



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ
ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ
ΧΑΛΥΒΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (ΑΗ36,S690)

ΕΥΘΥΜΙΟΥ ANNA

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ : ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ.Ι ΠΑΝΤΕΛΗΣ, ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ν.ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Π.Α. ΚΑΡΥΔΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2016

Αφιερωμένη στους γονείς μου,

Θεόδωρο και Νίκη

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει τίτλο «Μελέτη της μικροδομής και της συμπεριφοράς σε διάβρωση συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση χαλύβων υψηλής αντοχής (AH36,S690)» και εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Με την ολοκλήρωσή της θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Παντελή Δ. , Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών , για την ανάθεση αυτού του ενδιαφέροντος θέματος και τη βοήθειά του σε ό,τι χρειάστηκε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την κ. Τσιούρβα Θ. , Χημικό Μηχανικό και μέλος του επιστημονικού προσωπικού του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, για την πολύτιμη βοήθειά της και την καθοδήγησή της σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ θερμά όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας και ιδιαίτερα τον κ. Ξάνθη Χ. για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τον Δρ.Α.Αρβανίτη, Υπεύθυνο του Εργαστηρίου Μεταλλογραφίας στο Κέντρο Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων (ΚΔΕΠ-ΔΕΗ) για τη διάθεση του εξοπλισμού για τα πειραματικές δοκιμές των μικροσκοπιομετρήσεων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	i
Περιεχόμενα	iii
Εισαγωγή	ix
Abstract	xi

Α.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.2 Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	2
1.3 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ	3
1.3.1 Γεωμετρία εργαλείων συγκόλλησης	4
1.3.1.1 Σχεδιασμός Κεφαλών	4
1.3.1.2 Σχεδιασμός Περιαυχενείων	6
1.3.2 Διαστάσεις εργαλείων	8
1.3.2.1 Παραγόμενη θερμότητα	9
1.3.3 Υλικό εργαλείων	11
1.3.4 Φορτία και καταπονήσεις στα εργαλεία	13
1.4 ΡΟΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	17
1.4.1 Επίδραση του περιαυχενίου και της κεφαλής στη ροή του υλικού	17
1.5 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ	19
1.5.1 Ζώνη Ανάδευσης	19
1.5.1.1 Το σχήμα της ζώνης	19
1.5.1.2 Μέγεθος κόκκων	19
1.5.2 Θερμομηχανικά Επηρασμένη Ζώνη	20
1.5.3 Θερμικά Επηρασμένη Ζώνη	20
1.5.4 Ζώνη Βασικού Μετάλλου	20
1.6 ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΣΤΟΧΙΕΣ	22
1.7 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	23
1.7.1 Παραμένουσες Τάσεις	23

1.7.2 Σκληρότητα	23
1.7.3 Δυσθραυστότητα	23
1.7.4 Αντοχή σε Κόπωση	24
1.7.5 Συμπεριφορά σε Διάβρωση	25
1.7.6 Αντοχή και Ολκιμότητα	26
1.8 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	27
1.9 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	27
1.10 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΑΝΟΜΟΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ ΤΗΝ FSW	28
1.11 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ FSW	29
Βιβλιογραφία 1^{ου} κεφαλαίου	30
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΧΑΛΥΒΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ, (High Strength Steel,HSS)	
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	33
2.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ HSS	34
2.3 ΕΙΔΗ ΧΑΛΥΒΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	35
2.3.1 Χάλυβας AH36	35
2.3.2 Χάλυβες υψηλής αντοχής χαμηλής κραμάτωσης (HSLA)	37
2.3.2.1 HSLA χάλυβες στη ναυπηγική	38
2.3.2.2 Χάλυβας S690	40
2.3.2.3 Επίδραση των στοιχείων κραμάτωσης	41
2.3.2.4 Διαγράμματα CCT για τους HSLA	45
2.3.2.5 Χάλυβες για την σύλληψη ρωγμών από κόπωση (FCA)	47
2.3.3 Σύγκριση των χαρακτηριστικών του AH36 και S690	48
Βιβλιογραφία 2^{ου} Κεφαλαίου	49
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ	
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	51
3.2 ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΕΜΕΠΕΔΗΣΗΣ (EIS)	51
3.2.1 Αρχή της μεθόδου	51

3.2.2 Ανάλυση της σχέσης εμπέδησης	52
3.2.3 Διαγράμματα της φασματοσκοπίας ηλεκτροχημικής εμπέδησης	53
3.2.4 Προσομοίωση συστήματος	55
3.2.4.1 Στοιχεία ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος	55
3.2.4.2 Διάταξη σειράς και παράλληλα	57
3.2.4.3 Φυσική σημασία των στοιχείων ενός ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος	58
3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ (LRP)	61
3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΕΚΒΟΛΗΣ ΤΩΝ ΕΥΘΕΙΩΝ ΤΑΦΕΛ	63
3.4.1 Υπολογισμός ρυθμού διάβρωσης	65
Βιβλιογραφία 3^{ου} Κεφαλαίου	66
B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	67
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	67
4.2 ΥΛΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΩΝ – ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ	68
4.3 ΧΗΜΙΚΗ ΠΡΟΣΒΟΛΗ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ	69
4.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟΥ	71
4.4.1 Διαστασιολόγηση του μικροσκοπίου	72
4.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΟΥ	73
4.5.1 Κύρια μεγέθυνση και διαστασιολόγηση του MZ6	73
4.6 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ	75
4.7 ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΟ ΚΕΛΙ	77
4.7.1 Θερμοδυναμική του ηλεκτροχημικού κελιού	77
4.7.2 Βασικά ηλεκτρόδια του ηλεκτροχημικού κελιού	78
4.7.2.1 Ηλεκτρόδιο εργασίας (working electrode)	79
4.7.2.2 Βοηθητικό ηλεκτρόδιο (counter electrode)	79
4.7.2.3 Ηλεκτρόδιο Αναφοράς (reference electrode)	79
4.7.3 Πειραματική Διάταξη Ηλεκτροχημικών Μετρήσεων	80

4.7.3.1 Χαρακτηριστικά του Ποτενσιοστάτη	80
4.7.3.2 Χαρακτηριστικά του ηλεκτρολυτικού κελιού	81
4.7.4 Διάβρωση Χάλυβα με Ηλεκτροχημικές μεθόδους	83
4.8 ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (Θάλαμος Αλατονέφωσης)	84
4.8.1 Θάλαμος αλατονέφωσης (Salt spray test)	84
4.8.1.1 Στατικές συνθήκες	85
4.8.1.2 Κυκλικές δοκιμές	85
4.8.1.3 Σύνθετες κυκλικές δοκιμές	89
4.8.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του θαλάμου	90
4.8.3 Απαιτήσεις για τον εξοπλισμό του πειράματος	92
4.8.4 Προετοιμασία και Σήμανση των δοκιμών	93
4.8.5 Διαδικασία τοποθέτησης – απομάκρυνσης δοκιμών από το θάλαμο αλατονέφωσης (Planned Interval Test)	94
4.8.6 Υπολογισμός απώλειας μάζας (ρυθμός διάβρωσης)	95
4.8.7 Οργάνωση προγράμματος έκθεσης δοκιμών στον κλιματικό θάλαμο	96
Βιβλιογραφία 4^{ου} Κεφαλαίου	98
Κεφάλαιο 5 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΣΥΖΗΤΗΣΗ	
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	101
5.2 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	101
5.2.1 Μέταλλα βάσης	101
5.2.2 Συγκόλληση FSW AH36-S690	102
5.2.2.1 Ανάλυση των ζωνών της μικροδομής	103
5.2.3 Συγκόλληση FSW S690-S690	104
5.2.3.1 Ανάλυση των ζωνών της μικροδομής	
5.2.4 Ροή του υλικού	106
5.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	107
5.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	110
5.4.1 Πειραματικά αποτελέσματα της μεθόδου Γραμμικής Πόλωσης	110
5.4.2 Πειραματικά αποτελέσματα της μεθόδου προεκβολής των ευθειών Tafel	111
5.4.3 Πειραματικά αποτελέσματα της μεθόδου ηλεκτροχημικής εμπέδησης	113

5.4.4 Διαγράμματα Ανοιχτού Κυκλώματος (Open Circuit, OC)	115
5.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ – ΘΑΛΑΜΟΣ ΑΛΑΤΟΝΕΦΩΣΗΣ	116
5.5.1 Μακροσκοπικές παρατηρήσεις	116
5.5.1.1 Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμίων μετά την απομάκρυνσή τους από το θάλαμο	117
5.5.1.2 Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμίων μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης	122
5.5.2 Μετρήσεις απώλειας βάρους	127
5.5.3 Διαγράμματα Απώλειας Βάρους	131
5.5.3.1 Διαγράμματα της ετερογενούς συγκόλλησης AH36-S690	131
5.5.3.2 Διαγράμματα της ομογενούς συγκόλλησης S690-S690	132
5.5.3.3 Συγκριτικά διαγράμματα διάβρωσης	133
Κεφάλαιο 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	135

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής μελετήθηκε η συμπεριφορά σε διάβρωση των συγκολλήσεων με τη μέθοδο δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding, FSW), των χαλύβων AH36 και S690. Για τη μελέτη του φαινομένου της διάβρωσης έγινε χρήση των μεθόδων επιταχυνόμενης γήρανσης.

Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη, το θεωρητικό και το πειραματικό. Στο πρώτο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους αναπτύσσεται εκτενώς η μέθοδος συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, FSW. Επιπλέον, στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά των χαλύβων που μελετήθηκαν ενώ στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια αρχική προσέγγιση των ηλεκτροχημικών μεθόδων διάβρωσης.

Στο πειραματικό μέρος περιγράφονται αναλυτικά όλες οι πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν όπως η έκθεση των δοκιμίων σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης, μετρήσεις απώλειας βάρους και υπολογισμός του ρυθμού διάβρωσης, μικροσκοπιομετρήσεις, μεταλλογραφία καθώς και ηλεκτροχημική διάβρωση. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων καθώς και η ανάλυση και επεξεργασία τους. Τέλος, παρατίθεται τα σημαντικότερα συμπεράσματα που εξάγονται από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ABSTRACT

In the present thesis, was studied the corrosion behavior of high tensile strength steel AH36 and high strength low alloy (HSLA) S690 specimens and its weldments, after exposure of several specimens to accelerated aging conditions. There were examined one type of weldments, produced by Friction Stir Welding (FSW), as well as specimens of parent metal.

The thesis consists of a theoretical and an experimental part. The theoretical part includes detailed information on the FSW welding process. In addition detailed references on the features of the two steels take place in the second chapter. Finally, the third chapter includes an approach to the electrochemical corrosion methods.

The experimental part includes a detailed description of the experimental procedure that was followed: exposure of specimens to accelerated aging conditions, weight loss measurements and calculation of corrosion rate, microhardness tests and optical microscopy. Subsequently, all experimental results are presented and analyzed. Finally, substantial conclusions which have arisen through the entire course of this research are notated.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ [13] [18] [22]

Πρόκειται για μια μέθοδο, η οποία αναπτύχθηκε σχετικά πρόσφατα από τον τον Wayne Thomas στο Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (The Welding Institute, Δεκέμβριος 1991). Είναι τεχνική στερεής κατάστασης, κατά την οποία συμβαίνει πλαστική παραμόρφωση και συγκόλληση των υλικών αλλά σε θερμοκρασίες κάτω από το σημείο τήξης τους (περίπου 80% της θερμοκρασίας τήξης). Η μέθοδος αυτή δημιουργήθηκε ουσιαστικά για τη συγκόλληση αλουμινίου και μαγνησίου τα οποία είναι πολύ δύσκολο να συγκολληθούν με συμβατικές μεθόδους. Παρόλαυτα, λόγω των πολλών τεχνικών, περιβαλλοντικών και οικονομικών πλεονεκτημάτων της μεθόδου ο TWI αποφάσισε να την εισάγει και στη συγκόλληση χαλύβων (Σχήμα 1.1).

Η τεχνική της Συγκόλλησης δια Τριβής μέσω Ανάδευσης, θεωρείται ως μια σημαντική εξέλιξη στον τομέα των συγκολλήσεων. Οι πρώτες έρευνες το 1991 επικεντρώθηκαν σε βασικούς τομείς τόσο για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της μεθόδου, όσο και για τη δημιουργία των εξαρτημάτων που απαρτίζουν μια μηχανή FSW. Μέχρι το 1995 οι επιστήμονες είχαν μεταβεί πια από το θεωρητικό επίπεδο σε εφαρμογές τόσο στην αεροναυπηγική και στη ναυπηγική βιομηχανία, όσο και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η έρευνα και η ανάπτυξη της τελευταίας δεκαετίας πάνω στη μέθοδο αυτή οδήγησαν σε περαιτέρω εξέλιξη προϊόντων και άλλων παρόμοιων τεχνολογιών βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα των προϊόντων και μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος τους.



Steels welded

Carbon steels

- AISI 1018, 1060, 1085
- A36
- S275, S355, S690
- API X 65, X80, L80, X100
- EH36, DH36, EH46
- HSLA-65
- HY-80, HY-100
- D2 , O1

Stainless steels

- 304, 304 L, 316
- 420A, 420B, 420C
- RWL34
- 12C27
- S32205 duplex

ODS & others

- 20Cr5Al, PM2000, MA957
- PH14, PH17
- Others

Σχήμα 1.1 Λίστα από τον TWI με τους χάλυβες που έχουν συγκολληθεί ήδη με FSW [13]

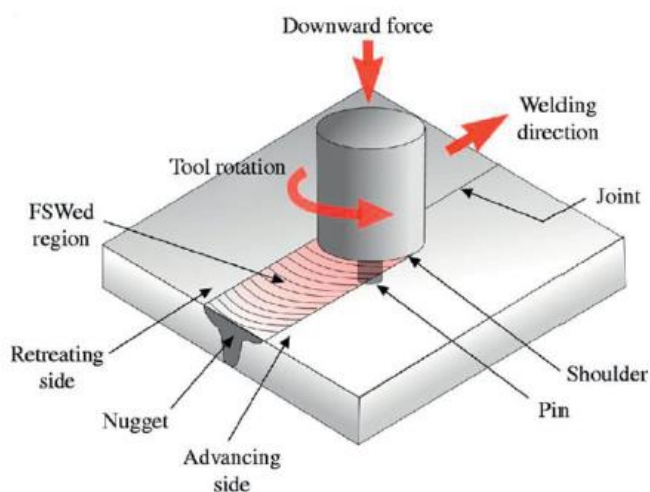
1.2 Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ [18] [23]

Οι βασικότερες αρχές που διέπουν τη μέθοδο FSW είναι η τριβή και η ανάδευση, όπου σε συνδυασμό με την παραγόμενη θερμότητα δημιουργούν τις προϋποθέσεις εκείνες που οδηγούν σε πλαστική παραμόρφωση και συγκόλληση των υλικών, σε θερμοκρασίες κάτω του σημείου τήξης τους. Ένα μη αναλώσιμο περιστρεφόμενο εργαλείο συγκόλλησης, με μία ειδικά σχεδιασμένη κεφαλή ως προέκταση ενός περιαιχηνίου, εισέρχεται στην επαφή των ακμών των δύο πλακών που πρόκειται να συγκολληθούν και διέρχεται κατά μήκος αυτών (Σχήμα 2.2).

Με το περιστρεφόμενο εργαλείο της μηχανής, συντελούνται τρεις βασικές λειτουργίες:

- α) Η τοπική θέρμανση του δοκιμίου,
- β) Η ανάδευση του υλικού των δύο πλακών που οδηγεί στη συγκόλλησή τους και
- γ) Η συγκράτηση του πλαστικοποιημένου υλικού στην περιοχή της συγκόλλησης, κάτω ακριβώς από το περιαιχένιο.

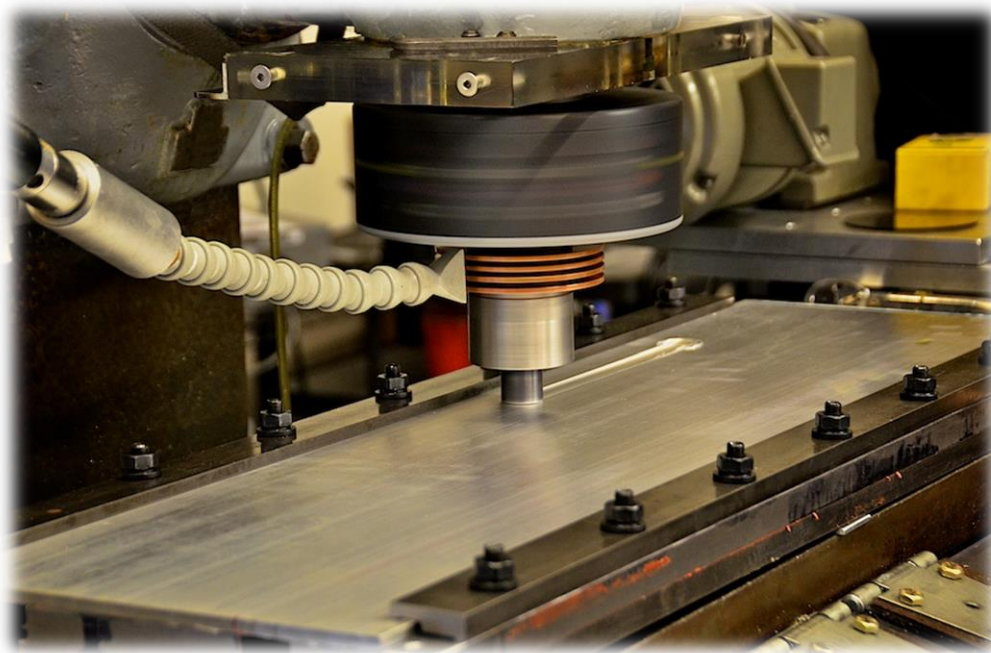
Η θερμότητα που αναπτύσσεται λόγω τριβής ανάμεσα στην κεφαλή συγκόλλησης και το δοκίμιο, οδηγεί στην πλαστική παραμόρφωση αυτού. Η τοπική θερμότητα μαλακώνει το υλικό γύρω από την κεφαλή. Ο συνδυασμός της περιστροφικής και της εμπρόσθιας κίνησης του εργαλείου προκαλεί την κίνηση του υλικού από το μπροστινό μέρος της κεφαλής, στο πίσω μέρος αυτής. Το περιαιχένιο περιορίζει τη ροή του μετάλλου περίπου στο αρχικό επίπεδο της επιφάνειας της πλάκας. Βέβαια όπως θα αναπτυχθεί και στη συνέχεια λόγω των πολλαπλών γεωμετρικών σχημάτων που μπορεί να έχει η κεφαλή, η κίνηση του υλικού είναι αρκετά σύνθετη. Ως αποτέλεσμα της διεργασίας αυτής, οδηγούμαστε στη συγκόλληση των πλακών στη «στερεά τους φάση».



Σχήμα 1.2: FSW εργαλείο και το προς συγκόλληση τεμάχιο [18]

1.3 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ [1] [3] [10] [11] [15] [16] [17] [19] [20] [22]

Το καθοριστικό μέρος μιας μηχανής FSW (Σχήμα 1.3), αποτελείται από ένα κυλινδρικό περιαιχένιο, η προέκταση του οποίου είναι μία κεφαλή, η οποία είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε περιστρεφόμενη να εισχωρεί εντός του προς κατεργασία υλικού και ταυτόχρονα να προωθείται με μία ταχύτητα ανάμεσα στα προς συγκόλληση υλικά τα οποία εφάπτονται. Τα προς συγκόλληση υλικά συγκρατούνται σφιχτά πάνω στην τράπεζα εργασίας με τέτοιο τρόπο έτσι παρά την πίεση που δέχονται κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης να παραμένουν ακίνητα. Περιστρεφόμενη η κεφαλή, περνά κατά μήκος των ακμών των τεμαχίων που πρόκειται να συγκολληθούν. Μεταξύ της κεφαλής και των προς συγκόλληση υλικών αναπτύσσεται θερμότητα λόγω τριβής. Η θερμότητα αυτή, «μαλακώνει» το υλικό των ακμών του κάθε τεμαχίου, το οποίο παρασύρεται από την περιστρεφόμενη κεφαλή, στροβιλίζεται, αναμιγνύεται και τελικά δημιουργεί τη ραφή μεταξύ των υλικών. Πραγματοποιείται απευθείας μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε θερμική. Η κινητική ενέργεια της περιστρεφόμενης κεφαλής, μετατρέπεται σε θερμική ισχύ που απαιτείται για τη συγκόλληση των δύο πλακών. Η νέα αυτή μέθοδος συγκόλλησης, αξιοποιώντας τη θερμότητα που αναπτύσσεται λόγω τριβής, σε συνδυασμό με την πίεση που ασκείται από την κεφαλή στις ακμές των υλικών, οδηγεί σε συγκόλληση τα υλικά, χωρίς αυτά να φτάνουν το σημείο τήξης, χαρακτηριστικό που την καθιστά ως μέθοδο καλύτερη από τις άλλες κλασικές μεθόδους συγκόλλησης.



Σχήμα 1.3: FSW μηχανή [21]

1.3.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Η γεωμετρία του εργαλείου είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας προκειμένου να επιτευχθεί τόσο η καλή ποιότητα της συγκόλλησης όσο και η μέγιστη δυνατή ταχύτητα που αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί. Το εργαλείο της FSW όπως προαναφέρθηκε αποτελείται από ένα περιαιχένιο και μια κεφαλή.

Η πειραματική εμπειρία αλλά και οι συνεχείς μελέτες οδήγησαν στη βελτίωση τόσο του υλικού όσο και του σχεδιασμού της κεφαλής και του περιαιχενίου. Έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές γεωμετρίες κεφαλών, που επικεντρώνονται στον τρόπο με τον οποίο η κεφαλή εισχωρεί στις πλάκες, στον τρόπο με τον οποίο το περιαιχένιο προωθείται στις πλάκες και στον τρόπο με τον οποίο τελικά τα υλικά αναμιγνύονται. Το ινστιτούτο TWI, έχει αναπτύξει κατά πολύ το σχεδιασμό τόσο των κεφαλών όσο και του περιαιχενίου του εργαλείου.






1.3.1.1 Σχεδιασμός Κεφαλών

Όσον αφορά τον σχεδιασμό των κεφαλών οι πιο δημοφιλείς είναι :

- Κυλινδρική κεφαλή με στρογγυλή άκρη (round bottom cylindrical pin)
Η κεφαλή αποτελείται πάντα από σπείρωμα το οποίο προωθεί το υλικό από το περιαιχένιο προς τα κάτω. Η στρογγυλή άκρη της κεφαλής, επιτρέπει τη μείωση της φθοράς του εργαλείου κατά την κάθετη διείσδυση του εργαλείου και βελτιώνει την ποιότητα της συγκόλλησης στα σημεία επαφής με την κεφαλή.
- Κυλινδρική κεφαλή με επίπεδη άκρη (flat bottom cylindrical pin)
Είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο είδος κεφαλής. Η επίπεδη άκρη προσφέρει μεγαλύτερη επιφανειακή ταχύτητα και έτσι έχει μεγαλύτερη επίδραση στη μεταφορά του υλικού. Επιπλέον είναι και το πιο εύκολο ως προς την κατασκευή του.
- Μικρού μήκους κωνική κεφαλή (truncated cone pin)
Αυτό το είδος κεφαλών χρησιμοποιείται για συγκόλληση λεπτών τεμαχίων, μικρότερα από 12 mm γιατί σε αυτές τις περιπτώσεις οι κυλινδρικές κεφαλές δεν μπορούν να τα συγκολλήσουν στη μέγιστη ταχύτητα. Οι κωνικές κεφαλές παρουσιάζουν τα μικρότερα εγκάρσια φορτία και τις μεγαλύτερες ροπές στο κάτω μέρος του κώνου.
- Κεφαλή με σπείρωμα (τύπου Wholr)
Αυτός ο τύπος κεφαλής μειώνει έως και 60% τον όγκο του υλικού που εκτοπίζεται σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους. Με αυτό τον τρόπο γίνεται μείωση των εγκάρσιων ροπών που επιτρέπει την αύξηση της ταχύτητας της εμπρόσθιας κίνησης του εργαλείου. Στην περίπτωση αυτή το

εξωτερικό σπείρωμα πάνω στην κεφαλή λειτουργεί ως τρυπάνι για να παραχθεί μια καθαρή κατακόρυφη κίνηση.

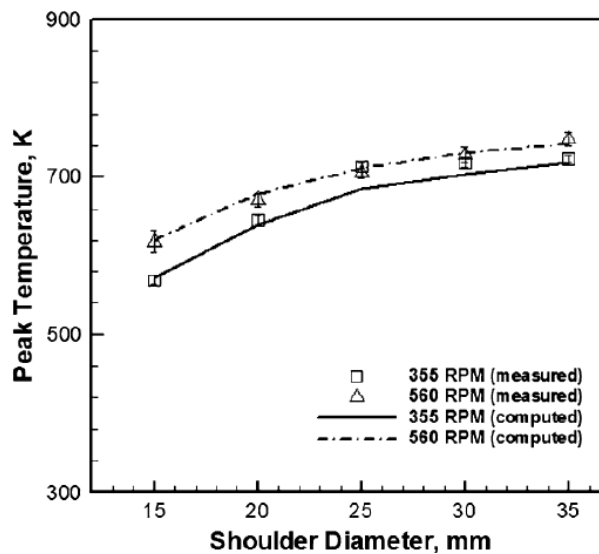
- Κεφαλή τύπου MX triflute
Σε αυτήν την περίπτωση δεν έχουμε συνεχές σπείρωμα αλλά τρεις ραβδώσεις κατά μήκος της κεφαλής, οπότε έτσι προκύπτει μείωση του εκτοπισμένου όγκου κατά 70 % αλλά και ενίσχυση της παραμόρφωσης στη γραμμή συγκόλλησης.
- Κεφαλή τύπου A-skew
Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με το MX triflute. Αυξάνεται η ταχύτητα της εμπρόσθιας κίνησης, βελτιώνεται η εφελκυστική αντοχή της συγκόλλησης και μειώνονται οι ασυμμετρίες στη γραμμή συγκόλλησης.

Tool	Cylindrical	Whorl™	MX triflute™	Flared triflute™	A-skew™	Re-stir™
Schematics						
Tool pin shape	Cylindrical with threads	Tapered with threads	Threaded, tapered with three flutes	Tri-flute with flute ends flared out	Inclined cylindrical with threads	Tapered with threads
Ratio of pin volume to cylindrical pin volume	1	0.4	0.3	0.3	1	0.4
Swept volume to pin volume ratio	1.1	1.8	2.6	2.6	Depends on pin angle	1.8
Rotary reversal	No	No	No	No	No	Yes
Application	Butt welding; fails in lap welding	Butt welding with lower welding	Butt welding with further lower	Lap welding with lower thinning of	Lap welding with lower thinning of	When minimum asymmetry

Σχήμα 1.4 : Τύποι κεφαλών για μια FSW μηχανή

1.3.1.2 Σχεδιασμός Περιαιχενίων

Όσον αφορά τα περιαιχένια, έχουν σχεδιαστεί ώστε να παράγουν θερμότητα στην επιφάνεια και υποεπιφάνεια των ως προς συγκόλληση τεμαχίων. Στο περιαιχένιο παράγονται επίσης το μεγαλύτερο ποσοστό της θερμικής τριβής και της παραμόρφωσης (Σχήμα 1.5). Έτσι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους για τον σχεδιασμό του περιαιχενίου είναι η διάμετρος του, επειδή καθορίζει αρκετά το ποσοστό της θερμότητας που παράγετε. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η σχέση αυτή για συγκόλληση αλουμινίου. Το διάγραμμα τροποποιείται ανάλογα με το υλικό συγκόλλησης άρα και τη θερμοκρασία τήξης αυτού.



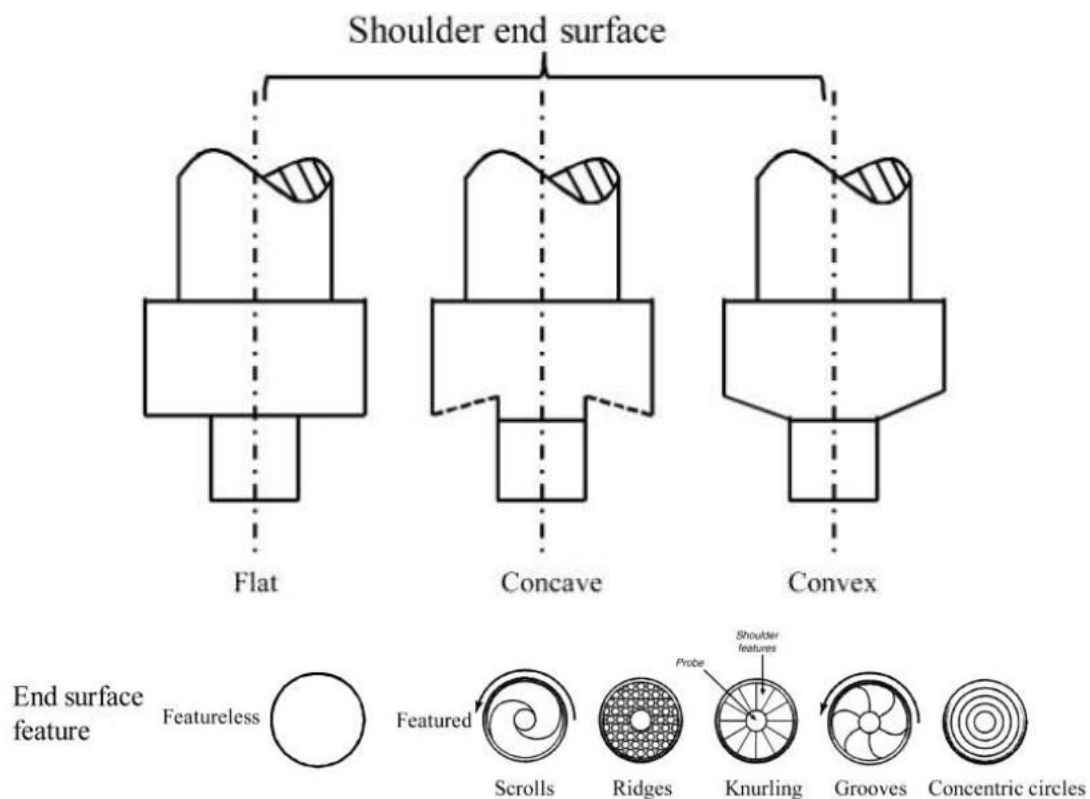
Σχήμα 1.5: Διάγραμμα της διαμέτρου του περιαιχενίου συναρτήσει τη θερμικής τριβής που παράγεται [3]

Τα περιαιχένια κατηγοριοποιούνται ως εξής :

- Κυρτό περιαιχένιο (concave shoulder)
Είναι ο αρχικός σχεδιασμός των περιαιχενίων. Δίνει καλής ποιότητας συγκόλληση και είναι εύκολο ως προς την κατασκευή του. Η κλίση που έχει η άκρη του περιαιχενίου σε σχέση με την κεφαλή είναι μεταξύ 6 και 10 μοιρών. Κατά τη διάρκεια της διείδυσης το υλικό που εκτοπίζεται από την κεφαλή τροφοδοτείται εντός της κοιλότητας του περιαιχενίου. Κατά την εμπρόσθια κίνηση του εργαλείου το υλικό που βρίσκεται εντός της κοιλότητας προωθεί το υπόλοιπο υλικό εντός της κεφαλής. Τέλος, ο αποδοτικός τρόπος συγκόλλησης με το συγκεκριμένο περιαιχένιο επιτυγχάνεται με τοποθέτηση του εργαλείου με κλίση 2 έως 4 μοιρών από την διεύθυνση μετακίνησης.

- **Κοίλο περιαιχένιο (convex shoulder)**
 Στα πρώτα στάδια της χρήσης του, ο τύπος αυτός του περιαιχενίου δεν ήταν πολύ επιτυχημένος γιατί λόγω του σχήματος του απομάκρυνε το υλικό από την κεφαλή αντί να το προωθεί σε αυτήν. Παρολαυτά, μπόρεσε να χρησιμοποιηθεί με την βοήθεια προωθητών υλικού (scrolls) προς την κεφαλή. Έτσι προκύπτει μεγάλη ευελιξία στην επαφή που θα πρέπει να έχει το περιαιχένιο με το τεμάχιο, υπάρχει μεγαλύτερη ευκολία στην συγκόλληση τεμαχίων με διαφορετικό πάχος και βελτιώνει την ικανότητα συγκόλλησης τεμαχίων με διάφορες καμπυλότητες.
- **Επίπεδο περιαιχένιο (flat shoulder)**
 Αποτελεί τον πιο απλό σχεδιασμό περιαιχενίου, εντούτοις το μεγαλύτερο του μειονέκτημα είναι ότι η επίπεδη επιφάνεια του το καθιστά μη αποτελεσματικό ως προς την προώθηση του υλικού στην κεφαλή, το οποίο οδηγεί σε υπερβολική εξώθηση υλικού προς τα έξω.

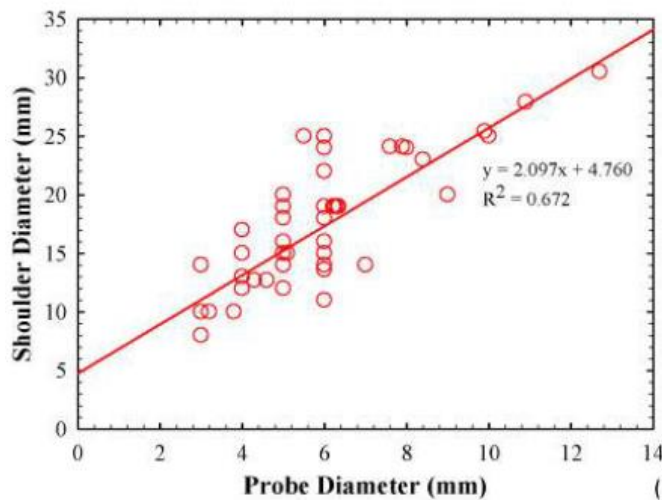
Τα περιαιχένια μπορούν να διαθέτουν κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά για να αυξήσουν την ποσότητα υλικού που προωθείται προς τις κεφαλές, αυξάνοντας έτσι την ανάδευση και άρα την ποιότητα της συγκόλλησης (Σχήμα 1.6). Τα πιο διαδεδομένα είναι προωθητές υλικού μέσω ολίσθησης (scrolls), σπείρωμα (ridges), αυλακώσεις (knurling, grooves) και ομόκεντροι κύκλοι (concentric circles).



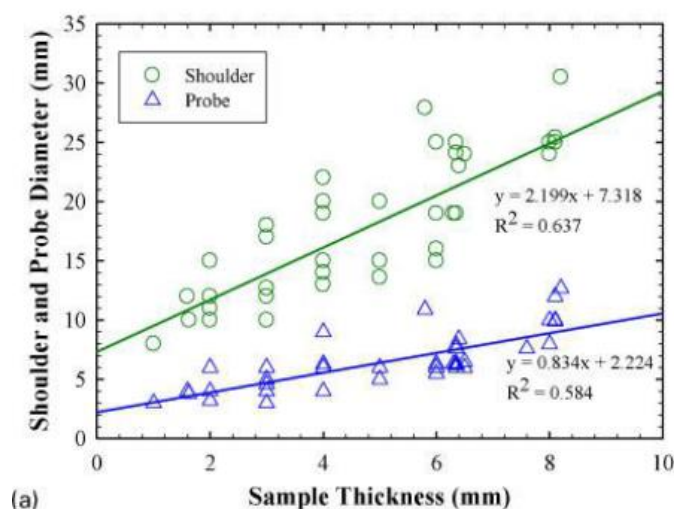
Σχήμα 1.6 : Τύποι περιαιχενίων [3, 17]

1.3.2 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Οι διαστάσεις τόσο του περιαιχενίου όσο και της κεφαλής, συμβάλουν καθοριστικά στη διαδικασία της συγκόλλησης, γιατί καθορίζουν τη θερμότητα που παράγεται. Η διάμετρος του περιαιχενίου είναι συνήθως 2.2 φορές το πάχος του προς συγκόλληση τεμαχίου συν επιπλέον 7.3mm . Έτσι, αυξάνοντας το πάχος του τεμαχίου απαιτείται μεγαλύτερη θερμότητα άρα και μεγαλύτερη διάμετρος περιαιχενίου. Όσον αφορά τη διάμετρο της κεφαλής συνήθως είναι 0.8 φορές το πάχος του τεμαχίου συν επιπλέον 2.2 mm. Ταυτόχρονα, πρέπει να τηρείται και η σχέση μεταξύ περιαιχενίου και κεφαλής όπου η διάμετρος του περιαιχενίου πρέπει να είναι 2.1 φορές τη διάμετρο της κεφαλής συν επιπλέον 4.8 mm. Οι σχέσεις αυτές παρουσιάζονται και στα διαγράμματα 1.7 και 1.8. Επιπλέον, το μήκος της κεφαλής είναι πάντα ελάχιστα πιο κοντό από το πάχος του δοκιμίου.



Σχήμα 1.7: Διάμετρος της κεφαλής συναρτήσει της διαμέτρου του περιαιχενίου [17]



Σχήμα 1.8 : Πάχος του προς συγκόλληση τεμαχίου συναρτήσει των διαμέτρων κεφαλής και περιαιχενίου [17]

1.3.2.1 Παραγόμενη θερμότητα

Η παραγόμενη θερμότητα μπορεί να υπολογιστεί με τους εξής δύο τρόπους, αφού υποθέσουμε ότι έχουμε τρεις επιφάνειες

- Επιφάνεια περιαιχενίου (tool shoulder)
- Παράπλευρη επιφάνεια κεφαλής (curved surface of tool pin)
- Κάτω επιφάνεια της κεφαλής (bottom surface of tool pin)

A. Υπολογίζουμε τη συνολική θερμότητα

Παραγόμενη θερμότητα = δύναμη x σχετική ταχύτητα

$$\bar{Q} = [(1 - \delta) \cdot \eta \cdot \tau + \delta \cdot \mu_f \cdot P] \cdot (rd\theta dr) \cdot (\omega \cdot r - U \cdot \sin \theta)$$

Όπου

δ = συντελεστής ολίσθησης (fractional slip)

η = μηχανικός βαθμός απόδοσης

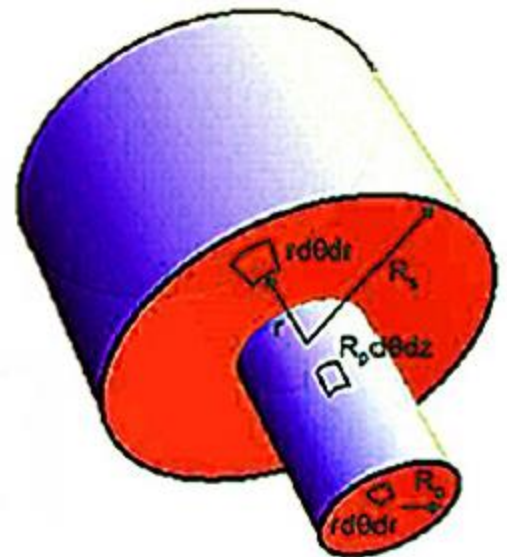
τ = όριο διαρροής σε διάτμηση

μ_f = συντελεστής τριβής

P = κατακόρυφη πίεση (axial pressure)

ω = περιστροφική ταχύτητα (rotational speed)

U = ταχύτητα συγκόλλησης (welding speed)



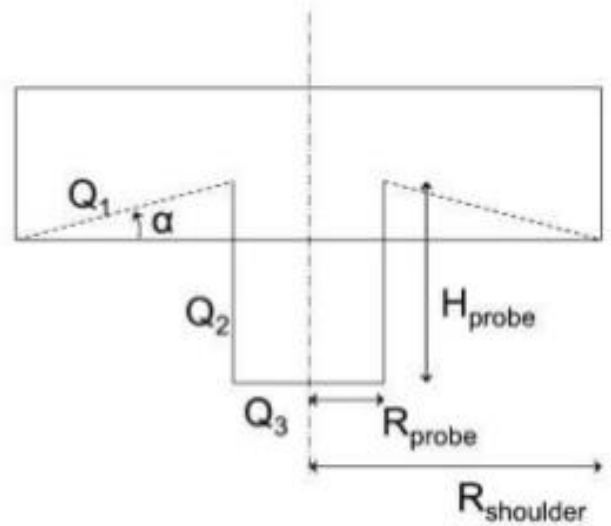
B. Υπολογίζουμε ξεχωριστά σε κάθε επιφάνεια τη θερμότητα όπως φαίνεται στο σχήμα και έπειτα τις προσθέτουμε.

$$Q_1 = 2 \cdot \pi \cdot (1 + \tan \alpha) \cdot \tau_{\text{shear}} \cdot (R_{\text{shoulder}}^3 - R_{\text{pin}}^3)$$

$$Q_2 = 2 \cdot \pi \cdot \tau_{\text{shear}} \cdot R_{\text{pin}}^2 \cdot \omega$$

$$Q_3 = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \tau_{\text{shear}} \cdot \omega \cdot R_{\text{pin}}^3$$

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$



1.3.3 ΥΛΙΚΟ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Το υλικό ενός εργαλείου μιας FSW μηχανής είναι πολύ καθοριστικό. Η επιλογή εξαρτάται αρχικά από το μέταλλο που θα συγκολληθεί και έπειτα από την προσδοκώμενη ζωή του εργαλείου. Η επιλογή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί καθορίζει την ποιότητα της συγκόλλησης, την τελική μικροδομή των τεμαχίων καθώς και τη φθορά που θα υποστεί το εργαλείο και άρα το κόστος της συγκόλλησης (Σχήμα 1.9).

Ιδανικά το εργαλείο πρέπει να διακρίνεται από :

- i. Καλή αντοχή σε θλιπτικά φορτία ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες
- ii. Καλές μηχανικές ιδιότητες, ικανότητα διατήρησης των διαστάσεων (dimensional stability) και αντοχή σε ερπυσμό
- iii. Καλή αντοχή σε κόπωση για να ανταποκρίνεται σε εναλλαγές θερμικών κύκλων
- iv. Να μην προκαλεί καμία αντίδραση ή επαφή του με το μέταλλο συγκόλλησης
- v. Αυξημένη δυσθραυστότητα
- vi. Χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής για μείωση των θερμικών τάσεων
- vii. Απλή κατασκευή για να είναι εύκολη η προσθήκη επιπλέον χαρακτηριστικών τόσο στο περιουχένιο όσο και στην κεφαλή όπως αναφέρθηκαν πιο πάνω
- viii. Χαμηλό κόστος

Tool materials	Advantages	Disadvantages	Comments
Tool steel	Low cost	Visible tool wear after welding for a certain distance	Surface hardening coating to increase wear resistance
AISI H13	Easy machinability		Probe shape optimisation
AISI 4340, O1 tool steel	Good elevated temperature strength	Severe tool wear for high strength materials or MMC	Widely used for Al, Mg, Cu, Al-/Mg-MMC
SKD61 tool steel	Good thermal fatigue resistance		
Wear resistant steel	High strength, ductility, creep resistance and corrosion resistance	Temperature must be kept below the precipitation temperature (typically 600-800°C) to prevent precipitate overaging and dissolution	Mainly used for Al, Cu alloys and Al-MMC
Ni/Co based alloys	Excellent tool wear resistance	Difficult to machine	
MP159			
Inconel 718, 738LC, 939, 100			
Waspalloy			
PM3030, Nimonic 90, Nimonic105			
Refractory metals	High melting temperature	Ta and Nb with high oxygen solubility at elevated temperatures lead to degraded ductility	Mainly used for high melting point materials such as Cu, Ti, Ni alloys and steel
W, W-3Re, W-25Re, W- 1LaO ₂ , Densimet (90W-10Fe-Ni)	Single phase, and high strength maintained to nearly the melting point temperature	Limited material availability, long lead time, high cost, and difficult to machine	
Mo based alloys: Mo-W alloys	No heat treatment	Excessive tool wear due to lower strength	
Nb			
Ta			
Carbides and MMCs	Reasonable fracture toughness at ambient temperatures	Not good for Cu alloys	To optimise probe shape: thread free probes
WC based alloys,	Superior tool wear resistance		Mainly used for Al, Mg and Ti alloys, and steel
WC-Co based alloys			
TiC, TiC-Ni-W			
Ti-Ni-Mo			
PCBN	Superabrasive Synthetic material, second in hardness after diamond	Limited welding depth (<12 mm)	Mainly used for high strength and wear resistant materials, such as Cu, Ti and Ni alloys, steel and Al-MMC
	Chemical stability	Difficult to machine for complex features	
	Excellent wear resistance at elevated temperature	Very expensive	

Σχήμα 1.9 : Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με το υλικό του εργαλείου [17]

1.3.4 ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

Κατά τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, χρησιμοποιούνται εργαλεία με καλή αντοχή σε αξονικές, διαμήκεις και εγκάρσιες δυνάμεις. Καθώς το εργαλείο περιστρέφεται εντός του τεμαχίου, αναπτύσσεται μία αξονική δύναμη η οποία σπρώχνει το εργαλείο προς τα πάνω και η οποία αντισταθμίζεται εάν ασκήσουμε μιας αντίθετης φοράς δύναμη δια μέσου του περιαιχηνίου.

Οι διαμήκεις δυνάμεις οφείλονται στην εμπρόσθια κίνηση του εργαλείου όπου σε συνδυασμό με την περιστροφική κίνηση του παράγουν ένα ασύμμετρο πεδίο ροής υλικού. Παράλληλα, δημιουργούνται και εγκάρσιες δυνάμεις με κατεύθυνση κάθετη στη διαμήκη κίνηση του εργαλείου κατά το φαινόμενο Magnus.

Κατά την αρχική διείσδυση του εργαλείου οι δυνάμεις αυτές διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους λόγω της διαφορετικής θερμότητας που παράγεται κατά το πάχος του τεμαχίου, όπου σε ορισμένες περιοχές το υλικό έχει μαλακώσει ενώ σε άλλες όχι. Έπειτα, οι δυνάμεις αυτές θα σταθεροποιηθούν σε μια τιμή χαμηλότερη από τις μέγιστες που αντέχει το εργαλείο.

Έτσι, είναι εμφανές ότι κατά το πρώτο στάδιο την διαδικασίας (διείσδυση), υπάρχει περίπτωση εργαλεία που αποτελούνται από ψαθυρά υλικά όπως το PCBN (Polycrystalline cubic boron nitride) να αστοχήσουν έτσι προτιμάται συνήθως η προθέρμανση των τεμαχίων με σκοπό την μείωση των τάσεων που ασκούνται στο εργαλείο.

Εκτός από δυνάμεις δημιουργούνται και ροπές που είναι σημαντικές για τρεις λόγους. Πρώτον, η μέγιστη ροπή καθορίζει τις απαιτήσεις αντοχής ολόκληρης της διάταξης και δεύτερον η παραμόρφωση και φθορά του εργαλείου καθορίζεται από τα φορτία που ασκούνται άρα και το κόστος που θα επιφέρει η συχνή αντικατάστασή του. Τέλος η φθορά του εργαλείου θα οδηγήσει σίγουρα σε μείωση της ποιότητας της συγκόλλησης.

Όλα τα μέχρι σήμερα πειράματα έχουν δείξει ότι η αξονική δύναμη αυξάνεται με την αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας και μειώνεται με την μείωση της ταχύτητας της εμπρόσθιας κίνησης του εργαλείου. Από την άλλη, αυξάνοντας την περιστροφική ταχύτητα και μειώνοντας την ταχύτητα εμπρόσθιας κίνησης προκύπτει μείωση της διαμήκου δύναμης τόσο στην κεφαλή όσο και στο περιαιχηνίο. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική κατανομή της δυναμικής πίεσης κατά το μήκος της γραμμής συγκόλλησης.

Τόσο η αξονική, η διαμήκης και η εγκάρσια δύναμη είναι μεγαλύτερες στο περιαιχηνίο σε σχέση με την κεφαλή. Τέλος, μπορούμε να πούμε ότι ο συνδυασμός χαμηλής περιστροφικής ταχύτητας και μεγάλης ταχύτητας εμπρόσθιας κίνησης οδηγεί στη δημιουργία των μεγαλύτερων ροπών.

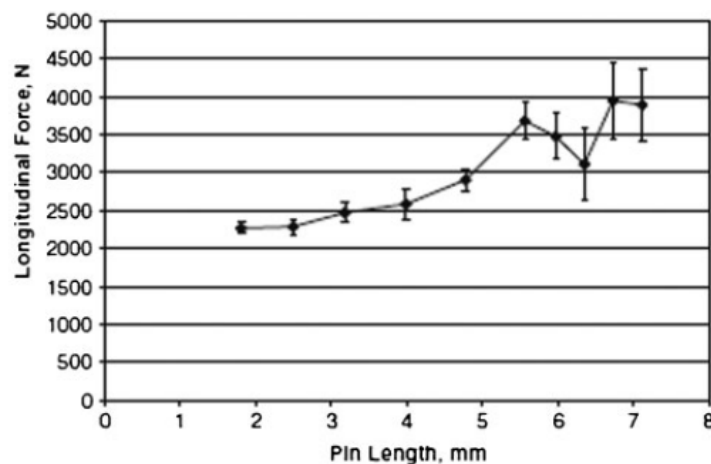
Τα παραπάνω φαίνονται στον πίνακα 1.10 που ακολουθεί.

		Ταχύτητα Προώθησης	Ταχύτητα Περιστροφής
Στην κεφαλή	Διαμήκης Δύναμη	+	-
	Κατακόρυφη Δύναμη	~	+
	Εγκάρσια Δύναμη	~	+
	Ροπή περί τον άξονα του εργαλείου	~	-
Στο Περιαιχένιο	Διαμήκης Δύναμη	+	-
	Κατακόρυφη Δύναμη	-	+
	Εγκάρσια Δύναμη	~	+
	Ροπή περί τον άξονα του εργαλείου	~	-
Συνολικά και στην κεφαλή και στο περιαιχένιο	Διαμήκης Δύναμη	+	-
	Κατακόρυφη Δύναμη	-	+
	Εγκάρσια Δύναμη	~	+
	Ροπή περί τον άξονα του εργαλείου	+	-

Τα σύμβολα (+) και (-) δείχνουν την επίδραση, αύξηση ή μείωση των διαφόρων δυνάμεων ανάλογα με την αύξηση των ταχυτήτων προώθησης και περιστροφής. Το σύμβολο ~ συμβολίζει μικρή ή καθόλου επίδραση.

Σχήμα 1.10: Οι φορτίσεις που ασκούνται στην κεφαλή και το περιαιχένιο [10]

Οι Sorensen και Stahl προσπάθησαν να υπολογίσουν τις διαμήκεις δυνάμεις για διαφορετικά μήκη κεφαλής, κρατώντας σταθερή τη διάμετρο της. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η διαμήκης δύναμη στο εργαλείο μειώνεται όσο μειώνεται το μήκος της κεφαλής ενώ η διάμετρος δεν διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Υποθέτοντας ότι η διαμήκης δύναμη του περιαιχενίου παραμένει ανεξάρτητη από το μήκος της κεφαλής, υπολόγισαν τη δύναμη στην κεφαλή ως τη διαφορά μεταξύ της συνολικής διαμήκεις δύναμης με την αντίστοιχη δύναμη στο περιαιχένιο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 1.11 που ακολουθεί.



