

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΡΩΓΜΑΤΩΣΗ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΥΠΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ (SCC)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΜΕΩΝΙΔΗ ΔΗΜΗΤΡΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ

AOHNA 2019

Τίτλος Διπλωματικής:

ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΡΩΓΜΑΤΩΣΗ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΥΠΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ (SCC)

Τριμελής Επιτροπή: Καθ. Δ. Μανωλάκος

Καθ. Δ. Παντελής

Καθ. Ν. Τσούβαλης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ7
ABSTRACT9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ11
1.1 Εισαγωγή11
1.2 Ομοιόμορφη διάβρωση12
1.3 Γαλβανική διάβρωση13
1.4 Περικρυσταλλική διάβρωση14
1.5 Διάβρωση με βελονισμούς15
1.6 Διάβρωση χαραγής
1.7 Εκλεκτική προσβολή - Έκπλυση
1.8 Διάβρωση εκτριβής ή Ρευστομηχανική διάβρωση18
1.9 Βιολογική διάβρωση20
1.10 Περιβαλλοντικά προκαλούμενη ρωγμάτωση20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΡΩΓΜΑΤΩΣΗ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΥΠΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ
2.1 Εισαγωγή
2.2 Βασικά χαρακτηριστικά
2.3 Ηλεκτροχημική προσέγγιση26
2.4 Παράγοντες επίδρασης28
2.4.1 Μηχανικοί παράγοντες28
2.4.1.1 Μορφολογία ρωγμάτωσης29
2.4.1.2 Εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις30
2.4.1.3 Ποιότητα επιφάνειας35
2.4.2 Μεταλλουργικοί παράγοντες36
2.4.3 Περιβαλλοντικοί παράγοντες41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΡΩΓΜΑΤΩΣΗΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΥΠΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ46
3.1 Εισαγωγή
3.2 Έναρξη ρωγμών
3.3 Μηχανισμοί διάδοσης ρωγμών51
3.3.1 Μοντέλα διάλυσης51

3.3.2 Μοντέλα μηχανικής θραύσης55
3.3.2.1 Θραύση υποβοηθούμενη από ανοδική αντίδραση
3.3.2.1 Μοντέλο διάβρωσης σήραγγας59
3.3.2.3 Ψαθυροποίηση από υδρογόνο60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΥΠΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ65
4.1 Εισαγωγή65
4.2 Τυποποίηση δοκιμών67
4.3 Μέθοδοι στατικής φόρτισης σε μη ρωγματωμένα δοκίμια71
4.3.1 Δοκιμές σταθερού φορτίου και σταθερής παραμόρφωσης
4.3.2 Δοκιμές SCC με κάμψη75
4.3.3 Δοκιμές SCC με εφελκυσμό82
4.3.4 Δοκιμές SCC με δοκίμια κάμψης-U (U-bend)86
4.3.5 Δοκιμές SCC με δοκίμια τύπου C (C-Ring)90
4.4 Μέθοδοι στατικής φόρτισης σε προ-ρωγματωμένα δοκίμια95
4.4.1 Γεωμετρία προ-ρωγματωμένων δοκιμίων97
4.4.2 Τρόποι φόρτισης102
4.4.3 Εκτίμηση αποτελεσμάτων105
4.5 Δοκιμές με δυναμική φόρτιση111
4.5.1 Μέθοδος βραδείας καταπόνησης112
4.5.2 Δοκιμή βηματικής φόρτισης126
4.5.3 Δοκιμή γραμμικά αυξανόμενης τάσης126
4.5.4 Δοκιμές αυξανόμενου φορτίου και αυξανόμενης μετατόπισης σε προ-ρωγματωμένα
δοκίμια127
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΕΤΗ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΒΡΑΔΕΙΑΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ
ΣΤΟΝ ΧΑΛΥΒΑ ΑΗ36129
5.1 Εισαγωγή
5.2 Παράμετροι πειράματος130
5.2.1 Υλικό – Χάλυβας ΑΗ36130
5.2.2 Περιβάλλον έκθεσης134
5.2.3 Ρυθμός παραμόρφωσης137
5.3 Πειραματική διάταξη
5.4 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας140

5.4.1 Εκτέλεση SSRT στον αέρα140
5.4.2 Εκτέλεση SSRT σε διάλυμα 3,5%NaCl142
5.4.3 Εκτέλεση SSRT μετά από προηγούμενη έκθεση του δοκιμίου σε διάλυμα 3,5%NaCl143
5.5 Αποτελέσματα
5.5.1 Αποτελέσματα SSRT στον άερα149
5.5.2 Αποτελέσματα SSRT σε διάλυμα 3,5%NaCl151
5.5.3 Αποτελέσματα SSRT μετά από προηγούμενη έκθεση του δοκιμίου σε διάλυμα 3,5%NaCl 151
5.6 Στερεοσκοπική εξέταση155
5.6.1 Αποτελέσματα- Δοκίμια:1,2155
5.6.2 Αποτελέσματα- Δοκίμια 3-6156
5.7 Μεταλλογραφία
5.7.1 Αποτελέσματα- Δοκίμια:1,2161
5.7.2 Αποτελέσματα- Δοκίμια 3-6164
5.8 Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα169
5.8.1 Προιόντα διάβρωσης του χάλυβα ΑΗ36 στο διάλυμα NaCl
5.8.2 Συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των SSRTs172
5.8.3 Συμπεράσματα από τη μελέτη στο στεροσκόπιο και τη μεταλλογραφία
5.8.4 Τελικά συμπεράσματα178
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει το φαινόμενο της ρωγμάτωσης λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking, SCC), το οποίο έχει οδηγήσει σε καταστροφικές κατασκευαστικές αστοχίες, τόσο στον τομέα των ναυπηγικών κατασκευών, όσο και στους υπόλοιπους βιομηχανικούς τομείς. Η εν λόγω εργασία έχει μία διττή υπόσταση, καθώς βασίζεται (α) σε μία εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετική με το φαινόμενο της SCC (χαρακτηριστικά, συνθήκες, παράγοντες και μηχανισμοί του φαινομένου) και τις μεθόδους δοκιμών εκτίμησης της ευαισθησίας των μετάλλων σε SCC και (β) σε μία μελέτη σκοπιμότητας που σχεδιάστηκε και πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή, κ. Δημήτριο Ι. Παντελή (Διευθυντή του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας), για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, καθώς και για την αδιάλειπτη στήριξη που μου παρείχε με τις γνώσεις, την εμπειρία και την υπομονή του κατά την εκπόνησή της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Βέρα Μπουγιούρη (MSc Χημικός Μηχανικός/εξωτερικός συνεργάτης του Ε.Ν.Τ.) για την πρόθυμη υποστήριξη και καθοδήγηση μέχρι την ολοκλήρωση του παρόντος πονήματος. Θα ήταν παράλειψή μου να μην πω ένα ευχαριστώ στους Υ.Δ. και στα μέλη του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας που συνετέλεσαν στην προσπάθεια αυτή, και ιδιαίτερα στους κ. Αθανάσιο Μαρκουλή (ΕΕΔΙΠ) και κ. Χαράλαμπο Ξάνθη (ΕΤΕΠ) για την πολύτιμη βοήθειά τους κατά τη διεξαγωγή των απαιτούμενων πειραματικών διαδικασιών. Θα ήθελα, τέλος, να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Νικόλαο Τσούβαλη, για την υποστήριξή του κατά το τελικό στάδιο της διεκπεραίωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας και τον Καθηγητή Δ. Μανωλάκο (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.) που δέχτηκε να είναι μέλος της τριμελούς επιτροπής επίβλεψης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο μελέτης της εν λόγω διπλωματικής εργασίας είναι το φαινόμενο της ρωγμάτωσης λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking, SCC). Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά, οι παράγοντες επίδρασης και οι μηχανισμοί έναρξης και διάδοσης του φαινομένου της SCC, καθώς επίσης και οι μέθοδοι δοκιμών που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ευαισθησίας των μεταλλικών υλικών στο φαινόμενο αυτό. Η παρούσα εργασία απαρτίζεται από πέντε κεφάλαια, το περιεχόμενο των οποίων παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Στο πρώτο κεφάλαιο, δίνεται ο ορισμός της διάβρωσης και πραγματοποιείται μια ανασκόπηση των κυριότερων μορφών διάβρωσης που έχουν παρατηρηθεί στις μεταλλικές κατασκευές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά της ρωγμάτωσης λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση και οι συνθήκες που οδηγούν στην έναρξη και τη διάδοση της ρωγμάτωσης. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των μηχανικών, μεταλλουργικών και περιβαλλοντικών παραγόντων που επιδρούν στην εξέλιξη του φαινομένου.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρατίθενται οι προτεινόμενοι μηχανισμοί της SCC, οι οποίοι αναπτύχθηκαν κατά καιρούς με στόχο την εξήγηση του φαινομένου. Για κάθε μηχανισμό, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο συνεργούν οι μηχανικές, περιβαλλοντικές και μεταλλουργικές παράμετροι ενός συστήματος υλικούπεριβάλλοντος, για την έναρξη και τη διάδοση της ρωγμάτωσης.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιέχει τις κυριότερες μεθόδους δοκιμών που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ευαισθησίας των μεταλλικών υλικών σε SCC. Για κάθε μέθοδο, πραγματοποιείται περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων που χρησιμοποιούνται, του είδους της μηχανικής καταπόνησης που εφαρμόζεται και της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθείται, ενώ παρατίθενται και ενδεικτικές παρατηρήσεις που αφορούν στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει μια μελέτη σκοπιμότητας της δοκιμής βραδείας καταπόνησης (Slow Strain Rate Test, SSRT), η οποία αποτελεί την επικρατέστερη μέθοδο εκτίμησης της συμπεριφοράς ενός μεταλλικού υλικού σε SCC. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε ένας κύκλος πειραμάτων σε χάλυβα AH36 υπό την επίδραση διαλύματος 3,5% χλωριούχου νατρίου (NaCl). Στο εν λόγω κεφάλαιο, περιγράφονται αναλυτικά όλα τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας (προετοιμασία δοκιμίων, εκτέλεση πειραμάτων, εξέταση της περιοχής θραύσης των δοκιμίων) και πραγματοποιείται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αυτήν.

Τέλος, στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το σύνολο της μελέτης που διεξήχθη στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to examine the Stress Corrosion Cracking (SCC) behavior of metallic materials, with particular emphasis on testing and evaluation methods.

In the introductory chapter, the definition and the repercussions of corrosion are presented, followed by a brief description of the common corrosion forms that metallic materials are subject to, including uniform corrosion, galvanic corrosion, pitting corrosion and environmentally induced cracking.

In the second chapter, the main principles of stress corrosion cracking are outlined, whilst the electrochemical processes that typically occur in a stress corrosion crack are noted. Furthermore, the mechanical (threshold stress, stress intensity factor, cracking morphology), environmental (temperature, concentration, flow velocity, pH, pressure, electrode potential) and metallurgical (alloy composition, dislocation structure, stacking fault energy) factors affecting the initiation and propagation of cracking are described in detail.

The third chapter contains the various mechanisms and models that have been developed to explain and predict stress corrosion cracking. Crack initiation at pits or at other surface discontinuities and crack initiation by intergranular corrosion are explained. In reference to crack propagation mechanisms, the slip dissolution model, the corrosion tunnel model, and other mechanical fracture models based on film induced cleavage, absorption and hydrogen embrittlement are detailed. Additionally, the applicability of the various proposed mechanisms is discussed.

The fourth chapter attempts to cover all aspects of testing and evaluation methods for stress corrosion cracking of metals and alloys. Initially, the importance of standardization of SCC test methods is pointed out, followed by a list of test standards issued by the American Society for Testing Materials (ASTM), the International Organization for Standardization (ISO) and the National Association of Corrosion Engineers (NACE). A detailed overview of the various specimen types, the loading mode and the testing procedures is provided. Additionally, guidelines for the assessment of test results and methods for quantitative evaluation of metallic materials' SCC susceptibility are noted. This chapter is mainly divided into two parts to deal with static load tests (bending, uniaxial tension, etc.) and dynamic load tests

(slow strain rate testing, linearly increasing stress testing, rising load and rising displacement tests, etc.). Testing of smooth and pre-cracked specimens is also considered separately because of their distinctive geometric characteristics and the kind of information they provide.

The fifth chapter contains a feasibility study for the evaluation of SCC susceptibility of AH36 High Strength Steel, using the Slow Strain Rate Testing (SSRT). The testing took place in a 3.5%NaCl solution. All stages of the experimental process (design and preparation of specimens, testing procedure) are described in detail. The test results and the results of stereoscopic and microscopic examination of the specimens after testing are presented and discussed.

Finally, the last chapter is dedicated to the synopsis of the conclusions drawn from the whole study that has been conducted.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

1.1 Εισαγωγή^{[1],[2],[4]}

Ο όρος «διάβρωση» σημαίνει φθορά και υποβάθμιση των ιδιοτήτων ενός υλικού, λόγω της αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται. Το φαινόμενο αυτό αφορά τόσο μεταλλικά (μέταλλα, κράματα), όσο και μη μεταλλικά υλικά (πολυμερή, κεραμικά, ξύλο, κλπ). Πριν τη χρήση τους, τα υλικά υφίστανται μια σειρά από διαδικασίες επεξεργασίας, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την ενεργειακή τους αναβάθμιση σε σχέση με τη φυσική τους κατάσταση. Συνεπώς, κάθε υλικό έχει μια εγγενή τάση να επιστρέψει στη φυσική του κατάσταση, η οποία είναι η πιο υποβαθμισμένη ενεργειακά.

Παρόλο που τα πολυμερή και τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται συχνά στις κατασκευές τα τελευταία χρόνια, τα μέταλλα και κράματα παραμένουν τα βασικά κατασκευαστικά υλικά, λόγω των υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων που επιδεικνύουν, καθώς και της καλής αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες σε σχέση με τα προηγούμενα. Ωστόσο, τα μεταλλικά υλικά είναι πιο ευπαθή σε διάβρωση σε σχέση με τα πολυμερή και τα κεραμικά.

Ως διάβρωση μετάλλου, ορίζουμε την αλληλεπίδραση αυτού με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του μετάλλου, του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος, που αυτά αποτελούν τμήμα του (ISO 8044, 1986).

Το φαινόμενο της διάβρωσης έχει μελετηθεί εκτενώς από μηχανικούς και επιστήμονες, επειδή υπάρχουν σοβαροί λόγοι ανησυχίας σχετικά με τις συνέπειες που προκαλεί. Πρόωρες κατασκευαστικές αστοχίες λόγω διάβρωσης είναι ικανές να προκαλέσουν τραυματισμούς, θανάτους, ενώ σε δεύτερη φάση, τεράστιες οικονομικές απώλειες [2]. Η διάβρωση μπορεί να εμφανιστεί με διάφορες μορφές στα μεταλλικά υλικά, ανάλογα με το σύστημα μετάλλου/κράματος – περιβάλλοντος. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται συνοπτικά οι πιο συχνά παρατηρούμενες.

1.2 Ομοιόμορφη διάβρωση^{[2],[3]}

Η Ομοιόμορφη Διάβρωση (Uniform or General Corrosion) χαρακτηρίζεται από σχετικά έντονη προσβολή, η οποία εκτείνεται στο σύνολο ή σε μεγάλο τμήμα της εκτεθειμένης μεταλλικής επιφάνειας. Αποτέλεσμα της ομοιόμορφης διάβρωσης

είναι ο σχηματισμός ενός περίπου ισόπαχου στρώματος προϊόντων διάβρωσης στην επιφάνεια ή η σχετικά ομοιόμορφη διάλυση αυτής (Εικόνα 1.1). Βασική προϋπόθεση για εμφάνιση ομοιόμορφης διάβρωσης είναι η πραγματοποίηση ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων σε όλη την επιφάνεια του υλικού



Uniform Corrosion

Εικόνα 1.1 Ομοιόμορφη Διάβρωση [3]

και όχι τοπικά σε συγκεκριμένα σημεία. Συνεπώς, παρουσιάζεται συνήθως σε ομοιογενή υλικά που δε σχηματίζουν παθητικά στρώματα.

Λόγω της ομοιόμορφης κατανομής της προσβολής, ο ρυθμός της ομοιόμορφης διάβρωσης συνήθως εκφράζεται σε απώλεια πάχους του μεταλλικού υλικού ανά μονάδα χρόνου. Η πιο συνηθισμένη έκφραση είναι σε mpy (mils per year). Ο προσδιορισμός του ρυθμού διάβρωσης ενός υλικού σε συγκεκριμένο περιβάλλον πραγματοποιείται με την έκθεση ενός δοκιμίου στο περιβάλλον και στη συνέχεια, τη μέτρηση του βάρους του μετά την απομάκρυνσή του από αυτό. Γνωρίζοντας το χρόνο έκθεσης, την απώλεια βάρους, το εμβαδό της εκτεθειμένης επιφάνειας και την πυκνότητα του μεταλλικού υλικού, ο ρυθμός διάβρωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$mpy = \frac{22.273 WL}{DAT}$$

Όπου:

WL: απώλεια βάρους (g)

D: πυκνότητα υλικού (g/cm³)

Α: εμβαδόν εκτεθειμένης επιφάνειας δοκιμίου (in²)

T: χρόνος έκθεσης (days).

Η ομοιόμορφη διάβρωση είναι εύκολα ανιχνεύσιμη, ενώ ο ρυθμός της είναι εύκολα μετρήσιμος και προβλέψιμος. Συνεπώς, αποτελεί ίσως την πιο ακίνδυνη μορφή διάβρωσης όσον αφορά την πιθανότητα αστοχίας, παρόλο που συνδέεται με μεγάλες απώλειες υλικού σε σχέση με άλλα είδη διάβρωσης. Ρυθμοί διάβρωσης χαμηλότεροι των 3 mpy είναι αποδεκτοί για τις περισσότερες κατασκευές και εξοπλισμούς.

1.3 Γαλβανική διάβρωση^{[1]-[3]}

Η Γαλβανική Διάβρωση (Galvanic Corrosion) πραγματοποιείται όταν δύο ανόμοια μέταλλα ή κράματα έλθουν σε επαφή, ενώ βρίσκονται στο ίδιο διαβρωτικό περιβάλλον (ηλεκτρολύτης). Λόγω της διαφοράς δυναμικού των ανόμοιων μετάλλων σχηματίζεται γαλβανικό κελί, με αποτέλεσμα να υπάρχει ροή ηλεκτρονίων από το δραστικότερο υλικό (άνοδος), το οποίο διαβρώνεται επιλεκτικά, προς το ευγενέστερο (κάθοδος), το οποίο προστατεύεται (Εικόνα 1.2).

Ο ρυθμός ανοδικής διάλυσης του δραστικότερου υλικού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο μετάλλων/κραμάτων ή ο λόγος εκτιθέμενης επιφάνειας ανόδου προς την αντίστοιχη της καθόδου. Όσο μειώνεται ο λόγος, τόσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης και η άνοδος διαβρώνεται με ταχύτατους ρυθμούς. Για παράδειγμα, καθώς το αλουμίνιο (AI) είναι δραστικότερο από το χάλυβα, αλουμινένια πριτσίνια σε χαλύβδινη πλάκα θα διαβρωθούν με πολύ υψηλότερους ρυθμούς σε σχέση με μια αλουμινένια πλάκα με χαλύβδινα πριτσίνια (Εικόνα 1.3).

Στην Εικόνα 1.4 παρουσιάζεται η σχετική δραστικότητα διάφορων εμπορικών μετάλλων και κραμάτων στο θαλασσινό νερό. Οι τιμές αντιστοιχούν σε δυναμικά διάβρωσης και γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ δύο μετάλλων/κραμάτων, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος γαλβανικής διάβρωσης.

13

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σειρά δραστικότητας μπορεί να είναι διαφορετική σε άλλα περιβάλλοντα.



Εικόνα 1.3 Γαλβανική διάβρωση σε πριτσινωτή πλάκα. Ο ρυθμός διάβρωσης των αλουμινένιων πριτσινιών θα είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της αλουμινένιας πλάκας λόγω της μεγάλης διαφοράς του εμβαδού ανοδικής και καθοδικής



Εικόνα 1.4 Γαλβανική σειρά εμπορικών μετάλλων και κραμάτων στο θαλασσινό νερό [3]

1.4 Περικρυσταλλική διάβρωση^{[1]-[3]}

Η Περικρυσταλλική Διάβρωση (Intergranular Corrosion) αποτελεί μια εντοπισμένη μορφή διάβρωσης, η οποία προσβάλλει τα όρια των κόκκων του μεταλλικού υλικού, ενώ το υπόλοιπο υλικό παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστο (Εικόνα 1.5). Η προσβολή ξεκινά από τα όρια των κόκκων στην επιφάνεια του υλικού, διαδίδεται κατά μήκος των κόκκων προς το εσωτερικό του, ενώ σταδιακά προκαλείται διαχωρισμός των κόκκων. Σε ακραίες περιπτώσεις, οι κόκκοι αποσπώνται από το υλικό σχηματίζοντας κοιλότητες. Σε κάθε περίπτωση όμως, εκτεταμένη περικρυσταλλική διάβρωση έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού και ειδικότερα της δυσθραυστότητας του, ενώ η θραύση,



Intergranular

Εικόνα 1.5 Περικρυσταλλική Διάβρωση [3]

εφόσον επέλθει, είναι ψαθυρή και απρόβλεπτη.

Η ευαισθησία της περιοχής των συνόρων των κόκκων οφείλεται κυρίως στη διαφορετική χημική τους σύσταση σε σχέση με το υπόλοιπο κράμα. Το γεγονός αυτό συμβαίνει για τους εξής λόγους:

- Οι ανεπιθύμητες προσμίξεις, ενώσεις καθώς και διάφορα κατακρημνίσματα τείνουν να συγκεντρώνονται στα όρια των κόκκων.
- Σε κάποια κράματα (πχ ορείχαλκος), η συγκέντρωση του ενός κραματικού στοιχείου είναι μεγαλύτερη στα όρια των κόκκων. Αντίθετα σε κάποια άλλα (πχ ανοξείδωτος χάλυβας), υπάρχει σημαντική έλλειψη κάποιου κραματικού στοιχείου στα σύνορα των κόκκων.

Λόγω της διαφοράς στη χημική σύσταση, σχηματίζονται τοπικά γαλβανικά κελιά, με τα σύνορα των κόκκων να αποτελούν την άνοδο και να παρουσιάζουν ανοδική διάλυση (περικρυσταλλική διάβρωση).

1.5 Διάβρωση με βελονισμούς^{[1]-[3]}

Η Διάβρωση με βελονισμούς ή Βελονοειδής Διάβρωση (Pitting Corrosion) αφορά μια εντοπισμένη μορφή προσβολής, η οποία έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό κοιλοτήτων ή οπών στο μεταλλικό υλικό. Ανάλογα με το διαβρωτικό περιβάλλον και τα μεταλλουργικά χαρακτηριστικά του κράματος, οι σχηματιζόμενες εσοχές έχουν διάφορες μορφές (Εικόνα 1.6), όμως βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η μικρή διάμετρος στην επιφάνεια σε σχέση με το βάθος τους, γι αυτό και αναφέρονται ως βελονισμοί (pits).

Σε υλικά που εμφανίζουν φαινόμενα παθητικοποίησης, η διάβρωση με βελονισμούς ξεκινά από κάποια αστοχία του προστατευτικού στρώματος. Η αστοχία αυτή μπορεί να προϋπάρχει και να οφείλεται σε μηχανικούς παράγοντες, είτε να δημιουργείται με τη προσρόφηση ιόντων αλογόνων, τα οποία διαπερνούν το παθητικό στρώμα σε προτιμητέα σημεία, όπως επιφανειακές ανωμαλίες, όρια κόκκων ή εγκλείσματα στο μεταλλικό υλικό. Με αυτό τον τρόπο τα ιόντα κινούνται στις περιοχές αυτές με αποτέλεσμα την τοπική διάλυση του στρώματος οξειδίου. Σε υλικά, στα οποία τα προστατευτικά στρώματα δεν είναι συνεχή, οι βελονισμοί αναπτύσσονται σε πόρους ή άλλες ασυνέχειες.



Εικόνα 1.6 Χαρακτηριστικές μορφές βελονισμών [3]

Η βελονοειδής διάβρωση αποτελεί συχνά μηχανισμό εξέλιξης και άλλων μορφών διάβρωσης, όπως διάβρωση χαραγής, περικρυσταλλική διάβρωση ή διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση. Η ανίχνευση των βελονισμών είναι αρκετά δύσκολη λόγω της μικρής διατομής, ενώ συχνά καλύπτονται από τα διάφορα προϊόντα διάβρωσης. Το γεγονός αυτό καθιστά τη βελονοειδή διάβρωση μια από τις πιο επικίνδυνες μορφές διάβρωσης, παρόλο που η απώλεια υλικού είναι αμελητέα.

Η αντίσταση ενός κράματος σε διάβρωση με βελονισμούς μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση δεικτών όπως η κρίσιμη θερμοκρασία βελονοειδούς διάβρωσης (Critical Pitting Temperature, CPT) ή το ισοδύναμο αντίστασης σε διάβρωση με βελονισμούς (Pitting Resistance Equivalent Number, PREN). Η CPT εκφράζει την ελάχιστη θερμοκρασία του περιβάλλοντος έκθεσης στην οποία παρατηρούνται βελονισμοί στο υλικό, και συνήθως προσδιορίζεται με εμβάπτιση σε διάλυμα (10% FeCl₃ · 6 H₂O). Ο PREN εκφράζει την αντοχή σε βελονοειδή διάβρωση,

16

δηλαδή όσο υψηλότερη είναι η τιμή του τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του κράματος. Καθορίζεται από την περιεκτικότητα του κράματος σε μολυβδαίνιο (Mo), χρώμιο (Cr) και άζωτο (N) και υπολογίζεται από τη σχέση:

PREN = (%Cr) + 3.3(%Mo) + 30(%N)

1.6 Διάβρωση χαραγής^{[1]-[3]}

Η Διάβρωση Χαραγής (Crevice Corrosion) αποτελεί μια εντοπισμένη μορφή προσβολής, η οποία λαμβάνει χώρα σε σχισμές ή άλλες «θωρακισμένες» περιοχές σε μεταλλικές κατασκευές και μηχανολογικά εξαρτήματα, όπως για παράδειγμα περιοχές κάτω από φλάντζες, παρεμβύσματα, καρφιά, μπουλόνια, πριτσίνια ή διεπιφάνειες επικαλύψεων συνδέσμων και σωλήνων. Οι σχισμές αυτές είναι αρκετά μεγάλες, ώστε να μπορεί να διεισδύσει το υγρό διαβρωτικό μέσο, όμως αρκετά μικρές, ώστε να παραμείνει στάσιμο.

Αυτή η μορφή διάβρωση οφείλεται κυρίως λόγω της διαφορετικής σύστασης του περιβάλλοντος έκθεσης στη σχισμή, σε σύγκριση με το υπόλοιπο περιβάλλον. Αρχικά ο ρυθμός διάβρωσης είναι ο ίδιος μέσα και έξω από τη χαραγή. Με την

πραγματοποίηση των καθοδικών αντιδράσεων μέσα στη χαραγή, σταδιακά το οξυγόνο καταναλώνεται. Παράλληλα, η παροχή οξυγόνου μέσα στη χαραγή είναι περιορισμένη, επομένως σταδιακά εκλείπει. Η έλλειψη οξυγόνου έχει ως αποτέλεσμα να συνεχίζεται η ανοδική διάλυση



Crevice Corrosion

του μετάλλου μέσα στη χαραγή με καθοδική Εικόνα 1.7 Διάβρωση Χαραγής [3] αντίδραση, αυτή της αναγωγής του οξυγόνου, να συνεχίζεται εκτός της χαραγής. Συνεπώς, επέρχεται αύξηση της δραστικότητας του διαλύματος μέσα στη σχισμή και κατ' επέκταση αύξηση του ρυθμού τοπικής διάλυσης του μετάλλου (Εικόνα 1.7).

Η διάβρωση χαραγής εξαρτάται από τη δραστικότητα του διαλύματος και την αντοχή του κράματος. Η τελευταία συχνά εκτιμάται μέσω της Κρίσιμης Θερμοκρασίας Διάβρωσης Χαραγής (Critical Crevice Temperature, CCT), δηλαδή της

ελάχιστης θερμοκρασίας όπου παρατηρείται διάβρωση χαραγής στο κράμα, όταν εμβαπτιστεί σε διάλυμα 10% χλωριούχου σιδήρου.

1.7 Εκλεκτική προσβολή- Έκπλυση^{[1],[3]}

Η Εκλεκτική Προσβολή (Selective attack) ή Έκπλυση (Leaching) αποτελεί μια μορφή διάβρωσης, η οποία προσβάλλει αποκλειστικά κράματα, δύο ή περισσότερων μετάλλων. Αφορά την επιλεκτική απομάκρυνση του πιο δραστικού κραματικού στοιχείου από την μεταλλική δομή, έχοντας ως αποτέλεσμα τη σημαντική υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του εναπομένοντος κράματος. Η απομάκρυνση πραγματοποιείται με ανοδική διάλυση του δραστικού στοιχείου, ενώ το ευγενές κραματικό στοιχείο συμπεριφέρεται ως κάθοδος. Η αντοχή των κραμάτων σε αυτού του τύπου διάβρωση εξαρτάται από την χημική σύσταση του κράματος. Όσο μειώνεται η συγκέντρωση του δραστικότερου στοιχείου, τόσο αυξάνεται η αντοχή του υλικού.

Το πιο γνωστό παράδειγμα εκλεκτικής προσβολής είναι η αποψευδαργύρωση του ορείχαλκου, από την οποία προκύπτει ένα πορώδες, εύθραυστο και χαμηλής αντοχής υλικό. Το φαινόμενο αυτό γίνεται δύσκολα αντιληπτό, διότι δεν υπάρχουν μεταβολές στο πάχος, ενώ τα σημεία που προσβάλλονται καλύπτονται συχνά από προϊόντα διάβρωσης. Ανάλογα με το ποσοστό του ψευδαργύρου στον ορείχαλκο, η αποψευδαργύρωση διακρίνεται σε ομοιόμορφη (υψηλό ποσοστό Zn) και σε εντοπισμένη (χαμηλό ποσοστό Zn).

1.8 Διάβρωση εκτριβής ή Ρευστομηχανική διάβρωση^{[1]-[3]}

Η Διάβρωση Εκτριβής (Erosion Corrosion) οφείλεται στη συνδυαστική δράση ηλεκτροχημικών αντιδράσεων διάβρωσης και μηχανικών επιδράσεων λόγω της σχετικής κίνησης ενός διαβρωτικού ρευστού στη μεταλλική επιφάνεια. Λόγω της ταχύτητας της ροής καταστρέφονται τα επιφανειακά στρώματα και απομακρύνονται τα προϊόντα διάβρωσης, αφήνοντας συνεχώς νέα εκτεθειμένη μεταλλική επιφάνεια στο διαβρωτικό περιβάλλον (Εικόνα 1.8). Ουσιαστικά, δημιουργείται τοπικό γαλβανικό κελί, με την εκτεθειμένη περιοχή της μεταλλικής επιφάνειας να συμπεριφέρεται ως άνοδος και την άθικτη περιοχή ως κάθοδος. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η επιταχυνόμενη τοπική ανοδική διάλυση στο υλικό και ο σχηματισμός εσοχών σε μορφή 'πετάλου', βελονισμών σε μορφή 'δακρύων' ή αυλακώσεων με υποκοπή κυματοειδούς μορφής. Η καταστροφή της επιφάνειας συνήθως συμβαίνει κατά τη διεύθυνση της ροής (Εικόνα 1.8), όμως μπορεί να γίνει και αντίθετα σ' αυτή (Εικόνα 1.9).



3. Elevated corrosion rate in base material

4. Further erosion maintains contact between base material and erosive fluid

Εικόνα 1.8 Μηχανισμός Διάβρωσης Εκτριβής [6]

Η διάβρωση εκτριβής επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η ταχύτητα ρευστού, η τύρβη της ροής, η παρουσία στερεών σωμάτων, η αντοχή του κράματος και του επιφανειακού στρώματος και η θερμοκρασία. Εμφανίζεται σε καμπύλα τμήματα σωληνώσεων, τουρμπίνες, αντλίες, προπέλες και γενικά σε εξαρτήματα που εκτίθενται σε κινούμενα ρευστά και ιδιαίτερα σε περιοχές όπου υπάρχουν αλλαγές στη διατομή και μεταβολές στην ταχύτητα και τη διεύθυνση της

ροής. Κράματα χαμηλής αντοχής, όπως ανθρακούχοι χάλυβες, χαλκός και αλουμίνιο παρουσιάζουν ευαισθησία σε διάβρωση εκτριβής. Αντίθετα, ανοξείδωτοι χάλυβες και κράματα νικελίου που σχηματίζουν ισχυρά παθητικά στρώματα με καλή πρόσφυση στην επιφάνειά τους, παρουσιάζουν διάβρωση εκτριβής μόνο σε πολύ έντονες συνθήκες.



Erosion Εικόνα 1.9 Διάβρωση Εκτριβής [3]

1.9 Βιολογική διάβρωση^[2]

Συχνά, η συγκέντρωση μικροοργανισμών στο περιβάλλον έκθεσης ενός μετάλλου/ κράματος μπορεί να οδηγήσει στη διαμόρφωση διαβρωτικών συνθηκών λόγω μεταβολικής δραστηριότητας, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως Βιολογική Διάβρωση (Biological Corrosion), ή λόγω της συνεισφοράς των μικροοργανισμών στην εξέλιξη της, ως Μικροβιολογική Διάβρωση (Microbiologically Induced Corrosion). Η εν λόγω μεταβολική δραστηριότητα μπορεί να προκαλέσει:

- Μετατροπή του περιβάλλοντος έκθεσης σε διαβρωτικό μέσο
- Δημιουργία ηλεκτρολυτικών κελιών στη μεταλλική επιφάνεια
- Μείωση της αντοχής των επιφανειακών στρωμάτων
- Επίδραση στο ρυθμό ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων
- Μεταβολή της σύστασης του περιβάλλοντος έκθεσης

1.10 Περιβαλλοντικά προκαλούμενη ρωγμάτωση^{[1],[3]-[5],[7]}

Η Περιβαλλοντικά Προκαλούμενη Ρωγμάτωση (Environmentally Induced Cracking) αφορά τη δημιουργία ρωγμών στο μεταλλικό υλικό, η οποία οφείλεται σε επιδράσεις του περιβάλλοντος έκθεσης σε συνδυασμό με μηχανικούς παράγοντες. Πρόκειται για μια κατηγορία επικίνδυνων μορφών εντοπισμένης προσβολής, η οποία, ανάλογα με το σύστημα υλικού-περιβάλλοντος, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα αργή και ελεγχόμενη εξέλιξη ρωγμής ή απρόβλεπτη και καταστροφική αστοχία. Διακρίνονται τρία είδη διάβρωσης τα οποία οδηγούν σε ρωγμάτωση των μεταλλικών υλικών:

- Διάβρωση υπό Μηχανική Καταπόνηση
- Διάβρωση Κόπωσης
- Ψαθυροποίηση από Υδρογόνο

Η εγγενής πολυπλοκότητα των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα και των παραμέτρων που επιδρούν στα παραπάνω είδη περιβαλλοντικής ρωγμάτωσης, καθιστά κάποιες φορές δύσκολη τη διαφοροποίηση καθενός από τα υπόλοιπα.

Ρωγμάτωση λόγω Διάβρωσης με Μηχανική Καταπόνηση ^{[1],[5]}

Ως ρωγμάτωση λόγω διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking, SCC), ορίζεται η ρωγμάτωση λόγω της συνεργιστικής δράσης διαβρωτικού περιβάλλοντος και στατικών εφελκυστικών τάσεων. Οι τάσεις αυτές μπορεί να είναι εξωτερικά εφαρμοζόμενες, παραμένουσες ή τάσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών (θερμικές). Η SCC αποτελεί μια ύπουλη μορφή διάβρωσης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα σημαντική υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων με πολύ μικρή απώλεια υλικού. Η βλάβη δύσκολα ανιχνεύεται κατά την επιθεώρηση, συνεπώς οι ρωγμές μπορούν να προκαλέσουν ταχεία θραύση και καταστροφικές αστοχίες σε μεταλλικά εξαρτήματα και κατασκευές.

Ρωγμάτωση λόγω Διάβρωσης Κόπωσης [1],[7]

Η Διάβρωση Κόπωσης (Fatigue Corrosion) συνδέεται με τη μειωμένη αντοχή που παρουσιάζει το μεταλλικό υλικό σε κόπωση, λόγω της συνδυαστικής δράσης κυκλικής φόρτισης και διαβρωτικού περιβάλλοντος, σε σχέση με την αντίστοιχη με απουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος. Η εικόνα της επιφάνειας θραύσης λόγω διάβρωσης κόπωσης είναι παρόμοια με αυτή λόγω απλής κόπωσης. Επειδή και στις δύο περιπτώσεις, η επιφάνεια θραύσης καλύπτεται από προϊόντα διάβρωσης, η διάκριση μεταξύ των δύο περιπτώσεων πραγματοποιείται με ειδικό εργαστηριακό έλεγχο.

Ψαθυροποίηση από Υδρογόνο^[1]

Ο όρος «Ψαθυροποίηση από Υδρογόνο» (Hydrogen Embrittlement) αφορά την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του μεταλλικού υλικού λόγω απορρόφησης υδρογόνου από την κρυσταλλική δομή. Η υποβάθμιση αυτή συνεισφέρει στην ανάπτυξη και διάδοση ρωγμών, η οποία πολλές φορές οδηγεί σε ψαθυρή θραύση.

Παράγοντες που διαφοροποιούν τα είδη Περιβαλλοντικής Ρωγμάτωσης^{[3]-[5]}

Σε γενικές γραμμές υπάρχουν πολλές ομοιότητες μεταξύ της SCC και της διάβρωσης κόπωσης. Η διαφοροποίηση τους έγκειται κυρίως στη φύση της φόρτισης, δηλαδή στην πρώτη είναι στατική εφελκυστική φόρτιση, ενώ στη δεύτερη είναι κυκλική. Μια ακόμη σημαντική διαφορά είναι ότι η SCC εμφανίζεται σε συγκεκριμένους συνδυασμούς υλικού – περιβάλλοντος. Επιπλέον, υπάρχουν και διαφορές που αφορούν τη μορφολογία των ρωγμών, την παρουσία προϊόντων διάβρωσης στην επιφάνεια θραύσης και άλλους παράγοντες, οι περισσότεροι από τους οποίους παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Η διαφοροποίηση μεταξύ Ψαθυροποίησης από Υδρογόνο και SCC δεν είναι πάντα ξεκάθαρη, καθώς η πρώτη συχνά αναφέρεται, ως μηχανισμός για την εξέλιξη της SCC, αντί σαν μια ξεχωριστή κατηγορία περιβαλλοντικής ρωγμάτωσης (Κεφάλαιο 3.3.2.3). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.1, υπάρχουν πολλές ομοιότητες σχετικά με τη φύση του φορτίου, τη μορφολογία των ρωγμών και την επιφάνεια θραύσης. Οι διαφορές τους αφορούν παράγοντες, όπως τη μικροδομή του μετάλλου και την καθοδική πόλωση, η οποία αναστέλλει την SCC ενώ επιταχύνει την ψαθυροποίηση από υδρογόνο.

Factor	SCC	Fatigue corrosion	Hydrogen induced cracking
Stress	Static tensile	Cyclic + tensile	Static tensile
Aqueous corrosive	Specific to the alloy	Any	Any
Temperature increase	Accelerates	Accelerates	< Ambient: increases < Ambient: increases
Pure metal	Resistant	Susceptible	Susceptible
Crack morphology	Transgranular Intergranular Branched	Transgranular Unbranched Blunt tip	Transgranular Intergranular Unbranched Sharp tip
Corrosion products in cracks	Absent	Present	Absent
Crack surface appearance	Cleavagelike	Beach marks and/or striations	Cleavagelike
Cathodic polarization	Suppresses	Suppresses	Accelerates
Near maximum strength	Susceptible but minor	Accelerates	Accelerates

Πίνακας 1.1

•	
Χαρακτηριστικά μορφών περιβαλλοντικής διάβρωσης	[3]

κεφαλαίο 2

ρωγματώση λογώ διαβρώσης ύπο μηχανική καταπονήση

2.1 Εισαγωγή^{[5],[7]}

Σχεδόν σε όλους τους βιομηχανικούς τομείς, έχουν παρουσιαστεί καταστροφικές αστοχίες λόγω Διάβρωσης υπό Μηχανική Καταπόνηση (Stress Corrosion). Η ασταθής φύση των αστοχιών αυτών κατέστησε αναγκαία την εκτεταμένη μελέτη του φαινομένου, ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση της πιθανότητας ρωγμάτωσης στις μεταλλικές κατασκευές και η πρόβλεψη των πιθανών συνεπειών στην ακεραιότητά τους. Ως αποτέλεσμα των ερευνών, έχουν αναπτυχθεί πολλά πρότυπα για την διεξαγωγή αποτελεσματικών και αξιόπιστων δοκιμών στα υλικά, ενώ υπάρχει πλέον πληθώρα πληροφοριών σχετικά με τη διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση. Παρόλα αυτά ακόμη παρατηρούνται αστοχίες λόγω SCC (Stress Corrosion Cracking) σε μεταλλικές κατασκευές, οι οποίες πιθανόν να οφείλονται στους παρακάτω παράγοντες:

- Οι παράμετροι συγκόλλησης δεν είναι πάντα ιδανικές, με αποτέλεσμα να προκαλούν ατέλειες στο υλικό και να υποβαθμίζουν τις ιδιότητές του.
- Οι συνθήκες λειτουργίας είναι διαφορετικές από τις αρχικά προβλεπόμενες,
 λόγω τροποποιήσεων προς βελτίωση της αποδοτικότητας της κατασκευής.
- Προσωρινές διαφοροποιήσεις πραγματοποιούνται (προγραμματισμένες ή τυχαίες) στις επιβαλλόμενες φορτίσεις, στη θερμοκρασία ή στο περιβάλλον της κατασκευής.
- Τοπικές διαδικασίες διάβρωσης οδηγούν στη δημιουργία βελονισμών ή χαραγών, δηλαδή σημείων έναρξης ρωγμάτωσης λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση.
- Η σύσταση των διαλυμάτων αλλάζει λόγω εξάτμισης ή βρασμού.

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται βασικά χαρακτηριστικά της SCC, παράμετροι που επηρεάζουν την εξέλιξή της, καθώς και μέθοδοι αντιμετώπισης.

2.2 Βασικά χαρακτηριστικά ^{[2],[3],[5],[7]}

Μια συνηθισμένη παρερμηνεία σχετικά με την SCC είναι ότι η ρωγμάτωση προκύπτει λόγω συγκέντρωσης τάσεων σε ασυνέχειες και ελαττώματα της επιφάνειας, τα οποία προκλήθηκαν από διάβρωση (βελονισμοί, χαραγές, κλπ). Με βάση αυτή την εξήγηση, η διάδοση της ρωγμής πραγματοποιείται μέχρι ο συντελεστής έντασης τάσης Κ να φτάσει την κρίσιμη τιμή K_c, οπότε θα επέλθει ψαθυρή θραύση. Στην πραγματικότητα, ασυνέχειες στην επιφάνεια του υλικού όντως αποτελούν σημεία έναρξης SCC, όμως έχει διαπιστωθεί ότι ο συντελεστής έντασης τάσης SCC δεν φτάνει τις κρίσιμες τιμές που μετρήθηκαν απουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος, δηλαδή ισχύει ότι K_{scc} < K_c.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1.10, ως SCC ορίζεται «η ρωγμάτωση λόγω της συνεργιστικής δράσης διαβρωτικού περιβάλλοντος και στατικών εφελκυστικών τάσεων». Στον παραπάνω ορισμό, ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στην έννοια «συνέργεια», που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διαδικασία διάδοσης ρωγμής, η οποία είναι αποτέλεσμα ταυτόχρονης και συνδυασμένης δράσης μηχανικών και χημικών παραγόντων, και δεν θα μπορούσε να εξελιχθεί, αν οι παράγοντες αυτοί δρούσαν εναλλάξ ή ανεξάρτητα μεταξύ τους. Παραδείγματος χάρη, διάβρωση ενός συστήματος ακολουθούμενη από φόρτιση σε αδρανές περιβάλλον δεν μπορεί να οδηγήσει σε SCC.

