
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΕΙΑΣ

Διερεύνηση της επίδρασης θαλάσσιου
περιβάλλοντος στην αντοχή του κράματος
Αλουμινίου 5052 H38

Comparative study of the marine environment
effects on the mechanical properties of
Aluminium 5052 H38

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ

Κα. Βασιλείου Παναγιώτα, Χημικός Μηχανικός, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Κος. Νικόλαος Τσούβαλης, Ναυπηγός Μηχ. Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστοφίδης Δημήτρης

23 ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 2021, ΑΘΗΝΑ

Ευρετήριο

Ευχαριστίες	4
Abstract	5
Περίληψη	6
1. Εισαγωγή στη Διάβρωση	7
1.1. Γενικά.....	7
1.2. Συνέπειες της διάβρωσης.....	7
1.3. Σημαντικά Ατυχήματα με κύρια αιτία την διάβρωση.....	8
2. Διάβρωση	11
2.1. Ορισμός της διάβρωσης:.....	11
2.2. Είδη διάβρωσης.....	12
2.2.1. Ομοιόμορφη ή γεννική διάβρωση (General or Uniform Corrosion).....	12
2.2.2. Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting Corrosion).....	14
2.2.3. Ψαθυρή θραύση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση(stress corrosion cracking) 16	
2.2.4. Σπηλαιώδης μηχανική διάβρωση (cavitation erosion).....	18
2.3. Είδη Διαβρωτικού περιβάλλοντος.....	18
2.3.1. Ατμοσφαιρικός αέρας.....	19
2.3.2. Έδαφος.....	19
2.3.3. Νερό.....	19
2.3.4. Καυσαέρια ή θερμά αέρια.....	20
2.3.5. Χημικό περιβάλλον.....	21
2.3.6. Πυρηνικές ακτινοβολίες.....	21
2.4. Παράγοντες που Επηρεάζουν την Ταχύτητα Διάβρωσης.....	21
2.4.1. Βιολογικοί παράγοντες.....	21
2.4.2. Περιπατικά ρεύματα (ή ρεύματα διαφυγής).....	21
2.4.3. Η αγωγιμότητα του διαβρωτικού περιβάλλοντος.....	21
2.4.4. Ενεργής οξύτητα.....	22
2.4.5. Θερμοκρασία.....	22
2.4.6. Συγκέντρωση του διαβρωτικού συστατικού.....	23
2.4.7. Ταχύτητα διακίνησης διαβρωτικού περιβάλλοντος.....	23
2.4.8. Αιωρούμενες ή κolloειδείς ουσίες.....	23
2.4.9. Τριεπιφάνεια και γαλβανική επαφή.....	24
2.4.10. Κατάσταση μεταλλικής επιφάνειας.....	24
2.4.11. Πλαστικές παραμορφώσεις και Ελαστικές παραμορφώσεις.....	24
2.4.12. Μηχανικές τάσεις.....	24
2.4.13. Ραδιενέργεια.....	24
2.5. Δράσεις που πραγματοποιούνται κατά την διάβρωση.....	24
3. Η διάβρωση του αλουμινίου	26

3.1.	Το Φυσικό στρώμα οξειδίων του αλουμινίου.	28
4.	Θερμοδυναμική της διάβρωσης	30
4.1.	Προδιάθεση των μετάλλων και κραμάτων για διάβρωση.	30
4.2.	Αποκατάσταση γαλβανικού στοιχείου ανάμεσα στο μέταλλο ή κράμα που διαβρώνεται και του διαβρωτικού περιβάλλοντος.	32
5.	Κινητική της Διάβρωσης.....	33
5.1.	Ηλεκτροχημικός Μηχανισμός κατά Wagner	33
5.2.	Μηχανισμός χημικής διάλυσης.....	34
6.	Το αλουμίνιο και τα κράματα του.	36
6.1.	Γενικά.	36
6.2.	Κατηγοριοποίηση κραμάτων αλουμινίου	39
6.2.1.	Κραματικά στοιχεία αλουμινίου-Κύριες Σειρές Αλουμινίου.	39
6.2.2.	Κράματα αλουμινίου χύτευσης (Casting Alloys).....	41
6.2.3.	Κράματα αλουμινίου Διαμορφωτικής (Wrought alloys).....	42
6.3.	Κράμα αλουμινίου 5052.....	50
6.3.1.	Χημική σύσταση του κράματος 5052:	50
6.3.2.	Μηχανικές ιδιότητες κράματος 5052 ανάλογα με την σκλήρυνση :	50
6.3.3.	Θερμική επεξεργασία	50
6.3.4.	Συγκόλληση.....	50
6.3.5.	Φυσικές ιδιότητες κράματος 5052	51
6.3.6.	Τυπικές εφαρμογές.....	51
6.4.	Η αντίσταση του αλουμινίου και των κραμάτων του στην ατμοσφαιρική διάβρωση	51
7.	Ειδική εισαγωγή – Ορισμοί από την αντοχή υλικών.	54
8.	Πειραματικό Μέρος.....	58
8.1.	Υλικά και προετοιμασία Δοκιμών	58
8.1.1.	Φυσικά χαρακτηριστικά Δοκιμών	58
8.1.2.	Προετοιμασία δοκιμών.....	60
8.2.	Θάλαμος αλατονέφωσης.	62
8.3.	Παχυμέτρηση του οξειδίου του αλουμινίου στην επιφάνεια των δοκιμών.	64
8.4.	Φωτογράφιση του Κέντρου Μηχανικής Φόρτισης των δοκιμών.....	67
8.5.	Δοκιμές Εφελκυσμού	71
9.	Παρατήρηση της Διατομής θραύσης των Δοκιμών σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης SEM με Φασματόμετρο Ενεργειακής Διασποράς.	75
9.1.	Εισαγωγή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο..	75
9.2.	Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων SEM.....	77
9.2.1.	Μη εκτεθειμένα σε θαλάσσιο διαβρωτικό περιβάλλον δοκίμια.	77
9.2.2.	Εκτεθειμένα σε θαλάσσιο διαβρωτικό περιβάλλον δοκίμια για 1300 ώρες	84
10.	Ανάλυση Αποτελεσμάτων Δοκιμών Εφελκυσμού.....	88

10.1. Δοκίμια που δεν εκτέθηκαν σε διαβρωτικό περιβάλλον.	88
10.2. Δοκίμια που εκτέθηκαν 240 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον.....	90
10.3. Δοκίμια που εκτέθηκαν 540 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον.....	93
10.4. Δοκίμια που εκτέθηκαν 750 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον.....	95
10.5. Δοκίμια που εκτέθηκαν 1050 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον.....	98
10.6. Δοκίμια που εκτέθηκαν 1300 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον.....	101
Βιβλιογραφία.....	108

Ευχαριστίες

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου κα. Βασιλείου Παναγιώτα, Καθηγήτρια ΕΜΠ, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, για την ανάθεση του θέματος και για την απεριόριστη βοήθεια και καθοδήγηση της σε όλα τα επιστημονικά ζητήματα, αλλά και στην ενθάρρυνσή της, για την περάτωση των σπουδών μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Όλγα Παπαδοπούλου και Μιχάλη Δελαγραμμάτικα, για τις χρήσιμες συμβουλές που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων, αλλά και την έμπρακτη βοήθεια τους στην χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για την αμέριστη συμπαράσταση και την ανιδιοτελή τους αγάπη καθ' όλη την διάρκεια της φοίτησης μου στο πολυτεχνείο.

Abstract

The purpose of this thesis is to search and study the effect of the marine corrosive environment on the mechanical properties of the aluminium alloy 5052 H38, primarily alloyed with magnesium (2,2%-2,8% by weight). This alloy is characterized of a good workability, very good corrosion resistance, weldability and medium to high strength.

Specimens used in the experimental process are based on ISO 6892-1 standard, ANNEX B and were cut by a metal sheet cutting press from a 0.42-0.46 mm thickness aluminum sheet in such a way that their longitudinal axis XX' to be parallel to the direction of their extrusion. Another parameter should be pointed out is that the specimens were stored in the laboratory for about 35 years, at room temperature and no air conditioning.

After the specimens had been prepared, they were placed inside a corrosion testing instrument (Salt spray Chamber) model Erischen (Model 606) where the specimens were exposed into a vapor mist of 5% NaCl solution for 1300 hours. Afterwards, the process followed was measuring the thickness of the aluminium oxide that produced on the specimens at 240-540-750-1050-1300 hours. The final and the most important part of the experiment was the tensile testing, which performed on the Instron 4460 load frame. The load frame machine was provided by the Laboratory of Polymer Technology at the School of Chemical Engineering. The specimens' ruptured sections were observed in a scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS).

The final conclusions are:

- The thickness of the aluminium oxide that produced on the specimens' surface is increased for a period of time and then has the tendency to be stabilized in a specific thickness.
- The corrosion resistance of aluminium alloy 5052 h38 is quite high after a 1300 hours exposure cycle to the salt spray environment.
- A decrease in the Ultimate tensile strength (UTS) was observed and this is due to the deterioration of the test surface. A more precise and objective comparison could be succeeded if more specimens of various thickness had been tested, under the same conditions. Specimens used were thin enough resulting to an essential effect in relation to the surface alteration and consequently on the results observed.
- The plastic deformation of the reference specimens was less than 1% before rupture and the plastic deformation of those specimens exposed in the corrosive environment was almost zero.

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση της επίδρασης θαλάσσιου διαβρωτικού περιβάλλοντος στην αντοχή του κράματος αλουμινίου 5052 H38 με κύριο συστατικό το μαγνήσιο σε ποσοστό 2,2-2,8%. Κύρια χαρακτηριστικά του κράματος αυτού είναι η καλή του κατεργασία, η καλή αντίσταση του στην διάβρωση, η συγκολλησιμότητα του και σχετικά η καλή αντοχή του.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία βασίζονται στο πρότυπο ISO 6892-1, ANNEX B και κόπηκαν με πρέσα από έλασμα πάχους 0,42-0,46 mm κατά τρόπο τέτοιο, ώστε ο διαμήκης άξονας τους XX' να είναι παράλληλος προς τη διεύθυνση της εξέλασης. Μια άλλη παράμετρος είναι ότι τα δοκίμια ήταν στο εργαστήριο για περίπου 35 χρόνια, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος εργαστηρίου στην Αθήνα, σε χώρο που δεν έχει κλιματισμό. Εισήχθησαν σε θάλαμο αλατονέφωσης Erischen Model 606 για 1300 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον διαλύματος NaCl 5% και κατά την έξοδο τους παχυμετρήθηκε το οξειδίο που δημιουργήθηκε πριν την υποβολή τους σε δοκιμή εφελκυσμού. Οι δοκιμές εφελκυσμού έγιναν με μηχανή εφελκυσμού Instron 4460 στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Πολυμερών στη Σχολή Χημικών Μηχανικών. Ακολούθησε παρατήρηση των διατομών θραύσης σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) και φασματογραφία σε διάφορες περιοχές.

Τελικά συμπεράσματα των δοκιμών:

- Τα πάχος του οξειδίου του αλουμινίου αυξάνεται ως ένα σημείο και στη συνέχεια σταθεροποιείται.
- Η αντοχή του αλουμινίου 5052 H38 στην διάβρωση είναι αρκετά υψηλή μετά από 1300 ώρες έκθεσης στο θάλαμο αλατονέφωσης.
- Παρατηρήθηκε μείωση του ορίου μέγιστης αντοχής και αυτό οφείλεται στην αλλοίωση της επιφάνειας του δοκιμίου. Καλή και αντικειμενικότερη σύγκριση θα μπορούσε να γίνει, αν κάτω από τις ίδιες συνθήκες δοκιμάζονταν και δοκίμια μεγαλύτερου πάχους, καθώς τα χρησιμοποιηθέντα ήταν τόσο λεπτά, που οι επιφανειακές μεταβολές τα επηρέασαν αρκετά.
- Η Πλαστική παραμόρφωση των δοκιμών αναφοράς ήταν μικρότερη από 1% πριν την θραύση τους, των δε εκτεθειμένων δοκιμών ήταν σχεδόν μηδενική.

1. Εισαγωγή στη Διάβρωση.

1.1. Γενικά

Τα μέταλλα και τα κράματα χρησιμοποιούνται σήμερα σε μεγάλο εύρος εφαρμογών (κτηριακές εγκαταστάσεις, μέσα μεταφοράς, μηχανολογικός εξοπλισμός κ.α.). Ο λόγος για την ευρεία αυτή χρήση τους είναι το πλήθος και η ποικιλία φυσικών ιδιοτήτων τους, που περιλαμβάνει την αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη, αντοχή σε ποικιλία θερμοκρασιών καθώς και ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα.

Όλα τα μέταλλα εκτός από τον χρυσό, υδράργυρο και μόλυβδο βρίσκονται στην φύση σε μορφή ορυκτών ή χημικών ενώσεων. Κατά την μεταλλουργική κατεργασία των μεταλλευμάτων, για την μετατροπή τους σε μέταλλα, κατά την οποία έχουμε αναγωγικές δράσεις, απαιτούνται μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Με την κατεργασία αυτή, τα μέταλλα αναβαθμίζονται ενεργειακά με αποτέλεσμα, σύμφωνα με το δεύτερο Θερμοδυναμικό νόμο, να έχουν προδιάθεση για αυθόρμητη ενεργειακή υποβάθμιση και επιστροφή τους σε χαμηλότερη ενεργειακά στάθμη. Η προδιάθεση αυτή αποτελεί την αιτία της διάβρωσης.

Το φαινόμενο της διάβρωσης, για πρώτη φορά παρατηρήθηκε κατά την Μινωική εποχή (2000π.χ.) σε χάλκινα αντικείμενα όπως οικιακά σκεύη, νομίσματα και κοσμήματα. Όπως αναφέρεται από μεταγενέστερους, τα αντικείμενα έχαναν την στιλπνότητά τους, που όπως ξέρουμε σήμερα, η απώλεια της στιλπνότητας οφείλεται στη δημιουργία οξειδίων, υδροξειδίων ή και άλλων χημικών ενώσεων στην επιφάνεια των μετάλλων. Η μελέτη της διάβρωσης έγινε εντονότερη με την αύξηση της χρήσης των μετάλλων από τον άνθρωπο, αλλά και την αύξηση των αιτιών διάβρωσης (ρύπανση του περιβάλλοντος).

1.2. Συνέπειες της διάβρωσης

Οι επιπτώσεις της διάβρωσης διακρίνονται σε δύο βασικούς τομείς, την οικονομία και την κοινωνία .

Όσον αφορά τις επιπτώσεις στην οικονομία, εύκολα διακρίνονται, αφού σχετίζονται άμεσα με τα ακόλουθα:

- Αντικατάσταση του διαβρωμένου εξοπλισμού, ο οποίος είτε καταστρέφεται ολοσχερώς είτε έχει απώλειες τεχνικών προδιαγραφών, για την σωστή του λειτουργία.
- Αύξηση των διαστάσεων (ιδιαίτερα πάχους) κατά το σχεδιασμό, με στόχο την ύπαρξη υλικού προς απομείωση.
- Προληπτική συντήρηση.
- Απώλεια αποδοτικότητας (π.χ. οξειδωμένοι εναλλάκτες θερμότητας).
- Απώλεια παραγόμενων προϊόντων λόγω επιμόλυνσης ή καταστροφής του χώρου φύλαξης.
- Απώλεια παραγωγικότητας λόγω των διακοπών λειτουργίας.
- Απώλεια εξοπλισμού που βρίσκεται στον ίδιο χώρο, μετά από διαρροή λόγω διάβρωσης.

Οι κοινωνικές επιπτώσεις είναι επίσης εμφανείς, αφού σχετίζονται άμεσα με τα ακόλουθα:

- Την υγιεινή και ασφάλεια. Για παράδειγμα, μια ξαφνική αστοχία μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ζωών μετά από φωτιά, έκρηξη, διαρροή τοξικών ή διαβρωτικών ουσιών και κατάρρευση ολόκληρης κατασκευής. Επίσης, με τη διαρροή τοξικών ουσιών έχουμε μακροπρόθεσμες συνέπειες, καθώς έχουμε επιμόλυνση του χώρου διαβίωσης του ανθρώπου.
- Τον αντίκτυπο στην καθημερινότητα της κοινωνίας, κατά τη διάρκεια συντήρησης ή αντικατάστασης μιας κατασκευής, παραδείγματος χάριν μιας γέφυρας.
- Τον αντίκτυπο στο περιβάλλον από την εξόρυξη μεταλλευμάτων, αλλά και ορυκτών καυσίμων με σκοπό την επεξεργασία αυτών.

Σύμφωνα με μελέτη του μη κερδοσκοπικού οργανισμού NACE INTERNATIONAL που σκοπό έχει να μειώσει τον αντίκτυπο της διάβρωσης, το κόστος της διάβρωσης υπολογίζεται σε US\$ 2.5 τρις, το οποίο αντιστοιχεί σε 3,4% του παγκόσμιου GDP (**Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν** - *Gross Domestic Product*), χωρίς να περιλαμβάνεται το έμμεσο κοινωνικό και περιβαλλοντολογικό κόστος, το οποίο βέβαια μπορεί να μειωθεί κατά 15-35% με κατάλληλες έρευνες και εφαρμογές προστασίας.

Economic Regions	Agriculture CoC US\$ billion	Industry CoC US\$ billion	Services CoC US\$ billion	Total CoC US\$ billion	Total GDP US\$ billion	CoC % GDP
United States	2.0	303.2	146.0	451.3	16,720	2.7%
India	17.7	20.3	32.3	70.3	1,670	4.2%
European Region	3.5	401	297	701.5	18,331	3.8%
Arab World	13.3	34.2	92.6	140.1	2,789	5.0%
China	56.2	192.5	146.2	394.9	9,330	4.2%
Russia	5.4	37.2	41.9	84.5	2,113	4.0%
Japan	0.6	45.9	5.1	51.6	5,002	1.0%
Four Asian Tigers + Macau	1.5	29.9	27.3	58.6	2,302	2.5%
Rest of the World	52.4	382.5	117.6	552.5	16,057	3.4%
Global	152.7	1446.7	906.0	2505.4	74,314	3.4%

Πίνακας 1.2.1. Παγκόσμιο κόστος διάβρωσης σύμφωνα με τον NACE INTERNATIONAL

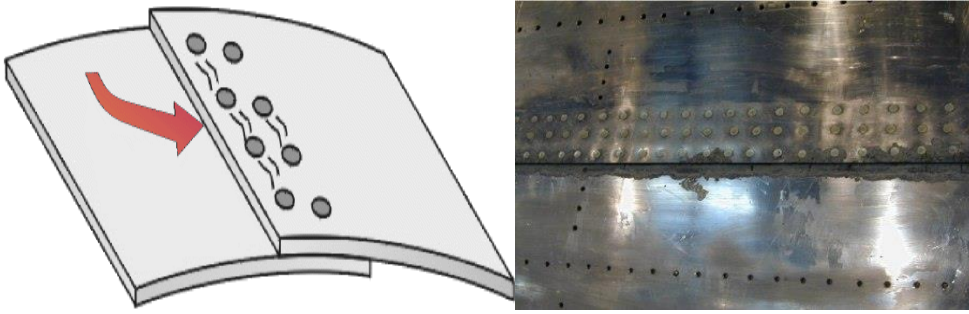
1.3. Σημαντικά Ατυχήματα με κύρια αιτία τη διάβρωση

Κάτω από συγκεκριμένες συγκυρίες, μια μη εμφανής αλλά και μικρή σε μέγεθος διάβρωση μπορεί να ενισχυθεί και να αποβεί καταστροφική. Μερικά τέτοια περιστατικά είναι τα εξής :

- Το περιστατικό της αεροπορικής εταιρείας Aloha Airlines 29/4/1988

Κατά τη διάρκεια της πτήσης ενός Boeing 737, που ήταν σε λειτουργία για 19 συναπτά έτη, το αεροπλάνο έχασε ένα μεγάλο κομμάτι από το πάνω μέρος της ατράκτου, ενώ βρισκόταν σε υψόμετρο 24000 πόδια. Παρά το γεγονός αυτό, ο Πιλότος κατάφερε να προσγειώσει το αεροσκάφος στο νησί Μάουι, με αποτέλεσμα αφενός να υπάρχει μόνο η απώλεια της ζωής μιας αεροσυνοδού και αφετέρου να μπορούν οι μελετητές να

διερευνήσουν την αιτία του συμβάντος με περισσότερα στοιχεία. Κατά την εξέταση της ατράκτου, διαπιστώθηκε η ύπαρξη ρωγμών περιμετρικά των οπών των πριτσινιών (rivets) εξαιτίας της καταπόνησης.



Σχήμα 1.3.1 Ρωγμές περιμετρικά πριτσινιών σε αεροσκάφος

Η εθνική υπηρεσία υπεύθυνη για την έρευνα απέδωσε το περιστατικό στην αποτυχία διαπίστωσης της διάβρωσης, που προήλθε από ελλιπή συνένωση των πάνελ της ατράκτου. Η καταπόνηση αυτή καθαυτή δε θα αποτελούσε πρόβλημα, αν η συνένωση ήταν δυνατή. Όμως, η διαδικασία της διάβρωσης και η συσσώρευση των προϊόντων διάβρωσης στο εσωτερικό των αρμών συνένωσης προκάλεσε το φαινόμενο που ονομάζεται «Pillowing of a lap joint», όπου οι επιφάνειες επαφής διαχωρίζονται.

- Πτώση μαχητικών αεροσκαφών F-16 λόγω διάβρωσης ηλεκτρικών απολήξεων

Αυτό είναι ένα παράδειγμα που δείχνει το πως μπορεί να καταλήξει να έχει μεγάλο αντίκτυπο, ακόμα και μια μικρή διάβρωση, η οποία δεν είναι εμφανής με γυμνό οφθαλμό. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι, μια ηλεκτρική ένωση στη βαλβίδα καυσίμων (που χρησιμοποιείται για απομόνωση της μηχανής, κατά τη διάρκεια της συντήρησης) είχε διαβρωθεί με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί βραχυκύκλωμα και να κλείσει η παροχή καυσίμων κατά τη διάρκεια πτήσης. Η λύση στο πρόβλημα θα ήταν αν γινόταν ετήσια εφαρμογή ενός αντιδιαβρωτικού και καθαριστικού σπρέι, για ηλεκτρικές επαφές στρατιωτικών προδιαγραφών MIL-L-87177A Grade B, αποφεύγοντας την κοστοβόρα αντικατάστασή τους.[5]

- Έκρηξη υπονόμων. Μεξικό

Ένα άλλο παράδειγμα ζημιάς, λόγω διάβρωσης, ήταν η έκρηξη των υπονόμων στην Guadalajara στο Μεξικό τον Απρίλιο το 1992, κατά την οποία σκοτώθηκαν πάνω από 200 άτομα. Εκτός των ανθρωπίνων απωλειών, η έκρηξη προκάλεσε ζημιές σε 1600 κτίρια και τραυμάτισε πάνω από 1500 ανθρώπους. Το κόστος της ζημιάς υπολογίστηκε στα 75 εκατομμύρια δολάρια. Η αιτία της έκρηξης εντοπίστηκε στην εγκατάσταση ενός σωλήνα από τον οποίο διέρρεε νερό, το οποίο έπεφτε πάνω σε έναν αγωγό βενζίνης που βρισκόταν ακριβώς από κάτω. Η επακόλουθη διάβρωση του αγωγού της βενζίνης προκάλεσε διαρροή της βενζίνης μέσα στον υπόνομο, η οποία ήταν και η αιτία της έκρηξης.[4]

- Έκρηξη λόγω διάβρωσης Gaylord Chemical στη Λουϊζιάνα

Άλλο περιστατικό έκρηξης, λόγω διάβρωσης, συνέβηκε στις 23 Οκτωβρίου 1995 στο εργοστάσιο Gaylord Chemical στη Λουϊζιάνα. Από βυτιοφόρο με τετροξειδίο του αζώτου διέρρευσαν κιτρινοκαφέ ατμοί και όταν έγινε σχετικός ψεκασμός για καταστολή των ατμών, το πώμα σφράγισης του ανοίγματος (κεφάλι) στο ένα άκρο του βυτιοφόρου σκίστηκε, πετάχτηκε 350 πόδια μακριά και το βυτιοφόρο εκτροχιάστηκε 35 πόδια πιο πέρα. Οι ατμοί συνέχισαν να απελευθερώνονται για 36 ώρες, προκαλώντας προβλήματα υγείας στους ανθρώπους της γύρω περιοχής.

Η έρευνα που ακολούθησε έδειξε ότι, το τετροξειδίο του αζώτου είχε μολυνθεί με νερό, με αποτέλεσμα να παραχθεί νιτρικό οξύ, που προκάλεσε περαιτέρω διάβρωση στα υλικά που είχαν εκτεθειμένη επιφάνεια σε αυτό. Προκλήθηκε ένα διαβρωμένο άνοιγμα ύψους 8 ιντσών με πλάτος 66 ιντσών στην κεφαλή του ενός άκρου του οχήματος και τουλάχιστον τρεις διακριτικές οριζόντιες λωρίδες διάβρωσης κοντά στην κορυφή του εσωτερικού τοιχώματος του βυτιοφόρου (μία ήταν στο άνοιγμα στην κεφαλή της δεξαμενής). Επίσης, οι σωλήνες εξαγωγής (κατασκευασμένες από ανθρακούχο χάλυβα) είχαν διαβρωθεί και μόνο ένα μικρό τμήμα του κάθε σωλήνα παρέμεινε κοντά στην κορυφή του βυτιοφόρου.

Η πρώτη διορθωτική και προληπτική ενέργεια στην οποία προέβηκε η Gaylord Chemical Corporation ήταν να διακόψει τη χρήση βυτιοφόρων, για τη μεταφορά τετροξειδίου του αζώτου και να χρησιμοποιεί στο εξής μικρότερες δεξαμενές. Επιπλέον, εφαρμόζει διαδικασίες διασφάλισης καθαρότητας φορτίου (εργαστηριακή εξέταση φορτίου πριν και μετά τη φόρτωση). Επίσης, η διορθωτική / προληπτική ενέργεια που λήφθηκε από πλευράς της αρμόδιας αρχής ήταν ότι, το βυτιοφόρο που καταστράφηκε σε αυτό το ατύχημα ήταν το τελευταίο από ανθρακούχο χάλυβα που είχε εγκριθεί από το Υπουργείο Μεταφορών των ΗΠΑ, για τη μεταφορά τετροξειδίου του αζώτου.[13]

- Έκρηξη λόγω διάβρωσης στις εγκαταστάσεις της Union Carbide India Limited (UCIL) στην Ινδία

Το 1984 στις εγκαταστάσεις της Union Carbide India Limited (UCIL) στην Ινδία, στη δεξαμενή ανοξειδωτού χάλυβα, που αποθηκευόταν ισοκυανικό μεθύλιο (MIC), εισήλθε νερό από ατύχημα. Το γεγονός αυτό προκάλεσε μια δραστική χημική αντίδραση, με αποτέλεσμα την ταχεία αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Η θερμότητα που εκκλήθηκε από την αντίδραση, η παρουσία υψηλότερων από τις κανονικές συγκεντρώσεις χλωροφορμίου και η παρουσία ενός καταλύτη σιδήρου, που παράχθηκε από τη διάβρωση του τοιχώματος της δεξαμενής ανοξειδωτού χάλυβα, οδήγησε σε αντίδραση τέτοιας ορμής, ώστε τα συστήματα ασφαλείας δεν μπόρεσαν να διαχειριστούν τα αέρια που σχηματίστηκαν. Ως αποτέλεσμα, το MIC και άλλα προϊόντα αντίδρασης, σε μορφή υγρού και ατμού, διέφυγαν από το εργοστάσιο στις γύρω περιοχές. Δεν πρόλαβε να γίνει καμιά προειδοποίηση των ανθρώπων που κατοικούσαν γύρω από το εργοστάσιο, καθώς οι σειρήνες έκτακτης ανάγκης είχαν απενεργοποιηθεί, γι' αυτό η επίπτωση σε όσους ζούσαν στους καταυλισμούς κοντά στο εργοστάσιο ήταν άμεση και καταστροφική. Πολλοί πέθαναν στα κρεβάτια τους, άλλοι καταπλακώθηκαν από τα σπίτια τους και άλλοι τυφλώθηκαν ή πνίγηκαν.[14]

2. Διάβρωση

2.1. Ορισμός της διάβρωσης:

«Διάβρωση λέγεται η αυθόρμητη κατά επέκταση εκβιασμένη, ηλεκτροχημικής κατά επέκταση χημικής, κατά επέκταση μηχανικής κατά επέκταση βιολογικής φύσης, αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων και των κραμάτων, που οδηγεί σε απώλεια του υλικού»

Αυτός είναι ο ορισμός, που προέκυψε από συζητήσεις στα πλαίσια συνεδρίων μεταξύ μελών της «Ευρωπαϊκής Ομοσπονδίας Διάβρωσης» και της «Διεθνούς Επιτροπής Θαλάσσιας Διάβρωσης και Ρύπανσης των υφάλων».

Ο ίδιος ορισμός που ισχύει για τα μέταλλα και τα κράματα, ισχύει και για οποιοδήποτε άλλο υλικό με τη διαφορά ότι, σε αυτά μπορεί να υπερέχει η χημικής και μηχανικής φύσης αλλοίωση, ως προς την ηλεκτροχημική και μεγαλώνει και η αλλοίωση βιολογικής φύσης. Για να αντιληφθούμε τον ίδιο τον ορισμό, καλό είναι να αναλύσουμε κάποιους από τους όρους που εμπεριέχονται σε αυτόν.

- Η αυθόρμητη αλλοίωση έχει τη θερμοδυναμική έννοια του αυθόρμητου φαινομένου σε συνηθισμένες συνθήκες θερμοκρασίας πίεσης και υγρασίας. Σε σχέση με την αναφορά στην εκβιασμένη αλλοίωση, αναφερόμαστε στην επιτάχυνση του οπωσδήποτε θερμοδυναμικά αυθόρμητου φαινομένου, εξαιτίας έντονου τεχνητού διαβρωτικού περιβάλλοντος (ανοδική ηλεκτρική φόρτιση, χημικές ουσίες, υψηλές θερμοκρασίες και υγρασία). Οπότε, στο φυσικό περιβάλλον (στον αέρα, στο γλυκό ή θαλασσινό νερό και στο έδαφος) μπορούμε να χαρακτηρίσουμε την αλλοίωση ως αυθόρμητη ελαφρά εκβιασμένη, διαχωρίζοντας την έτσι, από την τεχνητά εκβιασμένη διάβρωση, με κριτήριο την ταχύτητα της διάβρωσης.
- Η ηλεκτροχημική και κατά επέκταση χημικής φύσης αλλοίωση βασίζεται στη διάκριση ηλεκτροχημικών και χημικών δράσεων. Στις ηλεκτροχημικές δράσεις είτε με αυθόρμητη δημιουργία γαλβανικών στοιχείων είτε με επιβολή ηλεκτρικού ρεύματος απομακρύνονται ηλεκτρόνια έξω από το σύστημα μέσω ηλεκτροδίων και επιστρέφουν σε αυτό γαλβανικά στοιχεία. Αντίθετα, στις χημικές δράσεις πραγματοποιούνται αποκλειστικά μέσα στο ίδιο το σύστημα ανταλλαγές ηλεκτρονίων μεταξύ των αντιδρώντων. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες από ότι οι αντίστοιχες χημικές. Επίσης, ένα ακόμη στοιχείο που διαφοροποιεί τις δύο δράσεις είναι ότι, στην ηλεκτροχημική παράγεται ή καταναλίσκεται έργο (ηλεκτρικό), ενώ κατά τις χημικές παράγεται ή απορροφάται ενέργεια (θερμική, φωτεινή). Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι ηλεκτροχημικές δράσεις είναι ιδιαίτερα εκλεκτικές και η χημική απόδοση των ηλεκτροχημικών δράσεων είναι πολύ μεγαλύτερη.
- Η μηχανικής φύσης αλλοίωση αναφέρεται σε οποιονδήποτε επιφανειακή μηχανική κάκωση λόγω τριβής, κρούσης ή μηχανικής καταπόνησης. Οι αλλοιώσεις αυτές κατατάσσονται στην εκβιασμένη διάβρωση, με κύριες εξ αυτών την αμμοβολή, για καθαρισμό μιας μεταλλικής επιφάνειας και την εξάχνωση λόγω της δημιουργίας υποπίεσης (π.χ. σε έλικες πλοίων-αεροπλάνων, πτερύγια αντλιών και σε σωλήνες διέλευσης υγρών).

- Η επιφάνεια των μετάλλων και των κραμάτων περιλαμβάνει την πραγματική επιφάνεια και τις επιφανειακές ανωμαλίες (οι πόροι, τα ενεργά κέντρα και οι ενεργοί δρόμοι από αταξίες δομής). Έτσι, από την επιφάνεια αυτή και μέσω της διεπιφάνειας πραγματοποιείται μεταφορά μάζας και ενέργειας προς το διαβρωτικό περιβάλλον.
- Η απώλεια υλικού αναφέρεται στην κατανάλωση μετάλλου ή κράματος. Αυτή η κατανάλωση μπορεί να μειώσει το αρχικό βάρος του αντικειμένου, αλλά και να το αυξήσει, αν τα παραγόμενα προϊόντα διάβρωσης παραμείνουν προσκολλημένα στη μεταλλική επιφάνεια.

2.2. Είδη διάβρωσης

Τα βασικά είδη της διάβρωσης, που διακρίνονται ανάλογα με την μορφολογία του διαβρωτικού αποτελέσματος είναι:

1. Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση (General or Uniform Corrosion)
2. Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting Corrosion)
3. Ψαθυρή θραύση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (Stress corrosion cracking)
4. Σπηλαιώδης μηχανικής Διάβρωσης (Cavitation Corrosion)

Οι παράμετροι που καθορίζουν το είδος της διάβρωσης που θα εξελιχθεί είναι το είδος του μετάλλου ή κράματος, η κατάσταση της επιφάνειας του και το κυριότερο οι συνθήκες και η ένταση του διαβρωτικού περιβάλλοντος.

2.2.1. Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση (General or Uniform Corrosion)

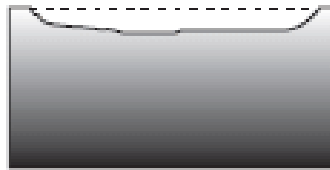
Η πιο συνηθής μορφή διάβρωσης είναι η ομοιόμορφη διάβρωση, η οποία εμφανίζεται σε μέταλλα που έχουν ομοιόμορφη μικρογραφική δομή και εκτίθενται σε παρόμοιο διαβρωτικό περιβάλλον. Η ομοιόμορφη διάβρωση επεκτείνεται συγχρόνως σε όλη την επιφάνεια του μετάλλου ή του κράματος με συνέπεια να δημιουργείται ένα ομοιόμορφο και περίπου ισόπαλο στρώμα προϊόντος διάβρωσης ή να πραγματοποιείται μια περίπου ομοιόμορφη διάλυση της επιφάνειας, από κάποια ηλεκτροχημική ή χημική διαδικασία, η οποία κατηγοριοποιείται στους εξής μηχανισμούς:

- Ομοιόμορφη, αυθόρμητη ηλεκτροχημικής φύσης, με σχηματισμό ομοιόμορφου ή σχεδόν ομοιόμορφου στρώματος προϊόντος διάβρωσης. Εμφανίζεται σε μέταλλα με μικρή προδιάθεση στη διάβρωση ή έχουν μικρό αριθμό και μικρής έντασης γεωμετρικά ή ενδόκοκκα ενεργά κέντρα, σε ήπιο διαβρωτικό περιβάλλον (χωρίς ή με λίγη υγρασία, σε χαμηλές θερμοκρασίες). Κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι καθαρά ηλεκτροχημικής φύσης και όχι χημικής φύσης. Σε κάθε άλλη περίπτωση η διάβρωση είναι ή εξελίσσεται σε διάβρωση με βελονισμούς.
- Ομοιόμορφη, εκβιασμένη, ηλεκτροχημικής φύσης με σχηματισμό στρώματος προϊόντος διάβρωσης. Εμφανίζεται σε μέταλλα με μικρή προδιάθεση στη διάβρωση και σε έντονο διαβρωτικό περιβάλλον με ελεγχόμενες συνθήκες (ανοδική οξειδωση,

ανοδική φόρτιση, υψηλές θερμοκρασίες) και την προϋπόθεση ότι, η επιφάνεια των μετάλλων δεν έχει σημαντικό αριθμό ή μεγάλης έντασης γεωμετρικά ή ενδόκοκκα ενεργά κέντρα.

- Ομοιόμορφη, εκβιασμένη, ηλεκτροχημικής ή χημικής φύσης, με μορφή διάλυσης. Εμφανίζεται όταν η ταχύτητα ανοδικής (με ηλεκτρικό ρεύμα ή χημικής διάλυσης του προϊόντος της διάβρωσης) διάλυσης του προϊόντος της διάβρωσης, είναι ίση με την ταχύτητα σχηματισμού του και όταν έχουμε χημική ομοιόμορφη διαλυτική προσβολή.

Αξίζει να επισημανθεί ότι η ομοιόμορφη, αυθόρμητη διάβρωση με τη μορφή ομοιόμορφης διάλυσης χωρίς υγρασία δεν υπάρχει και σε περίπτωση ύπαρξης υγρασίας, εξελίσσεται από την αρχή σε διάβρωση με βελονισμούς.



Uniform corrosion

Σχήμα 2.2.1.1. Σχηματική αναπαράσταση της επίδρασης της ομοιόμορφης διάβρωσης στην επιφάνεια του μετάλλου[15]

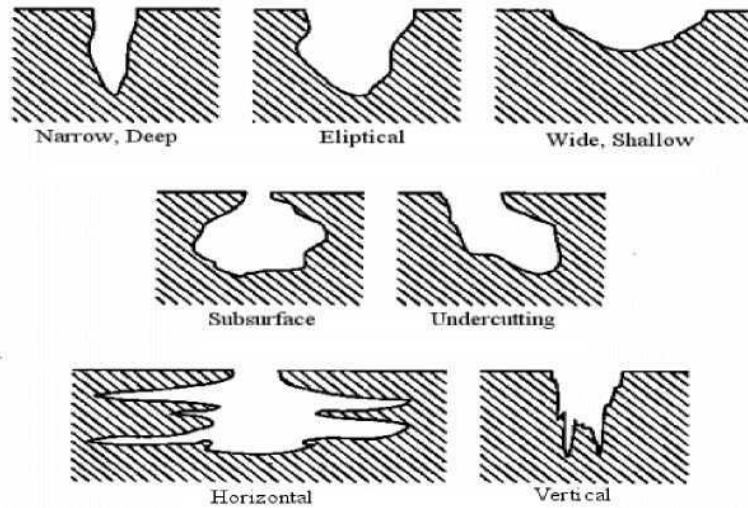


Εικόνα 2.2.1.1. Επιφάνεια μετάλλου που έχει υποστεί ομοιόμορφη διάβρωση [16]

2.2.2. Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting Corrosion)

Διάβρωση με βελονισμό ονομάζεται η διάβρωση που εμφανίζεται όταν ο σχηματισμός της διάβρωσης γίνεται εκλεκτικά και τοπικά στην επιφάνεια των μετάλλων ή των κραμάτων ή όταν εμφανίζεται εκλεκτική τοπική διάλυση της επιφάνειας. Αν η διάβρωση αυτή έχει σαν αρχικό στάδιο τον εκλεκτικό τοπικό σχηματισμό προϊόντος διάβρωσης, τελικά εξελίσσεται σε τοπική διάλυση με αποτέλεσμα τον σχηματισμό εσοχών, κρατήρων και σπηλαίων. Αυτό μπορεί να συμβεί ακόμα και αν υπάρχει τεχνητό προστατευτικό επίστρωμα (χρώμα, οξειδίο από ανοδική οξείδωση, επιμετάλλωση).

Η διάβρωση με βελονισμούς αποτελεί το πιο συνηθισμένο είδος διάβρωσης, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν πολλά ενεργά κέντρα και ψηλά ποσοστά υγρασίας. Είναι αρκετά επικίνδυνη, γιατί προκαλεί καταστροφή των επιφανειών με μικρή απώλεια βάρους σε μικρό χρονικό διάστημα και χωρίς να γίνεται έγκαιρα ορατή .



Σχήμα 2.2.2.1 Διάβρωση με βελονισμούς

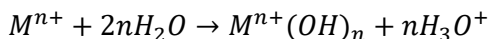
Η διάβρωση με βελονισμούς μπορεί να είναι

- Αυθόρμητη χωρίς ή με λίγη υγρασία :

Εμφανίζεται στην επιφάνεια των μετάλλων και των κραμάτων, όταν για κάποιο λόγο σημειωθεί αρχική ρήξη του αρχικού στρώματος προϊόντων διάβρωσης (μηχανική κάκωση, άνιση θερμική διαστολή, εσωτερικές μηχανικές τάσεις από αταξίες δομής), της αρχικής ομοιόμορφης ή σχεδόν ομοιόμορφης διάβρωσης με ενίσχυση του δυναμικού διάβρωσης του βασικού μετάλλου και αύξηση της πυκνότητας ρεύματος στο ρήγμα.

- Αυθόρμητη με παρουσία υγρασίας :

Στις συνθήκες αυτές το δραστικό περιβάλλον γίνεται δραστικότερο (περισσότερο αγωγίμο, μεγάλη συγκέντρωση οξυγόνου). Ακόμη, η παρουσία υγρασίας αποκαθιστά το γινόμενο της διαλυτότητας του αντίστοιχου υδροξειδίου, που δημιουργείται από την υδρόλυση των ιόντων του μετάλλου στα ενεργά κέντρα.



όπου n το σθένος του μετάλλου, το οποίο μέταλλο προσφέρει n ηλεκτρόνια και ενώνεται με αντίστοιχο του σθένους του αριθμό υδροξυλίων (το ηλεκτραρνητικό μέρος του μορίου του

νερού) για το σχηματισμό βάσης (υδροξείδιο του μετάλλου), δημιουργώντας συγχρόνως n μόρια υδροξωνίου, ηλεκτροθετικού χαρακτήρα.

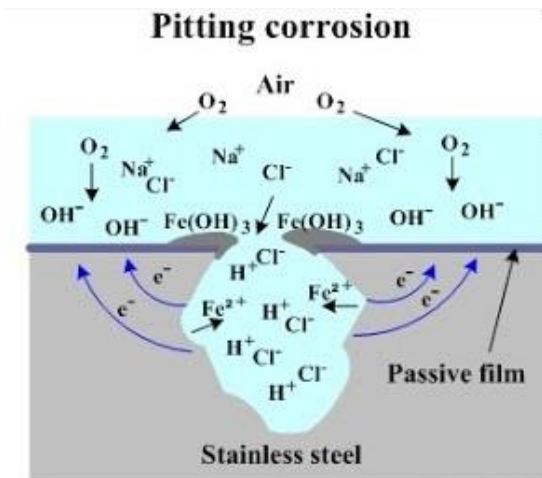
Τα υδροξώνια που σχηματίζονται αυξάνουν την οξύτητα ($pH < 7$) και την αγωγιμότητα του περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα τη διάλυση των προϊόντων διάβρωσης (των οξειδίων και υδροξειδίων) και των μετάλλων που είναι ηλεκτροθετικότερα του υδρογόνου (βρίσκονται πάνω από το υδρογόνο στην ηλεκτροδιακή σειρά των χημικών στοιχείων). Γενικά με την παρουσία υγρασίας, η διάβρωση με βελονισμούς εκδηλώνεται εντονότερα και εξελίσσεται γρήγορα.

- Εκβιασμένη:

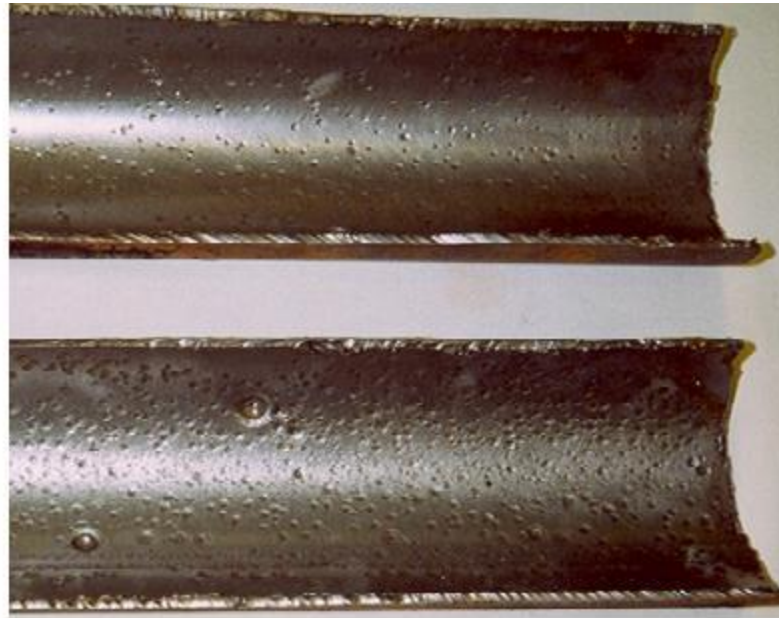
Όλες οι μορφές εκβιασμένης διάβρωσης με βελονισμούς παρουσιάζουν τα ίδια χαρακτηριστικά σε εντονότερες και ελεγχόμενες συνθήκες (με ανοδική φόρτιση, ψηλές θερμοκρασίες ή χημικά).

Στη διάβρωση με βελονισμούς, επηρεάζεται η μικρή περιοχή της επιφάνειας του μετάλλου εκεί όπου ο σχηματισμός των κοιλοτήτων λαμβάνει χώρα, ενώ η υπόλοιπη επιφάνεια του μετάλλου παραμένει ανεπηρέαστη. Ο σχηματισμός των κοιλοτήτων συνήθως συμβαίνει σε μία τοπικά ελαττωματική επιφάνεια. Οι κοιλοότητες συνήθως διεισδύουν από το εξωτερικό της οριζόντιας επιφάνειας προς το εσωτερικό σε μία σχεδόν κατακόρυφη κατεύθυνση, αφού η επίδραση της βαρύτητας επιφέρει την ανάπτυξη των κοιλοτήτων με τον τρόπο αυτό. Παράλληλα, το διάλυμα στην κορυφή της κοιλότητας γίνεται ολοένα πιο συμπυκνωμένο και πυκνό κατά τη διάρκεια ανάπτυξης της κοιλότητας. Για το λόγο αυτό, η διάβρωση με βελονισμούς παρουσιάζεται σε συνθήκες λιμνάζοντος περιβάλλοντος. Οι μεγαλύτερες προσβολές με βελονισμούς προκαλούνται κυρίως από διαλύματα που περιέχουν ιόντα χλωρίου σε ουδέτερες συνθήκες (σχηματισμός υδροχλωρικού οξέος από την υδρόλυση). Σε χαμηλότερες τιμές pH , η διάβρωση αντικαθίσταται από ομοιόμορφη διάβρωση.

Επειδή η δημιουργία των βελονισμών οφείλεται σε γεωμετρικά ενεργά κέντρα της επιφάνειας ή σημεία αναβαθμισμένα ενεργειακά από αταξίες δομής ή από διαφορετική σύσταση, η διάβρωση αυτή εμφανίζεται συνήθως σε ακατέργαστες ή ανώμαλα κατεργασμένες επιφάνειες.