Σχήμα 1.11 : Το μήκος της κεφαλής συναρτήσει της διαμήκους δύναμης [10]

Η τρισδιάστατη ροή του υλικού μπορεί να προσεγγιστεί από το μοντέλο του Nandan το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της εγκάρσιας δύναμης στην κεφαλή F_p

$$F_p = \int_0^L \int_0^{2\pi} \sigma(r) d\theta dL \quad (\text{Εξ. 1.1})$$

Όπου σ είναι η θερμοκρασία στο όριο διαρροής παραμόρφωσης του υλικού του εργαλείου, r είναι η μέση διάμετρος της κεφαλής και L το μήκος της κεφαλής.

Η εγκάρσια δύναμη χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό τόσο των καμπικών ροπών όσο και των ορθών και διατμητικών τάσεων. Η εγκάρσια δύναμη, αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το περιαιχένιο λόγω των μεγαλύτερων καταπονήσεων, που οφείλονται στις χαμηλότερες θερμοκρασίες αυτών των περιοχών.

Η καμπτική ροπή μπορεί να προσεγγιστεί με τον τύπο

$$\sigma_B = \frac{4 \cdot \cos \theta}{\pi \cdot r^3} \cdot \int_{z_1}^L z q(z) dz \quad (\text{Εξ. 1.2})$$

Όπου $q(z)$ είναι η εγκάρσια δύναμη της κεφαλής, r είναι η διάμετρος και L το μήκος της κεφαλής.

Οι διατμητικές τάσεις λόγω κάμψης υπολογίζονται από

$$\tau_B = \frac{4 \sin^2 \theta}{3 \pi r^2} \int_{z_1}^L q(z) dz \quad (\text{Εξ. 1.3})$$

Οι διατμητικές τάσεις λόγω στρέψης υπολογίζονται από

$$\tau_T = \frac{2}{\pi r^3} \oint_A \tau (1 - \delta) r(A) dA \quad (\text{Εξ. 1.4})$$

Η μέγιστη διατμητική τάση που μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε σημείο της κεφαλής είναι

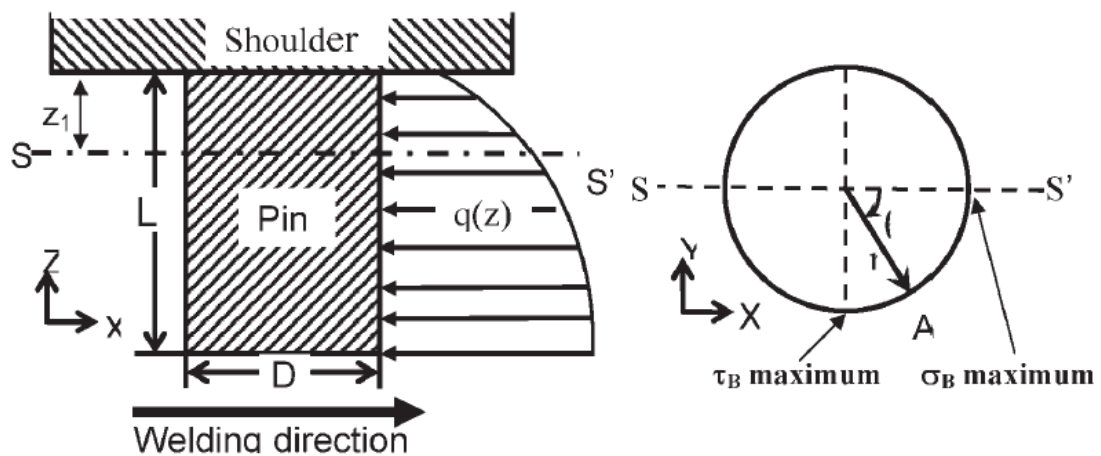
$$\tau_{max} = \left[\left(\frac{\sigma_B}{2} \right)^2 + (\tau_B + \tau_T \sin \theta)^2 + (\tau_T \cos \theta)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Εξ 1.5})$$

Η μέγιστη διατμητική τάση, συμπεριλαμβανομένου κάποιου συντελεστή ασφαλείας, πρέπει να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη μέγιστη του υλικού του εργαλείου στις θερμοκρασίες λειτουργίας για να αποφευχθούν αστοχίες κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

Η εγκάρσια δύναμη στην κεφαλή αυξάνεται όσο αυξάνεται το μήκος της κεφαλής ενώ η μέγιστη διατμητική τάση μειώνεται όσο αυξάνεται η διάμετρος της κεφαλής. Συχνά όμως υπάρχει περιορισμός στο μήκος κεφαλής ανάλογα με το πάχος του προς συγκόλληση τεμαχίου, έτσι εμείς μπορούμε να καθορίσουμε μόνο τη διάμετρο της κεφαλής ανάλογα με τις μέγιστες τάσεις και την αντοχή του υλικού του κάθε εργαλείου.

Επιπλέον, οι μέγιστες καμπτικές ροπές εμφανίζονται στην ένωση του περιαιχενίου με την κεφαλή, οπότε είναι προτιμότερες οι μεγαλύτερες διατομές στα σημεία αυτά. Από την άλλη όμως, όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της κεφαλής τόσο περισσότερο υλικό πρέπει να μετακινηθεί προς τα πίσω για να καλύψει τα κενά της συγκόλλησης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε κακής ποιότητας συγκολλήσεις στην περίπτωση που αυτά τα κενά δεν γεμίσουν πλήρως.

Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο σχεδιασμός και η διαστασιολόγηση τόσο του περιαιχενίου όσο και της κεφαλής είναι πολύπλοκη διαδικασία στην οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο οι προϋποθέσεις για μη αστοχία του εργαλείου όσο και η επιθυμητή ποιότητα συγκόλλησης.



Σχήμα 1.12 : Ονοματολογία των συμβόλων που χρησιμοποιήθηκε στις παραπάνω εξισώσεις. [10]

1.4 ΡΟΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ [4] [5] [8] [21]

Στις περισσότερες συγκολλήσεις, η ροή του υλικού είναι σχεδόν ίδια και πάντοτε ασύμμετρη ως προς γραμμή της συγκόλλησης. Αυτό οφείλεται στη διαφορά της ροής του υλικού από την προωθούμενη (advancing side) στην υποχωρούσα (retreating side) πλευρά λόγω των διαφορετικών σχετικών ταχυτήτων μεταξύ του εργαλείου και των προς συγκόλληση τεμαχίων. Όπως διακρίνεται στο Σχήμα 1.13 η προωθούμενη πλευρά είναι αυτή που προωθεί το υλικό μπροστά στην γραμμή της συγκόλλησης δηλαδή προς την κατεύθυνση του εργαλείου ενώ η υποχωρούσα πλευρά προωθεί το υλικό προς την αντίθεση κατεύθυνση από αυτή του εργαλείου συγκόλλησης.

Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της ροής υλικού ήταν με τη χρήση δεικτών υλικού που ανάλογα με την μετακίνηση τους από την αρχική τους θέση προσομοιάζαν τη ροή (marker insert technique). Εντούτοις, η προσομοίωση γίνεται υποθετικά γιατί οι δείκτες δίνουν πληροφορίες μόνο για την τελική τους θέση και όχι για ολόκληρη τη διαδρομή που ακολούθησαν.

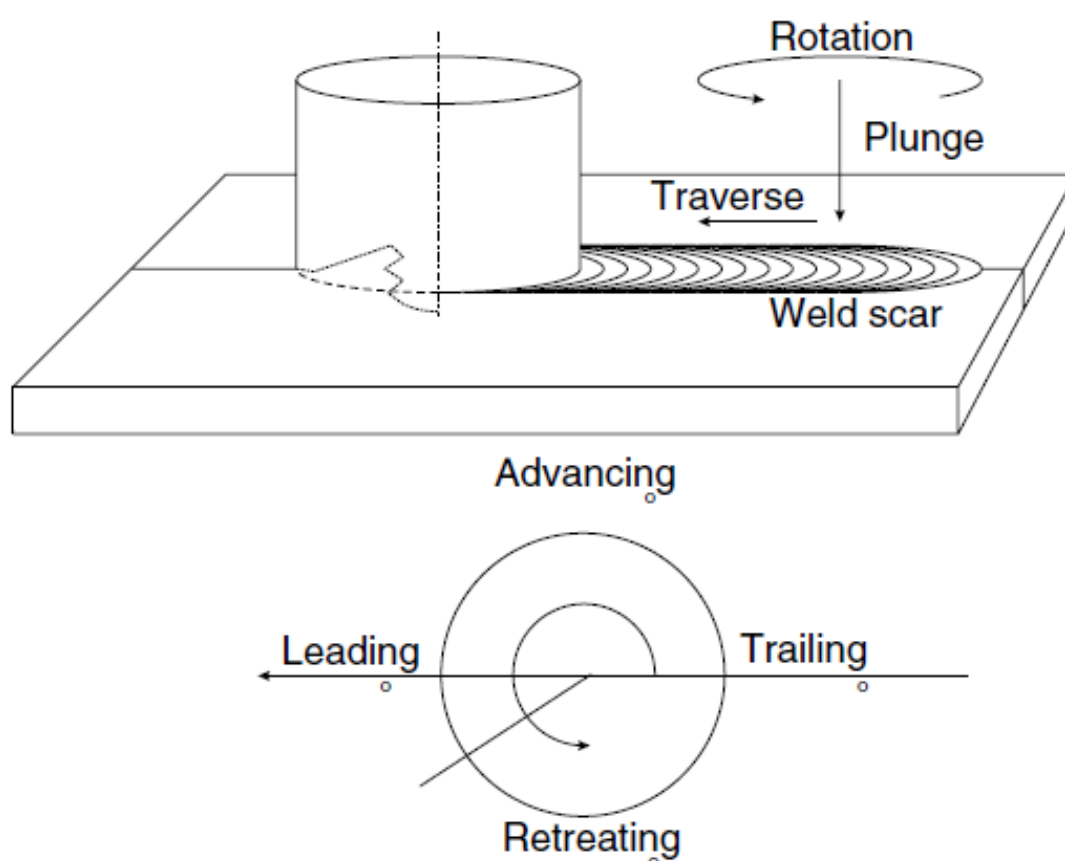
Με τη χρήση αυτής της τεχνικής, αποδείχθηκε ότι δεν υπάρχει επικάλυψη μεταξύ προωθούμενης και υποχωρούσας πλευράς αλλά μια συνεχής ροή ανάμεσα στις δύο. Επιπλέον, έδειξε ότι όλο το υλικό από την προωθούμενη πλευρά εναποτίθεται σε μια θέση πίσω από την αρχική και ότι καμία ποσότητα υλικού δεν μεταφέρετε προς τα πίσω σε απόσταση μεγαλύτερη από τη διάμετρο της κεφαλής.

Σημαντικό είναι ότι η ροή του υλικού γίνεται σε ολόκληρο το ύψος της συγκόλλησης, δηλαδή σε όλο το πάχος του τεμαχίου αλλά όχι ομοιόμορφα λόγω της διαφορετική γεωμετρίας του εργαλείου. Από την άλλη, το πλάτος της ζώνης συγκόλλησης μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από το περιαιχένιο λόγω της καμπυλότητας που παρουσιάζει η κεφαλή κατά το μήκος της. Και στις δύο περιπτώσεις, όλα τα πειράματα και τα μοντέλα αποδεικνύουν ότι το υλικό μεταφέρεται με δύο διαδικασίες. Κατά την πρώτη, μέρος του υλικού από την προωθούμενη πλευρά ακολουθώντας την κίνηση του περιαιχενίου υφίσταται ελικοειδή κίνηση και καθώς βυθίζεται μαζί με την κεφαλή μέσα στο τεμάχιο προωθείται προς τα πάνω και τοποθετείται σε περιοχή πίσω από αυτό. Κατά τη δεύτερη, υλικό από την υποχωρούσα πλευρά γεμίζει τα κενά που δημιουργήθηκαν στην προωθούμενη. Για το λόγο αυτό η ροή του υλικού, δεν είναι συμμετρική καθότι δημιουργούνται σύνθετα χαρακτηριστικά στροβιλισμού και ανάδευσης τα οποία συνθέτουν μια χαοτική – δυναμική ανάμειξη.

1.4.1 Επίδραση του περιαιχηνίου και της κεφαλής στη ροή του υλικού

Δεδομένης της σταθερής ταχύτητας περιστροφής και προώθησης συμβαίνει αύξηση του υλικού που μεταφέρεται από την προωθούμενη στην υποχωρούσα πλευρά όταν αυξάνεται η διάμετρος της κεφαλής. Επακόλουθο αυτού, είναι η αύξηση της ζώνης ανάδευσης, nugget zone, λόγω του ότι μεγαλύτερη ποσότητα υλικού έχει υποστεί πλαστική παραμόρφωση. Τέλος, μετρήσεις των Reynolds και Tang έδειξαν ότι μεγαλύτερη ενέργεια μεταφέρεται στη συγκόλληση με αύξηση την διαμέτρου της κεφαλής.

Επιπλέον, μεγαλύτερη μεταφορά υλικού συμβαίνει και με την αύξηση της διαμέτρου του περιαιχηνίου. Έτσι μεγαλύτερη ποσότητα υλικού σπρώχνεται προς το κάτω μέρος της συγκόλλησης με αποτέλεσμα να δημιουργείται και περιστροφή ως προς τον διαμήκη άξονα. Αυτό μπορεί να φανεί στην απόκλιση της ένωσης μεταξύ της προωθούμενης και υποχωρούσας πλευράς κοντά στον κεντρικό άξονα της συγκόλλησης.



Σχήμα 1.13: Ονοματολογία των πλευρών της συγκόλλησης [6]

1.5 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ [5] [11] [13] [18]

Κατά τη διάρκεια μιας συγκόλλησης με τη μέθοδο FSW, το υλικό υποβάλλεται σε έντονη πλαστική παραμόρφωση όπου σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία, έχουν ως αποτέλεσμα, τη δημιουργία λεπτόκοκκης δομής και ισοαξονικών κόκκων. Η λεπτόκοκκη αυτή μικροδομή της FSW, προσδίδει στο μέταλλο αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες. Η διαδικασία συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης, δημιουργεί τις ακόλουθες, σαφώς διακεκριμένες ζώνες στη συγκολλούμενη περιοχή.

1.5.1 Ζώνη Ανάδευσης (Nugget zone ή Stir Zone)

Στη ζώνη αυτή, έχουμε έντονη πλαστική παραμόρφωση και θερμότητα λόγω τριβής τα οποία οδηγούν σε πλήρη ανακρυστάλλωση που δίνει λεπτόκοκκη δομή εντός της ζώνης. Υπό ορισμένες συνθήκες στην περιοχή αυτή παρατηρούνται τα λεγόμενα Onion rings, κυρίως σε κράματα αλουμινίου. Σε αυτή τη ζώνη στο εσωτερικό των ανακρυσταλλωμένων κόκκων παρατηρείται χαμηλή πυκνότητα διαταραχών. Παρόλαυτα, έρευνες έχουν δείξει ότι σε μικρών διαστάσεων ανακρυσταλλωμένων κόκκων εντός της nugget zone εμφανίζονται μεγάλης πυκνότητας διαταραχές καθώς και υποκόκκοι. Η διεπιφάνεια μεταξύ της ζώνης ανάδευσης και του βασικού μετάλλου, καθορίζεται κυρίως από την υποχωρούσα πλευρά του εργαλείου αλλά και από την προωθούμενη πλευρά, σε μικρότερο βαθμό.

1.5.1.1 Το σχήμα της ζώνης

Ανάλογα με τις παραμέτρους της συγκόλλησης, όπως η γεωμετρία του εργαλείου, η θερμοκρασία του τεμαχίου και η παραγόμενη θερμότητα, μπορούν να προκύψουν ποικίλα σχήματα για τη ζώνη αυτή. Συνήθως, η περιοχή αυτή έχει δύο σχήματα, το πρώτο είναι κυκλικό το οποίο πλαταίνει όσο ανεβαίνει προς την επιφάνεια και το δεύτερο είναι ελλειπτικό. Πρόσφατες έρευνες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι για χαμηλές ταχύτητες περιστροφής του εργαλείου, περίπου 300-500 rpm προκύπτει το κυκλικό σχήμα ενώ για ταχύτητες άνω των 700 rpm προκύπτει το ελλειπτικό. Αυτό προφανώς, αποδεικνύει ότι με το ίδιο εργαλείο μπορεί να προκύψει διαφορετικό σχήμα ανάλογα με την ταχύτητα. Ο Reynolds μελέτησε τη σχέση μεταξύ του σχήματος της ζώνης και του σχήματος της κεφαλής και κατέληξε στο ότι η ζώνη ανάδευσης είναι πάντα ελάχιστα μεγαλύτερη από τη διάμετρο της κεφαλής, και ότι όσο μεγαλώνει η διάμετρος της κεφαλής η ζώνη αποκτά ένα πιο κυκλικό σχήμα με μέγιστη διάμετρο στο μέσον της συγκόλλησης.

1.5.1.2 Μέγεθος κόκκων

Όπως και στο σχήμα της ζώνης, έτσι και στο μέγεθος των κόκκων σημαντικό ρόλο παίζουν οι παράμετροι της συγκόλλησης, η γεωμετρία του εργαλείου, η χημική σύνθεση του τεμαχίου, η κατακόρυφη πίεση καθώς και η διαδικασία ψύξης της συγκόλλησης. Μελέτες έχουν δείξει ότι μείωση του μεγέθους των κόκκων μπορεί να επιφέρει η αύξηση της αρχικής θερμοκρασίας (προθέρμανσης), η μείωση της διαμέτρου του εργαλείου καθώς και η μείωση της ταχύτητας περιστροφής του

εργαλείου με σταθερή την ταχύτητα προώθησης ή αλλάζοντας την αναλογία περιστροφή εργαλείου/ταχύτητα προώθησης.

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι σε πείραμα που έγινε σε αλουμίνια, η μείωση της αναλογίας από 400 rpm/102 mm/min σε 350 rpm/152 mm/min οδήγησε σε μείωση του μεγέθους των κόκκων από 7.5 σε 3.8 mm

Τέλος είναι προφανές, ότι λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας που παρουσιάζεται όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια του τεμαχίου οι κόκκοι κοντά στην επιφάνεια είναι μεγαλύτεροι καθώς επίσης μεγαλύτεροι είναι και στην προωθούμενη πλευρά σε σχέση με την υποχωρούσα. Ενδεικτικά, σε αλουμίνιο 7050Al το μέγεθος των κόκκων στην επιφάνεια του τεμαχίου είναι 5.3 mm ενώ στο κάτω μέρος είναι 3.2 mm και στην προωθούμενη πλευρά είναι 5.1 mm ενώ στην υποχωρούσα είναι 3.5 mm. Είναι προφανές, ότι όσο το πάχος του τεμαχίου αυξάνεται θα αυξάνεται και η διαφορά μεταξύ των μεγεθών των κόκκων.

1.5.2 Θερμομηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη (Thermomechanical Affected Zone)

Αυτή η ζώνη παρατηρείται σχεδόν αποκλειστικά σε αυτήν τη μέθοδο, θεωρείται μεταβατική ζώνη και είναι ανάμεσα στη ζώνη ανάδευσης και στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Είναι απόρροια τόσο της θερμότητας που αναπτύσσεται, όσο και της παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό. Παρόλο που στην περιοχή αυτή παρατηρείται έντονη πλαστική παραμόρφωση δεν συμβαίνει όμως ανακρυστάλλωση λόγω της έλλειψης ικανοποιητικής τάσης παραμόρφωσης. Ωστόσο, σε πειράματα έχει παρατηρηθεί η ύπαρξη κατακρημνισμάτων στη ζώνη αυτή λόγω έκθεσης σε υψηλή θερμοκρασία και μεγάλη πυκνότητα των κόκκων στα όρια αυτής της ζώνης.

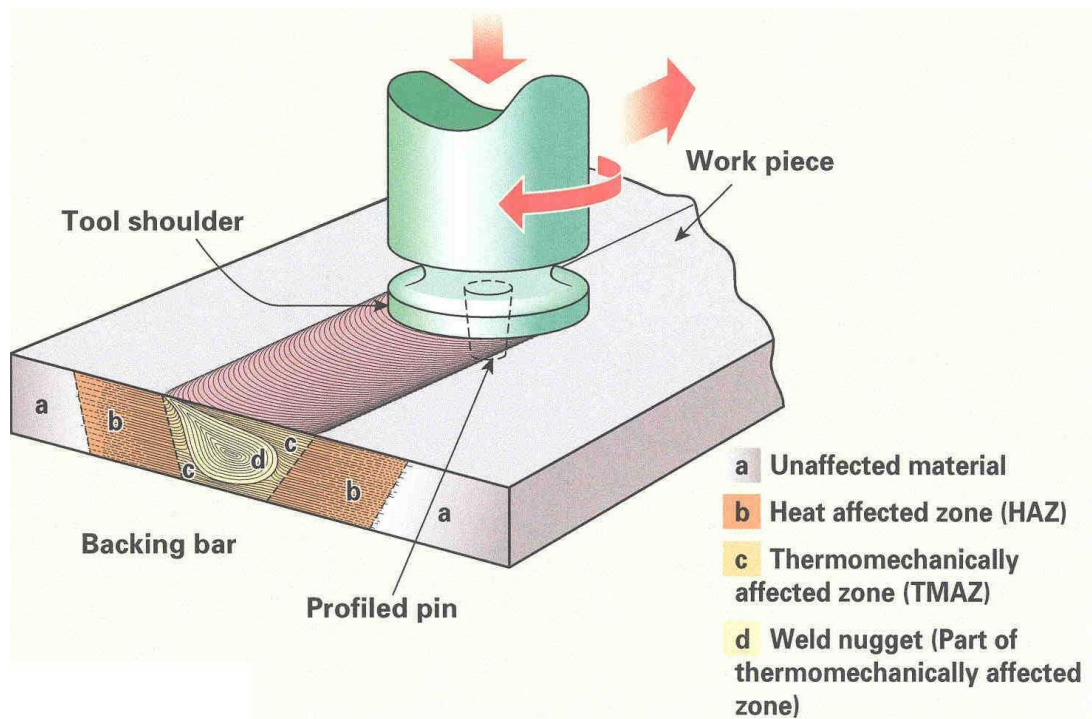
1.5.3 Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (Heat Affected Zone)

Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη βρίσκεται δίπλα στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη και καθορίζεται από τον θερμικό κύκλο, ο οποίος θα καθορίσει σε μεγάλο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Δεν παρατηρείται καθόλου πλαστική παραμόρφωση στη ζώνη αυτή. Η δομή των κόκκων είναι η ίδια με το μέταλλο βάσης αν και σε θερμοκρασίες άνω των 250°C παρατηρείται αλλαγή στη δομή των κατακρημνισμάτων.

1.5.4 Ζώνη Βασικού Μετάλλου (Unaffected Zone)

Η περιοχή αυτή βρίσκεται μακριά από τη ζώνη συγκόλλησης, δεν έχει παραμορφωθεί και δεν επηρεάζεται από τη θερμότητα, γιατί η θερμότητα που αναπτύσσεται στην περιοχή αυτή είναι πολύ χαμηλή.

Τέλος, είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι έρευνες έχουν δείξει ότι η ταχύτητα με την οποία το εργαλείο κινείται κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης επηρεάζει την τελική μικροδομή του υλικού πολύ περισσότερο από την ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται η κεφαλή.



Σχήμα 1.14 : Απεικόνιση των ζωνών στο προς συγκόλληση τεμάχιο [13]

1.6 ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΣΤΟΧΙΕΣ [2] [14] [23]

Κατά τη διαδικασία μιας συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης, εμφανίζονται κυρίως 3 είδη ατελειών: τα κενά, τα υπολείμματα υλικού και οι ρωγμές. Η παρουσία των κενών είναι εύκολα ανιχνεύσιμη, σε αντίθεση με τα δυο άλλα είδη ατελειών που μπορεί να εμφανιστούν. Τα ελαττώματα αυτά, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός εργαλείου FSW. Παράμετροι όπως ο σχεδιασμός του εργαλείου, του περιαυχενίου αλλά και της κεφαλής, το βάθος διείδυσης της κεφαλής στην πλάκα, η κλίση που θα έχει το εργαλείο αλλά και το πάχος των πλακών σχετίζονται με τα ελαττώματα αυτά.

- ΚΕΝΑ-ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΤΥΠΟΥ ΤΟΥΝΕΛ, εμφανίζονται κυρίως στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης, στα όρια μεταξύ της ζώνης ανάδευσης και του βασικού μετάλλου, μέσα στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και είναι πιθανό είτε να φτάνουν μέχρι την επιφάνεια της συγκόλλησης, είτε και όχι. Έχει παρατηρηθεί ότι αυτού του είδους οι ατέλειες, οφείλονται κατά κύριο λόγο στην ανεπαρκή πίεση που ασκεί το περιαυχένιο στην προς συγκόλληση πλάκα καθώς εισέρχεται σε αυτή. Οι ατέλειες τύπου τούνελ, καλύπτουν όλο το μήκος των συγκολλήσεων.
- ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΑ-ΡΩΓΜΕΣ, πρόκειται για μία συχνά εμφανιζόμενη ατέλεια την οποία στη βιβλιογραφία τη συναντάμε με διάφορους όρους όπως, kissing bond, lazy S ή entrapped oxide defect. Οφείλεται στην εμφάνιση ενός ημισυνεχούς στρώματος οξειδίου, που εγκλωβίζεται στη ζώνη συγκόλλησης. Η ατέλεια αυτή, εμφανίζεται είτε λόγω κακής προετοιμασίας του τεμαχίου, είτε λόγω κακής θέσης του εργαλείου, σε συνδυασμό με υπερβολικά μεγάλη ταχύτητα περιστροφής και προώθησης, είτε λόγω ελλιπούς διείδυσης εντός του τεμαχίου. Οι ατέλειες αυτές έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στην αντοχή σε κρούση και σε κόπωση της συγκόλλησης.

1.7 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ [11] [13] [14] [18] [20] [21]

1.7.1 Παραμένουσες Τάσεις

Κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, παρατηρείται πάντα η ύπαρξη σημαντικών παραμενουσών τάσεων, τόσο εφελκυστικών όσο και θλιπτικών. Οι μέγιστες παραμένουσες τάσεις, εμφανίζονται στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη λόγω της πλήρους ανακρυστάλλωσης, με τις μέγιστες θλιπτικές να βρίσκονται κυρίως στην προωθούμενη πλευρά δίπλα από τη ζώνη ανάδευσης.

Όσον αφορά τις διαμήκεις παραμένουσες τάσεις, οι μέγιστες εμφανίζονται στα όρια της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, και είναι θετικές κοντά στη γραμμή συγκόλλησης και αρνητικές όσο απομακρυνόμαστε από αυτή. Οι διαμήκεις παραμένουσες τάσεις αυξάνονται όσο αυξάνεται η περιστροφική ταχύτητα της κεφαλής όμως η κλίση του εργαλείου δεν τις επηρεάζει. Γενικότερα, όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα περιστροφής και η ταχύτητα προώθησης τόσο καλύτερες είναι οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού και τόσο μικρότερες είναι οι παραμένουσες τάσεις.

1.7.2 Σκληρότητα

Σε πειράματα που έγιναν σε αλουμίνια και χάλυβες, η μεγαλύτερη σκληρότητα παρουσιάζεται στη ζώνη ανάδευσης γύρω από τη γραμμή συγκόλλησης. Έξω από αυτή την περιοχή η σκληρότητα μειώνεται όσο προχωράμε στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη και έπειτα στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, για να αυξηθεί κατακόρυφα μόλις εισέλθουμε στην περιοχή του βασικού μετάλλου. Επιπλέον η σκληρότητα στην προωθούμενη πλευρά είναι μεγαλύτερη από την υποχωρούσα.

1.7.3 Δυσθραυστότητα

Όλες σχεδόν οι συγκολλητές κατασκευές παρουσιάζουν κάποια ελαττώματα όπως πορώδες, εγκλείσματα και μικρορωγμές. Για αυτές τις ατέλειες υπάρχουν κάποια όρια που τις καθιστούν αποδεκτές, αλλιώς θα πρέπει οι ατέλειες αυτές να εξαιρεθούν πριν το προϊόν μπει στην αγορά. Σε γενικές γραμμές η FSW μέθοδος δίνει προϊόντα χωρίς ατέλειες, όμως οι κατασκευές ελέγχονται με βάση δύο παραμέτρους, την έναρξη ρωγμών σε ελαστικό φορτίο και την ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής.

Στο πρώτο συνέδριο που πραγματοποιήθηκε το 1999 με θέμα τις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση, έγινε μια προσπάθεια εκτίμησης των επιπτώσεων της FSW στην δυσθραυστότητα του υλικού, κυρίως σε κράματα αλουμινίου. Τα αποτελέσματα ήταν ότι η δυσθραυστότητα αυξάνεται σε σχέση με το μέταλλο βάσης με εξαίρεση ορισμένα κράματα όπως το 2024Al όπου παρατηρήθηκε πολύ μικρή μείωση σε σχέση με το μέταλλο βάσης.

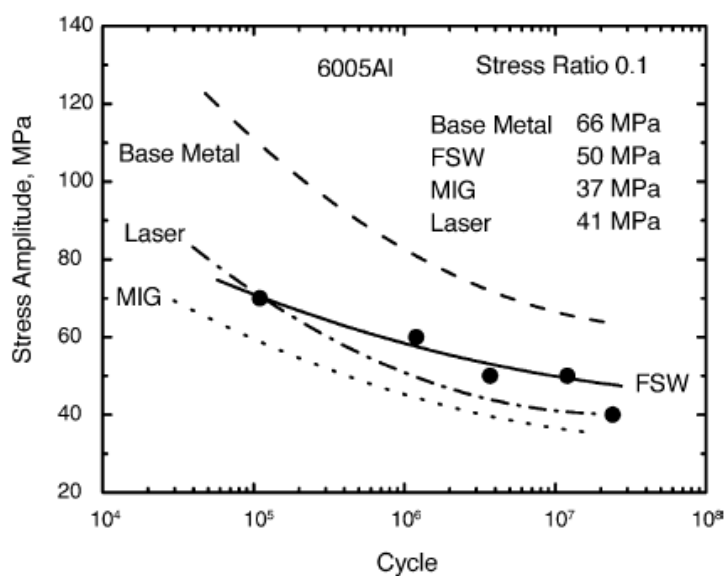
Επιπλέον, αυξημένη δυσθραυστότητα παρατηρήθηκε εντός της ζώνης ανάδευσης συγκριτικά με την θερμομηχανικά και θερμικά επηρεασμένη ζώνη χωρίς αυτό να είναι απόλυτο για όλα τα υλικά. Μέσα από τις τιμές που λαμβάνουν οι παράμετροι που αναφέρθηκαν πιο πάνω, δηλαδή η έναρξη ρωγμών και η ταχύτητα διάδοσής τους, μπορεί να αποδειχθεί ότι η δυσθραυστότητα των συγκολλήσεων αυξάνεται σε σχέση με το βασικό μέταλλο. Τέλος, έρευνες υποστηρίζουν ότι η αύξηση της

δυσθραυστότητας οφείλεται σε πολύ μεγάλο βαθμό στη διαδικασία της ανάδευσης και στο γεγονός ότι μαλακώνει το υλικό.

1.7.4 Αντοχή σε Κόπωση

Πολλές μελέτες έχουν γίνει γύρω από την αντοχή σε κόπωση των συγκολλήσεων διατριβής με ανάδευση, κυρίως σε κράματα αλουμινίου, και οι περισσότερες έχουν καταλήξει στα εξής πέντε συμπεράσματα. Πρώτον, η αντοχή σε κόπωση στις FSW συγκολλήσεις στους 10^7 κύκλους είναι μικρότερη από του βασικού μετάλλου και άρα οι συγκολλήσεις είναι ευαίσθητες στην έναρξη ρωγμών από κόπωση. Επιπλέον οι Bussu και Irving, έχουν αποδείξει ότι οι εγκάρσιες συγκολλήσεις έχουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τις συγκολλήσεις που έγιναν κατά το διάμηκες. Παρόλα αυτά η αντοχή σε κόπωση αυτών των συγκολλήσεων εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους όπως MIG και LASER (Σχήμα 1.15).

Δεύτερον, η επιφάνεια της συγκόλλησης επηρεάζει την αντοχή σε κόπωση και ο Hogri έχει αναφέρει ότι η αντοχή σε κόπωση μειώνεται όσο αυξάνεται η αναλογία ταχύτητα μεταφοράς/ταχύτητα περιστροφής. Όμως όσο η αναλογία αυτή παραμένει σταθερή, η ταχύτητα περιστροφής δεν επηρεάζει την αντοχή. Τρίτον, εάν μετά τη συγκόλληση ακολουθήσει ελαφριά στίλβωση του τεμαχίου (low plasticity burnishing, LPB), τότε αυξάνεται η αντοχή σε κόπωση. Τέταρτον, οι αρχικές θλιπτικές παραμένουσες τάσεις καθώς και το καλό τελικό φινίρισμα οδηγούν σε αύξηση της αντοχής. Πέμπτον, η αντοχή σε κόπωση μιας FSW συγκόλλησης στον αέρα είναι μικρότερη από του βασικού μετάλλου, όμως σε διαβρωτικό περιβάλλον παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά όπου και στις δύο περιπτώσεις τα προϊόντα της διάβρωσης είναι πολύ πιθανό να οδηγήσουν σε ρωγμάτωση λόγω κόπωσης. (fatigue crack).



Σχήμα 1.15: Συγκριτικό διάγραμμα για την αντοχή σε κόπωση διαφορετικών μεθόδων συγκόλλησης [11]

1.7.5 Συμπεριφορά σε Διάβρωση

Λόγω των πολλών διαφορετικών ζωνών που παρουσιάζονται εντός της μικροδομής του υλικού, είναι αναμενόμενο ότι θα υπάρχει και διαφορετική συμπεριφορά στη διάβρωση ανάλογα με τη ζώνη. Σε πρακτικές εφαρμογές, είναι σημαντικό να αντιληφθούμε όχι μόνο τη συμπεριφορά σε διάβρωση αλλά και το μηχανισμό της διάβρωσης, ανάλογα με το υλικό και την ανάλογη ζώνη εντός της μικροδομής.

Οι πρώτοι που ασχολήθηκαν με το θέμα αυτό ήταν οι Frankel και Xia, και συγκεκριμένα μελέτησαν τη διάβρωση με βελονισμούς (pitting corrosion) και τη διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (stress corrosion cracking) σε συγκολλήσεις FSW 5454Al και σύγκριναν τα αποτελέσματα τόσο με το βασικό μέταλλο όσο και με συγκολλήσεις GTAW του ίδιου υλικού.

Κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα. Πρώτον, βελονισμοί εμφανίστηκαν μόνο στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη μιας FSW συγκόλλησης ενώ εμφανίστηκαν σε μεγάλη έκταση σε ολόκληρη τη ζώνη τήξης συγκολλήσεων GTAW. Δεύτερον, οι FSW συγκολλήσεις έδειξαν μεγαλύτερη αντίσταση στους βελονισμούς από το ίδιο το βασικό μέταλλο αλλά και από τις GTAW συγκολλήσεις. Τρίτον, κατά τα πειράματα διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση (SCC) το βασικό μέταλλο και οι FSW συγκολλήσεις έμειναν ανεπηρέαστα σε αντίθεση με τις GTAW συγκολλήσεις που υπέστησαν αυξημένη ρωγμάτωση υπό τις ίδιες συνθήκες. Η τόσο καλή αντοχή των FSW συγκολλήσεων σε διάβρωση με βελονισμούς, αλλά και σε SCC έχουν πλέον επιβεβαιωθεί από όλους τους μελετητές.

1.7.6 Αντοχή και Ολκιμότητα

Πρόσφατες μελέτες των Strombeck και Mishra, προσπάθησαν να δείξουν τη συμπεριφορά των FSW συγκολλήσεων υπό διαφορετικές συνθήκες εντατικής φόρτισης σε αλουμίνια 7075Al. Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν είναι τα εξής, πρώτον, η αντοχή εντός της ζώνης ανάδευσης είναι σταθερή με το όριο διαρροής να είναι ίσο με το 80% του ορίου διαρροής του βασικού μετάλλου, ενώ η πραγματική αντοχή να είναι ίση με το 100% του βασικού μετάλλου. Βελτιωμένη είναι επίσης και η ολκιμότητα στη ζώνη αυτή, πράγμα που οφείλεται στη λεπτόκοκκη δομή της ζώνης. Δεύτερον, όσο προχωράμε από τη ζώνη ανάδευσης προς τη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη, η αντοχή παραμένει η ίδια σε αντίθεση με την ολκιμότητα που αρχίζει να μειώνεται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης που έχει υποστεί η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη. Τρίτον, η αντοχή μειώνεται εντός της θερμικά επηρεασμένης ζώνης και μπορεί να φτάσει μέχρι και 60% του βασικού μετάλλου. Παρόλαυτα, έκπληξη αποτελεί το γεγονός ότι η μείωση της αντοχής δεν συνοδεύεται από αύξηση της ολκιμότητας. Τέλος, η αντοχή και η ολκιμότητα είναι διαφορετικές στην υποχωρούσα και στην προωθούμενη πλευρά, όπου η υποχωρούσα έχει μικρότερη αντοχή και αυτό δικαιολογεί τον λόγο που η θραύση γίνεται πάντα στην υποχωρούσα πλευρά.

Επιπλέον, η αντοχή και η ολκιμότητα κατά το εγκάρσιο επίπεδο είναι σημαντικά μικρότερες από το διάμηκες. Με αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας του εργαλείου βελτιώνονται τόσο η αντοχή όσο και η ολκιμότητα και μεγαλύτερη αύξηση αντοχής παρατηρείται στα λεπτά τεμάχια.

1.8 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ [13] [22]

Οι χαμηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την εφαρμογή της μεθόδου και ο σχετικά μικρός θερμικός κύκλος, οδηγούν σε συγκολλήσεις:

- Με βελτιωμένη αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη, κάμψη αλλά και κόπωση.
- Χωρίς πορώδες.
- Χωρίς στρεβλώσεις ή συρρικνώσεις.
- Χωρίς οξειδία στη συγκόλληση.
- Λιγότερο επιρρεπή στη διάβρωση.
- Με βελτιωμένη εμφάνιση ραφής.
- Μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης.
- Δεν χρησιμοποιεί καταναλισκόμενα στοιχεία, οπότε δεν υπάρχει κόστος αναλώσιμων.
- Δεν χρησιμοποιεί αέρα προστασίας (εξαιρέση το τιτάνιο και κάποιοι χάλυβες).
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου που ανήκουν σε διαφορετική σειρά.
- Πλήρως αυτοματοποιημένη μέθοδος

1.9 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ [13] [22]

Θα πρέπει στις προς συγκόλληση πλάκες να υπάρχει ισχυρή συγκράτηση, κάτι το οποίο μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες σε επίπεδο παραγωγής, όπου οι παράγοντες του χρόνου και της ασφάλειας παίζουν σημαντικό ρόλο.

Επιπλέον, συμβαίνει αυξημένη φθορά του εργαλείου συγκόλλησης κάτι που αφενός περιορίζει το εύρος των προς συγκόλληση υλικών και αφετέρου οδηγεί στη συχνή αντικατάσταση του εργαλείου με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους.

Τέλος, είναι η ύπαρξη μιας χαρακτηριστικής οπής στο τέλος της συγκόλλησης στο σημείο από το οποίο εξέρχεται το εργαλείο στην οποία γίνεται συνήθως λείανση.

Το γεγονός ότι πρόκειται για μια καινούργια μέθοδο, εξηγεί την έλλειψη του απαραίτητου εξοπλισμού, κάτι που την καθιστά μια λιγότερο ευέλικτη διαδικασία. Ωστόσο, προβλήματα όπως τα παραπάνω καθώς και άλλα, όπως για παράδειγμα το υψηλό κόστος του ως τώρα υπάρχοντος εξοπλισμού, ενδέχεται να ξεπεραστούν, διότι η μέθοδος FSW γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής.

1.10 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΑΝΟΜΟΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ ΤΗΝ FSW [9] [14]

Η ποιότητα των συγκολλήσεων διαφορετικών μετάλλων, καθορίζεται από την τελική αντοχή σε εφελκυσμό και τη σκληρότητα της συγκόλλησης. Έρευνες έχουν δείξει ότι ο καλύτερος συνδυασμός για να επιτύχουμε την καλύτερη ποιότητα είναι η περιστροφή του εργαλείου στις 550 rpm και η ταχύτητα προώθησης στα 0.9 mm/sec. Η τελική σκληρότητα αποτελεί το 90% του μετάλλου βάσης ενώ η τελική αντοχή το 70% του μετάλλου βάσης. Επιπλέον, όσο αυξάνεται η ταχύτητα προώθησης από 0.9 σε 1.2-1.5 mm/sec η αντοχή σε εφελκυσμό αυξάνεται στο 75% του βασικού μετάλλου αλλά η σκληρότητα μπορεί να μειωθεί μέχρι και στο 60% του μετάλλου βάσης.

Οι Li και Shen, μετά από δοκιμές συγκόλλησης διαφορετικών κραμάτων αλουμινίου κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αλλάζοντας τη γωνία επαφής των δύο τεμαχίων, βελτιώνεται σημαντικά ο τρόπος προώθησης των δυο υλικών και δημιουργείται έτσι μια πιο ποιοτική συγκόλληση. Τέλος, παρατήρησαν ότι οι συγκολλήσεις που έγιναν με κυλινδρική κεφαλή έδιναν τα καλύτερα αποτελέσματα. Ο Palanivel πρόσθεσε ότι οι κεφαλές με επίπεδη άκρη δεν έχουν αρνητικές επιπτώσεις σε αυτές τις συγκολλήσεις σε αντίθεση με τις κωνικές κεφαλές που προκαλούν ατέλειες τύπου τούνελ στο κάτω μέρος της συγκόλλησης. Επιπλέον, καθόρισε τρεις διαφορετικές ζώνες, τη ζώνη που δεν έχει γίνει ανάμιξη, την περιοχή μηχανικής ανάμιξης και την περιοχή ανάμιξης με ροή υλικού. Από την άλλη ο Da Silva δήλωσε σαφώς, ότι παρατηρούνται οι τυπικές δομές της μικροδομής, ζώνη ανάδευσης, θερμομηχανικά και θερμικά επηρεασμένη ζώνη, και μάλιστα παρατηρείται απότομη μετάβαση από τη ζώνη ανάδευσης στις άλλες δύο, κυρίως στην προωθούμενη πλευρά σε αντίθεση με την υποχωρούσα πλευρά όπου η μετάβαση γίνεται σταδιακά.

Άλλες μελέτες, έδειξαν παραμένουσες τάσεις εντός του υλικού καθώς και λεπτόκοκκη τελική μικροδομή που οφείλεται στην ανακρυστάλλωση που υφίσταται το υλικό και του προσδίδει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Η τελική μικροδομή επηρεάζεται σχεδόν εξ ολοκλήρου από το υλικό που βρίσκεται στην υποχωρούσα πλευρά, αυτό σημαίνει ότι το υλικό με την μεγαλύτερη αντοχή θα πρέπει να τοποθετείται σε αυτή τη πλευρά.

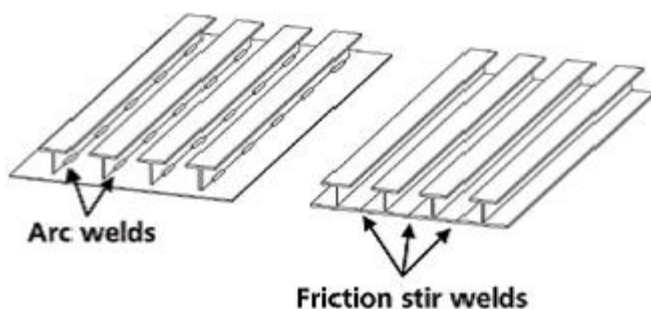
1.11 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ FSW [7] [12]

Ο τομέας της ναυπηγικής είναι από τους πρώτους που υιοθέτησε τη μέθοδο συγκόλλησης F.S.W. για διάφορες εφαρμογές. Αργότερα άρχισε να εφαρμόζεται και σε βιομηχανίες υψηλής τεχνολογίας, όπως η διαστημική και η αεροναυπηγική, λόγω της μεγάλης αξιοπιστίας της. Στον τομέα της ναυπηγικής η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για τις εξής εφαρμογές :

- Ελάσματα για τα καταστρώματα, πλευρές, φρακτές και έδρες.
- Γάστρα και υπερκατασκευές.
- Πλατφόρμες προσγείωσης ελικοπτέρων.
- Παράκτιες εγκαταστάσεις.
- Θαλάσσιες κατασκευές.
- Εγκαταστάσεις ψύξης.
- Κατάρτια στα ιστιοπλοϊκά πλοία.

Η παραδοσιακή μέθοδος για την κατασκευή φρακτών, καταστρωμάτων και γάστρας είναι η συγκόλληση τόξου η οποία είναι φαινομενικά η βέλτιστη καθώς μειώνει τον αριθμό συγκολλήσεων πλήρους διείδυσης, το οποίο οδηγεί στη μείωση του κόστους εργασίας και του κόστους λόγω παραμορφώσεων. Ωστόσο, δεδομένου ότι η FSW παράγει δραματικά χαμηλότερη παραμόρφωση, στις περισσότερες περιπτώσεις συγκολλήσεων και δεδομένου ότι η διαδικασία είναι πλήρως μηχανοποιημένη, το κόστος εργασίας είναι ελαχιστοποιημένο. Δεδομένου ότι η παραμόρφωση είναι χαμηλή, η συγκόλληση για τη δημιουργία των πάνελ δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί επί του πλοίου, όταν είναι υπό κατασκευή αλλά μπορούν να προστεθούν αργότερα στην κατασκευή ως προκατασκευασμένα συναρμολογήματα.

Η χρησιμότητα των προκατασκευασμένων πάνελ δεν πρέπει να υποτιμάται καθώς τα ναυπηγεία συχνά δυσκολεύονται να έχουν προσωπικό για τις συγκολλήσεις αυτές λόγω της ικανότητας που απαιτείται για να κάνει κάποιος υψηλής ποιότητας συγκολλήσεις με το χέρι. Αν όμως τα πάνελ μπορούν να αγοραστούν προκατασκευασμένα από μια αυτοματοποιημένη μηχανή τότε ο αριθμός των χειροκίνητων συγκολλήσεων μειώνεται σημαντικά. Αυτό μειώνει το κόστος εργασίας, μειώνει τις ανάγκες σε προσωπικό, και εάν σχεδιαστεί σωστά, μειώνει το χρόνο που χρειάζεται ένα πλοίο για να κατασκευαστεί. Επιπλέον, μειώνονται τα αναλώσιμα και έχουμε σαφώς βελτιωμένα πάνελ. Παράλληλα, λόγω της μείωσης των συγκολλήσεων τόξου επιτυγχάνονται και λιγότερες εκπομπές αερίων εντός του ναυπηγείου. Τέλος, δεδομένου ότι η FSW επιτυγχάνεται χωρίς την προσθήκη υλικού, υπάρχει η δυνατότητα για σημαντικό όφελος σε συγκολλήσεις χαλύβων υψηλής αντοχής, όπου δεν υπάρχουν σήμερα υλικά που να ταιριάζουν για πλήρωση, ή η αγορά τους είναι απαγορευτικά δαπανηρή.



Σχήμα 1.16 Έλασμα πλευράς με τα ενισχυτικά για τις δύο μεθόδους συγκόλλησης.[7]

Βιβλιογραφία 1^{ου} κεφαλαίου

1. A.De, H. K. D. H. Bhadeshia and T. DebRoy. Friction Stir Welding of Mild Steel -Tool Durability and Steel Microstructure. Indian Institute of Technology Bombay, Cambridge University, The Pennsylvania State University.
2. A. Oosterkamp, L. Djapic Oosterkamp and A. Nordeide. 'Kissing Bond' Phenomena in Solid-State Welds of Aluminum Alloys. Supplement to the welding journal, August 2004. Sponsored by the American Welding Society and the Welding Research Council.
3. Ákos Meilinger, Imre Török. The importance of friction stir welding tool. University of Miskolc, Department of Mechanical Technology. Production Processes and Systems, vol. 6. (2013).
4. Anthony P. Reynolds, Fundamental Study of Material Flow in Friction Stir Welds. University of South Carolina, 1999
5. Arakere, Ajay Prasad. Computational modeling of the friction stir welding (FSW) process and of the performance of FSW joints (2013). All Theses. Paper 1583. Clemson University
6. H.N.B. Schmidt, T.L. Dickerson, J.H. Hattel. Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3. May 2005
7. Kevin J. Colligan. Friction Stir Welding For Ship Construction. Concurrent Technologies Corporation
8. K. Colligan, Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminum. Supplement to the welding journal, July 1999. Sponsored by the American Welding Society and the Welding Research Council.
9. Mukuna P. Mubiayi and Esther T.Akinlabi. Friction stir welding of dissimilar materials: an overview. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering Vol:7, No:4, 2013
10. R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshia and T. DebRoy. Review: friction stir welding tools.
11. R.S. Mishraa, Z.Y. Ma. Friction stir welding and processing. Center for Friction Stir Processing, Department of Materials Science and Engineering, University of Missouri, Rolla, MO 65409, USA bInstitute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China. August 2005

12. Stephan Kallee, TWI, Cambridge,UK. Application of friction stir welding in the shipbuilding industry. Presented at Lightweight Construction - Latest Developments
The Royal Institution of Naval Architects , London, 24 & 25 Feb 2000.
13. Stephen Cater, Friction stir welding of steel: An update for the SMEA. TWI Technology Centre, Yorkshire, England, UK
14. Thaiping Chen, Wei-Bang Lin. A prime study on FSW joint of dissimilar metals. Proceedings of the XIth International Congress and Exposition, June 2-5, 2008 Orlando, Florida USA.
15. W.M. Thomas, E.D. Nicholas and S.D. Smith, TWI Ltd. Friction stir welding - tool developments. Paper presented at the Aluminum Joining Symposium during the 2001 TMS Annual Meeting, 11-15 February 2001, New Orleans, Louisiana, USA.
16. W.M. Thomas, P.L. Threadgill and E.D. Nicholas. The feasibility of friction stir welding steel. Slightly modified version published in Science and Technology of Welding and Joining, 1999.
17. Y. N. Zhang, X. Cao*, S. Larose and P. Wanjara. Review of tools for friction stir welding and processing. National Research Council Canada, Institute of Aerospace Research, Aerospace Manufacturing Technology Center, 5145 Decelles Ave., Montreal, PQ H3T 2B2, Canada. 2012.
18. Xiacong He, Fengshou Gu, Andrew Ball. A review of numerical analysis of friction stir welding. Innovative Manufacturing Research Centre, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, PR China. Centre for Efficiency and Performance Engineering, University of Huddersfield, Queensgate, Huddersfield HD1 3DH, UK.
19. Vinayak Malika, Sanjeev N Kb, H. Suresh Hebbarb, Satish V. Kailasa. Investigations on the Effect of Various Tool Pin Profiles in Friction Stir Welding Using Finite Element Simulations. 12th Global congress on manufacturing and management.
20. Paul J.Konkol, James A. Mathers, Richard Johnson, Joseph R. Pickens. Friction Strir Welding of HSLA-65 Steel for Shipbuilding
21. Athanasios Toumpis, Alexander Galloway. Stephen Cater, Norman McPherson. Development of a Process envelope for friction stir welding of DH36 steel-A step change. December 2013.

