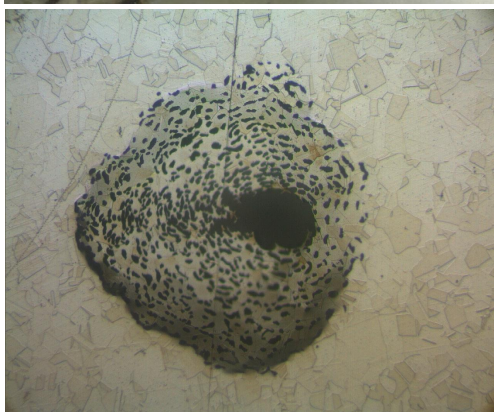




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***Μελέτη της Τάσης για Διάβρωση Ετεροειδών
Συγκολλήσεων Ανοξειδωτου Χάλυβα 316L
και Χάλυβα ΑΗ36
με Χρήση Ηλεκτροχημικών Μεθόδων***



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΟΥΤΣΟΥΜΠΛΗΣ

**Καθηγητής Δ.Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Επιβλέπων
Καθηγητής Β. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ
Αν. Καθηγητής Ν. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ**

*Αφιερωμένη
στον καθημερινό μου περίγυρο
– τους γονείς μου, την αδερφή μου,
την κοπέλα μου, τους φίλους μου –
που αποτελεί για μένα
έμπνευση και πηγή ζωής.
Κ.Κ.*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Μελέτη της Τάσης για Διάβρωση Ετεροειδών Συγκολλήσεων Ανοξειδωτου Χάλυβα 316L και Χάλυβα AH36 με Χρήση Ηλεκτροχημικών Μεθόδων» εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2007 – 2008 στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα, κ. Δ. Παντελή, Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, για την ανάθεση αυτού του πολύ ενδιαφέροντος θέματος, καθώς και για την πολύτιμη υποστήριξη και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Β. Παπάζογλου, Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και τον κ. Ν. Τσούβαλη, Αναπλ. Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την κ. Θ. Τσιούρβα, Χημικό Μηχανικό για την πολύτιμη βοήθειά της, τόσο στην εκτέλεση του βασικού σταδίου των πειραμάτων, όσο και στη συγκρότηση της δομής της διπλωματικής εργασίας. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Β. Μπουγιούρη, Χημικό Μηχανικό, για την ουσιαστική βοήθειά της, τόσο στην ολοκλήρωση, όσο και στη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σ. Χιονόπουλο, Τμηματάρχη Συγκολλήσεων των Ναυπηγείων Ελευσίνας, για τις συγκολλήσεις των ελασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, τον Δρ. Α. Κυριακόγονα για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέφερε στο κομμάτι της Μεταλλογραφίας, τον Υποψήφιο Διδάκτορα Ν. Δανιόλο για την καθοδήγηση στις μετρήσεις της Μικροσκληρότητας και την Υποψήφια Διδάκτορα Ν. Βασιλείου για την καθοδήγηση στη χρήση του στερεοσκοπίου και του οπτικού μικροσκοπίου.

Τέλος, θα ήθελα να κάνω ιδιαίτερη μνεία στην οικογένειά μου, για την αμέριστη συμπαράστασή της, τόσο κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας, όσο και καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Στην ηλεκτρονική μορφή της εργασίας παρουσιάζονται, ελλείπει χώρου, το κεφάλαιο 7 που σχετίζεται με την πειραματική διαδικασία, το κεφάλαιο 8 που παρουσιάζει τα αποτελέσματα και το κεφάλαιο 9 που δίνει τα συμπεράσματα. Τέλος, δίνεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιχειρήθηκε η μελέτη της προδιάθεσης για διάβρωση ετεροειδών συγκολλήσεων ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα 316L και χάλυβα υψηλής αντοχής AH36, σε διάλυμα 3.5%κ.β. NaCl. Η διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Για την αποτίμηση της προδιάθεσης για διάβρωση, εφαρμόστηκαν οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι: Γραμμική Πόλωση (Linear Polarization), Ανοδική Πόλωση (Anodic Polarization) και Προεκβολή Ευθειών Tafel (Tafel Extrapolation), σε ηλεκτρολύτη 3.5%κ.β. NaCl. Οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν, αρχικά, στην επιφάνεια συγκολλημένου ελάσματος ανοξειδωτού χάλυβα 316L – AH36, μέσω γυάλινων ηλεκτροχημικών κελιών (επιφάνειας $\sim 12\text{cm}^2$), και σε διαφορετικές περιοχές του ελάσματος: ζώνη τήξης, θερμικά επηρεασμένη ζώνη και μέταλλο βάσης. Μετά το πέρας των ανωτέρω μετρήσεων, οι ίδιες περιοχές του ελάσματος διαμορφώθηκαν (κόπηκαν και λειάνθηκαν), ούτως ώστε να δώσουν δοκίμια επιφάνειας $\sim 1\text{cm}^2$. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν εκ νέου ηλεκτροχημικές μετρήσεις με τις ίδιες μεθόδους σε ηλεκτροχημικό κελί τύπου Flat Cell, στον ίδιο ηλεκτρολύτη.

Παράλληλα, έλαβε χώρα μεταλλογραφική μελέτη του ελάσματος, μέσω οπτικής μικροσκοπίας, ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης και μετρήσεων μικροσκληρότητας. Μετά την ολοκλήρωση των ηλεκτροχημικών μετρήσεων, μελετήθηκε η μορφολογία της διάβρωσης με οπτική μικροσκοπία και ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης.

Η παρούσα εργασία αποτελείται από δύο μέρη, το θεωρητικό και το πειραματικό. Στο θεωρητικό μέρος γίνεται αναφορά στους χάλυβες, στις συγκολλήσεις αυτών, καθώς και στις ετεροειδείς συγκολλήσεις, στο φαινόμενο της διάβρωσης των συγκολλήσεων και στις ηλεκτροχημικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Στο πειραματικό μέρος παρατίθενται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων και τα συμπεράσματα που προέκυψαν. Τέλος, στο παράρτημα παρατίθενται όλα τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων μέσω των ηλεκτροχημικών μεθόδων.

ABSTRACT

The aim of this dissertation is the study of corrosion's tendency of stainless steel's dissimilar welds (austenitic stainless steel 316L to low alloy carbon steel AH36) in 3.5% NaCl solution. The dissertation was accomplished in the Shipbuilding Technology Laboratory of the Department of Naval Architecture and Marine Engineering, NTUA.

For the evaluation of the corrosion behavior three electrochemical methods were employed: Linear Polarization, Anodic Polarization and Tafel Extrapolation with 3.5% NaCl as electrolyte. Initially, the electrochemical experiments were conducted on the welded plate, using glass tubes (surface $\sim 12\text{cm}^2$) as electrochemical cells, fitted on the different areas of the plate: fusion zone, heat affected zone, base metal. When these experiments were completed, the same electrochemical experiments were performed on specimens, cut from the same spots of the plate, using flat cell, 1cm^2 surface, in the same electrolyte.

Except for the electrochemical experiments, the specimens were examined concerning the microstructure and the microhardness, in the different welding zones, as well as the corrosion morphology, employing optical and electron scanning microscopy.

The dissertation consists of two parts: in the first part issues like dissimilar welding and corrosion welding are presented, while in the second part one can find the experimental methods used, the results and the conclusion of this study. Finally, in the appendix, the reader can find all the experimental results.

Κεφάλαιο 7 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

7.1 Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς σε διάβρωση ετεροειδών συγκολλήσεων ανοξείδωτου χάλυβα 316L με χάλυβα υψηλής αντοχής AH36. Ειδικότερα, εξετάστηκαν ως προς την τάση για διάβρωση οι τρεις περιοχές της συγκόλλησης, δηλαδή η ζώνη τήξης (ZT), η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) και το μέταλλο βάσης (ΜΒ). Κύριος στόχος είναι ο προσδιορισμός της διαφορετικής τάσης για διάβρωση της κάθε περιοχής, δηλαδή να διερευνηθεί ποια από τις τρεις περιοχές εμφανίζει τη μεγαλύτερη τάση για διάβρωση, καθώς και ο ακριβής προσδιορισμός του ρυθμού διάβρωσης της κάθε περιοχής. Η μελέτη του φαινομένου της διάβρωσης έγινε με ηλεκτροχημικές μεθόδους.

Ιδιαίτερα δε, έγινε μια προκαταρκτική προσπάθεια να διερευνηθεί αν υπάρχει διαφορά στις παραμέτρους της διάβρωσης (δυναμικό διάβρωσης, ρυθμός διάβρωσης) όταν οι μετρήσεις γίνονται πάνω σε ένα έλασμα που έχει συγκολληθεί και όταν οι μετρήσεις γίνονται σε δοκίμια από τις τρεις διαφορετικές περιοχές της συγκόλλησης, που έχουν κοπεί από το αρχικό έλασμα. Με τον τρόπο αυτό επιχειρήθηκε να δοθεί μια εκτίμηση στις παραμέτρους της διάβρωσης, παραγόντων, όπως η κατάσταση της επιφάνειας του ελάσματος και οι παραμένουσες τάσεις.

Για την ολοκληρωμένη μελέτη του φαινομένου εφαρμόστηκαν και άλλες μέθοδοι. Έτσι, για τη μελέτη της δομής του χάλυβα στις τρεις διαφορετικές περιοχές χρησιμοποιήθηκε Οπτική Μικροσκοπία, καθώς και μικροσκληρομετρήσεις. Επίσης, για τη μελέτη της δομής του χάλυβα, αλλά και της μορφολογίας της διάβρωσης χρησιμοποιήθηκε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης. Επισημαίνεται ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνονται οι πρώτες εικόνες που ελήφθησαν με το νέο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy) του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας.

Στις επόμενες παραγράφους, περιγράφεται συνοπτικά η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε και στη συνέχεια δίνονται, συνοπτικά, οι αρχές των πειραματικών μεθόδων που εφαρμόστηκαν. Στο 8^ο Κεφάλαιο δίνονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν και ο σχολιασμός τους.

7.2 Συνοπτική Περιγραφή της Πειραματικής Διαδικασίας

Αρχικά, δύο ελάσματα – ένα ανοξειδωτού χάλυβα 316L και ένα χάλυβα υψηλής αντοχής – συγκολλήθηκαν με το χέρι με ηλεκτρόδιο παραγεμιστό τύπου 316L - Mo, μέθοδος FCAW, στα Ναυπηγεία της Ελευσίνας. Τα συγκολλημένα ελάσματα μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο και καθαρίστηκαν με αιθανόλη.

Πάνω στο έλασμα επικολλήθηκαν με αδιάβροχη σιλικόνη γυάλινοι σωλήνες εσωτερικής διαμέτρου 45mm. Οι γυάλινοι σωλήνες δημιούργησαν με τον τρόπο αυτό κελιά σε διαφορετικά σημεία του ελάσματος (έντεκα συνολικά). Στα κελιά αυτά έγιναν στη συνέχεια οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις.

Στη συνέχεια το έλασμα κόπηκε με υδροκοπή και ελήφθησαν δοκίμια από τις διακριτές περιοχές της συγκόλλησης: ζώνη τήξης (ZT), θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ), μέταλλο βάσης (MB). Τα δοκίμια λειάνθηκαν και στυλβώθηκαν και στη συνέχεια με το ηλεκτροχημικό κελί του Εργαστηρίου, τύπου Flat Cell, επαναλήφθηκαν οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις στις διαφορετικές περιοχές της συγκόλλησης, στα ίδια σημεία που είχαν γίνει και οι προηγούμενες μετρήσεις.

Παράλληλα, μελετήθηκε η δομή του ελάσματος στις διαφορετικές περιοχές της συγκόλλησης με οπτική μικροσκοπία και έγιναν μετρήσεις μικροσκληρότητας.

Όταν ολοκληρώθηκαν οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις οι διαβρωμένες επιφάνειες των δοκιμίων παρατηρήθηκαν στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο και μελετήθηκε η δομή της συγκόλλησης.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται αναλυτικά όλα τα ανωτέρω στάδια της πειραματικής διαδικασίας και η αρχή της κάθε μεθόδου συνοπτικά.

7.3 Υλικά – Χάλυβας Υψηλής Αντοχής AH36 και Ανοξειδωτος Χάλυβας 316L [3], [13], [14], [15], [35], [50], [51], [53], [54]

Τα υλικά που μελετήθηκαν είναι, όπως έχει προαναφερθεί, ο χάλυβας υψηλής αντοχής AH36, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία HTS (High Tensile Strength, Steel) και ο ανοξειδωτος χάλυβας 316L, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων.

Η ονομασία και κατάταξή του ως ναυπηγικού χάλυβα τύπου AH36, ακολουθεί το πρότυπο A131M της ASTM και προέρχεται από τον Lloyd's Register of Shipping Steels. Με αυτήν την ονομασία είναι παγκόσμια γνωστός, ωστόσο συναντάται και με

άλλη ονομασία, σύμφωνα με την κωδικοποίηση κάποιων χωρών (πχ K11852 Η.Π.Α, A36 Ρωσία, 1.0565 Γερμανία κλπ). Η χημική σύσταση του εν λόγω χάλυβα δίνεται στον πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1: Χημική σύσταση (% κ.β.) του χάλυβα AH36

C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	V	Ti	Cu	Cr	Ni	Mo
max 0.18	0.90 -1.60	0.10- 0.50	max 0.04	max 0.04	min 0.15	0.02- 0.05	0.05- 0.1	max 0.02	max 0.35	max 0.20	max 0.40	max 0.08

Έχει φερριτοπερλιτική δομή και το όριο διαρροής του χάλυβα είναι 36 Kp/mm² ή 353.2 MPa.

Για πάχη έως 12.5 mm (0.50 in) ο χάλυβας είναι συνήθως ημι-καθησυχασμένος, δηλαδή μερικώς αποξειδωμένος, ενώ για μεγαλύτερα πάχη ο χάλυβας είναι καθησυχασμένος, δηλαδή πλήρως αποξειδωμένος. Επίσης, 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 ημι-καθησυχασμένο χάλυβα, η κατώτερη περιεκτικότητα σε Si μπορεί να είναι χαμηλότερη του 0.10% κ.β.

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.

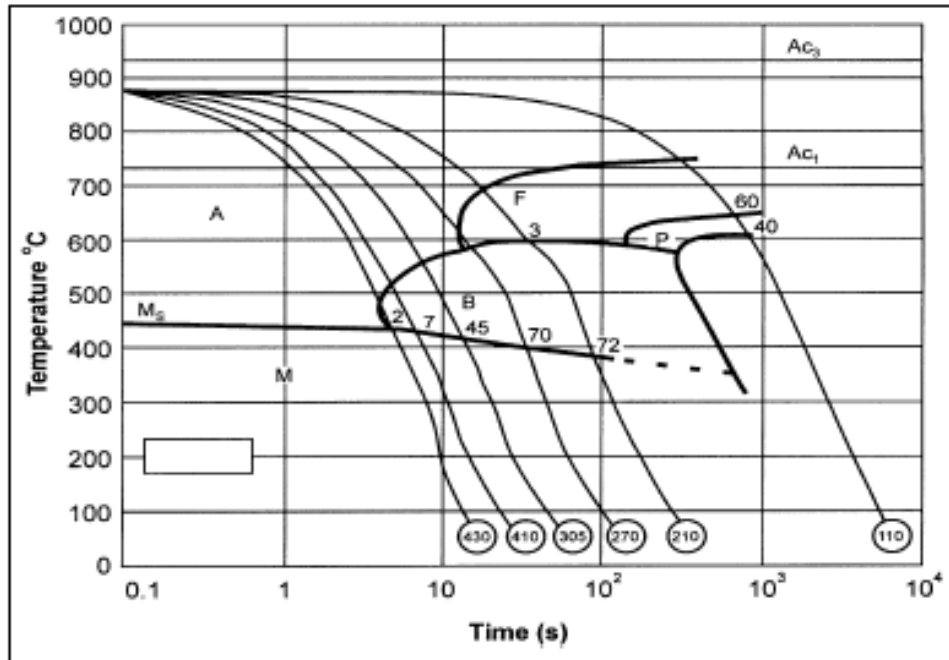
Η σκληρότητα του AH36 είναι της τάξης των 180 Vickers.

Η ποσότητα του ισοδύναμου άνθρακα (equivalent carbon content – ECC) του χάλυβα υψηλής αντοχής AH36 δίνεται από τη σχέση:

$$ECC = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Η τιμή του ισοδύναμου άνθρακα C_{eq} για τον AH36 ποικίλει από 0,38 – 0,57, αφού υπάρχει πολύ μεγάλη διακύμανση στην περιεκτικότητα του Mn. Συνήθως η τιμή του C_{eq} για τον AH36 του εμπορίου δεν ξεπερνάει το 0,40.

Στο σχήμα 7.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα CCT του χάλυβα AH36.



Σχήμα 7.1: Διάγραμμα CCT για τον χάλυβα AH36

Όσον αφορά τον ανοξείδωτο χάλυβα 316L, όπως ήδη αναφέρθηκε και στο Θεωρητικό Μέρος, έχει ωστενιτική δομή. Στον πίνακα 7.2 παρουσιάζεται η χημική του σύσταση και στον πίνακα 7.3 άλλες φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα 316L.

Πίνακας 7.2: Χημική σύσταση (% κ.β.) του χάλυβα 316L

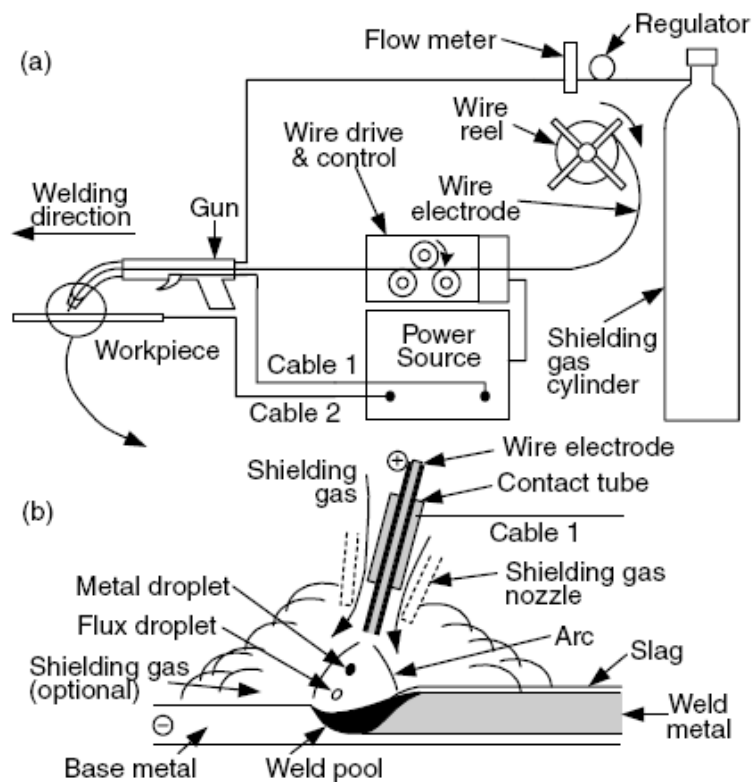
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N
Max - 0.03	Max - 2.00	Max - 0.045	Max - 0.03	Max - 0.75	16.00 - 18.00	10.00 - 14.00	2.00 - 3.00	Max 0.10

Πίνακας 7.3: Φυσικοχημικές και μηχανικές και ιδιότητες
του ανοξείδωτου χάλυβα 316L

Ιδιότητα	Τιμή
Πυκνότητα	: 8.027 gr/cm ³
Ηλεκτρική Αντίσταση (20°C)	: 74 microhm-cm
Θερμική αγωγιμότητα (100°C)	: 16.2 W/m·K
Θερμική αγωγιμότητα (500°C)	: 21.4 W/m·K
Μέτρο Ελαστικότητας (σε ένταση)	: 193 x 10 ³ MPa
Μέτρο Ελαστικότητας (σε στρέψη)	: 77 x 10 ³ MPa
Μαγνητική διαπερατότητα	: H = 200 Oersteds
Σημείο τήξης	: 1371 – 1399°C

7.4 Συγκόλληση

Η συγκόλληση του ελάσματος ανοξείδωτου χάλυβα 316L και χάλυβα υψηλής αντοχής AH36 πραγματοποιήθηκε στα Ναυπηγεία Ελευσίνας, υπό την επίβλεψη του κ. Σ. Χιονόπουλου, Μηχ. Μηχανικού. Το έλασμα του χάλυβα 316L ήταν πάχους 8mm και επιφάνειας 14 X 30cm. Το έλασμα του AH36 ήταν πάχους 7mm και επιφάνειας 14 X 30cm. Η συγκόλληση έγινε με τη μέθοδο FCAW (Flux-core arc welding) (σχήμα 7.2), με σύρμα τύπου 316L-Mo, σε δύο (2) πάσα. Η διάταξη για τη συγκόλληση τύπου FCAW παρουσιάζεται στο σχήμα 7.2α και η κατάσταση στο μέταλλο κατά τη συγκόλληση παρουσιάζεται στο σχήμα 7.2β. Στη μέθοδο αυτή το σύρμα του ηλεκτροδίου είναι παραγεμισμένο. Το ηλεκτρόδιο είναι ένας μεταλλικός σωλήνας και το flux είναι τυλιγμένο μέσα του. Στη διαδικασία της συγκόλλησης FCAW το τηγμένο μέταλλο προστατεύεται από τον αέρα με προστατευτικά αέρια.



Σχήμα 7.2: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου συγκόλλησης FCAW. Στο Σχήμα (α) παρουσιάζεται η διάταξη και στο (β) η κατάσταση κατά τη συγκόλληση.

Οι συνθήκες της συγκόλλησης παρουσιάζονται στον πίνακα 7.4, οι οποίες αποτελούν συνήθεις συνθήκες για τις συγκολλήσεις τέτοιων χαλύβων σε ναυπηγικές κατασκευές.

Πίνακας 7.4: Συνθήκες συγκόλλησης του ανοξειδωτου ωστενιτικού χάλυβα 316L με χάλυβα υψηλής αντοχής AH36

Συγκολλήσεις	Ένταση $I (A)$	Τάση $V(volts)$	Ταχύτητα $U(cm/min)$	Παροχή αερίου l/min	Διάκενο mm
NE 1 ^η στρώση	185-195	23-24	25,6	16-20	3,5
2 ^η στρώση	205-210	23-24	25,6	16-20	

Το ηλεκτρόδιο συγκόλλησης που χρησιμοποιείται συνήθως για αυτές τις συγκολλήσεις είναι κατά το πρότυπο W31635. Η χημική σύσταση του ηλεκτροδίου αυτού παρουσιάζεται στον πίνακα 7.5.

Πίνακας 7.5: Χημική σύσταση (% κ.β.) του ηλεκτροδίου συγκόλλησης

Χημική Σύσταση Ηλεκτροδίου Συγκόλλησης (% κ.β.)							
C	Mn	P	Si	S	Cr	Ni	Mo
0,04	0.5-2.5	0.04	1.0	0.03	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0

7.5 Ηλεκτροχημικές Μετρήσεις [21], [22], [23]

7.5.1 Πειραματική Διάταξη Ηλεκτροχημικών Μετρήσεων

Η μελέτη της συμπεριφοράς σε διάβρωση πραγματοποιήθηκε με χρήση:

- ηλεκτρολυτικών κελιών που διαμορφώθηκαν ειδικά πάνω σε ολόκληρο το συγκολλημένο έλασμα και
- ηλεκτρολυτικού κελιού στο οποίο μελετήθηκαν δοκίμια από τις διαφορετικές περιοχές της συγκόλλησης

Σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις η επιφάνεια του χάλυβα εκτέθηκε σε περιβάλλον NaCl 3.5%. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας με χρήση του λογισμικού PowerCorr, καθώς και η πειραματική διάταξη του κελιού περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

Οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό:

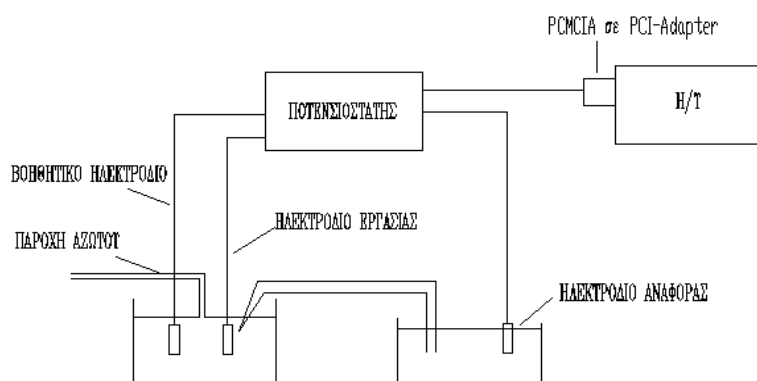
- του ρυθμού διάβρωσης,
- της έντασης του ρεύματος και
- του δυναμικού διάβρωσης

είναι

- η Γραμμική Πόλωση
- η Ανοδική Πόλωση
- Πόλωση Taffel

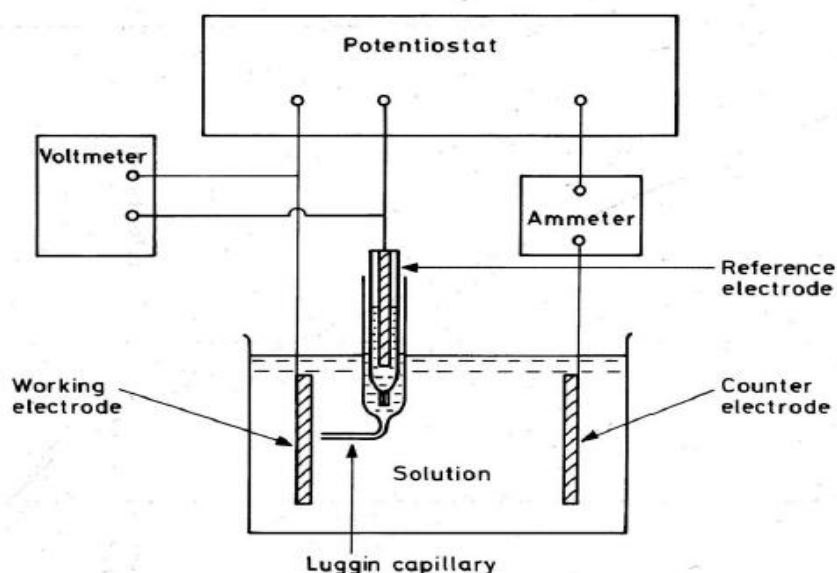
Η πειραματική διάταξη για την εκτέλεση των ηλεκτροχημικών μετρήσεων (σχήμα 7.3), αποτελείται από:

1. Ποτενσιοστάτη-Γαλβανοστάτη VersaStat™ II της EG&G Princeton Applied Research-Perkin Elmer Instruments,
2. Ηλεκτρολυτικό κελί K0235 Flat Cell - EG&G Princeton Applied Research-Perkin Elmer Instruments,
3. Ηλεκτρόδιο αναφοράς κορεσμένου καλομέλανα (SCE: Saturated Calomel Electrode),
4. Βοηθητικό ηλεκτρόδιο (αδρανές υλικό από κράμα Πλατίνας / Ροδίου (Pt/Rh)),
5. Ηλεκτρόδιο εργασίας
6. Ηλεκτρονικό υπολογιστή Pentium 4 CPU 1.6GHz, με χρήση των λογισμικών "Virtual Potentiostat" για τη διαχείριση του ποτενσιοστάτη και του "PowerCorr" για την λήψη των καμπυλών πόλωσης,
7. Καλώδιο μεταφοράς δεδομένων σε φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω κάρτας PCMCIA,
8. Υποδοχέα κάρτας PCMCIA με έξοδο PCI για την μεταφορά των δεδομένων σε σταθερό υπολογιστή.
9. Κλωβός Faraday



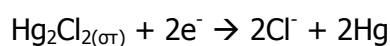
Σχήμα 7.3: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης του Εργαστηρίου

Σύμφωνα με τη θεωρία των ηλεκτροχημικών μετρήσεων, η μελέτη της συμπεριφοράς σε διάβρωση γίνεται με βάση το δυναμικό του δοκιμίου και το διαρρέον ρεύμα. Το **ηλεκτρολυτικό κελί** (σχήμα 7.4, εικόνα 7.1) παρέχει τη δυνατότητα επιβολής δυναμικού μεταξύ του υπό μελέτη δοκιμίου (**ηλεκτρόδιο εργασίας – working electrode**) και του **βοηθητικού ηλεκτροδίου – counter ή auxiliary electrode**). Η τιμή του δυναμικού ορίζεται ως προς το **ηλεκτρόδιο αναφοράς (reference electrode)**. Η ένταση του ρεύματος που προκύπτει από την επιβολή του δυναμικού καταγράφεται στο σύστημα, παρέχοντας με τον τρόπο αυτό διαγράμματα επιβαλλόμενου δυναμικού – έντασης ρεύματος, που ονομάζονται καμπύλες πόλωσης.

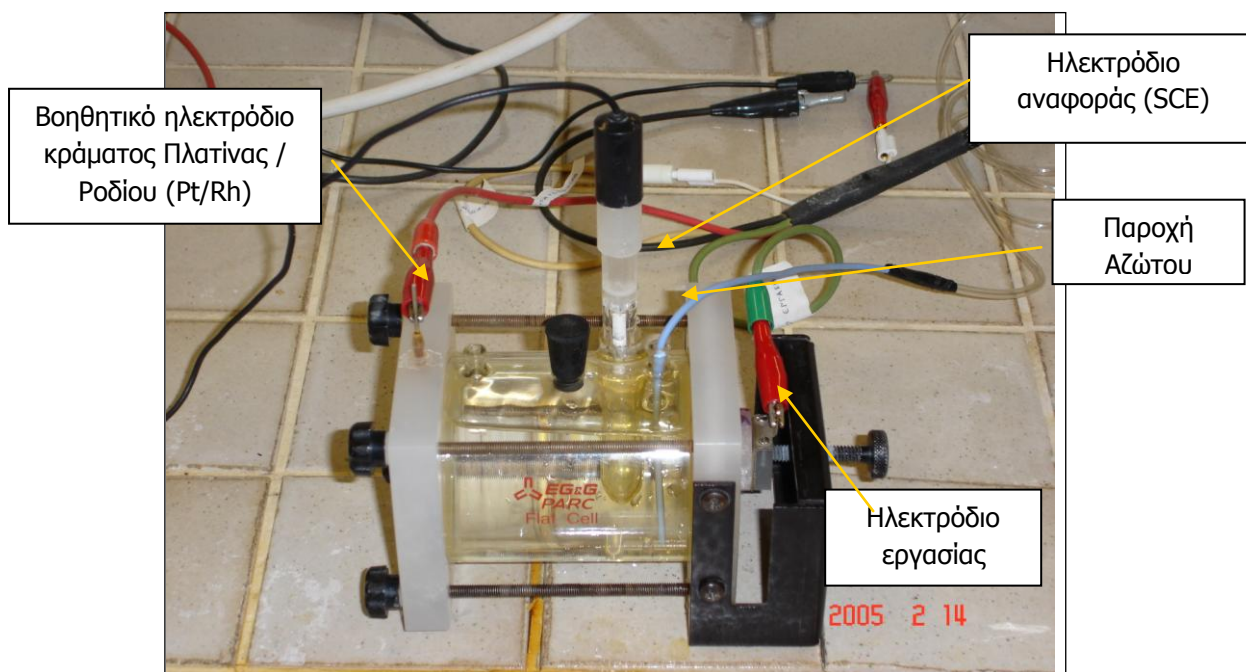


Σχήμα 7.4: Σχηματικό διάγραμμα διάταξης για τον καθορισμό των καμπυλών πόλωσης μετάλλου σε διάλυμα με τη χρήση ποτενσιοστάτη

Το ηλεκτρόδιο αναφοράς του κελιού, που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα, είναι το ηλεκτρόδιο του κορεσμένου καλομέλανα (SCE: Saturated Calomel Electrode) με δυναμικό $E = +244\text{mV vs SHE}$. Το ηλεκτρόδιο αυτό αποτελείται από μια δεξαμενή υδραργύρου καλυμμένη με πάστα υδραργύρου – χλωριούχου υδραργύρου (καλομέλανα) βυθισμένη σε διάλυμα χλωριούχου καλίου. Η επαφή πραγματοποιείται με σύρμα λευκόχρυσου που βυθίζεται μέσα στον υδράργυρο. Πρόκειται δηλαδή για το ημιστοιχείο $\text{Cl}^-/\text{Hg}_2\text{Cl}_2, \text{Hg}$, του οποίου η δράση είναι :



Στην πράξη συνήθως χρησιμοποιείται σαν ηλεκτρολύτης του ηλεκτροδίου αναφοράς, κορεσμένο διάλυμα KCl με λίγους κρυστάλλους στερεού KCl για να διατηρείται πάντοτε ο κορεσμένος χαρακτήρας του διαλύματος.



Εικόνα 7.1: Ηλεκτρολυτικό κελί
(K0235 Flat Cell - EG&G, PAR Perkin Elmer Instruments)

Η σχέση δυναμικού – ρεύματος του ηλεκτροδίου εργασίας, με την ποτενσιοστατική μέθοδο, προσδιορίζεται με την εφαρμογή σταθερού δυναμικού μεταξύ του ηλεκτροδίου εργασίας και του **βοηθητικού ηλεκτροδίου (counter electrode)**. Το βοηθητικό ηλεκτρόδιο είναι από αδρανές υλικό (κράμα Πλατίνας / Ροδίου (Pt/Rh)), το οποίο δε διαβρώνεται. Η μεταβολή του δυναμικού στο ηλεκτρόδιο εργασίας εξαιτίας της ροής ρεύματος μετράται ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Η απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίου εργασίας και βοηθητικού ηλεκτροδίου στο ηλεκτρολυτικό κελί τύπου Flat Cell είναι 80 mm.

Για την ελαχιστοποίηση τυχόν πτώσης τάσης, εξαιτίας της αντίστασης του διαλύματος (φαινόμενο ωμικής πτώσης τάσης (IR_s drop) στον ηλεκτρολύτη, μεταξύ του ηλεκτροδίου αναφοράς και του ηλεκτροδίου εργασίας), το ηλεκτρόδιο αναφοράς βρίσκεται σε επαφή με το ηλεκτρολυτικό διάλυμα μέσω σωλήνα ο οποίος καταλήγει σε λεπτό τριχοειδές, γνωστό ως **τριχοειδές Luggin (capillary Luggin)**. Αυτό τοποθετείται κοντά στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου εργασίας, σε απόσταση όχι μεγαλύτερη από δύο φορές την εξωτερική διάμετρο του τριχοειδούς. Είναι κατασκευασμένο από Teflon, διαμέτρου 0,6 mm και συνδέει την γυάλινη δεξαμενή

(χωρητικότητας 5 ml), μέσα στην οποία τοποθετείται το ηλεκτρόδιο αναφοράς, με την προς μελέτη επιφάνεια του δοκιμίου (σχήμα 7.4, εικόνα 7.1). Είναι προφανές ότι η ανωτέρω διάταξη υφίσταται μόνο στο ηλεκτρολυτικό κελί τύπου Flat Cell, και όχι στα κελιά που δημιουργήθηκαν πάνω στο συγκολλημένο έλασμα.

Προκειμένου ο έλεγχος των αντιδράσεων στο ηλεκτρόδιο εργασίας να μην ελέγχεται από το φαινόμενο της διάχυσης, στο ηλεκτρολυτικό κελί Flat Cell διοχετεύθηκε αδρανές αέριο N_2 , ως μέσο ανάδευσης του ηλεκτρολυτικού διαλύματος. Η παροχή του αερίου έγινε από φιάλη N_2 , μέσω βαλβίδας στραγγαλισμού, ώστε η παροχή να διατηρείται σταθερή σε πολύ μικρές τιμές.

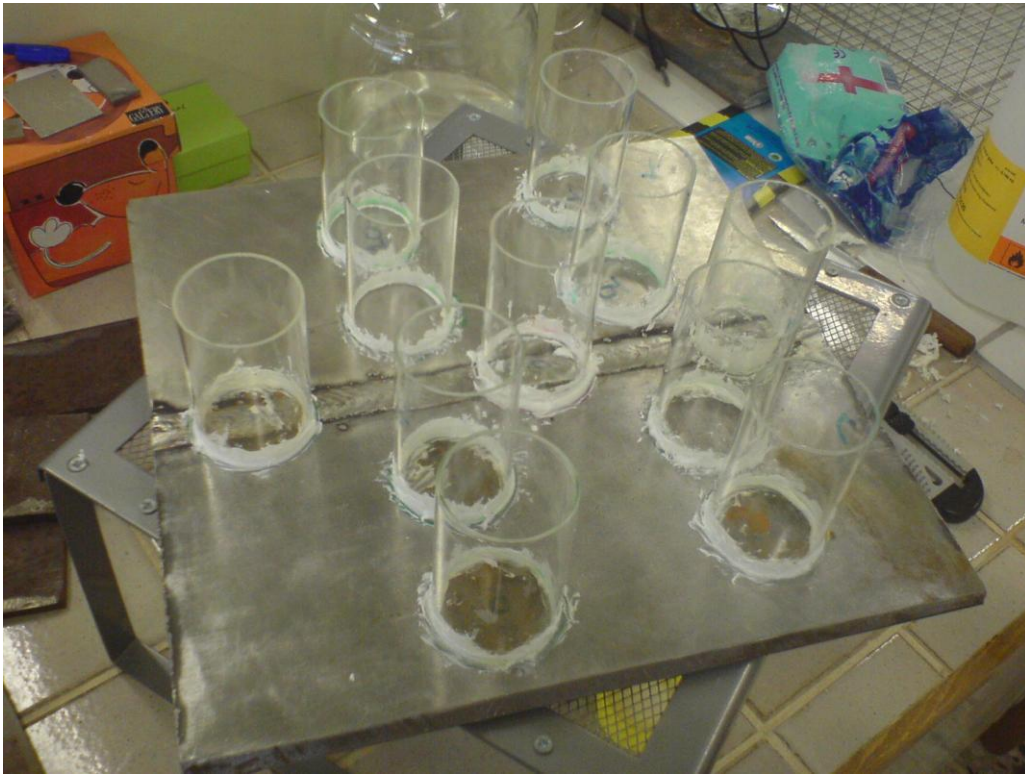
Στην ποτενσιοστατική μέθοδο, το δυναμικό του ηλεκτροδίου εργασίας αποκτά συγκεκριμένη τιμή με τη βοήθεια του ποτενσιοστάτη. Η επιβαλλόμενη **διαφορά δυναμικού**, εφαρμόζεται μεταξύ του **ηλεκτροδίου εργασίας** και του **ηλεκτροδίου αναφοράς** και οι μεταβολές της έντασης του ρεύματος, που διαρρέει το ηλεκτρολυτικό κελί, μετρώνται ή καταγράφονται στο άκρο μιας αντίστασης που βρίσκεται στον ποτενσιοστάτη, μεταξύ ηλεκτροδίου εργασίας και βοηθητικού ηλεκτροδίου (σχήμα 7.4, εικόνα 7.1).

Η διάταξη διαθέτει feed-back κύκλωμα για τη διέλευση του κατάλληλου ρεύματος από το ηλεκτρόδιο εργασίας ώστε το δυναμικό του, που μετράται ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς, να διατηρείται στην επιθυμητή τιμή, ανεξαρτήτως μεταβολών στο ρεύμα, που αντιστοιχούν σε μεταβολές του ρυθμού των αντιδράσεων. Η ποτενσιοστατική μέθοδος πόλωσης έχει το πλεονέκτημα ότι με αυτή μπορεί να παρακολουθείται με ακρίβεια η συμπεριφορά των μετάλλων, ιδιαίτερα κατά το σχηματισμό και τη διάρρηξη παθητικοποιημένων στρωμάτων, όπου η συμπεριφορά εξαρτάται κυρίως από το δυναμικό του μετάλλου και μεγάλες αλλαγές στο ρεύμα μπορεί να συμβαίνουν σε σταθερό δυναμικό.

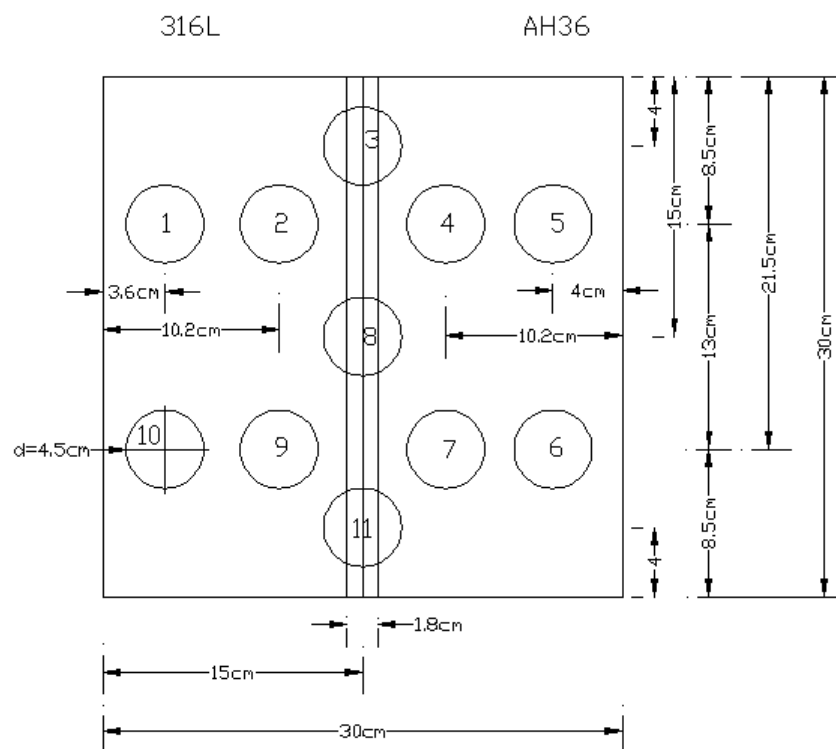
7.5.2 Ηλεκτροχημικές Μετρήσεις στο Συγκολλημένο Έλασμα 316L – ΑΗ36 με Φορητό Κελί

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια να μελετηθούν οι τρεις ζώνες της περιοχής της συγκόλλησης, δηλαδή το Μέταλλο Τήξης, η Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη και το Μέταλλο Βάσης. Στο έλασμα, επικολλήθηκαν με σιλικόνη 11 γυάλινοι σωλήνες (εικόνα 7.2) στα σημεία που φαίνονται στο σχήμα 7.5, οι οποίοι ανέλαβαν να παίξουν το ρόλο του ηλεκτρολυτικού κελιού στα

διαφορετικά σημεία της συγκόλλησης (πίνακας 7.6). Το εμβαδόν της επιφάνειας που εκτέθηκε στο διαβρωτικό περιβάλλον για κάθε ένα από τα δοκίμια ήταν 12.56 cm^2 .

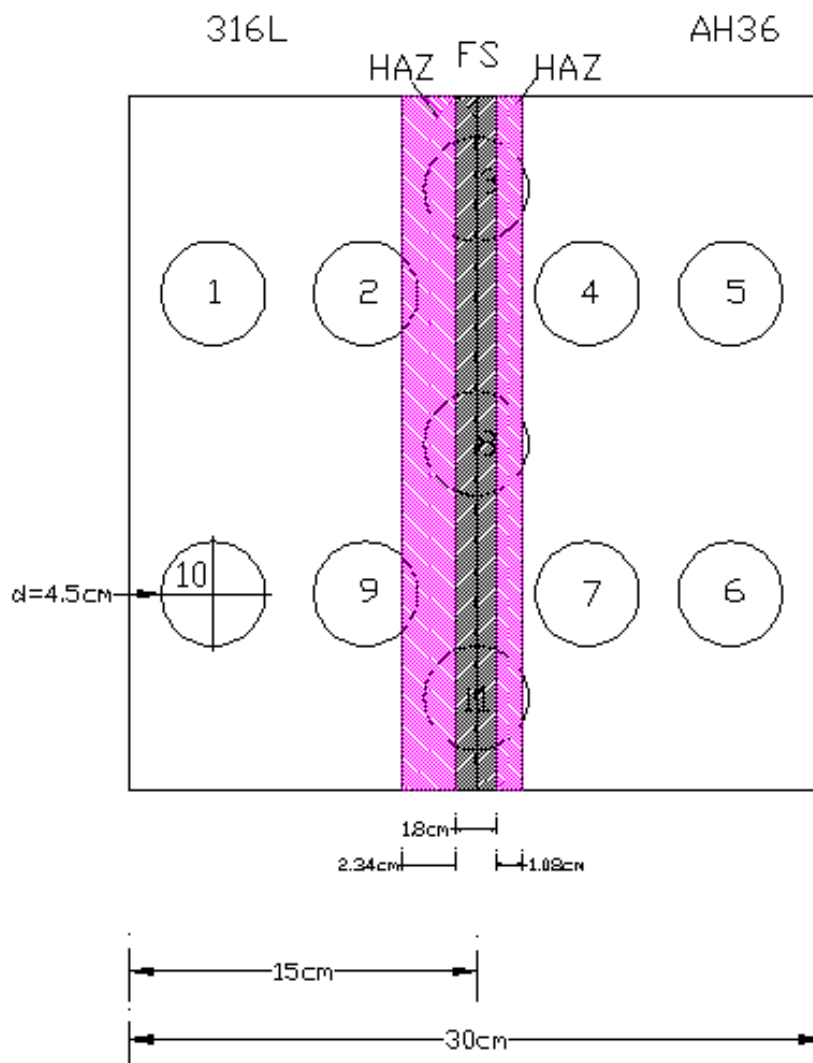


Εικόνα 7.2: Το έλασμα του χάλυβα 316L – AH36, με τα κελιά



Σχήμα 7.5: Κάτοψη συγκολλημένων δοκιμών στο έλασμα

Στο σχήμα 7.6 παρουσιάζεται η θέση των φορητών κελιών σε σχέση με τις τρεις ζώνες της περιοχής της συγκόλλησης. Ο διαχωρισμός των ζωνών για την επιφάνεια του συγκολλημένου ελάσματος προέκυψε αναγωγικά, με βάση τις μετρήσεις μικροσκληρότητας (βλ. Κεφάλαιο 8) που έγιναν σε τομή κάθετη στη συγκόλληση. Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις λήφθηκαν περίπου στο μέσο της συγκολλημένης τομής.

