



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ : Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς κράματος αλουμινίου-χαλκού υπό διάφορες κατεργασίες .

Study of mechanical behavior of a Al-Cu Alloy, under various conditions.

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ : ΚΑΜΠΟΥΡΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΑΜ:44407

ΤΖΟΥΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΜ:43788

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΔΡ. ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στον Καθηγητή μας κ. Δρ. Κωνσταντίνο Γιαννακόπουλο για την δυνατότητα που μας έδωσε να πραγματοποιήσουμε την πτυχιακή μας εργασία. Οι σημαντικές υποδείξεις και συμβουλές του, μας κατεύθυναν σ' ένα σωστό τρόπο σκέψης πάνω απ' όλα και μας προσέφεραν σημαντικά εφόδια για την μετέπειτα ζωή μας. Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε το Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών "Δημόκριτος" για τη παραχώρηση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου SEM αλλά και την Ναυπηγική εταιρία INTERMARINE S.A. για την πολύτιμη βοήθειά της ώστε να ολοκληρωθεί η κατεργασία των δοκιμίων και να έρθουν στην προς επεξεργασία μορφή . Τέλος, θέλαμε να εκφράσουμε ένα τεράστιο ευχαριστώ στις οικογένειες μας, για την στήριξη και την εμπιστοσύνη που μας έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μας. Πέραν όμως από την πολύτιμη αυτή στήριξη, μας έδωσαν όλα τα εφόδια ώστε να γίνουμε σωστοί άνθρωποι και αυτό είναι κάτι που δεν μαθαίνεται, αλλά μεταδίδεται.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

"Δηλώνουμε υπεύθυνα ότι η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε κάτω από τους διεθνείς ηθικούς και ακαδημαϊκούς κανόνες δεοντολογίας και προστασίας της πνευματικής ιδιοκτησίας. Σύμφωνα με τους κανόνες αυτούς, δεν έχουμε προβεί σε ιδιοποίηση ξένου επιστημονικού έργου και έχουμε πλήρως αναφέρει τις πηγές που χρησιμοποιήσαμε στην εργασία αυτή."

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ΣΚΟΠΟΣ	6
ΛΙΓΑ ΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ.....	7
ΤΟ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ.....	8
ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΜΕΛΕΤΕΣ	9
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ :	10
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	11
ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ :	11
ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	12
ΠΑΡΑΓΩΓΗ	13
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.....	14
ΧΡΗΣΕΙΣ	14
ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	15
ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (WROUGHT ALLOYS)	17
ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ	22
ΚΡΑΜΑ ΣΕΙΡΑΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2007	25
ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	25
ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	25
ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΩΝ	26
ΚΟΠΩΣΗ	26
<i>Εισαγωγή στη Κόπωση</i>	26
<i>Καμπύλες S – N (καμπύλες Wöhler)</i>	27
<i>Πειραματικός Προσδιορισμός των Καμπυλών S – N</i>	31
<i>Στατιστική Εξέταση της Κόπωσης</i>	33
ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ	37
<i>Επίδραση Γεωμετρικών Ασυνεχειών</i>	37
<i>Επίδραση Μεγέθους</i>	39
<i>Κατάσταση της Επιφάνειας</i>	40
ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ.....	41
<i>Εισαγωγή στον εφελκυσμό</i>	41
<i>Γενικό διαγράμματα Τάσης – Παραμόρφωσης</i>	43
<i>Όριο Μέγιστης Αντοχής σε Εφελκυσμό -UTS</i>	44
<i>Μέτρο Ελαστικότητας (METRO Young)</i>	45
<i>Ολκιμότητα</i>	46
ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ	48
ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	48
<i>ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΛΟΓΩ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΤΑΣΕΩΝ</i>	50
<i>ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕ ΟΠΕΣ (PITTING CORROSION)</i>	51
ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΟΞΕΙΔΙΩΝ	52

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	53
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΦΕΛΚΙΣΜΟΥ	57
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΟΠΩΣΗΣ	67
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	75
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	77
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	79

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Θέμα της πτυχιακής μας εργασίας είναι η ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου της σειράς 2XXX. Συγκεκριμένα, σκοπός της εργασίας είναι, στο πρώτο μέρος να γίνει μια θεωρητική παρουσίαση γενικά για το αλουμίνιο και τα κράματα του, αλλά και για τις πειραματικές διεργασίες κόπωσης και εφελκυσμού. Γίνεται ακόμα αναφορά για την διάβρωση του αλουμινίου αλλά και των κραμάτων του. Στην συνέχεια γίνεται η πειραματική μελέτη των παραπάνω κραμάτων σύμφωνα με τα όσα έχουν αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος της εργασίας, και πιο συγκεκριμένα στην συμπεριφορά και μηχανικές ιδιότητες που έχουν προκύψει έπειτα από μια σειρά κατεργασιών στις οποίες επιβλήθηκαν τα κράματα. Τέλος γίνεται η παρατήρηση της συμπεριφοράς των πειραματικών δοκιμών, η οποία οδηγεί στην εξαγωγή των συμπερασμάτων των μηχανικών ιδιοτήτων τους αλλά και το πως αυτές μεταβάλλονται στα κράματα αλουμινίου.

ΣΚΟΠΟΣ

Ο σκοπός αυτής της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας , είναι η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς κράματος αλουμινίου σειράς 2XXX (2007). Τα κράματα της σειράς 2XXX , είναι κράματα στα οποία ο χαλκός είναι το κυριότερο κραματικό τους στοιχείο . Έχουν υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά και σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες. Δεν έχουν όμως καλή αντοχή σε διάβρωση κάτω από ατμοσφαιρικές συνθήκες , γι αυτό βάφονται ή επενδύονται κατάλληλα και ανάλογα με την χρήση τους .Στην εργασία αυτή, θα γίνει μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος μετά από την επίδραση χλωριούχου νατρίου πάνω σε αυτό. Συγκεκριμένα θα μελετηθεί η αντοχή του κράματος σε εφελκυσμό αλλά και σε κόπωση , αφού πρώτα τα πειραματικά δοκίμια διαβρωθούν σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου (NaCl).

Λίγα λόγια για το εκπαιδευτικό ίδρυμα....

Το Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα έχει έδρα τον Άγιο Ιωάννη Ρέντη (Πειραιάς). Ιδρύθηκε το 1983 με τον Ν.1404/1983 ως Εκπαιδευτικό Ίδρυμα της Ελληνικής Τριτοβάθμιας Εκπαίδευσης, ενώ, μέχρι το 2013, ο τίτλος του Ιδρύματος ήταν *T.E.I. Πειραιά*. Το 2018, με το ΦΕΚ 4521/18 το Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. συγχωνεύεται με το Τ.Ε.Ι. Αθήνας και δημιουργείται το Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

Το Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα παρέχει προγράμματα: *Προπτυχιακών Σπουδών* τετραετούς διάρκειας (8 εξαμήνων) απονέμοντας *Πτυχία Ανώτατης Τεχνολογικής Εκπαίδευσης*. Επίσης, παρέχει προγράμματα *Μεταπτυχιακών Σπουδών* (αυτόνομα ή σε συνεργασία με άλλα πανεπιστήμια της Ελλάδας της Κύπρου και του εξωτερικού) απονέμοντας *Μεταπτυχιακά Διπλώματα Ειδίκευσης*. Έτσι, στα πλαίσια της αποστολής του, δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην *Ανώτατη Εκπαίδευση* και τις *Εφαρμογές Επιστημών και Τεχνολογίας*, στα αντίστοιχα επαγγελματικά πεδία. Στο πλαίσιο αυτό συνδυάζει την ανάπτυξη του κατάλληλου θεωρητικού υποβάθρου σπουδών (Μαθήματα *Θεωρίας*) με υψηλού επιπέδου εργαστηριακή και πρακτική άσκηση (*Εργαστήρια και Πρακτική Άσκηση*). Ένας σπουδαστής για να καταστεί πτυχιούχος πρέπει να εξετασθεί με επιτυχία σε όλα τα μαθήματα του τμήματός του, να ολοκληρώσει επιτυχώς την εκπόνηση πτυχιακής εργασίας και να πραγματοποιήσει εξάμηνη πρακτική άσκηση.

[1]

Οι εγκαταστάσεις και η έδρα του, βρίσκονται στον Άγιο Ιωάννη Ρέντη επί των οδών Πέτρου Ράλλη και Θηβών 250, στην ιστορική περιοχή του αρχαίου Ελαιώνα των Αθηνών σε συνολική έκταση 100.000τμ, ενώ ο δομημένος χώρος υπερβαίνει τα 50.000τμ., ενώ αποτελείται από κτίρια Ενεργειακά Αναβαθμισμένα. Εκτός των διδακτηρίων, υπάρχει η Βιβλιοθήκη με αναγνωστήριο 400 θέσεων, το Συνεδριακό Κέντρο με κύρια αίθουσα 500 θέσεων, το Εστιατόριο, Αναψυκτήρια κ.α.

Από το 2004 λειτουργούσε και παράρτημα στις Σπέτσες, στις βορειοδυτικές παρυφές της πόλης, στις εγκαταστάσεις της ιστορικής Αναργυρείου και Κοργιαλενείου Σχολής[1]

Το τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών..

Το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ., το παλαιότερο και μεγαλύτερο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της χώρας σε επίπεδο Ανώτατης Τεχνολογικής Εκπαίδευσης, με τις υψηλού επιπέδου εκπαιδευτικές και ερευνητικές δραστηριότητές του, έχει ως αποστολή τη μετάδοση εξειδικευμένων επιστημονικών και τεχνολογικών γνώσεων καθώς και την ενθάρρυνση των εφαρμογών τους.

Το Τμήμα επικεντρώνεται σε κλασικά αλλά και σε σύγχρονα πεδία της Μηχανολογίας με συνεχή παρουσία σε ερευνητικές και επιστημονικές δραστηριότητες και συνεργασίες με ελληνικά και ευρωπαϊκά εκπαιδευτικά και ερευνητικά ιδρύματα. Στόχος του είναι να δώσει στους αποφοίτους του τα απαραίτητα εφόδια αλλά και να διαμορφώσει τον τρόπο σκέψης και εργασίας τους, ώστε να εξασφαλίζονται οι καλύτερες προοπτικές για επιτυχημένη επαγγελματική σταδιοδρομία ή / και για συνέχιση των σπουδών μέσα στις έντονες απαιτήσεις της σύγχρονης εποχής. [1]

Προηγούμενες συναφείς μελέτες

E-1 Ο T. Kobayashi έκανε έρευνα σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες της αντοχής και της θραύσης διάφορων διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου. Υπέβαλλε τα κραματούχα δοκίμια σε μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού, θραύσεως και κοπώσεως. Έπειτα πραγματοποίησε μεταλλογραφική ανάλυση με SEM (scanning electron microscope) ,της κρυσταλλικής δομής καθώς και των επιφανειών θραύσης των δοκιμίων. Το συμπέρασμα που προέκυψε από την συγκεκριμένη ανάλυση ,είναι ότι η μεσομηχανική ανάλυση των μικροδομών είναι πάρα πολύ σημαντική για να γίνει η τελική αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων αλουμινίου. [E1]

E-2 Οι M. Marek και J. G. Rinker, έκαναν μελέτη πάνω στις επιπτώσεις που μπορεί να έχει η σκλήρυνση με κατακρήμνιση σε κράμα αλουμινίου της σειράς (2XXX) και συγκεκριμένα το κράμα 2020. Μελέτησαν δηλαδή την αλλαγή της μικροδομής ,σκλήρυνσης, αλλά και την αντοχή στην διάβρωση σε συνάρτηση με μηχανική καταπόνηση. (Stress Corrosion Cracking ή SSC) [E2]

E-3 Οι D. J. Duquette, K. Rajan και R. Balasubramaniam μελέτησαν την μηχανική συμπεριφορά κραμάτων Al-Li χρησιμοποιώντας την τεχνική σταθερής επιμηκύνσεως (CERT) κραμάτων Αλουμινίου-Λιθίου (Al-Li) , αφού είχε γίνει διάβρωση σε υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου (NaCl) γραμμοχωρτικότητας 0.5Moll . Με το πείραμα αυτό κατάφεραν να αποδείξουν ότι το υδρογόνο διαδραματίζει μείζονα ρόλο στην μηχανική καταπόνηση αυτών των κραμάτων , καθώς σχηματίζει βλάβη με την μορφή υδριδίου. [E3]

E-4 Ο Antony W. Thompson έκανε και αυτός μελέτη πάνω στον ρόλο που διαδραματίζει το υδρογόνο στην διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση (SCC ή Stress Corrosion Cracking). Συγκεκριμένα μελέτησε θεωρητικές και πειραματικές εργασίες καθώς και πολλές διαφορετικές εκδοχές σε σχέση με το ζήτημα αυτό , και ιδιαίτερα πάνω σε κράματα ανοξείδωτου χάλυβα και αλουμινίου. [E4]

E-5 Ο N. Takano διερεύνησε τις επιδράσεις που μπορεί να έχει το υδρογόνο , στην ευθραυστότητα και στις μηχανικές ιδιότητες ενός κράματος αλουμινίου της σειράς (7xxx) και συγκεκριμένα 7075. Αρχικά τα δοκίμια στιλβώθηκαν και κόπηκαν. Στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε ηδρογενή φόρτιση υπό ηλεκτρικό δυναμικό καθόδου ,με τάση της τάξεως των 6.25 A/m^2 σε θερμοκρασία των 318 βαθμών Κέλβιν και τοποθετημένα μέσα σε δοχείο με γλυκερίνη. Έπειτα τα κατεργασμένα δοκίμια υπέστησαν μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού και μεταλλογραφική ανάλυση με SEM (scanning electron microscope) της επιφανειας της θραύσεως. Εκεί διαπίστωσε ότι η απώλεια ολκιμότητας είναι αρκετά μεγάλη σε μεγάλες περιόδους προφόρτισης αλλά και στις συνθήκες υψηλής εξάτμισης .[E5]

Βιβλιογραφία Επιστημονικών ερευνών :

[E1] Kobayashi, 2000, Strength and fracture of aluminum alloys ,
Materials-Science-and-Engineering-A,

[E2] Microstructure, Toughness and Stress Corrosion Cracking Behavior
of Aluminum Alloy 2020 - M. Marek and J. G. Rinker.

Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA

[E3] Lithium Alloys- Stress Corrosion Cracking in Aluminum

O. J. Duquepe, Rajan J, and R. Balasubramaniam.

Materials Engineering Department, New York,U.S.A.

Indian Institute of Technology, Kanpur, Department of Metallurgical
Engineering, I.T. Kanpur India.

[E4] Antony W. Thompson The role of metallurgical variables in
hydrogen – assisted environmental fracture

University of California

[E5] Takano, 2008, , Hydrogen diffusion and embrittlement in 7075
aluminum alloy , Materials-Science-and-Engineering

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Γενικά για το αλουμίνιο :

Το αλουμίνιο είναι το χημικό στοιχείο που συμβολίζεται με Al και ο ατομικός του αριθμός είναι το 13. Είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο-στοιχείο, το οποίο ανήκει στην ομάδα 13 του περιοδικού συστήματος μαζί με το βόριο. Είναι το μέταλλο με την μεγαλύτερη αφθονία στο φλοιό της Γης και συνολικά το τρίτο πιο άφθονο χημικό στοιχείο συνολικά στον πλανήτη γη, μετά το πυρίτιο και το οξυγόνο. Ωστόσο είναι αρκετά δραστικό χημικά ώστε να έχει την δυνατότητα να βρίσκεται στη φύση ως ελεύθερο μέταλλο. Ο βωξίτης είναι η κύρια πηγή για τη βιομηχανική παραγωγή του μετάλλου.

ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mb	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	⁵⁷⁻⁷¹ λανθανίδες	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Th	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	⁸⁹⁻¹⁰³ ακτινίδες	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub						
	λανθανίδες		⁵⁷ La	⁵⁸ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu	
	ακτινίδες		⁸⁹ Ac	⁹⁰ Th	⁹¹ Pa	⁹² U	⁹³ Np	⁹⁴ Pu	⁹⁵ Am	⁹⁶ Cm	⁹⁷ Bk	⁹⁸ Cf	⁹⁹ Es	¹⁰⁰ Fm	¹⁰¹ Md	¹⁰² No	¹⁰³ Lr	

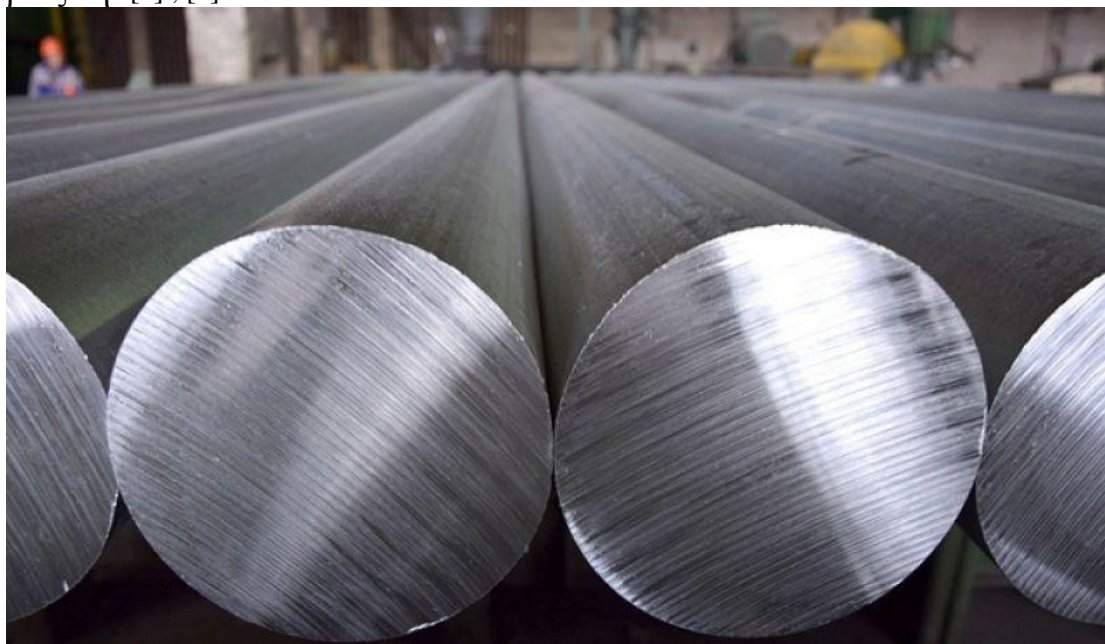
Εικόνα 1. : Περιοδικός πίνακας των στοιχείων . Γραμμή 3^η και στήλη 13^η βρίσκεται το αλουμίνιο

Μεγάλη ικανότητα του αλουμίνιο-σαν μέταλλο- είναι η αντοχή στη διάβρωση. Αυτό συμβαίνει όταν το αλουμίνιο έρχεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα, σχηματίζεται στιγμιαία ένα λεπτό επιφανειακό και μη ορατό, στρώμα οξειδίου, που εμποδίζει τη βαθύτερη διάβρωσή του αλουμινίου. Ακόμη, λόγω της χαμηλής πυκνότητας τού αλλά και της μεγάλης του ικανότητας να δημιουργεί αρκετά μεγάλη ποικιλία κραμάτων, εξελίχθηκε σε στρατηγικής σημασίας μέταλλο για την βιομηχανία της αεροδιαστημικής. Επίσης είναι πάρα πολύ χρήσιμο στη χημική βιομηχανία με τη μορφή των διαφόρων ενώσεών του. [2],[3],[4],

Ιστορία του αλουμινίου

Μετά το πυρίτιο και το οξυγόνο, το αλουμίνιο ως χημικό στοιχείο είναι το τρίτο σε περιεκτικότητα στο γήινο περιβάλλον. Συναντάται σε μεγάλη αφθονία παντού στη φύση, αλλά έχει την ιδιότητα να παραμένει καλά κρυμμένο σε χημικές ενώσεις με μεγάλη χημική ευστάθεια. Πρώτη φορά η χρήση του τεκμηριώθηκε ιστορικά στην Βαβυλώνα και τη Αίγυπτο. Ο Βρετανός Davy, υποστήριξε ότι το αλουμίνιο υπήρχε από το 1807, ενώ στη συνέχεια ο Δανός Oersted κατάφερε να απομονώσει το αλουμίνιο στοιχειακά. [5], [6]

Ο Γερμανός Woehler, το 1845, υπολόγισε το ειδικό βάρος του αλουμινίου, αποδεικνύοντας και επιδεικνύοντας ταυτόχρονα μία από τις σπουδαιότερες ιδιότητες του αλουμινίου που είναι η αβάσταχτη ελαφρότητά του. Ανάμεσα στα 1855 και το 1886, ο Γάλλος Deville παρουσίασε την πρώτη χημική μέθοδο παραγωγής του αλουμινίου –που ήταν αρκετά ασύμφορη για τη βιομηχανοποίηση της εποχής. Το 1886, με την ταυτόχρονη ανακάλυψη σε Αμερική και Γαλλία της ηλεκτρολυτικής μεθόδου παραγωγής μετάλλου από το οξείδιο του αλουμινίου, γυρίσε μια νέα σελίδα. Ο Αμερικανός Hall και ο Γάλλος Heroult χάραξαν το δρόμο που αργότερα μετέτρεψε σε λεωφόρο ο Γερμανός Bayer το 1888, εξελίσσοντας την οικονομική μέθοδο παραγωγής αλουμίνης από το βωξίτη. [5], [6]



Εικόνα 2. : Βέργες αλουμινίου

Παραγωγή

Η διαδικασία που ακολουθείται για την παραγωγή του αλουμινίου είναι η εξής:

Σε πρώτο στάδιο γίνεται η εξόρυξη του βοξίτη από το επιφανειακό κοίτασμα. Έπειτα ακολουθεί η έκπλυσή του και ο θρυματισμός του σε δυάλυμα καυστικού νατρίου και σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων. Αυτό γίνεται για να απομακρυνθούν οι προσμίξεις του βοξίτη, ώστε να παραμείνουν στο διάλυμα το οξείδιο του αργιλίου με το καυστικό νάτριο. Στη συνέχεια αφού γίνει η απομάκρυνση και του καυστικού νατρίου, μένει μόνο το οξείδιο του αργιλίου όπου στη συνέχεια θερμένεται στους 1100°C για να απομακρυνθεί το νερό.