Σχήμα 2.2.2.2 Μηχανισμός σχηματισμού διάβρωσης με βελονισμό ανοξειδωτου χάλυβα σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου.[19]



Εικόνα 2.2.2.1 : Επιφάνεια μετάλλου που έχει υποστεί διάβρωση με βελονισμούς [17]

2.2.3. Ψαθυρή θραύση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση(stress corrosion cracking)

Ψαθυρή θραύση υπό μηχανική καταπόνηση ονομάζεται το αυθόρμητο φαινόμενο που προκαλείται στα μέταλλα ή κράματα από τη συνδυασμένη δράση μηχανικών εφελκυστικών τάσεων (εξωτερικών ή εσωτερικών), πολύ κάτω του ορίου θραύσης και διαβρωτικού περιβάλλοντος. Το τελικό αποτέλεσμα ενός τέτοιου συνδυασμού είναι η Ψαθυρή θραύση μετάλλων. Ξεκινά από την εκτεθειμένη στο περιβάλλον πραγματική επιφάνεια (πόροι, ενεργά κέντρα κτλ.) δημιουργώντας ρηγματώσεις, οι οποίες καταλήγουν σε ψαθυρή θραύση.

Το είδος αυτής της διάβρωσης είναι πολύ επικίνδυνο, γιατί ενώ το μέταλλο ή το κράμα είναι σχεδόν απρόσβλητο στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειάς του, λεπτές ρωγμές προχωρούν στο εσωτερικό του, χωρίς να παρουσιάζει μακροσκοπικές διαταραχές. Η ρηγμάτωση μπορεί να συμβεί ακόμα και στο εύρος των τάσεων (ακόμα και στο 10% του ορίου αντοχής θραύσης) που μπορεί να έχουν προβλεφθεί κατά το σχεδιασμό της κατασκευής . [6]

Οι σημαντικότερες παράμετροι που επηρεάζουν τη ρηγμάτωση από διάβρωση από μηχανική καταπόνηση είναι:

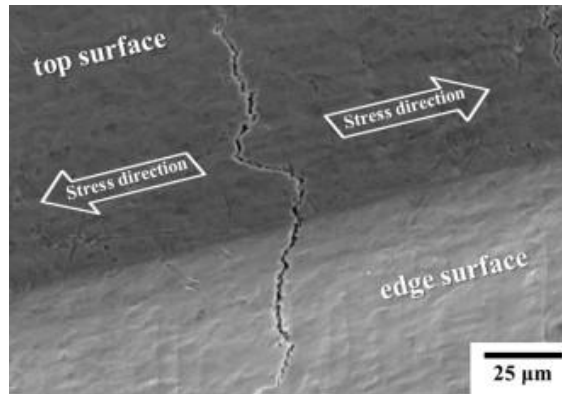
- Η σύσταση του διαλύματος
- Η σύσταση του μετάλλου
- Η θερμοκρασία
- Η επιβαλλόμενη τάση

Οι ρωγμές που προκύπτουν από αυτό το είδος της διάβρωσης έχουν τη μορφή ψαθυρής μηχανικής θραύσης. Η διάδοση τους μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

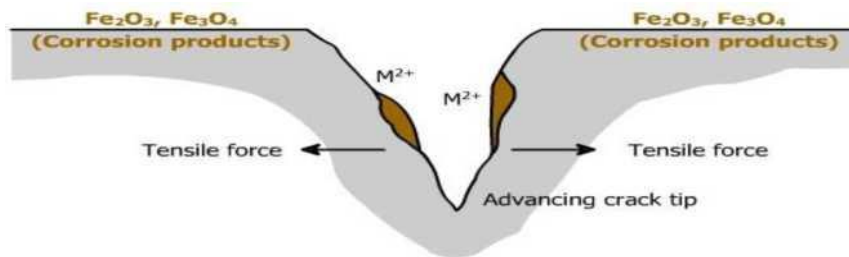
περικρυσταλλικά ή/και διακρυσταλλικά. Κατά την περικρυσταλλική διάδοση, η ρωγμή προχωράει κατά μήκος των ορίων των κόκκων, ενώ κατά τη διακρυσταλλική η διάδοση γίνεται διαμέσου των κόκκων κατά τη μία διεύθυνση ή και διακλαδισμένα, χωρίς να πηγαίνει στα όρια. Συχνά, μπορεί να συμβούν ταυτόχρονα και οι δύο τρόποι διάδοσης, αλλά ο επικρατέστερος καθορίζεται από το είδος και τη σύνθεση του κράματος, καθώς και το διαβρωτικό περιβάλλον. [2]

Γενικά μπορούμε να διακρίνουμε τα εξής στάδια[1]

- Το στάδιο δημιουργίας εσοχής
- Την περίοδο εκκόλαψης της
- Την περίοδο γρήγορης προώθησης της ρωγμής



Εικόνα 2.2.3.1. Ρήξη της μεμβράνης στην επιφάνεια του κράματος από τις δυνάμεις εφελκυσμού και η πρόοδος της ρωγμής[8]



Schematic of stress corrosion cracking.

Σχήμα 2.2.3.1. Ρήξη της μεμβράνης στην επιφάνεια του κράματος από τις δυνάμεις εφελκυσμού και η πρόοδος της ρωγμής

2.2.4. Σπηλαιώδης μηχανική διάβρωση (cavitation erosion)

Η μορφή αυτής της διάβρωσης εμφανίζεται με την δημιουργία εσοχών σπηλαίων κρατήρων από τοπική εξάχνωση υλικού, εξαιτίας δημιουργίας υποπίεσης. Τέτοιες συνθήκες δημιουργούνται σε περιστρεφόμενα πτερύγια αντλιών, έλικες πλοίων και αεροπλάνων και κατά τη ροή ρευστών σε σωλήνες.

Το είδος αυτό της διάβρωσης είναι καθαρά μηχανικό και η ταχύτητα εξάχνωσης του μετάλλου είναι πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα οποιουδήποτε άλλου είδους διάβρωσης. Η ταχύτητα απώλειας του υλικού είναι συνάρτηση της υποπίεσης και της τάσης ατμών του μετάλλου, της θερμοκρασίας, της ταχύτητας περιστροφής, του αριθμού και της έντασης των ενεργών κέντρων και της επιφάνειας του υλικού.



Εικόνα 2.2.4.1 Σπηλαιώδης διάβρωση σε έλικα πλοίου [7]

2.3. Είδη Διαβρωτικού περιβάλλοντος.

Δεν υπάρχει μέταλλο ή κράμα, οσοδήποτε ευγενές ή παθητικό κι αν είναι αυτό, που να μην παθαίνει διάβρωση στη πράξη. Κάθε μέταλλο ή κράμα, σύμφωνα με το 2ο Θερμοδυναμικό νόμο, έχει τάση για διάβρωση ανεξάρτητα από το διαβρωτικό περιβάλλον όπου εκτίθεται. Γι' αυτό, το διαφορετικό είδος του διαβρωτικού περιβάλλοντος δεν οδηγεί σε καμία ουσιαστική διαφορά από την άποψη του ορισμού της διάβρωσης. Το διαβρωτικό περιβάλλον όμως στο οποίο βρίσκεται, καθορίζει την ταχύτητα της διάβρωσης, το μηχανισμό, το είδος και το αποτέλεσμα της διάβρωσης.

Γενικά μπορούμε να διακρίνουμε τα ακόλουθα είδη διαβρωτικού περιβάλλοντος:

1. Ατμοσφαιρικός αέρας (ξηρό ή υγρό, καθαρό ή ρυπασμένο)
2. Έδαφος (πάνω ή μέσα στο έδαφος, ξηρό ή υγρό, καθαρό ή ρυπασμένο)
3. Γλυκό νερό (μέσα, πάνω, καθαρό ή ρυπασμένο)

4. Θαλασσινό νερό: «θαλάσσια διάβρωση» (μέσα, πάνω ή στη γειτονιά, καθαρό ή ρυπασμένο)
5. Καυσαέρια ή θερμά αέρια (ξηρά ή με υγρασία)
6. Χημικό περιβάλλον (με χημικά μέσα)
7. Πυρηνικές ακτινοβολίες (σε ξηρό ή υγρό περιβάλλον)[6][1][9]

2.3.1. Ατμοσφαιρικός αέρας

Διακρίνεται ανάλογα με τη σύσταση του, στις εξής κατηγορίες περιβάλλοντος :

- θαλασσινό (κοντά στη θάλασσα με υψηλή υγρασία και χλωρίδια)
- βιομηχανικό (υψηλή παρουσία ρυπαντικών αερίων)
- αγροτικό
- αστικό

Η διαβρωτική του δράση οφείλεται στο οξυγόνο και στην υγρασία, η οποία δρα ως ηλεκτρολύτης όταν φτάσει σε επίπεδο 60 %. Το επίπεδο της κρίσιμης υγρασίας δεν είναι σταθερό και εξαρτάται από το υπό διάβρωση υλικό, την τάση των προϊόντων διάβρωσης και των επιφανειακών αποθέσεων να απορροφούν υγρασία, αλλά και από την παρουσία ατμοσφαιρικών ρύπων.[6]

2.3.2. Έδαφος

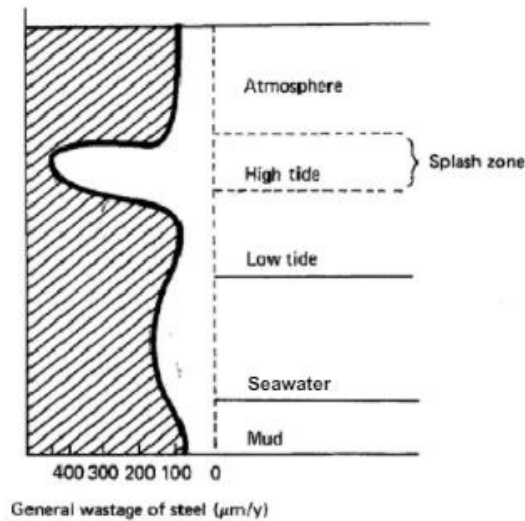
Η διαβρωτική του δράση οφείλεται στην υγρασία, στην οξύτητα, στα διαλυμένα άλατα, στους μικροοργανισμούς, στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του και είναι πιο έντονη κάτω από συνθήκες τριεπιφάνειας (έδαφος-μέταλλο-υγρασία ή αέρας). Σημαντικός παράγοντας που καθορίζει αυτές τις συνθήκες είναι το είδος του εδάφους και πιο συγκεκριμένα η πυκνότητα του εδάφους. Αν το έδαφος αποτελείται από σωματίδια μεγαλύτερα από 2mm (χαλίκι), τότε επιτρέπεται η διάδοση του οξυγόνου και του νερού, ενώ στην περίπτωση που τα σωματίδια είναι μικρότερα από 0,002mm (άργυλος), δεν περνά το οξυγόνο, αλλά ούτε και το νερό. Αντίθετα συγκρατείται. Συγκρίνοντας τις δύο πυκνότητες, παρατηρήθηκε ότι στα πυκνά εδάφη (σε ίδια περιοχή με μόνη διαφορά την πυκνότητα) η διάβρωση είναι πιο έντονη απ' ότι σε πορώδη εδάφη .[6][9]

2.3.3. Νερό

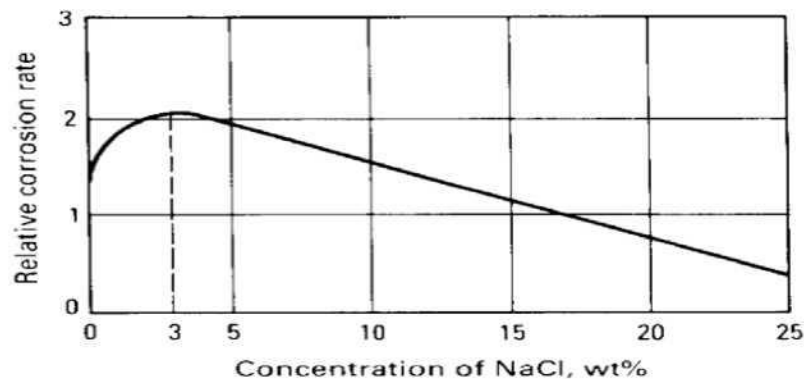
Κάθε είδος νερού (θαλασσινό, γλυκό υπόγειο βρόχινο, ακόμα και αποσταγμένο) είναι λιγότερο ή περισσότερο έντονα δραστικό. Η διαβρωτική δράση του νερού εξαρτάται από το διαλυμένο οξυγόνο, τα διαλυμένα άλατα και αέρια, τους μικροοργανισμούς, τα διαλυμένα ή μηχανικά αιωρούμενα σε αυτό σωματίδια, την τιμή του pH, τη θερμοκρασία και την ταχύτητα κίνησης του.

Όσον αφορά το θαλασσινό νερό, επειδή αφενός έχουμε χαμηλή ωμική αντίσταση (και μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα) του ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλης καθοδικής προς ανοδική επιφάνεια και αφετέρου λόγω της ύπαρξης ιόντων χλωρίου, η διάβρωση αυξάνεται. Άλλος παράγοντας που επηρεάζει τη διάβρωση είναι το pH του

θαλασσινού νερού, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 8-8,3. Στην επιφάνεια όμως των μετάλλων που εκτίθενται σε αυτό, το pH αυτού αυξάνεται λόγω της καθοδικής παραγωγής υδροξυλίων (OH^-) πράγμα που επηρεάζει ακόμα περισσότερο τη διάβρωση. Επίσης, αφού ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτάται και από την ποσότητα οξυγόνου που περιβάλλει ένα υλικό/μέταλλο, στην περίπτωση πλοίου παρατηρείται αυξημένος ρυθμός διάβρωσης στην water line (γνωστή και σαν Splash zone) του πλοίου, λόγω της τριεπιφάνειας αυτής (οξυγόνου-μετάλλου-θαλασσινού νερού). Αξίζει να σημειωθεί ότι, το διαλυμένο οξυγόνο στο θαλασσινό νερό μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης χλωριούχου νατρίου NaCl , δικαιολογώντας έτσι και την παρακάτω εικόνα με το ρυθμό διάβρωσης.



Σχήμα 2.3.3.1. Ρυθμός διάβρωσης χάλυβα ανάλογα με το βάθος του νερού [9]



Σχήμα 2.3.3.2. Επίδραση της συγκέντρωσης χλωριούχου νατρίου NaCl στη ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα [9]

2.3.4. Καυσαέρια ή θερμά αέρια

Σχεδόν όλα τα καυσαέρια και τα θερμά αέρια είναι έντονα διαβρωτικά. Η διαβρωτική τους δράση οφείλεται τόσο στις υψηλές θερμοκρασίες, πιέσεις και ταχύτητες ροής, που αναπτύσσονται κατά τη χρήση και την εκπομπή τους, όσο και στη φύση και στην ποσότητα των συστατικών που περιέχουν [6]

2.3.5. Χημικό περιβάλλον

Ως χημικό περιβάλλον θεωρούνται όλες οι χημικές ουσίες είτε αυτές είναι οργανικές είτε ανόργανες. Η διαβρωτική τους επίδραση εξαρτάται κυρίως από τη χημική συγγένεια των ουσιών αυτών με τις μεταλλικές επιφάνειες που έρχονται σε επαφή, από την θερμοκρασία, την πίεση και την ταχύτητα ροής τους. [6]

2.3.6. Πυρηνικές ακτινοβολίες

Ιδιαίτερα διαβρωτικό θεωρείται το περιβάλλον όπου γίνονται πυρηνικές δράσεις ή διακίνηση ραδιενεργών υλικών. Οι ακτινοβολίες αυτές επηρεάζουν τη χημική σύσταση, τη δομή και τις ηλεκτρονικές ιδιότητες των μετάλλων (δημιουργία ενεργών κέντρων και αταξιών δομής) και το μηχανισμό των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων.[6]

2.4. Παράγοντες που Επηρεάζουν την Ταχύτητα Διάβρωσης

Η διαβρωτική δράση των διαφόρων ειδών διαβρωτικού περιβάλλοντος είναι δυνατόν να διαφοροποιηθεί σημαντικά με την παρουσία ή τη διακύμανση της έντασης διαφόρων παραγόντων, οι οποίοι αναφέρονται παρακάτω.[6]

2.4.1. Βιολογικοί παράγοντες.

Οι μικροοργανισμοί που βρίσκονται στο φυσικό διαβρωτικό περιβάλλον προκαλούν βιολογική ρύπανση (fouling) και βιολογική διάβρωση (Biological corrosion). Η βιολογική ρύπανση οφείλεται στην επικάλυψη και ανάπτυξη μικροοργανισμών ζωικής και φυτικής προέλευσης στην επιφάνεια των μετάλλων. Η βιολογική διάβρωση οφείλεται στη χημική δραστηριότητα που προκύπτει από το μεταβολισμό των μικροοργανισμών αυτών.[6]

Στην κατηγορία των διαβρωτικών μικροοργανισμών περιλαμβάνονται βακτηρίδια, μύκητες, φύκη, πρωτόζωα, βρυόζωα κ.λ.π, που υπάρχουν κυρίως στο θαλασσινό νερό, αλλά και στο γλυκό νερό και στο έδαφος. Η επίδραση τους στη διαβρωτική διαδικασία μπορεί να είναι θετική με την εγκατάσταση επιβραδυντικού φράγματος, εξαιτίας της ανάπτυξης και του πολλαπλασιασμού τους. Όμως, πιο συχνά συμβαίνει το αντίθετο είτε με ενίσχυση του διαβρωτικού περιβάλλοντος είτε με απομάκρυνση αναστολέων διάβρωσης ή προστατευτικών επιστρωμάτων.[6]

2.4.2. Περιπατικά ρεύματα (ή ρεύματα διαφυγής).

Τα περιπατικά ρεύματα είναι τα ρεύματα που κυκλοφορούν ελεύθερα μέσα στο έδαφος, στους τοίχους, στις παραλίες κ.λ.π, έξω από τα προβλεπόμενα κυκλώματα εξαιτίας διαφυγής. Επειδή το ηλεκτρικό ρεύμα ακολουθεί τη διαδρομή με τη μικρότερη αντίσταση περνάει από τις υπάρχουσες υπόγειες, υποβρύχιες ή εντοιχισμένες μεταλλικές κατασκευές. Έντονα διαβρωτικά φαινόμενα παρουσιάζονται στα σημεία όπου το ηλεκτρικό ρεύμα εγκαταλείπει τις μεταλλικές επιφάνειες, ενώ στα σημεία προσέλευσης αποκαθιστά συνθήκες καθοδικής προστασίας.[6]

2.4.3. Η αγωγιμότητα του διαβρωτικού περιβάλλοντος.

Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του διαβρωτικού περιβάλλοντος, τόσο πιο έντονη είναι η διάβρωση .[6]

2.4.4. Ενεργής οξύτητα.

Το pH του περιβάλλοντος επηρεάζει την ταχύτητα της διάβρωσης ανάλογα με τη διαλυτότητα των μετάλλων ή των προστατευτικών οξειδίων ή των προϊόντων διάβρωσης. Πιο συγκεκριμένα, όσο το pH απομακρύνεται (είτε προς όξινο είτε προς πιο αλκαλικό) από το ουδέτερο σημείο, αυξάνεται η αγωγιμότητα με συνέπεια την αύξηση της ταχύτητας διάβρωσης. Στη διάβρωση με βελονισμούς, η καταπολέμηση της οξύτητας που δημιουργείται από την υδρόλυση των ιόντων του μετάλλου, με αλκαλοποίηση του διαλύματος, ελαττώνει τη διάβρωση.[6] Στο θαλάσσιο περιβάλλον με pH 8,1-8,3, η ύπαρξη κατιόντων όπως το ασβέστιο και το μαγνήσιο οδηγεί στο σχηματισμό ενός κελιού πάνω στη μεταλλική επιφάνεια, αποτρέποντας την περαιτέρω διάβρωση.

2.4.5. Θερμοκρασία

Με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρούμε την αύξηση της ταχύτητας διάβρωσης, αφού αυξάνεται η ταχύτητα των χημικών δράσεων. Επίσης, με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρούμε αύξηση της διαλυτότητας αερίων και αλάτων, του δυναμικού των γαλβανικών στοιχείων, της αγωγιμότητας, του pH και γενικά της έντασης των διαφόρων άλλων παραμέτρων της ταχύτητας διάβρωσης.[6]

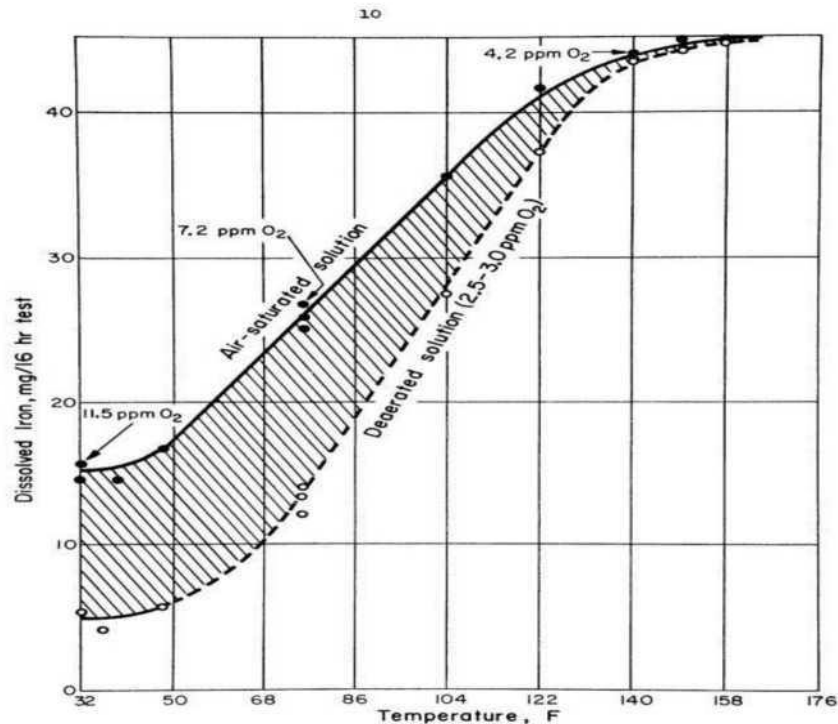


FIGURE 5. CORROSION OF IRON IN 3% NaCl SOLUTION SHOWING THE EFFECT OF TEMPERATURE AND AERATION
Adapted from Reference 1

Σχήμα 2.4.5.1. επίδραση της θερμοκρασίας στη διάβρωση του σιδήρου σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου 3%

2.4.6. Συγκέντρωση του διαβρωτικού συστατικού.

Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ταχύτητα διάβρωσης σε σχέση με τη συγκέντρωση του διαβρωτικού συστατικού είναι:

- Το είδος του διαβρωτικού συστατικού του περιβάλλοντος.
- Η χημική του συγγένεια με το διαβρωνόμενο μέταλλο.
- Η φύση του μετάλλου.
- Η μεταβολή του δυναμικού διάβρωσης.
- Η μεταβολή της αγωγιμότητας του διαβρωτικού περιβάλλοντος.
- Η ενεργότητα των δραστικών ιόντων.

Η ταχύτητα διάβρωσης σε μέταλλα που παρουσιάζουν παθητικότητα, δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη μεταβολή της συγκέντρωσης του διαβρωτικού συστατικού. Παρόλα αυτά, σε κάποια μέταλλα (π.χ. Pb), ενώ στην αρχή η ταχύτητα διάβρωσης έχει παρόμοια συμπεριφορά, στη συνέχεια και μόνο σε πολύ ψηλές συγκεντρώσεις, αυτή αυξάνεται. Στα οξέα, η ταχύτητα της διάβρωσης αυξάνει μέχρι μια μέγιστη τιμή και μετά ελαττώνεται με αύξηση της συγκέντρωσης του διαβρωτικού συστατικού.[6]

2.4.7. Ταχύτητα διακίνησης διαβρωτικού περιβάλλοντος

Η ταχύτητα διακίνησης του διαβρωτικού περιβάλλοντος αυξάνει συνολικά την ταχύτητα διάβρωσης. Η σχετική κίνηση του διαβρωτικού περιβάλλοντος σε σχέση με την μεταλλική επιφάνεια μπορεί να προκαλέσει τοπική απόξεση του προστατευτικού υμένα (προϊόντα διάβρωσης) ή εξάχνωση των προϊόντων διάβρωσης, εξαιτίας της δημιουργίας υποπίεσης και παραπέρα τη δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων. Ακόμη, η κίνηση του διαβρωτικού περιβάλλοντος ανανεώνει τη συγκέντρωση των διαβρωτικών του συστατικών, όπως το οξυγόνο, στην περιοχή της μεταλλικής επιφάνειας (αποκατάσταση γαλβανικού στοιχείου από διαφορετικό αερισμό) και μεταβάλλει τις άλλες ιδιότητες του (θερμοκρασία, pH, κ.λ.π)

Θετική επίπτωση από την κίνηση του διαβρωτικού περιβάλλοντος είναι η συνεχής απομάκρυνση των ιόντων του μετάλλου που έχουν διαλυθεί ανοδικά με συνέπεια τη μη υδρόλυση τους και τη μη παραγωγή H_3O^+ . Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγεται η ανομοιογένεια της μεταλλικής επιφάνειας από την απόθεση αιωρούμενων ουσιών.[6]

2.4.8. Αιωρούμενες ή κολλοειδείς ουσίες.

Αιωρούμενες ουσίες του διαβρωτικού περιβάλλοντος αυξάνουν την ταχύτητα διάβρωσης, είτε επειδή δημιουργούν τοπική ανομοιογένεια της επιφάνειας των μετάλλων, εξαιτίας τοπικής επικάλυψης, είτε επειδή ασκούν αποξεστική δράση στις επιφάνειες, όταν βρίσκονται σε διακινούμενο διαβρωτικό περιβάλλον. Επίσης επηρεάζουν το φαινόμενο ανάλογα με το είδος και το ποσό του ηλεκτρικού φορτίου τους.[6]

2.4.9. Τριεπιφάνεια και γαλβανική επαφή.

Η αποκατάσταση τριεπιφάνειας αυξάνει τη συγκέντρωση των δυναμικών γραμμών του δημιουργούμενου ηλεκτροστατικού πεδίου διάβρωσης, με συνέπεια την τοπική αύξηση του ρεύματος διάβρωσης. Ακόμη, η ηλεκτρολυτική επαφή του μετάλλου με άλλο καθοδικότερο ή παθητικότερο μέταλλο ή διαφορετικής σύστασης ή διαφορετικής δευτερεύουσας δομής δημιουργεί γαλβανικό στοιχείο με συνέπεια την έντονη τοπική ανοδική διάλυση του μετάλλου. [6]

2.4.10. Κατάσταση μεταλλικής επιφάνειας.

Οποιαδήποτε ανομοιογένεια της μεταλλικής επιφάνειας δημιουργεί τοπικά γαλβανικά στοιχεία και αποκατάσταση συνθηκών μικρής ανόδου προς μεγάλη κάθοδο με συνέπεια την αύξηση της διάβρωσης. Η ανομοιογένεια είναι δυνατόν να οφείλεται στις τοπικές διαφοροποιήσεις της χημικής σύστασης και της δευτερεύουσας δομής (γεωμετρικές και δομικές αταξίες) ή στις τοπικές αποθέσεις από το διαβρωτικό περιβάλλον. [6]

2.4.11. Πλαστικές παραμορφώσεις και Ελαστικές παραμορφώσεις.

Πλαστικές παραμορφώσεις που δημιουργήθηκαν με μηχανική ή θερμική κατεργασία χωρίς ανόπτηση, οδηγούν στην τοπική ανοδικοποίηση (δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων) με συνέπεια την αύξηση της διάβρωσης. Το ίδιο συμβαίνει και στις ελαστικές παραμορφώσεις [6]

2.4.12. Μηχανικές τάσεις.

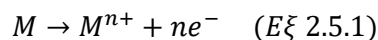
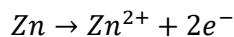
Εσωτερικές ή εξωτερικές μηχανικές τάσεις μεγαλώνουν τη διάβρωση και κάτω από ορισμένες συνθήκες οδηγούν σε Ψαθυρή θραύση της μεταλλικής κατασκευής. [6]

2.4.13. Ραδιενέργεια.

Η έκθεση του μετάλλου σε ραδιενέργεια μεγαλώνει τη διάβρωση με τη δημιουργία πρόσθετων ενεργών κέντρων από αταξίες δομής (Radiation damage).[6]

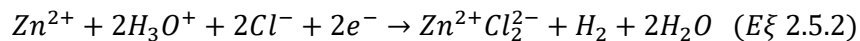
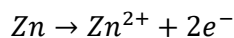
2.5. Δράσεις που πραγματοποιούνται κατά την διάβρωση.

Η κύρια και βασική δράση κατά τη διάβρωση, που αφορά στα μέταλλα και τα κράματα, είναι οξειδωτική, με την έννοια της απομάκρυνσης ηλεκτρονίων από το μέταλλο ή το κράμα. Έτσι, διάβρωση είναι η διάλυση του μετάλλου[1]:



Σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των ηλεκτρονίων που παράγονται ισούται με το φορτίο του ιόντος του μετάλλου. Το μέταλλο δηλαδή οξειδώνεται, αυξάνοντας το σθένος του από 0 σε $n +$ όπου n ο αριθμός των ηλεκτρονίων που απομακρύνθηκαν.

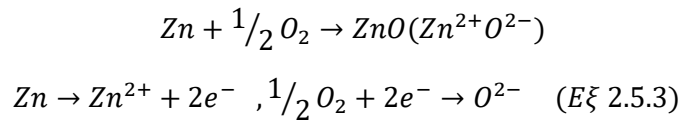
Η δημιουργία οποιασδήποτε ένωσης μετάλλου (οξείδια, θειούχες ενώσεις, θειϊκές κ.λ.π) οφείλεται στην απομάκρυνση ηλεκτρονίων και στην οξειδωτική δράση ορισμένων υλικών (οξυγόνο, υδροξόνιο, θειϊκή ρίζα κ.λ.π) έναντι του μετάλλου.



Δηλαδή ο ψευδάργυρος οξειδώνεται και το υδροξόνιο ανάγεται: Ο ψευδάργυρος, ως δισθενής, απελευθερώνει 2 ηλεκτρόνια οπότε καθίσταται ηλεκτροθετικό ιόν δισθενές, το

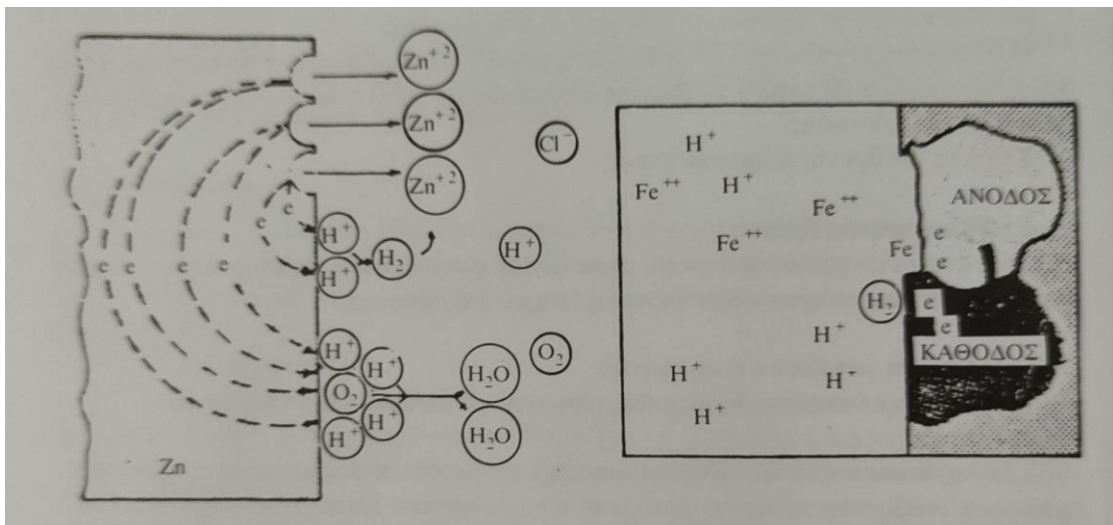
οποίο δεσμεύει 2 ιόντα χλωρίου (ηλεκτραρνητικό μονοσθενές) του διαβρωτικού περιβάλλοντος και σχηματίζει προϊόν διάβρωσης το χλωριούχο ψευδάργυρο. Το υδροξόνιο ανάγεται προσλαμβάνοντας τα ηλεκτρόνια που ελευθέρωσε ο ψευδάργυρος και μετατρέπεται σε υδρογόνο και νερό.

Στο επόμενο παράδειγμα ο ψευδάργυρος απελευθερώνει 2 ηλεκτρόνια, ως αναγωγικό σώμα, καθίσταται ιόν ηλεκτροθετικό δισθενές, προσφέρει τα ηλεκτρόνια του στο οξυγόνο που είναι οξειδωτικό το οποίο καθίσταται ιόν δισθενές ηλεκτραρνητικό, οπότε δημιουργείται η χημική ένωση οξείδιο του ψευδαργύρου, ως προϊόν οξείδωσης /διάβρωσης.



Δηλαδή ο ψευδάργυρος οξειδώνεται και το οξυγόνο ανάγεται.

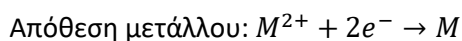
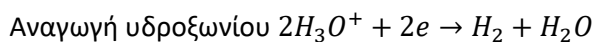
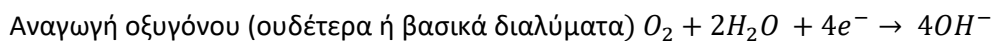
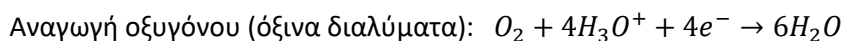
Στην επιφάνεια γίνονται και αναγωγές, εξ αιτίας και τοπικών γαλβανικών στοιχείων. Οι εξισώσεις (Eξ 2.5.2) πραγματοποιούνται σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω.



Σχήμα 2.5.1. Οξείδωση και αναγωγή σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας απροστάτευτου μετάλλου.

Στα ανοδικότερα σημεία (αρνητικός πόλος γαλβανικού στοιχείου - άνοδος) γίνονται οξειδώσεις και στα λιγότερο ανοδικά (θετικός πόλος γαλβανικού στοιχείου - κάθοδος) αναγωγές.

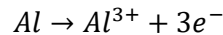
Το διαβρωτικό περιβάλλον ανάγεται:



Τα ηλεκτρόνια προέρχονται από την οξείδωση του μετάλλου (Eξ 2.5.1)

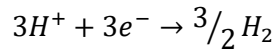
3. Η διάβρωση του αλουμινίου.

Στη περίπτωση επαφής Αλουμινίου με νερό ή όταν αυτό εκτίθεται στην ατμόσφαιρα και διαβρώνεται, η ανοδική αντίδραση είναι:

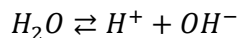


Το αλουμίνιο οξειδώνεται ελευθερώνοντας 3 ηλεκτρόνια και διαβρώνεται μετατρέπόμενο σε ιόν αλουμινίου τρισθενές.

Αναγωγή υδρογόνου (ιόντα υδρογόνου ανάγονται με πρόσληψη ηλεκτρονίων δημιουργώντας υδρογόνο)



Τα H^{+} προέρχονται από την διάσπαση των μορίων του νερού



Αναγωγή οξυγόνου (ουδέτερα ή βασικά διαλύματα) $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$

Κάθε ένα από τα δύο άτομα του μορίου του οξυγόνου (O_2) ανάγεται παίρνοντας $2e^{-}$ (ως δισθενές) και μετατρέπεται σε ανιόν οξυγόνου (O^{2-}). Στο σύνολο τα δύο άτομα οξυγόνου παίρνουν $4e^{-}$ και έχουμε $2O^{2-}$.

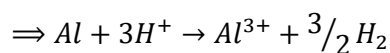
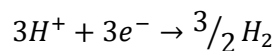
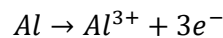
Από την υδρόλυση ενός μορίου του νερού έχουμε 1 υδρογονοκατιόν και 1 υδροξυλίων. Στο σύνολο από 2 μόρια νερού έχουμε ($2H^{+} + 2OH^{-}$).

Τα 2 υδρογονοκατιόντα ενώνονται με τα 2 δισθενή ιόντα οξυγόνου και δημιουργούν $2OH^{-}$. Στο σύστημα τελικά έχουμε $4OH^{-}$. Εν κατακλείδι, το οξυγόνο ανάγεται, αφού προσλαμβάνει ηλεκτρόνια και από σθένος 0 έγινε με σθένος -2.

Αναγωγή οξυγόνου (όξινα διαλύματα): $O_2 + 4H^{+} + 4e^{-} \rightarrow 2H_2O$

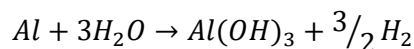
Το μόριο οξυγόνου σε όξινο περιβάλλον, όπου υπάρχουν υδρογονοκατιόντα ενώνεται με αυτά και παράγεται νερό. Το σθένος του από 0 έγινε σθένος -2, δηλαδή έχει αναχθεί αφού προσέλαβε ηλεκτρόνια.

Το αλουμίνιο σε όξινο περιβάλλον, όπου υπάρχουν υδρογονοκατιόντα έχουμε :



Το αλουμίνιο ελευθερώνει ηλεκτρόνια και μετατρέπεται σε ιόν αλουμινίου τρισθενές και τα υδρογονοκατιόντα προσλαμβάνουν τα ηλεκτρόνια και μετατρέπονται σε υδρογόνο

Ή

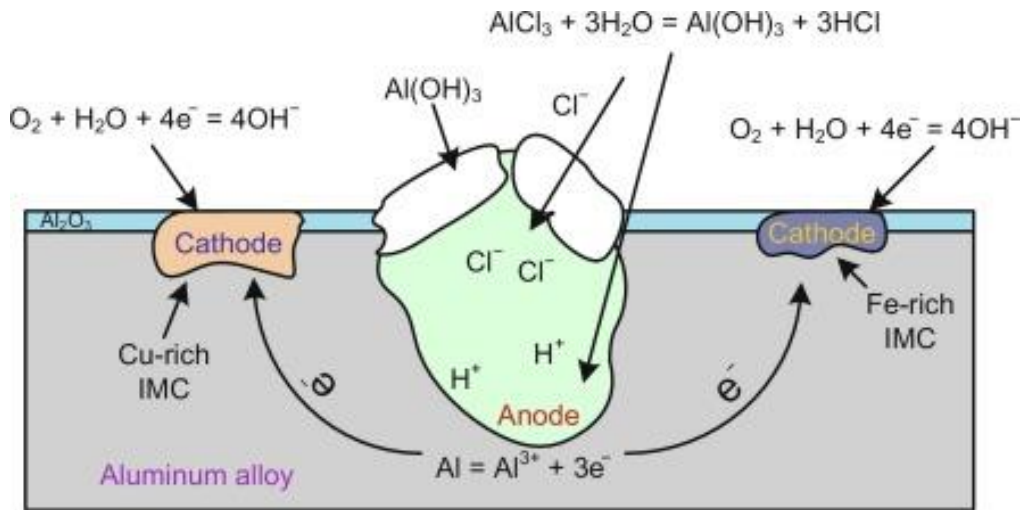


Το αλουμίνιο σε ουδέτερο ή αλκαλικό περιβάλλον π.χ. νερό πάλι ελευθερώνει ηλεκτρόνια (από σθένος 0 πάει σε σθένος +3) και δημιουργεί υδροξύλιο του αλουμινίου (βάση) και υδρογόνο.

Κατά τη διάβρωση, μπορεί να συμβούν περισσότερες από μία αντιδράσεις αναγωγής ή οξειδωσης. Όταν διαβρώνεται ένα κράμα, στοιχεία του μετάλλου περνούν στο διάλυμα με την μορφή των αντίστοιχων ιόντων.

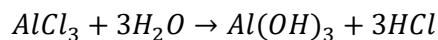
Το αλουμίνιο είναι επιρρεπές στη διάβρωση με βελονισμούς και η διάβρωση αυτή συναντάται σε όλα τα φυσικά περιβάλλοντα, είτε αυτό είναι θαλάσσιο ατμοσφαιρικό περιβάλλον είτε θαλασσινό νερό είτε απλή υγρή ατμόσφαιρα. Κύριο χαρακτηριστικό της διάβρωσης του αλουμινίου, σε αντίθεση με άλλα μέταλλα, είναι η κάλυψη των κοιλοτήτων διάβρωσης με ένα ομοιόμορφο λευκό στρώμα οξειδίων του αλουμινίου. Η διάβρωση αυτή θα συμβεί όταν το κράμα εκτεθεί συνεχώς στο διαβρωτικό περιβάλλον. Ο ρυθμός δημιουργίας του λευκού αυτού οξειδίου του αλουμινίου μειώνεται όσο περνά ο χρόνος έκθεσης.

Στην περίπτωση του αλουμινίου, η παρουσία ιόντων χλωρίου είναι κύριος παράγοντας για την ανάπτυξη εντοπισμένης διάβρωσης με βελονισμούς και τοπική ρήξη της παθητικής του μεμβράνης. Σαν αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία κοιλοτήτων διάβρωσης, οι οποίες με κατάλληλες συνθήκες θα καταλήξουν σε διάφορες μικρορωγμές στο υλικό μας. Άρα η διάβρωση με βελονισμούς μπορεί να διακριθεί σε δύο στάδια (της έναρξης και της διάδοσης).



Σχήμα 3.1. Μηχανισμός διάβρωσης αλουμινίου με βελονισμό.[22]

Η διάλυση του αλουμινίου με τον σχηματισμό ιόντων $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ στο πυθμένα της κοιλότητας δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο που μεταφέρει ιόντα Cl^- στον πυθμένα, εξουδετερώνοντας χημικά το διάλυμα και σχηματίζοντας χλωριούχο αλουμίνιο.

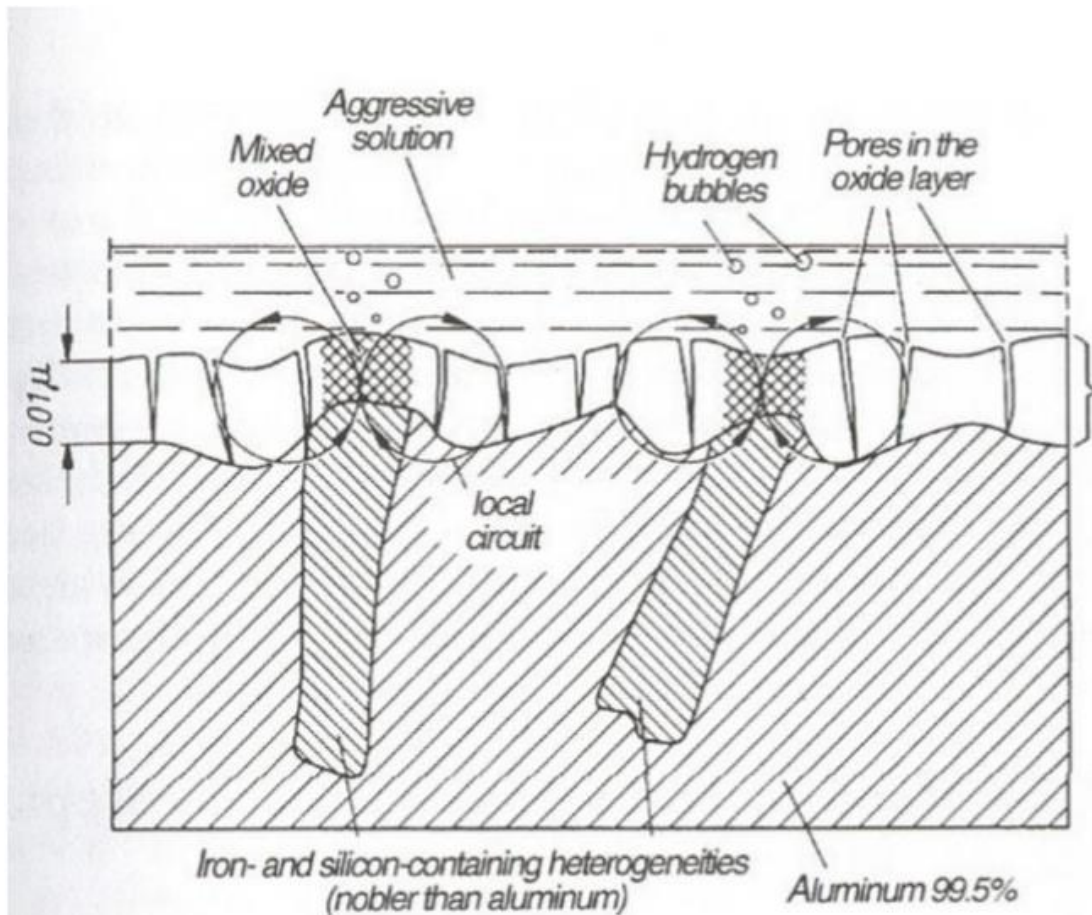


Επειδή οι αντιδράσεις οξειδωσης και αναγωγής στη διάβρωση είναι αλληλοεξαρτώμενες, μείωση του ρυθμού διάβρωσης μπορεί να επιτευχθεί με μείωση του ρυθμού πραγματοποίησης κάθε αντίδρασης. Για παράδειγμα, ο σίδηρος δε διαβρώνεται σε νερό ή σε θαλασσινό νερό που δεν περιέχει διαλυμένο οξυγόνο, γιατί δεν μπορεί να συμβεί η καθοδική αντίδραση. Η απομάκρυνση του οξυγόνου αποτελεί ένα κοινό μέτρο μείωσης της διαβρωτικότητας και μπορεί να επιτευχθεί τόσο με χημικά όσο και με μηχανικά μέσα.[2]

3.1. Το Φυσικό στρώμα οξειδίων του αλουμινίου.

Το αλουμίνιο καλύπτεται μόνιμα με ένα λεπτό στρώμα οξειδίων, το οποίο είναι διαφανές και διατηρεί τη μεταλλική λαμπρότητα του αλουμινίου. Αντίθετη εικόνα παρουσιάζει το κοκκινωπό οξείδιο του σιδήρου. Το στρώμα του οξειδίου του αλουμινίου μπορεί να παραλληλιστεί με ένα λεπτό υμένιο μη αγώγιμο, που εμποδίζει σε μεγάλο βαθμό τη γαλβανική διάβρωση.[23]

Το φυσικό στρώμα οξειδίου του αλουμινίου αποτελείται από ένα εξαιρετικά λεπτό και συμπαγές στρώμα (στρώμα βάσης) και ένα ενυδατωμένο ανώτερο στρώμα πάχους 0,005 μη- 0,01 μη. Αυτό το λεπτό στρώμα έχει μεγάλο αριθμό πόρων και κατά συνέπεια αδύνατα σημεία, οπότε το υποκείμενο μεταλλικό αλουμίνιο οδηγείται σε διάλυμα ($Al(OH)_3$).



Σχήμα 3.1.1. Αλουμίνιο 99,5% που έχει επικαλυφθεί από φυσικό στρώμα οξειδίου[23]

Εάν σε ένα τέτοιο πόρο το αλουμίνιο οδηγηθεί σε διάλυμα, αυτό συνήθως κατακρημνίζεται ως προϊόν διάβρωσης που γεμίζει τον πόρο και σταματά την περαιτέρω διάβρωση. Στην περίπτωση που το αλουμίνιο περιέχει κραματικά στοιχεία, υπό μορφή στερεού διαλύματος, εμφανίζονται και αυτά στο στρώμα οξειδίων. Π.χ. στα κράματα Al- Mg, η συγκέντρωση του Mg στο στρώμα οξειδίων είναι μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση του στο μέταλλο, ιδιαίτερα μετά την ανόπτηση. Γι' αυτό το λόγο, η επιφάνεια των ημικατεργασμένων προϊόντων, μετά από πλήρη ανόπτηση, μπορεί να πάρει μια γκρι χυτή μορφή. Αυτός είναι και ο λόγος που τέτοια κράματα υφίστανται ανόπτηση σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα και όχι στον αέρα. Όσον αφορά την αρχική επιφάνεια, το στρώμα των οξειδίων στο αλουμίνιο αναπτύσσεται μερικώς προς τα έξω, αφού ως οξείδιο έχει μεγαλύτερο όγκο από το μέταλλο του και μερικώς προς τα μέσα, υπερκαλύπτοντας το υποκείμενο μέταλλο.