Υπάρχει πιθανότητα για όλα τα μεταλλικά υλικά να εμφανίσουν SCC. Ωστόσο, είναι απαραίτητη η συνύπαρξη τριών συνθηκών (Εικόνα 2.1):

- Εφελκυστικές τάσεις
- Ευπαθές μέταλλο-κράμα
- Κατάλληλο διαβρωτικό περιβάλλον

Η ανάγκη συνύπαρξης των παραπάνω συνθηκών καθιστούν δύσκολη την εμφάνιση SCC φαινομενικά. Παρόλα αυτά, ακόμη κι αν οι συνθήκες αυτές δεν υφίστανται στην αρχή της λειτουργίας μιας μεταλλικής κατασκευής, υπάρχει πιθανότητα να διαμορφωθούν κατά τη διάρκεια ζωής της. Για παράδειγμα μπορεί να υπάρξουν μεταβολές στις συνθήκες του περιβάλλοντος λειτουργίας της κατασκευής που να οδηγήσουν σε ένα επιθετικό διαβρωτικό περιβάλλον ή σε

24

ευπαθές μέταλλο/κράμα, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες σε συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών (ευαισθητοποίηση).

Από τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω για την εμφάνιση της SCC, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το διαβρωτικό περιβάλλον είναι «κατάλληλο» για συγκεκριμένα μέταλλα/κράματα, που η έκθεση σ' αυτό τα καθιστά «ευπαθή» σε SCC. Για παράδειγμα, οι ανοξείδωτοι χάλυβες παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευαισθησία σε SCC όταν βρεθούν σε περιβάλλον με χλωριόντα, αλλά παραμένουν ανεπηρέαστοι σε περιβάλλον που περιέχει αμμωνία, ενώ για τον ορείχαλκο ισχύει το αντίθετο. Δηλαδή, SCC θα εμφανιστεί μόνο για συγκεκριμένους συνδυασμούς υλικού-περιβάλλοντος. Ήδη έχουν προσδιοριστεί για τα περισσότερα κατασκευαστικά κράματα τα κρίσιμα περιβάλλοντα έκθεσης που οδηγούν σε ρωγμάτωση (Πίνακας 2.1), ωστόσο έρευνες και πειράματα συνεχώς υποδεικνύουν νέους, άγνωστους μέχρι πρότινος, συνδυασμούς.

Πίνακας 2.1

Περιβάλλοντα στ	α οποία	συνήθη	εμπορικά	κράματα
παρουσιάζουν SC	C [7].			

Alloy	Environment
Carbon steel	Hot nitrate, hydroxide, carbonate/bicarbonate solutions
High-strength steels	Aqueous electrolytes, particularly when containing H ₂ S
Austenitic stainless steels	Hot, concentrated chloride solutions; chloride contaminated steam
High-nickel alloys	High-purity steam
α-brass	Ammoniacal solutions
Aluminum alloys	Aqueous Cl ⁻ , Br ⁻ , I ⁻ solutions
Titanium alloys	Aqueous Cl ⁻ , Br ⁻ , I ⁻ solutions; organic liquids; N ₂ O ₄
Magnesium alloys	Aqueous Cl ⁻ solutions
Zirconium alloys	Aqueous Cl ⁻ solutions; organic liquids; I ₂ at 350°C



Εικόνα 2.1 Η SCC εξαρτάται από ένα κρίσιμο συνδυασμό υλικού, περιβάλλοντος και εφελκυστικών τάσεων [5].

Για τη σωστή κατανόηση της SCC, είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι οι διαδικασίες που την προκαλούν καθορίζονται από τοπικούς παράγοντες (τοπικό περιβάλλον, τοπικές τάσεις και τοπικά μεταλλουργικά χαρακτηριστικά του υλικού), οι οποίοι παρουσιάζουν διαφορές σε συγκεκριμένες περιοχές της επιφάνειας του υλικού, σε σύγκριση με το υπόλοιπο σύστημα. Ομοιογένεια στην κατανομή τάσεων, στα συστατικά του διαλύματος και στα μεταλλουργικά χαρακτηριστικά δε θα μπορούσε να οδηγήσει σε SCC, αλλά μόνο σε ομοιόμορφη διάλυση της μεταλλικής επιφάνειας.

Η έναρξη των ρωγμών παρατηρείται σε περιοχές του υλικού, όπου υπάρχουν τοπικές ανομοιογένειες στη μικροδομή, στη χημική σύσταση του κράματος και στο περιβάλλον έκθεσης. Εντοπισμένες μορφές διάβρωσης προκαλούν βελονισμούς, χαραγές ή άλλες ασυνέχειες. Λόγω της γεωμετρίας τους, οι ασυνέχειες αυτές προξενούν (εκτός από συγκέντρωση τάσεων) τη δημιουργία τροποποιημένου περιβάλλοντος σε σχέση με το κυρίως διάλυμα, στο οποίο η φύση και η κινητική των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων διαφέρει σε σχέση με την υπόλοιπη επιφάνεια. Συχνά, η διαφορά αυτή έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο ρυθμό διάλυσης στη βάση της ασυνέχειας σε σχέση με τις πλευρές της, και επομένως το σταδιακό σχηματισμό ρωγμής. Η διάδοση της ρωγμής, καθορίζεται επίσης από τους τοπικούς παράγοντες με παρόμοιο τρόπο.

2.3 Ηλεκτροχημική προσέγγιση^{[1],[5]}

Η γεωμετρία της ρωγμής οδηγεί σε σημαντικές μεταβολές στο διάλυμα μέσα σε αυτήν, ως αποτέλεσμα των αντιδράσεων στα τοιχώματα και την άκρη της. Η σημαντικότερη και πιο συνηθισμένη καθοδική αντίδραση είναι αυτή της αναγωγής του οξυγόνου:

$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \quad (1)$

Ωστόσο, μπορεί να πραγματοποιείται και αναγωγή άλλων αντιδρώντων, π.χ. Η⁺, H₂S, HCO⁻₃, κλπ. Γενικά, το οξυγόνο αποτελεί έναν από τους βασικότερους οξειδωτικούς παράγοντες. Σε επιφάνειες χωρίς ασυνέχειες, και εφόσον οι συνθήκες προϋποθέτουν την ομοιόμορφη κατανομή του στο διάλυμα, το οξυγόνο επηρεάζει ολόκληρη τη μεταλλική επιφάνεια, δηλαδή η κατανομή της ανοδικής διάλυσης του μετάλλου είναι ομοιόμορφη. Ωστόσο, το άνοιγμα μιας ρωγμής είναι εξαιρετικά περιορισμένο (της τάξης του μm), επομένως το οξυγόνο του διαλύματος θα εξαντληθεί ταχύτατα εντός της ρωγμής, με αποτέλεσμα η αντίδραση αναγωγής του οξυγόνου να πραγματοποιείται μόνο έξω από τη ρωγμή. Αυτό συνεπάγεται ότι η διάδοση της ρωγμής διευκολύνεται λόγω της ταχείας διάλυσης του μετάλλου, μέσω ανοδικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό της:

 $M \rightarrow M^{n+} + ne^{-}$ (2)

Παράλληλα, ανιόντα του κυρίως διαλύματος (Aⁿ⁻) εισέρχονται στο εσωτερικό της ρωγμής για τη διατήρηση της ηλεκτρικής ουδετερότητας. Τα μεταλλικά κατιόντα (Mⁿ⁺) που προκύπτουν από τη διάλυση του μετάλλου αντιδρούν με τα ανιόντα Aⁿ⁻, σχηματίζοντας μεταλλικά άλατα σε μεγάλες συγκεντρώσεις. Η υδρόλυση των μεταλλικών κατιόντων μέσα στη ρωγμή προσδίδει όξινο χαρακτήρα στο διάλυμα, αυξάνοντας τη δραστικότητά του:

$M^{n+} + H_2 O \leftrightarrow MOH^{(n-1)+} + H^+$ (3)

Ως αποτέλεσμα της αντίδρασης (3), είναι πλέον δυνατή η καθοδική αντίδραση της αναγωγής του υδρογόνου στο εσωτερικό της ρωγμής που έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ατόμων υδρογόνου, τα οποία τείνουν να απορροφώνται από την κορυφή της ρωγμής, λόγω της έντονης εντατικής κατάστασης στην περιοχή αυτή.

$H^+ + e^- \rightarrow H$ (4)

Σε αυτήν την περίπτωση, ο μηχανισμός εξέλιξης της SCC βασίζεται σε φαινόμενα ψαθυροποίησης λόγω υδρογόνου και περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

Οι αντιδράσεις που περιεγράφηκαν παραπάνω αφορούν SCC σε υδατικά διαλύματα και συνοψίζονται στο σχήμα της Εικόνας 2.2, ενώ αποτελούν τις γενικές ηλεκτροχημικές διεργασίες που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό μιας ρωγμής. Αυτό δε σημαίνει ότι συμβαίνουν όλες μαζί απαραίτητα, καθώς το είδος και η κινητική των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που προωθούν την SCC, ποικίλουν ανάλογα με το υπάρχον σύστημα υλικού-περιβάλλοντος.



Εικόνα 2.2 Βασικές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στην περιοχή της ρωγμής, [5].

2.4 Παράγοντες επίδρασης

Στις τρεις αναγκαίες προϋποθέσεις για την εμφάνιση SCC, όπως εκφράζονται μέσω του διαγράμματος Venn, αντικατοπτρίζονται τρεις βασικές κατηγορίες παραμέτρων, οι οποίες επηρεάζουν την έναρξη, το μηχανισμό και την ταχύτητα εξέλιξης του SCC. Οι κατηγορίες αυτές αποτελούν τους μηχανικούς, τους περιβαλλοντικούς και τους μεταλλουργικούς παράγοντες.

2.4.1 Μηχανικοί παράγοντες ^{[1],[2],[4],[7],[8],[13]}

Οι εφελκυστικές τάσεις συνεισφέρουν με διάφορους τρόπους στην εξέλιξη της SCC. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα που περιγράφουν την SCC σε διαφορετικά συστήματα, επομένως ανάλογα με το σύστημα υλικού-περιβάλλοντος υπάρχει και ένας διαφορετικός μηχανισμός επίδρασης των τάσεων στο συνολικό φαινόμενο. Σε γενικές γραμμές, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις επηρεάζουν τη διάδοση των ρωγμών είτε με τη ρήξη των επιφανειακών στρωμάτων και κατά συνέπεια τη διευκόλυνση της χημικής διάλυσης του μετάλλου, είτε υποβοηθώντας τη διάδοση των ρωγμών μέσω ψαθυρών και εύθραυστων φάσεων που δημιουργήθηκαν λόγω της επίδρασης του περιβάλλοντος.

2.4.1.1 Μορφολογία ρωγμάτωσης [1],[7]

Παρόλο που η SCC δεν αποτελεί ένα καθαρά μηχανικό φαινόμενο, οι ρωγμές και οι επιφάνειες αστοχίας δίνουν την εικόνα ψαθυρής θραύσης. Συνεπώς, χρησιμοποιείται ο όρος «ρωγμή» παρόλο που στη διάδοση αυτής συντελούν και διαδικασίες διάβρωσης. Η εκκίνηση των ρωγμών πραγματοποιείται σε σημεία της επιφάνειας του υλικού, ενώ αναπτύσσονται προς το εσωτερικό του υλικού, είτε με διακλαδώσεις είτε χωρίς. Η ύπαρξη και ο βαθμός των διακλαδώσεων της ρωγμάτωσης εξαρτάται από τα μεταλλουργικά χαρακτηριστικά του κράματος και από το περιβάλλον έκθεσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η διεύθυνση διάδοσης της ρωγμάτωσης είναι κάθετη στη διεύθυνση της επιβαλλόμενης εφελκυστικής τάσης.

Η διάδοση της ρωγμής μπορεί να είναι είτε περικρυσταλλική, όπου η «διαδρομή» της ρωγμής ακολουθεί τα σύνορα των κόκκων, είτε ενδοκρυσταλλική, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3, όπου η ρωγμή εξελίσσεται διαμέσου των κόκκων. Ωστόσο, υπάρχουν και περιπτώσεις στις οποίες παρουσιάζεται συνδυασμός περικρυσταλλικής και ενδοκρυσταλλικής SCC. Το είδος της ρωγμάτωσης εξαρτάται επίσης από τη σύνθεση του μεταλλικού υλικού και το διαβρωτικό περιβάλλον.



Εικόνα 2.3 Περικρυσταλλική SCC σε 316L ανοξείδωτο χάλυβα σε καυστική σόδα (αριστερά) και ενδοκρυσταλλική SCC σε 316 ανοξείδωτο χάλυβα σε χλωριούχο διάλυμα (δεξιά) [31].

2.4.1.2 Εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις^{[1],[2],[4],[7],[13]}

Η επικινδυνότητα της SCC οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το επίπεδο των εφελκυστικών τάσεων που την προκαλούν είναι συνήθως χαμηλότερο από αυτό που προβλέπεται κατά το σχεδιασμό μιας κατασκευής, μάλιστα σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να είναι μόνο το 10% του ορίου διαρροής. Αυτό συμβαίνει γιατί τα πραγματικά δομικά στοιχεία μιας κατασκευής παρουσιάζουν διάφορες ατέλειες, όπως για παράδειγμα βελονισμούς, ή περιλαμβάνουν σχεδιαστικές λεπτομέρειες, όπως π.χ. εγκοπές, συγκολλήσεις, απότομες αλλαγές στη διατομή. Τα σημεία αυτά προκαλούν συγκέντρωση τάσεων, με αποτέλεσμα οι τάσεις τοπικά να φτάνουν ακόμη και το όριο διαρροής, ενώ η ονομαστική τάση να παραμένει εντός των προδιαγεγραμμένων ορίων. Παραμένουσες τάσεις (λόγω κακής συναρμολόγησης ή διαδικασιών συγκόλλησης) και θερμικές τάσεις λόγω ανομοιόμορφης θερμικής διαστολής (μετά από συγκόλληση ή θερμικές κατεργασίες) οδηγούν σε ανάλογα αποτελέσματα.

Το επίπεδο της τάσης και της παραμόρφωσης καθορίζει την έναρξη και τη διάδοση της ρωγμάτωσης λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση. Όσο υψηλότερη είναι η ονομαστική τάση, τόσο εντονότερος είναι ο ρυθμός ανάπτυξης της ρωγμής. Επομένως, υπάρχει η ανάγκη προσδιορισμού των κρίσιμων επιπέδων τάσης για την έναρξη και τη διάδοση της ρωγμάτωσης, καθώς και για την τελική αστοχία σε κάθε σύστημα υλικού-περιβάλλοντος. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται κάποιοι συντελεστές ως δείκτες, που υποδεικνύουν το βαθμό επίδρασης της ονομαστικής τάσης στην ευαισθησία του υλικού σε SCC και διευκολύνουν την πρόληψή της.

Οριακή τάση ^{[1], [4]}

Πρόκειται για την ελάχιστη τιμή ονομαστικής τάσης, στην οποία παρατηρείται SCC για ένα συγκεκριμένο συνδυασμό υλικού – περιβάλλοντος (Εικόνα 2.4). Η τιμή της οριακής τάσης καθορίζεται από διάφορους παράγοντες ενός συστήματος, όπως η θερμοκρασία, η σύσταση του κράματος και η χημική σύσταση του περιβάλλοντος. Η χρήση της οριακής τάσης απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, διότι η

30

τιμή της μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με τις πιθανές αλλαγές στο περιβάλλον λειτουργίας μιας κατασκευής κατά τη διάρκεια ζωής της.



Εικόνα 2.4 Η επίδραση της επιβαλλόμενης τάσης στο χρόνο μέχρι την τελική αστοχία λόγω SCC για χάλυβα μαρτενγήρανσης σε διάλυμα 3.5% NaCl. Παρατηρούμε ότι για τάσεις ίσες ή μικρότερες της οριακής δεν επέρχεται θραύση [4].

Σε υλικά που παρουσιάζουν φαινόμενα παθητικοποίησης, η οριακή τάση συνδέεται με το ρυθμό σχηματισμού και το ρυθμό ρήξης του παθητικού στρώματος. Για τιμές χαμηλότερες της οριακής τάσης, ο ρυθμός σχηματισμού είναι επαρκώς υψηλός, ώστε η επιφάνεια του υλικού να διατηρείται παθητικοποιημένη. Για υψηλότερες τιμές, ο ρυθμός ρήξης του στρώματος είναι υψηλότερος από τον ρυθμό σχηματισμού, έτσι ώστε βελονισμοί ή αυλακώσεις λόγω περικρυσταλλικής διάβρωσης να μπορούν να διαδοθούν και να εξελιχθούν σε ρωγμάτωση. Αντίστοιχα, σε υλικά, όπου η SCC διαδίδεται υπό την επίδραση μηχανικών παραγόντων μέσω ψαθυρών στρωμάτων που σχηματίστηκαν λόγω διάβρωσης, η οριακή τάση συνδέεται με την τάση θραύσης του ψαθυρού στρώματος.

Κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσης (K_c)^{[4], [13]}

Σύμφωνα με τη γραμμική ελαστική μηχανική θεωρία θραύσης, ασταθής θραύση επέρχεται όταν ο συντελεστής έντασης τάσης Κ φτάσει την κρίσιμη τιμή K_c. Γενικά, ο

συντελεστής έντασης τάσης Κ εκφράζει τη δεδομένη εντατική κατάσταση στο άκρο της ρωγμής και δίνεται από τη σχέση:

$$K = f(g) \cdot \sigma \cdot \alpha$$

Όπου:

f(g): συνάρτηση γεωμετρίας δοκιμίου και ρωγμής

σ: ονομαστική τάση

α: μήκος ρωγμής

Ο K_C ουσιαστικά αποτελεί το μέτρο αντίστασης του υλικού στην προοδευτική διάδοση της ρωγμής υπό συνθήκες στατικής φόρτισης και επίπεδης εντατικής κατάστασης, επομένως όταν ο Κ φτάσει την τιμή K_C η ψαθυρή θραύση είναι αναπόφευκτη. Για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης χρησιμοποιείται ο συμβολισμός K_{IC}.

Κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσης (K_{scc})^{[4],[7]}

Τα πραγματικά δομικά στοιχεία μιας κατασκευής περιλαμβάνουν διάφορες ατέλειες και ελαττώματα, μεταξύ των οποίων είναι διάφορες μικρορωγμές. Οι ατέλειες αυτές, ανάλογα με το σύστημα υλικού-περιβάλλοντος και το επίπεδο φόρτισης της κατασκευής, πολλές φορές δεν αποτελούν κίνδυνο για την ακεραιότητά της. Ο K_{SCC} ουσιαστικά εκφράζει την αντίσταση του υλικού σε SCC σε συγκεκριμένο περιβάλλον και συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης. Όταν ο συντελεστής έντασης τάσης K στη βάση μιας προϋπάρχουσας ατέλειας φτάσει αυτή την κρίσιμη τιμή, ξεκινά προοδευτικά η επέκταση της ρωγμάτωσης. Δηλαδή για τιμές μικρότερες του K_{SCC} δεν πραγματοποιείται διάδοση ρωγμής, ή ο ρυθμός ανάπτυξης είναι τόσο μικρός που δεν ανιχνεύεται με τα χρησιμοποιούμενα μέσα.

Η τιμή του K_{scc} διαφέρει για κάθε σύστημα, καθώς επηρεάζεται από μεταλλουργικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους, ενώ μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά μέσω δοκιμών που θα περιγραφούν αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο. Σε αντιστοιχία με την περίπτωση του K_{IC}, όταν πρόκειται για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης χρησιμοποιείται ο συμβολισμός K_{Iscc}.

Η εξάρτηση του ρυθμού ανάπτυξης της ρωγμής από το συντελεστή έντασης τάσης Κ απεικονίζεται σε διαγράμματα όπως αυτό της Εικόνας 2.5. Παρατηρούμε

32

ότι με το που ο συντελεστής Κ υπερβεί την κρίσιμη τιμή Κ_{ISCC}, ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής αυξάνεται ραγδαία μέχρι ένα σημείο, στο οποίο αλλάζει η κλίση της

καμπύλης. Το σημείο αυτό στην ξένη βιβλιογραφία αναφέρεται συχνά ως "plateau crack growth rate". Περαιτέρω αύξηση του Κ προκαλεί σταδιακή αύξηση ρυθμού ανάπτυξης του ρωγμής, μέχρι να φτάσει την τιμή Κις, οπότε θα επέλθει ασταθής θραύση. Στο τελευταίο στάδιο της εξέλιξης του φαινομένου, η διάδοση της ρωγμής και η τελική θραύση οφείλονται σχεδόν αποκλειστικά σε μηχανικούς παράγοντες, ενώ οι περιβαλλοντικές και μεταλλουργικές παράμετροι απλώς υποβοηθούν σε περιπτώσεις που η «διαδρομή» της ρωγμής περάσει από πιο σκληρές περιοχές εντός της μικροδομής.



Εικόνα 2.5 Ο ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής συναρτήσει του συντελεστή έντασης τάσης [4].

Ο Κ_{ISCC} αποτελεί ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τη μέτρηση της ευαισθησίας σε SCC. Εξασφαλίζοντας συνδυασμούς τάσης – μεγέθους ατέλειας που δίνουν τιμή του Κ μικρότερη από Κ_{ISCC}, αποφεύγεται η ρωγμάτωση. Παρόλα αυτά, η εξάρτηση του Κ_{ISCC} από περιβαλλοντικούς και μεταλλουργικούς παράγοντες καθιστά αναγκαία την προσεκτική διερεύνηση και επιλογή μιας κατάλληλης τιμής για κάθε υλικό.

Κρίσιμος ρυθμός παραμόρφωσης ἑ^[7]

Στις πειραματικές διαδικασίες, μέσω των οποίων προσδιορίζεται η ευαισθησία κάθε υλικού σε SCC, η επιβαλλόμενη φόρτιση είναι είτε στατική (πχ Constant Load Test) είτε δυναμική (π.χ. Slow Strain Rate Test, SSRT). Η επίδραση του στατικού φορτίου στο συνολικό φαινόμενο είναι διαφορετική από αυτή του δυναμικού. Για παράδειγμα, έστω ένα δοκίμιο, το οποίο έχει φορτιστεί σε τέτοιο

επίπεδο ώστε να παραμορφωθεί πλαστικά 10%, πριν να εμβαπτιστεί στο περιβάλλον έκθεσης. Αν η τάση μειωθεί ώστε να φτάσει κάτω από την οριακή και στη συνέχεια έλθει σε επαφή με το διαβρωτικό περιβάλλον, δε θα εμφανίσει SCC. Αντίθετα, αν παραμορφωθεί μέσα στο διάλυμα με αργό ρυθμό μέχρι 10%, μπορεί να υπάρξει ρωγμάτωση, η οποία σταδιακά να οδηγήσει μέχρι την τελική θραύση. Η διαφορά αυτή έχει επιβεβαιωθεί, καθώς μετρήσεις ρεύματος διάβρωσης υποδεικνύουν αρκετά μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος στη δεύτερη περίπτωση.

Επομένως, πειράματα δυναμικής φόρτισης, όπως τα SSRT, βοηθούν στον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ ρυθμού ανάπτυξης ρωγμής και ρυθμού επιβαλλόμενης παραμόρφωσης. Η σχέση αυτή απεικονίζεται σε διαγράμματα, όπως αυτό της Εικόνας 2.6. Παρατηρούμε ότι σε αντιστοιχία με τους συντελεστές K_{ISCC} και K_{IC}, τα μεγέθη *έ*₁ και *έ*₂ είναι οι κρίσιμοι ρυθμοί παραμόρφωσης και εκφράζουν το επίπεδο του ρυθμού παραμόρφωσης στο οποίο εμφανίζεται η SCC και στο οποίο επέρχεται ασταθής θραύση αντίστοιχα.

Παρόλο που ο μηχανισμός συνεισφοράς της τάσης και της παραμόρφωσης διαφέρει σε κάθε σύστημα υλικού περιβάλλοντος, η εξάρτηση του ρυθμού ανάπτυξης της ρωγμής από το ρυθμό παραμόρφωσης, καθώς και ο ρόλος της οριακής τάσης και των κρίσιμων συντελεστών έντασης τάσης (K_{ISCC}, K_{IC}) αποτελούν κοινά χαρακτηριστικά για τα περισσότερα συστήματα.



Εικόνα 2.6 Ο ρυθμός ανάπτυξης ρωγμάτωσης λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση ως συνάρτηση του ρυθμού επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και ο ρόλος των οριακών τιμών **ε**₁ και **ε**₂ [7].

2.4.1.3 Ποιότητα επιφάνειας ^{[7],[8]}

Η ρωγμάτωση λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση σχηματίζεται από μικρορωγμές, οι οποίες ξεκινούν να διαδίδονται από την επιφάνεια του υλικού, όπου υπάρχει αλληλεπίδραση αυτού με το διαβρωτικό περιβάλλον. Επομένως, τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής στοιβάδας του υλικού έχουν ιδιαίτερη σημασία για την έναρξη και εξέλιξη της SCC. Η ποιότητα και η αντοχή της επιφάνειας του υλικού επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, οι οποίοι συνήθως προέρχονται από τις διάφορες μηχανικές κατεργασίες. Τέτοιοι παράγοντες είναι η τραχύτητα, οι πιθανοί μετασχηματισμοί φάσεων, οι επιφανειακές παραμένουσες τάσεις, κ.α.

Τραχύτητα και σκληρότητα^[8]

Η επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας αφορά κυρίως την έναρξη των ρωγμών. Αυξημένες τιμές τραχύτητας σημαίνουν βαθύτερες «κοιλάδες», μέσα στις οποίες συγκεντρώνονται τα δραστικά ιόντα και δημιουργούν το κρίσιμο περιβάλλον για την μετατροπή αυτών σε μικρορωγμές. Η επιφανειακή σκληρότητα διαδραματίζει εξίσου σημαντικό ρόλο στην ευαισθησία ενός υλικού σε SCC, επηρεάζοντας το ρυθμό διάδοσης των μικρορωγμών, ο οποίος αυξάνεται με την αύξηση της επιφανειακής σκληρότητας. Ακόμη και το τελικό φινίρισμα της επιφάνειας μπορεί να επηρεάσει την έναρξη βελονοειδούς διάβρωσης ή άλλων εντοπισμένων μορφών προσβολής. Συμπερασματικά, διαφορετικές επιφάνειες του ίδιου υλικού επιδεικνύουν διαφορετική ηλεκτροχημική συμπεριφορά.

Μετασχηματισμοί φάσεων^[8]

Πιθανοί μετασχηματισμοί φάσεων ως αποτέλεσμα των μηχανικών κατεργασιών χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής, καθώς υπάρχει κίνδυνος σχηματισμού φάσεων, οι οποίες να επιτρέπουν υψηλούς ρυθμούς διάδοσης των μικρορωγμών. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός στους χάλυβες. Η παρουσία μαρτενσίτη στο επιφανειακό στρώμα του χάλυβα οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού εξέλιξης της SCC, λόγω του αυξημένου ρυθμού χημικής διάλυσης που επιδεικνύει ο μαρτενσίτης σε σχέση με τον ωστενίτη.

35

Παραμένουσες τάσεις^{[7], [8]}

Από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του υλικού που επηρεάζουν την εξέλιξη της SCC είναι οι επιφανειακές παραμένουσες τάσεις. Η συνεργιστική δράση της πλαστικής παραμόρφωσης και των παραμενουσών τάσεων που προκαλούνται από μηχανικές κατεργασίες, είναι ικανές να προκαλέσουν έναρξη της SCC ακόμη και χωρίς την επιβολή εξωτερικού φορτίου. Παραμένουσες τάσεις μπορούν να προκαλέσουν διάτρηση των προστατευτικών στρωμάτων, με αποτέλεσμα την έκθεση της γυμνής μεταλλικής επιφάνειας στο διαβρωτικό περιβάλλον και την προοδευτική ανάπτυξη της ρωγμής. Τα παραπάνω αφορούν εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις, καθώς οι αντίστοιχες θλιπτικές έχουν αντίθετα αποτελέσματα. Γενικά, έχει παρατηρηθεί σύλληψη ρωγμών σε περιοχές με θλιπτικές παραμένουσες τάσεις. Για το λόγο αυτό η επιβολή θλιπτικών παραμενουσών τάσεων στην επιφάνεια του υλικού αποτελεί συχνά μέθοδο για την αντιμετώπιση της SCC.

Ο W.Zhang και οι συνεργάτες του μελέτησαν την επίδραση των παραμενουσών τάσεων στην έναρξη της SCC σε δοκίμια από ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα 316, τα οποία εμβαπτίστηκαν σε βρασμένο χλωριούχο μαγνήσιο (MgCl₂) αφού προηγουμένως είχαν υποβληθεί σε διάφορες μηχανικές κατεργασίες. Τα αποτελέσματα της έρευνας υποδεικνύουν ότι όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο των εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων, τόσο αυξάνεται ο ρυθμός ανάπτυξης μικρορωγμών καθώς και η πυκνότητά τους. Οι εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις είναι υψηλές κυρίως κατά τη διεύθυνση της κατεργασίας, επομένως η έναρξη και η διάδοση των μικρορωγμών πραγματοποιείται κάθετα στη διεύθυνση αυτή. Τέλος αναφέρουν ότι υπάρχει μια κρίσιμη τιμή παραμενουσών τάσεων, η οποία εφόσον ξεπεραστεί εξελίσσεται το φαινόμενο, ενώ τιμές κάτω από αυτή δεν οδηγούν σε

2.4.2 Μεταλλουργικοί παράγοντες ^{[7], [9], [11]-[13]}

Η ευαισθησία ενός κράματος σε SCC καθορίζεται με πολύπλοκο τρόπο από διάφορους μεταλλουργικούς παράγοντες, όπως τη μέση χημική σύσταση, το σχήμα, το μέγεθος και τον προσανατολισμό των κόκκων, τη σύσταση και την κατανομή των
κατακρημνισμάτων, το είδος και την πυκνότητα των διαταραχών και την εξέλιξη του μετασχηματισμού των φάσεων. Γενικά, διαδικασίες οι οποίες προκαλούν αλλαγές στη μικροδομή, όπως θερμικές και μηχανουργικές κατεργασίες, κραμάτωση και συγκολλήσεις, επηρεάζουν την ευαισθησία σε SCC.

Επίδραση κραματικών στοιχείων, ανεπιθύμητων προσμίξεων και κατακρημνισμάτων στην SCC^{[7], [9]}

Η προσθήκη κραματικών στοιχείων στην κρυσταλλική δομή του μετάλλου έχει διάφορες θετικές επιδράσεις στη μηχανική αντοχή του, όμως συχνά προκαλεί ανομοιογένειες, οι οποίες βοηθούν την ανάπτυξη SCC. Τοπικές μεταβολές στη σύσταση και την ανθεκτικότητα των παθητικών στρωμάτων ή σχηματισμός ανεπιθύμητων ενώσεων υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας είναι μερικά από τα προβλήματα που δημιουργούνται λόγω των στοιχείων κραμάτωσης. Προφανώς, στα σημεία όπου βρίσκονται εγκλείσματα και κατακρημνίσματα, η σύσταση του κράματος είναι διαφορετική, γεγονός που επίσης επηρεάζει την ανάπτυξη μιας ρωγμής, εφόσον η κορυφή της συναντήσει τέτοια σημεία. Επιπλέον, αν το κραματικό στοιχείο είναι δραστικότερο από το κυρίως μέταλλο, εγκυμονεί ο κίνδυνος αποκραμάτωσης. Τέλος, οι ανεπιθύμητες προσμίξεις, οι οποίες τείνουν να συγκεντρώνονται στα όρια των κόκκων κατά τη διαδικασία της στερεοποίησης του μεταλλικού υλικού, έχουν ως αποτέλεσμα την αυξημένη ευαισθησία των περιοχών αυτών σε περικρυσταλλική SCC.

Θεωρητικά, τα καθαρά μέταλλα είναι απαθή σε SCC, διότι δεν παρουσιάζουν ανομοιογένειες στη μικροδομή τους, όπως αυτές που προαναφέρθηκαν. Ωστόσο, επειδή στην πραγματικότητα ακόμη και τα καθαρά μέταλλα περιέχουν ένα μικρό ποσοστό ακαθαρσιών (θείο, πυρίτιο, φώσφορος, κλπ.), υπό συγκεκριμένες συνθήκες εντατικής κατάστασης και διαβρωτικού περιβάλλοντος, μπορούν να εμφανίσουν SCC. Σε γενικές γραμμές όμως, τα καθαρά μέταλλα παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε SCC σε σύγκριση με τα κράματα.

Επίδραση συσσωρευμένων διαταραχών^[9]

Από μελέτες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας έχει προκύψει ότι η έναρξη των ρωγμών πραγματοποιείται σε περιοχές συσσωρευμένων διαταραχών, οι οποίες προκύπτουν από τη ραγδαία χημική διάλυση του μετάλλου. Μικρορωγμές σχηματίζονται σε ενεργά επίπεδα ολίσθησης στις περιοχές αυτές. Υπό την επίδραση της τάσης και του διαβρωτικού περιβάλλοντος, οι μικρορωγμές διαδίδονται και συνενώνονται δημιουργώντας μεγαλύτερες ρωγμές.

Λόγω της επίδρασης των διαταραχών, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη σχέση της ευαισθησίας ενός υλικού σε SCC με την κατανομή των διαταραχών, η οποία μπορεί να είναι είτε κυτταροειδής είτε επίπεδη. Μεταλλικά υλικά με κυτταροειδή όταν εμβαπτιστούν σε κατανομή διαταραχών, διαβρωτικό περιβάλλον προσβάλλονται με τη μορφή μεμονωμένων βελονισμών. Εφόσον ο αριθμός των διαταραχών σε κάθε επίπεδο είναι σχετικά μικρός, ο βελονισμός δεν πρόκειται να εξελιχθεί σε ρωγμή. Γενικά, η κυτταροειδής δομή διαταραχών καθιστά το μέταλλο λίγο ευαίσθητο έως απαθές σε ενδοκρυσταλλική SCC. Αντίθετα, σε περιπτώσεις που η πλαστική παραμόρφωση εγκλωβίζει τις διαταραχές στα αρχικά επίπεδα ολίσθησης, το μέταλλο είναι εξαιρετικά ευαίσθητο σε SCC. Τέλος, η κατανομή των διαταραχών καθορίζει επίσης αν η ρωγμάτωση θα είναι περικρυσταλλική ή ενδοκρυσταλλική.

Ενέργεια σφαλμάτων επιστοίβασης^{[9], [11],[12]}

Με τον όρο «σφάλματα επιστοίβασης» εννοούμε τις ατέλειες που παρεμβαίνουν στην προβλεπόμενη από την κρυσταλλική δομή διαδοχή των επιπέδων κατά μήκος μιας κρυσταλλογραφικής διεύθυνσης (Εικόνα 2.7). Η διαφορά ενέργειας μεταξύ τέλειας και εσφαλμένης επιστοίβασης ανά μονάδα επιφάνειας ονομάζεται ενέργεια σφάλματος επιστοίβασης (Stacking Fault Energy, SFE). Η SFE αποτελεί έναν από τους παράγοντες που επιδρούν στη διαμόρφωση της δομής των διαταραχών (κυτταροειδής ή επίπεδη κατανομή), καθώς επηρεάζει τη δυνατότητα μιας διαταραχής του κρυσταλλικού πλέγματος να μετακινηθεί σε άλλο κρυσταλλογραφικό επίπεδο. Όσο χαμηλότερη είναι η SFE τόσο δυσκολότερη είναι η μετακίνηση των διαταραχών, γεγονός που οδηγεί σε επίπεδες κατανομές. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτή η σχέση μεταξύ SFE και ευαισθησίας σε SCC.

Σε μεταλλικά υλικά με κυβική κρυσταλλική δομή, όπου η SFE είναι χαμηλή, η ευαισθησία σε SCC είναι αυξημένη, επειδή η πλαστική παραμόρφωση σε θερμοκρασία δωματίου προκαλεί επίπεδη κατανομή των διαταραχών. Αυτό συμβαίνει γιατί η εγκάρσια κίνηση των διαταραχών παρεμποδίζεται σε αυτές τις θερμοκρασίες. Επίσης, στοιχεία προσθήκης, όπως το νικέλιο και το χρώμιο, αυξάνουν την SFE, οδηγώντας σε μια κυτταροειδή κατανομή των διαταραχών. Συνεπώς, αύξηση της περιεκτικότητας του χάλυβα σε νικέλιο ή χρώμιο μπορεί να μειώσει ή και να εξαλείψει την πιθανότητα εμφάνισης SCC. Αντίθετα αποτελέσματα προκύπτουν με την προσθήκη ψευδαργύρου και αλουμινίου στο χαλκό. Ενώ στον καθαρό χαλκό, η δομή των διαταραχών είναι κυτταροειδής και η ευαισθησία σε SCC αμελητέα, με την προσθήκη Ζη και AI, μειώνεται η SFE και οι διαταραχές τείνουν να συσσωρεύονται στα αρχικά επίπεδα ολίσθησης αυξάνοντας την πιθανότητα ρωγμάτωσης. Σε περιπτώσεις όπως αυτή, η ευαισθησία σε SCC είναι ανάλογη της περιεκτικότητας των στοιχείων προσθήκης.



Εικόνα 2.7 Τέλεια και εσφαλμένη ακολουθία επιστοίβασης στη δομή συμπαγούς συσσωμάτωσης fcc [12].

Επίδραση μεταλλουργικών παραγόντων στη μορφολογία ρωγμάτωσης^{[7], [9]}

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ρωγμάτωση μπορεί να είναι είτε περικρυσταλλική (Intergranular Stress Corrosion Cracking, IGSCC), είτε ενδοκρυσταλλική (Transgranular Stress Corrosion Cracking, TGSCC), και αυτό καθορίζεται κυρίως από τους μεταλλουργικούς παράγοντες που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Στην πρώτη περίπτωση, στα σύνορα των κόκκων η συγκέντρωση των διαταραχών σε μικρές ομάδες μπορεί να οδηγήσει σε μικρορωγμές υπό την επίδραση παραμόρφωσης και διαβρωτικού περιβάλλοντος. Σταδιακά οι μικρορωγμές αυτές διαδίδονται και ενώνονται, σχηματίζοντας περικρυσταλλική ρωγμάτωση. Οι μεταλλουργικοί παράγοντες που επηρεάζουν την IGSCC διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

Κατακρήμνιση στα όρια των κόκκων

Η κατηγορία αυτή αφορά διαδικασίες περικρυσταλλικής SCC λόγω κατακρήμνισης διάφορων ενώσεων στα όρια των κόκκων, οι οποίες πολλές φορές αυξάνουν την ευπάθεια του υλικού σε SCC. Κλασικό παράδειγμα αποτελεί ο σχηματισμός καρβιδίων του χρωμίου στους ανοξείδωτους χάλυβες, με αποτέλεσμα την έλλειψη του χρωμίου από τις περιοχές αυτές και την τοπική εξασθένιση του παθητικού στρώματος (ευαισθητοποίηση). Ένα ακόμη παράδειγμα, αποτελεί η κατακρήμνιση διαμεταλλικών ενώσεων στα κράματα αλουμινίου, οι οποίες είναι δραστικότερες από το υπόλοιπο υλικό. Σε αυτήν την περίπτωση η ρωγμάτωση ξεκινά από τοπική γαλβανική διάβρωση, η οποία εξελίσσεται σε περικρυσταλλική SCC με τη συμβολή μηχανικών παραγόντων.

• Διαφορισμός στα όρια των κόκκων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι ανεπιθύμητες προσμίξεις (P, S, C, Si) τείνουν να συγκεντρώνονται στα σύνορα των κόκκων κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου/κράματος. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε εντελώς διαφορετική τοπική χημική σύσταση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα διαφορετική μηχανική αντοχή και συμπεριφορά σε διάβρωση στις περιοχές των ορίων των κόκκων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε ζώνη πάχους 1-2 mm κατά μήκος των συνόρων των κόκκων, η συγκέντρωση των ανεπιθύμητων προσμίξεων μπορεί να φτάσει έως και 50%.

Σε αντίθεση με την IGSCC, η οποία μπορεί να προκληθεί και από άλλους παράγοντες, η TGSCC δεν μπορεί να εξελιχθεί, αν δεν υπάρξει συσσώρευση

διαταραχών και ολίσθηση σε ενεργά επίπεδα. Εκτός από τη διάταξη και την πυκνότητα των διαταραχών, η έναρξη και ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής εξαρτάται και από άλλους μεταλλουργικούς παράγοντες, όπως η μέση χημική σύσταση και η μικροδομή του υλικού, το μέγεθος, το σχήμα, ο προσανατολισμός των κόκκων, η ανισοτροπία του υλικού, το όριο διαρροής του, οι φάσεις που μπορεί να υπάρχουν σε αυτό σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες και η ενέργεια σφαλμάτων επιστοίβασης.

2.4.3 Περιβαλλοντικοί παράγοντες^{[1],[5],[4],[7],[10]}

Τα περιβάλλοντα τα οποία προκαλούν SCC είναι συνήθως υδατικά διαλύματα, όμως SCC μπορεί να εμφανιστεί και σε περιβάλλον τηγμένων μετάλλων και αλάτων. Υπάρχουν διάφορες περιβαλλοντικές παράμετροι, οι οποίες επηρεάζουν τον ρυθμό εξέλιξης μιας ρωγμής λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση σε υδατικά διαλύματα. Οι πιο σημαντικές είναι:

- Θερμοκρασία
- Χημική σύσταση διαλύματος
- Πίεση
- pH
- Ηλεκτροδιακό δυναμικό
- Ιξώδες διαλύματος
- Ανάδευση
- Ταχύτητα ροής του διαλύματος

Επίδραση της χημικής σύστασης διαλύματος ^{[1], [7]}

Το είδος των στοιχείων του διαλύματος διαδραματίζει τον σημαντικότερο ρόλο, καθώς η ευαισθησία των μετάλλων/κραμάτων σε SCC καθορίζεται από την ύπαρξη συγκεκριμένων στοιχείων ή ιόντων στο περιβάλλον έκθεσης. Κάποια από αυτά έχουν τη δυνατότητα να διεισδύουν στα προστατευτικά στρώματα, δημιουργώντας βελονισμούς ή άλλα πιθανά σημεία έναρξης της SCC (π.χ. τα χλωριόντα στους ανοξείδωτους χάλυβες). Άλλα μπορεί να οδηγούν στη δημιουργία ψαθυρών στρωμάτων, μέσω των οποίων η ρωγμή διαδίδεται μηχανικά (π.χ. ψαθυρό επιφανειακό στρώμα στον ορείχαλκο λόγω αποψευδαργύρωσης). Η συγκέντρωση των στοιχείων αυτών επίσης επηρεάζει σημαντικά την SCC, καθώς αύξηση της συγκέντρωσης ενός διαλύματος αυξάνει τη δραστικότητά του, δημιουργώντας ένα κρίσιμο περιβάλλον για έναρξη και εξέλιξη της ρωγμάτωσης.

