

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ

ΜΗΧ
617



Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Σπουδαστής: Κωστάκης Ιωάννης του Μιλτιάδη Α.Μ. 36415

Επιβλέπων καθηγητής: Γιαννακόπουλος Κωνσταντίνος

ΠΕΙΡΑΙΑΣ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2012

Αφιερώνεται

στον πατέρα μου Μιλτιάδη και

στη μητέρα μου Παρασκευή

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	8
Εισαγωγή.....	10
Σκοπός της εργασίας.....	12
Ευχαριστίες.....	13
Προηγούμενες συναφείς μελέτες.....	14
1.Αλουμίνιο.....	19
1.1.Ιστορία του αλουμινίου.....	19
1.2.Γενικά για το αλουμίνιο.....	19
1.3.Μεταλλουργία και παραγωγή του αλουμινίου.....	21
1.4.Ιδιότητες του αλουμινίου.....	24
Βιβλιογραφία:.....	26
2.Κράματα αλουμινίου.....	27
2.1.Διαμορφωμένα κράματα αλουμινίου.....	29
2.2.Κράματα χύτευσης του αλουμινίου.....	37
Βιβλιογραφία:.....	42
3.Διαγράμματα ισορροπίας φάσεων συστημάτων αλουμινίου.....	43
3.1.Εισαγωγή.....	43
3.1.1.Διάκριση διαγραμμάτων.....	44
3.1.1α.Στερεά διαλύματα-φάσεις και ενώσεις στα διαγράμματα ισορροπίας.....	45
3.1.1β.Διμερή διαγράμματα φάσεων.....	46
3.2.Διμερή διαγράμματα ισορροπίας φάσεων συστημάτων αλουμινίου.....	48
Βιβλιογραφία:.....	58
4.Θερμικές κατεργασίες κραμάτων αλουμινίου.....	59
4.1.Εισαγωγή.....	59
4.2.Κατακρήμνιση στερεού διαλύματος.....	59

4.2.α.Τα εμπορικά κράματα αλουμινίου που υπόκεινται σε θερμικές κατεργασίες (θερμικά κατεργάσιμα).....	63
4.3.Θερμικές κατεργασίες κραμάτων αλουμινίου.....	65
4.3.α.Βελτίωση αντοχής με θερμική κατεργασία.....	65
4.3.β.Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης.....	74
4.3.γ.Απόψυξη(Βαφή).....	76
4.3.δ.Σκλήρυνση με κατακρήμνιση λόγω γήρανσης.....	80
4.4.Σκλήρυνση χυτών κραμάτων αλουμινίου.....	92
4.5.Ανόπτηση κατεργασμένων κραμάτων αλουμινίου.....	93
4.5.α.Πλήρης ανόπτηση.....	94
4.5.β.Αποτακική ανόπτηση.....	98
4.6.Ανάπτυξη κόκκων.....	99
Βιβλιογραφία:.....	104
5.Ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου.....	105
5.1.Μηχανικές ιδιότητες.....	105
5.1.α.Εισαγωγή.....	105
5.1.β. Μηχανικές καταπονήσεις δοκιμίων.....	108
5.1.γ.Μηχανικές ιδιότητες σειράς κραμάτων 5xxx.....	116
5.1.δ.Μηχανικές ιδιότητες σειράς κραμάτων 7xxx.....	118
Βιβλιογραφία:.....	127
6.Κράμα αλουμινίου-ψευδαργύρου 7075.....	128
6.1.Διάγραμμα ισοροπίας αναλυτικά.....	128
6.2.Ιδιότητες.....	130
Βιβλιογραφία:.....	134
7. Πειραματικό Πρόγραμμα.....	135
7.1. Προετοιμασία δοκιμίων.....	135
7.2. Θερμική κατεργασία δοκιμίων.....	136

7.3. Μηχανική καταπόνηση εφελκυσμού.....	136
7.4.Θραυστομηχανική	139
Βιβλιογραφία:.....	141
8. Αποτελέσματα και Συζήτηση	142
8.1. Διαγράμματα.....	142
8.2. Πίνακες	148
8.3. Φωτογραφίες.....	149
8.4. Συμπεράσματα	153

Πρόλογος

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται μια προσπάθεια προσέγγισης της επιστήμης και τεχνολογίας του αλουμινίου και των κραμάτων του σε καθολικό επίπεδο καλύπτοντας όσο το δυνατόν περισσότερα επιστημονικά πεδία γύρω από αυτό. Λόγω των ιδιοτήτων του το αλουμίνιο ως υλικό παράγεται, κατεργάζεται και χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών και καθίσταται το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μεταλλικό υλικό μετά το σίδηρο. Μάλιστα, κατά πολλούς θεωρείται το υλικό του μέλλοντος ειδικά στους τομείς των μεταφορών και της αρχιτεκτονικής.

Παρουσιάζοντας, λοιπόν, τεράστιο ενδιαφέρον από μηχανολογικής πλευράς το αλουμίνιο ως υλικό, με οδήγησε στην απόφαση συγγραφής αυτής της πτυχιακής εργασίας η οποία αποτελείται από δύο κύρια μέρη. Το θεωρητικό στο οποίο καλύπτεται η τεχνολογία του αλουμινίου συμπεριλαμβανομένων των κραμάτων και των ιδιοτήτων του αλλά και των μεθόδων κατεργασίας αυτού όπως οι θερμικές κατεργασίες. Και το πειραματικό μέρος στο οποίο ένα εμπορικά διαδεδομένο κράμα αλουμινίου υπόκεινται σε καταπονήσεις μέσω των οποίων οδηγούμαστε σε συμπεράσματα που ίσως συμβάλλουν στην περαιτέρω γνώση και αξιοποίηση αυτού του υλικού.

Στη σημερινή εποχή όπου η ποικιλία των διατιθέμενων υλικών είναι πολύ μεγάλη και οι μηχανολογικές κατασκευές γίνονται όλο και πιο πολύπλοκες καθίστανται εξαιρετικά δύσκολη η επιλογή των κατάλληλων υλικών κατασκευής και ο σχεδιασμός τους με βασικό κανόνα την ασφαλή και αποδοτική λειτουργία τους. Για να μπορούν λοιπόν οι σύγχρονες μηχανολογικές κατασκευές να επιτελούν τη λειτουργία για την οποία δημιουργήθηκαν με αποδοτικό και οικονομικό τρόπο θα πρέπει να είναι ασφαλή, ανθεκτικά, να διαρκούν, να μην παραμορφώνονται πέρα από κάποιο όριο και αν παραμορφώνονται να μην σπάνε, δηλαδή να αστοχούν. Στην πραγματικότητα, η θραύση κάποιου υλικού αντιπροσωπεύει την έσχατη αστοχία του επιλεχθέντος υλικού, που είναι αποτέλεσμα ανεπαρκούς σχεδιασμού ή/και επιλογής συνθηκών λειτουργίας του. Η θραύση των υλικών δεν έχει μόνο ως άμεση συνέπεια την οικονομική ζημιά, και πολλές φορές την απώλεια ανθρώπινης ζωής ή/και δυσμενείς περιβαλλοντικές συνέπειες.

Προκειμένου να αποφευχθούν η παραπάνω δυσμενείς συνέπειες κρίνεται απαραίτητη η πειραματική μελέτη ενός κατασκευαστικού υλικού. Για να μελετηθούν αποτελεσματικά και διεξοδικά τα φαινόμενα παραμόρφωσης, αστοχίας και θραύσης μέσω της εκτέλεσης πειραμάτων, πρέπει να ληφθούν υπόψη και να μελετηθούν πολλοί παράγοντες που

παίζουν σημαντικό ρόλο στην εκπόνηση του πειράματος και στη λήψη των αποτελεσμάτων. Τέτοιοι παράγοντες είναι το κόστος των υλικών που εξετάστηκαν, ο χρόνος διεξαγωγής των πειραμάτων, η σωστή χρήση του εργαστηριακού εξοπλισμού και οι συνθήκες υπό τις οποίες διεξήχθησαν τα πειράματα. Στο πειραματικό πρόγραμμα που εκπονήθηκε, πραγματοποιήθηκε σειρά δοκιμών εφελκυσμού σε σειρές αλουμινένιων δοκιμίων. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επιτυχή διεξαγωγή των πειραμάτων εμπεριέχει τη σωστή επιλογή του υπό εξέταση κατασκευαστικού υλικού, τα χαρακτηριστικά του, την κατάλληλη διαμόρφωση των δοκιμίων, την προετοιμασία και μηχανουργική επεξεργασία τους, τη σωστή χρήση των πειραματικών διατάξεων, τον έλεγχο των υπαρχουσών συνθηκών, τα χαρακτηριστικά των φορτίσεων που επιβλήθηκαν, την προσεκτική παρατήρηση των δοκιμίων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και, τέλος, την προσεκτική λήψη, καταγραφή, επεξεργασία και αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Ο σχεδιασμός των πειραμάτων είναι πάντα μια πολυσύνθετη διαδικασία, κατά την οποία προσδιορίζονται οι σχέσεις αλληλεπίδρασης μεταξύ διαφορετικών και ανεξάρτητων μεταβλητών, με στόχο να λάβουμε όσο το δυνατόν πιο έγκυρα και ακριβή αποτελέσματα. Είναι γνωστό, ότι κάθε πειραματική μελέτη εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, οι οποίοι όμως είναι πολύ δύσκολο να ληφθούν όλοι υπόψη κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Είναι σαφές, ότι μια πειραματική διαδικασία που θα συμπεριλαμβάνει μια πλήρη και πολυάριθμη ομάδα δοκιμίων για την απόλυτα ακριβή αξιολόγηση όλων των επιδράσεων των μεταβλητών στα πειραματικά αποτελέσματα, θα ήταν αναποτελεσματική, και από άποψη χρόνου και κόστους. Είναι, επομένως, απαραίτητη μια επιλογή των σημαντικότερων παραγόντων, περιορισμών και μεταβλητών που επηρεάζουν το πείραμα, έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικό της πραγματικής κατασκευής.

Εισαγωγή

Το θέμα της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων κατεργασμένων κραμάτων αλουμινίου. Πιο συγκεκριμένα, στόχος της παρούσης εργασίας είναι, αρχικά η θεωρητική παρουσίαση της επιστήμης και τεχνολογίας του αλουμινίου και των κραμάτων του καθώς επίσης και επίσης και οι κατεργασίες στις οποίες υπόκειται ως υλικό προκειμένου να αποκτήσει συγκεκριμένη μορφή και επιθυμητές ιδιότητες. Στην συνέχεια ακολουθεί πειραματική μελέτη συγκεκριμένων κραμάτων βασισμένη στα όσα έχουν αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος, και ειδικότερα στις μηχανικές ιδιότητες που έχουν προκύψει έπειτα από μια σειρά κατεργασιών, η οποία μελέτη μέσω της παρατήρησης πειραματικών δοκιμών μας οδηγεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες και το πως αυτές μεταβάλλονται στα κατεργασμένα κράματα αλουμινίου.

Λόγω της πολυπλοκότητας και της ποικιλομορφίας που παρουσιάζει το αλουμίνιο ως υλικό, πραγματοποιήθηκε προσπάθεια ώστε το θεωρητικό μέρος να είναι όσο πιο περιεκτικό αλλά και ουσιώδες γίνεται και η πειραματική διαδικασία σχεδιάστηκε έτσι ώστε να εξαχθούν δεδομένα τα οποία με πειραματική ανάλυση θα οδηγήσουν σε ουσιώδη και ασφαλή συμπεράσματα. Έτσι το θεωρητικό μέρος της εργασίας επικεντρώνεται κυρίως στα διαμορφωμένα κράματα αλουμινίου, θερμικά κατεργάσιμα και μη θερμικά κατεργάσιμα, και το πειραματικό μέρος περιλαμβάνει την ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων ενός συγκεκριμένου κράματος αλουμινίου, θερμικά κατεργασμένο κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης του, το οποίο υποβάλλεται στη δοκιμή του εφελκυσμού με αντίστοιχα strain rates (ρυθμούς αύξησης της επιβαλλόμενης τάσης) η οποία οδήγησε στην εξαγωγή των αντίστοιχων συμπερασμάτων.

Η πτυχιακή εργασία αποτελείται από οκτώ κεφάλαια πέραν των εισαγωγικών παραγράφων. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική παρουσίαση του αλουμινίου ως υλικό συμπεριλαμβανοντας ιστορικές αναφορές, μεθόδους παραγωγής και φυσικές ιδιότητες σε σχέση με άλλα γνωστά μέταλλα. Το δεύτερο κεφάλαιο ασχολείται με τα κράματα του αλουμινίου, χυτά και διαμορφωμένα, τις φυσικές-μηχανικές ιδιότητες αυτών και τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται. Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθενται τα διαγράμματα ισορροπίας φάσεων των συστημάτων αλουμινίου με ιδιαίτερη αναφορά στα διμερή διαγράμματα ισορροπίας φάσεων. Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει αναλυτικά τις σημαντικότερες θερμικές κατεργασίες στις οποίες υποβάλλονται τα

θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου και έχει ιδιαίτερη σημασία αφού είναι αφού είναι αυτές που πραγματοποιούνται και πειραματικό μέρος. Στο πέμπτο κεφάλαιο που είναι εξίσου σημαντικό με το τέταρτο, αναλύονται οι ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στις μηχανικές ιδιότητες των διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου. Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση του διμερούς διαγράμματος ισορροπίας φάσεων του κράματος 7075 αφού αποτελεί και το ένα από τα δύο χρησιμοποιούμενα κράματα του πειραματικού μέρους. Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πειραματικό πρόγραμμα συμπεριλαμβάνοντας όλες τις δοκιμές και τις πειραματικές μετρήσεις που έγιναν. Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού για κάθε δοκίμιο λαμβάνοντας υπ' όψη και όλα τα δεδομένα που εξήχθησαν.

Σκοπός της εργασίας

Βασικός σκοπός της πτυχιακής εργασίας, πέρα από τη θεωρητική παρουσίαση της επιστήμης και τεχνολογία του αλουμινίου, είναι η ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν τα κράματα αλουμινίου έπειτα από κατεργασίες όπως οι θερμικές κατεργασίες ομογενοποίησης και τεχνητής γήρανσης, η βαφή, η γήρανση και οι διάφοροι μέθοδοι συγκόλλησης. Πιστεύω, λοιπόν, ότι η ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας επιτρέπει μέσω των πειραματικών δοκιμών, τη συγκέντρωση πολύτιμων πληροφοριών οι οποίες οδηγούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων και μπορούν να ληφθούν υπ' όψη από το χρήστη, μηχανολόγο, μεταλλουργό, σχεδιαστή κτλ. παρέχοντας του τη δυνατότητα να αξιολογήσει, σχεδιάσει, κατασκευάσει νέα προϊόντα με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο και την βέλτιστη ποιότητα και ασφάλεια.

Ευχαριστίες

Θερμές ευχαριστίες για την πραγματοποίηση και ολοκλήρωση της πτυχιακής αυτής εργασίας οφείλονται στην οικογένεια μου και τη κοπέλα μου για την υπομονή και την στήριξη τους όλο αυτό τον καιρό, στον καθηγητή Κωνσταντίνο Γιαννακόπουλο που χωρίς την υποστήριξη του η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήταν αδύνατη και στα μέλη του εργαστηρίου Μηχανικής II για την παραχώρηση του εξοπλισμού για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Προηγούμενες συναφείς μελέτες

Στο κράμα 7075:

Οι LI Jin-feng κ.α. μελέτησαν τις μηχανικές ιδιότητες και τις μικροδομές του διαμορφωμένου κράματος αλουμινίου 7075 μέσω διαφόρων κατεργασιών γήρανσης. Οι ερευνητές αυτοί υπέβαλαν όλα τα δοκίμια σε θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης στους 470 °C για 1 ώρα και μετά ομαδοποιώντας τα δοκίμια, τα υπέβαλαν στις θερμικές κατεργασίες τεχνητής γήρανσεως T6, T73, RRA, T616 και HTPP. Στη συνέχεια στα θερμικά κατεργασμένα δοκίμια έκαναν μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού, δοκιμές διάβρωσης και μεταλλογραφική ανάλυση. Παρατήρησαν ότι η κατεργασία γήρανσης HTPP μείωσε την πυκνότητα των η' κατακρημνισμάτων του κράματος 7075 λόγω της κατακρήμνισης κάποιων χονδρόκοκκων σωματιδίων κατά τη διάρκεια της προκατακρημνίσεως διεργασίας στην θερμοκρασία των 445 °C. Το κράμα 7075-T616 εμφανίζει υψηλότερη πυκνότητα κατακρημνίσεων και υψηλότερο συνολικό όγκο κατακρημνισμάτων διαχωρισμένων στους κόκκους σε σχέση με το κράμα 7075-T73 και ο συνολικός όγκος των διασπασμένων κατακρημνισμάτων είναι ακόμα μεγαλύτερος από αυτόν του κράματος 7075-T6 λόγω της διακοπτόμενης διαδικασίας γήρανσης στους 65 °C για 240 ώρες. Η κατακρήμνιση της φάσης η' είναι συνεχώς κατανεμημένη στα όρια των κόκκων του κράματος 7075-T6. Ωστόσο οι κατεργασίες T73, RRA, T616 και HTPP προκαλούν προκαλούν ασυνέχειες στην κατανομή των η' κατακρημνισμάτων στα όρια των κόκκων. Ακόμη παρατήρησαν ότι συγκριτικά με την κατεργασία T6, οι κατεργασίες RRA και T616 όχι μόνο διατηρούν την υψηλή αντοχή του κράματος 7075 αλλά επίσης αυξάνουν και την αντίσταση του σε διάβρωση. Σε αντίθεση οι κατεργασίες γήρανσης T73 και HTPP αυξάνουν μεν την αντίσταση του κράματος σε διάβρωση αλλά μειώνουν την αντοχή του. Τέλος μέσα από τον σχετικό πίνακα 2 των ιδιοτήτων εφελκυσμού του κράματος 7075 παρατηρείται ότι με τις κατεργασίες T6, RRA, T616 επιτυγχάνεται υψηλή αντοχή ενώ με τις T73 και HTPP η αντοχή μειώνεται με το κράμα 7075-T73 να εμφανίζει τη μικρότερη αντοχή.[1]

Οι R. Clark Jr κ.α. μελέτησαν τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες διαμορφωμένου κράματος αλουμινίου 7075-T6 μέσω εναλλαγής διαφορετικών θερμοκρασιών κατεργασίας διαλυτοποίησης, διαφορετικών μέσων απόψυξης και διαφορετικών συνθηκών γήρανσης. Οι ερευνητές αυτοί υπέβαλαν τα δοκίμια σε θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης με πέντε διαφορετικές θερμοκρασίες διαλυτοποίησης, βαφή με δύο

διαφορετικά μέσα απόψυξης και μετά σε κατεργασίες τεχνητής γήρανσης και υπεργήρανσης με εναλλαγή διαφορετικών χρόνων και θερμοκρασιών γήρανσης. Συνολικά πραγματοποίησαν 100 συνθήκες κατεργασίας αποτελούμενες από πέντε διαφορετικούς χρόνους διαλυτοποίησης, δύο χρόνους βαφής και δέκα κατεργασίες τεχνητής γήρανσης. Μία εξ' αυτών των κατεργασιών είναι η T6 που θεωρείται και η καταλληλότερη. Στη συνέχεια στα θερμικά κατεργασμένα δοκίμια έκαναν μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού, σκληρομετρήσεις και μέτρηση της ειδικής αντίστασης. Μελετώντας τα δεδομένα φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων που εξήγαγαν και από τις εκατό συνθήκες κατεργασίας παρατήρησαν έναν εξαιρετικό γραμμικό συσχετισμό μεταξύ των τιμών σκληρότητας, μέγιστης εφελκυστικής αντοχής UTS και του ορίου διαρροής.[2]

Οι Y. Reda κ.α. μελέτησαν τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες διαμορφωμένου κράματος αλουμινίου 7075 κατά τη θραύση του μέσω διαφορετικών συνθηκών κατεργασίας προγήρανσης και διαφόρων θερμοκρασιών παλινδρόμησης. Οι ερευνητές αυτοί υπέβαλαν τα δοκίμια σε θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, βαφή στο νερό και μετά σε κατεργασίες τεχνητής προγήρανσης και παλινδρόμησης με εναλλαγή διαφορετικών χρόνων και θερμοκρασιών. Στη συνέχεια στα θερμικά κατεργασμένα δοκίμια έκαναν μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού, σκληρομετρήσεις, μεταλλογραφική ανάλυση και μέτρηση της αντίστασης τους σε διάβρωση. Από τα δεδομένα που εξήγαγαν παρατήρησαν ότι η προγήρανση στην T6 κατεργασία στους 120 °C και η παλινδρόμηση στην T7 κατεργασία στους 200 °C έχει ως αποτέλεσμα την υψηλότερη σκληρότητα και τις καλύτερες εφελκυστικές ιδιότητες. Επιπλέον παρατήρησαν ότι η προγήρανση στην T6 κατεργασία στους 120 °C και η παλινδρόμηση στην T7 κατεργασία στους 200 °C έχει ως αποτέλεσμα την χειροτέρευση των ιδιοτήτων διάβρωσης του κράματος 7075. Τα χονδρόκοκκα κατακρημνίσματα που σχηματίζονται κατά την διάρκεια της παλινδρόμησης και επαναγήρανσης λειτουργούν ως θύλακες εγκλεισμού υδρογόνου, μειώνοντας τοπικά τη συγκέντρωση υδρογόνου στο μητρικό κρυσταλλικό πλέγμα γύρω από τα όρια των κόκκων.[3]

Η Jeffrey L. Evans προσδιόρισε την εφελκυστική αντοχή και το θερμικό ιστορικό του κράματος 7050, συναφές και ελαφρά βελτιωμένο σε σχέση με το 7075, μέσω θραυσματογραφείας και ανάλυσης της επιφάνειας θραύσεως. Η ερευνήτρια αυτή υπέβαλε τα δοκίμια σε θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, βαφή σε νερό ή αέρα και φυσική γήρανση. Στη συνέχεια στα θερμικά κατεργασμένα δοκίμια έκανε μηχανικές δοκιμές

εφελκυσμού και θραυσματογραφεία σε scanning electron microscope (SEM). Η ερευνήτρια παρατήρησε ότι τα δοκίμια που είχαν υποστεί βαφή στον αέρα είχαν τις λιγότερο όλκιμες ρηγματώσεις, αυτά που είχαν υποστεί βαφή σε κρύο νερό εμφάνισαν τις μεγαλύτερες σε μέγεθος ρηγματώσεις και αυτά που είχαν υποστεί βαφή σε ζεστό νερό είχαν τις μεγαλύτερες σε μήκος ρηγματώσεις. Επιπλέον ήταν εμφανές ότι τα δοκίμια με το μεγαλύτερο χρόνο γήρανσης είχαν τις μεγαλύτερες σε μέγεθος ρηγματώσεις σε όλους τους ρυθμούς απόψυξης. Η μέγιστη αντοχή και τα όρια διαρροής όλων των δοκιμίων μπορούν να συσχετιστούν με το μέσο μέγεθος ρηγματώσεων. Αυτό μαζί με τη σχέση μεταξύ ρυθμού απόψυξης και μέσου μέγεθους ρηγματώσεων εξασφαλίζει σημαντικές πληροφορίες για τον προσδιορισμό του ιστορικού ενός υλικού μέσω ανάλυσης της επιφάνειας θραύσεως.[4]

Οι Mohammad Tajally και Esmacil Emadoddin μελέτησαν τις μηχανικές και ανισοτροπικές ιδιότητες διαμορφωμένου κράματος αλουμινίου 7075. Οι ερευνητές αυτοί υπέβαλαν τα δοκίμια σε ψυξηλασία και ανοπήσεις σε διάφορες θερμοκρασίες από 270~450 °C για πέντε λεπτά αφήνοντας τα μετά να κρυώσουν στο περιβάλλον. Στη συνέχεια στα θερμικά κατεργασμένα δοκίμια έκαναν μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού, μορφοποίησης και μεταλλογραφική ανάλυση. Έπειτα από την ανάλυση και τον συσχτισμό των αποτελεσμάτων συμπέραναν ότι οι μέγιστες αντοχές παρατηρήθηκαν στη γωνία μορφοποίησης των 90 ° και η μέγιστη επιμήκυνση παρατηρήθηκε στη γωνία μορφοποίησης των 45 °. Επιπλέον παρατήρησαν ότι τα δοκίμια που είχαν ανοπηθεί σε θερμοκρασίες πάνω από 350 °C είχαν καλύτερη διαμορφωσιμότητα χωρίς να μεταβάλλονται οι ιδιότητες τους. Ακόμη μέσα από τις δοκιμές εφελκυσμού παρατήρησαν ότι τα δοκίμια που είχαν ανοπηθεί στους 400°C για πέντε λεπτά παρουσίασαν καλή ολκιμότητα, φυσιολογικές τιμές ανισοτροπίας και μεγαλύτερη LDR (limited drawing ratio) τιμή στην θερμοκρασία με τη καλύτερη διαμορφωσιμότητα. Τέλος διαπίστωσαν ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού και Erichsen καθώς και οι τιμές LDR παρουσιάζουν συμφωνία μεταξύ τους.[5]

Ο N. Takano μελέτησε τις επιδράσεις που προκαλεί το υδρογόνου η διάχυση του στις μηχανικές ιδιότητες και στην ευθραυστότητα του κράματος αλουμινίου 7075. τα δοκίμια αφού κόπηκαν και στιλβώθηκαν υποβλήθηκαν σε hydrogen-charged in 1 N-H₂SO₄ υπό ηλεκτρικό δυναμικό καθόδου της τάξεως των 6.25 A/m² στα 318 K τοποθετημένα μέσα σε γλυκερίνη. Στη συνέχεια στα κατεργασμένα δοκίμια έκαναν μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού και μεταλλογραφική ανάλυση και μεταλλογραφική ανάλυση με SEM των

επιφανειών θραύσεως. Παρατήρησε ότι η απώλεια στην ολκιμότητα είναι μεγάλη σε συνθήκες υψηλής εξάτμισης (fugacity) και μεγάλων περιόδων προφόρτισης.[6]

Ο T. Kobayashi μελέτησε τις μηχανικές ιδιότητες αντοχής και θραύσεως διάφορων διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου (σειρά 7xxx κ.α.) υποβάλλοντας σε μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού, θραύσεως και κοπώσεως και στην συνέχεια πραγματοποίησε μεταλλογραφική ανάλυση της κρυσταλλικής δομής και των επιφανειών θραύσης των δοκιμίων. Έπειτα από ανάλυση και συσχέτισμό των δεδομένων που εξήγαγε κατέληξε στο συμπέρασμα ότι είναι ιδιαίτερα σημαντική η μεσομηχανική ανάλυση των μικροδομών για την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων αλουμινίου. Πιο συγκεκριμένα για το κράμα 7075 μετά από τις δοκιμές εφελκυσμού και θραύσεως παρατήρησε ότι υπάρχει άμεση εξάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων, όπως η πλαστική παραμόρφωση λόγω τάσεων, από τη μικροδομή που έχει αναπτυχθεί στο υλικό μετά από διάφορες θερμικές κατεργασίες και κατεργασίες διαμόρφωσης.[7]

Βιβλιογραφία:

1. LI Jin-feng, PENG Zhuo-wei, LI Chao-xing, JIA Zhi-qiang, CHEN Wen-jing, ZHENG Zi-qiao, Transactions of Nonferrous Metals, Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatments, Transactions of Nonferrous Metals Society of China
2. R. Clark Jr, B. Coughran, I. Traina, A. Hernandez, T. Scheck, C. Etuk a, J. Peters, E.W. Lee, J. Ogren, O.S. Es-Said, Engineering Failure Analysis, On the correlation of mechanical and physical properties of 7075-T6 Al alloy
3. Y. Reda, R. Abdel-Karim, I. Elmahallawi, Materials-Science-and-Engineering-A, Improvements in mechanical and stress corrosion cracking properties in Al-alloy 7075 via retrogression and reaging
4. Jeffrey L. Evans, Engineering Failure Analysis, Thermal history and tensile strength determination from fracture surface analysis
5. Mohammad Tajally, Esmacil Emadoddin, Materials and Design, Mechanical and anisotropic behaviors of 7075 aluminum alloy sheets
6. Takano, 2008, Materials-Science-and-Engineering-A, Hydrogen diffusion and embrittlement in 7075 aluminum alloy
7. Kobayashi, 2000, Materials-Science-and-Engineering-A, Strength and fracture of aluminum alloys

1. Αλουμίνιο

1.1. Ιστορία του αλουμινίου

Πριν από 135 χρόνια, ο Ιούλιος Βερν, γράφοντας το "Από τη Γη στη Σελήνη" είχε χαρακτηρίσει το αλουμίνιο: Άσπρο σαν το ασήμι και ελαφρό σαν το γυαλί.... Στη στροφή της 3ης χιλιετίας, το αλουμίνιο συμπληρώνει πραγματική ζωή 160 ετών περίπου, ενώ βρίσκεται σε βιομηχανική κλίμακα παραγωγής για περίπου 100 χρόνια μόνο. Σαν χημικό στοιχείο το αργίλιο, είναι το 3ο σε περιεκτικότητα στο Γήινο περιβάλλον, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Πώς εξηγείται όμως το γεγονός της τόσο όψιμης ανακάλυψης του. Η απάντηση βρίσκεται στη μεγάλη χημική του συνάφεια με άλλα στοιχεία. Έτσι, το αλουμίνιο υπάρχει σχεδόν παντού στη φύση, αλλά "κλειδωμένο" σε χημικές ενώσεις με μεγάλη χημική ευστάθεια. Η χρήση, ωστόσο, αρκετών από τις χημικές του ενώσεις, είναι ιστορικά αποδεδειγμένη για την Αίγυπτο και τη Βαβυλώνα. Πρώτος ο Βρετανός Davy, υποστήριξε την ύπαρξη του αλουμινίου το 1807, ενώ ο Δανός Oerstead, το 1825, κατάφερε να απομονώσει το μέταλλο αλουμίνιο σε εργαστήριο. Το 1845, ο Γερμανός Woehler υπολόγισε το ειδικό του βάρος, σηματοδοτώντας μία από τις σπουδαιότερες ιδιότητες του αλουμινίου: την "αβάσταχτη" ελαφρότητα του. Ανάμεσα στα 1855 και το 1886, ο Γάλλος Deville ανέπτυξε μία χημική μέθοδο παραγωγής που κατέληγε σε πολύ ακριβό αλουμίνιο - λόγω μεθόδου. [2]

Το γύρισμα της μοίρας έγινε το 1886, με την ταυτόχρονη - τυχαία - ανακάλυψη σε Αμερική και Γαλλία της **ηλεκτρολυτικής μεθόδου** κτήσης του μετάλλου από το οξειδίο του αλουμινίου (την αλουμίνα). Ο Αμερικανός Hall και ο Γάλλος Heroult χάραξαν το δρόμο που μετέτρεψε σε λεωφόρο ο Γερμανός Bayer το 1888, επινοώντας μια λογικά οικονομική μέθοδο παραγωγής αλουμίνας από τον βωξίτη. Σε μία νύχτα η τιμή του μετάλλου έπεσε από τα 18 \$ στα 4,50 \$. [2]

Ξεκίναγε η βιομηχανική ιστορία του αλουμινίου....

1.2. Γενικά για το αλουμίνιο

Αλουμίνιο: Το υλικό του 21ου αιώνα.

Οι χημικές και φυσικές ιδιότητες του αλουμινίου το καθιστούν μία από τις πλέον χρήσιμες βιομηχανικές πρώτες ύλες, που χαρακτήρισαν μεγάλα βήματα της ανθρωπότητας το δεύτερο μισό του 20ου αιώνα, όπως η κατάκτηση του διαστήματος. Το

αλουμίνιο ή αργίλιο είναι το τρίτο κατά σειρά στοιχείο μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο που συναντάμε στο φλοιό της γης. Σε αντίθεση με τον χαλκό, τον χρυσό και τον σίδηρο το αλουμίνιο δεν υπάρχει στην φύση σε απλές χημικές ενώσεις εύκολα διασπάσιμες, έτσι η απομόνωση του μετάλλου αυτού καθυστέρησε ιδιαίτερα όπως προαναφέραμε. [2],[4]

Το άργιλιο βρίσκεται στη φύση υπό μορφή ενώσεων και αποτελεί το 7,3 % του στερεού φλοιού της γης. Οι περισσότερες διαδεδομένες ενώσεις, είναι υπό μορφή πυριτικών ορυκτών, οι κυριότερες των οποίων είναι η άργιλος ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), η μίκα ή μαρμαρυγία ($\text{KHMg}_2\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$), η βήρυλλος ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$), ο ανορθίτης ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ή $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) κλπ. Το αργίλιο βρίσκεται επίσης, ως οξείδιο Al_2O_3 στο βωξίτη, το κορούνδιο ($\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$), τη σμύριδα (με προσμίξεις σιδήρου και SiO_2 υπό μορφή μαγνητίτη, αιματίτη και χαλαζία), το σπινέλιο ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) κλπ. Το σπουδαιότερο ορυκτό του Al είναι ο βωξίτης, ο οποίος είναι πολύ διαδεδομένος στην Ελλάδα. Ο βωξίτης αποτελείται από διάσπορο ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) και υδραργιλίτη ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), με προσμίξεις Fe_2O_3 , TiO_2 και SiO_2 , η δε περιεκτικότητά του σε Al_2O_3 κυμαίνεται από 55-65%. [2],[4]

Η ανακάλυψη του, αλλά και η παραγωγή του έγινε δυνατή μόνον μετά την ανακάλυψη και ευρεία χρήση του ηλεκτρισμού και όταν η χημεία αποχωρίσθηκε από το φάντασμα της αλχημείας. Το αλουμίνιο προέρχεται από το ορυκτό βωξίτης, που μετά την εξόρυξη του μετατρέπεται σε αλουμίνα και στη συνέχεια με την ηλεκτρόλυση μετατρέπεται σε μέταλλο αλουμίνιο. Η σημερινή υψηλή τεχνολογία και οι ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του, εξηγούν το σημερινό ευρύ φάσμα εφαρμογών του. Το αλουμίνιο μεταποιείται με διέλαση, με έλαση, με χύτευση, με μηχανουργικά εργαλεία για την παραγωγή προϊόντων ή τμημάτων διαφόρων προϊόντων, οπότε και τα αποκαλούμε ημι-προϊόντα για χρήση σε μηχανολογικές και ηλεκτρικές εφαρμογές. Η χρήση του αλουμινίου και των κραμάτων του εξασφαλίζουν σε κάθε περίπτωση την πολύ μεγάλη μηχανική αντοχή του σε σχέση με το βάρος του και καθιστούν το αλουμίνιο ένα ιδανικό υλικό για την κατασκευή μεταφορικών μέσων λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται. Το κυριότερο πλεονέκτημα του αλουμινίου και των κραμάτων του είναι το χαμηλό ειδικό βάρος ($2,7 - 2,85 \text{ g/cm}^3$) και η υψηλή αντοχή στη διάβρωση, σε συνθήκες συνήθους περιβάλλοντος.

Το αλουμίνιο ως υλικό συσκευασίας δεν είναι τοξικό, είναι αδιαπέραστο από υγρά και αέρια και εξασφαλίζει την υγιεινή των τροφίμων όταν και όπου χρησιμοποιείται για την

συσκευασία τους. Στην οικοδομή αποτελεί ένα από τα βασικά υλικά. Είναι αδιάβρωτο από καιρικούς παράγοντες και δίνει μοναδικές λύσεις στην κατασκευή μοντέρνων κτιρίων, στην ανακατασκευή, την ανακαίνιση ή συντήρηση παλαιών κτιρίων με ιστορική και αρχιτεκτονική αξία. Το αλουμίνιο είναι ελαφρύ αλλά και ακριβό ως υλικό μεταλλοτύπων. Για απ' ευθείας επαφή με το σκυρόδεμα πρέπει να βάφεται, λόγω των χημικών επιδράσεων που προκαλεί το σκυρόδεμα. Επειδή κολλάει με το σκυρόδεμα, πρέπει προηγουμένως να αλείφεται με διευκολυντική ουσία αποκόλλησης (release agent).[2],[4]

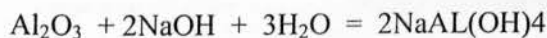
1.3.Μεταλλουργία και παραγωγή του αλουμινίου

Η παραγωγή του αλουμινίου γίνεται με δύο τρόπους, είτε με την παραγωγή του πρωτόχυτου αλουμινίου, διαδικασία η οποία και περιγράφεται παρακάτω και μας δίνει το αλουμίνιο που προέρχεται από την εξόρυξη βωξίτη, είτε με την παραγωγή του δευτερόχυτου αλουμινίου το οποίο παράγεται από ανακυκλώσιμο χρησιμοποιημένο αλουμίνιο διαφόρων μορφών. Η ανακύζωση του αλουμινίου τα τελευταία χρόνια διαδίδεται όλο και περισσότερο αφού χρειάζεται μόλις το 5% της ενέργειας για την παραγωγή του αλουμινίου σε σχέση με την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή νέου αλουμινίου λόγω σταδίων παραγωγής όπως η ηλεκτρόλυση κλπ. Η μεταλλουργία του αλουμινίου, γίνεται σήμερα σε βιομηχανική κλίμακα από βωξίτη σε δύο στάδια:

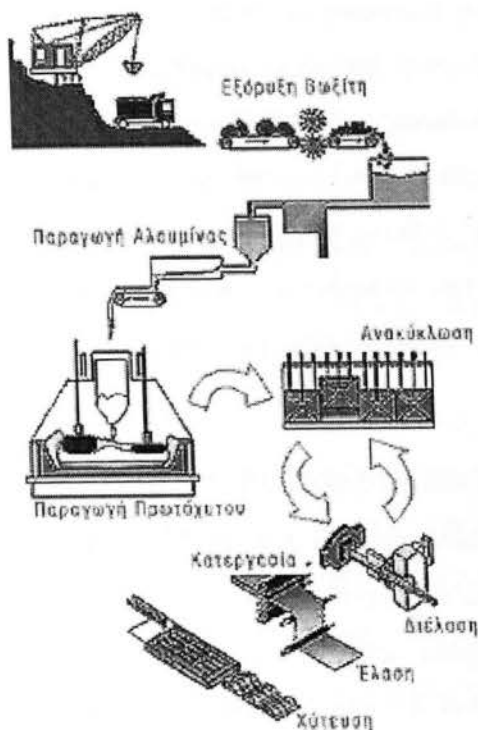
- Παρασκευή αλουμίνας (Al_2O_3) από βωξίτη, με τη μέθοδο Bayer.
- Παρασκευή Al από την αλουμίνα, με ηλεκτρολυτική μέθοδο.

Αναλυτικά, η παρασκευή της αλουμίνας και το Al γίνονται ως ακολούθως:

Ο βωξίτης αναμειγνύεται με πυκνό διάλυμα NaOH και θερμαίνεται σε αυτόκλειστο (Autoclave) υπό πίεση 5-6 Atm και θερμοκρασία $160^{\circ}C$, όπου το Al_2O_3 μετατρέπεται σε διαλυτό αργιλικό άλας, κατά την εξίσωση:



Στις παρακάτω εικόνες 1-4 παρουσιάζονται η διαδικασίες παραγωγής της αλουμίνας, του αλουμινίου ως μέταλλο καθώς και ένα σχεδιάγραμμα ηλεκτρολυτικού κελιού. [1],[2]



Σχήμα 1.1: Διαδικασία παραγωγής αλουμινίου[3]

Βωξίτης (μετάλλευμα αλουμινίου): Οξείδια αλουμινίου (60%), σιδήρου (25%), πυριτίου (3%), τιτανίου (3%), κλπ.

Ο βωξίτης θραύεται και αλέθεται για να γίνει σκόνη.

Αναμιγνύεται με διάλυμα καυστικής σόδας και θερμαίνεται αυτόκλεστα. Έτσι διαλυτοποιείται μόνο η αλουμίνα και ενώνεται με τη σόδα.

Σε περιστροφικά φίλτρα διαχωρίζεται:

Το διάλυμα σόδας που συμπυκνώνεται με εξάτμιση και χρησιμοποιείται ξανά για την επεξεργασία νέων ποσοτήτων βωξίτη.

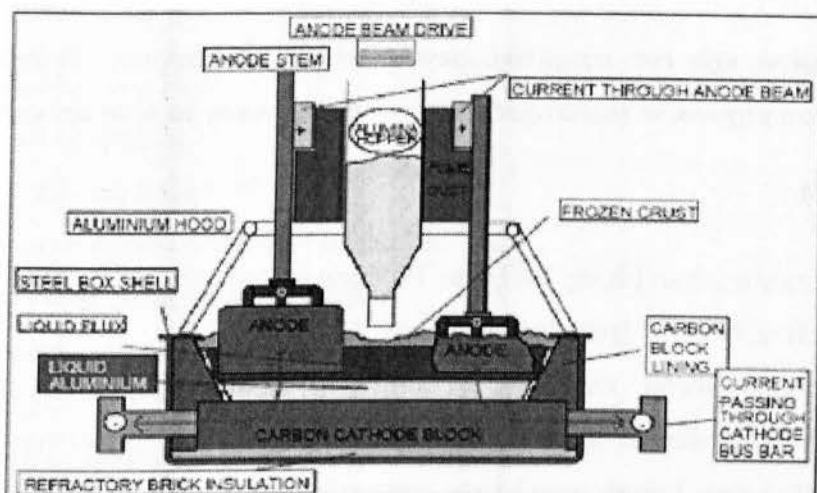
Το διάλυμα της ένωσης σόδας-αλουμίνιας ψύχεται και αραιώνεται σε μεγάλες δεξαμενές και διασπάται στα συστατικά δηλ. σε αραιό διάλυμα σόδας και κρυστάλλους αλουμίνιας.

Τα αδιάλυτα συστατικά του βωξίτη διαχωρίζονται με καθίζηση και απορρίπτονται αφού πλυθούν.

η αλουμίνα πυρώνεται σε φούρνους σε υψηλή θερμοκρασία ώστε να απαλλαγεί από το νερό που περιέχει και

με τη μορφή λεπτής σκόνης αποθηκεύεται σε σιλό (από όπου μεταφέρεται για ηλεκτρόλυση ώστε να μετατραπεί σε αλουμίνιο.

Σχήμα 1.2: Διάγραμμα παραγωγής της αλουμίνιας[3]



Σχήμα 1.3: Σχεδιάγραμμα ηλεκτρολυτικού κελιού[3]

Για το διαχωρισμό του αλουμινίου στην αλουμίνα (Al_2O_3) χρησιμοποιείται η ηλεκτρολυτική μέθοδος.

Σε μεγάλα δοχεία (λεκάνες) επενδυμένες εσωτερικά με άνθρακα, διαλύεται ποσότητα αλουμίνος μέσα σε λιωμένο κρυσλίθο σε θερμοκρασία 950ο C.

Με τη βοήθεια ηλεκτροδίων από άνθρακα διαβιβάζεται στο τήγμα κρυσλίθου-αλουμίνα ισχυρό ρεύμα (4V, 90.000A)

Κατά διαστήματα το αλουμίνιο αναρροφάται από το δοχείο και μεταφέρεται σε ειδικούς κάδους στο χυτήριο.

οξυγόνο που καίει σιγά-σιγά τα ηλεκτρόδια και αλουμίνιο που, σε ρευστή μορφή, κατακάθεται στον πυθμένα του δοχείου ηλεκτρόλυσης.

Η διαλυμένη αλουμίνα διασπάζεται σε:

Μεταγγίζεται σε φούρνους όπου προσθέτονται και μικρές ποσότητες άλλων μετάλλων (ανάλογα με το επιθυμητό κράμα).

Χυτεύεται σε διάφορα σχήματα: πλάκες, κορώνες, χελώνες, κλπ.

Σχήμα 1.4: Διάγραμμα παραγωγής αλουμινίου[3]

1.4.Ιδιότητες του αλουμινίου

Το αλουμίνιο έχει ένα εξαιρετικά μεγάλο εύρος δυνατοτήτων, ιδιοτήτων, φυσικών χημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών που επιδεικνύουν τα τόσα κράματα του. [3]

Συνοπτικά :

- Χαμηλό ειδικό βάρος. Μόλις το 1/3 εκείνου του σιδήρου άρα είναι πολύ ελαφρύ
 $E.B=2,7g/cm^3$ (χάλυβας= $7,8g/cm^3$)
- Διαμορφώνεται, ελάσσεται, εξελάσσεται, διελάσσεται, συγκολλάται, συνεπώς αποτελεί ιδανικό μέταλλο κατασκευών. Το μέτρο ελαστικότητας του (70.000 MPa) είναι 3 φορές χαμηλότερο από εκείνο του σιδήρου. Σε δεδομένη κατάσταση φόρτισης, μία κατασκευή από αλουμίνιο παρουσιάζει 3 φορές μεγαλύτερη ελαστική επιμήκυνση απ' ό,τι μία σιδερένια.
- Τα κράματα του αλουμινίου μπορούν να φτάσουν ή και να ξεπεράσουν τις αντοχές του χάλυβα
- Κρατά τη στιβαρότητα του και την αντοχή του σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες χωρίς να γίνεται εύθραυστο
- Κατεργάζεται πολύ εύκολα και μορφοποιείται (αλουμινόχαρτο)
- Μπορεί να έρθει σε επαφή με πολλά τρόφιμα
- Το αλουμίνιο και τα περισσότερα κράματά του είναι ανθεκτικό έως πολύ ανθεκτικό σε πολλές μορφές διάβρωσης. Λόγω της μεγάλης χημικής συνάφειας με το οξυγόνο, η φυσική επιφάνεια του μετάλλου είναι μόνιμα καλυμμένη με στρώμα οξειδίου του αργιλίου, που αποτελεί ένα πολύ αποτελεσματικό εμπόδιο εξάπλωσης της διάβρωσης. Το μειωμένο έως μηδενικό κόστος συντηρήσεως σε συνδυασμό με το χαμηλό ειδικό βάρος επηρεάζουν θετικά την επιλογή του αλουμινίου.
- Το αλουμίνιο είναι πολύ καλός αγωγός του ηλεκτρισμού .
- Δεν μαγνητίζεται και δεν καίγεται, ιδιότητες που θεωρούνται πολύ ουσιώδεις για ειδικές εφαρμογές όπως κατασκευές θαλάσσης (πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου).
- Δεν είναι τοξικό, είναι αδιαπέραστο για διάφορα περιβάλλοντα μέσα.
- Έχει υψηλή ανακλαστικότητα κατάλληλη για αρχιτεκτονικές εφαρμογές.
- Πολύ καλή θερμική αγωγιμότητα (σχεδόν διπλάσια του σιδήρου).
- Ιδιότητες πολύ χρήσιμες για τις μονώσεις και γενικότερα τη δόμηση. [3]

Φυσικές ιδιότητες: [3]

- Ατομικό βάρος 26,98
- Ατομικός αριθμός 13
- Κρυσταλλική δομή FCC
- Πλευρά μοναδιαίου κελιού = $4,0496 \cdot 10^{-8}$ cm
- Πυκνότητα στους 20° C = $2,71$ g/cm³
- Θερμική αγωγιμότητα = 2,1- 2,3 w/cm*K
- Συντελεστής συστολής ($60-100^\circ$ C) = $23,5 \cdot 1/K \cdot 10^6$
- Αύξηση όγκου από στερεό σε υγρό = 6,5%
- Σημείο τήξης = 658° C
- Θερμότητα τήξης (λανθάνουσα) = 396 j/g
- Σημείο βρασμού = 2270° C
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα = 34-36 m/ohm*mm²
- Αντίσταση = $2,65 \cdot 10^{-6}$ ohm*cm
- Μέτρο ελαστικότητας = $7,2 \cdot 10^4$ N/mm²

Βιβλιογραφία:

- [1] ΕΜΠ, Σημειώσεις του μαθήματος “Μεταλλουργία του αλουμινίου”, Πάνιας Δημήτριος
- [2] Springer, Materials Handbook, pg. 159~170
- [3] Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Σημειώσεις μαθήματος “Επιστήμη και τεχνολογία του αλουμινίου”, Μ. Γεωργάτης
- [4] ASM, Metals Handbook Desk Edition, pg. 999~1001

2.Κράματα αλουμινίου

Γενικά

Το αλουμίνιο έχει την δυνατότητα, με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων χημικών στοιχείων, να δημιουργεί συνθέσεις (κράματα) με διαφορετικές ιδιότητες. Η δυνατότητα αυτή, καθιστά το αλουμίνιο και τα κράματά του ως την πλέον κατάλληλη πρώτη ύλη για την παραγωγή τελικών προϊόντων με ξεχωριστές ιδιότητες και ειδικές απαιτήσεις.[1]

Η δυνατότητα που έχει το αλουμίνιο, να επιτυγχάνει διαφορετικές ιδιότητες προκειμένου να καλύψει τις ειδικές απαιτήσεις κάθε προϊόντος, οφείλεται στο γεγονός της εύκολης κραματοποίησής του. Ενώ μπορεί να βελτιωθεί και με ψυχρηλασία, με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων κραματοποιών (χημικών) στοιχείων (π.χ. χαλκός, μαγνήσιο, πυρίτιο, μαγγάνιο, ψευδάργυρος κλπ), μπορούμε να επιτύχουμε πρώτη ύλη αλουμινίου με τις επιθυμητές και κατάλληλες ιδιότητες για κάθε τύπο προϊόντος κατά πολύ βελτιωμένες. Οι τελικές ιδιότητες κάθε προϊόντος που θα παραχθεί από αλουμίνιο, επιτυγχάνονται με την επιλογή του κατάλληλου κράματος αλουμινίου, την μέθοδο επεξεργασίας του (μηχανική πλαστική διαμόρφωση ή χύτευση) και τις θερμικές κατεργασίες (βαφή, τεχνητή γήρανση, ανόπτηση κλπ) που θα υποστεί.[1]

Τα κράματα του αλουμινίου λοιπόν, διακρίνονται σε κράματα διαμόρφωσης και κράματα χύτευσης. Τα κράματα των δύο αυτών κατηγοριών υποδιαιρούνται σε κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία και σε κράματα των οποίων η θερμική κατεργασία είναι αδύνατη. Οι ιδιότητες των πρώτων εξαρτώνται από την ακολουθούμενη θερμική κατεργασία, ενώ οι ιδιότητες των δεύτερων εξαρτώνται από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί. Όπως το καθαρό αλουμίνιο, έτσι και τα κράματα του έχουν χαμηλή πυκνότητα, καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και υψηλή αντοχή σε διάβρωση.[1]

Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των τυπικών βιομηχανικών κραμάτων αλουμινίου είναι :[3]

1. Ο Χαλκός (Cu)
2. Το Μαγγάνιο (Mn)
3. Το Πυρίτιο (Si)
4. Το Μαγνήσιο (Mg)
5. Ο Ψευδάργυρος (Zn)
6. Ο Σίδηρος (Fe)

Γενικά, για τη συνήθη παραγωγή των κραμάτων αλουμινίου, ακολουθείται η μεθοδολογία της τήξης, της κραματοποίησης με προσθήκη στοιχείων, και της χύτευσης.

