mn κατά μήκος της ακτίνας της μπιγιέτας. (σελ.29)

Διάγραμμα 3.3.1: Ο θερμικός κύκλος που ακολουθήθηκε στο 1^ο πείραμα. (σελ.33)

Διάγραμμα 3.3.2: Μικροσκληρότητα μετά από ομογενοποίηση στους 580°C και βαφή από την θερμοκρασία αυτή. Το δοκίμιο στα 1631min είχε κρυώσει στον φούρνο μέσα και όχι με βαφή – τιμές: πρώτη μέρα και μετά από μερικές μέρες. (σελ.34)

Διάγραμμα 3.3.3 Ο θερμικός κύκλος που ακολουθήθηκε στο 2^ο πείραμα. (σελ.38)

Διάγραμμα 3.3.4: Μικροσκληρότητα μετά από ομογενοποίηση στους 580°C και βαφή από την θερμοκρασία αυτή. Το δοκίμιο στα 1440 min είχε κρυώσει στον φούρνο μέσα και όχι με βαφή – τιμές: πρώτη μέρα και μετά από μερικές μέρες - πείραμα 2^ο. (σελ.39)

Διάγραμμα 3.3.5: Μικροσκληρότητα μετά από ομογενοποίηση στους 580°C και βαφή από την θερμοκρασία αυτή. Τα τελευταία δύο δοκίμια ψύχθηκαν στον αέρα και στον φούρνο μέσα (με ανοιχτή πόρτα) και όχι με βαφή -πείραμα 4^ο. (σελ.42)

Διάγραμμα 3.4.1 : Από τα αποτελέσματα μικροσκληρότητας μετά από 8h ομογενοποίηση και τεχνητή γήρανση στους 240°C φαίνεται ότι για 20 λεπτά θα έχουμε την μέγιστη σκληρότητα περίπου 102,5HV. (σελ.47)

Διάγραμμα 3.4.2 : Αποτελέσματα μικροσκληρότητας μετά από 8h ομογενοποίηση και τεχνητή γήρανση στους 240°C , με τον χρόνο σε λογαριθμικές μονάδες. (σελ.47)

Διάγραμμα 3.4.3 : Αποτελέσματα μικροσκληρότητας μετά από 8h ομογενοποίηση και τεχνητή γήρανση στους 200°C και στους 240°C. (σελ.48)

Διάγραμμα 3.4.4 : Αποτελέσματα μικροσκληρότητας μετά από 8h ομογενοποίηση και τεχνητή γήρανση στους 160°C, στους 200°C και στους 240°C. (σελ.49)

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.2.1 : Σκληρομετρήσεις κατά μήκος της ακτίνας της μπιγιέτας. Τα πειράματα είναι δύο γιατί είναι από την πάνω πλευρά(*) και από το πλάι(**). (σελ.28)

Πίνακας 3.3.1: Μικροσκληρότητα μετά από ομογενοποίηση στους 580° C και βαφή από την θερμοκρασία αυτή. Το δοκίμιο στα 1631min είχε κρυώσει στον φούρνο μέσα και όχι με βαφή – τιμές: πρώτη μέρα και μετά από μερικές μέρες - πείραμα 1°. (σελ.34)

Πίνακας 3.3.2: Μικροσκληρότητα μετά από ομογενοποίηση στους 580° C και βαφή από την θερμοκρασία αυτή. Το δοκίμιο στα 1440 min είχε κρυώσει στον φούρνο μέσα και όχι με βαφή – τιμές: πρώτη μέρα και μετά από μερικές μέρες - πείραμα 2°. (σελ.38)

Πίνακας 3.3.3: Μικροσκληρότητα μετά από ομογενοποίηση στους 580° C και βαφή από την θερμοκρασία αυτή. Τα τελευταία δύο δοκίμια ψύχθηκαν στον αέρα (*) και στον φούρνο (**) μέσα (με ανοιχτή πόρτα) και όχι με βαφή -πείραμα 4°. (σελ.42)

Πίνακας 3.4.1 : Αποτελέσματα μικροσκληρότητας μετά από 8h ομογενοποίηση και τεχνητή γήρανση στους 240° C. (σελ.46)

Πίνακας 3.4.2 : Αποτελέσματα μικροσκληρότητας μετά από 8h ομογενοποίηση και τεχνητή γήρανση στους 200° C. (σελ.48)

Πίνακας 3.4.3 : Αποτελέσματα μικροσκληρότητας μετά από 8h ομογενοποίηση και τεχνητή γήρανση στους 160° C. (σελ.49)

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο υλικών στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος *‘Ανάλυση & Σχεδιασμός Θερμικών Κατεργασιών και Κατεργασιών Διαμόρφωσης Σκληρών Κραματων Αλουμινίου’* σε συνεργασία με την Ελληνική Βιομηχανία Διέλασης Αλουμινίου EXALCO A.E.

Στόχοι της διπλωματικής αυτής ήταν:

- Να εξεταστεί η μικροδομή του κράματος 6061 μετά από συνεχή χύτευση.
- Να γίνει η θερμική κατεργασία ομογενοποίησης εργαστηριακά
- Να προσδιοριστεί ο βέλτιστος θερμικός κύκλος ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη μικροδομή η οποία βελτιώνει κατά το δυνατό την απόκριση του υλικού κατά το επόμενο στάδιο της διέλασης.

Για την εργασία αυτή και για τις εργαστηριακές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν ακολουθήθηκαν βιβλιογραφικές πηγές από αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για ανάλογα κράματα αλουμινίου.

Αρχικά μελετήθηκε η δομή του χυτού υλικού, το οποίο προμηθεύτηκε το εργαστήριο από την EXALCO, από το κέντρο ως την άκρη – όπου και παρατηρήθηκε σε ένα σημείο η ψυχρή ζώνη – για να δούμε το μέγεθος των δενδριτών και αν αυτό είναι ανάλογο σε όλη την έκταση μιας τομής της μπιγιέτας.

Ακολούθως έγιναν θερμικές κατεργασίες ομογενοποίησης εργαστηριακά για διάφορους θερμικούς κύκλους για να προσδιοριστεί ο βέλτιστος. Αποτέλεσμα της ομογενοποίησης έπρεπε να είναι η καλύτερη δυνατή καθίζηση και διασπορά των κραματικών σωματιδίων μέσα στο κράμα.

Τέλος, βρέθηκαν πειραματικά οι καμπύλες γήρανσης για το συγκεκριμένο κράμα μετά από ομογενοποίηση 8 ωρών και για θέρμανση στους 240°C, 200°C και 160°C.

Η δομή της εργασίας είναι η εξής:

Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια εισαγωγή που αναφέρεται στις σειρές κραμάτων αλουμινίου, στην επίδραση των κραματικών στοιχείων στο κράμα 6061 και στις κατεργασίες κραμάτων αλουμινίου.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση γύρω από τα θέματα που ασχολείται αυτή η διπλωματική εργασία. Δηλαδή την διαδικασία χύτευσης, τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια της ομογενοποίησης αλλά και κατά την τεχνητή γήρανση η οποία είναι απαραίτητη για την ισχυροποίηση του κράματος.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξαγονται από τα πειράματα που έγιναν.

Τέλος, στο 5^ο κεφάλαιο δίνονται κάποιες προτάσεις για περετέρω έρευνα.

1.1 Γενικά

Τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές όπως στην αεροναυπηγική, την αυτοκινητοβιομηχανία, την βιομηχανία τροφίμων ως υλικά συσκευασίας και αλλού. Και αυτό γιατί καταφέρνουν να συνδυάζουν μηχανική αντοχή, αντοχή σε οξείδωση/διάβρωση και χαμηλή πυκνότητα. Διακρίνονται ανάλογα με τις κατεργασίες που έχουν υποστεί σε χυτά και ελατά, σε αυτά που επιδέχονται ή όχι θερμική κατεργασία και ανάλογα με το κραματικό σύστημα στο οποίο βασίζεται η σύστασή τους.

1.2 Κράματα Αλουμινίου

Το σύστημα IADS (International Alloy Designation System) βοηθάει στην εύκολη αναγνώριση των διαφορετικών κραμάτων αλουμινίου από χώρα σε χώρα. Σύμφωνα με αυτό τα διαφορετικά κράματα αναγνωρίζονται από έναν τετραψήφιο αριθμό του οποίου το πρώτο ψηφίο καθορίζει τα βασικά συστατικά του κράματος. Έτσι υπάρχουν οι σειρές:

- 1xxx , με 99% καθαρό *Αλουμίνιο*
- 2xxx , με *Χαλκό* (αλλά και *Μαγνήσιο*) ως βασικά στοιχεία
- 3xxx , με *Μαγγάνιο* (αλλά και *Μαγνήσιο*) ως βασικά στοιχεία
- 4xxx , με *Πυρίτιο* ως βασικό στοιχείο
- 5xxx , με *Μαγνήσιο* ως βασικό στοιχείο
- 6xxx , με *Μαγνήσιο* και *Πυρίτιο* ως βασικά στοιχεία
- 7xxx , με *Ψευδάργυρο* (αλλά και *Μαγνήσιο*) ως βασικά στοιχεία

1.2.1 Μη θερμικώς κατεργαζόμενα κράματα

Στη σειρά 1xxx ανήκουν τα κράματα αλουμινίου τα οποία περιέχουν Αλουμίνιο κατά 99,99 % και αυτά στα οποία έχουν προστεθεί κάποια ποσότητα κραματικών στοιχείων το πολύ 1% . Αυτή η σειρά αλουμινίου έχει πολλές εφαρμογές κυρίως σε ηλεκτρονικά και σε χημικά πεδία. Παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε διάβρωση, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, υψηλή κατεργασιμότητα, αλλά χαμηλές μηχανικές ιδιότητες.

Στη σειρά 3xxx ανήκουν τα κράματα τα οποία έχουν ως βασικό στοιχείο το Μαγγάνιο, συνδυάζουν μια μέτρια σκληρότητα με υψηλή ευπλαστότητα και αντοχή στην διάβρωση. Όταν προστεθεί και Μαγνήσιο στο κράμα τότε έχουμε μία αύξηση της σκληρότητας του στερεού διαλύματος. Ανάλογα με το ποσοστό Μαγνησίου και του Μαγγανίου έχουν διαφορετικές ιδιότητες και εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται για κατασκευή δοχείων για πόσιμα υγρά, για κατασκευή οικιακών εργαλείων κ.α

Στη σειρά 4xxx ανήκουν τα κράματα αλουμινίου που έχουν ως βασικό στοιχείο το Πυρίτιο με συγκέντρωση έως και 12%. Τα κράματα αυτά παρουσιάζουν χαμηλό σημείο τήξης χωρίς να δημιουργείται ευθραυστότητα. Γι'αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως σαν υλικό συγκόλλησης που θα κάνει την ένωση αλλά και σαν συγκολλητικό υλικό ανάμεσα σε κράματα αλουμινίου τα οποία έχουν υψηλότερο σημείο τήξης. Γενικά είναι μη-θερμικώς κατεργάσιμα αλλά όταν χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση θερμικώς κατεργάσιμων κραμάτων τότε θα πάρουν κάποιες ιδιότητες απο τα κράματα αυτά και θα αντιδράσουν θετικά στις θερμικές κατεργασίες αλλά σε μικρό βαθμό.

Στη σειρά 5xxx ανήκουν τα κράματα τα οποία έχουν ως βασικό στοιχείο το Μαγνήσιο με συστάσεις να κυμαίνονται από 0.8% έως 5% . Αντίστοιχα οι μηχανικές τους ιδιότητες λαμβάνουν τιμές από 40MPa έως 310MPa, με την επιμήκυνση να έχει υψηλές τιμές και να ξεπερνά και το 25% . Είναι κράματα με καλή συγκολλησιμότητα αλλά και αντοχή στη διάβρωση ακόμη και σε περιβάλλον όπως το θαλασσινό νερό.

1.2.2 Θερμικώς κατεργαζόμενα κράματα

Στη σειρά 2xxx ανήκουν τα κράματα τα οποία έχουν ως βασικό στοιχείο τον Χαλκό και είναι τα κράματα που έχουν εξεταστεί περισσότερο από τα άλλα. Αυτά τα κράματα απαιτούν θερμική κατεργασία για να αποκτήσουν τις καλύτερες τους ιδιότητες. Στη θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με καθίζηση (γήρανση) οφείλονται οι υψηλές μηχανικές τους ιδιότητες. Οι μηχανικές τους ιδιότητες που αποκτούν με θερμική κατεργασία είναι συνήθως ίδιες ή και καλύτερες και από ένα χάλυβα με χαμηλό ποσοστό άνθρακα. Όμως στα κράματα αυτά δεν συναντούμε μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, όσο σε άλλα κράματα αλουμινίου. Γι'αυτό στα κράματα αυτά όταν δίνεται η μορφή ελασμάτων συνήθως είναι καλυμμένα από καθαρό αλουμίνιο ή από αλουμίνιο της σειράς 6xxx τα οποία μπορούν να γαλβανιστούν ώστε να αντέχουν την διάβρωση.

Τα κράματα της σειράς αυτής είναι κατάλληλα για κατασκευαστικά στοιχεία για τα οποία είναι απαραίτητο να έχουν υψηλή αντοχή συνδυασμένη με μικρό βάρος. Τέτοια στοιχεία είναι ρόδες από φορτηγά και αεροπλάνα, αναρτήσεις φορτηγών, αλλά και ο σκελετός και τα μέρη των πτερυγίων του αεροσκάφους τα οποία έχουν αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Βέβαια εκτός από εξαιρέσεις αυτά τα κράματα έχουν χαμηλή συγκολλησιμότητα, αλλά και καλή επεξεργασιμότητα.

Στη σειρά 6xxx ανήκουν τα κράματα αλουμινίου που έχουν ως βασικά στοιχεία το Μαγνήσιο και το Πυρίτιο. Έχουν μια μέτρια αντοχή αλλά έχουν πλεονεκτήματά τους την καλή συγκολλησιμότητα, την αντοχή τους στην διάβρωση, και την εργοδιάβρωση. Το Μαγνήσιο και το Πυρίτιο σε ισορροπημένες ποσότητες ώστε να έχουμε σχηματισμό του ημιδιαδικού κράματος Al-Mg₂Si (Mg:Si 1.73:1) με λίγο μεγαλύτερη ποσότητα Si ώστε να σχηματιστεί Mg₂Si. Τα κράματα της σειράς αυτής δεν είναι τόσο ισχυρά όσο αυτά της σειράς 2xxx και 7xxx, αλλά μπορούν να επεξεργαστούν με θερμική κατεργασία και μετά την μορφοποίησή τους να ισχυροποιηθούν με την κατεργασία της γήρανσης λόγω καθίζησης της φάσης Mg₂Si. Συγκεκριμένα το κράμα 6061 –που είναι και αυτό που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα- είναι αυτό που έχει και μεγάλη ποσότητα Mg₂Si στη θερμοκρασία γήρανσης. Αυτά τα κράματα εκτός από κάποιες εφαρμογές στην αρχιτεκτονική μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή σκελετού του ποδηλάτου, ή άλλων μεταφορικών μέσων και τέλος σε κάποια μέρη γεφυρών και μέρη που συγκολλούνται. Στα κράματα αυτά αν δεν έχουμε αρκετό Μαγγάνιο και Χρώμιο τότε δημιουργούνται ενώσεις πλούσιες σε Σίδηρο όπως Fe₃SiAl₁₂ και Fe₂Si₂Al₉ ή μίγμα των δύο ενώσεων ανάλογα με τα ποσοστά στο κράμα των Μαγνησίου, Σιδήρου και Πυριτίου. Οι δευτερεύουσες διαμεταλλικές φάσεις που δημιουργούνται κατά την στερεοποίηση της σειράς 6xxx και οι οποίες φαίνονται κάτω από προϋποθέσεις και με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου είναι η β-φάση Mg₂Si καθώς και φάσεις του Σιδήρου όπως οι Al₁₃Fe₄ και AlFeSi.

Στη σειρά Zxxx ανήκουν τα κράματα αλουμινίου που έχουν ως βασικά στοιχεία τον Ψευδάργυρο και το Μαγνήσιο. Είναι από τα κράματα που δέχονται τεχνητή γήρανση αν και συνήθως τα πολύ ισχυρά κράματα της σειράς αυτής συνήθως έχουν ως κραματικό στοιχείο και τον Χαλκό. Βέβαια σ'αυτή την υποκατηγορία της σειράς ανήκουν κράματα τα οποία είναι μέτριας αντοχής και αυτά συνήθως έχουν ελάχιστο έως καθόλου Χαλκό αλλά έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν εύκολα να συγκολληθούν. Η διαφορά τους από τα άλλα συγκολλησιμα κράματα είναι ότι μπορούν να έχουν φυσική γήρανση στη θερμοκρασία δωματίου. Επιπλέον η αντοχή που αποκτά το κράμα αυτό αλουμινίου δεν επηρεάζεται από την ταχύτητα ψύξης καθώς πέφτει από τις υψηλές θερμοκρασίες της συγκόλλησης και ούτε από την ίδια την θερμοκρασία. Επιπλέον υπάρχει μια αξιοσημείωτη ανάκαμψη την αντοχής σε εφελκυσμό μετά την συγκόλληση που φτάνει γύρω στα 320 Mpa χωρίς επιπλέον θερμική κατεργασία. Στην άλλη υποκατηγορία της σειράς 7xxx, που έχουν ως βασικό στοιχείο και τον Χαλκό ,εκτός απο τον Ψευδάργυρο και το Μαγνήσιο, έχουν άμεση αντίδραση στην τεχνητή γήρανση. Ένα κράμα με ποσοστό Χαλκού 2.5% μπορεί να φτάσει και στα 580 Mpa αντοχή εφελκυσμού, όταν το ντουραλουμίνιο φτάνει τα 420 Mpa. Τα κράματα της σειράς 7xxx χαρακτηρίζονται και ως «αεροπορικά» γιατί πολλά από αυτά χρησιμοποιούνται σε πολλά μέρη του αεροσκάφους. Γενικά το μεγαλύτερο μέρος των αεροσκαφών αποτελείται από αλουμίνιο, σε ποσοστό που φτάνει και το 80%. Πολλά από αυτά ανήκουν στη σειρά 7xxx, άλλα στην σειρά 2xxx, ενώ μερικά στη σειρά 6xxx.

1.2.3 Ο ρόλος των κραματικών στοιχείων

Επίδραση Si Αξιοσημείωτη είναι η επίδραση του **Πυρίτιου** στα κράματα αλουμινίου αφού έχουμε βελτίωση των χαρακτηριστικών της χύτευσης. Προσθέτοντας Πυρίτιο σε κράμα αλουμινίου βελτιώνει τη ρευστότητα, βοηθά στην αντίσταση στο φαινόμενο “hot tear” και στα χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας.