Εφόσον το φυσικό στρώμα οξειδίων δημιουργείται και αναπτύσσεται μέσα στο μέταλλο, σε σημεία που υπάρχουν εγκλείσματα στη δομή του αλουμινίου, έχει διαφορετική χημική σύνθεση. Τα κατακρημνίσματα είναι μεγαλύτερα από το στρώμα του οξειδίου. Ενώσω αναπτύσσεται το στρώμα του οξειδίου συναντά το κατακρήμισμα του προϊόντος διάβρωσης στην επιφάνεια και δημιουργούνται συνθήκες γαλβανικού κελιού, εάν βρεθούν σε διαβρωτικό περιβάλλον.

Το οξείδιο του αλουμινίου είναι καλό μονωτικό υλικό από μόνο του, ενώ ένα οξείδιο αλουμινίου που περιέχει σίδηρο, θεωρείται ημιαγωγός που αφήνει σε τέτοιο βαθμό τα ηλεκτρόνια να το διαπεράσουν, που επιτρέπει τη γαλβανική διάβρωση. Αυτό μπορεί να γίνει ακόμη και αν αυξηθεί τεχνητά το πάχος του στρώματος των οξειδίων (π.χ. ανοδίωση). Έτσι το στρώμα των οξειδίων δε θεωρείται αδιαπέραστος τοίχος, που προφυλάσσει το υποκείμενο αλουμίνιο. Τα κραματικά στοιχεία του αλουμινίου επηρεάζουν τη σύνθεση του στρώματος του οξειδίου όπως εκείνη του γειτονικού μετάλλου. [23]

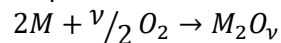
4. Θερμοδυναμική της διάβρωσης .

4.1. Προδιάθεση των μετάλλων και κραμάτων για διάβρωση.

Τα μεταλλεύματα με δαπάνη ενέργειας μετατρέπονται σε μέταλλα. Ένα μέρος της ενέργειας αυτής παραμένει στα μέταλλα με συνέπεια να αποκτήσουν μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια από την ενέργεια του αρχικού μεταλλεύματος. Έτσι, σύμφωνα με το 2ο Θερμοδυναμικό νόμο, τα μέταλλα έχουν την προδιάθεση για αυθόρμητη ενεργειακή υποβάθμιση, αν το περιβάλλον το επιτρέπει, με το σχηματισμό των αρχικών ενεργειακών χαμηλής στάθμης μορφών τους. Το ίδιο βέβαια ισχύει και για τα κράματα. Έτσι, τα μέταλλα, όπως το σίδηρο, το αλουμίνιο κ.λ.π, που βρίσκονται ως μεταλλεύματα με τη μορφή ένυδρων ή όχι οξειδίων, ξαναπαίρνουν την ίδια χημικά και κρυσταλλογραφικά αρχική μορφή τους, κατά τη διάβρωση στην ατμόσφαιρα (οξυγόνο, υγρασία) ή στο νερό (διαλυμένο οξυγόνο).[1]

Αυτή η φυσική προδιάθεση είναι και η αιτία της διάβρωσης. Η τελική πιστοποίηση της αυθόρμητης κατεύθυνσης του φαινομένου της διάβρωσης γίνεται με το αντίστοιχο κριτήριο της χημικής θερμοδυναμικής, με το αρνητικό πρόσημο της μεταβολής του ολικού προτύπου χημικού δυναμικού $\Delta_{\mu_{ολ}}$.

Εάν εξεταστεί η διαβρωτική δράση ενός ν-σθενούς, στη γενική περίπτωση, μετάλλου M, που περιγράφεται από την εξίσωση:



όπου το M οξειδώνεται δίνοντας ηλεκτρόνια στο Οξυγόνο και σχηματίζει οξείδιο του M

Και υπολογιστεί το :

$$\Delta\mu^o_{M \rightarrow M_2O_\nu} = \mu^o_{M_2O_\nu} - (2\mu^o_M + \nu/2 \mu^o_{O_2})$$

οπού: $\Delta\mu^o$ =μεταβολή του προτύπου χημικού δυναμικού,

$\mu^o_{O_2}$ = πρότυπο χημικό δυναμικό του οξυγόνου,

$\mu^o_{M_2O_\nu}$ =πρότυπο χημικό δυναμικό του οξειδίου και

μ^o_M =πρότυπο χημικό δυναμικό του μετάλλου

Δηλαδή η μεταβολή του ολικού χημικού δυναμικού σε πίεση μιας ατμόσφαιρας και σε θερμοκρασία 25°C, χωρίς υγρασία, αποδεικνύεται ότι, για όλα τα μέταλλα και κράματα είναι αρνητικό. Αυτό σημαίνει ότι, για όλα τα μέταλλα και τα κράματα υπάρχουν θερμοδυναμικά επιτρεπτές συνθήκες - ακόμη και στις συνηθισμένες συνθήκες και χωρίς υγρασία - που σ' αυτές είναι δυνατή η έναρξη της διάβρωσης.

Στην πράξη όμως, όλες οι δράσεις δεν πραγματοποιούνται στη θερμοδυναμικά επιτρεπτή θερμοκρασία έναρξης, αλλά στην πραγματική θερμοκρασία έναρξης, που είναι πάντοτε υψηλότερη της θερμοδυναμικά επιτρεπτής.

Σε όλες τις θερμικά διεγερόμενες αντιδράσεις στις οποίες παίρνει μέρος στερεό σώμα, μπορεί η αντίδραση να αρχίσει στη θερμοδυναμικά επιτρεπτή θερμοκρασία, με την βοήθεια των αταξιών δομής της επιφάνειας του στερεού, αλλά δεν είναι δυνατή η συνέχιση της. Αυτό οφείλεται, σύμφωνα με τη θεωρία της Αταξίας, στην έλλειψη αντιστρεπτών αταξιών

Frenkel (μεταλλικά ιόντα σε περιπλεγματικές θέσεις), των οποίων η παρουσία είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί η συνέχιση της αντίδρασης μέχρι την εξάντληση του υλικού.

Η διάβρωση ανήκει στην κατηγορία των αντιδράσεων αυτών. Επομένως, αν η συνέχιση της πραγματοποιείται με θερμική διέγερση, θα απαιτούσε την ανύψωση της θερμοκρασίας πάνω από το ένα τρίτο του απόλυτου σημείου τήξης κάθε κράματος ή μετάλλου, διότι από αυτή τη θερμοκρασία και πάνω είναι δυνατή η απορρόφηση της θερμικής ενέργειας ενεργοποίησης αταξιών, η οποία απαιτείται για τη δημιουργία των ιοντικών αντιστρεπτών αταξιών. Σε περίπτωση ηλεκτρικής ενέργειας, ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, ενέργειας ενεργοποίησης, παύει να υπάρχει φραγμός της πραγματικής και θερμοδυναμικά επιτρεπτής θερμοκρασίας έναρξης της αντίδρασης.

Οι θερμοκρασίες του ενός τρίτου του απόλυτου σημείου τήξης των διαφόρων μετάλλων, ιδιαίτερα των χαλύβων, βρίσκεται μεταξύ 570 και 910^oC. Η θερμική ενέργεια ενεργοποίησης (q*) αταξιών είναι μεταξύ 16 και 19 Kcal/mol. Η αντίστοιχη απαιτούμενη ηλεκτρική τάση (V), για να δημιουργηθούν αντιστρεπτές ιοντικές αταξίες στη συνηθισμένη θερμοκρασία και χωρίς υγρασία, προκύπτει ότι πρέπει να είναι μεταξύ 230 και 390 mV για (q*=16-19 Kcal/mol). Η τάση αυτή υπολογίζεται από τον τύπο:

$$E = T \left(\frac{dE}{dT} \right)_p - \frac{4,182 \times 10^3}{n_e * F'} q^*$$

Όπου :

- E=η απαιτούμενη να προσφερθεί τάση (σε V)
- T=θερμοκρασία πραγματοποίησης του φαινομένου που διεγείρεται ηλεκτρικά
- n_e=αριθμός ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων,
- F'=σταθερά του Faraday (96500 C/mol)

Και ,

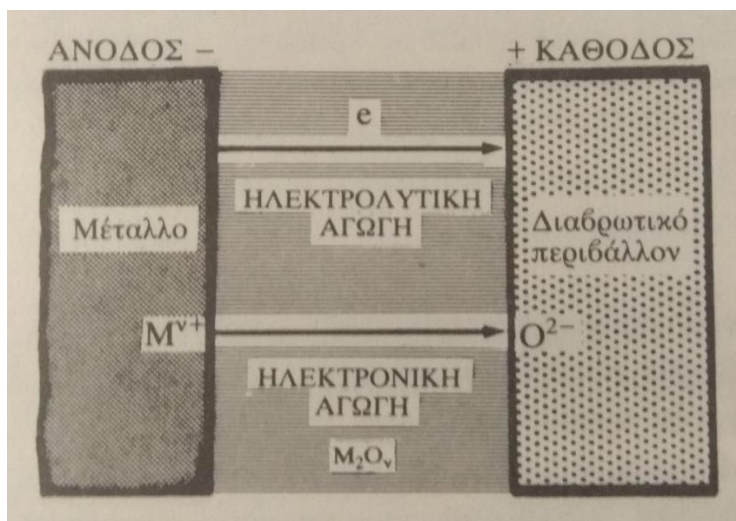
$$\frac{q^*}{N_L} = \varepsilon = h\nu, c = \nu\lambda, \lambda = \frac{h}{m_e\nu} = \frac{h}{\sqrt{2em_eV}}$$

Όπου ε=μέγεθος κβάντου, h= σταθερή του Planck, ν=συχνότητα, λ=μήκος κύματος, m_e= μάζα ηλεκτρονίων, ν_e=ταχύτητα ηλεκτρονίων, V= τάση με την οποία κινούνται τα ηλεκτρόνια , e=φορτίο ηλεκτρονίων N_L= σταθερή του Loschmidt.

Επομένως, η πραγματική θερμοκρασία έναρξης της διάβρωσης των μετάλλων είναι η συνηθισμένη με την προϋπόθεση να συμβεί διέγερση με τάση της τάξης 230-390 mV, γιατί τότε τα θερμικά κβάντα παραγόμενα στη θερμοκρασία του ενός τρίτου του απόλυτου σημείου τήξης είναι ίσα με τα ηλεκτρικά, παραγόμενα με την παραπάνω τάση, σε συνθήκη θερμοκρασία. Δηλαδή, το μήκος κύματος του ηλεκτρονίου στη δεύτερη περίπτωση είναι το ίδιο με το θερμικό μήκος κύματος στο 1/3 του απόλυτου σημείου τήξης, όταν η τάση με την οποία ρέουν τα ηλεκτρόνια είναι 340-390mV για δισθενή μέταλλα και 230 έως 289 mV για τρισθενή.

4.2. Αποκατάσταση γαλβανικού στοιχείου ανάμεσα στο μέταλλο ή κράμα που διαβρώνεται και του διαβρωτικού περιβάλλοντος.

Ο Wagner δέχθηκε και αποδείχτηκε απόλυτα αργότερα, ότι ανάμεσα στο μέταλλο ή στο κράμα και το διαβρωτικό περιβάλλον (ακόμα και ξηρός αέρας ή άλλο ξηρό διαβρωτικό αέριο) δημιουργείται αυτόματα δυναμικό γαλβανικού στοιχείου με αρνητικό πόλο (άνοδος) το μέταλλο ή το κράμα, θετικό πόλο (κάθοδος) το διαβρωτικό περιβάλλον (ένα αέριο ή υγρό ή διάλυμα ή τήγμα ή στερεό) και ηλεκτρολύτη το προϊόν της διάβρωσης, έστω και συμπαγές (χωρίς πόρους).



Σχήμα 4.2.1. Εσωτερικά βραχυκυκλούμενο γαλβανικό στοιχείο μετάλλου που διαβρώνεται κατά Wagner .

Τα δυναμικά που δημιουργούνται για τα διάφορα μέταλλα, αν αυτά μετρηθούν σε συνηθισμένη θερμοκρασία και χωρίς υγρασία στον αέρα και σε ακραίες εργαστηριακές συνθήκες φασματοσκοπικής καθαρότητας των μετάλλων, μετά από ανόπτησή τους και ηλεκτρολυτική λείανση της επιφάνειάς τους, δηλαδή χωρίς αταξίες δομής (ενεργά κέντρα), βρίσκονται μεταξύ 250-350 mV, ενώ χωρίς τέτοιες επεξεργασίες μεταξύ 320-450 mV.

Το συνολικό δυναμικό που δημιουργείται ανάμεσα στο μέταλλο ή κράμα και στο διαβρωτικό περιβάλλον λέγεται δυναμικό διάβρωσης. Στην πράξη, το δυναμικό αυτό ενισχύεται από την υγρασία και από άλλους παράγοντες του διαβρωτικού περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα να είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό που απαιτείται για τη δημιουργία αντιστρεπτών ιοντικών αταξιών. Γι' αυτό ακριβώς, παρατηρούμε όλα τα μέταλλα και τα κράματα να παθαίνουν διάβρωση σε συνηθισμένες συνθήκες, με αυτοδιέγερση τους από το δυναμικό διάβρωσης, που δημιουργεί αντιστρεπτές ιοντικές αταξίες.

5. Κινητική της Διάβρωσης.

Με εξαίρεση τις ήπιες ή έντονα ελεγχόμενες εκβιασμένες συνθήκες, στις οποίες παρουσιάζεται ομοιόμορφη διάβρωση και τη σπηλαιώδη μηχανική διάβρωση, σε όλες τις άλλες περιπτώσεις και ανεξάρτητα από το είδος του διαβρωτικού περιβάλλοντος, των δράσεων, της διάβρωσης και της κλίμακας τους, αυτές ανάγονται ποιοτικά σε δύο μηχανισμούς, τον ηλεκτροχημικό του Wagner και το χημικό.

5.1. Ηλεκτροχημικός Μηχανισμός κατά Wagner

Η αποκατάσταση του δυναμικού διάβρωσης στο γαλβανικό στοιχείο και η ενίσχυση του από τοπικά γαλβανικά στοιχεία οδηγεί στη δημιουργία ιοντικών αταξιών και στην κάλυψη της επιφάνειας του μετάλλου με προϊόντα διάβρωσης.

Ο Wagner, αφού μέτρησε τις ταχύτητες προώθησης του στρώματος του προϊόντος διάβρωσης, επεξεργάστηκε τα αποτελέσματα και κατέληξε στις πιο κάτω εξισώσεις της χρονικής εξέλιξης της διάβρωσης, η οποία αλλάζει χωρίς όμως να αλλάζει το βραδύτερο στάδιο του μηχανισμού (δηλαδή έχουμε ίδια τιμή της ενέργειας ενεργοποίησης).

$$y^2 = Kt \text{ για } y > 1000\text{\AA} \text{ (εξ 5.1.1)}$$

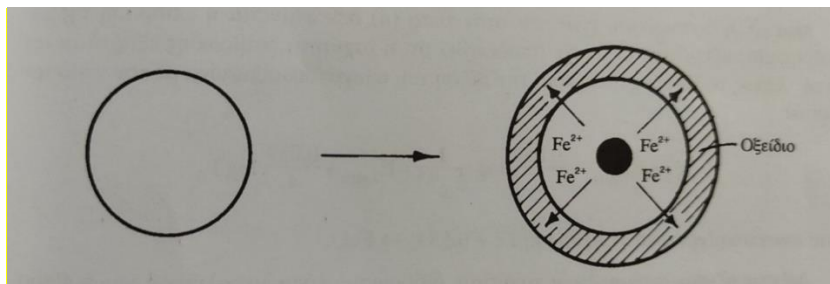
$$\text{ή } y^3 = Kt \text{ για } y < 1000\text{\AA} \text{ (εξ 5.1.2)}$$

Σύμφωνα με τον Fick, στις περιπτώσεις κραμάτων ή μετάλλων με μεγάλη επιφανειακή τάση, δηλαδή όταν η συνοχή τους είναι πολύ μεγάλη, δε σχηματίζεται αξονική τρύπα, όπως συμβαίνει στην περίπτωση σιδήρου κυκλικής διατομής (π.χ. ράβδοι οπλισμού σκυροδέματος) (Σχήμα 5.1.1). Αυτό, χωρίς να μεταβάλλει την τιμή της ενέργειας ενεργοποίησης και επομένως το είδος του βραδύτερου σταδίου (διάχυση ιόντων μετάλλου σε στερεή κατάσταση), οδηγεί στην πιο κάτω γραμμική εξίσωση

$$y = Kt \text{ (εξ 5.1.3)}$$

Όπου

- y = το πάχος των προϊόντων διάβρωσης σε \AA
- K = η σταθερή της ταχύτητας (σε cm^2/s)
- t = χρόνος δημιουργίας του στρώματος (s)



Σχήμα 5.1.1. Δημιουργία αξονικής τρύπας, εξαιτίας αυτοδιάχυσης των ιόντων του σιδήρου και της διάχυσης τους μέσα από το οξειδίο του προς το διαβρωτικό περιβάλλον.

Μετρώντας τη σταθερά K σε διάφορες θερμοκρασίες, ο Wagner υπολόγισε την ενέργεια ενεργοποίησης του φαινομένου σε $q^* = 18 \text{ Kcal/mol}$ (78 KJ/mol). Με βάση την τιμή αυτή έκανε τη σκέψη ότι, το βραδύτερο στάδιο θα είναι η διάχυση ενός συστατικού του συστήματος (ιόντα) σε στερεή κατάσταση, γιατί αυτή η ενέργεια απαιτείται για να δημιουργηθούν αντιστρεπτές αταξίες στα ιόντα των στερεών και να διαχυθούν. Δηλαδή τα ιόντα του μετάλλου διαχέονται γιατί έχουν μικρότερες ακτίνες από τα ιόντα του διαβρωτικού περιβάλλοντος (πχ ιόντα οξυγόνου).

Έτσι, ο Wagner έκανε την θεώρηση ότι, το γαλβανικό στοιχείο μετάλλου - διαβρωτικού περιβάλλοντος είναι εσωτερικά βραχυκυκλωμένο γαλβανικό στοιχείο, με αποτέλεσμα η διάχυση άτακτων ιόντων να συνοδεύεται από τη διάχυση ισοδύναμων ηλεκτρονίων. Με την εφαρμογή του νόμου του Faraday, επιστρέφουμε στην πειραματική εξίσωση $y^2 = Kt$ (5.1.1) και στην φυσική έννοια που απέκτησε η εμπειρική σταθερή K , η οποία ταυτίζεται με το μόρφωμα:

$$K = \frac{2E_{\delta}\mu'_e\mu'_+uV_m}{n_eF'} \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right] \quad (\text{εξ } 5.1.4)$$

Όπου

E_{δ} = το δυναμικό διάβρωσης του μετάλλου (V)

μ'_e = αριθμός μεταφοράς ηλεκτρονίων

μ'_+ = αριθμός μεταφοράς μεταλλικών ιόντων

u = ειδική αγωγιμότητα του προϊόντος διάβρωσης ($\frac{1}{\Omega \text{ cm}}$)

V_m = μοριακός όγκος του προϊόντος διάβρωσης (cm^3/mol)

n_e = ο αριθμός ηλεκτρονίων που ανταλλάσσει στη διάρκεια της αντίδρασης κάθε γραμμοΐον

F' = σταθερή του Faraday ($96500 \frac{\text{C}}{\text{mol}}$)

Δηλαδή, η χρονική εξέλιξη της διάβρωσης ακολουθεί τον παραβολικό νόμο των παραπάνω εξισώσεων, για τα περισσότερα μέταλλα με βραδύτερο στάδιο τη διάχυση των ιόντων του μετάλλου, μέσα από το οξείδιο προς το διαβρωτικό περιβάλλον και κύριο χαρακτηριστικό την αραίωση του εσωτερικού του μετάλλου μέχρι την πλήρη κατανάλωση του.

5.2. Μηχανισμός χημικής διάλυσης.

Ο μηχανισμός χημικής διάλυσης είναι ο μηχανισμός που παρουσιάζεται όταν επέρχεται χημική ομοιόμορφη διαλυτική προσβολή. Κατά το μηχανισμό αυτό, έχουμε διάλυση στερεών σε υγρά, όπου το βραδύτερο στάδιο είναι η διάχυση των ιόντων ή των μορίων του διαβρωτικού περιβάλλοντος προς την επιφάνεια του μετάλλου με ρυθμό που βασίζεται στην γραμμική εξίσωση του Fick $y = Kt$. Σε περίπτωση που έχουμε διάχυση σε διάλυμα των προϊόντων της διάβρωσης προς το εσωτερικό του διαβρωτικού περιβάλλοντος ισχύει η εξής λογαριθμική σχέση

$$y = e^{Kt}$$

Και στις δύο περιπτώσεις η ενέργεια ενεργοποίησης είναι 6 Kcal/mol (25 KJ/mol) και η σταθερή K είναι συνάρτηση του χρόνου διάχυσης και του πάχους της προσαρτημένης στιβάδας.

Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι, τα παραπάνω ισχύουν όταν η ταχύτητα διάβρωσης, δηλαδή η ένταση του διαβρωτικού περιβάλλοντος, δεν είναι μεγάλη. Όταν έχουμε μεγάλη ταχύτητα διάβρωσης, τότε το όλο σύστημα εξελίσσεται σε διάβρωση με βελονισμούς.

Αν η διάχυση των ιόντων σε διάλυμα γίνει αυθόρμητα η σκόπιμα γρήγορη, ώστε η όδευση των ιόντων του μετάλλου σε στερεή κατάσταση να γίνει στο βραδύτερο στάδιο, η χημική διάβρωση μετατρέπεται σε ηλεκτροχημική.

6. Το αλουμίνιο και τα κράματα του.

6.1. Γενικά.

Η εφαρμογή του Αλουμινίου και των κραμάτων του εντοπίζεται σε πολλούς τομείς της καθημερινότητας μας όπως μεταφορές, οικοδομική βιομηχανία, ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, συσκευασίες τροφίμων κ.α. Αυτό οφείλεται στις καλές ιδιότητες που έχει, όπως είναι οι :

- Χαμηλή πυκνότητα
- Αντίσταση στη διάβρωση
- Μεγάλη ποικιλία κραμάτων με διαφορετικές ιδιότητες και πεδία εφαρμογών
- Η ευκολία χύτευσης και μηχανικής διεργασίας
- Θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Η ανακυκλωσιμότητα του
- Καταλληλότητα για διάφορες μορφές επιφανειακής προστασίας

A) Χαμηλή πυκνότητα:

Το αλουμίνιο κατατάσσεται στα ελαφριά μέταλλα με πυκνότητα κραμάτων που κυμαίνεται από 2600 σε 2800 kg/m³. Για το λόγο αυτό, με πυκνότητα σχεδόν ενός τρίτου του σιδήρου, κατασκευές με αλουμίνιο μπορούν να έχουν μειωμένο βάρος κατά 50 % λαμβάνοντας υπόψιν και τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος. Έτσι, σε κατασκευές όπως οι κατασκευές του πλοίου, επιτυγχάνεται μείωση του βάρους στα υψηλότερα καταστρώματα και μετατόπιση του κέντρου βάρους του πλοίου προς τα κάτω.

B) Αντίσταση στη διάβρωση :

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του αλουμινίου και των κραμάτων του είναι η αντίσταση στη διάβρωση σε οικιστικό βιομηχανικό και θαλάσσιο περιβάλλον. Η αντίσταση αυτή προσφέρει μεγάλη περίοδο χρήσης με ελάχιστη συντήρηση ακόμα και σε απροστάτευτες επιφάνειες είτε με βαφή είτε με ανοδίωση. Εφαρμόζοντας προστασία στην επιφάνεια, αυτή καθίσταται ακόμη πιο ανθεκτική στη διάβρωση, διατηρώντας ταυτόχρονα και τα εμφανισιακά της χαρακτηριστικά.

Γ) Μεγάλη ποικιλία κραμάτων με διαφορετικές ιδιότητες και πεδία εφαρμογών:

Με οκτώ κατηγορίες/σειρές κραμάτων του Αλουμινίου, καλύπτεται μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών με μεγάλο πεδίο εφαρμογών. Για παράδειγμα η κατηγορία 2000 έχει καλές μηχανικές ιδιότητες, αλλά υστερεί σε συγκόλληση. Η 5000 έχει κακή συμπεριφορά σε συγκολλήσεις και καλή αντίσταση στη διάβρωση. Έτσι, η επιλογή του κράματος σε κάθε εφαρμογή είναι σημαντική, ώστε το κράμα να είναι συμβατό με τις συνθήκες χρήσης του.

Δ) Η ευκολία χύτευσης και μηχανικής διεργασίας :

Η χύτευση του αλουμινίου (casting) το καθιστά ιδανικό για τη δημιουργία εξαρτημάτων με περίπλοκα σχήματα και μεγέθη. Επίσης, σε συνδυασμό με την ευκολία μηχανουργικής κατεργασίας τους μπορούμε να πετύχουμε εξαρτήματα υψηλής ποιότητας με μείωση χρόνου κατασκευής.

Η μηχανικές διεργασίες που εφαρμόζονται στο αλουμίνιο είναι οι εξής:

Διέλαση (extrusion) είναι η τεχνική κατά την οποία γίνεται μορφοποίηση του μετάλλου συμπιέζοντας το με έμβολο μέσα από μια μήτρα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στην παραγωγή μορφοράβδων (προφίλ) αλουμινίου σταθερών διαστάσεων.

Ολκή (drawing) είναι η τεχνική κατά την οποία το μέταλλο περνά από μια μήτρα μικρής διατομής και με τράβηγμα επιτυγχάνεται μείωση της διαμέτρου του μετάλλου. Κύρια χρήση της μεθόδου είναι η παραγωγή συρμάτων.

Έλαση (rolling) είναι η τεχνική δημιουργίας φύλλων μετάλλου με την προώθηση του μετάλλου μέσα από μία σειρά κυλίνδρων είτε εν θερμώ (ψηλές θερμοκρασίες μετάλλου είτε εν ψυχρώ).

Σφυρηλάτηση (forging) είναι η τεχνική κατά την οποία διαμορφώνουμε το μέταλλο με συνεχή κτυπήματα ανάμεσα σε μία σφύρα και το αμόνι. Μια παραλλαγή της μεθόδου που χρησιμοποιείται ευρέως με το αλουμίνιο είναι η κοίλανση (deep drawing). Η κοίλανση εφαρμόζεται σε φύλλα μετάλλου τα οποία περνούν σε μια σειρά από πρέσες-μήτρες για σταδιακή μορφοποίηση του φύλλου σε ένα κούφιο τρισδιάστατο εξάρτημα.

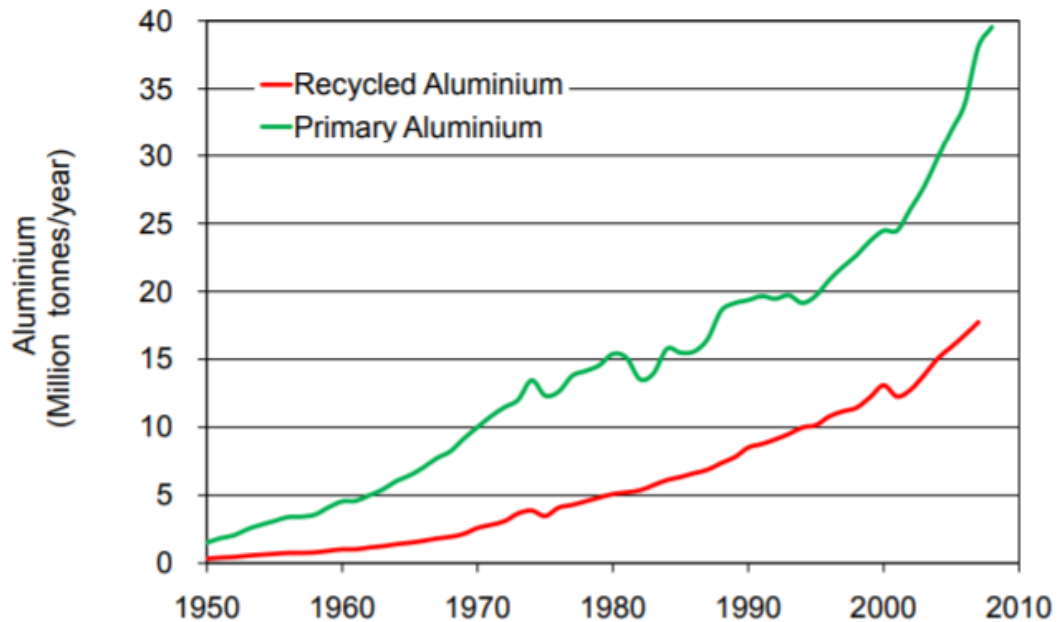
Ε) Θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα:

Η θερμική αγωγιμότητά του αλουμινίου ($237 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) σε σχέση με το χαλκό ($400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), σε συνδυασμό με την ευκολία και το κόστος μορφοποίησης, το καθιστά ιδανικό υλικό για την κατασκευή εναλλακτών θερμότητας (ραδιατέρ αυτοκινήτων ψυγείων κ.α.).

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αλουμινίου ($26,548 \cdot 10^{-9} \Omega\cdot\text{m}$) έχει τα 2/3 της αγωγιμότητας του χαλκού ($16,78 \cdot 10^{-9} \Omega\cdot\text{m}$), που και πάλι σε συνδυασμό με το κόστος, αλλά και την αντοχή του στη διάβρωση και την χαμηλή πυκνότητά του, το καθιστά ιδανικό μέσο για κατασκευή και χρήση καλωδίων για τηλεπικοινωνιακές και δικτυακές εγκαταστάσεις.

Στ') Η ανακυκλωσιμότητα του

Το αλουμίνιο είναι ανακυκλώσιμο σε ποσοστό 95%, χωρίς να μειώνονται οι ιδιότητες του και η ενέργεια που απαιτείται για την ανακύκλωση αντιστοιχεί στο 5% της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή του μετάλλου από βωξίτη.



Γραφική 6.1.1. Παγκόσμια εξέλιξη ανακύκλωσης αλουμινίου σε σχέση με την πρωτογενή παραγωγή αλουμινίου.[11]

Ζ) Καταλληλότητα για διάφορες μορφές επιφανειακής προστασίας

Με τις διάφορες μορφές επιφανειακής προστασίας που επιδέχεται το αλουμίνιο διευκολύνεται η χρήση του σε πολλούς τομείς. Για παράδειγμα, η σειρά 2000 και 7000 η οποία δεν έχει καλή αντοχή στη διάβρωση, λόγω του χαλκού που περιέχει, επιδέχεται βαφή. Η σειρά 3000 έχει καλή επιδεικτικότητα σε επιχάλκωση. Επίσης, μπορεί να διαμορφωθεί η σκληρότητα της επιφάνειας, αλλά και η όψη της. Έτσι, είτε με ανοδική προστασία είτε με βαφή είτε με επιμετάλλωση έχει αυξηθεί η χρήση του σε πολλές βιομηχανικές και οικιστικές εφαρμογές.

6.2. Κατηγοριοποίηση κραμάτων αλουμινίου

Όλα τα κράματα αλουμινίου κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, σε κράματα χύτευσης (cast alloys) και σε κράματα διαμόρφωσης (extruded or forged wrought alloys). Στη συνέχεια διαχωρίζονται ανάλογα με τα πρόσθετα τους σε διάφορες σειρές, οι οποίες παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά όσον αφορά την αντίσταση τους στη διάβρωση, τις μηχανικές τους ιδιότητες, την ευκολία χύτευσης κ.α. Γι' αυτό το λόγο, πρέπει να επιλέγουμε την σειρά που θα χρησιμοποιήσουμε ανάλογα με την εφαρμογή.

6.2.1. Κραματικά στοιχεία αλουμινίου-Κύριες Σειρές Αλουμινίου.

Τα βιομηχανικά κράματα αλουμινίου αποτελούνται από το κύριο κραματικό στοιχείο, πρόσθετα και ακαθαρσίες. Τα κραματικά στοιχεία αποτελούν, στις περιπτώσεις κραμάτων διαμόρφωσης, το 1-7% κατά μάζα και στις περιπτώσεις κραμάτων χύτευσης μέχρι 20% κατά μάζα. Τα κύρια Κραματικά στοιχεία είναι ο χαλκός, το μαγνήσιο, το πυρίτιο, το μαγγάνιο και ο ψευδάργυρος. Κάποια από αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα, για την επίτευξη πολλαπλών ιδιοτήτων. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι σειρές αλουμινίου με το κύριο του κραματικό στοιχείο και την επίδραση των κραματικών στοιχείων στις ιδιότητες της κάθε σειράς.

Κραματικό Στοιχείο	Σειρά κράματος χύτευσης	Σειρά κράματος διαμόρφωσης
Χωρίς προσθήκη	10000	1000
Χαλκός	20000	2000
Μαγγάνιο		3000
Πυρίτιο	40000	4000
Μαγνήσιο	50000	5000
Μαγνήσιο & Πυρίτιο		6000
Ψευδάργυρος	70000	7000

Πίνακας 6.2.1.1 : Κατηγοριοποίηση κραμάτων αλουμινίου ανάλογα με το κύριο κραματικό στοιχείο [12]

Τα πρόσθετα, που συνήθως περιέχονται σε ποσοστά μικρότερα του 1 % (χωρίς αυτό να είναι κανόνας) κατά μάζα, σκοπό έχουν να βελτιώσουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του κράματος. Για παράδειγμα το χρώμιο και το μαγγάνιο βελτιώνουν την συγκολλησιμότητα του αλουμινίου, το νικέλιο βελτιώνει την αντοχή σε ψηλές θερμοκρασίες, το τιτάνιο την επεξεργασία μετά την χύτευση και ο μόλυβδος την μηχανουργική κατεργασία. Τα βασικά κραματικά στοιχεία έχουν επιλεγεί για τις ιδιότητες τους, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα

Κραματικό Στοιχείο	Επίδραση	Κράματα αλουμινίου	
		Χύτευσης	Διαμορφοποίησης
Χαλκός	Age hardening alloy (θερμικής κατεργασίας) Βελτιώνει την ολκιμότητα Βελτιώνει την μηχ. Κατεργασία Μειώνει την αντοχή στη διάβρωση Μειώνει την συγκολλησιμότητα	21000	2017A 2024 2014 2618 2219 2030
Μαγγάνιο	Strain hardening alloy (Ενδοτράχυνσης) Βελτιώνει τη μηχανική αντοχή και την αντοχή στη διάβρωση.		3003 3004
Μαγνήσιο	Strain hardening alloy (Ενδοτράχυνσης) Σε ποσοστό έως 12%, προκαλεί βελτίωση της μηχανικής αντοχής και της κατεργασιμότητας. Η σκλήρυνση επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση.		5052 5454 5754 5083 5086
Πυρίτιο	Strain hardening alloy (Ενδοτράχυνσης) αν περιέχει 0,3-0,6% μαγνήσιο Βελτιώνει κατά πολύ, την αντοχή στη διάβρωση και τη διαδικασία χύτευσης με μέγιστο περιεχόμενο 13% Μειώνει την δυνατότητα μηχανουργικής κατεργασίας. Καλή αντοχή στη διάβρωση αν δεν περιέχει χαλκό	41000 45100 42000 42100 42200	
Μαγνήσιο & Πυρίτιο	Age hardening alloy (θερμικής κατεργασίας) Βελτιώνει τη μηχανική αντοχή Βελτιώνει τη εξώθηση αλουμινίου Καλή αντοχή στη διάβρωση Πολύ καλή αποδοχή επιφανειακής παθητικοποίησης .		6060 6005 6061 6082 6106 6262
Ψευδάργυρος	Βελτιώνει τη μηχανική αντοχή Βοηθά την συγκολλησιμότητα αν δεν περιέχει χαλκό Έχει κακή αντοχή στη διάβρωση	71000	7000 7020 7075 7049

Πίνακας 6.2.1.2 : Επίδραση των κραματικών στοιχείων στις ιδιότητες του αλουμινίου[12]

Οι κυριότερες ακαθαρσίες που παρατηρούνται είναι ο σίδηρος και το πυρίτιο, που στην σειρά 1000 συνήθως η αναλογία σιδήρου/πυρίτιο είναι κοντά στο 2/1. Η περιεκτικότητα των ακαθαρσιών κυμαίνεται από λίγα ppm (parts per million) στο εξευγενισμένο αλουμίνιο (π.χ. Σειρά 1199) μέχρι 2000 ppm στα περισσότερα αλουμίνια διαμόρφωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε ανακυκλωμένο αλουμίνιο η περιεκτικότητα μπορεί να είναι μεγαλύτερη και γ' αυτό το λόγο, σε εξαρτήματα μεγάλης επικινδυνότητας αστοχίας π.χ. εξαρτήματα αεροπλάνων χρησιμοποιείται μόνο αλουμίνιο πρωτογενούς παραγωγής.[12]

6.2.2. Κράματα αλουμινίου χύτευσης (Casting Alloys)

Η μεγαλύτερη χρήση κραμάτων αλουμινίου χύτευσης συναντάται στην αυτοκινητοβιομηχανία με ποσοστό μεγαλύτερο του 60% της παγκόσμιας παραγωγής και το υπόλοιπο συναντάται σε μηχανολογικές εγκαταστάσεις, άλλα μέσα μεταφοράς (τρένα) και οικιακές ηλεκτρικές συσκευές. [12]

6.2.2.1. Σειρά 10000 χωρίς κύριο πρόσθετο.

Η κύρια χρήση του είναι σε ηλεκτρολογικές εφαρμογές.

6.2.2.2. Σειρά 20000 με κύριο πρόσθετο το χαλκό.

Βρίσκει εφαρμογές σε μηχανές αυτοκινήτων π.χ. σε πιστόνια μηχανών πετρελαίου, στην κεφαλή της μηχανής (Cylinder heads). Το πιο κοινό αυτής της σειράς είναι το 21000. Η κακή αντοχή του στη διάβρωση το καθιστά ακατάλληλο για εκτενή έκθεση σε διαβρωτικά περιβάλλοντα.

6.2.2.3. Σειρά 40000 με κύριο συστατικό το πυρίτιο.

Είναι ένα από τα ευκολότερα των κραμάτων χύτευσης, καθώς έχει ευτηκτικό σημείο τους 575 °C. Διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την περιεκτικότητα ή μη σε χαλκό. Τα κράματα που περιέχουν χαλκό π.χ. 45100, 46200 με ελάχιστο 3% κατά μάζα χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μηχανών αυτοκινήτων και διαφόρων μερών τους.

Οι κύριες μέθοδοι χύτευσης αλουμινίου είναι οι εξής:

- Sand casting (Χύτευση σε καλούπι από άμμο διαμορφωμένο από μοντέλο εξαρτήματος)
- Investment casting (Χύτευση σε καλούπι από κεραμικό, το οποίο έχει κατασκευαστεί γύρω από κέρινο μοντέλο εξαρτήματος, το οποίο καίγεται κατά την διαδικασία)
- Permanent mold casting (Χύτευση σε μεταλλικό καλούπι πολλαπλών χρήσεων)
- Pressure Die Casting (Χύτευση σε μεταλλικό καλούπι πολλαπλών χρήσεων με χρήση υψηλής πίεσης)

6.2.3. Κράματα αλουμινίου Διαμορφοποίησης (Wrought alloys)

Τα κράματα Διαμόρφωσης μπορούν να καταταχθούν ανάλογα με την μεταλλουργική κατεργασία τους σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Strain-hardening Alloys
- Age hardening Alloys

6.2.3.1. Strain-hardening Alloys (Σκλήρυνση με μηχανική επεξεργασία)

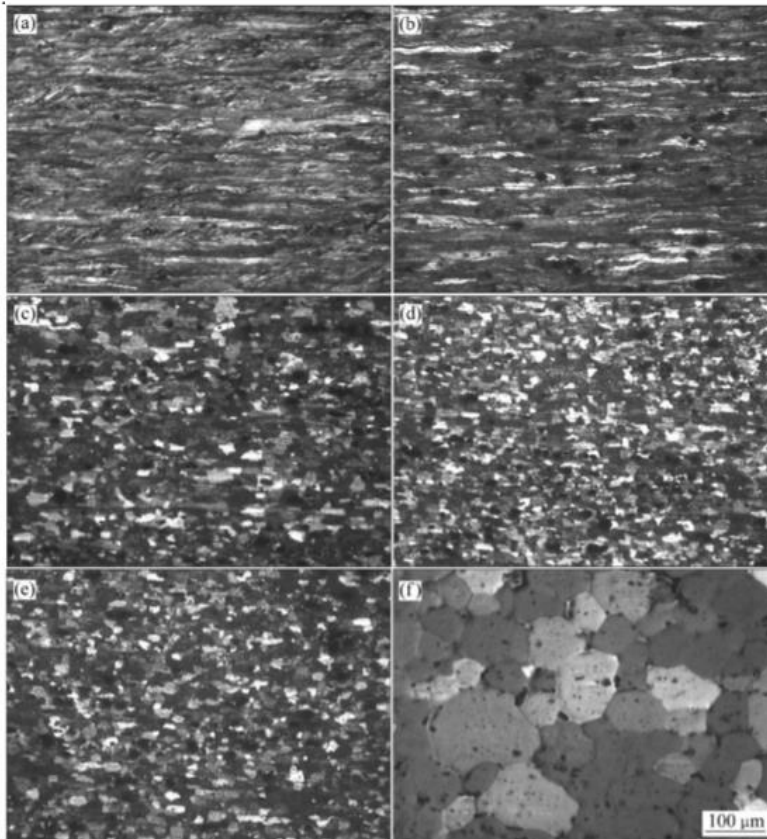
Αν και όλα τα μέταλλα μπορούν να σκληρυνθούν με μηχανική επεξεργασία, στην περίπτωση του αλουμινίου η διαφοροποίηση βασίζεται στην ιδιότητα του κράματος για σκλήρυνση μέσω θερμικής επεξεργασίας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι σειρές 1000, 3000, 5000, 8000.

Κύριο χαρακτηριστικό της σκλήρυνσης με μηχανικά μέσα είναι η παραποίηση της δομής του μετάλλου μέσω πλαστικής παραμόρφωσης. Η πλαστική παραμόρφωση συμβαίνει κατά την αρχική επεξεργασία μέσω έλασης (rolling), διέλασης (stretching), ολκής (drawing), αλλά και κατά την τελική χρήση σε εργοστάσια, όπου γίνεται η διαμόρφωση σε πρέσες ή άλλες μεθόδους σχηματισμού.

Με τη μέθοδο αυτή αυξάνονται οι μηχανικές αντοχές και η σκληρότητα, αλλά μειώνεται η ολκιμότητα (Ductility) του κράματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι, κατά την επεξεργασία με αυτή τη μέθοδο, το υλικό μας μπορεί λόγω της σκλήρυνσης να φτάσει ως ένα σημείο διαμόρφωσης πριν τη δημιουργία ρωγμών. Έτσι, είναι απαραίτητη η χρήση άλλων μεθόδων, όπως για παράδειγμα με Ανόπτηση (Softening by thermal annealing), ώστε να επανέλθει η ευκαμψία του και να αντέξει το υλικό στην τελική διαμόρφωση.

Η ανόπτηση αυτή γίνεται σε τρία στάδια:

- Αποκατάσταση: στο στάδιο αυτό, το υλικό θερμαίνεται σε θερμοκρασία ίση με $0,3T_m$ όπου T_m θερμοκρασία τήξης, επιτυγχάνοντας έτσι την αναδιοργάνωση και αποδέσμευση των κρυσταλλικών διαταραχών (ατελειών) που προκάλεσε η ενδοτράχυνση. Κατά το στάδιο αυτό έχουμε αύξηση της ολκιμότητας και μείωση της σκληρότητας του υλικού.
- Ανακρυστάλλωση: στο στάδιο αυτό, το υλικό θερμαίνεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από $0,4T_m$ έτσι ώστε, η υψηλότερη θερμοκρασία επιτρέπει τη δημιουργία νέων κόκκων (κρυστάλλων) που έχουν πολύ λίγες διαταραχές.
- Ανάπτυξη κρυστάλλων: κατά το στάδιο αυτό, η αύξηση του μεγέθους των κόκκων επιτυγχάνεται με παρατεταμένη έκθεση του υλικού στη θερμοκρασία Ανακρυστάλλωσης. Η αύξηση σε μέγεθος των κρυστάλλων συμβαίνει λόγω της ένωσης τους με μικρότερους κρυστάλλους που τους περιβάλλουν.



Εικόνα 6.2.3.1.1. Μικροδόμη ελάσματος αλουμινίου 5052 κατά την ανόπτηση α) Έλασμα πριν την ανόπτηση, b) 220 °C, c) 320 °C, d) 360 °C, e) 400°C, f) 440 °C [18]

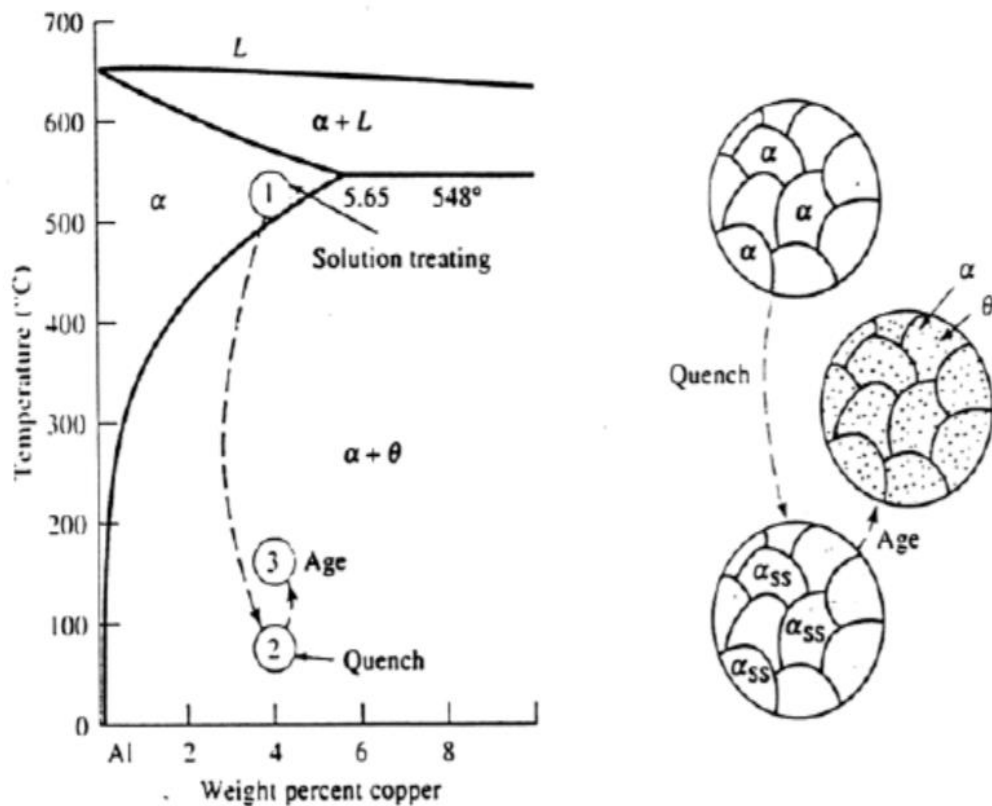
6.2.3.2. Age hardening Alloys (Σκλήρυνση με κατακρήμνιση θερμική επεξεργασία - Θερμοσκληρυνόμενα)

Η σκλήρυνση με κατακρήμνιση ή σκλήρυνση με γήρανση αναφέρεται στην ισχυροποίηση κράματος με σχηματισμό πολύ λεπτής διαμερισμένης φάσης μέσα στο αρχικό μητρικό πλέγμα. Η νέα διαμερισμένη φάση αποτελείται από πολύ μικρά και διασκορπισμένα ομοιόμορφα σωματίδια (τα κατακρημνίσματα). Οι μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων αυτών επιτυγχάνονται με τις εξής διαδικασίες σε τρία στάδια:

- Ομογενοποίηση (Solution Heat treatment): Θερμαίνουμε το υλικό κοντά στη θερμοκρασία solidus, επιτυγχάνοντας διαλυτοποίηση των κραματικών στοιχείων στη μητρική φάση του αλουμινίου. Το τελικό υλικό είναι ένα υπερκορεσμένο σε κραματικά στοιχεία στερεό διάλυμα. Ο χρόνος που απαιτείται να παραμείνει το κράμα μας σε αυτή τη θερμοκρασία εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κράματος μας και τον τύπο του φούρνου που διαθέτουμε (Air furnace ή Salt Bath Furnace)
- Βαφή (Quenching): Σκοπός της βαφής είναι η διατήρηση του υπερκορεσμένου σε στοιχεία στερεού διαλύματος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσω ταχείας ψύξης του κράματος σε κάποιο ψυκτικό μέσο. Η ταχεία αυτή ψύξη επιτυγχάνεται με εμβάπτιση του κράματος σε νερό ή λάδι, με ψέκασμα του ψυκτικού μέσου πάνω στο κράμα ή με εκβιασμένο αέρα πάνω στο κράμα. Σε περίπτωση που η ψύξη δεν είναι

ταχεία τότε τα διαλυτοποιημένα κραματικά στοιχεία διαρρέουν μειώνοντας τον αριθμό διαλυτοποιημένων κραματικών στοιχείων που θα δώσουν κατακρημνίσματα.