Το παραγόμενο διεθνώς αλουμίνιο, χωρίζεται σε 2 μεγάλες κατηγορίες:

A. Το αλουμίνιο κατεργασίας (wrought) που με έλαση ή διέλαση ή άλλη μηχανική κατεργασία οδηγεί στα τελικά προϊόντα. Ο κύριος ρόλος των προσθηκών είναι η ενίσχυση της σκληρότητας (αντοχής σε θραύση).

B. Το χυτό αλουμίνιο, που χρησιμοποιείται για την κατευθείαν παραγωγή τεμαχίων τελικών προϊόντων (χυτόπρεσες). Η κατηγορία αυτή χρησιμοποιεί μεγαλύτερο ποσοστό προσθηκών από την προηγούμενη με βασικότερο στόχο την ευκολότερη χύτευση της τελικής μορφής. [4]

Η συνολική **κατανάλωση** αλουμινίου (κατεργασίας -wrought, και χύτευσης) στην Ευρώπη για το 2000 εκτιμάται σε **7,8 εκατομμύρια τόνους**. Κάποιοι από τους τομείς εφαρμογών όπου μοιράσθηκε η παραπάνω κατανάλωση ήταν:

- Δόμηση
- Μεγάλα έργα υποδομής (γέφυρες, φορείς κατασκευών, πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου, πυλώνες σήμανσης αυτοκινητοδρόμων, κλπ.)
- Βιομηχανικές και τεχνικές εφαρμογές
- Γενικές κατασκευές

Η καλύτερη εκμετάλλευση των πολύ αξιόλογων ιδιοτήτων του αλουμινίου οδήγησε στη παραγωγή των εμπορικά ανεπτυγμένων σήμερα κραμάτων αλουμινίου, που το καθένα έχει τονισμένη (ή τονισμένες) κάποια ομάδα ιδιοτήτων.[1]

Το αλουμίνιο και τα κράματά του - είτε πρωτόχυτο είτε δευτερόχυτο – διαιρούνται όπως προαναφέραμε σε δύο κύριες κατηγορίες, ως αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου για μηχανική πλαστική διαμόρφωση (παραγωγή προϊόντων έλασης, διέλασης, ολκής, κλπ) και ως αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου για χρήση σε χυτήρια (παραγωγή χυτών αντικειμένων). Γενικά οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων αλουμινίου, σύμφωνα με την Aluminum Association (A.A.) αποτελούνται από δύο μέρη χωριζόμενα με μια παύλα στη μέση, το πρώτο αναφέρει αν είναι κράμα διαμόρφωσης ή χυτό και το δεύτερο μέρος αναφέρεται στην κατεργασία, μηχανική ή θερμική, την οποία έχουν υποστεί.[6]

2.1. Διαμορφωμένα κράματα αλουμινίου

Το αλουμίνιο και τα κράματά του που προορίζονται για μηχανική πλαστική διαμόρφωση προσδιορίζονται από τη χημική τους σύσταση βάσει ενός διεθνώς αποδεκτού συστήματος που χρησιμοποιεί τέσσερις αριθμούς. Το πρώτο από τα τέσσερα ψηφία δείχνει την ομάδα κράματος σύμφωνα με το, σε μεγαλύτερη αναλογία ευρισκόμενο, κραματοποιό στοιχείο.[3],[2]

Τα κράματα αλουμινίου που αφορούν στο αλουμίνιο κατεργασίας (ΕΛΑΣΗ - ΔΙΕΛΑΣΗ) τυποποιούνται διεθνώς - ανάλογα με τα βασικά στοιχεία κραματοποίησης - στις παρακάτω σειρές :

ΣΕΙΡΑ 1000 : Κράματα με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο πάνω από 99%.[1],[2],[3]

- ✓ Σκληρύνεται με ενδοτράχυνση
- ✓ Διαμορφώνεται πολύ εύκολα, παρουσιάζει καλή αντοχή στη διάβρωση και καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- ✓ Ηλεκτρικές και χημικές εφαρμογές
- ✓ Αντιπροσωπευτικές σειρές: 1100, 1350
- ✓ Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 69- 186 Μρα

Η σειρά 1xxx αντιπροσωπεύει το εμπορικά καθαρό αλουμίνιο, από το βασικό 1100 (99,00% min. Al) μέχρι τα σχετικά καθαρότερα 1050/1350 (99,50% min. Al) και 1175 (99,75% min. Al) . Μερικοί τύποι , σαν το 1350 που χρησιμοποιείται ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές, έχουν σφιχτές ανοχές στο ποσοστό των ακαθαρσιών που είναι υπεύθυνες για τη μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Η σειρά 1xxx υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, αλλά δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η αντοχή είναι το βασικό στοιχείο σχεδιασμού. Περισσότερη έμφαση πρέπει να δίνεται σε εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, καλή ολκιμότητα και/ή ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως φύλλα για συσκευασία, χημικό εξοπλισμό, σασί αυτοκινήτων η φορτηγών και όπου απαιτείται χρήση λαμαρίνας.

Τέλος χρησιμοποιείται για:

- Εγκατάσταση ηλεκτρικών αγωγών αλουμινίου με Al 1350.
- Αλουμινόχαρτο για τρόφιμα και φάρμακα από καθαρό αλουμίνιο 1100
- Αλουμινόχαρτο με έντυπο για τρόφιμα και ποτά από 1060 ή 1100

ΣΕΙΡΑ 2000 : Κράματα αλουμινίου – χαλκού(Al-Cu).[1],[2],[3]

- ✓ Υφίστανται θερμική κατεργασία
- ✓ Έχουν υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όπως και σε υψηλές θερμοκρασίες
- ✓ Εφαρμογές σε μεταφορές (αεροπλάνα τράινα)
- ✓ Αντιπροσωπευτικά κράματα: 2014, 2017, 2024, 2219, 2195
- ✓ Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 186- 427 Μπα

Η σειρά 2xxx υφίσταται θερμική κατεργασία και συνδυάζει σε κάποια κράματα υψηλή αντοχή (ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες), ακαμψία και σε μερικές περιπτώσεις καλή συγκολλησιμότητα. Δεν έχει καλή αντοχή σε διάβρωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, έτσι βάφεται ή επενδύεται κατάλληλα για τέτοιες εφαρμογές. Τα πιο ανθεκτικά κράματα της σειράς 2xxx κυρίως χρησιμοποιούνται για αεροσκάφη (2024) και για σασί φορτηγών (2014). Χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που συνδέονται με σπειρώματα ή πριτσίνια. Κάποια ειδικά κράματα της σειράς (π.χ 2219 και 2048) συγκολλούνται, και έτσι χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε αεροσκάφη όπου η μέθοδος της συγκόλλησης προτιμάται.

Το κράμα 2195 είναι νέο σχετικά κράμα με Li για διαστημικές εφαρμογές, έχοντας πολύ μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και παρουσιάζοντας καλή συγκολλησιμότητα. Υπάρχουν επίσης διάφοροι τύποι κραμάτων (π.χ. 2124, 2324, 2419) με υψηλή ακαμψία και στους οποίους επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος των ακαθαρσιών που είναι υπεύθυνες για την μείωση της αντοχής, και αναπτύχθηκαν για τη βιομηχανία αεροσκαφών. Τα κράματα 2011, 2017 και 2117 χρησιμοποιούνται ευρέως για βίδες και ροδέλες.

Τέλος χρησιμοποιείται για την εσωτερική κατασκευή των αεροσκαφών που περιλαμβάνει διατομές και φύλλα των σειρών 2xxx και 7xxx (2024, 2124 και 2618). Το εξωτερικό φύλλο μπορεί να είναι Alclad 2024 ή 2618. Επένδυση με υψηλής καθαρότητας αλουμίνιο (Alclad) προσδίδει προστασία σε διάβρωση στα κράματα Al-Cu τα οποία διαφορετικά θα μαυρίσουν με τον καιρό.

ΣΕΙΡΑ 3000 : Κράματα αλουμινίου – μαγγανίου(Al-Mn).[1],[2],[3]

- ✓ Διαμορφώνεται πολύ εύκολα, παρουσιάζει καλή αντοχή στη διάβρωση και καλή συγκολλησιμότητα. Μέτρια αντοχή.
- ✓ Χρησιμοποιείται για αγωγούς μεταφοράς θερμότητας, συσκευασία και εφαρμογές στέγης και πλαϊνών τοιχωμάτων.

✓ Αντιπροσωπευτικά κράματα: 3003, 3004, 3005.

✓ Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 110-282 Μpa

Η σειρά 3xxx υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, έχει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση και πολύ καλή συγκολλησιμότητα. Έχει πολύ καλή επιδεικτικότητα σε επιχάλκωση. Το κράμα 3003 χρησιμοποιείται ευρέως σε σκευή κουζίνας και για χημικό εξοπλισμό όπως και σε κτιριακές υποδομές. Το κράμα 3105 είναι ένα από τα βασικά για στέγες και πλαϊνές επικαλύψεις κτιρίων. Τα διάφορα κράματα της σειράς 3xxx χρησιμοποιούνται σε μορφή λαμαρίνας και σωλήνα για εναλλάκτες θερμότητας σε φορτηγά και ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς.

Τα κράματα 3004 και το 3104 είναι μεταξύ των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων κραμάτων λόγω της χρήσης τους στα τενεκεδάκια των αναψυκτικών.

Τέλος χρησιμοποιείται για την εσωτερική κατασκευή εναλλακτών θερμότητας αυτοκινήτων από το κράμα σαν το 3002, κράμα 3003 για εναλλάκτη θερμότητας εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρισμού και το σώμα από τα τενεκεδάκια των αναψυκτικών είναι από κράμα 3004 ή 3104, το περισσότερο παραγόμενο κράμα στη βιομηχανία.

ΣΕΙΡΑ 4000 : Κράματα αλουμινίου – πυριτίου(Al-Si).[1],[2],[3]

✓ Υφίστανται θερμική κατεργασία

✓ Καλά χαρακτηριστικά ροής , μέτρια αντοχή.

✓ Πιστόνια , σφυρήλατα πολύπλοκου σχήματος.

✓ Αντιπροσωπευτικά κράματα: 4032 και υλικό ηλεκτροδίων 4043.

✓ Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 172- 380 Μpa

Από τα δυο περισσότερο χρησιμοποιούμενα κράματα της σειράς 4xxx , το 4032 είναι ένα μέτριας προς υψηλής αντοχής κράμα, θερμικά κατεργάσιμο που χρησιμοποιείται κυρίως για σφυρήλατα προϊόντα και σε εφαρμογές όπως πιστόνια αεροσκαφών. Από την άλλη πλευρά το 4043 είναι ένα από τα πλέον γνωστά υλικά συγκόλλησης των κραμάτων της σειράς 6xxx για κατασκευές και εφαρμογές στα αυτοκίνητα.

Το ίδιο χαρακτηριστικό (της εύκολης σφυρηλασίας) οδηγεί στις εφαρμογές της σειράς. Πολύ καλή ολκιμότητα που οφείλεται στην ψηλή περιεκτικότητα σε Si, στη περίπτωση των σφυρήλατων προϊόντων εξασφαλίζει το γέμισμα περίπλοκων καλουπιών , στη δε περίπτωση του υλικού συγκόλλησης εξασφαλίζει πλήρωση των ρωγμών και των κενών των τεμαχίων που συγκολλούνται.

Οι σειρά 4xxx και τα κράματα της που χρησιμοποιούνται ευρέως αντιπροσωπεύονται από τις παρακάτω εφαρμογές:

- Σύστημα κυκλοφορίας ψυκτικού υγρού με επιχάλκωμένο κράμα υψηλής περιεκτικότητας σε Si.
- Κράμα 4043: Το πιο ευρέως διαδεδομένο σύρμα συγκόλλησης.

ΣΕΙΡΑ 5000 : Κράματα αλουμινίου – μαγνησίου(Al-Mg).[1],[2],[3]

- ✓ Σκληρύνεται με ενδοτράχυνση
- ✓ Παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση καλή συγκολλησιμότητα και καλή δυσκαμψία. Ενδιάμεση αντοχή.
- ✓ Εφαρμογές υποδομής κτιρίων και κατασκευών, αυτοκίνητα, κρυογενικά υλικά, εφαρμογές σε παραθαλάσσιες περιοχές.
- ✓ Αντιπροσωπευτικά κράματα: 5052, 5083, 5754.
- ✓ Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 172-380 Μpa

Όλα τα κράματα της σειράς 5xxx υφίστανται σκλήρυνση με ψυχρηλασία και έχουν σχετικά υψηλή αντοχή, εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση ακόμη και σε θαλάσσιο περιβάλλον, και μεγάλη ακαμψία ακόμη και σε κρυογενικό περιβάλλον κοντά στο απόλυτο 0° K. Συγκολλούνται εύκολα με πολλές τεχνικές ακόμη και σε μεγάλα πάχη μέχρι 20 cm. Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω η σειρά 5xxx βρίσκει μεγάλες εφαρμογές σε κτιριακά και κατασκευές, κατασκευές γεφυρών δοχεία αποθήκευσης και πιεστικά εφαρμογές συστημάτων για θερμοκρασίες -270° C και εφαρμογές κοντά στη θάλασσα.

Τα κράματα 5052, 5086 και 5083 χρησιμοποιούνται ευρέως σε κατασκευές με την αντοχή να αυξάνει καθώς αυξάνει η περιεκτικότητα σε Mg. Ειδικές εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν το 5182 (ο πυθμένας από το τενεκεδάκι των αναψυκτικών) το 5754 για σωληνωτό πλαίσιο αυτοκινήτων και 5252, 5457 και 5657 για εμφανισιακές εφαρμογές (φτερά, καπό αυτοκινήτου κ.λ.π.).

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίδεται ώστε να αποφεύγεται η χρήση κραμάτων σειράς 5xxx με Mg >3%, σε εφαρμογές συνεχούς έκθεσης σε θερμοκρασίες άνω των 100° C. Τέτοια κράματα μπορεί να ευαισθητοποιηθούν σε διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων. Σ' αυτές τις περιπτώσεις συνιστώνται κράματα σαν τα 5454 και 5754.

Παραδείγματα των εφαρμογών των ευρέως διαδεδομένων κραμάτων σειράς 5xxx:

- Μεγάλα ταχύπλοα έχουν το κύτος επενδυμένο με κράμα 5083 όπως και το κατάστρωμα και την ανωδομή.
- Η εσωτερική κατασκευή του ανωτέρω ταχυπλόου.
- Ταχύπλοα σκάφη απλών η διπλών τοιχωμάτων χρησιμοποιούν διάφορα κράματα όπως 5083 και 5454 σε φύλλα μαζί με διατομές σειράς 6xxx σε κατασκευές με συγκολλήσεις συνδεδεμένες.
- Το κράμα 5083 είναι το βασικό υλικό κατασκευής των σφαιρών διαμέτρου 125 ft για την θαλάσσια μεταφορά υγρού φυσικού αερίου. Η κατασκευή είναι όλη συγκολλητή και το πάχος στην οριζόντια διάμετρο είναι 200 περίπου mm.
- Η γέφυρα Foresmo στη Βόρεια Νορβηγία είναι ένα άριστο παράδειγμα χρήσης κραμάτων Al-Mg για την κατασκευή συστημάτων δοκών. Η εικόνα δείχνει το κύριο πλεονέκτημα αντικατάστασης γεφυρών αλουμινίου. Η δυνατότητα προκατασκευής των ανοιγμάτων και της γρήγορης μεταφοράς και τοποθέτησης ελαχιστοποιεί την αναστάτωση στη κυκλοφορία.
- Βαγόνια μεταφοράς κάρβουνου κατασκευασμένα από συγκολλητά φύλλα κράματος 5454.
- Εξέδρες άντλησης πετρελαίου. Οι απαιτήσεις σε διάβρωση λόγω της υψηλής υγρασίας και έκθεσης στο νερό καλύπτονται από συγκολλητές κατασκευές με κράματα 5454, 5086 και 5083.
- Στη βιομηχανία αυτοκινήτου η ποσότητα του 5754 κράματος σε μορφή φύλλων αυξάνει συνεχώς.
- Ο πυθμένας από τα τενεκεδάκια των αναψυκτικών είναι από κράμα 5182 ένα από τα περισσότερο παραγόμενα κράματα της σειράς 5xxx.

ΣΕΙΡΑ 6000 : Κράματα αλουμινίου - μαγνησίου – πυριτίου(Al-Mg-Si).[1],[2],[3]

- ✓ Υφίστανται θερμική κατεργασία
- ✓ Μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, εξαιρετική ολκιμότητα, ενδιάμεση αντοχή.
- ✓ Εφαρμογές υποδομής κτιρίων και κατασκευών, αυτοκίνητα, εφαρμογές σε παραθαλάσσιες περιοχές.
- ✓ Αντιπροσωπευτικά κράματα: 6061, 6063, 6111
- ✓ Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 125- 400 Mpa

Τα κράματα της σειράς 6xxx δέχονται θερμική κατεργασία, έχουν σχετικά υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό που συνδυάζεται με άριστη αντοχή σε διάβρωση. Συγκολλούνται εύκολα. Μια μοναδική τους ιδιότητα είναι η ικανότητα για διέλαση που τα κάνει την πρώτη εκλογή για αρχιτεκτονικές και κατασκευαστικές λύσεις όπου επίσης απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη αντοχή.

Το κράμα 6063 ίσως είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο, λόγω της ικανότητας του για διέλαση. Είναι ένα από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη γέφυρα Foresmo της Νορβηγίας και είναι το κράμα που η Audi έχει επιλέξει για το πλαίσιο των αυτοκινήτων της.

Το κράμα 6061 με υψηλότερη αντοχή βρίσκει εκτεταμένη χρήση σε κατασκευές συνδεδεμένες με συγκολλήσεις όπως φορτηγά, βαγόνια τραίνου και σωληνώσεις. Μεταξύ των ειδικών κραμάτων της σειράς: 6066-T6 με υψηλή αντοχή για σφυρήλατα 6111 για panel πλαισίων αυτοκινήτου και 6101 και 6201 για υψηλής αντοχής ηλεκτρικούς αγωγούς.

Οι πιο σπουδαίες εφαρμογές για κράματα Al-Mg-Si είναι:

- Η δυνατότητα των διελάσιμων κραμάτων Al-Mg-Si να μπαίνουν όπου τα χρειάζεσαι.
- Κατασκευές οροφής για κλειστούς στίβους και γυμναστήρια είναι συνήθως σωλήνες 6063 ή 6061 καλυμένες με φύλλα κράματος σειράς 5xxx.
- Ειδική διατομή για προστατευτικές μπάρες με κράμα 6063 τοποθετούνται σε ελάχιστο χρόνο.
- Διατομές κραμάτων σειράς 6xxx κατασκευάζουν τον εσωτερικό σκελετό μοτοσυκλετών και αυτοκινήτων (η εικόνα είναι από το Audi A8).
- Τα νέα τραίνα Mag-Lev που αναπτύσσονται στην Ευρώπη και Ιαπωνία χρησιμοποιούν τα κράματα 6061 και 6063 για τα σώματα των βαγονιών.

ΣΕΙΡΑ 7000 : Κράματα αλουμινίου - ψευδαργύρου – μαγνησίου(Al-Zn-Mg).[1],[2],[3]

- ✓ Υφίστανται θερμική κατεργασία
- ✓ Πολύ μεγάλη αντοχή, τύποι εξαιρετικής ακαμψίας.
- ✓ Εφαρμογές αυτοκινήτων και αεροδιαστημικές.
- ✓ Αντιπροσωπευτικά κράματα: 7005,7075,7475,7150

✓ Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 220-605 Μπα

Τα κράματα της σειράς 7xxx υφίστανται θερμική κατεργασία και μεταξύ των διαφόρων κραμάτων οι τύποι Al-Zn-Mg-Cu έχουν τις μεγαλύτερες αντοχές μεταξύ όλων των κραμάτων αλουμινίου. Υπάρχουν διάφορα κράματα της σειράς που παράγονται για την εξαιρετική τους ακαμψία, κυρίως τα 7150 και 7475 που με πολύ καλό έλεγχο του επιπέδου των ακαθαρσιών μεγιστοποιούν τον συνδυασμό αντοχής και ακαμψίας.

Η μεγαλύτερη εφαρμογή των σειρών 7xxx ιστορικά είναι στη βιομηχανία αεροσκαφών όπου απαιτούνται μεγάλες τιμές ακαμψίας. Τα κράματα αυτά δεν θεωρούνται συγκολλησίμα με τις κοινές μεθόδους και συνήθως χρησιμοποιούνται σε κατασκευές με πριτσίνια.

Η αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση της σειράς 7xxx δεν είναι τόσο υψηλή όσο των σειρών 5xxx και 6xxx, έτσι σε τέτοιες συνθήκες συνήθως επενδύονται η αν πρόκειται για φύλλα χρησιμοποιούνται επαλουμινωμένα (Alclad). Στις περιπτώσεις που υπάρχει υποψία για κατάρρευση με διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων (stress corrosion cracking) πρέπει να εφαρμόζεται θερμική T73 αντί για T6.

Εφαρμογές των κραμάτων σειράς 7xxx περιλαμβάνουν:

- Κατασκευές αεροσκαφών από φύλλα ή διατομές σειράς 7xxx: Τύποι 7075-T73 ή 7050 η 7475.
- Προφυλακτήρες αυτοκινήτων από 7029 ή 7129 μειώνουν το βάρος του αυτοκινήτου και βελτιώνουν την κατανάλωση του.

ΣΕΙΡΑ 8000 : Διάφορα κράματα αλουμινίου με άλλα στοιχεία όπως λιθίου, σιδηρούχα , κλπ.[1],[2],[3]

- ✓ Υφίστανται θερμική κατεργασία
- ✓ Μεγάλη αγωγιμότητα και αντοχή, σκληρότητα.
- ✓ Ηλεκτρικές εφαρμογές και αεροδιαστημικές.
- ✓ Αντιπροσωπευτικά κράματα: 8017,8176,8081,8280,8090.
- ✓ Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 117-241 Μπα

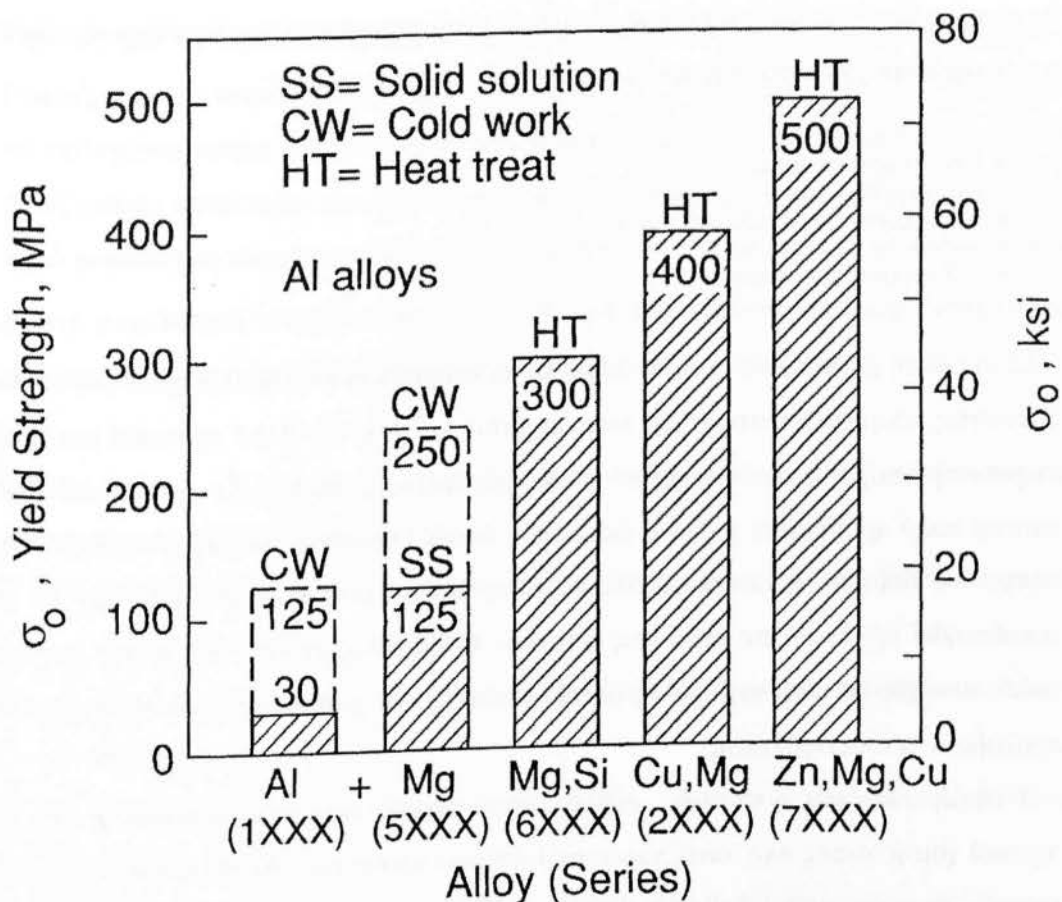
Η σειρά 8xxx χρησιμοποιείται για τα κράματα με τα λιγότερα χρησιμοποιούμενα κραματοποιητικά στοιχεία Fe, Ni, και Li. Το καθένα χρησιμοποιείται για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρέχει στο κράμα: Τα Fe και Ni παρέχουν αντοχή με μικρή

απώλεια ηλεκτρικής αγωγιμότητας (αντιπροσωπευτικό 8017). Το Li στο 8090 παρέχει εξαιρετικά υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας , έτσι χρησιμοποιείται για αεροδιαστημικές εφαρμογές.

Τα κράματα που περιλαμβάνει κάθε σειρά, τυποποιούνται ονοματολογικά με διαφοροποίηση του 2ου /3ου / και 4ου ψηφίου της σειράς (π.χ. 1050 ή 1233 ή 3003 ή 5052 ή 6082) ενώ η κατάσταση σκληρότητας του κράματος χαρακτηρίζεται με ένα επί πλέον γράμμα ακολουθούμενο από κάποιο αριθμό (π.χ. 3105 H14 σημαίνει κράμα 3105 σε ημίσκληρη κατάσταση, που έχει παραχθεί με καθορισμένη μέθοδο παραγωγής). Το κάθε εργοστάσιο παραγωγής αλουμινίου, είναι κατ' ανάγκη προσανατολισμένο σε ορισμένη γκάμα κραμάτων για λόγους οικονομικότητας παραγωγής.

Τέλος τα κράματα αλουμινίου κατεργασίας χωρίζονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί στη συνέχεια:

- Τα εργοσκληρυνόμενα, όπου η βελτίωση της μηχανικής αντοχής επιτυγχάνεται με μηχανικές κατεργασίες (π.χ. ψυχρή έλαση) .
- Τα θερμοσκληρυνόμενα, όπου η σκληρότητα βελτιώνεται με θερμικές κατεργασίες (γήρανση - κατακρήμνιση μεταλλουργικών φάσεων).



Σχήμα 2.1: Όριο διαρροής διαφόρων κραμάτων αλουμινίου και επίδραση της επεξεργασίας: Το καθαρό αλουμίνιο μπορεί να ισχυροποιηθεί με ψυχρή κατεργασία, ενώ τα κράματα με σκλήρυνση στερεού διαλύματος και ακόμη περισσότερο με θερμική κατεργασία που οδηγεί σε σκλήρυνση κατακρήμνισης.[5]

2.2.Κράματα χύτευσης του αλουμινίου

Η ποιότητα και τα χαρακτηριστικά ενός κράματος χύτευσης διαφέρουν από εκείνα των κραμάτων διαμόρφωσης. Τα χυτά εξαρτήματα έχουν οριστική και καθορισμένη μορφή και δεν υφίστανται πλέον καμία πλαστική παραμόρφωση. Τα ειδικά χαρακτηριστικά που πρέπει να διασφαλίζει ένα κράμα χύτευσης αλουμινίου είναι: η καλή χυτεσιμότητα, η απουσία ρωγματώσεων και η ομοιογενής κατανομή του πορώδους (ατέλειες λόγω της συστολής του μετάλλου κατά την στερεοποίηση), η παραγωγή λεπτόκοκκων χυτών αντικειμένων, η καλή αντοχή εν θερμώ και η καλή αντοχή σε διάβρωση. Οι χαμηλές

θερμοκρασίες τήξης των κραμάτων του αλουμινίου, επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση των καλουπιών χύτευσης που πραγματοποιείται με τρεις τρόπους:

- Χύτευση σε άμμο
- Χύτευση σε μεταλλικό τύπο
- Χύτευση υπό πίεση

Σε αντίθεση με τα κατεργάσιμα κράματα, τα κράματα χύτευσης περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες κραματικών στοιχείων όπως πυριτίου και χαλκού. Αυτό προκαλεί μια μεγάλη ετερογενή δομή π.χ. μια σημαντική ποσότητα δεύτερης φάσης. Αυτή η δεύτερη φάση απαιτεί πολύ προσεκτική μελέτη, διότι κάθε άγριο, κοφτερό και εύθραυστο συστατικό μπορεί να δημιουργήσει εσωτερικές εγκοπές και να ξεκινήσει ρωγμές όταν το χυτό τοποθετηθεί αργότερα σε συνθήκες φορτίου. Οι μεγάλες ετερογενείς δομές δεν έχουν καλές αντοχές σε κόπωση. Καλές μεταλλουργικές και χυτευτικές τεχνικές μπορούν να προλάβουν τέτοια σφάλματα.

Η επιμήκυνση και η αντοχή, ειδικά στην κόπωση, των περισσότερων χυτών είναι σχετικά χαμηλότερες από αυτές των κατεργάσιμων προϊόντων. Αυτό οφείλεται στο ότι οι τεχνικές χύτευσης ακόμη δεν μπορούν να προλάβουν τα χυτευτικά σφάλματα.

Τα κυριότερα κράματα χύτευσης του αλουμινίου είναι:

ΣΕΙΡΑ 2xx.x: Κράματα αλουμινίου – χαλκού (Al-Cu).[2],[3]

- ✓ Υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε «κοχύλι» (μεταλλικό καλούπι) και στο «χώμα».
- ✓ Υψηλές αντοχές σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και σε υψηλές θερμοκρασίες. Μερικά παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε κάμψη.
- ✓ Εφαρμογές για αεροσκάφη, αυτοκίνητα και μηχανές.
- ✓ Αντιπροσωπευτικά κράματα: 201.0, 203.0
- ✓ Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131-450 Mpa

Το περισσότερο ανθεκτικό κράμα είναι το 201.0/AlCu4Ti (Ντουραλουμίνιο) που επιδέχεται θερμική κατεργασία. Η χυτευσιμότητα του περιορίζεται λόγω της τάσης σχηματισμού μικροπορώδους και «θερμών σταγόνων» (hot tears) έτσι καλύτερα ταιριάζει στις μεθόδους επενδυμένων κελυφών. Η μεγάλη του αντοχή σε κάμψη το κάνει ιδιαίτερα κατάλληλο για εξαρτήματα υψηλής καταπόνησης σε εργαλειομηχανές, σε εφαρμογές ηλεκτρολογικού υλικού και στη κατασκευή αεροσκαφών.

Εκτός από τα κανονικά κράματα χύτευσης, υπάρχουν ειδικά κράματα για ιδιαίτερα εξαρτήματα π.χ. κεφαλές μηχανής, σώματα μηχανής ή κουζινέτα. Για τέτοιες εφαρμογές το επιλεγμένο κράμα απαιτεί καλή αντοχή στη φθορά και χαμηλό συντελεστή τριβής, όπως επίσης κατάλληλη αντοχή σε συνθήκες λειτουργίας υψηλών θερμοκρασιών. Ένα καλό παράδειγμα είναι το κράμα 203.0/AlCu5NiCo που σήμερα είναι το κράμα χύτευσης με την μεγαλύτερη αντοχή στους 200^o C. Φτερά προσγείωσης (landing flaps) και άλλα εξαρτήματα αεροσκαφών κατασκευάζονται επίσης από αυτή την σειρά.

ΣΕΙΡΑ 3xx.x Κράματα αλουμινίου-πυριτίου-χαλκού ή αλουμινίου-πυριτίου-μαγνησίου (Al-Si+Cu ή Mg).[2],[3]

- ✓ Υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε «κοχύλι» (μεταλλικό καλούπι) στο «χώμα» και σε χυτόπρεσσα
- ✓ Εξαιρετική χυτευσιμότητα (εύροια), υψηλή αντοχή, μερικά δε κράματα με υψηλή αντοχή σε κάμψη.
- ✓ Εφαρμογές σε εξαρτήματα αυτοκινήτου, πιστόνια, αντλίες ηλεκτρολογικά εξαρτήματα.
- ✓ Αντιπροσωπευτικά κράματα: 356.0, A356.0, 359.0, A360.0.
- ✓ Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131-275 Mpa

Η σειρά 3xx.x των χυτών είναι μια από τις πλέον διαδεδομένες σειρές λόγω της ελαστικότητας που προσδίδει το υψηλό σε πυρίτιο ποσοστό, όπως και της πολύ καλής χυτευσιμότητας. Σε αυτές τις ιδιότητες πρέπει να προστεθεί και μια ποικιλία υψηλών αντοχών μετά από θερμική κατεργασία. Επιπλέον η σειρά 3xx.x μπορεί να χυτευθεί με τις περισσότερες τεχνικές, από «χώμα» και χυτόπρεσσα μέχρι πολύπλοκα «κοχύλια» και με τις μεθόδους του χαμένου κεριού και του χαμένου ομοιώματος πολυστυρενίου καθώς και τις πολύ νέες «θιξοχύτευση» και χύτευση squeeze.

Μεταξύ των περισσότερο γνωστών είναι τα 319.0 356.0/A356.0 για «χώμα» και «κοχύλι», 360.0, 380.0/A380.0 και 390.0 για χυτόπρεσσα και 357.0/A357.0 για τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Το κράμα 332.0 είναι επίσης ένα πολύ διαδεδομένο κράμα που μπορεί να παραχθεί αποκλειστικά σχεδόν από ανακύκλωση.

Εφαρμογές:

- Πλαίσιο του υπερσυμπιεστή για φορτηγό Mercedes από 356.0.
- Το κιβώτιο ταχυτήτων επιβατηγού αυτοκινήτου σε χυτόπρεσσα από 380.0 κράμα.
- Κιβώτιο πίσω κίνησης επιβατηγού από 380.0 κράμα χυτευμένο στο «χώμα».

- Εξαρτήματα αυτοκινήτου από 357.0 και A357.0 χυτευμένα σε «χώμα» και σε «κοχύλι».
- Χυτά της σειράς 3xx.x με τη μέθοδο του χαμένου ομοιώματος πολυστερίνης που παρέχει ιδιαίτερες λεπτομέρειες και πολυπλοκότητα.
- Ζάντες αλουμινίου από A356.0.

ΣΕΙΡΑ 4xx.x: Κράματα αλουμινίου-πυριτίου (Al-Si).[2],[3]

- ✓ Δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Χυτεύονται σε «χώμα» «κοχύλι» και χυτόπρεσσα.
- ✓ Εξαιρετική χυτευσιμότητα πολύ καλή για περίπλοκα χυτά.
- ✓ Πλαίσια γραφομηχανών, εξοπλισμός οδοντιατρείου, παραθαλάσσιες εφαρμογές και διακοσμητικές.
- ✓ Αντιπροσωπευτικά κράματα: 413.0, 443.0
- ✓ Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131-275 Mpa

Το κράμα B413.0/AlSi12 είναι γνωστό για την καλή χυτευσιμότητα του και την καλή συγκολλησιμότητα που οφείλονται στην ευτηκτική του σύνθεση και το χαμηλό σημείο τήξης (570°C). Συνδυάζει μέτρια αντοχή με μεγάλη επιμήκυνση και καλή αντοχή σε διάβρωση. Το κράμα είναι καλό για πολύπλοκες λεπτές διατομές με καλή αντοχή σε κόπωση.

ΣΕΙΡΑ 5xx.x: Κράματα αλουμινίου-μαγνησίου (Al-Mg).[2],[3],[7]

- ✓ Δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Χυτεύονται σε «χώμα».
- ✓ Υψηλή αντοχή στη διάβρωση.
- ✓ Καλή κατεργασιμότητα.
- ✓ Καλή εμφάνιση έπειτα από την κατεργασία της ανοδίωσης.
- ✓ Μέτριες ιδιότητες χύτευσης.

ΣΕΙΡΑ 7xx.x: Κράματα αλουμινίου-ψευδαργύρου (Al-Zn).[2],[3],[7]

- ✓ Υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε «κοχύλι» (μεταλλικό καλούπι) στο «χώμα» και σε χυτόπρεσσα.
- ✓ Υψηλή αντοχή στη διάβρωση.
- ✓ Καλή διαστασιακή σταθερότητα κατά την διάρκεια κατεργασιών.
- ✓ Καλή κατεργασιμότητα ιδίως στα κράματα που περιέχουν χαλκό.

- ✓ Περιορισμένες ιδιότητες χύτευσης.

ΣΕΙΡΑ 8xx.x: Κράματα αλουμινίου-κασσιτέρου (Al-Tin).[2],[3],[7]

- ✓ Δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία.
- ✓ Υψηλή αντοχή στη διάβρωση.
- ✓ Μικρή μηχανική αντοχή
- ✓ Καλή κατεργασιμότητα ιδίως στα κράματα που περιέχουν χαλκό

Βιβλιογραφία:

- [1] ASM, Intro to Aluminum Alloys and Tempers, pg. 25~36, 87~118
- [2] ASM, Metals Handbook, Vol. 2, pg. 17~28,34~41,137
- [3] Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Διδασκτέα Ύλη και Σημειώσεις μαθήματος «Επιστήμη και Τεχνολογία του Αλουμινίου», υπό Μ. Γεωργιάτης
- [4] Springer, Materials Handbook, pg. 171~178
- [5] Πανεπιστήμιο Κρήτης, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών, Σημειώσεις και Διαλέξεις μαθήματος «Μηχανικές και Θερμικές Ιδιότητες Υλικών», Διάλεξη 3^η, υπό Β. Κουτσός
- [6] ASM, Metals Handbook Desk Edition, pg. 1001
- [7] ASM, Aluminum Alloy Castings, pg. 13~17

3. Διαγράμματα ισορροπίας φάσεων συστημάτων αλουμινίου

3.1. Εισαγωγή

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις διάφορες βιομηχανικές κατασκευές σπάνια είναι καθαρά σώματα ή τελείως ομογενή μίγματα. Κατά κύριο λόγο, συνίστανται από σώματα που εμπεριέχουν διάφορες διακεκριμένες φάσεις με διαφορετικές ιδιότητες.[2]

Ο όρος φάση αναφέρεται σε μια ομογενή περιοχή της ύλης, όπου τόσο η χημική σύσταση, όσο και η κρυσταλλική δομή, κατά συνέπεια και οι ιδιότητες, διατηρούνται ίδιες σε όλη της την έκταση. Αποτελεί τμήμα ενός συστήματος και διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα τμήματα του συστήματος από μια επιφάνεια.. οι γραφικές παραστάσεις οι οποίες περιγράφουν, σε συντεταγμένες θερμοκρασίας-συγκέντρωσης, τις περιοχές ύπαρξης ή συνύπαρξης των φάσεων ενός συστήματος ονομάζονται και παρέχουν πληροφορίες σχετικά με:

- την παρουσία, τον αριθμό και την χημική σύσταση των υπάρχουσών φάσεων σε διαφορετικές συγκεντρώσεις και θερμοκρασίες κάτω από συνθήκες εξαιρετικά χαμηλής ταχύτητας απόψυξης(συνθήκες ισορροπίας,
- τη διαλυτότητα, σε συνθήκες ισορροπίας, σε στερεά κατάσταση ενός στοιχείου ή ένωσης στο άλλο,
- τη θερμοκρασία στην οποία οι διαφορετικές φάσεις αρχίζουν να τήκονται και την θερμοκρασία στην οποία ένα ψυχόμενο κράμα σε συνθήκες ισορροπίας, αρχίζει να στερεοποιείται, καθώς και τη θερμοκρασιακή περιοχή εντός της οποίας πραγματοποιείται η στερεοποίηση.[2]

Στην πραγματικότητα, οι φάσεις των υπό μελέτη κραμάτων πιθανόν να βρίσκονται σε κάποια εξελισσόμενη κατάσταση, ωστόσο τα διατιθέμενα διαγράμματα ισορροπίας των φάσεων δίνουν μια αφετηρία βάσης από την οποία είναι δυνατόν να εξαχθούν πολύτιμα συμπεράσματα για περιεκτικότητες κραμάτων εκτός ισορροπίας.[2]

Το σύνολο των φάσεων σχηματίζεται από ένα ορισμένο αριθμό καθαρών ουσιών, όπως στοιχείων Fe, Cu, S κλπ. ή καθαρών ενώσεων όπως οι NaCl, SiO₂, Fe₃C κλπ. σε σταθερή αναλογία, που ονομάζονται συστατικά. Σε όλες τις περιπτώσεις ένα συστατικό έχει καθορισμένο σημείο τήξης.[2]

Ένα συστατικό είναι δυνατό να βρίσκεται σε στερεή, υγρή ή αέρια φάση, ενώ δύο συστατικά που αναμιγνύονται πλήρως σχηματίζουν μια μόνο φάση. Για παράδειγμα,

μίγμα νερού(H_2O) και αλκοόλης(CH_3COOH), τα οποία είναι πλήρως αναμίξιμα υγρά, αποτελεί ένα μονοφασικό υγρό σύστημα. Αντίστοιχα, ένα κράμα Cu και Ni, που αποτελούν συστατικά πλήρως αναμίξιμα σε στερεή κατάσταση, αποτελεί ένα μονοφασικό στερεό διάλυμα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μολονότι το κράμα αυτό αποτελείται από πολλούς κόκκους, συνιστά, ωστόσο, μονοφασικό σύστημα δεδομένου ότι η δομή του και η σύσταση του παραμένει ή ίδια από τον ένα κόκκο στον άλλο.[2]

Ακόμη, θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι ενδέχεται ορισμένα στοιχεία, όπως Fe, Sn, Ti κ.α. να παρουσιάζουν σε στερεή κατάσταση το φαινόμενο του πολυμορφισμού ή αλλοτροπίας. Εμφανίζονται, δηλαδή, με περισσότερες από μία κρυσταλλικές δομές, κάθε μία από τις οποίες είναι σταθερή σε ορισμένη περιοχή θερμοκρασιών. Τέλος, κράμα γενικά ονομάζεται ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων μετάλλων ή ενός μετάλλου(ή μετάλλων) με αμέταλλο(ή αμέταλλα) ή επαμφοτερίζον στοιχείο.[2]

3.1.1. Διάκριση διαγραμμάτων

Θερμοδυναμικό διάγραμμα φάσεων που δείχνει τις φάσεις μιας ουσίας υπό διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης αποκαλείται *θερμοδυναμικό διάγραμμα φάσεων καθαρής ουσίας*. Διάγραμμα φάσεων που δείχνει τις φάσεις που σχηματίζονται από δύο ουσίες αποκαλείται *διμερές θερμοδυναμικό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων*. Αντιστοίχως ένα διάγραμμα φάσεων που δείχνει τις φάσεις που σχηματίζονται από τρεις ουσίες αποκαλείται *τριμερές θερμοδυναμικό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων*. Παρότι τα θερμοδυναμικά διαγράμματα ισορροπίας φάσεων περιγράφουν τις φάσεις ενός συστήματος υπό συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας, εντούτοις συχνά χρησιμοποιούνται για να δείξουν και φάσεις που δημιουργούνται υπό μετασταθείς συνθήκες. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται λόγος για *ευσταθή διαγράμματα φάσεων ή διαγράμματα ισορροπίας*, ενώ στην δεύτερη περίπτωση γίνεται λόγος για *μετασταθή διαγράμματα φάσεων*. Τα διαγράμματα φάσεων είναι εξαιρετικά χρήσιμα για τον σχεδιασμό και την ανάλυση της συμπεριφοράς διαφόρων υλικών στην χημεία, την γεωλογία, την μεταλλουργία, την κεραμική, την επιστήμη των υλικών κ.ά. Επίσης, συχνά χρησιμοποιούνται διαγράμματα παρόμοια με τα διαγράμματα φάσεων για να παρουσιαστούν και άλλες ιδιότητες πολυμερών συστημάτων υπό διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης, σύστασης, όπως π.χ. ηλεκτρική αγωγιμότητα, χρώμα, κ.λπ.[5]

3.1.1α.Στερεά διαλύματα-φάσεις και ενώσεις στα διαγράμματα ισορροπίας

Όπως προαναφέρθηκε, πολύ λίγα μέταλλα χρησιμοποιούνται στην καθαρή τους μορφή. Συνήθως προστίθενται σε αυτά άλλα μέταλλα σχηματίζοντας έτσι κράματα τα οποία παρουσιάζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα κραματικά στοιχεία ή στοιχεία προσθήκης διαλύονται στο βασικό καθαρό μέταλλο σχηματίζοντας έτσι στερεά διαλύματα του δεύτερου. Η διαλυτότητα των στοιχείων προσθήκης στο βασικό μέταλλο κυμαίνεται από <math><0,01\%</math> έως 100% και εξαρτάται από τους συνδυασμούς των στοιχείων που επιλέγονται για κραμάτωση.[2]

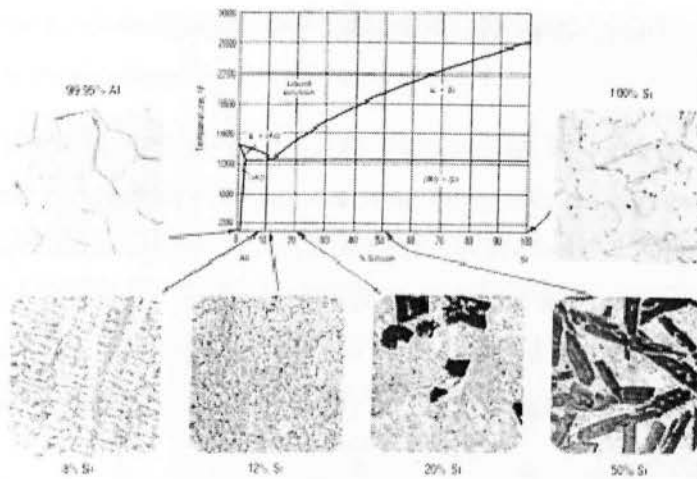
Σε ένα καθαρό μέταλλο A, λοιπόν μπορούμε να προσθέσουμε άτομα ξένου στοιχείου B χωρίς να μεταβληθεί η κρυσταλλική δομή του μετάλλου της βάσης A. το στοιχείο B διαλύεται στο A και σχηματίζει στερεό διάλυμα AB. Το ξένο άτομο B, το οποίο βρίσκεται και στη μικρότερη εκατοστιαία αναλογία, είναι ένα στοιχείο κραμάτωσης.[2]

Στις περισσότερες περιπτώσεις, υπάρχει μια οριακή συγκέντρωση, C_B , πέραν της οποίας η κρυσταλλική δομή μεταβάλλεται. Στο μεσοδιάστημα μεταξύ του καθαρού μετάλλου A και του κράματος AB συγκέντρωσης C_B υπάρχει το ακραίο στερεό διάλυμα, το οποίο ονομάζεται έτσι διότι εμφανίζεται στα άκρα των διαγραμμάτων φάσεων ισορροπίας, κοντά δηλαδή στα καθαρά συστατικά. Τα ακραία στερεά διαλύματα ανήκουν στα στερεά διαλύματα πλήρους διαλυτότητας, δηλαδή σε αυτά που σχηματίζουν μια μόνο δομή, την ίδια με εκείνη του στερεού διαλύτη, με τη διαφορά ότι τα ποσοστά συμμετοχής των δύο ειδών ατόμων στη στοιχειώδη κυψελίδα μεταβάλλονται.[2]

Πέραν της συγκέντρωσης C_B τα στοιχεία A και B μπορούν ακόμη να σχηματίσουν ένα στερεό διάλυμα που έχει μια κρυσταλλική δομή διαφορετική του καθαρού μετάλλου βάσης A και ονομάζεται ενδιάμεσο στερεό διάλυμα. Ενδιάμεσα στερεά διαλύματα είναι δυνατόν να σχηματιστούν και όταν τα συστατικά του διαγράμματος φάσεων δεν είναι μέταλλα αλλά οξείδια(κεραμικά υλικά). Σε ορισμένα διαγράμματα φάσεων σχηματίζονται ενδιάμεσες ενώσεις ανάμεσα σε δύο μέταλλα ή ανάμεσα σε ένα μέταλλο και ένα αμέταλλο. Τα κυριότερα είδη ενδιάμεσων ενώσεων και φάσεων ονομαστικά είναι οι ηλεκτρονικές ενώσεις, οι μεσομεταλλικές ενώσεις ή ενώσεις ιοντικού και ομοιοπολικού δεσμού και οι μεσομεταλλικές φάσεις ή φάσεις του Laves.[2]

3.1.1β. Διμερή διαγράμματα φάσεων

Ένα διμερές διάγραμμα φάσεων δείχνει ποιες φάσεις δημιουργούνται σε συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας όταν δύο ουσίες (στοιχεία ή χημικές ενώσεις) βρεθούν μαζί σε συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και σε συγκεκριμένη αναλογία. Συνήθως στα διμερή διαγράμματα φάσεων, η πίεση θεωρείται ίση με την ατμοσφαιρική. Στα διμερή διαγράμματα φάσεων, η αναλογία των δύο κυρίων συστατικών ουσιών παρουσιάζεται στον άξονα τον x και η θερμοκρασία στον άξονα τον y . Ο άξονας των x εκφράζεται συνήθως ως ατομική αναλογία (% mol) ή ως ποσοστό μάζας (% κ.β.). Το πιο απλό διάγραμμα φάσεων είναι εκείνο που παρουσιάζει δύο ουσίες που είναι πλήρως διαλυτές μεταξύ τους τόσο στην υγρή όσο και στην στερεά κατάσταση. Το διάγραμμα αυτό έχει δύο χαρακτηριστικές γραμμές: την γραμμή πλήρους τήξης, που αποκαλείται καμπύλη *liquidus*, και την γραμμή πλήρους στερεοποίησης, που αποκαλείται καμπύλη *solidus*. Επάνω από την καμπύλη *liquidus* το σύστημα είναι πλήρως υγρό, ενώ κάτω από την καμπύλη *solidus* το σύστημα είναι πλήρως στερεό. Μεταξύ των δύο γραμμών η υγρή και η στερεά φάση συνυπάρχουν σε αναλογία που προσδιορίζεται με τον κανόνα του μοχλού. Στις περιπτώσεις ουσιών που δεν είναι πλήρως διαλυτές μεταξύ τους, τότε στο διμερές θερμοδυναμικό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων παρουσιάζεται μία αναλογία των δύο κυρίων συστατικών με σημείο τήξεως χαμηλότερο από τα σημεία τήξεως και των δύο κυρίων συστατικών. Το σημείο αυτό αποκαλείται *ευτηκτικό* και αποτελεί χαρακτηριστικό σημείο του συστήματος.[5]



