

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧ/ΓΙΑΣ



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΜΗΧ
678

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΕΙΡΑΣ 5XXX

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΕΡΑΚΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ του ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΥ (Α.Μ. 36776)

ΣΤΑΘΑΤΟΥ ΗΛΙΑ του ΔΙΟΓΕΝΗ (Α.Μ. 37712)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Δρ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ι. ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2012



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

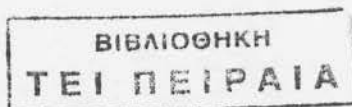
ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΕΙΡΑΣ 5XXX

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΕΡΑΚΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ του ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΥ (Α.Μ. 36776)

ΣΤΑΘΑΤΟΥ ΗΛΙΑ του ΔΙΟΓΕΝΗ (Α.Μ. 37712)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Δρ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ι. ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ



ΑΓΓΑΛΕΩ 2012

Κεφάλαιο 1 : ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
Κεφάλαιο 2 : ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	2
Κεφάλαιο 3 : ΣΚΟΠΟΣ	3
Κεφάλαιο 4 : ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΜΕΛΕΤΕΣ	4
Κεφάλαιο 5 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	5-68
5.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	5
5.1.1 Βιομηχανική Παραγωγή Αλουμινίου.....	6
5.1.2 Χρήσεις αλουμινίου και κραμάτων αλουμινίου.....	7
5.2 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	8
5.2.1 Ελαφριά μέταλλα και κράματα.....	8
5.2.2 Γενικές ιδιότητες αλουμινίου και των κραμάτων του	8
5.2.2.1 Επίδραση κραματικών στοιχείων.....	9
5.2.3 Ονοματολογία κραμάτων αλουμινίου.....	11
5.2.3.1 Ονοματολογία διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου.....	11
5.2.3.2 Παραγωγή διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου.....	14
5.2.3.3 Ονοματολογία χυτών κραμάτων αλουμινίου.....	17
5.2.3.4 Ονοματολογία θερμικών κατεργασιών κραμάτων αλουμινίου.....	21
5.2.4 Θερμικές κατεργασίες μεταλλικών υλικών.....	23
5.2.4.1 Βαφή.....	24
5.2.4.2 Μερική ή κλιμακωτή βαφή.....	24
5.2.4.3 Επαναφορά μετά από βαφή.....	25
5.2.4.4 Ανόπτηση.....	25
5.2.4.5 Σκλήρυνση με κατακρήμνιση.....	27
5.2.5 Κράματα ΑΙ που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία.....	32
5.2.6 Κράματα ΑΙ που υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμικές κατεργασίες.....	35
5.2.7 Διάβρωση.....	38
5.2.7.1 Διάβρωση του αλουμινίου.....	39
5.2.7.2 Ο μηχανισμός διάβρωσης του αλουμινίου.....	39
5.2.7.3 Δυναμικό διάβρωσης.....	41
5.2.7.4 Επίδραση των κραματικών στοιχείων και των προσμίξεων στην διάβρωση του αλουμινίου.....	41
5.2.7.5 Τύποι διάβρωσης.....	42
5.3 ΣΕΙΡΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 5XXX.....	44
5.3.1 Γενικές πληροφορίες σειράς 5XXX.....	44
5.3.2 Διάγραμμα ισορροπίας φάσεως κράματος 5052.....	53
5.4 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	54
5.4.1 Ελαστικότητα.....	54
5.4.2 Πλαστικότητα.....	55
5.4.3 Θραύση.....	55
5.4.3.1 Θεωρητική αντοχή κρυσταλλικού στερεού.....	59
5.4.3.2 Εφελκυστική θραύση χαμηλών θερμοκρασιών.....	60
5.4.3.3 Κατηγορίες εφελκυστικής θραύσης υψηλών θερμοκρασιών (θραύση από ερπυσμό).....	66
5.4.3.4 Θραύση από κόπωση.....	67
5.4.3.5 Η μηχανική θεωρία της θραύσης.....	68

Κεφάλαιο 6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....69
 6.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....69
 6.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....69
 6.2.1 Η δοκιμή του εφελκυσμού.....69
 6.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΜΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (AS RECEIVED).....71
 6.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (2WEEK).....75
 6.5 ΣΧΟΛΙΑ – ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ 80
Κεφάλαιο 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 81
Κεφάλαιο 8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΑΡΘΡΑ 82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το αργίλιο ή αλουμίνιο είναι ένα χημικό στοιχείο με σύμβολο **Al** και ατομικό αριθμό 13. Είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο, στοιχείο που ανήκει στην ομάδα III_A του περιοδικού συστήματος μαζί με το βόριο. Είναι ένα μη σιδηρομαγνητικό μέταλλο και το τρίτο πιο κοινό χημικό στοιχείο που απαντάται στον φλοιό της γης μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Οι ενώσεις αργιλίου αποτελούν το 8% του φλοιού της γης. Ωστόσο είναι πολύ δραστικό χημικά ώστε να βρίσκεται στη φύση ως ελεύθερο μέταλλο. Αντίθετα, βρίσκεται ενωμένο σε πάνω από 270 διαφορετικά ορυκτά. Στην φυσική του κατάσταση βρίσκεται σε πολλά πυριτικά άλατα .

Ως μετάλλευμα εξάγεται με το γνωστό όνομα του βωξίτη. Για την μετατροπή του βωξίτη χρησιμοποιείται πρώτη μετατροπή σε αλουμίνα χρησιμοποιώντας τη διαδικασία Bayer και στη συνέχεια μετατρέπεται σε μέταλλο με το όνομα αλουμίνιο με την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Αυτό το μέταλλο έχει ένα συνδυασμό ιδιοτήτων που το καθιστούν χρήσιμο σε μηχανολογικές εφαρμογές, όπως η χαμηλή του πυκνότητας ($2,700 \text{ kg / m}^3$) και την υψηλή του αντοχή στη διάβρωση. Αυτό στην ουσία συμβαίνει γιατί με την έκθεση του μετάλλου στην ατμόσφαιρα σχηματίζει στιγμιαία ένα λεπτό επιφανειακό, μη ορατό, στρώμα οξειδίου του, που εμποδίζει τη βαθύτερη διάβρωσή του (φαινόμενο της παθητικοποίησης). Επίσης, εξαιτίας της σχετικά χαμηλής του πυκνότητας και της μεγάλης του ικανότητας να δημιουργεί μεγάλη ποικιλία κραμάτων, έγινε στρατηγικό μέταλλο για την αεροδιαστημική (και όχι μόνο) βιομηχανία. Είναι, επίσης, εξαιρετικά χρήσιμο στη χημική βιομηχανία, τόσο αυτούσιο ως καταλύτης, όσο και με τη μορφή διαφόρων ενώσεων του.

Με κατάλληλα κράματα το αλουμίνιο μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αντοχή του μέχρι 690 MPa . Είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού και της θερμότητας, επεξεργάζεται εύκολα και είναι σχετικά φθηνό. Είναι από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, και είναι το δεύτερο ευρέως πιο χρησιμοποιούμενο μέταλλο μετά τον χάλυβα. Το κύριο μειονέκτημα του για την παραγωγή του είναι το υψηλό ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή του. Το πρόβλημα αυτό αντισταθμίζεται από το χαμηλό κόστος της ανακύκλωσης, τη μεγάλη διάρκεια ζωής του και της σταθερότητα των τιμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Επιβλέποντα Καθηγητή μας Δρ Κωνσταντίνο Ι. Γιαννακόπουλο για την ουσιαστική βοήθεια που μας προσέφερε, την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του για την διεκπεραίωση αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Θα θέλαμε επίσης να ευχαριστήσουμε την καθηγήτρια Δρ Πανδώρα Ψυλλάκη για τις χρήσιμες συμβουλές της καθώς επίσης και για την παραχώρηση του εργαστηριακού χώρου της Τριβολογίας, για να φυλάξουμε τα δοκίμια μας κατά την προετοιμασία τους.

Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Δρ Ματζούκο Σπυρίδωνα για την παραχώρηση του εργαστηριακού χώρου του Μηχανουργείου Ι για την κοπή των δοκιμίων.

Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Χρήστο Γ. Κατούφα Μηχανολόγο Μηχανικό Τ.Ε. για τις πολύτιμες συμβουλές του και την συμπαράσταση του σε όλη την διάρκεια αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μας στους γονείς μας Ελευθέριο και Ελένη Αεράκη, Διογένη και Κωνσταντίνα Σταθάτου για στήριξη που μας έδωσαν όλα αυτά τα χρόνια και συνεχίζουν να μας δίνουν ακόμα.

Γεώργιος Ε. Αεράκης
Ηλίας Δ. Σταθάτος
Αθήνα 2012

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός αυτής της πτυχιακής είναι η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς κράματος αλουμινίου σειράς 5XXX (5052). Τα κράματα της σειράς 5XXX ονομάζονται αλλιώς και ναυπηγικά κράματα, γιατί χρησιμοποιούνται κυρίως για ναυπηγικές εφαρμογές. Επομένως καταλαβαίνουμε ότι το περιβάλλον το οποίο βρίσκονται ευνοεί την διάβρωση των μετάλλων. Εμείς θα μελετήσουμε τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος μετά από την επίδρασή χλωριούχου νατρίου πάνω σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα θα μελετήσουμε την αντοχή του κράματος σε εφελκυσμό αφού πρώτα τα πειραματικά δοκίμια διαβρωθούν σε NaCl.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

Οι Abhay K. Jha *, P. Ramesh Narayanan, K. Sreekumar, P.P. Sinha, μελέτησαν την μέση αντοχή κράματος αλουμινίου AFNOR 7020 (Al-4.5Zn-1.5Mg) το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευή της κεφαλής υγραερίου της δεξαμενής κινητήρα πρόωσης. [E-1]

Ο Antony W. Thompson μελέτησε τον ρόλο που παίζει το υδρογόνο στην διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking, SCC) και πιο συγκεκριμένα μελέτησε πειραματικές και θεωρητικές εργασίες καθώς και διαφορετικές προοπτικές σχετικά με το πρόβλημα αυτό, πάνω σε κράματα αλουμινίου και ανοξείδωτου χάλυβα. [E-2]

Οι Songyi Chen, Kanghua Chen, Guosheng Peng, Le Jia, Pengxuan Dong, μελέτησαν την επίδραση της αντοχής του κράματος 7085 μετά την θερμικής κατεργασία, την αποβολή στις δοκιμές του εφελκυσμού, και την ηλεκτροχημική συμπεριφορά του κράματος.[E-3]

Οι Jing-Chie Lin, Hsueh-Lung Liao, Wern-Dare Jehng, Chih-Horng Chang, Sheng-Long Lee, μελέτησαν την επίδραση της θερμικής κατεργασίας του κράματος 7050, πάνω στην μέγιστη εφελκυστική τάση και στην διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση (SCC), όταν αυτό διαβρωθεί σε NaCl με PH 12.[E-4]

Οι Chen Song-yi, Chen Kang-hua, Peng Guo-sheng, Liang Xin, Chen Xue-hai μελέτησαν την επιρροή της βαφής του κράματος 7085 πάνω στην μικροδομή του και στην διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση (SCC). [E-5]

Οι Y. Reda, R. Abdel-Karim , I. Elmahallawi, μελέτησαν την γήρανση του κράματος 7075, σε διαφορετικές θερμοκρασίες, προκειμένου να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις των κύκλων θέρμανσης για την μηχανική, καθώς επίσης και οι ιδιότητες της διάβρωσης. [E-6]

Οι J. G. Rinker και M. Marek, μελέτησαν τις επιπτώσεις σκλήρυνσης με κατακρήμνιση στο κράμα 2020. Δηλαδή την αλλαγή της μικροδομής και της σκλήρυνσης, καθώς επίσης και της αντοχής στην διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση (SCC).[E-7]

Οι R. Balasubramaniam, D. J. Duquette και K. Rajan μελέτησαν την μηχανική συμπεριφορά με την μέθοδο CERT κραμάτων Al-Li, έπειτα από διάβρωση σε υδατικό διάλυμα NaCl 0.5M.[E-8]

ΚΑΙΦΑΛΑΙΟ 5 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5:1 Γενικές πληροφορίες για το αλουμίνιο

Οι αρχαίοι Έλληνες και Ρωμαίοι γνώριζαν τη στυπτηρία (διπλό θειικό άλας αργιλίου και καλίου) και την χρησιμοποιούσαν για να παρασκευάσουν στυπτικά και ξηραντικά προϊόντα. Η στυπτηρία είναι μία κρυσταλλική ένωση του αργιλίου με το κάλιο. Επίσης χρησιμοποιούσαν αργιλοπυριτικές ενώσεις στην κεραμική, φτιάχνοντας μαγειρικά σκεύη και άλλα αντικείμενα από πηλό, ο οποίος περιείχε μεγάλο ποσοστό στοιχείων αργιλίου.. Το 1761 ο Γκιτόν ντε Μορβό (Guyton de Morveau) πρότεινε το όνομα «αλουμίνα» για το οξειδίο του αργιλίου (Al_2O_3). Το αργίλιο ανακαλύφθηκε, ως στοιχείο, το 1808 από τον Βρετανό Σερ Χάμφρεϊ Ντέιβ, ο οποίος και του έδωσε το όνομα, αρχικά «αλούμιο» και αργότερα «αλουμίνιο», αφού το στοιχείο προερχόταν από το οξειδίο του, την αλουμίνα. Το 1825 ο Δανός επιστήμονας Χαν Κρίστιαν Έρνεστ (Hans Christian Ørsted) απομόνωσε πρώτη φορά το αργίλιο, όταν κατεργάστηκε άνυδρο χλωριούχο αργίλιο με αμάλγαμα καλίου. Το 1827 περιγράφηκε αναλυτικά από τον Βέλερ (Woehler) μία μέθοδος παρασκευής του αργιλίου σε σκόνη από άνυδρο χλωριούχο αργίλιο και κάλιο.

Ο Βέλερ γενικά πιστώνεται την απομόνωση του αργιλίου, αλλά επίσης και ο Έρστεντ πρέπει ν' αναφερθεί ως αυτός που το ανακάλυψε. Επιπλέον ο Pierre Berthier ανακάλυψε ότι περιέχεται αλουμίνιο στο βωξίτη και κατόρθωσε επιτυχημένα την εξόρυξη του μετάλλου από το ορυκτό. Το 1854 ο Ανρί Σεν-Κλερ Ντεβίλ (Henri St-Claire Deville), βασισμένος στις εργασίες του Βέλερ επινοεί την πρώτη εμπορική μέθοδο παραγωγής του. Αρχικά, το κόστος του αργιλίου ήταν υψηλότερο από αυτό του χρυσού και του λευκόχρυσου. Γι' αυτό το λόγο σε γεύματα του Ναπολέοντος Γ' της Γαλλίας, οι πιο σημαντικοί καλεσμένοι έτρωγαν σε πιάτα από αργίλιο.

Το 1886 ήρθε η μεγάλη επανάσταση στην παραγωγή αλουμινίου, οπότε εφευρέθηκε η μέθοδος Hall-Heroult. Σε αυτή τη μέθοδο, τήγμα μίγματος κρυσολίθου (φθοριούχο άλας του νατρίου και του αργιλίου: Na_3AlF_6) αργιλίου και οξειδίου του αργιλίου (αλουμίνα: Al_2O_3) ηλεκτρολύεται με συνεχές ρεύμα. Το τηγμένο αργίλιο συγκεντρώνεται στο βυθό του ηλεκτρολυτικού λουτρού. Όλο το αλουμίνιο που παράγεται στον κόσμο παράγεται με αυτή τη μέθοδο.

Το 1889 ο Bayer επινόησε μία μέθοδο καθαρισμού του βωξίτη προς παρασκευή αλουμίνας, με τη χρήση καυστικού νατρίου. Έτσι, άνοιξε ο δρόμος για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων αλουμινίου. Το 1900 η παγκόσμια παραγωγή αλουμινίου ήταν 8000 τόνοι. Έκτοτε αυξήθηκε με πολύ μεγάλους ρυθμούς, για να φτάσει το 1999 τα 24 εκατομμύρια τόνους. [1]

5.1.1 Βιομηχανική Παραγωγή Αλουμινίου

Το 1888 ξεκίνησε να παράγεται το αλουμίνιο σαν εμπορικό μέταλλο, με την μέθοδο Hall Heroult. Το πρώτο εργοστάσιο στην Ευρώπη που ξεκίνησε την παραγωγή αλουμινίου είχε έδρα την Ελβετία στο Neuhausen του Rheinfall, με την βοήθεια του Heroult. Εκείνη την περίοδο ιδρύθηκε στην Pennsylvania των Η.Π.Α η Αμερικάνικη Εταιρεία Αλουμινίου. Αυτά τα δύο εργοστάσια χρησιμοποιούσαν την μέθοδο Hall. Λίγο αργότερα η μέθοδος της ηλεκτρόλυσης έκανε την εμφάνισή της στην Γαλλία όπου ιδρύθηκε ένα εργοστάσιο στην Froges της Isere. Το εργοστάσιο αυτό ήταν εξοπλισμένο με λουτρά ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή αλουμινίου. Το 1914 χάρη στην ζήτηση των μετάλλων που είχε δημιουργηθεί λόγω του 1^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου, για την δημιουργία αεροπλάνων, οι κατασκευάστριες εταιρίες άρχισαν να χρησιμοποιούν το αλουμίνιο λόγω της ελαφρότητας του. Έτσι μετά τον 1^ο Παγκόσμιο Πόλεμο, η χρήση του αλουμινίου άρχισε να επεκτείνεται και σε άλλους κλάδους όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η ναυτιλία.

Σήμερα, η παραγωγή αλουμινίου ακολουθεί σε γενικές γραμμές την ακόλουθη διαδικασία: Πρώτα ο βωξίτης εξορύσσεται από το κοίτασμα (συνήθως επιφανειακό). Στη συνέχεια πλύνεται, θρυμματίζεται και διαλύεται σε πυκνό διάλυμα καυστικού νατρίου σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Με αυτό τον τρόπο, οι προσμίξεις του βωξίτη (κυρίως οξείδια του σιδήρου και του πυριτίου) απομακρύνονται και παραμένει στο διάλυμα το καυστικό νάτριο με το οξείδιο του αργιλίου. Στη συνέχεια απομακρύνεται και το καυστικό νάτριο και παραμένει μόνο το ένυδρο οξείδιο του αργιλίου, το οποίο πυρώνεται στους 1100° C έτσι, ώστε να απομακρυνθεί το νερό. Ακολουθεί η ηλεκτρόλυση. Το οξείδιο του αργιλίου διαλύεται σε τήγμα κρυολίθου, το οποίο βρίσκεται σε ηλεκτρολυτική λεκάνη με άνοδο ηλεκτρόδιο άνθρακα και κάθοδο την επένδυση της λεκάνης από ανθεκτικό μέταλλο. Στη συνέχεια διαβιβάζεται μέσα από αυτό συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσης αλλά εξαιρετικά υψηλής έντασης (περίπου 150000 Αμπέρ). Το τηγμένο αλουμίνιο συλλέγεται από το βυθό της λεκάνης. Το παραγόμενο κατά την ηλεκτρόλυση οξυγόνο κατευθύνεται προς την άνοδο από άνθρακα, τον οποίο καίει, (γι' αυτό και τα ηλεκτρόδια της ανόδου αντικαθίστανται τακτικά) διατηρώντας έτσι την θερμοκρασία του τήγματος σε υψηλά επίπεδα. Παράλληλα, όμως, παράγεται και φθόριο (προερχόμενο από τον κρυόλιθο), το οποίο συλλέγεται με ειδικό κάλυμμα της λεκάνης και, κατευθυνόμενο σε ειδική μονάδα ανακυκλώνεται, ώστε να μην καταλήξει στην ατμόσφαιρα.

Η ηλεκτρόλυση είναι μια διεργασία η οποία είναι εξαιρετικά ηλεκτροβόρα. Ένα τυπικό εργοστάσιο παραγωγής αλουμινίου καταναλώνει ρεύμα όσο μια μικρή πόλη. Ενδεχόμενη διακοπή ρεύματος για παραπάνω από 4 ώρες σημαίνει στερεοποίηση των τηγμάτων στις λεκάνες και, συνεπώς, καταστροφή τους. Γι' αυτό το λόγο, τα περισσότερα εργοστάσια είτε παράγουν επιτόπου την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν είτε συνδέονται με παραπάνω από μία πηγές ενέργειας.

Οι ιδιότητες που κάνουν το αλουμίνιο τόσο σημαντικό για την βιομηχανία είναι το χαμηλό του ειδικό βάρος, η υψηλή αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις και η εξαιρετική αντοχή του στη διάβρωση, η οποία οφείλεται στο φαινόμενο της παθητικοποίησης. Το καθαρό αλουμίνιο είναι αρκετά μαλακό και όλκιμο. Με την προσθήκη σιδήρου, χαλκού και άλλων κραματικών στοιχείων βελτιώνονται κατά πολύ οι μηχανικές του ιδιότητες. Το αλουμίνιο υφίσταται εύκολα κατεργασία με χύτευση και με αφαίρεση υλικού. Παρουσιάζει, επίσης, πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. [2]

5.1.2 Χρήσεις αλουμινίου και κραμάτων αλουμινίου

Τα κράματα αλουμινίου με 2,5-6,3% κ.β. χαλκό ονομάζονται ντουραλουμίνια. Περιέχουν συνήθως ως πρόσθετα κραματικά στοιχεία μαγνήσιο και σπανιότερα, μαγγάνιο και πυρίτιο. Παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες οφείλονται στη σκλήρυνση τους με δημιουργία κατακρημνισμάτων. Τα τελευταία χρόνια, χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική και σε άλλες εφαρμογές όπου το χαμηλό βάρος και οι καλές μηχανικές ιδιότητες σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι ζητούμενα κράματα αλουμινίου-λιθίου. Άλλα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία, τη βιομηχανία αθλητικών ειδών και τη ναυπηγική. Χρησιμοποιείται επίσης για την κατασκευή των κουτιών για ποτά, του αλουμινόχαρτου και άλλων υλικών και εργαλείων της κουζίνας.

Το οξείδιο του αργιλίου, ή αλουμίνα, βρίσκεται στη φύση με τη μορφή του ρουμπινιού, του ζαφειριού και του κορούνδιου. Το κορούνδιο έχει σκληρότητα στην κλίμακα Mohs ίση με 9, πράγμα που το κάνει ένα από τα σκληρότερα υλικά στη φύση. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ως λειαντικό η συνθετική αλουμίνα. Τα οξείδια του αργιλίου χρησιμοποιούνται επίσης στην υαλουργία και την κατασκευή λείξερ. Κρύσταλλοι ρουμπινιού χρησιμοποιούνται επίσης ως αισθητήρες πίεσης για υψηλές πιέσεις.

Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας κατασκευάζονται επίσης συχνά από αλουμίνιο, καθώς έχει μικρότερο βάρος και κόστος από το χαλκό (αν και όχι τόσο καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα). Οι στυπτηρίες, κρυσταλλικές ενώσεις (άλατα) του αργιλίου με το γενικό χημικό τύπο $K_2SO_4 \cdot Al_2(SO_4)_3 \cdot 24H_2O$ χρησιμοποιούνται ως στυπτικά καθώς και στη βαφική. [2]

5.2 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

5.2.1.Ελαφριά μέταλλα και κράματα

Το αλουμίνιο το τιτάνιο και το μαγνήσιο ανήκουν στην κατηγορία των ελαφριών μετάλλων των οποίων, δηλαδή των μετάλλων αυτών που η πυκνότητά τους έχει χαμηλές τιμές. Πιο συγκεκριμένα η πυκνότητές τους είναι: Al 2.7g/cm^3 , Ti 4.5g/cm^3 και Mg 1.7g/cm^3 . Για την κατασκευαστική βιομηχανία τα μέταλλα αυτά, και τα κράματα τους έχουν μεγάλη σημασία καθώς έχουν υψηλό ειδικό Μετρό Ελαστικότητας (E/ρ) και υψηλή ειδική μηχανική αντοχή (σ_{TS}/ρ), σε σχέση με τα άλλα μέταλλα και κράματα. Παρουσιάζουν επίσης και καλή αντοχή στην διάβρωση.

5.2.2. Γενικές ιδιότητες αλουμινίου και των κραμάτων του

Το καθαρό αλουμίνιο είναι μέταλλο ελαφρύ και όλκιμο. Οι μηχανικές του ιδιότητες εξαρτώνται από το ποσοστό καθαρότητας του αλλά και από το ποσοστό της ενδοτράχυνσης που έχει υποστεί κατά την διάρκεια των μηχανικών του κατεργασιών. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι 25% μικρότερη από του χαλκού. Λόγο όμως της χαμηλής πυκνότητάς του, το αλουμίνιο κατατάσσεται ως καλύτερος αγωγός του ηλεκτρισμού. Έχει μεγάλη χημική συγγένεια με το οξυγόνο και εάν αφαιρεθεί στην ατμόσφαιρα οξειδώνεται ταχέως, δίνοντας ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα Al_2O_3 το οποίο είναι αδιαπέραστο από το οξυγόνο, επομένως προσφέρει στο μέταλλο καλή αντιοξειδωτική προστασία.

Τα Κράματα αλουμινίου είναι κράματα που το αλουμίνιο (Al) είναι το επικρατέστερο μέταλλο. Τα χαρακτηριστικά στοιχεία των κραμάτων είναι ο χαλκός, το μαγνήσιο, το μαγγάνιο, το πυρίτιο και ο ψευδάργυρος. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες κραμάτων, τα κράματα **διαμόρφωσης και τα κράματα χύτευσης**, τα οποία υποδιαιρούνται σε **κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία, και σε κράματα των οποίων η θερμική κατεργασία είναι αδύνατη**. Οι ιδιότητες των κραμάτων διαμόρφωσης εξαρτώνται από την θερμική κατεργασία, ενώ των χυτών κραμάτων εξαρτώνται από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί.

Όπως το καθαρό αλουμίνιο, έτσι και τα κράματα του έχουν χαμηλή πυκνότητα, καλή θερμική αγωγιμότητα και υψηλή αντοχή σε διάβρωση. Οι κύριες προσθήκες των κραμάτων του αλουμινίου είναι : ο χαλκός Cu, ο

σίδηρος Fe, το μαγγάνιο Mn το μαγνήσιο Mg, το πυρίτιο Si και ο ψευδάργυρος Zn. Η επίδραση των προσθηκών στις ιδιότητες του αλουμινίου φαίνονται στον πίνακα 5.1. [3],[4]

ΠΟΣΘΗΚΗ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ
Χαλκός Cu	Σε ποσοστό έως 12% προκαλεί βελτίωση της μηχανικής αντοχής και της κατεργασιμότητας. Η σκλήρυνση επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση.
Σίδηρος Fe	Σε μικρά ποσοστά βελτιώνει την αντοχή και την σκληρότητα και ταυτόχρονα, μειώνει τις πιθανότητες θερμής ρωγμάτωσης κατά την χύτευση
Μαγγάνιο Mn	Βελτιώνει την ολκιμότητα και σε συνδυασμό με τον σίδηρο την χυτευσιμότητα
Μαγνήσιο Mg	Βελτιώνει την μηχανική αντοχή και την αντοχή στην διάβρωση. Σε ποσοστό μεγαλύτερο του 6% προκαλεί σκλήρυνση και κατακρήμνιση.
Πυρίτιο Si	Βελτιώνει κατά πολύ την χυτευσιμότητα και την αντοχή στην διάβρωση.
Ψευδάργυρος Zn	Μειώνει την χυτευσιμότητα, αλλά σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία προσθήκης βελτιώνει την μηχανική αντοχή.

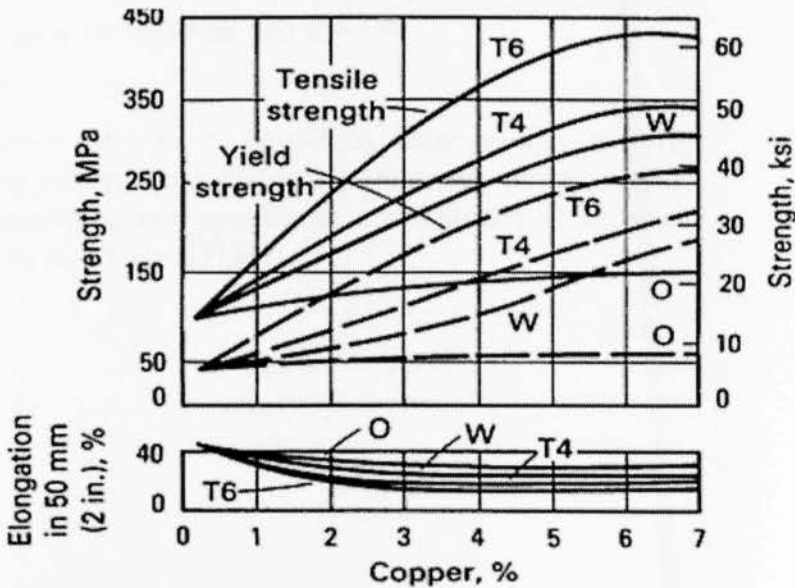
ΠΙΝΑΚΑΣ 1.Κύριες προσθήκες κραμάτων αλουμινίου και η επίδραση τους

5.2.2.1 Επίδραση κραματικών στοιχείων

Ο κυριότερος λόγος κραματοποίησης, είναι η αύξηση της αντοχής. Τα κραματικά στοιχεία όμως, που χρησιμοποιούνται, έχουν σημαντικές επιπτώσεις σε άλλα χαρακτηριστικά των κραμάτων. Οι σημαντικότερες επιπτώσεις των κυριότερων κραματικών στοιχείων αναλύονται παρακάτω :

➤ Χαλκός.

Μειώνει την αντοχή σε διάβρωση του κράματος και την ευχytότητα. Όμως βελτιώνει την σκληρότητα, την θερμική αγωγιμότητα και την μηχανική αντοχή σε ποσοστό έως 12 %.



➤ Μαγγάνιο.

Η ύπαρξη του σε ποσοστά μεγαλύτερα του 0,5% βελτιώνει την χυτευσιμότητα και την αυξάνει την ολκιμότητα.

➤ Πυρίτιο.

Στα περισσότερα κράματα χύτευσης, σαν κυρίαρχο κραματικό στοιχείο έχουν το πυρίτιο. Η προσθήκη πυριτίου βελτιώνει την χυτευσιμότητα και αυξάνει την αντοχή σε διάβρωση. Το πυρίτιο αλλάζει το χρώμα του κράματος από ασημί σε μαύρο όταν βρίσκεται σε περιεκτικότητα πάνω από 5% .

➤ Μαγνήσιο.

Στα κράματα αλουμινίου-πυριτίου σε πολύ μικρά ποσοστά (0,2-0,5%), αυξάνει την μηχανική αντοχή του κράματος. Σε ποσοστά μεγαλύτερα του 6% προκαλεί σκλήρυνση και κατακρήμνιση.

➤ Ψευδάργυρος.

Μειώνει την χυτευσιμότητα, αλλά εάν συνδυαστεί με χαλκό και μαγνήσιο αυξάνει τις μηχανικές αντοχές του κράματος με θερμική κατεργασία και φυσική γήρανση.

➤ Λίθιο

Σε πολύ μικρές ποσότητες έως 3%, στα διαμορφωμένα κράματα, βελτιώνει τις μηχανικές τους ιδιότητες. Αντιθέτως στα χυτά κράματα οι συνέπειες του είναι βλαβερές, και γι αυτό συνιστάτε η περιεκτικότητα του να μην υπερβαίνει το 0,003%.

➤ Σίδηρος

Η κατεργασιμότητα η ολκιμότητα και η αντοχή σε κρούση μειώνονται όταν η περιεκτικότητα σιδήρου στο κράμα είναι υψηλή. Στα κράματα χύτευσης υπό πίεση τα επίπεδα σιδήρου κυμαίνονται από 0,9-1%.

➤ Χαλκός – Μαγνήσιο

Στα κράματα αλουμινίου χαλκού, η προσθήκη μαγνησίου, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του κράματος, σύμφωνα με την οποία συνοδεύεται από υψηλή ολκιμότητα, που πραγματοποιείται κατά την διάρκεια της γήρανσης σε θερμοκρασία δωματίου. [3],[4]

5.2.3 Ονοματολογία κραμάτων αλουμινίου

Η ονοματολογία των χυτών και των διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου έχει αναπτυχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια. Η Ένωση Αλουμινίου (Aluminium Association, A.A. εμπορική ένωση για την παραγωγή αλουμινίου) είναι ευρέως γνωστή και αναγνωρίσιμη πλήρως από τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Η αναγνώριση των κραμάτων της μεταχειρίζεται διαφορετική ονοματολογία για τα **χυτά** και τα **διαμορφωμένα κράματα**, αλλά τα διαχωρίζει σε οικογένειες, για την απλοποίηση τους.

