



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΩΝ
ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ ΓΙΑ
ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΑΡΙΔΑΚΗΣ ΝΙΚ. ΑΝΤΩΝΗΣ
Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων - Μεταλλουργός

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Κ. ΚΟΛΛΙΑ

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβρης 2011

*Θα ήθελα να
αφιερώσω αυτή την
μελέτη στους γονείς
μου Νικόλαο και
Αθηνά Σαριδάκη που
με τόσο κόπο μου
συμπαραστέκονται
όλα αυτά τα χρόνια
μέχρι σήμερα,
θυσιάζοντας τον
εαυτό τους.*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	5
ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ – ΕΠΙΜΕΤΑΛΛΩΣΕΙΣ	5
1.1 Εισαγωγή.....	5
1.2 Ιστορική Αναδρομή	5
1.3 Επιψευδαργύρωση Χαλύβων.....	9
1.3.1 Γενικά για τον χάλυβα	9
1.3.2 Ιστορία του χάλυβα.....	9
1.3.3 Ποιότητες του χάλυβα	10
1.3.4 Χαλυβουργικά προϊόντα	12
1.5 Διάβρωση.....	24
1.5.1 Ορισμός.....	24
1.5.5 Διάβρωση μετάλλων σε υδατικό περιβάλλον	35
1.5.7. Τεχνικές προστασίας από την υγρή διάβρωση	45
1.5 Τεχνική της Ηλεκτροστίλβωσης.....	58
1.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Μεθόδων Επιψευδαργύρωσης	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	64
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	64
2.2 Μηχανικές Δοκιμές.....	65
2.4.4 Δοκιμή μικροσκληρότητας	79
2.5 Δοκιμή Κρούσης.....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	89
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	89
Πίνακας 3.2: Κωδικοποίηση δοκιμών – μέθοδοι επιμετάλλωσης.....	100
3.3 Μέθοδοι Χαρακτηρισμού δομής και επιφάνειας επικαλύψεων.....	101
3.3.1 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM – EDAX)	101
3.5 Μέθοδοι Προσδιορισμού Μηχανικών Ιδιοτήτων επικαλύψεων.....	107
3.5.3 Δοκιμή Μικροσκληρότητας (Vickers).....	113
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	116
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	116
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	150
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	150
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	156
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	158
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	162

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της δομής και των μηχανικών ιδιοτήτων χαλύβδινων ηλεκτρολυτικά επιψευδαργυρομένων εξαρτημάτων που χρησιμοποιεί η Δ.Ε.Η. στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής της.

Σφιγκτήρες τερματισμού και αναρτήσεως αγωγών, άκρα σύνδεσης μονωτήρων μέσης τάσης (Μ.Τ.), εξαρτήματα ασφαλειοαποζευκτών Μ.Τ., μικρο-εξαρτήματα των γραμμών διανομής, όπως παξιμάδια, ροδέλες, βίδες, κοχλίες, αποτελούν χαρακτηριστικές περιπτώσεις ορειχάλκινων ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένων εξαρτημάτων του δικτύου μεταφοράς και διανομής της Δ.Ε.Η.

Για την μελέτη αυτή κατασκευάστηκαν και διαμορφώθηκαν κατάλληλα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης τα οποία στην συνέχεια επιψευδαργυρώθηκαν ηλεκτρολυτικά με διάφορες μεθόδους (εργαστηριακά καθώς και με βιομηχανικές μεθόδους) με την εφαρμογή συνεχούς ρεύματος (D.C.).

Τα δοκίμια επιψευδαργυρώθηκαν με το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος όπως αυτό προδιαγράφεται από την αντίστοιχη προδιαγραφή της Δ.Ε.Η. για αντικείμενα με τις συγκεκριμένες διαστάσεις.

Για τον χαρακτηρισμό της δομής και της μορφολογίας των επικαλύψεων καθώς και του υποστρώματος, έγινε χρήση Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου (S.E.M.) και οπτικού Μεταλλογραφικού Μικροσκοπίου.

Για τον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού, κρούσης (κατά Charpy) και μικροσκληρότητας (Vickers).

Η σειρά των παραπάνω μετρήσεων πραγματοποιήθηκε παράλληλα και σε δοκίμια τα οποία δεν είχαν επιψευδαργυρωθεί ώστε να γίνει δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ – ΕΠΙΜΕΤΑΛΛΩΣΕΙΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ – ΕΠΙΜΕΤΑΛΛΩΣΕΙΣ

1.1 Εισαγωγή

Οι τεράστιες οικονομικές επιπτώσεις από κάθε μορφή διάβρωσης, αλλά και οι πολλές άλλες δυσάρεστες συνέπειες που επακολουθούν, επέβαλαν επιτακτικά την ανάγκη για ανάπτυξη μεθόδων και τεχνικών, τόσο για την πρόβλεψη και την εκτίμηση του διαβρωτικού κινδύνου όσο και για την αντιδιαβρωτική προστασία των μετάλλων. Η αντιμετώπιση του προβλήματος της διάβρωσης συνίσταται στην επιλογή των κατάλληλων σε κάθε περίπτωση υλικών με γνώμονα όχι μόνο τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους αλλά, και τη συμβατότητα της συμπεριφοράς και της αντοχής τους μέσα στο διαβρωτικό περιβάλλον που προορίζονται να λειτουργήσουν, στον περιορισμό των γενικών συνθηκών που προκαλούν ή επιτείνουν τη διάβρωση και την αποτελεσματική και σωστή εφαρμογή της καταλληλότερης μεθόδου ή συνδυασμού μεθόδων προστασίας. Οι κυριότερες μέθοδοι προστασίας που αποβλέπουν στη μείωση της ταχύτητας διάβρωσης, μέσω μεταβολής των θερμοδυναμικών ή / και των κινητικών στοιχείων της, είναι [1,3]:

- τροποποιήσεις του μετάλλου
- τροποποιήσεις του περιβάλλοντος
- τροποποιήσεις του ηλεκτροδιακού δυναμικού υλικού - περιβάλλοντος
- τροποποιήσεις της παραγωγικής διεργασίας.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Ίσως η αρχαιότερη αναφορά στην επιψευδαργύρωση μπορεί να βρεθεί σε μια Βαβυλωνιακή επιγραφή του 3^{ου} αιώνα, στην οποία αναφέρεται η χρήση του ψευδαργύρου ως μια φθηνή λύση για την προστασία του σιδήρου ή του χάλυβα. Παρά το γεγονός ότι έχουν βρεθεί αξιόλογες ποσότητες ψευδαργύρου σε αρχαιολογικά ευρήματα, καμία αναφορά του εν λόγω μετάλλου δεν εμφανίζεται σε αρχαίες Ελληνικές ή Ρωμαϊκές γραφές. Η πρώτη εμπορική πηγή ψευδαργύρου ήταν η Κίνα και η Ινδία. Τον 16^ο αιώνα εισάγονταν στην Ευρώπη μεγάλες ποσότητες ψευδαργύρου από την Κίνα και πέρασε σχεδόν ένας αιώνας μέχρι να αρχίσει η παραγωγή ψευδαργύρου σαν παραπροϊόν στα μεταλλεία μολύβδου της κεντροανατολικής Ευρώπης. Η μεγάλη αντοχή του ψευδαργύρου στη διάβρωση δεν

αξιοποιήθηκε για περίπου δύο αιώνες. Το 1741, ο Γάλλος χημικός Melonin για πρώτη φορά πραγματοποίησε πειράματα θερμής εμβάπτισης σε ψευδάργυρο. Η πρώτη ηλεκτροαπόθεση ψευδαργύρου έγινε το 1800, την ίδια χρονιά που ο Alessandro Volta ανακάλυψε το βολταϊκό στοιχείο. Ο Γερμανός Johann Wilhelm Ritter (Εικόνα 1.1) χρησιμοποίησε την μπαταρία του Volta για να αποθέσει ψευδάργυρο σε ψευδάργυρο και χάλυβα. Ο 19^{ος} αιώνας ήταν περίοδος αργής ανάπτυξης των μεθόδων επιψευδαργύρωσης και πολύ περιορισμένης εμπορικής χρήσης μέχρι και τα τελευταία χρόνια του αιώνα, οπότε και η γεννήτρια έγινε εμπορικά διαθέσιμη. Το 1805 μια αγγλική ευρεσιτεχνία αφορά μέθοδο επικάλυψης καρφιών και βιδών τοποθετώντας τα σε γαλβανική στήλη με ψευδάργυρο και θαλασσινό νερό. Οι πρώτες εμπορικές εφαρμογές της επιψευδαργύρωσης βασίστηκαν σε μία σειρά εφευρέσεων, όπως η αναγνώριση της παρουσίας ηλεκτρικού ρεύματος από τους σπασμούς που προκαλεί στους μύες των βατράχων, η ηλεκτρολυτική διάσπαση του νερού, ηλεκτρικές στήλες για την τροφοδοσία δεξαμενών ηλεκτραπόθεσης, η αναγγελία των νόμων του Faraday κ.ά.



**Εικόνα 1.1: Johann Wilhelm Ritter
(1776 -1810)**

Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη αυτή διαδραμάτισε η κατασκευή μεγάλων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας, όπως το δυναμό και η ηλεκτρομηχανική γεννήτρια, καθώς και η εύρεση κατάλληλων ιόντων που χρησιμοποιούνταν ως πηγές μετάλλου στην ηλεκτροχημική δράση. Πριν το 1830 οι επικαλύψεις χρησιμοποιούνταν για προστατευτικούς ή διακοσμητικούς λόγους αλλά όχι σε μεγάλη κλίμακα και σε μικρό εύρος μετάλλων και εφαρμογών. Οι πρώτες ευρεσιτεχνίες που αφορούν την ηλεκτρολυτική επιψευδαργύρωση (ηλεκτρογαλβανισμός) εκδόθηκαν στο Wall (Αγγλία) το 1852 και περιγράφουν ένα όξινο διάλυμα για απόθεση ψευδαργύρου σε σίδηρο με χρήση βολταϊκών στοιχείων. Άλλες αγγλικές ευρεσιτεχνίες ακολούθησαν το 1854, ενώ το 1855 ο Watt κατοχύρωσε με ευρεσιτεχνία το πρώτο κυανιούχο αλκαλικό λουτρό ψευδαργύρου. Την ίδια περίοδο στην Σοβιετική Ένωση, και συγκεκριμένα το 1837, ο Jacobi ανακάλυψε ότι σε ένα κελί επιχάλκωσης, ο χαλκός

αποτίθεται στην κάθοδο εάν χρησιμοποιείται θειικός χαλκός σαν ηλεκτρολύτης. Απομονώνοντας το χαλκό από την κάθοδο παρατήρησε, ότι ο χαλκός είχε μορφοποιηθεί ακριβώς στο σχήμα της καθόδου και έτσι κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο χαλκός αποτίθεται υπό την επίδραση ηλεκτρικού ρεύματος. Από το 1840 αρκετοί επιστήμονες στο Petersburg και στη Μόσχα ασχολήθηκαν με το θέμα της ηλεκτροαπόθεσης προσπαθώντας να επιλύσουν προβλήματα κυρίως τεχνικής φύσης. Μεγάλη σημασία δόθηκε στις επικαλύψεις με χρυσό ή ασήμι και κυρίως στην προσπάθεια δημιουργίας της κατάλληλης διάταξης που θα επικάλυπτε τα αντικείμενα σε όλες τους τις διαστάσεις. Η εξέλιξη της επιστήμης της ηλεκτροαπόθεσης στηρίχτηκε σε διαδοχικές ανακαλύψεις όπως η επιχρύσωση και επαργύρωση, η γαλβανοπλαστική, η χρήση μεταλλικών κυανιδίων για απόθεση μεταλλικών επιστρώσεων κ.ά.

Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1930, η πλειονότητα των επιψευδαργυρώσεων γινόταν με χρήση αδρανών όξινων διαλυμάτων που βασίζονταν στο θεικό και στο χλωριούχο ψευδάργυρο, είτε σε συνδυασμούς τους. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, τα όξινα διαλύματα τροποποιήθηκαν με χρήση ρυθμιστικών διαλυμάτων, όπως το βορικό οξύ και το χλωριούχο αμμώνιο. Επίσης την ίδια περίοδο άρχισε και η έρευνα για την προσθήκη οργανικών προσθέτων στα ηλεκτρολυτικά λουτρά, τα οποία άλλαζαν δραστικά τη κρυσταλλική δομή των αποθεμάτων. Μία τυπική σύνθεση λουτρού που χρησιμοποιήθηκε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα είναι η ακόλουθη:

- Θειικός ψευδάργυρος 100 g
- Θεικό νάτριο 20 g
- Χλωριούχος ψευδάργυρος 5 g
- Βορικό οξύ 2,5 g
- Liquorice 25 g
- Νερό 500 mL
- Θερμοκρασία δωματίου
- Πυκνότητα ρεύματος $0,5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$

Η παραπάνω σύνθεση αποτελεί πατέντα του A.Classen το 1906 ενώ παρόμοιας σύνθεσης λουτρά χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία εκείνη την περίοδο, τα οποία

αποτυπώθηκαν σε επιστημονικά συγγράμματα της εποχής, από τους L. Langbein και W. Pfanhausers, αναδεικνύοντας τη σπουδαιότητα των επιμεταλλώσεων ψευδαργύρου. Τα θειικά ηλεκτρολυτικά λουτρά συνέχισαν να είναι η κύρια πηγή αποθέσεων μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1930 λόγω του ότι ήταν οικονομικά, αποτελεσματικά, ήταν εύκολη η προμήθεια των απαιτούμενων χημικών, ενώ μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και για θερμό γαλβανισμό με εμβάπτιση. Από την αρχή του 20^{ου} αιώνα η έρευνα είχε επικεντρωθεί στην εύρεση πρόσθετων που θα βελτίωναν την απόδοση της απόθεσης σε όξινα λουτρά ψευδαργύρου. Τελικώς, παρόλο που κανένα οργανικό πρόσθετο δεν επέφερε αξιόλογα αποτελέσματα, ξεκίνησε μία έρευνα πάνω στη χρήση ετεροκυκλικών οργανικών προσθέτων που θα οδηγούσε στην εύρεση της λύσης του κυανιούχου λουτρού ψευδαργύρου. Το πρόβλημα με τη χρήση χλωριούχων ή θεικών λουτρών ψευδαργύρου που χρησιμοποιούνταν μέχρι το 1930 ήταν η μειωμένη ικανότητα απόθεσης που είχαν σε χαμηλές πυκνότητες ρεύματος. Για το λόγο αυτό επανεξετάστηκε η τεχνολογία των αλκαλικών κυανιούχων ηλεκτρολυτών, που ήταν γνωστή από το 1855. Τελικά, η ιδανική λύση δόθηκε από τον C.H. Proctor το 1921 ο οποίος πρότεινε το λουτρό της ακόλουθης σύνθεσης:

- Μεταλλικός ψευδάργυρος 22 g/L
- Κυανιούχο νάτριο 75 g/L
- Ανθρακικό νάτριο 30 g/L

το οποίο με μικρές μετατροπές θα χρησιμοποιούνταν σε βιομηχανική κλίμακα για σχεδόν 50 χρόνια.

Τα χρόνια μεταξύ 1935 και 1945 συχνά καλούνται ως η "χρυσή εποχή" των ηλεκτραποθέσεων ψευδαργύρου όπου και αναπτύχθηκαν πολλές εναλλακτικές τεχνικές όπως η προσθήκη μολυβδαινίου στο λουτρό από τον Westbrook, η προσθήκη αρωματικών αλδευδών από τον Hoffman, η προσθήκη πολυβυνιλικών αλκοολών από τον Wernuld καθώς και η κατασκευή της "Hull κυψελίδας" από τον Richard O. Hull. Στην δεκαετία του '60 μία πατέντα των Korpiun και Steeg οδήγησε στη χρήση αμμωνιακών λουτρών όπως το παρακάτω:

- Χλωριούχος ψευδάργυρος 15 – 50 g/L
- Χλωριούχο αμμώνιο 120 – 200 g/L
- Στιλβωτικοί φορείς 3,5 – 5 % κ.ό.
- Αρχικές στιλβωτικές ουσίες 0,1 – 0,5 % κ.ό.
- pH 5,2 – 6,2

ενώ στην δεκαετία του 50 δοκιμάστηκε χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία η χρήση αλκαλικών λουτρών [1,3].

1.3 Επιψευδαργύρωση Χαλύβων

1.3.1 Γενικά για τον χάλυβα

Ο **χάλυβας** (κοινώς *ατσάλι*) είναι κράμα σιδήρου–άνθρακα που περιέχει λιγότερο από 2,06% κ.β. άνθρακα, λιγότερο από 1,0% μαγγάνιο και πολύ μικρά ποσοστά πυριτίου, φωσφόρου, θείου και οξυγόνου. Οι κραματωμένοι χάλυβες, όπως π.χ. οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, κ.λπ., αποτελούν ειδική κατηγορία χαλύβων που περιέχουν υψηλότερα ποσοστά άλλων μετάλλων.

Είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο. Χρησιμοποιείται παντού: από την αρχιτεκτονική και τη ναυπηγική μέχρι την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων.

Το ατσάλι είναι ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά υλικά και οι χαλυβουργίες (εργοστάσια παραγωγής χάλυβα) ανήκουν στις «βαριές βιομηχανίες». Σε παλαιότερες εποχές, η βιομηχανική παραγωγή μιας χώρας αξιολογούνταν από την παραγωγή της σε χάλυβα. Μια από τις τρεις Ευρωπαϊκές Κοινότητες που ιδρύθηκαν το 1957 ήταν και η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Άνθρακα και Χάλυβα.

1.3.2 Ιστορία του χάλυβα

Η ιστορία του χάλυβα [7] ξεκινά γύρω στο 1000 π.Χ., όταν μεταλλουργοί της εποχής εκείνης άρχισαν να παράγουν χάλυβα συστηματικά με ενανθράκωση σπογγώδους σιδήρου. Πάντως οι Χετταίοι γνώριζαν πώς να παράγουν χάλυβα ήδη από το 2300 π.Χ. [8] Την εποχή της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, πολλοί μεσογειακοί λαοί, αλλά και

οι Ινδοί, οι Κινέζοι και οι Ιάπωνες γνώριζαν την τέχνη της παραγωγής σπογγώδους σιδήρου και χάλυβα, καθώς και την τέχνη της σκλήρυνσης του χάλυβα με θέρμανση και απότομη ψύξη («βαφή»). Περίφημα ήταν τα σφυρήλατα χαλύβδινα δαμασκηνά σπαθιά, που κατασκευάζονταν κατά τον Μεσαίωνα στη Συρία, αλλά και σε τόπους πιο μακρινούς όπως στην Ιαπωνία [8].

Η σύγχρονη ιστορία του χάλυβα αρχίζει στα μέσα του 19ου αι., όταν ο Άγγλος εφευρέτης Χένρι Μπέσσεμερ, ανακάλυψε πως να μετατρέπει τον τηγμένο χυτοσίδηρο σε χάλυβα με εμφύσηση οξυγόνου σε έναν κάδο («μεταλλάκτη») επενδυμένο με βασικά πυρίμαχα τούβλα. Την ίδια εποχή ανακαλύφθηκε η μετατροπή του χυτοσιδήρου σε χάλυβα σε καμίνους ανοικτής εστίας (κάμιнос Siemens-Martin). Σήμερα, η ανακάλυψη του Μπέσσεμερ χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για την απανθράκωση του χυτοσιδήρου. Η κάμιнос Siemens-Martin εγκαταλείφθηκε ως πιο ενεργοβόρος και λιγότερο φιλική προς το περιβάλλον.

1.3.3 Ποιότητες του χάλυβα

Ο χάλυβας δεν είναι ένα μοναδικό προϊόν. Σήμερα υπάρχουν περισσότερα από 3.500 διαφορετικά είδη χαλύβων με πολύ διαφορετικές φυσικές, χημικές και περιβαλλοντικές ιδιότητες. Περίπου τα τρία τέταρτα των ειδών των χαλύβων δημιουργήθηκαν μόλις τα τελευταία είκοσι χρόνια. Οι σύγχρονοι χάλυβες είναι πολύ πιο ανθεκτικοί σε σύγκριση με παλιότερες ποιότητες χαλύβων. Αν χτιζόταν σήμερα ο Πύργος του Άιφελ στο Παρίσι, θα χρειαζόταν το ένα τρίτο της ποσότητας χάλυβα. Ένα σύγχρονο αυτοκίνητο χρειάζεται 25% λιγότερο χάλυβα από ό,τι χρειαζόταν ένα αυτοκίνητο πριν από δυο με τρεις δεκαετίες.

Οι χάλυβες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες (grades), ανάλογα με την χημική τους σύσταση, την περαιτέρω κατεργασία τους, την κρυσταλλική τους δομή ή και την τελική τους χρήση.

Ως προς την χημική τους σύσταση, οι χάλυβες ταξινομούνται ως εξής:

- *Κοινοί* ή ανθρακούχοι χάλυβες (carbon steels). Περιέχουν άνθρακα (έως 2,06%) και μικρό ποσοστό μαγγανίου (έως 1,65%), πυριτίου (έως 0,6%) και χαλκού (έως 0,6%). Χρησιμοποιούνται πολύ και συγκολλούνται εύκολα. Με

βάση τον περιεχόμενο άνθρακα, οι κοινοί χάλυβες διακρίνονται στις εξής υποκατηγορίες:

- *χάλυβες χαμηλού άνθρακα ή μαλακοί χάλυβες* (mild steels· $C < 0,30\%$),
 - *χάλυβες μέτριου άνθρακα* (medium carbon steels· $0,30\% < C < 0,60\%$),
 - *χάλυβες υψηλού άνθρακα* (high carbon steels· $0,60\% < C < 1,00\%$), και
 - *χάλυβες πολύ υψηλού άνθρακα* (ultra-high carbon steels· $1,00\% < C < 2,00\%$).
- *Κραματομενοί χάλυβες* (alloy steels), δηλ. κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα σε σημαντική περιεκτικότητα. Τέτοιοι είναι οι
 - *ελαφρά κραματομενοί χάλυβες ή χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης*, που περιέχουν συνήθως χρώμιο, μολυβδαίνιο, βανάδιο, νικέλιο κ.λπ. σε συνολικό ποσοστό που δεν ξεπερνά το 10 % κ.β., όπως π.χ. οι *εργαλειοχάλυβες* ($0,7\% < C < 1,4\%$, $Mn < 0,3\%$) και οι
 - *ισχυρά κραματομενοί χάλυβες ή χάλυβες υψηλής κραμάτωσης*, όπως οι *ανοξειδωτοι χάλυβες* ($Cr > 10,5\%$), οι *ταχυχάλυβες* ($C \sim 0,7\%$, $Cr \sim 4,0\%$, $5,0\% < Mo < 10\%$, $1,5\% < W < 18,0\%$, $0\% < Co < 8,0\%$), κ.λπ.

Ανάλογα με την περαιτέρω κατεργασία τους, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- *χάλυβες διαμόρφωσης*, που υφίστανται περαιτέρω μηχανική κατεργασία (έλαση, διέλαση, κ.λπ.) και
- *χυτοχάλυβες*, που παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή πλινθωμάτων («χελωνών») και επαναχυτεύονται για την κατασκευή διαφόρων εξαρτημάτων.

Τέλος, συχνά γίνεται λόγος για φερριτικούς, περλιτικούς, μαρτενσιτικούς, μπαινιτικούς κ.λπ. χάλυβες ανάλογα με την κύρια κρυσταλλική φάση τους.