Σχήμα 3.1:Θερμοδυναμικό διάγραμμα ισορροπίας φάσεων αλουμινίου-πυριτίου και των μικροδομών που σχηματίζονται κατά την στερεοποίηση για διάφορες περιεκτικότητες κραμάτων αλουμινίου. Κράματα με λιγότερο από 12% πυρίτιο ονομάζονται υποευκτικά, με περίπου 12% πυρίτιο ευκτικά και με πάνω από 12% πυρίτιο ως υπereυκτικά.[3]

Πίνακας 3,1:Τριφασικές ισορροπίες διμερών διαγραμμάτων ισορροπίας των φάσεων[3]

Type	Reaction
Eutectic (involves liquid and solid)	$L_1 \xrightarrow{\vee} L_2 + S$ Monotectic
	$L \xrightarrow{\vee} S_1 + S_2$ Eutectic
	$L \xrightarrow{\vee} S_1 + S_2$ Catactetic (metatectic)
Eutectoid (involves solid only)	$S_1 \xrightarrow{\vee} S_2 + S_3$ Monotectoid
	$S_2 \xrightarrow{\vee} S_1 + S_3$ Eutectoid
Peritectic (involves liquid and solid)	$L_1 \xrightarrow{\wedge} L_2 + S$ Syntectic
	$L \xrightarrow{\wedge} S_1 + S_2$ Peritectic
Peritectoid (involves solid only)	$S_1 \xrightarrow{\wedge} S_2 + S_3$ Peritectoid

3.2. Διμερή διαγράμματα ισορροπίας φάσεων συστημάτων αλουμινίου

Το αλουμίνιο όπως τα περισσότερα μέταλλα ενισχύεται με κατεργασία εν ψυχρώ. Ακόμη περισσότερο δε, ενισχύεται με κραματοποίηση με διάφορα στοιχεία. Το καθαρό αλουμίνιο χρησιμοποιείται για ηλεκτρικούς αγωγούς, χημικό εξοπλισμό και σα φύλλο με διάφορες εφαρμογές. Οι κυριότερες προσθήκες στο αλουμίνιο είναι ο χαλκός, το μαγνήσιο, το πυρίτιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος ενώ και άλλα στοιχεία προστίθενται σε πολύ μικρές ποσότητες για πολύ ειδικούς σκοπούς (εκλέπτυνση κόκκου, μετασχηματισμό).[4]

Ο πίνακας 1,2 δείχνει τη μέγιστη διαλυτότητα των κύριων κραματικών στοιχείων καθώς και τη θερμοκρασία στην οποία παρατηρείται. Οι τιμές δίνονται για διμερή συστήματα, και η παρουσία και άλλων στοιχείων στο κράμα επηρεάζει την διαλυτότητα. Προσθήκες μεγαλύτερες από τη μέγιστη διαλυτότητα πολλές φορές γίνονται, ειδικά με το πυρίτιο και αυτό έχει σα συνέπεια τη παρουσία ετερογενών σωματιδίων στο στερεό διάλυμα.[4]

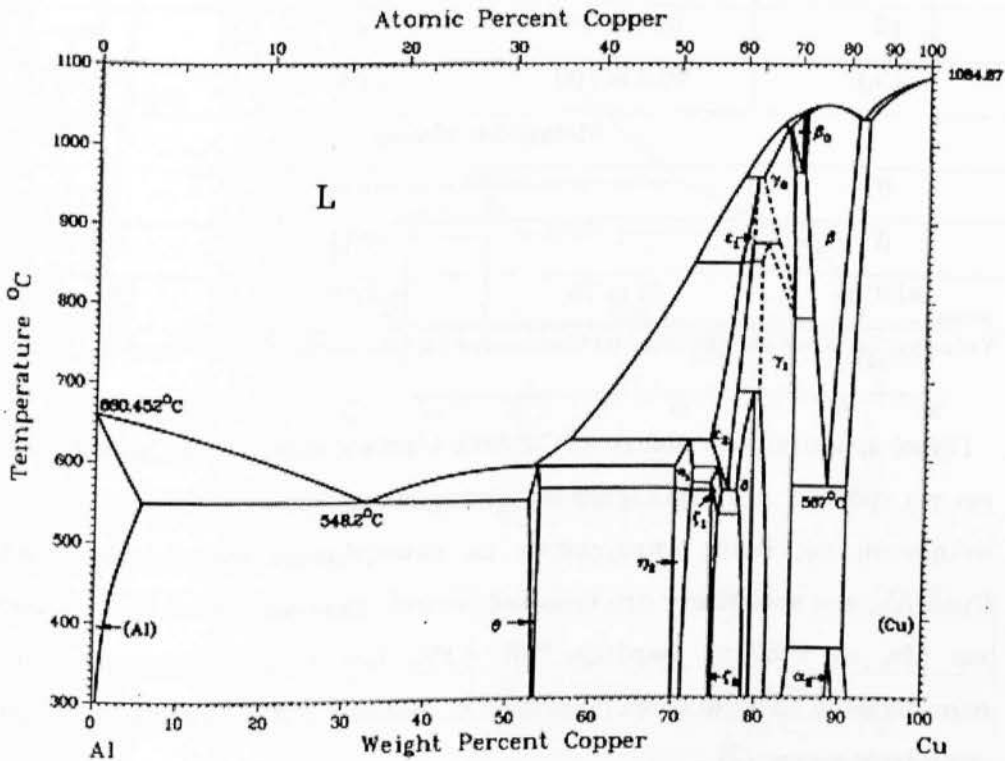
Πίνακας 3,2: Μέγιστη διαλυτότητα των κύριων κραματικών στοιχείων στο αλουμίνιο[4]

Προσθήκη	% κ/β	% άτομα	Θερμοκρασία °C
Cu	5,6	2,5	745
Mg	14,9	16,3	569
Mn	1,8	0,9	944
Si	1,6	1,6	798
Zn	82,8	66,4	447
Mg ₂ Si	1,8	1,9	740
MgZn ₂	16,9	9,6	614

Στη συνέχεια δίνονται τα διμερή διαγράμματα φάσεων. Από όλα τα κύρια κραματικά στοιχεία μόνο ο ψευδάργυρος έχει σημαντική διαλυτότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και μάλιστα λίγες μονάδες. Έτσι κάτω από συνθήκες ισορροπίας οι περισσότερες κραματικές προσθήκες βρίσκονται διεσπαρμένες στη μήτρα του αλουμινίου και το ενισχύουν με διασπορά. Πάντως δεν επιδέχονται όλα τα κράματα θερμική κατεργασία και απαιτείται περαιτέρω ενίσχυση με ψυχρηλασία. Παρουσιάζονται στη συνέχεια τα διμερή διαγράμματα με τις κυριότερες κραματικές προσθήκες καθώς και τις επιδράσεις που προκαλούν στο αλουμίνιο, ωστόσο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι

σπάνια τα κράματα είναι διμερή και συνήθως μικρές ποσότητες από άλλα στοιχεία προστίθενται για να προσδώσουν ειδικές ιδιότητες.[4]

Ο χαλκός είναι ένα από τα πιο σπουδαία στοιχεία για το αλουμίνιο. Έχει σημαντική διαλυτότητα και ενισχύει σημαντικά το αλουμίνιο με θερμική κατεργασία κατακρήμνισης και γήρανσης. Πολλά κράματα περιέχουν χαλκό είτε σα κύριο κραματικό στοιχείο, η μεταξύ των κυρίων κραματικών στοιχείων σε περιεκτικότητες από 1 έως 10%.[4]



Σχήμα 3,2: Al-Cu (Aluminum - Copper) phase diagram[1]

Al-Cu crystallographic data[1]

Phase	Composition, wt% Cu	Pearson symbol	Space group
(Al)	0 to 5.65	<i>cF4</i>	<i>Fm3m</i>
θ	52.5 to 53.7	<i>tI12</i>	<i>I4/mcm</i>
η1	70.0 to 72.2	<i>oP16</i> or <i>oC16</i>	<i>Pban</i> or <i>Cmmm</i>
η2	70.0 to 72.1	<i>mC20</i>	<i>C2/m</i>
ζ1	74.4 to 77.8	<i>hP42</i>	<i>P6/mmm</i>

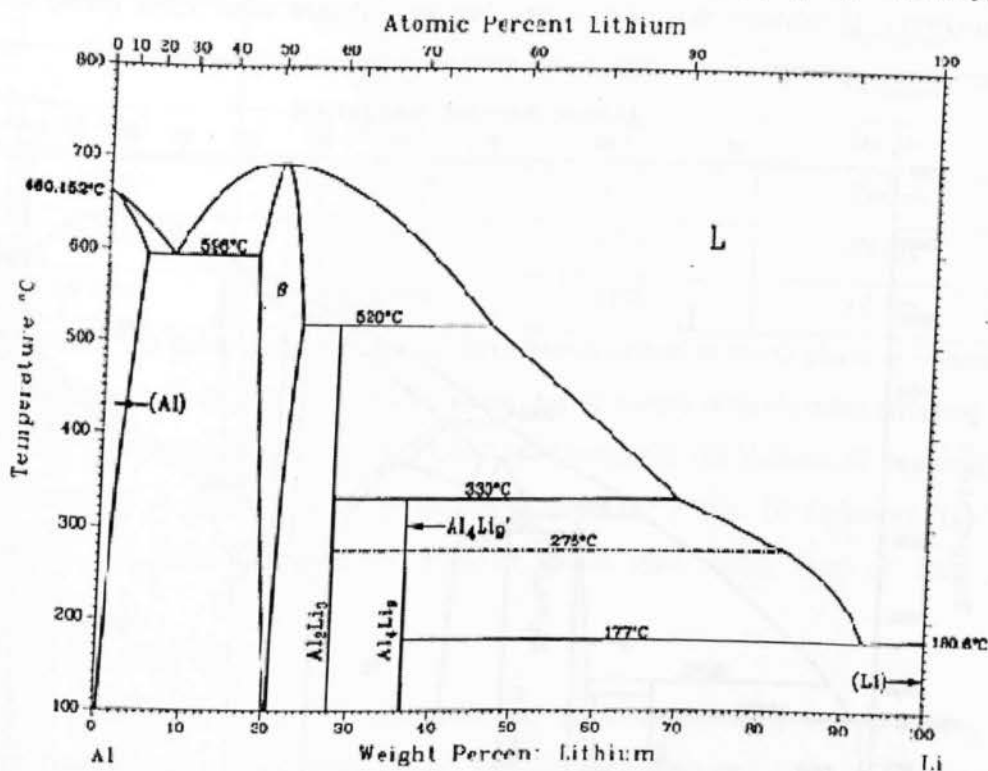
ζ_2	74.4 to 75.2	(a)	-
ϵ_1	77.5 to 79.4	(b)	-
ϵ_2	72.2 to 78.7	<i>hP4</i>	<i>P63/mmc</i>
δ	77.4 to 78.3	(c)	<i>R 3m</i>
γ_0	77.8 to 84	(d)	-
γ_1	79.7 to 84	<i>cP52</i>	<i>P 43m</i>
β_0	83.1 to 84.7	(d)	-
β	85.0 to 91.5	<i>cI2</i>	<i>Im 3m</i>
α_2	88.5 to 89	(e)	-
(Cu)	90.6 to 100	<i>cF4</i>	<i>Fm3m</i>
Metastable phases			
θ'	-	<i>tP6</i>	-
β'	-	<i>cF16</i>	<i>Fm3m</i>
Al3Cu2	61 to 70	<i>hP5</i>	<i>P 3m1</i>

Υπόμνημα: (a) Monoclinic? (b) Cubic? (c) Rhombohedral. (d) Unknown. (e) $D0_{22}$ -type long-period superlattice

Γενικά πρόκειται για κράματα Al-Cu, όπου ο χαλκός περιέχεται σε ποσοστά 2,6-6,3%, και για κράματα Al-Cu-Mg, όπου το μαγνήσιο κυμαίνεται μεταξύ 0,5% και 1,5%. Η σκλήρυνση της δομής επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση των ενώσεων CuAl_2 και CuMgAl_2 , που προσδίδουν στο κράμα εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Η προσθήκη Si και Mn, σε ποσοστά μικρότερα του 0,8%, ευνοεί τον σχηματισμό τετραμερών συστατικών τα οποία τα οποία βρίσκονται σε διασπορά και βελτιώνουν τις ιδιότητες της μεταλλικής μήτρας.[2]

Το λίθιο ως το ελαφρύτερο μεταλλικό στοιχείο καθίσταται ιδανικό για την δημιουργία κραμάτων αλουμινίου. Για κάθε 1% προσθήκης λιθίου στο αλουμίνιο, προκαλείται μείωση του βάρους του κατά ~3%, και αύξηση του ορίου ελαστικότητας κατά ~5%. Παρότι η μέγιστη διαλυτότητα του λιθίου στο αλουμίνιο είναι 4,2%, στα εμπορικά κράματα αλουμινίου λιθίου, το ποσοστό αυτό κυμαίνεται από 1% έως 3%. Η ανάπτυξη των κραμάτων αυτών, ως αρχικό στόχο είχε τη μείωση του βάρους των αεροσκαφών και των δομικών στοιχείων των διαστημοπλοίων, λόγω της μικρής τους πυκνότητας, της υψηλής μηχανικής τους αντοχής και του υψηλού ειδικού μέτρου ελαστικότητας. Σήμερα

τα κράματα Al-Li, βρίσκουν και πολλές άλλες εφαρμογές, λόγω της πολύ καλής αντοχής τους σε κόπωση και της υψηλής μηχανικής τους αντοχής σε χαμηλές θερμοκρασίες.[2]



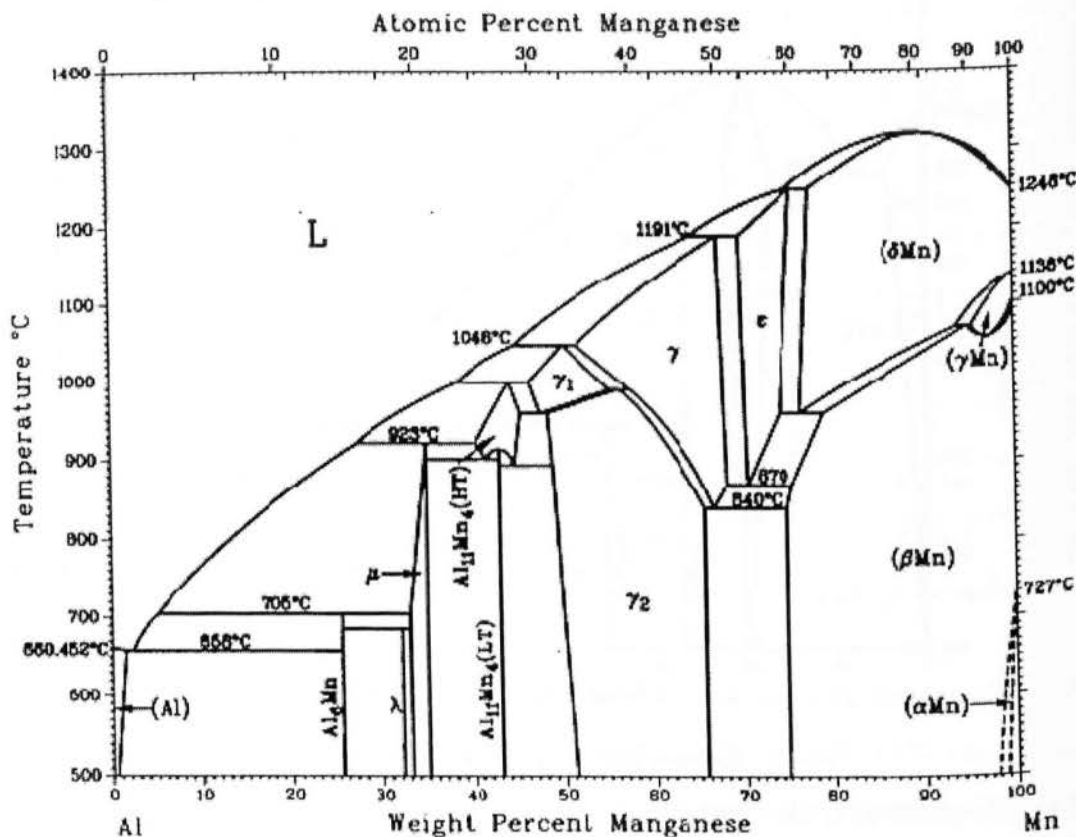
Σχήμα 3,3: Al-Li phase diagram[1]

Al-Li crystallographic data[1]

Phase	Composition, wt% Li	Pearson symbol	Space group
(Al)	0 to 4	<i>cF4</i>	<i>Fm3m</i>
β	17 to 24	<i>cF16</i>	<i>Fd 3m</i>
Al ₂ Li ₃	28 to 29	<i>hR15</i>	<i>R3m</i>
Al ₄ Li ₉	36.6	<i>mC26</i>	<i>C2/m</i>
Al ₄ Li ₉ '	36.6	-	-
(βLi)	100	<i>cI2</i>	<i>Im 3m</i>
(αLi)	100	<i>hP2</i>	<i>P6s/mmc</i>
Metastable phases			
Al ₃ Li	-	<i>cP4</i>	<i>Pm3m</i>

Το μαγγάνιο έχει περιορισμένη διαλυτότητα στο στερεό διάλυμα του αλουμινίου αλλά σε περιεκτικότητες περίπου 1% σχηματίζει μια σειρά από κατεργάσιμα κράματα που δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Προστίθεται ευρέως σαν συμπληρωματικό στοιχείο σε

κράματα (επιδεκτικά ή μη επιδεκτικά θερμικής κατεργασίας) και προσδίδει σημαντική ενίσχυση. Ωστόσο χρησιμοποιείται και ως κύρια προσθήκη για την δημιουργία κραμάτων αλουμινίου. Η μέγιστη διαλυτότητα του Mn στο Al που είναι 1,8% στους 659°C, ελαττώνεται γρήγορα με τη θερμοκρασία όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3,6.[4]



Σχήμα 3,4: Al-Mn phase diagram[1]

Al-Mn crystallographic data[1]

Phase	Composition, wt% Mn	Pearson symbol	Space group
(Al)	0 to 1.25	<i>cF4</i>	<i>Fm3m</i>
G(a)	(b)	<i>cI26</i>	<i>Im 3m</i>
Al ₆ Mn	25.2	<i>oC28</i>	<i>Cmcm</i>
λ ("Al ₄ Mn")(c)	~29.4 to ~32	(d)	-
μ	~32 to 34.8	(d)	-
Al ₁₀ Mn ₃ (Φ)	(b)	<i>hP28</i>	<i>P63/mmc</i>
Al ₁₁ Mn ₄ (LT)(e)	43	<i>aP30</i>	P1
Al ₁₁ Mn ₄ (HT)(e)	40 to 45.0	<i>oP160</i>	<i>Pnma</i>
γ ₁	47 to 55.7	(f)	-

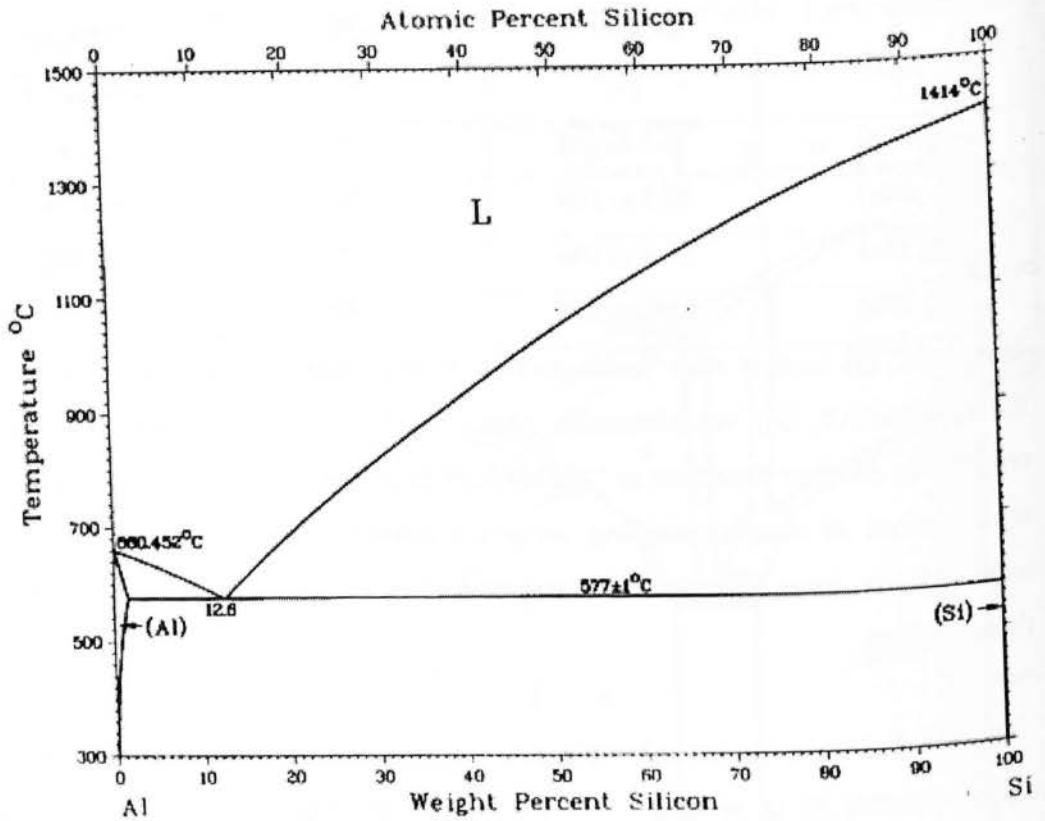
$\gamma_2^{(g)}$	48.2 to 64	<i>hR26</i>	<i>R3m</i>
γ	51.8 to 68.2	(f)	-
ϵ	69.8 to 75	<i>hP2</i>	<i>P63/mmc</i>
τ	(b)	<i>tP2</i>	<i>P4/mmm</i>
(δ Mn)	76.5 to 100	<i>cI2</i>	<i>Im 3m</i>
(γ Mn)	95.3 to 100	<i>cF4</i>	<i>Fm3m</i>
(β Mn)	75.0 to 100	<i>cP20</i>	<i>P4132</i>
(α Mn)	~ 99 to 100	<i>cI58</i>	<i>I4 3m</i>

Υπόμνημα: (a) Several other structures have been ascribed to the G phase or variants of the G phase (G', G"). (b) Metastable phase. (c) A simple orthorhombic structure was reported in an alloy described as "Al4Mn." (d) Hexagonal. (e) Variants of this structure are described as complex stacking sequences along the *b* axis. (f) Unknown. (g) The structure has been described as distorted -brass type, cubic (bcc or fcc), and rhombohedral.

Το Mn ενώνεται με το Al, σχηματίζοντας τη μεσομεταλλική ένωση Al₆Mn. Η σκλήρυνση του Al με προσθήκη Mn, σε ποσοστά μικρότερα από 1,5%, οφείλεται στη διασπορά της ένωσης αυτής μέσα στη μεταλλική μήτρα του αλουμινίου. Συγχρόνως, η παρουσία της Al₆Mn προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης του κράματος. Η προσθήκη χαλκού, σε ποσοστό 0,12%, προκαλεί αύξηση της μηχανικής τους αντοχής. Η προσθήκη μαγνησίου, σε ποσοστά μικρότερα από 1,2%, επιφέρει δευτερογενή σκλήρυνση, λόγω του σχηματισμού στερεού διαλύματος.[2]

Τα κράματα Al-Mn μορφοποιούνται εύκολα, αντέχουν στην ατμοσφαιρική διάβρωση και συγκολλώνται εύκολα. Αντικαθιστούν τα κράματα καθαρού αλουμινίου, σειρά 1000, σε εφαρμογές όπου απαιτούνται βελτιώμενες μηχανικές ιδιότητες.[2]

Το πυρίτιο μειώνει το σημείο τήξης και αυξάνει την ρευστότητα του αλουμινίου. Αυξάνει επίσης σε μέτριο βαθμό την αντοχή του.[4]

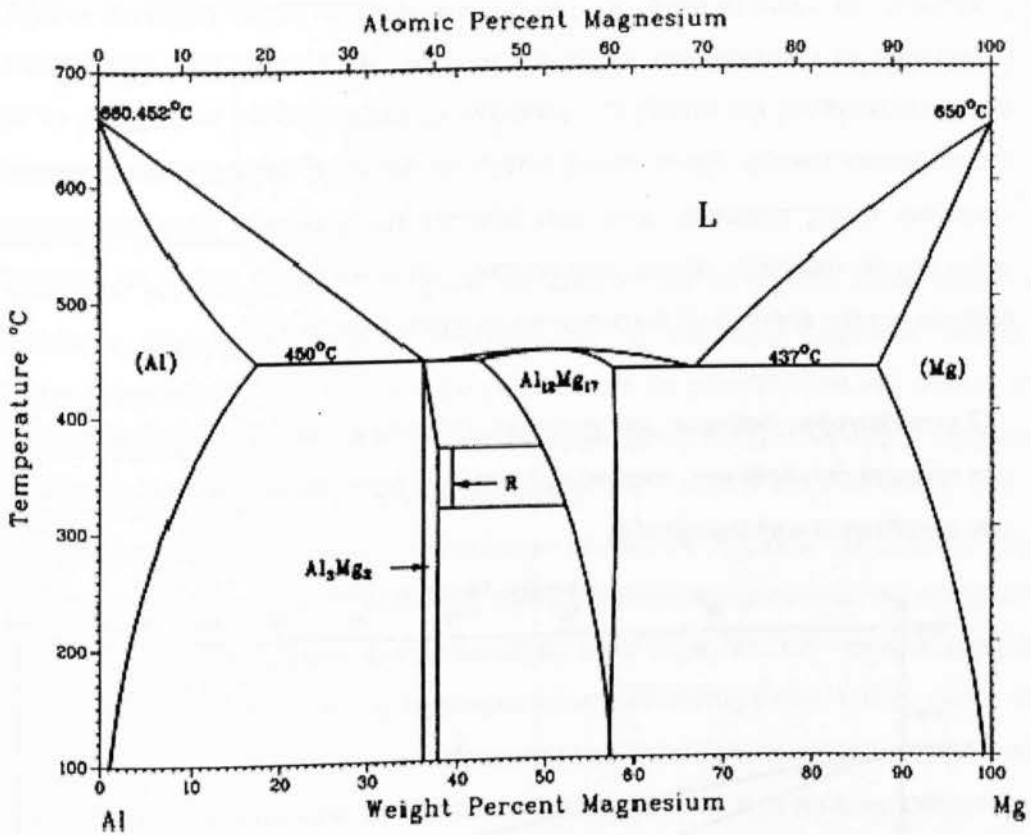


Σχήμα 3,5: Al-Si phase diagram[1]

Al-Si crystallographic data[1]

Phase	Composition, wt% Si	Pearson symbol	Space group
(Si)	99.985 to 100	<i>cF8</i>	<i>Fd 3m</i>

Το μαγνήσιο παρέχει σημαντική ενίσχυση και βελτίωση των χαρακτηριστικών της ψυχρηλασίας. Έχει σχετικά μεγάλη διαλυτότητα στο στερεό αλουμίνιο αλλά τα κράματα Al-Mg που περιέχουν Mg λιγότερο από 7% δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Το Mg προστίθεται επίσης σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία κυρίως χαλκό και ψευδάργυρο, για ακόμη καλύτερη ενίσχυση της αντοχής.[4]



Σχήμα 3,6: Al-Mg phase diagram[1]

Al-Mg crystallographic data[1]

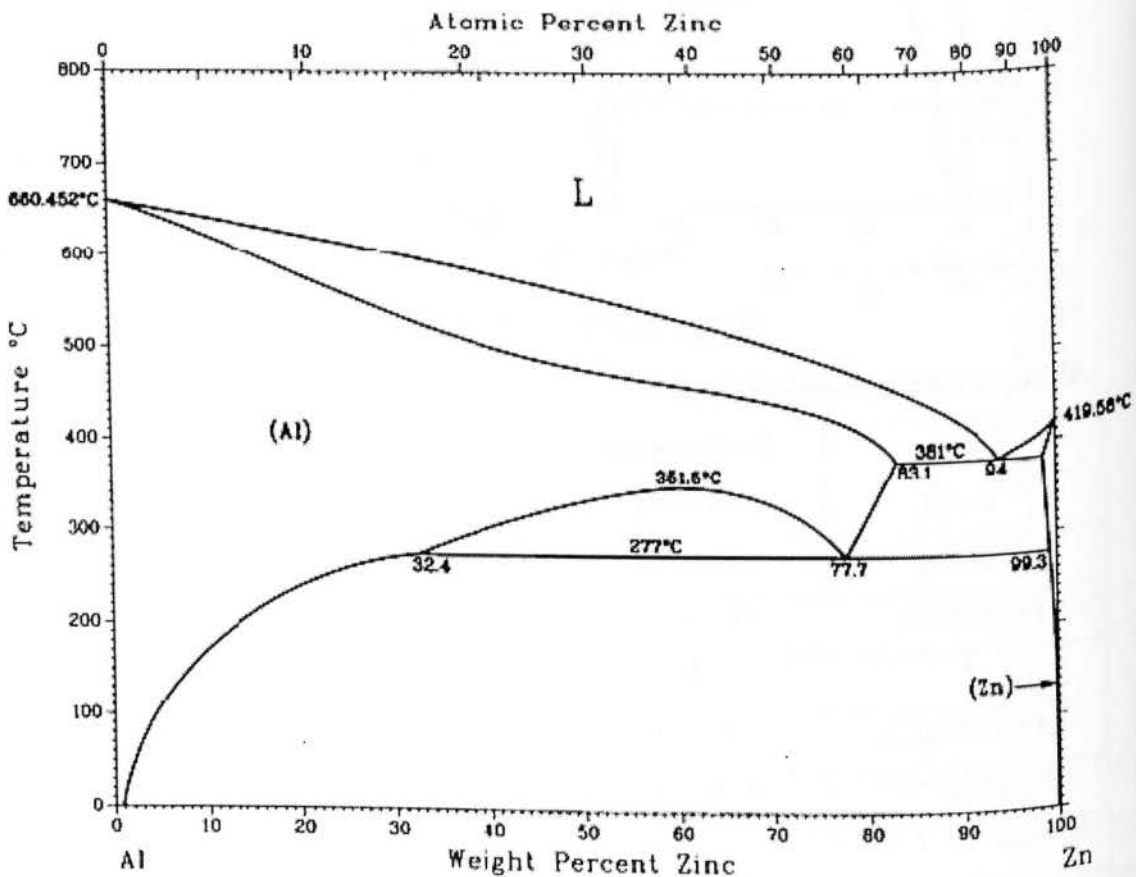
Phase	Composition, wt% Mg	Pearson symbol	Space group
(Al)	0 to 17.1	<i>cF4</i>	<i>Fm3m</i>
β(Al ₃ Mg ₂)	36.1 to 37.8	<i>cF1168</i>	<i>Fd 3m</i>
<i>R</i>	39	<i>hR53</i>	<i>R3</i>
γ(Al ₁₂ Mg ₁₇)	42 to 58.0	<i>cI58</i>	<i>I4 3m</i>
(Mg)	87.1 to 100	<i>hP2</i>	<i>P63/mmc</i>
Metastable phases			
Al ₂ Mg	31.0	<i>tI24</i>	<i>I41/amd</i>
γ'	38 to 56.2	(a)	-

Υπόμνημα: (a) Tetragonal

Γενικά για κράματα αλουμινίου το ποσοστό προσθήκης σε μαγνήσιο δεν ξεπερνά ποτέ το 4%. Σ' αυτά, το μεγαλύτερο μέρος του Mg βρίσκεται στο στερεό διάλυμα και το υπόλοιπο μετέχει στη μεσομεταλλική ένωση Mg₂Al₃ (φάση β), η οποία είναι σκληρή και

εύθραυστη. Τα κράματα αυτής της σειράς παρουσιάζουν μέτρια μηχανική αντοχή, που βελτιώνεται με ενδοτράχυνση, σε βάρος όμως, της ολκιμότητας τους. Όταν βρίσκονται στη μεταλλουργική κατάσταση O , μπορούν να διαμορφωθούν εν ψυχρό ή εν θερμό. Συγκολλώνται εύκολα, έχουν υψηλή αντοχή σε θαλάσσια διάβρωση και παρουσιάζουν επιφάνεια καλής ποιότητας μετά από λείανση και ανοδίωση. Στην περίπτωση που πρόκειται να υποστούν τέτοιες επιφανειακές κατεργασίες, θα πρέπει τα ποσοστά του σιδήρου και του πυριτίου να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα.[2]

Ο ψευδάργυρος εισάγεται στα χυτευτικά κράματα και σε συνδυασμό με το μαγνήσιο στα κράματα διαμόρφωσης, παράγει κράματα που έχουν τις μεγαλύτερες αντοχές μεταξύ των κραμάτων του αλουμινίου.[4]



Σχήμα 3,7: Al-Zn phase diagram[1]

Al-Zn crystallographic data[1]

Phase	Composition, wt% Zn	Pearson symbol	Space group
(Al)	0 to 83.1	<i>cF4</i>	<i>Fm3m</i>
(Zn)	98.8 to 100	<i>hP2</i>	<i>P63/mmc</i>

Metastable phases			
(α 'Al)R	78 to ~85	-	<i>R3m</i>
"R"	(a)	-	-
Y	-	-	-

Υπόμνημα: (a) Coherent precipitate

Πρόκειται για κράματα Al-Zn-Mg και για κράματα Al-Zn-Mg-Cu. Αυτά, μετά από κατάλληλες θερμικές κατεργασίες, παρουσιάζουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες απ'όλα τα κράματα του αλουμινίου. Το ποσοστό του Zn μεταβάλλεται από 4%έως 8% και αυτό του Mg από 1% έως 3%. Η επιτυγχανόμενη σκλήρυνση δομής οφείλεται κυρίως στην κατακρήμνιση της ένωσης MgZn₂. [2]

Τα κράματα αυτής της σειράς υποβάλλονται εύκολα σε θερμικές κατεργασίες, λόγω του μεγάλου θερμοκρασιακού εύρους της περιοχής ομογενοποίησης τους, της καλής τους εμβαιπτότητας, ενίοτε η βαφή πραγματοποιείται στον αέρα, και των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών γήρανσης, από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 160°C. Λόγω του συνόλου των ιδιοτήτων αυτών, τα χαρακτηριστικά των κραμάτων της σειράς αυτής (7000) δεν αλλοιώνονται κατά τη συγκόλληση τους. Ωστόσο, η συγκολλησιμότητα τους παραμένει μέτρια. Το κυριότερο μειονέκτημα των κραμάτων αυτής της σειράς είναι η μειωμένη αντοχή εν θερμώ, έτσι η θερμοκρασία χρήσης τους παραμένει χαμηλή, έως 120 °C. [2]

Βιβλιογραφία:

- [1] ASM, Metals Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagrams pg. 291-292, 304~308, 321-322, 335-336
- [2] Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης, Δημήτρης Ι. Παντελής, Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, εκδόσεις Παπασωτηρίου pg. 259~262, 565~571
- [3] ASM, Metals Handbook Desk Edition, pg. 179-1277
- [4] Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Διδακτέα Ύλη και Σημειώσεις μαθήματος «Επιστήμη και Τεχνολογία του Αλουμινίου», υπό Μ. Γεωργάτης
- [5] William D. Callister Jr., Materials Science and Engineering-An Introduction, 7th Edition, John Wiley & Sons Inc., 2007, pg. 252~259

4.Θερμικές κατεργασίες κραμάτων αλουμινίου

4.1.Εισαγωγή

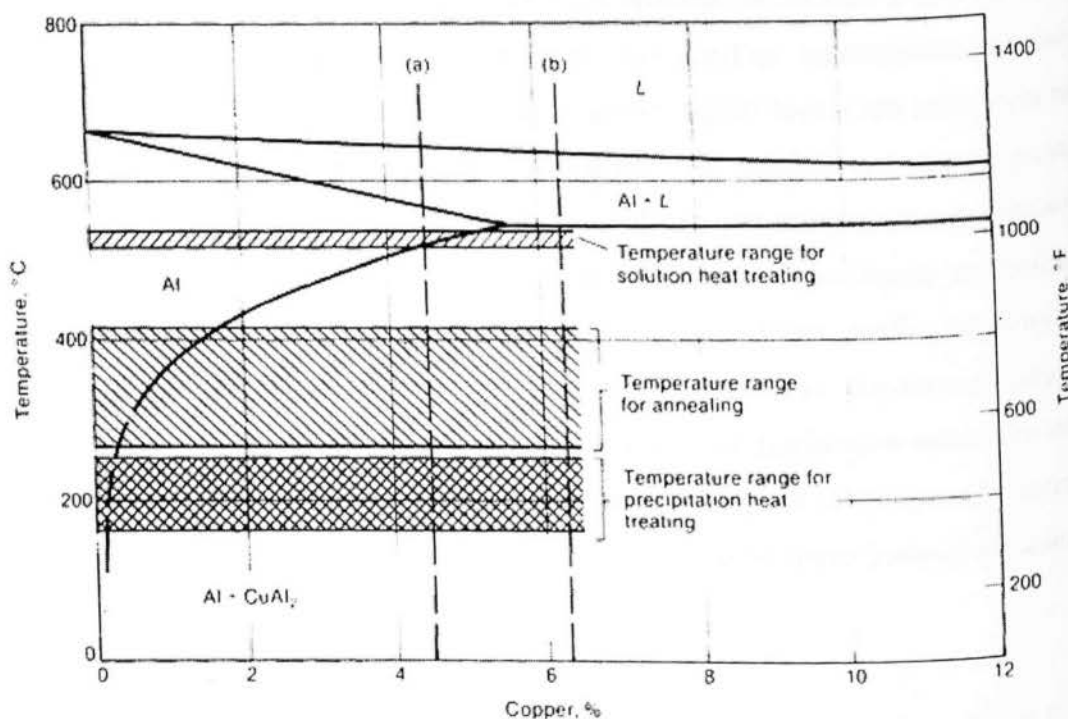
Η θερμική κατεργασία, κατά την γενική της έννοια, αναφέρεται σε κάθε διεργασία θέρμανσης και ψύξης που πραγματοποιείται με σκοπό την αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων, της μεταλλουργικής δομής ή της κατάστασης των παραμενουσών τάσεων ενός μεταλλικού προϊόντος. Όταν, ωστόσο, ο όρος αυτός αναφέρεται σε κράματα αλουμινίου η χρήση του συνήθως περιορίζεται σε συγκεκριμένες διεργασίες που πραγματοποιούνται για να αυξήσουν την αντοχή και την σκληρότητα των χυτών και διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου τα οποία επιδέχονται σκλήρυνση με κατακρήμνιση. Αυτά αναφέρονται συνήθως ως κράματα αλουμινίου που υπόκεινται σε σκλήρυνση δομής με θερμικές κατεργασίες (θερμικά κατεργάσιμα κράματα) ώστε να διαχωριστούν από εκείνα τα κράματα στα οποία δεν μπορεί να επιτευχθεί καμία ουσιαστική βελτίωση της αντοχής τους με καμία θερμική κατεργασία και βαφή. Τα τελευταία γενικά αναφέρονται ως μη θερμικά κατεργάσιμα κράματα και στηρίζονται στην ψυξηλασία για την αύξηση της αντοχής τους και γενικά την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Για τη μείωση της αντοχής και την αύξηση της ολκιμότητας χρησιμοποιείται η θερμική κατεργασία ανόπτησης για κράματα και των δύο τύπων των οποίων οι μεταλλουργικές αντιδράσεις μπορεί να ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο του κράματος και τον επιθυμητό βαθμό ολκιμότητας. Εκτός από την χαμηλής θερμοκρασίας κατεργασία σταθεροποίησης πολλές φορές δίνονται για την σειρά κραμάτων 5xxx (η οποία ανήκει στα κράματα διαμόρφωσης και αναλύεται παρακάτω), κατεργασίες πλήρους ή μερικής ανόπτησης και είναι οι μόνες θερμικές κατεργασίες που χρησιμοποιούνται για κράματα που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία.[2,11,12]

4.2.Κατακρήμνιση στερεού διαλύματος

Ένα ουσιώδες χαρακτηριστικό ενός σκληρυνόμενου με κατακρήμνιση κραματικού συστήματος είναι μια θερμοκρασιακά εξαρτώμενη ισορροπία στερεάς διαλυτοποίησης χαρακτηριζόμενη από αυξανόμενη διαλυτότητα με την αύξηση της θερμοκρασίας (διαγράμματα 1 και 2). Παρ' όλο που αυτή η κατάσταση συναντάται στα περισσότερα διμερή συστήματα κραμάτων αλουμινίου, πολλές φορές παρουσιάζουν πολύ μικρή σκλήρυνση λόγω κατακρήμνισης και αυτά τα κράματα συνήθως δεν θεωρούνται ως

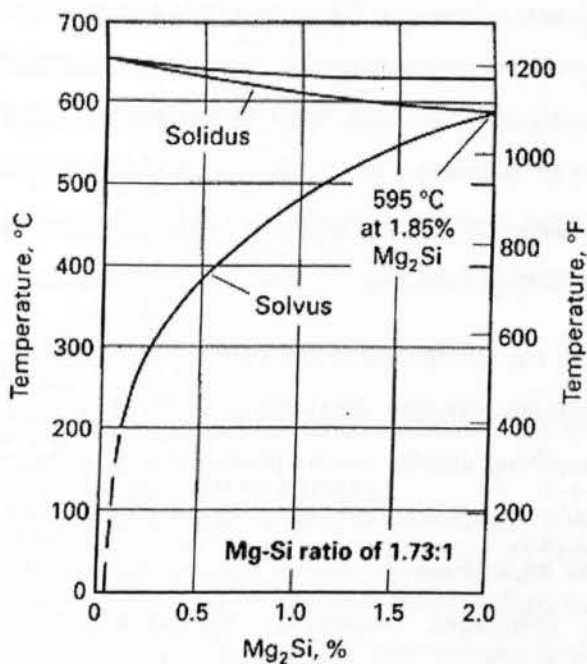
θερμικά κατεργάσιμα. Κράματα των διμερών συστημάτων, για παράδειγμα, αλουμινίου-πυριτίου (aluminum-silicon) και αλουμινίου-μαγνησίου (aluminum-magnesium) εμφανίζουν συχνά ασαφείς αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες τους ως αποτέλεσμα μιας θερμικής κατεργασίας που παρήγαγε μια αξιοσημείωτη κατακρήμνιση. Τα σημαντικότερα συστήματα κραμάτων αλουμινίου με κατακρήμνιση σκλήρυνσης είναι :[12]

- Αλουμινίου-χαλκού με βελτίωση αντοχής από CuAl_2
- Αλουμινίου-χαλκού-μαγνησίου (το μαγνήσιο εντείνει την κατακρήμνιση)
- Αλουμινίου-μαγνησίου-πυριτίου με βελτίωση αντοχής από Mg_2Si
- Αλουμινίου-ψευδαργύρου-μαγνησίου με βελτίωση αντοχής από MgZn_2
- Αλουμινίου-ψευδαργύρου-μαγνησίου-χαλκού

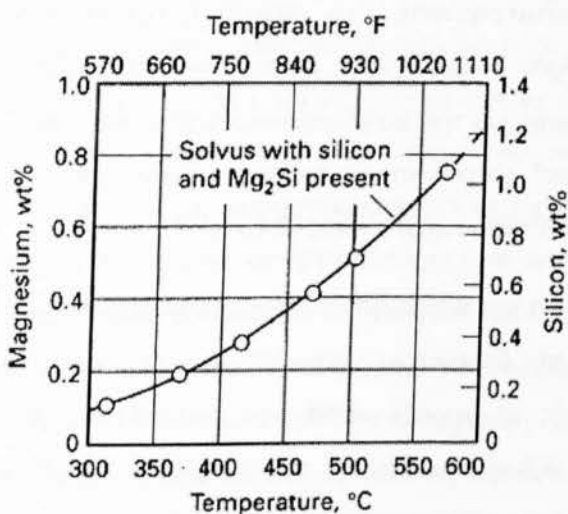


Διάγραμμα 4.1: Διάλυμα αλουμινίου-χαλκού διφασικού διαγράμματος. Εδώ οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις ανόπτησης (annealing), θερμικής κατεργασίας κατακρήμνισης (precipitation heat treating) και θερμικής κατεργασίας διαλυτοποίησης (solution heat treating) απεικονίζονται όπως φαίνεται στο διάγραμμα.[12]

Η κλίμακα θερμοκρασιών διαλυτοποίησης βρίσκεται κάτω από το ευθηκτικό σημείο τήξεως του διαλύματος στους 548 °C (1018 °F) στο 5.65 κ.β.% Cu.



(a)



(b)

Διάγραμμα 4.2: Διαλυτοποίηση ισορροπίας συναρτήσεως της θερμοκρασίας για (a) Mg_2Si σε αλουμίνιο με πυρίτιο που κυμαίνεται από 1,73% έως -1% και στο διάγραμμα (b) σε στερεό αλουμίνιο με μαγνήσιο και πυρίτιο όπου Mg_2Si και πυρίτιο είναι μαζί.[12]

Η γενική προϋπόθεση για βελτίωση της αντοχής με σκλήρυνση κατακρήμνισης των υπέρκορων στερεών διαλυμάτων περιλαμβάνει τον σχηματισμό διάσπαρτων κατακρήμνισμάτων κατά την διάρκεια της θερμικής κατεργασίας γήρανσεως (η οποία μπορεί να είναι είτε φυσική, είτε τεχνητή). Η γήρανση πρέπει να ολοκληρώνεται όχι μόνο κάτω από τη γραμμή solvus θερμοκρασιακής ισορροπίας, αλλά και κάτω από τη

μετασταθή περιοχή-ζώνη Guinier-Preston (GP) της γραμμής solvus. Ο υπερκορεσμός των κενών επιτρέπει την διάχυση και το σχηματισμό μιας ζώνης, προκαλώντας την πολύ γρηγορότερη από το αναμενόμενο ισορροπία διάχυσης σωματιδίων. Κατά την διεργασία της κατακρήμνισης, πρώτο το υπέρκορο στερεό διάλυμα μπορεί να αναπτύσσει συστάδες διαλυμένης ουσίας υπό μορφή δισκίων, τα οποία μετά εμπλέκονται στη δημιουργία (σε μη ισορροπία) κατακρημνίσεων.[2,4,11,12]

Ο μηχανισμός βελτίωσης της αντοχής με κατακρήμνιση περιλαμβάνει το σχηματισμό συνεκτικών συστάδων ατόμων στερεού διαλύματος. Αυτό προκαλεί μεγάλες τάσεις εξαιτίας της διαφοράς μεγέθους μεταξύ του στερεού διαλύματος και των ατόμων της διαλυμένης ουσίας. Συνεπώς, η παρουσία κατακρημνισμάτων και ακόμη πιο σημαντικά η παρουσία των πεδίων των παραμενουσών τάσεων στο μητρικό κρυσταλλικό πλέγμα τα οποία περιβάλλουν τα διάσπαρτα σωματίδια, εξασφαλίζει μεγαλύτερη αντοχή παρεμποδίζοντας ή επιβραδύνοντας τη κίνηση των διαταραχών. Το χαρακτηριστικό που καθορίζει εάν η φάση κατακρήμνισης έχει συνοχή ή όχι είναι η απόσταση των συγκεντρώσεων ή ο βαθμός συρρίκνωσης μεταξύ των ατομικών αποστάσεων της μητρικής κρυσταλλικής δομής και των κατακρημνισμάτων μετάπτωσης. Οι αλλαγές στις ιδιότητες αποτελούνται από μικρές συγκεντρώσεις ατόμων υπό μορφή δίσκου και ονομάζονται ζώνες Guinier-Preston ή GP ζώνες.[2,4,11,12]

Το ακριβές μέγεθος, σχήμα και η διανομή των GP ζωνών εξαρτάται από το κράμα στο οποίο σχηματίζονται και στη θερμική και μηχανική ιστορία των δειγμάτων. Το σχήμα τους μπορεί πολλές φορές να προσδιοριστεί από συνοδευτικές μελέτες με διάχυση διασποράς ακτινών x-ray. Κάτω από ιδανικές συνθήκες οι ζώνες GP μπορούν να γίνουν ορατές με μετάδοση μικρο-ηλεκτρογραφημάτων. Σφαιρικές περιοχές με μεγάλη περιεκτικότητα διαλύματος συνήθως δημιουργούνται όταν τα μεγέθη του διαλύματος και των διάχυτων ατόμων είναι σχεδόν ίδια, όπως στα συστήματα αλουμινίου-ασημιού και αλουμινίου-ψευδαργύρου. Αν υπάρχει μια διαφοροποίηση στα μεγέθη των ατόμων, όπως στο σύστημα αλουμινίου-χαλκού, οι GP ζώνες συνήθως εμφανίζονται σαν δισκοειδή πλακίδια των οποίων οι επιφάνειες κείτονται παράλληλα με μερικά επίπεδα ολίσθησης του μητρικού κρυσταλλικού πλέγματος με χαμηλό δείκτη. Μερικές φορές τα διαλυμένα άτομα καταλαμβάνουν συγκεκριμένες θέσεις της κρυσταλλικής δομής μέσω της ζώνης GP σχηματίζοντας μια μικρή περιοχή κρυσταλλικής διάταξης.[2,4,11,12]

Το μέγεθος των ζωνών GP είναι της τάξεως των 10 angstrom ή 10×10^{-10} μέτρα σε διάμετρο και προκαλούν τάσεις στο μητρικό πλέγμα εμποδίζοντας τη διάδοση των

διαταραχών μεταβάλλοντας έτσι τις μηχανικές ιδιότητες. Οι ζώνες GP είναι χαρακτηριστικά μετασταθείς και έτσι διαλύονται με την παρουσία ενός πιο σταθερού κατακρημνισμού. Αυτή η διάλυση προκαλεί μια ελεύθερη κατακρημνισμάτων, ορατή απογυμνωμένη περιοχή να σχηματιστεί γύρω από τα σταθερά κατακρημνισμένα σωματίδια. Η τελική δομή περιλαμβάνει ισορροπία κατακρημνισμάτων, τα οποία δεν συμβάλλουν ξεκάθαρα στην αύξηση της σκληρότητας.[2,4,11,12]

4.2.α. Τα εμπορικά κράματα αλουμινίου που υπόκεινται σε θερμικές κατεργασίες (θερμικά κατεργάσιμα)

Τα εμπορικά κράματα αλουμινίου που υπόκεινται σε θερμικές κατεργασίες είναι, με μερικές εξαιρέσεις, βασισμένα σε τριαδικά και τετραδικά συστήματα προερχόμενα από τους διαλύτες που αναμειγνύονται για την ανάπτυξη αντοχής με κατακρήμιση. Εμπορικά κράματα των οποίων η αντοχή και η σκληρότητα μπορούν να αυξηθούν σημαντικά με θερμική κατεργασία συμπεριλαμβάνονται στις σειρές διαμορφωμένων κραμάτων 2xxx, 6xxx και 7xxx (εκτός από το κράμα 7072) και στις σειρές χυτών κραμάτων 2xx.0, 3xx.0, 7xx.0. Μερικά από αυτά περιέχουν μόνο χαλκό, ή χαλκό και πυρίτιο, ως τα κύρια πρόσθετα κραματοποιητικά στοιχεία για την βελτίωση της αντοχής. Τα περισσότερα από τα θερμικά κατεργάσιμα κράματα ωστόσο, περιέχουν συνδυασμούς μαγνησίου με ένα ή περισσότερα από τα στοιχεία χαλκού, πυριτίου και ψευδαργύρου. Χαρακτηριστικά, ακόμη μικρότερες ποσότητες μαγνησίου σε συνδυασμό με αυτά τα στοιχεία επιταχύνουν και επιτείνουν την σκλήρυνση κατακρήμισης (precipitation hardening), ενώ άλλα κράματα της σειράς 6xxx περιέχουν πυρίτιο και μαγνήσιο περίπου στις αναλογίες που απαιτούνται για την δημιουργία πυριτιούχου μαγνησίου (Mg_2Si). Παρ' όλο που δεν είναι τόσο ισχυρά όσο τα κράματα των σειρών 2xxx και 7xxx, η σειρά 6xxx έχει καλή διαμορφωσιμότητα, συγκολλησιμότητα, κατεργαστικότητα και αντίσταση στη διάβρωση με μέτρια όμως αντοχή.

