

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΘΕΜΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΕΡΓΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΕ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟ
ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024

Υπεύθυνος φοιτητής: AL SHARIF IMAD

Υπεύθυνος καθηγητής: ΓΡΗΓΟΡΗΣ ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ

ΒΟΛΟΣ, 1996

αρ. ειλ. 34/0Α



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000055865

Αφιερώνω την εργασία αυτή στους γονείς μου, στους οποίους οφείλω τα όσα έχω κάνει μέχρι τώρα, καθώς και σε έναν μεγάλο άνθρωπο και ηγέτη που με ενέπνευσε με τις ιδέες και τους αγώνες του, και υποστήριξε πάντα τον αγώνα μας, τον Ανδρέα Γ. Παπανδρέου.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 1518/1

Ημερ. Εισ.: 12-09-1997

Δωρεά: _____

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ

1996

ΙΜΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα

Πρόλογος	
Εισαγωγή	
Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	1
Το πείραμα πού θα εκτελεστεί	2
1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	
1.1 Εισαγωγή στην ρηγμάτωση λόγω εργοδιάβρωσης	4
1.2 Μηχανισμός της ρηγμάτωσης λόγω εργοδιάβρωσης	8
1.3. Η εργοδιάβρωση σε κράματα αλουμινίου	15
1.4. Τρηματική διάβρωση(Pitting).	28
1.5. Σκλήρυνση με καθίζηση σε κράματα αλουμινίου	31
1.6. Περικρυσταλλική διάβρωση(Intergranuallar corrosion)	35
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	
2.1. Γενικά για τις μεθόδους δοκιμής και ερμηνεία των αποτελεσμάτων	36
2.2. Γενικά για το κράμα 2024-T3	47
2.3. Η εκτέλεση του πειράματος	50
2.4. Αξιολόγηση των διαφόρων τεστ εργοδιάβρωσης	55
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	67
4. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	86
5. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	
Παράρτημα I	88
Παράρτημα II	91
Παράρτημα III	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

	<u>Σελίδα</u>		<u>Σελίδα</u>
<u>Σχήμα 1.1</u>	8		
<u>Σχήμα 1.2</u>	9	<u>Σχήμα 3.3</u>	71
<u>Σχήμα 1.3</u>	16	<u>Σχήμα 3.4</u>	71
<u>Σχήμα 1.4</u>	17	<u>Σχήμα 3.5</u>	72
<u>Σχήμα 1.5</u>	18	<u>Σχήμα 3.6</u>	72
<u>Σχήμα 1.6</u>	19	<u>Σχήμα 3.7</u>	73
<u>Σχήμα 1.7</u>	23	<u>Σχήμα 3.8</u>	73
<u>Σχήμα 1.8</u>	26	<u>Σχήμα 3.9</u>	75
<u>Σχήμα 1.9</u>	29	<u>Σχήμα 3.10</u>	77
<u>Σχήμα 1.10</u>	31	<u>Σχήμα 3.11</u>	79
<u>Σχήμα 1.11</u>	33	<u>Σχήμα 3.12</u>	80
<u>Σχήμα 1.12</u>	34	<u>Σχήμα 3.13</u>	80
<u>Σχήμα 2.1</u>	37	<u>Σχήμα 3.14</u>	81
<u>Σχήμα 2.2</u>	39	<u>Σχήμα 3.15</u>	81
<u>Σχήμα 2.3</u>	41	<u>Σχήμα 3.16</u>	82
<u>Σχήμα 2.4</u>	43	<u>Σχήμα 3.17</u>	82
<u>Σχήμα 2.5</u>	45	<u>Σχήμα 3.18</u>	83
<u>Σχήμα 2.6</u>	46	<u>Σχήμα 3.19</u>	83
<u>Εικόνα 1</u>	56	<u>Σχήμα 3.20</u>	84
<u>Σχήμα 3.1</u>	68	<u>Σχήμα 3.21</u>	84
<u>Σχήμα 3.2</u>	70		

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

	<u>Σελίδα</u>
<u>Πίνακας 1.1</u>	<u>6</u>
<u>Πίνακας 1.2</u>	<u>20</u>
<u>Πίνακας 1.3</u>	<u>21</u>
<u>Πίνακας 1.4</u>	<u>22</u>
<u>Πίνακας 1.5</u>	<u>24</u>
<u>Πίνακας 1.6</u>	<u>25</u>
<u>Πίνακας 2.1</u>	<u>43</u>
<u>Πίνακας 2.2</u>	<u>47</u>
<u>Πίνακας 2.3</u>	<u>57</u>
<u>Πίνακας 2.4</u>	<u>58</u>
<u>Πίνακας 2.5</u>	<u>59</u>
<u>Πίνακας 2.6</u>	<u>62</u>
<u>Πίνακας 2.7</u>	<u>64</u>
<u>Πίνακας 3.1</u>	<u>67</u>
<u>Πίνακας 3.2</u>	<u>69</u>
<u>Πίνακας 3.3</u>	<u>76</u>

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργοδιάβρωση είναι ένα είδος διάβρωσης που υφίστανται πολλά υλικά κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος και φόρτισης και προκαλεί ρήγματα στο υλικό. Η προϋπόθεση για να συμβεί είναι να υφίσταται το υλικό εφελκυστικές τάσεις και να βρίσκεται σε διαβρωτικό περιβάλλον. Για κάθε κράμα αντιστοιχεί κάποιο συγκεκριμένο περιβάλλον που θα αρχίσει η ρηγμάτωση λόγω εργοδιάβρωσης (βλέπε πίνακα 1.1).

Το αεροπορικό κράμα αλουμινίου 2024 είναι από τα κράματα αλουμινίου υψηλής αντοχής λόγω ύπαρξης του χαλκού σαν κύριο κραματικό στοιχείο με ποσοστό περίπου 4% κ.β. και χρησιμοποιείται σε πολύ μεγάλο ποσοστό στην κατασκευή του σκελετού του αεροπλάνου λόγω του συνδυασμού της μικρής πυκνότητας που έχει - όπως και τα άλλα κράματα αλουμινίου- (2.78 gr/cm^3), και της μεγάλης αντοχής του (το όριο ροής του είναι περίπου 300 Mpa).

Τα κράματα αλουμινίου είναι ευαίσθητα στην ρηγμάτωση λόγω εργοδιάβρωσης όταν βρίσκονται σε θαλάσσιο περιβάλλον, ένα περιβάλλον που χαρακτηρίζει τον Ελλαδικό χώρο, και το αεροπλάνο υφίσταται σημαντικές καταπονήσεις, συνεπώς εκπληρούνται οι προϋποθέσεις για να υπάρξει το πρόβλημα της ρηγμάτωσης λόγω εργοδιάβρωσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι μια εισαγωγή σ' αυτό το είδος της διάβρωσης, κάνοντας μια προσπάθεια της μελέτης της θεωρίας της ρηγμάτωσης λόγω εργοδιάβρωσης και των παραμέτρων που εισέρχονται σ' αυτό το πρόβλημα, και πραγματοποιώντας ένα πείραμα επιταχυνόμενης διάβρωσης με διαδοχικές εμβαπτίσεις σε τυποποιημένο διάλυμα της ASTM (American Society for Testing of Materials) και με συγκεκριμένες προδιαγραφές χωρίς να υποστούν τα δοκίμια καμία φόρτιση

Έτσι εξετάστηκαν συνολικά 6 δοκίμια πού παρέμεναν 10 λεπτά εμβαπτισμένα μέσα στο διάλυμα και ακολούθησαν 50 λεπτά έξω από το

διάλυμα , από τα 6 δοκίμια εκτέθηκε το πρώτο δοκίμιο για 15 μέρες , το δεύτερο για 30 μέρες , το τρίτο για 45 μέρες , το τέταρτο για 60 μέρες , το πέμπτο για 75 μέρες , το έκτο για 90 μέρες.

Το πείραμα δηλαδή διάρκεισε συνολικά τρεις μήνες, και είχε ως στόχο να μάθουμε ποια είναι η συμπεριφορά των δοκιμίων αυτών στο διάλυμα του 3.5% χλωριούχου νατρίου που υποτίθεται ότι προσομοιάζει το πραγματικό περιβάλλον του προβλήματος, και να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα γύρω από το είδος της διάβρωσης και πως εξελίσσεται σαν συνάρτηση με το χρόνο παραμονής μέσα στο διάλυμα.

Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν σοβαρή τρηματική διάβρωση, όπου αυξανόταν ο αριθμός των λάκκων διάβρωσης (corrosion pits) σε συνάρτηση με τον χρόνο παραμονής των δοκιμίων στο διάλυμα, και αυτοί οι λάκκοι διάβρωσης ήταν σε μεγάλο ποσοστό θέσεις εκκίνησης της περικρυσταλλικής διάβρωσης η οποία επίσης είχε έντονη ύπαρξη στα διαβρωμένα δοκίμια ειδικά στο δοκίμιο των 30 μερών και μετά, επίσης παρατηρήθηκε μια συνεχή μείωση του βάρους των δοκιμίων με την πάροδο του χρόνου έκθεσης.

Με τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος συν τα αποτελέσματα των άλλων πειραμάτων¹ -της έρευνας που έχει αναθέσει η Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία (ΕΑΒ) στους φορείς του προγράμματος- θα μπορεί πιθανόν να εκτιμηθεί η φθορά των αεροπλάνων σε συνάρτηση με τις συνολικές ώρες πτήσης, και να κατασκευαστεί κάποια συσκευή που να ανιχνεύσει κάποιο κρίσιμο μήκος ρήγματος ώστε να γίνει σωστός έλεγχος την κατάλληλη στιγμή.

¹ Μερικά από αυτά τα πειράματα ολοκληρώθηκαν, και τα άλλα είναι σε εξέλιξη ή θα γίνουν στο άμεσο μέλλον.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το πρόβλημα ξεκινάει από την ανάγκη της Ε.Α.Β (Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία) να μελετήσει την συμπεριφορά των κραμάτων αλουμινίου - από τα οποία είναι κατασκευασμένος ο σκελετός των αεροπλάνων - σε διάβρωση.

Για το σκοπό αυτό έχει αναθέσει σε πέντε φορείς αυτή την μελέτη, ένας από αυτούς είναι το τμήμα μας - τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας -με τελικό στόχο τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την παραπάνω έρευνα να ενσωματωθούν σε ένα μοντέλο σε σχέση με το κατά πόσο ευθύνεται κάθε είδος διάβρωσης στο κράμα αλουμινίου 2024 και μία πιθανή πρόβλεψη της φθοράς σε συνάρτηση με τις συνολικές ώρες πτήσης.

Με αυτό το μοντέλο η Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία θα μπορεί :

1. Να κάνει τον κατάλληλο έλεγχο, άρα και την απαραίτητη συντήρηση την κατάλληλη στιγμή ελαχιστοποιώντας έτσι το κίνδυνο ατυχήματος.
2. Να κατέχει τις απαραίτητες πληροφορίες στο θέμα της διάβρωσης του αλουμινίου ελαχιστοποιώντας το κόστος της συντήρησης και αποφεύγοντας σε χειρότερη περίπτωση την ολική θραύση με τις γνωστές συνέπειες.

Γενικά το πρόβλημα είναι ότι η Ελλάδα περιβάλλεται από θάλασσα, και πιστεύεται ότι τα ιόντα χλωρίου (Cl⁻) που εμπλουτίζουν το θαλασσινό αέρα είναι μία βασική αιτία στην διάβρωση του αλουμινίου επειδή έχουν την ικανότητα να διασπών το προστατευτικό του φιλμ που είναι το οξειδίο του αλουμινίου (Al₂O₃), αυτό το φιλμ το οποίο θα αναφερθεί αναλυτικά στο δεύτερο κεφάλαιο.

Το θέμα πού μελετάται μέσω αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ρηγματώση λόγω εργοδιάβρωσης (*Stress Corrosion Cracking*) η οποία είναι συνδυασμός ύπαρξης μιας εφελκυστικής τάσης σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον. Στο πρώτο κεφάλαιο θα αναλυθεί αυτό το είδος της διάβρωσης και ο μηχανισμός του.

ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΠΟΥ ΘΑ ΕΚΠΟΝΗΘΕΙ

Θα προγραμματιστεί ένα πείραμα, που είναι από τα πειράματα επιταχυνόμενης διάβρωσης και λέγονται έτσι ακριβώς γιατί δεν εξετάζεται το υλικό στο φυσικό του περιβάλλον (θαλασσινό περιβάλλον στην προηκείμενη περίπτωση) αλλά υποβάλλεται στο εργαστήριο να διαβρωθεί προσομοιάζοντας έτσι το περιβάλλον του.

Το κράμα αλουμινίου 2024 T3 έχει κύριο ποσοστό στην σύστασή του το χαλκό (περίπου 4%) και έχει υποστεί αργή θέρμανση, στην συνέχεια ψυχρή κατεργασία και τέλος φυσιολογική σκλήρυνση με γήρανση σε θερμοκρασία δωματίου, τα χρησιμοποιηθέντα δοκίμια του κράματος 2024 T3 ήταν ανοδιωμένα και κατασκευάστηκαν από την E.A.B. με καθορισμένες διαστάσεις σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ASTM.

Το πείραμα ονομάζεται: πείραμα των διαδοχικών εμβαπτίσεων (*Alternate emmersion*) σε διάλυμα 3.5% χλωριούχου νατρίου (NaCl), όπου εξετάζονται συνολικά 6 δοκίμια πού θα παραμείνουν 10 λεπτά εμβαπτισμένα μέσα στο διάλυμα και ακολουθούν 50 λεπτά έξω από το διάλυμα, αυτό επιτυγχάνεται με δύο δεξαμενές συνδεδεμένες με δύο αντλίες και μια συσκευή με ένα αυτόματο χρονόμετρο και δύο αισθητήρες για την στάθμη του διαλύματος σε κάθε δεξαμενή, από τα 6 δοκίμια θα εκτεθεί το πρώτο δοκίμιο για 15 μέρες, το δεύτερο για 30 μέρες, το τρίτο για 45 μέρες, το τέταρτο για 60 μέρες, το πέμπτο για 75 μέρες, το έκτο για 90 μέρες.

Κάθε δοκίμιο από αυτά θα εξετασθεί στο στερεοσκόπιο όπου θα αναλυθεί η επιφάνεια του κάθε δοκιμίου, ακολουθεί η

μεταλλογραφική εξέταση στο μικροσκόπιο - εφόσον γίνει η απαραίτητη επεξεργασία σε κάθε δοκίμιο (κόψιμο σε τομή , λείανση , στίλβωση , χημική προσβολή) - όπου θα αναλυθεί η μεταλλουργική δομή του υλικού έτσι ώστε να έχουμε μία σαφή εικόνα της εξέλιξης της διάβρωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο έκθεσης κάθε δοκιμίου.

Από αυτά μπορούμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα όσον αφορά το είδος της διάβρωσης που έχουν υποστεί τα δοκίμια, την επίδραση της διάβρωσης στην δομή του υλικού, την επίδραση στο βάρος κάθε δοκιμίου και σε συνάρτηση με τον χρόνο, και τέλος κάποια στατιστικά αποτελέσματα γύρω από το είδος της διάβρωσης, πιθανή αλλαγή στην σκληρότητα σε συνάρτηση με τον χρόνο ή πιθανή αλλαγή της σκληρότητας σε συνάρτηση με την κατεύθυνση της εγκάρσιας τομής.

ΠΡΩΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΠΡΩΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ
1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ SCC :

Η δημιουργία ρήγματος λόγω εργοδιάβρωσης (Stress Corrosion Cracking) ή SCC είναι μια από τις 19 διεργασίες πού μπορούν να επιρεάσουν την δομική ακεραιότητα ή να περιορίσουν την διάρκεια ζωής των μεταλλικών κατασκευών , οι διεργασίες αυτές είναι :

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ:

1. Πλαστική παραμόρφωση (Yielding)
2. Ψαθυρή θραύση (Brittle fracture)
3. Υπερφόρτιση ή όλκιμη θραύση (Overload or ductile fracture)
4. Ερπυσμός λόγω υψηλών θερμοκρασιών, με ή χωρίς θραύση (High temperature creep)
5. Κόπωση (Fatigue)
6. Φθορά (Wear)

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΕΣ:

7. Διάβρωση με κόπωση (Corrosion fatigue)
8. Ψαθυροποίηση με υδρογόνο (Hydrogen embrittlement)
9. Ρηγμάτωση βοηθούμενη από υγρό μέταλλο (Ψαθυροποίηση με υγρό μέταλλο)
10. Ρηγμάτωση λόγω εργοδιάβρωσης (Stress corrosion cracking)
11. Erosion corrosion

ΧΗΜΙΚΕΣ:

12. Ομοιόμορφη διάβρωση (Uniform corrosion)
13. Διάβρωση με δημιουργία σχισμών (Crevice corrosion)
14. Τρηματική διάβρωση (Pitting)
15. Ανομοιόμορφη μεταλλική διάβρωση
16. Περικρυσταλλική διάβρωση (Intergranular corrosion)
17. Επιλεκτική διαλυτοποίηση (όπως στην διάβρωση του ψευδαργύρου στον μπρούντζο)

18. Filiform corrosion (όπως στην επιφανειακή αυλάκωση του χάλυβα όταν είναι επικαλυμμένο με βερνίκι)

19. Οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες

Για τις διεργασίες 14,16 της λίστας (την τρηματική διάβρωση) και (την περικρυσταλλική διάβρωση) θα αναφερθεί στο τέλος αυτού του κεφαλαίου γιατί θα αποδειχθεί στην συνέχεια ότι έχουν σημαντική επίδραση στο σχηματισμό της εργοδιάβρωσης.

Γενικά για το SCC έχουμε να παρατηρούμε τα εξής χαρακτηριστικά:

- [1] Το (SCC), μακροσκοπικά προκαλεί ψαθυρή θραύση ακόμα και όταν εμφανίζεται σε όλκιμα μέταλλα.
- [2] Το (SCC) προκαλεί τοπική πλαστική ροή.
- [3] Μπορεί να εμφανιστεί σε φορτίσεις που είναι πολύ μικρότερες από αυτές που αντέχει η κατασκευή.
- [4] Μόνο εφελκυστική τάση θα προκαλέσει αυτό το είδος ρήγματος.
- [5] Η θραύση συμβαίνει σε ένα επίπεδο ονομαστικό κάθετο στον άξονα εφελκυσμού, δηλαδή είναι μια θραύση της μορφής ανοίγματος (σαν να ανοίγεις ένα βιβλίο).
- [6] Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα ευαισθησίας ανάμεσα στους διάφορους συνδυασμούς κραμάτων και περιβάλλοντος, με άλλα λόγια, στο (SCC) μόνο μερικά χημικά είδη προκαλούν σοβαρά προβλήματα με τα ρήγματα, όταν έχουμε κάποιο δεδομένο κράμα, που σημαίνει για κάθε κράμα αντιστοιχεί κάποιο συγκεκριμένο περιβάλλον που θα αρχίσει το (SCC), στον πίνακα 1.1 φαίνονται τα πιο γνωστά συστήματα εργοδιάβρωσης.
- [7] Τα χημικά είδη που πρέπει να βρίσκονται στο περιβάλλον ώστε να προχωρήσει η διαδικασία πρόθεσης του ρήγματος δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται σε υψηλές συγκεντρώσεις ή σε μεγάλες ποσότητες.
- [8] Τα ρήγματα μπορεί είτε να είναι απλά ή να έχουν διακλαδώσεις.
- [9] Εάν και τα ρήγματα είναι μακροσκοπικά ψαθυρά, σε μικροσκοπικό επίπεδο το (SCC) περιλαμβάνει τοπική πλαστικότητα και

ακολουθεί δρόμους διαφορετικούς απ' αυτούς της καθαρά μηχανικής ψαθυρής θραύσης, το ρήγμα μπορεί να επιλέξει να προωθείται είτε από τα σύνορα των κόκκων, είτε μέσα από τους κόκκους, κάτι που εξαρτάται από μικρομεταβολές στο περιβάλλον, στην σύνθεση του κράματος, στο μέγεθος της φόρτισης, ή στις μεταβολές της διεργασίας.

[10] Τέλος, το (SCC) φαίνεται να συμβεί μόνο όταν συγκεκριμένες ηλεκτροχημικές συνθήκες ικανοποιούνται.

Πίνακας 1.1 : Συστήματα εργοδιάβρωσης

ΚΡΑΜΑ	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
Κράματα αλουμινίου	Διαλύματα NaCl- H ₂ O ₂ Διαλύματα NaCl Θαλασσινό νερό, αέρας, υδρατμός
Κράματα χαλκού	Αμμωνιακά διαλύματα
Χάλυβας υψηλής αντοχής	Νερό
Κράματα μαγνησίου	Διαλύματα χλωριόντων
Μαλακοί χάλυβες	Διαλύματα NaOH Διαλύματα NaOH-Na ₂ SiO ₂ Θαλασσινό νερό Διαλύματα HCN Διαλύματα οξικό H ₂ S Ρευστά κράματα Na-Pb Ασβέστιο, αμμωνία, διαλύματα NaCl
Ανοξειδωτοι χάλυβες (ωστενιτικοί)	Θερμά διαλύματα χλωριόντων Διαλύματα υδροξειδίων
Κράματα ζirkονίου	Διαλύματα FeCl
Κράματα τιτανίου	Διαλύματα χλωριόντων οργανικά διαλύματα τηγμένα χλωριούχα άλατα
Κράματα νικελίου υψηλής αντοχής	Ατμός υψηλής ποιότητας
α-μπρούτζος	Αμμωνιακά διαλύματα

Μία άλλη παρατήρηση είναι ότι και τα καθαρά μέταλλα μπορούν να υφίστανται εργοδιάβρωση όπως έδειξαν μερικές εργαστηριακές παρατηρήσεις σε χαλκό εξαιρετικά υψηλής καθαρότητας, όπου εμφανίστηκαν σημάδια SCC.

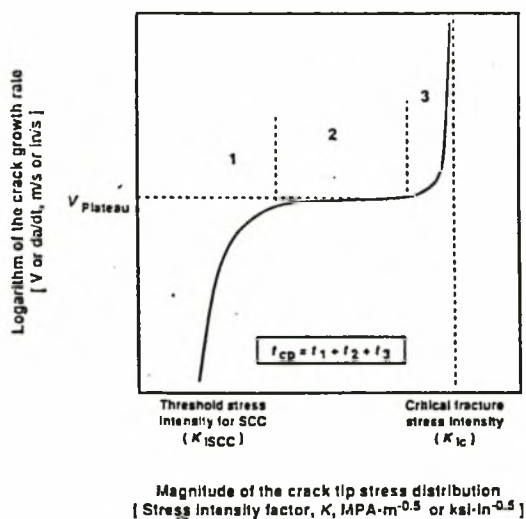
Υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ πολλών από τους (19) τρόπους αστοχίας κάποιου υλικού, ιδιαίτερα μεταξύ αυτών που συμπεριλαμβάνουν θραύση του υλικού. Είναι συνηθισμένο φαινόμενο η ρηγμάτωση λόγω εργοδιάβρωσης (SCC) να ξεκινάει από την τρηματική διάβρωση (Pitting corrosion). Είναι επίσης συνηθισμένο το SCC να προκαλεί την έναρξη ρηγμάτων κόπωσης, αυτό βέβαια σε αεροπορικά εξαρτήματα είναι ένας σημαντικός λόγος ανησυχίας σχετικά με το SCC στην αεροναυπηγική τεχνολογία. ψαθυρή θραύση μπορεί να ξεκινήσει από ρήγματα κόπωσης, ρήγματα εργοδιάβρωσης, ρήγματα υδρογόνου, και στους ψαθυρούς χάλυβες ακόμα από λάκκους που δημιουργήθηκαν λόγω διάβρωσης (corrosion pits)⁽¹⁾.

1.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΛΟΓΩ ΕΡΓΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (SCC)

Η ρηγάτωση λόγω εργοδιάβρωσης είναι μια διεργασία καθυστεριμένης βλάβης, το ρήγμα ξεκινάει και διαδίδεται με αργούς ρυθμούς (π.χ. 10^{-9} έως 10^{-6} m/s) μέχρι να υποστεί το υλικό θραύση.

Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η ακολουθία των γεγονότων της διεργασίας του SCC και είναι οι εξής :

- 1) Ξεκίνημα του ρήγματος και το πρώτο στάδιο της διάδοσης .
- 2) Το δεύτερο στάδιο ή η μόνιμη κατάσταση διάδοσης του ρήγματος.
- 3) Το τρίτο στάδιο διάδοσης του ρήγματος ή η τελική θραύση.



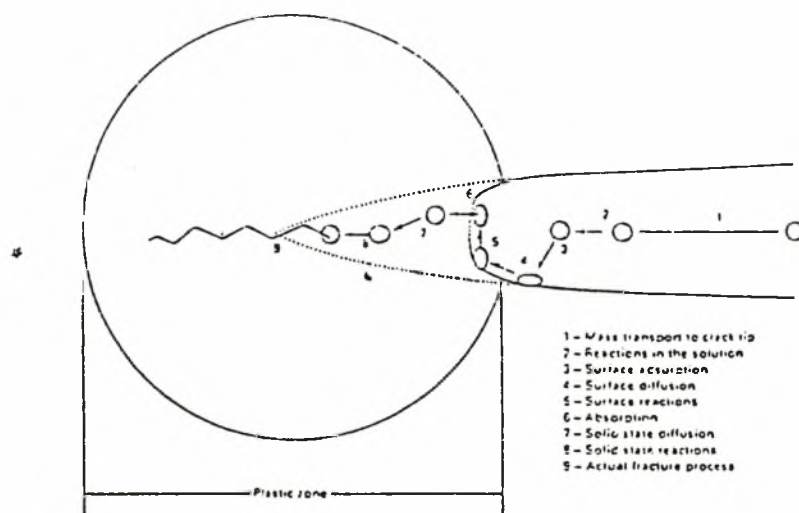
Σχήμα 1.1: Διάγραμμα του ρυθμού διάσωσης του ρήγματος σαν συνάρτηση με το παράγοντα έντασης τάσης στην κορυφή του ρήγματος δείχνοντας τις περιοχές των σταδίων 1, 2, και 3 της διάδοσης του ρήγματος.

Πολλοί διαφορετικοί μηχανισμοί έχουν προταθεί για να εξηγήσουν τις αντιδράσεις της εργοδιάβρωσης που συμβαίνουν στην κορυφή του ρήγματος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι μέχρι τώρα το φαινόμενο δεν έχει γίνει ακόμα πλήρως κατανοητό από την διεθνή επιστημονική κοινότητα.

Ένας προτεινόμενος μηχανισμός μπορεί να διαιρεθεί σε δύο βασικές κατηγορίες : Ανοδικός μηχανισμός και καθοδικός μηχανισμός. Όπως είναι γνωστό στην διάβρωση η ανοδική αντίδραση και η καθοδική αντίδραση πρέπει να λάβουν χώρα την ίδια χρονική στιγμή και στην ίδια επιφάνεια όπου στην άνοδο γίνεται η διάλυση του μετάλλου και η κάθοδος προστατεύεται δηλαδή συμβαίνουν κάποιες χημικές αντιδράσεις στην κορυφή του ρήγματος.

Στο σχήμα 1.2 φαίνεται η κορυφή του ρήγματος όπου η διάδοση του ρήγματος φαίνεται να είναι αποτέλεσμα κάποιων αντιδράσεων στο μέταλλο, όπου η θραύση των ατομικών δεσμών που συμβαίνει στην κορυφή του ρήγματος λαμβάνει χώρα ή από χημική διάλυση ή από μηχανική θραύση (όλκιμη ή ψαθυρή). Μηχανική θραύση η οποία υποβοηθείται ή επάγεται από μια ή παραπάνω από τις παρακάτω αντιδράσεις μεταξύ του υλικού και του περιβάλλοντος :

- I. Απορρόφιση χημικών ειδών που βρίσκονται στο περιβάλλον.
- II. Επιφανειακή διάχυση.
- III. Αντιδράσεις στο μέταλλο μπροστά από την κορυφή του ρήγματος.
- IV. Επιφανειακά φίλμ.



Σχήμα 1.2: Η κορυφή ενός ρήγματος, με την πλαστική ζώνη μπροστά, επίσης φαίνονται τα διάφορα δυνατά στάδια που κάποιο από αυτά μπορεί να είναι το καθοριστικό στάδιο για την διάδοση του ρήγματος.

Τα στάδια πού είναι πιθανά για την διάδοση του ρήγματος και που φαίνονται στο παραπάνω σχήμα είναι:

1. Μεταφορά μάζας στο μήκος του ρήγματος ή μακριά από την κορυφή του ρήγματος
2. Αντιδράσεις στο διάλυμα κοντά στο ρήγμα
3. Επιφανειακή εκκρόφηση στην κορυφή του ρήγματος ή κοντά της
4. Επιφανειακή διάχυση
5. Αντιδράσεις στην επιφάνεια
6. Απορρόφηση στον κύριο όγκο του μετάλλου
7. Διάχυση του κυρίου όγκου του μετάλλου προς την πλαστική ζώνη στο προωθούμενου ρήγματος
8. Χημικές αντιδράσεις στο κύριο όγκο του μετάλλου
9. Θραύση των ατομικών δεσμών

Μία επιβράδυνση για ένα από τα απαιτούμενα στάδια στην ακολουθία των γεγονότων μπορεί να είναι καθοριστικό βήμα και αυτό εξαρτάται από το περιβάλλον πού υφίσταται το υλικό, π.χ. σε υγρά διαλύματα τα στάδια 3 και 5 δηλαδή η επιφανειακή Εκκρόφηση στην κορυφή του ρήγματος ή κοντά της και οι αντιδράσεις στην επιφάνεια γίνονται συνήθως πολύ γρήγορα σε σύγκριση με την μεταφορά μάζας στο μήκος του ρήγματος ή μακριά από την κορυφή του ρήγματος δηλ. το στάδιο 1 σαν αποτέλεσμα οι αντιδράσεις σε αυτές τις δυο περιοχές φαίνεται να είναι υπεύθυνο για το προσδιορισμό της μόνιμης κατάστασης της διάδοσης του ρήγματος.