5.2.3.1 Ονοματολογία διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου

Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων αποτελούνται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος : Τα διαμορφωμένα κράματα διαχωρίζονται με έναν τετραψήφιο κωδικό, όπου το πρώτο στοιχείο δείχνει τα κύρια στοιχεία του κράματος. Το δεύτερο στοιχείο χρησιμοποιείται για να δηλώσει τροποποιήσεις των ορίων περιεκτικότητας των ακαθαρσιών. Τέλος, τα δύο τελευταία στοιχεία στην περίπτωση της σειράς 1XXX , δίνουν τα δεκαδικά ποσοστά, για περιεκτικότητες αλουμινίου υψηλότερες του 99,00%κ.β, ενώ στην περίπτωση κραμάτων αλουμινίου άλλων σειρών, τα δύο τελευταία στοιχεία χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της ειδικής κατηγορίας του κράματος της οικείας ομάδας. Παρακάτω συντάσσεται μια λίστα με τον χαρακτηρισμό κάθε οικογένειας **διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου** :

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 1XXX**

Είναι ουσιαστικά καθαρό αλουμίνιο με ελάχιστη περιεκτικότητα σε αλουμίνιο 99% κατά βάρος. Σκληρύνεται με ενδοτράχυνση. Διαμορφώνεται πολύ εύκολα, παρουσιάζει καλή αντοχή στη διάβρωση και καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα έχει καλές ηλεκτρικές και χημικές εφαρμογές. Οι πιο αντιπροσωπευτικές σειρές είναι : 1100, 1350. Το εύρος αντοχής σε εφελκυσμό κυμαίνεται από : 69 - 186 Mpa. 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). Η σειρά 1XXX υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, αλλά δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η αντοχή είναι το βασικό στοιχείο σχεδιασμού.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2XXX**

Κράματα στα οποία ο χαλκός είναι το κυριότερο κραματικό στοιχείο, ανάμεσα σε διάφορα στοιχεία όπως το μαγνήσιο. Η σειρά αυτή μπορεί με την κατάλληλη κατεργασία μπορεί να συγκριθεί με τον χάλυβα. Παλαιότερα αναφέρονταν ως σκληραλουμίνιο και ήταν κάποτε ένα από τα πιο κοινά κράματα της αεροδιαστημικής, αλλά ήταν ευαίσθητα σε ρηγμάτωση και διάβρωση λόγω καταπόνησης, και όλο και περισσότερο αντικαθίστανται από την σειρά 7000 σε νέα σχέδια. 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). Κάποια ειδικά κράματα της σειράς (πχ 2219 και 2048) συγκολλούνται, και έτσι χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε αεροσκάφη όπου η μέθοδος της συγκόλλησης προτιμάται. 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.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3XXX**

Πρόκειται για κράματα στα οποία το μαγγάνιο είναι το κυριότερο κραματικό στοιχείο. Διαμορφώνονται πολύ εύκολα και παρουσιάζουν καλή αντοχή στη διάβρωση και καλή συγκολλησιμότητα. Η αντοχή τους είναι μέτρια. Το εύρος αντοχής τους σε εφελκυσμό κυμαίνεται από : 110-282 Μpa. Η σειρά 3XXX υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση και έχει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση και πολύ καλή συγκολλησιμότητα. Έχει πολύ καλή επιδεκτικότητα σε επιχάλκωση.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 4XXX**

Πρόκειται για κράματα στα οποία το πυρίτιο είναι το κυριότερο κραματικό στοιχείο. Είναι επίσης γνωστά με την ονομασία silumin. Υφίστανται θερμική κατεργασία, έχουν καλά χαρακτηριστικά ροής και μέτρια αντοχή. Το εύρος της αντοχής τους σε εφελκυσμό κυμαίνεται από : 172- 380 Μpa.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5XXX**

Πρόκειται για κράματα στα οποία το μαγνήσιο είναι το κυριότερο κραματικό στοιχείο. Σκληρύνονται με ενδοτράχυνση. Παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση καλή συγκολλησιμότητα και καλή δυσκαμψία. Το εύρος της αντοχής σε εφελκυσμό κυμαίνεται από : 172-380

Mpa. Όλα τα κράματα της σειράς 5XXX υφίστανται σκλήρυνση με ψυξηλασία και έχουν σχετικά υψηλή αντοχή, εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση ακόμη και σε θαλάσσιο περιβάλλον. Συγκολλούνται εύκολα με πολλές τεχνικές ακόμη και σε μεγάλα πάχη μέχρι 20 cm. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίδεται ώστε να αποφεύγεται η χρήση κραμάτων σειράς 5XXX με Mg >3%, σε εφαρμογές συνεχούς έκθεσης σε θερμοκρασίες άνω των 100ο C. Τέτοια κράματα μπορεί να ευαισθητοποιηθούν σε διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων. Σ' αυτές τις περιπτώσεις συνιστώνται κράματα σαν τα 5454 και 5754.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 6XXX**

Πρόκειται για κράματα στα οποία το μαγνήσιο και το πυρίτιο είναι το κυριότερα κραματικά στοιχεία. Υφίστανται θερμική κατεργασία, έχουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση και εξαιρετική ολκιμότητα. Το εύρος της αντοχής τους σε εφελκυσμό κυμαίνεται από : 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.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 7XXX**

Πρόκειται για κράματα στα οποία ο ψευδάργυρος είναι το κυριότερο κραματικό στοιχείο, αλλά διαφορετικά στοιχεία όπως είναι ο χαλκός, το μαγνήσιο, το χρώμιο και το ζirkόνιο μπορούν να προσδιοριστούν. Η σειρά αυτή με τις κατάλληλες κατεργασίες μπορεί να παρουσιάσει τις μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας από όλα κράματα αλουμινίου. Το εύρος της αντοχής τους σε εφελκυσμό κυμαίνεται από : 220-605 Mpa. Η αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση της σειράς 7XXX δεν είναι τόσο υψηλή όσο των σειρών 5XXX και 6XXX, έτσι σε τέτοιες συνθήκες συνήθως επενδύονται, ή αν πρόκειται για φύλλα χρησιμοποιούνται επαλουμινωμένα (Alclad).

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 8XXX**

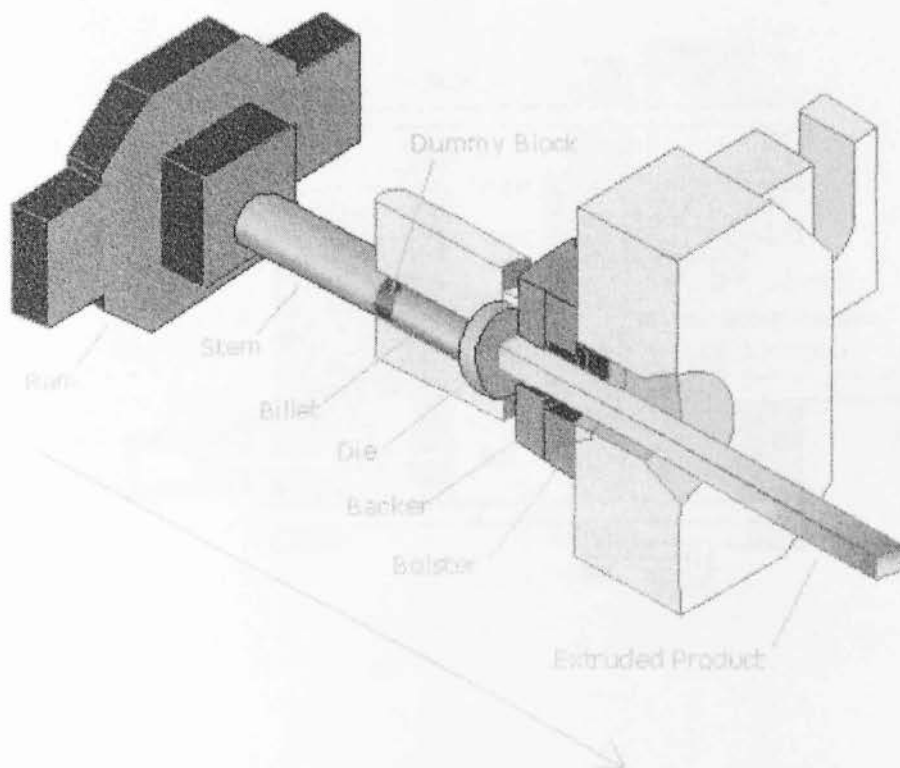
Πρόκειται για κράματα στα οποία χρησιμοποιείται κυρίως ο κασσίτερος και μερικές συνθέσεις λιθίου. Τα κράματα αυτά υφίστανται θερμική κατεργασία, έχουν μεγάλη αγωγιμότητα, μεγάλη αντοχή και σκληρότητα. Το εύρος της αντοχής τους σε εφελκυσμό κυμαίνεται από : 117-241 Mpa. Η σειρά 8XXX χρησιμοποιείται για τα κράματα με τα λιγότερα χρησιμοποιούμενα κραματικά στοιχεία Fe, Ni, και Li. Το καθένα χρησιμοποιείται για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρέχει στο κράμα.[3],[4]

5.2.3.2 Παραγωγή διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου

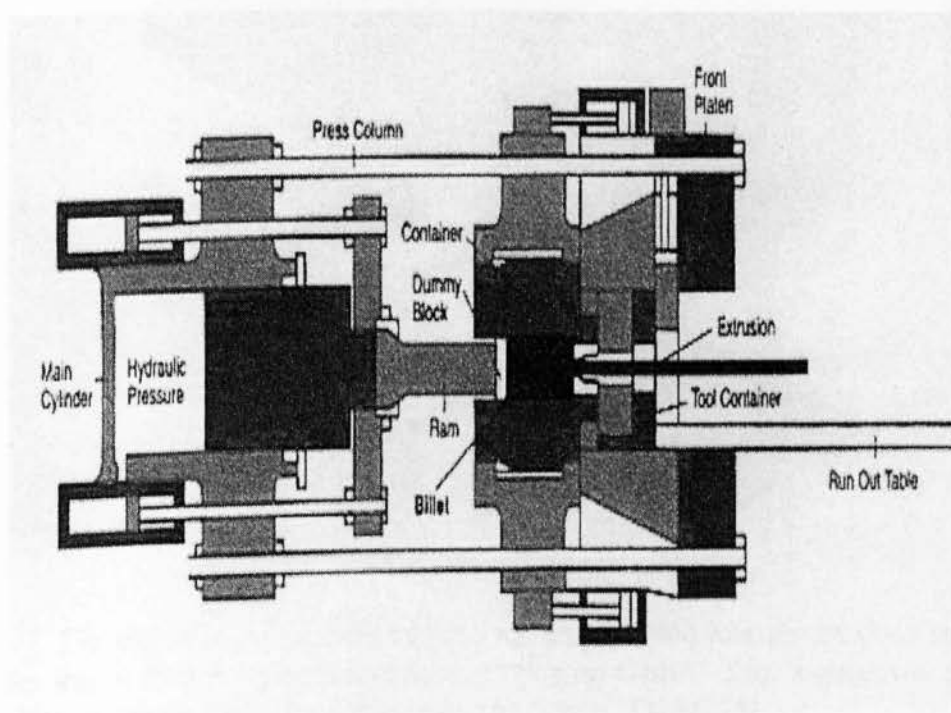
Τα διαμορφωμένα κράματα αλουμινίου προκύπτουν κυρίως από δύο διαδικασίες, την διέλαση και την έλαση. Η έλαση διαχωρίζεται σε θερμή και ψυχρή έλαση. Με την διέλαση παίρνουμε διάφορες διατομές, συμπαγείς ή κοίλες. Με την θερμή έλαση παίρνουμε πλάκες που μπορούν να έχουν πάχος έως 6mm. Ενώ με ψυχρή έλαση μπορούμε να πάρουμε φύλλο μέχρι και 0,05mm.

- **Διαδικασία της διέλασης**

Η διέλαση είναι μία τεχνική διαμόρφωσης του αλουμινίου σύμφωνα με την οποία το υλικό αναγκάζεται να περάσει από μία μήτρα η οποία δίνει το τελικό σχήμα στο προϊόν. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διαδικασία της διέλασης απλοποιημένη.



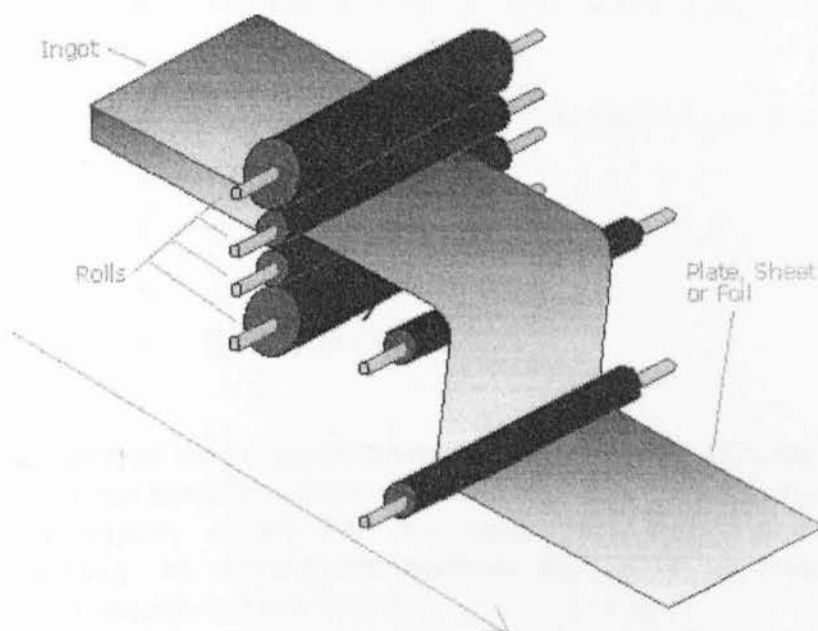
Το κράμα αλουμινίου που θα υποστεί διέλαση είναι σε μορφή μπιγέτας, που έχει προέλθει από χύτευση. Κατά την διέλευση το κράμα, εάν και είναι σε στερεή μορφή, είναι έντονα θερμό και ως εκ τούτου αρκετά μαλακό, ώστε να διευκολύνεται η διέλαση. Η θερμοκρασία στην οποία θερμαίνεται το κράμα είναι μεταξύ 375°C έως 500°C . Αφού τοποθετηθεί η μπιγέτα στην πρέσα της διέλασης, ασκείται τάση της τάξεως των 500 έως 700 MPa, οπότε η μπιγέτα αναγκάζεται να διέλθει από την μήτρα και να πάρει το επιθυμητό σχήμα. Εάν θέλουμε να πάρουμε κοίλη διατομή, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μία μπιγέτα η οποία έχει διατηρηθεί και επιπλέον μια βελόνα να περνάει μέσα από την οπή αυτής, σε αντίθετη φορά με την κίνηση του εμβόλου που προωθεί την μπιγέτα. Ο ρυθμός παραγωγής της πρέσας διέλασης εξαρτάται από το πόσο σκληρό είναι το κράμα του αλουμινίου. Έτσι για ένα σκληρό κράμα με πολύπλοκη διατομή, ο ρυθμός διέλασης μπορεί να είναι από 60 έως 80 cm το λεπτό. Αντιθέτως για μαλακό κράμα και απλή διατομή ο ρυθμός διέλασης μπορεί να είναι έως και 60-70 m το λεπτό. Καθώς το τελικό διαμορφωμένο κράμα εξέρχεται από την μήτρα ψήχεται είτε φυσικά, είτε με νερό ή αέρα. Το στάδιο της ψύξης είναι σημαντικό γιατί δίνει τις απαραίτητες μεταλλουργικές ιδιότητες στο κράμα. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται μια πρέσα διέλασης. Η φορά διέλασης είναι από αριστερά προς τα δεξιά.



- Διαδικασία της έλασης

Η έλαση είναι μια μέθοδος διαμόρφωσης των μετάλλων με πλαστική παραμόρφωση. Η μηχανή που πραγματοποιεί την έλαση ονομάζεται έλαστρο και αποτελείται από κυλίνδρους οι οποίοι περιστρέφονται με αντίθετη φορά και παρασύρουν το υλικό με την βοήθεια της τριβής. Η απόσταση μεταξύ των δύο κυλίνδρων καθορίζει το πόσο θα μειωθεί το πάχος του υλικού.

Στα κράματα αλουμινίου εφαρμόζεται η θερμή έλαση όταν θέλουμε να πετύχουμε μεγάλες μειώσεις πάχους. Η θέρμανση γίνεται σε θερμοκρασία περίπου 500°C και το κράμα περνάει αρκετές φορές από τους κυλίνδρους. Το αρχικό κομμάτι κράματος μπορεί να έχει πάχος έως 600 mm, και με διαδοχικές ελάσεις να φτάσει σε πάχος τα 6mm.



Για μεγαλύτερη μείωση πάχους και παρασκευή λεπτών φύλλων πάχους έως και 0,05mm, χρησιμοποιείται η ψυχρή έλαση. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται απλοποιημένη η διαδικασία της έλασης.[3],[4],[5]

5.2.3.3 Ονοματολογία χυτών κραμάτων αλουμινίου

Στα **κράματα χύτευσης**, το πρώτο στοιχείο υποδηλώνει, επίσης, το κύριο στοιχείο προσθήκης. Το δεύτερο και το τρίτο στοιχείο δείχνουν την ειδική κατηγορία του κράματος της οικείας ομάδας. Το τέταρτο στοιχείο, το οποίο χωρίζεται με τελεία από τα τρία πρώτα, αφορά την μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης : Με (0) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό, το οποίο έχει αποκτήσει την τελική του μορφολογία, με κατευθείαν χύτευση, ενώ με (1) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα. Μετατροπή της αρχικής χημικής σύστασης υποδηλώνεται με ένα γράμμα μπροστά από τον κωδικό.

Παρακάτω συντάσσεται μια λίστα με τον χαρακτηρισμό κάθε οικογένειας χυτών κραμάτων αλουμινίου :

- 1xx.x σειρά είναι τουλάχιστον 99% αλουμίνιο
- 2xx.x σειρά χαλκού
- 3xx.x σειρά πυρίτιο, το χαλκό και / ή μαγνήσιο
- 4xx.x σειρά πυριτίου
- 5xx.x σειρά μαγνήσιο
- 7xx.x ψευδαργύρου σειρά
- 8xx.x σειρά λιθίου

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 :

- i. Η καλή χυτευσιμότητα
- ii. Η απουσία ρωγματούσεων
- iii. Η ομογενής κατανομή του πορώδους (ατέλειες που μπορεί να προκληθούν λόγω της συστολής του μετάλλου κατά την στερεοποίηση)
- iv. Η παραγωγή λεπτόκοκκων χυτών αντικειμένων

- v. Η καλή αντοχή εν θερμώ, και
- vi. Η καλή αντοχή στην διάβρωση.

Οι χαμηλές θερμοκρασίες τήξης των κραμάτων αλουμινίου, επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση των καλουπιών χύτευσης που πραγματοποιούνται με τρεις τρόπους :

1. **Χύτευση σε άμμο.** Η μέθοδος εφαρμόζεται για την παραγωγή μικρής ποσότητας χυτών αντικειμένων, πολύπλοκων εξαρτημάτων ή αντικειμένων ιδιαίτερης μορφής.
2. **Χύτευση σε μεταλλικό τύπο.** Το κράμα χυτεύεται με την βοήθεια της βαρύτητας ή χαμηλής πίεσης. Με την μέθοδο αυτή τα παραγόμενα χυτά, παρουσιάζουν μικρότερο πορώδες σε σύγκριση με την χύτευση σε άμμο. Ωστόσο η μέθοδος αντενδείκνυται στην περίπτωση κατασκευής εξαρτημάτων, εργαλείων ή αντικειμένων πολύπλοκης γεωμετρίας.
3. **Χύτευση υπό πίεση.** Με την μέθοδο αυτή λαμβάνονται λεπτόκοκκα χυτά, με λείες επιφάνειες και γεωμετρική ακρίβεια.

Γενικά οι επιτυγχανόμενες μικροδομές και κατ' επέκταση οι μηχανικές ιδιότητες των χυτών εξαρτώνται από κυρίως από την ταχύτητα στερεοποίησης, άρα και από την μέθοδο χύτευσης.

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Κράμα	Τεχνική χύτευσης	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{TS} (MPa)	ϵ (%)	Χρήσεις
208.0-F	Σε άμμο	97	145	2,5	Για γενικές χρήσεις
242.0-T21	Σε άμμο	125	185	1	Για την κατασκευή βαλβίδων κυλινδροκεφαλών αυτοκινήτων, εμβόλων, κτλ.
242.0-T571	Σε άμμο	205	220	0,5	
242.0-T77	Σε άμμο	160	275	2	
242.0-T571	Σε μεταλλικό τύπο	235	205	1	
242.0-T61	Σε μεταλλικό τύπο	290	325	0,5	
295.0-T4	Σε άμμο	110	220	5	Για προϊόντα υψηλής αντοχής
295.0-T6	Σε άμμο	165	250	2	
308.0-F	Σε μεταλλικό τύπο	110	195	2	Για γενικές χρήσεις
319.0-F	Σε άμμο	125	185	2	Για τμήματα μηχανών
319.0-F	Σε μεταλλικό τύπο	130	235	2,5	

319.0-T6	Σε άμμο	165	250	2	
319.0-T6	Σε μεταλλικό τύπο	185	280	3	
355.0-T6	Σε άμμο	175	240	3	Για την κατασκευή τμημάτων μηχανών, αντλιών, πλαισίων στροφάλων, ζαντών τροχών αυτοκινήτων, μουσικών οργάνων, κτλ.
355.0-T6	Σε μεταλλικό τύπο	190	290	4	
355.0-T7	Σε άμμο	250	265	0,5	
355.0-T7	Σε μεταλλικό τύπο	210	280	2	
356.0-T6	Σε άμμο	165	230	3,5	
356.0-T6	Σε μεταλλικό τύπο	185	265	5	
356.0-T7	Σε άμμο	210	235	2	
356.0-T7	Σε μεταλλικό τύπο	165	220	6	
360.0-F	Υπό πίεση	170	325	3	
380.0-F	Υπό πίεση	165	330	3	
413.0-F	Υπό πίεση	140	300	2,5	Για την κατασκευή μεγάλων χυτών, πολύπλοκης γεωμετρίας και μικρού πάχους, όπου απαιτείται υψηλή αντοχή σε διάβρωση

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 : Μέσες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων και κύριες χρήσεις χαρακτηριστικών κραμάτων Al, που παράγονται με διαφορετικές τεχνικές χύτευσης.

Τα κράματα χύτευσης περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες στοιχείων κραμάτωσης, απ' ότι τα κράματα διαμόρφωσης. Τα στοιχεία αυτά σχηματίζουν ευτηκτικά, μειώνοντας έτσι τις θερμοκρασίες χύτευσης. Τα κυριότερα κράματα χύτευσης είναι :

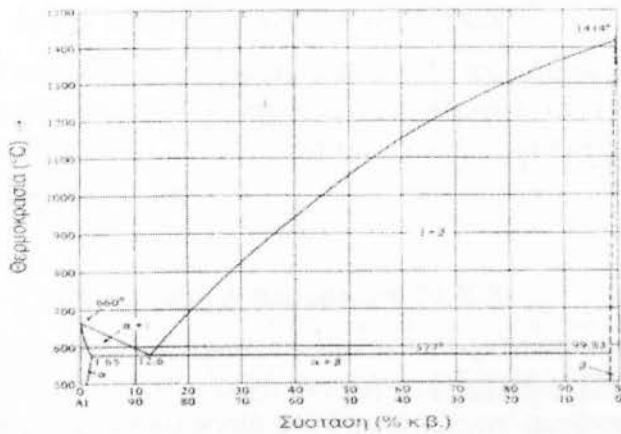
- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2XX.X**

Πρόκειται για κράματα Al-Cu, τα οποία χρησιμοποιούνται πλέον σπάνια, λόγω της χαμηλής μηχανικής τους αντοχής και της κακής αντοχής τους στην διάβρωση.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3XX.X**

Πρόκειται για κράματα Al-Si, κράματα Al-Si-Mg και κράματα Al-Si-Cu. Τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα είναι τα πρώτα. Αυτά περιέχουν πυρίτιο από 5%- 20%, αν και τις περισσότερες φορές προτιμούνται αυτά που έχουν ευτηκτική ή υποευτηκτική σύσταση (σχήμα 4), όπως για παράδειγμα το κράμα

ALPAX, με 13%Si (σχήμα 5 α). τα κράματα χυτεύονται εύκολα και έχουν

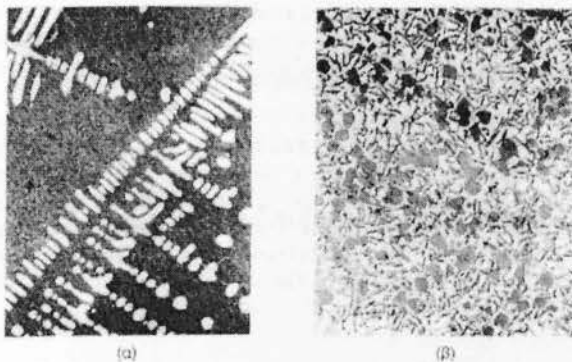


καλή αντοχή στην διάβρωση.

ΣΧΗΜΑ 4: Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του διμερούς συστήματος Al-Si.

Προσθήκη Mg, σε ποσοστό 0,3%-1%, ή Cu, σε ποσοστό 3% έως 5%, βελτιώνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων Al-Si. Κράματα Al-Si-Cu, η περιεκτικότητα των οποίων σε Si είναι γειτονική της ευτηκτικής σύστασης 12,7%Si, παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά εν θερμώ και χρησιμοποιούνται για την παρασκευή εμβόλων στις μηχανές εσωτερικής καύσης.

Η ρύθμιση των ιδιοτήτων των κραμάτων αυτών επιτυγχάνεται με τον συνδυασμό διάφορων μηχανισμών : με την δημιουργία στερεού διαλύματος, α φάσης, με την διασπορά φάσης β, και την ρύθμιση των συνθηκών στερεοποίησης (επίδραση στο μέγεθος των κόκκων και στο είδος των σχηματιζόμενων ευτηκτικών). Βιομηχανικά η εκλέπτυνση των κόκκων, γίνεται με την προσθήκη TiB_2 , ενώ η μεταβολή των ευτηκτικών με προσθήκη Na, με την μορφή NaF, ή Sr.



ΣΧΗΜΑ 5: (α) Μικροδομή ALPAX, δενδρίτες στερεού διαλύματος, φάσης α, μέσα στο ευτηκτικό Al-Si (x35). (β) Μικροδομή κράματος Al-20%Si-3.5%Cu. Διακρίνονται οι μικροί κρύσταλλοι Si ομογενώς διασκορπισμένοι μέσα στο ευτηκτικό Al-Si (x75)

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5XX.X**

Πρόκειται για κράματα Al-Mg. Το κυριότερο πλεονέκτημα τους είναι η εξαιρετική τους αντοχή σε θαλάσσιο περιβάλλον, (στην ατμόσφαιρα ή μέσα σε θαλασσινό νερό). Έχουν καλή κατεργασιμότητα αλλά μέτρια χυτευσιμότητα.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 7XX.X**

Πρόκειται για κράματα Al-Zn, και κράματα Al-Zn-Mg. Αυτά χυτεύονται δύσκολα, αλλά έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση. Επιπλέον υφίστανται φυσική γήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, γι' αυτό οι μηχανικές τους ιδιότητες λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους μετά από 1 μέχρι 2 μήνες. Η ταχύτητα απόψυξης λίγο επηρεάζει τις μηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες παραμένουν σταθερές σε όλο το πάχος των χυτών αντικειμένων.[3],[4],[5],[6]

5.2.3.4 Ονοματολογία θερμικών κατεργασιών κραμάτων αλουμινίου

Το δεύτερο μέρος της κωδικής ονομασίας, τόσο για τα κράματα διαμόρφωσης όσο και για τα κράματα χύτευσης, αναφέρεται στην κατεργασία, μηχανική ή θερμική, την οποία έχουν υποστεί. Για παράδειγμα, το 1060-H14 είναι αλουμίνιο καθαρότητας 99,60%, το οποίο έχει υποστεί μόνο ενδοτράχυνση, η οποία έχει οδηγήσει σε αύξηση της σκληρότητας του κατά 50%. [7]

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ
F	Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς μηχανική ή θερμική κατεργασία
O	Ανόπτηση
H	Ενδοτράχυνση, μόνο για τα κράματα διαμόρφωσης

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 θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης. Το X κυμαίνεται από 1-8, υποδηλώνοντας τον βαθμό σκλήρυνσης πριν από σταθεροποίηση.
H3X	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης. Το X κυμαίνεται από 1-8, υποδηλώνοντας τον βαθμό σκλήρυνσης πριν από την σταθεροποίηση.
T	Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση
T1	Βαφή από την θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και φυσική γήρανση
T2	Βαφή από την 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 την θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη από αυτής του περιβάλλοντος
T6	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη από 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 την θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, κατεργασίας εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση
W	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης. Χρησιμοποιείται μόνο για τα κράματα, που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3 : Κωδικοποίηση κατά Α.Α. των κραμάτων αλουμινίου, ανάλογα με τις κατεργασίες που έχουν υποστεί [7]

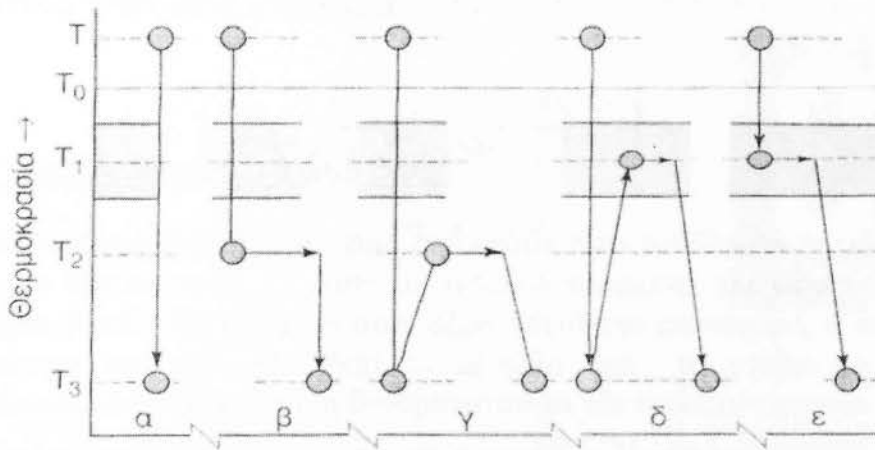
5.2.4. Θερμικές κατεργασίες μεταλλικών υλικών

Τα περισσότερα μεταλλικά προϊόντα υφίστανται σε κάποιο από τα στάδια της παραγωγής τους θερμικές κατεργασίες, οι οποίες άλλοτε συνοδεύονται από πλαστική παραμόρφωση και άλλοτε όχι. Οι θερμικές εργασίες εκτελούνται προκειμένου το μεταλλικό υλικό να αποκτήσει συγκεκριμένες ιδιότητες. Το αποτέλεσμα μιας θερμικής κατεργασίας καθορίζεται από δύο σημαντικές παραμέτρους :

1. Τον χρόνο παραμονής σε συγκεκριμένη θερμοκρασία,
2. Την ταχύτητα διέλευσης από την αρχική στην τελική θερμοκρασία

Οι κυριότερες θερμικές κατεργασίες των μεταλλικών υλικών είναι : η βαφή, η κλιμακωτή βαφή, η επαναφορά μετά από βαφή και η ισοθερμοκρασιακή ανόπτηση. (σχήμα 6). Στα κράματα αλουμινίου οι κυριότερες θερμικές κατεργασίες είναι η σκλήρυνση με κατακρήμνιση και η ανόπτηση.

Θεωρούμε ένα κράμα δεδομένης σύστασης, το οποίο παρουσιάζει ένα σημείο αντιστρεπτού μετασχηματισμού με αλλαγή φάσεων στην θερμοκρασία T_0 . Ξεκινώντας από την αρχική κατάσταση, για όλα τα πειράματα, το μέταλλο φέρεται σε μία θερμοκρασία $T > T_0$, για αρκετό χρόνο, ώστε να είναι δυνατό να αποκατασταθεί η σταθερή κατάσταση στην θερμοκρασία T . η θερμοκρασία T_1 αντιστοιχεί στην μέγιστη ταχύτητα μετασχηματισμού, όπου η ταχύτητα του μετασχηματισμού γίνεται πρακτικά μηδέν. [7],[8]



ΣΧΗΜΑ 6: Σχηματική παράσταση των κυριότερων θερμικών κατεργασιών, στις οποίες η περιοχή του γρήγορου μετασχηματισμού είναι γραμμοσκιασμένη : (α) βαφή, (β) κλιμακωτή βαφή, (γ) επαναφορά μετά από βαφή, (δ) και (ε) ισοθερμοκρασιακή ανόπτηση.

5.2.4.1 Βαφή

Κατά την βαφή, το κράμα που βρίσκεται, αρχικά, στην κατάσταση ισορροπίας σε θερμοκρασία T , αποψύχεται ταχύτατα σε θερμοκρασία T_3 . Κατά την διέλευση του από την γραμμοσκιασμένη περιοχή, (σχήμα 6), δεν έχει τον χρόνο να υποστεί τον αντίστοιχο αντιστρεπτό μετασχηματισμό. Η θερμική διαδικασία της βαφής επιτρέπει στο μέταλλο ή στο κράμα να διατηρήσει την αρχική δομή ισορροπίας, (που είχε στην υψηλή θερμοκρασία T) και στην χαμηλότερη θερμοκρασία T_3 , αλλά σε μετασταθή κατάσταση. Η βαφή πραγματοποιείται με την ταχεία εμβάπτιση του μετάλλου ή του κράματος υψηλής θερμοκρασίας T , σε μέσο βαφής ή λουτρό βαφής, χαμηλής θερμοκρασίας T_3 . Ως μέσα βαφής συνήθως χρησιμοποιούνται ο αέρας, το νερό το λάδι, τήγματα αλάτων, κτλ.[8]

5.2.4.2 Μερική ή κλιμακωτή βαφή

Κατά την μερική ή κλιμακωτή βαφή, το μέταλλο ή το κράμα από την θερμοκρασία T δεν αποψύχεται κατευθείαν σε θερμοκρασία T_3 , αλλά σε πρώτο στάδιο φέρεται σε ενδιάμεση θερμοκρασία T_2 , η οποία είναι κατώτερη της θερμοκρασίας T_1 , στην οποία πραγματοποιείτε ο αντιστρεπτός μετασχηματισμός. Στην θερμοκρασία αυτή το μέταλλο παραμένει για κάποιο σύντομο χρονικό διάστημα και εν συνεχεία αποψύχεται στην τελική θερμοκρασία T_3 . Κάτω από αυτές τις συνθήκες δίνεται στο κράμα η

δυνατότητα – ο χρόνος -, να έχει μια μερική εξέλιξη προς την κατάσταση ισορροπίας, χωρίς όμως ο μετασχηματισμός αυτός να ολοκληρώνεται. [8],[9]

5.2.4.3 Επαναφορά μετά από βαφή

Η επαναφορά μετά από βαφή συνιστάται στην αναθέρμανση του υλικού μέχρι την θερμοκρασία T_2 , όπου το μέταλλο παραμένει για κάποιο χρονικό διάστημα. Ακολουθεί απόψυξη στον αέρα. Μετά την επαναφορά, η αυξημένη σκληρότητα που είχε αποκτήσει το μέταλλο από το στάδιο της βαφής ελαττώνεται, ενώ αυξάνονται η δυσθραυστότητα και η ολκιμότητα του.