- Φυσική Γήρανση(Natural ageing): κατά την διαδικασία αυτή δημιουργείται μια ομοιόμορφη διασπορά κατακρημνισμάτων από το υπερκορεσμένο σε στοιχεία στερεό διάλυμα, καταλήγοντας σε ένα πιο σταθερό θερμοδυναμικά, σε σχέση με το ασταθές αρχικό διάλυμα. Το μειονέκτημα του σταδίου αυτού είναι ότι, αλλάζει τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος όσο περνά ο καιρός, μειώνοντας και την κατεργασιμότητα του. Γι' αυτό το λόγο, η τελική μορφοποίηση γίνεται κατά το στάδιο αυτό.
- Τεχνητή γήρανση (Artificial ageing): είναι η επιτάχυνση της παραπάνω διαδικασίας σε ελεγχόμενο περιβάλλον, επιτυγχάνοντας ποιότητα και ακρίβεια του τελικού υλικού κατασκευής. Η επιτάχυνση γίνεται με αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και με συγκεκριμένο ρυθμό μεταβολής, ανάλογα με το κράμα που επεξεργαζόμαστε.



Σχήμα 6.2.3.2.1. Η διαδικασία της σκλήρυνσης με κατακρήμνιση. α_{ss} είναι το υπέρκορο στερεό διάλυμα, α είναι το στερεό διάλυμα σε κατάσταση ισορροπίας, θ είναι τα κατακρημνίσματα.

Σύμφωνα με τις πιο πάνω κατεργασίες έχουν καθοριστεί κώδικες ονομασίας, οι οποίοι ακολουθούν τον τετραψήφιο αριθμό ανάλογα με τον τρόπο θερμικής-μηχανικής κατεργασίας και οι οποίοι αναλύονται στους πιο κάτω πίνακες.

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ
F	Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς μηχανική ή θερμική κατεργασία
O	Ανόπτηση
H	Ενδοτράχυνση, μόνο για τα κράματα διαμόρφωσης
H1	Μόνο ενδοτράχυνση.
H2	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από ανόπτηση.
H3	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης.
H4	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από βαφή με λάκα ή χρώμα
	Μετά τα δύο ψηφία H1-H2-H3-H4 μπορεί να ακολουθεί ένα ακόμα ψηφίο το οποίο θα καθορίζει την σκληρότητα του κράματος. Ποιο αναλυτικά: HX2 – Quarter Hard HX4 – Half Hard HX6 – Three-Quarters Hard HX8 – Full Hard HX9 – Extra Hard
W	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης Solution Heat-Treated πριν προλάβει να γίνει σκλήρυνση με γήρανση.(Ασταθής κατάσταση)
T	Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση
T1	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και φυσική γήρανση
T2	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, μηχανική κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση
T3	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση
T4	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση
T5	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος
T6	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία
T7	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, θερμική κατεργασία σταθεροποίησης
T8	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση

Πίνακας 6.2.3.2.1

Κατεργασία	Σειρά	Κύριο Κραματικό στοιχείο	Περιεκτικότητα Κραματικού στοιχείου Wt.%	Άλλα πρόσθετα	Αντοχή σε εφελκυσμό MPa
Μηχανική	1000	Δεν έχει	0	Cu	50-160
	3000	Μαγγάνιο	0,5-1,5	Mg, Cu	100-240
	5000	Μαγνήσιο	0,5-5	Mn, Cr	100-340
	8000	Σίδηρος Πυρίτιο	0,6-2 0,3-1		130-190
Θερμική	6000	Μαγνήσιο Πυρίτιο	0,5-1,5 0,5-1,5	Cu, Cr	200-320
	2000	Χαλκός	2-6	Si, Mg	300-480
	7000	Ψευδάργυρος Μαγνήσιο	5-7 1-2	Cu	Χωρίς Cu 320-350 Με Cu 430-600
	4000	Πυρίτιο	0,8-1,7		150-400

Πίνακας 6.2.3.2.2

6.2.3.3. Κράματα της σειράς 1XXX:

Η σειρά 1XXX είναι η βασική σειρά αναφοράς αλουμινίου με αντιπροσωπευτικές σειρές τις:

1100 με 99,00% κατ' ελάχιστο αλουμίνιο

1050-1030 με 99,50% κατ' ελάχιστο αλουμίνιο

1175 99,75% κατ' ελάχιστο αλουμίνιο

Αυτή η σειρά λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε αλουμίνιο συχνά αναφέρεται σαν καθαρό αλουμίνιο. Έχει καλή αντοχή στη διάβρωση, καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και σχετικά καλή συγκολλησιμότητα. Οι κακές του μηχανικές ιδιότητες το καθιστούν ακατάλληλο για εφαρμογές, όπου η αντοχή είναι προαπαιτήση. Έχει εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 69-186 MPa. Δεν επιδέχεται θερμική κατεργασία και η σκλήρυνση γίνεται με ενδοτράχυνση.

6.2.3.4. Κράματα της σειράς 2XXX:

Η σειρά 2000 έχει σαν κύριο κραματοποιό στοιχείο τον χαλκό (Cu) με περιεκτικότητα που κυμαίνεται από 0,7% - 6,8%. Επιδέχεται θερμική επεξεργασία. Η αντοχή σε εφελκυσμό κυμαίνεται από 186 MPa - 427 MPa, καθιστώντας το υψηλής αντοχής σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Δεν έχει καλή αντοχή σε ατμοσφαιρικά διαβρωτικά περιβάλλοντα, όμως με την αποδοχή της βαφής βελτιώνεται. Αντιπροσωπευτικά κράματα της σειράς είναι η 2024 με 3,8 % χαλκό, που χρησιμοποιείται στην αεροναυπηγική και η 2014 με 3,9 % χαλκό που χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία. Και στις δύο αυτές σειρές η ένωση στοιχείων της κατασκευής γίνεται με πριτσίνια. Αν η κατασκευή απαιτεί συγκόλληση, τότε οι προτιμότερες σειρές χρήσης είναι η 2048 με 5,8 % χαλκό και η 2219 με 6,8 % σε χαλκό.

6.2.3.5. Κράματα της σειράς 3XXX:

Η σειρά 3000 έχει σαν κύριο κραματοποιό στοιχείο το μαγγάνιο (Mn) με περιεκτικότητα που κυμαίνεται από 0,5% σε 1,5%. Δεν επιδέχεται θερμική κατεργασία και η σκλήρυνση γίνεται με ενδοτράχυνση. Έχει μέτρια αντοχή με εύρος αντοχής σε εφελκυσμό που

κυμαίνεται από 110 - 282 MPa. Έχει καλή αντοχή σε διάβρωση και καλή συγκολλησιμότητα. Κύριο χαρακτηριστικό του είναι η ευκολία διαμόρφωσης και η δυνατότητα επιχάλκωσης του. Αντιπροσωπευτικά κράματα είναι τα εξής:

- 3003: χρησιμοποιείται ευρέως σε σκεύη κουζίνας και για χημικό εξοπλισμό όπως και σε κτηριακές υποδομές.
- 3004 και 3104: κύρια χρήση στα τενεκεδάκια αναψυκτικών.
- 3015: χρησιμοποιείται για στέγες και πλαϊνές επικαλύψεις κτηρίων

6.2.3.6. *Κράματα της σειράς 4XXX:*

Η σειρά 4000 έχει σαν κύριο κραματοποιό στοιχείο το Πυρίτιο (Si) με περιεκτικότητα που κυμαίνεται από 0,8% - 1,7%. Επιδέχεται θερμική κατεργασία. Η αντοχή σε εφελκυσμό κυμαίνεται από 150 MPa - 400 MPa. Έχει καλά χαρακτηριστικά ροής, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται για δημιουργία περίπλοκων σε σχήμα εξαρτημάτων. Για παράδειγμα το αλουμίνιο 4032, που έχει μέτρια αντοχή, χρησιμοποιείται στην παραγωγή σφυρήλατων προϊόντων, όπως πιστόνια μηχανών αεροπλάνων. Επίσης, λόγω του πυριτίου μειώνεται το σημείο τήξης του και σε συνδυασμό με τα καλά χαρακτηριστικά ροής του, το καθιστά ιδανικό σαν υλικό συγκόλλησης (filler) της σειράς 6000

6.2.3.7. *Κράματα της σειράς 5XXX:*

Αναλύεται στο σημείο 6.2.3.10 καθώς είναι το υλικό υπό μελέτη.

6.2.3.8. *Κράματα της σειράς 6XXX:*

Η σειρά 6000 έχει σαν κύριο κραματοποιό στοιχείο το Μαγνήσιο (Mg) και το Πυρίτιο (Si) με περιεκτικότητα για το κάθε ένα, που κυμαίνεται από 0,5% - 1,5%. Επιδέχεται θερμική κατεργασία. Η αντοχή σε εφελκυσμό κυμαίνεται από 200 MPa - 320 MPa. Έχει καλή αντοχή στη διάβρωση και εξαιρετική ολκιμότητα. Η εξαιρετική του ικανότητα για διέλαση (π.χ. το 6063) το καθιστά ιδανικό για αρχιτεκτονικές εφαρμογές, όπως διάφορα προφίλ παραθύρων και άλλες υποδομές κτιριακών εγκαταστάσεων. Δεν έχει καλή συγκολλησιμότητα χωρίς συγκολλητικό - πληρωτικό υλικό, γι' αυτό όπου χρειάζεται, συνδυάζεται με το 4043 σαν συγκολλητικό υλικό. Άλλα ειδικά κράματα αυτής της σειράς είναι:

- 6061: χρησιμοποιείται σε πάνελ πλαισίου αυτοκινήτων, αεροσκαφών και Θαλαμηγών. Μετά από το 1995 χρησιμοποιείται και στην κατασκευή φιαλών κατάδυσης.
- 6061-T6: είναι υψηλής αντοχής και χρησιμοποιείται σε σκελετούς ποδηλάτων, θαλάμους υποπίεσης και σκάλες πυροσβεστικών οχημάτων.
- 6201: χρησιμοποιείται στην κατασκευή ηλεκτρικών αγωγών υψηλής αντοχής.

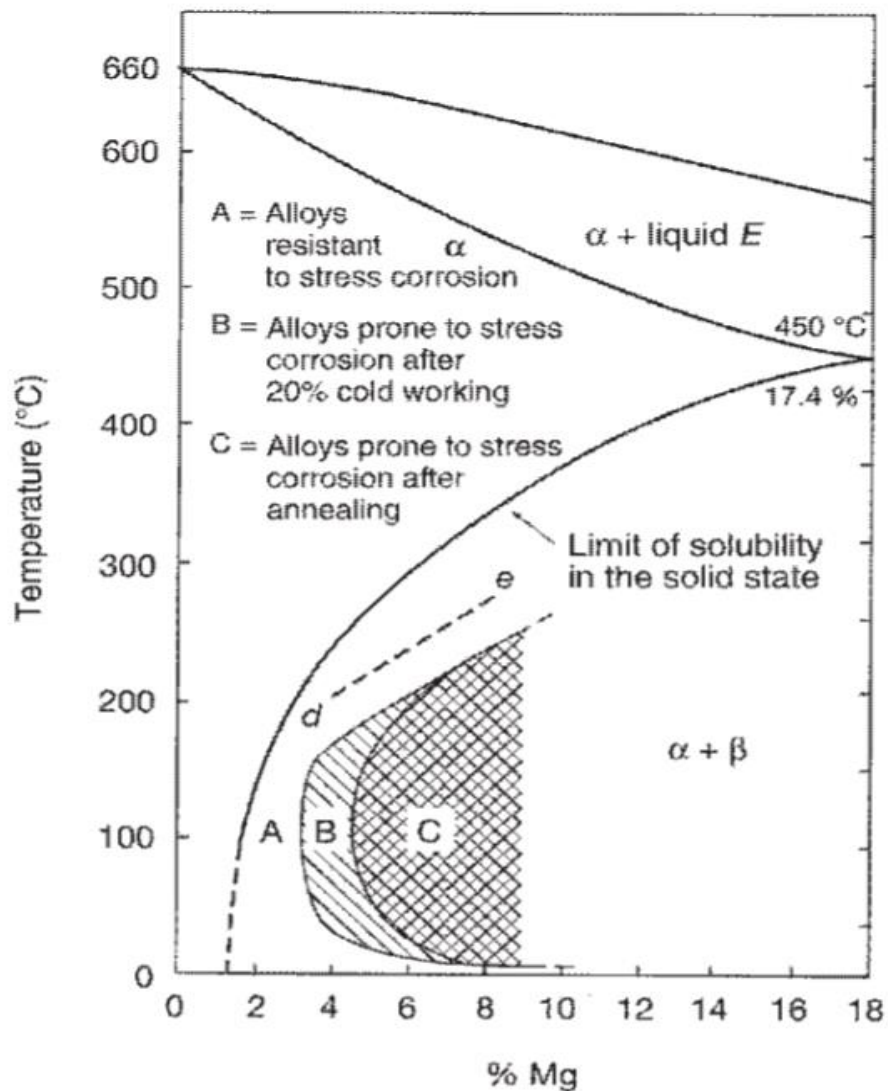
6.2.3.9. *Κράματα της σειράς 7XXX:*

Η σειρά 7000 έχει σαν κύριο κραματοποιό στοιχείο τον Ψευδάργυρο (Zn) με περιεκτικότητα που κυμαίνεται από 5% - 7% και το Μαγνήσιο (Mg) με περιεκτικότητα που κυμαίνεται από 1% - 2%. Επιδέχεται θερμική κατεργασία. Η αντοχή σε εφελκυσμό κυμαίνεται από 320 MPa - 600 MPa με τις υψηλότερες τιμές να αφορούν κράμα που έχει σαν πρόσθετο το χαλκό. Κάποια από τα κράματα της σειράς αυτής έχουν εξαιρετική ακαμψία όπως τα 7150 και τα 7475. Το μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογών τους είναι στην αεροδιαστημική και αεροπορική βιομηχανία, λόγω των καλών μηχανικών ιδιοτήτων τους. Στα αρνητικά του περιλαμβάνεται η μη συγκολλησιμότητα με συμβατικές μεθόδους και η κακή του συμπεριφορά σε ατμοσφαιρική διάβρωση.

6.2.3.10. Κράματα της σειράς 5XXX:

Η σειρά 5000 έχει σαν κύριο κραματοποιό στοιχείο το Μαγνήσιο (Mg) με περιεκτικότητα που κυμαίνεται από 0,5% - 5%. Οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος αυτού αυξάνονται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε μαγνήσιο, χωρίς όμως να υπερβαίνει το 5%. Γενικά, τα κράματα της σειράς αυτής έχουν καλή αντοχή στη διάβρωση είτε είναι συγκολλημένα είτε όχι (τα κράματα με ποσοστό 1.8% - 2,2% δεν έχουν καλές ιδιότητες συγκόλλησης). Έχουν καλές ιδιότητες σε χαμηλές θερμοκρασίες και η αντοχή σε εφελκυσμό κυμαίνεται από 200 MPa σε 320 MPa.

Η διαλυτότητα του μαγνησίου στο αλουμίνιο είναι πολύ μεγάλη ιδιαίτερα σε ψηλές θερμοκρασίας, όμως αυτή πέφτει στο 1% σε θερμοκρασίες δωματίου (όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω). Έτσι, έχουμε κατακρήμνιση του μαγνησίου στο αλουμίνιο μόλις η θερμοκρασία πέσει κάτω από την θερμοκρασία τήξης (Solidus Temperature). Η κατακρήμνιση αυτή θα ξεκινήσει στα όρια των κόκκων υπό τη μορφή Al_3Mg_2 δηλαδή β-φάσης. Η κατακρήμνιση αυτή είναι πιο έντονη σε υψηλές περιεκτικότητες μαγνησίου, σε υψηλές θερμοκρασίες και όταν η σκλήρυνση με μηχανική κατεργασία είναι υψηλή (strain hardening).



Σχήμα 6.2.3.10.1. Διαλυτότητα μαγνησίου σε αλουμίνιο [10]

Τα περισσότερα κράματα της σειράς 5000 περιέχουν και άλλα πρόσθετα, όπως μαγγάνιο, χρώμιο και τιτάνιο, με σκοπό την αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό, την αντοχή στη διάβρωση και την συγκολλησιμότητα τους. Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζονται οι περιεκτικότητες των πρόσθετων αυτών σε διάφορα κράματα του εμπορίου.

Κράμα	Περιεκτικότητα Αλουμινίου	Κραματικά στοιχεία και η περιεκτικότητά τους wt. %		
		Mg	Mn	Cr
5052	97,2	2,5		0,25
5049	97,2	2,5	0,25	
5454	96,4	2,7	0,8	0,12
5754	95,8	3,1	0,5	0,30
5154 & 5254	96,2	3,5		0,25
5086	95,4	4,0	0,4	0,15
5083	94,8	4,4	0,7	0,15
5182	95,2	5,0	0,25	
5019	94,7	5,0	0,25	

Πίνακας 6.2.3.10.1.

6.3. Κράμα αλουμινίου 5052.

Το αλουμινίου 5052 είναι κράμα αλουμινίου μαγνησίου, το οποίο περιέχει 2.5 % μαγνήσιο και 0,25 % χρώμιο. Είναι κράμα που δεν υφίσταται θερμική κατεργασία, αλλά η σκλήρυνση γίνεται με μηχανική κατεργασία (ενδοτράχυνση), με το τελικό αποτέλεσμα να είναι της κατηγορίας H. Έχει καλή αντοχή σε κόπωση, καλή συγκολλησιμότητα και πολύ καλή αντίσταση στη διάβρωση στο θαλασσινό νερό και τη θαλάσσια ατμόσφαιρα. Έχει χαμηλή πυκνότητα και εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα. Οι κυριότερες μορφές του είναι φύλλα πλάκες και σωλήνες.[20]

6.3.1. Χημική σύσταση του κράματος 5052:

Στοιχείο	%	Στοιχείο	%
Al	95,7-97,7	Cu	0,10 max
Mg	2,2-2,8	Mn	0,10 max
Cr	0,15-0,35	Zn	0,10 max
Si	0,25 max	Άλλα στοιχεία	0,05 max
Fe	0,40 max	Σύνολο Πρόσθετων	2,2-4,3

6.3.2. Μηχανικές ιδιότητες κράματος 5052 ανάλογα με την σκλήρυνση :

Κράμα	Όριο διαρροής -Yield strength 0,2% proof (MPa)	Όριο θραύσης -Tensile strength (MPa)	Επιμήκυνση-Elongation (% στα 50mm) ανάλογα με το πάχος του ελάσματος				
			0,15-0,32 mm	0,33-0,63 mm	0,64-1,20 mm	1,21-6,30 mm	6,31-80 mm
5052-O	65	170-215	13	15	17	19	18
5052-H32	160	215-265	-	4	5	7	11
5052-H34	180	235-285	3	3	4	6	10
5052-H36	200	255-305	2	3	4	4	-
5052-H38	220	270 min	2	3	4	4	-

6.3.3. Θερμική επεξεργασία

Το κράμα αυτό δεν είναι θερμοσκληρυνόμενο. Η σκλήρυνση με ενδοτράχυνση έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός εύρους κραμάτων διαφόρων σειρών H. Πιο συχνά χρησιμοποιούνται το H32 (1/4 σκληρότητα) και το H34(1/2 σκληρότητα). Το κράμα αμέσως μετά από μία ψυχρή κατεργασία, αυθόρμητα με τον καιρό μαλακώνει σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά τελικά θα καταλήξει σε μία σταθερή κατάσταση. Όλα τα προϊόντα της έλασης παρέχονται με σταθερές ιδιότητες. Η σταθερότητα αυτή επιτυγχάνεται με μια θερμική επεξεργασία σταθεροποίησης - Ανόπτηση (Softening by thermal annealing). Στο κράμα 5052 επιτυγχάνεται με ομοιόμορφη θέρμανση του κράματος στους 345°C και στη συνέχεια ψύξη του, χωρίς να το επηρεάζει ο ρυθμός ψύξης. [21]

6.3.4. Συγκόλληση.

Το κράμα 5052 έχει εξαιρετικές συγκολλητικές ιδιότητες με όλες τις συνηθισμένες μεθόδους gas, electric και resistance welding. Οι μέθοδοι GMAW και GTAW είναι οι πιο κοινές και με προτίμηση μέθοδοι για κατασκευές. Το πιο σύνηθες υλικό πλήρωσης συγκόλλησης είναι το 5356. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όσον αφορά τα σκληρυνόμενα αλουμίνια, τα χαρακτηριστικά μηχανικής αντοχής του κράματος στην περιοχή της συγκόλλησης θα επηρεαστούν.[21]

6.3.5. Φυσικές ιδιότητες κράματος 5052

Πυκνότητα: 2,68 gr/cm³

Θερμική Αγωγιμότητα: 138 (W/m.K) σε 25 °C

Ηλεκτρική Αγωγιμότητα: 67 MS/m σε 20°C

Ηλεκτρική Αντίσταση : 50 (nΩ.m)

6.3.6. Τυπικές εφαρμογές.

Οι πιο κοινές εφαρμογές του κράματος αυτού περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων, μικρά σκάφη, συσκευές επεξεργασίας τροφίμων, ελάσματα με φινίρισμα για αρχιτεκτονικές εφαρμογές ρυμουλκούμενα και βιομηχανικά δάπεδα.[21]

6.4. Η αντίσταση του αλουμινίου και των κραμάτων του στην ατμοσφαιρική διάβρωση

Τα κράματα αλουμινίου που δεν περιέχουν χαλκό (σειρές 1000, 3000, 5000, 6000) έχουν μεγάλη αντοχή στις καιρικές συνθήκες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, μόλις ξεκινήσει η διάβρωση, το φαινόμενο αρχίζει να επιβραδύνεται, επειδή τα προϊόντα της διάβρωσης είναι αδιάλυτα (οξείδιο του αλουμινίου). [10]

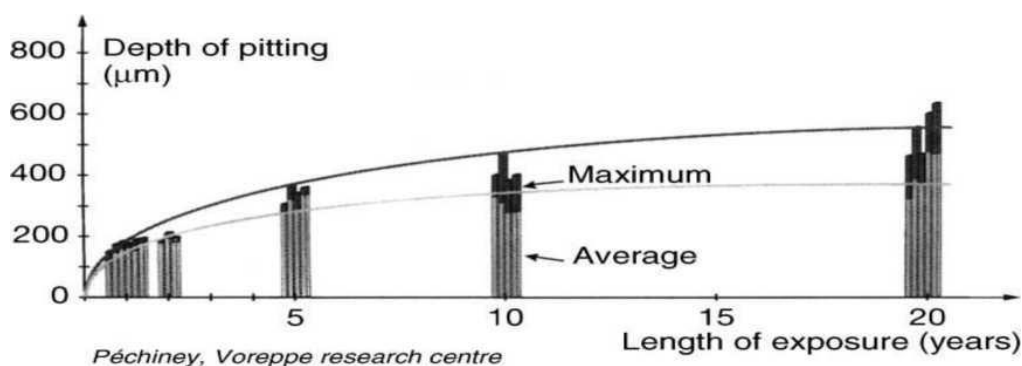
Η αξιολόγηση και εκτίμηση της ατμοσφαιρικής διάβρωσης ενός μετάλλου βασίζεται στα ακόλουθα:

- Απώλεια βάρους: η ατμοσφαιρική διάβρωση φθείρει το μέταλλο, ελαττώνοντας συγχρόνως το βάρος του. Αυτή η απώλεια βάρους προσδιορίζεται εύκολα αν ζυγιστούν δείγματα του μετάλλου πριν και μετά την έκθεση του στην ατμόσφαιρα. Νοείται ότι, η εν λόγω απώλεια βάρους έχει πρακτικό νόημα αν η διάβρωση είναι ομοιόμορφη. Στην πράξη όμως, η διάβρωση που παρατηρείται στο αλουμίνιο σπάνια είναι ομοιόμορφη. Κυρίως έχουμε διάβρωση με βελονισμούς.
- Μη συσχέτιση απώλειας βάρους και βάθους των κοιλιοτήτων: Από έρευνες που έγιναν σε παραθαλάσσιες περιοχές, σε σχέση με την ατμοσφαιρική διάβρωση του αλουμινίου, φαίνεται ότι τα δύο αυτά μεγέθη, η απώλεια του βάρους και το βάθος των κοιλιοτήτων, δε συσχετίζονται.
- Αλλοίωση μηχανικών χαρακτηριστικών: Η αλλοίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκε αρκετά στο παρελθόν ως στοιχείο παρατήρησης και έρευνας, αλλά δεν μπορεί πλέον να θεωρηθεί ως κριτήριο αξιολόγησης της ατμοσφαιρικής διάβρωσης του μετάλλου. Από διάφορες μετρήσεις που έγιναν (π.χ. σε ένα φύλλο πάχους 1 χιλιοστού φάνηκε ότι οι μηχανικές ιδιότητες μειώνονται μόνο αν τα κοιλώματα έχουν βάθος που υπερβαίνει το 5-6% του πάχους, δηλαδή τα 50-60 μm). Το συμπέρασμα των μελετών εστιάζει στο ότι το πάχος των κοιλωμάτων δεν εξαρτάται από το πάχος του φιλμ και κατά συνέπεια η σχετική διακύμανση των μηχανικών χαρακτηριστικών εξαρτάται από το πάχος του μετάλλου που εκτίθεται στην ατμόσφαιρα.[10]

Εξέλιξη της αντοχής σε εφελκυσμό -Μείωση μετά από 20 χρόνια έκθεσης (%)				
Ατμόσφαιρα	1100 H14	3003 H14	6061 T4	3017 T3
Αγροτική	0	0	0	0
Θαλάσσια	7	8	12	7
Βιομηχανική	8	7	20	20

Πίνακας 6.4.1. Εξέλιξη της αντοχής σε εφελκυσμό κραμάτων αλουμινίου σε διαφορετικά διαβρωτικά περιβάλλοντα

- Μέτρηση του βάθους των κοιλωμάτων: είναι το πιο αντιπροσωπευτικό κριτήριο αξιολόγησης και εκτίμησης της ατμοσφαιρικής διάβρωσης του αλουμινίου. Διενεργείται με ένα οπτικό μικροσκόπιο χαμηλής μεγέθυνσης (της τάξης 10X-20X) που εστιάζει διαδοχικά στο κάτω μέρος και στο βάθος της κοιλότητας. Αυτή η μέθοδος βέβαια απαιτεί αρκετό χρόνο, αφού πρέπει πρώτα να εντοπιστεί και να επιβεβαιωθεί η κοιλότητα με το μεγαλύτερο βάθος και στη συνέχεια να γίνουν πέντε μετρήσεις αυτής. Στη συνέχεια, αυτές οι μετρήσεις αξιολογούνται στατιστικά. Σε πολλές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στις στέγες των κτηρίων, η διάτρηση του μετάλλου λόγω διάβρωσης είναι αυτό που ανησυχεί και υπολογίζεται περισσότερο, για την επιλογή της δεδομένης εφαρμογής. Για το λόγο αυτό, η μέτρηση της εξέλιξης του βάθους των κοιλωμάτων είναι η μόνη μέθοδος που μπορεί να εφαρμοστεί για να εκτιμηθεί η διάρκεια ζωής του μετάλλου και να καθορίσει το ελάχιστο πάχος που απαιτείται για μία συγκεκριμένη εφαρμογή. Εμπειρία μεγαλύτερη των 50 χρόνων, που αποκτήθηκε είτε από μετρήσεις εξωτερικών σταθμών διάβρωσης είτε από πρακτική παρακολούθηση, έδειξε ότι η θαλάσσια ατμοσφαιρική διάβρωση των κραμάτων των σειρών 1000, 3000, 5000 και 6000, για επιφάνεια ίδιων χαρακτηριστικών, είναι παρόμοια σε μία περίοδο 20 ετών και περισσότερο.



Σχήμα 6.4.1. Διάβρωση των κραμάτων της σειράς 1000, 3000, 5000 και 6000 σε θαλάσσιο περιβάλλον. Δοκιμές μακροπρόθεσμης έκθεσης στην ακτή της Μεσογείου (εξωτερικός σταθμός διάβρωσης Pechiney στο Salin-de- Giraud).

Στον επόμενο πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα της μακροχρόνιας έκθεσης κάποιων κραμάτων της σειράς 5000 σε θαλάσσιο διαβρωτικό περιβάλλον. Αυτές οι δοκιμές διενεργήθηκαν στους γαλλικούς και αμερικανικούς υπαίθριους σταθμούς ελέγχου από το 1932. [10]

Pitting depth (μm)				
Alloy	Temper	Duration of exposure	max (μm)	min(μm)
5005	H14	20	130	120
	H14	20	220	150
	H18	20	130	100
	H18	20	385	275
5754	O	20	400	330
5086	H111	20	400	300
5056A	O	20	420	350
	H12	20	350	300

Πίνακας 6.4.2. Βάθος κοιλοτήτων διάβρωσης με βελονισμούς διαφόρων κραμάτων αλουμινίου σε θαλάσσιο διαβρωτικό περιβάλλον μετά από 20 χρόνια έκθεσης [10]

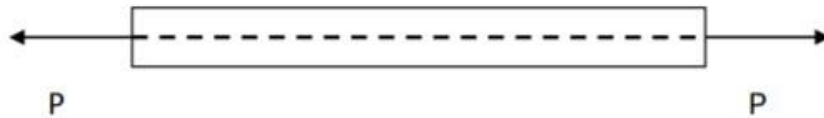
Οι δοκιμές αυτές, όπως και άλλες παρόμοιες, που έγιναν σε κράματα των σειρών 3000 και 6000 σε θαλάσσιο επίσης περιβάλλον, έδειξαν ότι το μεγαλύτερο βάθος των κοιλωμάτων ποτέ δεν υπερβαίνει το 0.5 mm μετά από 20 χρόνια. Οι διαφορές που παρουσιάζουν κράματα της ίδιας σειράς είναι της τάξης των 0.1 - 0.2 μm , μετά από 20 χρόνια έκθεσης.

Για τα κράματα της σειράς 1000 και 3000 (μη θερμοσκληρυνόμενα), το βάθος των κοιλοτήτων, σε ήπιες θερμοκρασίες, είναι συνήθως μικρότερο από αυτό που παρατηρείται στα θερμοσκληρυνόμενα. Στα τελευταία το βάθος αυξάνεται με ενδοτράχυνση από H12 σε H19. Το ίδιο ισχύει και στα κράματα σειράς 5000 που περιέχουν μαγνήσιο της τάξης του 3,5%. Πέραν της συγκέντρωσης αυτής, παρατηρείται η τάση για περικρυσταλλική διάβρωση, η οποία αυξάνεται με την ενδοτράχυνση. Αυτή η τάση περιορίζεται με κατεργασία σταθεροποίησης (H3X). Αντίσταση στην ατμοσφαιρική διάβρωση παρουσιάζουν τα κράματα της σειράς 6000, όπως και των σειρών 3000 και 5000.

Τα κράματα των σειρών 2000, 6000, και 7000, επειδή περιέχουν χαλκό και είναι ευαίσθητα στην περικρυσταλλική διάβρωση, δε χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που εκτίθενται σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, εκτός κι αν προστατευτούν κατάλληλα.

7. Ειδική εισαγωγή – Ορισμοί από την αντοχή υλικών.

Οι μηχανικές τάσεις στην περίπτωση της ψαθυρής θραύσης από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση είναι κατά κανόνα εφελκυστικές. Έτσι για την εξέταση της συμπεριφοράς των υλικών στις συνθήκες αυτές, η μελέτη γίνεται στα πλαίσια της Αντοχής των Υλικών και διεξάγουμε το πείραμα του μονοαξονικού εφελκυσμού. Η αρχή της λειτουργίας των πειραμάτων εφελκυσμού στηρίζεται στην επιβολή δύο δυνάμεων, ίδιου μέτρου, ίδιας και αντίθετης φοράς κατά τον κεντροβαρικό διαμήκη άξονα του υλικού με σημεία εφαρμογής τα άκρα του όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1.1

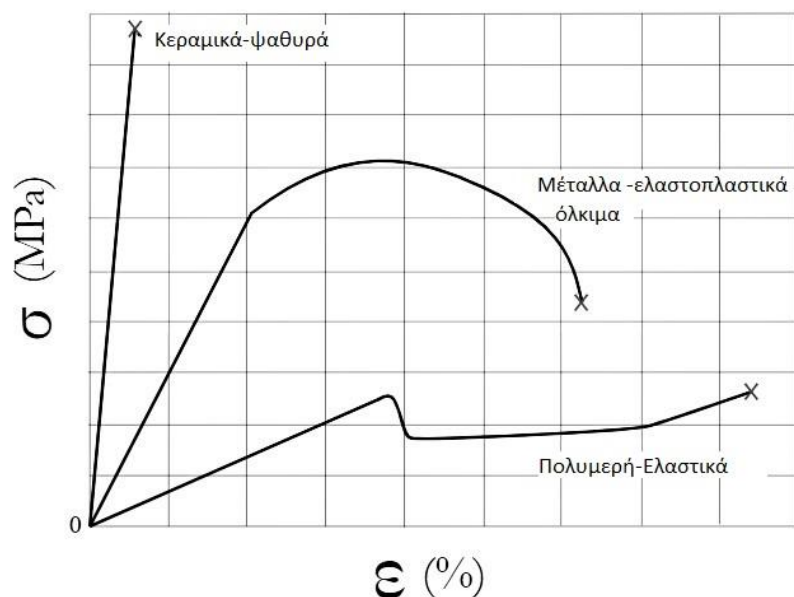


Σχήμα 7.1 Επιβολή Εφελκυστικών Φορτίων σε Δοκίμια.

Όταν σε ένα σώμα ασκείται μία δύναμη, η οποία αυξάνεται συνεχώς, τότε το σώμα αρχικά παραμορφώνεται. Μετά τη σταδιακή αποφόρτιση το σώμα επανέρχεται μερικώς ή ολικώς στις αρχικές του διαστάσεις. Η ιδιότητα των υλικών να επανέρχονται στην αρχική τους μορφή, μετά την απομάκρυνση της δύναμης που προκάλεσε την παραμόρφωση τους ονομάζεται ελαστικότητα. Οι παραμορφώσεις αυτής της μορφής ονομάζονται ελαστικές. Αν η δύναμη, η οποία ασκείται συνεχίσει να αυξάνεται πέραν μίας κρίσιμης τιμής, τότε τα υλικά δεν επανέρχονται στις αρχικές του διαστάσεις μετά την αποφόρτιση τους. Η παραμένουσα παραμόρφωση ονομάζεται Μόνιμη Παραμόρφωση ή Πλαστική παραμόρφωση. [6][26]

Υλικά τα οποία υφίστανται ελαστικές παραμορφώσεις υπό την επίδραση ακόμα και μεγάλου μέτρου δυνάμεων, ονομάζονται ελαστικά, ενώ σε περίπτωση που υφίστανται πλαστικές / μόνιμες παραμορφώσεις υπό την επίδραση ασθενών σχετικά δυνάμεων ονομάζονται ελαστοπλαστικά. Αν η ασκούμενη δύναμη ξεπεράσει ένα ορισμένο όριο, το υλικό υφίσταται θραύση και το όριο αυτό ονομάζεται Όριο Θραύσης και είναι χαρακτηριστικό για κάθε υλικό.

Τα υλικά που εμφανίζουν σημαντικές παραμορφώσεις μέχρι τη θραύση τους ονομάζονται όλκιμα (χαλκός, χάλυβας, αλουμίνιο) ενώ στην περίπτωση που εμφανίζουν πολύ μικρές παραμορφώσεις μέχρι τη θραύση ονομάζονται ψαθυρά (μάρμαρο, σκυρόδεμα, χυτοσίδηρος κ.ά.) [26]



Σχήμα 7.2 Σύγκριση διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων για διάφορα υλικά με διαφορετικές συμπεριφορές.

Έστω ότι, σε πακτωμένο δοκίμιο αλουμινίου (όπως στο πείραμα που θα ακολουθήσει), σε θερμοκρασία δωματίου 20°C, επιβάλλεται αξονικό φορτίο P , στο ελεύθερο άκρο του. Εάν η φορά της δύναμης που ασκείται είναι τέτοια ώστε να αυξηθεί το μήκος του, τότε η δύναμη αυτή ονομάζεται εφελκυστική. Το αρχικό μήκος του δοκιμίου θεωρείται πως είναι L_0 (m) και η διατομή του είναι ορθογωνική A_0 (m²). Υπό την επίδραση της άνω δύναμης, παρατηρείται μία παραμόρφωση του δοκιμίου κατά ΔL . [24]

Ο Hooke μελετώντας το ανωτέρω πείραμα, διαπίστωσε ότι, ο παράγοντας $P/\Delta L$ παραμένει σταθερός, όταν μεταβληθεί το επιβαλλόμενο φορτίο. Βάσει της παρατήρησης αυτής, ο Hooke διατύπωσε τον γενικευμένο νόμο της ελαστικότητας βάση του οποίου:

$$\frac{E \times A \times \Delta L}{L_0} = P \quad (\text{Εξίσωση 7.1})$$

Γενικά, τα χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά του υλικού κατά την εφαρμογή εφελκυστικών δυνάμεων περιγράφονται από τους τύπους που ακολουθούν.

1. Εφελκυστική Τάση (Tensile stress)

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad \left(\frac{N}{m^2}, \text{Pascal} \right) \quad (\text{Εξίσωση 7.2})$$

Όπου: P = Επιβαλλόμενο φορτίο που εφαρμόζεται κάθετα στη διατομή, και A_0 =διατομή του υλικού m².

Η εφελκυστική τάση μπορεί να διαχωριστεί σε Engineering Tensile Stress και σε True Tensile stress. Η διαφορά τους βρίσκεται στο ότι, στην πρώτη περίπτωση έχουμε σταθερή διατομή υλικού A_0 και στη δεύτερη περίπτωση, που είναι και το πραγματικό Stress, έχουμε μεταβαλλόμενη διατομή A_i .

2. Ανηγμένη παραμόρφωση ή ειδική επιμήκυνση ε (Extension, Strain)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100 \quad (\%) \quad (\text{Εξίσωση 7.3})$$

Όπου: ΔL = Η επιμήκυνση του δοκιμίου, L =το μήκος του δοκιμίου τη δεδομένη στιγμή της μέτρησης και L_0 =το αρχικό μήκος του δοκιμίου.

3. Όριο θραύσης (Ultimate Strength, Tensile Strength)

$$\sigma_U = \frac{P_{max}}{A_0} \quad \left(\frac{N}{m^2}\right) \quad (\text{Εξίσωση 7.4})$$

Όπου: P_{max} = Το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο, που μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς να επέλθει θραύση.

4. Όριο διαρροής (Yield point)

$$\sigma_S = \frac{P_S}{A_0} \quad \left(\frac{N}{m^2}\right) \quad (\text{Εξίσωση 7.5})$$

Όπου: P_S =Η δύναμη που για αυτή παρατηρείται μόνιμη παραμόρφωση σε περίπτωση Αστάθειας

5. Όριο αντοχής (0,2% Proof-stress -Proportionality limit) ή συμβατικό όριο διαρροής .

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{A_0} \quad \left(\frac{N}{m^2}\right) \quad (\text{Εξίσωση 7.6})$$

Όπου: $P_{0,2}$ =Η δύναμη που προκαλεί στο δοκίμιο του υλικού μόνιμη παραμόρφωση 0,2%.

Το όριο μεταξύ ελαστικής και πλαστικής περιοχής τις περισσότερες φορές είναι δύσκολο να καθορισθεί έτσι το Yield stress, yield strain ή Yield Strength το θεωρούμε ίσο με το όριο αντοχής 0,2% Proof-stress

6. Όριο ελαστικότητας (Elastic limit)

$$\sigma_{0,01} = \frac{P_{0,01}}{A_0} \quad \left(\frac{N}{m^2}\right) \quad (\text{Εξίσωση 7.7})$$

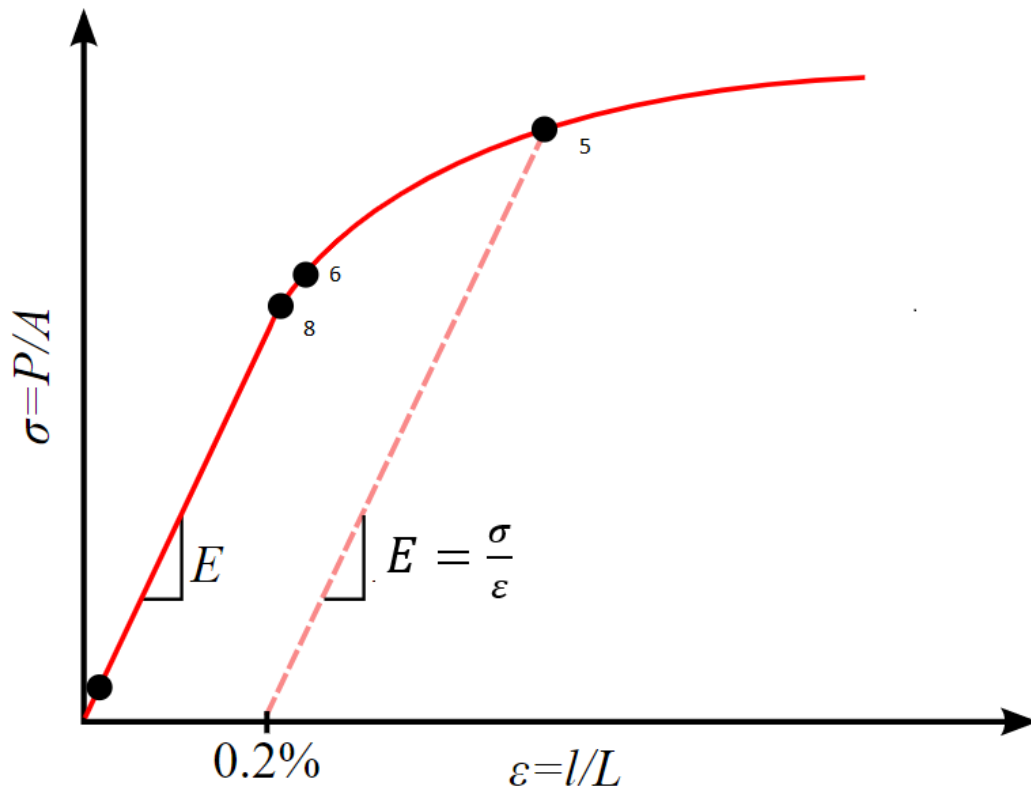
Όπου: $P_{0,01}$ =Η δύναμη που προκαλεί στο δοκίμιο του υλικού μόνιμη παραμόρφωση 0,01% θεωρείται σαν το όριο της ελαστικής περιοχής.

7. Μέτρο Ελαστικότητας (modulus of elasticity) E είναι το πηλίκο της Εφελκυστικής τάσης προς την ειδική επιμήκυνση ή ανηγμένη παραμόρφωση

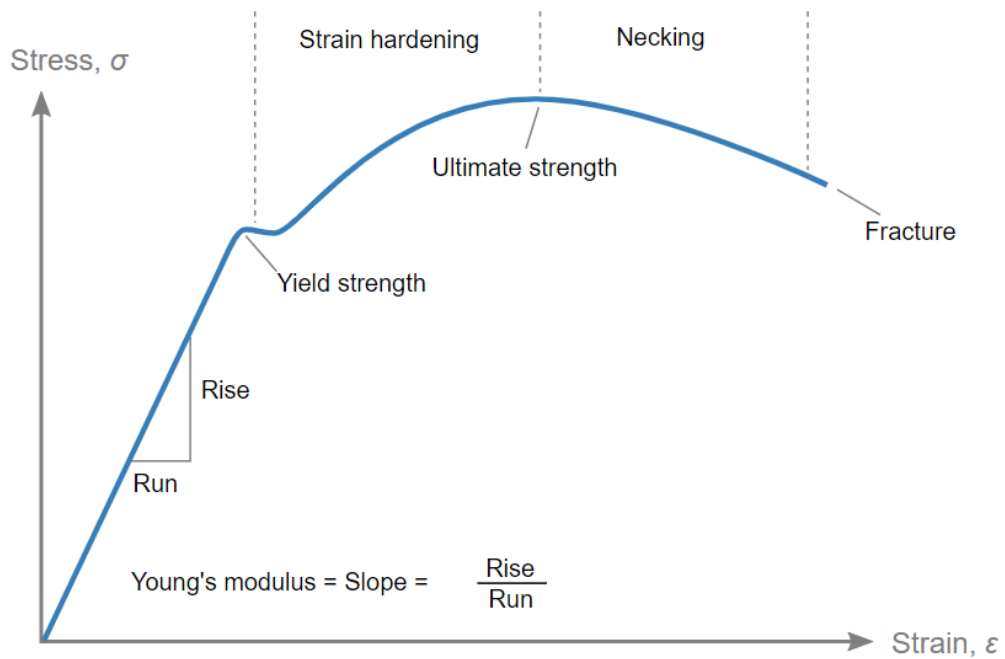
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \left(\frac{N}{m^2}\right) \quad (\text{Εξίσωση 7.8})$$

Ο όρος αυτός ισχύει για την ελαστική περιοχή

8. Όριο αναλογίας: Η τάση αυτή είναι το όριο φόρτισης πριν ξεκινήσει η πλαστική παραμόρφωση.



Σχήμα 7.3 Διαφορά μεταξύ Ορίου Αντοχής (5), Ορίου Ελαστικότητας(6) και Ορίου αναλογίας(8). [28]



Σχήμα 7.4 Τυπικό Διάγραμμα Τάσης-Ανηγμένης παραμόρφωσης πειράματος μονοαξονικού εφελκυσμού. [27]

8. Πειραματικό Μέρος.

8.1. Υλικά και προετοιμασία Δοκιμίων

8.1.1. Φυσικά χαρακτηριστικά Δοκιμίων

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από κράμα αλουμινίου 5052 Al-2.5 Mg το οποίο είχε παραμείνει σε συνθήκες εργαστήριου για σχεδόν 30 χρόνια. Πρόκειται για μη θερμοσκληρυνόμενο κατεργάσιμο κράμα αλουμινίου, γενικής χρήσης, μέσης αντοχής, με καλή πλαστικότητα και καλή αντοχή στη διάβρωση. Χρησιμοποιείται για επενδύσεις και για κατασκευές που είναι εκτεθειμένες σε θαλάσσια ατμόσφαιρα. Το υλικό αυτό κατασκευάστηκε από την ΕΛΒΑΛ Α.Ε και τα χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται, όπως δίνονται από τον κατασκευαστή του, στους πιο κάτω πίνακες.