Είναι γνωστό ότι πολλοί διαφορετικοί περιβαλλοντικοί παράμετροι έχουν επίδραση στο βαθμό ανάπτυξης του ρήγματος σε υγρά διαλύματα, μερικοί από αυτές είναι :

- ◆ Θερμοκρασία
- ◆ Πίεση
- ◆ Είδος της διαλυμένης ουσίας
- ◆ Συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας και η ενέργεια της
- ◆ pH
- ◆ Ηλεκτροχημικό δυναμικό

- ◆ Ιξώδες του διαλύματος
- ◆ Μίξη ή ανακάτιψη του διαλύματος

Μία αλλαγή στις παραπάνω παραμέτρους μπορεί να επιδράσει στην τιμή του καθοριστικού σταδίου που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Βέβαια εκτός από τις περιβαλλοντικές παραμέτρους, παράμετροι που επιδρούν στο βαθμό διάδοσης της ρηγμάτωσης λόγω εργοδιάβρωσης είναι οι εξής :

⇒ Το μέγεθος της εφαρμοσμένης τάσης ή του παράγοντα έντασης τάσης

⇒ Η εντατική κατάσταση , που περιλαμβάνει (1) επίπεδο της τάσης και (2) επίπεδο της παραμόρφωσης.

⇒ Το είδος της φόρτισης στην ρωγμή του ρήγματος (εφελκυστική ή θλιπτική, για παράδειγμα)

⇒ Η σύσταση του κράματος, που περιλαμβάνει (1) ονομαστική σύσταση, (2) πραγματική σύσταση, (3) ακαθαρσία του κράματος

⇒ Μεταλλουργικές συνθήκες, που περιλαμβάνει (1) το επίπεδο της αντοχής, (2) ύπαρξη μιας δεύτερης φάσης στην μήτρα και στα όρια των κόκκων, (3) σύσταση της φάσης, (4) το μέγεθος των κόκκων, (5) συσσώρευση στα όρια των κόκκων, και (5) παραμένουσες τάσεις.

⇒ Η γεωμετρία του ρήγματος που περιλαμβάνει (1) μήκος, βάθος, και (2) το άνοιγμα του ρήγματος και η αιχμή του.

Μηχανισμός έναρξης του ρήγματος εργοδιάβρωσης:

Η έναρξη του ρήγματος μπορεί να οφείλεται σε ένα από τους παρακάτω λόγους :

1. Έναρξη ρήγματος σε επιφανειακή ασυνέχεια : Το SCC συχνά ξεκινάει από προϋπάρχοντα χαρακτηριστικά της επιφάνειας ή από χαρακτηριστικά της επιφάνειας που προκλήθηκαν από διάβρωση, αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν εγκοπές, laps, και ανωμαλίες στην επιφάνεια.

2. Έναρξη ρήγματος σε λάκκους που δημιουργήθηκαν από διάβρωση (corrosion pits).
3. Έναρξη ρήγματος από περικρυσταλλική διάβρωση (intergranular corrosion).

Είναι γνωστό εδώ και πολύ καιρό, ότι τα χαρακτηριστικά του SCC καθορίζονται από στοιχεία της μικροδομής και από μικροδιεργασίες. Στα στοιχεία της μικροδομής περιλαμβάνεται οι κόκκοι, τα σύνορα των κόκκων, πρόσθετα σωματίδια, κ.τ.λ. .

Στις μικροδιεργασίες περιλαμβάνονται η κίνηση των γραμμοαταξιών, η μετάβαση των μεταλλικών ατόμων σε ιονισμένη κατάσταση (διαβρωμένη), η αναγωγή και η διάχυση του υδρογόνου, κ.τ.λ.

Έχουν προκύψει διάφορες θεωρίες για την ρηγμάτωση λόγω εργοδιάβρωσης (SCC), οι οποίες μπορούν να καταταγούν σε έξι ομάδες ως εξής :

- α) Θραύση με την μορφή "φιλμ" (film rupture) με συνέπεια την προώθηση του ρήγματος, λόγω διάλυσης στην αιχμή του ρήγματος.
- β) Διάλυση επιταχυνόμενη λόγω των τάσεων που υπάρχουν.
- γ) Ψαθυροποίηση με υδρογόνο
- δ) Προσρόφηση και αλληλεπίδραση στοιχείων του περιβάλλοντος με τους δεσμούς που έχουν σπάσει.
- ε) Σχηματισμός ψαθυρού στρώματος (brittle film) και θραύση αυτού, μια διαδικασία που επαναλαμβάνεται κυκλικά.
- ζ) Σχηματισμός σειρών από λάκκους (pits) που δημιουργήθηκαν λόγω διάβρωσης και οι οποίοι επιμηκύνονται, σχηματίζοντας μια διάταξη παράλληλων «τούνελ» διάβρωσης. Τα τούνελ αυτά όμως έχουν τοιχώματα που δεν έχουν διαβρωθεί και τα οποία τελικά προκαλούν την προώθηση του ρήγματος⁽²⁾.

Μέθοδοι πρόληψης από την ρηγμάτωση λόγω ερεγοδιάβρωσης

Το SCC μπορεί να ελαττωθεί εφαρμόζοντας μία ή παραπάνω από τις εξής μεθόδους:

1. Ελαττώνοντας την τάση κάτω από την τάση κατωφλίου αν αυτή υπάρχει. Αυτό μπορεί να γίνει κάνοντας ανόπτηση στην περίπτωση των παμένουσων τάσεων, μεγαλώνοντας το πάχος του κομματιού, ή ελαττώνοντας την φόρτιση.
2. Περιορίζοντας τα κρίσιμα περιβαλλοντικά είδη, κάνοντας π.χ. απόσταξη, degasification, demineralization.
3. Η αλλαγή του κράματος είναι μία πιθανή λύση αν δεν μπορεί να γίνει αλλαγή στην τάση ούτε στο περιβάλλον. Για παράδειγμα είναι γνωστή η χρησιμοποίηση του κράματος Inconel -(έχει νικέλιο σε μεγάλο ποσοστό)- όταν ο ανοξείδωτος χάλυβας τύπου 304 δεν είναι ικανοποιητικός. Παρόλο που ο ανθρακούχος χάλυβας έχει μικρή αντίσταση στην ομοιόμορφη διάβρωση, έχει μεγαλύτερη αντίσταση στην ρηγμάτωση λόγω ερεγοδιάβρωσης από τον ανοξείδωτο χάλυβα. Έτσι κάτω από συνθήκες που τείνουν να παράγουν SCC, οι ανθρακούχοι χάλυβες συχνά αντικαθιστούν τους ανοξείδωτους χάλυβες, για παράδειγμα, οι εναλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούν θαλάσσιο νερό ή πηγαδίσιο νερό, συχνά κατασκευάζονται από απλό χάλυβα.
4. Εφαρμογή της καθοδικής προστασίας, που πρέπει να χρησιμοποιηθεί μόνο σε περίπτωση που είναι σίγουρο ότι η αιτία της αστοχίας της εγκατάστασης είναι από ρηγμάτωση λόγω ερεγοδιάβρωσης, και αυτό γιατί η επίδραση της ψαθυροποίησης υδρογόνου (hydrogen embrittlement) επιταχύνεται με την εφαρμογή της καθοδικής προστασίας.
5. Πρόσθεση παρεμποδιστών (inhibitors) στο σύστημα αν είναι εφικτό οι παρεμποδιστές είναι ουσίες με πολυατομικά ιόντα, συνήθως ενώσεις των μεταβατικών στοιχείων, τα οποία προσροφούνται στην επιφάνεια

της ανόδου σχηματίζοντας ένα προστατευτικό μονομοριακό στρώμα, οι πιο γνωστοί είναι οι παρεμποδιστές σκουριάς.

6. Οι επικαλύψεις μερικές φορές χρησιμοποιούνται, και εξαρτάται από το πώς μπορεί να κρατηθεί το περιβάλλον μακριά από το μέταλλο.

7. Shot-peening (είναι γνωστή και σαν shot-blasting) που είναι μία μέθοδος που δημιουργεί θλιπτικές τάσεις στην επιφάνεια του μετάλλου. Έχει αποδειχθεί ότι φέρνει καλά αποτελέσματα στον περιορισμό της εργοδιάβρωσης⁽³⁾.

1.3. Η ΕΡΓΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ:

Η θραύση των κραμάτων αλουμινίου λόγω του SCC συμβαίνει εξαιτίας του νερού, του ατμού, και των υγρών διαλυμάτων. Οι απαραίτητες συνθήκες για την ρηγμάτωση λόγω εργοδιάβρωσης σε κράματα αλουμινίου είναι:

1. Νερό, υγρά διαλύματα, ή ατμοσφαιρική υγρασία.
2. Ευαισθησία του κράματος σ' αυτό το είδος διάβρωσης.
3. Να υφίσταται εφελκυστική τάση.

Τα οποία θα αναλυθούν στην σειρά:

1. Νερό: Τα ρήγματα δεν παρατηρούνται μόνο σε υγρά περιβάλλοντα αλλά και στην ατμόσφαιρα, αρκεί να έχει 1% υγρασία.

Το νερό στην υγρή φάση δημιουργεί ταχύτερη ρηγμάτωση από τον ατμό, και γ' αυτό μία στρατηγική που χρησιμοποιείται για την ελάττωση του SCC σε κατασκευές αλουμινίου στην ατμόσφαιρα όπως τα αεροπλάνα είναι ο σχεδιασμός έτσι ώστε να μην συσσωρευτεί νερό σε σχισμές και εσοχές. Όχι μόνο το υγρό είναι πιο επιθετικό από την ατμοσφαιρική υγρασία αλλά και οι μη αποστραγγισμένες εσοχές μπορεί να μαζέψουν άλατα που συσσωρεύονται στην εξάτμιση και μετά να επιταχύνουν το SCC.

Ένα σημαντικό βήμα για να εμποδιστεί το νερό να «μπει» στο αλουμίνιο είναι η βαφή του αλουμινίου και οι επικαλύψεις.

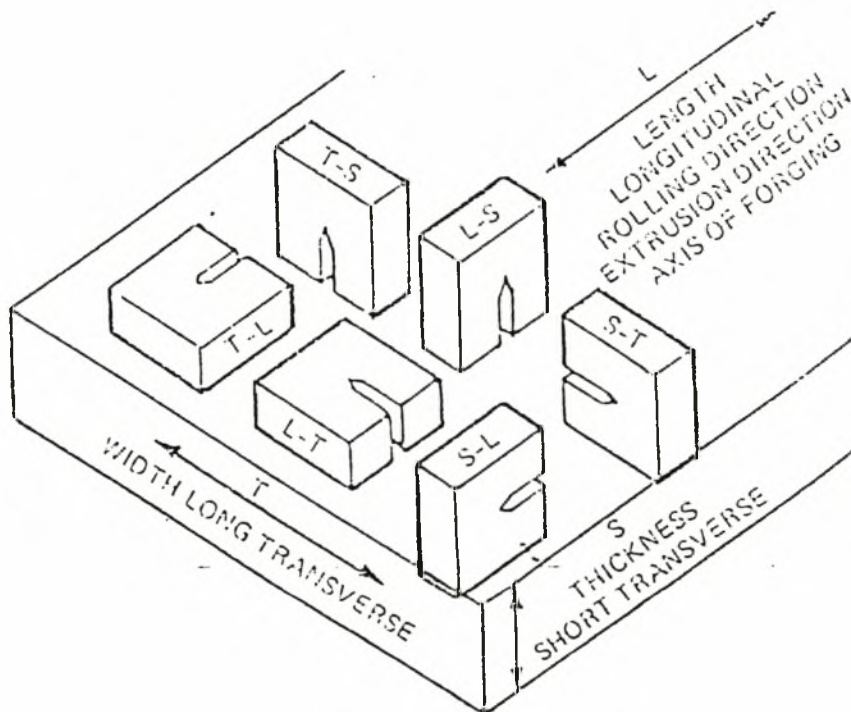
2. Ευαισθησία του κράματος : Μέλη από τις κατεργασμένες σειρές 2000 και 7000 είναι τρωτοί σε συγκεκριμένες κατεργασίες (θερμικές η μηχανικές), όπως και η σειρά 5000 στις σκληρύνσεις, όταν αυτά τα κράματα έχουν εξαχθεί, σφυρηλατηθεί, ελασθεί, οι κόκκοι επιμηκύνονται στην κατεύθυνση της μέγιστης ροής για να παράγουν μία τέτοια δομή που έχει σημαντική σημασία στην συμπεριφορά του SCC σε αυτά τα κράματα.

Η μακρύτερη γραμμή των κόκκων ορίζει την διαμήκη κατεύθυνση, και οι ιδιότητες της θραύσης (συμπεριλαμβανομένη του SCC) καθορίζονται φορτίζοντας παράλληλα σε αυτά την μακρύτερη

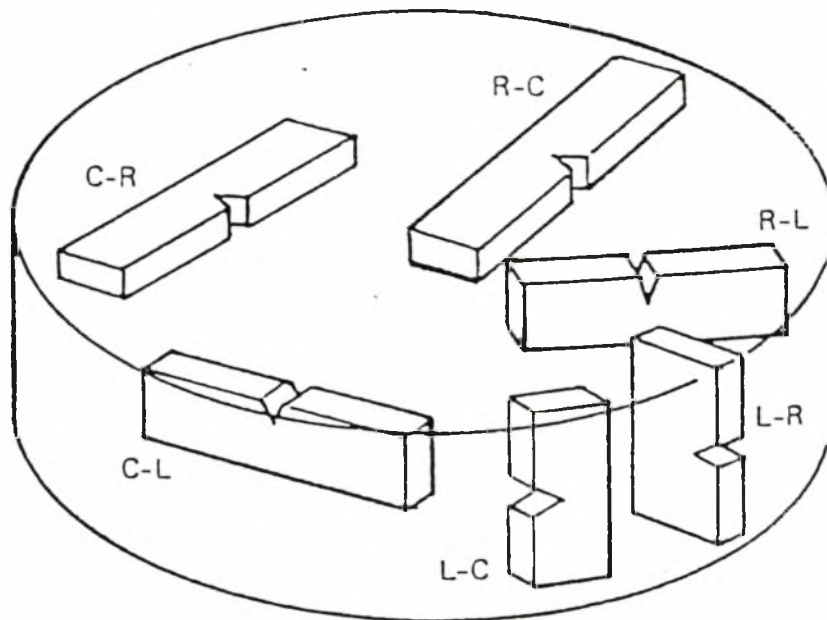
διάσταση που έχει οριστεί να ονομάζονται σαν διαμήκη ιδιότητες. Αντίστοιχα η κατεύθυνση όπου οι διαστάσεις των κόκκων είναι κοντές ορίζεται σαν εγκάρσια.

Η ανισοτροπία των κατεργασμένων κραμάτων αλουμινίου είναι τόσο σημαντικό για το SCC ώστε η ASTM όρισε έναν κώδικα για την περιγραφή του προσανατολισμού του επιπέδου θραύσης με έμφαση στην δομή και της κατεύθυνσης της διάδοσης του ρήγματος.

Αυτός ο κώδικας έχει δύο γράμματα, το πρώτο δείχνει τον άξονα της τάσης και το δεύτερο δείχνει την κατεύθυνση της διάδοσης, έτσι για ένα μακρύ έλασμα τα γράμματα είναι: L για την διαμήκη, S για εγκάρσια (το πάχος), και T για το πλάτος, αν είναι κυλινδρικό, τα γράμματα είναι: C για περιφέρεια και R για την ακτίνα, βλέπε σχήματα 1.3 και 1.4 αντίστοιχα⁽¹⁾.

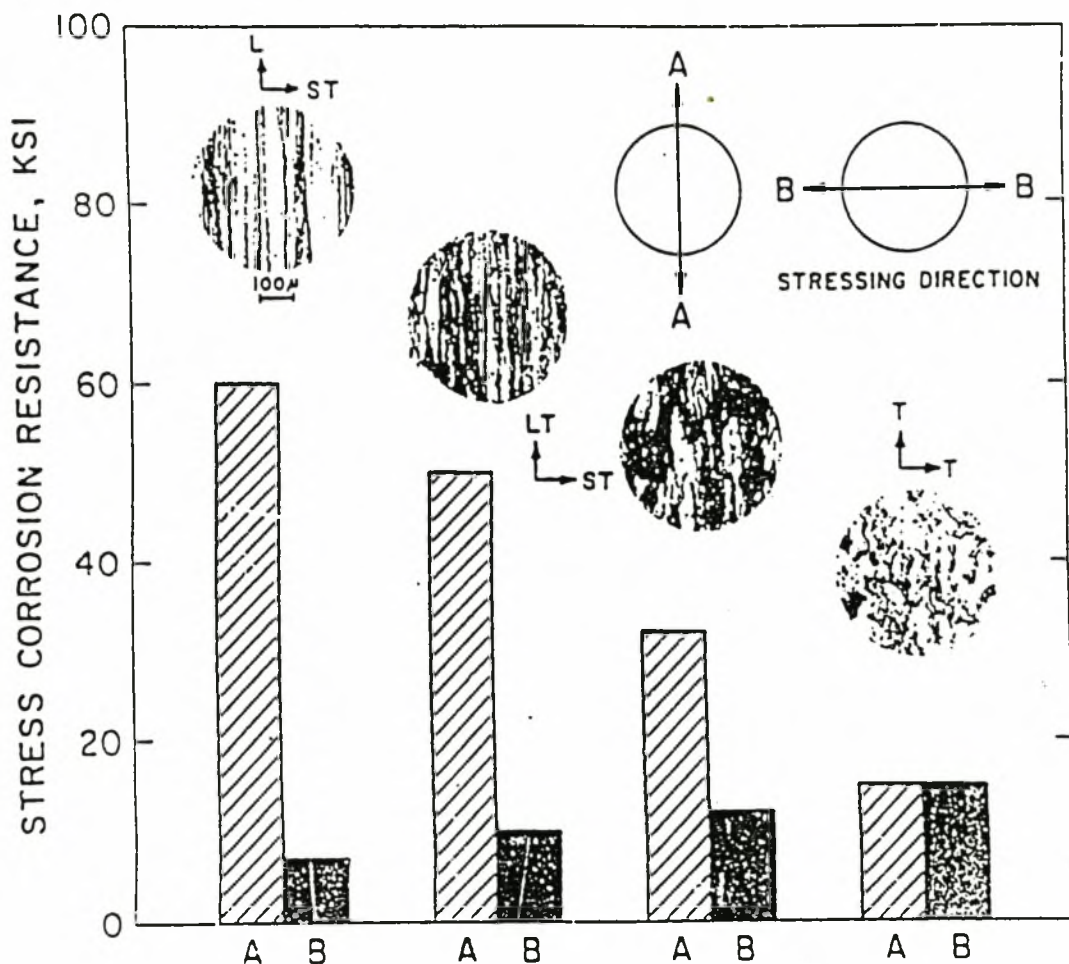


Σχήμα 1.3: Προσανατολισμός του επιπέδου θραύσης, που δείχνει τον κώδικα της ASTM για ελάσματα.



Σχήμα 1.4: Προσανατολισμός του επιπέδου θραύσης, που δείχνει τον κώδικα της ASTM για ράβδους κυλινδρικής διατομής.

Στο σχήμα 1.5 φαίνεται ο προσανατολισμός αυτός σε τομή ενός κυλινδρικού δοκιμίου, και πώς επηρεάζει ο προσανατολισμός αυτός την αντίσταση στην εργοδιάβρωση.

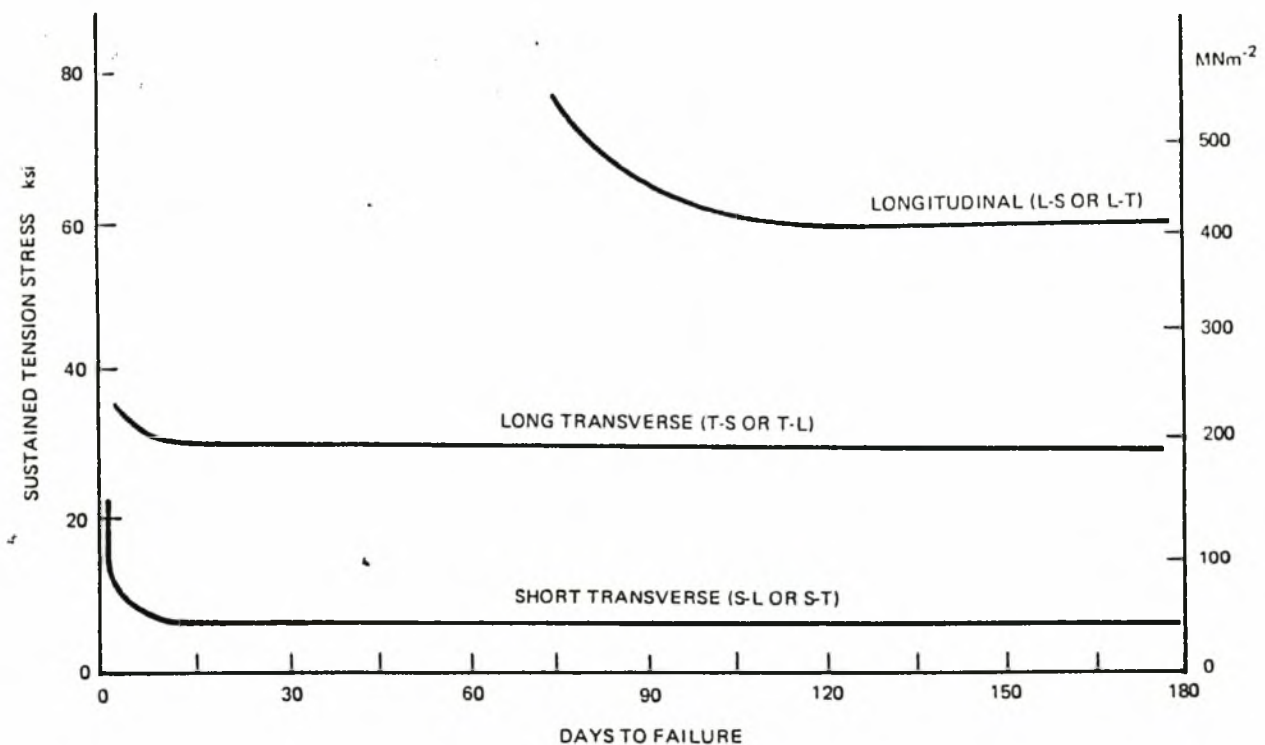


Σχήμα 1.5: Ο προσανατολισμός της ASTM σε τομή ενός κυλινδρικού εξελασμένου δοκιμίου 7075-T6, και πώς επηρεάζει ο προσανατολισμός αυτός την αντίσταση στην εργοδιάβρωση⁽⁴⁾.

Πρακτικά οι θραύσεις των κραμάτων αλουμινίου λόγω του SCC περιλαμβάνουν τα σύμβολα S-L ή S-T.

Η σύγκριση της ευαισθησίας των διαφορετικών κραμάτων και το ίδιο κράμα σε διαφορετικά επίπεδα επαναφοράς έχει γίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος είναι με λειασμένα δοκίμια που μπορεί να έχουν διαφορετικά σχήματα, εφαρμόζονται διαφορετικές φορτίσεις, και ο συνολικός χρόνος μέχρι να αρχίσει το ρήγμα παρατηρείται.

Δεδομένα από πειράματα σε ένα κράμα με διαφορετικούς προσανατολισμούς φαίνεται στο σχήμα 1.6. Δύο σημαντικά συμπεράσματα μπορούν να παρατηρηθούν σε αυτό το σχήμα, πρώτον, υπάρχει μια τάση κατώφλι (σ_{th}) κάτω από την οποία το SCC δεν αρχίζει, και δεύτερον, ότι η τάση αυτή για την διαμήκη κατεύθυνση (L-S ή L-T) είναι πολύ μεγαλύτερη από την εγκάρσια (S-L ή S-T).



Σχήμα 1.6: Η επίδραση του προσανατολισμού του εξελασμένου 7075-T6 στην αντίσταση κατά του SCC, σε τεστ των διαδοχικών εμβαπτίσεων σε διάλυμα 3.5% χλωριούχου νατρίου.

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού της ευαισθησίας του κράματος και της κατεργασίας του γίνεται δημιουργώντας ρήγμα μέσα στο δοκίμιο και ελέγχεται ο ρυθμός δημιουργίας του ρήγματος.

Από τιμές της σ_{th} και K_{ISCC} μπορεί να ταξινομηθούν τα κράματα αλουμινίου σε 4 κατηγορίες:

- a) Πολύ χαμηλή ευαισθησίας
- b) Χαμηλή ευαισθησία
- c) Μέτρια ευαισθησία
- d) Αισθητή ευαισθησία

Χρησιμοποιώντας αυτές τις κατηγορίες, η σύγκριση ευαισθησίας των διαφόρων κατεργασμένων κραμάτων αλουμινίου φαίνονται στον πίνακα 1.2 και εκείνοι των χυτών κραμάτων αλουμινίου στον πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.2: Κατηγορίες ευαισθησίας σε SCC σε υγρά περιβάλλοντα για εμπορικά κράματα αλουμινίου σε προσανατολισμό S-T ή S-L

Susceptibility category	Alloy	Temper
A. Very low	1100	all
	3003, 3004, 3005	all
	5000, 5050, 5052, 5154, 5454, 6063	all
	^a 5086	O, H32, H34
	6061, 6262	O, T6
	Alclad: 2014, 2219, 6061, 7075	all
B. Low	2219	T6, T8
	5086	H36
	5083, 5456	controlled
	6061	T4
	6161, 5351	all
	6066, 6070, 6071	T6
	2021	T8
	7049, 7050, 7075	T73
C. Moderate	2024, 2124	T8
	7050, 7175	T736
	7049, 7075, 7178	T6
D. Appreciable	2024, 2219	T3, T4
	2014, 7075, 7079, 7178	T6
	5083, 5086, 5456	sensitized
	7005, 7039	T5, T6

Πίνακας 1.3: Κατηγορίες ευαισθησίας σε SCC σε υγρά περιβάλλοντα για εμπορικά χυτά κράματα αλουμινίου.

Category	Alloy	Temper
A. Very low	514.0, 518.0, 535.0, A712.0 356.0, A357.0, 359.0, B358.0	as cast all
B. Low	319.0, 333.0, 380.0 355.0, C355.0, 354.0	as cast T6, T61
C. Moderate	520.0 295.0, B295.0, 707.0 D712.0	T4 T6 as cast

^a This table is based on far less experimental data than table 3.

Στον πίνακα 1.4 φαίνεται η εκτίμηση της μεγίστης εφελκυστικής τάσης σ_{th} όπου δοκίμια διαφορετικών προσανατολισμών της δομής των κόκκων δεν θα αστοχούσαν από εργοδιάβρωση σε πείραμα των διαδοχικών εμβαπτίσεων σε, διάλυμα 3.5% NaCl (για 84 μέρες), ή σε βιομηχανική ατμόσφαιρα (για 1 χρόνο), στον πίνακα σημειώνεται η μικρότερη τάση των δύο τεστ.

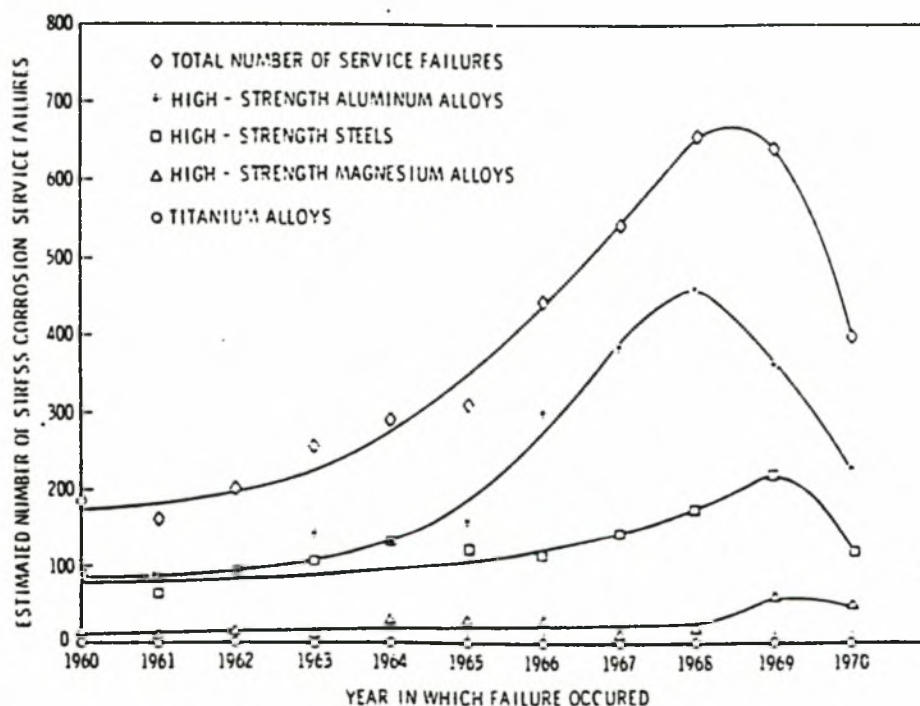
Πίνακας 1.4: Σύγκριση στην αντίσταση εργοδιάβρωσης για διάφορα κράματα αλουμινίου.