Η παρουσία οξειδωτικών ουσιών στο διάλυμα, όπως π.χ. του οξυγόνου, ευνοεί την ανάπτυξη SCC. Μάλιστα σε κάποια συστήματα, όπως αυτό του ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα σε διάλυμα με χλωριόντα, απομάκρυνση του οξυγόνου σημαίνει εξάλειψη του φαινομένου της SCC. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η γεωμετρία της ρωγμής δεν επιτρέπει την αναγωγή του οξυγόνου στο εσωτερικό της, αλλά μόνο έξω από αυτή. Παράλληλα μέσα στη ρωγμή πραγματοποιείται ανοδική διάλυση του μετάλλου, η οποία είναι εντονότερη όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του οξυγόνου στο κυρίως διάλυμα. Στο διάγραμμα της Εικόνας 2.8 φαίνεται η κατανομή του μέσου ρυθμού ανάπτυξης ρωγμής σε ευαισθητοποιημένο 304 ανοξείδωτο χάλυβα συναρτήσει της συγκέντρωσης του οξυγόνου σε νερό θερμοκρασίας 288°C.



Εικόνα 2.8 Μέσος ρυθμός ανάπτυξης ρωγμών λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση σε ευαισθητοποιημένο 304 ανοξείδωτο χάλυβα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε νερό θερμοκρασίας 288°C. Μελετήθηκαν τρεις μορφές SCC: α) περικρυσταλλική (IGSCC), β) ενδοκρυσταλλική (TGSCC) και γ) συνδυασμός IGSCC και TGSCC [7].

Για τη συλλογή των δεδομένων του διαγράμματος πραγματοποιήθηκε μελέτη περικρυσταλλικής SCC, ενδοκρυσταλλικής SCC, καθώς και συνδυασμός τους. Παρατηρήθηκε ότι και στις τρεις περιπτώσεις ο μέσος ρυθμός διάδοσης της ρωγμής αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας του οξυγόνου.

Επίδραση της θερμοκρασίας^{[1], [7]}

Η θερμοκρασία επηρεάζει όλες τις χημικές αντιδράσεις, συνεπώς επηρεάζει και την εκκίνηση και την εξέλιξη της SCC, καθορίζοντας την κινητική των αντιδράσεων και την διαλυτότητα των μεταλλικών ιόντων, οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση τις θερμοκρασίας. Για πολλά παθητικοποιημένα κράματα η ρωγμάτωση δε θα ξεκινήσει κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία, η οποία συνήθως είναι υψηλότερη των 100°C. Όμως υπάρχουν και εξαιρέσεις, όπως τα κράματα Mg, στα οποία μπορεί να εμφανιστεί ρωγμάτωση ακόμη και σε θερμοκρασία δωματίου. Η επίδραση της θερμοκρασίας στο ρυθμό διάδοσης της SCC διαφοροποιείται σε κάθε σύστημα, όμως συνήθως, αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει αύξηση του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής. Στην Εικόνα 2.9 παρουσιάζεται ενδεικτικά η επίδραση της θερμοκρασίας στον ρυθμό διάδοσης περικρυσταλλικής SCC σε 304 ανοξείδωτο χάλυβα.



Εικόνα 2.9 Επίδραση της θερμοκρασίας στον ρυθμό διάδοσης περικρυσταλλικής ρωγμάτωσης λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση (SCC) σε 304 ανοξείδωτο χάλυβα [7].

Επίδραση της ταχύτητας ροής [1], [5]

Η ταχύτητα ροής του διαλύματος επιδρά κυρίως στο αρχικό στάδιο της SCC, δηλαδή στο στάδιο πριν τη διαμόρφωση της ρωγμής. Εξασφαλίζει τη συνεχή παροχή των αντιδρώντων στην επιφάνεια του υλικού και προλαμβάνει την τοπική τροποποίηση των παραμέτρων του διαλύματος. Επομένως, διευκολύνεται η ισορροπία μεταξύ ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων, ενώ αναστέλλεται η δράση των εντοπισμένων μορφών διάβρωσης (π.χ. διάβρωση βελονισμών και χαραγής), οι οποίες οδηγούν σε πιθανά σημεία έναρξης ρωγμών. Ωστόσο, εφόσον δημιουργηθεί η ρωγμή, η γεωμετρία της δεν επιτρέπει τη ροή διαλύματος μέσα σε αυτήν, συνεπώς δεν υφίστανται οι παραπάνω θετικές επιδράσεις. Ακόμη, πολύ μεγάλες ταχύτητες ροής μπορούν να προκαλέσουν άλλου είδους προβλήματα, όπως για παράδειγμα διάβρωση εκτριβής.

Επίδραση του ηλεκτροδιακού δυναμικού^{[4], [10]}

Το ηλεκτροδιακό δυναμικό αποτελεί έναν ακόμη παράγοντα που επιδρά στην τάση εμφάνισης της SCC στα μεταλλικά υλικά. Σε συστήματα που το υδρογόνο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ρωγμάτωσης (π.χ. ψαθυροποίηση από υδρογόνο σε χάλυβες υψηλής αντοχής), όσο πιο αρνητική είναι η τιμή του ηλεκτροδιακού δυναμικού τόσο εντονότερος είναι ο ρυθμός παραγωγής και εισροής του υδρογόνου στο κρυσταλλικό πλέγμα. Για παράδειγμα, σε κράματα αλουμινίου, όπου η SCC αποδίδεται συνήθως στη δράση του υδρογόνου, η επαφή γυμνής αλουμινένιας επιφάνειας (χωρίς το παθητικό στρώμα οξειδίου) με νερό προκαλεί ταχεία παραγωγή υδρογόνου εξαιτίας της δραστικότητάς της (πολύ αρνητικές τιμές ηλεκτροδιακού δυναμικού). Τιμές δυναμικού αρκετά πιο θετικές από αυτή του ελεύθερου δυναμικού διάβρωσης μπορούν να οδηγήσουν σε ανάλογα αποτελέσματα, χωρίς όμως να είναι μέχρι στιγμής πλήρως κατανοητός ο λόγος που συμβαίνει αυτό.

Διαδικασίες SCC που δεν περιλαμβάνουν δράση υδρογόνου παρατηρούνται κυρίως σε συγκεκριμένα εύρη ηλεκτροδιακού δυναμικού. Σε μεταλλικά υλικά, όπου παρατηρούνται φαινόμενα παθητικοποίησης, η SCC συνήθως εμφανίζεται στις ζώνες μετάβασης από δραστικά δυναμικά σε δυναμικά παθητικοποίησης και από

δυναμικά παθητικοποίησης σε δυναμικά βελονισμού. Στο διάγραμμα της Εικόνα 2.10 απεικονίζεται η τυπική σχέση δυναμικού και πυκνότητας ρεύματος, καθώς και οι περιοχές όπου εμφανίζεται η SCC. Στις ζώνες αυτές, η τιμή του δυναμικού στην επιφάνεια του μετάλλου/κράματος ανήκει στην περιοχή παθητικοποίησης, ενώ η τιμή στην κορυφή της ρωγμής ανήκει στην περιοχή δραστικών δυναμικών ή δυναμικών βελονισμού.



Εικόνα 1.10 Περιοχές ηλεκτροδιακού δυναμικού όπου παρατηρείται η SCC σε υλικά που εμφανίζουν φαινόμενα παθητικοποίησης [10]

Επίδραση εναλλαγών του περιβάλλοντος έκθεσης^[1]

Εναλλαγές στο περιβάλλον έκθεσης αυξάνουν την ευαισθησία ενός μεταλλικού υλικού σε SCC. Για παράδειγμα, κράματα που εκτίθενται σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον παρουσιάζουν μικρότερη ευαισθησία σε SCC, σε σχέση με άλλα που εκτίθενται σε εναλλασσόμενα περιβάλλοντα (π.χ. εναλλαγές ξήρανσης-διαβροχής), υπό τις ίδιες συνθήκες τάσεων και θερμοκρασίας.

κεφαλαίο 3

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΡΩΓΜΑΤΩΣΗΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΥΠΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

3.1 Εισαγωγή^{[1],[5],[7]}

Παρόλο που η SCC αποτελεί μια από τις πιο ανησυχητικές μορφές διάβρωσης, ο μηχανισμός που διέπει το φαινόμενο αυτό δεν έχει κατανοηθεί πλήρως, λόγω της πολυπλοκότητας που παρουσιάζει η αλληλεπίδραση μεταξύ μεταλλικού υλικού, εφαρμοζόμενης τάσης και διαβρωτικού περιβάλλοντος. Μελέτες και πειράματα έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι ένας μόνο μηχανισμός δεν μπορεί να περιγράψει την SCC για όλα τα συστήματα υλικού-περιβάλλοντος. Ως αποτέλεσμα εκτενών ερευνών, αναπτύχθηκαν πολλοί μηχανισμοί και μοντέλα για διαφορετικά συστήματα που περιγράφουν την έναρξη των ρωγμών και το ρυθμό διάδοσής τους, ενώ παράλληλα εξηγούν στοιχεία που προκύπτουν από μελέτες θραυστογραφίας.

Η κατηγοριοποίηση των προτεινόμενων μηχανισμών SCC πραγματοποιείται σύμφωνα με διάφορα κριτήρια, εκ των οποίων τα δύο κυριότερα είναι:

1. Ανάλογα με το είδος της ηλεκτροχημικής αντίδρασης ^[7]

Η κατηγοριοποίηση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι κατά την εξέλιξη της διάβρωσης συμβαίνουν τόσο ανοδικές όσο και καθοδικές αντιδράσεις, επομένως τα φαινόμενα που οδηγούν στην έναρξη και τη διάδοση των ρωγμών μπορούν να συσχετιστούν με κάποια από τις δύο κατηγορίες αντιδράσεων. Επομένως, οι μηχανισμοί μπορούν να διακριθούν σε:

- Ανοδικούς μηχανισμούς
- Καθοδικούς μηχανισμούς

Ένας βασικός ανοδικός μηχανισμός είναι η διάλυση μέσω ολίσθησης, ενώ ο κυριότερος καθοδικός είναι η ψαθυροποίηση από υδρογόνο.

2. Ανάλογα με τον τρόπο λύσης των ατομικών δεσμών στην άκρη της ρωγμής^[7]

Αυτή η κατηγοριοποίηση μηχανισμών βασίζεται στην υπόθεση ότι η λύση των ατομικών δεσμών στην κορυφή της ρωγμής πραγματοποιείται με τους παρακάτω τρόπους:

- Χημική διάλυση
- Μηχανική θραύση

Στη πρώτη κατηγορία, η διάδοση της ρωγμής εξαρτάται αποκλειστικά από το ρυθμό ανοδικής διάλυσης του μετάλλου/κράματος, ενώ ο ρόλος της τάσης περιορίζεται στη διευκόλυνση της ρήξης των επιφανειακών στρωμάτων και την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης, διαδικασίες οι οποίες οδηγούν σε συνεχή έκθεση γυμνής μεταλλικής επιφάνειας στο διαβρωτικό περιβάλλον. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει μηχανισμούς ψαθυρής κυρίως θραύσης, οι οποίοι καθορίζονται κυρίως από μηχανικούς παράγοντες, ενώ ο ρόλος του διαβρωτικού περιβάλλοντος περιορίζεται σε διεργασίες που υποβαθμίζουν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και διευκολύνουν τη διάδοση της ρωγμής, όπως:

- Απορρόφηση στοιχείων του περιβάλλοντος από το υλικό
- Αντιδράσεις στην επιφάνεια του υλικού
- Σχηματισμός επιφανειακών στρωμάτων (προστατευτικών ή μη προστατευτικών)
- Αντιδράσεις στο υλικό στην κορυφή της ρωγμής

Οι προτεινόμενοι μηχανισμοί διαφέρουν μεταξύ τους στα αίτια που οδηγούν στην έναρξη και τη διάδοση της ρωγμής, καθώς και στον τρόπο με τον οποίο συνεργούν οι επιδράσεις του περιβάλλοντος. Παρόλα αυτά, όλοι περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες από τις προαναφερθείσες διαδικασίες, ως βασικό «βήμα» για την εξέλιξη της SCC.

3.2 Έναρξη ρωγμών^[7]

Σημαντικό ρόλο στην έναρξη των ρωγμών διαδραματίζει η διάβρωση. Λόγω διάβρωσης σχηματίζονται στην επιφάνεια του υλικού βελονισμοί, χαραγές και άλλες επιφανειακές ασυνέχειες. Γενικά, όσο μειώνεται η ακτίνα στη βάση της εγκοπής, τόσο αυξάνεται η συγκέντρωση τάσεων, συνεπώς οι ασυνέχειες που προαναφέρθηκαν αποτελούν τα συνηθέστερα σημεία έναρξης ρωγμών λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση.

Παρόλο που τα σημεία έναρξης των ρωγμών λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση είναι εύκολα ανιχνεύσιμα, δεν έχουν αναπτυχθεί επαρκείς μηχανισμοί για την περιγραφή του σχηματισμού της ρωγμής. Η έλλειψη αυτή οφείλεται στο συνδυασμό διάφορων παραγόντων, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη δυσκολία υπολογισμού και προσδιορισμού της έναρξης της ρωγμής πειραματικά. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε αδυναμία κατανόησης της μετάβασης μιας ασυνέχειας σε ρωγμάτωση. Πιο συγκεκριμένα, δεν είναι εύκολα αντιληπτές οι διεργασίες που οδηγούν στην εξέλιξη ενός βελονισμού σε ρωγμή, ή της περικρυσταλλικής διάβρωσης σε περικρυσταλλική SCC.

Έναρξη ρωγμών σε ασυνέχειες επιφάνειας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, προϋπάρχοντα ή προκαλούμενα από διάβρωση ελαττώματα στην επιφάνεια του υλικού συχνά αποτελούν σημεία έναρξης της SCC. Τέτοια ελαττώματα μπορεί να είναι αυλακώσεις, επικαλύψεις, και επιφανειακές ανωμαλίες, οι οποίες παράγονται κατά τη διάρκεια κατεργασιών, διαδικασιών κατασκευής ή συγκόλλησης. Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζονται ελαττώματα και ασυνέχειες στην επιφάνεια ενός 304 ανοξείδωτου χάλυβα, τα οποία προκλήθηκαν κατά την προετοιμασία για συγκόλληση. Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 3.1 (α) φαίνεται ένα αυλάκι, το οποίο στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης ανακρυσταλλώνεται, έχοντας ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας χαραγής. Η χαραγή αυτή λειτουργεί ως σημείο συγκέντρωσης τάσεων, ενώ λόγω της διαμόρφωσής της, η σύσταση του περιβάλλοντος στην περιοχή αυτή διαφέρει σημαντικά από αυτήν του κυρίως διαβρωτικού περιβάλλοντος, γεγονός που οδηγεί ρωγμής. Η εμφανής ευαισθητοποίηση στα όρια των κόκκων της ανακρυσταλλωμένης περιοχής επιβαρύνει την αντίσταση του υλικού και οδηγεί συνήθως σε περικρυσταλλική διάδοση της ρωγμής. Στην Εικόνα 3.1 (β) φαίνονται επιφανειακές ανωμαλίες, οι οποίες προκλήθηκαν λόγω ψυχρής κατεργασίας και οι οποίες διευκολύνουν την έναρξη της ρωγμής.



Εικόνα 3.1 Επιφανειακές ασυνέχειες σε 304 ανοξείδωτο χάλυβα, έπειτα από διαδικασίες συγκόλλησης [7]

α) Χαραγή που προέκυψε μετά από ανακρυστάλλωση μιας επικάλυψης
β) Επιφανειακές ανωμαλίες που παράχθηκαν λόγω ψυχρής κατεργασίας

Έναρξη ρωγμών από βελονισμούς

Σημαντικό ρόλο στην έναρξη της SCC διαδραματίζουν και οι βελονισμοί, οι οποίοι υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις μπορούν να εξελιχθούν σε ρωγμή. Οι διαδικασίες σχηματισμού βελονισμών στην επιφάνεια ενός μεταλλικού υλικού έχουν περιγραφεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 1.5. Ένας βελονισμός δεν εξελίσσεται απαραίτητα σε ρωγμή, καθώς η μετάβαση αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η ηλεκτροχημεία στη βάση του βελονισμού, η γεωμετρία του βελονισμού, η χημική σύσταση του υλικού, καθώς και το επίπεδο τάσης ή παραμόρφωσης στη βάση του βελονισμού.

Η γεωμετρία του βελονισμού είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς καθορίζει το επίπεδο συγκέντρωσης τάσεων στη βάση του. Επιπλέον, επικρατεί η άποψη ότι ο λόγος του ρυθμού διείσδυσης του βελονισμού στο υλικό προς το ρυθμό διάβρωσης των πλευρών του πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 10 προκειμένου ο βελονισμός να εξελιχθεί σε ρωγμή. Τιμή του λόγου κοντά στη μονάδα σημαίνει ότι μακροπρόθεσμα η διάβρωση θα εξελιχθεί από βελονοειδή σε ομοιόμορφη, ενώ τιμές κοντά στο 1000 έχουν παρατηρηθεί σε περιπτώσεις αναπτυσσόμενης ρωγμής λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση. Για να επιτευχθούν τόσο υψηλές τιμές του λόγου θα πρέπει στα «τοιχώματα» του βελονισμού να είναι εφικτός ο επανασχηματισμός παθητικού στρώματος, σε αντίθεση με τη βάση του βελονισμού, στην οποία η συγκέντρωση τάσεων δεν επιτρέπει κάτι τέτοιο.

Επίσης σημαντική για την έναρξη της SCC από βελονισμό είναι η πιθανή διαφοροποίηση του διαβρωτικού περιβάλλοντος και επομένως και του δυναμικού διάβρωσης στο εσωτερικό του. Οι βελονισμοί, όπως και οι ρωγμές και οι χαραγές λειτουργούν σαν «κλειστά» κελιά, παρόλο που ο όγκος τους δεν είναι τόσο περιορισμένος όπως στην κορυφή μιας ρωγμής. Τέλος, το επίπεδο των τοπικών τάσεων και παραμορφώσεων στη βάση του βελονισμού μπορεί επίσης να επηρεάσει τη μετάβαση από βελονοειδή διάβρωση σε SCC, όμως σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με τους ηλεκτροχημικούς παράγοντες.

Έναρξη ρωγμών από περικρυσταλλική διάβρωση

Η έναρξη και η ανάπτυξη της SCC είναι εφικτή και χωρίς την παρουσία εσοχών, χαραγών, βελονισμών ή επιφανειακών ασυνεχειών. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η προϋπόθεση για τη δημιουργία ρωγμής είναι η διαφορετική χημική σύσταση του υλικού στα όρια των κόκκων του σε σχέση με το κυρίως υλικό. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην τοπική διάλυση του υλικού κατά μήκος των ορίων των κόκκων και η ρωγμή διαδίδεται περικρυσταλλικά. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε ευαισθητοποιημένους ανοξείδωτους χάλυβες, καθώς και σε ποικιλία μεταλλικών υλικών λόγω συγκέντρωσης ανεπιθύμητων προσμίξεων (S, P, Si) στα όρια των κόκκων.

3.3 Μηχανισμοί διάδοσης ρωγμών

3.3.1 Μοντέλα διάλυσης ^{[4],[5],[7]}

Σύμφωνα με τα μοντέλα διάλυσης, η διάδοση της ρωγμής πραγματοποιείται μέσω προτιμησιακής διάλυσης του υλικού στην κορυφή της. Ένας σημαντικός αριθμός μοντέλων έχει αναπτυχθεί για την επεξήγηση αυτής της διαδικασίας, η οποία αποδόθηκε στο σχηματισμό δραστικών διαδρομών (active paths), στην πλαστικοποίηση του υλικού μπροστά από τη «μύτη» της ρωγμής, καθώς και σε διάφορες χημικομηχανικές αλληλεπιδράσεις. Ωστόσο, εκτεταμένες έρευνες έχουν αποκλείσει σταδιακά όλα τα μοντέλα εκτός από ένα, το οποίο περιγράφει το μηχανισμό εμπεριστατωμένα. Το μοντέλο αυτό αναφέρεται ως Διάλυση μέσω Ολίσθησης (Slip Dissolution) και η περιγραφή αυτής της κατηγορίας μηχανισμών επικεντρώνεται σε αυτό.

Διάλυση μέσω Ολίσθησης ^{[4], [5]}

Αποτελεί το βασικότερο και απλούστερο εννοιολογικά μηχανισμό για την επεξήγηση της διάδοσης της SCC, ενώ ανήκει στην κατηγορία των ανοδικών μηχανισμών. Αφορά κυρίως υλικά τα οποία σχηματίζουν προστατευτικά επιφανειακά στρώματα. Η διαδικασία αρχίζει με την ανάπτυξη τοπικών τάσεων, ικανών να οδηγήσουν σε ρήξη του επιφανειακού στρώματος, αφήνοντας εκτεθειμένη στο διαβρωτικό περιβάλλον τη γυμνή επιφάνεια του μεταλλικού υλικού. Η τοπική διάλυση του μετάλλου μέσω ανοδικών αντιδράσεων, σε συνδυασμό με τις τοπικές τάσεις οδηγούν σταδιακά στην εξέλιξη της ρωγμής. Συνήθως, ο ρυθμός των ανοδικών αντιδράσεων στις παρειές της ρωγμής είναι μικρότερος σε σύγκριση με το ρυθμό διάδοσής της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση της γεωμετρίας της ρωγμής (οξεία κορυφή) και της συγκέντρωσης τάσεων στην κορυφή της. Μετά από κάποιο διάστημα πραγματοποιείται εκ νέου σχηματισμός επιφανειακού στρώματος. Ουσιαστικά, η ρωγμή εξελίσσεται με εναλλαγές ρήξης και δημιουργίας του στρώματος (Εικόνα 3.2). Ωστόσο, κάποιοι μελετητές υποθέτουν ότι ο ρυθμός διάτρησης των επιφανειακών στρωμάτων είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό σχηματισμού τους, επομένως η μεταλλική επιφάνεια παραμένει εκτεθειμένη καθ' όλη τη διαδικασία (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.2 Η ρήξη του επιφανειακού στρώματος στην κορυφή της ρωγμής πραγματοποιείται με ολίσθηση σε συγκεκριμένα «ευνοϊκά» κρυσταλλογραφικά επίπεδα, εμφανίζοντας νέα γυμνή επιφάνεια μέταλλου/κράματος. Ακολουθεί ανοδική διάλυση του υλικού έως τη δημιουργία νέου στρώματος και η διαδικασία επαναλαμβάνεται [7].



Εικόνα 3.2 Η έντονη πλαστικοποίηση στην άκρη της ρωγμής δεν επιτρέπει το σχηματισμό νέου επιφανειακού στρώματος, με αποτέλεσμα η μεταλλική επιφάνεια να μένει μονίμως εκτεθειμένη στο διαβρωτικό περιβάλλον [7].

Ο μηχανισμός αυτός περιγράφει αποκλειστικά περικρυσταλλική διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση, επομένως η χημεία σε επίπεδο μικροκλίμακας στα όρια των κόκκων του υλικού έχει ιδιαίτερη σημασία. Σε κάθε μεταλλικό υλικό, οι ανεπιθύμητες προσμίξεις, καθώς και διάφορα εγκλείσματα και κατακρημνίσματα,

συγκεντρώνονται στα όρια των κόκκων, γεγονός που καθιστά δυσκολότερη την παθητικοποίηση, με αποτέλεσμα, να σχηματίζονται τοπικά πιο αδύνατα επιφανειακά στρώματα. Δεδομένης της αυξημένης ευαισθησίας στις περιοχές αυτές, σε σύγκριση με το υπόλοιπο παθητικοποιημένο υλικό, η διάβρωση ακολουθεί συγκεκριμένη διαδρομή στο υλικό, κατά μήκος των ορίων των κόκκων. Αυτός είναι και ο λόγος που ο μηχανισμός αναφέρεται συχνά με τον όρο "Ενεργοί Δρόμοι Διάλυσης" (Active Path Dissolution).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της Διάλυσης μέσω Ενεργών Μονοπατιών αποτελεί η SCC σε ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα, μετά από ευαισθητοποίηση στα όρια των κόκκων. Η ευαισθητοποίηση οφείλεται στη μείωση της συγκέντρωσης χρωμίου (Cr) στις περιοχές αυτές, από 18% (ενδεικτική περιεκτικότητα Cr στον ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα) έως και 10%. Βασικό ρόλο στη διαδικασία αυτή έχει ο σχηματισμός καρβιδίων του χρωμίου (Cr23C6) στα σύνορα των κόκκων, ο οποίος πραγματοποιείται σε συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών και δεσμεύει πολλά άτομα Cr για κάθε μόριο Cr23C6 , τα οποία εκλείπουν από το παθητικό στρώμα. Η εξάντληση του χρωμίου έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία του παθητικού στρώματος, συνεπώς διευκολύνεται η διάτρηση αυτού και δυσχεραίνεται η αναδημιουργία του. Υπό αυτές τις συνθήκες, είναι δυνατή η εκκίνηση SCC, ενώ ο ρυθμός διάδοσης των ρωγμών είναι σχετικά υψηλός.

Γενικά, περικρυσταλλική διάβρωση μπορεί να προκύψει και χωρίς ανάπτυξη τοπικών τάσεων, ξεκινώντας για παράδειγμα από κάποια ασυνέχεια του επιφανειακού στρώματος. Η διαφορά στην SCC είναι ότι λόγω των εφελκυστικών τάσεων διευκολύνεται η απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης και η διάτρηση των παθητικών στρωμάτων, αφήνοντας συνεχώς νέα επιφάνεια γυμνού μετάλλου εκτεθειμένη στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Οι παραπάνω διαδικασίες σχετίζονται με τους περισσότερους μηχανισμούς SCC. Η διαφοροποίηση της Διάλυσης μέσω Ολίσθησης από τους υπόλοιπους μηχανισμούς έγκειται στην υπόθεση, ότι ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής εξαρτάται αποκλειστικά από το μέγεθος της απώλειας υλικού μετά τη ρήξη του επιφανειακού στρώματος. Επομένως, ο ρυθμός διάδοσης εξαρτάται από τον ρυθμό αναδημιουργίας του παθητικού στρώματος και τη συχνότητα πραγματοποίησης των

ρήξεων αυτού λόγω της επιβαλλόμενης τάσης. Μια εκτίμηση για τη μέση ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής δίνεται από τον νόμο του Faraday:

$$\frac{da}{dt} = \frac{M}{zF\rho} \frac{q_f}{\varepsilon_f} \varepsilon_{ct}$$

Όπου:

Μ: ατομικό βάρος του μετάλλου

ρ: πυκνότητα μετάλλου/ μεταλλικού κράματος

z: αριθμός ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην αντίδραση οξείδωσης ενός ατόμου
του μετάλλου

F: σταθερά του Faraday

 \pmb{q}_f : πυκνότητα φορτίου οξείδωσης μεταξύ δύο ρήξεων του επιφανειακού στρώματος

ε_f: απαιτούμενη παραμόρφωση για τη ρήξη του επιφανειακού στρώματος

 $\dot{m{\epsilon_{ct}}}$: ρυθμός παραμόρφωσης στην κορυφή της ρωγμής

Για την ακριβή ποσοτική εκτίμηση ανάπτυξης της ρωγμής απαιτούνται δεδομένα για την πυκνότητα ρεύματος και τον ρυθμό αναδημιουργίας του στρώματος στην άκρη της ρωγμής, τα οποία είναι μη μετρήσιμα μεγέθη. Τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να εξαχθούν μέσω προσεκτικά σχεδιασμένων πειραματικών διαδικασιών, στις οποίες πραγματοποιείται προσομοίωση τόσο του υλικού της άκρης της ρωγμής όσο και του περιβάλλοντος έκθεσης αυτής και το δυναμικό που χρησιμοποιείται είναι αντίστοιχο αυτού στην άκρη της ρωγμής. Ο λόγος που δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο περιβάλλον της άκρης της ρωγμής είναι γιατί συνήθως διαφέρει από το υπόλοιπο περιβάλλον του υλικού, λόγω των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα τόσο στην άκρη όσο και στις παρειές της ρωγμής. Αντίστοιχα, απαιτείται προσοχή στην προσομοίωση του υλικού στην άκρη της ρωγμής, επειδή η χημική σύσταση σε αυτό το σημείο είναι διαφορετική. Επομένως, αν η πειραματική διαδικασία διεξαχθεί με το κυρίως υλικό και διάλυμα, πιθανότατα να προκύψουν διαφορετικά αποτελέσματα.

Η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής περιορίζεται εγγενώς από τον ρυθμό διάλυσης του μετάλλου, συνεπώς σε ακραίες περιπτώσεις φτάνει έως 10-2 mm/s.

Συνήθως όμως οι ταχύτητες είναι μικρότερες, δηλαδή περίπου 10-8 mm/s (1-3 mm/ έτος).

3.3.2 Μοντέλα μηχανικής θραύσης

Στα μοντέλα μηχανικής θραύσης, η εξέλιξη της ρωγμής πραγματοποιείται μέσω μηχανισμών κανονικής μηχανικής θραύσης, με τη διαφορά ότι στην SCC, η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον οδηγεί σε διεργασίες οι οποίες ενισχύουν και επιταχύνουν αυτούς τους μηχανισμούς. Τέτοιες διεργασίες είναι η αποκραμάτωση ορισμένων κραμάτων, η δημιουργία ψαθυρών ενώσεων στην επιφάνεια του υλικού, η αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης στην άκρη της ρωγμής και άλλες, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

3.3.2.1 Θραύση υποβοηθούμενη από ανοδική αντίδραση (Anodic Reaction-Enhanced Fracture)^{[4],[5],[7]}

Ο μηχανισμός της υποβοηθούμενης από ανοδική αντίδραση θραύσης περιγράφει τη διακρυσταλλική ρωγμάτωση που προκαλείται λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση. Ο μηχανισμός αυτός ανήκει στην κατηγορία των ανοδικών μηχανισμών. Ο εξαιρετικά υψηλός ρυθμός διάδοσης τέτοιων ρωγμών, σε σύγκριση με το ρυθμό διάλυσης της γυμνής μεταλλικής επιφάνειας, δεν μπορεί να εξηγηθεί απλά με την πραγματοποίηση ανοδικών αντιδράσεων, συνεπώς υποδεικνύει την ύπαρξη πρόσθετων διεργασιών στην περιοχή της ρωγμής. Με βάση αυτή την υπόθεση, αναπτύχθηκαν οι μηχανισμοί της Απόσχισης λόγω Ανοδικής Αντίδρασης, της Πλαστικής Ροής λόγω Ανοδικής Αντίδρασης και του Μοντέλου Επιφανειακής Σταθερότητας, στους οποίους οι ανοδικές αντιδράσεις προωθούν κάποιες άλλες διαδικασίες διάδοσης των ρωγμών.

Απόσχιση λόγω ανοδικής αντίδρασης (Anodic Reaction-Induced Cleavage) ^{[4],[5],[7]}

Σε μερικά όλκιμα κράματα, οι ανοδικές αντιδράσεις έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό στρώματος ψαθυρών ενώσεων στην επιφάνεια του υλικού. Ρωγμές, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί σε αυτό το στρώμα, υπό την επίδραση εφελκυστικών τάσεων διαδίδονται σε πολύ μικρή απόσταση (της τάξης του 1 μm) πριν συλληφθούν από το όλκιμο υλικό. Τα ψαθυρά αυτά στρώματα επανασχηματίζονται στην επιφάνεια της αμβλυμμένης κορυφής της ρωγμής, με τη συμβολή των ανοδικών αντιδράσεων που συνεχίζουν να πραγματοποιούνται. Με αυτόν τον τρόπο, η διαδικασία επαναλαμβάνεται και η ρωγμή διαδίδεται διακρυσταλλικά έως την τελική αστοχία (Εικόνα 3.4). Τα ψαθυρά στρώματα που εμφανίζονται συνήθως είναι αποκραματωμένα στρώματα, τα οποία σχηματίζονται στην επιφάνεια του υλικού λόγω διάλυσης του δραστικότερου κραματικού στοιχείου. Το πιο γνωστό είναι το νανοπορώδες αποκραματωμένο στρώμα στην επιφάνεια του υρείχαλκου, το οποίο δημιουργείται έπειτα από εκλεκτική απομάκρυνση του ψευδαργύρου (αποψευδαργύρωση).

Η δυνατότητα εφαρμογής αυτού του μοντέλου αποτελεί ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα. Μελέτες έχουν δείξει ότι θα μπορούσε να περιγράψει τη διακρυσταλλική διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση στον ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα, όταν βρεθεί σε περιβάλλον με χλωριόντα. Ωστόσο, αποτελέσματα προσεκτικής μικροθραυστογραφίας έχουν δείξει ότι οι μικρορωγμές εντός των ψαθυρών επιφανειακών στρωμάτων οφείλονται σε ολίσθηση σε συγκεκριμένα κρυσταλλογραφικά επίπεδα, όπως αναφέρεται στην περιγραφή του επόμενου μηχανισμού. Συνεπώς, μελέτες βρίσκονται σε εξέλιξη, ώστε να προσδιοριστούν τα



Εικόνα 3.4 Εξέλιξη μηχανισμού Απόσχισης λόγω Ανοδικής Αντίδρασης [7].

συστήματα υλικού-διαβρωτικού περιβάλλοντος, στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί το εν λόγω μοντέλο.



Εικόνα 3.5 Τροποποίηση του μοντέλου Απόσχισης λόγω Ανοδικής Αντίδρασης προς περιγραφή περικρυσταλλικής SCC λόγω διείσδυσης οξειδίου στη μεταλλική δομή, κατά μήκος των ορίων των κόκκων [7].

Έχει, επίσης, αναπτυχθεί μια παραλλαγή του μοντέλου με σκοπό να περιγράψει περικρυσταλλική SCC σε διάφορα συστήματα μετάλλων/ κραμάτων. Η τροποποίηση αυτή βασίστηκε στην ιδέα ότι κάποια σχηματιζόμενα επιφανειακά στρώματα οξειδίων έχουν τη δυνατότητα να διεισδύουν στην κρυσταλλική δομή, κατά μήκος των συνόρων των κόκκων. Όπως και προηγουμένως, η διαδικασία περιλαμβάνει εναλλάξ διάδοση ρωγμής διαμέσου του οξειδίου και επανασχηματισμό του στρώματος οξειδίου πάντα κατά μήκος των ορίων των κόκκων (Εικόνα 3.5).

Εντοπισμένη Πλαστικοποίηση λόγω Ανοδικής Αντίδρασης (Anodic reaction-enhanced localized plasticity)^[5]

Το μοντέλο της εντοπισμένης πλαστικοποίησης λόγω ανοδικής αντίδρασης αναπτύχθηκε με αφορμή την ανάγκη επεξήγησης του υψηλού ρυθμού εξέλιξης διακρυσταλλικών ρωγματώσεων στον ανοξείδωτο χάλυβα 316 σε περιβάλλοντα με χλωριόντα. Η βασική ιδέα έγκειται στο γεγονός ότι η ανοδική διάλυση στην κορυφή της ρωγμής έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κενών, η οποία διευκολύνει τη διάχυση στερεάς κατάστασης και οδηγεί σε έντονη εντοπισμένη πλαστικοποίηση. Η διάδοση της ρωγμής πραγματοποιείται με διαδικασίες ολίσθησης σε μικροσκοπικά κρυσταλλογραφικά επίπεδα. Η πλαστικότητα παρατηρείται με προσεκτική παρατήρηση της επιφάνειας θραύσης σε μικροσκόπιο, ενώ μακροσκοπικά δίνεται η εικόνα ρωγμής λόγω απόσχισης.

Μοντέλο Επιφανειακής Σταθερότητας (Surface stability model)^[5]

Η εφαρμογή του μοντέλου επιφανειακής σταθερότητας εντοπίζεται κυρίως σε συστήματα, όπου η SCC συνδέεται με τη διεξαγωγή ανοδικών αντιδράσεων και την ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου. Η ανάπτυξή του βασίζεται στην ιδέα, ότι η διάδοση των ρωγμών είναι αποτέλεσμα της συσσώρευσης μικροκενών και της «σύλληψης» αυτών από το τεταμένο κρυσταλλικό πλέγμα στην κορυφή της ρωγμής.

Ο ρυθμός εξέλιξης του φαινομένου εξαρτάται από την ταχύτητα μετακίνησης των προσροφημένων ατόμων (adatoms) στις παρειές της ρωγμής, τα οποία στη συνέχεια «χάνονται» λόγω των ανοδικών αντιδράσεων ή επιφανειακών μικροκενών (surface vacancies) που δημιουργούνται στις περιοχές αυτές (π.χ. κατά την αποψευδαργύρωση του ορείχαλκου). Η σύνδεση των παραπάνω διεργασιών με την ψαθυροποίηση από υδρογόνο, έγκειται στο γεγονός ότι τα άτομα του υδρογόνου υπό συγκεκριμένες συνθήκες αποδεσμεύονται αφήνοντας μικροκενά στη μεταλλική δομή, τα οποία τείνουν να απορροφούν τα μετακινούμενα προσροφημένα άτομα. Ο ρόλος του περιβάλλοντος είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς επηρεάζει τον ρυθμό επιφανειακής διάχυσης μέσω της επίδρασης που ασκεί στην κατανάλωση των προσροφημένων ατόμων. Επιπλέον, επιφανειακές ενώσεις που σχηματίζονται ως αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης περιβάλλοντος-υλικού επιδρούν στην εξέλιξη της επιφανειακής διάχυσης στο μέταλλο/κράμα. Οι βάσεις και η θεμελίωση του μηχανισμού αυτού αποτελεί σημείο αμφισβήτησης, επομένως η εφαρμογή του βρίσκεται ακόμη υπό διερεύνηση.

3.3.2.2 Μοντέλο Διάβρωσης Σήραγγας (The Corrosion Tunnel Model)^[7]

Σύμφωνα με το μοντέλο διάβρωσης σήραγγας, η διάδοση των ρωγμών οφείλεται στη δημιουργία μια σειράς παράλληλων μικροσκοπικών αυλακώσεων λόγω διάβρωσης. Η διεύθυνση των αυλακώσεων είναι κάθετη στην επιβαλλόμενη εφελκυστική τάση και προς το μέτωπο διάδοσης της ρωγμής. Το μήκος και η διάμετρός τους σταδιακά αυξάνεται, μέχρις ότου οι τάσεις στην εναπομένουσα διατομή να είναι επαρκώς υψηλές, ώστε τοπικά να επέλθει όλκιμη θραύση. Συνεπώς, η ρωγμή διαδίδεται με την ανάπτυξη και διεύρυνση των μικροσκοπικών σηράγγων και την επακόλουθη συνένωσή τους λόγω τοπικής όλκιμης θραύσης (Εικόνα 3.6 α).

Η επιφάνεια θραύσης που προκύπτει με αυτόν τον μηχανισμό διάδοσης ρωγμών, είναι αυλακωμένη με ενδείξεις συνένωσης μικροκενών στα άκρα. Ωστόσο, η εικόνα αυτή δε συνάδει με τα συνηθισμένα θραυστογραφικά χαρακτηριστικά μιας επιφάνειας που έχει υποστεί SCC. Για τον λόγο αυτό, έγινε η υπόθεση ότι η επιβολή εφελκυστικής τάσης οδηγεί στη μετατροπή της μορφολογίας των αυλακώσεων σε μικροσκοπικές επίπεδες σχισμές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.6 b. Η υπόθεση αυτή προέκυψε έπειτα από παρατήρηση τέτοιων σχισμών σε ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες, οι οποίες σχηματίστηκαν στα κρυσταλλογραφικά επίπεδα [110]. Από μελέτες εξάχθηκε το συμπέρασμα, ότι ο μηχανισμός του σχηματισμού και του μηχανικού αποχωρισμού των εν λόγω σχισμών μπορεί να περιγράψει διακρυσταλλική SCC σε διάφορα συστήματα μεταλλικού υλικού-περιβάλλοντος.





b) Παραλλαγή της προηγούμενης εκδοχής, σύμφωνα με την οποία, οι εφελκυστικές τάσεις οδηγούν στη δημιουργία σχισμών κατά μήκος προτιμητέων κρυσταλλογραφικών επιπέδων.

3.3.2.3 Ψαθυροποίηση από υδρογόνο (Hydrogen Embrittlement)^{[4],[5]}

Η ψαθυροποίηση από υδρογόνο αποτελεί έναν από τους καθοδικούς μηχανισμούς και εξελίσσεται κατόπιν εισβολής ατομικού υδρογόνου στη δομή του μετάλλου. Η παρουσία υδρογόνου στο περιβάλλον των μεταλλικών υλικών μπορεί

να προκύψει λόγω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων, γαλβανικής αλληλεπίδρασης μεταξύ ανόμοιων μετάλλων, διαδικασιών συγκόλλησης, κλπ.

Λόγω του μικρού τους μεγέθους, τα άτομα υδρογόνου μπορούν να διεισδύσουν στα κενά μεταξύ των ατόμων της κρυσταλλικής δομής και να διαχέονται σε αυτή με μεγάλη ευκολία. Βέβαια, η διαλυτότητα και η ικανότητα διάχυσης του υδρογόνου στο κρυσταλλικό πλέγμα διαφέρει σε κάθε υλικό ή σε διαφορετικές φάσεις του ίδιου υλικού. Για παράδειγμα, η κυβική χωροκεντρωμένη δομή (body-centered cubic, bcc) του φερρίτη διαθέτει μικρά κενά μεταξύ των ατόμων, όμως τα κανάλια μεταξύ των κενών είναι επαρκή. Επομένως, το υδρογόνο παρουσιάζει μεγάλο συντελεστή διάχυσης, αλλά περιορισμένη διαλυτότητα στον φερρίτη. Αντίθετα, η κυβική εδροκεντρωμένη δομή (face-centered cubic, fcc) του ωστενίτη, διαθέτει μεγάλα κενά και επιτρέπει την εύκολη διάλυση του υδρογόνου, όμως λόγω των μικρών καναλιών μεταξύ των κενών παρεμποδίζεται η διάχυσή τους στην κρυσταλλική δομή.

Τα άτομα υδρογόνου προσελκύονται κυρίως από διεσταλμένες περιοχές του κρυσταλλικού πλέγματος (π.χ. λόγω επιβολής εφελκυστικών τάσεων), καθώς και από περιοχές της μικροδομής όπως τα όρια των κόκκων, οι περιοχές συγκέντρωσης διαταραχών, οι περιοχές διεπιφάνειας της μήτρας με κατακρημνίσματα ή άλλα σωματίδια. Συνεπώς, περιοχές ρωγμών και εγκοπών στο υλικό, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην απορρόφηση του υδρογόνου επειδή βρίσκονται υπό την επίδραση τάσεων.