Η ονοματολογία των χαλύβων γίνεται σύμφωνα με διάφορα συστήματα τυποποίησης όπως DIN, ASTM, ΕΛΟΤ κ.λπ. Συχνά υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στο όνομα μιας κατηγορίας χάλυβα και την αντοχή της συγκεκριμένης κατηγορίας χάλυβα σε εφελκυσμό. Για παράδειγμα, το πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3 ορίζει ότι ο χάλυβας Β500C πρέπει να έχει όριο διαρροής μεγαλύτερο από 500 MPa (500 N/mm^2).



Εικόνα 1.2. Απόχυση τηγμένου χάλυβα από κάμινο ηλεκτρικού τόξου σε αμερικανικό χαλυβουργείο (περί το 1941).

1.3.4 Χαλυβουργικά προϊόντα

Τα χαλυβουργεία παράγουν ημιτελή και τελικά προϊόντα χάλυβα. Τα ημιτελή προϊόντα χάλυβα είναι συνήθως δοκοί τετραγωνικής διατομής («μπιγιέτες») με ακμή περίπου 10 εκ. ή κυκλικής διατομής με διάμετρο περίπου 25 εκ. (κυλινδρικές «μπιγιέτες» ή «κορμοί») και μήκος μερικά μέτρα, ή ακόμα πλατιά πρίσματα (πλάκες ή «σλαμπ») διατομής 10 εκ. x 100 εκ. και με μήκος μερικών μέτρων. Η παραγωγή των ημιτελών προϊόντων γίνεται με συνεχή χύτευση σε μήτρες από χαλκό, που ψύχονται με νερό και με έλαση σε ειδικά έλαστρα.

Τα ημιτελή προϊόντα αναθερμαίνονται και υποβάλλονται σε έλαση, διέλαση, ολκή κ.λπ. για την παραγωγή των τελικών προϊόντων, που μπορεί να είναι πλατέα ή επιμήκη [9]. Τόσο τα πλατέα προϊόντα όσο και τα επιμήκη παράγονται με θερμή ή ψυχρή έλαση. Η θερμή έλαση γίνεται σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 925 °C, οπότε οι παραμορφωμένοι κόκκοι του μετάλλου ανακρυσταλλώνονται. Η ψυχρή έλαση ωστόσο επιτρέπει την παραγωγή προϊόντων με διαστάσεις πολύ πλησιέστερες στις τελικές διαστάσεις που θέλει ο καταναλωτής.

Τα πλατέα προϊόντα διακρίνονται σε πλάκες ή χονδρές κατασκευαστικές λαμαρίνες (αγγλ., plates), με πάχος 1 έως 20 εκ. για χρήση στην ναυπηγική, την οικοδομή, κ.ά.,

και σε λεπτές λαμαρίνες σε ρολά ή επίπεδα φύλλα (αγγλ. strips), με πάχος 0,1 έως 1 εκ. για την αυτοκινητοβιομηχανία, την βιομηχανία οικιακών συσκευών, την οικοδομή, κ.ά.

Τα επιμήκη προϊόντα μπορεί να είναι *ράβδοι* ή *χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος* (μπετόβεργα - reinforcing bars), *ελάσματα* ή *λάμες* (τσέρκι - narrow strips), *μορφοσίδηρος* (χάλυβας διαμορφωμένης διατομής, όπως γωνίες, ταυ, κ.λπ - profiles), *κοίλες δοκοί* (hollow sections), *σωλήνες με ή χωρίς ραφή* (welded or seamless tubes), κ.ά. Στα επιμήκη προϊόντα συμπεριλαμβάνεται και το *σύρμα* (wire).

Εκτός από τα πλατέα και τα επιμήκη προϊόντα, ο χάλυβας διατίθεται ακόμα στην μορφή χυτής χελώνας (χυτοχάλυβας). Πολλές χαλβουργίες διαθέτουν φύλλα ή ρολούς επιψευδαργυρωμένου (γαλβανισμένου), επικασσιτερωμένου και επιχρωματισμένου χάλυβα.

1.3.5 Αντοχές

Η σχέση βάρους και αντοχής του ξύλου είναι καλύτερη από συνηθισμένα υλικά κατασκευών.

Υλικό	Αντοχή (κάμψη) Kg/cm ²	Πυκνότητα Kg/m ³	Λόγος Αντοχής/Βάρους
Σύνθετη Ξυλεία (κατηγορία I)	140	490	0,285
Δομικός Χάλυβας St 37 (Φωρτ. Η)	1400	7800	0,179
Ολόσωμη Ξυλεία	85	550	0,155
Σκυρόδεμα	80	1800	0,045

1.4 Γενικά για τον ψευδάργυρο (Zn)

1.4.1 Ιστορικά στοιχεία

Ενώσεις και κράματα του ψευδαργύρου (Zn) ήταν γνωστά από την αρχαιότητα.

Ονομασία γερμανικής προέλευσης: "zink" ("τσίγκος", υποδηλώνει συγγένεια με το "zinn": κασσίτερος). Ο ορείχαλκος (ή μπρούντζος ψευδαργύρου) είναι κράμα χαλκού-ψευδαργύρου γνωστό από την αρχαιότητα. Με τον ορείχαλκο κατασκευάζονταν σκληρότερα και ανθεκτικότερα εργαλεία και όπλα σε σχέση με εκείνα από καθαρό χαλκό. Αντικείμενα από ορείχαλκο που ανακαλύφθηκαν στην Παλαιστίνη χρονολογούνται από το 1000-1400 π.Χ. [10], ενώ ο Στράβων στα

"Γεωγραφικά" χρησιμοποιεί την έκφραση "ψευδής άργυρος" και περιγράφει μέθοδο παραγωγής ορειχάλκου με πρώτες ύλες ορυκτά του ψευδαργύρου και χαλκό [10-11]. Οι Ρωμαίοι πιθανότατα με την τεχνική αυτή παρήγαγαν ορείχαλκο στην Κύπρο με τον οποίο την εποχή του Αυγούστου (20 π.Χ.–14 μ.Χ.) κατασκεύαζαν εκτός από άλλα αντικείμενα και νομίσματα [12]. Χρησιμοποιήθηκε και από τους Γερμανούς για τη δημιουργία νομισμάτων κατά τη διάρκεια των δύο παγκόσμιων πολέμων. Επίσης το οξειδίο του ψευδαργύρου χρησιμοποιούνταν ως λευκή χρωστική στη ζωγραφική [13], ενώ οι Πέρσες παρασκεύαζαν φάρμακα στα συστατικά των οποίων περιλαμβάνονταν και ορυκτά του ψευδαργύρου [11].

Ο ψευδάργυρος όμως σε καθαρή μορφή απομονώθηκε γύρω στο 13^ο αιώνα μ.Χ. στην Ινδία. Η τεχνική αυτή πέρασε στην Κίνα όπου κατά τη δυναστεία των Ming (1368-1644) χρησιμοποιήθηκαν νομίσματα από ψευδάργυρο. Στην Ευρώπη ο ψευδάργυρος ταυτοποιήθηκε ως χημικό στοιχείο στη διάρκεια του 18^{ου} αιώνα, γι' αυτό και συχνά χαρακτηρίζεται ως το 8^ο μέταλλο, δεδομένου ότι είναι το 8^ο μεταλλικό στοιχείο που απομονώθηκε σε καθαρή μορφή [10-11]. Η πρώτη αυστηρά επιστημονική μελέτη για την παραγωγή του γράφτηκε το 1746 από τον Andreas Marggraf, αν και ένας Σουηδός χημικός, ο Anton von Swab, είχε προηγηθεί στην εργαστηριακή μελέτη, ενώ ένας Άγγλος ο William Champion ήδη το 1743 είχε καταγράψει την κινεζική τεχνική παραγωγής [10-11].

Η έκρηξη της βιομηχανικής επανάστασης έδωσε μεγάλη ώθηση στην παραγωγή του ψευδαργύρου με συνέπεια τη δημιουργία των πρώτων εγκαταστάσεων βιομηχανικής κλίμακας. Η χρήση του περιορίστηκε αρχικά στην παραγωγή ορειχάλκου, μέχρι τις αρχές του 19^{ου} αιώνα οπότε παρατηρήθηκε η εξαιρετική αντοχή του στη διάβρωση και αναπτύχθηκε ο θερμός γαλβανισμός που θεωρείται η παλαιότερη βιομηχανική μέθοδος προστασίας από τη διάβρωση.

1.4.2 Προέλευση-Παραγωγή

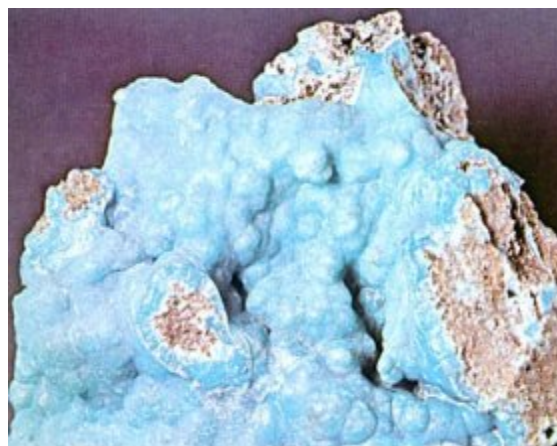
Ο ψευδάργυρος (με ατομικό αριθ. 30) είναι ένα στιλπνό, με ελαφριά κυανή απόχρωση μέταλλο το οποίο είναι σκληρό, κρυσταλλικό και τρίβεται εύκολα. Είναι το 24^ο στοιχείο από άποψη αφθονίας στο στερεό φλοιό της Γης.

Τα σπουδαιότερα ορυκτά του είναι ο σφαλερίτης ($Zn(Fe)S$) (Εικόνα 1.3) που θεωρείται η μόνη αξιόλογη πηγή), ο σμισθονίτης ($ZnCO_3$), η καλαμίνα ($Zn_4Si_2O_7(OH)_2$) (Εικόνα 1.4) και ο ζιγκίτης (ZnO), πιο σπάνιο ορυκτό του

ψευδαργύρου είναι ο **βιλλεμίτης**, Zn_2SiO_4 (Εικόνα 1.5). [14-15]. Κοιτάσματα Zn υπάρχουν σε πολλές περιοχές του πλανήτη (Η.Π.Α., Αγγλία, Βέλγιο, Αυστραλία κλπ). Στην Ελλάδα υπάρχουν στο Λαύριο, στη Χαλκιδική και στη Θάσο, όπου όμως η εκμετάλλευσή τους έχει κριθεί ασύμφορη [16,17].



Εικόνα 1.3. Σφαλερίτης, $Zn(Fe)S$



Εικόνα 1.4. Σμιθσονίτης ή καλαμίνα, $ZnCO_3$



Εικόνα 1.5. Βιλλεμίτης, Zn_2SiO_4



Εικόνα 1.6. Καθαρό μέταλλο

Δύο είναι οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του Zn: η ξηρή και η υγρή [14-15]. Κατά την ξηρή μέθοδο γίνεται φρύξη του ZnS και το παραγόμενο ZnO ανάγεται με C σε θερμοκρασία $1200^{\circ}C$ περίπου, οπότε τελικά λαμβάνονται ατμοί Zn που συμπυκνώνονται σε τήγμα καθαρότητας περίπου 98%. Η διαδικασία αυτή είναι αρκετά πολύπλοκη και διεξάγεται σε ειδικές συνθήκες λόγω της υψηλής πτητικότητας και δραστηριότητας του ψευδαργύρου που μπορούν να οδηγήσουν σε άμεση επανοξειδωσή του. Από το υγρό προϊόν που παράγεται με την αναγωγή του ZnO απομονώνεται με κλασματική απόσταξη μέταλλο καθαρότητας πάνω από 99.9%.

Κατά την υγρή μέθοδο το οξείδιο που παράγεται με φρύξη ZnS (όπως και κατά την ξηρή μέθοδο) διαλύεται σε αραιό H_2SO_4 και το παραγόμενο διάλυμα $ZnSO_4$ υφίσταται ηλεκτρόλυση, οπότε λαμβάνεται μέταλλο πολύ υψηλής καθαρότητας (99,99%).