Alloy and Temper	Direction of Applied Stress	Plates		Extrusions		Forgings	
		MN/m ²	(ksi)	MN/m ²	(ksi)	MN/m ²	(ksi)
2014-T6	L	310	(45)	310	(45)	210	(30)
	LT	210	(30)	150	(22)	170	(25)
	ST	<55	(<8)	<55	(<8)	<55	(<8)
2219-T87	L	>270	(>40)	>240	(>35)	>260	(>38)
	LT	>260	(>38)	>240	(>35)	>260	(>38)
	ST	>260	(>38)	>240	(>35)	>260	(>38)
2024-T3, T4	L	170	(25)	>340	(>50)		
	LT	140	(20)	120	(18)		
	ST	<55	(<8)	<55	(<8)		
2024-T8	L	>340	(>50)	>410	(>60)	290	(43)
	LT	>340	(>50)	>340	(>50)	290	(43)
	ST	200	(30)	>310	(>45)	100	(15)
7039-T64	L	>290	(>42)				
	LT	240	(35)				
	ST	<35	(<5)				
7075-T6	L	340	(50)	410	(60)	240	(35)
	LT	310	(45)	220	(32)	170	(25)
	ST	<55	(<8)	<55	(<8)	<55	(<8)
7075-T76	L	>340	(>49)	>360	(>52)		
	LT	>340	(>49)	>340	(>49)		
	ST	170	(25)	170	(25)		
7075-T73	L	>340	(>50)	>360	(>53)	>340	(>50)
	LT	>330	(>48)	>330	(>48)	>330	(>48)
	ST	>300	(>43)	>300	(>43)	>300	(>43)
7178-T6	L	380	(55)	450	(65)		
	LT	260	(38)	170	(25)		
	ST	<55	(<8)	<55	(<8)		
7178-T76	L	>360	(>52)	>380	(>55)		
	LT	>360	(>52)	>360	(>52)		
	ST	170	(25)	170	(25)		
7079-T6	L	>380	(>55)	>410	(>60)	>340	(>50)
	LT	270	(40)	240	(35)	210	(30)
	ST	<55	(<8)	<55	(<8)	<55	(<8)
7049-T73	ST					≈ 170	(≈ 25)
7050-T736	ST					>170?	(>25?)
7175-T736	ST					≈ 170	(≈ 25)
RX 720	ST	>170	(>25)				
RR 58	L	>360	(>44)				
	ST	>270	(>40)				
DTD 3067	ST	140	(20)				
DTD 3066	ST	140	(20)				
AZ 74	ST					310	(45)

3. Η τάση εφελκυσμού: η οποία προκαλεί το SCC σε κράματα αλουμινίου μπορεί να προβλέπεται με την τάση λειτουργίας (τάση σχεδιασμού), και όμως το μεγαλύτερο ποσοστό αστοχίας κατασκευών οφείλεται σε τάσεις λόγω των θερμικών κατεργασιών (heat treating stress) και σε τάσεις λόγω συναρμολόγησης (assembly stress)⁽¹⁾.

Οι τάσεις που απαιτούνται για το ξεκίνημα και την ανάπτυξη της ρωγμής μπορεί να είναι πολύ πιο κάτω από το όριο ροής, ειδικά σε συνδυασμούς κραμάτων και περιβαλλόντων που έχουν πρακτική σημασία όπως σε κράματα αλουμινίου υψηλής αντοχής στον αέρα.

Στο σχήμα 1.7 φαίνεται το διάγραμμα που δείχνει το σύνολο των αστοχιών λόγω εργοδιάβρωσης που είχε λάβει χώρα στην αεροδιαστημική στην δυτική Ευρώπη και στην νότια Αμερική από το 1960 μέχρι το 1970⁽⁵⁾.



Σχήμα 1.7: Εκτίμηση του συνόλου των αστοχιών λόγω εργοδιάβρωσης που είχε λάβει χώρα στην αεροδιαστημική στην δυτική Ευρώπη και στην νότια Αμερική από το 1960 μέχρι το 1970.

Τα δεδομένα σ' αυτό το διάγραμμα έχουν προκύψει από πάνω από 3000 αστοχίες που έχουν αναφερθεί από έξι διαστημικές εταιρίες και μερικά κυβερνητικά πρακτορεία και εργαστήρια ερευνών στην Αμερική και από πέντε χώρες της δυτικής Ευρώπης. Οι αστοχίες ήταν κυρίως σε μικρά αεροπλάνα, επίσης άλλες αναφορές υπήρχαν για ελικόπτερα, αεροπλάνα τύπου jet, και πυραύλους.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο μεγάλος αριθμός αστοχιών των κραμάτων αλουμινίου σε σχέση με τα άλλα υλικά του διαγράμματος οφείλεται στο γεγονός ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των αεροπλάνων είναι από κράματα αλουμινίου και όχι ότι τα κράματα αλουμινίου είναι πιο ευαίσθητα σε SCC από τα άλλα υλικά. Επίσης από το σύνολο των κραμάτων αλουμινίου, τα κράματα 7079-T6, 7075-T6, και 2024-T3 είχαν το ποσοστό του 90% των αστοχιών. Αυτό μας δείχνει ξεκάθαρα ότι το υλικό 2024-T3 -που μελετάται μέσω αυτής της διπλωματικής εργασίας- είναι πολύ ευαίσθητο σε ρηγμάτωση λόγω εργοδιάβρωσης.

Οι αιτίες ή οι θέσεις από τις οποίες μπορεί να ξεκινήσει ένα ρήγμα εργοδιάβρωσης στα κράματα αλουμινίου υψηλής αντοχής φαίνονται στο πίνακα 1.5, επίσης φαίνεται το ποσοστό τοις εκατό που αντιστοιχεί σε κάθε θέση⁽⁵⁾.

Πίνακας 1.5: Αιτίες εκκίνησης των ρηγμάτων εργοδιάβρωσης στα κράματα αλουμινίου υψηλής αντοχής

Τάσεις που οφείλονται στο σχεδιασμό (οπή γεώτρησης, μικρές ακτίνες)	25%
Τρύπες από συναρμολόγηση δακτυλιδιών	15%
Τρηματική διάβρωση(λάκκοι)	12%
Ρήγματα κόπωσης	5%
Βλάβη από τριβή(galling), φθορά	5%
Περικρυσταλλική διάβρωση, αποφλοιώση(exfoliation)	4%
Μην γνωστά	34%

Οι πηγές των τάσεων που προκαλούν την προώθηση του ρήγματος εργοδιάβρωσης φαίνονται στον πίνακα 6, επίσης φαίνεται το ποσοστό τοις εκατό που αντιστοιχεί σε κάθε πηγή τάσης.

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 1.6 οι τάσεις λόγω των θερμικών και μηχανολογικών κατεργασιών δείχνουν να έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό (40%).

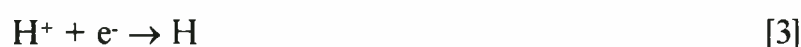
Πίνακας 1.6: Οι τάσεις που προκαλούν την προώθηση του ρήγματος εργοδιάβρωσης στα κράματα αλουμινίου υψηλής αντοχής

Παραμένουσες τάσεις (από θερμικές και μηχανολογικές κατεργασίες)	40%
Τάσεις εγκατάστασης	25%
Τάσεις λειτουργίας	25%
Μη γνωστά	10%

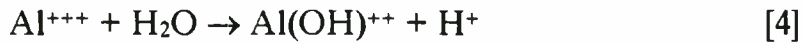
Πιθανές αντιδράσεις στην αιχμή του ρήγματος σε κράματα αλουμινίου:

Ο μηχανισμός όπου τα ρήγματα εργοδιάβρωσης προωθούνται στα κράματα αλουμινίου δεν είναι γνωστός με λεπτομέρειες. Τα ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν είναι: γιατί προωθούνται τα ρήγματα και πόσο γρήγορα προωθούνται.

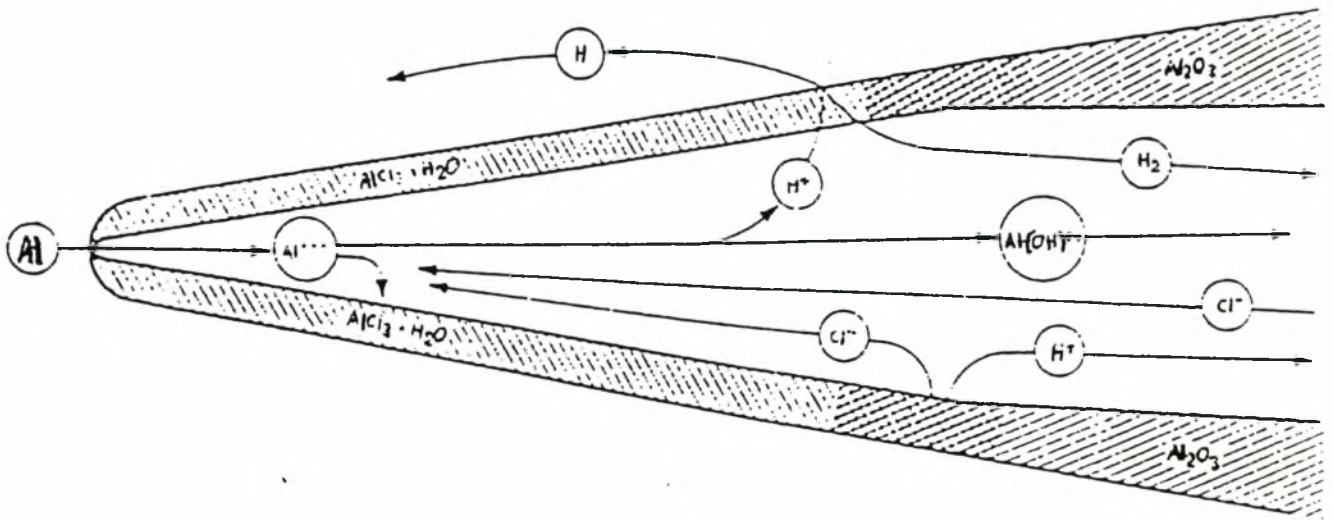
Όταν το αλουμίνιο έρχεται σε επαφή με το νερό δημιουργείται το οξείδιο του αλουμινίου Al_2O_3 . Κάποιες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις συμβαίνουν κοντά στην αιχμή του ρήγματος εργοδιάβρωσης στα κράματα αλουμινίου, όπως το εξής:



Τα ιόντα Al^{+++} υδρολύονται από την αντίδραση:



Αν δημιουργείται ένας λάκκος διάβρωσης, μία σχισμή από περικρυσταλλική διάβρωση, ή ένα ρήγμα εργοδιάβρωσης, η χημεία μέσα στην ρωγμή θα αλλάξει σχετικά με αυτήν του διαλύματος. Το σχήμα 1.8 δίνει ένα παράδειγμα πιθανών χημικών αντιδράσεων ενός ρήγματος σε κράμα αλουμινίου που είναι εμβαπτισμένο σε υγρό διάλυμα χλωρίου.

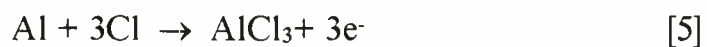


Σχήμα 1.8: Πιθανές αντιδράσεις κοντά στην αιχμή του ρήγματος εργοδιάβρωσης σε κράματα αλουμινίου σε υγρό διάλυμα χλωρίου.

Κοντά στην αιχμή του ρήγματος γίνεται η διάλυση του αλουμινίου και σχηματίζεται το Al^{3+} . Ένα μέρος του ρεύματος μεταφέρεται από την αιχμή του ρήγματος στο κύριο όγκο του διαλύματος μέσω των ιόντων αλουμινίου, και ένα άλλο μέρος του ρεύματος μεταφέρεται από τα ιόντα χλωρίου που βρίσκονται στην ατέλεια, προς την αιχμή της ατέλειας. Αν ένα μέρος των Al^{3+} παραμείνει στην περιοχή της αιχμής, στο διάλυμα θα συγκεντρωθεί και τελικά θα κορεστεί σε $AlCl_3 \cdot H_2O$, όπως φαίνεται από το σχήμα 1.8.

Ωστόσο, δεν είναι γνωστό μέχρι ποια έκταση, ο σχηματισμός του οξειδίου σύμφωνα με την εξίσωση 1 και ο σχηματισμός χλωριδίου

του αλουμινίου σύμφωνα με την επόμενη εξίσωση, συναγωνίζεται στην αιχμή του ρήγματος ή κοντά της.



Ο σχηματισμός του στερεού στρώματος του $\text{AlCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ στην αιχμή του ρήγματος επομένως είναι μία υπόθεση⁽⁵⁾.

1.4. ΤΡΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ (PITTING)

Όπως φάνηκε από τον πίνακα 1.5, η τρηματική διάβρωση είχε το ποσοστό του 12% στις αιτίες εκκίνησης του ρήγματος εργοδιάβρωσης, και στο πείραμα που εκτελέστηκε, τα δοκίμια έδειξαν σοβαρή τρηματική διάβρωση, γι' αυτό θα γίνει μια αναφορά σε αυτό το είδος διάβρωσης.

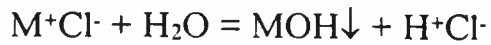
Είναι μία τοπική διάβρωση που εμφανίζεται σαν τρύπες ή λάκκοι στα μέταλλα, αυτές οι τρύπες μπορεί να είναι μικρές ή μεγάλες σε διάμετρο αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις είναι σχετικά μικρές.

Οι λάκκοι είναι απομονωμένοι ή τόσο κοντά μεταξύ τους έτσι που φαίνονται σαν ανωμαλία στην επιφάνεια, γενικά ο λάκκος (pit) μπορεί να περιγραφεί σαν κοίλωμα ή τρύπα που έχει επιφανειακή διάμετρος σχεδόν το ίδιο ή λιγότερο από το βάθος.

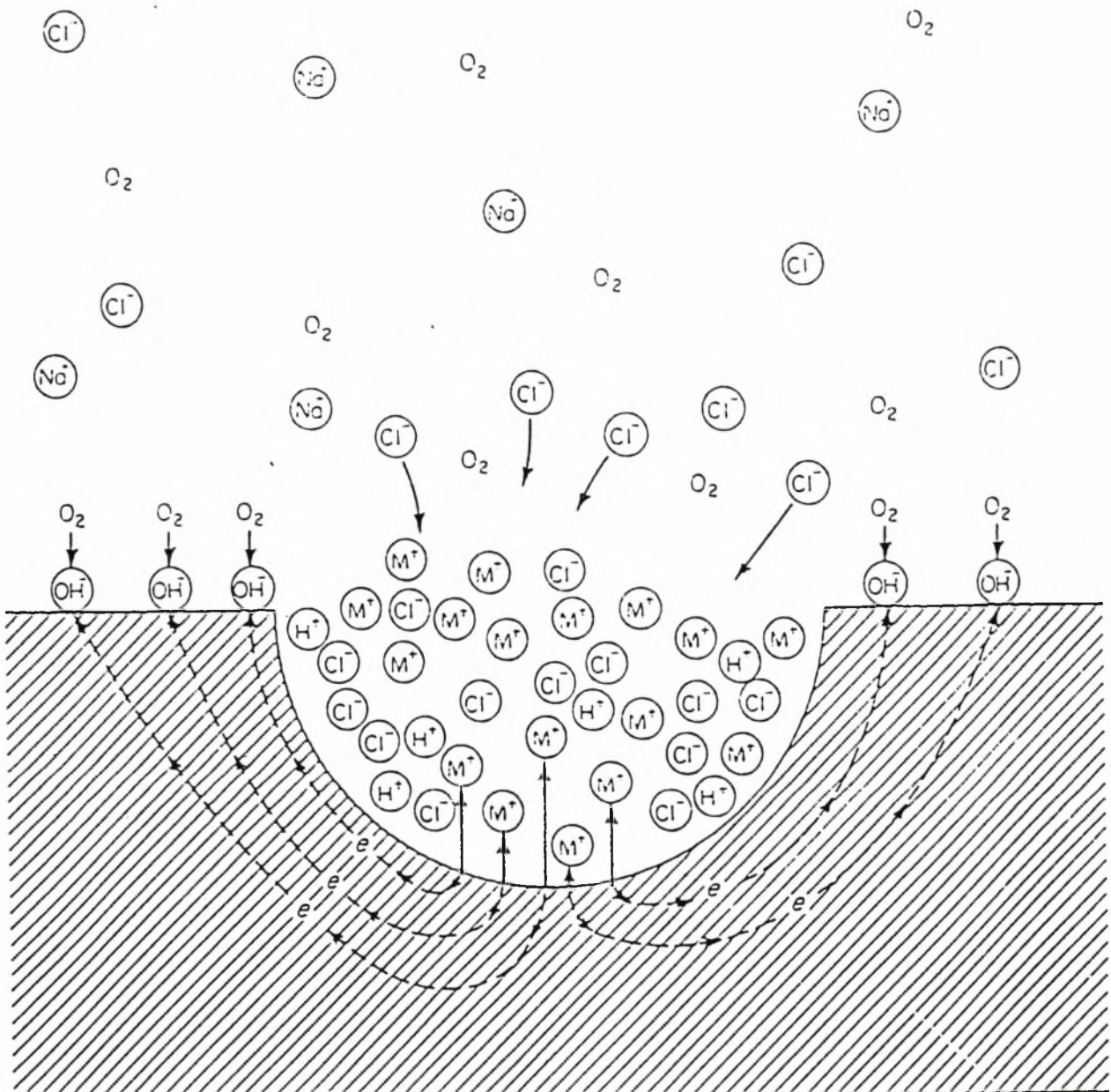
Η τρηματική διάβρωση είναι πολύ επικίνδυνη, επειδή μπορεί να φέρει αστοχία σε μία κατασκευή λόγω της διάτρησης με μικρό ποσοστό μείωσης του βάρους της κατασκευής. Είναι συχνά δύσκολο να ανιχνευθούν οι λάκκοι λόγω του μικρού μεγέθους τους και ότι οι λάκκοι είναι καλυμμένοι με προϊόντα διάβρωσης, είναι επίσης δύσκολο να ποσοτικοποιήσουμε και να συγκρίνουμε το μέγεθος της ζημιάς της τρηματικής διάβρωσης λόγω της ποικιλίας στα βάθη και της ποσότητας των λάκκων κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

Η τρηματική διάβρωση είναι μία εξαιρετική ανοδική αντίδραση, είναι μια αυτοκαταλυτική διεργασία, δηλ. η διεργασία της διάβρωσης μέσα στο λάκκος παράγει κάποιες συνθήκες που είναι απαραίτητες για το συνεχές έργο του λάκκου, αυτό φαίνεται στο σχήμα 1.9, όταν ένα μέταλλο Μ εμβαπτίζεται σε αραιό διάλυμα χλωριούχου νατρίου έχουμε την δημιουργία των λάκκων, καθώς και γρήγορη διάλυση του μετάλλου μέσα στο λάκκος και την αναγωγή του οξυγόνου σε προσκείμενες επιφάνειες. Με την μεγάλη διάλυση του μετάλλου μέσα στους λάκκους τείνει να έχουμε θετική φόρτιση σ' αυτήν την περιοχή με αποτέλεσμα

την φυγή των ιόντων χλωρίου Cl^- στον λάκκο και την μεγάλη συγκέντρωση του M^+Cl^- που με το νερό έχοντας υδρόλυση με αποτέλεσμα την μεγάλη συγκέντρωση των ιόντων υδρογόνου όπως το εξής:

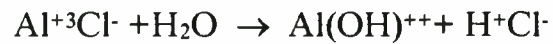


Τα δύο ιόντα, χλωρίου και υδρογόνου επιταχύνουν την διάλυση των περισσότερων μετάλλων και κραμάτων δηλαδή επιταχύνουν την ανοδική αντίδραση.



Σχήμα 1.9: Η αυτοκαταλυτική διεργασία που λαμβάνει χώρα στο λάκκος διάβρωσης.

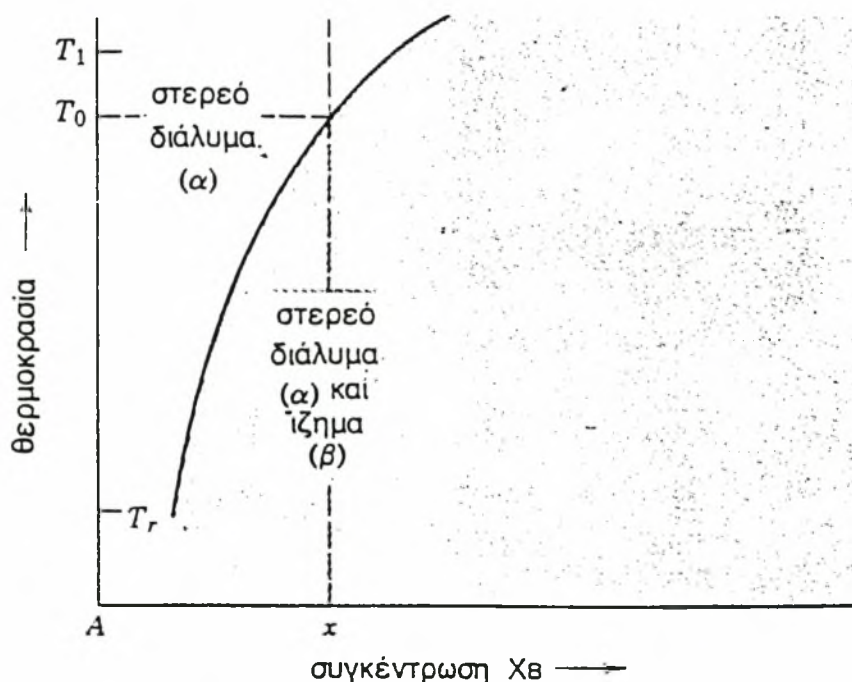
Σε ένα κράμα αλουμινίου οι αντιδράσεις της διάβρωσης θα είναι οι εξής:



Η τρηματική διάβρωση (Pitting) συσχετίζεται συνήθως με στάσιμες συνθήκες, όπως ένα υγρό σε μία δεξαμενή. Με την αύξηση της ταχύτητας μειώνεται η δημιουργία των λάκκων άρα και η τρηματική διάβρωση⁽³⁾.

1.5. ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕ ΚΑΘΙΖΗΣΗ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Σε πολλά διμερή συστήματα και κυρίως σε μεταλλικά κράματα η διαλυτότητα ενός ή και των δύο συστατικών στην κανονική φάση του άλλου συστατικού μικραίνει με την πτώση της θερμοκρασίας. Η περίπτωση αυτή φαίνεται καθαρά στο σχήμα 1.10.



Σχήμα 1.10: Μέρος του διαγράμματος φάσεων για ένα κράμα που παρουσιάζει σκλήρυνση από καθίζηση νέας (θυγατρικής) φάσης.

Υλικό με σύσταση x μπορεί να υπάρξει σαν μονοφασικό στερεό διάλυμα πάνω από την θερμοκρασία T_0 . Αν η θερμοκρασία πέσει ξαφνικά από την T_0 , το στερεό διάλυμα είναι υπερκορεσμένο και θα προσπαθήσει να φτάσει την θέση ισορροπίας με σχηματισμό καθίζησης β φάσης μέσα στην φάση α .

Η καθίζηση της β φάσης είναι μία άλλη περίπτωση του φαινομένου πυρήνωσης και ανάπτυξης. Επειδή η φάση β είναι πλουσιότερη στο συστατικό Β από την φάση α , για να σχηματισθεί η β

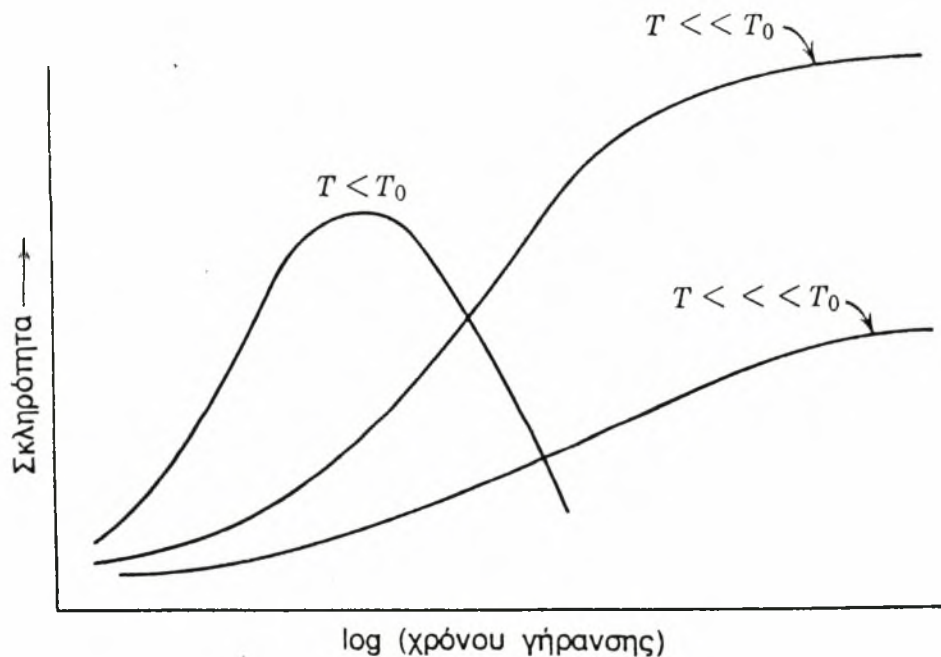
φάση, είναι φανερό ότι θα χρειαστεί μεταφορά μάζας του συστατικού Β από την φάση β στην φάση α. Καθίζηση χονδρόκοκκης φάσης β θα συμβεί, αν η καθίζηση γίνει σε υψηλές θερμοκρασίες, και λεπτόκοκκης, αν γίνει σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αν η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή τότε η ταχύτητα σχηματισμού πυρήνων της φάσης β είναι ανεπαίσθητη και ο μετασχηματισμός δεν γίνεται ενώ η φάση α παραμένει υπερκορεσμένη.

Στην πράξη με χρήση ελεγχόμενης καθίζησης έχουν πετύχει να τριπλασιάσουν την ωφέλιμη αντοχή κραμάτων του αλουμινίου και του χαλκού. Τα κράματα αλουμινίου που έχουν αυξημένη σκληρότητα που προκαλείται με γήρανση-καθίζηση (age hardened) χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα στην κατασκευή σκελετών αεροσκαφών. Τα κράματα αυτά του αλουμινίου λέγονται Ντουραλουμίνια και υπάρχουν σε μεγάλη ποικιλία με δεύτερο συστατικό χαλκό, μαγγάνιο, άργυρο, μαγνήσιο, χρώμιο, πυρίτιο, σίδηρο, με βάση πάντα το αλουμίνιο.

Για να αυξηθεί σημαντικά η αντοχή σε θραύση, η φάση που καθιζάνει πρέπει να είναι πολύ λεπτή και ομοιόμορφα διαμοιρασμένη στην μετρική φάση, επειδή το ίζημα πρέπει να έχει διαστάσεις ανάλογες με τις διαστάσεις των γραμμοαταξίων με τις οποίες αντιδρούν τα σωματίδια του ιζήματος. Η διασπορά όμως δεν πρέπει να δώσει πάρα πολύ λεπτά σωματίδια, διότι σ' αυτή την περίπτωση τα πεδία τάσεων που αναπτύσσονται γύρω τους δεν είναι αρκετά αναπτυγμένα. Υπάρχει δηλαδή μια κρίσιμη διασπορά που εξασφαλίζει την μέγιστη αντοχή.

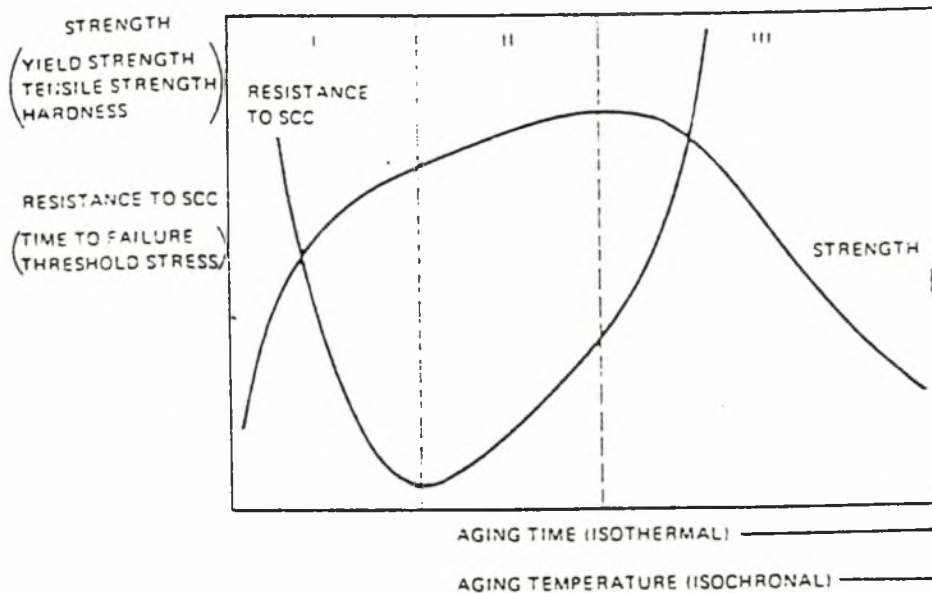
Η γενική διαδικασία αυτής της διεργασίας είναι η εξής : το κράμα στην αρχή θερμαίνεται στην περιοχή όπου ισορροπεί μια φάση και μέχρι να ομογενοποιηθεί, αυτό το στάδιο λέγεται διαλυτοποίηση. Ακολουθεί απότομη ψύξη (βαφή) σε μια θερμοκρασία T_f που είναι αρκετά χαμηλή ώστε να εμποδιστεί η καθίζηση της νέας φάσης όπου το υλικό γενικά εξακολουθεί να είναι κάπως μαλακό για όσο διάστημα διατηρείται σ' αυτή τη θερμοκρασία. Αργότερα η σκληρότητα του υλικού ανεβαίνει με τεχνητή γήρανση σε μία ψηλότερη κάπως θερμοκρασία. Κατάλληλη εκλογή των δυο μεταβλητών, δηλαδή χρόνου

και θερμοκρασίας γήρανσης εξασφαλίζει και το κατάλληλο μέγεθος κόκκου του ιζήματος. Το σχήμα 1.11 περιγράφει αυτή τη διεργασία σε γενικές γραμμές. Η σκληρότητα δίνεται σαν συνάρτηση του χρόνου μέτρησης ή της γήρανσης του υλικού. Αν η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή ($T \ll T_0$), δεν είναι δυνατή η κρίσιμη διασπορά, αν και η σκληρότητα αυξάνει με το πέρασμα του χρόνου και αυτό επειδή μεγαλώνει το μέγεθος των σωματιών του ιζήματος. Αν η θερμοκρασία στην οποία γίνεται η γήρανση είναι πολύ ψηλή, το ίζημα είναι πολύ χονδρόκοκκο. Η αρχική αύξηση της σκληρότητας μπορεί να εξαφανισθεί, αν το μέγεθος των σωματιών του ιζήματος μεγαλώνει πολύ, το φαινόμενο αυτό λέγεται υπεργήρανση. Είναι φανερό ότι με Κατάλληλη εκλογή της θερμοκρασίας ($T \ll T_0$) ή όλη διαδικασία θα δώσει την μέγιστη σκληρότητα. Η υπεργήρανση είναι δυνατό να αποκλεισθεί με βαφή ή και απλή ψύξη, αφού βέβαια σχηματισθεί το επιθυμητό ίζημα⁽⁶⁾.