Επίδραση Mg Όταν προστεθεί **Μαγνήσιο** στο κράμα Αλουμινίου-Χαλκού το θετικό αποτέλεσμα είναι η αύξηση της σκληρότητας μετά την θερμική κατεργασία και την βαφή. Στα κατεργασμένα κράματα έχουμε μία αύξηση της αντοχής που συνοδεύεται και από μία αύξηση της ελαστικότητας όταν έχουμε φυσική γήρανση. Η αντοχή στην διάβρωση εξαρτάται από την ποσότητα Μαγνησίου αλλά και από την θερμική κατεργασία.

Επίδραση Fe Ο **Σίδηρος** έχει μεγάλη διαλυτότητα στο Αλουμίνιο και γι'αυτό μπορεί να διαλυθεί εύκολα σε όλα τα χυτά στάδια της κατεργασίας. Η διαλυσιμότητα αυτή όμως είναι μικρή στη στερεή κατάσταση. Όταν το κράμα αλουμινίου περιέχει **Σίδηρο** έχει αντοχή ενάντια στο “hot tear”. Αύξηση της αναλογίας του σιδήρου στο κράμα συνοδεύεται από μείωση της ελαστικότητας. Ο Σίδηρος δημιουργεί πάρα πολλές αδιάλυτες στο αλουμίνιο φάσεις, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την αντοχή των κραμάτων ιδιαίτερα στις υψηλές θερμοκρασίες. Όμως καθώς αυτές οι φάσεις αυξάνουν όσο αυξάνει το ποσοστό του Σιδήρου στο κράμα αυτό έχει αρνητικά αποτελέσματα στη ροή και την τροφοδοσία της χύτευσης.

Επίδραση Cr Το Χρώμιο είναι σύνηθες κραματικό στοιχείο στα κράματα της σειράς 2xxx αλλά και της 6xxx και γενικά δεν ξεπερνά ποσότητα του 0.35% του κράματος. Το Χρώμιο χρησιμοποιείται στο να εμποδίσει την ανακρυστάλλωση σε μηχανικές κατεργασίες διαμόρφωσης και κατά την θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης. Η σκληρή δομή που προσδίδει το Χρώμιο στο υλικό μειώνει την ευπάθειά του στη διάβρωση και αυξάνει την σκληρότητα. Κατά την στερεά διαλυτότητα το χρώμιο καταφέρει να αυξήσει την σκληρότητα. Η παρουσία του Χρωμίου αυξάνει την αντοχή σε διάβρωση και σκληρότητα λόγω στερεάς διαλυτότητας.

Επίδραση Mn Ο συνδυασμός Μαγνησίου-**Μαγγανίου** ισχυροποιεί τα κράματα αλουμινίου κάτω από συνθήκες εργοσκληρυνσης αλλά δίνει αντοχή στην διάβρωση και καλή συγκολλησιμότητα.

Επίδραση Cu Τα κράματα που περιέχουν **Χαλκό** σαν ένα από τα βασικά κραματικά στοιχεία (περίπου 2-10%) είναι από τα σημαντικότερα κράματα του αλουμινίου. Και τα χυτά αλλά και τα κατεργαζόμενα αλουμινίου αποκρίνονται στην διαλυτότητα κατά την θερμική κατεργασία και διαδοχικά στη γήρανση με αποτέλεσμα μια αύξηση στην αντοχή και τη σκληρότητα και μια μείωση στην αντοχή της επιμήκυνσης. Η αντοχή γίνεται μέγιστη όταν το κράμα περιέχει 4-6% Χαλκό και ανάλογα βέβαια και με τα άλλα κραματικά στοιχεία. Όπως φαίνεται και από την βιβλιογραφία με τις περισσότερες θερμικές διεργασίες όσο περισσότερο Χαλκό περιέχει το κράμα τόσο μεγαλώνει η σκληρότητα μετά τη κατεργασία με όριο 6-7% στη συγκέντρωση Χαλκού.

Επίδραση Zn Δεν παρατηρούνται ιδιαίτερα πλεονεκτήματα προσθέτοντας **Ψευδάργυρο** σε κράμα αλουμινίου. Ωστόσο όταν συνδυάζεται με την παρουσία χαλκού ή / και μαγνησίου έχουμε καλά αποτελέσματα στην θερμική κατεργασία ή στη φυσική γήρανση με ορισμένους συνδυασμούς.

1.3 Κατεργασίες κραμάτων Αλουμινίου

1.3.1 Καταστάσεις θερμικής κατεργασίας κραμάτων Al (tempers)

Τα κράματα που επιδέχονται θερμική κατεργασία αποκτούν την μέγιστη αντοχή τους μέσω της διαδικασίας της τεχνητής γήρανσης που χαρακτηρίζεται από το σύμβολο T6 (temper). Άλλα συνηθισμένα tempers για το κράμα 6061 είναι τα: T3, T4 και T8

T3, Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, Ψυχρή κατεργασία και Φυσική Γήρανση. Πρόκειται για μια διαδικασία στην οποία η ψυχρή κατεργασία μετά τη θερμή διάλυση δίδει σκληρότητα στο κράμα και οι μηχανικές ιδιότητες σταθεροποιούνται με την φυσική γήρανση.

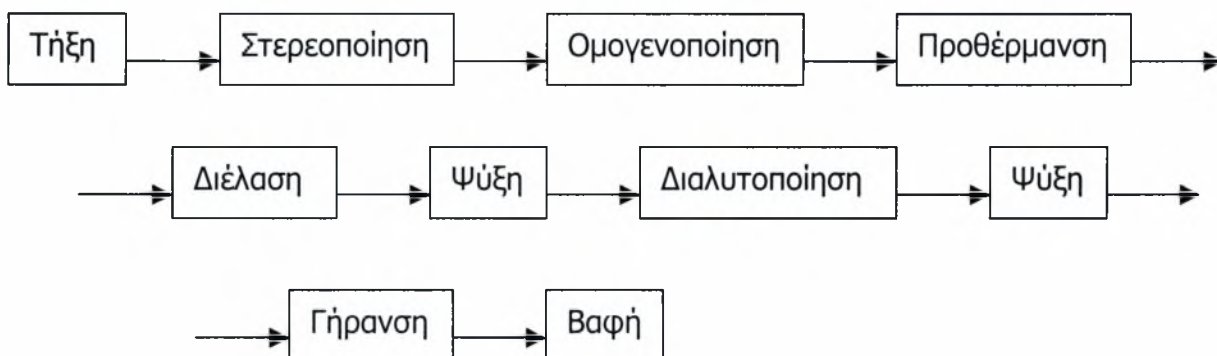
T4, Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και Φυσική. Αυτά τα κράματα δεν χρειάζονται Ψυχρή κατεργασία για να επιτευχθούν οι βέλτιστες Μηχανικές τους Ιδιότητες.

T6, Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και Τεχνητή Γήρανση. Μετά την διαλυτοποίηση από τη θερμική κατεργασία δεν χρησιμοποιούμε την Ψυχρή Κατεργασία για να έχουμε τις Μηχανικές ιδιότητες που θέλουμε αλλά την καθίζηση φάσεων ισχυροποίησης.

T8, Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, Ψυχρή κατεργασία και Τεχνητή Γήρανση. Αυτή η κατεργασία συνηθίζεται όταν ένα κράμα έχει υποστεί ψυχρή κατεργασία για να βελτιώσει την σκληρότητα μετά την θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης - μέσω της γήρανσης - και να διατηρήσει τις Μηχανικές ιδιότητες που έχει μετά την καθίζηση από την θερμική κατεργασία.

1.3.2 Κατεργασίες κραμάτων Αλουμινίου

Διάγραμμα Ροής



Παραπάνω βλέπουμε το διάγραμμα που παρουσιάζει μια τυπική γραμμή παραγωγής διέλασης κραμάτων αλουμινίου για την κατασκευή ευθύγραμμων μεταλλικών προϊόντων μεγάλου μήκους, όπως τα προφίλ αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στην αρχιτεκτονική. Αρχικά τοποθετείται το καθαρό Αλουμίνιο και όλα τα κραματικά στοιχεία σε αντίστοιχα ποσοστά σε σχέση με το αλουμίνιο ώστε το αποτέλεσμα να μας δίνει το κράμα αλουμινίου που θέλουμε – και αν υπάρχει σκραπ από το ίδιο κράμα. Όλα αυτά μέσα στον επαγωγικό φούρνο, ο οποίος λιώνει όλα τα μέταλλα ώστε να έχουμε ένα ομοιογενές αποτέλεσμα. Μετά χύνεται το λιωμένο μέταλλο στα καλούπια για να στερεοποιηθεί. Ακολούθως το στερεοποιημένο πια μέταλλο σε μορφή μπιγιέτας πρέπει να περάσει στην φάση της ομογενοποίησης γι'αυτό μπαίνει μέσα σε βιομηχανικούς φούρνους για μερικές ώρες. (Στην EXALCO το κράμα 6063 για 8hrs). Πριν από την διέλαση οι μπιγιέτες πρέπει να θερμανθούν για να διατηρηθεί το όριο διαρροής χαμηλό. Ακολουθεί η διέλαση που δίνει το σχήμα που θέλουμε στο κράμα. Μετά την διέλαση αφήνουμε το προφίλ να ψυχθεί και μετά περνά στην φάση της διαλυτοποίησης για να εξαληφθούν οι ατέλειες που δημιουργήθηκαν στην επιφάνειά του, από τη διέλαση, αφού καθώς εξέρχεται από την μήτρα αναπτύχθηκαν στα εξωτερικά του

μέρη υψηλότερες θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία της διαλυτοποίησης μπορεί να φτάσει και τους 480° C. Μετά έχουμε ταχεία ψύξη για το προφίλ το οποίο έχει πάρει πλέον το τελικό του σχήμα. Από εκεί μετά πρέπει να περάσει από θερμική κατεργασία τεχνητής γήρανσης, για να αποκτήσει την τελική του σκληρότητα. Εδώ οι τιμές της θερμοκρασίας κυμαίνονται γύρω στους 160° C. Τελικό στάδιο της γραμμής παραγωγής είναι η βαφή του κράματος σε διάφορα χρώματα.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Χύτευση

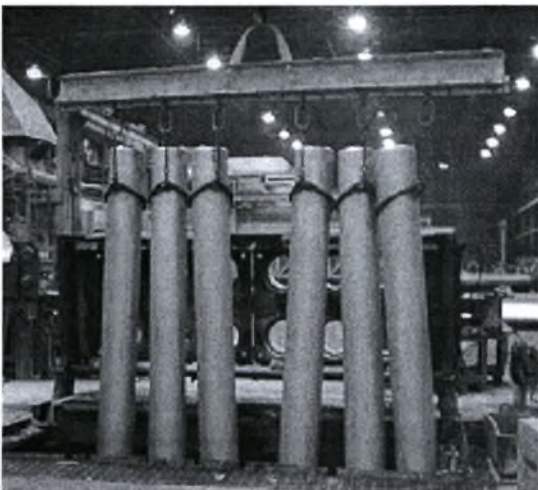
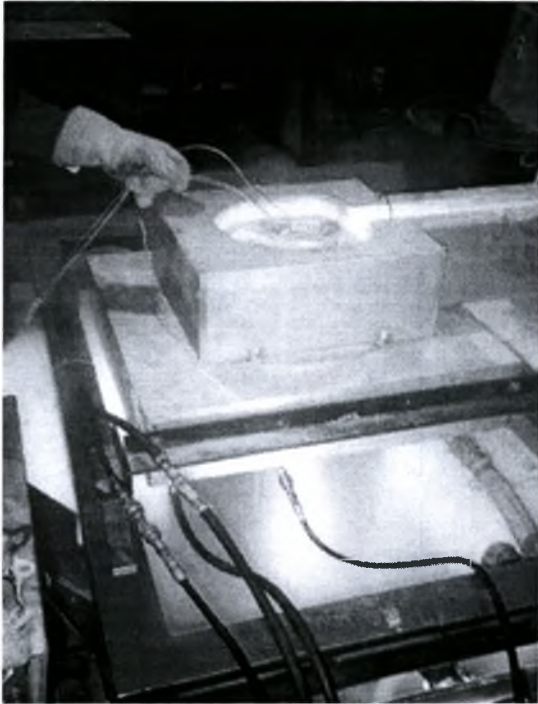
Ένα μεγάλο ποσοστό των κραμάτων αλουμινίου, περίπου το 85% , χρησιμοποιείται για μηχανικά κατεργασμένα προϊόντα όπως είναι διαφόρων ειδών μεταλλικά ελάσματα, σωλήνες, μεταλλικές ράβδοι, σύρμα κ.α. Αυτά τα προϊόντα έχουν κατασκευαστεί από χυτό πλινθώματα η κατασκευή των οποίων έχει μεταβληθεί αρκετά από τις διάφορες μηχανικές και θερμικές κατεργασίες που έχουν υποστεί. Κάθε τύπος κράματος συμπεριφέρεται διαφορετικά και η σύνθεσή του και η κατασκευή του ορίζει τα μηχανικά του χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες που δημιουργήθηκαν.

Οι ράβδοι ετοιμάζονται για την συνεχή χύτευση λιώνοντας πρώτα το καθαρό αλουμίνιο, το σκραπ και τα κραματικά στοιχεία, ανάλογα με το κράμα το οποίο θέλουμε και όλα αυτά σε έναν φούρνο. Το πιο ουσιαστικό κατά την χύτευση για την δημιουργία καλής ποιότητας κράματος είναι η προσεκτική ανάμιξη των συστατικών με αποτελεσματική τήξη, αφαίρεση αερίων και φίλτρανση του λιωμένου μετάλλου πριν την στερεοποίηση ώστε να απομακρυνθούν τα απορρίμματα, τα οξειδία, άλλα αέρια και άλλα μη μεταλλικά στοιχεία που είναι ανεπιθύμητα.

Πιο συνηθισμένη μέθοδος χύτευσης-και αυτή που χρησιμοποιείται και στην EXALCO- είναι αυτή που το υλικό μεταφέρεται υγρό στα καλούπια τα οποία είναι ράβδοι που προχωρούν σε κάθετη κατεύθυνση προς τα κάτω και συνεχώς τροφοδοτούνται, ενώ η βάση οποία μετακινείται προς τα κάτω κατά την διάρκεια της στερεοποίησης. Τα υδρόψυκτα καλούπια στο τέλος δημιουργούν κολώνες στερεού μετάλλου στις οποίες τελευταίο σημείο στερεοποίησης είναι το κέντρο.

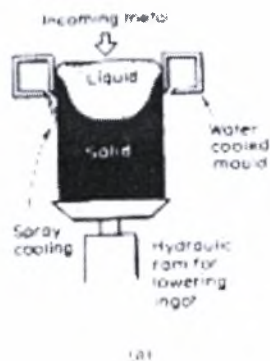
Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την διπλωματική αυτή εργασία χυτεύθηκε στις εγκαταστάσεις της EXALCO A.E. με τη κάθετη μέθοδο. Συνολικά, παράχθηκαν 22 κολόνες, μήκους 4m και διαμέτρου 20cm σε δύο χυτεύσεις. Η

θερμοκρασία υγρού μετάλλου μέσα στο καλούπι κατά την αρχή της χύτευσης ήταν 680-695°C, ενώ η ταχύτητα χύτευσης ήταν 90mm/min.



Φώτο 2.1.1

Εικόνες από χυτήριο όπου έχουμε παραγωγή κολώνων μετά από κάθετη χύτευση.



Στο διπλανό σκίτσο βλέπουμε την κάθετη χύτευση όπως γίνεται και στην EXALCO. Παρατηρούμε ότι από πάνω γίνεται η χύτευση και περιμετρικά γίνεται η ψύξη με νερό. Η βάση συνεχώς κατεβαίνει προς τα κάτω για να προστίθεται συνεχώς νέο υλικό. Εδώ φαίνεται και η κατεύθυνση της στερεοποίησης η οποία είναι από έξω προς τα μέσα.

Το κράμα που μελετάμε είναι το τριμερές Al-Mg-Si και γι'αυτό το κράμα όταν οι συγκεντρώσεις των Mg : Si έχουν λόγο 1,73:1 τότε το κράμα μας γίνεται ψευδοδιμερές. Έτσι η ευτηκτική αντίδραση που γίνεται θα είναι



Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί αποδεικνύουν ότι πρέπει να συμβαίνουν ημι-περιπικτικές αντιδράσεις εξαιτίας της παρουσίας Σιδήρου όπως,



κατά την στερεοποίηση. Όμως συμβαίνουν πιο σύνθετες αντιδράσεις κατά την διάρκεια της στερεοποίησης στα πλούσια σε Σίδηρο κράματα και πιστεύεται ότι έχουν σημαντική επίδραση τόσο στην στερεοποίηση όσο και στις δυνατότητες του κράματος για χρήση του. Κατά την στερεοποίηση πραγματοποιούνται και οι παρακάτω αντιδράσεις.



Οι αντιδράσεις αυτές είναι ευτηκτικές εκτός από τις (2) και (4) οι οποίες είναι ημι-περιτηκτικές. Η στερεοποίηση συχνά δεν γίνεται κάτω από συνθήκες ισορροπίας και έτσι κάποιες από τις παραπάνω αντιδράσεις ίσως να εμποδίζονται, ενώ και άλλες μεταβατικές αντιδράσεις μπορεί να επηρεάζονται.

Στο κεφάλαιο των πειραμάτων (3^ο) φαίνονται από τις μεταλλογραφίες τα πιθανά μέρη των παραπάνω φάσεων, γνωρίζοντας από την βιβλιογραφία ότι η φάση $\beta\text{-Mg}_2\text{Si}$ είναι οι μαύρες περιοχές και τα μικρά σωματίδια, ενώ οι φάσεις Σιδήρου είναι οι γκριζες και οι βελονοειδούς τύπου περιοχές.

2.2 Ομογενοποίηση

Μετά την χύτευση πρέπει το κράμα να περάσει από την διεργασία της ομογενοποίησης σε θερμοκρασία περίπου μεταξύ 450-600°C . Αυτό έχει ως στόχο:

1. Ελαχιστοποίηση της επίδρασης του μικροδιαφορισμού.
2. Μετακίνηση του ευκτικτικού σημείου, όπου δεν έχουμε ισορροπία και το σημείο τήξης είναι χαμηλό και το οποίο μπορεί να προκαλέσει ρηγμάτωση μετά από συνεχόμενες κατεργασίες.
3. Καθοδηγούμενη ιζηματοποίηση μεγάλης συγκέντρωσης στοιχείων που διαλύονται κατά την στερεοποίηση.
4. Αποφυγή της ανακρυστάλλωσης κατά την διέλαση μέσω μιας ελεγχόμενης επανακαθίζησης των δευτερευουσών ενδομεταλλικών φάσεων. Η ανακρυστάλλωση είναι η πυρήνωση και η ανάπτυξη νέων μικρών κόκκων εις βάρος των παλιών με αποτέλεσμα την μείωση της σκληρότητας του κράματος. Αυτό γίνεται εξαιτίας της μείωσης της αποθηκευμένης ενέργειας.