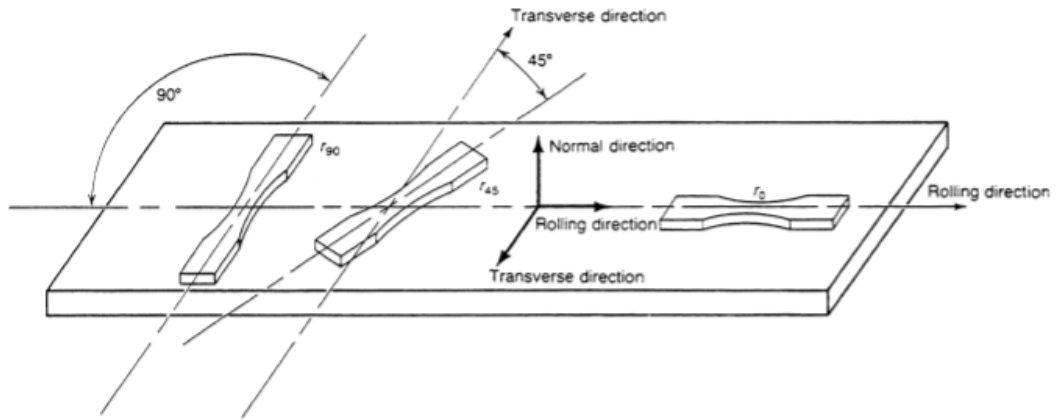
	Mg	Cr	Fe + Si	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
%	2,2-2,8	0,15-0,35	≤0,45	0,1	0,1	0,1	0,05	(Από τη Διαφορά)
wt.	≈2,5							

Πίνακας 8.1.1.1 Ονομαστική χημική σύσταση του κράματος 5052

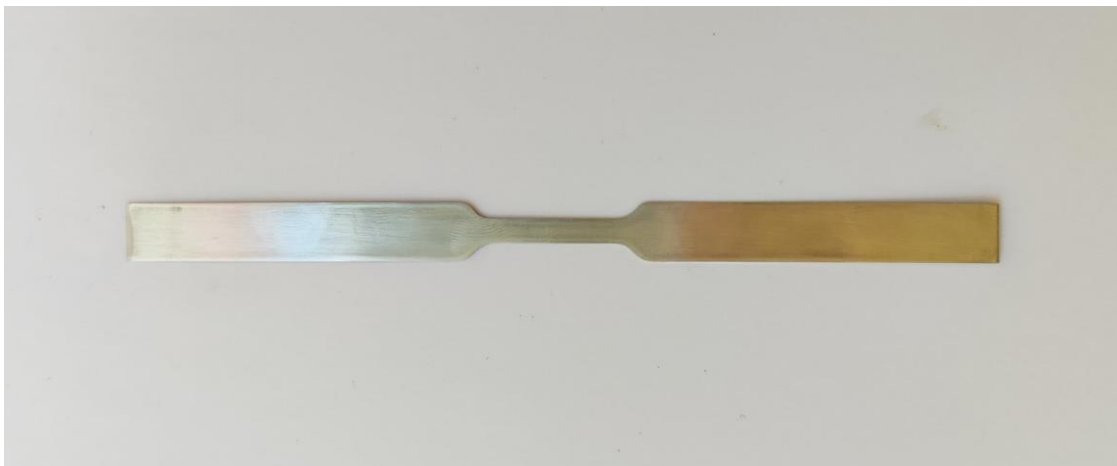
Ειδικό βάρος	2,68 g*/cm ³
Ειδική Αντίσταση	$\rho=4,4 \times 10^8 \Omega \times m$
Μέτρο Ελαστικότητας	$E=7000 \text{ kg}^*/\text{mm}^2$
Πρακτικό όριο διαρροής 0.2%	$\sigma_{0.2}=260 \text{ Mpa}$
Όριο θραύσης	$\sigma_u=290 \text{ Mpa}$
Επιμήκυνση	$A_{5.65}=7-8\% (\text{Min}4\%)$
Σκληρότητα Brinell	85
Επιφανειακή στιλπνότητα	lux

Πίνακας 8.1.1.2 Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του κράματος 5052

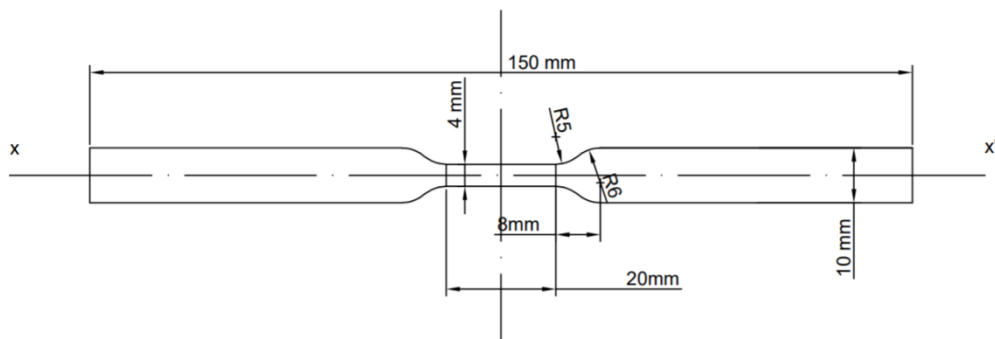
Τα δοκίμια κόπηκαν με πρέσα (αφού το έλασμα μας είναι τόσο λεπτό) από ελάσματα του κράματος 5052 H38, σε πάχος 0,42-0,46 mm κατά τρόπο τέτοιο ώστε ο διαμήκης άξονας τους ΧΧ' να είναι παράλληλος προς την διεύθυνση της εξέλασης Σχήμα 8.2.1.1. Η μορφή και οι διαστάσεις των δοκιμίων βασίζονται στο πρότυπο ISO 6892-1 ,ANNEX B [29] και φαίνονται στην Εικόνα 8.2.1.1 και στο Σχήμα 8.2.1.1 . Οι διαστάσεις της περιοχής των δοκιμίων που είναι κρίσιμα στην πειραματική διαδικασία μετρήθηκαν με ακρίβεια μικρόμετρου για κάθε δοκίμιο και παρουσιάζονται σε πίνακες πιο κάτω καθώς και το πάχος του οξειδίου του αλουμινίου που δημιουργήθηκε.



Σχήμα 8.1.1.2. Διεύθυνση κατά την οποία κόπηκαν τα Δοκίμια Κράματος Αλουμινίου 5052 r_0 [30].



Εικόνα 8.1.1.1 Δοκίμιο Κράματος Αλουμινίου 5052 H38.



Σχήμα 8.1.1.2. Διαστάσεις Δοκίμιο Κράματος Αλουμινίου 5052 H38.

8.1.2. Προετοιμασία δοκιμών.

Τα δοκίμια είχαν επικάλυψη από λάδι, γι' αυτό εφαρμόστηκε αλκαλικός καθαρισμός και στη συνέχεια ξέβγαλμα με απιονισμένο νερό και εμβάπτιση σε Ακετόνη για απομάκρυνση του νερού. Τέλος, αφέθηκαν να στεγνώσουν και αφού αριθμήθηκαν, έγιναν μετρήσεις σε σχέση με τις ακριβείς διαστάσεις στο κέντρο μηχανικής φόρτισης τους (το κεντρικό σημείο του δοκιμίου με γενικές διαστάσεις 4 mm × 20 mm × 0.44 mm). Στους πίνακες που ακολουθούν καταγράφονται οι μετρήσεις αυτές καθώς και οι ώρες που παρέμειναν τα υπό μελέτη δοκίμια σε διαβρωτικό περιβάλλον στο θάλαμο αλατονέφωσης.

Ώρες	Αριθμός δοκιμίου	Πάχος δοκιμίου (mm)	Πλάτος δοκιμίου (mm)
240	1	0,43	4,17
240	2	0,43	4,18
240	3	0,43	4,20
240	4	0,42	4,20
240	5	0,43	4,19
240	6	0,42	4,19

Πίνακας 8.1.2.1 Διαστάσεις δοκιμών που παρέμειναν σε διαβρωτικό περιβάλλον 240 h

Ώρες	Αριθμός δοκιμίου	Πάχος δοκιμίου (mm)	Πλάτος δοκιμίου (mm)
540	7	0,44	4,18
540	8	0,43	4,18
540	9	0,42	4,18
540	10	0,44	4,19
540	11	0,44	4,22
540	12	0,43	4,20

Πίνακας 8.1.2.2 Διαστάσεις δοκιμών που παρέμειναν σε διαβρωτικό περιβάλλον 540 h

Ώρες	Αριθμός δοκιμίου	Πάχος δοκιμίου (mm)	Πλάτος δοκιμίου (mm)
750	13	0,44	4,18
750	14	0,43	4,18
750	15	0,42	4,18
750	16	0,44	4,19
750	17	0,44	4,22
750	18	0,43	4,20

Πίνακας 8.1.2.3 Διαστάσεις δοκιμών που παρέμειναν σε διαβρωτικό περιβάλλον 750 h

Ώρες	Αριθμός δοκιμίου	Πάχος δοκιμίου (mm)	Πλάτος δοκιμίου (mm)
1050	19	0,44	4,23
1050	20	0,44	4,20
1050	21	0,45	4,21
1050	22	0,45	4,21
1050	23	0,45	4,19
1050	24	0,46	4,18
1050	25	0,44	4,18
1050	26	0,43	4,21

Πίνακας 8.1.2.4 Διαστάσεις δοκιμών που παρέμειναν σε διαβρωτικό περιβάλλον 1050 h

Ώρες	Αριθμός δοκιμίου	Πάχος δοκιμίου (mm)	Πλάτος δοκιμίου (mm)
1300	27	0,43	4,19
1300	28	0,43	4,18
1300	29	0,43	4,16
1300	30	0,44	4,19
1300	31	0,45	4,19
1300	32	0,43	4,20
1300	33	0,44	4,17
1300	34	0,43	4,22
1300	35	0,44	4,19
1300	36	0,43	4,18
1300	37	0,44	4,20

Πίνακας 8.1.2.5 Διαστάσεις δοκιμίων που παρέμειναν σε διαβρωτικό περιβάλλον 1300 h

Ώρες	Αριθμός δοκιμίου	Πάχος δοκιμίου (mm)	Πλάτος δοκιμίου (mm)
0	38	0,42	4,21
0	39	0,42	4,19
0	40	0,41	4,18
0	41	0,4	4,18
0	45	0,42	4,17
0	46	0,4	4,19
0	47	0,41	4,17

Πίνακας 8.1.2.6 Διαστάσεις δοκιμίων που δεν παρέμειναν σε διαβρωτικό περιβάλλον

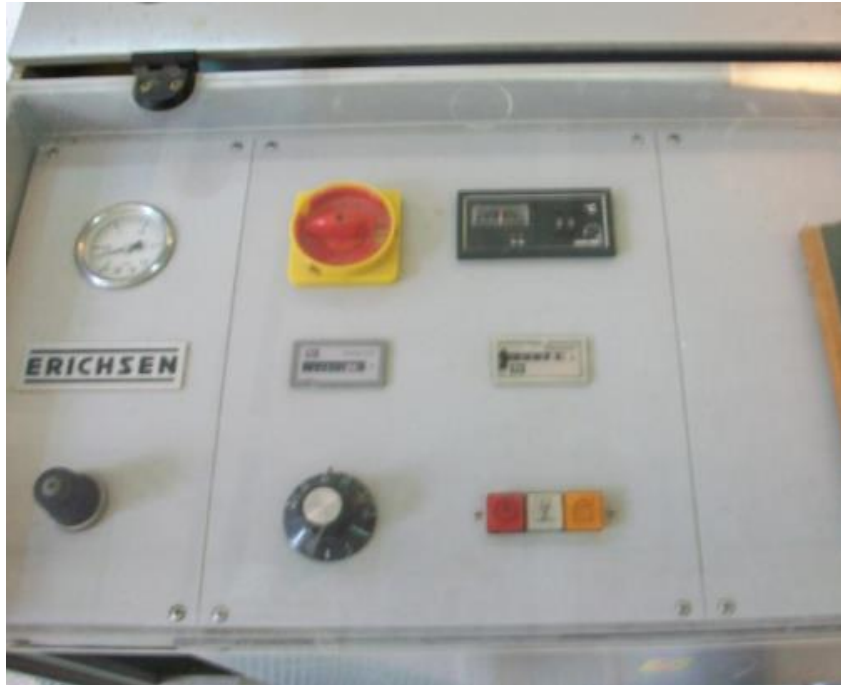
8.2. Θάλαμος αλατονέφωσης.

Το κύριο μέρος του πειράματος πραγματοποιήθηκε στο θάλαμο αλατονέφωσης με σκοπό να εκτεθούν τα δοκίμια σε συνθήκες θαλασσινής ατμοσφαιρικής διάβρωσης. Ο θάλαμος αλατονέφωσης είναι ο Erischen Model 606, ο οποίος αποτελείται από έναν αεροσυμπιεστή παροχής αέρα υψηλής πίεσης, τη δεξαμενή παροχής νερού, τον πίνακα ελέγχου θερμοκρασίας και το θάλαμο ομίχλης θαλασσινού νερού. Μέσα στο θάλαμο ομίχλης βρίσκεται το ακροφύσιο ψεκασμού, το οποίο με την βοήθεια του πεπιεσμένου αέρα και την παροχή του νερού δημιουργεί το νεφέλωμα, που δημιουργεί και τις συνθήκες διαβρωτικού περιβάλλοντος.



Εικόνα 8.2.1 Θάλαμος Αλατονέφωσης και Δεξαμενή Διαλύματος Αλατονέφωσης

Τα δοκίμια που τοποθετήθηκαν στον κλειστό θάλαμο εκτέθηκαν σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου NaCl 5 % σε απιονισμένο νερό και πίεση 1 bar. Η θερμοκρασία στο θάλαμο αλατονέφωσης είναι 30 °C. Ο ψεκασμός από το ακροφύσιο γίνεται από ψηλά και από το κέντρο του θόλου, έτσι ώστε η διασπορά του νέφους μέσα στο θάλαμο να είναι ομοιόμορφη με σκοπό τα δοκίμια να έχουν ίδια έκθεση στο διαβρωτικό υλικό. Αν και το ακροφύσιο βρίσκεται στον πυθμένα του θαλάμου, η διασπορά του νέφους προς το πάνω μέρος του γίνεται μέσω ενός κυλινδρικού σωλήνα που περιβάλλει το ακροφύσιο. Οι σταγόνες που δημιουργούνται από τη διαδικασία κατευθύνονται στο πυθμένα του θαλάμου από όπου και απομακρύνονται μέσω απορροής.



Εικόνα 8.2.2 Πίνακας Ελέγχου Αλατονέφωσης.



Εικόνα 8.2.3 Θάλαμος Αλατονέφωσης σε πλήρη λειτουργία.

Βασικές προϋποθέσεις στην τοποθέτηση των δοκιμών είναι οι εξής:

- Τα δοκίμια πρέπει να κρέμονται.
- Τα δοκίμια δεν πρέπει να έρχονται σε επαφή μεταξύ τους.
- Πρέπει να τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε το διαβρωτικό διάλυμα που συγκεντρώνεται σε κάθε δοκίμιο να μην στάζει από το ένα δοκίμιο στο άλλο.

Η παροχή του διαλύματος καθορίστηκε από τη ρύθμιση της παροχής πεπιεσμένου αέρα, ο οποίος παρασύρει και δημιουργεί το νέφος μέσα στο θάλαμο. Η παροχή του αέρα ρυθμίστηκε μέσω μίας βάνας πάνω στη δεξαμενή, αλλά δεν υπήρχε η δυνατότητα μέτρησης των τιμών αυτών. Σκοπός ήταν να ρυθμιστεί το σύστημα μία φορά, ώστε να παρέχει πλούσιο νέφος μέσα στο θάλαμο. Στο τέλος του πειραματικού μέρους, χρησιμοποιώντας τις καταγραφές επαναγέμισης της δεξαμενής παροχής διαλύματος (200 ℓ) υπολογίστηκε η παροχή διαλύματος σε 1,1 ℓ /hr.

8.3. Παχυμέτρηση του οξειδίου του αλουμινίου στην επιφάνεια των δοκιμίων.

Μετά το πέρας του χρόνου έκθεσης των δοκιμίων στο χρόνο που καθορίστηκε, τα δοκίμια βγήκαν από το σύστημα και ξεπλύθηκαν, ώστε να αφαιρεθεί το επικάθισμα αλάτων χωρίς όμως να ασκηθεί οποιανδήποτε μηχανική τριβή. Εν συνεχεία, έγινε στα δοκίμια παχυμέτρηση του οξειδίου του αλουμινίου για να παρατηρηθεί η εξέλιξη του, ανάλογα με το χρόνο έκθεσης του δοκιμίου. Στους πιο κάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών. Το μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του οξειδίου είναι το Elcometer 256FN, με δυνατότητα μέτρησης μη σιδηρούχων μετάλλων και εύρος μετρήσεων από 0 μέχρι 500 μm. Συνολικά έγιναν 10 μετρήσεις σε κάθε πλευρά και τα αποτελέσματα παραθέτονται στους πιο κάτω πίνακες.



Εικόνα 8.3.1. Παχύμετρο εργαστηρίου Elcometer 256FN

Ώρες	Αριθμός δοκιμίου	Μέση τιμή πλευρά A (μm)	Τυπική απόκλιση πλευρά A (μm)	Μέση τιμή πλευρά B (μm)	Τυπική απόκλιση πλευρά A (μm)
240	1	2	1	2	1
240	2	1	0	3	1
240	3	3	0	2	3
240	4	1	1	3	0
240	5	2	2	3	0
240	6	1	1	1	0

Πίνακας 8.3.1 Πάχος διάβρωσης Δοκιμίων που παρέμειναν σε διαβρωτικό περιβάλλον 240 h

Ώρες	Αριθμός δοκιμίου	Μέση τιμή πλευρά A (μm)	Τυπική απόκλιση πλευρά A (μm)	Μέση τιμή πλευρά B (μm)	Τυπική απόκλιση πλευρά A (μm)
540	7	4	0	4	2
540	8	5	2	3	4
540	9	4	3	4	0
540	10	4	1	5	0
540	11	5	0	4	1
540	12	3	2	4	0

Πίνακας 8.3.2 Πάχος διάβρωσης Δοκιμίων που παρέμειναν σε διαβρωτικό περιβάλλον 540 h

Ώρες	Αριθμός δοκιμίου	Μέση τιμή πλευρά A (μm)	Τυπική απόκλιση πλευρά A (μm)	Μέση τιμή πλευρά B (μm)	Τυπική απόκλιση πλευρά A (μm)
750	13	5	1	4	0
750	14	6	4	5	1
750	15	5	0	6	0
750	16	6	1	6	1
750	17	5	0	4	0
750	18	5	1	5	1

Πίνακας 8.3.3 Πάχος διάβρωσης Δοκιμίων που παρέμειναν σε διαβρωτικό περιβάλλον 750 h

Ώρες	Αριθμός δοκιμίου	Μέση τιμή πλευρά A (μm)	Τυπική απόκλιση πλευρά A (μm)	Μέση τιμή πλευρά B (μm)	Τυπική απόκλιση πλευρά A (μm)
1050	19	7	2	5	1
1050	20	5	0	6	2
1050	21	6	1	7	0
1050	22	7	2	7	1
1050	23	7	0	6	3
1050	24	8	0	5	2
1050	25	6	2	7	1
1050	26	5	1	8	0

Πίνακας 8.3.4 Πάχος διάβρωσης Δοκιμίων που παρέμειναν σε διαβρωτικό περιβάλλον 1050h

Ώρες	Αριθμός δοκιμίου	Μέση τιμή πλευρά A (μm)	Τυπική απόκλιση πλευρά A (μm)	Μέση τιμή πλευρά B (μm)	Τυπική απόκλιση πλευρά A (μm)
1300	27	9	2	6	1
1300	28	7	0	7	2
1300	29	7	1	8	2
1300	30	9	1	6	1
1300	31	8	0	7	0
1300	32	9	1	7	0
1300	33	7	1	6	2
1300	34	8	1	6	1
1300	35	7	0	8	0
1300	36	9	1	6	1
1300	37	6	2	8	1

Πίνακας 8.3.5 Πάχος διάβρωσης Δοκιμίων που παρέμειναν σε διαβρωτικό περιβάλλον 1300h

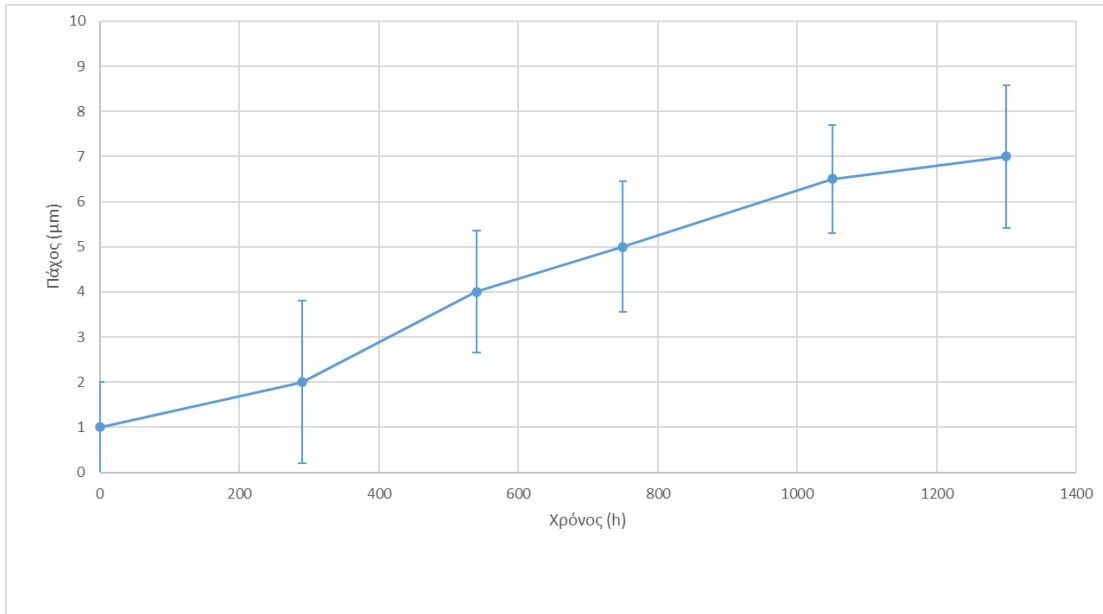
Ώρες	Αριθμός δοκιμίου	Μέση τιμή πλευρά A (μm)	Τυπική απόκλιση πλευρά A (μm)	Μέση τιμή πλευρά B (μm)	Τυπική απόκλιση πλευρά A (μm)
0	38	0	3	0	0
0	39	1	2	0	1
0	40	1	1	1	2
0	41	0	1	1	3
0	42	1	2	1	1
0	43	1	0	1	0
0	44	0	1	1	0

Πίνακας 8.3.6 Πάχος διάβρωσης Δοκιμίων που δεν παρέμειναν σε διαβρωτικό περιβάλλον

Συνοψίζοντας τα πιο πάνω, καταλήγουμε στα πιο κάτω δεδομένα τα οποία παρουσιάζονται σε μία γραφική για να υπάρχει μία οπτική αντίληψη της εξέλιξης της διάβρωσης.

Ώρες	Μέση τιμή (μm) (Combined arithmetic mean)	Τυπική απόκλιση (μm) (Combined variance)
0	1	1,23
240	2	1,8
540	4	1,35
750	5	1,45
1050	6,5	1,19
1300	7	1,58

Πίνακας 8.3.7 Πάχος διάβρωσης Δοκιμίων



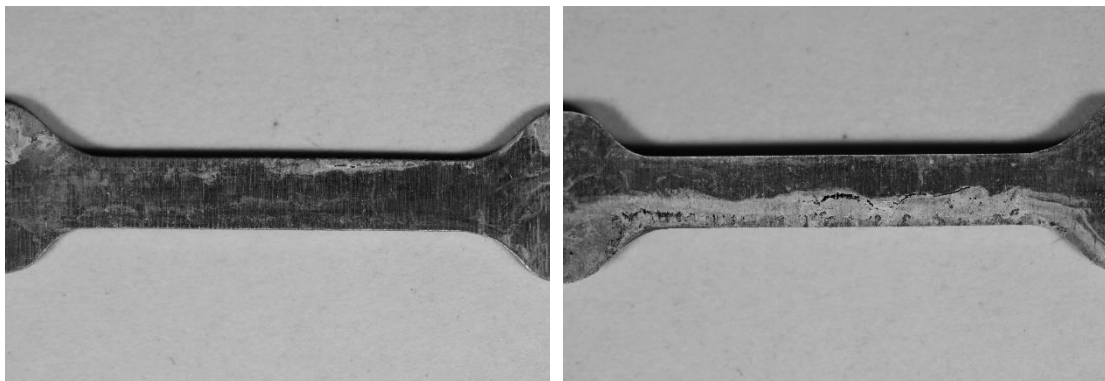
Γράφημα 8.3.1 Πάχος Διαβρωτικού Στρώματος Δοκιμίων στην εξέλιξη του χρόνου έκθεσης

Όπως παρατηρούμε η δημιουργία οξειδίου του αλουμινίου τείνει να σταματήσει όσο περνά ο χρόνος επιβεβαιώνοντας και τη θεωρία που αναφέραμε σε προηγούμενα κεφάλαια.

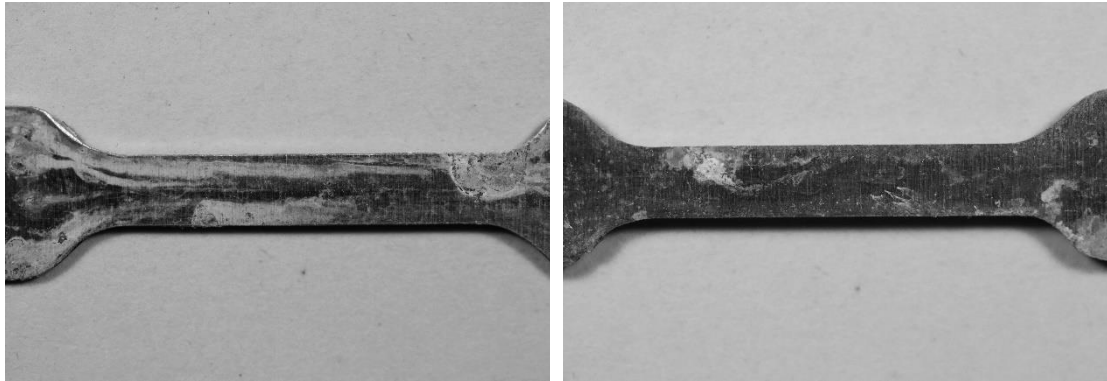
8.4. Φωτογράφιση του Κέντρου Μηχανικής Φόρτισης των δοκιμίων

Στη συνέχεια έγινε φωτογράφιση των Δοκιμίων με Φακό Macro 100mm F/2.8 USM για οπτική σύγκριση της εξέλιξης της οξείδωσης στο Κέντρο Μηχανικής Φόρτισης των δοκιμίων. Πιο κάτω παραθέτονται κάποιες φωτογραφίες της εξέλιξής αυτής.

240 Ώρες Έκθεσης



240 Ώρες Δοκίμιο 1 Πλευρά Α και Β

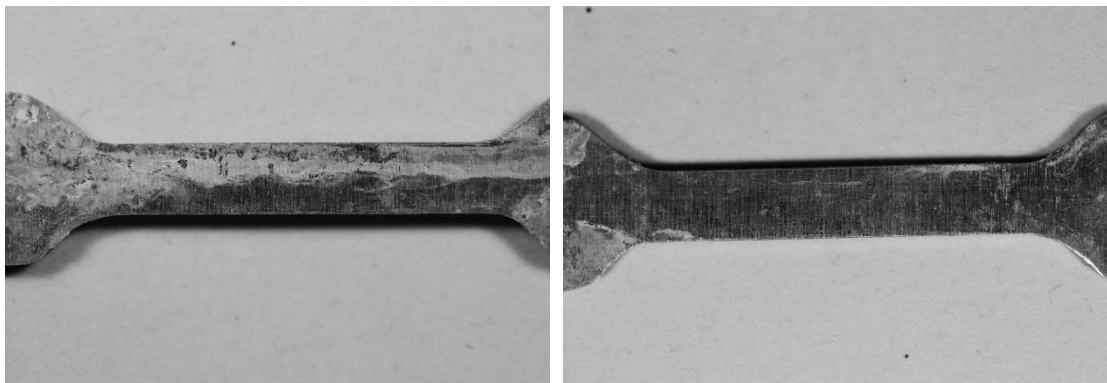


240 Ώρες Δοκίμιο 2 Πλευρά Α και Β

540 Ώρες Έκθεσης

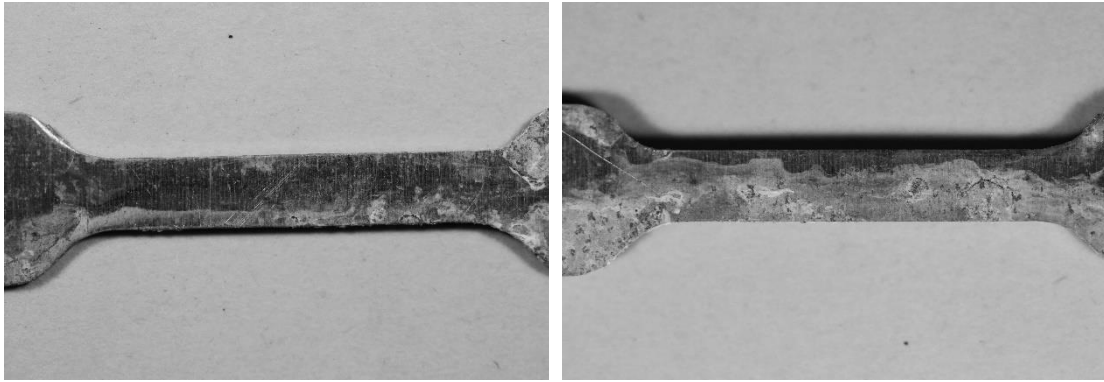


540 Ώρες Δοκίμιο 7 Πλευρά Α και Β

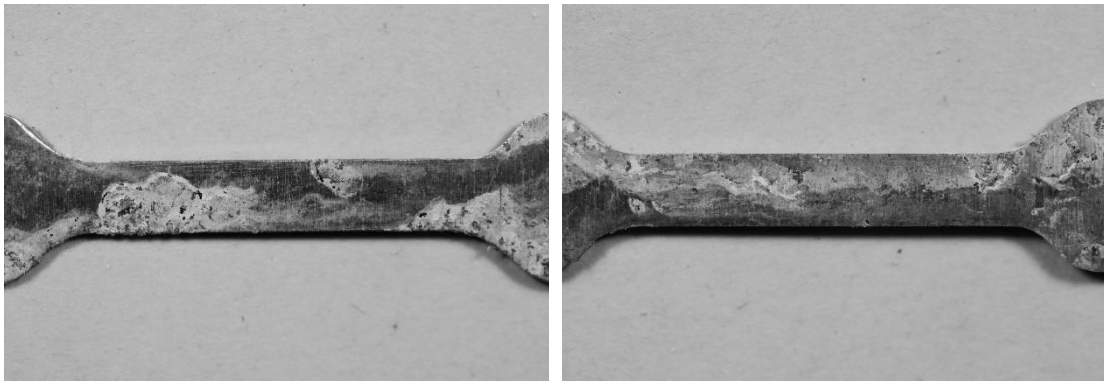


540 Ώρες Δοκίμιο 8 Πλευρά Α και Β

750 Ώρες Έκθεσης

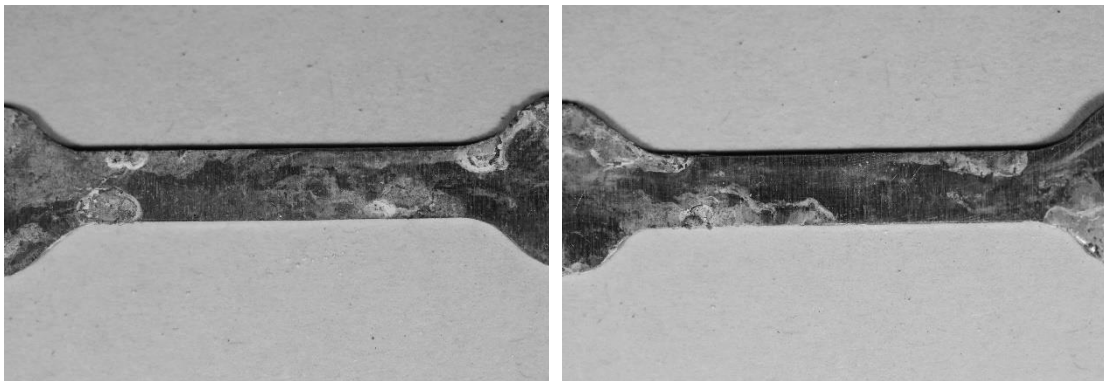


750 Ώρες Δοκίμιο 13 Πλευρά Α και Β



750 Ώρες Δοκίμιο 14 Πλευρά Α και Β

1050 Ώρες Έκθεσης

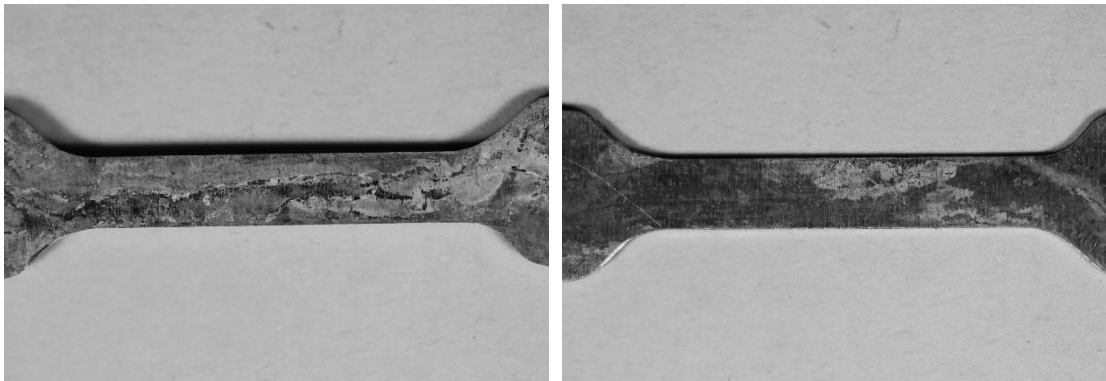


1050 Ώρες Δοκίμιο 20 Πλευρά Α και Β

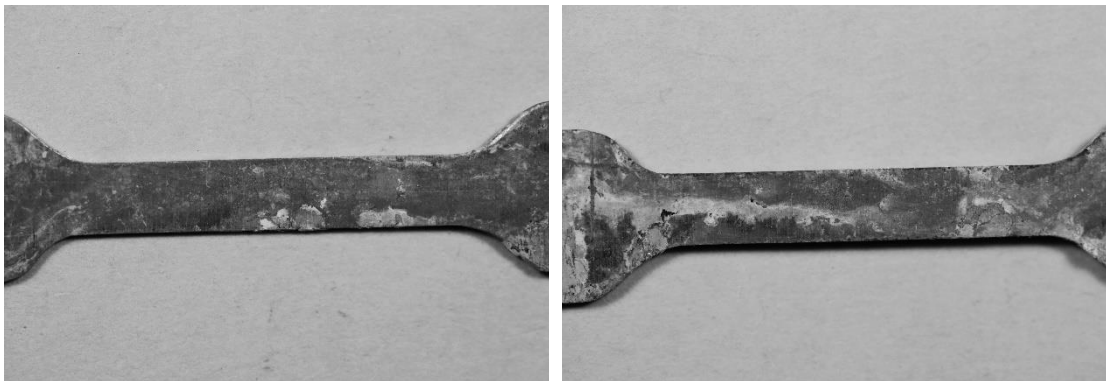


1050 Ώρες Δοκίμιο 23 Πλευρά Α και Β

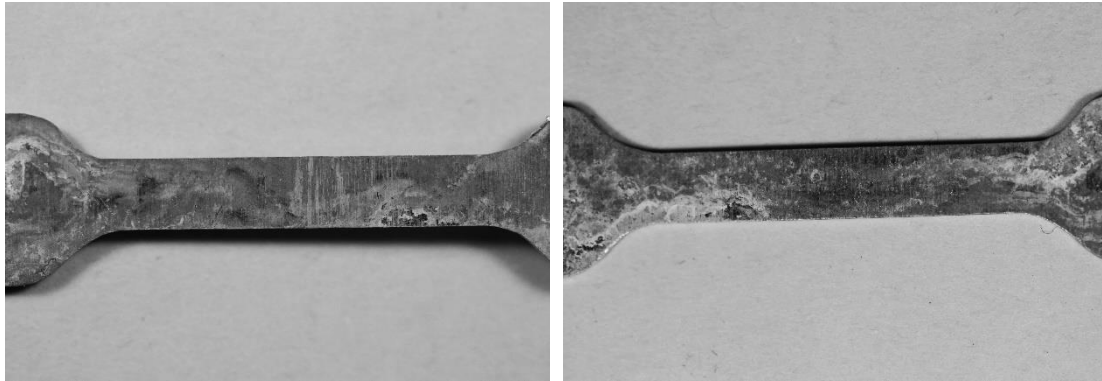
1300 Ώρες Έκθεσης



1300 Ώρες Δοκίμιο 29 Πλευρά Α και Β



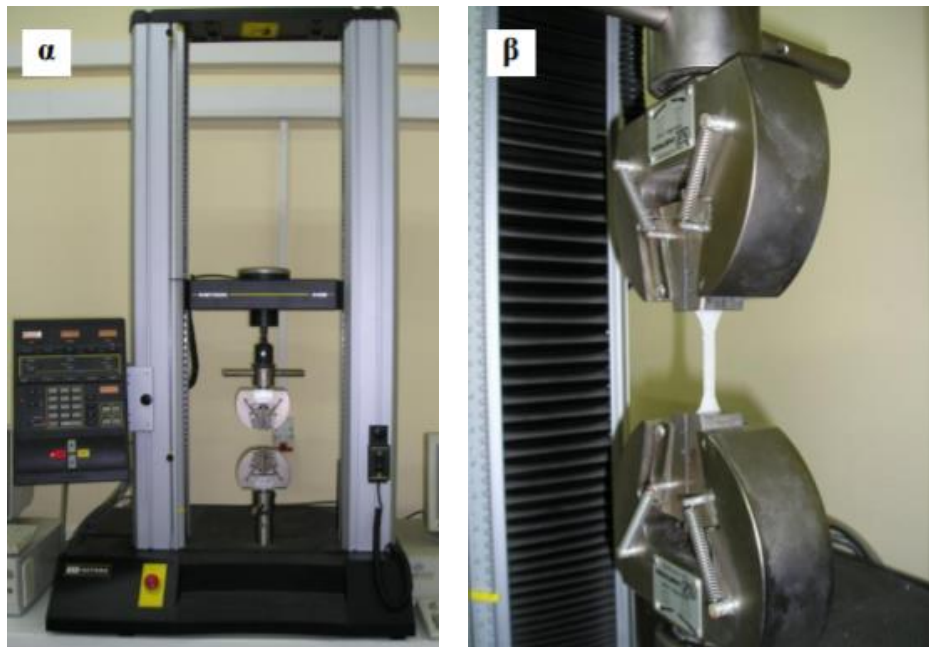
1300 Ώρες Δοκίμιο 31 Πλευρά Α και Β



1300 Ώρες Δοκίμιο 35 Πλευρά Α και Β

8.5. Δοκιμές Εφελκυσμού

Για τη μέτρηση της αντοχής σε εφελκυσμό των δοκιμίων Αλουμινίου 5052, χρησιμοποιήθηκε μια μηχανή εφελκυσμού Instron 4460 (Εικόνα 8.5.1.), με ένα στοιχείο φορτίου που επιτρέπει τη μετάφραση σε ηλεκτρικό δυναμικό της δύναμης που εφαρμόζεται σε ένα δείγμα κατά τη διάρκεια παραμόρφωσης. Η μηχανή εφελκυσμού και ο χρόνος του εργαστηρίου παραχωρήθηκαν από το Εργαστήριο Τεχνολογίας Πολυμερών στη Σχολή Χημικών Μηχανικών. Το στοιχείο φορτίου για τη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία έχει δυνατότητα μέτρησης 10 kN (Load Capacity) σύμφωνα με τις προδιαγραφές του και έχει την κωδική ονομασία 4466 , τα χαρακτηριστικά του οποίου περιγράφονται στον Πίνακα 8.5.1.



Εικόνα 8.5.1. α)Μηχανή εφελκυσμού Instron 4460 β) αρπαγές και δοκίμιο.

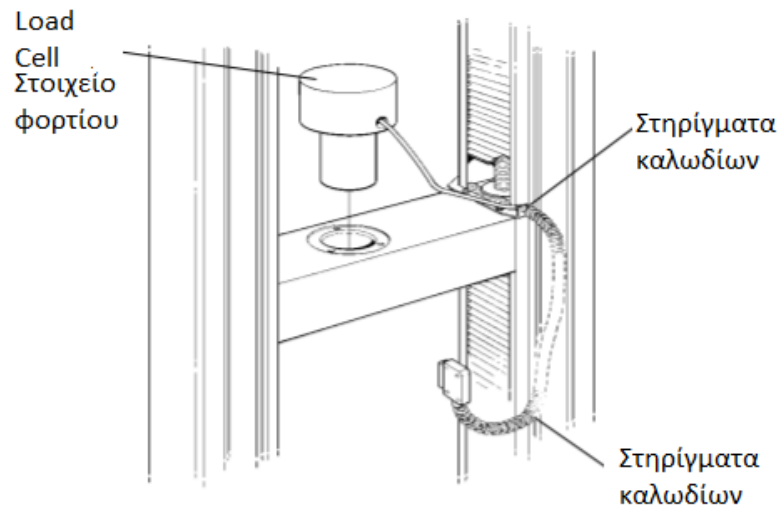
	Load Frame Model				
	4464	4465	4466	4467	4469
Load Capacity					
kN	2	5	10	30	50
kgf	200	500	1000	3000	5000
lbf	450	1125	2250	6750	11240
Maximum Speed					
mm/min	2500	1000	500	500	500
in/min	100	40	20	20	20
Minimum Speed					
mm/min	0.05	0.01	0.005	0.005	0.01
in/min	0.002	0.0004	0.0002	0.0002	0.0004
Maximum Force @ Full Speed	1kN (225 lbf)	5kN (1125 lbf)	10 kN (2250lbf)	30 kN (6750 lbf)	50 kN (11240lbf)
Maximum Speed @ Full Load					
mm/min	1000	1000	500	500	250
in/min	40	40	20	20	10
Return Speed					
mm/min	2500	1200	600	600	500
in/min	100	48	24	24	20
Speed Accuracy	± 0.1% steady state, measured over 100 mm or 30 sec, whichever is greater, no load				
Position Measurement Accuracy	±0.01 mm or 0.15% of displacement of displayed reading (whichever is greater)				
Position Repeatability	±0.05 mm (0.002 in.)				
Load Weighing Accuracy	±0.5% of full scale to 1/50 of load cell capacity, or ±1 count on the display, whichever is greater				
Strain Measurement Accuracy	0.6% of reading ±25% of calibration point ±1 count on the display, whichever is greater				
Total Crosshead Travel	1135 mm (44.7 in)	1135 mm (44.7 in)	1135 mm (44.7 in)	1135 mm (44.7 in)	1135 mm (44.7 in)

	Load Frame Model				
	4464	4465	4466	4467	4469
Total Vertical Test Space *	1192 mm (46.9 in)	1192 mm (46.9 in)	1192 mm (46.9 in)	1192 mm (46.9 in)	1192 mm (46.9 in)
Space Between Columns	420 mm (16.5 in)	420 mm (16.5 in)	420 mm (16.5 in)	420 mm (16.5 in)	420 mm (16.5 in)
Testing Type	Tension, Compression, Reverse Stress Single Space below Moving Crosshead				
Basic Control Mode	Position Control Loop, closed around crosshead drive				
Crosshead Position Control Resolution	0.000236 mm/pulse (8 μ in)	0.000118 mm/pulse (4 μ in)	0.000057 mm/pulse (2 μ in)	0.000054 mm/pulse (2 μ in)	0.0000625 mm/pulse(2.5 μ in)
Crosshead Position Repeatability	> ±0.05 mm (0.002 in)				
Acceleration Time, 0 to top speed	150 msec				
Emergency Stop Time	100 ms	100 ms	100 ms	300 ms	320 ms
Axial Stiffness	40 kN/mm (225,000 lb/in)	40 kN/mm (225,000 lb/in)	40 kN/mm (225,000 lb/in)	100 kN/mm (562,500 lb/in)	163 kN/mm (930,800 lb/in)
Height	1597 mm (62.7 in)	1597 mm (62.7 in)	1597 mm (62.7 in)	1597 mm (62.7 in)	1597 mm (62.7 in)
Width	909 mm (35.6 in)	909 mm (35.6 in)	909 mm (35.6 in)	909 mm (35.6 in)	909 mm (35.6 in)
Depth	700 mm (27.5 in)	700 mm (27.5 in)	700 mm (27.5 in)	700 mm (27.5 in)	700 mm (27.5 in)
Weight	136 kg (300 lb)	136 kg (300 lb)	136 kg (300 lb)	182 kg (400 lb)	240 kg (530 lb)

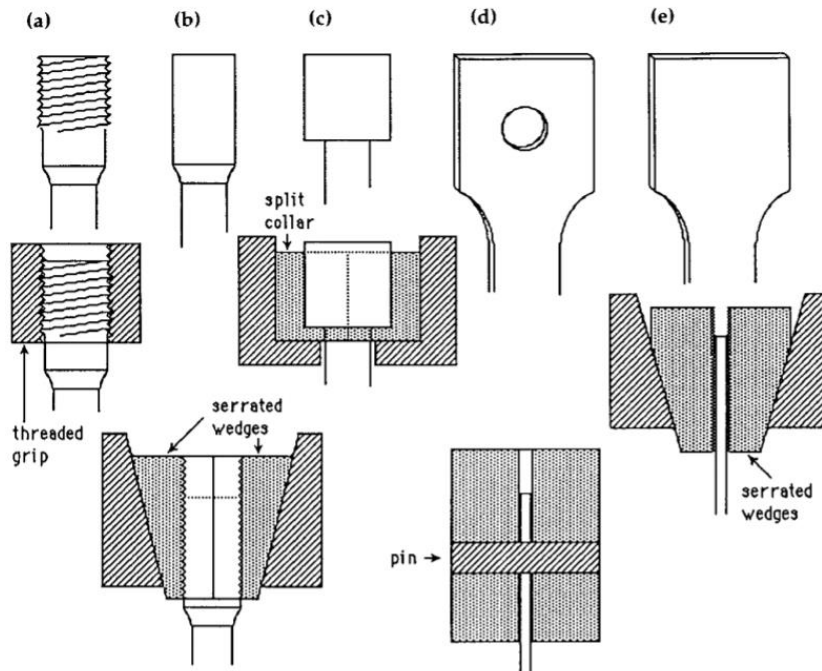
* Total vertical test space = distance from top surface of base platen to fixture attachment point on load cell.

