



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

**ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕ ΒΕΛΟΝΙΣΜΟΥΣ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗ
ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ:
ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ**

Διπλωματική Εργασία
Του Σπουδαστή
Αναστάσιου Κοτσαμπόπουλου

Επίβλεψη εργασίας : Καθηγητής ΒΑΣ. Ι. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ

Ιούλιος 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σύνοψη	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 Διάβρωση με βελονισμούς	5
2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΜΕ ΒΕΛΟΝΙΣΜΟΥΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	
2.1 Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή των υλικών σε θλίψη και εφελκυσμό.....	8
2.2 Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή των υλικών σε διάτμηση.....	13
3. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕ ΒΕΛΟΝΙΣΜΟΥΣ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	
3.1 Διάβρωση με βελονισμούς και μικροδομή των υλικών	17
4. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕ ΒΕΛΟΝΙΣΜΟΥΣ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	
4.1 Διάβρωση με βελονισμούς του χάλυβα στο θαλάσσιο περιβάλλον.....	20
4.1.1 Γενικά	20
4.1.2 Μοντέλο ανάπτυξης διάβρωσης με βελονισμούς.....	21
4.1.3 Σύγκριση κατανομών Gumbel και Frechet	28
4.1.4 Συμπεράσματα	28
4.2. Επίδραση των βακτηρίων στη διάβρωση με βελονισμούς του χάλυβα στο θαλάσσιο περιβάλλον.....	29
4.2.1 Πρώιμη διάβρωση (φάση 0).....	29
4.2.2 Μακροχρόνια διάβρωση (φάσεις 3 και 4).....	30
4.2.3 Η επίδραση της σύστασης του χάλυβα στη συμπεριφορά των βακτηρίων.....	32
4.2.4 Η επίδραση της ταχύτητας, της σύστασης και του βάθους του νερού στη βακτηριακή δραστηριότητα.....	33
4.3 Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής των Bulk carriers.....	35
4.3.1 Διάβρωση των νομέων στα κύτη φορτίου των Bulk carriers	35
4.3.2 Ομοιόμορφη διάβρωση και διάβρωση με βελονισμούς	37
4.3.3 Μορφολογία της διάβρωσης με βελονισμούς	37
4.3.4 Έλεγχος της αντοχής σε εφελκυσμό.....	38
4.3.5 Έλεγχος αντοχής σε θλίψη	52
4.3.6 Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στον τοπικό και στρεπτο-καμπτικό λυγισμό της μεταλλικής κατασκευής των Bulk Carriers	58
5. ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕ ΒΕΛΟΝΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΡΩΓΜΕΣ	
5.1 Εισαγωγή	76
5.2 Θεωρητικό μοντέλο μετάβασης από διάβρωση με βελονισμούς σε ρωγμές.....	76
5.2.1 Αρχική κατανομή εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς	76
5.2.2 Εξέλιξη της κατανομής εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς	77
5.2.3 Ρυθμός ανάπτυξης εσοχών	77
5.2.4 Μετάβαση από τις εσοχές λόγω διάβρωσης σε ρωγμές	78
5.2.5 Επέκταση των ρωγμών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς	79

5.3 Πειραματική παρατήρηση της μετάβασης από τη διάβρωση με βελονισμούς σε ρωγμές	80
6. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕ ΒΕΛΟΝΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ	
6.1 Γενικά	83
6.2 Η συγκόλληση των ανοξείδωτων χαλύβων	84
6.3 Θεωρητική εκτίμηση της αντίστασης σε διάβρωση με βελονισμούς των ανοξείδωτων χαλύβων	88
6.4 Σύγκριση του δυναμικού διάβρωσης με βελονισμούς συγκόλλησης από duplex ανοξείδωτο χάλυβα και ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα	90
6.5 Παράγοντες σχετικοί με τη διαδικασία της συγκόλλησης που επιδρούν στην αντίσταση των συγκολλήσεων σε διάβρωση με βελονισμούς	95
6.5.1 Επίδραση της μικροδομής της συγκόλλησης στην αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς των συγκολλήσεων	95
6.5.2 Επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στην αντίσταση των συγκολλήσεων σε διάβρωση με βελονισμούς	109
6.5.3 Επίδραση του ρυθμού απόψυξης της συγκόλλησης στην αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς.....	112
6.5.4 Επίδραση της προσδιδόμενης θερμότητας στην αντίσταση των συγκολλήσεων σε διάβρωση με βελονισμούς	114
6.5.5 Συμπεράσματα	117
Ευχαριστίες	118
Βιβλιογραφία	119

Σύνοψη

Στόχος της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση της επίδρασης της διάβρωσης με βελονισμούς στην μηχανική αντοχή συγκολλημένων και μη ελασμάτων. Η διάβρωση με βελονισμούς είναι μια ιδιαίτερα καταστρεπτική μορφή διάβρωσης, καθώς έχει την ικανότητα να οδηγήσει σε αστοχία με ελάχιστη απώλεια υλικού. Στην παρούσα εργασία, αρχικά γίνεται αναφορά στις ιδιότητες της διάβρωσης με βελονισμούς και στην επίδραση της στην μηχανική αντοχή των υλικών. Στη συνέχεια αναλύεται ο μηχανισμός της διάβρωσης με βελονισμούς στο θαλάσσιο περιβάλλον και η επίδραση της σε στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Η μετάβαση από διάβρωση με βελονισμούς σε ρωγμές και η επέκτασή τους με την πάροδο του χρόνου αναλύεται στη συνέχεια. Τέλος περιγράφεται η επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στις συγκολλήσεις από ανοξείδωτο χάλυβα, και γίνεται περιγραφή των βασικών παραμέτρων σχετικών με τη διαδικασία της συγκόλλησης, που επιδρούν στην ευαισθησία των συγκολλήσεων σε διάβρωση με βελονισμούς.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Διάβρωση με βελονισμούς

Η διάβρωση με βελονισμούς είναι διάβρωση τοπικής μορφής, η οποία προκαλεί τη δημιουργία εσοχών στα υλικά (Fontana Mars G., Greene Norbert D., 1967). Οι εσοχές αυτές είναι δυνατόν να έχουν ποικίλα μεγέθη, αλλά συνήθως έχουν σχετικά μικρό μέγεθος, ενώ η διάμετρός τους στην επιφάνεια του υλικού είναι κατά κανόνα μικρότερη από το βάθος τους.

Η διάβρωση με βελονισμούς είναι μια από τις πιο καταστρεπτικές και επικίνδυνες μορφές διάβρωσης, καθώς είναι δύσκολο να εντοπιστεί και να αντιμετωπιστεί. Υπάρχει κίνδυνος για αστοχία των υλικών με ελάχιστη απώλεια βάρους, καθώς ένα μικρό μόνο τμήμα τους διαβρώνεται. Ο εντοπισμός εσοχών που έχουν προκληθεί από τον συγκεκριμένο τύπο διάβρωσης είναι δύσκολος, καθώς αυτές είναι συνήθως καλυμμένες με προϊόντα διάβρωσης και επίσης έχουν μικρό μέγεθος.

Η μορφολογία των εσοχών αυτών ποικίλει και μπορεί να είναι κωνικού, ελλειπτικού ή ημισφαιρικού τύπου. Οι περισσότερες εσοχές ξεκινούν από την επιφάνεια των υλικών και επεκτείνονται προς τα κάτω. Λιγότερες εσοχές ξεκινούν σε κατακόρυφες επιφάνειες, ενώ πολύ σπάνια εσοχές ξεκινούν από την κάτω μεριά του υλικού και αναπτύσσονται προς τα πάνω. Για την εμφάνιση ορατών εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, απαιτείται μια σημαντική χρονική περίοδος. Αυτή η περίοδος μπορεί να διαρκέσει μερικούς μήνες, ως και χρόνια, ανάλογα με το διαβρωτικό περιβάλλον και το υλικό. Ο ρυθμός ανάπτυξης του φαινομένου με την πάροδο του χρόνου γίνεται όλο και μεγαλύτερος.

Η ανάπτυξη του φαινομένου γίνεται σε ποικίλα στάδια: καταστροφή του προστατευτικού επιστρώματος, στάδιο μετασταθούς βελονισμού, ανάπτυξη εσοχών. Οποιοδήποτε από αυτά τα στάδια μπορεί να θεωρηθεί το πιο σημαντικό. Το φαινόμενο της διάβρωσης με βελονισμούς ξεκινά με την καταστροφή τμήματος του προστατευτικού επιστρώματος. Αυτό συμβαίνει εντελώς απρόβλεπτα και πολύ γρήγορα, ενώ η παρατήρησή του είναι εξαιρετικά δύσκολη γιατί συμβαίνει σε μια πολύ μικρή περιοχή. Στο στάδιο του μετασταθούς βελονισμού ανήκουν εσοχές που αναπτύσσονται για ένα πολύ περιορισμένο χρονικό διάστημα. Οι μετασταθείς εσοχές έχουν μικροσκοπικό μέγεθος και έχουν διάρκεια ζωής μεγέθους δευτερολέπτων το πολύ. Ο μηχανισμός των μετασταθών εσοχών είναι σημαντικός, καθώς υπό συγκεκριμένες συνθήκες, αυτές συνεχίζουν να αναπτύσσονται έτσι ώστε να σχηματίσουν μεγαλύτερες εσοχές. Εσοχές που θεωρούνται σταθερές, έχουν ξεπεράσει το στάδιο των μετασταθών εσοχών και συνεχίζουν να αναπτύσσονται, ενώ αντίθετα οι μετασταθείς εσοχές σταματούν να αναπτύσσονται. Η ανάπτυξη των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς εξαρτάται από τη σύνθεση του υλικού το οποίο διαβρώνεται και από το δυναμικό διάβρωσης. Αν οι συνθήκες που επικρατούν στην εσοχή αλλάξουν και σταματήσουν να είναι τόσο επιθετικές, τότε θα σταματήσει και η επέκταση της εσοχής στο μέταλλο.

Η θερμοκρασία αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στη διάβρωση με βελονισμούς, καθώς πολλά υλικά δεν παρουσιάζουν διάβρωση με βελονισμούς κάτω από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Αυτή η θερμοκρασία ονομάζεται κρίσιμη θερμοκρασία διάβρωσης με βελονισμούς (Critical Pitting Temperature, CPT) και είναι ανεξάρτητη από τις

περιβαλλοντικές συνθήκες. Η θερμοκρασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ανάλογα με το δυναμικό διάβρωσης, ως μέτρο της πιθανότητας να εμφανιστεί διάβρωση με βελονισμούς σε κάποιο υλικό. Όσο πιο μεγάλη είναι αυτή η θερμοκρασία, τόσο πιο ανθεκτικό το υλικό στον συγκεκριμένο τύπο διάβρωσης.

Τις περισσότερες φορές, για αστοχίες λόγω διάβρωσης με βελονισμούς ευθύνονται ιόντα χλωρίου που περιέχονται σε υδάτινα διαλύματα. Ακόμα και τα πιο ανθεκτικά σε διάβρωση κράματα μπορούν να υποστούν διάβρωση με βελονισμούς από τα ιόντα αυτά (π.χ.: CuCl_2 , FeCl_3).

Η διάβρωση με βελονισμούς συνδέεται συνήθως με στάσιμες συνθήκες του διαβρωτικού περιβάλλοντος, π.χ. μια δεξαμενή γεμάτη με κάποιο υγρό ή κάποιο υγρό παγιδευμένο σε κάποιο τμήμα μιας σωληνώσεως. Κίνηση ή αυξανόμενη ταχύτητα του διαβρωτικού περιβάλλοντος συχνά προκαλεί την ελάττωση της εμφάνισης του φαινομένου. Κατ' αυτό τον τρόπο μια αντλία σε συνεχή λειτουργία δε θα εμφάνιζε διάβρωση με βελονισμούς, ενώ θα διαβρωνόταν έντονα, αν σταματούσε η λειτουργία της για σημαντικές χρονικές περιόδους.

Οι ανοξειδωτοί χάλυβες είναι η πιο ευπαθής κατηγορία μετάλλων ή κραμάτων, σε διάβρωση με βελονισμούς. Γι' αυτό το λόγο έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες για τη βελτίωση της αντοχής των συγκεκριμένων μετάλλων σε διάβρωση με βελονισμούς. Οι συνηθισμένοι χάλυβες παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση με βελονισμούς από τους ανοξειδωτους. Αν και η αντοχή σε διάβρωση των συνηθισμένων χαλύβων είναι εν γένει μικρότερη από την αντίστοιχη αντοχή των ανοξειδωτων χαλύβων, αυτοί δεν παρουσιάζουν διάβρωση με βελονισμούς σε τόσο μεγάλο βαθμό.

Εφ' όσον η διάβρωση με βελονισμούς είναι μια τοπική μορφή διάβρωσης, μέθοδοι μέτρησης της απώλειας βάρους του υλικού λόγω διάβρωσης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να γίνει αξιολόγηση ή/και σύγκριση της διάβρωσης που έχουν υποστεί διάφορα υλικά. Η απώλεια βάρους είναι πολύ μικρή και δεν είναι δυνατόν να καθορίσει το βάθος στο οποίο έχουν εισχωρήσει οι εσοχές λόγω της διάβρωσης με βελονισμούς. Κατ' αυτό τον τρόπο, ο υπολογισμός του μέσου βάθους των εσοχών δεν αποτελεί ικανοποιητική μέθοδο για να εκτιμηθεί η ζημιά που έχει υποστεί το υλικό λόγω της διάβρωσης με βελονισμούς, καθώς η βαθύτερη εσοχή είναι αυτή που οδηγεί στην αστοχία του υλικού. Αντίθετα, η μέτρηση του μέγιστου βάθους των εσοχών αποτελεί έναν πιο αξιόπιστο τρόπο για την αξιολόγηση της διάβρωσης με βελονισμούς που έχει υποστεί ένα υλικό. Δεν θα πρέπει, όμως, να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος αυτή για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς σε διάβρωση έξω από πειραματικά εργαστήρια, καθώς το αποτέλεσμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του δείγματος που έχει ληφθεί.

Οι κυριότεροι παράγοντες που συμβάλουν στην εμφάνιση και την εξάπλωση της διάβρωσης με βελονισμούς είναι οι ακόλουθοι:

- Η παρουσία τοπικών ανωμαλιών στην επιφάνεια του υλικού.
- Τοπική φθορά ή κακή εφαρμογή του προστατευτικού επιστρώματος
- Η χημική σύσταση του νερού, η οποία μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή του προστατευτικού επιστρώματος, εφ' όσον αυτό έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο και υψηλή περιεκτικότητα σε χλώριο

Η πρακτική σημασία της διάβρωσης με βελονισμούς εξαρτάται από το πάχος του υλικού και από τον ρυθμό εξάπλωσής της σε αυτό. Έτσι, σε λεπτά τμήματα ενός υλικού

η διάβρωση με βελονισμούς μπορεί να έχει μεγάλη σημασία, ενώ σε παχύτερα μπορεί να μην έχει σημαντική επίδραση στην αντοχή του υλικού. Ο ρυθμός διάβρωσης ελατώνεται με την αύξηση του αριθμού των εσοχών που δημιουργούνται από τη διάβρωση με βελονισμούς.

Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι οι εσοχές αυτές πρέπει να μοιραστούν την υπάρχουσα καθοδική περιοχή που ελέγχει το ρεύμα διάβρωσης.

Η διάβρωση με βελονισμούς συνδέεται συχνά και με άλλους τύπους διάβρωσης. Για παράδειγμα, ενδοκρυσταλική διάβρωση και ρωγμές είναι δυνατόν να ξεκινήσουν από την εσοχή που έχει δημιουργηθεί από τη διάβρωση με βελονισμούς και να εισχωρήσουν βαθύτερα στο μέταλλο.

Κατά καιρούς έχουν γίνει προσπάθειες να γίνει μια στατιστική προσέγγιση στον ρυθμό διάδοσης της διάβρωσης με βελονισμούς. Μια τέτοια μέθοδος είναι και η στατιστική μέθοδος ακροτήτων. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, αρχικά μετριέται το μέγιστο βάθος των εσοχών σε διάφορα δοκίμια που έχουν υποστεί διάβρωση με βελονισμούς και έπειτα κατατάσσονται τα βάθη αυτά των εσοχών σε αύξουσα μορφή. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθούν τα βάθη των εσοχών που πιθανώς μπορούν να επηρεάσουν το σύστημα από το οποίο αντλήθηκαν τα δεδομένα.

Για την αντιμετώπιση της διάβρωσης με βελονισμούς, ο γενικός κανόνας είναι να χρησιμοποιούνται υλικά ανθεκτικά στον συγκεκριμένο τύπο διάβρωσης. Για το σκοπό αυτό μπορούν να αυξηθούν οι συγκεντρώσεις κάποιων στοιχείων στα κράματα των μετάλλων, έτσι ώστε να αυξηθεί η αντοχή τους σε διάβρωση με βελονισμούς. Για παράδειγμα, στους ανοξείδωτους χάλυβες, η αύξηση της περιεκτικότητας σε μολυβδένιο μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης διάβρωσης με βελονισμούς. Κάποια άλλα στοιχεία, όπως άζωτο και βολφράμιο, έχουν ευεργετική επίδραση στη διαβρωτική αντοχή του συγκεκριμένου υλικού. Για την αξιολόγηση και σύγκριση της αντίστασης του ανοξείδωτου χάλυβα σε διάβρωση με βελονισμούς έχει αναπτυχθεί ο ακόλουθος τύπος:

$$\text{PREN} = \text{Cr} + 3.3\text{Mo} + 16\text{N} \text{ (wt\%)},$$

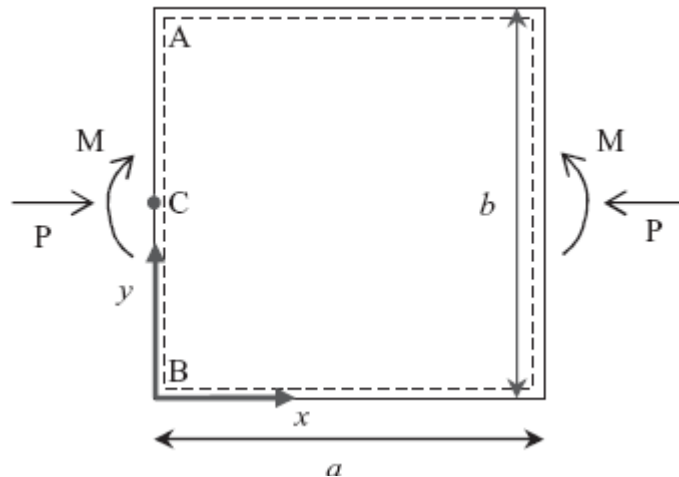
όπου 'Cr', 'Mo', 'N' οι επι τοις εκατό κατά βάρος περιεκτικότητες σε χρώμιο, μολυβδένιο και άζωτο και 'PREN' ο ισοδύναμος αριθμός διάβρωσης με βελονισμούς. Όσο μεγαλύτερη η τιμή αυτού του μεγέθους, τόσο μεγαλύτερη και η αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς.

Η διάβρωση με βελονισμούς μπορεί να αντιμετωπιστεί με την προσθήκη αναστολέων (inhibitors). Οι ουσίες αυτές, όταν εισέρχονται σε διαβρωτικό περιβάλλον, έχουν τη δυνατότητα να περιορίσουν την επέκταση του φαινομένου και δρουν με διάφορους τρόπους: κάποιοι αναστολείς ελαττώνουν την μετακίνηση των ιόντων χλωρίου στην εσοχή, ενώ άλλοι επιδρούν στην κινητική του φαινομένου.

2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΜΕ ΒΕΛΟΝΙΣΜΟΥΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

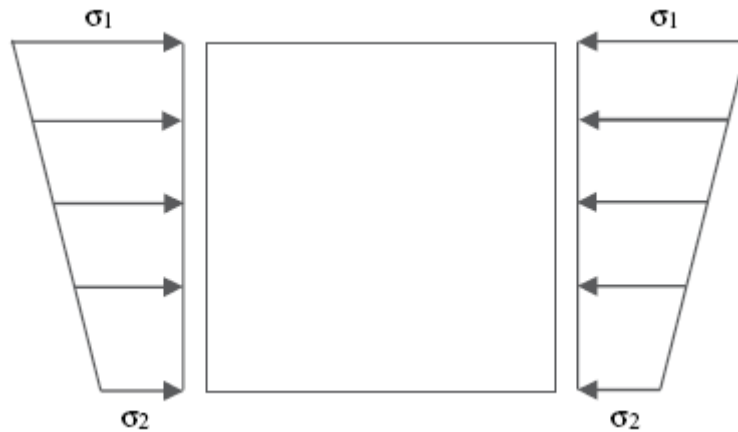
2.1 Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή των υλικών σε εφελκυσμό και σε θλίψη

Θεωρούμε έναν φορέα με τις διαστάσεις και φορτίσεις που φαίνονται στο σχήμα 2.1 (Nakai Tatsuro, Matsushita Hisao, Yamamoto Norio, 2005):



Σχήμα 2.1. Τετράγωνος φορέας σε θλίψη και κάμψη.

Οι δύο κάθετες πλευρές του φορέα φορτίζονται θλιπτικά, ενώ στο σημείο 'C' εφαρμόζεται μια καμπτική ροπή. Η κατανομή των (θλιπτικών) τάσεων φαίνεται στο Σχήμα 2.2:



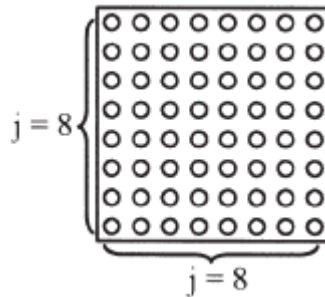
Σχήμα 2.2. Κατανομή τάσεων στο φορέα.

Η μέγιστη θλιπτική τάση είναι η ' σ_1 ', ενώ η ελάχιστη η ' σ_2 '. Θεωρούμε τον ακόλουθο συντελεστή ' φ ', ο οποίος εκφράζει τη φόρτιση που δέχεται ο φορέας:

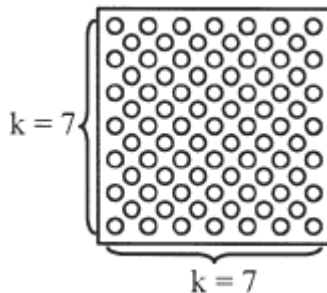
$$\varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1}$$

Για $\varphi = 0$ έχουμε μόνο θλίψη, ενώ για $\varphi = 2$ έχουμε μόνο κάμψη. Η μορφή των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς θα θεωρήσουμε ότι εκφράζεται από τους ακόλουθους παράγοντες: κατανομή εσοχών, διάμετρος εσοχών και συντελεστής 'φ'. Οι παράγοντες αυτοί εκφάζονται από τα σύμβολα: $A_j - D - \varphi$ και $B_k - D - \varphi$. Οι συντελεστές 'A' και 'B' εκφράζουν το είδος της κατανομής των εσοχών, οι συντελεστές 'j' και 'k' τον αριθμό των εσοχών σε κάθε σειρά, οι συντελεστές 'D' τη διάμετρό τους και 'φ' είναι ο συντελεστής που αναφέρθηκε παραπάνω.

Για παράδειγμα, στην επόμενη εικόνα έχουμε κατανομή $A_8 - D - \varphi$:



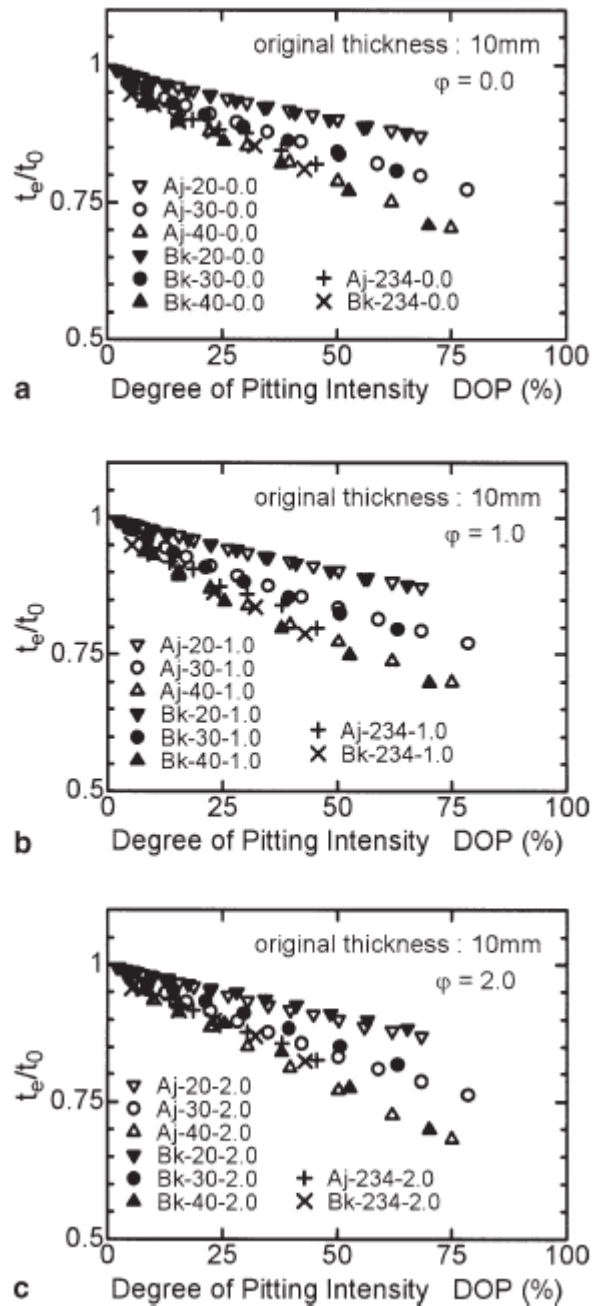
ενώ στην παρακάτω εικόνα η κατανομή των εσοχών είναι η $B_7 - D - \varphi$:



Θα θεωρήσουμε ότι η κατανομή των εσοχών λόγω διάβρωσης είναι η ίδια και για τις δύο πλευρές του φορέα. Κάτι τέτοιο δεν αποτελεί συνήθως αληθινό γεγονός, αλλά από πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί, έχει αποδειχθεί ότι η διαφορετική κατανομή των εσοχών στις δύο πλευρές του φορέα δεν επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του φορέα.

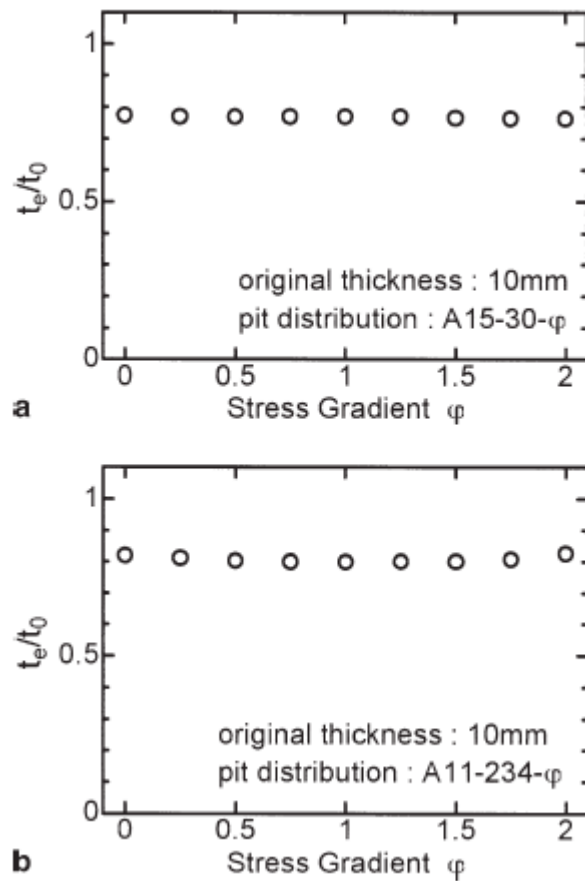
Για την εκτίμηση της αντοχής ενός υλικού το οποίο έχει υποστεί διάβρωση με βελονισμούς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέση απώλεια πάχους. Κάτι τέτοιο είναι δύσκολο να γίνει, όμως, λόγω της ανομοιομορφίας των εσοχών που έχουν δημιουργηθεί λόγω της διάβρωσης με βελονισμούς. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ο βαθμός έντασης της διάβρωσης με βελονισμούς (Degree of pitting intensity, DOP). Ο βαθμός έντασης της διάβρωσης με βελονισμούς ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας του υλικού που παρουσιάζει διάβρωση με βελονισμούς προς τη συνολική επιφάνεια του υλικού. Το ισοδύναμο πάχος 't_e', ορίζεται ως το πάχος ενός υλικού που παθαίνει ομοιόμορφη διάβρωση, έτσι ώστε το υλικό αυτό να έχει την ίδια αντοχή με ένα άλλο που παθαίνει διάβρωση με βελονισμούς. Το ισοδύναμο πάχος είναι συνάρτηση του βαθμού έντασης

της διάβρωσης με βελονισμούς, της διαμέτρου των εσοχών που έχουν δημιουργηθεί λόγω της διάβρωσης με βελονισμούς και του αρχικού πάχους του υλικού. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η σχέση μεταξύ του βαθμού έντασης της διάβρωσης με βελονισμούς και του ισοδύναμου πάχους t_e για διάφορες τιμές του συντελεστή φ .



Σχήμα 2.3. Σχέση μεταξύ της έντασης της διάβρωσης με βελονισμούς (DOP) και του ισοδύναμου πάχους για διάφορες τιμές του φ .

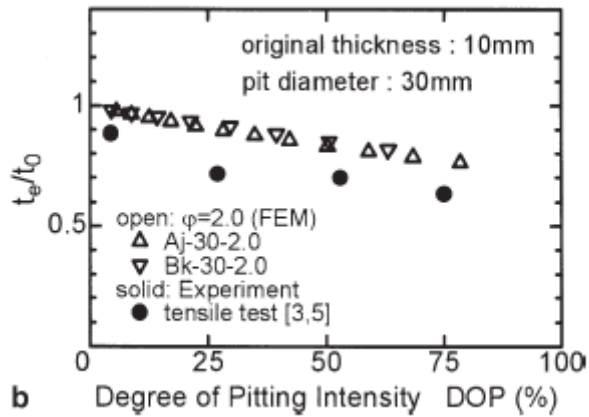
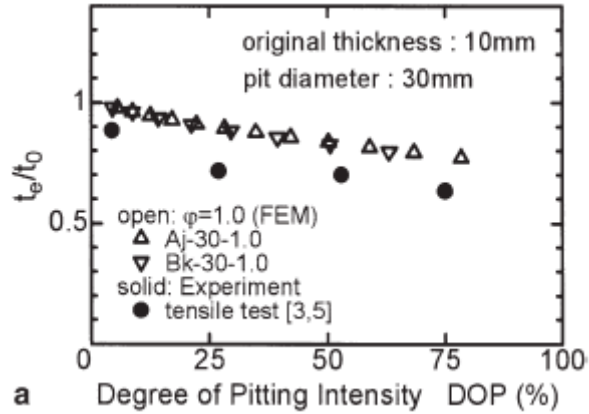
Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται η εξάρτηση του ισοδύναμου πάχους από τον συντελεστή 'φ'.



Σχήμα 2.4. Σχέση ανάμεσα στο ισοδύναμο πάχος και τον συντελεστή φ.

Παρατηρούμε πως η τιμή του ισοδύναμου πάχους παραμένει περίπου σταθερή για όλο το εύρος των τιμών του συντελεστή 'φ'. Συμπεραίνουμε έτσι πως το είδος της καταπόνησης (θλίψη – θλίψη\κάμψη) δεν επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του υλικού που υφίσταται διάβρωση με βελονισμούς.

Στο Σχήμα 2.5 εισάγεται και η αντοχή σε εφελκυσμό ενός υλικού με το ίδιο πάχος και τον ίδιο βαθμό έντασης διάβρωσης με βελονισμούς, σε όρους ισοδύναμου πάχους:



Σχήμα 2.5. Σχέση ανάμεσα στο ισοδύναμο πάχος και το βαθμό έντασης της διάβρωσης με βελονισμούς και σύγκριση με αποτελέσματα πειράματος εφελκυσμού.

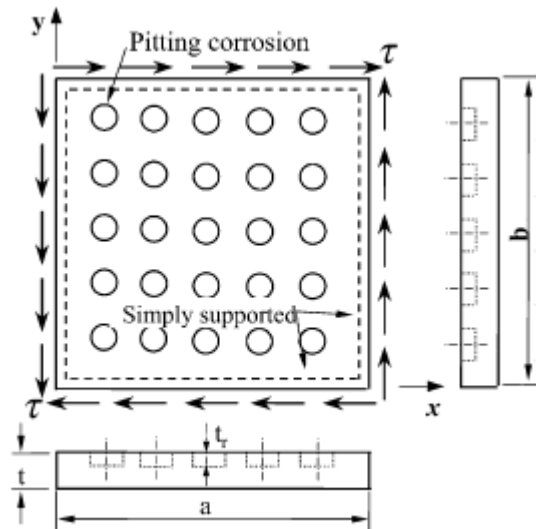
Όπως φαίνεται, η ελάττωση του ισοδύναμου πάχους σε σχέση με τον βαθμό έντασης της διάβρωσης με βελονισμούς είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση εφελκυστικής καταπόνησης.

Έτσι, καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η αντοχή ενός υλικού που έχει υποστεί διάβρωση με βελονισμούς είναι ανεξάρτητη από τον συντελεστή ϕ , δηλαδή είναι η ίδια για θλιπτική και θλιπτική – καμπτική καταπόνηση.
- Η ελάττωση της αντοχής σε εφελκυσμό ενός υλικού που έχει υποστεί διάβρωση με βελονισμούς, είναι μεγαλύτερη από την ελάττωση της αντοχής σε κάμψη – θλίψη, σε όρους ισοδύναμου πάχους.

2.2 Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή των υλικών σε διάτμηση

Θεωρούμε ένα φορέα που έχει υποστεί διάβρωση και που υποβάλλεται σε διάτμηση σύμφωνα με το Σχήμα 2.6 (Paik Jeom kee, Lee Jae Myung, Ko Man Ju, 2004):



Σχήμα 2.6. Φορέας με διάβρωση με βελονισμούς που δέχεται διατμητικές δυνάμεις.

Όπου : ‘b’ , το πλάτος του φορέα

‘a’ , το μήκος του φορέα

‘t’ , το πάχος του φορέα

‘t_r’ , το βάθος της εσοχής λόγω διάβρωσης με βελονισμούς

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η κατανομή της διάβρωσης με βελονισμούς είναι ομοιόμορφη. Για να εκφράσουμε το βαθμό της διάβρωσης που εμφανίζει ένας φορέας, θα χρησιμοποιήσουμε το μέγεθος ‘DOP’ (degree of pit corrosion intensity) που αποτελεί το λόγο της επιφάνειας του φορέα στην οποία εμφανίζεται διάβρωση με βελονισμούς προς την συνολική επιφάνεια του. Η παράμετρος ‘DOP’ δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$DOP = a = \frac{1}{ab} \sum_1^n A_{pi} \times 100(\%)$$

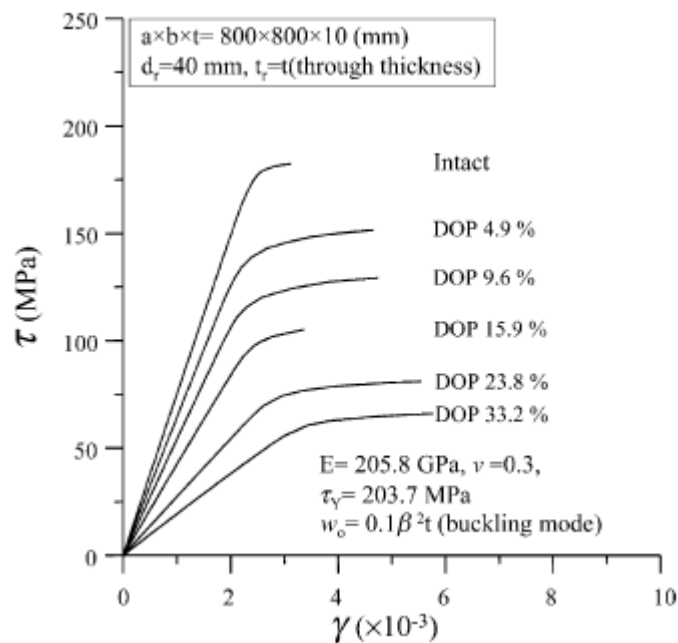
Στον παραπάνω τύπο ‘n’ είναι ο αριθμός των εσοχών που έχουν δημιουργηθεί λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, ‘A_{pi}’ η επιφάνεια που καταλαμβάνει η ‘i’ εσοχή, ‘a’ το μήκος του φορέα και ‘b’ το πλάτος του φορέα.

Η ελάττωση στην απόλυτη αντοχή σε διάτμηση ενός φορέα που εμφανίζει διάβρωση με βελονισμούς, μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της παραμέτρου ‘DOP’ σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$R_t = \frac{\tau_u}{\tau_{u0}}$$

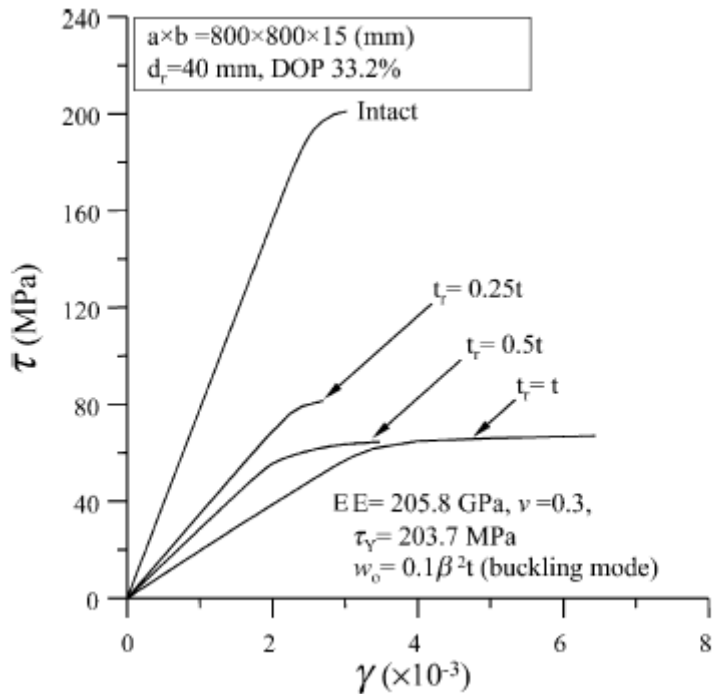
όπου ‘ τ_u ’, η μέγιστη αντοχή σε διάτμηση ενός φορέα που εμφανίζει διάβρωση με βελονισμούς και ‘ τ_{u0} ’ η μέγιστη αντοχή σε διάτμηση του φορέα χωρίς να εμφανίζει διάβρωση.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 2.7, δίνεται η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης σε διάτμηση για τον παραπάνω φορέα για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου ‘DOP’ και για ‘ $t_r = t$ ’.

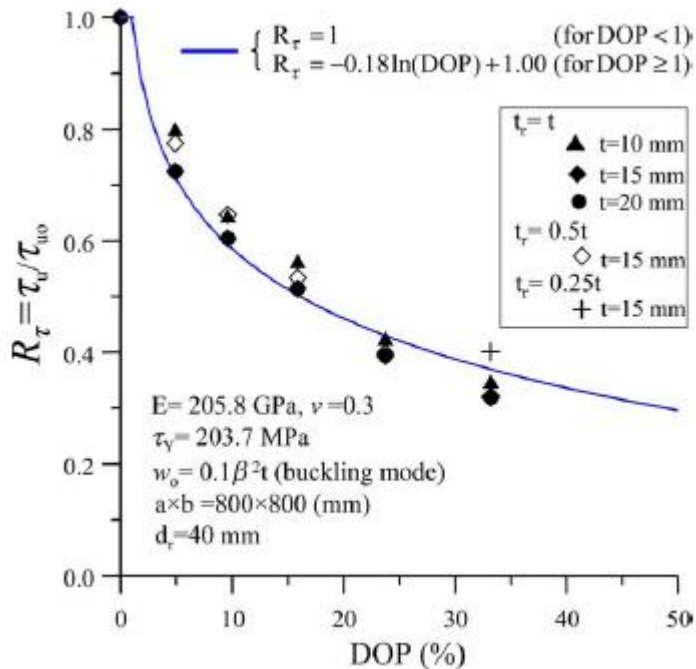


Σχήμα 2.7. Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για χαλύβδινο φορέα που εμφανίζει διάβρωση με βελονισμούς και δέχεται διατμητικές δυνάμεις.

Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται δίνεται η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για τον παραπάνω φορέα για σταθερή τιμή της παραμέτρου ‘DOP’ και διαφορετικές τιμές του βάθους των εσοχών που έχουν δημιουργηθεί λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, ‘ t_r ’.

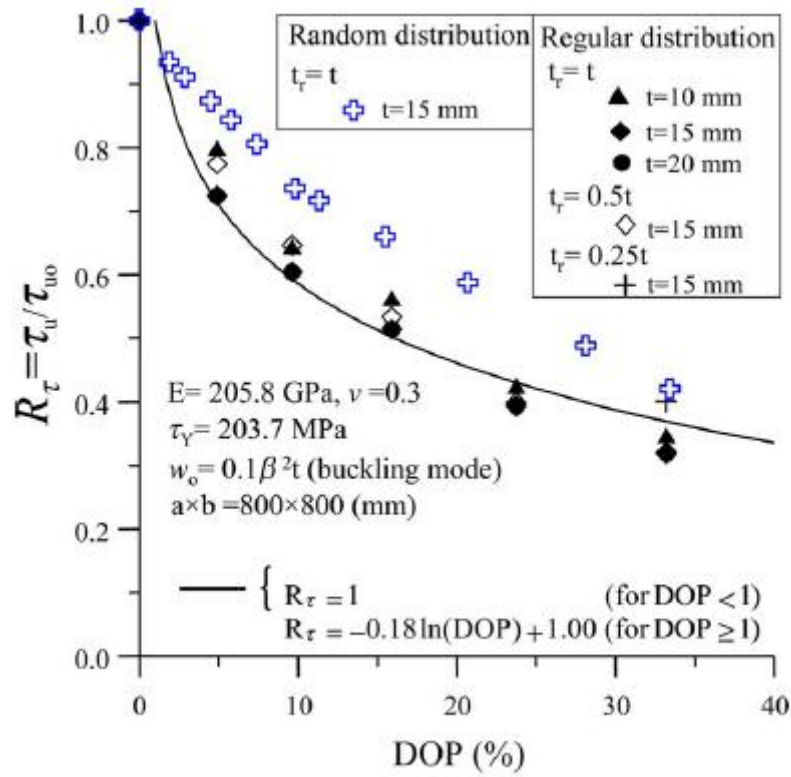


Σχήμα 2.8. Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για χαλύβδινο φορέα που εμφανίζει διάβρωση με βελονισμούς και δέχεται διατμητικές δυνάμεις. Στο Σχήμα 2.9 δίνεται η σχέση μεταξύ των συντελεστών ‘ R_τ ’ και ‘DOP’ για τον παραπάνω φορέα για διαφορετικές τιμές του βάθους των εσοχών ‘ t_r ’. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η αντοχή του φορέα σε διάτμηση μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του βαθμού έντασης της διάβρωσης με βελονισμούς (DOP).