Η ομογενοποίηση κυρίως περιλαμβάνει την διάχυση των κραματικών στοιχείων από τα όρια των κόκκων και από άλλες περιοχές που είναι πλούσιες σε κραματικά στοιχεία, στο εσωτερικό των κόκκων. Ο χρόνος που χρειάζεται εξαρτάται από τις αποστάσεις διάχυσης - εδώ το μέγεθος των κόκκων – αλλά και την τάξη της διάχυσης των κραματικών στοιχείων. Υπάρχει ο τύπος $x=(Dt)^{1/2}$, όπου D είναι ο συντελεστής διάχυσης, που μπορεί να αποτελέσει μια ένδειξη για το που κυμαίνεται ο χρόνος που είναι απαραίτητος για την ομογενοποίηση. Γενικά ο χρόνος αυτός είναι μεταξύ 6-24 ώρες, ανάλογα με τα κραματικά στοιχεία και τις συνθήκες της χύτευσης.

Η ομογενοποίηση είναι κυρίως σημαντική για τα υψηλής αντοχής κράματα αφού εξυπηρετεί στην καθίζηση και την ανακατανομή των σωματιδίων των

διαμεταλικών ενώσεων όπως είναι ενώσεις του Σιδήρου. Είναι απαραίτητο να διασκορπιστούν ομοιόμορφα τα σωματίδια στο εσωτερικό των κόκκων ώστε να αποφύγουμε προβλήματα κατά την διάρκεια συνεχόμενων κατατεργασιών και θερμών επεξεργασιών.

Για την ομογενοποίηση διαφορετικών κραμάτων πρέπει να συνυπολογιστούν διαφορετικοί παράγοντες. Όταν θέλουμε να πετύχουμε την καθίζηση κάποιων συστατικών στοιχείων τότε θα ο χρόνος και η θερμοκρασία είναι δύο σημαντικοί παράγοντες, αλλά και ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η θερμοκρασία μέχρι την θερμοκρασία ομογενοποίησης είναι αποφασιστικής σημασίας. Ένας συγκριτικά χαμηλός ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας θα μπορούσε να βοηθήσει στην ανάπτυξη κόκκων με λεπτή και ομοιόμορφη διασπορά των συστατικών.

Η Ομογενοποίηση αναγκαία πριν από την ελάση και την διέλαση

Τα χυτά κράματα αλουμινίου συνήθως διαλυτοποιούνται με θερμική κατεργασία πριν την τεχνητή γήρανση και πρώτου υποστούν διέλαση ή έλαση. Αυτό γίνεται για τους εξής λόγους:

- να μεταφερθούν σωματίδια στο εσωτερικό του κόκκων και να μειωθεί ο μικροδιαφορισμός, ο οποίος δίνει περιοχές με χαμηλό σημείο τήξης, για να αποφύγουμε το φαινόμενο "tearing"
- να στρογγυλεύουν σωματίδια που έχουν αιχμηρές γωνίες, τα οποία κάνουν το κράμα ελατό και δημιουργούν οπές σε λεπτού τοιχώματος προϊόντα.
- να μορφοποιούνται δευτερογενή σωματίδια τα οποία θα ελέγχουν το μέγεθος των κόκκων κατά τη διάρκεια της έλασης και της διέλασης.
- να πετυχαίνεται μια ομοιόμορφη ανακατανομή των κραματικών στοιχείων κατά την στερεή διαλυτοποίηση.

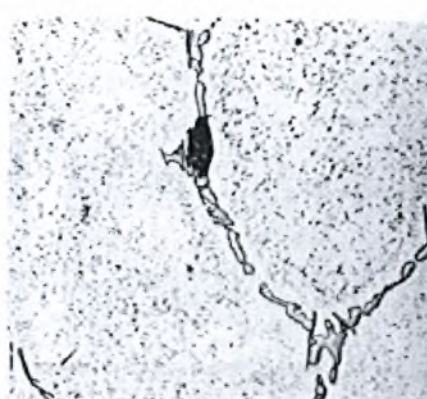
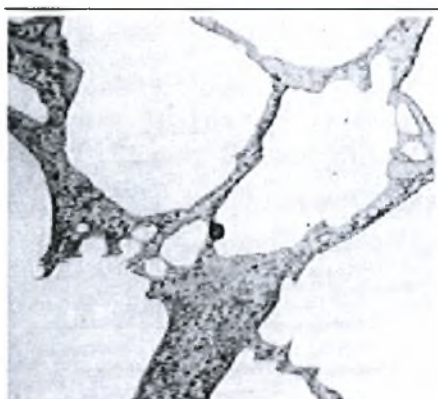
Κατά την διάρκεια της βιομηχανικής ομογενοποίησης θα έχουμε τρία στάδια από τα οποία θα περάσει το αλουμίνιο. Αρχικά θέρμανση μέχρι κάποια θερμοκρασία μετά σταθεροποίηση σ'αυτή για κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και τέλος ψύξη.

Όταν το αλουμίνιο είναι αρχικά σε θερμοκρασία δωματίου είναι σε κατάσταση υπερκορεσμού και με την θέρμανση έχουμε διαλυτοποίηση και τότε τα σωματίδια - κυρίως το Mg_2Si για το κράμα 6061 - μεταφέρονται στο εσωτερικό των κόκκων και καθιζάνουν. Πολλά από τα στοιχεία που μόλις είχαν καθιζάνει επαναδιαλύονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες και αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πυρήνες σε άλλα σωματίδια. Τα σωματίδια που τείνουν να ομογενοποιηθούν είναι των στοιχείων Fe, Cr, Mn και Zr. Αυτά προκαλούν διασκόρπισμα παρότι μπορεί να επαναδιαλυτοποιηθούν προτού φτάσει το κράμα στην θερμοκρασία της ομογενοποίησης. Ένα ακόμη γεγονός που λαμβάνει χώρα εκείνη τη στιγμή είναι τοπικό λιώσιμο. Κατά την στερεοποίηση στην βιομηχανία οι ταχύτητες είναι αυξημένες με αποτέλεσμα να έχουμε λίγο χρόνο για στερεή διάχυση και άρα το τελευταίο υγρό σημείο που στερεοποιείται να έχει ευτυκτική σύσταση. Άρα η απότομη θέρμανση μετά θα έχει ως αποτέλεσμα το λιώσιμο πάλι στην ίδια θερμοκρασία ακόμη και αν η θερμοκρασία τήξης του κράματος είναι αρκετά υψηλότερη.

Χαμηλότερη ταχύτητα θέρμανσης θα δώσει την ευκαρία στις φάσεις με χαμηλό σημείο τήξης να διαλυθούν. Έτσι για την περίπτωση της βιομηχανίας η ταχύτητα εξαρτάται από τον φούρνο, αλλά είναι ένας παράγοντας που βρίσκεται υπό διερεύνηση. Όσον αφορά την θερμοκρασία που θα γίνει η διαλυτοποίηση, διαλέγεται η υψηλότερη δυνατή θερμοκρασία ώστε να μην πλησιάσει την θερμοκρασία τήξης του κράματος. Κατά το χρονικό εκείνο διάστημα πραγματοποιούνται η εξάλειψη των ευτυκτικών φάσεων που έχουν χαμηλό σημείο τήξης, η στρογγυλοποίηση σωματιδίων βελονοειδούς μορφής και μετατροπή των φάσεων Σιδήρου σε άλλες φάσεις του. Τέλος σημαντική είναι η εξομάλυνση της μεγάλης συγκέντρωσης φάσεων Mg_2Si και Σιδήρου στα όρια των δενδριτών.

Καθίζηση των Mg, Si, και Cu σαν σωματίδια κατά την διάρκεια της ψύξης κυρίως δεν επιθυμείται. Η απομάκρυνση των κατακαθίσεων των φάσεων ήταν είναι ο κύριος στόχος της ομογενοποίησης.

Για οικονομικούς λόγους η θερμική κατεργασία στην βιομηχανία πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο σύντομη. Αυτό δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί και με χαμηλής ταχύτητας θέρμανση, μακράς διάρκειας σταθερή θερμοκρασία και ακόμη και αργή ψύξη. Γι'αυτό η ομογενοποίηση πρέπει να συνδιάζει όλα αυτά αλλά και να κάνει τελικά συμβιβασμούς.



Φώτο 2.2.1 Κράμα 2011 αμέσως μετά τη χύτευση. Στα όρια των κόκκων δομή $CuAl_2$.

Φώτο 2.2.2 Ομογενοποιημένο, το ίδιο κράμα, στους $525^{\circ}C$ για 12hrs. Η δομή $CuAl_2$ έχει σχεδόν διαλυθεί.

Το παραπάνω παράδειγμα μας δείχνει πόσο έχει διαλυθεί η φάση $CuAl_2$ και έχει φύγει υλικό από τα όρια των κόκκων που ήταν αρχικά (φώτο 2.2.1) και έχει μεταφερθεί στο εσωτερικό τους (φώτο 2.2.2). Αυτό είναι ένα παράδειγμα από την βιβλιογραφία που παρουσιάζει την εμφάνιση που έχει ένα ομογενοποιημένο κράμα Αλουμινίου.

Φάσεις κατά την Ομογενοποίηση για τα κράματα δxxx

Στα κράματα αλουμινίου δημιουργούνται κάποιες φάσεις ανάλογα με την σειρά στην οποία ανήκει το κράμα αυτό. Για την σειρά δxxx αυτές οι φάσεις είναι:

- **α -Al(Mn,Fe)Si**
- **β -AlFeSi**
- **η -AlMgFeSi (λιγότερο)**
- **Mg_2Si**
- **Si**

Τα πρώτα τρία ανήκουν στην κατηγορία των Mn, Fe σωματιδίων τα οποία δεν διαλυτοποιούνται τελείως στα βιομηχανικά κράματα και τα δύο τελευταία στην κατηγορία των Mg, Si σωματιδίων. Παρακάτω βλέπουμε τα κύρια στάδια της πυρήνωσης, ανάπτυξης και διαλυτοποίησης κατά την διάρκεια της ομογενοποίησης. Διάφορες ασταθείς φάσεις πυρηνώνονται κατά την διάρκεια της πρώτης φάσης της θέρμανσης οι οποίες, όμως, δύσκολα διακρίνονται. Στους 400°C περίπου είναι ορατές δευτερεύουσες φάσεις Μαγνησίου και Πιριτίου. Ενώ μετά διακρίνονται και οι φάσεις Μαγγανίου και Σιδήρου στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Πυρήνωση είναι η διαδικασία κατά την οποία έχουμε καθίζηση μιας φάσης (π.χ α-φάσης) μέσα σε ένα υπέρκορο στερεό διάλυμα άλλης φάσης ή του κράματος. Αρχικά έχουμε διάχυση της φάσης-α μέσα στο διάλυμα και άρα συνεπάγεται την δημιουργία νέας επιφάνειας, αυτής μεταξύ του α και του διαλύματος.

Ανάπτυξη είναι μια διεργασία, η οποία ακολουθεί την πυρήνωση της νέας φάσης, έως ότου η νέα φάση αποκτήσει το ποσοστό ισορροπίας, όπως αυτό ορίζεται από το διάγραμμα φάσεων.

Στα τρία στάδια της ομογενοποίησης τα φαινόμενα τα οποία συμβαίνουν είναι τα παρακάτω:

Κατά την Θέρμανση:

Πυρήνωση, ανάπτυξη και μερική επανδιαλυτοποίηση των φάσεων Mn και Fe.

Πυρήνωση, ανάπτυξη και διαλυτοποίηση των φάσεων Mg και Si.

Όταν έχουμε σταθερή θερμοκρασία:

Διάχυση των στοιχείων Fe, Si, Mn, Mg. Μεγαλώνουν, στρογγυλεύουν και μετατρέπονται σε φάσεις Fe και Mn. Διαλυτοποιούνται οι φάσεις Mg και Si.

Κατά την Ψύξη:

Πυρήνωση των φάσεων Fe και Mn.

Πυρήνωση και ανάπτυξη των φάσεων Mg και Si.

Γενικά οι φάσεις που δημιουργούνται αρχικά είναι σχεδόν ασταθής και όσο η θερμοκρασία αυξάνεται αυτές είτε διαλύονται είτε μετασχηματίζονται. Έτσι ισχύει:

- Κατά την διάρκεια της θέρμανσης και της ψύξης θα υπάρξει τουλάχιστον μία φάση που θα περιέχει κάθε ένα από τα στοιχεία του κράματος.
- Στην βιομηχανική μέθοδο ομογενοποίησης τα κράματα είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε όλες οι φάσεις εκτός αυτών του σιδήρου να διαλυτοποιούνται στην θερμοκρασία ομογενοποίησης. Οι φάσεις που φέρουν σίδηρο δεν μπορούν να αποφευχθούν παρά μόνο με υψηλό κόστος.
- Τα χυτά κράματα Αλουμινίου-Πυριτίου εξασφαλίζουν μεγάλο μέρος φάσης Si κατά την διάρκεια της σταθεροποιημένης θερμοκρασίας στην μέγιστη τιμή της.
- Αν φάσεις με Mg και Cu παραμένουν στο κράμα και μετά στην φάση της ψύξης τότε αυτό είναι καταστροφή ακριβών προϊόντων. Οι φάσεις είναι συνήθως μεγάλες και δημιουργούν περιοχές γύρω από αυτές οι οποίες έχουν χαμηλό σημείο τήξης και αυτό είναι καταστρεπτικό για την ποιότητα του προϊόντος.

2.3 Θερμική Κατεργασία Ισχυροποίησης

Η θερμική κατεργασία που χρειάζεται να περάσουν τα κράματα για να αποκτήσουν την κατάσταση T6 είναι αρχικά μια θερμική κατεργασία και μετά τεχνητή γήρανση με τη χρήση της θερμής καθίζησης. Με την κατεργασία αυτή πραγματοποιείται καθίζηση των φάσεων β (Mg_2Si). Έτσι ακολουθούνται τρία βήματα:

- α)** Διαλυτοποίηση με θέρμανση πάνω από την καμπύλη solvus ($580^{\circ}C$).
- β)** Πτώση στη θερμοκρασία δωματίου χωρίς ψυχρή κατεργασία.
- γ)** Τεχνητή γήρανση με θέρμανση σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες ($100-200^{\circ}C$) ώστε να ενεργοποιηθεί η διάχυση και σε συνδυασμό με την μεγάλη κινούσα δύναμη να έχουμε καθίζηση (της β φάσης).

Η τεχνητή γήρανση είναι το τελευταίο στάδιο της θερμικής κατεργασίας για την δημιουργία των ιδιοτήτων των θερμικώς κατεργαζόμενων κραμάτων αλουμινίου. Ορισμένα κράματα αλουμινίου υποβάλλονται σε γήρανση σε θερμοκρασία δωματίου (φυσική γήρανση) αλλά είναι απαραίτητο και για ένα χρονικό διάστημα να θερμαίνεται το κράμα σε θερμοκρασία μεγαλύτερη, που συνήθως κυμαίνεται γύρω στους $100-200^{\circ}C$. Το χρονικό διάστημα αυτό είναι συγκεκριμένο γιατί από ένα σημείο και μετά το κράμα θα υποστεί υπεργήρανση. Αύξηση της σκληρότητας πραγματοποιείται όσο το πλήθος και το μέγεθος των σωματιδίων αυξάνεται ενώ μετά η σκληρότητα μειώνεται λόγω μείωσης του πλήθους των σωματιδίων εξαιτίας της διεύρυνσης. Η θερμική κατεργασία της τεχνητής γήρανσης βασίζεται στην καθίζηση μιας δεύτερης φάσης ισχυροποίησης από ένα υπέρκορο στερεό διάλυμα.

Στα πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο η θερμική κατεργασία πραγματοποιήθηκε στους $580^{\circ}C$ όπου και έμεινε το κράμα για 8 ώρες και μετά βαφή. Το επόμενο στάδιο της τεχνητής γήρανσης έγινε με θέρμανση στους 240 , 200 και $160^{\circ}C$.

Τεχνητή Γήρανση για τα κράματα Al6061

Η σειρά καθίζησης των κραμάτων Al-Mg-Si είναι η παρακάτω:

GP (σφαίρες) \rightarrow β'' (βελόνες) \rightarrow β' (ράβδοι) \rightarrow β (Mg_2Si) (πλακίδια)

Αυτά τα κράματα ισχυροποιούνται ακόμη και όταν βρίσκονται για παρατεταμένη περίοδο σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτή η σκληρότητα συνεπάγεται την ανάπτυξη των ζωνών, ακόμη και αν δεν έχουν σίγουρα εντοπιστεί στο στάδιο της φυσικής γήρανσης. Μικροί χρόνοι γήρανσης στους $200^\circ C$ δημιουργεί πολύ λεπτές ζώνες με την μορφή βελόνων (β'') με διάμετρο 6 nm και με μήκος 20-100nm που διακρίνονται με ηλεκτρονική ανάλυση. Άλλες έρευνες έχουν δείξει ότι αρχικά έχουν σφαιρικό σχήμα οι ζώνες και μετά μετατρέπονται σε βελονοειδή μορφή όπου βρίσκονται και στην υψηλότερη τιμή από την καμπύλη της σκληρότητας. Μεγαλύτεροι χρόνοι γήρανσης προκαλούν μεγάλωμα των βελόνων και προς τις τρεις διαστάσεις με αποτέλεσμα την δημιουργία των ζωνών σε σχήμα ράβδου με δομή που αντιστοιχεί σε πλήρη εναρμόνιση με το Mg_2Si . Σε υψηλότερες θερμοκρασίες η αλλαγή φάσης (που χαρακτηρίζεται ως β') περνά μετά από μερική διαλυτοποίηση σε μετατροπή σε σταθερό Mg_2Si (β φάση).