1.4.3 Ιδιότητες

Οι φυσικές ιδιότητες του Zn συνοψίζονται στον Πίνακα 1.1 [19]. Από χημικής άποψης ο Zn θεωρείται δραστικό μέταλλο [14-16]. Το κανονικό δυναμικό του σε σχέση με το πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου είναι -0.762 V στους 25°C [10]. Ο ψευδάργυρος επομένως είναι δραστικότερος από το σίδηρο.

Η ταχύτητα διάβρωσης των επιψευδαργυρώσεων σε βιομηχανικές περιοχές είναι περίπου $5,6\ \mu\text{m} / \text{χρόνο}$, σε αστικές περιοχές $1,5\ \mu\text{m} / \text{χρόνο}$ ενώ σε αγροτικές περιοχές $0,8\ \mu\text{m} / \text{χρόνο}$. Το πάχος των επιψευδαργυρώσεων μεταβάλλεται, συνεπώς ανάλογα με την χρήση των αντικειμένων και το περιβάλλον στο οποίο εκτίθενται, κυμαίνεται από 5 έως $40\ \mu\text{m}$. Η αντοχή τους στην διάβρωση αυξάνεται σημαντικά αν οι επιψευδαργυρωμένες επιφάνειες παθητικοποιηθούν με εμβάπτισή τους σε χρωμικά ή φωσφορικά διαλύματα.

Κατά την έκθεσή του στην ατμόσφαιρα οξειδώνεται σχηματίζοντας ZnO που ακολούθως μετατρέπεται σε βασικό ανθρακικό άλας ($ZnCO_3 \cdot 3Zn(OH)_2$). Το άλας αυτό παρουσιάζει πολύ μικρή διαλυτότητα στο νερό. Στο γεγονός αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό η αντιδιαβρωτική δράση του.

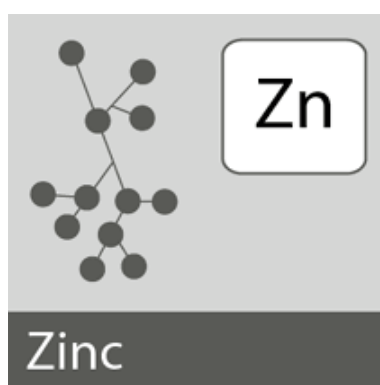
Αρκετά δραστικό μέταλλο, προσβάλλεται από όλα τα οξέα και τις ισχυρές βάσεις. Η τοξικότητα του μετάλλου και των ανόργανων ενώσεών του είναι σχετικά μικρή, ωστόσο μερικές από τις ενώσεις του απεδείχθησαν πειραματικά καρκινογόνα.

Θερμαινόμενος επίσης στον αέρα καίγεται με λαμπρή γαλαζωπή φλόγα σχηματίζοντας μεγάλες λευκές νιφάδες ZnO . Επιπλέον αντιδρά ζωηρά εν θερμώ με τα αλογόνα (F, Cl, Br, I), το θείο (S) και το φωσφόρο (P). Τέλος διαλύεται σε θερμά διαλύματα καυστικών αλκαλίων ($NaOH$) σχηματίζοντας ψευδαργυρικά άλατα (Na_2ZnO_2), όπως και σε HCl και αραιό H_2SO_4 εκλύοντας H_2 , ενώ σε πυκνό H_2SO_4 και HNO_3 διαλύεται σχηματίζοντας και προϊόντα αναγωγής των οξέων.

Αγγλικά	Γαλλικά	Γερμανικά	Ιταλικά	Ισπανικά
zinc	zinc	Zinc	zinco	cinc

Ατομικός αριθμός	30
Ατομικό βάρος	65,37
Ηλεκτρονική δομή	(Ar)3d ¹⁰ 4s ²
Κρυσταλλικό σύστημα	HCP
Πυκνότητα (25°C)	7140 kg/m ³
Σημείο τήξεως	419,5°C (692.7 K)
Σημείο ζέσεως (760 mm Hg)	907°C (1180 K)
Μέτρο ελαστικότητας	7 x 10 MN/m ^{4 2}
Θερμοχωρητικότητα (20°C)	0,382 kJ/kg.K
Λανθάνουσα θερμότητα τήξεως (419.5°C)	100,9 kJ/kg
Λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσεως (907°C)	1,782 MJ/kg
Ειδική θερμότητα	
στερεό (298-692,7 K)	$C = 22,4 + 10,5 \times 10 \times T \text{ J.mol}^{-1}$
υγρό	$C = 31,4 \text{ J.mol}^{-1}$
αέριο	$C = 20,8 \text{ J.mol}^{-1}$
Συντελεστής γραμμικής διαστολής (πολυκρυσταλλικός 20-250°C)	39,7 μm/m.K
Θερμική αγωγιμότητα (στερεός στους 18°C)	113 W/m.K
Αφθονία στο φλοιό της Γης	76 ppm
Αφθονία στη θάλασσα	0,005 ppm

Πίνακας 1.1: Φυσικές ιδιότητες του ψευδαργύρου (Zn) [14-18]



1.4.4 Χρήσεις

1.4.4.1 Γενικά

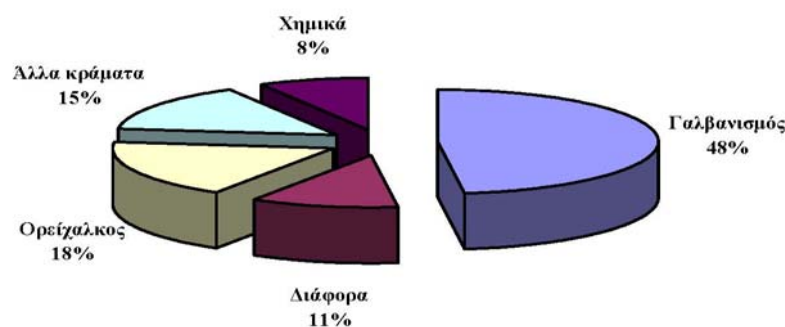
Οι χρήσεις του ψευδαργύρου παρουσιάζονται συνοπτικά στο Σχήμα 1.1, όπου παρατίθεται και η σχετική ποσότητα που καταναλώνεται από τη συνολική παραγωγή ψευδαργύρου σε παγκόσμιο επίπεδο [20].

Όπως φαίνεται λοιπόν από το Σχ. 1.1, περίπου το 50% της παγκόσμιας παραγωγής μεταλλικού Zn χρησιμοποιείται για την παραγωγή επικαλύψεων ή ανοδίων για την προστασία του χάλυβα από τη διάβρωση.

Μεγάλες ποσότητες χρησιμοποιούνται επίσης για την παραγωγή διαφόρων κραμάτων όπως ο ορείχαλκος (Zn-Cu/brass), ο γερμανικός άργυρος (Zn-Cu-Ni) κλπ. Από τα κράματα αυτά το κυριότερο είναι ο ορείχαλκος που εξαιτίας της μεγάλης αντοχής του στη διάβρωση χρησιμοποιείται σε μεγάλη έκταση στην οικοδομική για κατασκευή κρουνών ύδατος (βρύσες), εξαρτημάτων των σωληνώσεων κλπ [17].

Επιπρόσθετα στο ξηρό στοιχείο Leclanché ένα δοχείο από μεταλλικό ψευδάργυρο συνιστά την άνοδο, με αποτέλεσμα οι ανάγκες σε μεταλλικό ψευδάργυρο για την παραγωγή μπαταριών είναι εκτεταμένες [14-16].

Πέρα από τα προηγούμενα οι ενώσεις του ψευδαργύρου βρίσκουν διάφορες εφαρμογές. Το ZnO χρησιμοποιείται στην παραγωγή του συνθετικού ελαστικού, ως συστατικό λευκών χρωστικών και ως πρόσθετο σε διάφορα κεραμικά [14-16]. Επίσης, επειδή ο Zn συνιστά βασικό ιχνοστοιχείο για τους ζωντανούς οργανισμούς, τα άλατά του προστίθενται σε λιπάσματα, ζωοτροφές και σε διάφορα φαρμακευτικά σκευάσματα ή συμπληρώματα διατροφής [20-21]. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο ανθρώπινο σώμα υπάρχουν περίπου 2-5g Zn. Η ποσότητα αυτή συσσωρεύεται κυρίως στα οστά, ενώ συναντάται επίσης στα μάτια, στο πάγκρεας, στον προστάτη και στα ερυθρά αιμοσφαίρια.



Σχ. 1: Βασικές χρήσεις του ψευδαργύρου και σχετική κατανάλωση της παγκόσμιας παραγωγής για κάθε μια από αυτές για το έτος 2000 [20]

Όπως προαναφέρθηκε είναι το μέταλλο που χρησιμοποιείται κυρίως για την αντιδιαβρωτική προστασία του σιδήρου και του χάλυβα. Είναι ηλεκτραρνητικό ως προς το σίδηρο, αρκετά φθινό και παρέχει πολύ καλή αντιδιαβρωτική προστασία, ιδιαίτερα σε βιομηχανικό και αστικό περιβάλλον. Διαβρώνεται όμως εύκολα σε περιβάλλον με υψηλή υγρασία (σχετική υγρασία πάνω από 70%) και στις περιπτώσεις αυτές, αντικαθίσταται κυρίως από το κάδμιο.

Περίπου το 50% της παγκόσμιας κατανάλωσης Zn χρησιμοποιείται για την αντιδιαβρωτική προστασία του χάλυβα καθώς η συμπεριφορά της επιφάνειας του Zn, παίζει σημαντικό ρόλο έναντι της φθοράς εξαιτίας των καιρικών συνθηκών. Χαρακτηριστική είναι η σχέση των ρυθμών διάβρωσης Zn και χάλυβα η οποία κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1/10 και 1/20.



Εικόνα 1.7: Προϊόντα επιψευδαργύρωσης χάλυβα

Παγκοσμίως παράγονται περίπου 5.000.000 τόνοι μετάλλου. Κυριότερες παραγωγικοί χώρες: ΗΠΑ, Καναδάς, Αυστραλία, Αυστρία, Ρωσία [3].

Η μεγαλύτερη ποσότητα του Zn χρησιμοποιείται για την κατασκευή συσκευών, δοχείων και σωλήνων που έρχονται σε επαφή με το ύδωρ ή εκτίθενται στον αέρα και για την επιψευδαργύρωση ελασμάτων σιδήρου (γαλβανισμένη λαμαρίνα). Μεγάλες ποσότητες χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κραμάτων ως ο ορείχαλκος (μπρούντζος ψευδαργύρου) καθώς επίσης και στην κατασκευή μπαταριών (Zn-C). Ως ZnO χρησιμοποιείται στα ελαστικά, φαρμακευτικά, ως χρώμα και ως σταθεροποιητής πολυμερών [5-6].



Εικόνα 1.8: Μια συνηθισμένη χρήση του ψευδαργύρου είναι κάλυψη στεγών κατοικιών. Πρόχειρα κατασκευασμένοι χώροι καλύπτονται με τις γνωστές "τσιγκολαμαρίνες" [18]

1.4.4.2 Εφαρμογές ηλεκτρολυτικής επιψευδαργύρωσης στο Δύκτιο της Δ.Ε.Η.

