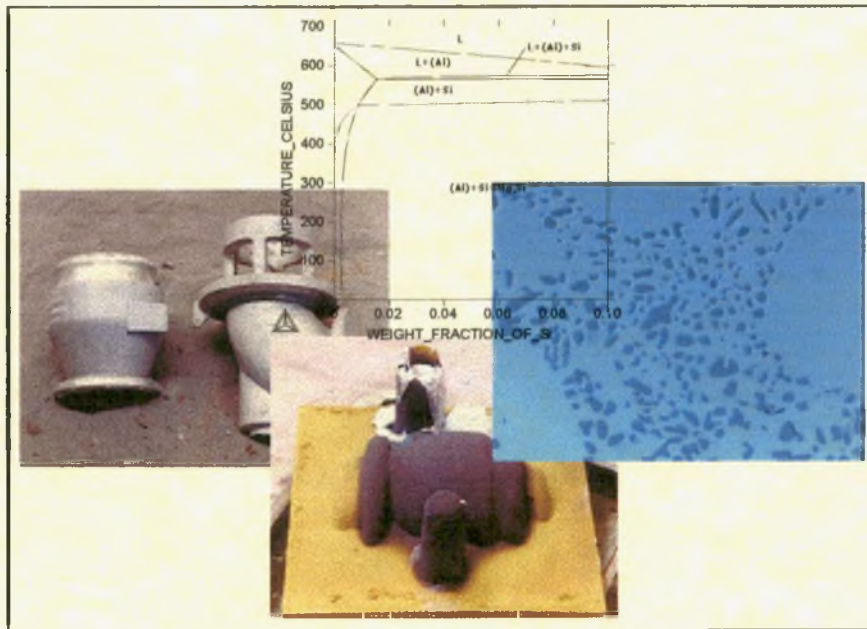


ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΧΑΛΚΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΜΑΣΚΩΝ



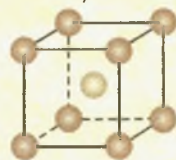
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Του Φοιτητή
Αριστεΐδη Λ. Περδίκη

Επιβλέπων Καθηγητής
Γρηγόρης Ν. Χαΐδεμενόπουλος

Laboratory of Materials



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ

Βόλος
Σεπτέμβριος 2001

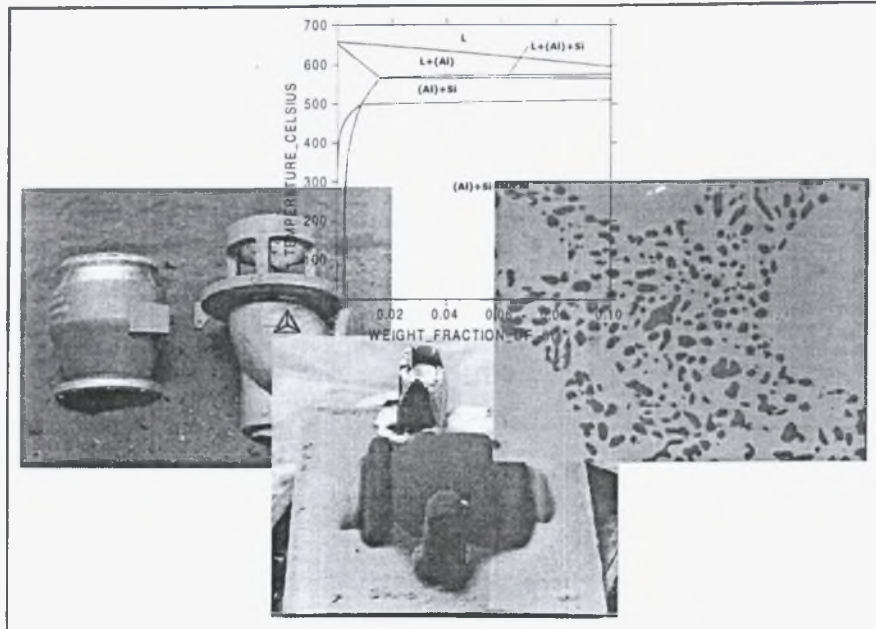


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 663/1
Ημερ. Εισ.: 05-10-2001
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜΒ
2001
ΠΕΡ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΧΑΛΚΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΜΑΣΚΩΝ



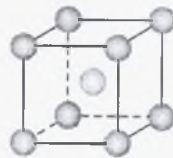
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Του Φοιτητή
Αριστεΐδη Λ. Περδίκη

Επιβλέπων Καθηγητής
Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος

Laboratory of Materials



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ

Βόλος
Σεπτέμβριος 2001

αρ. εισ. 270/ΠΑ



στους γονείς μου

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα απ' όλους τον καθηγητή μου και επιβλέποντα της παρούσας εργασίας κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο για την διάθεση, την καθοδήγηση και την αμέριστη υποστήριξη που μου προσέφερε κατά την διάρκεια υλοποίησής της. Ιδιαίτερα όμως θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις συμβουλές του και το ενδιαφέρον που έδειξε για το πρόσωπό μου, πέρα από τα πλαίσια της εργασίας αυτής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα του εργαστηρίου Βασιλάκο Απόστολο για το ιδανικό κλίμα που δημιούργησε στο εργαστήριο και που πραγματικά βοήθησε να ξεπερνιούνται δυσκολίες που προέκυπταν κατά την διάρκεια της συνεργασίας μας. Χωρίς την βοήθεια, την καθοδήγηση και την συμπαράστασή του θα ήταν δύσκολη η πραγματοποίηση της εργασίας αυτής.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Χασιώτη, υπεύθυνο του εργαστηρίου υλικών για την συμπαράστασή του και τις πολύτιμες συμβουλές του για ακαδημαϊκά και μη, θέματα. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις ωραίες συζητήσεις που κάναμε και οι οποίες μας ξεκούραζαν στα διαλείμματα της εργασίας μας.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες του εργαστηρίου για την βοήθεια και τις γνώσεις που μου προσέφεραν. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποιήφια διδάκτορα Ελένη Καμούτση, για την ανοχή της και το ωραίο κλίμα που δημιούργησε στο εργαστήριο.

Ευχαριστώ επίσης τον κ. Παντελή Πολατίδη, Μεταλλουργό Μηχανικό της Ε.Β.Ε.Τ.Α.Μ για τις πρακτικές συμβουλές του και για την μύησή μου στην πραγματικότητα των χυτηρίων.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που με ανέχτηκαν όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο Ευχαριστώ στην οικογένειά μου και ιδιαίτερα στους γονείς μου για την τεράστια συνεισφορά τους, τόσο ηθική όσο και οικονομική καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Το ελάχιστο που μπορώ να κάνω είναι να τους αφιερώσω την εργασία αυτή.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του επιχειρησιακού προγράμματος έρευνας και τεχνολογίας Π.Α.Β.Ε με τίτλο "Ανάπτυξη τεχνολογίας χύτευσης κραμάτων αλουμινίου και χαλκού με την μέθοδο των Μασκών (Croning)". Στα πλαίσια αυτής της εργασίας επιχειρήθηκε, για πρώτη φορά από Ελληνικό Χυτήριο, η κατασκευή χυτών από κράματα αλουμινίου και χαλκού χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των μασκών (Croning). Αντικείμενο της εργασίας ήταν η επιστημονική μελέτη και ανάπτυξη της παραπάνω μεθόδου χύτευσης, με στόχο την παραγωγή μηχανολογικών εξαρτημάτων χυτεύοντας βιομηχανικά κράματα με αποδεκτά χαρακτηριστικά ποιότητας σύμφωνα με διεθνείς προδιαγραφές. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου η Βιομηχανία Μεταλλουργίας και Τεχνικών Έργων (Β.Μ.Τ.Ε Α.Ε), το μεγαλύτερο χυτήριο της χώρας, συνεργάστηκε με την Εταιρία Βιομηχανικής Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης Μετάλλων (Ε.Β.Ε.Τ.Α.Μ Α.Ε) και το Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Ε.Υ.Π.Θ).

Η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας χύτευσης ακολούθησε μια συγκεκριμένη μεθοδολογία. Ξεκίνησε με τον καθορισμό των κραμάτων αλουμινίου και χαλκού που επρόκειτο να χυτευτούν σύμφωνα με την προδιαγραφή DIN, που συνεπάγεται και τον καθορισμό της χημικής τους σύστασης αλλά και τον μηχανικών τους ιδιοτήτων. Στη συνέχεια επιχειρήθηκε η βελτιστοποίηση της τελικής μικροδομής των κραμάτων με την βοήθεια της υπολογιστικής θερμοδυναμικής κραμάτων και την μέθοδο CALPHAD. Με την χρήση του λογισμικού Thermo-Calc έγινε προσπάθεια να ευρεθεί η βέλτιστη χημική σύσταση των κραμάτων, η οποία και οδήγησε σε ελαχιστοποίηση του εύρους τήξης, στην μεγιστοποίηση της κινούσας δύναμης για καθίζηση ορισμένων φάσεων, αλλά και στην ελαχιστοποίηση του διαφορισμού ορισμένων κραματικών στοιχείων κατά την στερεοποίηση. Ακολούθησε η προετοιμασία και ο υπολογισμός των παραμέτρων της χύτευσης (σχεδιασμός καλουπιού, υπολογισμός θερμοκρασιών και χρόνων χύτευσης κ.α). Τέλος πραγματοποιήθηκε η χύτευση δοκιμαστικών δοκιμίων αλλά και αντικειμένων, από κάθε ένα κράμα αλουμινίου και χαλκού με τις βέλτιστες χημικές συστάσεις που επελέγησαν προηγουμένως. Τα χυτά αυτά ελέγχθηκαν ποιοτικά και έγινε σύγκριση με τις προδιαγραφές.

Μετά την ολοκλήρωση των πειραματικών χυτεύσεων διαπιστώθηκε ότι τα κράματα αλουμινίου είχαν γενικά αποδεκτές ιδιότητες σε αντίθεση με αυτά του χαλκού των οποίων οι τιμές ολκιμότητας ήταν χαμηλότερες από τις προδιαγραφές. Οι αποκλίσεις αυτές αποδόθηκαν στη δημιουργία σφαλμάτων όπως το πορώδες, καθώς και στις αποκλίσεις από τις βέλτιστες συστάσεις που προσδιορίστηκαν από τους θερμοδυναμικούς υπολογισμούς. Η δημιουργία του πορώδους αποδόθηκε στις συνθήκες της χύτευσης και πιο συγκεκριμένα στο καλούπι που χρησιμοποιήθηκε. Στα περισσότερα πάλι κράματα αλουμινίου και χαλκού, ο μη καταστρεπτικός έλεγχος έδειξε πολύ καλή ποιότητα επιφανείας και εξαιρετική διαστατική ακρίβεια, χαρακτηριστικά της μεθόδου χύτευσης σε Μάσκες.

Από την υλοποίηση της παρούσας εργασίας η ΒΜΤΕ απέκτησε σημαντική τεχνογνωσία για την επέκταση της παραγωγικής της διαδικασίας πέρα από την χύτευση σιδηρούχων κραμάτων, όπου κατέχει την πρώτη θέση στην Ελλάδα, και στα κράματα αλουμινίου και χαλκού.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	II
Περίληψη	III
Περιεχόμενα	V
Πίνακας Πινάκων	VII
Πίνακας Εικόνων	X
1 Εισαγωγή	1
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	4
2.1 Εισαγωγή στο αλουμίνιο και τα κράματα αλουμινίου	4
2.2 Εισαγωγή στο χαλκό και τα κράματα χαλκού	8
2.3 Επιλογή χυτών κραμάτων αλουμινίου και χαλκού	9
2.3.1 Ιδιότητες χυτών κραμάτων αλουμινίου	11
2.3.2 Ιδιότητες χυτών κραμάτων χαλκού	15
2.4 Εισαγωγή στην χύτευση	19
2.4.1 Ορολογία της χύτευσης	19
2.4.2 Η διαδικασία στερεοποίησης	20
2.4.3 Μικροδομή και διαφορισμός των χυτών	22
2.4.4 Προβλήματα υγρού μετάλλου	23
2.4.5 Σύστημα τροφοδοσίας	24
2.4.6 Τροφοδότες (προσεπιχωνεύματα)	26
2.5 Μέθοδοι χύτευσης κραμάτων αλουμινίου και χαλκού	27
2.5.1 Χύτευση σε άμμο (Sand Casting)	28
2.5.2 Χύτευση σε καλούπι (Die Casting)	29
2.5.3 Χύτευση ακριβείας (Investment Casting)	31
2.5.4 Χύτευση σε καλούπι από γύψο (Plaster Mold Process)	32
2.5.5 Μέθοδος κατασκευής καλουπιών σε κενό (Vacuum-Process)	32
2.5.6 Χύτευση σε μόνιμο καλούπι (Permanent Mold Casting)	33
2.5.7 Μέθοδος ημίρρευστης κατάστασης μετάλλου (Semi-Solid Metal Process)	34
2.6 Αξιολόγηση των μεθόδων χύτευσης.	34
2.7 Μέθοδος Χύτευσης με Μάσκες (Croning)	35

3	Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί φάσεων κραμάτων Αλουμινίου και Χαλκού	39
3.1	Υπολογισμοί φάσεων	39
3.1.1	Περιγραφή προγράμματος Thermo-Calc	39
3.1.2	Προσομοίωση στερεοποίησης Sheil	44
3.2	Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί κραμάτων αλουμινίου	47
3.3	Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί κραμάτων χαλκού	53
4	Προετοιμασία χύτευσης, εξοπλισμού και χώρου	60
4.1	Προετοιμασία πρώτων και βοηθητικών υλών	60
4.2	Προετοιμασία χώρου και σχεδιασμός παραγωγικής διαδικασίας	61
4.3	Προετοιμασία χύτευσης	63
4.3.1	Σύνθεση φουρνιάς	63
4.3.2	Θερμοκρασίες χύτευσης και τήξης	65
4.3.3	Υπολογισμός χρόνου χύτευσης (κατά Nielsen)	66
4.3.4	Υπολογισμός τροφοδοσίας του συστήματος χύτευσης	67
5	Δοκιμαστική Χύτευση Και Ποιοτικός Έλεγχος	71
5.1	Θερμικές κατεργασίες	73
5.2	Χημική Ανάλυση	74
5.2.1	Κράματα Αλουμινίου	74
5.2.2	Κράματα Χαλκού	76
5.3	Μεταλλογραφικός έλεγχος	78
5.3.1	Κράματα Αλουμινίου	78
5.3.2	Κράματα Χαλκού	84
5.4	Έλεγχος Μηχανικών Ιδιοτήτων	89
5.4.1	Έλεγχος Σκληρότητας	89
5.4.1.1	Κράματα αλουμινίου	92
5.4.1.2	Κράματα Χαλκού	94
5.4.2	Έλεγχος αντοχής εφελκυσμού	95
5.4.2.1	Κράματα Αλουμινίου	97
5.4.2.2	Κράματα Χαλκού	100
5.5	Μη καταστρεπτικές δοκιμές δοκιμίων και αντικειμένων	102
5.5.1	Ραδιογραφικός έλεγχος δοκιμίων	102
5.5.2	Έλεγχος αντικειμένων με διεισδυτικά υγρά	104

6	Συζήτηση αποτελεσμάτων	107
6.1	Κράματα αλουμινίου	107
6.2	Κράματα χαλκού	111
	Βιβλιογραφία	115
	Παράρτημα Ι – Θερμοδυναμικά διαγράμματα φάσεων	116

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 2.1	Εύρος σύστασης κραμάτων αλουμινίου	10
Πίνακας 2.2	Εύρος σύστασης κραμάτων χαλκού	11
Πίνακας 2.3	Αξιολόγηση συνηθέστερων μεθόδων χύτευσης	35
Πίνακας 3.1	Υπολογισμοί της κινούσας δύναμης για καθίζηση της φάσης Mg ₂ Si και του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα αλουμινίου AlSi7Mg	49
Πίνακας 3.2	Υπολογισμοί της κινούσας δύναμης για καθίζηση της φάσης Mg ₂ Si και του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα αλουμινίου AlSi10Mg	50
Πίνακας 3.3	Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα αλουμινίου AlSi12	51
Πίνακας 3.4	Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα αλουμινίου AlMg3	52
Πίνακας 3.5	Υπολογισμοί της κινούσας δύναμης για καθίζηση της θ-φάσης και του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα αλουμινίου AlCu4Ti	53
Πίνακας 3.6	Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα χαλκού CuSn7ZnPb	54
Πίνακας 3.7	Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα χαλκού CuSn12Ni	55
Πίνακας 3.8	Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα χαλκού CuZn33Pb	56
Πίνακας 3.9.α	Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα χαλκού CuAl9Ni	57
Πίνακας 3.9.β	Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης απουσία Fe, σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα χαλκού CuAl9Ni	57
Πίνακας 3.10	Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα χαλκού CuPb5Sn	58
Πίνακας 3.11	Επιλογή χημικών συστάσεων για κάθε κράμα	59
Πίνακας 4.1	Πρώτες ύλες για χύτευση κραμάτων αλουμινίου	60
Πίνακας 4.2	Πρώτες ύλες για χύτευση κραμάτων χαλκού	60
Πίνακας 4.3	Θερμοκρασίες χύτευσης κραμάτων αλουμινίου	65
Πίνακας 4.4	Θερμοκρασίες χύτευσης κραμάτων χαλκού	65
Πίνακας 4.5	Διαστάσεις καλουπιών για τα κράματα αλουμινίου και χαλκού	70

Πίνακας 5.1	Θερμικές κατεργασίες κραμάτων αλουμινίου και χαλκού	73
Πίνακας 5.2.1	Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου AlSi7Mg	75
Πίνακας 5.2.2	Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου AlSi10Mg	75
Πίνακας 5.2.3	Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου AlMg3	75
Πίνακας 5.2.4	Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου AlSi12	76
Πίνακας 5.2.5	Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου AlCu4Ti	76
Πίνακας 5.2.6	Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου CuSn7ZnPb	76
Πίνακας 5.2.7	Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου CuSn12Ni	77
Πίνακας 5.2.8	Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου CuZn33Pb	77
Πίνακας 5.2.9	Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου CuAl9Ni	77
Πίνακας 5.2.10	Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου CuPb5Sn	78
Πίνακας 5.4.1	Πίνακας επιλογής βαθμού φόρτισης	91
Πίνακας 5.4.2	Επιλογή μεθόδου σκληρομέτρησης	92
Πίνακας 5.4.3	Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος AlSi7Mg	93
Πίνακας 5.4.4	Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος AlSi10Mg	93
Πίνακας 5.4.5	Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος AlSi12	93
Πίνακας 5.4.6	Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος AlMg3	94
Πίνακας 5.4.7	Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος AlCu4Ti	94
Πίνακας 5.4.8	Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος CuSn7ZnPb	94
Πίνακας 5.4.9	Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος CuSn12Ni	94
Πίνακας 5.4.10	Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος CuZn33Pb	95
Πίνακας 5.4.11	Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος CuAl9Ni	95
Πίνακας 5.4.12	Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος CuPb5Sn	95
Πίνακας 5.4.13	Διαστάσεις δοκιμών εφελκυσμού τύπου B	96
Πίνακας 5.4.14	Ανοχές εγκάρσιων διαστάσεων δοκιμών εφελκυσμού	96
Πίνακας 5.4.15	Διαστάσεις δοκιμών εφελκυσμού	97
Πίνακας 5.4.16	Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος AlSi7Mg	97
Πίνακας 5.4.17	Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος AlSi10Mg	98
Πίνακας 5.4.18	Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος AlSi12	99
Πίνακας 5.4.19	Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος AlMg3	99
Πίνακας 5.4.20	Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος AlCu4Ti	99
Πίνακας 5.4.21	Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος CuSn7ZnPb	100
Πίνακας 5.4.22	Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος CuSn12Ni	100
Πίνακας 5.4.23	Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος CuZn33Pb	101
Πίνακας 5.4.24	Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος CuAl9Ni	101
Πίνακας 5.4.25	Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος CuAl9Ni	101

Πίνακας 5.4.26	Αποτελέσματα ραδιογραφικού ελέγχου δοκιμίων αλουμινίου	103
Πίνακας 5.4.27	Αποτελέσματα ραδιογραφικού ελέγχου δοκιμίων χαλκού	103
Πίνακας 5.4.28	Αποτελέσματα ραδιογραφικού ελέγχου αντικειμένων αλουμινίου	104
Πίνακας 5.4.29	Αποτελέσματα ελέγχου αντικειμένων αλουμινίου με διεισδυτικά υγρά	105
Πίνακας 5.4.30	Αποτελέσματα ελέγχου αντικειμένων χαλκού με διεισδυτικά υγρά	106

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 2.1	Χύτευση σε άμμο	28
Εικόνα 2.2	Αντικείμενα μεθόδου χύτευσης σε καλούπι	30
Εικόνα 2.3	Αντικείμενα χύτευσης ακριβείας	31
Εικόνα 2.4	Αντικείμενα χύτευσης σε καλούπι από γύψο	32
Εικόνα 2.5	Αντικείμενο μεθόδου χύτευσης-V	33
Εικόνα 2.6	Αντικείμενο χύτευσης σε μόνιμο καλούπι	34
Εικόνα 2.7	Ράβδος ημίρρευστης κατάστασης	34
Εικόνα 2.8	Μοντέλο, μάσκες και το αποτέλεσμα της χύτευσης	37
Εικόνα 4.1	Φόρμες για την κατασκευή μασκών.	67
Εικόνα 5.1	Μάσκες Cropping	71
Εικόνα 5.2	Χύτευση αντικειμένων στο πειραματικό χυτήριο της EBETAM	71
Εικόνα 5.3	Αντικείμενα αλουμινίου	72
Εικόνα 5.4	Αντικείμενα χαλκού	72
Εικόνα 5.3.1(α)	Μικροδομή κράματος αλουμινίου AlSi7Mg [x50]	79
Εικόνα 5.3.1(β)	Μικροδομή κράματος αλουμινίου AlSi7Mg [x1000]	79
Εικόνα 5.3.2(α)	Μικροδομή κράματος αλουμινίου AlSi10Mg [x50]	80
Εικόνα 5.3.2(β)	Μικροδομή κράματος αλουμινίου AlSi10Mg [x1000]	80
Εικόνα 5.3.3(α)	Μικροδομή κράματος αλουμινίου AlSi12 [x50]	81
Εικόνα 5.3.3(β)	Μικροδομή κράματος αλουμινίου AlSi12 [x1000]	81
Εικόνα 5.3.4(α)	Μικροδομή κράματος αλουμινίου AlMg3 [x200]	82
Εικόνα 5.3.4(β)	Μικροδομή κράματος αλουμινίου AlMg3 [x1000]	82
Εικόνα 5.3.5(α)	Μικροδομή κράματος αλουμινίου AlCu4Ti [x200]	83
Εικόνα 5.3.5(β)	Μικροδομή κράματος αλουμινίου AlCu4Ti [x1000]	83
Εικόνα 5.3.6(α)	Μικροδομή κράματος αλουμινίου CuSn7ZnPb [x50]	84
Εικόνα 5.3.6(β)	Μικροδομή κράματος χαλκού CuSn7ZnPb [x500]	84
Εικόνα 5.3.7(α)	Μικροδομή κράματος χαλκού CuSn12Ni [x100]	85
Εικόνα 5.3.7(β)	Μικροδομή κράματος χαλκού CuSn12Ni [x1000]	85
Εικόνα 5.3.8(α)	Μικροδομή κράματος χαλκού CuZn33Pb [x50]	86
Εικόνα 5.3.8(β)	Μικροδομή κράματος χαλκού CuZn33Pb [x200]	86
Εικόνα 5.3.9(α)	Μικροδομή κράματος χαλκού CuAl9Ni [x50]	87
Εικόνα 5.3.9(β)	Μικροδομή κράματος χαλκού CuAl9Ni [x500]	87
Εικόνα 5.3.10(α)	Μικροδομή κράματος χαλκού CuPb5Sn [x200]	88
Εικόνα 5.3.10(β)	Μικροδομή κράματος χαλκού CuPb5Sn [x1000]	88

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Ανάπτυξης Βιομηχανικής Έρευνας (ΠΑΒΕ) με τίτλο "Ανάπτυξη τεχνολογίας χύτευσης κραμάτων αλουμινίου και χαλκού με την μέθοδο των Μασκών (Croning)". Για την πραγματοποίηση της παραπάνω μελέτης υπήρξε συνεργασία μεταξύ του ΕΥΠΘ (Εργαστήριο Υλικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας) της ΕΒΕΤΑΜ Α.Ε (Εταιρεία Βιομηχανικής Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης Μετάλλων) και της ΒΜΤΕ Α.Ε (Βιομηχανία Μεταλλουργίας και Τεχνικών Έργων) με στόχο την ανάπτυξη και αφομοίωση της τεχνολογίας χύτευσης από την τελευταία.

Η ΒΜΤΕ είναι το μεγαλύτερο χυτήριο της χώρας και ένα από τα μεγαλύτερα των Βαλκανίων και εξειδικεύεται κυρίως στις χυτεύσεις από χάλυβα και χυτοσίδηρο. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι στον Ελληνικό χώρο δεν υπάρχει συστηματική παραγωγή χυτών εξαρτημάτων και ανταλλακτικών από κράματα αλουμινίου και χαλκού καθώς επίσης και ότι διεθνώς το αλουμίνιο υποκαθιστά συνεχώς τα σιδηρούχα κράματα, κερδίζοντας ολοένα και περισσότερο έδαφος, η εταιρεία αποφάσισε την δραστηριοποίηση της και σε αυτόν τον τομέα, διευρύνοντας τις πωλήσεις της.

Έτσι η παρούσα εργασία έχει στόχο την λεπτομερή μελέτη όλων των παραμέτρων που οδηγούν στην παραγωγή χυτών αντικειμένων τα οποία να ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές. Οι παράμετροι αυτοί έχουν να κάνουν με:

- την χημική σύσταση των υλικών
- τη δομή των υλικών
- το σχεδιασμό των καλουπιών (μάσκες)
- το σχεδιασμό της χύτευσης
- την στερεοποίηση κ.α

Για την χύτευση των κραμάτων αλουμινίου και χαλκού επιλέχθηκε η μέθοδος των μασκών (shell casting process) ή μέθοδος Croning. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που οδήγησαν στην επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η επιτευξημότητα, το κόστος και η ποιότητα. Η μέθοδος των μασκών προσφέρει πολύ καλή ποιότητα επιφανείας σε σχέση με τις συνηθισμένες μεθόδους κατασκευής καλουπιών από άμμο, καλύτερη διαστατική ακρίβεια και ένα υψηλό ρυθμό παραγωγής με

μειωμένες απαιτήσεις. Επίσης η μέθοδος μπορεί να αυτοματοποιηθεί και να προσαρμοστεί για μαζική παραγωγή.

Για την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας χύτευσης επιλέχθηκε να χυτευτούν πέντε διαφορετικά κράματα αλουμινίου και πέντε κράματα χαλκού, σύμφωνα με τις ποιότητες:

- DIN 1705 – Κράματα Cu-Sn και Cu-Sn-Zn
- DIN 1716 – Κράματα Cu-Sn-Pb
- DIN 1714 – Κράματα Cu-Al και Cu-Al-Ni
- DIN 1709 – Κράματα Cu-Zn
- DIN 17658 – Κράματα Cu-Ni
- DIN 1725 – 5 Κράματα αλουμινίου

Η επιλογή των παραπάνω ποιοτήτων έγινε λαμβάνοντας υπόψη την εμπορικότητα, τις μηχανικές ιδιότητες και την ευχυτότητά τους. Ο καθορισμός των κραμάτων αλουμινίου και χαλκού σύμφωνα με την προδιαγραφή DIN, συνεπάγεται και τον καθορισμό της χημικής τους σύστασης αλλά και των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

Η μελέτη των κραμάτων αυτών εστιάστηκε κυρίως στην βελτιστοποίηση της τελικής μικροδομής τους η οποία οδηγεί και σε βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα υπολογιστικής θερμοδυναμικής Thermo-Calc και πιο συγκεκριμένα η μέθοδος CALPAD (CALculation of PHAse Diagrams). Με την χρήση του λογισμικού αυτού έγινε μια προσπάθεια να βελτιστοποιηθεί η χημική σύσταση των κραμάτων λαμβάνοντας υπόψη την

- ελαχιστοποίηση του εύρους στερεοποίησης
- μεγιστοποίηση της κινούσας δύναμης για καθίζηση ορισμένων φάσεων
- ελαχιστοποίηση του διαφορισμού κραματικών στοιχείων

Στο τέλος της θερμοδυναμικής μελέτης προτείνονται οι βέλτιστες χημικές συστάσεις για τα κράματα αλουμινίου και χαλκού.

Πριν πραγματοποιηθεί η χύτευση των κραμάτων, απαιτείται η μελέτη των παραμέτρων της χύτευσης που έχουν να κάνουν με

- την σύνθεση της φουρνιάς
- την τροφοδοσία του συστήματος χύτευσης
- το χρόνο χύτευσης
- τη θερμοκρασία τήξης των κραμάτων
- την θερμοκρασία χύτευσης των κραμάτων

Οι παράμετροι αυτοί οδηγούν στην στρωτή ροή του λιωμένου μετάλλου μέσα στο καλούπι και την πλήρωση όλων των τομέων του. Έτσι αποφεύγονται προβλήματα όπως ο εγκλωβισμός αερίων και η δημιουργία πόρων στο χυτό που έχουν αρνητικές επιπτώσεις στις μηχανικές ιδιότητες .

Μετά από την πραγματοποίηση της δοκιμαστικής χύτευσης ακολουθεί ο ποιοτικός έλεγχος των χυτών με καταστρεπτικές και μη καταστρεπτικές μεθόδους, συμπεριλαμβάνοντας:

- τον έλεγχο της χημικής σύστασης
- της σκληρότητας
- της αντοχής σε εφελκυσμό
- τον ραδιογραφικό έλεγχο
- και έλεγχο με διεισδυτικά υγρά

Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τις προδιαγραφές και εξάγονται τα συμπεράσματα.

Η δομή της εργασίας είναι η εξής:

- Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται λεπτομερής βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα κράματα αλουμινίου και χαλκού, με έμφαση στα χυτά κράματα, καταλήγοντας στην επιλογή των προς χύτευση ποιοτήτων. Επίσης γίνεται αναλυτική περιγραφή της χύτευσης και των μεθόδων κατασκευής καλουπιών. Τέλος γίνεται σύγκριση των μεθόδων και λεπτομερής περιγραφή της μεθόδου των Μασκών.
- Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η θεωρητική θερμοδυναμική βάση στην οποία στηρίζεται το πρόγραμμα υπολογιστικής θερμοδυναμικής Thermo-Calc. Επίσης παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της θερμοδυναμικής μελέτης για κάθε κράμα αλουμινίου και χαλκού τα οποία οδηγούν στον καθορισμό των βέλτιστων χημικών συστάσεων.
- Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται και υπολογίζονται λεπτομερώς όλοι οι παράμετροι οι οποίοι απαιτούνται πριν από την πραγματοποίηση της χύτευσης. Επίσης περιγράφονται σχεδιαστικές λεπτομέρειες του καλουπιού.
- Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου για κάθε κράμα αλουμινίου και χαλκού.
- Στο κεφάλαιο 6 γίνεται η συζήτηση των αποτελεσμάτων, όπου συνδυάζοντας όλους τους ελέγχους και αναλύοντας όλα τα αποτελέσματα που έχουν παρουσιαστεί στα προηγούμενα κεφάλαια εξάγονται συμπεράσματα για κάθε κράμα αλουμινίου και χαλκού.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

- Κράματα αλουμινίου και χαλκού
- Χύτευση και μέθοδοι κατασκευής καλουπιών

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση των κραμάτων αλουμινίου και χαλκού με έμφαση στα χυτά κράματα. Στη συνέχεια πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή όλων των σταδίων και των ιδιοτήτων της χύτευσης, καθώς και παρουσίαση των πιο συνηθισμένων μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την χύτευση των κραμάτων αλουμινίου και χαλκού. Τέλος γίνεται αναλυτική περιγραφή της μεθόδου χύτευσης με μάσκες (Croning).

2.1 Εισαγωγή στο αλουμίνιο και τα κράματα αλουμινίου

Χαρακτηριστικά στοιχείου

- Πυκνότητα (298K) : 2698 Kgr m^{-3}
- Κρυσταλλικό πλέγμα : f.c.c
- Σημείο τήξης : 934 K
- Σημείο βρασμού : 2740 K
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα (298 K) : $3.77 \times 10^7 \text{ Ohm}^{-1} \text{m}^{-1}$
- Θερμική αγωγιμότητα (300 K) : $237 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$

13	26.9815
934 K	1.61
2740 K	
2698 kg m^{-3}	Al
[Ne]3s ¹ 3p ¹	
Aluminium	



Το αλουμίνιο είναι το δεύτερο σε αφθονία μεταλλικό στοιχείο στην γη, το οποίο από το τέλος του 19^{ου} αιώνα έγινε σημαντικός οικονομικός ανταγωνιστής σε μηχανολογικές εφαρμογές. Η εμφάνιση των τριών βιομηχανικών επαναστάσεων οδήγησε στην αναζήτηση υλικών με μοναδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά που ταίριαζαν με αυτές του αλουμινίου και των κραμάτων του. Το γεγονός αυτό είχε σημαντικό αντίκτυπο στην αύξηση της παραγωγής και της χρήσης του νέου μετάλλου.

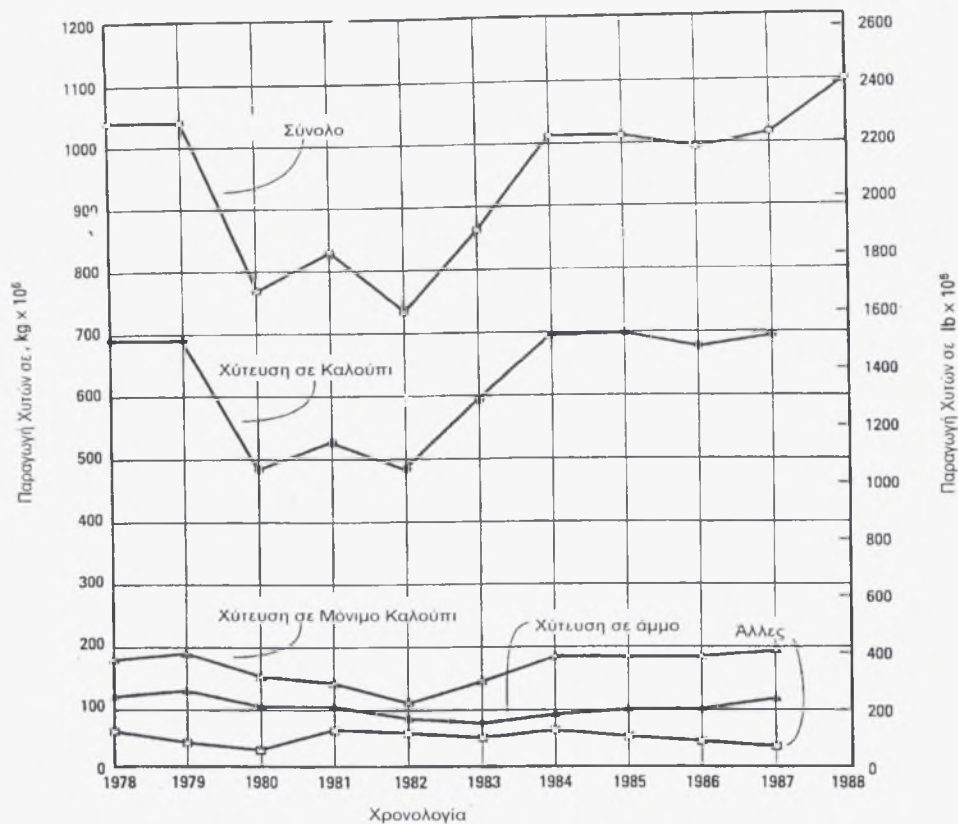
Όλη η παραγωγή αλουμινίου στηρίζεται στην μέθοδο Hall-Heroult. Η αλουμίνα (Al_2O_3) η οποία διαχωρίζεται από τον βωξίτη, διαλύεται σε μια κρυσταλλική λεκάνη μαζί με χλωριούχα άλατα τα οποία ελέγχουν την θερμοκρασία της λεκάνης, την πυκνότητα, την ειδική αντίσταση και την διαλυτότητα της αλουμίνας. Ηλεκτρικό ρεύμα διαπερνάει την λεκάνη ηλεκτρολύοντας την διαλυμένη αλουμίνα με

αποτέλεσμα τον διαχωρισμό του οξυγόνου το οποίο αντιδρά με την ανθρακούχο άνοδο και την συλλογή του καθαρού αλουμινίου στην κάθοδο. Το διαχωρισμένο μέταλλο συλλέγεται περιοδικά για να οδηγηθεί σε εγκαταστάσεις χύτευσης παράγοντας διάφορα προϊόντα πρωτόχυτου αλουμινίου.

Τα χυτά αλουμινίου έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη της βιομηχανίας αλουμινίου από την αρχή της παραγωγής τους στο τέλος του 19^{ου} αιώνα. Τα πρώτα εμπορικά προϊόντα ήταν χυτά, όπως μαγειρικά σκεύη και διακοσμητικά αντικείμενα τα οποία εκμεταλλεύτηκαν την καινοτομία και την πρακτικότητα του νέου μετάλλου. Αυτές οι πρώτες εφαρμογές γρήγορα διέδωσαν τις ικανότητες του νέου υλικού. Η ανάπτυξη κραμάτων και ο χαρακτηρισμός των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του, έδωσαν την βάση για την ανάπτυξη νέων προϊόντων στις δεκαετίες που ακολούθησαν. Νέες μέθοδοι χύτευσης αναπτύχθηκαν για να καλύψουν τις απαιτήσεις των χυτηρίων σε παραγωγική ικανότητα και ποιότητα. Η τεχνολογία του λιωμένου μετάλλου και της στερεοποίησης εξελίχθηκαν με αποτέλεσμα την παραγωγή αξιόπιστων και οικονομικών αντικειμένων τα οποία ανταποκρίνονται στις αυξημένες απαιτήσεις.

Τα κράματα αλουμινίου τα οποία χρησιμοποιούνται πιο συχνά στην παραγωγή χυτών αντικειμένων είναι τα κράματα αλουμινίου-πυριτίου λόγω της εξαιρετικής ρευστότητας που παρουσιάζουν, σε συνδυασμό με το κόστος, την αντίσταση σε διάβρωση και την αντίσταση σε διαστολικές ρωγμές. Η προσθήκη μαγνησίου είναι επιθυμητή σε αυτή την οικογένεια κραμάτων, λόγω της ισχυροποίησης που προσδίδει στο χυτό με την εμφάνιση της φάσης Mg_2Si . Συχνά όμως η προσθήκη μαγνησίου περιορίζεται σε χαμηλά επίπεδα για να ελαχιστοποιηθεί η οξειδωση η οποία οδηγεί σε ανεπιθύμητα οξειδία κατά την χύτευση. Σε χαμηλά επίσης επίπεδα (0.7%) προτιμάται και η προσθήκη σιδήρου η οποία προσδίδει αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και ελαχιστοποιεί τη κόλληση του χυτού με την επιφάνεια του καλουπιού. Τέλος πολύ καλή ρευστότητα παρουσιάζουν τα χυτά στα οποία προστίθεται ψευδάργυρος.

Σήμερα τα χυτά κράματα αλουμινίου παράγονται σε εκατοντάδες συστάσεις με όλες τις εμπορικές μεθόδους χύτευσης, συμπεριλαμβανομένου της χύτευσης σε πράσινη άμμο, σε ξηρή άμμο, σε μάσκες, της χύτευσης ακριβείας, της χύτευσης υπό πίεση, της χύτευσης σε καλούπι από γύψο (plaster mold), σε μόνιμο καλούπι (permanent mold) κτλ. Στατιστικά στοιχεία για την συνολική παραγωγή χυτών αλουμινίου στις ΗΠΑ (1978-1988) καθώς και για τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται περισσότερο, παρουσιάζονται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Στατιστικά στοιχεία χυτών. ΗΠΑ 1978 – 1988

Τα χαρακτηριστικά τα οποία δίνουν στα χυτά κράματα αλουμινίου το συγκριτικό πλεονέκτημα είναι:

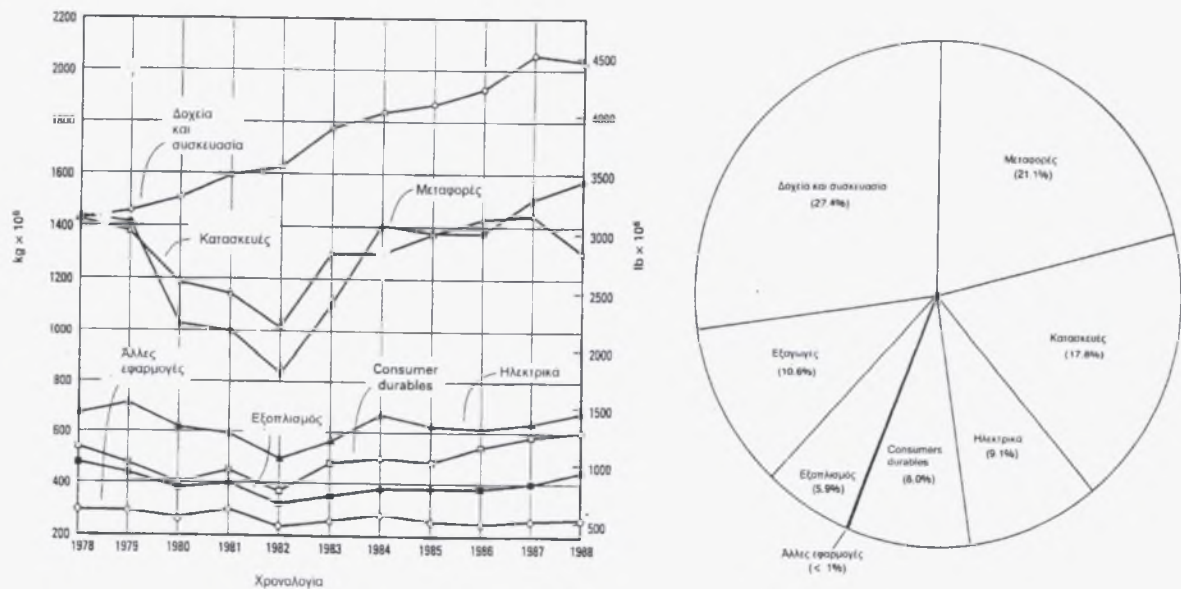
- Η καλή ρευστότητα για την πλήρωση λεπτών τομέων
- Το χαμηλό σημείο τήξεως σε σχέση με αυτό που απαιτείται για άλλα υλικά
- Η γρήγορη μετάδοση της θερμότητας από το τήγμα στο καλούπι, γεγονός που οδηγεί σε μικρότερους κύκλους χύτευσης
- Το ότι το υδρογόνο είναι το μόνο αέριο με υπολογίσιμη διαλυτότητα στα κράματα αλουμινίου, η οποία μπορεί εύκολα να ελεγχθεί
- Το ότι πολλά κράματα αλουμινίου είναι σχετικά απελευθερωμένα από διαστολικές θραύσεις και από τάση για ρωγμές
- Η χημική σταθερότητα
- Η καλή τελική επιφάνεια του χυτού με λίγες ή καθόλου ατέλειες

Οι ιδιότητες οι οποίες έκαναν το μέταλλο αυτό τόσο ελκυστικό είναι η εμφάνιση το μικρό βάρος, η διαμορφωσιμότητα, οι φυσικές ιδιότητες, οι μηχανικές ιδιότητες και η αντίσταση στη διάβρωση. Η πυκνότητα του αλουμινίου είναι μόνο 2.7gr/cm^3 δηλαδή περίπου το ένα τρίτο αυτής του χάλυβα (7.83 gr/cm^3), του χαλκού (8.93

gr/cm³) και του ορείχαλκου (8.53 gr/cm³). Παρουσιάζει εξαιρετική αντίσταση σε διάβρωση στα περισσότερα διαβρωτικά περιβάλλοντα συμπεριλαμβανομένου της ατμόσφαιρας, του νερού (και θαλασσινού), καθώς και πετροχημικών και χημικών συστημάτων.

Το αλουμίνιο επίσης εμφανίζει και εξαιρετική ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, όμως ειδικά κράματα έχουν σχεδιαστεί με υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Τα κράματα αυτά είναι χρήσιμα σε εφαρμογές όπως ηλεκτρικοί κινητήρες. Το αλουμίνιο συχνά επιλέγεται εξαιτίας της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας η οποία είναι σχεδόν διπλάσια από αυτή του χαλκού για το ίδιο βάρος. Τα χαρακτηριστικά της υψηλής αγωγιμότητας και της μηχανικής αντοχής μπορούν να συνδυαστούν σε υψηλής τάσης γραμμές μεταφοράς ισχύος. Η θερμική αγωγιμότητα του αλουμινίου η οποία είναι 50 με 60% αυτής του χαλκού είναι επωφελής σε εναλλάκτες θερμότητας, εξατμιστές, και κυλινδρικές κεφαλές αυτοκινήτων.

Το αλουμίνιο είναι μη σιδηρομαγνητικό υλικό, μια σημαντική ιδιότητα για την ηλεκτρική και ηλεκτρονική βιομηχανία. Επίσης είναι μη τοξικό με αποτέλεσμα να βρίσκει εφαρμογή στη συσκευασία τροφίμων και αναψυκτικών. Μερικά κράματα αλουμινίου υπερέχουν σε αντοχή από κατασκευαστικούς χάλυβες. Ωστόσο το αλουμίνιο και τα κράματά του εμφανίζουν σχετικά χαμηλή αντοχή και



Σχήμα 2.2 Κατανομή εφαρμογών αλουμινίου. ΗΠΑ 1978 - 1988

σκληρότητα. Το σχήμα 2.2 παρουσιάζει την κατανομή σύμφωνα με τις εφαρμογές του αλουμινίου και των κραμάτων του στις ΗΠΑ από το 1978 μέχρι το 1988.

2.2 Εισαγωγή στο χαλκό και τα κράματα χαλκού

Χαρακτηριστικά στοιχείου

- Πυκνότητα (298K) : 8960 Kgr m^{-3}
- Κρυσταλλικό πλέγμα : f.c.c
- Σημείο τήξης : 1357 K
- Σημείο βρασμού : 2840 K
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα (298 K) : $5.98 \times 10^7 \text{ Ohm}^{-1}\text{m}^{-1}$
- Θερμική αγωγιμότητα (300 K) : $401 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$

29	63.546
1357 K	1.90
2840 K	
8960 kg m^{-3}	Cu
	$[\text{Ar}]3\text{d}^{10}4\text{s}^1$
	Copper



Ο χαλκός είναι το πρώτο μέταλλο που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος. Από νωρίς οι τεχνίτες κατάλαβαν ότι μπορεί εύκολα να σφυρηλατηθεί σε σχήματα τα οποία γινόντουσαν όλο και πιο πολύπλοκα καθώς η εμπειρία τους μεγάλωνε. Έπειτα από την ανακάλυψη και του μπρούντζου ένας μεγάλος αριθμός από χυτά έγινε εφικτός.

Σήμερα ο χαλκός και τα κράματά του αποτελούν μια ομάδα από τα πιο εμπορικά μέταλλα. Περισσότεροι από 5 εκατομμύρια τόνοι παράγονται κάθε χρόνο, ενώ διαδραματίζει ένα συνεχώς αυξανόμενο κυρίαρχο ρόλο σε διάφορους κλάδους της σύγχρονης τεχνολογίας. Αυτό οφείλεται στην εξαιρετική ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, στην αντίσταση σε διάβρωση και στη διαμορφωσιμότητά του. Ο χαλκός και τα κράματά του είναι γενικά μη μαγνητικά υλικά ενώ μπορούν εύκολα να συγκολληθούν με διάφορους τρόπους. Ο καθαρός χαλκός χρησιμοποιείται εκτεταμένα ως καλώδιο καθώς επίσης και σε μια πληθώρα αντικειμένων στα οποία απαιτείται η διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος. Διάφοροι τύποι μπρούντζου και ορείχαλκου χρησιμοποιούνται σε εναλλάκτες θερμότητας, σε συστήματα θέρμανσης, σε συλλέκτες ηλιακής ενέργειας και σε πληθώρα άλλων εφαρμογών στις οποίες απαιτείται γρήγορη αγωγή της θερμότητας διαμέσω του υλικού. Εξαιτίας της ικανότητάς του να αντιστέκονται στη διάβρωση, χρησιμοποιούνται επίσης και σε σωληνώσεις, βαλβίδες και γενικά σε εγκαταστάσεις μεταφοράς νερού.

Ο χαλκός κραματώνεται με άλλα στοιχεία εξαιτίας του γεγονότος ότι ο καθαρός χαλκός είναι εξαιρετικά δύσκολο να χυτευτεί λόγω της προδιάθεσής του για επιφανειακή θραύση, δημιουργία πόρων και εσωτερικών κοιλοτήτων. Τα χαρακτηριστικά του ως προς την χύτευση βελτιώνονται με την προσθήκη μικρών

ποσοτήτων κραματικών στοιχείων όπως το βηρύλλιο, το πυρίτιο, το νικέλιο, ο ψευδάργυρος, ο κασσίτερος, το χρώμιο και το ασήμι. Τα πιο συνηθισμένα από αυτά είναι ο ψευδάργυρος και ο κασσίτερος τα οποία οδηγούν στην παραγωγή του ορείχαλκου και του μπρούντζου αντίστοιχα. Ένας μεγάλος αριθμός από άλλα κραματικά στοιχεία χρησιμοποιούνται για την βελτίωση των ιδιοτήτων του.

Τα κράματα χαλκού παράγονται με διάφορους τρόπους χύτευσης όπως χύτευση σε άμμο, με μάσκες, με χύτευση ακριβείας, σε καλούπια από γύψο, με περιστροφική χύτευση και χύτευση σε καλούπια. Τα χυτά κράματα χαλκού κατηγοριοποιούνται με ένα αριθμητικό σύστημα ξεκινώντας από το C80000 μέχρι το C99999 και το οποίο έχει να κάνει με τις ιδιότητες των κραμάτων (όπως σκληρότητα, κατεργασιμότητα, θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, αντίσταση σε διάβρωση κ.α). Τα χυτά κράματα χαλκού χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές οι οποίες απαιτούν εξαιρετική αντίσταση σε διάβρωση, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, καλή ποιότητα επιφανείας και άλλες ξεχωριστές ιδιότητες. Με την χύτευση είναι δυνατόν να παραχθούν αντικείμενα σε σχήματα τα οποία δεν είναι εύκολο να επιτευχθούν με μηχανικές μεθόδους. Οι πιο συνηθισμένες εφαρμογές στις οποίες συναντάμε τα κράματα αυτά είναι τα έδρανα ολίσθησης και κύλισης, τα γρανάζια, τα σώματα βαλβίδων και σε μια μεγάλη πληθώρα αντικειμένων τα οποία χρησιμοποιούνται σε χημικές βιομηχανίες.

2.3 Επιλογή χυτών κραμάτων αλουμινίου και χαλκού

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες, οι οποίοι επιδρούν στην επιλογή κραμάτων για παραγωγή χυτών αντικειμένων, συμπεριλαμβάνουν την μέθοδο χύτευσης η οποία θα χρησιμοποιηθεί, το σχήμα του χυτού, τις απαιτήσεις σε ιδιότητες κτ φυσικά τους οικονομικούς παράγοντες. Επομένως ένα κράμα για να είναι ικανό να παράγει χυτά αντικείμενα θα πρέπει να ικανοποιεί τις εξής απαιτήσεις:

- Απαιτήσεις της μεθόδου χύτευσης: ρευστότητα, αντίσταση σε διαστολικές ρωγμές, ρυθμός στερεοποίησης
- Σχεδιαστικές απαιτήσεις της χύτευσης: ρυθμός στερεοποίησης, ρευστότητα
- Απαιτήσεις μηχανικών ιδιοτήτων: σκληρότητα, ολκιμότητα, θερμική κατεργασιμότητα
- Απαιτήσεις επιφανείας: διαστατική σταθερότητα, επιφανειακές κατεργασίες, αντίσταση σε διάβρωση

- Οικονομικές απαιτήσεις: κατεργασιμότητα, συγκολλησιμότητα, κόστος τήξης, θερμικές κατεργασίες

Συνοψίζοντας, τα κριτήρια για την επιλογή των κραμάτων είναι τα ακόλουθα:

1. Εμπορικότητα τόσο των κραμάτων αλουμινίου όσο και των κραμάτων χαλκού
2. Ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες
3. Ευκολία στη χύτευση

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω έγινε η επιλογή (κατά DIN) 5 κραμάτων αλουμινίου και 5 κραμάτων χαλκού τα οποία είναι τα:

Κράματα αλουμινίου

1. AlSi7Mg
2. AlSi10Mg
3. AlSi12
4. AlMg3
5. AlCu4Ti

Κράματα χαλκού

1. CuSn7ZnPb
2. CuSn12Ni
3. CuZn33Pb
4. CuAl9Ni
5. CuPb5Sn

Η παραπάνω επιλογή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις παρακάτω προδιαγραφές:

- DIN 1705 – Κράματα Cu-Sn & Cu-Sn-Zn
- DIN 1716 – Κράματα Cu-Sn-Pb
- DIN 1714 – Κράματα Cu-Al & Cu-Al-Ni
- DIN 1709 – Κράματα Cu-Zn και
- DIN 1725 – Κράματα Al.