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Προετοιμασία δοκιμίων

Κοπή

Πριν από τις διεργασίες ομογενοποίησης και της τεχνητής γήρανσης, πρέπει να κοπεί το υλικό στο κατάλληλο μέγεθος. Από τις μπιγιέτες που προμηθεύτηκε το εργαστήριο, αρχικά μετά τη χύτευση κόπηκαν κάποιες ροδέλες πάχους 1cm και μετά αυτά τα κομμάτια κόπηκαν κατά τη διάμετρο σε ημικύκλια κομμάτια. Τα τελικά κομμάτια-δοκίμια που χρησιμοποιήσαμε για τα πειράματά μας ήταν μεγέθους 1cmx0.5cmx0.5cm

Χημική προσβολή

Η προσβολή είναι κατά κύριο λόγο μια ελεγχόμενη διαδικασία διάβρωσης η οποία είναι αποτέλεσμα της ηλεκτρολυτικής αντίδρασης ανάμεσα σε επιφάνειες του δοκιμίου με διαφορετικό δυναμικό. Η μικροδομή αποκαλύπτεται με την επιλεκτική διαλυτοποίηση της δομής, ξεκινώντας από την επιφάνεια και συνεχίζοντας προς το εσωτερικό. Ο χρόνος προσβολής πρέπει να ελεγχθεί προσεκτικά ώστε να μην υπάρχουν φαινόμενα υπερβολικής διάβρωσης (overetching). Τα χημικά αντιδραστήρια συνήθως αναμειγνύονται σε μικρές ποσότητες και τοποθετούνται σε ρηχά δοχεία. Συνήθως εμβαπτίζεται το δοκίμιο μέσα στο διάλυμα.

Αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν:

1. Keller's (κατάλληλο για κράματα Αλουμινίου)	2. Τροποποιημένο Keller's	3. Τροποποιημένο Keller's
2.5 ml HNO ₃ 1.5 ml HCl 1.0 ml HF 95 ml water	2.5 ml HNO ₃ 1.0 ml HCl 1.5 ml HF 95 ml water	10 ml HNO ₃ 1.5 ml HCl 1.0 ml HF 87.5 ml water

Οπτική μικροσκοπία

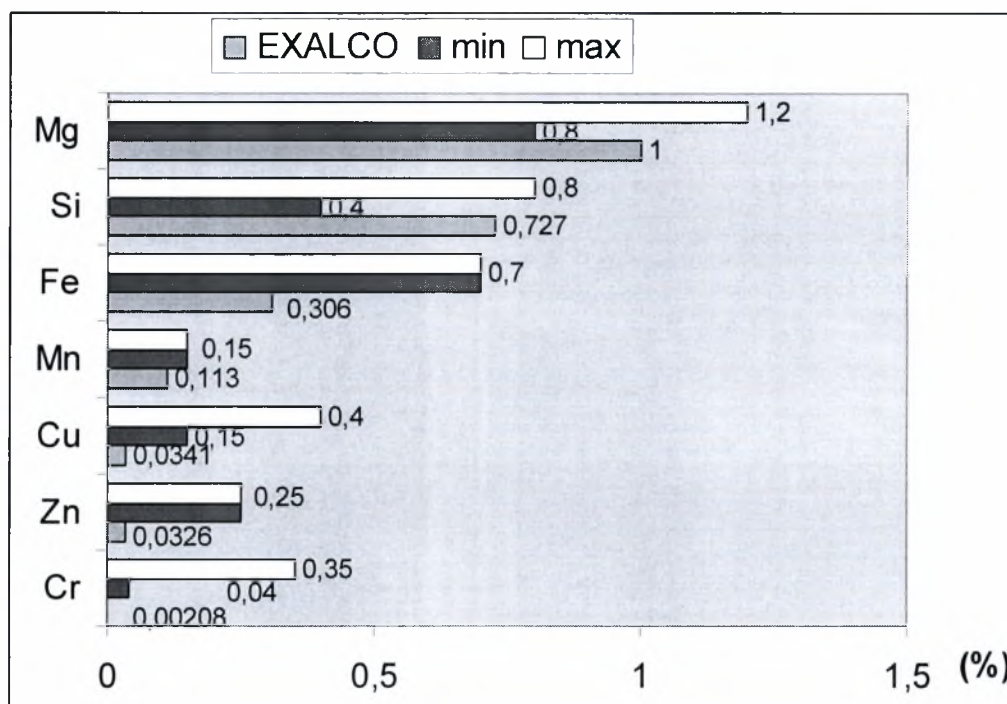
Το οπτικό μικροσκόπιο είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην διπλωματική αυτή, παρότι ήταν διαθέσιμο στο εργαστήριο και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Και αυτό γιατί στην περίπτωση της ομογενοποίησης αυτό που παρατηρείται είναι η καθίζηση από τα σύνορα των κόκκων και όχι ποιες είναι οι φάσεις αυτές κάτι που θεωρείται γνωστό. Ξεκινώντας από μια μικρή μεγένθυση βλέπουμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά της μικροδομής και μετά σε μεγαλύτερες μεγενθύσεις βλέπουμε περισσότερες λεπτομέριες.

Μέτρηση Μικροσκληρότητας κατά Vickers

Η μέθοδος κατά Vickers χρησιμοποιεί σαν εντυπωτή αδαμαντοπυραμίδα τετραγωνικής βάσης και γωνία κορυφής 136° . Τα βάρη που χρησιμοποιούμε στο μικροσκληρόμετρο είναι από μερικά γραμμάρια έως 2κιλά. Στα δικά μας πειράματα χρησιμοποιήσαμε 200γρ. Η εντύπωση κατά την σκληρομέτρηση έχει σχήμα ορθογωνίου. Η σκληρότητα κατά Vickers βρίσκεται από τον τύπο:
 $HV = 1.854 * P / d^2$, όπου P είναι το βάρος που χρησιμοποιήσαμε και d είναι ο μέσος όρος των δύο διαμέτρων του αποτυπώματος.

3.2 Χύτευση

Η μπιγιέτα που προμηθεύτηκε το εργαστήριο από την EXALCO δεν έχει τα ποσοστά συστατικών που αναφέρονται στην βιβλιογραφία ότι θα έπρεπε να έχει αλλά τα παρακάτω:

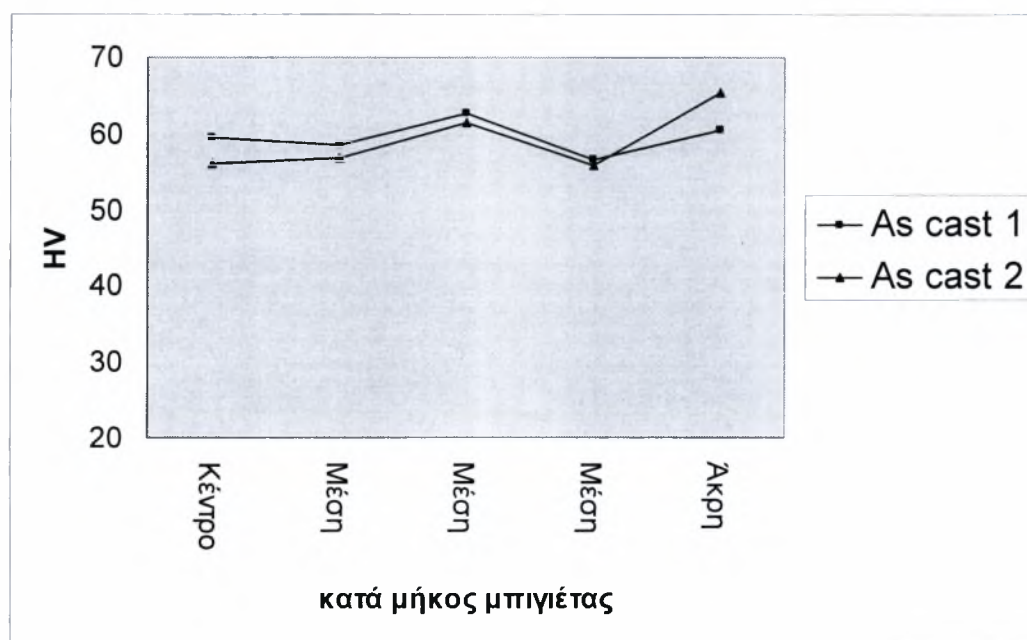


Διάγραμμα 3.2.1 : Χημική ανάλυση της μπιγιέτας από την EXALCO σε σύγκριση με τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές που δίνονται από την βιβλιογραφία για το 6061.

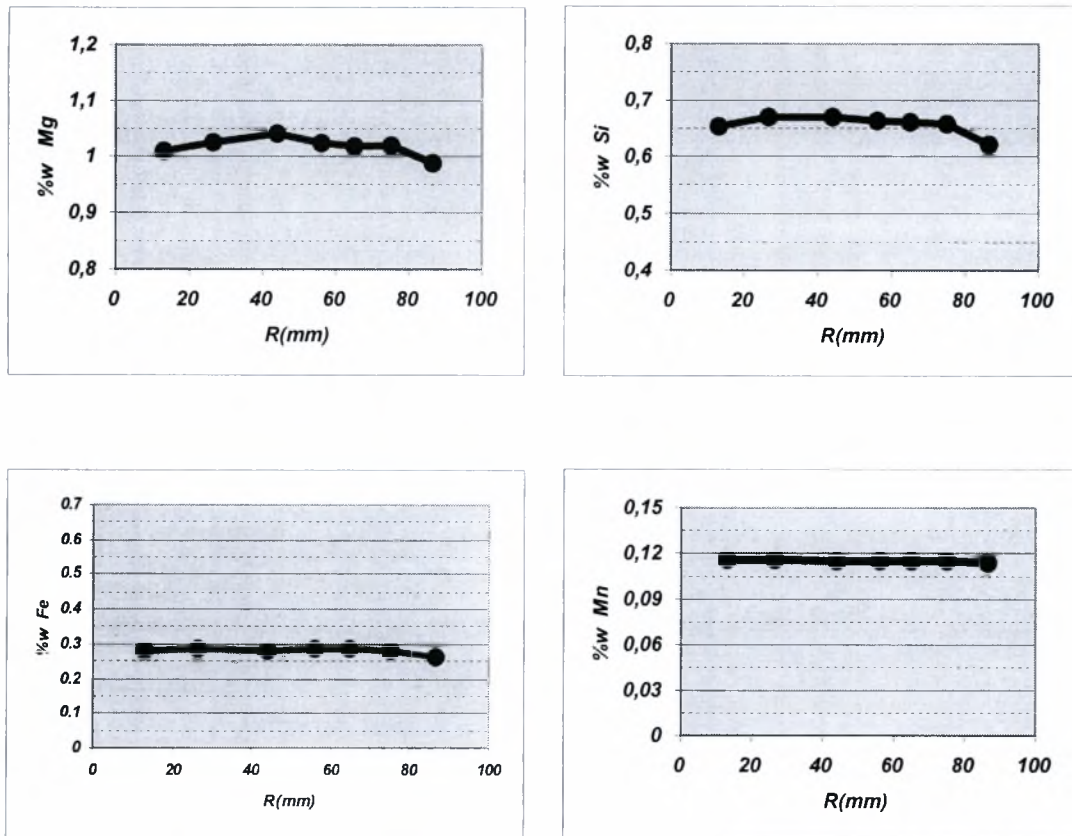
Η μπιγιέτα που έχει περίπου τα συστατικά του 6061 κράματος αλουμινίου, μετά από συνεχή χύτευση που έγινε στην EXALCO έπρεπε να εξεταστεί αν έχει σε όλη της την έκταση την ίδια σκληρότητα. Γι'αυτό έπρεπε να γίνουν κάποιες μετρήσεις κατά μήκος της ακτίνας της. Παρακάτω φαίνονται οι σκληρομετρήσεις που έγιναν και που δείχνουν ότι δεν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στην ακτίνα της μπιγιέτας. Τα πειράματα είναι δύο γιατί είναι από την πάνω πλευρά και από το πλάι.

	Κέντρο	Μέση	Μέση	Μέση	Άκρη
Μ.Ο.(*)	59,53	58,5	62,65	56,575	60,5
Μ.Ο.(**)	56,04	56,85	61,5	55,875	65,3

Πίνακας 3.2.1 : Σκληρομετρήσεις κατά μήκος της ακτίνας της μπιγιέτας. Τα πειράματα είναι δύο γιατί είναι από την πάνω πλευρά(*) και από το πλάι(**).



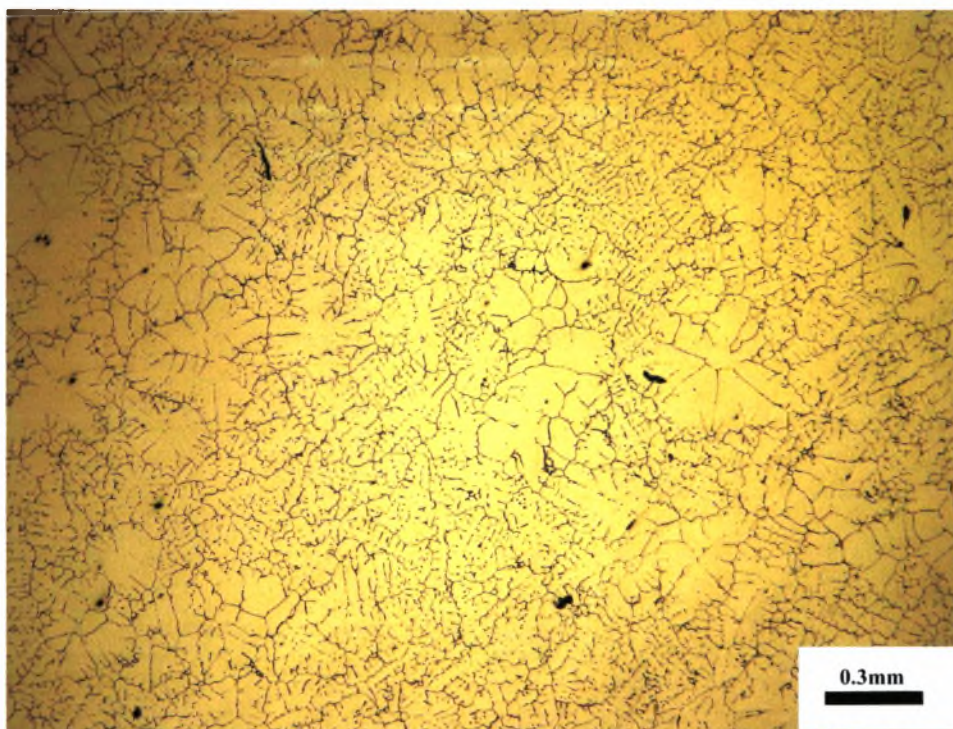
Διάγραμμα 3.2.2 : Σκληρομετρήσεις κατά μήκος της ακτίνας της μπιγιέτας. Τα πειράματα είναι δύο γιατί είναι από την πάνω πλευρά(1) και από το πλάι(2).



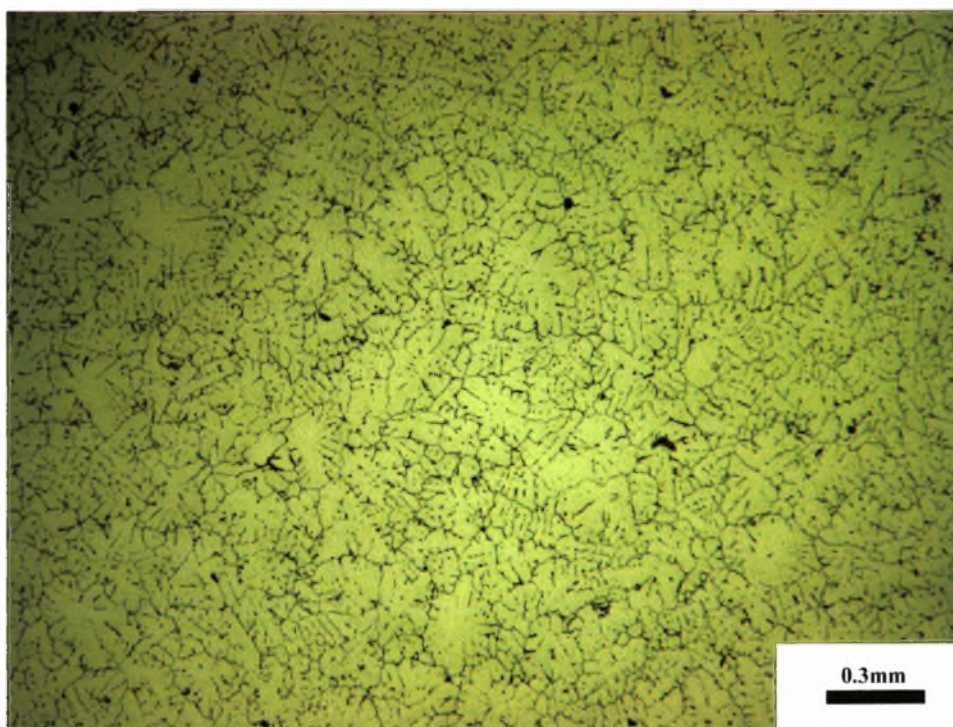
Διάγραμμα 3.2.3 Συγκεντρώσεις των βασικών στοιχείων Mg, Si, Fe, Mn κατά μήκος της ακτίνας της μπιγιέτας

Από μετρήσεις που έγιναν κατά μήκος της ακτίνας της μπιγιέτας διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει μακροδιαφορισμός. Οι συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν ήταν για τα στοιχεία Mg, Si, Fe, Mn και οι διαφορές τους είναι ελάχιστες.

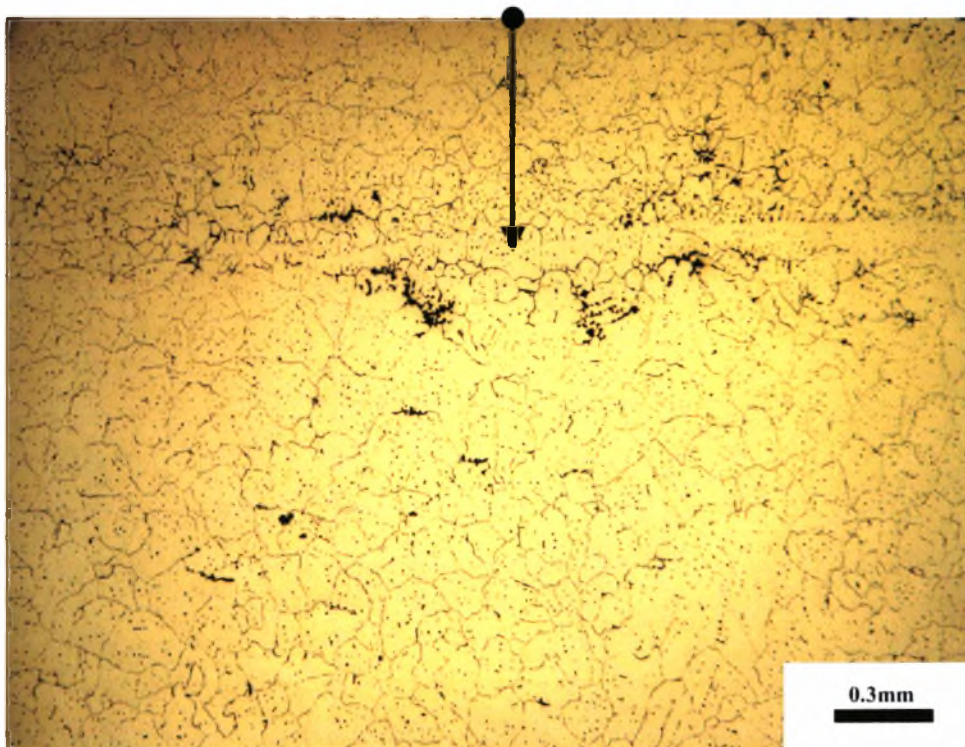
Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες κατά μήκος της ακτίνας της μπιγιέτας όπου φαίνεται ότι δεν υπάρχουν διαφορές μεγέθους των δενδριτών. Μόνο στην άκρη της μπιγιέτας και για ένα πολύ μικρό σημείο φαίνεται να υπάρχει ψυχρή ζώνη. Παρουσιάζονται επίσης και αυξανόμενης μεγένθυσης φωτογραφίες (x200, x500, x1000) για να κατανοηθεί η μορφή των δενδριτών.