22. Δημήτρης Ι. Παντελής, Διευθυντής Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση όμοιων και ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου. Παρουσίαση SNAME, Technical meeting. May 2014

23. Διονύσιος Ν Καλογερόπουλος. Μελέτη μεθοδολογίας ελέγχου και μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση κράματος αλουμινίου 5083-H111

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΧΑΛΥΒΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ, (High Strength Steel, HSS)

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ [5]

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής πρωτοκατασκευάστηκαν στις αρχές του 1900 όπου πλάκες θερμής εξέλασης κατασκευάστηκαν για να έχουν ιδιότητες υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό. Σε εκείνη την εποχή, και λόγω των τότε μεθόδων κατασκευής, χαρακτηριστικά όπως καλή συγκολλησιμότητα, εύκολη διαμόρφωση και δυσθραυστότητα ήταν μικρής σημασίας. Έτσι, για την επίτευξη της αντοχής σε εφελκυσμό χρησιμοποιούσαν απλά αυξημένες ποσότητες άνθρακα (0.3%). Η πρώτη απόπειρα αλλαγής αυτού του τρόπου κατασκευής έγινε το 1934, όπου διατήρησαν το υψηλό ποσοστό του άνθρακα, περίπου στο 0.27% αλλά αύξησαν το μαγνήσιο στο 1.5% και προέκυψε ένας χάλυβας με όριο διαρροής 350 MPa.

Κατά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο και με την εισαγωγή των συγκολλήσεων στις κατασκευές, ήταν απαραίτητη η χρήση καινούριων ιδεών γιατί η τόσο αυξημένη περιεκτικότητα σε άνθρακα καθιστούσε πολύ δύσκολη τη συγκόλληση ανάμεσα σε δυο χάλυβες υψηλής αντοχής. Παράλληλα, αποδείχτηκε ότι το υψηλό όριο διαρροής είναι σημαντικότερο από την υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και εκεί έπρεπε να δοθεί περισσότερη προσοχή.

Στις αρχές του 1950, μέσα από πειράματα αποδείχτηκε η ευεργετική επίδραση της εκλέπτυνσης των φεριτικών κόκκων στο όριο διαρροής και στην ολκιμότητα του υλικού ακόμα και σε θερμοκρασίες ψαθυρής θραύσης. Η εκλέπτυνση αυτή επετεύχθη με τη χρήση κατακρημνισμάτων αλουμινίου. Αυτοί οι χάλυβες είχαν όριο διαρροής 75-125 MPa και σχεδόν καθόλου επιπτώσεις στην αλλαγή θερμοκρασιών. Αργότερα, χρησιμοποιήθηκαν προσθήκες όπως νιόβιο και βανάδιο που αυξάνουν τη σκληρότητα και το όριο διαρροής.

Η ανάγκη για περεταίρω λεπτόκοκκη δομή και μικρότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα, οδήγησε στη μέθοδο ελεγχόμενης απόψυξης, όπου η ελεγχόμενη αργή απόψυξη μέχρι μια χαμηλή θερμοκρασία οδήγησε σε πολύ λεπτόκοκκη δομή ωστενίτη και φερρίτη. Το όριο διαρροής αυξήθηκε σε 450-525 MPa.

Παράλληλα, μια προσέγγιση έγινε και μέσω της βαφής και επαναφοράς του χάλυβα κάτι που έδειξε την αύξηση της αντίστασης σε ψαθυρή θραύση και τη μείωση του ορίου διαρροής και της δυσθραυστότητας. Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί, αναπτύχθηκαν οι χάλυβες υψηλής αντοχής χαμηλής κραμάτωσης (HSLA, High Strength Low Alloy), τους οποίους θα αναπτύξουμε εκτενώς παρακάτω.

2.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΗSS [6]

Ο ΗSS θεωρείται νέας γενιάς υλικό και έχει σαφώς βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με τους κοινούς χάλυβες. Είναι διαθέσιμος πάνω από τρεις δεκαετίες για την κατασκευή γεφυρών, κτιρίων, υπεράκτιων κατασκευών, γερανών και άλλα. Ο σημαντικότερος λόγος που χρησιμοποιούνται οι χάλυβες ΗSS είναι ότι λόγω της αυξημένης αντοχής χρησιμοποιούνται σε πολύ μειωμένα πάχη έτσι γίνεται τεράστια εξοικονόμηση βάρους στις κατασκευές η οποία μπορεί να φτάσει μέχρι και το 60%. Εκτός από τους ΗSS, όπως είναι οι S460-S700 υπάρχουν και οι VHSS (very high strength steel) όπως ο S1100 που έχει όριο διαρροής μέχρι και 1100 MPa.

Αυτοί οι χάλυβες πρέπει να χαρακτηρίζονται από υψηλή σκληρότητα και ολκιμότητα, για να αποφεύγουν την ψαθυρή θραύση, από καλή συγκολλησιμότητα και φυσικά από μεγάλη αντοχή. Βέβαια, ο συνδυασμός όλων των παραπάνω είναι συχνά πολύ δύσκολος να επιτευχθεί γιατί η αύξηση του ενός από αυτά θα συνοδεύεται από τη μείωση κάποιου άλλου, για παράδειγμα η αύξηση του άνθρακα θα αυξήσει την αντοχή αλλά θα μειώσει τη συγκολλησιμότητα.

Εντούτοις σήμερα, υπάρχει μια μεγάλη γκάμα χαλύβων υψηλής αντοχής όπου ο καθένας χαρακτηρίζεται με κάποιες από τις παραπάνω ιδιότητες και αυτό επιτυγχάνεται με την τροποποίηση της χημικής σύστασης αλλά και της μεθόδου κατεργασίας. Παρόλαυτα, το βασικότερο πρόβλημα είναι το υψηλό κόστος αυτών των χαλύβων.

Σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα οι ΗSS μπορούν να κατασκευαστούν με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι μέσω βαφής και επαναφοράς όπου το ελάχιστο όριο διαρροής είναι περίπου 1100 MPa, ενώ ο δεύτερος τρόπος είναι μέσω θερμομηχανικά ελεγχόμενης επεξεργασίας (TMPC) όπου το ελάχιστο όριο διαρροής είναι περίπου 500 MPa και χαρακτηρίζονται από εξαιρετική συγκολλησιμότητα.

Οι χάλυβες από βαφή και επαναφορά με κατώτατο όριο διαρροής 960 MPa έχουν τυποποιηθεί από το πρότυπο EN10025 αλλά ακόμα οι κατασκευές στην Ευρώπη περιορίζονται στη χρήση χαλύβων με ελάχιστο όριο διαρροή 690 MPa, ενώ οι VHSS χρησιμοποιούνται προς το παρόν μόνο για κατασκευές βιομηχανικού εξοπλισμού.

Τέλος πριν από τη συγκόλληση αυτών των χαλύβων, απαιτείται προθέρμανση στους 100-120 °C και ίσως και κάποια επεξεργασία αποκατάστασης (post-weld treatment) για να αποφευχθεί η ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου. Η προθέρμανση σε τεμάχια πάχους μέχρι 30mm δεν είναι απαραίτητη.

2.3 ΕΙΔΗ ΧΑΛΥΒΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ [1] [2] [4] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [15]

Ανάλογα με τις μηχανικές ιδιότητες και τη χημική σύσταση οι χάλυβες αυτοί ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες. Ανεξάρτητα όμως από την υποκατηγορία πρέπει όλοι να συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές που προβλέπονται από τα διεθνή πρότυπα ποιότητας (American (ASTM), European (EN), Japanese (JIS), etc). Βασικές κατηγορίες είναι αρχικά οι χάλυβες υψηλής αντοχής χαμηλής κραμάτωσης (HSLA) που θα αναπτυχθούν εκτενέστερα παρακάτω. Άλλη κατηγορία είναι οι High performance steel (HPS) που αποδεδειγμένα μειώνουν το κόστος της κατασκευής έως και 18% ενώ μειώνουν και το βάρος περίπου κατά 28%. Παράλληλα, έχουν εξαιρετική αντοχή σε κόπωση και διάβρωση. Ακολουθούν οι high strength weathering steel (W) οι οποίοι έχουν την καλύτερη αντοχή και ατμοσφαιρική διάβρωση και τέλος οι Bridge high performance steel (BHS) που κατασκευάστηκαν πρόσφατα στην Ιαπωνία και προορίζονται αποκλειστικά για την κατασκευή γεφυρών γιατί διαθέτουν τις προδιαγραφές τόσο σε μηχανικές ιδιότητες όσο και αντίσταση στη διάβρωση που απαιτούν οι κατασκευές αυτές.

2.3.1 Χάλυβας AH36 [1] [8] [9]

Ο AH36 αποτελεί μέρος των χαλύβων υψηλής αντοχής (HSS) και είναι ο κατεξοχήν χάλυβας της ναυπηγικής. Έχει τυποποιηθεί από τον ABS (American Bureau of Shipping) το 1984 αλλά και από τη Διεθνή Ομοσπονδία Νηογνωμόνων (IACS) το 1997 με βάση το πρότυπο A131M της ASTM.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του AH36 είναι ότι έχει ελάχιστο όριο διαρροής τα 353 MPa εξού και το 36kp/mm^2 , στους 0 °C απαιτείται μια ελάχιστη ενέργεια στα 34.3J για να υποστεί θραύση με βάση τη δοκιμή Charpy V, ενώ η μέγιστη σκληρότητα του φτάνει τα 183 Vickers.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του AH36 είναι ότι είναι ημικαθησυχασμένος ή πλήρως καθησυχασμένος χάλυβας (semi-killed or killed steel). Πλήρως καθησυχασμένος χάλυβας σημαίνει ότι έχει υποστεί πλήρη αποξείδωση πριν από τη χύτευση, με αποτέλεσμα η στερεοποίηση να γίνεται χωρίς καμία έκλυση αερίου με αποτέλεσμα την αποφυγή πορώδους επιφάνειας. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως για πάχη μικρότερα από 12.5mm. Αντίθετα, αν το πάχος είναι μεγαλύτερο προτιμάται η μέθοδος όπου γίνεται μερική αποξείδωση του χάλυβα, έτσι το μονοξείδιο του άνθρακα δημιουργεί πορώδες σε ολόκληρο το μήκος του υλικό. Το πόρωδες αυτό αυξάνει το όριο διαρροής κατά 90% του βάρους. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι:

- εφαρμόζεται σε χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα μεταξύ 0.15-0.25% γιατί κατασκευάζονται με εξέλαση και άρα το πορώδες μειώνεται.
- Ο στόχος της είναι η κατασκευή επιφάνειας χωρίς μικροδιακενώσεις.

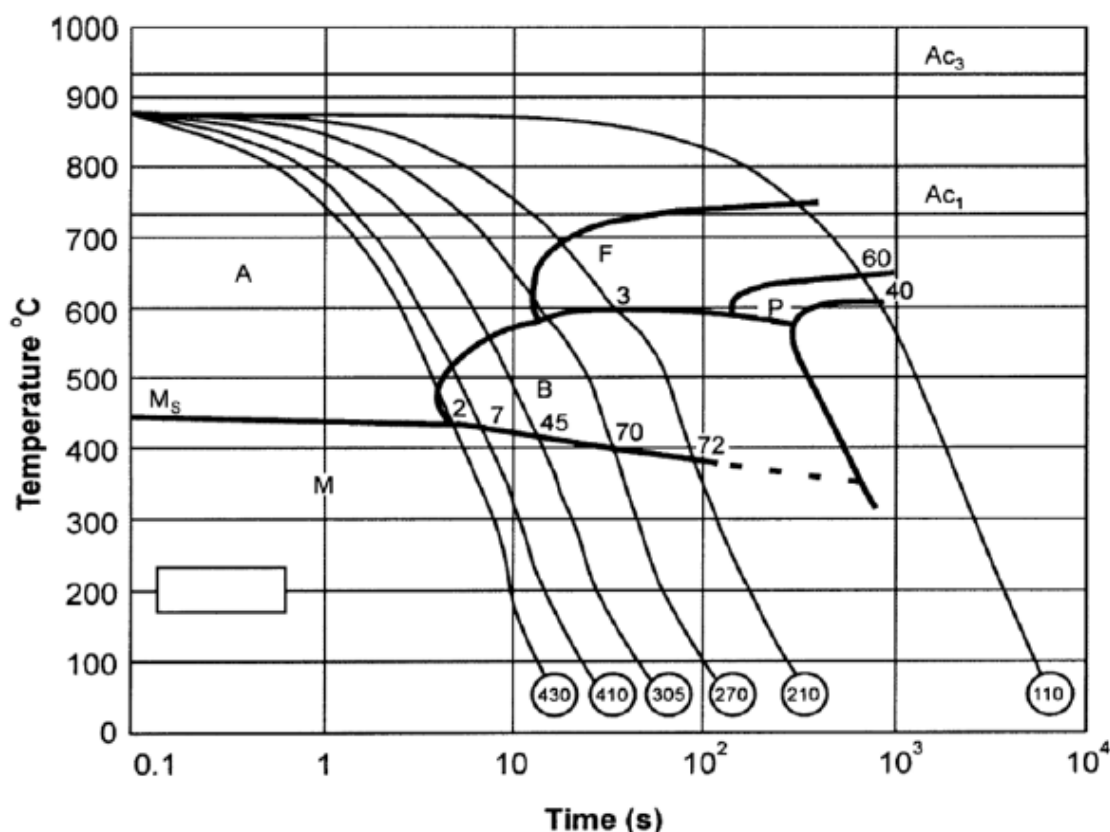
- Εφαρμόζεται κυρίως σε αυξημένα πάχη.
- Κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης ενός ημικαθυσυχασμένου χάλυβα υπάρχει έκλυση αερίου η οποία όμως αντισταθμίζεται από τη συρρίκνωση που συνοδεύεται κατά τη στερεοποίηση.

Επιπλέον, για πάχος ελάσματος έως 12.5 mm η ελάχιστη περιεκτικότητα σε Mn μπορεί να φτάσει το 0.70% κ.β., ενώ για τέτοια πάχη και για ημικαθυσυχασμένο χάλυβα, η κατώτερη περιεκτικότητα σε Si πρέπει να είναι χαμηλότερη του 0.10% κ.β. Στον πίνακα που ακολουθεί αναλύεται η χημική σύσταση ενός AH36 καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες που προκύπτουν για τη συγκεκριμένη σύσταση. Γενικότερα οι περιεκτικότητες κυμαίνονται κοντά στις τιμές που δίνονται στον πίνακα. [9]
Τέλος, όταν χρησιμοποιείται ένα εκ των Al, Nb και V πρέπει να ικανοποιείται η ελάχιστη περιεκτικότητα που έχει οριστεί για το καθένα, ενώ όταν γίνεται συνδυασμός, το συνολικό άθροισμα της περιεκτικότητας σε Al, Nb και V δεν πρέπει να ξεπερνάει το 0.12% κ.β.

Χημική Σύσταση, %								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Al	Cu
0.179	1.56	0.441	0.016	0.006	0.03	0.18	0.053	0.15 3
Ti	N	Nb	V	Mo	Ca	Sn	B	
0.003	0.007	0.003	0.005	0.054	0.000 2	0.002	0.0002	
Μηχανικές Ιδιότητες ως προς το διάμηκες επίπεδο								
Όριο διαρροής MPa	Αντοχή σε εφελκυσμό MPa							
380.6	590.9							
Μηχανικές Ιδιότητες ως προς το εγκάρσιο επίπεδο								
Όριο διαρροής MPa	Αντοχή σε εφελκυσμό MPa	Επιμήκνωση 2.5 in %	Δοκιμές Charpy V-notch (TS), J			ASTM Μέγεθος κόκκων No.*1	Πάχος δοκιμίου	
			-25°C	0°C	25°C			
322.2	621.1	19.7	9.5	16.6	35.3	5.7	25.4	

Επιπλέον, όπως φαίνεται και στον πίνακα το μέγεθος των κόκκων είναι κατά μέσο όρο κοντά στο 5.7 και είναι γνωστή η σχέση του μεγέθους των κόκκων με τη σκληρότητα του υλικού. Οι κόκκοι στον AH36 είναι κυρίως ισοαξονικοί και δίνουν φερριτική, περλιτική και μπαινιτική δομή. Παρατηρούνται επίσης σχετικά μικρές διαφορές όσον αφορά το όριο διαρροής και την αντοχή σε εφελκυσμό στο διάμηκες και στο εγκάρσιο επίπεδο.

Τέλος, ακολουθεί το διάγραμμα CCT για τον AH36 που όπως αναφέρθηκε πιο πάνω καθορίζει τη δομή του υλικού ανάλογα με τα κραματικά στοιχεία και το ρυθμό απόψυξης. (Σχήμα 2.1)



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα CCT για τον AH36 [2]

2.3.2 Χάλυβες υψηλής αντοχής χαμηλής κραμάτωσης (HSLA) [1] [4] [2] [7] [11][12]

Οι χάλυβες αυτοί (High strength low alloy, HSLA) λέγονται αλλιώς και μικροκραματωμένοι χάλυβες και είναι μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες χαλύβων αφού αποτελούν το 12% της παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα. Οι HSLA περιέχουν πολύ μικρά ποσοστά από διάφορα κραματικά στοιχεία τα οποία ποσοστά δεν είναι αυστηρώς καθορισμένα αλλά αλλάζουν ανάλογα με τις μηχανικές ιδιότητες που πρέπει να έχει το υλικό. Πάντα όμως περιέχουν από 0.07-0.12% άνθρακα, περίπου 2% μαγνήσιο και μικρές περιεκτικότητες νιοβίου, βαναδίου και τιτανίου σε διάφορες αναλογίες.

Οι HSLA χάλυβες σχεδιάστηκαν για να έχουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και καλύτερη αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση από τους κοινούς χάλυβες. Η κατασκευή τους γίνεται μέσω διαδικασίας θερμικής έλασης (thermomechanical rolling process) κατά την οποία επιτυγχάνεται εκλέπτυνση των κόκκων και άρα βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων. Η εκλέπτυνση των κόκκων και η ενίσχυση μέσω

κατακρημνισμάτων (precipitation strengthening) αυξάνουν το όριο διαρροής των μικροκραματωμένων χαλύβων, ενώ ταυτόχρονα διατηρούν τα επιθυμητά επίπεδα ολκιμότητας και συγκολλησιμότητας. Όμως, λόγω της μεγάλης αντοχής και σκληρότητας, οι HSLA απαιτούν περίπου 25-30% περισσότερη ενέργεια για τη διαμόρφωσή τους.

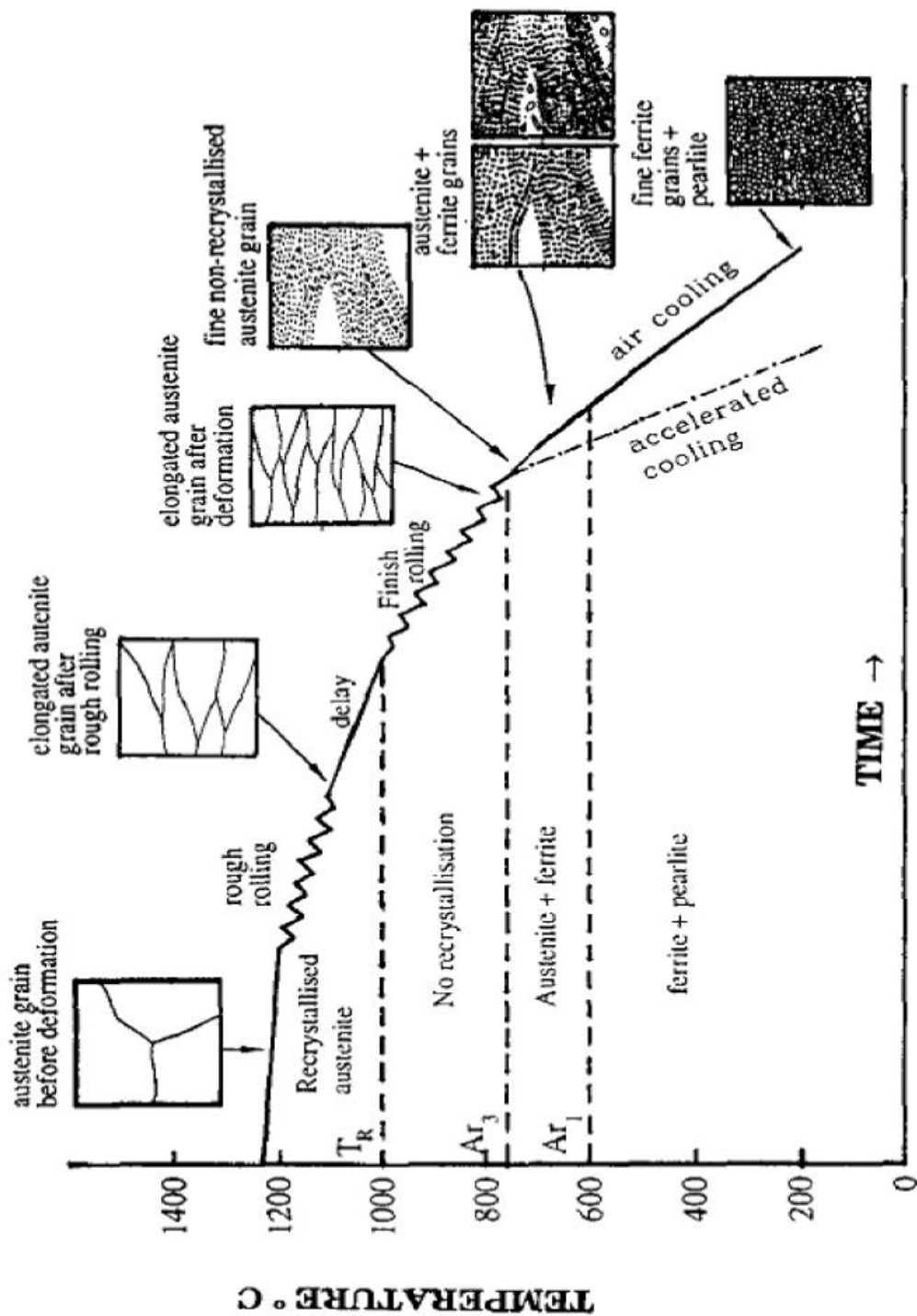
Μια υποκατηγορία των HSLA είναι οι HSLA-V όπου προορίζονται για να αντιπροσωπεύουν τους χάλυβες εκείνους που περιέχουν μικρές ποσότητες βαναδίου, μέχρι 0.12%, οι οποίοι λόγω του βαναδίου συνήθως υπερβαίνουν τις προσδοκίες για αυξημένη ολκιμότητα, σκληρότητα και συγκολλησιμότητα. Παράλληλα, οι χάλυβες αυτοί μειώνουν το λειτουργικό κόστος λόγω των μοναδικών μεταλλουργικών χαρακτηριστικών του βαναδίου τόσο στη μικροδομή όσο και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μιας κατασκευής με αυτό το είδος χάλυβα.

2.3.2.1 HSLA χάλυβες στη ναυπηγική

Παραδοσιακά, ο μαλακός χάλυβας είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος χάλυβας στις ναυπηγικές κατασκευές, λόγω του ότι είναι ιδιαίτερα οικονομικός. Το βασικό του μειονέκτημα είναι ότι έχει μειωμένη σκληρότητα άρα και αντοχή και δεν έχει την ικανότητα σύλληψης των ρωγμών. Σήμερα όμως στη ναυπηγική βιομηχανία υπάρχει μεγάλη απαίτηση για υψηλής ποιότητας χάλυβες που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μειωμένα πάχη, μειώνοντας έτσι το βάρος της κατασκευής και αυξάνοντας την ταχύτητα του σκάφους εξοικονομώντας παράλληλα σημαντική ποσότητα καυσίμων.

Οι HSLA, χάλυβες υψηλής αντοχής χαμηλής κραμάτωσης, (High Strength Low Alloy) είναι οι χάλυβες με την ευνοϊκότερη αναλογία αντοχή/βάρος συγκριτικά με τους χάλυβες υψηλής αντοχής. Οι πρώτοι ναυπηγικοί HSLA χάλυβες κατασκευάστηκαν στο Αμερικανικό ναυτικό και είχαν ονομασία HSLA-80 και HSLA-100.

Πριν από τη χρήση τους υποβάλλονται σε θέρμανση και έπειτα ταχεία ψύξη, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 2.2). Έτσι αποκτούν υψηλή αντοχή και σκληρότητα. Κραματικά στοιχεία όπως, Mo, Ni, Cr και Mn βελτιώνουν επίσης την σκληρότητα αυτών των χαλύβων ενώ στοιχεία όπως Nb, Ti και V συμβάλουν στη δημιουργία λεπτόκοκκης δομής.



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα μορφολογίας των κόκκων για τον HSLA [4]

2.3.2.2 Χάλυβας S690

Ο χάλυβας S690 είναι ένας HSLA χάλυβας ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί μόνο περιστασιακά στη ναυπηγική βιομηχανία και για συγκεκριμένα μέρη του πλοίου. Η χημική του σύσταση παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί όπου δίνονται οι μέγιστες τιμές, όπως δίνεται από το πρότυπο EN10025-6. [6]

Κατηγορία S690	Πάχος δοκιμίου	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Ti	Nb	N	B	Zr
S690QL	<150	0.2 max	1.7 max	0.2 max	0.1 max	0.8 max	1.5 max	2.0 max	0.7 max	0.12 max	0.5 max	0.5 max	0.6 max	0.15 max	0.005 max	0.15 max
S690Q	<150	0.2 max	1.7 max	0.25 max	0.15 max	0.8 max	1.5 max	2.0 max	0.7 max	0.12 max	0.5 max	0.5 max	0.6 max	0.15 max	0.005 max	0.15 max
S690QL1	<150	0.2 max	1.7 max	0.2 max	0.1 max	0.8 max	1.5 max	2.0 max	0.7 max	0.12 max	0.5 max	0.5 max	0.6 max	0.15 max	0.005 max	0.15 max

Η ακριβής ονομασία είναι S690QL όπου το S σημαίνει κατασκευαστικός χάλυβας (structural steel), το 690 υποδεικνύει ότι το ελάχιστο όριο διαρροής είναι 690 MPa, το Q δείχνει ότι έχει υποστεί ψύξη και σκλήρυνση και το L σημαίνει ότι οι μέσες τιμές αντοχής έχουν μετρηθεί σε χαμηλές θερμοκρασίες (Low), περίπου -40 °C ενώ το L1 δείχνει τις μετρήσεις αντοχής σε θερμοκρασίες -60 °C. Όταν το L υπολείπεται η θερμοκρασία εννοείται στους -20 °C. Ουσιαστική διαφορά όπως φαίνεται και στον πίνακα παρουσιάζεται μόνο στις περιεκτικότητες φωσφόρου και θείου. Ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής ο S690 μπορεί να έχει μπαινιτική ή μαρτενιτική δομή. Οι μηχανικές ιδιότητες του S690 παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα κατά το πρότυπο EN10025-6 (2004) και δίνονται για τρία διαφορετικά εύρη πάχους ελάσματος.

Πάχος Ελάσματος (Plate Thickness) MM	Όριο Διαρροής (Yield Strength) R _{eH} (MPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό (Tensile Strength) R _m (MPa)	Επιμήκυνση (Elongation) % Minimum	Αντοχή σε κρούση (Impact Strength) J, Minimum
3 to 50	690	770 - 940	14	30 στους -40° C
> 50 to 100	650	760 - 930	14	30 στους -40° C
> 100 to 150	630	710 - 900	14	30 στους -40° C

Άλλες χρήσεις του S690 είναι σε βαρέα οχήματα, γερανούς, γέφυρες και υπεράκτιες κατασκευές, χώρους με αυξημένη πίεση π.χ δεξαμενές αποθήκευσης, ηλεκτροπαραγωγικές εγκαταστάσεις, αγωγούς και στηρίγματα στέγης σε ορυχεία.

2.3.2.3 Επίδραση των στοιχείων κραμάτωσης

Το θέμα της επίδρασης των κραματικών στοιχείων τόσο στη μικροδομή όσο και στις μηχανικές ιδιότητες έχει γίνει αντικείμενο έρευνας για αρκετές δεκαετίες. Όλες οι έρευνες, με πιο πρόσφατη αυτή των Abson και Pargeter το 1986, δείχνουν τον καθοριστικό ρόλο που έχει η χημική σύσταση για τη δημιουργία των επιθυμητών μηχανικών ιδιοτήτων. Παρακάτω αναφέρονται οι επιδράσεις του κάθε στοιχείου κραμάτωσης τόσο στη μικροδομή όσο και στις μηχανικές ιδιότητες.

2.3.2.3.1 Επίδραση του άνθρακα (C, carbon)

Το ποσοστό άνθρακα επηρεάζει την αντοχή και τη δυσθραυστότητα σε ένα συγκολλημένο HSLA μέταλλο. Επηρεάζει σε τεράστιο βαθμό τη σκληρότητα του υλικού και καθορίζει την τελική μικροδομή. Με αύξηση του άνθρακα επιτυγχάνεται:

- a. Μείωση του πλάτους των κόκκων και μείωση ολόκληρου του μεγέθους των ωστενιτικών κόκκων και άρα ενίσχυση των ενδοκοκκικών μετασχηματισμών.
- b. Δίνει λεπτότερες φερριτικές περιοχές στα όρια των ωστενιτικών κόκκων.
- c. Αυξάνονται οι δευτερεύουσες φάσεις όπως μαρτενσίτη-ωστενίτη, καθώς και η ποσότητα του εναπομείναντος ωστενίτη ανάμεσα στο βελονοειδή φερρίτη
- d. Η ύπαρξη μεγάλου ποσοστού φερρίτη οδηγεί στη δημιουργία της κλασσικής μορφής φερρίτη Widmanstätten.

2.3.2.3.2 Επίδραση του Μαγγανίου (Mn, manganese)

Το μαγγάνιο χρησιμοποιείται γενικά ως αποξειδωτικό (deoxidant) και ως ρυθμιστής της αντοχής και της δυσθραυστότητας. Είναι επίσης ένας οικονομικός τρόπος για να γίνει έλεγχος της αντοχής του υλικού. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά συνοψίζονται παρακάτω:

- a. Συμβάλει στην δημιουργία βελονοειδούς φερρίτη (acicular ferrite, AF). Ο AF εμφανίζεται όταν το μαγγάνιο είναι κοντά στο 1% ενώ όταν το ποσοστό αυξηθεί στο 1.4-1.8% τότε προκύπτει η μεγαλύτερη δυσθραυστότητα. Μεγαλύτερα ποσοστά οδηγούν στη δημιουργία μπαινιτικής φάσης και μείωση της δυσθραυστότητας.
- b. Το μαγγάνιο δεν επηρεάζει την ύπαρξη του εναπομείναντος ωστενίτη
- c. Όσο αυξάνεται το μαγγάνιο αυξάνονται και η αντοχή του υλικού με βέλτιστη τιμή στο 1.4%

2.3.2.3.3 Επίδραση του πυριτίου (Si, silicon)

Όπως και το μαγγάνιο έτσι και το πυρίτιο έχει αποξειδωτικές ιδιότητες. Χρησιμοποιείται πάντα σε ποσότητα μικρότερη του 0.5% γιατί δημιουργεί ανεπιθύμητα αποτελέσματα στις συγκολλήσεις, όπως μείωση ολκιμότητας και γιατί περεταίρω αύξηση του πυριτίου οδηγεί σε μείωση του ορίου διαρροής. Η επίδραση του έχει άμεση σχέση με τα επίπεδα μαγγανίου εντός του υλικού.

- a. Όταν υπάρχει υψηλή περιεκτικότητα μαγγανίου, δεν παρατηρείται σημαντική επίδραση.
- b. Σε χαμηλή περιεκτικότητα μαγγανίου, το πυρίτιο αυξάνει ακανόνιστα τον βελονοειδή φερρίτη εις βάρος των υπόλοιπων φάσεων.
- c. Τέλος, έχει παρατηρηθεί ότι αυξάνει το ποσοστό του υπολειπόμενου ωστενίτη ενώ καθυστερεί σημαντικά το σχηματισμό του σεμεντίτη.

2.3.2.3.4 Επίδραση του Νικελίου (Ni, nickel)

Το νικέλιο έχει τη μικρότερη επίδραση στην αντοχή του υλικού σε σχέση με τα υπόλοιπα συστατικά, παρόλαυτα η αύξηση του οδηγεί σε καλή ανθεκτικότητα του υλικού και της κατασκευής. Οι επιδράσεις του συνοψίζονται :

- a. Αυξάνει τον βελονοειδή φερρίτη εις βάρος τόσο του περικρυσταλλικού όσο και του φερρίτη δεύτερης φάσης.
- b. Με υψηλά επίπεδα μαγγανίου σε συνδυασμό με 2.2%Ni παράγεται μαρτενσίτης και φερρίτης δεύτερης φάσης.
- c. Ο Kang και οι συνεργάτες του έδειξαν ότι ο συνδυασμός μαγγανίου και νικελίου με χαμηλή ποσότητα άνθρακα οδηγεί σε αύξηση της σκληρότητας.

2.3.2.3.5 Επίδραση του χρωμίου (Cr, chromium)

Το χρώμιο μαζί με το νικέλιο και το μολυβδαίνιο αποτελούν τα βασικά στοιχεία κραμάτωσης που πρέπει να περιέχουν οι προς συγκόλληση χάλυβες. Το χρώμιο αυξάνει το μέγεθος της ενδοτράχυνσης, όπως και το μαγγάνιο. Οι κυριότερες επιπτώσεις του είναι:

- a. Μειώνει και μπορεί και να εξαλείψει πλήρως τα όρια των φερριτικών κόκκων.
- b. Το ποσοστό του χρωμίου εξαρτάται από αυτό του μαγγανίου, για παράδειγμα για 1% μαγγάνιο το βέλτιστο είναι 1% χρώμιο ενώ όσο αυξάνεται το μαγγάνιο πρέπει να μειώνεται το χρώμιο γιατί αλλιώς δημιουργείται μπαινίτης εις βάρος του βελονοειδή φερρίτη.
- c. Τόσο το όριο διαρροής όσο η αντοχή σε εφελκυσμό αυξάνονται γραμμικά με αύξηση του χρωμίου.

2.3.2.3.6 Επίδραση Μολυδβαινίου (Mo, Molybdenum)

Το μολυβδάνιο έχει πολύ μεγάλη επίδραση στην αντοχή, ακόμη μεγαλύτερη και από αυτή που έχει το μαγγάνιο, παρόλαυτα μπορεί να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στη δυσθραυστότητα. Γενικά οι επιδράσεις στη μικροδομή είναι:

- a. Το ποσοστό Mo περίπου 0.2-0.3% βοηθάει στην ανάπτυξη βελονοειδούς φερρίτη, ενώ αύξηση του ποσοστού αυξάνει τον μπαινίτη.
- b. Σε ποσοστό Mo 0.5% εξαλείφει όλο τον βελονοειδή φερρίτη.
- c. Συνδυασμός Mo και Ti βοηθάει σημαντικά στην ανάπτυξη του βελονοειδή φερρίτη.

2.3.2.3.7 Επίδραση του Τιτανίου (Ti, titanium)

Έχει αναγνωριστεί ότι μικρές ποσότητες τιτανίου σε συνδυασμό πάντα με την ύπαρξη C-Mn προάγει τη δημιουργία βελονοειδούς φερρίτη (AF). Οι Evans και Bailey έχουν αποδείξει ότι η χρήση 1% ρουτιλίου (TiO_2) το οποίο δίνει 15ppm τιτανίου (ppm, μονάδα μέτρησης που υποδηλώνει περιεκτικότητα και αναλογία της τάξης του εκατομμυρίου) αυξάνει σημαντικά τον βελονοειδή φερρίτη.

Τέλος, η προσθήκη τιτανίου αυξάνει την αντοχή ενώ μειώνει ελαφρά την ολκιμότητα.

2.3.2.3.8 Επίδραση του Βορίου (B, boron)

Το βόριο αυξάνει σημαντικά το βαθμό ενδοτράχυνσης. Μάλιστα οι Devletian και Heinet μελέτησαν αυτήν την ιδιότητα και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η προσθήκη βορίου οδηγεί σε τόσο μεγάλη ενδοτράχυνση όσο αν το υλικό είχε υποστεί σφυρηλάτηση. Επιπλέον σε χαμηλά κραματωμένους χάλυβες, η ύπαρξη του νιτριδίου του βορίου (boron nitride) αναστέλλει τον διαχωρισμό στα όρια των κόκκων του φερρίτη.

2.3.2.3.9 Επίδραση του αλουμινίου (Al, aluminium)

Το αλουμίνιο είναι επίσης αποξειδωτικό και έχει ισχυρότερη έλξη με το οξυγόνο από ότι το τιτάνιο και το μαγγάνιο. Σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται και για να ελέγξει το άζωτο μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο για ευθραυστοποίηση του υλικού. Σε χαμηλή περιεκτικότητα αλουμινίου η δομή αποτελείται κυρίως από φερρίτη και βελονοειδή φερρίτη ενώ σε αυξημένη περιεκτικότητα μετατρέπεται σε ανώτερο μπαινίτη κάτι που επηρεάζει αρνητικά την σκληρότητα. Τέλος, η επίδραση του αλουμινίου είναι συνυφασμένη με την ύπαρξη οξυγόνου. Σε υψηλές περιεκτικότητες οξυγόνου, η ύπαρξη αλουμινίου είναι σχεδόν ασήμαντη σε αντίθεση με τις χαμηλές περιεκτικότητες όπου το αλουμίνιο απαγορεύει τη δημιουργία οξειδίων του τιτανίου και αναπτύσσει διαλύτες για τον τιτάνιο και το βόριο αλλάζοντας έτσι και τη μικροδομή.

2.3.2.3.10 Επίδραση του Οξυγόνου (O, oxygen)

Το οξυγόνο επηρεάζει γενικά ολόκληρη τη μικροδομή του υλικού, από μικρές περιεκτικότητες που δίνουν μπαινιτική δομή, μέχρι υψηλές περιεκτικότητες που δίνουν φερρίτη Widmanstätten. Γενικά η βέλτιστη περιεκτικότητα είναι 0.03-0.06% και ειδικά για τους HSLA ο Rotarom έχει επισημάνει ότι περιεκτικότητα 0.02-0.035% σχηματίζει βελονοειδή φερρίτη και δίνει τις βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες στο υλικό. Τέλος, για τον έλεγχο του οξυγόνου στο υλικό πρέπει όλα τα αποξειδωτικά, Mn, Si, Ti, και Al να βρίσκονται σε μία ισορροπία ώστε να προκαλούν μόνο θετικές επιπτώσεις στο μέταλλο και να μην μειώνουν τις μηχανικές ιδιότητες.

2.3.2.3.11 Επίδραση του Αζώτου (N, nitrogen)

Το άζωτο έχει την ιδιότητα να προσδίδει σκλήρυνση στο υλικό με σχεδόν ίδιο τρόπο με τον άνθρακα αλλά δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου τη μικροδομή του υλικού. Το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι ότι η αλληλεπίδραση των ατόμων του αζώτου με τα άτομα του χάλυβα προκαλούν την ευθραυστοποίηση του υλικού ακόμα και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η ποσότητα του αζώτου πρέπει πάντα να είναι μικρότερη από 0.007% ανάλογα πάντα και με την ποσότητα αλουμινίου και τιτανίου.

2.3.2.3.12 Επίδραση του Νιοβίου και Βαναδίου (Nb, niobium, V, vanadium)

Το νιόβιο και το βανάδιο δημιουργούν γενικά προβλήματα με τη σκληρότητα. Μικρές ποσότητες νιοβίου <0.02% και βαναδίου <0.05% δεν επηρεάζουν την σκληρότητα, ανάλογα πάντα με την περιεκτικότητα σε μαγγάνιο και τον ρυθμό απόψυξης.

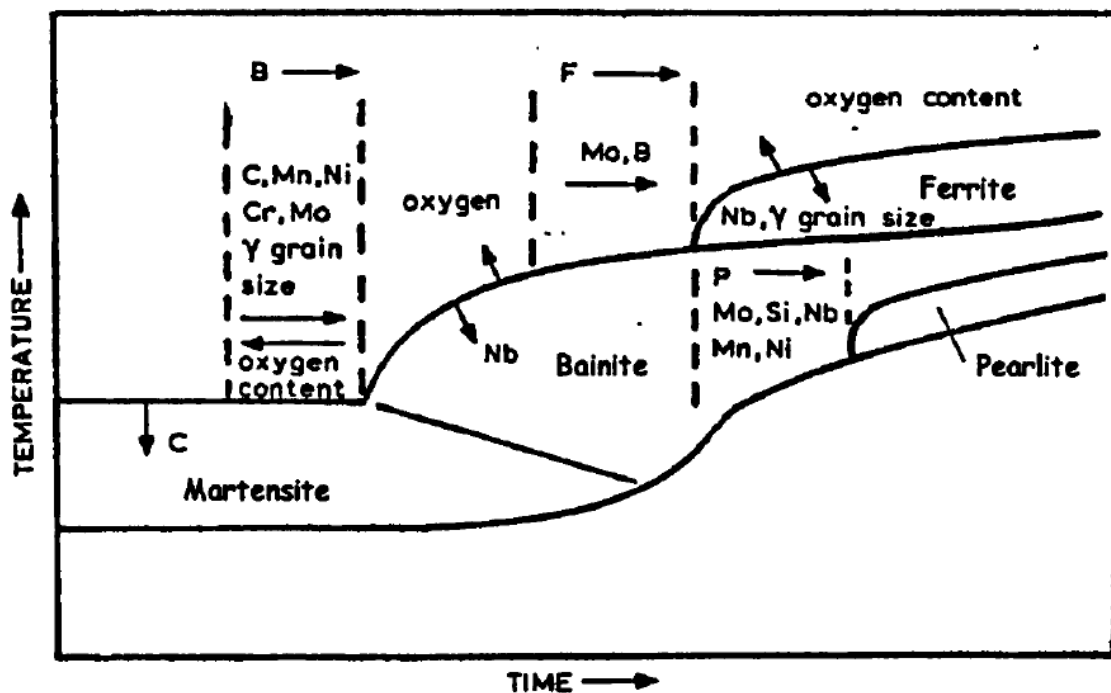
2.3.2.3.13 Επίδραση Φωσφόρου και Θείου (P, phosphorus, S, sulfur)

Ο φώσφορος και το θείο δημιουργούν και αυτά προβλήματα σκληρότητας. Συγκεκριμένα ο συνδυασμός οξυγόνου και θείου δημιουργεί εγκλείσματα εντός του υλικού ενώ η αύξηση του θείου περιορίζει τον βελονοειδή φερρίτη και μειώνει έτσι τη σκληρότητα, την αντοχή και την ολκιμότητα. Από την άλλη ο φώσφορος δεν προκαλεί καμία αλλαγή στη μικροδομή και ο Evans έχει αναφέρει ότι δεν προκαλεί αλλαγές ούτε στο όριο διαρροής, στην αντοχή σε εφελκυσμό και στην ολκιμότητα. Εντούτοις, ο συνδυασμός του με άλλα κραματικά στοιχεία μπορεί να επιφέρει προβλήματα τα οποία είναι δύσκολο να αναπτυχθούν λόγω της πολυπλοκότητας του και της συμμετοχής πολλών παραμέτρων σε αυτά.

2.3.2.4 Διαγράμματα CCT για τους HSLA (Continuous Cooling Transformation) [1]

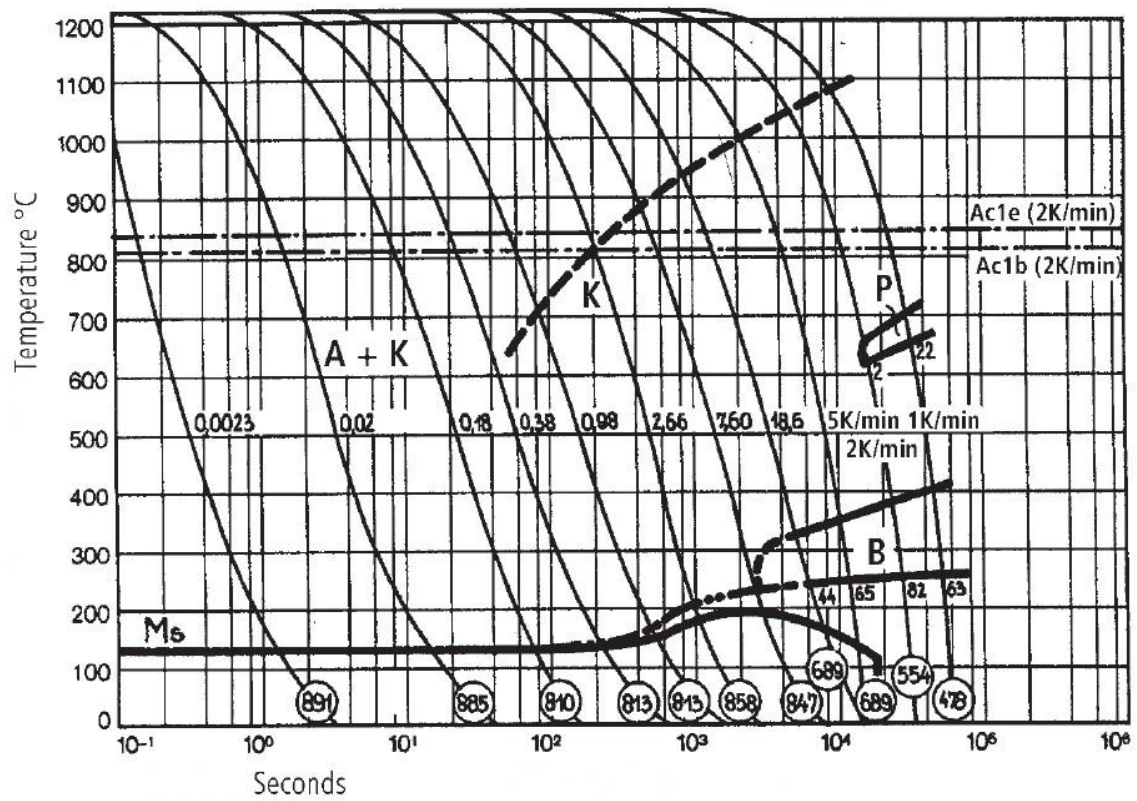
Τα CCT διαγράμματα παρέχουν πληροφορίες για τη μικροδομή, κάτω από συνθήκες μη ισορροπίας κατά τη διάρκεια μιας συγκόλλησης. Τα διαγράμματα αυτά έχουν συνεισφέρει σημαντικά στη κατανόηση αλλά και βελτίωση των μεταλλουργικών και μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων. Έχουν άμεση σχέση και επηρεάζονται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τα στοιχεία κραμάτωσης, την περιεκτικότητα σε οξυγόνο καθώς και τη θερμοκρασία. Τα CCT δείχνουν την επίδραση των διαφόρων κραματικών στοιχείων στους θερμικούς μετασχηματισμούς κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Ένα τέτοιο διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 2.3 που ακολουθεί.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, στοιχεία όπως άνθρακας, μαγγάνιο, νικέλιο, χρώμιο και το μολυβδαίνιο μετατοπίζουν πιο δεξιά τις μπαινιτικές και φερριτικές δομές για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Ταυτόχρονα, το μαγγνήσιο και το νικελίου κατεβάζουν τις θερμοκρασίες μετασχηματισμού σε χαμηλότερες τιμές και γενικά αυξάνουν τη σκληρότητα, ενώ το μολυβδαίνιο και το χρώμιο αυξάνουν την περιοχή της μπαινιτικής φάσης. Το νιόβιο καταστέλλει τη δημιουργία προευτηκτοειδή φερρίτη και χονδρού περλίτη. Παράλληλα, σε συγκολλήσεις με υψηλά επίπεδα οξυγόνου αυξάνεται ο βαθμός ενδοτράχυνσης και προωθείται η δημιουργία ανώτερου μπαινίτη, ενώ με ύπαρξη χαμηλής περιεκτικότητας οξυγόνου προωθείται η δημιουργία βελονοειδούς φερρίτη.



Σχήμα 2.3α : Τυπικό διαγράμμα CCT για HSLA χάλυβες με την επίδραση των κραματικών στοιχείων [1]

2.3.2.4.1 Διαγράμμα CCT του S690 [14]



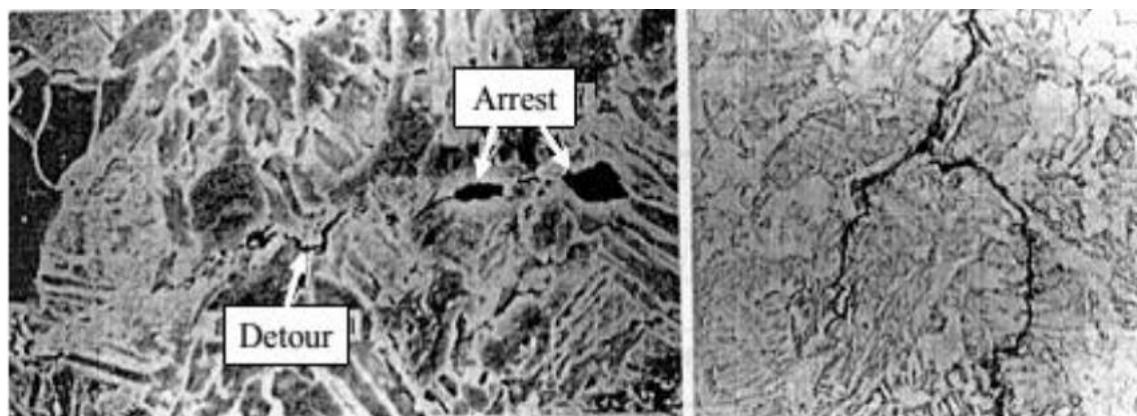
Σχήμα 2.3β : Τυπικό διάγραμμα CCT για χάλυβα S690

2.3.2.5 Χάλυβες για την σύλληψη ρωγμών από κόπωση (Fatigue Crack Arrester Steel, FCA) [10] [11]

Αυτοί οι χάλυβες είναι υποκατηγορία των HSLA χαλύβων και αναπτύχθηκαν από την εταιρεία Sumitomo (Sumitomo metal industries) το 2001-2002. Οι χάλυβες αυτοί έχουν μικρότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα από τους κοινούς χάλυβες και η μικροδομή τους αποτελείται από φερρίτη και μπαινίτη. Η καλή συγκολλησιμότητα καθώς και η δυνατότητα χρησιμοποίησης αυτών των χαλύβων είναι ίδια με των κοινών. Οι χάλυβες αυτοί έχουν βελτιωμένες ιδιότητες όσον αφορά στη διάδοση των ρωγμών σε ένα πολύ μεγάλο εύρος του συντελεστή έντασης τάσης. Οι βελτιωμένες αυτές ιδιότητες ισχύουν εξίσου το ίδιο και σε περιβάλλον διάβρωσης. Αυτές οι ιδιότητες, οφείλονται στην ύπαρξη μικροδομής διπλής φάσης όπου η διάδοση της ρωγμής καθυστερείται στα όρια των κόκκων. Συγκεκριμένα, σε πειράματα που έγιναν σε πολυκρυσταλλικά υλικά που αποτελούνταν μόνο από φερρίτη και μπαινίτη παρατηρήθηκε δραματική μείωση της διάδοσης της ρωγμής όταν αυτή εισέρχεται στο στρώμα του μπαινίτη (Σχήμα 2.4). Επιπλέον, κατά την κυκλική φόρτιση, κόπωση, σε αυτούς του χάλυβες παρατηρείται χαλάρωση των τάσεων στο άκρο της ρωγμής με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη αντίσταση σε θραύση. Ο Konda πραγματοποίησε πειράματα κατασκευάζοντας από FCA και από κοινό χάλυβα α) μικρά συγκολλημένα τεμάχια που προορίζονταν για αντικατάσταση κάποιου μέρους μιας κατασκευής και β) μια ολόκληρη διαμήκη πλευρά μιας κατασκευής. Τα αποτελέσματα μετά από δοκιμές κόπωσης ήταν ότι στην πρώτη περίπτωση η αντοχή σε κόπωση του FCA ήταν λίγο μεγαλύτερη αλλά χωρίς ουσιαστική διαφορά, ενώ στη δεύτερη περίπτωση που είχαμε αποκλειστικά FCA υλικό η ζωή της κατασκευής ήταν πολύ μεγαλύτερη πράγμα που επιβεβαιώνει ότι οι χάλυβες αυτοί βελτιώνουν την ποιότητα των συγκολλήσεων.