Πίνακας 8.5.1. Χαρακτηριστικά Μηχανής Δοκιμών εφελκυσμού INSTRON 4460

Επιλέχθηκε το μεγαλύτερο διαθέσιμο στοιχείο φορτίου, που τοποθετήθηκε στο μηχάνημα όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.5.1. και οι κατάλληλες αρπαγές όπως φαίνονται στην εικόνα 8.5.1.β. Η επιλογή των κατάλληλων αρπαγών εξαρτάται από τον τύπο του δοκιμίου και οι τύποι των αρπαγών που ήταν διαθέσιμοι φαίνονται στο Σχήμα 8.5.2. (στην περίπτωση της εν λόγω πειραματικής διάταξης χρησιμοποιούνται οι αρπαγές ε).



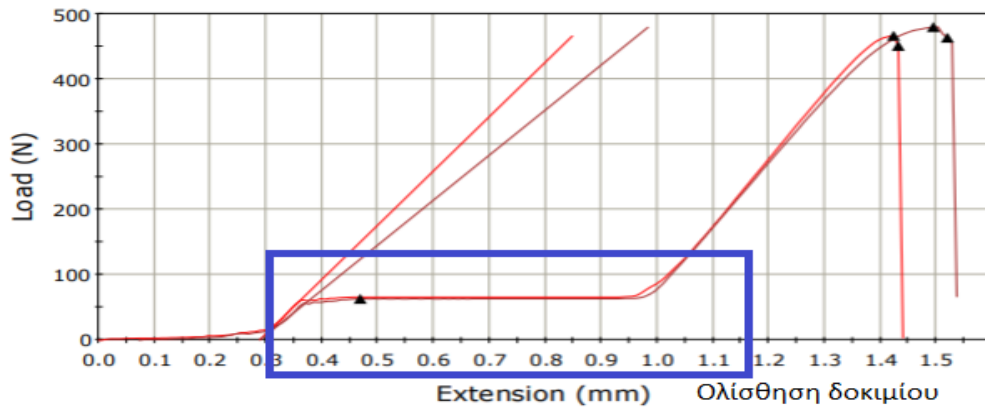
Σχήμα 8.5.1. Εγκατάσταση Στοιχείου Φόρτισης.



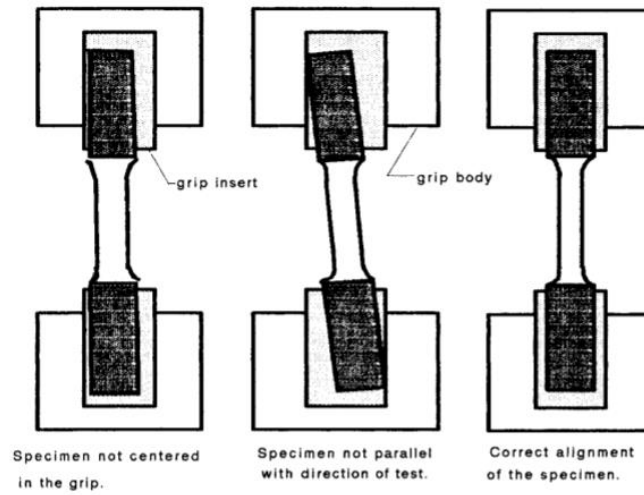
Σχήμα 8.5.2. Συστήματα αρπαγών για πειράματα εφελκυσμού. a, b, c) Κυκλικής διατομής με διαφορετικό τύπο αρπαγής d) Παραλληλεπίπεδης Διατομής έλασμα με τρύπα για πύρο e) Παραλληλεπίπεδης Διατομής έλασμα [30]

Στη συνέχεια κάθε δοκίμιο στερεώθηκε στις αρπαγές της μηχανής εφελκυσμού και εισήχθησαν οι διαστάσεις του κάθε δοκιμίου στον Ηλεκτρονικό υπολογιστή, που έκανε τις καταγραφές. Κατά τη διαδικασία του πειράματος, η κάτω κεφαλή της μηχανής παραμένει ακίνητη και η άνω κεφαλή κινείται με ρυθμιζόμενη ταχύτητα. Στην περίπτωση αυτής της πειραματικής διαδικασίας η ταχύτητα της άνω κεφαλής ορίστηκε σε 10mm/min μέχρι τη θραύση του δοκιμίου.

Είναι σημαντικό να τοποθετηθεί σωστά το δοκίμιο, όσον αφορά την κατά άξονα τοποθέτηση. Επίσης, σημασία έχει η περιοχή του δοκιμίου, που η αρπαγή αρπάζει, να είναι όσον το δυνατό μεγαλύτερη. Η κατά άξονα σωστή τοποθέτηση φαίνεται στο Σχήμα 8.5.3 και σκοπό έχει την ομοιόμορφη και κάθετη εφαρμογή της δύναμης. Η καλή αρπαγή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.5.4, είναι σημαντική αφενός για να μην υπάρχει πιθανότητα καταστροφής των αρπαγών και αφετέρου να μην υπάρχει ολίσθηση του δοκιμίου μας κατά την εκτέλεση του πειράματος. Ολίσθηση των δοκιμίων παρατηρήθηκε κατά την πρώτη προσπάθεια διεξαγωγής του πειράματος, πράγμα που οδήγησε τα αποτελέσματα να είναι μη επεξεργάσιμα. Στη Γραφική 8.5.1, η οποία δημιουργήθηκε από τα δεδομένα της πρώτης προσπάθειας διεξαγωγής του πειράματος, φαίνεται καθαρά η ολίσθηση του δοκιμίου.

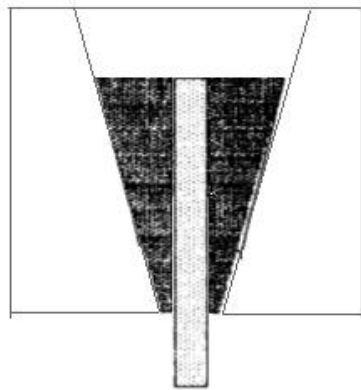


Γραφική 8.5.1 Δείγμα συμπεριφοράς ολίσθησης του δοκιμίου στο σημείο των αρπαγών.



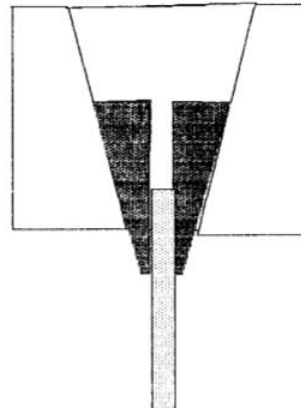
Σχήμα 8.5.3 Η κατά άξονα σωστή τοποθέτηση των δοκιμίων [30]

A)



Σχήμα 8.5.4 α) Καλή αρπαγή δοκιμίου

B)



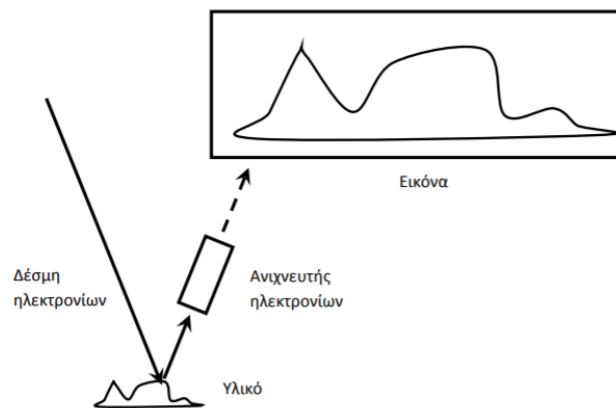
β) Κακή αρπαγή δοκιμίου [30]

POOR ENGAGEMENT.
THIS SMALL 'BITE' IS
LIKELY TO CAUSE DAMAGE
TO THE GRIPS, AND
RISK OF INJURY TO
ANYONE NEAR THE
MACHINE.

9. Παρατήρηση της Διατομής Θραύσης των Δοκιμίων σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης SEM με Φασματόμετρο Ενεργειακής Διασποράς.

9.1. Εισαγωγή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο..

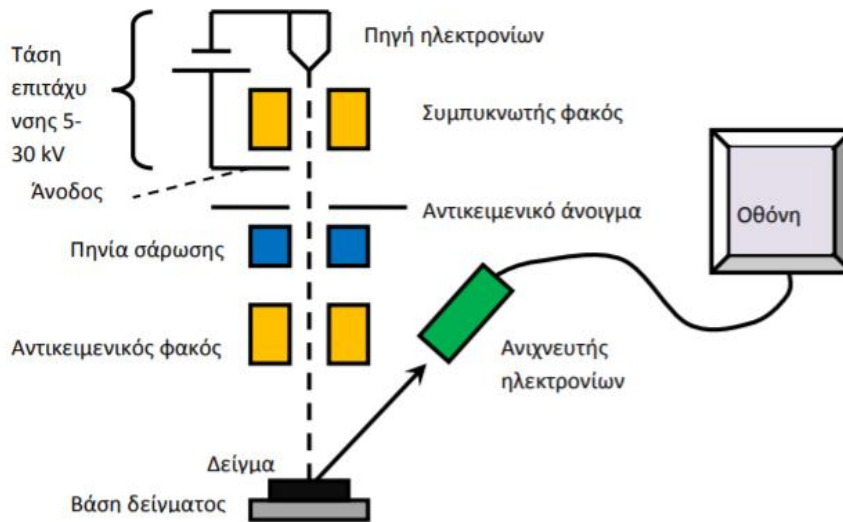
Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM (Scanning electron microscope) είναι ένα όργανο που λειτουργεί όπως περίπου και ένα οπτικό μικροσκόπιο μόνο που χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας αντί για φως, για να εξετάσει αντικείμενα σε λεπτομερή κλίμακα. Τα ηλεκτρόνια, λόγω της κυματικής τους φύσης, μπορούν να εστιαστούν όπως και τα φωτεινά κύματα αλλά σε πολύ μικρότερη επιφάνεια. Η δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος με το οποίο αλληλοεπιδρά. Από την αλληλεπίδραση αυτή προκύπτουν πληροφορίες σε σχέση με τα άτομα των στοιχείων που απαρτίζουν το εξεταζόμενο υλικό. Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας.[31]



Σχήμα 9.1.1 Αναπαράσταση λειτουργίας SEM

Το Sem αποτελείται από τα εξής μέρη όπως φαίνονται και στο Σχήμα 9.1.2:

1. Πηγή ηλεκτρονίων.
2. Τάση επιτάχυνσης. Είναι υπεύθυνη για την επιτάχυνση των ηλεκτρονίων προς το δείγμα.
3. Συμπυκνωτής φακός. Είναι υπεύθυνος για την συμπύκνωση της διαμέτρου της δέσμης.
4. Αντικειμενικό άνοιγμα. Είναι μια οπή μεταβλητού μεγέθους, η οποία περιορίζει την δέσμη.
5. Πηλίκια σάρωσης. Είναι υπεύθυνα για την περιοδική εκτροπή της δέσμης, ώστε να δημιουργείται η σάρωση.
6. Αντικειμενικός φακός είναι υπεύθυνος για την οπτική εστίαση.
7. Βάση του δείγματος. Είναι εκεί που τοποθετείται το δείγμα και μπορεί να κινηθεί ως προς τις τρεις κατευθύνσεις x-y-z και 2 γωνίες.
8. Ανιχνευτής ηλεκτρονίων. Είναι υπεύθυνος για την συλλογή των αναδυόμενων ηλεκτρονίων από την επιφάνεια του δείγματος.



Σχήμα 9.1.2 Γενική διάταξη Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης .[32]

Έτσι το SEM δίνει πληροφορίες που αφορούν κυρίως στη μορφολογία και στη σύσταση της επιφανείας. Εφαρμόζοντας ένα σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτίνων Χ που δημιουργούνται στην επιφάνεια από την προσπίπτουσα δέσμη, μπορεί να γίνει ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση του υλικού.[31]

Το όργανο που χρησιμοποιείται είναι το μοντέλο Quanta 200 της εταιρείας FEI συνδυασμένο με φασματόμετρο ακτίνων Χ ενεργειακής διασποράς-EDAX. Το Quanta 200. Επιτυγχάνει μεγεθύνσεις μεγαλύτερες του 100000X με διακριτική ικανότητα 6 nm. Χρησιμοποιεί νήμα βολφραμίου σαν πηγή ηλεκτρονίων και ανήκει στα σύγχρονα συστήματα τα οποία μπορούν να λειτουργούν σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης όσον αφορά το θάλαμο που εναποτίθενται τα δοκίμια:

- Υψηλού κενού (High Vacuum $\approx 2 \cdot 10^{-3}$ Pa)
- Χαμηλού κενού (Low Vacuum 3-12 Pa)
- Περιβάλλοντος (ESEM, Environmental Scanning Electron Microscopy)



Εικόνα 9.1.1. SEM Quanta 200

Διαθέτει τρεις διαφορετικούς ανιχνευτές δευτερογενών ηλεκτρονίων (ένα για κάθε διαφορετικό τρόπο λειτουργίας κενού): Everhart – Thornley (ETD), Large Field Detector (LFD), Gaseous Electron Detector (GED), ένα ανιχνευτή οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων Solid State Electron Detector (SSED), καθώς και ανιχνευτή ενεργειακής διασποράς ακτίνων Χ (EDX). Έτσι, μας δίνεται η δυνατότητα να παρατηρούμε ταυτόχρονα :

- Την επιφάνεια του δείγματος από τον ανιχνευτή δευτερογενών ηλεκτρονίων.
- Την κατανομή των φάσεων από τον ανιχνευτή των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων.
- Μια μεικτή εικόνα μορφολογίας και κατανομής φάσεων .
- Τη στοιχειακή ανάλυση σε ένα σημείο του δείγματος, οπότε προκύπτουν φάσματα της κλασικής μορφής, αλλά και η δυνατότητα ανάλυσης της ευρύτερης περιοχής μέσω του λογισμικού EDAX Genesis μέσω του ανιχνευτή ενεργειακής διασποράς ακτίνων Χ.

9.2. Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων SEM.

Η μελέτη έγινε σε δύο κατηγορίες δοκιμών. Σε μη εκτεθειμένα σε διαβρωτικό περιβάλλον δοκίμια και σε εκτεθειμένα δοκίμια που παρέμειναν 1300 ώρες στο διαβρωτικό περιβάλλον. Η πιο κάτω ανάλυση των αποτελεσμάτων χωρίζεται στις δύο αυτές κατηγορίες και σε αριθμό δοκιμών, καθώς αναζητούσαμε ενδιαφέροντα σημεία της κάθε κατηγορίας.

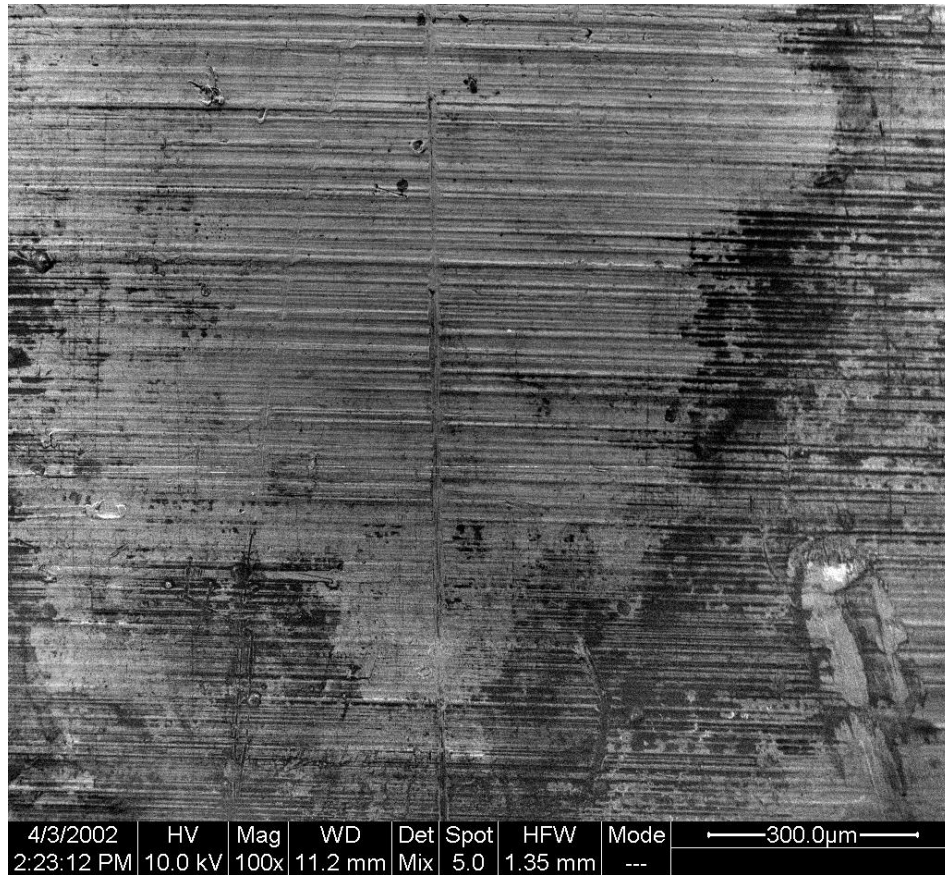
9.2.1. Μη εκτεθειμένα σε θαλάσσιο διαβρωτικό περιβάλλον δοκίμια.

Δοκίμιο 1:

Αν και το δοκίμιο αυτό δεν έχει εκτεθεί σε διαβρωτικό περιβάλλον, παρατηρούμε στην ανάλυση της επιφάνειας του ότι, έχει 13,93% κατά βάρος στοιχεία οξυγόνου και 33% άνθρακα, όπως φαίνονται στον Πίνακα 9.2.1.1. Αυτό είναι αποτέλεσμα αρκετών χρονών παραμονής των δοκιμών στο εργαστήριο, αφού η μόνη διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν απλός αλκαλικός καθαρισμός και στη συνέχεια ξέβγαλμα με απιονισμένο νερό και εμβάπτιση σε Ακετόνη για απομάκρυνση του νερού.

AL sur F1 (full frame)		
Element	Wt %	At %
C	33,63	49,84
O	13,93	15,50
Na	-	-
Mg	0,87	0,63
Al	51,57	34,02
Si	-	-
P	-	-
S	-	-
Cl	-	-
K	-	-
Ca	-	-
Total	-	-

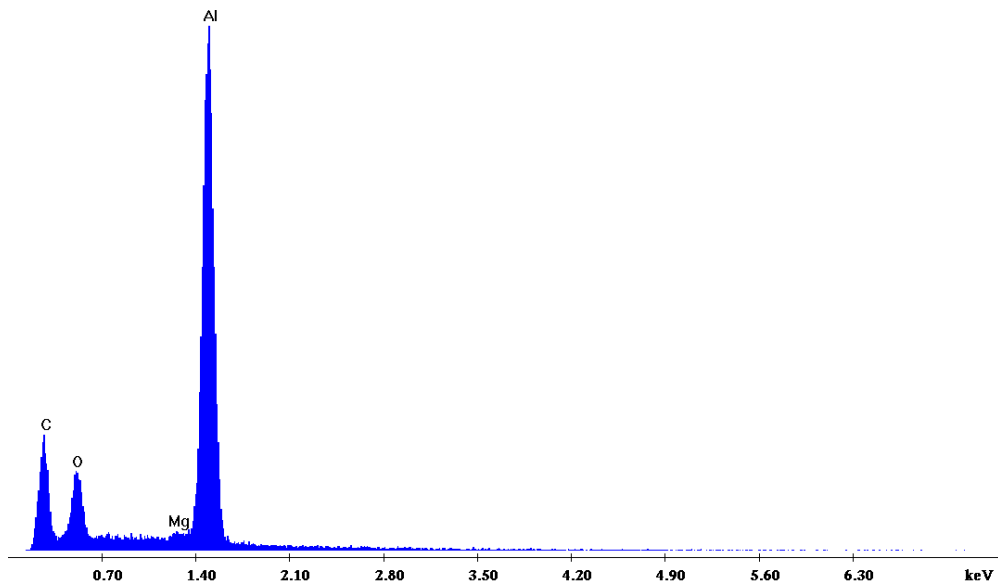
Πίνακα 9.2.1.1



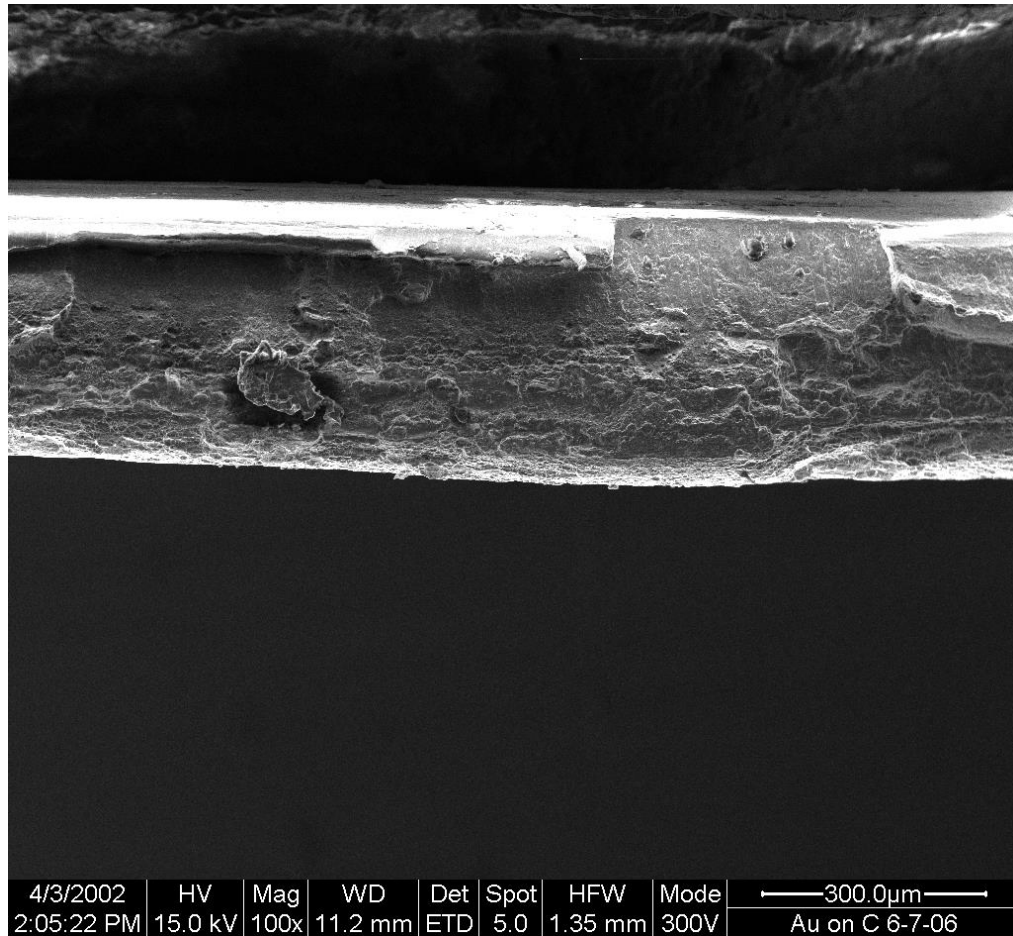
Εικόνα 9.2.1.1 Επιφάνεια μη εκτεθειμένου δοκιμίου 100X

C:\EDS\USR\Ivasileiou\Olga 2019-09-04\AI sur F1.spc

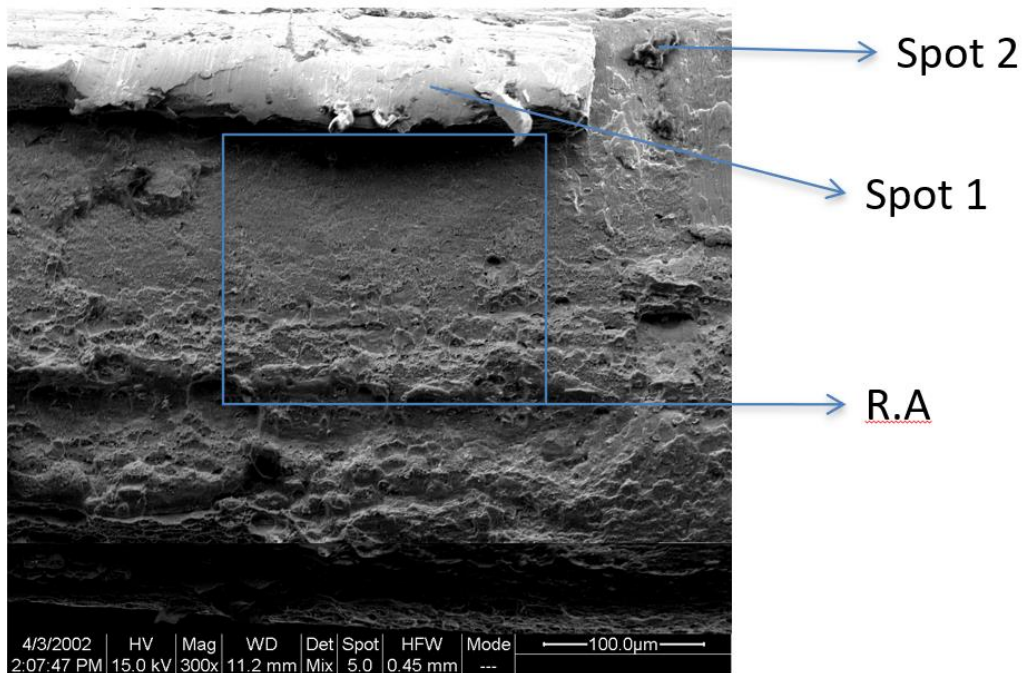
Label A: Chlorite (Nrm.%= 38.86, 20.96, 34.83, 1.14, 3.84, 0.28)



Εικόνα 9.2.1.2 Φασματογραφία επιφάνειας μη εκτεθειμένου δοκιμίου



Εικόνα 9.2.1.3 Επιφάνεια Θραύσης Δοκίμιο 1



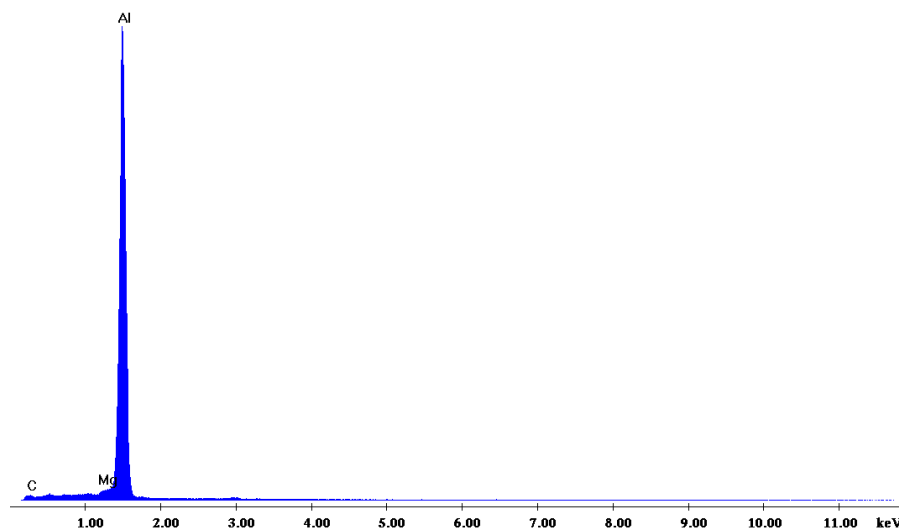
Εικόνα 9.2.1.4 Επιφάνεια Θραύσης Δοκίμιο 1

Al Fatigue Cut F2 (reduced area)			Al Fat Cut F2 Spot 1		Al Fat Cut F2 Spot 2 (10kV)	
Element	Wt %	At %	Wt %	At %	Wt %	At %
C	10,92	21,55	31,53	50,05	49,19	54,22
O	-	-	10,74	12,80	17,84	14,76
Cu	-	-	7,99	2,40	-	-
Mg	1,89	1,85	0,60	0,47	-	-
Al	87,19	76,60	46,70	33,01	0,33	0,16
Si	-	-	0,25	0,17	-	-
N	-	-	-	-	32,64	30,86
S	-	-	-	-	-	-
Cl	-	-	0,98	0,53	-	-
K	-	-	0,65	0,32	-	-
Ca	-	-	0,56	0,27	-	-
Total	100	100	100	100	100	100

Πίνακα 9.2.1.2 Φασματογραφία Γενικής Περιοχής Θραύσης και 2 άλλων σημείων.

C:\EDS\USRVasileiou\Olga 2019-09-04\Al Fat cut F2 RA.spc

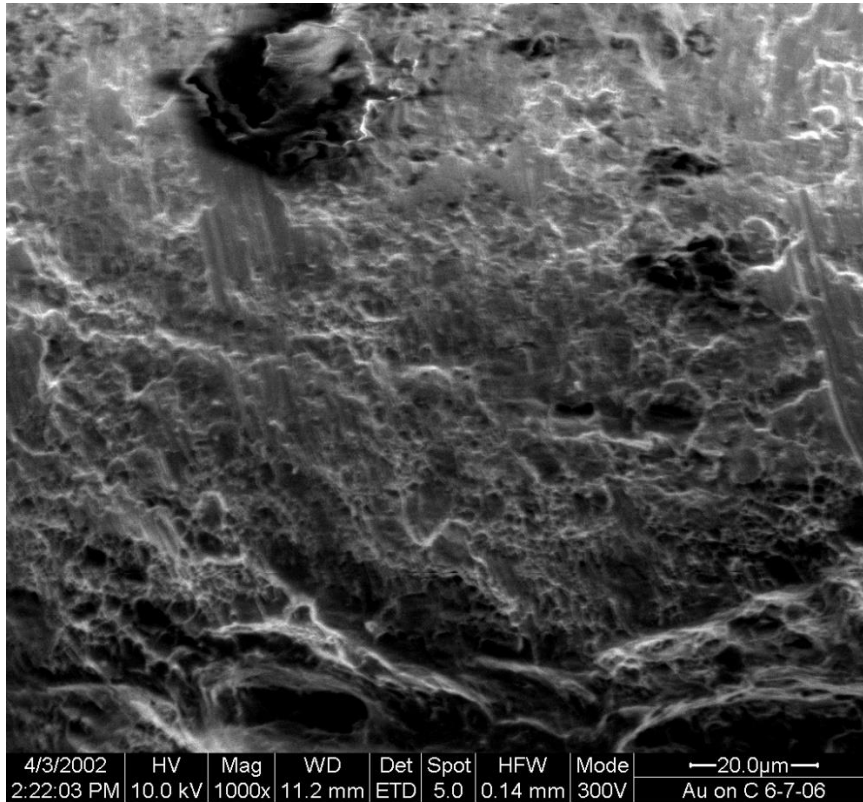
Label A: Chlorite (Nrm.%= 38.86, 20.96, 34.83, 1.14, 3.84, 0.28)



Εικόνα 9.2.1.5 Φασματογραφία Γενικής περιοχής Θραύσης

Όπως παρατηρούμε στη φασματογραφία της Γενικής Περιοχής, στην οποία δεν έχουμε καμία προσβολή από οποιοδήποτε περιβάλλον, τα κύρια στοιχεία είναι το αλουμίνιο 87,19% και το μαγνήσιο Mg 1,89% με μόνο παράδοχο την ύπαρξη άνθρακα σε ένα ποσοστό 10,92%. Το ποσοστό αυτό του άνθρακα δε δικαιολογείται σε τέτοια ποσοστά, οπότε μεγάλο μέρος αυτού πρέπει να αφορά επικαθήσεις στην επιφάνεια του δοκιμίου μας, κατά τη διάρκεια αναμονής μας από το ένα εργαστήριο στο άλλο, καθώς οι μετρήσεις έγιναν με διάρκεια αρκετών ημερών. Στα δύο άλλα σημεία παρατηρούμε και άλλες προσθήκες αφού η συγκέντρωση του μικροσκοπίου πήγε από 300X σε 1000X όπως φαίνεται στην πιο κάτω Εικόνα 9.2.1.6 όπου φαίνεται σε μεγέθυνση το σημείο 2 (Spot2) της Εικόνας 9.2.1.4.

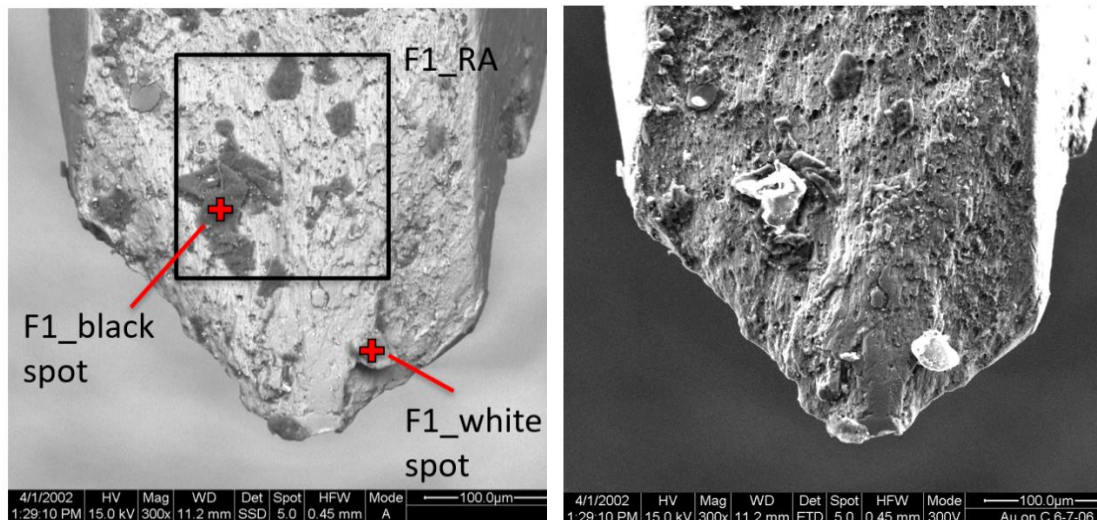
Αξίζει να σημειωθεί ότι στην Εικόνα 9.2.1.4 παρατηρούμε ότι στο σημείο 1 έχουμε οπτική παρατήρηση όλκιμης περιοχής που βρίσκεται και τα άκρα του δοκιμίου μας, σε αντίθεση με την Εικόνα 9.2.1.4 στο σημείο 2 και την Εικόνα 9.2.1.6 που παρατηρούμε καθαρά ψαθυρή θραύση.



Εικόνα 9.2.1.6 Σημείο 2 του Δοκιμίου 1 (μη εκτεθειμένο σε διαβρωτικό περιβάλλον) σε 1000X

Δοκίμιο 2:

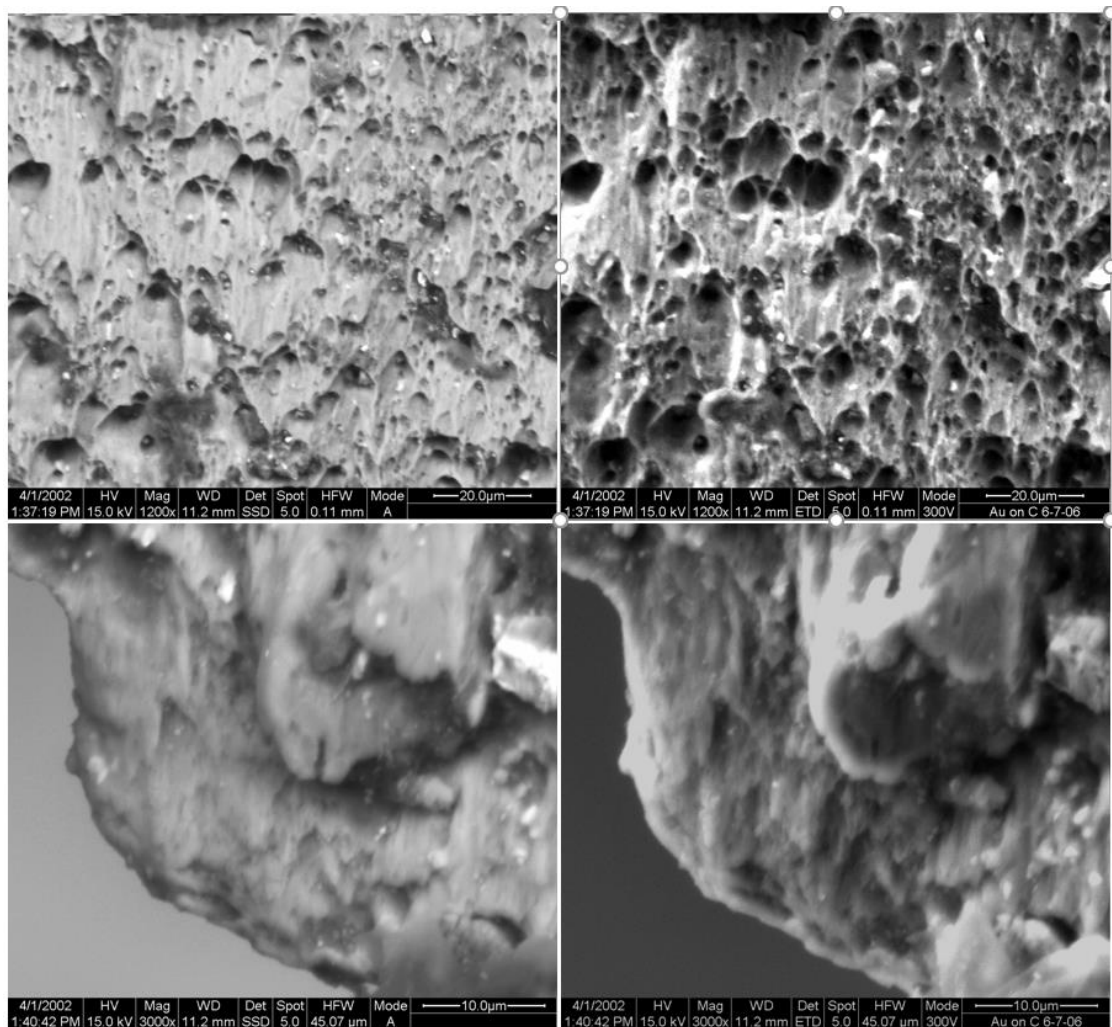
Στο δοκίμιο 2 μελετήσαμε περιοχή που βρισκόταν στο άκρο της επιφάνειας θραύσης και τα αποτελέσματα της φασματογραφίας περιλαμβάνονται στον Πίνακα



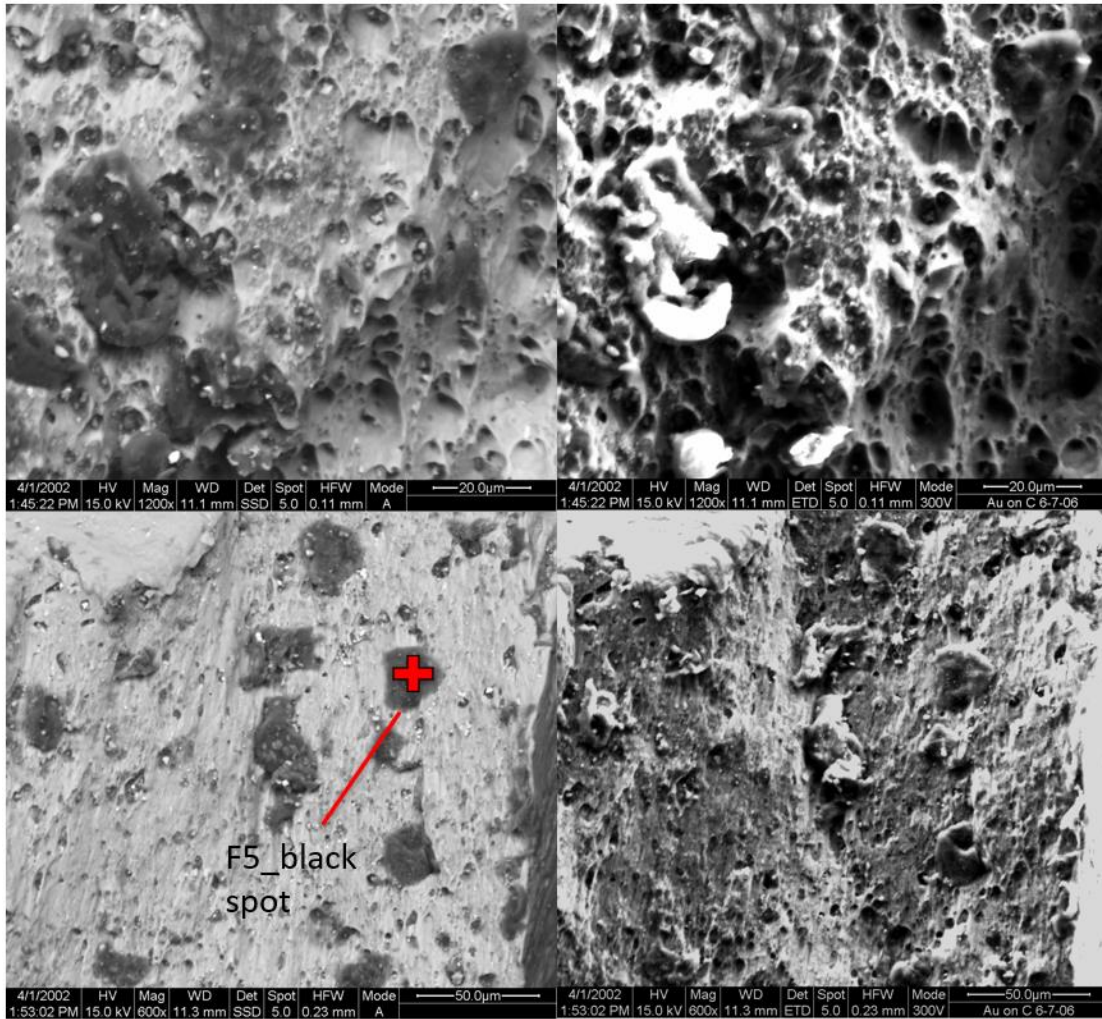
Εικόνα 9.2.1.7 Επιφάνεια Θραύσης Δοκίμιο 2 σε 300 X

AL1 F1 (reduced area)			AL1 F1 Black spot		AL1 F1 White spot	
Element	Wt %	At %	Wt %	At %	Wt %	At %
C	29,4	46,99	65,89	76,23	14,11	22,33
O	5,77	6,92	20,54	17,84	48,49	57,59
Na	0,74	0,61	2,62	1,58	0,52	0,43
Mg	1,01	0,79	0,13	0,07	0,1	0,08
Al	61,74	43,92	0,36	0,19	0,31	0,22
Si	0,23	0,16	0,23	0,11	0,52	0,35
P	-	-	-	-	-	-
S	-	-	1,13	0,49	16,28	9,64
Cl	1,11	0,60	7,11	2,79	0,17	0,09
K	-	-	1,25	0,45	2,78	1,35
Ca	-	-	0,74	0,26	16,72	7,93
Total	100	100	100	100	100	100

Πίνακα 9.2.1.3 Φασματογραφία Γενικής περιοχής Θραύσης Δοκιμίου 2 και 2 άλλων σημείων.



Εικόνα 9.2.1.8 Επιφάνεια Θραύσης Δοκίμιο 2 στο κάτω άκρο 1200 X και 3000X



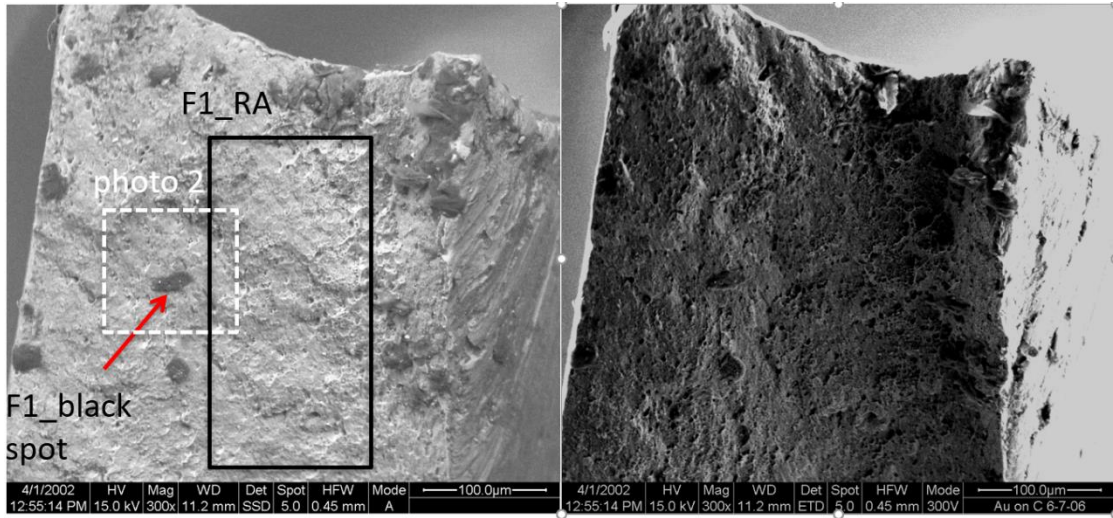
Εικόνα 9.2.1.9 Επιφάνεια Θραύσης Δοκίμιο 2 στο κέντρο του δοκιμίου σε 600 X και 1200X

Στον Πίνακα 9.2.1.4 που ακολουθεί παρουσιάζεται η Φασματογραφία σε μαύρο σημείο του δοκιμίου με στοιχεία που είναι εκτός προδιαγραφών να περιλαμβάνονται μέσα στη δομή του υλικού μας, όπως άνθρακας σε ποσοστό 56,45% και πολύ λίγο ποσοστό αλουμινίου. Αυτό μας δείχνει πόσο εύκολο είναι το ίδιο το υλικό να εμπεριέχει μέσα στη δομή του μεγάλες ποσότητες ακαθαρσιών που εσωκλείονται μέσα σε θαλάμους.

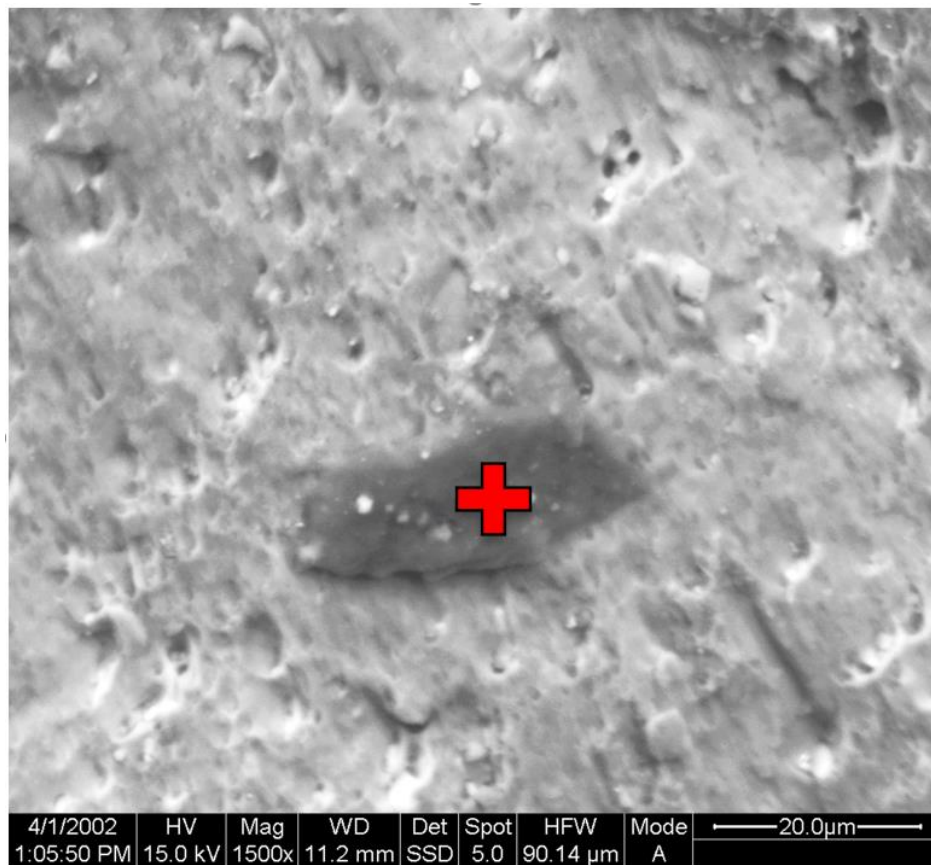
Elem	Wt %	At %	Elem	Wt %	At %
C	56,45	72,14	P	0,22	0,11
O	11,26	10,8	S	1,17	0,56
Na	3,25	2,17	Cl	5,74	2,48
Mg	0,63	0,4	K	2,11	0,83
Al	16,66	9,48	Ca	2,15	0,82
Si	0,38	0,21	Total	100	100

Πίνακα 9.2.1.3 Φασματογραφία Γενικής περιοχής Θραύσης Δοκιμίου 2 και 2 άλλων σημείων.