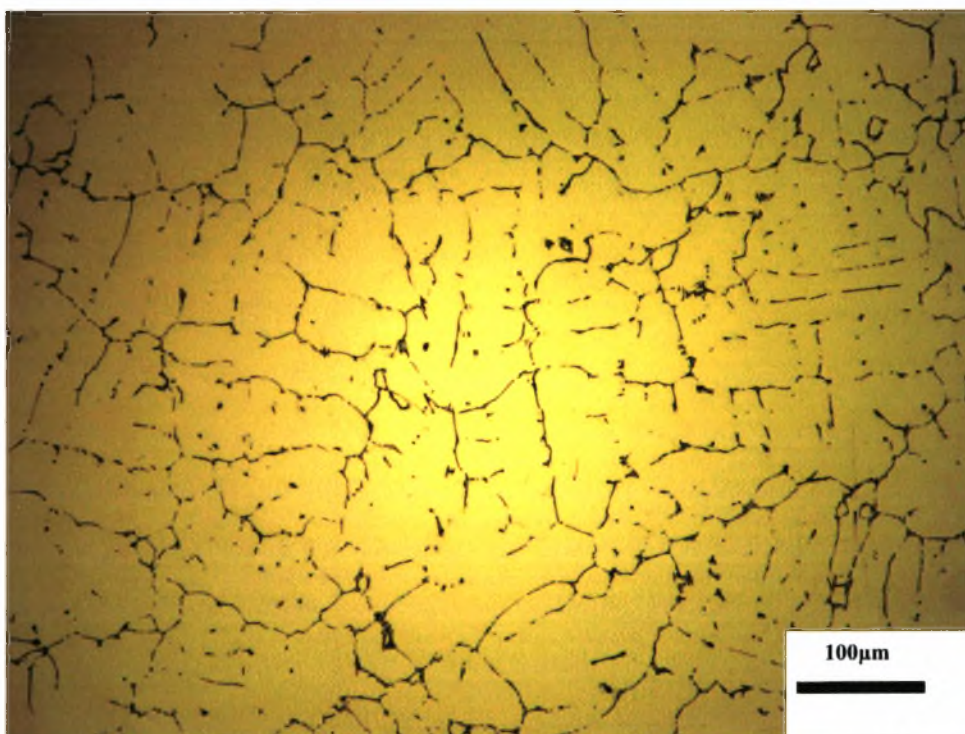
Φώτο. 3.2.1 : Χυτό 6061 στο κέντρο της μπιγιέτας, μεγέθυνση $\times 50$.



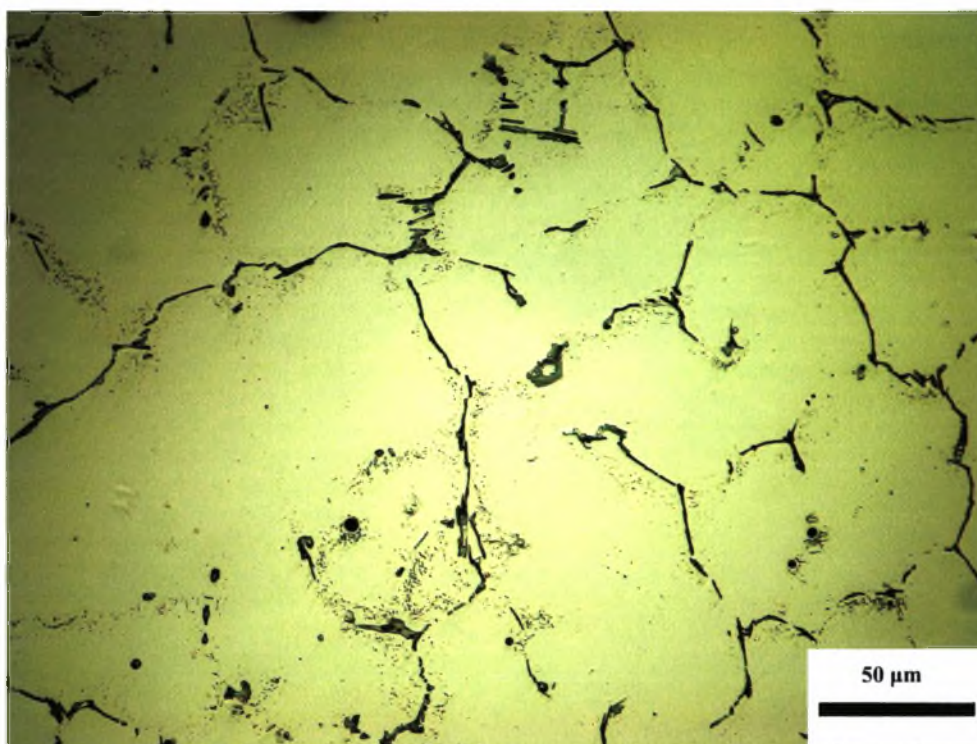
Φώτο. 3.2.2 : Χυτό 6061 σε ακτίνα $R=5\text{cm}$ από το κέντρο της μπιγιέτας, μεγέθυνση $\times 50$



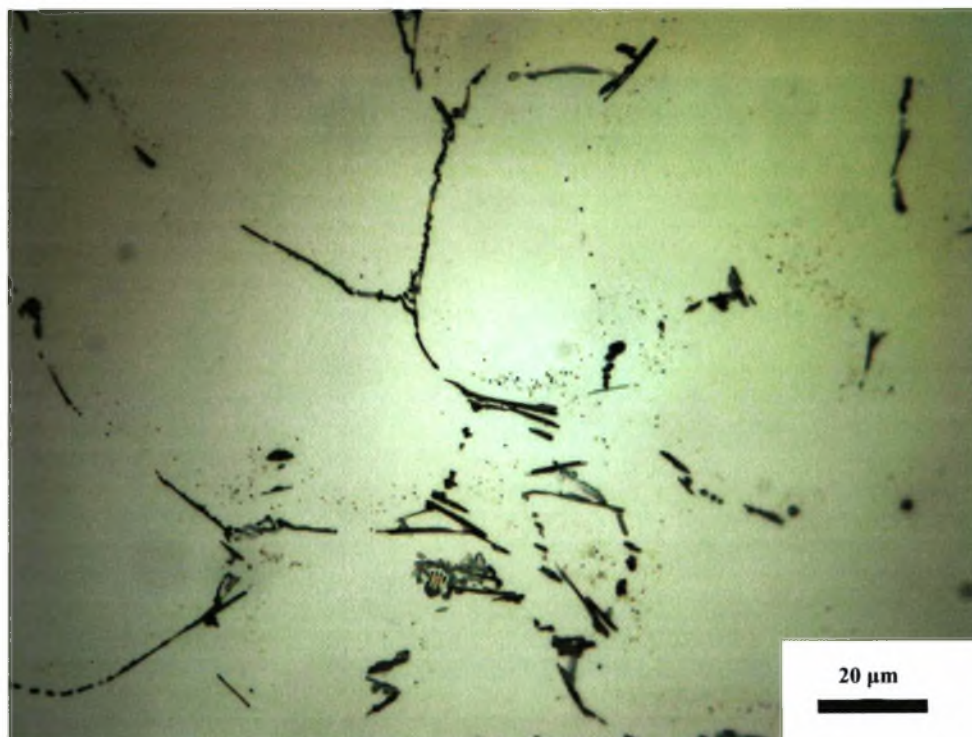
Φώτο. 3.2.3 : Χυτό 6061 στην άκρη της μπιγιέτας όπου διακρίνεται και η ψυχρή ζώνη στο βέλος, μεγέθυνση x50



Φώτο. 3.2.4 : Χυτό 6061, μεγέθυνση x200



Φώτο. 3.2.5 : Χιτό 6061, μεγέθυνση x500



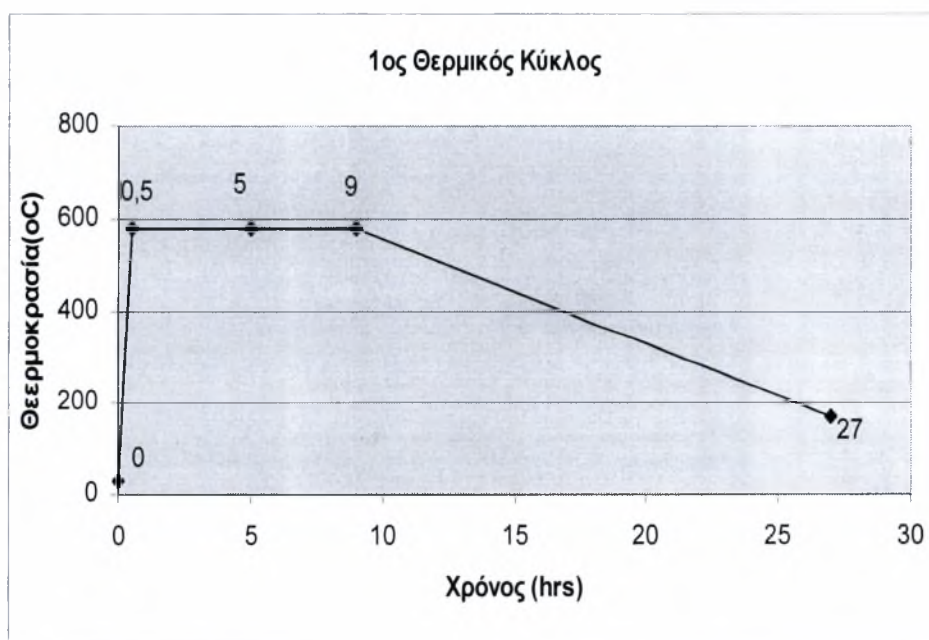
Φώτο. 3.2.6 : Χιτό 6061, μεγέθυνση x1000

3.3 Ομογενοποίηση

Οι πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για τον εντοπισμό του βέλτιστου κύκλου ομογενοποίησης ήταν κάθε φορά στους 580°C με διαφορετικούς χρόνους κάθε φορά. Για να παρακολουθηθεί η εξέλιξη του φαινομένου χρειάστηκε να παρατηρηθούν σε διάφορα στάδια η μορφή των κόκκων και η διαλυτοποίηση των φάσεων. Τα πειράματα ομογενοποίησης που έγιναν ήταν τέσσερα. Παρακάτω φαίνονται κάποια αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων των θερμικών αυτών κύκλων και κάποιες φωτογραφίες που ήταν χαρακτηριστικές.

3.3.1 Πρώτος Θερμικός Κύκλος

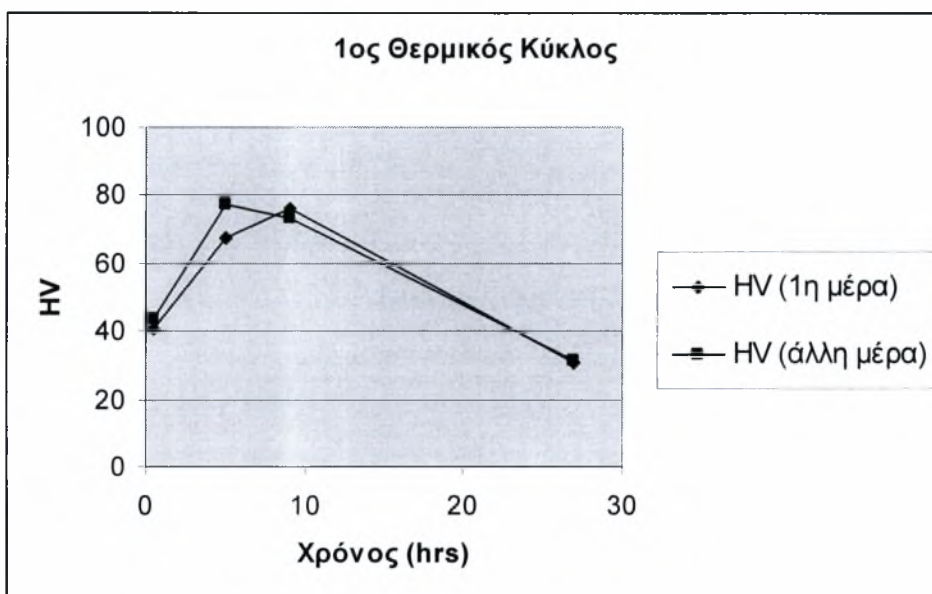
Στον πρώτο θερμικό κύκλο ξεκίνησε ο κύκλος από τους 30°C με τα δοκίμια μέσα στον φούρνο και έτσι είχαμε αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τους 580°C για τα δοκίμια με ρυθμό 1100 °C h⁻¹.



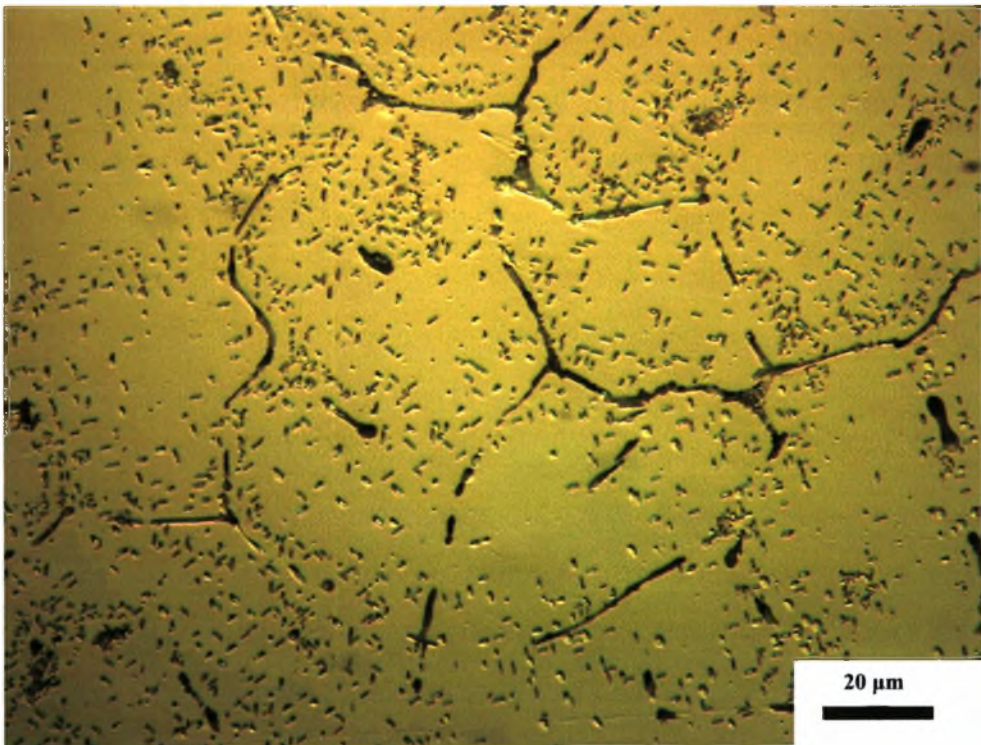
Διάγραμμα 3.3.1: Ο θερμικός κύκλος που ακολουθήθηκε στο 1^ο πείραμα.

min	37	311	551	1631
HV(1η μέρα)	40,5	67,425	76,275	30,575
HV(άλλη μέρα)	43,35	77,58	73,48	31,23

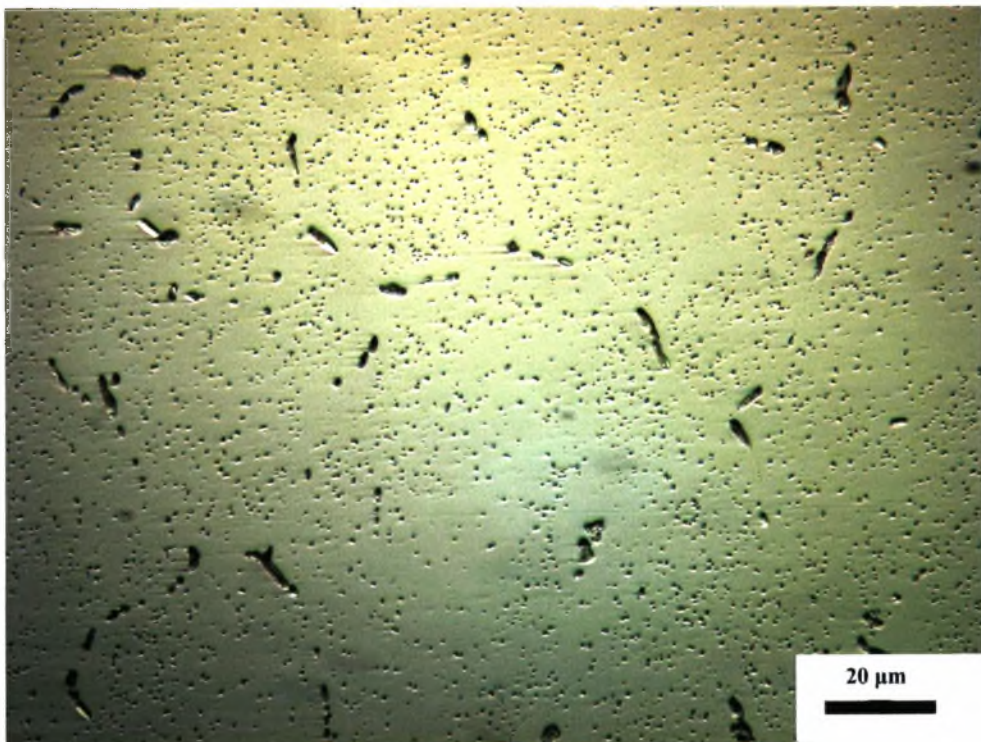
Πίνακας 3.3.1: Μικροσκληρότητα μετά από ομογενοποίηση στους 580°C και βαφή από την θερμοκρασία αυτή. Το δοκίμιο στα 1631min είχε κρυώσει στον φούρνο μέσα και όχι με βαφή – τιμές: πρώτη μέρα και μετά από μερικές μέρες - πείραμα 1^ο.