Θα πρέπει να αναφερθεί, ότι κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης το πλεονέκτημα που έχει ο FCA στη διάδοση των ρωγμών χάνεται εντός της θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Διατηρείται όμως εκτός της ζώνης αυτής γι' αυτό και η διάδοση της παραμένει πιο αργή από ότι στους κοινούς χάλυβες.

Τέλος, πειράματα που έγιναν από τον Sakano το 2004 έδειξαν ότι η καθυστέρηση στη διάδοση της ρωγμής είναι μέχρι και 1.5 φορά μεγαλύτερη από τους κοινούς χάλυβες, ενώ ο Hirota πρόσθεσε ότι αυξάνουν μέχρι και 80% τη ζωή των κατασκευών. Οι χάλυβες αυτοί έχουν βρει ήδη ευρεία εφαρμογή σε ναυπηγικές κατασκευές, και ο S690 είναι ένας τέτοιος χάλυβας.



Σχήμα 2.4 : Αναπαράσταση της σύλληψης ρωγμής σε έναν HSLA χάλυβα [10]

2.3.3 Σύγκριση των χαρακτηριστικών του AH36 και S690 [3]

Το 2012 με συνεργασία 2 πανεπιστημίων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και Πανεπιστήμιου του Birmingham, και δύο οργανισμών, AIMEN και Lloyd's Register πραγματοποιήθηκε έρευνα κατά την οποία έγινε σύγκριση ανάμεσα στα δύο αυτά υλικά με σκοπό να εξεταστεί η πιθανότητα να είναι δυνατή η αντικατάσταση του AH36 από τον S690 στις ναυπηγικές κατασκευές. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με βάση τα διεθνή πρότυπα αλλά και τα πρότυπα διαδικασίας δοκιμών του Lloyds.

Στα πειράματα εκτός από τον S690 μελετήθηκαν και άλλα υλικά της κατηγορίας των HSLA όπως X65 και FCA. Παρακάτω, παρατίθενται τα αποτελέσματα μόνο της σύγκρισης των AH36 και S690 γιατί αυτά αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία.

Τα πειράματα κατέληξαν στα εξής κύρια συμπεράσματα:

- Το πείραμα εφελκυσμού έδειξε ότι ο χάλυβας AH36 έχει ανώτερο όριο διαρροής ίσο με 393 MPa και ανώτερη αντοχή σε εφελκυσμό 524MPa, τιμές χαμηλότερες από αυτές του S690.
- Η επιμήκυνση για να προκύψει αστοχία του S690 πέφτει κάτω από το 22% των τιμών που ορίζουν τα πρότυπα, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τον AH36 είναι 10-12%.
- Οι δοκιμές κρούσης τύπου Charpy επιβεβαίωσαν ότι όλοι οι τύποι χαλύβων είναι στην άνω περιοχή της καμπύλης DBTT που αφορά τους -20° . Παρατηρήθηκε επίσης ότι όλοι οι τύποι χαλύβων που εξετάστηκαν είχαν αυξημένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κρούσης σε σχέση με τον κλασικό χάλυβα AH36, με τον τύπο FCA να εμφανίζει τη χαμηλότερη σχετική αύξηση ικανότητας.
- Το πείραμα δυσθραυστότητας έδειξε ότι ο S690 παρουσιάζει έως και τρεις φορές υψηλότερες τιμές δυσθραυστότητας.
- Τα πειράματα δυσθραυστότητας κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι είναι δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια ο συντελεστής K_{Ic} , ο οποίος εκφράζει την τιμή της τάσης που πρέπει να εφαρμοστεί στην άκρη μιας υπάρχουσας ρωγμής για να προέλθει η θραύση.
- Οι πειραματικές δοκιμές ταχύτητας διάδοσης ρωγμών από κόπωση τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο S690 παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση στη διάδοση, ωστόσο οι τιμές της κρίσιμης επιμήκυνσης παραμένουν κάτω από τα όρια που απαιτείται για εφαρμογές στη ναυπηγική βιομηχανία.
- Η οπτική ανάλυση έδειξε ότι η δομή του AH36 περιέχει υψηλά ποσοστά περλίτη ενώ ο S690 αποδείχθηκε ότι ήταν χάλυβας που έχει υποστεί βαφή και επαναφορά.

Βιβλιογραφία 2^{ου} Κεφαλαίου

1. Adalberto Rosales Mendoza. Relationship between Microstructure, Properties and HICC Resistance of HSLA steel weld metals. The University of Leeds, Doctor of Philosophy. March 2008.
2. Amir Masoud Akbari Pazooki, Distortion Control during Welding. Master of Science in Material Science and Engineering University of Tehran, Iran.
3. Carl Slater, Claire Davis, Mayorkinos Papaelias, Elias Hatzidouros, D. Pantelis, V. Papazoglou, Aurora Lopez, Elena Rodriguez, Jan Przydatek. HSLA Steel Selection and characterisation. University of Birmingham, NTUA, AIMEN, LR. Mosaic.
4. Chakrabarti, Debalay. Development of bimodal grain structures and their effect on toughness in HSLA steel. Thesis (PhD.)--University of Birmingham, Department of Metallurgy and Materials, School of Engineering. 2007.
5. Dr Callister, A study of fatigue crack propagation in quenched and tempered and controlled rolled HSLA steels. Cranfield institute of technology, School of industrial science, PhD Thesis, September 1987
6. Eleni Gogou. Use of High Strength Steel Grades for Economical Bridge Design. Master thesis study, Delft university, April 2012
7. High-Strength Low-Alloy Steels. ASM International, Materials Park, Ohio, USA
8. Juha-Pekka Keltanen, Narrow gap flux-cored arc welding of high strength shipbuilding steels. Masters Thesis, Lappeenranta university of technology.2015
9. Osamu Muragishi, Premature Cleavage of Ship Plating under Reversed Bending. Doctor of philosophy in structural mechanics at the Massachessets Insitute of Technology, February 2001
10. S. Wästberg, D. Brennan, R. Chen, T. Hodgson, D. Kihl, O. Litonov, S. Mahéroult- Mougine, N. Osawa, H. Paetzold, C.-Ho Shin, R. Tedeschi, X. Wang. Fatigue and Fracture. 16th international ship and offshore structures congress, Southampton, 20-25 August 2006

11. Shengrun Shi. Evaluating the Structural Integrity of High Strength Low Alloy Steels Considered for Shipbuilding Using Acoustic Emission. School of Metallurgy and Materials, College of Engineering and Physical Sciences, University of Birmingham. September 2014.
12. Htay Aung. An analysis of the study of mechanical properties and microstructural relationship of HSLA steels used in ship hulls. 2007
13. J. Chen, B. Young, B. Uy. Behavior of high strength structural steel at elevated Temperatures. 2006
14. BÖHLER Microclean. Schnellarbeitsstahl, High speed steel. BÖHLER S690
15. Δημήτρης Ι. Παντελής, Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης. Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών. 2008

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι, χρησιμοποιούνται ευρέως για τον έλεγχο των μεταλλικών υλικών, παρέχοντας άμεσα ακριβή και ποσοτικά αποτελέσματα σχετικά με τις αντιδιαβρωτικές τους ιδιότητες, την υποβάθμιση τους, την ταχύτητα και τον μηχανισμό διάβρωσης. Οι τρεις μέθοδοι που θα παρουσιαστούν στο παρόν κεφάλαιο είναι η Φασματοσκοπία ηλεκτροχημικής εμπέδησης (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS), Μέθοδος αντίστασης γραμμικής πόλωσης (Linear polarization resistance, LRP) και η μέθοδος προεκβολής των ευθειών Tafel (Tafel extrapolation.)

3.2 ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΕΜΠΕΔΗΣΗΣ (EIS) [2] [3] [7] [10] [11]

Η EIS είναι μία ισχυρή τεχνική για την διερεύνηση ηλεκτροχημικών αντιδράσεων και την μέτρηση των αντίστοιχων ιδιοτήτων σε πορώδη ηλεκτρόδια, οξειδία και επικαλύψεις. Η ανακάλυψη της μεθόδου έγινε από τον Heaviside στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, όπου χρησιμοποίησε τον μετασχηματισμό Laplace για την παροδική απόκριση του ηλεκτρικού κυκλώματος και δημιούργησε έτσι τα θεμέλια για την ηλεκτροχημική εμπέδηση όπου επιτρέπει τη μετατροπή της ροής του ρεύματος ενός κυκλώματος σε απλές αλγεβρικές εξισώσεις.

3.2.1 Αρχή της μεθόδου

Η μέθοδος αυτή έχει ευρεία εφαρμογή αλλά, όπου και να εφαρμόζεται η αρχή της μεθόδου παραμένει αμετάβλητη. Υπάρχουν δύο τρόποι για τη μέτρηση της αντίστασης ανάλογα με τις μεταβλητές ρύθμισης: ποτενσιοστατική λειτουργία και γαλβανοστατική λειτουργία. Για την ποτενσιοστατική λειτουργία εφαρμόζεται τάση μικρού σήματος με σταθερό πλάτος και έπειτα καταγράφεται το ρεύμα που προκύπτει, το οποίο σε αυτή την περίπτωση είναι πάντα A.C, εναλλασσόμενο ρεύμα. Σε αυτή τη διαδικασία το D.C, συνεχές ρεύμα, ρυθμίζεται σε μια ορισμένη τιμή για να διευκολύνει τη γραμμικότητα του συστήματος. Αντίθετα κατά την γαλβανοστατική λειτουργία το συνεχές D.C δεν έχει συγκεκριμένη τιμή και το A.C βρίσκεται με συγκεκριμένο πλάτος σε ολόκληρη την περιοχή του συνεχούς ρεύματος και προκύπτει έτσι η τιμή του. Η γαλβανοστατική λειτουργία υπολογίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την αντίσταση από ότι η ποτενσιοστατική.

Σε μελέτες διάβρωσης, όταν έχουμε εφαρμογή εναλλασσόμενου ρεύματος, A.C, με σήμα 5-10 mV, η καταγραφή του σήματος του ρεύματος γίνεται μέσω ενός ηλεκτροδίου. Έτσι για κάθε συχνότητα δημιουργείται ένα ζεύγος τάσης-ρεύματος και όλα τα ζεύγη δίνουν το φάσμα της αντίστασης.

Στα D.C. συστήματα η ηλεκτρική αντίσταση μπορεί να καθοριστεί από το νόμο του Ohms

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{Εξ. 3.1})$$

όπου το R είναι η αντίσταση σε Ohms, το V είναι η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του αντιστάτη και μετριέται σε Volts ενώ το I είναι το ρεύμα που προκύπτει σε amperes.

Ωστόσο, πολλά A.C. συστήματα εμφανίζουν πολύπλοκη συμπεριφορά οπότε σε αυτή την περίπτωση η αντίσταση δίνεται από έναν καινούριο όρο, τον Z. Το Z ονομάζεται εμπέδηση και καθορίζει την τάση των ηλεκτρικών κυκλωμάτων να αντιστέκονται στη ροή του εναλλασσόμενου ρεύματος και δίνεται από τον τύπο

$$Z = \frac{V_{ac}}{I_{ac}} \quad (\text{Εξ. 3.2})$$

όπου το V_{ac} είναι το δυναμικό του συνόλου του συστήματος και το I_{ac} είναι το ρεύμα εξόδου. Επίσης, εφόσον τα V_{ac} και I_{ac} είναι συναρτήσεις της συχνότητας μπορεί και το Z να εκφραστεί ως συνάρτηση της συχνότητας.

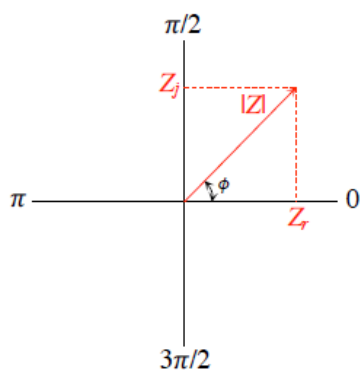
Τέλος, αναφέρουμε ότι η εξίσωση του Ohms θεωρεί ότι η σχέση ανάμεσα στα μεγέθη είναι γραμμική κάτι που στα ηλεκτροχημικά συστήματα δεν ισχύει, όμως σε ηλεκτροχημικά συστήματα με μικρά πλάτη σήματος μπορεί να γίνει η παραδοχή της γραμμικότητας.

3.2.2 Ανάλυση της σχέσης εμπέδησης

Η σχέση που εκφράζει την εμπέδηση είναι συχνά σύνθετη και εκφράζεται από:

$$Z = Z_r + jZ_j \quad (\text{Εξ. 3.3})$$

Όπου το Z_r εκφράζει το πραγματικό μέρος, το Z_j εκφράζει το φανταστικό μέρος ενώ το j είναι η φανταστική παράμετρος και είναι ίση με $j = \sqrt{-1}$



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα του phasor, ο άξονας x είναι το πραγματικό μέρος και ο άξονας y το φανταστικό και ϕ η γωνία φάσης [7]

Επίσης η εμπέδηση μπορεί να αναπαρασταθεί ως μιγαδικός αριθμός σε εκθετική μορφή από τη σχέση :

$$Z = |Z|\exp(j\varphi) \quad (\text{Εξ. 3.4})$$

Όπου το $|Z|$ αντιπροσωπεύει το διάνυσμα της εμπέδησης και το φ τη γωνία φάσης.

Το $|Z|$ μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα του πραγματικού και του φανταστικού μέρους, οπότε:

$$|Z| = \sqrt{Z_r(\omega)^2 + Z_j(\omega)^2} \quad (\text{Εξ. 3.5})$$

Όπου
$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Z_j(\omega)}{Z_r(\omega)} \right) \quad (\text{Εξ. 3.6})$$

Και
$$Z_r(\omega) = |Z(\omega)| \cos(\varphi(\omega)) \quad (\text{Εξ. 3.7α})$$

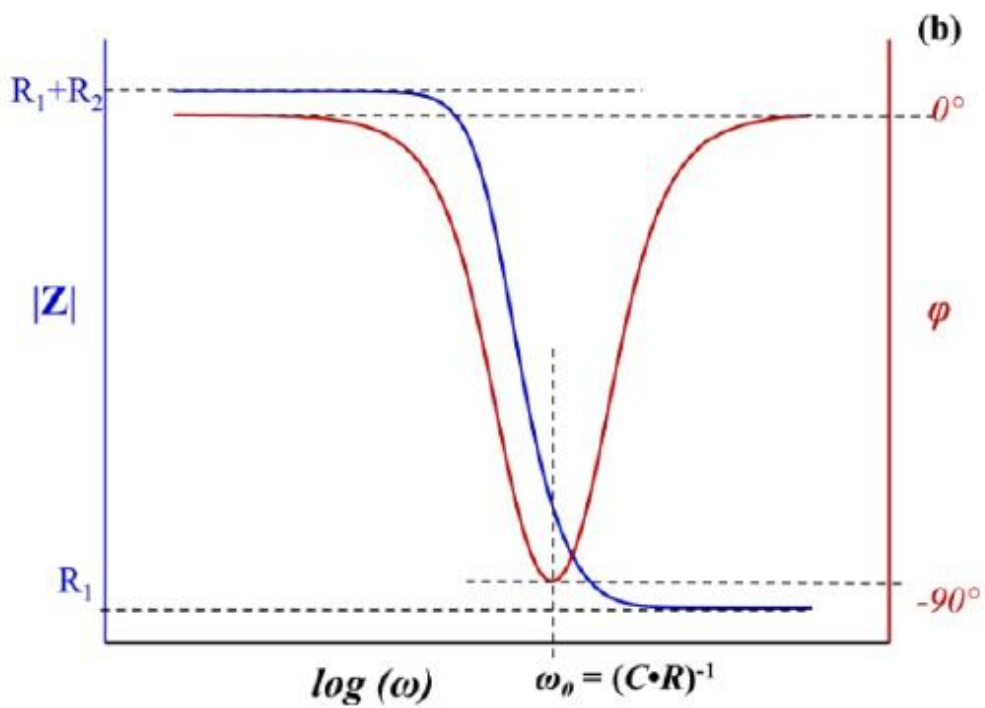
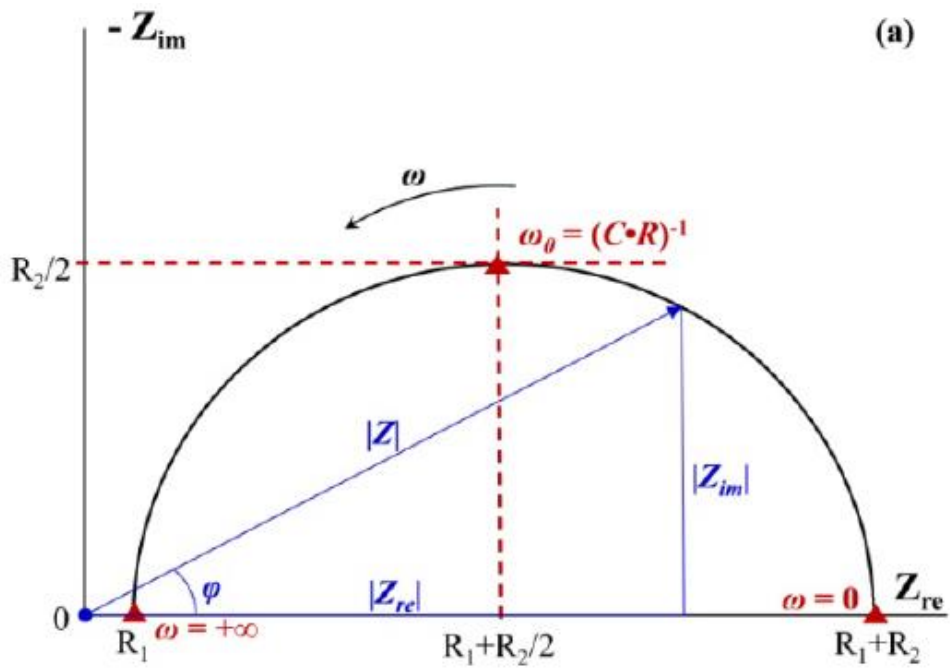
$$Z_j(\omega) = |Z(\omega)| \sin(\varphi(\omega)) \quad (\text{Εξ. 3.7β})$$

Όπου ω είναι η γωνιακή συχνότητα του σήματος.

3.2.3 Διαγράμματα της φασματοσκοπίας ηλεκτροχημικής εμπέδησης

Οι δύο μέθοδοι της αναπαράστασης των αποτελεσμάτων είναι μέσω των διαγραμμάτων Nyquist και Bode. Το διάγραμμα Nyquist πήρε το όνομα του από τον Harry Nyquist αλλά συχνά στη βιβλιογραφία αναφέρετε και ως διάγραμμα Argand η διαγράμματα Complex. Ο άξονας x αντιστοιχεί στο πραγματικό μέρος του μιγαδικού αριθμού της εμπέδησης, ενώ ο άξονας y αντιστοιχεί στο φανταστικό μέρος του, έτσι όπως δίνονται στις εξισώσεις 3.5 και 3.6 Η μορφή του διαγράμματος είναι ημικύκλιο και κάθε σημείο του αντιστοιχεί σε διαφορετική συχνότητα. Τα διαγράμματα αυτά παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τις μεταβλητές της αντίστασης, αλλά αδυνατούν να παρουσιάσουν την εξάρτησή τους από τη συχνότητα.

Τα διαγράμματα Bode πήραν το όνομα τους από τον Hendrik W. Bode, ο οποίος προσπάθησε να καλύψει αυτή την ανεπάρκεια των διαγραμμάτων Nyquist. Έτσι τα Bode είναι λογαριθμικά διαγράμματα και είναι ή $\log|Z|$ συναρτήσει της συχνότητας ω ή η γωνία φάσης φ συναρτήσει της συχνότητας ω (Σχήματα 3.2).



Σχήμα 3.2 α. Διάγραμμα Nyquist, β. Διάγραμμα Bode [10]

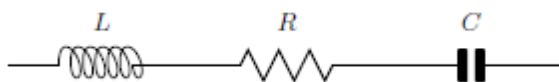
3.2.4 Προσομοίωση συστήματος

Υπάρχουν δύο τρόποι για να γίνει ο υπολογισμός της αντίστασης. Ο πρώτος είναι ο μαθηματικός τρόπος, ο οποίος βασίζεται σε θεωρητικές υποθέσεις όσον αφορά τις φυσικές και χημικές διεργασίες που συμβάλλουν στην αντίσταση. Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσω της χρήσης εμπειρικών μοντέλων που ονομάζονται ισοδύναμα κυκλώματα (equivalent circuits, EC). Πριν από την χρήση οποιουδήποτε από τους δύο τρόπους πρέπει να γίνει ο καθορισμός των παραμέτρων καθώς και το εύρος σφάλματος της κάθε παραμέτρου. Συγκριτικά με τα μαθηματικά μοντέλα η χρήση των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων είναι ευκολότερη, γρηγορότερη και δίνει την δυνατότητα εξαγωγής κάποιων αρχικών συμπερασμάτων πριν την ολοκλήρωση της διαδικασίας.

Παρακάτω, θα αναπτυχθούν τα κυριότερα στοιχεία που συνθέτουν ένα τέτοιο ηλεκτρικό σύστημα καθώς και οι συνδεσμολογίες στις οποίες εφαρμόζονται αλλά και οι εξισώσεις που προκύπτουν ανάλογα με τη συνδεσμολογία.

3.2.4.1 Στοιχεία ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος

Στην ηλεκτροχημεία χρησιμοποιούνται παθητικά στοιχεία για να συνθέσουν ένα ηλεκτροχημικό σύστημα. Τα παθητικά στοιχεία είναι αυτά που δεν παράγουν ρεύμα ή δυναμικό σε ένα τέτοιο σύστημα. Τα στοιχεία που φαίνονται και στο σχήμα 3.3 θα αναπτυχθούν παρακάτω με τον καθορισμό της σχέσης που έχει το κάθε ένα με την τάση και τη ροή ρεύματος.



Εικόνα 3.3: Παθητικά στοιχεία [7]

3.2.4.1.1 Αντιστάτης (Resistor,R)

$$V(t) = RI(t) \quad (\text{Εξ. 3.8})$$

Όταν ένα ημιτονοειδές κύμα εφαρμόζεται σε μια αντίσταση η στιγμιαία απόκριση του ρεύματος προς την τάση αλλάζει εξ ολοκλήρου και η διαφορά φάσης ρεύματος και τάσης που προκύπτει είναι μηδενική. Η εμπέδηση του αντιστάτη είναι μιγαδικός αριθμός χωρίς φανταστικό μέρος και είναι ανεξάρτητος από τη συχνότητα.

3.2.4.1.2 Πηνίο (Inductor, L)

$$V = L \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{Εξ. 3.9})$$

Το πηνίο συμπεριφέρεται ως ένα αγώγιμο σύρμα και είναι ισοδύναμο με ένα μικρό κύκλωμα υπό σταθερές συνθήκες, δηλαδή $di(t) = dt = 0$. Η εμπέδηση του πηνίου έχει μηδενικό πραγματικό μέρος και είναι ανάλογη της συχνότητας. Το ρεύμα που διαπερνά το πηνίο έχει μετατοπισμένη φάση -90° σε σχέση με την τάση.

3.2.4.1.3 Πυκνωτής (Capacitor, C)

$$I(t) = C \frac{dV(t)}{dt} \quad (\text{Εξ. 3.10})$$

Υπο σταθερές συνθήκες ο πυκνωτής συμπεριφέρεται ως ένα ανοιχτό κύκλωμα που δεν αφήνει το ρεύμα να διέρχεται. Ωστόσο, όταν εφαρμόζεται εναλλασσόμενο δυναμικό ο πυκνωτής οδηγείται σε μια διαδικασία εναλλαγής μεταξύ φόρτισης και αποφόρτισης του συστήματος και τότε το ρεύμα φτάνει τη μέγιστη τιμή του όταν η εναλλαγή από το μηδέν γίνει με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα. Όταν ένα ημιτονοειδές κύμα εφαρμόζεται στον πυκνωτή η απόκριση του ρεύματος θα έχει συνημιτονοειδή μορφή με μετατοπισμένη φάση κατά 90° σε σχέση με την τάση. Τέλος, ο πυκνωτής έχει μηδενικό μέρος και αποτελεί συνάρτηση της συχνότητας.

Με βάση τις εξισώσεις 3.8, 3.9 και 3.10 μπορούν να εκφραστούν οι αντίστοιχες σχέσεις για την εμπέδηση, Z

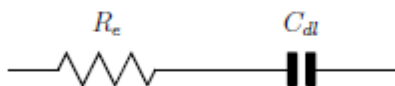
$$\text{Για τον αντιστάτη } Z = R \quad (\text{Εξ 3.11})$$

$$\text{Για το πηνίο } Z = j\omega L \quad (\text{Εξ 3.12})$$

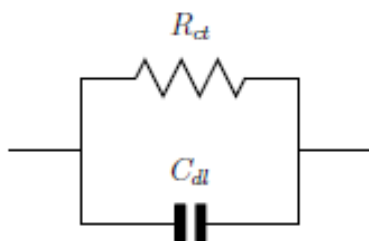
$$\text{Για τον πυκνωτή } Z = \frac{1}{j\omega C} \quad (\text{Εξ.3.13})$$

3.2.4.2 Διάταξη σειράς και παράλληλα

Υπάρχουν πολλοί τρόποι όπου τα στοιχεία ενός κυκλώματος μπορούν να ενωθούν. Οι δύο πιο απλές διατάξεις είναι σε σειρά και παράλληλα (Σχήματα 3.4), και είναι οι δύο θεμελιώδεις τρόποι όχι μόνο για τα ηλεκτροχημικά αλλά και για όλα τα κυκλώματα. Η συνεισφορά του κάθε στοιχείου σε διατάξεις σειράς γίνεται προσθετικά ενώ σε παράλληλες διατάξεις η αντίστροφη τιμή του κάθε στοιχείου προστίθεται.



Εικόνα 3.4 α. Διάταξη σε σειρά



Εικόνα 3.4 β. Διάταξη παράλληλα [7]

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.α για ένα ηλεκτρόδιο (blocking electrode) δύο παθητικά στοιχεία βρίσκονται σε σειρά και άρα ίδιο ρεύμα διέρχεται από το R_e που εκφράζει την αντίσταση του ηλεκτρολύτη (electrolyte resistance) και από το C_{dl} που εκφράζει την χωρητικότητα διπλού στρώματος ενώ η συνολική διαφορά δυναμικού είναι το άθροισμα της διαφοράς δυναμικού κάθε στοιχείου.

Η αντίσταση εμπέδησης στην διάταξη σειράς εκφράζεται από τη σχέση:

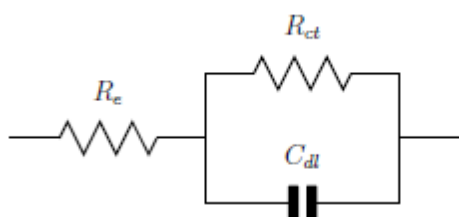
$$Z = Z_{R_e} + Z_{C_{dl}} = R_e + \frac{1}{j\omega C_{dl}} \quad (\text{Εξ. 3.14})$$

Η αντίσταση εμπέδησης για την παράλληλη διάταξη, η οποία φαίνεται στο σχήμα 3.4.β εκφράζεται μέσα από τη σχέση:

$$Z = \left[\frac{1}{Z_{R_{ct}}} + \frac{1}{Z_{C_{dl}}} \right]^{-1} = \left[\frac{1}{R_{ct}} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_{dl}}} \right]^{-1} = \frac{R_{ct}}{1 + j\omega R_{ct} C_{dl}} \quad (\text{Εξ. 3.15})$$

Όπου R_{ct} είναι η αντίσταση μεταφοράς φορτίου

Αν στο πιο πάνω σύστημα προστεθεί ο όρος R_e που εκφράζει την αντίσταση του ηλεκτρολύτη και χρησιμοποιείται σε διατάξεις σειράς τότε προκύπτει ένα πιο περίπλοκο σύστημα το οποίο όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να απλουστεύσει το ηλεκτροχημικό σύστημα. Η διάταξη ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στο σχήμα 3.4.γ



Σχήμα 3.4.γ Συνδυασμός διάταξης σειράς και παράλληλα [7]

Η αντίσταση εμπέδησης αυτής της διάταξης εκφράζεται από τη σχέση :

$$Z = Z_{R_e} + \left[\frac{1}{Z_{R_{ct}}} + \frac{1}{Z_{C_{dl}}} \right]^{-1} = R_e + \left[\frac{1}{R_{ct}} + \frac{1}{j\omega C_{dl}} \right]^{-1} = R_e + \frac{R_{ct}}{1+j\omega R_{ct}C_{dl}} \quad (\text{Εξ. 3.16})$$

Το κύκλωμα καθώς και οι εξισώσεις για τέτοιου είδους ηλεκτροχημικά συστήματα είναι σαφώς πολύ περίπλοκα εντούτοις η αντίσταση μπορεί να προσεγγισθεί με καλή ακρίβεια από τις βασικές εξισώσεις για διατάξεις σειράς και παράλληλα όπως αναπτύχθηκαν πιο πάνω.

3.2.4.3 Φυσική σημασία των στοιχείων ενός ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος

3.2.4.3.1 Αντίσταση ηλεκτρολύτη R_e

Κατά την εφαρμογή της EIS χρησιμοποιείται ένα ηλεκτροχημικό κελί το οποίο περιλαμβάνει ένα ηλεκτρόδιο εργασίας, ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς και το βοηθητικό ηλεκτρόδιο τα οποία έρχονται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη (συνήθως διάλυμα 3.5 wt.% NaCl). Η αντίσταση του ηλεκτρολύτη εξαρτάται κυρίως από τη συγκέντρωση και τον τύπο των ιόντων, τη θερμοκρασία και τη γεωμετρία της περιοχής στην οποία ρέει το ρεύμα. Για ένα διάλυμα που εκτίθεται σε μια ηλεκτροχημική περιοχή μήκους l και επιφάνεια A η αντίσταση δίνεται από:

$$R_e = \rho \frac{l}{A} \quad (\text{Εξ. 3.17})$$

Όπου ρ η ειδική αντίσταση του ηλεκτρολύτη

3.2.4.3.2 Αντίσταση μεταφορά φορτίου R_{ct} και χωρητικότητα διπλού στρώματος C_{dl}

Όταν δημιουργηθεί αποκόλληση υλικού από το μεταλλικό στρώμα τότε σχηματίζεται ένα ηλεκτροχημικό διπλό στρώμα στη διεπιφάνεια μεταξύ του μετάλλου και του ηλεκτρολύτη. Αυτό το στρώμα μπορεί να μοντελοποιηθεί με ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, όπου ένας πυκνωτής διπλού στρώματος και ένας αντιστάτης μεταφοράς φορτίου είναι συνδεδεμένοι παράλληλα.

Η χωρητικότητα διπλού στρώματος προέρχεται από τη δυσκολία των φορτίων (ηλεκτρόνια και ιόντα) να διαπεράσουν τη διεπιφάνεια μετάλλου/ηλεκτρολύτη με αποτέλεσμα τον διαχωρισμό τους.

Η μεταφορά του φορτίου μπορεί να συμβεί μόνο μέσω των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Η αντίσταση της μεταφοράς φορτίου αναπαρίσταται από τον αντιστάτη R_{ct} και σχετίζεται με τον ρυθμό των ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων.

3.2.4.3.3 Στοιχεία για μη ιδανικές διεργασίες

Παρολαυτά τα ισοδύναμα ηλεκτρικά στοιχεία του κυκλώματος παύουν να είναι ισοδύναμα όταν αλλάζουν οι εξωτερικοί παράγοντες. Έτσι έχει αναπτυχθεί ένα γενικευμένο στοιχείο, σταθερής φάσης (CPE, constant phase element) που συμβολίζεται με Q και χρησιμοποιείται για προσομοίωση μη ιδανικών διεργασιών. Οι μη ιδανικές διεργασίες μπορεί να οφείλονται σε διαφορετική τραχύτητα επιφάνεια, σε διαφορετικό πάχος ηλεκτροδίων, σε ανισοκατανομή της ροής ρεύματος ή και στη ανομοιογένεια της ταχύτητας αντίδρασης.

Η εμπέδηση του στοιχείου αυτού δίνεται από τη σχέση:

$$Z_{\Theta} = \frac{1}{Y_0(j\omega)^n} \quad (\text{Εξ. 3.18})$$

Για τιμές του n 1,0 και -1 έχει αποδειχθεί ότι η τιμή του Z είναι ίδια με αυτή πυκνωτή, της αντίστασης και του πηνίου αντίστοιχα. Ενώ το Y_0 εκφράζει τη χωρητικότητα του πυκνωτή.

Το 1899 ο Emil Warburg, βασιζόμενος στο νόμο του Fick για την διάχυση, όρισε το στοιχείο Warburg, W , για να περιγράψει την εμπέδηση λόγω διάχυσης. Έτσι το στοιχείο αυτό σήμερα χρησιμοποιείται για την προσομοίωση μιας μονοδιάστατης διαδικασίας διάχυσης με μεγάλο επίπεδο ηλεκτρόδιο. Η εμπέδηση του στοιχείου αυτού δίνεται από τη σχέση :

$$Z_W = \sqrt{2} \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} \quad (\text{Εξ. 3.19})$$

Τέλος είναι το στοιχείο πεπερασμένης διάχυσης (finite diffusion element, FDE), συμβολίζεται με O και δημιουργήθηκε με βάση το στοιχείο W. Η εμπέδηση του δίνεται από:

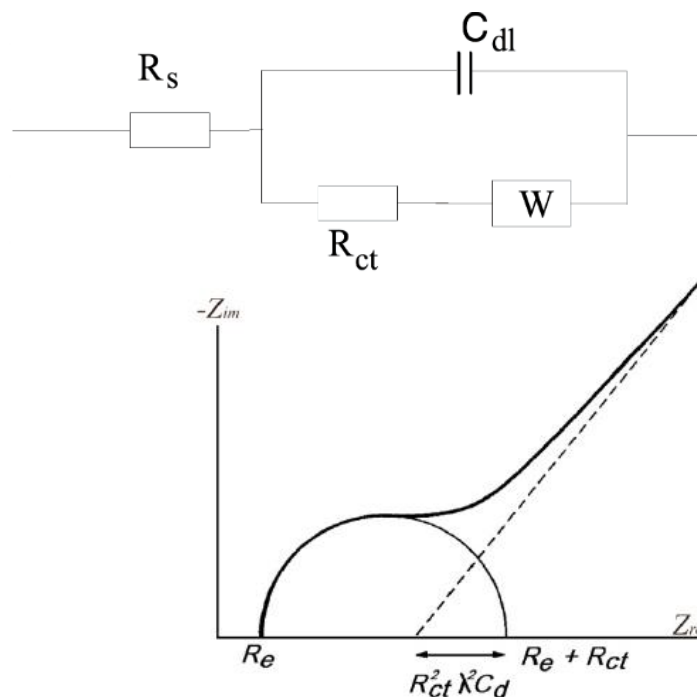
$$Z_O = \frac{1}{Y_O \sqrt{j\omega}} \tanh(B\sqrt{j\omega}) \quad (\text{Εξ. 3.20})$$

$$\text{Όπου } Y_O = \frac{(nF)^2 A}{R_{ig} T} \left(\sum \frac{1}{c_i \sqrt{D_i}} \right)^{-1} \text{ και } B = \frac{\delta}{\sqrt{D_i}}$$

Σε υψηλές συχνότητες το O παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το W.

3.2.4.4 Ηλεκτρικό κύκλωμα Randles

Μετά από όσα αναπτύχθηκαν πιο πάνω αξίζει να αναφερθεί το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του Randles. Για να περιγραφεί η συνδεσμολογία των στοιχείων συνήθως χρησιμοποιούνται οι αγκύλες για να δηλώσουν στοιχεία που βρίσκονται σε σειρά ενώ οι παρενθέσεις δηλώνουν στοιχεία που βρίσκονται παράλληλα. Έτσι το κύκλωμα του Randles είναι το $[R\Omega(C\parallel [R_{ct}W])]$. Αυτό το κύκλωμα περιλαμβάνει σχεδόν όλα τα στοιχεία που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Μια ωμική αντίσταση $R\Omega$ την αντίσταση μεταφοράς φορτίου και τη χωρητικότητα διπλού στρώματος καθώς και το στοιχείο Warburg. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, το διάγραμμα Nyquist μιας τέτοιας συνδεσμολογίας ξεκινάει με το κλασικό ημικύκλιο λόγω των στοιχείων C_{dl} και R_{ct} ενώ λόγω του W το ημικύκλιο μετατρέπεται σε ευθεία γραμμή 45° και εκφράζει τις χαμηλές συχνότητες. Οι διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τις περιοχές επικάλυψης των C_{dl} και R_{ct} με το W. (Σχήμα 3.5)



Σχήμα 3.5.α. Συνδεσμολογία Randles β. Διάγραμμα Nyquist για κύκλωμα Randles [11]

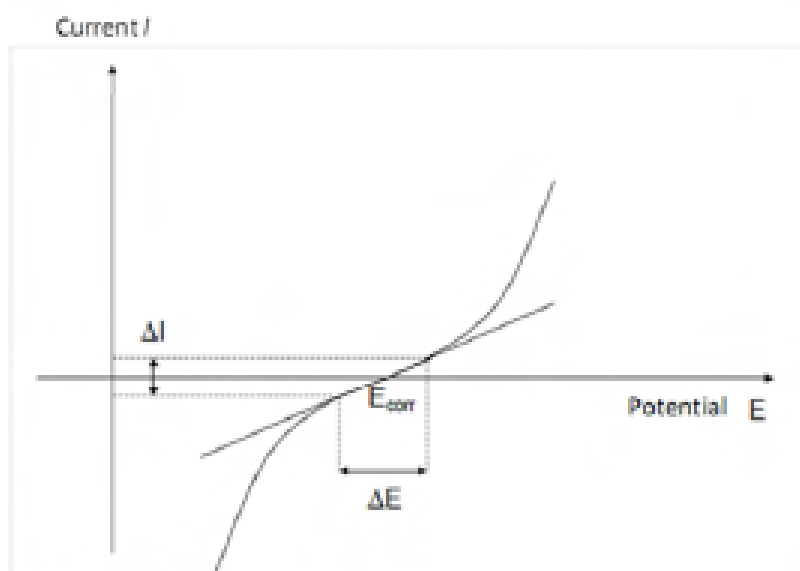
3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ (LRP) [4] [5] [6] [9]

Το βασικότερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι επιτρέπει τους γρήγορους ρυθμούς διάβρωσης έτσι τα αποτελέσματα της εξάγονται σε περίπου 2-10 λεπτά. Παράλληλα, η μέθοδος δεν είναι παρεμβατική. Το μοναδικό μειονέκτημα είναι ότι δεν παρέχει πληροφορίες όσον αφορά τον μηχανισμό της διάβρωσης.

Η τεχνική αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι η ποσότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων που απαιτούνται για τη μετατόπιση του δυναμικού του ηλεκτροδίου είναι ανάλογη με την πυκνότητα του ρεύματος της διάβρωσης και έτσι μετατρέπεται σε ρυθμό διάβρωσης. Έτσι έχουμε συνήθως μια εφαρμογή ενός δυναμικού 10-20 mV σε ένα δοκίμιο που διαβρώνεται ελεύθερα και καταγράφεται το παραγόμενο γραμμικό ρεύμα (Σχήμα 3.6).

Πρώτοι οι Stern και Geary το 1957 βασιζόμενοι στις γενικές αρχές της ηλεκτροχημείας, διατύπωσαν τις βασικές αρχές του ρυθμού διάβρωσης μέσω της καταγραφής των καμπυλών πόλωσης γύρω από την περιοχή του E_{corr} .

Άρα η προτεινόμενη αυτή τεχνική γίνεται μέσω της προσέγγισης της γραμμικής συμπεριφοράς ενός λογαριθμικού διαγράμματος που παρουσιάζει την εξάρτηση του δυναμικού με το ρεύμα.



Σχήμα 3.6 : Διάγραμμα γραμμικής πόλωσης [5]

Το δυναμικό που εφαρμόζεται αρχικά είναι μικρότερης τιμής από το δυναμικό ελεύθερης διάβρωσης και στη συνέχεια γίνεται μεγαλύτερο. Έτσι προκύπτει η αντίσταση πόλωσης R_p που είναι ο λόγος του εφαρμοζόμενου δυναμικού προς την προκύπτουσα απόκριση του ρεύματος. Η αντίσταση πόλωσης είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον ενιαίο ρυθμό διάβρωσης. Η κλίση της καμπύλης πόλωσης όπως φαίνεται και στο σχήμα είναι η αντίσταση πόλωσης και μαθηματικά διατυπώνεται:

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (\text{Εξ. 3.21})$$

Μόλις προσδιοριστεί η αντίσταση πόλωσης μπορεί να υπολογιστεί το ρεύμα διάβρωσης μέσα από την εξίσωση των Stern και Geary:

$$i_{\text{corr}} = \frac{b_a \cdot b_c}{2.3 \cdot (b_a + b_c)} \cdot \frac{1}{R_p} = \frac{B}{R_p} \quad (\text{Εξ. 3.22})$$

Όπου,

B είναι η σταθερά των Stern και Geary, σε mV

i_{corr} είναι το ρεύμα διάβρωσης σε $\frac{A}{\text{cm}^2}$

R_p είναι η αντίσταση πόλωσης σε Ωcm^2

Τα b_a και b_c ονομάζονται παράμετροι Tafel και προκύπτουν από τις κλίσεις των καμπυλών πόλωσης για την ανοδική και καθοδική περιοχή αντίστοιχα. Έχουν μονάδα μέτρησης V/decade του ρεύματος.

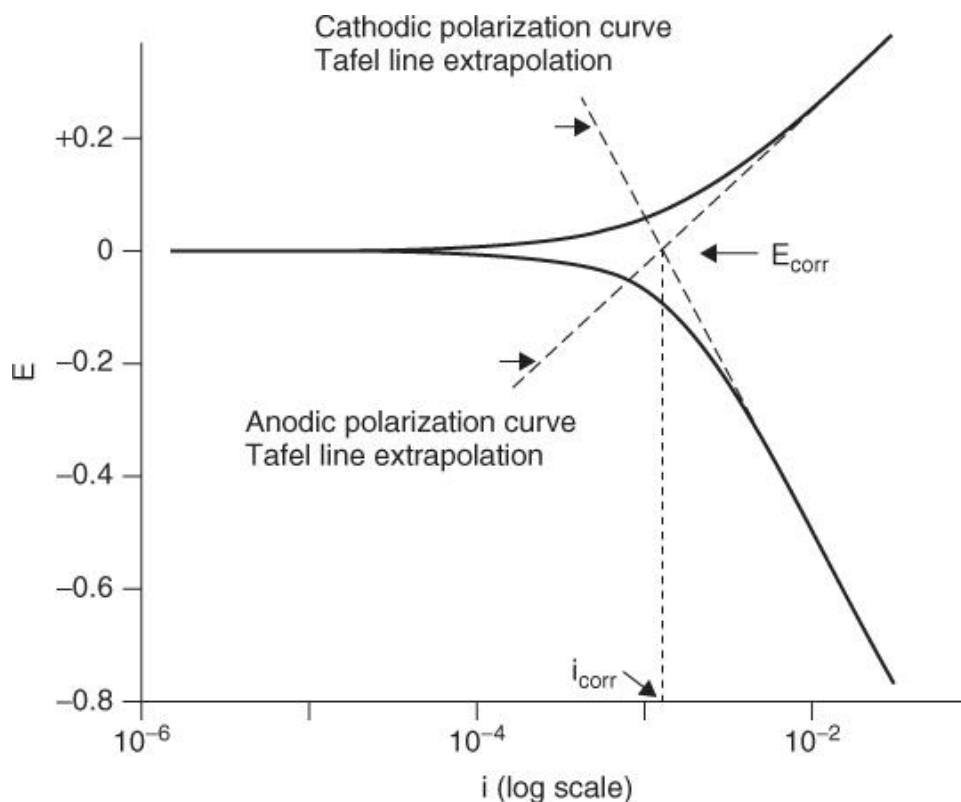
Τέλος σημειώνονται τα εξής. Σε περίπτωση που η περιοχή του ηλεκτροδίου διπλασιαστεί τότε η αντίσταση πόλωσης θα υποδιπλασιαστεί και μετά θα παραμείνει σταθερή στη τιμή αυτή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο ρυθμός διάβρωσης ανά μονάδα επιφάνειας να είναι ανεξάρτητος από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Επιπλέον η σταθερά B επηρεάζεται πάντα από τον μικρότερο συντελεστή ανοδικής και καθοδικής περιοχής. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι αν για παράδειγμα το $b_c \rightarrow \infty$ τότε η σταθερά $B = \frac{b_a}{2.3}$ και αντίστοιχα για το $b_a \rightarrow \infty$.

Επιπλέον η γνώση των R_p , b_a , και b_c επιτρέπει τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Η μέθοδος υπολογισμού θα αναπτυχθεί στην παράγραφο για την μέθοδο προεκβολής των ευθειών Tafel γιατί η μέθοδος συμπίπτει.

3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΕΚΒΟΛΗΣ ΤΩΝ ΕΥΘΕΙΩΝ TAFEL [1] [4] [6] [8] [9]

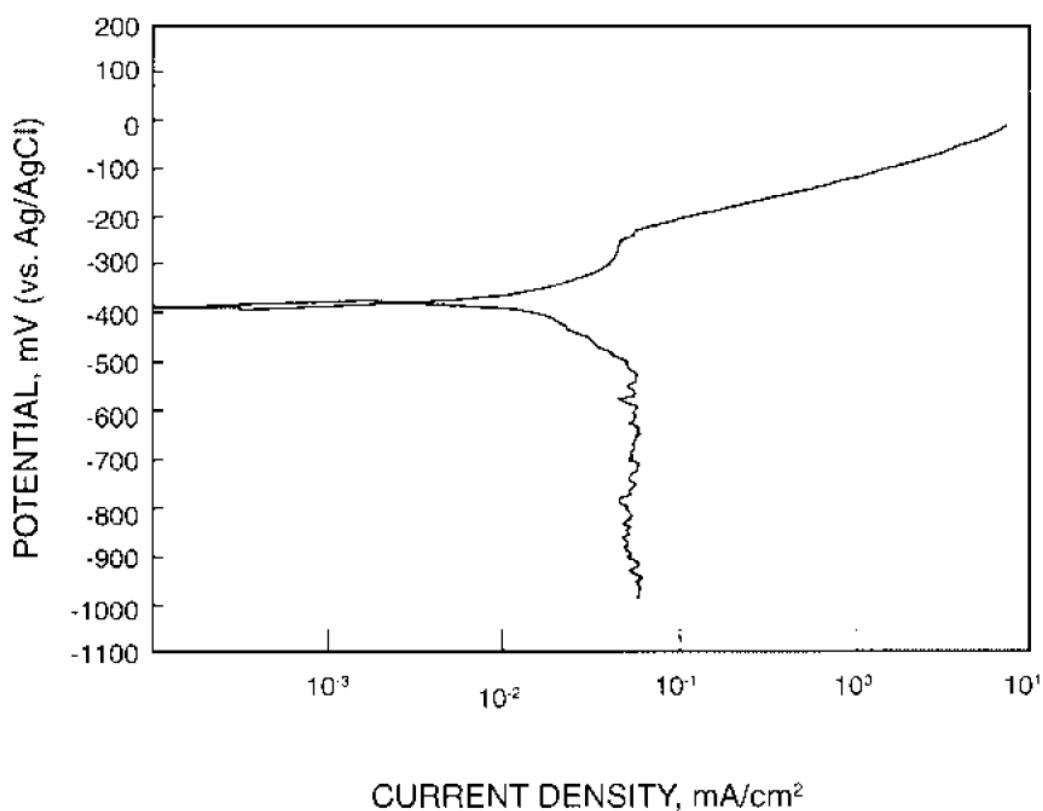
Η μέθοδος αυτή ακολουθεί τον νόμο του Tafel όπως διατυπώθηκε από τον ίδιο το 1905 και σύμφωνα με τον οποίο ο λογάριθμος της πυκνότητας του ρεύματος σε μια ηλεκτροχημική αντίδραση ποικίλλει ανάλογα με το δυναμικό του ηλεκτροδίου ($\log i \sim E$). Ο νόμος του Tafel έγινε με βάση την εμπειρική παρατήρηση και έπειτα εξελίχθηκε στην σπουδαιότερη ηλεκτροχημική τεχνική αφενός για τον υπολογισμό της πυκνότητας του ρεύματος και αφετέρου για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάβρωσης. Βασίζεται στην προέκταση της καμπύλης πόλωσης τόσο ως προς το ανοδικό όσο και ως προς το καθοδικό μέρος (Σχήμα 3.7). Το βασικότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η καταστροφή του δοκιμίου κατά την ανοδική πόλωση, με αποτέλεσμα να απαιτείται λείανση πριν από κάθε μέτρηση.)

Όπως προαναφέρθηκε η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί τα στοιχεία που προκύπτουν από την καθοδική και ανοδική μέτρηση πόλωσης. Τα δεδομένα της καθοδικής προτιμώνται, δεδομένου ότι είναι ευκολότερο να μετρηθούν πειραματικά. Όταν πραγματοποιείται εφαρμογή δυναμικού μακριά από το δυναμικό διάβρωσης παίρνουμε αντίστοιχα μια καθοδική ή ανοδική μέτρηση. Όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί αν προεκτείνουμε τα γραμμικά τμήματα του διαγράμματος πόλωσης προκύπτει μια τομή η οποία μας δίνει το E_{corr} και το i_{corr} .



Σχήμα 3.7.α: Διάγραμμα προεκβολής των ευθειών Tafel [9]

Ο λογαριθμικός άξονας του διαγράμματος μπορεί να οδηγήσει σε σφάλμα κατά τη διαδικασία των μετρήσεων καθώς και μια λανθασμένη επιλογή κλίσης των καμπυλών μπορεί να οδηγήσει σε απόκλιση του ρεύματος διάβρωσης περίπου $5-10 \frac{A}{cm^2}$. Για το λόγο αυτό, κατά τη χρήση της μεθόδου εφαρμόζονται δυο κανόνες για να είναι τα αποτελέσματα όσο το δυνατόν πιο ακριβή. Για την ακριβή προέκταση των καμπυλών Tafel πρέπει τουλάχιστον μια από τις καμπύλες πόλωσης να παρουσιάζουν ακριβώς γραμμική συμπεριφορά σε λογαριθμική κλίμακα για τουλάχιστον 10μΑ της πυκνότητας του ρεύματος. Δεύτερον η προέκταση πάντα πρέπει να ξεκινάει τουλάχιστον 50-100 mV μακριά από το E_{corr} .