Η επόμενη διαδικασία είναι αυτή της ηλεκτρόλυσης. Το οξείδιο του αργιλίου θα διαλυθεί σε τήγμα κρυόλιθου, το οποίο βρίσκεται μέσα σε ηλεκτρολυτική λεκάνη με άνοδο ηλεκτρόδιο από άνθρακα και κάθοδο την επένδυση της λεκάνης από ανθεκτικό μέταλλο. Γίνεται χρήση συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος μεγάλης έντασης (15000 A). Το τηγμένο αλουμίνιο, που βρίσκεται στο βυθό της λεκάνης, συλλέγεται. Παράλληλα με όλα αυτά, παράγεται και φθόριο, το οποίο συλλέγεται με ειδικό κάλυμα της λεκάνης και, οδηγείται σε ειδικά διαμορφωμένη μονάδα προκειμένου να γίνει η ανακύκλωση του, ώστε να μην καταλήξει στην ατμόσφαιρα[2],[3]

Η ηλεκτρόλυση σαν διεργασία 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 (έχουν δηλαδή απευθείας διεθνείς συνδέσεις). [2],[3]

Ιδιότητες του αλουμινίου

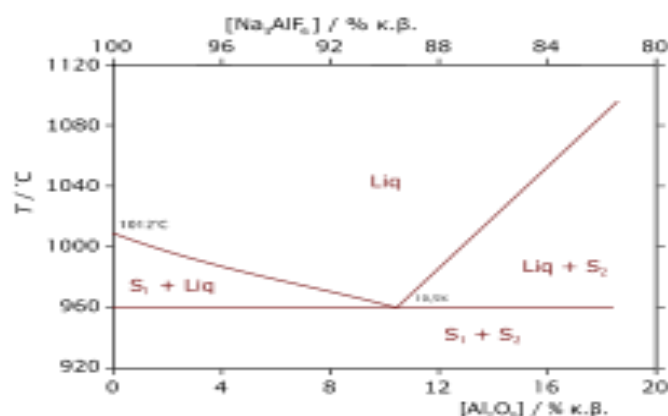
Το αλουμίνιο είναι πολύ σημαντικό για τη βιομηχανία καθώς έχει πολύ χαμηλό ειδικό βάρος, μεγάλη αντοχή στη διάβρωση αλλά και στις μηχανικές καταπονήσεις. Συγκεκριμένα το υπερκαθαρό αλουμίνιο είναι όλκιμο και αρκετά μαλακό. Για να βελτιωθούν ακόμα πιο πολύ οι μηχανικές του ιδιότητες γίνεται προσθήκη άλλων μετάλλων όπως ο σίδηρος, ο χαλκός και άλλα κραματικά στοιχεία.

Το αλουμίνιο είναι πολύ εύκολο να υποστεί κατεργασία με τη μέθοδο της χύτευσης αλλά και με αυτή της αφαίρεσης υλικού. Ακόμη παρουσιάζει υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα.

Χρήσεις

Ως ντουραλουμίνια, μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τα κράματα αλουμινίου που περιέχουν 2,5-6,3% χαλκό. Περιέχουν πρόσθετα κραματικά στοιχεία όπως μαγνήσιο και κάποιες φορές, μαγγάνιο και πυρίτιο. Έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, που οφείλονται στη σκλήρυνσή τους με δημιουργία κατακρημνισμάτων και χρησιμοποιούνται σε μεγάλο φάσμα στην αεροναυπηγική, διότι έχουν χαμηλό βάρος και εξαιρετική αντοχή.

Ακόμη πολλά από τα κράματα του αλουμινίου χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές εφαρμογές όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία, τη βιομηχανία αθλητικών ειδών αλλά και τη ναυπηγική. Χρησιμοποιούνται ακόμη για την κατασκευή κουτιών για ποτά, του κοινού αλουμινοχαρτου και άλλων υλικών και εργαλείων που υπάρχουν σε μια κουζίνα ή οικείους χώρους.



Εικόνα 3. : Το διάγραμμα φάσεων κρυολίθου-αλουμίνας παρουσιάζει ένα ευτηκτικό σημείο για 10,5% κ.β. Al₂O₃ με σημείο τήξης 960 °C, γεγονός που επιτρέπει την παραγωγή αλουμινίου από τήγμα των δύο ενώσεων

Κράματα Αλουμινίου

Το αλουμίνιο σαν στοιχείο , με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων χημικών στοιχείων, έχει την δυνατότητα να δημιουργεί διάφορες συνθέσεις (κράματα) .Έτσι τόσο το αλουμίνιο αλλά και τα κράματά του μπορούν να χαρακτηριστούν ως η πλέον πιο κατάλληλη πρώτη ύλη για παραγωγή τελικών προϊόντων . Στην αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και κυρίως την αεροναυπηγική απαιτείται υψηλή αντοχή στις κατασκευές αλλά και χαμηλό βάρος . Έτσι το αλουμίνιο, λόγω της μεγάλης μηχανικής αντοχής που έχει, είναι και το κύριο δομικό στοιχείο στις κατασκευές αυτές.

Επειδή το αλουμίνιο μπορεί να κραματοποιηθεί πιο εύκολα σε σχέση με τα άλλα μέταλλα , καταφέρνει να επιτυγχάνει διαφορετικές ιδιότητες για να καλύψει τις ειδικές απαιτήσεις κάθε προϊόντος. Με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων διάφορων χημικών στοιχείων (π.χ. πυρίτιο, μαγνήσιο, μαγγανιο, χαλκός, ψευδάργυρος), μπορεί να παραχθεί ποσότητα αλουμινίου που θα έχει τις κατάλληλες και επιθυμητές ιδιότητες για κάθε τύπο προϊόντος. Οι τελικές ιδιότητες κάθε προϊόντος που θα παραχθεί από αλουμίνιο, επιτυγχάνονται με την μέθοδο επεξεργασίας του (μηχανική πλαστική διαμόρφωση ή χύτευση) , την επιλογή του κατάλληλου κράματος αλουμινίου και τις θερμικές κατεργασίες (ανόπτηση, βαφή, τεχνητή γύρανση)που θα υποστεί.[7]

Οι κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται τα κράματα του αλουμινίου είναι :

A) κράματα διαμόρφωσης

B) κράματα χύτευσης.

Τα κράματα των δύο αυτών κατηγοριών υποδιαιρούνται σε άλλες δυο κατηγορίες :

A) σε κράματα τα οποία μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία. Οι ιδιότητες τους είναι στενά συνδεδεμένες με την θερμική κατεργασία που θα ακολουθεί.

B) σε κράματα ,στα οποία δεν είναι εφικτό να γίνει θερμική κατεργασία είναι αδύνατη.Οι ιδιότητες τους εξαρτώνται από το πόσο έχουν υποστεί ενδοτράχυνση.

Λόγο της δημιουργίας ενός λεπτού επιφανειακού στρώματος , το οποίο είναι αδιαπέραστο από οξυγόνο, το αλουμίνιο και τα κράματα του εμφανίζουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση.

Τα ακόλουθα στοιχεία χρησιμοποιούνται στην παραγωγή κραμάτων αλουμινίου για βιομηχανική χρήση :

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

Το αλουμίνιο και τα κράματά του που προορίζονται για μηχανική πλαστική διαμόρφωση προσδιορίζονται από τη χημική τους σύσταση βάσει ενός διεθνώς αποδεκτού συστήματος που χρησιμοποιεί τέσσερις αριθμούς. Το πρώτο από τα τέσσερα ψηφία δείχνει την ομάδα κράματος σύμφωνα με το, σε μεγαλύτερη αναλογία ευρισκόμενο, κραματοποιό στοιχείο. [8] ,[9] ,[10]

Οι σειρές κραμάτων του αλουμινίου είναι χωρισμένοι σύμφωνα με την κραματική προσθήκη στο καθαρό αλουμίνιο. Αυτές είναι οι εξής:

<i>Σειρά κράματος</i>	<i>Κύρια κραματικά στοιχεία</i>	<i>Εύρος σύστασης (κ.β%)</i>
1XXX	Al	Al > 99%
2XXX	Cu	2 - 6
3XXX	Mn	0.5 - 1.5
4XXX	Si	0.8 - 1.7
5XXX	Mg	0.5 - 5
6XXX	Mg & Si	Mg: 0.2 - 1.5 Si: 0.2 - 1.5
7XXX	Zn & Mg	Zn: 5 - 7 Mg: 1 - 2
8XXX	Si & Fe	Si: 0.3 - 1 Fe: 0.6 - 2

ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (WROUGHT ALLOYS)
Σειρά 1000: Καθαρό αλουμίνιο με 99,00% ελάχιστη καθαρότητα [11]

1XXX ΚΑΘΑΡΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	
Σκληρύνεται με ενδοτράχυνση	
Διαμορφώνεται πολύ ευκολα	
Έχει καλή ηλεκτρική αγιμότητα	
Αντιπροσωπευτικές σειρές	1100 ,1350
Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό	69- 186 Μpa

Εικόνα 4. : Επιγραμματα στοιχεία σειράς 1XXX

Η σειρά 1XXX είναι αντιπροσβευτική για το εμπορικά καθαρό αλουμίνιο, από το βασικό 1100 (99.00% minimum . AI) μέχρι τα σχετικά καθαρότερα 1050/1350 (99,50% ιηη. AI) και 1175 (99,75% min. AI) . Τύποι κραμάτων, όπως το 1350 το οποίο χρησιμοποιείται ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές, έχουν αρκετά σφιχτές ανοχές στο ποσοστό των ακαθαρσιών, που είναι υπεύθυνες για τη μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Συγκεκριμένα η σειρά 1XXX υφίσταται σκλήρυνση με . ενδοτράχυνση . Έτσι δε θα χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που έχουν ως βασικό στοιχείο του σχεδιασμού τους την αντοχή. Πρέπει να δίνεται περισσότερη έμφαση στις εφαρμογές με καλή ολκιμότητα και/ή ηλεκτρική αγωγιμότητα και που απαιτούν εξαιρετικά υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, όπως φύλλα για συσκευασία, χημικό εξοπλισμό, σασί αυτοκινήτων η φορητών και όπου απαιτείται χρήση λαμαρίνας. [11]

Τέλος χρησιμοποιείται για:

- Εγκατάσταση ηλεκτρικών αγωγών αλουμινίου με AI 1350.
- Αλουμινόχαρτο για φάρμακα και τρόφιμα από καθαρό αλουμίνιο 1100
- Αλουμινόχαρτο με έντυπο για συσκευασίες τροφίμων και ποτών από 1060

Σειρά 2000: κράματα αλουμινίου – χαλκού [11]

2XXX Κράματα Al-Cu	
Υφίστανται θερμική κατεργασία	
Υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος	
Εφαρμογές σε μεταφορές (αεροπλάνα , πλοία)	
Αντιπροσωπευτικές σειρές	2014 , 2017 , 2024 , 2219 , 2195
Εύρος αντοχής σε εφέλκυσμό	186- 427 Μρα

Εικόνα 5. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 2XXX

Στη συγκεκριμένη σειρά 2XXX τα κράματα υφίστανται θερμική κατεργασία και συνδυάζουν ,σε κάποιους τύπους ακαμψία, υψηλή αντοχή (ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες) και σε μερικές περιπτώσεις καλή συγκολλησιμότητα. Στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, δεν έχει καλή αντοχή σε διάβρωση, έτσι επενδύεται κατάλληλα ή βάφεται για τέτοιου είδους εφαρμογές. Τα πιο ανθεκτικά κράματα της σειράς αυτής κυρίως χρησιμοποιούνται για σασί φορτηγών (2014) και για την κατασκευή αεροσκαφών (2024). Χρησιμοποιούνται επίσης σε κατασκευές που συνδέονται με σπειρώματα η πριτσίνια. . Τα κράματα 2017, 2117 και 2017 χρησιμοποιούνται ευρέως για ροδέλες και βίδες. Κάποια ειδικά κράματα της σειράς (π.χ 2048 και 2219) μπορούν να συγκολληθούν, και έτσι ενδείκνεται η χρήση τους σε αεροσκάφη, όπου εκεί η μέθοδος της συγκόλλησης προτιμάται. Υπάρχουν επίσης διάφοροι τύποι κραμάτων (π.χ. 2324, 2124, 2419) που έχουν μεγάλη ακαμψία και έτσι επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος των ακαθαρσιών, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την μείωση της αντοχής. [11]

Σειρά 3000: κράματα αλουμινίου – μαγγανίου [11]

3XXX Κράματα Al-Mn	
Διαμορφώνεται εύκολα	
Υψηλή αντοχή σε διάβρωση -Μέτρια συγκολλησιμότητα	
Εφαρμογές σε αγωγούς μεταφοράς θερμότητας	
Αντιπροσωπευτικές σειρές	3003 , 3004 , 3005
Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό	110-282 Mpa

Εικόνα 6. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 3XXX

Η σειρά 3xxx υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση. Έχει πολύ καλή συγκολλησιμότητα και εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση. Έχει πολύ καλή επιδεκτικότητα σε επιχάλκωση. Το κράμα 3003 χρησιμοποιείται ευρέως σε σκεύη κουζίνας , σε υποδομές κτηρίων αλλά και σε χημικό εξοπλισμό

Στην κατασκευή στεγών και πλαινών επικαλύψεων κτηρίων χρησιμοποιείται το κράμα 3105. Τα κράματα 3104 και το 3004 είναι ευρέως διαδεδομένα καθώς χρησιμοποιούνται κραμάτων για την παραγωγή των τενεκεδένιων κουτίων των αναψυκτικών. [11]

Σειρά 4000: κράματα αλουμινίου – πυριτίου [11]

4XXX Κράματα Al-Si	
Υφίστανται θερμική κατεργασία	
Μέτρια αντοχή - Καλά χαρακτηριστικά ροής	
Εφαρμογές σε πιστόνια ,σφυρίλατα πολύπλοκου σχήματος	
Αντιπροσωπευτικές σειρές	4032 , 4043
Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό	172- 380 Mpa

Εικόνα 7. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 4XXX

Χαρακτηρίζεται από τα δυο πιο ευρέως διαδεδομένα κράματα ,το 4032 και το 4043 .Το 4032 είναι ένα κράμα με μέτρια προς υψηλή αντοχής, μπορεί να κατεργαστεί θερμικά και η χρήση του ενδείκνυται κυρίως στα σφυρήλατα προϊόντα και σε εφαρμογές όπως πιστόνια αεροσκαφών.

Στον αντίποδα το 4043 είναι ένα από τα πλέον γνωστά υλικά συγκόλλησης των κραμάτων της σειράς 6xxx για κατασκευές και εφαρμογές στα αυτοκίνητα. Η καλή ολκιμότητα που οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα σε θείο, εξασφαλίζει το γέμισμα περίπλοκων καλουπιών στη περίπτωση των σφυρήλατων προϊόντων, στη δε περίπτωση του υλικού συγκόλλησης εξασφαλίζει πλήρωση των ρωγμών και των κενών των τεμαχίων που συγκολλούνται. [11]

Σειρά 5000: κράματα αλουμινίου – μαγνησίου [11]

5XXX Κράματα Al-Mg	
Σκληρύνεται με ενδροτράχυνση	
Αντοχή στη διάβρωση, καλή δυσκαμψία και συγκολλησιμότητα	
Εφαρμογές σε αυτοκίνητα ,υποδομές κτηρίων και κατασκευών	
Αντιπροσωπευτικές σειρές	5052, 5083, 5754
Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό	172-380 Mpa

Εικόνα 8. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 5XXX

Όλα τα κράματα της σειράς 5xxx υφίστανται σκλήρυνση με τη μέθοδο της ψυχρηλασίας. Έτσι αποκτούν σχετικά μεγάλη αντοχή, αντοχή σε διάβρωση ακόμη και στο θαλάσσιο περιβάλλον, αλλά και μεγάλη ακαμψία ακόμη και σε κρυογενικό περιβάλλον σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο 0ο K. Με όλα τα παραπάνω καταλλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η σειρά 5xxx βρίσκει μεγάλες εφαρμογές σε κατασκευές γεφυρών, εφαρμογές κοντά στη θάλασσα, κτιριακά, αποθηκευτικά δοχεία και πιεστικά εφαρμογές συστημάτων για θερμοκρασίες -270°C και. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίδεται ώστε να αποφεύγεται η χρήση κραμάτων σειράς 5xxx με $\text{Mg} > 3\%$, σε εφαρμογές που εκτίθενται σε θερμοκρασίες $> 100^{\circ}\text{C}$ για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Το κράμα 5083 χρησιμοποιείται στη κατασκευή μερών ενός ταχύπλουου όπως το κατάστρωμα ή το κήτος. Σε εξέδρες άντλησης αργού πετρελαίου , οι οποίες έρχονται σε επαφή με νερό και περιβαλλοντικές συνθήκες , χρησιμοποιούνται προστατευτικές κατασκευές από κράματα όπως το 5086 και το 5454 . [11]

Σειρά 6000: κράματα αλουμινίου – μαγνησίου – πυριτίου [11]

6XXX Κράματα Al-Mg-Si	
Υφίστανται θερμική κατεργασία	
Μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, εξαιρετική ολκιμότητα	
Εφαρμογές σε αυτοκίνητα ,υποδομές κτηρίων και κατασκευών	
Αντιπροσωπευτικές σειρές	6061, 6063, 6111
Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό	125- 400 Mpa

Εικόνα 9. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 6XXX

Έχουν υψηλή αντοχή σε κατεργασίες εφελκυσμού και συνεπώς αντοχή σε διάβρωση .Κράματα όπως το 6061, ,με υψηλή αντοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συγκολλητές κατασκευές όπως ,βαγονέτα τρένων, φορτηγά αλλά και σε σωληνώσεις. [11]

Σειρά 7000: κράματα αλουμινίου – ψευδαργύρου

7XXX Κράματα Al-Zn	
Υφίστανται θερμική κατεργασία	
Μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, εξαιρετική ακαμψία	
Εφαρμογές σε αυτοκίνητα ,αεροδιαστημικές επιστήμες	
Αντιπροσωπευτικές σειρές	7005,7075,7475,7150
Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό	220-605 Mpa

Εικόνα 10. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 7XXX

Το μαγνήσιο με τον ψευδάργυρο είναι τα κύρια κραματοποιά στοιχεία. Τα κράματα αυτά επιτυγχάνουν τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα κράματα αλουμινίου. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική βιομηχανία. [11]

Σειρά 8000: κράματα αλουμινίου με άλλα στοιχεία [11]

8XXX Κράματα Al-με διάφορα στοιχεία	
Υφίστανται θερμική κατεργασία	
Μεγάλη αγωγιμότητα ,αντοχή και σκληρότητα	
Ηλεκτρικές εφαρμογές ,αεροδιαστημικές επιστήμες	
Αντιπροσωπευτικές σειρές	8017,8176,8081,8280,8090
Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό	117-241 Μρα

Εικόνα 11. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 8XXX

Στη σειρά 8xxx κατατάσσονται τα κράματα με τα λιγότερο χρησιμοποιούμενα στοιχεία ο σίδηρος(Fe), το νικέλιο(Ni), και το λίθιο (Li). Το καθένα από αυτά χρησιμοποιείται για τις ευεργετικές ιδιότητες που παρέχει στο κράμα: Ο σίδηρος και το νικέλιο παρέχουν αντοχή με μικρή απώλεια ηλεκτρικής αγωγιμότητας (κράμα 8017). Το λίθιο στο κράμα 8090 παρέχει εξαιρετικά υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας , έτσι το χρησιμοποιούν για αεροδιαστημικές επιστήμες και εφαρμογές. [11]

ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

Κραματικά στοιχεία όπως χαλκός και πυρίτιο , εμπεριέχονται σε μεγάλες ποσότητες στα κράματα χυτευσης σε αντίθεση με τα κατεργάσιμα κράματα, Αυτό έχει ως συνέπεια μια μεγάλη ετερογενή δομή π.χ. μια ποσότητα δεύτερης φάσης. Αυτή η δεύτερη φάση απαιτεί πολύ προσεκτική μελέτη, διότι κάθε εύθραυστο και άγριο συστατικό μπορεί να δημιουργήσει εσωτερικές εγκοπές και να ξεκινήσει ρωγμές όταν το χυτό τοποθετηθεί αργότερα σε συνθήκες φορτίου. Με τις συγκεκριμένες τεχνικές χύτευσης και μεταλλουργίας μπορούν να προλάβουν τέτοια σφάλματα. Οι τεχνικές χύτευσης δεν έχουν φτάσει ακόμα στο σημείο να προλαβαίνουν τα όποια χυτευτικά σφάλματα. Συνεπώς, η αντοχή και η επιμήκυνση , ειδικά στην κόπωση, των περισσότερων χυτών είναι σχετικά χαμηλότερες από αυτές των κατεργάσιμων προϊόντων. [12]

Σειρά 200.0: κράματα αλουμινίου με χαλκό

2XX.X Κράματα Al-Cu	
Υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε κοχύλι	
Αντοχή σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και σε κάμψη	
Εφαρμογές σε αεροσκάφη , αυτοκίνητα και μηχανές	
Αντιπροσωπευτικές σειρές	201.0 , 203.0
Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό	131-450 Mpa

Εικόνα 12. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 2XX.X

Το περισσότερο ανθεκτικό κράμα της σειράς 2xx.x είναι το 201.0/AlCu4Ti ή αλλιώς Ντουραλουμίνιο το οποίο επιδέχεται θερμική κατεργασία. Έχει περιορισμένη χυτευσιμότητα καθώς έχει την τάση να σχηματίζει «θερμές σταγόνες» (hot tears) και γι αυτό ταιριάζει καλύτερα σε μεθόδους επενδυμένα κελύφη. Είναι κατάλληλο σε εφαρμογές ηλεκτρολογικού υλικού, για εξαρτήματα υψηλής καταπόνησης σε εργαλειομηχανές, και στη κατασκευή πλοίων και αεροσκαφών διότι παρουσιάζει μεγάλη αντοχή σε κάμψη. Εκτός των κανονικών κραμάτων χύτευσης, υπάρχουν ειδικά κράματα για την κατασκευή ιδιαίτερων εξαρτημάτων π.χ. σώματα μηχανής, κουζινέτα ή κεφαλές. Τέτοιου είδους εφαρμογές απαιτούν από το κράμα την κατάλληλη αντοχή σε συνθήκες λειτουργίας υψηλών θερμοκρασιών, όπως επίσης καλή αντοχή στη φθορά και χαμηλό συντελεστή τριβής. Το κράμα 203.0/AlCu5NiCo αποτελεί την ιδανικότερη επιλογή για τέτοιες χρήσεις καθώς μέχρι και σήμερα είναι το μοναδικό χυτεύσιμο κράμα με την μεγαλύτερη αντοχή στους 200°C. [12]

Σειρά 300.0: κράματα αλουμινίου με πυρίτιο και χαλκό/μαγνήσιο

3XX.X Κράματα Al-Si+Cu ή Mg	
Υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε κοχύλι	
Εξαιρετική χυτευσιμότητα , υψηλή αντοχή	
Εφαρμογές σε εξαρτήματα αυτοκινήτου ,πιστόνια και αντλίες	
Αντιπροσωπευτικές σειρές	356.0, A356.0, 359.0, A360.0.
Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό	131-275 Mpa

Εικόνα 13. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 3XX.X

Η σειρά 3xx.x των χυτών είναι μια από τις πλέον διαδεδομένες σειρές λόγω της ελαστικότητας που προσδίδει χάρης στο υψηλό ποσοστό σε πυρίτιο αλλά και της πολύ καλής χυτευσιμότητας. Παρουσιάζει υψηλή αντοχή μετά από θερμική κατεργασία. Επιπλέον η σειρά αυτή μπορεί να χυτευθεί με τις περισσότερες τεχνικές, όπως με χυτόπρεσσα και από «χώμα» μέχρι πολύπλοκα «κοχύλια» και με την μέθοδο του χαμένου ομοιώματος πολυστυρενίου ,missing candle και καθώς και τις πιο νέες όπως «θιξοχύτευση» και τη μέθοδο squeeze. Μεταξύ των διαδεδομένων είναι τα 319.0 356.0/A356.0 για «κοχύλι» και «χώμα», 380.0/A380.0 ,360.0 και 390.0 για χυτόπρεσσα και 357.0/A357.0 για τις υπόλοιπες τεχνολογίες. [12]

Σειρά 400.0: κράματα αλουμινίου με πυρίτιο

3XX.X Κράματα Al-Si+	
ΔΕΝ υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε κοχύλι	
Εξαιρετική χυτευσιμότητα	
Εφαρμογές σε πλαίσια γραφομηχανών ,εξοπλισμο οδοντιατρείου	
Αντιπροσωπευτικές σειρές	413.0, 443.0
Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό	131-275 Mpa