Στα θερμικά κατεργάσιμα διαμορφωμένα κράματα, με κάποιες εξαιρέσεις (2024, 2219, 7178), τέτοια στοιχεία προσθήκης του διαλύματος τα οποία είναι εντός των ορίων του κοινού στερεού διαλύματος είναι εμφανή σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της ευκτικτικής θερμοκρασίας. Σε αντίθεση κάποια από τα χυτά κράματα της σειράς 2xx.0 και όλα τα κράματα της σειράς 3xx.0 περιέχουν ποσά διαλυμένων στοιχείων τα οποία απέχουν πολύ από τα όρια διαλυτότητας στερεάς κατάστασης. Σε αυτά τα κράματα η φάση που μετασχηματίζεται από το συνδυασμό των υπερβολικά διαλυτών στοιχείων με το

αλουμίνιο δεν διαλύεται ποτέ, παρ' όλο που το σχήμα των αδιάλυτων σωματιδίων μπορεί να αλλάζει από τη μερική διαλυτοποίηση.

Τα περισσότερα από τα θερμοσκληρυνόμενα συστήματα κραμάτων αλουμινίου παρουσιάζουν πολυσταδιακή κατακρήμνιση και συνοδευτικά υφίστανται αλλαγές στην αντοχή ανάλογες με αυτές των συστημάτων αλουμινίου-χαλκού. Πολλαπλά κραματοποιητικά πρόσθετα των δύο κύριων στοιχείων και συμπληρωματικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στα εμπορικά κράματα είναι αυστηρά λειτουργικά και μέσω διαφορετικών θερμικών κατεργασιών εξυπηρετούν την δημιουργία πολλών διαφορετικών συνδυασμών φυσικών, μηχανικών και ηλεκτροχημικών ιδιοτήτων που είναι απαραίτητες για διαφορετικές εφαρμογές. Κάποια κράματα, ιδίως εκείνα που παράγονται με τη διαδικασία της χύτευσης περιέχουν πολύ μεγαλύτερα ποσά πυριτίου από αυτά που μπορούν να διαλυθούν ή είναι απαραίτητα για τη βελτίωση της αντοχής. Η κύρια λειτουργία εδώ είναι η βελτίωση της ευχυτότητας και η αποτροπή δημιουργίας ρωγμών, αλλά το πλεονάζον πυρίτιο επίσης εξυπηρετεί στην αύξηση της αντίστασης σε τριβή, όπως κάνουν άλλα μικροδομημένα συστατικά σχηματισμένα από μαγγάνιο, νικέλιο και σίδηρο. Εξαρτήματα που κατασκευάζονται από τέτοια κράματα είναι ευρέως χρησιμοποιήσιμα σε μηχανές εσωτερικής καύσεως βενζίνης και πετρελαίου (πιστόνια, κυλινδροκεφαλές κ.ο.κ.).[2,4,11,12]

4.3.Θερμικές κατεργασίες κραμάτων αλουμινίου

4.3.α.Βελτίωση αντοχής με θερμική κατεργασία

Η θερμική κατεργασία για αύξηση της αντοχής των κραμάτων αλουμινίου αποτελεί μια διαδικασία τριών βημάτων:

- Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης: διάλυση διαλυτών φάσεων
- Βαφή: ανάπτυξη υπερκορεσμού
- Σκλήρυνση λόγω γήρανσης: κατακρήμιση μικρών και ομοιόμορφα διασκορπισμένων σωματιδίων μιας άλλης φάσης εντός του αρχικού μητρικού κρυσταλλικού πλέγματος είτε σε θερμοκρασία δωματίου (φυσική γήρανση) είτε σε ανώτερη θερμοκρασία (τεχνητή γήρανση ή κατακρήμιση θερμικής κατεργασίας)

Κάθε ένα από αυτά τα βήματα και η χρήση ανάλυσης του παράγοντα απόψυξης (βαφής) περιγράφονται στους τρεις τομείς που ακολουθούν. Οι τυπικές κατηγορίες διαλυτοποίησης και θερμικές κατεργασίες κατακρήμισης δίνονται στους πίνακες 4,1(α)/4,1(γ) και 4,2. Οι ονομασίες των επαναφορών ορίζονται στο τέλος αυτού του κεφαλαίου.[2,12]

Πίνακας 4,1(α): Τυπική διάλυση και κατακρήμιση θερμικών κατεργασιών για εμπορικά θερμοσκληρυνόμενα κράματα αλουμινίου για προϊόντα τόννευσης με κραματοποίηση χαλκού[12]

Alloy	Product form	Solution heat treatment(a)			Precipitation heat treatment			
		Metal temperature(b)		Temper designation	Metal temperature(b)		Time(c), h	Temper designation
		°C	°F	°C	°F			
Al-Cu alloys without magnesium alloying								
2011	Rolled or cold finished rod and bar	525	975	T3(d)	160	320	14	T8(d)
				T4	...	...	...	...
				T451(e)	...	...	...	...
2025	Die forgings	515	960	T4	170	340	10	T6
2219(f)	Flat sheet	535	995	T31(d)	175	350	18	T81(d)
				T37(d)	165	325	24	T87(d)
				T42	190	375	36	T62
	Plate	535	995	T31(d)	175	350	18	T81(d)

				T37(d)	175	350	18	T87(d)
				T351(e)	175	350	18	T851(e)
				T42	190	375	36	T62
	Rolled or cold finished wire, rod, and bar	535	995	T351(e)	190	375	18	T851(e)
2219(f)	Extruded rod, bar, shapes, and tube	535	995	T31(d)	190	375	18	T81(d)
				T3510(e)	190	375	18	T8510(e)
				T3511(e)	190	375	18	T8511(e)
				T42	190	375	36	T62
	Die forgings and rolled rings	535	995	T4	190	375	26	T6
	Hand forgings	535	995	T4	190	375	26	T6
T352(f)				175	350	18	T852(f)	
Al-Cu-Mg alloys								
2018	Die forgings	510(g)	950(g)	T4	170	340	10	T61
2024(h)	Flat sheet	495	920	T3(d)	190	375	12	T81(d)
				T361(d)	190	375	8	T861(d)
				T42	190	375	9	T62
					190	375	16	T72
2024(h)	Coiled sheet	495	920	T4	...	...	...	...
				T42	190	375	9	T62
					190	375	16	T72
	Plate	495	920	T351(e)	190	375	12	T851(e)
				T361(d)	190	375	8	T861(d)
				T42	190	375	9	T62
	Rolled or cold finished wire, rod, and bar	495	920	T4	190	375	12	T6
				T351(e)	190	375	12	T851(e)
				T36(d)	190	375	8	T86(d)
				T42	190	375	16	T62
				T3	190	375	12	T81
	Extruded rod, bar, shapes, and tube	495	920	T3510(e)	190	375	12	T8510(e)
				T3511(e)	190	375	12	T8511(e)
				T42	190	375	16	T62
				T3(d)	...	...	...	...
	Drawn tube	495	920	T42	...	...	...	...
T4				...	...	...	...
2036	Sheet	500	930	T4	...	...	...	...

2038	Sheet	540	1000	T4	205	400	2	T6
2218	Die	510(g)	950(g)	T4	170	340	10	T61
	forgings	510(i)	950(i)	T41	240	460	6	T72
Al-Cu-Mg-Si alloys								
2008	Sheet	510	950	T4(d)(j)	205	400	1	T62(e)
2014(h)	Flat sheet	500	935	T3(d)	160	320	18	T62
				T42	160	320	18	T6
	Coiled sheet	500	935	T4	160	320	18	T6
				T42	160	320	18	T62
2014(h)	Plate	500	935	T42	160	320	18	T62
				T451(e)	160	320	18	T651(e)
	Rolled or cold finished wire, rod, and bar	500	935	T4	160(k)	320(k)	18	T6
				T42	160(k)	320(k)	18	T62
				T451(e)	160(k)	320(k)	18	T651(e)
	Extruded rod, bar, shapes, and tube	500	935	T4	160(k)	320(k)	18	T6
				T42	160(k)	320(k)	18	T62
				T4510(e)	160(k)	320(k)	18	T6510(e)
	Drawn tube	500	935	T4	160(k)	320(k)	18	T6
				T42	160(k)	320(k)	18	T62
Die forgings	500(l)	935(l)	T4	170	340	10	T6	
2017	Rolled or cold finished wire, rod, and bar	500	935	T4	...	...	...	...
				T42	...	...	...	...
2117	Rolled or cold finished wire and rod	500	935	T4	...	...	...	...
				T42	...	...	...	...
2618	Forgings and rolled rings	530	985	T4	200	390	20	T61
4032	Die forgings	510(h)	950(h)	T4	170	340	10	T6
Al-Cu-Li alloys								
2090	Sheet	540	1000	T3(d)	165	325	24	T83(d)
2091	Sheet	530	990	T3(d)	120	250	24	T84(d)
	Extruded	530	990	T3(d)	190	375	12	Peak

	bar							aged(d)
8090	Extruded bar	530	990	T3(d)	190	375	12	Peak aged(d)
CP276	Extruded bar	540	1000	T3(d)	190	375	Δεκ-15	Peak aged(d)

Υπόμνημα:

- (a) το υλικό θα πρέπει να ψύχεται από τη θερμοκρασία της κατεργασίας διάλυσης όσο πιο γρήγορα γίνεται και με την ελάχιστη καθυστέρηση μετά την απομάκρυνση του από τον φούρνο. Όταν το υλικό ψύχεται με ολική βύθιση στο νερό, εκτός και αν υποδεικνύεται κάτι διαφορετικό, το νερό θα πρέπει να είναι σε θερμοκρασία δωματίου και να ψύχεται με τέτοιο τρόπο ώστε να παραμένει κάτω από τους 38°C κατά την διάρκεια του κύκλου απόψυξης. Η χρήση ψεκασμού κρύου νερού με μεγάλη ταχύτητα και με μεγάλο όγκο είναι επίσης αποτελεσματική με κάποια υλικά,
- (b) οι ονομαστικές θερμοκρασίες που αναγράφονται θα πρέπει να επιτυγχάνονται όσο πιο γρήγορα γίνεται και να διατηρούνται μεταξύ $\pm 6^\circ\text{C}$ των ονομαστικών θερμοκρασιών ,
- (c) κατά προσέγγιση χρόνος στη θερμοκρασία. Ο ακριβής χρόνος θα πρέπει να εξαρτάται από τον απαιτούμενο χρόνο για το φορτίο να φτάσει την απαιτούμενη θερμοκρασία. Οι χρόνοι που φαίνονται βασίζονται σε ταχύτερη θέρμανση, με soaking time μετρούμενο από την χρονική στιγμή που το φορτίο φτάνει θερμοκρασία μεταξύ 6 °C από την εφαρμοζόμενη θερμοκρασία.
- (d) ψυξηλασία υποκειμένη σε θερμική κατεργασία διάλυσης και η οποία προηγείται σε κάθε θερμική κατεργασία κατακρήμνισης είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται με συγκεκριμένες προδιαγραφές για αυτήν την επαναφορά,
- (e) απόταση μέσω έλασης για τη δημιουργία συγκεκριμένου ποσού παραμενουσών τάσεων μετά από τη θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και πριν από κάθε θερμική κατεργασία κατακρήμνισης,
- (f) απόταση με 1-5% ψυχρή μείωση μετά από κατεργασία διάλυσης που προηγείται της θερμικής κατεργασίας κατακρήμνισης,
- (g) απόψυξη σε νερό στους 100 °C,
- (h) αυτές οι θερμικές κατεργασίες επίσης εφαρμόζονται σε φύλλα alclad και λαμαρίνες τέτοιων κραμάτων,
- (i) απόψυξη στο αέρα σε θερμοκρασία δωματίου με χρήση διάταξης που να κατευθύνει τις απαιτούμενες ποσότητες αέρα,
- (j) βλέπε U.S. Patent 4,840,852,

(κ) μια εναλλακτική θερμική κατεργασία για 8 ώρες στους 177 °C μπορεί να χρησιμοποιηθεί,

(l) απόψυξη σε νερό στους 60-80 °C

Πίνακας 4,1(β): Τυπική διάλυση και κατακρήνιση θερμικών κατεργασιών για τα θερμοσκληρνώμενα (heat treatable) κράματα αλουμινίου Zn-Mg (σειρά 7XXX)[12]

Alloy	Product form	Solution heat treatment(a)			Precipitation heat treatment			
		Metal temperature		Temper designation	Metal temperature		Time h	Temper designation
		°C	°F		°C	°F		
7001	Extruded rod, bar, shapes, and tube	465	870	W	120	250	24	T6
					120	250	24	T62
				W510(d)	120	250	24	T6510(d)
				W511(d)	120	250	24	T6511(d)
7005	Extruded rod, bar, and shapes	...	...	...	...	...	...	T53(e)
7050	Plate	475		W51(d)	(f)	(f)	(f)	T7651(g)
					(h)	(h)	(h)	T7451(g)
	Extrusions	475		W510(d)	(f)	(f)	(f)	T76510(g)
					(h)	(h)	(h)	T76511(g)
	Die and hand forgings	475		W	(f)	(f)	(f)	T74(g)
					(h)	(h)	(h)	T7452(g)
7075(i)	Sheet	480	900	W	120(j)	250(j)	24	T6
					120(j)	250(j)	24	T62
					(f)	(f)	(f)	T76(g)
					(h)(k)	(h)(k)	(h)(k)	T73(g)
7075(i)	Plate	480	900	W	120(j)	250(j)	24	T62
					(h)(k)	(h)(k)	(h)(k)	T7351 (d)(g)
				W51(d)	120(j)	250(j)	24	T651(d)
					(f)	(f)	(f)	T7651(g)
					120	250	24	T6
					120	250	24	T62
7075(i)	Rolled or cold finished wire, rod, and bar	490	915	W	(h)(k)	(h)(k)	(h)(k)	T73(g)
					120	250	24	T651(d)
					(h)(k)	(h)(k)	(h)(k)	T7351(d)(g)
				W51(d)	120	250	24	T651(d)
					(h)(k)	(h)(k)	(h)(k)	T7351(d)(g)
					120(l)	250(l)	24	T6
7075(i)	Extruded rod, bar, shapes, and tube	465	870	W	120(l)	250(l)	24	T62
					(h)(k)	(h)(k)	(h)(k)	T73(g)
					(f)	(f)	(f)	T76(g)
					(f)	(f)	(f)	T76(g)

				W510(d)	120(l)	250(l)	24	T6510(d)
					(h)(k)	(h)(k)	(h)(k)	T73510(d)(g)
					(f)	(f)	(f)	T76510(g)
				W511(d)	120(l)	250(l)	24	T6511(d)
					(h)(k)	(h)(k)	(h)(k)	T73511(d)(g)
					(f)	(f)	(f)	T76511(g)
	Drawn tube	465	870	W	120	250	24	T6
					120	250	24	T62
	Die forgings	470(m)	880(h)	W	(h)(k)	(h)(k)	(h)(k)	T73(g)
					120	250	24	T6
					(h)	(h)	(h)	T73(g)
	Hand forgings	470(m)	880(h)	W	(h)	(h)	(h)	T7352(n)(g)
					120	250	24	T6
					(h)	(h)	(h)	T73(g)
	Rolled rings	470	880	W	120	250	24	T6
					(h)	(h)	(h)	T652(n)
					(h)	(h)	(h)	T7352(n)(g)
7175	Die forgings	(o)	(o)	W	(o)	(o)	(o)	T66(o)
		(o)	(o)	W	(o)	(o)	(o)	T74(g)(o)
		(o)	(o)	W52(n)	(o)	(o)	(o)	T7452(n)(g)(o)
	Hand forgings	(o)	(o)	W	(o)	(o)	(o)	T74(g)(o)
		(o)	(o)	W52(n)	(o)	(o)	(o)	T7452(n)(g)(o)
7475	Sheet	515(p)	960(p)	W	120	250	3	
					plus 155	315	3	T61(p)
					(f)	(f)	(f)	T761(g)(p)
	Plate	510(p)	950(p)	W51(d)	120	250	24	T651(p)
					(f)	(f)	(f)	T7651(g)(p)
(h)					(h)	(h)	T7351(g)(p)	
Alclad 7475	Sheet	495	920	W	120	250	3	
7475					plus 155	315	3	T61(p)
					(f)	(f)	(f)	T761(g)(p)

Υπόμνημα:

(a) το υλικό θα πρέπει να ψύχεται από τη θερμοκρασία της κατεργασίας διάλυσης όσο πιο γρήγορα γίνεται και με την ελάχιστη καθυστέρηση μετά την απομάκρυνση του από τον φούρνο. Όταν το υλικό ψύχεται με ολική βύθιση στο νερό, εκτός και αν υποδεικνύεται κάτι διαφορετικό, το νερό θα πρέπει να είναι σε θερμοκρασία δωματίου και να ψύχεται με τέτοιο τρόπο ώστε να παραμένει κάτω από τους 38°C κατά την

- διάρκεια του κύκλου απόψυξης. Η χρήση ψεκασμού κρύου νερού με μεγάλη ταχύτητα και με μεγάλο όγκο είναι επίσης αποτελεσματική με κάποια υλικά,
- (b) οι ονομαστικές θερμοκρασίες που αναγράφονται θα πρέπει να επιτυγχάνονται όσο πιο γρήγορα γίνεται και να διατηρούνται μεταξύ $\pm 6^{\circ}\text{C}$ των ονομαστικών θερμοκρασιών ,
- (c) κατά προσέγγιση χρόνος στη θερμοκρασία. Ο ακριβής χρόνος θα πρέπει να εξαρτάται από τον απαιτούμενο χρόνο για το φορτίο να φτάσει την απαιτούμενη θερμοκρασία. Οι χρόνοι που φαίνονται βασίζονται σε ταχύτερη θέρμανση, με soaking time μετρούμενο από την χρονική στιγμή που το φορτίο φτάνει θερμοκρασία μεταξύ 6°C από την εφαρμοζόμενη θερμοκρασία.
- (d) απόταση μέσω έλασης για τη δημιουργία συγκεκριμένου ποσού παραμενουσών τάσεων πριν από τη θερμική κατεργασία κατακρήμνισης,
- (e) όχι θερμική κατεργασία διάλυσης, 72 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου δημιουργώντας εξαναγκασμένη ψύξη ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία κατακρήμνισης δύο σταδίων συμπεριλαμβάνοντας 8 ώρες στους 107°C επιπλέον 16 ώρες στους 149°C ,
- (f) η διαδικασία γήρανσης ποικίλει ανάλογα με το προϊόν, το μέγεθος, τη φύση του εξοπλισμού, τις επενεργούμενες διαδικασίες και τις δυνατότητες ελέγχου του φούρνου. Η καλύτερη πρακτική για ένα ειδικό τεμάχιο μπορεί να εξακριβωθεί μόνο με μια πραγματική δοκιμαστική θερμική κατεργασία του τεμαχίου και κάτω υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Τυπικές τέτοιες διαδικασίες συμπεριλαμβάνουν κατεργασία δύο σταδίων περιλαμβάνοντας από 3 έως 30 ώρες στους 121°C ακολουθούμενη από 15 έως 18 ώρες στους 163°C για διελάσεις. Μία εναλλακτική κατεργασία δύο σταδίων που επίσης μπορεί να εφαρμοστεί περιλαμβάνει παραμονή 8 ωρών στους 99°C ακολουθούμενη από 24 έως 28 ώρες στους 163°C .
- (g) η γήρανση των κραμάτων αλουμινίου 7050, 7075, 7175 και 7475 με οποιαδήποτε επαναφορά από τις T73 ή T76 προϋποθέτει αυστηρότερο από ότι συνήθως έλεγχο στις μεταβλητές της διαδικασίας της γήρανσης όπως είναι ο χρόνος, η θερμοκρασία, ο ρυθμός θέρμανσης κ.ο.κ. για κάθε τεμάχιο. Επιπροσθέτως, όταν το υλικό σε μια T6 επαναφορά ξαναδέχεται γήρανση σε μια T73 ή T76 επαναφορά, η συγκεκριμένη κατάσταση του υλικού T6 (όπως τα επίπεδα των ιδιοτήτων του και οι επιδράσεις των μεταβλητών τέτοιας διαδικασίας), είναι εξαιρετικής σημασίας και επηρεάζουν την δυνατότητα ενός επαναγερασμένου υλικού στις συγκεκριμένες απαιτήσεις που ορίζονται για την εφαρμογή των T73 ή T76 επαναφορών.
- (h) δύο σταδίων κατεργασία περιλαμβάνει 6 έως 8 ώρες στους 107°C ακολουθούμενη από : 24 έως 30 ώρες στους 163°C για φύλλα και λαμαρίνες, 8 έως 10 ώρες στους 177°C

για ρόλους και μπιγιέτες ή κυλίνδρους από ψυχρηλασία, 6 έως 8 ώρες στους 177 °C για προφίλ διέλασης και σωλήνες, 8 έως 10 ώρες στους 177 °C για σφυρήλατα με T73 επαναφορά και 6 έως 8 ώρες στους 177 °C για σφυρήλατα με T7352 επαναφορά.

(i) αυτές οι θερμικές κατεργασίες σε φύλλα alclad και λαμαρίνες τέτοιων κραμάτων.

(j) μια εναλλακτική κατεργασία δύο σταδίων που περιλαμβάνει παραμονή για 4 ώρες στους 96 °C ακολουθούμενη από παραμονή 8 ωρών στους 157 °C μπορεί ίσως να χρησιμοποιηθεί.

(k) για φύλλα, λαμαρίνες, σωλήνες και διελάσεις, μια εναλλακτική κατεργασία δύο σταδίων που να περιλαμβάνει 6 έως 8 ώρες παραμονή στους 107 °C ακολουθούμενη από 14 έως 18 ώρες παραμονή στους 168 °C μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί, εξασφαλίζοντας ότι ο ρυθμός θέρμανσης που εφαρμόζεται θα είναι περίπου 14 °C/ώρα. Για ρόλους ή ψυχρήλατες μπιγιέτες και κυλίνδρους, η εναλλακτική κατεργασία είναι 10 ώρες στους 177 °C.

(l) μια εναλλακτική κατεργασία τριών σταδίων που περιλαμβάνει παραμονή για 5 ώρες στους 99 °C, για 4 ώρες στους 121 °C, και μετά για 4 ώρες στους 149 °C μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί.

(m) απόψυξη σε νερό στους 60 °C με 80 °C.

(n) απόταση από 1 έως 5 % ψυχρής μείωσης μετά την κατεργασία διάλυσης και πριν τη θερμική κατεργασία κατακρήμνισης.

(o) 7175-T74 και -T7452 θερμικές κατεργασίες είναι κατευθυνόμενες σε συγκεκριμένα αποτελέσματα και μπορεί να ποικίλουν από προμηθευτή σε προμηθευτή.

(p) πρέπει να πραγματοποιείται με διαβροχή στους 466 με 477 °C. Βλέπε U.S.Patent 3,791,880.

Πίνακας 4,2: Soaking times και μέγιστες ταχύτητες απόψυξης για κατεργασίες διάλυσης διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου[12]

Thickness(a), mm (in.)	Soak time, minutes				Maximum quench delay, s
	Air furnace(b)		Salt bath(c)		
	min	max(d)	min	max(d)	
≤ 0.41 (0.016)	20	25	10	15	5
0.51 (0.020)	20	30	10	20	7

0.64 (0.025)	25	35	15	25	7
0.81 (0.032)	25	35	15	25	7
1.02 (0.040)	30	40	20	30	10
1.27 (0.050)	30	40	20	30	10
1.35 (0.053)	30	40	20	30	10
1.80 (0.071)	35	45	25	35	10
2.03 (0.080)	35	45	25	35	10
2.29 (0.090)	35	45	25	35	10
2.54 (0.100)	40	55	30	45	15
3.18 (0.125)	40	55	30	45	15
4.06 (0.160)	50	60	35	45	15
4.57 (0.180)	50	60	35	45	15
6.35 (0.250)	55	65	35	45	15
>6.35 (0.250)- 12.7 (0.500)	65	75	45	55	15
For each additional 12.7 (1/2) or fraction	30	30	20	20	(e)
Rivets (all)	60	...	30	...	5

Υπόμνημα:

- (a) ελάχιστες διαστάσεις του λεπτότερου τμήματος
- (b) ο soaking time ξεκινάει όταν όλα τα όργανα πυρομέτρησης φτάνουν σε κανονική θερμοκρασία λειτουργίας
- (c) ο soaking time ξεκινάει την στιγμή της εμβάπτισης εκτός από όταν ένα βαρύ φορτίο προκαλεί την πτώση της θερμοκρασίας του λουτρού σε επίπεδα κατώτερα από τα καθορισμένα, σε κάθε περίπτωση ο soaking time ξεκινάει όταν το λουτρό ανακτήσει την ελάχιστη απαιτούμενη θερμοκρασία.
- (d) εφαρμόσιμο μόνο σε υλικά alclad.
- (e) αυξήσεις του πάχους μεγαλύτερες των 12,7 mm δεν επηρεάζουν την μέγιστη ταχύτητα απόψυξης η οποία παραμένει σταθερή στα 15 sec.

4.3.β.Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης

Για να πάρεις το πλεονέκτημα της αντίδρασης κατακρήμνιση-σκλήρυνση, είναι απαραίτητο να παραχθεί πρώτα ένα στερεό διάλυμα. Η διαδικασία με την οποία αυτό επιτυγχάνεται αποκαλείται θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, και σκοπός της είναι να προσδώσει στο στερεό διάλυμα τα μέγιστα πρακτικά ποσά των διαλυμένων στοιχείων σκλήρυνσης στο κράμα. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τον εμποτισμό του κράματος σε μια θερμοκρασία ικανοποιητικά υψηλή και σε αρκετό χρόνο ώστε να επιτευχθεί ένα σχεδόν ομοιογενές στερεό διάλυμα.

Η ονομαστική θερμοκρασία θερμικής κατεργασίας διαλυτοποίησης προσδιορίζεται από τα όρια σύστασης του κράματος και του επιτρεπόμενου ορίου για εκούσιες θερμοκρασιακές παραλλαγές. Παρ' όλο που οι κλίμακες συνηθισμένων τιμών επιτρέπουν μεταβολές της τάξεως των $\pm 6^{\circ}\text{C}$ από την ονομαστική, κάποια κράματα υψηλής κραματοποίησης, σκληρότητας και ελεγχόμενης αντοχής προϋποθέτουν ότι η θερμοκρασία πρέπει να ελέγχεται σε πιο περιοριστικά όρια. Ευρύτερες κλίμακες μπορεί να είναι επιτρεπτές για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα θερμοκρασίας μεταξύ των solvus και ευτηκτικών θερμοκρασιών τήξεως.[11,12]

ι) Χρόνος κατεργασίας διαλυτοποίησης.

Ο χρόνος στην ονομαστική θερμική κατεργασία διάλυσης (soak time) που απαιτείται ώστε να επιφέρει έναν ικανοποιητικό βαθμό διάλυσης του αδιάλυτου διαλύματος ή των συστατικών της κατακρημνισμένης διαλυτής φάσης και να επιτύχει καλή ομοιογένεια του στερεού διαλύματος, αποτελεί μια λειτουργία της μικροδομής πριν τη θερμική κατεργασία. Ο χρόνος που απαιτείται μπορεί να ποικίλει σε λιγότερο από ένα λεπτό για λεπτά φύλλα αλουμινίου έως ακόμη και 20 ώρες για μεγάλα χυτά τεμάχια. Οι οδηγίες για τα soaking times που απαιτούνται για τα διαμορφωμένα προϊόντα που ποικίλουν για διάφορες κατηγορίες παχών δίνονται παραπάνω στον πίνακα 4,2. Ο χρόνος που απαιτείται για να ζεστάνεις ένα φορτίο έως την θερμοκρασία κατεργασίας σε θερμική κατεργασία φούρνου επίσης αυξάνεται με τις κατηγορίες παχών και το φορτίο του φούρνου, έτσι ο συνολικός κύκλος χρόνου αυξάνει με βάσει αυτούς τους παράγοντες.

Ο soak time για τα φύλλα alclad και για τεμάχια κατασκευασμένα από φύλλα alclad πρέπει να διατηρείται στο ελάχιστο, επειδή υπερβολική διάχυση κραματοποιητικών στοιχείων από τον πυρήνα στην επικάλυψη μειώνει τη προστασία σε διάβρωση. Για τον ίδιο λόγο επαναθέρμανση με θερμική κατεργασία του φύλλου alclad με πάχος μικρότερο

του 0,75 mm γενικά αποφεύγεται και ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων θερμικών κατεργασιών που επιτρέπεται για λεπτότερα φύλλα alclad είναι περιορισμένος.

Οι soak times για διαμορφωμένα κράματα λαμβάνουν υπ' όψιν το φυσιολογικό thermal lag (θερμική υστέρηση) μεταξύ του φούρνου και του τεμαχίου και τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ επιφάνειας και καρδιάς για εμπορικούς εξοπλισμούς πιστοποιημένους με τα standards του MIL-H-6088. Ο ταχύς ρυθμός θέρμανσης των λουτρών με τήγμα άλατος επιτρέπει όλος ο χρόνος εμβάπτωσης να μετρηθεί ως soak time εκτός εάν η θερμοκρασία του λουτρού πέφτει χαμηλότερα από το ελάχιστο επιτρεπτό. Ακόμη και τότε, ο soak time μετράει όταν η θερμοκρασία του λουτρού επανέλθει στο ελάχιστο. Σε φούρνους αέρα ο soak time δεν ξεκινάει πριν όλα τα όργανα επανέλθουν στην κανονική ένδειξη θερμοκρασίας λειτουργίας τους και αυτή είναι η θερμοκρασία που μετρίεται πριν την εισαγωγή του φορτίου στο φούρνο.

Σε φούρνους αέρα τα θερμοζεύγη μπορεί επίσης να είναι προσκολλημένα επάνω στα τεμάχια ή τοποθετημένα στο εσωτερικό τους καθώς βρίσκονται σε φορτίο ώστε να καταγράφουν τις πιο θερμές και τις πιο κρύες θερμοκρασίες σε κάθε ζώνη. Με αυτό τον τρόπο είναι πιθανό να διασφαλιστεί ότι παρέχεται επαρκές soaking.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει επίσης να δίνεται στους συνιστάμενους soak times για σφυρηλάτα τεμάχια, ο soak time σε κάποιες περιπτώσεις επεκτείνεται σε διάρκεια ώστε να ολοκληρωθεί η διάλυση και ομογενοποίηση σε κάποιες περιοχές που λαμβάνουν οριακή μείωση κατά τη διάρκεια της σφυρηλάτησης. Αξιοσημείωτες μεταβολές υπάρχουν στο ποσό του προστιθέμενου soak time, κάποιες προδιαγραφές αναφέρονται σε αυθαίρετες προσθέσεις, όπως μια ώρα και κάποιες προσθέτουν μια ώρα για κάθε ίντσα πάχους από την αρχική σφυρηλάτηση.

Στους φούρνους αέρα, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη διάταξη του φορτίου. Η διανομή του αέρα και της θερμότητας στο εσωτερικό του φούρνου πρέπει να κανονίζεται σύμφωνα με τις εξής παραμέτρους:

- Να παρέχεται ελάχιστη αντίσταση στη ροή του αέρα.
- Να παράγεται η ελάχιστη διατάραξη στη φυσική διανομή της θερμότητας.
- Να αποφεύγεται συνεχής ανανέωση του χώρου με αέρα γύρω από κάθε εξάρτημα στο εσωτερικό του φούρνου.

Μια συνηθισμένη πρακτική είναι να ορίζεται ένα ελάχιστο κενό 50 mm μεταξύ των τεμαχίων, αλλά σε μεγάλα και πολύπλοκης γεωμετρίας τεμάχια μπορεί να απαιτούν αξιοσημείωτα μεγαλύτερο κενό. Πολλοί χειριστές βρίσκουν πιο συντηρητικές πρακτικές διατήρησης του φορτίου οι οποίες μπορεί να είναι οικονομικότερες σε βάθος χρόνου από

βαρύτερες φορτίσεις, επειδή με ελαφρύτερα φορτία οι ρυθμοί θέρμανσης είναι υψηλότεροι και αντιμετωπίζονται λιγότερες απορρίψεις και λάθη στο σέρβις κατά τη λειτουργία.[12]

4.3.γ. Απόψυξη(Βαφή)

Η απόψυξη για πολλούς λόγους αποτελεί το πιο κρίσιμο στάδιο στην αλληλουχία των εργασιών για την πραγματοποίηση μιας θερμικής κατεργασίας. Ο ρόλος της απόψυξης είναι η δημιουργία στερεού διαλύματος σχηματισμένου στη θερμοκρασία θερμικής κατεργασίας διάλυσης και με ταχύ ρυθμό απόψυξης σε κάποια χαμηλότερη θερμοκρασία, η οποία συνήθως είναι θερμοκρασία δωματίου. Από το προηγούμενο γενικό συμπέρασμα, αυτή η αναφορά εφαρμόζεται όχι μόνο για να διατηρήσει διαλυμένα άτομα (στοιχεία προσθήκης) στο διάλυμα, αλλά και για να συγκρατήσει ένα προκαθορισμένο ελάχιστο αριθμό σημείων ελεύθερης κρυσταλλικής δομής η οποία βοηθά στην προώθηση της διάχυσης σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, που απαιτείται για τη ζώνη σχηματισμού. Τα διαλυμένα άτομα που κατακρημνίζονται είτε στα όρια των κόκκων, ως **dispersoids** ή ελεύθερα σωματίδια που μετακινούνται (σε υψηλές ταχύτητες) σε αδιάτακτες περιοχές, είναι ανεπανόρθωτα χαμένα για πρακτικούς σκοπούς και αποτυγχάνουν να συνεισφέρουν στην διαδοχική αύξηση της αντοχής.[1,5,6,7,12]

Στις περισσότερες περιπτώσεις για να αποφευχθούν τέτοιοι τύποι κατακρημνίσεων οι οποίοι είναι καταστρεπτικοί για τις μηχανικές ιδιότητες και την αντοχή σε διάβρωση, ο σχηματισμός του στερεού διαλύματος κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας διάλυσης πρέπει να αποψύχεται αρκετά γρήγορα (και χωρίς διακοπές) για να παράγει ένα υπέρκορο διάλυμα έως τη θερμοκρασία δωματίου— η ιδανική συνθήκη για κατακρήμνιση σκλήρυνσης. Η αντίσταση σε stress-corrosion cracking (σπάσιμο από διάβρωση που αναπτύχθηκε λόγω τάσεων) ιδιαίτερων κραμάτων αλουμινίου-μαγνησίου-ψευδαργύρου άνευ χαλκού, ωστόσο, βελτιώνεται με αργή απόψυξη. Πιο συχνά, τεμάχια αποψύχονται με εμβάπτιση σε κρύο νερό ή σε περιπτώσεις με συνεχή θερμική κατεργασία φύλλων, ελασμάτων ή διελάσεων σε πρωταρχική κατεργασία έλασης, αποψύχονται με προοδευτική βύθιση ή με υψηλή ταχύτητα ψεκασμού κρύου νερού. Ωστόσο, τεμάχια με πολύπλοκη γεωμετρία, συχνά με τμήματα μικρού και μεγάλου πάχους, συνήθως αποψύχονται με ενδιάμεσο ρυθμό ο οποίος εξασφαλίζει πιο αργή απόψυξη, εδώ χρησιμοποιείται νερό στους 65 με 80°C , βραστό νερό, ένα υδατικό

διάλυμα πολυακετυλένιου γλυκόλης ή κάποιο άλλο κατευθυνόμενο ρευστό όπως αέρας ή πάχνη (mist).[1,5,6,7,12]

Εάν η κατακρήμνιση κατά τη διάρκεια της απόψυξης πρέπει να αποφευχθεί, θα πρέπει να ικανοποιούνται δύο προϋποθέσεις. Πρώτον, ο χρόνος που απαιτείται για μεταφορά του φορτίου από το φούρνο στο μέσο απόψυξης πρέπει να είναι αρκετά μικρός ώστε να προλαμβάνεται η αργή πρόψυξη στη θερμοκρασιακή κλίμακα όπου λαμβάνει χώρα η ταχύτερη κατακρήμνιση. Για το κράμα 7075, αυτή η κλίμακα καθορίζεται στους 400 με 290 °C και θεωρείται η πιο κρίσιμη θερμοκρασιακή κλίμακα για απόψυξη των κραμάτων αλουμινίου. Η δεύτερη προϋπόθεση για αποφυγή της κατακρήμνισης κατά τη διάρκεια της απόψυξης είναι ότι ο όγκος, η ικανότητα θερμοκρασιακής απορρόφησης και ο ρυθμός ροής του μέσου απόψυξης να είναι τέτοια ώστε κατά τη διάρκεια της απόψυξης να λαμβάνει χώρα μικρή ή καθόλου κατακρήμνιση. Κάθε διακοπή της απόψυξης που μπορεί να επιτρέψει επαναθέρμανση σε κάποια θερμοκρασία της κρίσιμης κλίμακας και να προκαλέσει ταχύτερη κατακρήμνιση πρέπει να αποφεύγεται.[1,5,6,7,12]

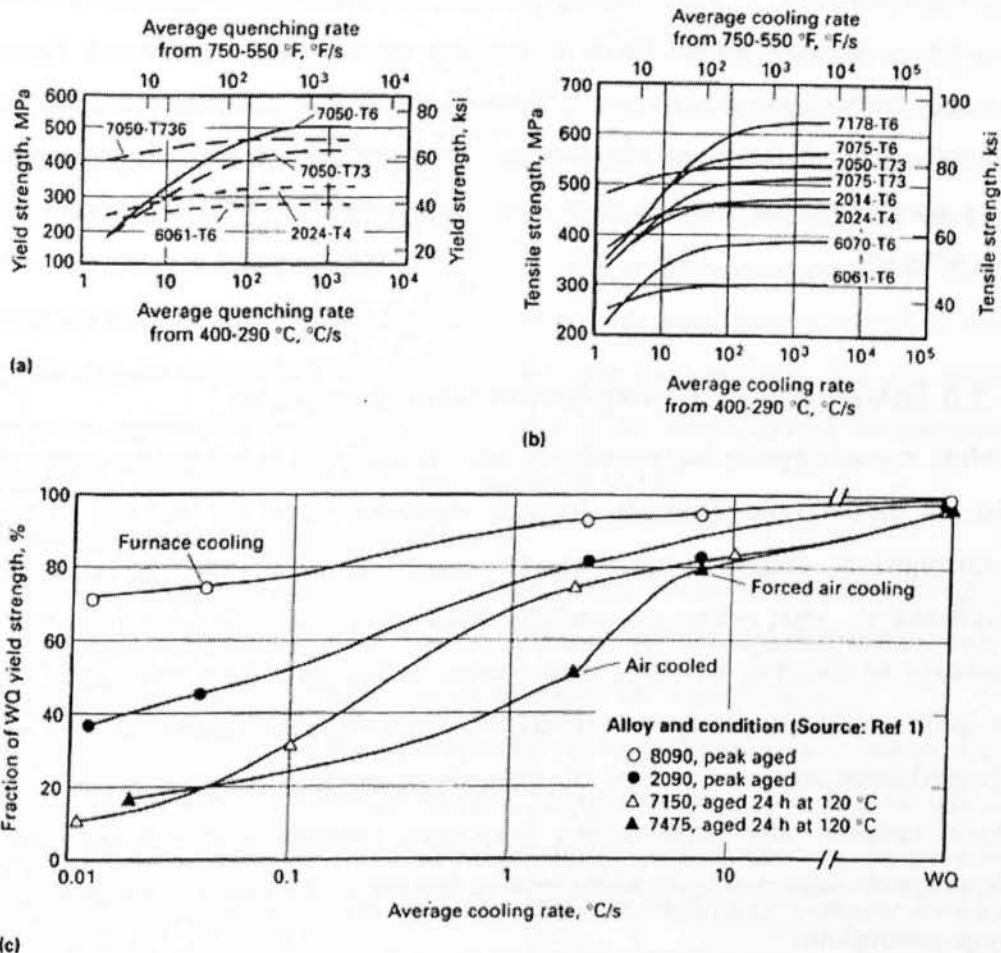
Για μέγιστη διαστασιακή σταθερότητα, κάποια σφυρήλατα ή χυτά τεμάχια ψύχονται στον αέρα. Σε κάποιες περιπτώσεις η απόκριση στη κατακρήμνιση σκλήρυνσης είναι περιορισμένη, αλλά παρ' αυτά επιτυγχάνονται ικανοποιητικές τιμές αντοχής και σκληρότητας. Η παραγωγή διελάσεων χωρίς ξεχωριστή θερμική κατεργασία διάλυσης μπορεί να ψύχει τα τεμάχια στον αέρα ή σε πάχνη (mist), αλλά σε σημεία με μεγαλύτερο πάχος μπορεί να απαιτείται απόψυξη με εμβάπτιση ή ψεκασμό. Κράματα τα οποία διαλύονται σχετικά εύκολα (diluted), όπως τα 6063 και 7005, είναι ιδιαιτέρως προσαρμόσιμα σε απόψυξη στον αέρα και οι μηχανικές τους ιδιότητες δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από τον αργό ρυθμό απόψυξης τους. [1,5,6,7,12]

i) Επίδραση του ρυθμού απόψυξης στις ιδιότητες των κραμάτων

Ως μια ευρύτατη γενίκευση, η επίτευξη των υψηλότερων αντοχών και των καλύτερων συνδυασμών αντοχής και σκληρότητας σχετίζονται άμεσα με τους πιο γρήγορους ρυθμούς απόψυξης. Η αντοχή στη διάβρωση και στη διάβρωση λόγω τάσεων και ρηγματώσεων είναι ακόμη κάποια χαρακτηριστικά τα οποία γενικά βελτιώνονται με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα απόψυξης. Κάποια από τα κράματα που χρησιμοποιούνται σε επαναφορά τεχνητής γήρανσης, και ειδικά στη σειρά 7xxx χωρίς χαλκό, αποτελούν εξαίρεση στον παραπάνω κανόνα. Η επίδραση του ρυθμού απόψυξης στις μηχανικές ιδιότητες μπορεί επίσης να εξαρτάται από την επιθυμητή επαναφορά. Στην υπογήρανση κατάσταση (underaged condition), για παράδειγμα, ένας αργός ρυθμός απόψυξης είναι

πιο επιβλαβής στην ολκιμότητα και στην αντοχή σε θραύση. Η αντοχή θα είναι πολύ πιο επηρεασμένη μετά την μέγιστη τιμή τάσης αναπτυσσόμενης λόγω γήρανσης. [1,5,6,7,8,12]

Εξαιτίας αυτών των επιδράσεων, ανά τα χρόνια έχει γίνει πολύ δουλειά πάνω στην κατανόηση και πρόβλεψη του πως οι συνθήκες απόψυξης και η μορφή του προϊόντος επιδρούν στις ιδιότητες του. Οι σχετικές επιδράσεις των μεθόδων απόψυξης μπορούν να συγκριθούν σε σχέση με τους μέσους ρυθμούς απόψυξης. Στο σχήμα 4,1 για παράδειγμα, οι επιδράσεις της απόψυξης στο όριο διαρροής των τεσσάρων κραμάτων συγκρίνονται σε σχέση με τους μέσους ρυθμούς απόψυξης μέσω της κλίμακας από 400 έως 290 °C. Για κράματα με σχετικά μεγάλη ευαισθησία στο ρυθμό απόψυξης, όπως το 7075, τιμές από 300 °C ή υψηλότερες απαιτούνται ώστε να εξασφαλιστεί η σχεδόν μέγιστη αντοχή έπειτα από τη θερμική κατεργασία κατακρήμνισης. Τα άλλα κράματα στο σχήμα 4,1 διατηρούν τις αντοχές τους σε τόσο χαμηλούς ρυθμούς ψύξης γύρω από τους 100 °C. [1,5,6,7,8,12]



Σχήμα 4,1: Ευαισθησία κατά την απόψυξη ποικίλων κραμάτων αλουμινίου ως μια λειτουργία μέσων ρυθμών απόψυξης.[12]

- (a) όριο διαρροής έπειτα από γήρανση των τεσσάρων διαμορφωμένων κραμάτων
 (b) όριο ελαστικότητας έπειτα από γήρανση των οχτώ διαμορφωμένων κραμάτων
 (c) συγκριτική ευαισθησία κατά την απόψυξη δύο κραμάτων αλουμινίου-λιθίου (2090 και 8090, και τα δύο με κατεργασία διάλυσης για μια ώρα στους 520 °C) και δύο κραμάτων αλουμινίου Zn-Mg-Cu (7150 και 7475, και τα δύο με κατεργασία διάλυσης για 40 λεπτά στους 480 °C)

Μέσοι ρυθμοί απόψυξης είναι χρήσιμοι στη σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων από ποικίλες μεθόδους απόψυξης. Ωστόσο μέσοι ρυθμοί απόψυξης έχουν συγκρίσιμα αποτελέσματα σε μία μόνο «κρίσιμη» θερμοκρασιακή κλίμακα όπου η κατακρήμιση είναι πιθανόν να λαμβάνει χώρα. Αυτή η μέθοδος, λοιπόν, δεν είναι απόλυτα ακριβής επειδή σημαντική κατακρήμιση μπορεί επίσης να συμβεί εξωτερικά των ορίων του ορισμένου εύρους κρίσιμων θερμοκρασιών των μέσων ρυθμών απόψυξης. Πέραν τούτου,

για κράματα υψηλής αντοχής, η σκληρότητα και αντοχή τους στη διάβρωση πιθανώς να μπορούν να μειωθούν χωρίς ουσιαστική απώλεια της αντοχής σε εφελκυσμό. Επομένως, μια πιο σύνθετη και εξεζητημένη σύγκριση, γνωστή ως ανάλυση του παράγοντα απόψυξης (quench-factor analysis, χρήσιμος για μη ομοιόμορφους ρυθμούς απόψυξης), είναι απαραίτητη για μια πιο ποσοτική υλική πρόβλεψη ή υλική βελτιστοποίηση. [1,5,6,7,8,12]

4.3.δ. Σκλήρυνση με κατακρήμνιση λόγω γήρανσης

Μετά την κατεργασία διαλυτοποίησης και την απόψυξη, η σκλήρυνση επιτυγχάνεται είτε σε θερμοκρασία δωματίου (φυσική γήρανση) ή με μια θερμική κατεργασία κατακρήμνισης (τεχνητή γήρανση). Σε κάποια κράματα, επαρκής κατακρήμνιση συμβαίνει σε λίγες μέρες σε σταθερή θερμοκρασία δωματίου σε σταθερού ορίου προϊόντα με ιδιότητες οι οποίες είναι ικανοποιητικές για πολλές εφαρμογές. Αυτά τα κράματα μερικές φορές έχουν υποστεί θερμική κατεργασία κατακρήμνισης ώστε να εξασφαλίσουν αυξημένη αντοχή και σκληρότητα σε διαμορφωμένα ή χυτά προϊόντα. Άλλα κράματα που παρουσιάζουν μικρότερη ευαισθησία σε κατακρήμνιση στη θερμοκρασία δωματίου έχουν πάντα υποστεί θερμική κατεργασία κατακρήμνισης προτού χρησιμοποιηθούν.

Σε κάποια κράματα, με κυριότερα αυτά της σειράς 2xxx, η ψυχρηλασία (cold working) ή η πρόσφατη απόψυξη του υλικού αυξάνουν την απόκριση τους σε μετέπειτα θερμική κατεργασία κατακρήμνισης. Τα έλαστρα χρησιμοποιούν αυτό το φαινόμενο εφαρμόζοντας ένα ελεγχόμενο ποσό κυλιόμενης (rolling, σε έλασμα και φύλλο) ή εντεινόμενης (stretching, σε διέλαση, ράβδους και λαμαρίνες) δύναμης για να δημιουργήσουν καλύτερες και ισχυρότερες μηχανικές ιδιότητες. Ωστόσο, εάν οι καλύτερες και ισχυρότερες μηχανικές ιδιότητες χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό, τότε η κατεργασία επαναθέρμανσης θα πρέπει να αποφεύγεται. [2,11,12]

ι) Η επαναφορά T3 (T3-type tempers ή Γήρανση T3)

Οι επαναφορές τύπου-T3 διακρίνονται από τις επαναφορές τύπου-T4 λόγω σημαντικών και κύριων μηχανικών διαφορών στις ιδιότητες τους οι οποίες απορρέουν από την καταπόνηση της ψυχρηλασίας σκλήρυνσης κατακρήμνισης λόγω ενδοτράχυνσης συσχετιζόμενης με κάποιες μηχανικές διεργασίες που εκτελούνται μετά την απόψυξη. Τα επίπεδα κύλισης και τράχυνσης ώστε να επιτευχθούν επιπεδότητα και ευθύτητα παράγουν μέτριες τάσεις ή διαταραχές (της τάξεως του 1 έως 4%) οι οποίες προκαλούν

αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες (κυρίως αύξηση της αντοχής). Περεταίρω αύξηση στην αντοχή μπορεί να επιτευχθεί με ψυχρηλασία (cold rolling), με ενδοτράχυνση, με συνδυασμούς των παραπάνω, ή για σφυρήλατα προϊόντα, θλιπτική παραμόρφωση. Οι επαναφορές που παράγονται από αυτές τις εργασίες και ακολουθούνται από φυσική γήρανση μόνο (όχι θερμική κατεργασία κατακρήμνισης), αποκαλούνται επαναφορές τύπου-T3 (T3-type tempers) και ένα πρόσθετο ψηφίο χρησιμοποιείται για να δείξει μια μεταβολή στη σκλήρυνση λόγω επιβολής τάσεων (τέντωμα, επιμήκυνση κλπ.) που έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές αλλαγές στις ιδιότητες του μετάλλου. Στο πιο πρόσφατα εισηγμένο αεροπορικό κράμα της σειράς 2xxx, 2324, υψηλή αντοχή επιτυγχάνεται με ψυχρηλασία ελασμάτων σε μια T39 επαναφορά.[2,11,12]

ii) Θερμικές κατεργασίες κατακρήμνισης

Γενικά οι θερμικές κατεργασίες κατακρήμνισης πραγματοποιούνται σε χαμηλές θερμοκρασίες και έχουν μεγάλη χρονική διάρκεια, οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από τους 115 °C έως τους 190 °C και οι χρόνοι ποικίλουν από 5 έως 48 ώρες.