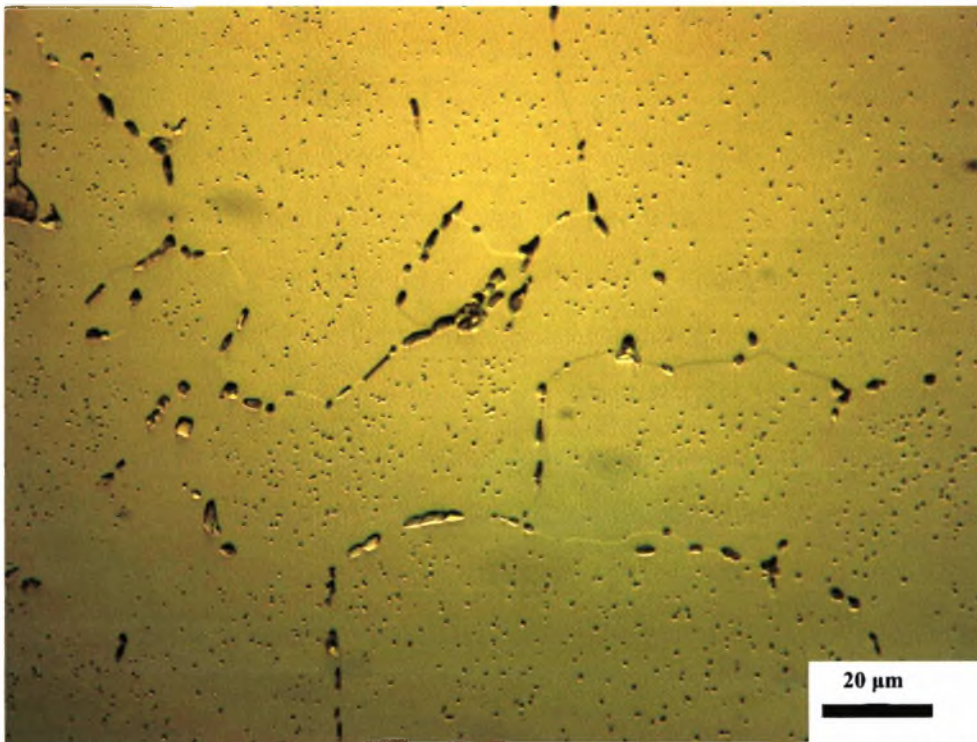
Διάγραμμα 3.3.2: Μικροσκληρότητα μετά από ομογενοποίηση στους 580°C και βαφή από την θερμοκρασία αυτή. Το δοκίμιο στα 1631min είχε κρυώσει στον φούρνο μέσα και όχι με βαφή – τιμές: πρώτη μέρα και μετά από μερικές μέρες.



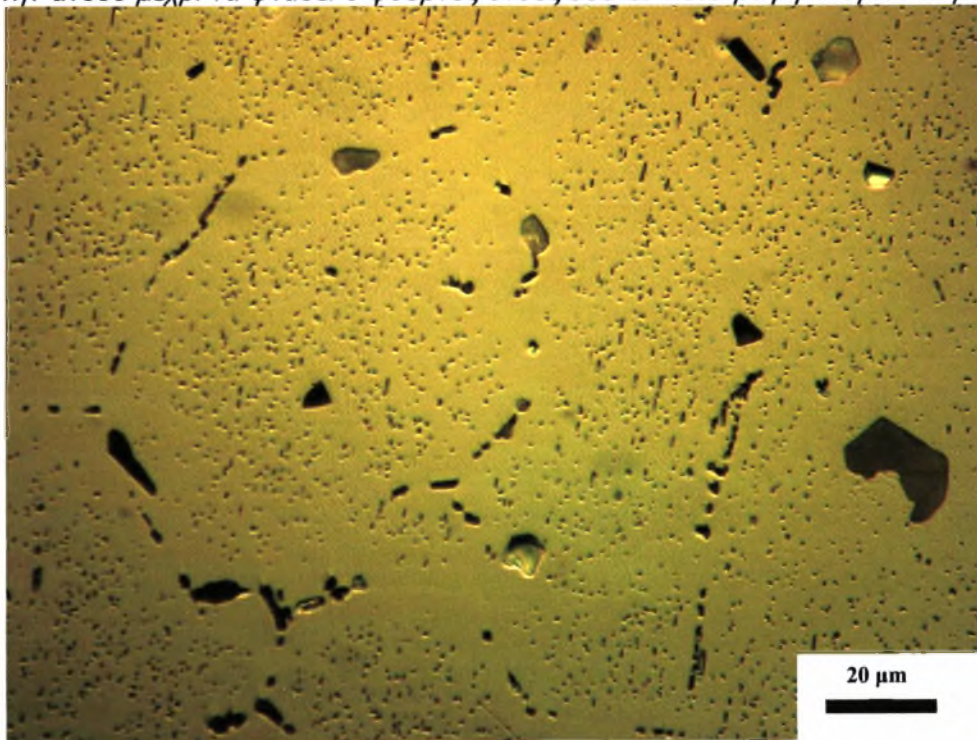
Φώτο. 3.3.1 : Χυτό 6061 του 1ου θερμικού κύκλου μετά από 37min στην άνοδο μέχρι να φτάσει ο φούρνος στους 580°C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x1000.



Φώτο. 3.3.2 : Χυτό 6061 του 1ου θερμικού κύκλου μετά από 311min, μαζί με την άνοδο μέχρι να φτάσει ο φούρνος στους 580°C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x1000.



Φώτο. 3.3.3 : Χυτό 6061 του 1ου θερμικού κύκλου μετά από 551min - μαζί με την άνοδο μέχρι να φτάσει ο φούρνος στους 580°C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x1000.

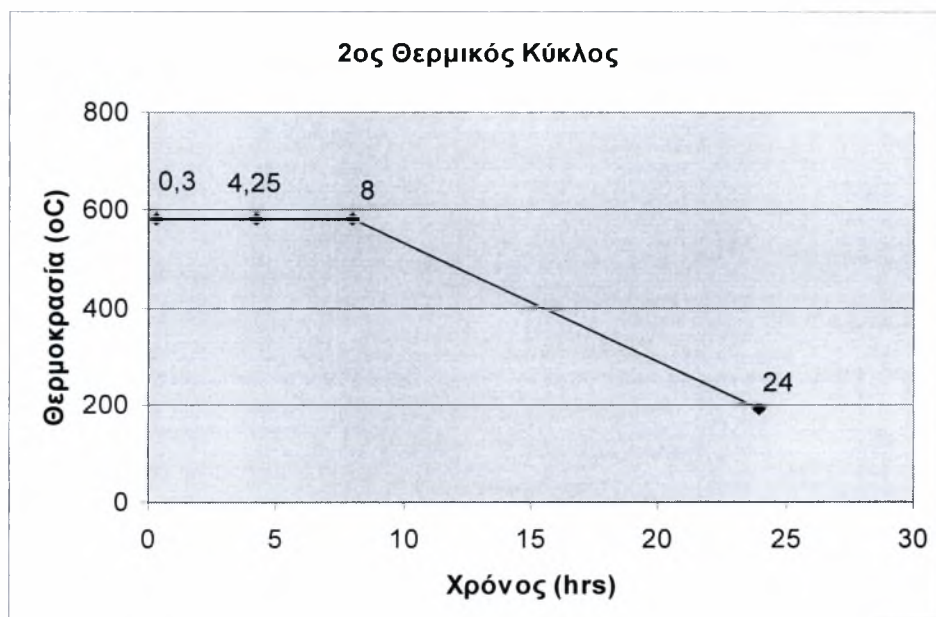


Φώτο. 3.3.4 : Χυτό 6061 του πρώτου θερμικού κύκλου μετά από 1631min - μαζί με την άνοδο μέχρι να φτάσει ο φούρνος στους 580°C. Μετά τα 551min ο φούρνος κλείνει και το δοκίμιο μένει μέσα. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x1000.

Παρατηρώντας την φωτογραφία 3.3.1 μπορούμε να αντιληφθούμε ότι αρχικά η πυρήνωση και οι ανάπτυξη των πρώτων φάσεων γίνονται κοντά στα όρια των δενδριτών και αυτό γιατί είναι πολύ μικρός ο χρόνος για να μπορέσουν να επαναδιαλυτοποιηθούν και να προχωρήσουν προς το κέντρο των δενδριτών. Στην επόμενη φωτογραφία 3.3.2 βλέπουμε ότι μετά από πέντε ώρες έχουμε πια διαλυτοποίηση των φάσεων του Mg και του Si. Το ίδιο βλέπουμε και στην φωτογραφία 3.3.3 όπου η διαλυτοποίηση μετά από 9 ώρες είναι ακόμη περισσότερη. Τέλος η φωτογραφία 3.3.4 δείχνει ότι στην αργή ψύξη – περίπου $23\text{ }^{\circ}\text{C h}^{-1}$ – αναπτύσσονται μεγαλύτερες φάσεις.

3.3.2 Δεύτερος Θερμικός Κύκλος

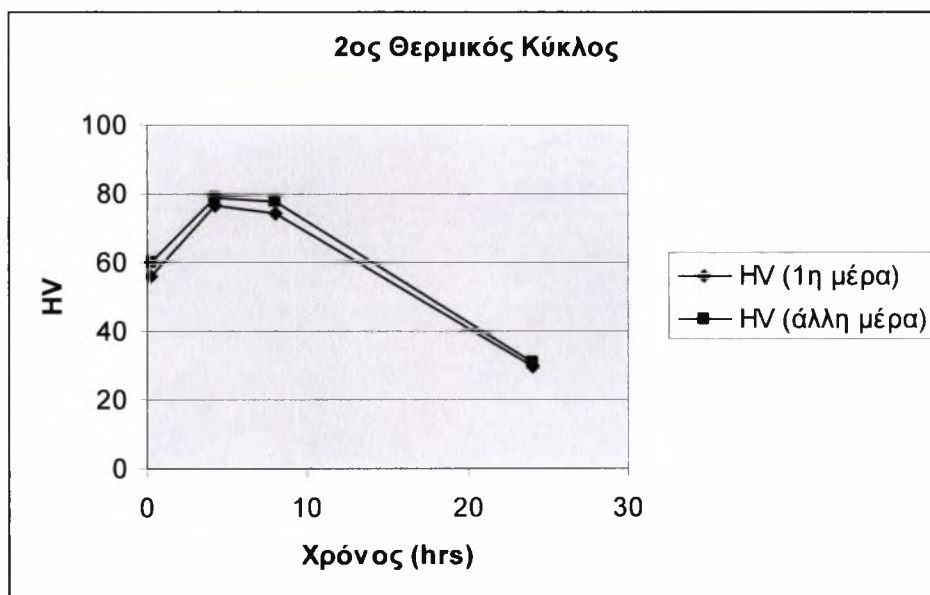
Κατά τον δεύτερο θερμικό κύκλο τα δοκίμια δεν είναι από το πρώτο λεπτό μέσα στον φούρνο αλλά από την στιγμή που ο φούρνος φτάνει στους 580°C.



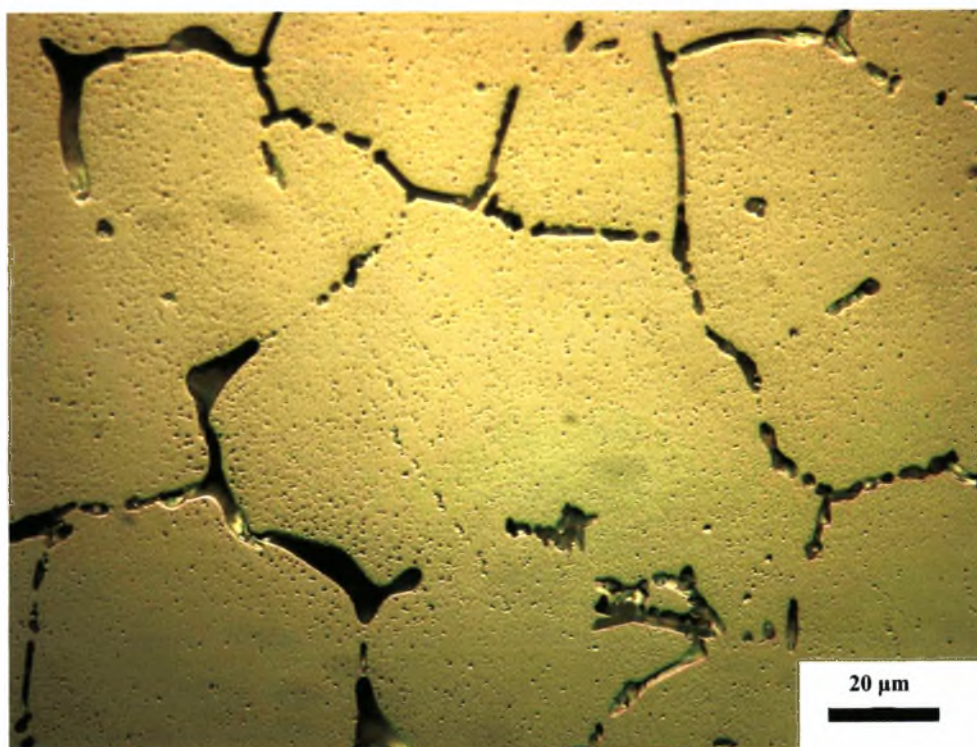
Διάγραμμα 3.3.3 Ο θερμικός κύκλος που ακολουθήθηκε στο 2^ο πείραμα.

min	20	255	480	1440
HV(1η μέρα)	56,12	76,37	74,475	29,8
HV(άλλη μέρα)	60,15	79,125	77,7	30,9

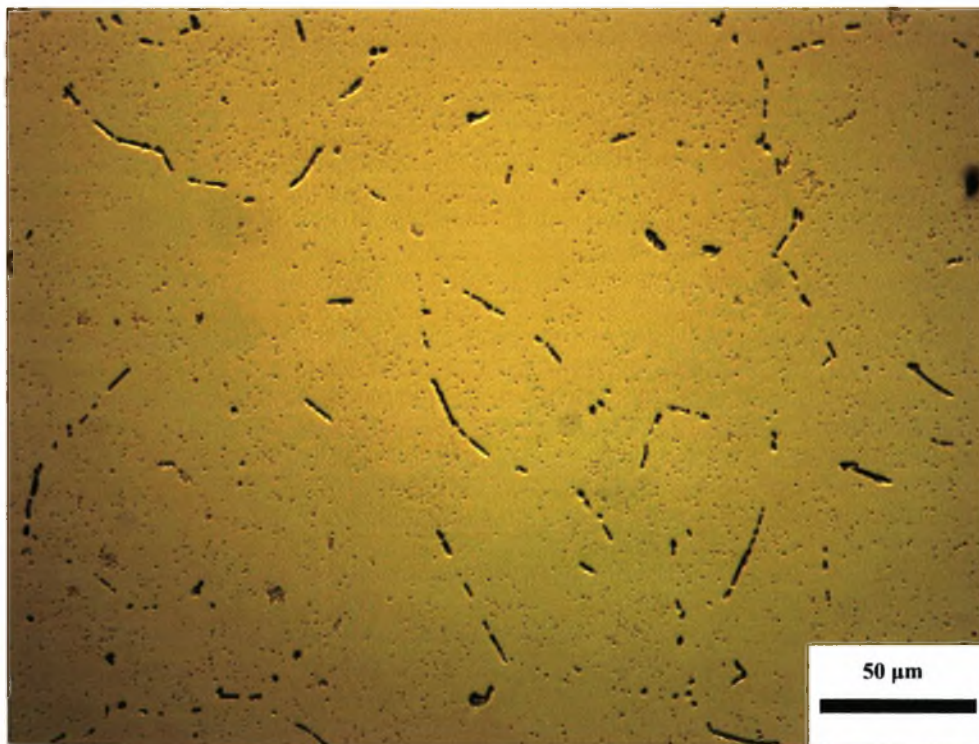
Πίνακας 3.3.2: Μικροσκληρότητα μετά από ομογενοποίηση στους 580°C και βαφή από την θερμοκρασία αυτή. Το δοκίμιο στα 1440 min είχε κρυώσει στον φούρνο μέσα και όχι με βαφή – τιμές: πρώτη μέρα και μετά από μερικές μέρες - πείραμα 2^ο.



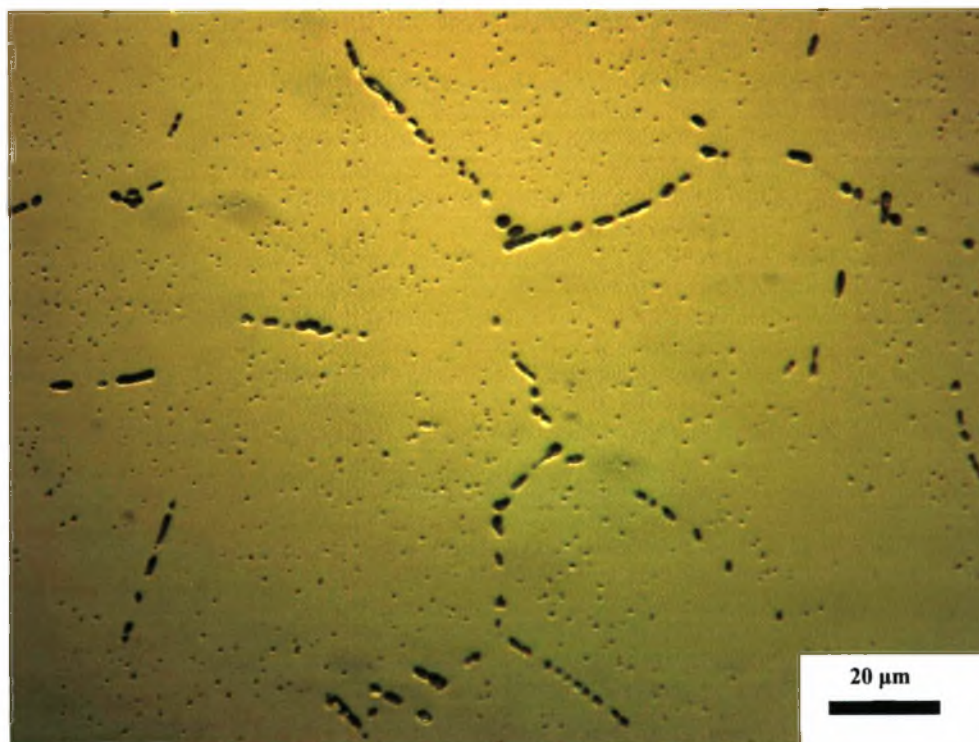
Διάγραμμα 3.3.4: Μικροσκληρότητα μετά από ομογενοποίηση στους 580°C και βαφή από την θερμοκρασία αυτή. Το δοκίμιο στα 1440 rpm είχε κρυώσει στον φούρνο μέσα και όχι με βαφή – τιμές: πρώτη μέρα και μετά από μερικές μέρες - πείραμα 2^ο.