Εικόνα 14. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 4XX.X

Το κράμα B413.0/AlSi12 είναι διαδεδομένο για την καλή συγκολλησιμότητα του και την καλή χυτευσιμότητα που οφείλονται στην ευτηκτική του σύνθεση και το χαμηλό σημείο τήξης (570 oC). Έχει μέτρια αντοχή με μεγάλη επιμήκυνση και μεγάλη αντοχή σε διάβρωση. [12]

Εμείς συγκεκριμένα στη παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με την σειρά αλουμινίου 2xxx , δηλαδή με κράματα αλουμινίου χαλκού. (Al-Cu)

Η συγκεκριμένη σειρά παρουσιάζει τα παρακάτω στοιχεία-ιδιότητες :

2XXX Κράματα Al-Cu	
Υφίστανται θερμική κατεργασία	
Υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος	
Εφαρμογές σε μεταφορές (αεροπλάνα , πλοία)	
Αντιπροσωπευτικές σειρές	2014 , 2017 , 2024 , 2219 , 2195
Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό	186- 427 Μpa

ΚΡΑΜΑ ΣΕΙΡΑΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2007

Χημική σύσταση

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Pb	Each	Total	Other
AA2007	Max 0,80	Max 0,80	3,3 4,6	0,5 1,0	0,4 1,8	Max 0,1	Max 0,80	Max 0,20	0,8 1,0	Max 0,05	Max 0,15	Ni 0,2 Sn 0,2

Φυσικές ιδιότητες

Destiny(g/cm^3)	2,82
Modulus of <u>elasticity</u> (MPa)	73640
Thermal conductivity (W/m K)	130-160
Coefficient of thermal expansion (20-100°) $10^{-6} /\text{K}$	23,0
Electrical resistivity (MS/m)	18-22 (31%-40% IACS)

Χημικές και φυσικές ιδιότητες αλουμινίου σειράς 2007

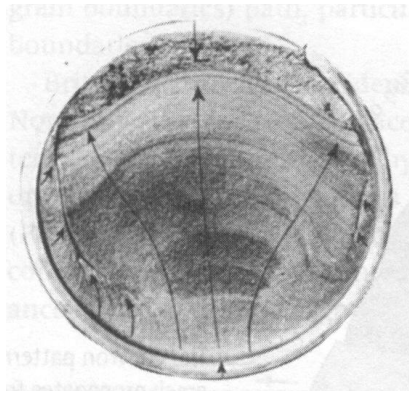
ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΩΝ

ΚΟΠΩΣΗ

Εισαγωγή στη Κόπωση

Λόγω των δυναμικών καταπονήσεων παρατηρείται η εμφάνιση μιας αστοχίας στα μεταλλικά υλικά, η οποία ονομάζεται κόπωση. Η εμφάνισή της γίνεται μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα λειτουργίας του δομικού στοιχείου ή εξαρτήματος μίας κατασκευής. Με την πάροδο των χρόνων ήρθε και η πρόοδος της τεχνολογίας η οποία αποτέλεσε σε χρήση νέων στοιχείων, τα οποία βρήκαν εφαρμογή σε κατασκευές όπως αεροσκάφη αυτοκίνητα, στρόβιλοι, συμπιεστές, κ.λ.π. και στα οποία οι μηχανικές καταπονήσεις είναι δυναμικές. Σαν αποτέλεσμα, ως μηχανισμός αστοχίας, η κόπωση θεωρήθηκε πολύ σημαντική. Το 90% των αστοχιών, που προέρχονται από μηχανικά αίτια, εκτιμάται ότι οφείλεται στη κόπωση. [13]

Το γεγονός ότι η κόπωση μεταλλικών υλικών εμφανίζεται δίχως προειδοποιητικές ενδείξεις την καθιστά έναν από τους κακόβουλους μηχανισμούς της αστοχίας. Ο τρόπος να αντιληφθούμε μία αστοχία λόγω κόπωσης είναι αν προσέξουμε την επιφάνεια θραύσης, αφού έχει εκδηλωθεί. Στην φωτογραφία της **Εικόνας 15** μπορούμε να παρατηρήσουμε πως ένα μεγάλο μέρος της επιφάνειας θραύσης είναι λείο, το οποίο είναι αποτέλεσμα της τριβής των επιφανειών του ρήγματος μεταξύ τους, κάτι το οποίο συμβαίνει σταδιακά κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Παράλληλα αν προσέξουμε καλύτερα, ένα πιο μικρό τμήμα της επιφάνειας, στο τελικό στάδιο της θραύσεως, παρουσιάζει ανώμαλη εμφάνιση, η οποία οφείλεται στη γρήγορη τελική προώθηση του ρήγματος με όλκιμο τρόπο μέσα στο υλικό. Αυτό γίνεται διότι η μειωμένη διατομή του υλικού που έχει απομείνει δεν μπορεί να αντέξει τα φορτία που της έχουν επιβληθεί. [13]



Εικόνα 15. : Επιφάνεια θραύσης από κόπωση σε περιστρεφόμενο άξονα.

Η αστοχία από κόπωση εμφανίζεται εξ αιτίας των παρακάτω παραγόντων:

- μία αρκετά μεγάλη και επαναλαμβανόμενη διακύμανση της τάσης κατά τη λειτουργία,
- μία αρκετά μεγάλη εφελκυστική τάση και
- ένας πολύ μεγάλος αριθμός των κύκλων φόρτισης, δηλαδή επαναλήψεων της δυναμικής του καταπόνησης.

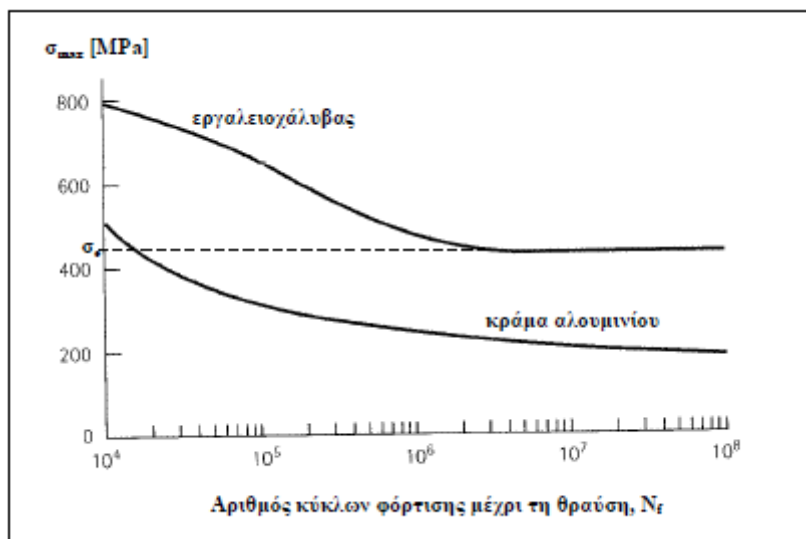
Πέρα όμως από τους προαναφερθέντες παράγοντες, το πως θα συμπεριφερθεί ένα μεταλλικό υλικό υπό κόπωση εξαρτάται κι από άλλους συντελεστές, όπως η παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος ,η θερμοκρασία, η μικροδομή του υλικού, κ.α. Εξ αιτίας των παραπάνω δεν έχει ακόμη εξηγηθεί πλήρως θεωρητικά και κατά κύριο λόγο η ανάλυση της κόπωσης των μεταλλικών υλικών γίνεται με πειραματικές και εμπειρικές παρατηρήσεις. [13]

Καμπύλες S – N (καμπύλες Wöhler)

Οι καμπύλες S – N ή καμπύλες Wöhler, είναι η κύρια μορφή στην οποία εμφανίζονται τα πειραματικά δεδομένα στην βιβλιογραφία για την συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών σε κόπωση. Τα διαγράμματα τους έχουν στον οριζόντιο άξονα τον αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση του υλικού , δηλαδή την διάρκεια ζωής του σε κόπωση (N) , ενώ στον κατακόρυφο άξονα ένα μέγεθος “S” που ορίζει την τάση. Ο οριζόντιος άξονας που δείχνει τον αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση σχεδόν πάντα είναι εκφρασμένος σε κλίμακα λογαριθμική. [13]

Υπάρχουν συγκεκριμένες μετρήσεις για κάθε καμπύλη ενός υλικού όπου ο συνδιασμός της αναλογίας τάσεων (R) στην οποία έχουν γίνει οι αντίστοιχες δοκιμές για την κόπωση και της μέσης τάσης (σ_m) είναι μοναδικός. Εάν για το ίδιο υλικό έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμές κόπωσης με διαφορετική τιμή R ή και σ_m , τότε η καμπύλη που θα προκύψει δεν θα είναι ίδια με την προηγούμενη. Στο **Σχήμα 2**, απεικονίζονται δύο καμπύλες S-N: μία για μη σιδηρούχα κράματα (π.χ. κράματα αλουμινίου) και μια για σιδηρούχα κράματα (π.χ. χάλυβες) και μία. Οι πιο πολλές από αυτές τις καμπύλες προέρχονται από δοκιμές που έγιναν σε περιστρεφόμενο πρόβολο. [13]

Οι καμπύλες S-N ή καμπύλες Wöhler αναφέρονται στη θραύση λόγω κόπωσης μετά από έναν αρκετά μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης, για $N > 10^4$ κύκλους. Στις περιπτώσεις αυτές, οι τάσεις σε μακροσκοπικό επίπεδο είναι ελαστικές, συνεπώς να μην προκαλείται η πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Η διάρκεια ζωής σε κόπωση μειώνεται σημαντικά ($N < 10^4$ κύκλοι) μόνο όταν οι τάσεις που εφαρμόζονται ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού. [13]



Σχ. 2: Καμπύλες Wöhler για σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα

Στις παρακάτω καμπύλες S-N του **Σχήματος 2**, παρατηρούμε πως η διάρκεια ζωής σε κόπωση - ο αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι να πραγματοποιηθεί η θραύση- αυξάνεται όσο μειώνεται η εφαρμοζόμενη τάση. Επίσης όσων αφορά τη μορφή που έχουν οι καμπύλες, στα μεταλλικά υλικά με μεγάλη πρακτική σημασία, όπως το τιτάνιο και οι χάλυβες, εμφανίζεται μία χαρακτηριστική τιμή τάσης (σε) κάτω από την οποία η καμπύλη θα γίνει οριζόντια. Στην πράξη αυτό μεταφράζεται με το ότι το υλικό έχει άπειρη διάρκεια ζωής σε κόπωση όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μικρότερη από σε, δηλαδή το υλικό δεν κινδυνεύει να υποστεί θραύση λόγω κόπωσης. Το όριο διαρκούς αντοχής ενός υλικού σε κόπωση (endurance limit) ονομάζεται τάση σε. Ο εργαλειοχάλυβας σύμφωνα με το Σχήμα 2 έχει όριο διαρκούς αντοχής 410 MPa. [13]

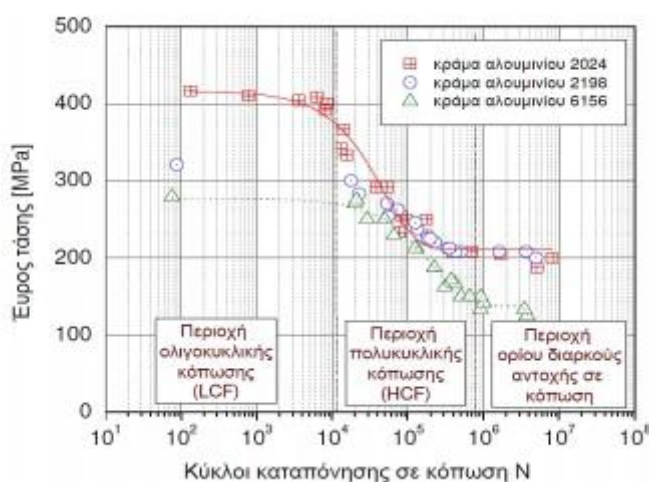
Προφανώς, αυτή συμπεριφορά δεν είναι εμφανή σε όλα το εύρος των μεταλλικών υλικών. Κράματα, όπως τα κράματα αλουμινίου, μαγνησίου, χαλκού, κ.α., που θεωρούνται μη σιδηρούχα κράματα, δεν εμφανίζουν όριο διαρκούς αντοχής. Μπορούμε να μελετήσουμε στο σχήμα 2 το κράμα αλουμινίου, και να παρατηρήσουμε ότι η καμπύλη για καμία τιμή τάσης δεν γίνεται οριζόντια, αλλά έχει πορεία προς τον οριζόντιο άξονα Nf όσο μειώνεται η εφαρμοζόμενη τάση. Αυτό υποδηλώνει ότι ανεξάρτητα από το πόσο μικρή είναι η εφαρμοζόμενη τάση, τα κράματα με τη συγκεκριμένη συμπεριφορά θα έχουν πάντοτε μία πεπερασμένη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Παραδείγματος χάριν, το κράμα αλουμινίου στο Σχήμα 2, σε κάποιο σημείο, ακόμη και μετά από αρκετούς κύκλους φόρτισης, θα υποστεί θραύση λόγω της κόπωσης, ακόμα και για πολύ μικρές εναλλασσόμενες τάσεις. Όταν συμβαίνει αυτό, για να ορισθεί μία τάση σαν αντοχή του υλικού σε κόπωση και να χρησιμοποιηθεί για την σχεδιασμένη κατασκευών, έχει καθιερωθεί η χρήση της συμβατικής αντοχής σε κόπωση. Επικρατέστερη είναι μία μεγάλη διάρκεια ζωής της τάξεως των $5 \times 10^7 - 10^8$ κύκλων φόρτισης. Μ' αυτό τον τρόπο, το κράμα αλουμινίου στο σχήμα 2 παρουσιάζει συμβατική αντοχή σε κόπωση για διάρκεια ζωής 5×10^7 της τάξης των 220 MPa, ενώ η συμβατική του αντοχή για διάρκεια ζωής 10^8 κύκλους είναι 200 MPa. [13]

Σε μια καμπύλη Wöhler μπορεί να παρατηρηθούν τρεις χαρακτηριστικές περιοχές :

A) η **περιοχή ολιγοκυκλικής κόπωσης (Low Cycle Fatigue – LCF)** κατά την οποία η διάρκεια ζωής του υλικού είναι σύντομη, έως και 10.000 κύκλοι φόρτισης για την αστοχία. Το υλικό υπόκειται σε φορτίσεις με υψηλές τιμές τάσης, οι οποίες είναι μεγαλύτερες ή ίσες από το όριο διαρροής του υλικού και επομένως αναμένονται σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις. [14]

B) η **περιοχή πολυκυκλικής κόπωσης (High Cycle Fatigue – HCF)**, κατά την οποία η διάρκεια ζωής του υλικού κυμαίνεται από τις 10.000 έως περίπου τους 1.000.000 κύκλους φορτίσεων για την αστοχία. Οι εφαρμοζόμενες τάσεις δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού. [14]

Γ) η **περιοχή διαρκούς αντοχής (Endurance Limit)**, το υλικό δεν πρόκειται να αστοχήσει υπό τα επιβαλλόμενα φορτία κόπωσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η περιοχή αυτή μπορεί να ξεκινάει στους 108 και 107 κύκλους φόρτισης για κράματα χάλυβα και αλουμινίου, αντίστοιχα. [14]

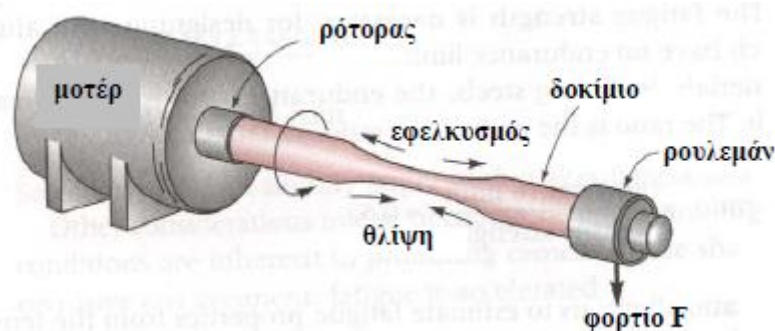


Καμπύλες S-N κραμάτων αλουμινίου με την ανάδειξη των χαρακτηριστικών περιοχών των διαγραμμάτων κόπωσης.

Πειραματικός Προσδιορισμός των Καμπυλών S – N

Η συμπεριφορά ενός υλικού σε εναλλασόμενες καταπονήσεις ή αλλιώς σε καταπόνηση σε κόπωση μπορεί να μελετηθεί πειραματικά με πολλές τεχνικές, με την πιο συνήθη να είναι αυτή που πραγματοποιείται σε δοκίμια εφελκυσμού. Αρκετοί είναι οι τύποι μηχανών που μπορούν να εκτελέσουν δοκιμές κόπωσης, εξασκώντας έτσι την προκαθορισμένη εναλλασσόμενη φόρτιση στο δοκίμιο. [13]

Στην **Εικόνα 16** απεικονίζεται η δοκιμή του περιστρεφόμενου προβόλου (rotating cantilever beam test) όπου όπως φαίνεται η διαταξή της είναι αρκετά απλή. Στη δοκιμή αυτή υποβάλλεται δοκίμιο κυλινδρικής γεωμετρίας, του υπό εξέταση υλικού. Το ένα άκρο του δοκιμίου συγκρατείται σε έναν ρότορα ο οποίος είναι συνδεδεμένος με έναν ηλεκτρικό κινητήρα, ενώ στο άλλο άκρο τοποθετείται ένα εγκάρσιο φορτίο, ασκώντας έτσι κάμψη στο δοκίμιο. [13]



Εικόνα 16. : Δοκιμή περιστρεφόμενου προβόλου.

Όταν ο ρότορας τίθεται σε λειτουργία, ξεκινάει μια περιστροφική κίνηση και το δοκίμιο αρχίζει να υποβάλλεται σε μία εναλλασσόμενη καταπόνηση. Όπως είναι γνωστό από την θεωρία κάμψης για τις δοκούς, οι μέγιστες τάσεις αναπτύσσονται στις εξωτερικές επιφάνειες της δοκού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στη συγκεκριμένη περίπτωση, το σημείο εκείνο του υλικού που θα βρίσκεται στην επάνω επιφάνεια, δέχεται την μέγιστη εφελκυστική τάση. [13]

Έπειτα από μια περιστροφή των 90° το σημείο αυτό θα έρθει σε μία θέση, όπου εκεί η τάση μηδενίζεται. Μετά από περιστροφή άλλων 90° , (δηλαδή συνολικά 180° από την αρχή) το σημείο έρχεται στην κάτω επιφάνεια, όπου εκεί θα δεχτεί την μέγιστη θλιπτική τάση. Η ίδια αναστρεφόμενη δυναμική καταπόνηση επαναλαμβάνεται σε κάθε περιστροφή του δοκιμίου έχοντας ημιτονοειδή μορφή με μέση τάση $\sigma_m = 0$ και $R = -1$. [13]

Η διαδικασία που ακολουθείται συνήθως για να καθοριστεί μία καμπύλης $S - N$ είναι η εξής : Το πρώτο προς υποβολή δοκίμιο θα δεχθεί μια υψηλή τάση που ισοδυναμεί με τα $\frac{3}{4}$ της μέγιστης αντοχής του σε εφελκυσμό (σ_{UTS}). Μετά από έναν μικρό αριθμό κύκλων φόρτισης το δοκίμιο θα υποστεί θραύση. Τα επόμενα δοκίμια θα υποβάλλονται σε όλο και πιο μικρές τάσεις και κάθε φορά θα καταγράφεται ο αριθμός κύκλων στον οποίο αστοχούν με θραύση. Στη συνέχεια με τον ίδιο τρόπο η δοκιμή θα προχωράει, μέχρι ένα ή δύο δοκίμια να μην έχουν αστοχήσει μετά από έναν προκαθορισμένο μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης, π.χ.

$> 10^7$ κύκλους. Σαν αποτέλεσμα ως όριο διαρκούς αντοχής του υλικού, θα οριστεί η υψηλότερη τάση στην οποία το δοκίμιο δεν αστόχησε. Κυρίως στα μεταλλικά υλικά, όταν το δοκίμιο αντέξει σε έναν πολύ μεγάλο αριθμό κύκλων, $10^8 - 5 \times 10^8$ κύκλους, χωρίς να σπάσει, δεν εμφανίζουν όριο διαρκούς αντοχής και έτσι οι δοκιμές τελειώνουν. [13]

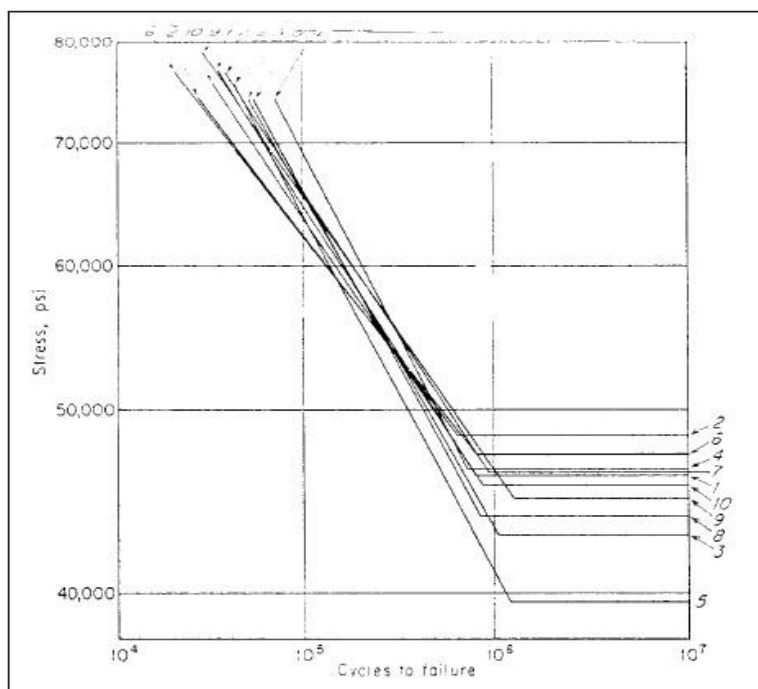
Έτσι η συμβατική αντοχή του υλικού σε κόπωση είναι η τιμή της τάσης που χρησιμοποιήθηκε στο δοκίμιο αυτό. Για τον προσδιορισμό μίας καμπύλης $S - N$, τις περισσότερες φορές χρησιμοποιούνται συνολικά από 10 έως 14 δοκίμια από το ίδιο υλικό.