3.7.β: Παράδειγμα δεδομένων σε πραγματικό διάγραμμα πόλωσης που απεικονίζει τα προβλήματα που σχετίζονται με την ανάλυση της περιορισμένης ή ψευδής περιοχής Tafel [9]

Πρέπει να επισημανθεί ότι οι πραγματικές καμπύλες πόλωσης δεν είναι σχεδόν ποτέ ίδιες με τις πρότυπες που έχουν παρουσιαστεί όποτε πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή στην ερμηνεία των εξαγόμενων καμπυλών και των αποτελεσμάτων τους.

3.4.1 Υπολογισμός ρυθμού διάβρωσης

Το ρεύμα διάβρωσης I_{corr} και το δυναμικό E_{corr} προκύπτουν από ένα γράφημα Tafel όπως περιγράφηκε πιο πάνω. Ο ρυθμός διάβρωσης, (Corrosion Rate, C.R), μετριέται σε miles per year (mpy) και μπορεί να υπολογισθεί από το i_{corr} , χρησιμοποιώντας την εξίσωση :

$$C. R = \frac{0.13 \cdot I_{corr} \cdot (E.W)}{d} \quad (\text{Εξ. 3.23})$$

όπου,

E.W. είναι το ισοδύναμο βάρος διάβρωσης σε gr

d, είναι η πυκνότητα του υλικού σε $\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$

I_{corr} , είναι πυκνότητα ρεύματος σε $\frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$

Το ανοδικό και καθοδικό τμήμα της καμπύλης Tafel, περιγράφεται από την εξίσωση :

$$n = \beta \cdot \log \frac{i}{i_{corr}} \quad (\text{Εξ. 3.24})$$

όπου

η , είναι η διαφορά δυναμικού του δοκιμίου και του δυναμικού διάβρωσης

β , είναι η σταθερά Tafel

i_{corr} , είναι ρεύμα για το η και μετριέται σε μA .

Άρα για το ανοδικό τμήμα η εξίσωση μετατρέπεται σε

$$n = \beta_A \cdot \log \frac{i_{O,M}}{i_{corr}} \quad (\text{Εξ. 3.25})$$

Ενώ για το καθοδικό τμήμα

$$n = -\beta_C \cdot \log \frac{i_{R,Z}}{i_{corr}} \quad (\text{Εξ. 3.26})$$

όπου $i_{O,M}$ είναι το ρεύμα της οξειδωσης και το $i_{R,Z}$ είναι το ρεύμα της αναγωγής

Τέλος κάποια από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι κάτω από ιδανικές συνθήκες τα αποτελέσματα της είναι αρκετά ακριβή και σαφώς καλύτερα από άλλες συμβατικές μεθόδους. Επίσης μπορεί να μετρήσει ακόμα και εξαιρετικά μικρούς ρυθμούς διάβρωσης και αποτυπώσει το ρεύμα διάβρωσης στα διαγράμματα Tafel και όλα αυτά μπορούν να γίνουν σε σχετικά γρήγορο χρονικό διάστημα.

Βιβλιογραφία 3^{ου} Κεφαλαίου

1. Badea G.E, Caraban A., Sebesan M., Dzitac S, Cret P., Setel A. University of Oradea, Faculty of Energy Engineering, University of Oradea, Faculty of Science, Focus Studio Srl, University of Oradea, National Geothermal Research Centre. Polarisation measurements used for corrosion rates determination. March 2010
2. Byoung-Yong Chang, Su-Moon Park. Electrochemical Impedance Spectroscopy
3. Gamry Instruments, Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy
4. Khaled Alawadhi, Inhibition of Weld Corrosion in Flowing Brines Containing Carbon Dioxide, PhD THESIS, Cranfield University, School of Applied Sciences. 2009
5. Muazzam Ghous SOHAIL, Corrosion of Steel in Concrete: Development of an Accelerated Test by Carbonation and Galvanic Coupling, University of Toulouse, Doctor of philosophy, thesis, May 2013
6. Nedal Mohamed, Comparative Study of the Corrosion Behaviour of Conventional Carbon Steel and Corrosion Resistant Reinforcing Bars. A Thesis Submitted to the College of Graduate Studies and Research In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in the Department of Civil Engineering University of Saskatchewan, Saskatoon. 2009
7. Peng Wang, Corrosion Behaviour of Zirconium Alloys in High Temperature Aqueous Environment By Electrochemical Impedance Spectroscopy, A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Sciences. October 2011
8. Princeton Applied Research, Basics of Corrosion Measurements, Illinois
9. Robert G.Kelly, John R.Scully, David W.Shoesmith, Rudolph G. Buchheit. Electrochemical techniques in corrosion science and engineering.
10. Ying Zhu, Wenhua H. Zhu and Bruce J. Tatarchuk, *In-Situ* Dynamic Characterization of Energy Storage and Conversion Systems.
11. C. Reece. An introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς σε διάβρωση συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση (FSW), χάλυβα υψηλής αντοχής AH36 και χάλυβα υψηλής αντοχής χαμηλής κραμάτωσης (HSLA, S690). Η μελέτη του φαινομένου της διάβρωσης έγινε τόσο με ηλεκτροχημικές μεθόδους όσο και με τη βοήθεια του θαλάμου αλατονέφωσης.

Για την ολοκληρωμένη μελέτη των συγκολλήσεων αυτών εφαρμόστηκαν και άλλες πειραματικές μέθοδοι. Έτσι, για τη μελέτη της μικροδομής των χαλύβων χρησιμοποιήθηκε η Οπτική Μικροσκοπία, μέσω στερεοσκοπίου και μικροσκοπίου καθώς και η Μικροσκληρομέτρηση.

Στις επόμενες παραγράφους, περιγράφεται συνοπτικά η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, καθώς και τα κυριότερα χαρακτηριστικά των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν. Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν καθώς και ο σχολιασμός τους.

4.2 ΥΛΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΩΝ – ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ [9] [12]

Αρχικά όλα τα δοκίμια ήταν συγκολλημένα με την μέθοδο δια τριβής με ανάδευση. Η συγκόλληση όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1 ήταν διπλή και πραγματοποιήθηκε στον TWI από τον οποίο εστάλησαν τα δοκίμια. Σε κάθε περίπτωση θα μπορούσε η συγκόλληση να γίνει με ένα μόνο πέρασμα αυξάνοντας το μήκος της κεφαλής αλλά μέσω της διπλής συγκόλλησης επιτυγχάνεται αύξηση της αντοχής σε κόπωση και της σκληρότητας. Παράλληλα εξαλείφονται οι ατέλειες ενώ περιορίζονται αρκετά οι παραμορφώσεις των προς συγκόλληση τεμαχίων.

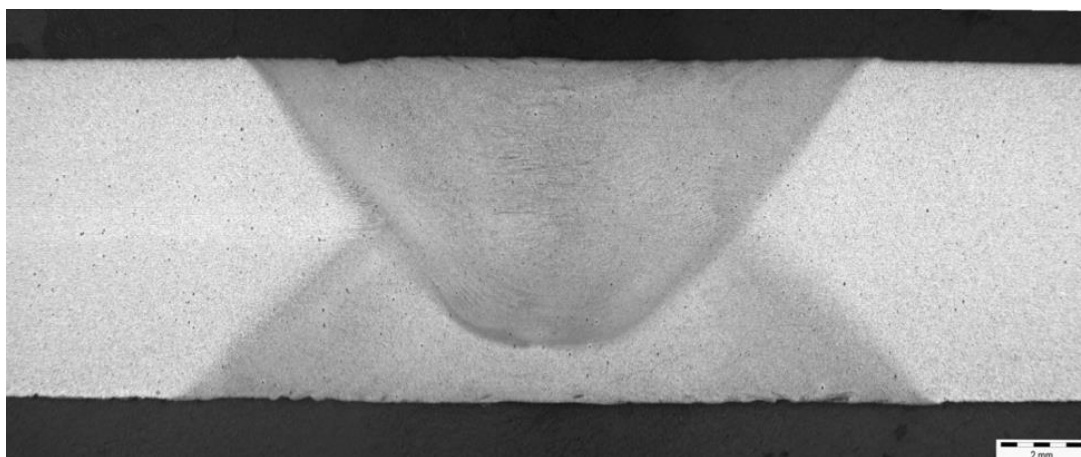
Η μηχανή με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις των υπό μελέτη δοκιμίων είναι η FY31 PowerStir machine. Η μηχανή αυτή ασκεί μέγιστη κατακόρυφη δύναμη 150kN ενώ η μέγιστη ροπή είναι 2480Nm. Το υλικό τόσο της κεφαλής όσο και του περιαιχενίου είναι το rcBN σε περιεκτικότητα 70% ενώ το υπόλοιπο 30% είναι ο χάλυβας Q70 τα οποία κατασκευάστηκαν από την MegaStir Inc. of Prono. Η προσθήκη του Q70 βελτιώνει τη συμπεριφορά του εργαλείου για συγκολλήσεις σε υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, το μήκος της κεφαλής ήταν 8mm οπότε προκύπτουν 4 mm επικάλυψης από την δεύτερη συγκόλληση στην περιοχή της πρώτης.

Για τη κατασκευή των συγκολλήσεων που μελετήθηκαν εφαρμόστηκε κατακόρυφη δύναμη 90kN, ταχύτητα προώθησης 100mm/min και ταχύτητα περιστροφής 150 rpm.

Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης έγινε χρήση αργού με σκοπό να προστατευτεί το εργαλείο από τυχόν οξείδωση στις υψηλές θερμοκρασίες. Η παροχή του αργού γινόταν μέσω ακροφυσίου, περιμετρικά του εργαλείου κατά τη διάρκεια τόσο της διείσδυσης όσο και της περιστροφής του. Η παροχή ήταν περίπου 14 l/min ενώ τελικά εκτός από προστασία του εργαλείου επετεύχθη και προστασία της επιφάνειας των προς συγκόλληση τεμαχίων από την οξείδωση.

Τα δοκίμια ήταν 26 και ανήκαν σε δύο γραμμές συγκόλλησης. Η πρώτη γραμμή με όνομα CHC ήταν συγκόλληση χάλυβα υψηλής αντοχής AH36 με μικροκραμματωμένο χάλυβα υψηλής αντοχής S690, τα χαρακτηριστικά των οποίων έχουν αναπτυχθεί στο 2^ο κεφάλαιο. Η δεύτερη γραμμή με όνομα HCH είχε όμοια μέταλλα βάσης με υλικό τον S690. Τέλος όλα τα δοκίμια είναι ιδίων διαστάσεων 100x70x12 mm.

Είδος Συγκολλήσεων	Μέταλλα συγκόλλησης	Διαστάσεις δοκιμίων (13)
Ετερογενείς συγκολλήσεις	AH36- S690	100x70x12 mm
Ομοιογενείς συγκολλήσεις	S690-S690	100x70x12 mm



Σχήμα 4.1 : FSW διπλή συγκόλληση [9]

4.3 ΧΗΜΙΚΗ ΠΡΟΣΒΟΛΗ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ [13, 14]

Η οπτική μικροσκοπία είναι η σημαντικότερη διαδικασία για την παρατήρηση και τον χαρακτηρισμό της μικροδομής των υλικών. Πριν την παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο, θα πρέπει να γίνει η κατάλληλη προετοιμασία του δοκιμίου η οποία αποτελείται από τα στάδια που ακολουθούν.

- **Κοπή** των δοκιμίων στο δισκοτόμο του εργαστηρίου και στη συνέχεια εγκιβωτισμός τους σε εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών (ρητίνη και σκληρυντής). Η κοπή των δοκιμίων γίνεται σε καθορισμένες διαστάσεις ώστε να χωράει το δοκίμιο στα καλούπια του εγκιβωτισμού αλλά κυρίως στο ηλεκτρολυτικό κελί (Σχήμα 4.2.α).
- **Λείανση** της προς παρατήρηση επιφάνειας. Πραγματοποιείται είτε με μηχανικές είτε με ηλεκτροχημικές μεθόδους και αποσκοπεί στην εξάλειψη των γεωμετρικών ανωμαλιών της επιφάνειας. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε μηχανική λείανση. Χρησιμοποιήθηκαν λειαντικά χαρτιά αποτελούμενα από σκληρούς κόκκους καρβιδίου του πυριτίου, SiC ή οξείδια του αλουμινίου Al_2O_3 των οποίων η αποξεστική δράση εξαλείφει τις επιφανειακές ανωμαλίες που έχουν μέγεθος μεγαλύτερο του μέσου μεγέθους των λειαντικών κόκκων. Η λείανση ξεκινάει με το τραχύτερο χαρτί, grit 80 και αφού περάσει ανά δύο λεπτά από τα χαρτιά, 120, 220, 320, 500, 800, 1000, 1200 και 2000 καταλήγει στο λιγότερο τραχύ στο grit 4000. Σε όλη τη διάρκεια της λείανσης απαιτείται η ροή νερού το οποίο ψύχει το δοκίμιο και απομακρύνει τα ρινίσματα μετάλλου και ρητίνης από την επιφάνεια επαφής (Σχήμα 4.2.β).



Σχήμα 4.2.α: Δισκοτόμος Μηχανουργείου



Σχήμα 4.2.β: Μηχανή λείανσης και στίλβωσης

- Το τελικό στάδιο της λείανσης είναι η **στίλβωση** και περιλαμβάνει λείανση σε ειδικά βελούδα με τη βοήθεια κolloειδούς αιωρήματος Al_2O_3 όταν πρόκειται για χάλυβες, spray με λεπτούς κόκκους διαμαντιού για αλουμίνια κλπ. Στην επεξεργασία των δοκιμίων που εξετάστηκαν, χρησιμοποιήθηκε αιώρημα Al_2O_3 με κόκκους αλούμινας πρώτα 1 μ m και έπειτα 0.1 μ m. Γενικά, η στίλβωση βελτιώνει την εξωτερική εμφάνιση του υλικού, αυξάνει τις αντιδιαβρωτικές του ιδιότητες καθώς και την αντοχή.
- **Χημική Προσβολή**, γίνεται πάντα σε μια επιφάνεια με σκοπό να αποκαλυφθούν λεπτομέρειες της μικροδομής του υλικού. Είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη τεχνική αποκάλυψης των χαρακτηριστικών της δομής και βασίζεται στην εκλεκτική διάβρωση στα όρια των κόκκων. Επιπλέον, τα άτομα που ανήκουν σε διαφορετικά κρυσταλλικά πλέγματα, δηλαδή διαφορετικές φάσεις, διαλύονται με διαφορετικούς ρυθμούς με αποτέλεσμα τη δημιουργία αντίθεσης στην επιφάνεια και την εμφάνιση των χαρακτηριστικών μικροδομής κατά την παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο.

Η προσβολή των υλικών γίνεται πάντα με εμβάπτιση της λείας μεταλλικής επιφάνειας σε κατάλληλο χημικό διάλυμα. Η εμβάπτιση γίνεται για ελάχιστο χρονικό διάστημα, περίπου 15 δευτερόλεπτα, γιατί περαιτέρω εμβάπτιση καταστρέφει την επιφάνεια. Το χημικό διάλυμα διαφέρει ανάλογα με το υλικό του δοκιμίου και στην περίπτωση των χαλύβων τόσο του AH36 όσο και του S690 χρησιμοποιήθηκε διάλυμα με 98% αιθανόλη, Ethanol Puriss και 2% νιτρικό οξύ, Nitric Acid, που ονομάζεται Nital.

Αφού ακολουθηθούν τα στάδια που αναπτύχθηκαν πιο πάνω τα δοκίμια είναι έτοιμα προς παρατήρηση. Τα μέσα οπτικής παρατήρησης αναπτύσσονται παρακάτω.

4.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟΥ [4]

Το οπτικό μικροσκόπιο του εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, ΕΜΠ, είναι τύπου Leica DMILM (Σχήμα 4.3) και τα κυριότερα μέρη του είναι :

- Η πηγή φωτός
- Οι φακοί που κατευθύνουν τη φωτεινή δέσμη
- Το διάφραγμα
- Οι μεγεθυντικοί φακοί
- Το ημιανακλαστικό κάτοπτρο
- Ο αντικειμενικός φακός
- Η τράπεζα πάνω στην οποία τοποθετείται το προς παρατήρηση δοκίμιο και επιτρέπει την μετακίνηση του μέσω κατάλληλης διάταξης
- Ο προσοφθάλμιος φακός



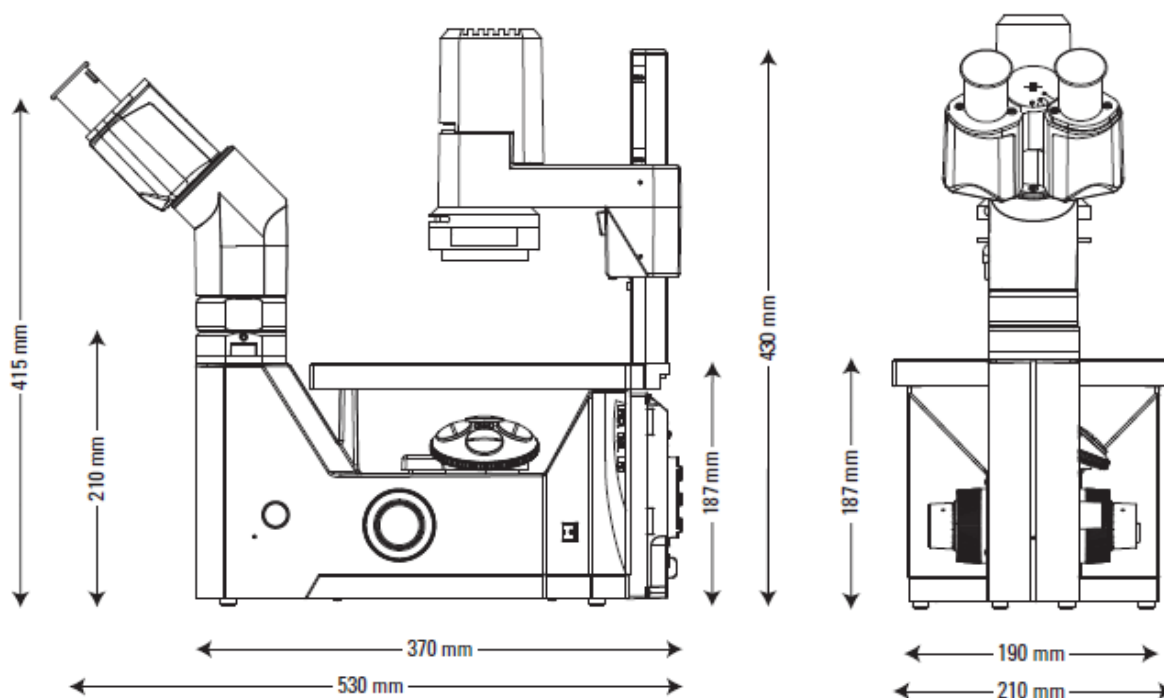
Σχήμα 4.3 Μικροσκόπιο LEICA DMILM

Εκτός από τα παραπάνω, το οπτικό μικροσκόπιο είναι εφοδιασμένο με κατάλληλη διάταξη που επιτρέπει τη στερέωση κάμερας για να είναι δυνατή η σύνδεση του με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Επίσης διαθέτει δύο τύπους μεγεθυντικών φακών, τους αντικειμενικούς και τους προσοφθάλμιους. Οι αντικειμενικοί είναι πιο σημαντικοί γιατί συγκεντρώνουν το ανακλώμενο από το μεταλλικό δοκίμιο φως και συνθέτουν την εικόνα. Είναι συνήθως βιδωτοί και τοποθετούνται πάνω σε μια περιστρεφόμενη βάση, η οποία δέχεται τέσσερις φακούς με διαφορετική μεγέθυνση ο καθένας.

Οι προσοφθάλμιοι φακοί έχουν σταθερή μεγέθυνση και βρίσκονται στο σημείο από το οποίο παρατηρεί ο χρήστης του μικροσκοπίου και μεγεθύνουν την παραγόμενη από τον αντικειμενικό φακό εικόνα, δίνοντας το τελικό αποτέλεσμα. Η συνολική μεγέθυνση της παρατηρούμενης εικόνας είναι το γινόμενο της μεγέθυνσης των δύο αυτών φακών. Οι μεγεθύνσεις που λαμβάνονται τελικά με το μικροσκόπιο του Εργαστηρίου είναι x100, x200, x500 και x1000.

4.4.1 Διαστασιολόγηση του μικροσκοπίου

Οι βασικές διαστάσεις του μικροσκοπίου που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα δίνονται από το εγχειρίδιο της Leica και φαίνονται στα σχήματα 4.4.

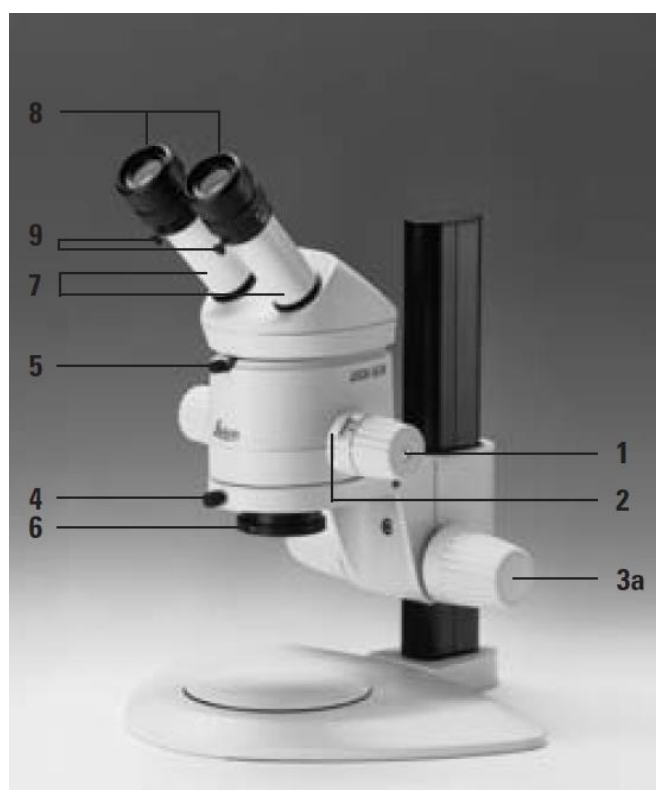


Σχήμα 4.4 : Διαστάσεις του μικροσκοπίου LEICA DMILM

4.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΟΥ [4]

Το στερεοσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα είναι το MZ6 της εταιρείας Leica. Τα κυριότερα μέρη του όπως φαίνονται και αριθμητικά στο σχήμα 4.5 που ακολουθεί είναι :

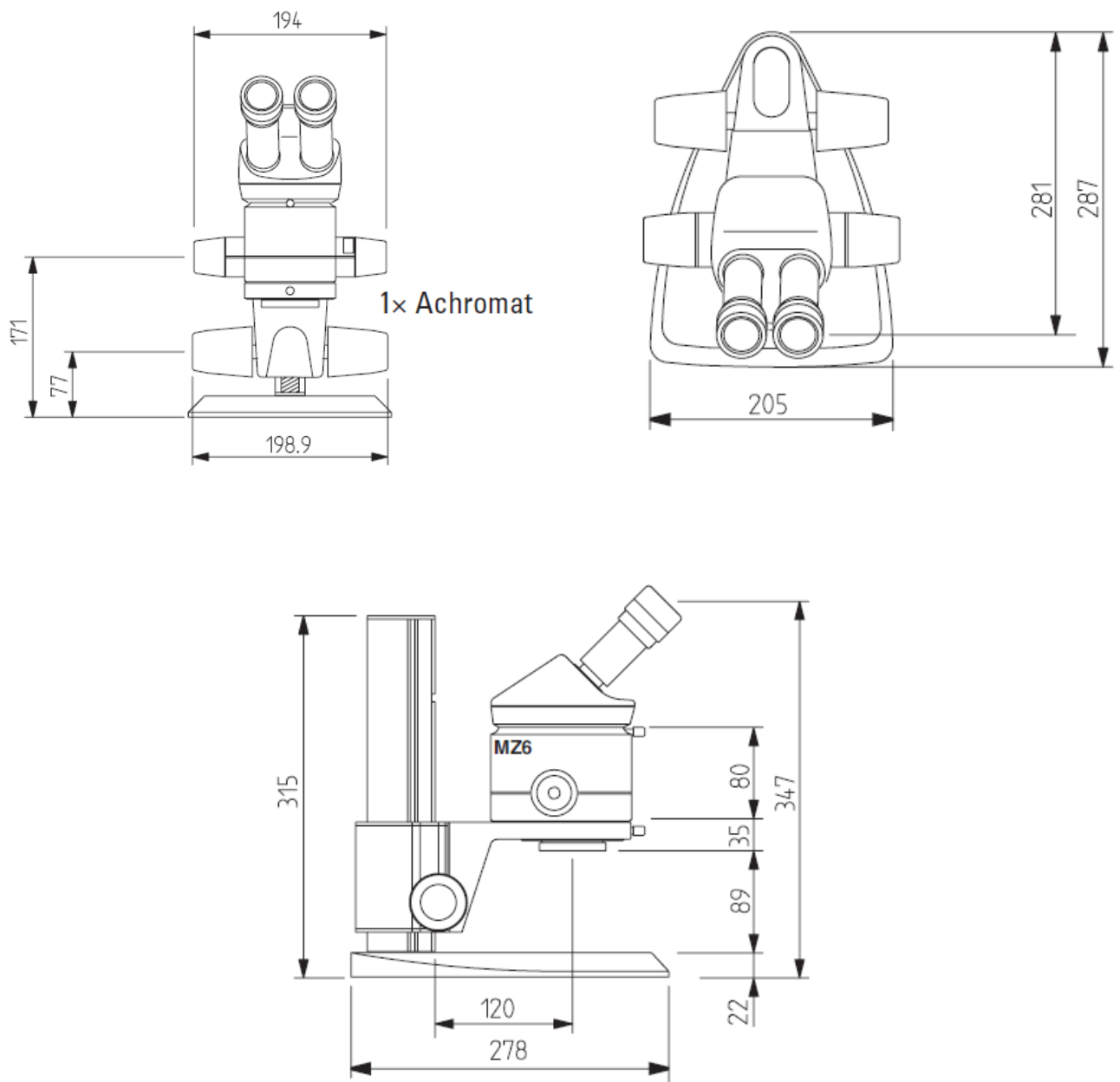
1. Ρυθμιστής μεγέθυνσης (Magnification changer)
2. Ρυθμιστής του Zoom (Engaging ratchet positions)
3. Οδηγός εστίασης (Focusing drive)
4. Βίδα σύσφιξης που συγκρατεί το οπτικό κομμάτι με το υπόλοιπο στερεοσκόπιο
5. Βίδα σύσφιξης που συγκρατεί τον διοπτρικό σωλήνα με το οπτικό κομμάτι
6. Αντικείμενο συναλλαγής του δοκιμίου (Interchangeable objective)
7. Ρυθμιζόμενοι σωλήνες για οπτική παρατήρηση (Adjustable eyepiece tubes), η απόσταση μεταξύ τους είναι από 52 έως 76 mm.
8. Ειδικά προσοφθάλμια για άτομα που φορούν γυαλιά
9. Βίδες σύσφιξης των προσοφθαλμίων με τον διοπτρικό σωλήνα



Σχήμα 4.5: Στερεοσκόπιο MZ6 με αριθμημένα τα επιμέρους στοιχεία

4.5.1 Κύρια μεγέθυνση και διαστασιολόγηση του MZ6

Το στερεοσκόπιο MZ6 περιλαμβάνει εννέα (9) στάδια μεγέθυνσης. Τα στάδια αυτά ξεκινώντας από τη μικρότερη μεγέθυνση είναι 0.63, 0.8, 1, 1.25, 1.6, 2, 2.5, 3.2 και 4 οποία πολλαπλασιάζονται x10 για να δώσουν την τελική μεγέθυνση καθώς ο προσοφθάλμιος φακός του στερεοσκοπίου αυξάνει κατά 10 φορές τη μεγέθυνση. Παρακάτω, ακολουθεί η πλήρης διαστασιολόγηση του στερεοσκοπίου έτσι όπως δίνεται από το εγχειρίδιο της Leica (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6: Διαστασιολόγηση του MZ6 σε όλες τις όψεις

4.6 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ [13]

Γενικά, η δοκιμή σκληρότητας πραγματοποιείται με πίεση ενός διεισδυτή γνωστής γεωμετρίας και μηχανικών ιδιοτήτων στο υπό μελέτη δοκίμιο. Ο διεισδυτής μπορεί να είναι σφαιρικός (Brinell και Rockwell B), κωνικός (Rockwell C) ή να έχει μορφή πυραμίδας (Vickers και Knoop). Όταν οι μετρήσεις σκληρότητας γίνονται με εφαρμογή πολύ μικρών φορτίων της τάξης των μερικών δεκάδων γραμμαρίων, τότε αυτές καλούνται μικροσκληρομετρήσεις. Κατά τη μικροσκληρομέτρηση Vickers χρησιμοποιείται ως διεισδυτής πυραμίδα διαμαντιού τετραγωνικής βάσης με γωνία κορυφής $\alpha=136^\circ$ και γνωστή δύναμη που κυμαίνεται από 5-1000gr. Η δύναμη εφαρμόζεται σταδιακά και η επαφή διαρκεί 10-20 δευτερόλεπτα. Η δύναμη πρέπει να είναι γνωστή επακριβώς (αναφορά στο πρότυπο ASTM E 384 σε ό,τι αφορά τις ανοχές). Μετά την αφαίρεση της δύναμης μετρούνται οι δυο διαγώνιοι (Σχήμα 4.7) και χρησιμοποιείται ο μέσος όρος για τον υπολογισμό της σκληρότητας κατά Vickers σύμφωνα με τη σχέση:

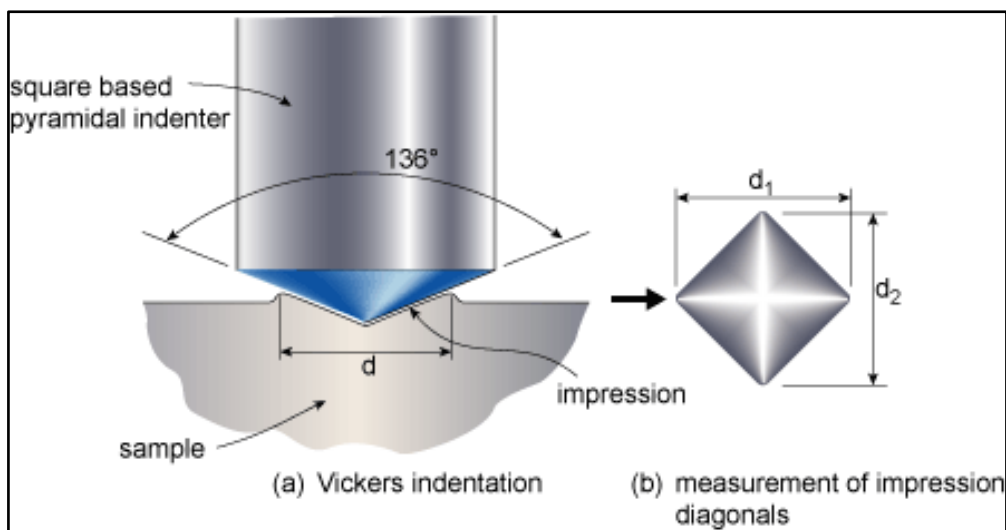
$$HV = \frac{2000 \cdot P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = \frac{1854.4 \cdot P}{d^2} \quad (\text{Εξ. 4.1})$$

όπου:

d: μέσος όρος διαγωνίων σε μm

α : γωνία κορυφής $=136^\circ$

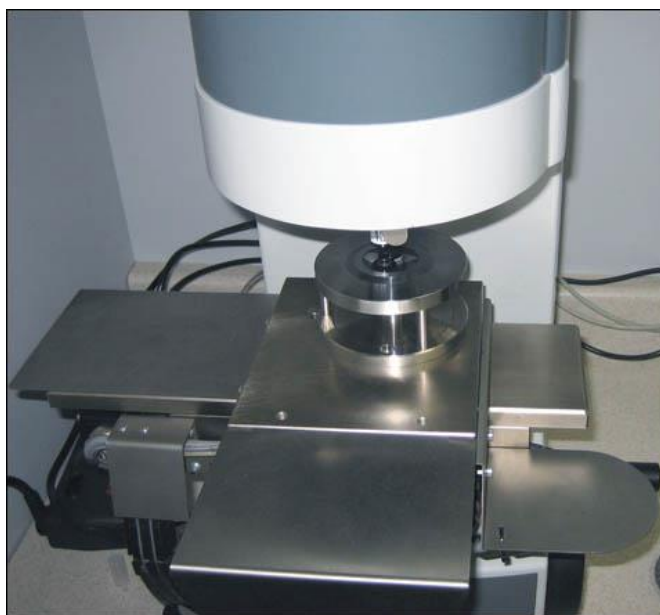
P: δύναμη σε gr.



Σχήμα 4.7 : Απεικόνιση της μεθόδου μικροσκληρομέτρησης (Vickers)

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε μηχάνημα μικροσκληρομετρήσεων της εταιρείας Stuers και συγκεκριμένα το μοντέλο Duramin A300 (Σχήμα 4.8). Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Κέντρο Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων (ΚΔΕΠ) το οποίο διαθέτει το συγκεκριμένο μηχάνημα. Με το Duramin A300 η διαδικασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη καθώς διαθέτει κλειστό κύκλωμα ελέγχου με υποδοχή του φορτίου, παροχή συνεχούς ρεύματος καθώς και ηλεκτρονική μονάδα μέτρησης και ελέγχου. Έτσι λόγω της αυτοματοποίησης τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι εξαιρετικά ακριβή και δίνει τη δυνατότητα για μεγάλη εξοικονόμηση χρόνου.

Παράλληλα, διαθέτει δύο κάμερες όπου η πρώτη δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης της εικόνας, ενώ η δεύτερη CCD κάμερα δίνει ένα ευρύ φάσμα οπτικού πεδίου διαστάσεων 30x40 mm και επιτρέπει τη μετατροπή της εικόνας από micro σε macro για να διευκολύνει έτσι την επιλογή των αρχικών σημείων δοκιμής καθώς και την επιλογή της σειράς δοκιμών. Τέλος η κινητή τράπεζα στην οποία τοποθετείται το δοκίμιο επιτρέπει την εκτέλεση της προεπιλεγμένης σειράς δοκιμών.



Σχήμα 4.8 : Μηχάνημα Stuers, Duramin A300

4.7 ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΟ ΚΕΛΙ [2] [3] [5] [6] [8] [13]

Σε ένα ηλεκτροχημικό κελί συμβαίνουν διάφορες αντιδράσεις οξειδωσης και αναγωγής εντός της επιφάνειας του ηλεκτροδίου. Κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων αυτών συμβαίνει ανταλλαγή ηλεκτρονίων ανάμεσα στα διάφορα στοιχεία που λαμβάνουν μέρος. Τα στοιχεία τα οποία κερδίζουν ηλεκτρόνια υφίστανται και μείωση του βαθμού οξειδωσης σε αντίθεση με αυτά που χάνουν ηλεκτρόνια. Η γενική εξίσωση που περιγράφει μια τέτοια αντίδραση, αν θεωρήσουμε ότι το O χάνει ηλεκτρόνια τα οποία πηγαίνουν R είναι :



Ένα ηλεκτροχημικό κελί αποτελείται κυρίως από τον ηλεκτρολύτη και δύο ηλεκτρόδια, το ανοδικό και το καθοδικό. Η οξειδωση συμβαίνει στην άνοδο ενώ η αναγωγή στην κάθοδο. Η πιο πάνω εξίσωση περιγράφει την αντίδραση της καθόδου. Η ανάποδη εξίσωση όπου το R χάνει ηλεκτρόνια γίνεται στην άνοδο όπου ξεκινάει η οξειδωση της ανόδου. Έτσι, ο συνδυασμός αυτών των δύο αντιδράσεων προκαλεί την παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της ροής ηλεκτρονίων μέσα σε ένα κύκλωμα είτε αυθόρμητα είτε όχι.

4.7.1 Θερμοδυναμική του ηλεκτροχημικού κελιού

Όπως προαναφέρθηκε, μέσω της οξειδωσης αναγωγής παράγεται ρεύμα εντός ενός κυκλώματος. Όσον αφορά το δυναμικό στο ηλεκτροχημικό κελί, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από δυναμικό του ηλεκτροδίου αναγωγής και λαμβάνεται από την εξίσωση του Nernst.

$$E^e_{\text{cell}} = E^e_C - E^e_A = E^e_{\text{min}} \quad (\text{Εξ. 4.3})$$

Όπως προκύπτει από την εξίσωση, το δυναμικό ισορροπίας στο κελί είναι η διαφορά μεταξύ του δυναμικού της καθόδου και της ανόδου. Αυτό αποτελεί και την ελάχιστη τάση που απαιτεί το σύστημα για την πραγματοποίηση της οξειδωσης και αναγωγής. Τις περισσότερες όμως φορές το δυναμικό τόσο της οξειδωσης όσο και της αναγωγής δεν βρίσκεται στην αναμενόμενη τιμή, έτσι ο Nernst έχει αναπτύξει την εξής εξίσωση :

$$\Delta E^e = \Delta E^o - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{C_R}{C_O} \right) \quad (\text{Εξ. 4.4})$$

Όπου, R η σταθερά αερίων

T η θερμοκρασία σε Kelvin

n τα ηλεκτρόνια που μεταφέρονται

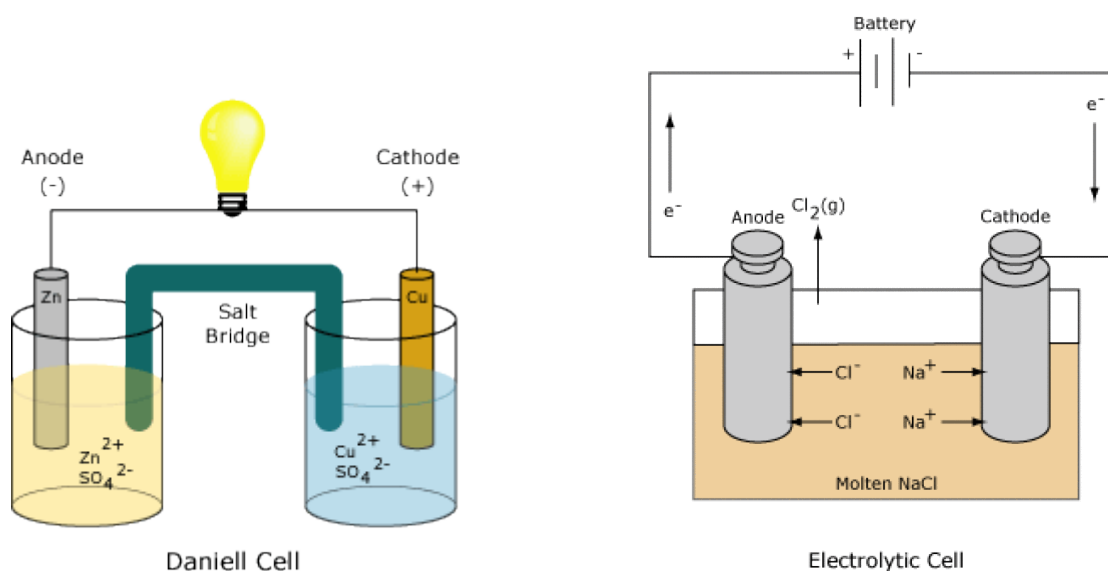
F η σταθερά Faraday

Το C_R/C_O εκφράζει το πηλίκο της αντίδρασης για αναγωγή (reduction) και οξείδωση (oxidation)

Αυτή η εξίσωση εφαρμόζεται μόνο όταν χρειάζεται να ισορροπήσει το σύστημα. Όταν ξεκινήσει η ροή ρεύματος δια μέσου του ηλεκτροδίου, τότε εμφανίζεται μετατόπιση του δυναμικού των ηλεκτροδίων από την κατάσταση ισορροπίας τους. Αυτή η μετατόπιση αφορά στην αύξηση της τάσης, η οποία επηρεάζεται από την αντίσταση του ηλεκτρολύτη. Επιπλέον, η τάση στο κελί επηρεάζεται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, ο ρυθμός ροής, το υλικό του ηλεκτροδίου και τη σύσταση του ηλεκτρολύτη.

Συνήθως, προτιμάται σταθερή μεταβολή της τάσης (δυναμικού) στο κελί και έπειτα για εφαρμογή σταθερού δυναμικού ηλεκτροδίου χρησιμοποιείται ποτενσιοστάτης, ενώ για σταθερή μεταβολή του ρεύματος εφαρμόζεται γαλβανοστάτης.

Τέλος, τα κελιά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα ηλεκτροχημικά ή γαλβανικά κελιά και τα ηλεκτρολυτικά. Η πρώτη κατηγορία παράγει ρεύμα μέσα από την αυθόρμητη αντίδραση (Daniell cell), ενώ η δεύτερη κατηγορία εφαρμόζει ενέργεια για να δημιουργήσει μια μη αυθόρμητη αντίδραση. Στο σχήμα 4.9 απεικονίζονται σχηματικά οι δύο διεργασίες. Σημειώνεται ότι στην παρούσα διπλωματική έγινε χρήση του ηλεκτρολυτικού κελιού.



Σχήμα 4.9 : Ηλεκτροχημικό και ηλεκτρολυτικό κελί

4.7.2 Βασικά ηλεκτρόδια του ηλεκτροχημικού κελιού

Τα ηλεκτρόδια ενός ηλεκτροχημικού κελιού είναι τρία. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς (reference electrode) το οποίο χρησιμεύει στη παρακολούθηση του εφαρμοζόμενου δυναμικού όσο δεν υπάρχει ροή ρεύματος. Όταν ξεκινήσει η ροή ρεύματος το βοηθητικό ηλεκτρόδιο θα αντικαταστήσει κατά κάποιο τρόπο το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Εν ολίγοις, τα τρία ηλεκτρόδια επιτρέπουν τη μέτρηση της τάσης ή του ρεύματος από το ηλεκτρόδιο αναφοράς το οποίο όμως είναι ανεξάρτητο από τα ηλεκτρόδια εργασίας και το βοηθητικό. Επιπλέον, η τάση στο ηλεκτρόδιο εργασίας για δεδομένο δυναμικό δεν μπορεί να μετρηθεί μέσω διάταξης δύο ηλεκτροδίων,

λόγω του ότι το ρεύμα που εφαρμόζεται αλλάζει το δυναμικό τόσο στο ηλεκτρόδιο αναφοράς όσο και στο βοηθητικό.

4.7.2.1 Ηλεκτρόδιο εργασίας (working electrode)

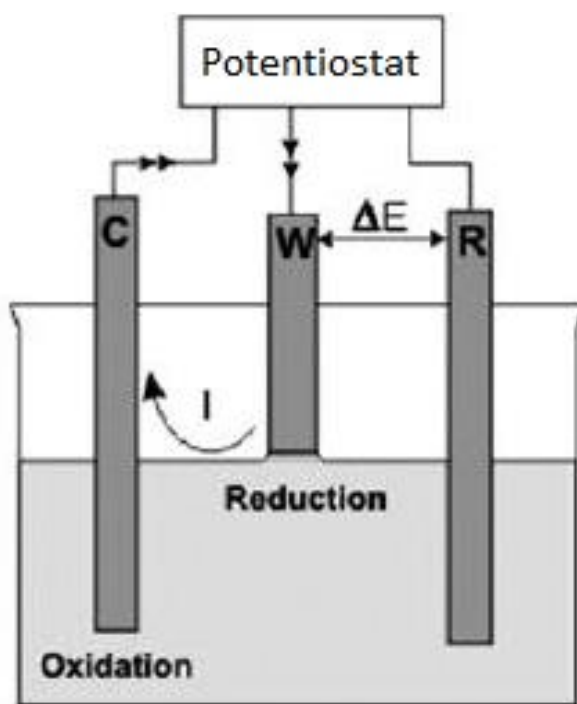
Το ηλεκτρόδιο εργασίας, βρίσκεται εκεί που λαμβάνει χώρα η αντίδραση, δηλαδή κοντά στο δοκίμιο. Η επιφάνεια του ηλεκτροδίου εργασίας πρέπει να είναι γνωστή ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η πυκνότητα του ρεύματος. Επιπλέον, βρίσκεται σε συνεχή επαφή με τον ηλεκτρολύτη, ώστε να είναι εφικτή η αντίδραση και αποτελεί ουσιαστικά το μισό κύκλωμα. Το υλικό των ηλεκτροδίων αυτών είναι συνήθως είτε πλατίνα είτε γραφίτης.

4.7.2.2 Βοηθητικό ηλεκτρόδιο (counter electrode)

Το δεύτερο μισό του κυκλώματος αποτελεί το βοηθητικό ηλεκτρόδιο. Η τάση στο ηλεκτρόδιο αυτό οδηγείται μέσω του ηλεκτροδίου αναφοράς στην κατάλληλη τιμή ανάλογα με το ρεύμα που εφαρμόζεται στο σύστημα. Έπειτα, το βοηθητικό ηλεκτρόδιο μεταφέρει το ρεύμα έτσι ώστε το ηλεκτρόδιο αναφοράς να μπορεί να καταγράφει ένα σταθερό δυναμικό έναντι του ηλεκτροδίου εργασίας. Και σε αυτή την περίπτωση το υλικό κατασκευής είναι η πλατίνα.

4.7.2.3 Ηλεκτρόδιο Αναφοράς (reference electrode)

Το ηλεκτρόδιο αναφοράς όπως προαναφέρθηκε έχει σκοπό να καταγράφει και να ελέγχει το δυναμικό που εφαρμόζεται στο σύστημα. Απαιτείται να έχει μια γνωστή και σταθερή τιμή δυναμικού ενώ δεν διέρχεται καθόλου ρεύμα μέσα από αυτό.



Σχήμα 4.10 : Αναπαράσταση των ηλεκτροδίων εντός του κελιού

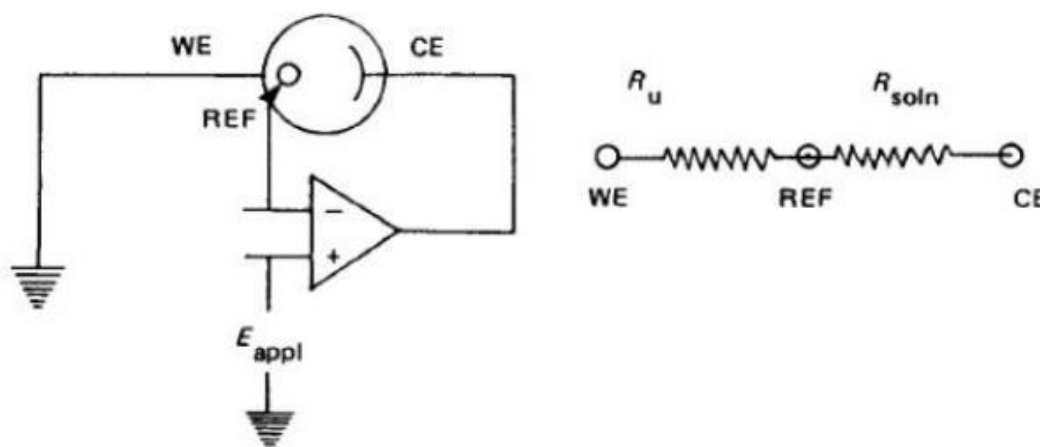
4.7.3 Πειραματική Διάταξη Ηλεκτροχημικών Μετρήσεων

Οι δοκιμές στο ηλεκτρολυτικό κελί του εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης, της έντασης του ρεύματος και το δυναμικό διάβρωσης τόσο για τις δύο σειρές συγκολλήσεων καθώς και για τα μέταλλα βάσης, του AH36 και του S690. Σε όλες τις περιπτώσεις, η επιφάνεια του χάλυβα εκτέθηκε σε περιβάλλον NaCl 3.5% και μέσω κατάλληλου λογισμικού (Versa Studio) έγινε η συλλογή των αποτελεσμάτων που θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο. Ο υπολογισμός των παραπάνω έγινε με τις τρεις μεθόδους που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, μέθοδος γραμμικής πόλωσης, μέθοδος προεκβολής των ευθειών Tafel και μέθοδος φασματοσκοπίας ηλεκτροχημικής εμπέδησης. Τα κυριότερα στοιχεία της πειραματικής διάταξης θα αναπτυχθούν παρακάτω.

4.7.3.1 Χαρακτηριστικά του Ποτενσιοστάτη

Ο ποτενσιοστάτης που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο είναι ο VersaSTAT 4 της εταιρείας EG&G Princeton Applied Research- Perkin Elmer Instruments. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του είναι :

- Βέλτιστη απόδοση και ακριβής αποτελέσματα σε πολύ μικρά ρεύματα της τάξης των μA .
- Δίνει μέγιστο ρεύμα 1 A αλλά με κατάλληλες διατάξεις φτάνει μέχρι 20 A.
- Πολύ γρήγορη μεταφορά δεδομένων περίπου 2 μs .
- Ύπαρξη αναλογικού φίλτρου για την τάση και το ρεύμα με αποτέλεσμα πολύ υψηλής ποιότητας σήμα.
- Επιλογή χρήσης αναλυτή της συχνότητας απόκρισης για συχνότητες 10μhz έως MHz.
- Εύκολη χρήση του σε συνδυασμό με το λογισμικό VersaStudio.



Σχήμα 4.11 : Συνδεσμολογία των ηλεκτροδίων με τον ποτενσιοστάτη

4.7.3.2 Χαρακτηριστικά του ηλεκτρολυτικού κελιού

Το ηλεκτρολυτικό κελί που χρησιμοποιήθηκε είναι και αυτό της εταιρείας EG&G Princeton Applied Research- Perkin Elmer Instruments. Συγκεκριμένα, είναι το μοντέλο K0235 Flat Cell και χρησιμοποιείται τόσο για τη μελέτη της διάβρωσης, όσο και για διάφορες επικαλύψεις. Λόγω της μορφολογία του μπορεί να δεχθεί ένα ευρύ φάσμα μεγεθών ηλεκτροδίων. Μπορεί γρήγορα και εύκολα να αποσυναρμολογηθεί ώστε να διευκολύνεται ο καθαρισμός του. Το υλικό κατασκευής του συγκεκριμένου κελιού είναι από γυαλί Pyrex ενώ στις άκρες αποτελείται από πολυπροπυλένιο. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του είναι :

Ως προς τις διαστάσεις:

- Χωρητικότητα σε ηλεκτρολύτη περίπου 250 ml.
- Η απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου αναφοράς και του βοηθητικού είναι 80mm.
- Η επιφάνεια του ηλεκτροδίου εργασίας είναι πάντα 1cm^2 .
- Ο σωλήνας Luggin έχει πάντα διάμετρο 12mm και βάθος 60mm ενώ η χωρητικότητα του σε ηλεκτρολύτη είναι 5ml.
- Το βοηθητικό ηλεκτρόδιο έχει διαστάσεις 2.54 cm x 2.54 cm.

Ως προς τα χαρακτηριστικά :

- Το pH εντός του κελίου είναι από 2-9.
- Το όριο για την θερμοκρασία είναι 80°C .