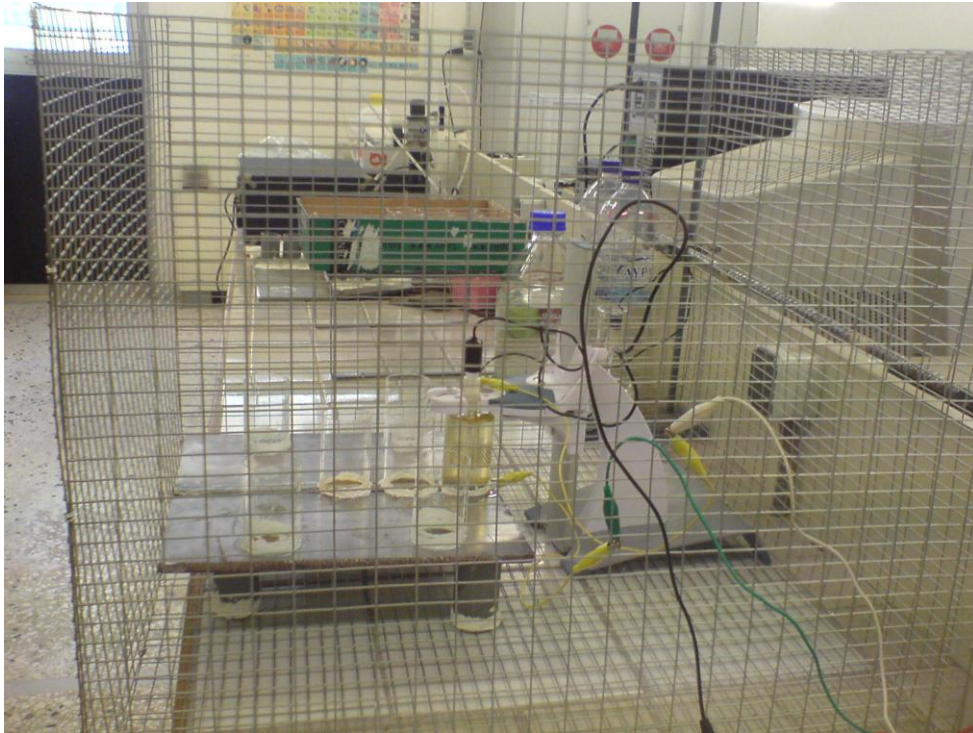


Σχήμα 7.6: Κάτοψη συγκολλημένων δοκιμίων στο έλασμα με εμφανείς: τη ζώνη τήξης και τις θερμικά επηρεασμένες ζώνες

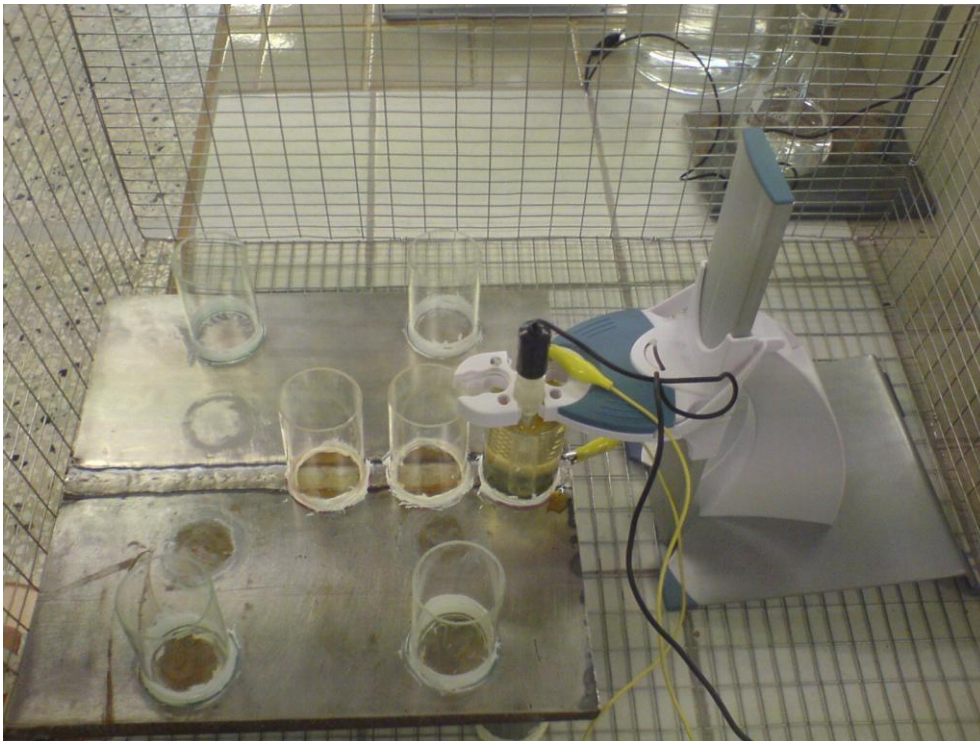
Πίνακας 7.6: Αύξων αριθμός δοκιμίου – θέση πάνω στη συγκόλληση

α/α	Θέση	α/α	Θέση
1	MB 316L	8	ΘΕΖ 316L – ΖΤ - ΘΕΖ ΑΗ36 – ΜΒ ΑΗ36
2	MB – ΘΕΖ 316L	9	MB – ΘΕΖ 316L
3	ΘΕΖ 316L – ΖΤ – ΘΕΖ ΑΗ36 – ΜΒ ΑΗ36	10	MB 316L
4	MB ΑΗ36	11	ΘΕΖ 316L – ΖΤ – ΘΕΖ ΑΗ36 – ΜΒ ΑΗ36
5	MB ΑΗ36		
6	MB ΑΗ36		
7	MB ΑΗ36		

Στα δοκίμια αυτά προσαρμόστηκε κατάλληλη διάταξη, ώστε να γίνουν οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις (εικόνες 7.3, 7.4). Έτσι για κάθε μέτρηση τοποθετήθηκε στον εκάστοτε σωλήνα το ηλεκτρόδιο αναφοράς και το βοηθητικό ηλεκτρόδιο, ενώ το ηλεκτρόδιο εργασίας τοποθετήθηκε στην κάτω πλευρά του ελάσματος (εικόνα 7.5).



Εικόνα 7.3: Πειραματική διάταξη ηλεκτροχημικών μετρήσεων στο έλασμα



Εικόνα 7.4: Πειραματική διάταξη ηλεκτροχημικών μετρήσεων στο έλασμα



Εικόνα 7.5: Το ηλεκτρόδιο εργασίας τοποθετήθηκε στην κάτω πλευρά του ελάσματος

Όλη η διάταξη τοποθετήθηκε σε κλωβό Faraday για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών. Η αρχή των ηλεκτροχημικών μεθόδων που εφαρμόστηκαν έχει αναπτυχθεί στο Θεωρητικό Μέρος της παρούσας εργασίας και τα αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών μετρήσεων που εφαρμόστηκαν παρουσιάζονται στο επόμενο Κεφάλαιο 8: Αποτελέσματα και Συζήτηση.

Μετά το πέρας των ηλεκτροχημικών μετρήσεων, οι γυάλινοι σωλήνες αποκολλήθηκαν και η πλάκα καθαρίστηκε για την απομάκρυνση των προϊόντων της διάβρωσης που προήλθαν από τις ηλεκτροχημικές μετρήσεις με αιθανόλη (εικόνα 7.6).



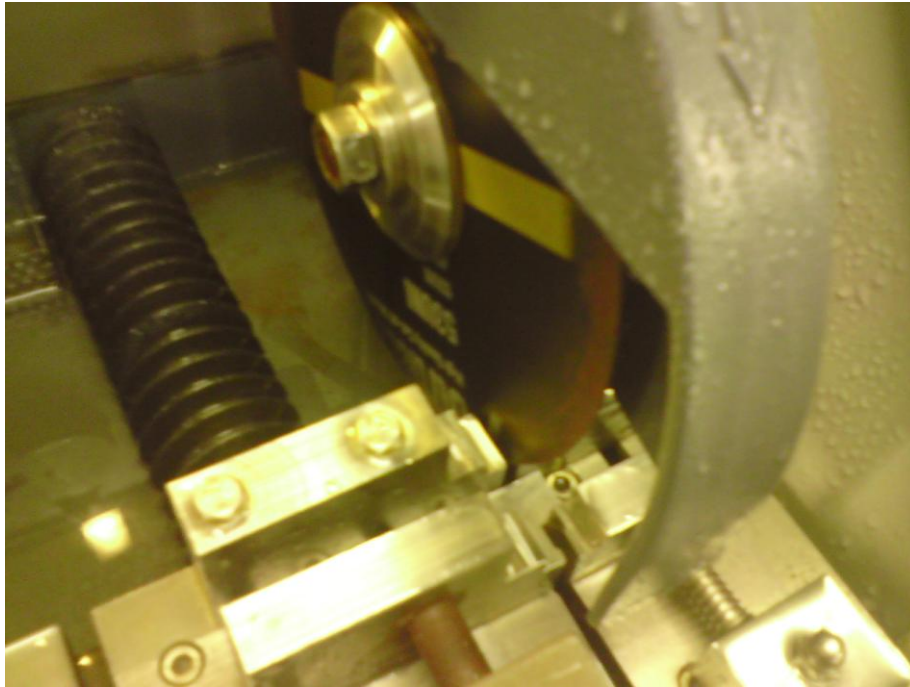
Εικόνα 7.6: Καθαρισμός ελάσματος με αιθανόλη

7.5.3 Ηλεκτροχημικές Μετρήσεις σε Δοκίμια Χάλυβα 316L και AH36 με Flat Cell

7.5.3.1 Προετοιμασία των δοκιμίων

Όταν ολοκληρώθηκαν οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις στο έλασμα και αφού το έλασμα καθαρίστηκε, κόπηκαν 11 δοκίμια από τις ίδιες περιοχές των προηγούμενων πειραμάτων της συγκολλητής κατασκευής, προκειμένου να γίνουν οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις σε κελί τύπου Flat Cell. Ειδικότερα, η διαδικασία για την προετοιμασία των δοκιμίων έχει ως εξής:

- **Κοπή των δοκιμίων:** Λαμβάνοντας υπόψη ότι η επιφάνεια του δοκιμίου στο ηλεκτρολυτικό κελί που βρίσκεται σε επαφή με το διάλυμα πρέπει να είναι 1cm^2 , τα δοκίμια από κάθε περιοχή κόπηκαν, με κοπτικό μηχάνημα (εικόνα 7.7), αναλόγως.



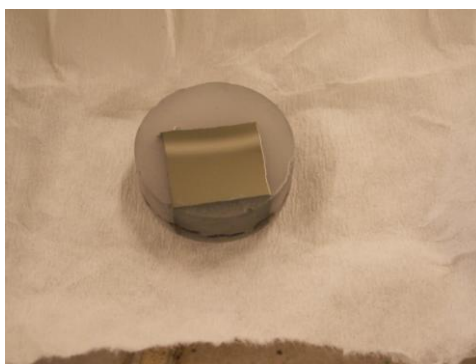
Εικόνα 7.7: Κοπή δοκιμίων με κοπτικό τροχό

- **Εγκιβωτισμός σε ρητίνη:** Ο εγκιβωτισμός σε ρητίνη γίνεται για πρακτικούς λόγους, δηλαδή για ευκολία στη λείανση, στη στίλβωση, και για την αποφυγή διαρροής διαλύματος από το κελί, δεδομένου ότι μη εγκιβωτισμένα δοκίμια δεν εφαρμόζουν σωστά στο κελί. Επίσης, κατά τη σκληρομέτρηση, το δοκίμιο θα πρέπει να “πατάει” καλά ώστε να δίνει σωστές τιμές.
- **Λείανση:** Η λείανση γίνεται σε ειδικό τριβείο αυτόματα και μηχανικά, πάνω σε γυαλόχαρτα από καρβίδια του πυριτίου (SiC), ξεκινώντας από το τραχύτερο (120) προς το λιγότερο τραχύ (2400), κλιμακωτά (εικόνα 7.8). Τα λειαντικά χαρτιά τοποθετούνται διαδοχικά σε περιστρεφόμενο δίσκο και η λείανση γίνεται μηχανικά. Πάνω στο χαρτί σε όλα τα στάδια ρέει νερό το οποίο ψύχει το δοκίμιο και βοηθά στην απομάκρυνση των ρινισμάτων του μετάλλου από την επιφάνεια επαφής.
- **Στίλβωση:** Η στίλβωση γίνεται με παρόμοιο τρόπο με τη λείανση, αλλά αντί για γυαλόχαρτα στον περιστρεφόμενο δίσκο υπάρχει κατάλληλο ύφασμα (βελούδο), στο οποίο έχει απλωθεί κατάλληλο σκληρό υλικό, πάστα αλούμινας Al_2O_3 , στην επιφάνειά του. Η πάστα που απλώνεται στο ύφασμα έχει κόκκους με πολύ μικρό μέγεθος, στην περίπτωση μας $1\mu m$ και στη συνέχεια $0.1\mu m$ μέγεθος κόκκων, το οποίο στίλβώνει την επιφάνεια του δοκιμίου. Στο τέλος της στίλβωσης η επιφάνεια θα πρέπει να είναι εντελώς λεία. Τέλος, η επιφάνεια καθαρίζεται με αλκοόλη, και ξηραίνεται στο μηχάνημα παροχής

θερμού αέρα και το δοκίμιο είναι πλέον έτοιμο να τοποθετηθεί στο κελί (εικόνα 7.9).



Εικόνα 7.8: Λειαντικό μηχάνημα Struers

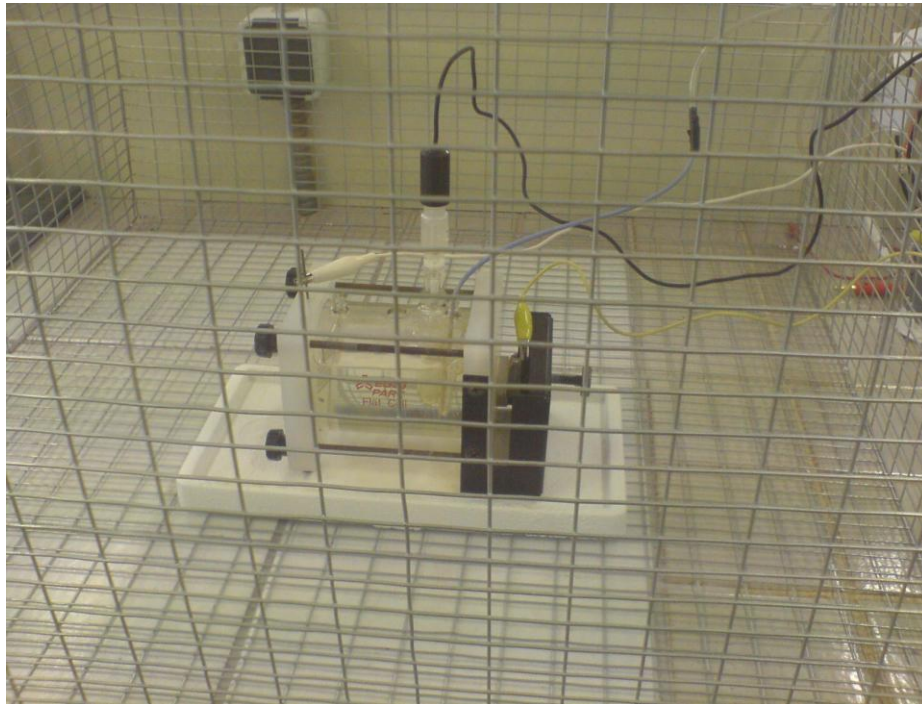


Εικόνα 7.9: Εγκιβωτισμένο και λειασμένο δοκίμιο πριν από την τοποθέτησή του στο ηλεκτροχημικό κελί

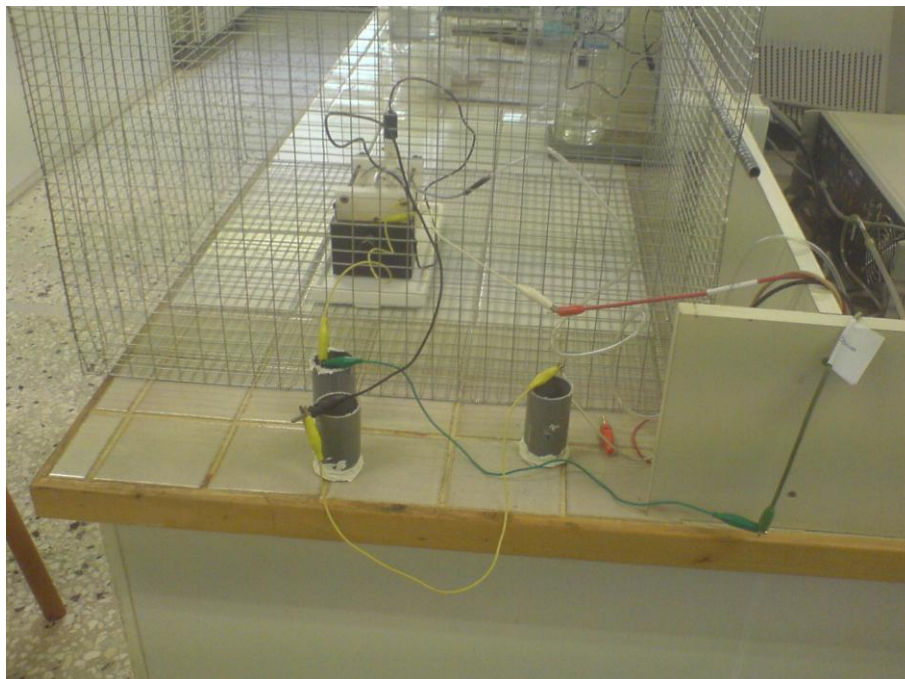
7.5.3.2 Ηλεκτροχημικές μετρήσεις

Τα δοκίμια που διαμορφώθηκαν τελικά, μετά την κοπή, τον εγκιβωτισμό, τη στίλβωση και τη λείανση, τοποθετήθηκαν στο κελί για τη λήψη των καμπυλών πόλωσης (εικόνα 7.1). Στη συνέχεια όλο το κελί τοποθετείται σε κλωβό Faraday για την αποφυγή παρεμβολών (εικόνα 7.10 και 7.11).

Τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος για τη λήψη των καμπυλών πόλωσης είναι όμοια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στα φορητά κελιά του ελάσματος, η οποία έχει ήδη περιγραφεί αναλυτικά στην παράγραφο 7.5.1 του παρόντος Κεφαλαίου. Οι μετρήσεις που ελήφθησαν παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 8: Αποτελέσματα και Συζήτηση.



Εικόνα 7.10: Πειραματική διάταξη ηλεκτροχημικών μετρήσεων στο ηλεκτρολυτικό κελί. Το κελί τοποθετείται σε κλωβό Faraday



Εικόνα 7.11: Πειραματική διάταξη ηλεκτροχημικών μετρήσεων στο ηλεκτρολυτικό κελί. Το κελί τοποθετείται σε κλωβό Faraday

7.5.4 Επεξεργασία των Ηλεκτροχημικών Μετρήσεων [16], [22], [23], [32], [40], [41], [42]

Όλα τα πειραματικά δεδομένα μεταφέρονται, μέσω ενός interface καλώδιο, στον ηλεκτρονικό υπολογιστή Pentium 4 CPU 6.6GHz από τον ποτενσιοστάτη - γαλβανοστάτη και στη συνέχεια ακολουθεί η επεξεργασία τους με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος PowerCorr.

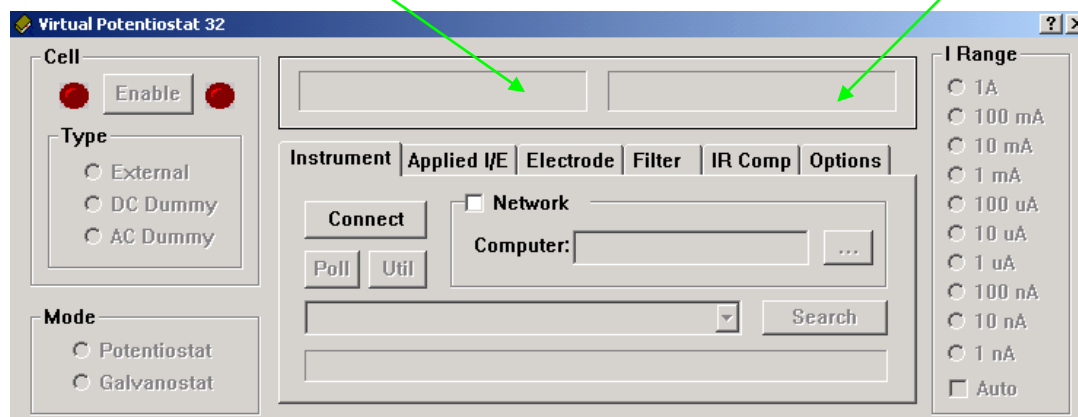
7.5.4.1 Λήψη καμπυλών πόλωσης

Στην πειραματική διαδικασία ακολουθήθηκε η ίδια μέθοδος λήψης καμπυλών πόλωσης για το σύνολο των πειραμάτων που εκτελέστηκαν, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα.

Αρχικά, για τα πειράματα στο έλασμα, το γυάλινο δοχείο το οποίο είναι κολλημένο πάνω στο έλασμα, πληρώνεται με το υδατικό διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. και έπειτα τοποθετούμε το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Για τα πειράματα στο ηλεκτρολυτικό κελί, αρχικά προσαρμόζεται το προς μελέτη μεταλλικό δοκίμιο στο κελί, το οποίο στη συνέχεια πληρώνεται με το υδατικό διάλυμα NaCl 3,5%κ.β. Έπειτα, τοποθετούμε το ηλεκτρόδιο αναφοράς.

Το επόμενο στάδιο αφορά στη σταθεροποίηση του δυναμικού ανοικτού κυκλώματος των δοκιμίων, στην τιμή του δυναμικού διάβρωσης αυτών, E_{corr} . Η παρακολούθηση της σταθεροποίησης γίνεται με χρήση του προγράμματος Virtual Potentiostat. Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνεται το μενού ενεργοποίησης της καταγραφής του δυναμικού διάβρωσης και του αντίστοιχου ρεύματος.

Πατώντας "Connect", ο υπολογιστής βρίσκει τη διεύθυνση του ποτενσιοστάτη και αποκαθιστά την επικοινωνία μεταξύ των δύο συσκευών. Στη συνέχεια πατώντας "Poll", στα δύο γκρι ορθογώνια εμφανίζονται οι τιμές του δυναμικού και του ρεύματος.

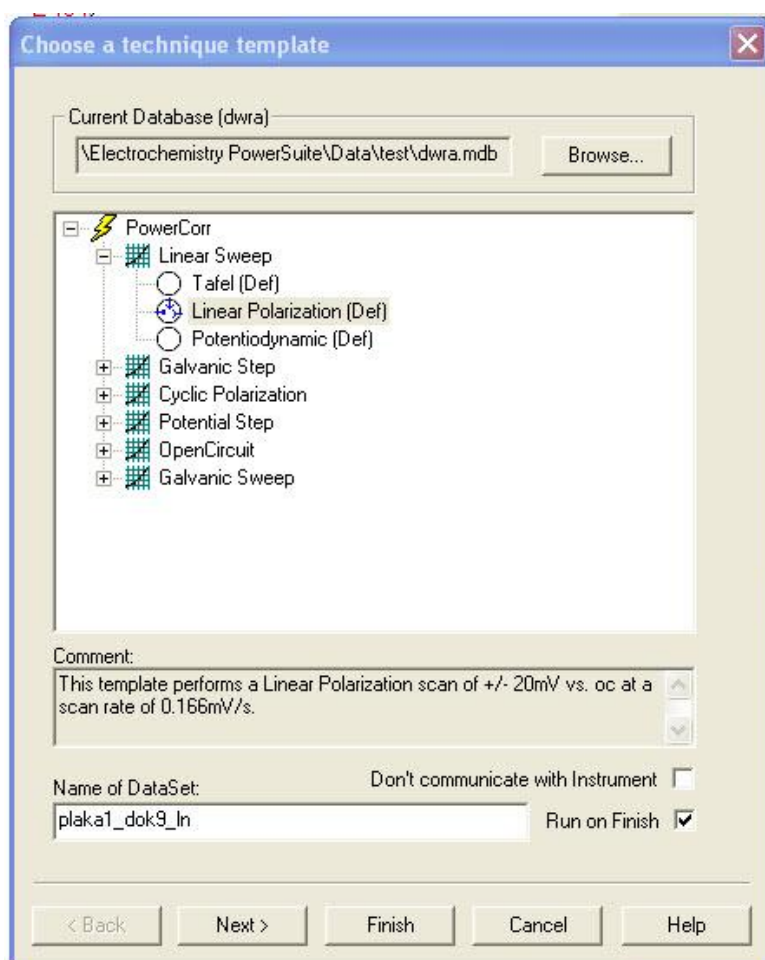


Παρατηρούμε την τιμή του δυναμικού έως ότου σταθεροποιηθεί και δεν μεταβάλλεται παραπάνω από 1mV σε διάστημα 30 λεπτών. Η αναμονή είναι αναγκαία, αφού για την εφαρμογή των ηλεκτροχημικών τεχνικών απαιτείται η τιμή του δυναμικού του ανοικτού κυκλώματος να είναι σταθεροποιημένη. Το επόμενο στάδιο αφορά στην έναρξη της εφαρμογής των ηλεκτροχημικών μεθόδων που έχουν επιλεγεί, δηλαδή της Γραμμικής Πόλωσης, της Ανοδικής Πόλωσης και της Tafel.

➤ Μέθοδος Γραμμικής Πόλωσης

Για 316L

Αφού σταθεροποιηθεί το δυναμικό, ενεργοποιούμε το PowerCorr. Από το "Experiment", επιλέγουμε "New" και επιλέγουμε Linear 316L Setup, το οποίο έχει τις ρυθμίσεις που φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



Cell Definition

Comment
 This template performs a Linear Polarization scan of +/- 20mV vs. oc at a scan rate of 0.166mV/s.

Instrument
 Instrument Set: Model VersaStatII at address 14

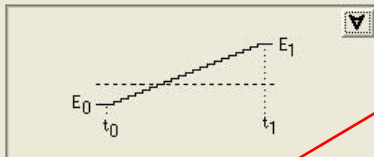
Working Electrode
 Type: Solid Electrode Area: 12,5600000 cm²
 Density: 8,027 g/ml
 Equivalent Weight: 25,500 g

Reference Electrode
 Type: SCE Saturated Calomel (sat'd KCl)
 Offset Potential vs Normal Hydrogen Electrode: 0,242 Volts

< Back Next > Finish Cancel Help

Το εύρος δυναμικού πόλωσης έχει οριστεί σε $\pm 20\text{mV}$

Scan Definition

Waveform: 

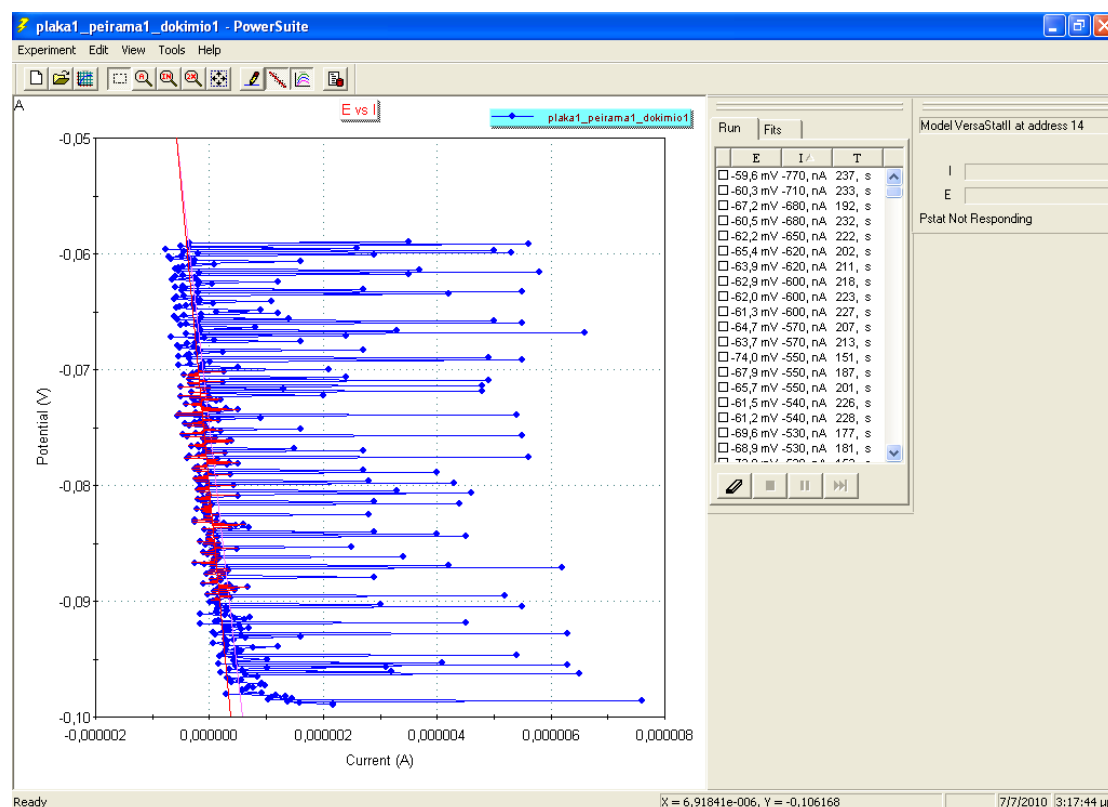
Potential E₀: -0,0200000 Volts vs Open Circuit Potential
 Potential E₁: 0,0200000 Volts vs Open Circuit Potential
 Step Height: 0,1000 mV
 Scan Rate: 0,1660 mV/s
 Step Time: 0,602 s
 Number of Points: 401

< Back Next > Finish Cancel Help

Το μεταλλικό ηλεκτρόδιο πολώνεται αρχικά καθοδικά (-20mV vs Ecorr) και κατόπιν ανοδικά (+20mV vs Ecorr) .

Άλλες παράμετροι που ορίζονται είναι ο ρυθμός σάρωσης (scan rate = 0,166mV), η πυκνότητα (density = 8.027gr/ml), το ισοδύναμο βάρος (Equivalent Weight=25,5gr), ενώ τέλος επιλέγεται το ηλεκτρόδιο του κορεσμένου καλομέλανα (SCE: Saturated Calomel Electrode) ως ηλεκτρόδιο αναφοράς.

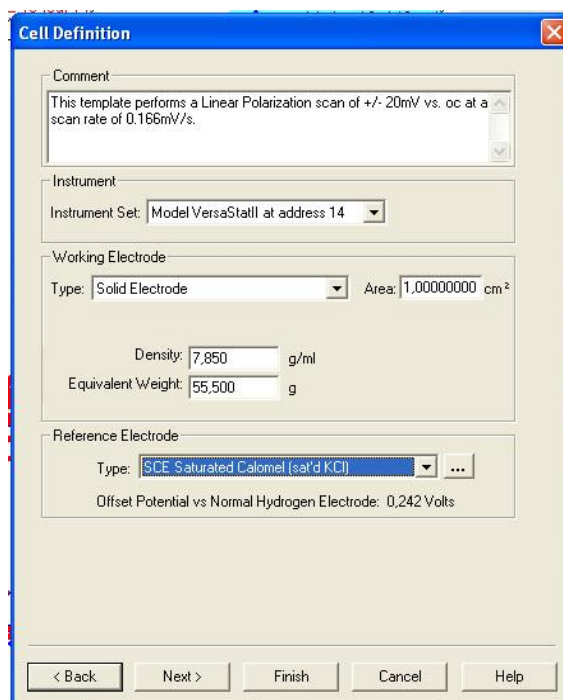
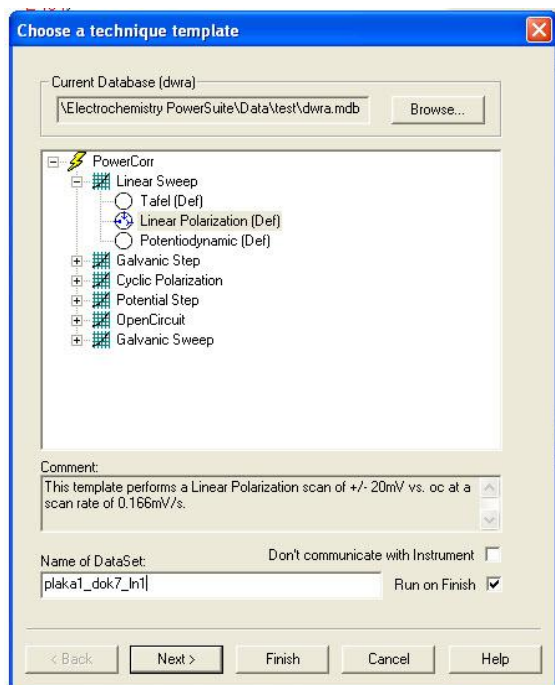
Πατώντας "Finish" το PowerCorr εκτελεί το πείραμα. Η καμπύλη που προκύπτει είναι της παρακάτω μορφής:



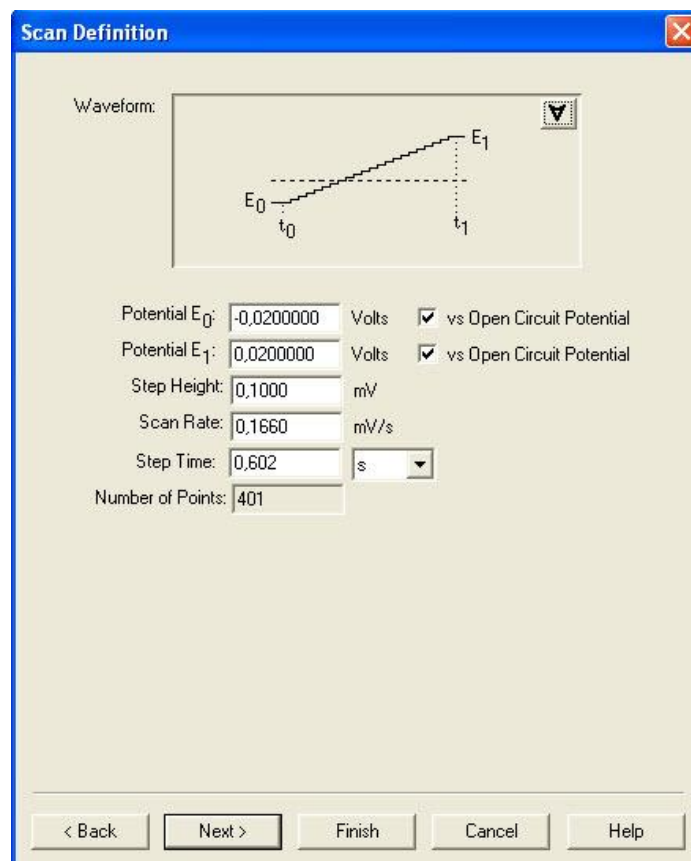
Η μέθοδος της γραμμικής πόλωσης έχει το πλεονέκτημα ότι, επειδή η πόλωση που εφαρμόζεται είναι μικρή, η επιφάνεια του δοκιμίου δεν αλλοιώνεται και έτσι το δοκίμιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλες μετρήσεις. Αφού την αποθηκεύσουμε λοιπόν, προχωρούμε στην εφαρμογή της μεθόδου της ανοδικής πόλωσης. Προτού ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία, αφήνουμε το σύστημα να ηρεμήσει και παρατηρούμε μέσω του Virtual Potentiostat ότι σε διάστημα λίγων λεπτών το δυναμικό έχει επανέλθει στην τιμή της αρχικής του σταθεροποίησης. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες δωματίου.

Για AH36

Αφού σταθεροποιηθεί το δυναμικό, ενεργοποιούμε το PowerCorr. Από το "Experiment", επιλέγουμε "New" και επιλέγουμε Linear AH36 Setup, το οποίο έχει τις ρυθμίσεις που φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



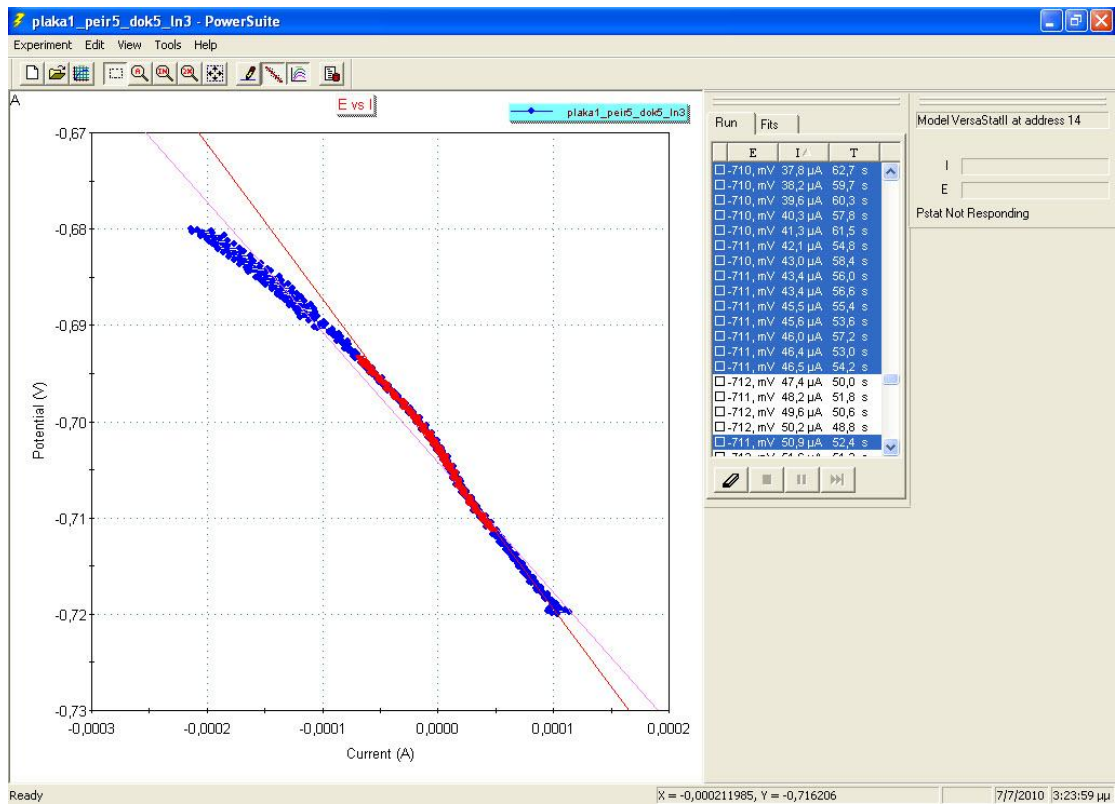
Το εύρος δυναμικού πόλωσης έχει οριστεί σε $\pm 20\text{mV}$



Το μεταλλικό ηλεκτρόδιο πολώνεται αρχικά καθοδικά (-20mV vs E_{corr}) και κατόπιν ανοδικά ($+20\text{mV}$ vs E_{corr}).

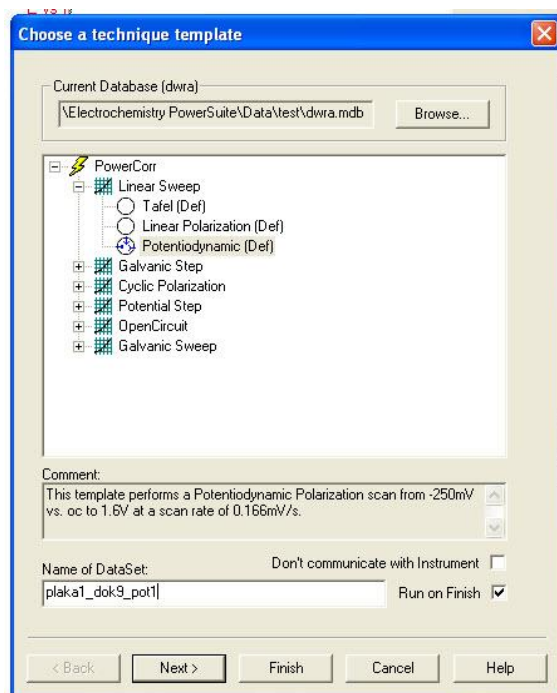
Άλλες παράμετροι που ορίζονται είναι ο ρυθμός σάρωσης (scan rate = $0,166\text{mV}$), η πυκνότητα (density = 7.850gr/ml), το ισοδύναμο βάρος (Equivalent Weight= 55.5gr), ενώ τέλος επιλέγεται το ηλεκτρόδιο του κορεσμένου καλομέλανα (SCE: Saturated Calomel Electrode) ως ηλεκτρόδιο αναφοράς.

Πατώντας "Finish" το PowerCorr εκτελεί το πείραμα. Η καμπύλη που προκύπτει είναι της παρακάτω μορφής:



➤ **Μέθοδος Ανοδικής πόλωσης (μόνο για 316L)**

Ενεργοποιούμε το PowerCorr και από το "Experiment", επιλέγουμε "New" και επιλέγουμε Potentiodynamic 316L Setup, το οποίο έχει τις ρυθμίσεις που φαίνονται στα σχήματα:



Cell Definition

Comment
This template performs a Potentiodynamic Polarization scan from -250mV vs. oc to 1.6V at a scan rate of 0.166mV/s.

Instrument
Instrument Set: Model VersaStatII at address 14

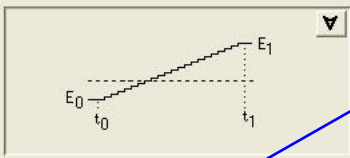
Working Electrode
Type: Solid Electrode Area: 12,5600000 cm²
Density: 8,027 g/ml
Equivalent Weight: 25,500 g

Reference Electrode
Type: SCE Saturated Calomel (sat'd KCl) ...
Offset Potential vs Normal Hydrogen Electrode: 0,242 Volts

< Back Next > Finish Cancel Help

Το εύρος του δυναμικού πόλωσης, είναι πλέον - 0.25 V έως 1.6V.