Το εύρος της σύστασης (κατά DIN) για κάθε κράμα παρουσιάζεται στους πίνακες που ακολουθούν.

Κωδικός	Κράμα	Εύρος Σύστασης
A1	AlSi7Mg	Si→6.5-7.5% Mg→0.25-0.45%
A2	AlSi10Mg	Si→9-11% Mg→0.2-0.5%
A3	AlSi12	Si→10.5-13.5%
A4	AlMg3	Mg→2.5-3.5%
A5	AlCu4Ti	Cu→4.5-5.2% Ti→0.15-0.3%

Πίνακας 2.1 Εύρος σύστασης κραμάτων αλουμινίου.

Κωδικός	Κράμα	Εύρος Σύστασης
C1	CuSn7ZnPb	Sn→6-8% Zn→3-5% Pb→5-7%
C2	CuSn12Ni	Sn→11-13% Ni→1.5-2.5%
C3	CuZn33Pb	Zn→33-34% Pb→1-3%
C4	CuAl9Ni	Al→8.5-10% Ni→1.5-4% Fe→1-3%
C5	CuPb5Sn	Sn→9-11% Pb→4-6%

Πίνακας 2.2 Εύρος σύστασης κραμάτων χαλκού.

2.3.1 Ιδιότητες χυτών κραμάτων αλουμινίου

A1. Κράμα AlSi7Mg (A356)

Εφαρμογές

Μέρη αντλιών σε αεροσκάφη, κιβώτια ταχυτήτων σε αυτοκίνητα, εξαρτήματα και αντικείμενα συστήματος ελέγχου αεροσκαφών, υδρόψυκτες κυλινδρικές κεφαλές. Άλλες εφαρμογές όπου απαιτείται ευχυτότητα συγκολλησιμότητα και αντίσταση σε διάβρωση.

Μηχανικές ιδιότητες

Όριο διαρροής: 190 – 240 Nt/mm²

Όριο αντοχής σε εφελκυσμό: 230 – 310 Nt/mm²

Λόγος Poisson: 0.33

Επιμήκυνση: 2 – 5 %

Φυσικές ιδιότητες

Πυκνότητα: 2.685 gr/cm³ (20°C)

Σκληρότητα: 75 – 110 HB 5/250

Θερμικές ιδιότητες

Θερμοκρασία Liquidus: 615 °C

Θερμοκρασία Solidus: 555 °C

Κατασκευαστικές ιδιότητες

Θερμοκρασία τήξης: 675 - 815 °C

Θερμοκρασία χύτευσης: 675 – 790 °C

Θερμοκρασία διαλυτοποίησης: 535 °C (6h)

Θερμοκρασία γήρανσης: 150 °C (8h)

A2. Κράμα AlSi10Mg (A360)Εφαρμογές

Κιβώτια οργάνων και προστατευτικές πλάκες. Άλλες εφαρμογές όπου απαιτείται αντίσταση σε διάβρωση, ευχυτότητα, αντίσταση σε ρωγμές και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Ανεπαρκείς συγκολλησιμότητα.

Μηχανικές ιδιότητες

Όριο διαρροής: 180 – 260 Nt/mm²

Όριο αντοχής σε εφελκυσμό: 220 – 320 Nt/mm²

Λόγος Poisson: 0.33

Επιμήκυνση: 1 – 4 %

Φυσικές ιδιότητες

Πυκνότητα: 2.630 gr/cm³ (20°C)

Σκληρότητα: 80 – 110 HB 5/250

Θερμικές ιδιότητες

Θερμοκρασία Liquidus: 595 °C

Θερμοκρασία Solidus: 555 °C

Κατασκευαστικές ιδιότητες

Θερμοκρασία τήξης: 650 – 760 °C

Θερμοκρασία χύτευσης: 635 – 705 °C

Θερμοκρασία διαλυτοποίησης: 530 °C (5h)

Θερμοκρασία γήρανσης: 165 °C (9h)

A3. Κράμα AlSi12 (413)

Εφαρμογές

Διάφορα λεπτότοιχα και πολύπλοκα χυτά. Άλλες εφαρμογές όπου απαιτείται αντίσταση σε διάβρωση και ευχυτότητα.

Μηχανικές ιδιότητες

Όριο διαρροής: 80 – 100 Nt/mm²

Όριο αντοχής σε εφελκυσμό: 150 – 210 Nt/mm²

Λόγος Poisson: 0.33

Επιμήκυνση: 2 – 6 %

Φυσικές ιδιότητες

Πυκνότητα: 2.657 gr/cm³ (20°C)

Σκληρότητα: 50 – 65 HB 5/250

Θερμικές ιδιότητες

Θερμοκρασία Liquidus: 575 °C

Θερμοκρασία Solidus: 577 °C

Κατασκευαστικές ιδιότητες

Θερμοκρασία τήξης: 650 – 760 °C

Θερμοκρασία χύτευσης: 635 – 705 °C

Θερμοκρασία ομογενοποίησης: 530 °C (5h)

A4. Κράμα AlMg3 (513)**Εφαρμογές**

Μαγειρικά σκεύη, εξαρτήματα για χημικά και διαβρωτικά περιβάλλοντα. Άλλες εφαρμογές όπου απαιτείται αντίσταση σε διάβρωση και καλή ποιότητα επιφανείας.

Μηχανικές ιδιότητες

Όριο διαρροής: 70 – 100 Nt/mm²

Όριο αντοχής σε εφελκυσμό: 140 – 190 Nt/mm²

Λόγος Poisson: 0.33

Επιμήκυνση: 3 – 8 %

Φυσικές ιδιότητες

Πυκνότητα: 2.650 gr/cm³ (20°C)

Σκληρότητα: 50 – 60 HB 5/250

Θερμικές ιδιότητες

Θερμοκρασία Liquidus: 630 °C

Θερμοκρασία Solidus: 585 °C

Κατασκευαστικές ιδιότητες

Θερμοκρασία τήξης: 675 – 815 °C

Θερμοκρασία χύτευσης: 675 – 790 °C

A5. Κράμα AlCu4Ti (206)**Εφαρμογές**

Κατασκευαστικά χυτά για την αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροπορική βιομηχανία και για άλλες εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή αντοχή εφελκυσμού με μέτρια επιμήκυνση. Κυλινδρικές κεφαλές για πετρελαιοκινητήρες, στροβίλους και πτερύγια υπερσυμπιεστών, και γενικά σε εφαρμογές όπου απαιτείται αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Επιρρεπής στη διάβρωση εξαιτίας του χαλκού.

Μηχανικές ιδιότητες

Όριο διαρροής: 200 – 260 Nt/mm²

Όριο αντοχής σε εφελκυσμό: 300 – 380 Nt/mm²

Λόγος Poisson: 0.33

Επιμήκυνση: 3 – 8 %

Φυσικές ιδιότητες

Πυκνότητα: 2.80 gr/cm³ (20°C)

Σκληρότητα: 95 – 110 HB 5/250

Θερμικές ιδιότητες

Θερμοκρασία Liquidus: 650 °C

Θερμοκρασία Solidus: 570 °C

Κατασκευαστικές ιδιότητες

Θερμοκρασία διαλυτοποίησης: 535 °C (6h)

Θερμοκρασία γήρανσης: 150 °C (13h)

2.3.2 Ιδιότητες χυτών κραμάτων χαλκού**C1. Κράμα CuSn7ZnPb (C 93200)**Εφαρμογές

Κάθε είδους έδρανα ολίσθησης και κύλισης, εξαρτήματα αυτοκινήτων.

Μηχανικές ιδιότητες

Όριο διαρροής: 120 Nt/mm²

Όριο αντοχής σε εφελκυσμό: 240 Nt/mm²

Λόγος Poisson: 0.33

Επιμήκυνση: 15 %

Φυσικές ιδιότητες

Πυκνότητα: 8.93 gr/cm³ (20°C)

Σκληρότητα: 70 HB 10

Θερμικές ιδιότητες

Θερμοκρασία Liquidus: 975 °C

Θερμοκρασία Solidus: 855 °C

C2. Κράμα CuSn12Ni (C 91700)Εφαρμογές

Οδοντωτούς τροχούς και γρανάζια, έδρανα κύλισης μεγάλου φορτίου και σχετικά μικρής ταχύτητας.

Μηχανικές ιδιότητες

Όριο διαρροής: 160 Nt/mm²

Όριο αντοχής σε εφελκυσμό: 280 Nt/mm²

Λόγος Poisson: 0.33

Επιμήκυνση: 14 %

Φυσικές ιδιότητες

Πυκνότητα: 8.75 gr/cm³ (20°C)

Σκληρότητα: 90 HB 10

Θερμικές ιδιότητες

Θερμοκρασία Liquidus: 1015 °C

Θερμοκρασία Solidus: 850 °C

C3. Κράμα CuZn33Pb (C 85700)Εφαρμογές

Έδρανα ολίσθησης, βιομηχανικά εξαρτήματα, διακοσμητικά χυτά, κλειδαριές.

Μηχανικές ιδιότητες

Όριο διαρροής: 70 Nt/mm²

Όριο αντοχής σε εφελκυσμό: 180 Nt/mm²

Λόγος Poisson: 0.33

Επιμήκυνση: 12 %

Φυσικές ιδιότητες

Πυκνότητα: 8.41 gr/cm³ (20°C)

Σκληρότητα: 45 HB 10

Θερμικές ιδιότητες

Θερμοκρασία Liquidus: 920 °C

Θερμοκρασία Solidus: 903 °C

C4. Κράμα CuAl9Ni (C 95410)Εφαρμογές

Πτερύγια συμπιεστών, έδρανα ολίσθησης και κύλισης, γρανάζια, έδρες και οδηγοί βαλβίδων.

Μηχανικές ιδιότητες

Όριο διαρροής: 200 Nt/mm²

Όριο αντοχής σε εφελκυσμό: 500 Nt/mm²

Λόγος Poisson: 0.33

Επιμήκυνση: 20 %

Φυσικές ιδιότητες

Πυκνότητα: 7.45 gr/cm³ (20°C)

Σκληρότητα: 110 HB 10

Θερμικές ιδιότητες

Θερμοκρασία Liquidus: 1040 °C

Θερμοκρασία Solidus: 1025 °C

Θερμοκρασία ισχυροποίησης: 620 °C

C5. Κοάμα CuPb5Sn (C 92700)Εφαρμογές

Πτερύγια συμπιεστών, έδρανα ολίσθησης και κύλισης, γρανάζια, έδρες και οδηγοί βαλβίδων, ελατήρια εμβόλων.

Μηχανικές ιδιότητες

Όριο διαρροής: 130 Nt/mm²

Όριο αντοχής σε εφελκυσμό: 240 Nt/mm²

Λόγος Poisson: 0.33

Επιμήκυνση: 15 %

Φυσικές ιδιότητες

Πυκνότητα: 8,8 gr/cm³ (20°C)

Σκληρότητα: 70 HB 10

Θερμικές ιδιότητες

Θερμοκρασία Liquidus: 980 °C

Θερμοκρασία Solidus: 845 °C

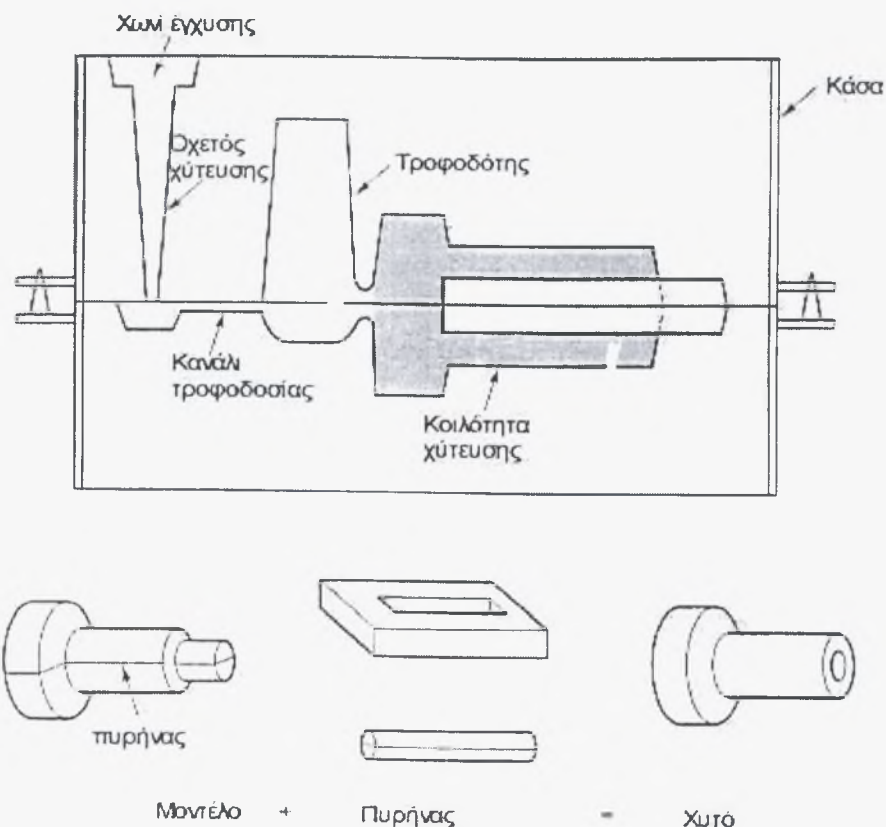
Θερμοκρασία ανακούφισης τάσεων: 260 °C

2.4 Εισαγωγή στην χύτευση

Στις μεθόδους χύτευσης, ένα στερεό υλικό αρχικά τήκεται, θερμαίνεται σε κατάλληλη θερμοκρασία και μερικές φορές επεξεργάζεται για να τροποποιηθεί η χημική του σύσταση. Στη συνέχεια το λιωμένο υλικό, χυτεύεται μέσα σε μια κοιλότητα (καλούπι) η οποία του προσδίδει το επιθυμητό σχήμα κατά τη στερεοποίηση. Με αυτόν τον τρόπο, απλά η πολύπλοκα σχήματα μπορούν να παραχθούν από οποιοδήποτε υλικό μπορεί να λιώσει. Το τελικό προϊόν μπορεί πραγματικά να πάρει οποιοδήποτε σχήμα επιθυμεί ο σχεδιαστής. Επί πρόσθετα η αντοχή του μπορεί να βελτιστοποιηθεί, οι ιδιότητες του μπορούν να ελεγχθούν και μια πολύ καλή επιφάνεια μπορεί να παραχθεί.

2.4.1 Ορολογία της χύτευσης

Πριν γίνει η ανάπτυξη των αρχών της χύτευσης θα ήταν χρήσιμο να παρουσιαστούν οι βασικοί όροι της μεθόδου. Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η τομή ενός καλουπιού από άμμο στο οποίο συνοψίζονται πολλά χαρακτηριστικά μιας τυπικής μεθόδου χύτευσης.



Σχήμα 2.3 Κάθετη τομή καλουπιού χύτευσης από άμμο.

Η μέθοδος ξεκινάει με την κατασκευή ενός *μοντέλου* (φόρμα), το οποίο είναι πιστό αντίγραφο του τελικού χυτού. Στη συνέχεια το υλικό κατασκευής του καλουπιού (άμμος) απλώνεται γύρω από το μοντέλο, το οποίο θα απομακρυνθεί, δημιουργώντας την κοιλότητα του καλουπιού. Η *κάσα* είναι ο κάδος ο οποίος περιέχει όλα τα τμήματα του καλουπιού. Ο *πυρήνας* (καρδία) είναι ένα σχήμα από άμμο το οποίο εισάγεται στο καλούπι για να δημιουργήσει τις εσωτερικές επιφάνειες του χυτού. Έτσι το εξωτερικό καλούπι συνεργάζεται με τον πυρήνα δημιουργώντας την *κοιλότητα χύτευσης*, στην οποία το λιωμένο μέταλλο χυτεύεται και στερεοποιείται σχηματίζοντας το επιθυμητό χυτό. Ο *τροφοδότης* (προσεπιχώννευμα), είναι ένας επιπλέον κενός χώρος του καλουπιού, ο οποίος επίσης γεμίζει με μέταλλο. Χρησιμοποιείται σαν αποθήκη υλικού, το οποίο μπορεί να εισρεύσει στην κοιλότητα αντισταθμίζοντας όποια διαστολή εμφανιστεί κατά την στερεοποίηση. Αν ο τροφοδότης στερεοποιηθεί τελευταίος οι συστολές περιορίζονται σε αυτόν και όχι στο χυτό.

Το *σύστημα τροφοδοσίας* είναι ένα δίκτυο καναλιών το οποίο χρησιμοποιείται για να μεταφέρει το λιωμένο μέταλλο στην κοιλότητα χύτευσης. Το *χωνί έγχυσης* είναι το τμήμα του συστήματος τροφοδοσίας, το οποίο αρχικά παραλαμβάνει το λιωμένο μέταλλο από τον κάδο έγχυσης και ελέγχει την είσοδό του στο υπόλοιπο καλούπι. Από το χωνί έγχυσης, το μέταλλο ταξιδεύει διαμέσω του *οχετού χύτευσης* (το κάθετο τμήμα του συστήματος τροφοδοσίας), και στην συνέχεια κατά μήκος των οριζόντιων διαδρόμων, οι οποίοι ονομάζονται *κανάλια τροφοδοσίας*, και τέλος μέσω των ελεγχόμενων εισόδων (*θύρες*) καταλήγει στην κοιλότητα του καλουπιού. Επιπρόσθετα κανάλια, γνωστά ως *εξαεριστήρες*, μπορεί να συμπεριλαμβάνονται, για να παρέχουν την δυνατότητα διαφυγής των αερίων, τα οποία δημιουργούνται στο εσωτερικό του καλουπιού.

2.4.2 Η διαδικασία στερεοποίησης

Η χύτευση είναι μια διαδικασία στερεοποίησης, όπου το λιωμένο υλικό χυτεύεται σε ένα καλούπι και αφήνεται να παγώσει στο επιθυμητό τελικό σχήμα. Πολλά από τα χαρακτηριστικά της δομής, τα οποία τελικά ελέγχουν τις ιδιότητες του προϊόντος, διαμορφώνονται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης. Ωστόσο πολλές ανωμαλίες, όπως οι πόροι από αέρια και οι συστολές, είναι χαρακτηριστικά της στερεοποίησης τα οποία μπορούν να μειωθούν ή να ελαχιστοποιηθούν, ελέγχοντας την διαδικασία της στερεοποίησης.

Η στερεοποίηση πραγματοποιείται σε δύο φάσεις, πυρήνωση και ανάπτυξη, και είναι σημαντικό να ελέγχονται και οι δύο διαδικασίες. Η *πυρήνωση* λαμβάνει χώρα όταν ένα σταθερό, στερεό σωματίδιο, αναπτύσσεται μέσα στο υγρό τήγμα. Καθώς το υλικό αλλάζει φάση, η εσωτερική ενέργειά του μειώνεται, αφού σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η στερεά φάση είναι πιο σταθερή από την υγρή. Την ίδια στιγμή, αλληλεπιδράσεις δημιουργούνται ανάμεσα στην επιφάνεια του νέου στερεού και της μήτρας υγρού. Σαν αποτέλεσμα, η πυρήνωση γενικά πραγματοποιείται σε θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη από το σημείο τήξεως. Η διαφορά ανάμεσα στο σημείο τήξεως και τη θερμοκρασία πυρήνωσης ονομάζεται *υπόψυξη*.

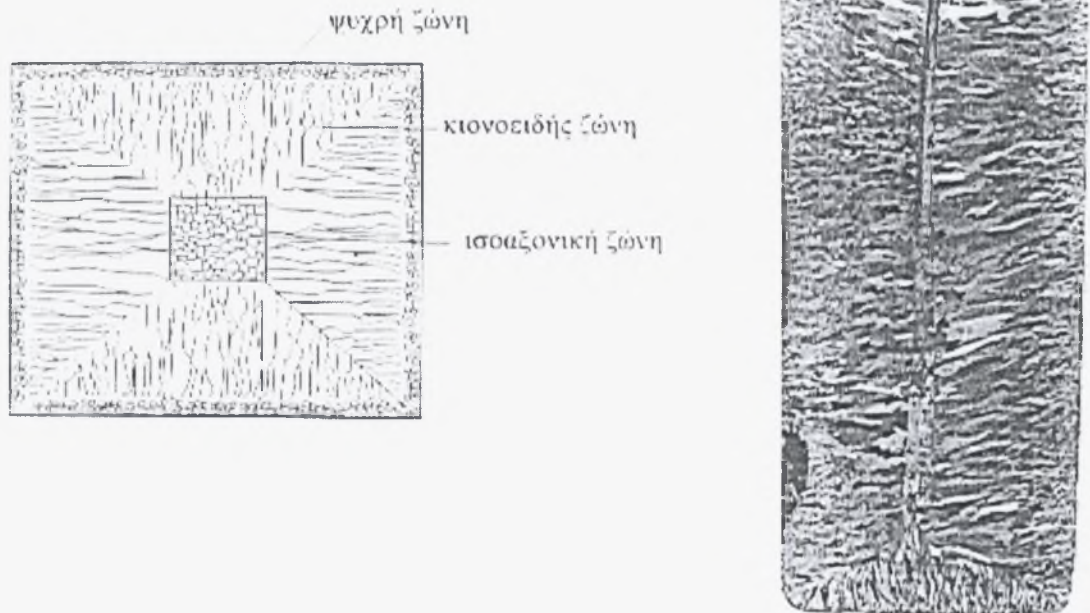
Στις περισσότερες περιπτώσεις η πυρήνωση χρησιμοποιεί υπάρχουσες επιφάνειες, όπου η στερεοποίηση μπορεί να ξεκινήσει χωρίς να απαιτείται η δημιουργία ολόκληρης επιφάνειας. Οι επιφάνειες αυτές είναι συνήθως τα τοιχώματα του καλουπιού ή στερεές ακαθαρσίες στο εσωτερικό του τήγματος.

Κάθε πυρήνωση δημιουργεί ένα κρύσταλλο η κόκκο στο τελικό χυτό. Τα λεπτόκοκκα υλικά παρέχουν αυξημένες μηχανικές ιδιότητες γεγονός που αποδεικνύει ότι η προώθηση της πυρήνωσης έχει ευεργετικά αποτελέσματα για το τελικό προϊόν. Έτσι δεν είναι καθόλου ασυνήθιστη η εισαγωγή σωματιδίων στο υγρό τήγμα πριν την χύτευση. Αυτά τα μικρά σωματίδια παρέχουν αναρίθμητα σημεία πυρήνωσης με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός ομοιόμορφου, λεπτόκοκκου υλικού. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως *εμβολιασμός* (inoculation) ή μέθοδος εκλέπτυνσης των κόκκων (grain refinement).

Το δεύτερο στάδιο της στερεοποίησης είναι η διαδικασία της *ανάπτυξης*, η οποία λαμβάνει χώρα καθώς η θερμότητα απορρίπτεται από το υγρό μέταλλο. Η κατεύθυνση, ο ρυθμός, και ο τύπος της ανάπτυξης είναι δυνατόν να ελεγχθούν με τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η απόρριψη της θερμότητας. Η *κατευθυντική στερεοποίηση* διασφαλίζει την παραγωγή ενός ποιοτικού χυτού. Το λιωμένο υλικό, στην υγρή πλευρά της διεπιφάνειας, ρέει μέσα στο καλούπι, προλαμβάνοντας την συστολή η οποία πραγματοποιείται καθώς το υλικό αλλάζει φάση. Γρηγορότεροι ρυθμοί ψύξης, γενικά παράγουν προϊόντα με μικρότερο μέγεθος κόκκων και εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες.

2.4.3 Μικροδομή και διαφορισμός των χυτών

Κατά την διαδικασία της χύτευσης η μικροδομή του στερεοποιημένου μετάλλου αποτελείται από τρεις ζώνες (σχήμα 2.4): την εξωτερική *ψυχρή ζώνη*, την *κιονοειδή ζώνη* και την κεντρική *ισοαξονική ζώνη*.



Σχήμα 2.4 Οι τρεις ζώνες στη μικροδομή ενός χυτού

Η ψυχρή ζώνη οφείλει το όνομά της στο γεγονός ότι το υγρό μετά την εισαγωγή του στο καλούπι ψύχεται απότομα στα σημεία όπου έρχεται σε επαφή με τα ψύχρα τοιχώματα του καλουπιού. Η ταχύτητα πυρήνωσης είναι μεγάλη και σχηματίζονται πολλοί μικροί κρύσταλλοι. Στη συνέχεια οι κρύσταλλοι αυτοί αναπτύσσονται δένδριτικά σε συγκεκριμένες κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις ($<100>$) παράλληλα με την διεύθυνση της θερμορής (κάθετα στα τοιχώματα του καλουπιού). Έτσι δημιουργείται η κιονοειδής δομή. Ο σχηματισμός της ισοαξονικής ζώνης στο κέντρο του χυτού δεν οφείλεται σε διεργασίες πυρήνωσης νέων κρυστάλλων αλλά σε ένα μηχανισμό *πολλαπλασιασμού κρυστάλλων*. Ο μηχανισμός αυτός περιλαμβάνει την αποκοπή δευτερογενών ή τριτογενών κλάδων των δένδριτών, που μεταφέρονται υπό ρεύμα συναγωγής στο

κεντρικό τμήμα του χυτού. Τα αποκομμένα τμήματα των δενδριτών, αναπτύσσονται και δημιουργούν την κεντρική ισοαξονική ζώνη.

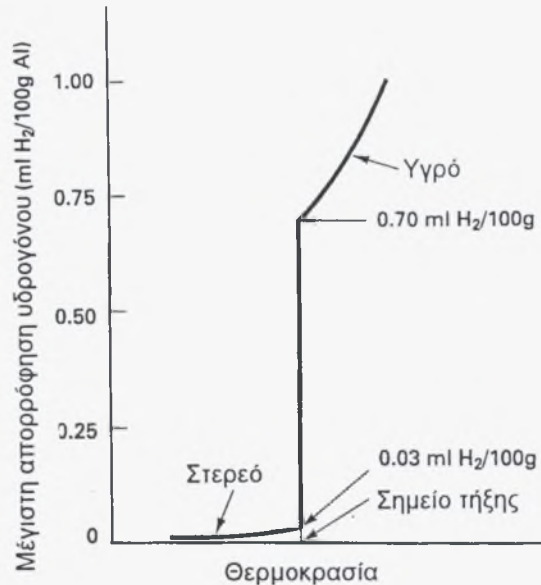
Οι συνθήκες στερεοποίησης επιδρούν σημαντικά στη μορφολογία της δενδριτικής δομής και ιδιαίτερα στην απόσταση μεταξύ των δενδριτικών κλάδων, DAS. Αύξηση της ταχύτητας ψύξεως οδηγεί σε μείωση του DAS και εκλέπτυνση της δενδριτικής δομής. Δηλαδή το DAS αυξάνεται με τον τοπικό χρόνο στερεοποίησης.

Ένα σημαντικό επακόλουθο της στερεοποίησης ενός χυτού είναι η μεταβολή της σύστασης από σημείο σε σημείο. Αυτή η ανομοιομορφία της συστάσεως ονομάζεται *διαφορισμός*. Εάν η ανομοιομορφία εμφανίζεται στην κλίμακα των διαστάσεων του χυτού, τότε πρόκειται για *μακροδιαφορισμό*. Εάν η μεταβολή της σύστασης εμφανίζεται στην κλίμακα των δενδριτικών περιοχών, τότε πρόκειται για *μικροδιαφορισμό*. Οι κυριότεροι παράγοντες οι οποίοι οδηγούν στο φαινόμενο του μακροδιαφορισμού είναι η συστολή του χυτού, οι διαφορές πυκνότητας στο υγρό, ρεύματα συναγωγής καθώς και η βαρύτητα. Ο μικροδιαφορισμός είναι αποτέλεσμα της απορρίψεως του δεύτερου συστατικού του κράματος στο ενδοδενδριτικό υγρό με την πρόοδο της στερεοποίησης. Ο μικροδιαφορισμός είναι έντονος στα όρια των κόκκων της κιονοειδούς ζώνης.

2.4.4 Προβλήματα υγρού μετάλλου

Η αλληλεπίδραση του υγρού με το περιβάλλον του οδηγεί σε δημιουργία ατελειών στη χύτευση. Η επίδραση του οξυγόνου στο υγρό παράγει οξείδια, τα οποία μπορούν να μεταφερθούν στο τήγμα κατά τη διάρκεια της χύτευσης και της πλήρωσης του καλουπιού. Η γνωστή σκουριά έχει αρνητική επίδραση στην επιφάνεια του χυτού, την κατεργασιμότητα και τις μηχανικές του ιδιότητες. Η δημιουργία σκουριάς μπορεί να ελεγχθεί με μεθόδους απομόνωσης του υγρού από το περιβάλλον κατά την χύτευση, όπως με χύτευση σε κενό ή σε προστατευτική ατμόσφαιρα.

Σημαντικές ποσότητες αερίων μπορούν να εγκλωβιστούν στο υγρό μέταλλο κατά την χύτευση. Όταν το μέταλλο στερεοποιείται τα αέρια αυτά δεν μπορούν να διαφύγουν με αποτέλεσμα την δημιουργία *πόρων* στο χυτό. Σημαντικό πρόβλημα στην χύτευση αλουμινίου αποτελεί η απορρόφηση υδρογόνου. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η μέγιστη διαλυτότητα του υδρογόνου στο αλουμίνιο σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.



Σχήμα 2.5 Μέγιστη διαλυτότητα υδρογόνου σε αλουμίνιο σε συνάρτηση με την θερμοκρασία

Είναι αξιοσημείωτη η αύξηση που παρατηρείται καθώς το υλικό πηγαίνει από την στερεά κατάσταση στην υγρή.

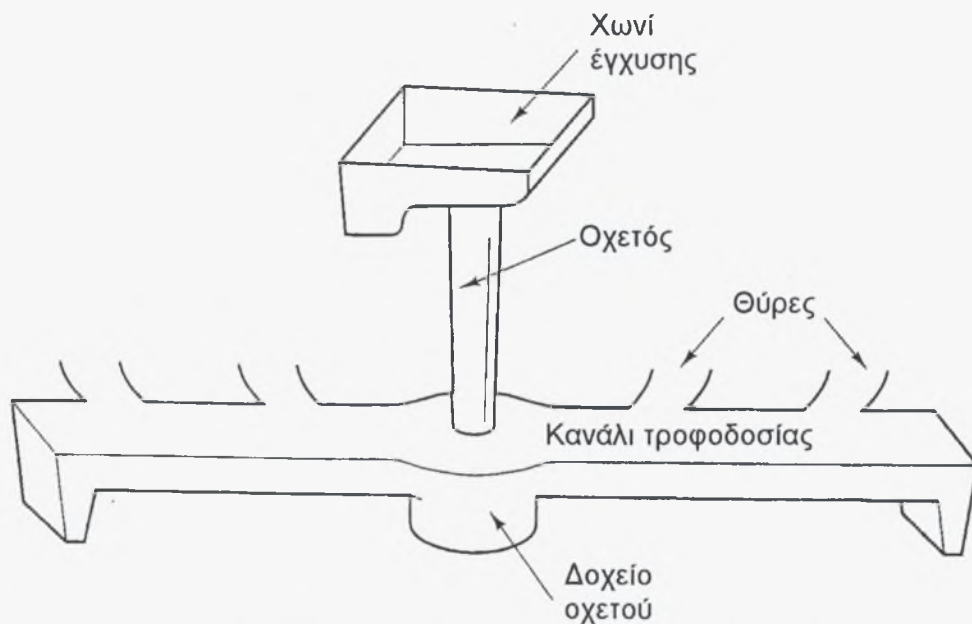
Αρκετές διαφορετικές τεχνικές έχουν επινοηθεί για την αποφυγή της δημιουργίας πόρων από αέρια. Εκτός από τις μεθόδους προστασίας και απομόνωσης του υγρού από την ατμόσφαιρα, υπάρχουν και τεχνικές απαέρωσης του υγρού. Τέτοιες είναι η δημιουργία κενού πάνω από το υγρό με αποτέλεσμα την μείωση των αερίων στο υγρό καθώς το σύστημα προσαρμόζεται στις νέες συνθήκες του περιβάλλοντος, καθώς και η εισαγωγή μικρών φυσαλίδων καθαριστικών αερίων στο υγρό. Για παράδειγμα η εισαγωγή αζώτου ή χλωρίνης στο αλουμίνιο έχει ως αποτέλεσμα την δέσμευση και απόρριψη του υδρογόνου από το υγρό.

2.4.5 Σύστημα τροφοδοσίας

Καθώς το υγρό μέταλλο χυτεύεται στο καλούπι το σύστημα τροφοδοσίας αναλαμβάνει να το οδηγήσει σε όλους τους τομείς της κοιλότητας χύτευσης. Η ταχύτητα ή ο ρυθμός κίνησης του μετάλλου είναι εξίσου σημαντικός όσο και ο ρυθμός ψύξης κατά την ροή του. Η αργή πλήρωση και η υψηλή απώλεια θερμότητας έχουν σαν αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της ροής. Από την άλλη πλευρά, γρήγοροι ρυθμοί οδηγούν σε διάβρωση του συστήματος τροφοδοσίας και

της κοιλότητας με αποτέλεσμα την παγίδευση υλικού από το καλούπι στο τελικό χυτό. Ο έλεγχος της ροής μπορεί να επιτευχθεί με την επιλογή κατάλληλων διακλαδώσεων και καναλιών. Επίσης το σχήμα και το μήκος των καναλιών είναι σημαντικά στον έλεγχο της απώλειας της θερμότητας.

Άλλη μια λειτουργία του συστήματος τροφοδοσίας είναι η ελαχιστοποίηση της τυρβώδους ροής η οποία οδηγεί σε μεγάλη απορρόφηση αερίων, σε οξειδωση του μετάλλου και επιτάχυνση της διάβρωσης του καλουπιού. Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται ένα τυπικό σύστημα τροφοδοσίας το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για να αναγνωριστούν μερικά μέρη κλειδιά, με την βελτιστοποίηση των οποίων μπορεί να επιτευχθεί στρωτή ροή του υγρού μετάλλου.



Σχήμα 2.6 Τυπικό σύστημα τροφοδοσίας χυτού

Κοντοί οχετοί χύτευσης είναι επιθυμητοί για την ελαχιστοποίηση του ύψους πτώσης του μετάλλου κατά την είσοδο στο καλούπι. Ορθογώνιο χωνί χύτευσης εμποδίζει την δίνη στο υγρό, η οποία τείνει να απορροφήσει αέρια και οξειδία. Επίσης η δίνη εμποδίζεται με κοντό οχετό. Ένα μεγάλο δοχείο οχετού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας της ροής. Τέλος η πιο μικρή διατομή του συστήματος τροφοδοσίας, η οποία ρυθμίζει το ρυθμό της ροής τοποθετείται στη βάση του οχετού.

Ο σχεδιασμός του συστήματος τροφοδοσίας εξαρτάται από το μέταλλο που χυτεύεται. Μέταλλα επιρρεπή στην τυρβώδη ροή, όπως το αλουμίνιο, με χαμηλό σημείο τήξεως απαιτούν σύστημα τροφοδοσίας ικανό να ελαχιστοποιήσει την

τυρβώδη ροή και να παγιδεύει τις ακαθαρσίες. Από την άλλη, μέταλλα μη επιρρεπή στην τυρβώδη ροή με υψηλό σημείο τήξεως, όπως ο χαλκός, γενικά απαιτούν μικρό και ανοιχτό σύστημα τροφοδοσίας το οποίο να επιτρέπει την γρήγορη πλήρωση της κοιλότητας.

2.4.6 Τροφοδότες (προσεπιχωνεύματα)

Οι τροφοδότες είναι πρόσθετοι αποθηκευτικοί χώροι υγρού μετάλλου, οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι για να τροφοδοτούν το χυτό κατά την στερεοποίηση και να αντισταθμίζουν την συστολή η οποία λαμβάνει χώρα κατά την στερεοποίηση. Για να επιτύχουν τον σκοπό τους οι τροφοδότες πρέπει να στερεοποιούνται μετά από το χυτό. Ωστόσο η χύτευση πρέπει να είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να παρέχει κατευθυντική στερεοποίηση, η οποία να ξεκινάει από τις άκρες του χυτού προς τον τροφοδότη. Με αυτόν τον τρόπο ο τροφοδότης μπορεί να παρέχει συνεχώς μέταλλο στο χυτό. Αν αυτός ο τρόπος στερεοποίησης δεν είναι δυνατός, περισσότεροι τροφοδότες χρησιμοποιούνται.

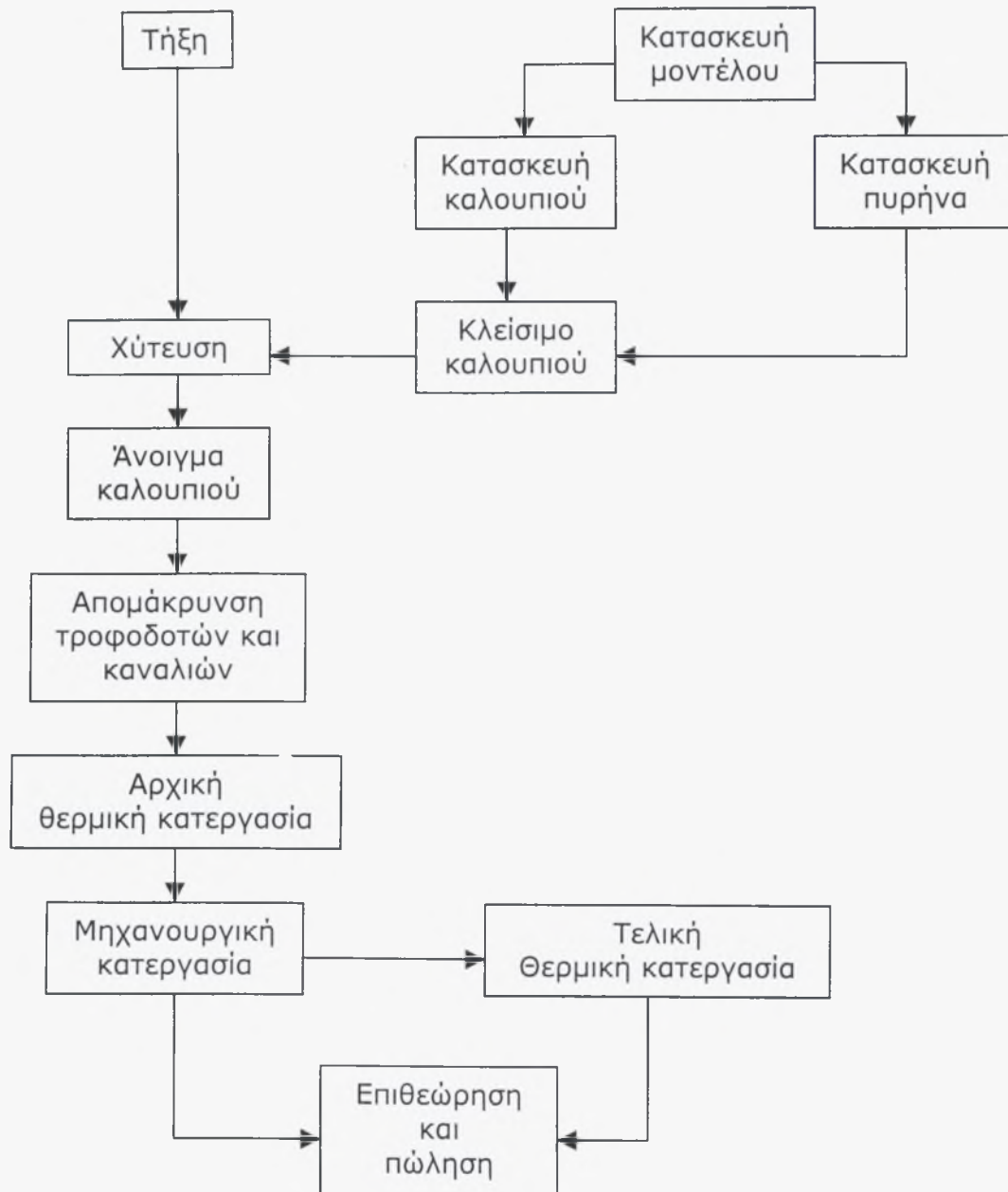
Επίσης επειδή ο πιο λεπτός τομέας του χυτού είναι αυτός που πρέπει να παγώσει τελευταίος, οι τροφοδότες τοποθετούνται προς αυτή την κατεύθυνση. Τέλος οι τροφοδότες τοποθετούνται κοντά στο χυτό με σχετικά κοντές συνδέσεις. Το καλούπι γύρω από την σύνδεση δέχεται θερμότητα από το χυτό αλλά και από τον τροφοδότη. Έτσι θερμαίνεται γρήγορα και παραμένει ζεστό σε όλη τη διάρκεια της χύτευσης, εμποδίζοντας το πάγωμα των καναλιών τροφοδοσίας.



Σχήμα 2.7 Τροφοδότες ανοιχτού-κλειστού τύπου

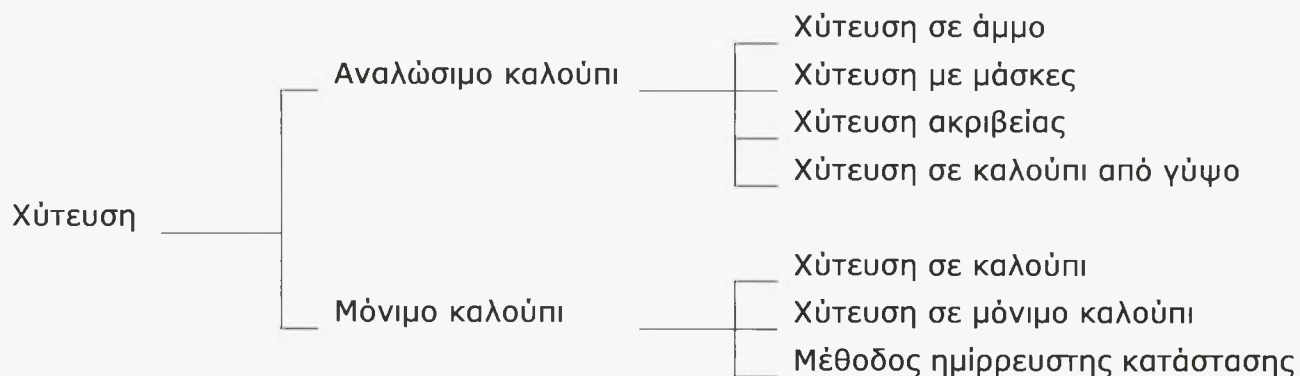
2.5 Μέθοδοι χύτευσης κραμάτων αλουμινίου και χαλκού

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία μεθόδων κατασκευής καλουπιών και χυτεύσεων, οι οποίες αναπτύχθηκαν και εξελίχθηκαν σύμφωνα με τις ανάγκες της τεχνολογίας. Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα ροής μιας τυπικής διαδικασίας παραγωγής ενός χυτού.



Σχήμα 2.8 Διάγραμμα ροής τυπικής διαδικασίας παραγωγής χυτού.

Οι μέθοδοι χύτευσης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.9, κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το αν το καλούπι είναι αναλώσιμο ή πολλών χρήσεων.



Σχήμα 2.9 Κατηγοριοποίηση μεθόδων χύτευσης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κλασικές μέθοδοι χύτευσης (όπως χύτευση σε άμμο, χύτευση σε καλούπι κτλ) καθώς και σύγχρονες μέθοδοι παραγωγής χυτών ακριβείας (όπως χύτευση ακριβείας και μέθοδος ημίρρευστης κατάστασης μετάλλου κτλ) οι οποίες χρησιμοποιούνται για την χύτευση κραμάτων αλουμινίου και χαλκού.

2.5.1 Χύτευση σε άμμο (Sand Casting)

Περιγραφή μεθόδου

Η μέθοδος χύτευσης σε άμμο είναι η μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται περισσότερο για την κατασκευή καλουπιών. Η άμμος απλώνεται γύρω από μια φόρμα (μοντέλο), μέσα σε ένα μεταλλικό δοχείο (κάσα). Η φόρμα απομακρύνεται δημιουργώντας την εξωτερική επιφάνεια του χυτού πάνω στο καλούπι από άμμο. Για τις εσωτερικές επιφάνειες του χυτού, κατασκευάζεται ο πυρήνας (καρδιά) από συνδετική άμμο. Ύστερα από την τοποθέτηση του πυρήνα, το καλούπι σφραγίζεται και είναι έτοιμο για χύτευση. Έπειτα από την χύτευση η άμμος απομακρύνεται και χρησιμοποιείται ξανά για την κατασκευή καλουπιών.



Εικόνα 2.1 Χύτευση σε άμμο

Διαδικασία

1. Το κάτω μισό της φόρμας τοποθετείται μέσα σε ένα μεταλλικό περίβλημα (κάσα).
2. Η άμμος απλώνεται πάνω στην φόρμα με πολλές στρώσεις για μεγαλύτερη συνοχή.
3. Έπειτα από την συμπλήρωση του κάτω μέρους, το καλούπι αναστρέφεται και το πάνω μέρος της φόρμας μαζί με το περίβλημα τοποθετούνται για την κατασκευή και του άλλου μισού καλουπιού.
4. Στο έτοιμο καλούπι το οποίο ακόμη περιέχει την φόρμα, δημιουργούνται οπές για την είσοδο του λιωμένου μετάλλου.
5. Τα δύο μέρη του καλουπιού αποχωρίζονται για την απομάκρυνση της φόρμας.
6. Η καρδιά από συνδετική άμμο κατασκευάζεται ξεχωριστά δημιουργώντας τις εσωτερικές επιφάνειες του χυτού.
7. Έπειτα από την τοποθέτηση της καρδιάς, το καλούπι σφραγίζεται έτσι ώστε να μπορέσει να αντέξει την πίεση του λιωμένου μετάλλου, όταν αυτό εισέλθει στο καλούπι.

Ιδιότητες

Μέγεθος χυτών: Εξαρτάται από την ικανότητα του χυτηρίου (από γραμμάρια μέχρι πολλούς τόνους).

Ποιότητα επιφανείας: Μη σιδηρούχα υλικά 150 - 350 RMS

Σιδηρούχα υλικά 300 - 700 RMS

Ελάχιστο πάχος τομέα πλήρωσης: Μη σιδηρούχα υλικά 1/8" - 1/4"

Σιδηρούχα υλικά 1/4" - 3/8"

2.5.2 Χύτευση σε καλούπι (Die Casting)Περιγραφή μεθόδου

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα της χύτευσης σε καλούπι είναι η χρήση μόνιμων καλουπιών στα οποία γίνεται έγχυση του μετάλλου απ' ευθείας ή υπό πίεση. Στη μέθοδο «θερμού θαλάμου» (hot chamber) μια ποσότητα λιωμένου μετάλλου πιέζεται μέσα στο καλούπι. Αυτή η μέθοδος μπορεί να παράγει ένα χυτό κάθε λίγα λεπτά. Η μέθοδος «ψυχρού θαλάμου» (cold chamber) προτιμάται για χυτά κράματα με υψηλότερο σημείο τήξεως. Ένα έμβολο πιέζει το λιωμένο μέταλλο προς το καλούπι από ένα κυλινδρικό θάλαμο ο οποίος διαθέτει ένα στόμιο για

έγχυση. Υψηλές πιέσεις επιτυγχάνονται επιτρέποντας χαμηλότερες θερμοκρασίες λιωμένου μετάλλου. Τα χυτά απομακρύνονται από τα καλούπια είτε με τα χέρια είτε με μηχανικούς τρόπους.

Διαδικασία

Μέθοδος θερμού θαλάμου

1. Μια ποσότητα λιωμένου μετάλλου διατηρείται σε θερμοκρασία πολύ πάνω από το σημείο τήξεως.
2. Μέταλλο από το δοχείο πιέζεται διαμέσω ενός αγωγού στο καλούπι το οποίο διατηρείται σε απ' ευθείας επαφή με το στόμιο.
3. Η χύτευση ολοκληρώνεται αυξάνοντας την πίεση του αέρα στο θάλαμο.
4. Το σύστημα πίεσεως του αέρα λειτουργεί στην περιοχή των 500 lbf/in².

Μέθοδος ψυχρού θαλάμου

1. Μέταλλο για μια χύτευση τοποθετείται σε ένα κυλινδρικό θάλαμο μέσω ενός στομίου.
2. Ένα έμβολο πιέζει το μέταλλο μέσα στο καλούπι. Η διαδικασία διαρκεί λίγα δευτερόλεπτα.
3. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάθετο ή οριζόντιο σύστημα.

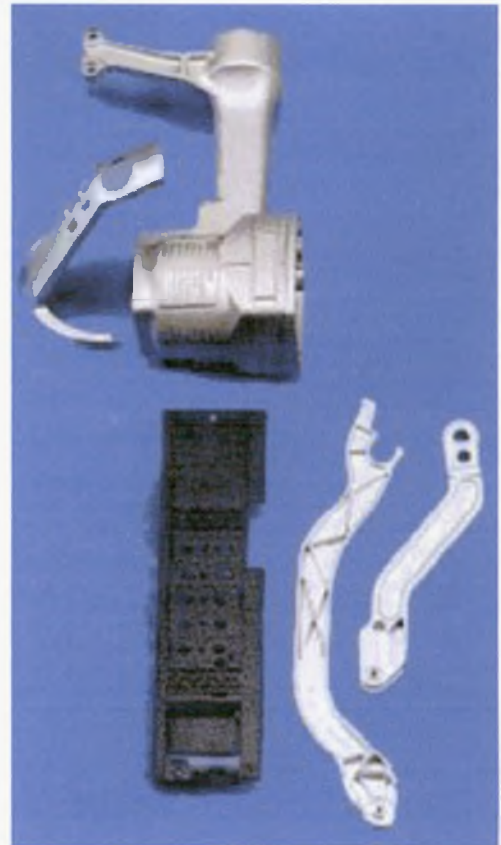
Ιδιότητες

Μέγεθος χυτών: Επιφάνεια συνήθως όχι μεγαλύτερη από 0.2 m²

Ποιότητα επιφανείας: 32 – 36 RMS

Ελάχιστο πάχος τομέα πλήρωσης: 0.03" για μικρά χυτά

0.06" για μεσαία χυτά



Εικόνα 2.2 Αντικείμενα μεθόδου χύτευσης σε καλούπι

2.5.3 Χύτευση ακριβείας (Investment Casting)

Περιγραφή μεθόδου

Η χύτευση ακριβείας είναι ιδανική για διαστατική ακρίβεια και ποιότητα επιφανείας του χυτού. Είναι γνωστή επίσης σαν μέθοδος χαμένου κεριού (lost-wax process).

Διαδικασία

1. Κερί ή πλαστικό προωθείται σε ένα καλούπι δημιουργώντας ένα μοντέλο.
2. Τα μοντέλα συνδέονται με ένα κεντρικό αγωγό.
3. Η δέσμη μοντέλων τοποθετείται μέσα σε κεραμική λάσπη.
4. Πυρίμαχοι κόκκοι εμφανίζονται πάνω στο επιχρισμένο μοντέλο. Τα βήματα 3 και 4 επαναλαμβάνονται αρκετές φορές μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος του καλουπιού.
5. Αφού σχηματισθεί το καλούπι και ξηραθεί, το μοντέλο λιώνει και χύνεται έξω από αυτό.
6. Το ξεστό καλούπι γεμίζει με μέταλλο.
7. Το καλούπι σπάει και απομακρύνεται από το χυτό.
8. Τα χυτά απομακρύνονται από τον κεντρικό αγωγό.