Ως προς τα υλικά:

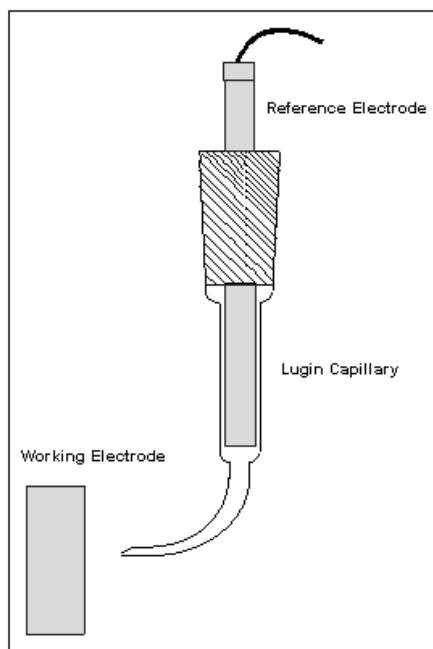
- Το υλικό του κελιού είναι γυαλί Pyrex.
- Οι άκρες είναι από πολυπροπυλένιο.
- Τα προστατευτικά στεγάνωσης (sealing gaskets) είναι από Viton.
- Ο σωλήνας Luggin είναι κατασκευασμένος από Ethyl Vinyl Acetate (EVA).
- Το βοηθητικό ηλεκτρόδιο είναι από πλατίνα.



Σχήμα 4.12 : Ηλεκτρολυτικό κελί τύπου K0235 Flat Cell

4.7.3.2.1 Σωλήνας Luggin (Luggin's capillary)

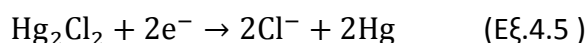
Ο σωλήνας Luggin αρχικά χρησιμοποιήθηκε για να υπάρχει καθορισμένη απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου αναφοράς και εργασίας. Ο σωλήνας αυτός πρέπει να είναι πάντα γεμάτος με τον ηλεκτρολύτη και εκεί βρίσκεται συνήθως το σημείο ανίχνευσης του ηλεκτροδίου αναφοράς. Σε εργαστηριακές εφαρμογές το υλικό κατασκευής του είναι είτε γυαλί είτε συνηθέστερα το πλαστικό. Ο σωλήνας αυτός εκτείνεται πολύ κοντά στο ηλεκτρόδιο εργασίας και είναι ανοιχτός στην άκρη για να γίνεται ευκολότερα η καταγραφή του δυναμικού (Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13 : Σωλήνας Luggin σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς και το ηλεκτρόδιο εργασίας

4.7.3.2.2 Ηλεκτρόδιο Αναφοράς – Κορεσμένου Καλομέλανα

Το ηλεκτρόδιο αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις είναι το ηλεκτρόδιο κορεσμένου καλομέλανα (Saturated Calomel Electrode, SCE). Το δυναμικό ισορροπίας του είναι $E=+0.241V$ vs SHE. Το ηλεκτρόδιο καλομέλανα στηρίζεται στην αντίδραση μεταξύ υδραργύρου και υδραργύρου του χλωρίου :



και αυτή η φάση καλείται και ως κορεσμένο διάλυμα χλωριούχου καλίου σε νερό. Το ηλεκτρόδιο αυτό αποτελείται από μια δεξαμενή υδραργύρου, καλυμμένη με πάστα υδραργύρου-χλωριούχου υδραργύρου (καλομέλανα) βυθισμένη σε κορεσμένο διάλυμα χλωριούχου καλίου. Το κορεσμένο αυτό διάλυμα επιτρέπει την ανταλλαγή ιόντων χλωρίου εντός του κελιού, καθώς επίσης η συγκέντρωση του διαλύματος αυτού επηρεάζει το δυναμικό του ηλεκτροδίου αναφοράς.

Το βασικότερο μειονέκτημα του ηλεκτροδίου είναι ότι σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 80°C η συγκέντρωση του χλωρίου αυξάνει έτσι το δυναμικό μειώνεται.

4.7.4 Διάβρωση Χάλυβα με Ηλεκτροχημικές μεθόδους

Σχεδόν σε όλες τις ηλεκτροχημικές διεργασίες ο σίδηρος εμφανίζεται σε ανοδική θέση και εισέρχεται εντός του ηλεκτρολύτη με τη μορφή ιόντος δισθενούς σιδήρου. Όσο τα άτομα του σιδήρου υφίστανται οξείδωση τόσο περισσότερα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται με αποτέλεσμα το αρνητικό τους φορτίο να επιτείνει την ανοδική αντίδραση. Η αντίδραση αυτή θα συνεχιστεί προφανώς, μόνο εάν τα ηλεκτρόνια που φεύγουν βρουν την αντίστοιχη επιφάνεια που θα υποστεί καθοδική αντίδραση. Στην καθοδική αντίδραση, τα ηλεκτρόνια αντιδρούν πάντα με τον ηλεκτρολύτη. Ο ρυθμός αντίδρασης τόσο στην ανοδική όσο και στην καθοδική περίπτωση πρέπει να είναι ισοδύναμος με τον νόμο του Faraday ο οποίος εξαρτάται από τη ροή ηλεκτρονίων και καθορίζει το ρεύμα διάβρωσης I_{corr} .

Οι πιο συχνές αντιδράσεις στην περίπτωση του σιδήρου είναι :

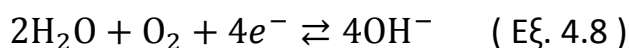
Ανοδική αντίδραση



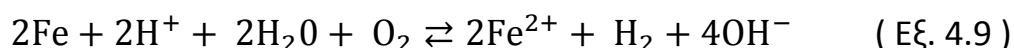
Καθοδική αντίδραση υδρογόνου



Και η καθοδική αντίδραση οξυγόνου



Οπότε τελικά προκύπτει ότι :



4.8 ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (Θάλαμος Αλατονέφωσης) [1] [2] [7] [10] [12]

Πολλοί επιστήμονες έχουν κατά καιρούς προσπαθήσει να επιταχύνουν τη διάβρωση σε διάφορα υλικά με αύξηση των φυσικών και χημικών καταπονήσεων-τάσεων, όπως αλλαγή της θερμοκρασίας, της υγρασίας, του pH, της συγκέντρωσης αλάτων καθώς και τη συγκέντρωση της υπερϊώδους ακτινοβολίας. Στην ιδανική περίπτωση οι τάσεις αυτές επιταχύνουν τη διαδικασία διάβρωσης και αστοχίας αλλά ο μηχανισμός διάβρωσης παραμένει ίδιος με την περίπτωση που η αστοχία θα γινόταν χωρίς επιτάχυνση.

4.8.1 Θάλαμος αλατονέφωσης (Salt spray test)

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος επιταχυνόμενης διάβρωσης είναι μέσω ψεκασμού άλατος εντός του θαλάμου αλατονέφωσης. Οι πρώτες απόπειρες για χρήση της συγκεκριμένης τεχνικής, έγιναν μόλις στις αρχές του 1900 ενώ η πρώτη τυποποίηση της διαδικασίας έγινε το 1939 με την ονομασία ASTM B117. Από τότε έχει βρει ευρεία εφαρμογή σε πολλές βιομηχανίες. Οι δοκιμές αυτές γίνονται εντός ειδικού θαλάμου, όπου μια ποσότητα διαλύματος άλατος περνάει μέσα από ένα ακροφύσιο, συναντάει πεπιεσμένο αέρα ο οποίος το μετατρέπει σε μικρά σταγονίδια και έπειτα ψεκάζεται εντός του θαλάμου όπου είναι τοποθετημένα τα δοκίμια. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται για ουδέτερο pH και ακολουθεί τα πρότυπα ASTM B117 και ISO 9227 τα οποία ορίζουν διάλυμα με 5 wt% NaCl στους 35°C. Όπως φαίνεται, η επιλογή των συνθηκών εντός του θαλάμου αντικατοπτρίζουν την δυσμενέστερη περίπτωση στην οποία μπορεί να επέλθει ένα μέταλλο. Παρόλαυτα, μερικοί επιστήμονες πιστεύουν ότι ακόμα και με αυτές τις συνθήκες τα αποτελέσματα δεν δίνουν την ακριβή συμπεριφορά σε διάβρωση των μετάλλων που βρίσκονται σε κατάσταση λειτουργίας σε πραγματικές συνθήκες. Αυτό όμως έχει παρατηρηθεί κυρίως όταν υπάρχουν επικαλύψεις όπου σε ορισμένα πειράματα η συμπεριφορά των επικαλύψεων ήταν εντελώς διαφορετική από τις πραγματικές συνθήκες. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι κατά της διαδικασία της ξήρανσης (Dry) εντός του θαλάμου δεν επιτρέπεται η χαλάρωση των τάσεων όπως θα γινόταν σε πραγματικές συνθήκες. Τέλος, λόγω του αποκλεισμού πολλών χημικών στοιχείων από το διάλυμα της αλατονέφωσης τα προϊόντα της διάβρωσης δεν περιέχουν την χημική σύσταση που θα είχαν σε πραγματικές συνθήκες.

Σήμερα οι πιο κοινά αποδεκτές μέθοδοι εφαρμογής δοκιμών αλατονέφωσης περιγράφονται με ακρίβεια στα πρότυπα:

- ASTM B117 “Standard method of salt spray (FOG) testing”
- B368 “Standard test method for copper-accelerated acetic- salt spray (FOG) testing”
- ASTM G 85 “Standard practice for modified salt spray (FOG) testing”

Σημειώνεται, ότι υπάρχουν δοκιμές διάβρωσης στις οποίες εφαρμόζονται συνθήκες υψηλής υγρασίας, όπου χρησιμοποιείται απιονισμένο νερό στο διάλυμα της διάβρωσης και στις οποίες δεν περιλαμβάνεται άλας ως στοιχείο διάβρωσης (ASTM D1735, ASTM D2247, ASTM G 60).

Οι δοκιμές αλατονέφωσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

- Δοκιμές σε «στατικές» συνθήκες
- Δοκιμές σε «κυκλικές» συνθήκες

Στις στατικές δοκιμές οι συνθήκες και η ατμόσφαιρα παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής: θερμοκρασία, πυκνότητα νέφους, pH του ηλεκτρολυτικού διαλύματος. Οι δοκιμές μπορεί να διαρκούν 24 ώρες την ημέρα, 7 ημέρες την εβδομάδα για όλο το διάστημα έκθεσης. Στη συνέχεια, τα δοκίμια απομακρύνονται από το θάλαμο για μελέτη και ανάλυση.

Η σύγχρονη έρευνα επικεντρώνεται στον σχεδιασμό δοκιμών που προσομοιάζουν περισσότερο ρεαλιστικά την πραγματική έκθεση στο περιβάλλον και τις συνθήκες λειτουργίας. Με γνώμονα αυτό σχεδιάζονται νέες κυκλικές δοκιμές. Κατά τις κυκλικές δοκιμές, τα δοκίμια υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενη σειρά βημάτων συγκεκριμένου χρόνου, διαφορετικής ατμόσφαιρας, έως ότου ολοκληρωθεί ο προκαθορισμένος χρόνος έκθεσης ή αριθμός κύκλων. Ένα πλήρες σύνολο βημάτων συνιστά έναν κύκλο. Τα βήματα αυτά περιλαμβάνουν:

- Διαφορετικές θερμοκρασίες
- Μεταβαλλόμενα επίπεδα σχετικής υγρασίας RH (20-100%)
- Διάφορα διαβρωτικά συστατικά (ρυπαντές, ηλεκτρολύτες)

4.8.1.1 Στατικές συνθήκες

Το πρότυπο ASTM B117 περιγράφει στατικές συνθήκες δοκιμής αλατονέφωσης. Η διαδικασία του προτύπου αυτού καθορίζει διαρκή έκθεση σε αλατονέφωση 5% και θερμοκρασία 35°C. Στα τελευταία 70 χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πολλές τροποποιήσεις και βελτιώσεις στο πρότυπο B117. Ωστόσο, παρά τις βελτιώσεις, αποτελεί κοινό τόπο ότι τα αποτελέσματα δοκιμών αλατονέφωσης σε στατικές συνθήκες δεν ανταποκρίνονται στα φαινόμενα διάβρωσης που παρατηρούνται στο περιβάλλον λειτουργίας.

4.8.1.2 Κυκλικές δοκιμές

Για να ξεπεραστούν τα προβλήματα που δημιουργούσαν οι στατικές συνθήκες αναπτύχθηκε το μοντέλο κυκλικών δοκιμών. Το πρώτο τέτοιο μοντέλο αναπτύχθηκε το 1960 όταν ο Harrison και οι συνεργάτες του υποστήριξαν ότι ο συνεχής ψεκασμός άλατος δεν θα μπορούσε σε καμία περίπτωση να προσομοιώσει τις πραγματικές συνθήκες. Κατά τα πειράματα άλλαξαν τον διάλυμα αλατονέφωσης σε 0.25 wt% NaCl και 3.25 wt% (NH₄)₂SO₄, και παρατήρησαν ότι δίνει βελτιωμένη συσχέτιση αποτελεσμάτων μεταξύ θαλάμου και πραγματικών συνθηκών.

Στο επόμενο στάδιο αραιώσαν περαιτέρω το διάλυμα και εισήγαγαν ταυτόχρονα την υγρή και την ξηρή φάση ενώ μείωσαν την φάση της αλατονέφωσης σε μία ώρα. Έτσι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αυτό το μοντέλο προσομοιώνει με τον βέλτιστο τρόπο τις πραγματικές συνθήκες.

Κατά τις κυκλικές δοκιμές πρέπει να επισημανθούν τα εξής:

- Κατά τη διάρκεια των δοκιμών αυτών αναπτύσσονται διάφορα εύρη θερμοκρασιών με αποτέλεσμα να δημιουργείται συστολή και διαστολή εντός του υλικού κάτι που δημιουργεί τάσεις.
- Κατά την υγρή φάση έχουμε αύξηση του όγκου του υλικού όπου κατά την φάση της αλατονέφωσης και της μετέπειτα ξήρανσης μετατρέπεται σε συστολή του όγκου. Αυτή η εναλλαγή είναι πιθανό να προκαλέσει φαινόμενα κόπωσης.
- Ο χάλυβας διαβρώνεται ταχύτερα κατά την υγρή φάση και κατά τη διάρκεια που λειώνουν τα άλατα της προηγούμενης φάσης (fog-αλατονέφωσης) πάνω στην επιφάνεια του υλικού. Αφού λειώσουν όλα τα άλατα ο ρυθμός διάβρωσης αρχίζει να μειώνεται γιατί υπάρχει σημαντική αραιώση του ηλεκτρολύτη λόγω της συνεχούς διαβροχής.
- Αυξημένο ρυθμό διάβρωσης έχουμε και κατά τη διάρκεια της ξηρής φάσης λόγω της αυξημένης ιοντικής δραστηριότητας η οποία οφείλεται στην υγρή φάση. Ο ρυθμός αρχίζει να μειώνεται όσο το ποσοστό του εναπομείναντος οξυγόνου τελειώσει.

Τέλος για τις κυκλικές δοκιμές διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης έχουν σήμερα χρησιμοποιούνται τα παρακάτω πρότυπα που καθορίζουν με ακρίβεια τις συνθήκες του πειράματος :

- ASTM G85 “Standard practice for modified salt spray (FOG) testing”
- ISO 14993 (2001) “ Corrosion of metals and alloys – Accelerated testing involving cyclic exposure to salt mist, “dry” and “wet” conditions”

Στην παρούσα διπλωματική εργασία υιοθετήθηκε το πρότυπο ISO 14993 (2001). Στο πρότυπο αυτό περιγράφεται η διάταξη και η πειραματική διαδικασία δοκιμών επιταχυνόμενης διάβρωσης για τη συγκριτική εκτίμηση υλικών με ή χωρίς προστατευτικές επικαλύψεις σε εξωτερικό περιβάλλον με υψηλά ποσοστά αλάτων. Το πρότυπο αυτό εφαρμόζεται για μέταλλα και κράματα, μεταλλικά επιστρώματα (ανοδικά και καθοδικά), οργανικά επιστρώματα σε μεταλλικά υλικά κ.λπ.

Το διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε είναι διάλυμα NaCl 5%. Επιπλέον, σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, κάθε κύκλος περιλαμβάνει τρία βήματα: αλατονέφωση, ξήρανση, υγρασία. Ο συνολικός χρόνος κάθε κύκλου είναι 8 ώρες και αποτελείται από τρία βήματα: 2 ώρες αλατονέφωση, 4 ώρες συνθήκες ξήρανσης, 2 ώρες συνθήκες υγρασίας.

Αλατονέφωση (Fog): Κατά τη διάρκεια λειτουργίας της αλατονέφωσης, ο θάλαμος λειτουργεί ως συμβατική διάταξη ανατονέφωσης:

- Ο συμπιεσμένος αέρας υγροποιείται περνώντας από τη στήλη φυσαλίδων κατά τη διαδρομή του προς το ακροφύσιο ψεκασμού.
- Διαβρωτικό διάλυμα αντλείται από την εσωτερική δεξαμενή στο ακροφύσιο ψεκασμού, όπου αναμιγνύεται με τον συμπιεσμένο αέρα
- Το ακροφύσιο ψεκασμού ατμοποιεί το διάλυμα και τον αέρα, δημιουργώντας νέφος διάβρωσης.
- Οι θερμοστάτες του θαλάμου διατηρούν την προγραμματισμένη θερμοκρασία του θαλάμου.

Ξήρανση (Dry): Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης ο συμπιεστές αέρα οδηγεί τον αέρα του δωματίου σε ένα θερμοστάτη αέρος στο θάλαμο. Αυτό δημιουργεί συνθήκες χαμηλής υγρασίας στο εσωτερικό του θαλάμου. Η θερμοκρασία του θαλάμου ελέγχεται από τους θερμοστάτες του θαλάμου και το θερμοστάτη αέρος.

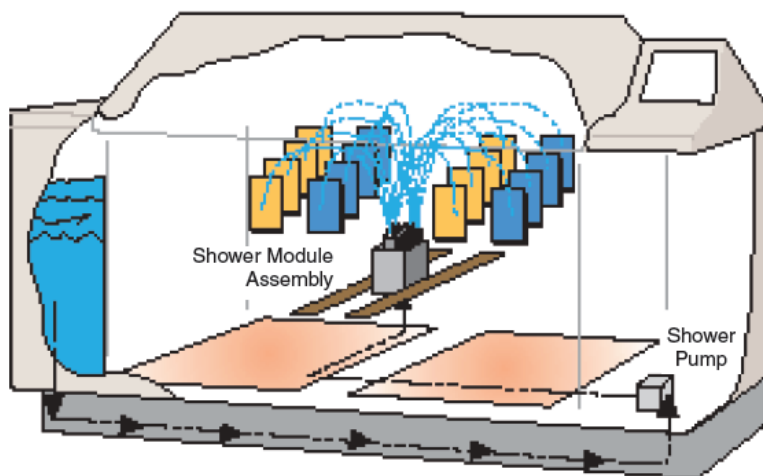
Υγρασία (Humid): Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας αυτής, ο θάλαμος διατηρείται στο 100% της σχετικής υγρασίας παρέχοντας ατμούς νερού στο θάλαμο.

Στον πίνακα 4.1 που ακολουθεί δίνονται όλες οι πληροφορίες σχετικά με διαδικασία όπως ακριβώς ορίζει το πρότυπο ISO 14993/2001.

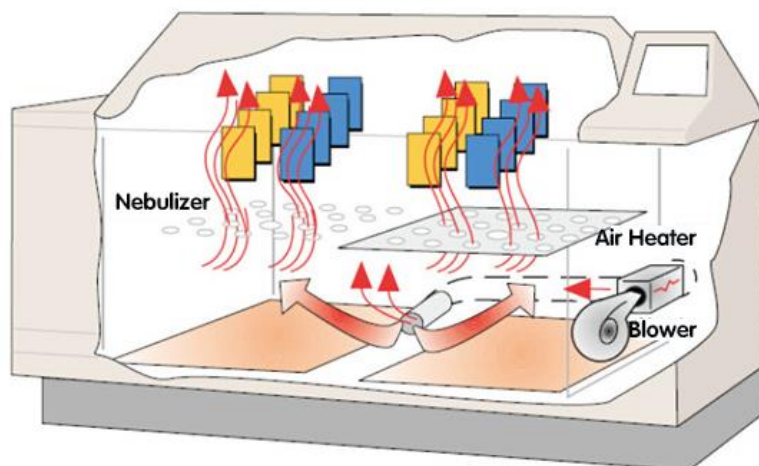
Συνθήκες αλατωνέφωσης (Salt mist conditions)	Θερμοκρασία = 35°C Διάλυμα άλατος = 50g NaCl / λίτρο
Συνθήκες ξήρανσης (Dry conditions)	Θερμοκρασία = 60°C Σχετική υγρασία < 30% RH
Συνθήκες υγρασίας (Wet conditions)	Θερμοκρασία = 50°C Σχετική υγρασία < 95% RH
Διάρκεια κύκλου	Συνολική διάρκεια κύκλου 8 ώρες όπου, Συνθήκες αλατωνέφωσης 2 ώρες Συνθήκες ξήρανσης 2 ώρες Συνθήκες υγρασίας 4 ώρες
Χρόνος που απαιτείται για να δημιουργηθούν οι απαιτούμενες συνθήκες μετά από κάθε αλλαγή εντός του κύκλου	Αλατωνέφωση σε Ξήρανση <30 λεπτά Ξήρανση σε Υγρασία < 15 λεπτά Υγρασία σε Αλατωνέφωση < 30 λεπτά
Γωνία τοποθέτησης των δοκιμίων	20° κάθετα

Πίνακας 4.1: Διαδικασία Προτύπου στο θάλαμο αλατονέφωσης

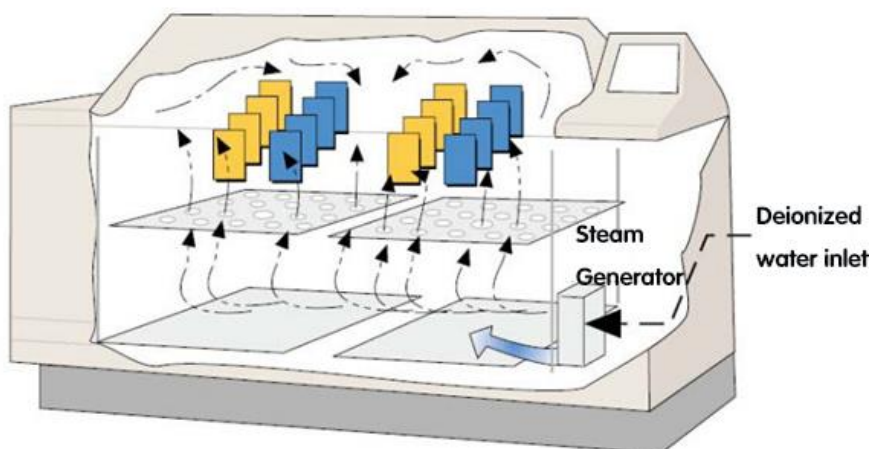
4.8.1.2.1 Σηματική αναπαράσταση όλων των φάσεων ενός κύκλου με τη σειρά που συμβαίνουν.



Σχήμα 4.13 : Αναπαράσταση των συνθηκών αλατονέφωσης



Σχήμα 4.14 : Αναπαράσταση των συνθηκών ξήρασης



Σχήμα 4.15 : Αναπαράσταση των συνθηκών Υγρασίας

4.8.1.3 Σύνθετες κυκλικές δοκιμές

Για λόγους βιβλιογραφικής πληρότητας αναφέρουμε και τις σύνθετες κυκλικές δοκιμές, οι οποίες συμβαίνουν όταν εκτός από αυτά που προαναφέρθηκαν τα δοκίμια εκτίθενται σε υπεριώδη ακτινοβολία UV. Αυτό γίνεται στα πλαίσια της προσπάθειας για ακριβέστερη αναπαράσταση των πραγματικών συνθηκών και χρησιμοποιείται κυρίως για την μελέτη της συμπεριφοράς των πολυμερικών υλικών και των επιστρωμάτων. Οι πρώτοι θάλαμοι με υπεριώδη ακτινοβολία εμφανίστηκαν γύρω στο 1920 και εκ τότε έχουν δεχτεί αρκετές βελτιώσεις.

Οι δοκιμές αυτές τυποποιήθηκαν για πρώτη φορά το 1996 με το πρότυπο ASTM D5894 το οποίο καθορίζει ακριβώς πως πρέπει να γίνεται η εναλλαγή από τις απλές κυκλικές συνθήκες σε UV κύκλο.

Γενικά, ο κύκλος αυτός περιλαμβάνει έκθεση σε ακτινοβολία UVA στους 60°C για 4 ώρες και έπειτα συμπύκνωση στους 50°C για άλλες 4 ώρες. Η συμπύκνωση πραγματοποιείται με θέρμανση νερού εντός του θαλάμου και ψεκασμός του πάνω στα δοκίμια. Το συνολικό πείραμα διαρκεί περίπου μια εβδομάδα.

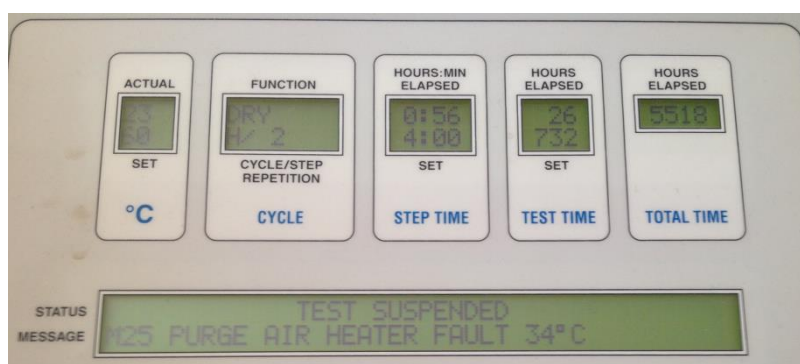
4.8.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του θαλάμου

Ο θάλαμος αλατονέφωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι ο Q FOG CCT1100, της εταιρείας Q Panel και διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ονομαστικό μέγεθος 1100 l
- Χωρητικότητα με υγρό 1103 l
- Χωρητικότητα χωρίς υγρό 857 l

Τα κυριότερα μέρη του θαλάμου είναι :

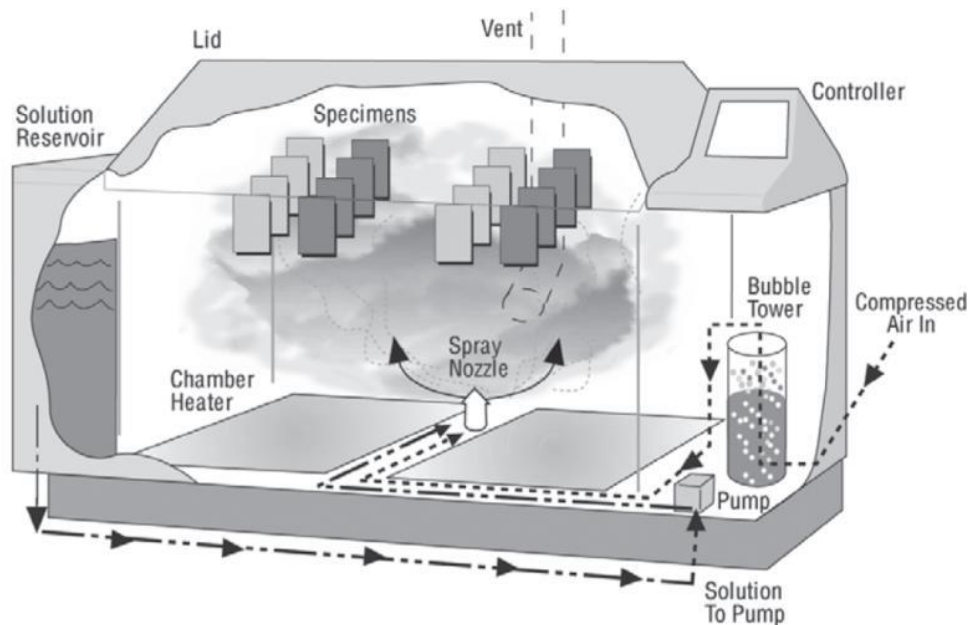
- Πίνακας Ελέγχου (Controller): Στον πίνακα ελέγχου αναγράφονται επακριβώς οι συνθήκες που επικρατούν στον θάλαμο. Με την ένδειξη 'actual' δείχνει τη θερμοκρασία που υπάρχει εκείνη τη στιγμή εντός του θαλάμου, με την ένδειξη 'function' δείχνει σε ποιο σημείο του κύκλου βρίσκεται, δηλ. H/1 για την αλατονέφωση, H/2 για την υγρασία και H/3 για την ξήρανση. Με την ένδειξη 'hours: min elapsed' δείχνει πόση ώρα έχει τρέξει το στάδιο στο οποίο βρίσκεται. Τέλος, με την ένδειξη 'status message' αναγράφει οποιοδήποτε πρόβλημα παρουσιάσει ο θάλαμος τόσο στην παροχή αέρα όσο και στη παροχή διαλύματος.



Σχήμα 4.16 : Πίνακας ελέγχου του θαλάμου που χρησιμοποιήθηκε

- Δεξαμενή διαλύματος άλατος (solution reservoir) : Η χωρητικότητά της είναι περίπου 120 λίτρα το οποίο εξασφαλίζει την αυτονομία του θαλάμου για 5 ημέρες συνεχούς λειτουργίας.
- Στήλη φυσαλίδων (bubble tower) : Ο σκοπός αυτής της διάταξης είναι ο κορεσμός του αέρα με υγρασία πριν να φτάσει το ακροφύσιο εκνέφωσης. Για το λόγο αυτό επιτυγχάνεται κορεσμός του αέρα σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές του θαλάμου. Η θερμοκρασία και ο κορεσμός ελέγχονται αυτόματα.
- Γεννήτρια ατμού (Vapour generator) : Κατά τη διάρκεια που ο θάλαμος λειτουργεί σε συνθήκες υγρασίας, ο θάλαμος διατηρείται στο 100% της σχετικής υγρασίας από ατμούς που παράγονται κατά τη θέρμανση νερού στη γεννήτρια ατμού.

- Συμπιεστής αέρα (Purge Blower) και εναλλάκτης θερμότητας (Air Heater) : Ο συμπιεστής αέρα ενεργοποιείται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της ξήρανσης για να φέρνει αέρα δωματίου στο θάλαμο. Ο εναλλάκτης θερμότητας και η ροή αέρος από τον συμπιεστή περνάει από τον ενεργοποιημένο εναλλάκτη θερμότητας στη διαδρομή του προς το θάλαμο.
- Θερμαντικές πλάκες : οι δύο πλάκες είναι τοποθετημένες στον πυθμένα του θαλάμου. Χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της αλατονέφωσης καθώς και κατά την ξήρανση για να επιτευχθεί η απαιτούμενη θερμοκρασία. Πρέπει να πλένονται μετά το τέλος του πειράματος γιατί μαζεύουν αρκετό αλάτι κατά το πείραμα το οποίο πρέπει να απομακρύνεται.



Σχήμα 4.17 : Διάκριση όλων το επι μέρους στοιχείων του θαλάμου

4.8.3 Απαιτήσεις για τον εξοπλισμό του πειράματος

Σύμφωνα πάντα με το πρότυπο ISO 14993/2001 πρέπει να τηρούνται κάποιες απαιτήσεις όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του θαλάμου αλλά και τις ιδιότητες των δοκιμών.

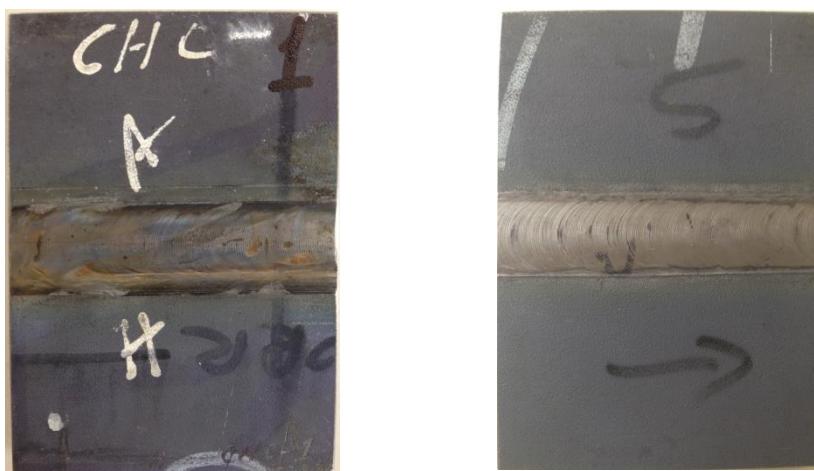
- Όλα τα δοκίμια που μπαίνουν στον θάλαμο πρέπει να είναι ανθεκτικά ή να έχουν ανθεκτική ικανότητα απέναντι στο διάλυμα που ψεκάζεται, ώστε να μην επηρεάζουν τη διαβρωτική ικανότητα του διαλύματος. Ουσιαστικά να μην διαλυθεί το δοκίμιο εντός του θαλάμου, αλλά να υποστεί την αναμενόμενη διάβρωση.
- Η χωρητικότητα του θαλάμου αλατονέφωσης δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0.4m^3 και το καπάκι του θαλάμου θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε οι σταγόνες που δημιουργούνται στο πάνω μέρος να μην πέφτουν πάνω στα δοκίμια.
- Ο πεπιεσμένος αέρας πριν οδηγηθεί στους ψεκαστήρες πρέπει να περνάει πρώτα από φίλτρο για να καθαρίζεται και πάντα η πίεση πρέπει να είναι 70 kPa με 170 kPa.
- Προκειμένου να αποφευχθεί η εξάτμιση του νερού από τα σταγονίδια που πρόκειται να ψεκαστούν, πρέπει ο αέρας πριν από την είσοδο του στον ψεκαστήρα να υγροποιείται. Αυτό επιτυγχάνεται μέσα στη στήλη φυσαλίδων (bubble tower) η οποία περιέχει πολύ ζεστό νερό.
- Οι ψεκαστήρες πρέπει να είναι κατασκευασμένοι από αδρανές υλικό όπως πλαστικό ή γυαλί.
- Το διάλυμα άλατος θα πρέπει να διατηρείται σε υψηλή ποσότητα εντός της δεξαμενής αποθήκευσής του ώστε να μην διακόπτεται ο ψεκασμός.
- Οι θέσεις υποδοχής των δοκιμών πρέπει να είναι επίσης κατασκευασμένες από αδρανές υλικό όπως γυαλί.



Σχήμα 4.18 : Θάλαμος τύπου Q FOG CCT1100 που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα

4.8.4 Προετοιμασία και Σήμανση των δοκιμών

Αρχικά έγινε η ονοματολογία των δοκιμών, η οποία ακολουθήθηκε με τον τρόπο που ο TWI ονομάτισε τα δοκίμια. Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, τα δοκίμια ήταν 26 από δύο σειρές συγκόλλησης. Από την πρώτη σειρά συγκόλλησης με κωδικό όνομα CHC και συγκόλληση χάλυβα AH36 με χάλυβα S690 τα 12 δοκίμια μπήκαν στον θάλαμο αλατονέφωσης ενώ το 1 χρησιμοποιήθηκε για την μικροσκοπία, την μικροσκληρομέτρηση και τις ηλεκτροχημικές μετρήσεις. Αντίστοιχα και στη δεύτερη σειρά συγκόλλησης με κωδικό όνομα HHC και συγκόλληση ίδιου μετάλλου βάσης, χάλυβα S690.



Σχήμα 4.19 : Δοκίμια από τις δύο σειρές συγκόλλησης όπως εστάλησαν από τον TWI

Για την έκθεση στο θάλαμο αλατονέφωσης, τα δοκίμια όπως ορίζει το πρότυπο, αρχικά αμμοβολήθηκαν στο μηχανουργείο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Στη συνέχεια, καθαρίστηκαν με απιονισμένο νερό και αιθανόλη και στη συνέχεια στεγνώθηκαν άμεσα με θερμό αέρα. Μετά, ζυγίστηκαν σε ζυγό ακριβείας τριών δεκαδικών ψηφίων.



Σχήμα 4.20α : Μηχανή αμμοβολής στο μηχανουργείο του ENT



Σχήμα 4.20β : Δοκίμιο μετά από αμμοβολή

Τέλος, σύμφωνα με το πρότυπο το πρότυπο ISO14993 τα δοκίμια στο θάλαμο πρέπει να εκτίθενται στο διαβρωτικό περιβάλλον μόνο από τη μια πλευρά, γιατί οι υπόλοιπες πλευρές του κάθε δοκιμίου επικαλύφθηκαν με προστατευτική ταινία, (3M 471 Vinyl Tape), όπως φαίνεται και στο σχήμα.



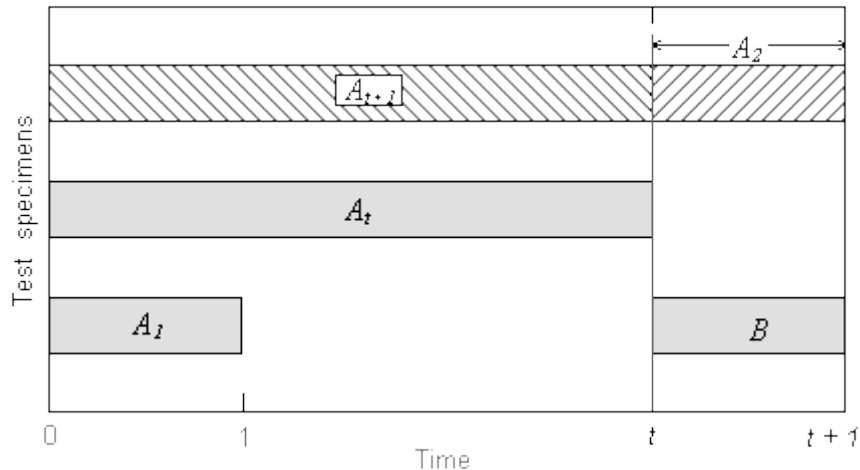
Σχήμα 4.21 : Δοκίμιο με την προστατευτική ταινία

4.8.5 Διαδικασία τοποθέτησης – απομάκρυνσης δοκιμίων από το θάλαμο αλατονέφωσης (Planned Interval Test)

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο θάλαμο σύμφωνα με το πρότυπο ASTM G31-72 (1999) , τρόπος γνωστός και ως Planned Interval Test.

Ένα παράδειγμα σχετικά με την προτεινόμενη διαδικασία του Planned Interval Test είναι η εξής:

- Δοκίμιο A_1 : Απομακρύνεται από το θάλαμο σε χρόνο που αντιστοιχεί σε μια χρονική μονάδα (unit time).
- Δοκίμιο A_t : Απομακρύνεται από το θάλαμο σε χρόνο t .
- Δοκίμιο A_{t+1} : Απομακρύνεται από το θάλαμο σε χρόνο $t+1$ (όπου $1=$ unit time) .
- Δοκίμιο B: Αντικαθιστά το δοκίμιο A_t όταν αυτό απομακρυνθεί από το θάλαμο σε χρόνο t και βγαίνει μαζί με το δοκίμιο A_{t+1} , δηλαδή παραμένει συνολικά στο θάλαμο χρόνο ίσο με unit time.



Σχήμα 4.22 : Σχηματική αναπαράσταση του Planned Interval Test.

Κατά αυτόν τον τρόπο, με τη σύγκριση του ρυθμού διάβρωσης των A και B που παραμένουν τον ίδιο χρόνο αλλά σε διαφορετικές περιόδους μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τις συνθήκες που επικρατούν στο θάλαμο και αν αυτές μεταβάλλονται (διαβρωτικό περιβάλλον).

Συγκρίνοντας δε το ρυθμό διάβρωσης του B με τη διαφορά του ρυθμού διάβρωσης μεταξύ των A_t και A_{t+1} , βλέπουμε πως συμπεριφέρεται το μέταλλο όσο διαβρώνεται. Φαίνεται δηλαδή αν ο ρυθμός διάβρωσης είναι σταθερός, αν αυξάνεται με την πρόοδο της διάβρωσης ή αν μειώνεται. Στην παρούσα διπλωματική, θεωρήθηκε unit time = 5 ημέρες και η τοποθέτηση των δοκιμίων στο θάλαμο κατά τη διάρκεια του πειράματος έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχουν τουλάχιστον δύο δοκίμια που θα παραμείνουν τον ίδιο χρόνο μέσα στο θάλαμο, αλλά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

4.8.6 Υπολογισμός απώλειας μάζας (ρυθμός διάβρωσης)

Για την απομάκρυνση των προϊόντων της διάβρωσης και τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης επελέγη η διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο ISO 8407 (1991). Μετά την απομάκρυνση από το θάλαμο τα δοκίμια καθαρίστηκαν με την εμβάπτιση τους σε διάλυμα 1000 ml, που αποτελείται από :

- 500ml υδροχλωρικό οξύ, HCl (37%)
- 3.5 g τετρ-αμινο-εξαμεθυλένιο (hexamethyletetramine)
- απιονισμένο νερό έως τη συμπλήρωση 1000ml

Ο χρόνος παραμονής μέσα στο διάλυμα κυμαίνεται από 5 ώρες για τα δοκίμια που εκτέθηκαν στον θάλαμο για 5 ημέρες έως και 24 ώρες για δοκίμια που είχαν παρατεταμένη έκθεση σε διάβρωση (30 ημέρες).

Μετά την έκθεση στο διάλυμα τα δοκίμια καθαρίζονται με απιονισμένο νερό και αιθανόλη και ξηραίνονται με παροχή θερμού αέρα. Στη συνέχεια τα δοκίμια ζυγίζονται ξανά και από την απώλεια μάζας υπολογίζεται ο ρυθμός διάβρωσης με βάση τον τύπο :

$$\text{Corrosion rate} = \frac{K \cdot W}{A \cdot T \cdot D} \quad (\text{Εξ. 4.10})$$

Όπου :

K : σταθερά ανάλογη με τη μονάδα μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης (πίνακας 4.2)

W : η απώλεια μάζας (g) με ακρίβεια χιλιοστού του g

A : η επιφάνεια έκθεσης (cm²) (με ακρίβεια 0.01cm²)

T : χρόνος έκθεσης σε ώρες (με προσέγγιση 0.01h)

D : πυκνότητα του χάλυβα (g/cm³)

Μονάδες ρυθμού διάβρωσης	Σταθερά (K)
mils per year (mpy)	3,45x10 ⁶
inches per year (ipy)	3,45x10 ³
inches per month (ipm)	2,87x10 ²
millimeters per year (mm/y)	8,76x10 ⁴
micrometres per year (µm/y)	8,76x10 ⁷
picometres per second (pm/s)	2,78x10 ⁶
grams per square metre per hour (g/m ² h)	1,00x10 ⁴ xD ^A
milligrams per square 96ecimetre per day (mdd)	2,40x10 ⁶ xD ^A
micrograms per square metre per second (µg/m ² s)	2,78x10 ⁶ xD ^A

Πίνακας 4.2 : Τιμές σταθεράς K για διαφορετικές μονάδες μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης

4.8.7 Οργάνωση προγράμματος έκθεσης δοκιμών στον κλιματικό θάλαμο

Για την πραγματοποίηση του πειράματος το πρόγραμμα που σχεδιάστηκε, βασίστηκε πάνω στη λογική του Planned Interval Test, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Η διαδικασία ξεκίνησε στις 21 Απριλίου 2015 και ολοκληρώθηκε στις 27 Μαΐου 2015. Η μικρή χρονική καθυστέρηση που υπάρχει στην ολοκλήρωση του κύκλου των 30 ημερών οφείλεται σε 4 ημέρες βλάβης που υπέστη ο θάλαμος αλατονέφωσης στην αρχή του πειράματος.

Η τοποθέτηση των δοκιμών μέσα στο θάλαμο έγινε έτσι ώστε να μπορεί να ελεγχθεί η διαβρωτικότητα του θαλάμου καθώς επίσης και να υπάρχει επαναληψιμότητα στα αποτελέσματα. Δηλαδή, δοκίμια που θα παρέμεναν στο θάλαμο για την ίδια χρονική διάρκεια, τοποθετήθηκαν σε διαφορετικές θέσεις πάνω στις ράγες. Στον πίνακα 4.3 που ακολουθεί υπάρχει ο χρόνος παραμονής των δοκιμών στο θάλαμο αλατονέφωσης καθώς και η ιδιότητα του δοκιμίου, δηλαδή Regular ή Interval.

Χρόνος t παραμονής στο θάλαμο (days)	Δοκίμια συγκόλλησης AH36-S690		Δοκίμια συγκόλλησης S690-S690	
	regular	Interval	regular	interval
5	CHC1	CHC11	HHC13	HHC11
10	CHC2	CHC10	HHC2	HHC10
15	CHC3	CHC9	HHC3	HHC9
20	CHC4	CHC8	HHC4	HHC8
25	CHC5	CHC7	HHC5	HHC7
30	CHC6, CHC12		HHC6,CHC12	

Πίνακας 4.3 : Ημέρες παραμονής του κάθε δοκιμίου στο θάλαμο

Βιβλιογραφία 4^{ου} Κεφαλαίου

1. Bo Carlsson, Göran Engström, Anne-Lise Hög Lejre, Mikael Johansson, Roy Johnsen, Reima Lahtinen, Mats Ström. Guideline for selection of accelerated corrosion test for product qualification
2. Charles Robert Werner. Corrosion resistance of enamel-coated steel reinforcement for concrete. 2010
3. Joshua P. Breen. The Effects of Temperature and Working Electrode Material on the Power Output of a Hydroxymethylfurfural Fuel Cell. A thesis submitted to Oregon State University. August 2013
4. Leica M Stereomicroscopes, User Manual, <http://www.leica-microsystems.com>
5. Model K0235 Flat Cell, User's manual. www.princetonappliedresearch.com
6. Muazzam Ghous Sohail. Corrosion of Steel in Concrete: Development of an Accelerated Test by Carbonation and Galvanic Coupling. University of Toulouse. May 2013
7. Q-lab representatives. New Q-FOG Controlled Relative Humidity Cyclic Corrosion Tester. March 2014
8. Rehan Muhammad Khan. Electrochemical removal of zinc and nickel ions from wastewater using flat plate electrodes. Karachi University. 1994
9. Stephen Cater, Hen Longden. D-3.1 Report on the HSLA welding parameters and the relevant numerical modelling. Mosaic
10. Tom Bos, Prediction of coating durability Early detection using electrochemical methods. University of Delft, March 2008
11. V. Ashworth, C. J. L. Booker, H. Charlton, J.J. Fairhurst, P. R. Falkner, E. Jackson, S. Monk, S. Sarsfield, T. J. J. Smith. A short introduction to corrosion and its control corrosion of metals and its prevention.
12. Stephen Cater, Hen Longden. D-3.1 Report on the HSLA welding parameters and the relevant numerical modelling. Materials Onboard:Steel Advancement and Integrated Composites. MOSAIC. 23 Nov 2014.

13. Μπάκας Αθανάσιος. Μελέτη της μικροδομής και της συμπεριφοράς σε διάβρωση συγκολλήσεων τόξου και υβριδικών συγκολλήσεων Laser-Τόξου. Ιανουάριος 2015

14. Κωνσταντίνος Κουτσουμπλής. Μελέτη της τάσης για διάβρωση ετεροειδών συγκολλήσεων ανοξείδωτου χάλυβα 316L και χάλυβα AH36 με τη χρήση ηλεκτροχημικών μεθόδων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΣΥΖΗΤΗΣΗ

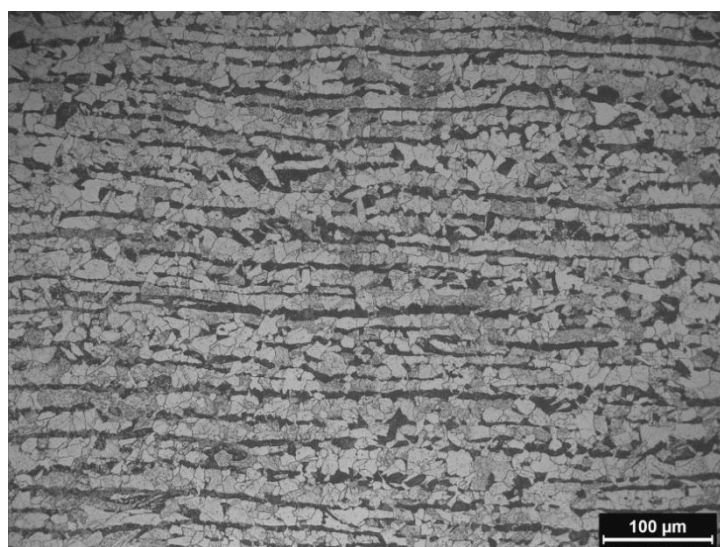
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε, με τη σειρά που παρουσιάστηκαν οι διαδικασίες στον προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεταλλογραφίας, τόσο μέσα από το μικροσκόπιο όσο και μέσα από το στερεοσκόπιο. Έπειτα, δίνονται τα αποτελέσματα της μικροσκληρομέτρησης, των ηλεκτροχημικών μεθόδων και τέλος του θαλάμου αλατονέφωσης. Σημειώνεται ότι όπως προαναφέρθηκε τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είναι 26 στο σύνολο και όλα έχουν πάχος 12mm. Από αυτά τα 13 ανήκουν στην πρώτη σειρά συγκόλλησης FSW : AH36 - S690, ενώ τα υπόλοιπα 13 ανήκουν στη δεύτερη σειρά συγκόλλησης FSW : S690-S690.