Σχήμα 1.11: Η επίδραση της θερμοκρασίας γήρανσης στην σκλήρυνση με γήρανση.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι όταν γίνεται η σκλήρυνση με καθίζηση στην ατμόσφαιρα ή σε μεγαλύτερη θερμοκρασία, μπορεί να αυξήσει την ευαισθησία των κραμάτων αλουμινίου σε ρηγμάτωση λόγω εργοδιάβρωσης, η μέγιστη ευαισθησία παρατηρείται πριν από την μέγιστη αντοχή που φτάνει στην σκλήρυνση με καθίζηση. Η γήρανση όμως σε μεγάλες θερμοκρασίες (υπεργήρανση) μπορεί να αυξήσει την αντίσταση στην ρηγμάτωση λόγω εργοδιάβρωσης, αυτό φαίνεται στο σχήμα 1.12, όπου αυτό το διάγραμμα είναι βασισμένο σε χιλιάδες πειράματα εργοδιάβρωσης σε πολλά ερευνητικά κέντρα και εργαστήρια⁽⁵⁾.



Σχήμα 1.12: Μεταβολή της αντοχής και της αντίστασης σε εργοδιάβρωση κατά την διάρκεια της γήρανσης σε κράματα αλουμινίου.

Από αυτό το διάγραμμα έχει γίνει σημαντική πρόοδος για να βρεθούν κράματα αλουμινίου μεγάλης αντοχής με σημαντική αντίσταση στο SCC.

1.6. ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η Περικρυσταλλική διάβρωση (Intergranular corrosion), είναι ένα είδος διάβρωσης που συμβαίνει στα όρια των κόκκων, δηλαδή τα όρια των κόκκων είναι ανοδικά σχετικά με το εσωτερικό τους και αυτό οφείλεται στην διαφορά δυναμικού που υπάρχει μεταξύ τους.

Όπως είναι γνωστό, η σκλήρυνση των κραμάτων αλουμινίου εξαρτάται από την φάση που καθιζάνει, και γενικά τα κράματα αλουμινίου είναι ευαίσθητα σε αυτό το είδος διάβρωσης.

Η εργοδιάβρωση στα κράματα αλουμινίου είναι χαρακτηριστικά περικρυσταλλική, οι λεπτομέρειες για αυτήν τη διεργασία της περικρυσταλλικής εργοδιάβρωσης στα κράματα αλουμινίου είναι πολύ πολύπλοκη και διαφέρει από σύσταση σε σύσταση.

ΔΕΥΤΕΡΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΔΕΥΤΕΡΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.1. Γενικά για τις μεθόδους δοκιμής και ερμηνεία των δεδομένων των δοκιμών

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι πειραμάτων για την ερμηνεία της ρηγματώσεως λόγω εργοδιάβρωσης (SCC), και θα αναλυθούν παρακάτω:

I. Δοκιμή λειασμένου δοκιμίου υπό σταθερά φορτία

Υπάρχουν περιπτώσεις στην μηχανολογία όπου ολόκληρο το εξάρτημα επιλέγεται σαν δοκίμιο. Ειδικά όταν η θεωρία είναι ατελής, θα ήταν προτιμότερο να γίνουν δοκιμές που μοιάζουν σε κάθε πιθανή λεπτομέρεια με την πραγματική κατάσταση. Είναι δύσκολο όμως να βρίσκονται πάντοτε τα ιδανικά δοκίμια-εξαρτήματα.

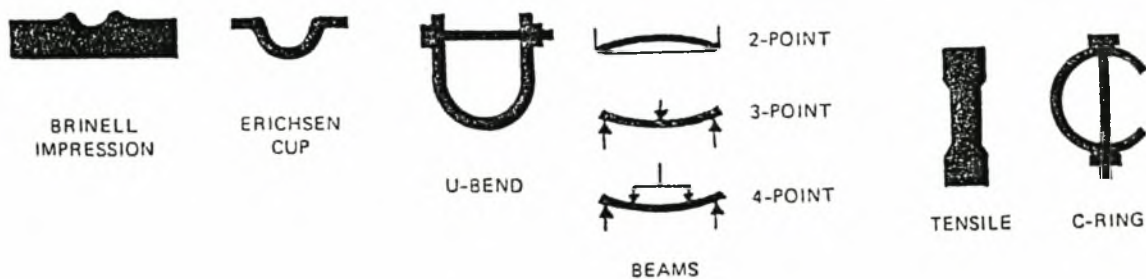
Για παράδειγμα είναι οικονομικά αδύνατο να γίνουν τεστ SCC σε ένα ολόκληρο κέλυφος αεροπλάνου. Συνεπώς είναι απαραίτητο να επιλέξουμε μικρότερα δοκίμια, τα οποία θα δώσουν την απαιτούμενη ικανότητα πρόβλεψης και για μεγάλες κατασκευές ή εξαρτήματα.

Μία τέτοια ομάδα δοκιμίων που χρησιμοποιούνται συχνά, έχει ένα φάσμα τάσεων σε κάθε δοκίμιο, που συνήθως μεταβάλλεται από το όριο ροής ως το μηδέν. Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο δοκίμιο αυτής της κατηγορίας είναι το δοκίμιο U-bend (βλέπε σχήμα 1) που κατασκευάζεται λυγίζοντας μια μεταλλική λωρίδα σε σχήμα U και συγκρατώντας τα άκρα με κάποιο κοχλία ή με άλλο μέσο. Αν χρειάζεται, το δοκίμιο U-bend μπορεί να τέτοιες διαστάσεις ώστε να αποφύγουμε την πλαστική παραμόρφωση και να προκαλέσουμε μόνο ένα φάσμα ελαστικών τάσεων.

Άλλα δοκίμια αυτής της κατηγορίας έχουν την μορφή μεταλλικού φύλλου ή δίσκου τα οποία μπορούν να φορτιστούν από την διύσδηση ενός διεσδυτή σκληρότητας Brinell ή από ένα έμβολο δοκιμής του «κυπέλλου» του Erichsen. Αυτά τα αυτοφορτισμένα δοκίμια είναι

κατάλληλα για να μπουν σε ρεύματα μάζας χημικών διεργασιών, όμως δεν δίνουν μια καλή ποσοτική εικόνα της εξάρτησης του ρήγματος από τις τάσεις.

Για να καθορισθεί η εξάρτηση από τις τάσεις, συνήθως χρησιμοποιείται στην πράξη ένα δοκίμιο μίας δοκού υπό κάμψη, ή ένα δοκίμιο μονοαξονικού εφελκυσμού τα οποία μπορούν να υποστούν αρκετά μεγάλη φόρτιση σε κάποιο τεστ, τα δοκίμια αυτά φαίνονται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Λειασμένα δοκίμια για τα πειράματα της SCC.

Εάν το περιβάλλον πού μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε είναι γνωστό, για παράδειγμα μη μολυσμένο θαλασσινό νερό, ή ένα ρεύμα κάποιας χημικής διεργασίας πού ξέρουμε την σύστασή του, τότε το περιβάλλον πού επιλέγεται για να κάνουμε το τεστ θα είναι αυτό πού θα υπάρχει και στην πραγματική λειτουργία. Εάν όμως το πραγματικό περιβάλλον λειτουργίας δεν είναι πλήρως καθορισμένο και γνωστό, όπως στην περίπτωση ενός αεροσκάφους, τότε η επιλογή του περιβάλλοντος για το τεστ δημιουργεί προβλήματα, τα οποία δεν έχουν απαντηθεί ικανοποιητικά, (εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο τέλος αυτού του κεφαλαίου θα μας απασχολήσει αυτό το πρόβλημα, δηλαδή κατά πόσο το διάλυμα του 3.5% χλωριούχου νατρίου (NaCl) πού χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα αυτής της εργασίας είναι ικανοποιητικό για την προσομοίωση του περιβάλλοντος των αεροπλάνων).

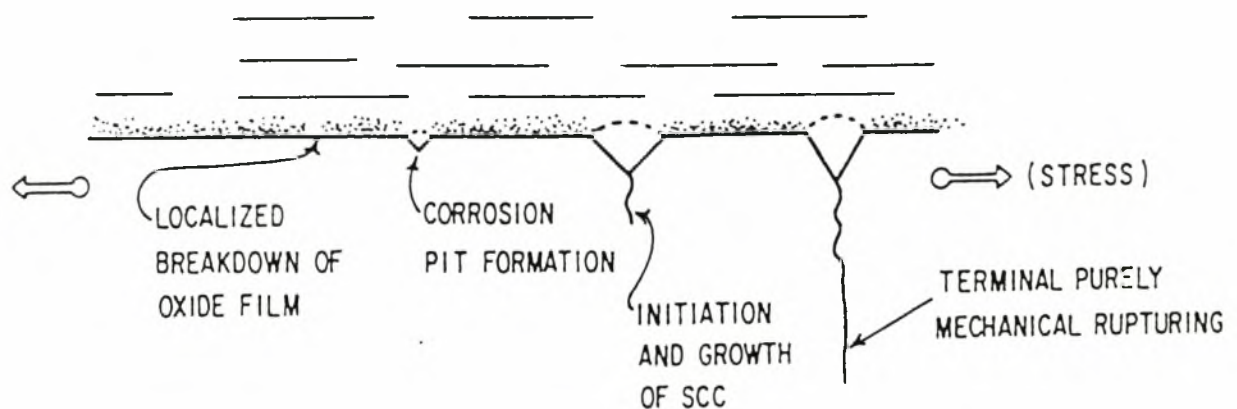
Το ερώτημα που γεννάται γενικά είναι ότι θα πρέπει να γίνει το τεστ με τις «χειρότερες συνθήκες» περιβάλλοντος, περιλαμβάνοντας την χειρότερη θερμοκρασία και το χειρότερο ηλεκτροχημικό δυναμικό. Υπάρχουν δύο προβλήματα εδώ :πρώτον, δεν γνωρίζουμε ποίες είναι οι χειρότερες συνθήκες για όλα τα κράματα, και δεύτερο, το να κάνουμε τεστ σε κάποια υλικά με τις χειρότερες συνθήκες περιβάλλοντος θα οδηγούσε πιθανότατα σε μια απόρριψη πολλών κραμάτων .

Παρόλη λοιπόν την σημασία πού μπορεί να έχει κάποιο τεστ χρησιμοποιώντας τις χειρότερες συνθήκες περιβάλλοντος, αυτές στην πράξη δεν έχουν ευρεία εφαρμογή ακόμα και για εκείνες τις οικογένειες κραμάτων πού θεωρείται ότι έχουν βρεθεί κάποιες συνθήκες του περιβάλλοντος πού την πλησιάζει στις χειρότερες.

Για τους λόγους πού αναφέρθηκαν παραπάνω, δεν χρησιμοποιούνται οι « χειρότερες συνθήκες» του περιβάλλοντος. Αντίθετα , για να γίνει γενικός χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων του SCC, ο τρόπος πού χρησιμοποιείται συχνότερα είναι να επιλεγθεί κάποια φυσικά περιβάλλοντα (π.χ. ατμόσφαιρα, θαλασσινό νερό), ή εναλλακτικά να χρησιμοποιούνται τυποποιημένα διαλύματα, τα οποία υπάρχουν πολλά πού ανήκουν στα τυποποιημένα περιβάλλοντα της ASTM (American Society for Testing and Materials) π.χ. :G36-73 για την δημιουργία ρηγμάτων σε ανοξείδωτους χάλυβες μέσα σε διάλυμα χλωριούχου μαγνησίου πού βράζει, G35-73 για την δημιουργία ρηγμάτων σε ανοξείδωτους χάλυβες μέσα σε πολυθειονικά οξέα (polythionic acids), G37-73 για δημιουργία ρηγμάτων σε κράματα χαλκού-ψευδαργύρου μέσα σε διάλυμα Mattsson, και G44-75 για τεστ διαδοχικών εμβαπτίσεων μέσα σε διάλυμα NaCl σε θερμοκρασία δωματίου.

Στην γενική περίπτωση η σειρά των γεγονότων σε ένα τεστ δημιουργίας ρήγματος λόγω εργοδιάβρωσης (SCC) πάνω σε ένα δοκίμιο που αρχικά είναι λειασμένο φαίνεται από τα αριστερά προς τα δεξιά στο σχήμα 2.2.

Τα περισσότερα μέταλλα καλύπτονται από λεπτά στρώματα, συνήθως οξειδία, τα οποία μπορούν να λειτουργούν προστατευτικά εναντίον της διάβρωσης, αρκεί να παραμένουν άθικτα. Το πρώτο βήμα στην διεργασία του (SCC) είναι το σπάσιμο αυτού του λεπτού στρώματος, που μπορεί να οφείλεται είτε σε μηχανική ζημιά, είτε σε ηλεκτρικό ρεύμα, όμως συνήθως ο κυριότερος λόγος που σπάει το λεπτό στρώμα είναι η δράση συγκεκριμένων χημικών ειδών του περιβάλλοντος, και ειδικότερα του ιόντος του χλωρίου Cl⁻.



Σχήμα 2.2: Γενική ακολουθία των γεγονότων στην ρηγμάτωση λόγω εργοδιάβρωσης, από αριστερά έως δεξιά.

Αφού σπάσει το λεπτό προστατευτικό στρώμα, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί ένας λάκκος λόγω διάβρωσης. Σε κάποιους συνδυασμούς περιβάλλοντος και κραμάτων η δημιουργία ρήγματος μπορεί να ξεκινήσει και χωρίς να έχουμε την εμφάνιση λάκκων, συνήθως όμως έχουμε σε μεγάλο ποσοστό αστοχιών, ένας λάκκος διάβρωσης προηγείται του SCC. Ο λάκκος παίζει τον ρόλο του ενισχυτή τάσεων (αυξάνει τις τάσεις στο σημείο που βρίσκεται), αλλά επιτελεί και έναν δεύτερο και ίσως πιο σημαντικό ρόλο σε κάποια συστήματα : το διαβρωμένο υλικό μέσα στο λάκκο αρχίζει και διαφέρει από το υλικό του κυρίως όγκου, εξαιτίας μίας ομάδας αντιδράσεων γνωστές στην χημεία ως υδρόλυση.

Μια τέτοια αντίδραση που περιλαμβάνει ένα από τα προϊόντα της διάβρωσης του ανοξειδωτου χάλυβα είναι :



Επομένως τα ιόντα υδρογόνου που παράγονται προκαλούν τοπικά οξύτητα μέσα στον λάκκο διάβρωσης, και η οξύτητα αυτή είναι τόσο σημαντική όσο και η αύξηση των τάσεων στον λάκκο στο να προκαλέσουν το ξεκίνημα του SCC.

Επιστρέφοντας στην σειρά των γεγονότων του σχήματος 2.2, εάν το φορτίο δεν χαλαρώσει καθώς το ρήγμα της εργοδιάβρωσης μεγαλώνει, σταδιακά η τάση στο μέρος του υλικού που δεν έχει εμφανίσει ρήγμα αυξάνεται, μέχρι που το υλικό να θραυτεί μηχανικά. Αυτή η τελική θραύση μπορεί να είναι είτε όλκιμη θραύση λόγω υπερφόρτιση, είτε ψαθυρή θραύση, εξαρτάται από την φύση του κράματος, την γεωμετρία του τεμαχίου και την θερμοκρασία.

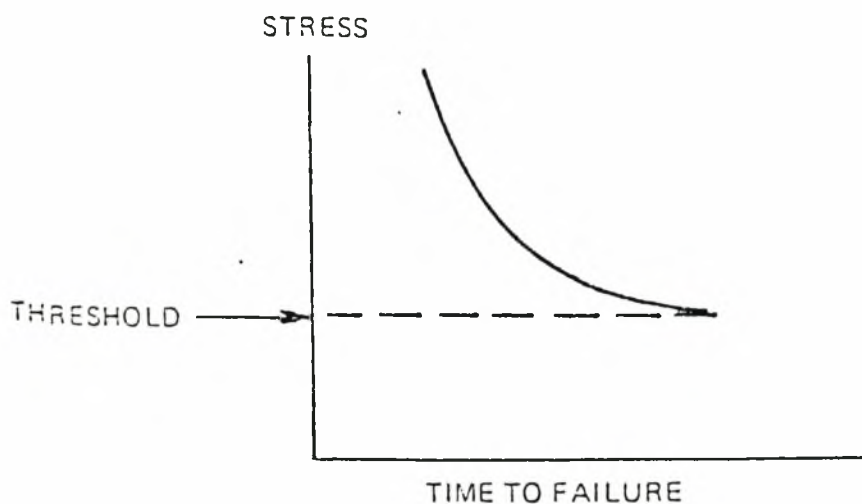
Σε ένα τεστ με λειασμένο δοκίμιο, η παράμετρος που μετριέται είναι ο χρόνος από την αρχή του τεστ μέχρι την αστοχία. ως αστοχία μερικές φορές εννοείτε η εμφάνιση κάποιου ρήγματος που να μπορεί να αναγνωρισθεί. Σε αυτήν την περίπτωση ο συνολικός χρόνος ως την αστοχία αντιπροσωπεύει (για την γενική περίπτωση) το άθροισμα των χρόνων για το σπάσιμο προστατευτικού λεπτού στρώματος, για την έναρξη και ανάπτυξη των «λάκκων» και για την έναρξη και ανάπτυξη του SCC μέχρι κάποιο αυθαίρετο μήκος ρήγματος που ορίζεται.

Εάν ως αστοχία ορίζεται η θραύση του δοκιμίου, στην περίπτωση αυτή η φύση της τελικής θραύσης έχει σημαντική συνεισφορά στον καθορισμό του συνολικού χρόνου ως την αστοχία.

Για να δοθεί έμφαση στις ελλείψεις που παρουσιάζει ο συνολικός χρόνος ως την αστοχία σαν μία παράμετρος του SCC, να σημειωθεί ότι το μέγεθος του χρόνου αυτού δεν εξαρτάται μόνο από παράγοντες της κινητικής του SCC, αλλά και από παράγοντες εκτός SCC όπως το μέγεθος και η γεωμετρία του δοκιμίου, η ολκιμότητα του μετάλλου, η αρχική φόρτιση και η συμπεριφορά κατά την έναρξη του τεστ.

Παρά αυτές τις ελλείψεις που παρουσιάζει η παράμετρος του συνολικού χρόνου ως την αστοχία για δοκίμια που είναι αρχικά λειασμένα, η παράμετρος αυτή αποτελεί την βάση αρχών όπου πάνω της στηρίζεται η τεχνολογία ελέγχου του SCC που διατίθεται μέχρι τώρα.

Αυτή η παράμετρος, του χρόνου ως την αστοχία, όταν μπει σε ένα διάγραμμα σαν συνάρτηση της αρχικής φόρτισης τυπικά παρουσιάζει την εικόνα που φαίνεται στο σχήμα 2.3, δηλαδή μία οριζόντια ασυμπτωτική, η οποία συνήθως συμβολίζεται με την τάση «κατώφλι» (threshold) σ_{th} . Αυτή η προφανής τάση κατώφλι είναι σημαντική για τον καθορισμό σειρών αξιολόγησης των κραμάτων ή των περιβαλλόντων.



Σχήμα 2.3: Ο χρόνος ως την αστοχία σαν συνάρτηση της αρχικής φόρτισης, σε λειασμένα δοκίμια σε πείραμα εργοδιάβρωσης, όπου φαίνεται η τάση κατωφλίου σ_{th} .

II. Δοκίμια με ρήγματα που προϋπάρχουν κάτω από στατική φόρτιση:

Η ύπαρξη μιας ρηγματοειδούς επιφανειακής ατέλειας μεταβάλλει τελείως την ανάλυση της συμπεριφοράς του SCC κάποιου ρήγματος, επειδή το αν η ατέλεια επεκταθεί σε ένα ρήγμα εργοδιάβρωσης εξαρτάται όχι μόνο από την φύση του κράματος και του

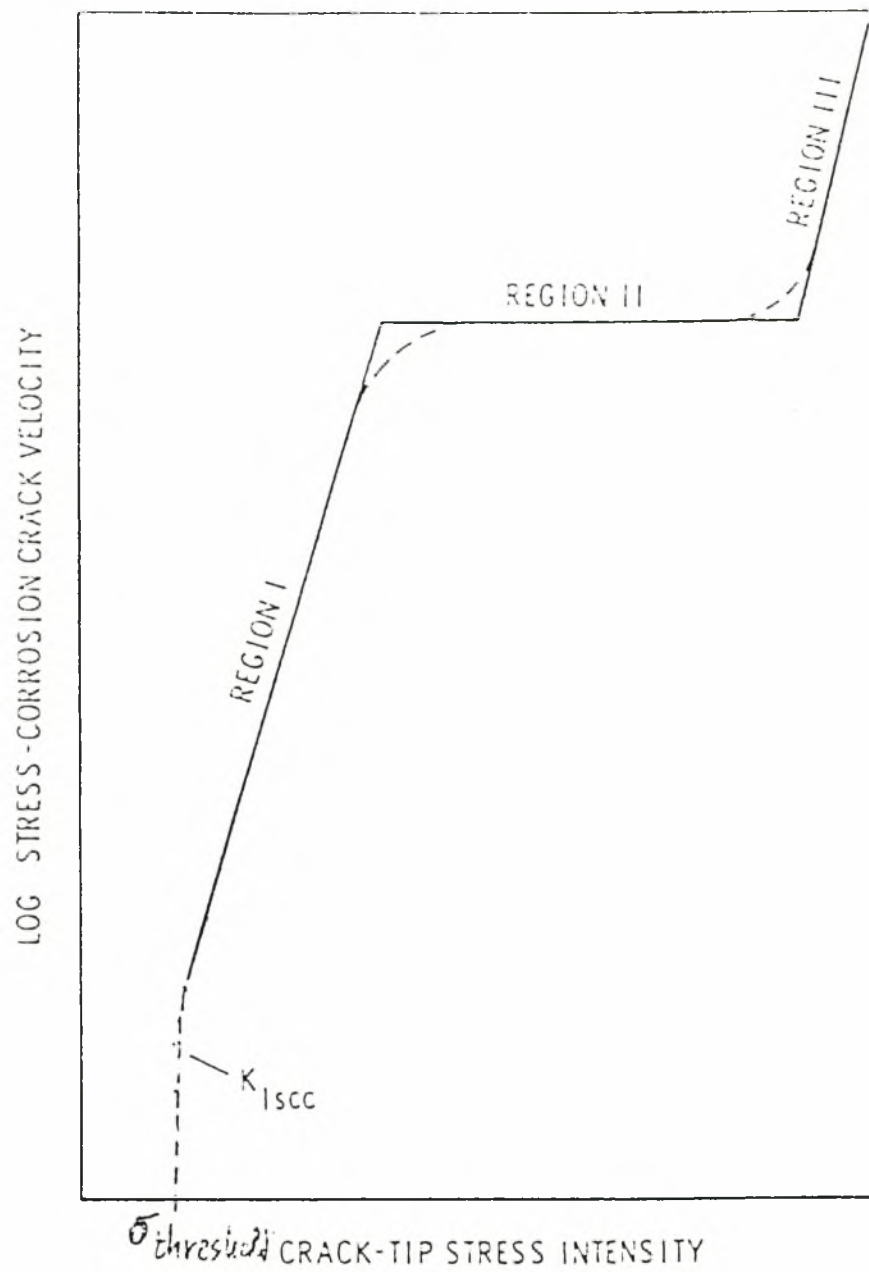
περιβάλλοντος και από το μέγεθος των τάσεων, αλλά εξαρτάται και από το βάθος της αρχικής ρηγματοειδούς ατέλειας.

Με την παρουσία κάποιας ρηγματοειδούς ατέλειας ή κάποιου ρήματος εργοδιάβρωσης, η ονομαστική τάση γίνεται κάτι το φανταστικό πού μπορεί να παραπλανήσει, και προς το παρόν η συμπεριφορά ενός σώματος που περιέχει ρήγματα όταν αυτό υποστεί φόρτιση μπορεί να περιγραφεί ποσοτικά μόνο από την θραυσομηχανική.

Τα ρήγματα εργοδιάβρωσης είναι ψαθυρά, επειδή στο μεγαλύτερο μέρος τους εμφανίζονται προτού ξεκινήσει μια γενικότερη πλαστική ροή, ενώ ο κυρίως όγκος του μετάλλου βρίσκεται ακόμη στην ελαστική περιοχή. Συνεπώς είναι κατάλληλο να χρησιμοποιηθούν οι γραμμικές ελαστικότητας εξισώσεις των Irwin-Kies για το SCC, ακόμα και για μέταλλα που είναι πολύ όλκιμα ώστε να μην μπορούν πρακτικά να μετρηθούν οι ιδιότητες (μηχανικές) με τις μεθόδους την θραυσομηχανικής.

Όταν ένα κομμάτι μετάλλου, το οποίο περιέχει ένα ρήγμα, φορτιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να τείνει να ανοίξει και να προωθήσει το ρήγμα, τότε η ονομαστική τάση εντείνεται κοντά στην κορυφή του ρήματος. Οι ερευνητές της ελαστικότητας έδωσαν τα μέσα ώστε να ποσοτικοποιηθεί αυτή ένταση τάσεων, που συμβολίζεται με K και έχει μονάδες $MN^{-3/2}$.

Εάν κάποιος μετρήσει το ρυθμό ανάπτυξης του SCC (δηλαδή την ταχύτητα με την οποία προωθείται το ρήγμα) σαν συνάρτηση του K τότε η γενική εικόνα φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 2.4 της επομένης σελίδας.



Σχήμα 2.4: Η Επίδραση της έντασης τάσης στην κινητική της ρηγμάτωσης εργοδιάβρωσης.

Πίνακας 2.1: Τιμές του συντελεστή ϕ^2

$\frac{a}{b}$	ϕ^2
0 (very long, thin crack)	1.00
.25	1.14
.5	1.45
.75	1.89
1.0 (semicircular)	2.46

Από το διάγραμμα του σχήματος 2.4 φαίνεται στην περιοχή II ότι ο ρυθμός ανάπτυξης του ρήγματος είναι υψηλός και ανεξάρτητος του K . Σε χαμηλότερες τιμές του K , στην περιοχή I, ο ρυθμός ανάπτυξης του ρήγματος γίνεται πολύ ευαίσθητος στις αλλαγές του K , σε κάποια πολύ χαμηλή τιμή του K εμφανίζεται ένα «κατώφλι», το οποίο συμβολίζεται με K_{ISSC} .

Η τιμή μιας τέτοιας παραμέτρου όπως το K_{ISSC} , όπου υπάρχει το «κατώφλι» έγκειται στην ικανότητα να προβλέπεται ο συνδυασμός της ονομαστικής τάσης και του μεγέθους της ρηγματοειδούς επιφανειακής ατέλειας, χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Irwin:

$$K^2 = 1.2 \pi \sigma^2 a / \phi^2 - 0.212(\sigma/\sigma_y)^2 \rightarrow 1$$

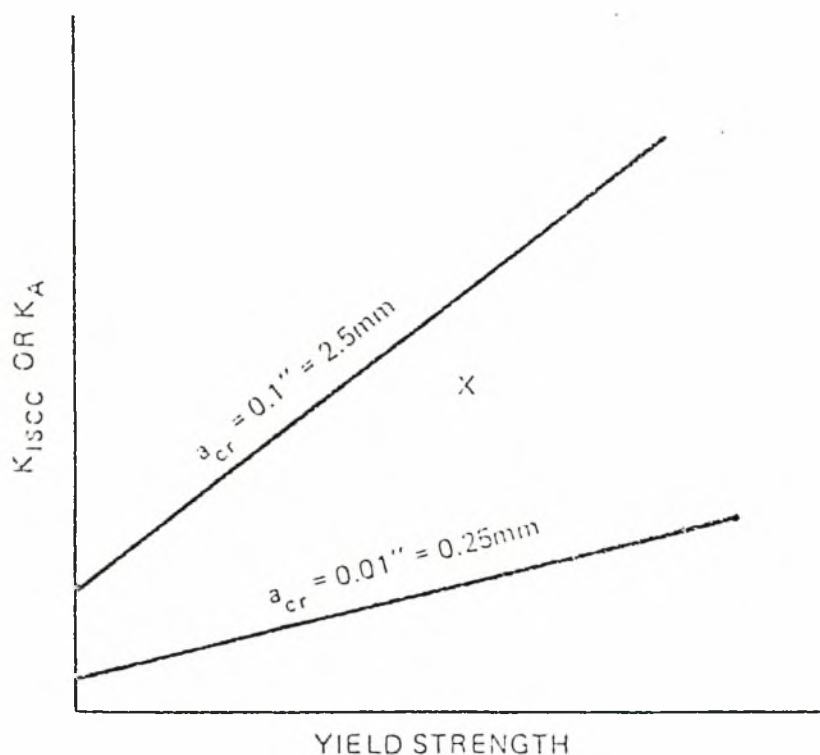
Όπου a είναι το βάθος του ρήγματος, σ είναι η τάση, σ_y είναι το όριο ροής, και ϕ είναι ένας συντελεστής για το σχήμα του ρήγματος. Εάν το μήκος του ρήγματος είναι $2b$, τότε το ϕ^2 παίρνει τιμές που φαίνονται στον πίνακα 2.1 της προηγούμενης σελίδας.

Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε μια μακριά και λεπτή ατέλεια και φορτίζουμε με τάση που αντιστοιχεί στο όριο ροής, τότε από την εξίσωση 1 η εργοδιάβρωση περιμένουμε να προωθηθεί όταν το βάθος της ατέλειας ξεπεράσει την τιμή a_{cr} που είναι :

$$a_{cr} = 0.2(K_{ISSC}/\sigma_y)^2 \rightarrow 2$$

Η τιμή του a_{cr} μπορεί να θεωρείται μια αξιόλογη ποσότητα η οποία συνδυάζει την αντίσταση κατά του SCC, δηλαδή το K_{ISSC} και την συνεισφορά που μπορεί να έχει η τάση του ορίου ροής στον κίνδυνο του SCC λόγω παραμένουσων τάσεων ή τάσεις λόγω συναρμολόγησης.

Κάποιος μπορεί να κάνει διάγραμμα της εξίσωσης 2 για διάφορες τιμές του a_{cr} , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Σχηματική παράσταση της εξίσωσης 2 για δύο τιμές της a_{cr} .

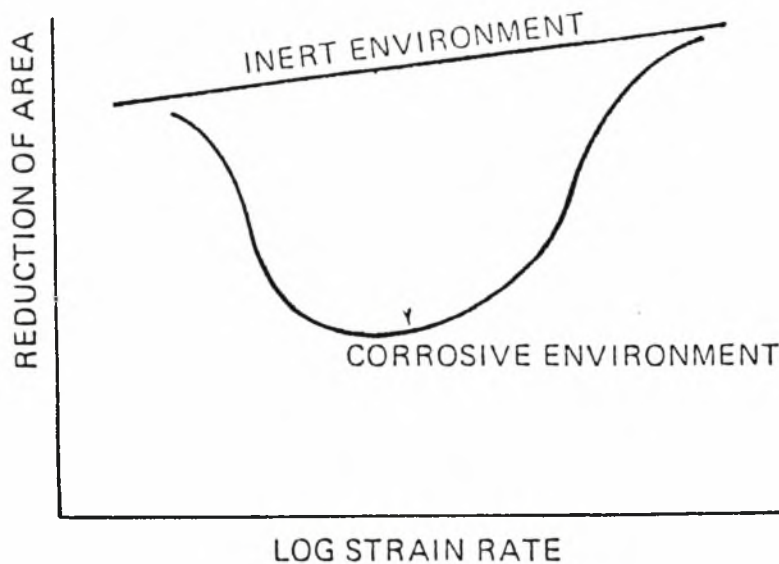
Το διάγραμμα αυτό είναι ένας βολικός τρόπος για να παραστηθούν τα χαρακτηριστικά του SCC των υλικών. Αν για ένα δεδομένο υλικό βρέθηκε ότι έχει το K_{ISCC} στο σημείο x , τότε ένα επιφανειακό ρήγμα βάθους 2.5 mm θα ήταν αρκετά βαθύ ώστε να προωθεί το ρήγμα, στο ίδιο βέβαια περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε για να καθορισθεί και το K_{ISCC} . Αυτό επειδή η γραμμή $a_{cr} = 2.5$ mm βρίσκεται πάνω από το σημείο x . Αντίθετα ένα ρήγμα βάθους 0.25 mm δεν θα μπορούσε να προωθηθεί για το ίδιο υλικό και στο ίδιο περιβάλλον.

Ένα διάγραμμα με δεδομένα για το K_{ISCC} , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με έναν λίγο διαφορετικό

τρόπο : αν κάποιος γνωρίζει ότι δεν μπορεί να ανιχνεύσει και να απομακρύνει ρηγματοειδείς ατέλειες κάτω από, ας πούμε 0.25 mm βάθος, τότε αν γνωρίζει το όριο ροής, πρέπει να επιλέξει ένα υλικό που να έχει K_{ISCC} πάνω από την γραμμή των 0.25 mm.

III. Δοκιμές με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης :

Είναι ένας εντελώς διαφορετικός τρόπος για να αποκτηθούν χαρακτηριστικά του SCC, όπου γίνεται η θραύση μιας σειράς μικρών και λειασμένων δοκιμίων εφελκυσμού, το καθένα με διαφορετικό αλλά με σταθερό ρυθμό, και να μετρηθεί η ελάττωση της επιφάνειας διατομής. (Άλλες παράμετροι μπορεί να σαν δείκτες των επιδράσεων του SCC, όπως η επιμήκυνση ή το όριο θραύσης). Αυτή η σειρά δοκιμίων δοκιμάζεται αρχικά σε αδρανές περιβάλλον και στην συνέχεια στο διαβρωτικό περιβάλλον που μας ενδιαφέρει. Ένα διάγραμμα με αντιπροσωπευτικά δεδομένα τέτοιων δοκιμών φαίνεται στο σχήμα 2.6 και δείχνει την συμπεριφορά ενός κράματος σε ένα περιβάλλον που προκαλεί SCC, σε σύγκριση με την συμπεριφορά του σε αδρανές περιβάλλον. Ο βαθμός του μέγιστου διαχωρισμού των δυο καμπυλών του σχήματος 2.6, αποτελεί την ένδειξη του βαθμού ευαισθησίας του κράματος στο περιβάλλον που προκαλεί τα ρήγματα⁽¹⁾.



Σχήμα 2.6: Παράσταση των αποτελεσμάτων σε τεστ με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης ενός υλικού σε δύο περιβάλλοντα, διαβρωτικό και αδρανές.

2.2. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΚΡΑΜΑ 2024 T3

Το κράμα αλουμινίου 2024 είναι κράμα της σειράς 2000 πού έχει τον χαλκό σαν κύριο ποσοστό στην σύνθεσή του, η αναλυτική χημική σύσταση του κράματος % είναι η εξής :

Πίνακας 2.2: Η χημική σύσταση του κράματος 2024

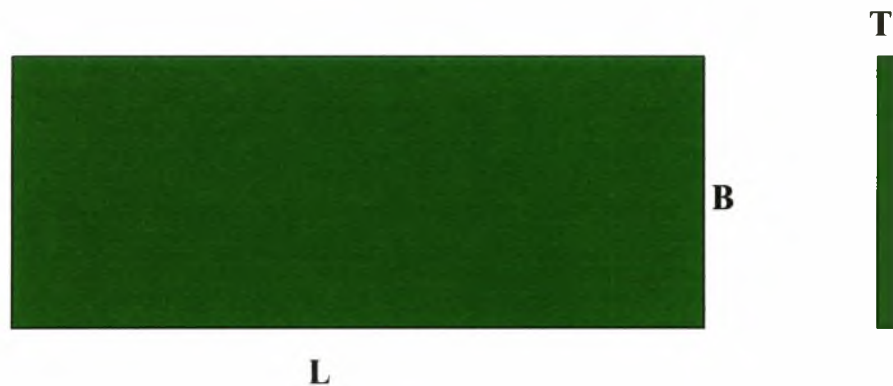
Στοιχείο	Σύμβολο	Χημική σύσταση%
Θείο	Si	0.50 max
Σίδηρο	Fe	0.50 max
Χαλκός	Cu	3.8 min / 4.9 max
Μαγνήσιο	Mn	0.30 min / 0.9 max
Μαγγάνιο	Mg	1.2 min / 1.8 max
Χρόμιο	Cr	0 - 0.10 max
Ψευδάργυρος	Zn	0 - 0.20 max
Τιτάνιο	Ti	0 - 0.10 max
Προσμίξεις	-	0 - 0.15

Το γράμμα T3 μετά από την σειρά δηλώνει ότι το κράμα έχει υποστεί αργή θέρμανση, στην συνέχεια ψυχρή κατεργασία και τέλος φυσιολογική σκλήρυνση με γήρανση σε θερμοκρασία δωματίου.

Τα δοκίμια ήταν ανοδιωμένα (παρακάτω θα αναφερθεί στην ανοδίωση και η σημασία της στα κράματα αλουμινίου)

Η μορφή των δοκιμίων που είχαν σταλεί από την E.A.B. (Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία), και οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος 2024 T3 φαίνονται αναλυτικά στην επόμενη σελίδα.

Η μορφή των δοκιμίων



Μήκος (L) = 100 mm

Πλάτος (B) = 50 mm

Πάχος (T) = 1.8 mm

Οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος 2024 T3 είναι:

Ελάχιστη αντοχή σε εφελκυσμό	Όριο διαρροής σε 0.2%		Επιμήκυνση σε 2 inches ή 4 φορές του ελάχιστου
MPa	Ελάχιστο MPa	Επέκταση υπό φόρτιση	% Ελάχιστο
434	290	0.060	15

• Η ανοδίωση σε κράματα αλουμινίου:

Η ανοδίωση (anodizing) είναι μια βιομηχανική κατεργασία για το σχηματισμό των οξειδίων στο αλουμίνιο, και γίνεται ως εξής: αντικείμενα από αλουμίνιο τοποθετούνται σε ηλεκτρολυτικό λουτρό ως άνοδοι με καθόδους πλάκες από θειικό οξύ (H_2SO_4), και στην άνοδο εκλύεται οξυγόνο. Το οξυγόνο αυτό ενώνεται με το αλουμίνιο και σχηματίζει πολύ σκληρό στρώμα οξειδίου, το οποίο είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού, είναι ανθεκτικό στις χημικές επιδράσεις και μπορεί να χρωματιστεί.

2.3. Η ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ :

Αρχικά θα πρέπει να τονιστεί ότι αυτό το πείραμα είναι μια εισαγωγή στην ρηγμάτωση λόγω εργοδιάβρωσης (Stress Corrosion Cracking) ή SCC, δηλαδή το περιβάλλον που έγινε το πείραμα είναι το ίδιο με το πείραμα του SCC και οι προδιαγραφές του πειράματος ήταν επίσης ίδιες, αυτό που άλλαξε ήταν η μορφή των δοκιμίων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο παράγραφο, και το σημαντικότερο είναι ότι αυτά τα δοκίμια ήταν αφόρτιστα.

Το πείραμα λέγεται πείραμα των διαδοχικών εμβαπτίσεων (Alternate emmersion) σε 3.5% διάλυμα χλωριούχου νατρίου (NaCl) όπου εξετάστηκαν συνολικά 6 δοκίμια που παραμείνανε 10 λεπτά εμβαπτισμένα μέσα στο διάλυμα και ακολουθούσαν 50 λεπτά έξω από το διάλυμα σύμφωνα με την προδιαγραφή G 44-94 της ASTM (American Society for Testing of Materials) και η οποία θα αναφερθεί παρακάτω, αυτό επιτυχήθηκε με δυο δεξαμενές συνδεδεμένες με δυο αντλίες και μια συσκευή με ένα αυτόματο χρονόμετρο και δυο αισθητήρες για την στάθμη του διαλύματος σε κάθε δεξαμενή (το σχέδιο αυτού του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 9), από τα 6 δοκίμια εκτέθηκε το πρώτο δοκίμιο για 15 μέρες , το δεύτερο για 30 μέρες , το τρίτο για 45 μέρες , το τέταρτο για 60 μέρες , το πέμπτο για 75 μέρες , το έκτο για 90 μέρες .

Κάθε δοκίμιο από αυτά εξετάστηκε στο στερεοσκόπιο όπου αναλύθηκε η επιφάνεια του κάθε δοκιμίου, ακολούθησε η μεταλλογραφική εξέταση στο μικροσκόπιο - εφόσον έγινε η απαραίτητη επεξεργασία σε κάθε δοκίμιο (κόψιμο σε τομή , λείανση , στίλβωση , χημική προσβολή) - όπου αναλύθηκε η μεταλλουργική δομή του υλικό έτσι ώστε να έχουμε μία σαφή εικόνα της εξέλιξης της διάβρωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο έκθεσης κάθε δοκιμίου.

Το πώς έγινε η εξέταση των δοκιμίων θα αναφερθεί στην συνέχεια αναλυτικά.

Παρακάτω αποικονίζονται οι προδιαγραφές του πειράματος.

• Προδιαγραφές για το τεστ των διαδοχικών εμβαπτίσεων σε διάλυμα 3.5% χλωριούχου νατρίου (NaCl), σύμφωνα με το G 44-94 της ASTM

1. Ο χρονικός κύκλος του τεστ είναι 1 ώρα . Από αυτό το χρονικό κύκλο τα 10 λεπτά αφορούν την παραμονή του δοκιμίου στο διάλυμα του 3.5% χλωριούχου νατρίου (NaCl) ακολουθούμενο με 50 λεπτά έξω από το διάλυμα, αυτό θα είναι για 24 ώρες του 24 άωρου.

2. Η συγκέντρωση του διαλύματος προετοιμάζεται με την διάλυση των 3.5 ± 0.1 μέρη κατά βάρος του NaCl σε 96.5 μέρη νερού.

3. Το PH του διαλύματος αλατιού , όταν προετοιμάζεται πρόσφατα, θα πρέπει να είναι μέσα στα όρια των 6.4 και 7.2 . Μόνο διαλυμένο, αντιδραστήριο του υδροχλωριούχου οξύ (HCl) ή αντιδραστήριο του καυστικού νατρίου (NaOH) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ρυθμιστεί το PH.

4. Η ελάχιστη αναλογία του όγκου διαλύματος και της επιφάνειας του δοκιμίου είναι 32 mL/cm² (200 mL/in²).

5. Λόγο της εξατμίσεως του διαλύματος θα πρέπει να υπάρχει μία ένδειξη (γραμμή) πού να υποδηλώνει την στάθμη του διαλύματος έτσι ώστε να αντικατασταθεί μόνο με νερό λόγω της εξατμίσεως, ο έλεγχος πρέπει να γίνει καθημερινά.

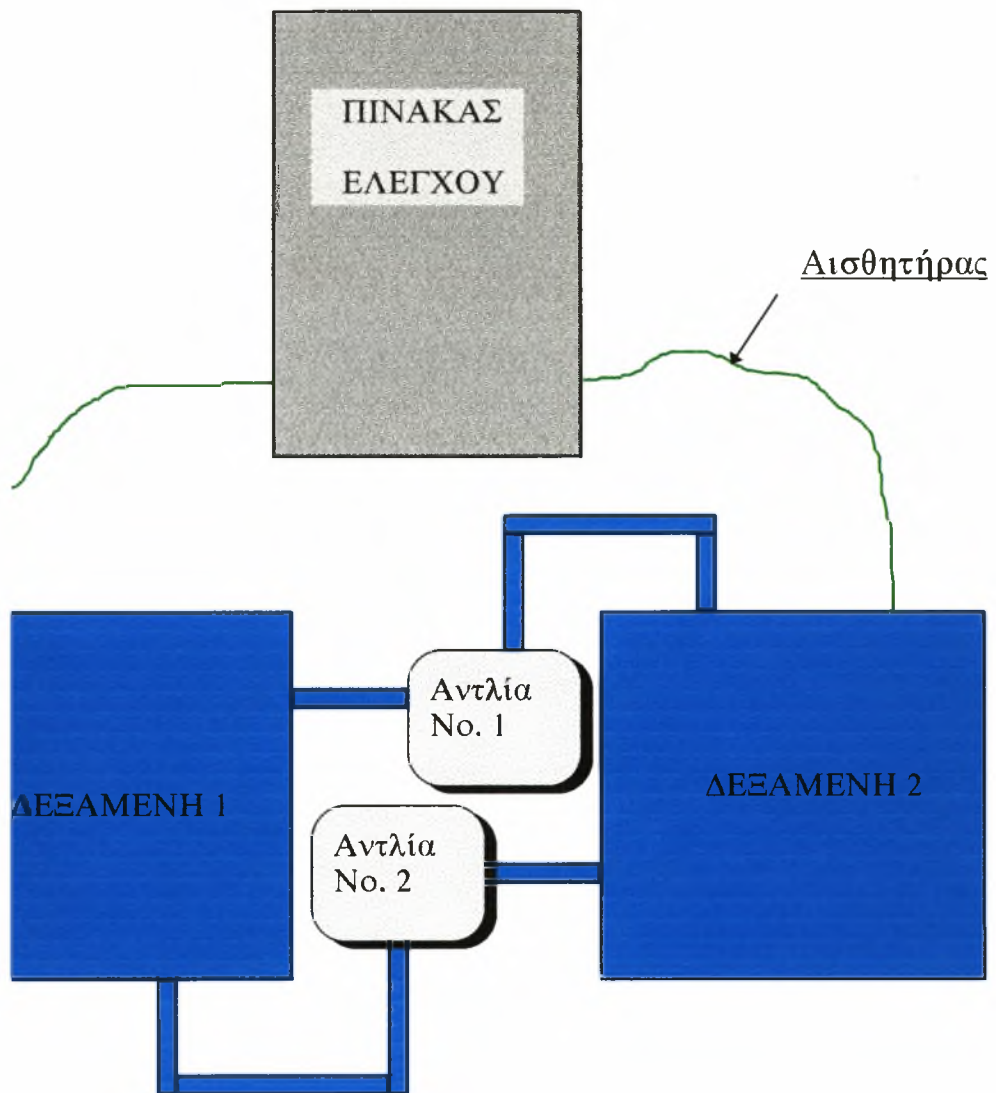
6. Καινούργιο διάλυμα θα πρέπει προετοιμάζεται εβδομαδιαίως.

7. Η εξωτερική θερμοκρασία θα πρέπει να είναι 27 ± 1 °C, και η σχετική υγρασία 45 ± 10 % .

8. Αφού εκτεθεί κάθε δοκίμιο, θα πρέπει να βρέχεται με νερό και μετά να καθαρίζεται με εμβάπτιση από ένα έως πέντε λεπτά σε νιτρικό οξύ στην συνέχεια βρέχεται με νερό όσο πιο γρήγορα γίνεται.

9. Σε κάθε διάλυμα που παρασκευάζεται χρειάζεται απεσταγμένο νερό.

Σκαρίφημα της διάταξης των συσκευών του πειράματος



- ⇒ Οι διαστάσεις του εργαστηρίου = 15 m x 8 m x 3m
- ⇒ Οι διαστάσεις κάθε δεξαμενής = 30 cm x 30 cm x 30 cm
- ⇒ Η ισχύς κάθε αντλίας = 20 Watt, και οι στροφές ≈ 2800 rpm
- ⇒ Το υλικό των αντλιών είναι από αντιδιαβρωτικό υλικό

Όπως φαίνεται και από το σκαρίφημα της διάταξης του πειράματος, τα δοκίμια ήταν σταθερά κρεμασμένα σε μια από τις δεξαμενές και το διάλυμα ήταν αυτό που μετακινιόταν με την βοήθεια των αντλιών. Ανάλογα με το χρόνο που ήθελε κανείς να παραμείνουν τα δοκίμια στην δεξαμενή, ρύθμιζε τον χρόνο στον πίνακα ελέγχου. Με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε η παραμονή των δοκιμών εμβαπτισμένα μέσα στο διάλυμα για 10 λεπτά και 50 λεπτά έξω από αυτό.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπήρχε περιορισμός σε όσον αφορά την διάταξη του πειράματος, δηλαδή το πώς θα γίνονταν οι διαδοχικές εμβάπτισεις των δοκιμών στο διάλυμα.

Στον πίνακα ελέγχου υπάρχει : γενικός διακόπτης, δύο διακόπτες για τις δύο αντλίες, δύο χρονόμετρα, και δύο υποδοχές για τους δύο αισθητήρες της στάθμης του διαλύματος που έχουν τοποθετηθεί στις δύο δεξαμενές.

Στο τέλος του χρόνου έκθεσης του κάθε δοκιμίου, έπρεπε να γίνει καθαρισμός των δοκιμών σύμφωνα με την προδιαγραφή G1-90 της ASTM, και αυτό γίνεται για να μην μείνουν άλατα τα οποία πιθανόν να συνεχίζουν να διαβρώνουν το υλικό και μετά από την απομάκρυνσή του από το διαβρωτικό περιβάλλον, αυτό επιτεύχθηκε με εμβάπτιση των δοκιμών σε διάλυμα νιτρικό οξύ HNO_3 από 1 έως 5 λεπτά σε θερμοκρασία 20 με 25 °C .

Στην συνέχεια έγινε η μέτρηση του βάρους του κάθε δοκιμίου αφού πριν ξεκινήσει το πείραμα είχε γίνει μέτρηση του βάρους κάθε δοκιμίου ώστε να μετρηθεί κάποια μεταβολή του βάρους που μπορεί να συμβεί λόγω της διάβρωσης.

Στην συνέχεια έγινε η στερεοσκοπική ανάλυση για να φανεί η επίδραση της διάβρωσης στην επιφάνεια των δοκιμών και το στερεοσκόπιο έχει μεγενθύνσεις από 10 μέχρι 40.

Η στερεοσκοπική ανάλυση έδειξε τρηματική διάβρωση (pitting), και όπως θα αναφερθεί στα αποτελέσματα, στο στερεοσκόπιο μπορούσε να γίνει η προσεγγιστική μέτρηση του αριθμού των λάκκων (pits), η μέτρηση αυτή έγινε ως εξής : διαιρέθηκε η επιφάνεια του κάθε

δοκιμίου (από την μια πλευρά που είναι 10 cm x 5 cm) σε 50 τετράγωνα με ένα μολύβι, το κάθε ένα δηλαδή είχε επιφάνεια = 1 cm², η μέτρηση έγινε προσεγγιστικά με το μάτι και παίρνοντας του μέσου όρου 6 τετραγώνων, ακολουθούσε η φωτογράφιση των 6 δοκιμίων.

Μετά από το στερεοσκόπιο έγινε η μεταλλογραφική εξέταση στο μικροσκόπιο, εφόσον έγινε η απαραίτητη επεξεργασία σε κάθε δοκίμιο (κόψιμο σε τομή, εγκιβωτισμός, λείανση, στίλβωση, χημική προσβολή).

Ο εγκιβωτισμός έγινε σε κενό με την βοήθεια μίας αντλίας κενού, ώστε η ρητίνη του τύπου Eporfix να εισχωρήσει στις διαβρωμένες περιοχές των δειγμάτων ώστε να ξεχωρίσουν και να φανούν καλύτερα οι διαβρωμένες περιοχές.

Στην χημική προσβολή χρησιμοποιήθηκε το αντιδραστήριο Keller's που έχει την εξής χημική σύσταση για 100 ml αντιδραστηρίου: 95 ml H₂O (απεσταγμένο), 2.5 ml HNO₃, 1.5 ml HCl, και 1 ml HF. Το εγκιβωτισμένο δείγμα αφού προσβληθεί από το συγκεκριμένο αντιδραστήριο για 13-15 δευτερόλεπτα, ξεπλένεται με απεσταγμένο νερό 40-50 °C, στην συνέχεια εμβαπτίζεται για ελάχιστο χρονικό διάστημα σε HNO₃ (65%) και στεγνώνεται με θερμό αέρα.

Η μεταλλογραφική εξέταση έγινε με μεταλλογραφικό μικροσκόπιο Aristomet (Leitz) εφοδιασμένου με πέντε φακούς μεγενθυτικής ικανότητας 50, 100, 200, 500, 1000 και αυτόματο σύστημα φωτογράφισης Leica-Wild MPS 48.

Στην μεταλλογραφική ανάλυση φάνηκε το βάθος των λάκκων διάβρωσης, η περικρυσταλλική διάβρωση, και εκεί μπορούσε να γίνει χαρακτηρισμός της διάβρωσης όπως θα αναφερθεί στο επόμενο κεφάλαιο που είναι το κεφάλαιο των αποτελεσμάτων.

2.4.ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΕΣΤ ΕΡΦΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Παρακάτω θα γίνει αναφορά στην αξιοπιστία του πειράματος των διαδοχικών εμβαπτίσεων σε διάλυμα 3.5% χλωριούχου νατρίου (NaCl), όσον αφορά την ικανότητά του να προσομοιώσει τις πραγματικές συνθήκες που υφίσταται ένα αεροπορικό κράμα.

Η αναφορά αυτή στηρίζεται σε δύο δημοσιεύσεις, όπου θα περιέχει αξιολόγηση πολλών τεστ που έγιναν σε διάφορα αεροπορικά κράματα αλουμινίου, και από κάποιες προδιαγραφές της ASTM.

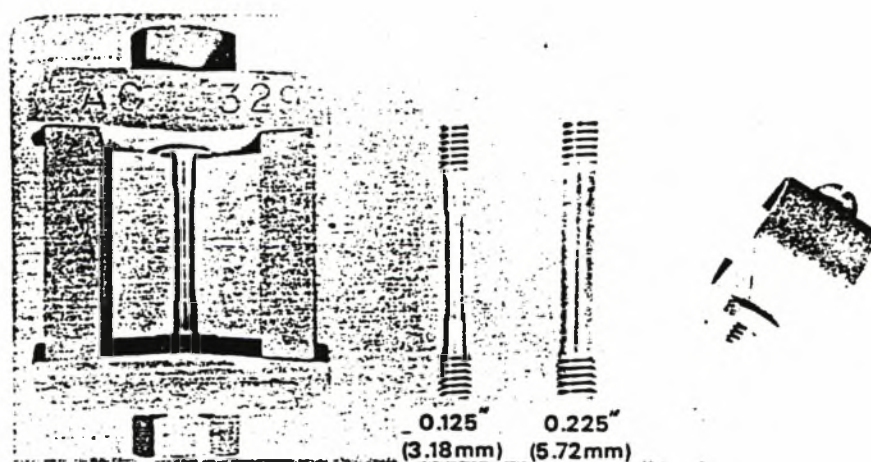
Όπως θα φανεί και παρακάτω, το τεστ των διαδοχικών εμβαπτίσεων σε διάλυμα 3.5% χλωριούχου νατρίου φαίνεται να είναι πολύ καλή λύση για την προσομοίωση του θαλασσίου περιβάλλοντος, όπου πετάνε τα αεροπλάνα, και δίνει αποτελέσματα σε μικρό χρονικό διάστημα. Επίσης το τεστ spray με 5% χλωριούχου νατρίου φαίνεται να δίνει μεγάλες ελπίδες όσον αφορά την προσομοίωση του θαλασσίου περιβάλλοντος, και μάλιστα δίνει αποτελέσματα σε μικρότερο χρονικό διάστημα από το τεστ των διαδοχικών εμβαπτίσεων σε διάλυμα 3.5% χλωριούχου νατρίου.

REFERENCE: sprowls, D. O., Summerson, T. J., Ugiansky, G. M., Epstein, S. G., and Craig, H. L., Jr., "Evaluation of a Proposed Method of Testing for Susceptibility to Stress Corrosion Cracking of High-Strength 7XXX Series Aluminum Alloy Products" *Stress Corrosion -New Approaches, ASTM STP 610*, American Society for Testing and Materials, 1976, pp. 3-31.

Το υλικό πού εξετάστηκε είναι το αλουμίνιο της σειράς 7075 με τρεις διαφορετικές θερμικές κατεργασίες : **T651** πού έχει χαμηλή αντίσταση σε SCC και με όριο ροής 436 MPa , **T7X51** πού έχει μέτρια αντίσταση σε SCC και με όριο ροής 419 MPa , **T7351** πού έχει μεγάλη αντίσταση σε SCC και με όριο ροής 356 MPa .

Στον πίνακα 2.3 της επόμενης σελίδας φαίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων όπου γίνεται σύγκριση του ποσοστού αστοχίας σε 3.5% χλωριούχου νατρίου διαδοχικών εμβαπτίσεων και στην έκθεση στην ατμόσφαιρα.

Παρακάτω στην εικόνα 1 φαίνονται τα τρία δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την έρευνα.



Εικόνα 1

Πίνακας 2.3: Σύγκριση του ποσοστού αστοχίας σε 3.5% NaCl διαδοχικών εμβαπτίσεων^(a) και στην έκθεση στην ατμόσφαιρα^(b).

Temper	Εφαρμόσιμη τάση(MPa)	Περιβάλλον	Ποσοστό αστοχίας		
			0.125in. (3.18mm)	0.225in. (5.72mm)	C- Rings
T651	170	20 μέρες σε 3.5% NaCl Al ^(c)	100	100	93
		30 μέρες σε 3.5% NaCl Al	100	100	96
		Θαλάσσια ατμόσφαιρα	100	100	90
		Βιομηχανική ατμόσφαιρα	100	100	100
T7X51	170	20 μέρες σε 3.5% NaCl Al	11	2	0
		30 μέρες σε 3.5% NaCl Al	16	3	0
		Θαλάσσια ατμόσφαιρα	20	0	0
		Βιομηχανική ατμόσφαιρα	0	0	0
T7X51	310	20 μέρες σε 3.5% NaCl Al	44	22	20
		30 μέρες σε 3.5% NaCl Al	59	25	20
		90 μέρες σε 3.5% NaCl Al	100	78	22
		Θαλάσσια ατμόσφαιρα	100	20	0
		Βιομηχανική ατμόσφαιρα	40	10	0
T7351	300	20 μέρες σε 3.5% NaCl Al	0	0	0
		30 μέρες σε 3.5% NaCl Al	3 ^(d)	0	0
		90 μέρες σε 3.5% NaCl Al	77 ^(d)	17	0
		Θαλάσσια ατμόσφαιρα	0	0	0
		Βιομηχανική ατμόσφαιρα	0	0	0

(a) Διαφορετικά εργαστήρια: 60 με 90 δοκίμια για κάθε επίπεδο τάσης.

(b) Έκθεσης 3 χρόνια: 10 δοκίμια για κάθε επίπεδο τάσης.

(c) Al = alternate immersion (διαδοχικές εμβαπτίσεις).

(d) Η αστοχία προέκυψε από pitting και transgranular cracking

Τα αποτελέσματα των τεστ των διαδοχικών εμβαπτίσεων βρέθηκαν πολύ κοντά σε αυτά που έγιναν στην ατμόσφαιρα, ειδικά στην παραλία (seacost).

Στο πίνακα 2.4 φαίνεται η σύγκριση των τεστ των διαδοχικών εμβαπτίσεων σε 3.5% NaCl και των διαδοχικών εμβαπτίσεων σε συνθετικό θαλάσσιο νερό.

Πίνακας 2.4: Η σύγκριση των τεστ των διαδοχικών εμβαπτίσεων σε 3.5% NaCl και των διαδοχικών εμβαπτίσεων σε συνθετικό θαλάσσιο νερό.