Εικόνα 2.3 Αντικείμενα χύτευσης ακριβείας

Ιδιότητες

Μέγεθος χυτών: Από μερικά γραμμάρια μέχρι 70 Kgr.

Ποιότητα επιφανείας: 63 – 125 RMS

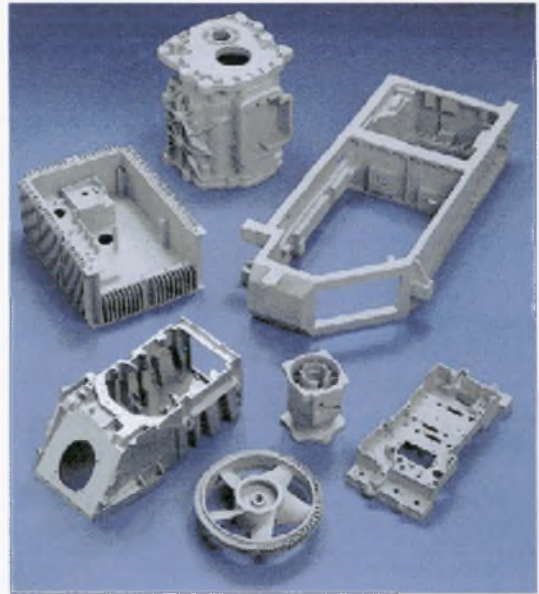
Ελάχιστο πάχος τομέα πλήρωσης: 0.030" (μικρές περιοχές)

0.060" (μεγαλύτερες περιοχές)

2.5.4 Χύτευση σε καλούπι από γύψο (Plaster Mold Process)

Περιγραφή μεθόδου

Η μέθοδος χύτευσης σε καλούπι από γύψο είναι γνωστή για την διαστατική ακρίβεια και την πολυπλοκότητα της επιφάνειας του παραγόμενου χυτού. Ο γύψος χύνεται πάνω σε μια φόρμα. Τα δύο μέρη του καλουπιού τοποθετούνται σε ένα φούρνο όπου ξηραίνονται. Αφού κολληθούν το λιωμένο μέταλλο χυτεύεται στο καλούπι.



Εικόνα 2.4 Αντικείμενα χύτευσης σε καλούπι από γύψο

Διαδικασία

1. Γύψος προστίθεται σε νερό και το μείγμα τοποθετείται σε μια κρεμώδη μορφή.
2. Το μείγμα χύνεται πάνω στη φόρμα.
3. Όταν ο γύψος τοποθετηθεί τα βήματα 1 και 2 επαναλαμβάνονται για το άλλο μισό καλούπι.
4. Τα δύο τμήματα του καλουπιού τοποθετούνται σε ένα φούρνο για ξήρανση.
5. Τα τμήματα ενώνονται και το καλούπι είναι έτοιμο για χύτευση.

Ιδιότητες

Μέγεθος χυτού: Επιφάνεια χυτών πάνω από 500 in².

Ποιότητα επιφάνειας: 63 – 125 RMS.

Ελάχιστο πάχος τομέα πλήρωσης: 0.07"

2.5.5 Μέθοδος κατασκευής καλουπιών σε κενό (Vacuum-Process)

Περιγραφή μεθόδου

Μια από τις πιο σύγχρονες μεθόδους κατασκευής καλουπιών είναι η μέθοδος-V στην οποία η άμμος διατηρείται στην θέση της σχηματίζοντας ένα καλούπι, με την εφαρμογή κενού.

Διαδικασία

1. Το μοντέλο το οποίο είναι διάτρητο τοποθετείται σε ένα δίσκο.
2. Ένας θερμαντήρας μαλακώνει ένα λεπτό (0.05 - 0.10 mm) πλαστικό στρώμα το οποίο είναι τυλιγμένο γύρω από το μοντέλο και το οποίο με μια απορρόφηση της τάξεως των 200 – 400 mmHg διαμέσω των διόδων προσκολλάται πάνω στο μοντέλο.
3. Ένας κάδος ο οποίος έχει έναν αγωγό προσρόφησης τοποθετείται πάνω από το επικαλυμμένο μοντέλο.
4. Ο κάδος γεμίζει με ξηρή άμμο.
5. Μια μικρή δόνηση αυξάνει την πυκνότητα της άμμου.
6. Ένα δεύτερο στρώμα πλαστικού τοποθετείται πάνω από την άμμο και κενό εφαρμόζεται στον κάδο. Η ατμοσφαιρική πίεση σταθεροποιεί την άμμο η οποία συγκρατείται στο μοντέλο. Έπειτα από την διακοπή του κενού, το καλούπι απομακρύνεται από τον δίσκο.
7. Το άλλο μισό καλούπι κατασκευάζεται με τον ίδιο τρόπο.



Εικόνα 1.5 Αντικείμενο μεθόδου χύτευσης-V

Ιδιότητες

Μέγεθος χυτού: απεριόριστο

Ποιότητα επιφανείας: 125-150 RMS στην πάνω πλευρά

200 RMS στην κάτω πλευρά

Ελάχιστο πάχος τομέα πλήρωσης: Μη σιδηρούχα υλικά 0.12"

Σιδηρούχα υλικά 0.1 – 0.125"

2.5.6 Χύτευση σε μόνιμο καλούπι (Permanent Mold Casting)Περιγραφή μεθόδου

Το λιωμένο μέταλλο χυτεύεται σε καλούπι από χυτοσίδηρο, επικαλυμμένο με μια κεραμική επίστρωση. Ο πυρήνας μπορεί να είναι από μέταλλο, άμμο ή άλλο υλικό. Το καλούπι ανοίγει και το χυτό αντικείμενο απομακρύνεται. Στη υπό πίεση μέθοδο χύτευσης σε μόνιμο καλούπι, η πίεση υπερβαίνει τα 15 psi.

Ιδιότητες

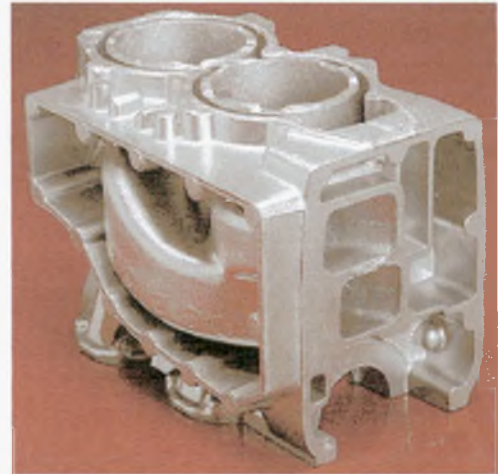
Μέγεθος χυτού: Εξαρτάται από την ικανότητα του χυτηρίου. Για κράματα αλουμινίου και χαλκού από γραμμάρια μέχρι 50 Kgr.

Ποιότητα επιφανείας: Αλουμίνιο 150–250 RMS
Χαλκός 125–200 RMS

Ελάχιστο πάχος τομέα πλήρωσης:

0.1" για μικρές επιφάνειες

>3/16" για μεγαλύτερες επιφάνειες



Εικόνα 2.6 Αντικείμενο χύτευσης σε μόνιμο καλούπι

2.5.7 Μέθοδος ημίρρευστης κατάστασης μετάλλου (Semi-Solid Metal Process).

Περιγραφή μεθόδου

Ειδικά προετοιμασμένες μεταλλικές ράβδοι θερμαίνονται σε μια ημίρρευστη κατάσταση. Στη συνέχεια οδηγείται σε μια μηχανή μορφοποίησης όπου ένα έμβολο ωθεί την ράβδο μέσα στο καλούπι. Αμέσως το καλούπι ανοίγει και το χυτό απομακρύνεται.



Εικόνα 2.7 Ράβδος ημίρρευστης κατάστασης

Ιδιότητες

Μέγεθος χυτού: γραμμάρια έως μερικά κιλά

Ποιότητα επιφανείας: 32 – 63 RMS

Ελάχιστο πάχος τομέα πλήρωσης: 0.03"

2.6 Αξιολόγηση των μεθόδων χύτευσης.

Στη συνέχεια επιχειρείται η αξιολόγηση των πιο συνηθισμένων μεθόδων χύτευσης οι οποίες χρησιμοποιούνται περισσότερο για την χύτευση κραμάτων

αλουμινίου και χαλκού. Χρησιμοποιείται μια αριθμητική κλίμακα από το 1 έως το 3 (το 3 είναι η καλύτερη ή η πιο οικονομική λύση).

	Μόνιμο καλούπι	Καλούπι από άμμο	Χύτευση σε καλούπι	Χύτευση ακριβείας	Χύτευση σε μάσκες
Ποιότητα επιφανείας	2	1	3	2.5	2
Πολυπλοκότητα σχημάτων	2	3	1	3	2
Διαστατική ακρίβεια	2	1	3	2.5	3
Κόστος εξοπλισμού ή καλουπιών	3	3	1	1	3
Κόστος ανά κομμάτι	3	2	3	1	2.5

Πίνακας 2.3 Αξιολόγηση συνηθέστερων μεθόδων χύτευσης.

2.7 Μέθοδος Χύτευσης με Μάσκες (Croning)

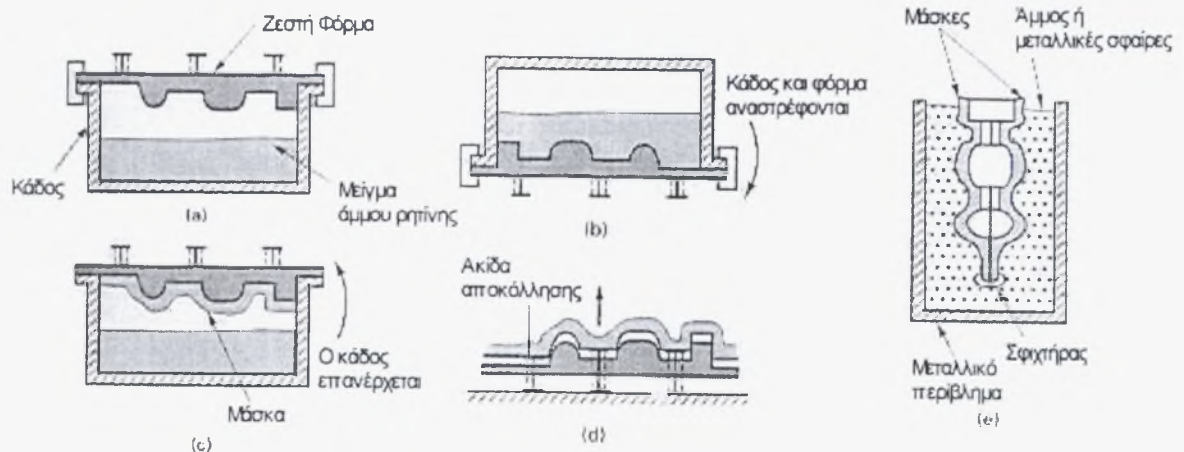
Για την χύτευση των κραμάτων αλουμινίου και χαλκού επιλέχθηκε η μέθοδος των μασκών ή μέθοδος Croning. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στην επιλογή της πιο κατάλληλης μεθόδου. Μερικοί από αυτούς είναι το μέγεθος του χυτού, το πάχος του τοιχώματος του αντικειμένου, οι ανοχές, ο τύπος της καρδίας, η τελική επιφάνεια, το πορώδες, το μέγεθος των κόκκων, η παραγωγική ικανότητα της μεθόδου και το κόστος του εξοπλισμού. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι οι πιο σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή της μεθόδου χύτευσης είναι η επιτευξιμότητα, το κόστος και η ποιότητα.

Η μέθοδος των μασκών προσφέρει πολύ καλή τελική επιφάνεια σε σχέση με τις συνηθισμένες μεθόδους κατασκευής καλουπιών από άμμο, καλύτερη διαστατική ακρίβεια και ένα υψηλό ρυθμό παραγωγής με μειωμένες απαιτήσεις. Σε πολλές περιπτώσεις η μέθοδος μπορεί να αυτοματοποιηθεί και να προσαρμοστεί για μαζική παραγωγή. Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζονται τα έξι βασικά βήματα της μεθόδου των μασκών.

1. Ένα μείγμα που αποτελείται από άμμο και από μια πλαστική θερμοκολλητική ουσία, τοποθετείται πάνω σε μια μεταλλική φόρμα η οποία έχει θερμανθεί στους 150-230°C. Αφήνεται για μερικά λεπτά έως ότου η

θερμότητα από την φόρμα να επηρεάσει ένα στρώμα από το μείγμα. Έτσι δημιουργείται μια σκληρή, στερεά περιοχή (μάσκα) πάχους περίπου 3.5 mm στην επιφάνεια της φόρμας. Το πραγματικό πάχος της μάσκας εξαρτάται από τη θερμοκρασία της φόρμας και από το χρόνο επαφής.

2. Η φόρμα και το μείγμα άμμου αναστρέφονται. Όλη η περίσσια άμμος πέφτει, αφήνοντας μόνο ένα στρώμα το οποίο είναι προσκολλημένο στη φόρμα.
3. Η φόρμα και η προσκολλημένη σε αυτή μάσκα τοποθετούνται για λίγα λεπτά σε ένα φούρνο για να ολοκληρωθεί η διαδικασία.
4. Η σκληρυμένη μάσκα αποκολλάται από την φόρμα.
5. Δύο ή περισσότερες μάσκες συγκρατούνται ή κολλιούνται μεταξύ τους παράγοντας ένα καλούπι.
6. Οι συνδεδεμένες μάσκες συνήθως τοποθετούνται σε ένα μεταλλικό περίβλημα και πλαισιώνονται από μεταλλικές σφαίρες ή άμμο παρέχοντας επιπλέον στήριξη κατά τη διάρκεια της χύτευσης.

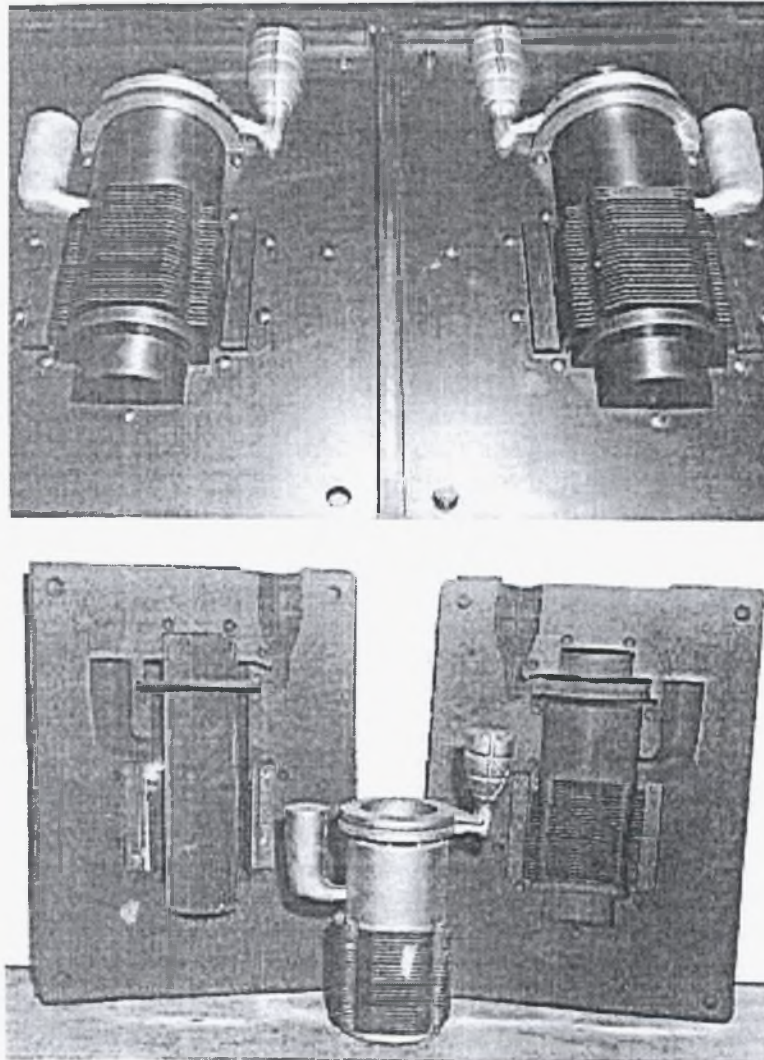


Σχήμα 2.10 Αναπαράσταση της μεθόδου των масκών.

Επειδή η άμμος είναι ένα μείγμα με σχεδόν καθόλου διαστολές και επειδή χρησιμοποιείται μεταλλική φόρμα, η μάσκα έχει εξαιρετική διαστατική ακρίβεια. Ανοχές της τάξεως των 0.08 με 0.13 mm είναι συχνά εμφανιζόμενες. Η άμμος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των масκών είναι λεπτότερη από τις συνηθισμένες άμμους που χρησιμοποιούνται στα χυτήρια, και σε συνδυασμό με την πλαστική ρητίνη παράγουν μια πολύ λεία επιφάνεια χύτευσης. Έτσι το κόστος

για τον καθαρισμό και την κατεργασία του χυτού μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Επιπρόσθετα η μέθοδος των μασκών προσφέρει μια παραγωγική σταθερότητα σε σχέση με την μέθοδο χύτευσης με πράσινη άμμο.

Στην εικόνα 2.8 φαίνονται οι φόρμες, οι δύο μάσκες πριν την ένωσή τους και το αποτέλεσμα της χύτευσης. Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μασκών ποικίλουν από απλές για μικρή παραγωγή, σε μεγάλες,



Εικόνα 2.8 Μοντέλο, μάσκες και το αποτέλεσμα της χύτευσης

πλήρως αυτοματοποιημένες συσκευές για μαζική παραγωγή. Το κόστος μιας μεταλλικής φόρμας είναι συχνά υψηλό και ο σχεδιασμός της πρέπει να περιλαμβάνει τον οχετό χύτευσης και το σύστημα τροφοδοσίας. Μεγάλες ποσότητες από ακριβές κόλλες απαιτούνται αλλά η ποσότητα των υλικών που είναι απαραίτητα για την κατασκευή μιας λεπτής μάσκας δεν είναι τόσο μεγάλη. Μεγάλη παραγωγική ικανότητα, μικρό κόστος υποστήριξης, λείες επιφάνειες και

Κεφάλαιο 3: Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί φάσεων κραμάτων αλουμινίου και χαλκού

3.1 Υπολογισμοί φάσεων

Στο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της υπολογιστικής θερμοδυναμικής και η μέθοδος CALPHAD. Τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιεί και το πρόγραμμα υπολογιστικής θερμοδυναμικής Thermo-Calc, με την βοήθεια του οποίου γίνονται και οι Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί των κραμάτων αλουμινίου και χαλκού οι οποίοι παρουσιάζονται στην συνέχεια. Οι υπολογισμοί αυτοί έχουν στόχο την βελτιστοποίηση της χημικής σύστασης των κραμάτων.

3.1.1 Περιγραφή προγράμματος Thermo-Calc

Το πρόγραμμα αυτό έχει σαν βάση την μέθοδο CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams), κεντρικό σημείο της οποίας είναι η εφαρμογή μοντέλων για την περιγραφή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs τόσο των καθαρών μετάλλων όσο και των φάσεων (στερεών διαλυμάτων) και των διμεταλλικών ενώσεων. Η μαθηματική περιγραφή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs για τα καθαρά μέταλλα, τις στοιχειομετρικές ενώσεις και τα διαλύματα παρατίθενται παρακάτω.

Καθαρά μέταλλα: Η ελεύθερη ενέργεια Gibbs ενός καθαρού μετάλλου είναι $G=H-TS$. Τα θερμοδυναμικά δεδομένα τηρούνται σε βάσεις θερμοχημικών δεδομένων. Η πιο διαδεδομένη βάση είναι αυτή της SGTE (Scientific Group Thermodata Europe) όπου η ελεύθερη ενέργεια εμφανίζεται με πολυωνυμική μορφή:

$$\begin{aligned} GH_{SER_i} &= G_i(T) - H_i(298.15K) = \\ &= a + bT + cT \ln T + dT^2 + eT^3 + fT^{-1} + gT^7 + hT^{-9} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Η πρώτη ισότητα είναι η ενέργεια Gibbs σε σχέση με την κατάσταση αναφοράς SER (Stable Element Reference) και την ενθαλπία του μετάλλου στους 298.15 K.

Οι συντελεστές a, b, c, \dots, h , προσδιορίζονται αν ληφθεί υπόψη ότι η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος της ποσότητας G_{HSER_i} ως προς την θερμοκρασία, αντιστοιχούν στην εντροπία και την ειδική θερμότητα του μετάλλου στην ίδια θερμοκρασία. Έτσι πειραματικές μετρήσεις της ειδικής θερμότητας χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των συντελεστών αυτών.

Στοιχειομετρικές ενώσεις: Η ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού της ένωσης $A_a B_b$ είναι:

$$G_{A_a B_b} - aG_A(298.15K) - bG_B(298.15K) = F(T) \quad (3.2)$$

όπου η $F(T)$ είναι η ίδια θερμοκρασιακή συνάρτηση της σχέσεως (3.1).

Εφαρμόζοντας την σχέση (3.1) σε κάθε συστατικό της παραπάνω σχέσης έχουμε:

$$\begin{aligned} F(T) &= G_{A_a B_b}^T - aG_A - bG_B + aG_{HSER_A} + bG_{HSER_B} \\ &= \Delta_F G_{A_a B_b}^T + aG_{HSER_A} + bG_{HSER_B} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Ο όρος $\Delta_F G_{A_a B_b}^T$ είναι η ενέργεια Gibbs σχηματισμού της ενώσεως σε σχέση με τα σταθερά συστατικά στη θερμοκρασία T .

Στερεά διαλύματα: Η βασικότερη μέθοδος περιγραφής των στερεών διαλυμάτων είναι αυτή των υποπλεγμάτων (Sublattice). Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή μια φάση θεωρείται ότι αποτελείται από δύο υποπλέγματα που διεισδύουν το ένα μέσα στο άλλο. Έτσι είναι δυνατόν να περιγραφούν από στερεά διαλύματα παρεμβολής έως και διαμεταλλικές ενώσεις. Μια μη στοιχειομετρική φάση σχηματίζεται με συνδυασμό υποπλεγμάτων:



όπου τα συστατικά A, B, C, D μπορεί να είναι άτομα, οπές ή ιόντα.

Για κάθε υποπλέγμα s ορίζεται το κλάσμα θέσεως y_i^s του συστατικού i :

$$y_i^s = \frac{n_i^s}{\sum_j n_j^s} = \frac{n_i^s}{n^s} \quad (3.4)$$

με

$$\sum_k y_k^s = 1 \quad \text{και} \quad \sum_k n_k^s = n \quad (3.5)$$

όπου n_j^s ο αριθμός των συστατικών j στο υποπλέγμα s
 n^s ο αριθμός των θέσεων στο υποπλέγμα s
 n ο συνολικός αριθμός θέσεων

Το ίδιο μοντέλο περιγράφει και στοιχειομετρικές φάσεις, όπου τα υποπλέγματα καταλαμβάνονται μόνο από ένα είδος ατόμου. Η ελεύθερη ενέργεια Gibbs μιας φάσεως είναι:

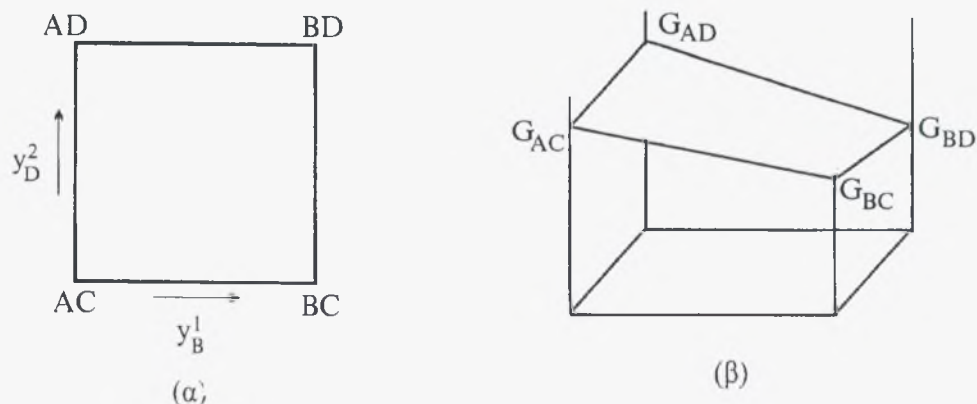
$$G_m = G^{\text{ref}} + G^{\text{id}} + G^{\text{ex}} \quad (3.6)$$

όπου G^{ref} η συνεισφορά των καθαρών συστατικών
 G^{id} η συνεισφορά του ιδανικού διαλύματος
 G^{ex} η απόκλιση από την ιδανική συμπεριφορά

Μια φάση που αποτελείται από δυο υποπλέγματα με δύο συστατικά ,έχει τύπο:

$$(A,B)_1, (C,D)_1$$

Ο όρος G^{ref} είναι δυνατόν να προσδιοριστεί, εάν θεωρήσουμε τα τέσσερα σημεία, όπου υπάρχει πλήρης κατάληψη θέσεων ($y_i^s=1$) στ ι δύο υποπλέγματα. Τα σημεία αυτά αντιστοιχούν στις κορυφές του τετραγώνου του σχήματος 3.1.



Σχήμα 3.1 (α) Τετράγωνο μεταβολής της συστάσεως (β) η επιφάνεια G^{ref}

Για παράδειγμα το σημείο AC περιγράφει την κατάσταση όπου το A καταλαμβάνει όλες τις θέσεις στο υποπλέγμα 1 ($y_A^1=1, y_B^1=0$) ενώ το C καταλαμβάνει όλες τις θέσεις στο υποπλέγμα 2 ($y_C^1=1, y_D^1=0$).

Αντίστοιχα ισχύουν για τα άλλα τρία σημεία BC, AD και BD. Έτσι ο χώρος μεταβολής της συστάσεως περιβάλλεται από τις τέσσερις ενώσεις, που αποκαλούνται οριακά μέλη. Τότε η ελεύθερη ενέργεια G^{ref} αντιπροσωπεύεται από την επιφάνεια του σχήματος και περιγράφεται από την σχέση

$$G^{ref} = y_A y_C G_{AC} + y_B y_C G_{BC} + y_A y_D G_{AD} + y_B y_D G_{BD} \quad (3.7)$$

Όπου ο όρος $G^{id} = -TS^{id}$ δίδεται από την σχέση

$$G^{id} = RT (y_A \ln y_A + y_B \ln y_B + y_C \ln y_C + y_D \ln y_D) \quad (3.8)$$

Για την περιγραφή του πρόσθετου όρου G^{ex} πρέπει να θεωρήσουμε τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστατικών. Οι αλληλεπιδράσεις A-C, A-D, B-C και B-D ορίζονται από την ενέργεια Gibbs των ενώσεων AC, BC, AD και BD. Η ανάμειξη των συστατικών μέσα σε κάθε υποπλέγμα καθορίζει τις αλληλεπιδράσεις A-B και C-D και είναι αυτές που διαμορφώνουν τον πρόσθετο όρο G^{ex} . Ο όρος αυτός μπορεί να έχει την μορφή

$$G^{ex} = y_A^1 y_B^1 L_{A,B;*} + y_C^2 y_D^2 L_{*,C,D} \quad (3.9)$$

όπου τα $L_{A,B;*}$ και $L_{*,C,D}$ είναι οι παράμετροι αλληλεπιδράσεως για την ανάμειξη των συστατικών αντίστοιχα στα υποπλέγματα 1 και 2 ανεξάρτητα από την κατάληψη θέσεων στο άλλο υποπλέγμα. Εάν θεωρήσουμε ότι οι παράμετροι αυτοί εξαρτώνται από τη σύσταση, δηλαδή την κατάληψη θέσεων στο άλλο υποπλέγμα, τότε ο όρος G^{ex} γίνεται:

$$G^{ex} = y_A^1 y_B^1 y_C^2 L_{A,B:C} + y_A^1 y_B^1 y_D^2 L_{A,B:D} \\ + y_C^2 y_D^2 y_A^1 L_{A:C,D} + y_C^2 y_D^2 y_B^1 L_{B:C,D} \quad (3.10)$$

όπου τα L είναι οι παράμετροι αλληλεπιδράσεως και εξαρτώνται από τα κλάσματα θέσεως y_i^s με τις παρακάτω σχέσεις:

$$L_{A,B:C} = \sum_{K=0}^2 L_{A,B:C}^K (y_A^1 - y_B^1)^K \quad (3.11)$$

$$L_{A,B:D} = \sum_{K=0}^2 L^K_{A,B:D} (Y^1_A - Y^1_B)^K \quad (3.12)$$

$$L_{A:C,D} = \sum_{K=0}^2 L^K_{A:C,D} (Y^2_C - Y^2_D)^K \quad (3.13)$$

$$L_{B:C,D} = \sum_{K=0}^2 L^K_{B:C,D} (Y^1_C - Y^1_D)^K \quad (3.14)$$

Στις παραπάνω σχέσεις τα L^0, L^1, L^2 είναι οι παράμετροι αλληλεπιδράσεως μηδενικής, πρώτης και δεύτερης τάξης αντίστοιχα.

Οι παραπάνω παράμετροι G καθώς και οι παράμετροι αλληλεπιδράσεως L είναι αποθηκευμένοι ως θερμοκρασιακές συναρτήσεις στη βάση SGTE. Η βάση αυτή χρησιμοποιείται από το Thermo-Calc για τους υπολογισμούς ισορροπίας. Το λογισμικό αυτό υπολογίζει την ελεύθερη ενέργεια της κάθε φάσης ως συνάρτηση της σύστασης και της θερμοκρασίας και προσδιορίζει την θερμοδυναμική ισορροπία με την ελαχιστοποίηση της συνολικής ενέργειας Gibbs. Έτσι μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε θερμοδυναμικό σύστημα στο πεδίο της μεταλλουργίας, της επιστήμης των υλικών, της ανάπτυξης κραμάτων κλπ. ανάλογα με το είδος της βάσης δεδομένων που είναι συνδεδεμένο.

Το Thermo-Calc αποτελείται από τμήματα (modules) για τις διάφορες εργασίες που ενδιαφέρεται να κάνει ο χρήστης. Υπάρχουν τμήματα για την επιλογή της τράπεζας δεδομένων και πληροφοριών, για τη δημιουργία πίνακα θερμοδυναμικών δεδομένων ή για την αλληλεπίδραση και την καταχώρηση δεδομένων και τέλος για υπολογισμούς ισορροπίας. Όλα αυτά τα τμήματα συνεργάζονται μεταξύ τους, επιτρέποντας την ανταλλαγή δεδομένων και πληροφοριών.

Το τμήμα για τους υπολογισμούς ισορροπίας που κυρίως χρησιμοποιήθηκε κατά την θερμοδυναμική ανάλυση των κραμάτων του Αλουμινίου και του Χαλκού, έχει μια πολύ δυνατή και γενική ομάδα εντολών ώστε να είναι δυνατός κάθε υπολογισμός ισορροπίας και διαγραμμάτων φάσεων. Οι συνθήκες οι οποίες είναι απαραίτητες για τους υπολογισμούς, ορίζονται ξεχωριστά και είναι :

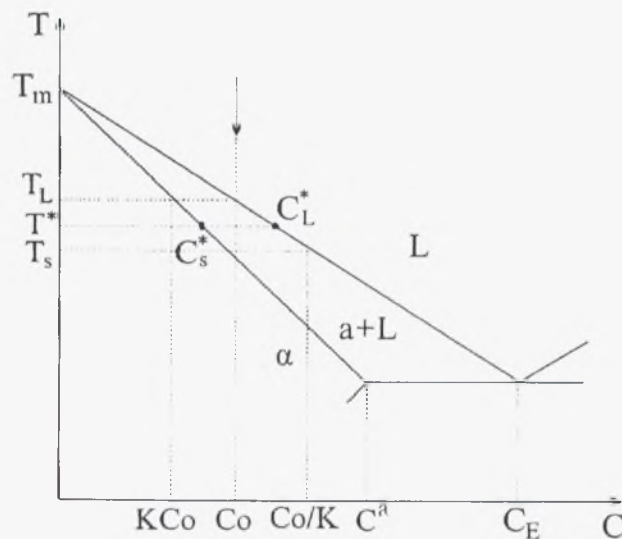
- η τιμή της θερμοκρασίας, της ενθαλπίας ή της εντροπίας
- η τιμή της πίεσεως ή του όγκου
- οι ενεργότητες ή το χημικό δυναμικό των συστατικών
- η ολική σύσταση σε συνολικό αριθμό γραμμομορίων ή μάζας η σε κλάσμα γραμμομορίων ή μάζας

- η σύσταση μιας σταθερής φάσης
- γενικές συναρτήσεις των διατυπωμένων μεταβλητών.

Συνδυάζοντας τους διάφορους τύπους συνθηκών μπορεί κανείς να υπολογίσει πολλούς τύπους ισορροπίας.

3.1.2 Προσομοίωση στερεοποίησης Scheil

Πολλές φορές ο ρυθμός ψύξεως κατά την στερεοποίηση είναι αρκετά μεγάλος έτσι ώστε η διάχυση να μην μπορεί να ομογενοποιήσει το στερεό. Με την προσομοίωση Scheil θεωρούμε ότι δεν συμβαίνει διάχυση στο στερεό, ενώ το υγρό ομογενοποιείται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης. Στο σχήμα 3.3.β η στερεοποίηση του κράματος με σύσταση C_0 αρχίζει στη θερμοκρασία T_L και το πρώτο στερεό, που σχηματίζεται, έχει σύσταση KC_0 . Σε μια ενδιάμεση θερμοκρασία T^* οι συστάσεις του υγρού και του στερεού στη διεπιφάνεια S/L δίδονται από το διάγραμμα φάσεων (Σχ. 3.2) ως C_L^* και C_S^* αντίστοιχα.



Σχήμα 3.2 Τμήμα διμερούς διαγράμματος φάσεων με συντελεστή διαχωρισμού $K=C_S^*/C_L^*$ μικρότερο της μονάδας.

Το υγρό επομένως εμπλουτίζεται και ομογενοποιείται στη σύσταση C_L^* , ενώ η σύσταση του στερεού μεταβάλλεται από την αρχική KC_0 έως τη σύσταση C_S^* στη διεπιφάνεια. Δηλαδή λόγω της απουσίας διαχύσεως στο στερεό δεν υπάρχει ομογενοποίηση και η σύσταση στο στερεό είναι μικρότερη από αυτή, που θα είχε, αν η στερεοποίηση γινόταν κάτω από συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας. Μπορούμε να υπολογίσουμε τη σύσταση του στερεού στη διεπιφάνεια C_S^* σαν

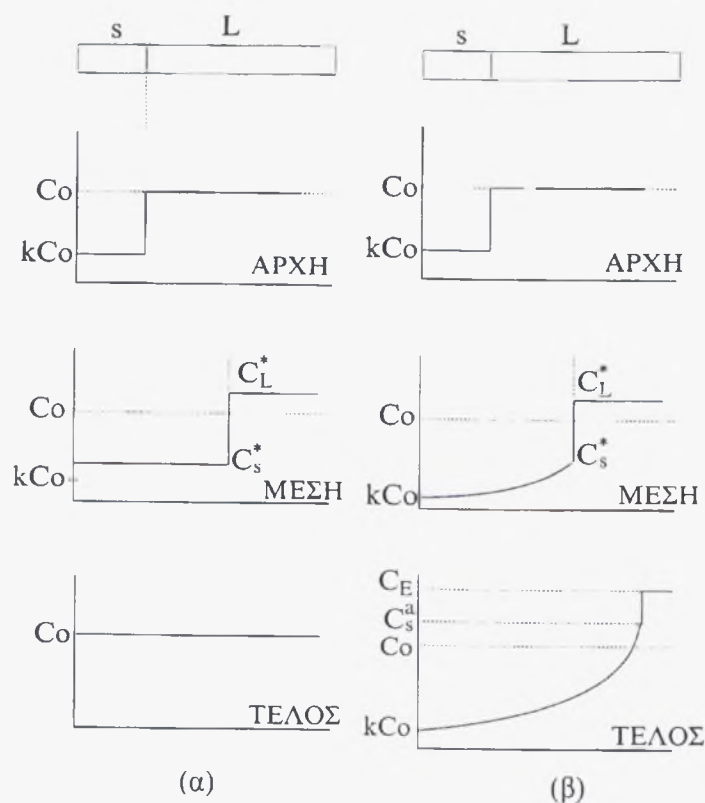
συνάρτηση του ποσοστού του στερεού f_s που έχει σχηματιστεί θεωρώντας ένα ισοζύγιο μάζας. Εξισώνουμε το ποσό του συστατικού, που αποβάλλεται από το στερεό, με την επακόλουθη αύξηση της σύστασης του υγρού dC_L^* , όταν σχηματίζεται μια μικρή ποσότητα στερεού df_s

$$(C_L^* - C_s^*) df_s = (1-f_s)dC_L^* \quad (3.15)$$

Ολοκληρώνοντας από $C_s^* = KC_0$ ($f_s=0$) έως $C_s^* = C_s^*$ ($f_s = f_s$) παίρνουμε:

$$C_s^* = KC_0(1-f_s)^{k-1} \quad (3.16)$$

η εξίσωση αυτή ονομάζεται και εξίσωση Scheil. Η εξίσωση του Scheil προβλέπει ότι η σύσταση του στερεού είναι μικρότερη από αυτήν, που προβλέπει η θερμοδυναμική ισορροπία. Επίσης προβλέπει μεγαλύτερη ποσότητα υγρού, που απομένει να στερεοποιηθεί. Όταν το στερεό αποκτήσει σύσταση C_s^a το υγρό αποκτά την ευτηκτική σύσταση C_E και το υπόλοιπο υγρό στερεοποιείται με βάση την ευτηκτική αντίδραση.



Σχήμα 3.3 Μεταβολή συστάσεως στερεού και υγρού (α) υπό συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας (β) με απουσία διαχύσεως στο στερεό

Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις στα Σχ.3.3.α και 3.3.β παρατηρούμε ότι η απουσία διαχύσεως στο στερεό κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης οδηγεί σε σχηματισμό μη ομογενοποιημένου στερεού με σημαντική μεταβολή της συστάσεως από KC_0 σε C_E κατά μήκος της ράβδου.

3.1.3 Αποτελέσματα θερμοδυναμικής ανάλυσης

Όπως φαίνεται από τους πίνακες και τα διαγράμματα που ακολουθούν, μελετήθηκε η επιρροή των κραματικών στοιχείων στη θερμοκρασία τήξης, στο εύρος στερεοποίησης, στη κινούσα δύναμη καθίζησης των ενδομεταλλικών φάσεων και σε ορισμένα κράματα στη διαφορίση κραματικών στοιχείων κατά την στερεοποίηση.

Οι παράγοντες αυτοί επιλέχθηκε να βελτιστοποιηθούν διότι είναι φανερό ότι επηρεάζουν την χύτευση, την ποιότητα του παραγόμενου αντικειμένου και κατ'επέκταση τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων. Αναλυτικότερα, η ελαχιστοποίηση του εύρους στερεοποίησης, το οποίο επιδρά στην μείωση του διαφορισμού και αύξηση της ομοιομορφίας του χυτού, καθώς επίσης και η μεγιστοποίηση της κινούσας δύναμης καθίζησης των ενδομεταλλικών φάσεων (π.χ Mg_2Si) η οποία επιδρά στην αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, ήταν κύρια επιδίωξη κατά την βελτιστοποίηση των κραμάτων.

Τα διαγράμματα που παρατίθενται στην συνέχεια, που είναι το αποτέλεσμα των θερμοδυναμικών υπολογισμών για κάθε κράμα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Α) Ισοσυστασιακά διαγράμματα φάσεως (Isopleth) στα οποία παρουσιάζονται οι φάσεις που σχηματίζονται σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας και τη μεταβολή του ποσοστού ενός κραματικού στοιχείου (τα υπόλοιπα κραματικά στοιχεία διατηρούνται σταθερά).
- Β) Διαγράμματα μεταβολής του ποσοστού των σχηματιζόμενων φάσεων σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία (NP).
- Γ) Διαγράμματα μεταβολής του ποσοστού της στερεάς φάσης, κατά τη στερεοποίηση του υγρού μετάλλου (Scheil), θεωρώντας απουσία διάχυσης στο στερεό.

3.2 Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί κραμάτων αλουμινίου

Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά οι υπολογισμοί για το κράμα A.1 (AlSi7Mg) ενώ για οικονομία του χώρου για τα υπόλοιπα κράματα δίδονται μόνο συνοπτικά τα αποτελέσματα, ενώ τα αντίστοιχα διαγράμματα φαίνονται στο Παράρτημα Ι.

A1. Κράμα AlSi7Mg

Si→6.5-7.5

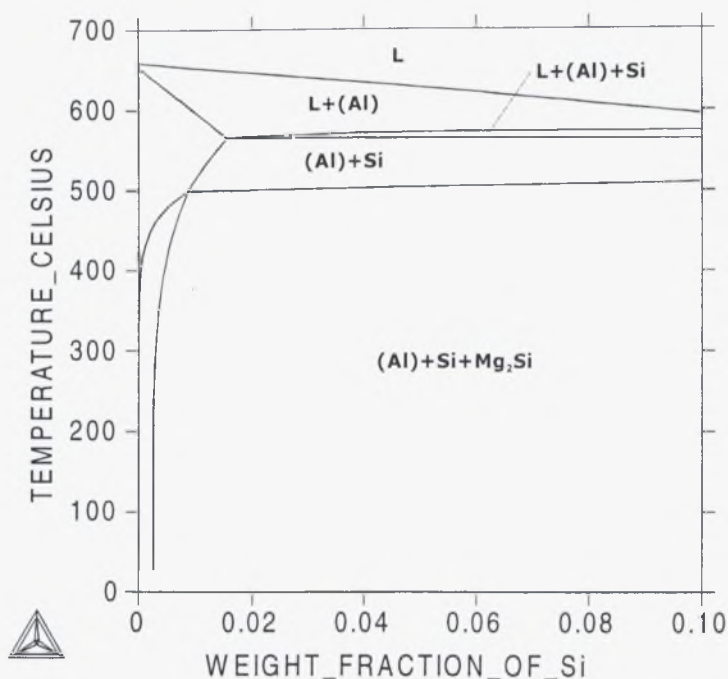
Mg→0.25-0.45

Το ισοσυστασιακό διάγραμμα φάσεων του Al-Mg-Si για Mg=0.45 wf% δίδεται, όπως υπολογίστηκε από το Thermo-Calc, στο σχήμα 3.4. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιήθηκε η SGTE Solution Database και συμμετείχαν οι φάσεις (Al), Si, Mg₂Si και L(υγρό).

Στη θερμοκρασία περιβάλλοντος το κράμα AlSi7Mg αποτελείται από την φάση (Al), δηλαδή στερεό διάλυμα αλουμινίου, την φάση Si καθώς και διασπορά φάσης Mg₂Si. Τα ποσοστά των φάσεων αυτών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία φαίνονται στο σχήμα 3.5. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η στερεοποίηση των κραμάτων στη μέθοδο Casting γίνεται αρκετά γρήγορα έτσι ώστε ο ρυθμός ψύξης να είναι τέτοιος που τουλάχιστον πρέπει να θεωρήσουμε ότι δεν πραγματοποιείται διάχυση στο στερεό που σχηματίζεται. Το γεγονός αυτό εκτός του ότι έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μικροδιαφορισμού στην φάση (Al) επιφέρει μεγαλύτερο εμπλουτισμό του υγρού απ' ότι προβλέπει η θερμοδυναμική ισορροπία σε Mg και Si. Έτσι το τελευταίο ενδοδενδριτικό υγρό υφίσταται ευτηκτική στερεοποίηση. Στο σχήμα 3.6 φαίνεται η πορεία της στερεοποίησης σύμφωνα με την εξίσωση Scheil (σχέση 3.16). Συγκεκριμένα φαίνεται το ποσοστό του στερεού που σχηματίζεται σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Το διάγραμμα αυτό έχει κατασκευαστεί για Al-7.5Si-0.45Mg και δείχνει ένα εύρος στερεοποίησης στους 612⁰C και λήξη στους 558⁰C, δηλαδή ένα εύρος στερεοποίησης 54⁰C. Το τμήμα 2 της καμπύλης αφορά τον σχηματισμό της φάσης (Al), το τμήμα 3 αφορά την καθίζηση του Si ενώ το τμήμα 4 αφορά την ευτηκτική στερεοποίηση (υπό σταθερή θερμοκρασία) που αναφέρθηκε παραπάνω. Τέτοια διαγράμματα Scheil υπολογίστηκαν για όλους τους συνδυασμούς κραμάτων AlSi7Mg μέσα στα όρια των συστάσεων για το Mg και το Si που ορίζουν οι προδιαγραφές, έτσι ώστε να

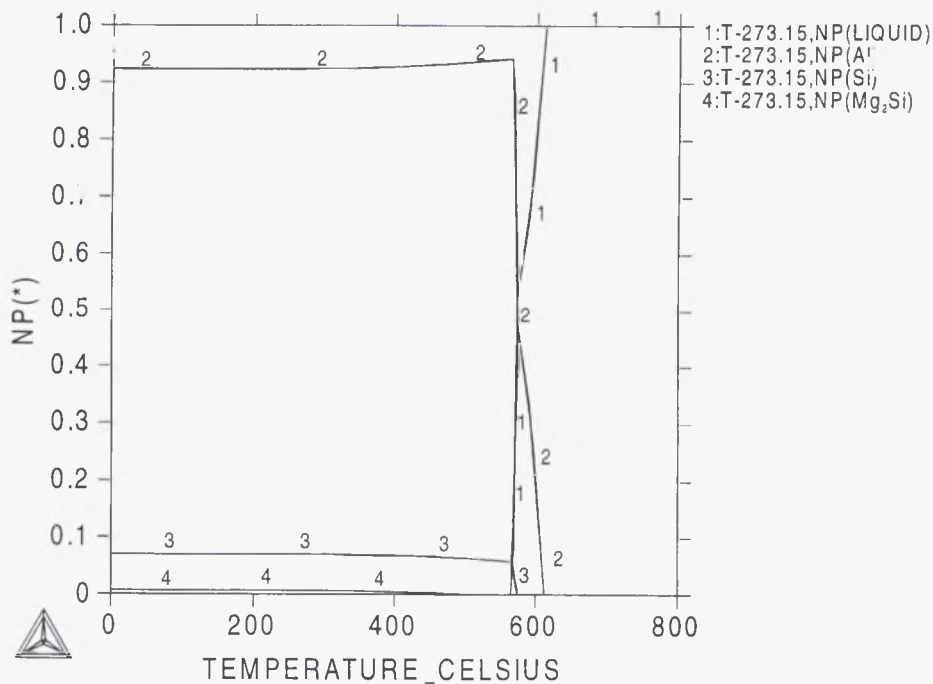
υπολογιστεί το αντίστοιχο εύρος στερεοποίησης. Ένα άλλο θερμοδυναμικό μέγεθος που υπολογίστηκε ήταν η κινούσα δύναμη για την καθίζηση της φάσης Mg_2Si , η οποία προσδίδει στο κράμα μια πρόσθετη ισχυροποίηση.

THERMO-CALC (**.02.18:21.24) :

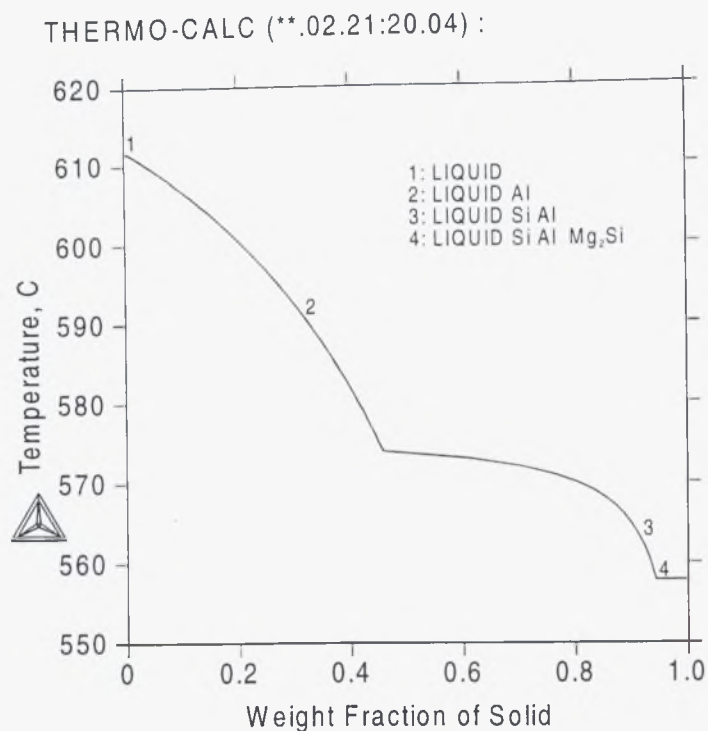


Σχήμα 3.4 Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlSi7Mg.

THERMO-CALC (**.02.23:18.07) :



Σχήμα 3.5 Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος AlSi7Mg.

Με την βοήθεια όλων των παραπάνω διαγραμμάτων είναι δυνατόν να δημιουργηθεί ο παρακάτω πίνακας για το κράμα A.1:

Si	Mg	Κινούσα Δύναμη (155°C)(Kj/mole)	Εύρος Στερεοποίησης (Scheil) (°C)
6.5	0.2	10.59562	619-558=61
6.5	0.25	11.11604	
6.5	0.3	11.53964	
6.5	0.35	11.89631	
6.5	0.4	12.20422	
6.5	0.45	12.47476	619-558=61
7	0.2	10.60808	
7	0.25	11.1285	
7	0.3	11.5521	
7	0.35	11.90877	616-558=58
7	0.4	12.21668	
7	0.45	12.48686	616-558=58
7.5	0.2	10.6209	614-558=56
7.5	0.25		
7.5	0.3	11.56456	613-558=55
7.5	0.35		
7.5	0.4	12.22914	612-558=54
7.5	0.45	12.49932	612-558=54

Πίνακας 3.1 Υπολογισμοί της κινούσας δύναμης για καθίζηση της φάσης Mg₂Si και του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα αλουμινίου AlSi7Mg

Το εύρος στερεοποίησης αν και δεν έχει μεγάλη διακύμανση, μας οδηγεί (όπως και η κινούσα δύναμη) στις μέγιστες συστάσεις των κραματικών στοιχείων. Δηλαδή η βέλτιστη χημική σύσταση του κράματος A.1 είναι η:

AlSi7.5Mg0.45

Θερμοκρασία διαλυτοποίησης $Mg_2Si \rightarrow 461.81^\circ C$

Θερμοκρασία Liquidus $\rightarrow 612.04^\circ C$

Θερμοκρασία Solidus $\rightarrow 564.92^\circ C$

Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό του εύρους στερεοποίησης και της κινούσας δύναμης για καθίζηση των ενδομεταλλικών φάσεων και για τα υπόλοιπα κράματα αλουμινίου, αλλά και για τα κράματα χαλκού. Στη συνέχεια παρατίθενται οι υπολογισμοί σε μορφή πινάκων για τα υπόλοιπα κράματα, ενώ τα διαγράμματα από τα οποία πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί δίνονται στο τέλος της παρούσας εργασίας στο Παράρτημα Ι.

A2. Κράμα AlSi10Mg

Si $\rightarrow 9-11\%$

Mg $\rightarrow 0.2-0.5\%$

Si	Mg	Κινούσα Δύναμη (155°C) (Kj/mole)	Εύρος Στερεοποίησης (Scheil) (°C)
9	0.2	10.65756	603-558=45
9	0.3	11.60264	603-558=45
9	0.4	12.26652	602-558=44
9	0.5	12.77768	602-557=45
10	0.2	10.68497	596-557=39
10	0.3	11.62827	595-557=38
10	0.4	12.29179	595-557=38
10	0.5	12.8026	594-557=37
11	0.2	10.71095	588-557=31
11	0.3	11.6539	588-557=31
11	0.4	12.31778	587-557=30
11	0.5	12.82823	587-557=30

Πίνακας 3.2 Υπολογισμοί της κινούσας δύναμης για καθίζηση της φάσης Mg_2Si και του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα αλουμινίου AlSi10Mg.