Σχήμα 2.9. Σχέση ανάμεσα στην απόλυτη αντοχή του φορέα σε διάτμηση και το βαθμό έντασης της διάβρωσης με βελονισμούς

Στην περίπτωση που η κατανομή των εσοχών δεν είναι ομοιόμορφη αλλά τυχαία, προκύπτει μια μικρή απόκλιση στη σχέση των παραμέτρων 'DOP' και 'R_τ', όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10

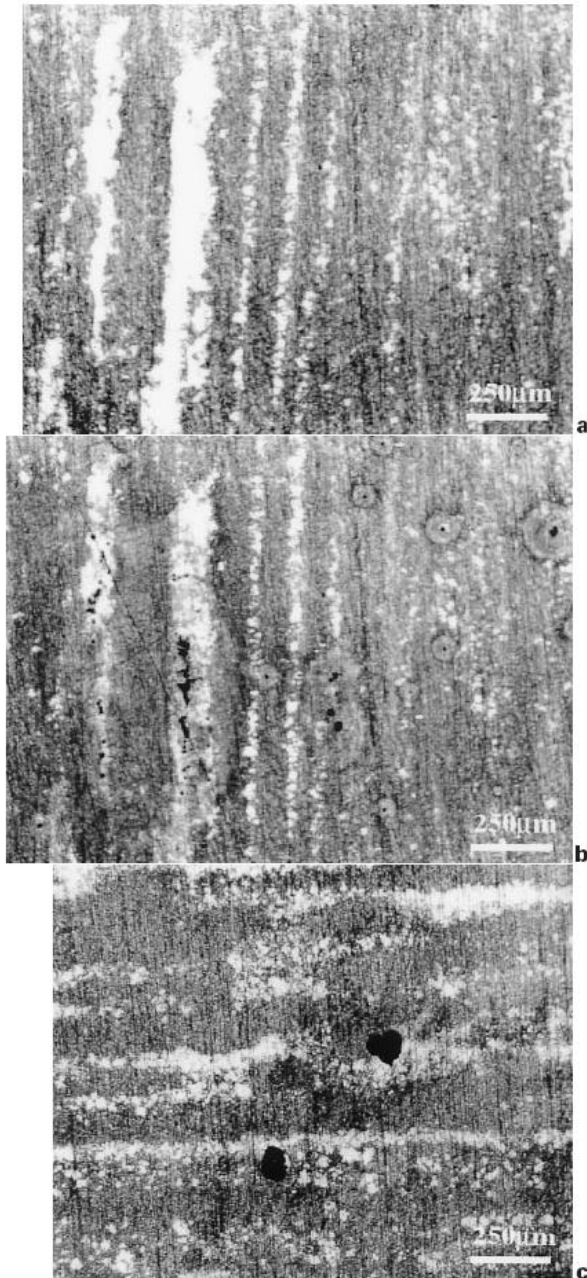


Σχήμα 2.10. Σύγκριση της ελάττωσης της αντοχής σε διάτμηση των δοκιμίων για ομοιόμορφη και τυχαία κατανομή εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς.

3. Διάβρωση με βελονισμούς και μικροδομή των υλικών

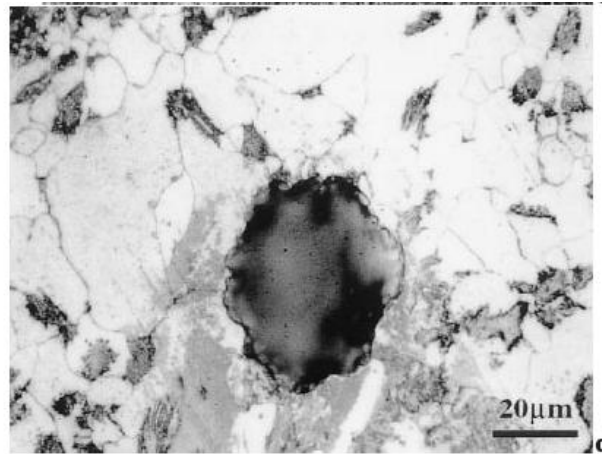
3.1 Διάβρωση με βελονισμούς και μικροδομή χαλύβδινων δοκιμίων

Η συμπεριφορά κραμάτων σε διάβρωση με βελονισμούς σε δεδομένο διαβρωτικό περιβάλλον εξαρτάται από τη σύστασή τους και από τη μικροδομή τους (Cui N. et al., 2000). Η συνύπαρξη δύο διαφορετικών μικροδομών είναι δυνατόν να προκαλέσει σημαντικές διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά του υλικού σε διάβρωση με βελονισμούς. Στις Εικόνες 3.1 a – c, φαίνεται η επιφανειακή μορφολογία ενός δείγματος από αγωγό με μικροδομή μαρτενσίτη – φερρίτη, πριν και μετά την έκθεσή του σε υδάτινο περιβάλλον.



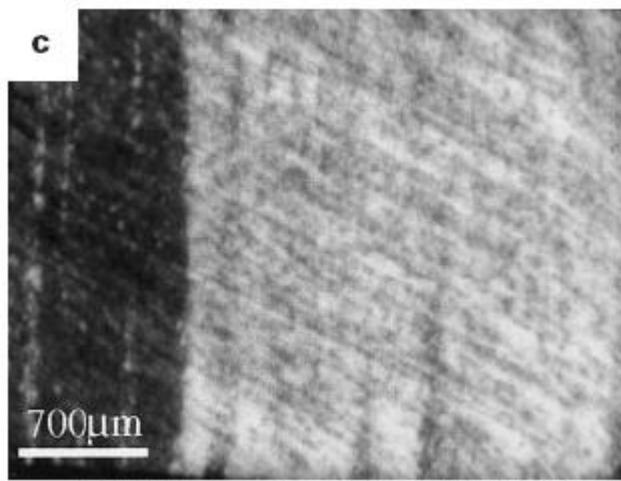
Εικόνα 3.1. Επιφανειακή μορφολογία δοκιμίου με μικροδομή μαρτενσίτη-φερρίτη.

Στην Εικόνα 'α' μπορεί να παρατηρηθεί η μαρτενσιτική μήτρα του υλικού (σκούρα περιοχή) και οι φερριτικές περιοχές (ανοιχτή περιοχή), το μέγεθος των οποίων ποικίλει. Στην εικόνα 'b' φαίνονται τα πρώτα αποτελέσματα της έκθεσης του δείγματος σε νερό. Έχουν εμφανιστεί εσοχές λόγω διάβρωσης με βελονισμούς στις φερριτικές περιοχές του δείγματος. Στην Εικόνα 'c' οι εσοχές αυτές έχουν επεκταθεί και στη μαρτενσιτική μήτρα του υλικού. Στην Εικόνα 3.2 φαίνεται μια εσοχή που έχει αναπτυχθεί στη φερριτική περιοχή σε μεγαλύτερη μεγέθυνση.

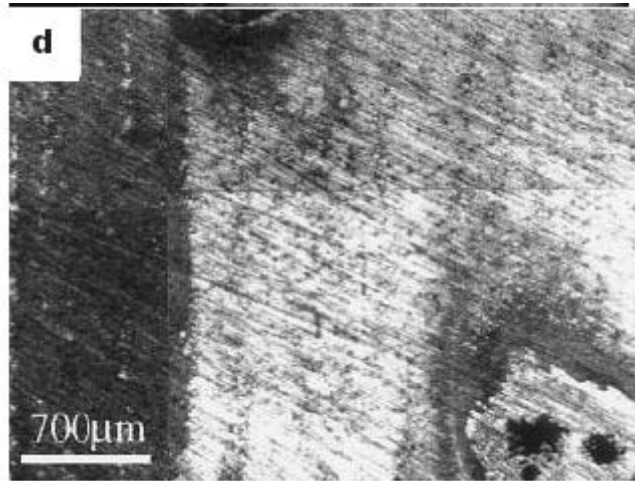


Εικόνα 3.2. Μεγέθυνση εσοχής λόγω διάβρωσης με βελονισμούς στη φερριτική φάση.

Στις Εικόνες 3.3 και 3.4, φαίνεται η επιφανειακή μορφολογία ενός δείγματος από αγωγό με μικροδομή περλίτη - μαρτενσίτη, πριν και μετά την έκθεσή του σε υδατικό περιβάλλον. Οι σκούρες και οι ανοικτές περιοχές αντιπροσωπεύουν περλίτη και μαρτενσίτη, αντίστοιχα. Σε αυτή την περίπτωση, διάβρωση με βελονισμούς παρατηρείται στη μαρτενσιτική φάση του υλικού.



Εικόνα 3.3. Μικροδομή δοκιμίου πριν την έκθεση σε υδατικό περιβάλλον.



Εικόνα 3.4. Μικροδομή δοκιμίου μετά την έκθεση σε υδατικό περιβάλλον

Έτσι καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Διάβρωση με βελονισμούς προκύπτει στη φερριτική φάση σε υλικά με μικροδομή μαρτενσίτη – φερίτη, ενώ σε υλικά με μικροδομή περλίτη – μαρτενσίτη, διάβρωση με βελονισμούς προκύπτει στη μαρτενσιτική φάση.
- Η διάβρωση με βελονισμούς σε υλικά με μικροδομή φερίτη – μαρτενσίτη, ενώ ξεκινά στη φερριτική φάση, είναι δυνατόν να προχωρήσει και στη μαρτενσιτική φάση.

4. Διάβρωση με βελονισμούς στο θαλάσσιο περιβάλλον

4.1 Διάβρωση με βελονισμούς του χάλυβα στο θαλάσσιο περιβάλλον.

4.1.1 Γενικά

Η διάβρωση με βελονισμούς είναι μια μορφή διάβρωσης που εμφανίζεται συχνά σε χαλύβδινες κατασκευές όπως πλοία, αγωγούς, παραθαλάσσιες κατασκευές, όταν τα προστατευτικά επιστρώματα ή οι μέθοδοι καθοδικής προστασίας, έχουν γίνει μη αποτελεσματικές ή δεν υπάρχουν καθόλου (Melchers Re, 2007). Χαλύβδινες κατασκευές που εκτίθενται σε θαλάσσιο περιβάλλον, συχνά εμφανίζουν σημαντική επιφανειακή διάβρωση. Προσεκτικός έλεγχος αυτών των επιφανειών, που συχνά απαιτεί και την αφαίρεση στρωμάτων σκουριάς, φανερώνει σημαντικού μεγέθους διάβρωση με βελονισμούς. Κάτι τέτοιο φαίνεται στις Εικόνες 4.1 και 4.2.



Εικόνα 4.1. Διάβρωση με βελονισμούς σε χάλυβδινη επιφάνεια μετά από έκθεση ενός έτους σε θαλάσσιο περιβάλλον.

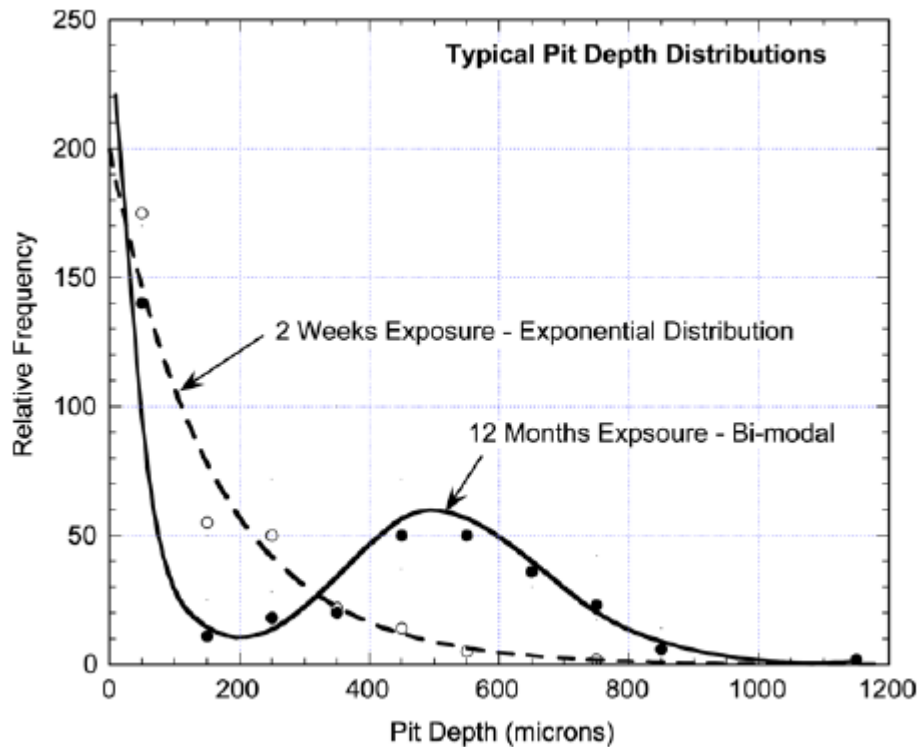


Εικόνα 4.2. Διάβρωση με βελονισμούς σε χάλυβδινη επιφάνεια μετά από έκθεση ενός έτους σε θαλάσσιο περιβάλλον.

Η διάβρωση με βελονισμούς μπορεί να έχει σημαντική επίπτωση στην αντοχή των υλικών όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 και συνάμα μπορεί να οδηγήσει σε περιβαλλοντικές ή άλλου είδους καταστροφές. Γι' αυτό το λόγο, η πρόβλεψη του ρυθμού ανάπτυξης των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς σε χάλυβδινες κατασκευές, παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον.

4.1.2 Μοντέλο ανάπτυξης διάβρωσης με βελονισμούς

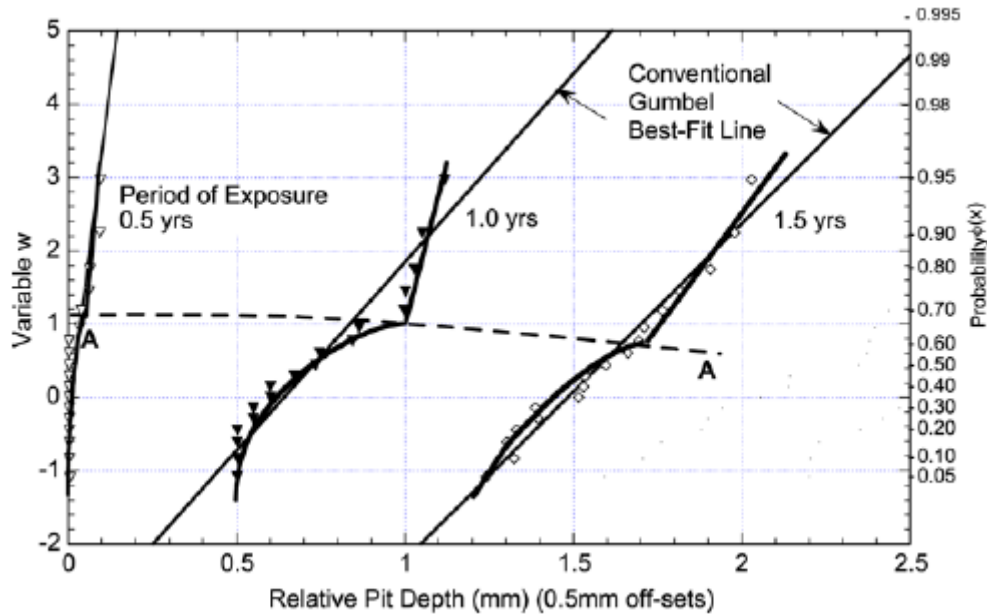
Η παραδοσιακή μέθοδος για την πρόβλεψη του μεγέθους της διάβρωσης με βελονισμούς σε ένα φορέα, είναι η συλλογή στοιχείων για τα βάθη των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς από πανομοιότυπες επιφάνειες και η αναπαράστασή τους σε ένα διάγραμμα Gumbel. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της διάβρωσης με βελονισμούς για μεγαλύτερες επιφάνειες και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Η μέθοδος αυτή δεν δίνει πάντα ικανοποιητικά αποτελέσματα, για διάφορους λόγους, αλλά ο κυριότερος έχει να κάνει με το γεγονός ότι η κατανομή των εσοχών δεν είναι ομοιόμορφη. Εκτός από πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, οι εσοχές λόγω διάβρωσης με βελονισμούς που αναπτύσσονται, μπορούν να τοποθετηθούν σε δύο κατηγορίες: Στις 'σταθερές' εσοχές που είναι και οι βαθύτερες και στις 'μετασταθείς' εσοχές που είναι μικρότερες. Μια τυπική κατανομή των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, φαίνεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1. Τυπική κατανομή της διάβρωσης με βελονισμούς σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης.

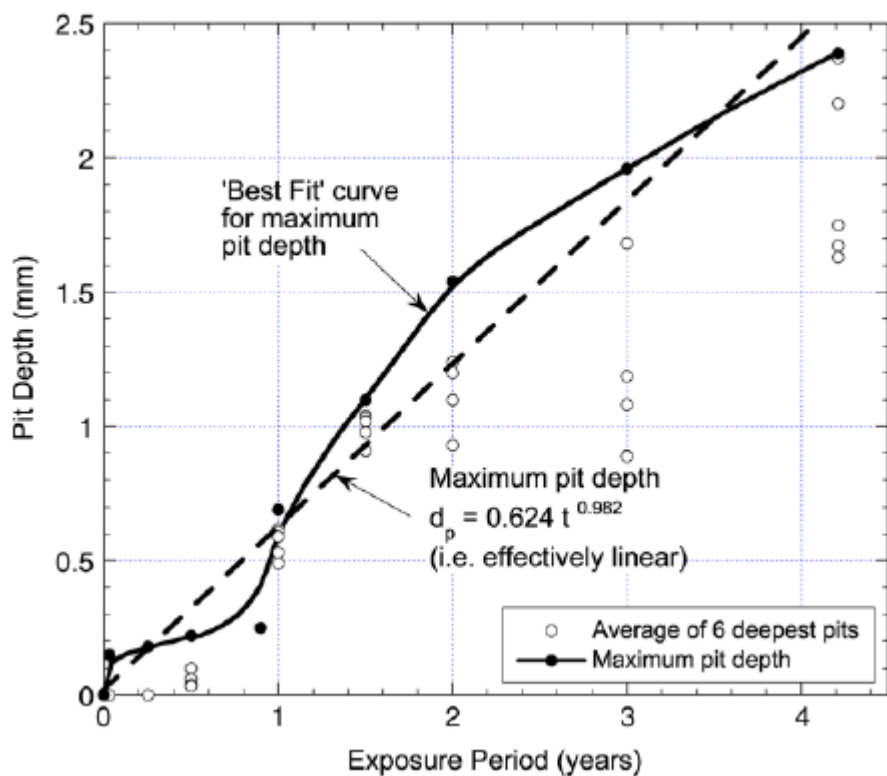
Οι κατανομές πιθανότητας για τους δύο τύπους εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς είναι η εκθετική για τις μετασταθείς εσοχές, ενώ για τις σταθερές εσοχές η κανονική ή Gumbel. Οι κατανομές αυτές περιγράφουν ικανοποιητικά το φαινόμενο της διάβρωσης με βελονισμούς για την περίοδο μετά την παροδο περίπου ενός έτους από την αρχή του φαινομένου. Οι μετασταθείς εσοχές δεν ξεκινούν να αναπτύσσονται απαραίτητα με την αρχή της διάβρωσης, αλλά θα σταματήσουν να αναπτύσσονται, σε κάποια χρονική στιγμή. Οι σταθερές εσοχές, αντίθετα, θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται με το χρόνο. Μια ακόμη κατηγορία εσοχών, οι 'υπερσταθερές' εσοχές, έχουν οριστεί ως οι σταθερές εσοχές που αναπτύσσονται με τον γρηγορότερο ρυθμό από όλες τις εσοχές. Επίσης, οι μετασταθείς εσοχές δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να είναι βαθύτερες από τις σταθερές ή τις 'υπερσταθερές' εσοχές.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα Gumbel που απεικονίζει την κατανομή της διάβρωσης με βελονισμούς σε ένα πειραματικό δοκίμιο, για τρεις χρονικές περιόδους.



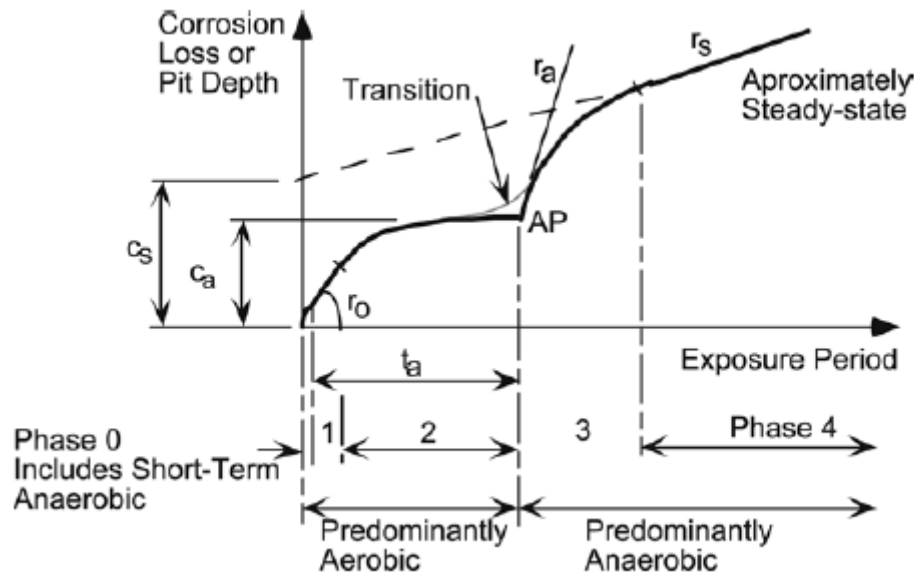
Σχήμα 4.2. Διάγραμμα Gumbel στο οποίο παρουσιάζονται οι βαθύτερες εσοχές λόγω διάβρωσης με βελονισμούς σε σχέση με το χρόνο έκθεσης στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Είναι προφανές ότι μια ευθεία γραμμή δεν μπορεί να παρεμβάλει ικανοποιητικά όλα τα πειραματικά δεδομένα για καμία από τις χρονικές περιόδους που απεικονίζονται. Όμως, μπορεί να παρατηρηθεί, πως μια ευθεία γραμμή παρεμβάλει ικανοποιητικά τα δεδομένα του διαγράμματος πάνω από τη γραμμή AA', που είναι η περιοχή δεδομένων των σταθερών εσοχών. Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται η εξέλιξη της διάβρωσης με βελονισμούς σε χάλυβα σε θαλάσσιο περιβάλλον, με την πάροδο του χρόνου.



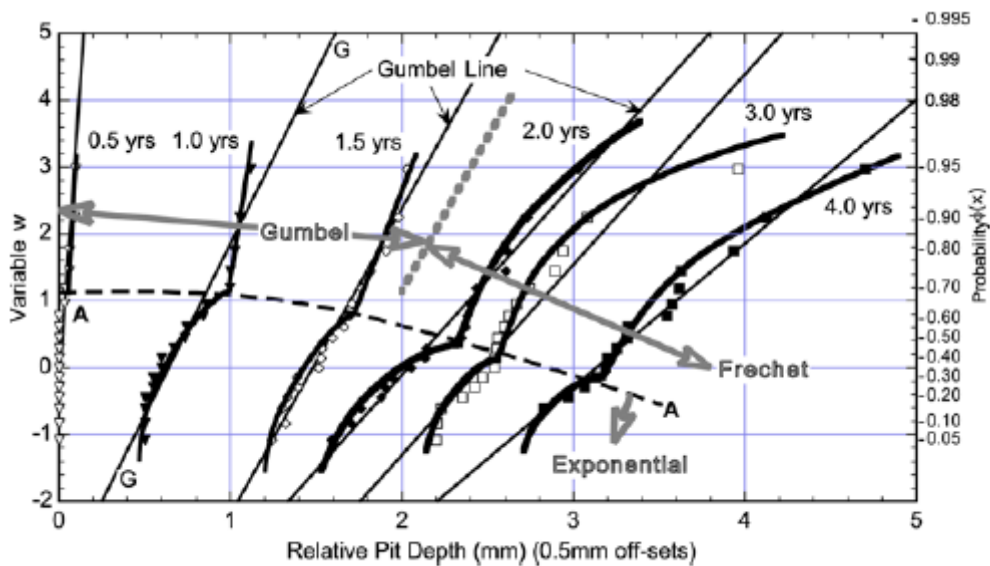
Σχήμα 4.3. Εξέλιξη της διάβρωσης με βελονισμούς σε σχέση με το χρόνο έκθεσης στο θαλάσσιο περιβάλλον που φανερώνει σημαντική απόκλιση από τη γραμμικότητα.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε μια σημαντική αύξηση στο ρυθμό της διάβρωσης, μετά από μια περίοδο όλο και μικρότερης επέκτασης των εσοχών λόγω διάβρωσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αλλαγή του μηχανισμού της διάβρωσης με βελονισμούς, από ηλεκτροχημική διαδικασία, σε διαδικασία που κυβερνάται από μικροβιολογικές διαδικασίες. Στο Σχήμα 4.4 φαίνονται οι φάσεις της διάβρωσης με βελονισμούς, του χάλυβα σε θαλάσσιο περιβάλλον.



Σχήμα 4.4. Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου της διάβρωσης με βελονισμούς σε σχέση με το χρόνο έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον.

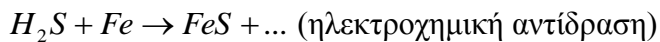
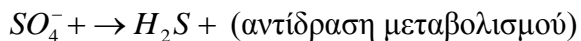
Στην φάση 3 του παραπάνω διαγράμματος, αλλάζει ο μηχανισμός της διάβρωσης με βελονισμούς, ο οποίος ελέγχεται πλέον από το μεταβολισμό των βακτηρίων (φάσεις 3,4). Σε αυτή τη φάση, η αλλαγή του μηχανισμού διάβρωσης οδηγεί σε διαφορετικούς ρυθμούς ανάπτυξης των εσοχών, κάτι που φαίνεται και στο διάγραμμα Gumbel του Σχήματος 4.5.



Σχήμα 4.5. Διάγραμμα Gumbel για το μέγιστο βάθος της διάβρωσης με βελονισμούς για διάφορες χρονικές περιόδους.

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η κατανομή των εσοχών δεν μπορεί να αναπαρασταθεί με γραμμική παρεμβολή, ούτε στο πάνω τμήμα του διαγράμματος Gumbel, που αναπαριστά σταθερές εσοχές.

Μεγάλη σημασία έχει η αποτελεσματική περιγραφή του μέγιστου βάθους των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, για τις φάσεις 3 και 4 του μοντέλου. Οι φάσεις αυτές είναι σύνθετες και περιλαμβάνουν ηλεκτροχημικές και μικροβιολογικές διαδικασίες. Τα βακτήρια που είναι κρίσιμα για τη διάβρωση είναι τα βακτήρια SRB (Sulphate-reducing bacteria), τα οποία δεν επιτίθενται στο μέταλλο απ'ευθείας. Τα προϊόντα του μεταβολισμού αυτών των βακτηρίων είναι αυτά που συμβάλουν στην διαδικασία της διάβρωσης. Τα βακτήρια προκαλούν τη διάσπαση των ριζών του θείου (SO_4^-) που υπάρχουν ελεύθερες στο θαλασσίνο νερό, σε θείο και υδρόθειο (H_2S). Αυτές οι ενώσεις αλληλεπιδρούν με το χάλυβα και προκύπτει η διάβρωση του. Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι οι ακόλουθες:



Συνοπτικά έχουμε για τις φάσεις 3 και 4:

Φάση 3: Οι περιβαλλοντικές συνθήκες που έχουν δημιουργηθεί από τις προηγούμενες φάσεις της διάβρωσης με βελονισμούς, είναι ιδανικές ώστε τα βακτήρια να δράσουν. Ο ρυθμός του μεταβολισμού των βακτηρίων, που ρυθμίζει και τον ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα, εξαρτάται από τον ρυθμό που τα βακτήρια λαμβάνουν θρεπτικά συστατικά από το περιβάλλον.

Φάση 4: Και σε αυτή τη φάση της διάβρωσης με βελονισμούς, ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτάται από το μεταβολισμό των βακτηρίων. Σε αυτή την περίπτωση όμως ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτάται και από την αργή φθορά του εξωτερικού τμήματος σκουριάς που έχει δημιουργηθεί.

Για την ανάπτυξη ενός μοντέλου για την περιγραφή της ποικιλομορφίας των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς σε αναερόβιες συνθήκες, σημαντικό ρόλο παίζει ο ρυθμός που τα βακτήρια λαμβάνουν θρεπτικά συστατικά, καθώς ο ρυθμός αυτός καθορίζει και το ρυθμό της διάβρωσης. Έστω, $e(t, T)$ ο ρυθμός πρόσληψης θρεπτικών συστατικών από τα βακτήρια, όπου 't' ο χρόνος που έχει παρέλθει από την έναρξη της αναερόβιας δραστηριότητας (αρχή φάσης 3) και 'T', η μέση θερμοκρασία του νερού. Επίσης, έστω $\rho(t)$ το ποσοστό της επιφάνειας του μετάλλου που έχει υποστεί διάβρωση με βελονισμούς. Έτσι, ο ρυθμός πρόσληψης θρεπτικών συστατικών από τα βακτήρια σε κάθε εσοχή σε κάποια στιγμή 't' είναι ανάλογος με το λόγο $\frac{e(t, T)}{\rho(t)}$.

Αυτό προϋποθέτει ότι οι βαθύτερες εσοχές λαμβάνουν αναλογικά περισσότερα θρεπτικά συστατικά από τις μικρότερες εσοχές.

Σε αυτή τη φάση της διάβρωσης με βελονισμούς, ο ρυθμός ανάπτυξης των εσοχών είναι ανάλογος με το ρυθμό του μεταβολισμού των βακτηρίων και άρα με το ρυθμό πρόσληψης θρεπτικών συστατικών από τα βακτήρια. Έτσι, ισχύει ότι:

$$\dot{x}(t, T) = Ce(t, T) / \rho(t),$$

όπου 'C' σταθερά αναλογίας. Εκτός από μια σχετικά μικρή περίοδο, μετα τη χρονική στιγμή t_a , το βάθος των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς είναι περίπου ανάλογο με το χρόνο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.4 – φάση 4. Ισχύει δηλαδή,

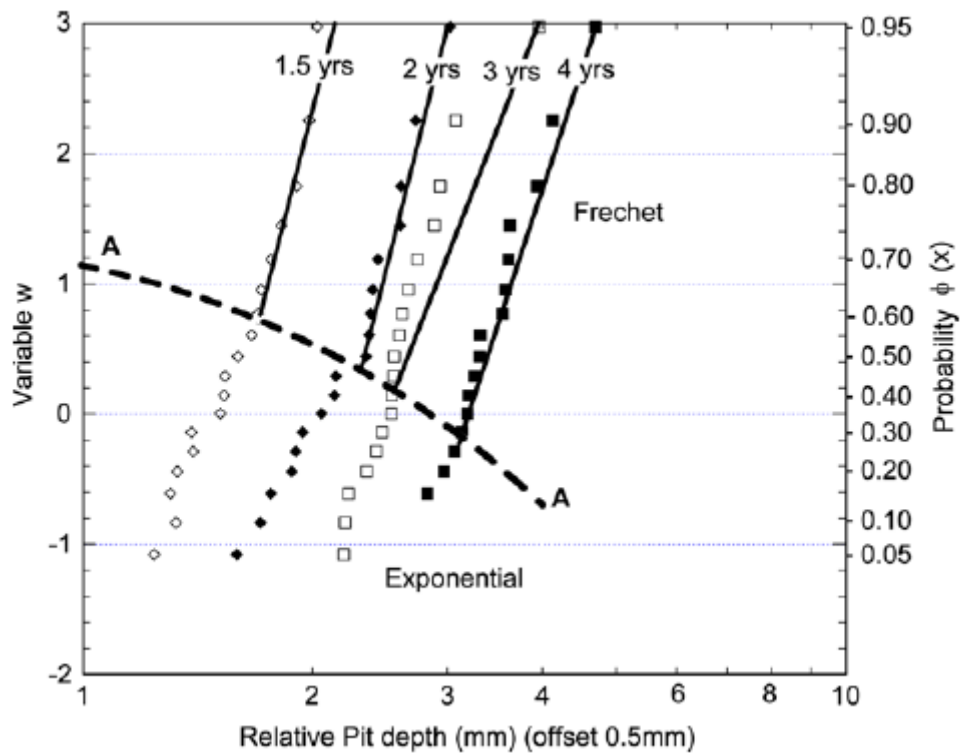
$$\dot{x}(t, T) \approx x(t, T)t.$$

Από τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτει για το βάθος μιας συγκεκριμένης εσοχής ότι:

$$x(t, T) = C[e(t, T) / \rho(t)]t$$

Λόγω της φύσεως του προβλήματος, καμία από τις παραμέτρους $e(t, T)$ και $\rho(t)$ δεν είναι δυνατόν να είναι γνωστή. Για τον λόγο αυτό υποθέτουμε ότι και οι δύο παράμετροι αντιπροσωπεύονται από την κανονική κατανομή.

Στο σχήμα 4.6 φαίνεται η κατανομή των εσοχών που έχουν δημιουργηθεί λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, για χρονικές περιόδους πάνω από ένα έτος.



Σχήμα 4.6. Διάγραμμα Frechet που απεικονίζει το μέγιστο βάθος της διάβρωσης με βελονισμούς για διάφορες χρονικές περιόδους.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.6, τα δεδομένα για το μέγιστο βάθος των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, μπορούν να απεικονιστούν με γραμμική παρεμβολή. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η κατανομή των εσοχών για χρονικά διαστήματα πάνω από ένα έτος μπορεί να μοντελοποιηθεί με την κατανομή Frechet.

Στο αντίστοιχο διάγραμμα Gumbel, η κατανομή Frechet παίρνει τη μορφή καμπύλης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5.

4.1.3 Σύγκριση των κατανομών Gumbel και Fretchet

Σε πρακτικές εφαρμογές, η δυνατότητα πρόβλεψης της πιθανότητας το βάθος των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς να φτάσει κάποια συγκεκριμένη τιμή, παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Σε κατασκευές όπως αγωγούς, δεξαμενές, πλοία κλπ, παράμετρος σχεδίασης αποτελεί η πιθανότητα διάτρησης της μεταλικής κατασκευής τους από διάβρωση με βελονισμούς. Ο χρόνος που θα συμβεί αυτό, μπορεί να ληφθεί ως κριτήριο αστοχίας της κατασκευής. Η αντοχή της κατασκευής εξαρτάται από το πάχος της και το βάθος της μεγαλύτερης εσοχής λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, οπουδήποτε στην επιφάνειά της. Με βάση τα δεδομένα για τα μέγιστα βάθη των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, είναι δυνατόν να κατασκευαστεί μια κατανομή πιθανότητας ακραίων τιμών (EVS). Από την κατανομή αυτή, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η πιθανότητα εμφάνισης εσοχής λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, δεδομένου μεγέθους. Για να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των δύο κατανομών, Gumbel και Fretchet, θα χρησιμοποιήσουμε το σχήμα 4.5. Έστω μια χαλύβδινη κατασκευή με πάχος τοιχωμάτων ίσο με 5 mm, η οποία εμφανίζει διάβρωση με βελονισμούς σε θαλάσσιο περιβάλλον, παρόμοιο με αυτό σύμφωνα με το οποίο το Σχήμα 4.5 δημιουργήθηκε. Στο σχήμα αυτό φαίνεται πως η πιθανότητα εμφάνισης του μέγιστου μεγέθους εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς μεταβάλεται, ανάλογα με το χρονικό διάστημα έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον. Κάνοντας χρήση της κατανομής Gumbel, η πιθανότητα εμφάνισης του μέγιστου βάθους εσοχής, λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, είναι αμελητέα, για χρονικό διάστημα έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον, μικρότερο από τρία έτη. Η αντίστοιχη πιθανότητα είναι ίση με 0,02, για χρονικό διάστημα έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον ίσο με 4 χρόνια. Αντίθετα, για τα δεδομένα που ακολουθούν την κατανομή Frechet, η αντίστοιχη πιθανότητα είναι αμελητέα για χρονικές περιόδους έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον μικρότερη των δύο χρόνων, ενώ για χρόνους έκθεσης ίσους με τρία και τέσσερα έτη, λαμβάνει τιμές ίσες με 0,03 και 0,04, αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι οι τιμές των πιθανοτήτων που αφορούν στην εμφάνιση του μέγιστου βάθους εσοχής λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, λαμβάνουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές για την κατανομή Frechet, σε σχέση με την κατανομή Gumbel. Το γεγονός αυτό μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις σε πρακτικές εφαρμογές.

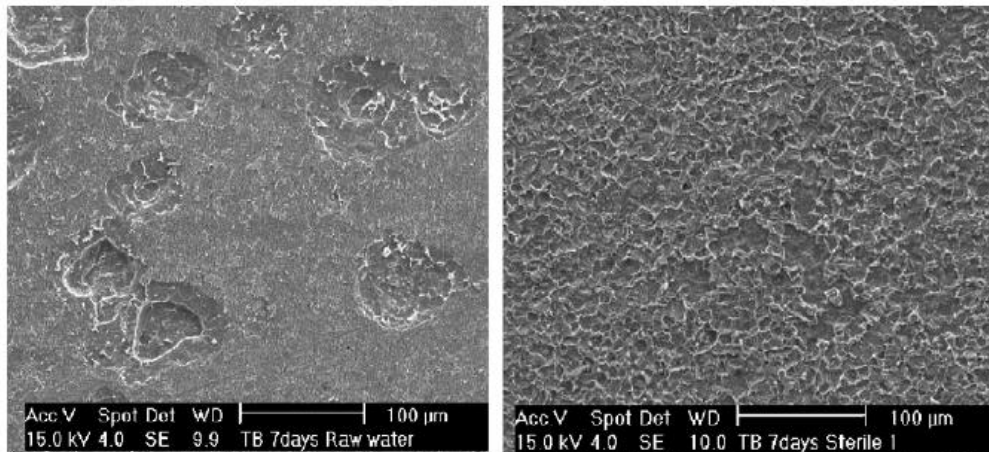
4.1.4 Συμπεράσματα

Για μακροχρόνια έκθεση του χάλυβα σε θαλάσσιο περιβάλλον, η διαδικασία της διάβρωσης με βελονισμούς αλλάζει με την πάροδο του χρόνου και τελικά καταλήγει να ελέγχεται από το ρυθμό του μεταβολισμού των βακτηρίων. Η κατανομή Frechet είναι ιδανική στην περιγραφή της ανάπτυξης της διάβρωσης με βελονισμούς για αυτή την περίοδο. Η κατανομή Frechet προβλέπει μεγαλύτερα βάθη για τις εσοχές λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, για δεδομένη τιμή πιθανότητας, ή αντίστοιχα, μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης του μέγιστου βάθους εσοχής για δεδομένη χρονική περίοδο, σε σχέση με την κατανομή Gumbel. Το αποτέλεσμα αυτό έχει σημαντικές επιπτώσεις σε πρακτικές εφαρμογές.

4.2 Επίδραση των βακτηρίων στην διάβρωση με βελονισμούς του χάλυβα σε θαλάσσιο περιβάλλον

4.2.1 Πρώιμη διάβρωση (φάση 0)

Εργαστηριακές παρατηρήσεις έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι τα βακτήρια SRB επιδρούν σημαντικά στη διάβρωση με βελονισμούς των μετάλλων και του χάλυβα σε υγρό περιβάλλον πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.2.2 (Melchers Re., Jeffrey R., 2008). Οι παρατηρήσεις αυτές αφορούν, τυπικά, μικρά χρονικά διαστήματα. Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε με την έκθεση δοκιμίων χάλυβα σε αποστειρωμένο και θαλασσινό νερό, μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις: Μετά από τρεις ημέρες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον, οι χαλύβδινες επιφάνειες των δοκιμίων εμφανίζουν σημαντικές διαφορές σε σχέση με την αρχική τους κατάσταση. Τα δοκίμια που είχαν εκτεθεί σε θαλασσινό νερό παρουσιάζουν σημαντικότερη διάβρωση με βελονισμούς σε σχέση με αυτά που είχαν εκτεθεί σε αποστειρωμένο νερό. Στην Εικόνα 4.3 φαίνεται η επιφάνεια των δοκιμίων αυτών μετά από έκθεση επτά ημερών σε διαβρωτικό περιβάλλον.



Εικόνα 4.3. Επιφάνεια του χάλυβα μετά από έκθεση επτά ημερών σε θαλασσινό νερό (αριστερά) και σε αποστειρωμένο νερό (δεξιά).

Τα βακτήρια SRB προκαλούν τη διάβρωση με βελονισμούς του χάλυβα, λόγω του μεταβολισμού τους. Η πρώιμη ανάπτυξη των βακτηρίων, όπως και η σταδιακή ελάττωσή τους στην επιφάνεια των μετάλλων έχει παρατηρηθεί, από πολλούς ερευνητές. Αυτή η ελάττωση του πληθυσμού των βακτηρίων μπορεί να συσχετιστεί με την αλλαγή της φάσης της διάβρωσης από τη φάση 0 στη φάση 1, η οποία ελέγχεται από τους μηχανισμούς της οξειδωσης. Όπως έχει αναφερθεί, ο ρυθμός του μεταβολισμού των βακτηρίων εξαρτάται από την ύπαρξη θρεπτικών συστατικών. Έρευνες πραγματοποιούνται διεθνώς για τη διαπίστωση της σχέσης ανάμεσα στην διάβρωση με βελονισμούς και την ύπαρξη θρεπτικών συστατικών στο θαλάσσιο περιβάλλον, όπως επίσης και για το ρόλο και την ταυτότητα των βακτηρίων που συμμετέχουν στο φαινόμενο της διάβρωσης.