Είναι πολύ σημαντικό το γεγονός πως τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης σε ένα συγκεκριμένο υλικό εμφανίζουν μεγάλη διασπορά. Αυτό σημαίνει πως αν συγκεντρώσουμε ένα μεγάλο αριθμό δοκιμών που προέρχονται από το ίδιο υλικό και υποβληθούν σε δοκιμές κόπωσης με τις ίδιες ακριβώς συνθήκες, θα γίνει αντιληπτό ότι η διάρκεια ζωής τους σε κόπωση (δηλ. ο αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι να σπάσουν) θα διαφέρει από δοκίμιο σε δοκίμιο. Για το λόγο αυτό και για να είναι τα αποτελέσματα δοκιμών της κόπωσης ασφαλή, αξιόπιστα και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα για ένα υλικό, κατά το στάδιο σχεδιομελέτης μίας κατασκευής, υποβάλλονται σε μια κατάλληλη στατιστική επεξεργασία. [13]

Στατιστική Εξέταση της Κόπωσης

Όπως είδαμε και προηγουμένως, τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης που προέρχονται από το ίδιο υλικό εμφανίζουν μεγάλες διαφορές, σχετικά με τη διάρκεια ζωής σε κόπωση αλλά και με το όριο διαρκούς αντοχής τους. Αυτό συνεπάγεται πως η καμπύλη $S - N$ ενός υλικού, προέρχεται από την διενέργεια δοκιμών κόπωσης σε ένα πλήθος από 10 – 14 δοκίμια και αφορά μία ενδιάμεση συμπεριφορά του υλικού σε κόπωση, η οποία θα χει σαν αποτέλεσμα μεγάλες αρκετά αποκλίσεις. [13]

Η μεγάλη στατιστική διασπορά που εμφανίζουν τα αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης μπορεί να γίνει πιο κατανοητή, υλοποιώντας τις ίδιες συνθήκες ακριβώς σε δοκίμια από το ίδιο υλικό, εξετάζοντας το πείραμα του Ransom, το οποίο πραγματοποιήθηκε το 1952. Ο Ransom ξεκίνησε με μία χαλύβδινη ράβδο, από την οποία έκοψε και έφτιαξε εκατό πανομοιότυπα δοκίμια κόπωσης, τα οποία έπειτα χώρισε σε 10 ομάδες (τοποθέτησε 10 δοκίμια σε κάθε ομάδα). Κάθε ομάδα δοκιμίων υποβλήθηκε σε δοκιμές κόπωσης με τις ίδιες ακριβώς συνθήκες. Έτσι, για κάθε ομάδα δοκιμίων προκύπτει η αντίστοιχη καμπύλη $S - N$, συνολικά 10 καμπύλες. Στο διάγραμμα του Σχήματος 3 φαίνονται οι καμπύλες $S - N$ που προέκυψαν με αυτό τον τρόπο. Η αρχική υποψία του Ransom επιβεβαιώθηκε. [13]

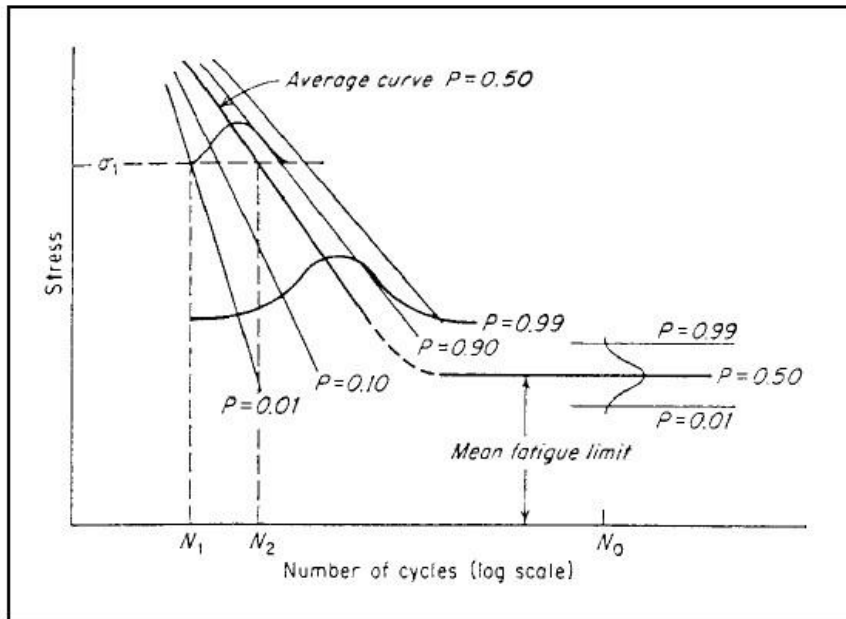


Σχ.3 : Οι δέκα συνολικά καμπύλες $S - N$.

Όντως, καμία από τις δέκα καμπύλες S – N που προέκυψαν δεν συμπίπτει με κάποια άλλη, αντιθέτως παρουσιάζουν αρκετά μεγάλες διαφορές, σχετικά με την διάρκεια ζωής για κάποια δεδομένη τιμή τάσης αλλά και με το όριο της διαρκούς αντοχής. Για παράδειγμα, θα συγκρίνουμε τις καμπύλες 2 και 5 (που προήλθαν από τις δοκιμές κόπωσης των ομάδων δοκιμίων 2 και 5, αντίστοιχα). Το διάγραμμα φανερώνει ότι με τάση 70.000 psi ($\cong 482$ MPa) η διάρκεια ζωής που προβλέπει η καμπύλη 2 είναι $N_f \cong 3 \times 10^4$ κύκλοι φόρτισης, ενώ η διάρκεια ζωής που προβλέπει η καμπύλη 5 είναι $N_f \cong 7 \times 10^4$ κύκλοι φόρτισης! Η διαφορά στο όριο διαρκούς αντοχής: η καμπύλη 2 δείχνει ότι σε $\cong 47.000$ psi (324 MPa), ενώ η 5 δείχνει ότι σε $\cong 39.000$ psi (269 MPa)! Όλα τα δοκίμια προέρχονται όχι μόνο από το ίδιο υλικό, αλλά και από την ίδια ράβδο. Οι αποκλίσεις όμως είναι σημαντικές, πράγμα που υποδηλώνει ότι είχαν υποστεί ακριβώς τις ίδιες θερμικές, μηχανικές ή άλλες κατεργασίες κατά την παραγωγή της ράβδου [13]

Ο Ransom το 1952 στο πείραμά του υπέδειξε αν αγνοήσουμε την ‘στατικής’ πλευράς της κόπωσης, οι επακόλουθες συνέπειες μπορεί να είναι σοβαρές έως και καταστροφικές. Για παράδειγμα, σε έναν μηχανικό που θα έκανε μία σχεδιομελέτη για συγκεκριμένη κατασκευή αποτελούμενη από το συγκεκριμένο υλικό θα θεωρούσε ότι, το όριο αντοχής σε κόπωση θα είναι 324 MPa εάν για ένα υλικό υπήρχε διαθέσιμη μόνο η καμπύλη 2 του Σχήματος. 3. Δικαιολογημένα θα θεωρούσε ότι εάν η τάση που θα καταπονήσει την κατασκευή κατά τη λειτουργία της δεν θα υπερβεί τα 324 MPa, η κατασκευή του θα είχε συνεχή διάρκεια ζωής σε κόπωση. Το υλικό ακολουθούσε στην πραγματικότητα την καμπύλη 5 και να είχε πραγματικό όριο διαρκούς αντοχής τα 269 MPa, με αποτέλεσμα η κατασκευή κάποια στιγμή να αστοχούσε λόγω κόπωσης. [13]

Γίνεται λοιπόν σαφές ότι πρέπει πάντοτε να παρέχεται η πληροφορία σχετικά με ακρίβια και αξιοπιστία των δεδομένων για την συμπεριφορά ενός υλικού σε κόπωση. [13]



Σχ.4 : Διάγραμμα που περιέχει διάφορες καμπύλες S – N ενός συγκεκριμένου υλικού.

Στο παραπάνω διάγραμμα συμπεριλαμβάνονται διάφορες καμπύλες S – N από ένα συγκεκριμένο υλικό, όπου κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο πιθανότητας P. Για να δημιουργηθεί ένα διάγραμμα τέτοιου είδους, είναι απαραίτητο ένα τεράστιο πλήθος δοκιμίων από ίδιο υλικό, που καλό θα είναι να ξεπερνά τα 1000 συνολικά δοκίμια, καθώς επίσης και να πραγματοποιηθούν αντίστοιχος αριθμός δοκιμών κόπωσης. Κατά συνέπεια είναι πολύ μεγάλο το κόστος για την δημιουργία ενός τέτοιου διαγράμματος. Κατά συνέπεια δεν συναντάμε εύκολα πλήρη διαγράμματα σαν του Σχήματος 4, και όσα υπάρχουν είναι υλικών που χρησιμοποιούνται σε πολύ κρίσιμες εφαρμογές. [13]

Ο τρόπος που μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα τέτοιο διάγραμμα είναι ο εξής: χρειαζόμαστε έναν μεγάλο αριθμό δοκιμίων, για παράδειγμα 100 δοκίμια, τα οποία θα υποβληθούν σε δοκιμή κόπωσης για κάποια συγκεκριμένη τιμή τάσης, για παράδειγμα στην Σ1. Όταν στην συγκεκριμένη αυτή τάση σπάσει το 1^ο δοκίμιο, τότε σημειώνουμε τον αριθμό κύκλων φόρτισης στον οποίο συνέβη το γεγονός αυτό (n_1 στο διάγραμμα). Συνεχίζουμε με τα υπόλοιπα 99 δοκίμια. Όταν σπάσει το 10^ο, σημειώνουμε πάλι τον αριθμό κύκλων φόρτισης στον οποίο συνέβη το γεγονός (n_{10} στο διάγραμμα).

Συνεχίζουμε τις δοκιμές με τα υπόλοιπα 90 δοκίμια. Όταν σπάσει το 50^ο κατά σειρά δοκίμιο σημειώνουμε αντίστοιχα τον αριθμό κύκλων φόρτισης N_{50} . Συνεχίζουμε με τα υπόλοιπα 50 δοκίμια. Όταν σπάσει το 99^ο κατά σειρά δοκίμιο σημειώνουμε τον αριθμό κύκλων φόρτισης N_{99} . Η πληροφορία που έχουμε συλλέξει μέχρι τώρα είναι ιδιαίτερα σημαντική. [13]

Γνωρίζουμε σε αυτλο το σημείο πως το υλικό που έχουμε επιλέξει, εάν υποβληθεί σε δυναμική καταπόνηση με τιμή τάσης Σ_1 (όπου Σ_1 μπορεί να είναι είτε η Σ_{max} , είτε το Σ_a , είτε κάποιο άλλο συναφές μέγεθος), τότε η διάρκεια ζωής του σε κόπωση θα ισούται με n_1 με πιθανότητα $P = 0,01$ (1%), με n_{10} με πιθανότητα $P = 0,10$ (10%), με n_{50} με πιθανότητα $P = 0,50$ (50%) ή με n_{99} με πιθανότητα $P = 0,99$ (99%). [13]

Εν κατακλείδι θα πρέπει να τονίσουμε ότι, όταν προβαίνουμε σε μια πολύ κρίσιμη κατασκευή και πρέπει οπωσδήποτε να γίνει η αποφυγή της αστοχίας λόγω κόπωσης, τότε θα πρέπει να αναλογιστούμε τα δεδομένα της καμπύλης $P = 0,01$. Οι συγκεκριμένες προβλέψεις ισχύουν με πιθανότητα μόλις 1%. Όμως, επειδή οι προβλέψεις αυτές έχουν να κάνουν με τη χειρίστη δυνατή συμπεριφορά του υλικού σε κόπωση (μικρότερη διάρκεια ζωής και χαμηλότερο όριο διαρκούς αντοχής), όταν η κατασκευή κρίνεται κρίσιμη είμαστε υποχρεωμένοι να τις λάβουμε υπόψη, έτσι ώστε να διασφαλίσουμε ότι η πιθανότητα αστοχίας λόγω κόπωσης είναι μικρότερη ακόμη και από 1%. [13]

Παράγοντες που Επηρεάζουν τη Συμπεριφορά σε Κόπωση

Όπως προκύπτει από την στατιστική “φύση” της κόπωσης, εκτός από το ίδιο το υλικό μία σειρά παραγόντων είναι υπεύθυνη για την συμπεριφορά του υλικού κατά τις δυναμικές καταπονήσεις. Προς το παρόν, δεν έχει γίνει κατανοητή πλήρως η επίδραση όλων των παραγόντων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών σε κόπωση. Οι κυριότεροι παράγοντες έχουν να κάνουν με την κατάσταση της επιφάνειάς του (π.χ. τραχύτητα, παραμένουσες τάσεις), με το μέγεθος του δομικού στοιχείου που υφίσταται δυναμική καταπόνηση ύπαρξη γεωμετρικών ασυνεχειών (π.χ. εγκοπών) στο υλικό κ.α. Τέλος θα παραθέσουμε επιγραμματικά την επίδραση ορισμένων από αυτούς παράγοντες. [13]

Επίδραση Γεωμετρικών Ασυνεχειών

Όπως γνωρίζουμε από την θραύση, η παρουσία διάφορων γεωμετρικών ασυνεχειών, όπως εγκοπές, σφηνάυλακες, οπές κ.τ.λ., έχει μεγάλη επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού, για δύο κυρίως λόγους:

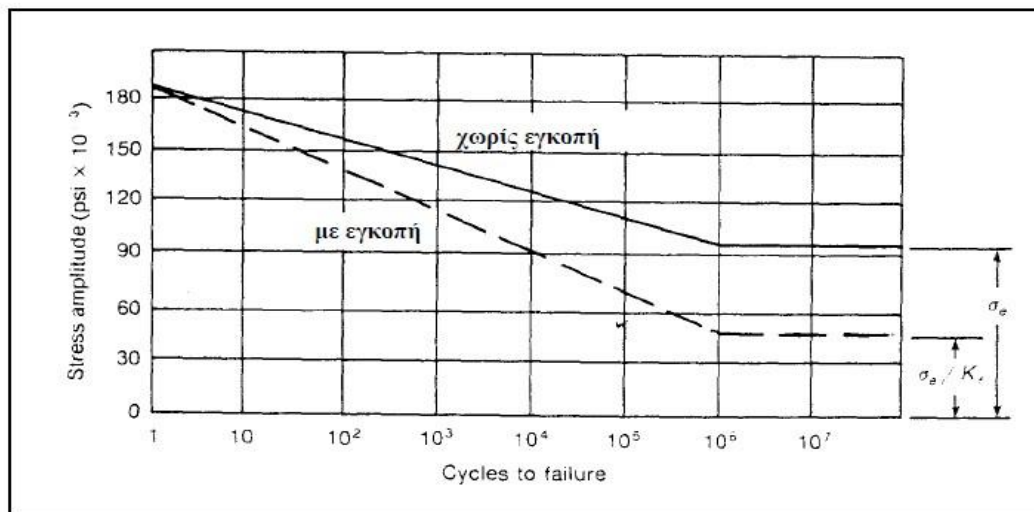
- α) την εντατική κατάσταση που επικρατεί γύρω από μία ασυνέχεια που εμφανίζει την τριαξονικότητα και
- β) κοντά στην ασυνέχεια υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τάσεων, δηλαδή οι τάσεις που επικρατούν τοπικά κοντά στην ασυνέχεια είναι πολύ υψηλότερες από ότι στο υπόλοιπο υλικό.

Στην ίδια ενότητα θα αναφερθεί η έννοια του θεωρητικού συντελεστή συγκέντρωσης των τάσεων.[13]

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}}$$

Στην εξίσωση αυτή σ_{\max} ονομάζεται η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται επάνω στην ασυνέχεια, αλλά δεν είναι η ίδια με την σ_{\max} που επικρατεί στη δυναμική καταπόνηση. σ_{nom} είναι η τάση που καταπονεί το υλικό μακριά από την ασυνέχεια. Με την θεωρία της ελαστικότητας είδαμε και ορισμένες σχέσεις για τον υπολογισμό του K_t για τις ασυνέχειες με απλή γεωμετρία. Η επίδραση των συγκεκριμένων γεωμετρικών ασυνεχειών, στην συμπεριφορά ενός υλικού που υφίσταται κόπωση, είναι μεγάλη. Για να γίνει ποσοστιαία η επίδραση αυτή, κατασκευάζονται δοκίμια του υλικού στα οποία δημιουργείται εσκεμμένα μία μικρή εγκοπή και τα οποία στη συνέχεια θα υποβληθούν σε δοκιμές κόπωσης. Τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του ίδιου υλικού, αλλά από δοκιμές σε δοκίμια χωρίς εγκοπή. [13]

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, ύπαρξη της εγκοπής σε ένα υλικό μειώνει κατά πολύ το όριο διαρκούς αντοχής του υλικού σ_e , αλλά και τη διάρκεια ζωής του σε κόπωση. Το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5) δείχνει ένα διάγραμμα Wöhler στο οποίο απεικονίζονται καμπύλες S-N ενός υλικού χωρίς εγκοπή και με εγκοπή. Ο Neuber έχει προτείνει την εξής σχέση για την ποσοστιαία επίδραση της εγκοπής στο όριο διαρκούς αντοχής του υλικού. [13]



Σχήμα 5: Καμπύλες S – N για ένα συγκεκριμένο υλικό με και χωρίς εγκοπή

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\frac{\rho'}{r}}}$$

K_f είναι ο συντελεστής της κόπωσης σε δοκίμια που παρουσιάζουν εγκοπή (fatigue-notch factor) και εκφράζει τον λόγο του ορίου διαρκούς αντοχής ενός υλικού χωρίς εγκοπή δια το όριο διαρκούς αντοχής του ίδιου υλικού με εγκοπή:

$$K_f = \frac{(\sigma_\varepsilon)_{un-notched}}{(\sigma_\varepsilon)_{notched}}$$

r είναι η ακτίνα καμπυλότητας της ρίζας (αιχμής) της εγκοπής, ενώ το ρ' είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από το υλικό, όπως και από τη μέγιστη αντοχή εφελκυσμού του υλικού. Κάποιες χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή ρ' βρίσκονται στον παρακάτω Πίνακα [13]

Υλικό	σ_{UTS} [MPa]	ρ' [mm]
Χάλυβες	552	0,15
	896	0,07
	1310	0,01
Κράματα αλουμινίου	150	2,00
	300	0,60
	600	0,40

Πίνακας : Χαρακτηριστικές τιμές ρ'

Επίδραση Μεγέθους

Κατά την διαδικασία της κόπωσης, δε μπορούμε εύκολα να προβλέψουμε την συμπεριφορά σε κόπωση ενός μεγάλου εξαρτήματος, καθώς είχαμε πάντα σαν δεδομένο αποτελέσματα δοκιμών από δοκίμια σε πολύ μικρότερα μεγέθη.

Η επίδραση του μεγέθους στη κόπωση είναι καθαρά εμπειρική, καθώς δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμα θεωρίες που να καλύπτουν το εύρος των μεταλλικών υλικών. Αντίθετα έχουν αναπτυχθεί κάποιοι μέθοδοι εκτίμησης της επίδρασης αυτής, χωρίς όμως να τις αναφέρουμε.

Κατάσταση της Επιφάνειας

Σχεδόν όλες οι αστοχίες λόγω κόπωσης, οφείλονται στην εξωτερική επιφάνεια του υλικού. Μικρές ανωμαλίες, όπως η τραχύτητα της επιφάνειας, μπορούν να οδηγήσουν σε ρήγματά της και τελικά να προκαλέσουν την θραύση του επεξεργασμένου υλικού.

Η επίδραση της τραχύτητας παίζει σημαντικό ρόλο στη διάρκεια ζωής ενός μεταλλικού υλικού. Αυτό γίνεται αντιληπτό από τον παρακάτω πίνακα, στον οποίο φαίνεται η διάρκεια ζωής σε κόπωση σε συνάρτηση με την επιφανειακή τραχύτητα δοκιμίων για τον χάλυβα SAE 3130. Τα δοκίμια αυτά υπεβλήθησαν σε πλήρως αναστρεφόμενη δυναμική καταπόνηση με $\sigma_{max} = 655 \text{ MPa}$. Ο παρακάτω πίνακας, εξηγεί ότι, η διάρκεια ζωής ενός δοκιμίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επίδραση της τραχύτητας, καθώς όσο μεγαλύτερη θα είναι η τραχύτητα (δηλ. όσο πιο ανώμαλη είναι η επιφάνεια του δοκιμίου) τόσο μικρότερη θα είναι η διάρκεια ζωής σε κόπωση.

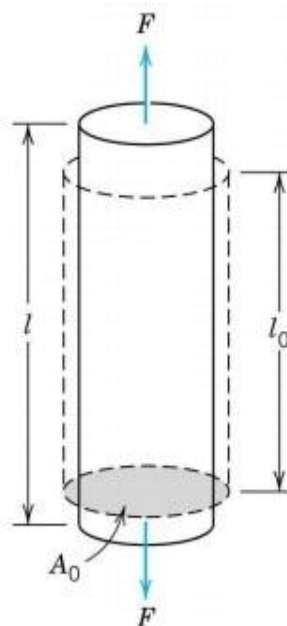
Μέθοδος φινιρίσματος	Τραχύτητα επιφάνειας [μm]	Αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση
Τορνίρισμα	2.67	24.000
Μερική στίλβωση με το χέρι	0.15	91.000
Πλήρης στίλβωση με το χέρι	0.13	137.000
Λείανση	0.18	217.000
Λείανση και στίλβωση	0.05	234.000

Πίνακας :Διάρκεια ζωής σε κόπωση σαν συνάρτηση της επιφανειακής τραχύτητας δοκιμίων από χάλυβα SAE 3130

ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ

Εισαγωγή στον εφελκυσμό

Ο εφελκυσμός είναι ένα από τα βασικότερα είδη φορτίσεως, που μπορεί να καταπονούν τη διατομή ενός σώματος, μαζί με τη θλίψη, τη κάμψη, τη διάτμηση και τη στρέψη. Είναι η καταπόνηση σε μια ράβδο, όπου εφαρμόζονται αξονικά φόρτια-δυνάμεις που, έχοντας σα φορέα τον άξονα της ράβδου, τείνουν να απομακρύνουν μεταξύ τους δύο εγκάρσιες διατομές της. Μια εφελκυόμενη ράβδος τεντώνεται, οπότε, αν υπάρχουν ανωμαλίες στον άξονά της, τείνουν να εξαφανιστούν. Όσο περισσότερο φορτίζεται η συγκεκριμένη ράβδος, τόσο πιο ευθύγραμμος θα είναι γίνεται ο άξονάς της. [15]



Εικόνα 17. : Περιγραφή φαινομένου λυγισμού.

Ο εφελκυσμός , όπως αναφέραμε , ανήκει στη κατηγορία των παραμορφώσεων . Συνεπώς υπάρχουν δύο στοιχεία που εμπλέκονται σε αυτό το φαινόμενο :

A) Η τάση σ (Stress)

B) Η παραμόρφωση ε

Η τάση σ είναι ο λόγος του φορτίου που δρα πάνω σε ένα σώμα (F) προς το εμβαδό (A) της επιφάνειας του σώματος που ασκείται η δύναμη .

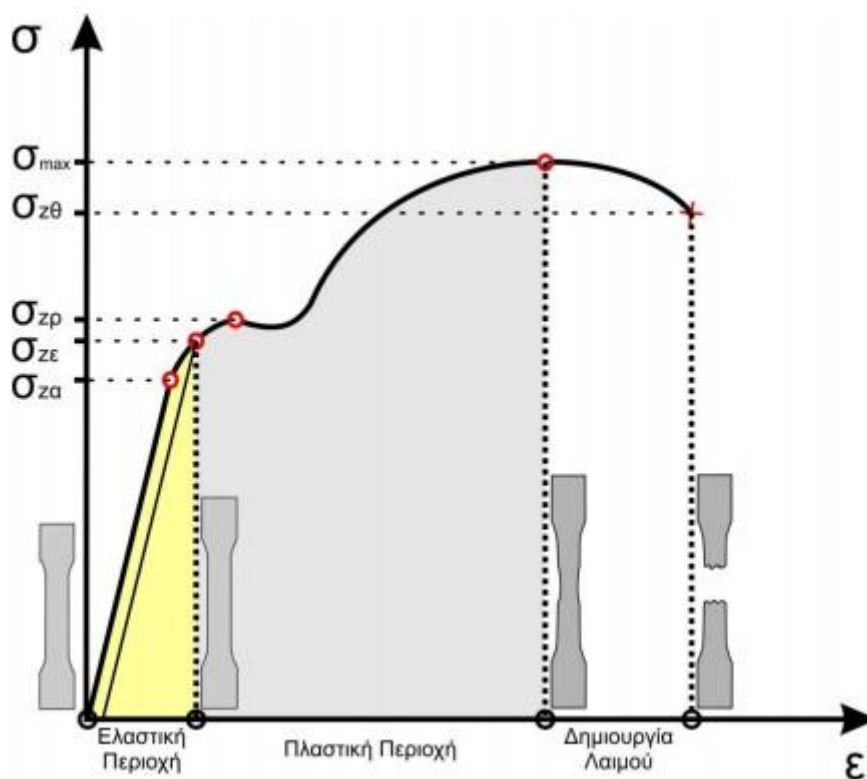
Υπολογίζεται από την σχέση :

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

Η παραμόρφωση ε είναι ο λόγος της αλλαγής του μήκους ενός σώματος προς το αρχικό μήκος (l) του σώματος. Υπολογίζεται από την σχέση :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Γενικό διαγράμματα Τάσης – Παραμόρφωσης



Εικόνα 18. : Γενικό διαγράμματα Τάσης – Παραμόρφωσης

Αρχικά ο τμήμα της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης, που εκτείνεται από την αρχή μέχρι το όριο αναλογίας είναι η ελαστική περιοχή. Το τμήμα που εκτείνεται από το όριο αναλογίας μέχρι το σημείο θραύσης είναι η πλαστική περιοχή.