Οι τιμές των παραμέτρων της επαναφοράς επιλέγονται έτσι ώστε να είναι συμβατές και αξιοποιήσιμες οι τιμές της δυσθραυστότητας και της ολκιμότητας.

5.2.4.4 Ανόπτηση

Η ανόπτηση είναι μία θερμική κατεργασία που εφαρμόζεται στα θερμικώς κατεργάσιμα κράματα άλλα και στα μη θερμικώς κατεργάσιμα, έχοντας σκοπό την μείωση των παραμενουσών τάσεων που δημιουργούνται κατά την ψυχρή κατεργασία ή την χύτευση. Εκτός όμως από την μείωση των τάσεων η ανόπτηση μεταβάλλει και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Η ανόπτηση γίνεται σε θερμοκρασίες της τάξης του $1/3$ και του $1/2$ του σημείου τήξης του κράματος ή του μετάλλου. Πιο συγκεκριμένα η ανόπτηση στο αλουμίνιο γίνεται σε θερμοκρασίες από 300°C έως 450°C . Ο χρόνος καθώς και η θερμοκρασία της ανόπτησης παίζουν σπουδαίο ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα. Στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 7) φαίνεται η επίδραση του χρόνου αλλά και της θερμοκρασίας ανόπτησης σε δύο κράματα αλουμινίου.

Είναι εμφανές ότι στην θερμοκρασία στην οποία γίνεται η ανόπτηση επιδρά σημαντικά στο όριο διαρροής, εν αντιθέσει με τον χρόνο, ο οποίος έχει μικρότερη επίδραση. Επίσης συνδυάζοντας τις κατάλληλες θερμοκρασίες με τον κατάλληλο χρόνο, μπορούμε να πάρουμε κράματα με μηχανικές ιδιότητες ενδιάμεσες του ψυχρά διαμορφωμένου υλικού και του πλήρως ανοπτημένου

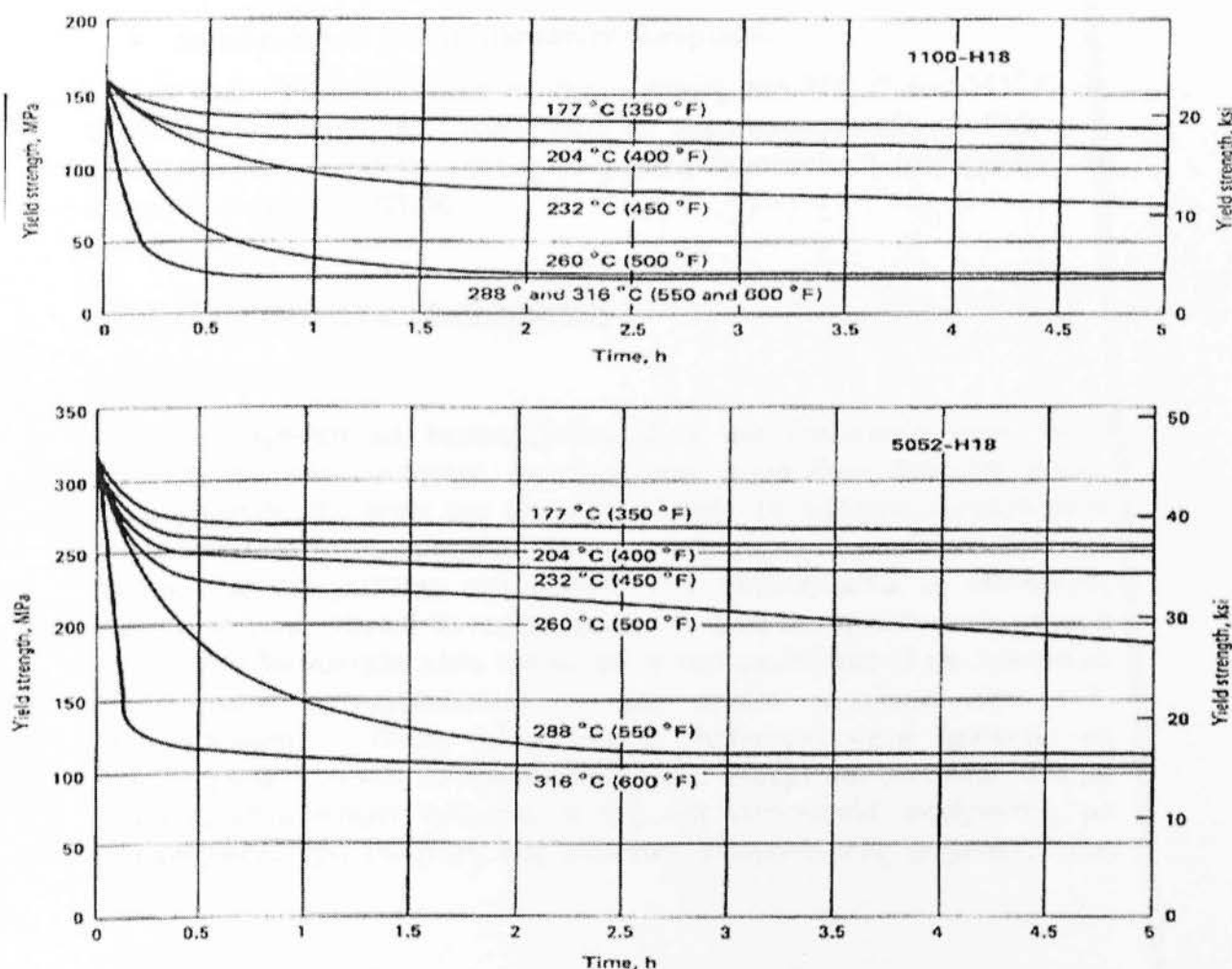
Εν συνεχεία ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή διάφορων ειδών ανόπτησης :

• Ολική ανόπτηση.

Η ολική ανόπτηση εφαρμόζεται σε θερμικώς και μη θερμικώς κατεργάσιμα κράματα και δίνει προϊόντα τα οποία έχουν την μέγιστη κατεργασιμότητα και ολκιμότητα. Επίσης το υλικό μετά την ανόπτηση είναι ανακρυσταλλωμένο. Οι

θερμοκρασίες στις οποίες συνήθως εφαρμόζεται αυτή η κατεργασία στα κράματα αλουμινίου κυμαίνονται από τους 345o C έως τους 415o C για το χρονικό διάστημα των 2-3 ωρών. Στα θερμικώς κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου, οι φάσεις που δημιουργούνται μετά από την ολική ανόπτηση κατακρημνίζονται και έτσι σταθεροποιούνται, έχοντας σαν αποτέλεσμα να αποφεύγεται η φυσική γήρανση.

Representative isothermal annealing curves for 1100-H18 and 5052-H18



ΣΧΗΜΑ 7: (α) Ανόπτηση κράματος αλουμινίου 1100-H18, (β) ανόπτηση κράματος αλουμινίου 5052-H18

• Μερική ανόπτηση.

Η μερική ανόπτηση εφαρμόζεται σε ψυχρά κατεργασμένα, μη θερμικώς κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου. Σκοπό έχει να παράγει προϊόντα με μηχανικές ιδιότητες ενδιάμεσες από εκείνες του υλικού που έχει ενδοτραχυνθεί στον μέγιστο βαθμό (H18) και του υλικού που έχει υποστεί ολική ανόπτηση.

- **Αποτατική ανόπτηση.**

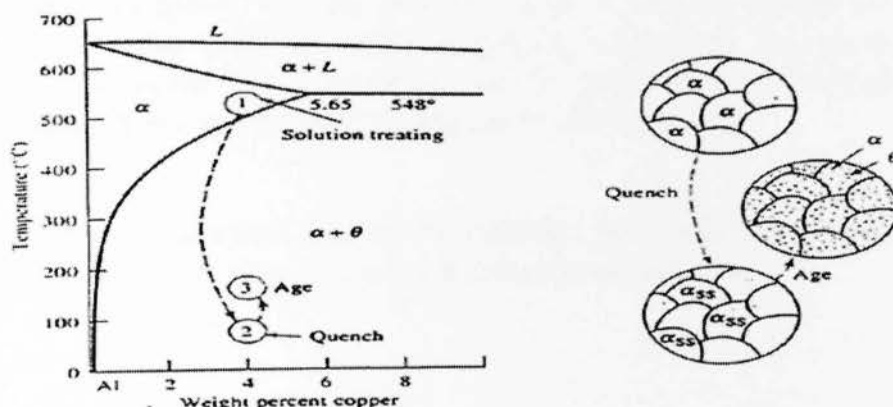
Η αποτατική ανόπτηση εφαρμόζεται στα θερμικώς κατεργάσιμα, διαμορφωμένα κράματα αλουμινίου, με σκοπό την απαλλαγή του υλικού από τις μηχανικές τάσεις που εφαρμόστηκαν, κατά την διάρκεια της ενδοτράχυνσης. Η αποτατική ανόπτηση γίνεται σε θερμοκρασίες μέχρι των 345°C. Κατά την αποτατική ανόπτηση το υλικό ενδέχεται να υποστεί μερική ή και ολική ανακρυστάλλωση

- **Ανόπτηση των χυτών κραμάτων αλουμινίου.**

Η ανόπτηση αυτή γίνεται σε θερμοκρασίες από 315° C έως 345° C, με σκοπό την απαλλαγή των χυτών από τις παραμένουσες τάσεις. Επίσης η ανόπτηση αυτή, προσδίδει στα χυτά μεγάλη διαστασιακή σταθερότητα σε βαθμιαίες θερμάνσεις.[8],[9]

5.2.4.5 Σκλήρυνση με κατακρήμνιση

Η σκλήρυνση με κατακρήμνιση είναι μία διαδικασία στην οποία δημιουργούμε μία λεπτομερή διασπορά των σωματιδίων δεύτερης φάσης (κατακρημνίσματα), εντός του μητρικού υλικού. Τα κατακρημνίσματα αυτά δρουν ανασταλτικά ως προς την κίνηση των διαταραχών με αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας του υλικού. Πιο συγκεκριμένα οι διαταραχές αναγκάζονται να τμήσουν τα κατακρημνίσματα ή να τα παρακάμψουν, οπότε η κίνηση των διαταραχών μέσα στο υλικό να παρεμποδίζεται. Η σκλήρυνση με κατακρήμνιση πραγματοποιείται σε τρία στάδια τα οποία είναι : 1. Ομογενοποίηση, 2. Βαφή, 3.Γήρανση. Η διαδικασία αυτή βρίσκεται σε εφαρμογή στα θερμικώς κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου. Αντίθετα, στα μη θερμικώς κατεργάσιμα κράματα, η θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με κατακρήμνιση, έχει ελάχιστη έως μηδενική επίδραση στις μηχανικές τους ιδιότητες.



ΣΧΗΜΑ 8: Στάδια σκλήρυνσης με κατακρήμνιση.

Το πρώτο στάδιο της είναι η **ομογενοποίηση**. Στην ομογενοποίηση έχουμε θέρμανση του υλικού κοντά στην θερμοκρασία της solidus. Με την θέρμανση αυτή προσπαθούμε να πετύχουμε την διάλυση των κραματικών στοιχείων στην μητρική φάση του αλουμινίου. Έτσι δημιουργείται ένα υπερκορεσμένο, σε κραματικά στοιχεία, στερεό διάλυμα.

Η θερμοκρασία ομογενοποίησης είναι σημαντικός παράγοντας, καθώς σχετίζεται άμεσα με τον ρυθμό διάχυσης των κραματικών στοιχείων. Έτσι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, τόσο περισσότερα κραματικά στοιχεία διαχέονται στο στερεό διάλυμα, με αποτέλεσμα το στερεό διάλυμα να γίνεται πιο ομογενές. Έτσι επιτυγχάνουμε καλύτερα αποτελέσματα στα επόμενα στάδια της θερμικής κατεργασίας.

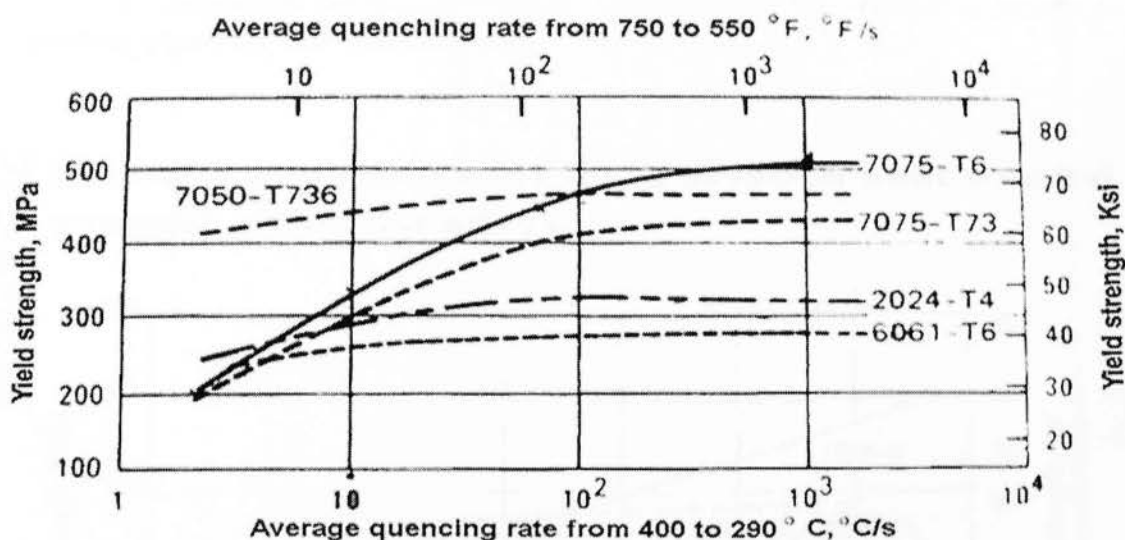
Ένας άλλος παράγοντας που επιδρά στην ομογενοποίηση είναι ο χρόνος. Ο χρόνος πρέπει να είναι αρκετός ώστε να γίνει πλήρης διάχυση όλων των κραματικών στοιχείων σε όλη την μάζα του μητρικού υλικού, και να δημιουργηθεί ένα ομογενές στερεό διάλυμα.

Το δεύτερο στάδιο είναι η **βαφή**. Σκοπός της βαφής είναι η διατήρηση του υπέρκορου στερεού διαλύματος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό επιτυγχάνεται με την ταχεία ψύξη του κράματος σε κάποιο ψυκτικό μέσο. (νερό, αέρας, λάδι). Κάθε ψυκτικό μέσο έχει διαφορετικό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, οπότε και προσφέρει το καθένα και διαφορετικό ρυθμό ψύξης. Η ψύξη κατά την βαφή γίνεται με συναγωγή θερμότητας. Ο ρυθμός ψύξης δίνεται από την παρακάτω σχέση, η οποία είναι γνωστή και σαν « νόμος ψύξης του Newton»

$$q = \bar{h}A(T_w - T_{\infty})$$

Ο ρυθμός ψύξης επιδρά στις μηχανικές ιδιότητες καθώς και στην αντοχή των κραμάτων στην διάβρωση. Αυτό συμβαίνει γιατί όσο πιο αργός είναι ο ρυθμός ψύξης, τα διαλυτοποιημένα κραματικά στοιχεία προλαβαίνουν να διαχυθούν, με αποτέλεσμα να μειωθεί ο αριθμός των διαλυτοποιημένων κραματικών στοιχείων που θα δώσουν στην συνέχεια κατακρημνίσματα. Αντίθετα όσο πιο γρήγορος είναι ο ρυθμός ψύξης, τα διαλυτοποιημένα κραματικά στοιχεία δε διαχέονται, οπότε μεγαλώνει ο αριθμός των κατακρημνισμάτων, και συνεπώς οι μηχανικές ιδιότητες.

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 9), φαίνεται πώς επιδρά ο ρυθμός ψύξης στο όριο διαρροής σε τρία διαφορετικά κράματα αλουμινίου.



ΣΧΗΜΑ 9: Επίδραση ρυθμού ψύξης στο όριο διαρροής.

Έχει παρατηρηθεί ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός ψύξης, τόσο αυξάνεται το όριο διαρροής σε κράματα τα οποία είναι ευαίσθητα στις αλλαγές του ρυθμού ψύξης. Τέτοια κράματα είναι της σειράς 7XXX. Αντιθέτως για κράματα τα οποία δεν είναι ευαίσθητα στις αλλαγές του ρυθμού ψύξης, όπως η σειρά 2XXX και η σειράς 6XXX, η αύξηση του ρυθμού ψύξης, δεν έχει σημαντική επίδραση στο όριο διαρροής. Αυτό επιβεβαιώνεται από το παρακάτω διάγραμμα.

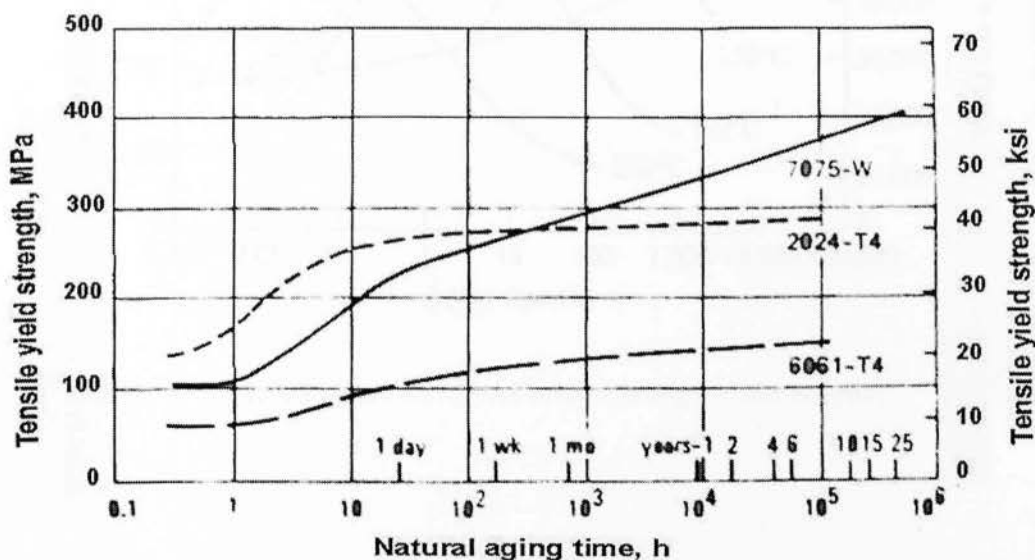
Το τρίτο στάδιο είναι η **γήρανση**. Η γήρανση είναι η διαδικασία με την οποία δημιουργείται μια ομοιόμορφη διασπορά κατακρημνισμάτων από το υπέρκορο στερεό διάλυμα. Επειδή το υπέρκορο στερεό διάλυμα δεν βρίσκεται σε ισορροπία, κατά την διάρκεια της γήρανσης μεταπίπτει σε πιο σταθερή μορφή, με ταυτόχρονο σχηματισμό κατακρημνισμάτων. Στο αρχικό στάδιο της γήρανσης δημιουργούνται οι ζώνες G.P.(Guinier-Preston). Οι ζώνες αυτές αποτελούνται από άτομα διαλελυμένων κραματικών στοιχείων (πχ Cu, Mg, Zn), που έχουν συσσωματωθεί. στην συνέχεια οι ζώνες G.P. αυξάνουν σε μέγεθος και δημιουργούν τα κατακρημνίσματα. Η γήρανση είναι δύο ειδών α) **φυσική** και β) **τεχνητή**. Η φυσική γήρανση πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, εν αντιθέσει με την τεχνητή, η οποία πραγματοποιείται σε υψηλότερη θερμοκρασία. (120° C – 200° C).

• Φυσική γήρανση

Κράματα τα οποία έχουν υποστεί ομογενοποίηση και βαφή και στην συνέχεια αφεθούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος παθαίνουν φυσική γήρανση. Τέτοια κράματα είναι της σειράς 6XXX, με μεγάλο ποσοστό κραμάτωσης, της σειράς 7XXX που περιέχουν χαλκό και, όλα τα κράματα της σειράς 2XXX.

Στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 10), φαίνεται πώς επιδρά ο χρόνος φυσικής γήρανσης στο όριο διαρροής.

Natural aging curves for three solution heat treated wrought aluminum alloys

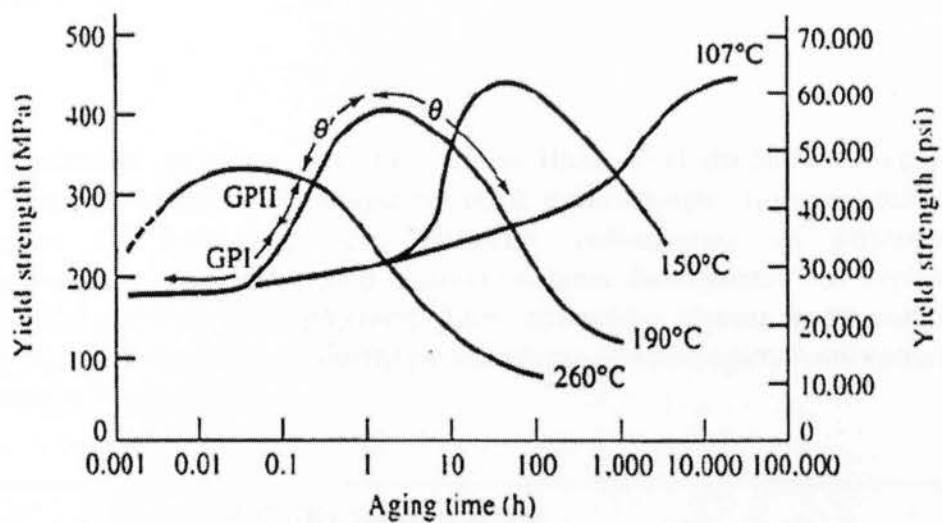


ΣΧΗΜΑ 10: Επίδραση γήρανσης στο όριο διαρροής

Όπως φαίνεται από τα διάγραμμα, το κράμα της σειράς 2XXX, σε διάστημα μερικών ημερών φτάνει σε σταθερή κατάσταση, δηλαδή δεν υπάρχει μεταβολή στο όριο διαρροής. Αντίθετα με το κράμα της σειράς 6XXX και της σειράς 7XXX που σε μεγαλύτερο βαθμό εμφανίζουν σημαντικές μεταβολές στις μηχανικές ιδιότητες με την πάροδο του χρόνου, για αρκετά χρόνια.

• Τεχνητή γήρανση

Οι δύο παράγοντες που επιδρούν την τεχνητή γήρανση είναι η θερμοκρασία και ο χρόνος. Έχει παρατηρηθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία της γήρασης, οι μηχανικές ιδιότητες μειώνονται, και όσο μικρότερος είναι ο χρόνος της γήρασης οι μηχανικές ιδιότητες βελτιώνονται. Παρακάτω φαίνεται η επίδραση του χρόνου και της θερμοκρασίας γήρανσης, στο όριο διαρροής σε ένα κράμα αλουμινίου – χαλκού. [9]



ΣΧΗΜΑ 11: Επίδραση χρόνου και θερμοκρασίας γήρανσης στο όριο διαρροής.

5.2.5. Κράματα ΑΙ που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία

Πρόκειται για τα κράματα των σειρών 1000, 3000 και 5000. Τα κράματα αυτά είναι μονοφασικά, με μικρά ποσοστά εγκλεισμάτων ή μεσομεταλλικών ενώσεων. Οι μηχανικές τους ιδιότητες ρυθμίζονται με κατεργασίες σκλήρυνσης, με την δημιουργία οριακών στερών διαλυμάτων και κυρίως με την επακολουθούσα ενδοτράχυνση. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται μέσες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων και κύριες χρήσεις ορισμένων κραμάτων της κατηγορίας αυτής.

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ					
ΚΩΔΙΚΟΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	σ_{TS} (MPa)	ϵ (%)	Αντοχή σε κόπωση* (MPa)	Χρήσεις
1060-O	28	70	40	-	Σε χημικές βιομηχανίες τροφίμων, κρυογενετικής. Για κατασκευή δεξαμενών
1060-H16	90	110	12	-	
1060-H18	125	130	6	-	
1100-O	35	80	35	30	Συνήθη προϊόντα όπου δεν απαιτούνται αυξημένες αντοχές. Επενδύσεις κτιρίων.
1100-H14	90	130	9	50	
1100-H18	130	150	6	60	
3003-O	40	110	30	45	Ίδιες ιδιότητες όπως η σειρά 1100, έχουν όμως αυξημένες ιδιότητες.
3003-H14	145	155	8	62	
3003-H18	185	200	4	70	
3004-O	70	180	22	65	Όπως και η σειρά 3003
3004-H14	200	245	9	110	
3004-H18	250	285	4	115	
5050-O	55	145	26	60	Στην οικοδομή και σε σωληνοργία Περιέχουν 1,4% Mg
5050-H14	165	190	25	110	
5050-H18	200	220	6	120	

5052-O	90	190	25	110	Σε σωληνοργία και λεβητοποιία
5052-H34	210	265	10	120	Περιέχουν 2,5% Mg και 0,25%Cr.
5052-H38	255	280	7	135	
5454-O	115	240	22	135	Για συγκολλητές κατασκευές και σωλήνες,
5454-H34	240	300	10	140	που λειτουργούν σε θαλάσσιο περιβάλλον.
5454-H38	275	340	7	150	Περιέχουν 2,7%Mg-0.8%Mn-0.12%Cr.

*Σε 5×10^8 κύκλους

ΠΙΝΑΚΑΣ 4 : Μέσες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων και κύριες χρήσεις κραμάτων Al, που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία.

• Σειρά κραμάτων αλουμινίου 1000

Τα κράματα αυτής της σειράς περιέχουν τουλάχιστον 99% Al. Οι τιμές των μηχανικών τους ιδιοτήτων είναι χαμηλές, αλλά βελτιώνονται με ενδοτράχυνση. Είναι κατάλληλα για κατεργασία εν ψυχρώ και αντέχουν σημαντικά σε υγρή και θαλάσσια ατμόσφαιρα. Παρουσιάζουν θαυμάσια ηλεκτρική αγωγιμότητα, (χρησιμοποιούνται για την κατασκευή συρμάτων, καλωδίων, κτλ), θερμική αγωγιμότητα (χρησιμοποιούνται για την κατασκευή καλοριφέρ, κτλ) και πολύ καλή αντοχή σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Οι κυριότερες ακαθαρσίες που περιέχονται σε αυτά τα κράματα είναι ο σίδηρος και το πυρίτιο, σε συνολικό ποσοστό 1%.(κράμα 1100)

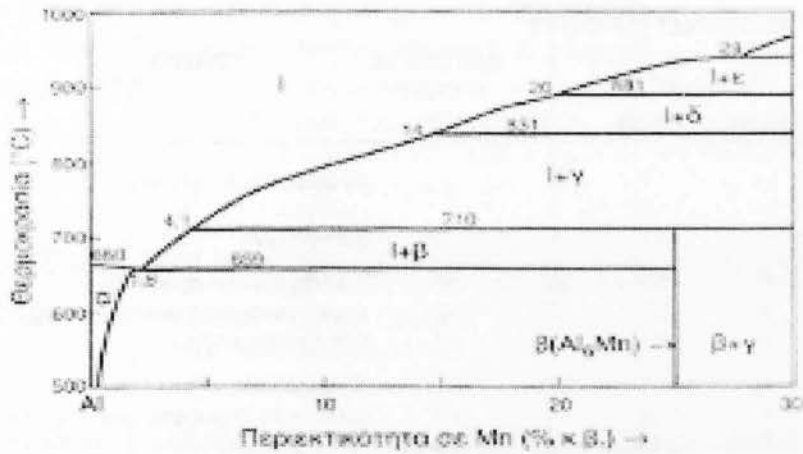
• Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3000

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου με κύρια προσθήκη Mg.η μέγιστη διαλυτότητα Mg στο Al που είναι 1,8% στους 659°C, ελαττώνεται γρήγορα με την θερμοκρασία. (Σχήμα 12)

Το Mn ενώνεται με το Al, σχηματίζοντας την μεσομεταλλική ένωση, Al_6Mn . Η σκλήρυνση του Al με την προσθήκη Mn σε ποσοστά μικρότερα του 1,5%, οφείλεται στη διασπορά της ένωσης αυτής μέσα στην μεταλλική μήτρα του αλουμινίου. Συγχρόνως η παρουσία της Al_6Mn προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης του κράματος. Η προσθήκη χαλκού σε ποσοστό 0,12% προκαλεί αύξηση της μηχανικής τους αντοχής (κράμα 3003). Η προσθήκη Mg σε ποσοστά μικρότερα του 1,2%, επιφέρει δευτερογενή σκλήρυνση, λόγω του σχηματισμού στερεού διαλύματος (κράμα 3004).

Τα κράματα Al-Mn μορφοποιούνται εύκολα, αντέχουν στην ατμοσφαιρική διάβρωση και συγκολλώνται εύκολα. Αντικαθιστούν τα

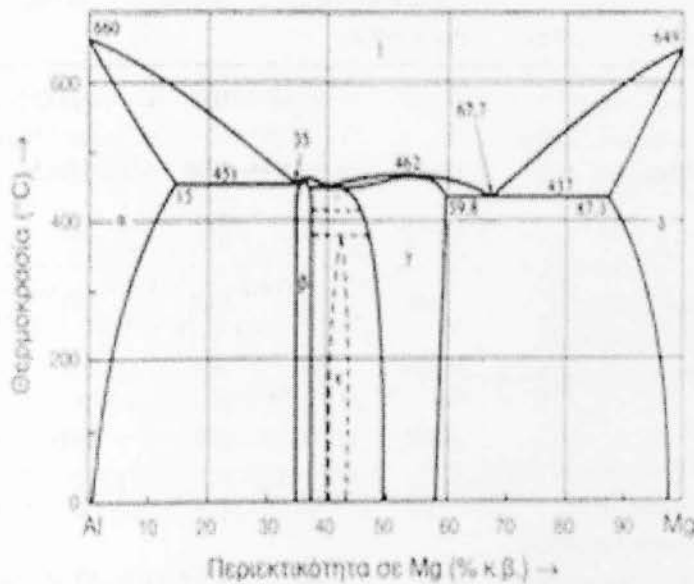
κράματα της σειράς 1000, σε εφαρμογές όπου απαιτούνται βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.



ΣΧΗΜΑ 12: Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του διμερούς συστήματος Al-Mn

• Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5000

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου με κύρια προσθήκη το μαγνήσιο, σε ποσοστό μικρότερο του 4%. Σ’ αυτά (σχήμα 13) το μεγαλύτερο μέρος Mg βρίσκεται στο αριστερό διάλυμα και το υπόλοιπο μετέχει στην μεσομεταλλική ένωση Mg₂Al₃, η οποία είναι σκληρή και εύθραυστη.