Η μεγιστοποίηση του Mg επηρεάζει την κινούσα δύναμη σε αντίθεση με το Si που την επηρεάζει ελάχιστα.

Αντίθετα το εύρος στερεοποίησης επηρεάζεται αρκετά από την αύξηση του Si ενώ ελάχιστα από το Mg.

Τα παραπάνω μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι βέλτιστη σύσταση θα έχουμε με μεγιστοποίηση του Si και του Mg.

AlSi11Mg0.5

Θερμοκρασία διαλυτοποίησης $Mg_2Si \rightarrow 524.11^\circ C$

Θερμοκρασία Liquidus $\rightarrow 587.61^\circ C$

Θερμοκρασία Solidus $\rightarrow 562.74^\circ C$

A3. Κράμα AlSi12

Si $\rightarrow 10.5-13.5\%$

Mn $\rightarrow 0.1-0.5\%$

Κατά την διάρκεια των θερμοδυναμικών υπολογισμών παρουσιάζεται η φάση AlMnSi_beta η οποία προφανώς είναι ακαθαρσία και την απορρίπτουμε από τους υπολογισμούς. Η μόνη ευνοϊκή φάση την οποία μπορεί να σχηματίσει το Mn είναι η $MnAl_6$

Si	Mn	Εύρος Στερεοποίησης (Scheil) ($^\circ C$)
10.5	0.1	593-572=21
10.5	0.3	593-567=26
10.5	0.5	593-567=26
12	0.1	582-572=10
12	0.3	582-568=14
12	0.5	582-568=14
12.6	0.1	578-572=6
12.6	0.3	578-567.5=10.5
12.6	0.5	578-567.5=10.5
13.5	0.1	591-572=19
13.5	0.3	590-567.5=22.5
13.5	0.5	589-567.5=21.5

Πίνακας 3.3 Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα αλουμινίου AlSi12.

Το βέλτιστο εύρος στερεοποίησης προκύπτει με ελαχιστοποίηση του Mn και όπως είναι φυσικό για ευτηκτική σύσταση του Si (12.6).

Επίσης όπως προκύπτει και από τα διαγράμματα (Παράρτημα I) με ελαχιστοποίηση του Si (10.5) έχουμε διαφόριση ενώ για $Si > 12.6$ δεν έχουμε.

AlSi12.6

Θερμοκρασία Liquidus $\rightarrow 577.15^{\circ}\text{C}$

Θερμοκρασία Solidus $\rightarrow 575.33^{\circ}\text{C}$

A4. Κράμα AlMg3

Mg $\rightarrow 2.5-3.5$

Mg	Εύρος Στερεοποίησης (Scheil) ($^{\circ}\text{C}$)
2.5	$648-450=198$
2.75	$647-450=197$
3	$646-450=196$
3.25	$645-450=195$
3.5	$643-450=193$

Πίνακας 3.4 Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα αλουμινίου AlMg3.

Στο συγκεκριμένο κράμα η βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση του Mg) επιφέρει μια ασήμαντη μείωση του εύρους στερεοποίησης. Επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί όλο το εύρος της σύστασης.

Θερμοκρασία διαλυτοποίησης $\text{Al}_3\text{Mg}_2 \rightarrow 200.37^{\circ}\text{C}$

Θερμοκρασία Liquidus $\rightarrow 642.6^{\circ}\text{C}$

Θερμοκρασία Solidus $\rightarrow 603.9^{\circ}\text{C}$

A5. Κράμα AlCu4Ti

Cu $\rightarrow 4.5-5.2\%$

Ti $\rightarrow 0.15-0.3\%$

Cu	Ti	Κινούσα Δύναμη (155°C) (Kj/mole)	Εύρος Στερεοποίησης (Scheil) (°C)
4.5	0.15	4.733608	686-511=175
4.5	0.2	4.73432	710-511=199
4.5	0.25	4.734676	730-511=219
4.5	0.3	4.735388	747-511=236
4.8	0.15	4.757458	686-511=175
4.8	0.2	4.757814	711-511=200
4.8	0.25	4.75817	731-511=220
4.8	0.3	4.758882	748-511=237
5.2	0.15	4.782375	687-511=176
5.2	0.2	4.782731	712-511=201
5.2	0.25	4.783087	732-511=221
5.2	0.3	4.783443	749-511=238

Πίνακας 3.5 Υπολογισμοί της κινούσας δύναμης για καθίζηση της θ-φάσης και του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα αλουμινίου AlCu4Ti.

Παρατηρήσεις:

- Η κινούσα δύναμη επηρεάζεται ελάχιστα από την προσθήκη Ti αλλά και Cu.
- Αντίθετα το εύρος στερεοποίησης επηρεάζεται σημαντικά από την προσθήκη Ti, ενώ η επιρροή του Cu είναι ελάχιστη.
- Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι το κράμα μπορεί να βελτιστοποιηθεί με την μεγιστοποίηση του Cu και την ελαχιστοποίηση του Ti.
- Η φάση Al₃M μέσα στην υγρή φάση πυρηνώνει την FCC.

AlCu5.2Ti0.15

Θερμοκρασία διαλυτοποίησης θ φάσης→536.34°C

Θερμοκρασία Liquidus→586.28°C

Θερμοκρασία Solidus→554.53°C

3.3 Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί κραμάτων χαλκού

C1. Κράμα CuSn7ZnPb

C93200 High-Lead Tin bronze

Sn→6-8%

Zn→3-5%

Pb→5-7%

Sn	Zn	Pb	Εύρος Στερεοποίησης (Scheil) (°C)
6	3	5	1036-695=341
6	3	6	1033-690=343
6	3	7	1030-685=345
6	4	5	1032-675=357
6	4	6	1029-669=360
6	4	7	1025-663=362
6	5	5	1028-655=373
6	5	6	1025-648=377
6	5	7	1021-641=380
7	3	5	1032-644=388
7	3	6	1029-638=391
7	3	7	1026-633=393
7	4	5	1028-623=405
7	4	6	1025-616=409
7	4	7	1021-610=411
7	5	5	1024-601=423
7	5	6	1020-593=427
7	5	7	1017-585=432
8	3	5	1028-588=440
8	3	6	1025-581=444
8	3	7	1021-547=447
8	4	5	1024-565=459
8	4	6	1021-556=465
8	4	7	1017-548=469
8	5	5	1020-538=482
8	5	6	1016-527=489
8	5	7	1013-516=497

Πίνακας 3.6 Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα χαλκού CuSn7ZnPb.

Το μικρότερο εύρος στερεοποίησης επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση όλων των κρυσταλλικών στοιχείων.

CuSn6Zn3Pb5

Θερμοκρασία Liquidus→1035.8°C

Θερμοκρασία Solidus→990.7°C

C2. Κράμα CuSn12Ni**C91700 Nickel gear bronze**

Sn→11-13%

Ni→1.5-2.5%

Sn	Ni	Εύρος Στερεοποίησης (Scheil) (°C)
11	1.5	1066-878=188
11	2	1070-878=202
11	2.5	1073-878=205
12	1.5	1054-860=204
12	2	1067-860=207
12	2.5	1071-860=211
13	1.5	1061-830=231
13	2	1064-830=234
13	2.5	1068-830=238

Πίνακας 3.7 Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα χαλκού CuSn12Ni.

Το μικρότερο εύρος στερεοποίησης επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση όλων των κραματικών στοιχείων.

CuSn11Ni1.5

Θερμοκρασία Liquidus→1065.7°C

Θερμοκρασία Solidus→1041.7°C

C3. Κράμα CuZn33Pb**Yellow brass C85700 (sand centrifugal castings)****C85800 (die castings)**

Zn→33-34%

Pb→1-3%

Zn	Pb	Εύρος Στερεοποίησης (Scheil) (°C)
32	1	934-888=46
32	2	929-889=40
32	3	929-890=39
33	1	928-886=42
33	2	924-888=36
33	3	926-888=38
34	1	922-885=37
34	2	920-886=34
34	3	923-884=39

Πίνακας 3.8 Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα χαλκού CuZn33Pb.

Το μικρότερο εύρος στερεοποίησης καθώς και η μικρότερη θερμοκρασία Liquidus επιτυγχάνονται για Zn=34% και Pb=2%

CuZn34Pb2

Θερμοκρασία Liquidus→919.4°C

Θερμοκρασία Solidus→909.6°C

C4. Κράμα CuAl9Ni

C95410 Aluminum bronzes

Al→8.5-10%

Ni→1.5-4%

Fe→1-3%

Al	Ni	Fe	Εύρος Στερεοποίησης (Scheil) (°C)	%mol Gamma-D83
8.5	1.5	2	1042-946=96	0.2784
8.5	2	2	1045-946=99	0.2855
8.5	3	2	1063-946=117	0.29722
8.5	4	2	1084-945=139	0.3147
9	1.5	2	1036-946=90	0.32611
9	2	2	1038-946=92	0.334
9	3	2	1044-945=99	0.35
9	4	2	1066-945=121	0.3684
9.5	1.5	2	1029-946=83	0.379
9.5	2	2	1032-946=86	0.387
9.5	3	2	1037-945=92	0.4038
9.5	4	2	1048-944=104	0.4215
10	1.5	2	1023-946=77	0.4315
10	2	2	1025-945=80	0.4395
10	3	2	1030-945=85	0.4563
10	4	2	1035-943=92	0.4741

Πίνακας 3.9.α Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα χαλκού CuAl9Ni.

Al	Ni	Εύρος Στερεοποίησης (Scheil) (°C)	%mol Gamma-D83
8.5	1.5	1046-966=80	0.2774
8.5	2	1049-965=84	0.2807
8.5	3	1054-965=89	0.2873
8.5	4	1059-965=94	0.2938
9	1.5	1040-965=75	0.331
9	2	1043-965=78	0.3343
9	3	1048-965=83	0.34
9	4	1053-965=88	0.3473
9.5	1.5	1034-965=69	0.384
9.5	2	1036-965=71	0.387
9.5	3	1042-965=77	0.3937
9.5	4	1047-964=83	0.4001
10	1.5	1028-965=63	0.4365
10	2	1030-965=65	0.4396
10	3	1035-964=71	0.446
10	4	1040-964=76	0.4523

Πίνακας 3.9.β Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης απουσία Fe, σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα χαλκού CuAl9Ni.

Η φάση GAMMA_D83 είναι ενδομεταλλική ένωση με:

Cu=84.123% και Al=15.877%

Το εύρος στερεοποίησης ελαχιστοποιείται με μεγιστοποίηση του Al και ελαχιστοποίηση του Ni ενώ η ένωση GAMMA_D83 μεγιστοποιείται με μεγιστοποίηση του Al και του Ni.

Επομένως επιλέγουμε:

Al=10%

Ni=1.5-4%

Ανάλογα με το αν επιθυμούμε ελαχιστοποίηση του εύρους στερεοποίησης ή μεγιστοποίηση του ποσοστού της ένωσης GAMMA_D83.

Θερμοκρασία Liquidus→1021.9°C

Θερμοκρασία Solidus→988.5°C

C5. Κράμα CuPb5Sn

C92700 Leaded tin bronzes

Sn→9-11%

Pb→4-6%

Pb	Sn	Εύρος Στερεοποίησης (Scheil) (°C)
4	9	1040-604=436
4	10	1036-544=492
4	11	1032-481=551
5	9	1037-599=438
5	10	1033-538=495
5	11	1029-474=555
6	9	1032-594=438
6	10	1029-532=497
6	11	1025-467=558

Πίνακας 3.10 Υπολογισμοί του εύρους στερεοποίησης σε συνάρτηση με την χημική σύσταση, για το κράμα χαλκού CuPb5Sn.

Το μικρότερο εύρος στερεοποίησης καθώς και η μικρότερη θερμοκρασία Liquidus επιτυγχάνονται για Sn=9% και Pb=6%

CuPb6Sn9

Θερμοκρασία Liquidus→1033.7°C

Θερμοκρασία Solidus→989.3°C

Από όλους τους παραπάνω υπολογισμούς είναι δυνατόν να δημιουργηθεί ο παρακάτω πίνακας, στον οποίο δίνονται οι τελικές συστάσεις που επελέγησαν για κάθε κράμα σύμφωνα με τα κριτήρια βελτιστοποίησης που τέθηκαν.

Κράματα Αλουμινίου		Κράματα Χαλκού	
A.1	AlSi7.5Mg0.45	C.1	CuSn6Zn3Pb5
A.2	AlSi11Mg0.5	C.2	CuSn11Ni1.5
A.3	AlSi12.6	C.3	CuZn34Pb2
A.4	AlMg3	C.4	CuAl10Ni1.5-4
A.5	AlCu4Ti	C.5	CuPb6Sn9

Πίνακας 3.11 Επιλογή χημικών συστάσεων για κάθε κράμα.

Κεφάλαιο 4: Προετοιμασία χύτευσης, εξοπλισμού και χώρου

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιούνται όλοι οι υπολογισμοί που αφορούν την διεξαγωγή μιας επιτυχούς χύτευσης. Παρουσιάζεται η προετοιμασία των πρώτων υλών καθώς και ο σχεδιασμός της παραγωγικής διαδικασίας. Στη συνέχεια υπολογίζονται λεπτομερώς παράγοντες, όπως η σύνθεση της φουρνιάς, οι θερμοκρασίες και ο χρόνος χύτευσης καθώς και οι διαστάσεις του μοντέλου, που επιδρούν σημαντικά στην παραγωγή αξιόπιστων χυτών.

4.1 Προετοιμασία πρώτων και βοηθητικών υλών

Οι πρώτες ύλες που απαιτήθηκαν για την χύτευση των κραμάτων αλουμινίου και χαλκού, συνοψίζονται στους πίνακες 4.1 και 4.2 αντίστοιχα:

<u>Πρώτες ύλες Αλουμινίου</u>				<u>Προκράματα</u>
GB-ALSi12	3.2523	σε χελώνες	DIN 1725/5	AlMg 10 ή 20% AlSr 5%
GB-ALSi10Mg	3.2331	σε χελώνες	DIN 1725/5	
GB-ALSi7Mg	3.2335	σε χελώνες	DIN 1725/5	
GB-ALCu4Ti	3.1842	σε χελώνες	DIN 1725/5	

Πίνακας 4.1 Πρώτες ύλες για χύτευση κραμάτων αλουμινίου.

<u>Πρώτες ύλες Χαλκού</u>		
GB-CuZn33Pb	2.0291	DIN 17656
GB-CuSn7ZnPb	2.1091	DIN 17656
GB-CuSn10		
Block – Zn 99.9%		
Block – Sn 99.9%		
Block – Ni 99.9%		
Block – Al 99.9%, Block – Cu 99.9%		

Πίνακας 4.2 Πρώτες ύλες για χύτευση κραμάτων χαλκού.

Οι βοηθητικές ύλες οι οποίες απαιτήθηκαν για την χύτευση των κραμάτων είναι:

1. Πυρίμαχο υλικό για την επένδυση του επαγωγικού φούρνου.
2. Εργαλεία αποξείδωσης, τοποθέτησης κραματικών στοιχείων, τσιμπίδες συγκράτησης καλουπιού δοκιμίου.
3. Καλούπι χυτοσίδηρο για δοκίμιο χημικής ανάλυσης.
4. Καλούπι για δοκίμια εφελκυσμού.
5. Άμμος Croning (χαλκού, αλουμινίου).
6. Κόλλα (θερμή) για κόλληση μασκών Croning.
7. Κόλλα (ψυχρή) για κόλληση μασκών Croning.
8. Αποκολλητικά μοδέλου Croning.
9. Βαφή (αποκολλητική croning-μέταλλου) μάσκας croning.
10. Αντιστάσεις προθέρμανσης πλάκας μοδέλου.
11. Δύο κάδοι χύτευσης μικροί με αντίστοιχο πυρίμαχο για κράματα Al.
12. Δύο κάδοι χύτευσης μικροί με αντίστοιχο πυρίμαχο για κράματα Cu.

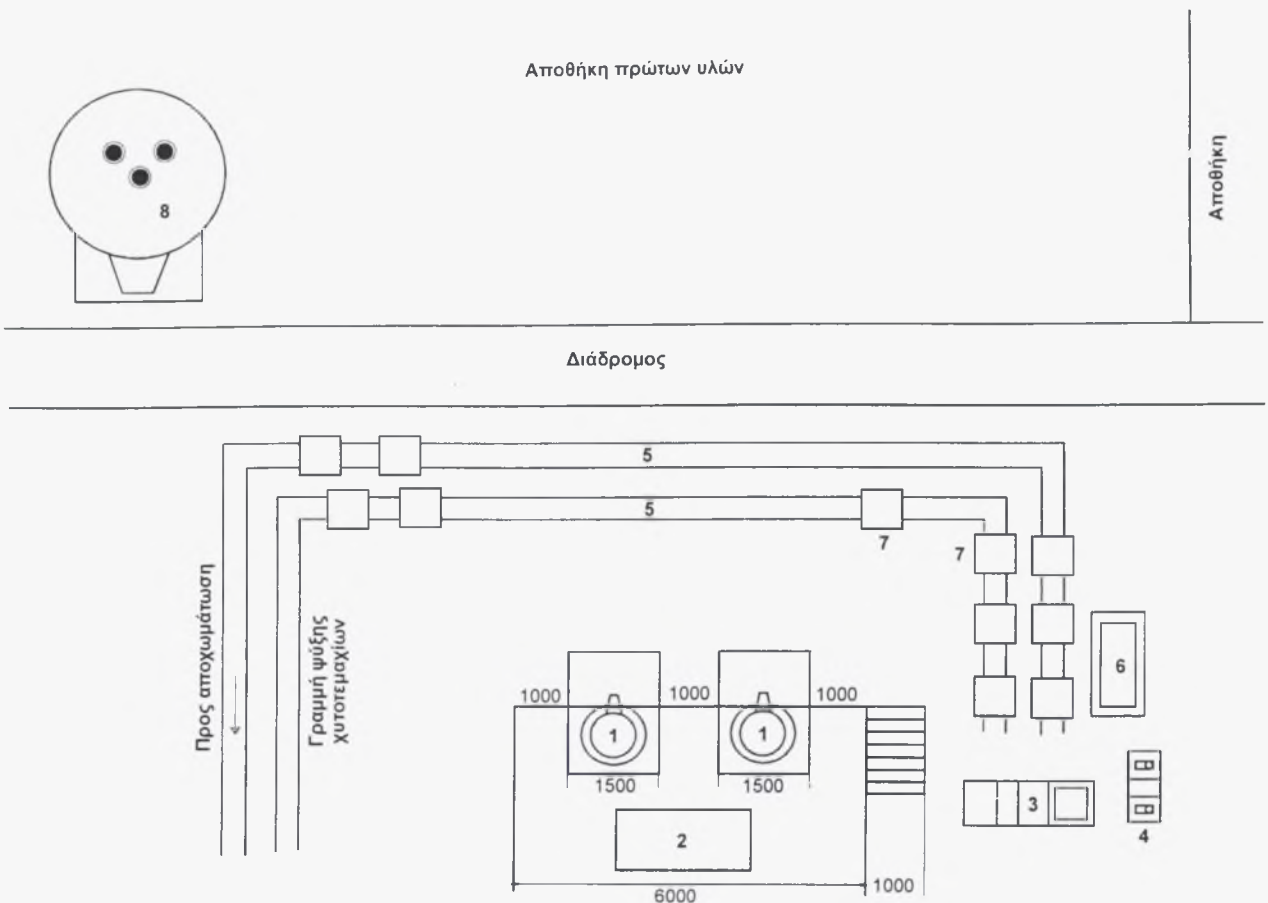
Τέλος ο εξοπλισμός που απαιτήθηκε για την χύτευση των δοκιμίων και των αντικειμένων είναι:

1. Επαγωγικός φούρνος
2. Μηχανή Croning μασκών.

4.2 Προετοιμασία χώρου και σχεδιασμός παραγωγικής διαδικασίας

Η διαμόρφωση του χώρου στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις της ΒΜΤΕ Α.Ε που αποσκοπεί στην βελτιστοποίηση της απόδοσης καθώς και στη αυτοματοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1.

Οι μάσκες οι οποίες σχηματίζονται στο χώρο 3 (μηχανή μασκών Croning) και κλείνουν στην κλειστική μηχανή 4, αποθηκεύονται στον χώρο 6 πριν ακολουθήσουν την γραμμή χύτευσης. Όταν το υγρό μέταλλο στους επαγωγικούς φούρνους είναι στην κατάλληλη θερμοκρασία, οι μάσκες κινούνται πάνω στους ραουλόδρομους και οδηγούνται προς χύτευση. Μετά από την ολοκλήρωση της χύτευσης συνεχίζουν να κινούνται πάνω στους ραουλόδρομους όπου και ψύχονται. Τέλος οδηγούνται στο χώρο αποχωμάτωσης όπου το χυτό απομακρύνεται από το καλούπι.



1. Επαγωγικοί φούρνοι χωρητικότητας 500kg ο καθένας
2. Πίνακας επαγωγικών φούρνων
3. Μηχανή CRONING
4. Κλειστική μηχανή μασκών CRONING
5. Γραμμές χύτευσης (ραουλόδρομοι)
6. Αποθήκευση μασκών CRONING
7. Μάσκες CRONING προς χύτευση
8. Υπάρχουσα εγκατάσταση φούρνου Βολταϊκού τόξου

Σχήμα 4.1 Παραγωγική διαδικασία μεθόδου χύτευσης μασκών Croning.

4.3 Προετοιμασία χύτευσης

Στην συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά όλοι οι υπολογισμοί οι οποίοι πραγματοποιήθηκαν πριν από την διεξαγωγή της χύτευσης. Οι παράγοντες οι οποίοι μελετήθηκαν έχουν σημαντική επίδραση στην παραγωγή χυτών με ιδιότητες που να ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές.

4.3.1 Σύνθεση φουρνιάς

Η σύνθεση της φουρνιάς για καθένα από τα πέντε κράματα αλουμινίου που πρόκειται να χυτευτούν έχει ως εξής:

A1. Κράμα AlSi7Mg

- V- AlSi7Mg 48kg
- V- AlMg3 2kg έχει 0.06% Mg στη φουρνιά
- + απαερωτικές ταμπλέτες
- + αποξειδωτική σκόνη
- V- AlTi5 0.5kg έχει 0.025% Ti.
- V- AlSr5 0.5kg

A2. Κράμα AlSi10Mg

- V- AlSi7Mg 32kg
- V- AlSi20 15kg
- V- AlSr5 0.5kg
- V- AlMg3 2kg
- V- AlTi5 0.5kg

A3. Κράμα AlSi12

- V- AlSi12 49kg
- V- AlTi5 0.5kg
- V- AlSr5 0.5kg
- + απαερωτικές ταμπλέτες
- + αποξειδωτική σκόνη

A4. Κράμα AlMg3

- V- AlMg3 49kg
- V- AlTi5 0.5kg
- V- AlSr5 0.5kg

<u>A5. Κράμα AlCu4Ti</u>	V-Al 99.9	47kg
	Cu-ηλεκτ.	2kg
	V-AlTi5	0.5kg
	V-AlSr5	0.5kg

Αντίστοιχα η σύνθεση φουρνιάς για καθένα από τα πέντε κράματα χαλκού που πρόκειται να χυτευτούν έχει ως εξής:

<u>C1. Κράμα CuSn7ZnPb</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Ηλεκτρ. Cu 41.5kg • Block Sn 3.5kg • Block Zn 2kg • Block Pb 3kg
----------------------------	---

<u>C2. Κράμα CuSn12Ni</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Ηλεκτρ. Cu 42.5kg • Block Sn 6.5kg • Block Ni 1kg
---------------------------	---

<u>C3. Κράμα CuZn33Pb</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Ηλεκτρ. Cu 32kg • Block Zn 17kg • Block Pb 1kg
---------------------------	--

<u>C4. Κράμα CuAl9Ni</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Ηλεκτρ. Cu 42.5kg • Block Al 5kg • Block Ni 1.5kg • Fe 1kg
--------------------------	---

<u>C5. Κράμα CuPb5Sn</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Ηλεκτρ. Cu 42.5kg • Block Pb 3kg • Block Sn 4.5kg
--------------------------	---

Η προσθήκη μικρών ποσοτήτων AlSr5 σε ορισμένα κράματα αλουμινίου οφείλεται στην χαρακτηριστική ιδιότητα του Sr να στρογγυλοποιεί τους κόκκους των κραματικών στοιχείων. Επίσης η προσθήκη αποξειδωτικής σκόνης και

απαερωτικών ταμπλετών οφείλεται στην αποφυγή των προβλημάτων της χύτευσης τα οποία περιγράφονται εκτενώς στο κεφάλαιο 2.3.4.

4.3.2 θερμοκρασίες χύτευσης και τήξης

Οι θερμοκρασίες στις οποίες πρέπει να βρίσκονται τα κράματα αλουμινίου κατά την χύτευση δίνονται στον πίνακα 4.3.

Κράματα Αλουμινίου	Θερμοκρασία [°C]
A1. AlSi7Mg	700
A2. AlSi10Mg	700
A3. AlSi12	680
A4. AlMg3	690
A5. AlCu4Ti	720

Πίνακας 4.3 Θερμοκρασίες χύτευσης κραμάτων αλουμινίου.

Αντίθετα, η θερμοκρασία τήξης είναι η ίδια για όλα τα κράματα και ίση με 750°C για τήξη και ομογενοποίηση όλων των κραματικών στοιχείων.

Για τα κράματα χαλκού, οι θερμοκρασίες πραγματοποίησης της χύτευσης δίνονται στον πίνακα 4.4.

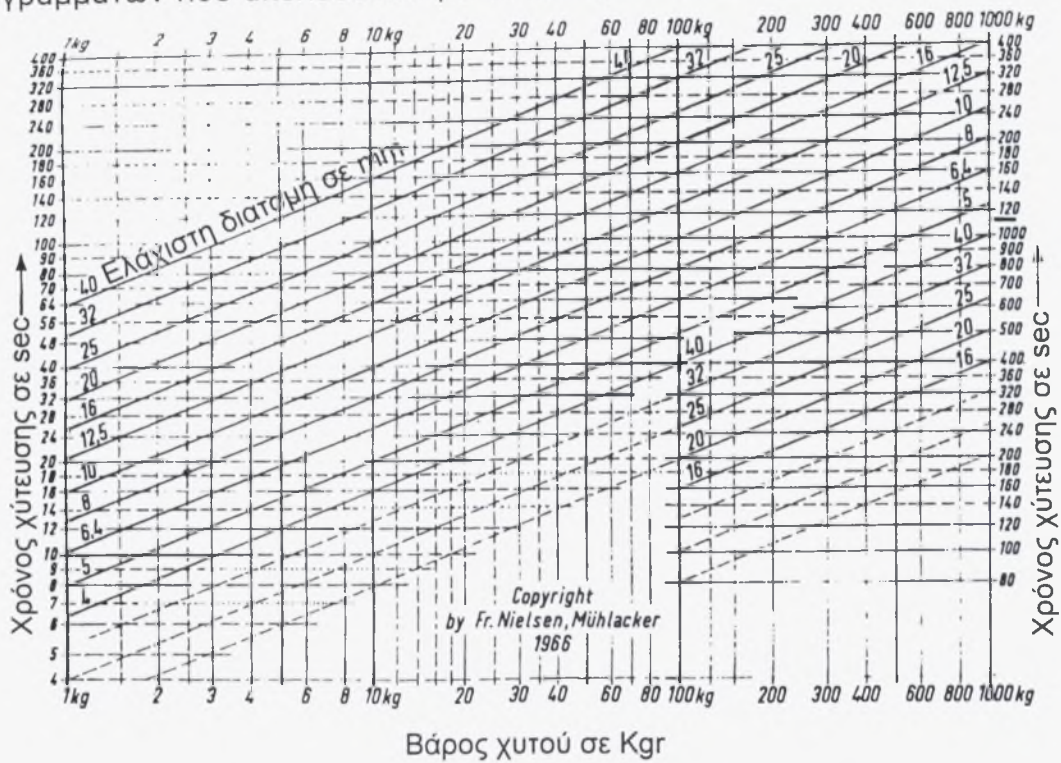
Κράματα Χαλκού	Θερμοκρασία [°C]
C1. CuSn7ZnPb	1100
C2. CuSn12Ni	1150
C3. CuZn33Pb	1100
C4. CuAl9Ni	1150
C5. CuPb5Sn	1100

Πίνακας 4.4. Θερμοκρασίες χύτευσης κραμάτων χαλκού.

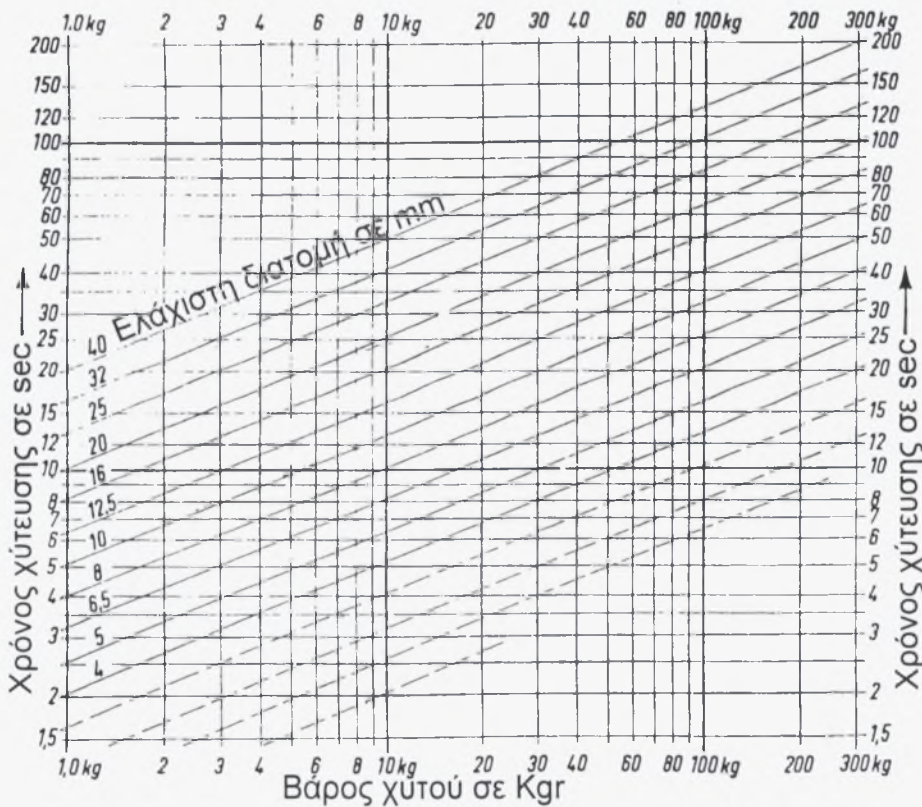
Η θερμοκρασία τήξης είναι η ίδια για όλα τα κράματα χαλκού και ίση με 1200°C για τήξη και ομογενοποίηση όλων των κραματικών στοιχείων.

4.3.3 Υπολογισμός χρόνου χύτευσης (κατά Nielsen)

Ο υπολογισμός του χρόνου χύτευσης πραγματοποιείται με την βοήθεια των διαγραμμάτων που ακολουθούν για το αλουμίνιο και το χαλκό αντίστοιχα.



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα υπολογισμού χρόνου χύτευσης κραμάτων αλουμινίου.



Σχήμα 4.3 Διάγραμμα υπολογισμού χρόνου χύτευσης κραμάτων χαλκού.

Ο χρόνος χύτευσης για τα δοκίμια αλουμινίου υπολογίζεται επιλέγοντας βάρος χυτών δοκιμίων 15kg και ελάχιστο πάχος τομέα πλήρωσης 20mm. Από το διάγραμμα 4.2 υπολογίζεται ο χρόνος χύτευσης **t=90 sec**.

Αντίστοιχα από το διάγραμμα 4.3, για βάρος χυτού 45kg και ελάχιστο πάχος τομέα πλήρωσης 20mm, ο χρόνος χύτευσης για τα χυτά δοκίμια χαλκού είναι **t=45 sec**.

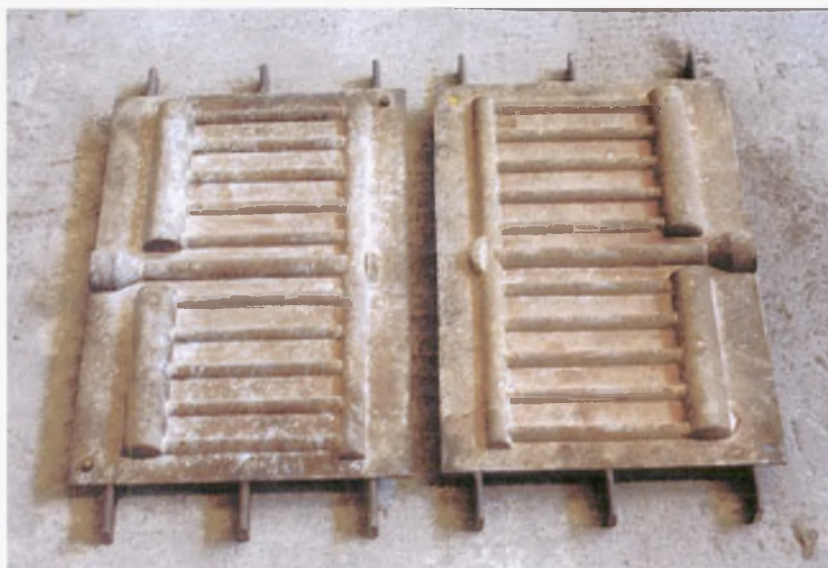
Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε το χρόνο χύτευσης και για τα χυτά αντικείμενα των κραμάτων αλουμινίου και χαλκού.

Έτσι, για αντικείμενα αλουμινίου βάρους 10kg και ελάχιστου πάχους τομέα πλήρωσης 10mm, ο χρόνος χύτευσης είναι **t=40 sec**.

Επίσης, για τα αντικείμενα χαλκού βάρους 20kg και ελάχιστου πάχους τομέα πλήρωσης 10mm, ο χρόνος χύτευσης είναι **t=17 sec**.

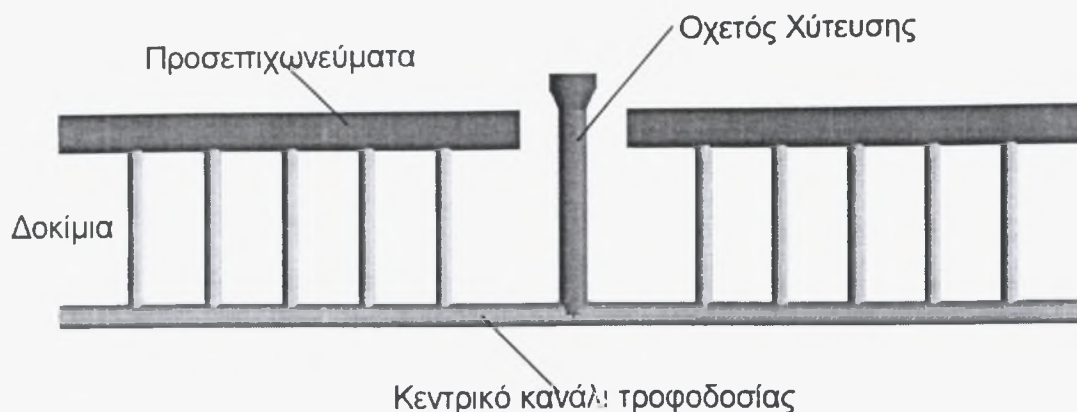
4.3.4 Υπολογισμός τροφοδοσίας του συστήματος χύτευσης

Τα κράματα αλουμινίου και χαλκού θα χυτευτούν πρώτα σε δοκίμια και στην συνέχεια σε πραγματικά αντικείμενα. Τα δοκίμια είναι κυλινδρικοί ράβδοι διαμέτρου 15-20mm. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι δύο φόρμες (μοντέλα) οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των μασκών:



Εικόνα 4.1 Φόρμες για την κατασκευή μασκών.

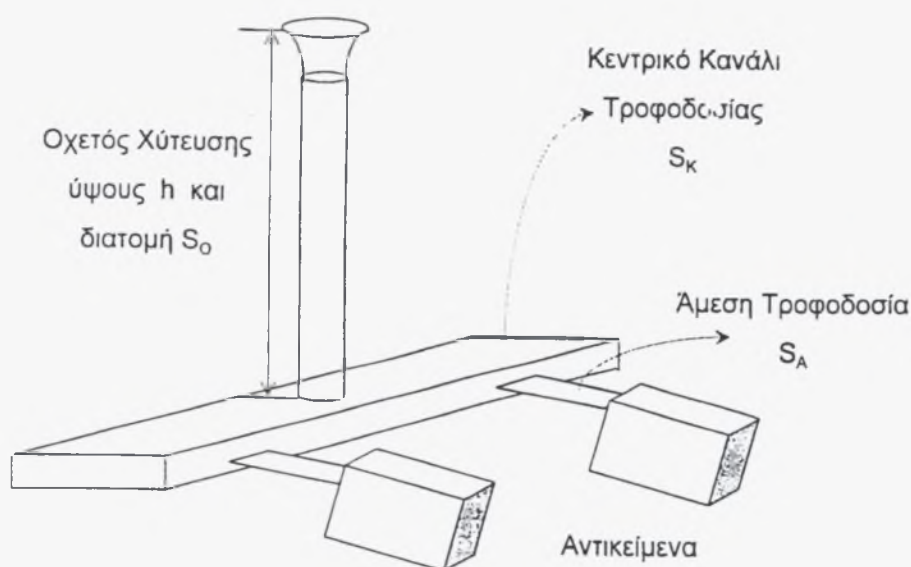
Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται αναλυτικά το σχέδιο του καλουπιού που θα χρησιμοποιηθεί για την χύτευση των δοκιμίων.



Σχήμα 4.4 Σχηματική περιγραφή συστήματος τροφοδοσίας δοκιμίων.

Το σύστημα τροφοδοσίας όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί αποτελείται από:

1. Οχετό χύτευσης
2. Κεντρικό κανάλι τροφοδοσίας
3. Άμεση τροφοδοσία (το κανάλι που επικοινωνεί άμεσα με το αντικείμενο)
4. Προσεπιχωνεύματα τα οποία μπαίνουν στα σημεία που υπάρχει αλλαγή διατομής για αποφυγή συστολών στο εσωτερικό του αντικειμένου.



Σχήμα 4.5 Θεωρητικό μοντέλο χύτευσης.

Η διατομή της άμεσης τροφοδοσίας, S_A , εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Την θερμοκρασία χύτευσης
- Το ύψος του οχετού χύτευσης h
- Το χρόνο
- Το βάρος και το πάχος του τοιχώματος του αντικειμένου
- Τη γεωμετρία του αντικειμένου
- Το ειδικό βάρος του υγρού μετάλλου
- Το υλικό του καλουπιού (άμμος, μεταλλικό καλούπι, κεραμικό κλπ.)

Η διατομή της άμεσης τροφοδοσίας, S_A , υπολογίζεται βάσει του ακόλουθου τύπου:

$$n \cdot S_A = \frac{22.6 \cdot G}{0.50 \cdot \rho \cdot t \cdot \sqrt{h}} \quad (4.1)$$

όπου S_A =διατομή άμεσης τροφοδοσίας

n =αριθμός άμεσων τροφοδοσιών

στην προκειμένη περίπτωση $n=10$

ρ =ειδικό βάρος του υγρού μετάλλου

στην περίπτωση χύτευσης αλουμινίου, $\rho=2.7 \text{ gr/cm}^3$,

ενώ στην περίπτωση χύτευσης χαλκού, $\rho=8.9 \text{ gr/cm}^3$.

G =βάρος χυτού

στην περίπτωση του αλουμινίου, $G=6.75 \text{ kg}$

(10 δοκίμια των 275gr + 2 προσεπιχωνεύματα των 2 Kgr)

ενώ στην περίπτωση του χαλκού, $G=20.85 \text{ kg}$

(10 δοκίμια των 885gr + 2 προσεπιχωνεύματα των 6 Kgr)

t =χρόνος χύτευσης

h =ύψος οχετού χύτευσης (20cm μαζί με το χωνί χύτευσης).

Βάσει των παραπάνω και αν επιλέξουμε $h=16 \text{ cm}$ τότε η σχέση 4.1 για τα χυτά δοκίμια αλουμινίου γίνεται:

$$10 \cdot S_A = \frac{22.6 \cdot 6.75}{0.50 \cdot 2.7 \cdot 90 \cdot \sqrt{16}} \Rightarrow S_A = 0.0314 \text{ cm}^2 \quad (d_{S_A}=20 \text{ mm})$$

Η διατομή του κεντρικού καναλιού χύτευσης, S_K , δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$S_K \geq 2S_A \quad (4.2)$$

$$\text{Άρα} \quad S_K \geq 2 \times 0.0314 \geq 0.0628 \text{ cm}^2 \quad (d_{S_K}=28 \text{ mm})$$

Η διατομή του οχετού χύτευσης, S_o , δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S_o \geq 2S_k \quad (4.3)$$

$$S_o \geq 2 \times 0.0628 \geq 0.1256 \text{ cm}^2 \quad (d_{s_o}=40 \text{ mm})$$

Αντίστοιχα, για τα χυτά δοκίμια χαλκού έχουμε:

$$10 \cdot S_A = \frac{22.6 \cdot 20.85}{0.50 \cdot 8.9 \cdot 45 \cdot \sqrt{16}} \Rightarrow S_A = 0.0588 \text{ cm}^2 \quad (d_{s_A}=28 \text{ mm})$$

Από την σχέση 4.2 η διατομή του κεντρικού καναλιού χύτευσης, S_k , είναι:

$$S_k \geq 2S_A$$

$$S_k \geq 2 \times 0.0588 \geq 0.1776 \text{ cm}^2 \quad (d_{s_k}=39 \text{ mm})$$

και αντίστοιχα η διατομή του οχετού χύτευσης, S_o , είναι:

$$S_o \geq 2S_k$$

$$S_o \geq 2 \times 0.1776 \geq 0.3552 \text{ cm}^2 \quad (d_{s_o}=67 \text{ mm})$$

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται οι διαστάσεις των καλουπιών για τα κράματα αλουμινίου και χαλκού

Κράματα αλουμινίου		Κράματα χαλκού	
$S_A=0.0314 \text{ cm}^2$	$d_{s_A}=20 \text{ mm}$	$S_A=0.0588 \text{ cm}^2$	$d_{s_A}=28 \text{ mm}$
$S_k=0.0628 \text{ cm}^2$	$d_{s_k}=28 \text{ mm}$	$S_k=0.1776 \text{ cm}^2$	$d_{s_k}=39 \text{ mm}$
$S_o=0.1256 \text{ cm}^2$	$d_{s_o}=40 \text{ mm}$	$S_o=0.3552 \text{ cm}^2$	$d_{s_o}=67 \text{ mm}$

Πίνακας 4.5 Διαστάσεις καλουπιών για τα κράματα αλουμινίου και χαλκού.

Προσεπιχωνεύματα: Ο κεντρικός αγωγός χύτευσης παίζει το ρόλο του προσεπιχωνεύματος (τροφοδοσία υλικού κατά τη στερεοποίηση). Επειδή χυτεύεται τελευταία είναι ζεστότερο, και τροφοδοτεί το αντικείμενο κατά την στερεοποίησή του (το προσεπιχώννευμα πρέπει να ψύχεται τελευταίο για να μπορεί να τροφοδοτεί υγρό μέταλλο το αντικείμενο κατά την στερεοποίηση και τη συστολή του).

Κεφάλαιο 5 : Δοκιμαστική Χύτευση Και Ποιοτικός Έλεγχος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου για κάθε κράμα αλουμινίου και χαλκού. Κατά την δοκιμαστική χύτευση η οποία πραγματοποιήθηκε στο πειραματικό χυτήριο της EBETAM, παράχθηκαν έξι δοκίμια και τέσσερα αντικείμενα από κάθε κράμα, τα οποία στην συνέχεια υποβλήθηκαν σε ποιοτικό έλεγχο. Συνολικά δηλαδή χυτεύθηκαν:

- 6 δοκίμια x 5 κράματα Al → 30 δοκίμια Al
- 6 δοκίμια x 5 κράματα Cu → 30 δοκίμια Cu
- 4 αντικείμενα x 5 κράματα Al → 20 αντικείμενα Al
- 4 αντικείμενα x 5 κράματα Cu → 20 αντικείμενα Cu

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται οι μάσκες Croning (Εικόνα 5.1), η χύτευση των αντικειμένων στο χυτήριο της EBETAM (Εικόνα 5.2) και το αποτέλεσμα της χύτευσης (Εικόνες 5.3 και 5.4) για κάθε κράμα αλουμινίου και χαλκού.



Εικόνα 5.1 Μάσκες Croning



Εικόνα 5.2 Χύτευση αντικειμένων στο πειραματικό χυτήριο της EBETAM



Εικόνα 5.3 Αντικείμενα αλουμινίου.



Εικόνα 5.4 Αντικείμενα χαλκού.

Τα παραγόμενα δοκίμια και αντικείμενα υποβλήθηκαν σε ποιοτικό έλεγχο και πιο συγκεκριμένα σε:

- α) έλεγχο χημικής σύστασης
- β) μεταλλογραφικό έλεγχο
- γ) έλεγχο μηχανικών ιδιοτήτων (έλεγχο εφελκυσμού, σκληρομέτρηση)
- δ) μη καταστρεπτικό έλεγχο (ραδιογραφίες, διεισδυτικά υγρά)

Τα αποτελέσματα των παραπάνω ελέγχων που σκοπό είχαν να διαγνώσουν αν τα χυτά αυτά ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές, παρουσιάζονται αναλυτικά στα

κεφάλαια που ακολουθούν.

5.1 Θερμικές κατεργασίες

Πριν προχωρήσουμε στη λεπτομερή ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι χρήσιμο να παραθέσουμε τις θερμικές κατεργασίες που υποβλήθηκαν τα εν λόγω κράματα αλουμινίου και χαλκού, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Κράμα		Θερμική κατεργασία		
AlSi7Mg	1.	Διαλυτοποίηση 535°C-6h	Βαφή Νερό 10°C	Γήρανση 150°C-8h
	2.	Διαλυτοποίηση 540°C-12h	Βαφή Νερό 10°C	Γήρανση 155°C-4h
	3.	Διαλυτοποίηση 510°C-6h	Βαφή Νερό 10°C	Γήρανση 150°C-8h
	4.	Διαλυτοποίηση 510°C-12h	Βαφή Νερό 10°C	Γήρανση 155°C-4h
AlSi10Mg		Διαλυτοποίηση 530°C-5h	Βαφή Νερό 10°C	Γήρανση 165°C-9h
AlMg3		As-Cast		
AlSi12(Cu)		Ομογενοποίηση 530°C -5h		
AlCu4Ti		Διαλυτοποίηση 535°C-6h	Βαφή Νερό 10°C	Γήρανση 150°C-13h
CuAl9Ni		Διαλυτοποίηση 850°C-2h	Βαφή Νερό 10°C	Επαναφορά 600°C-4h

Πίνακας 5.1 Θερμικές κατεργασίες κραμάτων αλουμινίου και χαλκού.

Το κράμα AlSi7Mg υποβλήθηκε σε τέσσερις διαφορετικές θερμικές κατεργασίες εξαιτίας της ασυμφωνίας που υπάρχει μεταξύ της Γερμανικής (κατά DIN) και της Αμερικάνικης (κατά ASTM) βιβλιογραφίας σε θερμικές κατεργασίες που αφορούν κράματα τα οποία υποβάλλονται σε διαλυτοποίηση και γήρανση. Επίσης από τη

θερμοδυναμική ανάλυση των κραμάτων που προηγήθηκε, προκύπτουν διαφορετικές θερμοκρασίες διαλυτοποίησης. Έτσι γίνεται μια προσπάθεια βελτιστοποίησης της θερμικής κατεργασίας των κραμάτων αυτών, εισάγοντας τις προτεινόμενες από το πρόγραμμα Thermo-Calc θερμοκρασίες διαλυτοποίησης στις είδη υπάρχουσες Γερμανικές και Αμερικάνικες θερμικές κατεργασίες. Οι θερμοκρασίες αυτές είναι περίπου 30°C χαμηλότερες, γεγονός που σημαίνει ότι θα μπορούσε να υπάρχει οικονομικό όφελος σε μια παραγωγική διαδικασία.

Έτσι έχουμε τη θερμική κατεργασία 1 η οποία είναι σύμφωνα με τη Γερμανική τυποποίηση, τη θερμική κατεργασία 2 σύμφωνα με την Αμερικάνικη τυποποίηση και τις θερμικές κατεργασίες 3 και 4 στις οποίες εισαγάγαμε τις νέες θερμοκρασίες διαλυτοποίησης στην Γερμανική και Αμερικάνικη τυποποίηση αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα τα οποία παραθέτονται στην συνέχεια, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί η Γερμανική τυποποίηση, η οποία προτείνει μικρότερους χρόνους θερμικής κατεργασίας και επίσης να μειωθεί η θερμοκρασία διαλυτοποίησης σύμφωνα με τη θερμοδυναμική ανάλυση (Thermo-Calc) χωρίς να υπάρχει αλλοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος. Έτσι όπως αναφέρεται και προηγουμένως η βελτιστοποίηση αυτή του χρόνου και της θερμοκρασίας διαλυτοποίησης μπορεί να επιφέρει σημαντικό οικονομικό όφελος σε μια παραγωγική διαδικασία.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου.

5.2 Χημική Ανάλυση

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι χημικές συστάσεις, που επιτεύχθηκαν κατά την χύτευση των κραμάτων αλουμινίου και χαλκού. Για να μπορεί να γίνει σύγκριση, παραθέτουμε και τις προδιαγραφές των κραμάτων κατά DIN καθώς επίσης και τις προτεινόμενες τιμές που προέκυψαν από την θερμοδυναμική ανάλυση.