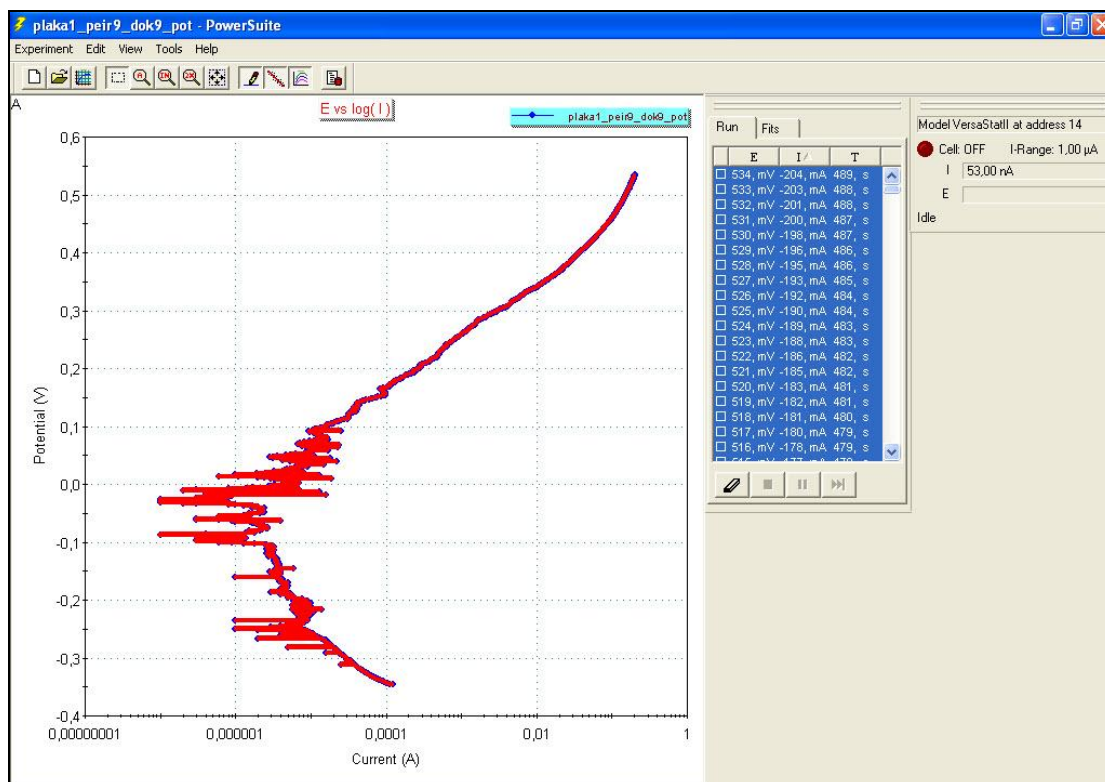
Scan Definition

Waveform: 

Potential E₀: -0,2500000 Volts vs Open Circuit Potential
 Potential E₁: 1,6000000 Volts vs Open Circuit Potential
 Step Height: 1,0000 mV
 Scan Rate: 1,8000 mV/s
 Step Time: 0,556 s
 Number of Points: 1851

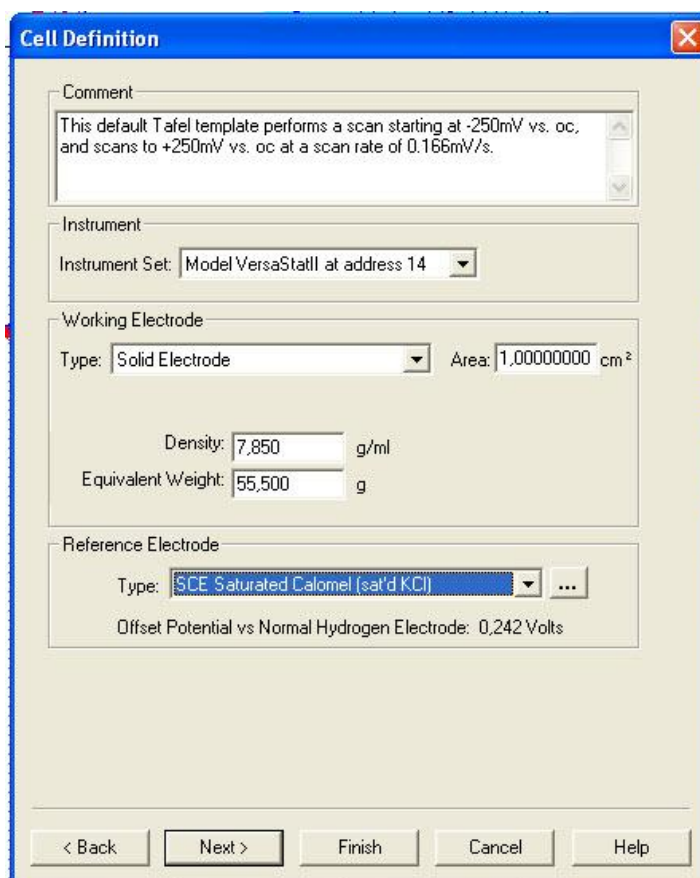
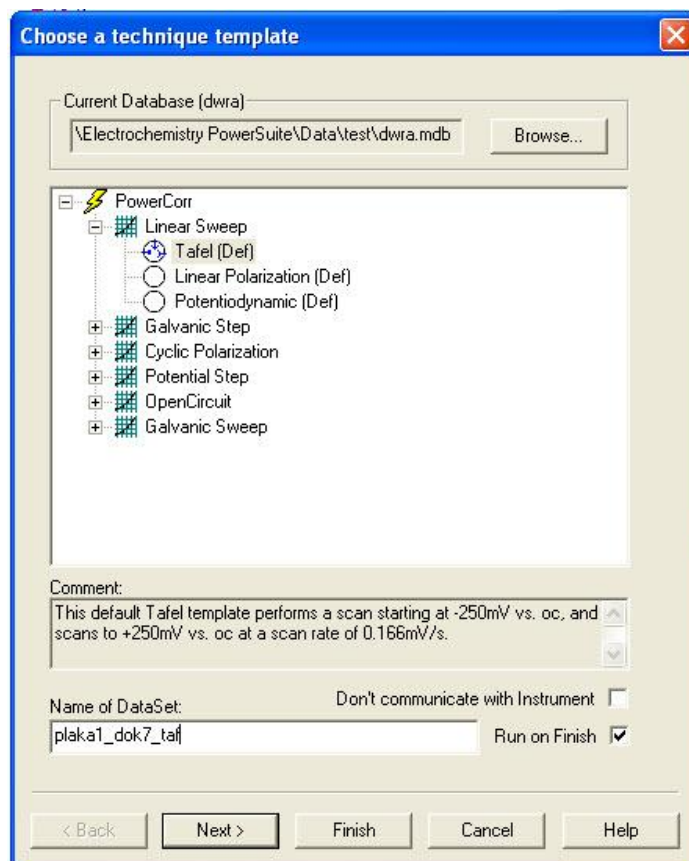
< Back Next > Finish Cancel Help

Πατώντας “Finish” το PowerCorr εκτελεί το πείραμα. Η καμπύλη που προκύπτει είναι της παρακάτω μορφής:

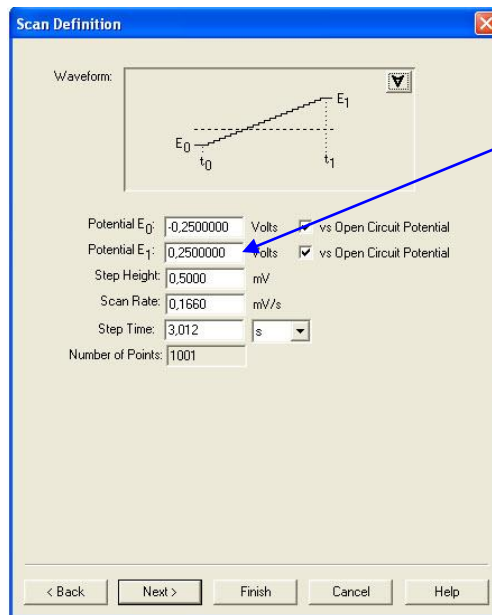


➤ Μέθοδος Tafel (μόνο για AH36)

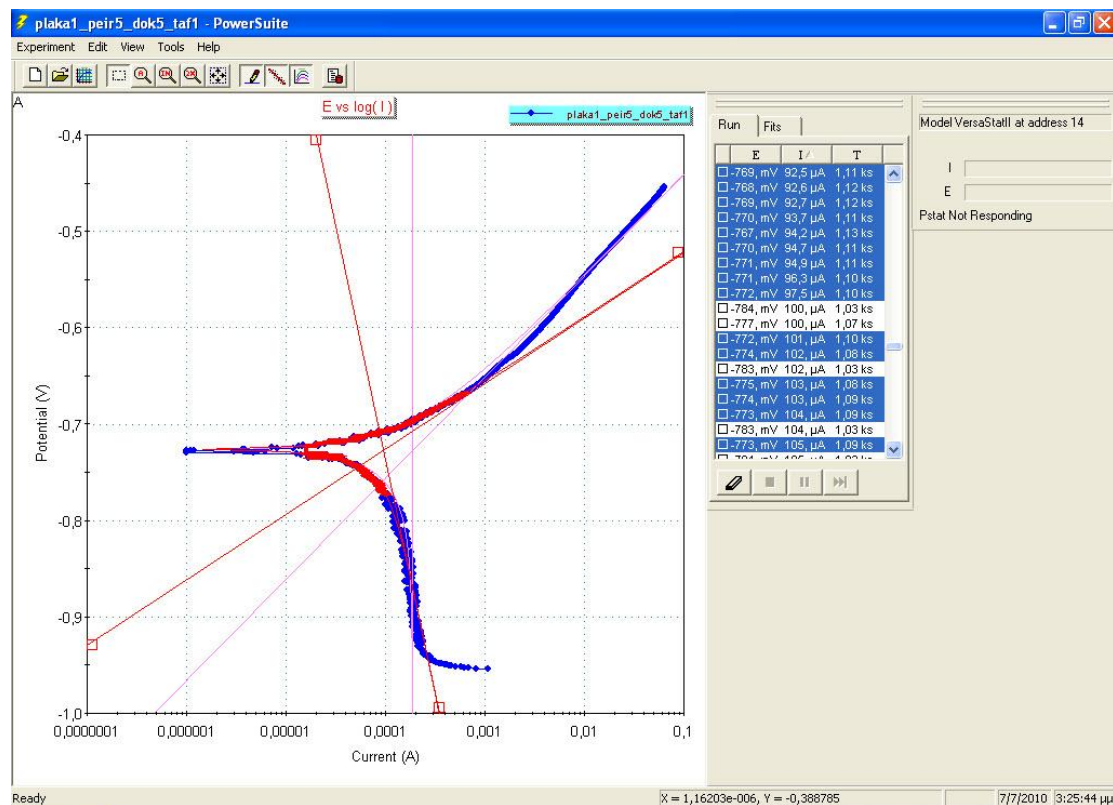
Ενεργοποιούμε το PowerCorr και από το “Experiment”, επιλέγουμε “New” και επιλέγουμε Tafel AH36 Setup, το οποίο έχει τις ρυθμίσεις που φαίνονται στα σχήματα:



Το εύρος του δυναμικού πόλωσης, είναι πλέον - 0.250mV έως 0.250mV.



Πατώντας "Finish" το PowerCorr εκτελεί το πείραμα. Η καμπύλη που προκύπτει είναι της παρακάτω μορφής:



7.6 Χημική Προσβολή και Οπτική Μικροσκοπία [1], [18]

7.6.1 Χημική Προσβολή

Η χημική προσβολή μιας μεταλλικής επιφάνειας γίνεται με σκοπό να αποκαλυφθούν λεπτομέρειες της μικροδομής του υλικού, κυρίως με τη μέθοδο της οπτικής μικροσκοπίας. Με τη χημική προσβολή μιας επιφάνειας, που αποτελεί τη συνηθέστερη μέθοδο, τα διαφορετικά συστατικά της επιφάνειας διαβρώνονται εκλεκτικά, με αποτέλεσμα να αντανακλούν διαφορετικά το φως και συνεπώς να εμφανίζονται διαφορετικά στο οπτικό μικροσκόπιο. Έτσι για παράδειγμα όταν ένα συστατικό αντανακλά πλήρως το φως εμφανίζεται να έχει ανοιχτό χρώμα. Η προσβολή γίνεται με εμβάπτιση του υλικού σε κατάλληλα χημικά αντιδραστήρια (εικόνα 7.12) τα οποία έχουν αναπτυχθεί κυρίως με βάση την εμπειρία. Γνωρίζοντας ποιες φάσεις προσβάλλει το αντιδραστήριο που επιλέχθηκε και ποιες όχι, αντιλαμβάνεται κανείς τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της δομής.



Εικόνα 7.12: Χημική προσβολή δοκιμίων

Μια άλλη μέθοδος προσβολής είναι η προσβολή χρωματικού τόνου (απόχρωσης tint etching). Με τη μέθοδο αυτή αποτίθεται ένα πολύ λεπτό υμένιο στην επιφάνεια

του δοκιμίου αποδίδοντας διαφορετικό χρωματικό τόνο σε κάθε συστατικό του δοκιμίου. Αυτό το είδος της προσβολής απαιτεί πολύ καλά προετοιμασμένες επιφάνειες δοκιμίων.

Εξαιτίας της παρουσίας του Cr η προσβολή των ανοξειδωτων χαλύβων είναι σχετικά δύσκολη. Με βάση τη βιβλιογραφία για τη μελέτη της μεταλλογραφικής δομής των συγκολλημένων δοκιμίων του ανοξειδωτου 316L χρησιμοποιήθηκαν δύο ειδών αντιδραστήρια :

- αντιδραστήριο Glyceregia για χημική προσβολή
- αντιδραστήριο Beraha (200mL HCL, 1000 mL H₂O) για προσβολή απόχρωσης των ωστενιτικών περιοχών

Το αντιδραστήριο Glyceregia περιέχει :

- μέρη HCl,
- μέρη glycerol,
- 1 μέρος HNO₃

Η προετοιμασία του αντιδραστήριου έγινε στον απαγωγό, εξαιτίας της παρουσίας του HCl. Η glycergia αποτελεί σύνηθες αντιδραστήριο για τους ανοξειδωτους χάλυβες και προσβάλλει κυρίως τη σ-φάση ενώ παράλληλα αναδεικνύει και τυχόν καρβίδια. Το δοκίμιο εμβαπτίστηκε στο διάλυμα για μερικά δευτερόλεπτα και στη συνέχεια ξεπλύθηκε με νερό και αιθανόλη.

Το αντιδραστήριο Beraha περιέχει :

- 200ml HCl,
- 1000 ml H₂O

Υπάρχουν διάφορα αντιδραστήρια χρωματικού τόνου (απόχρωσης – Tint etchants) που αναπτύχθηκαν από τον Dr E. Beraha. Το δοκίμιο εμβαπτίστηκε στο διάλυμα για μερικά δευτερόλεπτα και στη συνέχεια ξεπλύθηκε με νερό και αιθανόλη.

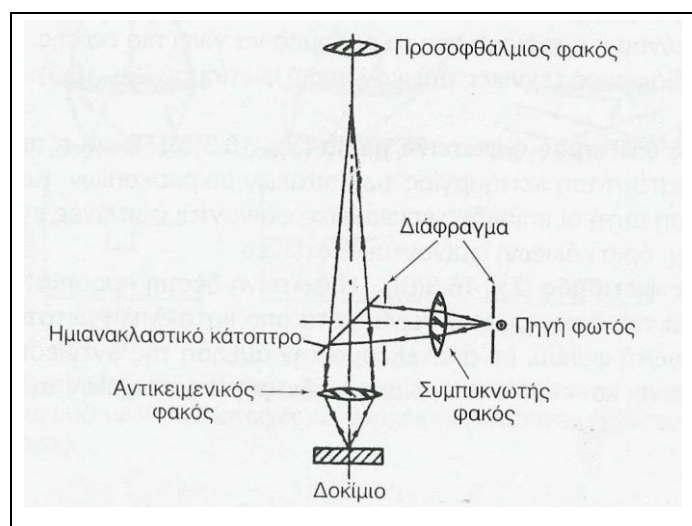
Στην περίπτωση του ναυπηγικού χάλυβα AH36 επιλέχθηκε το αντιδραστήριο Nital (διάλυμα αιθανόλης με 4% κ.ό. HNO₃) που δίνει πολύ καλά αποτελέσματα με εμβάπτιση του δοκιμίου σε δοχείο με το αντιδραστήριο για 4-7 sec.

7.6.2 Οπτική Μικροσκοπία [1]

Η Οπτική Μικροσκοπία (μεταλλογραφία) είναι, εδώ και δεκαετίες, μία πολύ σημαντική μέθοδος παρατήρησης και ερμηνείας της μικροδομής των υλικών, που αποτελεί το βασικό αντικείμενο της μεταλλογραφίας. Το Οπτικό Μικροσκόπιο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας είναι τύπου Leica DMILM.

Τα κύρια μέρη του μικροσκοπίου είναι (σχήμα 7.7):

- 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 τη μετακίνησή του μέσω κατάλληλης διάταξης
- Ο προσοφθάλμιος φακός



Σχήμα 7.7: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας του οπτικού (μεταλλογραφικού) μικροσκοπίου

Εκτός από τα παραπάνω, το οπτικό μικροσκόπιο είναι εφοδιασμένο με κατάλληλη διάταξη που να επιτρέπει τη στερέωση κάμερας. Το μικροσκόπιο διαθέτει δύο τύπους μεγεθυντικών φακών: τους αντικειμενικούς και τους προσοφθάλμιους. Οι πρώτοι είναι οι πιο σημαντικοί, γιατί συγκεντρώνουν το ανακλώμενο από το μεταλλικό δοκίμιο φως και συνθέτουν την εικόνα. Είναι συνήθως βιδωτοί και

τοποθετούνται σε μία περιστρεφόμενη βάση, η οποία δέχεται τέσσερις φακούς με διαφορετική μεγέθυνση ο καθένας. Οι προσοφθάλμιοι φακοί έχουν σταθερή μεγέθυνση. 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.

7.7 Μικροσκληρότητα [1], [14]

Ως σκληρότητα ορίζεται η ικανότητα ενός υλικού να αντιστέκεται σε μόνιμη παραμόρφωση ή αλλοίωση, όταν έρθει σε επαφή με ένα διεισδυτή υπό κάποιο φορτίο. Στη φυσική μεταλλουργία, ως σκληρότητα ενός υλικού ορίζεται η αντίσταση που προβάλλει το υλικό αυτό, στην κάθετη διείσδυση ενός άλλου σώματος μεγαλύτερης σκληρότητας από αυτήν του εξεταζόμενου υλικού.

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), κωνικός (Rockwell), 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.

Στα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικροσκληρότητας με τη μέθοδο Vickers. 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 (σχήμα 7.8). Η δύναμη εφαρμόζεται σταδιακά και η επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου 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 και χρησιμοποιείται ο μέσος όρος για τον υπολογισμό της σκληρότητας κατά Vickers σύμφωνα με τη σχέση:

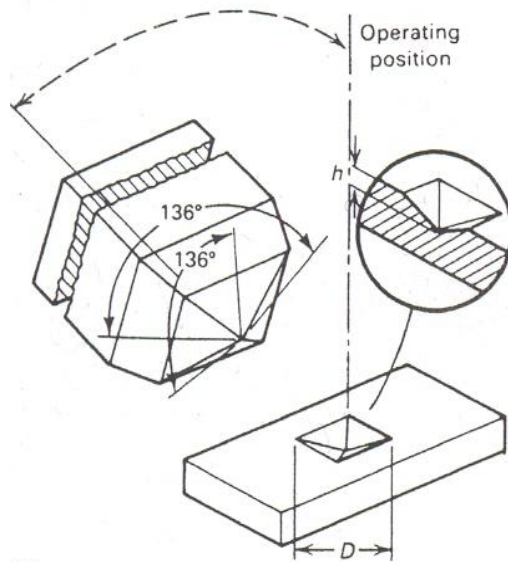
$$HV = \frac{2000 \cdot P \cdot \sin(\alpha/2)}{d^2} = \frac{1854.4 \cdot P}{d^2},$$

όπου:

d: μέσος όρος διαγωνίων σε μm ,

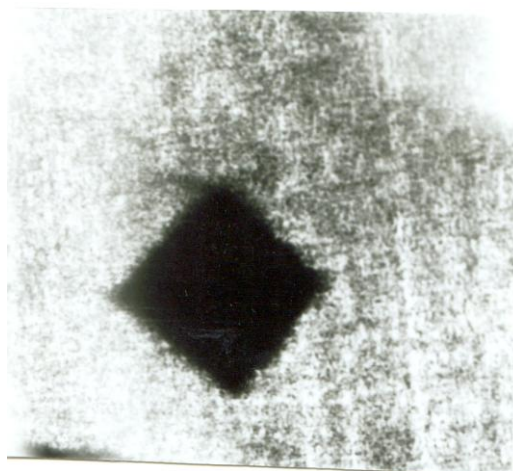
α : γωνία κορυφής = 136° και

P: δύναμη σε gr.



Σχήμα 7.8: Σχηματική αναπαράσταση μικροσκληρομέτρησης Vickers

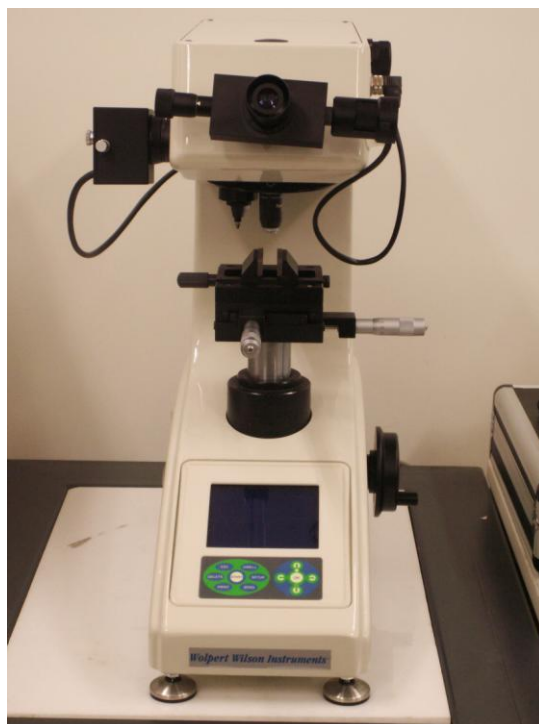
Η διαδικασία που ακολουθείται έχει ως εξής: τοποθετείται το δείγμα στην τράπεζα του οργάνου και μέσω του μικροσκοπίου που διαθέτει γίνεται εστίαση μέχρι να διακριθεί καθαρά η μικροδομή του δείγματος. Μετά προγραμματίζεται με όλες τις παραμέτρους που χρειάζεται και επιλέγεται ο χρόνος που θα διαρκέσει η διείσδυση, καθώς και το φορτίο που θα ασκήσει η πυραμίδα στην επιφάνεια του δοκιμίου. Γίνεται εστίαση στην περιοχή που είναι επιθυμητή η μέτρηση της σκληρότητας και αντικαθίσταται ο φακός του μικροσκοπίου με τον διεισδυτή. Πατώντας το κουμπί start η πυραμίδα διεισδύει στην επιφάνεια του υλικού δημιουργώντας ένα αποτύπωμα (εικόνα 7.13).



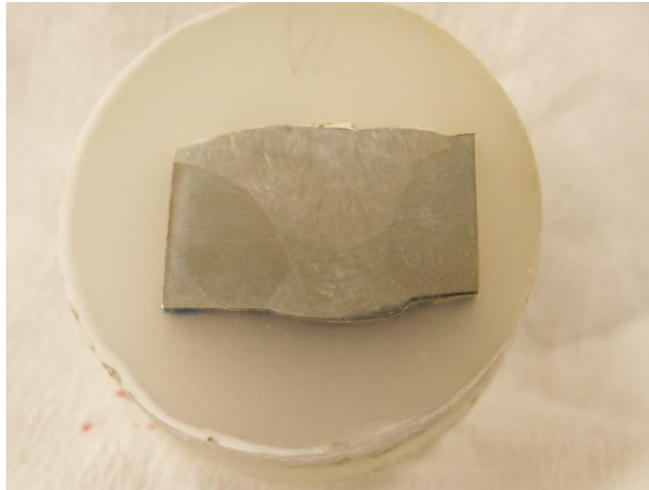
Εικόνα 7.13: Αποτύπωμα μικροσκληρότητας Vickers

Γυρίζοντας πάλι στο μικροσκόπιο υπολογίζονται (με τη βοήθεια γραμμών) οι διαγώνιοι της πυραμίδας που έχει σχηματιστεί. Τέλος, το λογισμικό υπολογίζει από τις τιμές των διαγώνιων τις τιμές σκληρότητας σε HVN (Hardness Vickers Number). Κρίνεται αναγκαίο στις πρώτες μετρήσεις να δοκιμάζονται διάφορες τιμές τόσο για το φορτίο όσο και για το χρόνο ώστε να κρίνεται πιο αποτύπωμα εξυπηρετεί καλύτερα.

Το μικροσκληρόμετρο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας είναι Wolpert Wilson Instruments, τύπου 402MVD με 2.942 N δύναμη (φορτίο 300 gr) στο δεισδυτικό μηχάνημα για 15 sec (εικόνα 7.14). Για τη λήψη των μικροσκληρομετρήσεων δοκίμιο από τομή της συγκόλλησης λειάνθηκε και στιλβώθηκε ώστε να διαμορφωθεί η κατάλληλη επιφάνεια (εικόνα 7.15). Οι μικροσκληρομετρήσεις έγιναν στην τομή της συγκόλλησης και κατά το μήκος της ώστε να ληφθούν μετρήσεις τόσο από το μέταλλο βάσης, τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και τη ζώνη τήξης. Εξαιτίας της διαμόρφωσης του δοκιμίου και του μεγέθους του, για τη στερέωση του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε ειδική βάση του μικροσκληρόμετρου.



Εικόνα 7.14: Το μικροσκληρόμετρο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας Wolpert Wilson Instruments, μοντέλο 402MVD



Εικόνα 7.15: Εγκιβωτισμένο, λειασμένο και προσβεβλημένο δοκίμιο από την τομή της συγκόλλησης για τη δοκιμή της μικροσκληρομέτρησης

7.8 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM) [44]

7.8.1 Πειραματική Διαδικασία

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το νεοαποκτηθέν Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscope) του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Το Μικροσκόπιο είναι της εταιρείας JEOL, τύπου 6390, υψηλού κενού, ανάλυσης έως 3nm (30kV), δυναμικού επιτάχυνσης 0.5 έως 30kV (accelerating voltage), με νήμα βολφραμίου (W). Το Μικροσκόπιο συνοδεύεται από σύστημα μικροανάλυσης (Energy Dispersive System EDS), το οποίο όμως όταν έγιναν τα πειράματα της διπλωματικής δεν είχε τεθεί ακόμα σε λειτουργία (εικόνα 7.16).

Τα δοκίμια που παρατηρήθηκαν στο μικροσκόπιο ήταν ελεύθερα, μη εγκιβωτισμένα, ώστε να εξασφαλίζεται η αγωγιμότητα. Στόχος των μικροσκοπικών παρατηρήσεων ήταν η μελέτη των βελονισμών που εμφανίστηκαν στις επιφάνειες των δοκιμίων μετά τις ηλεκτροχημικές μετρήσεις.



***Εικόνα 7.16:** Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης τύπου JSM6390 της εταιρείας JEOL. Διακρίνονται η στήλη των ηλεκτρονίων και ο θάλαμος του δοκιμίου.*

7.8.2 Αρχή της Μεθόδου

7.8.2.1 Γενικά

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) είναι ένα επιστημονικό όργανο με μοναδικές δυνατότητες για τη μελέτη επιφανειών. Το SEM χρησιμοποιεί μία εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας για την παραγωγή διαφόρων σημάτων από την επιφάνεια ενός στερεού δοκιμίου.

Τα σήματα αυτά που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων – επιφάνειας δοκιμίου αποκαλύπτουν πληροφορίες για ένα δοκίμιο όπως η μορφολογία του, η χημική του σύσταση, η κρυσταλλική δομή και ο προσανατολισμός των συστατικών του δοκιμίου. Τα δεδομένα συλλέγονται από μια συγκεκριμένη επιφάνεια του δοκιμίου και προκύπτει μια διδιάστατη εικόνα η οποία περιέχει τις παραπάνω

πληροφορίες. Η διακριτική ικανότητα του SEM θεωρητικά μπορεί να φτάσει έως $\times 800.000$, ωστόσο διάφορες παράμετροι του οργάνου, περιορισμοί στη μεγέθυνση και τη διακριτική ικανότητα περιορίζουν τη μεγέθυνση ενός συμβατικού SEM σε $\times 200.000$. Το SEM παρέχει επίσης τη δυνατότητα ποιοτικής και ημιποσοτικής ανάλυσης συγκεκριμένων σημείων και περιορισμένων επιφανειών της επιφάνειας του δοκιμίου με τη χρήση συστήματος EDS (Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy).

7.8.2.2 Λειτουργία του οργάνου

Τα ηλεκτρόνια δημιουργούνται από τη διέγερση του νήματος και στη συνέχεια επιταχύνονται στην καθοδική στήλη ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια αυτά περιέχουν σημαντική ποσότητα κινητικής ενέργειας και δημιουργούν διάφορα σήματα καθώς προσπίπτουν στην επιφάνεια του δοκιμίου. Στα σήματα αυτά περιλαμβάνονται δευτερογενή ηλεκτρόνια (secondary) τα οποία παράγουν την εικόνα του SEM, οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (backscattered), περιθλώμενα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (diffracted backscattered), που υποδεικνύουν την κρυσταλλική δομή και τον προσανατολισμό, ακτίνες X που χρησιμοποιούνται για στοιχειακή ανάλυση, ορατό φως και θερμότητα.

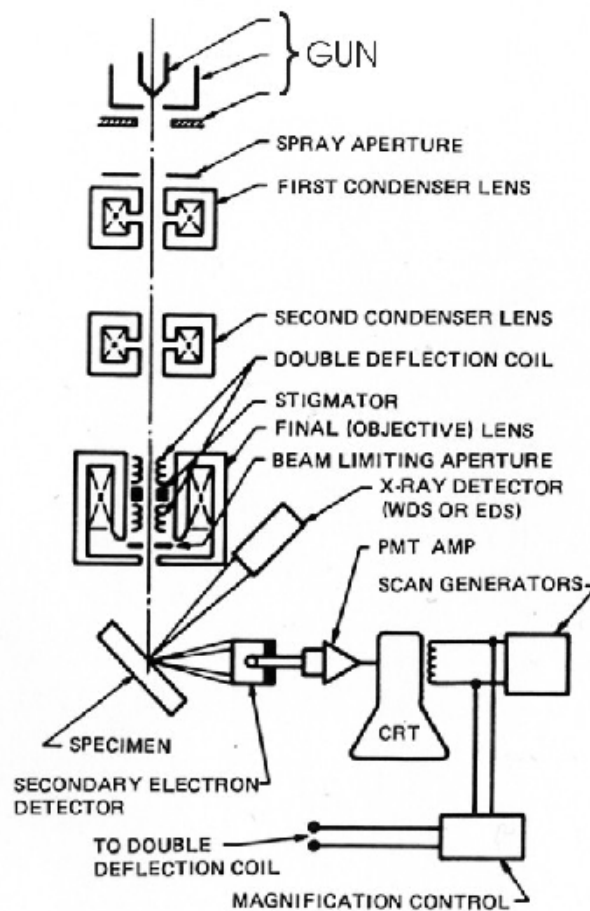
Τα δευτερογενή και τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια παρέχουν την εικόνα του δοκιμίου : τα δευτερογενή ηλεκτρόνια δείχνουν τη μορφολογία και την τοπογραφία του δοκιμίου και τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια δείχνουν την αντίθεση στη σύσταση. Η ακτινοβολία X παράγεται από τις ανελαστικές συγκρούσεις τυχαίων ηλεκτρονίων της δέσμης με ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε τροχιά (στοιβάδα) στα άτομα του δοκιμίου. Καθώς τα διεγερμένα ηλεκτρόνια επιστρέφουν σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη, εκπέμπουν ακτινοβολία X συγκεκριμένου μήκους κύματος, η οποία σχετίζεται με τη διαφορά στην ενεργειακή στάθμη ηλεκτρονίων διαφορετικής στοιβάδας για συγκεκριμένο στοιχείο. Έτσι, χαρακτηριστικές ακτίνες X προκύπτουν για κάθε στοιχείο του δοκιμίου που διεγείρεται από τη δέσμη των ηλεκτρονίων. Οι ακτίνες X που παράγονται δεν προκαλούν καμιά μεταβολή στο δοκίμιο και έτσι το δοκίμιο μπορεί να εξεταστεί ξανά.

7.8.3 Τα Βασικά Μέρη του SEM

Στα βασικά μέρη ενός συμβατικού SEM περιλαμβάνονται τα ακόλουθα (σχήμα 7.9):

- Πηγή ηλεκτρονίων (Όπλο – Electron Gun)
- Φακοί ηλεκτρονίων
- Τράπεζα δοκιμίου
- Ανιχνευτές
- Διατάξεις οθόνης / επεξεργασίας δεδομένων
- Απαιτήσεις υποδομής:
 - Παροχή ρεύματος (σταθερή)
 - Σύστημα κενού
 - Σύστημα ψύξης
 - Αντικραδασμική επιφάνεια
 - Χώρος ελεύθερος από μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία

Τα SEMs έχουν πάντα τουλάχιστον έναν ανιχνευτή, συνήθως αυτόν των δευτερογενών ηλεκτρονίων, και τα περισσότερα έχουν και άλλους. Οι δυνατότητες ενός SEM καθορίζονται από τους ανιχνευτές που διαθέτει.



Σχήμα 7.9: Τα βασικά μέρη ενός συμβατικού Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης

Κεφάλαιο 8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

8.1 Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τη μεταλλογραφική μελέτη των δοκιμίων χάλυβα, τη μελέτη της μικροσκληρότητας, της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM), καθώς και αποτελέσματα σχετικά με την τάση διάβρωσης του χάλυβα από την εφαρμογή των ηλεκτροχημικών μεθόδων πόλωσης. Όλα τα αποτελέσματα αφορούν στις τρεις διαφορετικές περιοχές των συγκολλημένων δοκιμίων, δηλαδή του μετάλλου βάσης (MB), της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (ΘΕΖ) και της ζώνης τήξης (ΖΤ). Επίσης, στο παράρτημα παρατίθενται και οι δοκιμαστικές μετρήσεις στο συγκολλημένο έλασμα ανοξειδωτού χάλυβα 316L και ΑΗ36, που πραγματοποιήθηκαν για να εξεταστούν οι μέθοδοι που τελικά ακολουθήθηκαν.

8.2 Μεταλλογραφική Μελέτη Δοκιμίων

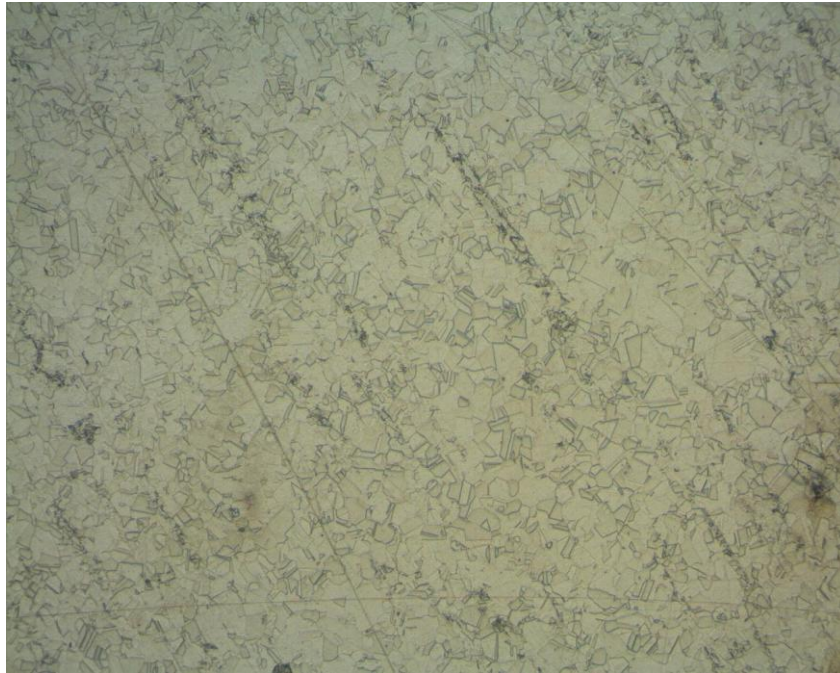
Για τη μελέτη της μεταλλογραφικής δομής των δοκιμίων, μελετήθηκαν όλες οι περιοχές της συγκόλλησης: το μέταλλο βάσης (MB), η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) και η ζώνη τήξης (ΖΤ). Τα δοκίμια προσβλήθηκαν με Glyceresia (χημική προσβολή) και με Beraha's διάλυμα (προσβολή απόχρωσης), όσον αφορά στον 316L, και με Nital, όσον αφορά στον ΑΗ36, όπως άλλωστε έχει ήδη περιγραφεί στο Κεφάλαιο 7. Στις επόμενες παραγράφους παρατίθενται εικόνες από το οπτικό μικροσκόπιο από τις διαφορετικές περιοχές και την τομή της συγκόλλησης.

8.2.1 Ανοξειδωτος Χάλυβας 316L

8.2.1.1 Μέταλλο Βάσης

Ο χάλυβας 316L εμφανίζει δομή ωστενίτη σε θερμοκρασία δωματίου. Ο ωστενίτης είναι η μητρική δομή του φερρίτη, του σεμεντίτη, του περλίτη, του μπαϊνίτη και του μαρτενσίτη. Η κρυσταλλική δομή του ωστενίτη είναι FCC. Στους περισσότερους χάλυβες ο ωστενίτης είναι φάση υψηλής θερμοκρασίας και

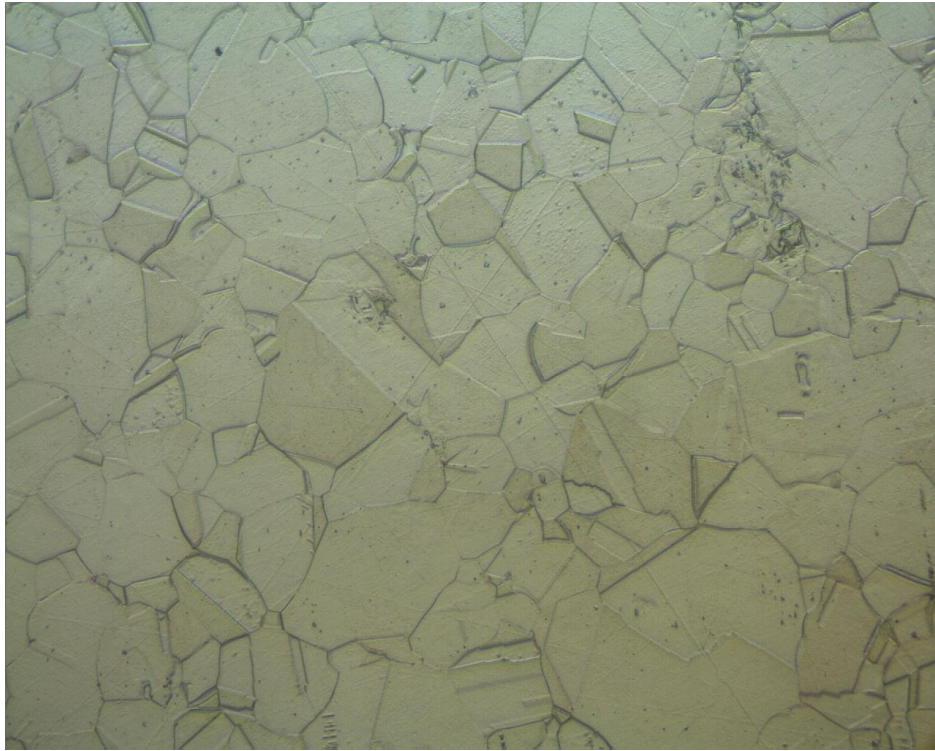
εμφανίζεται γενικά μόνο σε θερμοκρασίες πάνω από 700°C. Ωστόσο, κάποιοι χάλυβες, όπως οι ωστενιτικοί 316 και 314, εμφανίζουν 100% ωστενιτική φάση σε θερμοκρασία δωματίου.



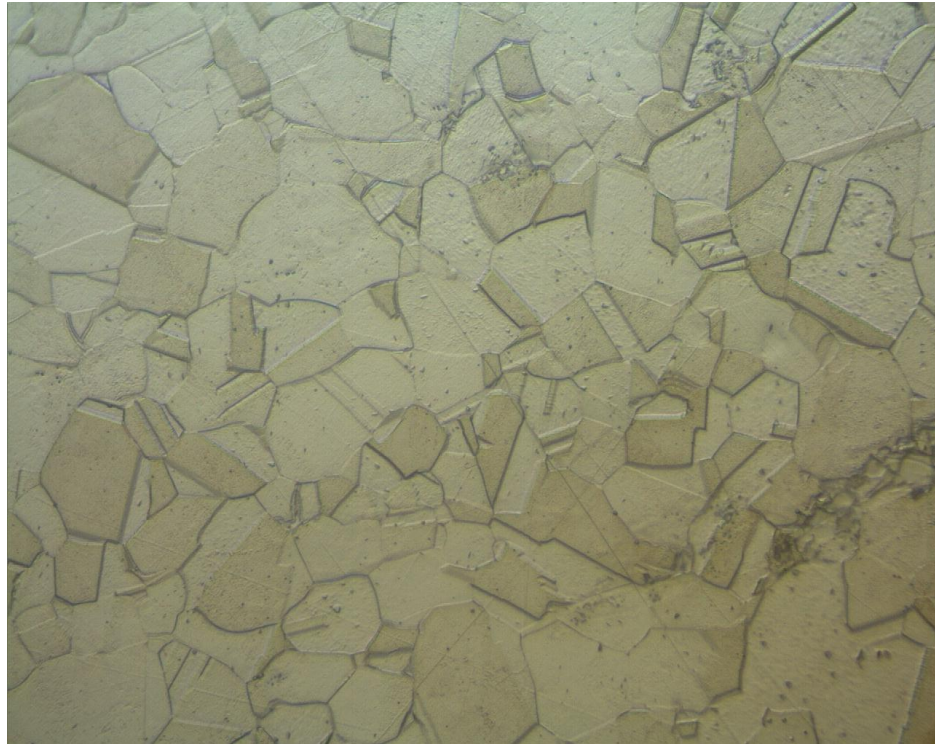
Εικόνα 8.1: Κόκκοι ωστενίτη στο μέταλλο βάσης (10x). Διακρίνονται οι διδυμίες (Glyceregia)



Εικόνα 8.2: Μικρογραφία μετάλλου βάσης του χάλυβα 316L (20x). Διακρίνονται οι διδυμίες στους κόκκους του ωστενίτη (Glyceregia)

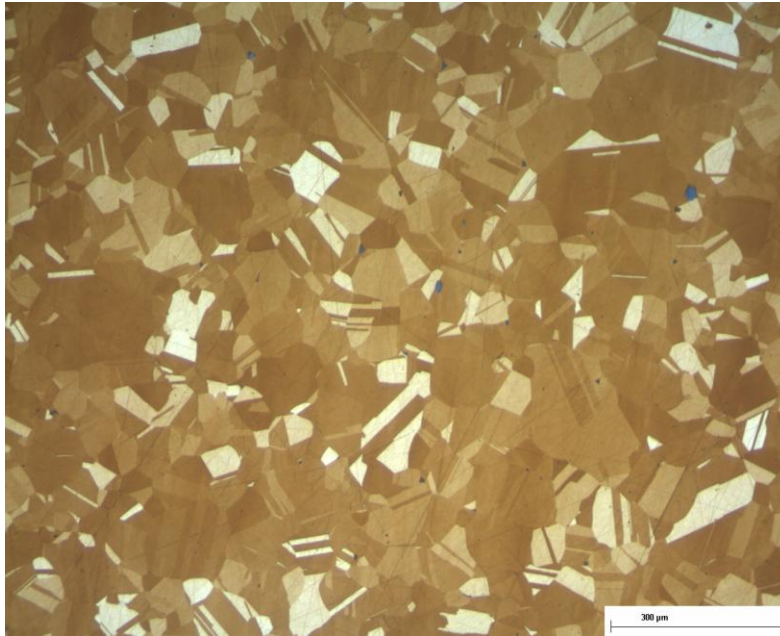


Εικόνα 8.3: Μικρογραφία μετάλλου βάσης του χάλυβα 316L (50x). Διακρίνονται οι διδυμίες στους κόκκους του ωστενίτη (Glyceregia)

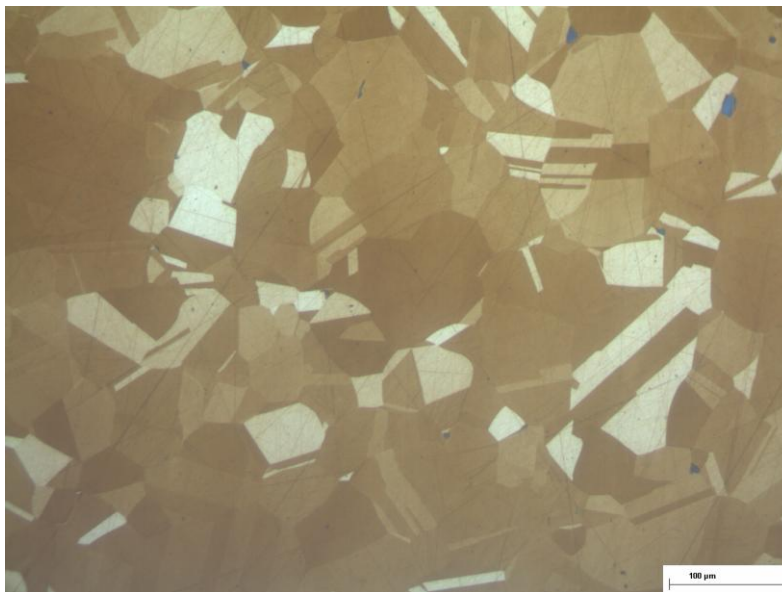


Εικόνα 8.4: Μέσα στους κόκκους του ωστενίτη σκιαγραφούνται ζώνες παραμόρφωσης (Glyceregia) (50x)

Από την παρατήρηση των δοκιμίων του μετάλλου βάσης διακρίνονται ξεκάθαρα οι κόκκοι του ωστενίτη (εικόνες 8.1 έως 8.4). Οι παράλληλες γραμμές μέσα στους κόκκους του ωστενίτη είναι διδυμίες. Ξεχωριστές, λόγω της ιδιαίτερης χρωματικής απεικόνισης, είναι οι εικόνες που προέκυψαν από την προσβολή του χάλυβα με προσβολή απόχρωσης με διάλυμα Beraha (tint etching) (εικόνα 8.5 και 8.6). Και σ' αυτές τις εικόνες διακρίνονται οι κόκκοι του ωστενίτη και οι διδυμίες.

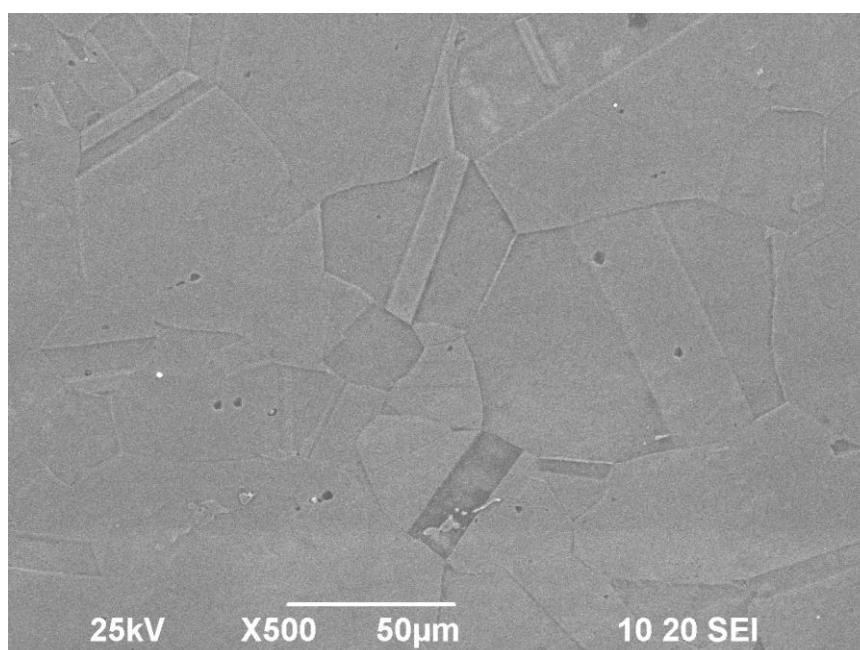


Εικόνα 8.5: Μικρογραφία μετάλλου βάσης του χάλυβα 316L (10x) (Beraha's)



Εικόνα 8.6: Μικρογραφία μετάλλου βάσης του χάλυβα 316L (20x).
Διακρίνονται οι διδυμίες στους κόκκους του ωστενίτη (Beraha's)

Κατά την παρατήρηση των δοκιμίων στο μικροσκόπιο, ιδιαίτερα στις μεγάλες μεγεθύνσεις (εικόνες 8.3 και 8.4), καθώς και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (εικόνα 8.7) φάνηκε ξεκάθαρα το ανάγλυφο της επιφάνειας, δηλαδή τα διαφορετικά επίπεδα των κόκκων, των ορίων τους, καθώς και των διδυμιών. Επίσης, μέσα σε κάποιους από τους κόκκους του ωστενίτη σκιαγραφούνται ζώνες παραμόρφωσης (εικόνες 8.3 και 8.4). Αυτές οι ζώνες παραμόρφωσης έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό σε τρεις διευθύνσεις. Ο προσανατολισμός αυτός αντιπροσωπεύει τα επίπεδα $\{1\ 1\ 1\}$ του κρυστάλλου, κατά μήκος των οποίων μπορεί να γίνει ευκολότερα η παραμόρφωση. Οι ζώνες αυτές πρέπει να προέρχονται από την ψυχρή κατεργασία (cold working) του χάλυβα.



Εικόνα 8.7: Μικρογραφία μετάλλου βάσης του χάλυβα 316L (500x) από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Διακρίνονται οι διδυμίες στους κόκκους του ωστενίτη και τα διαφορετικά επίπεδα (Beraha's).

8.2.1.2 Ζώνη τήξης

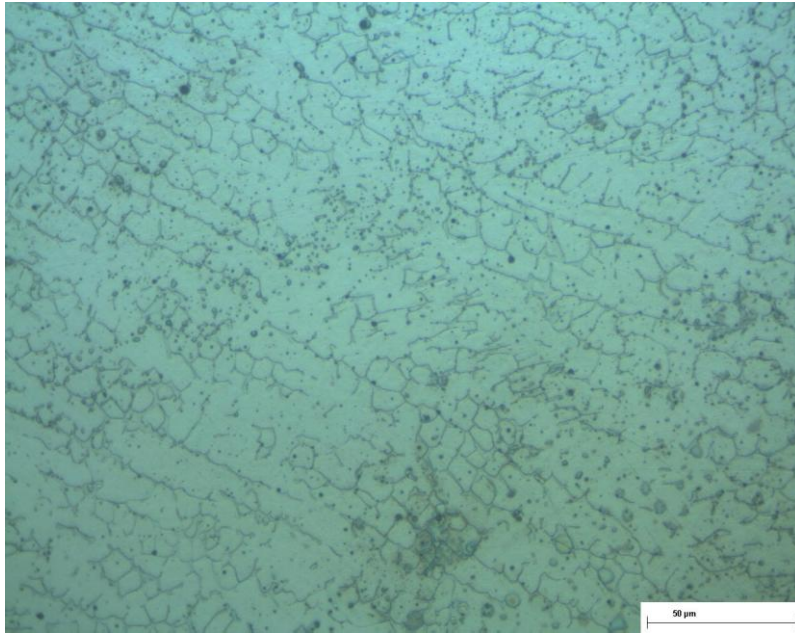
Η μικροδομή της ζώνης τήξης σε θερμοκρασία δωματίου των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων εξαρτάται από τον ρυθμό στερεοποίησης και τους εν συνεχεία μετασχηματισμούς στερεάς φάσης. Όλοι οι ανοξείδωτοι χάλυβες στερεοποιούνται με

κύρια φάση είτε το φερρίτη, είτε τον ωστενίτη, ανάλογα με τη συγκεκριμένη σύσταση του κράματος. Το εύρος της σύστασης των ωστενιτικών χαλύβων είναι τέτοιο ώστε σε ένα συγκεκριμένο κράμα δύναται να παρουσιάζονται και οι δύο φάσεις.