Temper	Stress, ksi	Corrodent	MSFC		Kaiser		Frankford		Alcoa		Frankford-C-Rings	
			F/N	Days to Failure	F/N	Days to Failure	F/N	Days to Failure	F/N	Days to Failure	F/N	Days to Failure
T651	25	sea salt	5/5	3,3,3,3,4	5/5	1,2,2,2,2	5/5	2,2,2,2,3	3/3	3,5,7	5/5	3,3,3,3,4
T651	(170 MPa)	3.5% NaCl	5/5	1,2,2,2,2	5/5	1,2,2,2,2	...	...	5/5	2,2,2,3,3	5/5	2,2,2,2,2
T651		3.5% NaCl	5/5	1,1,2,2,2	5/5	1,2,2,2,2	...	...	5/5	2,2,2,3,4	5/5	2,2,2,2,2
T651	15	sea salt	5/5	3,3,4,8,86	5/5	2,2,2,4,4	5/5	2,2,3,4,4	3/3	5,7,9	5/5	4,4,4,4,4
T651	(100 MPa)	3.5% NaCl	5/5	2,2,2,2,2	5/5	2,2,7,7,10	...	...	5/5	3,6,9,46,65	5/5	6,7,8,12,13
T651		3.5% NaCl	5/5	1,2,2,3,4	5/5	2,2,2,3,5	...	...	5/5	3,4,4,5,5	5/5	2,7,11,13,19
T651	8	sea salt	3/5	7,7,8,2OK90	5/5	5,25,25,84,90	3/5	8,8,24,2OK90	3/3	9,11,11	0/5	5OK90
T651	(55 MPa)	3.5% NaCl	4/5	2,3,9,9,OK90	1/5	4,4OK90	...	...	1/5	90,4OK90	0/5	OK90
T651		3.5% NaCl	5/5	3,3,3,4,56	4/5	8,27,62,85,OK90	...	...	2/5	28,43,3OK90	1/5	19,4OK90
T7X51	45	sea salt	4/5	7,10,10,14,OK90	5/5	4,4,4,4,4	5/5	8,8,14,17,18	3/3	6,10,10	5/5	8,8,10,10,10
T7X51	(310 MPa)	3.5% NaCl	5/5	2,2,3,4,4	5/5	23,27,33,33,40	...	...	5/5	8,42,50,69,72	4/5	5,5,30,49,OK90
T7X51		3.5% NaCl	5/5	3,3,3,3,3	5/5	20,39,41,48,69	...	...	5/5	26,33,63,64,69	2/5	3,3,3OK90
T7X51	35	sea salt	2/5	14,28,3OK90	5/5	4,5,7,9,29	5/5	14,17,17,18,18	1/3	10,2OK90	5/5	8,8,8,11,24
T7X51	(240 MPa)	3.5% NaCl	5/5	2,2,3,3,4	4/5	44,48,52,81,OK90	...	...	2/5	69,78,3OK90	0/5	5OK90
T7X51		3.5% NaCl	5/5	2,2,3,3,3	4/5	42,55,67,71,OK90	...	...	2/5	63,63,3OK90	1/5	3,4OK90
T7X51	25	sea salt	0/5	5OK90	5/5	5,7,7,26,33	5/5	17,18,18,23,28	0/3	3OK90	5/5	8,10,14,16,80
T7X51	(170 MPa)	3.5% NaCl	5/5	5,6,16,20,21	1/5	74,4OK90	...	...	0/5	5OK90	0/5	5OK90
T7X51		3.5% NaCl	5/5	3,15,18,57,63	1/5	76,4OK90	...	...	0/5	5OK90	0/5	5OK90
T7351	43	sea salt	0/5	5OK90	0/5	5OK90	0/5	5OK90	0/3	3OK90	0/5	5OK90
T7351	(350 MPa)	3.5% NaCl	5/5	23,24,31,34,52	4/5	53,59,74,77,OK90	...	...	2/5	71,82,3OK90	0/5	5OK90
T7351		3.5% NaCl	5/5	44,52,56,59,80	4/5	60,74,80,81,OK90	...	...	3/5	79,80,89,2OK90	0/5	5OK90

* Tests made with 0.125-in. (3.18-mm) tension specimens except where noted otherwise.

Επίσης στο πίνακα 2.5 φαίνεται η ποσοστιαία μείωση της αντοχής μη φορτισμένων δοκιμίων εκτεθειμένα 30 ημερών σε 3.5% NaCl με διαδοχικές εμβαπτίσεις σε διάφορα εργαστήρια.

Πίνακας 2.5: Η ποσοστιαία μείωση της αντοχής μη φορτισμένων δοκιμίων εκτεθειμένα 30 ημερών σε 3.5% NaCl με διαδοχικές εμβαπτίσεις σε διάφορα εργαστήρια.

Laboratory	Test Run	0.125 in. Tension (3.18 mm)			0.225 in. Tension (5.72 mm)		
		T651	T7X51	T7351	T651	T7X51	T7351
Alcoa	1	24	16 ^b	1	7 ^c	10	3
	2	25	24	11	12	13	3
Kaiser	1	36	27	16	24	15	6
	2	32	25	10	21	13	3
Martin Marietta	1	23	23	14	14	14	6
	2	23	26	16	13	15	7
MSFC	1	34	28	14	20	17	9
	2	34	28	13	24	27	9
NADC	1	38	26	13	no test		
	2	25	26	13			
Pechiney	1	28	22	11	17	15	7
	2	34	23	10	20	16	5
Reynolds	1	27	24	14	14	12	5
	2	21	25	14	12	14	3

^a Averages of duplicate tests; test values were close except where noted otherwise.

^b Test values averaged were 9 and 22 percent.

^c Test values averaged were 3 and 11 percent.

Εκτός από τα δύο πειράματα των διαδοχικών εμβαπτίσεων σε 3.5% NaCl και σε συνθετικό θαλάσσιο νερό και το πείραμα της έκθεσης των δοκιμίων στην ατμόσφαιρα (βιομηχανική και θαλάσσια ατμόσφαιρα), έγιναν και άλλα δυο τεστ επιταχυνόμενης διάβρωσης πού ήταν λιγότερο διαβρωτικά:

- 1) Συνεχή εμβάπτιση για 96 ώρες σε διάλυμα 6% NaCl.
- 2) Συνεχή εμβάπτιση για 168 ώρες σε διάλυμα 1% NaCl + 2% K₂Cr₂O₇ σε θερμοκρασία 60°C.

Τα αποτελέσματα των εξερευνητικών πειραμάτων του SCC στα δύο τελευταία πειράματα ήταν απογοητευτικά και δεν εμπεριείχανε στα αποτελέσματα, τα δεδομένα ήταν εσφαλμένα και δεν έδειξαν την αναμενόμενη κατεύθυνση όπως παρατηρήθηκε στα άλλα πειράματα.

♦ Περίληψη από τις προδιαγραφές της ASTM G44, G47

* Η διάρκεια του τεστ εφελκυσμού ενός δοκιμίου με διάμετρο 3.18 mm θα είναι 10 μέρες για την σειρά 2XXX και στην εγκάρσια κατεύθυνση εκτός αν η αστοχία λαμβάνει χώρα πιο πριν. Μεγαλύτερος χρόνος από τις 10 μέρες θα δημιουργήσει αστοχία στο δοκίμιο λόγω της τρηματικής διάβρωσης (pitting) και αυτό γιατί: ένα μειονέκτημα του τεστ των διαδοχικών εμβαπτίσεων σε 3.5% NaCl για κράματα αλουμινίου υψηλής αντοχής είναι το σοβαρό pitting που δημιουργείται στο δοκίμιο, που μεσολαβεί στην αρχή των ρηγμάτων της εργοδιάβρωσης και μπορεί να δημιουργεί μηχανική αστοχία που δυσκολεύει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της εργοδιάβρωσης. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται συγκεκριμένα σε κράματα αλουμινίου χαλκού όταν η διάμετρος των δοκιμίων είναι μικρή (όπως και στην περίπτωση που έχουμε).

Με άλλα λόγια η τρηματική διάβρωση μπορεί να μειώσει την διατομή και να δημιουργήσει μια τάση στην διατομή που είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική εφαρμόσιμη τάση με αποτέλεσμα :

1. Να έχουμε θραύση από μηχανική υπερφόρτιση του μετάλλου που δεν είναι ευαίσθητο σε Stress Corrosion Cracking, ή
2. Να έχουμε ρηγμάτωση λόγω εργοδιάβρωσης (SCC) ενός υλικού σε μια πραγματική τάση μεγαλύτερη από την επιθυμητή ονομαστική τάση του πειράματος.

Το να συμβεί ένα από αυτά τα γεγονότα μπορεί να παρεμβάλλεται με έγκυρος υπολογισμός κάποιων υλικών που έχουν σχετικά μεγάλη αντίσταση σε SCC.

* Το πλεονέκτημα του θαλασσινού νερό είναι ότι δημιουργεί λιγότερο pitting απ'ότι το 3.5% NaCl.

REFERENCE: B. W. Lifka and D. O. Sprowls, "Stress Corrosion Testing of 7079-T6 Aluminum Alloy in Various Environment," *Stress Corrosion Testing, ASTM STP 425*, Am. Soc. Testing Mats., 1967, p.342.

Στον πίνακα 2.6 φαίνονται τα αποτελέσματα των τεστ που έγιναν στο κράμα 7079-T651 όπου δίνεται για διαφορετικά περιβάλλοντα ο αριθμός των δοκιμών και ο χρόνος μέχρι την αστοχία.

Πίνακας 2.6: Αντίσταση στο SCC του κράματος 7079-T651, δίνεται ο αριθμός των δοκιμών και ο χρόνος μέχρι την αστοχία.

Test Environment	Test Period, days	Short-Transverse Stress, 10 ksi		Long-Transverse Stress, 53 ksi		Longitudinal Stress, 56 ksi	
		No.	Days	No.	Days	No.	Days
Industrial atmosphere (New Kensington, Pa.)	1460	3	448, 644, 1202	0	...	0	...
Seacoast atmosphere (Point Judith, R.I.)	1460	3	126, 126, 716	3	716, 716, 826	0	...
3.5% NaCl alternate immersion	84	0	...	0	...	0	...
Acidified 5% NaCl intermittent spray	14	3	6, 7, 10	0	...	0	...
Acidified 5% NaCl intermittent spray	30	...	...	2	19, 24	0	...
4.55% NaCl + 1.16% CrO ₃ alternate immersion							
First run	30	2	10, 17	3	7, 9, 9	2	23, 28
Second run	30	3	10, 15, 17	3	7, 7, 8	2	17, 24

* Type of specimen: 1/8-in.-diameter tensile bar.

Το πιο πολύ αποδεκτό ευρέως τεστ επιταχυνόμενης εργοδιάβρωσης για το αλουμίνιο είναι το 3.5% NaCl διαδοχικών εμβαπτίσεων. Εκτεταμένη έρευνα πάνω από πολλά χρόνια στα εργαστήρια έρευνας της Alcoa έχει αποδείξει έκθεση των κραμάτων αλουμινίου-χαλκού και αλουμινίου-μαγνησίου και για τα πιο πολλά κράματα αλουμινίου-ψευδαργύρου-μαγνησίου-χαλκού μια καλή

συσχέτιση μεταξύ αυτού του πειράματος και της ατμόσφαιρας της ακτής και της βιομηχανικής .

Τα ευαίσθητα δοκίμια αυτών των κραμάτων συχνά έχουν την τάση να εμφανίσουν ρήγματα λόγω εργοδιάβρωσης σε διάλυμα 3.5% NaCl των διαδοχικών εμβαπτίσεων παρά στην ατμόσφαιρα της ακτής και την βιομηχανική ατμόσφαιρα.

Αυτή η πληροφορία δίνει την δυνατότητα στην βιομηχανία να πειραματιστεί με εμπιστοσύνη στο τεστ των διαδοχικών εμβαπτίσεων σε διάλυμα 3.5% NaCl χωρίς να αναγκαστεί συνέχεια να κάνει πειράματα σε φυσικά περιβάλλοντα.

Στον πίνακα 2.7 φαίνονται τα πειράματα που έγιναν στο κράμα 7079-T6 -(το κράμα 7079-T6 έχει όριο ροής περίπου ίσον με 68 Ksi=470 MPa και χαρακτηρίζεται με χαμηλή αντίσταση σε SCC)- σε 3 ομάδες δοκιμίων με διάμετρο 3.175mm και μήκος 50.8 mm που είχαν υποστεί σφουρηλάτηση στην εγκάρσια κατεύθυνση.

Αρχικά έγιναν πειράματα σε 4 διαφορετικούς εξωτερικούς περιβάλλοντες: δύο σε βιομηχανική ατμόσφαιρα και δύο σε θαλάσσιο περιβάλλον, τα άλλα πειράματα που έγιναν φαίνονται στο πίνακα 5.

Πίνακας 2.7: Η διάρκεια ζωής των δοκιμίων που εξετάστηκαν στην έρευνα, σε μέρες.

Forging	100% Relative Humidity						Industrial Atmosphere—4 Years						Seacoast Atmosphere—4 Years					
	at 80 F			at 120 F			New Kensington, Pa.			Cleveland, Ohio			Point Comfort, Tex.			Point Judith, R.I.		
	10 ksi	20 ksi	30 ksi	10 ksi	20 ksi	30 ksi	10 ksi	20 ksi	30 ksi	10 ksi	20 ksi	30 ksi	10 ksi	20 ksi	30 ksi	10 ksi	20 ksi	30 ksi
No. 1.....	730 ^a	187	180	730 ^a	59	81	296	140	20	559	198	20	598	221	77	589	232	6
	730 ^a	200	200	730 ^a	391	300	339	140	44	633	201	77	598	221	221	920	232	14
	730 ^a	730 ^a	302	730 ^a	535	339	339	151	50	643	205	80	836	221	221	1322	232	14
No. 2.....	...	...	...	...	...	...	1141	249	44	1460	262	38	1460	221	221	232	145	14
	...	...	...	...	...	...	1460 ^c	296	135	1460	293	150	1460 ^c	221	221	1460 ^c	232	14
	...	...	...	...	...	...	1460 ^c	421	140	1460 ^c	303	155	1460 ^c	221	221	1460 ^c	232	23
No. 3.....	730 ^a	180	173	730 ^a	303	3	140	94	94	123	23	20	221	221	221	232	145	14
	730 ^a	730 ^a	200	730 ^a	303	39	151	94	94	123	24	23	221	221	221	232	145	14
	730 ^a	730 ^a	730 ^a	730 ^a	730 ^a	66	339	94	99	123	25	38	305	221	221	232	232	14
Forging	Alternate Immersion—12 Weeks									Total Immersion						Acidified 5% NaCl Intermittent Spray at 120 F—2 Weeks		
	3.5% NaCl			3.5% NaCl + 0.1% NiHCO ₃			Synthetic Sea Water ^b			3.5% CrO ₃ + 0.3% NaCl + 2.9% K ₂ Cr ₂ O ₇ —12 Weeks			Boiling 6% NaCl 4 Days					
	10 ksi	20 ksi	30 ksi	10 ksi	20 ksi	30 ksi	10 ksi	20 ksi	30 ksi	10 ksi	20 ksi	30 ksi	10 ksi	20 ksi	30 ksi		10 ksi	20 ksi	30 ksi
No. 1.....	84 ^c	29	11	84 ^c	15	...	84 ^c	60	...	21	11	1	1	1	1	7	1	...
	84 ^c	29	11	84 ^c	21	...	84 ^c	84 ^c	...	61	22	3	1	1	1	11	1	...
	84 ^c	42	13	...	...	...	84 ^c	84 ^c	...	84 ^c	26	7	4 ^c	1	1	11	3	...
No. 2.....	84 ^c	35	6	84 ^c	20	...	84 ^c	35	13	61	26	2	4 ^c	1	1	7	4	...
	84 ^c	48	8	84 ^c	28	...	84 ^c	42	15	84 ^c	84 ^c	2	4 ^c	1	1	14 ^c	5	...
	84 ^c	64	10	...	...	...	84 ^c	84 ^c	18	84 ^c	84 ^c	2	4 ^c	1	1	14 ^c	8	...
No. 3.....	11	4	4	80	28	...	84 ^c	10	...	84 ^c	7	4	4 ^c	1	1	14 ^c	7	...
	84 ^c	4	4	82	32	...	84 ^c	18	...	84 ^c	84 ^c	21	4 ^c	1	1	14 ^c	7	...
	84 ^c	6	11	...	...	...	84 ^c	35	...	84 ^c	84 ^c	28	4 ^c	1	1	14 ^c	14 ^c	...

^a Specimens still in test scheduled to complete 4 years.

^b Composition of solution as per ASTM Specifications D 1141 without heavy metals.

^c Specimen did not fail.

Σε αυτή την έρευνα βρέθηκαν τα εξής αποτελέσματα:

Η έκθεση των δοκιμίων σε κορεσμένη ατμόσφαιρα με υδρατμό (100% σχετική υγρασία σε 80 και 125 F έχει αποτέλεσμα την αστοχία όλων των δοκιμίων στην τάση των 30 Ksi = 207 MPa όπως και στην φυσική ατμόσφαιρα, υπήρχαν και λιγότερες αστοχίες σε 20 Ksi και δεν υπήρχε αστοχία για δυο χρόνια τεστ στα δοκίμια με τάση 10 Ksi, σε αυτά τα τεστ οι μεγαλύτερες αστοχίες υπήρχαν στην υψηλή θερμοκρασία.

Πέντε εργαστηριακά τεστ εξετάστηκαν στην έρευνα για την βελτίωση του τεστ των διαδοχικών εμβάπτισεων σε διάλυμα 3.5% NaCl, τα πειράματα αυτά ήταν :

- 1) Το συνθετικό θαλάσσιο νερό ήταν λιγότερο διακεκριμένο από το 3.5% NaCl.
- 2) Η αύξηση της 0.1% NH_4HCO_3 στο διάλυμα 3.5% NaCl έφερε μικρή βελτίωση.
- 3) Η συνεχής εμβάπτιση σε διάλυμα (3.5% CrO_3 + 0.3%NaCl + 2.9% $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) για 12 εβδομάδες δεν ήταν τόσο αποδοτικό όσο το 3.5% NaCl
- 4) Η συνεχής εμβάπτιση για 4 μέρες σε 6% NaCl δεν ήταν πιο αποδοτικό από το 3.5% NaCl ώστε να προκαλεί θραύση στα χαμηλά επίπεδα τάσεων, αλλά είχε το πλεονέκτημα ότι είχε μικρότερο χρόνο.
- 5) Το διακοπτόμενο Spry του Acidified 5% NaCl δείχνει να δίνει υποσχέσεις, αν και δεν είχε μεγάλο ποσοστό αστοχίας στα 10 Ksi όπως συμβαίνει στην ατμόσφαιρα.

Δεν φτάνει για ένα επειταχυνόμενο πείραμα να δίνει γρήγορες αστοχίες, για να είναι πιο χρήσιμο θα πρέπει να έχει συσχέτιση με το φυσικό περιβάλλον και να μην είναι πολύ επιθετικό ώστε να προκαλέσει αστοχία που δεν λαμβάνει χώρα σε κανονικές συνθήκες.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κράμα 7079-T6 δείχνει μεγάλη ευαισθησία σε SCC μόνο όταν οι τάσεις εφαρμόζονται στην εγκάρσια κατεύθυνση.

Απ'ότι φαίνεται τα καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με την ατμόσφαιρα για το υλικό 7079-T6 το δίνει το τεστ με Spry 5% NaCl χωρίς να είναι αυτό απόλυτο.

Πειράματα σε 9 κράματα των αλουμινίου -ψευδαργύρου-μαγνησίου (7000 σειράς), αλουμινίου-μαγνησίου(5000 σειράς), και αλουμινίου-χαλκού(2000), έδειξαν ότι το διακοπτόμενο τεστ με Spry 5%NaCl έδωσε καλή συσχέτιση με την ατμοσφαιρική έκθεση .

Να σημειωθεί ότι αυτό το τεστ έχει το μειονέκτημα ότι είναι σχετικά διαβρωτικό για τα πιο πολλά κράματα αλουμινίου και μπορεί να φέρει αστοχία από υπερφόρτιση λόγω μείωσης της διατομής,

γι'αυτό η μέγιστη διάρκεια αυτού του τεστ είναι 2 εβδομάδες, μεγαλύτερος χρόνος από 3 ή 4 εβδομάδες μπορεί να γίνει για κράματα που έχουν μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση ή για δοκίμια που η φορτισμένη επιφάνεια είναι μεγάλη.

ΤΡΙΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ

**ΤΡΙΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

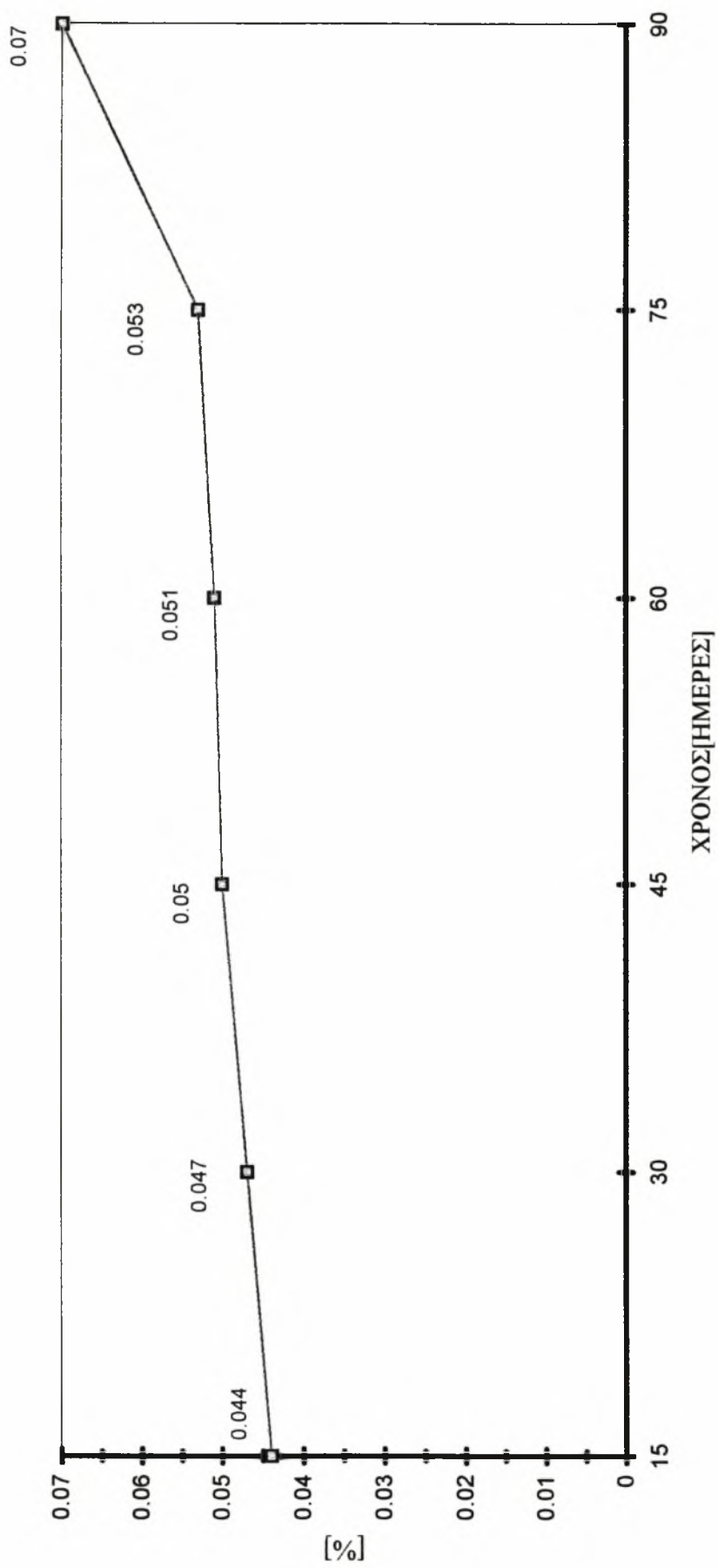
Αρχικά, η μέτρηση του βάρους κάθε δοκιμίου έδειξε μία μικρή συνεχή μείωση του βάρους σε συνάρτηση με το χρόνο έκθεσης των δοκιμίων, αυτή η μείωση του βάρους οφείλεται στην τρηματική διάβρωση (Pitting), είναι δηλαδή αποτέλεσμα της διάλυσης του αλουμινίου. Στον πίνακα 3.1 φαίνεται η ποσοστιαία απώλεια βάρους για κάθε ένα από τα έξι δοκίμια.

Πίνακας 3.1: Ποσοστιαία απώλεια βάρους σε συνάρτηση με τον χρόνο έκθεσης κάθε ένα από τα έξι δοκίμια.

Αριθμός δοκιμίου	Χρόνος παραμονής (Μέρες)	Ποσοστιαία απώλεια βάρους %
1	15	0.044
2	30	0.047
3	45	0.050
4	60	0.051
5	75	0.053
6	90	0.070

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 3.1, η μείωση του βάρους είχε αργό και σχεδόν σταθερό ρυθμό από το δοκίμιο 1 μέχρι το δοκίμιο 5, και στο δοκίμιο 6 -που είχε την μεγαλύτερη διάρκεια παραμονής στο πείραμα (90 μέρες)- έκανε απότομη μεταβολή.

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.1 φαίνεται σχηματικά τα αποτελέσματα που αναγράφονται στον πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.1: Ποσοστιαία απώλεια βάρους σε συνάρτηση με το χρόνο έκθεσης των δοκιμίων.

Όλα τα δοκίμια έδειξαν σοβαρή τρηματική διάβρωση ειδικά στα δοκίμια των 45 μερών και πάνω, αυτό φάνηκε από την μέτρηση του αριθμού των λάκκων (Pits) σε κάθε δοκίμιο, με τον τρόπο που εξηγήθηκε στο κεφάλαιο της πειραματικής διαδικασίας. Στον πίνακα 3.2 απεικονίζεται ο αριθμός των λάκκων (Pits) που βρέθηκαν σε κάθε δοκίμιο ανηγμένο σε m^2 .

Πίνακας 3.2: Ο αριθμός των λάκκων (Pits) / m^2 για κάθε ένα από τα έξι δοκίμια.

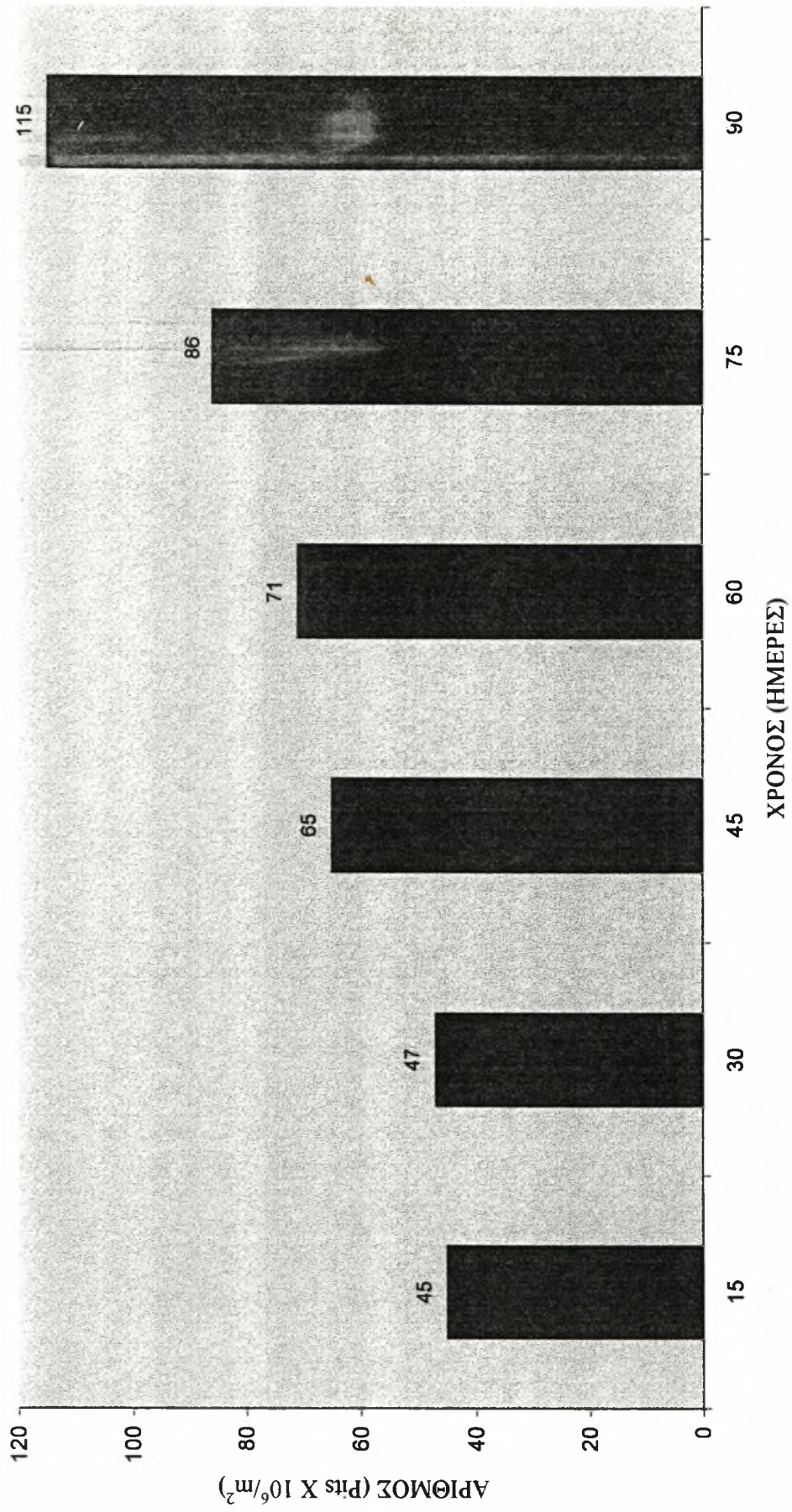
Αριθμός δοκιμίου	Χρόνος παραμονής (Μέρες)	Αριθμός Pits / m^2 $\times 10^6$
1	15	45
2	30	47
3	45	65
4	60	71
5	75	86
6	90	115

Γενικά τα Pits ήταν μικρά σε μέγεθος και είχαν μεγάλη διασπορά, έτσι δικαιολογείται ο μεγάλος αριθμός τους.