ΣΧΗΜΑ 13: Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του διμερούς συστήματος Al-Mg

Τα κράματα της σειράς 5000 παρουσιάζουν μέτρια μηχανική αντοχή, που βελτιώνεται με ενδοτράχυνση, σε βάρος όμως της ολκιμότητας τους. Όταν βρίσκονται στην μεταλλουργική κατάσταση O , μπορούν να διαμορφωθούν εν ψυχρώ ή εν θερμώ. Συγκολλώνται εύκολα, έχουν υψηλή αντοχή σε θαλάσσια διάβρωση και παρουσιάζουν επιφάνεια καλής ποιότητας μετά από λείανση και ανοδίσωση. Στην περίπτωση που πρόκειται να υποστούν τέτοιες επιφανειακές κατεργασίες, θα πρέπει να ποσοστά σιδήρου και πυριτίου να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. [10]

5.2.6.Κράματα Al που υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμικές κατεργασίες

Πρόκειται για κράματα των σειρών 2000, 6000 και 7000. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων και οι κύριες ιδιότητες των κραμάτων της κατηγορίας αυτής

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ					
ΚΩΔΙΚΟΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{TS} (MPa)	ϵ (%)	Αντοχή σε κόπωση* (MPa)	Χρήσεις
2014-O	100	200	20	90	Δομικά στοιχεία αεροσκαφών και πλαισίων φορτηγών. Περιέχουν 4,4%Cu-0.5%Mg-0.8%Mn-0.8%Si
2014-T4	290	420	18	140	
2014-T6	390	475	10	125	
2024-O	100	200	20	90	Στην αεροναυπηγική, σε σκελετούς οικοδομών, κοχλίες, αθλητικά είδη. Περιέχουν 4.4%Cu-1.5%Mn-0.6%Mn
2024-T4	320	460	18	140	
2024-T6	390	475	17	100	
6061-O	55	125	25	50	Σε αμαξώματα αυτοκινήτων και φορτηγών, στην οικοδομική, σε πυλώνες και αγωγούς. Περιέχουν 1%Mg-0.6%Si-0.2%Cr-0.3%Cu
6061-T4	150	245	22	90	
6061-T6	275	410	17	100	
6070-O7	145	20	65	-	Σε συγκολλητές κατασκευές, και στην

6070-T6	295	360	12	100	ναυπηγική. Περιέχουν 0,8%Mg-1.4%Si-0.7%Mn-0.3%Cu
7005-O	85	200	20	-	Για υλικά οδικών και σιδηροδρομικών μεταφορών. Περιέχουν 4,5%Zn-1.4%Mg-0.12%Cr-0.4%Mn-0.15%Zr
7005-T6	295	360	13	155	
7075-O	105	230	17	-	Στην αεροναυπηγική, στην κατασκευή όπλων, βαλβίδων αθλητικών ειδών.
7075-T6	500	570	11	160	Περιέχουν 5,6%Zn-2.5%Mg-1.6%Cu-0.3%Cr

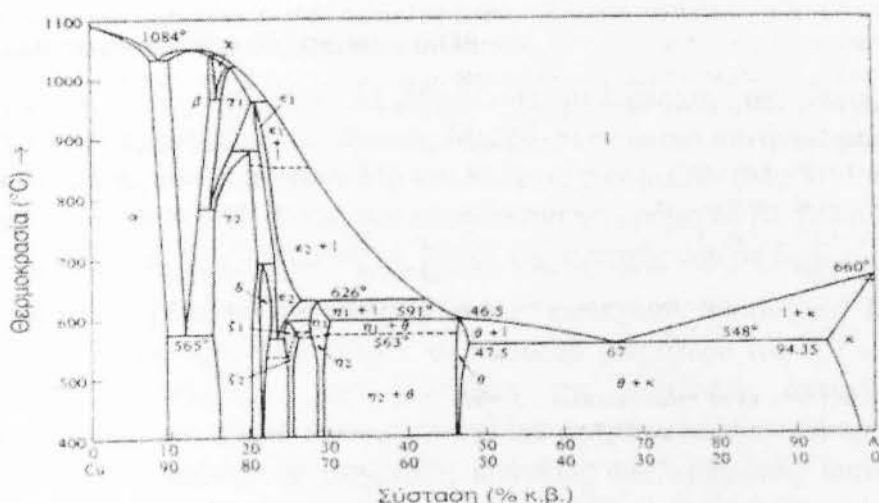
*Σε 5×10^8 κύκλους

ΠΙΝΑΚΑΣ 5 : Μέσες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων και κύριες χρήσεις κραμάτων Al, που υπόκεινται σε σκλήρυνση δομής με θερμικές κατεργασίες.

• Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2000

Πρόκειται για κράματα Al-Cu, όπου ο χαλκός περιέχεται σε ποσοστά 2,6-6,3%, και για τα 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 των 0,8% ευνοεί τον σχηματισμό τετραμερών συστατικών τα οποία βρίσκονται σε διασπορά και βελτιώνουν τις ιδιότητες της μεταλλικής μήτρας.



ΣΧΗΜΑ 14: Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του διμερούς συστήματος Al-Cu

Η παρουσία Fe, συχνά αποδεικνύεται βλαβερή εξαιτίας του σχηματισμού της ένωσης Cu_2FeAl_7 η οποία στερεί από το στερεό διάλυμα μέρος του χαλκού, ελαττώνοντας την δυνατότητα σκλήρυνσης της δομής. Εάν ωστόσο

προσθεθεί και Ni, σχηματίζεται η ένωση Al_9FeNi , που προσδίδει στο κράμα πολύ καλή μηχανική αντοχή, μέχρι τους $230^{\circ}C$.

Τα κράματα της σειράς 2000, μετά από βαφή και γήρανση, έχουν μέτρια αντοχή στην διάβρωση και συγκολλώνται δύσκολα, διότι οι ζώνες, (οι γειτονικές προς την περιοχή της συγκόλλησης), υπόκεινται σε ανόπτηση, εξαιτίας του επιβαλλόμενου από την συγκόλληση θερμικού κύκλου, με αποτέλεσμα οι μηχανικές τους ιδιότητες να εξασθενούν σημαντικά.

Στην σειρά 2000 ανήκουν τα κράματα Al-Li. Το λίθιο είναι το ελαφρύτερο μεταλλικό στοιχείο. Για κάθε 1% προσθήκης λιθίου στο αλουμίνιο, προκαλείται μείωση του βάρους του κατά περίπου 3%, και αύξηση του ορίου ελαστικότητας κατά περίπου 5%. Παρότι η μέγιστη διαλυτότητα στο αλουμίνιο είναι 4,2%, στα εμπορικά κράματα Al-Li, το ποσοστό αυτό κυμαίνεται από 1% έως 3%.

Η ανάπτυξη των κραμάτων αυτών, ως αρχικό στόχο είχε την μείωση του βάρους των αεροσκαφών και των δομικών στοιχείων των διαστημοπλοίων, λόγω της μικρής πυκνότητας, της υψηλής μηχανικής τους αντοχής και του υψηλού ειδικού μέτρου ελαστικότητας. Για παράδειγμα το 25% των δομικών στοιχείων των ελικοπτέρων EH101 της British Westland (15% του συνολικού τους βάρους) κατασκευάζονται από το κράμα AA8090. Επίσης κράματα Al-Li χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των δομικών στοιχείων των ρωσικών στρατιωτικών αεροσκαφών YAK-36 και MIG-29, των αεροσκαφών C-17 της McDonnell Douglass, των Boeing 777 και των A330 και A430 της Airbus Industries. 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. Για παράδειγμα η McDonnell Douglass κατασκευάζει από κράματα Al-Li τις δεξαμενές υγρού οξυγόνου DC-XA.

• Σειρά κραμάτων αλουμινίου 6000

Πρόκειται για κράματα Al,Mg,Si. Η σκλήρυνση της δομής τους οφείλεται στον σχηματισμό της ένωσης Mg_2Si , στην οποία συνήθως μετέχει το σύνολο της μάζας των στοιχείων Mg και Si λόγω των μαζών (Mg/Si) ίσες προς 1.73. κάποια περίσσεια Si, όπως για παράδειγμα το κράμα 6070, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος εις βάρος της αντοχής του σε διάβρωση.

Ορισμένα κράματα της σειράς αυτής περιέχουν προσθήκες Mn, σε ποσοστό μικρότερο του 0,8% και Cr, σε ποσοστό μικρότερο του 0,3%. Αυτές οι προσθήκες συντελούν στην βελτίωση της μηχανικής αντοχής, της δυσθραυστότητας και υποβοηθούν στην εκλέπτυνση των κόκκων. Η προσθήκη χαλκού βελτιώνει επίσης τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, ωστόσο το ποσοστό του θα πρέπει να παραμείνει μικρότερο του 0,5% λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της αντοχής σε διάβρωση, που προκαλεί.

Τα κράματα της σειράς 6000 μορφοποιούνται εν θερμώ και συγκολλώνται εύκολα, συγχρόνως δε, παρουσιάζουν καλή μηχανική συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά η χρήση τους περιορίζεται μέχρι τους $150^{\circ}C$.

Τέλος παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση και σε διάβρωση από μηχανική καταπόνηση.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 7000**

Πρόκειται για κράματα AL-Zn-Mg και για κράματα Al-Zn-Mg-Cu. Αυτά τα κράματα, μετά από κατάλληλες θερμικές κατεργασίες, παρουσιάζουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα κράματα 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 $MgZn_2$. προσθήκη χαλκού σε ποσοστό μικρότερο του 2% προκαλεί σκλήρυνση λόγω της δημιουργίας στερεού διαλύματος και κατακρήμνισης. Ωστόσο η παρουσία του χαλκού μειώνει την εμβαπτότητα, την συγκολλησιμότητα και την δυσθραυστότητα των κραμάτων Al-Mg-Zn. Παρουσία χρωμίου, σε ποσοστό μικρότερο του 0,3%, βελτιώνει την αντοχή των κραμάτων αυτών σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση, ενώ η παρουσία Zr βελτιώνει την συγκολλησιμότητα τους.

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

Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 7000, χρησιμοποιούνται κυρίως στην κατασκευή δομικών στοιχείων αεροσκαφών και τμημάτων κατασκευών που υφίστανται ισχυρή καταπόνηση, όπου απαιτούνται υψηλή μηχανική αντοχή και αντοχή στην διάβρωση.[11]

5.2.7. Διάβρωση

Διάβρωση είναι η αλληλεπίδραση του μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του. Το φαινόμενο της διάβρωσης είναι κυρίως ηλεκτροχημικό. Στις ηλεκτροχημικές δράσεις παίρνει μέρος ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο προέρχεται είτε από αυθόρμητη λειτουργία γαλβανικών στοιχείων, είτε από εξωτερική επιβολή τάσης. Σε όλες τις χημικές δράσεις υπάρχει οξειδοαναγωγικό στάδιο, που σε αυτό ανταλλάσσονται ηλεκτρόνια ή ιόντα ανάμεσα στο κράμα ή το μέταλλο και το περιβάλλον του.

5.2.7.1 Διάβρωση του αλουμινίου

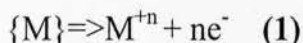
Το αλουμίνιο και τα κράματα του, παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στην διάβρωση, και αυτό οφείλεται στο λεπτό στρώμα οξειδίου που σχηματίζεται στην επιφάνεια του υλικού. Το οξείδιο αυτό έχει την ιδιότητα να σχηματίζεται ταχύτατα μόλις το υλικό έρθει σε επαφή με το διαβρωτικό περιβάλλον. Επίσης εάν αυτό το προστατευτικό οξείδιο καταστραφεί, εύκολα αναγεννάται. Το πάχος του οξειδίου είναι της τάξεως του 1nm, αλλά παρά το γεγονός ότι είναι αρκετά λεπτό, παρέχει αποτελεσματική προστασία από την διάβρωση. Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου που σχηματίζεται όταν το αλουμίνιο είναι σε κανονική ατμόσφαιρα, έχει αρκετά μεγαλύτερο πάχος. Αυτό αποτελείται από δύο ζώνες. Η πρώτη ζώνη, αυτή που βρίσκεται σε επαφή με το μέταλλο, έχει άμορφη κρυσταλλική δομή και πάχος το οποίο καθορίζεται αποκλειστικά και μόνο από τη θερμοκρασία. Η δεύτερη ή εξωτερική ζώνη, έχει μεγαλύτερο πάχος και αυξημένο πορώδες και αποτελείται από ένυδρα οξείδια.,

Το προστατευτικό στρώμα χαρακτηρίζεται σαν μια λεπτή ισορροπία μεταξύ των δύο αντικρουόμενων δυνάμεων, εκείνων που τείνουν να σχηματίσουν την πρώτη συμπτκνωμένη ζώνη οξειδίου και αυτών που θέλουν να την καταστρέψουν. Εάν δεν υπάρχουν καταστρεπτικές δυνάμεις, όπως όταν το υλικό βρίσκεται σε θερμό αέρα, θα σχηματιστεί μόνο η εξωτερική ζώνη των οξειδίων που γρήγορα θα φτάσει το μέγιστο πάχος. Αντιθέτως εάν οι καταστροφικές δυνάμεις είναι πολύ υψηλές τότε η προστατευτική ζώνη των οξειδίων, θα ενυδατώνεται πολύ πιο γρήγορα απ' ότι θα σχηματίζεται, με τελικό αποτέλεσμα την καταστροφή του. Στις περισσότερες περιπτώσεις που συναντούμε, υπάρχει μια ισορροπία ανάμεσα σε αυτές τις δύο τάσεις, που καθορίζονται πάντα από το διαβρωτικό περιβάλλον.

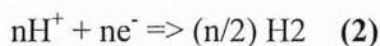
5.2.7.2 Ο μηχανισμός διάβρωσης του αλουμινίου

Το φαινόμενο της διάβρωσης είναι κυρίως ηλεκτροχημικό και προκύπτει όταν τα άτομα των μετάλλων οξειδώνονται και φεύγουν απ' το υλικό, με τη μορφή ιόντων. Κατά την διαδικασία αυτή έχουμε την μεταφορά ηλεκτρονίων από τα άτομα του υλικού προς το διάλυμα του ηλεκτρολύτη και στην συνέχεια την αποχώρηση των ατόμων από το υλικό με την μορφή θετικά φορτισμένων ιόντων. Οπότε η άνοδος είναι το αλουμίνιο αφού από αυτό φεύγουν τα ηλεκτρόνια και έχουμε διάβρωση και η κάθοδος είναι το ηλεκτρολυτικό διάλυμα. Παρακάτω δίνονται οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην άνοδο και στην κάθοδο κατά την διάβρωση ενός μετάλλου. [12]

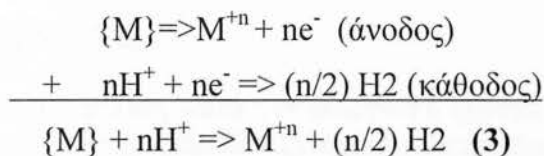
Στην άνοδο έχουμε :



Στην κάθοδο όταν δεν υπάρχει διαλυμένο οξυγόνο έχουμε :



το άθροισμα των δύο παραπάνω αντιδράσεων δίνει :

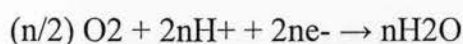


Οπότε για το αλουμίνιο έχουμε :



Όπως φαίνεται από την αντίδραση 2 άτομα αλουμινίου δίνουν τα τρία ηλεκτρόνια της εξωτερικής τους στοιβάδας (ηλεκτρόνια σθένους) και μετατρέπονται σε ιόντα Al^{+3} . Τα ιόντα υδρογόνου H^{+} , προσλαμβάνουν τα έξι ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται και σχηματίζουν τρία άτομα υδρογόνου.

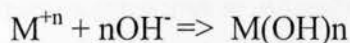
Αν το διάλυμα περιέχει διαλυμένο οξυγόνο, ναι μεν η ανοδική αντίδραση παραμένει ίδιο, αλλά η καθοδική μετασχηματίζεται στην ακόλουθη :



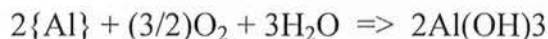
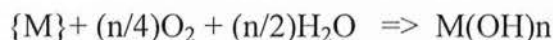
Επομένως παίρνουμε :



Τέλος στην περίπτωση που το διάλυμα είναι ουδέτερο ($pH = 7$) τότε η διαδικασία της διάβρωσης του μετάλλου θα αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια :



Επομένως παίρνουμε :



5.2.7.3 Δυναμικό διάβρωσης

Όπως αναφέραμε παραπάνω, κατά την διάβρωση έχουμε στην άνοδο περίσσεια ηλεκτρονίων και στην κάθοδο έλλειμμα ηλεκτρονίων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτρικού δυναμικού. Όσο μεγαλύτερο είναι το δυναμικό της διάβρωσης, το υλικό έχει τη τάση να μην διαβρώνεται, αντίθετα όσο μικρότερο είναι το δυναμικό διάβρωσης, το υλικό έχει την τάση να διαβρώνεται ευκολότερα.

Συνήθως το δυναμικό της διάβρωσης σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς, που είναι το ηλεκτρόδιο καλομέλανα (calomel half-cell reference electrode). Η χρήση του παραπάνω ηλεκτροδίου σαν σημείου αναφοράς μας δίνει την δυνατότητα να συγκρίνουμε τα δυναμικά διάβρωσης διαφορετικών υλικών μεταξύ τους και να εξάγουμε συμπεράσματα για την τάση που έχουν να διαβρωθούν.[12]

5.2.7.4 Επίδραση των κραματικών στοιχείων και των προσμίξεων στην διάβρωση του αλουμινίου

Το αλουμίνιο υψηλής καθαρότητας παρουσιάζει την καλύτερη αντοχή στην διάβρωση γιατί έχει μικρότερες δυνατότητες να έχει ατέλειες στο στρώμα του προστατευτικού οξειδίου, εξαιτίας ετερογένειας στην μικροδομή του.

Τα κραματικά και οι προσμίξεις, ενώ αυξάνουν τις μηχανικές ιδιότητες, ταυτόχρονα επιδρούν στην αντιδιαβρωτική συμπεριφορά. Η επίδραση τους στην αντιδιαβρωτική συμπεριφορά οφείλετε στο διαφορετικό δυναμικό διάβρωσης που παρουσιάζουν σε σχέση με το μητρικό υλικό αλουμίνιο.

Τα κραματικά στοιχεία και οι προσμίξεις κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει αυτά που είναι σχετικά διαλυτά, που είτε κατακρατούνται στο στερεό διάλυμα είτε κατακρημνίζονται σαν δεύτερες φάσεις. Στην δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται αυτά που είναι αδιάλυτα ή σχηματίζουν ενδομεταλλικές ενώσεις.

Διαλυτά στοιχεία

Ο χαλκός, ο ψευδάργυρος, το μαγνήσιο έχουν σημαντική στερεά διαλυτότητα. Το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος κάνουν το στερεό διάλυμα ηλεκτροχημικά ενεργό. Αντίθετα ο χαλκός κάνει το στερεό διάλυμα λιγότερο ηλεκτροχημικά ενεργό.

Αδιάλυτα στοιχεία

Αδιάλυτα στοιχεία είναι το πυρίτιο, ο σίδηρος, το μαγγάνιο, το χρώμιο, το ζirkόνιο, το βανάδιο το τιτάνιο και το νικέλιο. Αυτά βρίσκονται στα κράματα σε στοιχειακή μορφή ή πιο συχνά σχηματίζουν ενδομεταλλικές ενώσεις οι οποίες είναι διασπαρμένες στο υλικό. Οι ενδομεταλλικές ενώσεις παρουσιάζουν διαφορετικό δυναμικό διάβρωσης σε σχέση με την μητρική φάση του αλουμινίου, και έτσι δρουν ως κάθοδοι ή άνοδοι δημιουργώντας τοπικά γαλβανικά στοιχεία. για παράδειγμα οι ενδομεταλλικές ενώσεις FeAl_3 MnAl_6 έχουν την τάση να αυξάνουν την συχνότητα εμφάνισης βελονοειδούς διάβρωσης. [13],[14]

5.2.7.5 Τύποι διάβρωσης

Κατά την διάβρωση του αλουμινίου και των κραμάτων του παρατηρούνται διάφορες μορφές διάβρωσης που αναλύονται παρακάτω :

Βελονοειδής διάβρωση (pitting corrosion) : Η βελονοειδής διάβρωση παρατηρείται όταν το αλουμίνιο βρίσκεται στην παθητική του περιοχή, και είναι μία μορφή διάβρωσης όπου έχουμε τον σχηματισμό τυχαίων βελόνων (pits). Στα κράματα αλουμινίου η βελονοειδής διάβρωση δημιουργείται από τα διαβρωτικά ιόντα (halide ions), από τα οποία τα χλωρίδια τα χλωρίδια είναι αυτά που συναντούνται πιο συχνά. Η διαδικασία σχηματισμού των βελόνων έχει ως εξής : πρώτα απορροφώνται χλωριόντα στις ατέλειες του λεπτού στρώματος οξειδίου που προστατεύει το αλουμίνιο. Στην συνέχεια δημιουργείται χημική αντίδραση των χλωριόντων με τα ιόντα του αλουμινίου και δημιουργείται $\text{Al}(\text{OH})_2\text{Cl}$. Τέλος απομακρύνονται τα προϊόντα που σχηματίστηκαν από την παραπάνω αντίδραση και έτσι το προστατευτικό οξείδιο αδυνατίζει με αποτέλεσμα τα μην προστατεύεται το υλικό, και να διαβρώνεται δημιουργώντας μια οπή. [16]

Γαλβανική διάβρωση (galvanic corrosion) : Η γαλβανική διάβρωση εξηγείται ως εξής : εάν δύο διαφορετικά μέταλλα (π.χ. αλουμίνιο – χαλκός) βυθιστούν σε έναν ηλεκτρολύτη και ενωθούν με ένα καλώδιο, τότε ρεύμα θα διατρέξει από τον ηλεκτρολύτη, από το υλικό με το μικρότερο δυναμικό διάβρωσης προς το υλικό με το μεγαλύτερο δυναμικό διάβρωσης, δηλαδή από

το αλουμίνιο στον χαλκό. Το αλουμίνιο λειτουργεί ως άνοδος και ο χαλκός ως κάθοδος.

Η γαλβανική διάβρωση μπορεί να εμφανιστεί σε μακροσκοπική κλίμακα, για παράδειγμα σε μία κατασκευή όπου συνυπάρχουν δύο υλικά με διαφορετικό δυναμικό διάβρωσης, αλλά και σε μικροσκοπική κλίμακα όπως για παράδειγμα στα όρια των κόκκων ενός κράματος αλουμινίου, μπορεί να υπάρχουν κατακρημνίσματα πλούσια σε χαλκό, που ευνοούν την δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων.[15]

Περικρυσταλλική διάβρωση (intergranular corrosion) : Η περικρυσταλλική διάβρωση συμβαίνει λόγω δημιουργίας τοπικών γαλβανικών στοιχείων στα όρια των κόκκων ενός υλικού. Τα γαλβανικά στοιχεία δημιουργούνται εξαιτίας διαφόρων φάσεων που κατακρημνίζονται στα όρια των κόκκων. Οι φάσεις που κατακρημνίζονται έχουν διαφορετικό δυναμικό διάβρωσης από το εσωτερικό το εσωτερικό του κόκκου, με αποτέλεσμα την επιλεκτική διάβρωση των φάσεων αυτών. Στην περικρυσταλλική διάβρωση, παρατηρούμε πως η διάβρωση εμφανίζεται στα όρια των κόκκων, σε αντίθεση με τις περιοχές εντός των κόκκων, που δεν προσβάλλονται καθόλου από την διάβρωση.

Σπηλαιώδης διάβρωση (crevice corrosion) : Η σπηλαιώδης διάβρωση δημιουργείται κυρίως σε σημεία όπου υπάρχουν εγκοπές και κενά. Εκεί παραμένουν λιμνάζοντα διαλύματα που παρεμποδίζουν την διάχυση του οξυγόνου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός διαφορετικού περιβάλλοντος διάβρωσης από το εξωτερικό περιβάλλον. Έτσι η οξείδωση του οξυγόνου δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί, με αποτέλεσμα να αποκτά ανοδικό χαρακτήρα η σπηλαιώδης περιοχή, σε αντίθεση με τον καθοδικό χαρακτήρα του εξωτερικού περιβάλλοντος. Οπότε έχουμε διάβρωση του υλικού. Κατά την διάβρωση στην σπηλαιώδη περιοχή υπάρχει έκλυση θετικού φορτίου, το οποίο δημιουργεί ένα όξινο περιβάλλον, το οποίο ελκύει τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα (κυρίως χλωριόντα) με αποτέλεσμα να επιταχύνεται η διάβρωση.

Το βάθος της διάβρωσης είναι τόσο μικρό που ορισμένες φορές, δεν μπορεί καν να μετρηθεί. Ωστόσο η θολή όψη του κράματος στο σημείο της σπηλαιώδους διάβρωσης σε αντίθεση με την γυαλιστερή και ανοιχτόχρωμη υπόλοιπη επιφάνεια του δίνει ένα άσχημο οπτικό αποτέλεσμα. Γι' αυτό τα κράματα του αλουμινίου και των υπολοίπων μετάλλων, πρέπει να φυλάσσονται υπό καλές συνθήκες ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα σπηλαιώδους διάβρωσης.[17]

Διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση (stress corrosion cracking) : Η διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση μπορεί να θεωρηθεί μία ταχεία δημιουργία και διάδοση ρωγμών κάτω από την επίδραση διαβρωτικού μέσου

και ελκυστικής δύναμης. Ο μηχανισμός της διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση πραγματοποιείται σε τρία στάδια :

1. Τον σχηματισμό εγχοπών από την αργή διαδικασία της περικρυσταλλικής διάβρωσης.
2. Τοπική πλαστική παραμόρφωση στην ρίζα των εγχοπών, η οποία αφενός μπορεί να δημιουργήσει ρωγμές και αφετέρου παρεμποδίζει τον σχηματισμό προστατευτικού στρώματος, αφήνοντας εκτεθειμένο το μέταλλο – κράμα.
3. Ταχεία φθορά του μετάλλου – κράματος από διάβρωση.

Ο ρυθμός φθοράς σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση εξαρτάται κατά μείζονα λόγο από την ένταση της δύναμης που εφελκύει το σώμα και από την διεύθυνσή της, ως προς την ανάπτυξη των κρυστάλλων του κράματος. Γι' αυτό πάντα οι αξονικές καταπονήσεις θεωρούνται μικρότερης σημασίας απ' ό,τι οι κάθετες, που φθείρουν με πολύ μεγαλύτερη ένταση το υλικό. Η φθορά λόγω της διάβρωσης υπό καταπόνηση εντείνεται όταν στο υλικό υπάρχουν παραμένουσες τάσεις λόγω κάποιας κατεργασίας του υλικού π.χ. έλαση, συγκόλληση κτλ. [13]

5.3 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5XXX

5.3.1 Γενικές πληροφορίες σειράς 5XXX

Το μαγνήσιο στα εμπορικά κράματα, κυμαίνεται από 0,5 έως 12 -13% Mg, η χαμηλή περιεκτικότητα μαγνησίου προσδίδει καλή πλαστικότητα, η υψηλή περιεκτικότητα μαγνησίου δίνει καλή χυτευσιμότητα και υψηλή αντοχή. Συνήθως για την παρασκευή αυτών των κραμάτων, προτιμάται, όσο το δυνατόν περισσότερη ποσότητα αλουμινίου για να επιτευχθεί η μέγιστη αντοχή στη διάβρωση. Έτσι το περιεχόμενο σιδήρου και πυριτίου είναι συνήθως χαμηλότερο σε σχέση με άλλα κράματα αλουμινίου.

Ο σίδηρος και το ζirkόνιο προστίθενται μερικές φορές για την αύξηση της θερμοκρασίας επανακρυσταλλοποίησης. Το πυριτίου προστίθενται για τη βελτίωση της ρευστότητας, το μαγγάνιο ή το χρώμιο για να διορθώσουν την διαβρωτική επίδραση του σιδήρου. Επιπλέον ο χαλκός προστίθενται για να μειώσει την βελονοειδής διάβρωσης, βελτιώνοντας γενικά την διάβρωση. Ο ψευδάργυρος έχει ελάχιστη έως καθόλου επίδραση στη διάβρωση, αλλά ενισχύει χυτευσιμότητα και αντοχή.

Πρόσφατα προστέθηκε το χημικό στοιχείο αντιμόνιο, και το οξείδιο του ώστε να αυξηθεί η διάβρωση στο θαλασσινό νερό, αλλά αργότερα πειράματα διέψευσαν την αποτελεσματικότητά του. Το τιτάνιο και το τιτάνιο-βόριο

προστίθενται συχνά, σαν διωλιστής κόκκων. Το βηρύλλιο και μερικές φορές το λίθιο, μειώνουν την οξείδωση του μαγνησίου σε υψηλές θερμοκρασίες, και ιδιαίτερα στην κατάσταση τήξης. Ο μόλυβδος έχει προστεθεί για τη βελτίωση της κατεργασιμότητας, δήθεν χωρίς απώλεια δύναμης και αντοχή στη διάβρωση.

Τα όρια σύνθεσης των εμπορικών κραμάτων είναι τα εξής :

Mg	0.5 – 13%	Zn	Έως 3%
B	Έως 0,05%	Li	Έως 3%
Si	Έως 2 %	Cr	Έως 0,5%
Ni	Έως 0,5%	Zr	Έως 0,5%
Fe	Έως 0,8%	Ti	Έως 0,2%
Be	Έως 0,01%	Mn	Έως 2%
Cu	Έως 0,2%	-	-

Στο εμπορικό κράμα αλουμινίου-μαγνησίου η στερεοποίηση τους ξεκινά με το αλουμίνιο ως κύριο κρύσταλλο και συνήθως μεγαλώνει σαν δενδρίτες, με τα άλλα συστατικά του διαχωρισμού στα όρια κόκκων ή μεταξύ των δενδρίτικών όπλων. Σε κράματα με περισσότερο από 10% Mg και περισσότερο από το 0,5% Si, οι κρύσταλλοι Mg_2Si μπορούν να είναι πρωτογενείς, με τη μορφή κύβων ή εξαγώνων.

Αν ο σίδηρος, το μαγγάνιο-σίδηρος, σίδηρος-χρώμιο είναι πάνω από 1-2% (ανάλογα με την περιεκτικότητα σε μαγνήσιο), πρώτα κρυσταλλώνεται ο $FeAl_3$, $(FeMn)Al_6$, $(FeMn)_3Si_2Al_{15}$, $(FeCr)Al_7$, ή αλλιώς μπορεί να σχηματιστεί $(FeCr)_4Si_4Al_{13}$. Αυτοί οι βασικοί κρύσταλλοι δεν έχουν ουσιαστική επίδραση στη δύναμη, αλλά μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την πλαστικότητα, την αντοχή σε κόπωση και το φινίρισμα επιφάνειας. Είναι αμφίβολος ο ισχυρισμός ότι οι προσθήκες μαγνησίου μειώνουν το μέγεθος του $FeAl_3$ και Co_2Al_9 .

Το πυρίτιο συνήθως σχηματίζει Mg_2Si , συνήθως αδιάλυτο, ειδικά σε κράματα με περισσότερο από 3-4% μαγνήσιο. Ο σίδηρος σε χαμηλές περιεκτικότητες μαγνησίου μπορεί να σχηματίσει Fe_2SiAl_8 , ενώ σε υψηλές περιεκτικότητες πυριτίου σχηματίζει $FeAl_3$, σε περίπτωση απουσίας του χρωμίου ή του μαγγανίου έχουμε τους σχηματισμούς $(FeMn)Al_6$ ή $(FeMn)_3Si_2Al_{15}$, όταν υπάρχει μαγγάνιο. Όταν υπάρχει χρώμιο σχηματίζονται οι $(FeCr)Al_7$ ή $(FeCr)_4Si_4Al_{13}$. Ο χαλκός έχει ανιχνευθεί ως $CuMgAl_2$ και Cu_2FeAl_7 . Ο ψευδάργυρος εκτός από διάλυμα σχηματίζεται στις μορφές $Mg_3Zn_3Al_2$, το τιτάνιο, το βόριο και το βηρύλλιο είναι συνήθως διαλύματα.

Στα περισσότερα από τα εμπορικά κράματα, άλλα στοιχεία συναντώνται μόνο σε μικρές ποσότητες, και οι επιπτώσεις τους στις φυσικές ιδιότητες κατακλύζονται από εκείνες του μαγνησίου. Το μαγνήσιο είναι ο κύριος παράγοντας που ελέγχει τις μηχανικές ιδιότητες, αλλά όλα τα άλλα κραματικά στοιχεία συμβάλουν σε αυτές.

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις ιδιότητες συναρτήσει της περιεκτικότητας μαγνησίου. Η θερμική επεξεργασία σε αυτά τα κράματα δεν παράγει καμία ουσιαστική βελτίωση στη δύναμη, γι αυτό και βρίσκονται στην κατηγορία των μη θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων.[18]

Alloy	Condition	Hardness (HV)	R _M (Mpa)	R _{p0.2} (Mpa)	Elong A (%)
0.5-1.5% Mg	Annealing, Stress Relieved	25-35 60-80	100-150 200-300	40-80 150-250	20-40 5-15
1 %Mg, 1%Mn	Annealing, Stress Relieved	35-50 65-90	150-200 250-350	50-100 200-300	20-30 5-8
2-3%Mg 0-2 % Zn	Sand cast	50-60	150-200	50-100	3-7
	PM cast	50-70	170-220	70-150	3-8
	annealing,	40-55	150-250	80-150	25-35
	Stress relieved	65-90	250-350	200-300	6-15
5-7%Mg	Sand cast	50-60	150-200	70-150	4-10
	PM cast	60-80	200-300	100-200	5-12
	annealing,	60-80	250-350	120-250	20-30
	Stress relieved	80-100	400-500	250-350	10-15
8-12% Mg	Sand cast	70-90	150-300	100-200	3-8
	PM die cast	75-95	200-350	100-250	5-10
	annealing,	80-100	350-500	150-300	10-25
	Stress relieved	90-110	450-600	300-400	5-15
	Heat treated	120-140	400-500	250-350	20-25

Οι ιδιότητες απευθύνονται σε κράματα με 4-5% Mg και το 1-3% Li μετά τη θερμική επεξεργασία είναι τα ίδιες με εκείνες που λαμβάνονται στα κράματα 5-7% Mg με ψυχρή κατεργασία.

Στα διαμορφωμένα προϊόντα, το μέγεθος των κόκκων έχει μικρή επίδραση στη δύναμη. Οι ιδιότητες των διαμορφωμένων προϊόντων, εξαρτώνται σε κάποιο βαθμό από την ποιότητα της μπιγέτας από τις οποίες έγιναν, ειδικά οι χοντρές πλάκες ή ταινίες κατασκευασμένες από λεπτό χυτό. Υψηλής πίεσης χύτευση μπορεί να δώσει ιδιότητες που πλησιάζουν αυτές των διαμορφωμένων προϊόντων.

Τα κράματα που περιέχουν περισσότερο από 5% Mg σπάνια χρησιμοποιούνται σε ψυχρές κατεργασίες, διότι μπορεί να είναι ευαίσθητα στην διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση. Η αποτατική ανόπτηση, έχει μικρή επίδραση στις ιδιότητες των κραμάτων αυτών, αλλά μειώνει σημαντικά την ευαισθησία σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση. Οι ιδιότητες στα λεπτά ελάσματα τείνουν να είναι χαμηλότερες, ειδικά η ολκιμότητα. Για να αυξήσουμε την αντοχή της επιφάνειας των κραμάτων αυτών χρησιμοποιούμε μεθόδους όπως

υπερηχητική ακτινοβολία, αλλά αν εφαρμοστεί σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον δρα αντίστροφα. Με την ακτινοβολία νετρονίων αυξάνουμε την σκλήρυνση, η οποία εξαφανίζεται μόνο μετά την ανόπτηση πάνω από 500K.