Στο διάγραμμα παρατηρείται ότι υπάρχει το σημείο σ_{ZA} . Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση που μπορεί να αναπτυχθεί κατά τη δοκιμή του εφελκυσμού, ώστε η τάση να είναι μια γραμμική συνάρτηση της παραμόρφωσης και ονομάζεται όριο αναλογίας. Ο προσδιορισμός του είναι ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία και εξαρτάται από την ευαισθησία του δυναμομέτρου.

Στη συνέχεια υπάρχει το όριο ελαστικότητας με τον χαρακτηρισμό σ_{ZE} . Το όριο ελαστικότητας είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να υποβληθεί ένα υλικό χωρίς να υποστεί μόνιμη (πλαστική) παραμόρφωση. Συμβολίζεται με R_e . Πάντοτε το όριο ελαστικότητας ταυτίζεται ή είναι μεγαλύτερο του ορίου αναλογίας του υλικού.

Ακόμη υπάρχει και το σημείο σ_{ZP} το οποίο ονομάζεται όριο διαρροής και είναι η τιμή της τάσης όπου η παραμόρφωση θα αυξάνεται χωρίς να αυξηθεί η τάση. Δηλαδή η τιμή από την οποία η παραμόρφωση παύει να είναι ελαστική και γίνεται πλαστική.

Μετά την πλαστική παραμόρφωση του υλικού, η καταπόνηση μπορεί να αυξηθεί μέχρι η τάση να φτάσει το όριο θραύσης $\sigma_{Z\Theta}$. Όριο θραύσης ονομάζεται η τάση κατά την οποία το δοκίμιο θα σπάσει. Φαίνεται να είναι μικρότερη από την αντοχή εφελκυσμού διότι η διατομή του δοκιμίου θεωρείται σταθερή ενώ στη πραγματικότητα μικραίνει.

Όριο Μέγιστης Αντοχής σε Εφελκυσμό -UTS

Το ανώτατο σημείο της καμπύλης του εφελκυσμού σημείο σ_{MAX} είναι γνωστό και ως όριο θραύσης του υλικού. Πρόκειται για την μέγιστη τάση του διαγράμματος και συμβολίζεται με το R_m . Κατά την εφελκυστική παραμόρφωση του δοκιμίου, η συνολική αντοχή του υλικού επηρεάζεται από δύο ανταγωνιστικά φαινόμενα. Πρώτον, τη μείωση της διατομής του δοκιμίου, με άμεσο αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής του και δεύτερον την ενδοτράχυνση που προκύπτει λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης του δοκιμίου, η οποία και αυξάνει την αντοχή του δοκιμίου. [16]

Τα φαινόμενα αυτά εμφανίζονται ταυτοχρόνως σε όλο το εύρος της πλαστικής παραμόρφωσης του δοκιμίου. Κατά την περιοχή από το όριο διαρροής έως το UTS, επικρατεί η ενδοτράχυνση του δοκιμίου. Στο σημείο της μέγιστης τάσης (UTS) εμφανίζεται ένα ιδιαίτερο φαινόμενο κατά το οποίο η επιμήκυνση και η ταυτόχρονη μείωση της διατομής να μην διανέμονται ομοιόμορφα σε όλο το ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας πολύ έντονης εγκάρσιας στένωσης, η οποία λέγεται λαιμός. [16]



στένωση, λαιμός
(necking)

Μέτρο Ελαστικότητας (ΜΕΤΡΟ Young)

Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας Young γίνεται πειραματικά με την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος μέχρι το όριο αναλογίας. Είναι δηλαδή το πηλίκο τάση αναλογίας προς την ανηγμένη παραμόρφωση και αποδίδει την ευκολία με την οποία ένα υλικό παραμορφώνεται εντός της ελαστικής του περιοχής. Αποτελεί πάντοτε φυσική ιδιότητα των υλικών και δεν μεταβάλλεται με οποιαδήποτε πειραματική συνθήκη. [16]

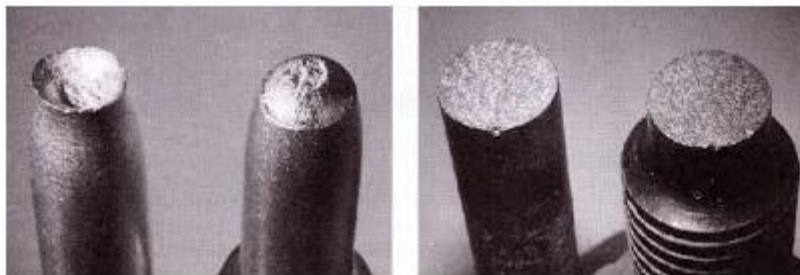
$$E = \frac{\left(\frac{F}{\sigma}\right)}{\left(\frac{DL}{L_0}\right)}, \text{σε } (Pa)$$

Ολκιμότητα

Η ολκιμότητα ενός μετάλλου είναι η ιδιότητα του μετάλλου να παραμορφώνεται μόνιμα ανεξάρτητα από το μέγεθος των φορτίων που εφαρμόστηκαν σε αυτό. Αποτελεί μια πολύ σπουδαία ιδιότητα των μεταλλικών υλικών, η οποία επηρεάζεται από τις πειραματικές παραμέτρους των μηχανικών δοκιμών.

Όλα τα στερεά υλικά, κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες με κριτήριο το είδος της μόνιμης παραμόρφωσης που μπορούν να υποστούν.

Έτσι, τα υλικά, τα οποία μετά την ελαστική παραμόρφωση τους υφίστανται και μόνιμες, πλαστικές καταπονήσεις ονομάζονται όλκιμα υλικά, ενώ εκείνα, τα οποία μετά την ελαστική παραμόρφωση, θραύονται ακαριαία, χωρίς να παραμορφωθούν μόνιμα, ονομάζονται ψαθυρά υλικά. [16]



Εικόνα 19 : Παραδείγματα όλκιμου και ψαθυρού υλικού



Θραύση όλκιμου υλικού
(ductile material)



Θραύση ψαθυρού υλικού
(brittle material)

Εικόνα 20 : Παραδείγματα θραύσης όλκιμου και ψαθυρού υλικού

Το πόσο ψαθυρό ή όλκιμο είναι ένα μέταλλο ,δεν μπορεί να οριστεί ως απόλυτη ιδιότητα του υλικού. Το βολφράμιο για παράδειγμα, , το οποίο είναι ψαθυρό σε θερμοκρασίες δωματίου, αντιθέτως είναι αρκετά όλκιμο σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Κάτω από ορισμένες συνθήκες υδροστατικής πίεσης, ένα μέταλλο που ενώ μπορεί να είχε ψαθυρή συμπεριφορά κατά τη δοκιμή του εφελκυσμού, μπορεί στη συνέχεια να γίνει αρκετά όλκιμο. [13],[16]

Επομένως, αρκετές φορές η συμπεριφορά ενός μετάλλου εξαρτάται και από τη συγκεκριμένη εντατική κατάσταση στην οποία υπόκειται. Υπάρχουν μέταλλα που σε θερμοκρασίες δωματίου δεχόμενα καταπονήσεις εφελκυστικές , έχουν όλκιμο χαρακτήρα ενώ όταν βρίσκονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες συμπεριφέρονται με ψαθυρό τρόπο. Συνεπώς, φαίνεται πως πολλοί εξωγενείς παράγοντες είναι υπεύθυνοι για την όλκιμη ή ψαθυρή συμπεριφορά των μετάλλων. [13],[16]

ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Διάβρωση ενός μετάλλου εννοούμε το σύνολο των πολύπλοκων χημικών φαινομένων, που λαμβάνουν χώρα σ' αυτό, υπό την επίδραση του άμεσου περιβάλλοντός του, και που οδηγούν στην αλλοίωση αυτού, και έχουν σαν αποτέλεσμα την αρνητική επίδραση στις φυσικές και χημικές ιδιοτήτές του.

Η διάβρωση των μετάλλων οδηγεί στην υποβάθμιση των κατασκευών ή και στη μείωση του χρόνου αντικατάστασης αυτών, με αποτέλεσμα το υψηλό κόστος συντήρησης ή/και αντικατάστασης των κατασκευών.

ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Για να γίνει κατανοητό πως δύο κράματα αλουμινίου τα οποία εφάπτονται διαβρώνονται, πρέπει να υπάρχει η αντίληψη ότι κάθε κράμα έχει διαφορετική αντοχή σε διάβρωση. Η διάβρωση μπορεί να επιταχυνθεί με τα γαλβανικά κελιά, τα οποία δημιουργούνται από σωματίδια που είναι ενσωματωμένα στο αλουμίνιο. Ανάλογα με το πόσο 'καθαρό' είναι ένα κράμα αλουμινίου, δηλαδή το ποσοστό περιεκτικότητας άλλων στοιχείων μέσα σε αυτό, κάθε κράμα διαβρώνεται λίγο, πολύ ή μπορεί και καθόλου. Το εμπορικής καθαρότητας αλουμίνιο διαβρώνεται σε σημαντικά σε μεγάλο βαθμό, το υπερκαθαρό αλουμίνιο δεν διαβρώνεται από διάλυμα οξέος σε αξιολογη έκταση και τέλος τα κράματα αλουμινίου με χαλκό διαβρώνονται σοβαρά. Το υπερκαθαρό αλουμίνιο (Al 99.99%) έχει ομογενή μορφή που σημαίνει ότι δεν έχει δεύτερη φάση. Επίσης είναι ένα μέταλλο στο οποίο δε μπορούν να δημιουργηθούν γαλβανικά κελιά. Έτσι το καθιστά ικανό να μπορεί να βυθιστεί σε αρκετά επιθετικούς ηλεκτρολύτες για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Καθώς το αλουμίνιο βυθίζεται, τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται δεν μπορούν εύκολα να βρουν περιοχές για να ανάγουν τα ιόντα υδρογόνου σε αέριο υδρογόνο.[17], [18], [19]

Το εμπορικής καθαρότητας αλουμίνιο όταν βρίσκεται μαζί με διαβρωτικό υγρό, θα διαβρωθεί σαφώς πιο εύκολα. Τα γαλβανικά κελιά θα δημιουργηθούν και αυτά ευκολότερα καθώς, το εμπορικής καθαρότητας αλουμίνιο περιέχει φάσεις αλουμινίου και πυριτίου. Για ορισμένους σκοπούς, ένα εμπορικής καθαρότητας αλουμίνιο περιεκτικότητας Al 99,5 % και Fe < 0,4 %, έχει αντιδιαβρωτική προστασία χάρη στο οξειδιακό στρώμα που το περιβάλλει. [18], [19]

Τα περισσότερα από τα κράματα διαμόρφωσης που δεν εμπεριέχουν χαλκό αλλά και το εμπορικής καθαρότητας αλουμίνιο, μπορούν να παρουσιάσουν μείωση της αντοχής σε διάβρωση ακόμα και σε αδύναμο περιβάλλον διάβρωσης όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε Fe (π.χ., Fe από 0,2% έως 0.7%). Το ίδιο πράγμα ισχύει για την περιεκτικότητα σε πυρίτιο, ειδικά στα κράματα αλουμινίου (Al)-μαγνησίου(Mg). Τα πιο ανθεκτικά κράματα αλουμινίου σε διάβρωση, είναι αυτά που περιέχουν μαγγάνιο αλλά και μαγνήσιο ως κύρια στοιχεία ανάμιξής τους. Τα παραπάνω κράματα καθώς και τα κράματα που εμπεριέχουν το πυρίτιο ως στοιχείο ανάμιξης, έχουν παρόμοιο ηλεκτροχημικό δυναμικό μέσα σε υγρά, συμπεριλαμβανομένου και του θαλάσσιου νερού, έτσι στη πιθανή επαφή τους να μην επιδεινώσουν τον κίνδυνο διάβρωσης. Κάτω από διαβρωτικές συνθήκες, κράματα που δεν περιέχουν ψευδάργυρο εάν βρεθούν σε επαφή με κράματα που περιέχουν ψευδάργυρο, θα έχουν πιο αρνητικό δυναμικό και θα διαβρωθούν. [17], [18], [19]

ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΛΟΓΩ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΤΑΣΕΩΝ

Όταν έχουμε απότομη κατάρρευση υλικού ,σε μερικά κραματικά συστήματα , μπορούμε να την ονομάσουμε διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων (stress corrosion cracking). Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να υπάρχουν παράλληλα τρεις παράγοντες :

- ❖ Α) Να υπάρχουν εφελκιστικές τάσεις
- ❖ Β) Να υπάρχει διαβρωτικό περιβάλλον
- ❖ Γ) Η μεταλλουργική δομή να υπόκειται σε διάβρωση

Για να υφίσταται η κατάρρευση με διάβρωση λόγω της επιβολής των τάσεων, δεν πρέπει κάποιος από τους παραπάνω παράγοντες να ελαχιστοποιηθεί.

Η κατάρρευση με διάβρωση λόγω επιβολής των τάσεων στο αλουμίνιο χαρακτηρίζεται ως περικρυσταλλική. Δεν μπορεί να συμβεί κατάρρευση με διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων σε όλα τα κράματα του αλουμινίου που υφίστανται περικρυσταλλική διάβρωση. Έχει παρατηρηθεί μόνο με τα κράματα υψηλών αντοχών όπως Al-Si-Mg, Al-Zn-Mg, - Al-Zn-Mg-Cu, Al-Cu και Al-Mg (Mg<3%). Στο καθαρό αλουμίνιο και στα κράματα Al-Si, Al-Mi δεν έχει παρατηρηθεί κατάρρευση με διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων. [18]

Η κατάρρευση με διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων σε κράματα του αλουμινίου είναι αρκετά συνδεδεμένη με την κατακρήμνιση στα όρια των κόκκων. Συνεπώς η σχετική αντίσταση των επιδεκτικών κραμάτων, μπορεί να επηρεαστεί από μεταλλουργική κατεργασία. [19]

Άλλοι τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει έλεγχος της κατάρρευσης με διάβρωση λόγω της επιβολής των τάσεων περιλαμβάνουν:

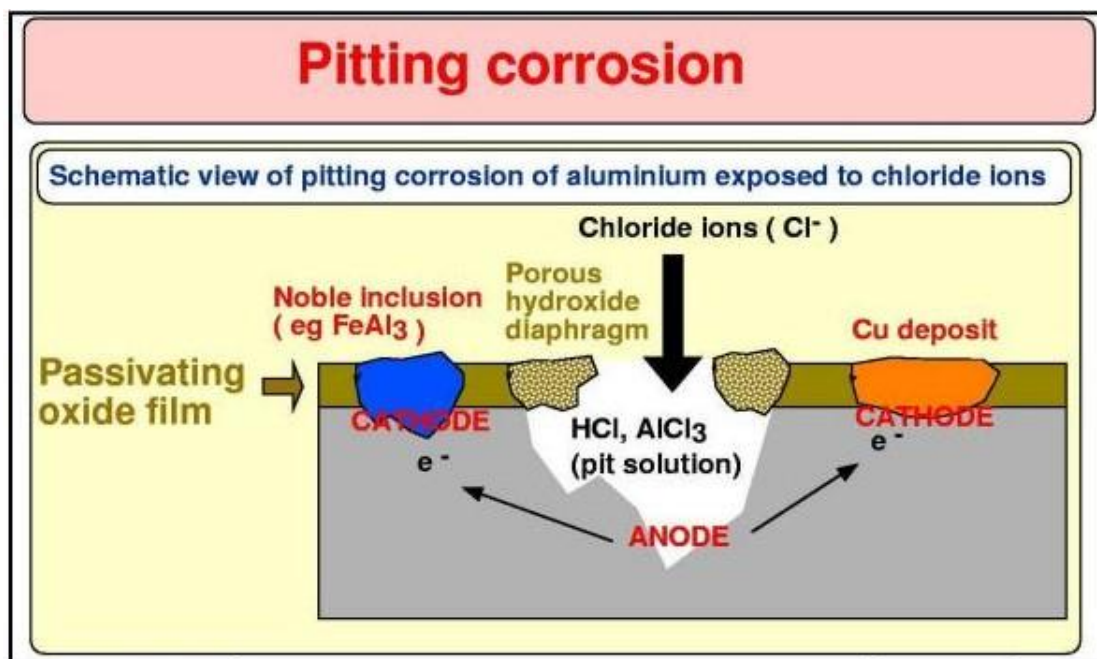
- μείωση των εσωτερικών τάσεων,
- κατάλληλο σχεδιασμό για τη μείωση των εφελκυστικών τάσεων κυρίως στις κρίσιμες διευθύνσεις,
- προστατευτικές επικαλύψεις, όπως επικάλυψη με Al (Alclad). [18]

ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕ ΟΠΕΣ (PITTING CORROSION)

Η πιο κοινή μορφή διάβρωσης στα προϊόντα αλουμινίου, είναι η διάβρωση με οπές. Η δημιουργία τους παρατηρείται εντός των τοπικών ασυνεχειών του λεπτού στρώματος οξειδίου, που περιβάλλει την επιφάνεια του κράματος, το οποίο είναι εκτεθειμένο στην ατμόσφαιρα, σε φρέσκο ή σε θαλάσσιο νερό ή και σε άλλους ουδέτερους ηλεκτρολύτες.

Το οξείδιο είναι ασταθές σε έντονα αλκαλικές ή οξειδωτικές συνθήκες συνεπώς οι οπές αρχίζουν να δημιουργούνται σε ένα εύρος pH που κειμένεται από 14 έως 9. Το μέγεθός τους ποικίλει, όπως επίσης και ότι μπορεί να είναι ευρέως εξαπλωμένες ή συγκεντρωμένες. Αυτό εξαρτάται από την ποιότητα του στρώματος οξειδίων, τη σύνθεση του κράματος, και τη φύση του διαβρωτικού.

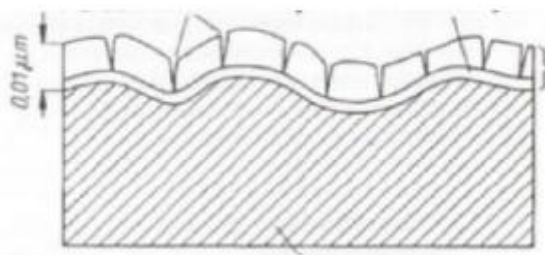
Όσο πιο καθαρό είναι ένα αλουμίνιο τόσο πιο ανθεκτικό θα είναι στη διάβρωση. Συνεπώς αντίσταση του αλουμινίου στη διάβρωση είναι στενά συνδεδεμένη με την καθαρότητα του. Η παρουσία άλλων κραματικών στοιχείων εκτός από Mg, Zn και Mn, αυξάνει την επιδεκτικότητα σε διάβρωση με οπές. Ο χαλκός και ο σίδηρος έχουν την μεγαλύτερη αρνητική επίπτωση στη αντοχή στη διάβρωση, συνεπώς τα κράματα αλουμινίου που περιέχουν αυτά τα δύο παραπάνω στοιχεία δεν είναι ανθεκτικά στη διάβρωση. [18]



Εικόνα 21: Παραδείγμα διάβρωσης με οπές κράματος αλουμινίου.

ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΟΞΕΙΔΙΩΝ

Η επιφάνεια του αλουμινίου είναι καλυμμένη με ένα λεπτό στρώμα οξειδίων. Το στρώμα αυτό είναι διαφανές και είναι υπεύθυνο για διατήρηση της μεταλλικής λαμπρότητας του αλουμινίου, σε αντίθεση με το κοκκινωπό οξείδιο σιδήρου.



Εικόνα 22 : Φυσικό στρώμα οξειδίου του αλουμινίου

Το φυσικό στρώμα οξειδίου του αλουμινίου αποτελείται από δύο στρώματα :

- α) ένα εξαιρετικά λεπτό και συμπαγές στρώμα που ονομάζεται στρώμα βάσης
- β) ένα ανώτερο στρώμα από αυτό της βάσης, το οποίο έχει πάχος από 0,005 μm ως 0,01 μm .

Γενικά στο αλουμίνιο , το στρώμα των οξειδίων αναπτύσσεται από μέσα προς τα έξω, επειδή έχει πιο μεγάλο όγκο άπ' το μέταλλο προέλευσής του. Παρουσιάζει όμως και μια μικρή ανάπτυξη προς τα μέσα, καταναλώνοντας έτσι το μεταλλικό υπόβαθρό του. Όταν βρίσκεται μόνο του , το οξείδιο του αλουμινίου θεωρείται καλός μονωτής. Στη περίπτωση που περιέχει κάποιο στοιχείο, όπως σίδηρο π.χ. θεωρείται ημιαγωγός καθώς αφήνει τα ηλεκτρόνια να περνούν σε βαθμό που επιφέρει την γαλβανική διάβρωση. Αυτό είναι δυνατόν να συμβεί ακόμη και μετά την ανοδίωση , δηλαδή την τεχνική αύξηση του πάχους του στρώματος οξειδίων. Συμπεραίνοντας , το στρώμα οξειδίων δε μπορεί να χαρακτηριστεί ως 'αδιαπέραστος τοίχος' , καθώς δε προφυλάσσει τελείως το αλουμίνιο από διάβρωση. [18]

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σαν πρώτη ύλη για τον σχηματισμό των δοκιμίων μας χρησιμοποιήθηκαν 2 ράβδοι αλουμινίου μήκους $L=3\text{m}$ και διαμέτρου $D1=20\text{mm}$ (για τις δοκιμές κόπωσης) και $D2=6\text{mm}$ (για τις δοκιμές εφελκυσμού) .



Εικόνα 23 : Παραδείγματα αρχικής μορφής του υλικού μας .

Έπειτα το υλικό μας επεξεργάστηκε στην εργαλειομηχανή του τόρνου ώστε να εφαρμοστεί στις μηχανές δοκιμής του Εφελκυσμού και της κόπωσης.



Εικόνα 24 : Εργαλειομηχανή (Τόρνος) Celtic Model 14 .

Αφού τα επεξεργαστούμε , τα δοκίμια έρχονται προς την τελική τους μορφή,



Εικόνα 25 : Τελική μορφή δοκιμίων (Αριστερά τα δοκίμια για την δοκιμή σε εφελκυσμό-Δεξιά τα δοκίμια για δοκιμή σε κόπωση.)