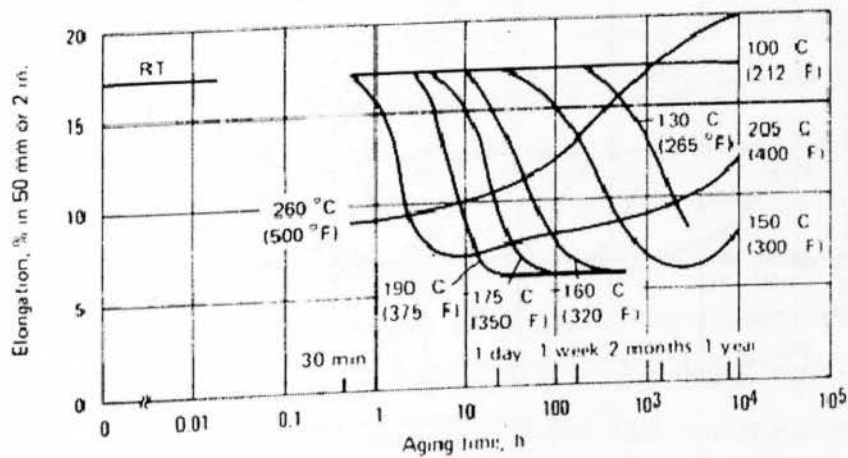
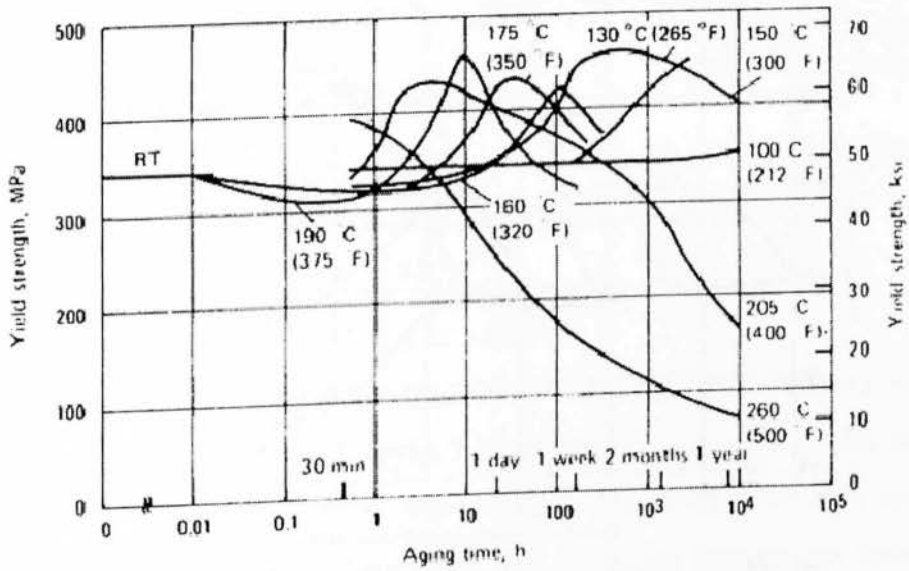
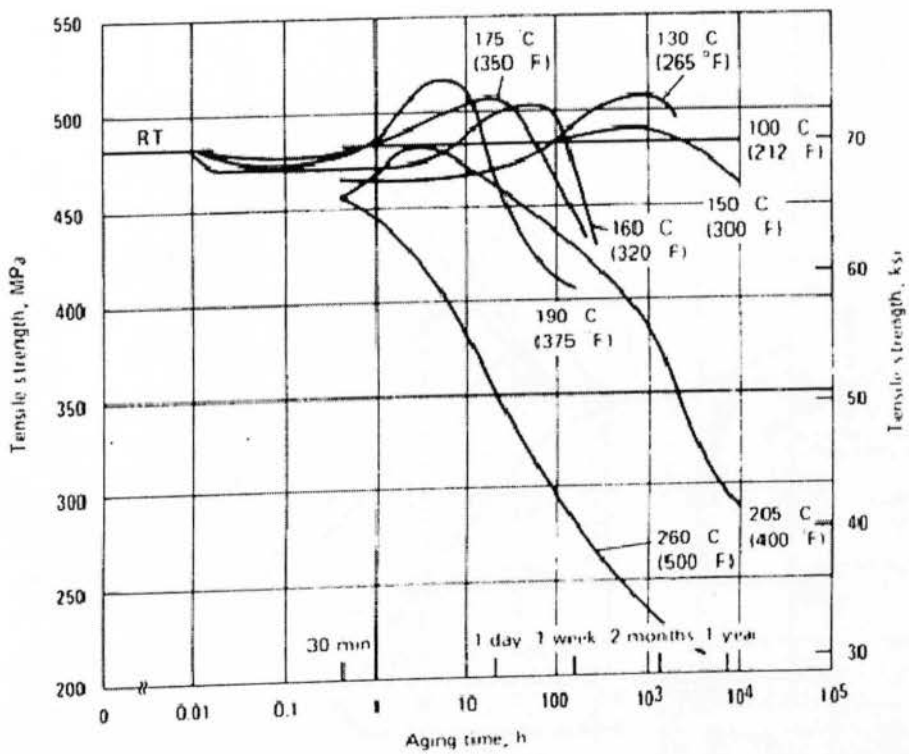
Η επιλογή των κύκλων χρόνου θερμοκρασίας για θερμικές κατεργασίες κατακρήμνισης πρέπει να λαμβάνεται πολύ σοβαρά υπ όψιν. Μεγαλύτερα κατακρημνίσματα απορρέουν από μεγαλύτερους χρόνους και μεγαλύτερες θερμοκρασίες, ωστόσο, τα μεγαλύτερα σωματίδια πρέπει απαραίτητως να είναι λιγότερα σε αριθμό με μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους. Η οδηγία είναι να επιλεγεί ένας κύκλος τέτοιος που να παράγει ιδανικό μέγεθος κατακρημνισμάτων και ομοιόμορφο διασκορπισμό αυτών. Δυστυχώς, ο κύκλος που απαιτείται για να μεγιστοποιηθεί μια ιδιότητα, όπως η αντοχή σε εφελκυσμό, είναι διαφορετικός από αυτόν που απαιτείται για να μεγιστοποιηθούν άλλες ιδιότητες, όπως το όριο διαρροής και η αντοχή σε διάβρωση. Συνεπώς, οι κύκλοι που χρησιμοποιούνται αντιπροσωπεύουν συμβιβασμούς που εξασφαλίζουν τους καλύτερους συνδυασμούς των ιδιοτήτων.

Παραγωγή του υλικού σε T5 μέσω T10 επαναφορών συνεπάγεται θερμική κατεργασία κατακρήμνισης σε υψηλότερες θερμοκρασίες (τεχνητή γήρανση). Παρ' όλο που η σκλήρυνση με κατακρήμνιση που αναπτύσσεται από αυτή τη διεργασία είναι υπομικροσκοπική, δομές πριν και μετά τη θερμική κατεργασία κατακρήμνισης συχνά μπορούν να διακριθούν με χημική προσβολή μεταλλογραφικών δειγμάτων. Σε κράματα αλουμινίου στη κατάσταση της θερμικής κατεργασίας διάλυσης και της απόψυξης, ο χρωματισμός αντίθεσης μεταξύ κόκκων διαφορετικού προσανατολισμού είναι σχετικά υψηλός, ειδικότερα στη σειρά 2xxx διαμορφωμένων κραμάτων και στη 2xx.0 σειρά

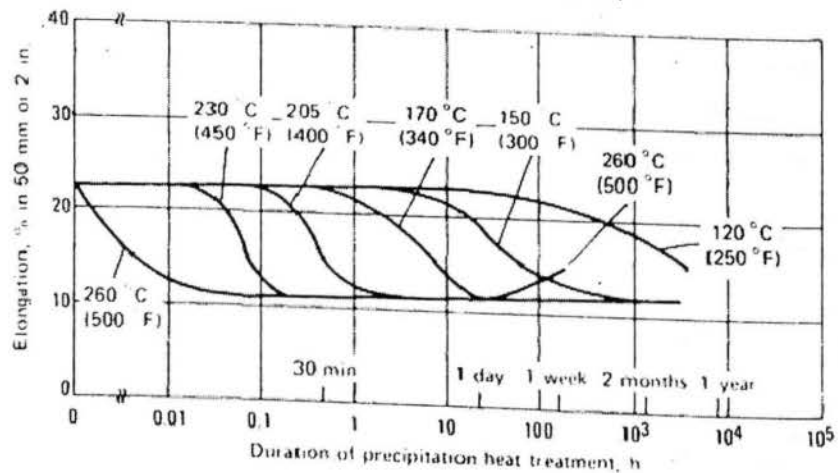
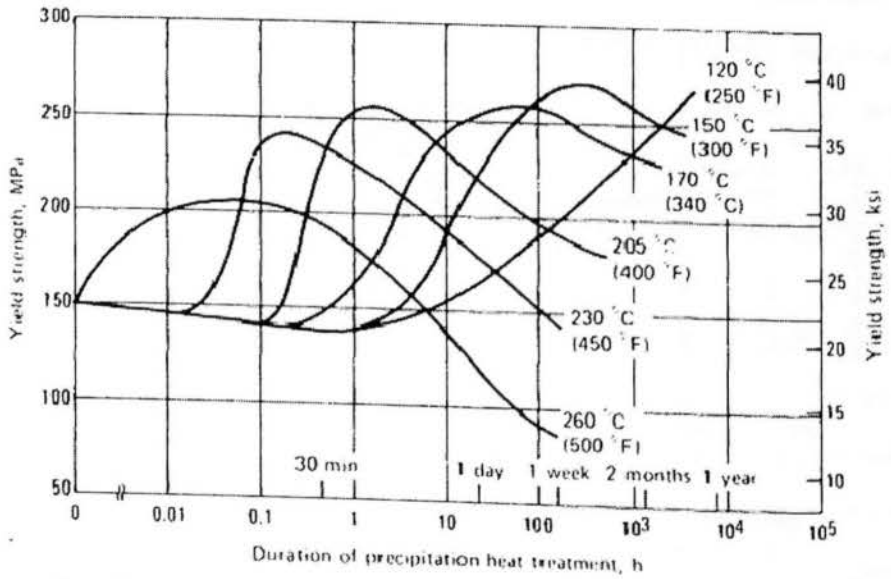
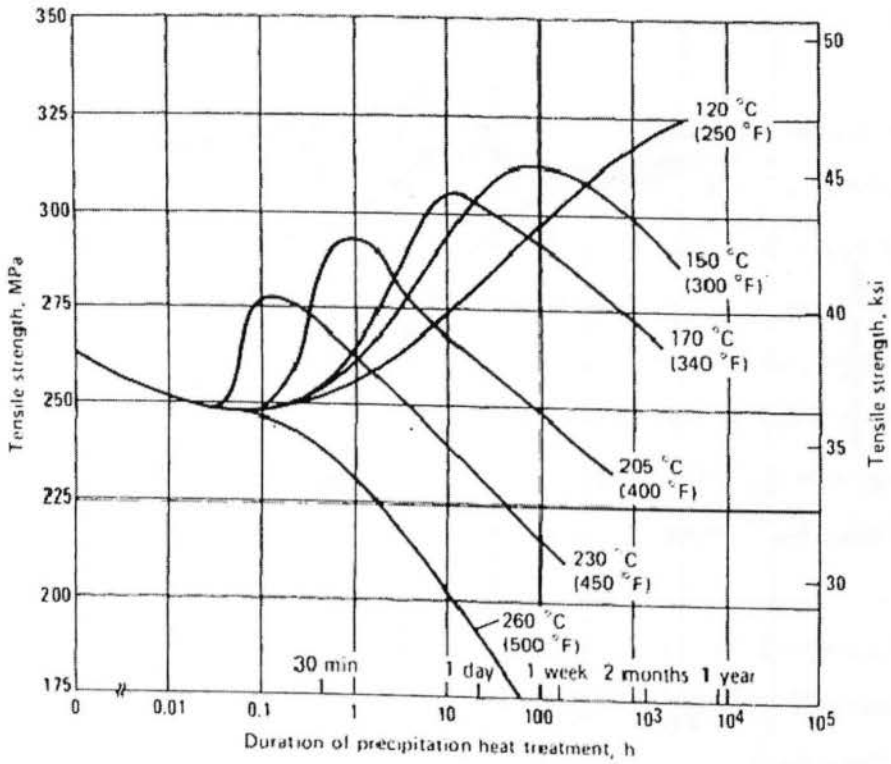
χυτών κραμάτων. Αυτή η αξιοσημείωτη αντίθεση μειώνεται με θερμική κατεργασία κατακρήμνισης.

Διαφορές στον τύπο, στον κλασματικό όγκο, στο μέγεθος και στο διασκορπισμό των κατακρήμνισμένων σωματιδίων επιδρούν στις ιδιότητες καθώς παρατηρούνται οι σύμφωνα με τη θερμοκρασία και το χρόνο αλλαγές, και αυτές όλες επηρεάζονται από την αρχική κατάσταση της δομής. Η αρχική δομή μπορεί να ποικίλει στα διαμορφωμένα προϊόντα από μη ανακρυσταλλωμένη σε ανακρυσταλλωμένη και ίσως εμφανίσει μόνο μέτριες διαταραχές από την απόψυξη ή επιπρόσθετες διαταραχές από την ψυχρηλασία μετά την θερμική κατεργασία διάλυσης. Αυτές οι συνθήκες, όπως ακόμη ο χρόνος και η θερμοκρασία της θερμικής κατεργασίας κατακρήμνισης, επηρεάζουν την τελική δομή και τις επακόλουθες μηχανικές ιδιότητες.

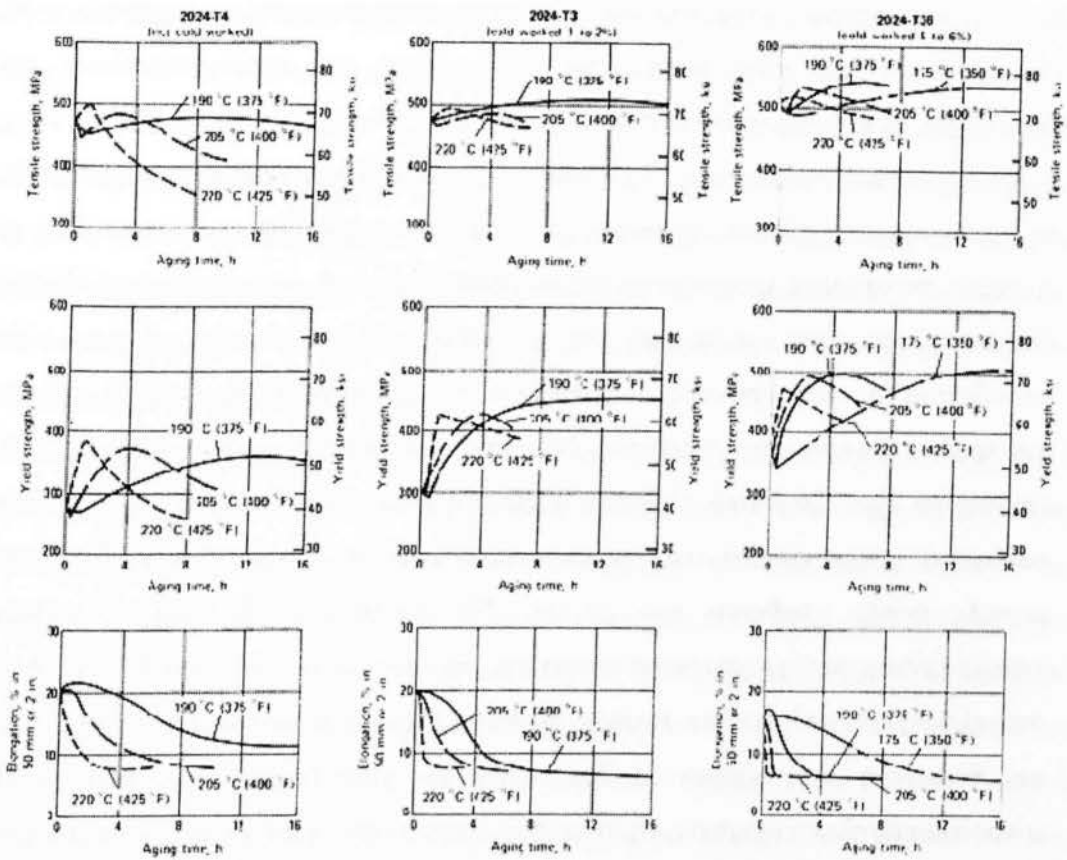
Επειδή μηχανικές ιδιότητες και άλλα χαρακτηριστικά αλλάζουν συνεχώς με το χρόνο και την θερμοκρασία, όπως φαίνεται στα σχήματα 4,2 ως 4,5 από τυπικές καμπύλες για τρία διαμορφωμένα κράματα, κατεργασμένα να παράγουν ένα συνδυασμό ιδιοτήτων ανταποκρινόμενων σε ένα συγκεκριμένο συνδυασμό κράματος-επαναφοράς που προϋποθέτει έναν ή περισσότερους συγκεκριμένους και συντονισμένους συνδυασμούς χρόνου και θερμοκρασίας, υποβάλλονται και οι δύο αυτές παράμετροι σε κάποια πρακτικά όρια. Προτεινόμενες εμπορικές κατεργασίες συχνά συμβιβάζονται μεταξύ των παραγόντων χρόνου και κόστους και της πιθανότητας επίτευξης των επιθυμητών ιδιοτήτων, λαμβάνοντας υπ όψιν τις ανοχές των μεταβλητών όπως σύσταση του κράματος σε ορισμένη κλίμακα και θερμοκρασιακές μεταβολές μεταξύ φούρνου και φορτίου. Χρήση υψηλότερων θερμοκρασιών μπορεί να μειώσει τον χρόνο κατεργασίας, αλλά αν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή, χαρακτηριστικά στοιχεία της κατεργασίας κατακρήμνισης σκλήρυνσης μειώνουν την πιθανότητα επίτευξης των απαιτούμενων ιδιοτήτων.[2,11,12]



Σχήμα 4,2: Χαρακτηριστικά γήρανσης σε έλασμα κράματος 2024[12]



Σχήμα 4.3: Χαρακτηριστικά γήρανσης σε έλασμα κράματος 6061[12]



Σχήμα 4,4: Επιδράσεις της ψυξηλασίας μετά την απόψυξη και πριν τη γήρανση στις ιδιότητες του ορίου διαρροής σε έλασμα κράματος 2024[12]

iii) Οι επαναφορές T6 και T7 (T6 and T7 tempers)

Η θερμική κατεργασία κατακρήμνισης ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία διάλυσης και απόψυξη παράγει τις T6 και T7 επαναφορές. Κράματα με T6 επαναφορές γενικά έχουν την υψηλότερη αντοχή χωρίς πρακτικά να θυσιάζουν ούτε τα ελάχιστα επίπεδα των ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών που εμπειρικά θεωρούνται ικανοποιητικά και χρήσιμα για μηχανολογικές εφαρμογές. Τα κράματα με T7 επαναφορές έχουν υποστεί υπεργήρανση, πράγμα που σημαίνει ότι ένας βαθμός αντοχής έχει θυσιαστεί ή «ανταλλαχθεί» με την βελτίωση ενός ή περισσότερων άλλων χαρακτηριστικών. Για παράδειγμα, η αντοχή μπορεί να θυσιαστεί για να βελτιωθεί είτε η διαστασιακή σταθερότητα ιδιαιτέρως λόγω γραμμικών διαστολών σε προϊόντα που προορίζονται για λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες είτε για ελάττωση των παραμενουσών τάσεων με σκοπό να μειωθεί το φαινόμενο του ερπυσμού ή της ολίσθησης(περπάτημα) κατά τη μηχανουργική κατεργασία. Οι T7 επαναφορές συχνά είναι τυποποιημένες για τεμάχια όπως χυτά ή σφυρήλατα τμήματα μηχανών εσωτερικής καύσης. Οι θερμοκρασίες

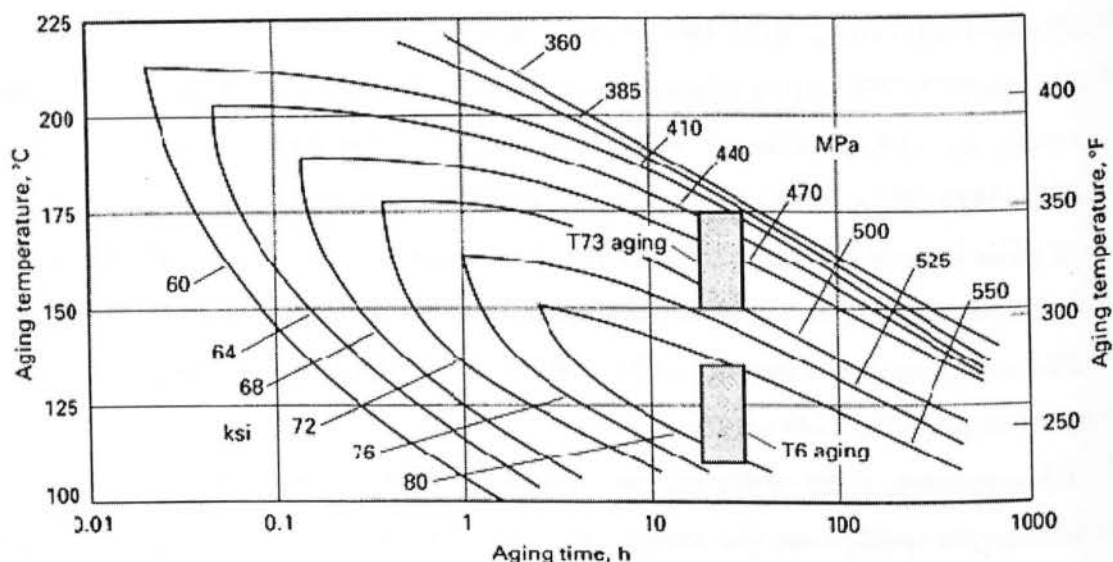
θερμικής κατεργασίας κατακρήμνισης που χρησιμοποιούνται για να παράγουν αυτές τις επαναφορές γενικά είναι υψηλότερες από εκείνες που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία T6 επαναφορών στα ίδια κράματα.

Δύο σημαντικές ομάδες από T7 επαναφορές— οι T73 και T76—έχουν αναπτυχθεί για τα διαμορφωμένα κράματα της σειράς 7xxx, τα οποία περιέχουν πάνω από 1,25% χαλκό. Αυτές οι επαναφορές προορίζονται για να βελτιώσουν την αντοχή σε αποφλοιώση λόγω διάβρωσης στα όρια των κόκκων και σε διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων, αλλά ως αποτέλεσμα της υπεργήρανσης, αυξάνουν επίσης την αντοχή σε θραύση και υπό κάποιες συνθήκες μειώνουν τους ρυθμούς διάδοσης των ρωγμών λόγω κόπωσης. Η T73 επαναφορά έχει εξαιρετικά ελάχιστη διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων σε μεγάλα και πολύπλοκα μηχανουργικά τεμάχια κατασκευασμένα από αυτά τα κράματα, κάτι που μερικές φορές συμβαίνει και με τις T6 επαναφορές. Η θερμική κατεργασία κατακρήμνισης που χρησιμοποιείται για την δημιουργία των T73 και T76 επαναφορών αποτελείται είτε από μια δύο σταδίων ισόθερμη θερμική κατεργασία κατακρήμνισης είτε από θέρμανση με ελεγχόμενο ρυθμό σε μια και μόνο θερμοκρασία κατεργασίας. Οι μικροδομικές/ηλεκτροχημικές σχέσεις που απαιτούνται έτσι ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά αντοχής σε διάβρωση μπορούν να αναπτυχθούν χρησιμοποιώντας μόνο ένα στάδιο θερμικής κατεργασίας κατακρήμνισης πάνω από τους 150 °C, αλλά υψηλότερη αντοχή επιτυγχάνεται αφού προηγηθεί αυτού ένα στάδιο κατεργασίας σε χαμηλότερη θερμοκρασία ή με μια ελεγχόμενη αργή θέρμανση. Εκτεταμένη φυσική γήρανση μπορεί να εξασφαλίσει τα ίδια αποτελέσματα αλλά οι χρόνοι παραμονής σε θερμοκρασία δωματίου που απαιτούνται είναι μη πρακτικοί. Είτε κατά τη διάρκεια πρωταρχικού σταδίου είτε κατά την αργή θέρμανση, μια μικρή υψηλής πυκνότητας διασπορά των ζωνών GP εμφανίζει πυρήνες κατακρημνίσματος. Είτε ο χρόνος και η θερμοκρασία του πρώτου σταδίου είτε ο ρυθμός θέρμανσης πρέπει να ελέγχονται για να δημιουργηθούν οι ζώνες GP οι οποίες δεν θα διαλυθούν αλλά θα μετασχηματιστούν σε η' κατακρήμνιση όταν θερμανθούν σε θερμοκρασία γήρανσης μεγαλύτερη των 150 °C. Η γήρανση είναι αυτή που πρακτικά δημιουργεί τα αποτελέσματα στο λιγότερο χρόνο στηριζόμενη στις ζώνες GP της θερμοκρασίας solvus. Αυτή η θερμοκρασία διαδοχικά, στηρίζεται σε ελλειπτική συγκέντρωση, ένας παράγοντας που επηρεάζεται από τη θερμοκρασία της θερμικής κατεργασίας διάλυσης και του ρυθμού απόψυξης, καθώς και από τη χημική σύνθεση του κράματος. Εάν ο χρόνος του πρώτου σταδίου γήρανσης είναι πολύ μικρός, εάν η θερμοκρασία του πρώτου σταδίου γήρανσης είναι πολύ μικρότερη από τη ζώνη GP της θερμοκρασίας solvus, ή εάν

οι ρυθμοί θέρμανσης είναι πολύ υψηλοί, οι ζώνες GP θα διαλυθούν σε θερμοκρασία πάνω από 150 °C, και τα κατακρημνίσματα θα διασπαρθούν πλήρως, θα αυξηθούν σε μέγεθος και έτσι θα μειώσουν κι άλλο την αντοχή. Οι κατεργασίες T76 έχουν την ίδια λειτουργική ακολουθία αλλά περιλαμβάνουν και δεύτερο στάδιο θέρμανσης αρκετό μόνο και μόνο για την ανάπτυξη αντίστασης σε αποφλοιώση λόγω διάβρωσης στα όρια των κόκκων υψηλότερη από αυτή που εξασφαλίζεται από τις T6 επαναφορές. Τα υλικά στην T73 επαναφορά έχουν επίσης υψηλή αντοχή σε αποφλοιώση λόγω διάβρωσης στα όρια των κόκκων (exfoliation corrosion).

Προτεινόμενες κατεργασίες για την δημιουργία T5 και T6 επαναφορών, καθώς και T7 επαναφορών φημίζονται για διαστασιολογική σταθερότητα και διατήρηση μηχανικών ιδιοτήτων ενώ εξασφαλίζουν και επαρκή ανοχή για φυσιολογικές μεταβολές που μπορούν να αντιμετωπισθούν με σωστές και λειτουργικές πρακτικές. Απ την άλλη μεριά, οι T73, T74 και T76 επαναφορές για κράματα 7049, 7050, 7075, 7175 και 7475 επιδρούν στο κράμα με αλλαγές στην αντοχή οι οποίες συμβαίνουν σημαντικά πιο γρήγορα στις θερμοκρασίες που εφαρμόζονται κατά το δεύτερο στάδιο ενός κύκλου θερμικής κατεργασίας κατακρήμνισης T7x συγκρινόμενης με τις αλλαγές που συμβαίνουν στις θερμοκρασίες που εφαρμόζονται κατά τη δημιουργία μιας T6 επαναφοράς.

Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4,5 , μεταβολές στον soak time αρκετών ωρών, και μεταβολές στη **soak** θερμοκρασία πάνω από τους 11 °C από την ονομαστική πρακτική γήρανση των 24 ωρών στους 120 °C, επηρεάζουν την αντοχή του κράματος 7075-T6 σχεδόν κατά 28 MPa ή 4ksi. Σε αντίθεση, παρόμοιες μεταβολές στον soak time και τη θερμοκρασία του δεύτερου σταδίου θέρμανσης για κράμα 7075-T73 οι οποίες πραγματοποιούνται για 24 ώρες στους 165 °C, επηρεάζουν την αντοχή του κράματος σχεδόν κατά 150 MPa ή 22ksi.[2,11,12]

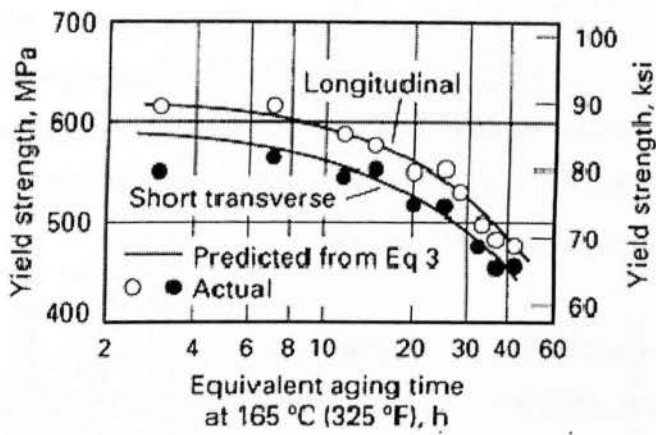


Σχήμα 4,5: Iso-yield-strength καμπύλες για κράμα 7075[12]

Συνεπώς, ο έλεγχος της θερμοκρασίας και του χρόνου που ορίζεται ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες και η απαιτούμενη αντοχή σε διάβρωση γι αυτές τις επαναφορές είναι πιο κρίσιμη από τον έλεγχο που απαιτείται για τη δημιουργία μιας T6 επαναφοράς. Επιπλέον, ο ρυθμός θέρμανσης από το πρώτο στο δεύτερο βήμα γήρανσης πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ όψιν, επειδή η κατακρήμνιση προκαλείται κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.

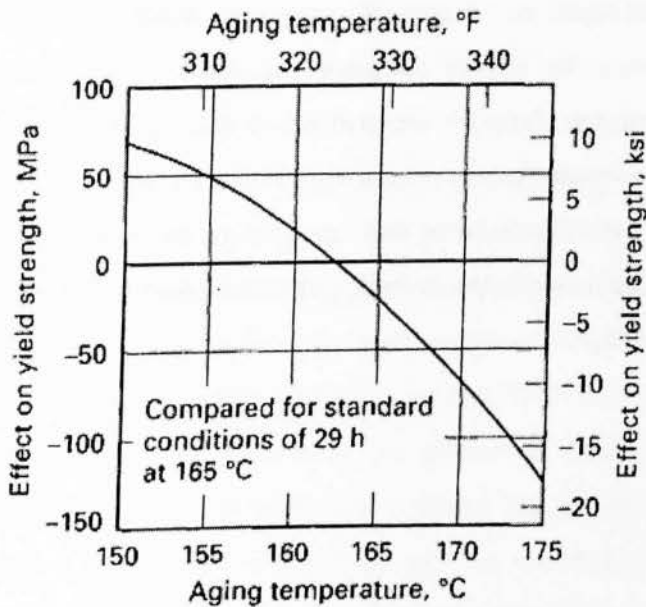
Οι χειριστές που πραγματοποιούν τις θερμικές κατεργασίες προσπαθούν να διευθετήσουν αυτά τα νέα προβλήματα τροποποιώντας εμπειρικά τους soak times αντισταθμίζοντας τους και για κατακρήμνιση κατά τη διάρκεια της θέρμανσης αλλά και για τις επιδράσεις του soaking σε θερμοκρασίες πάνω ή κάτω από τις ονομαστικές.

Σε ένα πείραμα δοκίμια διέλασης από 7050-W (4 ημερών) υπέστησαν γήρανση για 24 ώρες στους 120 °C συν το ισοδύναμο των 3 έως 42 ωρών στους 165 °C. Για το δεύτερο βήμα μια λογαριθμική θέρμανση θα χρησιμοποιηθεί στην οποία απαιτούνται 10 ώρες ώστε το φορτίο να φτάσει τους 155 °C και ονομαστική soak θερμοκρασία στους 165 °C. Το σχήμα 4,6 απεικονίζει το όριο διαρροής που γενικά συμβαδίζει με τις τιμές που προβλέφθηκαν χρησιμοποιώντας εξισώσεις που περιγράφουν τις επιδράσεις της υπεργήρανσης. Η απόκλιση από την καμπύλη για τη **short-transverse** αντοχή για τους **short aging** χρόνους απεικονίζει ότι τέτοιες μέθοδοι υπολογισμού είναι μη επαρκείς για τη πρόβλεψη της αντοχής στην πλευρά υπογήρανσης της καμπύλης γήρανσης.[2,9,11,12]



Σχήμα 4,6: Ακριβής αντιστροφή προβλεπόμενων ορίων διαρροής για διελάσεις κράματος 7050[12]

Εάν αμεληθεί η αντιστάθμιση των θερμοκρασιών κατά το soaking και αυτές προκύψουν διαφορετικές από τις ονομαστικές τότε όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4,7 η επιδράσεις θα είναι μεγάλες. Για παράδειγμα, η υπολογιζόμενη διαφορά σε αντοχή μεταξύ του κράματος διελάσεων 7050 soaked για 29 ώρες στους 160 °C και στους 165 °C είναι περίπου 50 MPa ή 7 ksi, και η υπολογιζόμενη μέσω εξισώσεων διαφορά σε αντοχή μεταξύ του κράματος διελάσεων 7050 soaked για 29 ώρες στους 155 °C και στους 170 °C είναι περίπου 100 MPa ή 14 ksi.[12]



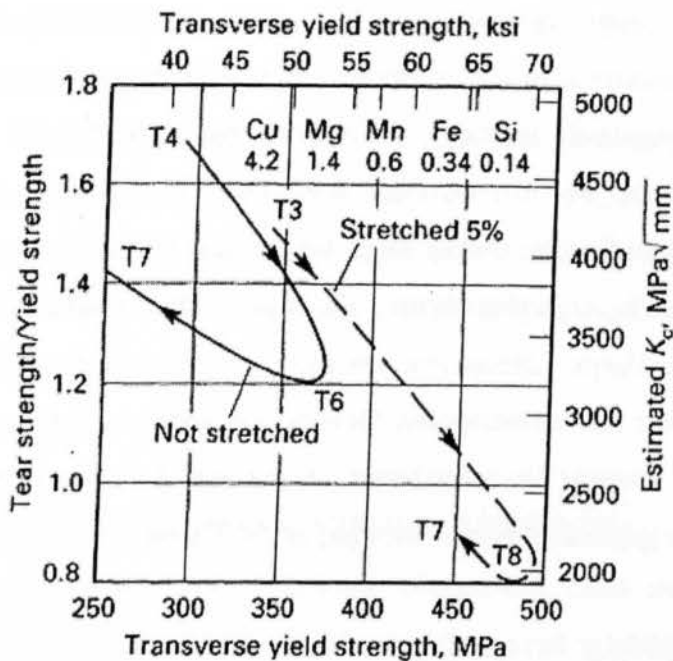
Σχήμα 4,7: Επίδραση της θερμοκρασίας γήρανσης στο όριο διαρροής του κράματος 7050-T736[12]

Αμελώντας την αντιστάθμιση του δαπανηθέντος χρόνου θέρμανσης στη *soak* θερμοκρασία αυξάνεις τη μεταβλητότητα. Μείωση της αντοχής αποδιδόμενη στη θέρμανση υπολογίζεται περίπου στα 14 MPa ή 2 ksi. Κινηματικές σχέσεις μπορούν επίσης να βοηθήσουν στην επιλογή χρόνων εξισορρόπησης της γήρανσης για εναλλακτικό δεύτερο βήμα γήρανσης. [12]

iv) Θερμομηχανικές επιδράσεις στη γήρανση

Θερμομηχανικές επιδράσεις στη γήρανση συμβαίνουν από το μετασχηματισμό μετά την θερμική κατεργασία διάλυσης. Το στάδιο του μετασχηματισμού μπορεί να είναι ζεστό ή ψυχρό και πριν, μετά ή κατά τη διάρκεια της γήρανσης. Οι απλούστερες θερμομηχανικές πρακτικές είναι εκείνες των συμβατικών T3, T8 και T9 επαναφορών. Ο ρυθμός και η έκταση της κατακρήμνισης βελτίωσης αντοχής είναι εμφανώς αυξημένα σε κάποια κράματα που έχουν υποστεί ψυξηλασία μετά την απόψυξη, δεδομένου ότι κάποια κράματα δείχνουν λίγη ή καθόλου αύξηση της αντοχής όταν κατεργάζονται με αυτή την ακολουθία των διεργασιών.

Κράματα της σειράς 2xxx όπως τα 2014, 2024 και 2019 έχουν ιδιαίτερα καλή απόκριση σε ψυξηλασία μεταξύ απόψυξης και γήρανσης και αυτό το χαρακτηριστικό είναι η βάση για τις υψηλής αντοχής T8 επαναφορές βελτίωσης της αντοχής. Η αυξανόμενη βελτίωση της αντοχής από το συνδυασμό ψυξηλασίας και θερμικής κατεργασίας κατακρήμνισης είναι ένα αποτέλεσμα της πυρηνοποίησης των κατακρημνισμάτων λόγω επιβολής αυξημένων τάσεων. Σε κάποια κράματα της σειράς 2xxx, η παραγωγή τάσεων με ψυξηλασία μετά την θερμική κατεργασία κατακρήμνισης και την απόψυξη επίσης περιλαμβάνει πυρηνοποίηση και καλύτερη διασπορά των κατακρημνισμάτων η οποία αυξάνει την αντοχή. Εξαρτώμενη από τη γήρανση επαναφοράς ωστόσο, η σκληρότητα μπορεί να επηρεαστεί αντίστροφα όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 4,8 για ελάσματα κράματος 2024. [12]



Σχήμα 4,8: Επιδράσεις ενδοτράχυνσης και γήρανσης στη σκληρότητα και το όριο διαρροής σε έλασμα κράματος 2024.[12]

Η αύξηση της αντοχής με θερμομηχανικές διεργασίες αποτελεί τη βάση για τις υψηλής αντοχής T8 επαναφορές των κραμάτων 2011, 2024, 2124, 2219 και 2419 τα οποία τα οποία παράγονται εφαρμόζοντας ελεγχόμενες ποσότητες έλασης σε ψυχόμενα έλαστρα (cold rolling), ενδοτράχυνσης ή συνδυασμούς των δύο διεργασιών. Φυσιολογικά η ψυχρηλασία πραγματοποιείται με έλαση, ωστόσο άλλες μέθοδοι όπως η ψυχρή κύλιση (cold rolling) μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Πρόσφατα, το 2324-T39 αναπτύχθηκε. Η επαναφορά T39 επιτυγχάνεται με ψυχρή έλαση (cold rolling) περίπου κατά 10% μετά την απόψυξη και ακολουθούμενη από ενδοτράχυνση σε υψηλότερες θερμοκρασίες για απόταση. Αυτός ο τύπος προσέγγισης καταλήγει σε αντοχές παρόμοιες με εκείνες που επιτυγχάνονται με τις T8 επαναφορές αλλά με καλύτερη σκληρότητα και χαρακτηριστικά αντοχής σε κόπωση από τα προϊόντα της T3. Κράματα 2024, 2124 και 2219 σε T8 επαναφορές είναι ιδιαίτερος κατάλληλα για υπερηχητικά και στρατιωτικά αεροσκάφη, κράματα 2219 σε τέτοιες επαναφορές καθώς και το κράμα 2014-T65 αποτελούν τα κύρια υλικά για δεξαμενές καυσίμων, οξειδωτικά περιβάλλοντα, ακόμη και διαστημικές κατασκευές. Θερμική κατεργασία επαναδιάλυτοποίησης για προϊόντα μηχανουργικής κατεργασίας ενισχυμένα σε τέτοιες επαναφορές έχει ως αποτέλεσμα μεγάλωμα των κόκκων και ουσιαστική μείωση της αντοχής πέραν του φυσιολογικού για την αρχική επαναφορά. Τέτοια κατεργασία επαναθέρμανσης δεν προτείνεται.[12]

Κράματα της σειράς 7xxx δεν ανταποκρίνονται ευνοϊκά στη ακολουθία των διεργασιών που πραγματοποιούνται για την δημιουργία των T8 επαναφορών και καμία τέτοια

επαναφορά δεν είναι τυποποιημένη για αυτά τα κράματα. Οι συσχετιζόμενες εφελκυστικές ή θλιπτικές τάσεις με την αντοχή των 7xxx κραμάτων έχουν σχετικά μικρή επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού που έχει υποστεί θερμική κατεργασία κατακρήμνισης και T6 επαναφορές. Από την άλλη, αυτές οι διεργασίες έχουν καθοριστικές και επιβλαβείς μετρήσιμες επιδράσεις στην τελική αντοχή όταν επαναφορές T73-,T736 ή T76 δημιουργούνται, ιδιαίτερα όταν υπολείπονται από αυτή της ψυξηλασίας. Ανάλογα, λεπτομερείς ιδιότητες είναι κάπως χαμηλότερες για τις εκδοχές με απόταση αυτών των επαναφορών. Μείωση του χρόνου υπεργήρανσης με συμβιβασμό στη μείωση της αντοχής δεν προτείνεται, επειδή αυτό θα ελαχιστοποιούσε την ανάπτυξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών αντοχής σε διάβρωση.[12]

4.4.Σκλήρυνση χυτών κραμάτων αλουμινίου

Γενικά, οι αρχές και οι διαδικασίες για την θερμική κατεργασία διαμορφωμένων και χυτών κραμάτων αλουμινίου είναι πανομοιότυπες. Οι μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των συνθηκών κατεργασίας διάλυσης για χυτά και για διαμορφωμένα προϊόντα βρίσκονται στους soak χρόνους και τα μέσα απόψυξης. Παρουσία διάλυσης σχετικά μεγάλων μικροδομών προϋποθέτει μεγαλύτερες soak περιόδους από αυτές που χρησιμοποιούνται σε διαμορφωμένα προϊόντα. Όταν η θερμική κατεργασία σε χυτά τεμάχια πρέπει να είναι επαναλαμβανόμενη, τότε οι χρόνοι διάλυσης είναι παρόμοιοι με αυτούς των διαμορφωμένων προϊόντων, επειδή το συνολικό ποσό διάλυσης και ομογενοποίησης έχει ολοκληρωθεί και είναι μη αντιστρεπτό κάτω υπό φυσιολογικές συνθήκες. Μείωση των τάσεων και των στρεβλώσεων (distortions) από την απόψυξη είναι επίσης σημαντική επειδή τα χυτά τεμάχια γενικά έχουν πολύπλοκα σχήματα και μεγάλες μεταβολές πάχους στα διάφορα τμήματα τους.

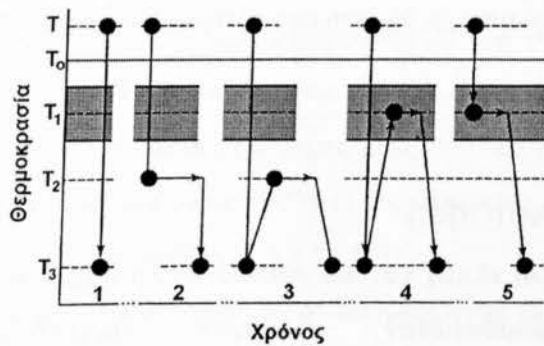
Διαφορετικές διεργασίες καλουπώματος και πρακτικές χύτευσης καταλήγουν επίσης σε διαφορές της μικροδομής σε σχέση με τις πρακτικές θερμικής κατεργασίας, επειδή οι αδιάτακτες μικροδομές που σχετίζονται με αργούς ρυθμούς υγροποίησης απαιτούν μεγαλύτερη έκθεση σε θερμική κατεργασία διάλυσης. Επομένως, ο χρόνος που απαιτείται στη θερμοκρασία επίτευξης διάλυσης είναι προοδευτικά μικρότερος για επενδεδυμένα, από άμμο ή μόνιμα καλούπια χύτευσης. Η πρακτικές του χυτηρίου παίζουν επίσης ένα σημαντικό ρόλο στην απόκριση ενός χυτού τεμαχίου σε θερμική κατεργασία. Για παράδειγμα μικρού πάχους καλούπια άμμου παραγόμενα με συνεχή χρήση ψύξης συχνά φανερώνουν εξαιρετικές μικροδομές σε αντίθεση με τα τεμάχια που

παράγονται με βαρέως τύπου μόνιμα καλούπια τα οποία δεν εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα τέτοιων διεργασιών.

Γι αυτούς τους λόγους πρακτικές θερμικής κατεργασίας διάλυσης βελτιώνονται για κάθε τεμάχιο ξεχωριστά ώστε να επιτύχουν διάλυση με το μικρότερο δυνατό κύκλο σε μια τελειοποιήσιμη διαδικασία παραγωγής, παρ όλο που τα περισσότερα χυτήρια και οι χειριστές τους τυποποιούν μια πρακτική με μεγάλο περιθώριο ασφαλείας.[3,11,12]

4.5.Ανόπτηση κατεργασμένων κραμάτων αλουμινίου

Οι κατεργασίες ανόπτησης των κραμάτων αλουμινίου είναι πολλών τύπων και διαφέρουν ως προς τον αντικειμενικό σκοπό που εξυπηρετεί η καθεμιά από αυτές. Οι χρόνοι και οι θερμοκρασίες ανόπτησης εξαρτώνται από τον τύπο του κράματος ως επίσης και από την δομή και την επαναφορά του.[2]



Σχήμα 4,9: Χαρακτηριστικά είδη θερμικών κατεργασιών
1.βαφή, 2.κλιμακωτή βαφή, 3.επαναφορά, 4.-5.ανόπτηση[2]

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα η ανόπτηση γενικά μπορεί να λάβει χώρα κατά δύο τρόπους αντίστοιχα:[2]

- i. Μετά από βαφή και επαναφορά σε θερμοκρασία T_3
- ii. Απ ευθείας, ξεκινώντας από τη σταθερή κατάσταση σε θερμοκρασία T_0

Και στις δύο περιπτώσεις η διαδικασία ανόπτησης ακολουθεί τις εξής φάσεις:

1. Το κράμα φέρεται στην περιοχή γρήγορου και αντιστρεπτού μετασχηματισμού περί τη θερμοκρασία T_1 .
2. Παραμονή στη θερμοκρασία T_1 για αρκετό χρονικό διάστημα, έως ότου επιτευχθεί ο πλήρης μετασχηματισμός.

3. Αργή απόψυξη σε θερμοκρασία T_3 .

Αποτέλεσμα της ανόπτησης είναι η απόκτηση από το υλικό της κατάστασης ισορροπίας του, σε φυσικοχημικό επίπεδο και σε επίπεδο δομής. Στόχος της ανόπτησης είναι να ελευθερωθεί η συσσωρευμένη ενέργεια μέσα στο μέταλλο υπό τη μορφή μηχανικού έργου παραμόρφωσης (πλαστικό έργο), με αποτέλεσμα την ελάττωση της πυκνότητας των διαταραχών και τη μετακίνηση τους σε σταθερότερες θέσεις. Γενικά, οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την ανόπτηση μπορεί να είναι:

- ο Αποκατάσταση
- ο Ανακρυστάλλωση
- ο Ανάπτυξη των κόκκων μετά από ανακρυστάλλωση

Τα είδη ανόπτησης που εφαρμόζονται σε κατεργασμένα κράματα αλουμινίου είναι:

- a) Πλήρης ανόπτηση
- b) Τμηματική ανόπτηση
- c) Αποτατική ανόπτηση και
- d) Ανόπτηση ελεγχόμενης ατμόσφαιρας και σταθεροποίησης ή αποκατάστασης.

Στη συνέχεια αναλύονται οι δύο σημαντικότερες κατηγορίες ανοπτήσεων, η πλήρης και η αποτατική.[2]

4.5.α.Πλήρης ανόπτηση

Η μαλακότερη, πιο ελατή και πιο εύκολα κατεργάσιμη κατάσταση και για τις δύο κατηγορίες διαμορφωμένων κραμάτων, θερμοσκληρυνόμενα και μη θερμοσκληρυνόμενα, δημιουργείται με πλήρη ανόπτηση στην ονομαζόμενη επαναφορά «Ο». Προϊόντα που έχουν υποστεί ενδοτράχυνση σε αυτή την επαναφορά φυσιολογικά υπόκεινται σε ανακρυστάλλωση, αλλά τα προϊόντα θερμηλασίας ίσως παραμένουν χωρίς ανακρυστάλλωση. Στην περίπτωση των θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου, τα διαλυμένα σωματίδια είναι αρκετά πλήρως κατακρημνισμένα ώστε να αποφευχθεί η σκλήρυνση φυσικής γήρανσης. Μια μέγιστη θερμοκρασία υψηλότερη από αυτή που χρησιμοποιείται για αποτατική ανόπτηση, ελεγχόμενη απόψυξη σε χαμηλότερη θερμοκρασία, και περεταίρω διατήρηση χρονικά σε χαμηλότερη θερμοκρασία είναι γενικά εφικτή.