Η αντοχή σε θλίψη των κραμάτων αυτών είναι περίπου ίδια με την αντοχή τους στον εφελκυσμό και η αντοχή τους σε διάτμηση ισούται περίπου με το 70-80% της αντοχής σε εφελκυσμό. Το μαγνήσιο σαν κραματικό στοιχείο μειώνει το μέτρο ελαστικότητας του κράματος, γι' αυτό χρησιμοποιούμε άλλες προσθήκες ώστε να το αυξήσουμε. Η επίδραση είναι αθροιστική και το αποτέλεσμα είναι ένα μέτρο ελαστικότητας λίγο διαφορετικό από του καθαρού αλουμινίου για τα κράματα μέχρι 5-6% Mg, και ελαφρώς μικρότερο στα κράματα με υψηλότερες περιεκτικότητες μαγνησίου.

Η αντοχή σε κόπωση αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε μαγνήσιο. Όπως και σε άλλα κράματα αλουμινίου, η αντοχή σε κόπωση είναι πολύ ευαίσθητη σε μεθόδους δοκιμών, ετερογένεια του κράματος, εγκοπές, τρύπες, ποιότητα της επιφάνειας, τη διάβρωση και την ατμόσφαιρα.

Η αλλαγή των ιδιοτήτων σχετικά με την θερμοκρασία είναι η ίδια όπως και σε άλλα κράματα αλουμινίου: χαμηλότερες θερμοκρασίες προκαλούν αύξηση στη δύναμη και της αντοχής κοπώσεως, με ελάχιστη ή καθόλου μείωση στην ολκιμότητα και την ανθεκτικότητα στις εγκοπές στα διαμορφωμένα κράματα. Στα χυτά κράματα, από την άλλη πλευρά, με περισσότερο ή λιγότερο συνεχής ασταθής φάσεις στα όρια των κόκκων, η ολκιμότητα και η ανθεκτικότητα στις εγκοπές, μειώνονται αισθητά σε θερμοκρασίες υπό το μηδέν.

Το ποσοστό του πυριτίου που βρίσκεται φυσιολογικά στο κράμα ($<0,2\% \text{ Si}$) μειώνει ελαφρώς την ολκιμότητα και την ανθεκτικότητα στις εγκοπές χωρίς να αυξάνει την δύναμη. Όταν προστίθεται σε μεγαλύτερα ποσά, βελτιώνει την χυτευσιμότητα αλλά μειώνει σημαντικά την ολκιμότητα.

Ο σίδηρος έχει περιορισμένη επίδραση στα κράματα χαμηλής περιεκτικότητας μαγνησίου ($<2\% \text{ Mg}$). Στα κράματα με υψηλή περιεκτικότητα μαγνησίου εμφανίζουν σχετικά χοντροειδής κρυστάλλους, οι οποίοι μειώνουν την ολκιμότητα και την αντοχή σε κόπωση.[19]

Το μαγγάνιο και χρώμιο σε κράματα χαμηλής περιεκτικότητας μαγνησίου, μειώνουν την ολκιμότητα, επειδή μπορούν να διαλυθούν στη μήτρα, αντιθέτως όταν έχουμε υψηλές περιεκτικότητες μαγνησίου, η διαλυτότητα τους μειώνεται και το μέγεθος των σωματιδίων τους τείνει να εκτραχυνθεί.

Ο χαλκός στα ποσοστά που συνήθως βρίσκεται στο κράματα έχει μικρή ή καμία επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες. Ο ψευδάργυρος μέχρι 1,5-2% αυξάνει ελαφρώς τη δύναμη, με ελάχιστη ή καμία επίδραση στην αντοχή του ερπυσμού. Το δημήτριο, το τιτάνιο, το μολυβδαίνιο, το βανάδιο και το ζirkόνιο δεν έχουν άμεσο αποτέλεσμα στην ενίσχυση του κράματος, αλλά αύξηση της σκλήρυνσης και αύξηση της αντοχής του ερπυσμού μπορεί να προκύψει από την

εκλέπτυνση των κόκκων και την αύξηση της θερμοκρασίας επανακρυσταλλοποίησης. Το βηρύλλιο, το ασβέστιο, το ασήμι και αντιμόνιο δεν έχουν αισθητές επιπτώσεις στις μηχανικές ιδιότητες.[20]

Παρακάτω επισυνάπτεται ένας πίνακας με τις τυπικές χημικές συστάσεις όλων σειρών αλουμινίου :

<u>χημική σύσταση κ.β.%</u>											
Ομάδα	Mg	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Zr	άλλο
<u>διαμορφωμένα κράματα</u>											
1xxx (Al)	0,006-0,25	0,006-0,7	0,002-0,06	0,01-0,03	0,002-0,05	0,006-0,35	-	0,006-0,35	0,006-0,05	-	-
2xxx (Cu)	0,02-0,8	0,1-1,3	0,2-0,3	0,05-0,2	0,05-1,3	0,12-1,3	0,05-2,3	0,08-6,8	0,1-0,8	0,05-0,5	-
3xxx (Mn)	0,05-1,3	0,3-1,8	0,05-0,14	0,05-0,4	0,05-1,8	0,1-1	0,05	0,05-0,5	0,05-1	0,1-0,5	-
4xxx (Si)	0,05-2	0,8-13,5	0,04-0,3	0,05-0,25	0,03-1,5	0,20-1	0,15-1,3	0,05-1,5	0,05-1,25	-	-
5xxx(Mg)	0,2-5,6	0,08-0,7	0,05-0,2	0,05-0,35	0,03-1,4	0,1-0,7	0,03-0,05	0,03-0,35	0,05-2,8	-	-
6xxx(Mg+Si)	0,05-1,5	0,2-1,8	0,08-0,2	0,03-0,035	0,03-1	0,08-1	0,2	0,1-1,2	0,05-2,4	0,05-0,2	-
7xxx (Zn)	0,1-3,7	0,1-0,5	0,03-0,15	0,04-0,35	0,02-1,5	0,1-0,7	0,1	0,05-2,6	0,8-8,7	0,05-0,18	-
8xxx (άλλο στοιχείο)	0,02-1,4	0,1-1	0,08-0,2	0,01-0,2	0,02-1	0,1-2	0,2-1,3	0,03-2,2	0,03-1,8	0,04-0,16	Li, B, Sn, Ga
<u>Χυτά κράματα</u>											
1xx.x (Al)	-	0,1-0,15	0,15-0,35	-	-	0,25-0,8	-	0,05-0,1	0,05	-	-
2xx.x (Cu)	0,03-2,3	0,05-3,5	0,06-0,35	0,15-0,4	0,05-0,7	0,04-1,5	0,03-2,3	3,5-10,7	0,05-2,5	-	-
3xx.x (Si+Cu/Mg)	0,03-1,5	4,5-23	0,04-0,25	0,05-0,35	0,03-0,8	0,06-1,5	0,1-3	0,03-5	0,03-4	-	-
4xx.x (Si)	0,05-0,1	3,3-13	0,20-0,25	0,25	0,05-0,5	0,12-1,3	0,05-0,5	0,05-1	0,05-0,5	-	-
5xx.x(Mg)	1,4-10,6	0,1-2,2	0,1-0,25	0,25	0,05-0,6	0,1-1,3	0,05-0,4	0,05-0,3	0,05-0,2	-	-
7xx.x (Zn)	0,2-2,4	0,1-0,3	0,1-0,25	0,06-0,6	0,05-0,6	0,01-1,4	0,15	0,1-1	2-7,8	-	-
8xx.x (Sn)	0,1-0,9	0,4-6,5	0,2	-	0,1-0,5	0,5-0,7	0,3-1,5	0,7-4	Sn, 5,5-7	-	-

Παρακάτω συντάσσεται ένας πίνακας με τις κυριότερες χημικές συνθέσεις διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου :

A/A	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Άλλα Καθένα / σύνολο		Al
1050	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05			0.05	0.03	0.03		99.50 min
1060	0.25	0.35	0.05	0.03	0.03		...	0.05	0.03	0.03	...	99.60 min
1100	1.0 Si + Fe		0.05-0.20	0.05	...			0.10		0.05	0.15	99.00 min
1145	0.55 Si + Fe		0.05	0.05	0.05		...	0.05	0.03	0.03		99.45 min
1175	0.15 Si + Fe		0.10	0.02	0.02		...	0.04	0.02	0.02	...	99.75 min
1200	1.0 Si + Fe		0.05	0.05		...	...	0.10	0.05	0.05	0.15	99.00 min
1230	0.7 Si + Fe		0.10	0.05	0.05		...	0.10	0.03	0.03	...	99.30 min
1235	0.65 Si + Fe		0.05	0.05	0.05		...	0.10	0.06	0.03	...	99.35 min
1345	0.30	0.40	0.10	0.05	0.05		...	0.05	0.03	0.03	...	99.45 min
1350	0.10	0.40	0.05	0.01		0.01		0.05		0.03	0.10	99.50 min
2011	0.40	0.7	5.0-6.0		...			0.30		0.05	0.15	Rem
2014	0.50-1.2	0.7	3.9-5.0	0.40-1.2	0.20-0.8	0.10		0.25	0.15	0.05	0.15	Rem
2017	0.20-0.8	0.7	3.5-4.5	0.40-1.0	0.40-0.8	0.10		0.25	0.15	0.05	0.15	Rem
2018	0.9	1.0	3.5-4.5	0.20	0.45-0.9	0.10	1.7-2.3	0.25		0.05	0.15	Rem
2024	0.50	0.50	3.8-4.9	0.30-0.9	1.2-1.8	0.10		0.25	0.15	0.05	0.15	Rem
2025	1.0	3.9-5.0	3.9-5	0.40-1.2	0.05	0.10		0.25	0.15	0.05	0.15	Rem
2036	0.50	0.50	2.2-3.0	0.10-0.40	0.30-0.6	0.10	...	0.25	0.15	0.05	0.15	Rem
2117	0.8	0.7	2.2-3.0	0.20	0.20-0.50	0.10		0.25	...	0.05	0.15	Rem
2124	0.20	0.30	3.8-4.9	0.30-0.9	1.2-1.8	0.10		0.25	0.15	0.05	0.15	Rem
2218	0.9	1.0	3.5-4.5	0.20	1.2-1.8	0.10	1.7-2.3	0.25		0.05	0.15	Rem
2219	0.20	0.30	5.8-6.8	0.20-0.40	0.02			0.10	0.02-0.10	0.05	0.15	Rem
2319	0.20	0.30	5.8-6.8	0.20-0.40	0.02	...	...	0.10	0.10-0.20	0.05	0.15	Rem
2618	0.10-0.25	0.9-1.3	1.9-2.7	...	1.3-1.8		0.9-1.2	0.10	0.04-0.10	0.05	0.15	Rem
3003	0.6	0.7	0.05-0.2	1.0-1.5		...		0.10		0.05	0.15	Rem
3004	0.30	0.7	0.25	1.0-1.5	0.8-1.3			0.25		0.05	0.15	Rem
3005	0.6	0.7	0.30	1.0-1.5	0.20-0.6	0.10		0.25	0.10	0.05	0.15	Rem
3105	0.6	0.7	0.30	0.30-0.8	0.20-0.8	0.20	...	0.40	0.10	0.05	0.15	Rem
4032	11.0-13.5	1.0	0.5-1.3	...	0.8-1.3	0.10	0.50-1.3	0.25		0.05	0.15	Rem
4043	4.5-6.0	0.8	0.3	0.05	0.05			0.10	0.20	0.05	0.15	Rem
4045	9.0-11.0	0.8	0.3	0.05	0.05		...	0.10	0.20	0.05	0.15	Rem
4047	11.0-13.0	0.8	0.3	0.15	0.10			0.20		0.05	0.15	Rem
4145	9.3-10.7	0.8	3.3-4.7	0.15	0.15	0.15		0.20		0.05	0.15	Rem
4343	6.8-8.2	0.8	0.25	0.10	...			0.20	...	0.05	0.15	Rem
4643	3.6-4.6	0.8	0.10	0.05	0.10-0.30		...	0.10	0.15	0.05	0.15	Rem
5005	0.30	0.7	0.2	0.20	0.50-1.1	0.10		0.25		0.05	0.15	Rem
5050	0.40	0.7	0.2	0.10	1.1-1.8	0.10	...	0.25	...	0.05	0.15	Rem
5052	0.25	0.40	0.1	0.10	2.2-2.8	0.15-0.35	...	0.10	...	0.05	0.15	Rem
5056	0.30	0.40	0.1	0.05-0.20	4.5-5.6	0.05-0.20		0.10		0.05	0.15	Rem
5083	0.40	0.40	0.1	0.40-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	...	0.25	0.15	0.05	0.15	Rem
5086	0.40	0.50	0.1	0.20-0.7	3.5-4.5	0.05-0.25	...	0.25	0.15	0.05	0.15	Rem
5154	0.25	0.40	0.1	0.10	3.1-3.9	0.15-0.35		0.20	0.20	0.05	0.15	Rem
5183	0.40	0.40	0.1	0.50-1.0	4.3-5.2	0.05-0.25		0.25	0.15	0.05	0.15	Rem
5252	0.08	0.10	0.1	0.10	2.2-2.8		...	0.05		0.03	0.10	Rem
5254	0.45 Si + Fe		0.05	0.01	3.1-3.9	0.15-0.35		0.20	0.05	0.05	0.15	Rem
5356	0.25	0.40	0.1	0.05-0.20	4.5-5.5	0.05-0.20		0.10	0.06-0.20	0.05	0.15	Rem
5454	0.25	0.40	0.1	0.50-1.0	2.4-3.0	0.05-0.20		0.25	0.20	0.05	0.15	Rem
5456	0.25	0.40	0.1	0.50-1.0	4.7-5.5	0.05-0.20		0.25	0.20	0.05	0.15	Rem
5457	0.08	0.10	0.2	0.15-0.45	0.8-1.2	...	...	0.05		0.03	0.10	Rem
5554	0.25	0.40	0.1	0.50-1.0	2.4-3.0	0.05-0.20		0.25	0.05-0.20	0.05	0.15	Rem
5556	0.25	0.40	0.1	0.50-1.0	4.7-5.5	0.05-0.20		0.25	0.05-0.20	0.05	0.15	Rem
5652	0.40 Si + Fe		0.04	0.01	2.2-2.8	0.15-0.35		0.10		0.05	0.15	Rem
5654	0.45 Si + Fe		0.05	0.01	3.1-3.9	0.15-0.35	...	0.20	0.05-0.15	0.05	0.15	Rem
5657	0.08	0.10	0.1	0.03	0.6-1.0	...	...	0.05	...	0.02	0.05	Rem

6003	0.35-1.0	0.6	0.1	0.8	0.8-1.5	0.35		0.20	0.10	0.05	0.15	Rem
6005	0.6-0.9	0.35	0.1	0.10	0.40-0.6	0.01		0.10	0.10	0.05	0.15	Rem
6009	0.6-1.0	0.50	0.15-0.6	0.20-0.8	0.40-0.8	0.10		0.25	0.10	0.05	0.15	Rem
6010	0.8-1.2	0.50	0.15-0.6	0.20-0.8	0.60-1.0	0.10		0.25	0.10	0.05	0.15	Rem
6053		0.35	0.10		1.1-1.4	0.15-0.35		0.10	...	0.05	0.15	Rem
6061	0.40-0.8	0.7	0.15-0.4	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	...	0.25	0.15	0.05	0.15	Rem
6063	0.20-0.6	0.35	0.10	0.10	0.45-0.9	0.10	...	0.10	0.10	0.05	0.15	Rem
6066	0.9-1.8	0.50	0.7-1.2	0.6-1.1	0.8-1.4	0.40		0.25	0.20	0.05	0.15	Rem
6070	1.0-1.7	0.50	0.15-0.4	0.40-1.0	0.50-1.2	0.10	...	0.25	0.15	0.05	0.15	Rem
6101	0.30-0.7	0.50	0.10	0.03	0.35-0.8	0.03	...	0.10		0.03	0.10	Rem
6105	0.6-1.0	0.35	0.10	0.10	0.45-0.8	0.10	...	0.10	0.10	0.05	0.15	Rem
6151	0.6-1.2	1.0	0.35	0.20	0.45-0.8	0.15-0.35		0.25	0.15	0.05	0.15	Rem
6162	0.40-0.8	0.50	0.20	0.10	0.7-1.1	0.10		0.25	0.10	0.05	0.15	Rem
6201	0.50-0.9	0.50	0.10	0.03	0.6-0.9	0.03		0.10		0.03	0.10	Rem
6253		0.50	0.10		1.0-1.5	0.04-0.35		1.6-2.4		0.05	0.15	Rem
6262	0.40-0.8	0.7	0.15-0.4	0.15	0.8-1.2	0.04-0.14		0.25	0.15	0.05	0.15	Rem
6351	0.7-1.3	0.50	0.10	0.40-0.8	0.40-0.8	...		0.20	0.20	0.05	0.15	Rem
6463	0.20-0.6	0.15	0.20	0.05	0.45-0.9		...	0.05	...	0.05	0.15	Rem
6951	0.20-0.50	0.8	0.15-0.4	0.10	0.40-0.8			0.20		0.05	0.15	Rem
7001	0.35	0.40	1.6-2.6	0.20	2.6-3.4	0.18-0.35		6.8-8.0	0.20	0.05	0.15	Rem
7005	0.35	0.40	0.10	0.20-0.7	1.0-1.8	0.06-0.20	...	4.0-5.0	0.01-0.06	0.05	0.15	Rem
7008	0.10	0.10	0.05	0.05	0.7-1.4	0.12-0.25		4.5-5.5	0.05	0.05	0.10	Rem
7016	0.10	0.12	0.45-1.0	0.03	0.8-1.4			4.0-5.0	0.03	0.03	0.10	Rem
7021	0.25	0.40	0.25	0.10	1.2-1.8	0.05	...	5.0-6.0	0.10	0.05	0.15	Rem
7029	0.10	0.12	0.5-0.9	0.03	1.3-2.0		...	4.2-5.2	0.05	0.03	0.10	Rem
7049	0.25	0.35	1.2-1.9	0.20	2.0-2.9	0.10-0.22	...	7.2-8.2	0.10	0.05	0.15	Rem
7050	0.12	0.15	2.0-2.6	0.10	1.9-2.6	0.04		5.7-6.7	0.06	0.05	0.15	Rem
7072	0.7 Si + Fe		0.10	0.10	0.10		...	0.8-1.3		0.05	0.15	Rem
7075	0.40	0.50	1.2-2.0	0.30	2.1-2.9	0.18-0.28		5.1-6.1	0.20	0.05	0.15	Rem
7175	0.15	0.20	1.2-2.0	0.10	2.1-2.9	0.18-0.28		5.1-6.1	0.10	0.05	0.15	Rem
7178	0.40	0.50	1.6-2.4	0.30	2.4-3.1	0.18-0.28		6.3-7.3	0.20	0.05	0.15	Rem
7475	0.10	0.12	1.2-1.9	0.06	1.9-2.6	0.18-0.25		5.2-6.2	0.06	0.05	0.15	Rem

Όλες οι τιμές είναι μέγιστες εκτός από αυτές που έχουν άνω και κάτω όριο.
Το υπόλοιπο είναι αλουμίνιο.[20]

Παρακάτω συντάσσεται ένας πίνακας με τις κυριότερες χημικές συνθέσεις χυτών κραμάτων αλουμινίου :

A/A	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sn	Ti	Υπόλοιπα Καθένα / σύνολο	
201.0	0.10	0.15	4.0-5.2	0.20-0.50	0.15-0.55					0.15-0.35	0.05	0.10
A201.0	0.05	0.10	4.0-5.0	0.20-0.40	0.15-0.35					0.15-0.35	0.03	0.10
202.0	0.10		0.30	0.20-0.8	0.15-0.55	0.20-0.6				0.15-0.35	0.05	0.10
203.0	0.30	0.50	4.5-5.5	0.20-0.30	0.10		1.3-1.7	0.10		0.15-0.25	0.05	0.20
204.0	0.20		0.10	0.10	0.15-0.35		0.05	0.10	0.05	0.15-0.30	0.05	0.15
206.0	0.10	0.05	4.2-5.0	0.20-0.50	0.15-0.35		0.05	0.10	0.05	0.15-0.30	0.05	0.15
A206.0	0.05	0.10	4.2-5.0	0.20-0.50	0.15-0.35		0.05	0.10	0.05	0.15-0.30	0.05	0.15
208.0	2.5-3.5	1.2	1.0-3.0	0.50	0.10		0.35	1.0		0.25		0.50
213.0	1.0-3.0	1.2	2.0	0.6	0.10		0.35	2.5		0.25		0.50
222.0	2.0	1.5	0.06	0.50	0.15-0.35		0.50	0.8		0.25		0.35
224.0	0.06	0.10	4.5-5.5	0.20-0.50						0.35	0.03	0.10
238.0	3.5-4.5	1.5	9.0-11.0	0.6	0.15-0.35		1.0	1.5		0.25		0.50
240.0	0.50	0.5	0.7	0.30-0.7	5.5-6.5		0.30-0.7	0.10		0.20	0.05	0.15
242.0	0.7	1.0	0.6	0.35	1.2-1.8	0.25	1.7-2.3	0.35		0.25	0.05	0.15
A242.0	0.6	0.8	0.35	0.10	1.2-1.7	0.15-0.25	1.8-2.3	0.10		0.07-0.20	0.05	0.15
243.0	0.35	0.4	0.05	0.15-0.45	1.8-2.3	0.20-0.40	1.9-2.3	0.05		0.06-0.20	0.05	0.15
249.0	0.05	0.10	3.8-4.6	0.25-0.50	0.25-0.50			2.5-3.5		0.02-0.35	0.03	0.10
295.0	0.7-1.5	1.0	4.0-5.0	0.35	0.03			0.35		0.25	0.05	0.15
296.0	2.0-3.0	1.2	4.0-5.0	0.35	0.05		0.35	0.50		0.25		0.35
305.0	4.5-5.5	0.6	1.0-1.5	0.50	0.10	0.25		0.35		0.25	0.05	0.15
A305.0	4.5-5.5	0.2	5.0-6.0	0.10	0.10			0.10		0.20	0.05	0.15
308.0	5.0-6.0	1.0	5.5-6.5	0.50	0.10			1.0		0.25		0.50
319.0	5.5-6.5	1.0	3.0-4.0	0.50	0.10		0.35	1.0		0.25		0.50
A319.0	5.5-6.5	1.0	7.0-8.0	0.50	0.10		0.35	3.0		0.25		0.50
324.0	7.0-8.0	1.2	0.40-0.6	0.50	0.40-0.7		0.30	1.0		0.20	0.15	0.20
328.0	7.5-8.5	1.0	1.0-2.0	0.20-0.6	0.20-0.6	0.35	0.25	1.5		0.25		0.50
332.0	8.5-10.5	1.2	2.0-4.0	0.50	0.50-1.5		0.50	1.0		0.25		0.50
333.0	8.0-10.0	1.0	3.0-4.0	0.50	0.05-0.50		0.50	1.0		0.25		0.50
A333.0	8.0-10.0	1.0	3.0-4.0	0.50	0.05-0.50		0.50	3.0		0.25		0.50
336.0	11.0-13.0	1.2	0.50-1.5	0.35	0.7-1.3		2.0-3.0	0.35		0.25	0.05	...
339.0	11.0-13.0	1.2	1.5-3.0	0.50	0.50-1.5		0.50-1.5	1.0		0.25		0.50
343.0	6.7-7.7	1.2	0.50-0.9	0.50	0.10	0.10		1.2-2.0	0.5		0.10	0.35
354.0	8.6-9.4	0.20	1.6-2.0	0.10	0.40-0.6			0.10		0.20	0.05	0.15
355.0	4.5-5.5	0.6	1.0-1.5	0.50	0.40-0.6	0.25		0.35		0.25	0.05	0.15
C355.0	4.5-5.5	0.20	1.0-1.5	0.10	0.40-0.6	...		0.10		0.20	0.05	0.15
356.0	6.5-7.5	0.6	0.25	0.35	0.20-0.45	...		0.35		0.25	0.05	0.15
A356.0	6.5-7.5	0.20	0.20	0.10	0.25-0.45			0.10		0.20	0.05	0.15
F356.0	6.5-7.5	0.20	0.20	0.10	0.17-0.25			0.10		0.20	0.05	0.15
357.0	6.5-7.5	0.15	0.05	0.03	0.45-0.6			0.05		0.20	0.05	0.15
A357.0	6.5-7.5	0.20	0.20	0.10	0.40-0.7	...		0.10		0.10-0.20	0.05	0.15
358.0	7.6-8.6	0.30	0.20	0.20	0.40-0.6	0.20		0.20		0.10-0.20	0.05	0.15
359.0	8.5-9.5	0.20	0.20	0.10	0.50-0.7	...		0.10		0.20	0.05	0.15
360.0	9.0-10.0	2.0	0.6	0.35	0.40-0.6	...	0.50	0.50	0.15			0.25
A360.0	9.0-10.0	1.3	0.6	0.35	0.40-0.6		0.50	0.50	0.15			0.25
361.0	9.5-10.5	1.1	0.50	0.25	0.40-0.6	0.20-0.30	0.20-0.30	0.50	0.10	0.20	0.05	0.15
363.0	4.5-6.0	1.1	2.5-3.5		0.15-0.40		0.25	3.0-4.5	0.25	0.20		0.30
364.0	7.5-9.5	1.5	0.20	0.10	0.20-0.40	0.25-0.50	0.15	0.15	0.15		0.05	0.15
369.0	11.0-12.0	1.3	0.50	0.35	0.25-0.45	0.30-0.40	0.05	1.0	0.10		0.05	0.15
380.0	7.5-9.5	2.0	3.0-4.0	0.50	0.10		0.50	3.0	0.35			0.50
A380.0	7.5-9.5	1.3	3.0-4.0	0.50	0.10		0.50	3.0	0.35			0.50
B380.0	7.5-9.5	1.3	3.0-4.0	0.50	0.10		0.50	1.0	0.35			0.50
383.0	9.5-11.5	1.3	2.0-3.0	0.50	0.10	...	0.30	3.0	0.15			0.50
384.0	10.5-12.0	1.3	3.0-4.5	0.50	0.10	...	0.50	3.0	0.35			0.50
A384.0	10.5-12.0	1.3	3.0-4.5	0.50	0.10		0.50	1.0	0.35			0.50
385.0	11.0-13.0	2.0	2.0-4.0	0.50	0.30		0.50	3.0	0.30			0.50

390.0	16.0-18.0	1.3	4.0-5.0	0.10	0.45-0.65			0.10	...	0.20	0.10	0.20
A390.0	16.0-18.0	0.50	4.0-5.0	0.10	0.45-0.65	...		0.10		0.20	0.10	0.20
B390.0	16.0-18.0	1.3	4.0-5.0	0.50	0.45-0.65		0.10	1.5		0.20	0.10	0.20
392.0	18.0-20.0	1.5	0.40-0.8	0.20-0.6	0.8-1.2		0.50	0.50	0.30	0.20	0.15	0.50
393.0	21.0-23.0	1.3	0.7-1.1	0.10	0.7-1.3		2.0-2.5	0.10		0.10-0.20	0.05	0.15
413.0	11.0-13.0	2.0	1.0	0.35	0.10	...	0.50	0.50	0.15			0.25
A413.0	11.0-13.0	1.3	1.0	0.35	0.10	...	0.50	0.50	0.15			0.25
443.0	4.5-6.0	0.8	0.6	0.50	0.05	0.25		0.50		0.25		0.35
A443.0	4.5-6.0	0.8	0.30	0.50	0.05	0.25	...	0.50		0.25		0.35
8443.0	4.5-6.0	0.8	0.15	0.35	0.05		...	0.35		0.25	0.05	0.15
C443.0	4.5-6.0	2.0	0.6	0.35	0.10	...	0.50	0.50	0.15	...		0.25
444.0	6.5-7.5	0.6	50.25	0.35	0.10			0.35		0.25	0.05	0.15
A444.0	6.5-7.5	0.20	0.10	0.10	0.05			0.10		0.20	0.05	0.15
511.0	0.30-0.7	0.50	0.15	0.35	3.5-4.5			0.15	...	0.25	0.05	0.15
512.0	1.4-2.2	0.6	0.35	0.8	3.5-4.5	0.25	...	0.35		0.25	0.05	0.15
513.0	0.30	0.40	0.10	0.30	3.5-4.5		...	1.4-2.2		0.20	0.05	0.15
514.0	0.35	0.50	0.15	0.35	3.5-4.5			0.15		0.25	0.05	0.15
515.0	0.50-1.0	1.3	0.20	0.40-0.6	2.5-4.0		...	0.10		...	0.05	0.15
518.0	0.35	1.8	0.25	0.35	7.5-8.5		0.15	0.15	0.15	...		0.25
520.0	0.25	0.30	0.25	0.15	9.5-10.6			0.15		0.25	0.05	0.15
535.0	0.15	0.15	0.05	0.10-0.25	6.2-7.5					0.10-0.25	0.05	0.15
A535.0	0.20	0.20	0.10	0.10-0.25	6.5-7.5					0.25	0.05	0.15
B535.0	0.15	0.15	0.10	0.05	6.5-7.5	...				0.10-0.25	0.05	0.15
705.0	0.20	0.20	0.20	0.40-0.6	1.4-1.8	0.20-0.40		2.7-3.3	...	0.25	0.05	0.15
707.0	0.20	0.8	0.20	0.40-0.6	1.8-2.4	0.20-0.40		4.0-4.5		0.25	0.05	0.15
710.0	0.15	0.5-0.7	0.35-0.65	0.05	0.6-0.8			6.0-7.0		0.25	0.05	0.15
711.0	0.30	0.7-1.4	0.35-0.65	0.05	0.25-0.45		...	6.0-7.0		0.20	0.05	0.15
712.0	0.30	0.50	0.25	0.10	0.50-0.65	0.40-0.6		5.0-6.5		0.15-0.25	0.05	0.20
713.0	0.25	1.1	0.40-1.0	0.6	0.20-0.50	0.35	0.15	7.0-8.0		0.25	0.10	0.25
771.0	0.15	0.15	0.10	0.10	0.8-1.0	0.06-0.20		6.5-7.5		0.10-0.20	0.05	0.15
772.0	0.15	0.15	0.1	0.10	0.6-0.8	0.06-0.20	...	6.0-7.0		0.10-0.20	0.05	0.15
850.0	0.7	0.7	0.7-1.3	0.10	0.10		0.7-1.3		5.5-7.0	0.20		0.30
851.0	2.0-3.0	0.7	0.7-1.3	0.10	0.10		0.30-0.7		5.5-7.0	0.20		0.30
852.0	0.40	0.7	1.7-2.3	0.10	0.6-0.9	...	0.9-1.5	...	5.5-7.0	0.20		0.30
853.0	5.5-6.5	0.7	3.0-4.0	0.50					5.5-6.0	0.20		0.30

Όλες οι τιμές είναι μέγιστες εκτός από αυτές που έχουν άνω και κάτω όριο.
Το υπόλοιπο είναι αλουμίνιο.[21]

5.3.2 Διάγραμμα ισορροπίας φάσεως κράματος 5052

Τα θερμοδυναμικά διαγράμματα ισορροπίας φάσεως αποτελούνται από τον οριζόντιο άξονα, ο οποίος εκφράζει την περιεκτικότητα κατά βάρος (κ.β). ή κατά άτομο (κ.α.) του κραματικού στοιχείου, και τον κατακόρυφο άξονα ο οποίος εκφράζει την θερμοκρασία σε °C ή K, ανάλογα με την κατά βάρος ή κατά άτομο περιεκτικότητα του κράματος. Σε ένα κραματικό στοιχείο η νοητή ευθεία απόψυξης (παράλληλη με τον άξονα των θερμοκρασιών) δείχνει την εναλλαγή

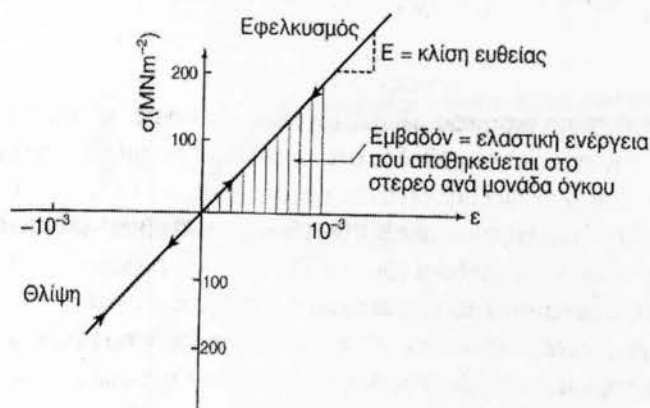
των μεταλλουργικών φάσεων από την υγρή κατάσταση του τήγματος μέχρι την θερμοκρασία του περιβάλλοντος του εν λόγω κράματος με την δεδομένη χημική σύσταση.

Το κράμα αλουμινίου 5052 έχει περιεκτικότητα περίπου 4,7% σε Mg κατά βάρος. Αυτή η χημική σύσταση βρίσκεται βρίσκεται σε μορφή τήγματος σε θερμοκρασία πάνω από τους 636°C. Κατά την στερεοποίηση του από τους 363°C έως τους 601°C στερεοποιείτε μερικώς το Al, και δημιουργούνται δενδρίτες γύρο από το τιγμένο υλικό. Κάτω από τους 601°C μέχρι τους 234°C όλο το στερεοποιημένο υλικό έχει την μορφή στερεού διαλύματος Αλουμινίου με Μαγνήσιο, και κάτω από τους 234°C μέχρι και την θερμοκρασία περιβάλλοντος, μέρος του στερεού διαλύματος μετασχηματίζεται σε ενδομεταλλική ένωση Mg_5Al_8 .