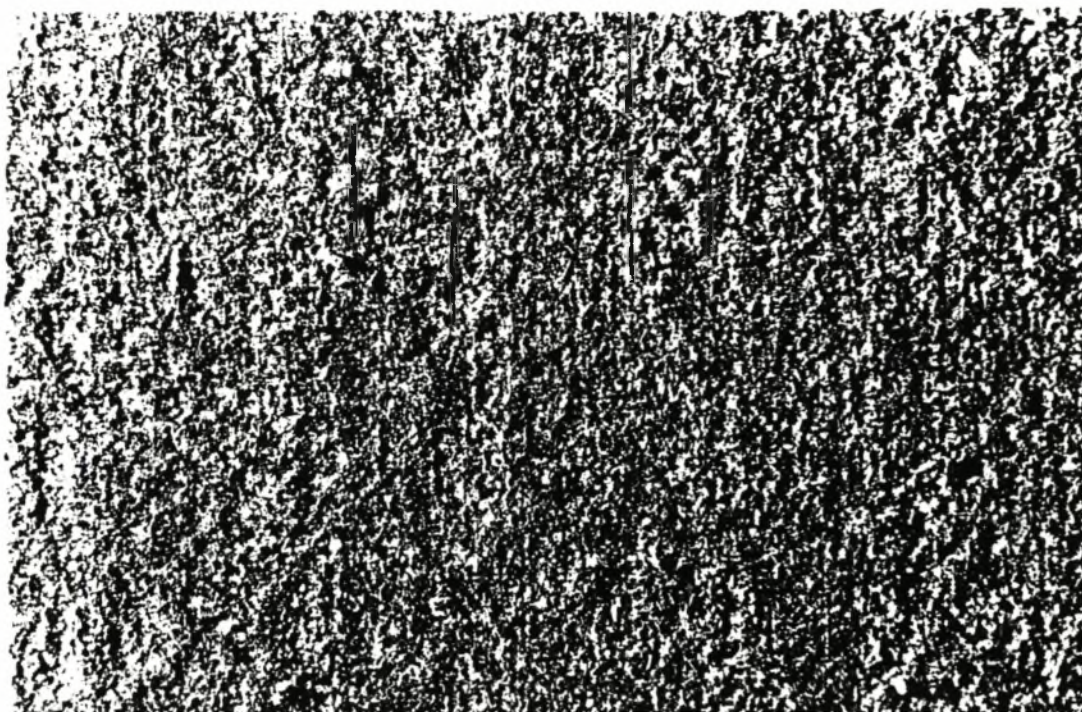
Ο αριθμός των Pits στα δύο πρώτα δοκίμια ήταν σχετικά μικρό σε σύγκριση με τα άλλα δοκίμια, ενώ στο έκτο δοκίμιο παρατηρήθηκε πολύ μεγάλο αριθμό Pits.

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.2 φαίνεται σχηματικά τα αποτελέσματα που αναγράφονται στον πίνακα 3.2.

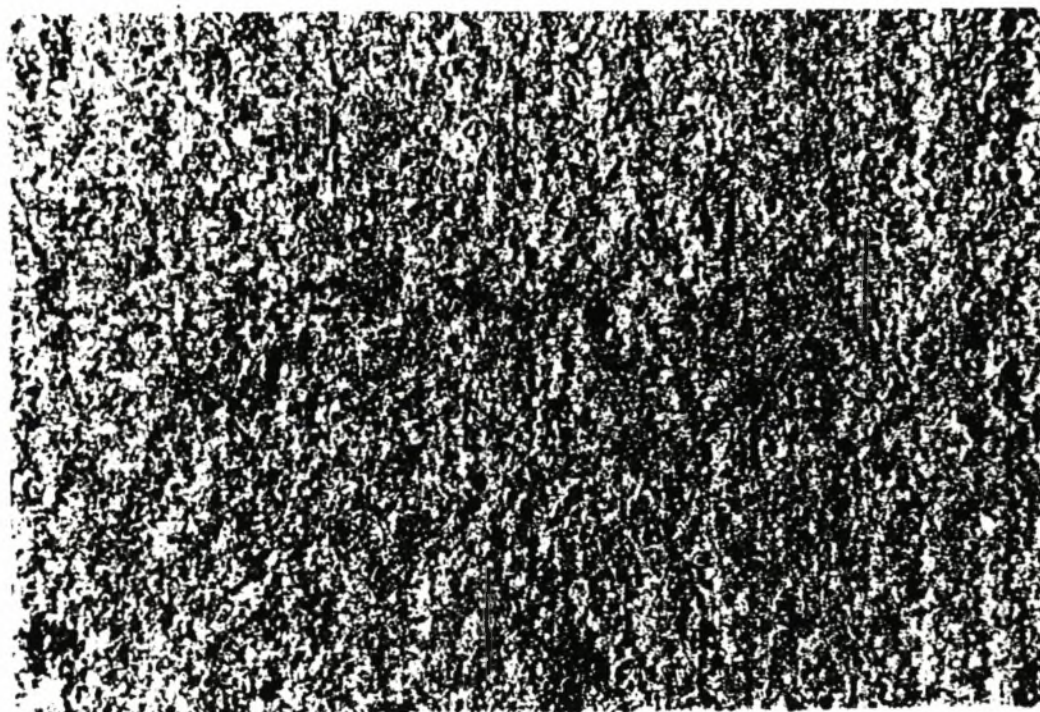
Επίσης στα σχήματα 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, και 3.8 φαίνονται οι φωτογραφίες που δείχνουν την τρηματική διάβρωση στην επιφάνεια των έξι δοκιμίων αντίστοιχα.



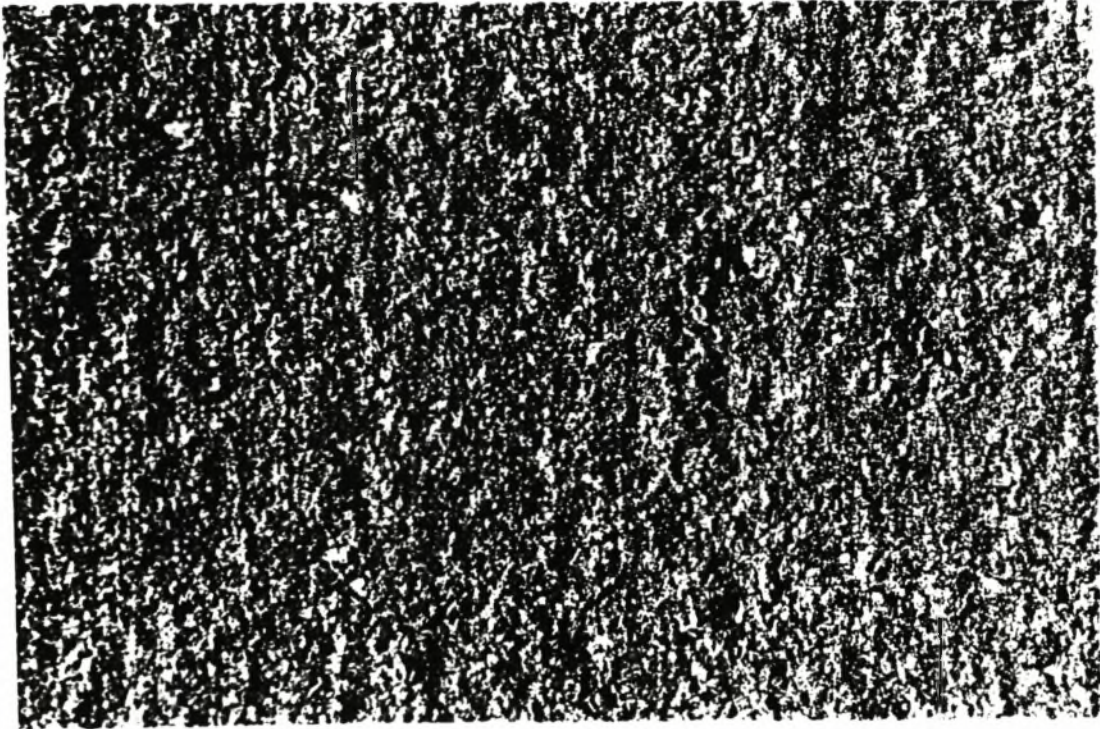
Σχήμα 3.2: Μεταβολή του αριθμού Pits με το χρόνο έκθεσης των δοκιμίων.



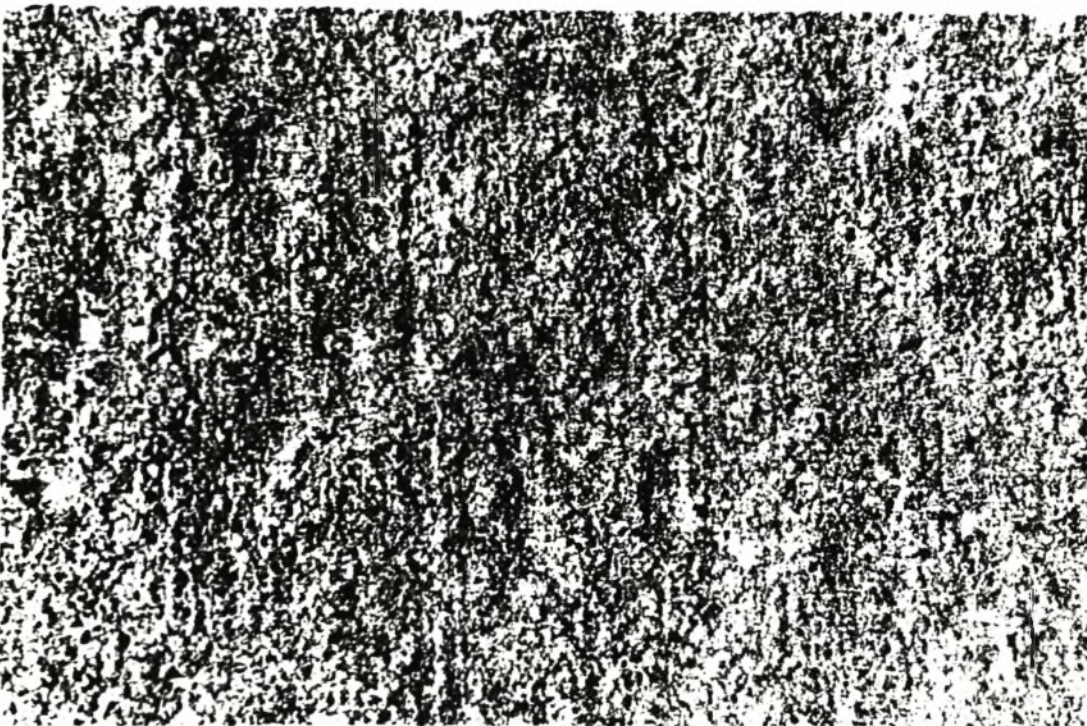
Σχήμα 3.3: Τρηματική διάβρωση στο δοκίμιο των 15 μερών, φωτογράφιση από το στερεοσκόπιο. Μεγέθυνση: 40X.



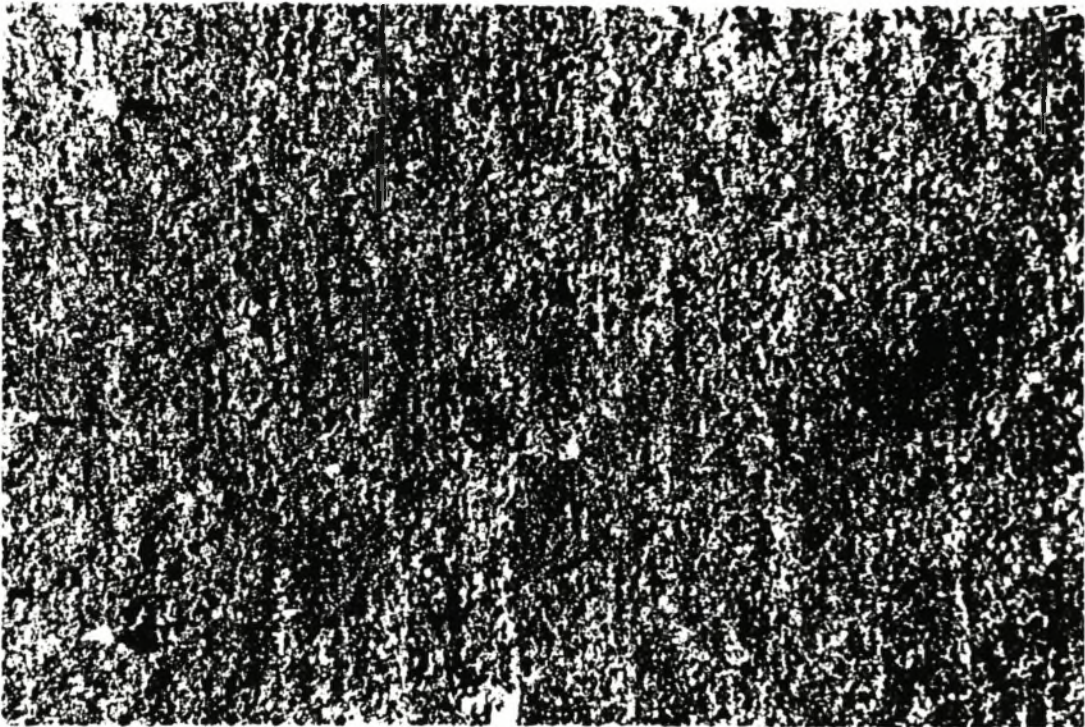
Σχήμα 3.4: Τρηματική διάβρωση στο δοκίμιο των 30 μερών, φωτογράφιση από το στερεοσκόπιο. Μεγέθυνση: 40X.



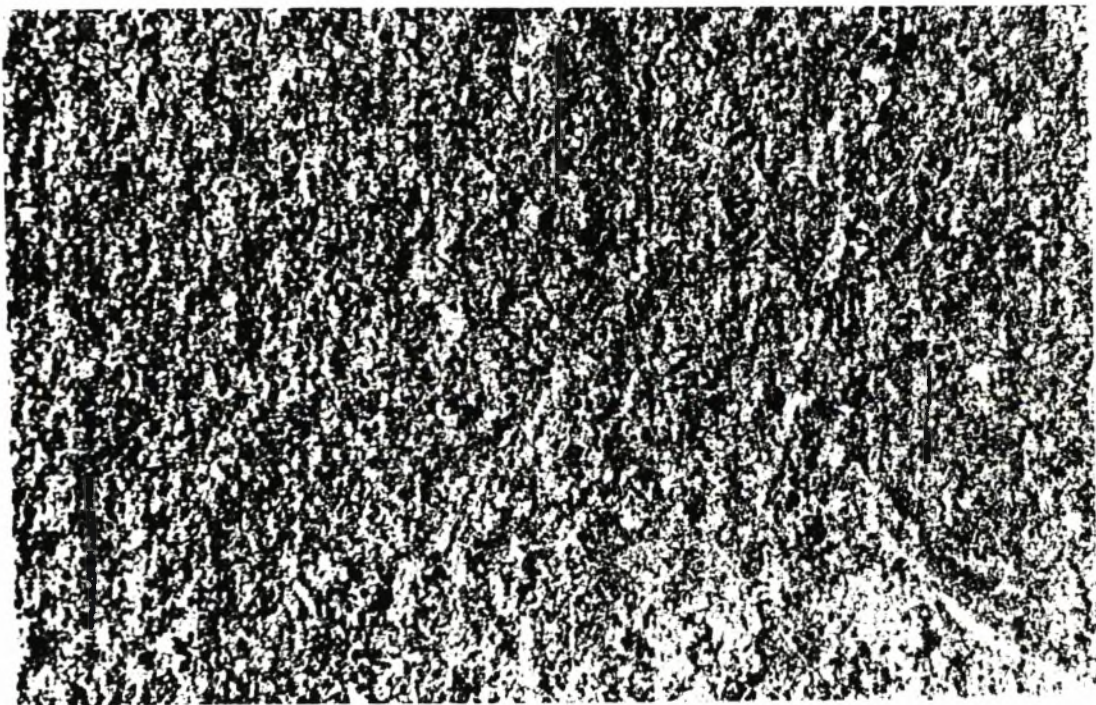
Σχήμα 3.5: Τρηματική διάβρωση στο δοκίμιο των 45 μερών, φωτογράφιση από το στερεοσκόπιο. Μεγέθυνση: 40X.



Σχήμα 3.6: Τρηματική διάβρωση στο δοκίμιο των 60 μερών, φωτογράφιση από το στερεοσκόπιο. Μεγέθυνση: 40X.



Σχήμα 3.7: Τρηματική διάβρωση στο δοκίμιο των 75 μερών, φωτογράφιση από το στερεοσκόπιο. Μεγέθυνση: 40X.

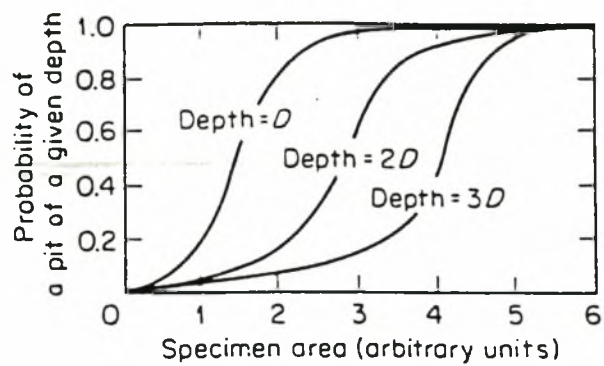


Σχήμα 3.8: Τρηματική διάβρωση στο δοκίμιο των 90 μερών, φωτογράφιση από το στερεοσκόπιο. Μεγέθυνση: 40X.

Η απώλεια βάρους των δοκιμίων όπως φαίνεται από τον πίνακα 3.1 ήταν μικρή - (η μεγαλύτερη ποσοστιαία απώλεια βάρους ήταν 0.07 % στο δοκίμιο με το μεγαλύτερο χρόνο έκθεσης, που ήταν 90 μέρες) - και δεν είναι η παράμετρος που θα έδειχνε μόνη της το μέγεθος της ζημιάς της τρηματικής διάβρωσης. Η μέτρηση του βάθους διείσδυσης του λάκκου είναι μία σημαντική παράμετρος αλλά είναι δύσκολο να μετρηθεί λόγω ότι υπάρχει μεγάλη ποικιλία στα βάθη των λάκκων, να σημειωθεί ότι μία μέτρηση του μέσου όρου του βάθους των λάκκων είναι ένας φτωχός τρόπος για την εκτίμηση της ζημιάς του λάκκου, αφού ο λάκκος με το μέγιστο βάθος είναι αυτός που φέρνει την αστοχία.

Έτσι η μέτρηση του μέγιστου βάθους φαίνεται να είναι ένας αξιόπιστος τρόπος για το χαρακτηρισμό της τρηματικής διάβρωσης και για την σύγκριση της αντίστασης στην τρηματική διάβρωση μεταξύ των υλικών στην εργαστηριακή έρευνα.

Θα πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι αυτή η μέτρηση του μέγιστου βάθους δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής ενός εξαρτήματος αφού το βάθος του (Pit) είναι μία συνάρτηση του μεγέθους του δοκιμίου, αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.9, που δείχνει την πιθανότητα να βρεθεί ένα (Pit) με δεδομένο βάθος σαν συνάρτηση του μεγέθους της εκτεθειμένης περιοχής, για παράδειγμα, υπάρχει πιθανότητα της τάξης 0.2 (20%) για έναν λάκκο (Pit) με βάθος D σε δοκίμιο με επιφάνεια =1, ενώ για δοκίμιο τέσσερις φορές μεγαλύτερο είναι ουσιαστικά σίγουρο - (πιθανότητα = 100%) - ότι θα υπάρχει ένας λάκκος με αυτό το βάθος, και πιθανότητα 90% ότι ένας λάκκος με διπλάσιο βάθος θα υπάρχει.



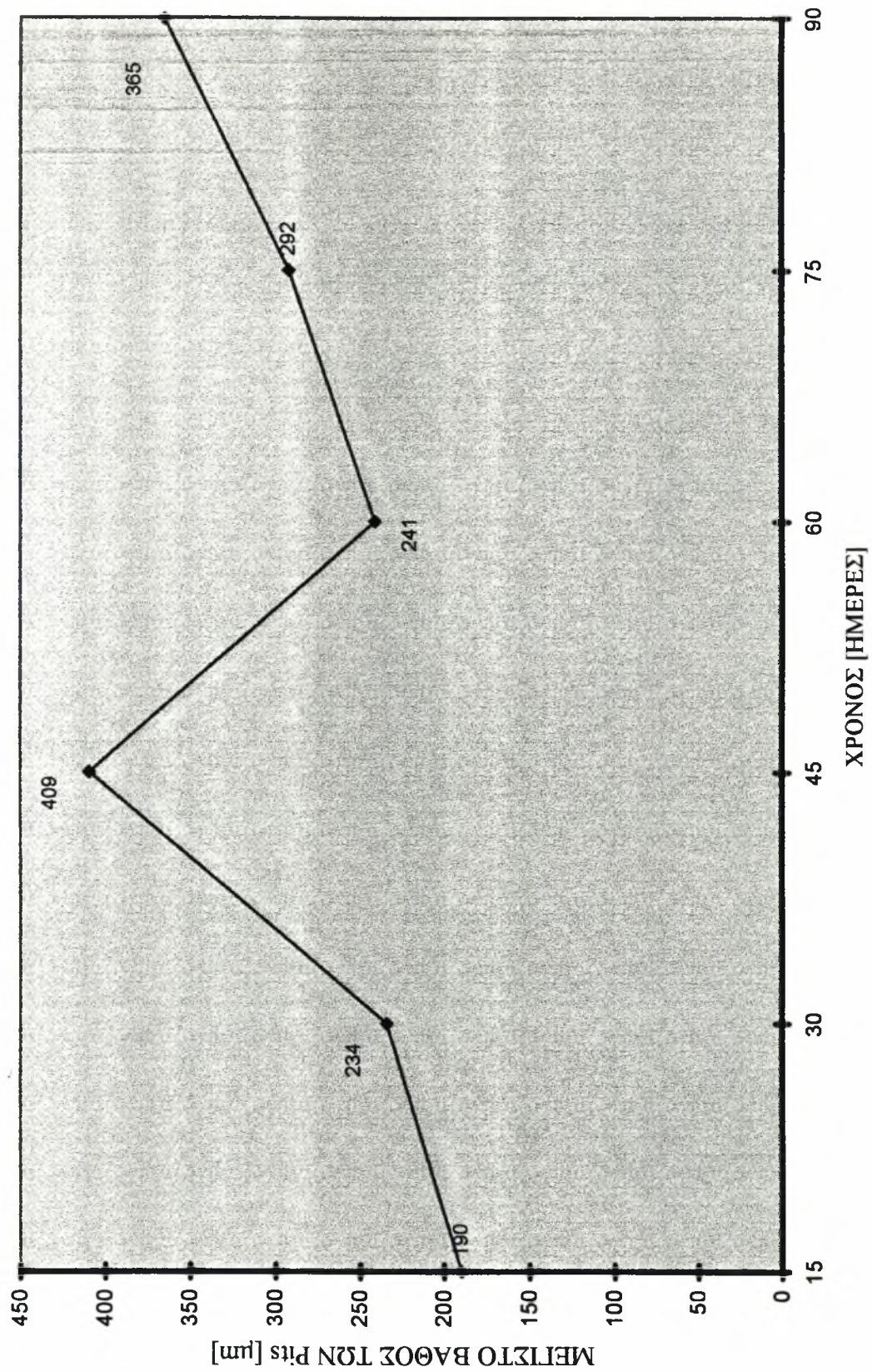
Σχήμα 3.9: Το βάθος του λάκκου (pit) σαν συνάρτηση της εκτιθέμενης περιοχής.

Στον πίνακα 3.3 φαίνεται η μέτρηση του μέγιστου βάθους των λάκκων για κάθε ένα από τὰ ἕξι δοκίμια. Να σημειωθεί ὅτι το πάχος των δοκιμίων είναι ἴσον με $1.8 \text{ mm} = 1800 \mu\text{m}$.

Πίνακας 3.3: Η μέτρηση του μέγιστου βάθους των λάκκων για κάθε ένα από τὰ ἕξι δοκίμια.

Αριθμός δοκιμίου	Χρόνος παραμονής (Μέρες)	Μέγιστο βάθος των λάκκων σε μm
1	15	190
2	30	234
3	45	409
4	60	241
5	75	292
6	90	365

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.10 φαίνεται σχηματικά τα αποτελέσματα που αναγράφονται στον πίνακα 3.3.

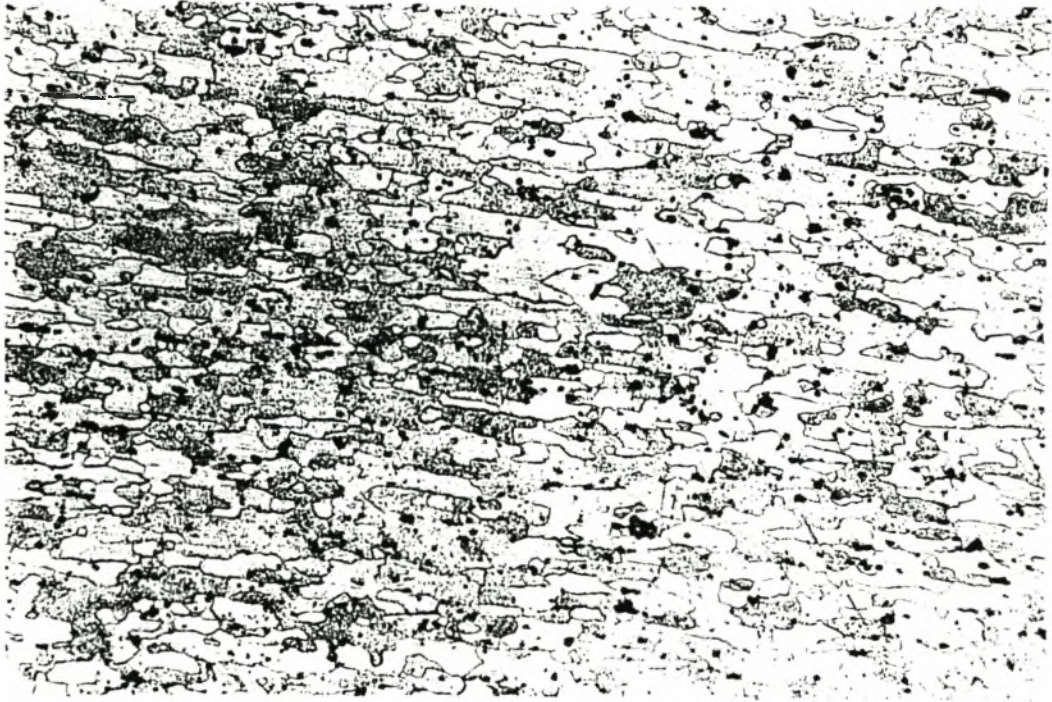


Σχήμα 3.10: Μεταβολή του μέγιστου βάθους των λάκκων (Pits) σε συνάρτηση με το χρόνο έκθεσης των δοκιμίων.

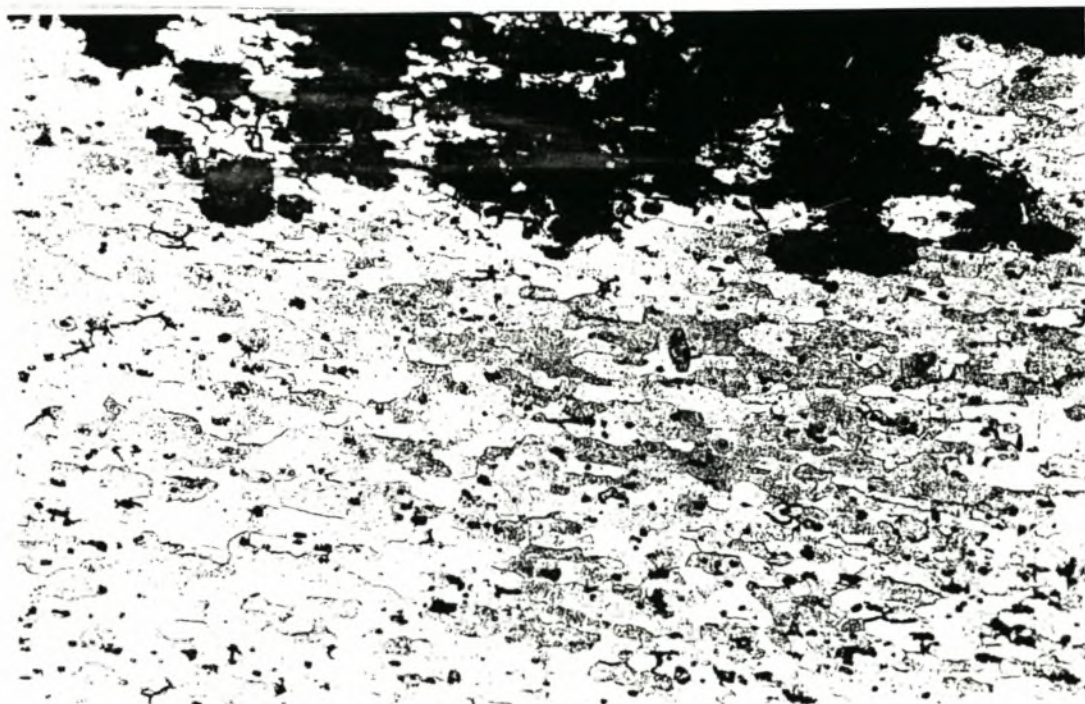
Παρατηρήθηκε ανάπτυξη ρωγμών στα διαβρωμένα δοκίμια, οι ρωγμές αναπτύχθηκαν στα όρια των κόκκων, οι ρωγμές αυτές είναι αποτέλεσμα της περικρυσταλλικής διάβρωσης που αναφέρθηκε στο τέλος του πρώτου κεφαλαίου.