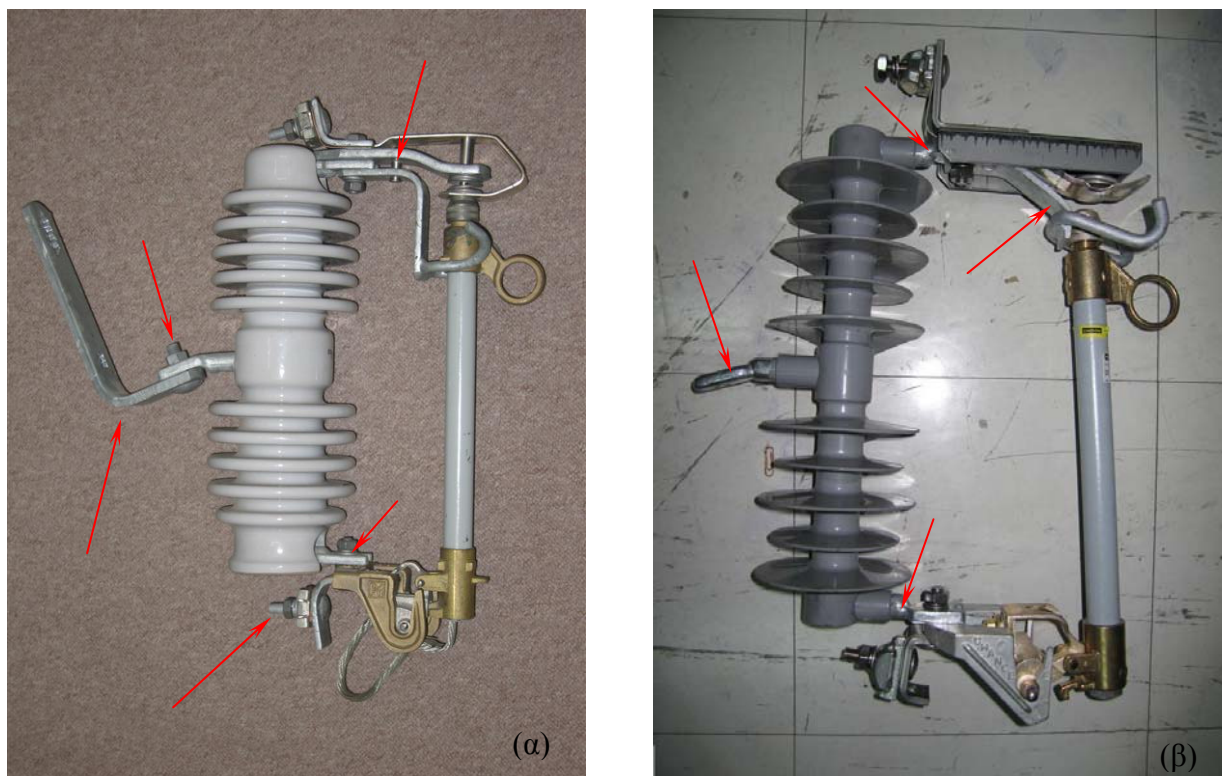
Στην Ελλάδα το μεγαλύτερο μέρος του Δικτύου διανομής της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) είναι εναέριο. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκονται κοντά σε θαλάσσιες περιοχές μας αναγκάζει τους Μηχανικούς να λάβουν σοβαρά υπόψη στο σχεδιασμό εξαρτημάτων το πρόβλημα της προστασίας από τη διάβρωση.

Στο δίκτυο της η Δ.Ε.Η. χρησιμοποιεί πολλά χαλύβδινα εξαρτήματα (διαφόρων διαστάσεων και σχημάτων), κυρίως για στήριξη εξοπλισμού. Η προστασία των εξαρτημάτων αυτών επιτυγχάνεται με επιψευδαργύρωση εν θερμώ ή ηλεκτρολυτική ανάλογα με τις διαστάσεις και την εφαρμογή τους. Τα μικρότερα σε διαστάσεις εξαρτήματα συνήθως επιψευδαργυρώνονται ηλεκτρολυτικά σύμφωνα με την Τεχνική Περιγραφή της Δ.Ε.Η. Χ.Κ. 11.01/11.11.87 – (GR-182).

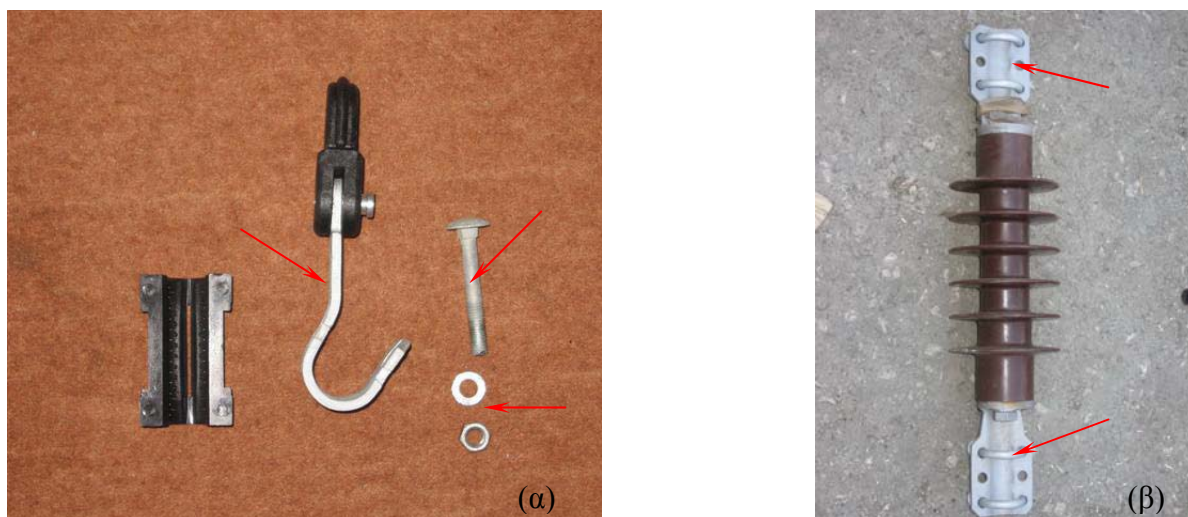
Μερικά από αυτά είναι βάσεις στήριξης μονωτήρων μέσης τάσης (Μ.Τ.), στηρίγματα ασφαλειοαποζευκτών, εξαρτήματα ανάρτησης αγωγών, καλύμματα, κ.α. (εικόνες 1.9 και 1.10).

Στην Τεχνική Περιγραφή της Δ.Ε.Η. Χ.Κ. 11.01/11.11.87 – (GR-182) (παρατίθεται στο παράρτημα) αναφέρονται οι ελάχιστες απαιτήσεις πάχους επιψευδαργύρωσης ανάλογα πάντα με τις διαστάσεις των χαλύβδινων αντικειμένων. Επίσης υπάρχουν

πληροφορίες που αφορούν τις απαιτήσεις των δοκιμών που εφαρμόζονται από τη Δ.Ε.Η. για τον έλεγχο των επικαλύψεων αυτών.



Εικόνα 1.9: (α) ασφαλειοαποζεύκτης 24KV με μονωτήρα πορσελάνης, (β) ασφαλειοαποζεύκτης 24KV με συνθετικό μονωτήρα



Εικόνα 1.10: (α) στήριγμα ανάρτησης συνεστραμμένων καλωδίων Μ.Τ. , (β) συνθετικός μονωτήρας 24KV

1.4.5 Γενικές χημικές ιδιότητες των ενώσεων του Zn

1.4.5.1 Οξειδωτικές καταστάσεις

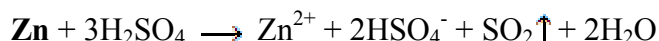
- Η μόνη σταθερή οξειδωτική κατάσταση του Zn είναι η Zn(II).

1.4.5.2 Διαλυτοποίηση του μετάλλου

- Ο Zn, ως δραστικό μέταλλο, διαλύεται σε όλα τα αραιά ισχυρά οξέα καθώς επίσης και στο οξικό οξύ με έκλυση H₂:



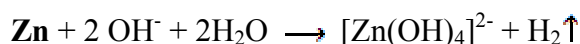
- Διαλύεται και σε οξειδωτικά οξέα, όπως το πυκνό-θερμό H₂SO₄:



- Διαλύεται στο HNO₃ και όσο αραιότερο είναι το HNO₃, τόσο χαμηλότερο αριθμό οξείδωσης έχει το προϊόν αναγωγής του. Έτσι, με πολύ αραιό HNO₃ παράγονται ιόντα NH₄⁺, ενώ με πυκνότερα διαλύματα παράγονται NO και NO₂:



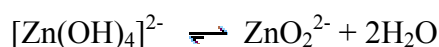
- Διαλυτοποιείται εύκολα σε διαλύματα ισχυρών βάσεων, με έκλυση H₂:



1.4.5.3 Σταθερότητα των διαλυμάτων του

- Τα ιόντα Zn²⁺ είναι σταθερά, αλλά είναι απαραίτητη η ελαφριά οξίνιση των διαλυμάτων τους για να περιοριστεί η έστω και σε μικρό βαθμό υδρόλυσή τους.

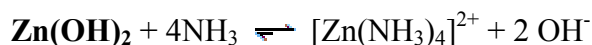
- Σε αλκαλικά διαλύματα σχηματίζεται λευκό, ζελατινώδες ίζημα Zn(OH)₂, το οποίο, ως επαμφοτερίζον υδροξείδιο, διαλύεται εύκολα σε περίσσεια βάσης σχηματίζοντας σειρά υδροξυσυμπλόκων και άλλων ανιοντικών σωματιδίων όπως: [Zn(OH)₄]²⁻, [Zn(OH)₃]⁻, HZnO₂⁻, ZnO₂²⁻ (ψευδαργυρικά ανιόντα)



1.4.5.4 Σχηματισμός συμπλόκων ιόντων

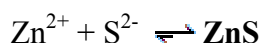
• Τα ιόντα Zn^{2+} σε υδατικά διαλύματα υφίστανται ως άχρωμα εφυδατωμένα σύμπλοκα του τύπου $[Zn(H_2O)_6]^{2+}$.

• Ο Zn(II) σχηματίζει σύμπλοκα με την NH_3 (χαρακτηριστική διαφορά από τα Al, Mn, Fe, Cr):

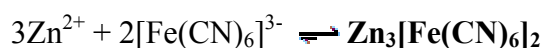


1.4.6 Ειδικά χαρακτηριστικά

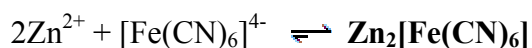
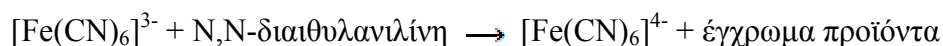
• Σχηματίζει θειούχο άλας σε υδατικά διαλύματα. Ο ZnS είναι το μόνο λευκό και πλέον δυσδιάλυτο θειούχο άλας της IIIης κατιόντων και για το λόγο αυτό μέρος του Zn μπορεί να συγκαθιζάνει με τα θειούχα άλατα της IIης κατιόντων. Ο ZnS είναι αδιάλυτος σε περίσσεια S^{2-} , σε ισχυρές βάσεις, σε οξικό οξύ, αλλά διαλύεται εύκολα σε αραιά ισχυρά οξέα:



• Με σιδηρικυανιούχα ανιόντα (εξακυανοσύμπλοκο του Fe(III)) παρέχει καστανοκίτρινο ίζημα σιδηρικυανιούχου άλατος:



• Εάν η προηγούμενη αντίδραση πραγματοποιηθεί παρουσία N,N-διαιθυλανιλίνης, $C_6H_5N(C_2H_5)_2$, τότε μέρος της οργανικής ένωσης οξειδώνεται από τα σιδηρικυανιούχα ιόντα προς έγχρωμα προϊόντα. Τα σιδηροκυανιούχα ιόντα (εξακυανοσύμπλοκο του Fe(II)), που παράγονται από την αντίδραση αυτή, αντιδρούν με τα ιόντα Zn^{2+} και καθιζάνει λευκό ίζημα σιδηροκυανιούχου ψευδαργύρου, το οποίο όμως προσροφά τα έγχρωμα προϊόντα της προηγούμενης αντίδρασης και χρωματίζεται έντονα ερυθρό:



$Zn_2[Fe(CN)_6]$ (λευκό) + έγχρωμα προϊόντα $\rightleftharpoons Zn_2[Fe(CN)_6] \cdot \text{έγχρωμα προϊόντα}$ (ερυθρό)

Τυπικές αντιδράσεις Zn^{2+}

Ιόντα S^{2-}

$Zn^{2+} + S^{2-} \rightleftharpoons ZnS$ / Τα ιόντα Zn^{2+} με ιόντα S^{2-} παρέχουν λευκό ίζημα ZnS (το μόνο λευκό θειούχο άλας της IIIης ομάδας), που είναι αδιάλυτο σε περίσσεια ιόντων S^{2-} , σε ισχυρές βάσεις, σε οξικό οξύ.