9.2.2. Εκτεθειμένα σε θαλάσσιο διαβρωτικό περιβάλλον δοκίμια για 1300 ώρες



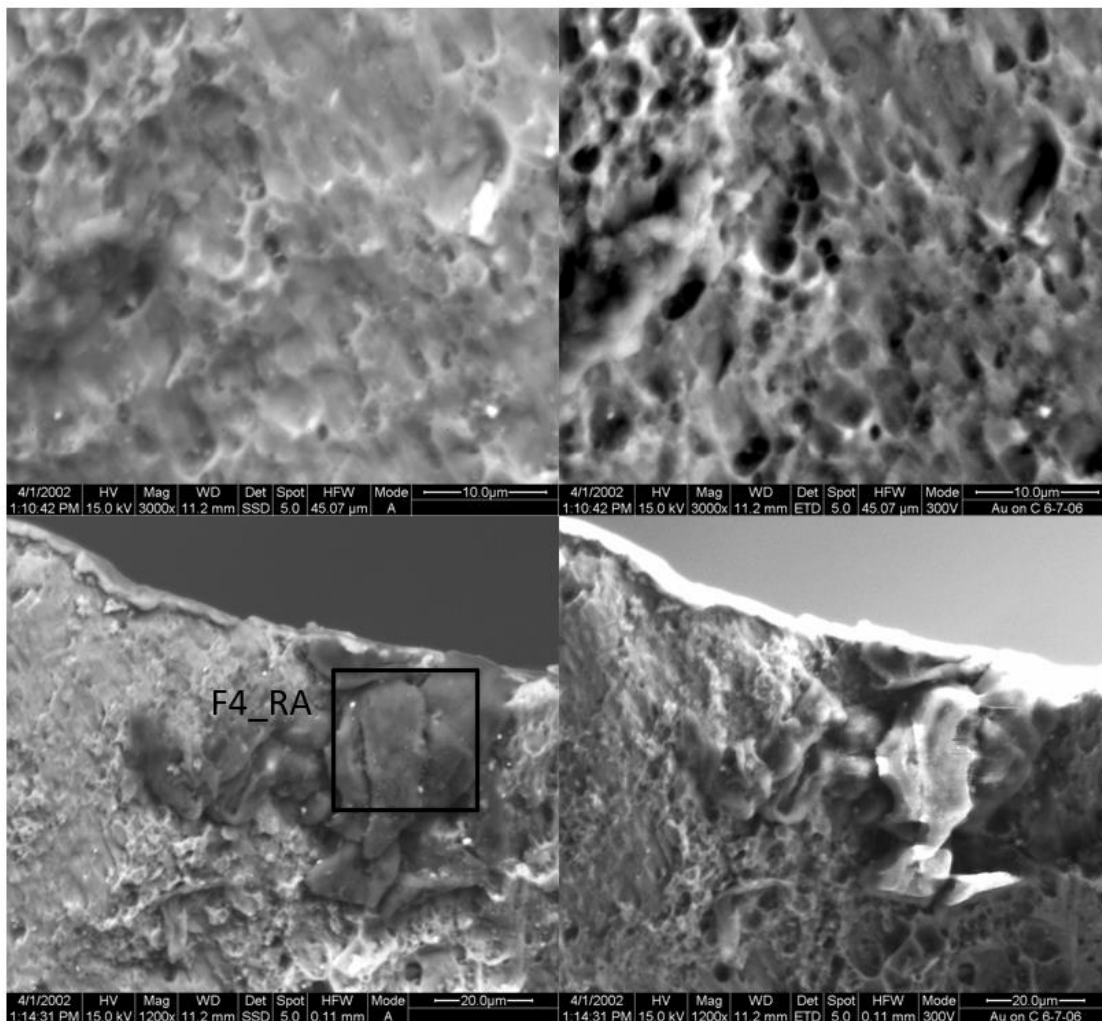
Εικόνα 9.2.2.1 Επιφάνεια Θραύσης Δοκίμιο 1300h στο άνω άκρο του δοκίμιου σε 300 X



Εικόνα 9.2.2.2 Μαύρο σημείο στο Δοκίμιο 1300h σε μεγέθυνση 1500X

AL6 F1 (reduced area)			AL6 F1 Black spot	
Element	Wt %	At %	Wt %	At %
C	16,85	30,52	58,73	71,38
O	4,57	6,21	18,65	17,02
Na	0,68	0,65	1,62	1,03
Mg	-	-	0,32	0,19
Al	77,06	62,11	14,4	7,79
Si	-	-	0,42	0,22
S	-	-	1,21	0,55
Cl	0,84	0,52	2,5	1,03
K	-	-	0,92	0,34
Ca	-	-	1,22	0,44
Total	100	100	100	100

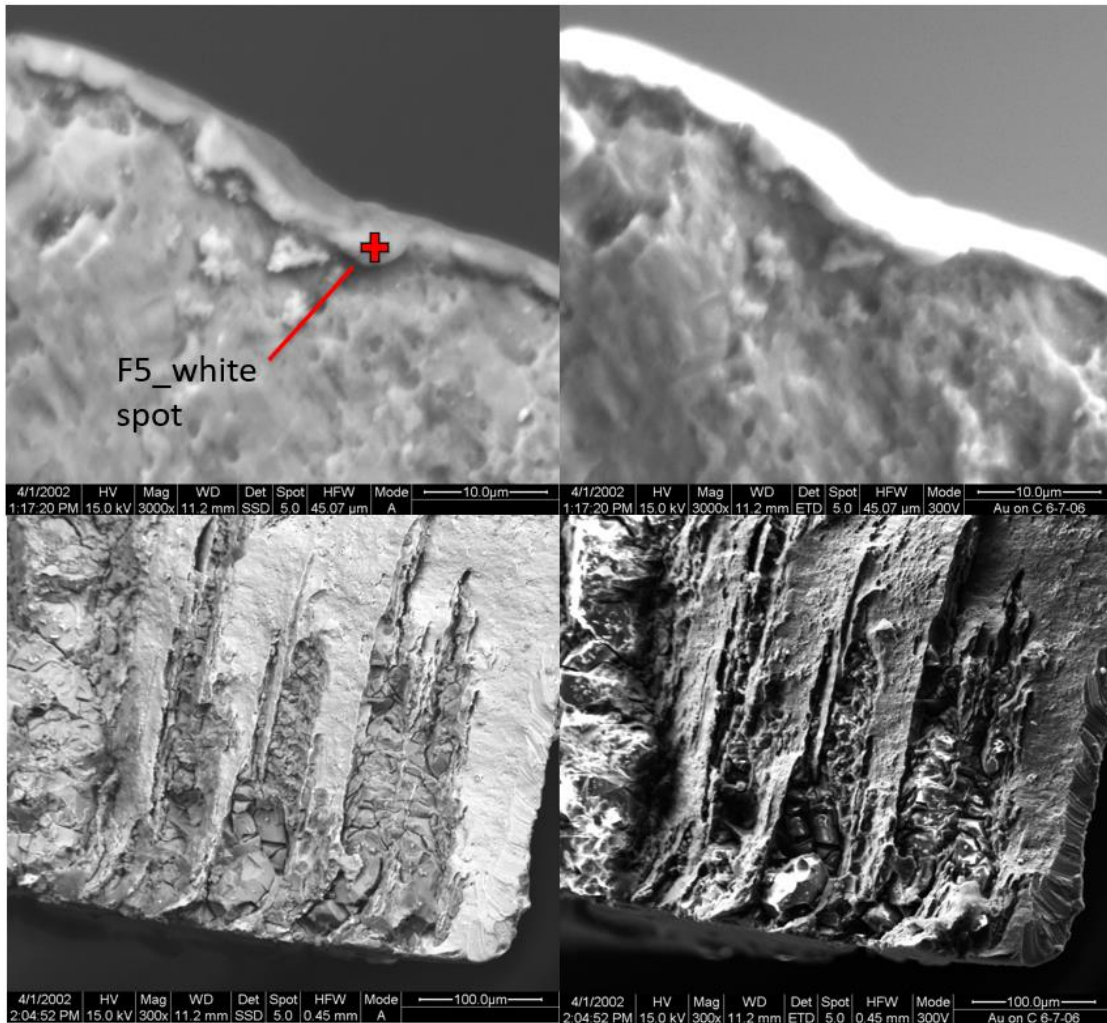
Πίνακα 9.2.2.1 Φασματογραφία Γενικής περιοχής Θραύσης Δοκιμίου 1300h και του ενός μαύρου σημείου όπως φαίνονται στην Εικόνα 9.2.2.1



Εικόνα 9.2.2.3 Επιφάνεια Θραύσης Δοκίμιο 1300h στο άνω άκρο του δοκιμίου σε 1200 X και 3000X

AL6 F4 RA (reduced area)					
Element	Wt %	At %	Element	Wt %	At %
C	63,28	74,66	Si	0,33	0,17
O	19,02	16,85	S	0,76	0,33
Na	4,34	2,68	Cl	5,82	2,33
Mg	0,15	0,09	K	1,7	0,62
Al	3,83	2,01	Ca	0,77	0,27
			Total	100	100

Πίνακα 9.2.2.1 Φασματογραφία Γενικής περιοχής Άνω άκρου Θραύσης Δοκιμίου 1300h όπως φαίνονται στην Εικόνα 9.2.2.3

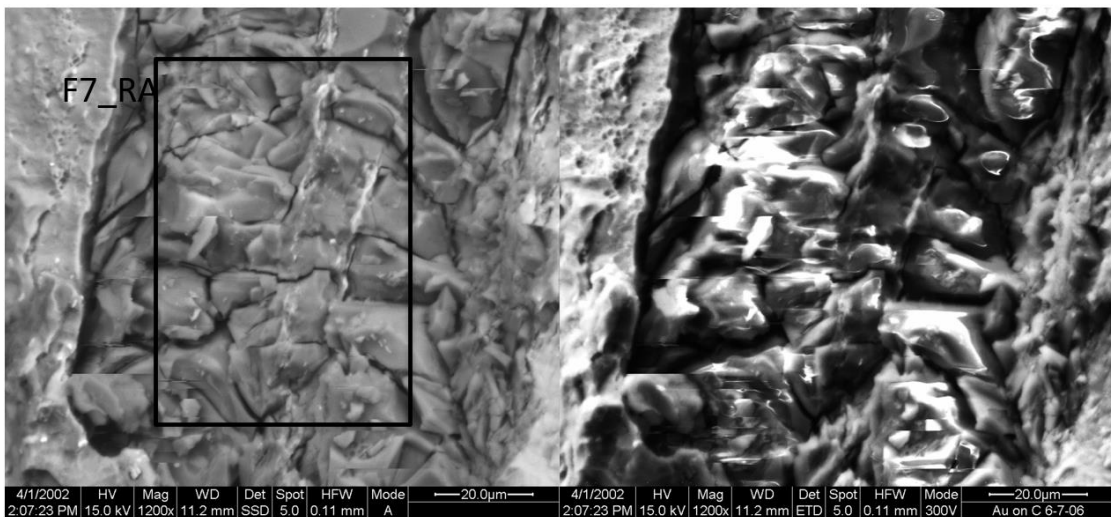


Εικόνα 9.2.2.4 Επιφάνεια Θραύσης Δοκιμίου 1300h στο άνω άκρο του δοκιμίου σε 300 X και 3000X

Παρατηρείται σε κάποιες περιοχές (Εικόνα 9.2.1.8 1200X) διαφορά στην όψη, η οποία παραπέμπει σε πιο όλκιμα υλικά, με τραβηγμένες στα άκρα κοιλότητες και σε άλλες (Εικόνα 9.2.2.4 και Εικόνα 9.2.2.1) όψη που παραπέμπει σε πιο ψαθυρά υλικά.

AL6 F5 White spot					
Element	Wt %	At %	Element	Wt %	At %
C	13,86	25,8	Si	-	-
O	4,71	6,58	S	-	-
Na	-	-	Cl	-	-
Mg	1,6	1,47	K	-	-
Al	79,83	66,15	Ca	-	-
			Total	100	100

Πίνακα 9.2.2.2 Φασματογραφία Λευκού Σημείου Άνω άκρου Θραύσης Δοκιμίου 1300h όπως φαίνονται στην Εικόνα 9.2.2.4



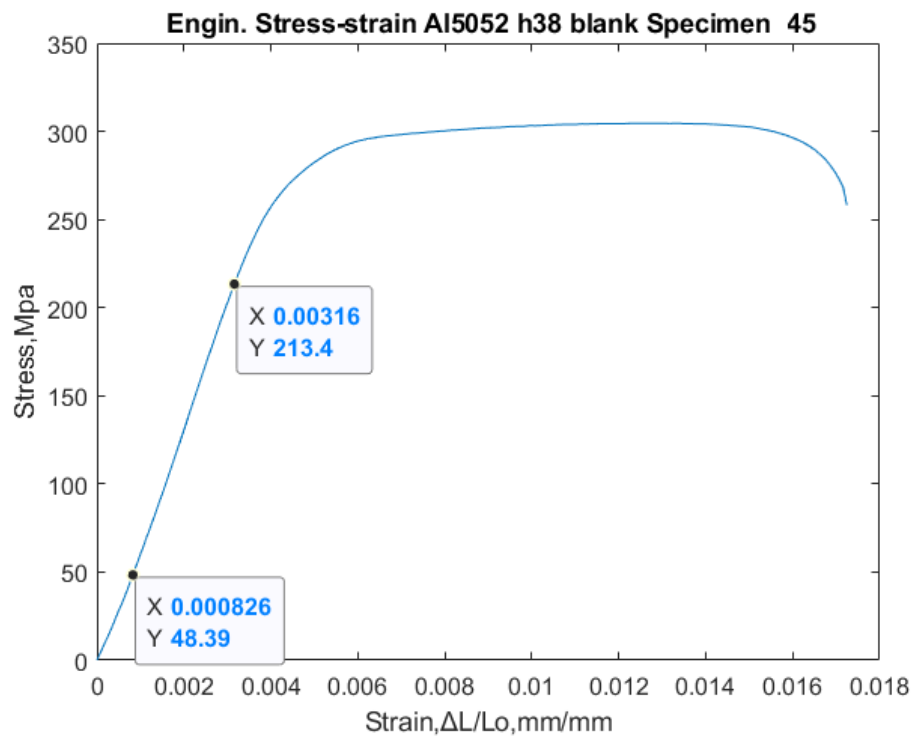
Εικόνα 9.2.2.5 Επιφάνεια Θραύσης Δοκίμιο 1300h στο άνω άκρο του δοκιμίου σε 1200X

AL6 F7 RA (reduced area)			Element	Wt %	At %
Element	Wt %	At %	Si	0,27	0,17
C	10,31	15,47	S	0,63	0,36
O	54	60,82	Cl	1,04	0,53
Na	1,16	0,91	K	0,28	0,13
Mg	0,43	0,32	Ca	-	-
Al	31,88	21,29	Total	100	100

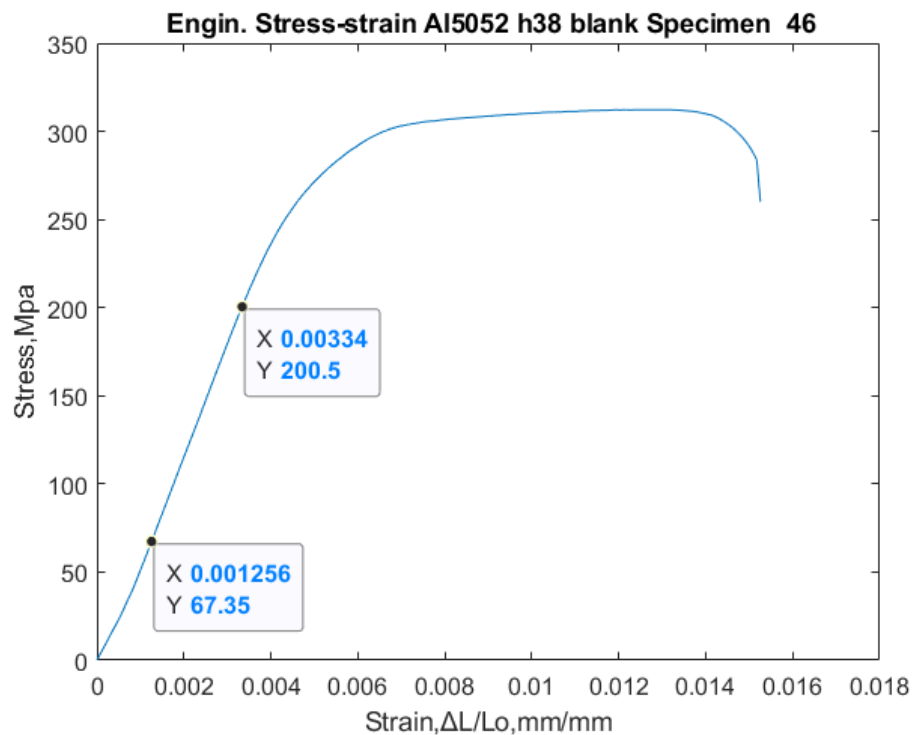
Πίνακα 9.2.2.3 Φασματογραφία Λευκού Σημείου Άνω άκρου Θραύσης Δοκιμίου 1300h όπως φαίνονται στην Εικόνα 9.2.2.5

10. Ανάλυση Αποτελεσμάτων Δοκιμών Εφελκυσμού

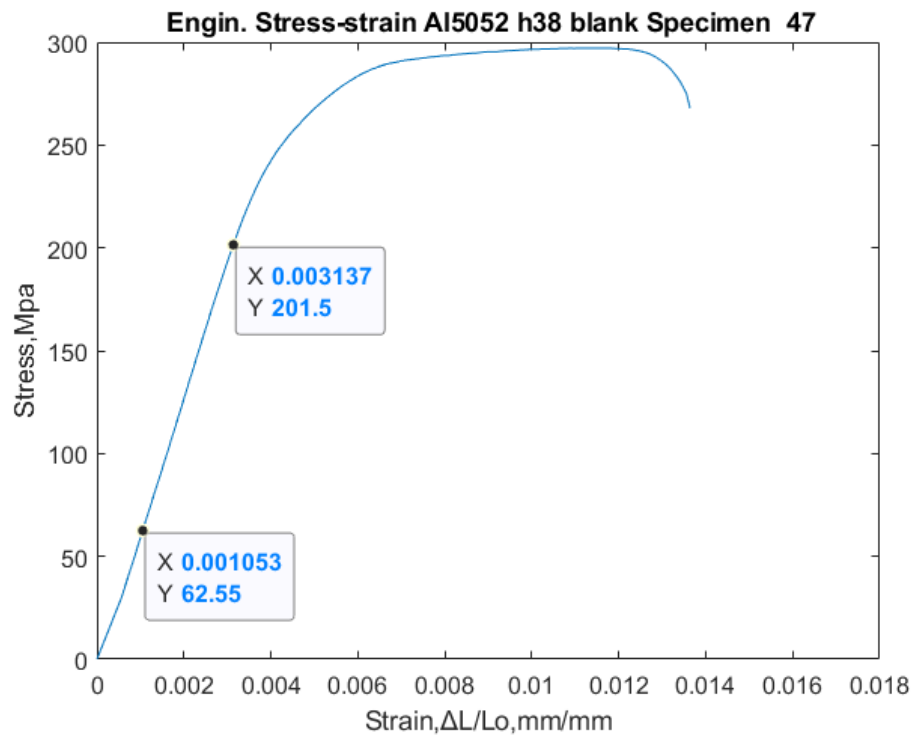
10.1. Δοκίμια που δεν εκτέθηκαν σε διαβρωτικό περιβάλλον.



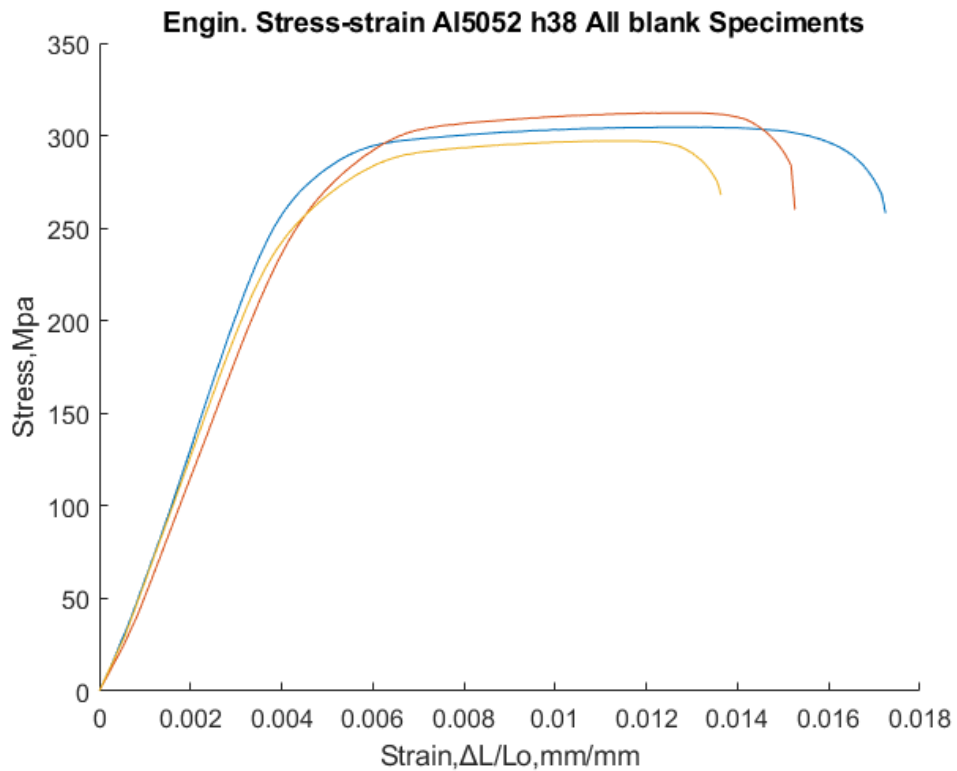
Γραφική 10.1.1 Δοκίμιο 45 Χωρίς έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον



Γραφική 10.1.2. Δοκίμιο 46 Χωρίς έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον



Γραφική 10.1.3. Δοκίμιο 47 Χωρίς έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον



Γραφική 10.1.4. Δοκίμια Χωρίς έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον

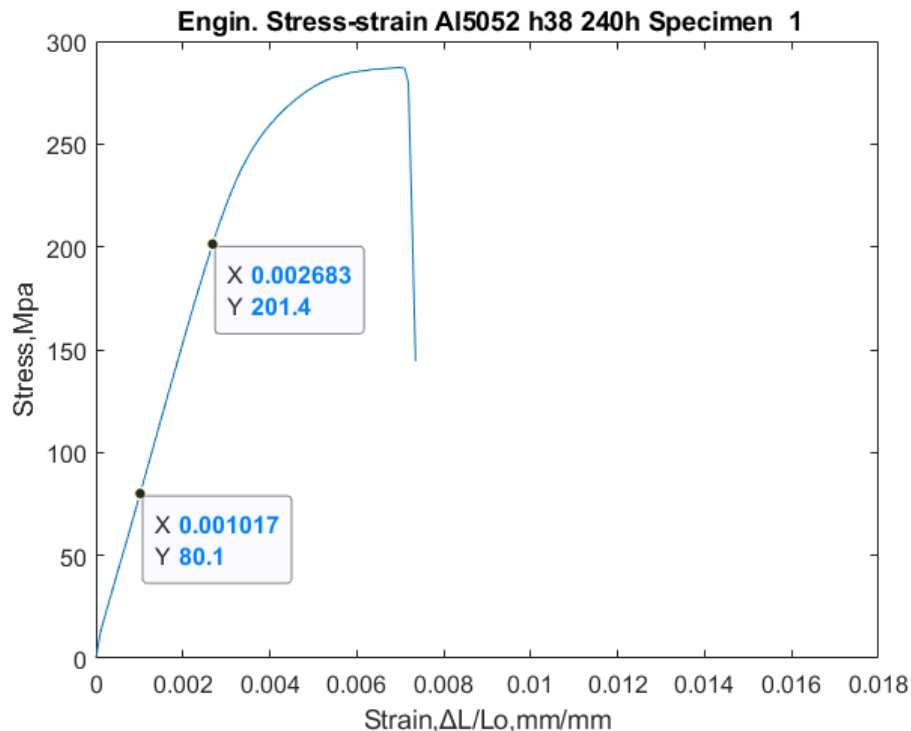
Όπως παρατηρείται στις γραφικές, το υλικό μας μπορεί να καταταχθεί στην κατηγορία των όλκιμων καθώς έχουμε πλαστική παραμόρφωση πριν από την θραύση .

Specimen	Tensile stress at max Load (Mpa)	Μέτρο ελαστικότητας E=stress/strain (GPa)
45	304,52	70
46	312,22	65
47	297,12	64

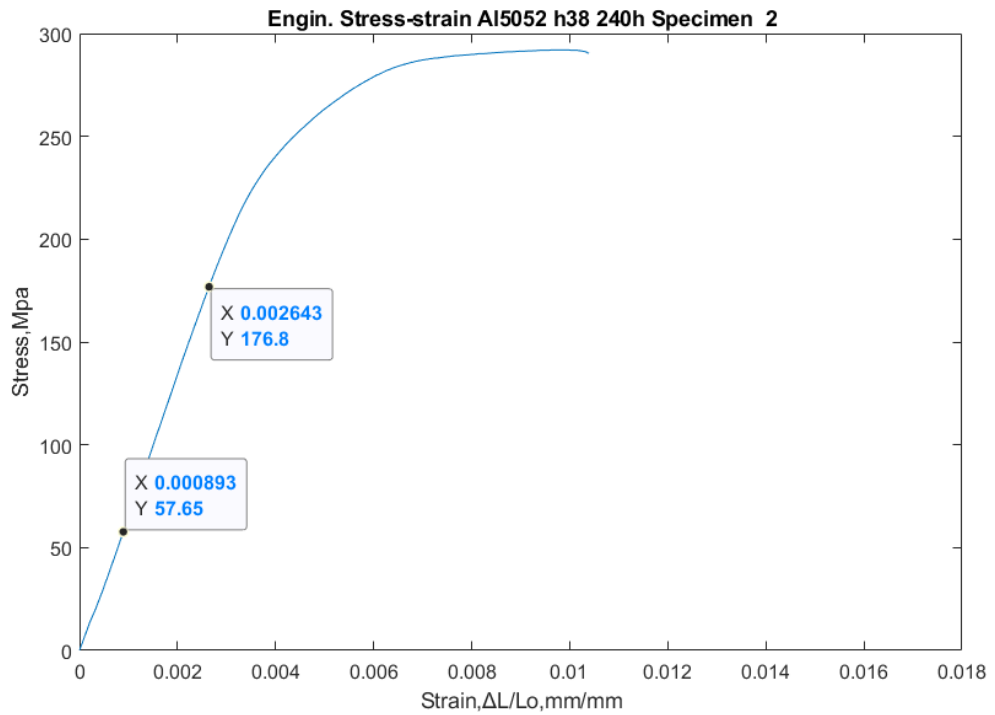
Πίνακας 10.1.1. Χαρακτηριστικά δοκιμών που δεν εκτέθηκαν σε διαβρωτικό περιβάλλον.

Σε όλες τις γραφικές που περιλαμβάνουν μόνο ένα δοκίμιο επιλέχθηκαν 2 σημεία για τον υπολογισμό της κλίσης του ευθύγραμμου τμήματος που καθορίζει το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμών. Οι τιμές στον Πίνακα 10.1.1 κυμαίνονται στα πρότυπα του A15052 H38 με μικρές σχετικά διαφοροποιήσεις. Όσον αφορά τις διαφοροποιήσεις στο μέτρο ελαστικότητας, μπορούν να αποδοθούν στο εξτενσιόμετρο, που ήταν τοποθετημένο στο μηχάνημα μεταξύ των αρπαγών, χωρίς όμως να μας επηρεάζει τη γενική παρατήρηση της μη σημαντικής μεταβολής κατά τη διάρκεια του πειράματος. Πιο κάτω παρουσιάζεται γραφική σε σχέση με τη μεταβολή όλων των τιμών σε βάθος χρόνου έκθεσης.

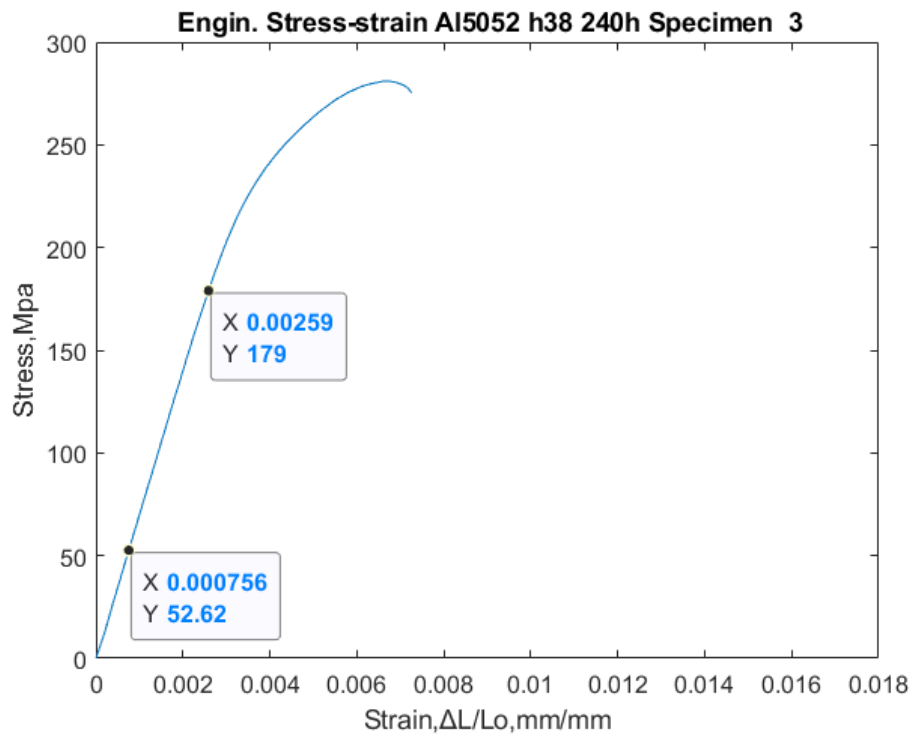
10.2. Δοκίμια που εκτέθηκαν 240 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον.



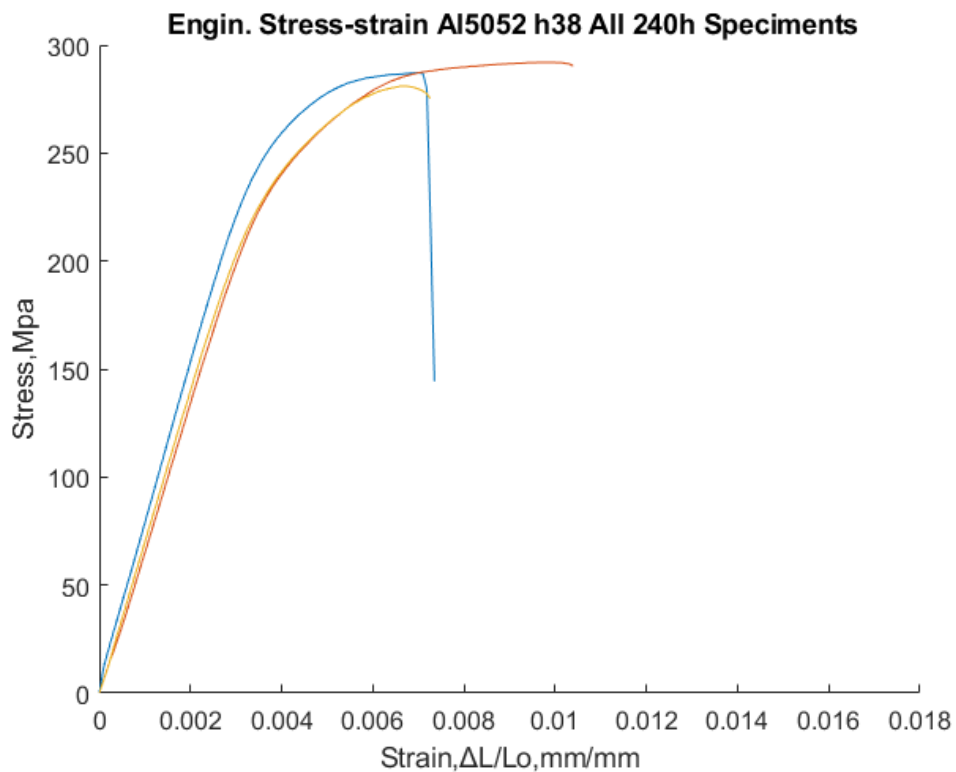
Γραφική 10.2.1. Δοκίμιο 1 Με 240 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον



Δοκίμιο 2 Με 240 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον



Γραφική 10.2.3. Δοκίμιο 3 Με 240 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον



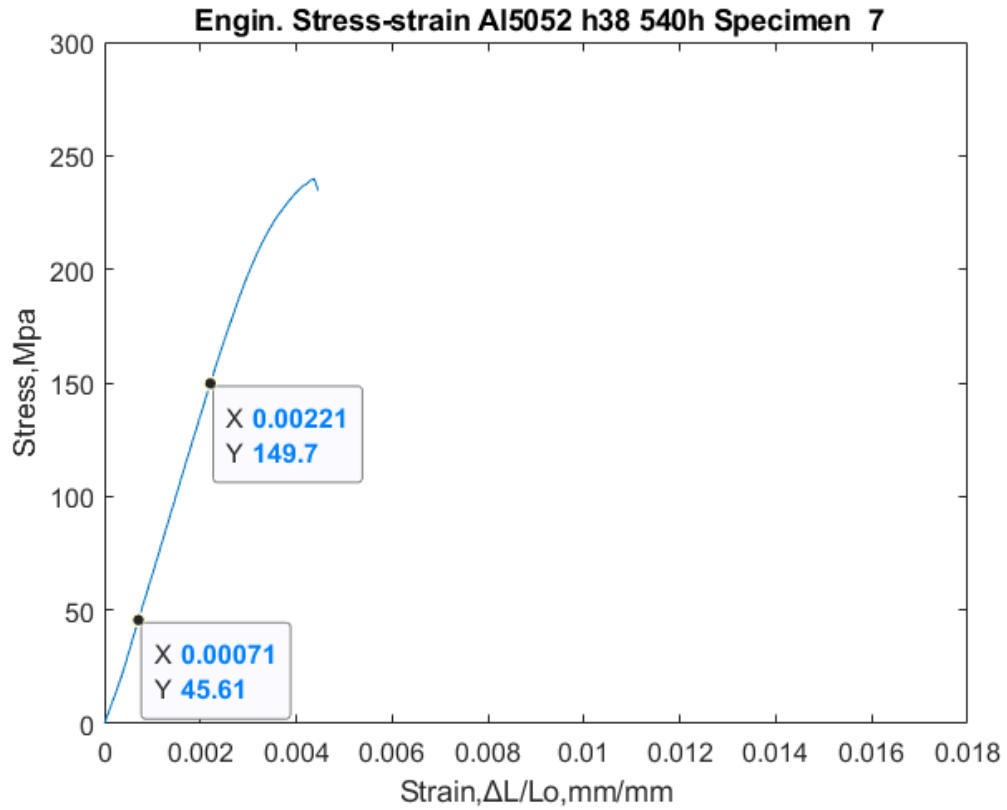
Γραφική 10.2.4. Δοκίμια με 240 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον

Specimen	Tensile stress at max Load (Mpa)	Μέτρο ελαστικότητας $E = \text{stress/strain}$ (GPa)
1	287,15	70
2	299,99	65
3	280,94	64

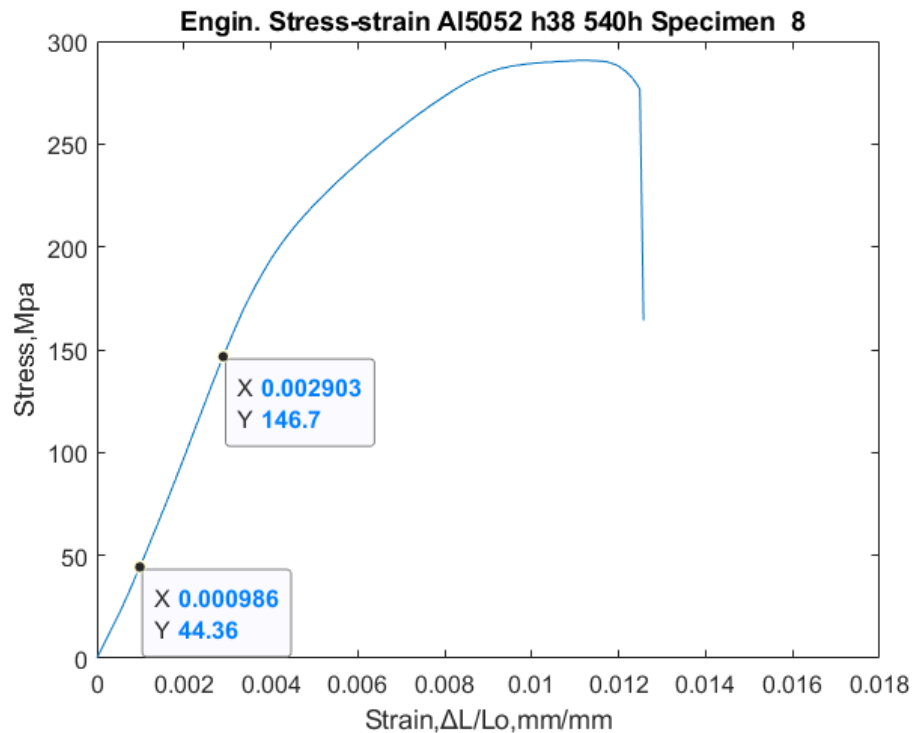
Πίνακας 10.2.1. Χαρακτηριστικά δοκιμών που εκτέθηκαν 240 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον

Στις πιο πάνω γραφικές παρατηρείται ότι, το μέγιστο όριο θραύσης των δοκιμών μας άρχισε να ελαττώνεται και τα δοκίμια να γίνονται πιο ψαθυρά. Αυτό ίσως οφείλεται σε μικρορωγμές, οι οποίες προκαλούν θραύση του υλικού σε χαμηλότερες τιμές φορτίων πριν προλάβει το δοκίμιο μας να παραμορφωθεί πλαστικά.

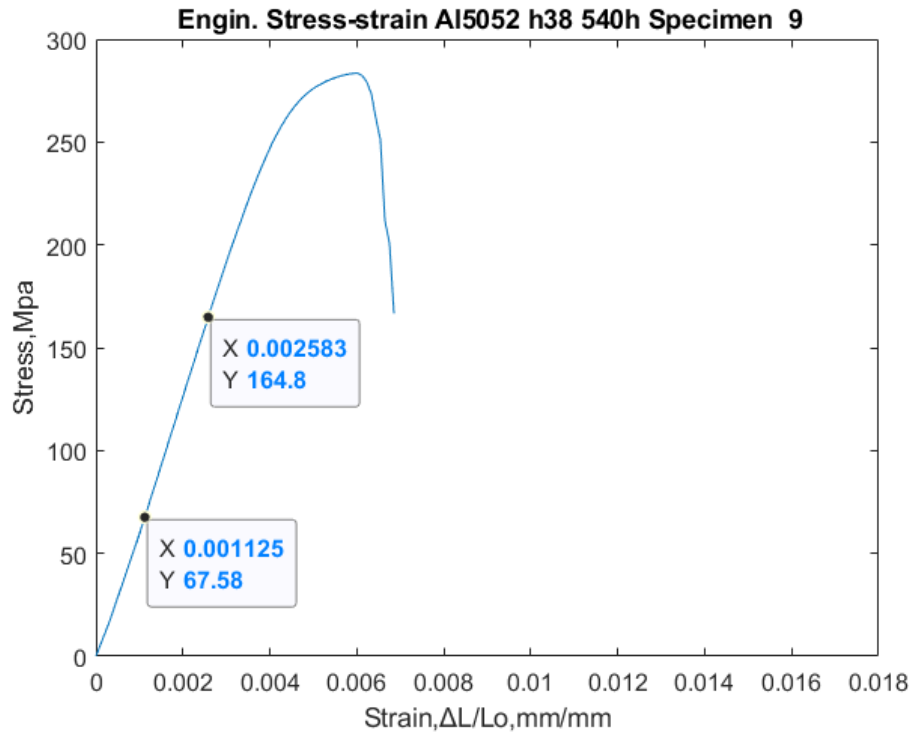
10.3. Δοκίμια που εκτέθηκαν 540 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον.



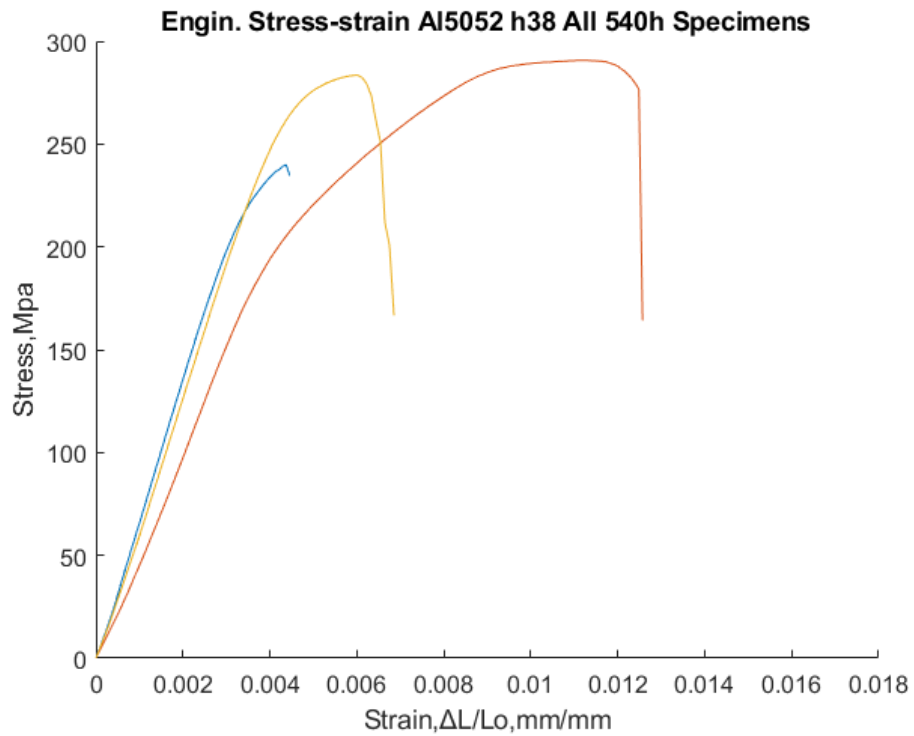
Γραφική 10.3.1. Δοκίμιο 7 με 540 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον



Γραφική 10.3.2. Δοκίμιο 8 με 540 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον



Γραφική 10.3.3. Δοκίμιο 9 με 540 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον

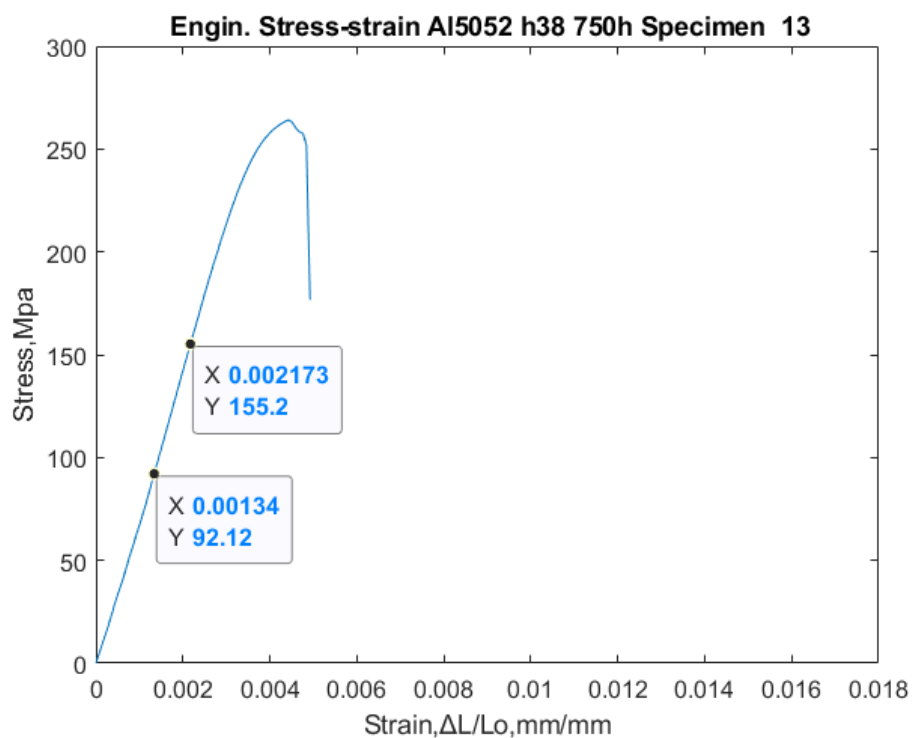


Γραφική 10.3.4. Δοκίμια με 540 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον

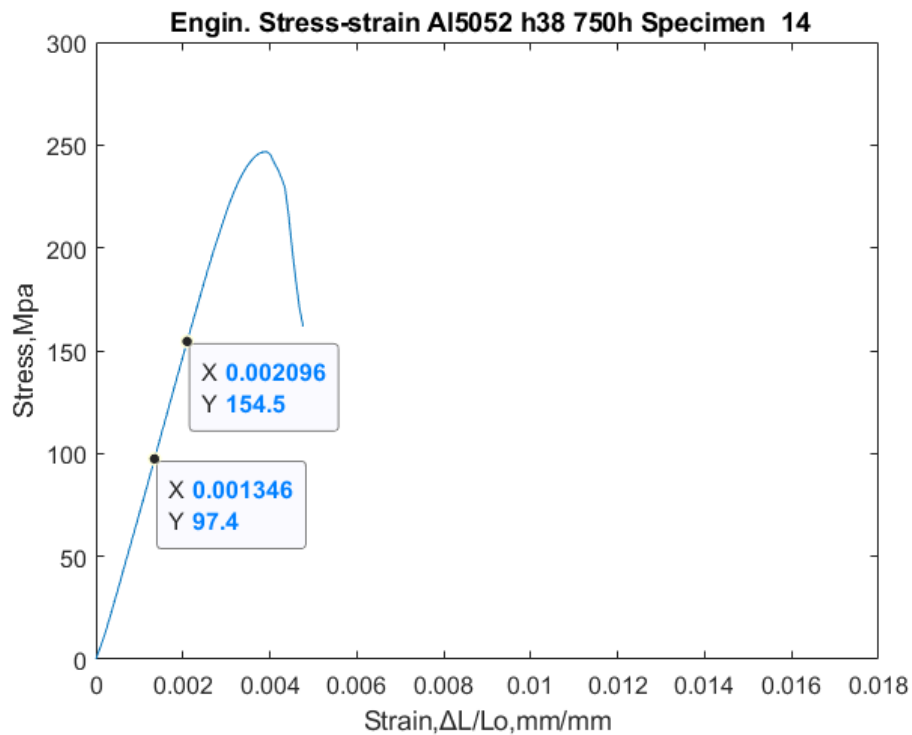
Specimen	Tensile stress at max Load (Mpa)	Μέτρο ελαστικότητας E=stress/strain (GPa)
7	239,94	69
8	290,65	54
9	283,50	67

Πίνακας 10.3.1. Μετρήσεις δοκιμών που εκτέθηκαν 540 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον

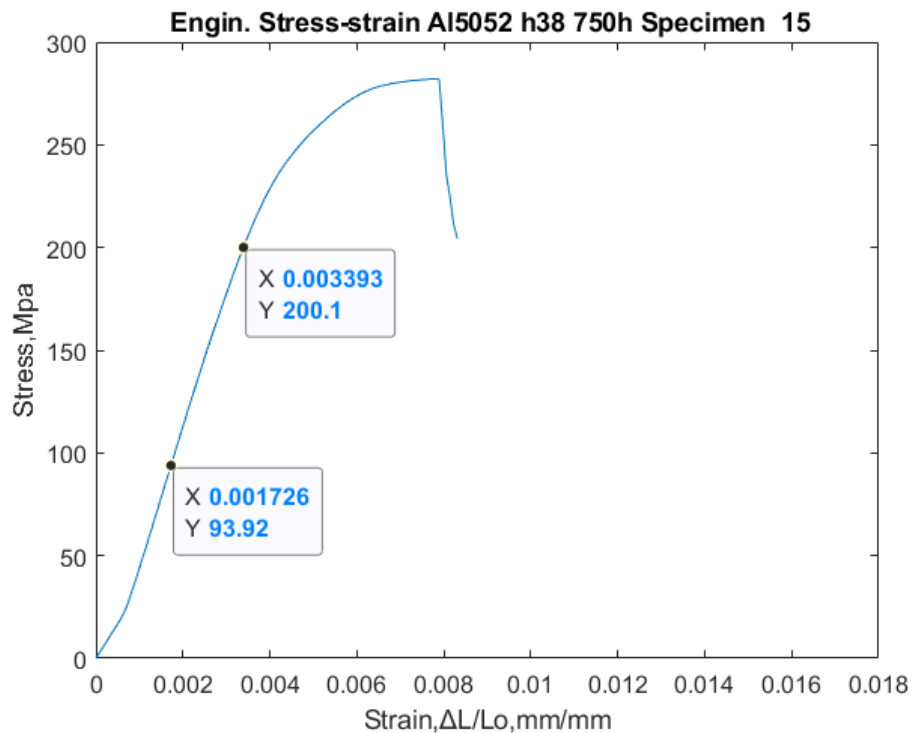
10.4. Δοκίμια που εκτέθηκαν 750 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον.