5.2.1 Κράματα Αλουμινίου

Κραματικά Στοιχεία		Προδιαγραφές DIN 1725	Προτεινόμενη Τιμή	Χημική Ανάλυση
Κύρια	Si	6.5-7.5	7.5	7.76
	Mg	0.25-0.45	0.45	0.2291
	Ti	0.001-0.20		0.0515
Δευτερεύοντα	Cu	Max 0.5		0.1585
	Fe	Max 0.18		0.3785
	Mn	Max 0.10		0.3208
	Zn	Max 0.07		0.1066

Πίνακας 5.2.1 Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου **AlSi7Mg**

Κραματικά Στοιχεία		Προδιαγραφές DIN 1725	Προτεινόμενη Τιμή	Χημική Ανάλυση
Κύρια	Si	9.0-11.0	11.0	9.76
	Mg	0.20-0.50	0.50	0.49
	Mn	0.001-0.40		0.17
Δευτερεύοντα	Cu	Max 0.05		0.83
	Fe	Max 0.50		0.49
	Ti	Max 0.15		0.07
	Zn	Max 0.10		0.33

Πίνακας 5.2.2 Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου **AlSi10Mg**

Κραματικά Στοιχεία		Προδιαγραφές DIN 1725	Προτεινόμενη Τιμή	Χημική Ανάλυση
Κύρια	Mg	2.5-3.5		2.40
	Mn	0.001-0.40		0.38
	Ti	0.001-0.20		0.13
Δευτερεύοντα	Cu	Max 0.05		0.77
	Fe	Max 0.50		0.22
	Si	Max 0.50		2.20
	Zn	Max 0.10		0.10

Πίνακας 5.2.3 Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου **AlMg3**

Κραματικά Στοιχεία		Προδιαγραφές DIN 1725	Προτεινόμενη Τιμή	Χημική Ανάλυση
Κύρια	Si	10.5-13.5	12.6	12.17
	Mn	0.1-0.5		0.14
Δευτερεύοντα	Cu	Max 0.10		1.55
	Fe	Max 0.80		0.37
	Mg	Max 0.30		0.22
	Ti	Max 0.15		0.09
	Zn	Max 0.50		0.47

Πίνακας 5.2.4 Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου **AlSi12**

Κραματικά Στοιχεία		Προδιαγραφές DIN 1725	Προτεινόμενη Τιμή	Χημική Ανάλυση
Κύρια	Cu	4.5-5.2	5.2	5.16
	Ti	0.15-0.30	0.15	0.04
	Mn	0.001-0.50		0.05
Δευτερεύοντα	Fe	Max 0.18		0.41
	Si	Max 0.18		1.6
	Zn	Max 0.07		0.12

Πίνακας 5.2.5 Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου **AlCu4Ti**

5.2.2 Κράματα Χαλκού

Κραματικά Στοιχεία		Προδιαγραφές DIN 1705	Προτεινόμενη Τιμή	Χημική Ανάλυση
Κύρια	Sn	6.0-8.0	6.0	6.42
	Zn	3.0-5.0	3.0	4.60
	Pb	5.0-7.0	5.0	7.33
Δευτερεύοντα	Ni	Max 2.0		<0.002
	Sb	Max 0.3		
	Fe	Max 0.25		0.013
	Al			0.453

Πίνακας 5.2.6 Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου **CuSn7ZnPb**

Κραματικά Στοιχεία		Προδιαγραφές DIN 1705	Προτεινόμενη Τιμή	Χημική Ανάλυση
Κύρια	Sn	11.0-13.0	11.0	11.3
	Ni	1.5-2.5	1.5	1.865
Δευτερεύοντα	Pb	Max 0.3		0.44
	Zn			0.10
	Al			<0.001
	Fe	Max 0.2		0.013

Πίνακας 5.2.7 Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου **CuSn12Ni**

Κραματικά Στοιχεία		Προδιαγραφές DIN 1709	Προτεινόμενη Τιμή	Χημική Ανάλυση
Κύρια	Zn	32.0-34.0	34.0	24.88
	Pb	1.0-3.0	2.0	1.73
Δευτερεύοντα	Ni	Max 1.0		0.069
	Al	Max 0.1		<0.001
	Sn	Max 1.5		0.4
	Fe	Max 0.8		0.015

Πίνακας 5.2.8 Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου **CuZn33Pb**

Κραματικά Στοιχεία		Προδιαγραφές DIN 1714	Προτεινόμενη Τιμή	Χημική Ανάλυση
Κύρια	Al	8.5-10.0	10.0	9.371
	Ni	1.5-4.0	4.0	1.719
	Fe	1.0-3.0	2.0	2.264
Δευτερεύοντα	Sn	Max 0.2		0.24
	Zn	Max 0.5		0.7
	Pb	Max 0.05		0.18
	Si	Max 0.1		

Πίνακας 5.2.9 Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου **CuAl9Ni**

Κραματικά Στοιχεία		Προδιαγραφές DIN 1716	Προτεινόμενη Τιμή	Χημική Ανάλυση
Κύρια	Pb	4.0-6.0	6.0	5.52
	Sn	9.0-11.0	9.0	12.24
Δευτερεύοντα	Ni	Max 1.5		0.034
	Al			<0.001
	Zn	Max 2.0		0.7
	Fe	Max 0.25		0.018

Πίνακας 5.2.10 Χημική ανάλυση κράματος αλουμινίου **CuPb5Sn**

5.3 Μεταλλογραφικός έλεγχος

Στο κεφάλαιο αυτό παραθέτουμε την μεταλλογραφική ανάλυση, που έχει στόχο τον χαρακτηρισμό της μικροδομής των κραμάτων αλουμινίου και χαλκού. Οι φωτογραφίες που ακολουθούν παρουσιάζουν την μικροδομή των θερμικά κατεργασμένων κραμάτων. Για να γίνει εφικτή η παρατήρηση της μικροδομής των κραμάτων χαλκού, χρειάστηκε να προσβληθούν χημικά με κατάλληλο αντιδραστήριο η σύσταση του οποίου είναι:

2g FeCl₃

3ml νερό

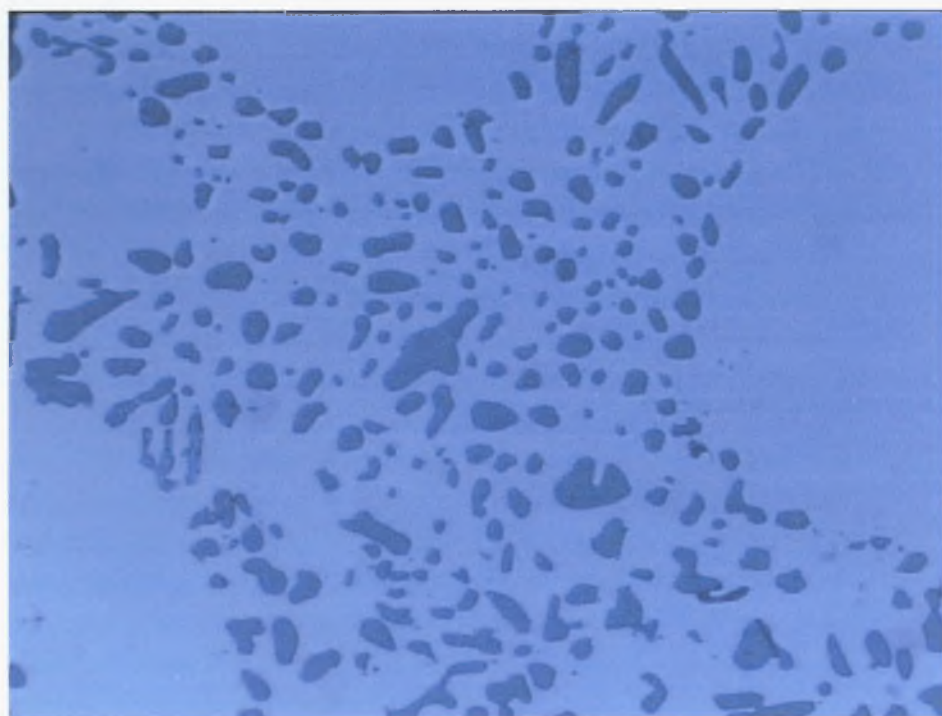
10ml HCl

60ml αιθανόλη

Η προσβολή των προς εξέταση δοκιμίων διάρκεσε 2 min.

Για την παρατήρηση των κραμάτων αλουμινίου δεν χρειάστηκε να γίνει χημική προσβολή, αφού η επιφάνειά τους έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεταλλογραφικής ανάλυσης για κάθε κράμα χωριστά.

5.3.1 Κράματα Αλουμινίου

A1. AlSi7MgΕικόνα 5.3.1(α) Μικροδομή κράματος αλουμινίου **AlSi7Mg** [x50]Εικόνα 5.3.1(β) Μικροδομή κράματος αλουμινίου **AlSi7Mg** [x1000]

Στις παραπάνω φωτογραφίες φαίνεται η διασπορά του Πυριτίου (μαύρες περιοχές) στη μήτρα Αλουμινίου. Η στρογγυλοποίηση των κόκκων Si οφείλεται εκτός από την θερμική κατεργασία και στην προσθήκη Στροντίου (Sr) κατά την χύτευση. Η φάση Mg_2Si δεν φαίνεται λόγω του μικρού ποσοστού και της μεγάλης διασποράς της.

A2. AlSi10Mg



Εικόνα 5.3.2(α) Μικροδομή κράματος αλουμινίου **AlSi10Mg** [x50]



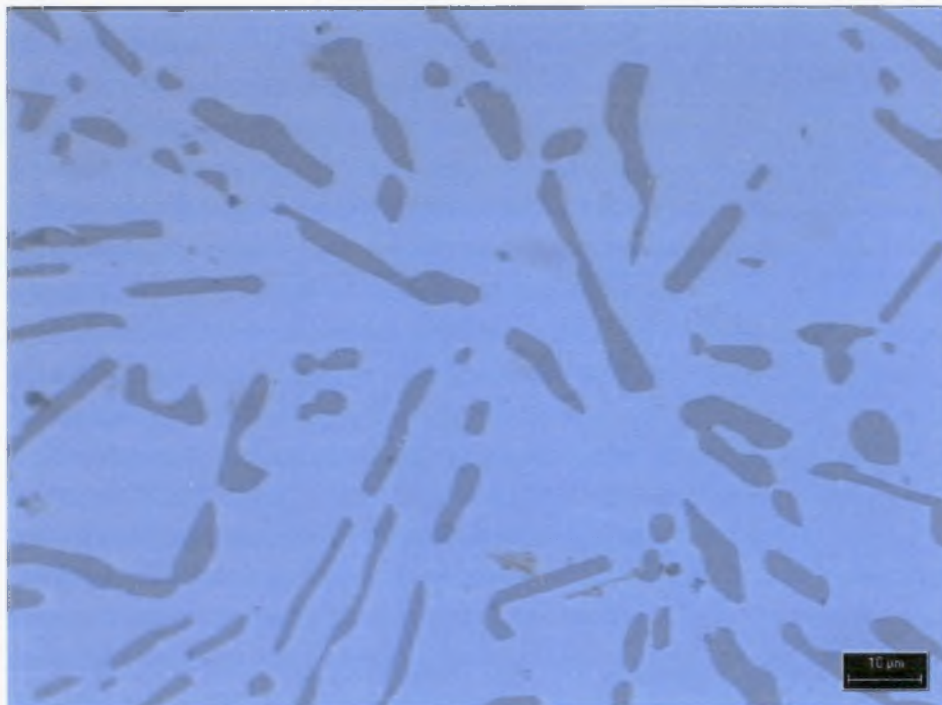
Εικόνα 5.3.2(β) Μικροδομή κράματος αλουμινίου **AlSi10Mg** [x1000]

Όπως και στο προηγούμενο κράμα παρατηρούμε την διασπορά του Πυριτίου (μαύρες περιοχές) στη μήτρα Αλουμινίου. Η φάση Mg_2Si δεν φαίνεται για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

A3. AlSi12



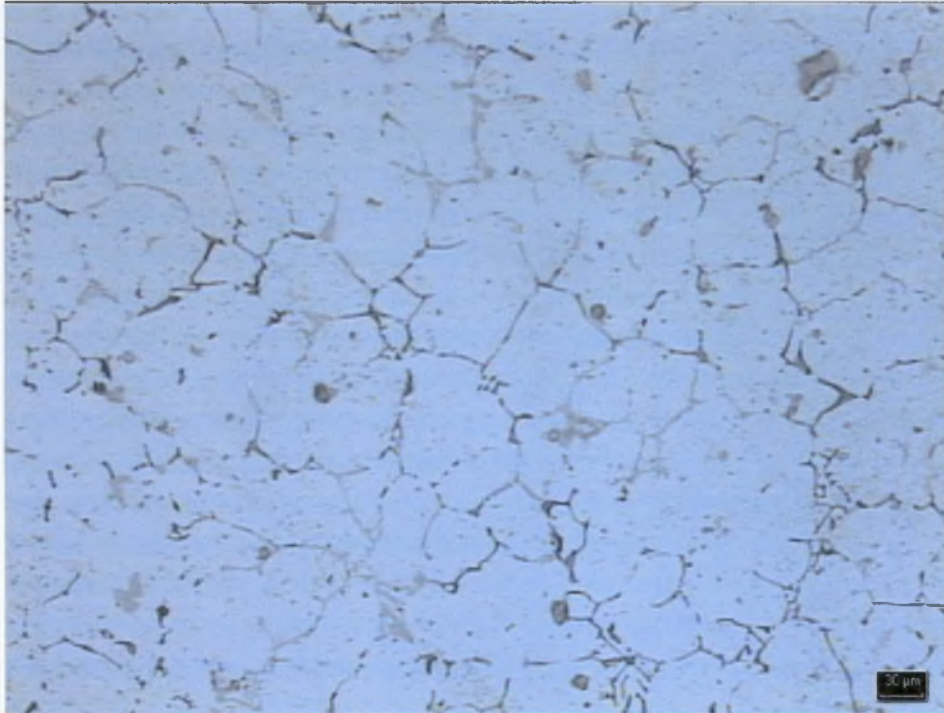
Εικόνα 5.3.3(α) Μικροδομή κράματος αλουμινίου **AlSi12** [x50]



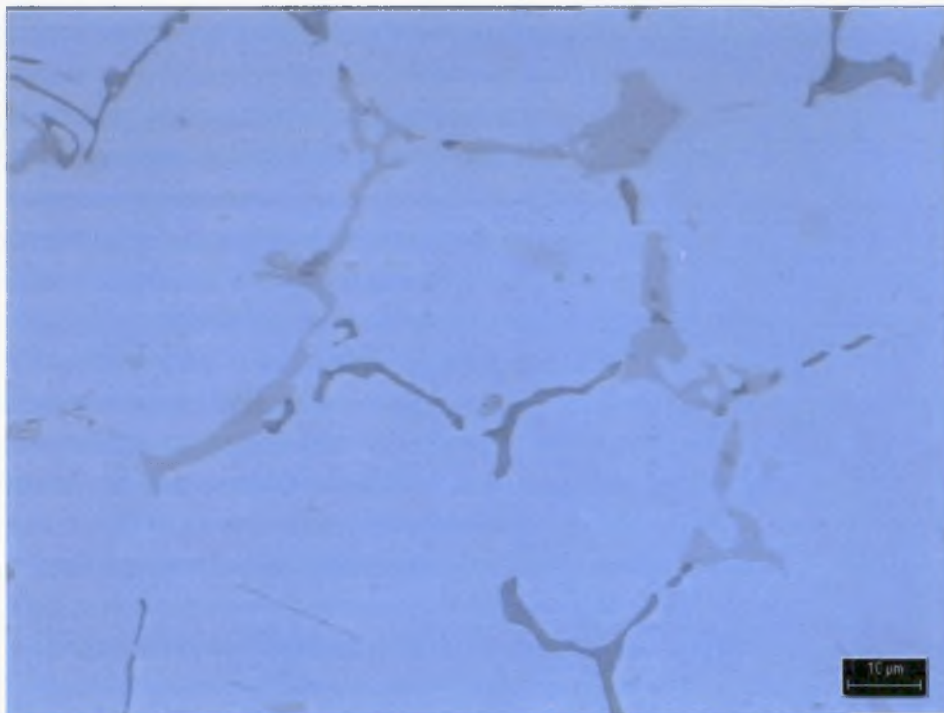
Εικόνα 5.3.3(β) Μικροδομή κράματος αλουμινίου **AlSi12** [x1000]

Η δομή του συγκεκριμένου κράματος περιέχει την ευθικτική δομή του Πυριτίου (μαύρες περιοχές) στη μήτρα Αλουμινίου.

A4. AlMg3



Εικόνα 5.3.4(α) Μικροδομή κράματος αλουμινίου **AlMg3** [x200]



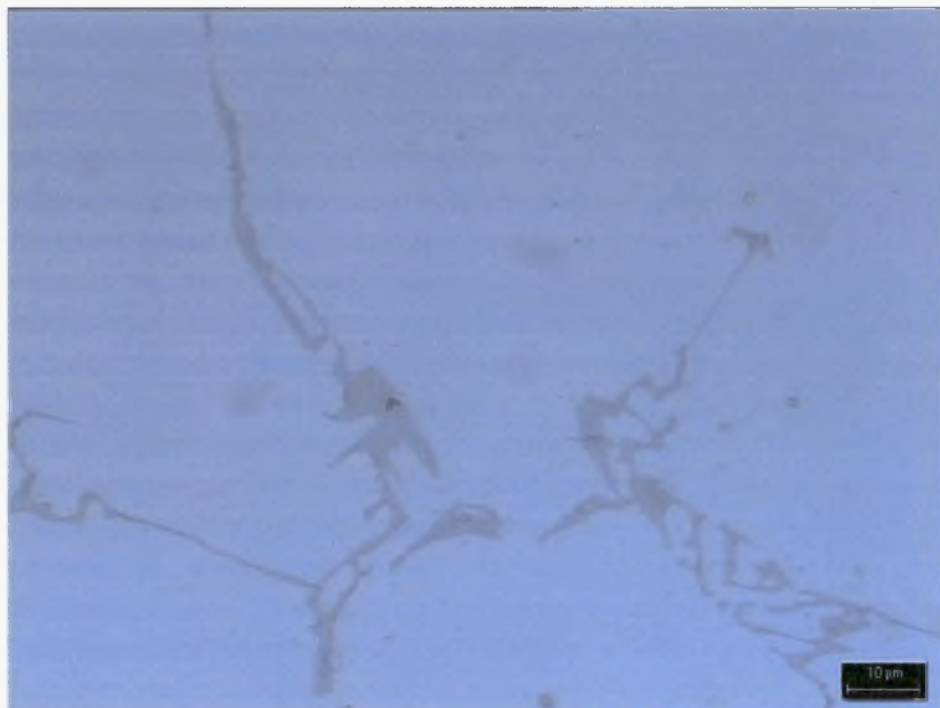
Εικόνα 5.3.4(β) Μικροδομή κράματος αλουμινίου **AlMg3** [x1000]

Η δομή αποτελείται από ένα δενδριτικό δίκτυο της φάσης Mg_2Al_3 (γκρι περιοχές) σε μήτρα αλουμινίου.

A5. AlCu4Ti



Εικόνα 5.3.5(α) Μικροδομή κράματος αλουμινίου **AlCu4Ti** [x200]

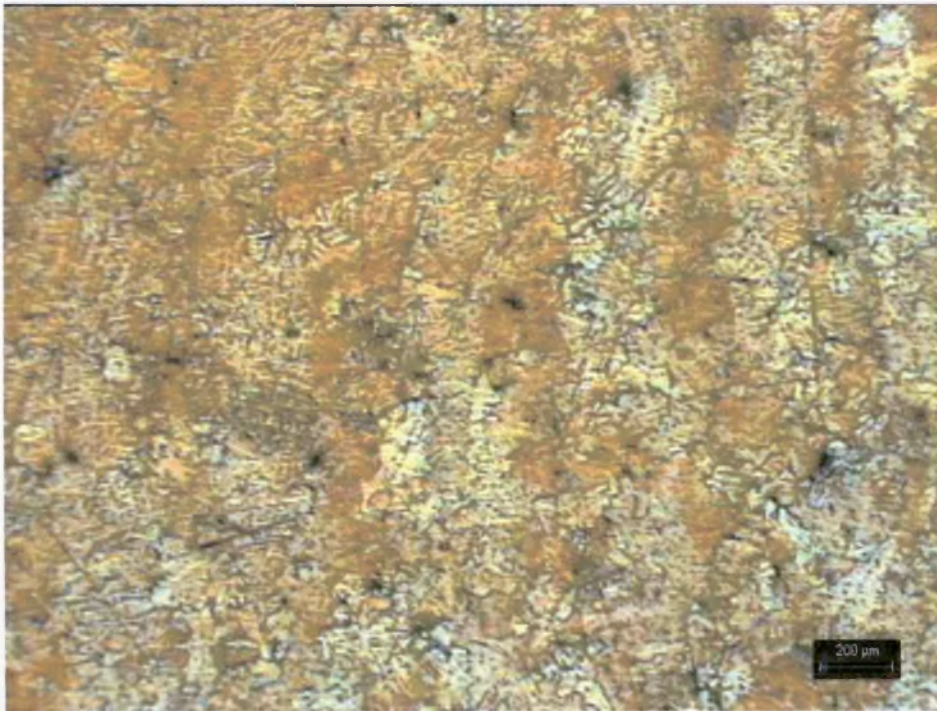


Εικόνα 5.3.5(β) Μικροδομή κράματος αλουμινίου **AlCu4Ti** [x1000]

Η δομή του κράματος αποτελείται από τη φάση Al_2Cu (σκούρες περιοχές) σε μήτρα Αλουμινίου.

5.3.2 Κράματα Χαλκού

C1. CuSn7ZnPb



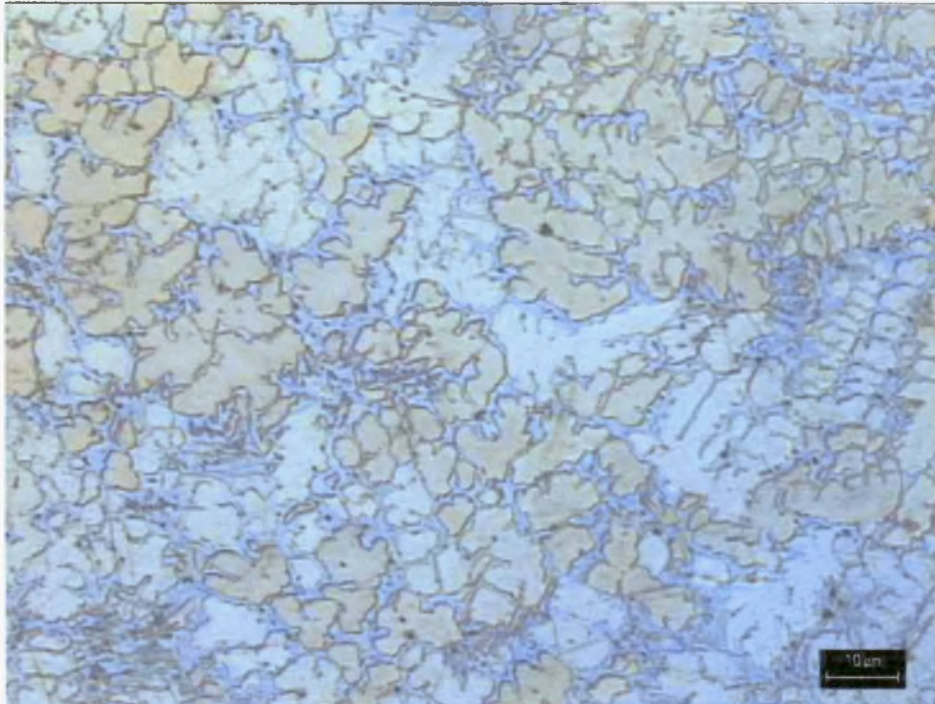
Εικόνα 5.3.6(α) Μικροδομή κράματος αλουμινίου **CuSn7ZnPb** [x50]



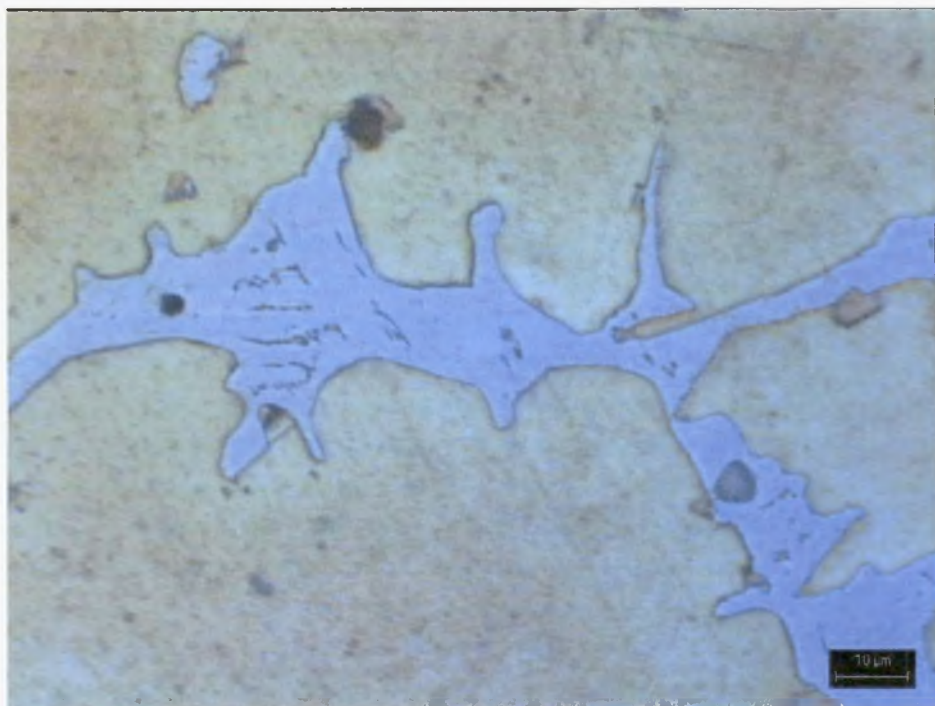
Εικόνα 5.3.6(β) Μικροδομή κράματος χαλκού **CuSn7ZnPb** [x500]

Σύμφωνα με τις παραπάνω φωτογραφίες και την θερμοδυναμική ανάλυση που προηγήθηκε οι καφέ περιοχές είναι η φάση FCC (Cu+Sn) ενώ οι μολυβί περιοχές είναι η φάση HCP (Pb+Cu).

C2. CuSn12Ni



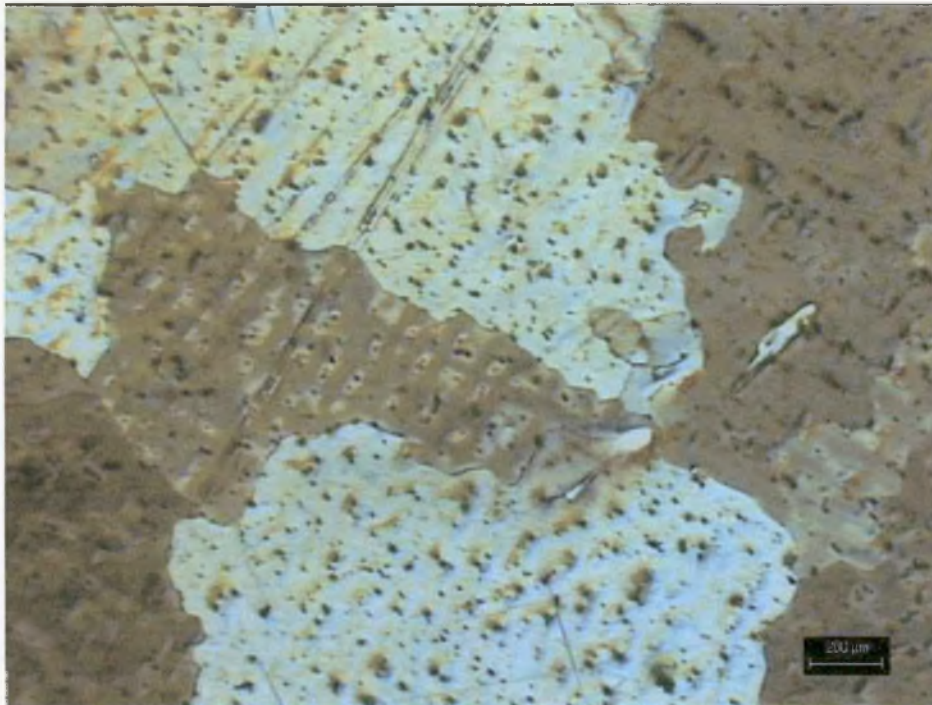
Εικόνα 5.3.7(α) Μικροδομή κράματος χαλκού **CuSn12Ni** [x100]



Εικόνα 5.3.7(β) Μικροδομή κράματος χαλκού **CuSn12Ni** [x1000]

Η δομή του παραπάνω κράματος αποτελείται από τη φάση του Cu (άσπρες και καφέ περιοχές) και τη φάση του Sn (μπλε περιοχές)

C3. CuZn33Pb



Εικόνα 5.3.8(α) Μικροδομή κράματος χαλκού **CuZn33Pb** [x50]



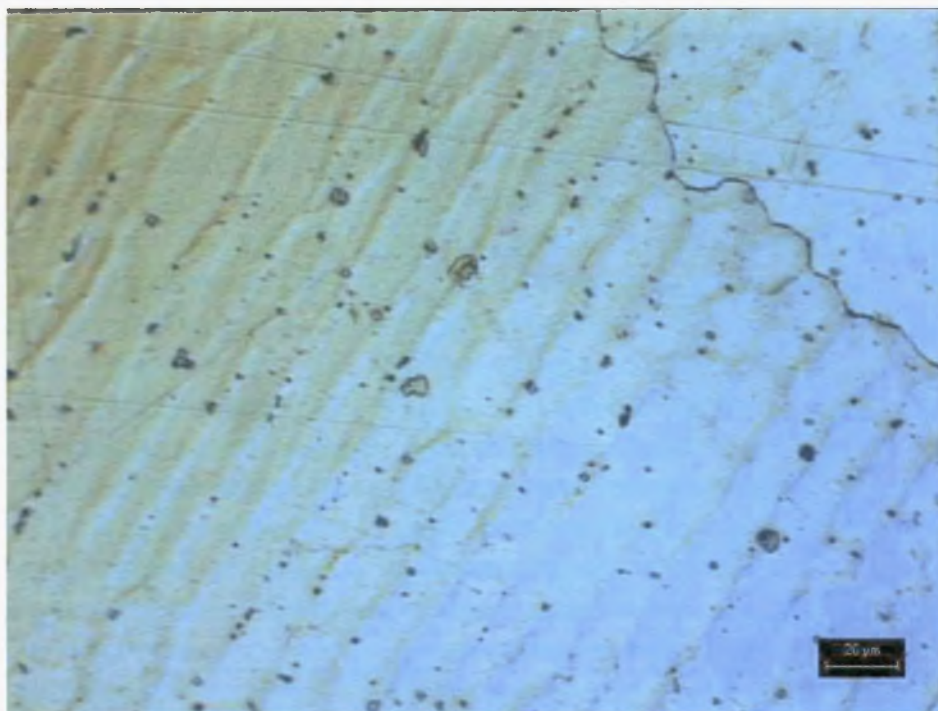
Εικόνα 5.3.8(β) Μικροδομή κράματος χαλκού **CuZn33Pb** [x200]

Σύμφωνα με τη θερμοδυναμική ανάλυση (Thermo-Calc) η δομή του παραπάνω κράματος αποτελείται από τις φάσεις Cu(FCC) και Cu(BCC) (άσπρες και καφέ περιοχές) και από τη φάση Pb(HCP) (στιγμάτα).

C4. CuAl9Ni



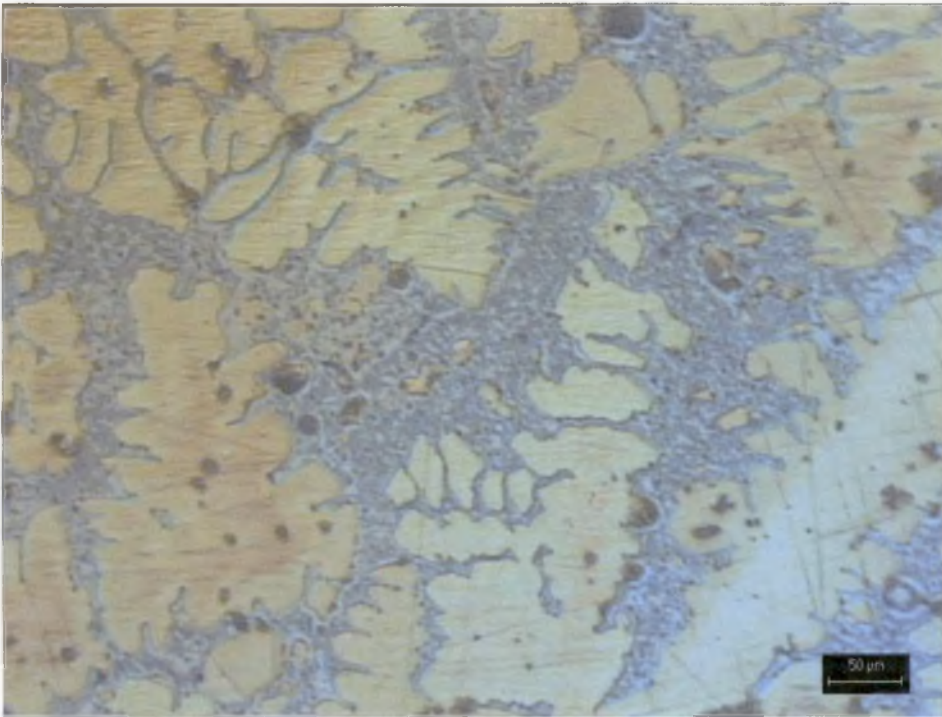
Εικόνα 5.3.9(α) Μικροδομή κράματος χαλκού **CuAl9Ni** [x50]



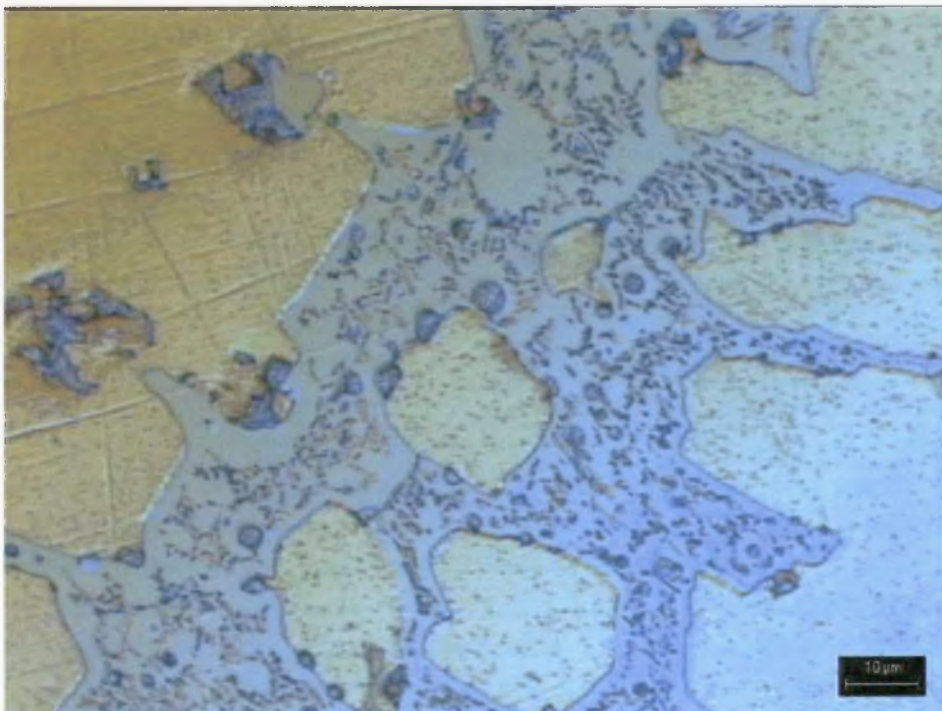
Εικόνα 5.3.9(β) Μικροδομή κράματος χαλκού **CuAl9Ni** [x500]

Η δομή του συγκεκριμένου κράματος αποτελείται από τη φάση Cu(FCC) (μπλε μήτρα) και από τη φάση GAMMA (κυματώσεις).

C5. CuPb5Sn



Εικόνα 5.3.10(α) Μικροδομή κράματος χαλκού **CuPb5Sn** [x200]



Εικόνα 5.3.10(β) Μικροδομή κράματος χαλκού **CuPb5Sn** [x1000]

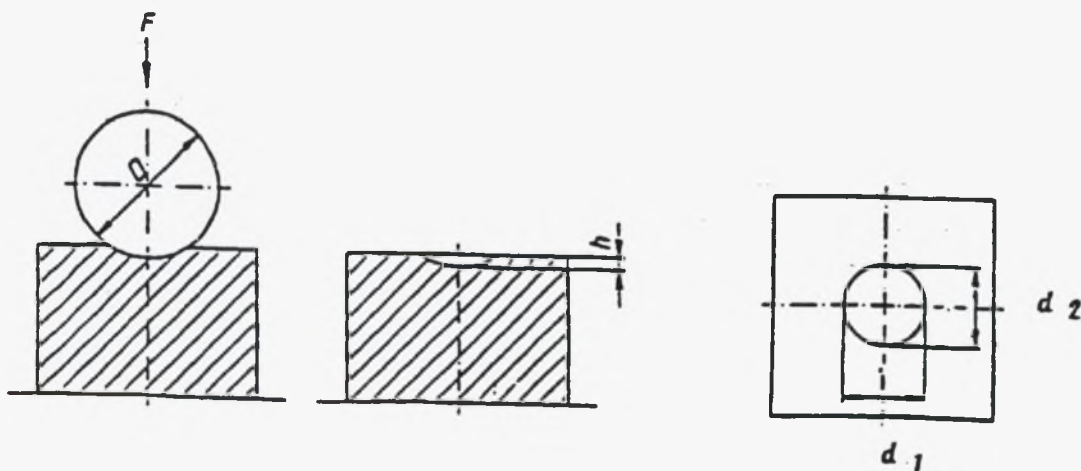
Η δομή του κράματος αποτελείται από τη φάση FCC(Cu+Sn) (καφέ δενδρίτες) και από τη φάση HCP(Cu+Pb+Sn) (μπλε με στίγματα περιοχές).

5.4 Έλεγχος Μηχανικών Ιδιοτήτων

Στο κεφάλαιο αυτό παραθέτουμε τα αποτελέσματα από τις δοκιμές σκληρομέτρησης και εφελκυσμού που διενεργήθηκαν για τα κράματα Αλουμινίου και Χαλκού.

5.4.1 Έλεγχος Σκληρότητας

Η μέτρηση της σκληρότητας των δοκιμίων Αλουμινίου και Χαλκού, έγινε με την μέθοδο Brinell στο εργαστήριο μηχανικών δοκιμών της EBETAM. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, ασκείται μια δύναμη F μέσω ενός διεισδυτή (σφαίρα από χάλυβα ή σκληρομέταλλο διαμέτρου D) στην επιφάνεια του δοκιμίου, και μετράται η διάμετρος του αποτυπώματος d . Η σκληρότητα είναι ανάλογη του πηλίκου που επιτυγχάνεται διαιρώντας την εφαρμοζόμενη δύναμη με την καμπύλη επιφάνεια του αποτυπώματος, η οποία θεωρείται ότι είναι σφαιρική.



Σχήμα 5.1 Αρχές της δοκιμής σκληρομέτρησης.

Επομένως

$$\begin{aligned} \text{Σκληρότητα Brinell} &= \text{Σταθερά} \times \frac{\text{Εφαρμ. Δύναμη}}{\text{Επιφ. Αποτυπώματος}} \\ &= 0.102 \times \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \end{aligned}$$

όπου:

D διάμετρος σφαίρας σε mm

F εφαρμοζόμενη δύναμη σε Nt

d μέση διάμετρος αποτυπώματος σε mm ($d = \frac{d_1 + d_2}{2}$)

h βάθος αποτυπώματος σε mm

$$\text{Σταθερά} = \frac{1}{g} = \frac{1}{9.806} = 0.102$$

Για τη σωστή εκτέλεση των μετρήσεων πρέπει η επιφάνεια του δοκιμίου να μην είναι οξειδωμένη, να μην έχει ξένα σώματα και ιδιαίτερα λιπαντικά. Ακόμη θα πρέπει

- η επιφάνεια να είναι κάθετη προς το φορτίο και να έχει λιανθεί καλά
- το φορτίο να επιβάλλεται ομαλά κατά συνεχή τρόπο και χωρίς κρούσεις
- το πάχος του δοκιμίου να είναι τουλάχιστον 8 φορές μεγαλύτερο από το βάθος του αποτυπώματος
- η απόσταση του κέντρου του αποτυπώματος από την άκρη του δοκιμίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 2.5-3 φορές η μέση διάμετρος του αποτυπώματος
- η απόσταση του κέντρου δύο αποτυπωμάτων πρέπει να είναι τουλάχιστον 4-6 φορές η μέση διάμετρος του αποτυπώματος
- ο χρόνος εφαρμογής του φορτίου πρέπει να είναι 2-8 sec
- και ο χρόνος διατήρησης του φορτίου 10-15 sec.

Η εφαρμοζόμενη δύναμη επιλέγεται έτσι ώστε η διάμετρος d του αποτυπώματος να κυμαίνεται μεταξύ 0.24D και 0.6D. Ο βαθμός φόρτισης ($0.102F/D^2$) επιλέγεται σύμφωνα με το υλικό, όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Υλικό	Σκληρότητα Brinell	0.102 F/D ²
Χαλκός Κράματα Χαλκού	<35	5
	35-200	10
	>200	30
Ελαφρά μέταλλα Και τα κράματά τους	<35	2.5
	35-80	5
		10
		15
	>80	10
		15

Πίνακας 5.4.1 Πίνακας επιλογής βαθμού φόρτισης.

Τέλος η επιλογή της μεθόδου γίνεται από τον πίνακα που ακολουθεί λαμβάνοντας υπόψη τις προηγούμενες παρατηρήσεις.

Σύμβολο Μεθόδου Σκληρομέτρησης	Διάμετρος σφαίρας D mm	Λόγος 0.102 F/D ²	Επιβαλλόμενη Δύναμη F
HBS(HBW) 10/3 000	10	30	29.42 kN
HBS(HBW) 10/1 000	10	15	14.71 kN
HBS(HBW) 10/1 000	10	10	9.807 kN
HBS(HBW) 10/ 500	10	5	4.903 kN
HBS(HBW) 10/ 250	10	1.5	2.452 kN
HBS(HBW) 10/ 100	10	1	980.7 N
HBS(HBW) 5/750	5	30	7.355 kN
HBS(HBW) 5/250	5	10	2.452 kN
HBS(HBW) 5/125	5	5	1.226 kN
HBS(HBW) 5/62.5	5	2.5	612.9 N
HBS(HBW) 5/25	5	1	245.2 N

HBS(HBW) 2.5/187.5	2.5	30	1.839 kN
HBS(HBW) 2.5/62.5	2.5	10	612.9 N
HBS(HBW) 2.5/31.25	2.5	5	306.5 N
HBS(HBW) 2.5/15.625	2.5	2.5	153.2 N
HBS(HBW) 2.5/6.25	2.5	1	61.29 N
HBS(HBW) 2/120	2	30	1.177 kN
HBS(HBW) 2/40	2	10	392.3 N
HBS(HBW) 2/20	2	5	196.1 N
HBS(HBW) 2/10	2	2.5	98.07 N
HBS(HBW) 2/4	2	1	39.23 N
HBS(HBW) 1/30	1	30	294.2 N
HBS(HBW) 1/10	1	10	98.07 N
HBS(HBW) 1/5	1	5	49.03 N
HBS(HBW) 1/2.5	1	2.5	24.52 N
HBS(HBW) 1/1	1	1	9.807 N

Πίνακας 5.4.2 Επιλογή μεθόδου σκληρομέτρησης.

Με βάση όλα όσα προαναφέρθηκαν, για την σκληρομέτρηση των κραμάτων Αλουμινίου και Χαλκού χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος HBS 2.5/31.25 με:

- διάμετρο σφαίρας 2.5mm,
- λόγο $0.102 F/D^2=5$
- εφαρμοζόμενη δύναμη 306.5 Nt
- χρόνο διείσδυσης 6 sec
- χρόνο εφαρμογής φορτίου 13 sec

Τα αποτελέσματα για κάθε κράμα χωριστά, παρατίθενται στην συνέχεια.

5.4.1.1 Κράματα αλουμινίου.

A1. AlSi7Mg

Περιγραφή Δοκιμίου	Αποτελέσματα Σκληρομέτρησης			Μέση Τιμή
As-Cast	49.8	50.1	52.8	50.9
διαλυτοποίηση-βαφή	63.9	68.3	68.1	66.76
Θερμική κατεργασία 1	100	98.1	103	100.36
Θερμική κατεργασία 2	102	96.6	98.5	99.03
Θερμική κατεργασία 3	95.9	98.1	97.9	97.3
Θερμική κατεργασία 4	97	99.5	96.3	97.63

Πίνακας 5.4.3 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος **AlSi7Mg**.

Σκληρότητα κράματος κατά DIN 1725 → 75 - 110

A2. AlSi10Mg

Περιγραφή Δοκιμίου	Αποτελέσματα Σκληρομέτρησης			Μέση Τιμή
As-Cast	70.5	70.5	74.3	71.76
Θερμικά κατεργασμένο	120	121	113	118

Πίνακας 5.4.4 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος **AlSi10Mg**.

Σκληρότητα κράματος κατά DIN 1725 → 80 - 110

A3. AlSi12(Cu)

Περιγραφή Δοκιμίου	Αποτελέσματα Σκληρομέτρησης			Μέση Τιμή
As-Cast	81.4	78.4	80.7	80.16
Θερμικά κατεργασμένο	113	115	101	110

Πίνακας 5.4.5 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος **AlSi12**.

Σκληρότητα κράματος κατά DIN 1725 → 50-65

A4. AlMg3

Περιγραφή Δοκιμίου	Αποτελέσματα Σκληρομέτρησης			Μέση Τιμή
As-Cast	61.8	61.2	63.1	62.03

Πίνακας 5.4.6 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος **AlMg3**.

Σκληρότητα κράματος κατά DIN 1725 → 50 - 60

A5. AlCu4Ti

Περιγραφή Δοκιμίου	Αποτελέσματα Σκληρομέτρησης			Μέση Τιμή
As-Cast	69.8	68.2	72.8	70.26
Θερμικά κατεργασμένο	104	109	110	107.6

Πίνακας 5.4.7 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος **AlCu4Ti**.

Σκληρότητα κράματος κατά DIN 1725 → 95 - 110

5.4.1.2 Κράματα Χαλκού**C1. CuSn7ZnPb**

Περιγραφή Δοκιμίου	Αποτελέσματα Σκληρομέτρησης			Μέση Τιμή
As-Cast	58	64.8	61.4	61.4

Πίνακας 5.4.8 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος **CuSn7ZnPb**.

Σκληρότητα κράματος κατά DIN 1705 → min 65

C2. CuSn12Ni

Περιγραφή Δοκιμίου	Αποτελέσματα Σκληρομέτρησης			Μέση Τιμή
As-Cast	86.8	91.9	88.5	89.06

Πίνακας 5.4.9 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος **CuSn12Ni**.

Σκληρότητα κράματος κατά DIN 1705 → min 90

C3. CuZn33Pb

Περιγραφή Δοκιμίου	Αποτελέσματα Σκληρομέτρησης			Μέση Τιμή
As-Cast	42.2	42.8	41.8	42.26

Πίνακας 5.4.10 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος **CuZn33Pb**.

Σκληρότητα κράματος κατά DIN 1709 → min 45

C4. CuAl9Ni

Περιγραφή Δοκιμίου	Αποτελέσματα Σκληρομέτρησης			Μέση Τιμή
As-Cast	121	130	136	129

Πίνακας 5.4.11 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος **CuAl9Ni**.

Σκληρότητα κράματος κατά DIN 1714 → min 110

C5. CuPb5Sn

Περιγραφή Δοκιμίου	Αποτελέσματα Σκληρομέτρησης			Μέση Τιμή
As-Cast	88.7	91.8	88	89.5

Πίνακας 5.4.12 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κράματος **CuPb5Sn**.

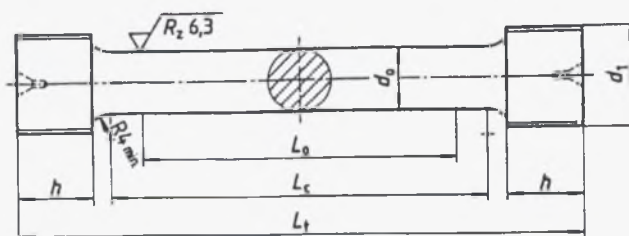
Σκληρότητα κράματος κατά DIN 1716 → min 70

5.4.2 Έλεγχος αντοχής εφελκυσμού

Οι δοκιμές εφελκυσμού των κραμάτων Αλουμινίου και Χαλκού πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Μηχανικών Δοκιμών της EBETAM. Τα δοκίμια εφελκυσμού διαμορφώθηκαν από τις θερμικά κατεργασμένες ράβδους σύμφωνα με την προδιαγραφή DIN 50125. Το πρότυπο αυτό,

- α) καθορίζει το σχήμα και τις διαστάσεις των δοκιμίων εφελκυσμού
- β) παρέχει πληροφορίες οι οποίες πρέπει να τηρούνται κατά την προετοιμασία των δοκιμίων.

Στην συνέχεια δίνονται πληροφορίες σχετικά με το σχήμα τις διαστάσεις και τις ανοχές του τύπου B δοκιμίου εφελκυσμού, το οποίο και χρησιμοποιήθηκαν.



- d_0 : διάμετρος δοκιμίου
 d_1 : μετρικό σπειρώμα κατά ISO
 h : μήκος σπειρώματος
 L_0 : μήκος αναφοράς δοκιμίου ($= 5 d_0$)
 L_c : ανάλογο μήκος ($\geq L_0 + d_0$)
 L_t : ολικό μήκος

d_0	L_0	d_1	h min.	L_c min.	L_t min.
3	15	M 5	5	18	32
4	20	M 6	6	24	40
5	25	M 8	7	30	50
6	30	M 10	8	36	60
8	40	M 12	10	48	75
10	50	M 16	12	60	90
12	60	M 18	15	72	110
14	70	M 20	17	84	125
16	80	M 24	20	96	145
18	90	M 27	22	108	160
20	100	M 30	24	120	175
25	125	M 33	30	150	220

Πίνακας 5.4.13 Διαστάσεις δοκιμίων εφελκυσμού τύπου B

Τύπος Δοκιμίου	Εγκάρσια διάσταση	Ανοχή
B	$d_0 \leq 6$	0.03
	$6 < d_0 \leq 18$	0.04
	$d_0 > 18$	0.05

Πίνακας 5.4.14 Ανοχές εγκάρσιων διαστάσεων δοκιμίων εφελκυσμού

Οι διαστάσεις των δοκιμών που χρησιμοποιήσαμε φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

d_0	L_0	d_1	h min	L_c min	L_t min
12	60	M18	15	72	110

Πίνακας 5.4.15 Διαστάσεις δοκιμών εφελκυσμού.

Στη συνέχεια παραθέτουμε τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού για κάθε κράμα Αλουμινίου και Χαλκού.

5.4.2.1 Κράματα Αλουμινίου

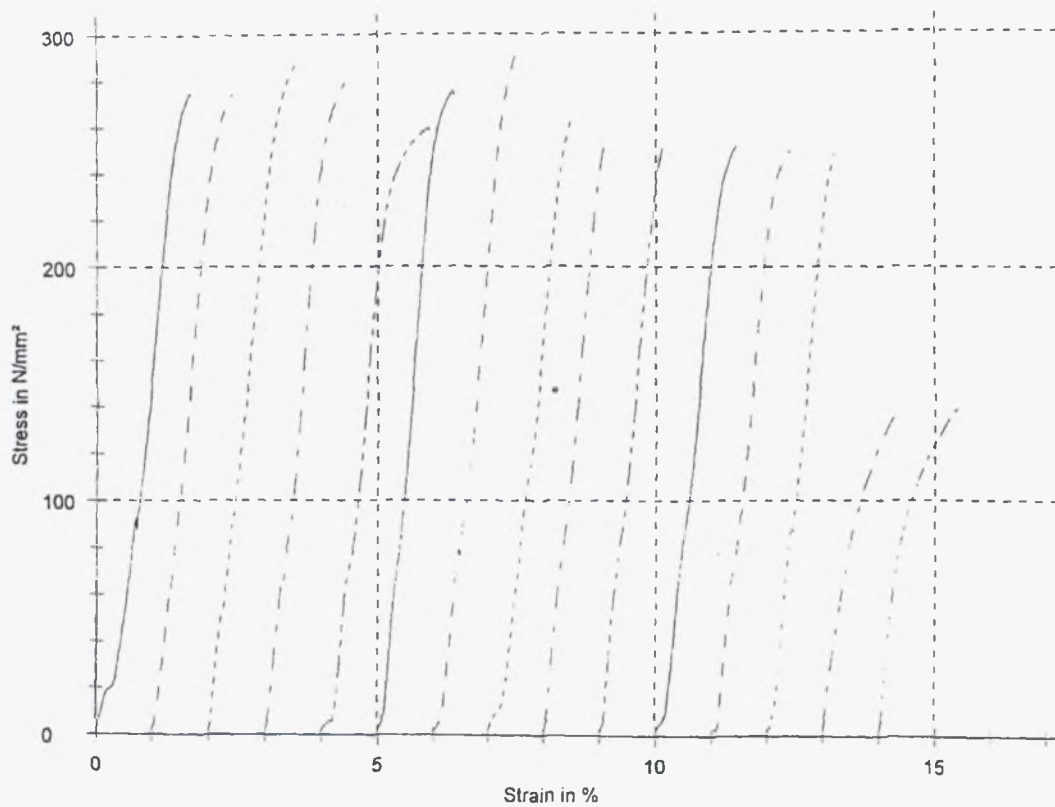
A1. AlSi7Mg

Περιγραφή δοκιμίου	Αριθμός δοκιμίου	Πάχος mm	L_0 mm	L_1 mm	$\epsilon\%$	Μέση Τιμή $\epsilon\%$	R_m MPa	Μέση Τιμή R_m
Θερμική κατεργ. 1	1	12	60	60.8	1.3	1.8	275	279.2
	2	12	60	60.8	1.3		275	
	3	12	60	60.7	1.1		287	
	4	12	60	62.1	3.5		280	
Θερμική κατεργ. 2	5	12	60	62.2	3.6	2.31	259	274.2
	6	12	60	60.8	1.3		275	
	7	12	60	61.0	1.6		291	
	8	12	60	61.7	2.75		272	
Θερμική κατεργ. 3	9	12	60	61.4	2.3	1.46	264	257
	10	12	60	60.3	0.5		254	
	11	12	60	61.0	1.6		253	
Θερμική κατεργ. 4	12	12	60	61.3	2.1	1.5	251	249.3
	13	12	60	61.0	1.6		249	
	14	12	60	60.5	0.8		248	
As-Cast	15	12	60	62.0	3.3	2.4	139	139
	16	12	60	60.9	1.5		139	

Πίνακας 5.4.16 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος **AlSi7Mg**.