4.2.2 Μακροχρόνια διάβρωση (φάσεις 3 και 4)

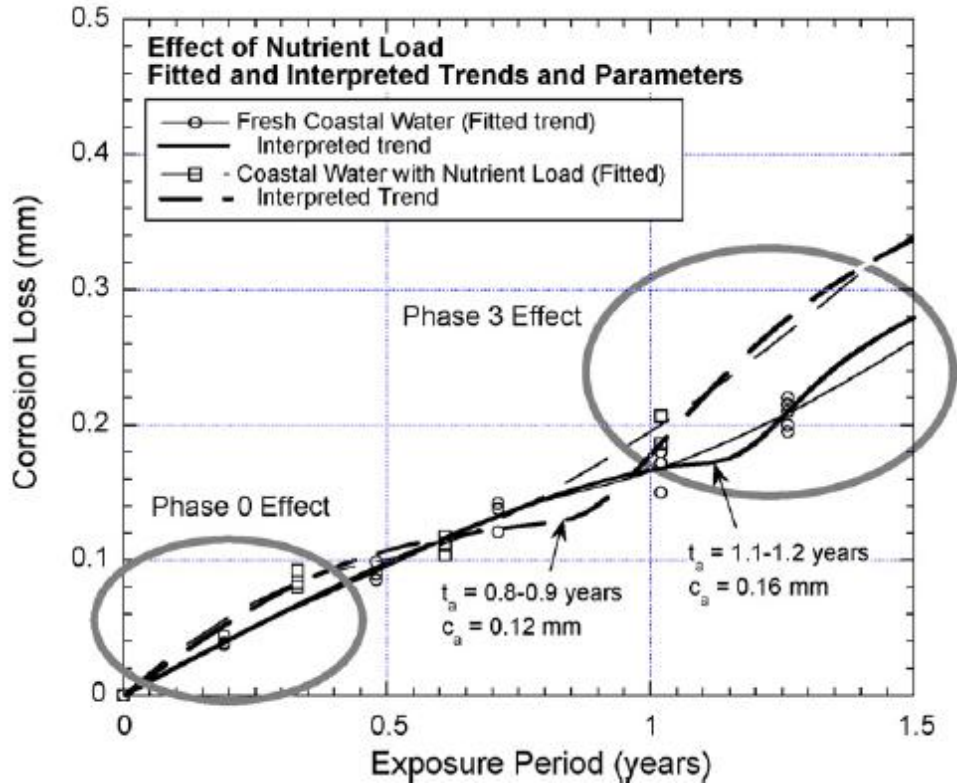
Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του μοντέλου διάβρωσης που αναπτύχθηκε προηγουμένως, είναι η μετάβαση από τη φάση της ηλεκτροχημικής διάβρωσης στη φάση που η διάβρωση ελέγχεται από το μεταβολισμό των βακτηρίων (φάσεις 3 και 4). Οι φάσεις της διάβρωσης φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1. Σύνοψη των φάσεων της διαβρωσης στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Phase	Corrosion process
0	On immersion steel surface is colonized by biofilm, bacteria and marine organisms and subject to a complex mix of localized influences. Bacterial metabolites may influence early corrosion if nutrient supply is elevated.
1	Oxidation process controlled by rate of arrival of oxygen at the metal surface from the surrounding seawater ('oxygen concentration' control). Rust layers are still very thin. The resulting corrosion loss may be modelled, closely, as a linear function
2	Build-up of corrosion products (rust) increasingly retards the rate of oxygen supply to the corroding surface ('oxygen diffusion' control). Increasing thickness of the rust layer reduces the capability for oxygen to reach the corroding surface, thereby allowing localized anaerobic conditions to develop at AP
3	Sulphate-reducing bacteria (SRB) flourish under appropriate nutrient supply conditions. The rate of corrosion now depends on rate of bacterial metabolism. This depends on rate of supply of nutrients, including those stored in the rust layers
4	Metabolism of sulphate-reducing bacteria (SRB) depends on rate of nutrient supply. Allowing also for the slow loss of rust layer through erosion and wear this phase may be modelled as near-steady-state and almost linear

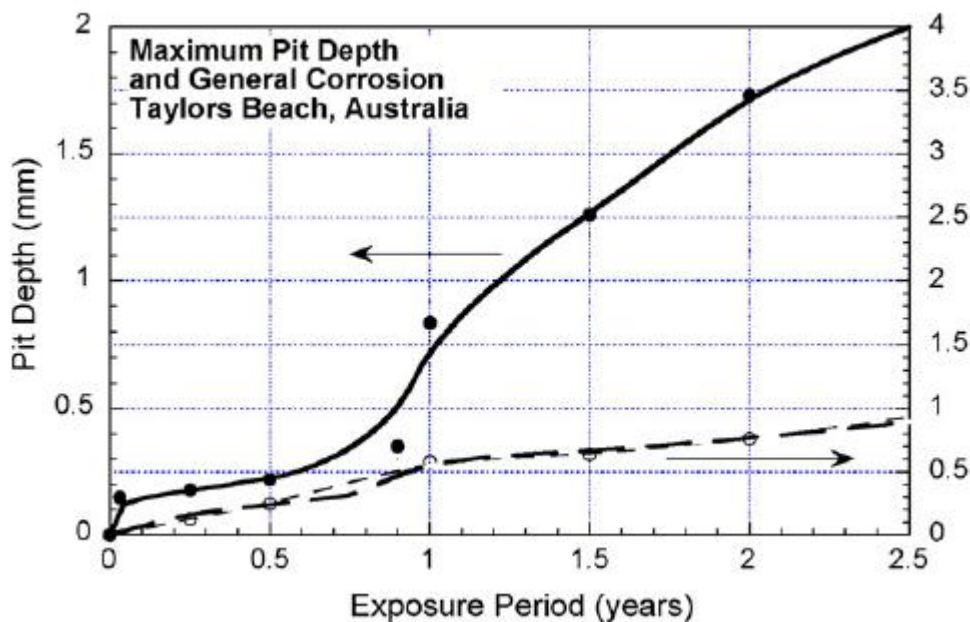
Άμεση παρατήρηση της διάβρωσης με βελονισμούς στις φάσεις 3 και 4 και του ρόλου των βακτηρίων στην εξέλιξη της πραγματοποιήθηκε τυχαία με την παρατήρηση αυξημένων απωλειών λόγω διάβρωσης σε μια συγκεκριμένη κατασκευή. Πειραματικά δεδομένα είχαν ήδη ληφθεί από ένα κοντινό παραθαλάσσιο διαβρωτικό περιβάλλον. Αρχικά και οι δύο περιοχές παρατήρησης παρουσίαζαν παρόμοια διαβρωτική συμπεριφορά, αλλά μετά από ένα έτος, ο ρυθμός διάβρωσης αυξήθηκε σημαντικά στη μια από αυτές. Ο έλεγχος του διαβρωτικού περιβάλλοντος και για τις δύο περιοχές, φανέρωσε αυξημένα ποσοστά θρεπτικών συστατικών, κυρίως αμμωνίας, σε μία από αυτές. Τα αυξημένα επίπεδα αμμωνίας μπορούν να εξηγηθούν λόγω της παραθαλάσσιας αγροτικής δραστηριότητας. Οι απώλειες υλικού λόγω διάβρωσης με βελονισμούς για τις δύο περιοχές παρατήρησης φαίνονται στο Σχήμα 4.7. Τα αυξημένα επίπεδα θρεπτικών συστατικών σε αυτό το θαλάσσιο περιβάλλον σίγουρα δεν θα ήταν αρκετά για να προκαλέσουν σημαντική αλλαγή στην κανονική ανόργανη φάση της διάβρωσης. Το γεγονός αυτό φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Πρίν τη χρονική στιγμή μετάβασης στη φάση 3, t_a , δεν παρατηρείται σημαντική αλλαγή στη διαβρωτική συμπεριφορά ανάμεσα στα δύο διαβρωτικά περιβάλλοντα

Παρόμοια περιστατικά περιέργης διαβρωτικής συμπεριφοράς, μπορούν να εξηγηθούν ανάλογα με το προηγούμενο παράδειγμα. Τέτοια φαινόμενα μπορούν να παρατηρηθούν σε υπονόμους και σε διαρροές πετρελαίου από πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου. Πολυ πρόσφατα, η επανεξέταση των δεδομένων διάβρωσης του χάλυβα για τον ποταμό Τάμεσση, ένα ποτάμι μολυσμένο από αστικά και βιομηχανικά απόβλητα, φανέρωσε την ύπαρξη ενός παρομοίου μηχανισμού διάβρωσης.



Σχήμα 4.7. Επίδραση των θρεπτικών συστατικών στη διάβρωση με βελονισμούς.

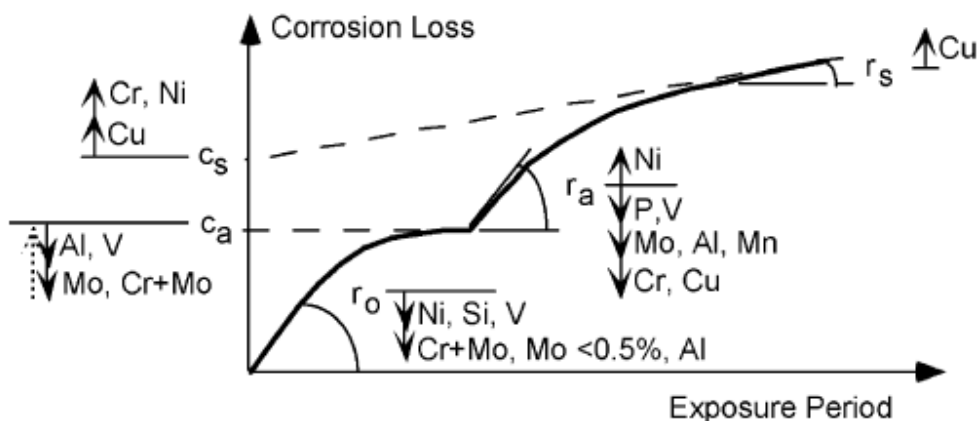
Η πορεία της διάβρωσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3 και το Σχήμα 4.7, ακολουθεί ακόμα εντονότερους ρυθμούς, στην περίπτωση που το διαβρωτικό περιβάλλον είναι το θαλασσινό νερό. Στο Σχήμα 4.8 γίνεται σύγκριση της διάβρωσης με βελονισμούς με την ομοιόμορφη διάβρωση. Μπορεί να παρατηρηθεί σημαντική αύξηση της διάβρωσης με βελονισμούς στην χρονική περίοδο που αντιστοιχεί στις φάσεις 3 και 4 του φαινομένου.



Σχήμα 4.8. Μέγιστο βάθος διάβρωσης με βελονισμούς σε σχέση με το χρόνο και σύγκριση με την ομοιόμορφη διάβρωση.

4.2.3 Η επίδραση της σύστασης του χάλυβα στη συμπεριφορά των βακτηρίων

Παραδοσιακά, οι πειραματικές παρατηρήσεις και μετρήσεις για την επίδραση της σύστασης των μετάλλων στους μηχανισμούς της διάβρωσης, δεν οδηγούσαν σε ουσιαστικά συμπεράσματα. Αλλαγές στη σύσταση των μετάλλων σε κάποιες γεωγραφικές περιοχές οδηγούσε σε διαφορετικούς ρυθμούς ομοιόμορφης διάβρωσης και διάβρωσης με βελονισμούς, σε σχέση με ανάλογες αλλαγές στη σύσταση των μετάλλων σε άλλες γεωγραφικές περιοχές. Κάποιες αλλαγές στη σύσταση του χάλυβα επηρεάζουν περισσότερο τις φάσεις 1 και 2 της διάβρωσης με βελονισμούς, ενώ άλλες επηρεάζουν περισσότερο τις φάσεις 3 και 4 της διάβρωσης με βελονισμούς. Στο Σχήμα 4.9, φαίνονται κάποιες παρατηρήσεις για την επίδραση της σύστασης του χάλυβα στη διάβρωση με βελονισμούς. Επίσης, το ποσοστό άνθρακα του χάλυβα, το οποίο στο παρελθόν είχε θεωρηθεί πως έχει αμελητέα επίδραση στο φαινόμενο της διάβρωσης, φαίνεται να επηρεάζει σημαντικότερα τις φάσεις 3 και 4 της διάβρωσης. Το διάγραμμα, αν και δε δίνει ποσοτικές πληροφορίες και λεπτομέρειες, για τον τρόπο που το κάθε στοιχείο επιδρά στη διάβρωση με βελονισμούς του χάλυβα, δίνει μια βάση για περαιτέρω έρευνες γύρω από το ζήτημα.



Σχήμα 4.9. Σύνοψη της επίδρασης ορισμένων στοιχείων στη διάβρωση του χάλυβα.

4.2.4 Η επίδραση της ταχύτητας, της σύστασης και του βάθους του νερού στη βακτηριακή δραστηριότητα

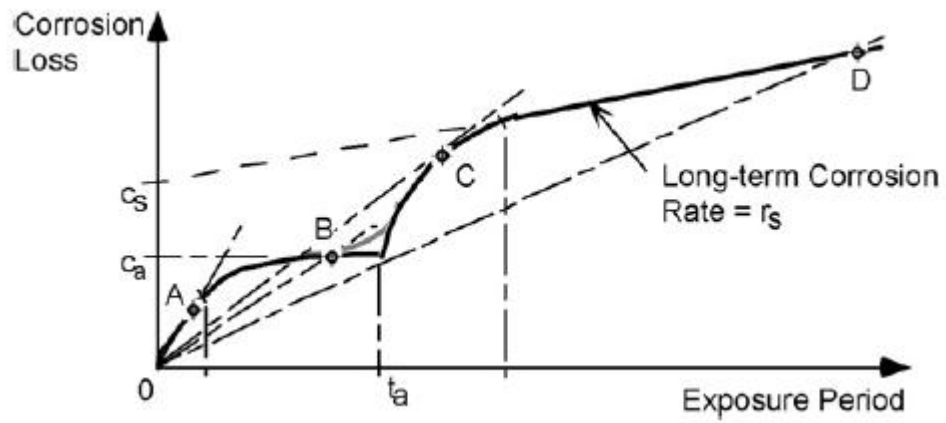
Η επίδραση της ταχύτητας, της σύστασης και του βάθους του νερού στη βακτηριακή δραστηριότητα, έχουν διερευνηθεί σύμφωνα με το μοντέλο διάβρωσης με βελονισμούς των τεσσάρων φάσεων. Οι πειραματικές παρατηρήσεις και οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί δεν έχουν μπορέσει, μέχρι στιγμής, να οδηγήσουν σε ασφαλή συμπεράσματα για τον τρόπο που τα παραπάνω χαρακτηριστικά του διαβρωτικού περιβάλλοντος επιδρούν στη συμπεριφορά των βακτηρίων.

Η ταχύτητα του νερού, αν είναι αρκετά υψηλή, μπορεί οδηγήσει σε υψηλότερες απώλειες υλικού λόγω διάβρωσης σε πρώιμο επίπεδο, πριν τη φάση 1 της διάβρωσης. Το γεγονός αυτό μπορεί να αναπαρασταθεί, μετακινώντας την καμπύλη διάβρωσης – χρόνου προς τα πάνω, ανάλογα σχεδόν με την ταχύτητα του νερού.

Υπάρχουν ελάχιστα δεδομένα για διάβρωση σε περιβάλλον βαθύτερο από ελάχιστα μέτρα. Η εξέταση των δεδομένων αυτών, δεν οδήγησε σε ασφαλή συμπεράσματα για την επίδραση του βάθους του νερού στη συμπεριφορά των βακτηρίων. Παρ'όλα αυτά, η βακτηριακή δραστηριότητα δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε μεταβολές της πίεσης και είναι γνωστό πως προκύπτει σε μεγάλα βάθη.

Όσον αφορά στη σύσταση του νερού, το ποσοστό αλατιού σε αυτό, που για καιρό αποτελούσε σημαντική παράμετρο διάβρωσης, αποδείχθηκε πρόσφατα ότι παρουσιάζει αμελητέα επίδραση στην διάβρωση με βελονισμούς, ειδικά σε μακροχρόνια διαστήματα έκθεσης.

Στο Σχήμα 4.10 γίνεται σύγκριση του ρυθμού διάβρωσης του χάλυβα σε διαφορετικές φάσεις διάβρωσης (χρονικές στιγμές A,B,C και D).



Σχήμα 4.10. Μοντέλο εξέλιξης της διάβρωσης με βελονισμούς σε σχέση με το χρόνο και σύγκριση του ρυθμού διάβρωσης σε κάθε φάση.

4.3 Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής των Bulk carriers

Τα κατασκευαστικά μέρη της γάστρας των πλοίων υποβάλλονται σε διάβρωση σε όλη τη διάρκεια της ζωής τους και η ελάττωση του πάχους τους, λόγω της διάβρωσης αυτής, είναι αναπόφευκτη (Nakai et al, 2004). Γι' αυτό τον λόγο το φαινόμενο της διάβρωσης περιορίζει σημαντικά τη διάρκεια ζωής των πλοίων. Για να διασφαλιστεί η προστασία της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, είναι σημαντική η γνώση των μηχανισμών της διάβρωσης και την επίδραση που έχει, όχι μόνο στη συνολική αντοχή, αλλά και στην τοπική αντοχή του πλοίου.

Η διάβρωση που παρατηρείται στη μεταλλική κατασκευή των πλοίων, χωρίζεται γενικά σε δύο κατηγορίες: Ομοιόμορφη διάβρωση και τοπική διάβρωση. Γενικά, η διάβρωση με βελονισμούς ορίζεται ως μια πολύ τοπικής μορφής διάβρωση και τα τμήματα που παρουσιάζουν τέτοιου είδους διάβρωση είναι πολύ μικρά σε σχέση με τη συνολική επιφάνεια που εκτίθεται. Όσον αφορά στη διάβρωση με βελονισμούς που παρατηρείται στους νομείς στα κύτη φορτίου των Bulk carriers, η εσοχές που παρατηρούνται έχουν γενικά μεγάλο μέγεθος (η διάμετρος τους μπορεί να φτάσει τα 50 mm).

4.3.1 Διάβρωση των νομέων στα κύτη των Bulk carriers

Στην Εικόνα 4.4 a - c φαίνεται η διάβρωση με βελονισμούς στους νομείς ενός Bulk carrier 14 ετών, που μεταφέρει σιδηρομέταλλευμα και κάρβουνο. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η διάβρωση με βελονισμούς είναι μεγαλύτερη στο κατώτερο και στο μεσαίο τμήμα των νομέων. Επίσης σημαντική ποσότητα σκουριάς παρατηρείται στην επιφάνεια του ενισχυτικού. Στην Εικόνα 4.4c φαίνεται η επιφάνεια του ενισχυτικού μετά από αμμοβολή.



(a)

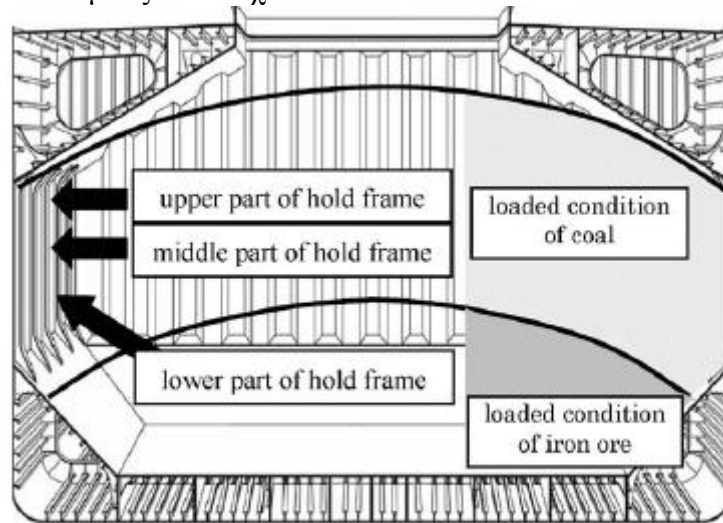


(b)

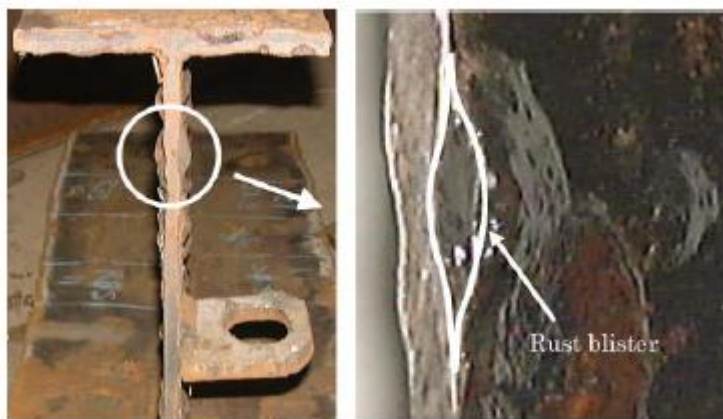


Εικόνα 4.4. Διάβρωση με βελονισμούς στους νομείς ενός Bulk carrier 14 ετών.

Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση ενός κύτους φορτίου Bulk carrier (εικόνα 2) και στην Εικόνα 4.5 μια μεγέθυνση εσοχής που έχει δημιουργηθεί λόγω διάβρωσης με βελονισμούς σε ενισχυτικό του.



Σχήμα 4.11. Σχηματική αναπαράσταση της θέσης των νομέων στα κύτη φορτίου των Bulk carriers.



Εικόνα 4.5. Διάβρωση με βελονισμούς σε νομέα Bulk carrier.

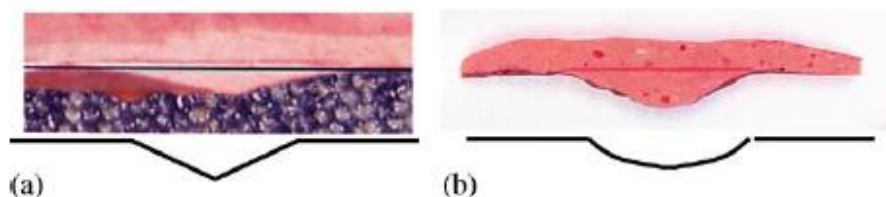
Στην Εικόνα 4.5 φαίνεται η σκουριά η οποία έχει καλύψει την εσοχή που έχει δημιουργηθεί λόγω διάβρωσης κατα τέτοιο τρόπο, ώστε να μην φαίνεται η απώλεια πάχους του υλικού. Όταν αφαιρεθεί η σκουριά με χρήση σφυριών, γίνεται φανερή η μεγάλη απώλεια πάχους του υλικού.

4.3.2 Ομοιόμορφη διάβρωση και διάβρωση με βελονισμούς

Ομοιόμορφη διάβρωση και τοπική διάβρωση, όπως είναι η διάβρωση με βελονισμούς, παρατηρούνται στην μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Μέχρι την εφαρμογή του σχετικού κανονισμού το 1992, το βάψιμο των νομέων του πλοίου δεν ήταν απαραίτητο. Κατ'αυτο τον τρόπο, εμφανιζόταν ομοιόμορφη διάβρωση στους νομείς. Όταν υπάρχει προστατευτική βαφή στους νομείς, τότε εμφανίζεται διάβρωση με βελονισμούς. Όταν εμφανίζονται πολλές εσοχές λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, η αξιολόγηση της εξέλιξης του φαινομένου είναι πιο δύσκολη λόγω της ανομοιογένειας της επιφάνειας. Επίσης, ανακύπτει το πρόβλημα του μεγέθους που θα χρησιμοποιηθεί (μέσο πάχος, ελάχιστο πάχος, ένταση της διάβρωσης κλπ) για την αξιολόγηση της προόδου της διάβρωσης.

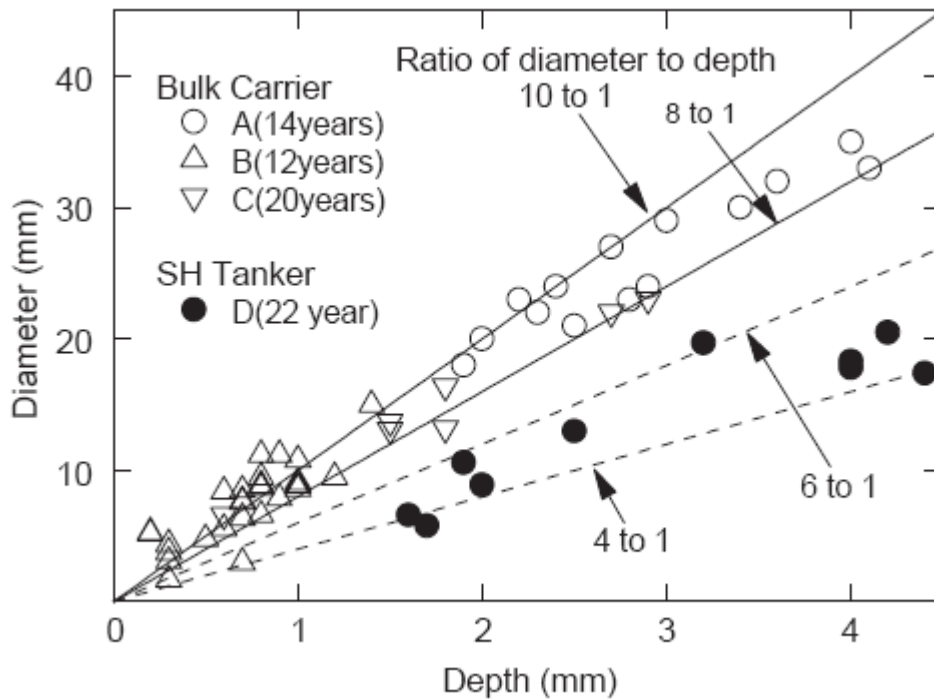
4.3.3 Μορφολογία της διάβρωσης με βελονισμούς.

Στην Εικόνα 4.6 φαίνεται η τομή δύο εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς. Στην πρώτη εικόνα έχουμε διάβρωση με βελονισμούς στους νομείς ενός Bulk carrier, ενώ στη δεύτερη έχουμε διάβρωση με βελονισμούς σε έλασμα δεξαμενόπλοιου.



Εικόνα 4.6. Τομές εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς σε νομείς Bulk carrier (α) και tanker (β).

Οι δύο εσοχές παρουσιάζουν διαφορές στη μορφή τους: Στη περίπτωση του Bulk carrier η εσοχή έχει σχήμα κυκλικού κώνου, ενώ στη περίπτωση του Tanker η εσοχή έχει σχήμα τμήματος σφαίρας. Η σχέση ανάμεσα στο βάθος και τη διάμετρο των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, φαίνεται στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12. Σχέση ανάμεσα στη διάμετρο και το βάθος των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς.

Παρατηρείται μια σταθερή σχέση ανάμεσα στο βάθος και τη διάμετρο των εσοχών για το δεξαμενόπλοιο και τα Bulk carriers: Ο λόγος διαμέτρου προς το βάθος των εσοχών για τα Bulk carrier είναι από 8 προς 1 μέχρι 10 προς 1 και για τα δεξαμενόπλοια από 4 προς 1 μέχρι 6 προς 1 αντίστοιχα. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί λόγω της διαφοράς στις συνθήκες στις οποίες υποβάλλονται τα μέταλλα στις δύο παραπάνω περιπτώσεις.

4.3.4 Έλεγχος της αντοχής σε εφελκυσμό των ενισχυτικών

Νομείς από το Bulk carrier των 14 ετών χρησιμοποιήθηκαν ως δείγματα για έλεγχο αντοχής. Οι νομείς αυτοί είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα υψηλής αντοχής AH 32 (κλάσης NK grade KA32 χάλυβας). Δεκαεπτά δοκίμια (δεκαέξι μικρά και ένα πλατύ δοκίμιο) αποκόπηκαν από τους νομείς για να ελεγχθεί η αντοχή τους σε εφελκυσμό. Το κατασκευαστικό πάχος των νομέων είναι ίσο με 10 mm. Για να γίνει αποτελεσματικός έλεγχος της αντοχής των νομέων τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ποικίλους αριθμούς εσοχών λόγω διάβρωσης. Στον Πίνακα 4.2 αναγράφονται το μέσο πάχος, το πλάτος και το μήκος των δοκιμίων. Το μέσο πάχος των δοκιμίων που υπολογίστηκε από το βάρος τους, λαμβάνει τιμές από 6,3 mm ως 10 mm. Επίσης, στον ίδιο πίνακα αναγράφεται ο αριθμός των εσοχών λόγω διάβρωσης στις δύο πλευρές των δοκιμίων. Πριν από την εκτέλεση του πειράματος αντοχής υπολογίστηκε η μέση διάμετρος των εσοχών ίση με 25 mm.

Πίνακας 4.2. Δοκίμια εφελκυσμού με πραγματική διάβρωση με βελονισμούς

No.	Average thickness (mm)	Width (mm)	G.L. (mm)	Number of pits	
				Side-A	Side-B
XA1	8.0				
XA2	8.3				
XA3	8.6			Several ^a	Many ^b
XA4	8.7				
XA5	7.1				
XA6	7.1				
XA7	10.0			0	0
XA8	10.0	80	200	1	0
XA9	9.9			1	0
XA10	9.8			1	0
XA11	9.5			10	4
XA12	9.7			9	8
XA13	9.8			6	8
XA14	7.0				
XA15	7.6			Many ^b	Many ^b
XA16	7.8				
XB	6.3	200	300	132	178

^aMore than 40% of surface is corrosion-pitted.

^bMore than 80% of surface is corrosion-pitted.

Επίσης, 75 δοκίμια κατασκευάστηκαν από το ίδιο υλικό (χάλυβα AH32), με πάχος από 10 mm ως 22 mm. Οι μηχανικές ιδιότητες αυτών των δοκιμίων φαίνονται πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3. Μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα AH32.

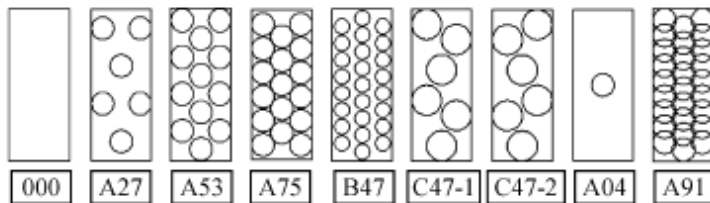
Heat no.	t (mm)	Y.P. (MPa)	T.S. (MPa)	El. (%)
H1	10	381	536	28.9
H2	14	372	523	26.4
H3	16	347	516	30.5
H4	19	366	504	29.0
H5	22	360	527	30.2
H6	10	397	555	27.3
H7	10	457	507	23.3

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.3, το όριο διαρροής των δοκιμίων παίρνει τιμές από 347 MPa ως 457 MPa ενώ η αντοχή τους έχει εύρος από 504 MPa ως 555 MPa. Τεχνητές εσοχές δημιουργήθηκαν στην επιφάνεια των δοκιμίων έτσι ώστε να γίνει προσομοίωση της διάβρωσης με βελονισμούς. Οι εσοχές αυτές έχουν σχήμα κυκλικού κώνου και ο λόγος της διαμέτρου προς το βάθος είναι ίσος με 8 προς 1. Οι διαμέτροι των εσοχών που δημιουργήθηκαν έχουν τιμές 20 mm, 30 mm και 40 mm, αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 4.4 φαίνονται οι κατανομές των εσοχών που χρησιμοποιήθηκαν, όπως επίσης και ο αριθμός των εσοχών και το ποσοστό της επιφάνειας του δοκιμίου που καταλαμβάνουν.

Πίνακας 4.4. Τύποι κατανομής βελονισμών στα δοκίμια εφελκυσμού.

No.	Pit dia. (mm)	Number of pits	Area ratio of pit
000	—	0	0.00
A27	30	6	0.27
A53	30	12	0.53
A75	30	17	0.75
B47	20	24	0.47
C47-1	40	6	0.47
C47-2	40	6	0.47
A04	30	1	0.044
A91	30	27	0.91



Στον Πίνακα 4.4 φαίνονται τα χαρακτηριστικά 27 αντιπροσωπευτικών δοκιμίων. Επίσης, κατασκευάστηκαν πέντε πλατύτερα δοκίμια από το ίδιο υλικό με διαστάσεις: πλάτος ίσο με 240 mm, μήκος ίσο με 400 mm και πάχος ίσο με 10 mm. Η κεντρική περιοχή των δοκιμίων χωρίζεται σε τρία ίσα τμήματα πλάτους 80 mm και μήκους 200 mm και κάθε τμήμα έχει μία από τις κατανομές εσοχών που χρησιμοποιήθηκαν στα μικρά δοκίμια. Τα χαρακτηριστικά αυτών των δοκιμίων αναγράφονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.5. Μικρά δοκίμια εφελκυσμού με τεχνητούς βελονισμούς.

T.P.	Heat	t (mm)	Pit distribution		Average thickness loss (mm)
			Side A	Side B	
A000	H1	9.8	000	000	0.00
AA27	H1	9.7	A27	A27	0.66
AA53	H1	9.7	A53	A53	1.33
AA75	H1	9.7	A75	A75	1.88
AB47	H1	9.7	B47	B47	0.79
AC47	H1	9.6	C47-1	C47-2	1.57
B000	H2	13.1	000	000	0.00
BA27	H2	13.1	A27	A27	0.66
BA53	H2	13.1	A53	A53	1.33
BA75	H2	13.1	A75	A75	1.88
F000	H2	11.0	000	000	0.00
C000	H3	16.0	000	000	0.00
CA27	H3	16.0	A27	A27	0.66
CA53	H3	16.0	A53	A53	1.33
CA75	H3	16.0	A75	A75	1.88
D000	H4	21.6	000	000	0.00
DA27	H4	21.6	A27	A27	0.66
DA53	H4	21.6	A53	A53	1.33
DA75	H4	21.6	A75	A75	1.88
AA04	H1	9.8	A04	A04	0.11
BA04	H2	13.0	A04	A04	0.11
I000	H5	18.6	000	000	0.00
IA27	H5	18.6	A27	000	0.33
IA53	H5	18.6	A53	000	0.66
IA75	H5	18.6	A75	000	0.94
IA04	H5	18.6	A04	000	0.06
AA91	H6	10.0	A91	A91	2.72
BA91	H2	13.1	A91	A91	2.72
IA91	H5	18.7	A91	0	1.36

Note: specimen designation 'AA27' A = thickness; (A:10 mm, B:13 mm, C:16 mm, D:22 mm, F:11 mm, I:19 mm)

A27 = pit distribution as depicted in Table 3;

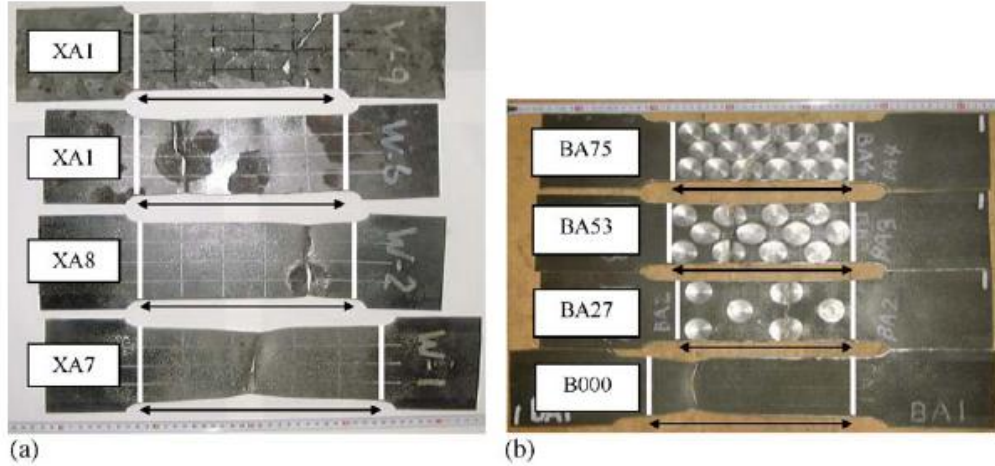
A = pit diameter (A:30 mm, B:20 mm, C:40 mm)

27 = area ratio of pit in percentage.

Πίνακας 4.6. Πλατιά δοκίμια εφελκυσμού με τεχνητούς βελονισμούς

T.P.	Heat	t (mm)	Pit distribution			Pit distribution			Average thickness loss (mm)
			Side A			Side B			
			Left	Center	Right	Left	Center	Right	
AW1	H6	9.7	A27	A53	A75	A75	A53	A25	1.29
AW2	H6	9.7	B47	A53	C47-2	C47-1	A53	B47	1.23
AW3	H7	9.4	B47	A53	C47-2	B47	A53	C47-2	1.23
AW4	H7	9.4	B47	C47-2	A53	A53	C47-2	B47	1.23
AW5	H7	9.4	B47	C47-2	A53	B47	A53	C47-1	1.23

Τα δοκίμια μετά το πείραμα εφελκυσμού φαίνονται στην Εικόνα 4.7. Όταν τα δοκίμια περιείχαν μια μόνο εσοχή λόγω διάβρωσης με βελονισμούς (XA8 στην Εικόνα 4.7), η αστοχία έλαβε χώρα στη μέση τομή που περιείχε την εσοχή. Σε δοκίμια που περιείχαν περισσότερες εσοχές λόγω διάβρωσης, ρωγμές αναπτύχθηκαν στο κατώτερο τμήμα μερικών εσοχών οι οποίες συνενώθηκαν και οδήγησαν το δοκίμιο στην αστοχία.



Εικόνα 4.7. Δοκίμια μετά το πέρας του πειράματος αντοχής σε εφελκυσμό: (a) δοκίμια με διάβρωση με βελονισμούς (b) δοκίμια με τεχνητές εσοχές..

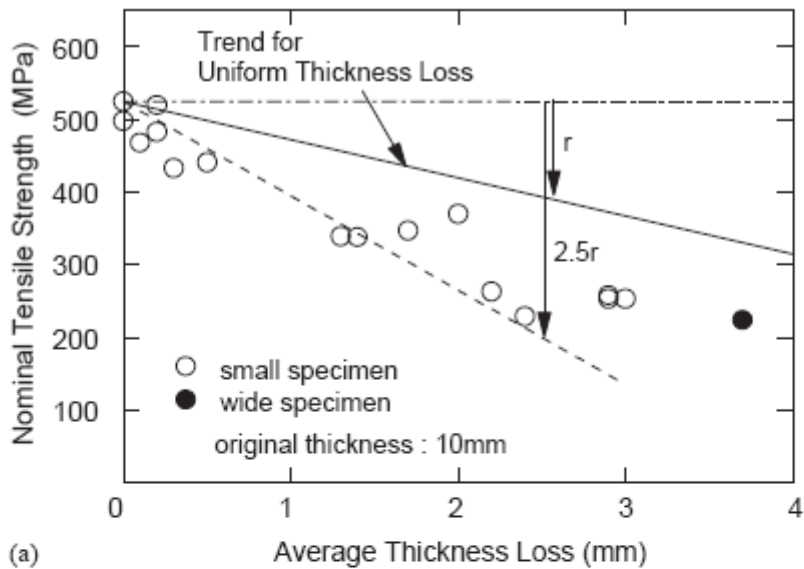
Τα πειραματικά αποτελέσματα από το πείραμα εφελκυσμού, στα δοκίμια που ελήφθησαν από τους νομείς του Bulk carrier, φαίνονται στο σχήμα 4.13.

Στην Σχήμα 4.13α παρουσιάζεται η σχέση ανάμεσα στην ονομαστική αντοχή και τη μέση απώλεια πάχους των δοκιμίων. Η ονομαστική αντοχή εφελκυσμού των δοκιμίων ορίζεται με την ακόλουθη σχέση:

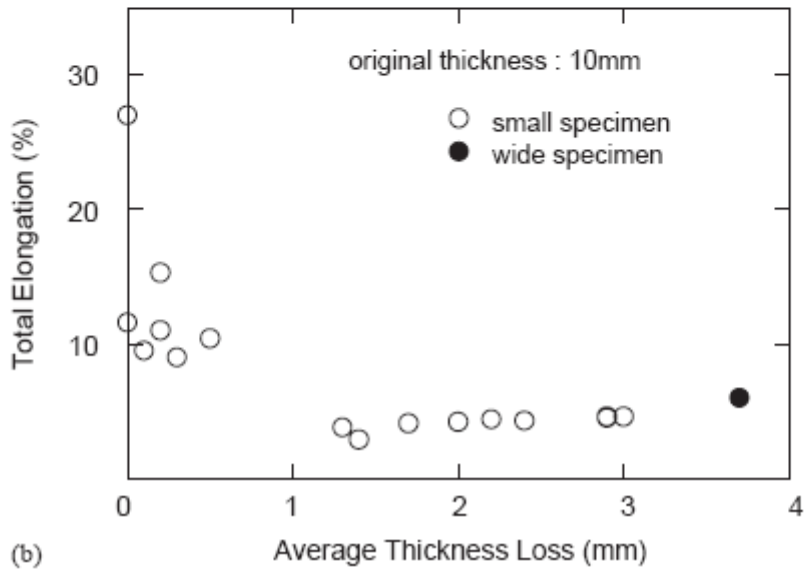
$$\sigma_{nominal} = \frac{P_{max}}{A_0}$$

Όπου P_{max} και A_0 , το μέσο εφελκυστικό φορτίο και η επιφάνεια της μέσης τομής, αντίστοιχα.

Η επιφάνεια A_0 , ορίζεται ως το γινόμενο του αρχικού πάχους των δοκιμίων με το αντίστοιχο πλάτος τους. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.13α, η ονομαστική αντοχή των δοκιμίων ελατώνεται με την αύξηση της επιφάνειας που καταλαμβάνουν οι εσοχές λόγω διάβρωσης με βελονισμούς. Επίσης, είναι φανερό ότι η ελάττωση της ονομαστικής αντοχής των δοκιμίων με διάβρωση με βελονισμούς είναι ίση με 2,5 φορές την αντίστοιχη ελάττωση της αντοχής δοκιμίων που έχουν υποστεί ομοιόμορφη διάβρωση, στις χειρότερες περιπτώσεις. Στο Σχήμα 4.13b, φαίνεται η σχέση ανάμεσα στην συνολική επιμήκυνση και τη μέση απώλεια πάχους των δοκιμίων. Προκύπτει ότι η συνολική επιμήκυνση ελατώνεται σημαντικά στην περίπτωση που τα δοκίμια έχουν υποστεί διάβρωση με βελονισμούς.