Ανάλογα με τον συντελεστή διάχυσης και τη διαλυτότητα που παρουσιάζει κάθε υλικό, τα άτομα υδρογόνου μπορούν να εισέλθουν από οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας του υλικού (και όχι απαραίτητα από περιοχές κοντά σε ρωγμές και εγκοπές), να μετακινηθούν και να φτάσουν στις κορυφές των ρωγμών. Σε αυτήν την περίπτωση, η εξέλιξη της ρωγμής εξαρτάται από τον λόγο του ρυθμού απορρόφησης του υδρογόνου στην κορυφή της ρωγμής, προς τον αντίστοιχο ρυθμό στις περιοχές εκτός της ρωγμής, ο οποίος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως τη χημική σύσταση του διαλύματος, το ηλεκτροδιακό δυναμικό και τη φύση των επιφανειακών στρωμάτων. Υψηλή τιμή του λόγου, σημαίνει έντονη δράση του υδρογόνου στην κορυφή της ρωγμής σε σύγκριση με την υπόλοιπη επιφάνεια, επομένως ταχύτερη διάδοση. Αντίθετα, όσο η τιμή του λόγου πλησιάζει τη μονάδα,

οι επιδράσεις του υδρογόνου είναι ομοιόμορφες σε όλη την έκταση του υλικού, επομένως παρατηρείται άμβλυνση της κορυφής της ρωγμής.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η έναρξη και η διάδοση ρωγμών θα πραγματοποιηθεί όταν επιτευχθεί ένας κρίσιμος συνδυασμός τοπικής περιεκτικότητας σε υδρογόνο, τάσης/παραμόρφωσης και ευπάθειας μικροδομής. Ο ακριβής μηχανισμός εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και παρουσιάζει διαφορές σε κάθε σύστημα υλικού-περιβάλλοντος, όμως σε κάθε περίπτωση οδηγεί σε ψαθυροποίηση του υλικού, συνεπώς διευκολύνεται η διάδοση ρωγμών, η οποία πραγματοποιείται είτε περικρυσταλλικά, είτε διακρυσταλλικά. Ο ρυθμός διάδοσης ρωγμής σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει έως 1mm/s.

Το φαινόμενο της ψαθυροποίησης από υδρογόνο συχνά αναφέρεται και ως ανεξάρτητη κατηγορία περιβαλλοντικής ρωγμάτωσης. Αυτό συμβαίνει όταν η ρωγμάτωση οφείλεται αποκλειστικά στην επίδραση του υδρογόνου. Κατά την περιγραφή των κυριότερων ηλεκτροχημικών αντιδράσεων στο εσωτερικό της ρωγμής (Κεφάλαιο 2.3), αναφέρθηκε ότι η αναγωγή του υδρογόνου αποτελεί μια συνηθισμένη καθοδική αντίδραση, ως συνέπεια άλλων ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Τα προκύπτοντα άτομα υδρογόνου επηρεάζουν την εξέλιξη της SCC διευκολύνοντας τη διάδοση της ρωγμάτωσης, χωρίς όμως να είναι ο μοναδικός παράγοντας που την προκαλεί. Σε αυτήν την περίπτωση, η ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου αναφέρεται ως καθοδικός μηχανισμός SCC. Ωστόσο, η διάκριση αυτή είναι συχνά αυθαίρετη επειδή οι μηχανισμοί της SCC δεν είναι εντελώς ξεκάθαροι σε όλες τις περιπτώσεις. Κατά συνέπεια, πολλές αστοχίες που οφείλονται αποκλειστικά στη δράση του υδρογόνου καταλογίζονται συμβατικά στην SCC. Οι κυριότεροι μηχανισμοί ψαθυροποίησης από υδρογόνο περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Μηχανισμός Εσωτερικής Πίεσης (Internal Pressure Mechanism)^[5]

Συχνά, διάφοροι παράγοντες, όπως ο μετασχηματισμός μιας φάσης κατά τη συγκόλληση, μπορούν να οδηγήσουν σε αναδιάταξη των ατόμων του υδρογόνου στα κενά και στις σχισμές της μεταλλικής δομής. Η αναδιάταξη αυτή έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση υψηλών πιέσεων από μόρια αέριου υδρογόνου, η οποία

οδηγεί στη διεύρυνση των κενών και των σχισμών. Σε κάποιες περιπτώσεις, πραγματοποιείται αποδέσμευση του υδρογόνου από το κρυσταλλικό πλέγμα (η οποία συνήθως συνοδεύεται από αντιδράσεις παραγωγής αερίων) αφήνοντας κενές τις διευρυμένες εσωτερικές κοιλότητες, οι οποίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού και κατ' επέκταση διευκολύνουν την ανάπτυξη ρωγμάτωσης. Το φαινόμενο ονομάζεται ρωγμάτωση λόγω ρόφησης υδρογόνου (Hydrogen Induced Cracking, HIC). Οι αστοχίες λόγω HIC είναι προοδευτικές και απαιτούνται μεγάλα χρονικά διαστήματα μέχρις ότου να γίνουν αντιληπτές (Εικόνα 3.7).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η HIC σε φερριτικό ανοξείδωτο χάλυβα, έπειτα από διαδικασίες συγκόλλησης. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά τη συγκόλληση, η φάση του φερρίτη μετατρέπεται σε ωστενίτη, στον οποίο το υδρογόνο παρουσιάζει μεγάλη διαλυτότητα. Τα άτομα του υδρογόνου εισέρχονται με μεγάλη ευκολία στη κρυσταλλική δομή και σε υψηλές συγκεντρώσεις, όμως μετά την απόψυξη και τη μετατροπή του ωστενίτη σε φερρίτη, όπου τα κενά στη bcc δομή του είναι μικρότερα, ασκούν πιέσεις στο κρυσταλλικό πλέγμα. Εφόσον ο συντελεστής διάχυσης είναι μεγαλύτερος στο φερρίτη, τα άτομα υδρογόνου κινούνται και σταδιακά αποδεσμεύονται από το κράμα αφήνοντας πολλές εσωτερικές κοιλότητες.

Τοπική Πλαστικοποίηση λόγω Υδρογόνου (Hydrogen-Enhanced Local Plastification)^[5]

Ο όρος «ψαθυροποίηση» συνδέεται με απώλεια ολκιμότητας και κοκκώδη επιφάνεια θραύσης, η οποία γίνεται αντιληπτή ακόμη και σε μικρή σχετικά μεγέθυνση. Ωστόσο, υπάρχουν πολλά παραδείγματα ψαθυροποίησης από υδρογόνο, στα οποία η οπτική παρατήρηση της επιφάνειας αστοχίας έδωσε την εικόνα όλκιμης θραύσης, ακόμη και σε μικροσκοπία υψηλής ανάλυσης.

Το χαρακτηριστικό-κλειδί στο φαινόμενο αυτό είναι η εξαιρετικά έντονη αλλά εντοπισμένη παραμόρφωση του υλικού, ενώ μακροσκοπικά, η συνολική παραμόρφωση διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Ο μηχανισμός αστοχίας περιλαμβάνει εντοπισμένη διάτμηση, υποβοηθούμενη από την παρουσία

υδρογόνου. Επειδή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα ταχύτερη διάδοση ρωγμής, περιλαμβάνεται στους μηχανισμούς «ψαθυροποίησης» λόγω υδρογόνου.

Αποσύνδεση προκαλούμενη από Υδρογόνο (Hydrogen-Induced Decohesion)^[5]

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα άτομα υδρογόνου που εισέρχονται στη μεταλλική δομή, τείνουν να συγκεντρώνονται σε περιοχές όπως οι ρωγμές, όπου υπάρχουν εφελκυστικές τάσεις. Συχνά, επιτυγχάνονται πολύ υψηλές συγκεντρώσεις υδρογόνου στην άκρη της ρωγμής, με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η ισχύς των δεσμών μεταξύ των ατόμων του μετάλλου. Ρωγματώσεις πραγματοποιούνται, όταν αναπτυχθούν τοπικές εφελκυστικές τάσεις, ικανές να ξεπεράσουν τις συνδετικές δυνάμεις.

Σχηματισμός Υδριδίων (Hydride Formation)^[5]

Μέταλλα της πέμπτης στήλης του περιοδικού πίνακα, όπως νιόβιο, βανάδιο, ταντάλιο, αλλά και άλλα, όπως ζιρκόνιο, τιτάνιο, μαγνήσιο, παλλάδιο, καθώς και τα κράματά τους, σχηματίζουν υπό συγκεκριμένες συνθήκες επιβαλλόμενης τάσης εύθραυστες υδριδικές ενώσεις. Η κορυφή της ρωγμής αποτελεί σημείο συγκέντρωσης τάσεων, επομένως είναι ευνοϊκή περιοχή για το σχηματισμό τέτοιων ενώσεων. Το φαινόμενο εξελίσσεται με διάδοση της ρωγμής εντός της υδριδικής φάσης και σύλληψη της ρωγμής στην περιοχή διεπαφής με τη μήτρα. Οι διαδικασίες αυτές εναλλάσσονται και με αυτόν τον τρόπο διαδίδεται η ρωγμή έως την τελική αστοχία.



Εικόνα 3.7 Ρωγμάτωση λόγω ρόφησης υδρογόνου (HIC) [15]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΥΠΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

4.1 Εισαγωγή ^{[4],[7],[22],[24]}

Η απρόβλεπτη και ασταθής φύση των αστοχιών λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking - SCC) καθιστούν ιδιαίτερα σημαντική την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας πραγματοποίησής τους. Για το σκοπό αυτό είναι αναγκαία η πρόληψη της SCC κατά την λειτουργία των δομικών στοιχείων μιας κατασκευής, με τη σωστή επιλογή υλικού και την κατάλληλη διαστασιολόγηση με βάση το προβλεπόμενο περιβάλλον λειτουργίας. Η δυσκολία τόσο της επιλογής υλικού, όσο και της διαστασιολόγησης, έγκειται στο γεγονός ότι θα πρέπει να μην είναι υπερβολικά συντηρητική, ώστε να επιτυγχάνεται υψηλό επίπεδο ασφάλειας της κατασκευής χωρίς να απαιτείται υπερβολικά υψηλό κόστος.

Τα δεδομένα που απαιτούνται για την πρόληψη της SCC παρέχονται από την υπάρχουσα εμπειρία, σχετικά με αστοχίες που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν, και από κατάλληλα σχεδιασμένα εργαστηριακά πειράματα. Με τις σύγχρονες εργαστηριακές δοκιμές υπάρχει πλέον η δυνατότητα πρόβλεψης της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς ενός υλικού στο προβλεπόμενο περιβάλλον λειτουργίας από πειράματα μικρής διάρκειας. Καθώς ο ρόλος των εργαστηριακών πειραμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντικός, έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι, οι συνηθέστερες από τις οποίες θα περιγραφούν αναλυτικά στο κεφάλαιο αυτό.

Ο βασικότερος στόχος μιας εργαστηριακής δοκιμής είναι ο προσδιορισμός της καταλληλότητας ενός υλικού για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Σε αυτήν την περίπτωση η πειραματική διαδικασία σχεδιάζεται έτσι ώστε το υλικό να υποβληθεί στις δυσμενέστερες συνθήκες που προβλέπονται κατά την λειτουργία του. Άλλες φορές ο στόχος των δοκιμών είναι η σύγκριση της συμπεριφοράς διαφορετικών υλικών σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και ο προσδιορισμός των υλικών που είναι ευπαθή σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Ο σχεδιασμός πειραμάτων με τέτοιο σκοπό πραγματοποιείται είτε με βάση συγκεκριμένο

στόχοι μιας δοκιμής SCC είναι η αξιολόγηση συστημάτων προστασίας, η διασφάλιση της ποιότητας του υλικού, η διερεύνηση των μηχανισμών SCC, η εκτίμηση της σχετικής επιθετικότητας ενός διαβρωτικού μέσου, ενώ σπανιότερα πραγματοποιούνται πειράματα SCC για τον έλεγχο της ύπαρξης παραμενουσών τάσεων στο υλικό.

Γενικά μια δοκιμή SCC αποτελείται από ένα μεταλλικό δοκίμιο, το οποίο υποβάλλεται σε εφελκυστικά φορτία, ενώ ταυτόχρονα εκτίθεται σε ένα περιβάλλον που εκτιμάται να είναι διαβρωτικό για το συγκεκριμένο υλικό. Οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων αφορούν τη μορφή του δοκιμίου, την τοποθέτηση και συντήρηση του διαβρωτικού περιβάλλοντος, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο επιβάλλονται οι εφελκυστικές τάσεις.

4.2 Τυποποίηση δοκιμών^{[7],[22]-[24],[26]}

Στην πράξη ο σχεδιασμός και η διεξαγωγή των πειραμάτων δεν είναι απλή υπόθεση, καθώς απαιτείται πλήρης έλεγχος των μηχανικών, περιβαλλοντικών και μεταλλουργικών παραγόντων, καθώς και ιδιαίτερη προσοχή στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Η μακροχρόνια μελέτη των αποτελεσμάτων διάφορων πειραματικών διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν και η αξιολόγηση της καταλληλότητας και της εφαρμοστικότητας τους, οδήγησε σταδιακά στην ανάπτυξη συγκεκριμένων μεθόδων, ενώ αργότερα ακολούθησε και η τυποποίησή τους.

Η τυποποίηση των δοκιμών SCC ξεκίνησε στις Η.Π.Α. τη δεκαετία του 1960 από τους ASTM (American Society for Testing and Materials) και NACE (National Association of Corrosion Engineers) και συνεχίστηκε στην Ευρώπη, ενώ αργότερα ο ISO (International Organization for Standarization) προέβη στην δημοσίευση προτύπων με πιο αναλυτική περιγραφή των μεθόδων και των παραμέτρων των εργαστηριακών δοκιμών. Πλέον, οι πιο διαδεδομένες και αξιόπιστες μέθοδοι εργαστηριακών πειραμάτων περιγράφονται λεπτομερώς σε πρότυπα από τους ASTM, NACE και ISO, καθώς και σε διάφορα επιστημονικά άρθρα, συγγράμματα και δημοσιεύσεις.

Τα πρότυπα βοηθούν σημαντικά στην πραγματοποίηση των πειραμάτων γιατί παρέχουν κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με :

- Τη μορφή των δοκιμίων, τις προτεινόμενες διαστάσεις τους, την απαιτούμενη προετοιμασία τους πριν την εκτέλεση του πειράματος, τις απαιτήσεις που αφορούν τις ανοχές στις διαστάσεις, την ποιότητα επιφάνειας, κ.λπ.
- Το είδος της φόρτισης (στατική ή αυξανόμενη, εφελκυστική ή καμπτική) και το προτεινόμενο εύρος των τιμών φορτίου για κάθε περίπτωση.
- Την επιλογή του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Όταν ο σκοπός του πειράματος είναι ο προσδιορισμός της καταλληλότητας ενός υλικού για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, προτείνεται το διαβρωτικό περιβάλλον να προσομοιάζει όσο το δυνατόν καλύτερα το περιβάλλον λειτουργίας της πραγματικής κατασκευής. Σε άλλες περιπτώσεις προτείνονται διαλύματα συγκεκριμένης χημικής σύστασης και συγκεκριμένες συνθήκες, κυρίως όταν ο στόχος των δοκιμών είναι η ταξινόμηση μεταλλικών υλικών σύμφωνα με την ευαισθησία τους σε SCC.

Επιπλέον, σε περιπτώσεις που το περιβάλλον είναι εκρηκτικό ή εύφλεκτο ή επιβλαβές για την ανθρώπινη υγεία, δίνονται οδηγίες για μέτρα προστασίας.

- Τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας και τη χρονική διάρκειά της ανάλογα με τον σκοπό του πειράματος. Επίσης, επισημαίνονται προβλήματα, τα οποία είτε επηρεάζουν τα αποτελέσματα του πειράματος, είτε μπορούν να προκαλέσουν ζημιές στην πειραματική διάταξη, ενώ δίνονται οδηγίες για την αντιμετώπισή τους.
- Τον υπολογισμό κρίσιμων μεγεθών για τον χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς του υλικού (όπως είναι η οριακή τάση, ο κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσης K_{SCC}, ο κρίσιμος συντελεστής παραμόρφωσης έ, ο ελάχιστος χρόνος μέχρι την τελική αστοχία, ο ελάχιστος χρόνος μέχρι την εμφάνιση της πρώτης ανιχνεύσιμης ρωγμής, κλπ.), τον προσδιορισμό της ευαισθησίας του υλικού σε SCC από μεγέθη που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος και γενικότερα την εκτίμηση των αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια παρατίθεται ένας κατάλογος των προτύπων με την ευρύτερη εφαρμογή:

ISO 7539-1:2012, Corrosion of metals and alloys – Stress corrosion testing – Part 1: General guidance on testing procedures

ISO 7539-2:1989, Corrosion of metals and alloys — Stress corrosion testing — Part 2: Preparation and use of bend-specimens

ISO 7539-3:1989, Corrosion of metals and alloys — Stress corrosion testing — Part 3: Preparation and use of U-bend specimens

ISO 7539-4:1989, Corrosion of metals and alloys — Stress corrosion testing — Part 4: Preparation and use of uniaxially loaded tension specimens

ISO 7539-5:1989, Corrosion of metals and alloys — Stress corrosion testing — Part 5: Preparation and use of C-ring specimens

ISO 7539-6:2011, Corrosion of metals and alloys — Stress corrosion testing — Part 6: Preparation and use of precracked specimens for tests under constant load or constant displacement

ISO 7539-7:2005, Corrosion of metals and alloys — Stress corrosion testing — Part 7: Method for slow strain rate testing

ISO 7539-8:2000, Corrosion of metals and alloys — Stress corrosion testing — Part 8: Preparation and use of specimens to evaluate weldments

ISO 7539-9:2003, Corrosion of metals and alloys — Stress corrosion testing — Part 9: Preparation and use of precracked specimens for tests under rising load or rising displacement

ISO 7539-10:2013, Corrosion of metals and alloys — Stress corrosion testing — Part 10: Reverse U-bend method

ISO 7539-11:2013, Corrosion of metals and alloys — Stress corrosion testing — Part 11: Guidelines for testing the resistance of metals and alloys to hydrogen Embrittlement and hydrogen-assisted cracking

ISO 9591:2004, Corrosion of aluminum alloys — Stress corrosion testing — Part 7: Method for slow strain rate testing

NACE - **TM0198-2016**, Slow Strain Rate Test Method for Screening Corrosion-Resistant Alloys for Stress Corrosion Cracking in Sour Oilfield Service

NACE - TM0177-2016, Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments

NACE - SP0204-2015-SG, Stress Corrosion Cracking (SCC) Direct Assessment Methodology

ASTM G39 – 99 (2016), Standard Practice for Preparation and Use of Bent-Beam Stress-Corrosion Test Specimens

ASTM G38 – 01 (2013), Standard Practice for Making and Using C-Ring Stress-Corrosion Test Specimens

ASTM G49 – 85 (2011), Standard Practice for Preparation and Use of Direct Tension Stress-Corrosion Test Specimens

ASTM G30 – 97 (2016), Standard Practice for Making and Using U-Bend Stress-Corrosion Test Specimens

ASTM G129 – 00 (2013), Standard Practice for Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking

ASTM E1681 – 03 (2013), Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials

ASTM G37 – 98 (2016), Standard Practice for Use of Mattsson's Solution of pH 7.2 to Evaluate the Stress-Corrosion Cracking Susceptibility of Copper-Zinc Alloys

ASTM G103 – 97 (2016), Standard Practice for Evaluating Stress-Corrosion Cracking Resistance of Low Copper 7XXX Series Al-Mg-Cu Alloys in Boiling 6% Sodium Chloride Solution

ASTM G36 – 94 (2018), Standard Practice for Evaluating Stress-Corrosion-Cracking Resistance of Metals and Alloys in a Boiling Magnesium Chloride Solution

ASTM G123 – 00 (2015), Standard Test Method for Evaluating Stress-Corrosion Cracking of Stainless Alloys with Different Nickel Content in Boiling Acidified Sodium Chloride Solution

4.3 Μέθοδοι στατικής φόρτισης σε μη ρωγματωμένα δοκίμια

4.3.1 Δοκιμές σταθερού φορτίου και σταθερής παραμόρφωσης^{[7],[22],[23]}

Οι στατικές μέθοδοι δοκιμών σε SCC μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες, τις δοκιμές σταθερού φορτίου και τις δοκιμές σταθερής παραμόρφωσης, όπου κατά τη διάρκεια του πειράματος διατηρείται σταθερό το φορτίο ή η παραμόρφωση αντίστοιχα.

Δοκιμές σταθερού φορτίου (Constant Load Tests)

Για τις μεθόδους αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά είδη δοκιμίων, (επίπεδα, κυλινδρικά, δοκίμια με εγκοπή, κλπ.). Ο πιο εύκολος και διαδεδομένος τρόπος επίτευξης του σταθερού φορτίου είναι με εφελκυσμό, ωστόσο μπορεί να επιτευχθεί και με κάμψη διάφορων τύπων δοκιμίων με κατάλληλες τροποποιήσεις, όπως θα περιγραφεί αναλυτικά στη συνέχεια του κεφαλαίου. Οι δοκιμές αυτές προσομοιάζουν καλύτερα αστοχίες λόγω SCC, οι οποίες οφείλονται σε εφαρμοζόμενες τάσεις και τάσεις λειτουργίες.

Σε καθεμία από τις παραπάνω περιπτώσεις, η φόρτιση μπορεί να πραγματοποιείται είτε τοποθετώντας τα δοκίμια σε εξωτερικό πλαίσιο φόρτισης (external load frame), είτε χρησιμοποιώντας δοκίμια σε πλαίσιο που προκαλεί ιδίαφόρτιση (self-loading frame). Τα πλεονεκτήματα που επιδεικνύει η χρήση του πλαισίου που προκαλεί ιδία-φόρτιση έναντι του εξωτερικού πλαισίου φόρτισης αφορούν το χαμηλό κόστος εξοπλισμού και τη μείωση του αναγκαίου χώρου για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, η οποία καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική σε περιπτώσεις που οι δοκιμές λαμβάνουν χώρα σε περιβαλλοντικούς θαλάμους, κλιβάνους κλπ.

Τα αποτελέσματα μια σειράς δοκιμών σταθερού φορτίου μπορούν να οδηγήσουν σε καμπύλες όπως αυτή της Εικόνας 4.1. Οι δοκιμές αυτές διευκολύνουν σημαντικά τον προσδιορισμό της οριακής τάσης (σ_{th}) ενός συστήματος υλικού-περιβάλλοντος. Ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας ρωγμάτωσης είναι επίσης εύκολος και υπολογίζεται μετρώντας το μήκος της μεγαλύτερης ρωγμής και διαιρώντας αυτό με το χρόνο διάρκειας του πειράματος.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι για αυτήν τη μέθοδο θεωρούμε ως στιγμή έναρξης της ρωγμάτωσης τη στιγμή έναρξης του πειράματος. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκλίνουν ικανοποιητικά με τα αποτελέσματα μεθόδων υπολογισμού μεγαλύτερης ακρίβειας.



Εικόνα 4.1 Ποιοτικό διάγραμμα της τάσης αστοχίας σε συνάρτηση του χρόνου μέχρι την αστοχία, το οποίο προέκυψε από σειρά πειραμάτων σταθερού φορτίου και οδήγησε στον προσδιορισμό της οριακής τάσης για SCC. [22]

Δοκιμές σταθερής παραμόρφωσης (Constant Strain Tests)

Στις δοκιμές σταθερής παραμόρφωσης, εφαρμόζεται μια σταθερή μετατόπιση στο δοκίμιο, είτε εφελκυστική (επιμήκυνση δοκιμίου), είτε καμπτική (βέλος κάμψης). Για το λόγο αυτό, αναφέρονται στη βιβλιογραφία και ως δοκιμές σταθερής μετατόπισης (Constant Displacement Tests) και στην πραγματικότητα ο όρος αυτός περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις συνθήκες φόρτισης. Αποτελούν δοκιμές χαμηλού κόστους, εύκολες στη διεξαγωγή τους. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι αυτοφορτιζόμενα (self-loaded specimens) ή δοκίμια που η φόρτισή τους επιβάλλεται μέσω πλαισίων που προκαλούν ιδίαφόρτιση (self-loading frame), ενώ τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα είναι δοκίμια κάμψης και δοκίμια τύπου C-Ring και U-Bend. Οι δοκιμές σταθερής παραμόρφωσης προσομοιάζουν καλύτερα τις κατασκευαστικές τάσεις (fabrication stresses), στις οποίες συχνά οφείλονται αστοχίες λόγω SCC.
Σύγκριση δοκιμών σταθερού φορτίου και σταθερής παραμόρφωσης

Μετά την έναρξη της SCC σε μικρά δοκίμια υπό σταθερή παραμόρφωση, η τάση μειώνεται. Καθώς διαδίδονται οι ρωγμές λόγω της υψηλής συγκέντρωσης τάσεων στην κορυφή τους, μέρος της επιβαλλόμενης ελαστικής παραμόρφωσης μετατρέπεται σε πλαστική, ενώ το αρχικό φορτίο μειώνεται. Στα διαγράμματα της Εικόνας 4.2 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέγιστης τάσης στην κορυφή της ρωγμής (σ_M), της μέσης τάσης της καθαρής διατομής (σ_N) και της εφαρμοζόμενης τάσης της ολικής διατομής (σ_G), σε σύγκριση με την αντίστοιχη συμπεριφορά δοκιμίων υπό σταθερό φορτίο.



Εικόνα 4.2 Σχηματική σύγκριση της μεταβολής της τάσης κατά τη διάρκεια της έναρξης και της διάδοσης SCC σε δοκιμές σταθερού φορτίου και σταθερής παραμόρφωσης δοκιμίου υπό μονοαξονικό εφελκυσμό. α) Δοκιμή σταθερής παραμόρφωσης (πάνω). β) Δοκιμή σταθερού φορτίου (κάτω). [7]

Η μορφή των διαγραμμάτων αντιπροσωπεύει όλους τους τύπους δοκιμίων που χρησιμοποιούνται για κάθε μέθοδο, όμως ποσοτικά υπάρχουν διαφοροποιήσεις.

Παρατηρούμε ότι στις δοκιμές σταθερού φορτίου η σ_G παραμένει σταθερή, ενώ οι σ_M και σ_N αυξάνονται όσο διαδίδεται η ρωγμή, εφόσον η εναπομένουσα επιφάνεια διατομής μειώνεται. Στην περίπτωση δοκιμών σταθερής παραμόρφωσης οι σ_M και σ_N, ακόμη και η σ_G από ένα σημείο διάδοσης της ρωγμάτωσης και μετά παρουσιάζουν πτωτική συμπεριφορά.

Μια άλλη σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων φόρτισης είναι η επίδραση του αριθμού και της πυκνότητας των αρχικών μικρορωγμών στα αποτελέσματα των δοκιμών σταθερής παραμόρφωσης. Σε περίπτωση ανάπτυξης μεμονωμένης ρωγμής στο δοκίμιο, η διάδοσή της είναι ραγδαία με αποτέλεσμα όλο και αυξανόμενη σ_N μέχρι την τελική αστοχία. Αντίθετα, σε περίπτωση έναρξης πολλών μικρορωγμών σε κοντινές θέσεις, υπάρχει αλληλεπίδραση των συγκεντρώσεων τάσης που παρουσιάζεται σε καθεμία από αυτές, έχοντας ως αποτέλεσμα χαλάρωση των τάσεων. Συχνά, η χαλάρωση τάσεων είναι επαρκής ώστε να εμποδίσει τελικά την διάδοση της SCC και να μην υπάρξει τελική αστοχία. Στα πειράματα σταθερού φορτίου, αφού σχηματιστούν πολλές μικρορωγμές συνεχίζουν να αναπτύσσονται έως την τελική αστοχία, υπό την επίδραση της συνεχώς αυξανόμενης τάσης (σ_N).

Το μέγεθος της χαλάρωσης των τάσεων εξαρτάται από το υλικό και τον τύπο του δοκιμίου. Ο αριθμός και η πυκνότητα των μικρορωγμών εξαρτάται από το σύστημα υλικού-περιβάλλοντος, τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού με κυριότερη τη δυσθραυστότητά του, το πόσο δραστικό είναι το διάλυμα και τη στιβαρότητα του πλαισίου φόρτισης (stressing frame) που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή. Αυξημένη στιβαρότητα του πλαισίου φόρτισης, έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη χαλάρωση τάσεων.

Ένα μειονέκτημα των δοκιμών σταθερού φορτίου αφορά κυρίως τα δοκίμια μικρής επιφάνειας διατομής, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως για υλικά πολύ υψηλής αντοχής, ώστε να αποφεύγεται η εφαρμογή πολύ υψηλών φορτίων. Λόγω του μικρού τους πάχους (ή μικρής διαμέτρου), είναι πολύ πιθανό η θραύση των δοκιμίων να οφείλεται στη δημιουργία κάποιου επιφανειακού σφάλματος (π.χ. βελονισμού) σε συνδυασμό με την πολύ υψηλή τάση που αναπτύσσεται στην εναπομένουσα διατομή. Τέτοιου είδους αστοχίες δεν οφείλονται σε SCC και περιπλέκουν την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Στις δοκιμές σταθερής παραμόρφωσης τέτοια φαινόμενα είναι λιγότερο πιθανά.

4.3.2 Δοκιμές SCC με κάμψη^{[7],[22]-[25]}

Η βασική αρχή των δοκιμών SCC με κάμψη είναι η επιβολή καμπτικής παραμόρφωσης σε δοκίμιο κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής με ταυτόχρονη έκθεση στο υπό μελέτη περιβάλλον. Η καμπτική παραμόρφωση που επιβάλλεται αντιστοιχεί στο επιθυμητό επίπεδο εφελκυστικής τάσης, το οποίο ασκείται στην κυρτή επιφάνεια του δοκιμίου υπό κάμψη. Οι δοκιμές κάμψης πραγματοποιούνται για τάσεις χαμηλότερες του ορίου ελαστικότητας, προκειμένου να είναι δυνατός ο υπολογισμός της παραμόρφωσης από το μέτρο ελαστικότητας και την επιθυμητή τιμή της εφελκυστικής τάσης. Από εκεί και πέρα είναι εφικτός και ο υπολογισμός του απαιτούμενου βέλους κάμψης.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως επίπεδες λωρίδες μετάλλου ομοιόμορφης ορθογωνικής διατομής ή επιμήκεις ράβδοι κυκλικής διατομής, τα οποία μπορούν να προκύψουν από πολλές μορφές προϊόντων, όπως φύλλα, πλάκες, προϊόντα χύτευσης, ράβδους, σωλήνες κλπ. Δοκιμές SCC με κάμψη μπορούν να εφαρμοστούν για οποιοδήποτε υλικό και οποιοδήποτε περιβάλλον. Στις Εικόνες 4.3-4.7 παρουσιάζονται οι έξι βασικότερες διατάξεις κάμψης που χρησιμοποιούνται για δοκιμές SCC, οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

Κάμψη δύο σημείων (Two Point Bending)

Η κάμψη δύο σημείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υλικά που δεν παραμορφώνονται πλαστικά όταν κάμπτονται κατά (L-H)/H=0.01. Σε αυτήν τη διάταξη (Εικόνα 4.3), το δοκίμιο παρουσιάζει τη μέγιστη εφελκυστική τάση στο μέσο της κυρτής επιφάνειάς του, η οποία σταδιακά μειώνεται μέχρι τα άκρα του δοκιμίου, όπου η τάση μηδενίζεται. Η μέγιστη εφελκυστική τάση υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$L = (ktE/\sigma)sin^{-1}(H\sigma/ktE)$$

Όπου:

L: το μήκος του δοκιμίου σε μέτρα (m)

σ: η μέγιστη τάση σε N/mm²

Ε: το μέτρο ελαστικότητας του υλικού σε N/mm²

Η: η οριζόντια απόσταση των άκρων του λυγισμένου δοκιμίου

t: το πάχος του δοκιμίου σε μέτρα (m)

k=1,280, εμπειρική σταθερά.

Η σχέση αυτή θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο όταν ισχύει:



 $H\sigma/ktE = 1, 0$

Εικόνα 4.3 Διάταξη κάμψης δύο σημείων για δοκιμές SCC [24]

Κάμψη τριών σημείων (Three Point Bending)

Σε αυτήν τη διάταξη η κάμψη προκαλείται από έναν κοχλία με σφαιρικό άκρο, ο οποίος πιέζει το μέσο του δοκιμίου, ενώ τα άκρα του κρατούνται σταθερά με κατάλληλα στηρίγματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.4. Η μέγιστη εφελκυστική τάση ασκείται στο μέσον της κυρτής επιφάνειας του δοκιμίου και μειώνεται γραμμικά έως τα στηρίγματα στις άκρες του, όπου μηδενίζεται.

Ένα μειονέκτημα της δοκιμής SCC με κάμψη τριών σημείων αποτελεί ο κίνδυνος εμφάνισης διάβρωσης χαραγής στο σημείο επαφής του δοκιμίου με το σφαιρικό άκρο του κοχλία, όπου βρίσκεται η μέγιστη εφελκυστική τάση. Επίσης, το μεσαίο στήριγμα προκαλεί διαξονικές τάσεις, γεγονός που περιπλέκει τον ακριβή προσδιορισμό της τάσης στο πιο σημαντικό σημείο του δοκιμίου.

Η μέγιστη εφελκυστική τάση υπολογίζεται με τη σχέση:

$$\sigma = 6Ety/H^2$$

Όπου:

σ: η μέγιστη τάση σε N/mm²

Ε: το μέτρο ελαστικότητας του υλικού σε N/mm²

Η: η οριζόντια απόσταση μεταξύ των ακριανών στηριγμάτων του δοκιμίου

t: το πάχος του δοκιμίου σε μέτρα (m)

y: η μέγιστη μετατόπιση του δοκιμίου (βέλος κάμψης)



Εικόνα 4.4 Διάταξη κάμψης τριών σημείων για δοκιμές SCC [25]

Κάμψη τεσσάρων σημείων (Four Point Bending)

Στην κάμψη τεσσάρων σημείων το δοκίμιο στηρίζεται στα άκρα με δύο εξωτερικά στηρίγματα, συμμετρικά τοποθετημένα ως προς το μέσον, ενώ δύο εσωτερικά στηρίγματα πιέζουν το δοκίμιο στην αντίθετη κατεύθυνση (Εικόνα 4.5).

Οι εφελκυστικές τάσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στην περιοχή της κυρτής επιφάνειας των δοκιμίων μεταξύ των δύο εσωτερικών στηριγμάτων, ενώ μειώνεται γραμμικά μέχρι τα εξωτερικά στηρίγματα, όπου είναι μηδενική. Το γεγονός ότι η μέγιστη τάση είναι ομοιόμορφη, καθιστά την κάμψη τεσσάρων σημείων προτιμητέα έναντι των δύο προηγούμενων μεθόδων. Η τιμή της εφελκυστικής τάσης δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = 12Ety/(3H^2 - 4A^2)$$

Όπου:

σ: η μέγιστη τάση σε N/mm²

Ε: το μέτρο ελαστικότητας του υλικού σε N/mm²

Η: η οριζόντια απόσταση μεταξύ των ακριανών στηριγμάτων του δοκιμίου

t: το πάχος του δοκιμίου σε μέτρα (m)

y: η μέγιστη μετατόπιση του δοκιμίου (βέλος κάμψης)

Α: η απόσταση μεταξύ κάθε εσωτερικού στηρίγματος με το αντίστοιχο εξωτερικό.



Εικόνα 4.5 Διάταξη κάμψης τεσσάρων σημείων για δοκιμές SCC [25]

Δοκίμια διπλής γεωμετρίας (Double-Beam Specimens)

Τα δοκίμια διπλής γεωμετρίας (Εικόνα 4.6) αποτελούνται από δύο λωρίδες υλικού, οι οποίες συγκολλούνται στα άκρα, ενώ η χρήση ενός διαχωριστικού (spacer) τις αναγκάζει σε κάμψη.

Τέτοιου τύπου δοκίμια χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιπτώσεις δοκιμίων μεγάλου πάχους. Η εφελκυστική τάση κατανέμεται ομοιόμορφα στις κυρτές επιφάνειες των δοκιμίων μεταξύ των σημείων επαφής με το διαχωριστικό. Από τα σημεία αυτά, η τάση μειώνεται σταδιακά μέχρι τα άκρα, όπου είναι μηδενική. Η μέγιστη εφελκυστική τάση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma=\frac{3Ets}{H^2(1-(h/H))(1+(2h/H))}$$

Όπου:

σ: η μέγιστη τάση σε N/mm²

Ε: το μέτρο ελαστικότητας του υλικού σε N/mm²

s: το πάχος του διαχωριστικού σε μέτρα (m)

t: το πάχος του δοκιμίου σε μέτρα (m)

Η: το μήκος του δοκιμίου σε μέτρα (m)

h: το μήκος του διαχωριστικού σε μέτρα (m)



Εικόνα 4.6 Διάταξη κάμψης με δοκίμια διπλής γεωμετρίας για δοκιμές SCC [25]

Πλήρως ενισχυμένα δοκίμια (Fully Supported Specimens)

Τα πλήρως ενισχυμένα δοκίμια χρησιμοποιούνται όταν το μήκος των δοκιμίων είναι μικρό για να υποβληθούν σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Για τη φόρτιση του δοκιμίου χρησιμοποιείται ένα μπλοκ στήριξης, το οποίο αναγκάζει το δοκίμιο σε κάμψη, με τη βοήθεια κατάλληλων σφικτήρων που το συγκρατούν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.7. Το μέγεθος του μπλοκ επιλέγεται ανάλογα με την ακτίνα καμπυλότητας που θέλουμε να αποκτήσει το δοκίμιο.

Η εφελκυστική τάση είναι ομοιόμορφη στην περιοχή της κυρτής επιφάνειας των δοκιμίων μεταξύ των δύο σημείων επαφής με τους σφικτήρες, ενώ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma = 4Ety'/h^2$$

Όπου:

σ: η μέγιστη τάση σε N/mm²

Ε: το μέτρο ελαστικότητας του υλικού σε N/mm²

t: το πάχος του δοκιμίου σε μέτρα (m)

γ': η μέγιστη μετατόπιση της περιοχής του δοκιμίου μεταξύ των σφικτήρων

h: η απόσταση μεταξύ των δύο εσωτερικών άκρων των σφικτήρων

Τόσα τα δοκίμια διπλής γεωμετρίας, όσο και τα πλήρως ενισχυμένα δοκίμια αποτελούν εναλλακτικές μεθόδους της κάμψης τεσσάρων σημείων όταν η τελευταία δεν μπορεί να εφαρμοστεί.



Εικόνα 4.7 Διάταξη κάμψης με πλήρως ενισχυμένα δοκίμια για δοκιμές SCC [25]

Οι μέθοδοι τριών και τεσσάρων σημείων μπορούν να μετατραπούν από δοκιμές σταθερής παραμόρφωσης σε δοκιμές σταθερού φορτίου με κατάλληλες τροποποιήσεις στις διατάξεις τους, όπως η αντικατάσταση των στηριγμάτων με ελατήρια και των κοχλιών με βάρη στα αντίστοιχα σημεία, ώστε να παραχθούν οι ίδιες μετατοπίσεις. Ο υπολογισμός της μέγιστης εφελκυστικής τάσης πραγματοποιείται από το φορτίο που εφαρμόζεται, το οποίο μπορεί να μετρηθεί άμεσα, μέσω κατάλληλων σχέσεων, ανάλογα με τη διαμόρφωση των δοκιμίων. Ωστόσο, οι δοκιμές SCC με κάμψη πραγματοποιούνται κυρίως σε συνθήκες σταθερής παραμόρφωσης.

Η τάση που προκύπτει από τους υπολογισμούς και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων είναι η μέγιστη εφελκυστική τάση που εφαρμόστηκε στην αρχή της δοκιμής. Όπως, έχει ήδη αναφερθεί, μετά την έναρξη της ρωγμάτωσης (αν υπάρξει), τόσο στις δοκιμές σταθερής παραμόρφωσης, όσο και στις δοκιμές σταθερού φορτίου, υπάρχουν τοπικές μεταβολές της τάσης και της παραμόρφωσης.

Πειραματική διαδικασία

Το περιβάλλον έκθεσης μπορεί να επιλεχθεί ανάλογα με την προτιθέμενη χρήση και τις αναμενόμενες συνθήκες που θα αντιμετωπίσει το υλικό κατά τη διάρκεια ζωής του. Η έκθεση στο περιβάλλον θα πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν ταυτόχρονα με την εφαρμογή του φορτίου ή της παραμόρφωσης. Συνίσταται να χρησιμοποιούνται δοκίμια που εκτίθενται στο διαβρωτικό μέσο, χωρίς φόρτιση και δοκίμια τα οποία υποβάλλονται σε κάμψη σε αδρανές περιβάλλον. Αυτό είναι χρήσιμο για τον προσδιορισμό της προέλευσης της αστοχίας (αν υπάρχει) μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων όλων των δοκιμίων μετά τα πειράματα.

Το υλικό των σφικτήρων, των στηριγμάτων και των κοχλιών που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να παραμένει ανεπηρέαστο από το διαβρωτικό μέσο που θα χρησιμοποιηθεί. Επίσης, θα πρέπει να είναι το ίδιο με το υλικό του δοκιμίου, για την εξάλειψη της γαλβανικής αλληλεπίδρασης, διαφορετικά θα πρέπει να μονώνονται κατάλληλα στα σημεία επαφής με το δοκίμιο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πλαστικοί σφικτήρες και πλαστικά στηρίγματα, αρκεί να εξασφαλιστεί ότι δε θα παραμορφωθούν υπό τις επικρατούσες συνθήκες φόρτισης.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Κριτήριο για την εκτίμηση της συμπεριφοράς σε SCC είναι ο απαιτούμενος χρόνος για την έναρξη των ρωγμών και η οριακή τάση για την έναρξη των ρωγμών σ_{th}, καθώς επίσης και η ταχύτητα ρωγμάτωσης, η οποία υπολογίζεται διαιρώντας το μήκος της μέγιστης ρωγμής (μετρούμενο στην επιφάνεια θραύσης) δια του χρόνου μέχρι την αστοχία. Ωστόσο, σε αυτόν τον υπολογισμό θεωρούμε ότι η έναρξη της SCC συμπίπτει με την έναρξη της δοκιμής. Υπάρχουν πιο ακριβείς μέθοδοι για τον προσδιορισμό της έναρξης της ρωγμής, όμως έχει παρατηρηθεί από πειράματα ότι και η πρώτη μέθοδος συγκλίνει ικανοποιητικά με τις πιο ακριβείς.

Κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η χαλάρωση τάσεων, ειδικά αν το διαβρωτικό περιβάλλον είναι υψηλής θερμοκρασίας. Ο υπολογισμός της χαλάρωσης των τάσεων είναι εφικτός, εφόσον υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για τη συμπεριφορά σε ερπυσμό.

81

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρουσιάζουν συνήθως μεγάλη διασπορά, για αυτόν το λόγο μπορεί να χρειαστούν αρκετές επαναλήψεις του πειράματος και να υπολογιστούν οι μέσες τιμές των εξεταζόμενων μεγεθών.

4.3.3 Δοκιμές SCC με εφελκυσμό^{[7],[22],[24]}

Τα δοκίμια εφελκυσμού που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού, μπορούν με κατάλληλη προσαρμογή να χρησιμοποιηθούν για δοκιμές SCC. Κατά τον μονοαξονικό εφελκυσμό, η κατανομή της εφελκυστικής τάσης είναι ομοιόμορφη και το μέγεθός της προσδιορίζεται με ευκολία και ακρίβεια. Με τον κατάλληλο εξοπλισμό, η δοκιμή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε υπό συνθήκες σταθερού φορτίου είτε υπό συνθήκες σταθερής παραμόρφωσης. Τα φορτία και οι παραμορφώσεις που χρησιμοποιούνται μπορούν να ανήκουν στην ελαστική ή στην πλαστική περιοχή.