5.4 Μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών υλικών

5.4.1 Ελαστικότητα

Όλα τα στερεά εμφανίζουν κάτω από συνθήκες φόρτισης ένα όριο ελαστικότητας, δηλαδή μια τάση πάνω από την οποία αλλάζει η συμπεριφορά τους. Ένα ψαθυρό υλικό, (πχ γυαλί), πάνω από το όριο ελαστικότητας του οδηγείται σε θραύση, ενώ ένα όλκιμο υλικό (πχ αλουμίνιο) αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά. Στο σχήμα 15 φαίνεται η καμπύλη σ-ε για ένα ελαστικό στερεό που επιδεικνύει γραμμική ελαστικότητα, δηλαδή ισχύει ο νόμος του Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$). Το υλικό αυτό εμφανίζει γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Τέτοια υλικά είναι κυρίως ψαθυρά υλικά όπως το γυαλί και τα κεραμικά υλικά

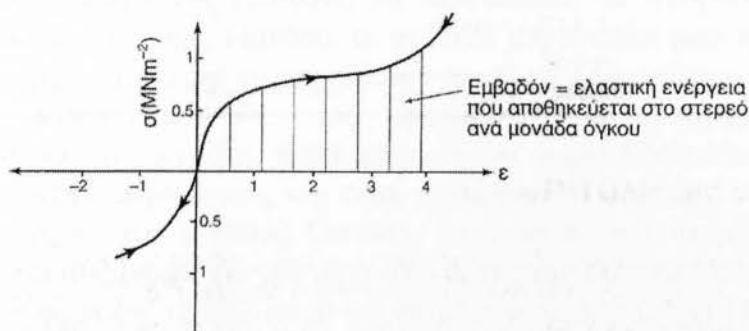


ΣΧΗΜΑ 15: Διάγραμμα σ-ε για ένα γραμμικά ελαστικό στερεό

Τα περισσότερα μεταλλικά υλικά, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης τους και για μικρές παραμορφώσεις (κατά την δοκιμή του εφελκυσμού) εμφανίζουν γραμμική πλαστική συμπεριφορά, όπως στο παραπάνω σχήμα. Η κλίση της

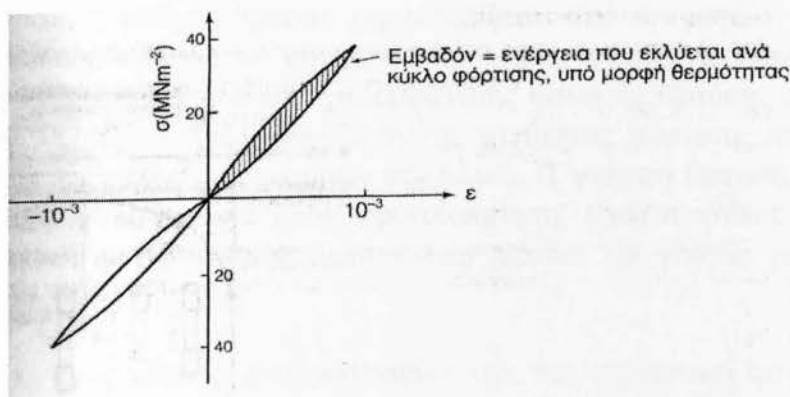
ευθείας είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, ενώ η διαγραμμισμένη επιφάνεια είναι η ελαστική ενέργεια ανά μονάδα όγκου που αποθηκεύτηκε στο υλικό. Η άρση της καταπόνησης οδηγεί σε 100% απόδοση της ενέργειας αυτής.

Στο σχήμα 16 φαίνεται η ελαστική συμπεριφορά ενός ελαστομερούς. Η τάση σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι ανάλογη της παραμόρφωσης, δηλαδή δεν ισχύει ο νόμος του Hooke. Παρόλα αυτά το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά. Ένα τέτοιο υλικό εμφανίζει μη γραμμική ελαστική συμπεριφορά.[22]



ΣΧΗΜΑ 16: Διάγραμμα σ-ε ελαστομερούς

Τέλος η καμπύλη του σχήματος 17 αναφέρεται σε ένα τρίτο είδος ελαστικότητας. Μια τέτοια συμπεριφορά καλείται ανελαστική συμπεριφορά και το υλικό καλείται ανελαστικό στερεό. Σύμφωνα με αυτήν τη συμπεριφορά δεν συμπίπτουν οι διαδρομές φόρτισης και αποφόρτισης με αποτέλεσμα να εμφανίζεται στην καμπύλη σ-ε ένας βρόχος υστέρησης μεταξύ φόρτισης και αποφόρτισης. Το εμβαδόν του βρόχου ταυτίζεται με την ενέργεια ανά μονάδα όγκου που εφελκύεται από το σύστημα υπό μορφή θερμότητας. Μια τέτοια συμπεριφορά ταυτίζεται σε διάφορα πολυμερή αλλά και σε μαλακά μέταλλα όπως ο μόλυβδος, και είναι επιθυμητή σε περιπτώσεις απόσβεσης δονήσεων. Υλικά που παρουσιάζουν μεγάλες ανελαστικές απώλειες, εμφανίζουν μεγάλη ικανότητα απόσβεσης δονήσεων. Άλλοτε πάλι αυτή η συμπεριφορά απόσβεσης δονήσεων δεν είναι επιθυμητή όπως για παράδειγμα στα ελατήρια.



ΣΧΗΜΑ 17: Διάγραμμα σ-ε για ένα ανελαστικό στερεό

5.4.2 Πλαστικότητα

Στη φυσική και την επιστήμη των υλικών, η πλαστικότητα περιγράφει την παραμόρφωση του υλικού που υποβάλλεται σε μια μη αναστρέψιμη αλλαγή του σχήματος του, για την αντιμετώπιση των δυνάμεων που εξασκούνται. Για παράδειγμα, ένα στερεό κομμάτι του μετάλλου που είναι λυγισμένο ή σφυροκοπείται σε ένα νέο σχήμα, έχει πλαστικότητα τις μόνιμες αλλαγές που συμβαίνουν εντός του ίδιου του υλικού. Πλαστική παραμόρφωση παρατηρείται στα περισσότερα υλικά, όπως μέταλλα, τα πετρώματα, το σκυρόδεμα, τους αφρούς, τα οστά και το δέρμα. Ωστόσο, οι φυσικοί μηχανισμοί που προκαλούν πλαστική παραμόρφωση μπορεί να ποικίλλουν ευρέως. Σε ένα όλκιμο μέταλλο, η εφελκυστική φόρτιση που θα του εφαρμοστεί, θα το αναγκάσει να συμπεριφερθεί με ελαστικό τρόπο. Κάθε αύξηση του φορτίου συνοδεύεται από ανάλογη αύξηση στην επιμήκυνση, και όταν αφαιρείται η φόρτιση, το κομμάτι επιστρέφει στο αρχικό του μέγεθος. Ωστόσο, όταν το φορτίο υπερβεί κάποιο όριο, η επιμήκυνση αυξάνεται πιο γρήγορα από ό, τι στην ελαστική περιοχή, και όταν αφαιρείται η φόρτιση, κάποιο ποσό της επιμήκυνσης παραμένει. [34]

5.4.3 Θραύση

Θραύση (fracture) ονομάζεται ο διαχωρισμός, ή θρυμματισμός, ενός στερεού σώματος σε δύο ή περισσότερα κομμάτια, κάτω από την επίδραση μηχανικών τάσεων. Η διαδικασία της θραύσης μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο διακριτά στάδια: την πυρήνωση (initiation) και την προώθηση (propagation) ρηγμάτων.

Η θραύση των υλικών γενικά διακρίνεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: *όλκιμη* (ductile) και *ψαθυρή* (brittle). Η όλκιμη θραύση χαρακτηρίζεται από το μεγάλο ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό, πριν και κατά τη διάρκεια προώθησης των ρηγμάτων, τα οποία τελικά επιφέρουν τη θραύση. Αντίθετα, η ψαθυρή θραύση χαρακτηρίζεται από την μεγάλη ταχύτητα με την οποία προωθούνται τα ρήγματα στο υλικό, χωρίς να προκαλέσουν πλαστική παραμόρφωση. Η πιθανότητα εμφάνισης ψαθυρής θραύσης αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας, με αύξηση της ταχύτητας φόρτισης και με την παρουσία εγχοπών ή άλλων ασυνεχειών στο υλικό. Η ψαθυρή θραύση, ακριβώς επειδή συμβαίνει ακαριαία και χωρίς προειδοποίηση, είναι συνήθως ιδιαίτερα καταστροφική και ο σχεδιασμός κατασκευών πρέπει να γίνεται με βασικό κριτήριο την αποφυγή της. [32]

Η θραύση ενός υλικού αντιπροσωπεύει την πιο σημαντική αστοχία του επιλεχθέντος υλικού, η οποία μπορεί να είναι αποτέλεσμα ή ανεπαρκούς σχεδιασμού ή των συνθηκών λειτουργίας τις οποίες υφίσταται το υλικό ή συνδυασμός και των δύο παραγόντων. Η θραύση των υλικών είναι ένα πολύ σημαντικό κεφάλαιο, καθώς πέραν από τις άμεσες συνέπειές της, που είναι οι

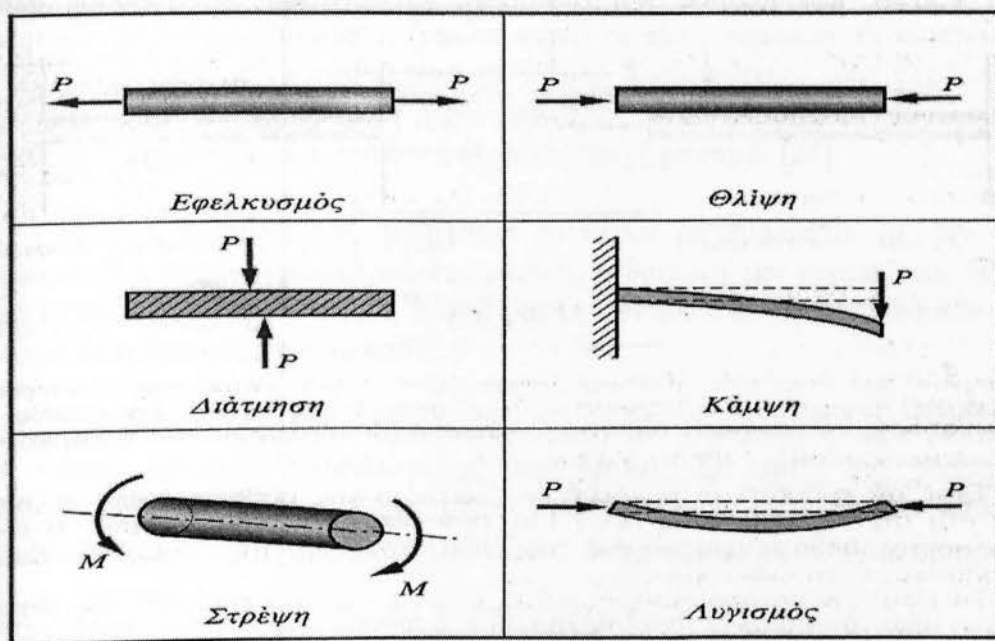
οικονομικές ζημιές από τη μερική ή και ολική απώλεια της κατασκευής, μπορεί να επιφέρει και δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον και ακόμα χειρότερα, μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια ανθρώπινης ζωής. [23]

Ένα υλικό μπορεί να υποστεί θραύση με πολλούς τρόπους, πάντα σε συνάρτηση με τις εξωτερικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, η καταπόνηση, ο ρυθμός παραμόρφωσης, αλλά και το εξωτερικό περιβάλλον.

Η θραύση μπορεί να επέλθει μέσα από πολλούς και διαφορετικούς τρόπους, οι οποίοι είναι τα ακόλουθοι : *Εφελκυσμός, Θλίψη, Διάτμηση, Κάμψη, Στρέψη, Αυγισμός Εφελκυστική Θραύση Χαμηλών Θερμοκρασιών, Εφελκυστική Θραύση Υψηλών Θερμοκρασιών (θραύση από ερπυσμό), Θραύση από Κόπωση και Περιβαλλοντική Θραύση.*

Οι εξωτερικές δυνάμεις επενεργούν στα σώματα με διαφορετικούς τρόπους και προκαλούν διάφορα είδη απλών και σύνθετων καταπονήσεων, έχοντας σαν αποτέλεσμα συνήθως την θραύση. Στον παρακάτω πίνακα υπάρχει μία γραφική απεικόνιση του τρόπου άσκηση των δυνάμεων πάνω στα υλικά. [24]

Τα διάφορα είδη των απλών καταπονήσεων



ΣΧΗΜΑ 18: Είδη απλών καταπονήσεων

Α) Εφελκυσμός : Ένα σώμα καταπονείται σε εφελκυσμό όταν επενεργούν επάνω του δυο ίσες και αντίθετες δυνάμεις οι οποίες τείνουν να το διασπάσουν.

Β) Θλίψη : Ένα σώμα καταπονείται σε θλίψη όταν επενεργούν επάνω του δυο ίσες και αντίθετες δυνάμεις οι οποίες τείνουν να το συνθλίβουν.

Γ) **Διάτμηση** : Ένα σώμα καταπονείται σε διάτμηση όταν δυο ίσες και αντίθετες δυνάμεις επενεργούν κάθετα στον άξονά του.

Δ) **Κάμψη** : Ένα σώμα καταπονείται σε κάμψη, όταν δυο ίσες και αντίθετες δυνάμεις επενεργούν κάθετα στον άξονά του. Αναπτύσσονται τότε ροπές κάμψης και προκαλείται καμπύλωση της δοκού.

Ε) **Στρέψη** : Ένα καταπονείται σε στρέψη, όταν οι δυνάμεις που αποτελούν ζεύγος με επίπεδο κάθετο στον άξονα του, το οποίο τείνουν να το περιστρέψουν.

ΣΤ) **Λυγισμός** : Ο λυγισμός από άποψη δράσης των δυνάμεων μοιάζει με την θλίψη, ενώ από άποψη παραμορφώσεων με την κάμψη. Τελικά όμως διαφέρει αρκετά και από τις δύο προηγούμενες, αποτελώντας ιδιαίτερο τρόπο καταπόνησης, η οποία μάλιστα είναι πολύ επικίνδυνη στις κατασκευές. [25]

Πολλές φορές ένα σώμα είναι δυνατόν να φορτίζεται με συνδυασμό δύο η και περισσότερων απλών καταπονήσεων, οπότε η νέα αυτή καταπόνηση, ονομάζεται **σύνθετη καταπόνηση**. [27]

Ως Εφελκυστική Θραύση ορίζεται ο διαχωρισμός, κάτω από την επίδραση στατικής φόρτισης, ατομικών δεσμών και κρυσταλλικών επιπέδων, τα οποία ονομάζονται επίπεδα θραύσης (εφελκυστική θραύση χαμηλών θερμοκρασιών). Εάν η διαδικασία αυτή συντελείται σε υψηλή θερμοκρασία, τότε υποβοηθείται από τις μετακινήσεις ατόμων λόγω διάχυσης τότε ονομάζεται Εφελκυστική Θραύση Υψηλών Θερμοκρασιών ή Θραύση από Ερπυσμό. [26]

Όταν η φόρτιση που υφίσταται το υλικό μεταβάλλεται με τον χρόνο (περιοδική ή κυκλική μεταβολή της τάσης), η θραύση του ονομάζεται Θραύση από Κόπωση. Πολλές φορές, η θραύση αυτή συντελείται για τιμές τάσεων κάτω από το όριο διαρροής του υλικού.

Περιβαλλοντική Θραύση καλείται η αστοχία του υλικού λόγω συνέργειας της τάσης και του περιβάλλοντος λειτουργίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις διευκολύνεται η διάσταση και ρήξη των ατομικών δεσμών και επιπέδων, προωθώντας με αυτόν τον τρόπο τη διάδοση των ρωγμών (ψαθυροποίηση). [28]

Τέτοιες περιπτώσεις θραύσης, που συναντώνται πολύ συχνά, είναι οι εξής :

- α) Η ψαθυροποίηση από το υδρογόνο.
- β) Η ψαθυροποίηση λόγω υγρού μετάλλου.
- γ) Η διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση.

5.4.3 1 Θεωρητική αντοχή κρυσταλλικού στερεού

Η θραύση χαμηλής θερμοκρασίας ενός ιδανικού (χωρίς ατέλειες) κρυσταλλικού στερεού, λαμβάνει χώρα με την ταυτόχρονη ρήξη των ατομικών δεσμών που διευθετούνται κάθετα στο επίπεδο θραύσης. Το ατομικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θεωρητικής τάσης θραύσης (ή θεωρητικής αντοχής του στερεού, σ_{th}), προϋποθέτει τη δυνατότητα ελαστικής έκτασης των ατομικών δεσμών κάτω από την επίδραση εφελκυστικής τάσης πριν από τη θραύση του. Σε μια κρίσιμη τιμή παραμόρφωσης, η οποία επιτυγχάνεται κάτω από την επιβολή της κρίσιμης θεωρητικής τάσης σ_{th} , οι δεσμοί «σπάνε» σε κάποιο χαρακτηριστικό επίπεδο, που ονομάζεται επίπεδο θραύσης, και το στερεό διαχωρίζεται. Η ελαστική παραμόρφωση σε καθένα από τα δύο μέρη του στερεού ανακτάται μετά από τη θραύση του. Με προσεγγιστικές διαδικασίες αποδεικνύεται ότι η θεωρητική αντοχή του στερεού είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερη του μέτρου ελαστικότητας, όπως φαίνεται και παρακάτω :

$$\sigma_{th} \approx E/(2\pi) \approx E/10 \quad (1.1)$$

Επίσης, υπολογίζεται ότι:

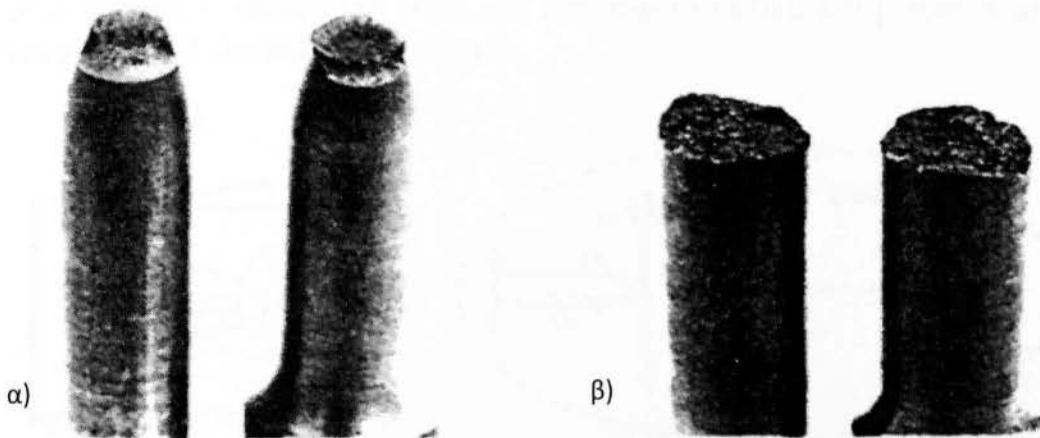
$$\sigma_{th} = [(\gamma^*E)/\alpha_o]^{1/2} \quad (1.2)$$

όπου γ , η επιφανειακή τάση.[33]

Οι τιμές της θεωρητικής αντοχής είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνες της πραγματικής αντοχής κάποιου υλικού. Αυτό εξηγείται λόγω της θεώρησης του στερεού ως ιδανικού για τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής του. Στην πραγματικότητα, οι ατέλειες που υπάρχουν στα υλικά (σημειακές, γραμμικές, επίπεδες και τρισδιάστατες) και οι πολλές προϋπάρχουσες ρωγμές καταλύουν τη δημιουργία και διάδοση των ρωγμών, με αποτέλεσμα τη θραύση του υλικού σε πολύ χαμηλότερη τιμή της τάσης. Επιπλέον αυτού, η πλαστική παραμόρφωση του υλικού προηγείται της δημιουργίας και διάδοσης των ρωγμών, κάτι το οποίο δεν ελήφθη υπόψη στη θεώρηση του μοντέλου μέγιστης θεωρητικής αντοχής.[29], [35]

5.4.3.2 Εφελκυστική θραύση χαμηλών θερμοκρασιών

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** (όπως προείπαμε). 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.



ΣΧΗΜΑ 19: α) όλκιμη θραύση και β) ψαθυρή θραύση

Τέλος, στις περιπτώσεις όπου η θραύση είναι ψαθυρή, δεν υπάρχει μακροσκοπική πλαστική παραμόρφωση που προηγείται αυτής. Ωστόσο, ανάλογα με το ποσοστό της τοπικής (ή μικροσκοπικής) πλαστικής παραμόρφωσης που τη συνοδεύει, διακρίνουμε τρεις υποκατηγορίες ή τύπους θραύσης: ο Τύπος Α, ο Τύπος Β και ο Τύπος Γ.[31]

Ψαθυρή θραύση Τύπος Α

Ο πρώτος τύπος ψαθυρής θραύσης, Τύπος Α, παρατηρείται για χαμηλές τάσεις και θερμοκρασίες. Κατά τον Τύπο Α θραύσης, η ρωγμή μεταδίδεται είτε μέσω των κόκκων (ενδοκρυσταλλική ρωγμάτωση) είτε κατά το μήκος των συνόρων των κόκκων (περικρυσταλλική ρωγμάτωση). Ο Τύπος Α θραύσης προέρχεται από προϋπάρχουσες ρωγμές ή ατέλειες μέσα στο υλικό, διαστάσεων μεγαλύτερων του μεγέθους των κόκκων. Ο χαρακτηρισμός της ψαθυρής θραύσης ως «Τύπος Α» δείχνει τη μηδενική πλαστική παραμόρφωση του υλικού πριν από την τελική θραύση. Τέτοια υλικά που προσεγγίζουν την ψαθυρή θραύση Τύπου Α είναι κυρίως το γυαλί και διάφορα ανόργανα στερεά και κεραμικά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (οξείδια, χλωρίδια, κλπ.).

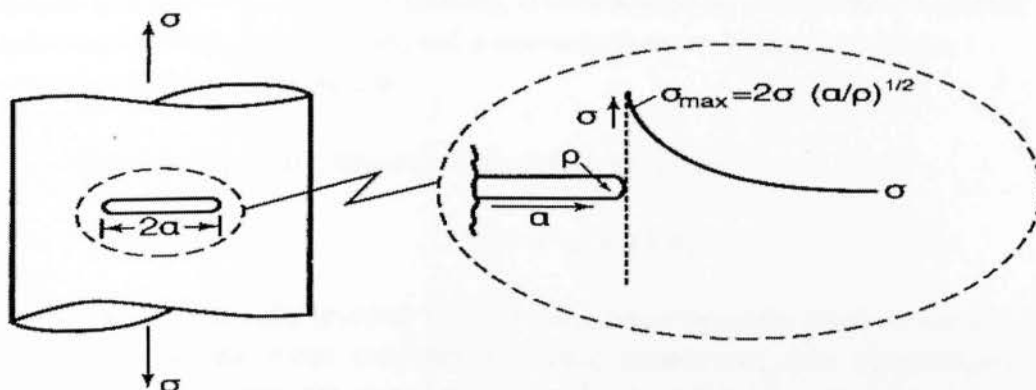
Έχουν αναπτυχθεί δύο θεμελιώδεις θεωρίες γύρω από τον Τύπο Α της ψαθυρής θραύσης. Αυτές είναι ‘η θεωρία της μέγιστης θεωρητικής αντοχής’ και η ‘θεωρία Griffith’.

1. Θεωρία Μέγιστης Θεωρητικής Αντοχής

Μία ρωγμή προκαλεί συγκέντρωση τάσεων πλησίον του άκρου της, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα της ρωγμής (Σχήμα 20). Για ρωγμές ελλειπτικού σχήματος, μεγάλου άξονα $2a$, η μέγιστη τιμή της τάσης στο άκρο της ρωγμής έχει την ακόλουθη τιμή:

$$\sigma_{\max} = 2\sigma \left(\frac{a}{\rho}\right)^{1/2} \quad (1.3)$$

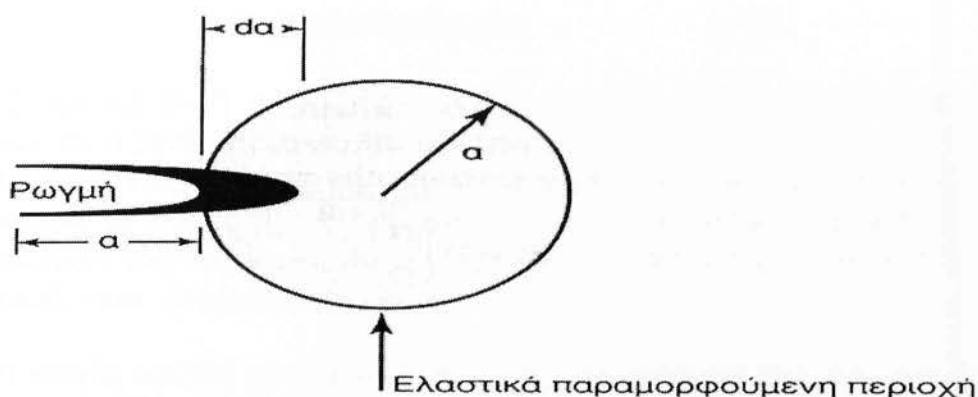
όπου σ είναι η ονομαστική τάση που ασκείται στο υλικό και ρ είναι η ακτίνα καμπυλότητας του άκρου της ρωγμής.



Σχήμα 20. Συγκέντρωση τάσεων στο άκρο της ρωγμής ελλειπτικού σχήματος (μεγάλου άξονα $2a$) μέσα σε γραμμικά ελαστικό στερεό, κάτω από την επίδραση ονομαστικής εφελκυστικής τάσης σ .

2. Θερμοδυναμική Θεωρία ή Θεωρία Griffith

Στην πραγματικότητα η θραύση ενός στερεού αποτελεί γεγονός μείωσης της ολικής διαφοράς της ελεύθερης ενέργειας του συστήματος. Οι συνιστώσες της ολικής ενέργειας είναι δύο ειδών: επιφανειακή ενέργεια, U_s και ελαστική ενέργεια, U_{el} (Σχήμα 21).



Σχήμα 21. Θερμοδυναμική θεώρηση της διάδοσης της ρωγμής. Κατά την ανάπτυξη της ρωγμής κατά da , δημιουργείται επιφανειακή ενέργεια, λόγω των νέων επιφανειών που σχηματίζονται. Παράλληλα, με την αύξηση της επιφανειακής ενέργειας, λαμβάνει χώρα αποκατάσταση της ελαστικής ενέργειας που σχετίζεται με τη χαλάρωση των ατομικών δεσμών εκατέρωθεν του επιπέδου θραύσης. Ο θετικός όρος της επιφανειακής ενέργειας καθυστερεί τη διάδοση της ρωγμής, ενώ ο αρνητικός όρος της ελαστικής ενέργειας επιταχύνει τη διάδοση της ρωγμής.

Ο πρώτος όρος της επιφανειακής ενέργειας είναι:

$$U_s = 4 \cdot a \cdot \gamma \quad (1.4)$$

(ενέργεια ανά μονάδα μήκους του υλικού). Δημιουργείται κατά τη διάδοση της ρωγμής, οφείλεται στην ενέργεια της νέας επιφάνειας που σχηματίζεται και συνεπάγεται αύξηση της συνολικής ελεύθερης ενέργειας του συστήματος. Ο δεύτερος όρος, αυτός της ελαστικής ενέργειας, σχετίζεται με την απελευθέρωση ελαστικής ενέργειας του συστήματος κατά τη διάδοση της ρωγμής. Αποδεικνύεται ότι η ελαστική ενέργεια που εκλύεται ανά μονάδα μήκους του υλικού είναι:

$$U_{el} = (\pi \cdot \sigma^2 \cdot a^2) / E \quad (1.5)$$

Άρα, η συνολική διαφορά στην ελεύθερη ενέργεια κατά τη διάδοση της ρωγμής, U_{tot} , ισούται με:

$$U_{tot} = U_s - U_{el} \quad (1.6)$$

Το κρίσιμο μήκος ρωγμής a είναι το μήκος εκείνο πέραν του οποίου η ρωγμή διαδίδεται αυθόρμητα με αποτέλεσμα τη θραύση του υλικού. Το κρίσιμο μήκος ρωγμής αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της διαφοράς ελεύθερης ενέργειας, δηλαδή όταν

$$dU_{tot}/da = 0$$

Από την εξίσωση (1.6) υπολογίζεται η τάση θραύσης σ_F . Δηλαδή :

$$\sigma_F = [(2 \cdot \gamma \cdot E) / (\pi \cdot a)]^{1/2} \quad (1.7)$$

Η εξίσωση (1.7) ονομάζεται εξίσωση Griffith. Σύμπτωση της θεωρίας μέγιστης θεωρητικής αντοχής και θεωρίας Griffith υπάρχει όταν $\rho = 3 \cdot \text{ao}$. Παρόλα αυτά, ελάχιστη διαφορά υπάρχει στην τάση θραύσης που υπολογίζεται σύμφωνα με τις δύο αυτές θεωρίες, καθώς σε απόλυτα ψαθυρά υλικά η ακτίνα καμπυλότητας του άκρου της ρωγμής, πριν από τη διάδοσή της και τη θραύση του υλικού, είναι ατομικών διαστάσεων.

Η θεωρία Griffith εισάγει και τον όρο της δυσθραυστότητας του υλικού, ο οποίος συμβολίζεται ως G_c . Η δυσθραυστότητα στην εξίσωση Griffith εξ' ορισμού ισούται με $2 \cdot \gamma$.

Από την εξίσωση (1.7) προκύπτει ότι:

$$\sigma_F = [(G_c \cdot E) / (\pi \cdot a)]^{1/2} \quad (1.8)$$

Αποδεικνύεται, επίσης, ότι η δυσθραυστότητα είναι ίση με το γινόμενο $\sigma^* \rho^* \epsilon$ (όπου ϵ είναι η παραμόρφωση θραύσης του υλικού), το οποίο συμβολίζει την ενέργεια ανά μονάδα όγκου στην καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων του υλικού. Στην περίπτωση της ψαθυρής θραύσης Τύπου A, το γινόμενο αυτό είναι ίσο με $\sigma_{th}^* \rho^* \epsilon$.

Επίσης προσδιορίζεται ο κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσης, ο οποίος συμβολίζεται ως K_{Ic} . Ισχύει λοιπόν ότι:

$$K_{Ic} = (E \cdot G_c)^{1/2} = Y \cdot \sigma_F \cdot (\pi \cdot a^*)^{1/2} \quad (1.9)$$

Όπου Y είναι ο συντελεστής γεωμετρίας του δοκιμίου και a^* το κρίσιμο μήκος της ρωγμής. Ο συντελεστής Y είναι μία παράμετρος χωρίς διαστάσεις, εξαρτώμενη από τη γεωμετρία του δοκιμίου και του λόγου a/w , όπου a είναι το μήκος της ρωγμής και w η διάσταση του δοκιμίου κατά τη διεύθυνση της διάδοσης της ρωγμής. Για μικρών διαστάσεων δοκίμια ισχύει ότι $Y = 1$.

Ψαθυρή θραύση - Τύπος B

Χαρακτηριστικό αυτού του τύπου ψαθυρής θραύσης είναι η μικροσκοπικής κλίμακας πλαστική διαρροή του υλικού που προηγείται. Η θραύση σε αυτήν την περίπτωση συντελείται είτε με μηχανισμούς ενδοκρυσταλλικής είτε με μηχανισμούς περικρυσταλλικής ρωγμάτωσης. Ο Τύπος B ψαθυρής θραύσης λαμβάνει χώρα σε υψηλότερες τιμές τάσης από τον Τύπο A και σε υλικά στα οποία δεν προϋπάρχουν καθόλου ρωγμές ή αυτές έχουν μέγεθος κάτω του κρίσιμου μήκους. Οι υψηλότερες τιμές των τάσεων είναι αρκετές για να ενεργοποιηθούν διαδικασίες ολίσθησης ή διδυμίας σε επίπεδα κάθετα στη διεύθυνση εφαρμογής της τάσης. Εφόσον η τοπική πλαστική διαρροή δε

συννοδεύεται από αντίστοιχη μακροσκοπική, η μικροσκοπική αυτή πλαστικότητα ακολουθείται από τη δημιουργία μικρορωγμών και τη διάδοση αυτών στη συνέχεια μέσα στο υλικό.

Η τάση θραύσης αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση που αντιστοιχεί σε ένα από τα τρία στάδια:

Μικροσκοπική πλαστικότητα → Έναρξη ρωγμάτωσης → Διάδοση ρωγμών

Το ελέγχον στάδιο εξαρτάται επίσης και από τη θερμοκρασία. Για παράδειγμα, σε χαμηλές θερμοκρασίες, τα μέταλλα που ανήκουν στο κυβικό χωροκεντρωμένο σύστημα (bcc) εμφανίζουν μεγαλύτερη τάση διαρροής σ_y , σε σχέση με την τάση διάδοσης της ρωγμής. Επομένως, και η τάση θραύσης ενός τέτοιου μετάλλου μπορεί να θεωρηθεί ότι ισούται με την τάση διαρροής του. Το αντίθετο συμβαίνει σε υψηλές θερμοκρασίες.