(a)



(b)

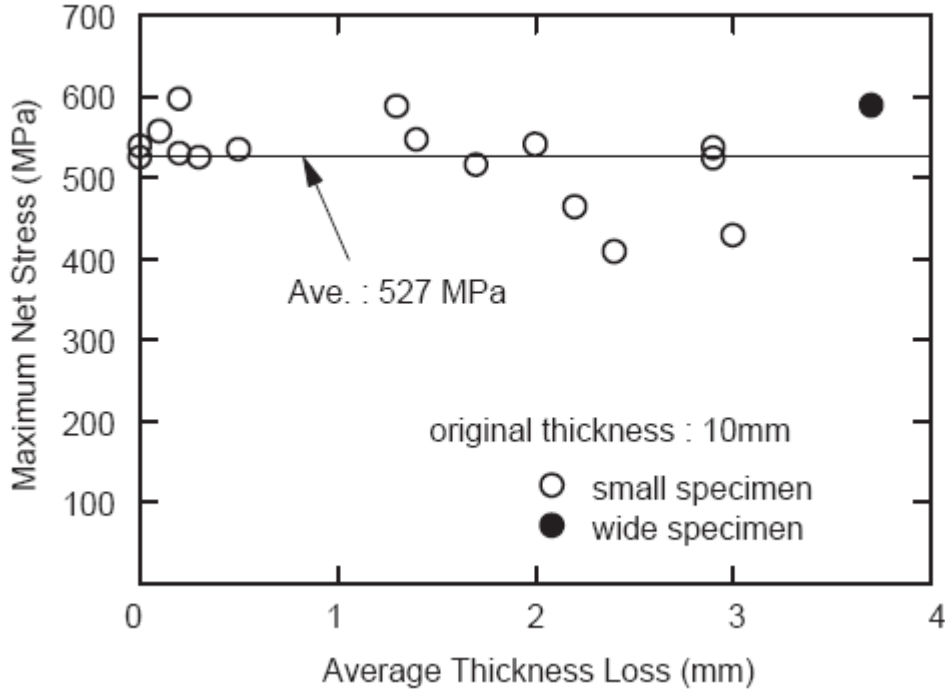
Σχήμα 4.13. Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή σε εφελκυσμό (α) και στην συνολική επιμήκυνση (β).

Στο Σχήμα 4.14, φαίνεται η σχέση ανάμεσα στη μέγιστη ονομαστική εφελκυστική τάση (αντοχή του δοκιμίου στην επιφάνεια θράυσης) και τη μέση απώλεια πάχους του δοκιμίου. Η τάση αυτή ορίζεται ως:

$$\sigma_{n \max} = \frac{P_{\max}}{A_{f0}}$$

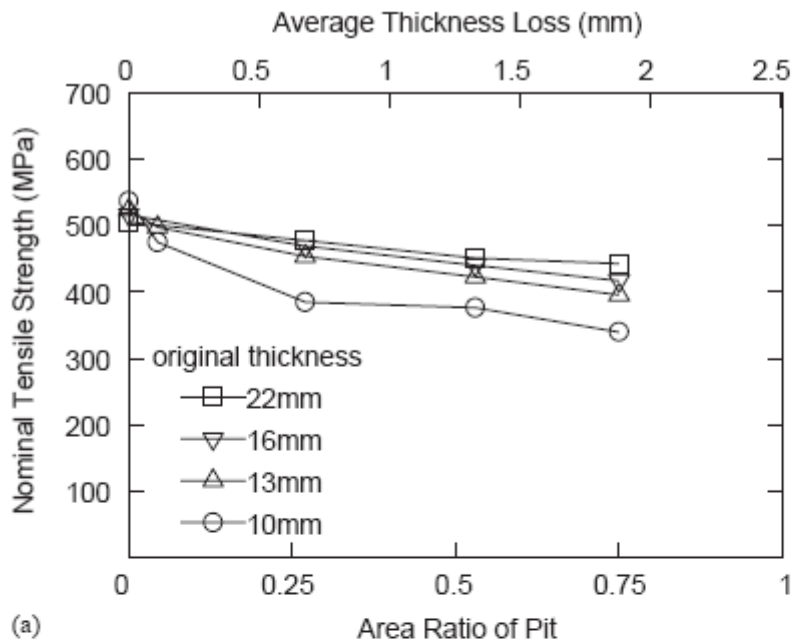
όπου A_{f0} η επιφάνεια θράυσης πριν τη φόρτιση, προβεβλημένη σε επίπεδο κάθετο στον άξονα της φόρτισης. Η μεγάλη διασπορά των μετρήσεων στο Σχήμα 4.14, οφείλεται στη δυσκολία μέτρησης της επιφάνειας στην περιοχή της αστοχίας του δοκιμίου. Οι τιμές της

ονομαστικής εφελκυστικής τάσης ξεκινούν από 409 και φτάνουν τα 589 MPa, ενώ η μέση τιμή της είναι ίση με 527 MPa. Το πάχος των δοκιμίων διαφέρει σημαντικά τοπικά λόγω της διάβρωσης με βελονισμούς και οδηγεί στη μεγάλη διασπορά των τιμών της ονομαστικής αντοχής.

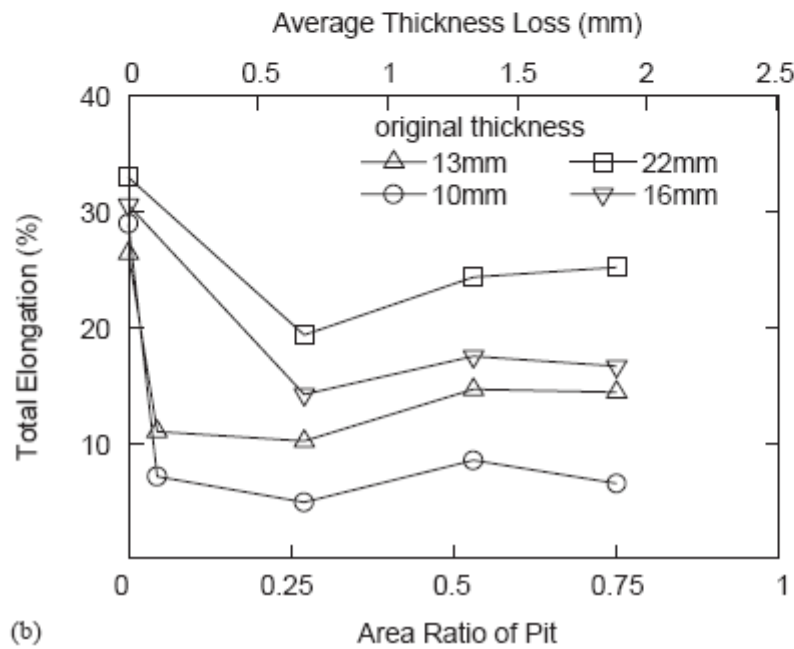


Σχήμα 4.14. Σχέση ανάμεσα στη μέγιστη τάση και τη μέση απώλεια υλικού.

Τα πειραματικά αποτελέσματα για τα δοκίμια με όμοιες τεχνητές εσοχές και στις δύο πλευρές τους, φαίνονται στο Σχήμα 4.15. Στο Σχήμα 4.15α, φαίνεται η σχέση ανάμεσα στην ονομαστική αντοχή των δοκιμίων και στο ποσοστό της επιφάνειας των δοκιμίων που περιλαμβάνει εσοχές λόγω διάβρωσης με βελονισμούς. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα αυτό, η αντοχή των δοκιμίων μειώνεται με την αύξηση της επιφάνειας των δοκιμίων που περιλαμβάνει εσοχές λόγω διάβρωσης με βελονισμούς. Στο Σχήμα 4.15b, φαίνεται η σχέση ανάμεσα στην ολική επιμήκυνση και το ποσοστό της επιφάνειας των δοκιμίων που περιλαμβάνει εσοχές λόγω διάβρωσης με βελονισμούς. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα αυτό, η συνολική επιμήκυνση μειώνεται δραματικά στην περίπτωση των δοκιμίων που εμφανίζουν διάβρωση με βελονισμούς.



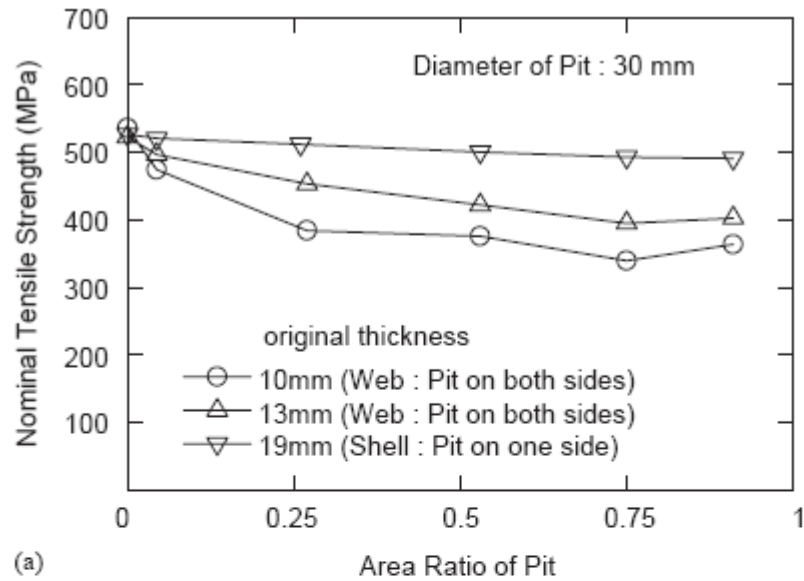
(a)



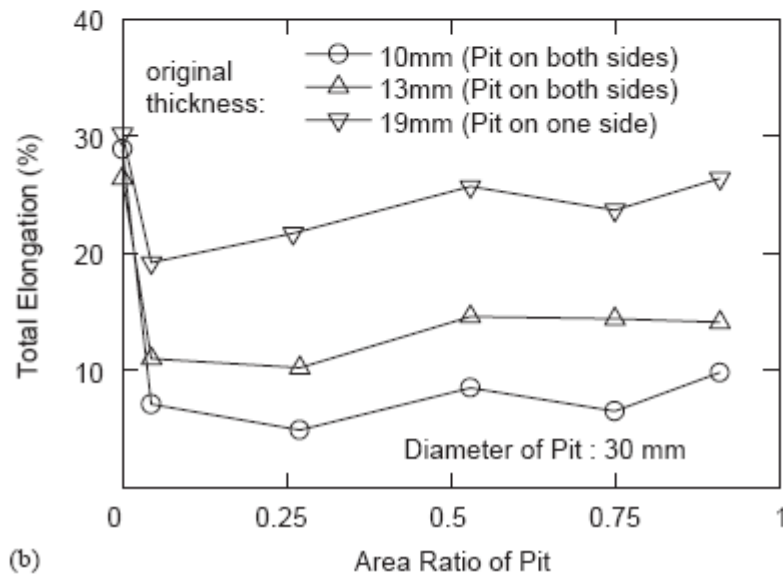
(b)

Σχήμα 4.15. Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή σε εφελκυσμό (α) και στη συνολική επιμήκυνση (β).

Στα διαγράμματα του Σχήματος 4.16, φαίνονται οι αντίστοιχες σχέσεις με τα προηγούμενα διαγράμματα, για δοκίμια με εσοχές λόγω διάβρωσης με βελονισμούς μόνο από τη μια πλευρά και για δοκίμια με εσοχές και στις δύο πλευρές τους.



(a)



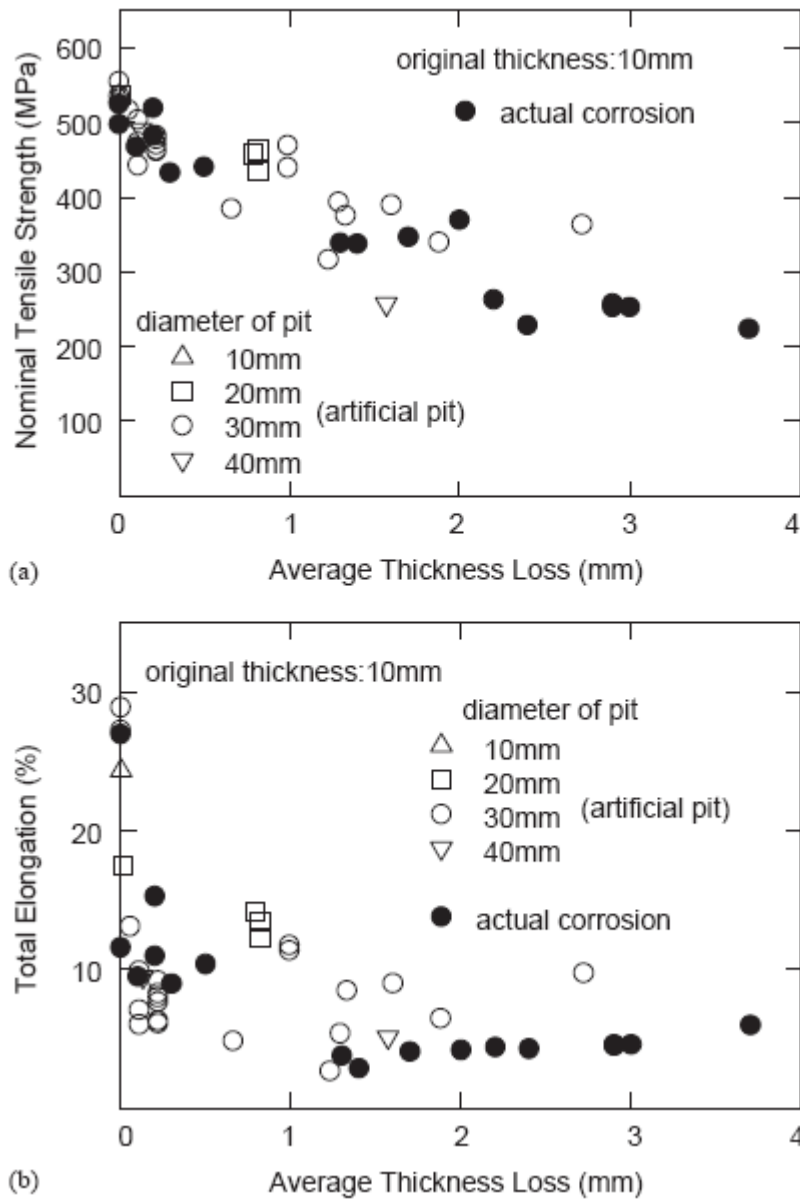
(b)

Σχήμα 4.16. Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή σε εφελκυσμό (α) και στη συνολική επιμήκυνση (b).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η συνολική επιμήκυνση των δοκιμίων με εσοχές είναι μικρή. Οι πλάγιες τομές των δοκιμίων διαφέρουν σημαντικά λόγω της παρουσίας των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, και η συγκέντρωση παραμόρφωσης λαμβάνει χώρα στην ελάχιστη επιφάνεια του δοκιμίου. Ως αποτέλεσμα, η συνολική παραμόρφωση των δοκιμίων είναι μικροτερη. Στην περίπτωση που το αρχικό πάχος είναι μεγάλο, η συνολική επιμήκυνση του δοκιμίου αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του ποσοστού της διάβρωσης του δοκιμίου, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.15b και 4.16b. Όταν το

αρχικό πάχος των δοκιμίων είναι μικρό (10 mm), η αύξηση στην συνολική επιμήκυνση είναι μικρή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16b.

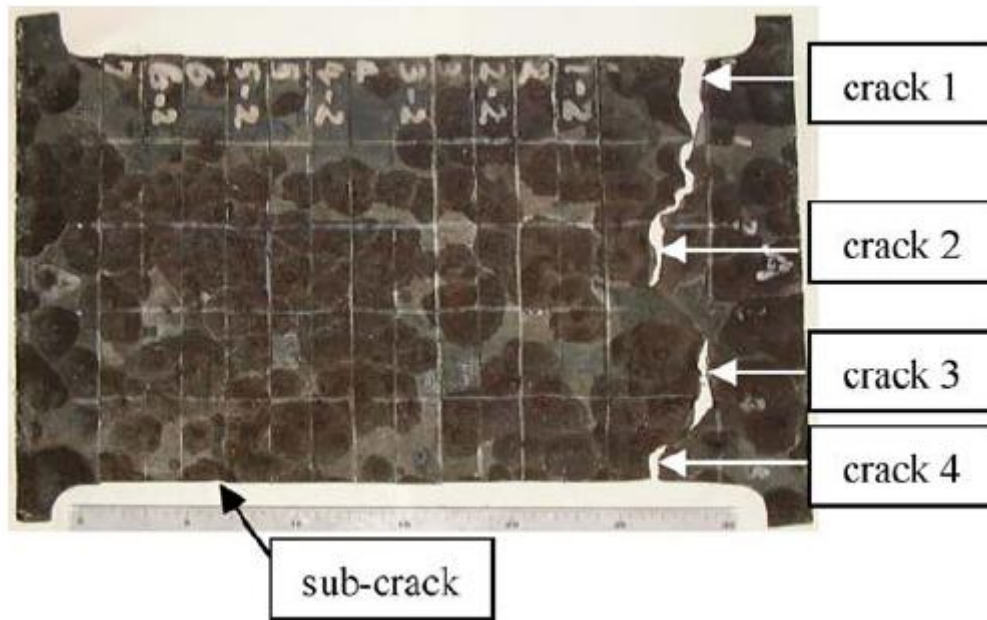
Στα διαγράμματα του Σχήματος 4.17 γίνεται σύγκριση της αντοχής και της επιμήκυνσης θραύσης των δοκιμίων από τους νομείς του Bulk carrier που έχουν υποστεί διάβρωση με βελονισμούς, με τα αντίστοιχα μεγέθη των δοκιμίων που έχουν τεχνητές εσοχές.



Σχήμα 4.17. Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή σε εφελκυσμό (α) και στη συνολική επιμήκυνση (β) για δοκίμια με τεχνητή και μη τεχνητή διάβρωση με βελονισμούς.

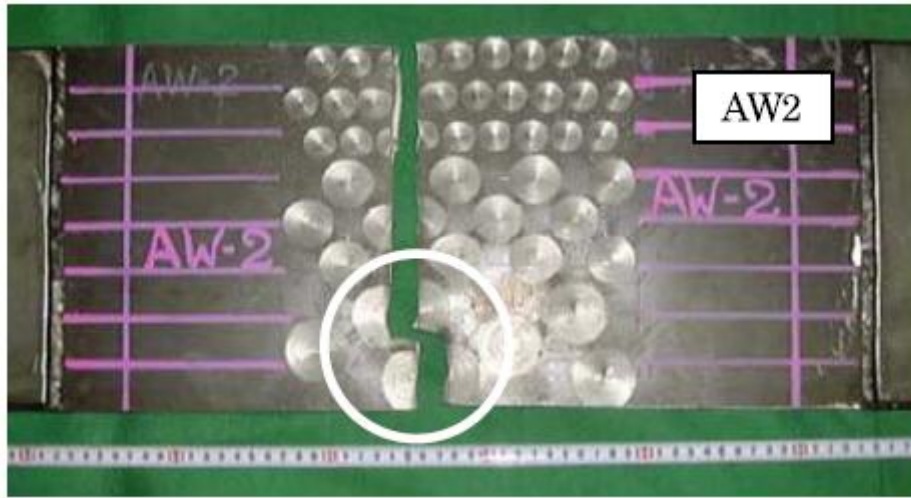
Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, τα πειραματικά αποτελέσματα λαμβάνουν παρόμοιες τιμές για τα δοκίμια με πραγματική διάβρωση με βελονισμούς και τα δοκίμια με τεχνητές εσοχές διαμέτρου ίσης με 30 mm. Η μέση διάμετρος των εσοχών στα δοκίμια που είχαν υποστεί διάβρωση με βελονισμούς λαμβάνει τιμές από 25 ως 30 mm, εκτός από μερικές εξαιρέσεις. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι δοκίμια με τεχνητές εσοχές, διαμέτρου ίσης με τη μέση τιμή της διαμέτρου των εσοχών δοκιμίων που έχουν υποστεί διάβρωση με βελονισμούς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν τη συμπεριφορά δοκιμίων που έχουν υποστεί διάβρωση με βελονισμούς και που παρουσιάζουν τυχαία κατανομή εσοχών.

Στην Εικόνα 4.8 φαίνεται ένα πλατύ δοκίμιο που έχει υποστεί διάβρωση με βελονισμούς, μετά το πείραμα εφελκυσμού. Φαίνεται πως δημιουργήθηκαν τέσσερις ρωγμές στο κατώτερο τμήμα των εσοχών, οι οποίες συνενώθηκαν ώστε να δημιουργήσουν μια κεντρική ρωγμή, η οποία οδήγησε τελικά στην αστοχία του δοκιμίου. Μια ακόμα μικρή ρωγμή (subcrack) παρατηρήθηκε σε κάποια απόσταση από τη κεντρική ρωγμή.



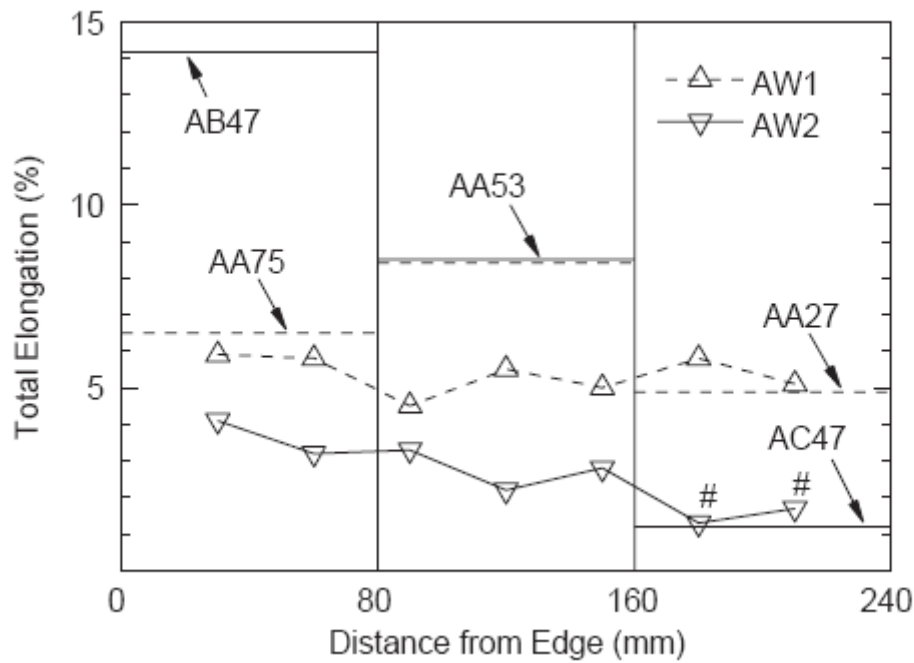
Εικόνα 4.8. Πλατύ δοκίμιο μετά το πείραμα εφελκυσμού.

Στην Εικόνα 4.9, φαίνεται ένα πλατύ δοκίμιο με τεχνητές εσοχές (AW 2) μετά το πείραμα εφελκυσμού. Δύο μεγάλες εσοχές 40 mm υπάρχουν στην περιοχή αστοχίας, στις οποίες έλαβε χώρα πλαστική παραμόρφωση που οδήγησε σε τοπική αστοχία του δοκιμίου.



Εικόνα 4.9. Πλατύ δοκίμιο μετά το πείραμα εφελκυσμού.

Στα πλατύτερα δοκίμια, η συνολική επιμήκυνση μετρήθηκε σε επτά σημεία, σε απόσταση 30 mm. Στο Σχήμα 4.18, φαίνεται η κατανομή της συνολικής επιμήκυνσης για τα δοκίμια AW1 και AW2. Στον οριζόντιο άξονα του σχήματος αναγράφεται η απόσταση από τα άκρα του δοκιμίου. Στην περίπτωση του δοκιμίου AW1, στο οποίο όλες οι εσοχές έχουν διάμετρο ίση με 30 mm, η συνολική επιμήκυνση είναι περίπου η ίδια για όλα τα σημεία. Στην περίπτωση του δοκιμίου AW2, στο οποίο οι εσοχές έχουν διάμετρο 20, 30 και 40 mm, η συνολική επιμήκυνση διαφέρει από περιοχή σε περιοχή, και συγκεκριμένα στην περιοχή σημαδεμένη με '#' στο Σχήμα 4.18, λαμβάνει πολύ μικρές τιμές. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται επίσης η επιμήκυνση των μικρότερων δοκιμίων που έχουν την ίδια κατανομή εσοχών με τα πλατύτερα δοκίμια. Όπως φαίνεται, στα πλατύτερα δοκίμια, η συνολική επιμήκυνση επηρεάζεται σημαντικά από τη διάμετρο και τη κατανομή των εσοχών και διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκύπτει τοπική αστοχία στην περιοχή που η επιμήκυνση φτάνει μια οριακή τιμή και αυτή η τοπική αστοχία είναι καθοριστικός παράγοντας για τη μέγιστη επιτρεπτή φόρτιση.



Σχήμα 4.18. Συνολική επιμήκυνση για τα πλατιά δοκίμια.

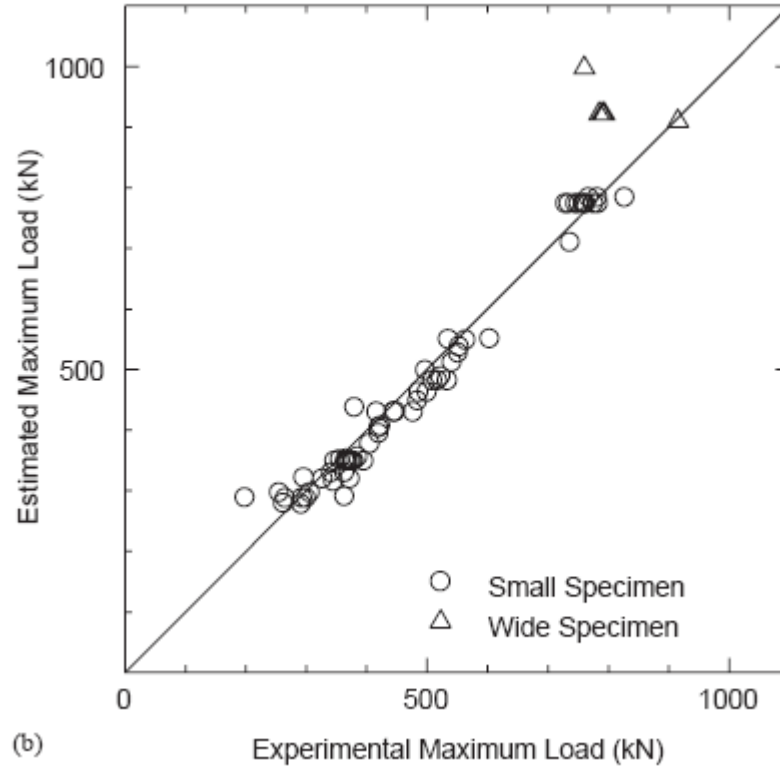
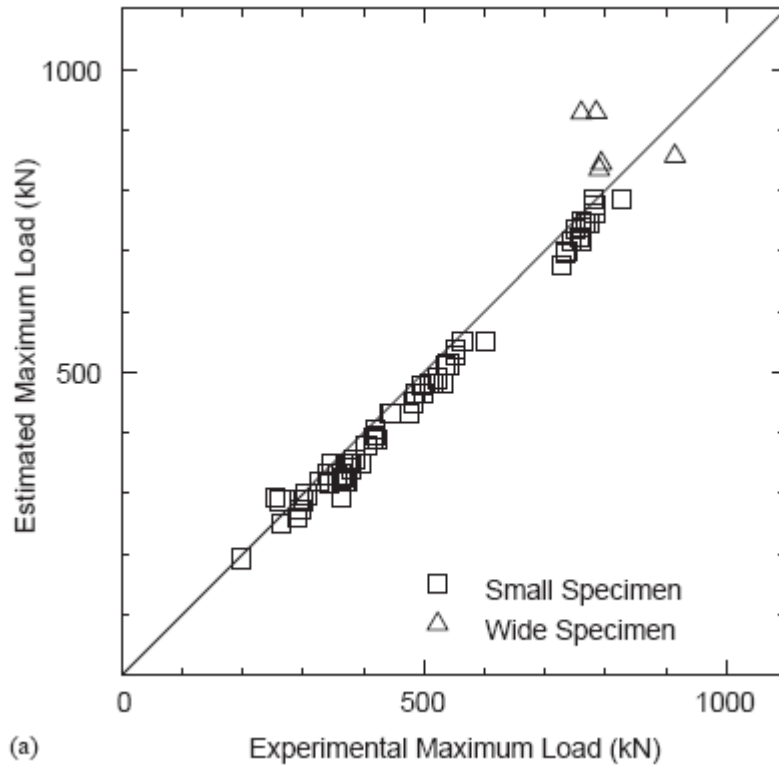
Στο Σχήμα 4.19, φαίνονται οι τιμές του μέγιστου φορτίου για τα δοκίμια με τεχνητές εσοχές. Το μέγιστο φορτίο υπολογίζεται από τη σχέση (Σχήμα 4.19α):

$$P_{pre1} = A_{f0} \times \sigma_B$$

όπου A_{f0} και σ_B όπως έχουν οριστεί παραπάνω. Στο δεύτερο διάγραμμα (Σχήμα 4.19b) το μέγιστο φορτίο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{pre2} = A_m \times \sigma_B$$

όπου A_m η ελάχιστη επιφάνεια του δοκιμίου κάθετη στον άξονα φόρτισης.

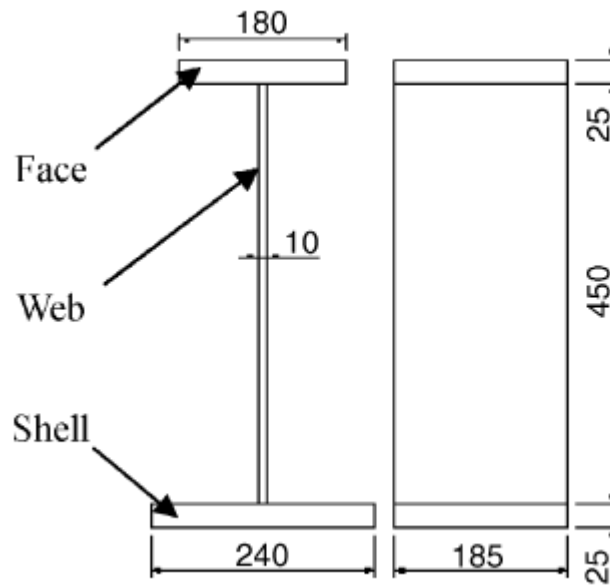


Σχήμα 4.19. Εκτίμηση του μέγιστου φορτίου του πειράματος εφελκυσμού.

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, η πρόβλεψη του μέγιστου φορτίου για τα μικρά δοκίμια είναι ικανοποιητική. Για κάποια πλατύτερα δοκίμια, η πρόβλεψη του μέγιστου φορτίου είναι μεγαλύτερη από την πραγματική. Στην περίπτωση των μικρότερων δοκιμίων, η αστοχία προκύπτει όταν πραγματοποιηθεί πλαστική παραμόρφωση σε σημαντικό τμήμα του δοκιμίου. Στην περίπτωση των πλατύτερων δοκιμίων, η συνολική επιμήκυνση επηρεάζεται σημαντικά από τη διάμετρο των εσοχών και διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκύπτει τοπική αστοχία στο τμήμα του δοκιμίου στο οποίο η επιμήκυνση φτάνει την οριακή της τιμή πρώτα. Γι' αυτό το λόγο, οι παραπάνω εξισώσεις δεν δίνουν πάντα σωστά αποτελέσματα στην περίπτωση των πλατύτερων δοκιμίων.

4.3.5 Έλεγχος αντοχής σε θλίψη

Για την εξέταση της αντοχής σε θλίψη, κατασκευάστηκαν δοκίμια από τον ίδιο χάλυβα όπως και στο πείραμα εφελκυσμού, με χρήση συγκόλλησης. Ένα από τα δοκίμια αποκόπηκε από τα αμπάρια του Bulk carrier, όπως παραπάνω. Η μορφολογία των δοκιμίων φαίνεται στο σχήμα 4.20. Όπως φαίνεται στο σχήμα, το πλάτος και το ύψος του τμήματος του δοκιμίου του οποίου ελέγχεται η αντοχή είναι ίσο με 185 και 450 mm, αντίστοιχα, ενώ το πάχος του είναι 10 mm ή 13 mm.

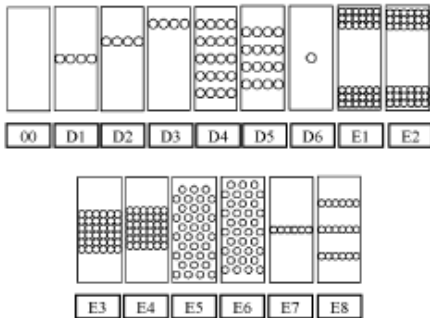


Σχήμα 4.20. Δοκίμια πειράματος θλίψης.

Η κατανομή των εσοχών, ο αριθμός τους και το ποσοστό που καταλαμβάνουν στην συνολική επιφάνεια των δοκιμίων αναγράφονται στον Πίνακα 4.7. Στον Πίνακα 4.8 αναγράφεται η κατανομή των εσοχών σε κάθε δοκίμιο, όπως επίσης και η μέση απώλεια πάχους του κάθε δοκιμίου.

Πίνακας 4.7. Κατανομή βελονισμών στη δοκιμή θλίψης

No.	Pit dia. mm	Number of Pits	Area ratio of pit
00	—	0	0.00
D1	40	4	0.06
D2	40	4	0.06
D3	40	4	0.06
D4	40	20	0.30
D5	40	16	0.24
D6	40	1	0.015
E1	30	36	0.30
E2	30	36	0.30
E3	30	36	0.30
E4	30	36	0.30
E5	30	35	0.30
E6	30	35	0.30
E7	30	6	0.05
E8	30	18	0.15
F1	—	0	See Fig. 19



Πίνακας 4.8. Δοκίμια θλιπτικής δοκιμής.

T.P.	Heat	T (mm)	Pit distribution		Average thickness loss (mm)
			Side A	Side B	
JD10	H6	9.9	D1	0	0.10
JD20	H6	9.9	D2	0	0.10
JD30	H6	10.0	D3	0	0.10
JD45	H6	10.0	D4	D5	0.91
KD45	H3	13.2	D4	D5	0.91
J000	H6	9.9	0	0	0.00
JD60	H6	10.2	D6	0	0.025
JE12	H6	9.9	E1	E2	0.76
JF11	H6	9.9	F1	F1	2.2
KF11	H3	13.0	F1	F1	2.2
JE34	H6	10.0	E3	E4	0.76
KE34	H6	13.2	E3	E4	0.76
JE56	H6	9.9	E5	E6	0.74
KE56	H3	13.1	E5	E6	0.74
JE77	H6	9.9	E7	E7	0.13
JE88	H6	10.0	E8	E8	0.38
YA	(KA32)	10.0	actual corrosion		2.0

Note: specimen designation 'JD45'

J = thickness; (J: 10 mm, K: 13 mm)

D45 = pit distribution D4 on side A and D5 on side B (see Table 6)

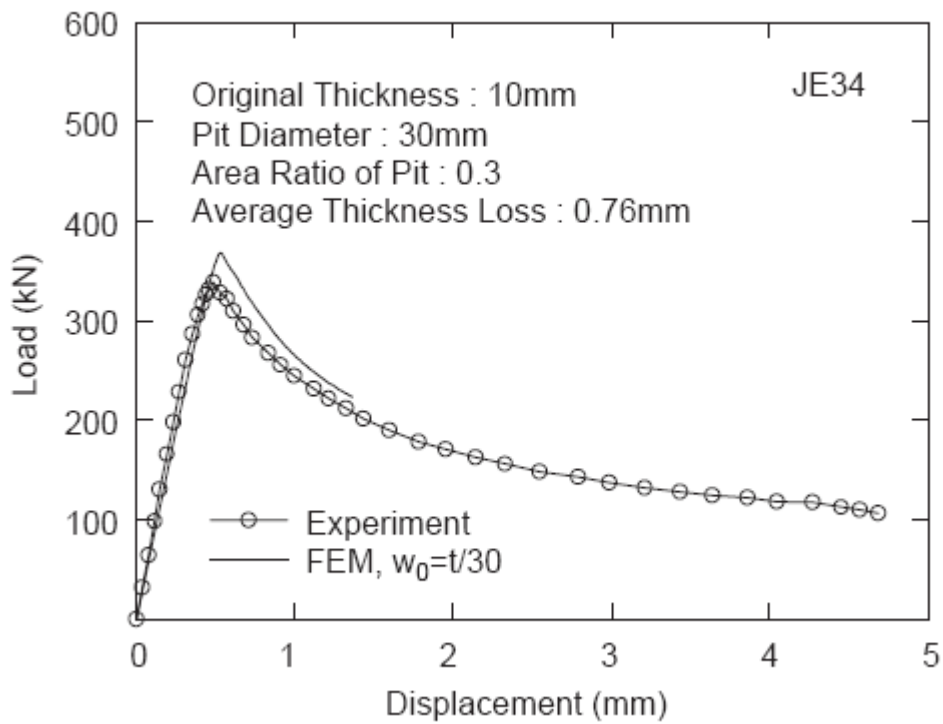
D = pit diameter (D: 40 mm, E: 30 mm, F: see Fig. 19).

Στον Πίνακα 4.8 το δοκίμιο 'YA' είναι το μοναδικό που έχει υποστεί διάβρωση με βελονισμούς. Στην Εικόνα 4.10, φαίνονται δύο δοκίμια μετά την εκτέλεση του πειράματος (JE34 και YA). Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το θλιπτικό φορτίο προκάλεσε λυγισμό και στα δύο δοκίμια.



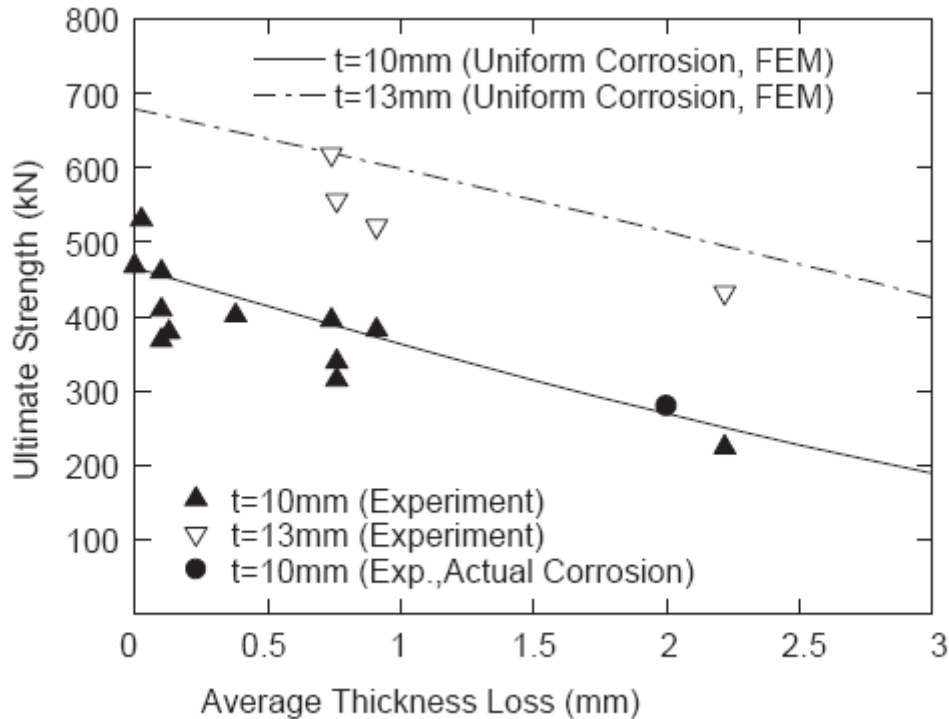
Εικόνα 4.10. Δοκίμια που υποβλήθηκαν σε θλιπτική καταπόνηση.

Η καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης για το δοκίμιο ‘JE34’ φαίνεται στο Σχήμα 4.21.



Σχήμα 4.21. Καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης για το δοκίμιο ‘JE34’.

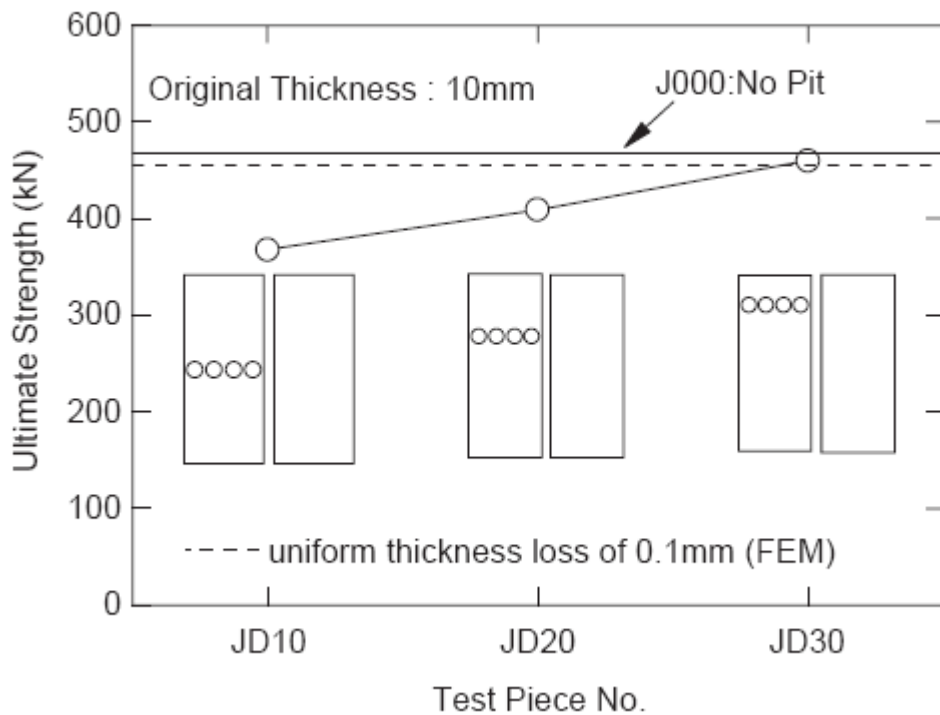
Μπορεί να παρατηρηθεί η σημαντική ελάττωση του θλιπτικού φορτίου, μετά από τη μέγιστη τιμή που λαμβάνει. Τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν τη σχέση ανάμεσα στην αντοχή των δοκιμίων φαίνονται στο Σχήμα 4.22..



Σχήμα 4.22. Σχέση ανάμεσα στη μέγιστη αντοχή σε θλίψη και της απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης με βελονισμούς.

Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται επίσης η ελάττωση της αντοχής των δοκιμίων για την περίπτωση ομοιόμορφης διάβρωσης. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, η αντοχή των δοκιμίων με διάβρωση με βελονισμούς είναι μικρότερη ή ίση με την αντοχή αντίστοιχων δοκιμίων με ομοιόμορφη διάβρωση.

Στο Σχήμα 4.23, φαίνεται η αντοχή δοκιμίων με τέσσερις εσοχές διαμέτρου ίσης με 40 mm σε σειρά (δοκίμια JD10 – JD30, $t = 10$ mm). Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται η αντοχή δοκιμίου χωρίς εσοχές (J000, $t = 10$ mm). Η διακεκομμένη γραμμή στο ίδιο διάγραμμα, περιγράφει την αντοχή δοκιμίου που έχει υποστεί ομοιόμορφη διάβρωση ίση προς 0,1 mm, υπολογισμένη με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Είναι φανερό η ελάττωση της αντοχής των δοκιμίων, καθώς οι εσοχές πλησιάζουν προς το κέντρο.