Προδιαγραφή DIN 1725

- $R_m \rightarrow 230-310 \text{ MPa}$
- $\epsilon\% \rightarrow 2-5$



Σχήμα 5.2 Διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης κράματος **AlSi7Mg**.

A2. AlSi10Mg

Κωδικός δοκιμίου	R_m Mpa	Μέση Τιμή R_m	$\epsilon\%$	Μέση Τιμή $\epsilon\%$
1	250	262.83	0.8	1.56
2	258		2.0	
3	287		1.8	
5	256		1.2	
6	287		1.8	
6A	239		1.8	

Πίνακας 5.4.17 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος **AlSi10Mg**.

Προδιαγραφή DIN 1725

- $R_m \rightarrow 220-320 \text{ MPa}$
- $\varepsilon\% \rightarrow 1-4 \%$

A3. AlSi12

Κωδικός δοκιμίου	R_m MPa	Μέση Τιμή R_m	$\varepsilon\%$	Μέση Τιμή $\varepsilon\%$
21	187	186.3	1.6	1.26
22	187		0.6	
23	185		1.6	

Πίνακας 5.4.18 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος **AlSi12**.

Προδιαγραφή DIN 1725

- $R_m \rightarrow 150-210 \text{ MPa}$
- $\varepsilon\% \rightarrow 1-4 \%$

A4. AlMg3

Κωδικός δοκιμίου	R_m MPa	Μέση Τιμή R_m	$\varepsilon\%$	Μέση Τιμή $\varepsilon\%$
8	139	137	1.2	1.6
28	135		2	
43	72		1.4	

Πίνακας 5.4.19 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος **AlMg3**.

Προδιαγραφή DIN 1725

- $R_m \rightarrow 140-190 \text{ MPa}$
- $\varepsilon\% \rightarrow 3-8 \%$

A5. AlCu4Ti

Κωδικός δοκιμίου	R_m MPa	Μέση Τιμή R_m	$\varepsilon\%$	Μέση Τιμή $\varepsilon\%$
17	205	159	1.0	1.13
18	157		1.0	
19	115		1.4	

Πίνακας 5.4.20 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος **AlCu4Ti**.

Προδιαγραφή DIN 1725

- $R_m \rightarrow 300-380 \text{ MPa}$
- $\epsilon\% \rightarrow 3-8 \%$

5.4.2.2 Κράματα Χαλκού

C1. CuSn7ZnPb

Κωδικός δοκιμίου	R_m MPa	Μέση Τιμή R_m	$\epsilon\%$	Μέση Τιμή $\epsilon\%$
4	75	77.66	2.0	2.5
7	83		3.0	
12	58		-	

Πίνακας 5.4.21 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος **CuSn7ZnPb**.

Προδιαγραφή DIN 1705

- $R_m \rightarrow 240 \text{ MPa}$
- $\epsilon\% \rightarrow 15 \%$

C2. CuSn12Ni

Κωδικός δοκιμίου	R_m MPa	Μέση Τιμή R_m	$\epsilon\%$	Μέση Τιμή $\epsilon\%$
6	92	95	4.0	4.0
11	97		4.0	
13	91		-	

Πίνακας 5.4.22 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος **CuSn12Ni**.

Προδιαγραφή DIN 1705

- $R_m \rightarrow 280 \text{ MPa}$
- $\epsilon\% \rightarrow 14 \%$

C3. CuZn33Pb

Κωδικός δοκιμίου	R _m MPa	Μέση Τιμή R _m	ε%	Μέση Τιμή ε%
1	37	48.33	-	2.65
3	53		1.5	
10	55		3.8	

Πίνακας 5.4.23 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος **CuZn33Pb**.

Προδιαγραφή DIN 1709

- R_m → 180 MPa
- ε% → 12 %

C4. CuAl9Ni

Κωδικός δοκιμίου	R _m Mpa	Μέση Τιμή R _m	ε%	Μέση Τιμή ε%
2	114	211.5	3.8	6.13
9	160		9.2	
14	149		5.4	

Πίνακας 5.4.24 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος **CuAl9Ni**.

Προδιαγραφή DIN 1714

- R_m → 500 MPa
- ε% → 20 %

C5. CuPb5Sn

Κωδικός δοκιμίου	R _m MPa	Μέση Τιμή R _m	ε%	Μέση Τιμή ε%
5	86	77	-	-
8	68		-	
-	-		-	

Πίνακας 5.4.25 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κράματος **CuAl9Ni**.

Προδιαγραφή DIN 1716

- R_m → 240 MPa
- ε% → 15 %

5.5 Μη καταστρεπτικές δοκιμές δοκιμών και αντικειμένων.

Οι μη καταστρεπτικές δοκιμές στα δοκίμια και τα αντικείμενα των κραμάτων αλουμινίου και χαλκού πραγματοποιήθηκαν στα εργαστήρια της EBETAM. Οι παράμετροι των δοκιμών καθώς και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα κεφάλαια που ακολουθούν.

5.5.1 Ραδιογραφικός έλεγχος δοκιμών.

Παράμετροι ελέγχου:

- Συσκευή ακτινοβολίας: X RAY
- Μέγιστη ισχύς: 225 KV
- Απόσταση πηγής-αντικειμένου: 700 mm
- Τύπος φιλμ: AGFA D7
- Ενισχυτικά φύλλα: 0.020
- Συνολικός χρόνος εμφάνισης φιλμ: 15 min
- Διαστάσεις πηγής: 2.3 x 2.3

Δοκίμια Αλουμινίου

Κράμα	Αριθμός Δοκιμίου	Περιγραφή Δοκιμίου	Παραδεκτό	Μη Παραδεκτό
A'Si10Mg	1	1 ^η χύτευση	X	
	2		X	
	3		X	
	5	2 ^η χύτευση	X	
	6		X	
	AlMg3	7	1 ^η χύτευση	X
8		X		
28		X		
30		X		
10		2 ^η χύτευση	X	
11			X	
12			X	

AlSi12	21	1 ^η χύτευση	X	
	22		X	
	23		X	
AlCu4Ti	14	1 ^η χύτευση	X	
	16		X	
	17	2 ^η χύτευση	X	
	18		X	
	19		X	

Πίνακας 5.4.26 Αποτελέσματα ραδιογραφικού ελέγχου δοκιμίων αλουμινίου.

Δοκίμια Χαλκού

Κράμα	Αριθμός Δοκιμίου	Περιγραφή Ελαττωμάτων	Παραδεκτό	Μη Παραδεκτό
CuSn7ZnPb	4	-	X	
	7	-	X	
	12	-	X	
CuSn12Ni	6	Συστολές	X	
	11	-	X	
	13	-	X	
CuZn33Pb	1	Συστολές	X	
	3	-	X	
	10	Συστολές	X	
CuAl9Ni	2	-	X	
	9	-	X	
	14	-	X	
CuPb5Sn	5	-	X	
	8	-	X	

Πίνακας 5.4.27 Αποτελέσματα ραδιογραφικού ελέγχου δοκιμίων χαλκού.

Αντικείμενα Αλουμινίου

Περιγραφή Αντικειμένου	Περιγραφή Ελαττωμάτων	Παραδεκτό	Μη Παραδεκτό
Τάπα	--	X	
Σφικτήρας 1	Συστολή	X	
Σφικτήρας 2	Συστολή	X	
Καβαλέτο 1	Συστολές	X	
Καβαλέτο 2	Συστολές	X	
Δίχαλο 1	--	X	
Δίχαλο 2	--	X	

Πίνακας 5.4.28 Αποτελέσματα ραδιογραφικού ελέγχου αντικειμένων αλουμινίου.

5.5.2 Έλεγχος αντικειμένων με διεισδυτικά υγρά

Παράμετροι ελέγχου:

- Τύπος υγρών: CGM RED WR 271
- Χρόνος διείσδυσης: 15m¹
- Επιφάνεια: Καθαρισμένη
- Μέθοδος καθαριστικού: Νερό
- Χρόνος καθαρισμού: 5 min
- Τύπος εμφανιστηρίου: CGM R2-82
- Χρόνος εμφανιστικού: 15 min
- θερμοκρασία: 25⁰C

Αντικείμενα Αλουμινίου

Περιγραφή Αντικειμένου	Περιγραφή Ελαττωμάτων	Παραδεκτό	Μη Παραδεκτό
Καβαλέτο 1	--	X	
Τάπα 1	--	X	
Δίχαλο 1	--	X	
Βάση 1	--	X	
Σφικτήρας 1	--	X	
Βάση Κουζινέτου 1	Πόροι	X	
Βάση Ευκολίας 1	--	X	
Καβαλέτο 2	--	X	
Τάπα 2	--	X	
Δίχαλο 2	--	X	
Σφικτήρας 2	Πόροι	X	
Καβαλέτο 3	--	X	
Τάπα 3	--	X	
Τάπα 3/2	--	X	
Σφικτήρας 3	--	X	
Τάπα 4	--	X	
Τάπα 4/2	--	X	
Δίχαλο 4	--	X	
Δίχαλο 4/2	--	X	
Σφικτήρας 4	--	X	
Καβαλέτο 4	--	X	

Πίνακας 5.4.29 Αποτελέσματα ελέγχου αντικειμένων αλουμινίου με διεισδυτικά υγρά.

Αντικείμενα Χαλκού

Περιγραφή Αντικειμένου	Περιγραφή Ελαττωμάτων	Παραδεκτό	Μη Παραδεκτό
Τάπα 1	Πόροι	X	
Σφικτήρας 1	Πόροι	X	
Δίχαλο 1	Συστολές	X	
Καβαλέτο 1	Πόροι	X	
Τάπα 2	Πόροι	X	
Τάπα 2/2	Πόροι	X	
Σφικτήρας 2	Πόροι	X	
Σφικτήρας 2/2	Πόροι	X	
Καβαλέτο 2	Πόροι	X	
Καβαλέτο 2/2	Πόροι	X	
Δίχαλο 2	Πόροι	X	
Δίχαλο 2/2	Πόροι	X	
Δακτύλιος 2	Πόροι	X	
Τάπα 3	--	X	
Σφικτήρας 3	--	X	
Δίχαλο 3	Πόροι	X	
Περιγραφή Αντικειμένου	Περιγραφή Ελαττωμάτων	Παραδεκτό	Μη Παραδεκτό
Καβαλέτο 3	Πόροι	X	
Δακτύλιος 3	Συστολές	X	
Τάπα 4	--	X	
Δίχαλο 4	Cold Shut		X
Καβαλέτο 4	--	X	
Σφικτήρας 4	Συστολές	X	

Πίνακας 5.4.30 Αποτελέσματα ελέγχου αντικειμένων χαλκού με διεισδυτικά υγρά.

Κεφάλαιο 6: Συζήτηση αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό σχολιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε κράμα αλουμινίου και χαλκού. Ξεκινώντας από την θερμοδυναμική ανάλυση και καταλήγοντας στα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου παραθέτονται λεπτομερώς όλα τα στάδια της ανάλυσης κατά την παραγωγή ενός χυτού κράματος.

6.1 Κράματα αλουμινίου

A1. Κράμα αλουμινίου AlSi7Mg

Η θερμοδυναμική ανάλυση έδειξε ότι στο κράμα αυτό εμφανίζονται οι φάσεις του Πυριτίου (Si) και της ενδομεταλλικής ένωσης Mg_2Si μέσα στη μήτρα αλουμινίου. Ο μεταλλογραφικός έλεγχος δείχνει τους στρογγυλοποιημένους (από την θερμική κατεργασία και την προσθήκη Στροντίου (Sr)) κόκκους πυριτίου. Η φάση Mg_2Si δεν φαίνεται λόγω του μικρού ποσοστού και της μεγάλης διασποράς της, η οποία επιτυγχάνεται κατά την θερμική κατεργασία (διαλυτοποίηση - βαφή-γήρανση). Στη διασπορά αυτή του Mg_2Si οφείλεται και ο διπλασιασμός της σκληρότητας και της αντοχής του εφελκυσμού, μεταξύ των μη θερμικά κατεργασμένων και των θερμικά κατεργασμένων δοκιμίων (αποτελέσματα Κεφαλαίου 5).

Στο κράμα αυτό, όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 5.1, εφαρμόστηκαν 4 διαφορετικές θερμικές κατεργασίες με στόχο την εύρεση της βέλτιστης, συνδυάζοντας την Γερμανική και την Αμερικάνικη βιβλιογραφία με τις προτεινόμενες από την θερμοδυναμική ανάλυση θερμοκρασίες διαλυτοποίησης. Τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου ήταν πολύ καλά και για τις 4 κατηγορίες, γεγονός που οδήγησε στην επιλογή της θερμικής κατεργασίας που προκύπτει από τον συνδυασμό της Γερμανικής τυποποίησης με τις προτεινόμενες από το Thermo-Calc θερμοκρασίες διαλυτοποίησης. Η κατεργασία αυτή προτείνει μικρότερους χρόνους και χαμηλότερη κατά $30^\circ C$ θερμοκρασία διαλυτοποίησης, γεγονός που οδηγεί σε εξοικονόμηση χρόνου και ενέργειας σε μια παραγωγική διαδικασία.

Τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών είναι μέσα στα όρια των προδιαγραφών παρά το γεγονός ότι η χημική ανάλυση έδειξε τα ποσοστά του Mg

και Si έξω από αυτές, με το πρώτο να βρίσκεται αρκετά χαμηλότερα από την προτεινόμενη από την θερμοδυναμική ανάλυση τιμή. Επίσης η επιμήκυνση βρίσκεται στο κατώτερο όριο, γεγονός που πιθανών να οφείλεται σε εγκλείσματα (ίσως Al_2O_3) και μικροπόρους που δημιουργούνται κατά την χύτευση και δεν μπορούν να διαγνώσουν οι μη καταστρεπτικές δοκιμές παρά μόνο η μεταλλογραφική ανάλυση. Η μικρή επιμήκυνση ίσως οφείλεται και στο αυξημένο ποσοστό χαλκού και σιδήρου, όπου το πρώτο δυσχεραίνει την χυτευσιμότητα του υλικού και το δεύτερο δημιουργεί αδιάλυτες φάσεις όπως $FeAl_3$ και $\alpha AlFeSi$.

Τέλος οι μη καταστρεπτικές δοκιμές έδειξαν καλά αποτελέσματα για την συνοχή του υλικού. Τα δοκίμια και τα αντικείμενα που χυτεύτηκαν είχαν πολύ καλή ποιότητα επιφανείας και διαστατική ακρίβεια, χαρακτηριστικά της μεθόδου χύτευσης με Μάσκες.

A2. Κράμα αλουμινίου AlSi10Mg.

Στο κράμα αυτό όπως και στο προηγούμενο η θερμοδυναμική ανάλυση έδειξε ότι αποτελείται από την φάση του πυριτίου (Si) και την ενδομεταλλική ένωση Mg_2Si μέσα στη μήτρα του αλουμινίου. Η διασπορά του πυριτίου στη μήτρα αλουμινίου φαίνεται και στην μεταλλογραφική ανάλυση όπου για τους λόγους που αναφέρθηκαν και στο προηγούμενο κράμα, δεν φαίνεται η ενδομεταλλική ένωση Mg_2Si .

Η χημική ανάλυση έδειξε ότι τα κύρια κραματικά στοιχεία (Mg και Si) βρίσκονται μέσα στα όρια των προδιαγραφών με το Mg να πλησιάζει την προτεινόμενη από την θερμοδυναμική ανάλυση τιμή. Οι μηχανικές δοκιμές έδειξαν αυξημένη σκληρότητα (λίγο πάνω από το μέγιστο όριο των προδιαγραφών), αντοχή εφελκυσμού μέσα στα όρια των προδιαγραφών, με χαμηλή επιμήκυνση που πλησιάζει το κατώτερο όριό τους. Η αυξημένη σκληρότητα και η μικρή ολκιμότητα του κράματος πιθανών να οφείλεται στο ότι η ποσότητα του χαλκού στο κράμα βρέθηκε 16 φορές μεγαλύτερη από την μέγιστη από τις προδιαγραφές τιμή. Η προσθήκη χαλκού βελτιώνει την σκληρότητα και την αντοχή του κράματος, όμως μειώνει την χυτευσιμότητά του. Η μικρή επιμήκυνση του κράματος επίσης, ίσως οφείλεται και στους μικροπόρους οι οποίοι εμφανίστηκαν κατά την μεταλλογραφική ανάλυση και οι οποίοι δεν διαγνώνονται με τους μη καταστρεπτικούς ελέγχους (ραδιογραφίες). Η ατέλεια αυτή του χυτού εκτός από

την μεγάλη συγκέντρωση του χαλκού ίσως έχει να κάνει με προβλήματα υγρού μετάλλου που αναφέρονται στο κεφάλαιο 2, όπως απορρόφηση υδρογόνου, μη σωστή απαέρωση του τήγματος κ.α. Τέλος τα χυτά που παράχθηκαν από αυτό το κράμα είχαν πολύ καλή επιφάνεια και διαστατική ακρίβεια.

A3. Κράμα αλουμινίου AlMg3.

Από την θερμοδυναμική ανάλυση προκύπτει ότι η μικροδομή του συγκεκριμένου κράματος αποτελείται από την ενδομεταλλική ένωση Al_2Mg_3 μέσα στη μήτρα αλουμινίου. Η μορφολογία αυτή επιβεβαιώνεται και από την μεταλλογραφική ανάλυση όπου φαίνεται το δενδριτικό δίκτυο της ένωσης μέσα στη μήτρα αλουμινίου.

Για το κράμα αυτό δεν προτείνεται βέλτιστη χημική σύσταση σε Mg, διότι η βελτιστοποίηση αυτή στηρίχθηκε στην ελαχιστοποίηση του εύρους στερεοποίησης και του διαφορισμού όπου δεν υπήρχαν σημαντικές μεταβολές κατά την διακύμανση του ποσοστού του Mg μέσα στο εύρος των προδιαγραφών. Η χημική ανάλυση έδειξε συγκέντρωση χαλκού 15 φορές και πυριτίου 4 φορές μεγαλύτερη από αυτή που προτείνεται από τις προδιαγραφές. Στο γεγονός αυτό ίσως οφείλεται η αυξημένη σκληρότητα και η μικρή ολκιμότητα των χυτών που προέκυψε από τον ποιοτικό έλεγχο, όπου η αντοχή σε εφελκυσμό αγγίζει τα κατώτερα όρια και η επιμήκυνση είναι κάτω από τα κατώτερα όρια των προδιαγραφών. Τα στοιχεία αυτά (Cu και Si) προσδίδουν σκληρότητα και αντοχή στο κράμα. Η μικρή αντοχή σε εφελκυσμό ίσως οφείλεται και σε μικροπόρους που διαγνώστηκαν κατά την μεταλλογραφική ανάλυση. Τα δοκίμια και τα αντικείμενα που χυτεύτηκαν είχαν πολύ καλή επιφάνεια και διαστατική ακρίβεια.

A4. Κράμα αλουμινίου AlSi12.

Η θερμοδυναμική ανάλυση η οποία βασίστηκε στην ελαχιστοποίηση του εύρους στερεοποίησης και του διαφορισμού, οδήγησε στην ευτηκτική σύσταση του κράματος (12.6% Si). Όπως προκύπτει από την θερμοδυναμική ανάλυση η δομή του κράματος αποτελείται από το ευτηκτικό πυρίτιο και την ενδομεταλλική ένωση Al_6Mn σε πολύ μικρό ποσοστό μέσα στη μήτρα αλουμινίου. Κατά τους

υπολογισμούς εμφανίστηκε η αδιάλυτη φάση AlMnSi_beta η οποία είναι ακαθαρσία και απορρίφθηκε. Η δομή αυτή επιβεβαιώνεται και από την μεταλλογραφική ανάλυση όπου φαίνεται η ευτηκτική δομή του πυριτίου στη μήτρα αλουμινίου.

Η χημική σύσταση του κράματος έδειξε αυξημένη συγκέντρωση χαλκού (15 φορές μεγαλύτερη από αυτή που προτείνουν οι προδιαγραφές) γεγονός στο οποίο μπορεί να οφείλεται και η αυξημένη σκληρότητα η οποία παρουσιάστηκε κατά τον έλεγχο των μηχανικών δοκιμών. Ο έλεγχος αυτός έδειξε ότι οι ιδιότητες βρίσκονται μέσα στις προδιαγραφές με την επιμήκυνση να πλησιάζει το κατώτερο όριο. Οι μη καταστρεπτικές δοκιμές έδειξαν πολύ καλή ποιότητα των χυτών τα οποία είχαν πολύ καλή επιφάνεια και διαστατική ακρίβεια.

A5. Κράμα αλουμινίου AlCu4Ti.

Η θερμοδυναμική ανάλυση έδειξε ότι η δομή του κράματος αποτελείται από την φάση θ-Al₂Cu και ένα μικρό ποσοστό της ενδομεταλλικής ένωσης TiAl₂ μέσα στη μήτρα αλουμινίου. Η εμφάνιση της φάσης TiAl₂ μέσα στην υγρή φάση πυρηνώνει την φάση FCC(Al). Η βελτιστοποίηση του κράματος οδήγησε σε μεγιστοποίηση του Cu και ελαχιστοποίηση του Ti. Ο μεταλλογραφικός έλεγχος δείχνει τους δενδρίτες της φάσης θ-Al₂Cu μέσα στη μήτρα του αλουμινίου. Η φάση αυτή ευθύνεται για την βελτίωση των ιδιοτήτων του κράματος.

Τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης δείχνουν πολύ καλό ποσοστό του Cu που πλησιάζει την προτεινόμενη από την θερμοδυναμική ανάλυση τιμή, ενώ πολύ μικρό ποσοστό Ti, κάτω από το χαμηλότερο όριο των προδιαγραφών.

Ο ποιοτικός έλεγχος έδειξε πολύ καλή σκληρότητα του κράματος με μικρή όμως αντοχή σε εφελκυσμό (περίπου το μισό από αυτό που προβλέπουν οι προδιαγραφές) με μειωμένη επιμήκυνση. Τα άσχημα αυτά αποτελέσματα της δοκιμής του εφελκυσμού οφείλονται σε πόρους και μικροπόρους που διαγνώστηκαν κατά τον μεταλλογραφικό έλεγχο. Για τους πόρους αυτούς ίσως ευθύνεται ο χαλκός ο οποίος μειώνει την χυτευσιμότητα και την ρευστότητα του λιωμένου μετάλλου με αποτέλεσμα την μη σωστή πλήρωση του καλουπιού. Άλλοι παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε δημιουργία πόρων είναι οι συνθήκες της χύτευσης (μη σωστή απαέρωση, απορρόφηση υδρογόνου και αερίων κτλ.).

Τέλος και αυτό το κράμα όπως και τα προηγούμενα κράματα αλουμινίου, έδωσαν πολύ καλή ποιότητα επιφάνειας και διαστατική ακρίβεια.

Παρατηρήσεις.

Όλα τα δοκίμια και τα αντικείμενα που χυτεύτηκαν από τα κράματα αλουμινίου παρουσίασαν πολύ καλή τελική επιφάνεια και διαστατική ακρίβεια, χαρακτηριστικό της μεθόδου χύτευσης με Μάσκες. Επίσης ο ποιοτικός έλεγχος έδωσε καλά αποτελέσματα με μόνο αρνητικό την μειωμένη επιμήκυνση των κραμάτων και την μειωμένη αντοχή σε εφελκυσμό του κράματος AlCu4Ti. Η μειωμένη επιμήκυνση όπως αναφέρεται και προηγουμένως αποδίδεται στην παρουσία μικροπόρων στο εσωτερικό των κραμάτων. Η ατέλεια αυτή οφείλεται σε προβλήματα υγρού μετάλλου (απορρόφηση υδρογόνου και αερίων), στις συνθήκες χύτευσης και στο αυξημένο ποσοστό χαλκού που εμφανίζεται σε όλα τα κράματα αλουμινίου και το οποίο μειώνει την χυτευσιμότητα των κραμάτων.

6.2 Κράματα χαλκού

C1. Κράμα χαλκού CuSn7ZnPb.

Η θερμοδυναμική ανάλυση του κράματος έδειξε ότι η μικροδομή του αποτελείται από ένα μικρό ποσοστό της φάσης HCP(Pb+Cu) και ένα μεγάλο ποσοστό της φάσης FCC(Cu+Sn). Η μικροδομή αυτή επιβεβαιώνεται και από τον μεταλλογραφικό έλεγχο όπου φαίνεται η διασπορά της φάσης HCP μέσα στη φάση FCC. Η χημική ανάλυση του κράματος δείχνει ότι τα κύρια κραματικά στοιχεία βρίσκονται μέσα στις προδιαγραφές, αποκλίνουν όμως από τις προτεινόμενες από την θερμοδυναμική ανάλυση τιμές.

Ο έλεγχος των μηχανικών ιδιοτήτων έδωσε πολύ άσχημα αποτελέσματα με την σκληρότητα να είναι κάτω από την ελάχιστη προδιαγραφόμενη τιμή και την δοκιμή εφελκυσμού να δίνει αποτελέσματα πολύ κάτω από τα όρια των προδιαγραφών. Τα αποτελέσματα αυτά οφείλονται κατά κύριο λόγο στο μεγάλο πορώδες που διαγνώστηκε κατά τον μεταλλογραφικό έλεγχο και τον μη καταστρεπτικό έλεγχο. Οι πόροι αυτοί οφείλονται στο σχεδιασμό της χύτευσης και

κυρίως του καλουπιού. Παρόλα αυτά τα χυτά παρουσίασαν πολύ καλή διαστατική ακρίβεια.

C2. Κράμα χαλκού CuSn12Ni.

Από την θερμοδυναμική ανάλυση προκύπτει ότι η δομή του κράματος αποτελείται από την φάση του Cu. Ο μεταλλογραφικός έλεγχος δείχνει ότι το Sn σχηματίζεται στα όρια των κόκκων του Cu. Τα ποσοστά των κύριων κραματικών στοιχείων όπως παρουσιάζονται από την χημική ανάλυση του κράματος είναι πολύ κοντά στις προτεινόμενες από την θερμοδυναμική ανάλυση τιμές.

Ο ποιοτικός έλεγχος έδωσε και για αυτό το κράμα μη αποδεκτά αποτελέσματα, με την σκληρότητα να αγγίζει την χαμηλότερη τιμή που προτείνεται από τις προδιαγραφές και τα αποτελέσματα της δοκιμής του εφελκυσμού να είναι πολύ χαμηλότερα από τις προδιαγραφές. Τα αποτελέσματα αυτά οφείλονται στο μεγάλο πορώδες που διέγνωσε ο μεταλλογραφικός έλεγχος και ο έλεγχος των μη καταστρεπτικών δοκιμών. Οι πόροι οφείλονται σε προβλήματα που έχουν να κάνουν με τις συνθήκες και τον σχεδιασμό της χύτευσης. Τέλος τα χυτά αυτά έδωσαν πολύ καλή διαστατική ακρίβεια.

C3. Κράμα χαλκού CuZn53Pb.

Από την θερμοδυναμική ανάλυση του κράματος προκύπτει ότι η μικροδομή του αποτελείται από την φάση Cu-FCC και από ένα μικρό ποσοστό της φάσης Pb-HCP. Η δομή αυτή επιβεβαιώνεται και από τον μεταλλογραφικό έλεγχο όπου φαίνεται η διασπορά της φάσης Pb-HCP στην Cu-FCC. Ο έλεγχος της χημικής σύστασης του κράματος έδειξε ότι το ποσοστό του Zn είναι πολύ μικρότερο από αυτό που προτείνουν οι προδιαγραφές.

Τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου και για αυτό το κράμα χαλκού είναι εκτός των προδιαγραφών με την σκληρότητα να πλησιάζει το κατώτερο όριο και τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού να είναι πολύ χαμηλότερα από τις προδιαγραφές. Οι μικρές αυτές τιμές της αντοχής του εφελκυσμού και της επιμήκυνσης οφείλονται σε πόρους και διαστυλές που παρουσιάστηκαν κατά τον μεταλλογραφικό έλεγχο και έχουν να κάνουν με τις συνθήκες της χύτευσης και

τον σχεδιασμό του καλουπιού. Παρόλα αυτά τα εξωτερικά χαρακτηριστικά των χυτών ήταν καλά, με εξαιρετική διαστατική ακρίβεια και καλή ποιότητα επιφανείας.

C4. Κράμα χαλκού CuAl9Ni.

Η μικροδομή του κράματος όπως προκύπτει από την θερμοδυναμική ανάλυση και επιβεβαιώνεται μεταλλογραφικά αποτελείται από ένα μεγάλο ποσοστό της φάσης GAMMA (84%Cu+16%Al) περίπου 43% και ένα μικρό ποσοστό περίπου 2% της φάσης HCP (Ni-Cu) σε μήτρα FCC (Cu-Al-Ni). Η φάση GAMMA είναι αυτή που προσδίδει τις αυξημένες μηχανικές ιδιότητες σε αυτό το κράμα και για την οποία γίνεται η θερμική κατεργασία. Η χημική ανάλυση δείχνει ότι τα κύρια κραματικά στοιχεία βρίσκονται μέσα στις προδιαγραφές, αποκλίνουν όμως από τις προτεινόμενες από την θερμοδυναμική ανάλυση τιμές.

Από τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών μόνο η σκληρότητα είναι μέσα στις προδιαγραφές, ενώ αυτά της δοκιμή εφελκυσμού είναι πολύ κάτω από τα όρια. Το γεγονός ότι η αντοχή σε εφελκυσμό και η επιμήκυνση είναι εκτός των προδιαγραφών, οφείλεται και πάλι στο μεγάλο πορώδες που εμφάνισαν τα χυτά και κατ' επέκταση στις συνθήκες χύτευσης και κυρίως στο σχεδιασμό του καλουπιού. Και αυτά τα χυτά παρουσίασαν πολύ καλή διαστατική ακρίβεια και καλή ποιότητα επιφανείας.

C5. Κράμα χαλκού CuPb5Sn.

Όπως προκύπτει από την θερμοδυναμική ανάλυση και επιβεβαιώνεται από τον μεταλλογραφικό έλεγχο η μικροδομή του κράματος αποτελείται από την φάση HCP (Cu+Pb+Sn) μέσα στη φάση FCC (Cu+Sn). Από την χημική ανάλυση φαίνεται ότι το ποσοστό του Sn βρίσκεται πάνω από τις προδιαγραφές και αρκετά μακριά από την προτεινόμενη από την θερμοδυναμική ανάλυση τιμή.

Από τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών η σκληρότητα βρίσκεται εντός των προδιαγραφών ενώ η αντοχή σε εφελκυσμό και η επιμήκυνση πολύ κάτω από τα όρια. Και σε αυτό το κράμα διαγνώστηκαν πολλοί πόροι οι οποίοι είναι αποτέλεσμα των συνθηκών της χύτευσης και κυρίως του σχεδιασμού του

καλουπιού. Στους πόρους αυτούς οφείλονται και τα μη αποδεκτά αποτελέσματα της δοκιμής του εφελκυσμού. Τέλος τα χυτά έδωσαν καλή επιφάνεια και εξαιρετική διαστατική ακρίβεια.

Παρατηρήσεις.

Σε όλα τα κράματα χαλκού παρατηρήθηκε το φαινόμενο ότι ενώ είχαν ικανοποιητική σκληρότητα τα αποτελέσματα της δοκιμής του εφελκυσμού (αντοχή εφελκυσμού και επιμήκυνση) ήταν σημαντικά χαμηλότερα από τις προδιαγραφόμενες τιμές. Το γεγονός αυτό όπως σχολιάστηκε και προηγουμένως οφείλεται στο μεγάλο πορώδες που διαπιστώθηκε κατά τον μεταλλογραφικό έλεγχο. Η δημιουργία αυτή των πόρων αποδίδεται στις συνθήκες της χύτευσης και κυρίως στις διαστάσεις του καλουπιού.

Αναλυτικότερα, ενώ στο κεφάλαιο 4.3.4 (Υπολογισμός τροφοδοσίας του συστήματος χύτευσης) υπολογίστηκαν διεξοδικά όλες οι διαστάσεις του καλουπιού και για τα κράματα αλουμινίου αλλά και για τα κράματα χαλκού, με τις διαστάσεις του δεύτερου να είναι σχεδόν διπλάσιες από αυτές του πρώτου, κατά την χύτευση των κραμάτων του χαλκού χρησιμοποιήθηκε το ίδιο καλούπι που χρησιμοποιήθηκε και για την χύτευση των κραμάτων αλουμινίου. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την μη στρωτή ροή του λιωμένου μετάλλου μέσα στο καλούπι και κατ' επέκταση την μη σωστή πλήρωσή του. Το γεγονός αυτό οδήγησε στο σχηματισμό του πορώδους στο εσωτερικό των χυτών, το οποίο ευθύνεται και για τα αποτελέσματα της δοκιμής του εφελκυσμού.

Βιβλιογραφία

- [1]. Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, *Φυσική Μεταλλουργία-Θεμελιώδεις Αρχές*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος 2000.
- [2]. ASM Specialty Handbook, *Aluminum and Aluminum Alloys*, Fourth Edition, ASM International 1998.
- [3]. ASM Handbook Vol. 2, *Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Special Purpose Materials*, Tenth Edition, ASM International 1998.
- [4]. ASM Handbook Vol. 3, *Alloy Phase Diagrams*, Second Edition, ASM International 1995.
- [5]. ASM Handbook Vol. 4, *Heat Treating*, Third Edition, ASM International 1995.
- [6]. ASM Handbook Vol. 9, *Metallography and Microstructure*, Eighth Edition, ASM International 1995.
- [7]. ASM Handbook Vol. 15, *Casting*, Ninth Edition, ASM International 1995.
- [8]. E. Paul DeGarmo – JT. Black – Ronald. A. Kohser, *Materials and processes in Manufacturing*, Eighth Edition, Prentice-Hall International Inc. 1997.
- [9]. P. R. Beeley, *Foundry Technology*, Butterworth 1980.
- [10]. Vander Voort, *Metallography-Principles and Practice*, Mc Graw-Hill Inc. 1984.
- [11]. Bo Sundman, *Thermo-Calc Examples*, Royal Institute of Technology, Sweden 1993.
- [12]. Robert H. Heyer, *Engineering Physical Metallurgy*, D. Van Nostrand Company Inc. 1939.
- [13]. Carl H. Samans, *Engineering Metals and Their Alloys*, The Macmillan Company, 1949.
- [14]. M. Hillert, *Some View Points on the Use of a Computer for Calculating Phase Diagrams*, North-Holland Publishing Company.
- [15]. Greg. N. Haidemenopoulos, *Computer-Aided Thermodynamics of Alloys*, Mineral Wealth 74/1991.
- [16]. VND-Schulungsdienst, *Anschnitt-und Speisertechnik beim Sandgießverfahren fur Aluminium-und Kupferlegierungen*, Lehrgang.
- [17]. Βασιλάκος Απόστολος *Βελτιστοποίηση του κράματος Αλουμινίου A357*, Διπλωματική εργασία , 1996.

Παράρτημα Ι

Θερμοδυναμικά διαγράμματα φάσεων

1. Θερμοδυναμικά διαγράμματα φάσεων κράματος AlSi7Mg

- Σχήμα 1.1* Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlSi7Mg
- Σχήμα 1.2* Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlSi7Mg
- Σχήμα 1.3* Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος AlSi7Mg
- Σχήμα 1.4* Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος AlSi7Mg
- Σχήμα 1.5* Διάγραμμα διαφορισμού του Si κατά την στερεοποίηση του κράματος AlSi7Mg

2. Θερμοδυναμικά διαγράμματα φάσεων κράματος AlSi10Mg

- Σχήμα 2.1* Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlSi10Mg
- Σχήμα 2.2* Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlSi10Mg
- Σχήμα 2.3* Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος AlSi10Mg
- Σχήμα 2.4* Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος AlSi10Mg

3. Θερμοδυναμικά διαγράμματα φάσεων κράματος AlSi12

- Σχήμα 3.1* Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlSi12
- Σχήμα 3.2* Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος AlSi12
- Σχήμα 3.3* Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος AlSi12
- Σχήμα 3.4* Διάγραμμα διαφορισμού του Si κατά την στερεοποίηση του κράματος AlSi12 με σύσταση Si - 10.5

Σχήμα 3.5 Διάγραμμα διαφορισμού του Si κατά την στερεοποίηση του κράματος AlSi12 με σύσταση Si - 12.6

Σχήμα 3.6 Διάγραμμα διαφορισμού του Si κατά την στερεοποίηση του κράματος AlSi12 με σύσταση Si - 13.5

4. Θερμοδυναμικά διαγράμματα φάσεων κράματος AlMg3

Σχήμα 4.1 Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlMg3

Σχήμα 4.2 Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος AlMg3

Σχήμα 4.3 Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος AlMg3

Σχήμα 4.4 Διάγραμμα διαφορισμού του Mg κατά την στερεοποίηση του κράματος AlMg3 με σύσταση Mg - 2.5

Σχήμα 4.5 Διάγραμμα διαφορισμού του Mg κατά την στερεοποίηση του κράματος AlMg3 με σύσταση Mg - 3

Σχήμα 4.6 Διάγραμμα διαφορισμού του Mg κατά την στερεοποίηση του κράματος AlMg3 με σύσταση Mg - 3.5

5. Θερμοδυναμικά διαγράμματα φάσεων κράματος AlCu4Ti

Σχήμα 5.1 Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlCu4Ti

Σχήμα 5.2 Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlCu4Ti

Σχήμα 5.3 Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος AlCu4Ti

Σχήμα 5.4 Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος AlCu4Ti

6. Θερμοδυναμικά διαγράμματα φάσεων κράματος CuSn7ZnPb

Σχήμα 6.1 Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuSn7ZnPb

Σχήμα 6.2 Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuSn7ZnPb

Σχήμα 6.3 Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuSn7ZnPb

Σχήμα 6.4 Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος CuSn7ZnPb

Σχήμα 6.5 Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος CuSn7ZnPb

7. Θερμοδυναμικά διαγράμματα φάσεων κράματος CuSn12Ni

- Σχήμα 7.1* Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuSn12Ni
- Σχήμα 7.2* Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuSn12Ni
- Σχήμα 7.3* Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος CuSn12Ni
- Σχήμα 7.4* Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος CuSn12Ni

8. Θερμοδυναμικά διαγράμματα φάσεων κράματος Z 33Pb

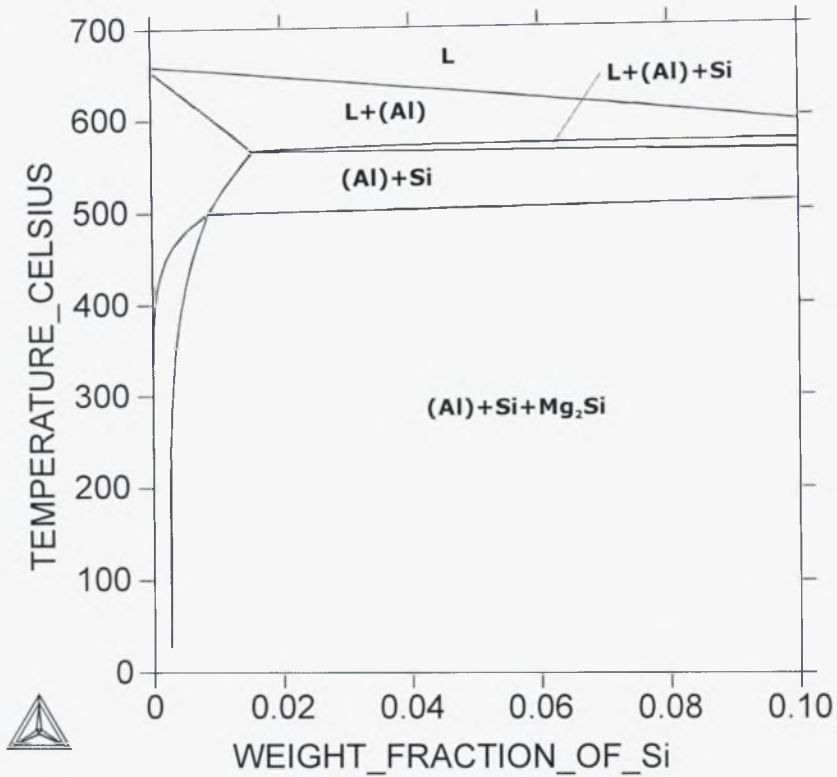
- Σχήμα 8.1* Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuZn33Pb
- Σχήμα 8.2* Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuZn33Pb
- Σχήμα 8.3* Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος CuZn33Pb
- Σχήμα 8.4* Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος CuZn33Pb

9. Θερμοδυναμικά διαγράμματα φάσεων κράματος Al9

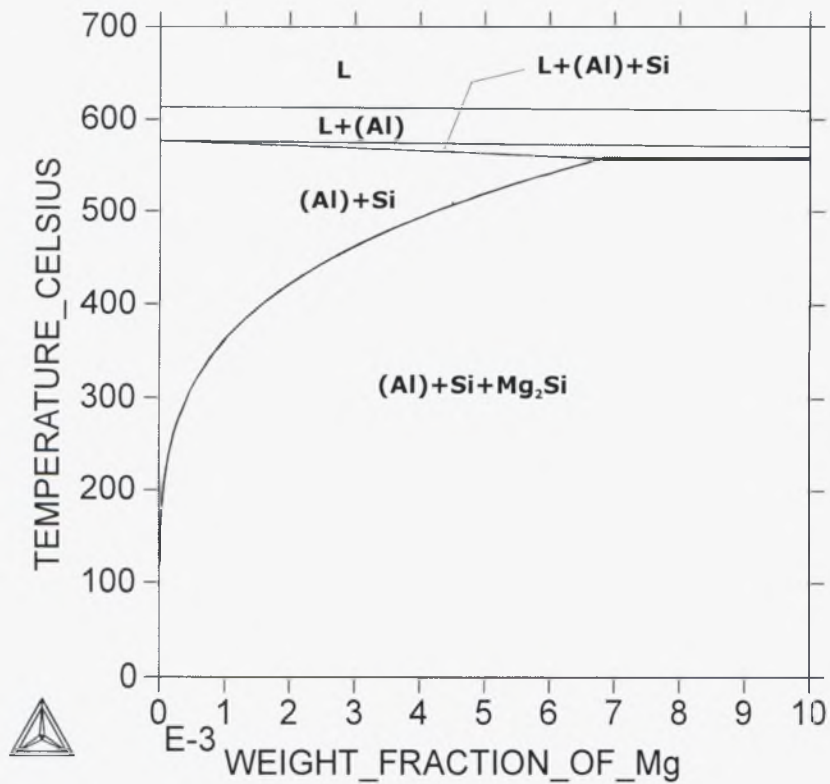
- Σχήμα 9.1* Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuAl9Ni
- Σχήμα 9.2* Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuAl9Ni
- Σχήμα 9.3* Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος CuAl9Ni
- Σχήμα 9.4* Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος CuAl9Ni

10. Θερμοδυναμικά διαγράμματα φάσεων κράματος Pb5

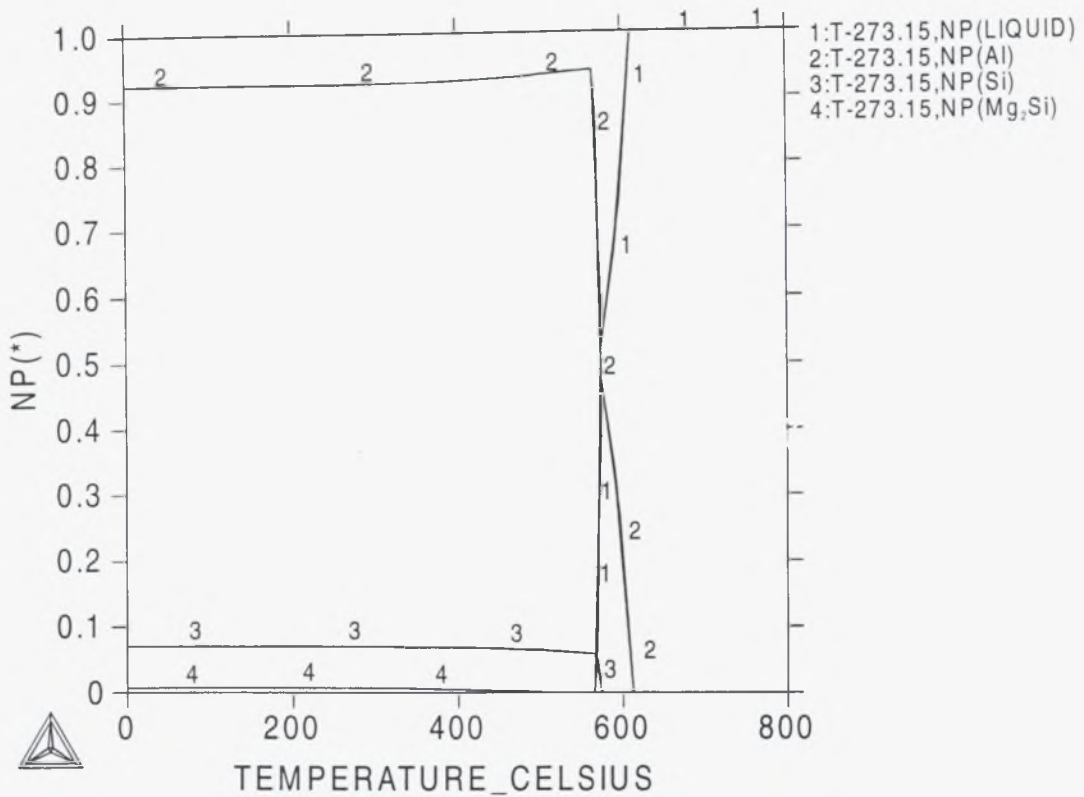
- Σχήμα 10.1* Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuPb5Sn
- Σχήμα 10.2* Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuPb5Sn
- Σχήμα 10.3* Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος CuPb5Sn
- Σχήμα 10.4* Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος CuPb5Sn



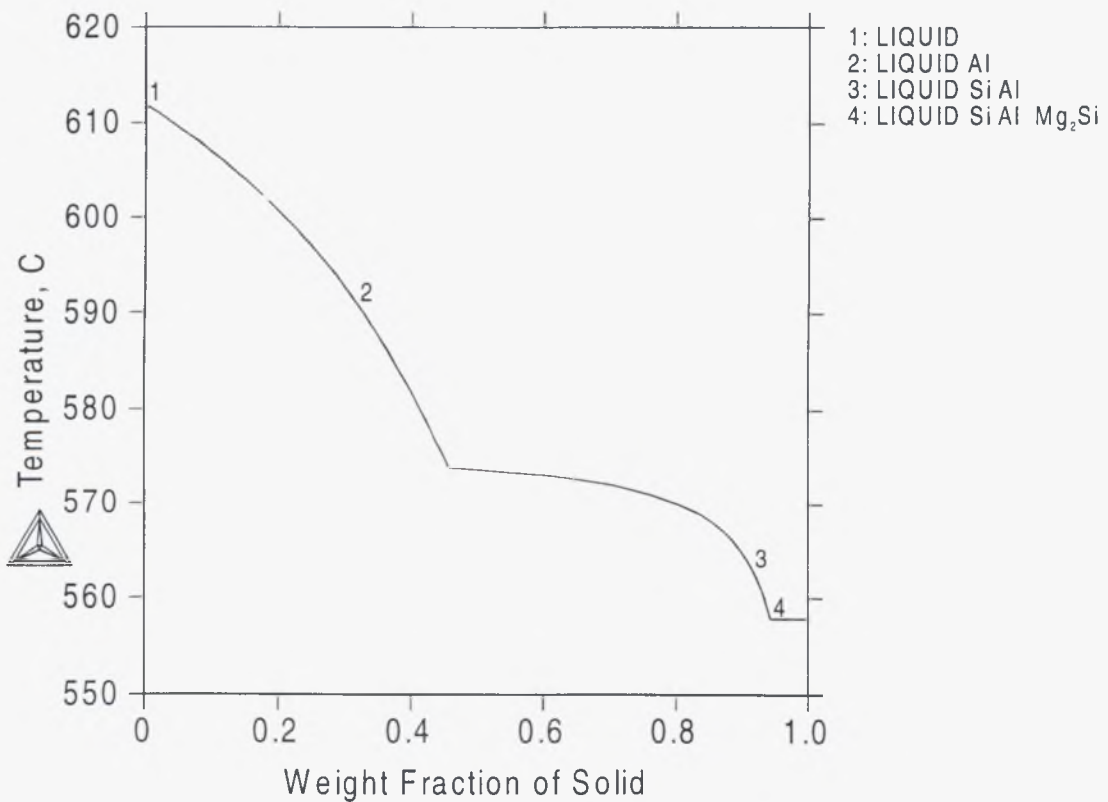
Σχήμα 1.1. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlSi7Mg



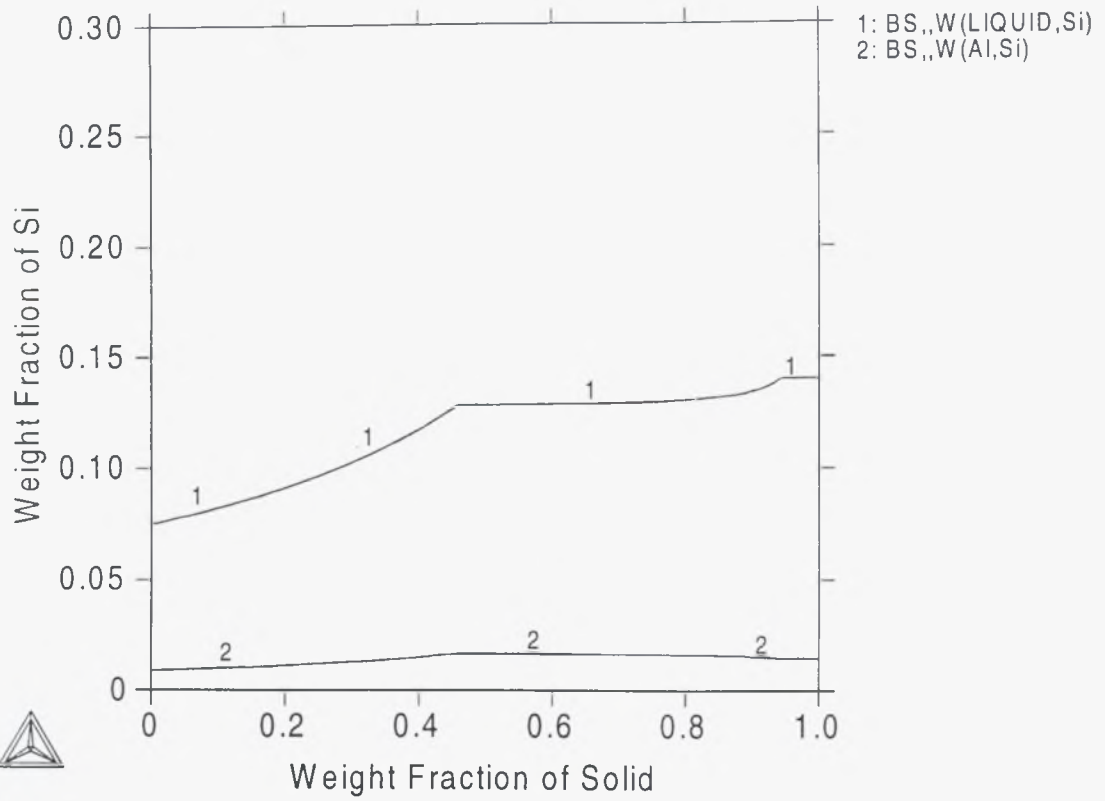
Σχήμα 1.2. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlSi7Mg