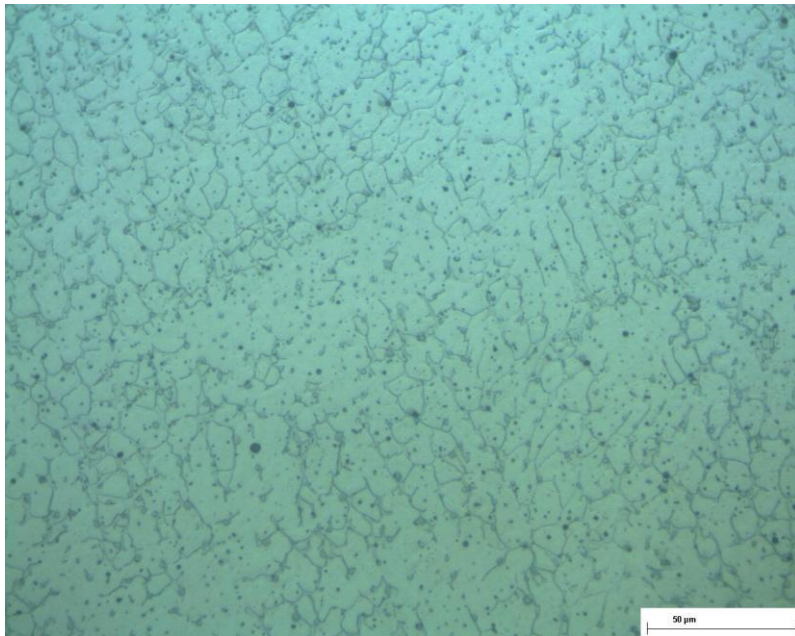
Μετά τη στερεοποίηση, κατά την ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου, μπορεί να συμβούν επιπλέον μετασχηματισμοί. Υπάρχουν τέσσερις πιθανοί μετασχηματισμοί στερεάς φάσης κατά τη στερεοποίηση στη ζώνη τήξης των ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων:

Τύπος στερεοποίησης	Μικροδομή
A	Πλήρως ωστενιτική δομή
AF	Ωστενιτική δομή με μικρό ποσοστό φερρίτη στα όρια των κόκκων του ωστενίτη
FA	Φερριτική μήτρα με ωστενίτη στα όρια των κόκκων
F	Βελονοειδής (Acicular) φερρίτης

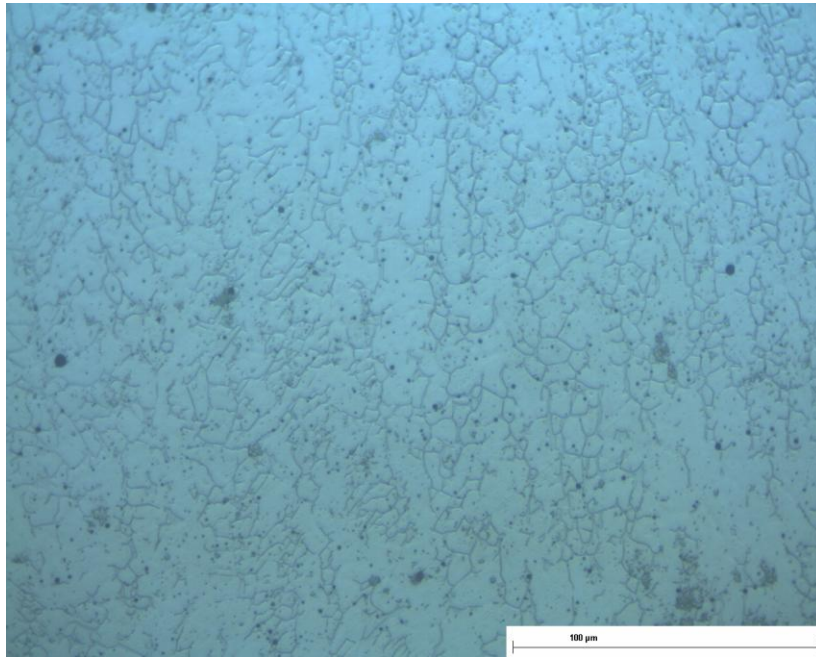
Από την παρατήρηση των εικόνων, τόσο της Οπτικής Μικροσκοπίας (εικόνες 8.8 – 8.10) όσο και της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας (εικόνες 8.11 – 8.16), συμπεραίνεται ότι στις συγκολλήσεις που παρατηρήθηκαν ο τύπος της στερεοποίησης του τηγμένου μετάλλου είναι FA, σκελετοειδούς μορφής. Το υλικό έχει υποστεί φερριτωστενιτική στερεοποίηση και ο φερρίτης παρουσιάζεται στην κορυφή των φερριτικών δένδριτικών κόκκων, οι οποίοι στερεοποιήθηκαν πρώτοι μέσα στο τήγμα.



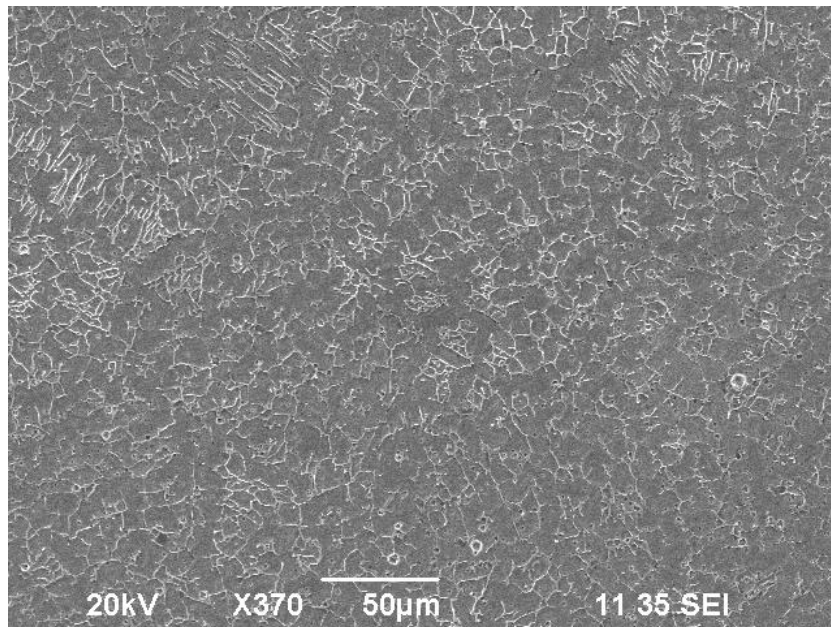
Εικόνα 8.8: Μικρογραφία της ζώνης τήξης (50x). Διακρίνεται η στερεοποίηση FA.



Εικόνα 8.9: Μικρογραφία της ζώνης τήξης (50x). Διακρίνεται η στερεοποίηση FA.

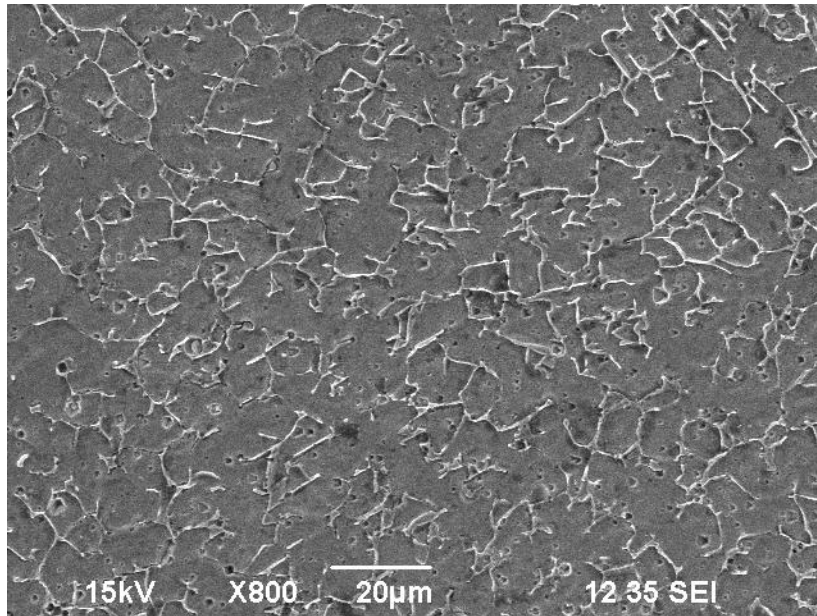


Εικόνα 8.10: Μικρογραφία της ζώνης τήξης (50x)

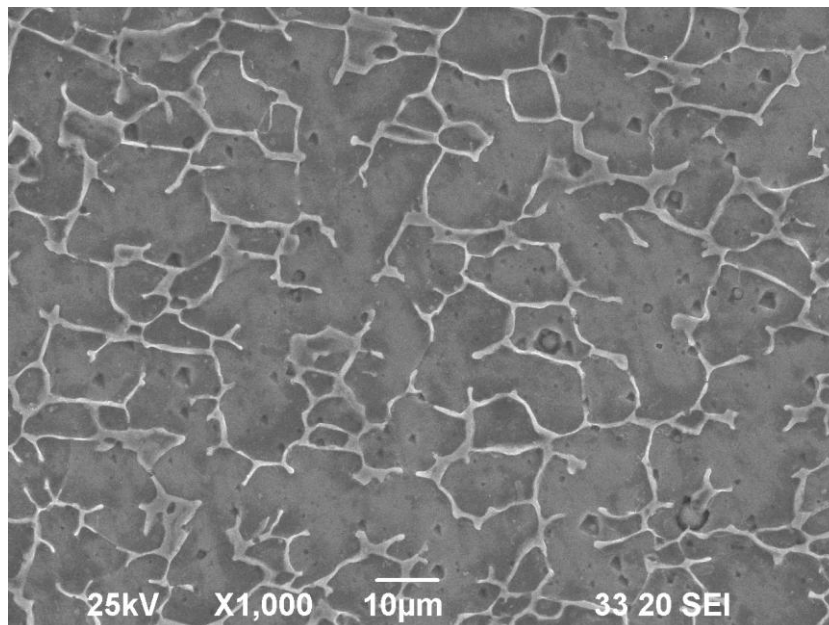


Εικόνα 8.11: Μικρογραφία της ζώνης τήξης (370x).

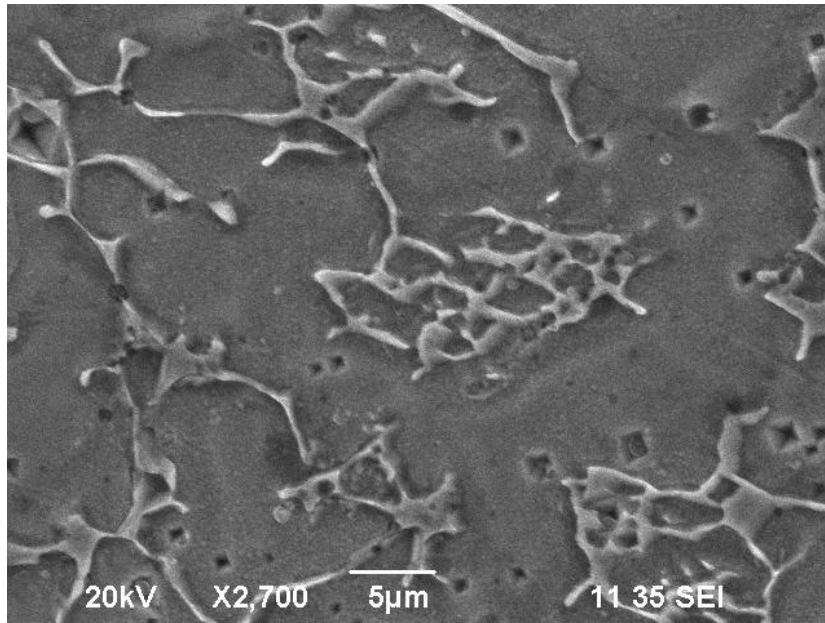
Διακρίνεται η στερεοποίηση FA (SEM).



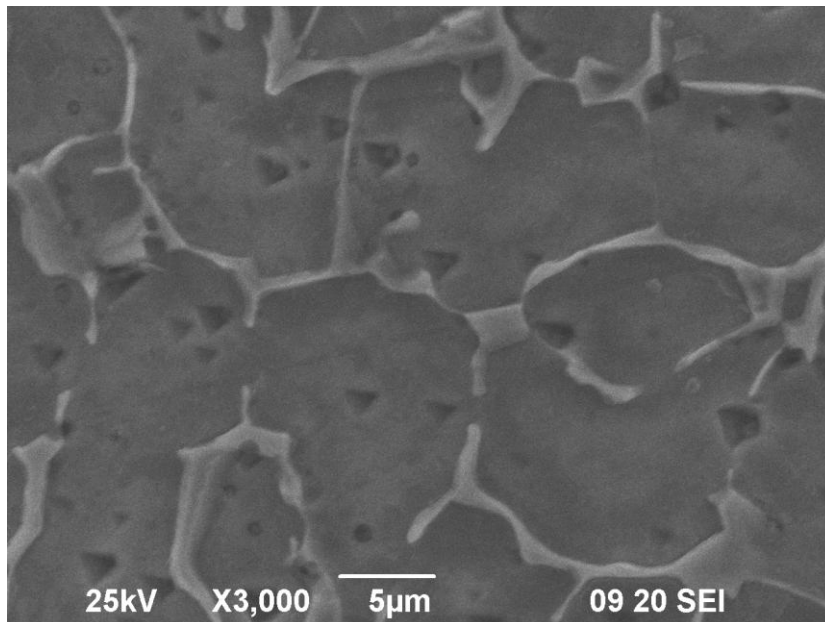
Εικόνα 8.12: Μικρογραφία της ζώνης τήξης (800x).
Διακρίνεται η στερεοποίηση FA (SEM).



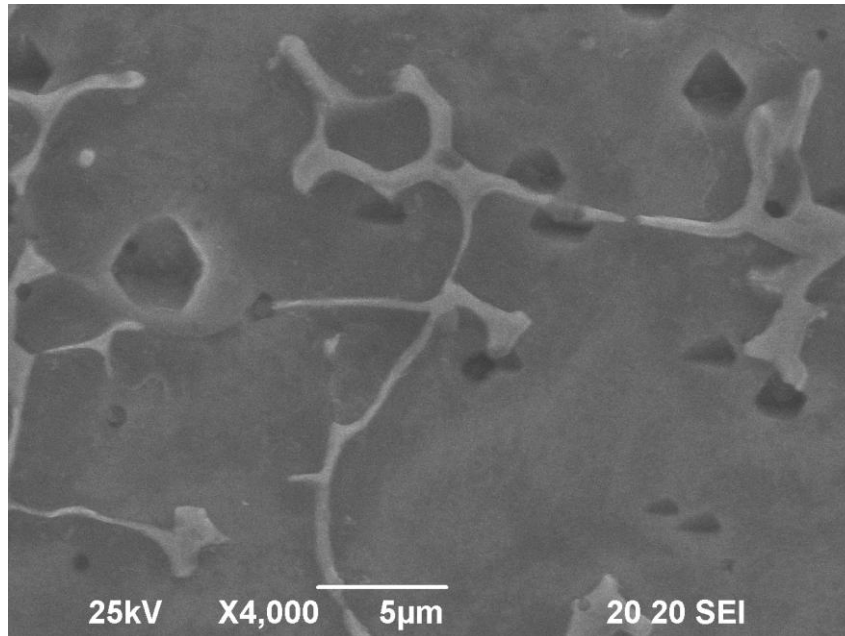
Εικόνα 8.13: Μικρογραφία της ζώνης τήξης (1000x).
Διακρίνεται η στερεοποίηση FA (SEM).



Εικόνα 8.14: Μικρογραφία της ζώνης τήξης (2700x).
Διακρίνεται η στερεοποίηση FA (SEM).



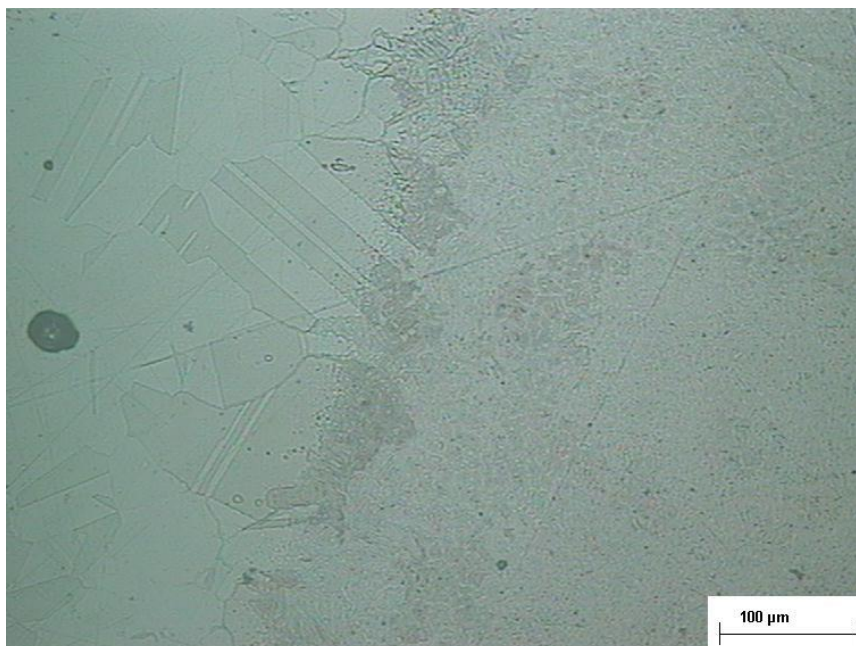
Εικόνα 8.15: Μικρογραφία της ζώνης τήξης (3000x).
Διακρίνεται η στερεοποίηση FA (SEM).



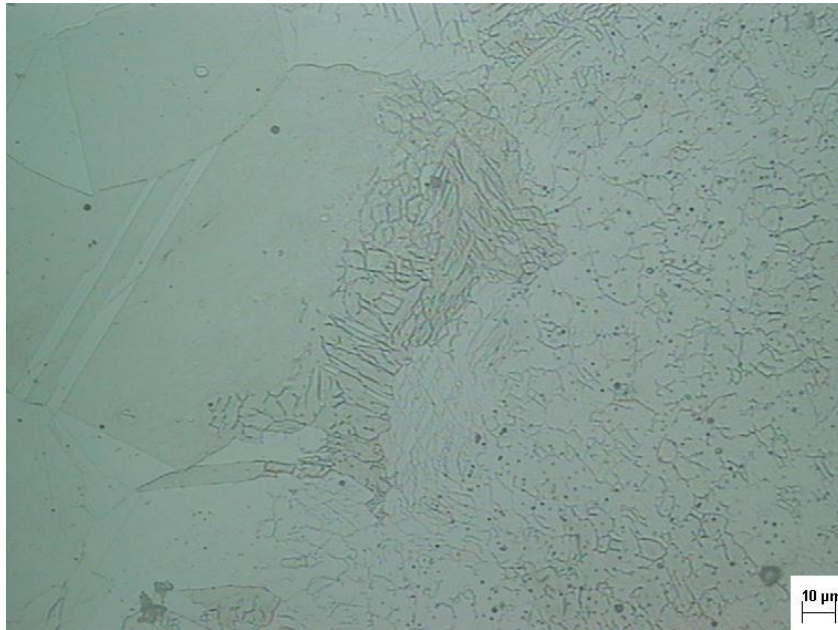
Εικόνα 8.16: Μικρογραφία της ζώνης τήξης (4000x), (SEM).

8.2.1.3 Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη

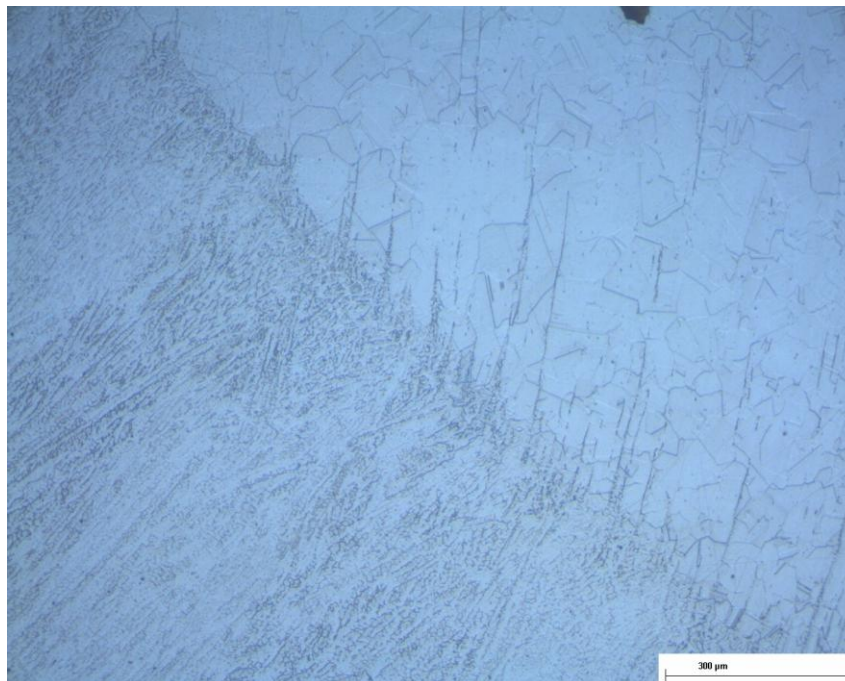
Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη εμφανίζεται πολύ καλή, μεταλλουργικής φύσεως, σύνδεση του μετάλλου βάσης 316L με τη ζώνη τήξης (εικόνες 8.17 – 8.21). Στη ζώνη σύνδεσης εμφανίζεται διείσδυση του φερριτη δ από το μέταλλο συγκόλλησης στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.



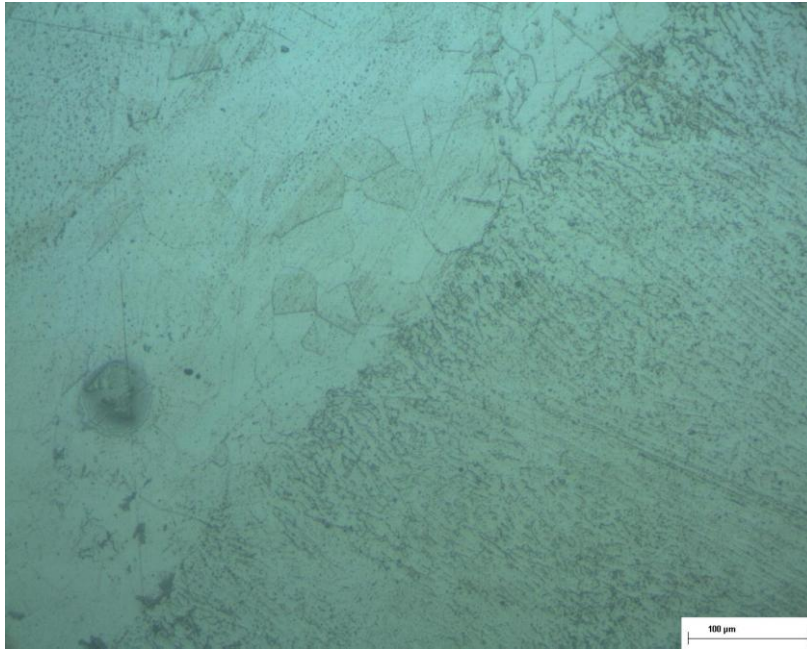
Εικόνα 8.17: Μικρογραφία θερμικά επηρεασμένης ζώνης του χάλυβα 316L (20x)



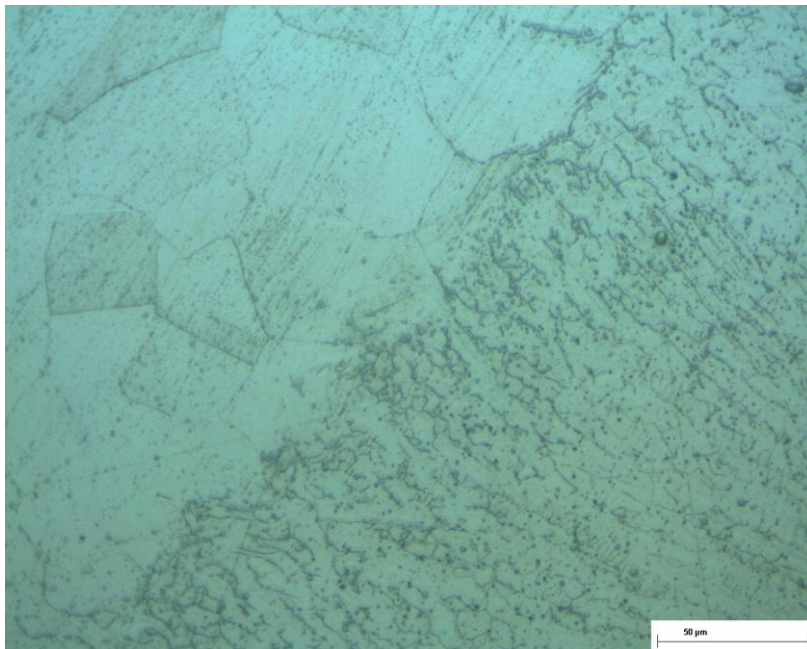
Εικόνα 8.18: Μικρογραφία θερμικά επηρεασμένης ζώνης του χάλυβα 316L (50x)



Εικόνα 8.19: Μικρογραφία τομής συγκόλλησης (WZ) του χάλυβα 316L (10x)



Εικόνα 8.20: Μικρογραφία τομής συγκόλλησης (ΘΕΖ) του χάλυβα 316L (20x)

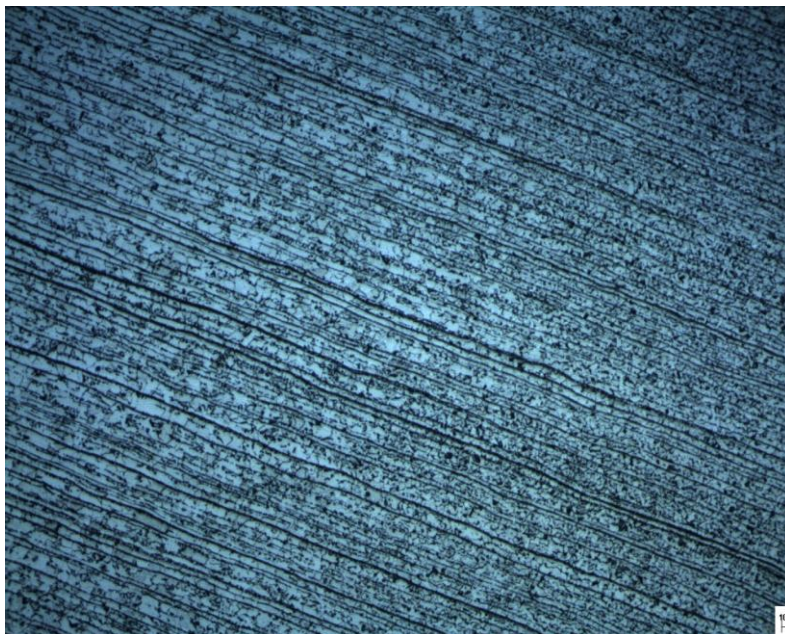


Εικόνα 8.21: Μικρογραφία τομής συγκόλλησης (ΘΕΖ) του χάλυβα 316L (50x)

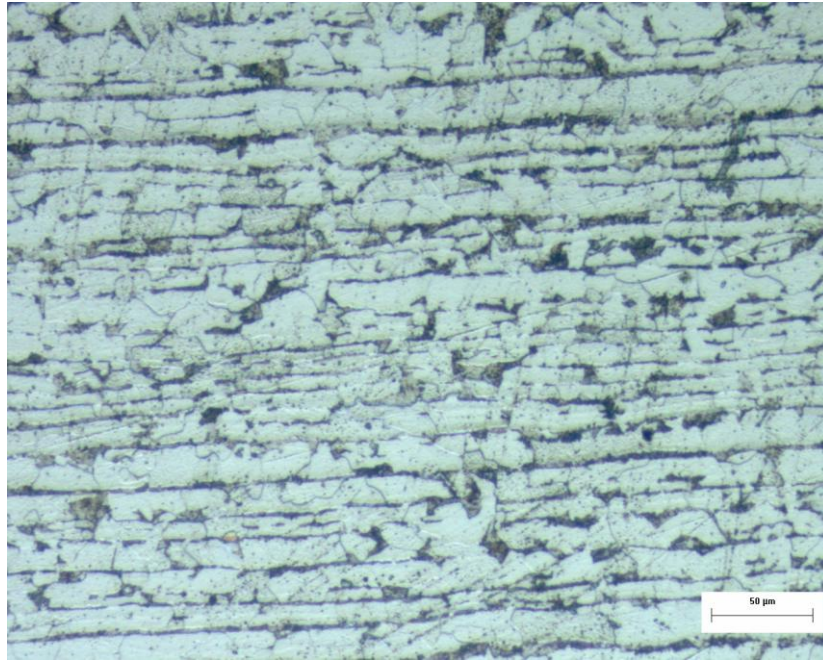
8.2.2 Χάλυβας Υψηλής Αντοχής AH36

8.2.2.1 Μέταλλο Βάσης

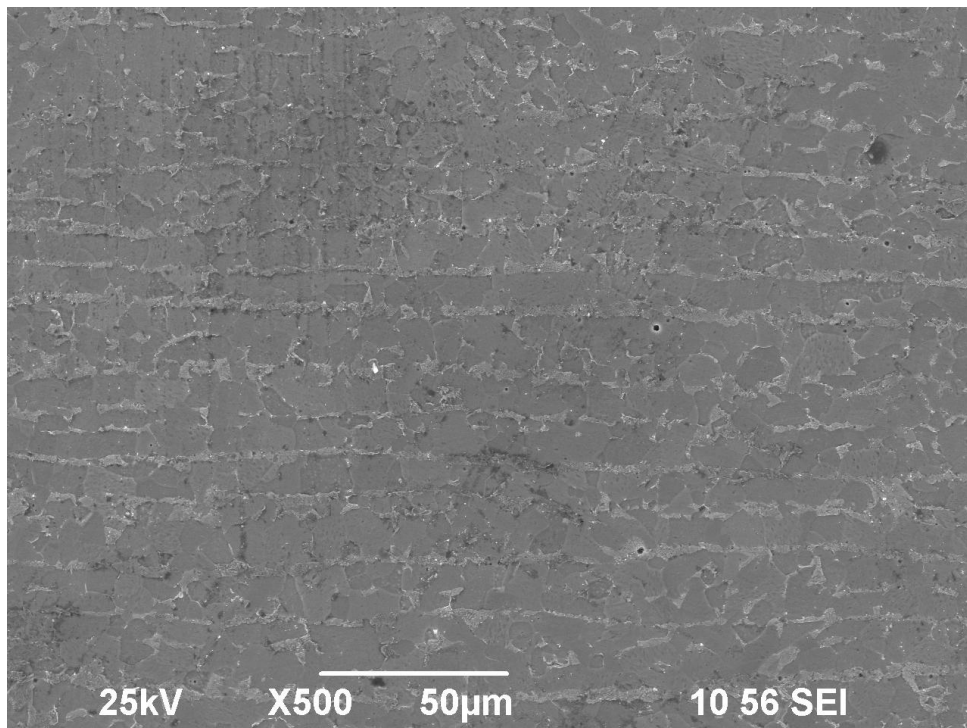
Παρατηρώντας τις μικρογραφίες που αφορούν στο μέταλλο βάσης (εικόνες 8.22 – 8.25) διαπιστώνεται ότι πρόκειται για **φερριτο-περλιτική** δομή. Η φερριτική δομή (λευκόχρωμη φάση) έχει μεγαλύτερη έκταση, πράγμα αναμενόμενο για τη χημική σύσταση του χάλυβα (0.18%C). Επίσης, οι κόκκοι του φερρίτη και του περλίτη έχουν έντονο προσανατολισμό, πράγμα που οφείλεται στον προσανατολισμό τους κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας (έλαση) των ελασμάτων χάλυβα. Ο προσανατολισμός των κόκκων είναι κάθετος στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου.



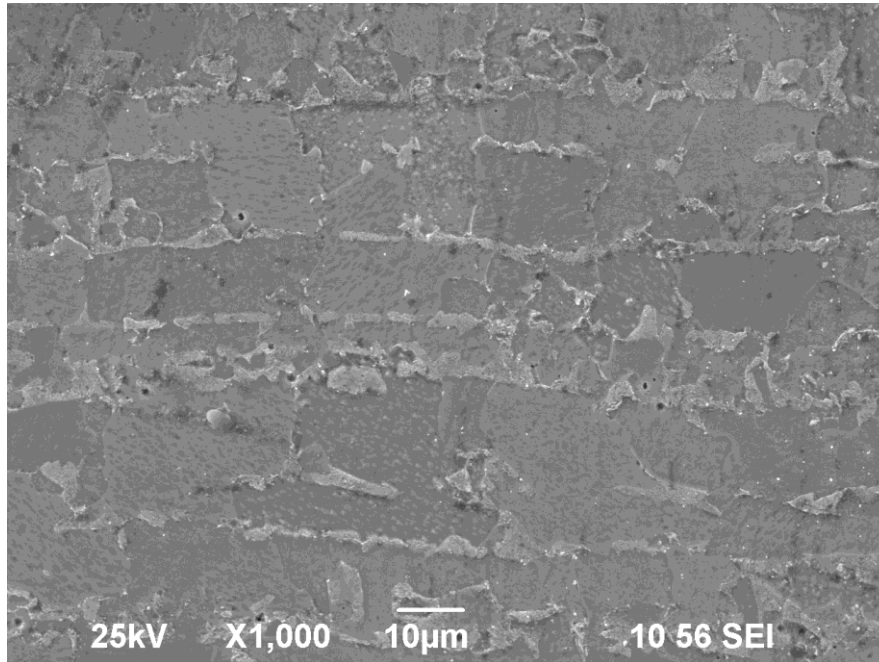
Εικόνα 8.22: Μικρογραφία μετάλλου βάσης του χάλυβα AH36 (10x).
Προσανατολισμός των κόκκων (Nital).



Εικόνα 8.23: Μικρογραφία μετάλλου βάσης του χάλυβα AH36 (20x)



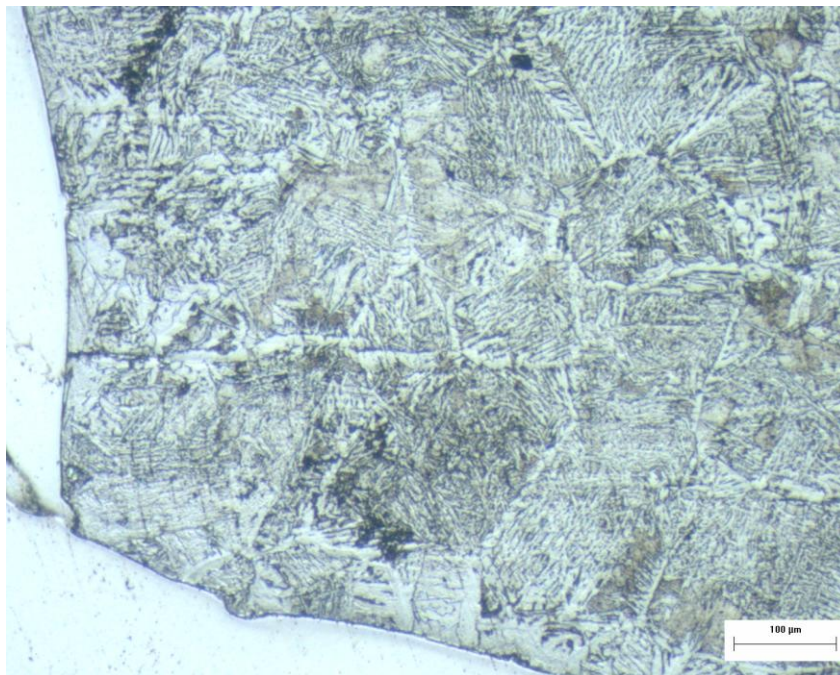
Εικόνα 8.24: Μικρογραφία μετάλλου βάσης του χάλυβα AH36 (500x).
Προσανατολισμός των κόκκων (SEM)



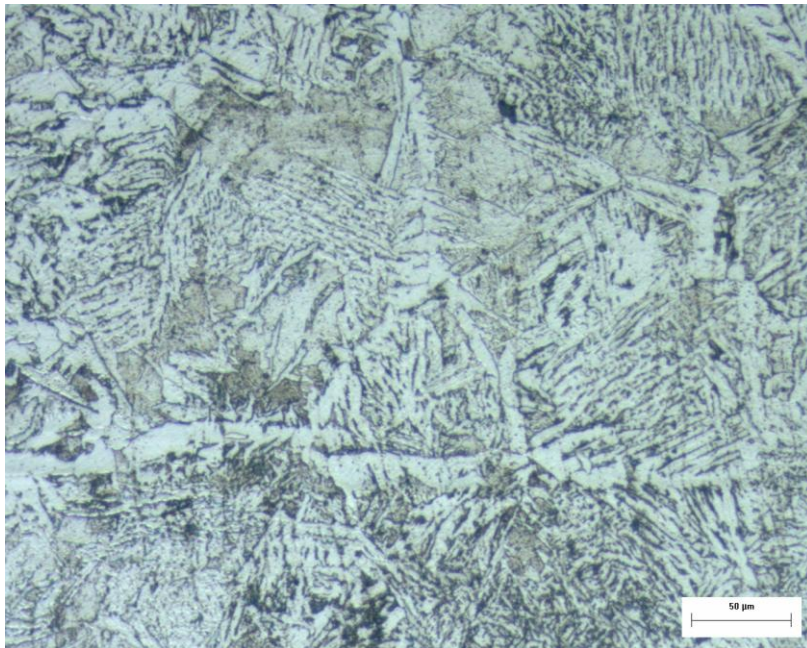
Εικόνα 8.25: Μικρογραφία μετάλλου βάσης του χάλυβα AH36 (1000x). Προσανατολισμός των κόκκων (SEM)

8.2.2.2 Θερμικά Επηρασαμένη Ζώνη

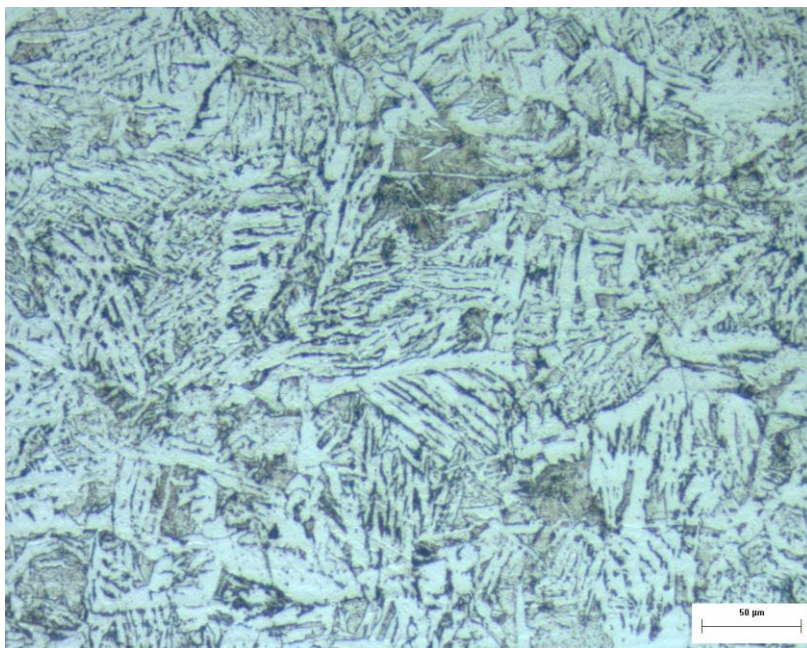
Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη έχει και αυτή φερριτο – περλιτική δομή. Σε σχέση με το μέταλλο βάσης φαίνεται η ανακρυστάλλωση των κόκκων και έχουν εξαφανιστεί οι γραμμές της θερμής έλασης (εικόνες 8.26 - 8.28).



Εικόνα 8.26: Μικρογραφία θερμικά επηρεασμένης ζώνης χάλυβα AH36 (Nital) (10x)



Εικόνα 8.27: Μικρογραφία θερμικά επηρεασμένης ζώνης χάλυβα AH36 (20x)



Εικόνα 8.28: Μικρογραφία θερμικά επηρεασμένης ζώνης χάλυβα AH36 (20x)

8.3 Μετρήσεις Μικροσκληρότητας

Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας έγιναν σε λειασμένη τομή της συγκόλλησης. Λόγω της ετεροειδούς συγκόλλησης, για να αποκαλυφθεί η δομή του κάθε υλικού, έπρεπε να γίνει προσβολή με διαφορετικό αντιδραστήριο για το κάθε υλικό. Έτσι, γίνανε μετρήσεις μικροσκληρότητας σε δύο διαφορετικά δοκίμια (εικόνα 8.29 και 8.30) – ένα για κάθε υλικό – και, κατόπιν, έγινε η σύνθεση των τιμών. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν παρουσιάζονται στον πίνακα 8.1 και στο σχήμα 8.1 που ακολουθούν. Οι μετρήσεις της μικροσκληρότητας στην τομή έγιναν ανά 0.5mm. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η σκληρότητα βρίσκεται σε αποδεκτά επίπεδα τιμών. **Σχετικά μεγαλύτερη σκληρότητα εμφανίζει η ζώνη τήξης** και ακολουθούν η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) του 316L, το μέταλλο βάσης 316L, το μέταλλο βάσης ΑΗ36 και, τέλος, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) του ΑΗ36.



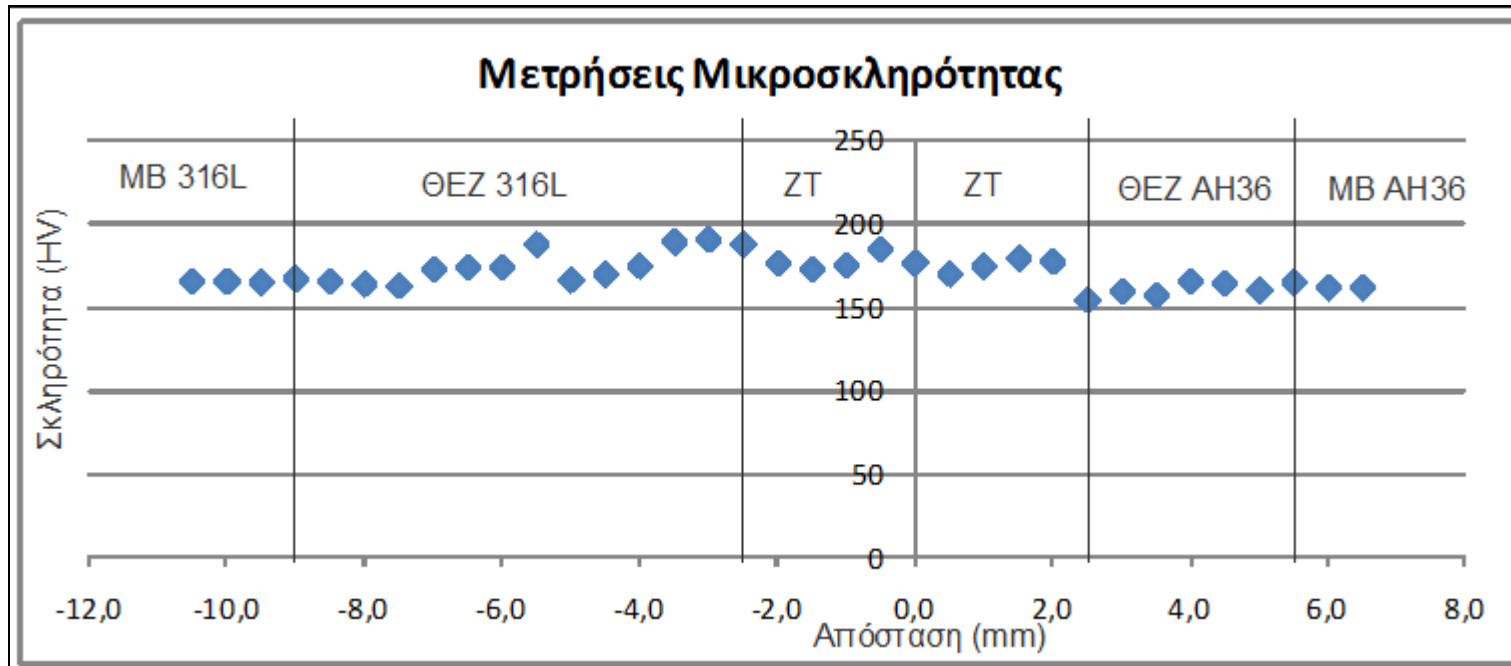
Εικόνα 8.29: Δοκίμιο ΑΗ36 για μέτρηση μικροσκληρότητας



Εικόνα 8.30: Δοκίμιο 316L για μέτρηση μικροσκληρότητας

Πίνακας 8.1: Μετρήσεις μικροσκληρότητας στις τρεις περιοχές της συγκόλλησης

Αριθμός Δοκιμής	Περιοχή - Σκληρότητα (HV ₃₀₀)				
	MB 316 L	ΘΕΖ	ΖΤ	ΘΕΖ	MB AH36
1	166.2	167.9	188.5	155.4	165.6
2	166.3	166.2	177.2	160.2	162.4
3	165.6	164.7	173.5	158.1	162.4
4		163.5	175.9	166.4	
5		173.3	185.5	165.2	
6		174.5	177.1	160.8	
7		174.7	170.7		
8		188.2	175.2		
9		167.0	180.0		
10		170.5	178.0		
11		175.4			
12		189.7			
13		191.2			
Μέσος Όρος	166.0	174.4	178.2	161.0	163.5



Σχήμα 8.1: Οι τιμές της μικροσκληρότητας στις τρεις περιοχές της συγκόλλησης

Πιο συγκεκριμένα από τις τιμές του πίνακα 8.1, προκύπτει ότι:

- Ο μέσος όρος της σκληρότητας του 316L είναι 166.0HV και η τυπική απόκλιση 0.3786
- Ο μέσος όρος της ΘΕΖ του 316L είναι 174.4HV και η τυπική απόκλιση 9.5805
- Ο μέσος όρος της ζώνης τήξης είναι 178.2HV και η τυπική απόκλιση 5.3488
- Ο μέσος όρος της ΘΕΖ του AH36 είναι 161.0HV και η τυπική απόκλιση 4.1773
- Ο μέσος όρος του AH36 είναι 163.5HV και η τυπική απόκλιση 1.8475
- Η σκληρότητα της ζώνης τήξης είναι μεγαλύτερη κατά 7.35% από τη σκληρότητα του μετάλλου βάσης 316L και 8.25% του μετάλλου βάσης AH36
- Η σκληρότητα της ζώνης τήξης είναι μεγαλύτερη κατά 2.18% από τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη του 316L και 10.68% από τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη του AH36
- Η σκληρότητα της θερμικά επηρεασμένη ζώνη του 316L είναι μεγαλύτερη κατά 5.06% από το μέταλλο βάσης του
- Η σκληρότητα του μετάλλου βάσης AH36 είναι μεγαλύτερη κατά 1.55% από τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη του
- Η διαφορά της σκληρότητας του ελάσματος, από τη μεγαλύτερη (178.2HV) στη μικρότερη (161.0HV), είναι της τάξεως του 10%
- Η απότομη μεταβολή της σκληρότητας από τη ζώνη τήξης στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη του AH36 δικαιολογείται από το μέταλλο προσθήκης που είναι 316L – Mo. Το συγκεκριμένο μέταλλο δεν είναι κατάλληλο για να προσδώσει ομοιογένεια μεταξύ του AH36 και του 316L
- Οι αποκλίσεις από τις αναμενόμενες τιμές για τον 316L (200HV) είναι 17% και για τον AH36 (180HV) είναι 9.2%.