Σχήμα 4.23. Επίδραση της θέσης των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή σε θλίψη.

Συμπεράσματα:

- Και στις τρεις περιπτώσεις των Bulk carriers που εξετάστηκαν, το σχήμα των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς που παρατηρήθηκε, ήταν ένας κυκλικός κώνος με λόγο διαμέτρου προς βάθος ίσο με 8 ως 10.
- Η αντοχή των υλικών μειώνεται σταδιακά με την αύξηση της διάβρωσης με βελονισμούς, ενώ η συνολική επιμήκυνση μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης. Στις χειρότερες περιπτώσεις, η αντοχή μπορεί να ελαττωθεί ως και 2,5 φορές περισσότερο σε σχέση με την αντοχή των δοκιμίων που έχουν υποστεί ομοιόμορφη διάβρωση.
- Στην περίπτωση των πλατύτερων δοκιμίων, προκύπτει τοπικά πλαστική παραμόρφωση και αυτό οδηγεί σε τοπική αστοχία του υλικού.
- Η αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων που παρουσιάζουν διάβρωση με βελονισμούς, είναι μικρότερη ή ίση με την αντίστοιχη αντοχή δοκιμίων που παρουσιάζουν ομοιόμορφη διάβρωση.

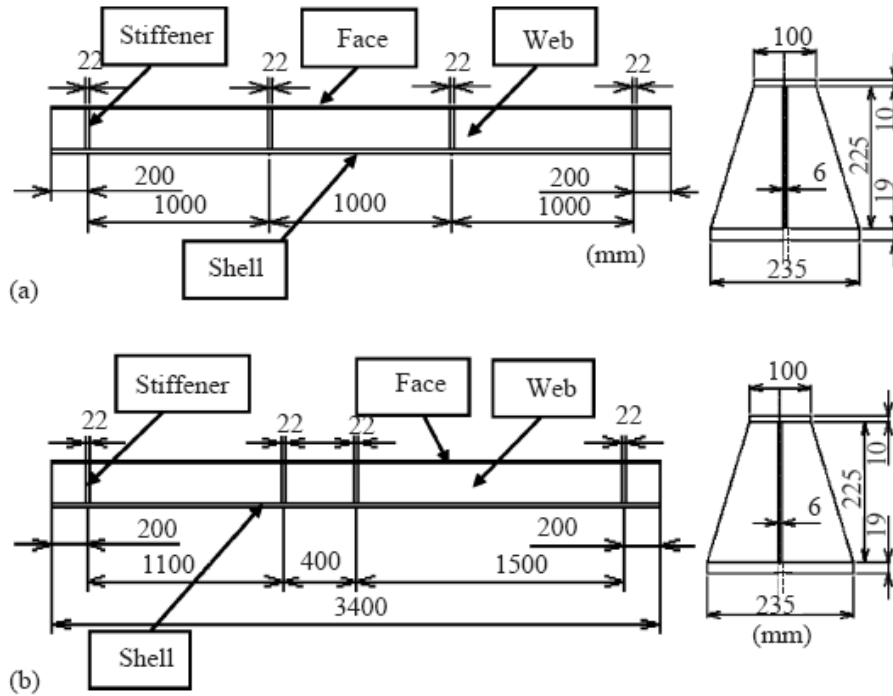
4.3.6 Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στον τοπικό και στον στρεπτο-καμπτικό λυγισμό στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής Bulk Carriers

Για να γίνει ο έλεγχος της αντοχής των νομέων του πλοίου που έχουν υποστεί διάβρωση με βελονισμούς, σε τοπικό και στρεπτοκαμπτικό λυγισμό, κατασκευάστηκαν δοκίμια που υποβλήθηκαν σε πειράματα κάμψης (Nakai Tatsuro, Matsushita Hisao, Yamamoto Norio, 2005). Τεχνητές εσοχές δημιουργήθηκαν στους νομείς αυτούς με χρήση τρυπανιού. Τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε πειράματα κάμψης τεσσάρων και τριών σημείων αντίστοιχα. Ο τοπικός λυγισμός στους νομείς του πλοίου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές παραμορφώσεις, ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης.

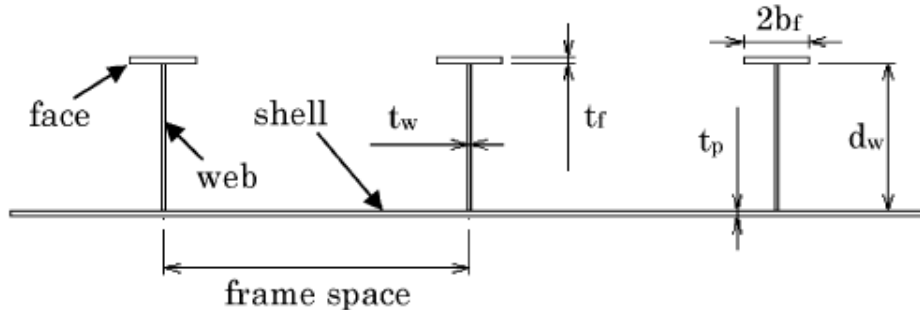
Για το πείραμα κάμψης τεσσάρων σημείων χρησιμοποιήθηκαν έξι δοκίμια (Σειρά D: D4-1 ως D4-6) ενώ για το πείραμα κάμψης τριών σημείων χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια (Σειρά F:F3-1 ως F3-3), κατασκευασμένα από χάλυβα AH32. Το πάχος των δοκιμίων είναι 6,10,19 και 22 mm. Οι μηχανικές ιδιότητες του κάθε δοκιμίου φαίνονται στον Πίνακα 4.9. Τα δοκίμια έχουν κατασκευαστεί με τη χρήση συγκόλλησης και εξομοιώνουν τους νομείς των κοιτών των Bulk carriers, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.24 και 4.25.

Πίνακας 4.9. Μηχανικές ιδιότητες των υπό δοκιμή χαλύβων AH32

t (mm)	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)
6	404	578	31
10	359	555	30
19	346	540	30
22	356	535	32



Σχήμα 4.24. Δοκίμια πειράματος κάμψης: (a) Πείραμα κάμψης τεσσάρων σημείων (b) Πείραμα κάμψης τριών σημείων.



Σχήμα 4.25. Μέση τομή των νομέων των κυτών φορτίου των Bulk carriers.

Για το πείραμα κάμψης τεσσάρων σημείων, δύο ίσα κατανομημένα φορτία δρουν στο δοκίμιο έτσι ώστε το θλιπτικό φορτίο λόγω κάμψης να ενεργήσει στο πάνω τμήμα του νομέα (face plate). Η περιοχή ανάμεσα στα δύο σημεία φόρτισης ($L = 1000$ mm), είναι το τμήμα του δοκίμιου στο οποίο ενεργεί η ομοιόμορφη κάμψη. Για τη μέτρηση του τοπικού και στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, μετρήθηκαν οι διαμήκεις παραμορφώσεις σε τέσσερα σημεία στο πάνω τμήμα του νομέα (face plate) και σε δύο σημεία στο κατώτερο τμήμα του νομέα (shell plate).

Στις Εικόνες 4.11 α και β, φαίνεται η πειραματική διάταξη για το πείραμα κάμψης τεσσάρων και τριών σημείων, αντίστοιχα:

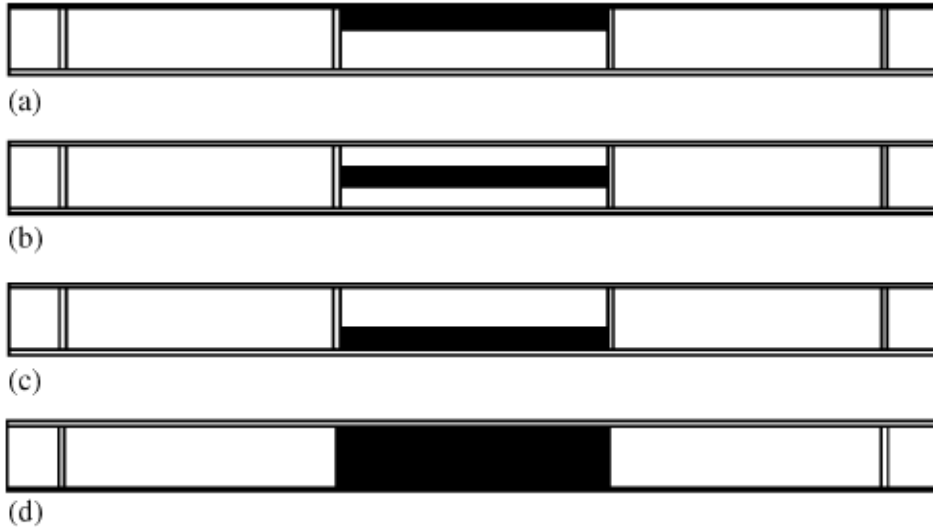


Εικόνα 4.11. Δοκίμια για τα πειράματα κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων.

Τα δοκίμια περιλαμβάνουν τεχνητές εσοχές στο μεσαίο τμήμα τους (web plates). Το σχήμα τους είναι κυκλικού κώνου, ενώ η διάμετρος και το βάθος τους είναι ίσα με 20 mm και 2,5 mm, αντίστοιχα. Ο λόγος της διαμέτρου προς το βάθος των τεχνητών εσοχών είναι ίσος με 8, όπως και η μέση τιμή του αντίστοιχου λόγου στους νομείς των Bulk carriers.

Η περιοχή των δοκιμίων με τεχνητές εσοχές για το πείραμα κάμψης τεσσάρων σημείων φαίνεται στο Σχήμα 4.26. Στην περίπτωση των δοκιμίων D4-5 και D4-6, όλη η επιφάνεια του web plate του νομέα περιέχει τεχνητές εσοχές. Η περιοχή με τεχνητές εσοχές για τα δοκίμια D4-2, D4-3 και D4-4, είναι η ανώτερη, η μεσαία και η κατώτερη περιοχή του web plate, αντίστοιχα. Το δοκίμιο D4-1 δεν έχει καμία τεχνητή εσοχή.

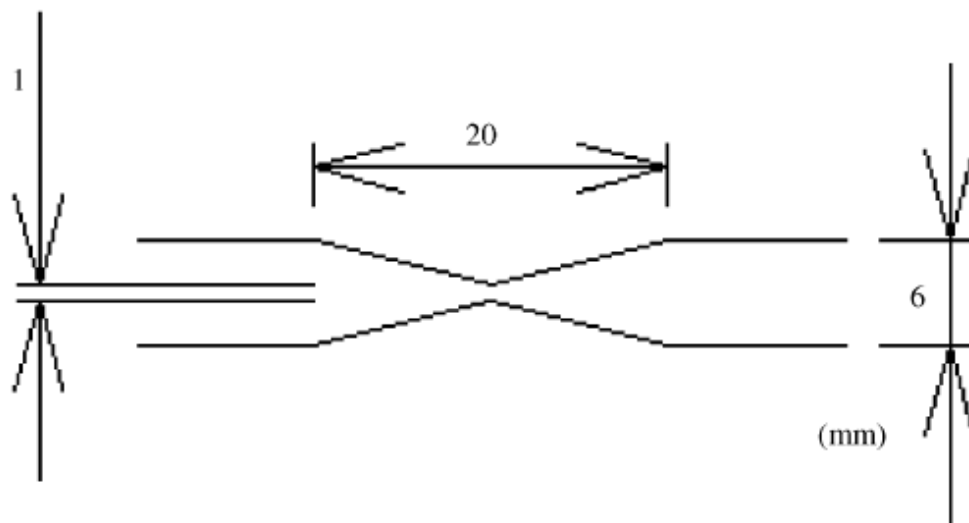
Στο Σχήμα 4.27, φαίνεται η περιοχή των δοκιμίων με τεχνητές εσοχές , για το πείραμα κάμψης τριών σημείων. Το δοκίμιο F3-1 δεν περιλαμβάνει καμία εσοχή. Για τα δοκίμια F3-2 και F3-3, η περιοχή μήκους 1000 mm προς τα δεξιά από τη μέση τομή, έχει τεχνητές εσοχές. Τεχνητές εσοχές δημιουργήθηκαν στην ίδια θέση και στις δύο πλευρές του web plate των νομέων. Κατ'αυτο τον τρόπο το πάχος του ελάσματος στο βάθος των εσοχών είναι πολύ μικρό, περίπου ίσο με 1 mm, που αντιστοιχεί στο 17% του αρχικού πάχους του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.28.



Σχήμα 4.26. Περιοχή διάβρωσης με βελονισμούς (μαύρη σκίαση) για τα δοκίμια του πειράματος κάμψης τεσσάρων σημείων.



Σχήμα 4.27. Περιοχή διάβρωσης με βελονισμούς (μαύρη σκίαση) για τα δοκίμια του πειράματος κάμψης τριών σημείων.

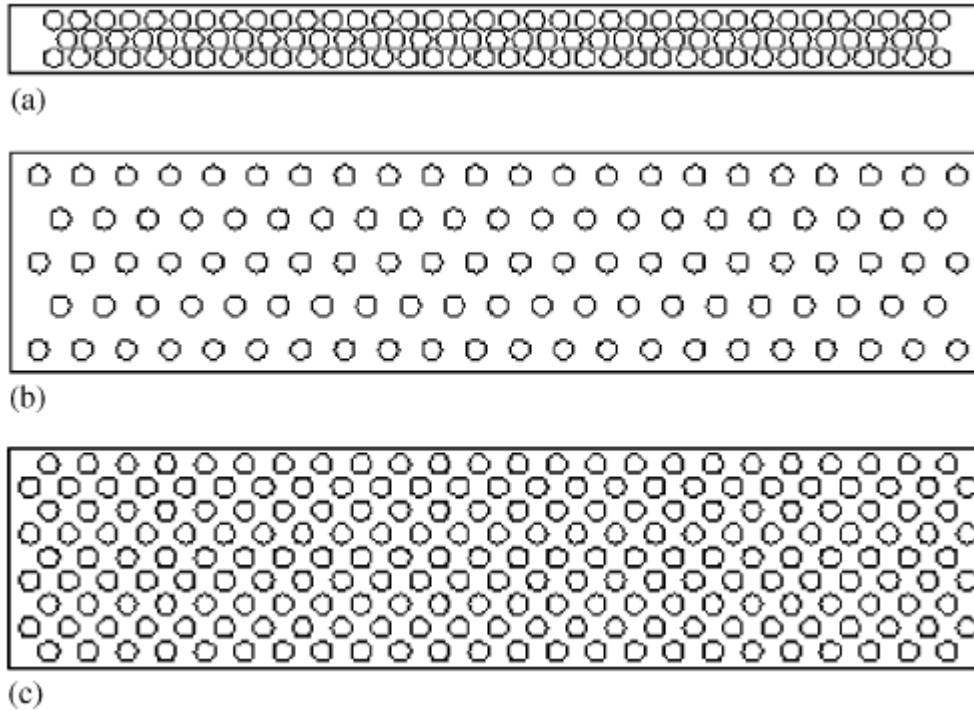


Σχήμα 4.28. Μέση τομή των τεχνητών εσοχών.

Ο αριθμός των εσοχών, ο βαθμός έντασης της διάβρωσης με βελονισμούς (DOP) και η μέση απώλεια πάχους των δοκιμίων αναγράφονται στον Πίνακα 4.10. Οι τεχνητές εσοχές είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.29.

Πίνακας 4.10. Τεχνητές εσοχές για τα δοκίμια της θλιπτικής δοκιμής.

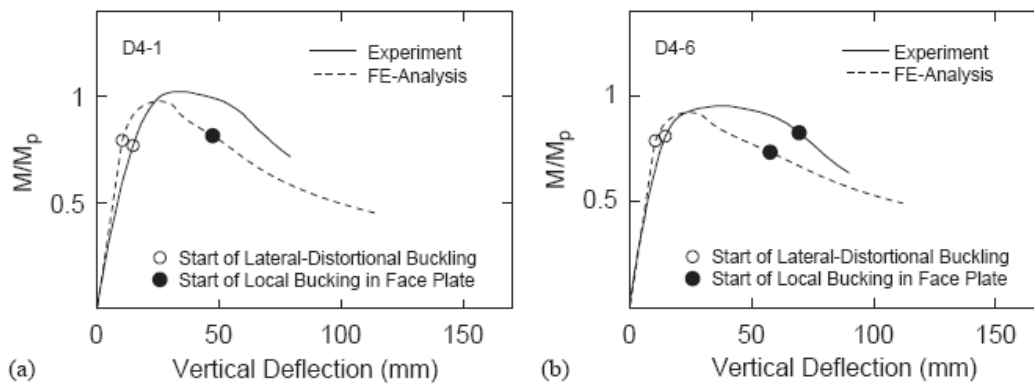
No.	Pit diameter (mm)	Number of pits		Degree of pitting intensity	Average thickness loss	
		Side A	Side B		(mm)	(%)
D4-1	No pit	0	0	0.0	0.0	0.0
D4-2	20	107	107	0.45	0.75	12.5
D4-3	20	107	107	0.45	0.75	12.5
D4-4	20	107	107	0.45	0.75	12.5
D4-5	20	108	108	0.15	0.25	4.2
D4-6	20	220	220	0.30	0.50	8.3
F3-1	No pit	0	0	0.0	0.0	0.0
F3-2	20	108	108	0.15	0.25	4.2
F3-3	20	220	220	0.30	0.50	8.3



Σχήμα 4.29. Κατανομή των εσοχών σε κάθε δοκίμιο (α) D4- 2 ως D4- 4 (β) D4- 5, F3 -2 (γ) D4 -6. F3- 3.

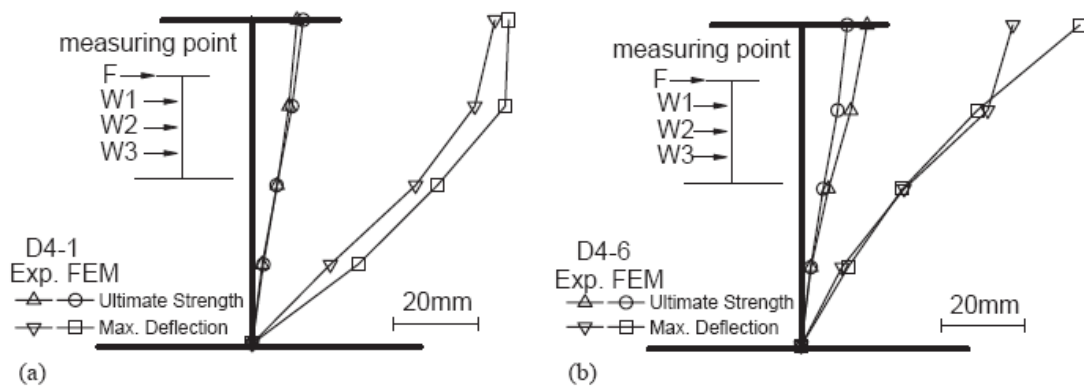
Πειραματικά αποτελέσματα πειράματος κάμψης τεσσάρων σημείων

Οι καμπύλες φορτίου – παραμόρφωσης για τα δοκίμια D4-1 και D4-6 - το πρώτο από τα οποία δεν έχει καθόλου εσοχές ενώ το δεύτερο έχει τον μεγαλύτερο αριθμό τεχνητών εσοχών - φαίνονται στα διαγράμματα του Σχήματος 4.30. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα αυτά, πρώτα έλαβε χώρα στρεπτοκαμκτικός λυγισμός, έπειτα το δοκίμιο έφτασε στο μέγιστο φορτίο και τέλος, έχουμε τοπικό λυγισμό του πάνω τμήματος του νομέα (face plate).



Σχήμα 4.30. Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης: (α)D4-1, (β)D4-6.

Στα Σχήματα 4.31 α και β, φαίνεται η παραμόρφωση της μέσης τομής στο μέγιστο φορτίο, όπως επίσης και η μέγιστη παραμόρφωση, για τα δοκίμια D4-1 και D4-6.



Σχήμα 4.31. Παραμόρφωση της μέσης τομής για τα δοκίμια D4-1 και D4-6.

Η παραμόρφωση του web plate και του face plate των δοκιμίων, υπολογίζεται με χρήση επιμηκυνσιόμετρων προσαρμοσμένων στο shell plate τους. Γι' αυτό το λόγο οι υπολογιζόμενες παραμορφώσεις είναι οι σχετικές παραμορφώσεις των τμημάτων αυτών των δοκιμίων, σε σχέση με το shell plate. Όσον αφορά την παραμόρφωση του shell plate, αυτή είναι σχετικά μικρή σε σχέση με την παραμόρφωση του web plate και του face plate του δοκιμίου. Στις Εικόνες 4.12 – 4.15, φαίνεται η παραμόρφωση που υπέστη το δοκίμιο D4-1 κατά το πείραμα κάμψης τεσσάρων σημείων:



Εικόνα 4.12. Γενική εικόνα του δοκιμίου μετά το πείραμα.



Εικόνα 4.13. Παραμόρφωση του face plate του δοκιμίου:



Εικόνα 4.14. Τοπικός λυγισμός του face plate του δοκιμίου:



Εικόνα 4.15. Μέση τομή δοκιμίου.

Η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων M_u , η αντοχή των δοκιμίων σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό M_{ldb} και η αντοχή σε τοπικό λυγισμό του face plate των δοκιμίων αναγράφονται στον Πίνακα 4.11.

Πίνακας 4.11. Αποτελέσματα δοκιμών και ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (κάμψη τεσσάρων σημείων).

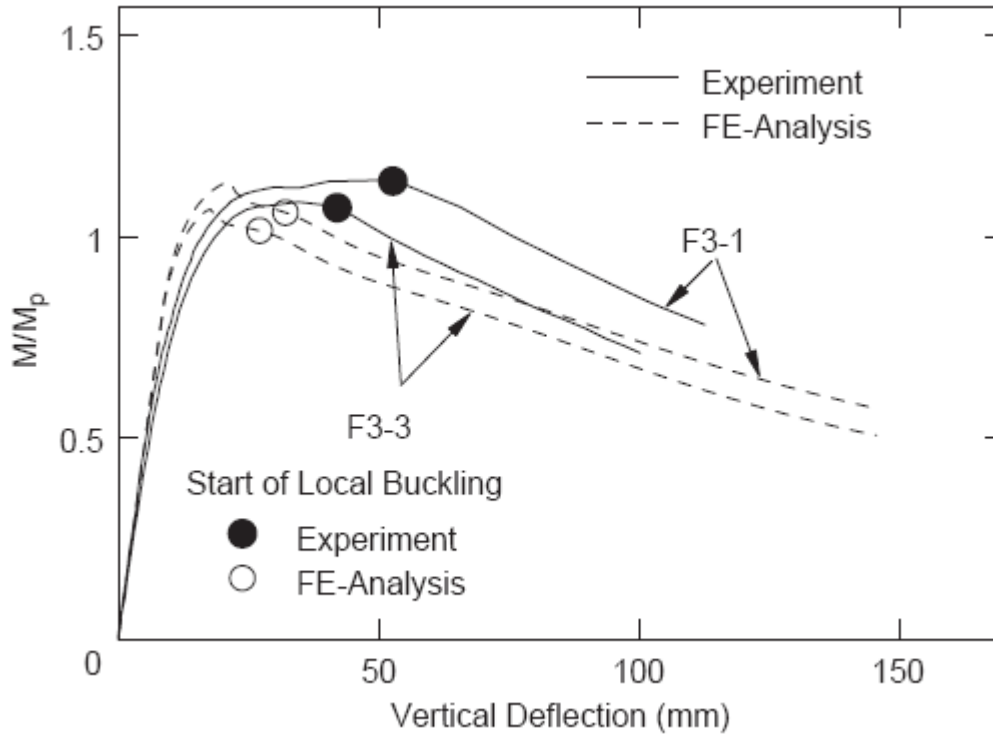
TP no.	M_u/M_p		M_{ldb}/M_p		M_{lfb}/M_p		Vertical deflection at M_{lfb} (mm)	
	Exp.	FEM	Exp.	FEM	Exp.	FEM	Exp.	FEM
D4-1	1.02	0.98	0.77	0.79	—*	0.82	—*	47.4
D4-2	1.03	0.94	0.95	0.79	0.98	0.76	63.4	55.0
D4-3	0.99	0.95	0.76	0.79	—*	0.73	—*	62.7
D4-4	1.01	0.97	0.88	0.79	0.90	0.82	54.0	42.9
D4-5	0.99	0.95	0.84	0.79	0.91	0.80	56.4	45.4
D4-6	0.95	0.92	0.81	0.79	0.83	0.73	69.4	57.5

Note: M_u : ultimate strength, M_p : full plastic moment, M_{ldb} : lateral-distortional buckling strength, M_{lfb} : local face buckling strength (local face buckling occurs after ultimate strength), * M_{ldb} for this specimen is not measured.

Η ελάττωση στη συνολική αντοχή των δοκιμίων D4-5 και D4-6, που έχουν ομοιόμορφη κατανομή εσοχών, είναι περίπου ίση με 3% και 7%, αντίστοιχα. Το δοκίμιο D4-3 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ελάττωση στη συνολική αντοχή - περίπου ίση με 3% - ανάμεσα στα δοκίμια D4-3, D4-4 και D4-5.

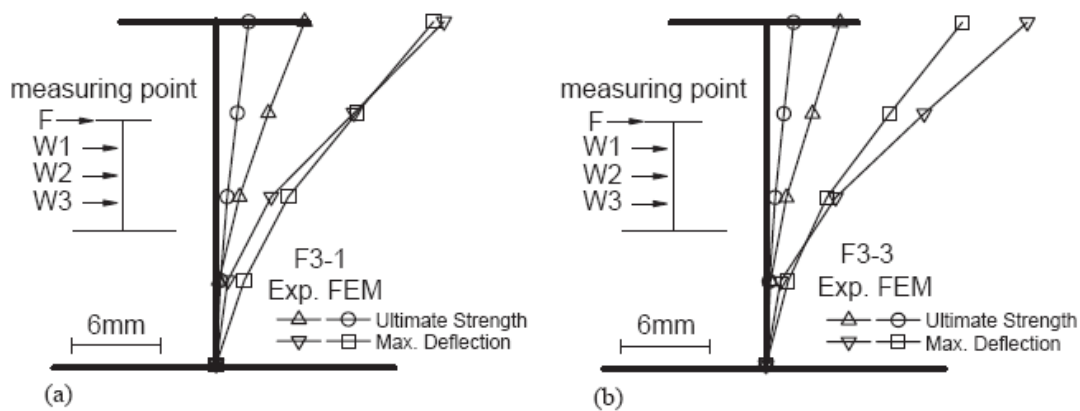
Πειραματικά αποτελέσματα πειράματος κάμψης τριών σημείων

Οι καμπύλες φορτίου – παραμόρφωσης για τα δοκίμια F3-1 και F3-3 - το πρώτο από τα οποία δεν έχει καθόλου εσοχές, ενώ το δεύτερο έχει το μεγαλύτερο αριθμό τεχνητών εσοχών - φαίνονται στο Σχήμα 4.32.



Σχήμα 4.32. Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης.

Στο διάγραμμα αυτό περιλαμβάνονται επίσης αποτελέσματα από ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.32, ο τοπικός λυγισμός εμφανίστηκε λίγο μετά το μέγιστο φορτίο. Στα Σχήματα 4.33 α και β, φαίνεται η παραμόρφωση της μέσης τομής των παραπάνω δοκιμίων, για την κατάσταση μέγιστης παραμόρφωσης και την κατάσταση μέγιστου φορτίου:



Σχήμα 4.33. Παραμόρφωση της μέσης τομής των νομέων F3-1 και F3-3.

Η παραμόρφωση του web plate και του face plate των δοκιμίων, υπολογίζεται με χρήση επιμηκυνσιόμετρων προσαρμοσμένων στο shell plate τους. Γι' αυτό το λόγο οι υπολογιζόμενες παραμορφώσεις είναι οι σχετικές παραμορφώσεις των τμημάτων αυτών των δοκιμίων, σε σχέση με το shell plate. Όσον αφορά την παραμόρφωση του shell plate, αυτή είναι σχετικά μικρή σε σχέση με την παραμόρφωση του web plate και του face plate του δοκιμίου. Στις Εικόνες 4.16 – 4.18, φαίνεται η παραμόρφωση που υπέστη το δοκίμιο F3-1, κατά το πείραμα κάμψης τριών σημείων:



Εικόνα 4.16. Γενική εικόνα του δοκιμίου μετά το πείραμα.



Εικόνα 4.17. Τοπικός λυγισμός του face plate του δοκιμίου.



Εικόνα 4.18. Παραμόρφωση του face plate του δοκιμίου:

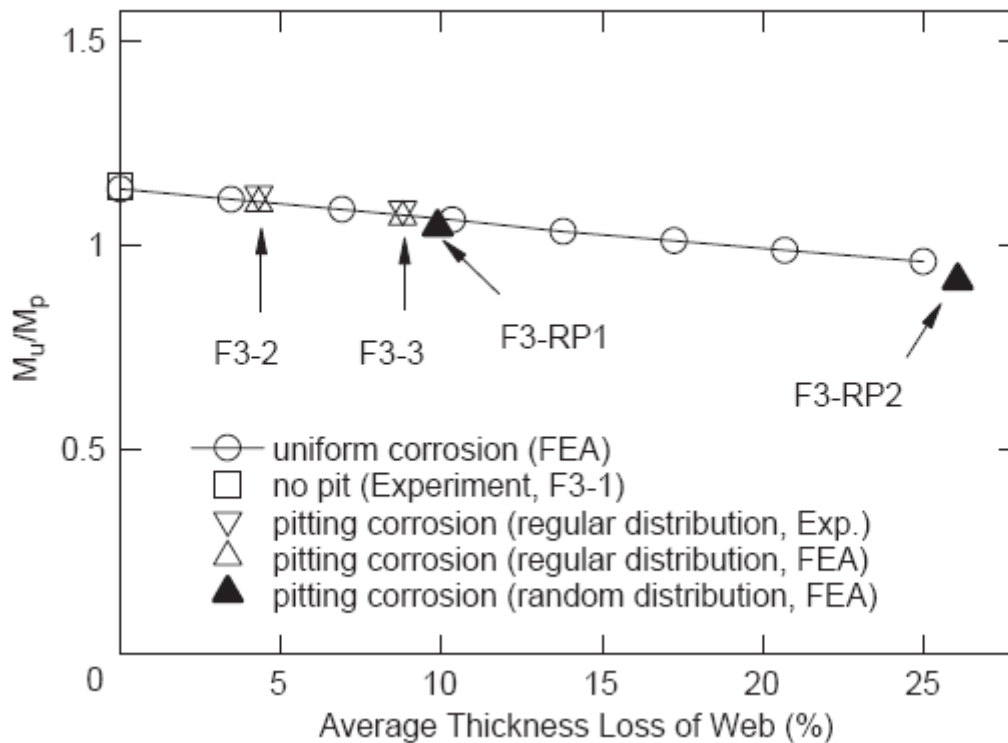
Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή των δοκιμίων

Στον Πίνακα 4.12, αναγράφονται η μέγιστη αντοχή και η αντοχή σε τοπικό λυγισμό των δοκιμίων F3-1 ως F3-3. Στο Σχήμα 4.34, φαίνεται η σχέση ανάμεσα στη μέγιστη αντοχή των δοκιμίων και το ποσοστό διάβρωσης με βελονισμούς που έχουν υποστεί. Η ελάττωση στην αντοχή του δοκιμίου F3-3 (Βαθμός έντασης της διάβρωσης με βελονισμούς: 0.30) είναι περίπου ίση με 5%, ενώ η αντίστοιχη ελάττωση της αντοχής για το δοκίμιο F3-2 (βαθμός έντασης της διάβρωσης με βελονισμούς: 0.15) είναι περίπου ίση με 2%.

Πίνακας 4.12. Αποτελέσματα δοκιμών και ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (κάμψη τριών σημείων).

TP no.	M_u/M_p		M_{fb}^*	
	Exp.	FEM	Exp.	FEM
F3-1	1.14	1.14	1.14	1.06
F3-2	1.12	1.10	1.12	1.04
F3-3	1.09	1.07	1.07	1.01

Note: M_u : ultimate strength, M_p : full plastic moment, M_{fb} : local face buckling strength (local face buckling occurs just after ultimate strength).



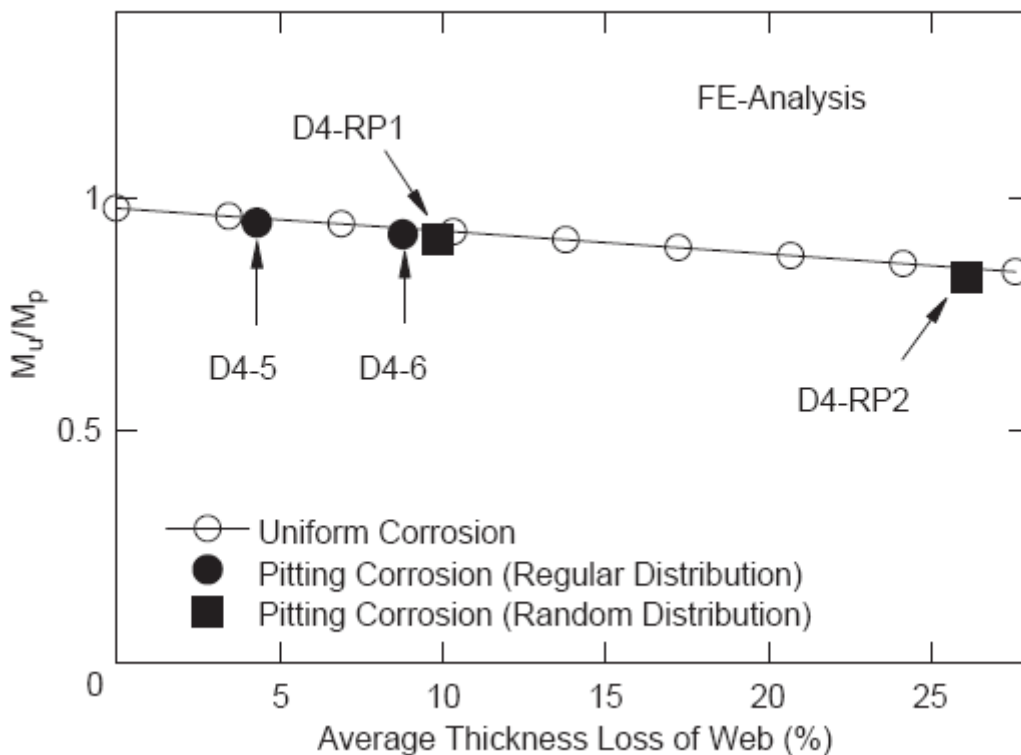
Σχήμα 4.34. Σχέση ανάμεσα στην αντοχή των δοκιμών και την απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης για το πείραμα κάμψης τριών σημείων.

Ο ρόλος του web plate των δοκιμών είναι η μεταφορά διατμητικών τάσεων. Στο πείραμα κάμψης τεσσάρων σημείων, δεν επιδρούν διατμητικές τάσεις στο ελεγχόμενο τμήμα των δοκιμών, ενώ στο πείραμα κάμψης τριών σημείων δρουν διατμητικές τάσεις στα δοκίμια. Γι' αυτό το λόγο, η ελάττωση της αντοχής των δοκιμών αναμένεται να είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση του πειράματος κάμψης τριών σημείων, σε σχέση με την αντοχή των δοκιμών του πειράματος κάμψης τεσσάρων σημείων. Αντίθετα με τις προβλέψεις, η ελάττωση της αντοχής του δοκιμίου D4-6 (βαθμός έντασης της διάβρωσης

με βελονισμούς: 0.30) στο πείραμα κάμψης τεσσάρων σημείων είναι περίπου ίση με 7%, λίγο μεγαλύτερη από την ελάττωση της αντοχής του δοκίμιου F3-3 (Βαθμός έντασης της διάβρωσης με βελονισμούς: 0.30) στο πείραμα κάμψης τριών σημείων. Μπορεί, να θεωρηθεί ότι η επίδραση των διατμητικών τάσεων στην καμπτική ροπή είναι πολύ μικρή όσον αφορά στο συγκεκριμένο πείραμα κάμψης τριών σημείων.

Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς και της ομοιόμορφης διάβρωσης στην αντοχή των δοκιμίων

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις από τα πειραματικά αποτελέσματα, η αντοχή των δοκιμίων ελαττώνεται με την αύξηση του αριθμού των εσοχών, που εξομοιώνουν την διάβρωση με βελονισμούς. Στα Σχήματα 4.35 και 4.34, φαίνεται η σχέση ανάμεσα στην αντοχή των δοκιμίων και τη μέση απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης, για το πείραμα κάμψης τεσσάρων και τριών σημείων, αντίστοιχα. Στα ίδια διαγράμματα φαίνεται και η ελάττωση της αντοχής με την αύξηση της απώλειας πάχους, για δοκίμια που έχουν υποστεί ομοιόμορφη διάβρωση, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

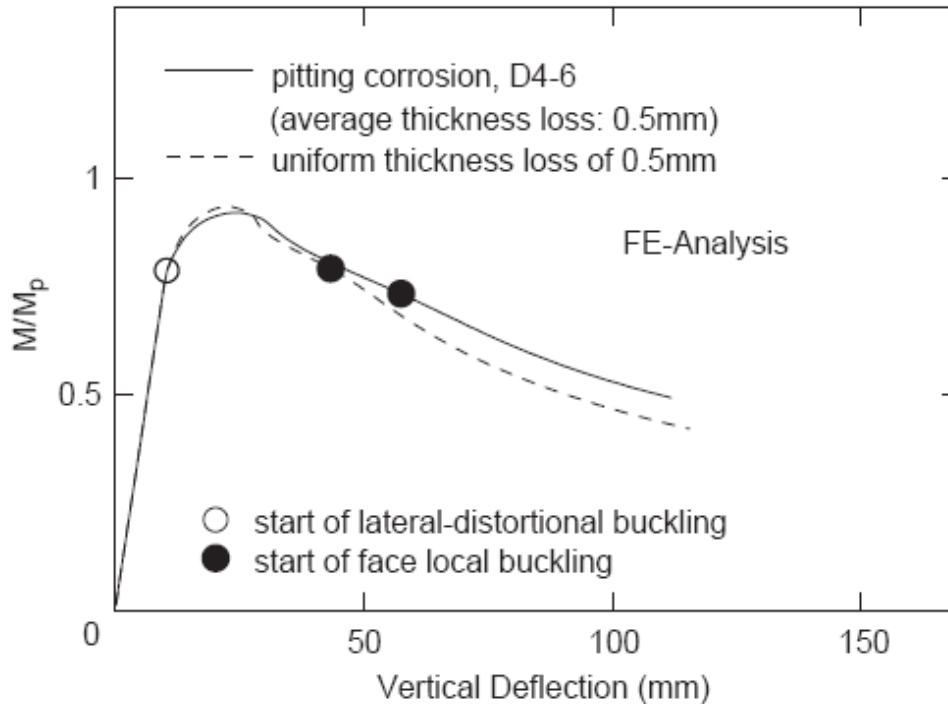


Σχήμα 4.35. Σχέση ανάμεσα στην αντοχή των δοκιμίων και της απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης για το πείραμα κάμψης τεσσάρων σημείων.

Από τα διαγράμματα αυτά, είναι φανερό, πως για την ίδια μέση απώλεια πάχους, η ελάττωση της αντοχής των δοκιμίων είναι σχεδόν η ίδια, για τα δοκίμια που έχουν

υποστεί διάβρωση με βελονισμούς και για τα δοκίμια που έχουν υποστεί ομοιόμορφη διάβρωση (δοκίμια D4-5, D4-6, F3-2 και F3-3).

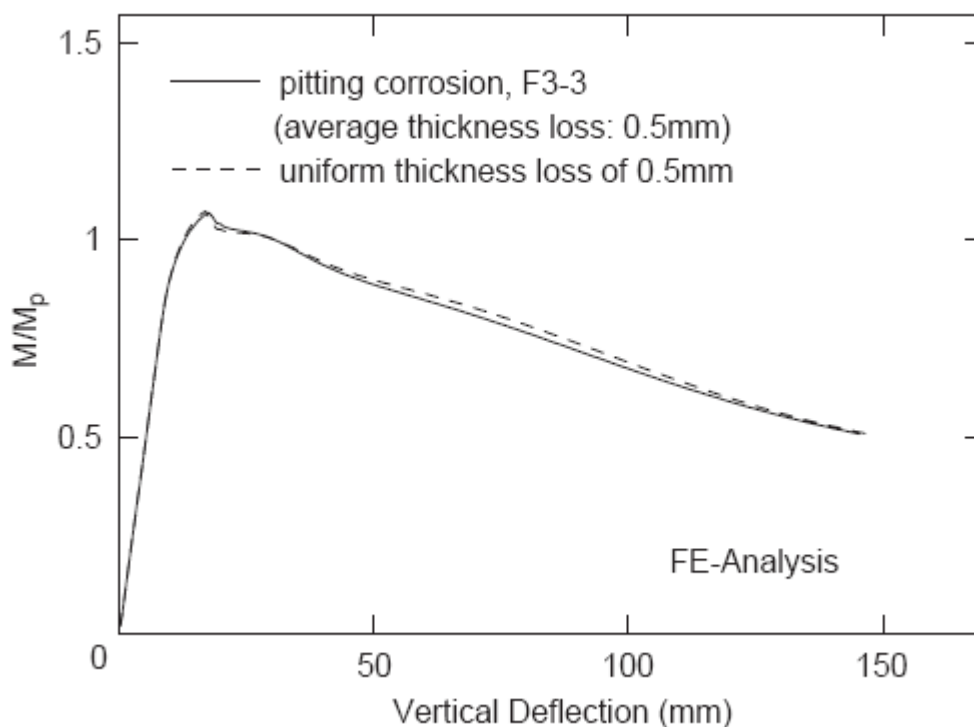
Στο Σχήμα 4.36, φαίνεται η καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης για το δοκίμιο D4-6 και ένα δοκίμιο με ομοιόμορφη διάβρωση που αντιστοιχεί στη μέση ελάττωση του πάχους του δοκιμίου D4-6.



Σχήμα 4.36. Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για το πείραμα κάμψης τεσσάρων σημείων.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα αυτό, η συμπεριφορά των δύο δοκιμίων είναι σχεδόν ταυτόσημη ως την εμφάνιση του τοπικού λογισμού στο face plate τους. Όμως, η πορεία ελάττωσης του φορτίου και η αντοχή των δύο δοκιμίων σε τοπικό λογισμό είναι διαφορετική.

Η καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης για το δοκίμιο F3-3 και ένα δοκίμιο με ομοιόμορφη διάβρωση που αντιστοιχεί στην μέση ελάττωση του πάχους του δοκιμίου F3-3, φαίνεται στο Σχήμα 4.37.