Πριν τοποθετήσουμε τα δοκίμια στις μηχανές δοκιμής , μετρήσαμε την μάζα τους και τα τοποθετήσαμε σε υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου (αλάτι) γραμμομοριακότητας κατ' όγκο – Molarity C- και έπειτα μετρήσαμε την μάζα τους ξανά για να διαπιστώσουμε αν αυτή έχει μεταβληθεί .

Molarity C :

$$C = \frac{n}{V}$$

n = τα moles της διαλυμένης ουσίας (mol)

V = ο όγκος του διαλύματος (L)

Για τον υπολογισμό πρέπει να υπολογίσουμε τα mol της διαλυμένης ουσίας .

$$381 \text{ g NaCl} \times \frac{1 \text{ mol NaCl}}{58.44 \text{ g NaCl}} = 6.50 \text{ mol NaCl}$$

Μοριακή μάζα NaCl=58.44 g/mol

Στη συνέχεια αντικαθιστούμε στον τύπο της γραμμομοριακότητας τα δεδομένα:

$$C = \frac{n}{V} = \frac{6.50 \text{ mol NaCl}}{5 \text{ L solution}} = 1,3 \text{ mol/L.}$$

Ο ακόλουθος πίνακας καταγράφει τις μάζες των δοκιμίων πριν αυτά εμβαπτιστούν στο υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου.

α/α	ΚΟΠΩΣΗ	ΕΦΕΛΚΙΣΜΟΣ
1	39,43	12,01
2	38,92	12,01
3	39,1	12,02
4	39,26	12,01
5	39,16	12,03
6	39,4	12,01
7	38,9	12
8	39,41	12
9	39,71	12,01
10	39,7	11,99
11	39,53	12,03
12	38,99	12

Ο ακόλουθος πίνακας καταγράφει τις μάζες των δοκιμίων αφού αυτά εμβαπτιστούν στο υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου και παραμένουν σ' αυτό για ένα μήνα.

α/α	ΚΟΠΩΣΗ	ΕΦΕΛΚΙΣΜΟΣ
1	39,41	12,01
2	38,90	12,00
3	39,09	12,01
4	39,25	12,01
5	39,15	12,02
6	39,39	12,00

Ο ακόλουθος πίνακας καταγράφει τις μάζες των δοκιμίων αφού αυτά εμβαπτιστούν στο υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου και παραμένουν σ' αυτό για δύο μήνες.

α/α	ΚΟΠΩΣΗ	ΕΦΕΛΚΙΣΜΟΣ
7	38,89	11,99
8	39,40	11,99
9	39,70	11,99
10	39,69	11,97
11	39,51	12,01
12	38,97	11,99

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΦΕΛΚΙΣΜΟΥ

Για το πείραμα του εφελκυσμού τοποθετήσαμε τα δοκίμια πάνω στην ειδική μηχανή του πειράματος .



Η πειραματική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των δοκιμών εφελκυσμού είναι η GALDABINI Quasar 100 . Η συγκεκριμένη μηχανή διαθέτει πληθώρα εξαρτημάτων , τα οποία χρησιμεύουν για τη συγκράτηση των δοκιμίων που είναι προς εξέταση κάθε φορά . Ανάλογα με το είδος της δοκιμής που έχουμε να κάνουμε, αλλά και το μέγεθος και το σχεδιασμό των δοκιμίων που θα εξεταστούν , θα γίνει η επιλογή των κατάλληλων εξαρτημάτων , μέσω των οποίων γίνεται η συγκράτηση των δοκιμίων από τις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού.

Στην περίπτωση των δικών μας δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν ειδικές διατάξεις (αρπάγες) για την συγκράτηση των δοκιμίων



Εικόνα 26 : Μηχανή δοκιμής εφελκυσμού (Quasar 100).

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

Εικόνα 27 : Ιδιότητες μηχανής δοκιμής εφελκυσμού (Quasar 100).

Πριν την τοποθέτηση των δοκιμίων πάνω στο μηχάνημα καταγράψαμε σε πίνακα τα στοιχεία των δοκιμίων

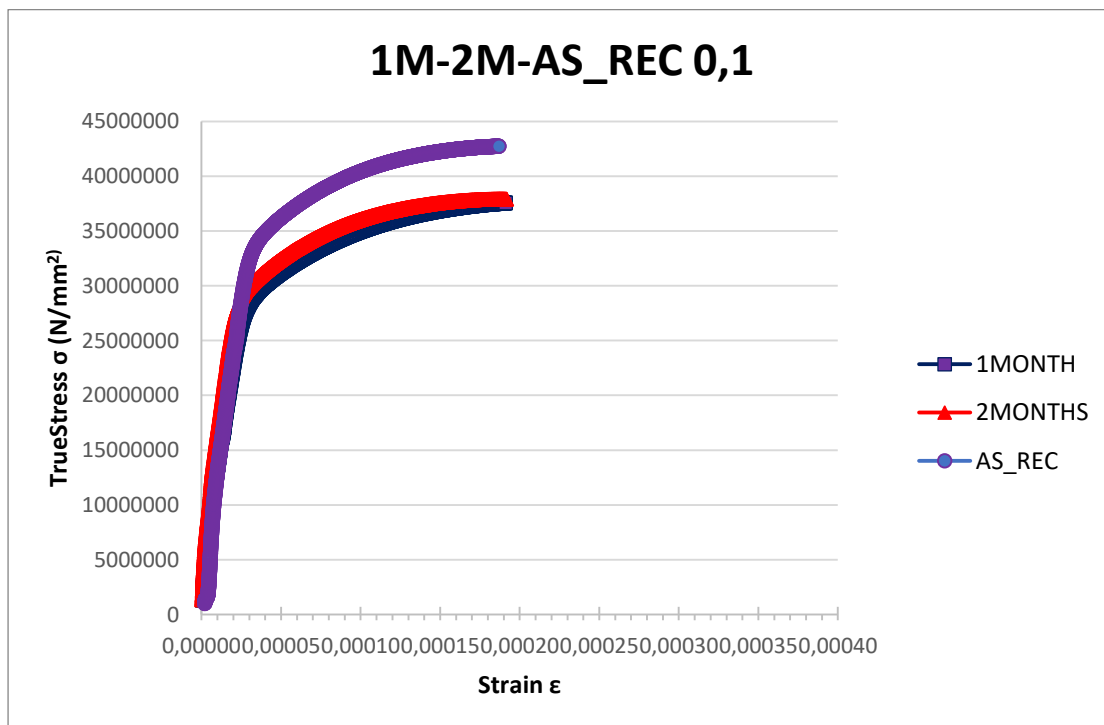
Κατεργασία	Do(mm)	Dt(mm)	l	Strain rate(sec ⁻¹)	Αρ. Δοκιμών
As received	6	5	106	0,1	A1
1 month	6	4,5	95	0,1	N3
1 month	6	4,6	109	0,1	N5
2 months	6		107	0,1	N10
2 months	6	4,7	110	0,1	N11
As received	6	5	113	0,01	A2
1 month	6	4,8	112	0,01	N6
1 month	6	4,6	111	0,01	N2
2 months	6	5	114	0,01	N8
2 months	6	5	111	0,01	N7
As received	6		111	0,001	A3

As_received : Ακατέργαστο δοκίμιο

1_Month : Δοκίμιο εμβαπτισμένο στο υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου και παραμένει σ' αυτό για ένα μήνα

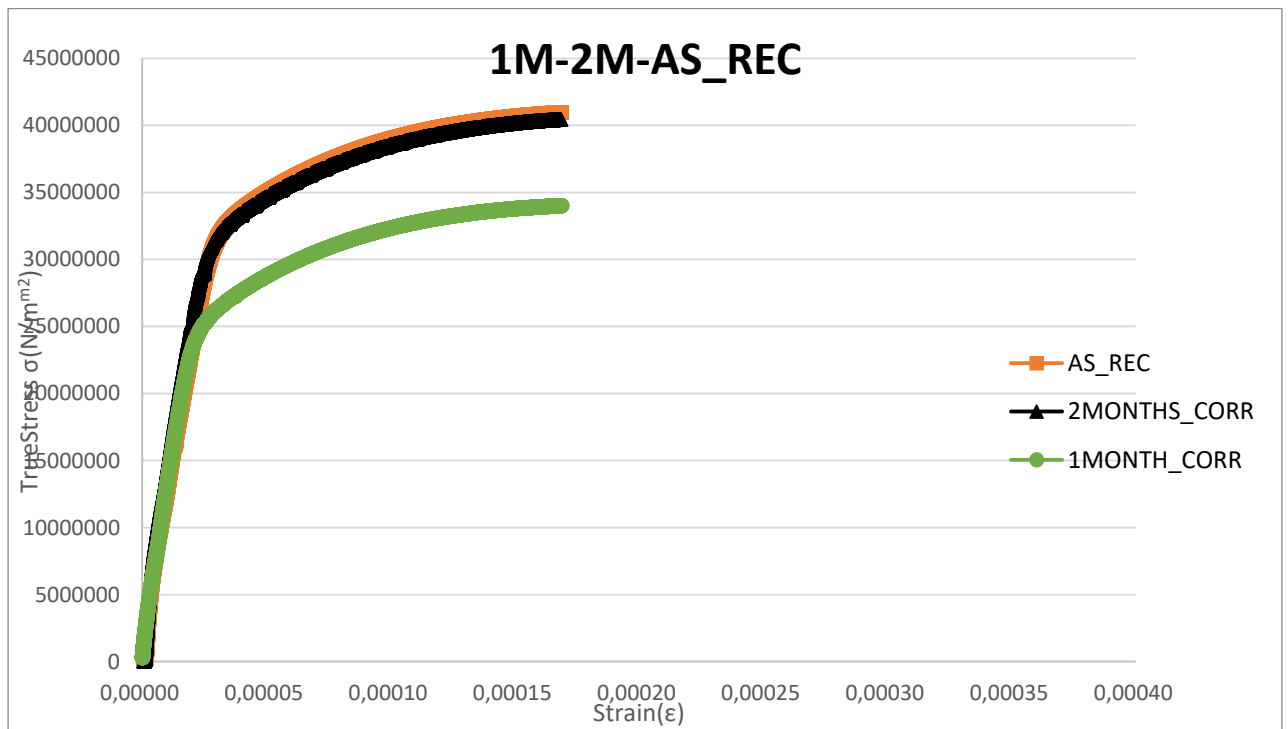
2_Month : Δοκίμιο εμβαπτισμένο στο υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου και παρέμεινε σ' αυτό για δύο μήνες.

Αφού ολοκληρώθηκε η πειραματική διαδικασία έγινε η συλλογή και στη συνέχεια η επεξεργασία των μετρήσεων. Από την επεξεργασία προέκυψαν τα ακόλουθα διαγράμματα .



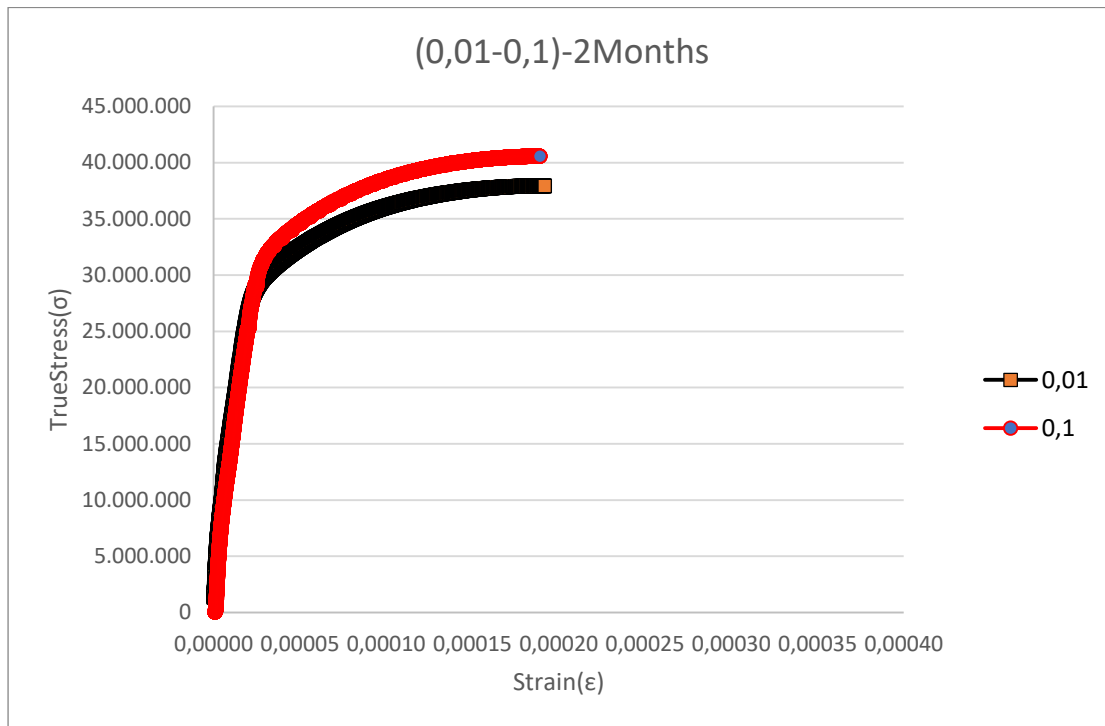
Διάγραμμα 1 : Καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού τριών δοκιμίων με ρυθμό ανοιγμένης παραμόρφωσης $0,1 \text{ sec}^{-1}$

Στο διάγραμμα 1 απεικονίζονται οι καμπύλες μονοαξονικού εφελκυσμού των 3ων δοκιμίων AS_REC , 1 MONTH_CORR , 2 MONTH_CORR . Και τα 3 δοκίμια παραμορφώνονται υπό σταθερό ρυθμό ανοιγμένης παραμόρφωσης $0,1 \text{ sec}^{-1}$. Όπως παρατηρείται το ακατέργαστο δοκίμιο εμφάνισε ανώτερη τιμή μέγιστης αντοχής σε σχέση με τα διαβρωμένα δοκίμια του ενός και δύο μηνών , ενώ αντίθετα η ολκιμότητα του μειώθηκε ελαφρά σε σχέση με των δυο άλλων.



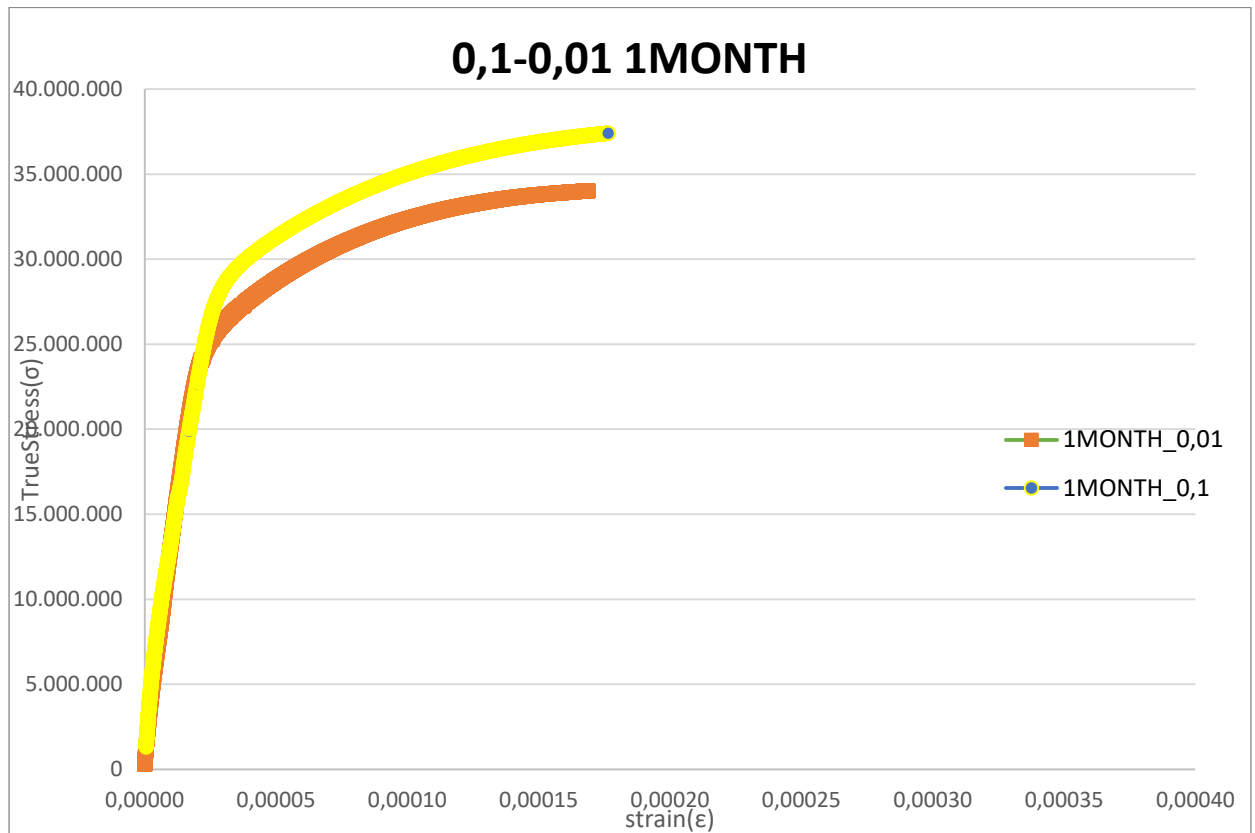
Διάγραμμα 2 : Καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού τριών δοκιμίων με ρυθμό ανοιγμένης παραμόρφωσης $0,01 \text{ sec}^{-1}$

Στο διάγραμμα 2 απεικονίζονται οι καμπύλες μονοαξονικού εφελκυσμού των τριών δοκιμίων AS_REC , 1 MONTH_CORR , 2 MONTH_CORR . Και τα 3 δοκίμια παραμορφώνονται υπό σταθερό ρυθμό ανοιγμένης παραμόρφωσης $0,01 \text{ sec}^{-1}$. Παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με το διάγραμμα 1 , όπου πιθανώς τα διαβρωτικά ιόντα του διαλύματος διαμέσου των ορίων των κόκκων , διάβρωσαν εκτός της επιφάνειας και το εσωτερικό της κρυσταλλικής δομής των υλικών , υποβιβάζοντας τις ιδιότητάς τους .



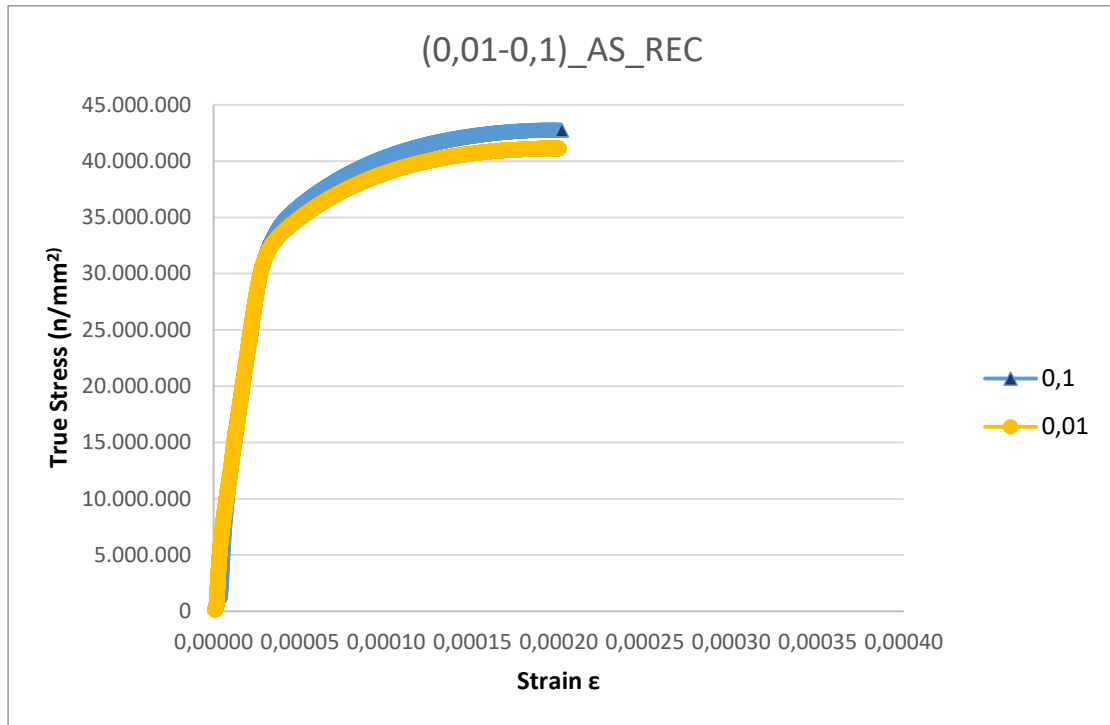
Διάγραμμα 3 : Καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού διαβρωμένων κραμάτων αλουμινίου σειράς 2007 για δύο μήνες

Στο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων απεικονίζονται καμπύλες μονοαξονικού εφελκυσμού διαβρωμένων κραμάτων αλουμινίου σειράς 2007 για δύο μήνες σε υδατικό διαβρωτικό περιβάλλον χλωριούχου νατρίου γραμμοχωρητικότητας $C=1.3$. Από τις δύο καμπύλες είναι σαφές ότι η καμπύλη του δοκιμίου με ρυθμό φόρτισης υψηλότερο σε σχέση με το άλλο εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή UTS ενώ η ολκιμότητα των δύο παραμένει πρακτικά αμετάβλητη. Η μηχανική καταπόνηση υπό συνθήκες διάβρωσης (SCC) είναι πολύ εντονότερη λόγω της διάβρωσης σε σχέση με την απλή μηχανική καταπόνηση ειδικά για μεταλλικά διμερή κράματα. Κατά τη φόρτιση των δύο δοκιμίων , μετά το όριο διαρροής τους οι διαταραχές κινούνται γρηγορότερα και πολλαπλασιάζονται μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Στη περίπτωση του υψηλού ρυθμού ανοιγμένης παραμόρφωσης το φαινόμενο είναι εντονότερο σε σχέση με τον αργό ρυθμό. Τα διαβρωτικά ιόντα διαχέονται στο εσωτερικό του υλικού διαμέσου των ορίων των κόκκων οι οποίοι αποτελούν και χαρακτηριστικά σημεία εμπόδισης της κίνησης των διαταραχών διαμέσου των κόκκων .



Διάγραμμα 4 : Καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού διαβρωμένων κραμάτων αλουμινίου σειράς 2007 για έναν μήνα.

Στο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων απεικονίζονται καμπύλες μονοαξονικού εφελκυσμού διαβρωμένων κραμάτων αλουμινίου σειράς 2007 για έναν μήνα σε υδατικό διαβρωτικό περιβάλλον χλωριούχου νατρίου γραμμοχωρητικότητας $C=1.3$. Από τις δύο καμπύλες είναι σαφές ότι η αύξηση του ρυθμού ανηγμένης παραμόρφωσης συνετέλλεσαι στην αύξηση του UTS του υλικού ενώ αντίθετα δεν επηρέασε σημαντικά την ολκιμότητα του δοκιμίου.