$ZnS + 2H^+ \rightleftharpoons Zn^{2+} + H_2S \uparrow$ / διαλυτό όμως σε αραιά ισχυρά οξέα [18].

1.5 Διάβρωση

1.5.1 Ορισμός

Ο ακριβής ορισμός της έννοιας της διάβρωσης δεν είναι εύκολο να διατυπωθεί παρά το γεγονός ότι έχουν γίνει πολλές προσπάθειες [22-26]. Η περιεκτικότερη διατύπωση είναι πιθανότατα η παρακάτω [27]:

Με τον όρο "διάβρωση" περιγράφεται η αντίδραση ενός ορισμένου υλικού με το περιβάλλον του η οποία προκαλεί μια μετρήσιμη μεταβολή στο υλικό αυτό. Η μεταβολή αυτή μπορεί να υποβαθμίσει τη λειτουργία ενός εξαρτήματος ή ενός ολόκληρου συστήματος από το συγκεκριμένο υλικό. Η φύση της μεταβολής μπορεί να είναι ηλεκτροχημική, χημική ή φυσική.

Όπως φαίνεται από αυτόν τον ορισμό η διάβρωση δεν περιορίζεται σε μια συγκεκριμένη ομάδα υλικών. Παρόλ' αυτά το φαινόμενο είναι πολύ πιο έντονο στα μεταλλικά υλικά, γι' αυτό και ο όρος χρησιμοποιείται περισσότερο στην πράξη στη συγκεκριμένη κατεύθυνση. Στην περίπτωση αυτή η μετρήσιμη μεταβολή που αναφέρει ο ορισμός συνίσταται ισυνήθως σε απώλεια μάζας του μετάλλου ή στην αντίδρασή του με στοιχεία του περιβάλλοντος που οδηγούν στη μετατροπή του σε άλλα υλικά [25-26]. Και στις δύο περιπτώσεις το φαινόμενο είναι ανεπιθύμητο γιατί έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων της κατασκευής από το συγκεκριμένο υλικό. Στην πρώτη περίπτωση αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η απώλεια μάζας οδηγεί σε μείωση της ενεργού διατομής ορισμένων ή όλων των μελών της κατασκευής. Αντίθετα στη δεύτερη περίπτωση, ενώ δεν υπάρχει απώλεια μάζας, τα προϊόντα που προκύπτουν από τη χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα έχουν πολύ μικρότερη μηχανική αντοχή από το αρχικό μέταλλο.

Η ποιότητα του περιβάλλοντος, συνδράμει καθοριστικά στην μορφή της διάβρωσης και της ταχύτητας που εξελίσσεται. Η τάση επανόδου των μετάλλων στην πρώιμη – αρχέγονη – μορφή τους που είναι τα οξειδία – μεταλλεύματα από τα οποία προέρχονται, αποδεδειγμένα μας δείχνει το νομοτελές χημικοφυσικό δρομολόγιο τους, λόγω της αυθόρμητης έλξης τους προς περιοχές υποβαθμισμένες ενεργειακά (όσον αφορά την ατομική δομή τους) που είναι τα οξειδία.

Όλα τα μεταλλεύματα (π.χ όπως ο Βωξίτης), με αναγωγικές μεθόδους και δράσεις, μετατρέπονται σε μέταλλα. Η μετατροπή αυτή, απαιτεί ως γνωστόν δαπάνη ενέργειας. Μέρος της ενέργειας αυτής μένει στα μέταλλα που αποκτήθηκαν και έτσι αποκτούν μεγαλύτερη ενέργεια (από την εσωτερική ενέργεια του μεταλλεύματος). Αυτό έχει την συνέπεια, τα μέταλλα να έχουν την προδιάθεση – σύμφωνα με το 2ο θερμοδυναμικό αξίωμα – για αυθόρμητη ενεργειακή υποβάθμιση, δηλαδή αυθόρμητη ροπή προς τον επανασηματισμό των αρχικών μορφών από όπου προήλθαν.

Οι δράσεις που πραγματοποιούνται μεταξύ ενός μεταλλικού υλικού και του περιβάλλοντος του, είναι ηλεκτροχημικής φύσης και αφορούν κυρίως την υγρή διάβρωση ή απλώς διάβρωση, που πραγματοποιείται σε υδατικό περιβάλλον.

1.5.2 Είδη Διάβρωσης

Η διάβρωση μπορεί να χωριστεί σε κατηγορίες με πολλούς διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με τα κριτήρια που χρησιμοποιούμε σε κάθε περίπτωση. Τρία είναι όμως τα πιο συνηθισμένα [28]:

1. **Η φυσική κατάσταση του διαβρωτικού μέσου:** Στην περίπτωση αυτή αναφερόμαστε σε υγρή και ξηρή διάβρωση. Η υγρή διάβρωση προϋποθέτει την ύπαρξη κάποιας υγρής φάσης (π.χ. θαλασσινού νερού, ατμοσφαιρικής υγρασίας, βιολογικών υγρών κλπ) προκειμένου να προχωρήσει. Αντίθετα στην ξηρή διάβρωση το διαβρωτικό μέσο είναι θερμά αέρια, όπως π.χ. τα καυσαέρια οχημάτων. Η ξηρή διάβρωση συχνά ονομάζεται και οξειδωση όταν το διαβρωτικό μέσο είναι οξυγόνο ή ατμοσφαιρικός αέρας.

2. **Ο μηχανισμός της διάβρωσης από χημικής άποψης:** Με βάση το κριτήριο αυτό διακρίνουμε την ηλεκτροχημική διάβρωση που εξελίσσεται μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων, οπότε οι διάφορες φάσεις που εμπλέκονται στο φαινόμενο μπορεί να μην είναι σε άμεση, αλλά μόνο σε ηλεκτρική επαφή και τη χημική διάβρωση όπου οι

χημικές δράσεις δεν είναι ηλεκτροχημικής φύσεως και η άμεση επαφή των διαφόρων φάσεων είναι απαραίτητη προϋπόθεση.

3. Η μορφολογία της φάσης που διαβρώνεται: Στην περίπτωση αυτή η διάβρωση Η διάβρωση μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα είδη.

Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση, (General corrosion) ονομάζεται έτσι η διάβρωση όταν στην επιφάνεια του μετάλλου ή του κράματος δημιουργείται ένα ομοιόμορφο¹ στρώμα προϊόντος διάβρωσης ή όταν πραγματοποιείται μία περίπου ομοιόμορφη διάλυση της επιφάνειας.

Διάβρωση με βελονισμούς : μακροσκοπική τοπική διάβρωση (Pitting corrosion). Πρόκειται για εκλεκτικό τοπικό σχηματισμό προϊόντος διάβρωσης² ή για εκλεκτική τοπική διάλυση της επιφάνειας. Η επιφάνεια φαίνεται να είναι τρυπημένη με καρφίτσα, αλλά κάθε τρύπημα έχει αρκετό βάθος.

Ψαθυρή θραύση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (Stress corrosion cracking). Το είδος αυτό της διάβρωσης είναι το πιο οδυνηρό από την άποψη του αποτελέσματος και οδηγεί σε εξαιρετικά μεγάλες και μεγάλων οικονομικών επιπτώσεων καταστροφές, για μικρή πραγματική απώλεια υλικού από διάβρωση. Όταν από διάβρωση με βελονισμούς ή μηχανικές κακώσεις δημιουργηθεί εσοχή στην επιφάνεια ενός τμήματος μηχανής ή εγκατάστασης που καταπονείται μηχανικά, τότε μπορεί να συμβεί ψαθυρή θραύση ολόκληρου του τμήματος, ακόμα και αν οι εφελκυστικές τάσεις είναι μικρότερες του 10% του φορτίου θραύσης του τμήματος αυτού³.

Σπηλαιώδης μηχανική διάβρωση (Cavitation erosion). Το είδος αυτό της διάβρωσης είναι καθαρά μηχανικό. Κατ' αυτό δημιουργούνται εσοχές, σπήλαια, κρατήρες από τοπική εξάχνωση υλικού, εξαιτίας δημιουργίας πίεσης. Τέτοιες συνθήκες δημιουργούνται σε περιστρεφόμενα πτερύγια αντλιών, έλικες πλοίων και αεροπλάνων. Μηχανική σπηλαιώδης διάβρωση πραγματοποιείται και κατά την ροή ρευστών σε σωλήνες.

¹ Περίπου ισόπαχο στρώμα.

² Ακόμα και όταν το μέταλλο ή το κράμα είναι καλυμμένο με τα προϊόντα της διάβρωσης ή με χρώμα ή έχει επιμεταλλωθεί.

³ Για παράδειγμα, για φορτίο θραύσης 50 Kg/mm² πραγματοποιείται θραύση και για φόρτιση κάτω των 5 Kg/mm².

Συναντάμε ακόμα την Βιολογική διάβρωση όπου προσβάλλει τα μέταλλα μέσω μικροοργανισμών και οργανικών ρύπων και την διάβρωση από Λιπαντικά που δημιουργείται από ακάθαρτα λιπαντικά ή και από τα οξειδωμένα πετρελαιοειδή.

Από τα προηγούμενα βέβαια είναι προφανές ότι ένα υλικό μπορεί να ενταχθεί ταυτόχρονα σε περισσότερες από μια διαφορετικές κατηγορίες.

Η ωθούσα δύναμη της διάβρωσης των μεταλλικών υλικών

Είναι γνωστό ότι σχεδόν κανένα μέταλλο δεν υφίσταται στη φύση σε καθαρή μορφή (με μικρές εξαιρέσεις, όπως π.χ. ο αυτοφυής χρυσός [29]), αλλά πάντα ενωμένο με άλλα στοιχεία, όπως το οξυγόνο ή το θείο σχηματίζοντας διάφορα ορυκτά ή μεταλλεύματα. Στην πράξη όμως στις διάφορες κατασκευές τα μέταλλα βρίσκουν εφαρμογή είτε σε καθαρή μορφή είτε ως κράματα με άλλα υλικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα διάφορα μεταλλεύματα, αν και περιέχουν τα επιθυμητά μέταλλα, δεν χαρακτηρίζονται από τις απαιτούμενες ιδιότητες (μηχανική αντοχή, ολκιμότητα, δυνατότητα συγκόλλησης κλπ) που τα τελευταία εκδηλώνουν σε καθαρή μορφή.

Από τα προηγούμενα λοιπόν καθίσταται προφανές ότι η χρήση ενός μετάλλου σε κάποια πρακτική εφαρμογή προϋποθέτει την παραλαβή του από το μέταλλευμα σε καθαρή μορφή (εξυγενισμός). Το αποτέλεσμα αυτό επιτυγχάνεται πάντοτε μετά από ένα μεγάλο πλήθος πολύπλοκων φυσικών και χημικών διεργασιών. Αυτό έχει ως συνέπεια το τελικό προϊόν που παραλαμβάνεται (καθαρό μέταλλο ή κράμα) να είναι ενεργειακά αναβαθμισμένο σε σχέση με την πρώτη ύλη, το μέταλλευμα. Για το λόγο αυτό τα μέταλλα τείνουν να μειώσουν το ενεργειακό περιεχόμενό τους. Έτσι, αντιδρούν αυθόρμητα με τα χημικά στοιχεία της ατμόσφαιρας και σχηματίζουν ενώσεις παρόμοιες με αυτές από τις οποίες απομονώθηκαν. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί στη διάβρωσή τους [25-26].