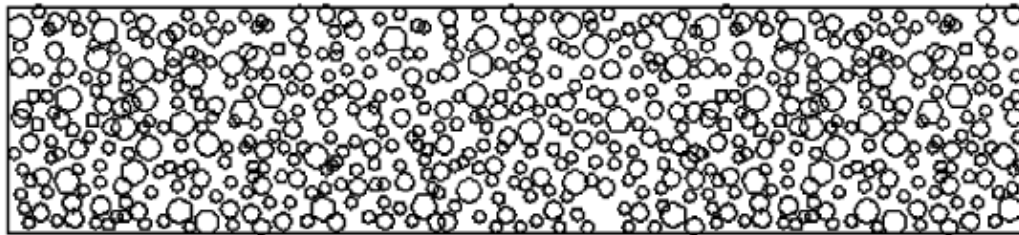


Σχήμα 4.37. Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για το πείραμα κάμψης τριών σημείων.

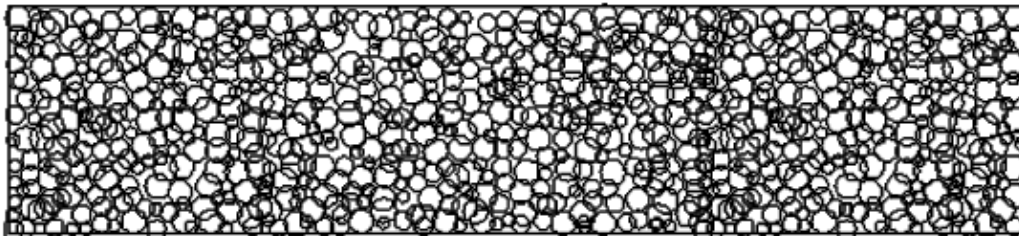
Σύμφωνα με το Σχήμα 4.37, η συμπεριφορά του δοκιμίου με διάβρωση με βελονισμούς είναι παρόμοια με αυτή του δοκιμίου με ομοιόμορφη διάβρωση.

Επίδραση της μη ομοιόμορφης κατανομής της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή των δοκιμίων

Στα παραπάνω δοκίμια η κατανομή της διάβρωσης με βελονισμούς ήταν ομοιόμορφη. Προφανώς, στους νομείς των Bulk carriers, η κατανομή των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς είναι τυχαία. Στην Εικόνα 4.19 φαίνονται δύο τυχαίες κατανομές διάβρωσης με βελονισμούς (RP1 και RP2), που χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστεί η αντοχή δοκιμίων, με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.



(a)



(b)

Εικόνα 4.19. Τυχαία κατανομημένη διάβρωση με βελονισμούς.

Οι εσοχές αυτές έχουν λόγο διαμέτρου προς βάθος 8 προς 1 και τοποθετούνται στα ίδια σημεία και στις δύο πλευρές των δοκιμίων. Τα χαρακτηριστικά των εσοχών αυτών φαίνονται στον επόμενο Πίνακα 4.13.

Πίνακας 4.13. Μη ομοιόμορφα κατανομημένη διάβρωση με βελονισμούς.

TP no.	Type	Pit diameter (mm)	Number of pits		Degree of pitting intensity	Average thickness loss	
			Side A	Side B		(mm)	(%)
D4-RP1 ^a	RP1	12	385	385	0.41	0.59	9.9
		18	132	132			
		24	56	56			
D4-RP2 ^a	RP2	12	232	232	0.80	1.56	26.1
		18	246	246			
		24	315	315			

Note: Several pits are overlapped as shown in Fig. 35.

^aStructural models for 4-point bend test in FE-analysis.

^bStructural models for 3-point bend test in FE-analysis.

Η επίδραση της τυχαίας κατανομής εσοχών στην αντοχή των δοκιμίων, φαίνεται στα Σχήματα 4.34 και 4.35. Παρατηρείται, ότι ακόμα και στην περίπτωση αυτή, η ελάττωση στην αντοχή των δοκιμίων, με την αύξηση της απώλειας του μέσου πάχους τους, είναι παρόμοια με την ελάττωση της αντοχής των δοκιμίων με ομοιόμορφη διάβρωση.

Συμπεράσματα:

- Η επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στον στρεπτο-καμπτικό λυγισμό είναι μικρή.
- Η επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στον τοπικό λυγισμό του face plate των νομέων, είναι σημαντική.
- Η επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή των δοκιμίων σε κάμψη, είναι σχεδόν ίδια με την επίδραση της ομοιόμορφης διάβρωσης, σε όρους μέσης απώλειας πάχους.

5. Μετάβαση από τη διάβρωση με βελονισμούς σε ρωγμές

5.1 Εισαγωγή

Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, η διάβρωση με βελονισμούς αποτελεί προπομπό της διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση (S.C.C.), καθώς παρέχει το συνδυασμό ενός επιθετικού τοπικού διαβρωτικού περιβάλλοντος και μιας τοπικής συγκέντρωσης τάσεων. Τα βασικά στάδια στην ανάπτυξη και εξέλιξη ρωγμών από εσοχές που έχουν δημιουργηθεί λόγω διάβρωσης με βελονισμούς είναι τα ακόλουθα: Δημιουργία εσοχής, επέκταση εσοχής, μετάβαση από την εσοχή σε ρωγμή, ανάπτυξη ρωγμής (Turnbull A., McCartney I.N., Zhou S., 2005). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για να μελετήσουμε την ανάπτυξη ρωγμών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, λόγω της κατανεμημένης φύσης των βαθών των εσοχών και των διαφοροποιημένων ρυθμών ανάπτυξης, απαιτείται μια στατιστική φύσεως προσέγγιση στο θέμα.

Για τη μετάβαση από τη διάβρωση με βελονισμούς σε ρωγμές, απαιτείται η ικανοποίηση δύο κριτηρίων (κριτήρια του Kondo):

- Το βάθος της εσοχής που έχει δημιουργηθεί λόγω διάβρωσης με βελονισμούς θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από ένα οριακό βάθος, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα πεδίο τιμών 'ΔΚ' του συντελεστή έντασης τάσης:

$$x \geq X_{th}$$

- Ο ρυθμός επέκτασης της ρωγμής θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό επέκτασης της εσοχής που έχει δημιουργηθεί λόγω διάβρωσης με βελονισμούς:

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{crack} \geq \left. \frac{dx}{dt} \right|_{pit}$$

5.2 Θεωρητικό μοντέλο μετάβασης από διάβρωση με βελονισμούς σε ρωγμές

5.2.1 Αρχική κατανομή εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς

Θεωρούμε μια αρχική σταθερή κατανομή βάθους των εσοχών που έχουν δημιουργηθεί λόγω διάβρωσης με βελονισμούς. Ο όρος 'σταθερή κατανομή' δηλώνει πως δεν μεταβάλλεται η πυκνότητα της κατανομής των εσοχών με την πάροδο του χρόνου. Οι εσοχές απλά γίνονται βαθύτερες με την πάροδο του χρόνου. Έτσι, θεωρούμε μια αρχική σταθερή κατανομή βάθους των εσοχών, έστω $P(x,0)$. Η παράσταση $P(x,t)dx$ εκφράζει τον αριθμό των εσοχών που σε κάποια χρονική στιγμή 't', έχουν βάθος από 'x' έως 'x+dx'. Χρήσιμο είναι να περιορίζονται τα βάθη των εσοχών στην αρχική κατανομή βάθους, έτσι ώστε να βρίσκονται στο πεδίο τιμών $x_0 < x < x_{max}$, όπου τυπικά x_0 είναι το ελάχιστο βάθος των εσοχών, έτσι ώστε να θεωρείται σταθερή η κατανομή.

Η πιθανότητα μια εσοχή να έχει βάθος από 0 έως 'x' δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F(x) = \int_0^x p(\xi) d\xi = 1 - \exp[-a_1(x - x_0)^{a_2}]$$

Στην παραπάνω σχέση οι παράμετροι 'α₁' και 'α₂' είναι παράμετροι της κατανομής Weibull. Η τιμή της παραμέτρου x_{max} δεν παρουσιάζει μεγάλη σημασία, αρκεί να έχει μια αρκετά μεγάλη τιμή, έτσι ώστε να μην επηρεάζει την κατανομή.

5.2.2 Εξέλιξη της κατανομής εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς

Αποδεικνύεται ότι η εξέλιξη της κατανομής του βάθους των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, από μια σταθερή αρχική κατανομή, δίνεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}[g(x)P(x,t)] + S(P(x,t),x,t),$$

Στην παραπάνω εξίσωση, η συνάρτηση g(x) δίνει τον ρυθμό ανάπτυξης των εσοχών, ενώ ο όρος S(P(x,t),x,t) υποδηλώνει τον αριθμό των εσοχών με μέγεθος από 'x' ως 'x + dx' που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος 'dt'.

Ο τελευταίος αυτός όρος, μπορεί να αγνοηθεί εφ'όσον έχουμε κάνει την υπόθεση σταθερής κατανομής, σύμφωνα με την οποία δεν δημιουργούνται νέες εσοχές.

5.2.3 Ρυθμός ανάπτυξης εσοχών

Το βάθος 'x' των εσοχών που έχουν δημιουργηθεί από διάβρωση με βελονισμούς δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$x = \alpha t^\beta.$$

όπου α,β, κατάλληλες παράμετροι που αντιπροσωπεύουν τα πειραματικά αποτελέσματα.

Ανάλογα, για τον ρυθμό επέκτασης των εσοχών έχουμε την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{dx}{dt} = g(x) = \beta \alpha^{1/\beta} x^{(1-1/\beta)}.$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις, είναι φανερό πως ο ρυθμός ανάπτυξης των εσοχών θα πρέπει να είναι στατιστικά κατανομημένος. Για σταθερές τιμές των μεταβλητών 'α' και 'β', οι βαθύτερες εσοχές θα αναπτύσσονται με πιο αργούς ρυθμούς σε σχέση με ρηχότερες εσοχές. Έτσι, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, οι μικρότερες εσοχές θα πλησιάσουν το βάθος των αρχικά βαθύτερων εσοχών, καθώς αυτές θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται γρηγορότερα σε σχέση με τις βαθύτερες, μέχρι τη στιγμή που όλες οι εσοχές θα αποκτήσουν το ίδιο βάθος και θα αναπτύσσονται με τον ίδιο ρυθμό.

5.2.4 Μετάβαση από τις εσοχές λόγω διάβρωσης με βελονισμούς σε ρωγμές.

Θα υποθέσουμε ότι ισχύουν τα κριτήρια του Kondo. Έτσι, η μετάβαση από εσοχές λόγω διάβρωσης με βελονισμούς σε ρωγμές προκύπτει όταν το βάθος της εσοχής είναι μεγαλύτερο από ένα οριακό βάθος και όταν ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό διάδοσης της εσοχής.

Το οριακό βάθος αποτελεί συνάρτηση της εφαρμοσμένης τάσης και των τοπικών συνθηκών του διαβρωτικού περιβάλλοντος και πρέπει να υπολογιστεί πειραματικά. Ο ρυθμός επέκτασης της ρωγμής δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{dx}{dt} = C\sigma^p x^q$$

Στην εξίσωση αυτή οι συντελεστές 'p' και 'q' έχουν σταθερές τιμές, ενώ η τιμή της παραμέτρου 'C' ακολουθεί κανονική κατανομή..

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω εξισώσεις προκύπτει το οριακό βάθος στο οποίο ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής γίνεται μεγαλύτερος από τον ρυθμό διάδοσης της εσοχής:

$$x_{\text{crit}} = \left(\frac{\beta\alpha^{1/\beta}}{C\sigma^p} \right)^{\frac{\beta}{1+\beta(q-1)}}$$

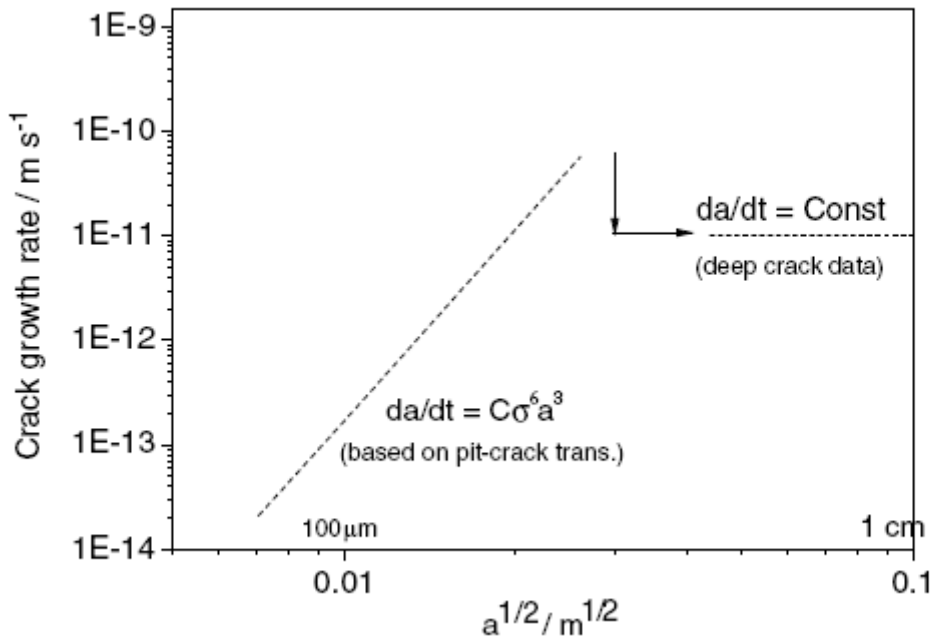
Εφ' όσον κάποια εσοχή που έχει αναπτυχθεί λόγω διάβρωσης με βελονισμούς ικανοποιεί τα παραπάνω κριτήρια, τότε δημιουργείται μια ρωγμή με αρχικό βάθος ίσο με αυτό της εσοχής. Ο ρυθμός ανάπτυξης της εσοχής δεν επηρεάζεται από τον σχηματισμό της ρωγμής.

5.2.5 Επέκταση των ρωγμών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς

Ο ρυθμός επέκτασης των ρωγμών που έχουν δημιουργηθεί λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, όπως έχει αναφερθεί, δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\frac{dx}{dt} = C\sigma^p x^q, \text{ όπου 'x' το βάθος της ρωγμής και 'C' μια παράμετρος με κανονική}$$

κατανομή (Turnbull A, McCartney Ln, Zhou S.,2006). Η παραπάνω σχέση θα οδηγούσε σε ένα ρυθμό επέκτασης των ρωγμών ολοένα και μεγαλύτερο, κάτι το οποίο δεν συμβαδίζει με τις πειραματικές παρατηρήσεις, σύμφωνα με τις οποίες ο ρυθμός επέκτασης των βαθύτερων ρωγμών τείνει να είναι σταθερός και ανεξάρτητος από το συντελεστή έντασης τάσης, για ένα συγκεκριμένο περιβάλλον. Ο ρυθμός επέκτασης των ρωγμών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς σε σχέση με το βάθος τους, φαίνεται στο Σχήμα 5.1.

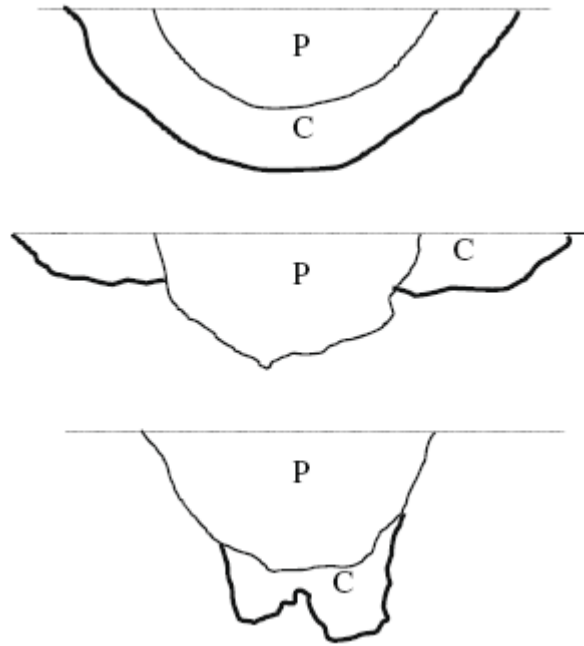


Σχήμα 5.1 Ρυθμός επέκτασης ρωγμών σε σχέση με το μέγεθος τους.

Η έλλειψη δεδομένων για τους μηχανισμούς μετάβασης από μικρές σε βαθύτερες – μεγαλύτερες – ρωγμές, οδηγεί στην προσέγγιση του φαινομένου μέσω μιας τυπικής υπόθεσης ενός οριακού βάθους ρωγμής, πέρα από το οποίο οι ρωγμές αναπτύσσονται με σταθερό ρυθμό.

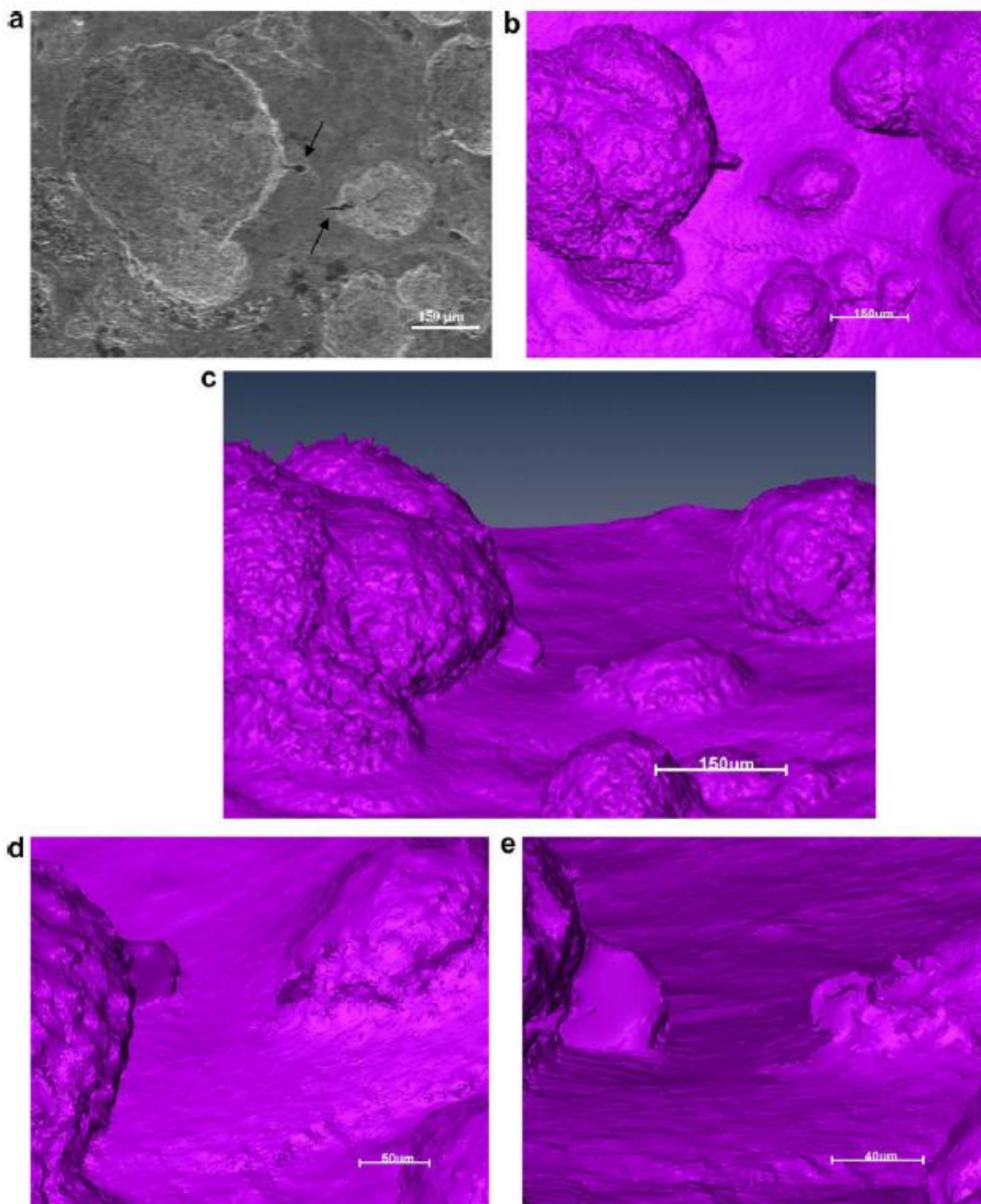
5.3 Πειραματική παρατήρηση της μετάβασης απο διάβρωση με βελονισμούς σε ρωγμές.

Πειραματικές μετρήσεις και παρατηρήσεις φανέρωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2 (P: εσοχή λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, C: ρωγμή):



Σχήμα 5.2. Σχηματική αναπαράσταση των εσοχών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς και των ρωγμών που έχουν αναπτυχθεί απο τις εσοχές αυτές.

Το 43% των ρωγμών επεκτείνονται πέρα από τη βάση της εσοχής και φτάνουν ως την επιφάνεια του υλικού, όπως αναμενόταν (Turnbull A., Horner D.A, Connolly B.J., 2008). Παρ' όλα αυτά, το 50% των ρωγμών φτάνουν στην επιφάνεια του υλικού όμως η εσοχή λόγω διάβρωσης είναι βαθύτερη από τη ρωγμή. Τέλος, το 7% των ρωγμών επεκτείνονται πέρα του βάθους της εσοχής αλλά δεν φτάνουν στην επιφάνεια του υλικού. Στις Εικόνες 5.1a-5.1e, φαίνεται η δημιουργία ρωγμών από δύο εσοχές λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, χρησιμοποιώντας ακτίνες X.



Εικόνα 5.1. Παρατήρηση της δημιουργίας και ανάπτυξης ρωγμών λόγω διάβρωσης με βελονισμούς με χρήση ακτίνων Χ.

Σε πολλές περιπτώσεις, περισσότερες από μια ρωγμές ξεκινούν από μια εσοχή λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, φαινόμενο που γίνεται εντονότερο με την πάροδο του χρόνου.

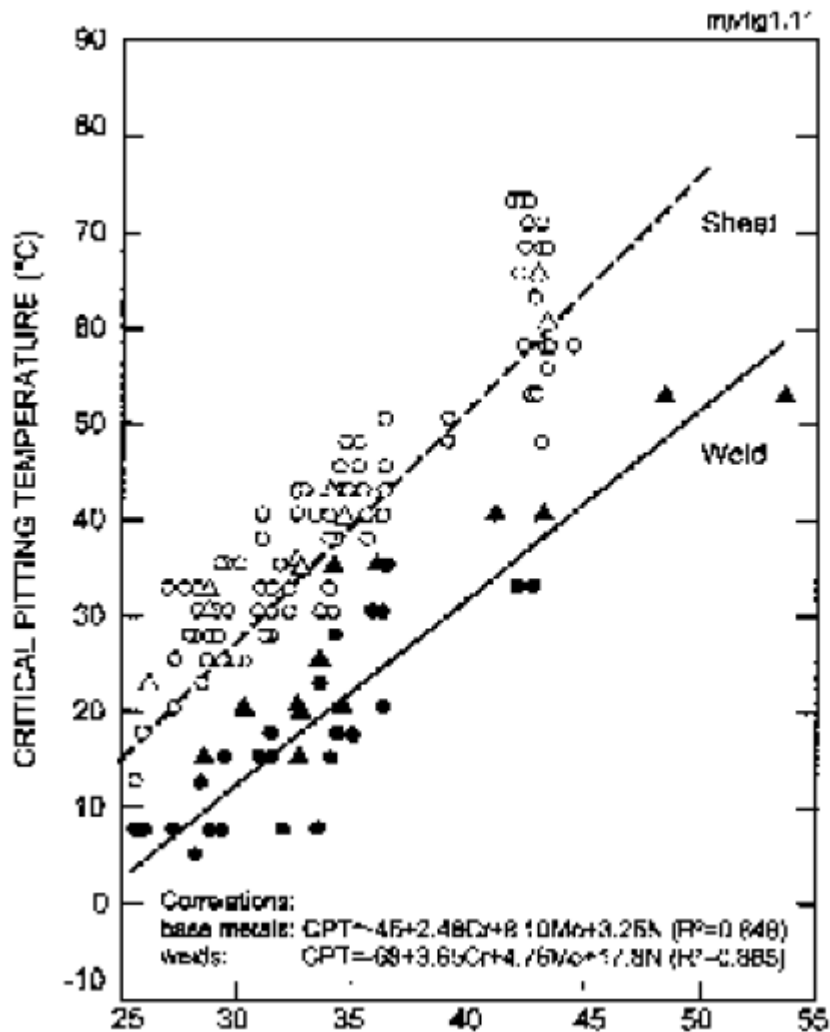
Οι παραπάνω πειραματικές παρατηρήσεις οδηγούν στο συμπέρασμα, πως η εξέλιξη μιας ρωγμής λόγω διάβρωσης με βελονισμούς είναι μια πολύ σύνθετη διαδικασία. Η υπόθεση του Kondo, ότι κατά τη στιγμή της δημιουργίας της ρωγμής, το βάθος της εσοχής λόγω

διάβρωσης με βελονισμούς θα πρέπει να είναι το ίδιο με το βάθος της ρωγμής, παρουσιάζεται ανεπαρκής για την περιγραφή του φαινομένου.

6. Διάβρωση με βελονισμούς σε συγκολλήσεις ανοξείδωτων χαλύβων

6.1. Γενικά

Η ανομοιογένεια του μετάλλου συγκόλλησης καθιστά τις συγκολλήσεις πιο ευάλλωτες σε διάβρωση με βελονισμούς, σε σχέση με το μέταλλο βάσης (Vilpas Mariti, 1999). Η διάβρωση με βελονισμούς αναπτύσσεται ευκολότερα σε περιοχές που δεν υπάρχουν σημαντικές ποσότητες χρωμίου και μολυβδένιου. Επίσης, ο τύπος στερεοποίησης του μετάλλου συγκόλλησης επηρεάζει πολύ σημαντικά τη διάβρωση με βελονισμούς των συγκολλήσεων. Ως αποτέλεσμα αυτής της ανομοιογένειας, η κρίσιμη θερμοκρασία διάβρωσης με βελονισμούς για το μέταλλο συγκόλλησης λαμβάνει μικρότερες τιμές σε σχέση με την αντίστοιχη θερμοκρασία για το μέταλλο βάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1. Κρίσιμες θερμοκρασίες διάβρωσης με βελονισμούς για συγκολλήσεις και μέταλλα βάσης συναρτήσει του αριθμού PREN.

Η διασπορά των δεδομένων στο παραπάνω διάγραμμα, οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως η σύσταση του μετάλλου, διαφορετική διαδικασία συγκόλλησης και κυρίως, η διαφορετική προσδιδόμενη θερμότητα. Υψηλές τιμές προσδιδόμενης θερμότητας κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές κρίσιμης θερμοκρασίας διάβρωσης με βελονισμούς. Σε κράματα χάλυβα με υψηλά ποσοστά αζώτου, η διαδικασία συγκόλλησης μπορεί να προκαλέσει σημαντική απώλεια αζώτου, κάτι που οδηγεί σε μειωμένη αντοχή σε διάβρωση με βελονισμούς του μετάλλου συγκόλλησης. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υψηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης και μικρότερος όγκος μετάλλου συγκόλλησης.

6.2 Η συγκόλληση των ανοξειδωτων χαλύβων

6.2.1 Γενικά

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες είναι μια μεγάλη κατηγορία χαλύβων με δύο βασικά χαρακτηριστικά (Παπάζογλου Βασ. Ι., Παπαδημητρίου Γ., 1994):

- Είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό, σε σχέση με άλλους χάλυβες.
- Περιέχουν χρώμιο σε αναλογία άνω του 10% και, μια μεγάλη κατηγορία από αυτούς, νικέλιο.

Η σπουδαιότητά τους πηγάζει από τις αντιδιαβρωτικές και αντιοξειδωτικές τους ιδιότητες σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες τους καθιστούν κατάλληλους για πλήθος εφαρμογών.

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες περιέχουν απαραίτητα σίδηρο, ως το κυριότερο συστατικό και χρώμιο ως βασικό κραματικό στοιχείο κατά της διάβρωσης. Σε ορισμένες κατηγορίες ανοξειδωτων χαλύβων, συμμετέχει και το νικέλιο, επίσης ως βασικό στοιχείο εξευγενισμού του κράματος κατά της διάβρωσης. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες μπορούν να περιέχουν σε σχετικά χαμηλές περιεκτικότητες άλλα στοιχεία, όπως μολυβδαίνιο, βανάδιο, αλουμίνιο και τιτάνιο, που βελτιώνουν ορισμένες ιδιότητες σε συγκεκριμένες κατηγορίες ανοξειδωτων χαλύβων. Τα στοιχεία μαγγάνιο και πυρίτιο προστίθενται σε χαμηλές αναλογίες, όπως και στους κοινούς χάλυβες, με σκοπό να βελτιώσουν τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Όσο για το άζωτο, το στοιχείο αυτό αποτελεί σε μερικές κατηγορίες βασική κραματική πρόσμιξη, όπως συμβαίνει στην κατηγορία των duplex ανοξειδωτων χαλύβων. Από πλευράς ταξινόμησης, οι ανοξειδωτοι χάλυβες περιέχουν πάντοτε κραματικές προσμίξεις σε πολύ υψηλές αναλογίες, έτσι ώστε να χαρακτηρίζονται ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες.

6.2.2 Κατηγορίες ανοξειδωτων χαλύβων

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- 1) Μαρτενσιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες
- 2) Φερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες
- 3) Ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες
- 4) Duplex ανοξειδωτοι χάλυβες

Οι δύο πρώτες κατηγορίες στηρίζονται σχεδόν αποκλειστικά στο χρώμιο ως κραματικό στοιχείο, ενώ οι δύο τελευταίες περιέχουν πάντοτε, εκτός από το χρώμιο και νικέλιο.

Μαρτενσιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες

Συμβατικά ορίζουμε τους μαρτενσιτικούς χάλυβες ως εκείνους τους χάλυβες που περιέχουν Cr<13% κ.β. Τυπική σύνθεση μαρτενσιτικού ανοξειδωτου χάλυβα είναι ο '410' (αμερικάνικη τυποποίηση), με 11.5 – 13.5% Cr και κάτω του 0.15% C.

Στην πράξη οι μαρτενσιτικοί χάλυβες περιέχουν 10 – 16% Cr και ως 1% C και υπο αυτές τις συνθήκες, μετά τη βαφή και επαναφορά, παρουσιάζουν δομή επαναφερμένου μαρτενσίτη με καρβίδια. Τυπική σύνθεση μαρτενσιτικού χάλυβα με υψηλό χρώμιο είναι ο '440' με 16 – 18% Cr και άνθρακα 0.6 – 1.2%.

Άλλες συνθέσεις περιέχουν 0 – 4% νικέλιο σε αντικατάσταση του άνθρακα, π.χ. 20% Cr, 4% Ni, <0.15% C. Η τελευταία σύνθεση είναι πολύ πλεονεκτική από πλευράς αντοχής στη διάβρωση λόγω του υψηλού χρωμίου και του χαμηλού άνθρακα, ενώ εξασφαλίζει τη μαρτενσιτική δομή, η οποία έχει το βασικό πλεονέκτημα της υψηλής μηχανικής αντοχής.

Φερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες

Όταν ένα κράμα Fe-Cr έχει περισσότερο από 13% Cr κ.β., κατά την απόψυξη θα στερεοποιηθεί για να δώσει φερρίτη και στη συνέχεια δε θα συμβεί κανένας άλλος μετασχηματισμός μέχρι τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Ο χάλυβας παραμένει φερριτικός και σε κάθε ενδεχόμενη αναθέρμανση, ανόπτηση κ.λπ.

Ένας τέτοιος χάλυβας ονομάζεται φερριτικός, διότι η μήτρα του αποτελείται από φερρίτη.

Είναι περιττό να τονίσουμε ότι ένας φερριτικός χάλυβας δεν επιδέχεται μαρτενσιτική βαφή, αφού δεν περνάει από ωστενιτική κατάσταση, σε οποιαδήποτε θερμοκρασία κι αν τον φέρουμε.

Συμβατικά, οι φερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες ορίζονται ως εκείνοι οι χρωμιούχοι χάλυβες που περιέχουν χρώμιο άνω του 13%. Είναι επίσης φανερό ότι εφ' όσον το κράμα περιέχει και άνθρακα ή νικέλιο, χρειάζεται αντίστοιχη αύξηση της περιεκτικότητας σε χρώμιο για να παραμείνει φερριτικό και να μην μεταπέσει στην κατηγορία των μαρτενσιτικών χαλύβων.

Στην πράξη οι φερριτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες περιέχουν 16-17% Cr και έχουν χαμηλές περιεκτικότητες σε άνθρακα (0.05 – 0.1%) που τους δίνουν μια δομή φερρίτη και καρβιδίων. Γνωστός και ευρύτατα διαδεδομένος φερριτικός ανοξειδωτός χάλυβας είναι ο '430' με 14-18% Cr και 0.12% max C.

Άλλη κατηγορία φερριτικών χάλυβων είναι οι πυρίμαχοι με 22 -30% Cr. Επίσης, υπάρχουν οι φερριτομαρτενσιτικοί χάλυβες, όπου κατά την απόψυξη ένα μέρος του φερρίτη δίνει ωστενίτη και στη συνέχεια μαρτενσίτη, ενώ ένα άλλο μέρος δεν μετασχηματίζεται.

Ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες

Ο κλασικός ωστενιτικός ανοξειδωτός χάλυβας είναι ο 18/8, ο οποίος περιέχει 18% Cr και 8% Ni. Στις ΗΠΑ ο χάλυβας αυτός είναι γνωστός ως '304'. Χωρίς την προσθήκη νικελίου θα ήταν ένας γνήσιος φερριτικός χάλυβας, αλλά η παρουσία του νικελίου τον μετατρέπει σε γνήσιο ωστενιτικό, τελειώς σταθερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά και σε θερμοκρασίες πολύ κάτω του μηδενός.

Ο ωστενιτικός ανοξειδωτός χάλυβας 18/8 περιέχει συνήθως άνθρακα κάτω του 0.08%, διότι για μεγαλύτερες περιεκτικότητες έχουμε κατακρήμνιση καρβιδίων κοντά στα όρια των κόκκων, των οποίων η παρουσία καταστρέφει τις αντιδιαβρωτικές ιδιότητες, λόγω δημιουργίας τοπικών γαλβανικών στοιχείων.

Τυπικές συνθέσεις ωστενιτικών ανοξειδωτών χάλυβων είναι οι 17/7, 18/10, 25/20 και 18/38, όπου ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει την περιεκτικότητα σε χρώμιο και ο δεύτερος την περιεκτικότητα σε νικέλιο. Οι υψηλότερες περιεκτικότητες στα στοιχεία αυτά συνοδεύονται από καλύτερες αντιδιαβρωτικές ιδιότητες, αλλά αυξάνουν το κόστος.

Duplex ανοξειδωτοί χάλυβες

Οι duplex ανοξειδωτοί χάλυβες ονομάζονται έτσι, διότι έχουν μια μικροδομή δύο φάσεων, φερρίτη και ωστενίτη. Όταν το μέταλλο από duplex ανοξειδωτό χάλυβα λιώσει, στερεοποιείται σε πλήρη φερριτική φάση. Κατά την επαναφορά του χάλυβα σε θερμοκρασία δωματίου, οι μισοί, περίπου, φερριτικοί κόκοι μετατρέπονται σε ωστενιτικούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια μικροδομή φερρίτη – ωστενίτη 50%, κατά προσέγγιση.

Όσον αφορά στην αντίστασή τους σε διάβρωση, αυτή εξαρτάται από τη χημική τους σύσταση. Οι duplex ανοξειδωτοί χάλυβες έχουν παρόμοια αντίσταση σε διάβρωση με την αντίσταση σε διάβρωση των ωστενιτικών ανοξειδωτών χάλυβων.

Οι duplex ανοξειδωτοί χάλυβες έχουν μικρότερες περιεκτικότητες σε μολυβδαίνιο και νικέλιο, σε σχέση με τους ωστενιτικούς ανοξειδωτούς χάλυβες, για παρόμοια αντίσταση σε διάβρωση. Λόγω αυτής της ιδιότητάς τους, μπορούν να έχουν μικρότερο κόστος, σε σχέση με τους ωστενιτικούς ανοξειδωτούς χάλυβες, παρόμοιας συμπεριφοράς σε διάβρωση.

6.2.3 Ιδιομορφίες των ανοξειδωτων χαλύβων κατά τη συγκόλληση

Οι ιδιομορφίες της συγκόλλησης ανοξειδωτων χαλύβων οφείλονται όχι μόνο σε μεταλλουργικά φαινόμενα, αλλά και σε ορισμένες φυσικές ιδιότητες, οι οποίες διαφέρουν ριζικά από τις αντίστοιχες ιδιότητες των κοινών χαλύβων.

Χαρακτηριστικό των ανοξειδωτων χαλύβων είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, η οποία δημιουργεί απότομες θερμικές διαβαθμίσεις και κατά συνέπεια μεγάλες τάσεις και παραμορφώσεις.

Οι παραμορφώσεις και στρεβλώσεις που παρατηρούνται ιδιαίτερα κατά τη συγκόλληση λεπτών ελασμάτων, είναι εντονότερες για τους ωστενιτικούς χάλυβες.

Ιδιαίτερη, επίσης προσοχή πρέπει να δίδεται στην περίπτωση συγκόλλησης ετεροειδών χαλύβων, κυρίως λόγω του διαφορετικού συντελεστή διαστολής. Ο ωστενιτικός χάλυβας έχει συντελεστή διαστολής κατά 30 – 40 % ανώτερο του κοινού μαλακού χάλυβα και κατά 50 – 70% μεγαλύτερο του μαρτενσιτικού. Σε τέτοιες περιπτώσεις το πρόβλημα δεν είναι μόνο η ανάπτυξη τάσεων κατά τη συγκόλληση, αλλά και η ανάπτυξη τάσεων κατά τη λειτουργία, εφ' όσον η κατασκευή προορίζεται να λειτουργήσει και σε θερμοκρασίες πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτό, οι συγκολλήσεις ετεροειδών χαλύβων πρέπει να αποφεύγονται σε κατασκευές υψηλών, αλλά και χαμηλών θερμοκρασιών.

6.3 Θεωρητική εκτίμηση της αντίστασης σε διάβρωση με βελονισμούς των ανοξειδωτων χαλύβων

Η αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς για ανοξειδωτους χάλυβες, μπορεί να υπολογιστεί με χρήση ενός θεωρητικού τύπου, που βασίζεται στη χημική σύστασή τους. Ο τύπος αυτός οδηγεί σε ένα αριθμητικό αποτέλεσμα (PREN, pitting resistance equivalent number), που αντιπροσωπεύει την αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς των μετάλλων.

Ο τύπος αυτός είναι χρήσιμος για την κατάταξη και σύγκριση της αντίστασης σε διάβρωση με βελονισμούς για διάφορους τύπους και κατηγορίες ανοξειδωτων χαλύβων, αλλά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους σε πρακτικές εφαρμογές.

Η πιο συνηθισμένη μορφή του τύπου PREN είναι η ακόλουθη:

$$PREN = Cr + 3.3Mo + 16N \quad (1)$$

Στον Πίνακα 6.1 αναγράφεται η χημική σύσταση για διάφορες κατηγορίες ανοξειδωτων χαλύβων, όπως επίσης και οι αντίστοιχες τιμές του μεγέθους PREN, για κάθε χάλυβα.

Πίνακας 6.1. Χημική σύσταση για διάφορες κατηγορίες ανοξειδωτων χαλύβων και τιμές του μεγέθους PREN.

Grade	Type	Cr	Mo	N	PREN
Ferritics					
1.4003	Nirosta 4003 / F12N	10.5-12.5	NS	0.030 max	10.5-13.0
1.4016	430	16.0-18.0	NS	NS	16.0
1.4113	434	16.0-18.0	0.9-1.4	NS	19.0-22.6
1.4521	444	17.0-20.0	1.8-2.5	0.030max	23.0-28.7
Austenitics					
1.4301	304	17.0-19.5	NS	0.11max	17.0-20.8
1.4311	304LN	17.0-19.5	NS	0.12-0.22	18.9-23.0
1.4401	316	16.5-18.5	2.0-2.5	0.11max	23.1-28.5
1.4406	316LN	16.5-18.5	2.0-2.5	0.12-0.22	25.0-30.3
1.4539	904L	19.0-21.0	4.0-5.0	0.15max	32.2-39.9
1.4547	254SMO	19.5-20.5	6.0-7.0	0.18-0.25	42.2-47.6
1.4529	.	19.0-21.0	6.0-7.0	0.15-0.25	41.2-48.1
Duplex					
1.4362	SAF 2304	22.0-24.0	0.1-0.6	0.05-0.20	23.1-29.2
1.4462	SAF 2205	21.0-23.0	2.5-3.5	0.10-0.22	30.8-38.1
1.4410	SAF 2507	24.0-26.0	3.0-4.0	0.24-0.35	37.7-46.5
1.4501	Zeron 100	24.0-26.0	3.0-4.0	0.2-0.3	37.1-44.0

Οι χάλυβες για τους οποίους το μέγεθος PREN λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 40, ονομάζονται “super” austenitic και “super” duplex, ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκουν.