Οι δοκιμές SCC με εφελκυσμό χαρακτηρίζονται από μεγάλη ευελιξία, καθώς υπάρχει η δυνατότητα χρήσης πολλών μεγεθών και τύπων δοκιμίων και εφαρμογής μεγάλου εύρους τιμών τάσης. Η πειραματική διαδικασία είναι σχετικά απλή και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων εύκολη.

Πειραματικές διατάξεις

Οι συνθήκες σταθερού φορτίου επιτυγχάνονται με διάφορους τρόπους, όπως για παράδειγμα:

- Με χρήση μηχανών εφελκυσμού, όπου η παράμετρος ελέγχου θα είναι το φορτίο, το οποίο θα διατηρείται σταθερό (ευνοϊκές για δοκίμια μεγάλης επιφάνειας διατομής)
- Με τοποθέτηση ενός βάρους στο κάτω άκρο του δοκιμίου, ενώ το άνω άκρο διατηρείται σταθερό.
- Με χρήση άλλων πλαισίων φόρτισης, όπως αυτό της Εικόνας 4.8.

Οι μηχανές εφελκυσμού δεν είναι αρκετά βολικές για επίτευξη συνθηκών σταθερής παραμόρφωσης. Ο μόνος τρόπος για κάτι τέτοιο είναι η φόρτιση του δοκιμίου μέχρι το επιθυμητό επίπεδο παραμόρφωσης και στη συνέχεια μια κινούμενη ράβδος «κλειδώνει» τη θέση του. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα πλαίσια φόρτισης, όπως αυτό της Εικόνας 4.9, για την επίτευξη σταθερής παραμόρφωσης. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η χαλάρωση τάσεων, η οποία επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ειδικά όταν η διαφορά των θερμικών συντελεστών του δοκιμίου και του πλαισίου φόρτισης είναι σημαντική.



Εικόνα 4.8 Δοκιμή SCC με δοκίμιο εφελκυσμού, το οποίο φορτίζεται με τη βοήθεια κατάλληλα διαμορφωμένου δακτυλίου [7]



Εικόνα 4.9 Διάταξη για δοκιμή SCC με εφελκυσμό υπό συνθήκες σταθερής παραμόρφωσης: α) πριν τη συναρμολόγηση (αριστερά) και β) μετά τη συναρμολόγηση (δεξιά) [7]

Δοκίμια

Η διατομή των δοκιμίων μπορεί να είναι ορθογωνική, κυκλική, δακτυλιοειδής ή να είναι άλλης μορφής σε κάποιες ειδικές περιπτώσεις. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης και κωνικά δοκίμια, τα οποία διευκολύνουν σε περιπτώσεις που δεν έχουμε καθόλου δεδομένα για τη συμπεριφορά ενός υλικού σε SCC, γιατί εξετάζεται ένα εύρος τιμών τάσης με χρήση ενός μόνο δοκιμίου.

Οι διαστάσεις έχουν λιγότερη σημασία για τις δοκιμές σε SCC απ' όσο στις δοκιμές εφελκυσμού, όμως συνήθως χρησιμοποιούνται οι διαστάσεις που υποδεικνύουν τα πρότυπα για τα δοκίμια εφελκυσμού, προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση των ιδιοτήτων τους. Μεγάλη σημασία έχει η καμπυλότητα στην περιοχή μετάβασης από τα άκρα του δοκιμίου (gripped ends) έως το παράλληλο μήκος, διότι αποτρέπει τη συγκέντρωση τάσεων, η οποία ευνοεί την εξέλιξη της SCC. Τα άκρα του δοκιμίου μπορούν να έχουν οποιοδήποτε σχήμα απαιτεί η πειραματική διάταξη. Αν χρησιμοποιηθεί μηχανή εφελκυσμού, το σχήμα των άκρων θα πρέπει να ταιριάζει στις αρπάγες της μηχανής.

Το εμβαδόν της επιφάνειας διατομής των δοκιμίων συχνά επηρεάζει τα αποτελέσματα μιας δοκιμής SCC με εφελκυσμό. Δοκίμια μεγάλης επιφάνειας διατομής αντιπροσωπεύουν με καλύτερο τρόπο τα κατασκευαστικά στοιχεία πραγματικών κατασκευών, όμως δεν μπορούν πάντα να παραχθούν από τα διαθέσιμα αρχικά προϊόντα και επίσης δεν είναι πάντα εύκολα στη διαχείριση και τη φόρτιση κατά την πειραματική διαδικασία.

Δοκίμια μικρής επιφάνειας διατομής χρησιμοποιούνται συχνά επειδή παρέχουν ταχύτερα αποτελέσματα, καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στην εκκίνηση της SCC. Η διαχείριση τέτοιων δοκιμίων, όπως και η φόρτισή τους πραγματοποιούνται με ευκολία, αφού απαιτούνται μικρότερα φορτία για την επίτευξη της επιθυμητής τάσης. Παρόλα αυτά, υπάρχουν δυσκολίες στην παραγωγή και την κατεργασία τους, ενώ η αντοχή τους επηρεάζεται σημαντικά από επιφανειακά σφάλματα (π.χ. βελονισμοί), τα οποία, σε συνδυασμό με την υψηλή συγκέντρωση τάσεων, μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία που στην πραγματικότητα δεν θα οφείλεται σε SCC. Το γεγονός αυτό περιπλέκει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και απαιτεί περεταίρω μελέτη. Για τον λόγο αυτό, δε συνίσταται η χρήση δοκιμίων με πάχος μικρότερο από 3mm.

Πειραματική διαδικασία

Το περιβάλλον έκθεσης επιλέγεται ανάλογα με την προτιθέμενη χρήση του υλικού που μελετάται και τις συνθήκες που αναμένεται να αντιμετωπίσει κατά τη λειτουργία του. Χρησιμοποιείται επίσης ένας αριθμός τυποποιημένων περιβαλλοντικών συνθηκών έκθεσης, όμως σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να πραγματοποιείται προσεκτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τις αναμενόμενες συνθήκες λειτουργίας.

Θα πρέπει τα άκρα του δοκιμίου που έρχονται σε επαφή με τις αρπάγες της μηχανής να προστατεύονται κατάλληλα από το διαβρωτικό μέσο, ώστε να αποφευχθεί η γαλβανική αλληλεπίδραση μεταξύ των αρπαγών της μηχανής και του

δοκιμίου (εφόσον είναι από διαφορετικό υλικό) και η διάβρωση χαραγής, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ρωγμάτωση, η οποία μπορεί να μη συνέβαινε διαφορετικά.

Μετά την προετοιμασία του δοκιμίου και της πειραματικής διάταξης, το δοκίμιο εκτίθεται στο περιβάλλον όσο γίνεται ταυτόχρονα με την εφαρμογή της τάσης. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, είναι χρήσιμο να εμβαπτιστούν όμοια δοκίμια στο διαβρωτικό μέσο για το ίδιο διάστημα που διαρκεί η δοκιμή εφελκυσμού, χωρίς φόρτιση. Επίσης, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η ίδια δοκιμή, υπό τις ίδιες συνθήκες χωρίς την παρουσία του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα και οι εικόνες αυτών των δοκιμίων θα αποτελέσουν βάση για σύγκριση με τα υπόλοιπα, ώστε να βγουν πιο σίγουρα συμπεράσματα για την παρουσία SCC στο δοκίμιο.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Ένα από τα κριτήρια για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι ο χρόνος έως την αστοχία (t_f), ο οποίος μπορεί να μετρηθεί εύκολα και με ακρίβεια και εξαρτάται από την αρχική επιβαλλόμενη τάση, τα χαρακτηριστικά του υλικού και τη δραστικότητα του περιβάλλοντος έκθεσης. Λόγω αυτής της εξάρτησης, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σύγκριση διαφόρων υλικών μεταξύ τους, ανάλογα με την ευαισθησία τους σε SCC.

Ένας πιο αποτελεσματικός τρόπος αξιολόγησης θα ήταν να πραγματοποιηθούν δοκιμές σε ένα εύρος τιμών ονομαστικής τάσης, ώστε να προσδιοριστεί η οριακή τάση, δηλαδή η χαμηλότερη τάση που οδηγεί ένα σύστημα σε SCC. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των υλικών.

Συχνά, η δοκιμή σε SCC με εφελκυσμό, όπως και όλες οι στατικές δοκιμές, συνηθίζεται να διακόπτονται όταν δεν έχει επέλθει θραύση μετά από αυθαίρετα επιλεγμένο χρονικό διάστημα. Όμως στα δοκίμια μπορεί να έχει αρχίσει ήδη η ρωγμάτωση και να μην έχει προλάβει να εξελιχθεί επαρκώς ώστε να οδηγήσει σε τελική αστοχία. Επιπλέον, ενώ στις δοκιμές εφελκυσμού με συνθήκες σταθερού φορτίου το δοκίμιο οδηγείται σε θραύση εφόσον υπάρξει εκκίνηση της SCC, υπάρχουν περιπτώσεις (πχ σε όλκιμα υλικά όταν φορτίζονται σε τάσεις κοντά στην οριακή τάση για SCC) που μπορεί να μην υπάρξει ολική αστοχία. Για τις παραπάνω περιπτώσεις, το δοκίμιο αυτό θα πρέπει να υποβληθεί σε στερεοσκοπική και μεταλλογραφική εξέταση, όπου θα ελεγχθεί προσεκτικά για ρωγμές.

Ο αριθμός των ρωγμών ανά μονάδα μήκους του δοκιμίου μπορεί να αποτελέσει επίσης κριτήριο για τη σύγκριση υλικών, ειδικότερα σε ό,τι αφορά την έναρξη της SCC. Η μέση ταχύτητα της ρωγμής υπολογίζεται διαιρώντας το μήκος της μεγαλύτερης ρωγμής (μετρούμενο στην επιφάνεια θραύσης) με τον χρόνο μέχρι την αστοχία.

4.3.4 Δοκιμές SCC με δοκίμια κάμψης-U (U-Bend)^{[7],[22],[24]}

Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιούνται με έκθεση στο διαβρωτικό μέσο ενός δοκιμίου, σχήματος U, το οποίο κρατείται με τέτοιο τρόπο, ώστε να εφαρμόζονται εφελκυστικές τάσεις σε μια περιοχή της κυρτής του επιφάνειας. Οι τάσεις αυτές μπορούν να ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού, δηλαδή εκτός από την ελαστική παραμόρφωση υπάρχει και πλαστική, επομένως οι συνθήκες φόρτισης είναι δυσμενέστερες σε σχέση με τις μεθόδους κάμψης που περιγράφηκαν προηγουμένως.

Οι δοκιμές αυτές είναι απλές, χαμηλού κόστους και μπορούν να πραγματοποιηθούν σε οποιοδήποτε διαβρωτικό μέσο, καθώς δεν υπάρχει κανένας περιορισμός που να εμποδίζει την ακριβή επίτευξη των επιθυμητών περιβαλλοντικών συνθηκών. Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να είναι επαρκώς όλκιμα, ώστε να μπορούν να μορφοποιηθούν σε U-διαμόρφωση χωρίς να δημιουργηθούν ρωγμές. Πραγματοποιούνται συνήθως υπό συνθήκες σταθερής παραμόρφωσης.

Σκοπός διεξαγωγής μια δοκιμής με δοκίμιο U-bend είναι να προσδιοριστεί η καταλληλότητα του υλικού για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του κινδύνου εμφάνισης SCC σε μεταλλικά υλικά που χρησιμοποιούνται ήδη σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Η μορφή των δοκιμίων επιτρέπει την επί τόπου πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας υπό τις συνθήκες λειτουργίας.

Ένα από τα μειονεκτήματα των δοκιμών αυτών είναι η μεγάλη διασπορά των αποτελεσμάτων και η ανάγκη για αρκετές επαναλήψεις κάθε πειράματος. Επιπλέον, λόγω της εισαγωγής σημαντικών παραμορφώσεων κατά τη μορφοποίηση του δοκιμίου, μπορεί η συμπεριφορά του σε SCC να είναι διαφορετική σε σχέση με αυτή που θα επιδείκνυε το ίδιο υλικό σε άλλη μορφή. Για τον λόγο αυτό, υπάρχει η άποψη ότι οι δοκιμές αυτές είναι περισσότερο επιθετικές από όσο θα έπρεπε και ότι δεν ταιριάζουν σε πολλές εφαρμογές, ωστόσο οι συνθήκες φόρτισης αντιπροσωπεύουν κάποιες συγκεκριμένες καταστάσεις, όπως για παράδειγμα τις τάσεις που αναπτύσσονται λόγω σύνδεσης και συναρμολόγησης, οι οποίες πολλές φορές ευθύνονται για την εμφάνιση SCC σε πραγματικές κατασκευές.

Δοκίμια

Τα δοκίμια αποτελούνται από επιμήκη τμήματα μετάλλου μικρής διατομής (λωρίδες, σύρματα, ράβδους), τα οποία κάμπτονται κατά 180° σχηματίζοντας μια U-διαμόρφωση σε προκαθορισμένη καμπυλότητα ώστε να επιτυγχάνεται το επιθυμητό επίπεδο τάσης. Η καμπυλότητα των δοκιμίων πρέπει να διατηρείται σταθερή, ώστε να διατηρούνται σταθερές και οι παραμορφώσεις, και αυτό επιτυγχάνεται με διατάξεις που καθιστούν τα δοκίμια αυτοφορτιζόμενα. Τα άκρα του δοκιμίου μπορεί να συγκρατούνται στην επιθυμητή θέση με τη βοήθεια κάποιου κοχλία (Εικόνα 4.10.a), με μια κατάλληλα διαμορφωμένη βάση (Εικόνα 4.10.b), ή με συγκόλληση (Εικόνα 4.10.c). Η συγκόλληση θα πρέπει να πραγματοποιείται με ιδιαίτερη προσοχή και στο τέλος να εξετάζεται αν η παραμόρφωση είναι αυτή που είχε υπολογιστεί αρχικά. Στην Εικόνα 4.10.d παρουσιάζεται μια εναλλακτική διάταξη, η οποία αποτελείται από δύο δοκίμια Ubend κολλημένα μεταξύ τους. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία συνθηκών διάβρωσης χαραγής, όταν αυτό είναι απαραίτητο για κάποια μελέτη.

Στην Εικόνα 4.11, παρουσιάζονται οι μέθοδοι μορφοποίησης των δοκιμίων. Κατά την κατασκευή των δοκιμίων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η διεύθυνση εξέλασης για να δίνεται προσοχή στις θερμικές κατεργασίες. Μετά τη μορφοποίηση θα πρέπει τα δοκίμια να εξεταστούν προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι δεν προέκυψαν ρωγμές λόγω της μορφοποίησης και των κατεργασιών. Όταν σε μια διάταξη χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα υλικά, π.χ. αν το υλικό του δοκιμίου είναι διαφορετικό από αυτό του κοχλία, τότε θα πρέπει να μονώνονται κατάλληλα στα σημεία επαφής για να αποφευχθεί η γαλβανική διάβρωση.









Εικόνα 4.10 Διατάξεις δοκιμίων U-Bend για δοκιμές SCC [24]



Εικόνα 4.11 Διαδικασία διαμόρφωσης δοκιμίων τύπου U-bend [26]

Πειραματική διαδικασία

Η τάση στην επιφάνεια των δοκιμίων δεν είναι ομοιόμορφη. Για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης, μια σχέση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια είναι η εξής:

$$\varepsilon = \frac{t}{2R}$$

Όπου:

ε: η επιβαλλόμενη παραμόρφωση

t: το πάχος του δοκιμίου

R: η ακτίνα καμπυλότητας του δοκιμίου

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται όταν t<R. Η τάση που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση που υπολογίζεται μπορεί να προσδιοριστεί από το διάγραμμα σ-ε του υλικού. Οι τάσεις δεν κατανέμονται ομοιόμορφα στην επιφάνεια του δοκιμίου και είναι δύσκολο να προσδιοριστούν με ακρίβεια.

Μετά τη μορφοποίηση του δοκιμίου, ακολουθεί η εμβάπτιση στο περιβάλλον έκθεσης. Στα εργαστηριακά πειράματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά δοκίμια ταυτόχρονα, τα οποία μπορούν να εξάγονται ένα-ένα και να μελετώνται, ώστε να προσδιοριστεί πιο εύκολα η χρονική στιγμή έναρξης της ρωγμάτωσης και έτσι επιλέγεται το πότε θα τερματιστεί η πειραματική διαδικασία αν δεν επέλθει θραύση μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα.

Όμως στα πειράματα που πραγματοποιούνται κατά τη λειτουργία μιας κατασκευής, τέτοιου είδους διαδικασία δεν είναι εύκολα πραγματοποιήσιμη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα δοκίμια εξετάζονται μετά από αυθαίρετα επιλεγμένους χρόνους έκθεσης, επαρκώς μεγάλους ώστε το δοκίμιο να υποβληθεί σε όλες της φάσεις της λειτουργίας του. Πέντε με δέκα εβδομάδες θεωρείται ικανοποιητικός χρόνος διάρκειας μια τέτοιας δοκιμής.

Δοκίμια που δεν εκτίθενται στο διαβρωτικό μέσο χρησιμοποιούνται για σύγκριση μετά το τέλος της δοκιμής SCC, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι οι ρωγμές (αν υπάρχουν) οφείλονται σε SCC και όχι σε μηχανικούς παράγοντες.

89

Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Πριν την εξέταση των δοκιμίων θα πρέπει να εξεταστούν τα σημεία πρόσδεσης και οι συνδέσεις της διάταξης, ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν υπήρξε κάποια αστοχία στα σημεία αυτά που να ακυρώνει τη δοκιμή. Στη συνέχεια εξετάζεται η επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου, ή αν δεν υπάρχει θραύση το δοκίμιο ελέγχεται για ρωγμές στην επιφάνειά του με οπτική παρατήρηση ή στερεοσκοπική εξέταση και στη συνέχεια πραγματοποιείται μεταλλογραφική εξέταση σε τομές κατάλληλα επιλεγμένες.

Οι δοκιμές SCC με χρήση U-bend δοκιμίων θα πρέπει να θεωρούνται ως επιτυχείς/ανεπιτυχείς" (go/no go) δοκιμές και οι μικρές διαφορές στη χρονική στιγμή της έναρξης της ρωγμής ή στο μέγεθος της ρωγμής να λαμβάνονται ως μη σημαντικές. Αυτό σημαίνει ότι μόνο η εμφάνιση ρωγμών που αποδεδειγμένα οφείλεται σε SCC αποτελεί ένδειξη αστοχίας. Έλλειψη ρωγμών σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα για δοκιμές που πραγματοποιούνται κατά τη λειτουργία θεωρείται ως ένδειξη αντοχής του υλικού σε SCC στις συγκεκριμένες συνθήκες.

4.3.5 Δοκιμές SCC με δοκίμια τύπου C (C-Ring)^{[7],[24]}

Οι δοκιμές SCC με δοκίμια τύπου C-Ring χαρακτηρίζονται από ευελιξία και χαμηλό κόστος κατασκευής δοκιμίων και διεξαγωγής πειραματικής διαδικασίας. Σκοπός των δοκιμών αυτών είναι η ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση της ευαισθησίας ενός υλικού σε SCC. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά μεγέθη δοκιμίων από οποιοδήποτε μεταλλικό υλικό, τα οποία μπορούν να προκύψουν από πολλές μορφές προϊόντων. Οι δοκιμές αυτές ανήκουν κυρίως στην κατηγορία των δοκιμών υπό συνθήκες σταθερής παραμόρφωσης, όμως μπορούν με κατάλληλες τροποποιήσεις να επιτευχθούν και συνθήκες σταθερού φορτίου.

Δοκίμια

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά μεγέθη δοκιμίων τύπου C-Ring για δοκιμές SCC. Ωστόσο, δε συνίσταται η χρήση δοκιμίων με εξωτερική διάμετρο μικρότερη από 16mm, γιατί παρουσιάζονται δυσκολίες κατά

90

την κατεργασία τους και η τάση που εφαρμόζεται δε μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια.

Τα C-Rings μπορούν να αποσπαστούν από πολλές μορφές προϊόντων, όπως για παράδειγμα από ράβδους και σωλήνες διαφόρων σχημάτων διατομής και από πλάκες μεγάλου πάχους (Εικόνα 4.12). Η φόρτιση των δοκιμίων πραγματοποιείται με διάφορους συνδυασμούς κοχλιών και ελατηρίων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.13.



Εικόνα 4.12 Απόσπαση δοκιμίων από διάφορες μορφές προϊόντων, όπως a) σωλήνες, b) ράβδους c) πλάκες. [7]



Εικόνα 4.13 Διατάξεις δοκιμών SCC με δοκίμια τύπου C-Ring σε: a) συνθήκες σταθερής παραμόρφωσης (εφελκυστικές τάσεις στην εξωτερική περιφέρεια), b) συνθήκες σταθερού φορτίου (εφελκυστικές τάσεις στην εξωτερική περιφέρεια) c) συνθήκες σταθερής παραμόρφωσης (εφελκυστικές τάσεις στην εσωτερική περιφέρεια). [7]

Στις διατάξεις a) και b) της Εικόνας 4.13 οι εφελκυστικές τάσεις ασκούνται στην εξωτερική επιφάνεια του δακτυλίου, ενώ στη διάταξη c) ασκούνται στην εσωτερική επιφάνεια. Επίσης, οι διατάξεις a) και c) αφορούν συνθήκες σταθερής παραμόρφωσης , ενώ η δοκιμή SCC με διάταξη τύπου b), λόγω του ελατηρίου που τοποθετείται, πραγματοποιείται υπό συνθήκες σταθερού φορτίου.

Κατά την κατασκευή των δοκιμίων απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στη μορφοποίηση και τις κατεργασίες που θα επιβληθούν, διότι η εισαγωγή παραμενουσών και θερμικών τάσεων αλλοιώνει τη μέτρηση της πραγματικής τάσης που εφαρμόζεται και περιπλέκει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Πειραματική Διαδικασία

Η φόρτιση των δοκιμίων μπορεί να πραγματοποιηθεί με υψηλή ακρίβεια. Οι εφελκυστικές τάσεις κατανέμονται στην περιφέρεια (εσωτερική ή εξωτερική) του δακτυλίου, όμως η κατανομή αυτή δεν είναι ομοιόμορφη. Στα άκρα, στα σημεία επαφής με τον κοχλία, οι τάσεις είναι μηδενικές και αυξάνονται σταδιακά μέχρι το μέσο του τόξου του δακτυλίου, όπου μεγιστοποιούνται. Η τάση μεταβάλλεται

επίσης και κατά το πάχος, καθώς στην εξωτερική διάμετρο είναι μέγιστη εφελκυστική, ενώ στην εσωτερική είναι μέγιστη θλιπτική (ή αντίστροφα σε διατάξεις όπως της Εικόνας 4.13.c).

Η φόρτιση των δοκιμίων πραγματοποιείται με την εξής διαδικασία:

- Προσδιορίζεται το επιθυμητό επίπεδο περιφερειακής (σ_c) και εγκάρσιας τάσης
 (σ_t) που θα εφαρμοστεί στο δοκίμιο.
- Υπολογίζονται η μέγιστη περιφερειακή παραμόρφωσης ε_c και η μέγιστη εγκάρσια παραμόρφωση ε_t μέσω των σχέσεων:

$$\sigma_{\rm c} = \frac{\rm E}{1-\mu^2} (\epsilon_{\rm c} + \mu \epsilon_{\rm t})$$

$$\sigma_{\rm t} = \frac{\rm E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{\rm t} + \mu \varepsilon_{\rm c})$$

Όπου:

Ε: το μέτρο ελαστικότητας του υλικού σε N/mm²

μ: ο λόγος Poisson

 Εφαρμόζονται ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης στο δοκίμιο για τη μέτρηση των ε_c και ε_t. Ο δακτύλιος συσφίγγεται μέχρι οι ενδείξεις των μετρητών να δείξουν τις τιμές που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο βήμα και σταθεροποιείται η θέση του.

Η πειραματική διαδικασία μπορεί να διεξαχθεί σε οποιοδήποτε περιβάλλον, όμως πρέπει να τηρούνται κάποιοι περιορισμοί. Για παράδειγμα, το δοκίμιο θα πρέπει να εμβαπτίζεται στο διαβρωτικό μέσο με τέτοιο τρόπο ώστε η επιφάνεια όπου ασκούνται οι τάσεις να έρχεται σε επαφή αποκλειστικά με το περιβάλλον έκθεσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί κρεμώντας το δοκίμιο μέσα στο δοχείο που του διαβρωτικού μέσου.

Το υλικό των κοχλιών θα πρέπει να είναι το ίδιο με το υλικό του δοκιμίου, ώστε να αποφεύγεται η γαλβανική αλληλεπίδραση, διαφορετικά θα πρέπει οι περιοχές επαφής να μονώνονται κατάλληλα. Στη Εικόνα 4.14 παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι μόνωσης των επικίνδυνων σημείων της διάταξης. Στις διατάξεις a) και b) χρησιμοποιούνται ειδικά διαμορφωμένα μονωτικά ώστε τα κρίσιμα σημεία να μην έρχονται σε επαφή με το διαβρωτικό μέσο., ενώ στη διάταξη c) χρησιμοποιείται κατάλληλη επίστρωση, η οποία προστατεύει τον κοχλία και τα σημεία επαφής με τον δακτύλιο. Τόσο το υλικό των μονωτικών, όσο και η επικάλυψη θα πρέπει να είναι από υλικό ανθεκτικό στο περιβάλλον έκθεσης και παράλληλα να μην το επιμολύνει καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.







c) Coating

a) Stopped Insulating bushing b) Spherical insulating bushing Εικόνα 4.14 Τρόποι μόνωσης των σημείων επαφής κοχλία-δοκιμίου [24]

Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η χαλάρωση τάσεων, ειδικά σε περιπτώσεις που το περιβάλλον έκθεσης είναι υψηλής θερμοκρασίας. Για την εκτίμηση της χαλάρωσης τάσεων απαιτούνται δεδομένα από δοκιμές ερπυσμού για τον δακτύλιο και τους κοχλίες.

Τα κριτήρια αξιολόγησης των αποτελεσμάτων είναι ο χρόνος μέχρι την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής και η οριακή τάση, δηλαδή η χαμηλότερη τάση για την οποία το εξεταζόμενο σύστημα εμφανίζει έστω και μία ανιχνεύσιμη ρωγμή.

Η μεταλλογραφική εξέταση του δοκιμίου είναι απαραίτητη για τον έλεγχο ύπαρξης ρωγμών, καθώς σε κάποια συστήματα υλικού-περιβάλλοντος η ρωγμάτωση δεν είναι εμφανής, ενώ πολλές φορές το δοκίμιο δεν οδηγείται σε θραύση. Επίσης, με μεταλλογραφία μπορεί να προσδιοριστεί η προέλευση των ρωγμών και να διαπιστωθεί αν οφείλεται σε SCC ή σε άλλους μηχανικούς ή περιβαλλοντικούς παράγοντες.

4.4 Μέθοδοι στατικής φόρτισης σε προ-ρωγματωμένα δοκίμια^{[13],[22],[24]}

Οι μέθοδοι αυτοί αναπτύχθηκαν προκειμένου να περιγράψουν τις συνθήκες έναρξης και διάδοσης ρωγμάτωσης λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση, που προκύπτει από σφάλματα τύπου ρωγμής (crack-like flaws), επιφανειακά ή εσωτερικά, σε κατασκευές με δομικά στοιχεία μεγάλου πάχους. Οι μέθοδοι που αναπτύσσονται για την περιγραφή της συμπεριφοράς των μη προ-ρωγματωμένων δοκιμίων σε SCC καθίστανται ανεπαρκείς για την εκτίμηση της αντοχής (ή της ευαισθησίας) σε SCC μιας τέτοιας περίπτωσης.

Η εκτίμηση της συμπεριφοράς των προ-ρωγματωμένων δοκιμίων και δομικών στοιχείων πραγματοποιείται με τη βοήθεια της Γραμμικής Ελαστικής Θεωρίας Θραύσης (Linear Elastic Fracture Mechanics), εφόσον, εκτός από την πλαστική ζώνη στο άκρο της ρωγμής, στο υπόλοιπο δοκίμιο ασκούνται τάσεις μικρότερες του ορίου διαρροής, δηλαδή οι παραμορφώσεις είναι ελαστικές.

Η κινητήρια μηχανική δύναμη για τη διάδοση των ρωγμών εκφράζεται με τη βοήθεια του συντελεστή έντασης τάσης σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (K_I). Ο K_I εξαρτάται από το μήκος και τη θέση της ρωγμής (κεντρική ή ακραία ρωγμή), από τη γεωμετρία του δοκιμίου και από την εφελκυστική τάση που ασκείται στο δοκίμιο μακριά από τη ρωγμή, μέσω της σχέσης:

$$K = f(g) \cdot \sigma \cdot \alpha$$

Όπου:

f(g): συνάρτηση γεωμετρίας δοκιμίου και ρωγμής

σ: ονομαστική τάση

α: μήκος ρωγμής

Για συγκεκριμένο συνδυασμό υλικού-περιβάλλοντος υπάρχει μια μονοσήμαντη σχέση μεταξύ του K₁ και του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής (da/dt)_{SCC}, η οποία απεικονίζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 4.15. Η περιγραφή των περιοχών του διαγράμματος έχει πραγματοποιηθεί και στο Κεφάλαιο 2.4.1, όμως επαναλαμβάνεται για λόγους διευκόλυνσης. Ο συντελεστής έντασης τάσης K_{ISCC} εκφράζει την χαμηλότερη τιμή K₁, όπου εμφανίζεται η πρώτη ανιχνεύσιμη ρωγμή. Στην πραγματικότητα αυτό το όριο είναι δύσκολο να προσδιοριστεί για τα περισσότερα συστήματα υλικού-περιβάλλοντος. Για το λόγο αυτό, ο Κ_{ISCC} πρακτικά θεωρείται ως ο συντελεστής έντασης τάσης, στον οποίο αντιστοιχεί μια πολύ χαμηλή τιμή ρυθμού ανάπτυξης ρωγμής, η οποία συνήθως ορίζεται 10⁻¹⁰m/s, που ισούται με ταχύτητα διάδοσης ρωγμής 3mm το χρόνο.



Εικόνα 4.15 Διαγραμματική απεικόνιση της σχέσης του ρυθμού ανάπτυξης της ρωγμής da/dt και του συντελεστή έντασης τάσης K_i [22]

Για K_I > K_{ISCC} (περιοχή I), η ταχύτητα της ρωγμής εξαρτάται από τον K_I, δηλαδή αυξάνεται με την αύξησή του. Στην περιοχή II (plateau crack growth rate) όμως, παρατηρούμε ότι ο ρυθμός da/dt διατηρείται σταθερός, γεγονός που υποδηλώνει ότι σχεδόν ανεξαρτητοποιείται από τον K_I. Σε αυτή τη φάση λαμβάνουν χώρα τα ηλεκτροχημικά φαινόμενα, τα οποία ελέγχουν την κινητική της ρωγμής και καθορίζουν τον ρυθμό ανάπτυξής της. Σε ακόμη υψηλότερες τιμές K_I (περιοχή III), ο ρυθμός (da/dt)_{SCC} αυξάνεται με την αύξηση του K_I, μέχρι μια κρίσιμη τιμή K_{IC}, όπου ο συντελεστής έντασης τάσης έχει φτάσει το όριο δυσθραυστότητας του υλικού και επέρχεται η θραύση του δοκιμίου. Η θραύση είναι καθαρά μηχανική, όμως οφείλεται στην ύπαρξη της ρωγμάτωσης που έχει διαδοθεί υπό την επίδραση της διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση. Σε ορισμένα συστήματα υλικούπεριβάλλοντος μπορεί να μην υπάρχει κάποια από τις περιοχές Ι ή ΙΙ του διαγράμματος.

Σημαντική προϋπόθεση για τη χρήση της Γραμμικής Ελαστικής Θεωρίας Θραύσης αποτελεί η επικράτηση συνθηκών επίπεδης παραμόρφωσης, ώστε να εξασφαλίζεται πολύ μικρό μέγεθος της πλαστικής ζώνης στο άκρο της ρωγμής και να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα η ύπαρξή της. Σε περιπτώσεις λεπτών δοκιμίων ή δομικών στοιχείων ή πολύ όλκιμων μεταλλικών υλικών, όπου η αρχή της μικρής έκτασης πλαστικής ζώνης δεν ισχύει, η συμπεριφορά σε SCC εκτιμάται με τη βοήθεια της Ελαστοπλαστικής Θραυστομηχανικής (Elastic-Plastic Fracture Mechanics).

Σκοπός διεξαγωγής τέτοιων δοκιμών είναι ο προσδιορισμός του Κ_{ISCC} ενός συστήματος υλικού-περιβάλλοντος και η μέτρηση του ρυθμού ανάπτυξης της ρωγμάτωσης da/dt. Λόγω της προϋπάρχουσας ρωγμής, οι δοκιμές με χρήση προρωγματωμένων δοκιμίων αποκλείουν τη μελέτη της έναρξης της SCC. Στην ουσία, το στάδιο της έναρξης της SCC δε λείπει ούτε σε αυτήν την περίπτωση, καθώς η συνεργιστική δράση μηχανικών και περιβαλλοντικών παραγόντων είναι απαραίτητη για την ενεργοποίησή της, όμως ο μηχανισμός είναι διαφορετικός σε σχέση με τα μη προ-ρωγματωμένα δοκίμια.

4.4.1 Γεωμετρία προ-ρωγματωμένων δοκιμίων^[24]

Υπάρχουν πολλά μεγέθη και πολλοί τύποι δοκιμίων κατάλληλοι για κάθε στατική δοκιμή διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση, οι οποίοι παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.16, κατηγοριοποιημένοι ανάλογα με τη μέθοδο, στην οποία θα χρησιμοποιηθούν. Το κοινό τους χαρακτηριστικό είναι η προϋπάρχουσα ρωγμή, η οποία δημιουργείται ελεγχόμενα από μια κατάλληλα διαμορφωμένη εγκοπή, πριν τη διεξαγωγή της δοκιμής SCC, υποβάλλοντας το δοκίμιο σε κόπωση (fatigue cracking).



Εικόνα 4.16 Τύποι προ-ρωγματωμένων δοκιμίων που χρησιμοποιούνται για δοκιμές SCC [24]

Από τα δοκίμια της Εικόνας 4.16, λόγω συγκεκριμένων πλεονεκτημάτων, χρησιμοποιούνται συχνότερα τα παρακάτω:

 Δοκίμια πρόβολοι δοκοί (Cantilever bend specimens), τα οποία είναι απλά και φθηνά στην κατασκευή. Χρησιμοποιούνται κυρίως υπό συνθήκες σταθερού φορτίου.

- Συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού (Compact tension Specimens) υπό συνθήκες σταθερού φορτίου, τα οποία ελαχιστοποιούν την απαιτούμενη ποσότητα υλικού.
- Αυτοφορτιζόμενα δοκίμια πρόβολοι δοκοί με εγκοπή (Self-loaded double cantilever beam specimens), τα οποία βολεύουν για δοκιμές SCC υπό συνθήκες σταθερής μετατόπισης σε συνθήκες λειτουργίας.
- Τροποποιημένα συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού (Modified wedge opening loaded specimens), τα οποία είναι επίσης αυτοφορτιζόμενα (self-loaded) και ελαχιστοποιούν την απαιτούμενη ποσότητα υλικού για δοκιμές SCC υπό συνθήκες σταθερής μετατόπισης.
- Δοκίμια σχήματος C (C-shaped specimens), τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν από κυλινδρικούς σωλήνες μεγάλου πάχους για δοκιμές υπό συνθήκες σταθερού φορτίου, με σκοπό τη μελέτη της ακτινικής διάδοσης ρωγμών, προσανατολισμένων κατά το διάμηκες.

Στις Εικόνες 4.17-4.21 παρουσιάζεται η γεωμετρία καθενός από τα προαναφερθέντα δοκίμια.



Εικόνα 4.17 Γεωμετρία συμπαγούς δοκιμίου εφελκυσμού για δοκιμές SCC. [24]



Εικόνα 4.18 Γεωμετρία δοκιμίων προβόλων δοκών για δοκιμές SCC. [24]





Εικόνα 4.19 Γεωμετρία αυτοφορτιζόμενων δοκιμίων προβόλων δοκών με εγκοπή για δοκιμές SCC. [24]



Εικόνα 4.20 Γεωμετρία τροποποιημένων συμπαγών δοκιμίων εφελκυσμού για δοκιμές SCC. [24]



Εικόνα 4.21 Γεωμετρία δοκιμίων σχήματος C για δοκιμές SCC. [24]

Ένας από τους περιορισμούς που πρέπει να τηρούνται για τη σχεδίαση και την κατασκευή των δοκιμίων είναι να διατηρούνται συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Ο περιορισμός αυτός εκφράζεται μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\alpha$$
, B, $(W - \alpha) \ge 2.5 \left(\frac{K_I}{\sigma_Y}\right)^2$

Όπου:

α: μήκος προϋπάρχουσας ρωγμής Β: πάχος δοκιμίου W: πλάτος δοκιμίου K_{IC}: κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσης σ_Y: όριο διαρροής του υλικού

4.4.2 Τρόποι φόρτισης^{[7],[22],[24]}

Οι δοκιμές μπορούν να εκτελεστούν με διάφορους τρόπους, προκειμένου να επιτευχθεί η λήψη των επιθυμητών δεδομένων. Οι μέθοδοι φόρτισης που χρησιμοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό του συντελεστή Κ_{ISCC} και τη μέτρηση του ρυθμού διάδοσης της ρωγμάτωσης da/dt είναι οι εξής:

- Δοκιμές υπό σταθερό φορτίο
- Δοκιμές υπό σταθερή μετατόπιση
- Δοκιμές αυξανόμενου φορτίου και αυξανόμενης παραμόρφωσης.

Σημαντικό πλεονέκτημα των δοκιμών υπό σταθερό φορτίο και υπό σταθερή παραμόρφωση είναι οι μέτριες απαιτήσεις σε εξοπλισμό για τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας και το χαμηλό κόστος. Ωστόσο, παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα, όπως η πολύ μεγάλη χρονική διάρκεια και η μεγάλη διασπορά στα αποτελέσματα. Αντίθετα, η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει επιταχυνόμενες δοκιμές SCC σε προ-ρωγματωμένα δοκίμια και αντιπροσωπεύουν με καλύτερο τρόπο τις συνθήκες έναρξης και διάδοσης της SCC που παρατηρούνται στις πραγματικές εφαρμογές. Οι δοκιμές αυτές περιλαμβάνουν δυναμική επιβαλλόμενη φόρτιση και θα περιγραφούν σε επόμενο εδάφιο.

Δοκιμές υπό συνθήκες σταθερού φορτίου

Οι δοκιμές υπό σταθερό φορτίο μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- Δοκιμές σταθερού φορτίου, όπου αυξάνεται ο Κ₁ με την αύξηση του μήκους της ρωγμής και είναι κατάλληλες για τον προσδιορισμό K_{ISCC} και (da/dt)_{SCC}
- Δοκιμές σταθερού φορτίου, όπου ο Κ₁ είναι ανεξάρτητος από το μήκος της ρωγμής (περιοχή ΙΙ του διαγράμματος της Εικόνας 4.15) και είναι κατάλληλες για θεμελιώδεις μελέτες των μηχανισμών της SCC. Οι δοκιμές αυτές διεξάγονται σπάνια.

Ο σκοπός για τη διεξαγωγή της πρώτης κατηγορίας των δοκιμών SCC υπό συνθήκες σταθερού φορτίου, είναι ο προσδιορισμός του ρυθμού διάδοσης της ρωγμάτωσης da/dt και του συντελεστή K_{ISCC}, ο πραγματοποιείται μέσω ενός κύκλου πειραμάτων με φόρτιση των δοκιμίων σε διάφορα επίπεδα συντελεστή έντασης τάσης Κ. Για τις δοκιμές αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως συμπαγή δοκίμια και δοκίμια κάμψης με εγκοπή (βλ: Εικόνα 4.16). Το επιθυμητό επίπεδο Κ επιτυγχάνεται είτε με κάμψη, είτε με εφελκυσμό. Συνήθως πραγματοποιείται με εφελκυσμό, ενώ αν χρησιμοποιηθεί κάμψη προτιμάται η κάμψη τριών ή τεσσάρων σημείων. Σε αυτές τις δοκιμές, οι παράμετροι που σχετίζονται με την τάση μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια.

Χαρακτηριστικό των δοκιμών SCC υπό σταθερό φορτίο είναι ότι με το που αρχίσει η ρωγμάτωση, η διάδοση της ρωγμής έχει ως αποτέλεσμα αυξανόμενο άνοιγμα ρωγμής και αυξανόμενο συντελεστή έντασης τάσης Κ_I. Επομένως είναι δύσκολο να ανασταλεί η διάδοση της ρωγμής λόγω σχηματισμού οξειδίων ή άλλων προϊόντων διάβρωσης στο άκρο της, καθώς ο συνεχώς αυξανόμενος Κ_I οδηγεί στη ρήξη οποιουδήποτε στρώματος οξειδίων τείνει να δημιουργηθεί.

Από την άλλη πλευρά, εφόσον η ανάπτυξη της ρωγμής προκαλεί ραγδαία αύξηση του Κ_I στο άκρο της, η περεταίρω διάδοσή της οφείλεται κυρίως στην έντονη πλαστικοποίηση στο άκρο της και όχι σε περιβαλλοντικούς παράγοντες. Έτσι οι μετρούμενοι, με αυτή τη μέθοδο, ρυθμοί διάδοσης της ρωγμάτωσης δεν αντιπροσωπεύουν απόλυτα αυτούς που επιτυγχάνονται αποκλειστικά από διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση. Ένα ακόμη μειονέκτημα των μεθόδων αυτών αποτελεί η ανάγκη για εξωτερικό σύστημα φόρτισης, δηλαδή δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτοφορτιζόμενα δοκίμια υπό σταθερό φορτίο, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα κάποιους περιορισμούς που αφορούν το περιβάλλον έκθεσης (π.χ. δυσκολία διεξαγωγής δοκιμών σε κλίβανους ή περιβαλλοντικούς θαλάμους).

Δοκιμές υπό συνθήκες σταθερής μετατόπισης

Στις δοκιμές υπό συνθήκες σταθερής παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται συνήθως αυτοφορτιζόμενα δοκίμια, επομένως δεν απαιτούνται εξωτερικά συστήματα και μηχανές για την επιβολή της παραμόρφωσης. Για το λόγο αυτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Είναι πολύ οικονομικές μέθοδοι και πραγματοποιούνται με χρήση των αυτοφορτιζόμενων δοκιμίων προβόλων δοκών με εγκοπή και τροποποιημένων συμπαγών δοκιμίων εφελκυσμού, όπως αναφέρθηκε ήδη προηγουμένως.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι προσδιορισμού του Κ_{ISCC} υπό συνθήκες σταθερής μετατόπισης. Η πρώτη μέθοδος πραγματοποιείται, χρησιμοποιώντας δοκίμια, τα οποία εξετάζονται για διάφορες τιμές συντελεστή έντασης τάσης Κ_I. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται η τιμή του K_{ISCC}, η οποία αντιστοιχεί στην υψηλότερη τιμή του συντελεστή έντασης τάσης, για την οποία δεν υπάρχει διάδοση της προϋπάρχουσας ρωγμής. Η δεύτερη μέθοδος πραγματοποιείται με σύλληψη της διαδιδόμενης ρωγμάτωσης. Σύλληψη της ρωγμής ουσιαστικά σημαίνει ότι ο ρυθμός ανάπτυξης της ρωγμής είναι τόσο χαμηλός που δεν μπορεί πλέον να μετρηθεί. Η διαδικασία αυτή είναι εφικτή μόνο υπό συνθήκες σταθερής μετατόπισης, εφόσον σε αυτήν την περίπτωση ο συντελεστής έντασης τάσης μειώνεται σταδιακά με την αύξηση της ρωγμής. Θεωρητικά απαιτείται ένα μόνο δοκίμιο για αυτήν την μέθοδο, όμως πρακτικά θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τουλάχιστον τρία, προκειμένου να αποφευχθούν λανθασμένα συμπεράσματα.