Όσον αφορά την υψηλότερη σκληρότητα της ζώνης τήξης, σε σχέση με το μέταλλο βάσης, αυτή μπορεί να αποδοθεί στους μετασχηματισμούς φάσεων κατά τη συγκόλληση. Όμως, η αύξηση της σκληρότητας από το μέταλλο βάσης προς τη ζώνη τήξης είναι κάτι που παρατηρείται στις συγκολλήσεις ετεροειδών μετάλλων.

Επίσης, από τις μετρήσεις της μικροσκληρότητας, που πραγματοποιήθηκαν περίπου στο μέσον του πάχους του συγκολλημένου ελάσματος, προσδιορίστηκαν αναγωγικά: η ζώνη τήξης και οι θερμικά επηρεασμένες ζώνες των υλικών στην επιφάνεια του ελάσματος (βλ. σχήμα 7.6, κεφ.7). Ο παραπάνω προσδιορισμός των ζωνών δεν είναι ίσως ο βέλτιστος, όμως δεδομένων των συνθηκών προτιμήθηκε.

8.4 Πειραματικά Αποτελέσματα Ηλεκτροχημικών Μετρήσεων

Τα αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών μετρήσεων μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων, ελήφθησαν από το λογισμικό PowerCorr του εργαστηρίου και έπειτα έγινε η επεξεργασία τους. Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται πίνακες με τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων, καθώς και τα διαγράμματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων και τη μεταξύ τους σύγκριση. Τα αναλυτικά αποτελέσματα όλων των πειραμάτων παρατίθενται στο Παράρτημα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, η μέθοδος Γραμμικής Πόλωσης πραγματοποιήθηκε στις περιοχές:

- MB AH36 (θέσεις 4, 5, 6, 7)
- MB AH36 – ΘΕΖ AH36 – ΖΤ – ΘΕΖ 316L (θέσεις 3, 8, 11)
- ΘΕΖ 316L – MB 316L (θέσεις 2,9)
- MB 316L (θέσεις 1, 10)

Η μέθοδος Tafel πραγματοποιήθηκε στις περιοχές:

- MB AH36 (θέσεις 4, 5, 6, 7)
- MB AH36 – ΘΕΖ AH36 – ΖΤ – ΘΕΖ 316L (θέσεις 3, 8, 11)

Ενώ, η μέθοδος της Ανοδικής Πόλωσης πραγματοποιήθηκε στις περιοχές:

- MB AH36 – ΘΕΖ AH36 – ΖΤ – ΘΕΖ 316L (θέσεις 3, 8, 11)
- ΘΕΖ 316L – MB 316L (θέσεις 2,9)
- MB 316L (θέσεις 1, 10)

8.4.1 Αποτελέσματα Ηλεκτροχημικών Μετρήσεων στο Συγκολλημένο Έλασμα 316L – AH36 με Φορητό Κελί

Στους πίνακες που ακολουθούν (πίνακες 8.2 και 8.3) παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών μεθόδων στο συγκολλημένο έλασμα: της Γραμμικής Πόλωσης (Linear Polarization) και της Προεκβολής ευθειών Tafel (Tafel Plots), για κάθε μια από τις περιοχές της συγκόλλησης: για το μέταλλο βάσης, τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και τη ζώνη τήξης. Για τη μέθοδο της Ανοδικής Πόλωσης (Anodic Polarization) θα προκύψουν ποιοτικά και όχι ποσοτικά συμπεράσματα.

Πίνακας 8.2: Τιμές ηλεκτροχημικών παραμέτρων – Γραμμική Πόλωση - Έλασμα

Μέθοδος	Δοκίμιο		Πείραμα	Cor. Rate (mpy)	Rp (kOhms)	E (mV)	Icorr (μA)
LINEAR - AH36	5	MB	1	162.300	121.878	-681.809	178.400
			2	165.900	119.244	-685.074	182.300
			3	165.900	119.248	-688.928	182.300
			MO	164.700	120.123	-685.270	181.000
	6	MB	1	143.300	137.994	-698.623	157.500
			2	146.300	135.243	-701.742	160.700
			3	146.100	135.358	-704.171	160.600
			MO	145.233	136.198	-701.512	159.600
		MO		154.967	128.161	-693.391	170.300
	4	MB	1	125.400	157.710	-691.671	137.800
			2	141.600	139.666	-694.449	155.700
			3	129.700	152.473	-700.906	142.600
			MO	132.233	149.950	-695.675	145.367
	7	MB	1	147.700	133.930	-685.265	162.300
			2	141.500	139.817	-696.058	155.500
			3	136.000	145.395	-701.613	149.500
			MO	141.733	139.714	-694.312	155.767
		MO		136.983	144.832	-694.994	150.567
		MO		145.975	136.4963	-694.192	160.43333

Μέθοδος	Δοκίμιο		Πείραμα	Cor. Rate (mpy)	Rp (kOhms)	E (mV)	Icorr (μA)
LINEAR - ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ	3	MB AH36 - ΘΕΖ AH36 - ΖΤ - ΘΕΖ 316L	1	5.652	125.210	-615.453	173.600
			2	5.196	136.185	-619.094	159.600
			3	4.811	147.092	-619.049	147.800
			MO	5.220	136.162	-617.865	160.333
	8	MB AH36 - ΘΕΖ AH36 - ΖΤ - ΘΕΖ 316L	1	6.272	112.819	-626.590	192.700
			2	5.878	120.384	-630.635	180.600
			3	5.070	139.581	-637.058	155.700
			MO	5.740	124.261	-631.428	176.333
	11	MB AH36 - ΘΕΖ AH36 - ΖΤ - ΘΕΖ 316L	1	6.752	104.807	-624.696	207.400
			2	6.504	108.802	-625.875	199.800
			3	6.946	101.877	-627.948	213.400
			MO	6.734	105.162	-626.173	206.867
		MO		5.898	121.862	-625.155	181.178

Μέθοδος	Δοκίμιο		Cor. Rate (mpy)	Rp (kOhms)	E (mV)	Icorr (μA)
LINEAR - 316L	1	MB	0.0167	42304.227	-70.911	0.582
	10	MB	0.0166	42663.511	-74.480	0.510
	MO		0.0167	42483.869	-72.696	0.546
	2	MB - ΘΕΖ	0.1196	5915.747	-200.569	3.675
	9	MB - ΘΕΖ	0.0480	14745.118	-228.064	1.474
	MO		0.0838	10330.433	-214.317	2.575

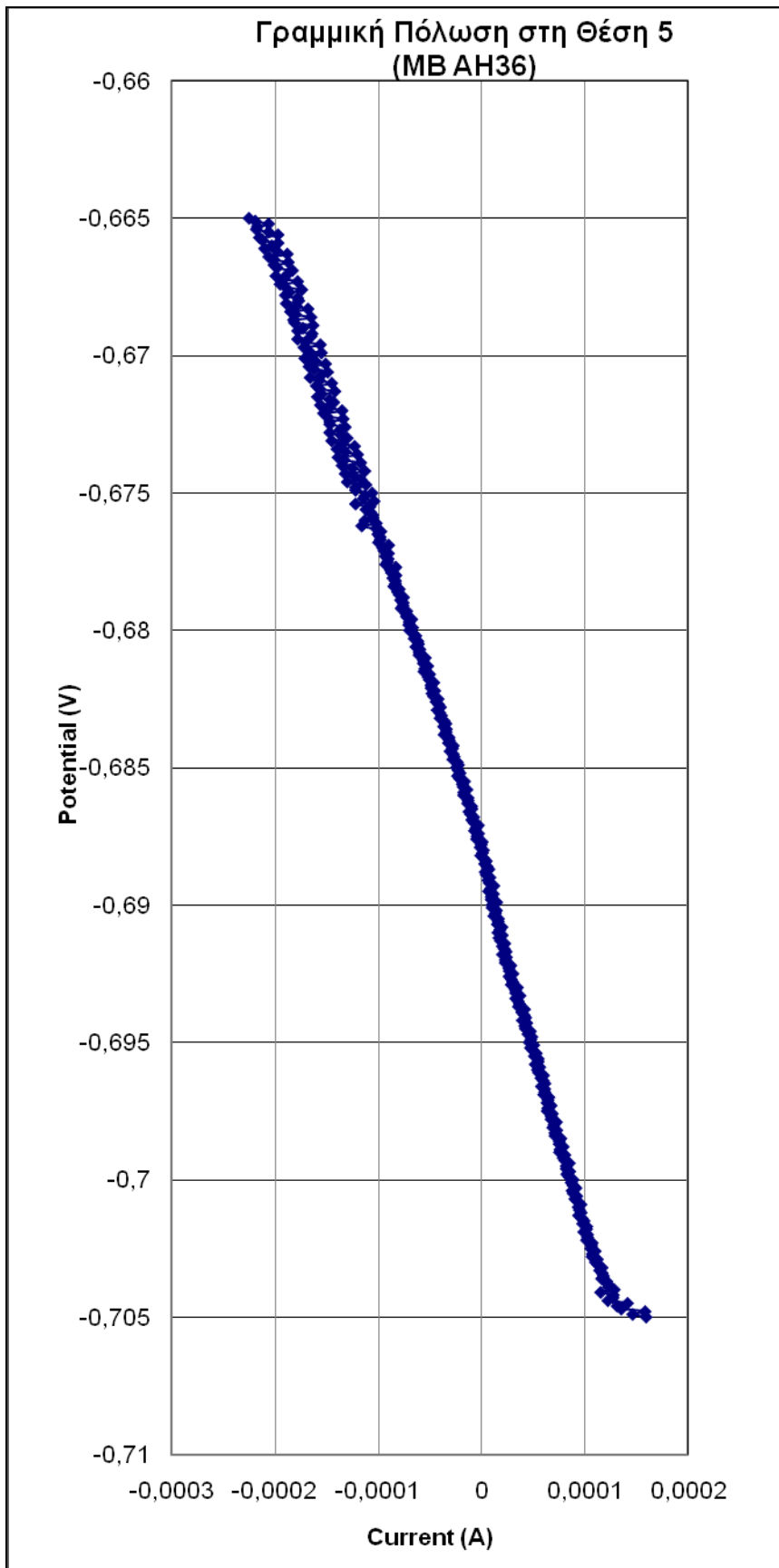
Πίνακας 8.3: Τιμές ηλεκτροχημικών παραμέτρων - Πόλωση Tafel - Έλασμα

Μέθοδος	Δοκίμιο		Cor. Rate (mpy)	E (mV)	Icorr (μA)
TAFEL - AH36	5	MB	213.300	-703.992	234.400
	6	MB	172.400	-727.489	189.500
	4	MB	197.200	-707.080	216.700
	7	MB	235.400	-704.083	258.700
	MO		204.575	-710.661	224.825

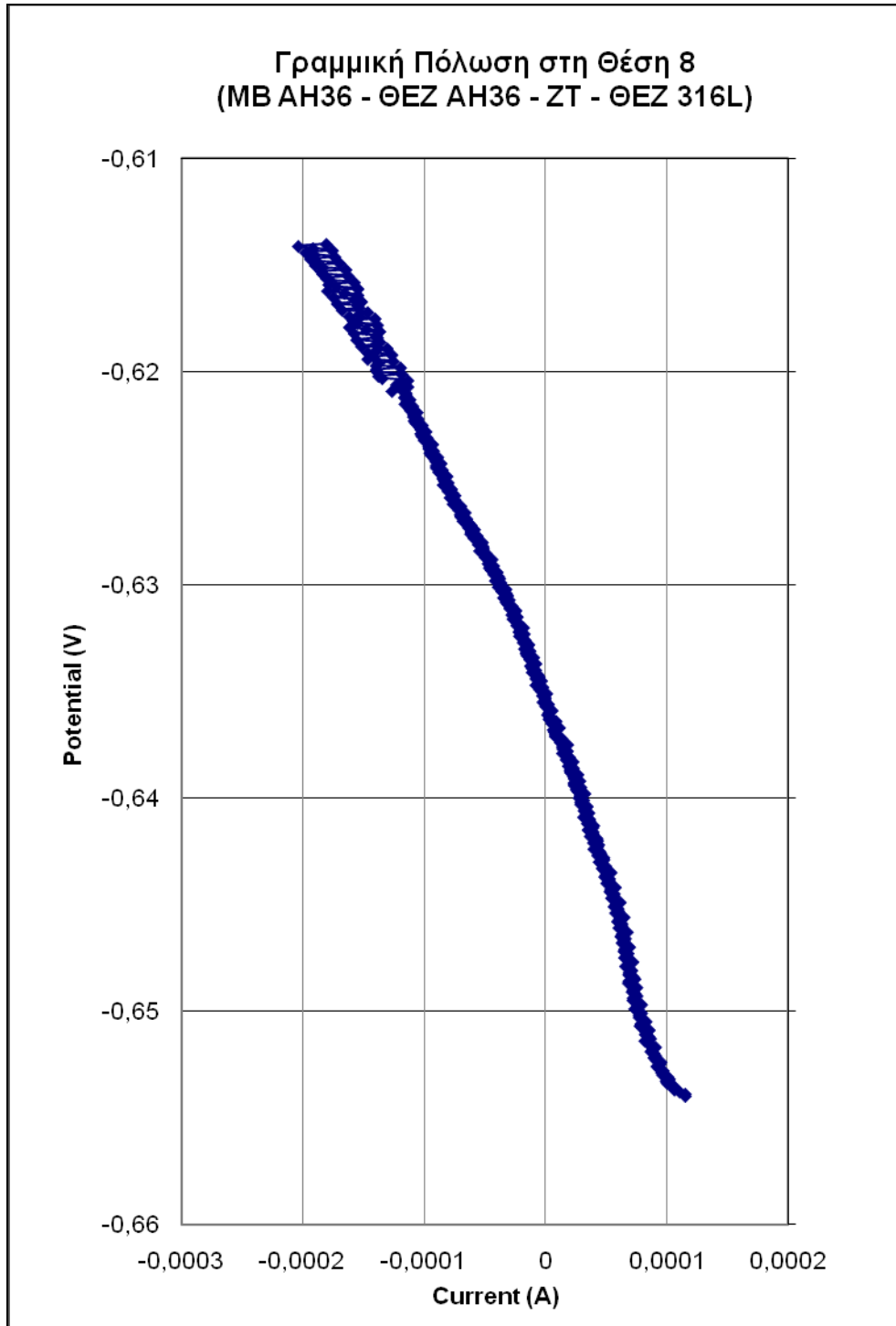
Μέθοδος	Δοκίμιο		Cor. Rate (mpy)	E (mV)	Icorr (μA)
TAFEL - ΣΥΤΚΟΜΗΣΗ	3	ZT	31.07	-659.280	34.150
	8	ZT	53.280	-639.233	58.560
	11	ZT	24.860	-656.256	27.320
	MO		36.403	-651.590	40.010

Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος εργασίας και η μεθοδολογία επεξεργασίας των διαφόρων καμπυλών παρατίθενται, στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των τριών μεθόδων για κάθε ζώνη. Στα σχήματα που ακολουθούν (Σχ. 8.2 – 8.10) παρουσιάζονται, δειγματοληπτικά, οι καμπύλες κάθε μεθόδου, ανάλογα με τη ζώνη μέτρησης.

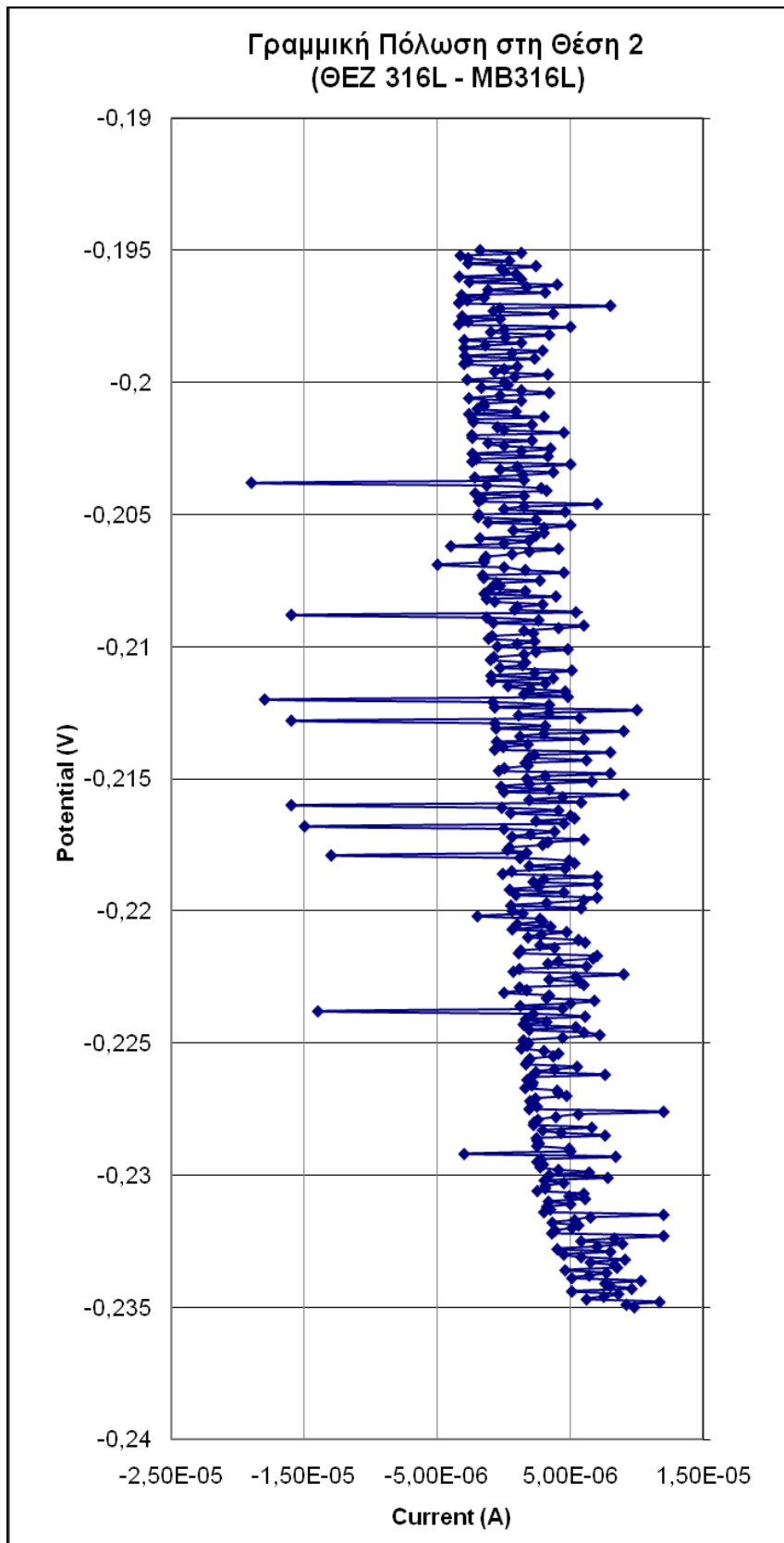
Να σημειωθεί ότι, στην περίπτωση της γραμμικής πόλωσης, η κατά IUPAC (ευρωπαϊκή) σύμβαση λαμβάνει τα ανοδικά ρεύματα ως θετικά και τα καθοδικά ως αρνητικά. Όμως, το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ακολουθεί την αμερικάνικη σύμβαση, σύμφωνα με την οποία τα ρεύματα συμβολίζονται αντίστροφα, δηλαδή η άνοδος αντιστοιχεί σε αρνητικά ρεύματα και η κάθοδος σε θετικά.



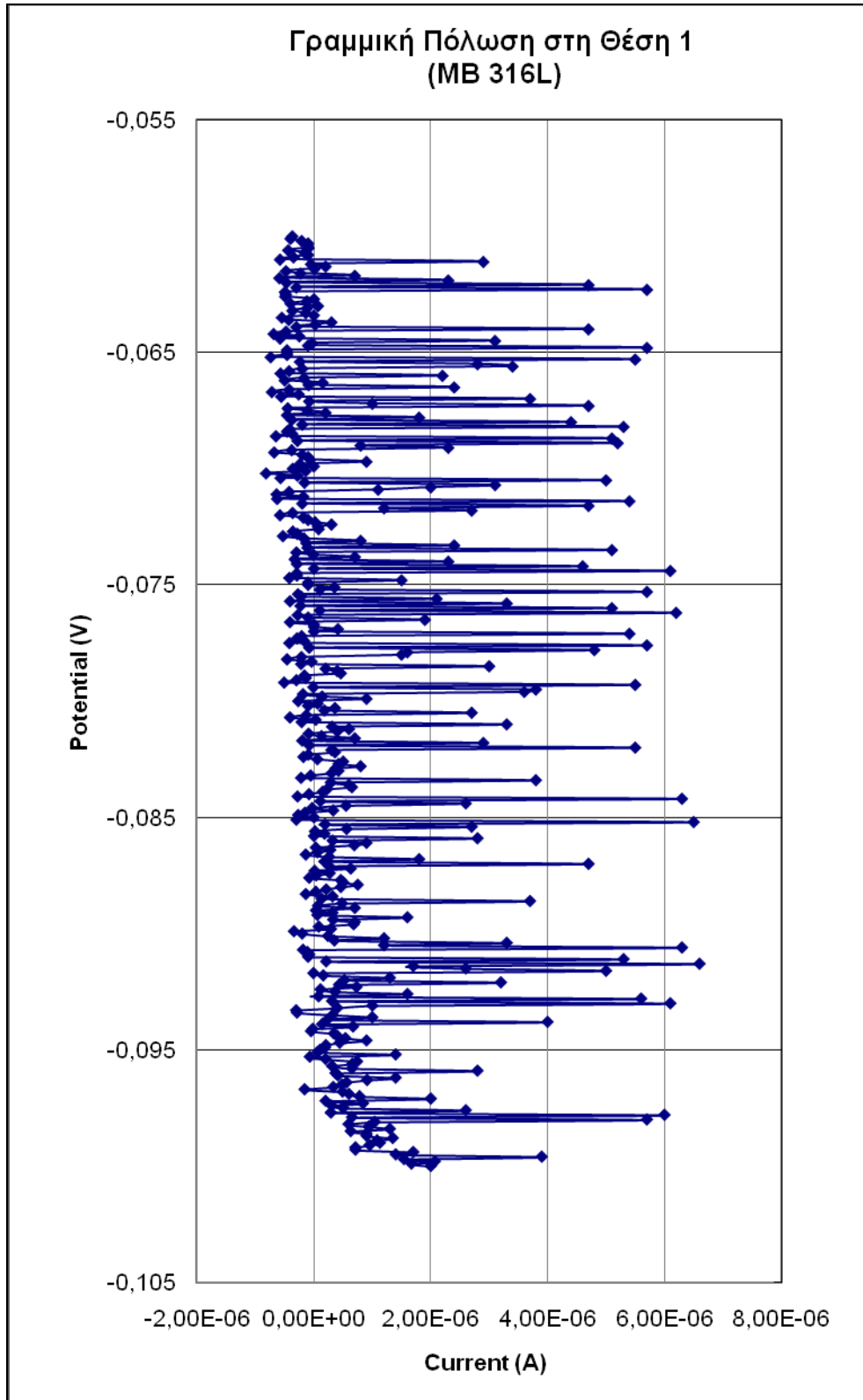
Σχήμα 8.2: Καμπύλη γραμμικής πόλωσης στη θέση 5 (MB AH36) (φορητό κελί)



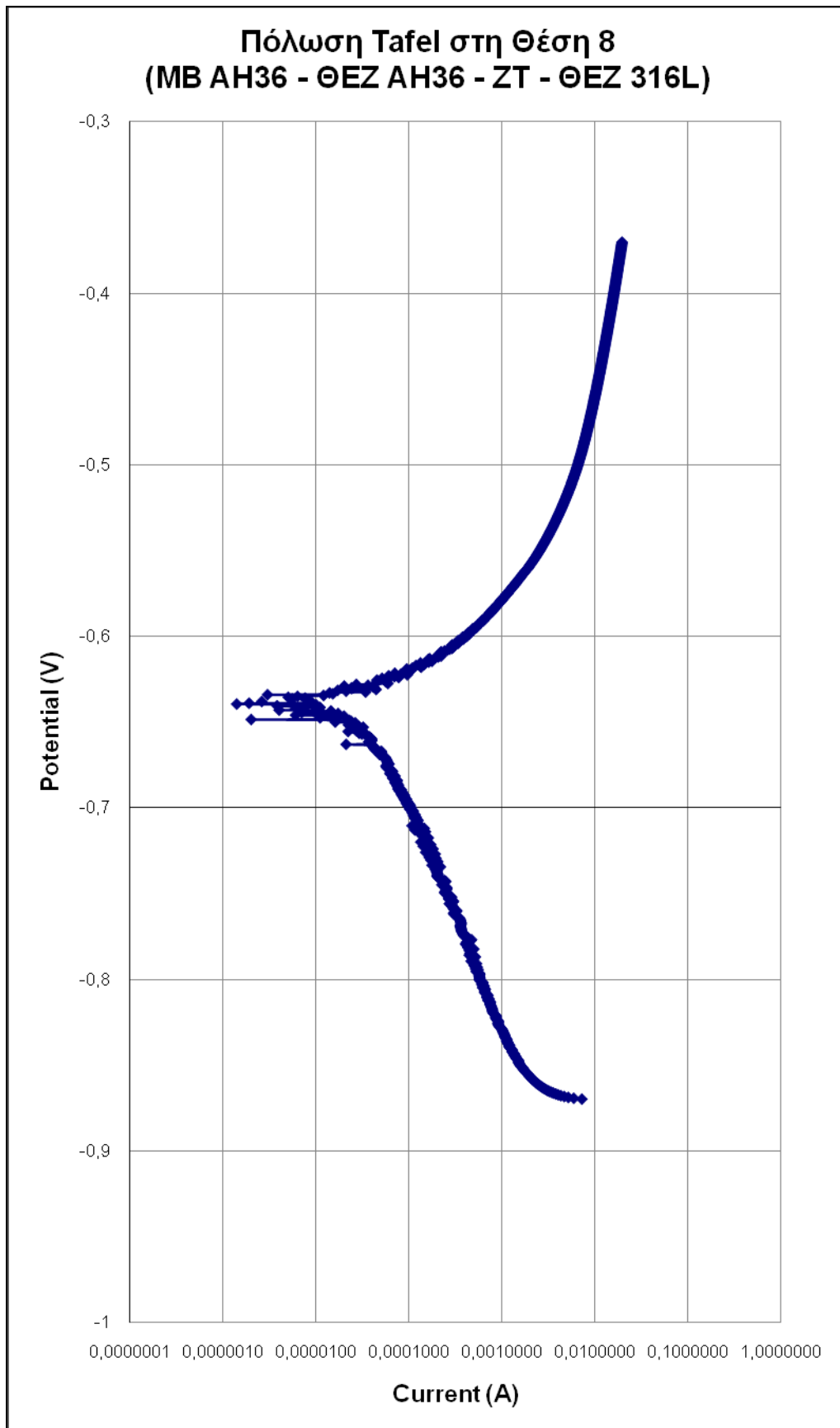
Σχήμα 8.3: Καμπύλη γραμμικής πόλωσης στη θέση 8 (MB AH36 – ΘΕΖ ΑΗ36 – ΖΤ – ΘΕΖ 316L) (φορητό κελί)



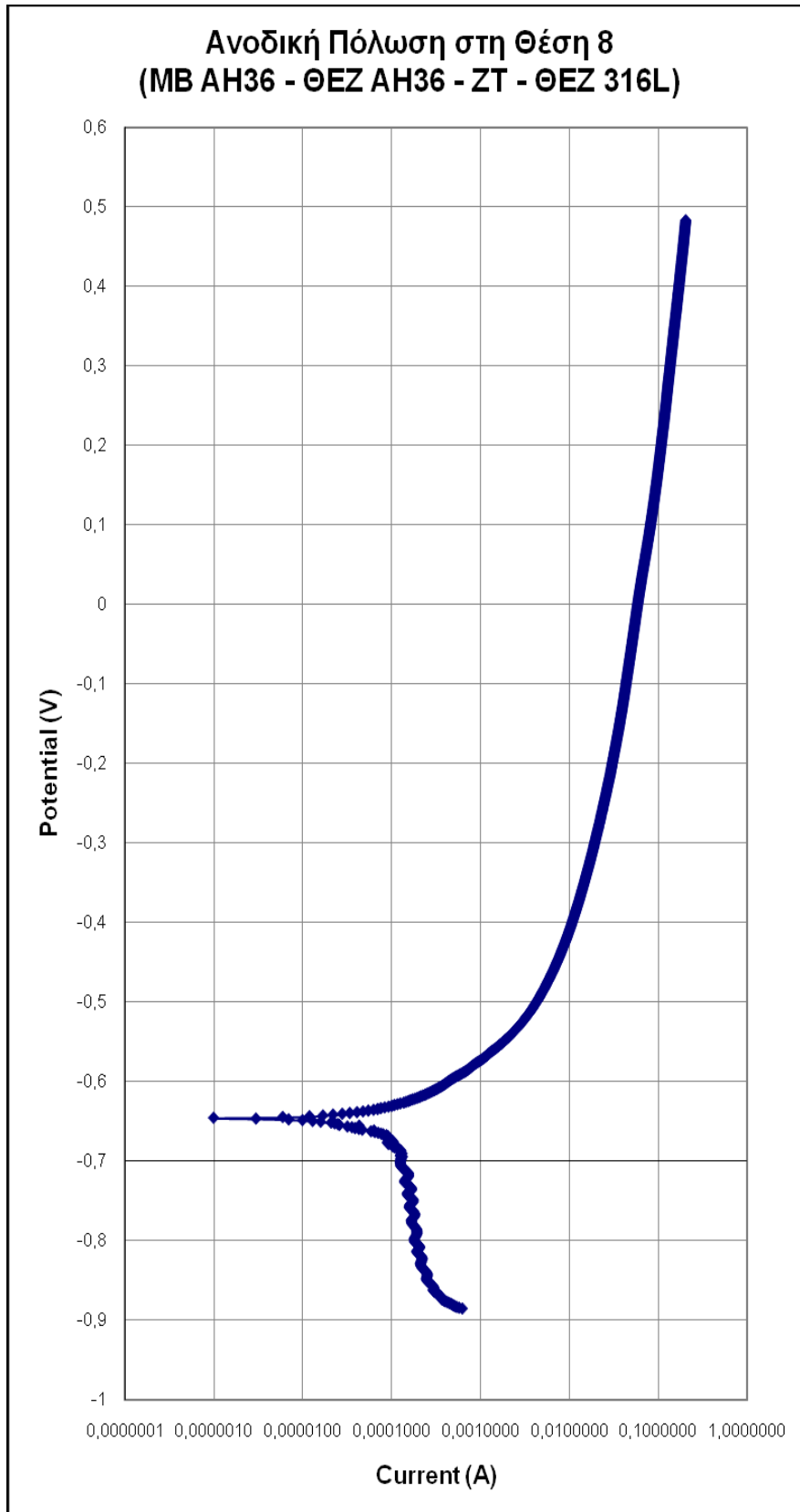
Σχήμα 8.4: Καμπύλη γραμμικής πόλωσης στη θέση 2 (ΘΕΖ 316L – MB 316L)
(φορητό κελί)



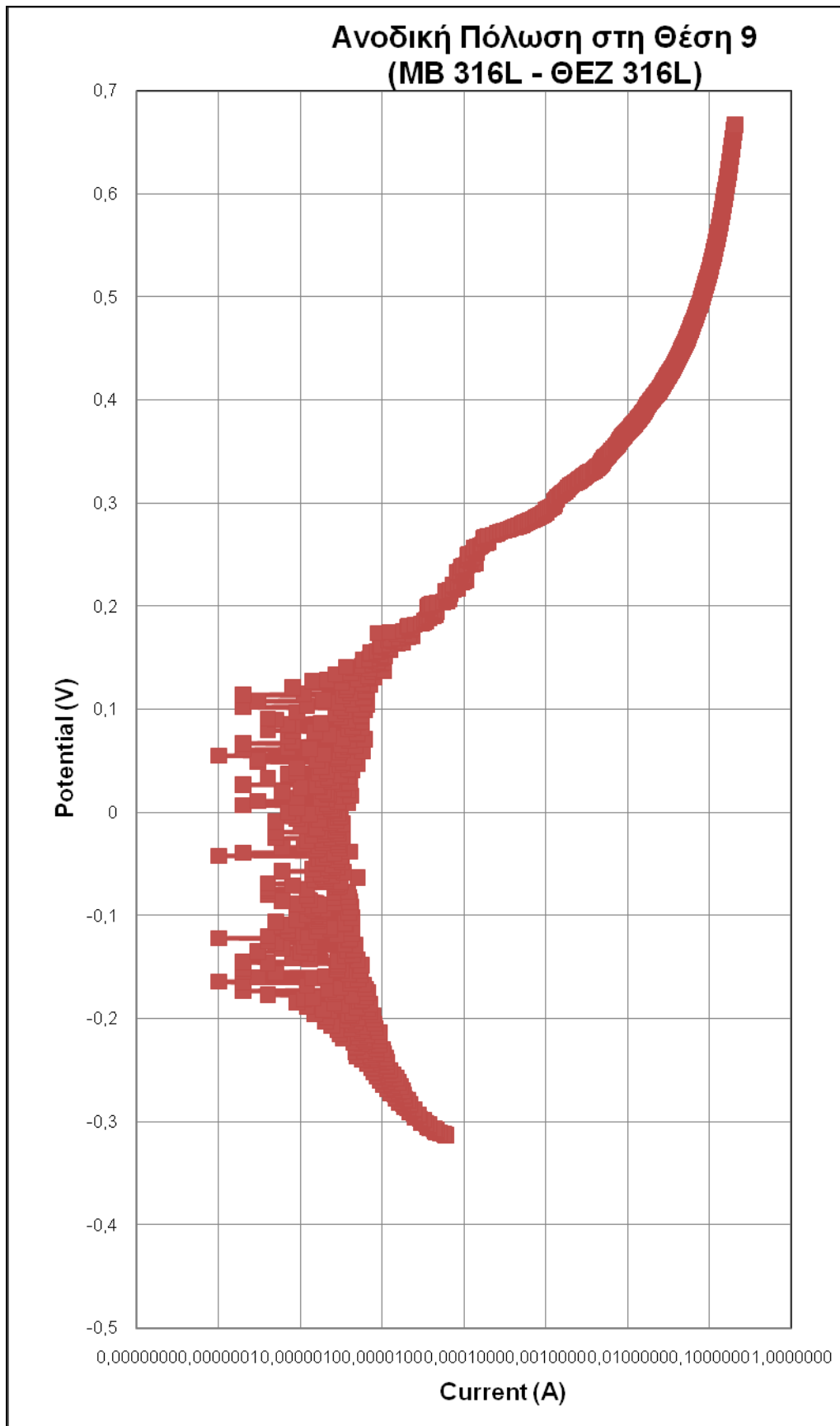
Σχήμα 8.5: Καμπύλη γραμμικής πόλωσης στη θέση 1 (MB 316L) (φορητό κελί)



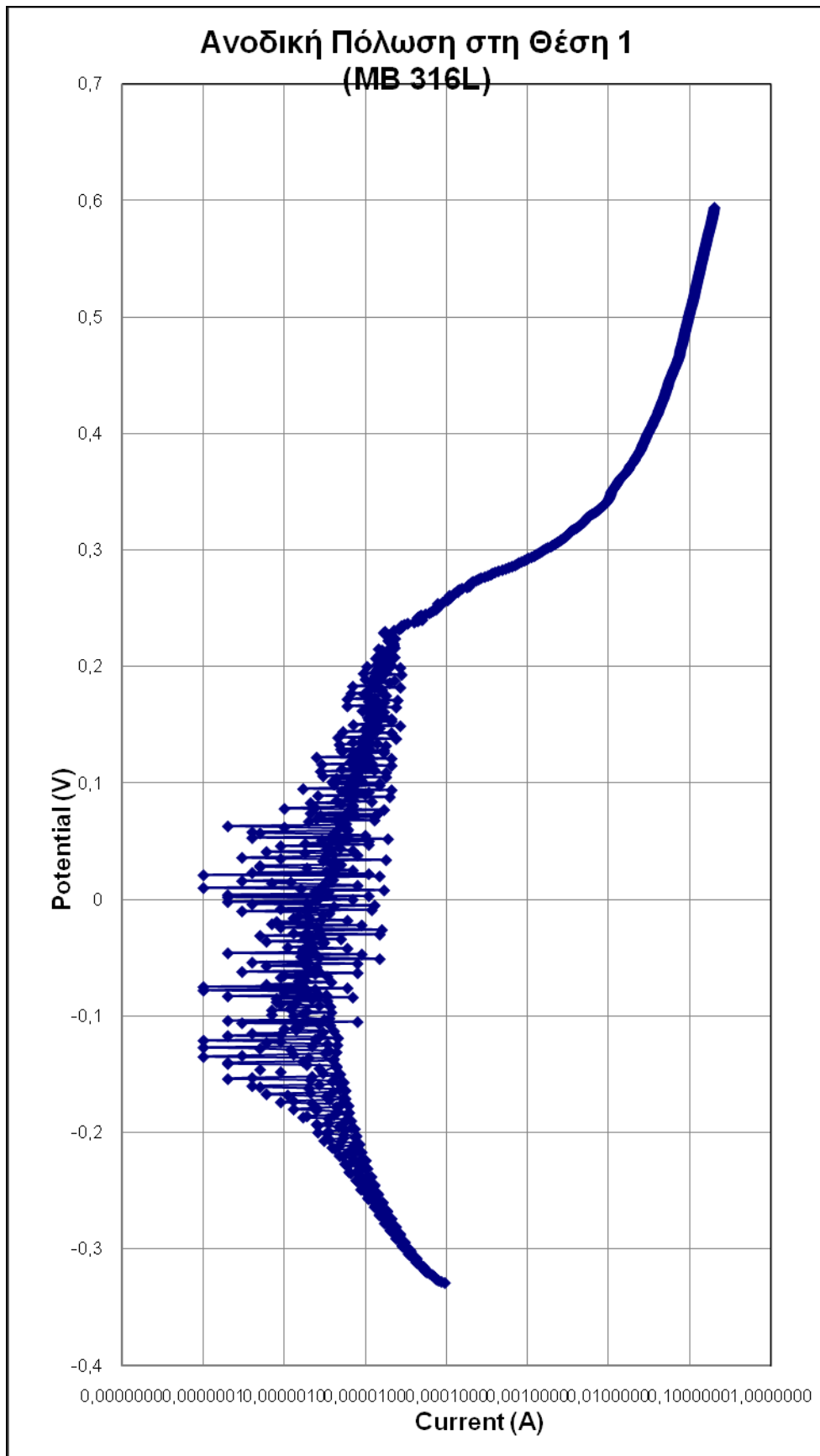
Σχήμα 8.7: Καμπύλη πόλωσης Tafel στη θέση 8 (MB AH36 – ΘΕΖ AH36 – ZT – ΘΕΖ 316L) (φορητό κελί)



Σχήμα 8.8: Καμπύλη ανοδικής πόλωσης στη θέση 8 (MB AH36 – ΘΕΖ ΑΗ36 – ΖΤ – ΘΕΖ 316L) (φορητό κελί)



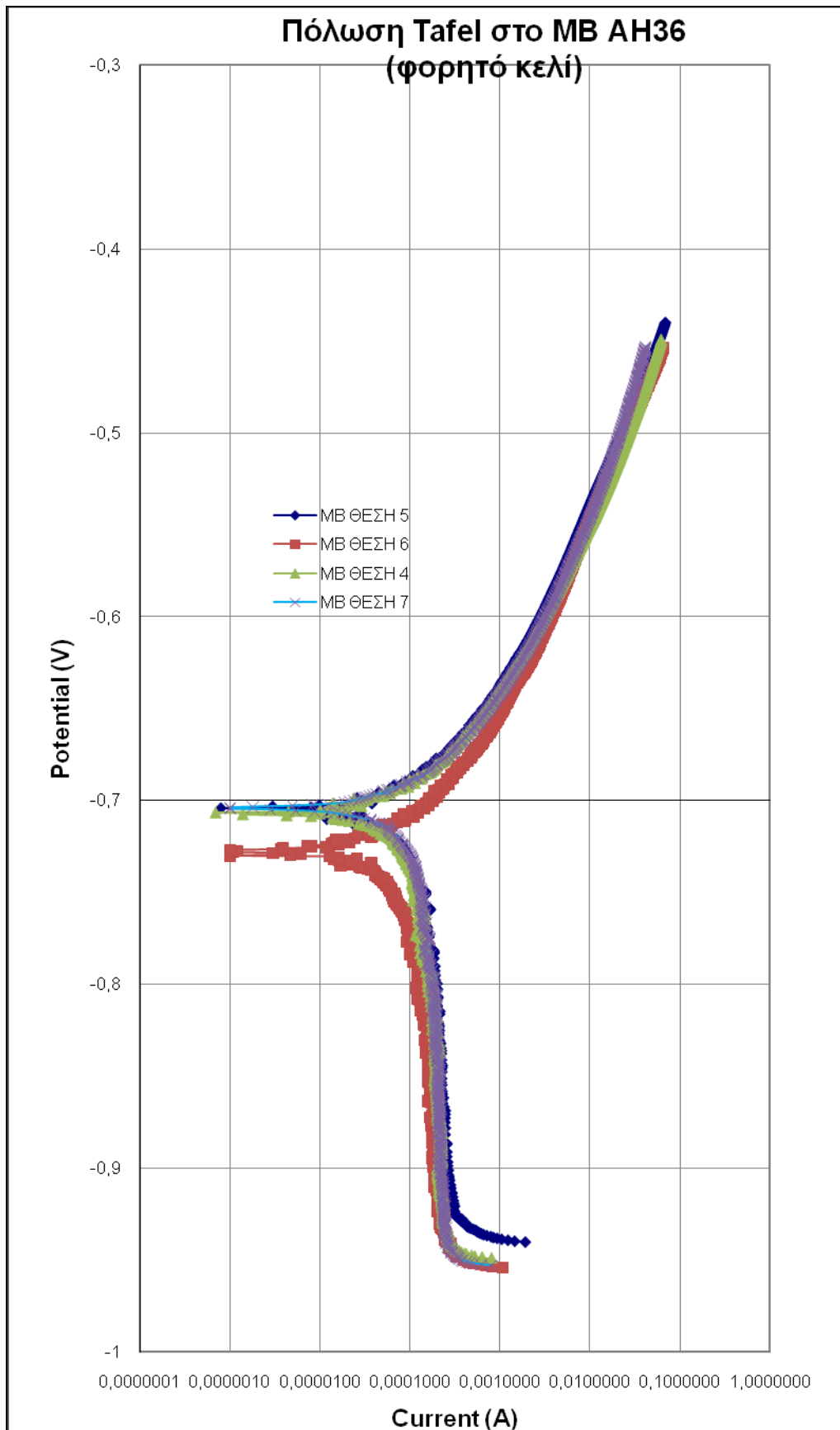
Σχήμα 8.9: Καμπύλη ανοδικής πόλωσης στη θέση 9 (ΘΕΖ 316L – MB 316L)
(φορητό κελί)



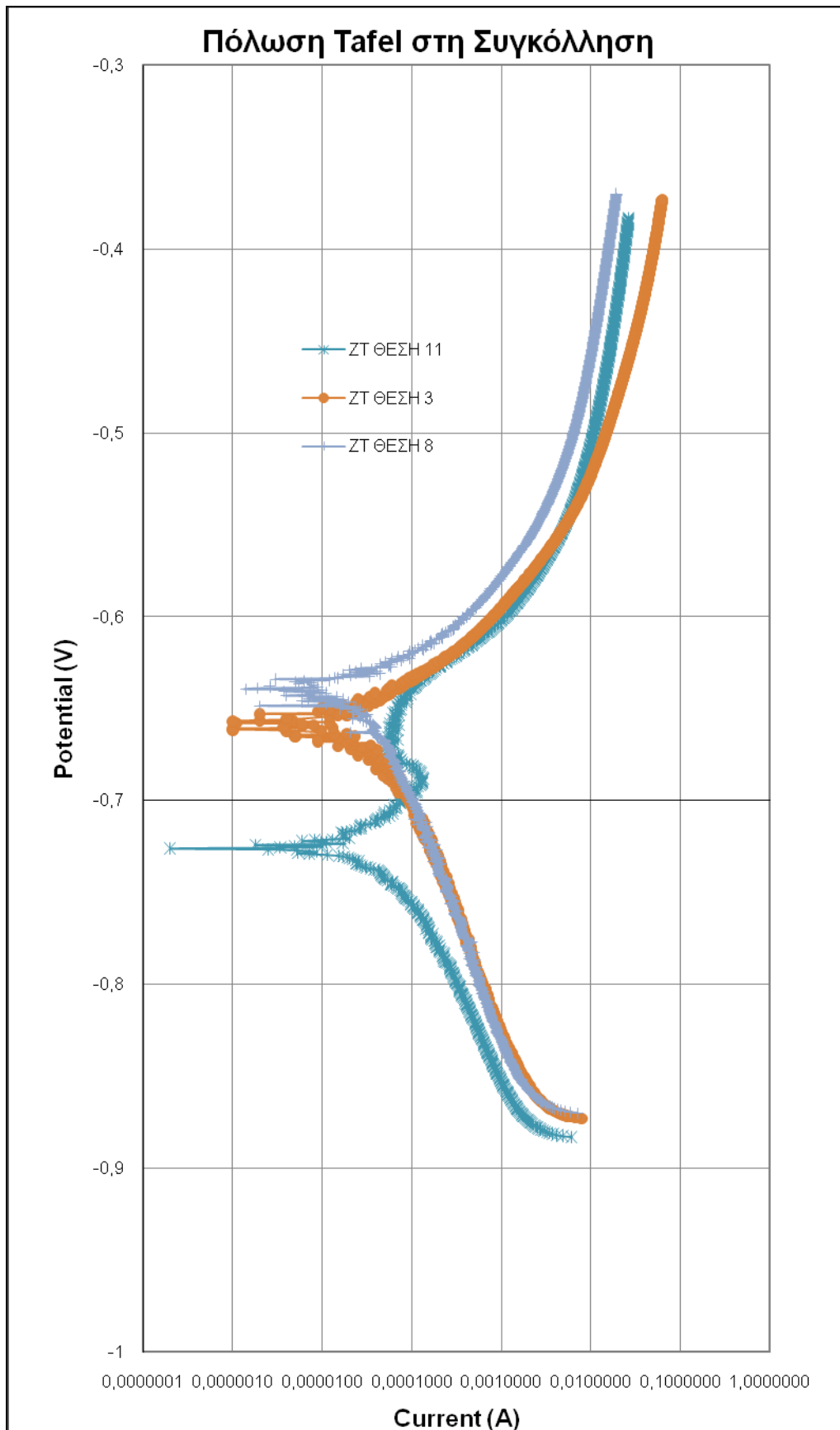
Σχήμα 8.10: Καμπύλη ανοδικής πόλωσης στη θέση 1 (MB 316L) (φορητό κελί)

Στα σχήματα 8.11, 8.12 και 8.14 έως 8.16 απεικονίζονται όλες οι καμπύλες της Πόλωσης Tafel και της Ανοδικής Πόλωσης για κάθε περιοχή της συγκόλλησης ξεχωριστά. Ενώ στα σχήματα 8.13 και 8.17 παρουσιάζονται όλες οι καμπύλες που προκύπτουν από την κάθε μέθοδο.