Σε όλες τις περιπτώσεις ψαθυρής τάσης Τύπου B, η τάση θραύσης είναι ανάλογη του $d^{-1/2}$, όπου d είναι η μέση διάμετρος των κόκκων. Αυτό εξηγείται από τη δυσκολία της μικροσκοπικής πλαστικής παραμόρφωσης που προηγείται της ρωγμάτωσης των λεπτόκοκκων υλικών.

Ψαθυρή θραύση - Τύπος Γ

Σε αυτόν τον τύπο της θραύσης εκδηλώνεται μακροσκοπική (γενικευμένη) πλαστική παραμόρφωση πριν από τη θραύση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα ελάττωση της διατομής μετά τη θραύση σε ποσοστό όχι πάνω από 10%. Η τελική ρηγμάτωση μπορεί να γίνει είτε περικρυσταλλικά είτε ενδοκρυσταλλικά.

Ο μηχανισμός ρωγμάτωσης κατά τη θραύση Τύπου Γ διαφέρει τόσο από τους Τύπους A και B όσο και από την όλκιμη θραύση. Πιο συγκεκριμένα, η ενδοτράχυνση που προκαλείται λόγω πλαστικής παραμόρφωσης αυξάνει την τάση πλαστικής ροής του υλικού κοντά στην τιμή της διάδοσης της ρωγμής. Σε αυτό το στάδιο, όλες οι παρούσες μικρορωγμές συνενώνονται και η θραύση θα επέλθει είτε διαμέσου των κόκκων είτε κατά μήκος των συνόρων τους. Πριν από την τελική αυτή θραύση, η πλαστική ζώνη μπροστά από το μέτωπο της ρωγμής είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τους άλλους τύπους θραύσης. Μετά από τοπική παραμόρφωση του υλικού πλησίον της ρωγμής, η ακτίνα της πλαστικής ζώνης R είναι ίση με:

$$R=2 \cdot r_y= 2 \cdot K^2/\sigma_y \quad (1.10)$$

όπου: r_y , είναι η ακτίνα της πλαστικής ζώνης πριν από την τοπική παραμόρφωση του υλικού και K είναι ο συντελεστής έντασης τάσης.

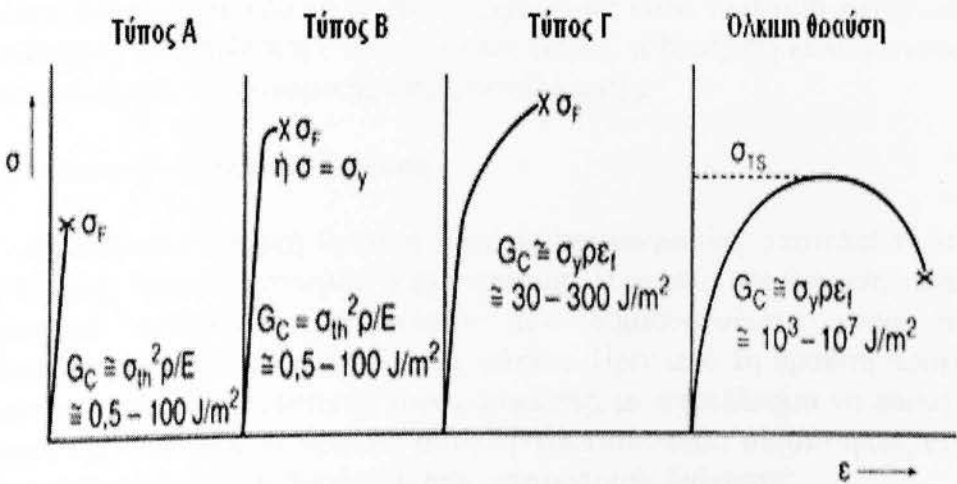
Όλκιμη θραύση

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 ολκιμότητα, εφόσον έχουν μικρότερη ολκιμότητα από τη μήτρα. Η παρουσία των συστατικών αυτών λειτουργεί καταλυτικά στην έναρξη μικρορωγμών ή μικρών κενών 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.

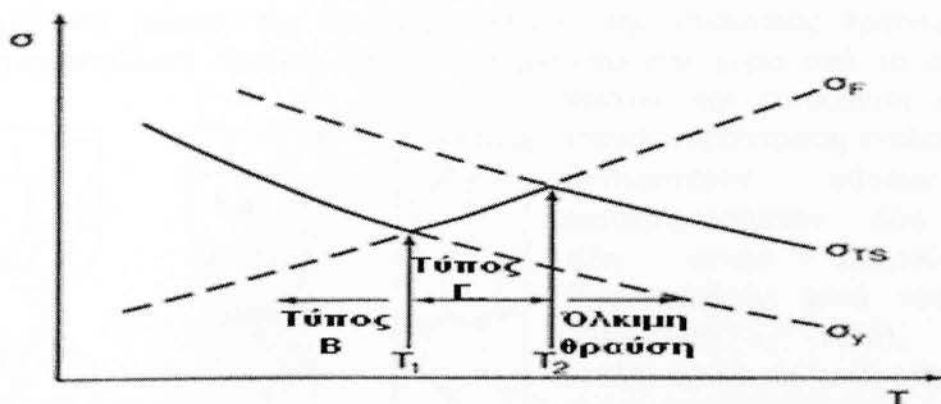
Για τη συνολική εφελκυστική τάση σ_T που μεταφέρεται στη διεπιφάνεια ισχύει:

$$\sigma_T = \sigma_{Te} + \sigma_{gd} \tag{1.11}$$

Σε συγκεκριμένη τιμή της τάσης σ_T τα μικροκενά που δημιουργούνται συνενώνονται μεταξύ τους και οδηγούν σε τελική θραύση του υλικού. Συνολικά, οι μεταβολές $\sigma - \epsilon$ και G_C , ανάλογα με την κατηγορία θραύσης, φαίνονται στο Σχήμα 22. Επίσης, στο Σχήμα 23, απεικονίζονται οι μεταβολές της τάσης διαρροής, της μέγιστης τάσης εφελκυσμού και της τάσης διάδοσης της ρωγμής σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, καθώς επίσης και οι αντίστοιχες μεταβάσεις Τύπος Β/Τύπος Γ/Όλκιμη θραύση. [29]



Σχήμα 22. Μεταβολές $\sigma - \epsilon$ αναλόγως τον τύπο θραύσης.



Σχήμα 23. Μεταβολές $\sigma - T$ αναλόγως τον τύπο θραύσης

5.4.3.3 Κατηγορίες εφελκυστικής θραύσης υψηλών θερμοκρασιών (θραύση από ερπυσμό)

Γενικά, υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι θραύσης από ερπυσμό. Αυτοί είναι οι εξής: *Διάσχιση*, *Ενδοκρυσταλλική Θραύση* και *Περικρυσταλλική Θραύση*

1. Διάσχιση

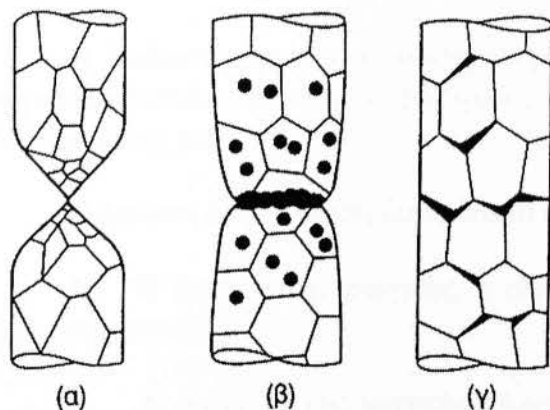
Η διάσχιση χαρακτηρίζεται από μεγάλη μείωση της διατομής (σχεδόν 100%) πλησίον της επιφάνειας θραύσης και λαμβάνει χώρα σε μεγάλες τάσεις και θερμοκρασίες. Οι τιμές των τάσεων και των ρυθμών παραμόρφωσης είναι περίπου στο ίδιο επίπεδο με τις αντίστοιχες τιμές κατά τη θερμή κατεργασία (για παράδειγμα, θερμή έλαση). Έτσι, πολλές φορές, η διάσχιση είναι συνυφασμένη με το φαινόμενο της δυναμικής ανακρυστάλλωσης.

2. Ενδοκρυσταλλική Θραύση

Η ενδοκρυσταλλική θραύση υψηλής θερμοκρασίας αποτελεί το ανάλογο της όλκιμης θραύσης χαμηλής θερμοκρασίας. Η πορεία της θραύσης ακολουθεί μηχανισμό συνένωσης μικροκενών που δημιουργούνται γύρω από τα εγκλείσματα ή από τις δευτερογενείς φάσεις. Πριν από τη θραύση προκαλείται σημαντικό ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μείωση της διατομής. Η θραύση αυτή πραγματοποιείται σε πιο ήπιες συνθήκες από τη διάσχιση και υποβοηθείται από μηχανισμούς διάχυσης.

3. Περικρυσταλλική Θραύση

Η περικρυσταλλική θραύση από ερπυσμό λαμβάνει χώρα για τιμές τάσεων και ταχυτήτων παραμόρφωσης μικρότερες από αυτές που προκαλούν διάσχιση ή ενδοκρυσταλλική θραύση. Η πορεία αυτού του είδους θραύσης εξελίσσεται κατά μήκος των ορίων των κόκκων. Μετά την τελική θραύση, δεν παρατηρείται σημαντική μείωση της διατομής πλησίον της επιφάνειας θραύσης. Στην περικρυσταλλική θραύση, τα κενά δημιουργούνται γύρω από τα όρια των



κόκκων και ευνοούνται από την τοπική συγκέντρωση εγκλεισμάτων, δευτερογενών φάσεων και κατακρημνισμάτων. Δύο βασικά είδη κενών μπορούν να δημιουργηθούν: κενά τύπου "w" (σφηνοειδή κενά), που υποδηλώνουν την επίδραση υψηλής τάσης, και κενά τύπου "r" (σφαιρικά κενά), που υποδηλώνουν την επίδραση χαμηλής τάσης. [25],[31]

Τύποι θραύσης από ερπυσμό:

- α) Διάσχιση,
- β) Ενδοκρυσταλλική Θραύση,
- γ) Περικρυσταλλική Θραύση

5.4.3.4 Θραύση από κόπωση

Κόπωση καλείται το φαινόμενο της αστοχίας ενός υλικού, η οποία προκαλείται από επαναλαμβανόμενη επιβολή εξωτερικών φορτίων για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι οι μηχανισμοί της κόπωσης και οι επιδράσεις τους στη χρονική διάρκεια ζωής μιας κατασκευής δεν είναι απόλυτα γνωστοί. Επίσης, η κόπωση σχεδόν ποτέ δεν εμφανίζεται ανεξάρτητη ως φαινόμενο αλλά σε συνδυασμό με άλλους μηχανισμούς φόρτισης, όπως οι κραδασμοί, οι συγκεντρώσεις τάσεων και κυρίως, σε συνδυασμό με διάβρωση. Το σύνηθες αποτέλεσμα της κόπωσης σε μία κατασκευή είναι η έναρξη κάποιας ρωγμής, όμως, η επίδραση διάφορων μεταβλητών στην έναρξη της ρωγμής δεν είναι απόλυτα γνωστή. Υπάρχουν τουλάχιστον τέσσερις τύποι μηχανισμών που σχετίζονται με την έναρξη μίας ρωγμής λόγω κόπωσης. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι οι εξής:

1) Διάβρωση με βελονισμούς (pitting), όπου ο πυρήνας της ρωγμής σχετίζεται με συγκέντρωση τάσεων στις "βελόνες" που σχηματίζονται από τη διαβρωτική δράση.

2) Διακριτική διάλυση ενός υλικού, παραμορφωμένου σε μεγάλο βαθμό, που δρα ως τοπική άνοδος, και μη παραμορφωμένου υλικού, που δρα ως τοπική κάθοδος.

3) Ρήξη του επιφανειακού στρώματος, όπου το προστατευτικό επίστρωμα (όπως είναι τα οξειδία) υφίσταται διάρρηξη, επιτρέποντας την εμφάνιση διαβρωτικής δράσης.

4) Μείωση της επιφανειακής ενέργειας προκαλούμενη από απορρόφηση περιβαλλοντικών στοιχείων (οξυγόνο, υδρογόνο) και αύξηση του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής.

Η θραύση από κόπωση διακρίνεται σε τρία στάδια, τα οποία είναι τα εξής:

A. **Η έναρξη της ρωγμής**, η οποία προκύπτει συνήθως στην επιφάνεια της κατασκευής.

B. **Η διάδοση της ρωγμής**. Η αρχική μικρή ρωγμή μεγαλώνει σταδιακά με κάθε εναλλαγή του φορτίου. Διαδίδεται σε κατεύθυνση κάθετη προς τη μέγιστη εφελκυστική τάση.

Γ. **Η ασταθής θραύση**. Καθώς η ρωγμή διαδίδεται, οι τάσεις στην εναπομένουσα εγκάρσια τομή αυξάνουν, οπότε επέρχεται ταυτόχρονη αύξηση του ρυθμού διάδοσης. Τελικά, προκύπτει είτε ψαθυρή θραύση, όταν το μέγεθος της ρωγμής φτάσει στην κρίσιμη τιμή του για τις επικρατούσες συνθήκες και τη γεωμετρία, είτε όλκιμη θραύση, όταν η τοπική τάση φτάσει στο όριο θραύσης.[27]

5.4.3.5 Η μηχανική θεωρία της θραύσης

Σύμφωνα με τη Μηχανική Θεωρία της Θραύσης, οι κατανομές των ελαστικών τάσεων και των μετατοπίσεων στην περιοχή του άκρου μιας ρωγμής υπό την επίδραση μιας δεδομένης μορφής παραμόρφωσης είναι αναλλοίωτες ως προς όλες τις συνιστώσες τους. Η κατανομή αυτή μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια της παραμέτρου K , για διάφορους τύπους ρωγμών.

Η παράμετρος K ονομάζεται Συντελεστής Έντασης Τάσης (Stress Intensity Factor). Επομένως, η εξωτερική επιβαλλόμενη φόρτιση, η μορφή και το μέγεθος της ρωγμής και η γεωμετρία, που αντιστοιχούν σε κάποιο κατασκευαστικό στοιχείο το οποίο υπόκειται σε μία δεδομένη μορφή παραμόρφωσης, επηρεάζουν την τιμή του συντελεστή έντασης τάσης, δεν επιδρούν όμως στη μορφή της κατανομής των τάσεων. Η γενική μορφή των εξισώσεων, βάσει των οποίων υπολογίζεται ο συντελεστής έντασης τάσης είναι:

$$K = f(g) \cdot \sigma^* (\alpha^{1/2}) \quad (1.12)$$

όπου $f(g)$ είναι μία παράμετρος που εξαρτάται από τη γεωμετρία του δοκιμίου και της ρωγμής.

Γενικά, υπάρχει πληθώρα σχέσεων μεταξύ του συντελεστή έντασης τάσης και διαφόρων γεωμετρικών δοκιμίων, σχημάτων, μεγεθών, προσανατολισμών ρωγμών και συνθηκών φόρτισης. Όσον αφορά στην κόπωση, η διάδοση της ρωγμής οφείλεται στην εναλλασσόμενη τάση. Ως εκ τούτου, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής K για τον καθορισμό του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής. Στην περίπτωση της κόπωσης, η σημαντικότερη παράμετρος είναι το εύρος του συντελεστή έντασης τάσης, ΔK , που ορίζεται από την εξής σχέση:

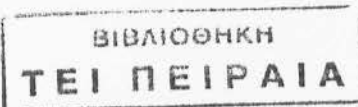
$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (1.13)$$

όπου $K_{\max}$ και $K_{\min}$ είναι οι τιμές του K στη μέγιστη και την ελάχιστη, αντίστοιχα, τιμή της τάσης. Οι Paris και Erdogan πρότειναν την ακόλουθη σχέση μεταξύ του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής και του ΔK :

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (1.14)$$

όπου C και m είναι σταθερές του υλικού, οι οποίες όμως εξαρτώνται και από τη συγκεκριμένη εντατική κατάσταση (τύπο επαναληπτικής φόρτισης) και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Η πειραματική ανάπτυξη των σχέσεων μεταξύ da/dN και ΔK γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, καθορίζεται η σχέση ανάμεσα στο μήκος της ρωγμής και τις αντίστοιχες εναλλαγές φόρτισης. Στο δεύτερο στάδιο, γίνεται ο υπολογισμός των αντίστοιχων τιμών da/dN και ΔK για διάφορα μήκη της ρωγμής.[30]



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6.1 Πειραματική Διαδικασία

Για την διεκπεραίωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικές ράβδοι από διαμορφωμένο κράμα αλουμινίου σειράς 5052. Προμηθεύτηκαν υπό την μορφή φύλλων αλουμινίου, και κόπηκαν με τελική διάσταση 2X1X0,003m. Η κοπή τους έγινε με δισκοτόμο και χρήση ψυκτικού υγρού προς αποφυγή αλλοίωσης της δομής και συσσώρευσης τάσεων. Από το φύλλο αλουμινίου 5052, διαμορφώθηκαν με κοπή δοκίμια διαστάσεων 250X10X3mm.

Εν συνεχεία τα δοκίμια μας διαβρώθηκαν για 336 ώρες (2 εβδομάδες), σε υδατικό διάλυμα NaCl 0.5M, ώστε να εξεταστεί η μηχανική τους συμπεριφορά μετά από διάβρωση.

6.2 Μηχανικές δοκιμές

6.2.1 Η δοκιμή του εφελκυσμού

Η συνηθέστερη δοκιμή των μηχανικών ιδιοτήτων είναι η καταστρεπτική δοκιμή του εφελκυσμού, και συνιστάται στην εφελκυστική καταπόνηση των προς χαρακτηρισμό δοκιμίων.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία η δοκιμή του εφελκυσμού έγινε βάση του προτύπου ASTM E 08-03, και η απομάκρυνση των αρπαγών τέθηκε σε 0,003 - 0,05 - 0,5 - 0,9 - 1,4 - 1,8 sec⁻¹. Η δοκιμή αυτή έγινε σε κράμα αλουμινίου 5052, σε μη διαβρωμένα δοκίμια (as received) και σε δοκίμια τα οποία έχουν υποστεί διάβρωση σε NaCl για 336 ώρες.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η μηχανή εφελκυσμού σύμφωνα με την οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματά μας.

TECHNICAL SPECIFICATIONS:

Frame Capacity 100 kN (22,000lbf)

Standards met or exceeded ASTM E4, EN-ISO 7500/1

Load reading resolution 1/200000 f.s.

Stroke resolution 0,1 micron

Speed at maximum load 0,0005-200 mm/min.

Idle speed 400 mm/min.

Controlled total stroke 1000 mm (40in.)

Maximum daylight between connecting adapters 1000 mm (40in.)

Daylight between columns 410 mm (16 in.)

(Potential to extend minimum certified load to 1/500 f.s.)

Power Supply 230V/50Hz or 120V/60Hz

Power consumption 1000 W

Machine weight (without accessories) 360 Kg (792 lb)

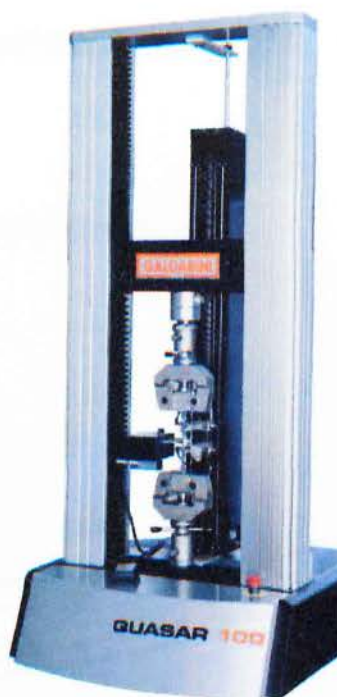
(A compressed air line at six bar is required for some options)

DIMENSIONS:

Height 1680 mm (66 in.)

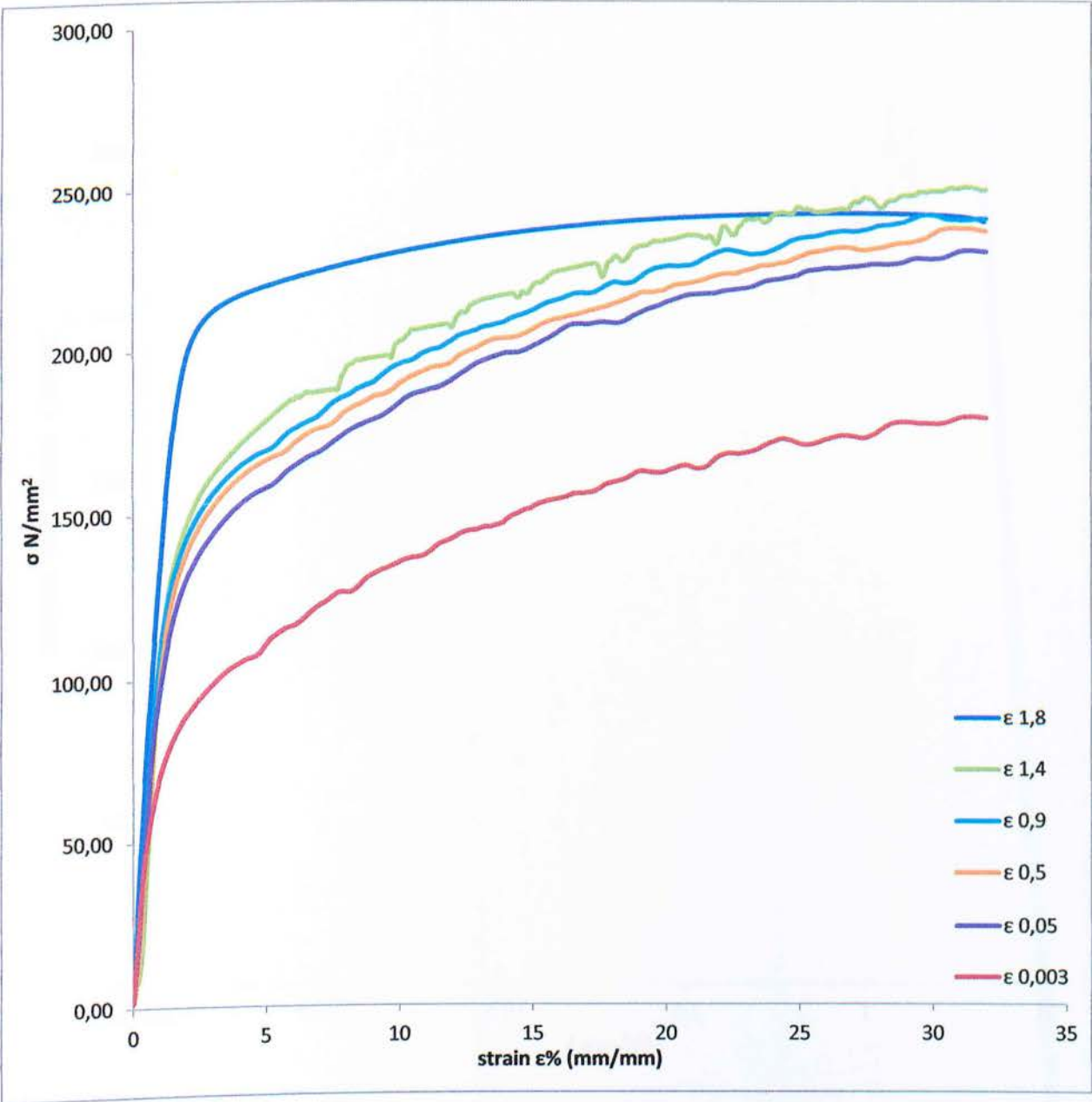
Width 785 mm (31 in.)

Depth 820 mm (32 in.)



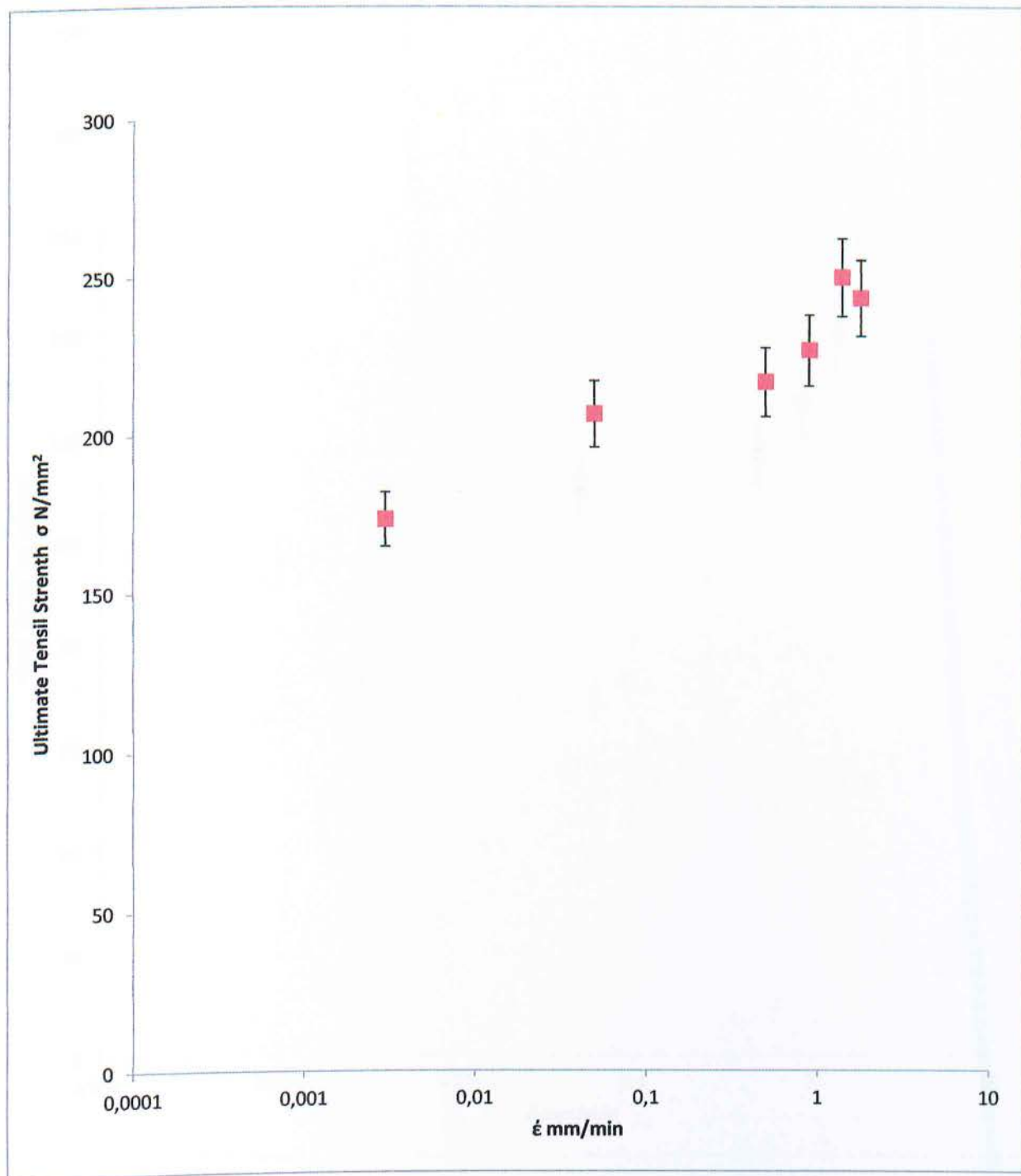
6.3 Διαγράμματα εφελκυσμού μη επεξεργασμένων δοκιμίων
(as received)