Τα μειονεκτήματα των δοκιμών υπό συνθήκες σταθερής μετατόπισης είναι τα εξής:

- Τα φορτία που εφαρμόζονται μπορούν μόνο να υπολογιστούν έμμεσα από τις μεταβολές των μετατοπίσεων.
- Υπό συνθήκες σταθερού φορτίου, επιτυγχάνεται σταθερό άνοιγμα ρωγμής και όχι αυξανόμενο, όπως στα πειράματα σταθερού φορτίου, γεγονός που οδηγεί σε

σταδιακά μειούμενο συντελεστή έντασης τάσης. Επομένως, οξείδια ή άλλα προϊόντα διάβρωσης μπορούν να εμποδίσουν τη διάδοση της ρωγμάτωσης.

- Όταν για τον προσδιορισμό του Κ_{ISCC} χρησιμοποιείται η μέθοδος σταθερής μετατόπισης με σύλληψη της ρωγμής, δημιουργούνται συχνά διακλαδώσεις, οι οποίες ακυρώνουν τη δοκιμή.
- Όταν το σύστημα επιβολής της φόρτισης παρουσιάζει ελαστική χαλάρωση κατά την ανάπτυξη των ρωγμών προκαλούνται αυξημένη μετατόπιση και υψηλοτέρα φορτία από τα αναμενόμενα.
- Όταν το δοκίμιο παρουσιάζει πλαστική χαλάρωση με την πάροδο του χρόνου,
 προκαλούνται χαμηλότερα φορτία από τα αναμενόμενα.

4.4.3 Εκτίμηση αποτελεσμάτων

Προσδιορισμός K_{ISCC} με δοκιμές σταθερής μετατόπισης

Για τον προσδιορισμό του K_{ISCC} με σύλληψη της ρωγμάτωσης, θα πρέπει η περιοχή της εγκοπής και της προϋπάρχουσας ρωγμής των δοκιμίων να εκτίθεται στο υπό μελέτη περιβάλλον. Στο δοκίμιο επιβάλλεται σταθερή μετατόπιση, με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται μια επιθυμητή τιμή K_{II} του συντελεστή έντασης τάσης. Η τιμή αυτή θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη τιμή K_{ISCC}. Αν δεν γνωρίζουμε τίποτα για τη συμπεριφορά του υλικού μας σε SCC, μπορούμε να επιλέξουμε μια K_{II}, ελαφρώς μικρότερη από τον K_c, ο οποίος προκύπτει από δοκιμές δυσθραυστότητας.

Για την κατανόηση της πειραματικής διαδικασίας, ακολουθεί περιγραφή των βημάτων της επίτευξης του επιθυμητού Κ₁₁, μέσω επιβολής σταθερής μετατόπισης σε τροποποιημένα συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού (Εικόνα 4.22):

- Σύμφωνα με την επιθυμητή τιμή του Κ_{li}, υπολογίζεται το φορτίο Ρ που απαιτείται για την επίτευξή του, μέσω της σχέσης που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.22.
- Από το φορτίο Ρ μπορεί πλέον να υπολογιστεί το απαιτούμενο άνοιγμα ν_{LL} στην κατακόρυφη που διέρχεται από το κέντρο του πείρου που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση του δοκιμίου (Εικόνα 4.23).

 Επειδή η θέση της ν_{LL} καθιστά δύσκολη τη μέτρησή της, υπολογίζεται η απόσταση ν₀ στην άκρη του δοκιμίου (Εικόνα 4.23), μέσω της σχέσης:



^a V, the crack-opening displacement (COD) for a rigid bolt, is a constant $(g - g_i)$

$$K_{1} = \frac{YP}{B\sqrt{a}}$$

where $Y = 30,96 \left(\frac{a}{W}\right) - 195,8 \left(\frac{a}{W}\right)^{2} + 730,6 \left(\frac{a}{W}\right)^{3} + 1186,3 \left(\frac{a}{W}\right)^{4} + 754,6 \left(\frac{a}{W}\right)^{5}$

Εικόνα 4.22 Άσκηση φορτίου σε τροποποιημένο συμπαγές δοκίμιο εφελκυσμού και υπολογισμός του K_I. [24]



Εικόνα 4.23 Τα ανοίγματα ν_{LL} και ν₀ σε τροποποιημένο συμπαγές δοκίμιο εφελκυσμού κατά τη δοκιμή σύλληψης ρωγμής (συνθήκες σταθερής παραμόρφωσης).[24]

 Στη συνέχεια, εφαρμόζονται οι βραχίονες του μετρητικού μετατόπισης (displacement gauge), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.24. Η v₀ που υπολογίστηκε προηγουμένως, εφαρμόζεται πλέον με τη βοήθεια του μετρητικού.



Εικόνα 4.24 Τοποθέτηση μετρητικού μετατόπισης (displacement gauge) σε τροποποιημένο συμπαγές δοκίμιο εφελκυσμού. [24]

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.22, με την εξέλιξη της δοκιμής και τη διάδοση της ρωγμής, η τιμή του συντελεστή έντασης τάσης μειώνεται σταδιακά και τείνει στον K_{Iscc}, ο οποίος, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αντιστοιχεί σε έναν πολύ χαμηλό ρυθμό διάδοσης ρωγμής (συνήθως 10⁻¹⁰mm/s), η τιμή του οποίου έχει προκαθοριστεί από πριν. Ο ρυθμός διάδοσης υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης μήκους ρωγμής-χρόνου, η οποία προκύπτει από καταγραφή του μήκους της ρωγμής καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

Όταν η σύλληψη της ρωγμής φαίνεται να έχει πραγματοποιηθεί, η δοκιμή σταματάει και προσδιορίζεται το τελικό μήκος της ρωγμής και το τελικό φορτίο. Για επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων, θα πρέπει να επαναληφθεί η δοκιμή εφαρμόζοντας συντελεστή έντασης τάσης K_{ISCC}, ώστε να ελεγχθεί αν η ρωγμάτωση διαδίδεται υπό αυτές τις συνθήκες με μεγαλύτερη ταχύτητα από την κρίσιμη τιμή.

Ένας άλλος τρόπος προσδιορισμού του K_{ISCC} είναι με την εκτέλεση πολλών δοκιμών για διάφορα επίπεδα K_{II} μέχρι να προσδιοριστεί το επίπεδο συντελεστή έντασης τάσης, για το οποίο ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής είναι ίσος με 10⁻¹⁰mm/s. Η μετατόπιση που απαιτείται για κάθε τέτοια δοκιμή μπορεί να υπολογιστεί όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, το μήκος της ρωγμής θα πρέπει να παρατηρείται οπτικά ανά διαστήματα ή με μετρήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης καθ' όλη τη διάρκεια. Μετά το τέλος των δοκιμών, θα πρέπει να μετρηθεί στην επιφάνεια θραύσης των δοκιμίων, το μήκος της μεγαλύτερης και της μικρότερης ρωγμής που έχει εμφανιστεί. Αν δεν έχει επέλθει θραύση, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί πλήρης αποχωρισμός των δοκιμίων για τη διεξαγωγή της μέτρησης αυτής.

Προσδιορισμός Κιscc με δοκιμές σταθερού φορτίου

Με τις δοκιμές σταθερού φορτίου, ο προσδιορισμός του Κ_{ISCC}, πραγματοποιείται, όπως και στις δοκιμές σταθερής μετατόπισης, με διεξαγωγή πειραμάτων σε διάφορα επίπεδα συντελεστή έντασης Κ_{Ii}, μέχρι τον προσδιορισμό του K_{ISCC}. Το φορτίο που απαιτείται για την επίτευξη συγκεκριμένων τιμών Κ_{Ii}, υπολογίζεται από σχέσεις, όπως αυτές στις Εικόνες 4.25 και 4.26.


Εικόνα 4.25 Υπολογισμός συντελεστή έντασης τάσης από τις διαστάσεις και το ασκούμενο φορτίο σε δοκίμιο πρόβολο δοκό. [24]



where
$$Y = \frac{2 + \frac{a}{W}}{\sqrt{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^3}} \left[0,886 + 4,64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13,32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$$

Εικόνα 4.26 Υπολογισμός συντελεστή έντασης τάσης από τις διαστάσεις και το ασκούμενο φορτίο σε συμπαγές δοκίμιο εφελκυσμού. [24]

Χρονική διάρκεια δοκιμών

Η επιλογή της διάρκειας των δοκιμών είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων καθώς, ανάλογα με τη μεταλλουργική δομή του κράματος, το περιβάλλον έκθεσης και τη μέθοδο φόρτισης, απαιτείται διαφορετικός χρόνος για τη δράση του φαινομένου. Λανθασμένη επιλογή διάρκειας δοκιμής μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά ενός συστήματος υλικού-περιβάλλοντος σε SCC. Για παράδειγμα, σε κάποια υλικά (π.χ. χάλυβες), η διάρκεια επώασης των ρωγμών είναι για χαμηλούς συντελεστές Κ₁, με αποτέλεσμα δοκιμές μικρής διάρκειας να οδηγούν σε υπερεκτίμηση του Κιscc. Θα πρέπει να δίνεται επαρκής χρόνος για την αλληλεπίδραση μεταξύ μεταλλουργικών, ηλεκτροχημικών και μηχανικών παραγόντων που μπορεί να οδηγήσει σε SCC. Τα πρότυπα ASTM και ISO προτείνουν για στατικές δοκιμές σε προ-ρωγματωμένα δοκίμια χρόνο έκθεσης περίπου από 10 μέχρι 1000 ώρες, ανάλογα με το υλικό που εξετάζεται. Για μείωση της διάρκειας των δοκιμών μπορούν να εκτελεστούν δυναμικές δοκιμές, όπως η δοκιμή αυξανόμενου φορτίου.

Μέτρηση ταχύτητας ρωγμής

Η μέτρηση της ταχύτητας της ρωγμής μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις μεθόδους που πραγματοποιείται ο προσδιορισμός του K_{ISCC}, δηλαδή είτε με δοκιμές σταθερού φορτίου είτε με δοκιμές σταθερής μετατόπισης. Για την επιβεβαίωση της αξιοπιστίας των δεδομένων που αφορούν τον ρυθμό (da/dt)_{SCC} είναι απαραίτητη η περεταίρω εξέταση της επιφάνειας θραύσης μετά το τέλος της πειραματικής διαδικασίας.

4.5 Δοκιμές με δυναμική φόρτιση (Dynamic testing)^{[7],[22]-[24],[26]-[28]}

Συχνά, η διαμόρφωση των συνθηκών για την έναρξη της SCC και η εξέλιξή της μέχρι τη δημιουργία ανιχνεύσιμης ρωγμάτωσης ή μέχρι την τελική αστοχία, απαιτούν μεγάλα χρονικά διαστήματα. Αυτό αποτελεί πρόβλημα για τα εργαστηριακά πειράματα, καθώς ο σκοπός διεξαγωγής τους είναι η παροχή αξιόπιστων αποτελεσμάτων σε μικρό χρονικό διάστημα.

Μείωση της διάρκειας των δοκιμών μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, είτε μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία, την πίεση και τη χημική σύσταση του περιβάλλοντος έκθεσης ώστε να γίνει δυσμενέστερο για το υπό μελέτη υλικό, είτε διεγείροντας τις αντιδράσεις διάβρωσης γαλβανοστατικά ή ποτενσιοστατικά, είτε μεταβάλλοντας τη μικροδομή και τη χημική σύσταση του υλικού ώστε να γίνει πιο ευαίσθητο για το υπό μελέτη περιβάλλον. Ωστόσο, μεταβολές στο υλικό και στο περιβάλλον έκθεσης συχνά δεν ενδείκνυνται, ειδικά όταν σκοπός του πειράματος είναι η αναζήτηση κατάλληλου υλικού για μια κατασκευή. Για τον λόγο αυτό, αναπτύχθηκαν διάφορες δυναμικές δοκιμές.

Η διαφορά των δοκιμών με δυναμική φόρτιση σε σχέση με εκείνες που περιγράφηκαν προηγουμένως, είναι οι σκόπιμες μεταβολές στο εφαρμοζόμενο φορτίο ή στην εφαρμοζόμενη παραμόρφωση κατά τη διάρκεια του πειράματος. Παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα και χρησιμοποιούνται όλο και συχνότερα αντί για τις μεθόδους σταθερού φορτίου και σταθερής παραμόρφωσης, καθώς διευκολύνουν όταν οι τελευταίες παρουσιάζουν χαμηλή αναπαραγωγιμότητα ή όταν διαρκούν πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα. Επιπλέον, οι δοκιμές με δυναμική φόρτιση οδηγούν σε πιο ασφαλή αποτελέσματα, καθώς παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές οριακής τάσης και κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσης K_{scc} και υψηλότερες ταχύτητες διάδοσης ρωγμών σε πειράματα όπου εφαρμόζεται δυναμική φόρτιση. Πλέον έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι δυναμικής φόρτισης, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

4.5.1 Μέθοδος βραδείας καταπόνησης^{[7],[22]-[24],[26]-[28],[30]}

Η μέθοδος βραδείας καταπόνησης (Slow Strain Rate Testing), αποτελεί από τις πιο πρόσφατες μεθόδους δοκιμής SCC που έχουν αναπτυχθεί. Αρχικά εφαρμόστηκε για τη μελέτη των μηχανισμών SCC, όμως στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της ποιότητας και της καταλληλότητας των μεταλλικών υλικών για συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως επίσης και για την εκτίμηση της σχετικής συμπεριφοράς των υλικών σε SCC. Η ευρεία εφαρμογή της σε ποικιλία υλικών και διαβρωτικών περιβαλλόντων οδήγησε στην τυποποίησή της και σήμερα αποτελεί ίσως την πιο διαδομένη μέθοδο δοκιμών SCC. Τα πιο γνωστά πρότυπα για SSRT είναι τα ASTM G129 και ISO 7539-7. Συχνά, τα SSRTs αναφέρονται στη βιβλιογραφία και ως CERT (Constant Extension Rate Test).

Στα SSRTs το δοκίμιο υπόκειται σε συνεχώς αυξανόμενη μετατόπιση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εφελκυστικής παραμόρφωσης, ενώ ταυτόχρονα εκτίθεται στο διαβρωτικό περιβάλλον. Η επιθυμητή εφελκυστική παραμόρφωση μπορεί να επιτευχθεί υποβάλλοντας το δοκίμιο είτε σε εφελκυσμό, είτε σε κάμψη. Το SSRT μπορεί να εφαρμοστεί σε μη ρωγματωμένα δοκίμια, σε δοκίμια με εγκοπή καθώς και σε προ-ρωγματωμένα δοκίμια. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δοκιμές διαφόρων μορφών προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων και συγκολλημένων τεμαχίων.

Παρόλο που το βασικό χαρακτηριστικό αυτής της μεθόδου είναι ο αργός ρυθμός αύξησης της παραμόρφωσης, τα SSRTs διακρίνονται για τη γρήγορη παροχή αποτελεσμάτων, καθώς, ανάλογα με το σύστημα υλικού-περιβάλλοντος, τα πειράματα διαρκούν από λίγες ώρες μέχρι μερικές μέρες. Το βασικό αυτό πλεονέκτημα προκύπτει από το γεγονός ότι η επιβολή δυναμικής καταπόνησης διευκολύνει την έναρξη και τη διάδοση της SCC. Αυτή η επιταχυνόμενη διαδικασία συνάδει με τους προτεινόμενους μηχανισμούς SCC, αφού οι περισσότεροι από αυτούς περιλαμβάνουν διαδικασίες έντονης τοπικής πλαστικοποίησης και ρήξης επιφανειακών στρωμάτων.

Τα SSRTs ολοκληρώνονται πάντα με ολική θραύση του δοκιμίου (είτε όλκιμη, είτε λόγω SCC) και το κριτήριο για την εκτίμηση της ευαισθησίας ενός συστήματος σε SCC είναι ο τρόπος θραύσης. Αυτό αποτελεί ένα επιπλέον πλεονέκτημα σε σχέση

112

με τις δοκιμές υπό συνθήκες σταθερού φορτίου και σταθερής παραμόρφωσης, όπου συχνά συμβαίνει να μην εμφανίζονται αστοχίες στο δοκίμιο μετά από πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα (ακόμη και μήνες), με αποτέλεσμα κάποια στιγμή να διακόπτονται αυθαίρετα. Σε τέτοιες περιπτώσεις το αποτέλεσμα είναι μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων των επαναληπτικών πειραμάτων, ενώ παραμένει η αμφιβολία για το τι θα γινόταν αν το πείραμα συνεχιζόταν.

Ρυθμός παραμόρφωσης

Ο ρυθμός παραμόρφωσης που θα επιβληθεί στο δοκίμιο είναι η κρισιμότερη παράμετρος σε ένα SSRT. Στα πρότυπα υποδεικνύονται ρυθμοί έως 10^{-7} 1/s (το ASTM G129 δίνει εύρος 10^{-4} - 10^{-7} 1/s ενώ το ISO 7539-7 δίνει 10^{-3} - 10^{-7} 1/s). Παρόλα αυτά, απουσία ρωγμάτωσης σε αυτούς τους ρυθμούς δε σημαίνει απαραίτητα ότι το υλικό είναι απαθές σε SCC, καθώς σε κάποια συστήματα υλικού-περιβάλλοντος έχει παρατηρηθεί SCC μόνο σε πολύ αργούς ρυθμούς παραμόρφωσης της τάξης των 10^{-8} και 10^{-9} 1/s. Τα περισσότερα, όμως, συστήματα υλικού-περιβάλλοντος εμφανίζουν SCC σε ρυθμούς από 10^{-5} έως από 10^{-7} 1/s.

Εφόσον παρατηρηθεί κάποια ευπάθεια σε SCC στο υπό μελέτη σύστημα υλικού περιβάλλοντος, θα πρέπει να προσδιοριστούν ο ελάχιστος και ο μέγιστος ρυθμός παραμόρφωσης στους οποίους παρατηρείται ρωγμάτωση, καθώς και ο δριμύτερος ρυθμός παραμόρφωσης, ο οποίος οδηγεί στην ταχύτερη εξέλιξη του φαινομένου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για τα μη ρωγματωμένα δοκίμια, ο πραγματικός ρυθμός παραμόρφωσης είναι μόνο στην αρχή απόλυτα γνωστός, δηλαδή δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια η τιμή του κατά τη διάρκεια του πειράματος. Μπορούν να γίνουν μόνο εκτιμήσεις ή να υπολογιστεί ο ονομαστικός ρυθμός παραμόρφωσης.

Το εύρος ρυθμών παραμόρφωσης ($\vec{\varepsilon}_1$, $\vec{\varepsilon}_2$) που μπορούν να οδηγήσουν στην εμφάνιση SCC κατά την εκτέλεση του SSRT διαφέρει ανάλογα με το σύστημα υλικού περιβάλλοντος. Αν η τιμή του ρυθμού παραμόρφωσης $\vec{\varepsilon}$ είναι υψηλότερη από $\vec{\varepsilon}_2$, τότε οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που προωθούν την SCC δεν προλαβαίνουν να δράσουν με αποτέλεσμα η θραύση να εξελιχθεί κανονικά πριν την έναρξη της SCC. Αντίθετα, αν ο ρυθμός παραμόρφωσης $\vec{\varepsilon}$ είναι μικρότερος από $\vec{\varepsilon}_1$, τότε δεν παρατηρείται ρωγμάτωση λόγω SCC (Εικόνα 2.6). Στα συστήματα όπου η ρωγμάτωση ξεκινά και εξελίσσεται με ρήξεις του προστατευτικού στρώματος, η μείωση αυτή αποδίδεται στο γεγονός ότι ο ρυθμός επανασχηματισμού του επιφανειακού στρώματος είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό παραμόρφωσης που επιβάλλεται στο δοκίμιο. Σε κάθε περίπτωση, όταν ο έ είναι εκτός του εύρους (έ₁, έ₂), η διαδικασία της θραύσης δεν επηρεάζεται, παρόλο που η τάση φτάνει την μέγιστη τάση εφελκυσμού, η οποία είναι μεγαλύτερη από την οριακή τάση για SCC, και παρόλο που το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται το υλικό προωθεί την SCC σε κατάλληλους ρυθμούς παραμόρφωσης.

Η αναδημιουργία των παθητικών στρωμάτων, η οποία παρατηρείται σε πολύ χαμηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης, προλαμβάνει μόνο το σχηματισμό και τη διάδοση ρωγμών λόγω ανοδικών αντιδράσεων (ανοδική SCC). Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται στις περιπτώσεις που η ρωγμάτωση προκαλείται από την καθοδική αντίδραση αναγωγής του υδρογόνου. Συχνά, η διαφορά αυτή χρησιμοποιείται για να διαλευκανθεί αν η ρωγμάτωση προήλθε από ανοδική SCC ή από ψαθυροποίηση από υδρογόνο. Στο ακόλουθο σχήμα (Εικόνα 4.27), παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της SCC η μείωση στην επιφάνεια διατομής του δοκιμίου είναι σχετικά υψηλή και σταθερή εκτός του κρίσιμου εύρους ρυθμών παραμόρφωσης, γεγονός που υποδηλώνει όλκιμη θραύση, ενώ μειώνεται εντός του εύρους τιμών όπου παρατηρείται ρωγμάτωση.

Αντίθετα, στην περίπτωση της ρωγμάτωσης λόγω ψαθυροποίησης από υδρογόνο, παρατηρούμε ότι σε σχετικά υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης, η μείωση της διατομής είναι σχετικά υψηλή (όμοια συμπεριφορά με την προηγούμενη περίπτωση), αφού δεν επαρκεί ο χρόνος για τη δράση του υδρογόνου και το δοκίμιο οδηγείται σε όλκιμη θραύση. Όσο μειώνεται ο ρυθμός, τόσο χαμηλότερη είναι η μείωση της διατομής του δοκιμίου. Η μείωση είναι σχεδόν εκθετική μέχρι κάποια ελάχιστη τιμή, η οποία υποδηλώνει ότι ακόμη και να διατεθεί περισσότερος χρόνος (δηλαδή να μειωθεί περαιτέρω ο έ) η δράση του υδρογόνου δεν θα έχει δυσμενέστερα αποτελέσματα. Προφανώς, η ελάχιστη και η μέγιστη μείωση της διατομής του δοκιμίου είναι διαφορετική για κάθε σύστημα υλικού-περιβάλλοντος.



Εικόνα 4.27 Σχηματική απεικόνιση της επίδρασης του ρυθμού παραμόρφωσης στην SCC και στην ψαθυροποίηση από υδρογόνο. [7]

Οι τιμές των οριακών ρυθμών παραμόρφωσης \vec{e}_1 , \vec{e}_2 εξαρτώνται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, καθώς η γενική ιδέα του κρίσιμου εύρους (\vec{e}_1 , \vec{e}_2) σχετίζεται με την επίτευξη μιας κρίσιμης ισορροπίας μεταξύ του \vec{e} που προκαλεί διάτρηση του επιφανειακού στρώματος (αφήνοντας εκτεθειμένο το γυμνό μέταλλο) και του \vec{e} στον οποίο η άκρη της ρωγμής καθίσταται μη ενεργή από τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις.

Πλέον, έπειτα από πειράματα που διεξήχθησαν έχουν προσδιοριστεί κάποιοι κρίσιμοι ρυθμοί παραμόρφωσης στους οποίους παρατηρήθηκε ρωγμάτωση σε συγκεκριμένες κατηγορίες συστημάτων υλικού-περιβάλλοντος (Πίνακα 4.1).

System	Applied strain rate, s ⁻¹
Aluminum alloys in chloride solutions	10 ⁻⁴ and 10 ⁻⁷
Copper alloys in ammoniacal and nitrite solutions	10 ⁻⁶
Steels in carbonate, hydroxide, or nitrate solutions and liquefied ammonia	10-6
Magnesium alloys in chromate/chloride solutions	10-5
Stainless steels in chloride solutions	10-6
Stainless steels in high-temperature solutions	10-7
Titanium alloys in chloride solutions	10-5

Κρίσιμοι ρυθμοί παραμόρφωσης που προάγουν την SCC σε διάφορα συστήματα υλικούπεριβάλλοντος

Δοκίμια

Πίνακας 4.1

Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται στα SSRTs είναι συνήθως δοκίμια σταθερής διατομής, με κυκλική, τετραγωνική, ορθογωνική, πολυγωνική ή δακτυλιοειδή διατομή. Συχνά, μπορεί να χρησιμοποιηθούν και δοκίμια μεταβαλλόμενης διατομής (πχ. κωνικά δοκίμια), τα οποία δίνουν τη δυνατότητα να μελετηθούν διαφορετικές τιμές τάσης σε ένα μόνο δοκίμιο.

Τα δοκίμια με μικρή επιφάνεια διατομής παρέχουν ταχύτερα αποτελέσματα λόγω της μεγαλύτερης ευαισθησίας που παρουσιάζουν σε μικρορωγμές που προκαλούνται από διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση. Ωστόσο, υπάρχουν και μειονεκτήματα στη χρήση τους, καθώς η κατασκευή και η κατεργασία τους είναι δυσκολότερη. Επιπλέον, παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία σε συγκεντρώσεις τάσεων, οι οποίες πολλές φορές οφείλονται σε εξωγενείς παράγοντες και αλλοιώνουν τα τελικά αποτελέσματα. Τα άκρα κάθε δοκιμίου, τα οποία συγκρατούνται στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού, θα πρέπει να διαμορφώνονται έτσι ώστε το σχήμα τους να ταιριάζει με το σχήμα των αρπάγων. Επιπλέον, θα πρέπει να είναι κατάλληλα προστατευμένα, ώστε να μην έρχονται σε επαφή με το διαβρωτικό περιβάλλον κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται αστοχίες στις περιοχές αυτές.

Οι αναλογίες των διαστάσεων των δοκιμίων δεν είναι τόσο σημαντικές για τις δοκιμές σε SCC όσο είναι για τις δοκιμές εφελκυσμού. Ωστόσο, συνίσταται να ακολουθούνται οι οδηγίες που παρέχονται από τα πρότυπα για τη μορφή και τις διαστάσεις των δοκιμίων εφελκυσμού, προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα SSRTs με τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού.

Ανάλογα με τους παράγοντες και τα χαρακτηριστικά της SCC που εξετάζονται, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και δοκίμια με εγκοπή όταν:

- επιθυμούμε να περιορίσουμε τη ρωγμάτωση σε μια περιοχή ειδικού ενδιαφέροντος (π.χ. μελέτη της SCC στο μέταλλο συγκόλλησης ή στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη ενός συγκολλημένου τεμαχίου),
- θέλουμε να επιταχύνουμε την έναρξη της ρωγμάτωσης προκαλώντας συγκέντρωση τάσεων,
- θέλουμε να διευκολύνουμε την εισαγωγή του υδρογόνου στην κρυσταλλική δομή του μετάλλου, εκμεταλλευόμενοι την τριαξονική εντατική κατάσταση (επίπεδη παραμόρφωση) που επικρατεί στην κορυφή της εγκοπής.

Αντίστοιχα υπάρχουν περιπτώσεις που προτιμάται η χρήση προρωγματωμένων δοκιμίων, οι οποίες έχουν αναφερθεί αναλυτικά προηγουμένως. Ωστόσο, στην περίπτωση των SSRTs τα προ-ρωγματωμένα δοκίμια προσφέρουν ένα επιπλέον πλεονέκτημα. Στα μη ρωγματωμένα δοκίμια από όλκιμα μεταλλικά υλικά, κατά το σχηματισμό λαιμού στο δοκίμιο, ο πραγματικός ρυθμός παραμόρφωσης στην περιοχή αυτή αυξάνεται κατά τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στην εκτίμηση των αποτελεσμάτων, καθώς ο πραγματικός ρυθμός δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια, ενώ υπάρχει ο κίνδυνος η τιμή του να βγει εκτός του κρίσιμου εύρους. Ωστόσο έχει διαπιστωθεί ότι ο ρυθμός παραμόρφωσης παραμένει σχετικά σταθερός αν το μέγεθος της πλαστικής ρωγματωμένα δοκίμια, τα οποία κρίνονται ως καταλληλότερα έναντι των μη ρωγματωμένων δοκιμίων, ειδικά όταν μελετάται ένα σύστημα υλικούπεριβάλλοντος, για το οποίο δεν υπάρχουν στοιχεία στη βιβλιογραφία σχετικά με το εύρος των κρίσιμων ρυθμών παραμόρφωσης ($\vec{\varepsilon}_1$, $\vec{\varepsilon}_2$).

Συσχέτιση με τις μεθόδους στατικής φόρτισης

Φαινομενικά, οι συνθήκες αστοχίας ενός δοκιμίου που υπόκειται σε αργά αυξανόμενη παραμόρφωση δε συνάδουν με αυτές των δοκιμών υπό σταθερό φορτίο και υπό σταθερή παραμόρφωση. Στην πραγματικότητα όμως στις μεθόδους στατικής ονομαστικής φόρτισης, όπως και στις αστοχίες κατά τη λειτουργία, η ρωγμάτωση εξελίσσεται υπό συνθήκες βραδείας δυναμικής καταπόνησης. Ο ρυθμός παραμόρφωσης εξαρτάται από:

- την τιμή της επιβαλλόμενης τάσης,
- τη χρονική στιγμή έναρξης της ρωγμάτωσης,
- διάφορες μεταλλουργικές παραμέτρους που διέπουν τον ερπυσμό.

Ο ερπυσμός είναι μια αργή, χρονικά εξαρτώμενη και μη αναστρέψιμη διαδικασία πλαστικής παραμόρφωσης ενός μεταλλικού υλικού, η οποία συμβαίνει υπό την μακρόχρονη επίδραση συνεχούς τάσης χαμηλότερης του ορίου διαρροής. Με την πάροδο το χρόνου, ο ερπυσμός προκαλεί συγκέντρωση παραμορφώσεων ή χαλάρωση τάσεων. Δίκαια θεωρείται φαινόμενο υψηλής θερμοκρασίας, αφού ο ρυθμός ερπυσμού αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ η επίδρασή του γίνεται αισθητή όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει το 30% της θερμοκρασίας τήξης. Ωστόσο, όλα τα μεταλλικά υλικά εμφανίζουν φαινόμενα ερπυσμού υπό την επίδραση τάσεων, απλώς σε θερμοκρασία περιβάλλοντος τα περισσότερα από αυτά επιδεικνύουν πολύ χαμηλούς ρυθμούς ερπυσμού, οι οποίοι δε θεωρούνται επικίνδυνοι για την ακεραιότητα του υλικού και μπορούν να αγνοηθούν.

Κατά την εξέλιξη των πειραμάτων υπό σταθερό φορτίο ή υπό σταθερή παραμόρφωση, προκαλείται ρυθμός ερπυσμού (ή ρυθμός παραμόρφωσης), ο οποίος σταδιακά φθίνει, όσο περνάει ο χρόνος από την επιβολή της καταπόνησης, λόγω σκλήρυνσης του υλικού. Επομένως, έναρξη της ρωγμάτωσης πραγματοποιείται όταν οι αναγκαίες για την SCC συνθήκες δημιουργηθούν για ρυθμό παραμόρφωσης εντός του κρίσιμου εύρους. Η έναρξη της ρωγμής προκαλεί εκ νέου αύξηση του ρυθμού ερπυσμού και έτσι εξελίσσεται το φαινόμενο. Η διαδικασία αυτή επηρεάζεται από το μέγεθος της αρχικής καταπόνησης και τη θερμοκρασία, καθώς όσο αυξάνεται η τιμή τους, τόσο αυξάνεται και η ταχύτητα ερπυσμού.

Όσα ειπώθηκαν προηγουμένως έχουν αποδειχθεί με δοκιμές σε διάφορους συνδυασμούς μεταλλικών υλικών και διαβρωτικών περιβαλλόντων. Ενδεικτικά, στην Εικόνα 4.28 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών σε προ-ρωγματωμένα δοκίμια από μαγγανιούχο χάλυβα σε διάλυμα 1 N Na₂CO₃ + 1N NaHCO₃ στους 75°C, το οποίο υπό την επίδραση κατάλληλου δυναμικού προωθεί την περικρυσταλλική SCC σε τέτοιους χάλυβες. Η καμπύλη Α δείχνει τη συμπεριφορά ενός δοκιμίου, στο οποίο εφαρμόστηκε ευνοϊκό για την SCC δυναμικό (-650 mV).



Εικόνα 4.28 Διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου για χάλυβα C-Mn σε 1N Na₂Co₃ + 1N NaHCO₃ στους 75°C υπό την επίδραση διάφορων τιμών δυναμικού. [30]

Η μορφή της υποδηλώνει ότι στην αρχή ο ρυθμός αύξησης του βέλους κάμψης μειώνεται καθώς ο ερπυσμός φθίνει, ενώ μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής, ο ρυθμός αυξάνεται ξανά λόγω της συνεργιστικής δράσης της διάδοσης της ρωγμής και του ερπυσμού στο άκρο της. Αν το δυναμικό που εφαρμόζεται δεν είναι κρίσιμο για την εμφάνιση ρωγμάτωσης (-950 mV), το αποτέλεσμα είναι να μειωθεί σταδιακά ο ρυθμός παραμόρφωσης, όπως φαίνεται στην καμπύλη Β. Επίσης, αν το ίδιο πείραμα διεξαχθεί υπό την επίδραση δυναμικού που δεν οδηγεί σε SCC (-900 mV), και μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα αλλάξει το δυναμικό σε μια κρίσιμη για την SCC τιμή (-650 mV), η συμπεριφορά θα είναι παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση (Καμπύλη C). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι στο διάστημα που μεσολάβησε μέχρι την εφαρμογή ενός κρίσιμου δυναμικού η ταχύτητα ερπυσμού μειώθηκε αρκετά ώστε να μην μπορεί να προκαλέσει πλέον ρωγμάτωση. Τέλος, στην καμπύλη D απεικονίζεται η συμπεριφορά του δοκιμίου αν η προαναφερθείσα μεταβολή του δυναμικού πραγματοποιηθεί πριν ο ρυθμός ερπυσμού μειωθεί σημαντικά, ώστε να είναι εφικτή η έναρξη της SCC.

Συμπερασματικά, η τιμή του ρυθμού παραμόρφωσης τη χρονική στιγμή που θα δημιουργηθούν οι κατάλληλες για SCC ηλεκτροχημικές συνθήκες, είναι αυτή που καθορίζει το αν θα υπάρξει ρωγμάτωση. Συνεπώς, η ταχύτητα ερπυσμού ή ταχύτητα παραμόρφωσης καθίσταται ως παράμετρος ελέγχου της SCC, ακόμη και όταν η επιβαλλόμενη φόρτιση είναι στατική. Επομένως, οι συνθήκες φόρτισης στα SSRTs είναι αντιπροσωπευτικές των πραγματικών συνθηκών φόρτισης που θα αντιμετωπίσει το δοκίμιο κατά την λειτουργία του.

Σημασία των μη διαδιδόμενων ρωγμών (Non-propagating cracks)

Στις δοκιμές υπό σταθερό φορτίο ή υπό σταθερή παραμόρφωση υπάρχει περίπτωση να σχηματιστούν ρωγμές, οι οποίες μετά από ένα διάστημα σταματούν να διαδίδονται. Αυτό συμβαίνει όταν ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής δεν είναι επαρκής για τη διατήρηση του ρυθμού παραμόρφωσης στο άκρο της ρωγμής πάνω από μια κρίσιμη τιμή για την SCC. Τέτοιου είδους συμπεριφορά αναμένεται όταν η αρχική τάση, στην οποία υποβάλλεται το δοκίμιο είναι χαμηλότερη από την οριακή. Η διάδοση μιας τέτοιας ρωγμής μπορεί να συνεχιστεί αν επιβληθεί κάποια αύξηση στο επιβαλλόμενο φορτίο, η οποία είναι ικανή να προκαλέσει και πάλι πλαστική παραμόρφωση στο άκρο της και επανεκκίνηση του ερπυσμού.

Η οριακή τάση που προκύπτει από τα SSRTs είναι συχνά χαμηλότερη από αυτή που προκύπτει από τις στατικές δοκιμές. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται με την ύπαρξη μη διαδιδόμενων ρωγμών, καθώς οι ρωγμές που θα σταματούσαν να διαδίδονται στα πειράματα σταθερού φορτίου ή σταθερής παραμόρφωσης, στα SSRTs μπορούν να εξελιχθούν αν διατηρηθεί ένας κατάλληλος ρυθμός παραμόρφωσης.

Εκτίμηση αποτελεσμάτων

Τα SSRTs ολοκληρώνονται πάντα με θραύση του δοκιμίου (εκτός από περιπτώσεις που ο σκοπός της δοκιμής επιβάλλει τη διακοπή της διαδικασίας μετά από προκαθορισμένο χρονικό διάστημα), η οποία προκαλείται από SCC ή από κάποιον άλλο μηχανισμό όλκιμης ή ψαθυρής θραύσης. Ο τρόπος θραύσης γίνεται τις περισσότερες φορές διακριτός έπειτα από προσεκτική εξέταση του δοκιμίου με οπτική παρατήρηση ή παρατήρηση σε στερεοσκόπιο ή ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, Scanning Electron Microscope).

Για τα περισσότερα μεταλλικά υλικά, που παρουσιάζουν κάποια ολκιμότητα σε αδρανές περιβάλλον υπό κανονικές συνθήκες φόρτισης, η παρουσία της SCC συνοδεύεται από εμφανώς μειωμένη ολκιμότητα του δοκιμίου. Επιπλέον, κάποια μεταλλικά υλικά (κυρίως οι χάλυβες) εμφανίζουν δευτερεύουσες ρωγματώσεις στην περιοχή της επιφάνειας θραύσης. Αντίθετα, σε περίπτωση που η θραύση δεν οφείλεται στην SCC, η περιοχή της θραύσης έχει την τυπική μορφή cup-and-cone (Εικόνα 4.29). Τα παραπάνω χαρακτηριστικά μπορούν να γίνουν αντιληπτά με οπτική παρατήρηση, ωστόσο συνηθίζεται να πραγματοποιείται και μεταλλογραφική εξέταση ή παρατήρηση στο SEM, προκειμένου να επιβεβαιωθούν τα αρχικά συμπεράσματα. Η μέθοδος αυτή έχει αποδειχθεί χρήσιμη για τον εντοπισμό της SCC, όμως δεν παρέχει κάποιου είδους ποσοτική εκτίμηση της έκτασης και της έντασης του φαινομένου.

121



Εικόνα 4.29 Τυπική μορφή cup and cone όλκιμου δοκιμίου μετά της θραύση [32]

Η επίδραση της SCC αντικατοπτρίζεται επίσης στις καμπύλες τάσηςπαραμόρφωσης, οι οποίες καταγράφονται κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Η σύγκριση των καμπυλών με τις καμπύλες που προκύπτουν από όμοια πειράματα σε αδρανές για το υλικό περιβάλλον, συνήθως αποκαλύπτει την ύπαρξη ευαισθησίας σε SCC. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.30, σε περίπτωση προσβολής του δοκιμίου από SCC, υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην επιμήκυνση μέχρι τη θραύση και στη μέγιστη αντοχή του δοκιμίου.



Εικόνα 4.30 Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για κράμα μαγνησίου ΑΖ31. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε αδρανές περιβάλλον (αέρας) και σε διαβρωτικό περιβάλλον (σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D1384), υπό αρχικό ρυθμό παραμόρφωσης ίσο με 10⁻⁸ s⁻¹. [22]

Τα κυριότερα μεγέθη που επηρεάζονται σε περίπτωση ύπαρξης SCC είναι τα παρακάτω:

- Ποσοστιαία επιμήκυνση μέχρι τη θραύση
- Μέγιστη τάση (σ_{max})
- Μείωση επιφάνειας διατομής
- Χρόνος μέχρι τη θραύση T_F
- Εμβαδόν της επιφάνειας που ορίζεται από την καμπύλη σ-ε.

Η ποσοστιαία επιμήκυνση και η μείωση της επιφάνειας διατομής περιγράφουν την ολκιμότητα του δοκιμίου, επομένως αποτελούν σημαντικές παραμέτρους για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων, καθώς η παρουσία SCC συνδέεται με μείωση της ολκιμότητας. Εφόσον στα SSRTs το δοκίμιο επιμηκύνεται με σταθερό ρυθμό, η τελική του επιμήκυνση συνδέεται με το χρόνο μέχρι την τελική αστοχία (T_F), συνεπώς ο T_F αποτελεί επίσης σημαντική ένδειξη για την ευαισθησία σε SCC. Το εμβαδόν που ορίζεται από την καμπύλη σ-ε αντιπροσωπεύει την ενέργεια θραύσης του δοκιμίου. Υψηλές τιμές της ενέργειας θραύσης υποδηλώνουν μικρή ή αμελητέα ευπάθεια σε SCC. Τέλος, η έναρξη και η διάδοση της ρωγμάτωσης πραγματοποιείται σε τάσεις χαμηλότερες του ορίου διαρροής. Επομένως ψαθυρή θραύση λόγω SCC θα συνοδεύεται και από χαμηλότερη μέγιστη αντοχή του δοκιμίου.

Η ποσοτικοποίηση της ευαισθησίας σε SCC επιτυγχάνεται με τη σύγκριση των παραπάνω μεγεθών με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από πειράματα σε αδρανές περιβάλλον. Το πρότυπο ISO 7539-7 υποδεικνύει τη σχέση

τιμή μεγέθους από δοκίμιο στο υπό μελέτη περιβάλλον τιμή μεγέθους από δοκίμιο σε αδρανές περιβάλλον

ως δείκτη ευπάθειας σε SCC, ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε μέγεθος μετριέται κατά την πειραματική διαδικασία ή υπολογίζεται στη συνέχεια από αποτελέσματα του πειράματος. Αυξανόμενη απόκλιση του παραπάνω λόγου από τη μονάδα φανερώνει αυξανόμενη ευαισθησία σε SCC.

Να σημειωθεί ότι για τη διεξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, θα πρέπει οι συνθήκες φόρτισης (ρυθμός παραμόρφωσης) των δοκιμών στο υπό μελέτη και στο

αδρανές περιβάλλον να είναι όμοιες, ενώ τα δοκίμια θα πρέπει να προέρχονται από το ίδιο αρχικό προϊόν και να έχουν υποβληθεί στις ίδιες μηχανικές και θερμικές κατεργασίες. Επίσης, σε περίπτωση που παρατηρηθεί κάποια υποβάθμιση μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων στο υπό μελέτη περιβάλλον, επιβάλλεται η σύγκρισή τους με αντίστοιχα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες, για το ίδιο χρονικό διάστημα, χωρίς όμως ταυτόχρονη επιβολή φόρτισης. Η διαδικασία αυτή ενδείκνυται προκειμένου να εξακριβωθεί ότι η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων προέρχεται από SCC και όχι από κάποια άλλη μορφή διάβρωσης, γιατί κάποιες φορές παρατηρούνται στα δοκίμια μειωμένες μηχανικές ιδιότητες που οφείλονται σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι υπόκεινται σε SCC. Τέλος, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πιθανή μείωση της διατομής των δοκιμίων, σε περίπτωση που η έκθεση στο διαβρωτικό διάλυμα διαρκεί μεγάλα χρονικά διαστήματα και μπορεί να επιφέρει ομοιόμορφη διάβρωση.