5.2 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

5.2.1 Μέταλλα βάσης

Αρχικά, παρατηρείται ότι ο AH36 αποτελείται από φερριτο-περλιτική μικροδομή όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα 5.1. Η φερριτική δομή η οποία εκφράζεται με τις ανοιχτόχρωμες περιοχές έχει μεγαλύτερη έκταση, το οποίο ήταν αναμενόμενο λόγω της χημικής σύστασης του χάλυβα (0.18% C). Παράλληλα, οι κόκκοι τόσο του φερρίτη όσο και του περλίτη έχουν έντονο προσανατολισμό το οποίο οφείλεται στην παραγωγική διαδικασία (έλαση) των ελασμάτων του χάλυβα. Ο προσανατολισμός των κόκκων είναι κάθετος στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου (εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1 : Μέταλλο βάσης χάλυβας AH36

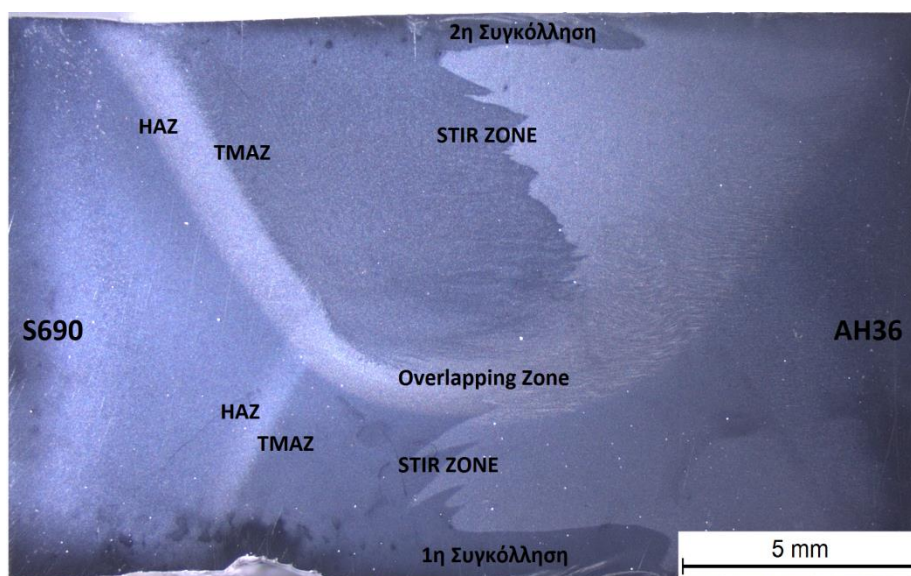
Αντίθετα, στον S690 παρατηρείται δομή η οποία αποτελείται από περλίτη και μπαινίτη καθώς και μαρτενσίτη από επαναφορά. Δεν εμφανίζεται ο προσανατολισμός των κόκκων εξαιτίας της θερμομηχανικής κατεργασίας που έχει υποστεί (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2 : Μέταλλο Βάσης χάλυβας S690

5.2.2 Συγκόλληση FSW AH36-S690

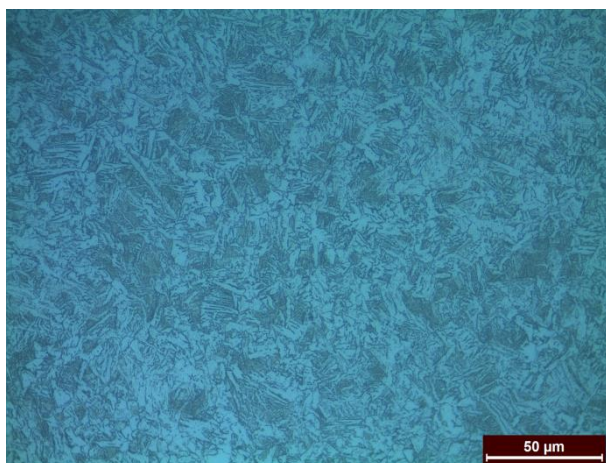
Στην ακόλουθη εικόνα (5.3) παρουσιάζεται η τομή της ετερογενούς συγκόλλησης AH36-S690 έτσι όπως φαίνεται στο στερεοσκόπιο. Συγκεκριμένα, διακρίνονται η Θερμικά Επηρασαμένη Ζώνη (HAZ), η Θερμομηχανικά Επηρασαμένη Ζώνη (TMAZ) καθώς και η Ζώνη ανάδευσης (Stir Zone) καθώς και η Ζώνη Επικάλυψης (Overlapping Zone) μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης συγκόλλησης.



Εικόνα 5.3 : Τομή της συγκόλλησης FSW AH36-S690

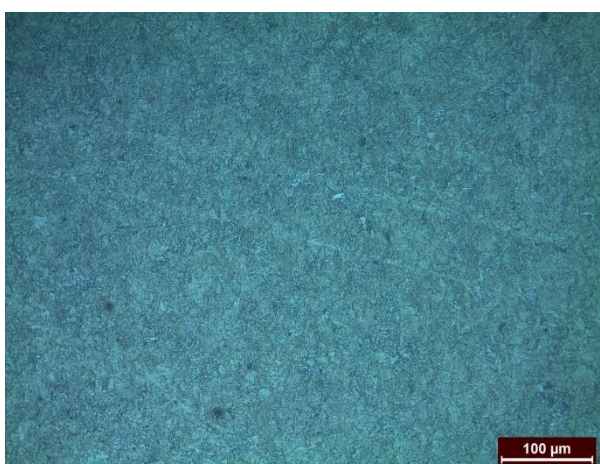
5.2.2.1 Ανάλυση των ζωνών της μικροδομής

Μελετώντας τη μικροδομή στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη στην πλευρά που βρίσκεται ο ΑΗ36 παρατηρούμε ότι αποτελείται κυρίως από βελονοειδή φερρίτη Widmastätten και περλίτη. (Εικόνα 5.4)



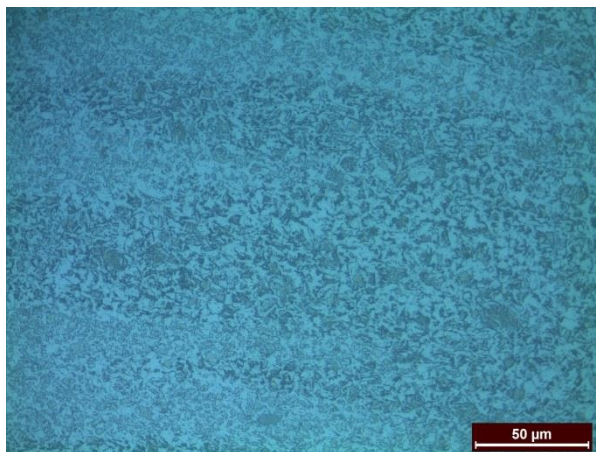
Εικόνα 5.4: Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) του ΑΗ36

Στη ζώνη ανάδευσης της ετερογενούς συγκόλλησης ΑΗ36-S690, η μικροδομή αποτελείται από μίγμα φάσεων όλων των μικροδομών των επιμέρους χαλύβων (φερρίτη, περλίτη, μπαινίτη) και επιπλέον μικρό ποσοστό μαρτενσίτη και παραμένοντος ωστενίτη. (Εικόνα 5.5)



Εικόνα 5.5: Ζώνη ανάδευσης (SZ) της ετερογενούς συγκόλλησης ΑΗ36-S690

Στην ακόλουθη εικόνα (5.6) παρουσιάζεται η μικροδομή του υλικού στην ζώνη επικάλυψης. Η ζώνη αυτή δημιουργείται όταν έχουμε διπλή συγκόλληση όπου η δεύτερη συγκόλληση καλύπτει μέρος της πρώτης. Σε αυτή τη ζώνη, παρατηρούνται φερρίτης, περλίτης, μπαινίτης.



Εικόνα 5.6: Ζώνη Επικάλυψης (Overlapping Zone) της ετερογενούς συγκόλλησης AH36-S690

5.2.3 Συγκόλληση FSW S690-S690

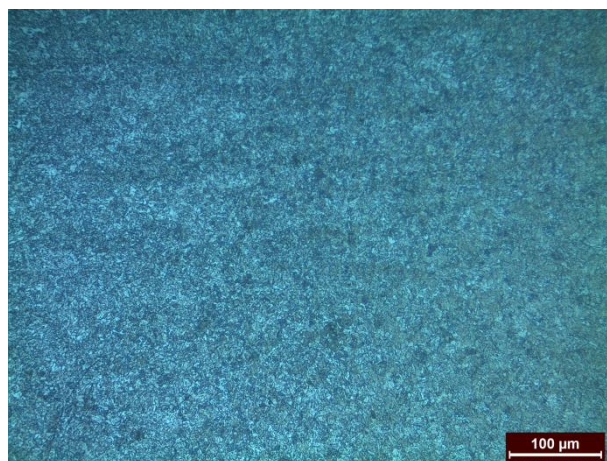
Στην παρακάτω εικόνα (5.7) παρουσιάζεται η τομή της ομογενούς συγκόλλησης S690-S690 έτσι όπως φαίνεται στο στερεοσκόπιο. Συγκεκριμένα, διακρίνονται η Θερμικά Επηρασαμένη Ζώνη (HAZ), η Θερμομηχανικά Επηρασαμένη Ζώνη (TMAZ) καθώς και η Ζώνη ανάδευσης (Stir Zone) καθώς και η Ζώνη Επικάλυψης (Overlapping Zone) μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης συγκόλλησης.



Εικόνα 5.7: Τομή της συγκόλλησης FSW S690-S690

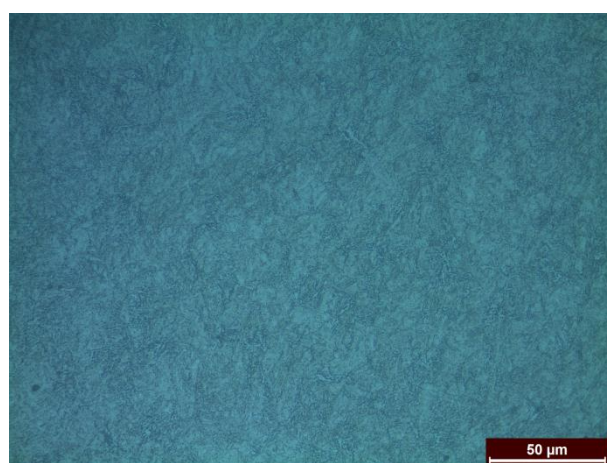
5.2.3.1 Ανάλυση των ζωνών της μικροδομής

Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Εικόνα 5.8) οι ανοιχτόχρωμες περιοχές υποδηλώνουν την πλήρη ανακρυστάλλωση που έχει υποστεί το υλικό στην περιοχή, ενώ στην θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη παρατηρείται μερική ανακρυστάλλωση.



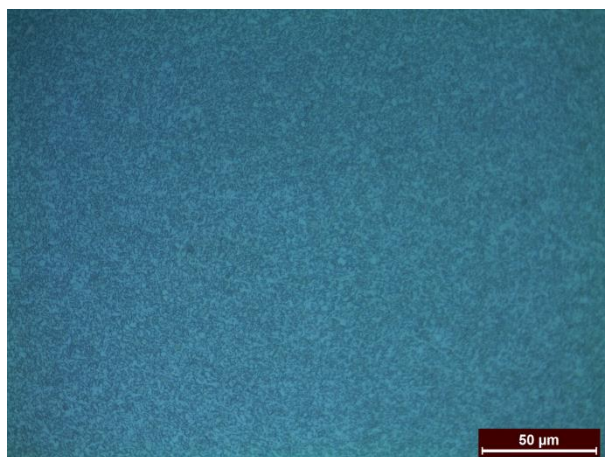
Εικόνα 5.8: Θερμικά επηρεασμένη ζώνη του S690

Στη ζώνη ανάδευση της συγκόλλησης S690-S690 (Εικόνα 5.9) παρατηρείται αρχικά σταθερή κατανομή στη ροή του υλικού γιατί το μέταλλο βάσης είναι το ίδιο. Επιπλέον, οι ανοιχτόχρωμες περιοχές υποδηλώνουν την ύπαρξη παραμένουστος ωστενίτη. Παράλληλα οι σκουρόχρωμες περιοχές υποδηλώνουν την ύπαρξη μπαινίτη και περλίτη. Τέλος, η περιοχή αυτή διαθέτει πολύ λίγο μαρτενσίτη ο οποίος όμως δεν είναι ευδιάκριτος καθώς και σεμεντίτη.



Εικόνα 5.9 : Ζώνη Ανάδευσης για την ομογενή συγκόλληση S690-S690

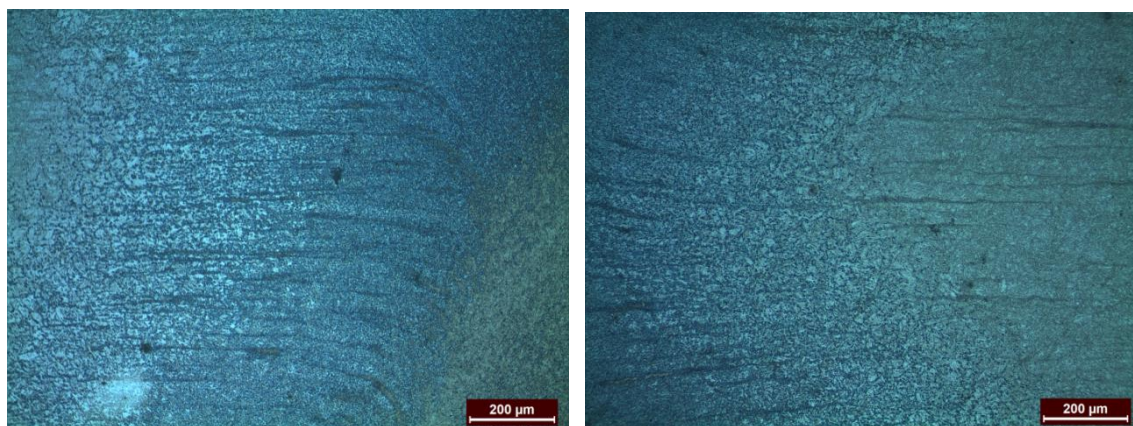
Η ζώνη επικάλυψης της συγκόλλησης S690-S690 (Εικόνα 5.10) δημιουργείται λόγω της ύπαρξης διπλής συγκόλλησης, όπου κατά τη δεύτερη συγκόλληση επικαλύπτεται μέρος της πρώτης. Στη συγκεκριμένη ζώνη παρατηρούμε την ύπαρξη περλίτη και ανώτερου μπαινίτη.



Εικόνα 5.10: Ζώνη επικάλυψης της ομογενούς συγκόλλησης S690-S690

5.2.4 Ροή του υλικού

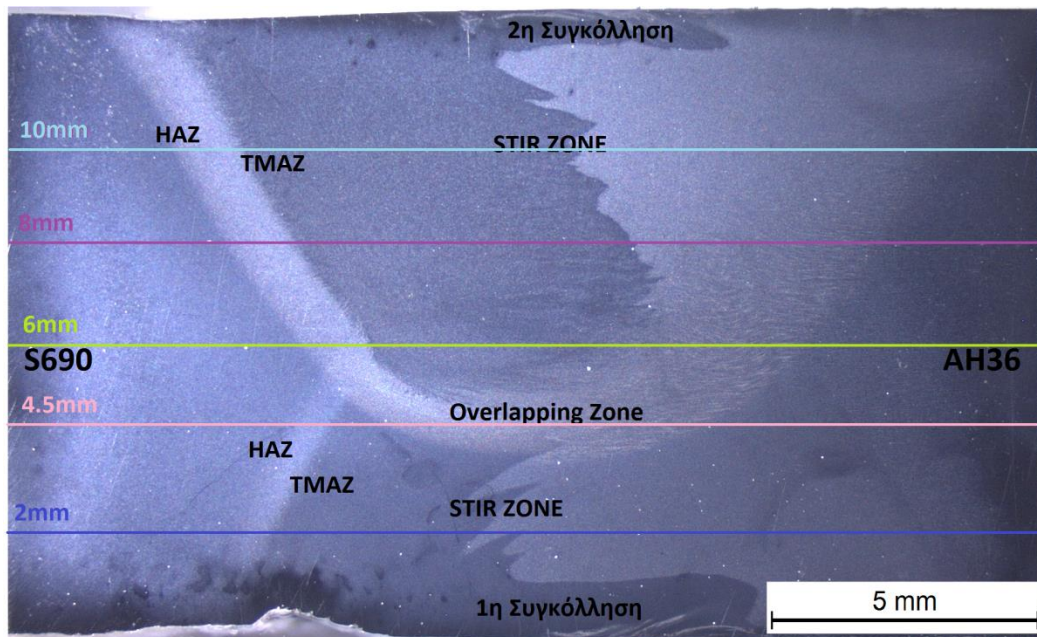
Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η ροή του υλικού και συγκεκριμένα η ανάδευση λόγω της κίνησης του εργαλείου. Στην πρώτη (Εικόνα 5.10.α) απεικονίζεται η ροή του υλικού εντός της θερμικά επηρεασμένης ζώνης του AH36, ενώ στο δεξί μέρος της εικόνας φαίνεται ελάχιστα η ζώνη ανάδευσης. Στην δεύτερη (εικόνα 5.10.β) απεικονίζεται η ροή στην πλευρά του S690 και διακρίνονται η θερμικά επηρεασμένη ζώνη και στο αριστερό μέρος της εικόνας διακρίνεται το μέταλλο βάσης (S690).



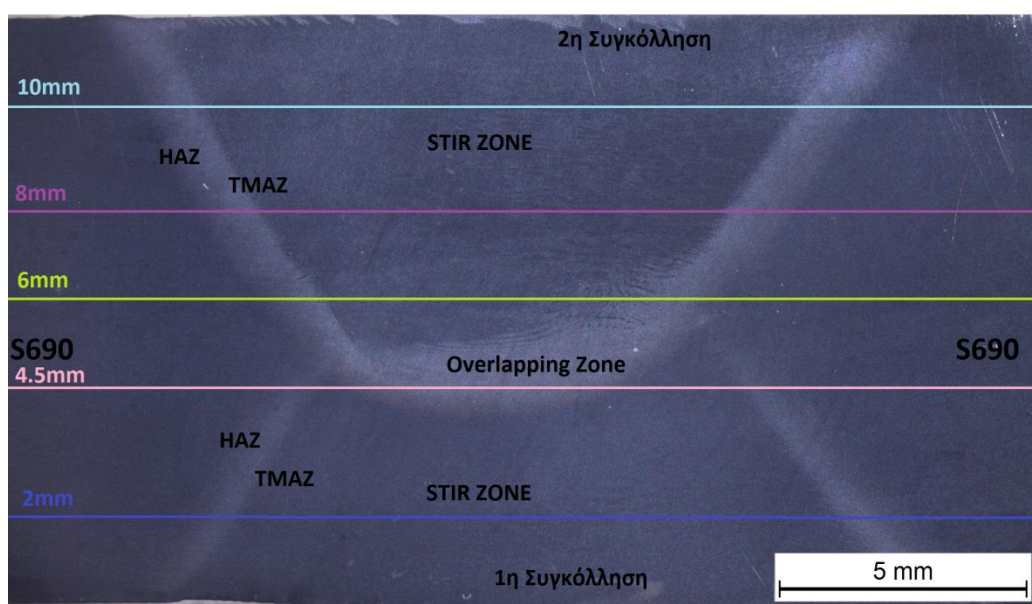
Εικόνα 5.11.α.β Αναπαράσταση της ροής του υλικού

5.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Για τις πειραματικές δοκιμές των μικροσκληρομετρήσεων, εφαρμόστηκαν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε πέντε διαφορετικές καθ' ύψος αποστάσεις όπως φαίνεται στα σχήματα 5.12 και 5.13 που ακολουθούν. Η κάθε απόσταση αντιστοιχίζεται με το ίδιο χρώμα του διαγράμματος μικροσκληρότητας που προέκυψε για την καλύτερη ανάγνωση του διαγράμματος. Επιπλέον, οι μετρήσεις έγιναν σε όλο το μήκος της συγκόλλησης δηλαδή σε όλες τις ζώνες, Μέταλλο βάσης, Θερμικά και Θερμομηχανικά Επηρασμένη ζώνη καθώς και Ζώνη Ανάδευσης.

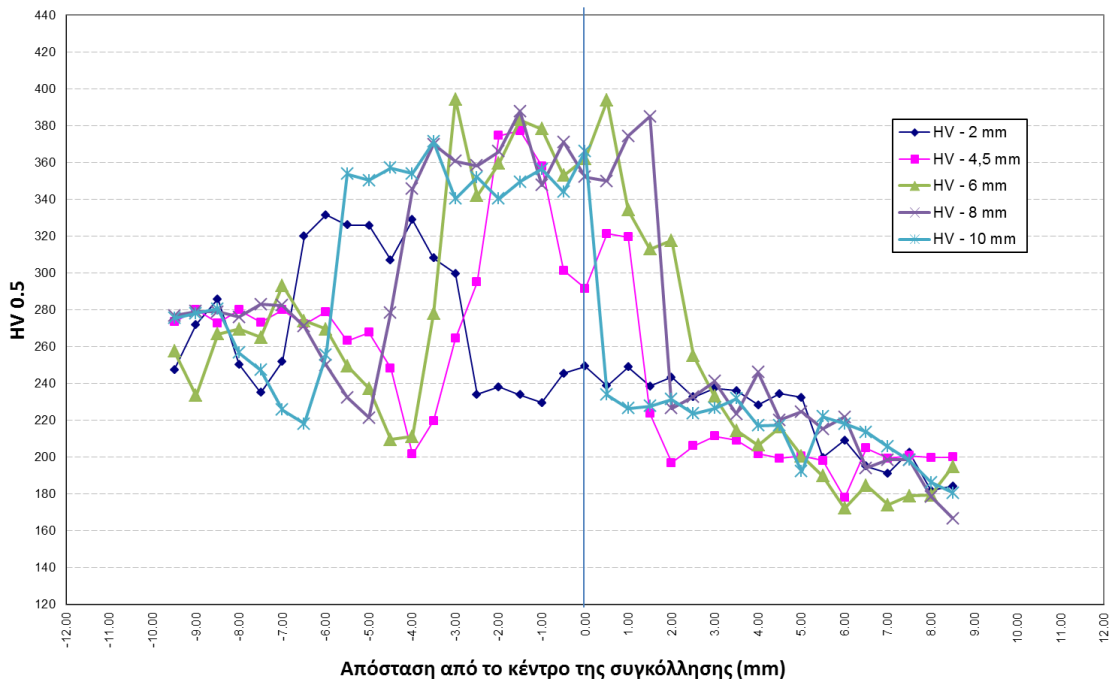


Εικόνα 5.12: Τομή της συγκόλλησης FSW AH36-S690 με τις θέσεις των μετρήσεων μικροσκληρότητας



Εικόνα 5.13: Τομή της συγκόλλησης FSW S690-S690 με τις θέσεις των μετρήσεων μικροσκληρότητας

Διάγραμμα μικροσκληρομετρήσεων της συγκόλλησης ΑΗ36-S690

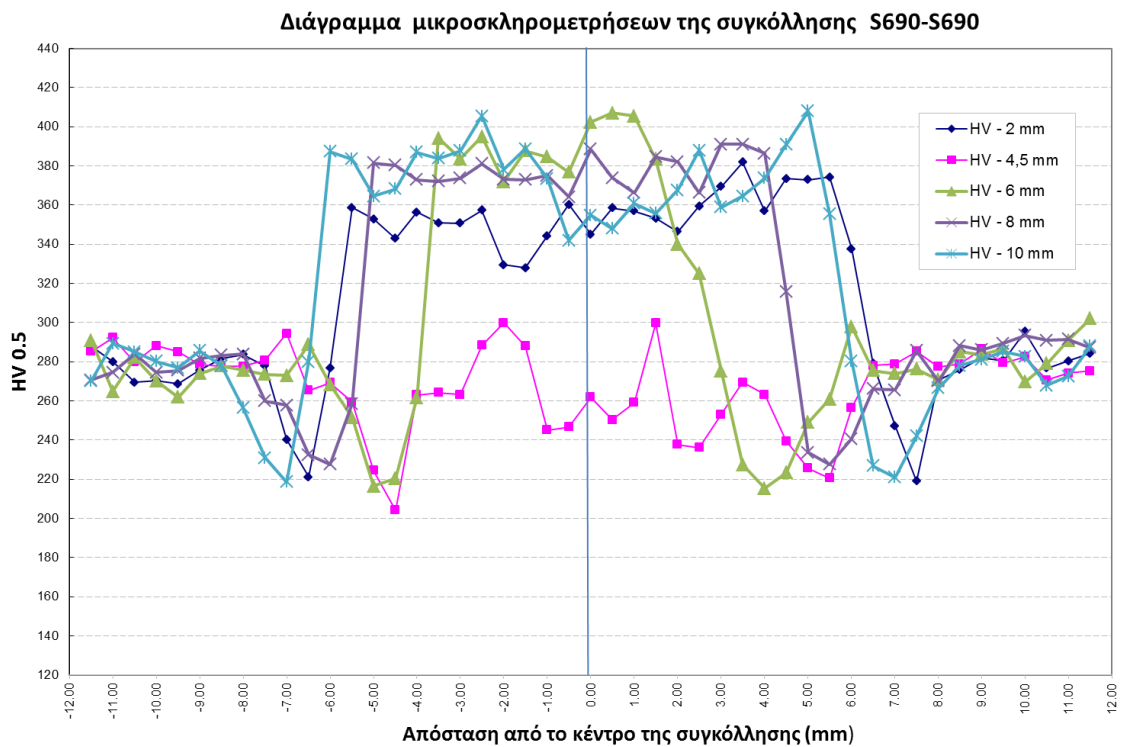


Διάγραμμα 5.1 : Διάγραμμα μικροσκληρομετρήσεων της συγκόλλησης ΑΗ36-S690

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις πειραματικές μετρήσεις της μικροσκληρότητας για την ετερογενή συγκόλληση ΑΗ36-S690. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για 5 διαφορετικές καθ' ύψος αποστάσεις από το κάτω μέρος της πρώτης συγκόλλησης του δοκιμίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.12.

Παρατηρώντας το διάγραμμα αρχικά μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η σκληρότητα των δύο μετάλλων βάσης είναι περίπου 180 Vickers για τον ΑΗ36 ενώ η σκληρότητα του S690 είναι αρκετά μεγαλύτερη, 280 Vickers.

Παράλληλα, στο διάγραμμα από το -6mm έως τα +6mm απεικονίζεται η ζώνη ανάδευσης. Στο διάστημα αυτό περιλαμβάνεται η θερμικά και θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη των οποίων οι αποστάσεις από το κέντρο της συγκόλλησης διαφέρουν ανάλογα με το ύψος στο οποίο έγινε η μέτρηση. Είναι προφανές ότι η μικρότερη σκληρότητα της συγκόλλησης παρατηρείται στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, και αυξάνεται κατακόρυφα μόλις εισέλθουμε στη ζώνη ανάδευσης. Η ζώνη ανάδευσης χωρίζεται σε δύο μέρη όπου το πρώτο έχει μεγάλη σκληρότητα γιατί περιέχει υψηλή ποσότητα S690 ενώ στο δεύτερο μέρος η σκληρότητα μειώνεται γιατί αρχίζει να μειώνεται η ποσότητα του S690 και αυξάνεται η ποσότητα του ΑΗ36 ο οποίος έχει σημαντικά χαμηλότερη σκληρότητα.



Διάγραμμα 5.2 : Διάγραμμα μικροσκληρομετρήσεων της συγκόλλησης AH36-S690

Στο παραπάνω διάγραμμα (5.2) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις πειραματικές μετρήσεις της μικροσκληρότητας για την ομογενή συγκόλληση S690-S690. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για 5 διαφορετικές καθ' ύψος αποστάσεις από το κάτω μέρος της πρώτης συγκόλλησης του δοκιμίου.

Παρατηρώντας το διάγραμμα διαπιστώνουμε ότι τα δύο άκρα του διαγράμματος είναι στα 280 Vickers καθώς η συγκόλληση περιέχει ως μέταλλο βάσης μόνο τον S690 και αυτή είναι η τιμή της σκληρότητας του.

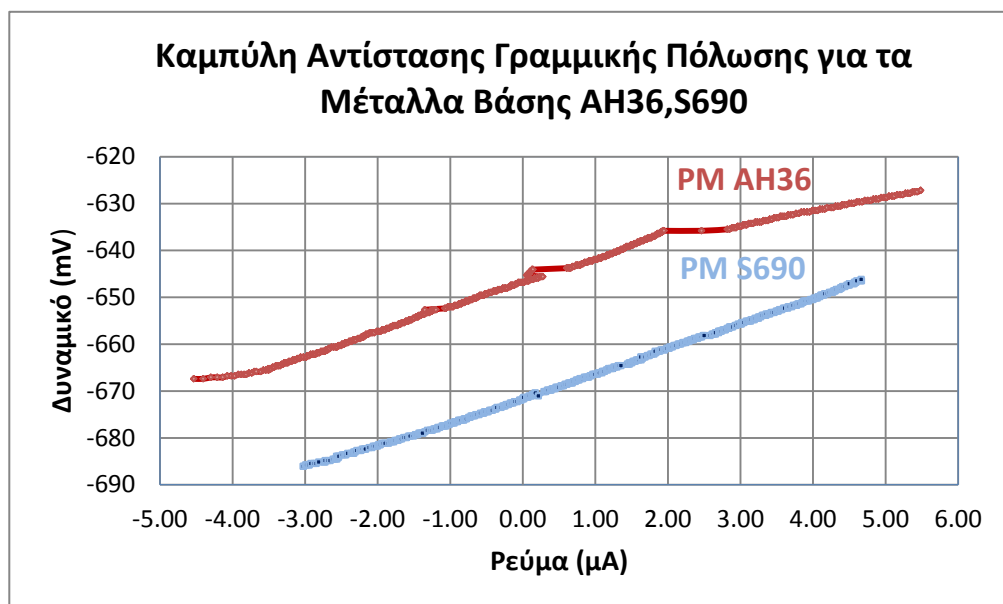
Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε ότι η θερμικά επηρεασμένη ζώνη έχει την χαμηλότερη σκληρότητα, η οποία αυξάνεται κατακόρυφα εντός της ζώνης ανάδευσης. Σε αντίθεση με το προηγούμενο διάγραμμα (5.1), σε αυτή την περίπτωση η ζώνη ανάδευσης παρουσιάζει ίδια συμπεριφορά σε όλο το μήκος της καθώς τα μέταλλα βάσης είναι τα ίδια. Η σκληρότητα στη ζώνη αυτή είναι κατά μέσο όρο στα 390 Vickers.

Τέλος, με ροζ χρώμα παρουσιάζεται η μέτρηση που έγινε στα 4.5 mm το οποίο συμπίπτει με την περιοχή επικάλυψης της πρώτης συγκόλλησης από τη δεύτερη. Η σκληρότητα στην περιοχή αυτή είναι εμφανώς μικρότερη, περίπου 250 Vickers, και αυτό οφείλεται στην ανόπτηση που έχει υποστεί το υλικό της πρώτης συγκόλλησης κατά τη διάρκεια της δεύτερης.

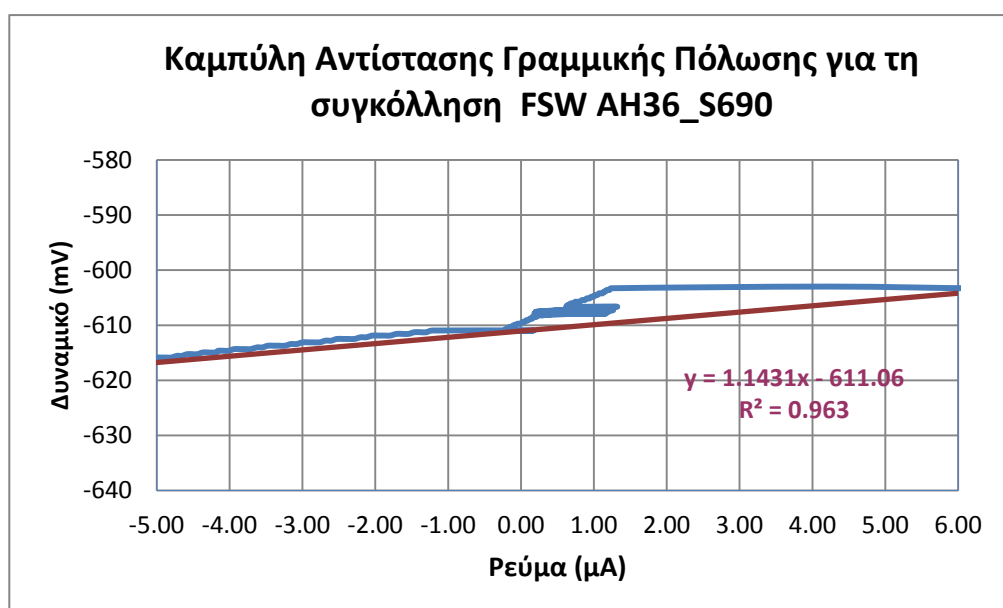
5.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

5.4.1 Πειραματικά αποτελέσματα της μεθόδου Γραμμικής Πόλωσης

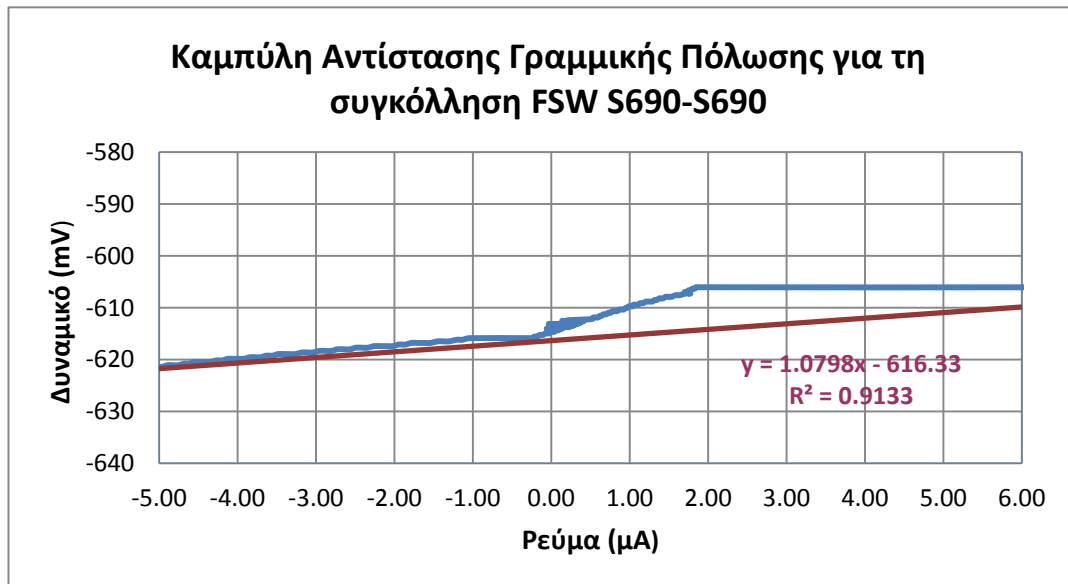
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα που προέκυψαν μέσω των δοκιμών επιταχυνόμενης διάβρωσης σε ηλεκτροχημικό κελί με τη μέθοδο Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης (Linear Polarization Resistance). Αρχικά έγινε προσδιορισμός της καμπύλης ρεύματος-δυναμικού για τα μέταλλα βάσης (Διάγραμμα 5.3) και έπειτα για τις δύο συγκολλήσεις FSW AH36-S690 (Διάγραμμα 5.4) και FSW S690-S690 (Διάγραμμα 5.5). Για την εκτέλεση του πειράματος εφαρμόστηκε πόλωση $\pm 25\text{mV}$.



Διάγραμμα 5.3 : Σύγκριση των δύο μετάλλων βάσης με τη μέθοδο LPR

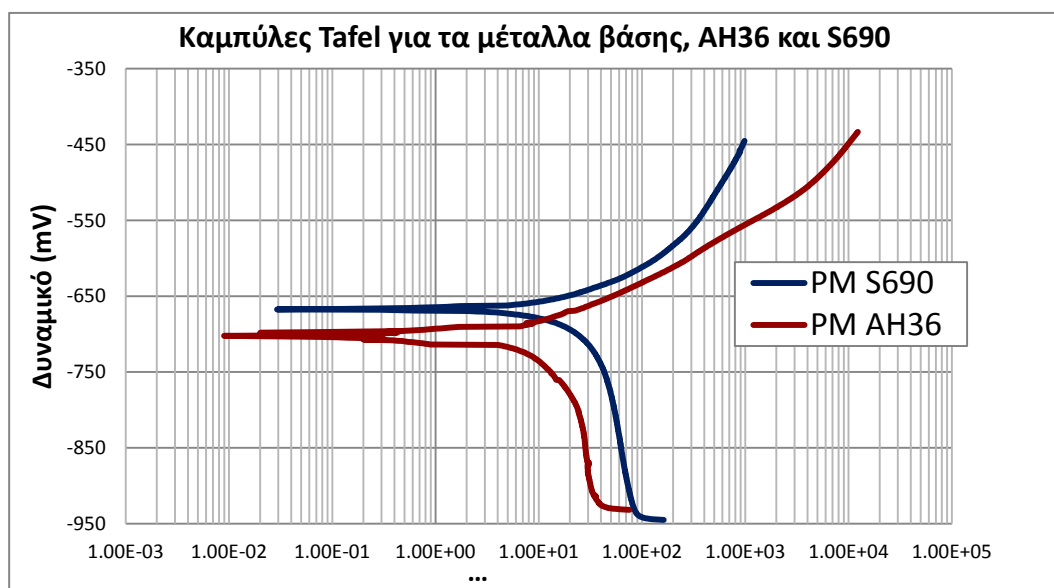


Διάγραμμα 5.4: Καμπύλη LPR για την ετερογενή συγκόλληση AH36-S690

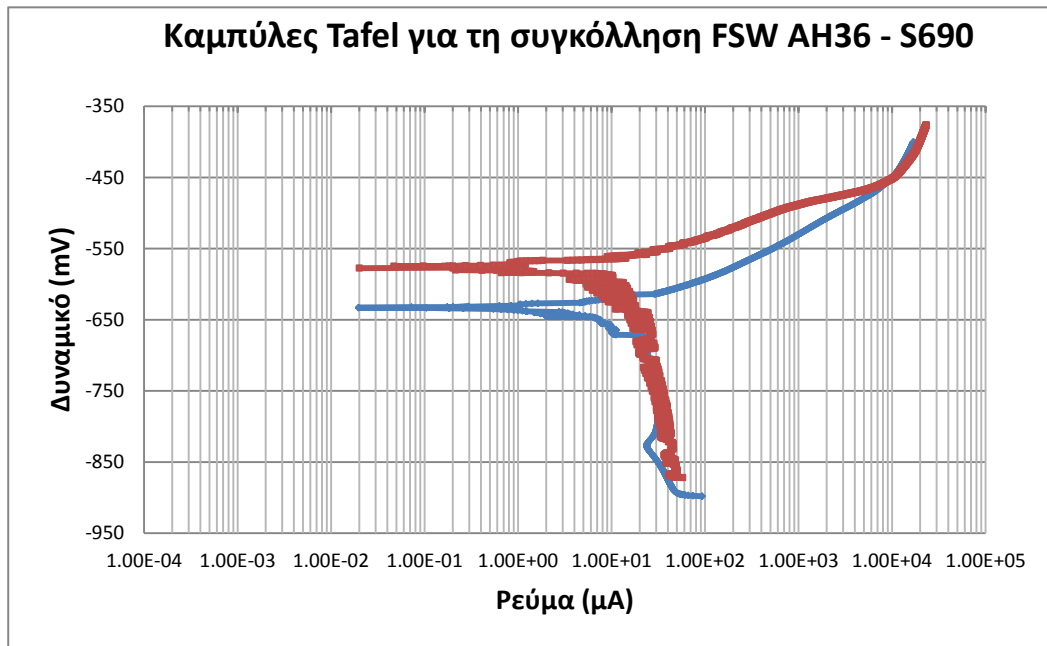


5.4.2 Πειραματικά αποτελέσματα της μεθόδου προεκβολής των ευθειών Tafel

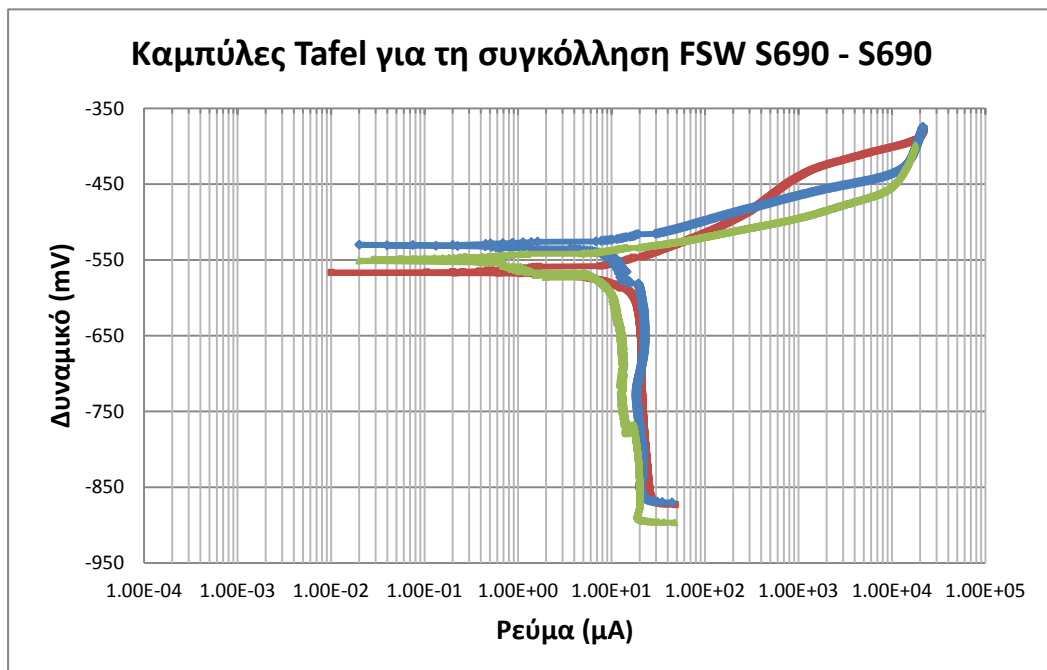
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την πειραματική διαδικασία ηλεκτροχημικών μετρήσεων με την μέθοδο προεκβολής των ευθειών Tafel. Αρχικά παρατίθενται οι καμπύλες για τα μέταλλα βάσης (Διάγραμμα 5.6). Έπειτα ακολουθούν οι δύο μετρήσεις για τη συγκόλληση AH36-S690 και οι τρεις μετρήσεις για τη συγκόλληση S690-S690 (Διαγράμματα 5.7 και 5.8) και έπειτα το συγκριτικό διάγραμμα όλων των μετρήσεων (Διαγράμματα 5.9). Για την εκτέλεση του πειράματος εφαρμόστηκε τάση $\pm 250\text{mV}$. Για τα μέταλλα βάσης προκύπτει i_{corr} περίπου $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ για τον S690 και $5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ για τον AH36. Το δυναμικό είναι περίπου -700mV για τον AH36 και -650mV για τον S690. (Διάγραμμα 5.6)



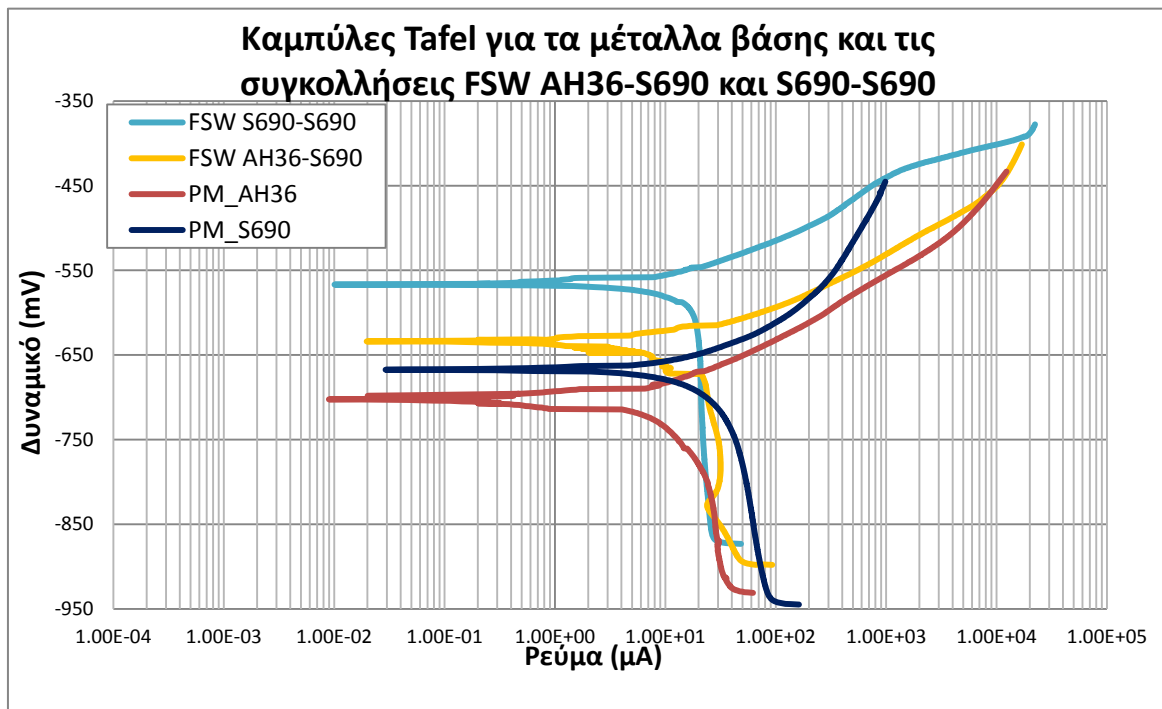
Κατά τις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις παρατηρήθηκε αρχικά ότι οι τιμές στην καθοδική πόλωση συγκλίνουν. Το προκύπτον i_{corr} για τη συγκόλληση AH36-S690 είναι περίπου $2\mu A/cm^2$ ενώ το δυναμικό είναι περίπου $-600mV$ (Διάγραμμα 5.7). Για τη συγκόλληση S690-S690 το i_{corr} είναι περίπου $3\mu A/cm^2$ ενώ το δυναμικό είναι περίπου $-550mV$ (Διάγραμμα 5.8). Έτσι θεωρούμε ότι οι διαφορές είναι ελάχιστες και ότι οι δύο συγκολλήσεις παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά.



Διάγραμμα 5.7: Καμπύλες Tafel για την ετερογενή συγκόλληση AH36-S690



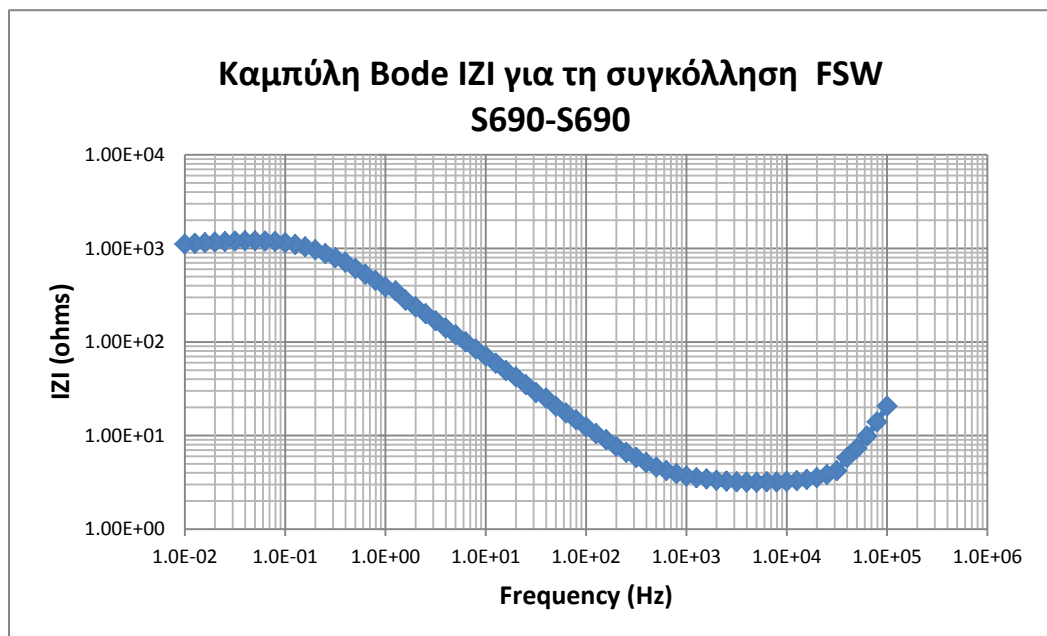
Διάγραμμα 5.8: Καμπύλες Tafel για την ομογενή συγκόλληση S690-S690



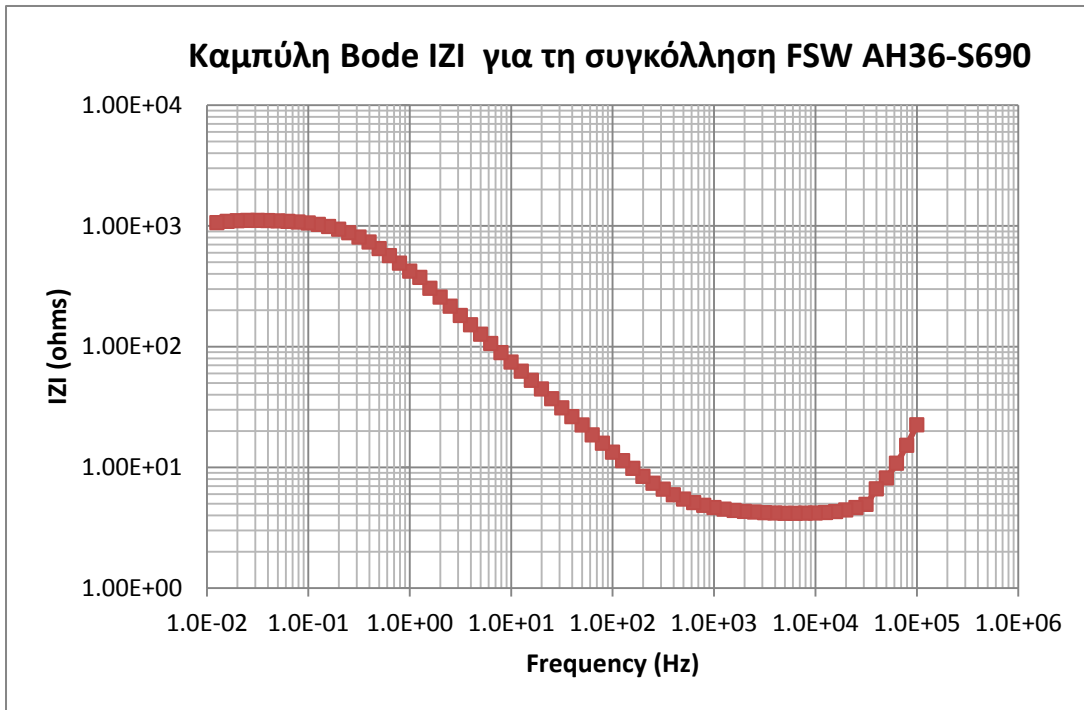
Διάγραμμα 5.9: Συγκριτικό διάγραμμα των καμπυλών Tafel για τα μέταλλα βάσης και τις συγκολλήσεις FSW AH36-S690, S690-S690

5.4.3 Πειραματικά αποτελέσματα της μεθόδου ηλεκτροχημικής εμπέδησης (EIS)

Ακολουθούν τα διαγράμματα Bode για τις δύο συγκολλήσεις που μελετήθηκαν καθώς και το συγκριτικό διάγραμμα (Διάγραμμα 5.12) των δύο συγκολλήσεων (FSW AH36-S690, FSW S690-S690) με τα μέταλλα βάσης.