1.5.3. Ξηρή διάβρωση των μεταλλικών υλικών

1.5.3.1. Γενικά

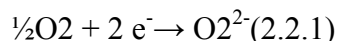
Η ξηρή διάβρωση, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, περιλαμβάνει τα φαινόμενα διάβρωσης που παρατηρούνται όταν μεταλλικά υλικά βρίσκονται σε επαφή με θερμά αέρια, όπου ο όρος "θερμά" υπονοεί θερμοκρασίες μερικών εκατοντάδων βαθμών Κελσίου. Στην περίπτωση αυτή τα θερμά αέρια αντιδρούν με την επιφάνεια του μετάλλου σχηματίζοντας διάφορες ενώσεις η χημική σύσταση και η δομή των οποίων επηρεάζεται από το εκτεθειμένο μέταλλο, το θερμό αέριο και τις συνθήκες του περιβάλλοντος (θερμοκρασία, στατική ή μεταβαλλόμενη ατμόσφαιρα, επίδραση

ακτινοβολιών κλπ). Για την έκθεση σε οξυγόνο ή ατμοσφαιρικό αέρα (οξειδωση) τα πιο συνηθισμένα προϊόντα είναι οξειδία. Για άλλα αέρια, όπως π.χ. καυσαέρια, σχηματίζονται εκτός από οξειδία, σουλφίδια, καρβίδια κλπ [25-26].

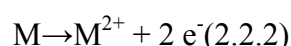
1.5.3.2 Μηχανισμός οξειδωσης

Για την αποσαφήνιση του μηχανισμού οξειδωσης ενός μεταλλικού υλικού αρχικά γίνεται η παραδοχή ότι η επιφάνειά του είναι ήδη καλυμμένη από ένα λεπτό στρώμα οξειδίου [25, 26, 30]. Το στρώμα αυτό δεν είναι αποτέλεσμα της επίδρασης υψηλών θερμοκρασιών αλλά σχηματίζεται πριν από αυτή κατά την έκθεση του μετάλλου στον ατμοσφαιρικό αέρα σε συνηθισμένες συνθήκες. Η παραδοχή αυτή είναι αληθής για τη συντριπτική πλειοψηφία των μετάλλων μεελάχιστες εξαιρέσεις, όπως ο χρυσός και ο άργυρος [29].

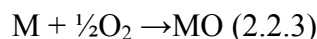
Όταν το μέταλλο εκτεθεί σε υψηλή θερμοκρασία, οξυγόνο από την αέρια φάση ανάγεται σε ιόντα O^{2-} στη διεπιφάνεια αερίου / οξειδίου σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση [25, 26, 30]:



Τα ηλεκτρόνια που απαιτούνται για την αντίδραση αυτή παρέχονται από το μεταλλικό υπόστρωμα το οποίο οξειδώνεται στη διεπιφάνεια οξειδίου / μετάλλου [25, 26, 30]:



Τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια που παράγονται από τις παραπάνω αντιδράσεις κινούνται διαμέσου του στρώματος οξειδίου σχηματίζοντας τελικά οξείδιο του εκτεθειμένου μετάλλου (scale). Συνεπώς η συνολική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι η παρακάτω [25, 26, 30]:



Βέβαια είναι πιθανό το μέταλλο να μην είναι δισθενές όπως υποτίθεται στις αντιδράσεις

(2.2.2) και (2.2.3). Επίσης είναι δυνατόν να σχηματίζει περισσότερα από ένα οξειδία στις συγκεκριμένες συνθήκες. Ακόμα όμως και στις περιπτώσεις αυτές ο μηχανισμός

είναι ο ίδιος. Αναπόφευκτα βέβαια οι αλλαγές του σθένους θα οδηγήσουν σε επαναδιατύπωση των παραπάνω αντιδράσεων. Η συνύπαρξη επίσης πολλών οξειδίων, ενώ δεν θα τροποποιήσει το μηχανισμό, αλλάζει τη χημική σύσταση του οξειδίου, καθώς κοντά στη διεπιφάνεια αερίου / οξειδίου αναπτύσσονται αυτά που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε οξυγόνο [25, 26, 30].

Όπως είναι φανερό η πρόοδος της οξείδωσης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη μικροδομή του στρώματος οξειδίου που εκφράζεται από τρεις παράγοντες:

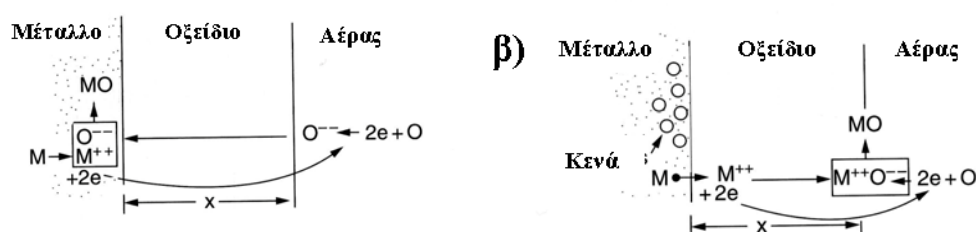
Το συντελεστή διάχυσης των ιόντων O^{2-} στο στρώμα του οξειδίου.

Το συντελεστή διάχυσης των ιόντων M^{2+} στο στρώμα του οξειδίου.

Την ευκινησία των ηλεκτρονίων κατά την κίνησή τους στο στρώμα του οξειδίου. Οι παραπάνω παράγοντες βέβαια δεν είναι οι μοναδικοί που ελέγχουν την οξείδωση.

Στην οξείδωση πολύ μεγάλη σημασία έχει το στρώμα του οξειδίου που σχηματίζεται.

Το στρώμα αυτό λειτουργεί ταυτόχρονα ως ηλεκτρολύτης, καθώς αποτελεί το μέσο που εξασφαλίζει την αγωγή των ιόντων, ως ηλεκτρονικός αγωγός, καθώς εξασφαλίζει ηλεκτρική επαφή ανάμεσα στις αντιδράσεις οξείδωσης και αναγωγής και ως ηλεκτρόδιο, επειδή στην επιφάνειά του ανάγεται το οξυγόνο. Η εξέλιξη επομένως της οξείδωσης επηρεάζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητές του.



Σχήμα 1.2: Σχηματική περιγραφή του μηχανισμού οξείδωσης ενός μετάλλου σε υψηλή θερμοκρασία. Το σκαρίφημα (α) αναφέρεται στην περίπτωση που τα ιόντα O^{2-} διαχέονται ταχύτερα στο στρώμα του οξειδίου, οπότε το οξείδιο αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια οξειδίου / μετάλλου. Η αντίθετη περίπτωση παρουσιάζεται στο σκαρίφημα (β), όπου παρουσιάζονται και τα κενά που είναι ενδεχόμενο να δημιουργηθούν στο μέταλλο [30].

Έτσι, το στρώμα του οξειδίου μπορεί να προστατεύει το υπόστρωμα και να επιβραδύνει σε πολύ μεγάλο βαθμό την οξείδωσή του. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να πληρεί τις ακόλουθες προϋποθέσεις [25, 31-35]:

Να είναι συμπαγές και να παρουσιάζει ισχυρή συνάφεια με το υπόστρωμα.

Η ανάπτυξή του να μη συνοδεύεται από μεγάλη αλλαγή του ειδικού όγκου του μετάλλου.

Να έχει χαμηλή τάση ατμών στη θερμοκρασία οξείδωσης.

Να έχει σημείο τήξεως υψηλότερο από τη θερμοκρασία οξείδωσης.

Να χαρακτηρίζεται από χαμηλούς ρυθμούς διάχυσης ιόντων. Στην περίπτωση αυτή το οξείδιο λειτουργεί ανασταλτικά καθώς η αύξηση του πάχους του δυσχεραίνει την κίνηση των ιόντων και συνεπώς την οξείδωση. Όταν όμως δεν πληρείται κάποια από τις προηγούμενες προϋποθέσεις η διάβρωση προχωρεί ανεξέλεγκτα μέχρι την πλήρη αποσύνθεση του μεταλλικού υποστρώματος (καταστροφική διάβρωση).

1.5.4 Υγρή διάβρωση των μεταλλικών υλικών

1.5.4.1. Γενικά

Με τον όρο υγρή διάβρωση εννοείται η διάβρωση που παρατηρείται όταν ένα υλικό βρίσκεται σε επαφή με κάποια υγρή φάση. Ο ορισμός αυτός είναι γενικός και περιλαμβάνει τη διάβρωση διαφόρων υποστρωμάτων σε διάφορα υγρά. Έτσι, π.χ. στην υγρή διάβρωση θα μπορούσε να ενταχθεί η διάβρωση του σκυροδέματος στο θαλασσίνο νερό, η διάβρωση του ξύλου στο έδαφος, η διάβρωση του χάλυβα σε επαφή με υγροποιημένα αέρια ή υγρά καύσιμα, όπως και πολλές άλλες περιπτώσεις. Στην παρούσα εργασία όμως εξετάζεται μόνο η διάβρωση μεταλλικών υλικών σε επαφή με υδατικές φάσεις, δηλαδή τα φαινόμενα που παρατηρούνται όταν ένα μέταλλο είναι βυθισμένο ή απλά εκτεθειμένο σε κάποιο υδατικό διάλυμα (θαλασσίνο νερό, ατμοσφαιρική υγρασία, νερό ύδρευσης κλπ) που αποτελεί και την πιο συνηθισμένη περίπτωση υγρής διάβρωσης.

1.5.4.2. Μηχανισμός υγρής διάβρωσης

Έστω ένα ομογενές και ισότροπο δοκίμιο ενός μεταλλικού υλικού, που αποτελείται από έναν ιδανικό μονοκρυστάλλο. Ας υποθέσουμε ότι το δοκίμιο αυτό βυθίζεται σε καθαρό νερό. Στις συνθήκες αυτές ιόντα από την επιφάνεια του μετάλλου μεταπηδούν στην υγρή φάση. Η συμπεριφορά αυτή ονομάζεται ηλεκτροδιαλυτική τάση [36-40].

Η απομάκρυνση όμως ιόντων από το μέταλλο συνεπάγεται τη δημιουργία περίσσειας ηλεκτρονίων στη μάζα του. Το αποτέλεσμα είναι η στερεά φάση να φορτιστεί αρνητικά ενώ το υγρό που την περιβάλλει θετικά. Αυτό το φορτισμένο σύστημα (στερεό και υγρό) ονομάζεται ημιστοιχείο ή ηλεκτρόδιο και η υγρή φάση ηλεκτρολύτης.

Το ηλεκτρικό φορτίο του στερεού ασκεί ελκτικές δυνάμεις στα ιόντα της υγρής φάσης, με αποτέλεσμα σε πολύ μικρό διάστημα να αποκαθίσταται ισορροπία ανάμεσα στο μέταλλο και στο υγρό και η διάλυση του μετάλλου να σταματά, ενώ στην υγρή φάση σε επαφή με το στερεό σχηματίζεται μια στοιβάδα ιόντων που ονομάζεται διπλοστοιβάδα Helmholtz [36-40].

Βέβαια, η ακριβής μορφή της στοιβάδας αυτής δεν είναι τόσο απλή και επηρεάζεται από το μέταλλο που δίνει ιόντα, όπως και από την υγρή φάση. Έτσι, τα ιόντα στο νερό είναι ενυδατωμένα, περιβάλλονται δηλαδή από έναν ορισμένο αριθμό ατόμων νερού εξαιτίας της πολικότητας που παρουσιάζουν τα τελευταία. Επίσης στην περίπτωση που η υγρή φάση δεν είναι καθαρό νερό, αλλά κάποιο υδατικό διάλυμα, τα ιόντα του διαλύματος συμμετέχουν και αυτά στο σύστημα. Αν επίσης στο σύστημα προϋπάρχουν ιόντα του μετάλλου η μεταφορά από το στερεό στο υγρό περιορίζεται.