Για θερμικά κατεργάσιμα και μη θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου, μείωση ή εξάλειψη των επιδράσεων από την αύξηση της αντοχής με ψυχρηλασία επιτυγχάνεται με θέρμανση σε θερμοκρασίες από 260 έως 440 °C. Ο ρυθμός μαλάκωσης είναι απολύτως

θερμοκρασιακά εξαρτώμενος, έτσι ο ρυθμός που απαιτείται για το μαλάκωμα ενός δοσμένου υλικού μιας κάποιας ποσότητας μπορεί να ποικίλει χρονικά από κάποιες ώρες για χαμηλές θερμοκρασίες έως δευτερόλεπτα για υψηλές θερμοκρασίες. Εάν ο σκοπός της ανόπτησης είναι η μερική απομάκρυνση των επιδράσεων της ενδοτράχυνσης, τότε η θέρμανση στους περίπου 345 °C είναι συνήθως επαρκής. Εάν είναι απαραίτητο να απομακρυνθούν οι επιδράσεις της σκλήρυνσης από μια θερμική κατεργασία ή από την ψύξη των θερμοκρασιών θερμηλασίας, μια ειδική κατεργασία σχεδιασμένη να παράγει μια κοινή και εκτενώς αραιωμένη κατακρήμνιση εφαρμόζεται για αυτό το σκοπό. Αυτή συνήθως αποτελείται από **soaking** στους 415 με 440 °C ακολουθούμενη από αργή απόψυξη (28°C/h max) έως τους 260 °C. Οι υψηλοί ρυθμοί διάχυσης που υπάρχουν κατά τη διάρκεια του soaking και της αργής απόψυξης επιτρέπουν μεγάλη συγκέντρωση κατακρημνισμένων σωματιδίων στα όρια των κόκκων και καταλήγουν σε ελάχιστη σκληρότητα. Ως αποτέλεσμα αυτής της κατεργασίας, μόνο μερική κατακρήμνιση λαμβάνει χώρα στα κράματα της σειράς 7xxx, και μια δεύτερη κατεργασία (soaking στους 230 ±6 °C για 2h) απαιτείται. Όταν εμφανίζεται η ανάγκη για μικρές επιπρόσθετες βελτιώσεις στη διαμορφωσιμότητα, η απόψυξη στους 28°C/h θα πρέπει να επιτείνεται έως τους 230 °C, και το υλικό θα πρέπει να soaked στους 230 °C για 6 ώρες. Η επιδράσεις της εξάλειψης ή της περαιτέρω παραμονής στο δεύτερο στάδιο των 230 °C στην ολκιμότητα ελασμάτων κράματος 7075-O συγκρίνονται με τις τυποποιημένες κατεργασίες στον πίνακα που ακολουθεί.[1,3,4,11,12]

Πίνακας 4,3: Επιδράσεις των κατεργασιών ανόπτησης στην ολκιμότητα ελασμάτων κράματος 7075-O[12]

Annealing treatment	Elongation in tension ^(a) , % in 50 mm (2 in.) for thickness of:			Bend angle ^(b) , degrees, for thickness of:		Elongation in bending ^(c) , % in 50 mm (2 in.) for thickness of:	
	0.5 mm (0.020 in.)	1.6 mm (0.064 in.)	2.6 mm (0.102 in.)	1.6 mm (0.064 in.)	2.6 mm (0.102 in.)	1.6 mm (0.064 in.)	2.6 mm (0.102 in.)
Treatment 1 ^(d)	12	12	12	82	73	48	50
Treatment 2 ^(e)	14	14	14	91	76	58	57
Treatment 3 ^(f)	16	16	...	92.5	84	56	60

Υπόμνημα:

- (a) Ομοιόμορφη επιμήκυνση μεταλλικών δειγμάτων υπό τάση
- (b) Γωνία κάμψεως στη πρώτη θραύση
- (c) Επιμήκυνση σε τέστ κάμψης για 1,3 mm προκαλούμενης ρωγμής έκτασης 1,3mm

- (d) Soak για 2 ώρες στους 415 ± 14 °C, απόψυξη στο φούρνο στους 260 °C με ρυθμό 30 °C/h με χρήση ψυχρού αέρα
- (e) Soak για 2 ώρες στους 425 °C-ψύξη σε αέρα, soak για 2 ώρες στους 230 °C-ψύξη σε αέρα
- (f) Soak για 2 ώρες στους 425 °C, απόψυξη στο φούρνο στους 230 °C με ρυθμό 30 °C/h, soak για 6 ώρες στους 230 °C, απόψυξη με χρήση ψυχρού αέρα

Στην ανόπτηση είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι έχει επιτευχθεί η κατάλληλη θερμοκρασία σε όλα τα τμήματα του τεμαχίου, συνεπώς είναι συνηθισμένο να καθορίζεται μια **soaking** περίοδος τουλάχιστον μιας ώρας. Η μέγιστη θερμοκρασία ανόπτησης που είναι καθοριστικής σημασίας, είναι συνετό να μην ξεπερνάει τους 415 °C επειδή δημιουργείται οξείδωση και μεγάλωμα του κόκκου. Σχετικά αργή απόψυξη σε στάσιμο αέρα ή μέσα στο φούρνο, προτείνεται σε όλα τα κράματα για την ελαχιστοποίηση των στρεβλώσεων. Τυπικές συνθήκες ανόπτησης που είναι κοινός εφαρμόσιμες σε κάποια κράματα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.[12]

Πίνακας 4,4: Τυπικές κατεργασίες πλήρους ανόπτησης για κάποια κοινά διαμορφωμένα κράματα αλουμινίου[12]

Αυτές οι κατεργασίες που κάνουν ανόπτηση του υλικού στην "Ο" επαναφορά, είναι τυπικές για ποικίλα μεγέθη και μεθόδους κατεργασίας και μπορεί να μην περιγράφουν επακριβώς τις βέλτιστες κατεργασίες για τα συγκεκριμένα τεμάχια.

Alloy	Metal temperature		Approximate time at temperature, h
	°C	°F	
1060	345	650	(a)
1100	345	650	(a)
1350	345	650	(a)
2014	415(b)	775(b)	2 to 3
2017	415(b)	775(b)	2 to 3
2024	415(b)	775(b)	2 to 3
2036	385(b)	725(b)	2 to 3
2117	415(b)	775(b)	2 to 3
2124	415(b)	775(b)	2 to 3
2219	415(b)	775(b)	2 to 3
3003	415	775	(a)

3004	345	650	(a)
3105	345	650	(a)
5005	345	650	(a)
5050	345	650	(a)
5052	345	650	(a)
5056	345	650	(a)
5083	345	650	(a)
5086	345	650	(a)
5154	345	650	(a)
5182	345	650	(a)
5254	345	650	(a)
5454	345	650	(a)
5456	345	650	(a)
5457	345	650	(a)
5652	345	650	(a)
6005	415(b)	775(b)	2 to 3
6009	415(b)	775(b)	2 to 3
6010	415(b)	775(b)	2 to 3
6053	415(b)	775(b)	2 to 3
6061	415(b)	775(b)	2 to 3
6063	415(b)	775(b)	2 to 3
6066	415(b)	775(b)	2 to 3
7001	415(c)	775(c)	2 to 3
7005	345(d)	650(d)	2 to 3
7049	415(c)	775(c)	2 to 3
7050	415(c)	775(c)	2 to 3
7075	415(c)	775(c)	2 to 3
7079	415(c)	775(c)	2 to 3
7178	415(c)	775(c)	2 to 3
7475	415(c)	775(c)	2 to 3
Brazing sheet			
No. 11 and 12	345	650	(a)
No. 21 and 22	345	650	(a)
No. 23 and 24	345	650	(a)

Υπόμνημα:

(a) Ο χρόνος στο φούρνο δεν χρειάζεται να είναι περισσότερος από αυτόν που χρειάζεται ώστε να έρθουν όλα τα τεμάχια στην επιθυμητή θερμοκρασία. Ο ρυθμός απόψυξης είναι αμελητέος.

- (b) Αυτές οι κατεργασίες προορίζονται να εξαλείψουν τις επιδράσεις της κατεργασίας διάλυσης και περιλαμβάνουν ρυθμούς απόψυξης της τάξεως των 30 °C/h από τη θερμοκρασία ανόπτησης έως τους 260 °C. Ο ρυθμός των διαδοχικών αποψύξεων είναι ασήμαντος. Κατεργασία στους 345 °C, ακολουθούμενη από μη ελεγχόμενη ψύξη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξάλειψη των επιδράσεων της ψυχρηλασίας ή τη μερική εξάλειψη των επιδράσεων της θερμικής κατεργασίας.
- (c) Αυτές οι κατεργασίες προορίζονται να εξαλείψουν τις επιδράσεις της κατεργασίας διάλυσης και περιλαμβάνουν ανεξέλεγκτους ρυθμούς απόψυξης της τάξεως των 205 °C ή λιγότερο, ακολουθούμενη από επαναθέρμανση στους 230 °C για 4 ώρες. Κατεργασία στους 345 °C, ακολουθούμενη από μη ελεγχόμενη ψύξη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μερική εξάλειψη των επιδράσεων της θερμικής κατεργασίας.
- (d) Ρυθμούς απόψυξης έως τους 205 °C ή χαμηλότερα είναι λιγότεροι ή ίσοι με 30 °C/h.

Προϊόντα τα οποία μπορούν να θερμανθούν και να ψυχθούν πάρα πολύ γρήγορα, όπως σύρμα, ανοπτύονται με συνεχείς διεργασίες οι οποίες απαιτούν ένα συνολικό χρόνο θέρμανσης και ψύξης μερικών μόνο δευτερολέπτων. Συνεχής ανόπτηση ελασμάτων τυλιγμένων σε ρόλους γίνεται σε ένα συνολικό χρονικό διάστημα μερικών λεπτών. Για αυτές τις ακραίες ταχύτητες λειτουργίας, η μέγιστη θερμοκρασία μπορεί να υπερβαίνει ακόμη και τους 440 °C.

Παρ' όλο που τα υλικά ανοπτύονται από τη κατάσταση ακόμα της σκλήρυνσης κατακρήμνισης συνήθως παραμένουν αρκετά όλκιμα για τις περισσότερες διεργασίες μορφοποίησης, η ολκιμότητα τους συνήθως είναι ελάχιστα χαμηλότερα από αυτήν των υλικών τα οποία δεν έχουν υποβληθεί σε θερμική κατεργασία— η οποία είναι ανόπτηση του υλικού στην αρχή της παραγωγής. Συνεπώς, όταν απαιτείται μέγιστη ολκιμότητα, η ανόπτηση ενός προηγούμενα θερμικά κατεργασμένου προϊόντος είναι μερικές φορές ανεπιτυχής.[11,12]

4.5.β. Αποτατική ανόπτηση

Για κράματα ψυχρής διαμόρφωσης, η μερική εξάλειψη με ανόπτηση των επιδράσεων της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση αναφέρεται ως αποτατική ανόπτηση. Τέτοιες κατεργασίες προϋποθέτουν θερμοκρασίες πάνω από τους 345 °C, ή πάνω από τους 400±8 °C για 3003 κράμα, και απόψυξη σε θερμοκρασία δωματίου χωρίς να απαιτείται

αξιοσημείωτος χρόνος διατήρησης σ αυτήν. Τέτοια κατεργασία μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μια απλή ανάκτηση, μερική ανακρυστάλλωση ή πλήρη ανακρυστάλλωση. Γήρανση σκλήρυνσης μπορεί να ακολουθήσει μετά από την αποτατική ανόπτηση των θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων, ωστόσο, δεν είναι απαραίτητη αφού υπάρχει μια συγκέντρωση κραματικών στοιχείων του διαλύματος αρκετή ώστε να προκαλέσει φυσική γήρανση σε στερεό διάλυμα μετά από τέτοιες κατεργασίες.

Μια ειδική μορφή αποτατικής επαναφοράς χρησιμοποιείται για θερμικά κατεργάσιμα κραματομένα προϊόντα τα οποία διαδοχικά θα επιθεωρηθούν με υπερήχους. Το προϊόν θερμαίνεται στη φυσιολογική του θερμοκρασία θερμικής κατεργασίας διάλυσης και έπειτα ψύχεται στον αέρα σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτή η επαναφορά αναφέρεται ως «Ο1» επαναφορά.[10,11,12]

4.6.Ανάπτυξη κόκκων

Πολλά από τα κράματα του αλουμινίου ευρείας χρήσεως υπόκεινται σε ανάπτυξη κόκκων κατά τη διάρκεια της κατεργασίας διάλυσης και της ανόπτησης. Αυτό το φαινόμενο λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια ή μετά την ανακρυστάλλωση του υλικού το οποίο έχει υποστεί προηγουμένως ένα μικρό κρίσιμο ποσό ψυχρηλασίας. Ενδεικτικό αυτής της κατεργασίας είναι η τραχεία επιφάνεια που δημιουργείται κατά τη διάρκεια διαδοχικών κατεργασιών έλασης και συχνά καταλήγει σε απορρίψεις λόγω κακής εμφάνισης ή δυσλειτουργιών. Λιγότερο συχνά μια επιδείνωση των μηχανικών ιδιοτήτων μπορεί να εμφανιστεί ξαφνικά κάτι που είναι ανεπιθύμητο ασχέτως των επιδράσεων της επιφανειακής τράχυνσης.

Ο βαθμός αποδεκτότητας της ανάπτυξης του κόκκου ποικίλει ανάλογα με το κράμα, τη δομή, τη χημική σύνθεση και το είδος του προϊόντος. Ο κρίσιμος ρυθμός ψυχρηλασίας κυμαίνεται από 5 έως 15%. Συνήθως θερμοκρασίες των 400 °C και πάνω πρέπει να επιτυγχάνονται πριν ξεκινήσει η ανάπτυξη του κόκκου, ωστόσο, κάποιες φορές η ανάπτυξη επιτυγχάνεται ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες της τάξεως των 345 °C. Η ανάπτυξη του κόκκου που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της ανακρυστάλλωσης είναι περισσότερο ένας συνδυασμός σύνθεσης, δομής και βαθμού ψυχρηλασίας παρά θερμοκρασίας ανά δευτερόλεπτο· θερμοκρασίες πλέον των 455°C σε κοινά κράματα μπορούν να οδηγήσουν σε προβλήματα δευτερεύουσας ανακρυστάλλωσης ανάπτυξης κόκκου. Μια κοινή ένδειξη που υποδηλώνει μέτρια χονδρόκοκκα υλικά είναι η αραχύτητα ή η όψη φλοιού πορτοκαλιού (orange peel) στις εξωτερικές επιφάνειες που

κάμπτονται. Υπερβολική ανάπτυξη των κόκκων σε μέγεθος δακτύλου ή και κάποιες φορές μεγαλύτερο αποτελεί στοιχείο των τεμαχίων που έχουν ανοπτηθεί με «Ο» επαναφορά μέσω μορφοποίησης έλασης και μετά έχουν υποστεί θερμομηχανική κατεργασία ή παρόμοιες διεργασίες. Αυτός ο τύπος ανάπτυξης του κόκκου συχνά ανιχνεύεται κατά την διάρκεια διαδοχικής ανοδίωσης, χημικής προσβολής και χημικών διεργασιών μορφοποίησης.

Η ρωγμάτωση κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης είναι ένα ακόμη χαρακτηριστικό το οποίο μπορεί να μας δείξει ότι έχει συμβεί απότομη ανάπτυξη των κόκκων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ρωγμές διαδίδονται κατά μήκος των ορίων των κόκκων τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερη παρεμπόδιση στην προοδευτική διάδοση των ρωγμών. Εάν η τραχύτητα επιφανείας είναι απαράδεκτη είτε από άποψη εμφάνισης είτε από πλευράς λειτουργικότητας, τότε οι διεργασίες λείανσης επιφάνειας, όπως η αμμοβολή, θα πρέπει να αξιολογηθούν. Εάν υποψιαστούμε ύποπτες μειώσεις στις μηχανικές ιδιότητες, τότε θα, πρέπει αυτές να επαληθευτούν πειραματικά και να αξιολογηθούν σε σχέση με την προβλεπόμενη χρήση. Σε μια εφαρμογή, ένα τεμάχιο το οποίο έχει δημιουργηθεί με μορφοποίηση έλασης ως έλασμα 2 mm με «Ο» επαναφορά και θερμική κατεργασία παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερη μέγιστη συμβατική τάση και όριο διαρροής σε τμήματα όπου έχει συμβεί απότομη ανάπτυξη των κόκκων παρά σε περιοχές στις οποίες έχει συμβεί φυσιολογική ανάπτυξη των κόκκων.[10,11,12]

Πίνακας 4,5[12]

Test	Grain structure	Tensile strength		Yield strength	
		MPa	ksi	MPa	ksi
Transverse					
1	Coarse	265	38.5	247	35.8
2	Coarse	263	38.2	241	35.0
3	Fine	311	45.1	261	37.8
Longitudinal					
1	Coarse	259	37.6	243	35.3
2	Coarse	269	39.0	245	35.6
3	Fine	305	44.2	270	39.1

Σε άλλες παρόμοιες έρευνες, δεν ανακαλύφθηκαν επιβλαβής επιδράσεις και σε πολλές περιπτώσεις τέτοια τεμάχια λειτούργησαν ικανοποιητικά σε κρίσιμες εφαρμογές.

Όταν ένα πρόβλημα λόγω ανάπτυξης κόκκων ανακαλυφθεί, είναι πολύ αργά για να τεθεί θέμα αλλαγής της κατάστασης των τεμαχίων, αλλά πολλές πιθανές μέθοδοι είναι διαθέσιμες για την αποφυγή της δημιουργίας τέτοιων δυσκολιών. Η απλούστερη εξ αυτών είναι η απελευθέρωση των λανθανουσών τάσεων παρεμβάλλοντας μια αποτατική ανόπτηση κατά την ακολουθία κατασκευής αυστηρά πριν τη κατεργασία διάλυσης ή τον κύκλο πλήρους ανόπτησης στον οποίο και λαμβάνει χώρα η ανάπτυξη των κόκκων. Αυτή η προσέγγιση συνήθως είναι επιτυχής και πρακτική. Μια άλλη πιθανότητα είναι να ρυθμιστεί άμεσα το ποσό των παραμένων τάσεων στο τεμάχιο πριν τη κρίσιμη θερμική κατεργασία έτσι ώστε το επίπεδο των τάσεων να βρίσκεται έξω από την κρίσιμη κλίμακα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί προσθέτοντας μια κατεργασία ψυξηλασίας πριν το σχηματισμό των ρόλων, όπως ένα όπως μια προ-έλαση πριν την τελική διαμόρφωση (στρατζάρισμα, πρεσάρισμα κλπ.), ή δημιουργώντας τους ρόλους σε πολλαπλά στάδια κάνοντας μια αποτατική ανόπτηση πριν από κάθε ένα στάδιο.[12]

Μια Τρίτη μέθοδος η οποία είναι κάποιες φορές επιτυχής περιλαμβάνει αύξηση του ρυθμού θέρμανσης κατά τη διάρκεια της κρίσιμης θερμικής κατεργασίας με μείωση του μεγέθους των φορτίων του φούρνου ή αλλάζοντας από ένα φούρνο αέρα σε λουτρό

άλατος. Σε μια εφαρμογή, βρέθηκε απότομη ανάπτυξη των κόκκων κατά τη διάρκεια του λυγίσματος ένας κράματος 1100 σε τετραγωνικής διατομής προφίλ. Η τράχυνση των εσωτερικών επιφανειών των τεμαχίων, η οποία λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της μορφοποίησης χονδρόκοκκου υλικού βλάπτει τη λειτουργία τους ως οδηγοί κυματομορφών. Έρευνα αποκάλυψε ότι για να ελαχιστοποιηθούν τα σημάδια χειρισμού το υλικό πρέπει να υποστεί επαναφορά μετά την ενδοτράχυνση (H14) και απόταση (με κατεργασία αποτατικής ανόπτησης) στους 345 °C (650 °F) αμέσως πριν την τελική διαμόρφωση. Η ανάπτυξη των κόκκων που επέρχεται κατά τη διάρκεια της ανόπτησης ως αποτέλεσμα του μέτριου ποσού ψυξηλασίας εισάγεται κατά την έλαση. Το πρόβλημα εξαλείφθηκε αλλάζοντας τη κατεργασία απότασης σε μια περίοδο θέρμανσης 5 λεπτών σε φούρνο αέρα που λειτουργεί στη θερμοκρασία των 540 °C. Η εξήγηση που δόθηκε για την επιτυχία αυτής της κατεργασίας ήταν ότι παρά τον ταχύτατο ρυθμό θέρμανσης, η θερμοκρασία του υλικού ανήλθε μέσα από τη κλίμακα ανακρυστάλλωσης για τους κόκκους που είχαν υποστεί τη λιγότερο απότομη ψυξηλασία και τους κόκκους κρίσιμης ψυξηλασίας οι οποίοι είχαν χρόνο να αναπτυχθούν ικανοποιητικά.[11,12]

Τέλος ακολουθεί αναλυτικός πίνακας όλων των κατεργασιών των κραμάτων.

Πίνακας 4,6: Κωδικοποίηση, κατά το σύστημα Α.Α., των κραμάτων αλουμινίου, ανάλογα με τις κατεργασίες που έχουν υποστεί.[2]

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ
F	Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς μηχανική ή θερμική κατεργασία.
O	Ανόπτηση
H	Ενδοτράχυνση, μόνο για τα κράματα διαμόρφωσης (ή ψυχρηλατημένα-σκληρυμένα).
H1X	Μόνον ενδοτράχυνση, (το X αναφέρεται στο βαθμό ενδοτράχυνσης) H11: Κράμα ελάχιστης σκληρότητας H12: Κράμα σκληρυμένο κατά 25% H14: Κράμα σκληρυμένο κατά 50% H16: Κράμα σκληρυμένο κατά 75% H18: Κράμα σκληρυμένο κατά 100% H19: Υπέρσκληρο κράμα
H2X	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από ανόπτηση αποκατάστασης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης μετά την ανόπτηση.
H3X	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης πριν από τη σταθεροποίηση.
T	Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση. Πρόκειται για θερμική κατεργασία διαφορετική από τις προηγούμενες. Πραγματοποιείται συνήθως μετά από υπερβαφή και κατακρήμνιση. Η προσθήκη αριθμού δείχνει διάφορες μορφές όπως π.χ.: T6 θ.κ. διαλυτοποίησης και σκλήρυνσης με τεχνητή γήρανση. Ακολουθούν αναλυτικά όλες οι μορφές θ.κ.
T1	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και φυσική γήρανση
T2	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, μηχανική κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.
T3	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.
T4	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση.
T5	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.
T6	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.
T7	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, θερμική κατεργασία σταθεροποίησης.
T8	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.
T9	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, τεχνητή γήρανση και κατεργασία εν ψυχρώ.
T10	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.
W	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης. Χρησιμοποιείται μόνο για τα κράματα, που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση ή θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης.

Βιβλιογραφία:

1. S. Hirano *et al.*, Quench Sensitivity in Al-Li Based Alloys, *Proceedings of Conference on Aluminum-Lithium Alloys (Vol 1)*, Materials and Component Engineering Publications, 1989, p 335-344
2. Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης, Δημήτρης Ι. Παντελής, Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, εκδόσεις Παπασωτηρίου pg. 427-452, 561-574
3. J. Gilbert Kaufman, Elwin L. Rooy, ASM, Aluminum Alloy Castings, Properties-Processes-Applications, p. 40-45
4. J.E. Hatch, in *Aluminum Properties and Physical Metallurgy*, American Society for Metals, 1984, p 165-166
5. C.E. Bates, Selecting Quenchants to Maximize Tensile Properties and Minimize Distortion in Aluminum Parts, *J. Heat Treat.*, Vol 5 (No. 1), 1987, p 27-40
6. T. Croucher, Critical Parameters for Evaluating Polymer Quenching of Aluminum, *Heat Treat.*, Vol 19 (No. 12), Dec 1987, p 21-25
7. W.L. Fink and L.A. Willey, Quenching of 75S Aluminum Alloy, *Trans. AIME*, Vol 175, 1948, p 414-427
8. J.W. Evancho and J.T. Staley, Kinetics of Precipitation in Aluminum Alloys during Continuous Cooling, *Metall. Trans. A*, Vol 5A, Jan 1974, p 43-47
9. J.T. Staley, *Industrial Heating XLIV*, Oct 1977, p 6-9
10. G.F. Bobart, *J. Heat Treat.*, Vol 6 (No. 1), 1988, p 47-52
11. William D. Callister Jr., *Materials Science and Engineering-An Introduction*, 7th Edition, John Wiley & Sons Inc., 2007, p.188-201, 388-390, 402-407
12. ASM, *Metals Handbook*, Vol. 4, Heat Treating, p. 1861-1960

5.Ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου

5.1.Μηχανικές ιδιότητες

5.1.α.Εισαγωγή

Οι μηχανικές ιδιότητες των διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου εξαρτώνται από τα χημικά στοιχεία κραματοποίησης τους, την θερμική κατεργασία(γήρανση) που έχουν υποστεί εάν πρόκειται για θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου ή την μηχανική κατεργασία (ενδοτράχυνση) εάν πρόκειται για μη θερμικά κατεργάσιμα κράματα και τον τρόπο διαμόρφωσης τους (φύλλα, ράβδους κ.α.). Γενικά οι μηχανικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τα κράματα αλουμινίου είναι οι εξής:[2,3,4,6]

1. Αντοχή σε θραύση. Το μέγιστο όριο αντοχής των κραμάτων αλουμινίου γενικά είναι συγκρίσιμο με αυτό του χάλυβα και ανάλογα με τη γεωμετρία της κατασκευής μπορεί ακόμη και να φτάσει τις αντοχές του χάλυβα.[2,3,4,6]
2. Ειδικό βάρος. Το αλουμίνιο έχει τρεις φορές μικρότερη πυκνότητα από το χάλυβα, περίπου $2,7 \text{ gr/cm}^3$. Έτσι το ειδικό βάρος του αλουμινίου είναι αισθητά μικρότερο από αυτό του χάλυβα, ωστόσο δεν πρέπει να θεωρείται ότι γενικά μια κατασκευή αλουμινίου που εκπληρώνει τους ίδιους σκοπούς με μια χαλύβδινη κατασκευή θα έχει βάρος τρεις φορές μικρότερο από την τελευταία. Ο λόγος στην πραγματικότητα πλησιάζει το ένα δεύτερο.[2,3,4,6]
3. Λόγος αντοχής προς βάρος. Τα κράματα του αλουμινίου έχουν πολύ υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος. Έτσι το αλουμίνιο σε πολλές κατασκευές αντικαθιστά άλλα βαρύτερα μέταλλα, χωρίς να μειώνεται η ικανότητα της κατασκευής να φέρει όμοια φορτία.[2,3,4,6]
4. Μέτρο Ελαστικότητας: Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά των κραμάτων αλουμινίου, που τα διαχωρίζουν από τον χάλυβα, είναι το χαμηλό μέτρο ελαστικότητάς τους (το $1/3$ από αυτό του χάλυβα). Αυτό σημαίνει ότι έχουν μεγαλύτερη ευκαμψία από τον χάλυβα, και ότι μπορούν να απορροφήσουν 3 φορές περισσότερη ενέργεια από αυτόν, πριν τη θραύση. Αυτή η μηχανική ιδιότητα του αλουμινίου αποτελεί και πλεονέκτημα και μειονέκτημα μαζί. Για παράδειγμα οι ναυπηγικές κατασκευές από αλουμίνιο υπερέχουν έναντι των χαλύβδινων, στην περίπτωση κρουστικών φορτίων, διότι έχουν την ιδιότητα να απορροφούν πολύ μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, άρα μειώνεται η πιθανότητα θραύσης από κρουστική φόρτιση. Επίσης, το μικρό μέτρο ελαστικότητας του

αλουμινίου συμβάλλει στην αποφυγή αρμών στη σύνδεση υπερκατασκευών με το κατάστρωμα. Από την άλλη μεριά, υπάρχουν κατασκευές στις οποίες η έκταση της παραμόρφωσης που μπορούν να δεχθούν είναι περιοριστικός παράγοντας. Κατασκευή από αλουμίνιο με την ίδια γεωμετρία και υπό τις ίδιες συνθήκες φόρτισης με μία χαλύβδινη κατασκευή μπορεί να εμφανίσει έως και 3 φορές μεγαλύτερη παραμόρφωση. Οι παραμορφώσεις αυτές είναι μερικές φορές απαγορευτικές στις ναυπηγικές κατασκευές, διότι επηρεάζουν τη στατική αντοχή του σκάφους. Έτσι λαμβάνεται ως περιοριστικός παράγοντας σε τέτοιες κατασκευές από αλουμίνιο η ελαστική παραμόρφωση. Για την ίδια ελαστική παραμόρφωση το αλουμίνιο απαιτεί τριπλάσια ροπή αδράνειας από τον χάλυβα, όπως προκύπτει από τη σχέση $I_A = I_S \cdot E_S / E_A$, όπου A:αλουμίνιο, S:χάλυβας. Σε κατασκευές από αλουμίνιο προτιμάται το διάμηκες σύστημα ενίσχυσης, καθώς επίσης και η χρήση διελασμένων μορφοδοκών που διαθέτουν μεγάλη ροπή αδράνειας. Επίσης, χρησιμοποιούνται και άλλες διατάξεις, όπως κυψελωτές κατασκευές (honeycomb construction), κ.α.[2,3,4,6]

5. Αντοχή σε χαμηλές θερμοκρασίες. Το αλουμίνιο εμφανίζει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες (δυσθραυστότητα και ολκιμότητα) σε χαμηλές θερμοκρασίες (υπό το μηδέν), σε πολλά κράματα καλύτερες από ότι σε θερμοκρασία δωματίου. Πιο συγκεκριμένα, τα κράματα των σειρών 3000, 5000, και 6000, ενδείκνυνται για χρήση σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ένα παράδειγμα είναι αυτό του κράματος 5083, το οποίο χρησιμοποιείται στις δεξαμενές των πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φορτίου στους -163°C . [3,4,6]
6. Δυσθραυστότητα. Το αλουμίνιο είναι όλκιμο ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπου άλλα μέταλλα ψαθυροποιούνται εύκολα. Είναι λιγότερο ευπαθή σε θραύση κατ'εγκοπή (notch sensitive), σε σχέση με τους περισσότερους χάλυβες. Έτσι οι νηογνώμονες δεν απαιτούν δοκιμές δυσθραυστότητας (δοκιμή Charpy) στα κράματα αλουμινίου για ναυπηγική χρήση. Η δυσθραυστότητα μειώνεται με αύξηση του ορίου διαρροής. Τα κράματα της σειράς 5000 διαθέτουν τη μεγαλύτερη δυσθραυστότητα, και ακολουθούν αυτά των σειρών 6000, 2000 και 7000. [3,4,6]
7. Θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Το αλουμίνιο και τα κράματά του είναι πολύ καλοί αγωγοί της θερμότητας. Παρόλο που έχουν χαμηλότερο σημείο τήξης από τον χάλυβα, σε περίπτωση έκθεσής τους σε φωτιά αγγίζουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες με χαμηλότερο ρυθμό απ'ότι ο χάλυβας. Όμως, πρέπει να ληφθεί

υπόψη το γεγονός ότι με αύξηση της θερμοκρασίας πέραν των 93°C, οι μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου παρουσιάζουν σημαντική μείωση, γεγονός που μπορεί να αποβεί μοιραίο για μια κατασκευή σε περίπτωση πυρκαγιάς. Το αλουμίνιο και τα κράματα του έχουν εξαιρετικά υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Για αυτό το λόγο χρησιμεύουν στη κατασκευή καλωδίων, συρμάτων, κ.α.[3,4,6]

8. Σκληρότητα. Σαν ιδιότητα του αλουμινίου η σκληρότητα δεν εξαρτάται άμεσα από την αντοχή του όπως ισχύει με τον χάλυβα, παρ' όλα αυτά επειδή είναι πολύ εύκολο να μετρηθεί με μια σειρά από μεθόδους λαμβάνεται και αυτή η ιδιότητα υπ' όψιν. Συνήθως οι μετρήσεις της σκληρότητας χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ποιότητας της θερμικής κατεργασίας. Σε κάποιες περιπτώσεις πάλι η κλίμακα σκληρότητας Brinell πολλαπλασιαζόμενη με 0,56 μας δίνει τιμές οι οποίες προκύπτουν σχεδόν ίσες με το UTS μετρούμενο σε ksi, προσδιορίζοντας με αυτή τη σχέση το υλικό και την εκτιμούμενη αντοχή του. Τέλος οι σκληρομετρήσεις χρησιμοποιούνται πολύ συχνά για την μέτρηση των επιδράσεων στην αντοχή που προκαλούνται στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη κατ τη συγκόλληση.[1,3,4]
9. Κατεργασιμότητα και συγκολλησιμότητα. Τα κράματα αλουμινίου είναι εύκολα κατεργάσιμα καθώς παράγονται με διαδικασία εξέλασης (κράματα διαμόρφωσης) και εμφανίζουν καλή συγκολλησιμότητα με χρήση των μεθόδων GTAW και GMAW, με τη δεύτερη να είναι πιο γρήγορη και αποτελεσματική, βρίσκοντας έτσι πληθώρα εφαρμογών στις μεταλλικές κατασκευές.[2,3,4,6]
10. Χαμηλό συντελεστή θερμικών διαστολών. Ποικίλει ανάλογα με το κράμα και σε κάποιες κατασκευές είναι πολύ μεγάλη η σημασία του καθιστώντας ιδανικό για αυτές υλικό κατασκευής το αλουμίνιο. Στον πίνακα 5,1 συγκρίνεται ο συντελεστής θερμικών διαστολών του αλουμινίου με κάποιων άλλων ευρέως χρησιμοποιούμενων μετάλλων.[1,3,4]

Πίνακας 5,1: Συντελεστής θερμικών διαστολών[1]

Material	Coefficient of Thermal Expansion	
	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Copper	18	32
Magnesium	15	27
Aluminum	13	23
304 Stainless steel	9.6	17
Carbon Steel	6.5	12
Concrete	6.0	11

5.1.β. Μηχανικές καταπονήσεις δοκιμίων

Η γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών είναι θεμελιώδης όσον αφορά στη σωστή επιλογή και χρήση τους σε μεταλλικές κατασκευές. Ειδικότερα, προκειμένου να μπορεί να γίνει σωστή χρήση του υλικού αυτού σε μία κατασκευή, είναι απαραίτητη η γνώση τόσο των φυσικών όσο και των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, όπως το μέγιστο φορτίο που μπορεί να δεχθεί ένα συγκεκριμένο υλικό χωρίς να αστοχήσει. Στη μηχανική, δεν είναι επικίνδυνα μόνο τα οριακά φορτία που μπορούν να επιφέρουν θραύση στο υλικό, αλλά έχουν μεγάλη σημασία και τα φορτία στα οποία το υλικό αρχίζει και παρουσιάζει έντονες παραμορφώσεις, οι οποίες σε μεγάλο βαθμό προκαλούν μη αναστρέψιμες αλλαγές στη γεωμετρία του.[10]

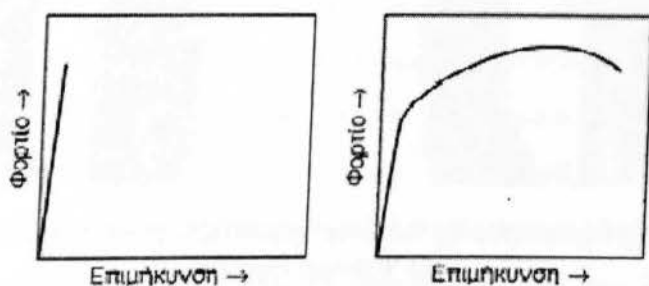
Δοκιμή Εφελκυσμού-Παραμορφώσεις

Η παρούσα πτυχιακή επικεντρώνεται στις ομοεπίπεδες φορτίσεις και ειδικότερα σε αυτή του μονοαξονικού εφελκυσμού. Η δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό της αντοχής, της ολκιμότητας, της δυσθραυστότητας, και άλλων μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού υπό εξέταση. Στο πειραματικό μέρος, η πειραματική δοκιμή παρέχει πολύ χρήσιμα στοιχεία για τη συμπεριφορά του δοκιμίου υπό εφελκυσμό, όπως το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, το όριο διαρροής και η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό και το μέτρο παραμόρφωσης του υλικού.

Συγκεκριμένα, η μηχανική δοκιμή από την οποία μπορούμε να λάβουμε μια ικανοποιητική εικόνα της συμπεριφοράς ενός υλικού, με τη μόνη εξαίρεση της εξαρτημένης από το χρόνο συμπεριφοράς του, είναι το πείραμα του μονοαξονικού εφελκυσμού, από τον οποίο προσδιορίζεται το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεών του. Οι παρακάτω παράμετροι χρησιμοποιούνται για να χαρακτηριστεί η συμπεριφορά των διαφόρων μεταλλικών υλικών όσον αφορά στην αντοχή τους:

1. Η ακαμψία, δηλαδή η επιμήκυνση (σύντμηση) ανά μονάδα φορτίου, που υπολογίζεται με το μέτρο ελαστικότητας.
2. Η τάση διαρροής, σ_Y , η οποία είναι το όριο μετάβασης από την ελαστική στην πλαστική περιοχή.
3. Η μέγιστη τάση εφελκυσμού, σ_{UTS} , η οποία και ορίζει το μέγιστο φορτίο που μπορεί να φέρει η κατασκευή.

Η καταγραφή της καμπύλης $F = f(\Delta l)$ ή $\sigma = f(\epsilon)$ είναι χαρακτηριστική του κάθε μεταλλικού υλικού. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται οι καμπύλες εφελκυσμού που αντιστοιχούν στα δύο κύρια είδη δυνατής συμπεριφοράς των υλικών σε εφελκυσμό.[10,11]



Σχήμα 5.1: Χαρακτηριστική συμπεριφορά σε εφελκυσμό. Συμπεριφορά ψαθυρού (αριστερά) και όλκιμου (δεξιά) υλικού[9]

Συμπεριφορά ψαθυρού υλικού.

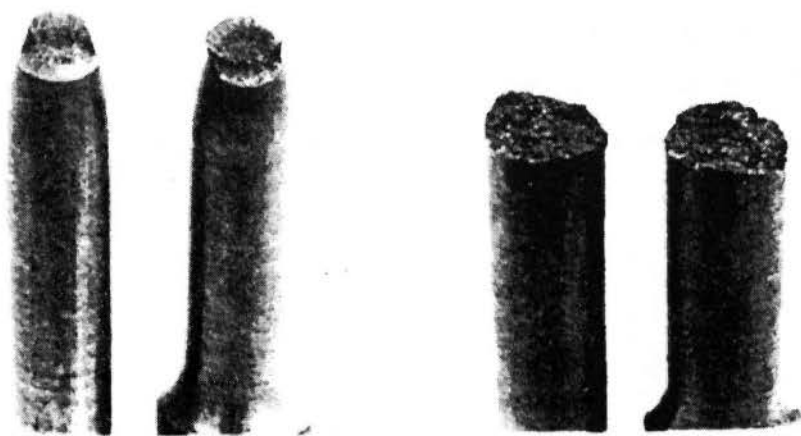
Στην περίπτωση του ψαθυρού υλικού δεν υπάρχει πλαστική περιοχή, διότι η θραύση επέρχεται πριν την έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης.[9]

Συμπεριφορά όλκιμου υλικού.

Η μόνιμη παραμόρφωση, συνήθως, συνοδεύεται από σκλήρυνση του υλικού. Η συμπεριφορά αυτή χαρακτηρίζει την πλειονότητα των μετάλλων και κραμάτων, καθώς και των κραμάτων αλουμινίου που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.[9]

Κατηγορίες εφελκυστικής θραύσης χαμηλής θερμοκρασίας

Ανάλογα με τον βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης που προηγείται της θραύσης, η εφελκυστική θραύση χαμηλής θερμοκρασίας χωρίζεται σε δύο βασικά είδη: την **Ψαθυρή Θραύση** και την **Όλκιμη Θραύση**. Η αναγνώριση των βασικών αυτών κατηγοριών θραύσης γίνεται από τη μακροσκοπική παρατήρηση των επιφανειών θραύσης και τη μεταβολή της διατομής τους. Στην περίπτωση της *Όλκιμης Θραύσης*, η ελάττωση της διατομής στην περιοχή θραύσεως είναι σημαντική λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης που προηγείται, ενώ αντιθέτως, στην *Ψαθυρή Θραύση*, η ελάττωση της διατομής είναι από μηδενική έως αμελητέα [9] (Σχήμα 5.2).[9]



Σχήμα 5.2: Γενικές κατηγορίες θραύσης χαμηλής θερμοκρασίας: α) Όλκιμη Θραύση. β) Ψαθυρή Θραύση.[9]

Τέλος, στις περιπτώσεις όπου η θραύση είναι ψαθυρή, δεν υπάρχει μακροσκοπική πλαστική παραμόρφωση που προηγείται αυτής.

Όλκιμη θραύση

Η όλκιμη θραύση είναι η κατηγορία θραύσης όπου προηγείται σημαντική πλαστική παραμόρφωση πλησίον της επιφάνειας θραύσης. Η παραμόρφωση αυτή εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής εφελκυσμού, σε τάσεις μεγαλύτερες από τη μέγιστη τάση, όπου εμφανίζεται η δημιουργία λαιμού.

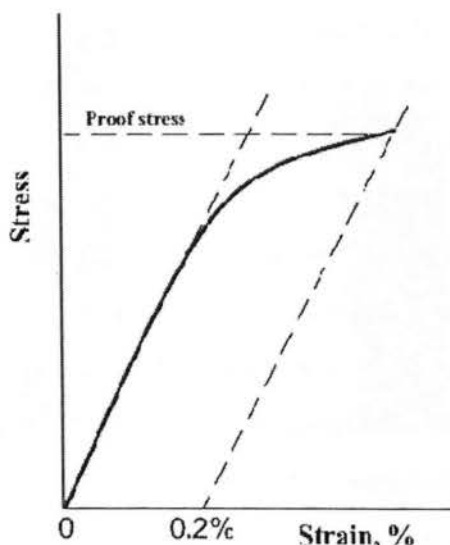
Η ρωγμάτωση και θραύση σε αυτήν την κατηγορία ακολουθεί τον παρακάτω μηχανισμό, που είναι γνωστός ως *συνένωση* ή *συμφυΐα μικροκενών*. Η ύπαρξη δευτερογενών φάσεων ή εγκλεισμάτων μέσα σε ένα υλικό επηρεάζει αρνητικά τη συνολική όλκιμότητα, εφόσον έχουν μικρότερη όλκιμότητα από τη μήτρα. Η παρουσία των συστατικών αυτών λειτουργεί καταλυτικά στην έναρξη μικρορωγμών ή μικροκενών γύρω από αυτά. Κατά την επιβολή μιας εξωτερικής εφελκυστικής τάσης, σ_{Te}, η ασυνέχεια της παραμόρφωσης στη διεπιφάνεια εγκλείσματος/μήτρας οδηγεί στη δημιουργία νέων διαταραχών, οι οποίες προκαλούν μία επιπρόσθετη τάση, σ_{gd}, η οποία τείνει να αποκολλήσει το εγκλείσμα από τη μήτρα ή να το οδηγήσει σε θραύση.

Πιο αναλυτικά, η καμπύλη μεταβολής φόρτισης σε σχέση με την επιβαλλόμενη αξονική μετάθεση των άκρων ενός δοκιμίου που υφίσταται μονοαξονικό εφελκυσμό έχει τη γενική μορφή, Σχήμα 5.4.

Τα στάδια από τα οποία αποτελείται η απόκριση του υλικού στον μονοαξονικό εφελκυσμό από μηδενικό αρχικό φορτίο έως την τελική θραύση του, χαρακτηρίζονται από ορισμένα βασικά μεγέθη, των οποίων οι ορισμοί δίνονται παρακάτω.[10,11]

σ_γ : Όριο διαρροής. Είναι η τάση πάνω από την οποία εμφανίζεται η πλαστική παραμόρφωση. Η περιοχή διαρροής (yielding) χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων στο υλικό. Από την περιοχή αυτή και μετά το υλικό αρχίζει να «ρέει». Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο όριο ελαστικότητας E το υλικό έχει εξαντλήσει τις δυνατότητες του για ελαστικές (αντιστρεπτές) παραμορφώσεις και μικρή επιπλέον αύξηση των τάσεων οδηγεί τους στοιχειώδεις δομικούς λίθους του υλικού σε θέσεις ισορροπίας από τις οποίες δεν μπορούν να επιστρέψουν στην αρχική τους θέση, έστω και αν αφαιρεθούν οι εξωτερικές τάσεις. Για τιμές μικρότερες του ορίου διαρροής, οι παραμορφώσεις του υλικού είναι ελαστικές. Για τιμές μεγαλύτερες του ορίου διαρροής, οι συνολικές παραμορφώσεις του υλικού είναι το άθροισμα των ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων. Μετά την περιοχή διαρροής η παραμόρφωση αυξάνει πολύ πιο γρήγορα από την τάση και η καμπύλη σ - ϵ τείνει να γίνει σχεδόν οριζόντια. Αυτό παρατηρείται μέχρι το σημείο B του διαγράμματος του Σχήματος 5.4, μετά το οποίο η τάση αρχίζει να ελαττώνεται.

Όσον αφορά στο αλουμίνιο, η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή δεν πραγματοποιείται στιγμιαία, όπως στα κράματα σιδήρου, αλλά προοδευτικά, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατο να μετρηθεί με ακρίβεια το όριο διαρροής του. Έτσι έχει οριστεί συμβατικά, το όριο διαρροής να αντιστοιχεί στην καταπόνηση που επιφέρει μόνιμη παραμόρφωση 0.2%. Η τιμή $\sigma_{0.2\%}$, λαμβάνεται ως τομή της ευθείας παράλληλης προς την ευθεία της ελαστικής περιοχής ή της εφαπτόμενης στην αρχή της καμπύλης σ - ϵ για παραμόρφωση 0.2% και της καμπύλης εφελκυσμού: $\sigma=f(\epsilon)$, Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Υπολογισμός συμβατικού ορίου διαρροής (proof stress)[10]

σ_{UTS} ή σ_{TS} : Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό. Είναι η μέγιστη τάση στο διάγραμμα σ - ϵ , κατά τη δοκιμή εφελκυσμού, πάνω από την οποία εμφανίζεται η δημιουργία λαιμού. Το σημείο B αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να αντέξει το δοκίμιο, δηλαδή στη μέγιστη τάση, σ_{TS} , του υλικού, η οποία λέγεται και αντοχή του υλικού. [10,11,12,13,14]

ϵ_f : Παραμόρφωση θραύσης. Είναι η παραμόρφωση που παρουσιάζεται μετά τη θραύση του υλικού. Η περιοχή μετά το σημείο B, όπου η συμβατική τάση ελαττώνεται και η συμβατική παραμόρφωση αυξάνει, τερματίζεται στο σημείο Γ, όπου το δοκίμιο αποχωρίζεται σε δύο κομμάτια, με αποτέλεσμα τη θραύση του υλικού. Στην περιοχή αυτή έχουμε εμφανή σμίκρυνση της διατομής του δοκιμίου σε μια περιοχή του, δηλαδή δημιουργία λαιμού. Ακριβώς η σμίκρυνση αυτή της διατομής οδηγεί στη μείωση της συμβατικής τάσεως μετά το σημείο B, πράγμα που δεν ισχύει για την πραγματική τιμή της. Η συμβατική τάση σ_f που αντιστοιχεί στο σημείο Γ λέγεται τάση θραύσης του υλικού και η αντίστοιχη παραμόρφωση, ϵ_f , παραμόρφωση θραύσης, ενώ η επί τοις εκατό έκφρασή της ονομάζεται ολκιμότητα του υλικού και είναι μέτρο της δυνατότητας παραμόρφωσης του υλικού στην πλαστική περιοχή. [10,11,12,13,14]

E : Μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο Young. Η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης αποτελεί μέτρο της ακαμψίας του υλικού, είναι δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας του υλικού (modulus of elasticity ή Young's modulus) ή αλλιώς συντελεστής αναλογίας, E, μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων. Προφανώς, το μέτρο ελαστικότητας ορίζεται πειραματικά ως το πηλίκο σ/ϵ που αντιστοιχεί σε οποιοδήποτε σημείο του ευθυγράμμου τμήματος. [10,11,12,13,14]

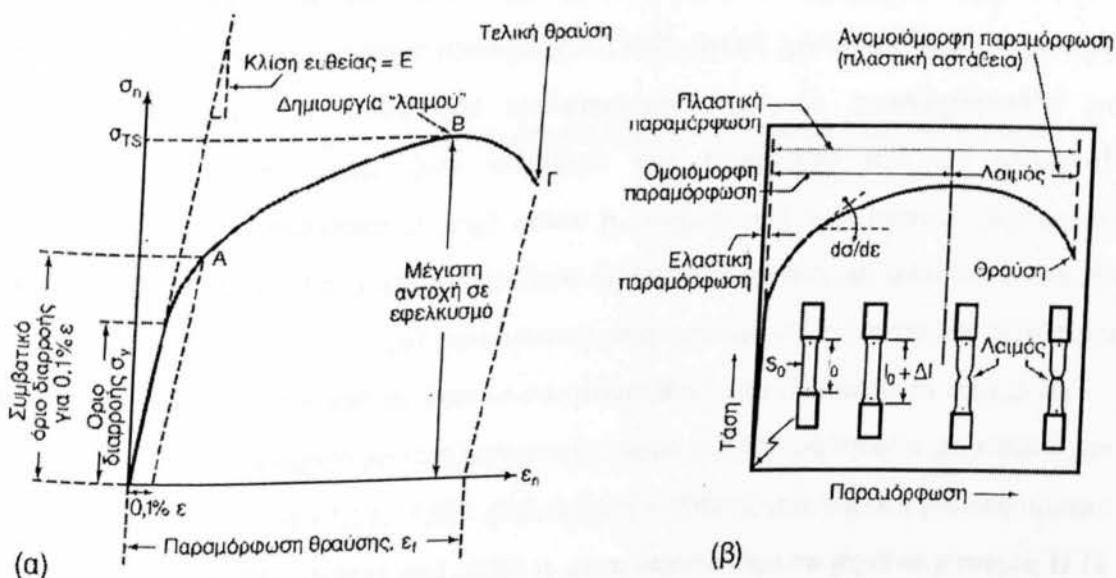
Γενικά, η μηχανική δοκιμή η οποία μπορεί να δώσει μια πλήρη εικόνα των μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού είναι κυρίως ο **μονοαξονικός εφελκυσμός**. Από τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής μπορούμε να εξάγουμε το διάγραμμα **τάσεων- παραμορφώσεων (σ-ε)** του εξεταζόμενου υλικού. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι που υπολογίζονται και που δίνουν μία εικόνα για την αντοχή του υλικού είναι οι εξής:[10,11,12,13,14]

α) Το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο Young (E) του υλικού, το οποίο αποτελεί το συντελεστή αναλογίας ανάμεσα στις τάσεις και τις παραμορφώσεις, δηλαδή, ισχύει ότι: $\sigma = E \cdot \epsilon$. Το μέτρο ελαστικότητας αποτελεί ένα μέτρο της ακαμψίας του εξεταζόμενου υλικού.