Μέσω των SSRTs υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της οριακής τάσης (σ_{th}), δηλαδή της υψηλότερης τάσης για την οποία το υπό μελέτη σύστημα παραμένει απαθές σε SCC. Ωστόσο, ο προσδιορισμός της οριακής τάσης στις δυναμικές δοκιμές είναι πολύ πιο πολύπλοκος σε σχέση με τις στατικές, διότι το δοκίμιο υπόκειται σε συνεχώς μεταβαλλόμενη τάση κατά τη διάρκεια του πειράματος. Πλέον έχουν αναπτυχθεί διαδικασίες προσδιορισμού της σ_{th}, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στα πρότυπα. Για παράδειγμα, στο πρότυπο ISO 7539-7 παρατίθεται μια προτεινόμενη σειρά πειραμάτων, η οποία οδηγεί στον προσδιορισμό της σ_{th} για κάποιο σύστημα υλικού-περιβάλλοντος, ακολουθώντας τα εξής βήματα:

- Διεξαγωγή SSRT στο πρώτο δοκίμιο με κάποιο ρυθμό παραμόρφωσης, ο οποίος έχει επιβεβαιωθεί ότι οδηγεί το συγκεκριμένο σύστημα σε SCC.
- Προσδιορισμός της μέσης ταχύτητας ρωγμάτωσης λόγω διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση.
- Υπολογισμός του ελάχιστου χρόνου μέχρι την εμφάνιση της πρώτης ανιχνεύσιμης ρωγμής, ο οποίος προκύπτει από τη διαίρεση του ελάχιστου μήκους ρωγμής που παρατηρήθηκε με τη μέση ταχύτητα ρωγμάτωσης.

- Φόρτιση του δεύτερου δοκιμίου σε σχετικά υψηλό ρυθμό παραμόρφωσης μέχρι ένα προκαθορισμένο επίπεδο τάσης (π.χ. 50% της μέγιστης τάσης που παρατηρήθηκε στο πρώτο πείραμα) σε αδρανές περιβάλλον.
- 5. Διατήρηση σταθερής μετατόπισης στο προαναφερθέν επίπεδο τάσης, έως ότου κάθε υπάρχουσα χρονικά εξαρτώμενη παραμόρφωση στο δοκίμιο μειωθεί τόσο ώστε να είναι μικρότερη από τον ρυθμό παραμόρφωσης που πρόκειται να εφαρμοστεί στη συνέχεια. Σε κάποια συστήματα, το στάδιο μπορεί να διαρκέσει μέρες.
- 6. Διεξαγωγή SSRT στο δεύτερο δοκίμιο υπό τον ίδιο ρυθμό παραμόρφωσης με το πρώτο. Η πειραματική διαδικασία διακόπτεται μετά την παρέλευση του ελάχιστου χρονικού διαστήματος (Βήμα 3) μέχρι την πρώτη ανιχνεύσιμη ρωγμή.
- Μεταλλογραφική εξέταση και παρατήρηση του δοκιμίου για τον εντοπισμό ρωγμών (αν υπάρχουν) και υπολογισμός της μέσης ταχύτητας ρωγμάτωσης.
- 8. Επανάληψη της διαδικασίας (Βήματα 4-7) για διαφορετικό αρχικό επίπεδο τάσης κάθε φορά, μέχρι τον προσδιορισμό της οριακής τάσης, κάτω από την οποία δεν παρατηρείται ρωγμάτωση, ενώ πάνω από αυτή, η μέση ταχύτητα της ρωγμάτωσης είναι σημαντική.

Στα μη ρωγματωμένα δοκίμια και στα δοκίμια χωρίς εγκοπή, η μέση ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής μπορεί να υπολογιστεί εύκολα, γνωρίζοντας το χρόνο διάρκειας της δοκιμής και μετρώντας το μήκος της μεγαλύτερης ρωγμής. Το τελευταίο μπορεί να μετρηθεί είτε στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου, είτε σε κάποιες τομές, αν η δοκιμή διακόπηκε πριν την τελική αστοχία του δοκιμίου. Οι ταχύτητες διάδοσης που προκύπτουν μέσω αυτής της διαδικασίας, συνήθως είναι υποεκτιμημένες σε σχέση με τις πραγματικές. Αυτό συμβαίνει διότι η χρονική στιγμή έναρξης της ρωγμάτωσης δεν είναι γνωστή και θεωρείται ότι η εκκίνηση της πρώτης ρωγμής πραγματοποιείται αμέσως μετά την έναρξη του πειράματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η διαδικασία αυτή προσφέρει μια ικανοποιητική εκτίμηση για την ταχύτητα διάδοσης, παρόλο που δεν είναι απόλυτα ακριβής. Στα προ-ρωγματωμένα δοκίμια υπάρχουν άλλες μέθοδοι για την παρακολούθηση της ανάπτυξης της ρωγμής, οι οποίες επιτρέπουν τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης με ακρίβεια. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος είναι μέσω της Μεθόδου Πτώσης Δυναμικού, κατά την οποία παρακολουθείται η αντίσταση του μη ρωγματωμένου τμήματος του δοκιμίου καθώς η ρωγμή διαδίδεται. Εφόσον μετριέται η μεταβολή της αντίστασης, μπορεί στη συνέχεια να συσχετιστεί με το μήκος και την ταχύτητα της ρωγμής, όταν οι επιδράσεις άλλων παραγόντων είναι αμελητέες. Επιπλέον, μέσω αυτής της τεχνικής είναι εφικτή μια πιο άμεση μέθοδος προσδιορισμού της οριακής τάσης.

4.5.2 Δοκιμή βηματικής φόρτισης^[22]

Η δοκιμή βηματικής φόρτισης (Breaking Load Test) αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο δοκιμών SCC, που περιλαμβάνει μη ρωγματωμένα δοκίμια, τα οποία αυτοφορτίζονται ή φορτίζονται σε ένα πλαίσιο που προκαλεί ιδία-φόρτιση, χωρίς ταυτόχρονη έκθεση στο υπό μελέτη περιβάλλον. Στη συνέχεια, το δοκίμιο εκτίθεται στο διαβρωτικό περιβάλλον και ακολουθούν δοκιμές παραμένουσας στατικής αντοχής (residual static strength tests), προκειμένου να προσδιοριστεί αν και κατά πόσο έχει υποστεί διάβρωση με μηχανική καταπόνηση. Η μέθοδος αυτή δεν έχει τυποποιηθεί μέχρι στιγμής.

4.5.3 Δοκιμή γραμμικά αυξανόμενης τάσης^[22]

Η Δοκιμή Γραμμικά Αυξανόμενης Τάσης (Linearly Increasing Stress Test- LIST) αποτελεί μια καινοτόμα εξέλιξη της SSRT. Η διαφορά μεταξύ των δύο έγκειται στην παράμετρο ελέγχου της κάθε δοκιμής, δηλαδή, ενώ στα SSRTs επιβάλλεται στο δοκίμιο σταθερά αυξανόμενη μετατόπιση, στα LISTs επιβάλλεται σταθερά αυξανόμενο φορτίο. Σε αυτή τη μέθοδο τα δοκίμια υποβάλλονται σε εφελκυσμό κατά προτίμηση και όχι σε κάμψη, όπως συμβαίνει συχνά στα SSRTs. Μια ακόμη διαφορά των LISTs έναντι των SSRTs, είναι το ότι τα πρώτα εφαρμόζονται μόνο σε μη ρωγματωμένα δοκίμια.

Δεδομένου ότι το συνεχώς αυξανόμενο φορτίο σημαίνει συνεχώς αυξανόμενη παραμόρφωση, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων ταυτίζονται μέχρι τη χρονική στιγμή έναρξης της ρωγμάτωσης. Μετά την έναρξη της ρωγμάτωσης, οι δύο μέθοδοι αποκλίνουν μέχρι την τελική θραύση του δοκιμίου. Στα LISTs η θραύση επέρχεται όταν η ρωγμή φτάσει το κρίσιμο μέγεθος, ενώ στα SSRTs η θραύση πραγματοποιείται συχνά αρκετά αργότερα, καθώς μπορεί να υπάρξει σημαντική επιμήκυνση του δοκιμίου καθώς οι ρωγμές ανοίγουν. Όπως είναι προφανές, η διάρκεια των LISTs είναι αρκετά μικρότερη από αυτή των SSRTs.

Σε σύγκριση με τα SSRTs, οι δοκιμές αυτές θεωρήθηκαν πιο κατάλληλες για τον προσδιορισμό της οριακής τάσης, διότι είναι εφικτός ο άμεσος υπολογισμός της μέσω της Τεχνικής Πτώσης Ηλεκτρικού Δυναμικού (Electrical Potential Drop Technique?). Κατά τη διάρκεια του πειράματος, καταγράφεται η πτώση δυναμικού σε συνάρτηση με την ονομαστική τάση. Ο προσδιορισμός της οριακής τάσης σ_{th} πραγματοποιείται εύκολα από την καμπύλη αυτή, καθώς, όταν η τάση φτάσει την οριακή τιμή για SCC, η μείωση του δυναμικού αρχίζει να αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό. Στην πορεία αποδείχθηκε ότι η ίδια τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό της σ_{th} από τα SSRTs.

4.5.4 Δοκιμές Αυξανόμενου Φορτίου και Αυξανόμενης Μετατόπισης σε προ-ρωγματωμένα δοκίμια^[22]

Οι δοκιμές αυξανόμενου φορτίου και αυξανόμενης μετατόπισης χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της SCC σε προ-ρωγματωμένα δοκίμια και περιλαμβάνουν μια σκόπιμη αύξηση του συντελεστή έντασης τάσης στο άκρο της ρωγμής με ταυτόχρονη έκθεση στο υπό μελέτη περιβάλλον.

• Δοκιμή αυξανόμενου φορτίου (Rising Load Test)

Η πρώτη μέθοδος αυτής της κατηγορίας δοκιμών που αναπτύχθηκε, ήταν η δοκιμή αυξανόμενου φορτίου, στην οποία η αύξηση του συντελεστή Κ₁ επιτυγχάνεται με την εφαρμογή σταθερά αυξανόμενου φορτίου. Ουσιαστικά, ο τρόπος φόρτισης του δοκιμίου είναι όμοιος με αυτόν που εφαρμόζεται στα LISTs για μη ρωγματωμένα δοκίμια. Αντίστοιχα με τα LISTs, τα πειράματα αυξανόμενου φορτίου είναι τα καταλληλότερα για τον προσδιορισμό του οριακού συντελεστή έντασης τάσης Κ_{ISCC}. Μια παραλλαγή αυτής της μεθόδου είναι η εφαρμογή βηματικής φόρτισης, όπου το φορτίο αυξάνεται κατά συγκεκριμένο «βήμα» ανά μικρά σταθερά χρονικά διαστήματα.

Δοκιμή αυξανόμενης μετατόπισης (Displacement-Controlled Rising Load Test)

Οι δοκιμές αυτές αποτελούν μια διαφορετική προσέγγιση της ίδιας μεθόδου. Κατά την πειραματική διαδικασία, επιβάλλεται στο δοκίμιο (το οποίο παράλληλα εμβαπτίζεται στο υπό μελέτη διαβρωτικό διάλυμα) σταθερά αυξανόμενη μετατόπιση, όπως ακριβώς συμβαίνει και στα μη ρωγματωμένα δοκίμια κατά τη διάρκεια των SSRTs. Ενδείκνυται για τη μελέτη των μηχανισμών έναρξης, διάδοσης και θραύσης λόγω διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση.

Όπως στα μη ρωγματωμένα δοκίμια, έτσι και στα προ-ρωγματωμένα ο ρυθμός μεταβολής του φορτίου (ή της μετατόπισης) είναι η παράμετρος κλειδί για την έναρξη και τη διάδοση της SCC, εφόσον κάθε σύστημα υλικού-περιβάλλοντος παρουσιάζει ευπάθεια για διαφορετικό εύρος ρυθμών φόρτισης. Συνήθως ο ρυθμός πρέπει να είναι επαρκώς χαμηλός, ώστε να προλάβουν να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες για την SCC ηλεκτροχημικές διεργασίες και να αποφευχθεί η αμιγής μηχανική θραύση. Συνήθως χρησιμοποιούνται ρυθμοί μετατόπισης 1-10 μm/h. Παρόλο που οι τιμές αυτές φαίνεται να είναι πολύ χαμηλοί, οι μέθοδοι αυξανόμενου φορτίου και αυξανόμενης μετατόπισης ανήκουν στην κατηγορία των επιταχυνόμενων δοκιμών και παρέχουν τις πληροφορίες που απαιτούνται σε σχετικά λογικά χρονικά διαστήματα.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται μέσω του K_{ISCC}, ο οποίος υπολογίζεται έπειτα από διεξαγωγή πειραμάτων σε κάποιο αριθμό δοκιμίων. Σε καθένα από τα πειράματα αυτά, προσδιορίζεται η στιγμή της έναρξης της ρωγμής με τη χρήση μιας έμμεσης τεχνικής μέτρησης μήκους ρωγμής. Προκειμένου, να περιοριστεί η συνολική διάρκεια των δοκιμών (ώστε να έχει νόημα η επιταχυνόμενη φύση της δυναμικής φόρτισης) θα πρέπει ο αριθμός των δοκιμών να μειωθεί στο ελάχιστο. Αυτό μπορεί να συμβεί με την εκτίμηση του ρυθμού φόρτισης ή μετατόπισης, ο οποίος αντιστοιχεί στις χαμηλότερες τιμές της σιγμοειδούς καμπύλης, μέσω του οποίου υπολογίζεται ο K_{ISCC}.

128

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΛΕΤΗ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΒΡΑΔΕΙΑΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΣΤΟΝ ΧΑΛΥΒΑ ΑΗ36

5.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκαν οι βασικότερες μέθοδοι δοκιμών διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση (SCC) και όπως αναφέρθηκε, η πιο διαδεδομένη από αυτές είναι η μέθοδος βραδείας καταπόνησης (SSRT). Κρίθηκε λοιπόν χρήσιμο, να πραγματοποιηθεί μια μελέτη σκοπιμότητας, με στόχο την εξοικείωση με τη μέθοδο SSRT, τη διερεύνηση κάθε σταδίου της διαδικασίας (προετοιμασία δοκιμίων, επιλογή παραμέτρων πειράματος, δόμηση πειραματικής διάταξης, διεξαγωγή πειράματος, ερμηνεία αποτελεσμάτων) και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ευκολία της πρακτικής εφαρμογής της και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Για το σκοπό αυτό διεξήχθη ένας κύκλος πειραμάτων, ο οποίος θα περιγραφεί αναλυτικά στο παρόν κεφάλαιο.

5.2 Παράμετροι πειράματος

5.2.1 Υλικό - Χάλυβας ΑΗ36^[19]

Το υλικό που μελετήθηκε για διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (SCC), είναι ο χάλυβας AH36, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των ναυπηγικών χαλύβων υψηλής αντοχής (High Strength Steel, HSS) και χρησιμοποιείται ευρέως στη ναυπηγική βιομηχανία. Η κωδική ονομασία του προέρχεται από τη Διεθνή Ομοσπονδία Νηογνωμόνων (International Association of Classification Societies, IACS) και είναι η επικρατέστερη παγκοσμίως, όμως κάποιες χώρες χρησιμοποιούν διαφορετική ονοματολογία, συνεπώς μπορεί κανείς να τον συναντήσει με τον κωδικό K11852 στις Η.Π.Α., A36 στη Ρωσία, 1.0565 στη Γερμανία κλπ.

Μηχανικές ιδιότητες

Το όριο διαρροής του ΑΗ36 είναι περίπου 355 MPa, η μέγιστη τάση σε εφελκυσμό κυμαίνεται μεταξύ 490 και 630 MPa (ανάλογα με την ακριβή χημική σύσταση, τη μέθοδο παρασκευής και τις κατεργασίες στις οποίες υποβάλλεται), ενώ η επιμήκυνση μέχρι τη θραύση φτάνει το 21%. Το μέτρο ελαστικότητας του είναι κοντά στα 210 GPa, ενώ η σκληρότητά του είναι της τάξης των 180 Vickers (συνήθως δεν ξεπερνά τα 183 Vickers). Τέλος, η δυσθραυστότητά του, δηλαδή η ενέργεια που απορροφά μέχρι τη θραύση, σύμφωνα με δοκιμές Charpy είναι 34,4 J, μετρούμενη σε θερμοκρασία 0°C.

Χημική σύσταση - μικροδομή

Η χημική σύσταση του χάλυβα ΑΗ36 παρατίθεται στον Πίνακα 5.1. Η μικροδομή του συνίσταται από εναλλασσόμενες ζώνες φερρίτη και περλίτη, σε αναλογία περίπου 75-25, ενώ το μέσο μέγεθος των κόκκων του είναι 14,4 μm.

Πίνακας 5.1

Χημική σύσταση του χάλυβα ΑΗ36

Grade	C _{max}	Si _{msx}	Mn	P _{max}	S _{max}	AI_{min}	Ti _{max}	Cu _{max}	\mathbf{Cr}_{max}	Ni _{max}	Mo _{max}	Nb	V
AH36	0.18	0.50	0.90- 1.60	0.035	0.035	0.015	0.02	0.35	0.20	0.40	0.08	0.02	0.05

Λοιπά στοιχεία

Για πάχη ελασμάτων έως και 12,5 mm, ο χάλυβας ΑΗ36 συναντάται ως ημικαθησυχασμένος, ενώ για πάχη μεγαλύτερα από 12,5 mm είναι προτιμότερη η ποιότητα του πλήρως καθησυχασμένου.

Η ποσότητα του ισοδύναμου άνθρακα (Equivalent Carbon Content) του ΑΗ36 δίνεται από τη σχέση:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$
(1)

Λόγω του μεγάλου εύρους της περιεκτικότητας σε Mn, η τιμή του ισοδύναμου άνθρακα για τον AH36 κυμαίνεται μεταξύ 0,38 – 0,57, όμως συνήθως στο εμπόριο κυκλοφορεί AH36 με C_{eq} μέχρι 0,40.

Μεταλλογραφία

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων (Slow Strain Rate Tests, SSRTs), χρησιμοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας πλάκα από χάλυβα AH36, πάχους 10mm. Από το εν λόγω υλικό, κόπηκαν δοκίμια μικρών διαστάσεων, τα οποία αφού εγκιβωτίστηκαν σε εποξική ρητίνη, λειάνθηκαν χαρτιά λείανσης καρβιδίου του πυριτίου (SiC) κοκκομετρίας: 80, 120, 220, 500, 800, 1200, 2000 και 4000. Στη συνέχεια στιλβώθηκαν με αλούμινα AP-A Suspension 1μm και 0,1μm και πραγματοποιήθηκε χημική προσβολή με 4% Nital, ώστε να υποβληθούν σε μεταλλογραφία . Στις Εικόνες 5.1 και 5.2 βλέπουμε τη μικροδομή του υλικού ως αποτέλεσμα της μεταλλογραφίας, σε δύο μεγεθύνσεις (x200 και x500), όπου παρατηρούμε τις εναλλασσόμενες ζώνες φερρίτη (λευκό χρώμα) και περλίτη (μαύρο χρώμα), καθώς και μια τάση για ευθυγράμμιση των κόκκων η οποία οφείλεται στη διαδικασία της έλασης στην οποία υποβλήθηκε η πλάκα. Τα ποσοστά των φάσεων του φερρίτη και του περλίτη μετρήθηκαν στα επίπεδα x-z και x-y και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.



Εικόνα 5.1 Μικροδομή του χάλυβα AH36



Εικόνα 5.2 Μικροδομή του χάλυβα AH36

Πίνακας 5.2

Ποσοστά φάσεων περλίτη και φερρίτη στον χάλυβα ΑΗ36

Φάση	Επίπεδο x-y (%)	Επίπεδο x-z (%)	Μέση τιμή (%)
Φερρίτης	68,5	70,3	69,4
Περλίτης	31,5	29,7	30,6

Δοκίμια

Από την πλάκα που προμηθευτήκαμε, διαστάσεων 300mm x 250mm x 10mm, αποσπάστηκαν έξι (6) δοκίμια dog-bone μορφής για τα SSRTs. Οι διαστάσεις των δοκιμίων παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.3 και επιλέχθηκαν με βάση το πρότυπο ISO 6892 – 1: 2016, ενώ η κοπή τους πραγματοποιήθηκε σε μηχανουργείο εκτός του εργαστηρίου χρησιμοποιώντας τεχνολογία water-jet (υδροκοπή).

Στις διαστάσεις των δοκιμίων που προέκυψαν από την κοπή, όπως είναι λογικό, υπήρχαν πολύ μικρές αποκλίσεις σε σχέση με τις ζητούμενες. Το πραγματικό πλάτος και το πάχος των δοκιμίων μετρήθηκε με παχύμετρο σε τρία σημεία για καθένα από αυτά, στη συνέχεια υπολογίστηκε η μέση τιμή τους καθώς και η ακριβής επιφάνεια διατομής (Πίνακας 5.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε αργότερα στους υπολογισμούς αντοχής.



Εικόνα 5.3 Φωτογραφία και σχέδιο διαστάσεων δοκιμίου SSRT

Πίνακας 5.3 Διαστάσεις δοκιμίων SSRT

Δοκίμιο	Πλάτος b (mm)	Πάχος t (mm)	Επιφάνεια Διατομής (mm²)
1	12.230	10.020	122.5446
2	12.167	9.930	120.8183
3	12.267	9.980	122.4247
4	12.267	9.980	122.4247
5	12.113	9.953	120.5610
6	12.270	10.053	123.3500

5.2.2 Περιβάλλον έκθεσης

Εφόσον το περιβάλλον λειτουργίας ενός ναυπηγικού χάλυβα είναι κυρίως το θαλάσσιο περιβάλλον, το διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε έπρεπε να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικό του θαλασσινού νερού.

Θαλασσινό νερό ^{[18],[20],[21]}

Γενικά το θαλασσινό νερό περιέχει σχεδόν όλα τα χημικά στοιχεία που έχουν βρεθεί στη γη, με κυριότερα το χλώριο (Cl), το νάτριο (Na), το θείο (S), το μαγνήσιο (Mg), το ασβέστιο (Ca) και το κάλιο (K) . Η μέση αλατότητα του θαλασσινού νερού (δηλαδή η ποσότητα αλάτων που περιέχεται σε 1kg θαλασσινού νερού) είναι περίπου 3,5%, όμως εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και συνεπώς μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή, ανάλογα με το ρυθμό εξάτμισης λόγω ηλιακής ακτινοβολίας και την παρουσία γλυκού νερού στην περιοχή (πχ. περιοχές κοντά σε εκβολές ποταμών). Η αλατότητα είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που καθιστούν διαβρωτικό το θαλασσινό νερό σε σύγκριση με το γλυκό, κυρίως επειδή συνδέεται άμεσα με τη συγκέντρωση των ιόντων. Μελέτες έχουν δείξει ότι διάλυμα NaCl με αλατότητα 3,5% οδηγεί σε πιο αυξημένο ρυθμό διάβρωσης των χαλύβων, σε σχέση με διαλύματα NaCl μικρότερης ή μεγαλύτερης αλατότητας, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της Εικόνας 5.4.



Εικόνα 5.4 Ο ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει της περιεκτικότητας του διαλύματος σε χλωριούχο νάτριο (NaCl)[21]

Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται από το γεγονός ότι με αυτή τη σύσταση επιτυγχάνεται η περιεκτικότητα σε χλωριόντα που οδηγεί στην υψηλότερη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, επομένως και στο χειρότερο συνδυασμό από άποψη διαβρωτικότητας του διαλύματος.

Χημική σύσταση περιβάλλοντος έκθεσης

Με βάση τα προηγούμενα, για την πειραματική διαδικασία επιλέχθηκε διάλυμα 3.5% NaCl, δεδομένου ότι η συγκέντρωση NaCl στο θαλασσινό νερό υπερισχύει κατά πολύ της συγκέντρωσης των υπόλοιπων αλάτων. Επιπλέον, η διάβρωση του χάλυβα είναι εντονότερη για περιεκτικότητα 3,5% σε NaCl, γεγονός που καθιστά το διάλυμα αυτό το δυσμενέστερο διάλυμα από άποψη διάβρωσης. Το πειραματικό διάλυμα αποτελούταν από NaCl και απιονισμένο νερό, ώστε να αποφευχθεί η συμπερίληψη άλλων αλάτων ή ανεπιθύμητων ενώσεων και σωμάτων.

Θερμοκρασία

Για τη θερμοκρασία του διαλύματος δεν πραγματοποιήθηκε κάποια προσπάθεια επίτευξης συγκεκριμένης τιμής, αλλά διαμορφώθηκε από το

περιβάλλον του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, η θερμοκρασία του διαλύματος μετρήθηκε από 22-28°C. Τέτοιες τιμές συναντώνται στις τροπικές περιοχές του Ατλαντικού και του Ειρηνικού Ωκεανού καθ' όλη της διάρκεια του έτους, και αποτελούν σχετικά δυσμενείς συνθήκες θερμοκρασίας, αφού, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, αυξημένη θερμοκρασία σημαίνει εντονότερος ρυθμός διάβρωσης.

Περιεκτικότητα σε οξυγόνο

Σε αντίθεση με κάποια πρότυπα για δοκιμές SCC, τα οποία υποδεικνύουν απομάκρυνση του οξυγόνου από το διάλυμα με διάφορα μέσα, εμείς δεν πραγματοποιήσαμε τέτοιου είδους διαδικασία, εφόσον στην πραγματικότητα το θαλασσινό νερό αποτελεί ένα ανοιχτό σύστημα.

рΗ

Το pH του διαλύματος στις συνθήκες που περιγράφτηκαν παραπάνω, μετρήθηκε ως 7.08.

Σημείωση

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα πρότυπα που προδιαγράφουν τις δοκιμές SCC περιλαμβάνουν απαιτήσεις που αφορούν την εξασφάλιση σταθερών συνθηκών (θερμοκρασία, πίεση, pH, κλπ.) και τη στεγανότητα του δοχείου σε περίπτωση δραστικών ουσιών (οξέα, βάσεις, καυστικά διαλύματα κλπ.). Στο διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα μελέτη (3,5%κ.β.NaCl σε θερμοκρασία περιβάλλοντος), δεν παρατηρήθηκαν διαφορές κατά την εξέλιξη της πειραματικής διαδικασίας, επομένως η πειραματική διάταξη που σχεδιάστηκε ήταν σχετικά απλή (βλ. Παράγραφο 5.3). Ωστόσο, σε περιπτώσεις χρήσης δραστικών χημικών ουσιών ή διαλυμάτων υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται πιο πολύπλοκες πειραματικές διατάξεις με στεγανά και κατάλληλα διαμορφωμένα δοχεία και με κατάλληλο εξοπλισμό για την εξασφάλιση της σταθερότητας των συνθηκών και της ασφάλειας.

5.2.3 Ρυθμός παραμόρφωσης

Το πρότυπο ISO 7539-7, υποδεικνύει εύρος ρυθμών παραμόρφωσης 10⁻³-10⁻⁷ 1/s. Επομένως επιλέχθηκε ρυθμός επιμήκυνσης των δοκιμίων δl=0,062mm/s, ο οποίος αντιστοιχεί σε περίπου 2x10⁻⁷ 1/s. Το σκεπτικό για την επιλογή του ρυθμού παραμόρφωσης ήταν η επίτευξη όσο το δυνατόν χαμηλότερου ρυθμού παραμόρφωσης, ώστε να δοθεί όσο γίνεται περισσότερος χρόνος για τη δράση των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Ρυθμός χαμηλότερος από 2x10⁻⁷ 1/s κρίθηκε ότι δεν μπορούσε να επιτευχθεί με ασφάλεια, δεδομένου ότι έπρεπε να εξασφαλιστεί η σταθερότητα λειτουργίας της μηχανής εφελκυσμού.

5.3 Πειραματική διάταξη

Κελί

Για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε κελί από Plexiglas μέσα στο οποίο διοχετεύτηκε το διαβρωτικό μέσο. Ο σχεδιασμός του κελιού (Εικόνα 5.5) πραγματοποιήθηκε με βάση τις διαστάσεις των δοκιμίων εφελκυσμού, ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτησή του μεταξύ των δύο κεφαλών της μηχανής. Οι ζώνες στήριξης του δοκιμίου στις αρπάγες της μηχανής (grip zones) παρέμειναν εκτός διαλύματος, όπως υποδεικνύει το πρότυπο ISO 7539. Το κελί εφαρμόστηκε και στηρίχθηκε πάνω σε κάθε δοκίμιο, επομένως στο πάνω μέρος του ήταν ανοιχτό ώστε να επιτρέπεται η επιμήκυνση του δοκιμίου κατά την εξέλιξη του πειράματος, ενώ στον πυθμένα υπήρχε κατάλληλα διαμορφωμένη οπή προκειμένου να είναι εφικτή η διέλευση του δοκιμίου. Η εφαρμογή, η στήριξη του δοκιμίου στο κελί και η απαραίτητη υδατοστεγανότητα στο κάτω μέρος εξασφαλίστηκαν με τη χρήση κατάλληλου σφραγιστικού υλικού (Sikaflex-291i) στην περιοχή της προαναφερθείσας οπής (Εικόνα 5.6). Το υλικό αυτό αποτελείται κυρίως από πολυουρεθάνη, η οποία έχει την ιδιότητα να ωριμάζει δημιουργώντας ένα ανθεκτικό ελαστομερές, κατάλληλο για ναυτιλιακές εφαρμογές.

Μηχανή εφελκυσμού

Οι πειραματικές δοκιμές (SSRTs) πραγματοποιήθηκαν στο Τμήμα Μηχανικών Δοκιμών του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, όπου χρησιμοποιήθηκε η υδραυλική μηχανή δοκιμών MTS 100kN. Η διάταξη, όπως ακριβώς στήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.7.



Εικόνα 5.5 Σχέδιο και διαστάσεις κελιού α) Κάτοψη (πάνω), β) όψη (κάτω)



Εικόνα 5.6 Εφαρμογή δοκιμίου στο κελί με τη χρήση Sikaflex-291i.



Εικόνα 5.7 Πειραματική διάταξη

5.4 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Η διεξαγωγή των δοκιμών με τη μέθοδο SSRT πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του προτύπου ISO-7539 (2016). Ο κύκλος των πειραμάτων μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες:

- SSRT στον αέρα
- SSRT σε διάλυμα 3.5%NaCl
- SSRT μετά από προηγούμενη έκθεση των δοκιμίων για προκαθορισμένο χρονικό διάστημα σε διάλυμα 3.5%NaCl

Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν έξι (6) δοκίμια, καθένα από τα οποία χρησιμοποιήθηκε για διαφορετικό πείραμα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4
Χρήση δοκιμίων

Δοκίμιο	Χρήση
1	SSRT στον αέρα
2	SSRT στον αέρα
3	SSRT σε 3.5%NaCl
4	SSRT σε 3.5%NaCl (προηγούμενη έκθεση: 6 ημέρες)
5	SSRT σε 3.5%NaCl (προηγούμενη έκθεση: 12 ημέρες)
6	SSRT σε 3.5%NaCl (προηγούμενη έκθεση: 18 ημέρες)

5.4.1 Εκτέλεση SSRT στον αέρα

Σύμφωνα με τις οδηγίες του προτύπου, θα πρέπει να υπάρχουν δεδομένα για τις ιδιότητες του υλικού σε αδρανές περιβάλλον, ώστε να μπορούν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τα πειράματα με διαβρωτικό περιβάλλον στη συνέχεια. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν αρχικά δύο SSRT στον αέρα (Δοκίμια 1,2), υπό τον ίδιο ρυθμό παραμόρφωσης (Εικόνα 5.8). Παρόλο που ο ατμοσφαιρικός αέρα δεν αποτελεί απόλυτα αδρανές περιβάλλον για τους χάλυβες, οι μηχανικές ιδιότητες δεν επρόκειτο να επηρεαστούν, αφού τα δοκίμια διέθεταν επίστρωση ασταριού (primer coating), η οποία τα προστατεύει έναντι της οξείδωσης.

Ο ρυθμός επιμήκυνσης, όπως είπαμε και προηγουμένως, ήταν 0,062mm/s. Δεν υπήρξε κάποια ιδιαίτερη προετοιμασία του δοκιμίου πριν την εκτέλεση του πειράματος. Κατά την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας τοποθετήθηκε επιμηκυνσιόμετρο (strain gauge) πάνω σε κάθε δοκίμιο, το οποίο έδινε τη μεταβολή της παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια. Το πείραμα επαναλήφθηκε έτσι ώστε να εξασφαλισθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5.8 Διεξαγωγή SSRT στον αέρα

5.4.2 Εκτέλεση SSRT σε διάλυμα 3,5%NaCl

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε SSRT με ταυτόχρονη έκθεση σε διάλυμα NaCl. Πριν την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας, το Δοκίμιο 3 υποβλήθηκε σε αμμοβολή (Εικόνα 5.9), ώστε να απομακρυνθεί η επίστρωση ασταριού και να είναι δυνατή η έκθεση γυμνού μεταλλικού υλικού στο διάλυμα. Η αμμοβολή πραγματοποιήθηκε σε θάλαμο αμμοβολής του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, υπό πίεση ίση με 5 bar.



Εικόνα 5.9 Διαδικασία αμμοβολής δοκιμίων

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, η ποιότητα της επιφάνειας του υλικού επιδρά σημαντικά στην εξέλιξη της διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση (SCC), επομένως μετά την αμμοβολή θεωρήθηκε χρήσιμος ο προσδιορισμός της τραχύτητας του Δοκιμίου 3. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το τραχύμετρο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας (TR100 Surface Roughness Tester), με το οποίο πάρθηκαν συνολικά πέντε (5) μετρήσεις μέσης τραχύτητας (σε 5 διαφορετικά σημεία του δοκιμίου) και στη συνέχεια υπολογίστηκε η μέση τιμή τους (Πίνακας 5.5). Ως μήκος μέτρησης επιλέχθηκε $\lambda_c = \lambda_3 = 2.50$ mm, το οποίο αποτελεί κατάλληλο μήκος μέτρησης για επιφάνειες με μεγάλη τραχύτητα.

Πίνακας 5.5 Μέση τραχύτητα Ra – Δοκίμιο 3

Δοκίμιο	3	
Μέση τραχύτητα Ra (μm)	8.482	

Στη συνέχεια το δοκίμιο τοποθετήθηκε στο κελί, όπως περιγράφηκε στο εδάφιο 5.4, το κελί γέμισε με διάλυμα NaCl και τέλος τοποθετήθηκε στη μηχανή προκειμένου να ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία (Εικόνα 5.10) Η τοποθέτηση επιμηκυνσιόμετρου δεν ήταν δυνατή αυτή τη φορά, εφόσον το δοκίμιο ήταν εμβαπτισμένο σε διάλυμα NaCl.



Εικόνα 5.10 Διεξαγωγή SSRT σε διάλυμα 3,5%NaCl – Δοκίμιο 3

5.4.3 Εκτέλεση SSRT μετά από προηγούμενη έκθεση του δοκιμίου σε διάλυμα 3,5%NaCl

Η πειραματική διαδικασία συνεχίστηκε με τρία ακόμη SSRTs, τα οποία πραγματοποιήθηκαν με τον ίδιο ρυθμό παραμόρφωσης, σε όμοια δοκίμια εμβαπτισμένα στο ίδιο διάλυμα, υπό όμοιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, με τη διαφορά ότι αυτή τη φορά κάθε δοκίμιο θα παρέμενε εμβαπτισμένο στο διάλυμα 3,5%NaCl για κάποιο προκαθορισμένο χρονικό διάστημα.

Ο στόχος των πειραμάτων αυτών ήταν να γίνουν δυσμενέστερες συνθήκες για το δοκίμιο, καθώς στο πρότυπο ISO 7539-7 αναφέρεται ότι προκειμένου να δοθεί

περισσότερος χρόνος να εξελιχθούν τα ηλεκτροχημικά φαινόμενα, προτείνεται έκθεση του δοκιμίου στο διαβρωτικό διάλυμα για κάποιο διάστημα πριν την διεξαγωγή του SSRT. Κατά τη διάρκεια του SSRT, το δοκίμιο θα συνεχίσει να είναι εμβαπτισμένο στο ίδιο διάλυμα. Για τα τρία επόμενα δοκίμια επιλέχθηκαν οι εξής χρόνοι έκθεσης πριν την πραγματοποίηση του SSRT:

- Δοκίμιο 4 → 6 ημέρες
- Δοκίμιο 5 → 12 ημέρες
- Δοκίμιο 6 → 18 ημέρες

Τέλος, σύμφωνα με τις οδηγίες του προτύπου, χρησιμοποιήθηκαν τρία ακόμη δοκίμια, μικρού μεγέθους και σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου (βλ: Εικόνα 5.11), καθένα από τα οποία παρέμεινε εμβαπτισμένο στο διάλυμα 3.5%NaCl για το ίδιο χρονικό διάστημα που παρέμεινε καθένα από τα Δοκίμια 4,5,6. Δηλαδή:

- Δοκίμιο 4' → 6 ημέρες
- Δοκίμιο 5' → 12 ημέρες
- Δοκίμιο 6' → 18 ημέρες

Τα Δοκίμια 4',5',6' δεν υποβλήθηκαν σε SSRT, αλλά εξετάστηκαν στο στερεοσκόπιο. Ο λόγος γι αυτή τη διαδικασία είναι ότι εφόσον τα αποτελέσματα των SSRTs υποδείκνυαν μη όλκιμη θραύση, θα έπρεπε να εξασφαλιστεί ότι η θραύση προήλθε όντως από SCC και όχι από κάποια άλλη μορφή διάβρωσης που εξελίχθηκε κατά τη διάρκεια της έκθεσης του δοκιμίου πριν το SSRT. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί μετά από εξέταση των Δοκιμίων 4,5,6 και τη σύγκριση των εικόνων με αυτές των Δοκιμίων 4',5',6'.

Αρχικά, τόσο τα Δοκίμια 4,5,6, όσο και τα 4',5',6' υποβλήθηκαν σε αμμοβολή. Η διαδικασία και οι συνθήκες της αμμοβολής ήταν οι ίδιες με αυτές που επιβλήθηκαν στο Δοκίμιο 3. Μετά την αμμοβολή πραγματοποιήθηκε μέτρηση τραχύτητας, όπως ακριβώς και για το Δοκίμιο 3. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στους Πίνακες 5.6 και 5.7.

Πίνακας 5.6 Μέση τραχύτητα Ra - Δοκίμια 4,5,6

Δοκίμιο	4	5	6
Μέση τραχύτητα Ra (μm)	8.555	8.320	7.333
Πίνακας 5.7 Μέση τραχύτητα Ra – Δοκίμια 4',5',6'

Δοκίμιο	4'	5′	6'	
Μέση τραχύτητα Ra (μm)	8.392	7.298	8.892	

Στη συνέχεια καθένα από τα Δοκίμια 4,5,6 τοποθετήθηκαν σε ογκομετρικό κύλινδρο που περιείχε διάλυμα 3,5%NaCl. Το μέγεθος του ογκομετρικού κυλίνδρου και η ποσότητα του διαλύματος ήταν τέτοια, ώστε το δοκίμιο να είναι πλήρως εμβαπτισμένο. Πριν την εμβάπτιση, οι άκρες των δοκιμίων, οι οποίες επρόκειτο να έρθουν σε επαφή με τις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού, τυλίχθηκαν με μονωτική ταινία (Vinyl Tape 471 της 3M), ώστε να μείνουν ανεπηρέαστες από το διάλυμα, όπως ακριβώς προδιαγράφει το πρότυπο ISO 7539. Δεδομένης της σημασίας του οξυγόνου στην εξέλιξη των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων (βλ: Κεφάλαιο 2), κρίθηκε απαραίτητη η ανανέωση του διαλύματος κάθε δύο μέρες στους τρεις ογκομετρικούς κυλίνδρους.

Μαζί με καθένα από τα Δοκίμια 4,5,6, τοποθετήθηκαν στον αντίστοιχο ογκομετρικό κύλινδρο τα Δοκίμια 4',5',6', προκειμένου τα τελευταία να εκτεθούν στο διάλυμα ακριβώς το ίδιο χρονικό διάστημα, υπό τις ίδιες ακριβώς συνθήκες. Κατά την τοποθέτηση, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε οι μεταλλικές επιφάνειες των δύο δοκιμίων να μην έρχονται σε επαφή, προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε πιθανή αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Στις Εικόνες 5.11-5.14 παρουσιάζονται τα δοκίμια όπως ακριβώς τοποθετήθηκαν στους κυλίνδρους, για διάφορα χρονικά διαστήματα έκθεσης στο διάλυμα.

Μετά το πέρας του χρονικού διαστήματος που είχε προκαθοριστεί για κάθε ζεύγος δοκιμίων, τα δοκίμια ξεπλύθηκαν με απιονισμένο νερό και, αφαιρέθηκε η μονωτική ταινία. Τα Δοκίμια 4,5,6 υποβλήθηκαν σε SSRTs με την ίδια ακριβώς διαδικασία που ακολουθήθηκε για το Δοκίμιο 3 (βλ: 5.4.2).

145



Εικόνα 5.11 Τα Δοκίμια 4,4',5,5',6,6' την ημέρα της τοποθέτησης στο διάλυμα



Εικόνα 5.12 Τα Δοκίμια 4,4',5,5',6,6' έξι ημέρες μετά την τοποθέτηση στο διάλυμα



Εικόνα 5.13 Τα Δοκίμια 5 και 5', δώδεκα ημέρες μετά την τοποθέτηση στο διάλυμα



Εικόνα 5.14 Τα Δοκίμια 6 και 6', δεκαοκτώ ημέρες μετά την τοποθέτηση

5.5 Αποτελέσματα

Από την επεξεργασία των μετρήσεων που λάβαμε από το σύστημα της μηχανής εφελκυσμού, προέκυψαν για κάθε δοκίμιο η μέγιστη αντοχή, το όριο διαρροής, η ποσοστιαία επιμήκυνση του δοκιμίου, ο χρόνος μέχρι την τελική αστοχία, καθώς και η καμπύλη τάσης-επιμήκυνσης (σ-δΙ). Για τον προσδιορισμό των παραπάνω μεγεθών, χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο ISO 6892-1 (2016): "Metallic Materials-Tensile Testing- Part 1: Method of Test at Room Temperature". Σύμφωνα με τις οδηγίες που παρέχει, λαμβάνουμε ως:

- Άνω όριο διαρροής σ_{0H}, τη μέγιστη τιμή της τάσης πριν την πρώτη μείωσή της, η οποία μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα από το διάγραμμα σ-δl.
- Κάτω όριο διαρροής σ_{0L}, την ελάχιστη τιμή της τάσης που παρουσιάζεται στην περιοχή της καμπύλης σ-δΙ, από το άνω όριο διαρροής έως 0,25% παραμόρφωση μετά από αυτό, μη λαμβάνοντας υπόψη τα αρχικά μεταβατικά φαινόμενα.
- Μέγιστη αντοχή σ_m, τη μέγιστη τιμή της τάσης που εμφανίζεται στο διάγραμμα σ-δl.
- Ποσοστιαία επιμήκυνση μετά τη θραύση Α, την τιμή που προκύπτει από τη σχέση:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100 \quad (2)$$

Όπου:

L₀: το αρχικό μήκος περιοχής μέτρησης L_u: το μήκος περιοχής μέτρησης μετά τη θραύση

- Χρόνο μέχρι τη θραύση T_F , το συνολικό χρόνο του πειράματος.