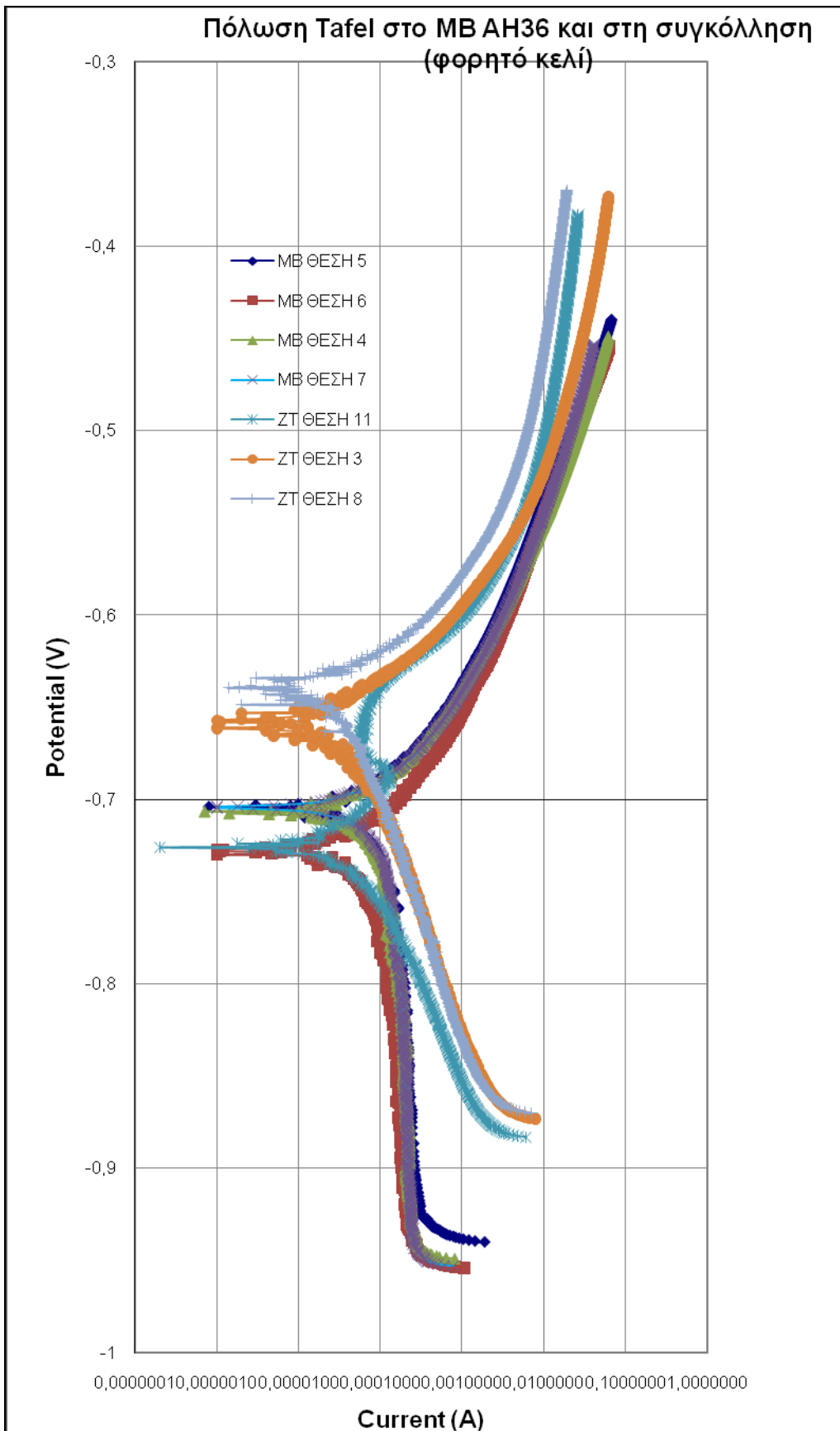
Όσον αφορά τη μέθοδο της Γραμμικής Πόλωσης, δεν πραγματοποιήθηκε απεικόνιση όλων των καμπυλών στο ίδιο γράφημα, διότι η μέθοδος ήταν πολύ γρήγορη (~10min) και τα αποτελέσματά της δεν ανταποκρίνονται σε τιμές ρεύματος.



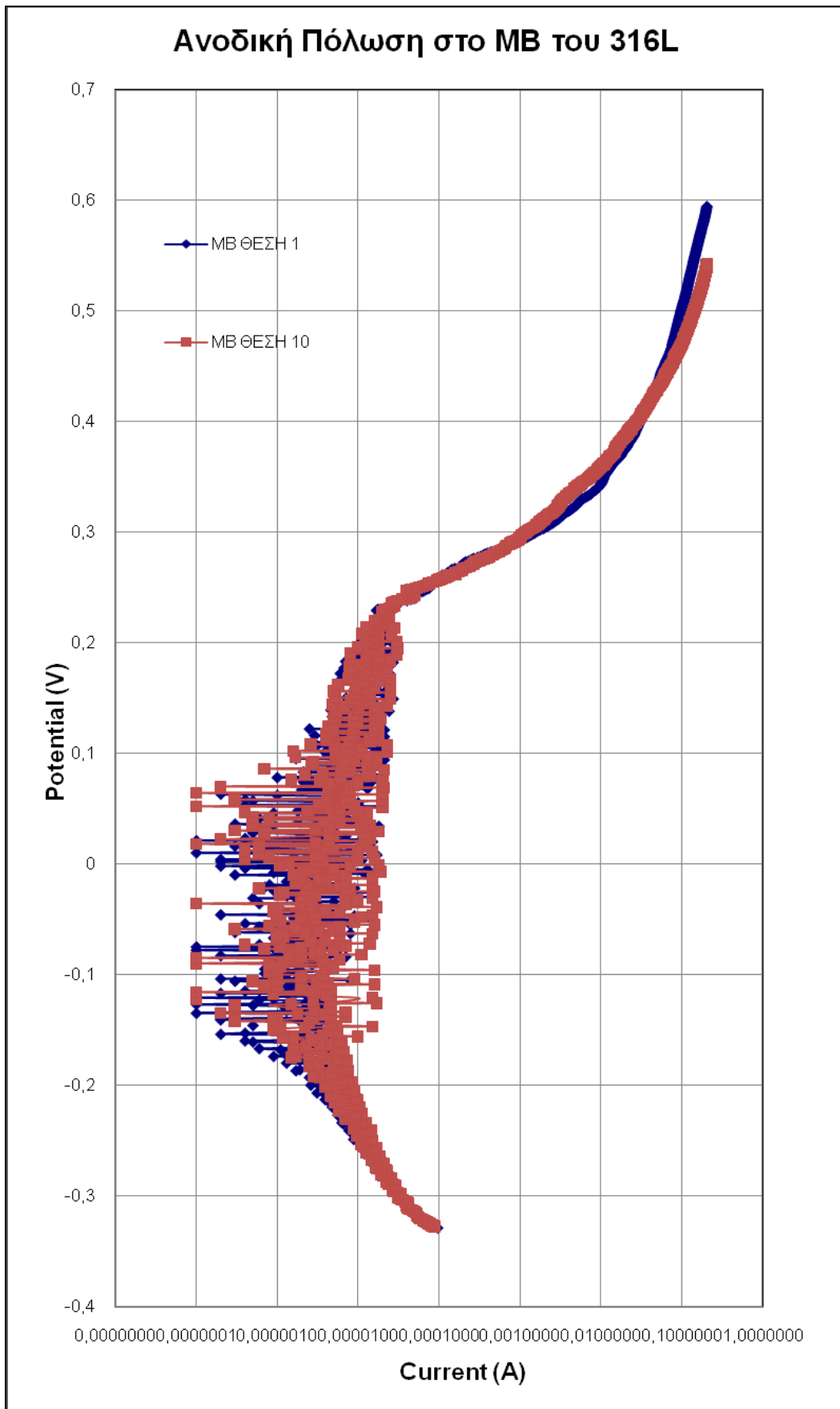
Σχήμα 8.11: Καμπύλες πόλωσης Tafel στο MB AH36 (φορητό κελί)



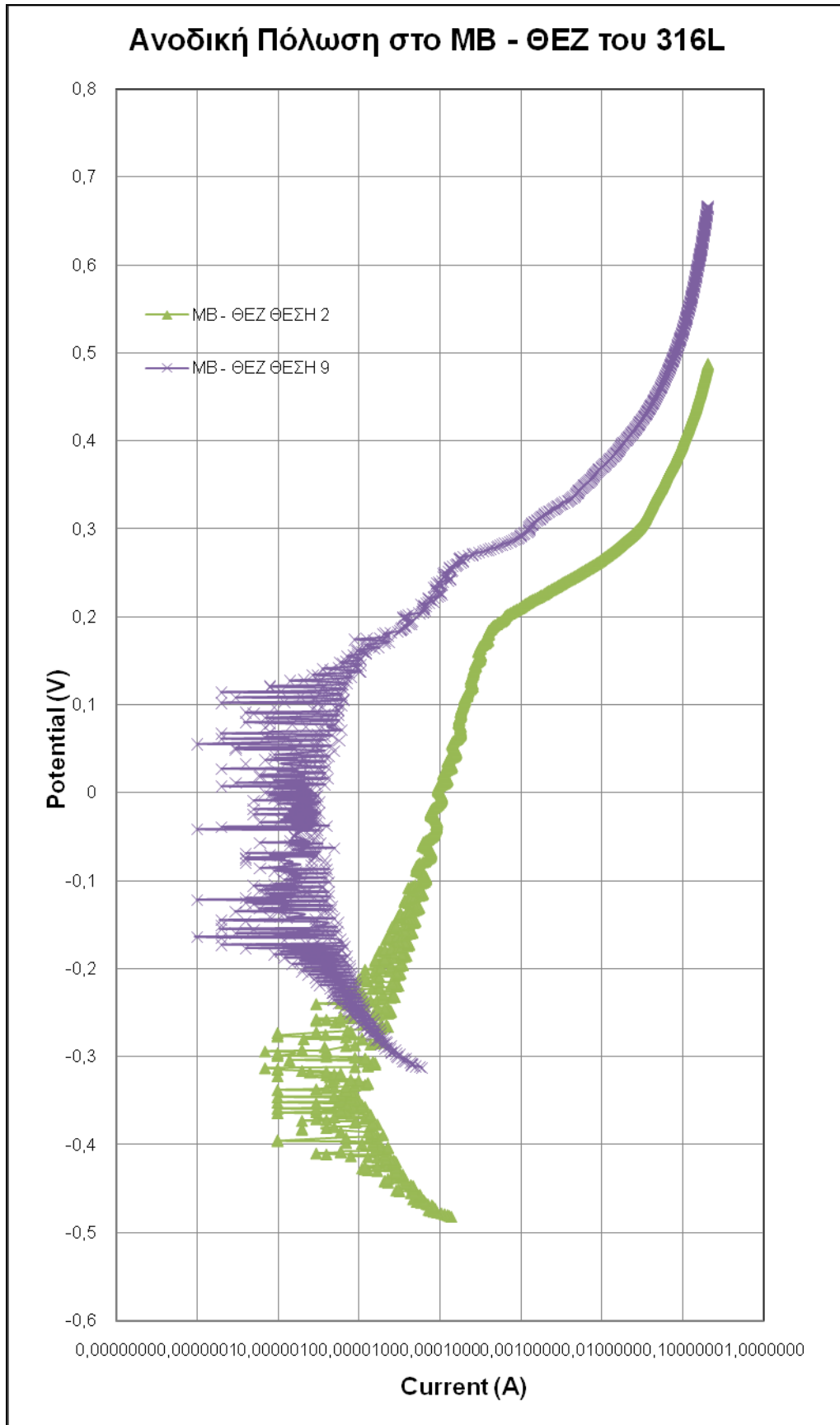
Σχήμα 8.12: Καμπύλες πόλωσης Tafel στην περιοχή της συγκόλλησης (φορητό κελί)



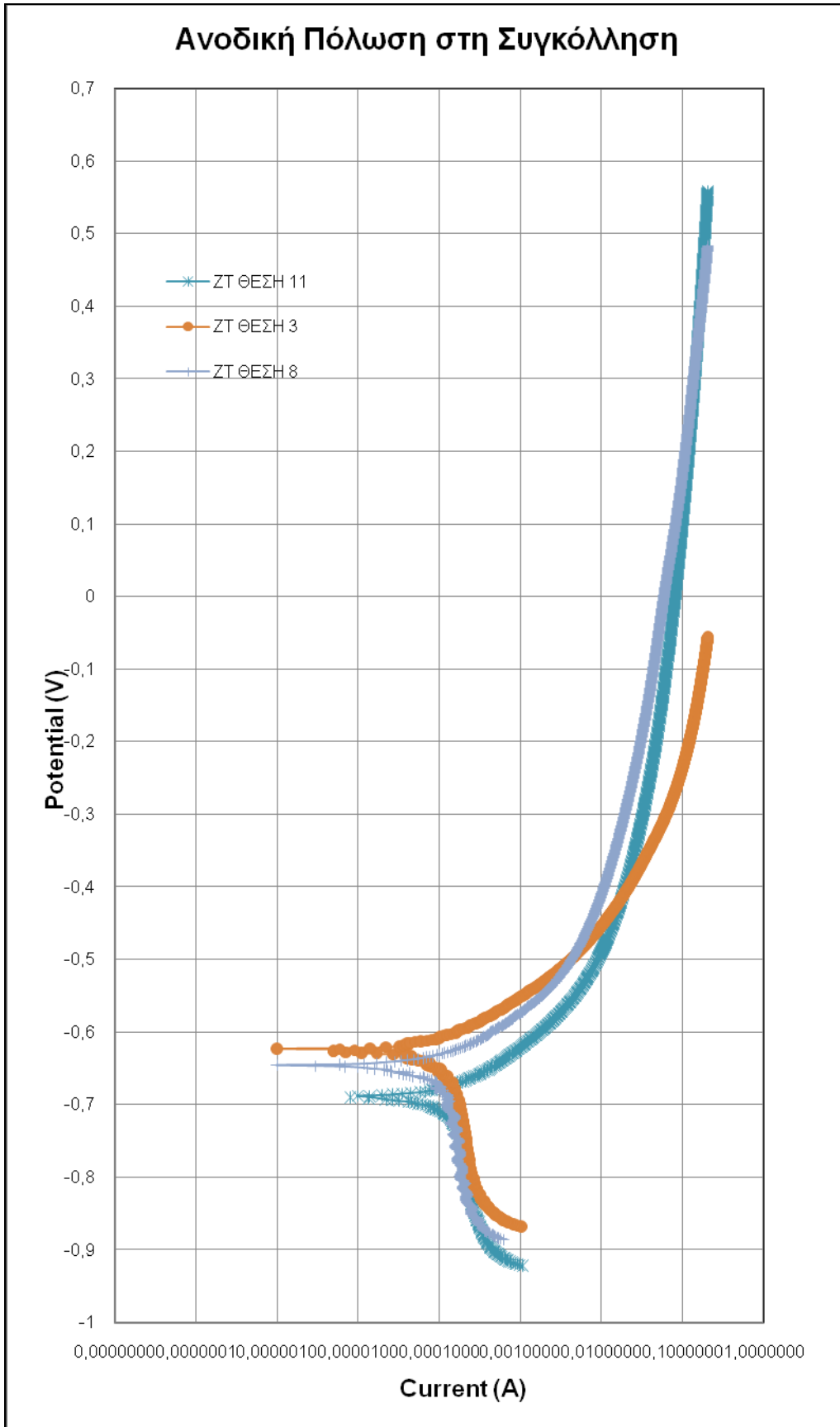
Σχήμα 8.13: Καμπύλες πόλωσης Tafel στο MB AH36 και στην περιοχή της συγκόλλησης (φορητό κελί)



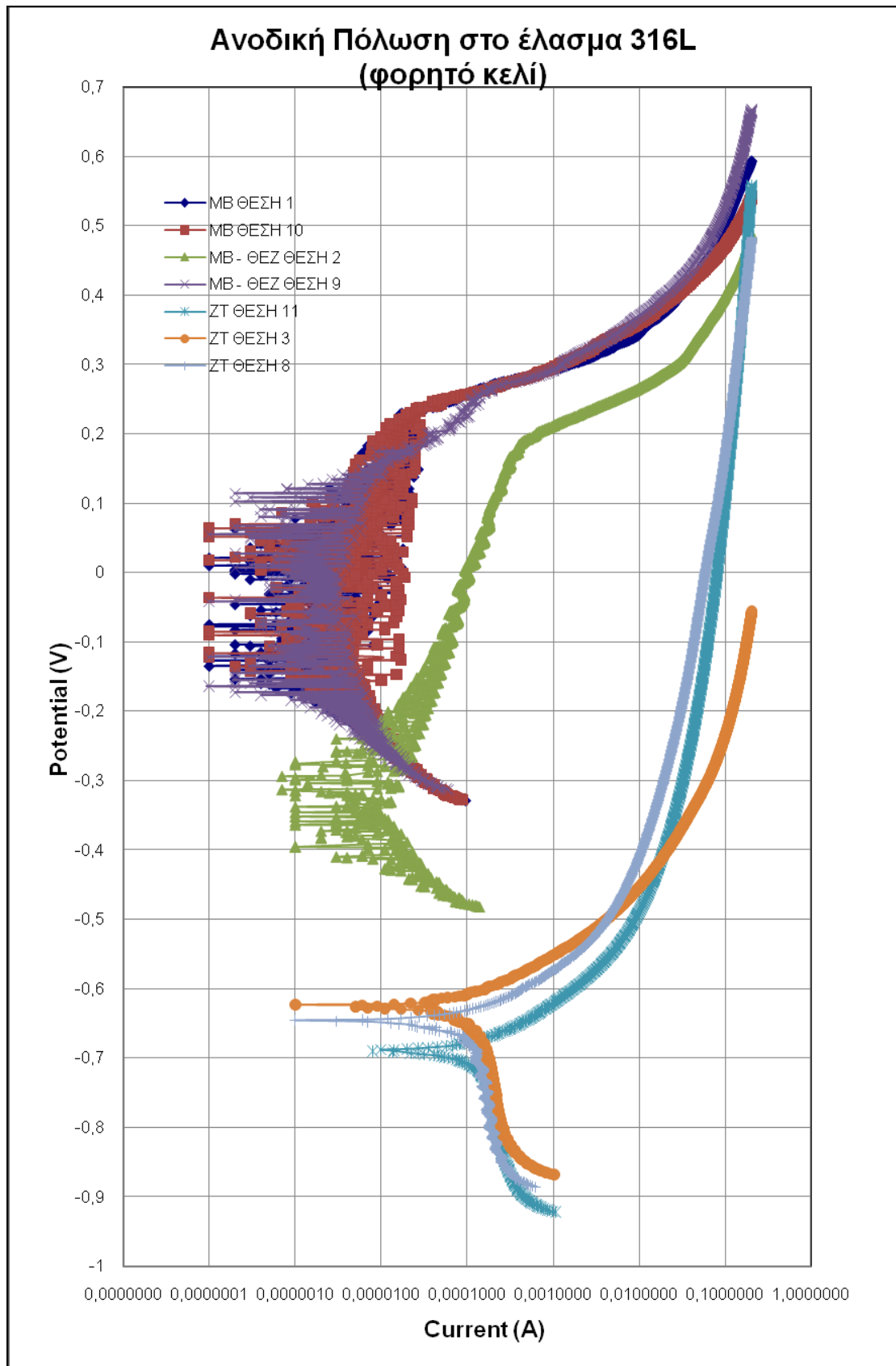
Σχήμα 8.14: Καμπύλες ανοδικής πόλωσης στο MB 316L (φορητό κελί)



Σχήμα 8.15: Καμπύλες ανοδικής πόλωσης στο MB – ΘΕΖ του 316L (φορητό κελί)



Σχήμα 8.16: Καμπύλες ανοδικής πόλωσης στην περιοχή της συγκόλλησης (φορητό κελί)



Σχήμα 8.17: Καμπύλες ανοδικής πόλωσης για τον 316L και τη συγκόλληση (φορητό κελί)

8.4.2 Αποτελέσματα Ηλεκτροχημικών Μετρήσεων στο Συγκολλημένο Έλασμα 316L – ΑΗ36 με Flat Cell

Στους πίνακες που ακολουθούν (πίνακες 8.4 και 8.5) παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών μεθόδων στο κελί: της Γραμμικής Πόλωσης (Linear Polarization) και της Προεκβολής ευθειών Tafel (Tafel Plots), για κάθε μια από τις περιοχές της συγκόλλησης: για το μέταλλο βάσης, τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και τη ζώνη τήξης. Για τη μέθοδο της Ανοδικής Πόλωσης (Anodic Polarization) θα προκύψουν ποιοτικά και όχι ποσοτικά συμπεράσματα.

Πίνακας 8.4: Τιμές ηλεκτροχημικών παραμέτρων για τη μέθοδο της Γραμμικής Πόλωσης στο Κελί

Μέθοδος	Δοκίμιο	Πείραμα	Cor. Rate (mpy)	Rp (kOhms)	E (mV)	Icorr (μA)	
LINEAR - ΑΗ36	5	MB	1	24.920	793.924	-732.765	27.380
			2	25.460	777.078	-733.743	27.980
			3	25.290	782.240	-734.488	27.790
			MO	25.223	784.414	-733.665	27.717
	6	MB	1	2.368	8354.624	-742.701	2.602
			2	2.487	7952.270	-737.092	2.734
			3	5.154	3838.200	-727.469	5.664
			MO	3.336	6715.031	-735.754	3.667
		MO		14.280	3749.723	-734.710	15.692
	4	MB	1	9.532	2075.225	-724.682	10.480
			2	10.330	1914.473	-725.894	11.360
			3	9.645	2050.952	-731.180	10.620
			MO	9.836	2013.550	-727.252	10.820
	7	MB	1	14.580	1356.979	-742.812	16.020
			2	12.090	1636.647	-747.032	13.280
			3	11.490	1722.037	-748.428	12.600
			MO	12.720	1571.888	-746.091	13.967
		MO		11.278	1792.719	-736.671	12.393
		MO		12.778833	2771.22075	-735.691	14.0425

Μέθοδος	Δοκίμιο		Πείραμα	Cor. Rate (mpy)	Rp (kOhms)	E (mV)	Icorr (μA)	
LINEAR - ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ	3	MB	1	0.168	4206.146	-692.895	5.168	
		ΑΗ36 - ΘΕΖ	2	0.166	4266.717	-695.717	5.095	
		ΑΗ36 - ΖΤ - ΘΕΖ	3	0.159	4457.647	-699.088	4.877	
		316L	MO	0.164	4310.170	-695.900	5.047	
	8	MB	1	0.138	5137.555	-703.486	4.231	
		ΑΗ36 - ΘΕΖ	2	0.137	5178.267	-704.581	4.198	
		ΑΗ36 - ΖΤ - ΘΕΖ	3	0.128	5527.815	-706.551	3.933	
		316L	MO	0.134	5281.212	-704.873	4.121	
	11	MB	1	0.000	8982711.748	1211.541	0.002	
		ΑΗ36 - ΘΕΖ	2	0.015	607493.360	-191.769	0.036	
		ΑΗ36 - ΖΤ - ΘΕΖ	3	0.025	362647.159	-219.466	0.060	
		316L	MO	0.013	3317617.422	266.769	0.033	
		MO			0.104	4795.691	-700.386	4.584

Μέθοδος	Δοκίμιο		Cor. Rate (mpy)	Rp (kOhms)	E (mV)	Icorr (μA)
LINEAR - 316L	1	MB	0.000	1777574.022	189.207	0.012
	10	MB	0.010	73365.569	-230.127	0.296
		MO	0.010	73365.569	-230.127	0.296
	2	MB - ΘΕΖ	0.040	17705.023	-373.246	1.228
	9	MB - ΘΕΖ	0.011	63700.471	-277.039	0.341
		MO	0.026	40702.747	-325.143	0.785

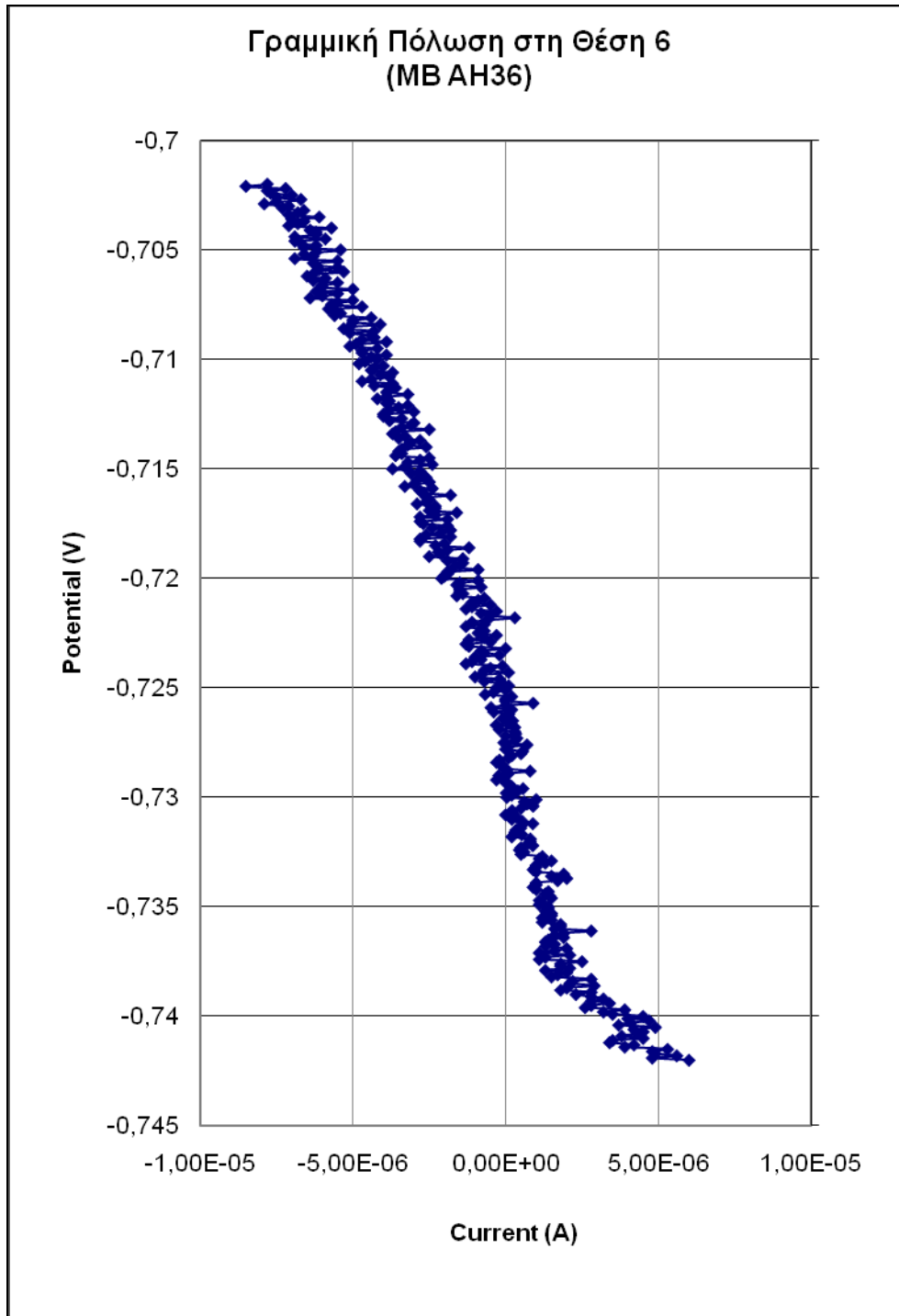
Πίνακας 8.5: Τιμές ηλεκτροχημικών παραμέτρων για τη μέθοδο της Πόλωσης Tafel στο Flat Cell

Μέθοδος	Δοκίμιο	Cor. Rate (mpy)	E (mV)	Icorr (μA)	
TAFEL - AH36	5	MB	52.82	-731.589	58.05
	6	MB	52.82	-762.342	55.71
	MO		52.82	-746.966	56.88
	4	MB	16.26	-761.305	17.87
	7	MB	-	-	-
	MO		16.26	-761.305	17.87
	MO	34.540	-754.135	37.375	

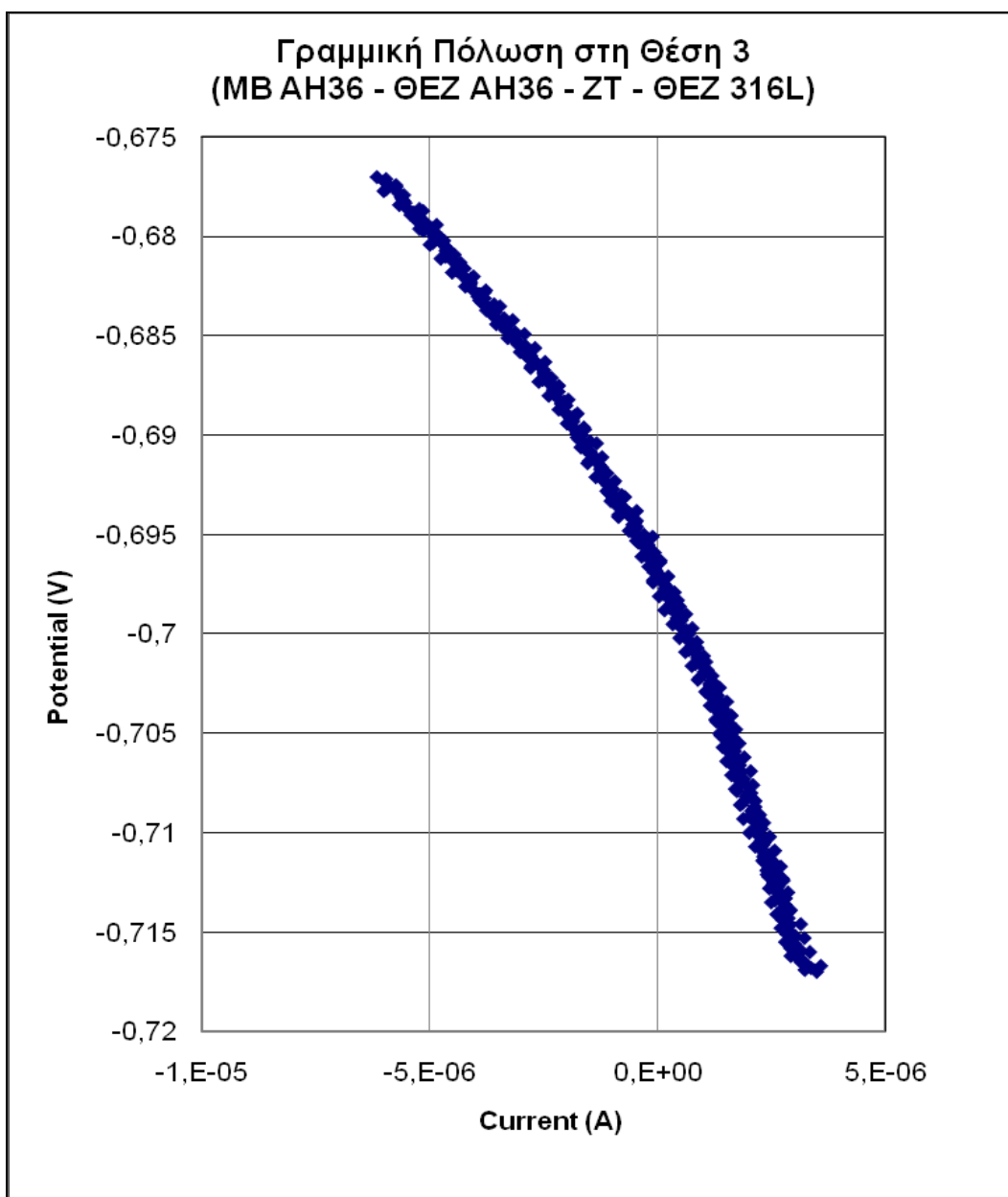
Μέθοδος	Δοκίμιο	Cor. Rate (mpy)	E (mV)	Icorr (μA)	
TAFEL - ZT	3	ZT	0.9323	-728.704	1.025
	8	ZT	11.560	-658.702	12.700
	11	ZT	-	-	-
	MO		6.246	-693.703	6.863

Οι τιμές που είναι με κόκκινο χρώμα απορρίφθηκαν στον τελικό υπολογισμό, λόγω της μεγάλης απόκλισης των τιμών του δυναμικού ή λόγω μη δυνατής λήψης μετρήσεων.

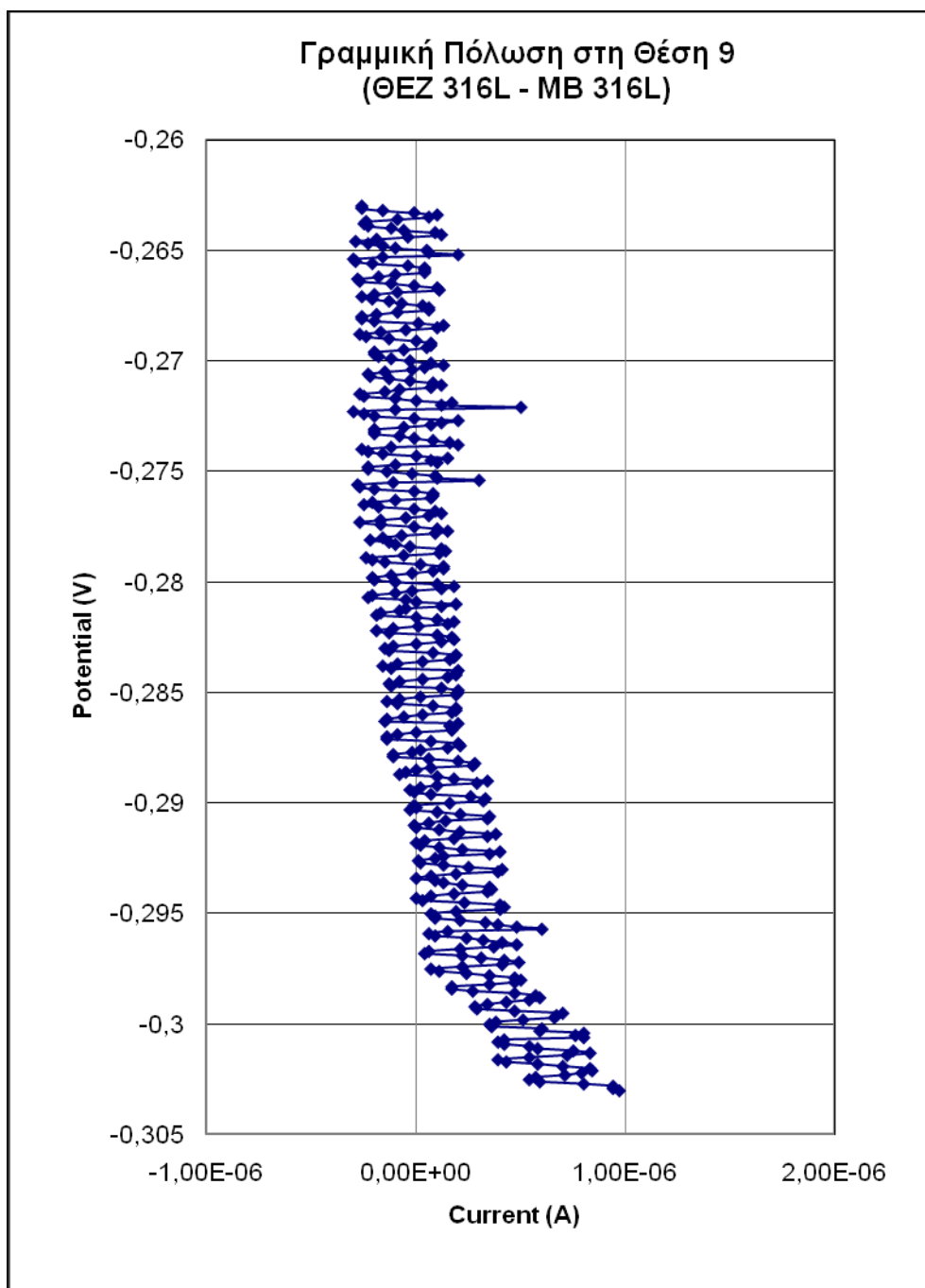
Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος εργασίας και η μεθοδολογία επεξεργασίας των διαφόρων καμπυλών παρατίθενται στη συνέχεια τα αποτελέσματα των τριών μεθόδων για κάθε ζώνη. Στα σχήματα 8.18 έως 8.26, που ακολουθούν, παρουσιάζονται δειγματοληπτικά οι καμπύλες κάθε μεθόδου, ανάλογα με τη ζώνη μέτρησης.



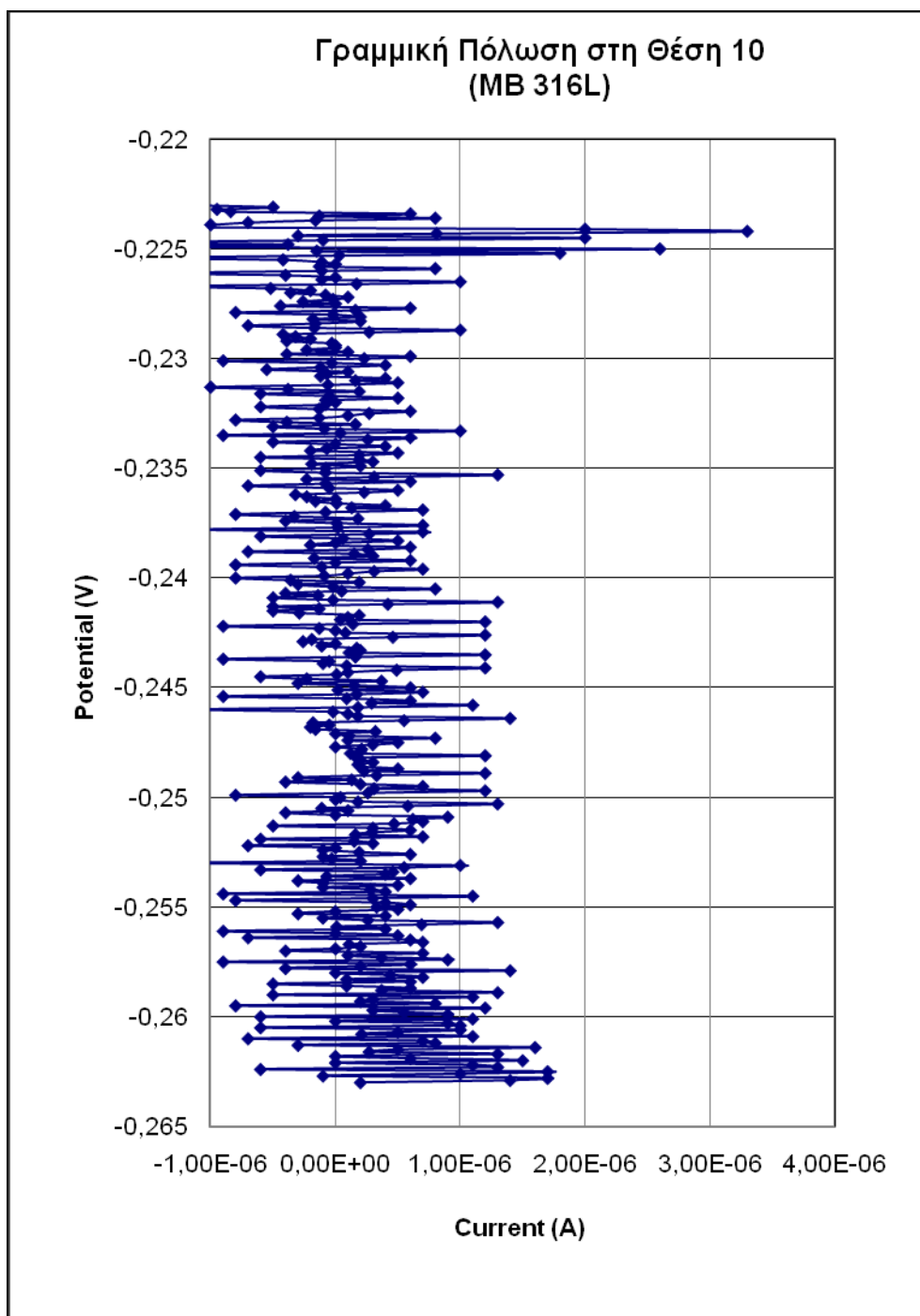
Σχήμα 8.18: Καμπύλη γραμμικής πόλωσης στη θέση 6 (MB AH36) (Flat Cell)



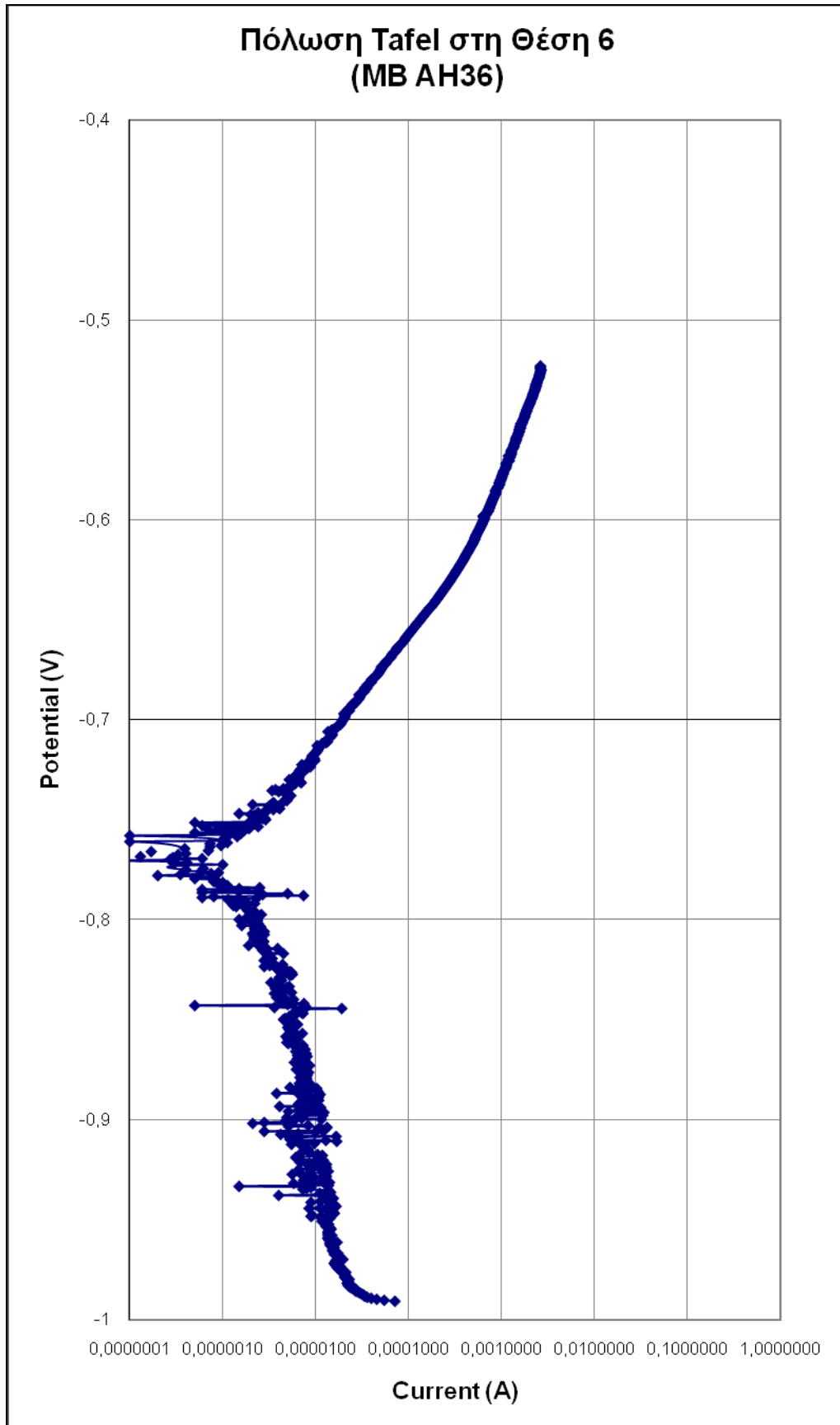
Σχήμα 8.19: Καμπύλη γραμμικής πόλωσης στη θέση 3 (MB AH36 – ΘΕΖ ΑΗ36 – ΖΤ – ΘΕΖ 316L) (Flat Cell)