Η ανάπτυξη των ρωγμών άρχισε από το δοκίμιο των 30 μερών και μετά. Αυτό εξάλλου φαίνεται και από τις φωτογραφίες των σχημάτων 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, και 3.22, δύο φωτογραφίες με διαφορετικές μεγεθύνσεις για κάθε δοκίμιο, οι φωτογραφίες έγιναν στο μικροσκόπιο, σε τομή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε μεγάλο ποσοστό οι ρωγμές ξεκινούσαν από το τέλος του λάκκου διάβρωσης (Pit).



Σχήμα 3.11: Το δοκίμιο των 15 μερών, το δοκίμιο φαίνεται να μην έχει υποστεί περικρυσταλλική διάβρωση. Μεγέθυνση: 200X.



Σχήμα 3.12: Η διάβρωση του δοκιμίου των 30 μερών, στο δοκίμιο φαίνεται η διεύρυνση της τρηματικής διάβρωσης στη βάση του αλουμινίου. Μεγέθυνση: 200X.



Σχήμα 3.13: Η διάβρωση του δοκιμίου των 30 μερών, στο δοκίμιο φαίνεται να αρχίζει η περικρυσταλλική διάβρωση. Μεγέθυνση: 500X.



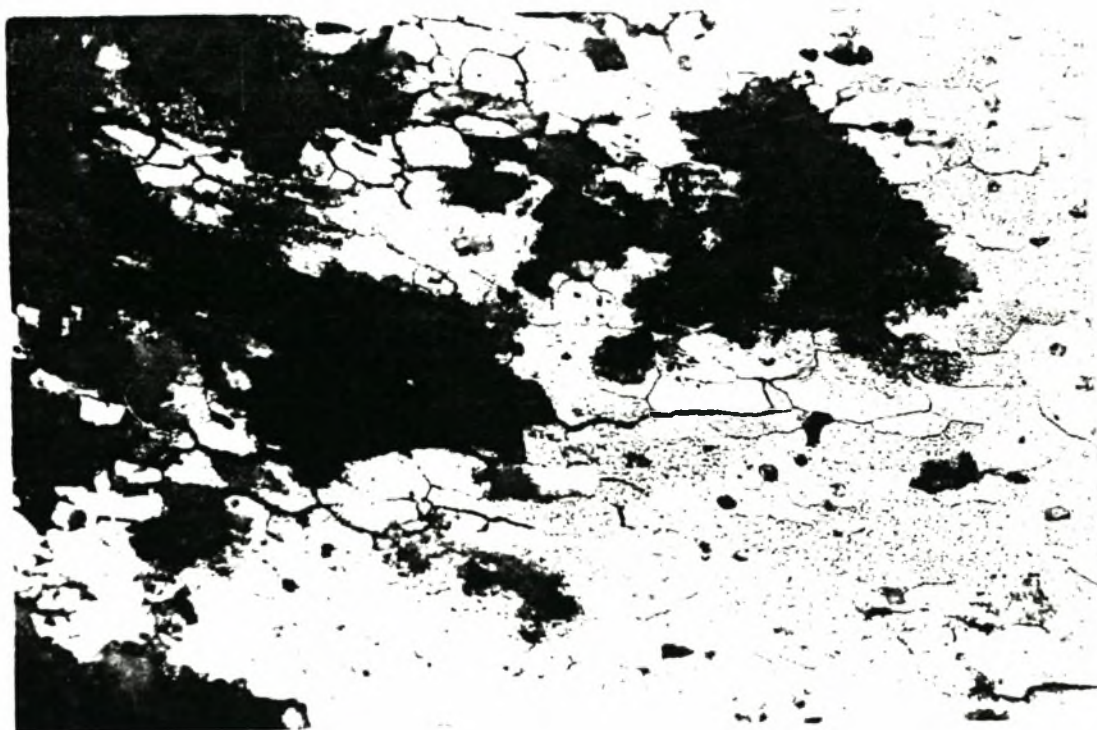
Σχήμα 3.14: Η διάβρωση του δοκιμίου των 45 μερών.
Μεγέθυνση: 200X.



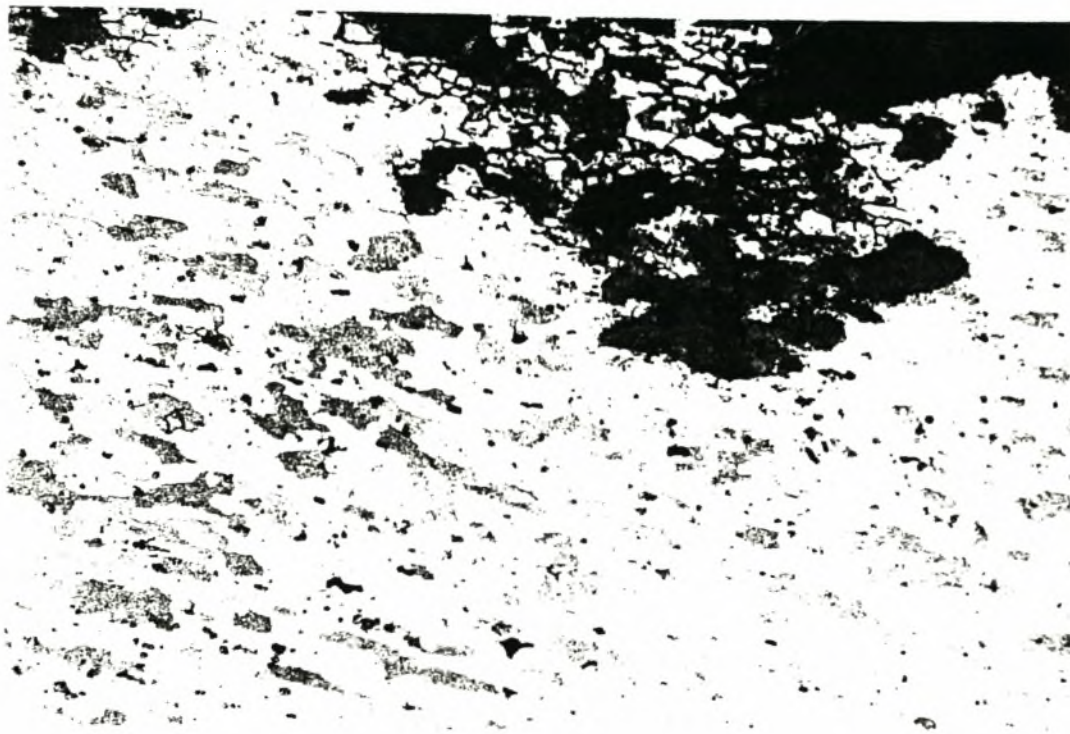
Σχήμα 3.15: Η διάβρωση του δοκιμίου των 45 μερών.
Μεγέθυνση: 500X.



Σχήμα 3.16: Η διάβρωση του δοκιμίου των 60 μερών.
Μεγέθυνση: 200X.



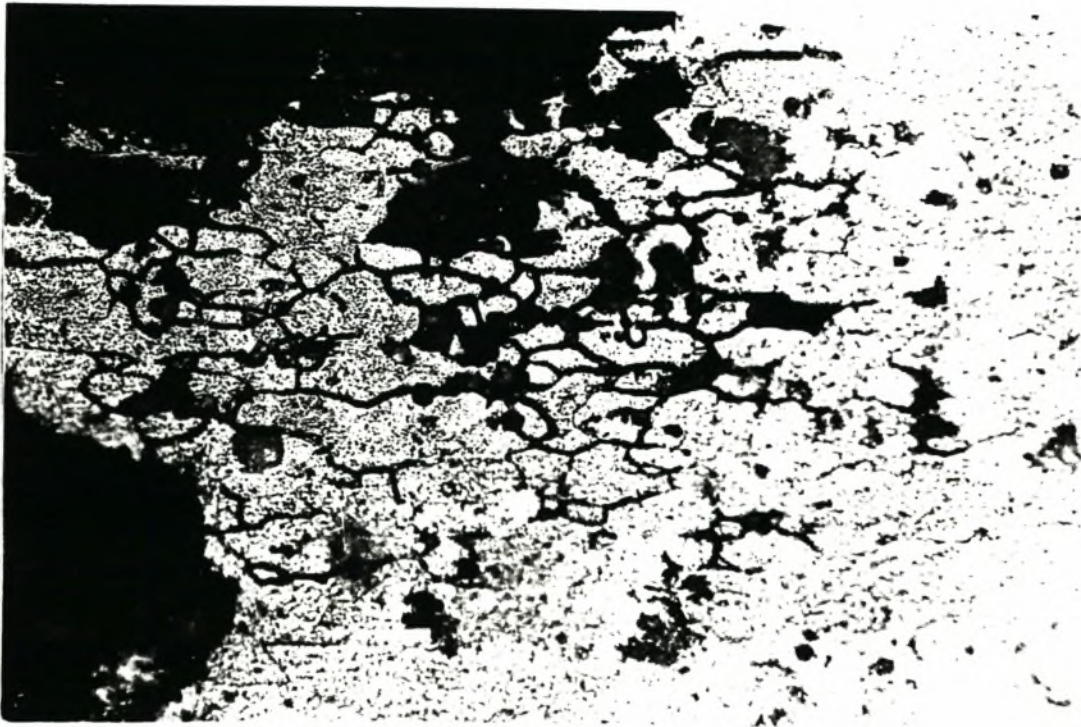
Σχήμα 3.17: Η διάβρωση του δοκιμίου των 60 μερών.
Μεγέθυνση: 500X.



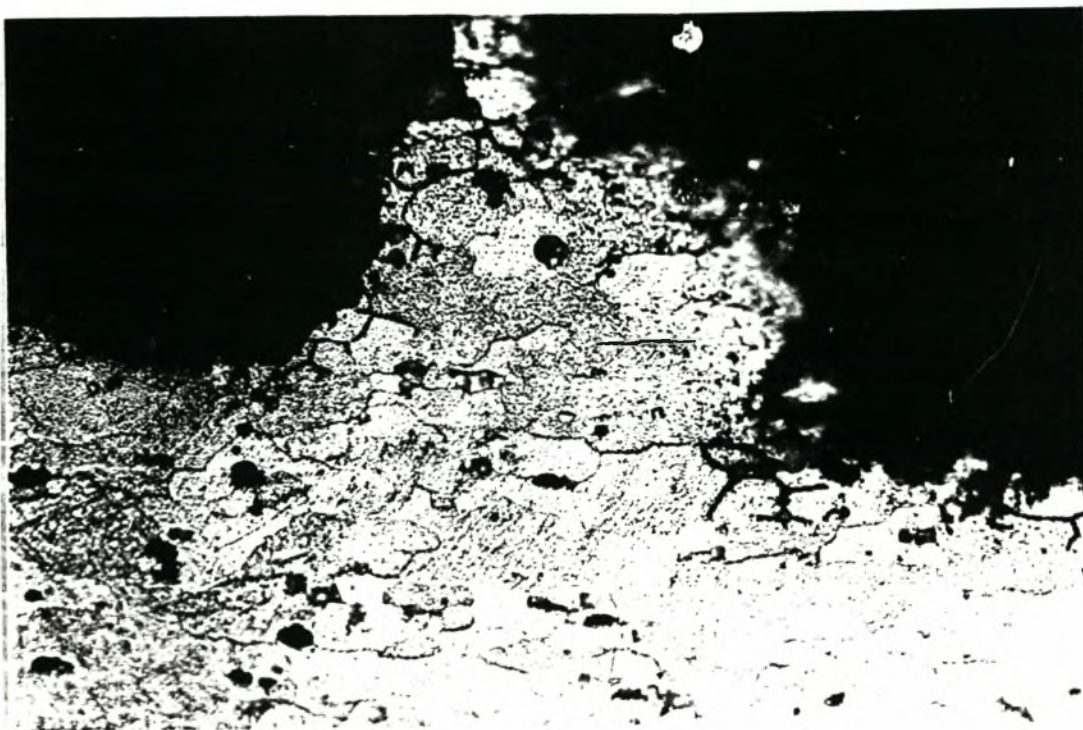
Σχήμα 3.18: Η διάβρωση του δοκιμίου των 75 μερών.
Μεγέθυνση: 200X.



Σχήμα 3.19: Η διάβρωση του δοκιμίου των 75 μερών, φαίνονται διακλαδώσεις στην ρωγμή. Μεγέθυνση: 1000X.



Σχήμα 3.20: Η διάβρωση του δοκιμίου των 90 μερών.
Μεγέθυνση: 500X.



Σχήμα 3.21: Η διάβρωση του δοκιμίου των 90 μερών.
Μεγέθυνση: 500X.

Επίσης μετρήθηκε η σκληρότητα των έξι δοκιμίων μετά από την εμβάπτισή τους, και όπως ήταν αναμενόμενο βρέθηκε ότι δεν υπάρχει αλλαγή στην σκληρότητα σε συνάρτηση με το χρόνο έκθεσης των δοκιμίων, ακόμη μετρήθηκε η σκληρότητα κατά μήκος της εγκάρσιας τομής ενός δοκιμίου (το δοκίμιο των 90 μερών), με επιλογή ικανοποιητικού αριθμού μετρήσεων και δεν βρέθηκε καμία αλλαγή στην σκληρότητα, γεγονός που μας βεβαιώνει ότι η σκληρότητα δεν επηρεάζεται από την διάβρωση.

Τελικά η διάβρωση στο κράμα 2024-T3 ήταν συνδυασμός της τρηματικής και περικρυσταλλικής διάβρωσης, δεν παρατηρήθηκε ενδοκρυσταλλική διάβρωση μέσα στα δοκίμια που εξετάστηκαν.

4. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Είναι φανερό ότι η εργοδιάβρωση στα κράματα αλουμινίου είναι πολύπλοκο φαινόμενο λόγω των πολλών παραμέτρων που εισέρχονται σε αυτό το πρόβλημα, και όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η παρούσα διπλωματική εργασία ήταν μία εισαγωγή σε αυτό το είδος διάβρωσης που υφίστανται τα αεροπορικά κράματα αλουμινίου.

Συνεπώς υπάρχει μεγάλος χώρος για έρευνα, ώστε να γίνει κατανοητό αυτό το φαινόμενο. Μερικές προτάσεις που ίσως να βοηθούσαν στην συνέχεια της έρευνας αυτής φαίνονται παρακάτω:

1. Να γίνει το πείραμα των διαδοχικών εμβαπτίσεων σε διάλυμα 3.5% χλωριούχου νατρίου -(όπως το πείραμα που παρουσιάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία)- αλλά με την ύπαρξη εφελκυστικής τάσης μέσω κάποιας ειδικής συσκευής, το πείραμα αυτό γίνεται σε λειασμένα κυλινδρικά δοκίμια υπό σταθερή τάση ή σταθερή παραμόρφωση (βλέπε το δεύτερο κεφάλαιο αυτής της εργασίας), με την εκτέλεση αυτού του πειράματος μπορεί να γίνει μία σύγκριση μεταξύ των δύο πειραμάτων και να φανεί η επίδραση της τάσης, επίσης θα υπάρχει πιθανόν καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού της ρηγμάτωσης λόγω εργοδιάβρωσης.
2. Να γίνει το πείραμα με ρήγματα που προϋπάρχουν, ώστε να μετρηθεί ο παράγοντας έντασης τάσεων στο διαβρωτικό περιβάλλον (K_{ISCC}) και να συγκριθεί με την δυσθραυτότητα (K_C) αυτού του αεροπορικού κράματος, να αποδεχθεί δηλαδή αν πραγματικά ισχύει ότι: $K_{ISCC} < K_C$.
3. Να γίνουν πειράματα για να βρεθεί η τάση κατωφλίου για το κράμα 2024-T3, αυτό επιτυγχάνεται «σπάζοντας» αρκετά δοκίμια- μέσα στο διαβρωτικό περιβάλλον - σε διαφορετικά επίπεδα τάσεων και βρίσκοντας εκείνη την τάση στην οποία το δοκίμιο δεν θα αστοχήσει. Βέβαια θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η τάση είναι γνωστό ότι είναι τόσο μικρή (βλέπε πίνακα 1.4) που ίσως να ήταν άσκοπο αυτό το πείραμα, από την άλλη πλευρά αυτή η τάση αμφισβητείται σε πολλά κράματα αλουμινίου.

4. Να γίνουν πειράματα σε αυτό το αεροπορικό κράμα με ύπαρξη τάσεως, σε φυσικό θαλάσσιο περιβάλλον (στην ακτή), αυτό το πείραμα έχει μεγάλο χρονικό διάστημα (μπορεί να είναι έως 5 ή 6 χρόνια).
5. Να γίνουν πειράματα σε αυτό το αεροπορικό κράμα με ύπαρξη τάσεως, σε βιομηχανική ατμόσφαιρα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Συμβολισμός του αλουμινίου και των κραμάτων του

Ο συμβολισμός καθιερώθηκε το 1954 από την Aluminum Association και αποτελείται τόσο για κατεργασμένα όσο για χυτά προϊόντα από ένα σύστημα τεσσάρων ψηφίων, που στα κατεργασμένα ακολουθείται από συνδυασμό γράμματος και αριθμών που δείχνουν την κατεργασία στην οποία υποβλήθηκε το υλικό. Το πρώτο ψηφίο χαρακτηρίζει την πρόσμιξη με την μεγαλύτερη συμμετοχή (το ψηφίο 1 στην θέση αυτή χαρακτηρίζει το αλουμίνιο). Ο πίνακας I δίνει τα πρώτα ψηφία και την ανάλογη πρόσμιξη, ενώ τα άλλα ψηφία έχουν αντικατασταθεί προς το παρόν με x.

Πίνακας I: Συμβολισμός του αλουμινίου και των κραμάτων του

Κατεργασμένα κράματα		Χυτά κράματα	
Αλουμίνιο $\geq 99\%$	1xxx	Αλουμίνιο $\geq 99\%$	1xx.x
Χαλκός	2xxx	Χαλκός	2xx.x
Μαγγάνιο	3xxx	Πυρίτιο με χαλκό και/ή μαγνήσιο	3xx.x
Πυρίτιο	4xxx	Πυρίτιο	4xx.x
Μαγνήσιο	5xxx	Μαγνήσιο	5xx.x
Μαγνήσιο και πυρίτιο	6xxx	Ψευδάργυρος	7xx.x
Ψευδάργυρος	7xxx	Κασσίτερος	8xx.x
Άλλο στοιχείο	8xxx	Άλλο στοιχείο	9xx.x

Για τα κατεργασμένα, το δεύτερο ψηφίο δείχνει οριακό ποσοστό ακαθαρσιών του αρχικού κράματος. Το ψηφίο 0 στην θέση αυτή δείχνει αρχικό κράμα καθαρό. Τέλος τα δύο τελευταία ψηφία συμβολίζουν το συγκεκριμένο κράμα της ομάδας ή το ποσοστό αλουμινίου πάνω από 99%, όταν το πρώτο ψηφίο είναι το 1.

Για χυτά κράματα, το δεύτερο και το τρίτο ψηφίο συμβολίζουν ότι τα δύο τελευταία ψηφία στα κατεργασμένα, ενώ το τελευταίο ψηφίο, που είναι ύστερα από την τελεία, συμβολίζεται μορφή του χυτού.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν το 1000 συμβολίζει το αλουμίνιο του εμπορίου, ενώ το 1060 συμβολίζει 99,6% αλουμίνιο, και το 2017 είναι το πρώτο ντουραλουμίνιο.

Ο συμβολισμός της κατεργασίας χωρίζεται με παύλα από τον προηγούμενο και αποτελείται από ένα γράμμα που χαρακτηρίζει την κατεργασία και δύο αριθμούς που χαρακτηρίζουν το βαθμό και τον τρόπο σκλήρυνσης. Έτσι έχουμε ότι:

-F = Το προϊόν δεν υποβλήθηκε σε καμιά πρόσθετη κατεργασία

-H = το προϊόν σε σκλήρυνση (ενδοτράχυνση) με παραμόρφωση. Ειδικότερα:

-H1 = σκλήρυνση μόνο με ψυχρή κατεργασία. Μπορεί να ακολουθεί και δεύτερο στοιχείο, που δείχνει το βαθμό της σκλήρυνσης. π.χ. 2 σημαίνει 1/4 σκληρό, 6 σημαίνει 3/4 σκληρό, 8 σημαίνει πλήρη σκλήρυνση, ενώ 9 σημαίνει εξαιρετικά σκληρό.

-H2 = σκλήρυνση με ψυχρή κατεργασία και στην συνέχεια μερική ανόπτηση(το δεύτερο ψηφίο όπως και στην προηγούμενη περίπτωση)

-H3 = σκλήρυνση με ψυχρή κατεργασία και στην συνέχεια σταθεροποίηση. Εφαρμόζεται κυρίως στα κράματα με μαγνήσιο (το δεύτερο ψηφίο όπως και στην προηγούμενη περίπτωση)

-O = το προϊόν υποβλήθηκε σε ανόπτηση (είναι το πιο μαλακό είδος)

-T = το προϊόν υποβλήθηκε σε ειδική θερμική κατεργασία. Ακολουθείται από ένα ψηφίο που δηλώνει το είδος της κατεργασίας:

-T1 = ψύξη ύστερα από θερμή κατεργασία και φυσιολογική σκλήρυνση με γήρανση σε θερμοκρασία δωματίου.

-T2 = ψύξη ύστερα από θερμή κατεργασία, στην συνέχεια ψυχρή κατεργασία και τέλος φυσιολογική σκλήρυνση με γήρανση σε θερμοκρασία δωματίου.

-T3 = αργή θέρμανση, στην συνέχεια ψυχρή κατεργασία και τέλος φυσιολογική σκλήρυνση με γήρανση σε θερμοκρασία δωματίου.

-T4 = αργή θέρμανση και φυσιολογική σκλήρυνση με γήρανση σε θερμοκρασία δωματίου.

-T5 = ψύξη ύστερα από θερμή κατεργασία και σκλήρυνση με γήρανση σε καθορισμένη θερμοκρασία (πάνω από την θερμοκρασία δωματίου).

-T6 = αργή θέρμανση και σκλήρυνση με γήρανση σε καθορισμένη θερμοκρασία (πάνω από την θερμοκρασία δωματίου).

-T7 = αργή θέρμανση και σταθεροποίηση.

-T8 = αργή θέρμανση, στην συνέχεια ψυχρή κατεργασία και τέλος σκλήρυνση με γήρανση σε καθορισμένη θερμοκρασία (πάνω από την θερμοκρασία δωματίου).

-T9 = αργή θέρμανση, στην συνέχεια σκλήρυνση με γήρανση σε καθορισμένη θερμοκρασία (πάνω από την θερμοκρασία δωματίου) και τέλος ψυχρή έλαση.

-T10 = ψύξη ύστερα από θερμή κατεργασία, στην συνέχεια ψυχρή κατεργασία και τέλος σκλήρυνση με γήρανση σε καθορισμένη θερμοκρασία (πάνω από τη θερμοκρασία δωματίου).

-W = το προϊόν υποβλήθηκε μόνο σε αργή θέρμανση. Συνήθως ακολουθείται σε παρένθεση και ο αντίστοιχος χρόνος, π.χ. 2024-W (1/2h).

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι η Αγγλία ακολουθεί δικό της χαρακτηρισμό, ο οποίος περιέχει στους κανονισμούς BS 1470-1475 για τα κατεργασμένα και τον BS 1490 για τα χυτά κράματα.

Η ονομαστική χημική σύσταση μερικών κραμάτων αλουμινίου

Alloy	Wt-pct of Alloying Elements								
	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Fe	Other
2014	0.8	4.4	0.8	0.50	0.10*			0.70*	
2219	0.20*	6.3	0.30	0.02*			0.15		V 0.10
2024	0.50*	4.4	0.6	1.5	0.10*			0.50*	
2124	0.20*	4.4	0.6	1.5	0.10*	0.25*		0.30*	total 0.15*
2048	0.15*	3.3	0.4	1.5		0.25*		0.20*	total 0.15*
Avior	0.05	4.6		0.4		1.4		0.05*	Ag 0.5
7039			0.27	2.8	0.20	4.0			
7075	0.40*	1.6		2.5	0.30	5.6		0.50*	
7178	0.40*	2.0		2.7	0.30	6.8		0.50*	
7079	0.30*	0.6	0.20	3.3	0.20	4.3		0.50*	
7049	0.25*	1.5	0.20*	2.5	0.15	7.6		0.35*	
7050	0.12*	2.4	0.10*	2.3	0.04*	6.3	0.12	0.15*	Ti 0.06*
7175	0.15*	1.6	0.10*	2.5	0.24	5.6			
RX 720	0.10*	1.2	0.10*	2.5	0.30	6.75	0.12	0.12*	
RR 55	0.19	2.4	0.06	1.6		0.10	-	1.0	Ni 1.0
5050	0.10	1.3	0.2	2.5	0.1	5.9	-	0.3	Ni 0.01*
5020	0.7	4.3	0.7	0.4		-	-	0.3	Ni 0.03
X 7067	0.1	1.5		2.5		6.0	0.15	0.1	Ag 0.35
X 7066	0.1	1.5		2.5		6.0	0.15	0.1	
Zergal 4	0.20*	0.8	0.20	2.3	0.05*	6.0	0.15	0.25*	
AZ 74	0.40	0.7-1.0	0.10	2.3	0.2	6.0		0.50	Ag 0.4
P.M.K		1.0		2.5	0.1	3.0	-	3.25	Ni 5.0

*Maximum values.

Οι μηχανικές ιδιότητες μερικών κραμάτων αλουμινίου

Alloy and Temper	Tensile Strength		Yield Strength		Fracture Toughness			
	N/m ²	(ksi)	N/m ²	(ksi)	Longitudinal		Short Transverse	
					N/m ^{3/2}	(ksi√in)	N/m ^{3/2}	(ksi√in)
2014-T6	480	(70)	410	(60)	23-26	(21-24)	18-21	(16-19)
2219-T87	470	(69)	390	(57)	28-32	(25-29)	21-33	(19-30)
2024-T3	450	(65)	310	(45)	33-50	(30-45)	22-29	(20-26)
2024-T8	480	(70)	450	(66)	22-27	(20-24)	18-22	(16-20)
2124-T8	490	(71)	440	(64)	31	(28)	25	(23)
2048-T3	460	(67)	420	(61)	37	(34)	28	(25)
Avior-T6	500	(72)	440	(64)	36	(33)	36	(33)
Avior-T73	492	(71)	435	(63)	31	(28)	31	(28)
7039-T64	430	(63)	370	(54)	>44	(>40)	33-27	(30-34)
7075-T6	570	(83)	500	(73)	26-29	(24-26)	17-22	(15-20)
7075-T76	540	(78)	470	(68)	29-33	(26-30)	19-23	(17-21)
7075-T73	500	(73)	430	(63)	31-33	(28-30)	20-23	(18-21)
7175-T6	610	(88)	540	(78)	21-23	(19-23)	15-23	(14-21)
7175-T76	570	(83)	500	(73)	29-33	(26-30)	19-21	(17-19)
7079-T6	540	(78)	470	(68)	25-32	(23-29)	20-22	(18-20)
7049-T73	532	(77)	470	(69)	28-33	(25-32)	19-23	(17-23)
7050-T736	550	(80)	510	(74)	33-39	(30-36)	21-29	(19-26)
7175-T736	540	(78)	470	(69)	33-38	(30-35)	21-29	(19-26)
RN 720	530	(77)	470	(69)	42	(38)	29	(26)
RR 53	423	(61)	377	(55)	30-37	(27-34)	18-23	(16-21)
DT2 5050	522	(75)	404	(59)			22-25	(20-23)
DT2 5022	446	(65)	446	(65)	25	(25)	27-29	(24-26)
X 3067	540	(78)	485	(70)				
X 3066	545	(79)	485	(70)	32	(29)	28.5	(26)
Zergal 4	540	(78)	490	(71)				
AZ 74		(78)	470	(68)	30-36	(27-32)	≈24	(≈22)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. B.F.Brown, "Stress Corrosion Cracking Control Measures". 1981.
2. Russell H. Jones, "Stress Corrosion Cracking Materials Performance and Evaluation".
3. Mars G. Fontana, "Corrosion Engineering".
4. Donald O. Sprowls, "High Strength Aluminum Alloys With Improved Resistance To Corrosion And Stress Corrosion Cracking".
5. Markus O. Speidel "Stress Corrosion Cracking of Aluminum Alloys", vol.2, pp. 631-650, 1975.
6. Jere H. Brophy, Robert M. Rose, and John Wulff, Τόμος II Μετάφραση Α. Α. Τζαβάρα, "Η Δομή και Ιδιότητες των Υλικών" - 1982.
7. Γιάννη Γ. Αντωνόπουλου, "Μεταλλογνωσία".
8. A.John Sedriks, B.C.Syrett, Series Editor, "Stress Corrosion Cracking Test Methods".
9. Annual Book of ASTM Standards, Volume 03.02 "Wear and Erosion; Metal Corrosion, 1994.
10. S. L. Chawla, R.K.Gupta "Materials Selection for Corrosion Control".
11. Bruce D. Craig, "Handbook of Corrosion Data".
12. Vinod S. Agarwala and Gilbert M. Ugiansky, "New Methods for Corrosion Testing of Aluminum Alloys".
13. Sprowls, D. O., Summerson, T. J., Ugiansky, G. M., Epstein, S. G., and Craig, H. L., Jr., "Evaluation of a Proposed Method of Testing for

Susceptibility to Stress Corrosion Cracking of High-Strength 7XXX Series Aluminum Alloy Products” *Stress Corrosion -New Approaches. ASTM STP 610*, American Society for Testing and Materials, 1976, pp. 3-31.

14. B. W. Lifka and D. O.Sprolws, “Stress Corrosion Testing of 7079-T6 Aluminum Alloy in Various Enviroment”, *Stress Corrosion Testing. ASTM STP 425*. Am. Soc. Testing Mats., 1967, p.342.



ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ

ΤΙΤΛΟΣ

Λ Η Ξ Η

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΣΜΕΝΟΥ

23-10-02

1728

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

Τηλ.: 74.760 -61