β) Το όριο διαρροής (σ_y) του υλικού, το οποίο είναι η τάση πάνω από την οποία εμφανίζεται πλαστική παραμόρφωση στο υλικό.

γ) Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (σ_{UTS} ή σ_{TS}) του υλικού, η οποία είναι η μέγιστη τάση στο διάγραμμα σ-ε.

Τα παραπάνω στοιχεία, μαζί επίσης και με άλλα χαρακτηριστικά σημεία ενός διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 5.4: (α) Διάγραμμα σ-ε δοκιμίου κατά τη δοκιμή εφελκυσμού. (β) Σχηματική παράσταση θραύσης δοκιμίου κατά τη δοκιμή εφελκυσμού.[9]

Παρατηρούμε ότι το **μέτρο ελαστικότητας E** ορίζεται ως η κλίση της ευθείας που ριζοθετείται από την αρχή των αξόνων του διαγράμματος σ-ε και από το σημείο του διαγράμματος που αντιστοιχεί στο όριο διαρροής. Ουσιαστικά, το μέτρο ελαστικότητας ορίζεται πειραματικά από το πηλίκο σ/ϵ που αντιστοιχεί σε οποιοδήποτε σημείο αυτής της ευθείας. Στο παραπάνω διάγραμμα, παρατηρούμε

επίσης τα εξής σημεία. [10,11,12,13,14]

1) Το όριο διαρροής σ_y , το οποίο έχει οριστεί προηγουμένως. Για τιμές μικρότερες του ορίου διαρροής, οι παραμορφώσεις του υλικού είναι ελαστικές. Για τιμές μεγαλύτερες, οι συνολικές παραμορφώσεις του υλικού προκύπτουν από το άθροισμα των ελαστικών και πλαστικών του παραμορφώσεων.

Στην περίπτωση που είναι αδύνατο να μετρηθεί με ακρίβεια το σ_y λόγω του ότι η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή πραγματοποιείται προοδευτικά, έχει οριστεί, συμβατικά, το όριο διαρροής να αντιστοιχεί στην καταπόνηση που επιφέρει μόνιμη παραμόρφωση 0,2%. Η τιμή $\sigma_{0,2\%}$ λαμβάνεται σαν τομή μίας ευθείας παράλληλης προς την ευθεία της ελαστικής περιοχής ή της εφαπτόμενης στην αρχή της καμπύλης σ - ϵ για παραμόρφωση 0,2% και της καμπύλης εφελκυσμού $\sigma=f(\epsilon)$.

Οι τιμές των παραμορφώσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό του συμβατικού ορίου διαρροής, βάσει των διεθνών προδιαγραφών, κυμαίνονται από 0,05% έως 0,5% και ανάλογα υποδηλώνονται ως δείκτες στο σύμβολο της τάσης.

Από το όριο διαρροής και έπειτα, η περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση απαιτεί την αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης. Στη δεύτερη αυτή περιοχή συντελείται το φαινόμενο της **ενδοτράχυνσης**, το οποίο περιγράφεται από καμπύλη παραβολικής μορφής. Πρόκειται για ένα φαινόμενο που οφείλεται στην παρεμποδιζόμενη, από άλλες διαταραχές, κίνηση των διαταραχών, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη σκλήρυνση του υλικού. Το στάδιο της ενδοτράχυνσης, το οποίο αντιστοιχεί στο τμήμα AB της παραπάνω καμπύλης, καλείται στάδιο ομοιόμορφης παραμόρφωσης.

Τέλος, από το σημείο B έως τη θραύση του υλικού, παρατηρείται το τελευταίο στάδιο της πλαστικής παραμόρφωσης, η οποία χαρακτηρίζεται ως ανομοιόμορφη παραμόρφωση ή πλαστική αστάθεια (τμήμα ΒΓ). [10,11,12,13,14]

2) Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό σ_{UTS} , η οποία έχει οριστεί παραπάνω.

Παρατηρούμε από το παραπάνω σχήμα ότι πάνω από την τάση αυτή, στο δοκίμιο σχηματίζεται λαιμός, μειώνεται δηλαδή αισθητά η διατομή του. [10,11,12,13,14]

3) Η παραμόρφωση θραύσης ϵ_f , η οποία ορίζεται ως η παραμόρφωση που παρουσιάζεται μετά τη θραύση του υλικού. [10,11,12,13,14]

Τα ονομαστικά μεγέθη τάσης και παραμόρφωσης υπολογίζονται ως προς τις αρχικές διαστάσεις (αρχική διατομή A_0 και αρχικό μήκος l_0) του στερεού σώματος, δηλαδή: [10,11,12,13,14]

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0} \text{ και } \varepsilon_n = \frac{\Delta l}{l_0}$$

όπου F η επιβαλλόμενη δύναμη και Δl η επιμήκυνση και ο δείκτης n υποδηλώνει ότι τα μεγέθη είναι ονομαστικά.

Η μορφή του συμβατικού διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης δεν αποδίδει σωστά το φαινόμενο της ενδοτράχυνσης, η οποία συμβαίνει στην πλαστική περιοχή και συνοδεύεται από μείωση της διατομής του εφελκυόμενου δοκιμίου. Άρα, η στιγμιαία τάση σ είναι διαφορετική (μεγαλύτερη) σε σύγκριση με την ονομαστική της τιμή. Η στιγμιαία αυτή τάση ονομάζεται **πραγματική τάση** και ορίζεται ως ακολούθως:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

όπου A η εκάστοτε (στιγμιαία) διατομή του δοκιμίου. Η σχέση ανάμεσα στην ονομαστική και την πραγματική τάση είναι η εξής:

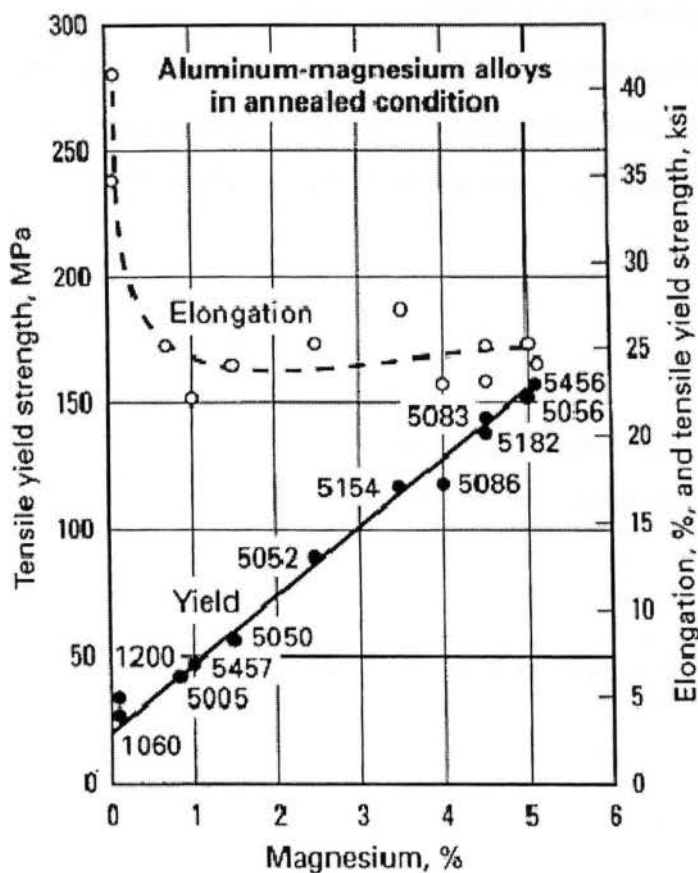
$$\sigma = \sigma_n \times (1 + \varepsilon_n)$$

Επίσης, η σχέση που συνδέει την ονομαστική και την πραγματική παραμόρφωση είναι η εξής:

$$\varepsilon = \ln \times (1 + \varepsilon_n)$$

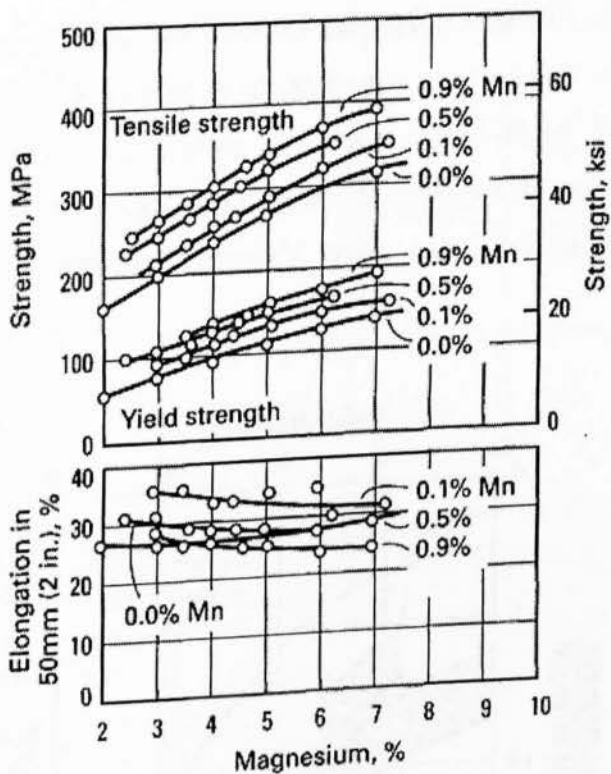
5.1.γ.Μηχανικές ιδιότητες σειράς κραμάτων 5xxx

Τα κράματα της σειράς 5xxx έχουν σαν κύριο κραματικό στοιχείο το μαγνήσιο με την αντοχή να αυξάνει καθώς αυξάνει και η περιεκτικότητα σε Mg, βλέπε σχ.2. Υφίστανται σκλήρυνση με ψυχρηλασία (ενδοτράχυνση), βλέπε σχ. 3, και έχουν σχετικά υψηλή αντοχή, καλή δυσκαμψία και αντοχή σε εφελκυσμό που κυμαίνεται από 170 έως 380 MPa περίπου.

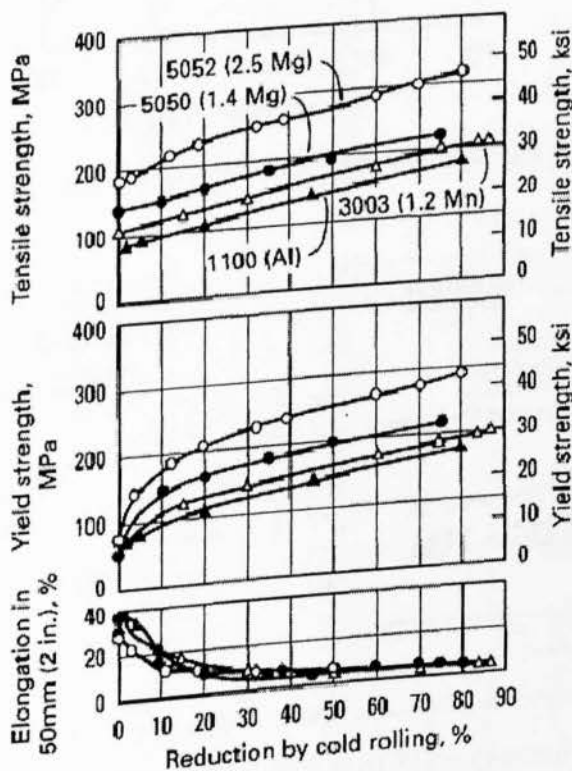


Σχήμα 5.5: Συσχετισμός μεταξύ ορίου αντοχής σε εφελκυσμό, επιμήκυνσης και περιεκτικότητας σε μαγνήσιο για κάποια εμπορικά κράματα αλουμινίου της σειράς

5xxx[8]



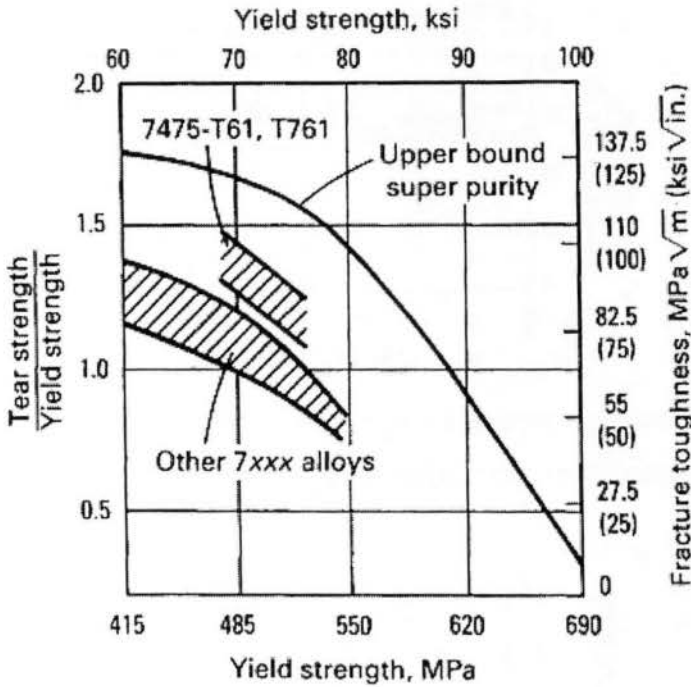
Σχήμα 5.6: Ιδιότητες εφελκυσμού σε κράματα Al-Mg-Mn έπειτα από ανόπτηση (Ο κατεργασία) και υπό μορφή φύλλων λαμαρίνας πάχους 13 mm[8]



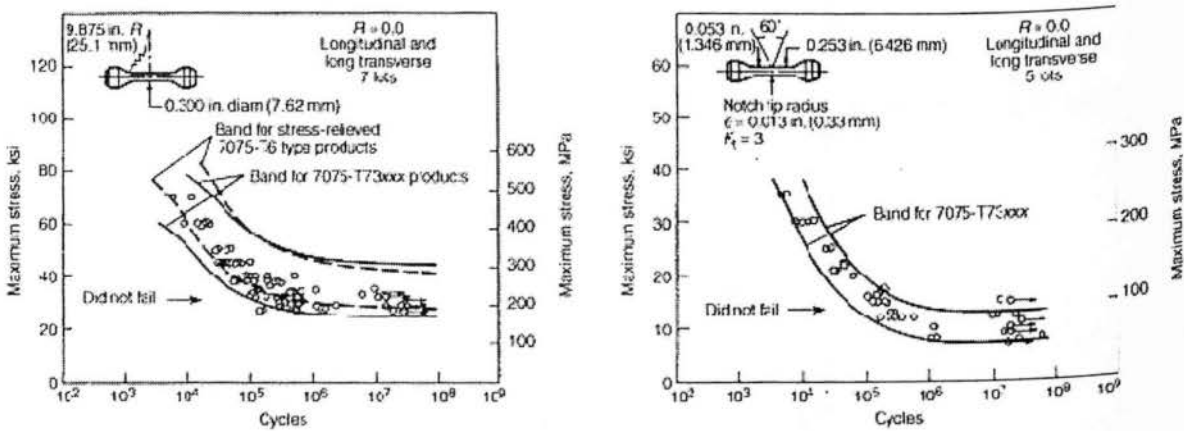
Σχήμα 5.7: Καμπύλες ενδοτράχυνσης για τα κράματα αλουμινίου 1100, αλουμινίου μαγγανίου Al-Mn (3003) και αλουμινίου μαγνησίου Al-Mg (5050 και 5052)[8]

5.1.δ. Μηχανικές ιδιότητες σειράς κραμάτων 7xxx

Τα κράματα της σειράς 7xxx είναι θερμικά κατεργάσιμα και μεταξύ των διαφόρων κραμάτων οι τύποι Al-Zn-Mg-Cu έχουν τις μεγαλύτερες αντοχές μεταξύ όλων των κραμάτων αλουμινίου. Παρουσιάζουν εξαιρετική ακαμψία και πολύ μεγάλη αντοχή σε καταπονήσεις όπως ο εφελκυσμός όπου η αντοχή κυμαίνεται από 220 έως 605 MPa περίπου.[5]



Σχήμα 5.8: Λόγος tear strength και ορίου αντοχής για λαμαρίνα κράματος 7475[8]



Σχήμα 5.9: Smooth and notched axial stress fatigue data for 7050-T7451 plate, 25 to 152 mm thick, shown in relation to bands established for 7075 wrought products in T6 and T73xx temps[5]

Πίνακας 5,2: Τυπικές μηχανικές ιδιότητες διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου
[5]

Κράμα και κατεργασία	Μέγιστη Συμβατική Τάση σε Εφελκυσμό (UTS)	Όριο Διαρροής σε Εφελκυσμό	Επιμήκυνση σε 50mm,%		Σκληρότητα	Μέγιστη Αντοχή σε Διάτμηση (USS)	Όριο συνεχούς κόπωσης (b)	Μέτρο Ελαστικότητας
	MPa	MPa	1,6mm thick specimen	1,3mm diam specimen	HB(a)	MPa	MPa	GPa
5005-O	125	40	25	-	28	75	-	69
5005-H12	140	130	10	-	-	95	-	69
5005-H14	160	150	6	-	-	95	-	69
5005-H16	180	170	5	-	-	105	-	69
5005-H18	200	195	4	-	-	110	-	69
5005-H32	140	115	11	-	36	95	-	69
5005-H34	160	140	8	-	41	95	-	69
5005-H36	180	165	6	-	46	105	-	69
5005-H38	200	185	5	-	51	110	-	69
5050-O	145	55	24	-	36	105	85	69
5050-H32	170	145	9	-	46	115	90	69
5050-H34	195	165	8	-	53	125	90	69
5050-H36	205	180	7	-	58	130	95	69
5050-H38	220	200	6	-	63	140	95	69
5052-O	195	90	25	30	47	125	110	70
5052-H32	230	195	12	18	60	140	115	70
5052-H34	260	215	10	14	68	154	125	70
5052-H36	275	240	8	10	73	160	130	70
5052-H38	290	255	7	8	77	165	140	70
5056-O	290	150	-	35	65	180	140	71

5056-H18	435	405	-	10	105	235	150	71
5056-H38	415	345	-	15	100	220	150	71
5083-O	290	145	-	22	-	170	-	71
5083- H321,H116	315	230	-	16	-	-	160	71
5086-O	260	115	22	-	-	160	-	71
5086- H32,H116	290	205	12	-	-	-	-	71
5086-H34	325	255	10	-	-	185	-	71
5086-H112	270	130	14	-	-	-	-	71
5154-O	240	115	27	-	58	150	115	70
5154-H32	270	205	15	-	67	150	125	70
5154-H34	290	230	13	-	73	165	130	70
5154-H36	310	250	12	-	78	180	140	70
5154-H38	330	270	10	-	80	195	145	70
5154-H112	240	115	25	-	63	-	115	70
5252-H25	235	170	11	-	68	145	-	69
5252- H38,H28	285	240	5	-	75	160	-	69
5254-O	240	115	27	-	58	150	115	70
5254-H32	270	205	15	-	67	150	125	70
5254-H34	290	230	13	-	73	165	130	70
5254-H36	310	250	12	-	78	180	140	70
5254-H38	330	270	10	-	80	195	145	70
5254-H112	240	115	25	-	63	-	115	70
5454-O	250	115	22	-	62	160	-	70
5454-H32	275	205	10	-	73	165	-	70
5454-H34	305	240	10	-	81	180	-	70
5454-H111	260	180	14	-	70	160	-	70

5454-H112	250	125	18	-	62	160	-	70
5456-O	310	160	-	24	-	-	-	71
5456-H112	310	165	-	22	-	-	-	71
5456- H321,H116	350	255	-	16	90	205	-	71
5457-O	130	50	22	-	32	85	-	69
5457-H25	180	160	12	-	48	110	-	69
5457- H38,H28	205	185	6	-	55	125	-	69
5652-O	195	90	25	30	47	125	110	70
5652-H32	230	195	12	18	60	140	115	70
5652-H34	260	215	10	14	68	145	125	70
5652-H36	275	240	8	10	73	160	130	70
5652-H38	290	255	7	8	77	165	140	70
5657-H25	160	140	12	-	40	95	-	69
5657- H38,H28	195	165	7	-	50	105	-	69
7049-T73	515	450	-	12	135	305	-	72
7049-T7352	515	435	-	11	135	295	-	72
7050- T73510,T735 11	495	435	-	12	-	-	-	72
7050- T7451(h)	525	470	-	11	-	305	-	72
7050-T7651	550	490	-	11	-	325	-	72
7075-O	230	105	17	16	60	150	-	72
7075-T6,T651	570	505	11	11	150	330	160	72
Alclad 7075- O	220	95	17	-	-	150	-	72
Alclad 7075- T6,T651	525	460	11	-	-	315	-	72
7175-T74	525	455	-	11	135	290	160	72

7178-O	230	105	15	16	-	-	-	-	72
7178-T6,T651	605	540	10	11	-	-	-	-	72
7178-T76,T7651	570	505	-	11	-	-	-	-	71
Alclad 7178-O	220	95	16	-	-	-	-	-	72
Alclad 7178-T6,T651	560	490	10	-	-	-	-	-	72
7475-T61	565	490	11	-	-	-	-	-	70
7475-T651	585	510	-	13	-	-	-	-	72
7475-T7351	495	420	-	13	-	-	-	-	72
7475-T761	515	450	12	-	-	-	-	-	70
7475-T7651	530	460	-	12	-	-	-	-	72
Alclad 7475-T61	515	455	11	-	-	-	-	-	70
Alclad 7475-T761	490	420	12	-	-	-	-	-	70

Υπόμνημα: (α) 500 kg φορτίο και 10 mm σφαιρικός διεισδυτής, (β) βασισμένο σε 500.000.000 κύκλους πλήρους αντεστραμμένης τάσης χρησιμοποιώντας τη μηχανή και τα δείγματα τύπου R.R. Moore

Πίνακας 5,3: Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή σε εφελκυσμό των διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου[5]

Κράμα και κατεργασία	Μέγιστη συμβατική τάση σε εφελκυσμό (UTS) (α), MPa, στους:									
	-195 °C	-80 °C	-30 °C	24 °C	100 °C	150 °C	205 °C	260 °C	315 °C	370 °C
5050-O	255	152	145	145	145	130	97	62	40	27
5050-H34	303	207	193	193	193	172	97	62	40	27
5050-H38	317	235	220	220	215	185	97	62	40	27
5052-O	303	200	193	193	193	160	117	83	52	35
5052-H34	380	275	262	262	262	207	165	83	52	35
5052-H38	415	303	290	290	275	235	172	83	52	35

5083-O	407	295	290	290	275	215	152	117	75	40
5086-O	380	270	262	262	262	200	152	117	75	40
5154-O	360	248	240	240	240	200	152	117	75	40
5254-O	360	248	240	240	240	200	152	117	75	40
5454-O	372	255	248	248	248	200	152	117	75	40
5454-H32	407	290	283	275	270	220	172	117	75	40
5454-H34	435	317	303	303	295	235	180	117	75	40
5456-O	427	317	310	310	290	215	152	117	75	40
5652-O	303	200	193	193	193	166	117	83	52	35
5652-H34	380	275	262	262	262	207	165	83	52	35
5652-H38	415	303	290	290	275	235	172	83	52	35
7075-T6,T651	703	620	593	572	483	215	110	75	55	40
7075-T73,T7351	635	545	525	506	435	215	110	75	55	40
7178-T6,T651	730	648	627	607	503	215	103	75	59	45
7178-T76,T7651	730	627	607	572	475	215	103	75	59	45

Υπόμνημα: (α) τα δεδομένα βασίζονται σε περιορισμένη ποσότητα δειγμάτων από δοκιμές και αντιπροσωπεύουν τη χαμηλότερη αντοχή που προέκυψε από έκθεση σε θερμοκρασίες δοκιμής χωρίς την επιβολή κάποιου φορτίου και με διάρκεια 10000 ωρών, εφαρμοζόμενη τάση στα 34 MPa/λεπτό έως το όριο αντοχής και μετά με ρυθμό καταπόνησης σε εφελκυσμό (strain rate) 0,05 mm/mm το λεπτό έως την αστοχία του δοκιμίου. Κάτω υπό κάποιες συνθήκες θερμοκρασίας και χρόνου, η εφαρμογή της θερμότητας μπορεί να επιδράσει αντίθετα σε άλλες ιδιότητες κάποιων κραμάτων.

Πίνακας 5,4: Επίδραση της θερμοκρασίας στο όριο αντοχής των διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου[5]

Κράμα, κατεργασία και 0,2% υπέρβαση του ορίου αντοχής (offset yield strength) (α), MPa, στους:										
	-195 °C	-80 °C	-30 °C	24 °C	100 °C	150 °C	205 °C	260 °C	315 °C	370 °C
5050-O	70	59	55	55	55	55	52	40	29	18
5050-H34	207	172	165	165	165	152	52	40	29	18
5050-H38	248	207	200	200	200	172	52	40	29	18
5052-O	110	90	90	90	90	90	75	52	38	21
5052-H34	248	220	215	215	215	185	103	52	38	21
5052-H38	303	262	255	255	248	193	103	52	38	21
5083-O	165	145	145	145	145	130	117	75	52	29
5086-O	130	117	117	117	117	110	103	75	52	29
5154-O	130	117	117	117	117	110	103	75	52	29
5254-O	130	117	117	117	117	110	103	75	52	29
5454-O	130	117	117	117	117	110	103	75	52	29
5454-H32	248	215	207	207	200	180	130	75	52	29
5454-H34	283	248	240	240	235	193	130	75	52	29
5456-O	180	160	160	160	152	138	117	75	52	29
5652-O	110	90	90	90	90	90	75	52	38	21
5652-H34	248	220	215	215	215	185	103	52	38	21
5652-H38	303	262	255	255	248	193	103	52	38	21
7075-T6,T651	635	545	517	503	448	185	90	62	45	32
7075-T73,T7351	495	462	448	435	400	185	90	62	45	32
7178-T6,T651	648	580	558	538	470	185	83	62	48	35
7178-T76,T7651	615	538	525	503	440	185	83	62	48	38

Υπόμνημα: (α) τα δεδομένα βασίζονται σε περιορισμένη ποσότητα δειγμάτων από δοκιμές και αντιπροσωπεύουν τη χαμηλότερη αντοχή που προέκυψε από έκθεση σε

θερμοκρασίες δοκιμής χωρίς την επιβολή κάποιου φορτίου και με διάρκεια 10000 ωρών, εφαρμοζόμενη τάση στα 34 MPa/λεπτό έως το όριο αντοχής και μετά με ρυθμό καταπόνησης σε εφελκυσμό (strain rate) 0,05 mm/mm το λεπτό έως την αστοχία του δοκιμίου. Κάτω υπό κάποιες συνθήκες θερμοκρασίας και χρόνου, η εφαρμογή της θερμότητας μπορεί να επιδράσει αντίθετα σε άλλες ιδιότητες κάποιων κραμάτων.

Πίνακας 5,5: Επίδραση της θερμοκρασίας στην επιμήκυνση των διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου[5]

Κράμα, κατεργασία and Επιμήκυνση(a) σε 50 mm, %, στους:										
	-195 °C	-80 °C	-30 °C	24 °C	100 °C	150 °C	205 °C	260 °C	315 °C	370 °C
5052-O	46	35	32	30	36	50	60	80	110	130
5052-H34	28	21	18	16	18	27	45	80	110	130
5052-H38	25	18	15	14	16	24	45	80	110	130
5083-O	36	30	27	25	36	50	60	80	110	130
5086-O	46	35	32	30	36	50	60	80	110	130
5154-O	46	35	32	30	36	50	60	80	110	130
5254-O	46	35	32	30	36	50	60	80	110	130
5454-O	39	30	27	25	31	50	60	80	110	130
5454-H32	32	23	20	18	20	37	45	80	110	130
5454-H34	30	21	18	16	18	32	45	80	110	130
5456-O	32	25	22	20	31	50	60	80	110	130
5652-O	46	35	32	30	30	50	60	80	110	130
5652-H34	28	21	18	16	18	27	45	80	110	130
5652-H38	25	18	15	14	16	24	45	80	110	130
7075-T6,T651	9	11	11	11	14	30	55	65	70	70
7075-T73,T7351	14	14	13	13	15	30	55	65	70	70
7178-T6,T651	5	8	9	11	14	40	70	76	80	80
7178-T76,T7651	10	10	10	11	17	40	70	76	80	80

Υπόμνημα: (α) τα δεδομένα βασίζονται σε περιορισμένη ποσότητα δειγμάτων από δοκιμές και αντιπροσωπεύουν τη χαμηλότερη αντοχή που προέκυψε από έκθεση σε θερμοκρασίες δοκιμής χωρίς την επιβολή κάποιου φορτίου και με διάρκεια 10000 ωρών, εφαρμοζόμενη τάση στα 34 MPa/λεπτό έως το όριο αντοχής και μετά με ρυθμό καταπόνησης σε εφέλκυσμό (strain rate) 0,05 mm/mm το λεπτό έως την αστοχία του δοκιμίου. Κάτω υπό κάποιες συνθήκες θερμοκρασίας και χρόνου, η εφαρμογή της θερμότητας μπορεί να επιδράσει αντίθετα σε άλλες ιδιότητες κάποιων κραμάτων.

Πίνακας 5,6: Δεδομένα εμφάνισης ερπυσμού ανά 1000 ώρες λειτουργίας δύο κοινών διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου[2]

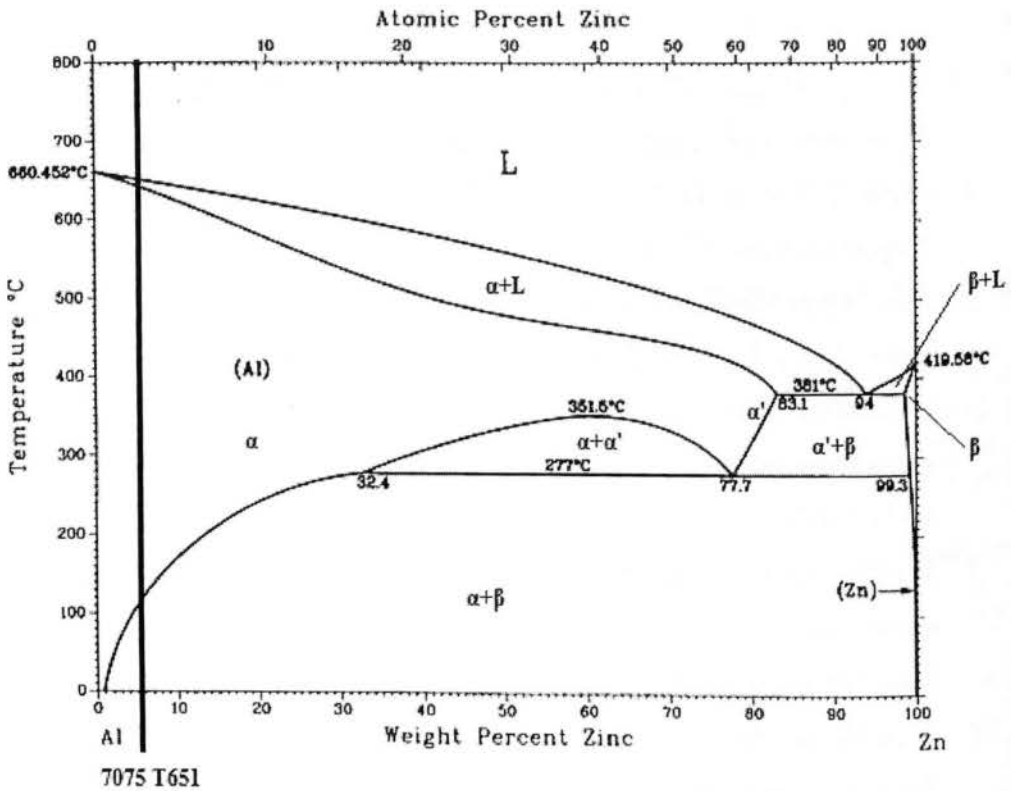
Υλικό (specification)	Ονομαστική σύσταση %	Κατάσταση	Κατεργασία	Θερμοκρασία °C	Τάση MPa	Ελάχιστος ρυθμός ερπυσμού % ανά 1000 h	Συνολική Προέκταση % σε 1000 h
Al-Mg (5052)	Mg	Sheet	H111	80	45	0,005	0,085
Al-Cu-Mg-Zn (7075)	Zn 5,6 Cu 1,6 Mg 2,5	Clad sheet	T6	35	430	0,1	-
				35	480	1,0	-
				35	495	10,0	-
				100	295	0,1	-
				100	355	1,0	-
				100	370	10,0	-
				150	70	0,1	-
				150	170	1,0	-
				150	245	10,0	-
				190	45	0,1	-
				190	75	1,0	-
				190	125	10,0	-

Βιβλιογραφία:

1. Aluminum Structures, Specs and Design, pg. 109-111
2. E. A. Brandes, G. B. Brook, *Smithel's Light Metals Handbook*, B&H, pg.14~16,24,39
3. John E. Hatch, *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*, Aluminum Association-American Society for Metals, pg. 2,3,4
4. Philip A. Schweitzer, P. E., *Metallic Materials, Physical-Mechanical and Corrosion Properties*, Marcel Dekker, pg.1~9,579~584
5. *Asm Metals Handbook Desk Edition*, pg. 999-1344
6. Ρήγγου Δήμητρα, Διπλωματική εργασία: Πειραματική ανάλυση της συμπεριφοράς σε θραύση υβριδικών και ενισχυμένων ναυπηγικών κατασκευών από κράματα αλουμινίου με χρήση συμπαγών δοκιμίων εφελκυσμού. ΕΜΠ-Σχολή Ναυπηγών ΜΗΧ/ΜΗΧ
7. Πανεπιστημιακές σημειώσεις του μαθήματος «Επιστήμη και τεχνολογία του αλουμινίου» του τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων υπό τον Εμμανουήλ Γεωργάτη
8. *Asm Metals Handbook Vol.2, Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, pg 151-153,161
9. Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης, Δημήτρης Ι. Παντελής, *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, εκδόσεις Παπασωτηρίου pg. 136~160
10. William D. Callister Jr., *Materials Science and Engineering-An Introduction*, 8th Edition, John Wiley & Sons Inc., 2009, pg. 150~169
11. J.R. Davis, *Tensile Testing*, 2nd Edition, ASM International, 2004, pg. 1~21,28,29
12. BEER F. P., *Mechanics of Materials th Edition*, Mc Graw Hill, 2011, pg. 54~65
13. R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials 4th Edition*, Prentice Hall, 2000, pg.83~95,106
14. Π. Α. Βουθούνης, *Τεχνική Μηχανική-Αντοχή των Υλικών*, Αθήνα, pg.24~39,41,42,59~64

6.Κράμα αλουμινίου-ψευδαργύρου 7075

6.1.Διάγραμμα ισορροπίας αναλυτικά



Σχήμα 6,1: Al-Zn phase diagram[1]

Πίνακας 6.1: Al-Zn crystallographic data[1]

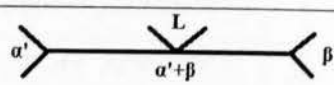
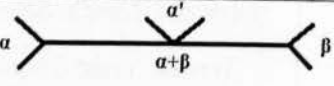
Phase	Composition, wt% Zn
(Al)	0 to 83.1
(Zn)	98.8 to 100
Metastable phases	
(α' Al)R	78 to ~85
"R"	(a)
Y	-

Υπόμνημα: (a) Coherent precipitate

Πρόκειται για κράμα Al-Zn. Αυτό, μετά από κατάλληλες θερμικές κατεργασίες, παρουσιάζει τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες απ'όλα τα κράματα του αλουμινίου. Το ποσοστό του Zn μεταβάλλεται από 4%έως 8% και αυτό του Mg από 1% έως 3%. Η

επιτυγχάνομενη σκλήρυνση δομής οφείλεται κυρίως στην κατακρήμνιση της ένωσης $MgZn_2$. [2]

Πίνακας 6.2: Τριφασικές ισορροπίες

Θερμοκρασία (°C)	Μετασχηματισμός	Αντίδραση	Χαρακτηριστική μορφή στο διάγραμμα φάσεων
381	Ευτηκτικός	$L \xrightarrow{\text{Απόψυξη}} \alpha' + \beta$	
277	Ευτηκτοειδής	$\alpha' \xrightarrow{\text{Απόψυξη}} \alpha + \beta$	

Πίνακας 6.3: Όρια χημικής περιεκτικότητας % στοιχείων του κράματος 7075 [3]

Πυρίτιο	Σίδηρος	Χαλκός	Μαγγάνιο	Μαγνήσιο	Χρόμιο	Ψευδάργυρος	Τιτάνιο	Αλουμίνιο
0,4	0,5	1,2~2	0,3	2,1~2,9	0,18~0,28	5,1~6,1	0,2	υπόλοιπο

Προτεινόμενη κατεργασία ανόπτησης για το κράμα 7075 είναι οι $407 \text{ }^\circ\text{C} \pm 6 \text{ }^\circ\text{C}$ για χρόνο 2~3 ώρες και με συμβολισμό -O. Αυτή η θερμική κατεργασία προορίζεται και για πλήρη ανόπτηση με στόχο την απομάκρυνση των αρνητικών επιδράσεων της θερμικής κατεργασίας διαλυτοποίησης. Η κατεργασία αυτή απαιτεί συνεχόμενη ψύξη στον αέρα με ελεγχόμενη ροή αυτού έως τους $204 \text{ }^\circ\text{C}$ ή λιγότερο ακολουθούμενη από επαναθέρμανση στους $232 \text{ }^\circ\text{C}$ για 4 ώρες και απόψυξη στον αέρα με ελεγχόμενη ροή αυτού. Μερική ανόπτηση του θερμικά κατεργασμένου υλικού ή απομάκρυνση των επιδράσεων της ψυχρηλασίας μπορεί να επιτευχθεί με θέρμανση του υλικού στους $343 \text{ }^\circ\text{C}$ και απόψυξη στον αέρα με μη ελεγχόμενο ρυθμό. [3]

6.2.Ιδιότητες

Πίνακας 6.4: Θερμομηχανικές ιδιότητες του κράματος 7075-T651[6]

Physical Properties	
Density	2,81 g/cc
Mechanical Properties	
Hardness, Brinell	150
Hardness, Vickers	175
Ultimate Tensile Strength	572 MPa
Tensile Yield Strength	503 MPa
Elongation at Break	11%
Modulus of Elasticity	72 GPa
Poisson's Ratio	0,33
Fatigue Strength	159 MPa
Fracture Toughness	20 MPa-m ^{1/2}
Fracture Toughness	25 MPa-m ^{1/2}
Fracture Toughness	29 MPa-m ^{1/2}
Machinability	70%
Shear Modulus	27 GPa
Shear Strength	331 MPa
Thermal Properties	
CTE, linear 68°F	23.6 μm/m-°C
CTE, linear 250°C	25.2 μm/m-°C
Specific Heat Capacity	0.96 J/g-°C
Thermal Conductivity	130 W/m-K
Melting Point	477 - 635 °C
Solidus	477 °C
Liquidus	635 °C
Processing Properties	
Annealing Temperature	413 °C
Solution Temperature	466 - 482 °C
Aging Temperature	121 °C

Πίνακας 6.5: Οριακές τιμές ιδιοτήτων εφελκυσμού του κράματος 7075[4]

Temper	Specified Thickness, mm		Tensile Strength, MPa		Yield Strength (0.2 % offset), MPa		Elongation, C min, %	
	over	through	min	max	min	max	in 50 mm	in 5x Diameter
								(5.65 A)
				Alloy 7075				
O	0.39	12.50	...	275	...	145	10	...
	12.50	50.00	...	275	...	...	...	9
T6, T62F	0.19	0.32	510	...	435	...	5	...
	0.32	1.00	525	...	460	...	7	...
	1.00	3.20	540	...	470	...	8	...
	3.20	6.30	540	...	475	...	8	...
T62F, T651E	6.30	12.50	540	...	460	...	9	...
	12.50	25.00	540	...	470	...	...	6
	25.00	50.00	530	...	460	...	...	5
	50.00	60.00	525	...	440	...	...	4
	60.00	80.00	495	...	420	...	...	4
	80.00	90.00	490	...	400	...	...	4
	90.00	100.00	460	...	370	...	...	2
T73 sheet	1.00	6.30	460	...	385	...	8	...
T7351E plate	6.30	12.50	475	...	390	...	7	...
	12.50	25.00	475	...	390	...	...	6
	25.00	50.00	475	...	390	...	...	5
	50.00	60.00	455	...	360	...	...	5
	60.00	80.00	440	...	340	...	...	5
	80.00	90.00	435	...	340	...	...	5

	90.00	100.00	420	...	330	...	...	5
T76 sheet	3.10	6.30	500	...	425	...	8	...
T7651E plate	6.30	12.50	495	...	420	...	8	...
	12.50	25.00	490	...	415	...	...	5
FG	6.30	100.00	...	...	...	...	...	...

A To determine conformance to this specification, each value for tensile strength shall be rounded to the nearest 1 MPa and each value for elongation to the nearest 0.5 %, both in accordance with the Rounding Method of Practice E 29.

B The basis for establishment of mechanical property limits is shown in Annex AI.

C Elongations in 50 mm apply for thicknesses up through 12.50 mm and in 53 diameter ($5.65=A$) for thicknesses over 12.50 mm where A is the cross-sectional area of the specimen.

D Coiled sheet.

E For stress-relieved tempers (T351, T451, T651, T7351, T7651, and T851), characteristics and properties other than those specified may differ somewhat from the corresponding characteristics and properties of material in the basic temper.

F Material in the T42, T62, and T72 tempers is not available from the material producer.

G Test for tensile properties in the F temper are not required.

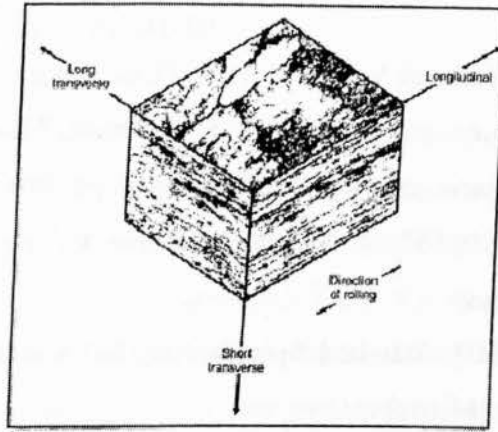
H The tension test specimen from plate over 12.50 mm in thickness is machined from the core and does not include the cladding.

I The T72 temper is applicable only to Alloys 2024 and Alclad 2024 sheet solution heat treated and artificially overaged by the user to develop increased resistance to stress-corrosion cracking.

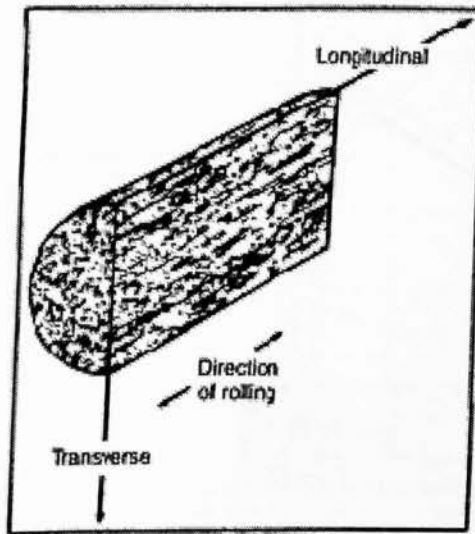
J Short transverse tensile properties are not applicable to material less than 40 mm in thickness.

K Use of Alloys 2219 and Alclad 2219 in the T31, T351, and T37 tempers for finished products is not recommended.

L The properties for this thickness apply only to the T651 temper.



Σχήμα 6.1: Σύσταση της μικροδομής λαμαρίνας flat-rolled κράματος 7075-T6 που απεικονίζει την διεύθυνση που ακολουθεί η μεταλλουργική δομή. 40× [5]



Σχήμα 6.2: Σύσταση της μικροδομής ράβδου κράματος 7075-T6 που απεικονίζει την διεύθυνση που ακολουθεί η μεταλλουργική δομή. 40× [5]

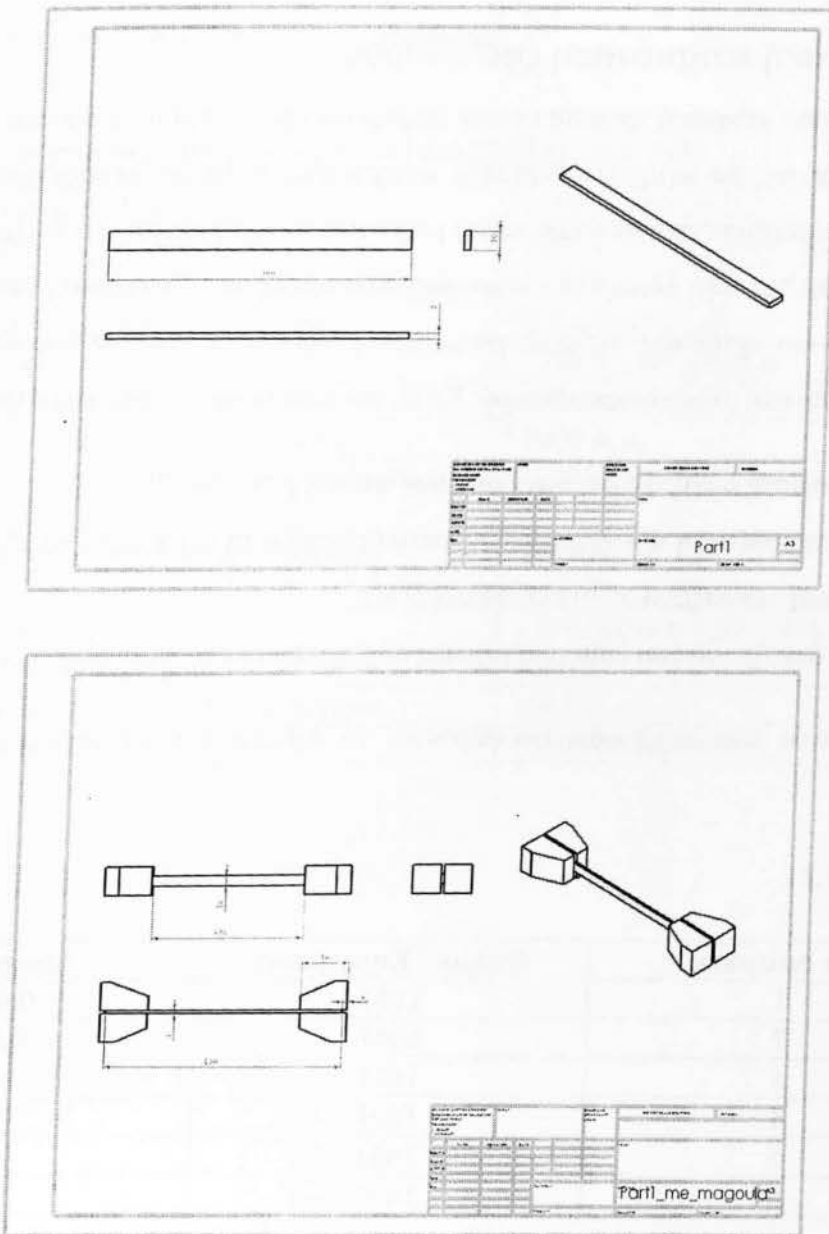
Βιβλιογραφία:

- [1] ASM, Metals Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagrams pg. 335-336
- [2] Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης, Δημήτρης Ι. Παντελής, Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, εκδόσεις Παπασωτηρίου pg. 570-571
- [3] ASTM B918/B 918M-09, Standard Practice for Heat Treatment Of Wrought Aluminum-Alloys
- [4] ASTM B209M-07, Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate [Metric]
- [5] ASM, Metals Handbook Desk Edition, pg. 1122
- [6] Asm Metals Handbook Vol.2, Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Special-Purpose Materials, pg. 450-462

7. Πειραματικό Πρόγραμμα

7.1. Προετοιμασία δοκιμίων

Κατεργάστηκαν και κόπηκαν συνολικά έξι δοκίμια με μήκος 160 mm, πλάτος 10 mm και ύψος 3 mm που ήταν και το αρχικό πάχος της λαμαρίνας αλουμινίου κράματος 7075 από την οποία προήλθαν όλα τα δοκίμια μας. Κατά την κοπή τους δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή έτσι ώστε όλες τους οι πλευρές στο σημείο τομής του να σχηματίζουν ορθή γωνία όπως φαίνεται και στο σχήμα 7,1 που ακολουθεί. Για την κοπή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε υδραυλικό κρουστικό ψαλίδι κοπής λαμαρίνων.



Σχήμα 7.1: Πρόοψη και διαστάσεις δοκιμίων

7.2. Θερμική κατεργασία δοκιμίων

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι θερμικές κατεργασίες που έχει υποστεί η λαμαρίνα μας κατά την διάρκεια της έλασης στη διαδικασία παραγωγής.

Πίνακας 7.1 [3]

Προϊόν	Θ.Κ. Διαλυτοποίησης W51			Θ.Κ. Κατακρημνίσεως T651	
	Θερμοκρασία μετάλλου	Χρόνος παραμονής (soak)	Θερμοκρασία αποψύξεως	Θερμοκρασία μετάλλου	Χρόνος παραμονής
Λαμαρίνα κράματος 7075 πάχους 3 mm	460~500 °C	40 λεπτά	43 °C	121 °C	24 ώρες
Προτεινόμενη Θ.Κ. Απότασης: 765 °C για 2~3 ώρες					

7.3. Μηχανική καταπόνηση εφελκυσμού

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία έγιναν πειράματα εφελκυσμού σε συνολικά 6 δοκίμια σταθερού μήκους, διατομής και θερμικής κατεργασίας αλλά με διαφορετικούς ρυθμούς αύξησης του φορτίου (various strain rates) μέχρι την τελική θραύση των δοκιμίων. Όλα τα δοκίμια προήλθαν από λαμαρίνα διαμορφωμένου αλουμινίου κράματος 7075 και T651 επαναφοράς και έχουν όλα τις ίδιες γεωμετρικές διαστάσεις και όλα τοποθετήθηκαν με τον ίδιο τρόπο στη μηχανή εφελκυσμού. Κατά την τοποθέτηση δόθηκε ιδιαίτερη μέριμνα:

- στη σωστή συγκράτηση των δοκιμίων από τις μέγγενες[2]
- στη τοποθέτηση των δοκιμίων σε απολύτως κάθετη θέση ώστε να εξασφαλισθεί η δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού[2] και
- στη διατήρηση του καθαρού μήκους από αρπάγη σε αρπάγη στα 160mm[2]

Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε κάθε δοκιμή.