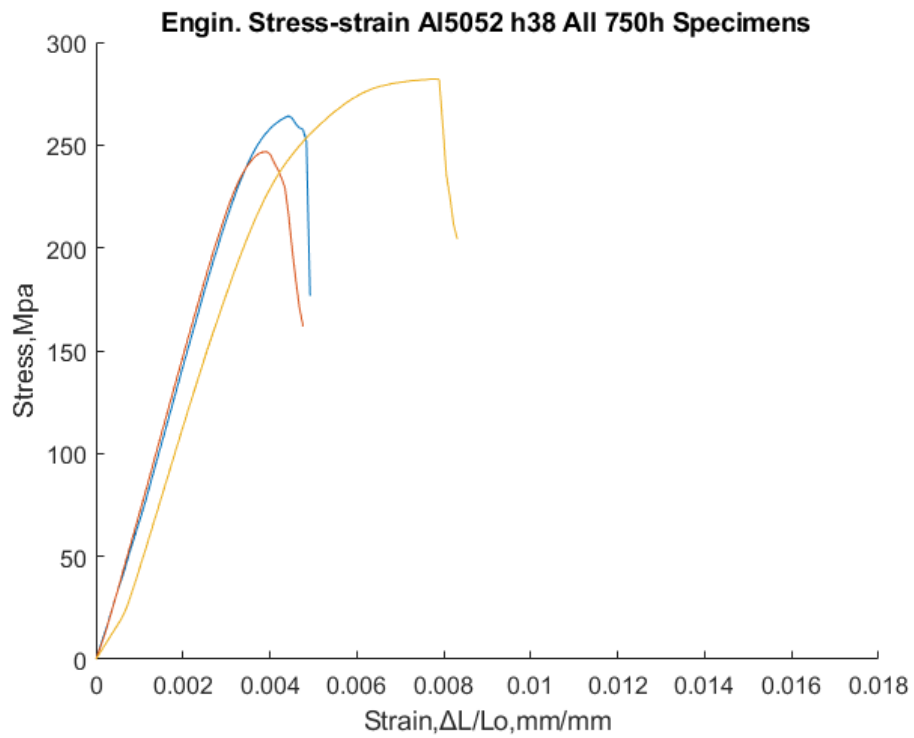
Γραφική 10.4.1. Δοκίμιο 13 με 750 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον



Γραφική 10.4.2. Δοκίμιο 14 με 750 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον



Γραφική 10.4.3. Δοκίμιο 15 με 750 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον

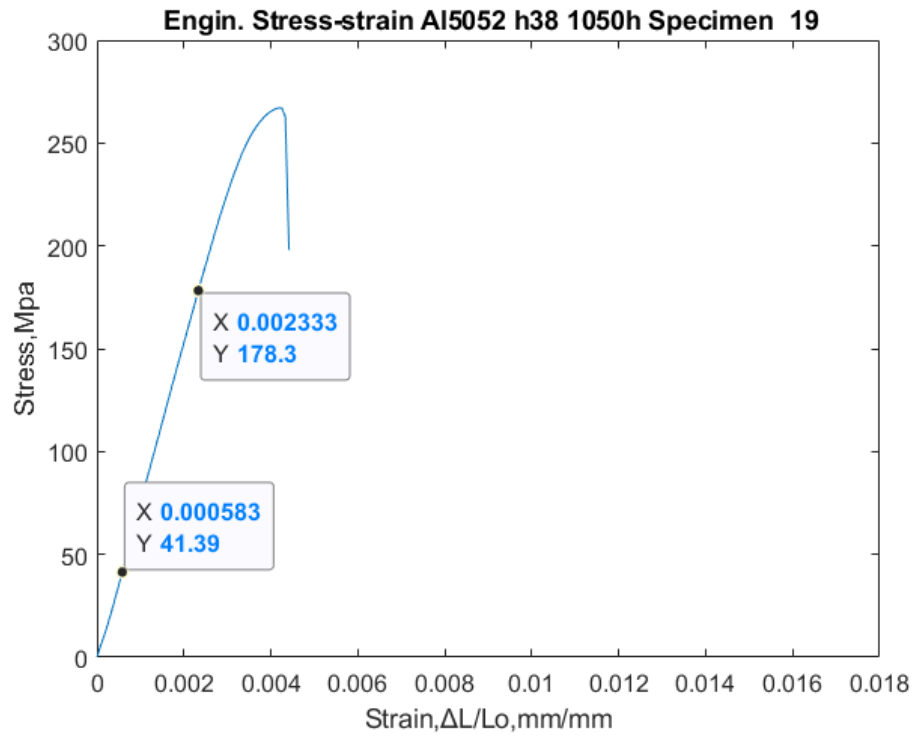


Γραφική 10.4.4. Δοκίμια με 750 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον

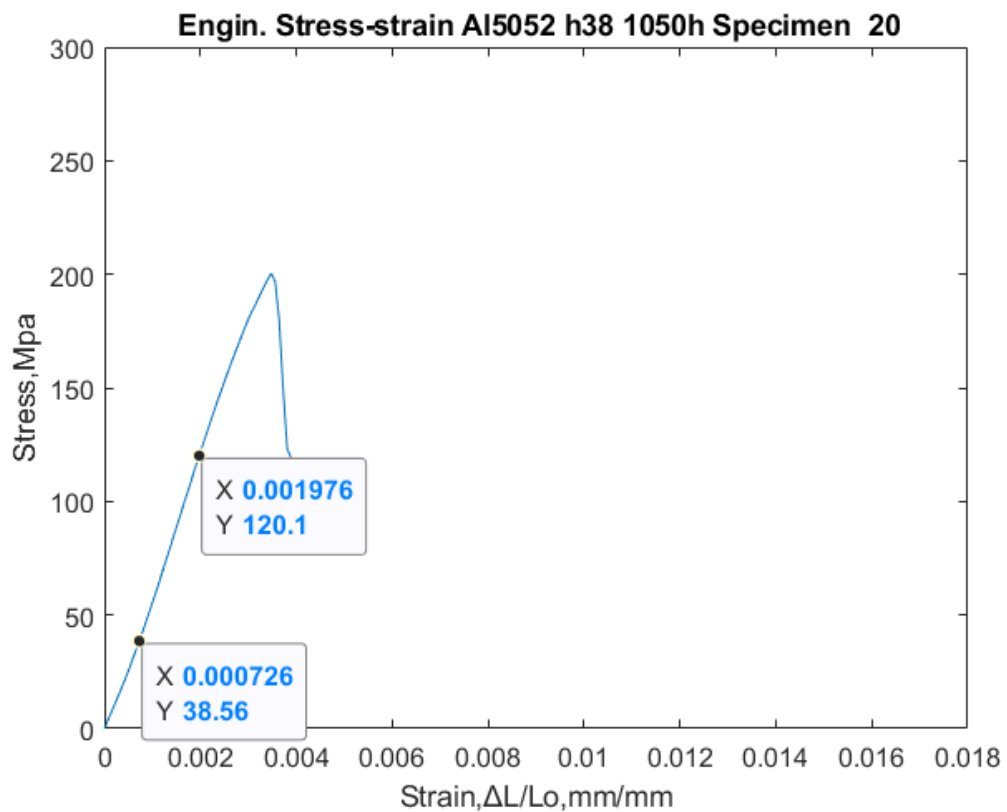
Specimen	Tensile stress at max Load (Mpa)	Μέτρο ελαστικότητας E=stress/strain (GPa)
13	264,11	75
14	246,78	76
15	282,08	69

Πίνακας 10.4.1. Μετρήσεις δοκιμίων που εκτέθηκαν 750 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον

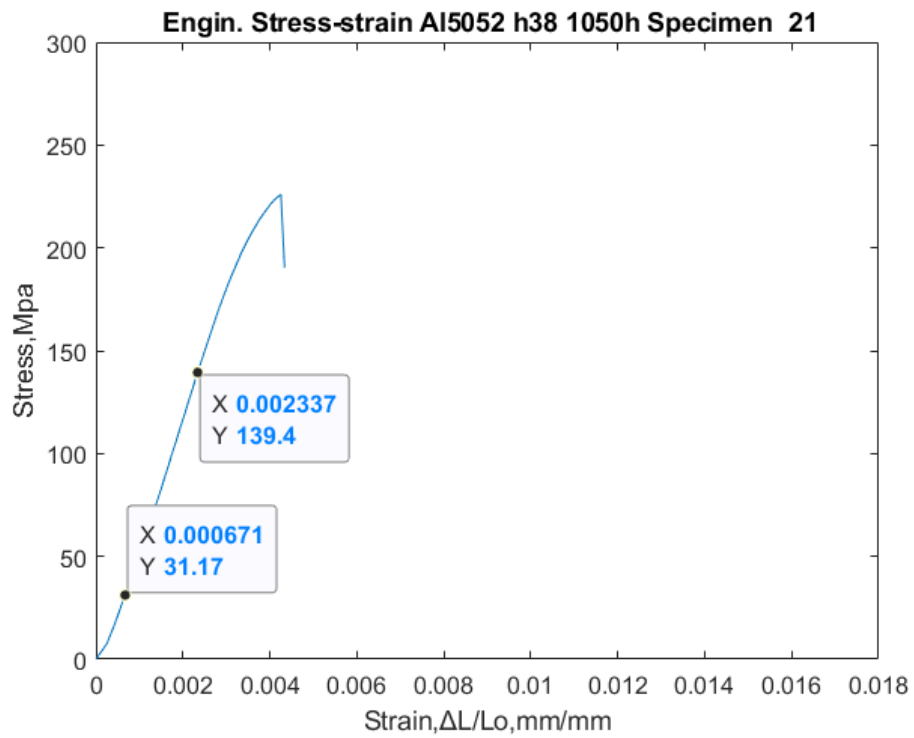
10.5. Δοκίμια που εκτέθηκαν 1050 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον.



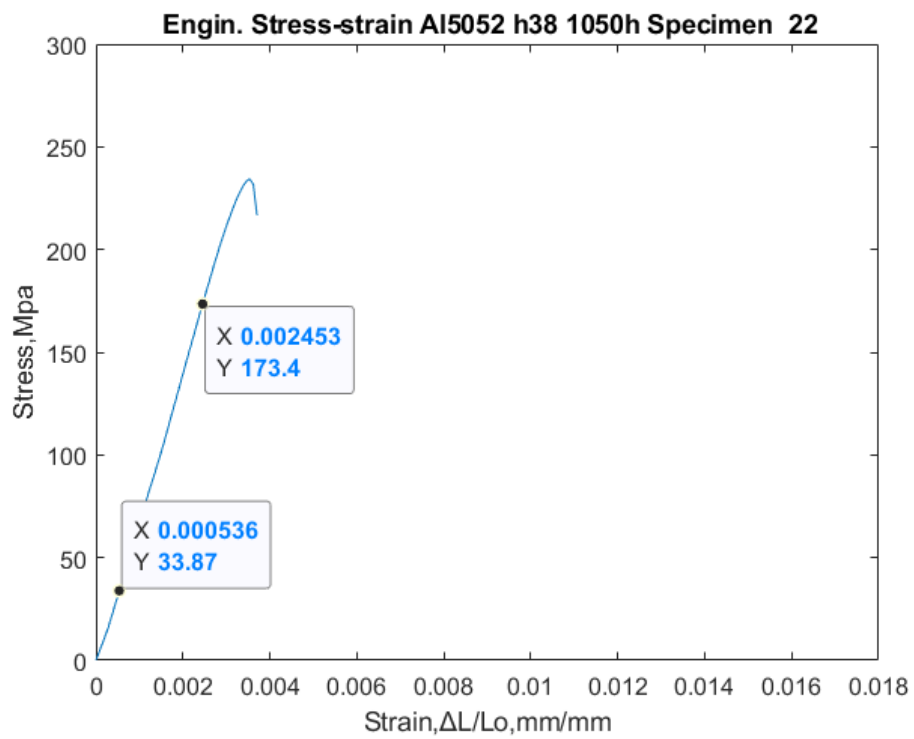
Γραφική 10.5.1. Δοκίμιο 19 με 1050 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον



Γραφική 10.5.2. Δοκίμιο 20 με 1050 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον

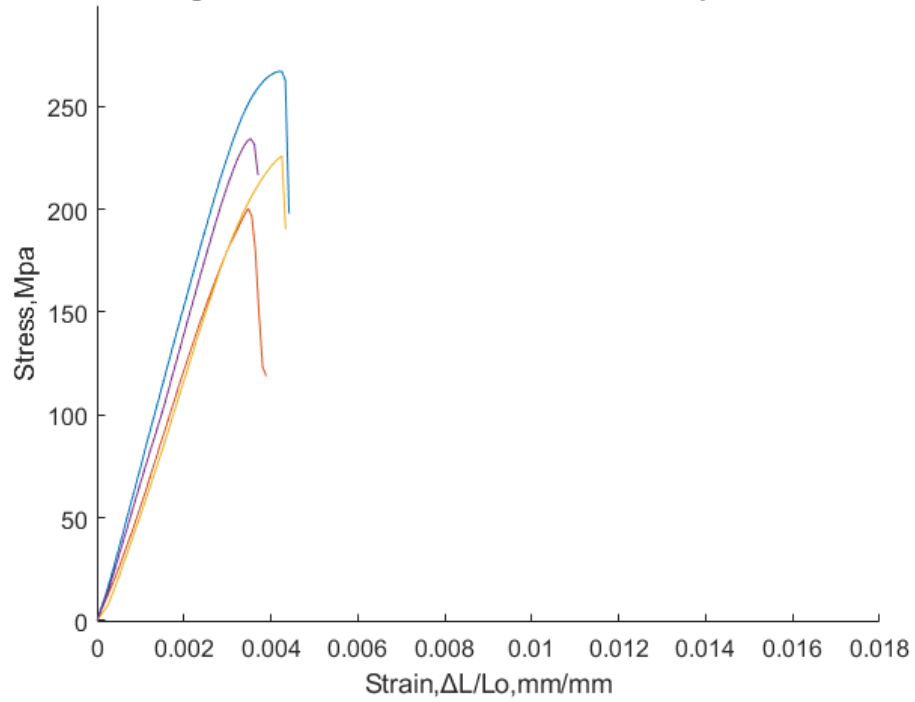


Γραφική 10.5.3. Δοκίμιο 21 με 1050 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον



Γραφική 10.5.4. Δοκίμιο 22 με 1050 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον

Engin. Stress-strain Al5052 h38 All 1050h Specimens

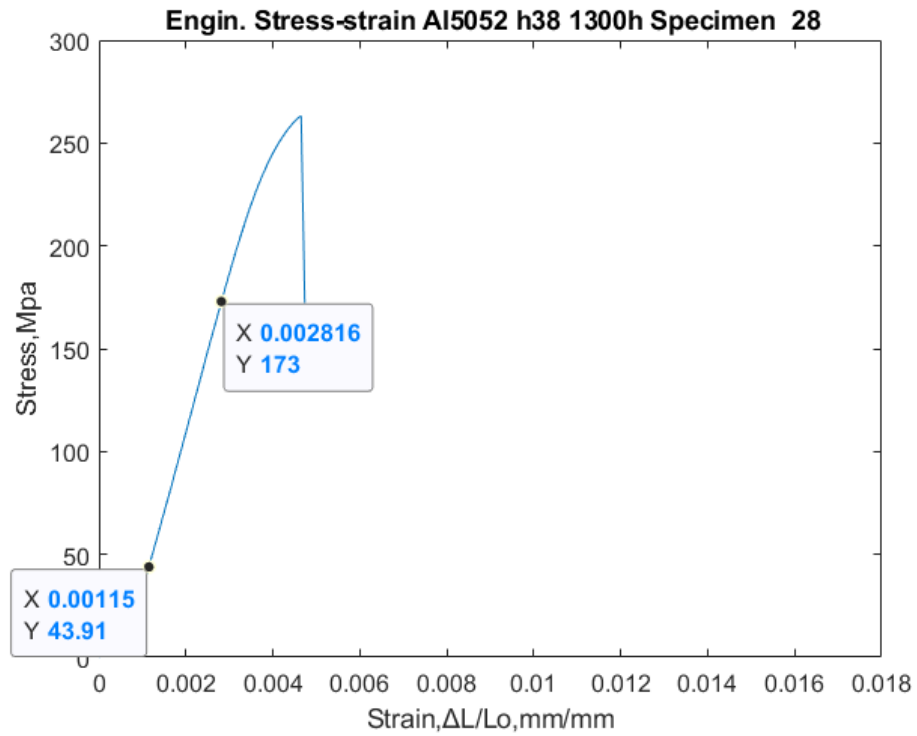


Γραφική 10.5.5. Δοκίμια με 1050 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον

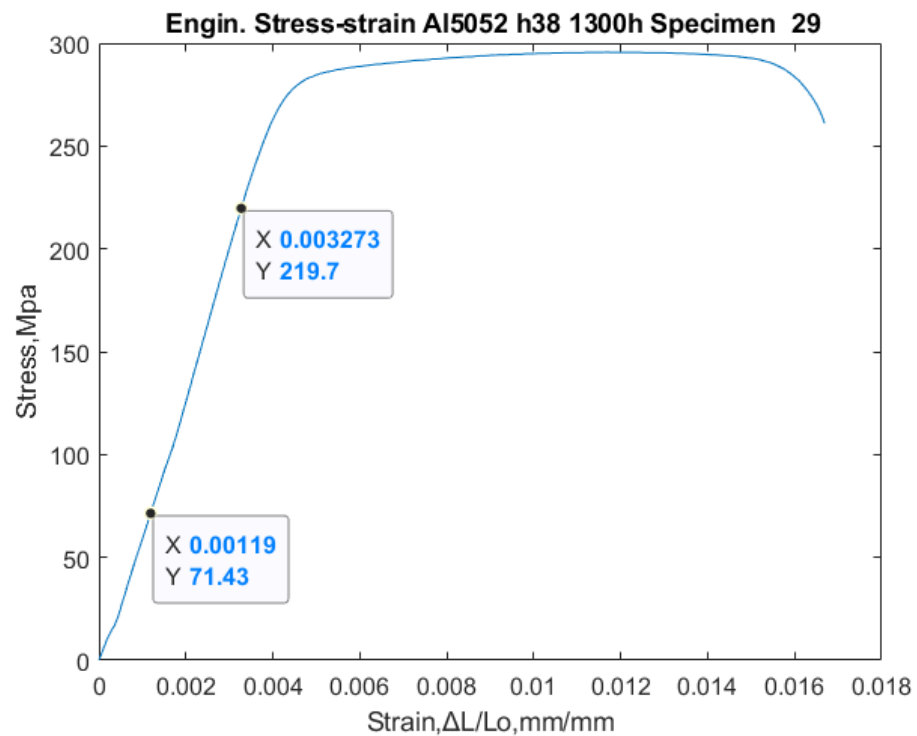
Specimen	Tensile stress at max Load (Mpa)	Μέτρο ελαστικότητας E=stress/strain (GPa)
19	267,13	78
20	200,38	65
21	226,01	65
22	234,37	73

Πίνακας 10.5.1. Μετρήσεις δοκιμίων που εκτέθηκαν 1050 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον

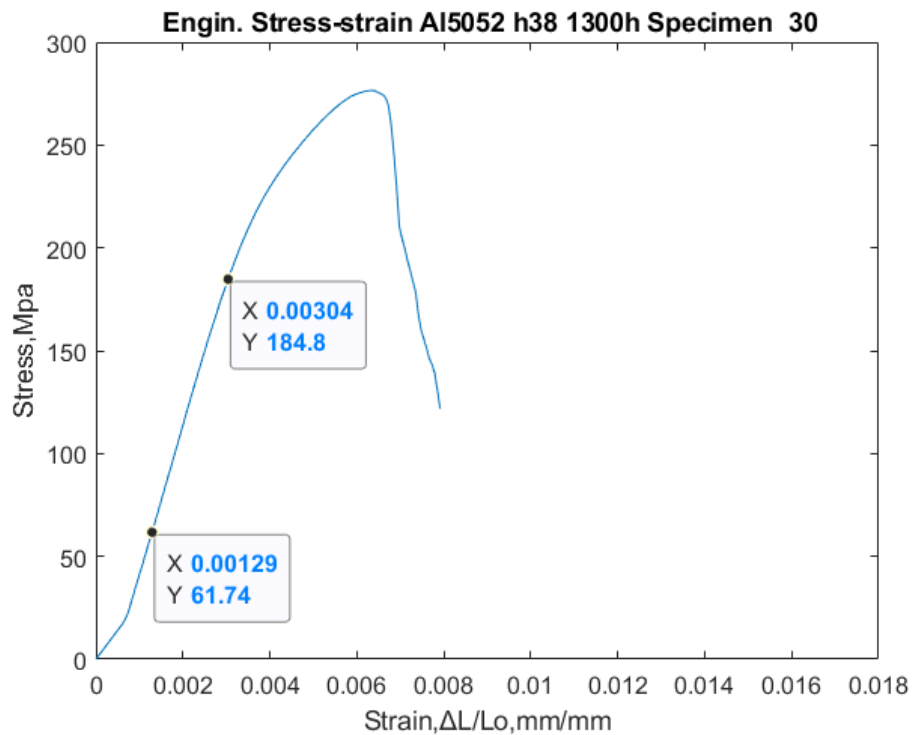
10.6. Δοκίμια που εκτέθηκαν 1300 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον.



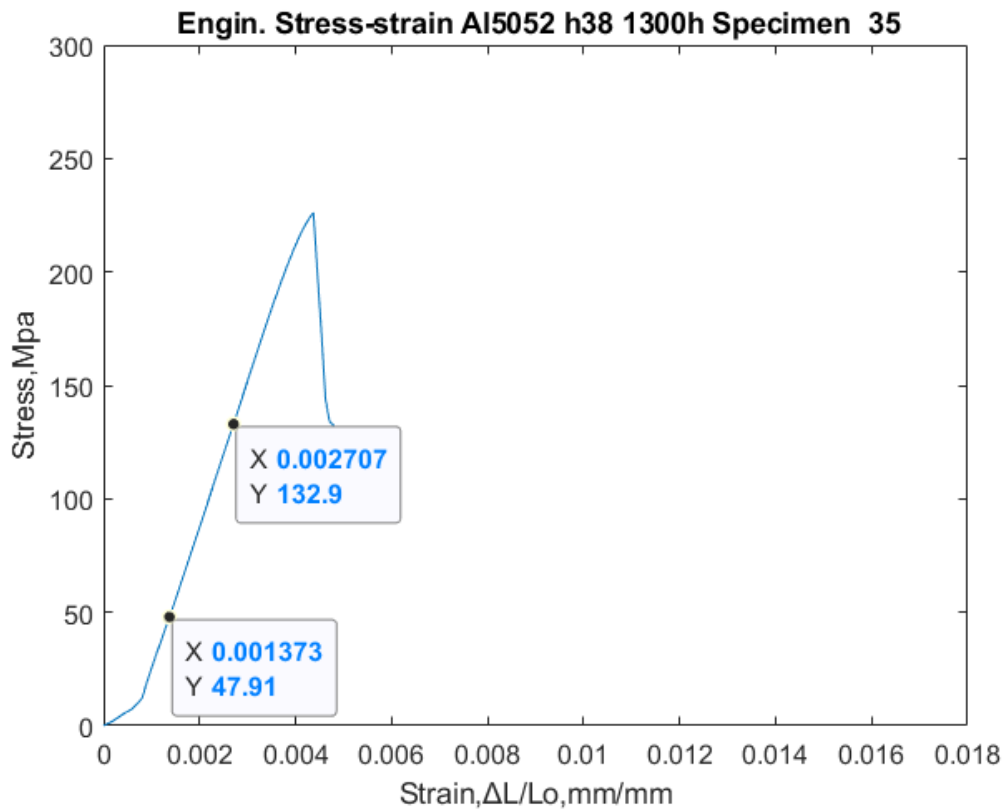
Γραφική 10.6.1. Δοκίμιο 28 με 1300 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον



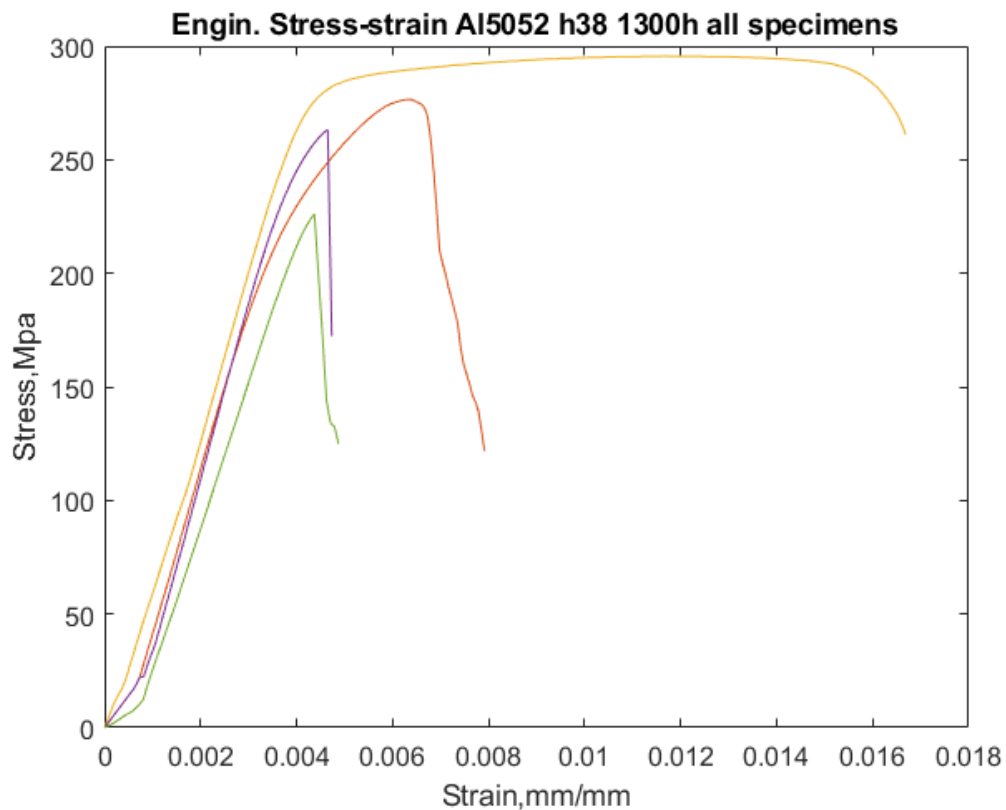
Γραφική 10.6.2. Δοκίμιο 29 με 1300 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον



Γραφική 10.6.3. Δοκίμιο 30 με 1300 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον



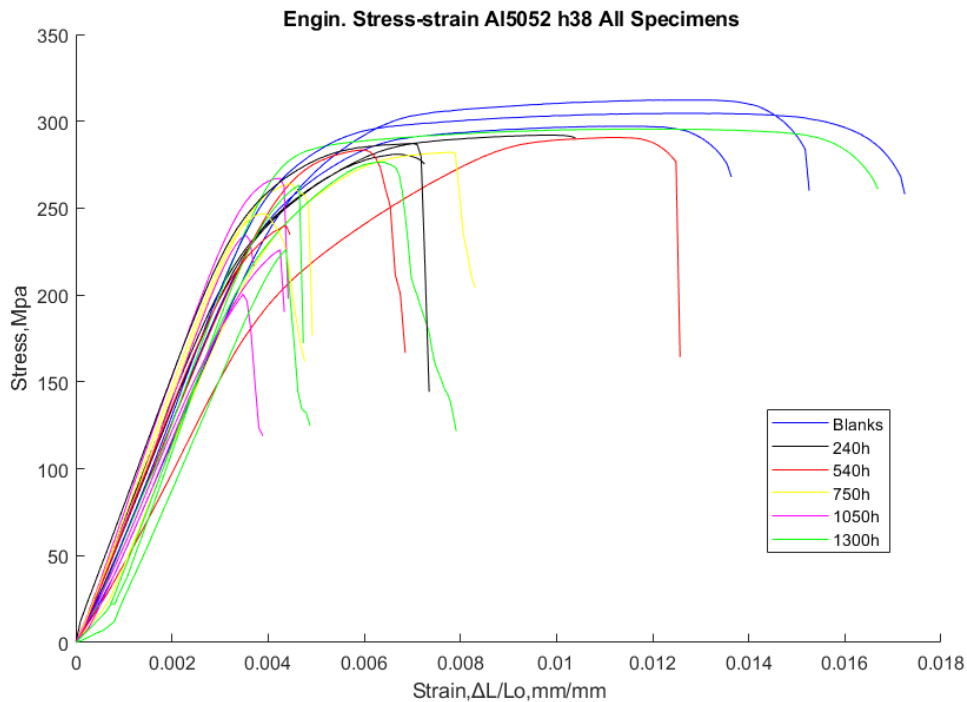
Γραφική 10.6.4. Δοκίμιο 35 με 1300 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον



Γραφική 10.6.5. Δοκίμια με 1300 ώρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον

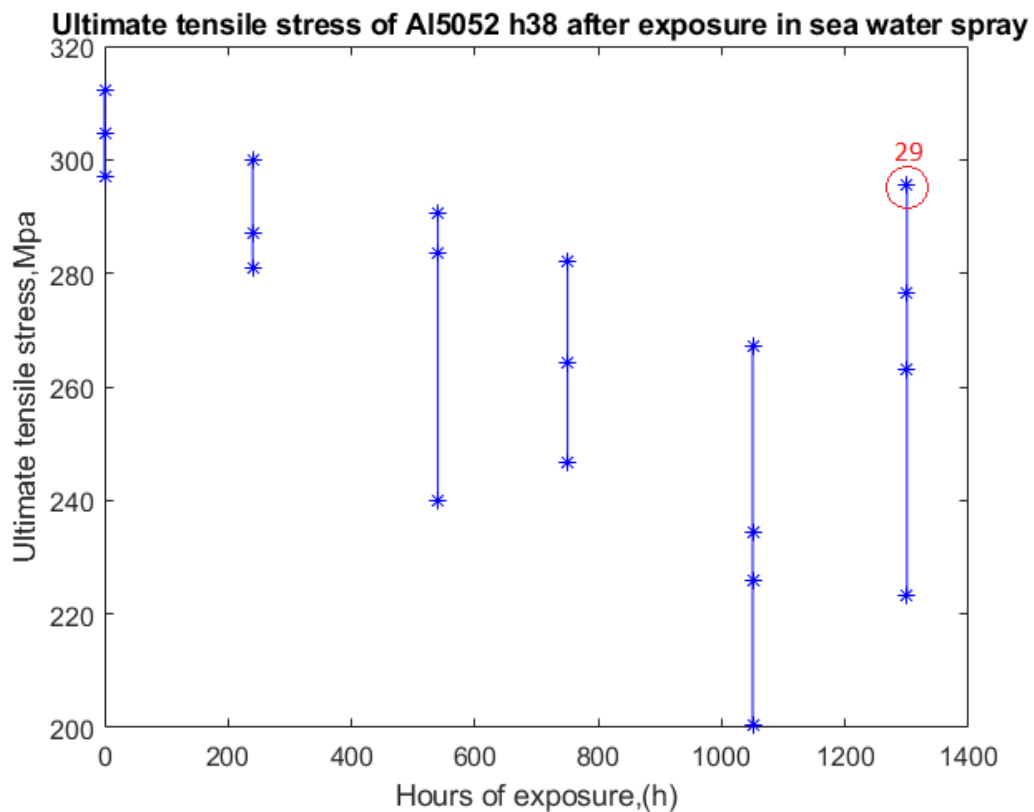
Specimen	Tensile stress at max Load (Mpa)	Μέτρο ελαστικότητας E=stress/strain (GPa)
28	263,17	77
29	295,65	72
30	276,52	70
35	223,14	63

Εντύπωση προκαλεί η Γραφική 10.6.2 στην οποία παρουσιάζεται το δοκίμιο 29. Όπως παρατηρούμε έχει παρόμοια εικόνα με ένα μη εκτεθειμένο σε διαβρωτικό περιβάλλον δοκίμιο. Στη συγκριτική Γραφική 10.6.5, που περιλαμβάνει όλα τα δοκίμια που εκτέθηκαν 1300 ώρες σε διαβρωτικό περιβάλλον, αυτή η διαφορά φαίνεται ακόμα πιο έντονα. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους. Η πιο απλή εξήγηση είναι η ύπαρξη λάθους κατά την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας. Παραδείγματος χάριν, η καταχώρηση λανθασμένου ονόματος δοκιμίου κατά την εισαγωγή των δεδομένων στον υπολογιστή που κάνει τις καταγραφές. Μία άλλη πιθανότητα είναι το συγκεκριμένο δοκίμιο να μην εκτέθηκε τόσο πολύ στο διαβρωτικό περιβάλλον, λόγω της θέσης του στον θάλαμο ή στην περίπτωση που εκτέθηκε, να είχε προστασία στην έκθεση αυτή, λόγω της ύπαρξης σημαντικού πάχους οξειδίου του αλουμινίου πριν τοποθετηθεί στο θάλαμο.



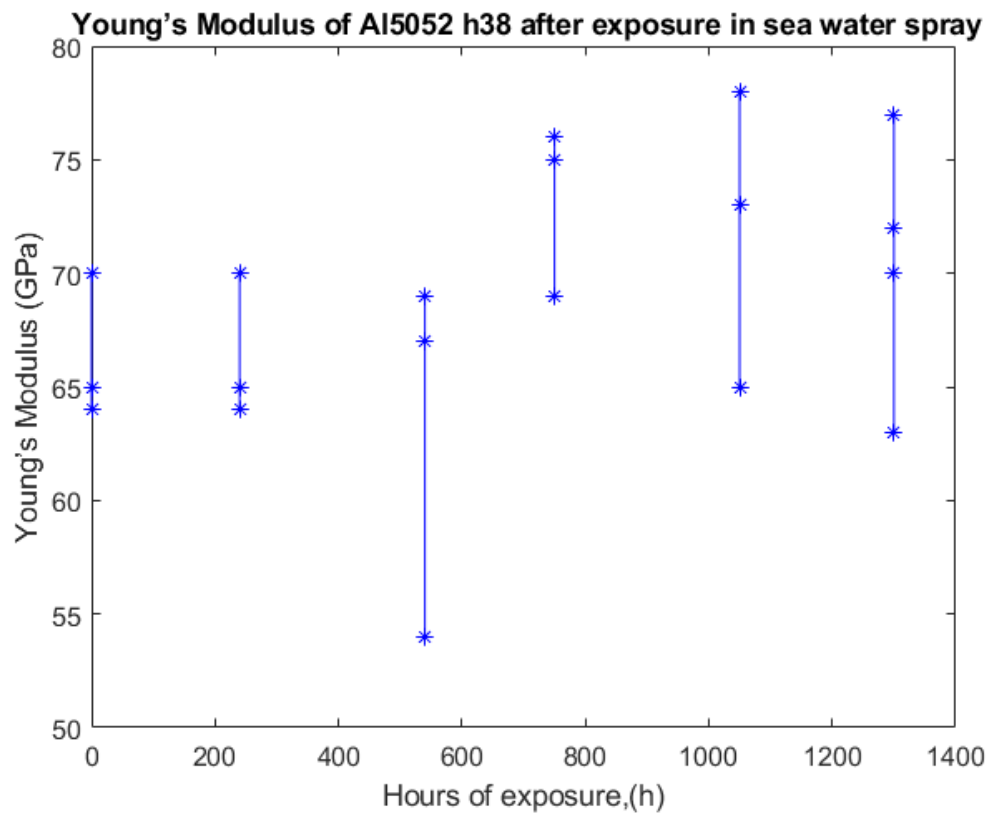
Γραφική 10.6.6. Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων όλων των Δοκιμίων που μελετήθηκαν .

Με βάση την πιο πάνω Γραφική 10.6.6 παρατηρείται ότι τα μη εκτεθειμένα δοκίμια έχουν μεγαλύτερη περιοχή, στην οποία το υλικό συνεχίζει να σκληραίνει (παραμορφωσιακή κράτυνση, δηλαδή ενδοτράχυνση) στην περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης πριν φτάσει στο όριο μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό-όριο θραύσης του υλικού. Αντίθετα, τα δοκίμια που εκτέθηκαν σε διαβρωτικό περιβάλλον έχουν όριο θραύσης σε πιο χαμηλές τάσεις, λόγω ύπαρξης μικρορωγμών και γι' αυτό δεν προλαβαίνουν να περάσουν από το στάδιο της πλαστικής παραμόρφωσης. Όπως παρατηρείται και στην πιο κάτω Γραφική 10.6.7, στην οποία παρουσιάζονται οι μέγιστες επιβαλλόμενες τάσεις πριν την θραύση, υπάρχει μείωση του ορίου μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό, με εξαίρεση το δοκίμιο 29, για το οποίο αναφερθήκαμε στην προηγούμενη παράγραφο.



Γραφική 10.6.7. Όριο μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό (Ultimate tensile strength)

Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας, η μεταβολή δεν είναι τέτοια που να μπορεί να γίνει αξιόλογη ανάλυση των αποτελεσμάτων. Ίσως αυτό να είναι πιο εφικτό με ανάλυση περισσότερων δοκιμών ανά κατηγορία έκθεσης και με χρήση πιο ακριβούς εξετασιόμετρου κατά την πειραματική διαδικασία. Το μέτρο ελαστικότητας κάθε υλικού παραμένει το ίδιο για δεδομένη χημική σύσταση και δεν επηρεάζεται από την γεωμετρία του δοκιμίου, επηρεάζεται ωστόσο από την θερμοκρασία. Έτσι, αν δεν έχουμε αλλαγή στη χημική σύσταση, οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας πρέπει να παραμένουν ίδιες. Η γενική εικόνα όμως της πιο κάτω Γραφικής 10.6.8, συμβαδίζει με τη θεωρία για σταθερό μέτρο ελαστικότητας με εξαίρεση την τιμή του δοκιμίου 8 με τιμή 54 GPa.



Γραφική 10.6.8. Μέτρο ελαστικότητας των δοκιμών μας σε σχέση με το χρόνο έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον.

Συμπεράσματα.

Σκοπός της εργασίας ήταν η διερεύνηση της μεταβολής της αντοχής του αλουμινίου 5052 H38 μετά από την έκθεση του σε ένα ισχυρό διαβρωτικό περιβάλλον, όπως είναι το θαλάσσιο περιβάλλον. Από την όλη πειραματική διαδικασία προκύπτουν τα ακόλουθα.

- Το πάχος του οξειδίου του αλουμινίου, όταν εκτεθεί το δοκίμιο σε διαβρωτικό περιβάλλον, αυξάνεται ως ένα σημείο και μετά σταθεροποιείται παραμένοντας στο ίδιο επίπεδο.
- Η αντοχή του αλουμινίου 5052 H38 στη διάβρωση είναι αρκετά υψηλή μετά από 1300 έκθεσης στο θάλαμο αλατονέφωσης.
- Όσον αφορά το όριο μέγιστης αντοχής, παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής του και αυτό οφείλεται στην αλλοίωση της επιφάνειας του δοκιμίου. Καλή και αντικειμενικότερη σύγκριση θα μπορούσε να γίνει, αν κάτω από τις ίδιες συνθήκες δοκιμάζονταν δοκίμια μεγαλύτερου πάχους, καθώς τα χρησιμοποιηθέντα ήταν τόσο λεπτά, που οι επιφανειακές μεταβολές τα επηρέασαν αρκετά.
- Το οξείδιο του αλουμινίου που δημιουργήθηκε στην επιφάνεια ως προϊόν διάβρωσης, από τη μία προστατεύει το υλικό για περαιτέρω διάβρωση, από την άλλη όμως, σε τέτοια λεπτά δοκίμια επηρεάζει τη μέγιστη αντοχή λόγω ύπαρξης μικρορωγμών, με αποτέλεσμα να αρχίσει το υλικό να συμπεριφέρεται ως πιο ψαθυρό.
- Το όριο διαρροής του δεν είναι είναι ευδιάκριτο.
- Όπως φάνηκε στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, σε διάφορες περιοχές του υλικού υπήρχαν μικτά δείγματα ολκισμού και ψαθυρού υλικού. Οι δοκιμές εφελκυσμού όμως, ήταν καθοριστικές για την κατηγοριοποίηση του ως ψαθυρό(όλκιμο προς ψαθυρό), καθώς στα μη εκτεθειμένα στο διαβρωτικό υλικό δοκίμια παρατηρήθηκε μικρή πλαστική παραμόρφωση πριν την θραύση τους. Η ολκιμότητα αυτή όμως, δεν ξεπέρασε ποτέ το 1% σε παραμόρφωση πριν την θραύση, στα δε πιο εκτεθειμένα ήταν σχεδόν μηδενική. Ως εκ τούτου, συμπεραίνεται ότι, τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν βρίσκονταν στο όριο της πλήρους ενδοτράχυνσης τους και σε συνδυασμό με την επιφανειακή διάβρωση τους, ως τελικό αποτέλεσμα υπήρξε η μείωση της μέγιστης αντοχής τους.

Βιβλιογραφία.

- [1] Διάβρωση και Προστασία Υλικών, Θ. Σκουλικίδης, Π. Βασιλείου, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2007
- [2] Διάβρωση και Προστασία Ναυπηγικών και Μηχανολογικών κατασκευών, Δ. Παντελής, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2006
- [3] <http://impact.nace.org/economic-impact.aspx>
- [4] <https://www.corrosion-doctors.org/Forms-pitting/sewer.htm>
- [5] <https://www.corrosion-doctors.org/Aircraft/Examples.htm#Electrical>
- [6] Προστασία κραμάτων αλουμινίου-μαγνησίου από τη διάβρωση με μηχανική καταπόνηση με προσανατολισμένο ηλεκτρολυτικό ,Μηνά Ν. Νερσισιγιάν, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 1984
- [7] <https://www.vicprop.com/blog/cavitation-erosion>
- [8] Wen-Ta Tsai, Chien-Liang Lin, Szu-Jung Pan, Susceptibility of Ti-6Al-4V alloy to stress corrosion cracking in a Lewis-neutral aluminium chloride-1-ethyl-3-methylimidazolium chloride ionic liquid, Corrosion Science, Volume 76,2013
- [9] Corrosion and Protection, E. Bardal, Springer, 2003
- [10] Corrosion Engineering, Volkan Cicek
- [11] Global Aluminium Recycling: A Cornerstone of Sustainable Development
https://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/01/15/fl0000181.pdf
- [12] Corrosion of aluminium, Christian Vargel, Elsevier 2004
- [13] <https://www.corrosion-doctors.org/ProcessIndustry/Bogalusa-explosion.htm>
- [14] <https://www.corrosion-doctors.org/Pollution/bhopal.htm>
- [15] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-most-common-corrosion-mechanism-6_fig5_322627227
- [16] <https://www.hkdivedi.com/2015/11/different-forms-of-corrosion.html>
- [17] <http://brojowesi-chemicalengineering.blogspot.com/2007/08/pitting-corrosion-mechanism-prevention.html>
- [18] Effect of annealing on microstructure and properties of Er modified 5052 alloy Wang Jinliana, Xu Junb, Pan Feng, Results in Physics Volume 10, September 2018, Pages 476-480
- [19] <https://www.hkdivedi.com/2015/11/different-forms-of-corrosion.html>
- [20] <https://www.australwright.com.au/technical-data/advice/aluminium/aluminium-alloy-5052/>
- [21] https://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas_Aluminium_datasheet_5052_rev_Oct_2013.pdf
- [22] Intermetallic Matrix Composites, Properties and Applications, 2017 Woodhead

Publishing

- [23] http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/7_stoixeia%20antoxhs%20diavrosh%20anodiosi.pdf
- [24] <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> Δρ. Κωνσταντίνος Ι.Γιαννακόπουλος, Σημειώσεις Πειραματικής Αντοχής Υλικών
- [25] <https://mstudent.com/stress-strain-and-the-stress-strain-curve/>
- [26] Αντοχή υλικών , Νικόλαου Δ.Γαλιατσάτου, Γεράσιμου Σ Λιναρδάτου, Διονύσιου Σ Λιναρδάτου ,Εκπαιδευτικό Κείμενο Ακαδημιών Εμπορικού Ναυτικού
- [27] https://en.wikipedia.org/wiki/Stress%E2%80%93strain_curve
- [28] [https://en.wikipedia.org/wiki/Yield_\(engineering\)#/media/File:Metal_yield.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Yield_(engineering)#/media/File:Metal_yield.svg)
- [29] ISO 6892-1:2019 Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature
- [30] ASM International , Tensile Testing , Second Edition 2004
- [31] ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ ΜΕ ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΑΚΤΙΝΩΝ-Χ SCANNING ELECTRON MICROSCOPE WITH ENERGY DISPERSIVE X-RAY SPECTROMETER (SEM-EDAX) Κουή Αναπλ.Καθ. Ε.Μ.Π Θ. Λυμπεροπούλου Δρ. Χημικός – Ε.Ε.ΔΙ.Π
- [32] Μικροσκόπιο Σάρωσης Ηλεκτρονίων, Δημήτρης Κουζούδης, Πανεπιστήμιο Πατρών.