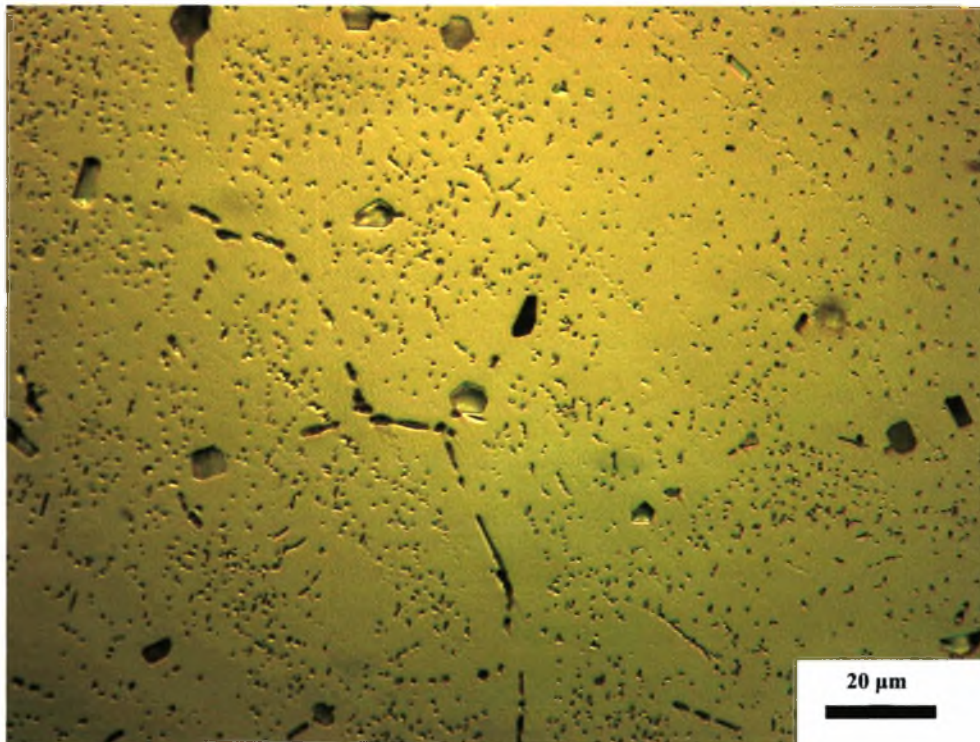
Φώτο. 3.3.5 : Χυτό 6061 του 2ου θερμικού κύκλου για 20min στους 580°C . Μετά βαφή. Μεγέθυνση $\times 1000$.



Φώτο. 3.3.6 : Χυτό 6061 του 2ου θερμικού κύκλου για 255min στους 580° C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x500.



Φώτο. 3.3.7 : Χυτό 6061 του 2ου θερμικού κύκλου για 480min στους 580° C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x1000.



Φώτο. 3.3.8 : Χυτό 6061 του 2ου θερμικού κύκλου μετά από 1440min. Μετά τα 480min ο φούρνος κλείνει και το δοκίμιο μένει μέσα. Μετά βαφή. Μεγέθυνση $\times 1000$.

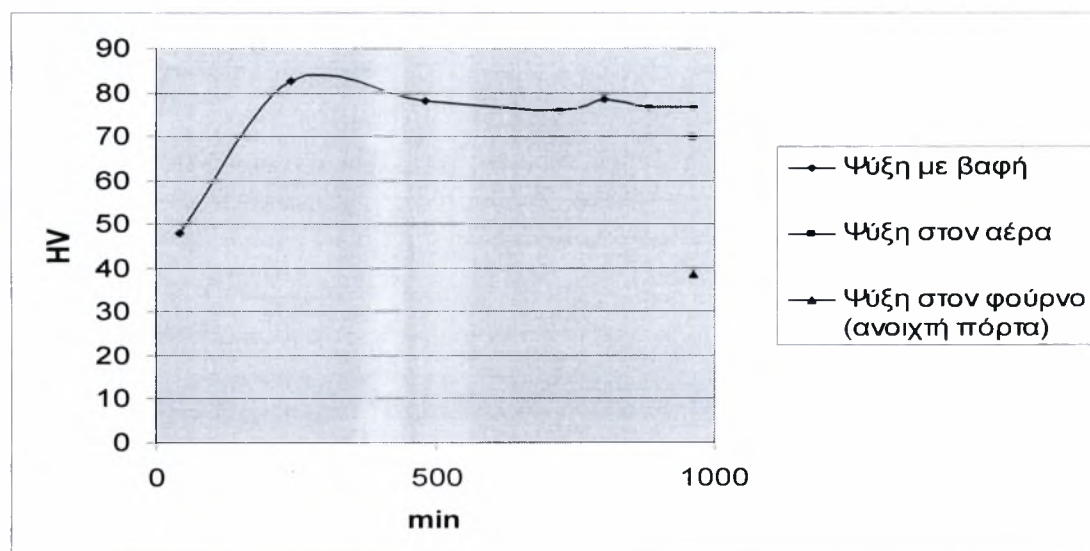
Παρόμοια αποτελέσματα φαίνονται από τις φωτογραφίες του 2^{ου} θερμικού κύκλου με αυτά του 1^{ου}. Εκτός από το γεγονός ότι στην φωτογραφία 3.3.5 δεν παρατηρείται, αντίστοιχα με την 3.3.1, η πυρήνωση και η ανάπτυξη κοντά στα όρια των φάσεων.

3.3.3 Τρίτος Θερμικός Κύκλος

Ο τρίτος θερμικός κύκλος έγινε για να εξεταστεί τυχόν διακύμανση που παρουσιάζει η σκληρότητα κατά την θερμική κατεργασία σε μεγαλύτερους χρόνους. Γι'αυτό και δεν παρουσιάζονται στο τέλος φωτογραφίες από αυτόν τον θερμικό κύκλο.

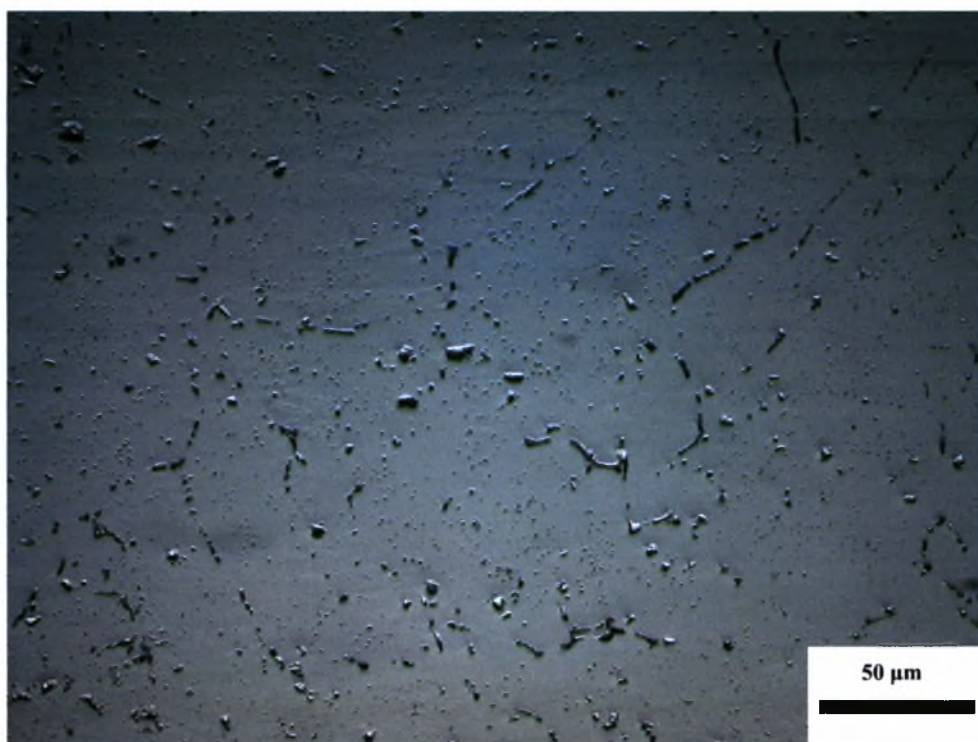
min	42	240	480	720	800	880	960	960(*)	960(**)
HV	48,01	82,82	78,08	75,87	78,36	76,66	76,64	69,73	38,62

Πίνακας 3.3.3: Μικροσκληρότητα μετά από ομογενοποίηση στους 580°C και βαφή από την θερμοκρασία αυτή. Τα τελευταία δύο δοκίμια ψύχθηκαν στον αέρα (*) και στον φούρνο (**) μέσα (με ανοιχτή πόρτα) και όχι με βαφή -πείραμα 4.

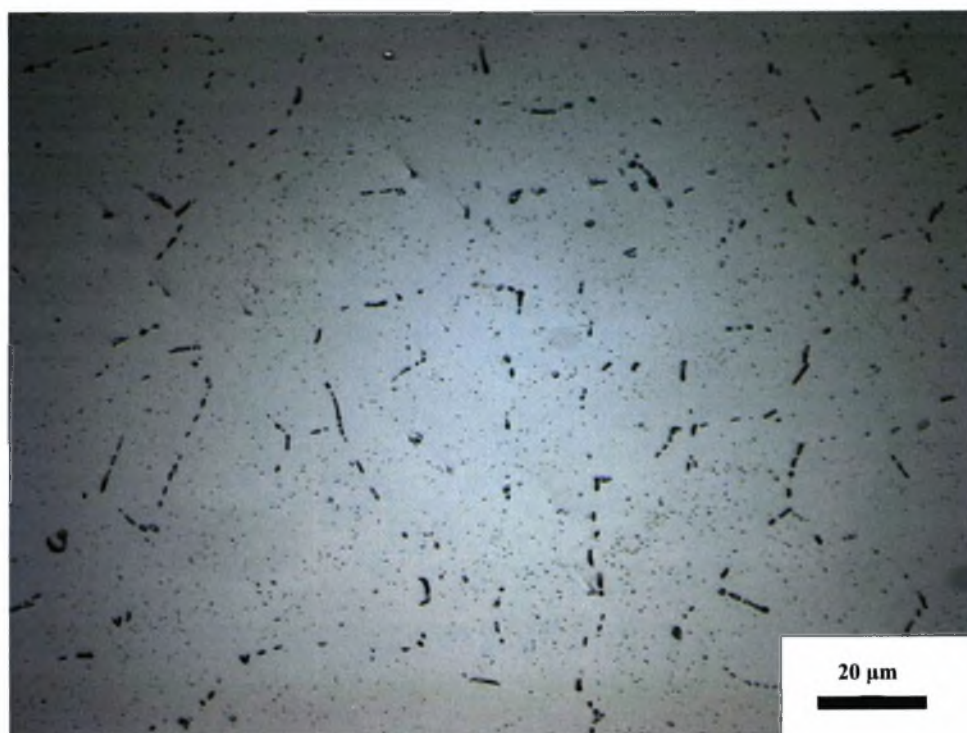


Διάγραμμα 3.3.5: Μικροσκληρότητα μετά από ομογενοποίηση στους 580°C και βαφή από την θερμοκρασία αυτή. Τα τελευταία δύο δοκίμια ψύχθηκαν στον αέρα και στον φούρνο μέσα (με ανοιχτή πόρτα) και όχι με βαφή -πείραμα 4.

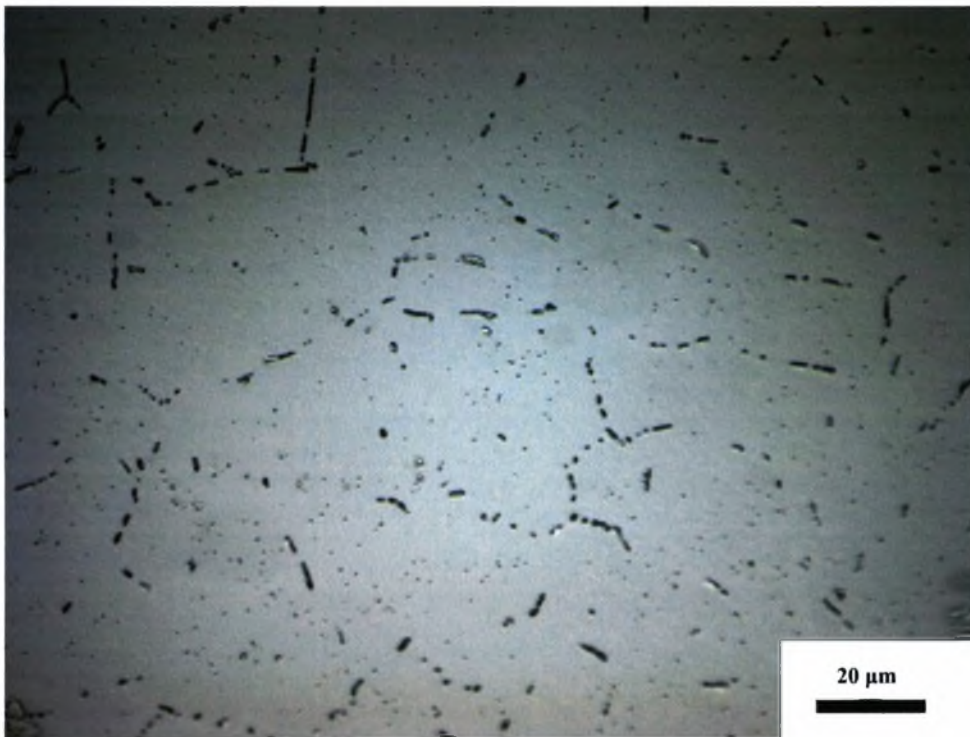
Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες από ομογενοποίηση από έναν τέταρτο θερμικό κύκλο που έγινε για 11h, 12h, 16h και για 3μέρες που φαίνεται η εξέλιξη της ομογενοποίησης του κράματος. Τέλος παρουσιάζεται το ίδιο κράμα μετά από τρεις μέρες στους 580° C και μετά όχι βαφή αλλά αργή ψύξη μέσα στον φούρνο για 24 hrs με ρυθμό περίπου 21°C/h.



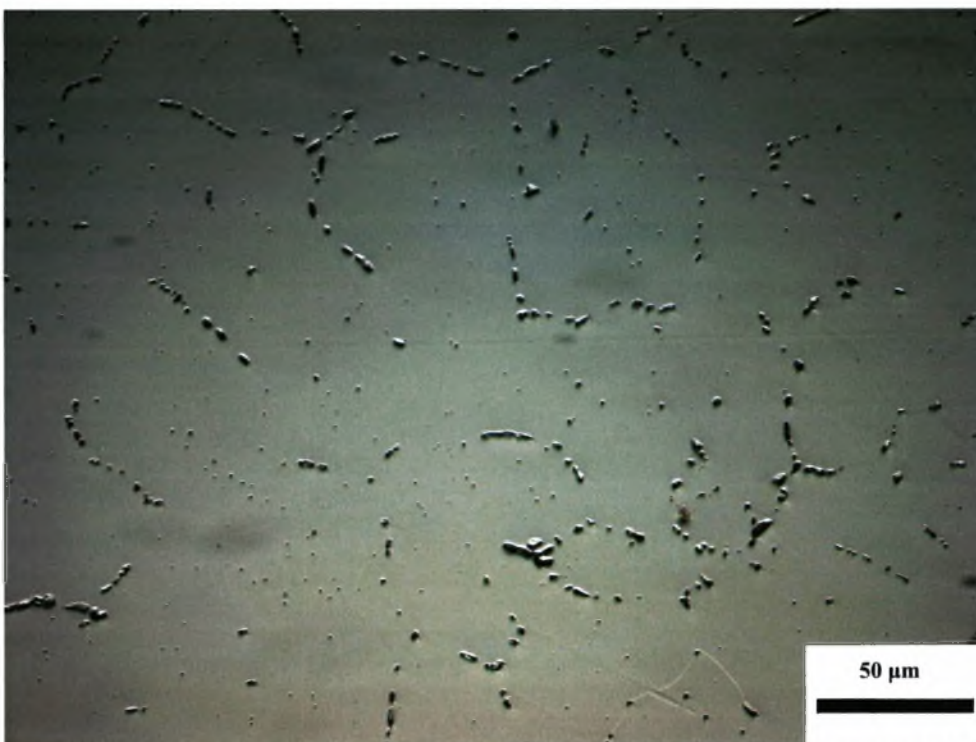
Φώτο. 3.3.9 : Χυτό 6061 του 4ου θερμικού κύκλου για 11ώρες στους 580°C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x500.



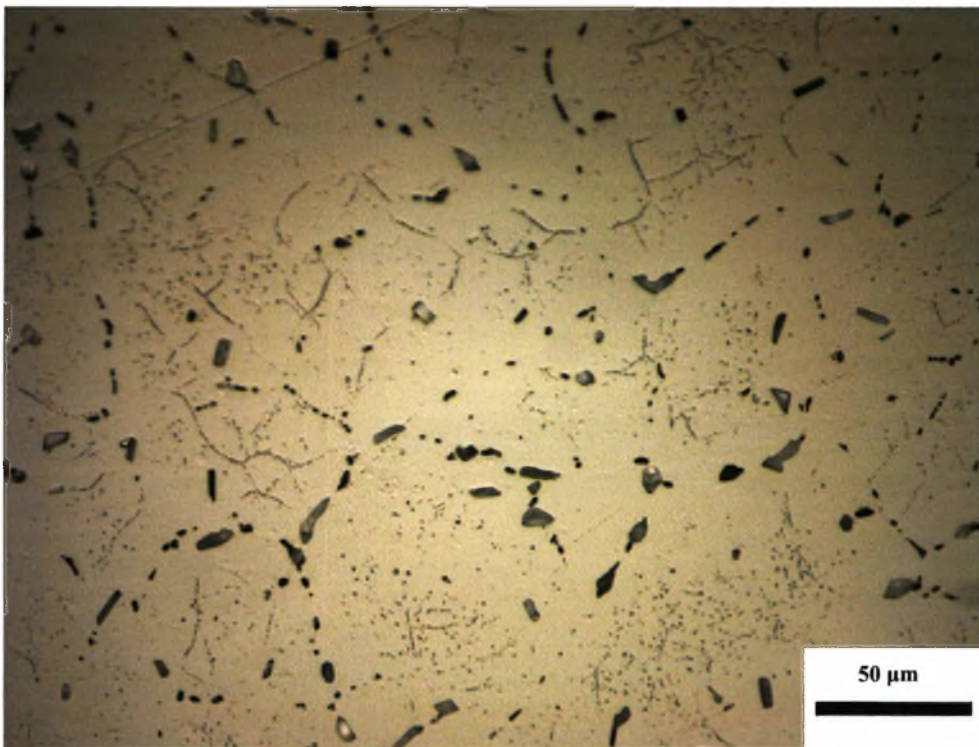
Φώτο. 3.3.10 : Χυτό 6061 του 4ου θερμικού κύκλου για 12ώρες στους 580°C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x500.