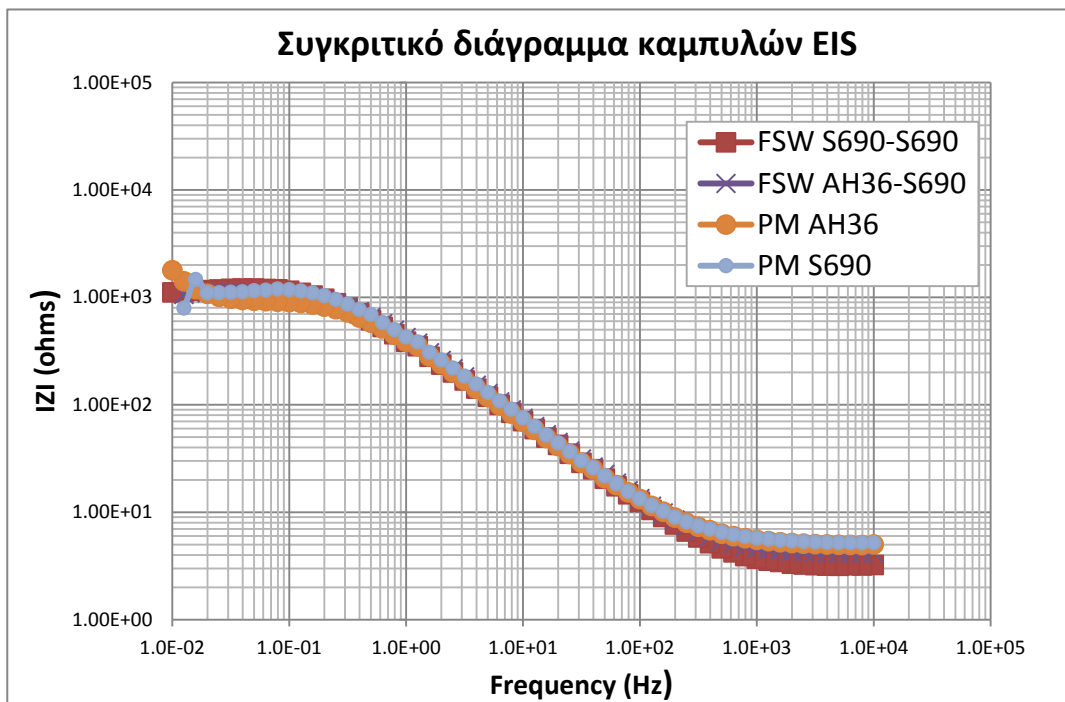


Διάγραμμα 5.10: Καμπύλη Bode για την ετερογενή συγκόλληση AH36-S690



Διάγραμμα 5.11: Καμπύλη Bode για την ομογενή συγκόλληση S690-S690

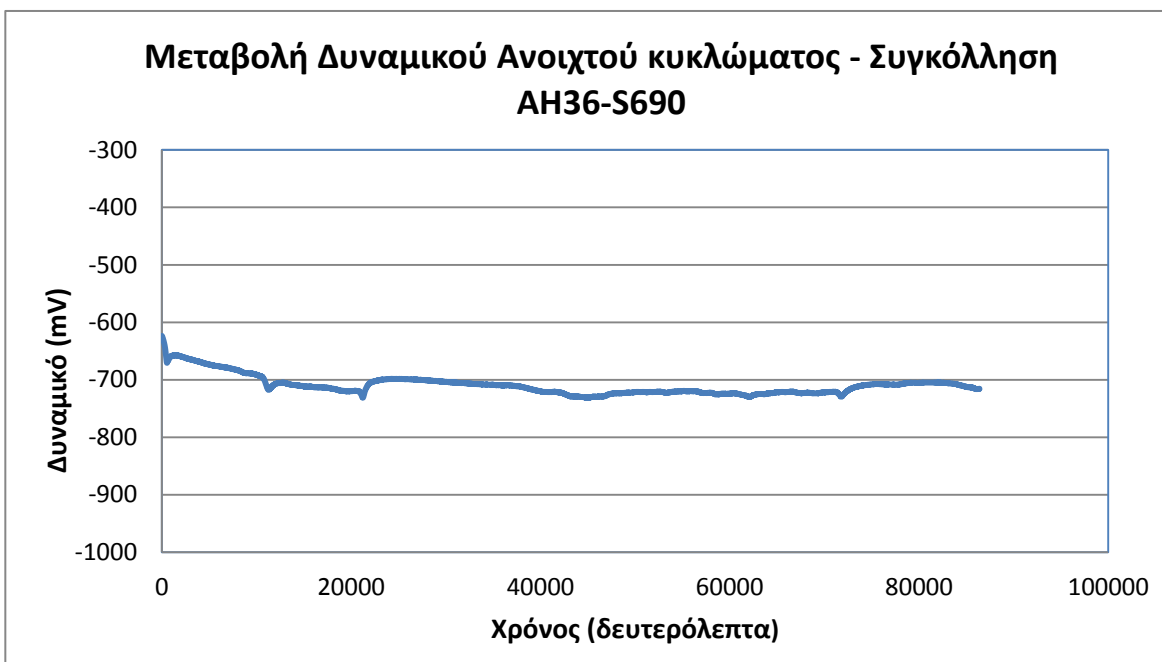
Με τη μέθοδο ηλεκτροχημικής εμπέδησης (EIS) υπολογίζεται η αντίσταση πόλωσης σε εναλλασσόμενο ρεύμα. Η αντίσταση στην πόλωση είναι παρόμοια τόσο για τα μέταλλα βάσης όσο και για τις δύο συγκολλήσεις. Για όλες τις καμπύλες η τιμή της αντίστασης πόλωσης είναι περίπου $1 \cdot 10^3$ ohms.



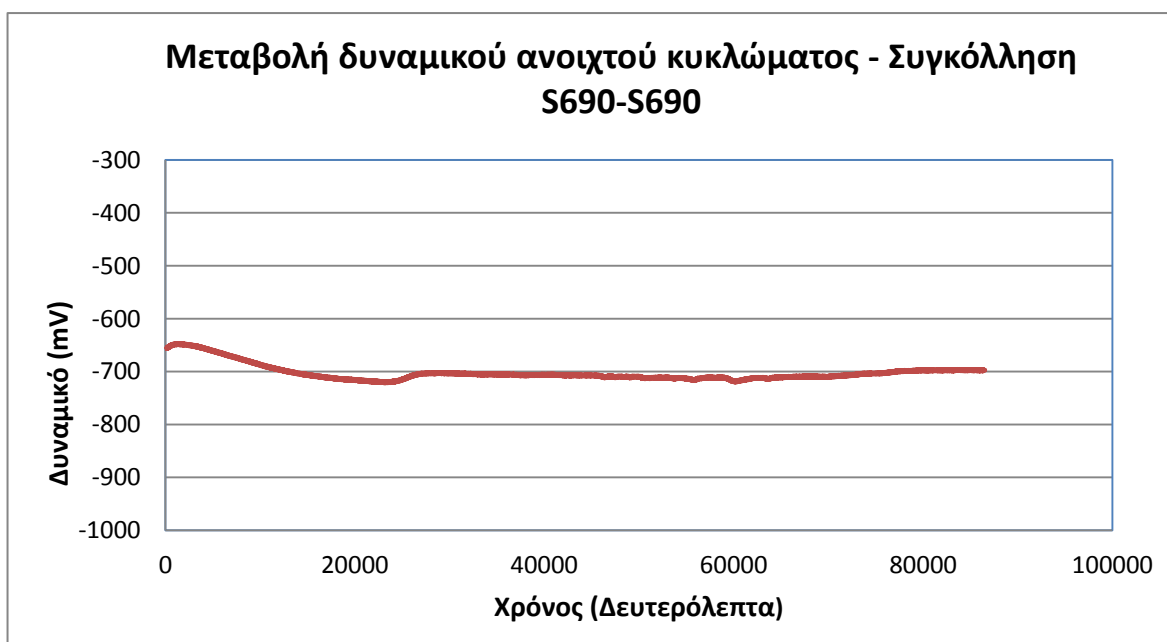
Διάγραμμα 5.12: Συγκριτικό Διάγραμμα των καμπυλών Bode για τα μέταλλα βάσης και τις δύο συγκολλήσεις FSW AH36-S690 και S690-S690

5.4.4 Διαγράμματα Ανοιχτού Κυκλώματος (Open Circuit, OC)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα ανοιχτού κυκλώματος για τις δύο συγκολλήσεις που μελετήθηκαν. Για την εκτέλεση του πειράματος τα δοκίμια εκτέθηκαν στον ηλεκτρολύτη σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος με ταυτόχρονη καταγραφή του δυναμικού συναρτήσει του χρόνου, για 24 ώρες με σκοπό να μετρηθεί με ακρίβεια το δυναμικό ισορροπίας. Συνεπώς, με βάση τα διαγράμματα αυτά (5.13 και 5.14) το δυναμικό είναι περίπου 700mV και για τις δύο συγκολλήσεις.



Διάγραμμα 5.13: Open Circuit της συγκόλλησης FSW AH36-S690



Διάγραμμα 5.14: Open Circuit της συγκόλλησης FSW S690- S690

5.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ – ΘΑΛΑΜΟΣ ΑΛΑΤΟΝΕΦΩΣΗΣ

Τα δοκίμια με την τοποθέτησή της στον κλιματικό θάλαμο, εκτέθηκαν σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς της σε διάβρωση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται της ακόλουθες παραγράφους.

5.5.1 Μακροσκοπικές παρατηρήσεις

Για τη μακροσκοπική μελέτη, τα δοκίμια φωτογραφήθηκαν σε τρία στάδια:

- Μετά την αμμοβολή και λίγο πριν την τοποθέτηση του στο θάλαμο
- Μετά την απομάκρυνση του από τον θάλαμο, με τα προϊόντα της διάβρωσης
- Μετά τον καθαρισμό και απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 5.14 : (α) Δοκίμιο μετά την αμμοβολή, πριν την τοποθέτηση στο θάλαμο αλατονέφωσης, (β) Δοκίμιο μετά την απομάκρυνση από το θάλαμο με τα προϊόντα της διάβρωσης, (γ) Δοκίμιο μετά τον καθαρισμό από τα προϊόντα της διάβρωσης

5.5.1.1 Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμών μετά την απομάκρυνσή της από το θάλαμο

Παρατηρώντας τα δοκίμια που εκτέθηκαν στο θάλαμο αρχικά διακρίνουμε ότι από τις 5 κιόλας ημέρες έκθεσης ολόκληρη η επιφάνεια των δοκιμών έχει καλυφθεί από το προϊόν της διάβρωσης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι μέχρι και τις 20 μέρες το προϊόν αυτό είναι πορτοκαλί χρώματος και από τις 20 μέχρι τις 30 ημέρες έκθεσης γίνεται σκούρο καφέ. Έτσι, συμπεραίνουμε κάποια αλλαγή στη χημική σύσταση του προϊόντος διάβρωσης όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης.

Πιο συγκεκριμένα, στις 5 ημέρες προκύπτει διάβρωση σε όλη την επιφάνεια, πορτοκαλί χρώματος, όπου ανά διαστήματα εμφανίζονται σημεία ανοιχτότερου χρώματος τα οποία περιβάλλονται από γκριζωπό περίγραμμα.

Στις 10 ημέρες έκθεσης, τα εντοπισμένα αυτά σημεία αρχίζουν να πληθαίνουν, αυξάνεται σημαντικά η διάμετρός τους, ενώ καταλαμβάνουν μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του δοκιμίου.

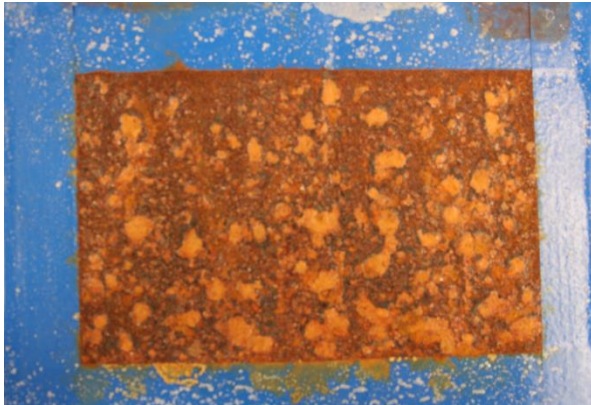
Μετά από παραμονή 15 ημερών στον θάλαμο, τα εντοπισμένα αυτά σημεία έχουν καλύψει σχεδόν ολόκληρη την επιφάνεια των δοκιμών ενώ παράλληλα αρχίζει η δημιουργία μικρών κρατήρων, οι οποίοι διαρρηγνύονται πρώτα στα Interval δοκίμια.

Μετά το πέρας των 20 ημερών, το προϊόν της διάβρωσης έχει αλλάξει εμφανώς το χρώμα του σε σκούρο καφέ, κυρίως στα Interval δοκίμια ενώ ο αριθμός των κρατήρων έχει αυξηθεί σημαντικά και ο αριθμός αυτών που έχουν διαρρηχθεί.

Στις 25 και 30 ημέρες, παρατηρείται η συνένωση των μικρών κρατήρων σε μεγαλύτερους όπου η διάρρηξη τους αποκαλύπτει τα επάλληλα στρώματα των προϊόντων της διάβρωσης. Τα ανώτερα στρώματα των προϊόντων διάβρωσης είναι εύθραυστα και απομακρύνονται εύκολα από την επιφάνεια.

Συγκρίνοντας τα δοκίμια που τοποθετήθηκαν από την αρχή στο θάλαμο (Regular) με αυτά που τοποθετήθηκαν μεταγενέστερα ανάλογα με το πρόγραμμα (Interval), καταλήγουμε ότι για τον ίδιο χρόνο παραμονής το φαινόμενο εξελίσσεται εντονότερα στα Interval δοκίμια κυρίως τις πρώτες 15 ημέρες, ενώ για μεγαλύτερη παραμονή ο ρυθμός διάβρωσης συγκλίνει και συνήθως τα Regular δοκίμια παρουσιάζουν ελαφρά μεγαλύτερες τιμές.

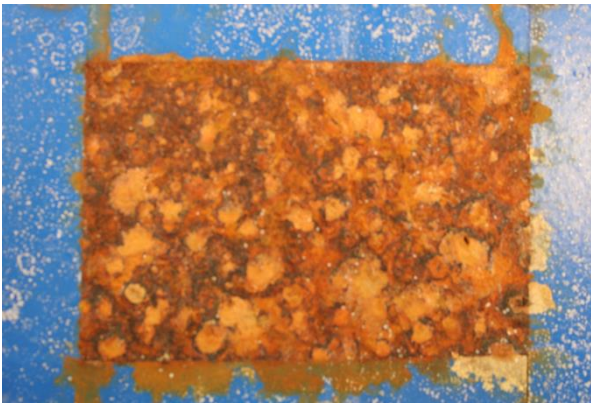
5.5.1.1.1 Δοκίμια της συγκόλλησης AH36-S690



Δοκίμιο CHC1, 5 ημέρες Regular



Δοκίμιο CHC11, 5 ημέρες Interval



Δοκίμιο CHC2, 10 ημέρες Regular



Δοκίμιο CHC10, 10 ημέρες Interval



Δοκίμιο CHC3, 15 ημέρες Regular



Δοκίμιο CHC9, 10 ημέρες Interval



Δοκίμιο CHC4, 20 ημέρες Regular



Δοκίμιο CHC8, 20 ημέρες Interval



Δοκίμιο CHC5, 25 ημέρες Regular



Δοκίμιο CHC7, 25 ημέρες Interval



Δοκίμιο CHC6, 30 ημέρες Regular



Δοκίμιο CHC12, 30 ημέρες Regular

5.5.1.1.2 Δοκίμια της συγκόλλησης S690-S690



Δοκίμιο HHC13, 5 ημέρες Regular



Δοκίμιο HHC11, 5 ημέρες Interval



Δοκίμιο HHC2, 10 ημέρες Regular



Δοκίμιο HHC10, 10 ημέρες Interval



Δοκίμιο HHC3, 15 ημέρες Regular



Δοκίμιο HHC9, 15 ημέρες Interval



Δοκίμιο HHC4, 20 ημέρες Regular



Δοκίμιο HHC8, 20 ημέρες Interval



Δοκίμιο HHC5, 25 ημέρες Regular



Δοκίμιο HHC7, 25 ημέρες Interval



Δοκίμιο HHC6, 30 ημέρες Regular



Δοκίμιο HHC12, 30 ημέρες Interval

5.5.1.2 Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμών μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

Η απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης από την επιφάνεια των δοκιμών αποκαλύπτει τη μορφολογία της διάβρωσης η οποία διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το είδος του χάλυβα. Έτσι, για τον ΑΗ36 παρατηρείται διάβρωση με βελονισμούς (pitting corrosion), οι οποίοι εξελίσσονται κυρίως κατά το πλάτος ενώ παρατηρείται η ύπαρξη χαμηλού βάθους διάβρωσης. Αντίθετα, στον S690 παρατηρείται διάβρωση βελονισμών οι οποίοι παρουσιάζουν μικρή διάμετρο αλλά αρκετά μεγαλύτερο βάθος. Άρα, είναι πιθανό στον S690 η εξέλιξη του φαινομένου είναι πιο επικίνδυνη.

Ταυτόχρονα, μετά τον καθαρισμό των δοκιμών παρατηρήθηκε ότι για μικρό διάστημα έκθεσης στο θάλαμο αλατονέφωσης ο S690 δίνει επιφάνεια κιτρινωπού χρώματος η οποία μετατρέπεται με μαύρο χρώμα όσο αυξάνονται οι ημέρες έκθεσης. Αντίθετα, ο ΑΗ36 δίνει επιφάνεια λευκού χρώματος. Παράλληλα, παρατηρείται προσβολή και στη γραμμή της συγκόλλησης, τόσο στην ομογενή όσο και στην ετερογενή συγκόλληση, το οποίο διακρίνεται εύκολα λόγω του πιο σκούρου χρώματος. Αυτή η έντονη προσβολή στη γραμμή της συγκόλλησης οφείλεται πιθανότατα στην ενδοτράχυνση που έχει υποστεί η γραμμή της συγκόλλησης λόγω της τριβής της με το περιαιχένιο.

Παρατηρήθηκε επίσης, ότι για μικρά διαστήματα παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης τα προϊόντα της διάβρωσης απομακρύνονταν με ευκολία, ενώ όταν αυξήθηκε ο χρόνος παραμονής αυξήθηκε και η δυσκολία καθαρισμού των δοκιμών. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής τα προϊόντα της διάβρωσης εμφανίζουν ισχυρότερη συνάφεια με το υπόστρωμα, εξαιτίας και της προκύπτουσας μορφολογίας της επιφάνειας.

Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι τα δοκίμια που εκτέθηκαν στο θάλαμο αλατονέφωσης για 5 ημέρες χρειάστηκαν περίπου 5 ώρες στο διάλυμα για να καθαρίσουν εντελώς, σε αντίθεση με αυτά που εκτέθηκαν 30 ημέρες τα οποία παρέμειναν στο διάλυμα έως και 24 ώρες. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι τα προϊόντα διάβρωσης του ΑΗ36 καθαρίστηκαν πιο εύκολα κάτι που πιθανότατα οφείλεται στο χαμηλό βάθος των προϊόντων αυτών.

5.5.1.2.1 Δοκίμια της συγκόλλησης AH36-S690

Για την καλύτερη παρατήρηση των δοκιμών επισημαίνουμε ότι ο AH36 είναι στη δεξιά πλευρά της φωτογραφίας.



Δοκίμιο CHC1, 5 ημέρες Regular



Δοκίμιο CHC11, 5 ημέρες Interval



Δοκίμιο CHC2, 10 ημέρες Regular



Δοκίμιο CHC10, 10 ημέρες Interval



Δοκίμιο CHC3, 15 ημέρες Regular



Δοκίμιο CHC9, 15 ημέρες Interval



Δοκίμιο CHC4, 20 ημέρες Regular



Δοκίμιο CHC8, 20 ημέρες Interval



Δοκίμιο CHC5, 25 ημέρες Regular



Δοκίμιο CHC7, 25 ημέρες Interval



Δοκίμιο CHC6, 30 ημέρες Regular



Δοκίμιο CHC12, 30 ημέρες Interval

5.5.1.2 Δοκίμια της συγκόλλησης S690-S690



Δοκίμιο HHC13, 5 ημέρες Regular



Δοκίμιο HHC11, 5 ημέρες Interval



Δοκίμιο HHC2, 10 ημέρες Regular



Δοκίμιο HHC10, 10 ημέρες Interval



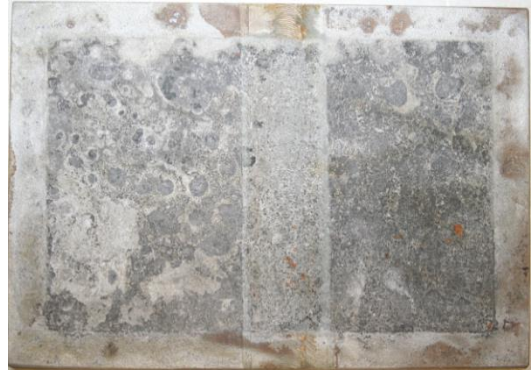
Δοκίμιο HHC3, 15 ημέρες Regular



Δοκίμιο HHC9, 15 ημέρες Interval



Δοκίμιο ΗΗC4, 20 ημέρες Regular



Δοκίμιο ΗΗC8, 20 ημέρες Interval



Δοκίμιο ΗΗC5, 25 ημέρες Regular



Δοκίμιο ΗΗC7, 25 ημέρες Interval



Δοκίμιο ΗΗC6, 30 ημέρες Regular



Δοκίμιο ΗΗC12, 30 ημέρες Regular

5.5.2 Μετρήσεις απώλειας βάρους

Οι πειραματικές μετρήσεις, όπως περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4, έδωσαν αποτελέσματα σχετικά με την απώλεια βάρους των δοκιμίων. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτών υπολογίστηκε ο ρυθμός διάβρωσης των δοκιμίων και το βάθος της διάβρωσης. Ακολουθούν οι εξισώσεις με τις οποίες έγιναν οι υπολογισμοί καθώς και οι συγκεντρωτικοί πίνακες με όλα τα στοιχεία για το κάθε δοκίμιο αλλά και τα τελικά αποτελέσματα.

Ειδικότερα, σύμφωνα με το ASTM G31-72, ο ρυθμός διάβρωσης προκύπτει από τον εξής τύπο :

$$\text{Ρυθμός διάβρωσης} = \frac{K \times W}{A \times T \times D} \quad (\text{Εξ. 5.1})$$

Επιπλέον σύμφωνα με το ISO 14993 το βάθος της διάβρωσης μπορεί να υπολογισθεί συνάρτηση της μεταβολής της μάζας. Δηλαδή :

$$\text{Βάθος Διάβρωσης} = \frac{W}{A \times D} \quad (\text{Εξ. 5.2})$$

Όπου :

K : σταθερά (ανάλογα με τη μονάδα μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης), ίση με 8.76×10^4 για υπολογισμό σε mm/year

W : η απώλεια μάζας (g) με ακρίβεια χιλιοστού του g

A : η επιφάνεια έκθεσης (cm^2) (με ακρίβεια 0.01cm^2). Η επιφάνεια έκθεσης υπολογίστηκε για κάθε δοκίμιο, θεωρώντας το παραλληλόγραμμο με πλευρές ίσες με το μέσο όρο των δύο πλευρών.

T : χρόνος έκθεσης σε ώρες

D : πυκνότητα του χάλυβα ίση με 7.86 g/cm^3

Παρατίθενται εκ νέου ο πίνακας με τη χρονική διάρκεια έκθεσης του κάθε δοκιμίου στο θάλαμο αλατονέφωσης για την αρτιότερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Χρόνος t παραμονής στο θάλαμο (days)	Δοκίμια συγκόλλησης AH36-S690		Δοκίμια συγκόλλησης S690-S690	
	regular	Interval	regular	interval
5	CHC1	CHC11	HHC13	HHC11
10	CHC2	CHC10	HHC2	HHC10
15	CHC3	CHC9	HHC3	HHC9
20	CHC4	CHC8	HHC4	HHC8
25	CHC5	CHC7	HHC5	HHC7
30	CHC6, CHC12		HHC6,CHC12	

Πίνακας 5.1 : Πρόγραμμα τοποθέτησης των δοκιμίων στο θάλαμο αλατονέφωσης

Στους πίνακες 5.2 και 5.3 παρουσιάζεται για κάθε δοκίμιο το αρχικό βάρος, το τελικό βάρος, η απώλεια βάρους που προκύπτει σε g, ο χρόνος έκθεσης σε ώρες, κύκλους και ημέρες, η εκτεθειμένη επιφάνεια σε cm², καθώς και το βάθος και ο ρυθμός διάβρωσης που προκύπτουν.

Συγκόλληση FSW για AH36-S690											
α/α Δοκίμιο	regular / interval	Αρχικό βάρος (g)	Τελικό βάρος (g)	Διαφορά (g)	Χρόνος Έκθεσης (hrs)	Κύκλοι	Ημέρες	A (cm ²)	Βάθος διάβρωσης (μm)	Ρυθμός διάβρωσης (mm/year)	Διαφορά %
1	CHC1	r	659.5	657	2.5	120	15	35.720	89.044	6.500	0.379
2	CHC11	i	659.3	656.6	2.7	90	11	53.690	63.981	6.227	0.410
3	CHC2	r	659.6	656.2	3.4	243	30	26.880	160.926	5.801	0.515
4	CHC10	i	662.2	657	5.2	207	26	47.520	139.221	5.892	0.785
5	CHC3	r	663.5	658.6	4.9	365	46	34.200	182.284	4.375	0.739
6	CHC9	i	664.9	657.3	7.6	306	38	46.750	206.828	5.921	1.143
7	CHC4	r	663.2	657.5	5.7	485	61	30.150	240.528	4.344	0.859
8	CHC8	i	661.9	654.1	7.8	449	56	48.400	205.034	4.000	1.178
9	CHC5	r	659.9	653	6.9	602	75	31.680	277.103	4.032	1.046
10	CHC7	i	661.5	653.5	8	571	71	42.870	237.418	3.642	1.209
11	CHC6	r	659.4	651.3	8.1	692	87	32.560	316.503	4.007	1.228
12	CHC12	r	659.4	652.7	6.7	692	87	30.750	277.209	3.509	1.016

Πίνακας 5.2 : Μετρήσεις απώλειας βάρους για τη συγκόλληση AH36-S690

Συγκόλληση FSW για S690-S690												
α/α Δοκίμιο	regular / interval	Αρχικ ό βάρος	Τελικό βάρος (g)	Διαφορά (g)	Χρόνος Έκθεσης (hrs)	Κύκλοι	Ημέρες	A (cm ²)	Βάθος διάβρωσης (μm)	Ρυθμός διάβρωσης (mm/year)	Διαφορά %	
1	HHC13	r	664.3	662.9	1.4	120	15	5	31.920	55.801	4.073	0.211
2	HHC11	i	663.8	661.5	2.3	90	11	4	50.160	58.337	5.678	0.346
3	HHC2	r	663.1	659.8	3.3	243	30	10	26.220	160.125	5.772	0.498
4	HHC10	i	663	658.1	4.9	207	26	9	45.900	135.819	5.748	0.739
5	HHC3	r	661.4	656.8	4.6	365	46	15	33.300	175.748	4.218	0.695
6	HHC9	i	664.3	657.3	7	306	38	13	48.160	184.922	5.294	1.054
7	HHC4	r	661.4	655.9	5.5	485	61	20	33.120	211.276	3.816	0.832
8	HHC8	i	663.6	657	6.6	449	56	19	49.020	171.296	3.342	0.995
9	HHC5	r	661.7	655.6	6.1	602	75	25	31.390	247.238	3.598	0.922
10	HHC7	i	662.2	656.5	5.7	571	71	24	36.800	197.063	3.023	0.861
11	HHC6	r	662.7	655.6	7.1	692	87	29	36.190	249.602	3.160	1.071
12	HHC12	r	664	657.6	6.4	692	87	29	32.760	248.550	3.146	0.964

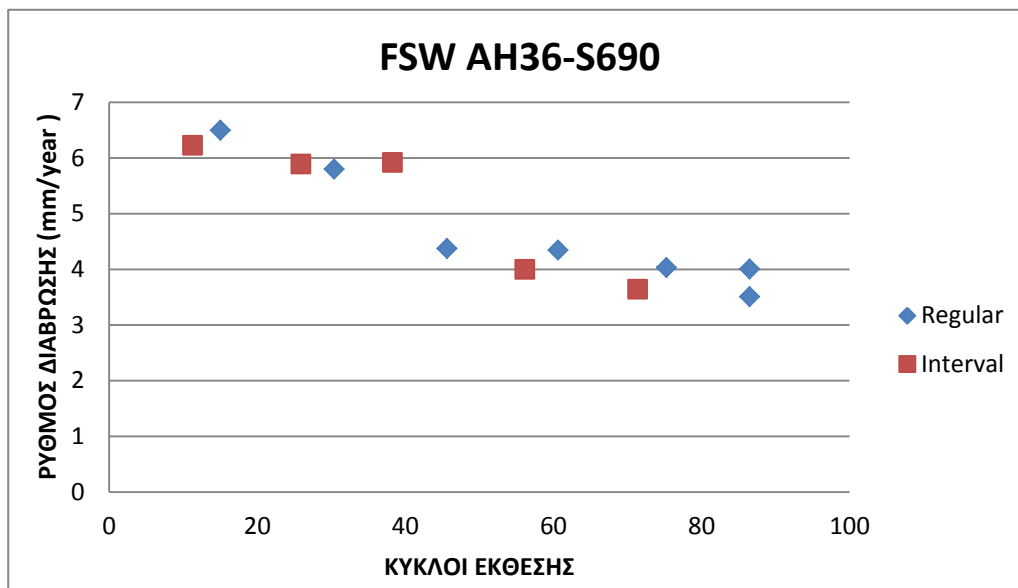
Πίνακας 5.3 : Μετρήσεις απώλειας βάρους για τη συγκόλληση S690-S690

5.5.3 Διαγράμματα Απώλειας Βάρους

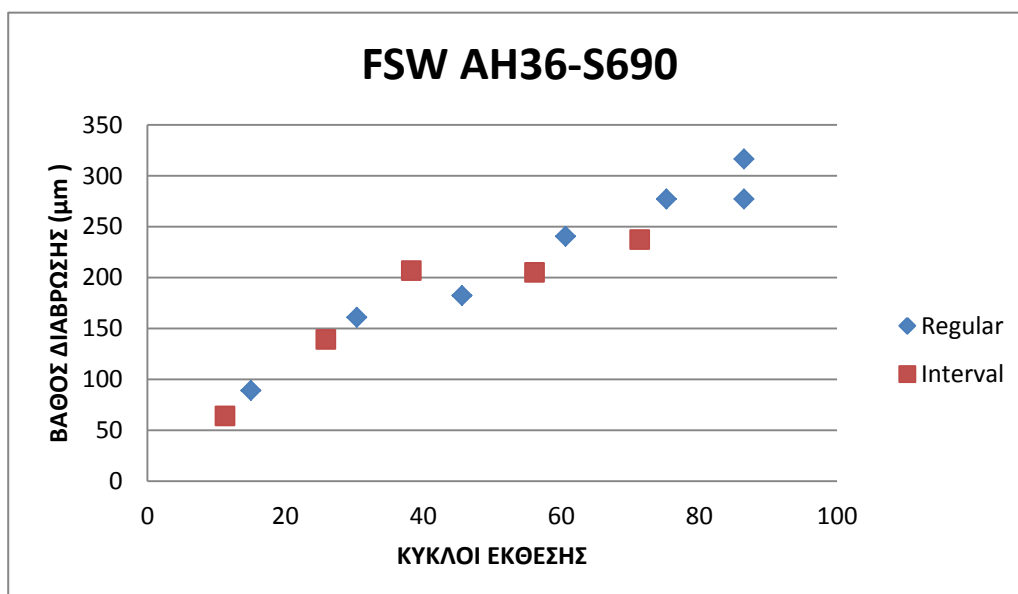
Στα διαγράμματα απώλειας βάρους παρουσιάζονται ο ρυθμός και το βάθος διάβρωσης συναρτήσει των κύκλων έκθεσης. Τα κυριότερα συμπεράσματα παρουσιάζονται στα συγκριτικά διαγράμματα (Διαγράμματα 5.19 και 5.20)

5.5.3.1 Διαγράμματα της ετερογενούς συγκόλλησης AH36-S690

Στα διαγράμματα 5.15 και 5.16 παρουσιάζονται οι ρυθμοί διάβρωσης για τα δοκίμια της συγκόλλησης FSW AH36-S690 για τα interval και τα regular δοκίμια.



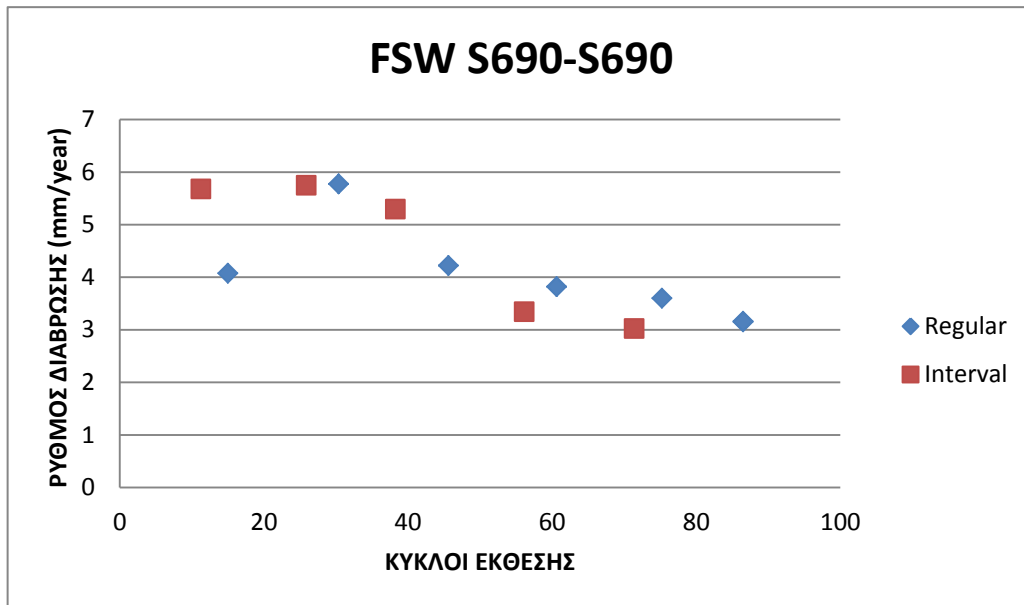
Διάγραμμα 5.15: Ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει των κύκλων έκθεσης της ετερογενούς συγκόλλησης AH36-S690 (1 κύκλος= 8 ώρες)



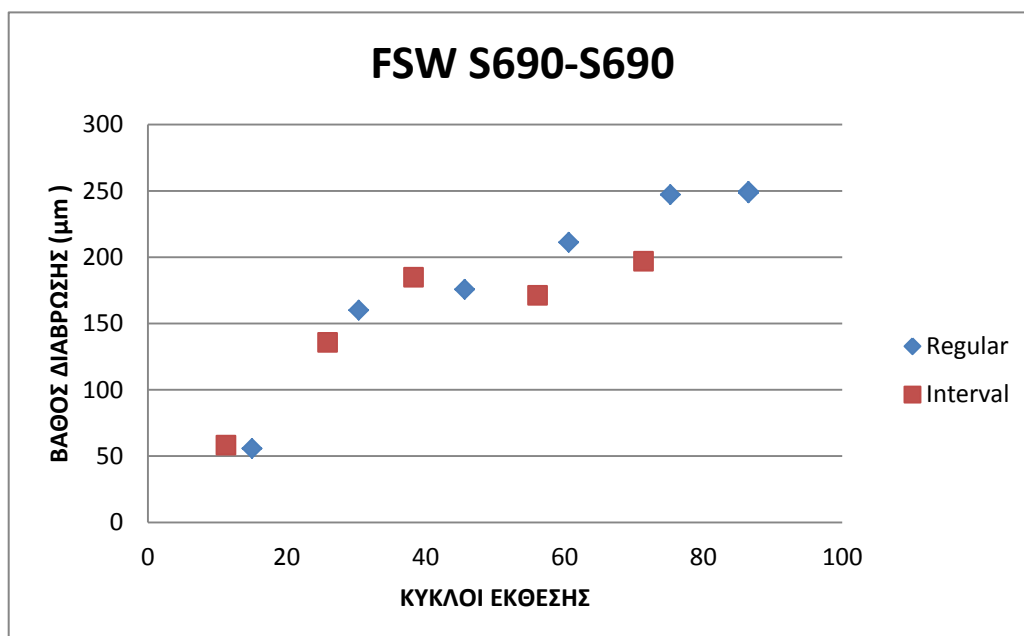
Διάγραμμα 5.16: Βάθος διάβρωσης συναρτήσει των κύκλων έκθεσης της ετερογενούς συγκόλλησης AH36-S690

5.5.3.2 Διαγράμματα της ομογενούς συγκόλλησης S690-S690

Στα διαγράμματα 5.17 και 5.18 παρουσιάζονται οι ρυθμοί διάβρωσης για τα δοκίμια της συγκόλλησης FSW S690-S690 για τα interval και τα regular δοκίμια.

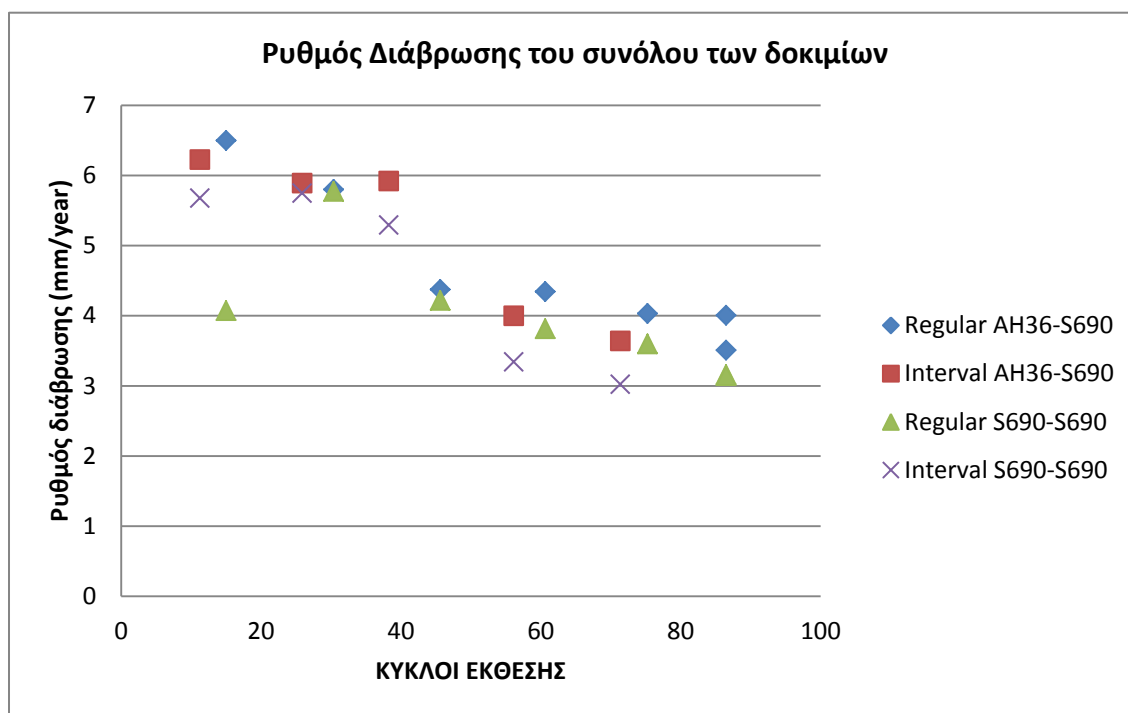


Διάγραμμα 5.17: Ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει των κύκλων έκθεσης για την ομογενή συγκόλληση S690-S690



Διάγραμμα 5.18: βάθος διάβρωσης συναρτήσει των κύκλων έκθεσης για την ομογενή συγκόλληση S690-S690

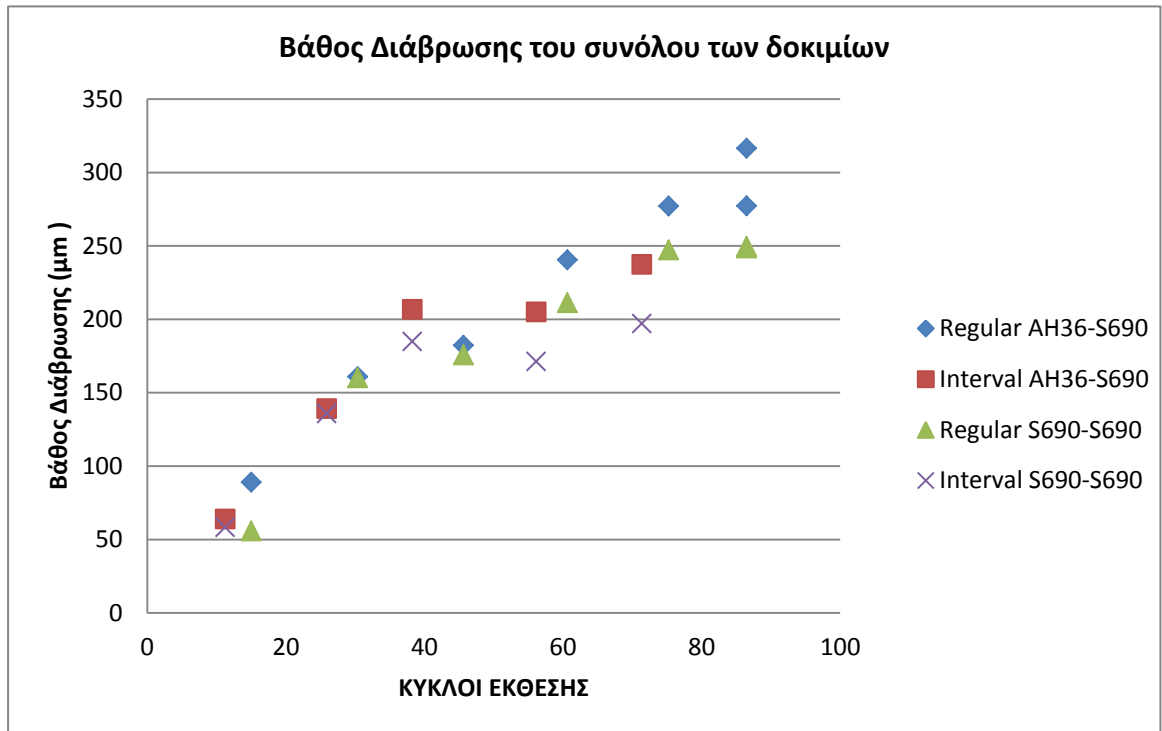
5.5.3.3 Συγκριτικά διαγράμματα διάβρωσης



Διάγραμμα 5.19: Συγκριτικό διάγραμμα του ρυθμού διάβρωσης για τις δυο συγκολλήσεις

Από το διάγραμμα σύγκρισης όλων των δοκιμίων για το ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει των κύκλων έκθεσης προκύπτουν τα εξής κύρια συμπεράσματα :

- Ο ρυθμός διάβρωσης των δοκιμίων κυμαίνεται μεταξύ 3-6.5 mm/ year. Πιο συγκεκριμένα, για τη συγκόλληση AH36-S690 η μέγιστη τιμή είναι 6.5 mm/year ενώ η ελάχιστη είναι 3.509 mm/year και ο μέσος όρος για ολόκληρο το διάστημα έκθεσης προκύπτει 4.854 ± 1.064 mm/year. Αντίστοιχα για τη συγκόλληση S690-S690 η μέγιστη τιμή ανέρχεται στα 5.678 mm/year ενώ η ελάχιστη στα 3.023 mm/year και ο μέσος όρος προκύπτει 4.239 ± 1.043 mm/year.
- Για χρόνους έκθεσης από 5 έως 15 ημέρες παρατηρούνται γενικά υψηλότεροι ρυθμοί διάβρωσης στα Interval δοκίμια ενώ από 20 έως 30 ημέρες οι τιμές συγκλίνουν και τα Regular παρουσιάζουν ελαφρώς υψηλότερες τιμές.
- Επιπλέον, είναι προφανές ότι όσο αυξάνονται οι κύκλοι έκθεσης ο ρυθμός διάβρωσης μειώνεται, έτσι στις 5 ημέρες (20 κύκλους) ο μέσος όρος για όλα τα δοκίμια είναι περίπου 6 mm/ year ενώ στις 30 ημέρες (90 κύκλοι) ο ρυθμός έχει μειωθεί κατά μέσο όρο στα 3.5 mm/ year.
- Τέλος, παρατηρείται ότι τα δοκίμια της ετερογενούς συγκόλλησης AH36-S690 παρουσιάζουν υψηλότερους ρυθμούς διάβρωσης σε όλα τα στάδια της παραμονής τους στο θάλαμο.



Διάγραμμα 5.20: Συγκριτικό διάγραμμα του βάθους διάβρωσης για τις δύο συγκολλήσεις

Από το διάγραμμα σύγκρισης όλων των δοκιμίων για το βάθος διάβρωσης συναρτήσει των κύκλων έκθεσης προκύπτουν τα εξής κύρια συμπεράσματα :

- Το βάθος διάβρωσης των δοκιμίων κυμαίνεται μεταξύ 50-320 μm/ year. Πιο συγκεκριμένα για τη συγκόλληση AH36-S690 ο μέσος όρος για το σύνολο των κύκλων έκθεσης υπολογίζεται στα 199.67μm ενώ για τη συγκόλληση S690-S690 είναι περίπου 174.648μm.
- Για μικρούς χρόνους έκθεσης παρατηρείται σαφέστατα μικρότερο βάθος διάβρωσης το οποίο αυξάνεται με την αύξηση των κύκλων, έτσι στις 5 ημέρες (20 κύκλους) το βάθος διάβρωσης είναι κατά μέσο όρο στα 50 μm/ year ενώ στις 30 ημέρες (90 κύκλοι) το βάθος διάβρωσης αυξάνεται στα 290 μm/ year κατά μέσο όρο.
- Γενικότερα τα Interval δοκίμια και για τις δύο συγκολλήσεις παρουσιάζουν το μικρότερο βάθος, ενώ σε αντίθεση με το ρυθμό διάβρωσης δεν συγκλίνουν οι τιμές όσο αυξάνεται η παραμονή στο θάλαμο, αλλά έχουν μια σταθερή διαφορά από τα Regular.
- Τέλος, παρατηρείται ότι τα δοκίμια της ετερογενούς συγκόλλησης AH36-S690 παρουσιάζουν μεγαλύτερο βάθος διάβρωσης σε όλα τα στάδια της παραμονής τους στο θάλαμο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς σε διάβρωση συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση (FSW), χάλυβα υψηλής αντοχής AH36 και χάλυβα υψηλής αντοχής χαμηλής κραμάτωσης (HSLA, S690). Η μελέτη του φαινομένου της διάβρωσης έγινε τόσο με ηλεκτροχημικές μεθόδους όσο και με τη βοήθεια του θαλάμου αλατονέφωσης.

Για την ολοκληρωμένη μελέτη των συγκολλήσεων αυτών εφαρμόστηκαν και άλλες πειραματικές μέθοδοι. Έτσι, για τη μελέτη της μικροδομής των χαλύβων χρησιμοποιήθηκε η Οπτική Μικροσκοπία, μέσω στερεοσκοπίου και μικροσκοπίου καθώς και η Μικροσκληρομέτρηση.

Τα συμπεράσματα τα οποία εξάγονται από την παρούσα εργασία είναι τα εξής :

Αναφορικά με τις ιδιότητες του υλικού :

- Το μέταλλο βάσης AH36 παρουσιάζει φερριτο-περλιτική δομή, προσανατολισμένη λόγω έλασης ενώ στον S690 παρατηρείται δομή αποτελούμενη από περλίτη, μπαινίτη και μαρτενσίτη από επαναφορά.
- Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) συμβαίνει πλήρης ανακρυστάλλωση ενώ στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ) συμβαίνει μερική ανακρυστάλλωση. Η TMAZ είναι μια πολύ λεπτή ζώνη δίπλα στη HAZ και σε αρκετές περιπτώσεις το πλάτος της είναι δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια.
- Στη ζώνη ανάδευσης (Stir Zone) παρατηρείται σταθερή κατανομή όταν τα μέταλλα βάσης είναι ίδια. Όταν τα μέταλλα βάσης είναι διαφορετικά η κατανομή εξαρτάται από τη διάχυση του ενός υλικού μέσα στο άλλο κατά την ανάδευση.

Από τα πειράματα των μικροσκληρομετρήσεων προέκυψαν τα εξής κύρια συμπεράσματα:

- Η μέση σκληρότητα του AH36 ανέρχεται στα 180 Vickers ενώ S690 παρουσιάζει σαφώς υψηλότερη σκληρότητα, 280 Vickers.
- Οι μεγαλύτερες τιμές της σκληρότητας εμφανίζονται στη ζώνη ανάδευσης (Stir Zone), ενώ οι χαμηλότερες στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ). Σε περιπτώσεις διπλής συγκόλλησης οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται στη ζώνη επικάλυψης (overlapping zone) λόγω της ανόπτησης που υφίσταται η πρώτη συγκόλληση κατά τη δημιουργία της δεύτερης.

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων επιταχυνόμενης γήρανσης προκύπτουν τα εξής :

- Ο μέσος όρος του ρυθμού διάβρωσης της συγκόλλησης FSW AH36-S690 για ολόκληρο το διάστημα έκθεσης προκύπτει 4.854 ± 1.064 mm/year ενώ για τη συγκόλληση FSW S690-S690 ο μέσος όρος 4.239 ± 1.043 mm/year.
- Τους υψηλότερους ρυθμούς διάβρωσης εμφανίζουν τα interval δοκίμια με μικρούς χρόνους έκθεσης (10,30 κύκλοι έκθεσης), ενώ όσο αυξάνεται το διάστημα έκθεσης ο ρυθμός διάβρωσης μεταξύ interval και regular συγκλίνει. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος στο οποίο εκτίθενται τα δοκίμια, αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου και σταθεροποιείται από τους 30 κύκλους και μετά.
- Το βάθος της διάβρωσης αυξάνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης και γενικά κυμαίνεται από 50-320 $\mu\text{m}/\text{year}$. Σε αυτή την περίπτωση τα Interval δοκίμια παρουσιάζουν μικρότερο βάθος διάβρωσης σε ολόκληρο το εύρος έκθεσης.
- Η γραμμή της συγκόλλησης, σε όλα τα δοκίμια εμφανίζει σκούρο γκρι χρώμα, γεγονός που αποδίδεται στην ενδοτράχυνση που έχει υποστεί το υλικό κατά την τριβή της επιφάνειας με το περιαιχένιο.

Από τα αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών μετρήσεων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Για τα μέταλλα βάσης προκύπτει i_{corr} περίπου $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ για τον S690 και $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ για τον AH36. Το δυναμικό είναι περίπου -700mV για τον AH36 και -650mV για τον S690.
- Για τη συγκόλληση AH36-S690 η τιμή του i_{corr} είναι περίπου $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ενώ το δυναμικό είναι περίπου -600mV.
- Για τη συγκόλληση S690-S690 το i_{corr} είναι περίπου $3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ενώ το δυναμικό είναι περίπου -550 mV.
- Από τις μετρήσεις ανοιχτού κυκλώματος προκύπτει ότι τα δυναμικά για τα δύο μέταλλα βάσης ισορροπούν σε παρόμοιες τιμές δυναμικού, ίσο με -700mV.

Συνεπώς με βάση τις ηλεκτροχημικές μετρήσεις προκύπτει ότι οι τιμές του δυναμικού διάβρωσης E_{corr} , του ρεύματος διάβρωσης i_{corr} , και της αντίστασης πόλωσης R_p για τα μέταλλα βάσης AH36, S690, δεν παρουσιάζουν αξιοσημείωτες διαφορές. Παρόμοιες είναι μεταξύ τους και οι αντίστοιχες τιμές για την ομοιογενή συγκόλληση S690-S690 και την ετερογενή συγκόλληση AH36-S690.

Συνεπώς, με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι οι δύο συγκολλήσεις δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ως προς τη συμπεριφορά σε διάβρωση, τόσο μεταξύ τους όσο και σε σχέση με τα μέταλλα βάσης τους.