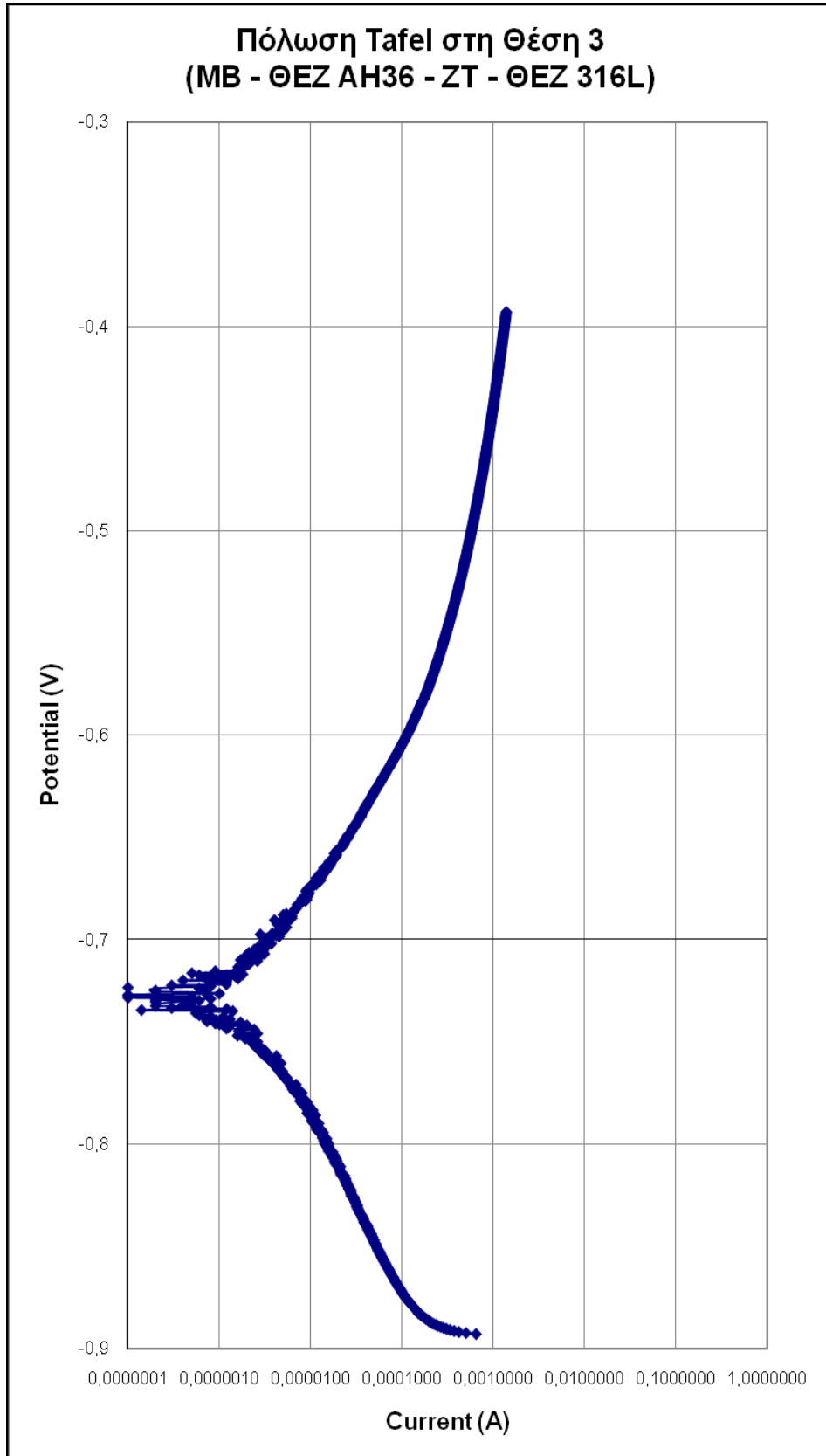
Σχήμα 8.20: Καμπύλη γραμμικής πόλωσης στη θέση 9 (ΘΕΖ 316L – ΜΒ 316L)
(Flat Cell)



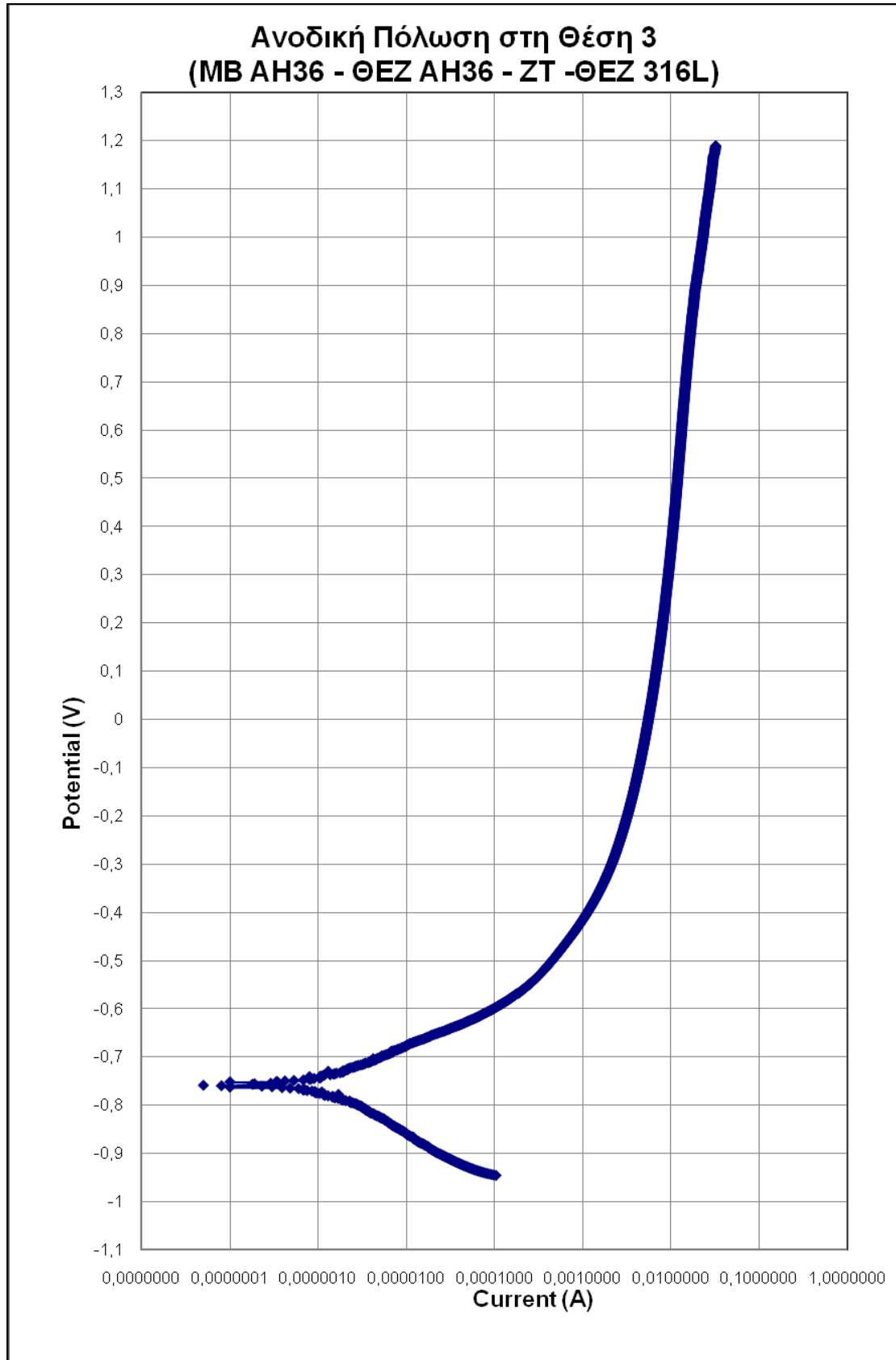
Σχήμα 8.21: Καμπύλη γραμμικής πόλωσης στη θέση 10 (MB 316L) (Flat Cell)



Σχήμα 8.22: Καμπύλη πόλωσης Tafel στη θέση 6 (MB AH36) (Flat Cell)

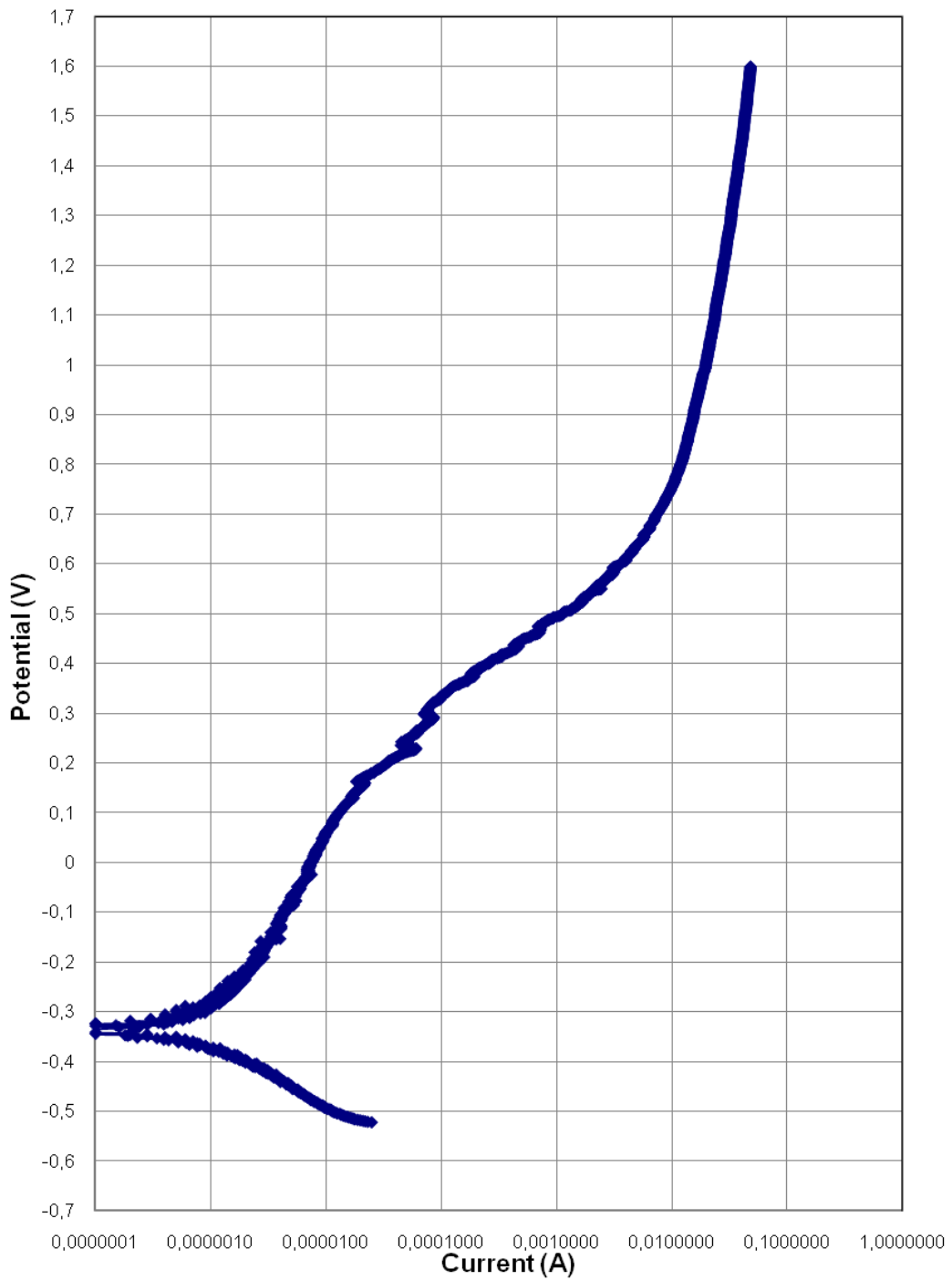


Σχήμα 8.23: Καμπύλη πόλωσης Tafel στη θέση 3 (MB AH36 – ΘΕΖ AH36 – ΖΤ – ΘΕΖ 316L) (Flat Cell)

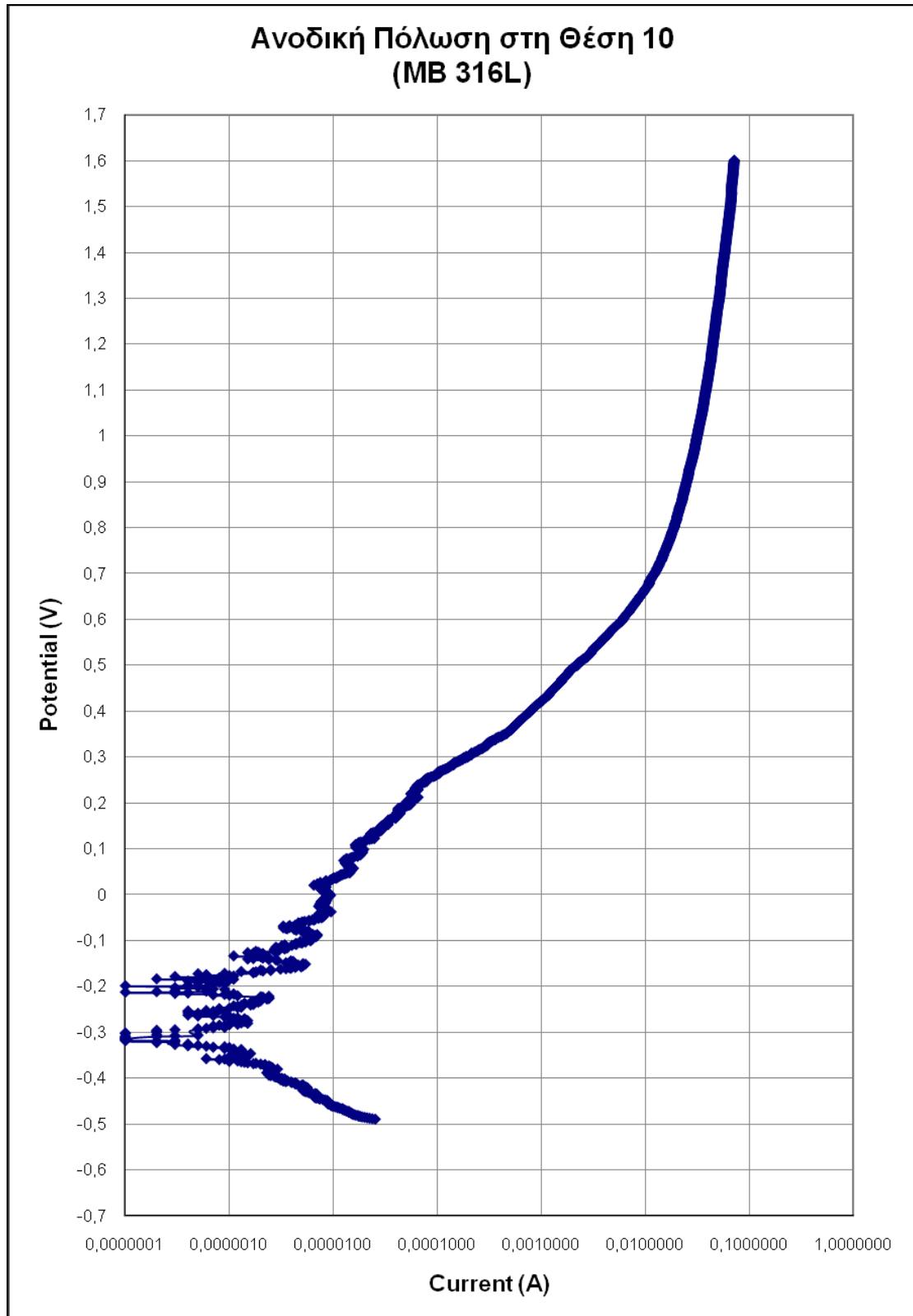


Σχήμα 8.24: Καμπύλη ανοδικής πόλωσης στη θέση 3 (MB AH36 – ΘΕΖ ΑΗ36 – ΖΤ – ΘΕΖ 316L) (Flat Cell)

Ανοδική Πόλωση στη Θέση 9
(ΘΕΖ 316L - ΜΒ 316L)

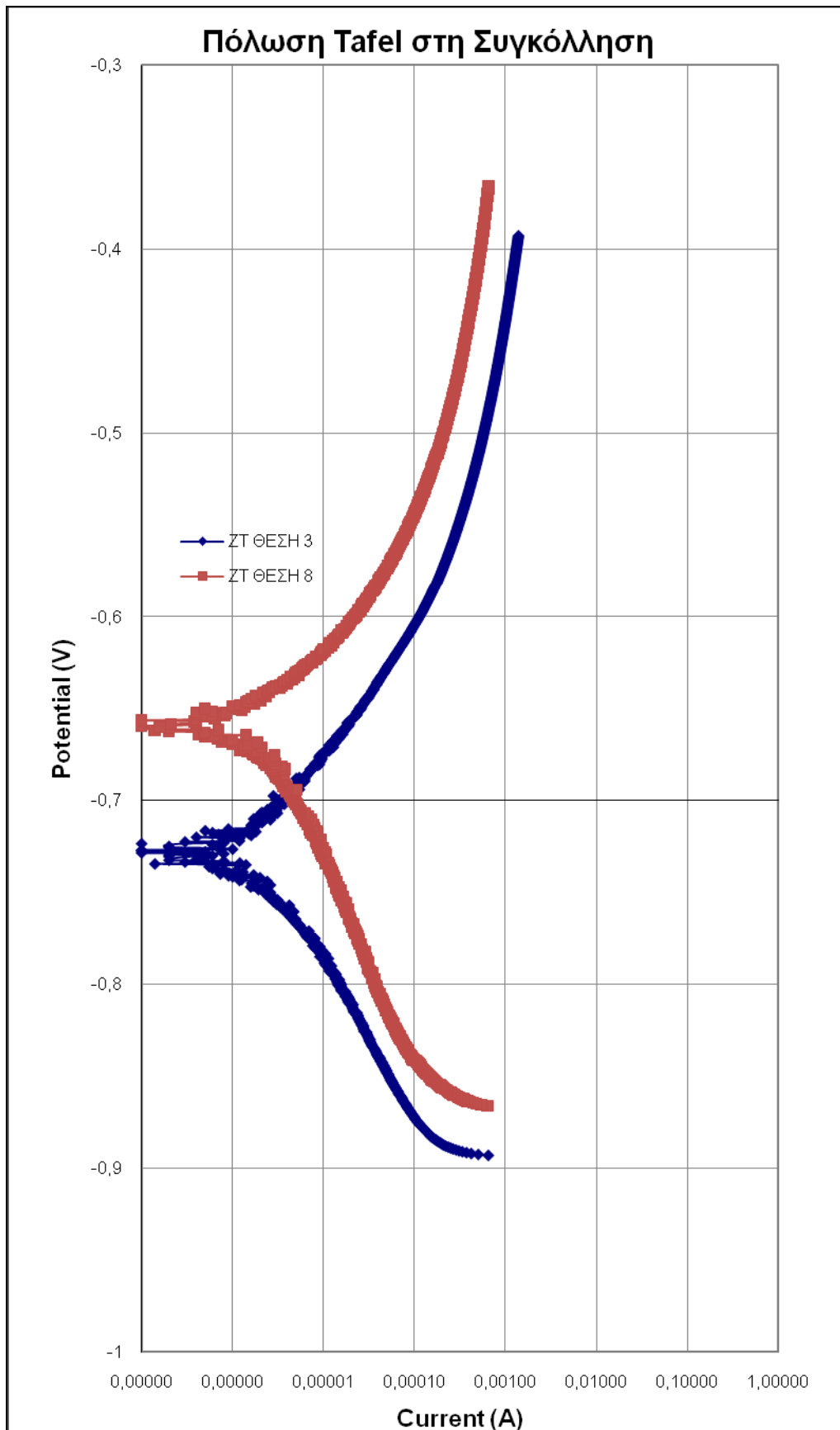


Σχήμα 8.25: Καμπύλη ανοδικής πόλωσης στη θέση 9 (ΘΕΖ 316L – ΜΒ 316L)
(Flat Cell)

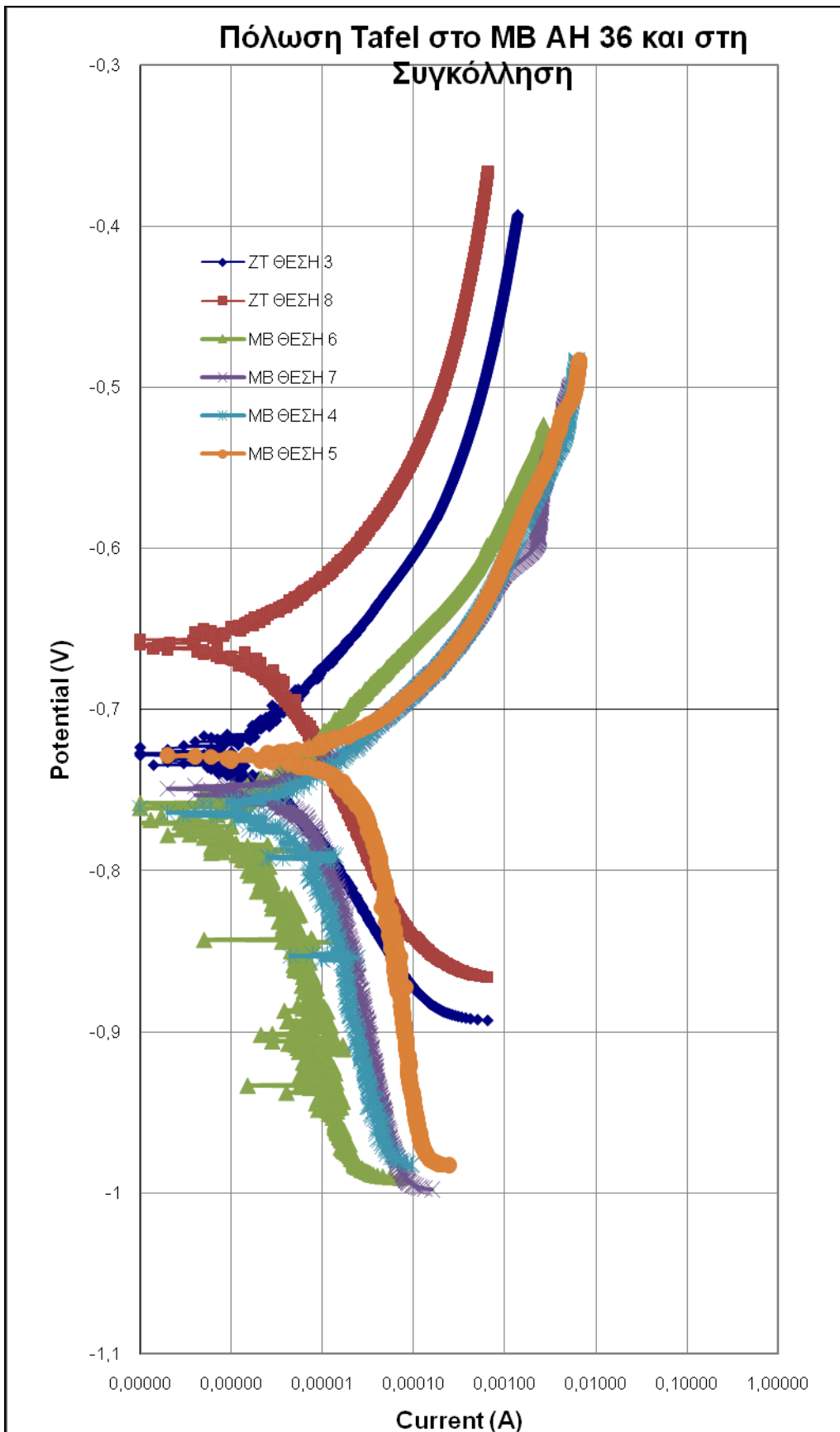


Σχήμα 8.26: Καμπύλη ανοδικής πόλωσης στη θέση 10 (MB 316L) (Flat Cell)

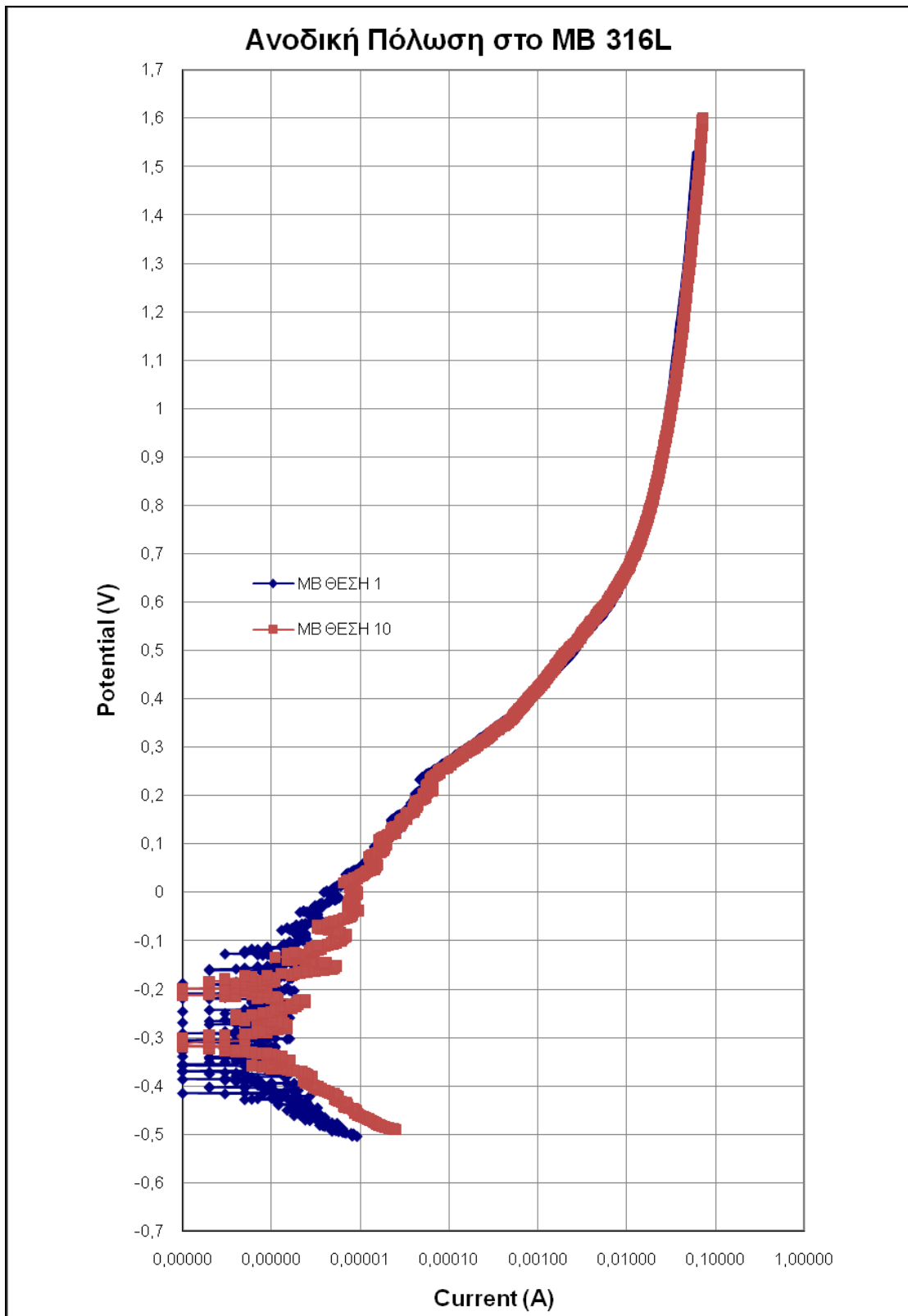
Στα σχήματα 8.27 – 8.28 και 8.30 – 8.32 απεικονίζονται όλες οι καμπύλες της Πόλωσης Tafel και της Ανοδικής Πόλωσης για κάθε περιοχή της συγκόλλησης ξεχωριστά. Ενώ στα σχήματα 8.29 και 8.33 παρουσιάζονται όλες οι καμπύλες που προκύπτουν από την κάθε μέθοδο.



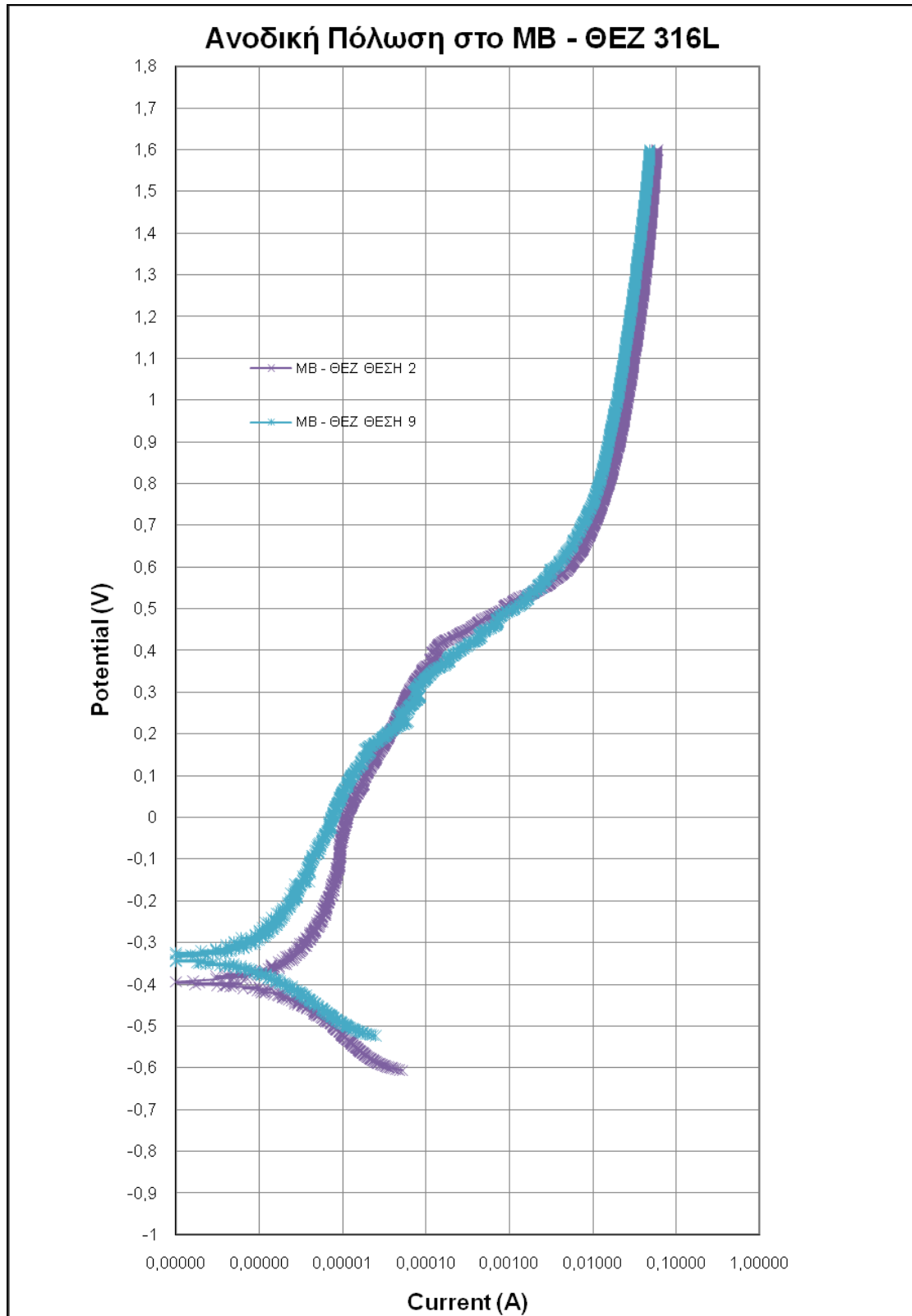
Σχήμα 8.28: Καμπύλες πόλωσης Tafel στην περιοχή της συγκόλλησης (Flat Cell)



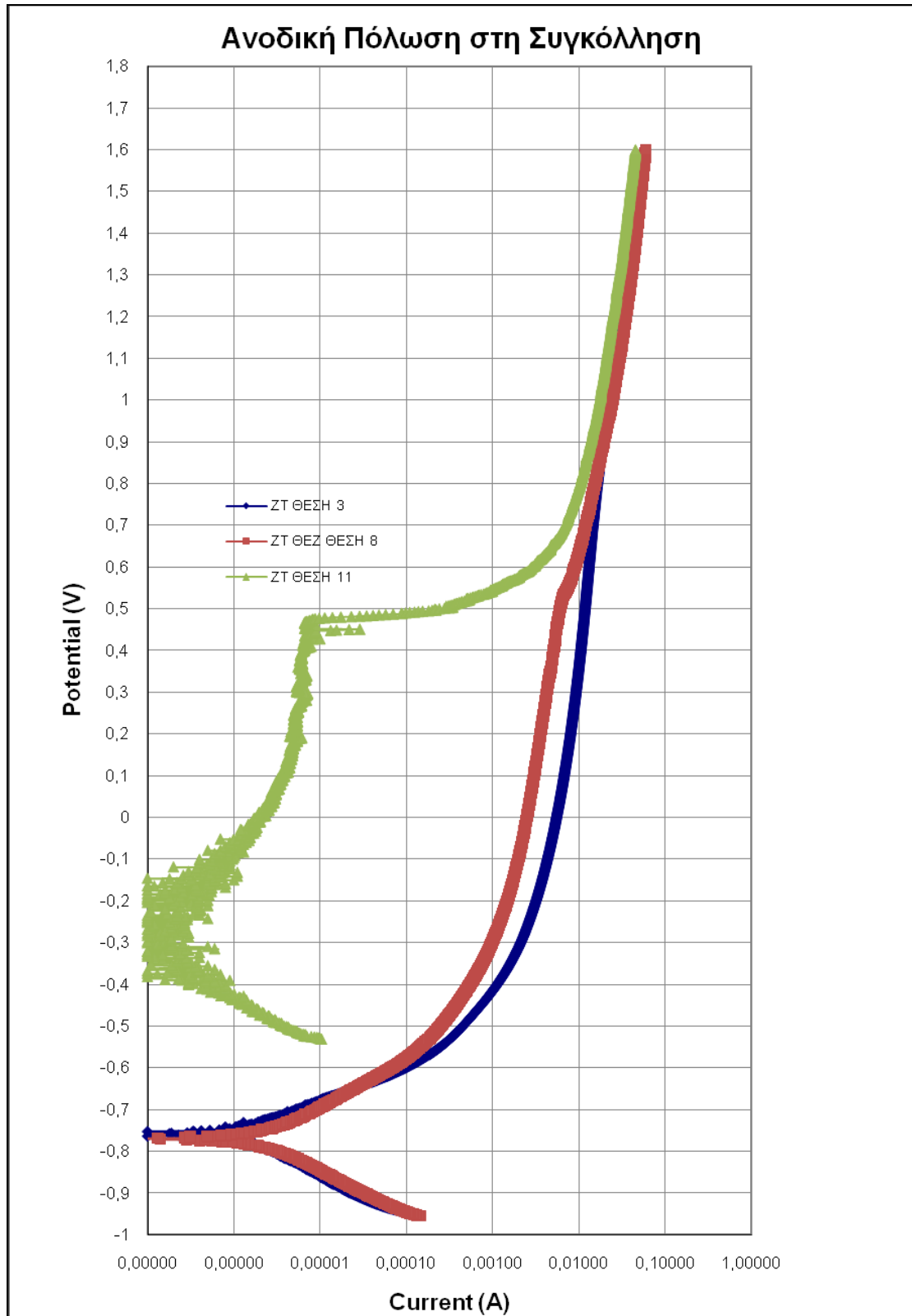
Σχήμα 8.29: Καμπύλες πόλωσης Tafel στο MB AH36 και στην περιοχή της συγκόλλησης (Flat Cell)



Σχήμα 8.30: Καμπύλες ανοδικής πόλωσης στο MB 316L (Flat Cell)

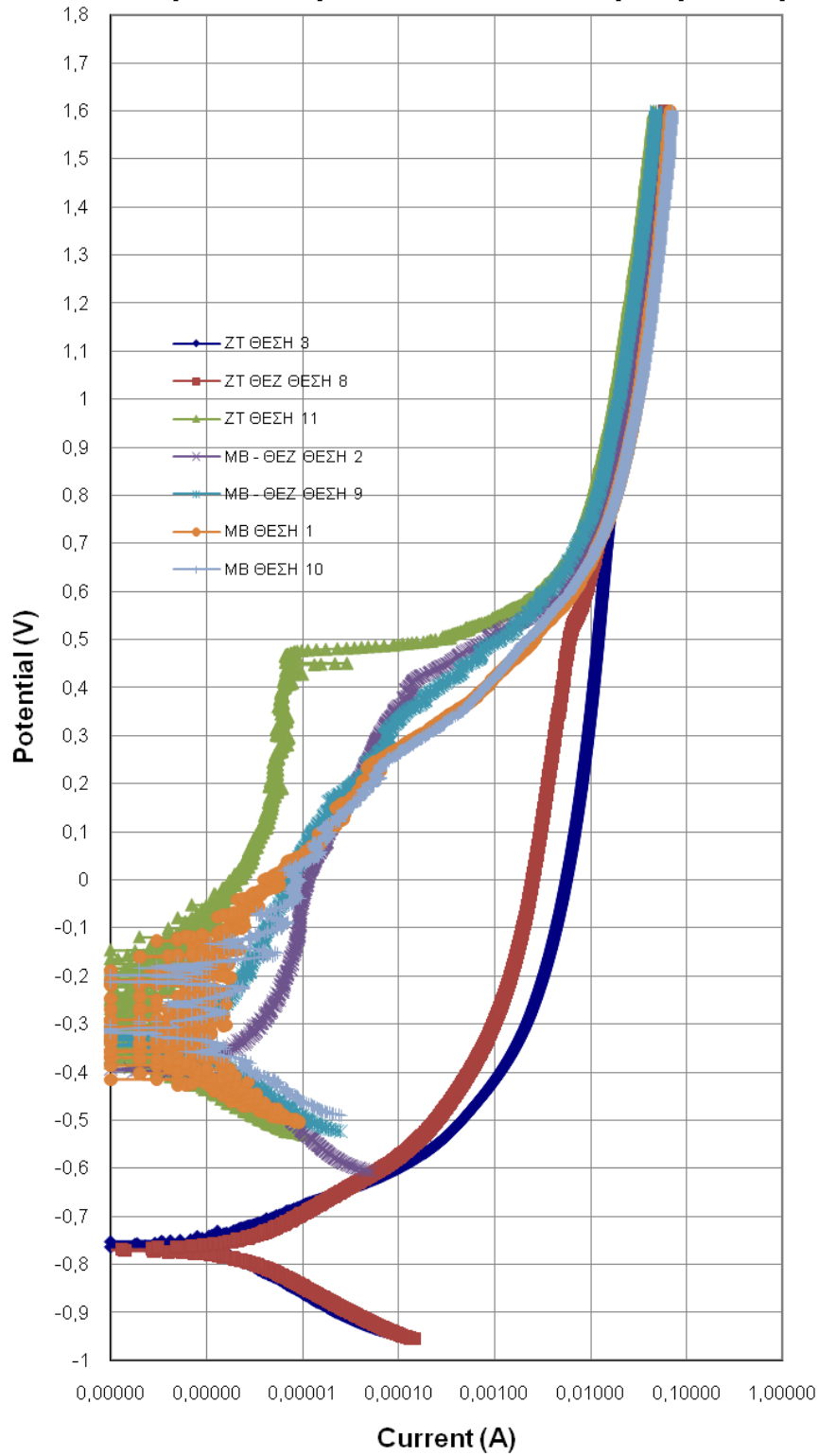


Σχήμα 8.31: Καμπύλες ανοδικής πόλωσης στο MB – ΘΕΖ του 316L (Flat Cell)



Σχήμα 8.32: Καμπύλες ανοδικής πόλωσης στην περιοχή της συγκόλλησης (Flat Cell)

Ανοδική Πόλωση στον 316L και στη Συγκόλληση



Σχήμα 8.33: Καμπύλες ανοδικής πόλωσης για τον 316L και τη συγκόλληση (Flat Cell)

8.4.3 Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Για την αποτίμηση των αποτελεσμάτων των ηλεκτροχημικών μετρήσεων, λαμβάνονται υπόψη το δυναμικό διάβρωσης, E_{corr} , η αντίσταση πόλωσης, R_p , το ρεύμα διάβρωσης, I_{corr} , που προκύπτει από το R_p και ο ρυθμός διάβρωσης, $Corr. Rate$, που προκύπτει από το I_{corr} .

Από τα μεγέθη αυτά το δυναμικό διάβρωσης δίνει πληροφορίες για την τάση διάβρωσης του υλικού, δηλαδή για τη θερμοδυναμική του φαινομένου της διάβρωσης.

Η αντίσταση πόλωσης, το ρεύμα διάβρωσης και ο ρυθμός διάβρωσης δίνουν πληροφορίες για την ταχύτητα με την οποία εξελίσσεται το φαινόμενο της διάβρωσης, δηλαδή για την κινητική αυτής.

Εκτός από το δυναμικό διάβρωσης, E_{corr} , στη γραμμική μέθοδο, το R_p είναι η πλέον αντιπροσωπευτική τιμή, αφού είναι η κλίση της εκάστοτε καμπύλης που λαμβάνεται με το πέρας της πειραματικής διαδικασίας. Από την τιμή του I_{corr} μπορούμε να εξαγάγουμε μόνο ποιοτικά συμπεράσματα και όχι ποσοτικά, αφού οι τιμές των β_a και β_c από τις οποίες υπολογίζεται το ρεύμα διάβρωσης δεν είναι οι πραγματικές, αλλά καθορίζονται εξ' ορισμού από το πρόγραμμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρούνται ίσες με 100mV. Το ίδιο ισχύει και για το $Corr. Rate$ που είναι συνάρτηση του I_{corr} . Βέβαια, δεν παύει να ισχύει το γεγονός ότι το I_{corr} είναι αντιστρόφως ανάλογο του R_p και ανάλογο του $Corr. Rate$.

Από την άλλη, στη μέθοδο Tafel, τα συμπεράσματα προκύπτουν με βάση τις τιμές που λαμβάνουμε για το I_{corr} .

Ειδικά για το κομμάτι του ελάσματος που αποτελείται από ανοξείδωτο χάλυβα, πληροφορίες για τη συμπεριφορά στη διάβρωση του υλικού και ειδικότερα για τα χαρακτηριστικά της παθητικοποίησης θα μπορούσαμε να αντλήσουμε από τις καμπύλες της ανοδικής πόλωσης. Η μέθοδος της ανοδικής πόλωσης υποδεικνύει την παθητική συμπεριφορά του υλικού, δηλαδή το μέγιστο ρεύμα της ανοδικής διάλυσης του μετάλλου, το εύρος της παθητικής περιοχής και, τέλος, το δυναμικό βελονισμού, όπου πλέον αστοχεί το παθητικό στρώμα. Η μέθοδος αυτή εκτός από το δυναμικό διάβρωσης E_{corr} , δίνει αποτελέσματα για το ρεύμα I_{corr} και το ρυθμό διάβρωσης $Corr. Rate$. Όμως, για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο της ανοδικής πόλωσης, το λογισμικό ενώ κατέγραψε τις καμπύλες δεν προχώρησε σε επεξεργασία αυτών. Επομένως, δεν έχουμε ποσοτικά αποτελέσματα από την εν λόγω μέθοδο και θα πραγματοποιήσουμε έναν ποιοτικό σχολιασμό αυτών των καμπυλών.

Ο λόγος για τον οποίο το λογισμικό δεν πραγματοποίησε την επεξεργασία των μετρήσεων είναι πιθανόν το πολύ μικρό εύρος τιμών ρεύματος και δυναμικού της καθοδικής καμπύλης, η οποία οφείλεται στο είδος του υλικού που μελετήθηκε.

8.4.3.1 Αποτελέσματα Ηλεκτροχημικών Μετρήσεων στο Συγκολλημένο Έλασμα με Φορητό Κελί

Γραμμική Πόλωση

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων (πίνακας 8.2) και των καμπυλών της γραμμικής πόλωσης παρατηρούνται τα ακόλουθα:

- Σύμφωνα με τις τιμές του δυναμικού διάβρωσης, E_{corr} , την υψηλότερη τάση για διάβρωση παρουσιάζει το μέταλλο βάσης AH36 ($E_{corr} = -694.192\text{mV}$), ενώ τη μικρότερη τάση για διάβρωση παρουσιάζει το μέταλλο βάσης 316L ($E_{corr} = -72.696\text{mV}$).
- Η μεταβολή του δυναμικού διάβρωσης γίνεται κλιμακωτά από το μέταλλο βάσης AH36 στο μέταλλο βάσης 316L (πίνακας 8.6).

Πίνακας 8.6: Δυναμικό διάβρωσης για κάθε περιοχή του ελάσματος

	LINEAR	E (mV)
1	MB AH36	-694.192
2	ZT (=MB AH36 – ΘEZ AH36 – ZT – ΘEZ 316L)	-625.155
3	MB - ΘEZ 316L	-214.317
4	MB 316L	-72.696

- Σύμφωνα με τις τιμές της αντίστασης πόλωσης, υψηλότερη τιμή εμφανίζει το μέταλλο βάσης 316L ($R_p = 42483.869\text{kOhms}$), ενώ μικρότερη η περιοχή γύρω από τη ζώνη τήξης ($R_p = 121.862\text{kOhms}$). Όμως, πολύ κοντινή τιμή R_p με την περιοχή γύρω από τη ζώνη τήξης έχει και το μέταλλο βάσης AH36 ($R_p = 136.496\text{kOhms}$). Η διαφορά των δύο τιμών αγγίζει τα όρια του σφάλματος.
- Αν και φαίνεται ξεκάθαρα ότι το μέταλλο βάσης 316L και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη ανθίστανται στη διάβρωση, για την περιοχή γύρω από τη ζώνη τήξης θα βγάλουμε τελικά συμπεράσματα αφού εξετάσουμε τα αποτελέσματα από τη μέθοδο Tafel και τις μετρήσεις με το Flat Cell.

Μέθοδος Tafel

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων (πίνακας 8.3) και των καμπυλών της πόλωσης Tafel (σχήμα 8.28) παρατηρούνται τα ακόλουθα:

- Σύμφωνα με τις τιμές του δυναμικού διάβρωσης (E_{corr}), την υψηλότερη τάση για διάβρωση παρουσιάζει το μέταλλο βάσης AH36 ($E_{corr} = -710.661\text{mV}$), ενώ μικρότερη τάση για διάβρωση παρουσιάζει η περιοχή της συγκόλλησης ($E_{corr} = -651.590\text{mV}$).
- Παρατηρούμε ότι οι τιμές είναι παραπλήσιες με αυτές που προέκυψαν από τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης.
- Σύμφωνα με τις τιμές του ρεύματος διάβρωσης, για το μέταλλο βάσης AH36 έχουμε $I_{corr} = 224.825\mu\text{A}$ και για την περιοχή της συγκόλλησης $I_{corr} = 40.010\mu\text{A}$.
- Ομοίως, το Corr. Rate του μετάλλου βάσης AH36 είναι πολύ μεγαλύτερο αυτού της περιοχής της συγκόλλησης (204.575 έναντι 5.898mpy).
- Πρακτικά, το μέταλλο βάσης AH36 διαβρώνεται πολύ περισσότερο από το μέταλλο της συγκόλλησης. Αυτό το συμπέρασμα είναι λογικό από τη στιγμή που ως μέταλλο συγκόλλησης χρησιμοποιείται χάλυβας 316L.