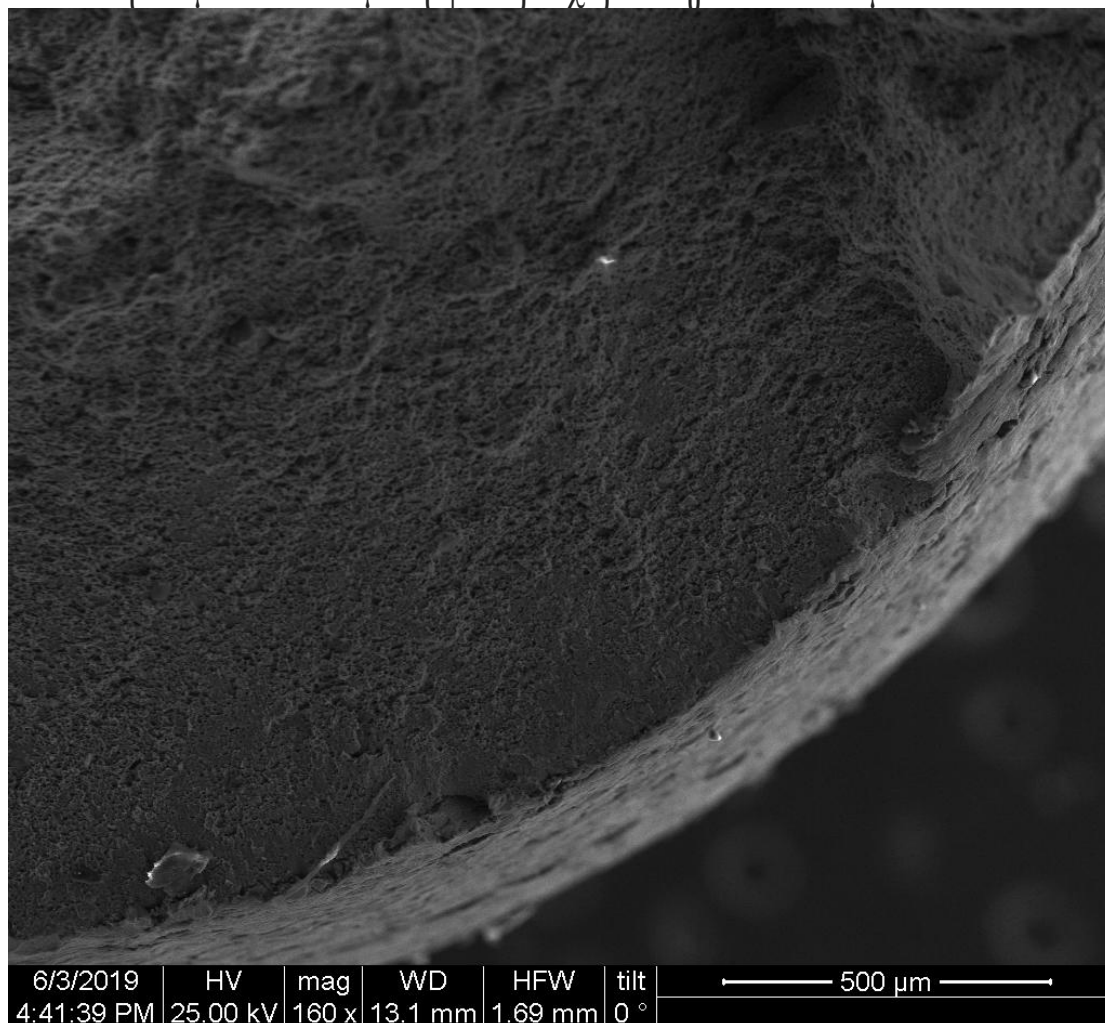


Διάγραμμα 5 : Καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού διαβρωμένων κραμάτων αλουμινίου σειράς 2007 για έναν μήνα

Στο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων απεικονίζονται καμπύλες μονοαξονικού εφελκυσμού μη-διαβρωμένων κραμάτων αλουμινίου σειράς 2007. Αυτό που παραμορφώθηκε με υψηλότερο βαθμό ανηγμένης παραμόρφωσης εμφανίζει μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή η οποία πιθανώς οφείλεται στον αυξημένο βαθμό ενδροτράχυνσης λόγω της αύξησης της κίνησης και της πυκνότητας των διαταραχών στο δοκίμιο.

Συγκριτικά στα τρία διαγράμματα παρατηρείται ότι τα ακατέργαστα δοκίμια έχουν υψηλότερη μηχανική αντοχή σε σχέση με τα διαβρωμένα που πιθανώς οφείλεται στη δημιουργία επιφανειακών ατελειών λόγω της διάβρωσης όπως βελονοειδείς ρωγμές ή κρατήρες.

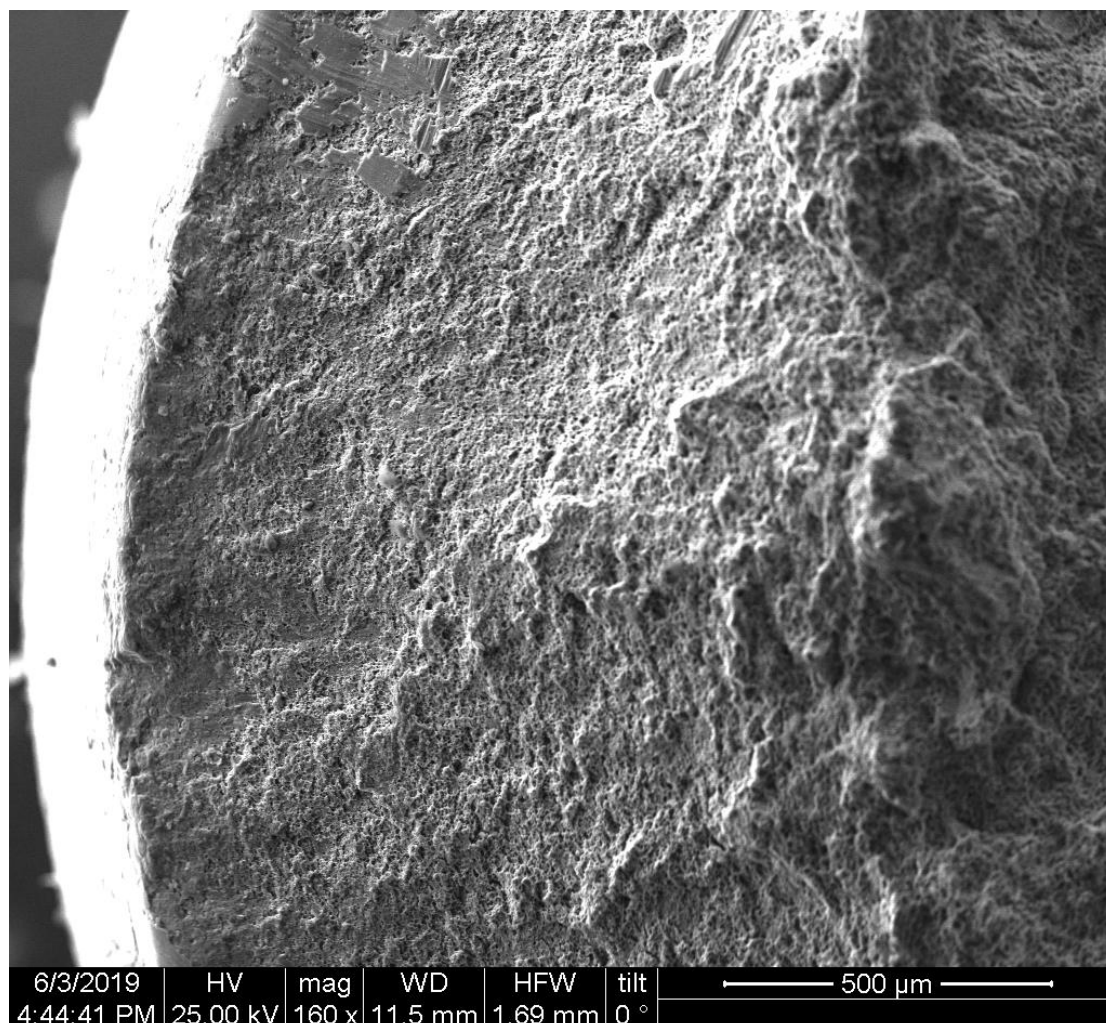
Μετά το πέρας των μετρήσεων τα δοκίμια στάλθηκαν στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ" για να γίνει ανάλυση με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) . Με την ανάλυση αυτή μπορούμε να διακρίνουμε τυχόν ρωγμές , κρατήρες αλλά και να κατανοήσουμε τον όγκιμο ή ψαθυρό χαρακτήρα του δοκιμίου .



Εικόνα 28 : Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου Al2007 το οποίο διαβρώθηκε ένα μήνα σε υδατικό διάλυμα NaCl

Αποτελεί φωτογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης στην επιφάνεια θραύσης δοκιμίου Al2007 το οποίο διαβρώθηκε ένα μήνα σε υδατικό διάλυμα NaCl , $M=1,3$ και εν συνεχεία υπαίστει μονοαξονικό εφελκισμό με ρυθμό ανηγμένης παραμόρφωσης 10^{-1} sec^{-1} . Όπως παρατηρείται η εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου εμφανίζει περιοχές μειωμένου όγκιμου χαρακτήρα (λύες περιοχές) οι οποίες προς το εσωτερικό περιορίζονται. Κυριαρχεί η όγκιμη θραύση με έντονο

ανάγλυφο και ύπαρξη μικροκρατήρων στην εξωτερική στοιβάδα της επιφάνειας μέχρι βάθος 500μm και είναι έντονες οι μικρορογμές του δοκιμίου.



Εικόνα 29 : Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου Al2007 το οποίο διαβρώθηκε ένα μήνα σε υδατικό διάλυμα NaCl.

Αποτελεί φωτογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης στην επιφάνεια θραύσης δοκιμίου Al2007 το οποίο διαβρώθηκε ένα μήνα σε υδατικό διάλυμα NaCl , $M=1,3$ και εν συνεχεία υπαίσκει μονοαξονικό εφελκισμό με ρυθμό ανηγμένης παραμόρφωσης 10^{-2} sec^{-1} . Παρατηρείται η ύπαρξη λείων περιοχών και έντονων μικρορογμών στην εξωτερική περιφέρεια της επιφάνειας θραύσης μέχρι το βάθος των 500μm προς το εσωτερικό. Στο εσωτερικό κυριαρχεί όλκιμη θραύση με πολύ έντονο ανάγλυφο και μικροκρατήρες.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΟΠΩΣΗΣ

Για το πείραμα του εφελκυσμού τοποθετήσαμε τα δοκίμια πάνω στην ειδική μηχανή του πειράματος .



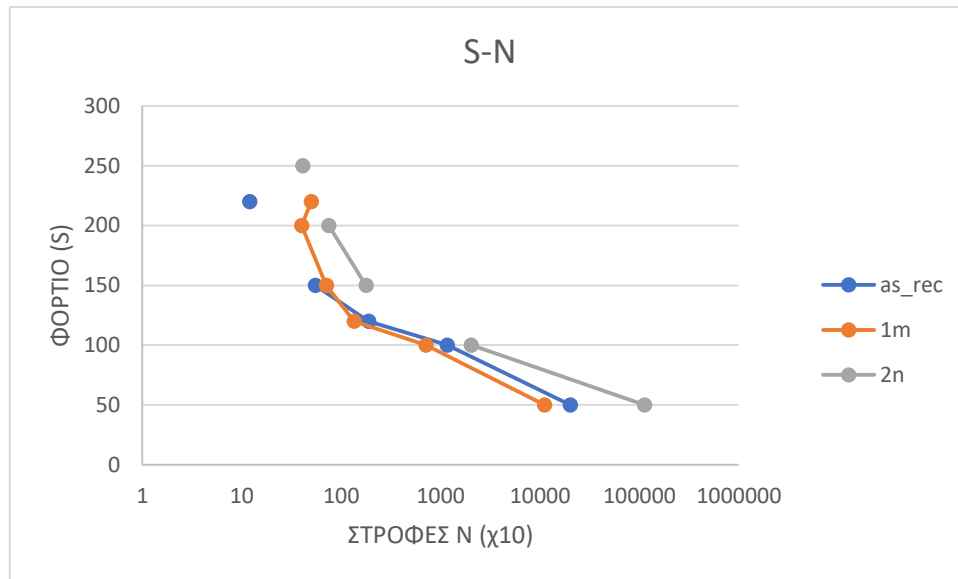


Εικόνα 30 : Μηχάνη δοκιμής κόπωσης (Maguina Ensayo)

Μετά την τοποθέτηση των δοκιμίων πάνω στο μηχάνημα καταγράψαμε σε πίνακα τα αποτελέσματα των δοκιμών.

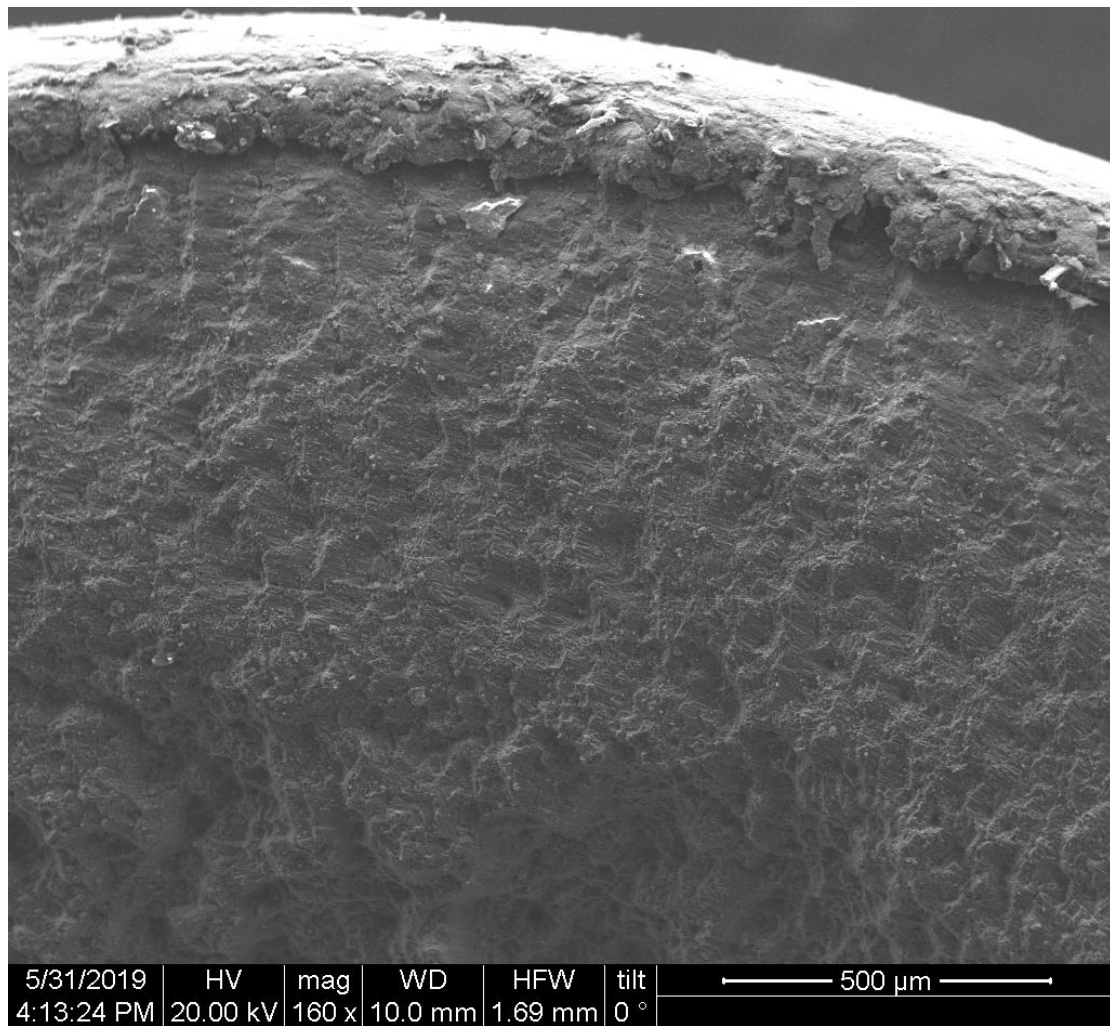
ΦΟΡΤΙΟ	ΣΤΡΟΦΕΣx10		
	AS_REC	1M	2M
50			112643
100	20186	11106	2031
120	1165	712	
150	189	135	178
200	55	71	75
220		40	
250	12	50	41

Από την επεξεργασία προέκυψε το ακόλουθο διαγράμμα .



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ : Καμπύλη S-N

Μετά το πέρας των μετρήσεων τα δοκίμια στάλθηκαν στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ" για να γίνει ανάλυση με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) . Με την ανάλυση αυτή μπορούμε να διακρίνουμε τυχόν ρωγμές , κρατήρες αλλά και να κατανοήσουμε τον όλκιμο ή ψαθυρό χαρακτήρα του δοκιμίου .

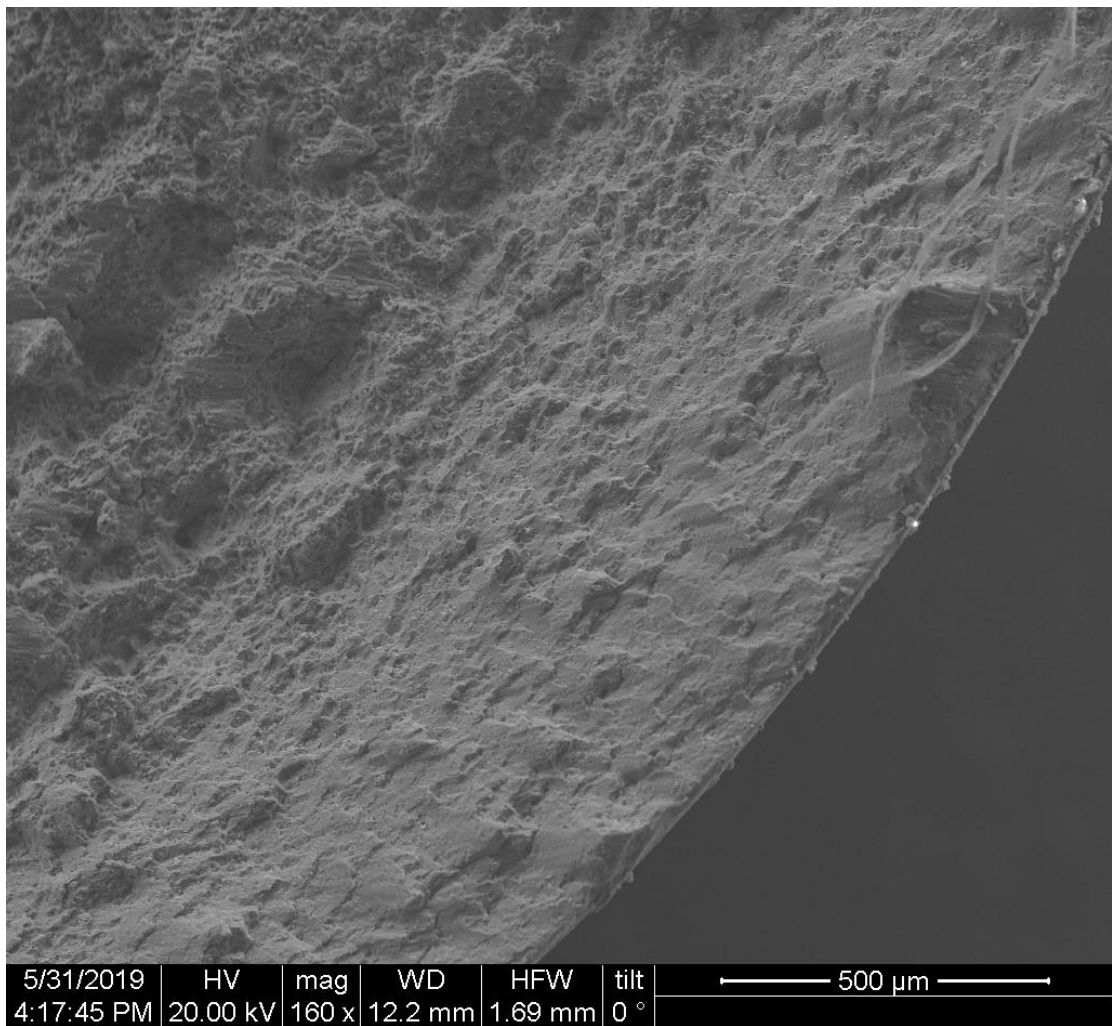


Εικόνα 31 : κόπωση σε φορτίο 200N ακατέργαστου δοκιμίου.

Η **Εικόνα 31** αποτελεί φωτογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης στην επιφάνεια θραύσης ακατέργαστου δοκιμίου μετά από κόπωση σε φορτίο 200N.

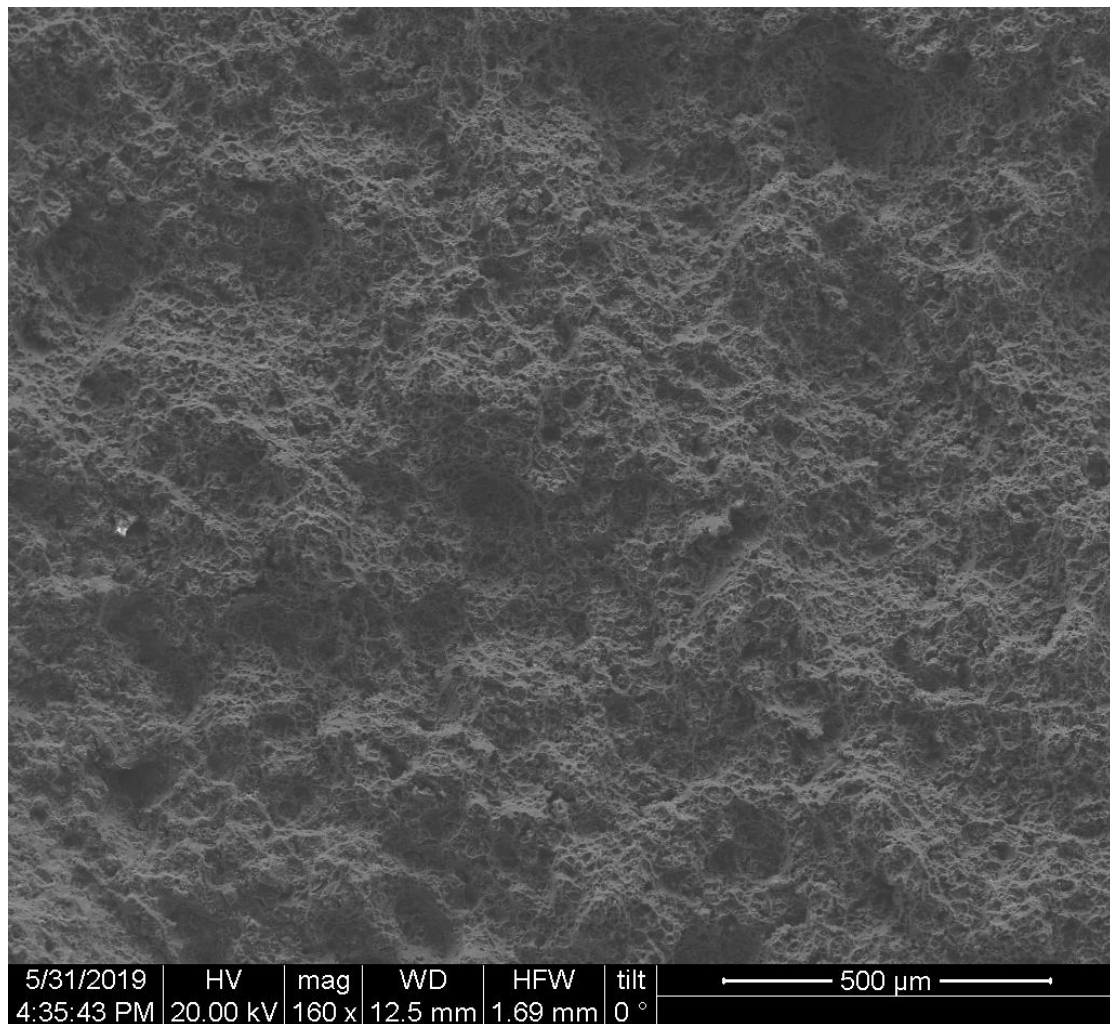
Είναι εμφανές ότι στη φωτογραφία κυριαρχεί ο όλκιμος χαρακτήρας της θραύσεως λόγω των χαρακτηριστικών έντονων ανάγλυφων επιφανειών ενώ κινούμενοι από την εξωτερική επιφάνεια προς το εσωτερικό είναι ορατή η έντονη πλαστική παραμόρφωση της περιφέρειας λόγω των υψηλότερων τιμών τάσεως λόγω κάμψης.