Πίνακας 7.2

α/α Δοκιμίου	Θερμική Κατεργασία	Strain Rate
1	T651	0,005
2	T651	0,05
3	T651	0,1
4	T651	0,5
5	T651	0,8
6	T651	1,0

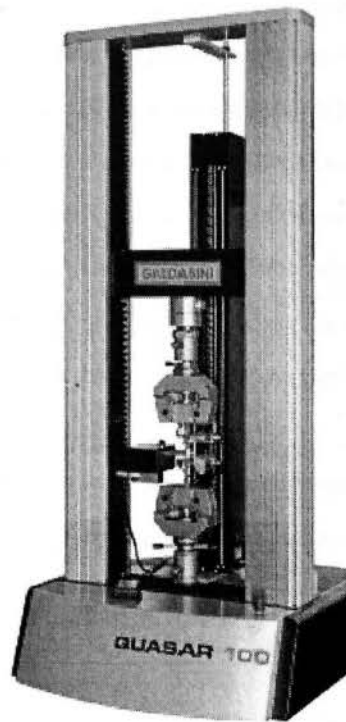
Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των δοκιμών εφελκυσμού

Η πειραματική μηχανή εφελκυσμού GALDABINI Quasar 100 διαθέτει έναν αριθμό από εξαρτήματα, τα οποία χρησιμεύουν για τη συγκράτηση των δοκιμών που εξετάζονται κάθε φορά. Ανάλογα με το είδος της δοκιμής, αλλά και το μέγεθος και το σχεδιασμό των εξεταζόμενων δοκιμών, επιλέγονται τα κατάλληλα εξαρτήματα μέσω των οποίων γίνεται η συγκράτηση των δοκιμών από τις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού. Στην περίπτωση των δικών μας δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν ειδικές διατάξεις (μάγουλα) για την συγκράτηση των δοκιμών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα Α.1.

Στον παρακάτω πίνακα και στο σχήμα Α.2 που ακολουθεί αναγράφονται οι ιδιότητες της μηχανής εφελκυσμού που χρησιμοποιήσαμε.

Πίνακας τεχνικών προδιαγραφών GALDABINI Quasar 100:

Δυναμικότητα Πλαισίου	100KN (22000 lbf)
Σύμφωνα Διεθνή Πρότυπα	ASTM E4, EN-ISO 7500/1
Διακριτική Ικανότητα Καταγραφής Φορτίου	1/200000 f.s.
Διακριτική Ικανότητα Τραβέρσας	0,1 μm (micron)
Ταχύτητα Δοκιμής	0,0005-200 mm/min
Σταθερή Ταχύτητα	400 mm/min
Ελεγχόμενη Διαδρομή Τραβέρσας	1000 mm
Μέγιστη Καθαρή Απόσταση Μεταξύ Άνω & Κάτω αρπάγης	1000 mm
Καθαρή Απόσταση Μεταξύ Πλαϊνών Κολόνων	410 mm
Τροφοδοτικό	230V/50Hz ή 120V/60Hz
Κατανάλωση Ενέργειας	1000W
Βάρος Μηχανής Χωρίς Παρελκόμενα	360 kg
Διαστάσεις (Υ/Π/Μ)	1680/785/820 mm

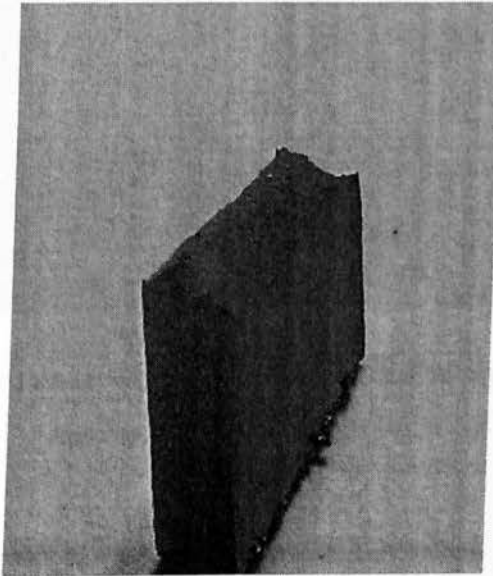


Σχήμα 7.2: Μηχανή εφελκυσμού GALDABINI Quasar 100

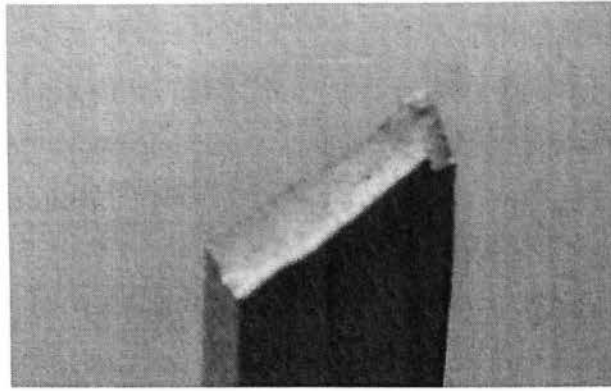
7.4.Θραυστομηχανική

Το αλουμίνιο, ανάλογα με την κατεργασία που έχει υποστεί, κατά την εφελκυστική θραύση παρουσιάζει συμπεριφορά όλκιμου υλικού δημιουργώντας δύο βασικούς τύπους επιφανειών θραύσης όπου και στους δύο η ελάττωση της διατομής στην περιοχή της θραύσης είναι σημαντική λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης που προηγείται και είναι εμφανείς ακόμα και με γυμνό μάτι.[1] Οι δύο αυτοί τύποι είναι:

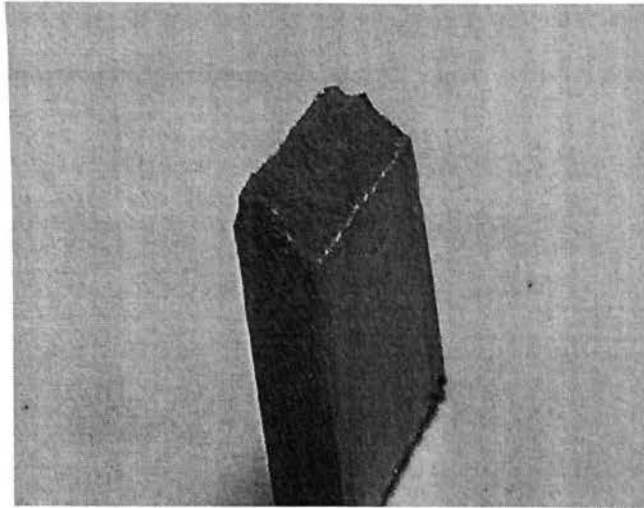
- Η θραύση με διάτμηση των άκρων και δημιουργία των επιφανειών κώνου-κρατήρα (σχ. 7.3)
- Η θραύση με διάρρηξη των άκρων και δημιουργία των επιφανειών διπλού κρατήρα(σχ. 7.4)
- Η θραύση με διάτμηση του ενός άκρου της επιφάνειας πρώτα και τη δημιουργία ίσιων επιφανειών θραύσης υπό γωνία κάποιων μοιρών σε σχέση με τον κάθετο άξονα του δοκιμίου και της άσκησης της δύναμης εφελκυσμού (σχ. 7.5)



Σχήμα 7.3: Δημιουργία κώνου σε μια από τις δύο επιφάνειες θραύσεως τύπου κώνου-κρατήρα



Σχήμα 7.4: Δημιουργία κρατήρα σε μια από τις δύο επιφάνειες θραύσεως τύπου διπλού κρατήρα



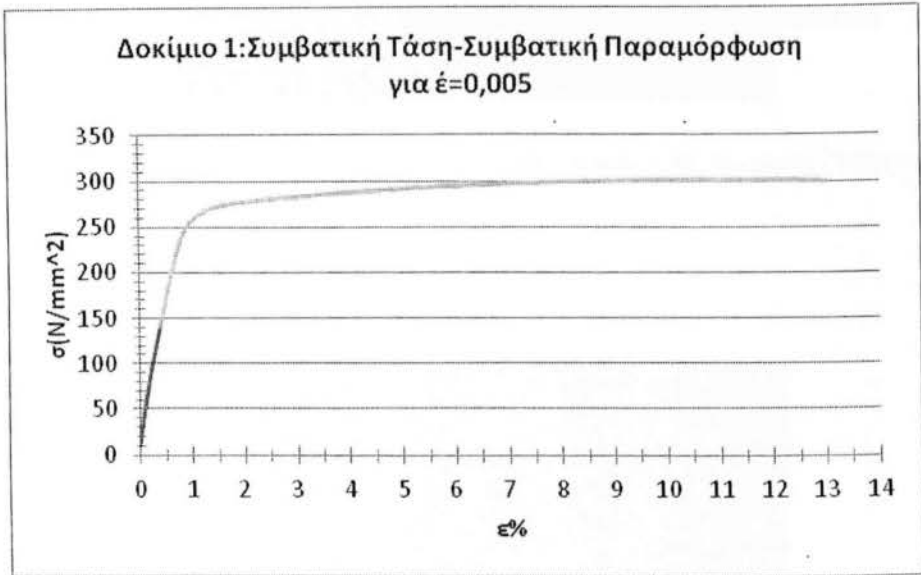
Σχήμα 7.5: Δημιουργία ίσιας επιφάνειας υπό γωνία σε μια από τις δύο επιφάνειες θραύσεως με διάτμηση

Βιβλιογραφία:

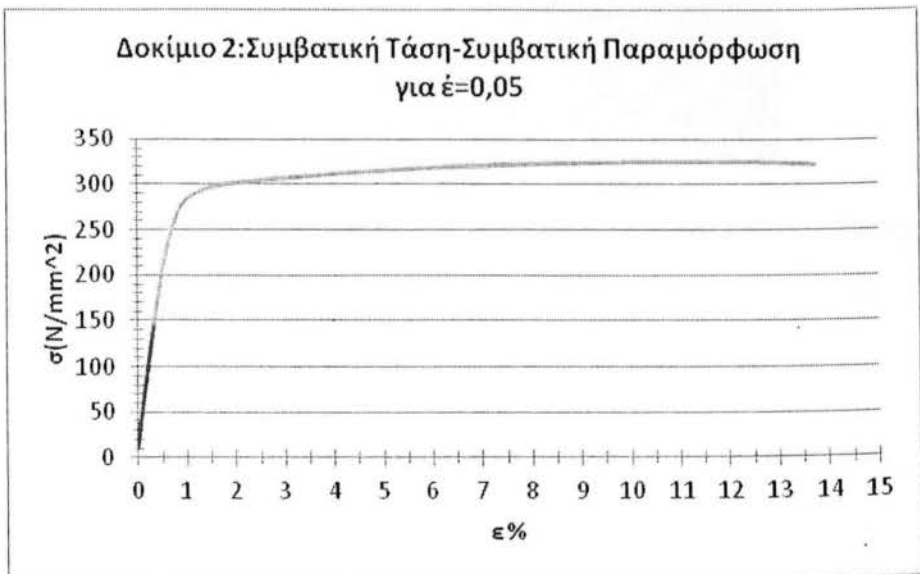
1. Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης, Δημήτρης Ι. Παντελής, Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, εκδόσεις Παπασωτηρίου pg. 136~160
2. J.R. Davis, Tensile Testing, 2nd Edition, ASM International, 2004, pg. 1~21,28,29
3. Standard Practice for Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloys, ASTM International B 918/B 918M-09, pg. 7

8. Αποτελέσματα και Συζήτηση

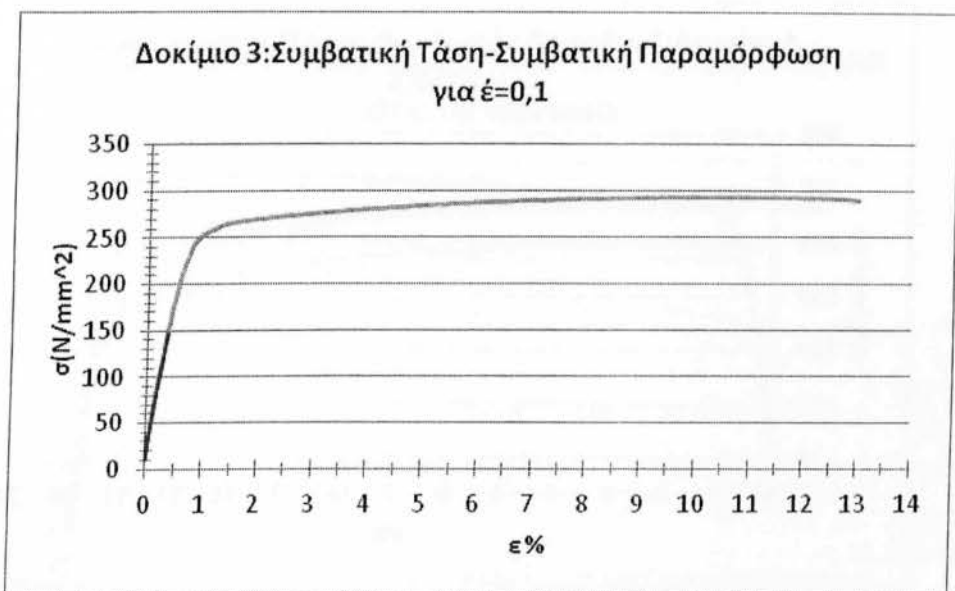
8.1. Διαγράμματα



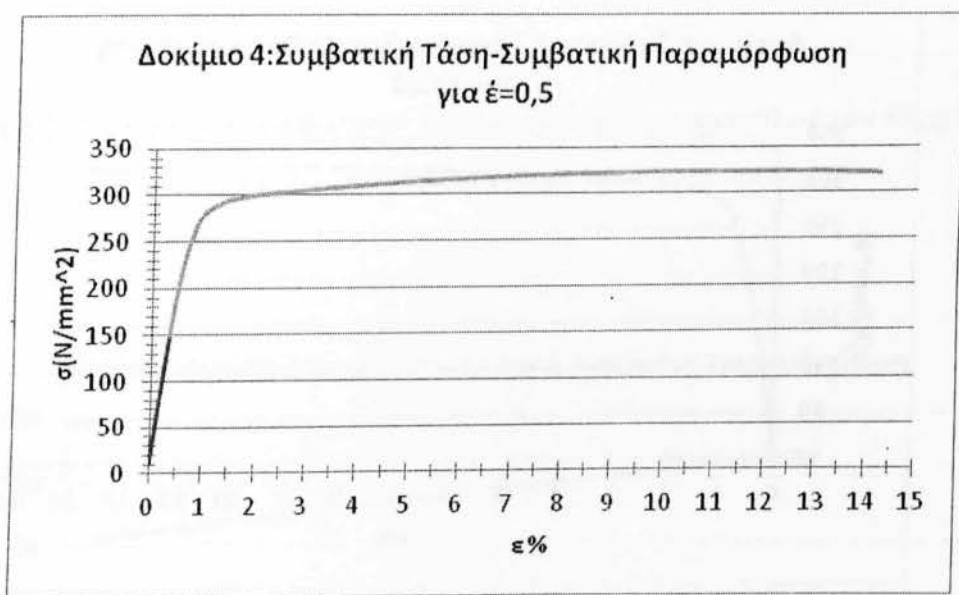
Σχήμα 8.1: Διάγραμμα Συμβατικών Τάσεων-Παραμορφώσεων δοκιμίου 1



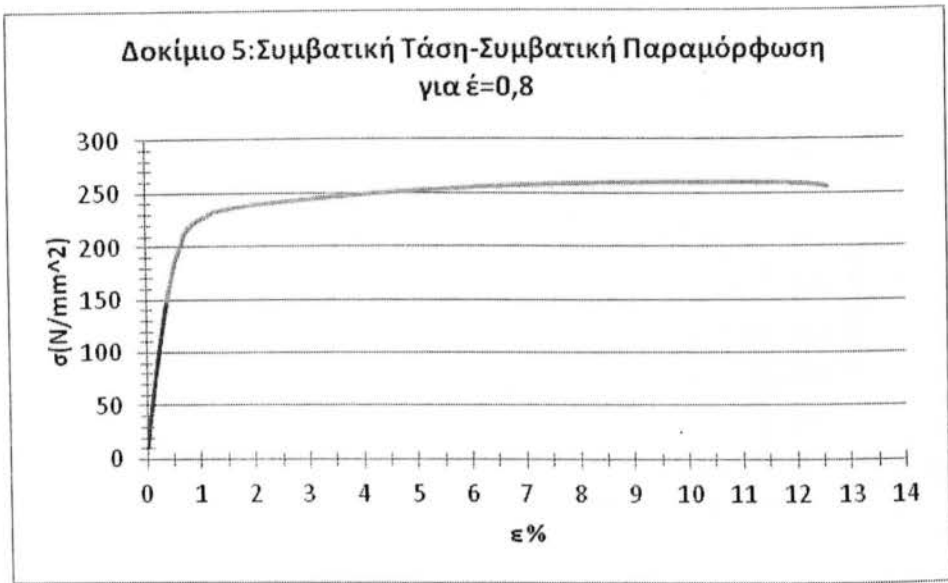
Σχήμα 8.2: Διάγραμμα Συμβατικών Τάσεων-Παραμορφώσεων δοκιμίου 2



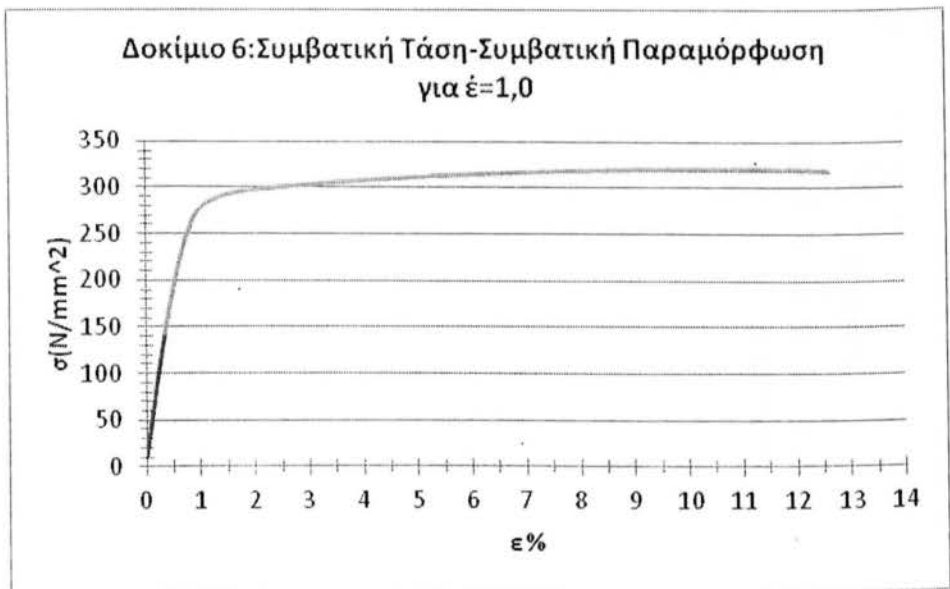
Σχήμα 8.3: Διάγραμμα Συμβατικών Τάσεων-Παραμορφώσεων δοκιμίου 3



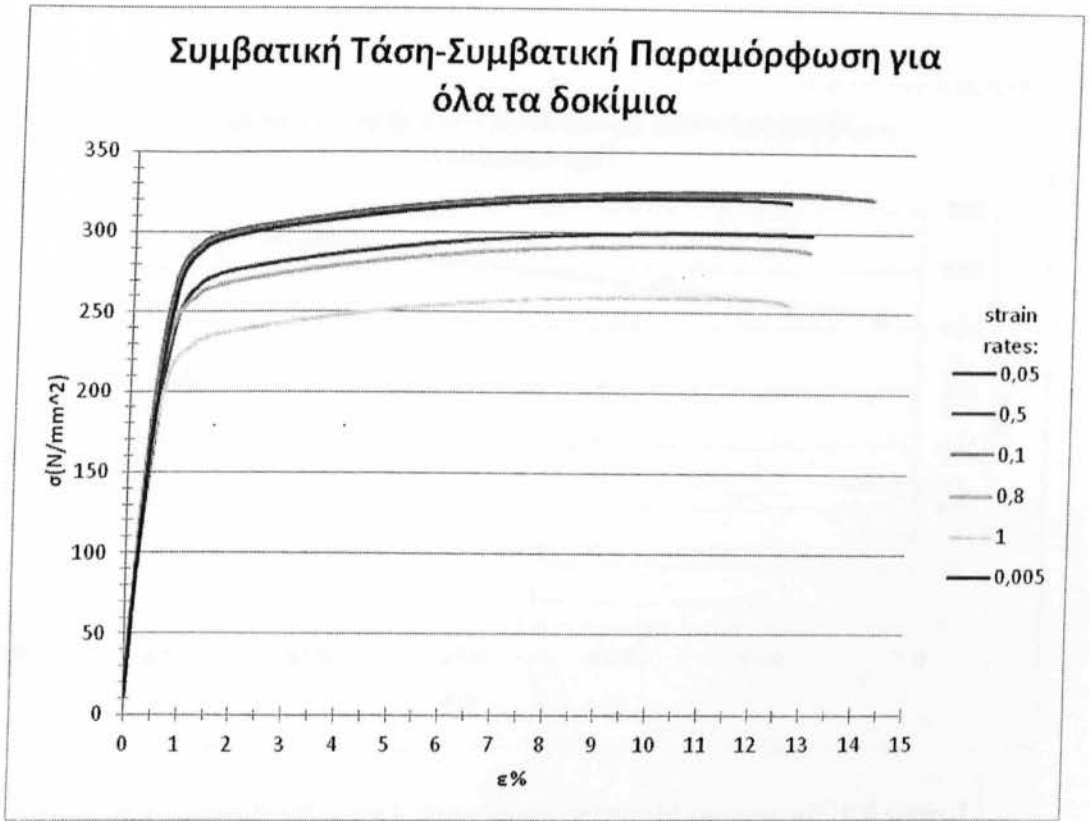
Σχήμα 8.4: Διάγραμμα Συμβατικών Τάσεων-Παραμορφώσεων δοκιμίου 4



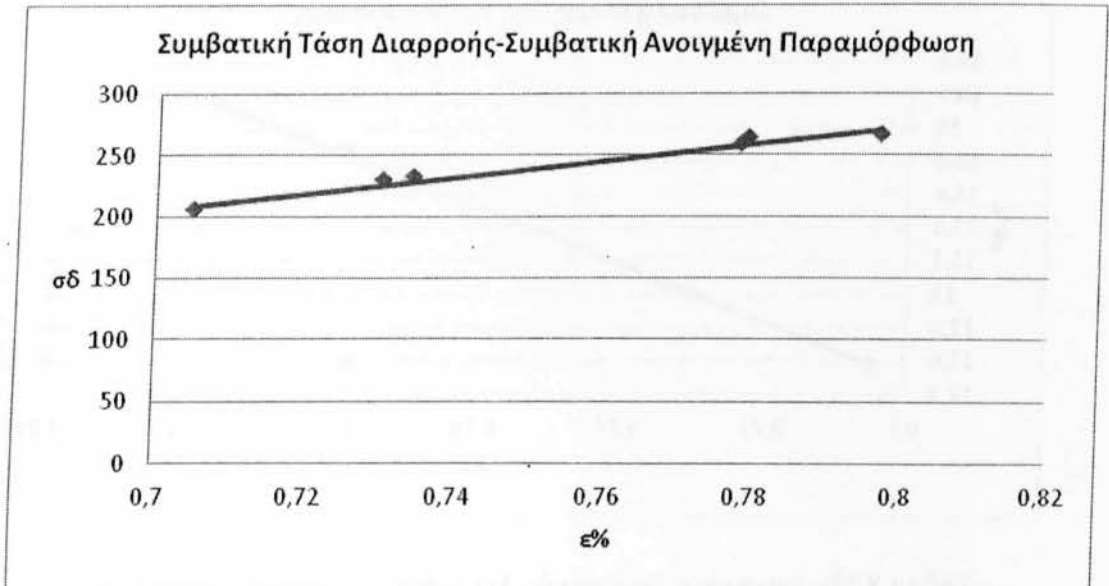
Σχήμα 8.5: Διάγραμμα Συμβατικών Τάσεων-Παραμορφώσεων δοκιμίου 5



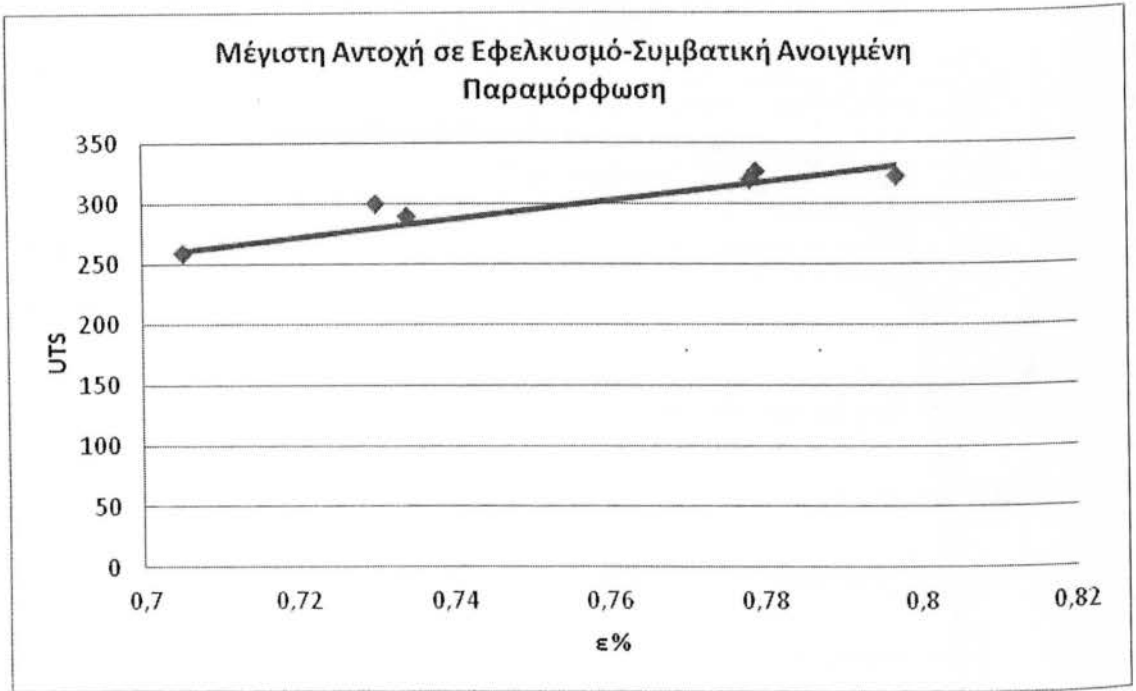
Σχήμα 8.6: Διάγραμμα Συμβατικών Τάσεων-Παραμορφώσεων δοκιμίου 6



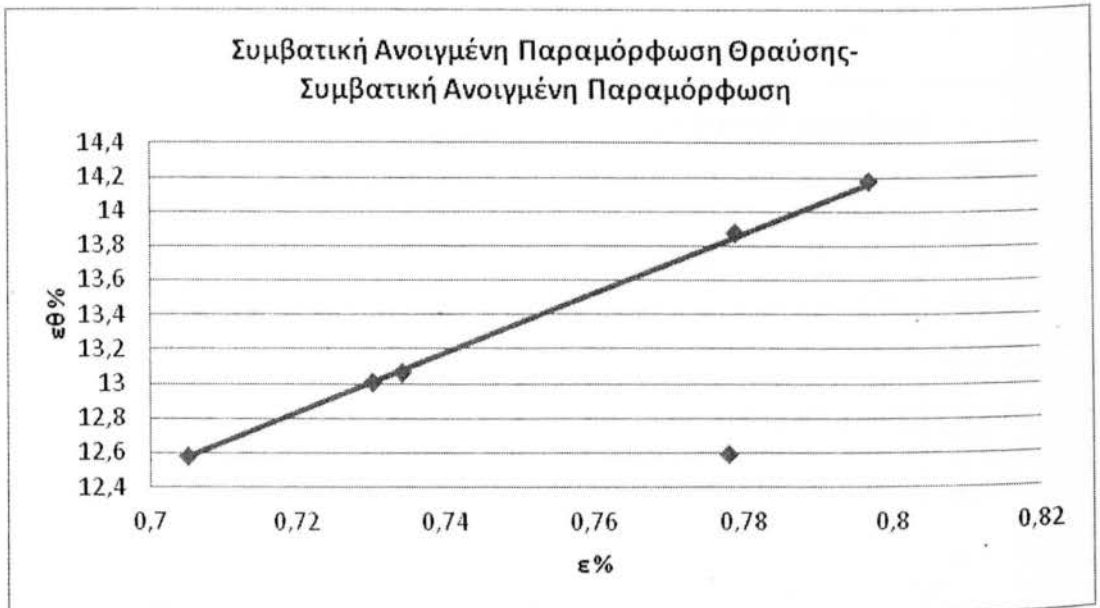
Σχήμα 8.7: Διάγραμμα Συμβατικών Τάσεων-Παραμορφώσεων όλων των δοκιμών με διαφορετικά strain rates



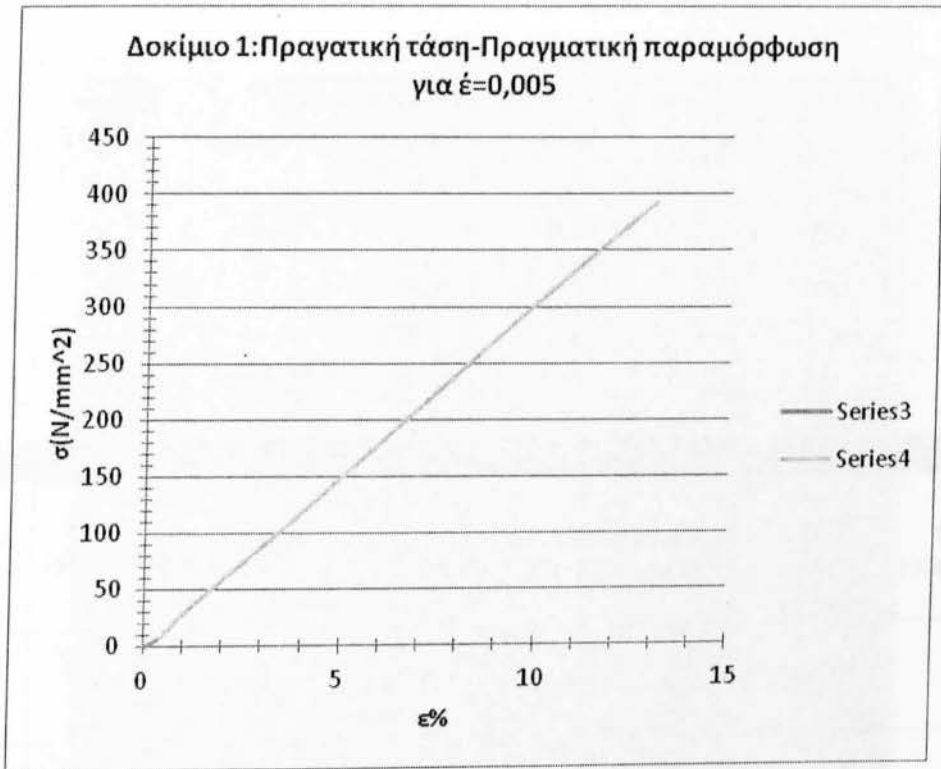
Σχήμα 8.8: Διάγραμμα Συμβατικής Τάσης Διαρροής-Συμβατικής Ανοιγμένης Παραμόρφωσης



Σχήμα 8.9: Διάγραμμα Μέγιστης Συμβατικής Τάσης-Συμβατικής Ανοιγμένης Παραμόρφωσης



Σχήμα 8.10: Διάγραμμα Συμβατικής Ανοιγμένης Παραμόρφωσης Θραύσης-Συμβατικής Ανοιγμένης Παραμόρφωσης



Σχήμα 8.11: Διάγραμμα Πραγματικής Τάσης-Πραγματικής Ανοιγμένης Παραμόρφωσης

8.2. Πίνακες

Πίνακας 8.1: Δεδομένα και Αποτελέσματα πειράματος εφελκυσμού

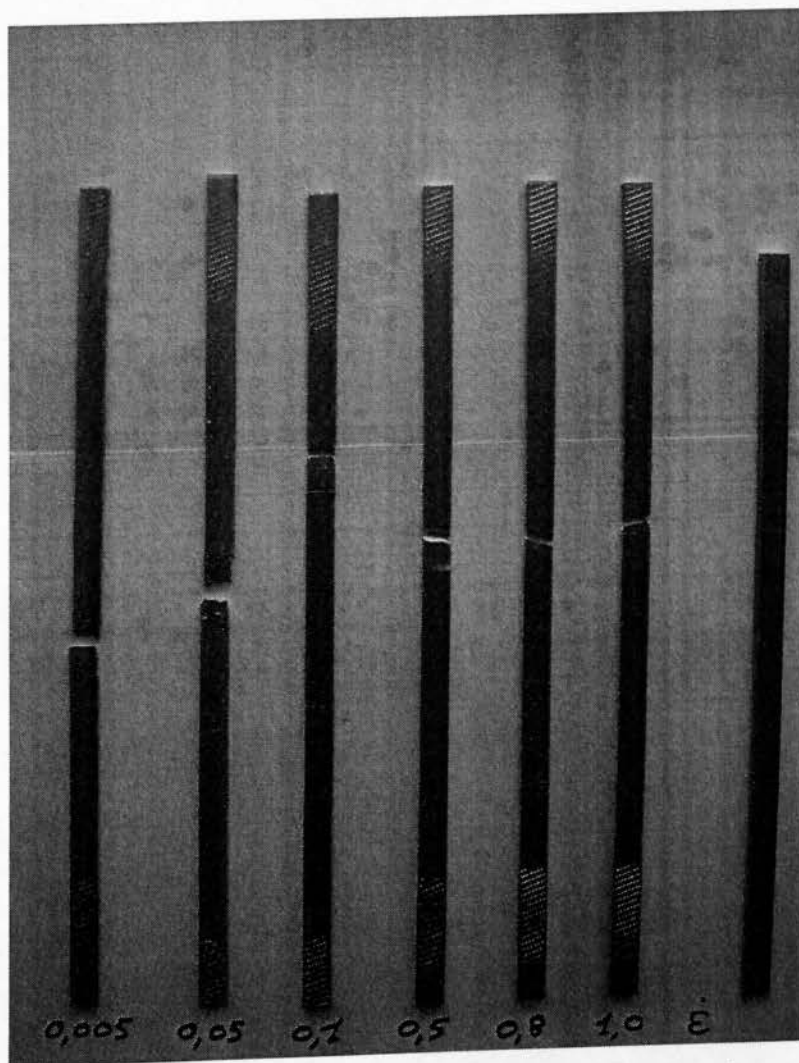
α/α Δοκιμίου	Strain Rate [(mm/ mm)/s]	σ_{UTS} (MPa)	ϵ %	Μέγιστο Φορτίο F_{max} (KN)	ΔL (mm)	Μέτρο Ελ/τας E (N/mm ²)	Τελικό Μήκος L_0 (mm)
1	0,005	300	13,03	9	20,848	29.167	180,848
2	0,05	326,7	13,9	9,8	22,24	29.539	182,24
3	0,1	290	13,09	8,7	20,944	30.000	180,944
4	0,5	323,2	14,22	9,7	22,752	29.630	182,752
5	0,8	260	12,6	7,8	20,16	30.000	180,16
6	1,0	320	12,6	9,6	20,16	28.718	180,16

α/α Δοκιμίου	Strain Rate [(mm/ mm)/s]	$\sigma_{\text{διαρροής}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{θραύσης}}$ (MPa)	Εδιαρροής %	Εθραύσης %	Τύπος Θραύσης *	Δημιουργία Στένωσης
1	0,005	231	299	0,73	13,01	Όλκιμη/ Υπο γωνία	ναι
2	0,05	265	322,7	0,779	13,87	Όλκιμη/ Κρατήρα κόνου	ναι
3	0,1	234	288,2	0,734	13,06	Όλκιμη/ Υπο γωνία	ναι
4	0,5	268	321,2	0,797	14,18	Όλκιμη/ Κρατήρα κόνου	ναι
5	0,8	207	255	0,705	12,58	Όλκιμη/ Υπο γωνία	ναι
6	1,0	260	318,2	0,778	12,59	Όλκιμη/ Υπο γωνία	ναι

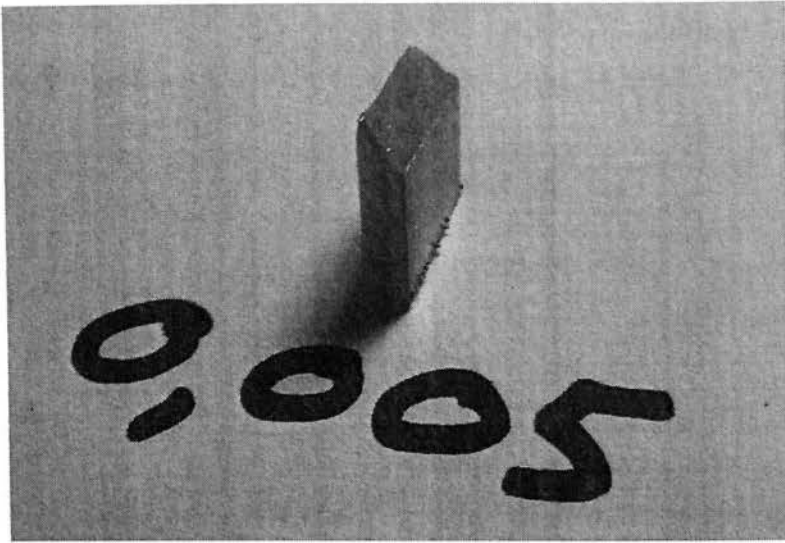
Υμόννημα: 1 MPa=1 N/mm²

*Βλέπε σχήματα 8.13 έως 8.18

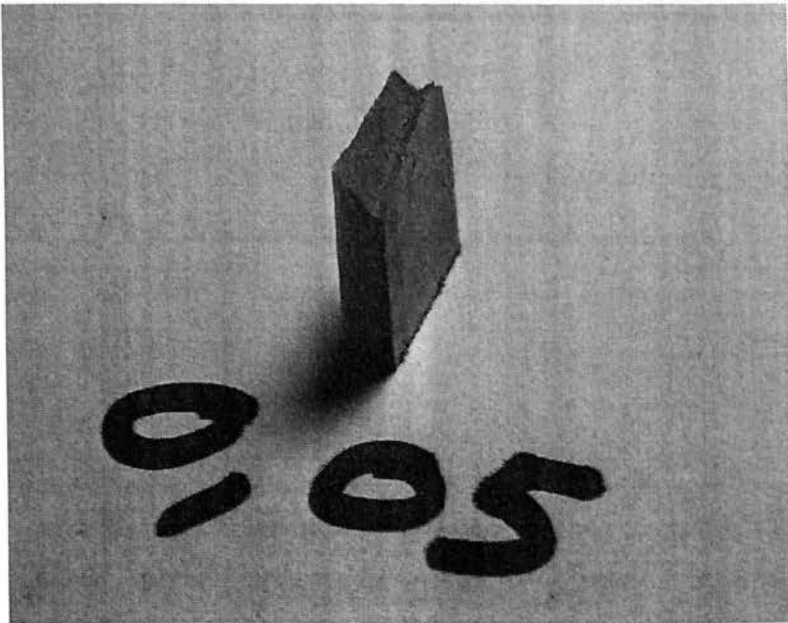
8.3. Φωτογραφίες



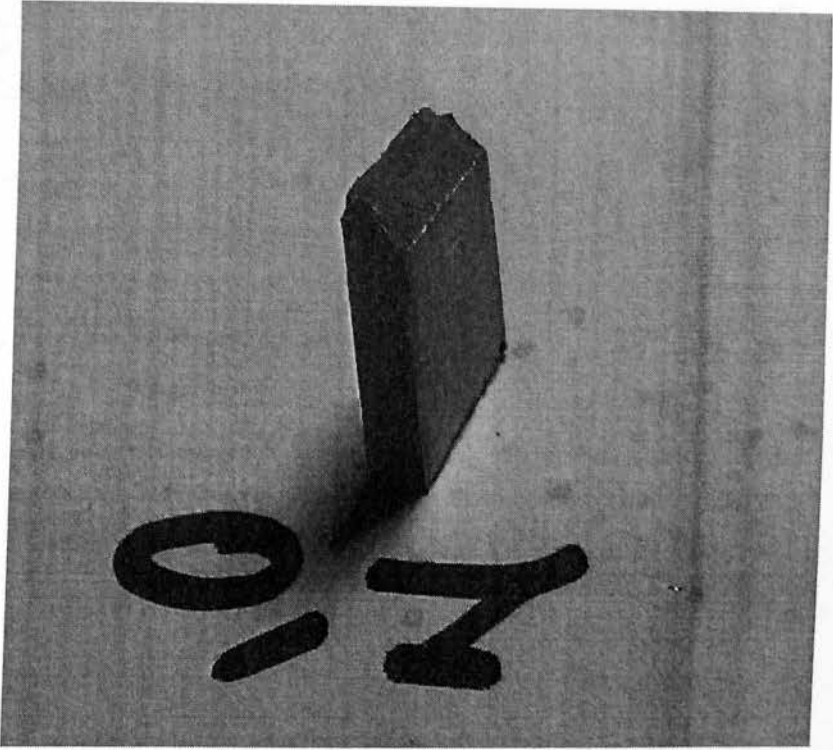
Σχήμα 8.12: Δοκίμιο πριν από τη θραύση και όλα τα δοκίμια ανά strain rate μετά την πειραματική δοκιμή



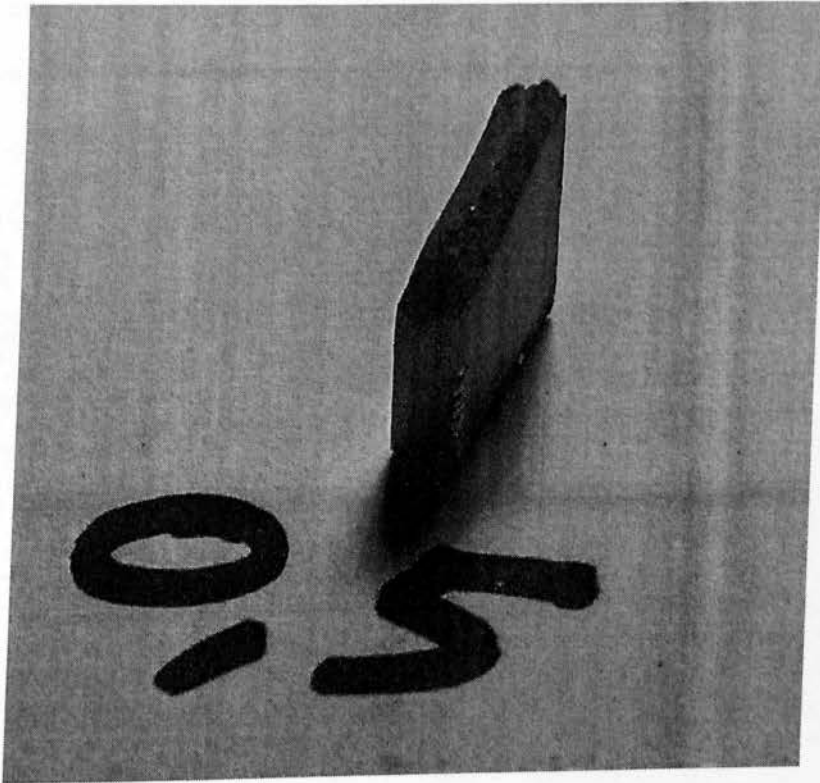
Σχήμα 8.13: Δοκίμιο 1 με strain rate $\dot{\epsilon}=0,005$



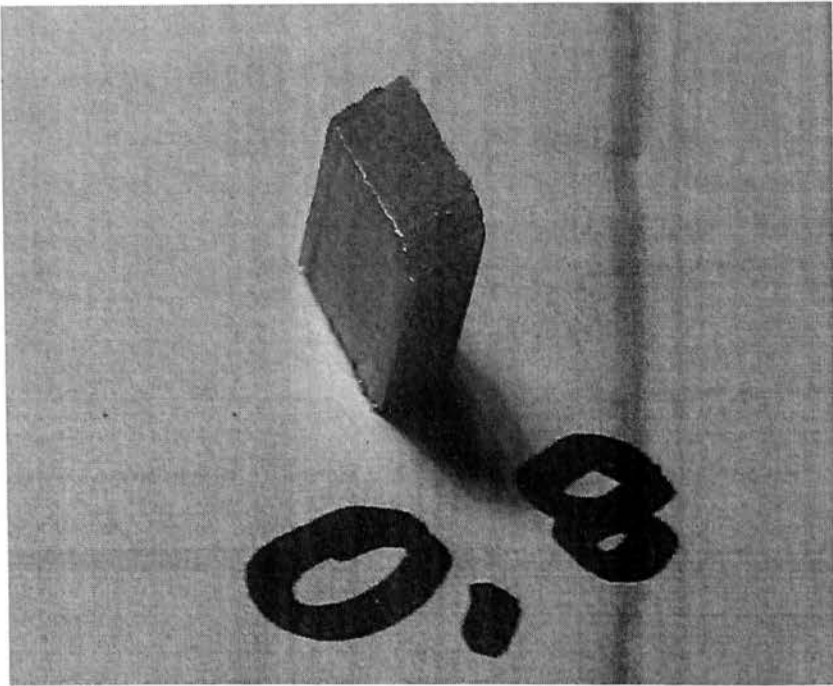
Σχήμα 8.14: Δοκίμιο 2 με strain rate $\dot{\epsilon}=0,05$



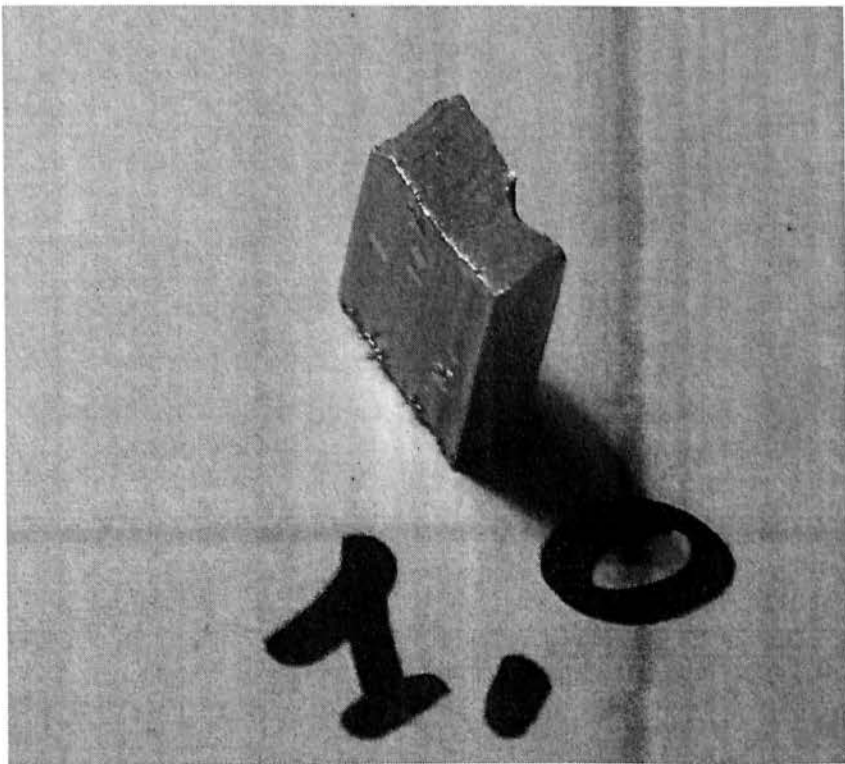
Σχήμα 8.15: Δοκίμιο 3 με strain rate $\dot{\epsilon}=0,1$



Σχήμα 8.16: Δοκίμιο 4 με strain rate $\dot{\epsilon}=0,5$



Σχήμα 8.17: Δοκίμιο 5 με strain rate $\dot{\epsilon}=0,8$



Σχήμα 8.18: Δοκίμιο 6 με strain rate $\dot{\epsilon}=1,0$

8.4. Συμπεράσματα

Κατά την ολοκλήρωση ενός πειράματος δίνεται η δυνατότητα στον ερευνητή να εκτιμήσει το κατά πόσο ανακτήθηκαν ικανοποιητικά στοιχεία για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων που έχουν σχέση με τον σκοπό για τον οποίο εκτελέστηκε και κατά πόσο αυτά τα στοιχεία μπορούν να καταγραφούν για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων που θα περιγράψουν πλήρως το φαινόμενο μελέτης. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετήθηκαν η μηχανικές ιδιότητες και συγκεκριμένα η αντοχή του κράματος αλουμινίου 7075 μέσω της καταπόνησης δοκιμίων με την καταστροφική μέθοδο του εφελκυσμού. Οι κύριες παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται στα ακόλουθα:

1. Παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται ο ρυθμός αύξησης του επιβαλλόμενου φορτίου τόσο μειώνεται και η μέγιστη αντοχή του μετάλλου, δηλαδή όσο πιο γρήγορα ασκείται μια καταπόνηση στο δοκίμιο τόσο πιο εύκολα αυξάνονται οι πιθανότητες να αστοχήσει.
2. Παρατηρείται μια ανομοιομορφία στις επιφάνειες θραύσης ως προς τη γεωμετρία τους και τον τρόπο που έχουν δημιουργηθεί η οποία μπορεί να οφείλεται σε τοπική αστοχία του υλικού, στη μεταβολή των strain rates ή ακόμη και στο χρήστη από λανθασμένη τοποθέτηση των δοκιμίων στη μηχανή του εφελκυσμού.
3. Όλα τα δοκίμια από τη τάση διαρροής μέχρι τη τάση θραύσης παρουσιάζουν ένα εύρος τιμών από +55 έως +65 MPa και με εξαίρεση το δοκίμιο 5 παρουσιάζουν μέγιστη τάση (UTS) γύρω στα 300 MPa και συνολική επιμήκυνση 12% με 14% που είναι αρκετά ικανοποιητικές σαν τιμές σύμφωνα με τα δεδομένα που παίρνουμε από το prospectus ALCOA ALLOY 7075 PLATE AND SHEET εάν αναλογιστούμε το πάχος της δικής μας λαμαρίνας και τις γεωμετρικές διαστάσεις των δοκιμίων.
4. Μέσω του πειράματος του εφελκυσμού είδαμε από τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων ότι πιθανόν να υπάρχουν παραμένουσες τάσεις στο υλικό οι οποίες μπορεί να οφείλονται στη θερμική κατεργασία T651 που έχουν αυτά υποστεί κατά τη διαδικασία της έλασης των φύλλων λαμαρίνας και μας αυτές είναι που πιθανώς μας οδήγησαν στην πρόωρη θραύση του δοκιμίου 5. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι ίσως μια θερμική κατεργασία αποτατικής ανόπτησης θα

μείωνε ελαφρώς τη μέγιστη αντοχή του κράματος αλλά θα βελτίωνε την ολκιμότητα και τη συνοχή του με ομαλότερες επιφάνειες θραύσης και καλύτερη αντοχή σε απότομες μεταβολές όπως ο ρυθμός αύξησης του επιβαλλόμενου φορτίου.