8.4.3.2 Αποτελέσματα Ηλεκτροχημικών Μετρήσεων στο Συγκολλημένο Έλασμα με Flat Cell

Γραμμική Πόλωση

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων (πίνακας 8.4) και των καμπυλών της γραμμικής πόλωσης παρατηρούνται τα ακόλουθα:

- Σύμφωνα με τις τιμές του δυναμικού διάβρωσης, E_{corr} , την υψηλότερη τάση για διάβρωση παρουσιάζει το μέταλλο βάσης AH36 ($E_{corr} = -735.691\text{mV}$), ενώ τη μικρότερη τάση για διάβρωση παρουσιάζει το μέταλλο βάσης 316L ($E_{corr} = -230.127\text{mV}$).
- Η μεταβολή του δυναμικού διάβρωσης γίνεται κλιμακωτά από το μέταλλο βάσης AH36 στο μέταλλο βάσης 316L (πίνακας 8.7).

Πίνακας 8.7: Δυναμικό διάβρωσης για κάθε περιοχή του ελάσματος

	LINEAR	E (mV)
1	MB AH36	-735.691
2	ZT (=MB AH36 – ΘEZ AH36 – ZT – ΘEZ 316L)	-700.386
3	MB - ΘEZ 316L	-325.143
4	MB 316L	-230.127

- Σύμφωνα με τις τιμές της αντίστασης πόλωσης, υψηλότερη τιμή εμφανίζει το μέταλλο βάσης του 316L ($R_p = 73365.569\text{k}\Omega$), ενώ μικρότερη το μέταλλο βάσης AH36 ($R_p = 2771.221\text{k}\Omega$).
- Το μέταλλο βάσης 316L και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη ανθίστανται στη διάβρωση.

Μέθοδος Tafel

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων (πίνακας 8.5) και των καμπυλών της πόλωσης Tafel παρατηρούνται τα ακόλουθα:

- Σύμφωνα με τις τιμές που λαμβάνει το δυναμικό διάβρωσης, E_{corr} , την υψηλότερη τάση για διάβρωση παρουσιάζει το μέταλλο βάσης AH36 ($E_{corr} = -754.135\text{mV}$), ενώ τη μικρότερη τάση για διάβρωση παρουσιάζει η περιοχή γύρω από τη συγκόλληση ($E_{corr} = -693.703\text{mV}$).
- Παρατηρούμε ότι η τιμή για το μέταλλο βάσης είναι παραπλήσια με αυτή που προέκυψε από τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης.
- Σύμφωνα με τις τιμές του ρεύματος διάβρωσης, για το μέταλλο βάσης AH36 έχουμε $I_{corr} = 37.375\mu\text{A}$ και για την περιοχή τη συγκόλλησης $I_{corr} = 6.863\mu\text{A}$.
- Ομοίως, το Corr. Rate του μετάλλου βάσης AH36 είναι πολύ μεγαλύτερο αυτού της περιοχής της συγκόλλησης (34.540 έναντι 6.246mpy).
- Πρακτικά, το μέταλλο βάσης AH36 διαβρώνεται πολύ περισσότερο από το μέταλλο της συγκόλλησης. Όπως, ήδη, αναφέραμε αυτό το συμπέρασμα είναι

λογικό από τη στιγμή που ως μέταλλο συγκόλλησης χρησιμοποιείται χάλυβας 316L.

8.4.3.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων μεταξύ Φορητού Κελιού και με Flat Cell

Γραμμική Πόλωση

Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων όλων των ηλεκτροχημικών παραμέτρων παρατηρούνται τα ακόλουθα:

- Υπάρχει ταύτιση των μεθόδων όσον αφορά το ποιοτικό αποτέλεσμα.
- Ποσοτικά, το Ecorr για το μέταλλο βάσης AH36 είναι παρόμοιο, ενώ για τις υπόλοιπες ζώνες διαφέρει κλιμακωτά, αλλά μας οδηγεί στο ίδιο συμπέρασμα.
- Υπάρχει αντιστοιχία, όχι όμως ποσοτική στις τιμές του Rp.
- Η διαφορά στις μετρήσεις μπορεί να οφείλεται στην τραχύτητα της επιφάνειας και στην ύπαρξη παραμενουσών τάσεων στην πρώτη μέθοδο, σε σχέση με τις λειασμένες επιφάνειες που πολώθηκαν στο κελί.

Πόλωση Tafel

Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων όλων των ηλεκτροχημικών παραμέτρων παρατηρούνται τα ακόλουθα:

- Υπάρχει ταύτιση των μεθόδων όσον αφορά το ποιοτικό αποτέλεσμα.
- Ποσοτικά, οι τιμές του Ecorr για το μέταλλο βάσης AH36 είναι παρόμοιες, ενώ διαφέρουν για την περιοχή της συγκόλλησης.
- Υπάρχει αντιστοιχία στις τιμές του ρεύματος διάβρωσης, Icorr, όχι όμως ποσοτικά.
- Οι διαφορές στις μετρήσεις πιθανόν να οφείλονται στην τραχύτητα της επιφάνειας και στην ύπαρξη παραμενουσών τάσεων στην πρώτη μέθοδο, σε σχέση με τις λειασμένες επιφάνειες που πολώθηκαν στο κελί.

Ανοδική Πόλωση

Παρατηρώντας τις καμπύλες τις ανοδικής πόλωσης, οι οποίες ελήφθησαν στην περιοχή του 316L και στην περιοχή της συγκόλλησης, και στις δύο μεθόδους (φορητό κελί, flat cell) προκύπτει ότι:

- Το Icorr είναι πολύ μικρό, της τάξης του 10^{-5} . Αυτό συνεπάγεται είτε ότι το υλικό μας είναι πάρα πολύ ανθεκτικό στη διάβρωση, είτε ότι δεν έχει ξεκινήσει η δράση του φαινομένου της διάβρωσης. Στη δεύτερη περίπτωση και για το χρονικό διάστημα που αφήνουμε το σύστημα να ισορροπήσει, οι αντιδράσεις οξειδωσης – αναγωγής δεν πραγματοποιούνται με ικανοποιητικό ρυθμό.
- Σε αρκετές από τις ανοδικές καμπύλες παρατηρούμε ένα «θόρυβο», στην περιοχή όπου το ρεύμα τείνει να μηδενιστεί. Αυτό συμβαίνει κατά βάση στις καμπύλες μετάλλου βάσης 316L, όπου αναμέναμε πράγματι πολύ μικρό ρεύμα για μια περιοχή του δυναμικού γύρω από το Ecorr.
- Θα έπρεπε σε δεύτερο χρόνο να εφαρμοστεί η όλη πειραματική διαδικασία ξανά, μετά το πέρας της πρώτης πειραματικής μέτρησης, για να δούμε αν το σύστημα βρίσκεται εξ αρχής σε ισορροπία ή όχι.
- Από τις καμπύλες που λάβαμε, παρατηρούμε πως τα υλικά, όπως το 316L, τα οποία διαβρώνονται δύσκολα (έχουν δηλαδή πολύ μικρό Icorr), θα πρέπει να πολωθούν πολύ ανοδικά, δηλαδή να εφαρμοστεί σε αυτά πολύ μεγαλύτερη τάση για να λάβουμε την ίδια τιμή I, από ότι τα υλικά που διαβρώνονται εύκολα, όπως ο ΑΗ36.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε τέτοιες εργαστηριακές μετρήσεις βαρύνουσα σημασία έχουν περισσότερο οι σχετικοί ρυθμοί διάβρωσης και λιγότερο οι απόλυτες τιμές τους, ενώ κάθε συστηματικό σφάλμα στις τιμές του ρυθμού διάβρωσης είναι ήσσονος σημασίας. [32]

Συνοψίζοντας, το συμπέρασμα που προκύπτει από αυτές τις δύο μεθόδους είναι ότι μεγαλύτερη τάση για διάβρωση έχει το μέταλλο βάσης ΑΗ36, μετά η περιοχή της συγκόλλησης, μετά η ΘΕΖ του 316L και, τέλος, το μέταλλο βάσης 316L. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στο ότι το συγκολλημένο έλασμα που μελετήθηκε είναι ετεροειδές.

Όσον αφορά στην πιθανότητα ανάπτυξης γαλβανικού στοιχείου μεταξύ των διαφορετικών περιοχών της συγκόλλησης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι με βάση και τη βιβλιογραφία, ο ρόλος της ανόδου ή καθόδου που αναλαμβάνει κάθε περιοχή (μέταλλο βάσης, θερμικά επηρεασμένη ζώνη, ζώνη τήξης) προσδιορίζεται από τις συνθήκες του υλικού (π.χ. το pH, την έκταση της προστασίας, την επιφάνεια της

ανόδου σε σχέση με την κάθοδο κλπ). Στις εν λόγω μετρήσεις, τόσο η ζώνη τήξης, όσο και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη δεν εξετάστηκαν ξεχωριστά. Για το λόγο αυτό υποθέτουμε πως κατά τη διάρκεια των πειραμάτων υπήρξε δημιουργία γαλβανικού στοιχείου.

Πράγματι, παρατηρώντας τα δυναμικά διάβρωσης βλέπουμε ότι:

a. Για τη θέση MB – ΘΕΖ 316L, παρατηρείται ένα Ecorr πιο αρνητικό από εκείνο του MB 316L. Οι τιμές αυτές για τη μέθοδο Γραμμικής Πόλωσης είναι:

- -214.317mV και -72.696mV, αντίστοιχα (φορητό κελί)
- -325.143mV και -230.127mV, αντίστοιχα (flat cell)

Για την ίδια θέση και με βάση την καμπύλη της ανοδικής πόλωσης δεν μπορούμε να βγάλουμε συμπέρασμα, διότι οι τιμές του Ecorr είναι πολύ κοντά.

b. Για τη θέση της ζώνης συγκόλλησης, τα πράγματα γίνονται πιο πολύπλοκα, διότι δεν έχουμε δύο διαφορετικές ζώνες, αλλά περισσότερες. Παρ' όλα αυτά, εάν εξετάσουμε και πάλι τις τιμές του δυναμικού διάβρωσης θα παρατηρήσουμε πιο αρνητικές τιμές Ecorr στη ζώνη συγκόλλησης από ότι στο MB AH36, λιγότερο αρνητικές όμως από το MB 316L. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές του Ecorr με βάση τη μέθοδο Γραμμικής Πόλωσης είναι:

- -694.192mV (MB AH36), -625.155mV (Z.Σ.) και -72.696mV (MB 316L) για το φορητό κελί
- -735.691mV (MB AH36), -700.386mV (Z.Σ.) και -230.127mV (MB 316L) για το flat cell.

Για τις ίδιες θέσεις με βάση τη μέθοδο Προεκβολής Ευθειών Tafel, οι τιμές του Ecorr είναι:

- -710.661mV (MB AH36), -651.590mV (Z.Σ.) για το φορητό κελί
- -754.135mV (MB AH36), -693.703mV (Z.Σ.) για το flat cell.

Σε ότι αφορά τη μέθοδο Ανοδικής Πόλωσης, στις δύο από τις τρεις καμπύλες που αναφέρονται, στη Z.Σ. έχουμε πολύ πιο αρνητικές τιμές Ecorr (~ -750mV) απ' ότι στο MB 316L (~-300mV).

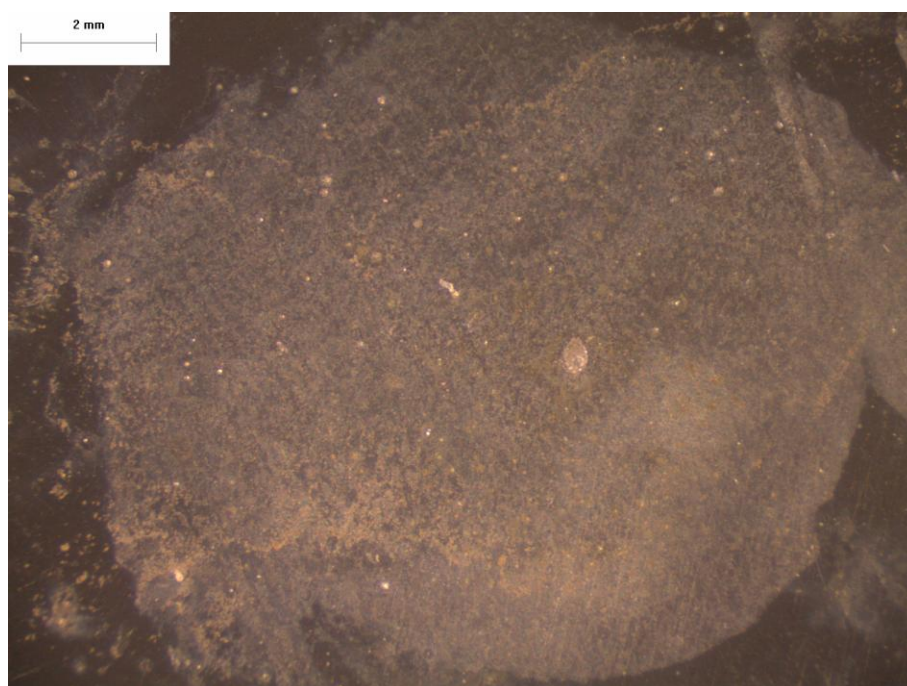
8.5 Παρατήρηση των Επιφανειών των Δοκιμίων μετά την Πόλωση

8.5.1 Εισαγωγή

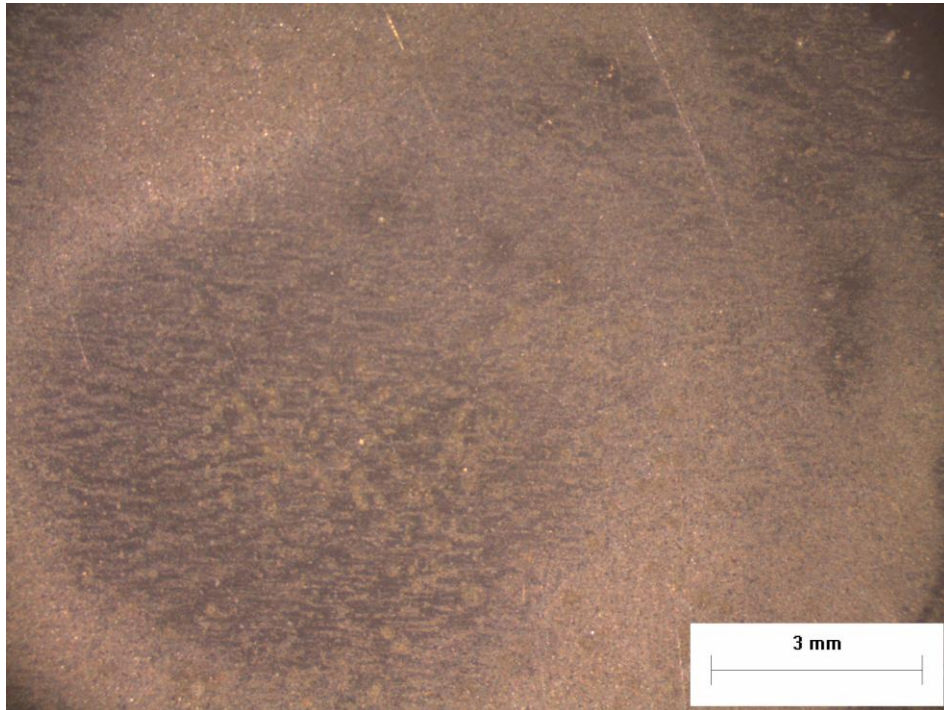
Μετά την ολοκλήρωση των ηλεκτροχημικών μετρήσεων τα δοκίμια παρατηρήθηκαν μακροσκοπικά, στο στερεοσκόπιο, στο οπτικό μικροσκόπιο, καθώς και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Στόχος ήταν να διερευνηθεί η μορφολογία των επιφανειών τους και ιδιαίτερα των ανοξειδωτων χαλύβων που υπόκεινται σε διάβρωση με βελονισμούς.

8.5.2 Μακροσκοπικές Παρατηρήσεις

Όσον αφορά το μέταλλο βάσης AH36, μετά την εφαρμογή της μεθόδου Tafel, η επιφάνειά του παρουσιάζει την εξής μορφή (εικόνες 8.31 και 8.32):



Εικόνα 8.31: Επιφάνεια μετάλλου βάσης AH36 μετά την πόλωση



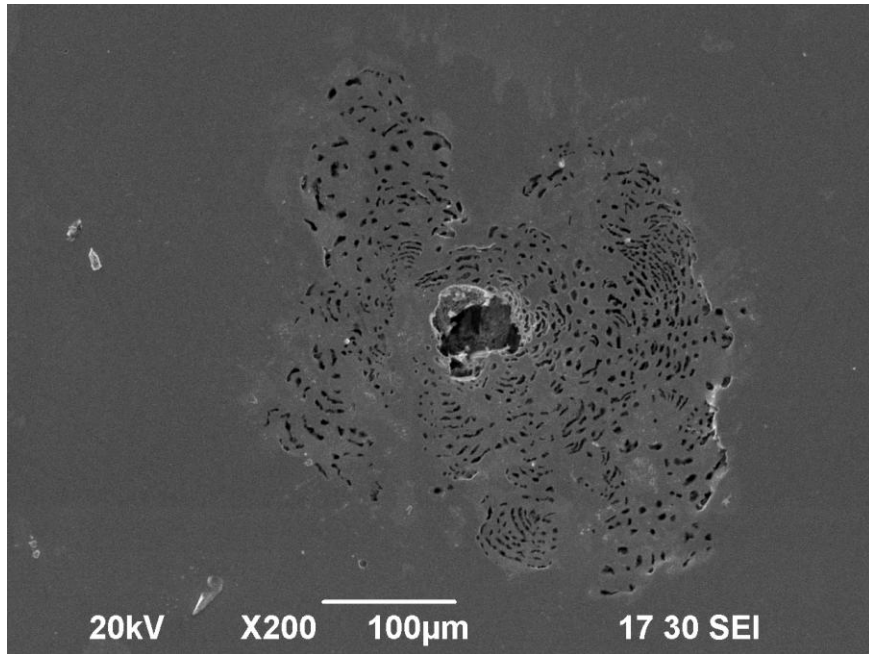
Εικόνα 8.32: Επιφάνεια μετάλλου βάσης AH36 μετά την πόλωση

Είναι φανερό ότι η επιφάνεια, μετά την εφαρμογή της πόλωσης με τη μέθοδο Tafel σε εύρος $\pm 250\text{mV}$, έχει διαβρωθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε τα δοκίμια να μην μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν.

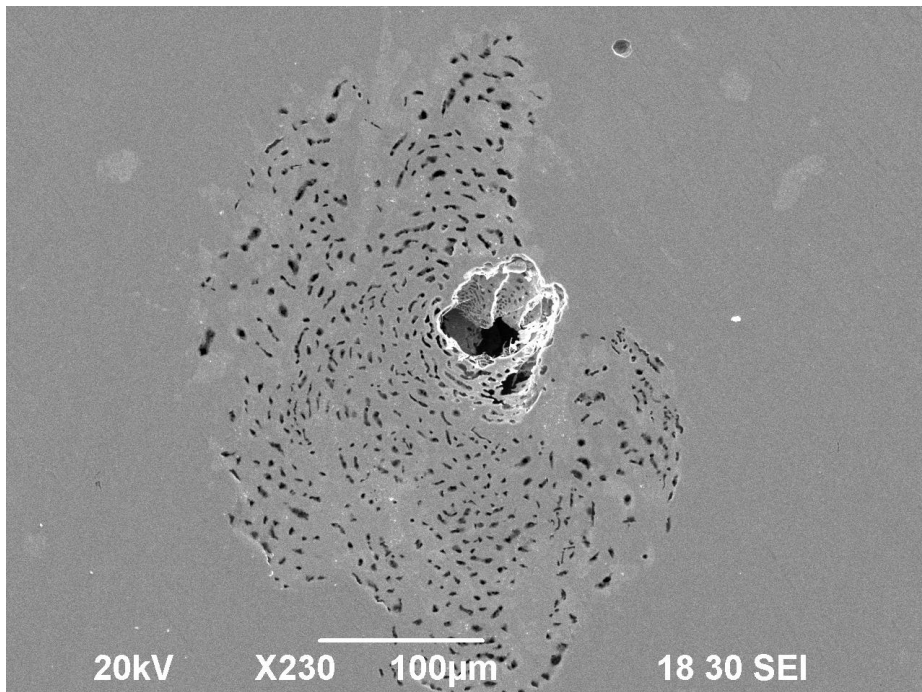
Όσον αφορά το μέταλλο βάσης 316L, οι βελονισμοί εμφανίζουν ένα κέντρο, έναν πυρήνα, γύρω από τον οποίο αναπτύσσονται κυκλικά και άλλοι βελονισμοί και στο τέλος ενώνονται δημιουργώντας βελονισμό μεγαλύτερης διαμέτρου (εικόνες 8.33 έως 8.36)



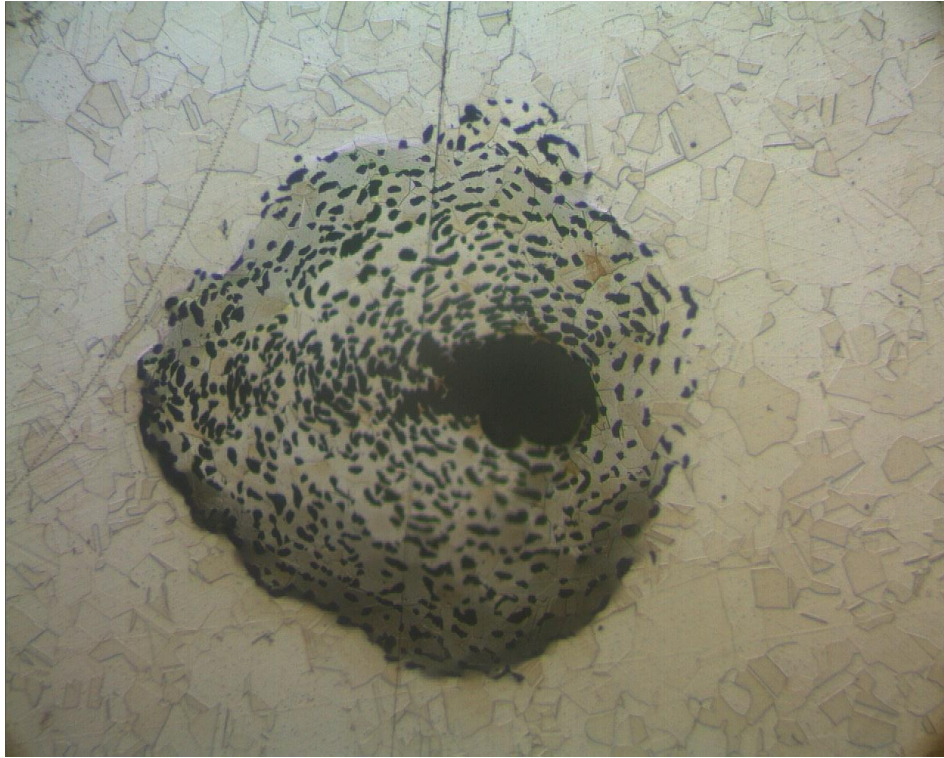
Εικόνα 8.33: Βελονισμοί στο μέταλλο βάσης 316L



Εικόνα 8.34: Βελονισμοί στο μέταλλο βάσης 316L (SEM x200)

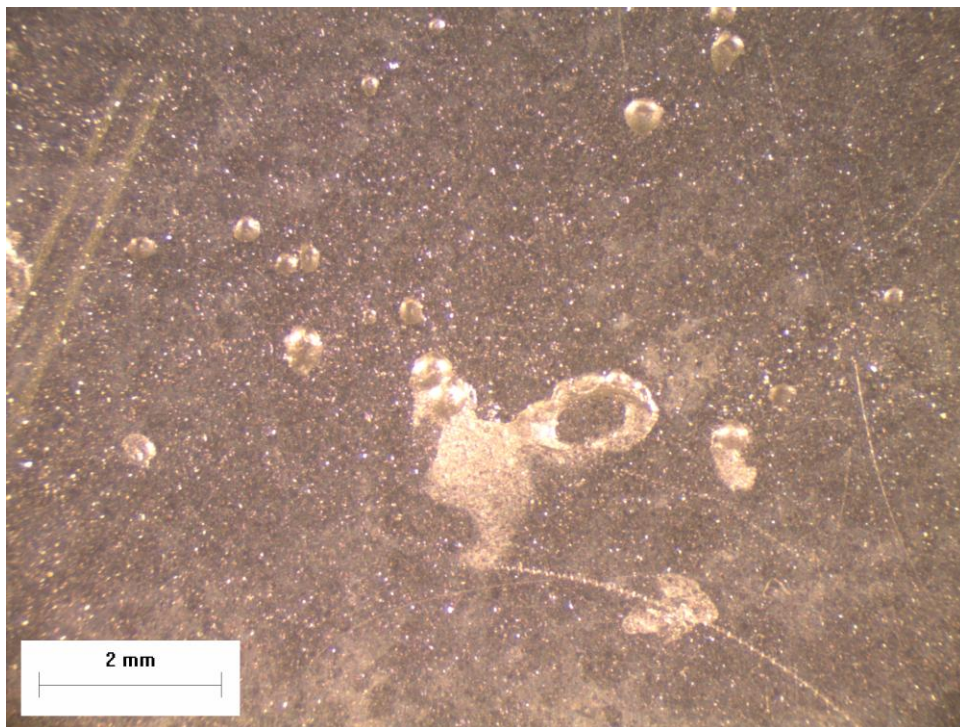


Εικόνα 8.35: Βελονισμοί στο μέταλλο βάσης 316L (SEM x230)



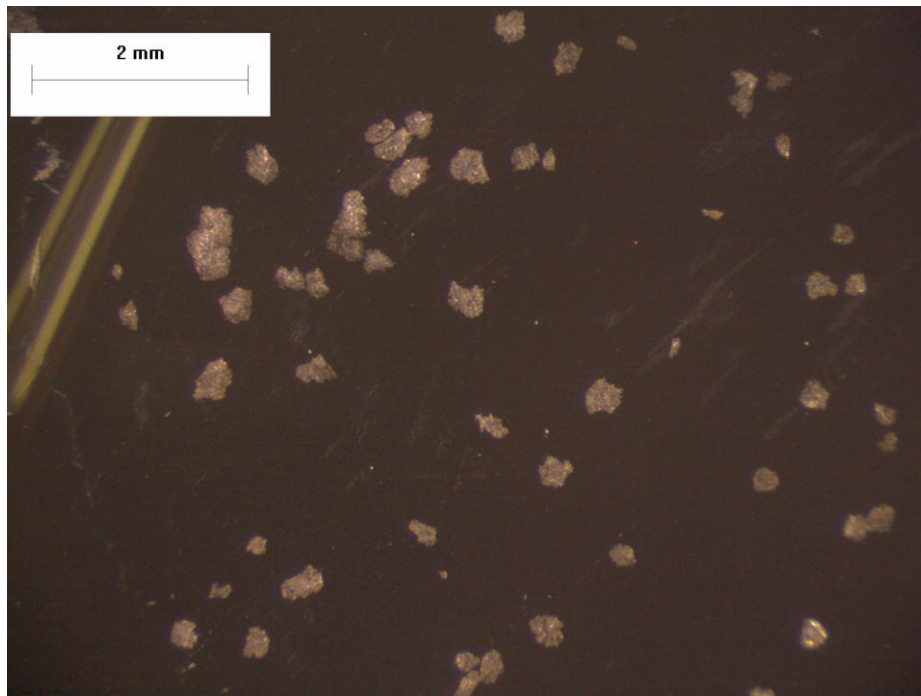
Εικόνα 8.36: Βελονισμοί στο μέταλλο βάσης 316L (προσβεβλημένο δοκίμιο)

Στην περιοχή της ΘΕΖ του 316L, παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο, μόνο που οι βελονισμοί είναι πιο αραιοί (εικόνα 8.37).

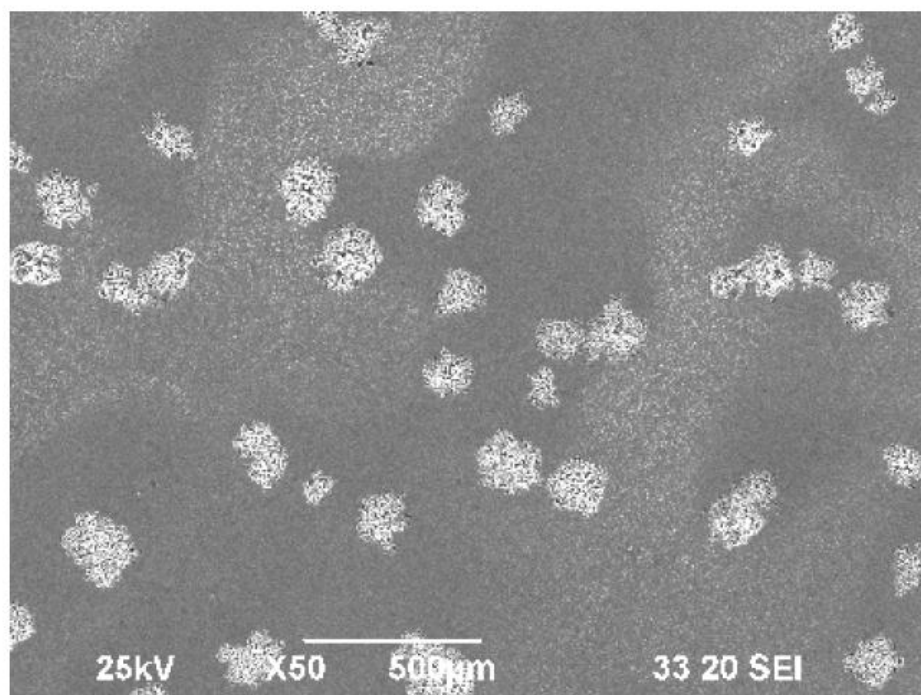


Εικόνα 8.37: Βελονισμοί στη ΘΕΖ του 316L

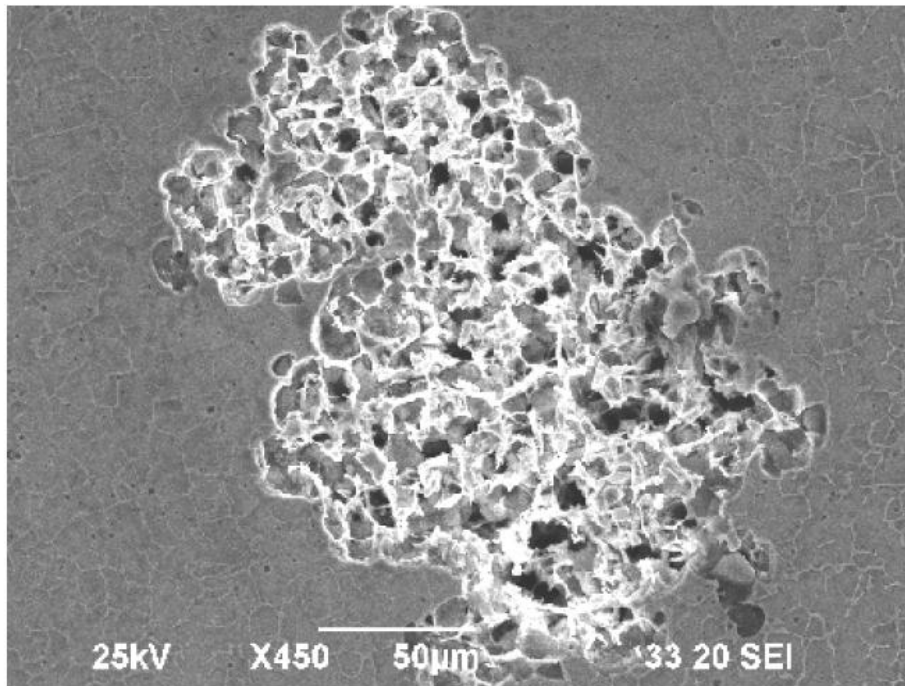
Τέλος, όσον αφορά τη περιοχή γύρω από τη ζώνη τήξης, εμφανίζονται βελονισμοί χωρίς κυκλική ανάπτυξη. Οι βελονισμοί είναι πολύ μικρότερης διαμέτρου και αναπτύσσονται μάλλον τυχαία, πάντα ο ένας κοντά στον άλλον (εικόνες 8.38 έως 8.40).



Εικόνα 8.38: Βελονισμοί στη ζώνη τήξης



Εικόνα 8.39: Βελονισμοί στη ζώνη τήξης (SEM) (x50)



Εικόνα 8.40: Βελονισμοί στη ζώνη πήξης (SEM) (x450).
Διακρίνεται η στερεοποίηση FA.

Κεφάλαιο 9

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιχειρήθηκε η μελέτη της προδιάθεσης για διάβρωση ετεροειδών συγκολλήσεων ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα 316L και χάλυβα υψηλής αντοχής AH36, σε διάλυμα 3.5%κ.β. NaCl.

Για την αποτίμηση της προδιάθεσης για διάβρωση, εφαρμόστηκαν οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι: Γραμμική Πόλωση (Linear Polarization), Ανοδική Πόλωση (Anodic Polarization) και Προεκβολή Ευθειών Tafel (Tafel Extrapolation), σε ηλεκτρολύτη 3.5%κ.β. NaCl.

Παράλληλα, έλαβε χώρα μεταλλογραφική μελέτη του ελάσματος, μέσω οπτικής μικροσκοπίας, ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης και μετρήσεων μικροσκληρότητας, ενώ μετά την ολοκλήρωση των ηλεκτροχημικών μετρήσεων, μελετήθηκε η μορφολογία της διάβρωσης με οπτική μικροσκοπία και ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης.

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

- Το μέταλλο βάσης 316L παρουσιάζει ωστενιτική δομή. Στη ζώνη τήξης έχουμε στερεοποίηση FA σκελετοειδούς μορφής, ενώ η θερμικά επηρεασμένη ζώνη του 316L εμφανίζει πολύ καλή σύνδεση (μεταλλουργικής φύσεως) του μετάλλου βάσης με τη ζώνη τήξης. Το μέταλλο βάσης AH36 παρουσιάζει φερριτο-περλιτική δομή, προσανατολισμένη λόγω έλασης. Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη του AH36 συναντάται, επίσης, φερριτο – περλιτική δομή. Σε σχέση, όμως, με το μέταλλο βάσης AH36 φαίνεται η ανακρυστάλλωση των κόκκων, ενώ επιπλέον έχουν εξαφανιστεί οι γραμμές της θερμής έλασης.
- Τα αποτελέσματα της μικρο-σκληρότητας εμφανίζουν ως σκληρότερη περιοχή τη ζώνη τήξης. Η τιμή της σκληρότητας για τη ζώνη τήξης έχει μικρή απόκλιση από αυτήν της θερμικά επηρεασμένης ζώνης του 316L, εν αντιθέσει, όμως, με αυτήν της θερμικά επηρεασμένης ζώνης του AH36. Η απότομη μεταβολή της σκληρότητας από τη ζώνη τήξης στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη του AH36 δικαιολογείται από το μέταλλο προσθήκης (συγκόλλησης) που είναι 316L – Mo, το οποίο δεν είναι κατάλληλο για να προσδώσει ομοιογένεια μεταξύ του AH36 και του 316L.
- Όσον αφορά στις ηλεκτροχημικές μεθόδους που εφαρμόστηκαν στο Flat Cell, πρέπει να σημειωθεί ότι έγιναν με χρήση παροχής αερίου αζώτου ως μέσου ανάδευσης του ηλεκτρολύτη στην πειραματική διάταξη. Επειδή η παροχή αζώτου αποτελεί προϋπόθεση για την εξαγωγή ασφαλέστερων αποτελεσμάτων (ομοιόμορφη συγκέντρωση ηλεκτρολύτη), προτείνεται η χρήση της σε παρόμοιες εφαρμογές.

- Οι μέθοδοι της Γραμμικής Πόλωσης και της προεκβολής Tafel είναι πολύ δύσκολο να προσδώσουν απόλυτες τιμές σχετικά με το ρυθμό διάβρωσης των διαφορετικών περιοχών της συγκόλλησης. Ωστόσο, παρουσιάζουν ομοιογενή αποτελέσματα σχετικά με την τάση διάβρωσης των διαφορετικών περιοχών της συγκόλλησης.
- Από τις περιοχές που εξετάστηκαν, μεγαλύτερη τάση για διάβρωση εμφανίζει το μέταλλο βάσης AH36 και μικρότερη το μέταλλο βάσης 316L. Ωστόσο, παρατηρείται κλιμακωτή τάση για διάβρωση από το ένα μέταλλο βάσης στο άλλο, κατά μήκος των διαφορετικών περιοχών που εξετάστηκαν.
- Πρέπει να σημειωθεί ότι οι περιοχές που εξετάστηκαν, με εξαίρεση το μέταλλο βάσης 316L και το μέταλλο βάσης AH36, δεν αφορούσαν σε ξεχωριστές ζώνες του συγκολλημένου ελάσματος (π.χ. μόνο θερμικά επηρεασμένη ζώνη ή μόνο ζώνη τήξης) και για αυτόν τον λόγο κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων (της 'εξαναγκασμένης' διάβρωσης) υπήρξε δημιουργία γαλβανικού στοιχείου.
- Παρατηρώντας μακροσκοπικά τα δοκίμια για κάθε περιοχή του ελάσματος μετά τις πειραματικές μεθόδους συμπεραίνουμε τα εξής: (α) η περιοχή του μετάλλου βάσης AH36, μετά την εφαρμογή της πόλωσης με τη μέθοδο Tafel, σε εύρος $+250\text{mV}$, έχει διαβρωθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, (β) τα δοκίμια του 316L εμφανίζουν, όπως αναμενόταν διάβρωση με βελονισμούς, (γ) στο μέταλλο βάσης οι βελονισμοί είναι πυκνοί και εμφανίζουν ένα κέντρο, έναν πυρήνα, όπου αναπτύσσονται γύρω από αυτόν κυκλικά και άλλοι βελονισμοί δημιουργώντας, τελικά, βελονισμό μεγαλύτερης διαμέτρου, (δ) στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη υπάρχει το ίδιο φαινόμενο με όμως πιο αραιούς βελονισμούς, (ε) ενώ στη ζώνη τήξης γίνονται ακόμα πιο αραιοί και χάνουν την κυκλική τους ανάπτυξη.

Θα ήταν ενδιαφέρον να επαναλάβει κανείς τις συγκεκριμένες ηλεκτροχημικές μεθόδους με φορητό κελί μικρότερης επιφάνειας, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού των ηλεκτροχημικών μεγεθών σε κάθε ζώνη χωριστά, κάτι που δεν πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία καθώς η όλη μελέτη πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά.

Όσον αφορά τις καμπύλες της ανοδικής πόλωσης, για τις οποίες δε μπόρεσαν να εξαχθούν ποσοτικά συμπεράσματα, ίσως θα ήταν ενδιαφέρον, σε δεύτερο χρόνο, να επαναληφθεί η μέτρηση για όλα τα δείγματα ξανά, μετά το πέρας της πρώτης πειραματικής μέτρησης. Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσαμε να συμπεράνουμε εάν το σύστημά μας βρισκόταν εξ αρχής σε ισορροπία ή όχι.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Παντελής, Δ.Ι., Χρυσουλάκης, Γ. Δ., Επιστήμη και Τεχνολογία Μεταλλικών Υλικών, Παπασωτηρίου, 1996.
- [2] Παντελής, Δ.Ι., Τσιούρβα Θ., Διάβρωση και Προστασία Ναυπηγικών Κατασκευών, 2006.
- [3] Παπάζογλου, Β.Ι., Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων, 1994.
- [4] Παπάζογλου, Β.Ι., Ναυπηγική Τεχνολογία, 1995.
- [5] Σκουλικίδης, Θ., Διάβρωση και Προστασία Υλικών, Συμεών, Αθήνα 1998.
- [6] Σκουλικίδης, Θ., Βασιλείου, Π., Διάβρωση και Προστασία Υλικών, Συμεών, Αθήνα 1994.
- [7] Καρύδης, Α.Π., Γ. Αργυρόπουλος, Η Μεταλλική Κατασκευή του Πλοίου, 2000.
- [8] Καρύδης, Α.Π., Επιθεώρηση, Συντήρηση και Επισκευή της Μεταλλικής Κατασκευής του Πλοίου, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2002.
- [9] Κονοφάγος, Κ., Μεταλλογνωσία, Τόμος ΙΙΙ, Τα Βιομηχανικά κράματα, 1^η έκδοση, Αθήνα 1967.
- [10] Κουλουμπή, Ν., Χρυσουλάκης, Γ., Θεωρητική Ηλεκτροχημεία, 2^η έκδοση, Συμεών, Αθήνα, 1992.
- [11] Κυρτάτος, Ν.Π., Σημειώσεις και Βοηθήματα για το Μάθημα «Συστήματα και Βοηθητικά Μηχανήματα Πλοίου», 2007.
- [12] Βασιλείου Π., Ανδρεόπουλος Α., Υλικά, Ξύλο, Κεραμικά, Πολυμερή και Μέταλλα, Ε.Μ.Π., 2004
- [13] Δημάρατος Λ., Διπλωματική Εργασία «Μελέτη της Διάβρωσης Συγκολλήσεων Ναυπηγικού Χάλυβα Υψηλής Αντοχής», 2005.
- [14] Κακουλάκης, Γ.Ν., «Συγκόλληση GMAW Ανοξειδωτου Χάλυβα (316L) με Κοινό Ναυπηγικό Χάλυβα (Grade A) με τη Χρήση Αυτοματοποιημένης Συγκολλητικής Διάταξης (Robot), Μεταπτυχιακή Εργασία, 2008.
- [15] Κοντογιάννης Π., Λιαρμακόπουλος Α., «Μελέτη Μετωπικών Συγκολλήσεων με τη Μέθοδο FCAW μεταξύ Ελασμάτων από Ναυπηγικό Χάλυβα ΑΗ36 και Ελασμάτων από Ωστενιτικό Ανοξειδωτο Χάλυβα 316L», Μεταπτυχιακή Εργασία, 2008.
- [16] Χονδρογιάννης Χ., «Μελέτη διάβρωσης συγκόλλησης GMAW ναυπηγικού χάλυβα grade A με χρήση ηλεκτροχημικών μεθόδων σε θαλάσσιο περιβάλλον», Διπλωματική Εργασία, 2003.
- [17] Akran U.O., Koko T.S., Agyub B., Dunbar T.E., Reliability Assessment of Corroding Ship Hull Structure, Naval Engineers Journal, Fall 2003, pp. 37
- [18] ASM Metals Handbook Volume 09 – Metallography And Microstructures, 2004.
- [19] ASM Metals Handbook Volume 13 – Corrosion, 2003.
- [20] ASM Metals Handbook Volume 13A – Corrosion Fundamentals, Testing and Protection, 2003.
- [21] ASTM G3-89 (Reapproved 1999), Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing.

- [22] ASTM G5-94 (Reapproved 1999), Standard Reference Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.
- [23] ASTM G59-97 Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements.
- [24] Blekkenhorst F., Ferrari G.M., Van der Wekken C.J., Ijsseling F.P., Development of High Strength Low Alloy Steels for Marine Applications, *British Corrosion Journal*, 1986, Vol.21, No 3, pp.163-176.
- [25] Brautigam, F.C., *Welding Practices that Minimize Corrosion*, Materials Engineering Forum.
- [26] *Corrosion of Weldments*, edited by J.R.Davis, ASM, 2006.
- [27] DNV Guidelines No8, *Corrosion Protection of Ships*, Det Norske Veritas.
- [28] Fontana, M.G., *Corrosion Engineering*, 3rd ed. Mc Graw Hill, 1985, pp.39-86.
- [29] Griffiths, A. J., Turnbull, A, *Corrosion Testing of Welds*, NPL Report, CMMT(A) 130, May 1999.
- [30] Hemmingsen, T., Hovdan., H., Sanni, P., Aagotnes, N.O., Determination of Tafel lines, *Electrochemical Soc., Proc.*, Vol. 2001-22, pp. 1044-1052.
- [31] Hemmingsen, T., Hovdan., H., Sanni, P., Aagotnes, N.O., The influence of electrolyte reduction potential on weld corrosion, *Electrochimica Acta*, 47 (2002) 3949-3955.
- [32] Jones D.A., *Principles and prevention of corrosion*, Prentice Hall, 2nd ed. 1995, pp.148-149, 199-231, 309-318.
- [33] Lippold John C. & Kotecki Damian J., *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, John Wiley and Sons, New York, 2005, pp287-307.
- [34] *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*, McGraw Hill, 8th Ed., pp 6-29.
- [35] Masubuchi, K., *Analysis of welded structures*, Pergamon Press, 1st ed., 1980.
- [36] Montemarano, T., W., Sack, B. P, Gudas, J.P., Vassilaros, M.G., Vanderveldt, H.H., High Strength Low Alloy Steels in Naval Construction, *Journal of Ship Production*, Vol. 2, No 3, 1986, pp. 145-162.
- [37] Sedriks, A.J., *Corrosion of Stainless Steels*, Corrosion Monograph Series, 2nd ed. 1996.
- [38] Sharp J.V., Billingham J., Robinson M.J., The Risk Management of High Strength Steels in Jack-ups in Seawater, *Marine Structures*, 14, (2001) pp. 537-551.
- [39] Sindo Kou, *Welding Metallurgy*, Second Edition, John Wiley and Sons, New York, 2003.
- [40] *Electrochemistry Power Suite user manual*, Princeton Applied Research, 2003.
- [41] *Basics of Corrosion measurements*, Princeton Applied Research, 1982.
- [42] *Electrochemistry and Corrosion measurements*, Princeton Applied Research, 1982.
- [43] B. Bramfitt, A. Benscoter, *Metallographer' s Guide, Practices and Procedures for Iron and Steel*, ASM International 2002.

- [44] B.L. Gabriel, SEM: A user's manual for materials science, ASM 1988.
- [45] C. Garcia, F. Martin, P. de Tietdra, Y. Blanco, M. Lopez, Pitting corrosion of welded joints of austenitic stainless steels studied by using an electrochemical minicell, *Corrosion Science* 50, pp. 1184 – 1194, 2008.
- [46] C. Garcia, F. Martin, P. de Tietdra, Y. Blanco, M. Lopez, Pitting corrosion of welded joints of austenitic stainless steels studied by using an electrochemical minicell, *Corrosion Science* 50, pp. 2390 – 2397, 2008.
- [47] David G Enos, *The Potentiodynamic Polarization Scan*, Solartron Group, 1997.
- [48] J. – P. Birat, "Alternative ways of making steel: Retrospective and prospective...", *La Revue de Metallurgie – CIT*, annee 101(2006, n° 11, pp. 937 – 955.
- [49] T. D. Kelly and G.R. Matos, *Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States*, 2005.
- [50] Tsirkas, S.A., Papanikos, P., Kermandis, Th., Numerical simulation of the laser welding process in butt-welding joint, *Journal of Materials Processing Technology*, 134, 2003, pp.54-69.
- [51] Aalco, *Stainless Steel Grade 316/1.4401*, datasheet.
- [52] Nidi, *The successful use of austenitic stainless steels in sea water*, American Iron and Steel Institute, Pub. n° 1259.
- [53] Nidi, *Welding of stainless steels and other joining methods*, American Iron and Steel Institute, Pub. n° 9 002.
- [54] Wegst, C.W., *Key to steel*, 1992.