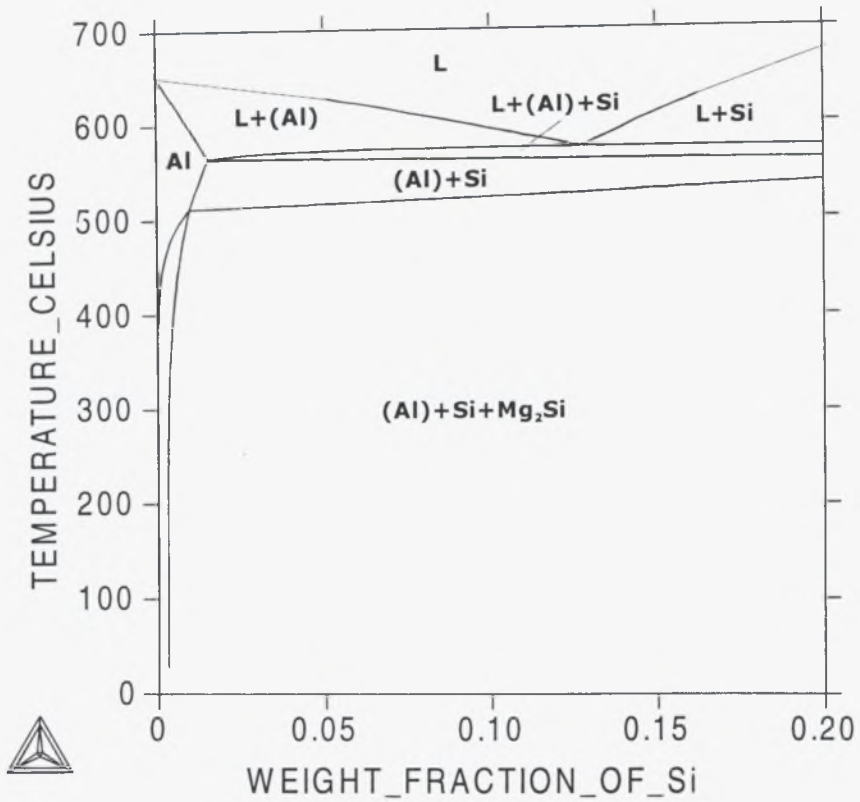
Σχήμα 1.3. Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος AlSi7Mg



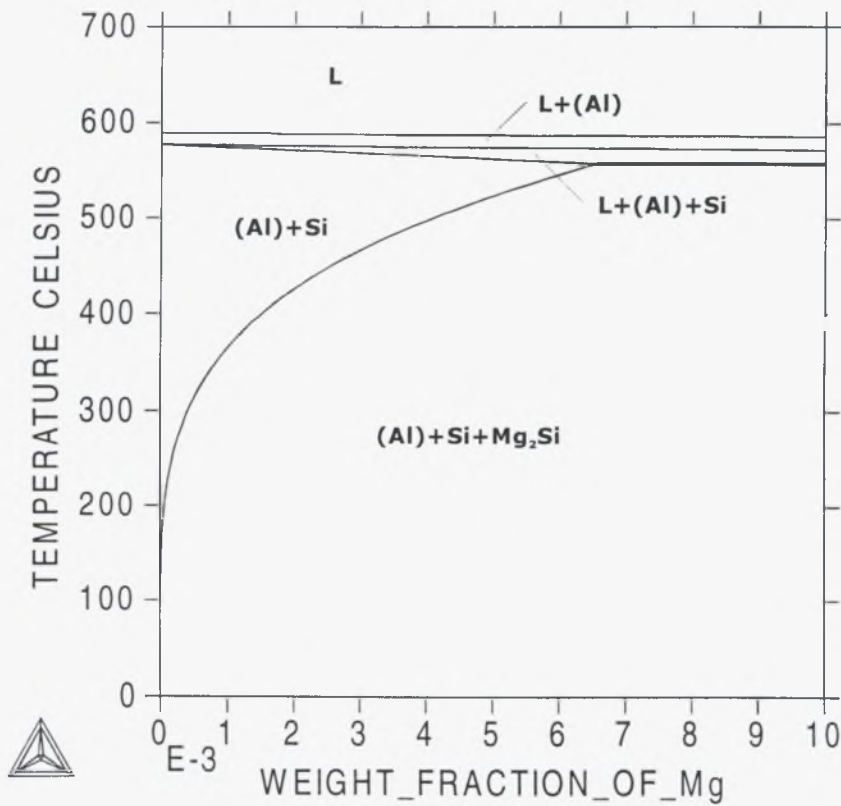
Σχήμα 1.4. Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος AlSi7Mg



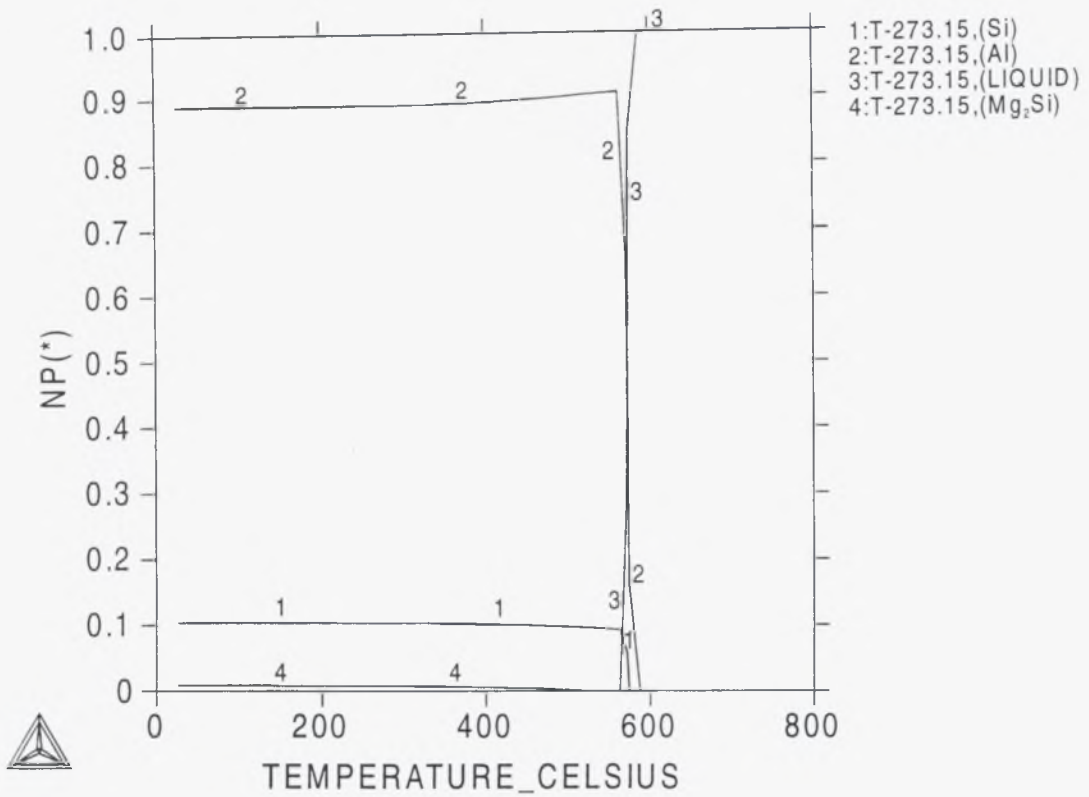
Σχήμα 1.5. Διάγραμμα διαφορισμού του Si κατά την στερεοποίηση του κράματος AlSi7Mg



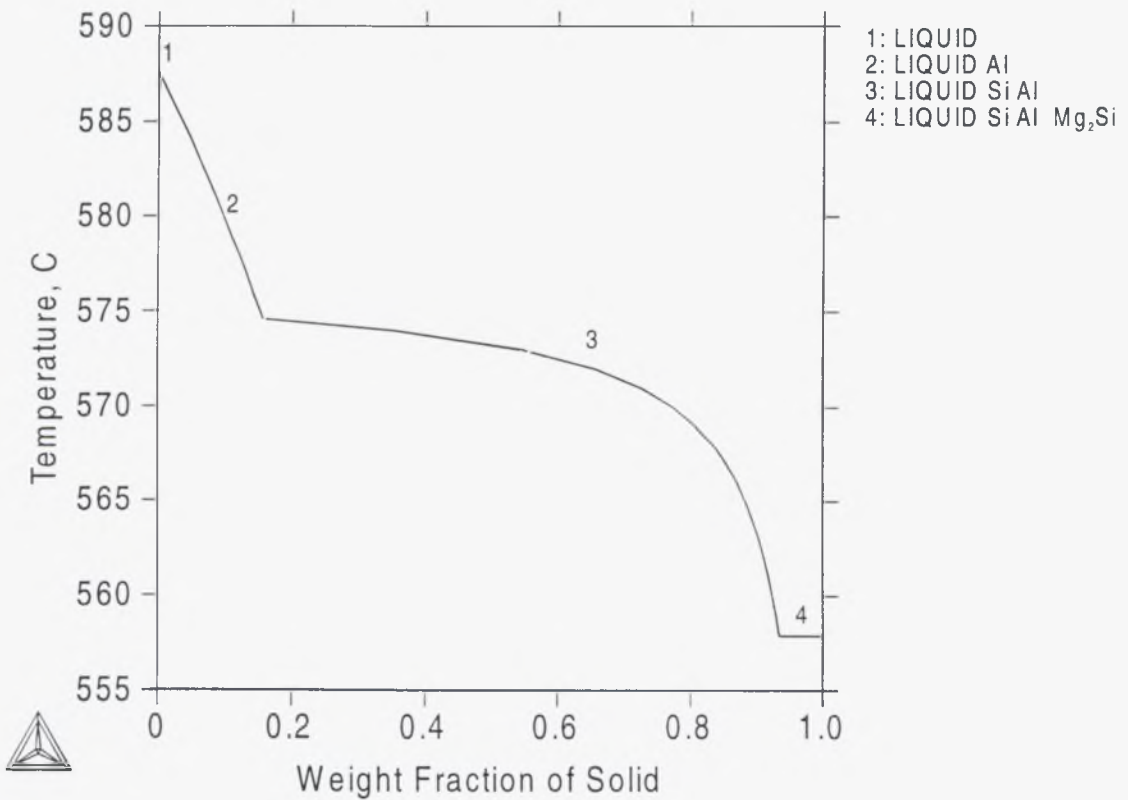
Σχήμα 2.1. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlSi10Mg



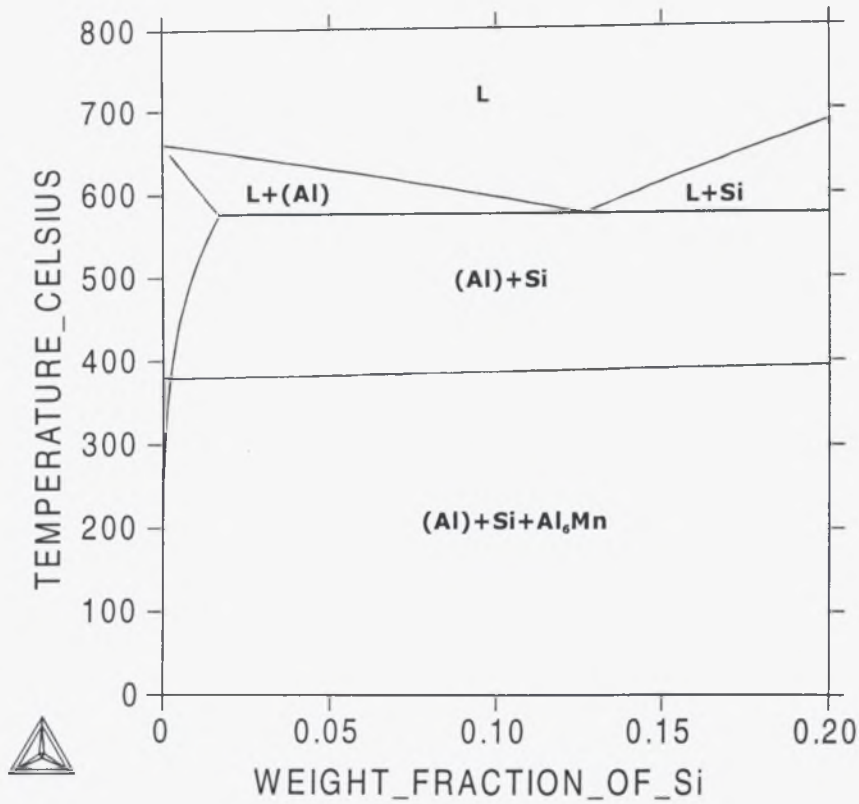
Σχήμα 2.2. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlSi10Mg



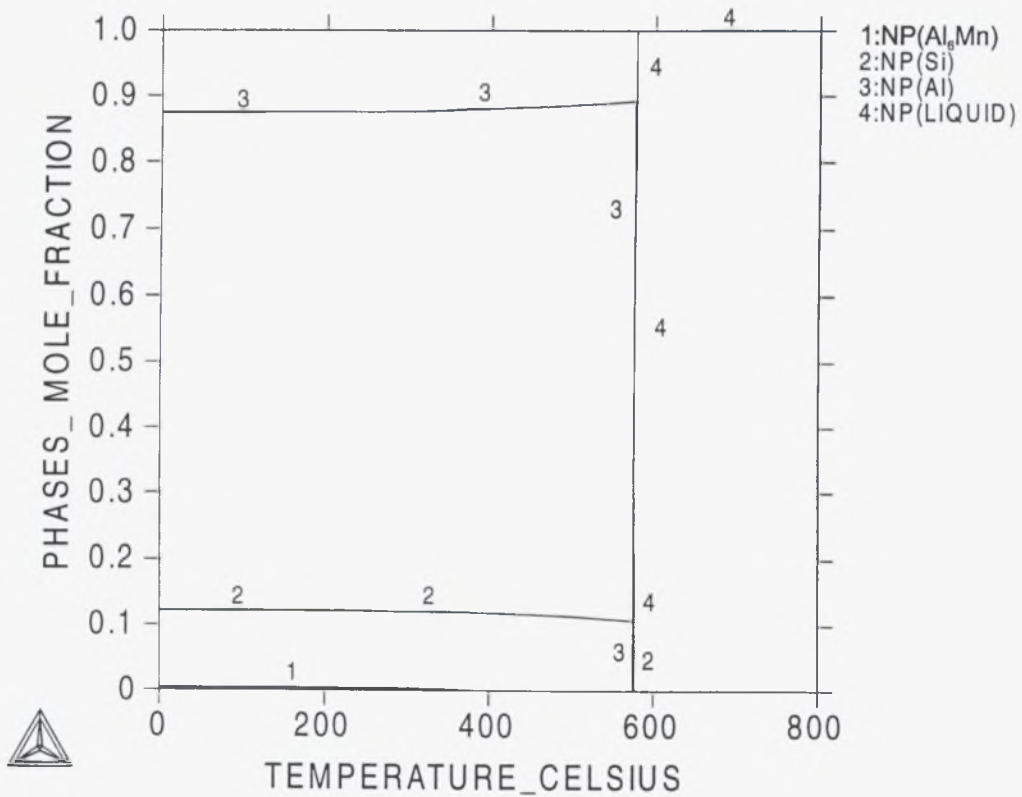
Σχήμα 2.3. Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος AlSi10Mg



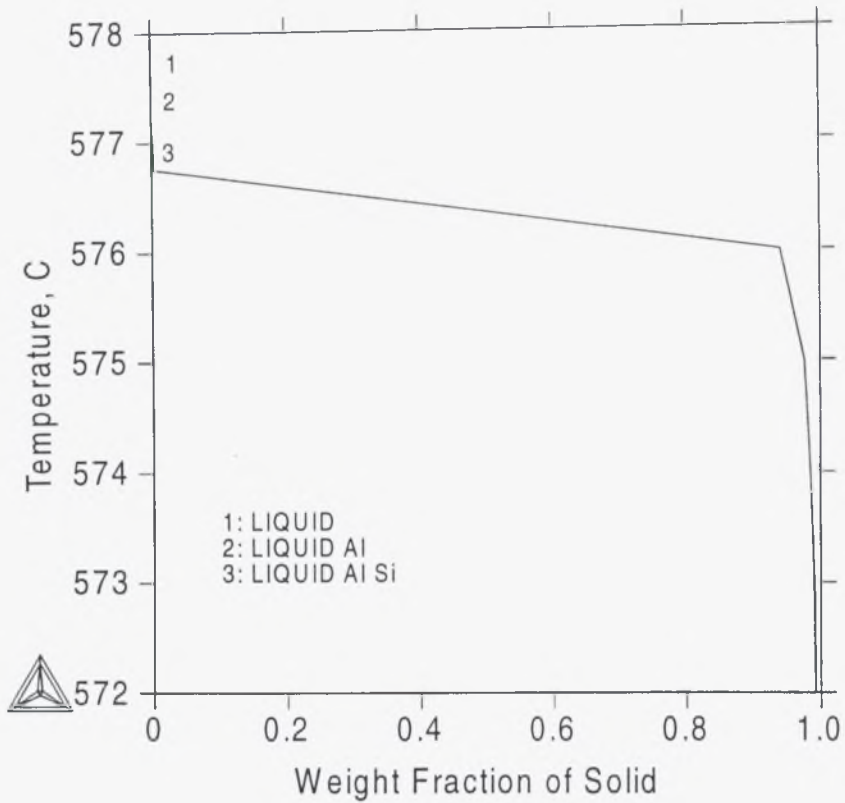
Σχήμα 2.4. Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος AlSi10Mg



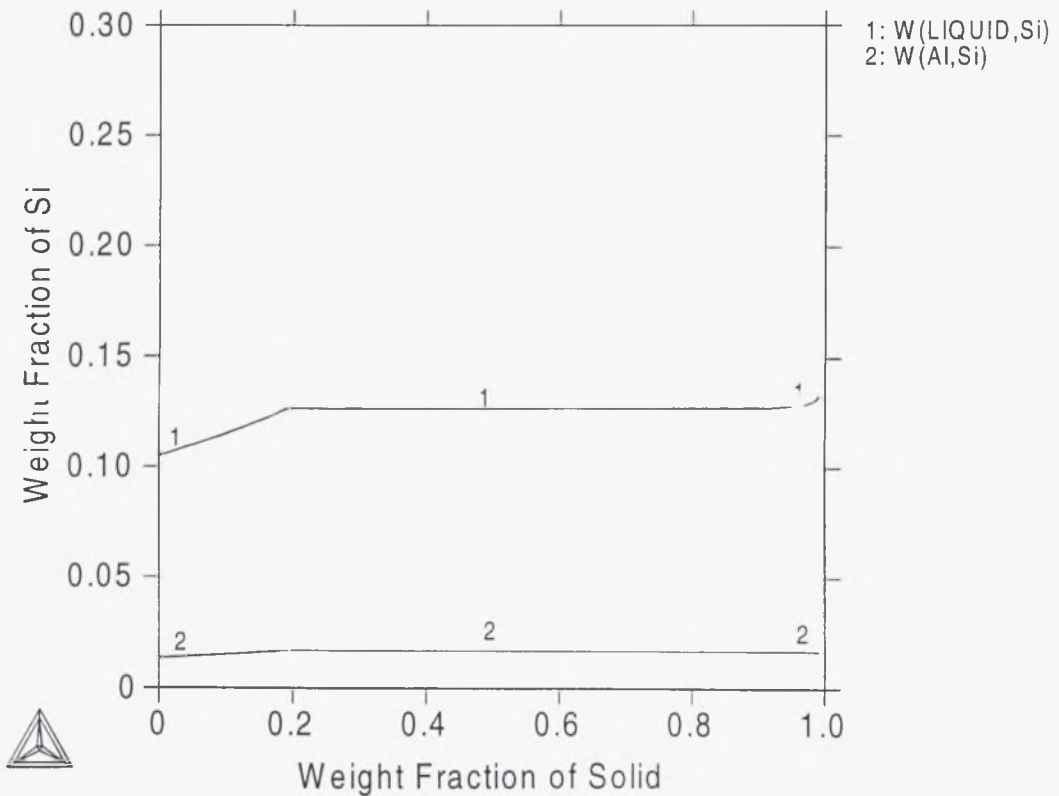
Σχήμα 3.1. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlSi12



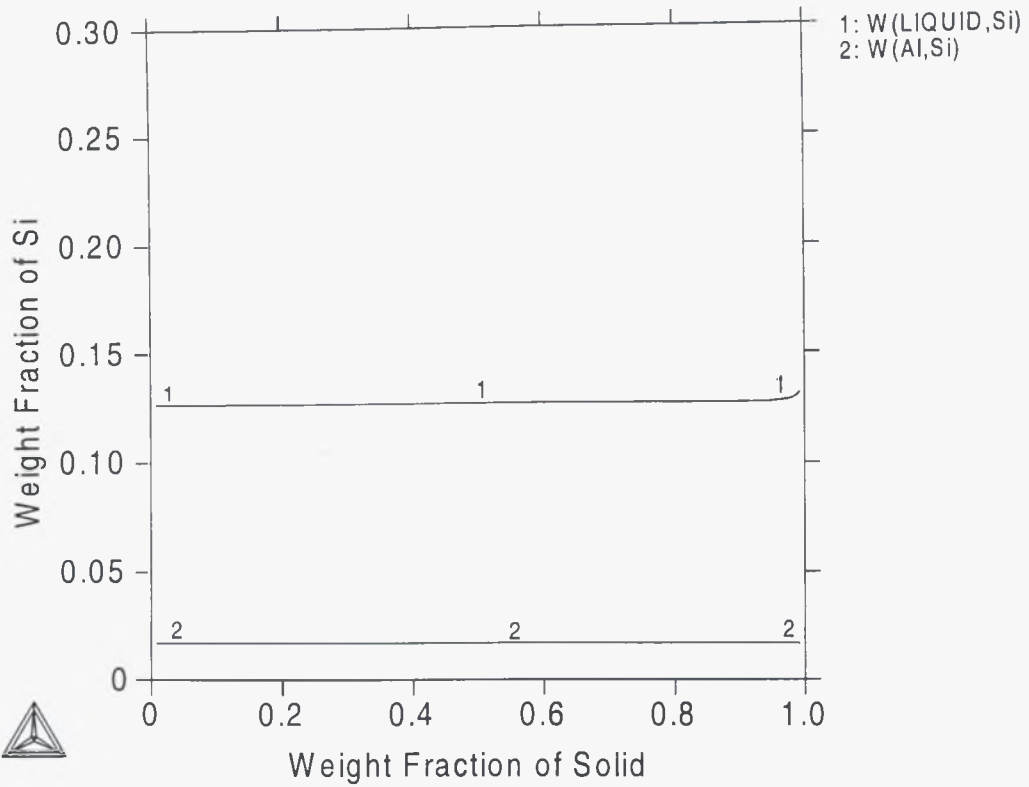
Σχήμα 3.2. Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος AlSi12



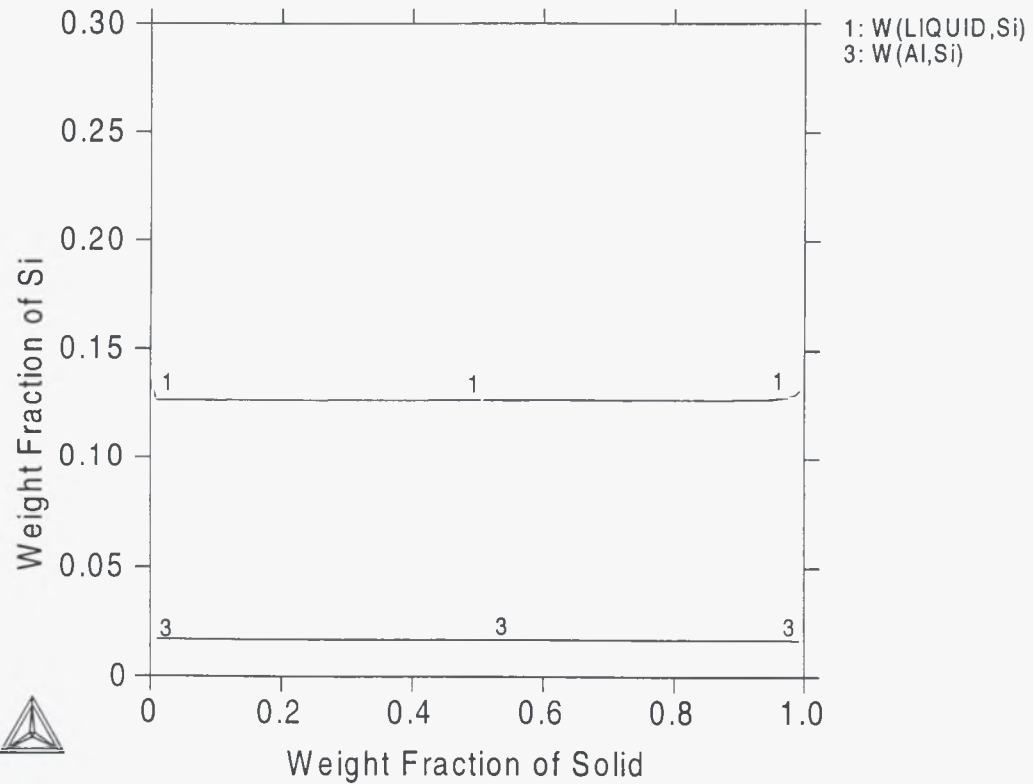
Σχήμα 3.3. Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος AlSi12



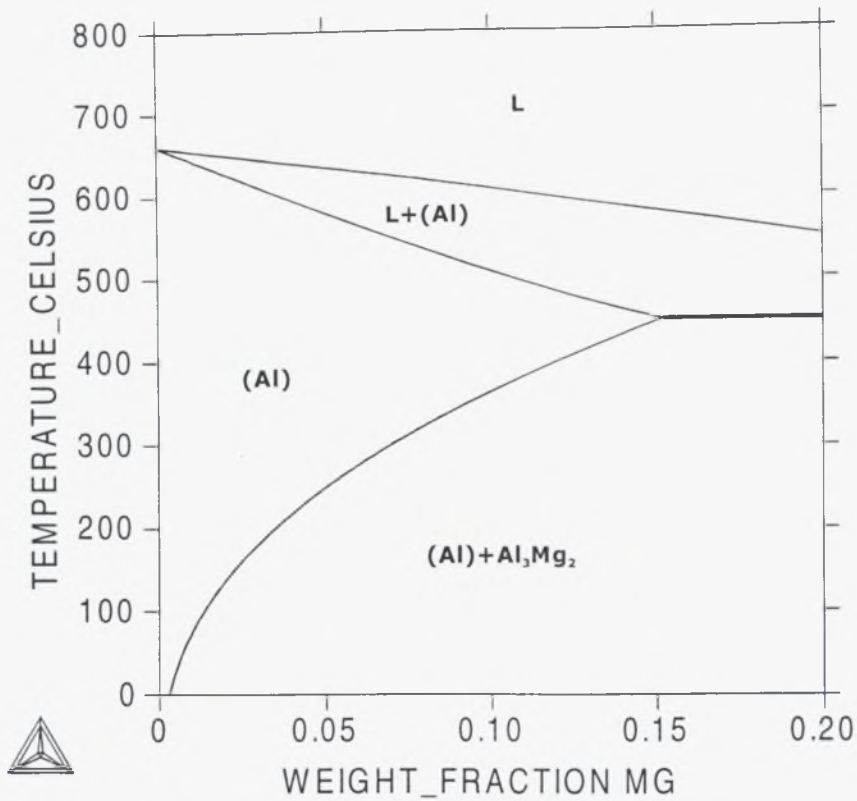
Σχήμα 3.4. Διάγραμμα διαφορισμού του Si κατά την στερεοποίηση του κράματος AlSi12 με σύσταση Si - 10.5



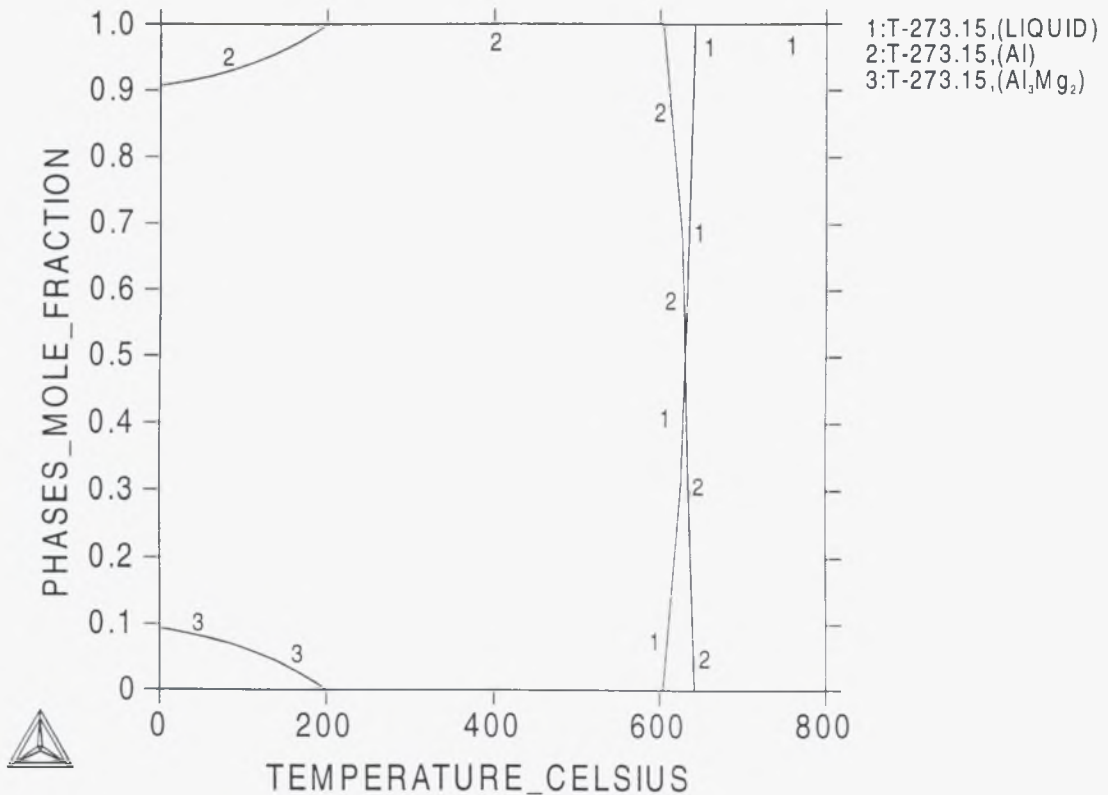
Σχήμα 3.5. Διάγραμμα διαφορισμού του Si κατά την στερεοποίηση του κράματος AlSi12 με σύσταση Si - 12.6



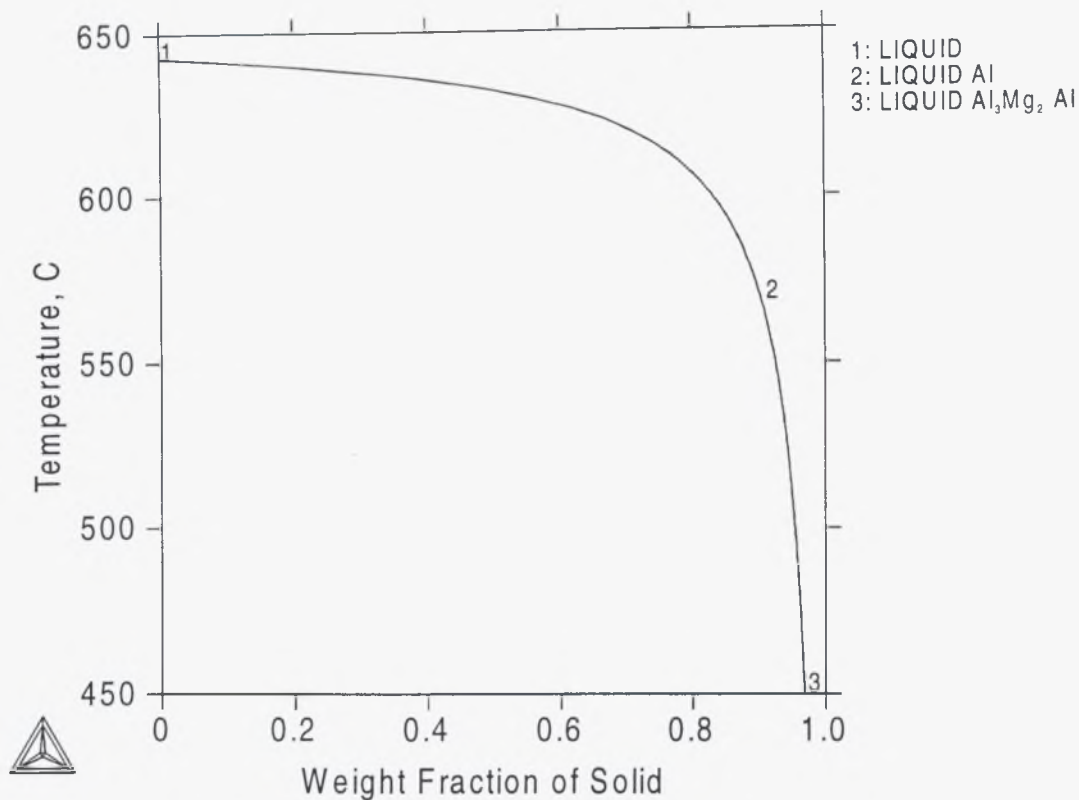
Σχήμα 3.6. Διάγραμμα διαφορισμού του Si κατά την στερεοποίηση του κράματος AlSi12 με σύσταση Si - 13.5



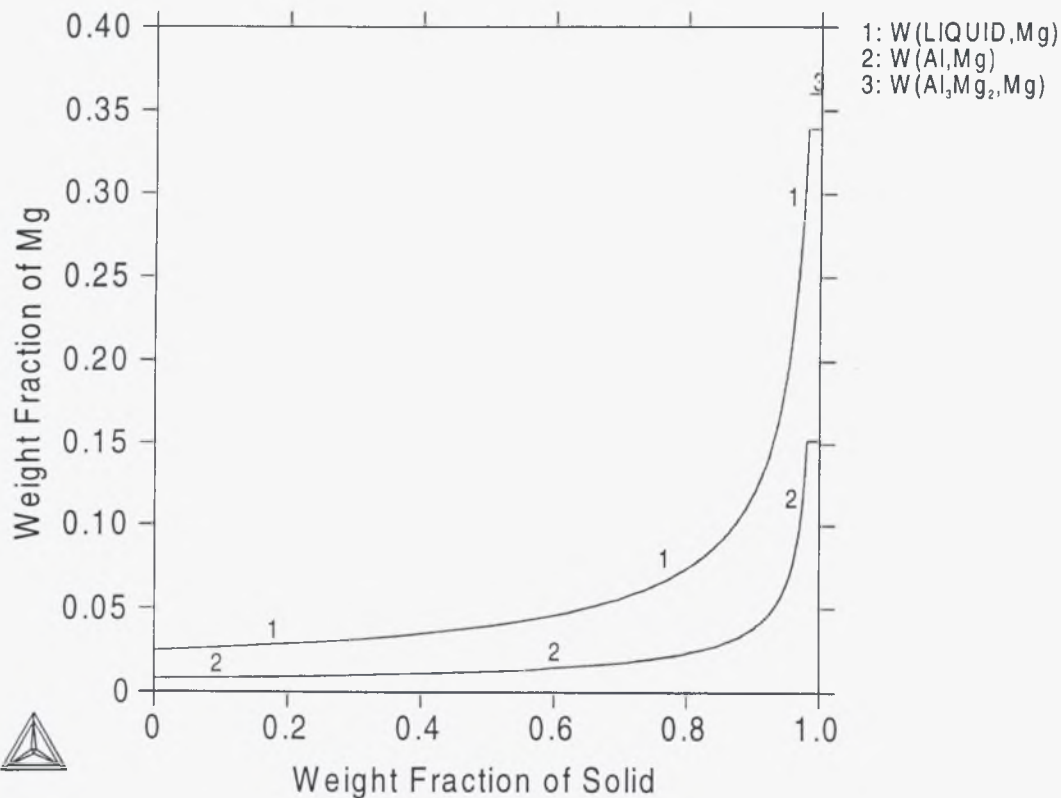
Σχήμα 4.1. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlMg3



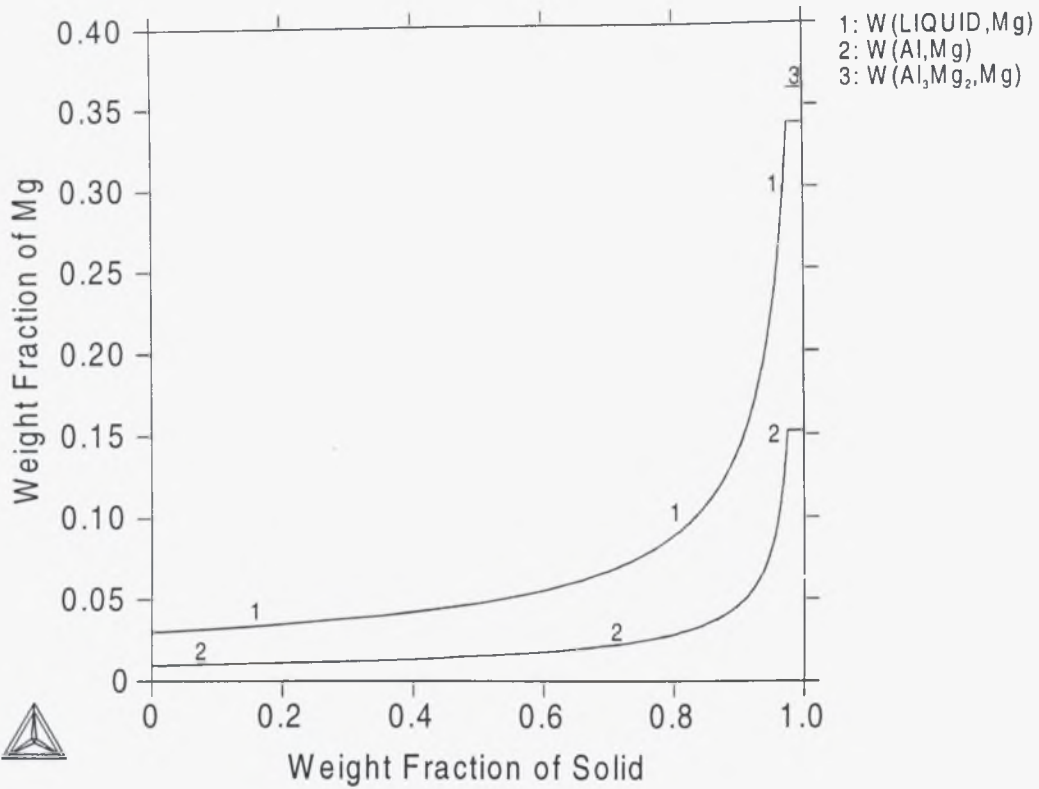
Σχήμα 4.2. Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος AlMg3



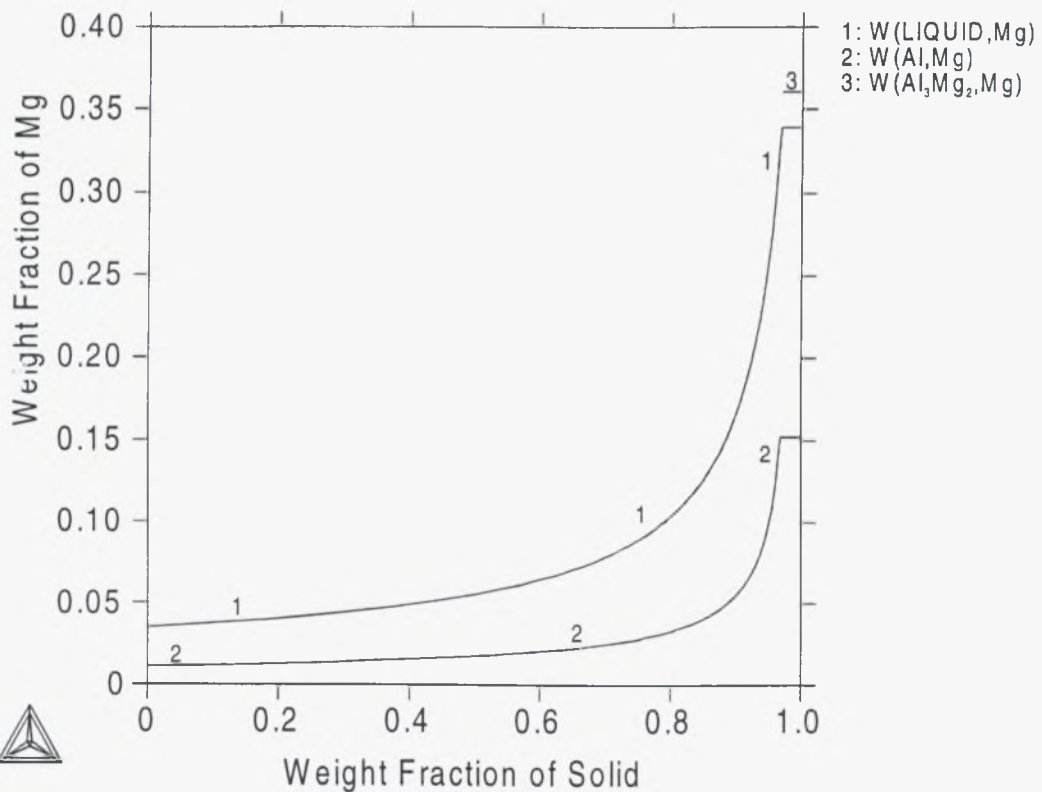
Σχήμα 4.3. Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος AlMg₃



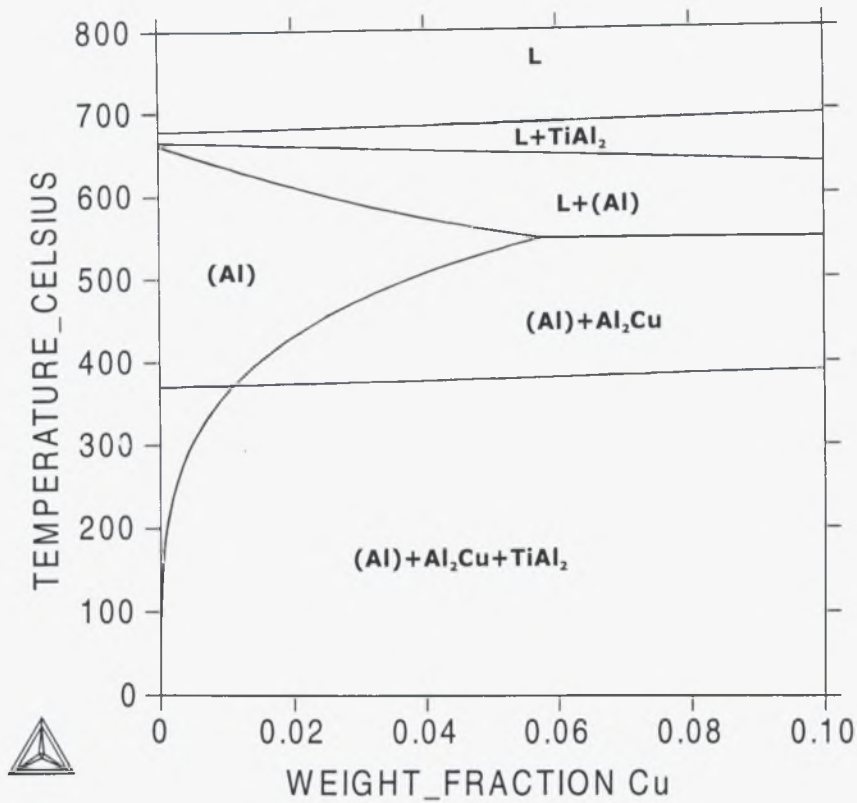
Σχήμα 4.4. Διάγραμμα διαφορισμού του Mg κατά την στερεοποίηση του κράματος AlMg₃ με σύσταση Mg - 2.5



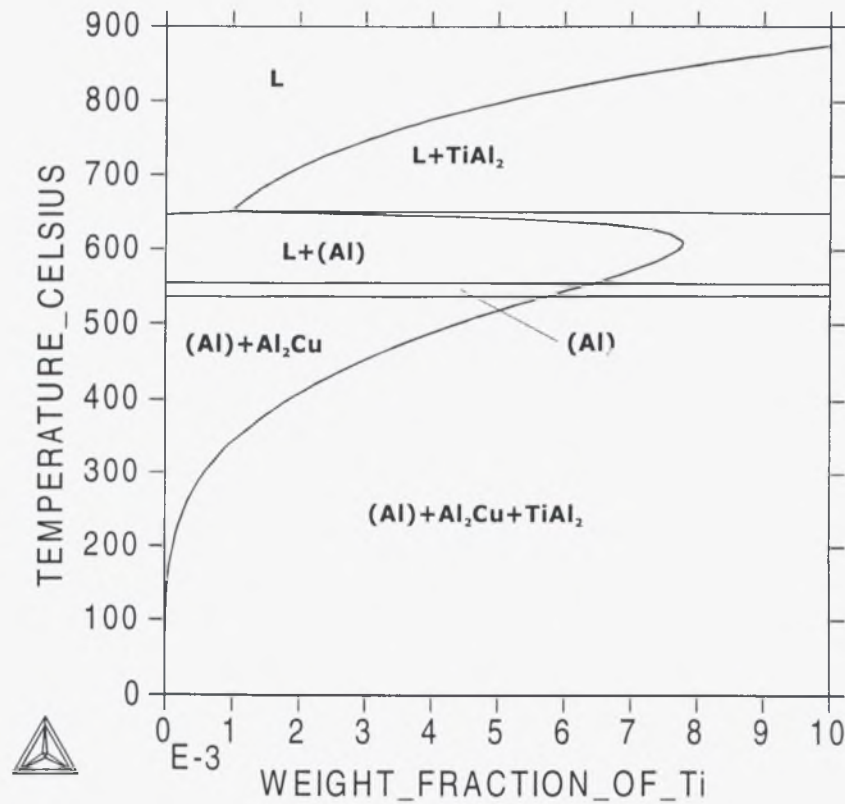
Σχήμα 4.5. Διάγραμμα διαφορισμού του Mg κατά την στερεοποίηση του κράματος AlMg₃ με σύσταση Mg - 3



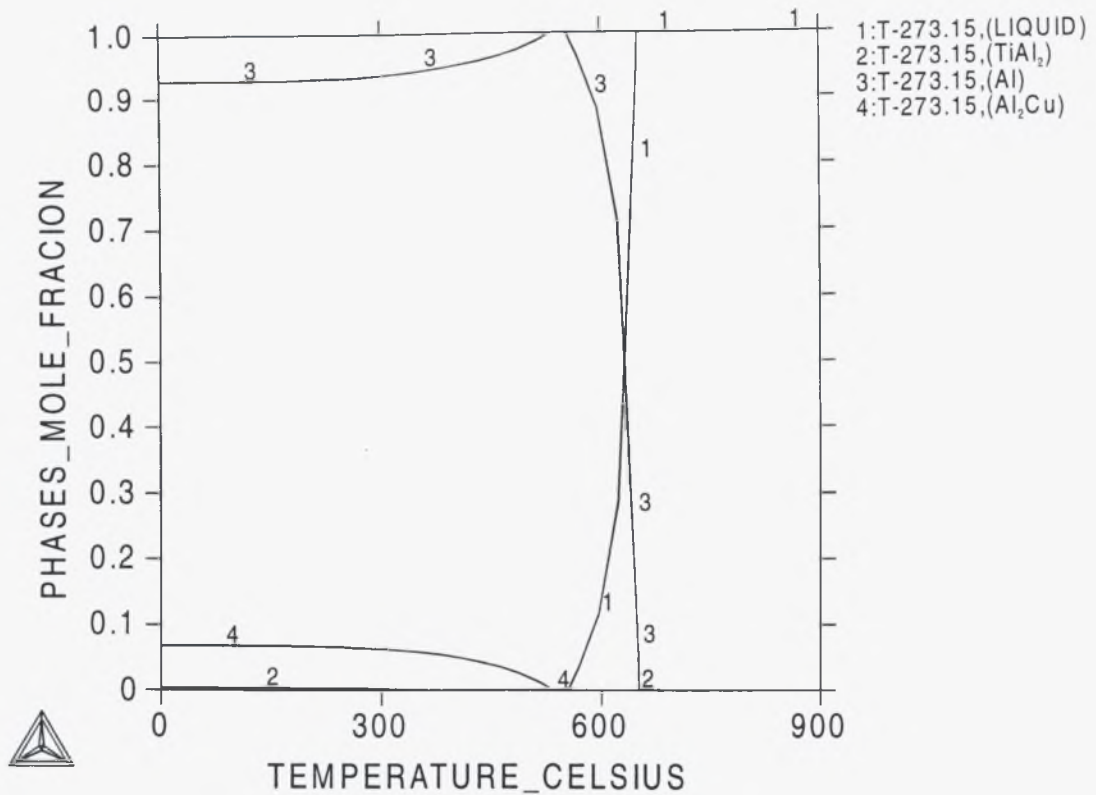
Σχήμα 4.6. Διάγραμμα διαφορισμού του Mg κατά την στερεοποίηση του κράματος AlMg₃ με σύσταση Mg - 3.5



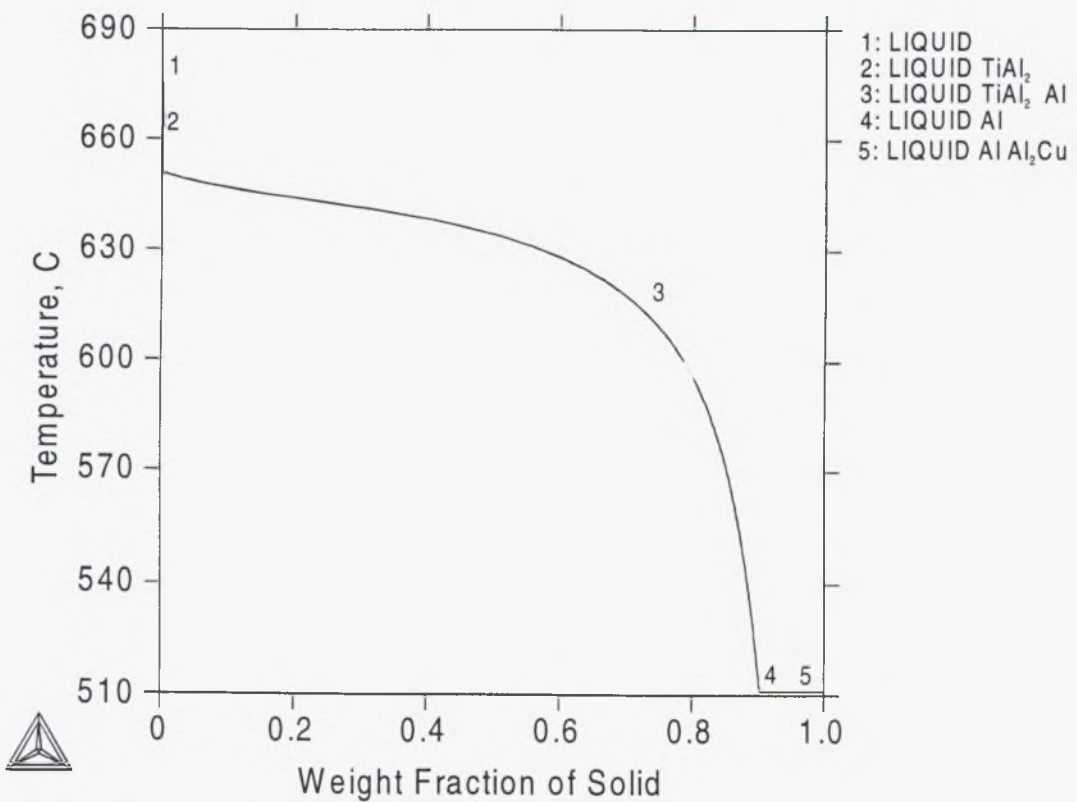
Σχήμα 5.1. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlCu4Ti