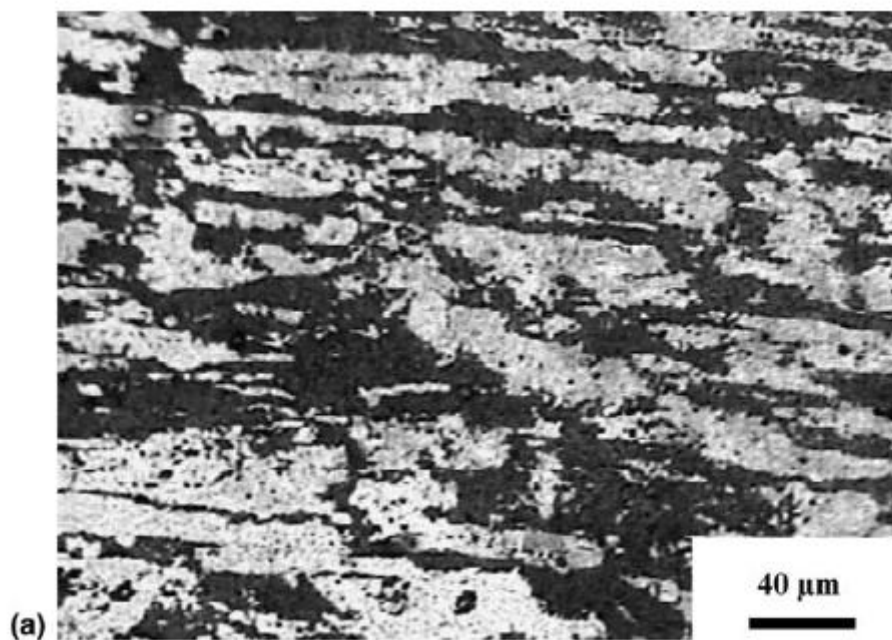
6.4 Σύγκριση του δυναμικού διάβρωσης με βελονισμούς συγκόλλησης από duplex ανοξείδωτο χάλυβα και ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα

Πειραματική διαδικασία

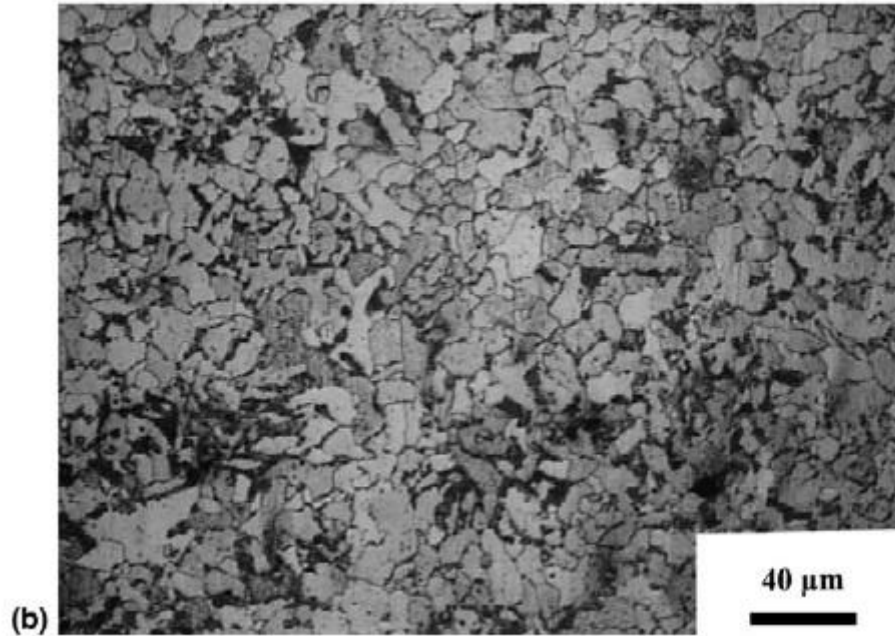
Τα μέταλλα που συγκολλήθηκαν είχαν πάχος ίσο με 5 mm και είχαν δομή duplex ανοξείδωτου χάλυβα UNS31803 (22.2% Cr, 5.9% Ni, 2.9% Mo, 0.15% N, 0.02% C) και συμβατικού χάλυβα τύπου IS 2062 (0.25% C, 0.20% Si, 0.75% Mn). Οι συγκολλήσεις έγιναν με χρήση ηλεκτροδίων τύπου SMAW, από duplex ανοξείδωτο χάλυβα (E2209 – 22.8% Cr, 9.3% Ni, 3.2% Mo, 0.10% N) και ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα (E309 – 23.2% Cr, 11.2% Ni), διαμέτρου ίσης με 3.15 mm. Οι παράμετροι συγκόλλησης ήταν οι ακόλουθες: τάση ίση με 22 – 24 V, ένταση ρεύματος ίση με 110 – 120 A και ταχύτητα συγκόλλησης ίση με 120 – 150 mm min⁻¹. Εξέταση με χρήση ακτίνων X πραγματοποιήθηκε για τον έλεγχο της ποιότητας της συγκόλλησης, η οποία κρίθηκε ικανοποιητική σύμφωνα με τους κανονισμούς της ASME (Srinivasan P et al, 2004). Τα δοκίμια που συγκολλήθηκαν με χρήση ηλεκτροδίων τύπου E2209 και E309, θα αναφέρονται ως δοκίμια 'A' και 'B', αντίστοιχα, στη συνέχεια του κειμένου. Ο έλεγχος της μικροδομής των δοκιμίων έγινε με χρήση μικροσκοπίου υψηλής ανάλυσης. Ο έλεγχος της συμπεριφοράς των δοκιμίων σε διάβρωση με βελονισμούς έγινε σε διάλυμα NaCl 1M, σε θερμοκρασία δωματίου (30°C).

Μικροδομή των μετάλλων βάσης και συγκόλλησης

Η μικροδομή των μετάλλων βάσης (DSS και CS αντίστοιχα) φαίνεται στις Εικόνες 6.1 και 6.2 αντίστοιχα

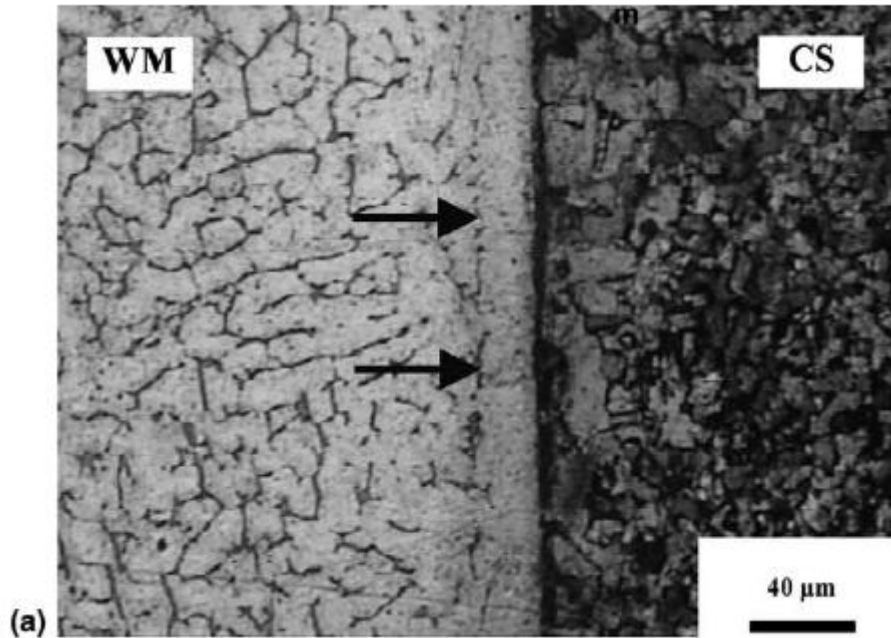


Εικόνα 6.1. Μικροδομή του μετάλλου βάσης από duplex ανοξείδωτο χάλυβα.

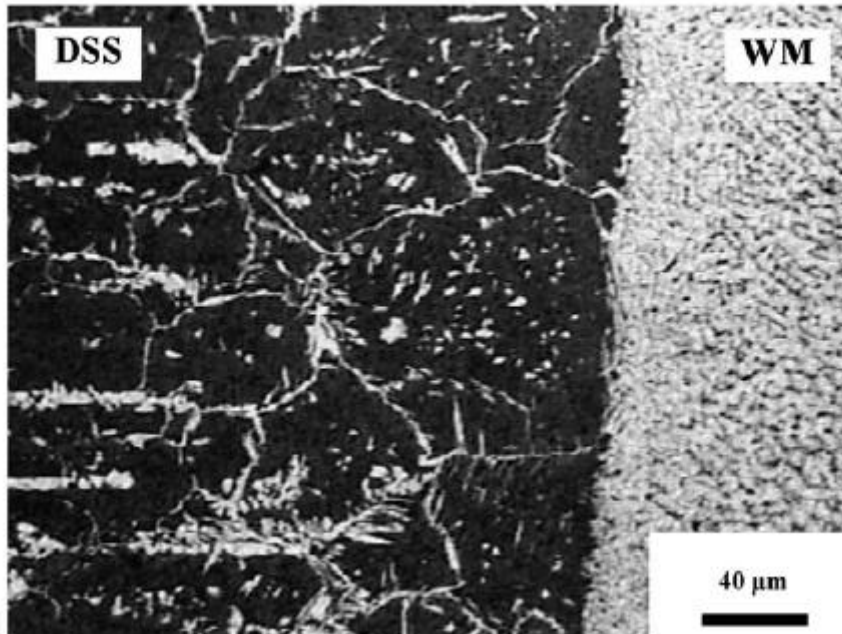


Εικόνα 6.2. Μικροδομή του μετάλλου βάσης από κοινό χάλυβα.

Στις Εικόνες 6.3 και 6.4, φαίνεται η μικροδομή των μετάλλων συγκόλλησης και των μετάλλων βάσης.

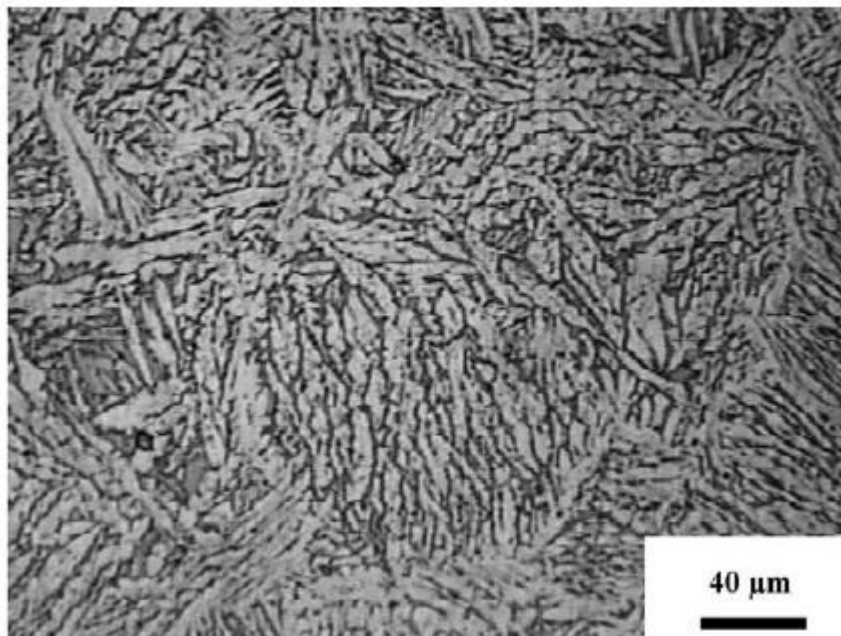


Εικόνα 6.3. Μικροδομή του μετάλλου βάσης από κοινό χάλυβα και της συγκόλλησης..

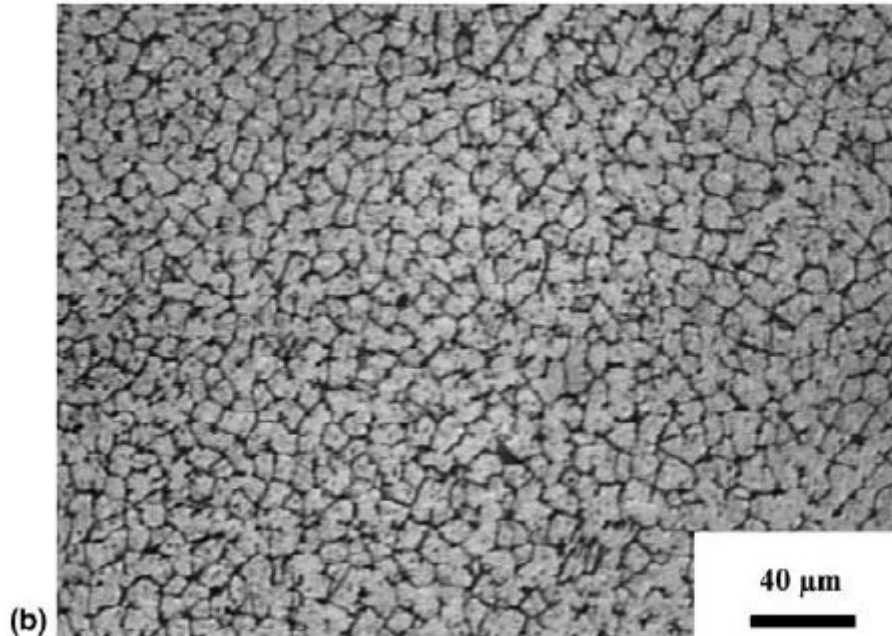


(b) Εικόνα 6.4. Μικροδομή του μετάλλου βάσης από κοινό χάλυβα και μικροδομή της συγκόλλησης

Στις Εικόνες 6.5 και 6.6 φαίνεται η μικροδομή των μετάλλων συγκόλλησης ‘Α’ και ‘Β’, αντίστοιχα



(a) Εικόνα 6.5. Μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης από duplex ανοξείδωτο χάλυβα.



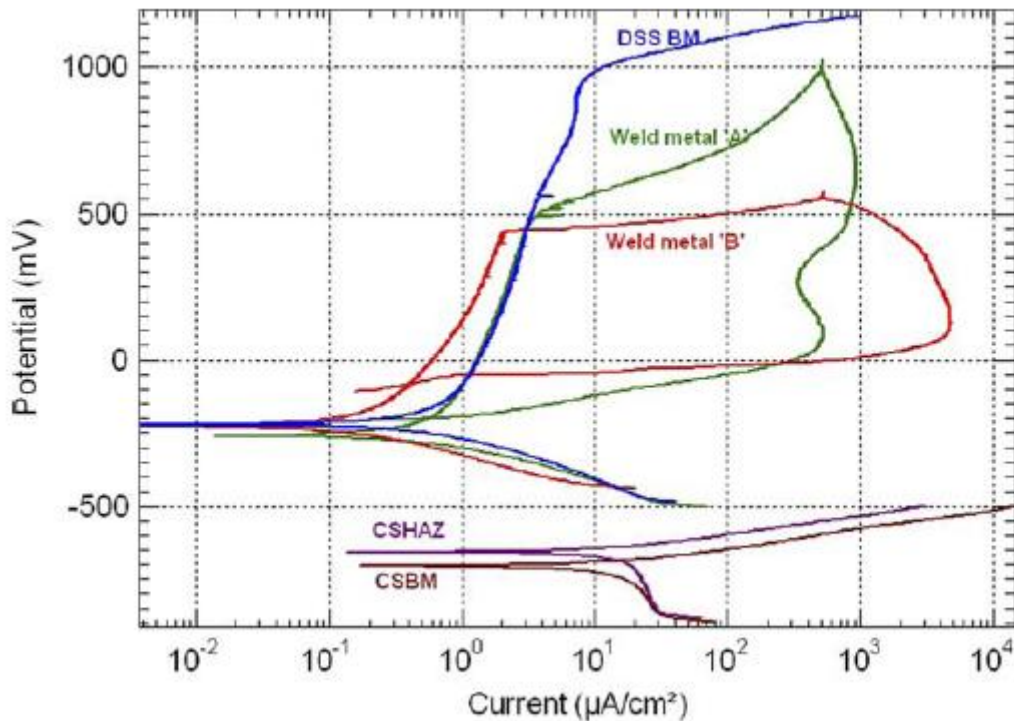
Εικόνα 6.6. Μικροδομή του μέταλλου συγκόλλησης από ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα.

Η μικροδομή και των δύο μετάλλων συγκόλλησης αποτελείται από ωστενίτη και φερρίτη, με διαφορετική μορφολογία. Όσον αφορά στα ποσοστά ωστενίτη και φερρίτη, παρόμοια ποσοστά μπορούν να παρατηρηθούν και στα δύο μέταλλα συγκόλλησης.

Διαβρωτική συμπεριφορά

Οι ποτενσιοδυναμικές καμπύλες για τα μέταλλα βάσης και τα μέταλλα συγκόλλησης 'Α' και 'Β' σε περιβάλλον 1 M NaCl, φαίνονται στο Σχήμα 6.2.

Στον Πίνακα 6.2 φαίνονται τα ηλεκτροχημικά δεδομένα της διάβρωσης.



Σχήμα 6.2. Ποτενσιοδυναμικές καμπύλες για τα μέταλλα βάσης και τα μέταλλα συγκόλλησης σε περιβάλλον 1M NaCl.

Πίνακας 6.2. Ηλεκτροχημικά δεδομένα για τις συγκολλήσεις από τις ποτενσιοδυναμικές καμπύλες σε διάλυμα 1 M NaCl.

Region	Corrosion potential, E_{corr} (mV vs. SCE)	Corrosion current density, I_{corr} ($\mu\text{A cm}^{-2}$)	Pitting potential, E_{pit} (mV vs. SCE)	Protection potential, E_{prot} (mV vs. SCE)
CSBM	-705	15.28	-	-
CSHAZ	-657	16.58	-	-
DSSBM	-220	0.37	- No pitting -	-
Weld metal A	-258	0.29	510	-196
Weld metal B	-236	0.15	437	-133

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το μέταλλο συγκόλλησης 'A' εμφανίζει μεγαλύτερη αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς, σε σχέση με την αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς του μετάλλου συγκόλλησης 'B', κάτι το οποίο οφείλεται κατα κύριο λόγο στη διαφορετική χημική σύσταση των δύο μετάλλων διάβρωσης. Το μέταλλο συγκόλλησης 'A' έχει ένα 0,10% ποσοστό αζώτου σε σχέση με την πλήρη απουσία αζώτου στο μέταλλο συγκόλλησης 'B'. Επίσης, το ποσοστό μολυβδενίου στο μέταλλο συγκόλλησης 'B' είναι κόντα στο 0,4%, σε σχέση με το ποσοστό μολυβδενίου στο μέταλλο συγκόλλησης 'A', που είναι ίσο με 3%. Οι αντίστοιχες τιμές για το μέγεθος PREN, είναι ίσες με 33,36 και 24,52 για τα μέταλλα 'A' και 'B', αντίστοιχα. Από τα παραπάνω, είναι δυνατό να εξηγηθεί η συμπεριφορά σε διάβρωση με βελονισμούς για τα δύο μέταλλα συγκόλλησης.

6.5 Παράγοντες σχετικοί με τη διαδικασία της συγκόλλησης που επιδρούν στην αντίσταση των συγκολλήσεων σε διάβρωση με βελονισμούς

Σε αυτή τη παράγραφο, θα αναφερθούμε στην επίδραση ορισμένων παραμέτρων στην ευαισθησία των συγκολλήσεων σε διάβρωση με βελονισμούς. Τέτοιες παράμετροι είναι οι ακόλουθες: η μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης, η ταχύτητα συγκόλλησης, ο ρυθμός απόψυξης της συγκόλλησης και η προσδιδόμενη θερμότητα κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης

6.5.1 Επίδραση της μικροδομής του μετάλλου συγκόλλησης στην αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς των συγκολλήσεων

6.5.1.1 Επίδραση της μικροδομής του μετάλλου συγκόλλησης στην αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς συγκολλήσεων από μαρτενσιτικό ανοξείδωτο χάλυβα

Γενικά

Η υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα των συνηθισμένων μαρτενσιτικών ανοξείδωτων χαλυβών, προκαλεί προβλήματα στη διαδικασία της συγκόλλησης, έτσι ώστε οι ανοξείδωτοι χάλυβες να είναι ακατάλληλοι για συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως για τις γραμμές μεταφοράς αερίου και πετρελαίου (Bilmes P.D et al, 2005). Οι μαρτενσιτικοί χάλυβες με χαμηλό ποσοστό άνθρακα και με σημαντική περιεκτικότητα σε μολυβδένιο αποτελούν μια θετική εξέλιξη στην αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, ενώ εμφανίζουν ενισχυμένη αντίσταση σε διάβρωση όπως επίσης υψηλή αντοχή και καλή σκληρότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Τοπική διάβρωση μπορεί να προκληθεί σε ένα σύστημα σε λειτουργία, από συγκέντρωση υγρών τοπικά σε ένα σωλήνα, όπως και από άλλες αιτίες.

Σε πρόσφατες έρευνες, οι ωστενιτικές φάσεις δεν έδειξαν να έχουν αρνητική επίδραση στην αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς για χαλύβδινο αγωγό με 13% χρώμιο.

Τέτοιες πληροφορίες θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με σύνεση, καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα επεξεργασμένα με στοχαστικές διαδικασίες που να λαμβάνουν υπόψη τη διασπορά στα δυναμικά διάβρωσης που εμφανίζονται.

Ο στόχος της ακόλουθης πειραματικής διαδικασίας ήταν η διερεύνηση της επιρροής της μικροδομής του μετάλλου συγκόλλησης στην αντίσταση της συγκόλλησης σε διάβρωση με βελονισμούς, έτσι ώστε να γίνει δυνατή η βελτίωση των διαδικασιών συγκόλλησης.

Πειραματική διαδικασία

Συγκολλήσεις πολλαπλών περασμάτων πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια τύπου AISI 410, χρησιμοποιώντας μέταλλο συγκόλλησης τύπου 13CrNiMo. Η σύσταση του μετάλλου συγκόλλησης φαίνεται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3. Σύσταση του σύρματος συγκόλλησης

Grade	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
13Cr4NiMo	<0.03	0.7	0.7	13	4.7	0.5

Δοκίμια αποκόπηκαν από το μέταλλο συγκόλλησης, τα οποία υποβλήθηκαν σε διαφορετικές θερμικές κατεργασίες (PWHT: post weld heat treatments). Οι θερμικές κατεργασίες ήταν οι ακόλουθες:

- Θέρμανση στους 550°C για χρονικό διάστημα ίσο με 2 ώρες.
- Θέρμανση στους 600°C για χρονικό διάστημα ίσο με 2 ώρες
- Θέρμανση αρχικά στους 670°C για χρονικό διάστημα ίσο με 2 ώρες και έπειτα αναθέρμανση στους 600°C για 2 και 8 ώρες, αντίστοιχα

Για κάποιες από τις παραπάνω διαδικασίες θέρμανσης, προηγήθηκε ανόπτηση στους 950°C για χρονικό διάστημα ίσο με 1 ώρα. Σε κάθε περίπτωση, οι συγκολλήσεις επανήλθαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στον Πίνακα 6.4 συνοψίζονται οι παραπάνω θερμικές κατεργασίες.

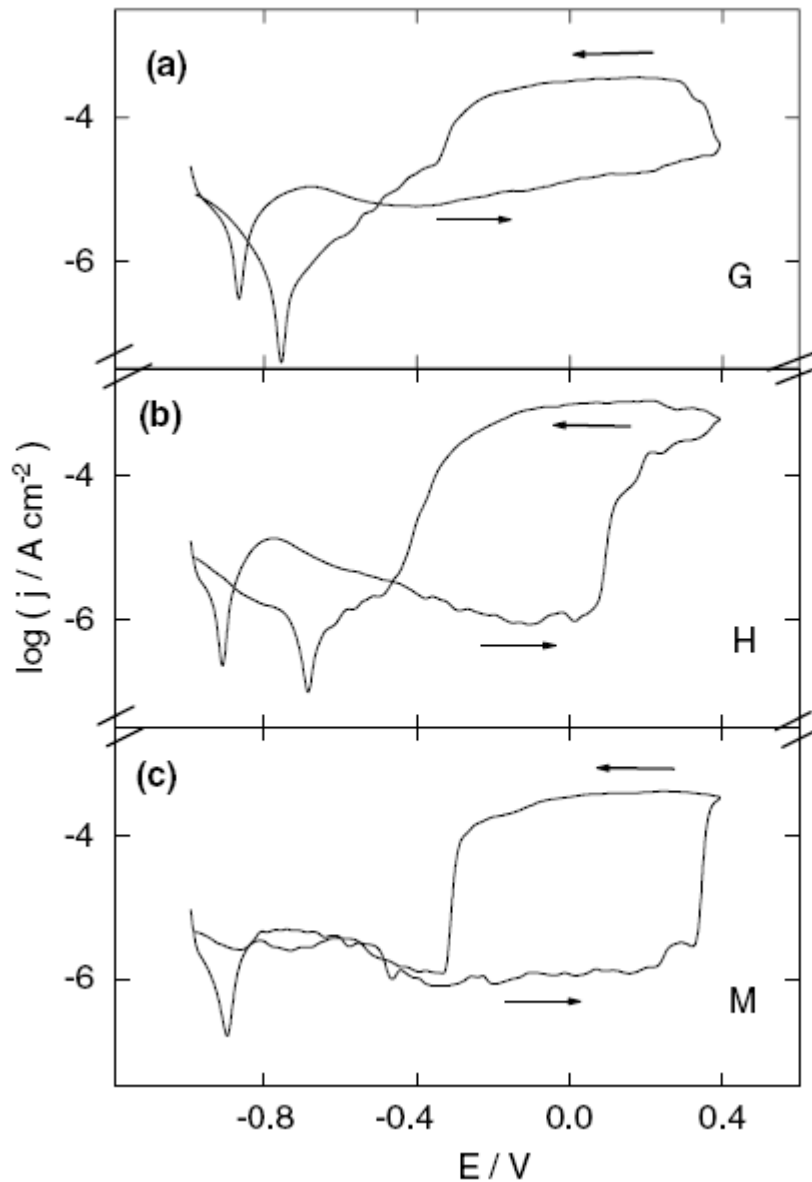
Πίνακας 6.4. Περιγραφή των θερμικών κατεργασιών μετά τη συγκόλληση.

Condition	PWHT	Temperature (°C)	Time (h)
B	Single tempering	600	2
E	Solution annealing + tempering	950 + 550	1 2
G	Solution annealing + tempering	950 + 600	1 2
H	Solution annealing + double tempering	950 + 670 + 600	1 2 2
M	Solution annealing + double tempering	950 + 670 + 600	1 2 8
P	Double tempering	670 + 600	2 2

Για κάθε διαφορετική θερμική κατεργασία και για κάθε δοκίμιο, προσδιορίστηκαν οι ακόλουθες ιδιότητες του υλικού συγκόλλησης: η χημική σύσταση, η μικροδομή, οι μηχανικές ιδιότητες και η ενέργεια κρούσης της ένωσης κατά Charpy V. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις, τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε διπλή θέρμανση παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα ποσοστά ωστενίτη. Καρβονιτρίδια του τύπου $M_2(C,N)$ παρατηρήθηκαν με χρήση ακτίνων – X σε όλα τα δοκίμια.

Πραγματοποιήθηκαν μέτρησεις του δυναμικού με ένα ρυθμό $0,5mVs^{-1}$, σε ένα τυπικό κελί τριών ηλεκτροδίων. Τα δυναμικά μετρήθηκαν με χρήση ενός ηλεκτροδίου αναφοράς τύπου $Hg/Hg_2SO_4, K_2SO_4$ (0.65 V στην κλίμακα SHE).

Πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες δωματίου ($25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) σε διάλυμα $0.05 \text{ M K}_2\text{SO}_4 + 0.04 \text{ M NaCl}$ ($\text{pH} = 4.1$). Μετά το τέλος των ηλεκτροχημικών μετρήσεων, κάποια ηλεκτρόδια ελέγχθηκαν με χρήση μικροσκοπίου. Στο Σχήμα 6.3 φαίνονται τυπικές ποτενσιοδυναμικές καμπύλες, για τρεις διαφορετικές θερμικές κατεργασίες του μετάλλου συγκόλλησης.



Σχήμα 6.3. Ποτενσιοδυναμικές καμπύλες για τρεις διαφορετικές κατεργασίες του μετάλλου συγκόλλησης σε περιβάλλον $0.05 \text{ M K}_2\text{SO}_4 + 0.04 \text{ M NaCl}$.

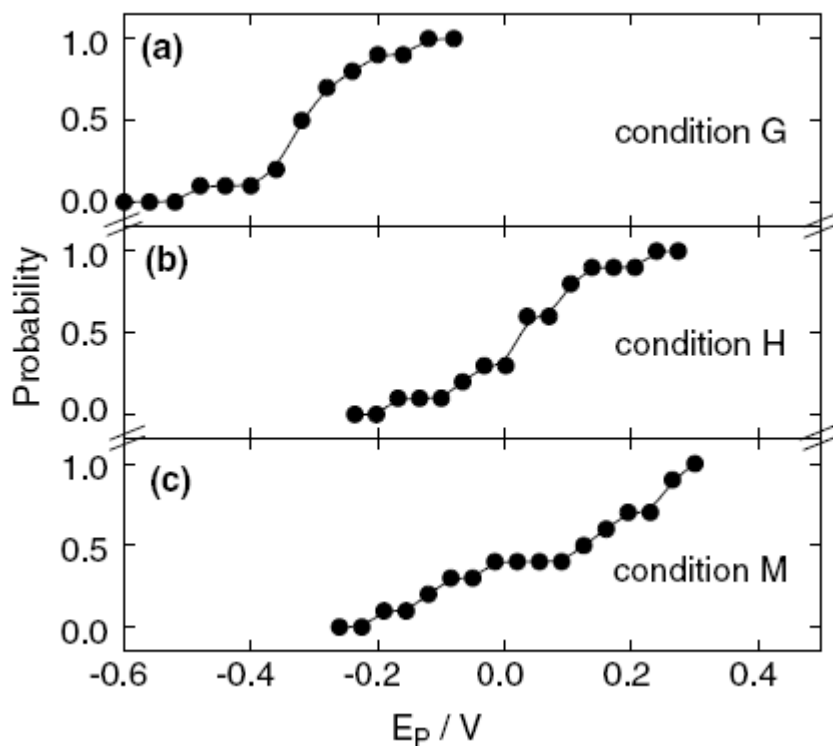
Λόγω της διασποράς των μετρούμενων τιμών του δυναμικού E_p , πραγματοποιήθηκαν είκοσι διαφορετικές μετρήσεις για κάθε δοκίμιο, όπως αναφέρεται στο Πίνακα 6,4. Οι πειραματικές αυτές μετρήσεις του δυναμικού E_p επεξεργάστηκαν σύμφωνα με τις γνωστές στοχαστικές διαδικασίες.

Η πιθανότητα εμφάνισης διάβρωσης με βελονισμούς σε ένα δοκίμιο δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P(E) = n/(1 + N),$$

όπου 'N' ο αριθμός των δοκιμίων που ελέγχθηκαν, και 'n' ο αριθμός των δοκιμίων που παρουσιάζουν διάβρωση με βελονισμούς για τιμές του δυναμικού μικρότερες ή ίσες του 'E'.

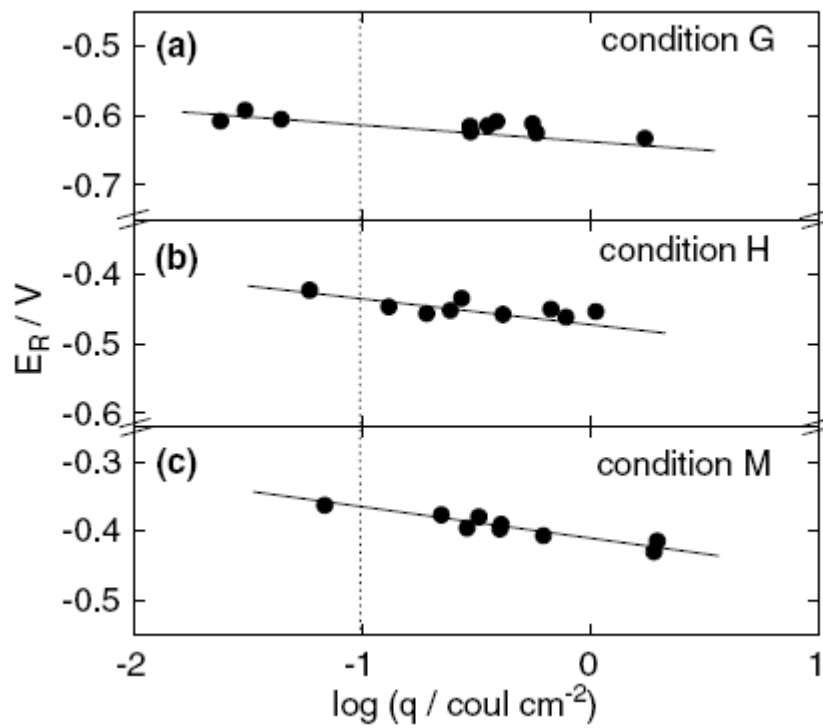
Στο σχήμα 6.4 φαίνεται η πιθανότητα εμφάνισης διάβρωσης με βελονισμούς σε σχέση με την τιμή του δυναμικού για διαφορετικές συνθήκες. Το δυναμικό για τιμή πιθανότητας 'P = 0.5' μπορεί να θεωρηθεί ως το δυναμικό 'E_p', το οποίο αντιπροσωπεύει την κατάσταση και την προετοιμασία του υλικού.



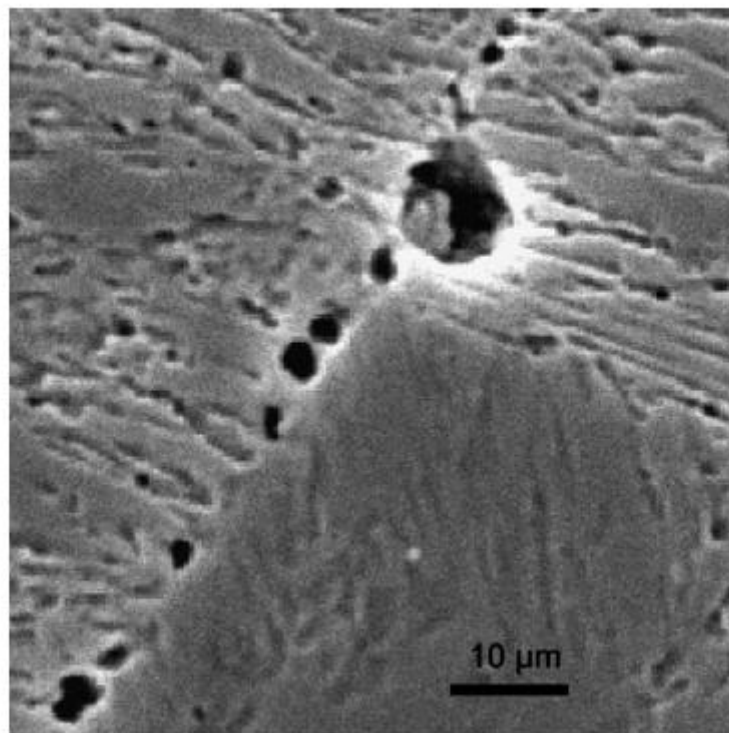
Σχήμα 6.4. Κατανομή του δυναμικού διάβρωσης για τις ακόλουθες συνθήκες προετοιμασίας: (a) κατάσταση G, (b) κατάσταση H, (c) κατάσταση M.

Στο Σχήμα 6.5, φαίνεται η σχέση ανάμεσα στο δυναμικό 'E_R' και το ποσοστό επέκτασης της διάβρωσης με βελονισμούς.

Στην Εικόνα 6.7, φαίνεται μια λήψη από μικροσκόπιο για το δοκίμιο 'M', η οποία δείχνει ένα καρβίδιο πλούσιο σε χρώμιο και επιλεκτική διάβρωση κοντά σε αυτό.

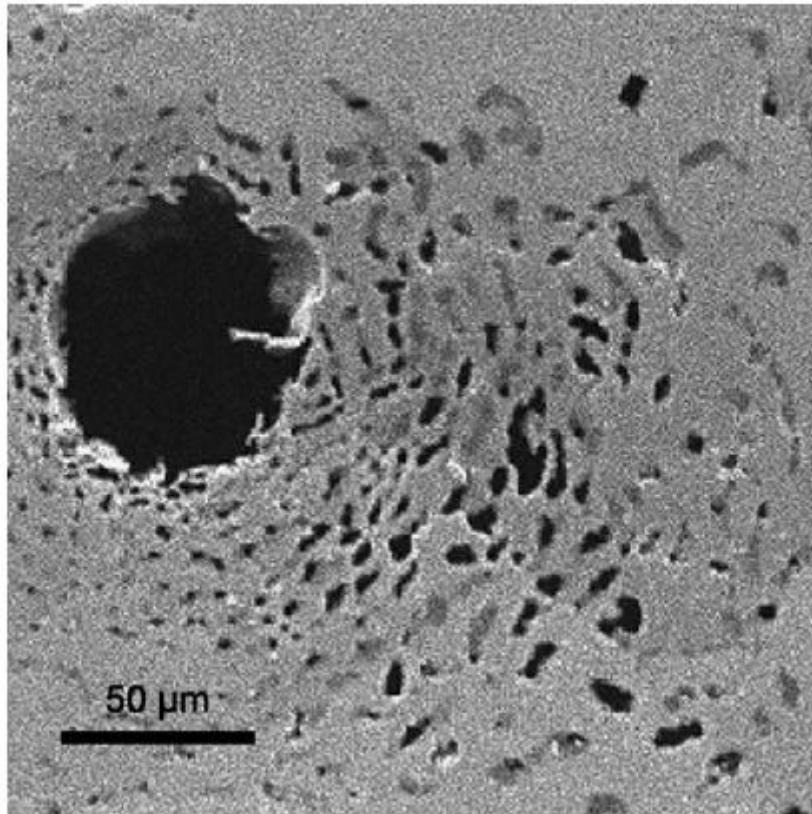


Σχήμα 6.5. Επίδραση της επέκτασης της διάβρωσης με βελονισμούς στο δυναμικό E_R για τις ακόλουθες συνθήκες προετοιμασίας: (a) κατάσταση G, (b) κατάσταση H (c) κατάσταση M.



Εικόνα 6.7. Καρβίδιο πλούσιο σε χρώμιο και τοπική διάβρωση.

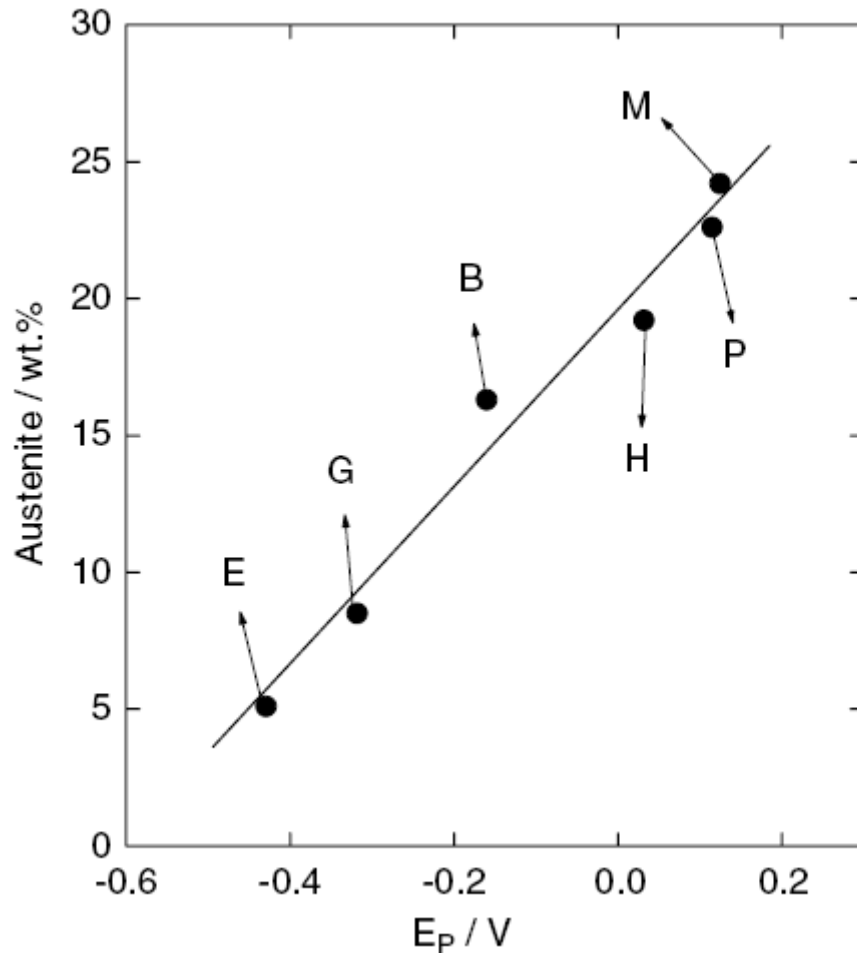
Η Εικόνα 6.8 δείχνει τη μορφολογία της διάβρωσης με βελονισμούς, για το δοκίμιο 'M'.



Εικόνα 6.8. Διάβρωση με βελονισμούς στο δοκίμιο M.

Οι τιμές των δυναμικών E_P και E_R σε σχέση με την περιεκτικότητα των δοκιμίων σε ωστενίτη, παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.6 και 6.7 Σε κάθε περίπτωση μπορεί να παρατηρηθεί μια γραμμική σχέση ανάμεσα στο ποσοστό του ωστενίτη και στη τιμή των δυναμικών E_P και E_R .

Οι χαρακτηριστικές τιμές των δυναμικών κινούνται προς την κατεύθυνση μεγαλύτερων τιμών με την αύξηση του ποσοστού ωστενίτη, για κάθε δοκίμιο.

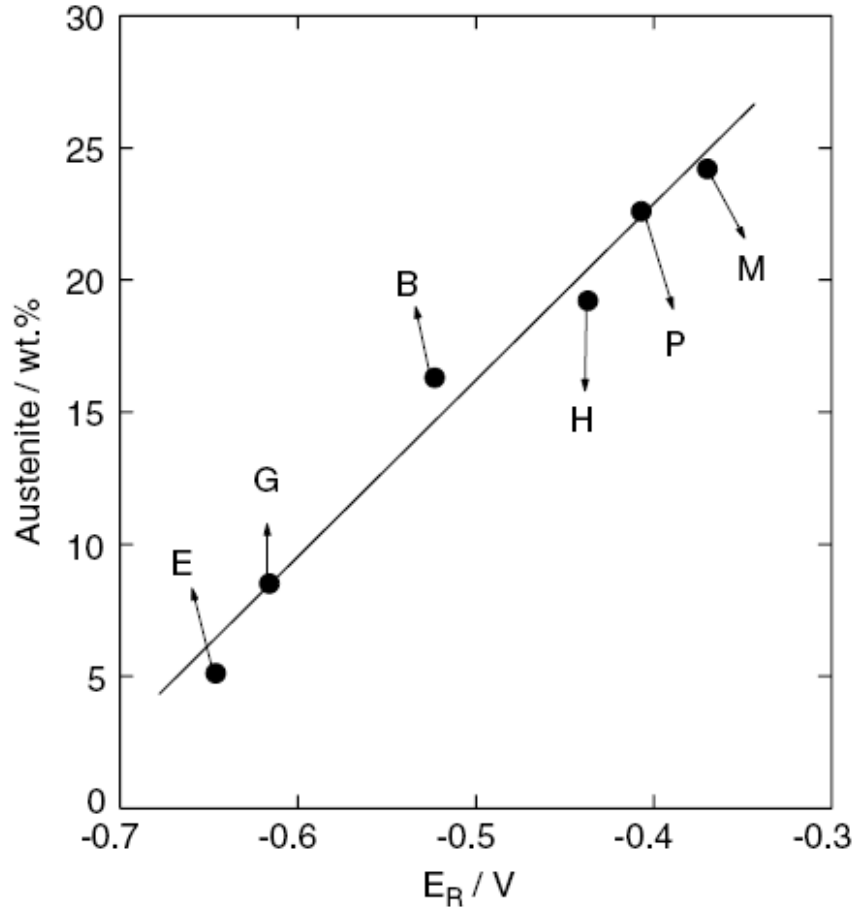


Σχήμα 6.6. Σχέση ανάμεσα στο δυναμικό διάβρωσης και το ποσοστό ωστενίτη στο μέταλλο της συγκόλλησης για τα διάφορα δοκίμια.