5.5.1 Αποτελέσματα SSRT στον αέρα

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τα Δοκίμια 1 και 2 παρουσιάζονται στον Πίνακες 5.8, ενώ οι αντίστοιχες καμπύλες σ-δΙ στις Εικόνες 5.15-5.16.



Δοκίμιο 1

Εικόνα 5.15 Καμπύλη σ-δ
Ι από SSRT στον αέρα – Δοκίμιο 1





Εικόνα 5.16 Καμπύλη σ-δΙ από SSRT στον αέρα – Δοκίμιο 2

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει ιδιαίτερη απόκλιση μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων των δύο δοκιμίων. Επομένως, ως τελικές τιμές της μέγιστης αντοχής, των άνω και κάτω ορίων διαρροής και της μέγιστης επιμήκυνσης λαμβάνονται οι τιμές που προκύπτουν από το μέσο όρο των αντίστοιχων ιδιοτήτων των δοκιμίων, και αυτές θα αποτελέσουν στη συνέχεια το σημείο αναφοράς για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων των SSRTs στο διαβρωτικό περιβάλλον (Πίνακας 5.10). Το ίδιο ισχύει και για το χρόνο μέχρι την τελική αστοχία του δοκιμίου.

Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίων – SSRT στον αέρα						
	σ _{он} (MPa)	σ _{0L} (MPa)	σ _m (MPa)	A (%)	T _F	
Δοκίμιο 1	378	375	504	23.42	19948	
Δοκίμιο 2	376	366	510	25	21294	
Μέσος Όρος	377	370.5	507	24.21	20621	

Πίνακας 5.8

5.5.2 Αποτελέσματα SSRT σε διάλυμα 3,5%NaCl

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για το Δοκίμιο 3 παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.9, ενώ η καμπύλη σ-δΙ στην Εικόνα 5.17.



Δοκίμιο 3

Εικόνα 5.17 Καμπύλη σ-δΙ από SSRT σε 3.5%NaCl– Δοκίμιο 3

Πίνακας 5. Αποτελέσμ	9 ιατα – Δοκίμιο 3			
σ _{0Н} (MPa)	σ_{0L} (MPa)	σ _m (MPa)	A (%)	T _F
374	358	505	24.49	20859

5.5.3 Αποτελέσματα SSRT μετά από προηγούμενη έκθεση του δοκιμίου σε διάλυμα 3,5%NaCl

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τα Δοκίμια 4,5,6 παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.10-5.12 , ενώ οι αντίστοιχες καμπύλες σ-δΙ στις Εικόνες 5.18-5.20.





Εικόνα 5.18 Καμπύλη σ-δΙ από SSRT σε 3.5% NaCl με προηγούμενη έκθεση-Δοκίμιο 4 (6 ημέρες)

Πίνακας 5.10 Αποτελέσματα – Δοκίμιο 4

σ _{0Н} (MPa)	σ _{0L} (MPa)	σ _m (MPa)	A (%)	T _F (sec)
377	362	506	23,95	20398





Πίνακας 5.11 Αποτελέσματα – Δοκίμιο 5

σ _{0Н} (MPa)	σ _{oL} (MPa)	σ _m (MPa)	A (%)	T _F (sec)
386	361	511	24,99	21289



Εικόνα 5.20 Καμπύλη σ-δΙ από SSRT σε 3.5%NaCl με προηγούμενη έκθεση- Δοκίμιο 6 (18 ημέρες)

Πίνακας 5.12 Αποτελέσματα – Δοκίμιο 6

σ _{он} (МРа)	σ_{0L} (MPa)	σ _m (MPa)	A (%)	T _F (sec)
367	354	498	24,49	20858

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι δεν υπάρχει καμιά σημαντική υποβάθμιση των ιδιοτήτων σε κανένα από τα Δοκίμια 3,4,5,6, (Πίνακας 5.13) γεγονός που υποδηλώνει ότι το υλικό δεν υπέστη ρωγμάτωση λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση. Το ίδιο υποδεικνύουν και οι καμπύλες σ-δΙ, η μορφή των οποίων συνδέεται με όλκιμη θραύση.

Πίνακας 5.13 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμίων 4,5,6

Δοκίμιο	σ _{он} (МРа)	σ _{οL} (MPa)	σ _m (MPa)	A (%)	T _F (sec)
4	377	362	506	23,95	20398
5	386	361	511	24,99	21289
6	367	354	498	24,49	20858

5.6 Στερεοσκοπική εξέταση

Σκοπός της στερεοσκοπικής μελέτης ήταν ο έλεγχος για ρωγμές στην επιφάνεια των δοκιμίων και ο προσδιορισμός του τρόπου θραύσης τους. Παρά τα αποτελέσματα που έδωσαν τα SSRTs, η διαδικασία αυτή πρέπει να πραγματοποιηθεί προκειμένου να διεξάγονται σίγουρα συμπεράσματα.

5.6.1 Αποτελέσματα – Δοκίμια: 1,2

Αρχικά πραγματοποιήθηκε μελέτη των Δοκιμίων 1 και 2. Παρόλο που δεν αναμενόταν ρωγμάτωση στα δοκίμια αυτά, έπρεπε να παρθούν εικόνες από το στερεοσκόπιο ώστε να υπάρχει μέτρο σύγκρισης για τα επόμενα δοκίμια. Στην Εικόνα 5.21 παρουσιάζεται το Δοκίμιο 2 μετά τη θραύση, ενώ στις Εικόνες 5.22, 5.23 παρουσιάζονται μερικές από τις εικόνες που έδωσε το στερεοσκόπιο από την περιοχή του δοκιμίου που φαίνεται στην Εικόνα 5.21 (κόκκινο βέλος).



Εικόνα 5.21 Το Δοκίμιο 2 μετά τη θραύση



Εικόνα 5.22 Εικόνα του Δοκιμίου 2 από το στερεοσκόπιο μετά τη θραύση – Μεγέθυνση: x1.25



Εικόνα 5.23 Εικόνα του Δοκιμίου 2 από το στερεοσκόπιο μετά τη θραύση – Μεγέθυνση: x3.2

5.6.2 Αποτελέσματα - Δοκίμια: 3-6

Στην Εικόνα 5.24 παρουσιάζεται το ένα από τα δύο τμήματα του Δοκιμίου 3, μετά τη θραύση, σε πρόσθια και πλάγια όψη. Ακολουθούν οι εικόνες που προέκυψαν για καθένα από τα Δοκίμια 3,4,5,6 (Εικόνες 5.24-5.37). Οι περιοχές που εξετάστηκαν στο στερεοσκόπιο φαίνονται επίσης στην Εικόνα 5.24 (κόκκινο βέλος).



Εικόνα 5.24 Το Δοκίμιο 3 μετά τη θραύση



Εικόνα 5.25 Εικόνες του Δοκιμίου 3 από το στερεοσκόπιο μετά τη θραύση (πρόσθια όψη)



Εικόνα 5.26 Εικόνες του Δοκιμίου 3 από το στερεοσκόπιο μετά τη θραύση (πλάγια όψη)



Εικόνα 5.27 Εικόνες της επιφάνεια θραύσης του Δοκιμίου 3



Εικόνα 5.28 Εικόνες του Δοκιμίου 4 από το στερεοσκόπιο μετά τη θραύση (πρόσθια όψη)



Εικόνα 5.29 Εικόνες του Δοκιμίου 4 από το στερεοσκόπιο μετά τη θραύση (πλάγια όψη)



Εικόνα 5.30 Εικόνα του Δοκιμίου 4 από το στερεοσκόπιο μετά τη θραύση (πρόσθια όψη)



Εικόνα 5.31 Εικόνα της επιφάνεια θραύσης του Δοκιμίου 4



Εικόνα 5.32 Εικόνες του Δοκιμίου 5 από το στερεοσκόπιο μετά τη θραύση (πρόσθια όψη)



Εικόνα 5.33 Εικόνες του Δοκιμίου 5 από το στερεοσκόπιο μετά τη θραύση (πλάγια όψη)



Εικόνα 5.34 Εικόνα της επιφάνεια θραύσης του Δοκιμίου 5



Εικόνα 5.35 Εικόνες του Δοκιμίου 6 από το στερεοσκόπιο μετά τη θραύση (πρόσθια όψη)



Εικόνα 5.36 Εικόνες του Δοκιμίου 6 από το στερεοσκόπιο μετά τη θραύση (πλάγια όψη)



Εικόνα 5.37 Εικόνα της επιφάνεια θραύσης του Δοκιμίου 6

Παρατηρούμε ότι σε καθένα από τα Δοκίμια 3,4,5,6 υπάρχουν μικρορωγμές στην περιοχή κοντά στην επιφάνεια θραύσης, οι οποίες όμως εκ πρώτης όψεως φαίνονται επιφανειακές, ενώ αν συνδυάσουμε το γεγονός αυτό με τις μηχανικές ιδιότητες και τις καμπύλες σ-δΙ που περιγράφηκαν στο εδάφιο 5.6, βγάζουμε το συμπέρασμα ότι οι επιφανειακές μικρορωγμές δεν κατάφεραν να διαδοθούν προς το εσωτερικό του δοκιμίου και να σχηματίσουν κάποια κύρια ρωγμάτωση.

5.7 Μεταλλογραφία

Η διαδικασία της μεταλλογραφίας επιτρέπει την εξέταση της μικροδομής ενός υλικού και τον έλεγχο για την ύπαρξη ατελειών. Στην περίπτωσή μας, ο κύριος σκοπός ήταν να μελετηθούν στο μικροσκόπιο τα Δοκίμια 3-6 προκειμένου να ελέγξουμε αν οι επιφανειακές μικρορωγμές που φαίνονται στο στερεοσκόπιο επεκτείνονται στο εσωτερικό του υλικού.

Η περιοχή που εξετάστηκε ήταν η επιφάνεια μιας εγκάρσιας τομής πολύ κοντά στην επιφάνεια θραύσης. Για τις ανάγκες της διαδικασία αυτής αποσπάστηκε ένα μικρό τμήμα των δοκιμίων, από την επιφάνεια θραύσης μέχρι μια εγκάρσια τομή πολύ κοντά στην επιφάνεια θραύσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.38. Η διαδικασία που ακολούθησε ήταν η ίδια με αυτή που πραγματοποιήθηκε για το χαρακτηρισμό του υλικού (βλ: 5.2.1).



Εικόνα 5.38 Οριοθέτηση του τμήματος του Δοκιμίου 2 που αποσπάστηκε για τη μεταλλογραφία

5.7.1 Αποτελέσματα – Δοκίμια: 1,2

Τα Δοκίμια 1,2 υποβλήθηκαν σε μεταλλογραφία για τον ίδιο λόγο που υποβλήθηκαν και σε στερεοσκοπική μελέτη, για να μπορούμε να συγκρίνουμε τις φωτογραφίες με τις αντίστοιχες των Δοκιμίων 3-6 στη συνέχεια. Στις Εικόνες 5.39-5.41 παρουσιάζονται δύο ενδεικτικές φωτογραφίες που τραβήχτηκαν κατά την μελέτη στο μικροσκόπιο, από την άκρη και τη μέση της διατομής.



Εικόνα 5.39 Εικόνα Δοκιμίου 2 από το μικροσκόπιο (άκρη διατομής)



Εικόνα 5.40 Εικόνα Δοκιμίου 2 από το μικροσκόπιο (άκρη διατομής)



Εικόνα 5.41 Εικόνα Δοκιμίου 2 από το μικροσκόπιο (μέση διατομής)

5.7.2 Αποτελέσματα – Δοκίμια: 3-6

Ακολουθούν φωτογραφίες που τραβήχτηκαν κατά την εξέταση στο μικροσκόπιο για τα Δοκίμια 3-6 (Εικόνες 5.41-5.49). Η περιοχή που μελετήθηκε ήταν κυρίως η άκρη της εγκάρσιας τομής, όπου είχαν εντοπιστεί οι επιφανειακές μικρορωγμές κατά τη μελέτη στο στερεοσκόπιο. Ωστόσο παρατίθενται και ενδεικτικές φωτογραφίες από τη μέση της διατομής.



Εικόνα 5.42 Εικόνα Δοκιμίου 3 από το μικροσκόπιο (άκρη διατομής)



Εικόνα 5.43 Εικόνα Δοκιμίου 3 από το μικροσκόπιο (μέση διατομής)



Εικόνα 5.44 Εικόνα Δοκιμίου 4 από το μικροσκόπιο (άκρη διατομής)



Εικόνα 5.45 Εικόνα Δοκιμίου 4 από το μικροσκόπιο (μέση διατομής)



Εικόνα 5.46 Εικόνα Δοκιμίου 5 από το μικροσκόπιο (άκρη διατομής)



Εικόνα 5.47 Εικόνα Δοκιμίου 5 από το μικροσκόπιο (μέση διατομής)



Εικόνα 5.48 Εικόνα Δοκιμίου 6 από το μικροσκόπιο (άκρη διατομής)



Εικόνα 5.49 Εικόνα Δοκιμίου 6 από το μικροσκόπιο (μέση διατομής)

Συγκρίνοντας τα Δοκίμια 3, 4, 5 και 6 με το Δοκίμιο 2 παρατηρούμε τα εξής: (α) Στα Δοκίμια 3, 4 και 5 δεν παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη διαφορά της μικροδομής τόσο στην άκρη όσο και στη μέση της εγκάρσιας τομής που μελετήθηκε σε σχέση με αυτήν για το Δοκίμιο 2.

(β) Στο Δοκίμιο 6 παρατηρείται σχετική διαφοροποίηση της μικροδομής της επιφάνειας στην άκρη της διατομής (περισσότερες και ελαφρώς βαθύτερες εσοχές) (Εικόνα 5.48), η οποία υποδηλώνει μεγαλύτερη φθορά σε σχέση με το δοκίμιο 2 και κατά συνέπεια και με όλα τα υπόλοιπα δοκίμια.

Σε κανένα από τα Δοκίμια 3, 4, 5 και 6 δεν παρατηρείται εξελιγμένη ρωγμάτωση.

5.8 Παρατηρήσεις- Συμπεράσματα

5.8.1 Προϊόντα διάβρωσης του χάλυβα ΑΗ36 στο διάλυμα NaCl^{[2],[16],[17]}

Γενικά, ο αριθμός οξείδωσης του σιδήρου κυμαίνεται μεταξύ -2 και 6, όμως συνήθως εμφανίζεται ως Fe²⁺ ή Fe³⁺. Επιπλέον, σίδηρος αυτού του σθένους συμμετέχει κυρίως στο σχηματισμό οξειδίων και υδροξειδίων.

 FeO. Πρόκειται για οξείδιο, με τη μορφή μαύρης σκόνης, το οποίο σχηματίζεται με την αντίδραση:

$$Fe^{2+} + O^{2-} \rightarrow FeO$$

Η ορυκτή του μορφή ονομάζεται βουστίτης και είναι αδιάλυτο στο νερό, σε αλκοόλες και αλκάλια, ενώ διαλύεται σε οξύ.

- Fe₂O₃. Ο σίδηρος συνήθως προστατεύεται από το διαβρωτικό περιβάλλον με στρώμα οξειδίου, πάχους 1-4 mm, το οποίο αποτελείται από τα οξείδια Fe₂O₃, το οποίο προστατεύει ουσιαστικά τον Fe, και Fe₃O₄, το οποίο αποτελεί τη βάση για το σχηματισμό του Fe₂O₃. Γενικά, η παθητικοποίηση του σιδήρου αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία σε σχέση με άλλα μέταλλα, όπως το αλουμίνιο (AI) και ο χαλκός (Cu). Η δυσκολία αυτή οφείλεται στην ανάγκη σταθεροποίησης του Fe₃O₄ στην επιφάνεια του υλικού, για επαρκές χρονικό διάστημα, ώστε να αρχίσει να δημιουργείται το προστατευτικό στρώμα από Fe₂O₃. Μέχρι να σταθεροποιηθεί, όσο υπάρχει οξυγόνο θα δημιουργείται μόνο Fe₃O₄. Η ορυκτή μορφή του Fe₂O₃ είναι γνωστή ως αιματίτης (hematite) και έχει σκούρο κόκκινο χρώμα.
- Fe(OH)₂. Παράγεται από άλατα σιδήρου, όταν έρθουν σε επαφή με ανιόντα υδροξειδίου (OH⁻). Πρόκειται για ένα λευκό στερεό, το οποίο, όταν έλθει σε επαφή με οξυγόνο, γίνεται πρασινωπό (green rust).
- Fe(OH)₃. Ερχόμενος σε επαφή με το διάλυμα NaCl (ηλεκτρολύτης), ο σίδηρος οξειδώνεται προς κατιόντα σιδήρου:

$$Fe_{(s)} \rightarrow Fe^{2+}_{(aq)} + 2e^{-}$$

Συγχρόνως, τα ηλεκτρόνια που παράγονται ανάγουν το διαλυμένο στο νερό οξυγόνο, σύμφωνα με την αντίδραση:

$$O_{2(g)} + 2H_2O_{(I)} + 4e^- \rightarrow 4OH^-_{(aq)}$$

Προσθέτοντας τις δύο ημιαντιδράσεις προκύπτει η αντίδραση για το πρώτο στάδιο σχηματισμού της σκουριάς:

$$2Fe_{(s)} + O_{2(g)} + 2H_2O_{(l)} \rightarrow 2Fe(OH)_{2(aq)}$$

Στη συνέχεια το $Fe(OH)_2$ οξειδώνεται από το οξυγόνο προς $Fe(OH)_3$, σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:

$$2Fe(OH)_{2(aq)} + 1/2 O_{2(g)} + H_2O_{(I)} \rightarrow 2Fe(OH)_{3(aq)}$$

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω αντιδράσεων, έχουμε τη δημιουργία σκουριάς, η οποία γενικά αποτελείται από ένυδρα οξείδια (υδροξείδια) του Fe²⁺ και του Fe³⁺, τα οποία σχηματίζονται σε κάθε περίπτωση όταν νερό, οξυγόνο και μάζα σιδήρου έλθουν σε επαφή.

Κατά την έκθεση των Δοκιμίων 4,5,6 στο διάλυμα NaCl (πριν την πραγματοποίηση των SSRTs), παρατηρήθηκε ότι στον πυθμένα των δοχείων είχε επικαθίσει σκουριά, ενώ στην επιφάνεια των δοκιμίων είχε σχηματιστεί FeO, όπως καταλαβαίνουμε από το μαύρο χρώμα των δοκιμίων (Εικόνες 5.50,5.51). Ο σχηματισμός FeO απαιτεί λιγότερα άτομα οξυγόνου για κάθε άτομο σιδήρου, επομένως υπερισχύει κατά πολύ σε σχέση με άλλα οξείδια και υδροξείδια του σιδήρου. Το δοχείο με το διάλυμα αποτελούν ένα ανοιχτό σύστημα, όμως το νερό σε αυτή την περίπτωση είναι στάσιμο και επομένως δεν πραγματοποιείται συνεχής μεταφορά οξυγόνου κοντά στην επιφάνεια του χάλυβα, όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα στο θαλάσσιο περιβάλλον, συνεπώς η ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου είναι περιορισμένη.

Στο Δοκίμιο 3, το οποίο παρέμεινε εκτεθειμένο στο διάλυμα NaCl μόνο κατά τη διάρκεια του SSRT (περίπου 5,5 ώρες), εμφανίστηκε μόνο σκουριά, όπως μαρτυρά το κιτρινοκόκκινο χρώμα της επιφάνειας του (Εικόνα 5.52).



Εικόνα 5.50 Σκουριά στον πυθμένα του δοχείου του Δοκιμίου 4 μετά από 6 ημέρες έκθεσης



Εικόνα 5.51. Το Δοκίμιο 6 πριν και μετά 18 ημέρες έκθεση στο διάλυμα NaCl



Εικόνα 5.52. Το Δοκίμιο 3 μετά την τελική αστοχία

5.8.2 Συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των SSRTs

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των υπολογισμών που προέκυψαν από τα SSRTs (Πίνακας 5.14) δεν μαρτυρούν παρουσία ρωγμάτωσης λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση. Τόσο η μορφή των διαγραμμάτων σ-δl, όσο και οι ιδιότητες υποδηλώνουν ότι το υλικό έμεινε σχεδόν ανεπηρέαστο από την συνδυαστική δράση του διαλύματος NaCl και του επιβαλλόμενου ρυθμού παραμόρφωσης.

Στην Εικόνα 5.53 παρατηρούμε ότι, αν εξαιρέσουμε μικρές διαφοροποιήσεις, η μορφή των καμπυλών σ-δΙ παραμένει η ίδια. Η μορφή της σ-δΙ αποτελεί ένα ενδεικτικό στοιχείο για το αν το δοκίμιο έχει υποστεί ρωγμάτωση ή όχι, όπως έχει ειπωθεί στο Κεφάλαιο 4. Βλέπουμε ότι σε όλα τα δοκίμια, η καμπύλη παρουσιάζει εκτεταμένη περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης, γεγονός που δεν συνάδει με την παρουσία ρωγμάτωσης.

Πίνακας 5.14 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα						
σ _{0Н} (MPa)	σ _{oL} (MPa)	σ _m (MPa)	A (%)	T _F (sec)		
377	370,5	507	24,21	20621		
374	358	505	24,49	20859		
377	362	506	23,95	20398		
386	361	511	24,99	21289		
	4 ικά αποτελέσματι <u>σ_{0Η} (MPa)</u> 377 374 377 386	4 ικά αποτελέσματα σ _{0H} (MPa) σ _{0L} (MPa) 377 370,5 374 358 377 362 386 361	4 ικά αποτελέσματα σ _{0H} (MPa) σ _{0L} (MPa) σ _m (MPa) 377 370,5 507 374 358 505 377 362 506 386 361 511	4 ικά αποτελέσματα σ _{0H} (MPa) σ _{0L} (MPa) σ _m (MPa) A (%) 377 370,5 507 24,21 374 358 505 24,49 377 362 506 23,95 386 361 511 24,99		

354

6

367

Σε σχέση με τη μέση σ_m των Δοκιμίων 1 και 2, η σ_m των Δοκιμίων 4,3,6 (κατά φθίνουσα σειρά) είναι χαμηλότερη, ενώ το Δοκίμιο 5 επέδειξε καλύτερη αντοχή ακόμη και από τα δοκίμια που δοκιμάστηκαν στον αέρα. Η ποσοστιαία επιμήκυνση Α παρέμεινε σχεδόν ίδια, με απειροελάχιστες διαφοροποιήσεις σε κάθε δοκίμιο, το ίδιο και ο χρόνος μέχρι την αστοχία T_F. Οι τιμές του άνω ορίου διαρροής των δοκιμίων 3,4,5,6 παρουσιάζουν σχετικά μικρές διαφοροποιήσεις τόσο μεταξύ τους, όσο και σε σχέση με τη μέση τιμή σ_{0H} των Δοκιμίων 1,2 (Εικόνα 5.54). Γενικά, δεν υπάρχει κάποια σημαντική μείωση στις ιδιότητες των δοκιμίων που να μπορεί να συνδεθεί με την SCC. Οι μικρές διαφορές μπορούν κάλλιστα να οφείλονται σε τυχαία πειραματικά σφάλματα.

498

24,49

20858



Εικόνα 5.53 Καμπύλη σ-δΙ από τα SSRTs –Δοκίμια 1-6



Εικόνα 5.54 Η περιοχή διαρροής των διαγραμμάτων σ-δΙ από τα SSRTs – Δοκίμια 1-6

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, η μέγιστη αντοχή, η ποσοστιαία επιμήκυνση και ο χρόνος μέχρι τη θραύση αποτελούν κριτήρια για το αν το υλικό έχει υποστεί SCC ή όχι. Επομένως θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση που υποδεικνύει το πρότυπο της ISO 7539-7 για μια ποσοτική εκτίμηση των αποτελεσμάτων :

Στον Πίνακα 5.15 παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών των λόγων για καθένα από τα Δοκίμια 3-6. Στο Κεφάλαιο 4 είχε αναφερθεί ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή του λόγου, τόσο μεγαλύτερη ευαισθησία σε SCC υποδηλώνει. Παρατηρούμε ότι οι λόγοι για όλα τα δοκίμια είναι πολύ κοντά στη μονάδα, κάποιες φορές μάλιστα είναι και ελαφρώς μεγαλύτερη. Το γεγονός αυτό ενισχύει το συμπέρασμα ότι οι μικρές διαφοροποιήσεις στις τιμές ιδιοτήτων των δοκιμίων είναι απλώς αποτέλεσμα τυχαίων πειραματικών σφαλμάτων.

Πίνακας 5.15 Αποτελέσματα της σχέσης (3) για κάθε δοκίμιο

Δοκίμιο	$\sigma_m/\sigma_{m,air}$	A/A _{air}	$T_F/T_{F,air}$
3	0,996	1,012	1,012
4	0,998	0,989	0,989
5	1,008	1,032	1,032
6	0,982	1,012	1,011

5.8.3 Συμπεράσματα από τη μελέτη στο στερεοσκόπιο και τη μεταλλογραφία

Τα αποτελέσματα της στερεοσκοπικής εξέτασης έδειξαν για τα Δοκίμια 1,2 την εικόνα όλκιμης θραύσης, όπως ακριβώς αναμενόταν. Στην περιοχή της θραύσης των Δοκιμίων 3-6, οι εικόνες από το στερεοσκόπιο έδειξαν την ύπαρξη μικρορωγμών (Εικόνα 5.55), οι οποίες όμως δε διαδίδονται στο εσωτερικό του δοκιμίου, γεγονός που επιβεβαιώθηκε και από την εξέταση των εγκάρσιων τομών στο μικροσκόπιο.



Εικόνα 5.55 Μικρορωγμές στην περιοχή θραύσης – Δοκίμιο 3 (πάνω αριστερά), Δοκίμιο 4 (πάνω δεξιά), Δοκίμιο 5 (κάτω αριστερά) και Δοκίμιο 6 (κάτω δεξιά).

Συγκρίνοντας τις εικόνες της μεταλλογραφίας του Δοκιμίου 2 με καθένα από τα Δοκίμια 3-6, παρατηρούμε ότι φαίνεται φθορά στην επιφάνειά τους, ωστόσο σε κανένα από αυτά δεν παρατηρείται εξελιγμένη ρωγμάτωση (Εικόνα 5.56). Συγκεκριμένα το Δοκίμιο 6 επιδεικνύει εμφανή φθορά στην επιφάνεια του, σε σχέση με τα προηγούμενα, καθώς παρατηρείται αυξημένος αριθμός εσοχών, μεγαλύτερου μεγέθους σε σχέση με τα προηγούμενα.

Κατά την περιγραφή των μηχανισμών έναρξης και διάδοσης της SCC (Κεφάλαιο 3) αναφέρθηκε ότι η ρωγμάτωση μπορεί να ξεκινήσει από μικρορωγμές και άλλα επιφανειακά ελαττώματα (εσοχές, βελονισμούς, κλπ), όμως για να διαδοθεί θα πρέπει οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις και οι εφελκυστικές τάσεις στα σημεία αυτά να είναι τέτοιες, ώστε να επιτρέψουν τη διατήρηση της γεωμετρίας της, δηλαδή τη διατήρηση της οξύτητας του άκρου της ρωγμής (ή πχ της βάσης του βελονισμού), και να αποτρέψουν την άμβλυνσή της. Στη δική μας περίπτωση αυτό δε συνέβη, επειδή ο συνδυασμός του επιβαλλόμενου ρυθμού παραμόρφωσης και των πραγματοποιούμενων ηλεκτροχημικών αντιδράσεων δεν επαρκεί για την προώθηση της SCC στο υπό μελέτη υλικό.

Τέλος, θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι ο σκοπός των Δοκιμίων 4',5',6' (βλ: 5.4.3.) ήταν οι φωτογραφίες τους από το στερεοσκόπιο και το μικροσκόπιο να αποτελέσουν σημείο αναφοράς σε περίπτωση που εντοπιστεί SCC σε κάποιο από τα 4,5,6. Εφόσον όμως δε συνέβη κάτι τέτοιο, δε χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν, ενώ οι εικόνες τους παραλείπονται στην παρούσα εργασία.

176



Εικόνα 5.56 Σύγκριση μεταξύ των εικόνων των Δοκιμίων 2-6 από το μικροσκόπιο (Δοκίμιο 2,3,4,5,6, ξεκινώντας από αριστερά)

5.8.4 Τελικά συμπεράσματα

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, η μέθοδος SSRT καταλήγει πάντα με θραύση του δοκιμίου και μετά από μελέτη των αποτελεσμάτων καταλήγουμε αν το σύστημα παρουσιάζει ευαισθησία σε SCC ή όχι. Με βάση όλα τα προηγούμενα εξάγουμε λοιπόν το συμπέρασμα ότι το σύστημα "Χάλυβας AH36 – 3.5%NaCl" δεν παρουσιάζει ευαισθησία σε SCC υπό τον συγκεκριμένο ρυθμό παραμόρφωσης (2x10⁻⁷ 1/s).

Η έκθεση του δοκιμίου στο διάλυμα είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός στρώματος επιφανειακών οξειδίων, τα οποία αποτελούν ψαθυρές ενώσεις. Ο αυξανόμενος ρυθμός παραμόρφωσης που επιβλήθηκε σε κάθε δοκίμιο, οδήγησε στη ρήξη των εύθραυστων επιφανειακών ενώσεων και στη δημιουργία μικρορωγμών, οι οποίες όμως δεν μπόρεσαν να εξελιχθούν σε κύρια ρωγμάτωση και να οδηγήσουν σε θραύση, πιθανόν λόγω της σύλληψής τους από το όλκιμο υλικό στη συνέχεια.

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, ενδείκνυται η επανάληψη κάθε SSRT τουλάχιστον πέντε φορές και ο υπολογισμός της μέσης τιμής των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, το γεγονός ότι ένα σύστημα δεν παρουσιάζει ρωγμάτωση για ένα συγκεκριμένο ρυθμό παραμόρφωσης, δεν σημαίνει απαραίτητα ότι είναι γενικά απαθές σε SCC, γιατί ίσως ο ρυθμός που επιλέχθηκε να ήταν απλώς εκτός του κρίσιμου εύρους (βλ: Κεφάλαιο 4). Η ανθεκτικότητα ενός συστήματος υλικού-περιβάλλοντος σε SCC εξασφαλίζεται μετά από δοκιμές SSRT σε ένα μεγάλο εύρος ρυθμών παραμόρφωσης (10⁻³-10⁻⁹ 1/s).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η ρωγμάτωση λόγω διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση (SCC) ανήκει στην κατηγορία της περιβαλλοντικά προκαλούμενης ρωγμάτωσης, ενώ για την εξέλιξή της απαιτείται η συνύπαρξη τριών συνθηκών: α) ευπαθές μεταλλικό υλικό, β) εφελκυστικές τάσεις και γ) "κατάλληλο" διαβρωτικό περιβάλλον.
- 2. Η έναρξη και η διάδοση της SCC καθορίζεται από μηχανικούς, περιβαλλοντικούς και μεταλλουργικούς παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί δρουν ταυτόχρονα και συνδυασμένα και καθιστούν την εξέλιξη του φαινομένου ιδιαίτερα πολύπλοκη, καθώς, πολλές φορές, η διαφοροποίηση ενός μόνο παράγοντα μπορεί να προκαλέσει έναρξη της SCC σε ένα αρχικά απαθές σύστημα υλικού-περιβάλλοντος.
- 3. Για την κατανόηση και την αποτελεσματικότερη πρόληψη της SCC έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μηχανισμοί που περιγράφουν την έναρξη και τη διάδοση της ρωγμάτωσης ξεχωριστά. Οι μηχανισμοί που περιγράφουν τη διάδοση της ρωγμάτωσης περιγράφουν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά διαφόρων συστημάτων υλικού-περιβάλλοντος και έχουν υποστηριχθεί πειραματικά. Όσον αφορά την έναρξη της ρωγμάτωσης, δεν έχουν αναπτυχθεί επαρκείς μηχανισμοί, διότι διάφοροι παράγοντες δυσκολεύουν τη διεκπεραίωσή τους. Παρόλο που τα σημεία έναρξης των ρωγμών είναι εύκολα ανιχνεύσιμα (π.χ. βελονισμοί, εσοχές, χαραγές και άλλες επιφανειακές ασυνέχειες), υπάρχουν δυσκολίες στον προσδιορισμό της διαδικασίας μετασχηματισμού μιας επιφανειακής ασυνέχειας σε ρωγμή.
- 4. Εφόσον ο τρόπος αλληλεπίδρασης των μηχανικών, μεταλλουργικών και περιβαλλοντικών παραγόντων είναι διαφορετικός για κάθε σύστημα, δεν υπάρχει μηχανισμός που να αντιπροσωπεύει όλα τα συστήματα, αλλά καθένας περιγράφει το φαινόμενο για συγκεκριμένους συνδυασμούς υλικού-περιβάλλοντος.
- 5. Διάφορες δοκιμές διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση έχουν αναπτυχθεί με στόχο τη μελέτη των μηχανισμών που διέπουν το φαινόμενο, τον προσδιορισμό της καταλληλότητας ενός υλικού για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, σύγκριση των υλικών ανάλογα με την ευαισθησία τους, κλπ.

- 6. Οι δοκιμές SCC είναι πολύπλοκες διαδικασίες, καθώς απαιτείται ο έλεγχος πολλών παραμέτρων, όμως πλέον υπάρχουν αναγνωρισμένα πρότυπα, τα οποία περιγράφουν λεπτομερώς την πειραματική διαδικασία για διάφορες μεθόδους.
- 7. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία δοκιμίων, ως προς τη μορφή και τη γεωμετρία τους, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις δοκιμές SCC. Μια βασική κατηγοριοποίησή τους είναι σε μη ρωγματωμένα και προ-ρωγματωμένα δοκίμια. Προ-ρωγματωμένα δοκίμια χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της συμπεριφοράς σε SCC ενός υλικού στο οποίο προϋπάρχουν σφάλματα όπως μικρορωγμές, ενώ μη ρωγματωμένα δοκίμια χρησιμοποιούνται σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις.
- 8. Ως προς το είδος της φόρτισης, οι δοκιμές SCC διακρίνονται σε μεθόδους στατικής και μεθόδους δυναμικής φόρτισης. Οι στατικές δοκιμές εκτελούνται σε μη ρωγματωμένα και προ-ρωγματωμένα δοκίμια, είτε υπό συνθήκες σταθερού φορτίου, είτε υπό συνθήκες σταθερής παραμόρφωσης, ενώ οι πιο συνηθισμένες είναι η δοκιμή SCC με κάμψη και η δοκιμή SCC με εφελκυσμό. Οι επικρατέστερες δοκιμές με δυναμική φόρτιση είναι η μέθοδος βραδείας καταπόνησης (SSRT) για προ-ρωγματωμένα και μη ρωγματωμένα δοκίμια και οι δοκιμές συνεχώς αυξανόμενης καταπόνησης (Rising load/displacement Tests), οι οποίες εφαρμόζονται αποκλειστικά σε προ-ρωγματωμένα δοκίμια.
- 9. Σημαντικά πλεονεκτήματα των μεθόδων με δυναμική φόρτιση είναι η ταχύτητα παροχής και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, ενώ δεν υπάρχει ανάγκη αυθαίρετου τερματισμού του πειράματος, καθώς το πείραμα ολοκληρώνεται πάντα με θραύση του δοκιμίου και η ευαισθησία του υλικού σε SCC εκτιμάται από τη μορφή της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, τον υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων και τη μεταλλογραφική εξέταση. Ωστόσο, σε περίπτωση που ο σκοπός του πειράματος είναι ο προσδιορισμός της οριακής τάσης, προτιμώνται οι δοκιμές στατικής φόρτισης (υπό συνθήκες σταθερού φορτίου), καθώς στις δοκιμές δυναμικής φόρτισης η διαδικασία είναι δυσκολότερη και με περισσότερες απαιτήσεις σε εξοπλισμό.
- Κάθε πειραματική μέθοδος για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός συστήματος
 σε SCC παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, δηλαδή δεν υπάρχει η
 ιδανική μέθοδος για όλες τις περιπτώσεις. Η μέθοδος θα πρέπει να επιλέγεται
ανάλογα με τον σκοπό του πειράματος, το υλικό και το περιβάλλον που εξετάζουμε και τα μεγέθη που μας ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε.

- 11. Σήμερα η επικρατέστερη πειραματική μέθοδος είναι η μέθοδος βραδείας καταπόνησης, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει σχετικά με την ταχύτητα παροχής και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Με τη μελέτη σκοπιμότητας της μεθόδου αυτής στον χάλυβα AH36 αναγνωρίστηκαν και στην πράξη τα πλεονεκτήματα αυτά.
- 12. Κατά τη μελέτη για τη σχεδίαση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη σκοπιμότητας, αναγνωρίστηκαν πρακτικές δυσκολίες που αφορούν το περιβάλλον έκθεσης, καθώς, τα πρότυπα υποδεικνύουν απόλυτη διατήρηση των περιβαλλοντικών συνθηκών, καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Σε διαλύματα, όπως το 3,5%NaCl σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες διαφορές για δοκιμές μερικών ωρών. Ωστόσο, περιβάλλοντα έκθεσης που χαρακτηρίζονται από υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, ή περιλαμβάνουν χημικές ουσίες, όπως οξέα, βάσεις και καυστικά διαλύματα, έχουν ως αποτέλεσμα περιορισμούς στη σχεδίαση της πειραματικής διάταξης για την εξασφάλιση της σταθερότητας των συνθηκών και της ασφάλειας. Αυτό επιτυγχάνεται με στεγανά και κατάλληλα διαμορφωμένα δοχεία και με τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού.
- 13. Στα πειράματα που διεξήχθησαν, έγινε εύκολα αντιληπτό από τη μορφή των διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης, τη στερεοσκοπική εξέταση και τη μεταλλογραφία που πραγματοποιήθηκαν για κάθε δοκίμιο, ότι δεν υπήρξε εκκίνηση και διάδοση ρωγμάτωσης. Επομένως, η ποιοτική εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός μεταλλικού υλικού σε SCC με τη μέθοδο SSRT συνιστά μια εύκολη διαδικασία. Παρόλα αυτά, λόγω της απουσίας ρωγμάτωσης στο σύστημά μας (Χάλυβας AH36 3,5%κ.β.NaCl) δεν υπήρξε η δυνατότητα να προσδιορίσουμε το πόσο εύκολη είναι η ποσοτική εκτίμηση της ευαισθησίας ενός υλικού σε SCC με χρήση της μεθόδου SSRT.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δ.Ι. Παντελής, Δ. Τσιούρβα, 'Διάβρωση και Προστασία Ναυπηγικών και Μηχανολογικών Κατασκευών', Αθήνα, 2012
- [2] Philip A. Schweitzer, 'Fundamentals of Metallic Corrosion: Atmospheric and Media Corrosion of Metals', Corrosion Engineering Handbook (Second Edition), CRC Press, New York, 2006, pp. 3-29
- [3] Pierre R. Roberge, 'Handbook of Corrosion Engineering', McGraw-Hill, New York, 1999, pp. 332-352
- [4] National Physical Laboratory, 'Guides to Good Practice in Corrosion Control: Stress Corrosion Cracking' <u>http://www.npl.co.uk/upload/pdf/stress.pdf</u>
- [5] A. Turnbull, 'Encyclopedia of Materials: Science and Technology', Chapter:
 'Stress Corrosion Cracking: Mechanisms', Elsevier Ltd., 2001, pp.8886-8891
- [6] Book Review: Energy Institute's 'Guidelines on sand erosion and erosioncorrosion management' <u>http://www.corrosionguru.com/review-energy-institutes-guidelines-sanderosion-erosion-corrosion-management/</u>
- [7] ASM Handbook, Volume 13: 'Corrosion', USA, 1987, pp.311-360 & 543-593
- [8] Wenqian Zhang, Kewei Fang, Yujin Hu, Siyang Wang, Xuelin Wang, 'Effect of machining-induced surface residual stress on initiation of stress corrosion cracking in 316 austenitic stainless steel', Corrosion Science, 2016, Vol. 108, pp. 173-184
- [9] G.V. Karpenko, I.I.Vasilenko, 'Stress Corrosion Cracking of Steels', Second Edition, Trans Tech Publications, Aedermannsdorf, 1979, pp. 46-58

- [10] Metallurgical Consulting, 'Corrosion Analysis & Testing' http://www.metalconsult.com/corrosion-analysis-testing.html
- [11] Γ.Δ.Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, Έπιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών' (2^η έκδοση), Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2008, σελ.72-73
- [12] <u>https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_5/backbone/r5_3_3.html</u>
- [13] Β.Ι. Παπάζογλου, 'Ναυπηγική Τεχνολογία' (Σημειώσεις), Αθήνα, 1995
- [14] Fontana, M.G., Corrosion Engineering, 3rd ed., Mc Graw Hill, 1985, pp.39-79.
- [15] <u>https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_embrittlement</u>
- [16] <u>https://el.wikipedia.org/wiki/Οξείδιο_του_σιδήρου</u>
- [17] <u>http://users.sch.gr/marbagana/entheta/entheta03.html</u>
- [18] Αντώνιος Κ. Τασιόπουλος, Ή Διάβρωση των Δεξαμενών Φορτίου (Cargo Holds) των Φορτηγών Πλοίων Μεταφοράς Ξηρού Φορτίου Χύδην (Bulk Carriers)', Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2014, pp.76-91
- [19] Λουκάς Ι. Δημαράτος, 'Μελέτη της διάβρωσης συγκολλήσεων ναυπηγικού χάλυβα υψηλής αντοχής', Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2005, pp.104-106
- [20] <u>https://www.quora.com/What-is-the-composition-of-sea-water</u>
- [21] <u>https://www.corrosionpedia.com/2/1432/corrosion-101/an-intro-to-pipeline-</u> <u>corrosion-in-seawater</u>
- [22] V.S. Raja, Tetsuo Shoji, 'Stress Corrosion Cracking: Theory and Practice', Woodhead Publishing Limited, Oxford, 2011, pp.133-162
- [23] 'Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation', 2nd edition, ed. R. Baboian, ASTM International, 2005, pp.289-300

- [24] ISO Standards Handbook: Corrosion, 1st edition, Switzerland, 2004, pp.161-318
- [25] ASTM G39-99 (2016), Standard Practice for Preparation and Use of Bend-Beam Stress-Corrosion Test Specimens
- [26] ASTM G129-00 (2013), Standard Practice for Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking
- [27] ISO 6892-1 (2016), Metallic materials Tensile testing Part1: Method of test at room temperature
- [28] ISO 7539-7 (2016), Corrosion of metals and alloys Stress corrosion testing —
 Part 7: Method for slow strain rate testing
- [29] <u>https://www.asminternational.org/documents/10192/1755223/amp15908p036.p</u> <u>df/026e7c61-4606-424e-9ade-3455865aba71</u>
- [30] 'Stress Corrosion Cracking: The Slow Strain Rate Technique', 2nd edition, ed.G.M. Ugiansky, J.H. Payer, ASTM International, Baltimore, 1979, pp.5-23
- [31] <u>https://abduh137.wordpress.com/2008/01/20/corrosion-morphology/</u>
- [32] <u>http://mycourses.ntua.gr/courses/NAVAL1027/document/%D0%E1%F1%EF%</u> F5%F3%E9%DC%F3%E5%E9%F2_%C4%E9%E4%E1%F3%EA%FC%ED% F4%F9%ED/%CD%D4_%CA%E5%F6%DC%EB%E1%E9%EF_2_%D8%E1 %E8%F5%F1%DE_%C8%F1%E1%FD%F3%E7_%D0%E1%F1%EF%F5%F 3%DF%E1%F3%E7.pdf

(Παρουσίαση μαθήματος Ναυπηγικής Τεχνολογίας – Καθ. Ν. Τσούβαλης)