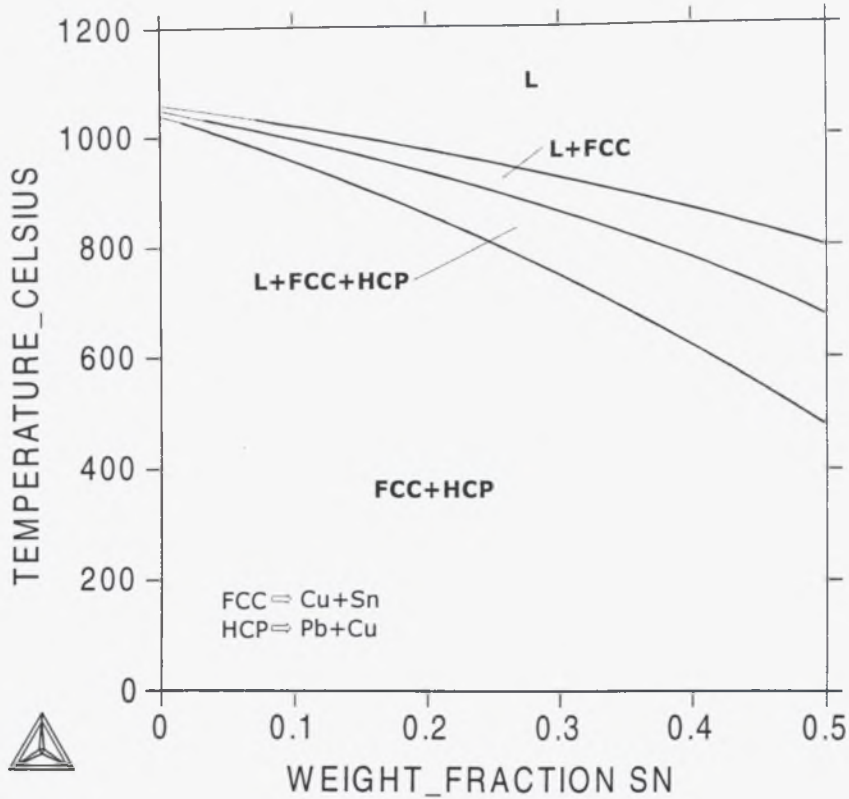
Σχήμα 5.2. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος AlCu4Ti



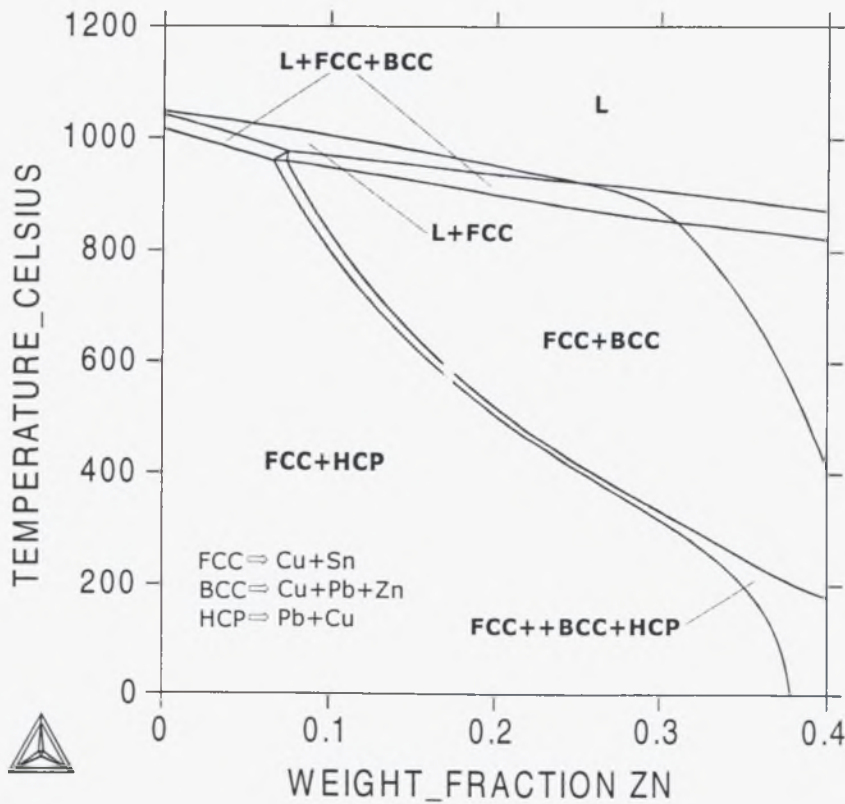
Σχήμα 5.3. Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος AlCu4Ti



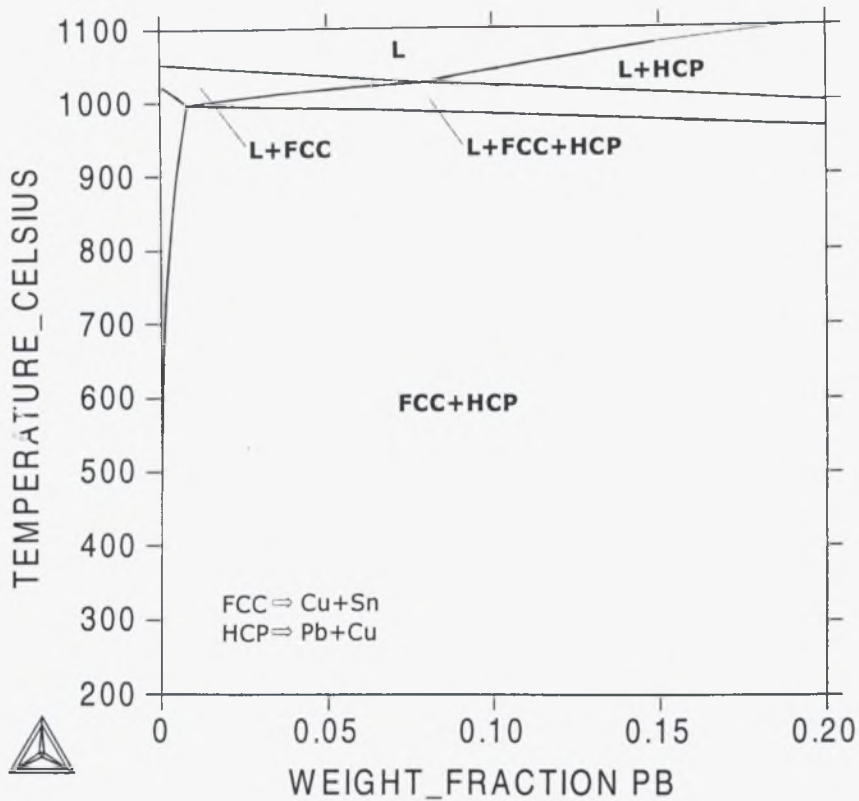
Σχήμα 5.4. Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος AlCu4Ti



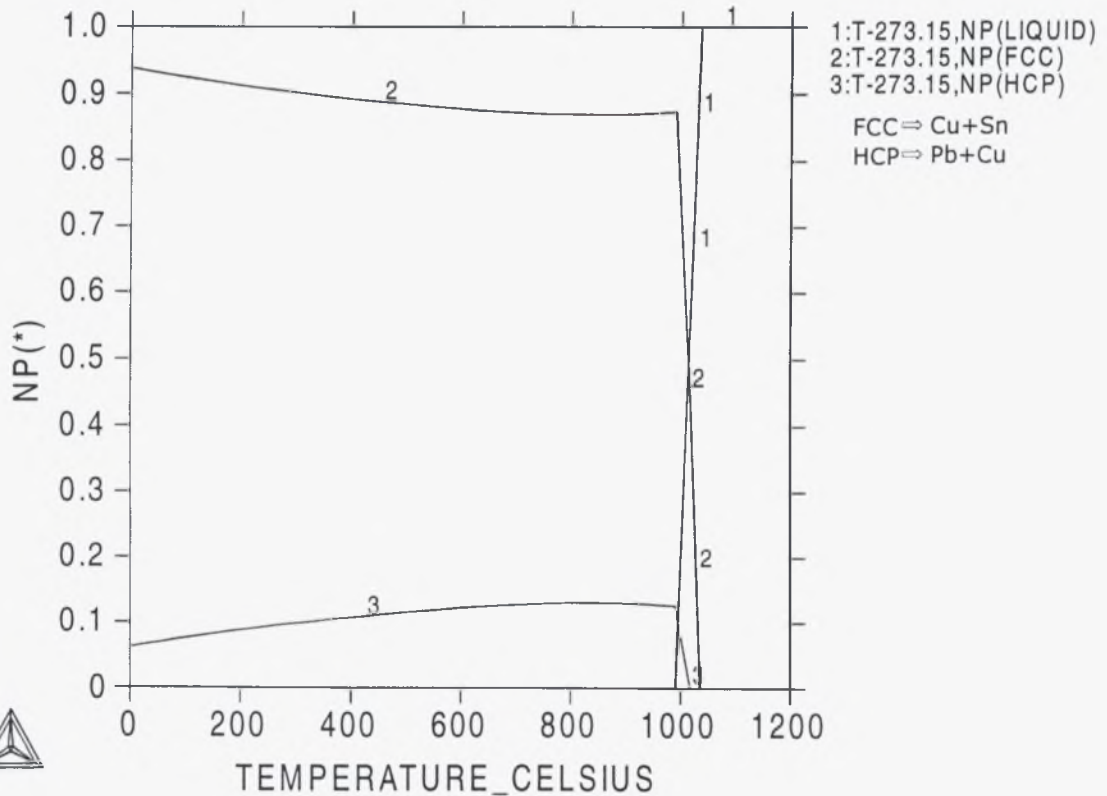
Σχήμα 6.1. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuSn7ZnPb



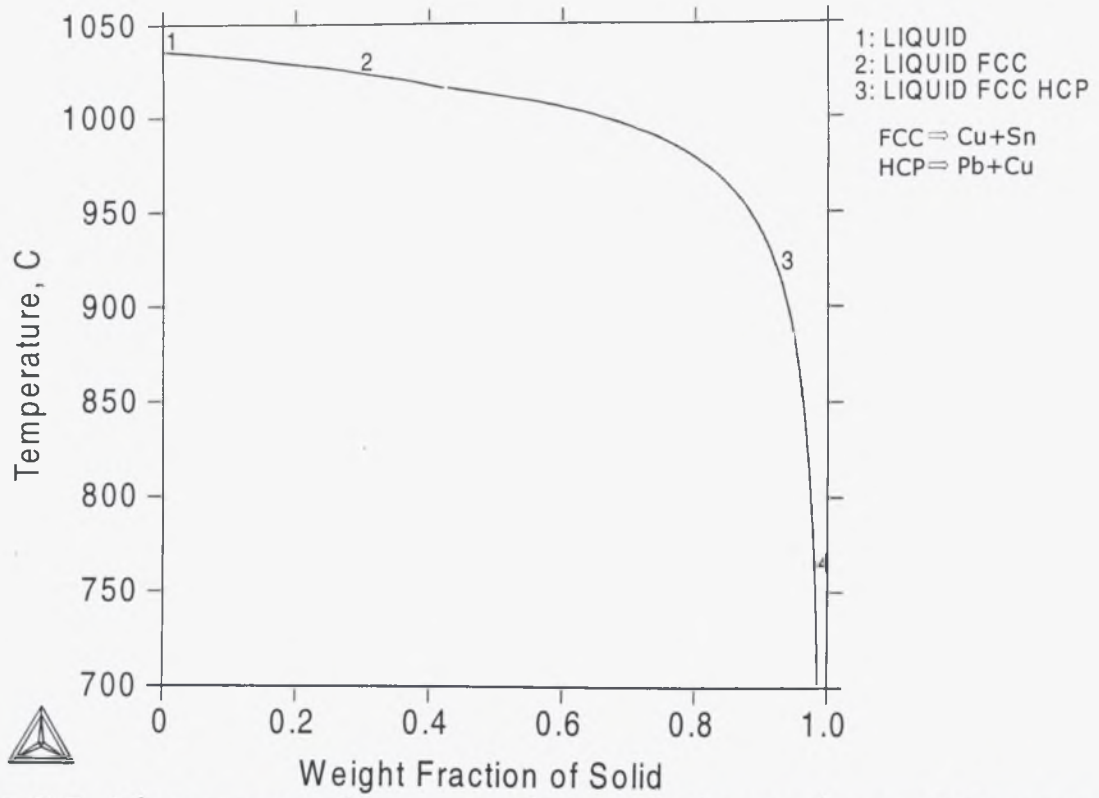
Σχήμα 6.2. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuSn7ZnPb



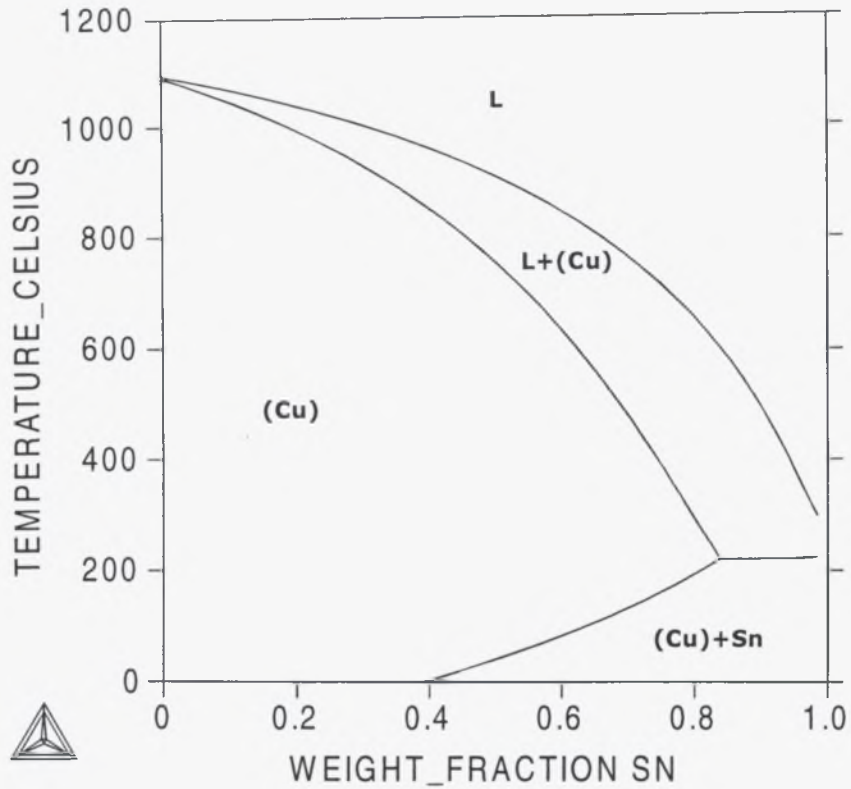
Σχήμα 6.3. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuSn7ZnPb



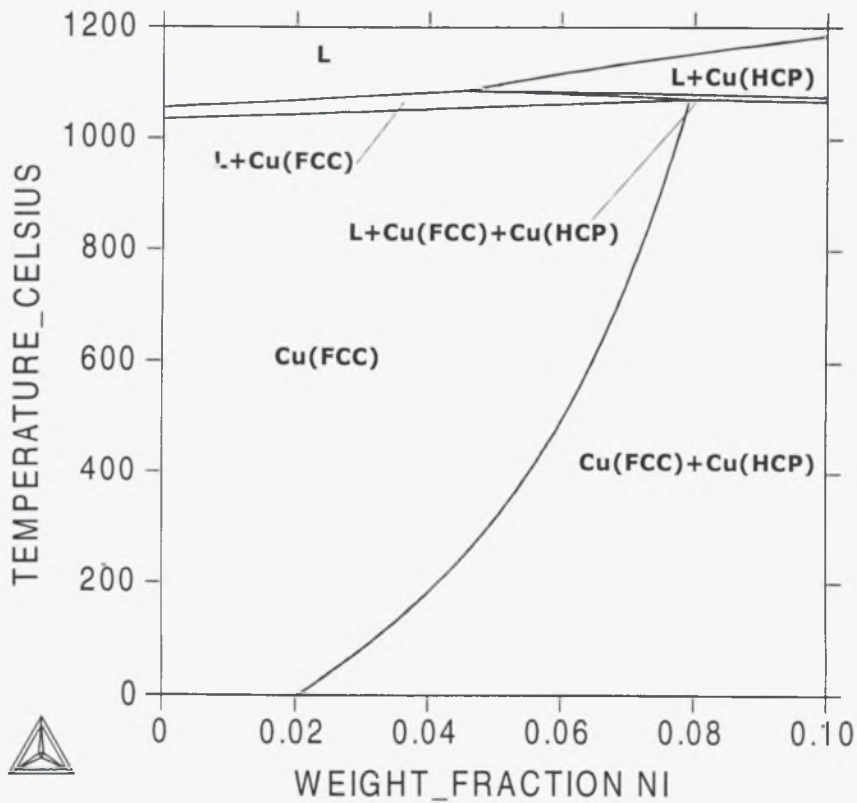
Σχήμα 6.4. Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος CuSn7ZnPb



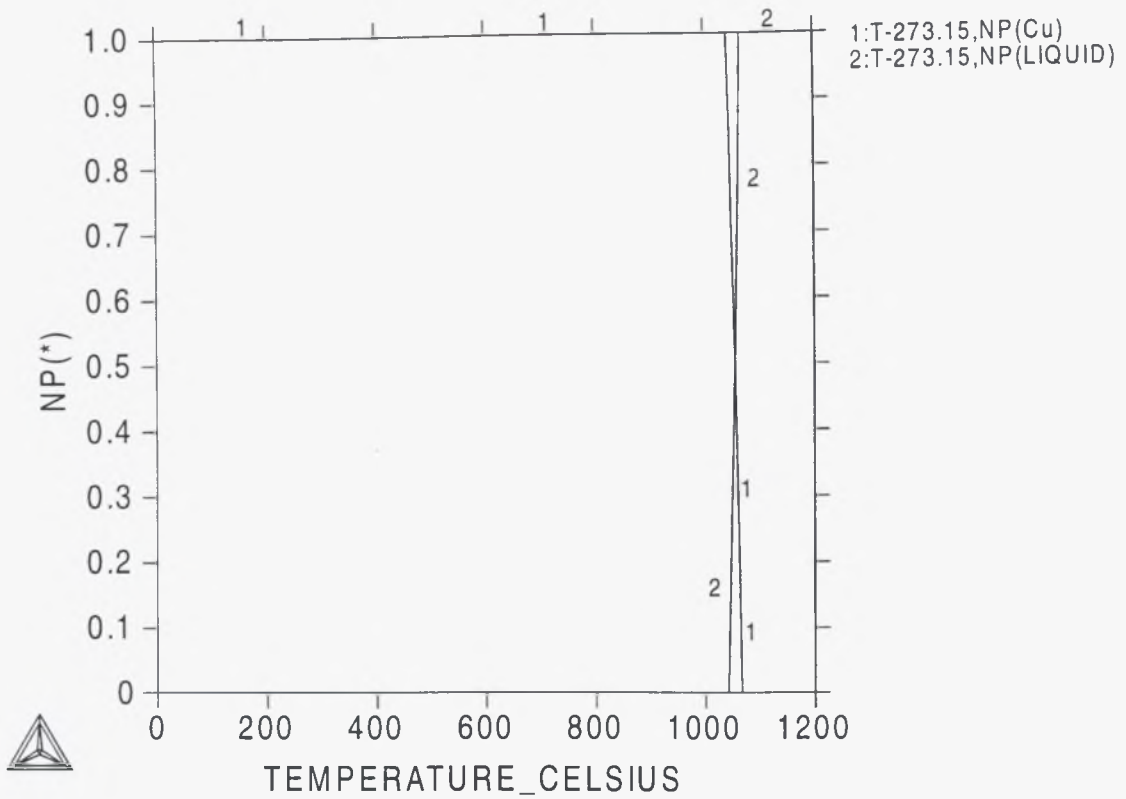
Σχήμα 6.5. Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος CuSn7ZnPb



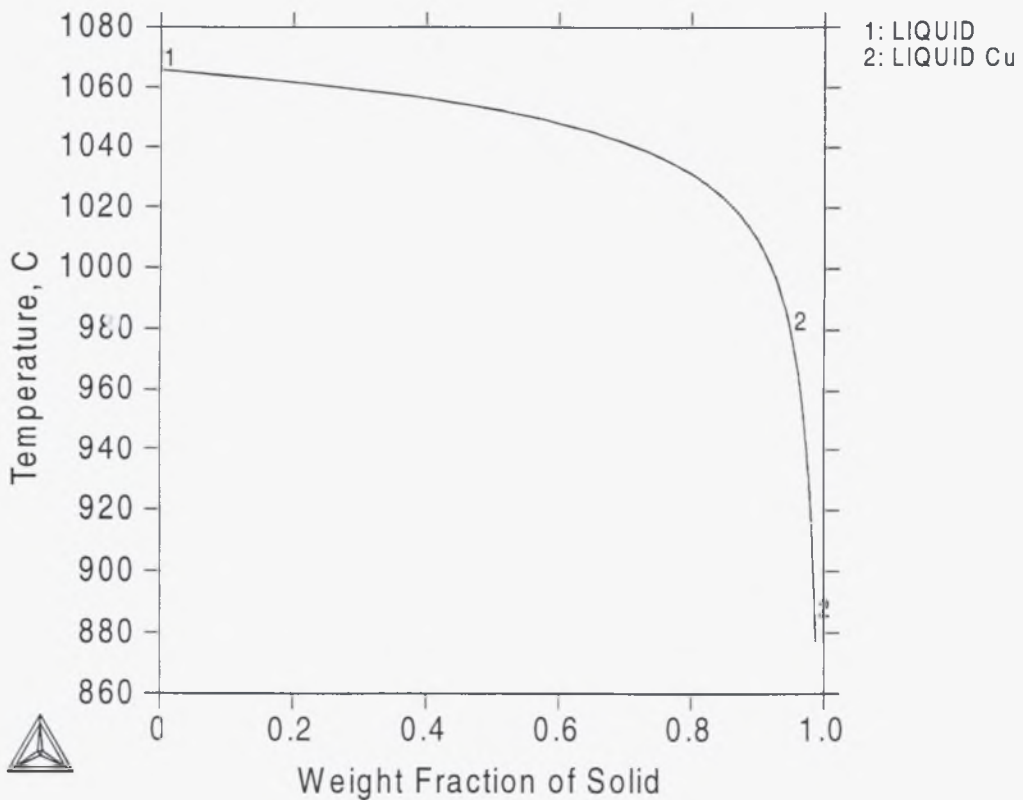
Σχήμα 7.1. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuSn12Ni



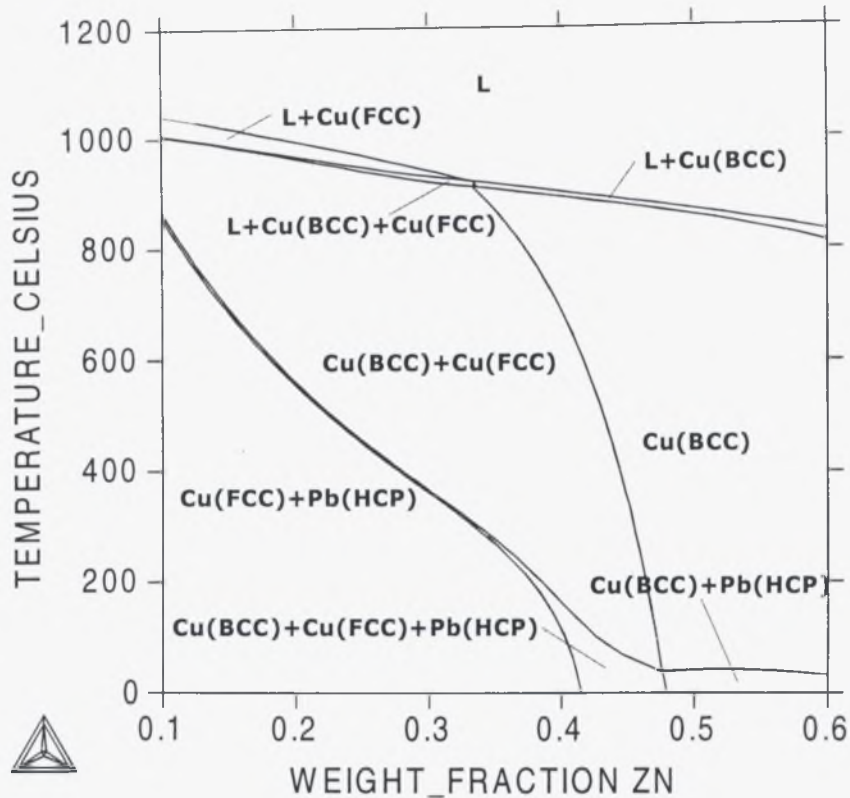
Σχήμα 7.2. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuSn12Ni



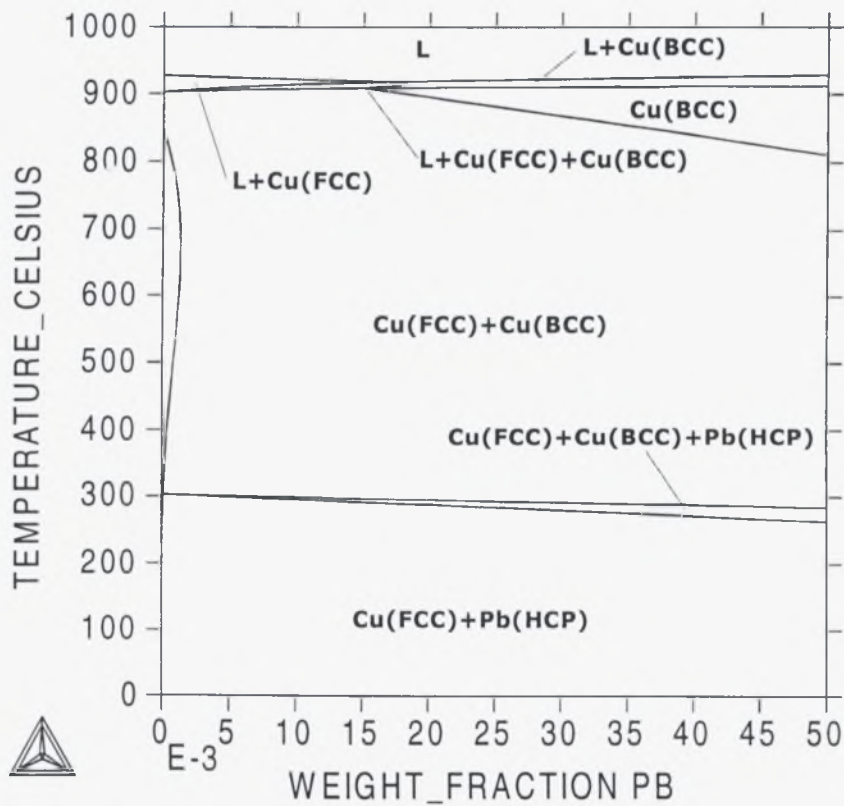
Σχήμα 7.3. Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος CuSn12Ni



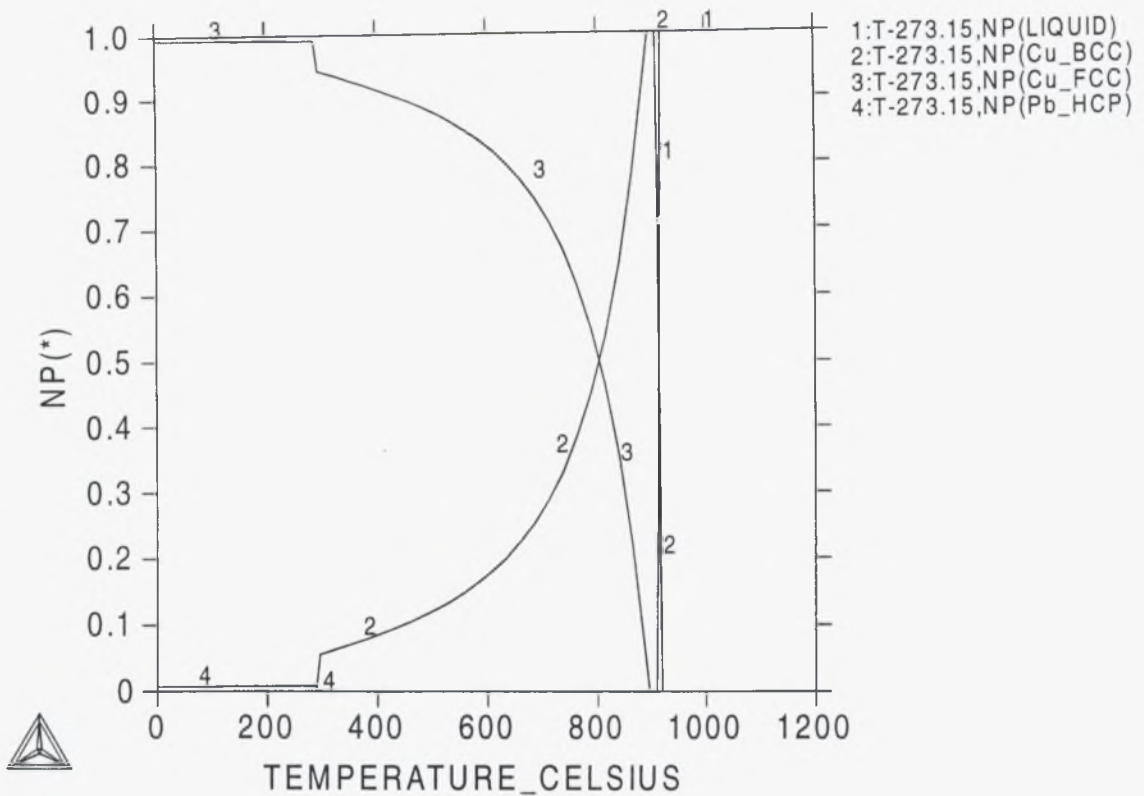
Σχήμα 7.4. Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος CuSn12Ni



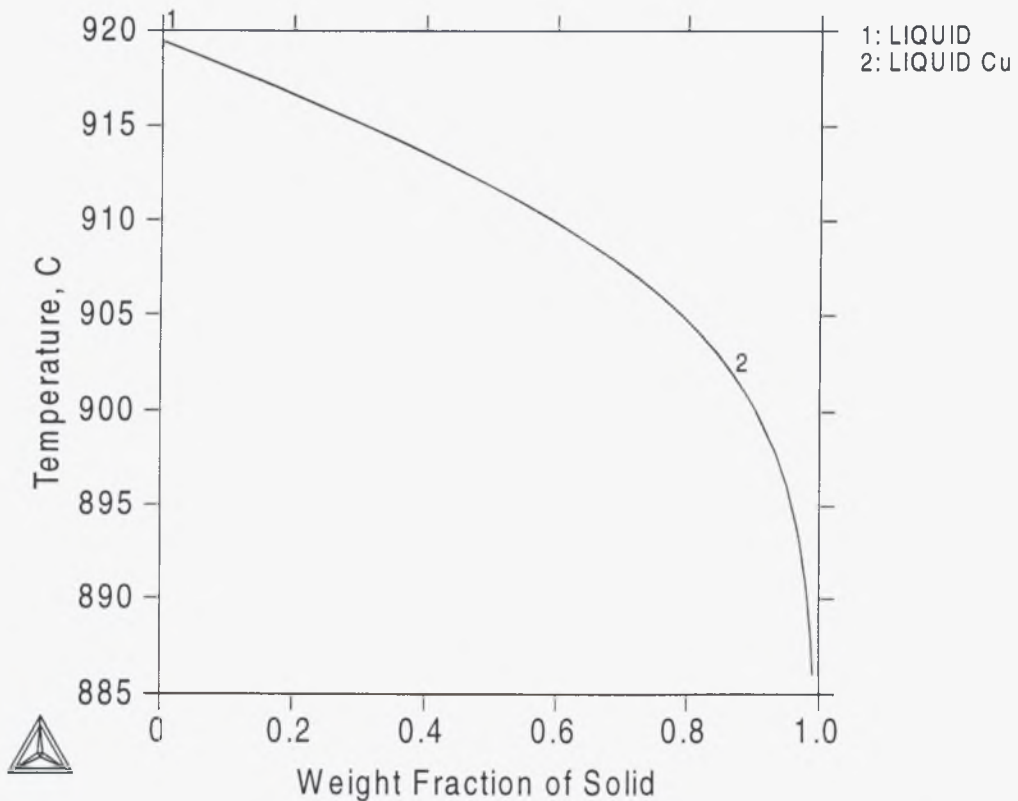
Σχήμα 8.1. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuZn33Pb



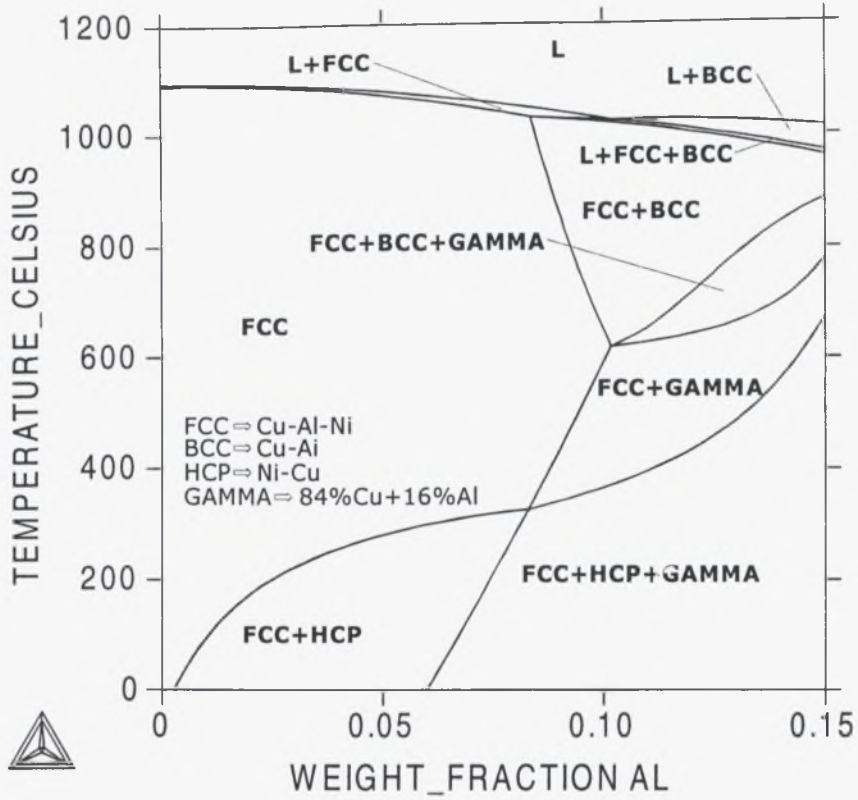
Σχήμα 8.2. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuZn33Pb



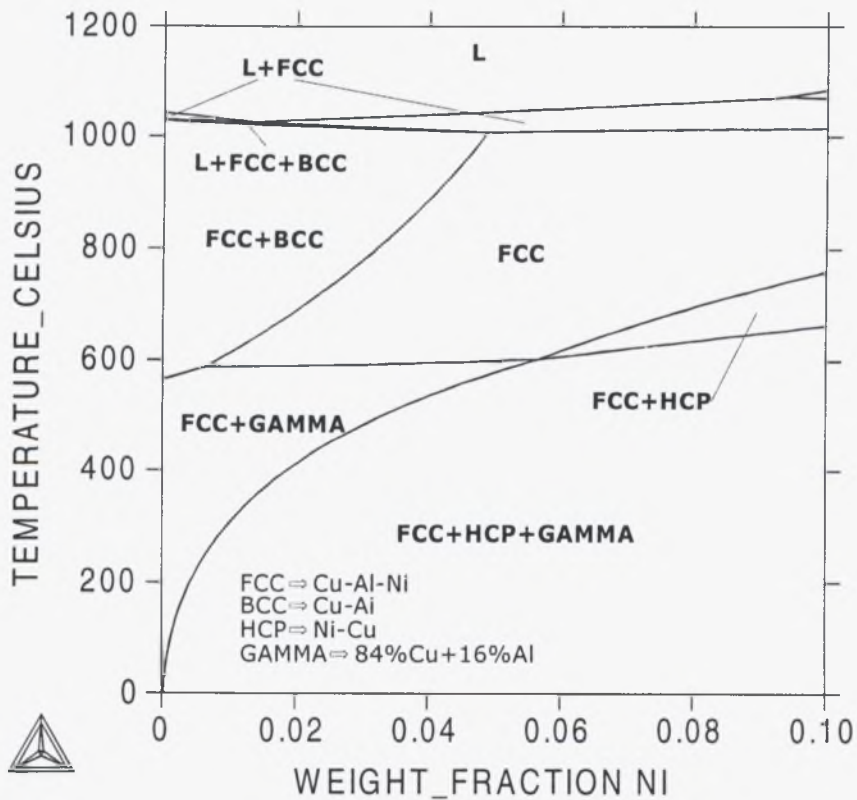
Σχήμα 8.3. Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος CuZn33Pb



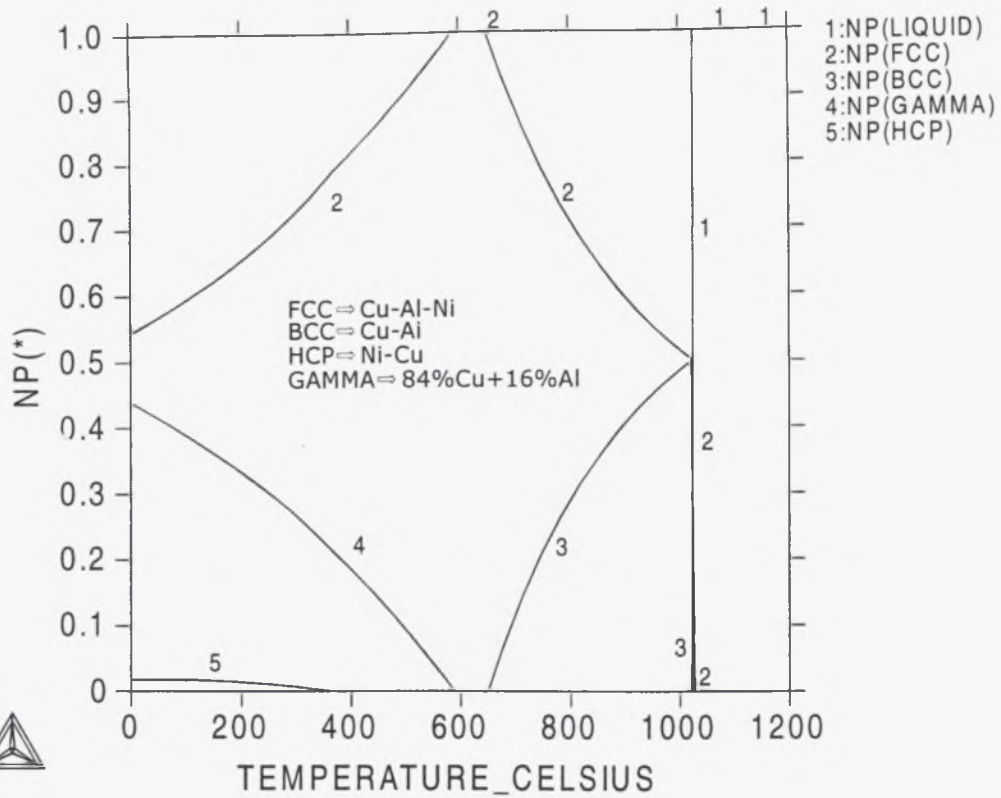
Σχήμα 8.4. Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος CuZn33Pb



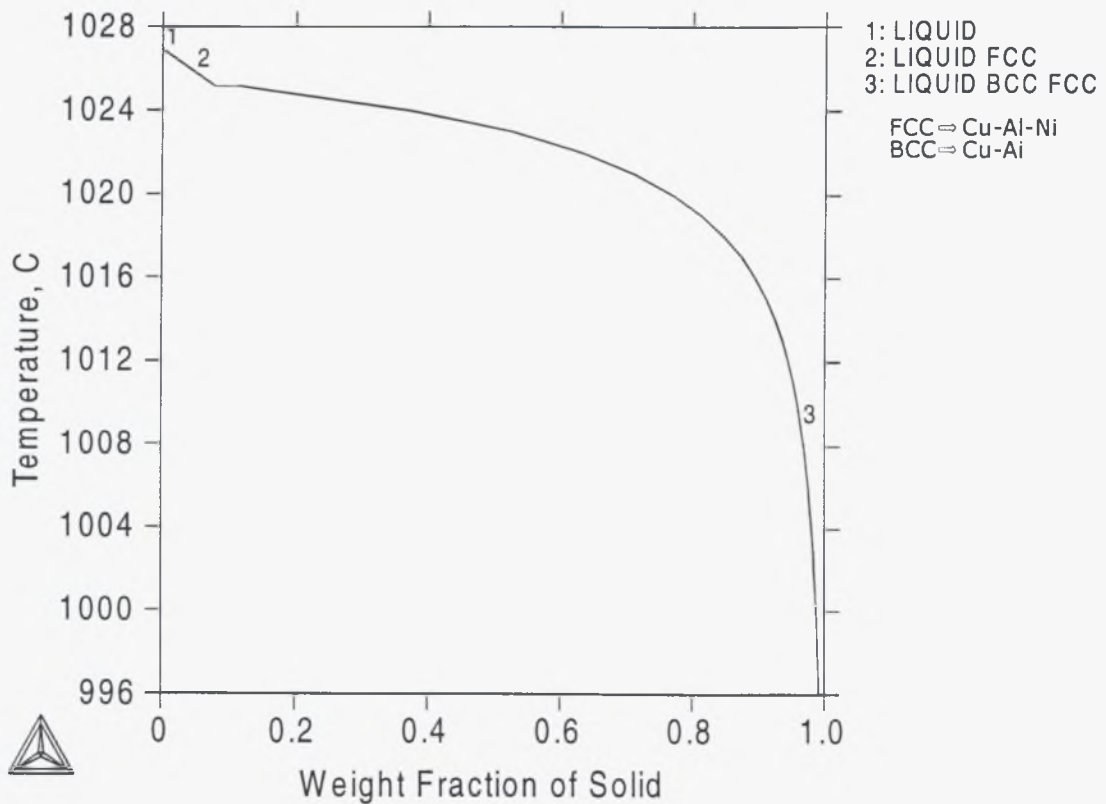
Σχήμα 9.1. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuAl9Ni



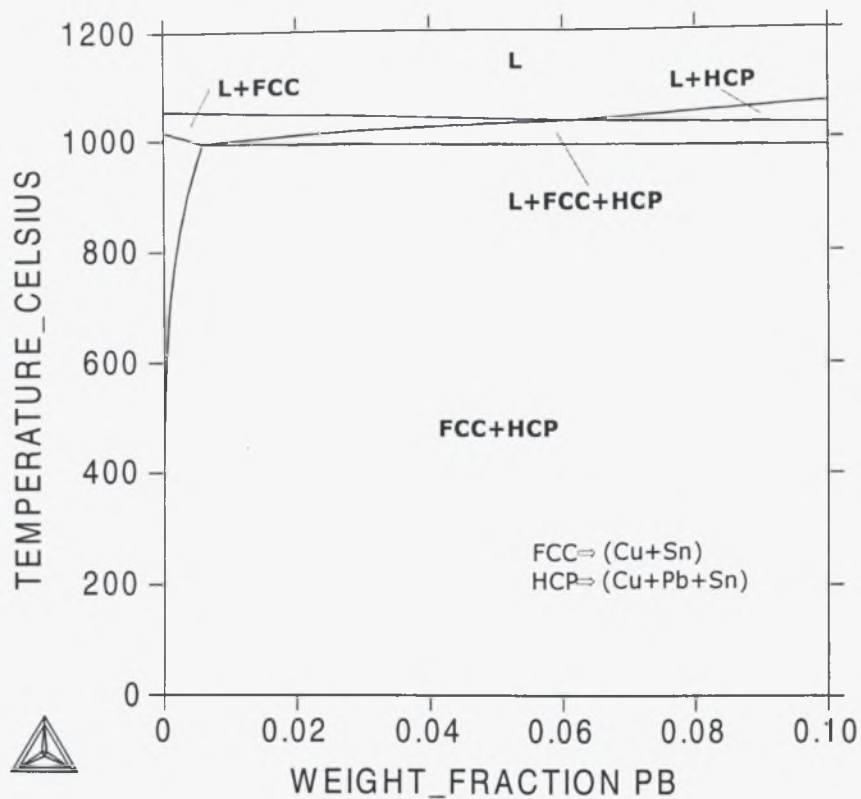
Σχήμα 9.2. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuAl9Ni



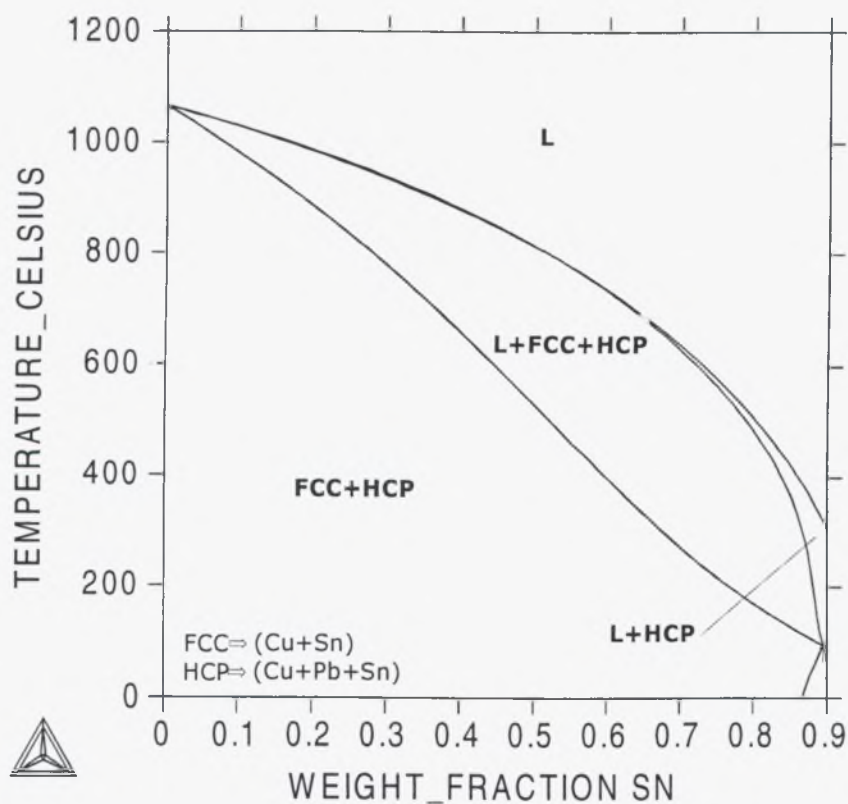
Σχήμα 9.3. Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος CuAl9Ni



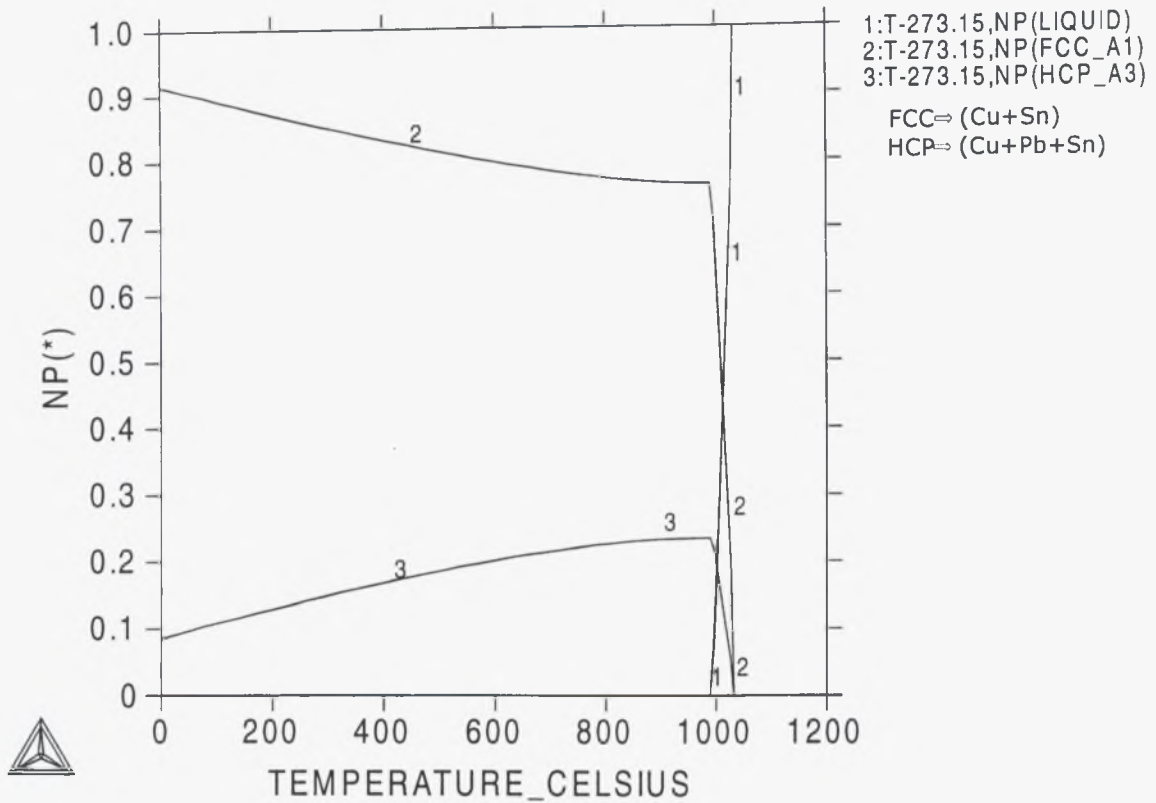
Σχήμα 9.4. Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος CuAl9Ni



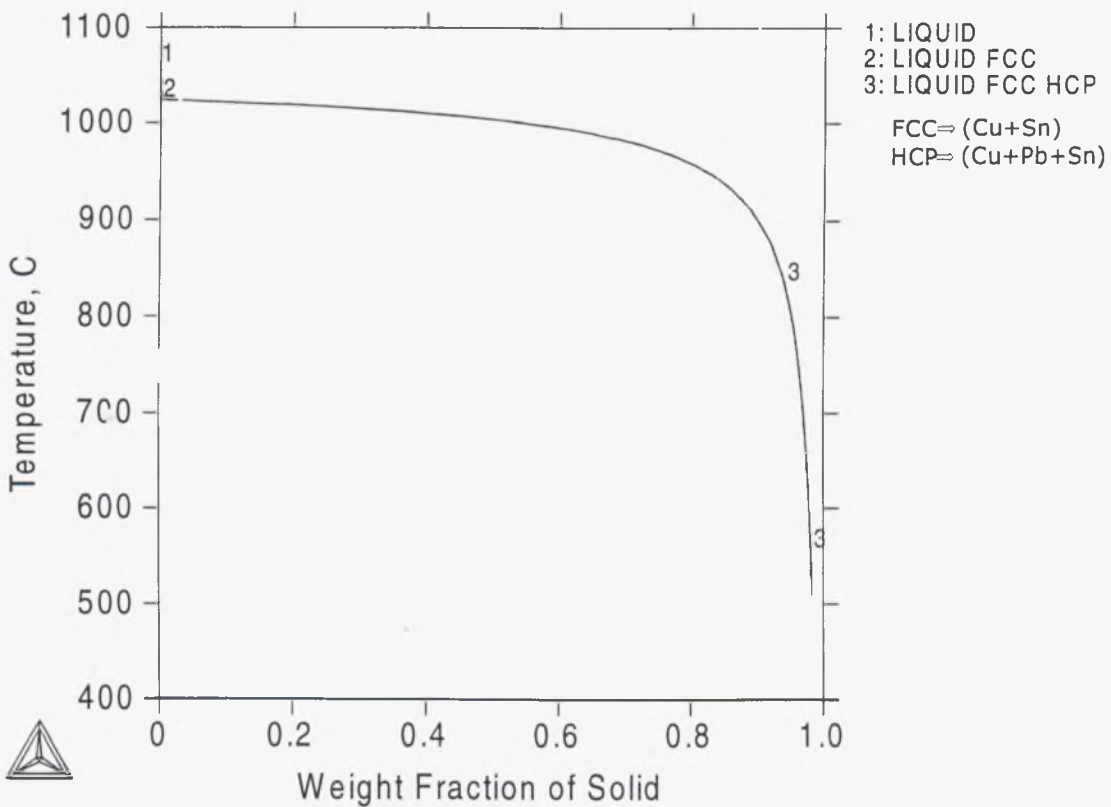
Σχήμα 10.1. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuPb5Sn



Σχήμα 10.2. Ισοσυστασιακό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του κράματος CuPb5Sn



Σχήμα 10.3. Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού των φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του κράματος CuPb5Sn



Σχήμα 10.4. Διάγραμμα πορείας στερεοποίησης Scheil του κράματος CuPb5Sn

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ

ΤΙΤΛΟΣ

ΛΗΞΗ	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΥ
10.6.02	ΛΑΡΑΝΑΣ
2/10/02	400
23.10.02	400

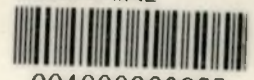
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

Τηλ.: 74.760-61

74233-5



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000062985