Κατ'αυτό τον τρόπο, ενισχυμένη αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς παρουσιάζουν τα δοκίμια που έχουν υποστεί διπλή αναθέρμανση. Τα αποτελέσματα υπό αυτές τις πειραματικές συνθήκες, δείχνουν ότι η αντίσταση των δοκιμίων σε διάβρωση με βελονισμούς μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από τη μικροδομή τους και συγκεκριμένα από το ποσοστό ωστενίτη.

Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να εξηγηθούν, μέσω της επίδρασης της θερμότητας στη μικροδομή των δοκιμίων. Με αναθέρμανση στους 600°C, προκύπτει μια μικροδομή που αποτελείται από μαρτενσίτη και μικρά ποσοστά ωστενίτη. Η διπλή αναθέρμανση των δοκιμίων, αρχικά στους 670 °C και έπειτα στους 600 °C, οδηγεί σε μεγαλύτερα ποσοστά ωστενίτη στη μικροδομή τους. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα αναθέρμανσης των δοκιμίων, όπως στην περίπτωση του δοκιμίου 'M' η αναθέρμανση του οποίου είχε διάρκεια οκτώ ωρών, οδηγούν σε μικροδομές με μεγαλύτερα ποσοστά ωστενίτη, σε σχέση με τη μικροδομή

δοκιμίων που αναθερμάνθηκαν για μικρότερα χρονικά διαστήματα (π.χ: δοκίμια H και P).



Σχήμα 6.7. Σχέση ανάμεσα στο δυναμικό διάβρωσης ' E_R ' και το ποσοστό ωστενίτη στο μέταλλο της συγκόλλησης για τα διάφορα δοκίμια.

Λόγω της διπλής αναθέρμανσης, η κατανομή του ωστενίτη στη μικροδομή των δοκιμίων είναι πιο ομοιόμορφη και η διαδικασία αυτή οδηγεί σε μεγαλύτερη αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς.

Για την περίπτωση του δοκιμίου 'E', η θέρμανση στους 550°C οδηγεί στο χαμηλότερο ποσοστό ωστενίτη, σε σχέση με τα άλλα δοκίμια, ίσο με 4,8%. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το συγκεκριμένο δοκίμιο να παρουσιάζει τη μικρότερη αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς, σε σχέση με τα άλλα δοκίμια.

Η απόπτηση που έγινε στους 950 °C σε μερικά δοκίμια επηρεάζει την ηλεκτροχημική τους συμπεριφορά. Η κατεργασία αυτή είχε ως στόχο την ομογενοποίηση της μικροδομής των δοκιμίων μέσω της διάλυσης του δ-φερρίτη. Στο διάγραμμα του Σχήματος 6.6, μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα δοκίμια χωρίς απόπτηση, στα οποία

υπάρχει η φάση του δ-φερρίτη (δοκίμια Β και Ρ), παρουσιάζουν μεγαλύτερα ποσοστά ωστενιτικής φάσης, σε σχέση με τα δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν σε ανόπτηση (δοκίμια Ε και Η).

Συμπεράσματα:

- Η αντίσταση των μετάλλων συγκόλλησης τύπου 13CrNiMo σε διάβρωση με βελονισμούς μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από αλλαγές στη μικροδομή τους λόγω θερμικών κατεργασιών.
- Το ποσοστό της ωστενιτικής φάσης στο μέταλλο συγκόλλησης, είναι η σημαντικότερη παράμετρος μικροδομής που επηρεάζει την αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς.
- Και τα δύο χαρακτηριστικά δυναμικά διάβρωσης, E_p και E_R , λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές ανάλογα με την αύξηση του ποσοστού ωστενίτη στο μέταλλο συγκόλλησης.

6.5.1.2 Επίδραση της μικροδομής στην αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς συγκόλλησης από “superduplex” ανοξείδωτο χάλυβα

Εισαγωγή

Οι ‘superduplex’ ανοξείδωτοι χάλυβες (SDSS) είναι κράματα με υψηλή μηχανική αντοχή και χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε χημικές βιομηχανίες (Tavares S.S.M et al, 2006). Επίσης, οι χάλυβες αυτοί χρησιμοποιούνται σε έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα που περιέχουν H₂S, CO₂, CL⁻ και CN⁻. Οι πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες των ‘superduplex’ ανοξείδωτων χάλυβων, οφείλονται τόσο στη μικροδομή τους, όσο και στα στοιχεία κραμάτωσής τους (Cr, Mo, N, Ni). Ο δείκτης ‘PRE’ (pitting resistance equivalent), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της αντίστασης σε διάβρωση με βελονισμούς, λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές για τους συγκεκριμένους χάλυβες. Όμως, είναι γνωστό ότι η αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως η μικροδομή των χάλυβων και συγκεκριμένα από τα ποσοστά ωστενίτη και φερρίτη στη μικροδομή τους. Οι ‘superduplex’ ανοξείδωτοι χάλυβες εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση για ίσα ποσοστά φερρίτη – ωστενίτη (50%) και όταν απουσιάζουν άλλες φάσεις, όπως Cr₂N και ε(Cu). Λόγω των παραπάνω, ο δείκτης PRE δεν επαρκεί για την περιγραφή του σύνθετου φαινομένου της διάβρωσης. Ιστορικά, μεγάλη δυσκολία κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης παρουσιάζει η επίτευξη μεγάλων ποσοστών ωστενίτη, δηλαδή κοντά στο 50%. Για την επίτευξη της επιθυμητής μικροδομής, μεγάλη σημασία έχει ο έλεγχος της μετάδοσης θερμότητας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Γενικά, οι ‘superduplex’ ανοξείδωτοι χάλυβες πρέπει να λαμβάνουν θερμότητα ίση με 0,5 – 2,0 KJ/mm, ανάλογα με τη γεωμετρία της συγκόλλησης. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η χημική σύσταση του μετάλλου συγκόλλησης, που επηρεάζει σημαντικά τη μικροδομή και την αντίσταση σε διάβρωση της συγκόλλησης.

Διαδικασία συγκόλλησης

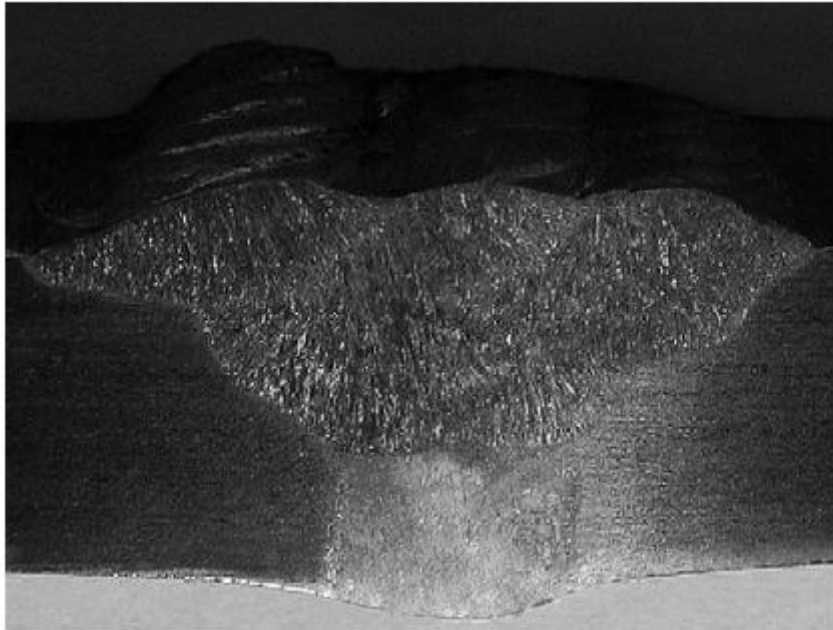
Ένας σωλήνας πάχους ίσου με 9,0 mm και διαμέτρου ίσης με 900 mm από ‘superduplex’ ανοξείδωτο χάλυβα, συγκολλήθηκε με χρήση των GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) και SMAW (Shielded Metal Arc Welding) μεθόδων συγκόλλησης. Η προσδιδόμενη θερμότητα κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης κυμαινόταν από 1,5 – 2,0 KJ/mm. Η χημική σύσταση του μετάλλου βάσης και του μετάλλου συγκόλλησης φαίνεται στον Πίνακα 6.5.

Πίνακας 6.5. Χημική σύσταση του μετάλλου βάσης και των μετάλλων συγκόλλησης.

Material	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Mn	%S	%P	%Si	%Cu
Base metal	0.020	24.6	6.68	3.8	0.26	0.83	0.001	0.026	0.34	0.25
GTAW wire	0.020	25.1	5.10	3.7	0.22	0.70	0.001	0.020	0.20	1.80
SMAW rod	0.030	25.3	7.09	3.3	0.18	0.65	0.005	0.022	0.81	1.96

Η αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς του μετάλλου συγκόλλησης και του μετάλλου βάσης μετρήθηκε με πείραμα σε υγρό περιβάλλον με 3,5% NaCl, έτσι ώστε να έχουμε εξομοίωση του θαλασσινού περιβάλλοντος.

Στην Εικόνα 6.9, φαίνεται η μορφή της συγκόλλησης. Το κατώτερο τμήμα της (root pass) συγκολλήθηκε με χρήση της μεθόδου συγκόλλησης GTAW, ενώ το άνω από αυτό τμήμα της συγκόλλησης, συγκολλήθηκε με χρήση της μεθόδου συγκόλλησης SMAW.

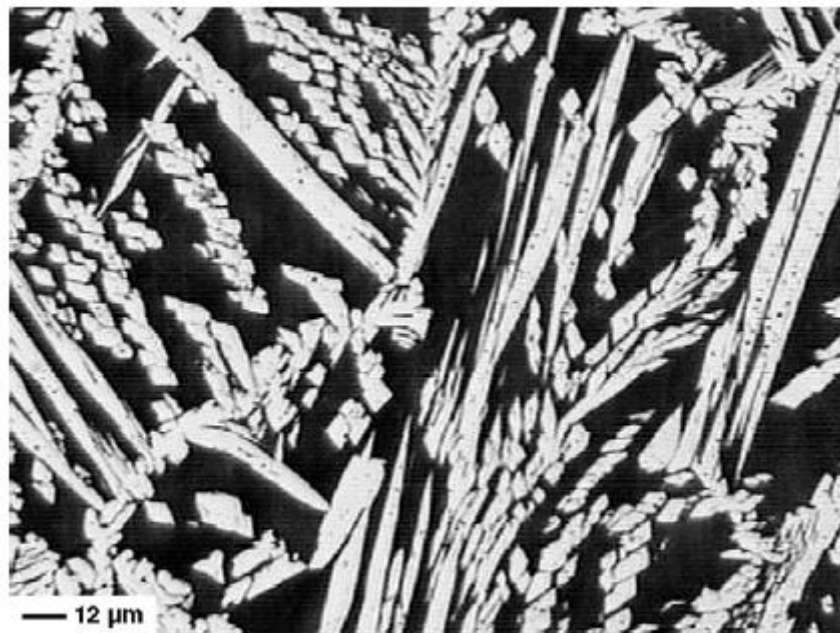


Εικόνα 6.9. Μορφολογία της συγκόλλησης

Σε πρακτικές εφαρμογές και οι δύο πλευρές της συγκόλλησης μπορούν να εκτεθούν σε έντονο διαβρωτικό περιβάλλον. Γι' αυτό το λόγο ο χαρακτηρισμός της μικροδομής τους έχει μεγάλη πρακτική σημασία. Στις Εικόνες 6.10 και 6.11 φαίνεται η μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης για τις δύο διαφορετικές μεθόδους που εφαρμόστηκαν (GTAW – Εικόνα 6.10 , SMAW – Εικόνα 6.11).



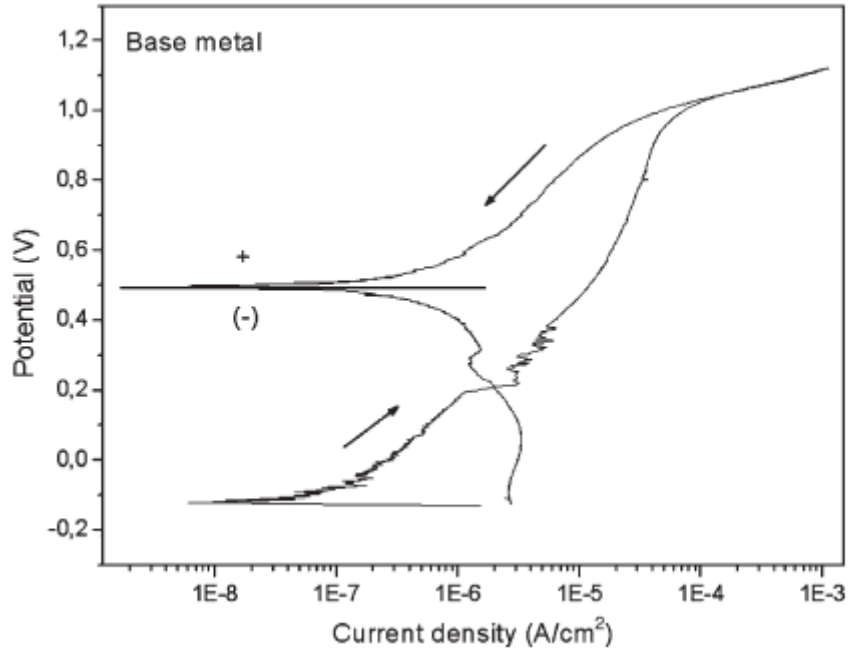
Εικόνα 6.10. Μικροδομή μετάλλου συγκόλλησης (μέθοδος GTAW)



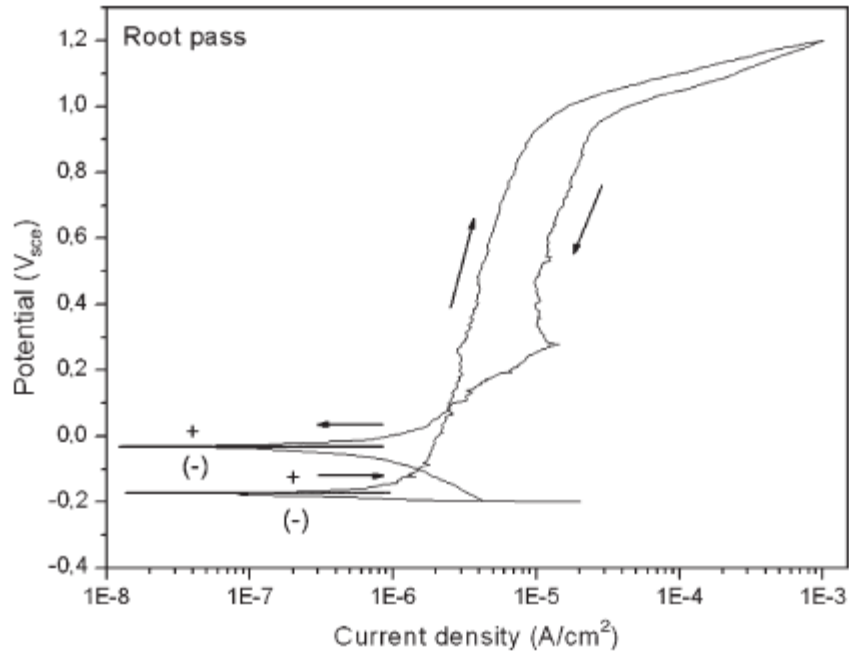
Εικόνα 6.11. Μικροδομή μετάλλου συγκόλλησης (μέθοδος SMAW)

Τα ποσοστά ωστενίτη στη μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης, ήταν 34,2% για τη μέθοδο GTAW και 46,7% για τη μέθοδο SMAW.

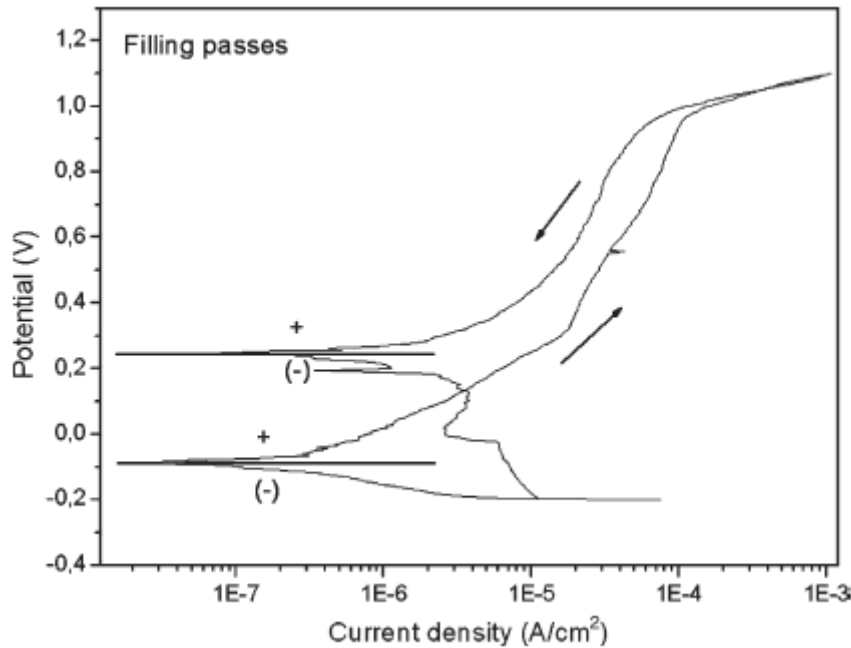
Στα Σχήματα 6.8, 6.9 και 6.10 φαίνονται οι ποτενσιοδυναμικές καμπύλες για το μέταλλο βάσης και για το μέταλλο συγκόλλησης, αντίστοιχα.



Σχήμα 6.8. Ποτενσιοδυναμικές καμπύλες για το μέταλλο βάσης.



Σχήμα 6.9. Ποτενσιοδυναμικές καμπύλες για το μέταλλο που συγκολλήθηκε με τη μέθοδο GTAW.



Σχήμα 6.10. Ποτενσιοδυναμικές καμπύλες για το μέταλλο που συγκολλήθηκε με τη μέθοδο SMAW.

Τα δυναμικά διάβρωσης με βελονισμούς λαμβάνουν περίπου την ίδια τιμή ($1,0 V_{SCE}$) και για τις τρεις διαφορετικές περιοχές. Οπτικές παρατηρήσεις στο μέταλλο συγκόλλησης, φανέρωσαν μεγαλύτερη διάβρωση με βελονισμούς στο μέταλλο συγκόλλησης που δημιουργήθηκε με χρήση της μεθόδου GTAW. Ο δείκτης PRE λαμβάνει επίσης παρόμοιες τιμές: 42,5% για το μέταλλο με συγκόλληση GTAW, 42,2% για το μέταλλο με συγκόλληση SMAW και 41,3% για το μέταλλο βάσης. Οι μικρές αυτές διαφορές δεν επαρκούν για να εξηγήσουν τη διάβρωση που παρατηρήθηκε.

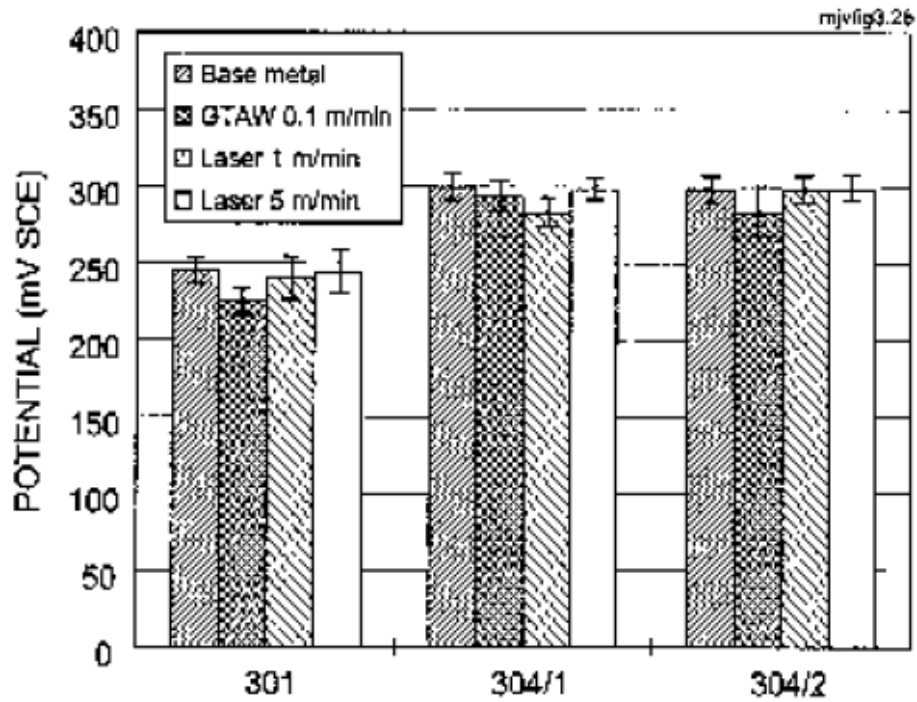
Το μέταλλο συγκόλλησης που δημιουργήθηκε με τη μέθοδο GTAW έχει μικρότερα ποσοστά ωστενίτη, σε σχέση με το μέταλλο συγκόλλησης που δημιουργήθηκε με τη μέθοδο SMAW. Η περίσσεια αυτή σε φερρίτη, του μετάλλου συγκόλλησης που δημιουργήθηκε με τη μέθοδο GTAW, μπορεί να εξηγήσει τη μεγαλύτερη διάβρωση με βελονισμούς που υπέστη.

6.5.2 Επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στην αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς των συγκολλήσεων

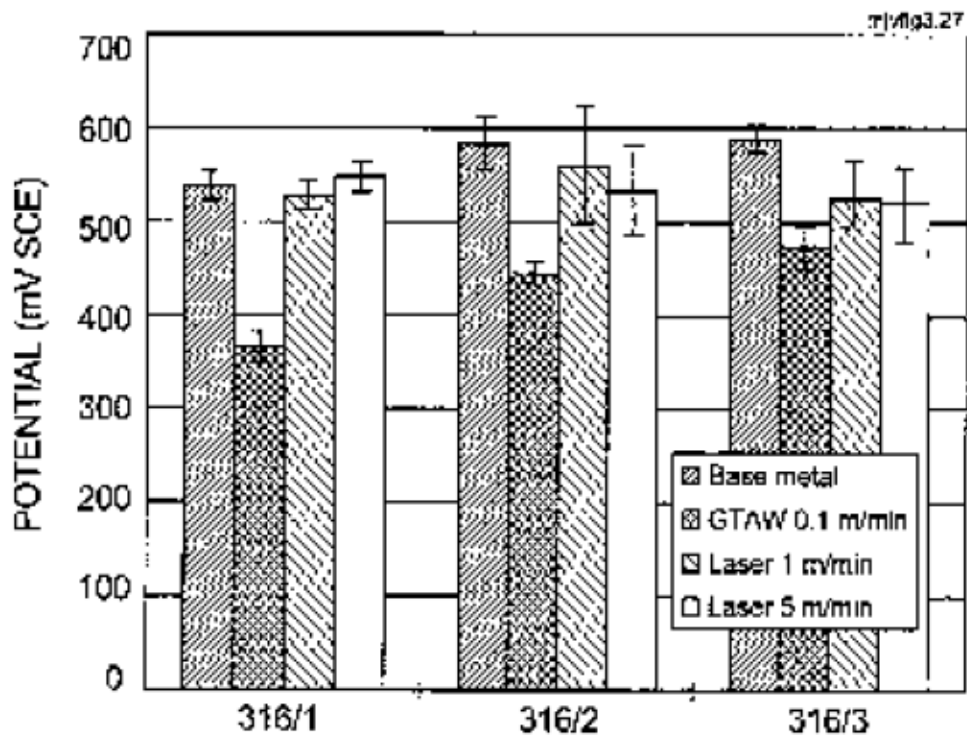
6.5.2.1 Επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στην αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς των συγκολλήσεων από ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα

Τα αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων για το δυναμικό διάβρωσης με βελονισμούς για συγκεκριμένους τύπους μετάλλων συγκόλλησης, φαίνονται στα Σχήματα 6.11 και 6.12 (Vilpas Martti, 1999). Τα μέταλλα συγκόλλησης τύπου AISI 301, 304/1 και 304/2, παρουσιάζουν δυναμικά διάβρωσης πολύ κοντά στο δυναμικό διάβρωσης του μετάλλου βάσης (Σχήμα 6.11). Η αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης δεν φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στη διάβρωση με βελονισμούς για αυτά τα μέταλλα συγκόλλησης. Επίσης, οι συγκολλήσεις 304/1 και 304/2 εμφανίζουν μεγαλύτερα δυναμικά διάβρωσης με βελονισμούς σε σχέση με τα μέταλλα συγκόλλησης τύπου AISI 301.

Για τα μέταλλα συγκόλλησης τύπου AISI 316, το δυναμικό διάβρωσης με βελονισμούς είναι σημαντικά υψηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο δυναμικό των μετάλλων συγκόλλησης τύπου AISI 301 και 304 (Σχήμα 6.12). Επίσης, αργή ταχύτητα συγκόλλησης προκαλεί σημαντική ελάττωση στο δυναμικό διάβρωσης, για αυτά τα μέταλλα συγκόλλησης. Η ελάττωση αυτή του δυναμικού διάβρωσης είναι σημαντικότερη για τη συγκόλληση τύπου 316/1, σε σχέση με τη μείωση του αντίστοιχου δυναμικού για συγκολλήσεις τύπου 316/2 και 316/3. Με την αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης, το δυναμικό διάβρωσης για όλους τους τύπους μετάλλου συγκόλλησης, αυξάνεται σημαντικά. Η αύξηση αυτή του δυναμικού διάβρωσης, είναι μεγαλύτερη για την κατηγορία μετάλλου συγκόλλησης 316/1. Για τα μέταλλα συγκόλλησης 316/2 και 316/3, η αύξηση του δυναμικού διάβρωσης, λαμβάνει μικρότερες τιμές, σε σχέση με την περίπτωση του μετάλλου συγκόλλησης τύπου 316/1.



Σχήμα 6.11. Αποτελέσματα μέτρησεων του δυναμικού διάβρωσης σε διάλυμα 3.56% NaCl για ανοξείδωτους χάλυβες τύπου 301 και 304.



Σχήμα 6.12. Αποτελέσματα μέτρησεων του δυναμικού διάβρωσης σε διάλυμα 3.56% NaCl για ανοξείδωτους χάλυβες τύπου 316.

Μπορεί να παρατηρηθεί, ότι η αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης έχει θετική επίδραση στην αντίσταση των συγκολλήσεων από ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες σε διάβρωση με βελονισμούς.

6.5.3 Επίδραση του ρυθμού απόψυξης της συγκόλλησης στην αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς των συγκολλήσεων

6.5.3.1 Επίδραση του ρυθμού απόψυξης της συγκόλλησης στη διάβρωση με βελονισμούς των συγκολλήσεων από duplex ανοξείδωτους χάλυβες

Πειραματική διαδικασία

Οι συγκολλήσεις έγιναν από duplex ανοξείδωτο χάλυβα τύπου UNS S31803. Η χημική σύσταση του μετάλλου συγκόλλησης και οι συνθήκες συγκόλλησης φαίνονται στον Πίνακα 6.6 (Fourlaris G., Papadimitriou G., Kordatos J.D., 2000) . Οκτώ συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με μήκος ίσο με 40 cm. Οι μισές από αυτές αφέθηκαν να κρυσώσουν σε θερμοκρασία δωματίου (22°C), ενώ οι άλλες μισές εμβαπτήστικαν σε νερό θερμοκρασίας 10°C, αμέσως μετά το πέρας της διαδικασίας της συγκόλλησης. Δοκίμια αποκόπηκαν από τις συγκολλήσεις έτσι ώστε να γίνει ανάλυση της μικροδομής τους με χρήση μικροσκοπίου. Η συμπεριφορά των συγκολλήσεων σε διάβρωση με βελονισμούς ελέγχθηκε σύμφωνα με τις μεθόδους ASTM.

Πίνακας 6.6. Παράμετροι της διαδικασίας της συγκόλλησης

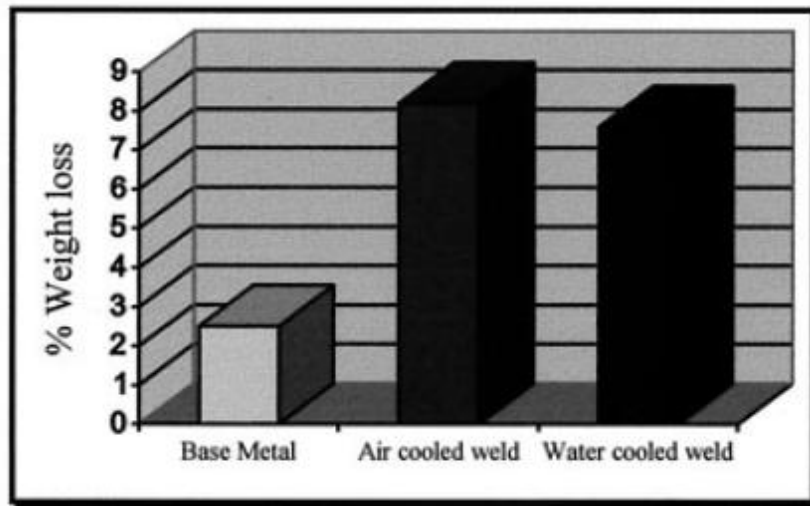
	Cr %	Ni %	Mo %	N %	C %	Mn %	Si %
SAF 2205	22.28	5.32	3.18	0.191	0.022	1.24	0.376
GRINOX T-62	23.00	8.50	3	0.150	0.020	1.50	0.300
Welding Parameters	2.4 mm electrode: 110 A DCEN 2 mm electrode wolfram—thorium AWS A 5.12 EWTh 2 Pure Argon 99.99% shielding and backing gas Gas flow: 12 l/min shielding gas, 6 l/min backing gas Interpass Temperature: 150°C						

Όλα τα δοκίμια παρουσιάζουν μικροδομή ωστενίτη – φερρίτη. Καμία άλλη φάση δεν εμφανίστηκε σε καμία από τις οκτώ συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν. Στον επόμενο Πίνακα 6.7. φαίνονται τα ποσοστά ωστενίτη – φερρίτη στις διάφορες περιοχές του μετάλλου συγκόλλησης, για τις δύο μεθόδους ψύξης της συγκόλλησης που εφαρμόστηκαν.

Πίνακας 6.7. Μικροδομή των μετάλλων βάσης και συγκόλλησης.

	Base Metal % Austenite	Partial Anneal. % Austenite	Overheating Zone % Austenite	Melting Zone % Austenite
Air cooled welds	48.3 ± 3.7	37.2 ± 2	20.3 ± 1, 3	53.3 ± 3
Water cooled welds		35.4 ± 1.7	20 ± 2	43.1 ± 1.6

Στο Σχήμα 6.13 φαίνεται η απώλεια βάρους ανά μονάδα επιφάνειας, λόγω διάβρωσης με βελονισμούς, για το μέταλλο συγκόλλησης, όπως επίσης και για το μέταλλο βάσης. Η εξέταση του διαγράμματος φανερώνει πως το μέταλλο βάσης παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς, ενώ τα μέταλλα συγκόλλησης που ψύχθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, παρουσιάζουν τη μικρότερη αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς. Η απώλεια βάρους ανά μονάδα επιφάνειας, για το μέταλλο βάσης και τα μέταλλα συγκόλλησης που ψύχθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε νερό, είναι ίση με 292 gr/m^2 , 1011 gr/m^2 , 898 gr/m^2 , αντίστοιχα.



Σχήμα 6.13. Απώλεια βάρους λόγω διάβρωσης με βελονισμούς.

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την ύπαρξη, σε επίπεδο μικροδομής των συγκολλήσεων που ψύχονται με γρήγορους ρυθμούς με νερό, ενός συνεχούς «δικτύου» ωστενίτη, που έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της επέκτασης της διάβρωσης με βελονισμούς.

6.5.4 Επίδραση της προσδιδόμενης θερμότητας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης στην αντίσταση των συγκολλήσεων σε διάβρωση με βελονισμούς

6.5.4.1 Επίδραση της προσδιδόμενης θερμότητας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης στην αντίσταση των συγκολλήσεων από duplex ανοξείδωτο χάλυβα σε διάβρωση με βελονισμούς

Στον Πίνακα 6.9 φαίνεται η επίδραση της προσδιδόμενης θερμότητας στην ευαισθησία σε διάβρωση με βελονισμούς συγκολλήσεων από duplex ανοξείδωτο χάλυβα, τύπου Ferralium 255 (Fourie J.W, Robinson F.P.A, 1990). Η σύσταση του χάλυβα αυτού φαίνεται στον Πίνακα 6.8.

Πίνακας 6.8. Χημική σύσταση duplex ανοξείδωτου χάλυβα τύπου Ferralium 255.

Elements	C	Cr	Cu	Fe	Mo	Mn	N	Ni	P	S	Si
Minimum		24.5	1.50	REMAINDER	3.10	0.80	0.20	5.50			0.20
Maximum	0.030	26.50	2.00		3.80	1.20	0.25	6.50	0.040	0.020	0.70

Πίνακας 6.9. Επίδραση της προσδιδόμενης θερμότητας στην αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς συγκολλήσεων από duplex ανοξείδωτο χάλυβα τύπου Ferralium 255.

Specimen no.	Heat input kJ/mm	Loss in mass %	Remarks
1	4,4	0	No pitting
2	1,8	0	No pitting
3	1,06	0,20	Slight pitting of weld metal
4	0,91	0,24	Corrosion of weld metal-fusion line
5	0,55	0,42	Corrosion of weld metal-fusion line
6	0,47	0,42	Corrosion of weld metal-fusion line
7	0,24	0,86	Corrosion of weld metal-fusion line
8	0,12	0,63	Corrosion of weld metal-fusion line

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.9, είναι προφανές ότι η αύξηση της προσδιδόμενης θερμότητας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης έχει θετική επίδραση στην αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς για συγκόλλησεις από duplex ανοξείδωτο χάλυβα τύπου Ferralium 255.

Στον Πίνακα 6.11, φαίνεται η επίδραση της θερμότητας στην ευαισθησία σε διάβρωση με βελονισμούς συγκολλήσεων από duplex ανοξείδωτο χάλυβα, τύπου 2205. Η σύσταση του χάλυβα αυτού φαίνεται στον Πίνακα 6.10.

Πίνακας 6.10. Χημική σύσταση duplex ανοξείδωτου χάλυβα τύπου 2205.

Grade		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
2205 (S31803)	Min	-	-	-	-	-	21.0	2.5	4.5	0.08
	Max	0.030	2.00	1.00	0.030	0.020	23.0	3.5	6.5	0.20
2205 (S32205)	Min	-	-	-	-	-	22.0	3.0	4.5	0.14
	Max	0.030	2.00	1.00	0.030	0.020	23.0	3.5	6.5	0.20

Πίνακας 6.11. Επίδραση της προσδιδόμενης θερμότητας στην αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς συγκολλήσεων από duplex ανοξείδωτο χάλυβα τύπου 2205.(x/2 = δοκίμια που εμφάνισαν διάβρωση με βελονισμούς προς τα δοκίμια που ελέγχθηκαν).

Filler metal	Temp. °C	Heat input, kJ/mm					
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Sandvik 22.8.3.L	25	–	2/2	2/2	0/2	0/2	0/2
	30	–	2/2	2/2	2/2	1/2	0/2
None	25	2/2	2/2	2/2	2/2	0/2	0/2
	30	2/2	2/2	2/2	2/2	1/2	0/2

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.11, είναι προφανές ότι η αύξηση της προσδιδόμενης θερμότητας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης έχει θετική επίδραση στην αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς για συγκολλήσεις από duplex ανοξείδωτο χάλυβα τύπου 2205.

6.5.5 Συμπεράσματα:

- Οι θεωρητικές τιμές της αντίστασης σε διάβρωση με βελονισμούς με χρήση του μεγέθους PREN, αν και ενδεικτικές της συμπεριφοράς των μετάλλων συγκόλλησης σε διάβρωση με βελονισμούς, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν με βεβαιότητα την αντίστασή τους σε διάβρωση με βελονισμούς
- Η μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης επηρεάζει σημαντικά την αντίστασή του σε διάβρωση με βελονισμούς. Για μέταλλα συγκόλλησης από μαρτενσιτικό ανοξείδωτο χάλυβα και μέταλλα συγκόλλησης από duplex ανοξείδωτο χάλυβα, η αύξηση του ποσοστού ωστενίτη αυξάνει την αντίσταση της συγκόλλησης σε διάβρωση με βελονισμούς
- Η ταχύτητα της συγκόλλησης μπορεί να επηρεάσει την ευαισθησία σε διάβρωση με βελονισμούς. Για μέταλλα συγκόλλησης από ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα, αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης έχει θετική επίδραση στη συμπεριφορά σε διάβρωση με βελονισμούς.
- Ο ρυθμός απόψυξης της συγκόλλησης, επιδρά στη αντίσταση της συγκόλλησης σε διάβρωση με βελονισμούς. Για συγκολλήσεις από duplex ανοξείδωτο χάλυβα, αύξηση του ρυθμού απόψυξης αυξάνει την αντίσταση σε διάβρωση με βελονισμούς.
- Η προσδιδόμενη θερμότητα κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, επιδρά στην ευαισθησία σε διάβρωση με βελονισμούς. Για μέταλλο συγκόλλησης από duplex ανοξείδωτο χάλυβα, αύξηση της προσδιδόμενης θερμότητας έχει θετικά αποτελέσματα στην αντίσταση της συγκόλλησης σε διάβρωση με βελονισμούς.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Βασ. Ι. Παπάζογλου για τις συμβουλές του και τον χρόνο που διέθεσε για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Βιβλιογραφία:

Bilmes P.D, Llorente C.L, Huaman L., Gassa L.M, Gervasi C.A., 2005, “Microstructure and pitting corrosion of 13CrNiMo weld metals”, Corrosion Science, Vol. no. 48, pp. 3261 – 3270.

Cui N., Qiao L.J., Luo J.L, Chiovelli S, 2000, “Pitting of carbon steel with banded microstructures in chloride solutions”, British corrosion journal, Vol. no. 35, pp. 210 – 215.

Engelhardt George, Macdonald Digby D, 2004, “Unification of the deterministic and statistical approaches for predicting localized corrosion damage: I. Theoretical foundation”,

Ergun M., Akcay L., 2002, “Investigation of pitting potential of carbon steel using experimental design method”, British Corrosion Journal, Vol . no. 37, pp. 235 – 238

Fontana Mars G., Greene Norbert D., 1967, “Corrosion engineering”.

Fourie J.W, Robinson F.P.A, 1990, “Literature review on the influence of weld heat inputs on the mechanical and corrosion properties of duplex stainless steels”, J.S. Afr. Inst. Min. Metall., Vol. no. 90, pp. 59 – 65.

Fourlaris G., Papadimitriou G., Kordatos J.D., 2000, “The effect of cooling rate on the mechanical and corrosion properties of SAF 2205 (UNS 31803) Duplex stainless steel welds”, Scripta Materialia, Vol. no. 44, pp. 401 – 408.

Francis Marc, Rahman Sharif, 1999, “Probabilistic analysis of weld cracks in center-cracked tension specimens”, Computers and Structures, Vol. no. 76, pp. 483 – 506.

Melchers Robert E., 2007, “Extreme value statistics and long term marine pitting corrosion of steel”, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. no. 23, pp. 482 – 488.

Melchers Re, Jeffrey R., 2008, “The critical involvement of anaerobic bacterial activity in modeling the corrosion behavior of mild steel in marine environments”, Electrochimica Acta, Vol. no. 54, pp. 80 – 85.

Mercer A.D, 1990, “Corrosion in seawater systems”.

Nakai Tatsuro, Matsushita Hisao, Yamamoto Norio, Arai Hinonori, 2004, “Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of Bulk carriers (1st report)”, Marine Structures, Vol. no.17, pp. 403 – 432.

Nakai Tatsuro, Matsushita Hisao, Yamamoto Norio, 2005, “Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of Bulk carriers (2nd report) – Lateral distortional buckling and local face buckling”, Marine Structures, Vol. no. 17, pp. 612 – 641.

Nakai Tatsuro, Matsushita Hitsao, Yamamoto Norio, 2005, “Effect of pitting corrosion on the ultimate strength of steel plates subjected to in-plane compression and bending”, Journal of Marine Science and technology, Vol. no. 11, pp. 52 – 64.

Paik Jeom kee, Lee Jae Myung, Man Ju Ko, 2004, “Ultimate shear strength of plate elements with pit corrosion wastage”, Thin - Walled Structures, Vol. no. 42, pp. 1161 – 1176.

Roberge Pierre R, 2007, “Corrosion inspection and monitoring”.

Srinivasan P. Bala, Muthupandi V., Dietzel W., Sivan V., 2004, “An assessment of impact strength and corrosion behaviour of shielded metal arc welded dissimilar weldments between UNS 31803 and IS 2062 steels”, Materials and Design, Vol. no. 27, pp. 182 – 191.

Tavares S.S.M, Pardal J.M., Lima L.D, Bastos I.N, Nascimento I.N, de Souza J.A., 2006, “Characterization of microstructure, chemical composition, corrosion resistance and toughness of a multipass weld joint of superduplex stainless steel UNS S32750”, Materials Characterization, Vol. no. 58, pp. 610 -616.

Turnbull A., McCartney L.N, Zhou S., 2005, “A model to predict the evolution of pitting corrosion and the pit-to-crack transition incorporating statistically distributed input parameters”, Journal of marine science and technology Vol.no.11, pp. 52 – 64.

Turnbull A., Horner D.A, Connolly B.J, 2008, “Challenges in modeling the evolution of stress corrosion cracks from pits”, Engineering Fracture mechanics Vol. no.76, pp. 633 – 640.

Turnbull A., McCartney LN, Zhou S, 2006, “Modelling of the evolution of stress corrosion cracks from corrosion pits”, Scripta Materialia, Vol. no 54, pp. 575-578.

Vilpas Martti, 1999, “Prediction of microsegregation and pitting corrosion resistance of austenitic stainless steel welds by modeling”.

Vorel Michael, Ruzicka Milan., 2003, “Fatigue threshold and crack growth in an electron beam weld made of steel and bronze”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. no. 70, pp. 2617 – 2624.

Παπάζογλου Βασ. Ι., Παπαδημητρίου Γ., 1994, ‘Επιστήμη και τεχνική των συγκολλήσεων’.