Φώτο. 3.3.11 : Χυτό 6061 του 4ου θερμικού κύκλου για 16 ώρες στους 580° C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x500.



Φώτο. 3.3.12 : Χυτό 6061 του 4ου θερμικού κύκλου για 3μέρες στους 580° C. Μετά βαφή. Μεγέθυνση x500.



Φώτο. 3.3.13 : Χυτό 6061 του 4ου θερμικού κύκλου μετά από 4 μέρες. Μετά τις 3 μέρες ο φούρνος κλείνει και το δοκίμιο μένει μέσα. Μετά βαφή. Μεγέθυνση $\times 500$.

Οι δύο τελευταίες φωτογραφίες είναι από δοκίμια που έμειναν για 3 και 4 μέρες αντίστοιχα μέσα στον φούρνο κάτι το οποίο θα ήταν ασύμφορο για βιομηχανική χρήση. Έτσι όμως παρουσιάζεται πιο θα ήταν το οπτικό αποτέλεσμα μετά από μεγάλη διατήρηση στους 580°C . Και σ'αυτά τα πειράματα μετρήθηκαν οι σκληρότητες αλλά δεν υπήρχε διακύμανση. Σε όλες τις περιπτώσεις η σκληρότητα ήταν περίπου στα 70HV εκτός από την τελευταία (φώτο 3.3.13) στην οποία η σκληρότητα έπεσε στα 30HV.

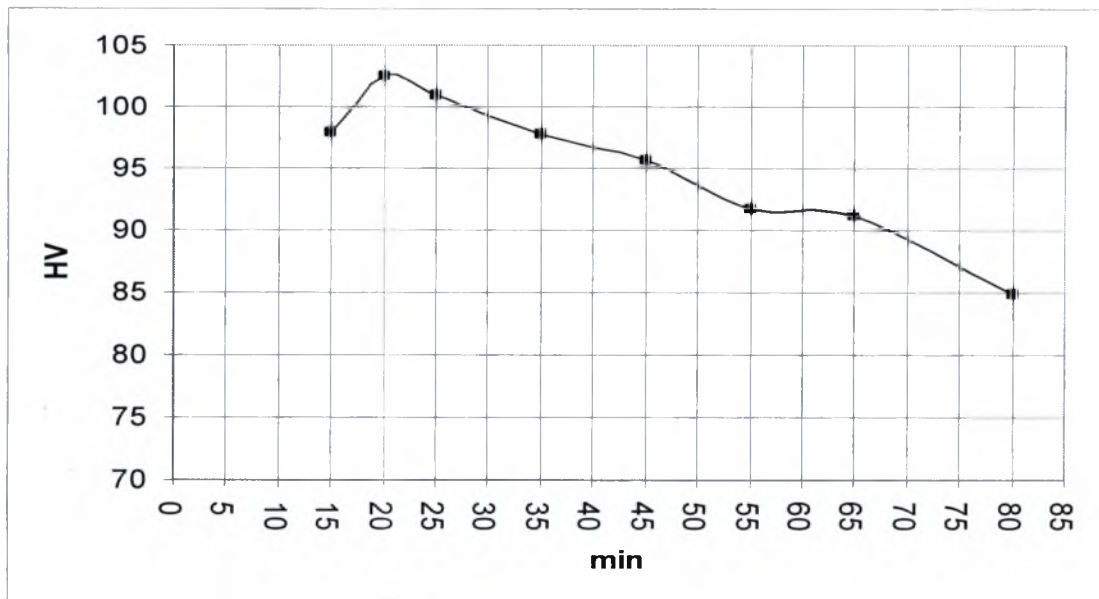
3.4 Θερμική Κατεργασία Ισχυροποίησης

Στόχος της θερμικής κατεργασίας είναι η δημιουργία κατά την γήρανση ενός πληθυσμού σωματιδίων ισχυροποίησης. Τελευταίο στάδιο της ισχυροποίησης είναι η γήρανση. Από τα πειράματα παρατηρήθηκε η απόκριση στη γήρανση για το κράμα 6061 αλλά αφού πρώτα είχε ομογενοποιηθεί στους 580°C για 8h και είχε υποστεί βαφή. Εξετάστηκε η απόκριση του κράματος στη γήρανση σε 240°C, 200°C και 160°C.

Σε πρώτη φάση εξετάστηκε η περίπτωση της γήρανσης στους 240°C που πετυχαίνεται η μέγιστη σκληρότητα σε μικρό χρόνο. Ενώ όσο μειώνεται η θερμοκρασία της θερμικής κατεργασίας τόσο η μέγιστη σκληρότητα θα εμφανίζεται σε μεγαλύτερους χρόνους - και μάλιστα ο χρόνος αυξάνεται λογαριθμικά - και επιπλέον υπάρχει και αύξηση της μέγιστης σκληρότητας. Και αυτό γιατί καθώς μειώνεται η θερμοκρασία αυξάνεται η κινούσα δύναμη της καθίζησης της φάσης β' με αποτέλεσμα μεγαλύτερο κλάσμα όγκου της φάσης αυτής που είναι σε πλήρη συνοχή με την μήτρα. Επιπλέον η μείωση της θερμοκρασίας μειώνει την ταχύτητα της διάχυσης και έτσι η μέγιστη σκληρότητα εμφανίζεται σε αρκετά μεγαλύτερους χρόνους. Με δοκιμές στα 15, 20, 25, 35, 45, 55, 65, 80 τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

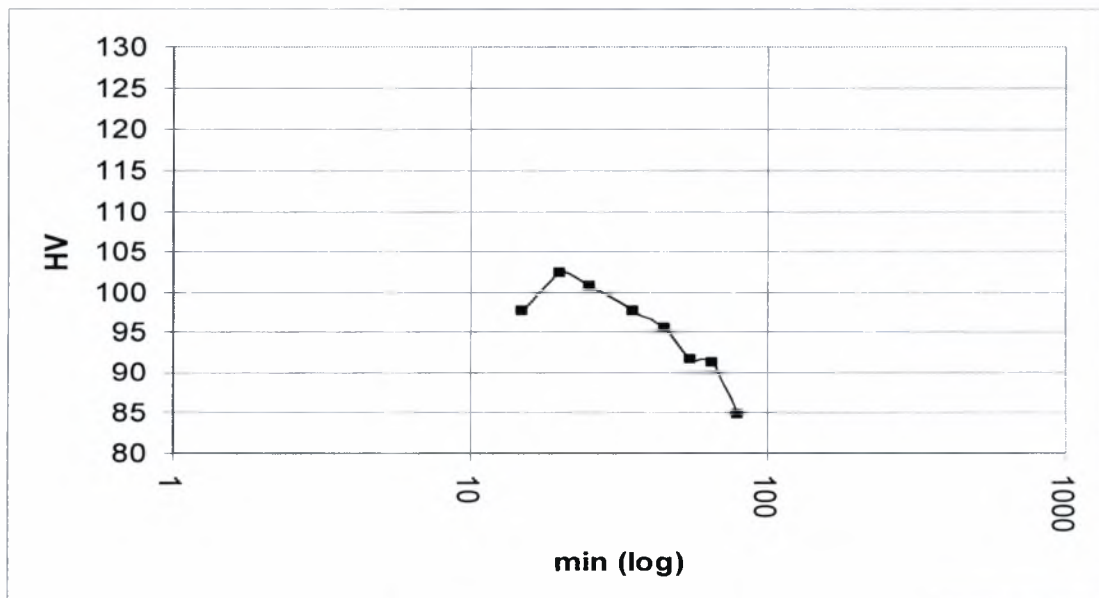
min	15	20	25	35	45	55	65	80
HV	97,9	102,5	100,9	97,8	95,7	91,7	91,2	84,9

Πίνακας 3.4.1 : Αποτελέσματα μικροσκληρότητας μετά από 8h ομογενοποίηση και τεχνητή γήρανση στους 240°C.



Διάγραμμα 3.4.1 : Από τα αποτελέσματα μικροσκληρότητας μετά από 8h ομογενοποίηση και τεχνητή γήρανση στους 240°C φαίνεται ότι για 20 λεπτά θα έχουμε την μέγιστη σκληρότητα περίπου 102,5HV.

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα 3.4.1 με λογαριθμικές ομως μονάδες στον άξονα του χρόνου:

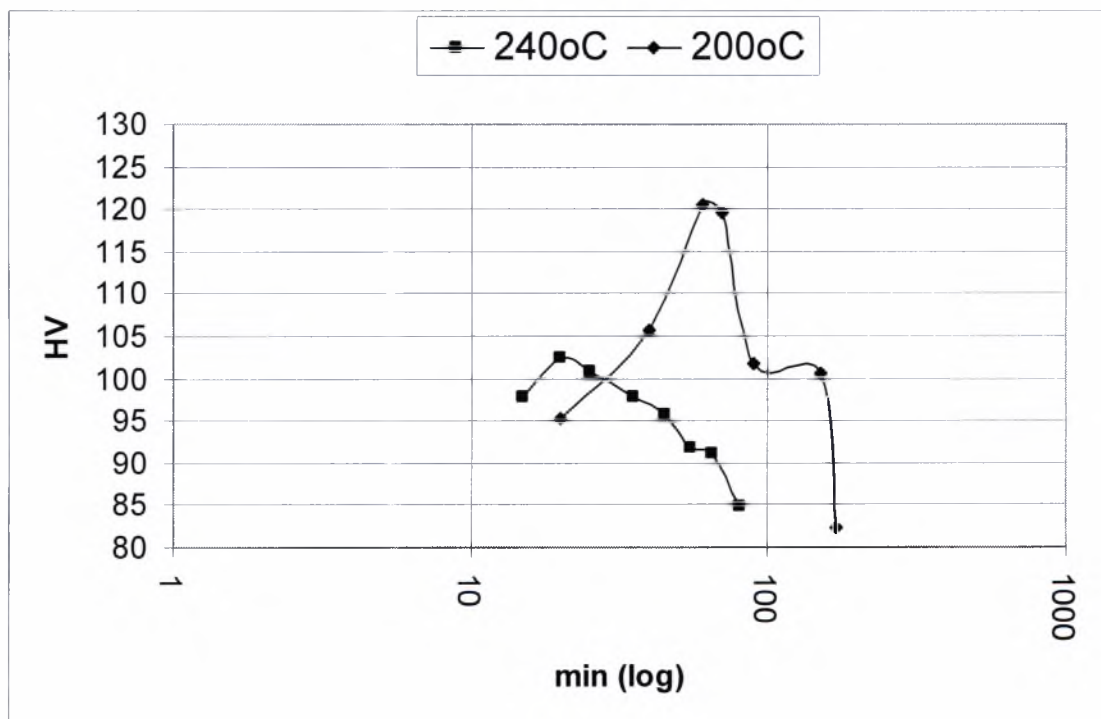


Διάγραμμα 3.4.2 : Αποτελέσματα μικροσκληρότητας μετά από 8h ομογενοποίηση και τεχνητή γήρανση στους 240°C , με τον χρόνο σε λογαριθμικές μονάδες.

Σε επόμενη φάση πραγματοποιείται η τεχνητή γήρανση στους 200°C όπου η μέγιστη σκληρότητα επιτυγχάνεται σε μεγαλύτερο χρόνο από πριν. Με δοκιμές στα 20, 40, 60, 70, 90, 150, 170 τα αποτελέσματα είναι τα παρακάτω:

min	20	40	60	70	80	120	150	170
HV	95,3	105,6	120,6	119,6	112,2	110	100,56	82,42

Πίνακας 3.4.2 : Αποτελέσματα μικροσκληρότητας μετά από 8h ομογενοποίηση και τεχνητή γήρανση στους 200°C.

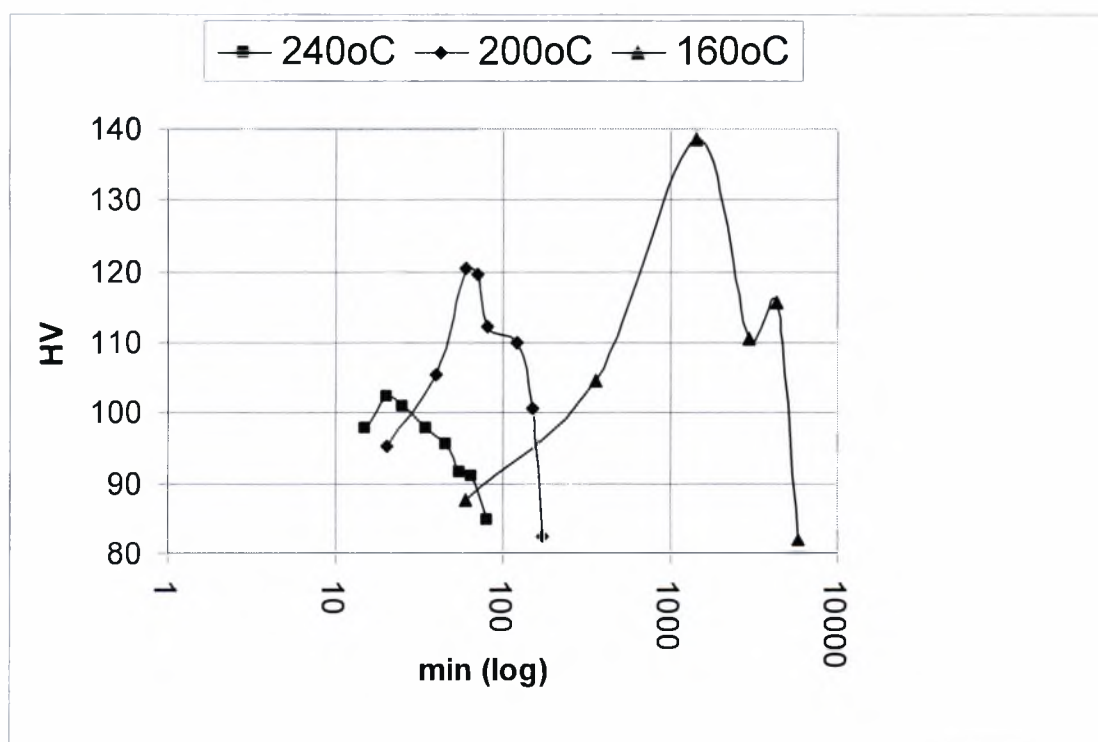


Διάγραμμα 3.4.3 : Αποτελέσματα μικροσκληρότητας μετά από 8h ομογενοποίηση και τεχνητή γήρανση στους 200°C και στους 240°C.

Τελευταία πραγματοποιήθηκε η τεχνητή γήρανση στους 160°C όπου η μέγιστη σκληρότητα επιτυγχάνεται σε πολύ μεγαλύτερο χρόνο από τους 200°C και 240°C και είναι μεγαλύτερη αυτή. Με δοκιμές στα 60, 360, 1440, 2970, 4320 και 5760 λεπτά (ή 1hr, 6hrs, 24hrs, 49,5hrs, 72hrs και 96hrs αντίστοιχα) τα αποτελέσματα ήταν:

hrs	1	6	24	49.5	72	96
min	60	360	1440	2970	4320	5760
HV	87,77	104,68	138,50	110,67	115,67	82,03

Πίνακας 3.4.3 : Αποτελέσματα μικροσκληρότητας μετά από 8h ομογενοποίηση και τεχνητή γήρανση στους 160°C.



Διάγραμμα 3.4.4 : Αποτελέσματα μικροσκληρότητας μετά από 8h ομογενοποίηση και τεχνητή γήρανση στους 160°C, στους 200°C και στους 240°C.

4.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Από τα αποτελέσματα της διπλωματικής αυτής εργασίας βρέθηκε ότι - όπως αναμένονταν και από την βιβλιογραφία - κατά την ομογενοποίηση πραγματοποιείται διαλυτοποίηση των ευτηκτικών περιοχών Mg_2Si και Si που έχουν χαμηλό σημείο τήξεως και προκαλούν τοπικές τήξεις (tearing) στο υλικό κατά την διέλαση. Οι φάσεις αυτές πυρηνώνονται και αναπτύσσονται στα όρια των κόκκων και με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας επαναδιαλυτοποιούνται.
- Μετά την ομογενοποίηση σχηματίστηκε μια ομοιογενή κατανομή διεσπαρμένων σωματιδίων μέσω της οποίας αποφεύγεται η ανακρυστάλλωση κατά την διέλαση.
- Οι φάσεις του Fe μετασχηματίζονται (πιθανώς $Al_{13}Fe_4 \rightarrow AlFeSi$) και από βελονοειδής που είναι σφαιροποιούνται.
- Παρατηρήθηκε τέλος, ότι μετά από 8-12 ώρες η διαλυτοποίηση φαίνεται να είναι καλή. Όσο αυξάνεται ο χρόνος γίνεται καλύτερη, αλλά πρέπει να συνδιαστεί και τον οικονομικό παράγοντα που δεν επιτρέπει πολύ μεγάλους χρόνους, χωρίς πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

5. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΕΡΕΥΝΑΣ

- Τα πειράματα ισχυροποίησης μέσω γήρανσης θα πρέπει να επεκταθούν. Και αυτό γιατί πρέπει να βρεθεί από ποιον χρόνο και μετά δεν θα υπάρχει μεγαλύτερη πια απόκριση του υλικού στην γήρανση. Πιστεύεται ότι από ένα σημείο και μετά της ομογενοποίησης το υλικό δεν θα ισχυροποιείται περισσότερο – για την ίδια θερμοκρασία γήρανσης – και άρα αυτός θα είναι ο καλύτερος χρόνος ομογενοποίησης.
- Τέλος αυτό που πρέπει επίσης να εξεταστεί είναι η ταχύτητα θέρμανσης και ψύξης. Κυρίως η ταχύτητα θέρμανσης θα δώσει περιθώριο σε φάσεις με χαμηλό σημείο τήξης να διαλυτοποιηθούν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- 1.** Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, "Φυσική Μεταλλουργία.Θεμελιώδεις Αρχές". Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας Βόλος 2000
- 2.**ASM Specialty Handbook, "Aluminum and Aluminum Alloys", ASM International, USA, 1993
- 3.**I. J. Polmear, "Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals", Metallurgy and Materials Science Series
- 4.** J.E. Hatch, "Aluminum: Properties and Physical Metallurgy", ASM International, USA, 1984
- 5.** Anne Lise Dons, "The Alstruc homogenization model for industrial aluminum alloys". Journal of Light Metals 1 (2001) 133-149
- 6.** G. Sha, K.A.Q. O'Reilly, B Cantor, J.M. Titchmarsh, R.G. Hamerton, "Quasi-peritectic solidification reactions in 6xxx series wrought Al alloys". Acta Materialia 51 (2003) 1883-1897



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074013