Το σημείο στο οποίο επήλθε η θραύση του δοκιμίου είναι στο σημείο της πάκτωσης του όπου και εμφανίζεται η μέγιστη ροπή κάμψης.



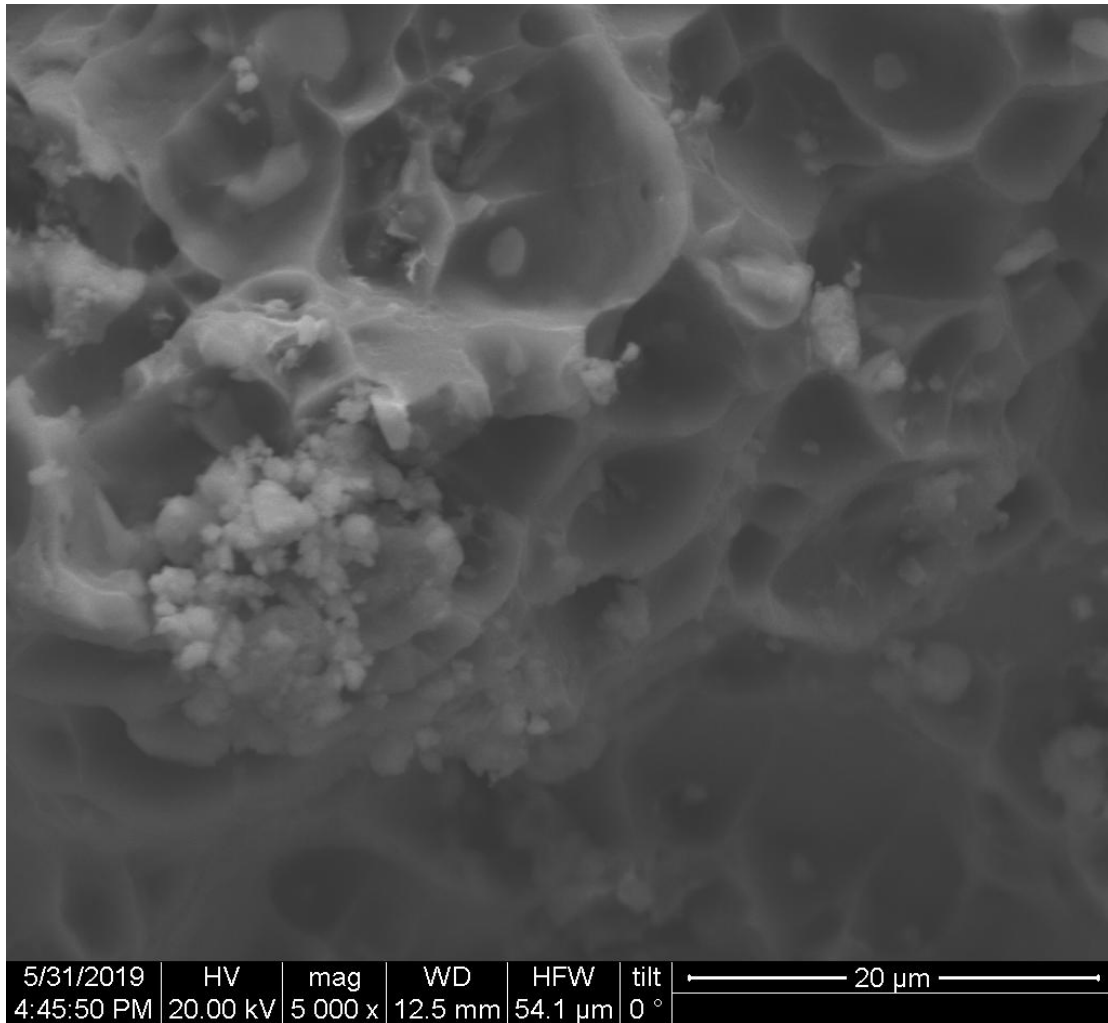
Εικόνα 32 : Κόπωση σε φορτίο 200N δοκιμίου διαβρωμένου για 2 μήνες.

Η Εικόνα 32 αποτελεί μεταλλογραφία θραύσεως ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης διαβρωμένου δοκιμίου ενός μήνα σε υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου (molarity υλικού) . Από την εικόνα παρατηρείτε ότι στο υλικό εμφανίζονται εξωτερικά και για τα πρώτα 400 μικρά μια περιοχή έντονης ψαθυρής περικρυσταλικής θραύσεως ενώ στις εσωτερικές στιβάδες είναι έντονα ορατό το φαινόμενο μικροκρατήρων γεγονός που υποδηλώνει πιθανότατα τον όγκιμο χαρακτήρα της θραύσεως.



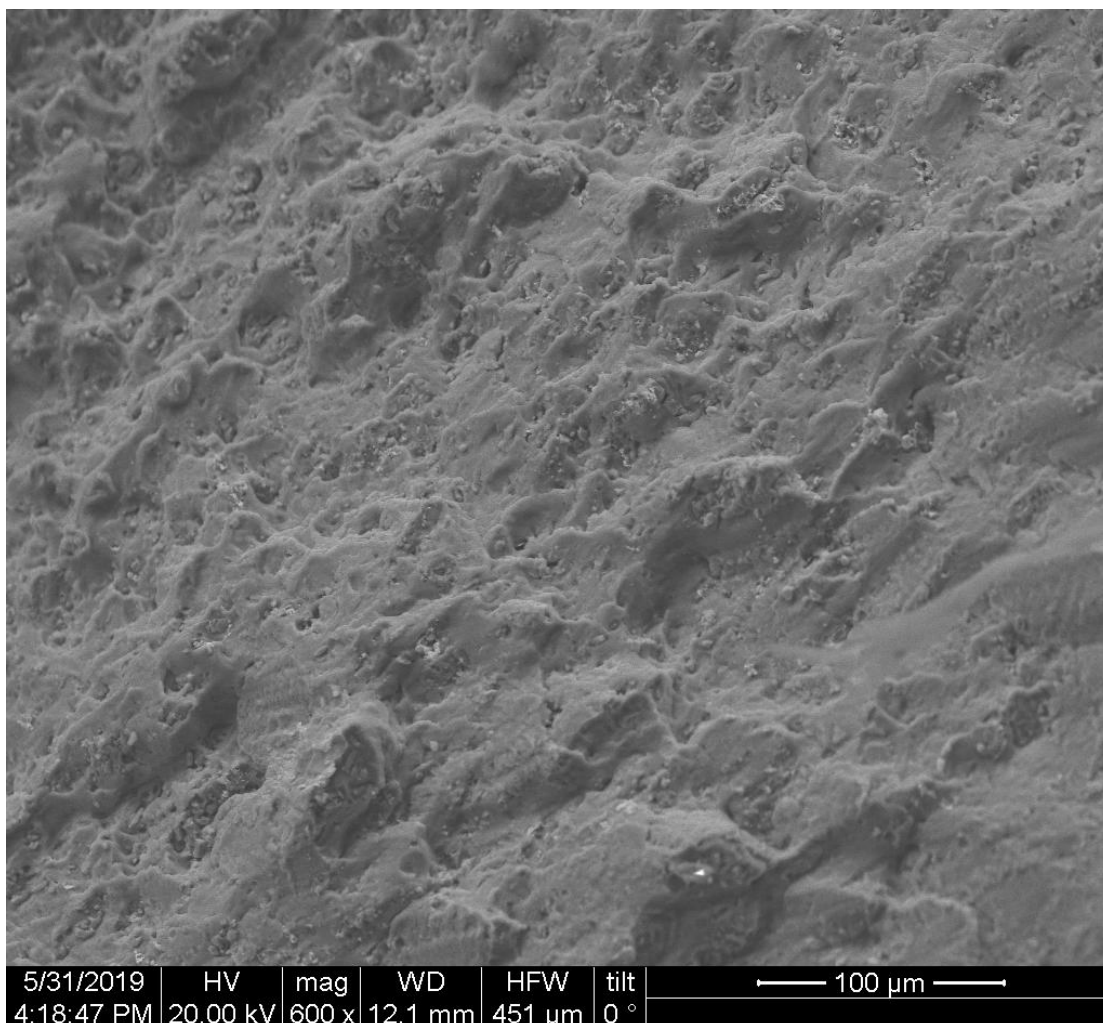
Εικόνα 33 : Κόπωση σε φορτίο 200N δοκιμίου διαβρωμένου για 1 μήνα.

Η **Εικόνα 33** αποτελεί φωτογραφία της επιφάνειας θραύσεως ηλεκτρονικού μικροσκοπίου θραύσεως υπό συνθήκες κόπωσης 200N όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και στη συγκεκριμένη η θραύση επήλθε στο σημείο της εμφανίσεως της μέγιστης ροπής λόγω κάμψης . Το υλικό διαβρώθηκε για ένα μήνα σε υδατικό περιβάλλον χλωριούχου νατρίου . Στην εικόνα είναι εμφανής η ύπαρξη περιοχών όλκιμης θραύσης με τον σχηματισμό μικροκρατήρων ενώ στα όρια της περιφέρειας του δοκιμίου παρατηρούνται περιοχές ψαθυρής θραύσης οι οποίες πιθανότατα αποδίδονται σε μηχανισμούς αγκύρωσης της κίνησης των διαταραχών απ' τα απορροφημένα διαβρωτικά άτομα χλωρίου.



Εικόνα 34: κόπωση σε φορτίο 200N δοκιμίου διαβρωμένου για 1 μήνα.

Η **Εικόνα 34** αποτελεί μεγέθυνση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου διαβρωμένου σε 2 μήνες σε υδατικό διάλυμα χλωρίου $M=$. Έχει ληφθεί από τις κεντρικές στιβάδες του δοκιμίου σε απόσταση $1500\mu m$ απ' την εξωτερική περιφέρεια του δοκιμίου. όπως παρατηρείται ο χαρακτήρας της θραύσεως είναι αμυδρός όλκιμος και με την εμφάνιση ανάγλυφου και μικροκρατηρών στο εσωτερικό των οποίων εμφανίζονται ξένα σώματα των οποίων η χημική ανάλυση δηλώνει την ύπαρξη προϊόντων διάβρωσης των μεταλλικών στοιχείων του κράματος. Η αύξηση του χρόνου έκθεσης του κράματος στο διαβρωτικό περιβάλλον πιθανώς οδήγησε στην εντονότερη διάχυση διάμεσου των κόκκων των διαβρωτικών ατόμων στις εσωτερικές στιβάδες του δοκιμίου και την ανάπτυξη στο εσωτερικό του δοκιμίου προϊόντων διάβρωσης παρά το γεγονός ότι ο μηχανισμός θραύσεως παραμένει όλκιμος.



Εικόνα 35 : Κόπωση σε φορτίο 100N δοκιμίου διαβρωμένου για 2 μήνες.

Η **Εικόνα 35** αποτελεί μεγέθυνση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου διαβρωμένου σε 2 μήνες σε υδατικό διάλυμα χλωρίου $M= 1,3$ σε απόσταση 100μ από την περιφέρεια του δοκιμίου . Στην εικόνα είναι εμφανής η ύπαρξη περιοχών έντονης περικρυσταλικής θραύσεως (λείες περιοχές) οι οποίες πιθανόν να οφείλονται στην αύξηση της ψαθυρωτητας του κράματος στις εξωτερικές στιβάδες λόγω της υψηλότερης διάχυσης και συγκέντρωσης διαβρωτικών ατόμων στις επιφανειακές στιβάδες και λιγότερο στη κυρίως μάζα του υλικού.

Συμπεράσματα

Όταν ένα πείραμα ολοκληρώνεται, ο ερευνητής έχει την δυνατότητα να εκτιμήσει αν τα στοιχεία και τα δεδομένα που χρησιμοποίησε για την διεξαγωγή της έρευνας σχετίζονται με τον σκοπό για τον οποίο εκτελέστηκε και αν μπορούν τα στοιχεία αυτά να εξάγουν συμπεράσματα. Στην συγκεκριμένη πτυχιακή έγινε μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων κράματος αλουμινίου και συγκεκριμένα η αντοχή του κράματος αλουμινίου 2007, μέσω καταπόνησης πειραματικών δοκιμίων με την μέθοδο της κόπωσης και του εφελκυσμού.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν μετά από σύγκριση των μη διαβρωμένων δοκιμίων – as_received, με των διαβρωμένων δοκιμίων 1_Month και 2_Month είναι :

Για τον Εφελκυσμό :

- Τα ακατέργαστα δοκίμια έχουν υψηλότερη μηχανική αντοχή σε σχέση με τα διαβρωμένα που πιθανώς οφείλεται στη δημιουργία επιφανειακών ατελειών λόγω της διάβρωσης όπως βελονοειδείς ρωγμές ή κρατήρες.
- Ανεξάρτητα με τον ρυθμό ανοιγμένης παραμόρφωσης , κυριαρχεί η όλκιμη θραύση με έντονο ανάγλυφο και ύπαρξη μικροκρατήρων στην εξωτερική στοιβάδα της επιφάνειας μέχρι βάθος 500μm και είναι έντονες οι μικρορογμές του δοκιμίου.

Για την Κόπωση :

- Είναι εμφανές ότι κυριαρχεί ο όλκιμος χαρακτήρας της θραύσεως λόγω των χαρακτηριστικών έντονων ανάγλυφων επιφανειών ενώ κινούμενοι από την εξωτερική επιφάνεια προς το εξωτερικό είναι ορατή η έντονη πλαστική παραμόρφωση της περιφέρειας λόγω των υψηλότερων τιμών τάσεως λόγω κάμψης. Το σημείο στο οποίο επήλθε η θραύση του δοκιμίου είναι στο σημείο της πάκτωσης του όπου και εμφανίζεται η μέγιστη ροπή κάμψης.

- Για τα πρώτα 400 μικρά υπάρχει μια περιοχή έντονης ψαθυρής περικρυσταλικής θραύσεως ενώ στις εσωτερικές στιβάδες είναι έντονα ορατό το φαινόμενο μικροκρατήρων γεγονός που υποδηλώνει πιθανότατα τον όλκιμο χαρακτήρα της θραύσεως.
- Η αύξηση του χρόνου έκθεσης του κράματος στο διαβρωτικό περιβάλλον πιθανώς οδήγησε στην εντονότερη διάχυση διάμεσου των κόκκων των διαβρωτικών ατόμων στις εσωτερικές στιβάδες του δοκιμίου και την ανάπτυξη στο εσωτερικό του δοκιμίου προϊόντων διάβρωσης παρά το γεγονός ότι ο μηχανισμός θραύσεως παραμένει όλκιμος.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1. : Περιοδικός πίνακας των στοιχείων . Γραμμή 3^η και στήλη 13^η βρίσκεται το αλουμίνιο
σελ.11

Εικόνα 2. : Βέργες αλουμινίου σελ.12

Εικόνα 3 Το διάγραμμα φάσεων κρυσθίθου–αλουμίνιας σελ.14

Εικόνα 4. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 1XXX σελ.17

Εικόνα 5. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 2XXX σελ.18

Εικόνα 6. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 3XXX σελ.19

Εικόνα 7. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 4XXX σελ.19

Εικόνα 8. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 5XXX σελ.20

Εικόνα 9. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 6XXX σελ.21

Εικόνα 10. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 7XXX σελ.21

Εικόνα 11. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 8XXX σελ.22

Εικόνα 12. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 2XX.X σελ.23

Εικόνα 13. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 3XX.X σελ.24

Εικόνα 14. : Επιγραμματικά στοιχεία σειράς 4XX.X σελ.24

Εικόνα 15. : Επιφάνεια θραύσης από κόπωση σε περιστρεφόμενο άξονα σελ. 27

Εικόνα 16. : Δοκιμή περιστρεφόμενου προβόλου σελ. 31

Εικόνα 17. : Περιγραφή φαινομένου λυγισμού σελ.41

Εικόνα 18. : Γενικό διαγράμματα Τάσης – Παραμόρφωσης σελ.43

Εικόνα 19 : Παραδείγματα όλκιμου και ψαθυρού υλικού σελ.46

Εικόνα 20 : Παραδείγματα θραύσης όλκιμου και ψαθυρού υλικού σελ.46

Εικόνα 21 : Παραδείγμα διάβρωσης με οπές κράμματος αλουμινίου. σελ.51

Εικόνα 22 : Φυσικό στρώμα οξειδίου του αλουμινίου σελ.52

Εικόνα 23 : Παραδείγματα αρχικής μορφής του υλικού μας σελ.53

Εικόνα 24 : Εργαλειομηχανή (Τόρνος) Celtic Model 14 σελ.54

Εικόνα 25 : Τελική μορφή δοκιμίων (Αριστερά τα δοκίμια για την δοκιμή σε εφελκυσμό-Δεξιά τα δοκίμια για δοκιμή σε κόπωση.)σελ. 55

Εικόνα 26 : Μηχανή δοκιμής εφελκυσμού (Quasar 100) σελ.58

Εικόνα 27 : Ιδιότητες μηχανής δοκιμής εφελκυσμού (Quasar 100). σελ.57

Εικόνα 28 : Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου Al2007 το οποίο διαβρώθηκε ένα μήνα σε υδατικό διάλυμα NaCl σελ.65

Εικόνα 29 : Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου Al2007 το οποίο διαβρώθηκε ένα μήνα σε υδατικό διάλυμα NaCl σελ.66

Εικόνα 30 : Μηχανή δοκιμής κόπωσης (Maguina Ensayo) σελ.67

Εικόνα 31 : Κόπωση σε φορτίο 200N ακατέργαστου δοκιμίου σελ.69

Εικόνα 32 : Κόπωση σε φορτίο 200N δοκιμίου διαβρωμένου για 2 μήνες σελ.70

Εικόνα 33 : Κόπωση σε φορτίο 200N δοκιμίου διαβρωμένου για 1 μήνα σελ.71

Εικόνα 34 : κόπωση σε φορτίο 200N δοκιμίου διαβρωμένου για 1 μήνα σελ.72

Εικόνα 35 : Κόπωση σε φορτίο 100N δοκιμίου διαβρωμένου για 2 μήνες σελ.73

Διάγραμμα 1 : Καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού τριών δοκιμίων με ρυθμό ανοιγμένης παραμόρφωσης $0,1 \text{ sec}^{-1}$ σελ.60

Διάγραμμα 2 : Καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού τριών δοκιμίων με ρυθμό ανοιγμένης παραμόρφωσης $0,01 \text{ sec}^{-1}$ σελ.61

Διάγραμμα 3 : Καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού διαβρωμένων κραμάτων αλουμινίου σειράς 2007 για δύο μήνες σελ.62

Διάγραμμα 4 : Καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού διαβρωμένων κραμάτων αλουμινίου σειράς 2007 για έναν μήνα σελ.63

Διάγραμμα 5 : Καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού διαβρωμένων κραμάτων αλουμινίου σειράς 2007 για έναν μήνα σελ.64

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

<https://www.uniwa.gr/spoydes/scholes-kai-tmimata/feng/mech/>

[2] Sialumin – ΣΙΑΤΗΣ-Κουφώματα αλουμινίου/αλουμινοκασκευές

<https://sialumin.gr/alouminio/>

[3] ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ, Ελληνική εγκυκλοπαίδεια, (2019)

<https://el.wikipedia.org/wiki/>

[4] Bassam Z. Shakhashiri. «Chemical of the Week: Aluminum» (2007)

<https://www.webcitation.org/6HZyXW9z6?url=http://scifun.chem.wisc.edu/chemweek/Aluminum/ALUMINUM.html>

[5] De l'aluminium, ses propriétés, sa fabrication (Paris, 1859)

https://books.google.gr/books?id=rCoKAAAIAAJ&printsec=frontcover&hl=el&source=gs_bge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

[6] <https://www.elval.com/el/about-aluminium-why-aluminium>

[7] <https://www.ateo-oe.gr/alouminio-plirofories/kramata-alouminiou/kramata-alouminiou-xarakteristika.html>

[8] <https://www.alunet.gr/2015/02/1630v>

[9] <https://www.ateo-oe.gr/alouminio-plirofories/idiotites-alouminiou/idiotites-katharou-alouminiou-kramaton.html>

[10] http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_PROFIL/al1.2.htm

[11] ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΓΕΩΡΓΑΤΗΣ (2018) ‘ Σημειώσεις θεωρίας στο Μάθημα ‘ Τεχνολογία αλουμινίου’ Κεφάλαιο 2 -**ΦΥΣΙΚΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΙ**- Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης των Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/2a_aluminum_alloys.pdf

[12] <http://www.cskartados.gr/kramata-xyteysis/>

[13] Γ. Χαϊδεμενόπουλος, Α. Κατσαμάς, (2004)

“Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών”, σημειώσεις μαθήματος Μηχανική συμπεριφορά των υλικών

Λάρισα

http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/mhx_symp_yltik_VIII.pdf

[14] Αλεξόπουλος, Ν. (2010). Κεφάλαιο 9ο , Σημειώσεις και ασκήσεις στην κόπωση. Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μηχανικών Οικονομίας Και Διοίκησης.

[15] Φιλόθεος Λόκκας (2007) ‘Αρχές και μέθοδοι στην αντοχή των υλικών. Λάρισα

http://users.teilar.gr/~p.lokkas/Ant_Yl

[16] Κωνσταντίνος Ι.Γιαννακόπουλος

Πειραματική Αντοχή Υλικών Ενότητα:Μονοαξονικός Εφελκυσμός

(Αθήνα 2011)

<http://eclass.teipir.gr/openeclass/modules/document/file.php/MECH104/%CE%A3%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%B9%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82%20%CE%A0%CE%B5%CE%B9%CF%81%CE%B1%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82%20%CE%91%CE%BD%CF%84%CE%BF%CF%87%CE%AE%CF%82%20%CE%A5%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD.pdf>

[17] ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΓΕΩΡΓΑΤΗΣ (2018) ‘ Σημειώσεις θεωρίας στο Μάθημα ‘ Τεχνολογία αλουμινίου’ Κεφάλαιο 7 -**ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ-ΑΝΟΔΙΩΣΗ**- Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης των Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/7_stoixeia%20antoxhs%20diavrosh%20anodiosi.pdf

[18] Μεκερίδης Ευάγγελος- Διπλωματική εργασία ‘ Βελτίωση των αντιδιαβρωτικών ιδιοτήτων Ormosil επιστρώσεων σε κράμα αργυλίου 2024-T3 με χρήση ναοδοχείων CE-TI εμπλουτισμένων με αναστολής διάβρωσης . (Πάτρα ,2010)

https://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/3680/1/MSc_Mekeridis.pdf

[19] Δάμαλις Κωνσταντόπουλος (2017) ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΑΝΟΔΙΩΣΗ

<https://docplayer.gr/45458254-Stoiheia-antohis-sti-diavrosi-toy-aloyminioy-anodiosi.html>