Διάγραμμα τάσης σ – Ανοιγμένης παραμόρφωσης $\epsilon\%$



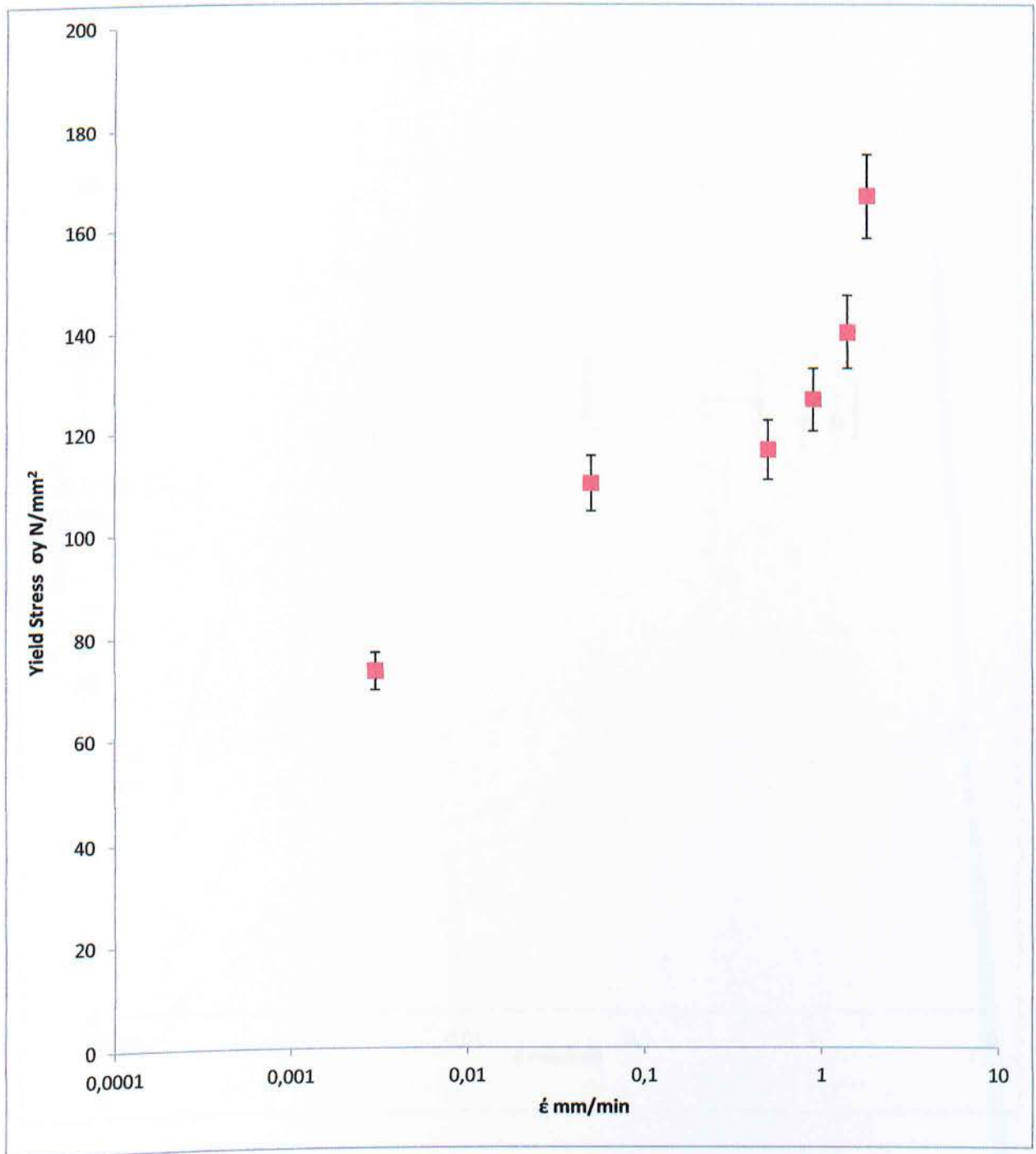
Διάγραμμα 1

Διάγραμμα μέγιστης τάσης σ_{UTS} – Ρυθμού Φόρτισης $\dot{\epsilon}$



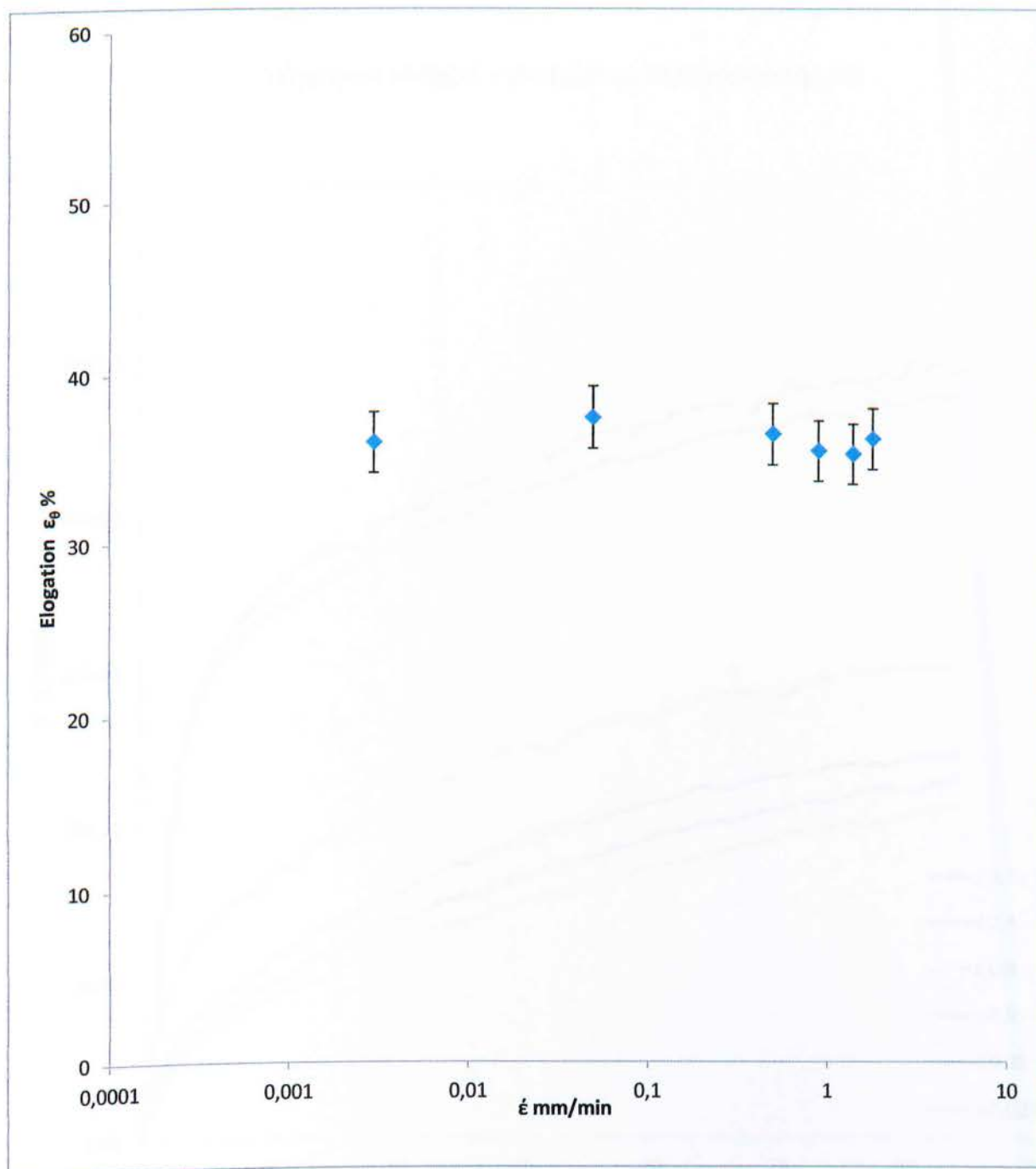
Διάγραμμα 2

Διάγραμμα τάσης σ_{Yield} – Ρυθμού Φόρτισης $\dot{\epsilon}$



Διάγραμμα 3

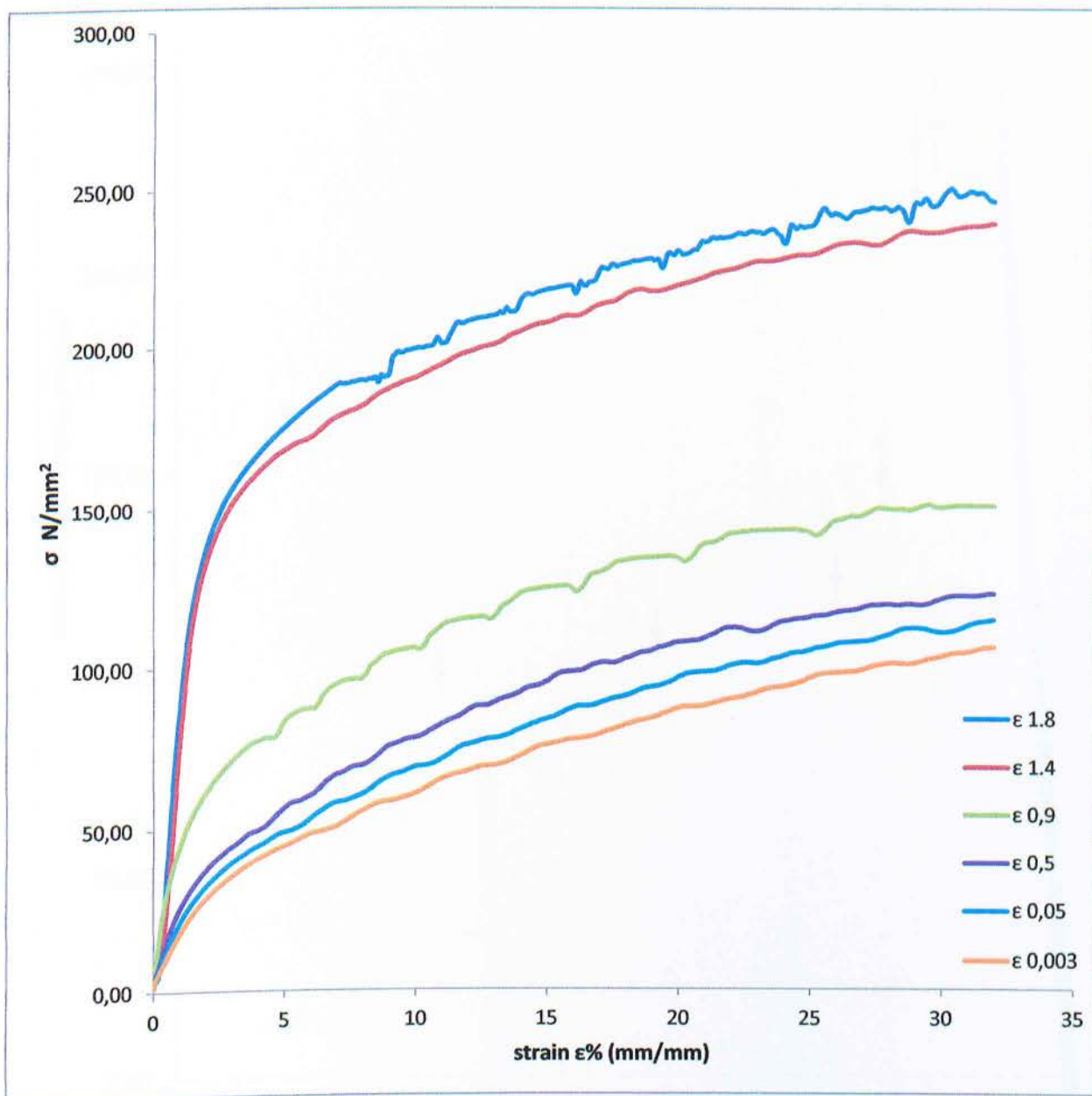
Διάγραμμα Ολκιμότητας $\epsilon_{\theta}\%$ – Ρυθμού Φόρτισης $\dot{\epsilon}$



Διάγραμμα 4

6.4 Διαγράμματα εφελκυσμού διαβρωμένων δοκιμίων (2week)

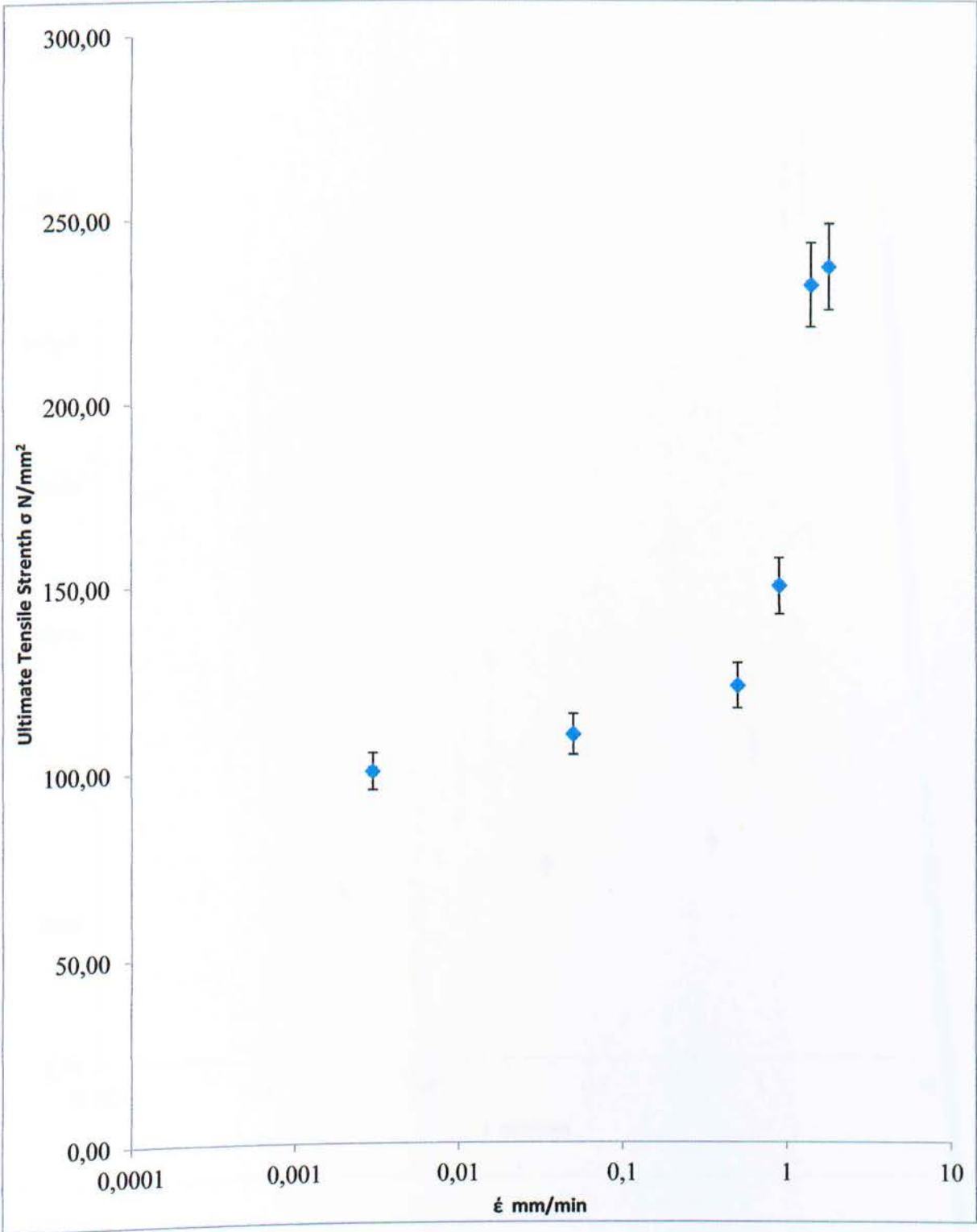
Διάγραμμα τάσης σ – ανοιγμένης παραμόρφωσης $\epsilon\%$



Διάγραμμα 5

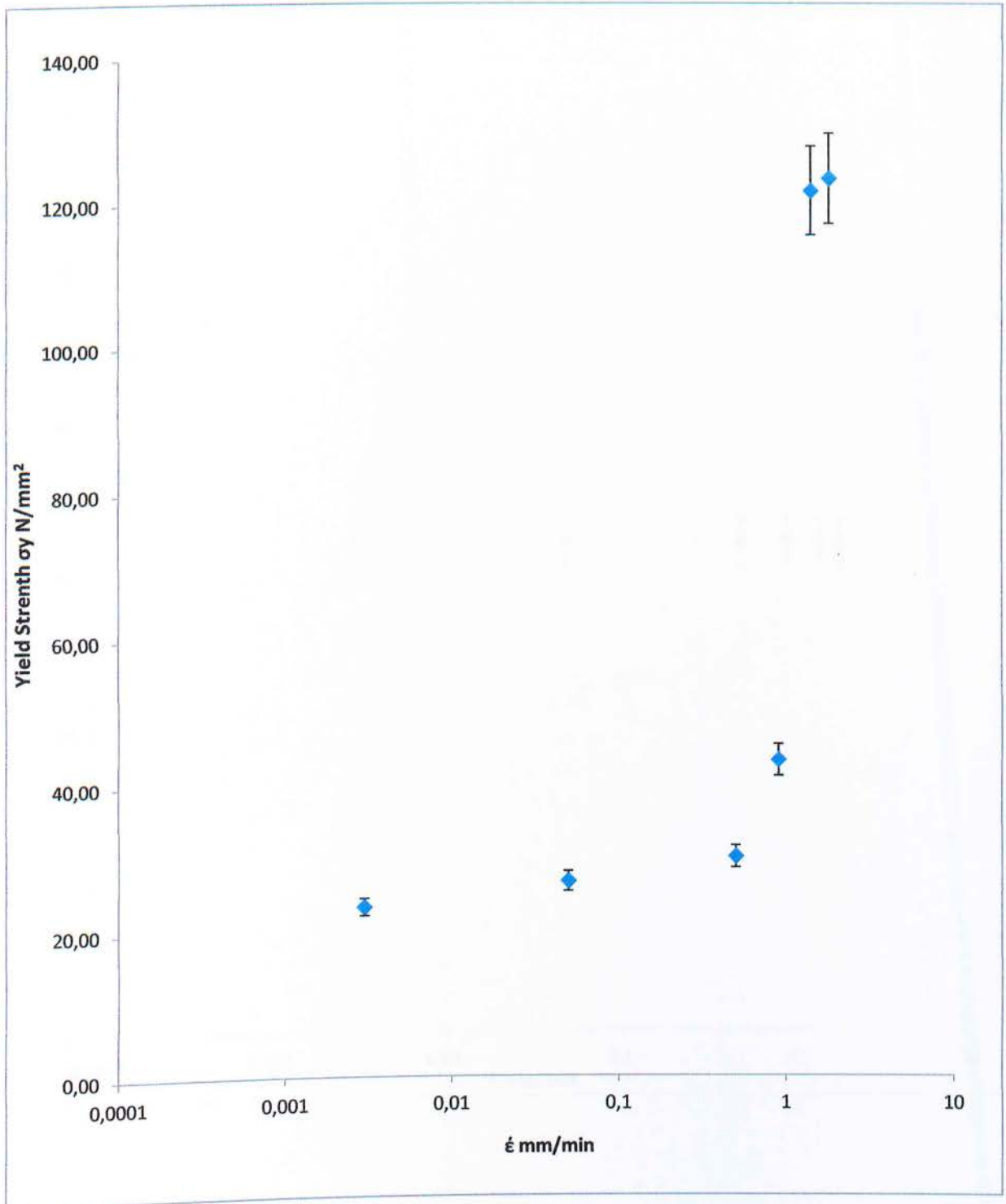
ΓΕΩΠΕΡΙΓΑΙΑ

Διάγραμμα μέγιστης τάσης σ_{UTS} – Ρυθμού Φόρτισης $\dot{\epsilon}$



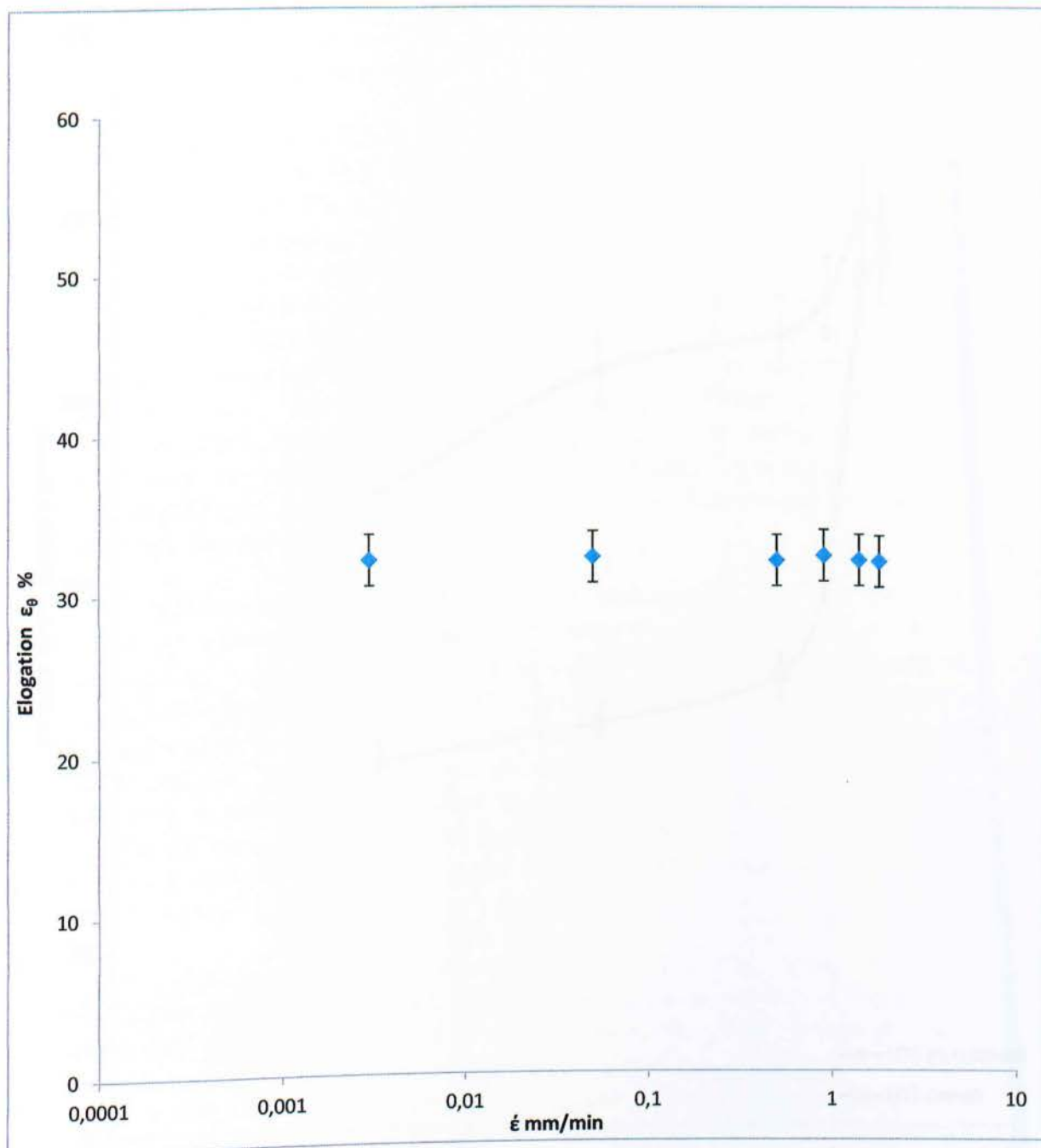
Διάγραμμα 6

Διάγραμμα τάσης σ_{Yield} – Ρυθμού Φόρτισης $\dot{\epsilon}$



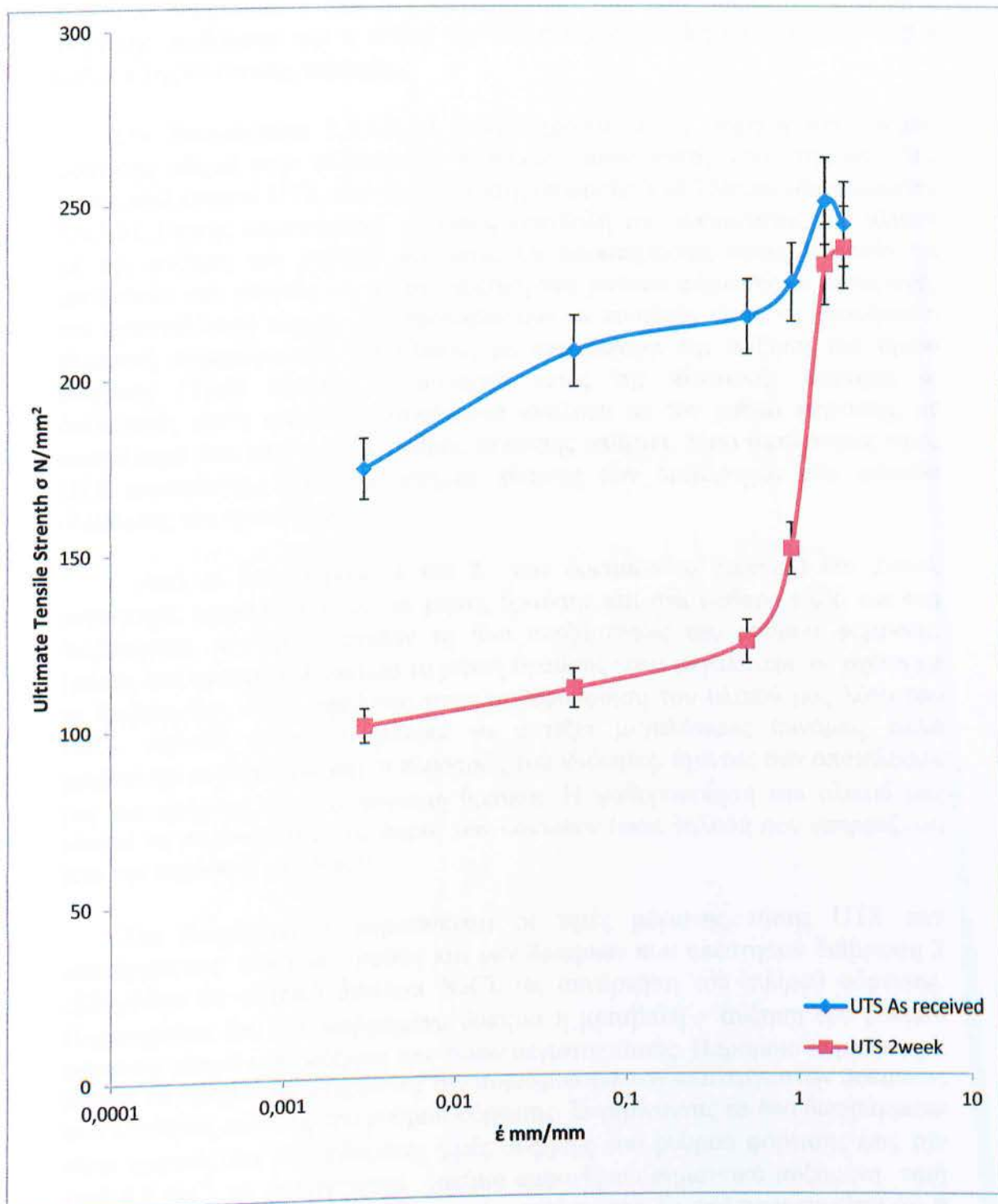
Διάγραμμα 7

Διάγραμμα Ολκιμότητας $\epsilon_0\%$ – Ρυθμού Φόρτισης $\dot{\epsilon}$



Διάγραμμα 8

Κοινό διάγραμμα σ_{UTS} – ρυθμού φόρτισης $\dot{\epsilon}$



Διάγραμμα 9

6.5 Σχόλια – Παρατηρήσεις διαγραμμάτων

Στο διάγραμμα 1 και 5 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται ο ρυθμός φόρτισης, αυξάνεται και η κλίση της καμπύλης σ- ε. Δηλαδή παρατηρώ μία αύξηση της ελαστικής περιοχής.

Στα διαγράμματα 2,3,4,6,7,8 παρατηρούμε ότι η αύξηση του ρυθμού φόρτισης οδηγεί στην αύξηση των κρίσιμων τιμών τάσης, τόσο της μέγιστης τάσης εφελκυσμού UTS, όσο και της τάσης διαρροής Yield Stress, (διαγράμματα 2,3,5,6). Επίσης παρατηρείται μηδενική μεταβολή της ολκιμότητας του υλικού με την αύξηση του ρυθμού φόρτισης. Οι παρατηρήσεις αυτές μπορούν να αποδοθούν στο γεγονός ότι με την αύξηση του ρυθμού φόρτισης οι διαταραχές του κρυσταλλικού υλικού, δεν προλαβαίνουν να κινηθούν ώστε να ξεκινήσει η πλαστική παραμόρφωση του υλικού, με αποτέλεσμα την αύξηση του ορίου διαρροής (Yield Stress). Εν συνεχεία εντός της πλαστικής περιοχής οι διαταραχές αυτές κινούνται ταυτόχρονα ανάλογα με τον ρυθμό φόρτισης, με αποτέλεσμα όσο υψηλότερος ρυθμός φόρτισης υπάρχει, τόσο υψηλότερες τιμές UTS απαντώνται, λόγω της υψηλής κίνησης των διαταραχών στα επίπεδα ολίσθησης του κρυστάλλου.

Από τα διαγράμματα 4 και 8 των δοκιμών as received και 2week αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι το μήκος θραύσης και στα καθαρά αλλά και στα διαβρωμένα, παραμένει σχεδόν το ίδιο ανεξαρτήτως του ρυθμού φόρτισης. Επίσης στα as received δοκίμια το μήκος θραύσης είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα διαβρωμένα. Αυτό οφείλεται στην ψαθυροποίηση του υλικού μας λόγω του NaCl. Δηλαδή το υλικό μπορεί να αντέξει μεγαλύτερες δυνάμεις αλλά μειώνονται οι ελαστικές και οι πλαστικές του ιδιότητες, έχοντας σαν αποτέλεσμα μια πιο απότομη και πιο σύντομη θραύση. Η ψαθυροποίηση του υλικού μας μπορεί να παρατηρηθεί στις άκρες των δοκιμών (εκεί δηλαδή που επηρεάζεται από την παρουσία του NaCl).

Στο διάγραμμα 9 παρατίθενται οι τιμές μέγιστης τάσης UTS των ακατέργαστων δοκιμών, καθώς και των δοκιμών που υπέστησαν διάβρωση 2 εβδομάδων σε υδατικό διάλυμα NaCl, ως συνάρτηση του ρυθμού φόρτισης. Παρατηρείται ότι στα διαβρωμένα δοκίμια η μεταβολή – αύξηση του ρυθμού φόρτισης οδηγεί στην αύξηση των τιμών μέγιστης τάσης. Παρόμοιο συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί παρατηρώντας την συμπεριφορά των ακατέργαστων δοκιμών, υπό συνθήκες αύξησης του ρυθμού φόρτισης. Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα είναι εμφανές ότι για δεδομένες τιμές αύξησης του ρυθμού φόρτισης έως την τιμή $0,9 \text{ sec}^{-1}$, τα ακατέργαστα δοκίμια εμφανίζουν σημαντικά αυξημένη τιμή μέγιστης αντοχής UTS, σε σχέση με τα ακατέργαστα. Γενικά παρατηρείται ότι η αύξηση του ρυθμού φόρτισης αυξάνει τις τιμές μέγιστης τάσης UTS όσο των διαβρωμένων όσο και των ακατέργαστων δοκιμών, ενώ τα ακατέργαστα εμφανίζουν σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερες τιμές αντοχής σε σχέση με τα αντίστοιχα διαβρωμένα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρακάτω επισυνάπτονται αναφορικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν μετά το πέρας των πειραμάτων :

Με την αύξηση του ρυθμού φόρτισης έχουμε σαν αποτέλεσμα :

1. Αύξηση της κλίσης της καμπύλης σ - ϵ
2. Αύξηση της ελαστικής περιοχής.
3. Αύξηση της τάσης διαρροής (Yield Stress)
4. Αύξηση της μέγιστης τάσης UTS
5. Το μήκος θραύσης παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστο από τον ρυθμό φόρτισης.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την σύγκριση των μη διαβρωμένων δοκιμίων - as received, με των διαβρωμένων δοκιμίων 2week είναι τα εξής :

1. Τα διαβρωμένα δοκίμια παρουσιάζουν μικρότερη τάση διαρροής. (Yield Stress) σε σχέση με τα ακατέργαστα.
2. Τα διαβρωμένα δοκίμια παρουσιάζουν μικρότερη μέγιστη τάση UTS σε σχέση με τα ακατέργαστα δοκίμια, για δεδομένες τιμές ρυθμού παραμόρφωσης.
3. Η ολκιμότητα των διαβρωμένων δοκιμίων είναι ελαφρώς μικρότερο από των ακατέργαστων δοκιμίων. Στα διαβρωμένα δοκίμια η ολκιμότητα παραμένει πρακτικά αμετάβλητη με την μεταβολή του ρυθμού παραμόρφωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΑΡΘΡΑ

- [1]. Warren Haupin, 2820 7th Street Road, Lower Burrell, PA 15068 – Profilnet, www.profilnet.gr/istoria-alouminiou/istoria-alouminiou-a-meros
- [2]. C. Grand, Aluminium And Its Alloys, Constable & Company LTD, London 1921 p.3 – p.11.
- [3]. Χρυσουλάκης Δ. Γιάννης-Παντελής Ι. Δημήτρης, Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, Παπασωτηρίου, Αθήνα 2008 p.561-p.577
- [4]. ASM Handbook Volume 2, Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM international 1990. P.164-177
- [5]. ASM Handbook Volume 2, Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM international 1990. P.177-197
- [6]. Casting Aluminium Alloys, Vadim S. Zolotorevsky, Nikolai A. Belov, Michael V. Glazoff. p.110-p.120
- [7]. ASM Handbook, Volume 4, Heat Treating, ASM International 1991, p.1862-p.1895
- [8]. ASM Handbook, Volume 4, Heat Treating, ASM International 1991, p.1900-p.1925
- [9]. ASM Handbook, Volume 4, Heat Treating, ASM International 1991, p.1930-p.1960
- [10]. Χρυσουλάκης Δ. Γιάννης-Παντελής Ι. Δημήτρης, Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, Παπασωτηρίου, Αθήνα 2008 p.565-p.567
- [11]. Χρυσουλάκης Δ. Γιάννης-Παντελής Ι. Δημήτρης, Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, Παπασωτηρίου, Αθήνα 2008 p.567-p.571
- [12]. ASM Handbook, Volume 13A, Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection, ASM international 2003.p.683-p.685
- [13]. ASM Handbook, Volume 13A, Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection, ASM international 2003.p.685-p.691
- [14]. ASM Handbook, Volume 13A, Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection, ASM international 2003.p.474-p.477
- [15]. ASM Handbook, Volume 13A, Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection, ASM international 2003.p.530.-p.539
- [16]. ASM Handbook, Volume 13A, Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection, ASM international 2003.p.590-p.605
- [17]. ASM Handbook, Volume 13A, Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection, ASM international 2003.p.606-p.623
- [18]. ASM Handbook Volume 2, Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM international 1990. p.343-p.395
- [19]. ASM Handbook, Volume 9, Metallography And Microstructures 2004, p.1689-p.1695
- [20]. ASM Handbook, Volume 9, Metallography And Microstructures 2004, p.1696-p.1708
- [21]. ASM Handbook, Volume 9, Metallography And Microstructures 2004, p.1709-p.1714
- [22]. ASM Handbook, Volume 8, Mechanical Testing And Evaluation 2000, p.20-p.42

- [23]. ASM Handbook, Volume 8, Mechanical Testing And Evaluation 2000, p.237-
p.263
- [24]. Bassam Z. Shakhashiri. "Chemical of the Week: Aluminum". Science is Fun.
- [25]. Ανδριανόπουλος, Ε. Κυριαζή, Κ. Λιακόπουλος, «Πειραματική Αντοχή των
Υλικών», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1991.
- [26]. Παναγιώτης Γ. Χαρώνης Διπλ. Μηχανικός – Ηλεκτρολόγος ΕΜΠ «Αντοχή
των Υλικών», σύγχρονη εκδοτική, Αθήνα 2002
- [27]. Παναγιώτης Α. Βουθούνης, «Τεχνική Μηχανική, Αντοχή των Υλικών»
Αθήνα 1993
- [28]. Μιχαήλ Κ. Κωβαίου «Αντοχή των Υλικών». Αθήνα 1977.
- [29]. Ευριπίδης Παπαμήχος (επίκουρος καθηγητής) / Νίκος Χ. Χαραλαμπίδης
(καθηγητής) «Αντοχή των Υλικών» εκδόσεις Τζόλια Θεσσαλονίκη
- [30]. Θ. Α. Διαμαντούδης «Συγκολλήσεις Μετάλλων» Α έκδοση, Θεσσαλονίκη
2000 (βιβλίο εργαστηρίου 'ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΓΚΟΛΗΣΕΩΝ')
- [31]. Physical Metallurgy and Advanced Materials, R.E. Smallman, A.H.W. Ngan.
p.474-p.475
- [32]. Bassam Z. Shakhashiri. "Chemical of the Week: Aluminum". Science is Fun.
- [33]. Wöhler, Friedrich. "Ueber das Aluminium". Annalen der Physik und Chemie.
- [34]. Yinon Bentor. "Periodic Table: Aluminum". ChemicalElements.com.
- [35]. "Pierre Berthier". Today in Science History

Επιστημονικά Άρθρα

- [E-1] Cracking of Al-4.5Zn-1.5Mg aluminium alloy propellant tank – A metallurgical investigation Abhay K. Jha *, P. Ramesh Narayanan, K. Sreekumar, P.P. Sinha Materials Characterization Division, Materials and Metallurgy Group, Vikram arabhai Space Centre, Indian Space Research Organization.
- [E-2] Current Status of the Role of Hydrogen in Stress Corrosion Cracking ANTHONY W. THOMPSON *Department of Metallurgy and Materials Science, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh.*
- [E-3] Effect of heat treatment on strength, exfoliation corrosion and electrochemical behavior of 7085 aluminum alloy Songyi Chen, Kanghua Chen †, Guosheng Peng, Le Jia, Pengxuan Dong State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University.
- [E-4] Effect of heat treatments on the tensile strength and SCC-resistance of AA7050 in an alkaline saline solution Jing-Chie Lin a,*, Hsueh-Lung Liao b, Wern-Dare Jehng c, Chih-Horng Chang b, Sheng-Long Lee. [E-5] Stress corrosion cracking of 7085 aluminum alloy CHEN Song-yi, CHEN Kang-hua, PENG Guo-sheng, LIANG Xin, CHEN Xue-hai State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University.
- [E-5] Effect of quenching rate on microstructure and stress corrosion cracking of 7085 aluminum alloy CHEN Song-yi, CHEN Kang-hua, PENG Guo-sheng, LIANG Xin, CHEN Xue-hai State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University.
- [E-6] Improvements in mechanical and stress corrosion cracking properties in Al alloy 7075 via retrogression and reaging Y. Reda, R. Abdel-Karim *, I. Elmahallawi *Department of Metallurgy, Faculty of Engineering, Cairo University, Giza, Egypt.*
- [E-7] Microstructure, Toughness and Stress Corrosion Cracking Behavior of Aluminum Alloy 2020 J. G. RINKER and M. MAREK. Metallurgy Program, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA. T. H. SANDERS, JR. School of Materials Engineering, Purdue University, West Lafayette, USA.
- [E-8] ON STRESS CORROSION CRACKING IN ALUMINUM-LITHIUM ALLOYS R. BALASUBRAMANIAM 2, D. J. DUQUETTE † and K. RAJAN I. Materials Engineering Department, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, U.S.A. Indian Institute of Technology, Kanpur, Department of Metallurgical Engineering, I.I.T. Kanpur India.