Όπως φαίνεται από τα προηγούμενα, η διάβρωση ενός μετάλλου σε ένα υδατικό διάλυμα προχωρεί μέχρις ότου να αποκατασταθεί ισορροπία ανάμεσα στο μέταλλο και στην υγρή φάση. Αν η ισορροπία αυτή δεν διαταραχθεί, η διάβρωση δεν προχωρά. Η κατάρρευση της ισορροπίας επέρχεται αν με κάποιο τρόπο απομακρυνθούν ηλεκτρόνια από το στερεό ή ιόντα από το υγρό, οπότε η διάβρωση μπορεί να προχωρήσει μέχρι την πλήρη αποσύνθεση του μεταλλικού υποστρώματος. Σε πραγματικές συνθήκες (και όχι στην ιδανική κατάσταση που περιγράφηκε προηγούμενα) αυτό είναι ο κανόνας και μπορεί να οφείλεται [36-40]:

1. *Στο γεγονός ότι το μεταλλικό υπόστρωμα δεν είναι ομοιόμορφο* (πολυκρυσταλλικότητα, διαφοροποιήσεις στη χημική σύσταση, παραμένουσες τάσεις κλπ.). Έτσι η απόσπαση ιόντων από ορισμένα σημεία της μεταλλικής επιφάνειας γίνεται ταχύτερα απ' ό,τι σε άλλα. Επομένως τα πλεονάζοντα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται σε μια περιοχή απομακρύνονται από αυτή προς άλλες ηλεκτρικά ουδέτερες, δεδομένου ότι όλες οι περιοχές του μετάλλου είναι μεταξύ τους βραχυκυκλωμένες, καθώς τα μέταλλα είναι καλοί αγωγοί του

ηλεκτρισμού. Ο μηχανισμός αυτός είναι υπεύθυνος για τη διάλυση π.χ. του μεταλλικού ψευδαργύρου σε υδατικά διαλύματα HCl.

2. **Σε διαφοροποιήσεις της υγρής φάσης.** Όπως αναφέρθηκε η δημιουργία της διπλοστοιβάδας Helmholtz επηρεάζεται από τη σύσταση του ηλεκτρολύτη. Διαφορετική σύσταση σε διαφορετικές περιοχές επιδρά διαφορετικά. Έτσι π.χ. η διάβρωση μεταλλικών πλοίων είναι εντονότερη στα χαμηλότερα τμήματά τους επειδή στην περιοχή εκείνη η περιεκτικότητα του θαλασσινού νερού σε διαλυμένο οξυγόνο είναι διαφορετική απ' ότι στην επιφάνεια.
3. **Στην αποκατάσταση ηλεκτρικής επαφής του ηλεκτροδίου με κάποιο άλλο ηλεκτρόδιο.** Αυτό συμβαίνει όταν στονίδιο ηλεκτρολύτη εμβαπτίζονται δύο διαφορετικά μέταλλα που μεταξύ τους έχουν ηλεκτρική επαφή. Έτσι, αν σε ένα αραιό υδατικό διάλυμα H_2SO_4 βυθίσουμε μερικά μία ράβδο Zn και μια ράβδο Cu και συνδέσουμε τα μη βυθισμένα τμήματά τους με έναν μεταλλικό αγωγό, ο Zn που είναι δραστικότερος (αποδίδει δηλαδή ιόντα ευκολότερα) αρχίζει να διαλύεται ενώ ταυτόχρονα στη μάζα του σχηματίζονται ελεύθερα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά μεταφέρονται στο Cu ο οποίος φορτίζεται αρνητικά με αποτέλεσμα να έλκει και να αλληλεπιδρά με τα θετικά φορτισμένα ιόντα του ηλεκτρολύτη, χωρίς όμως ο ίδιος να διαλύεται. Το σύστημα αυτό των δύο ηλεκτροδίων ονομάζεται γαλβανικό στοιχείο. Το ηλεκτρόδιο του Zn που διαλύεται (και συμμετέχει σε αντιδράσεις οξειδωσης) ονομάζεται άνοδος, ενώ το ηλεκτρόδιο του Cu που δέχεται ηλεκτρόνια (και συμμετέχει σε αντιδράσεις αναγωγής) ονομάζεται κάθοδος.

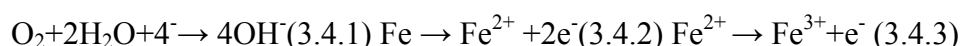
Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η έννοια της ανόδου και της καθόδου έχουν γενικευτεί [25]. Έτσι ο όρος "άνοδος" μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε επιφάνεια στην οποία λαμβάνει χώρα οξείδωση και ο όρος "κάθοδος" για οποιαδήποτε επιφάνεια συμμετέχει σε αντιδράσεις αναγωγής. Με τη λογική αυτή μπορούμε να μιλήσουμε για μικροανόδους και μικροκαθόδους ακόμα και στις περιπτώσεις εκείνες που έχουμε μόνο ένα μέταλλο σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη (περιπτώσεις 2 και 3). Στην περίπτωση αυτή ως μικροάνοδοι χαρακτηρίζονται οι περιοχές που απελευθερώνουν ιόντα (και υφίστανται οξείδωση), ενώ ως

μικροκάθοδοι αυτές που είναι σχετικά αδρανείς και δέχονται ηλεκτρόνια (και συμμετέχουν σε αντιδράσεις αναγωγής). Στην κατάσταση αυτή επειδή οι συνθήκες είναι δυναμικές, η θέση των μικροανόδων και των μικροκαθόδων μεταβάλλεται βαθμιαία καθώς προχωρεί η διάβρωση. Ουσιαστικά δηλαδή κάθε φαινόμενο υγρής διάβρωσης μπορεί να αναχθεί σε υγρή διάβρωση λόγω ηλεκτρικής επαφής δύο διαφορετικών ηλεκτροδίων. Σύμφωνα με την υπόθεση αυτή στο ένα από αυτά τα ηλεκτρόδια λαμβάνει χώρα οξείδωση και στο άλλο αναγωγή.

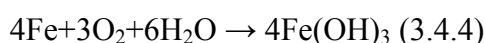
1.5.4.3 Η υγρή διάβρωση του χάλυβα

Ένα από τα πιο συνηθισμένα χημικά φαινόμενα που μπορεί να παρατηρήσει κανείς στη φύση είναι η υγρή διάβρωση των αντικειμένων που περιέχουν σίδηρο. Πράγματι, ο καθένας γνωρίζει ότι ένα αντικείμενο από σίδηρο "σκουριάζει" όταν εκτίθεται στην ατμόσφαιρα καθώς καλύπτεται από ένα χαρακτηριστικό στρώμα με κόκκινο-καφέ χρώμα. Το πρόβλημα βέβαια δεν είναι μόνο αισθητικό. Τα προϊόντα της διάβρωσης τα οποία αποτελούν αυτό το στρώμα χαρακτηρίζονται από πολύ υποβαθμισμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με το μεταλλικό υπόστρωμα. Επιπλέον έχουν μικρή συνάφεια με αυτό με αποτέλεσμα να απομακρύνονται με διάφορες φυσικές διαδικασίες (π.χ. βροχή) οπότε μειώνεται δραστικά η διατομή του αρχικού αντικειμένου. Συνέπεια όλων των παραπάνω είναι η ταχύτερη αύξηση των πιθανοτήτων αστοχίας.

Η υγρή διάβρωση του σιδήρου στη συνηθισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος μπορεί να περιγραφεί από τις παρακάτω χημικές αντιδράσεις [25, 26, 30]:



Από τις αντιδράσεις αυτές η (3.4.1) είναι η αντίδραση αναγωγής, ενώ οι (3.4.2) και (3.4.3) οι αντιδράσεις οξείδωσης. Συνδυάζοντας τις αντιδράσεις αυτές παίρνουμε τελικά τη συνολική αντίδραση διάβρωσης του σιδήρου:



Το υδροξείδιο του σιδήρου ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) είναι ένα κόκκινο ίζημα. Κατά την παραμονή του στην ατμόσφαιρα συμμετέχει και σε άλλες χημικές αντιδράσεις (αφυδάτωση,

αντίδραση με το CO₂ κλπ) σχηματίζοντας τελικά τα προϊόντα που αποτελούν τα οστρώμα της σκουριάς.

Τα πράγματα όμως δεν είναι τόσο απλά. Το σύνολο των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα είναι αρκετά πολυπλοκότερο [41-42]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η έκταση της υγρής διάβρωσης όπως ήδη αναφέρθηκε επηρεάζεται από την ανομοιογένεια της δομής και της σύστασης του υποστρώματος (τοποχημικός χαρακτήρας της διάβρωσης) εξαιτίας της παρουσίας ακαθαρσιών και εσωτερικών τάσεων σ' αυτό, όπως και πλαστικών ή ελαστικών παραμορφώσεων, προεξοχών αλλά και ρευμάτων διαφυγής (π.χ. όταν το αντικείμενο λειτουργεί ως γείωση για κάποια ηλεκτρική συσκευή). Επιπλέον σημαντικό ρόλο παίζουν και οι ενδεχόμενες ανομοιομορφίες του διαβρωτικού περιβάλλοντος (αγωγιμότητα, pH, παρουσία οξειδωτικών, θερμοκρασία, περιοχές επαφής με άλλα σώματα). Στα παραπάνω πρέπει να λάβουμε υπόψη και τη συμπεριφορά των προϊόντων της διάβρωσης (διαλυτότητα, ψαθυρότητα, ειδικός όγκος, χημική σταθερότητα στις συγκεκριμένες συνθήκες), γιατί στην περίπτωση αυτή δεν είναι όλα διαλυτά στην υγρή φάση όπως αναφέρθηκε προηγούμενα.

Πως εξελίσσεται

Η ταχύτητα με την οποία εξελίσσεται η διάβρωση, επηρεάζεται περισσότερο από την θερμοκρασία και τον βαθμό υγρασίας του περιβάλλοντος. Η ευκολία με την οποία εκδηλώνεται, εξαρτάται από κάποια στοιχεία ή χημικές ενώσεις που το περιβάλλον εμπεριέχει π.χ. ίχνη άλλων μετάλλων, ίχνη άνθρακα, κονιορτός ιονισμένος, οξείδια του S, του N, υδροθεικό οξύ, χλωρίδια, σουλφίδια κ.λ.π.

Πως δημιουργείται

Από τους εξής παράγοντες :

- A) Από τη δημιουργία των λεγομένων τριεπιφανειών
- B) Από την αλληλοεπίδραση μεταξύ του μετάλλου, της ατμόσφαιρας και ενός άλλου στοιχείου ή ένωσης
- Γ) Από τους δημιουργούμενους διαύλους χημικής επικοινωνίας, μεταξύ του μετάλλου και του περιβάλλοντος, μέσω χημικών ενώσεων, που ευνοούν (αναβαθμίζουν) τον βαθμό αγωγιμότητας π.χ. χλωρίδια
- Δ) Λόγω αταξίας της δομής των 2 ή περισσότερων στοιχείων επαφής του μετάλλου με αυτά. Ο βαθμός ανομοιογένειας της επιφάνειας του μετάλλου λόγω

μεταλλουργίας, μορφοποίησης, μηχανικής ή θερμικής κατεργασίας (βλ. διέλαση) ή και η συσσώρευση ιχθών άλλων μετάλλων, με διαφορετική αναλογία σύστασης, δημιουργεί διάβρωση

E) Από την έλλειψη γείωσης των μετάλλων

Z) Από την παρουσία περιπατητικών (αλητηριων) ρευμάτων

H) Από την συνεχή διακύμανση της ποιότητας του περιβάλλοντος (μεταβαλλόμενη θερμοκρασία, αγωγιμότητα, ΡΗ, περιεκτικότητα σε οξυγόνο κ.λ.π.).

1.5.5 Διάβρωση μετάλλων σε υδατικό περιβάλλον

Η διάβρωση των μετάλλων σε υδατικό περιβάλλον είναι ένα φαινόμενο ηλεκτροχημικής φύσης, δεδομένου ότι περιλαμβάνει δράσεις μεταξύ ιόντων και ηλεκτρονίων.

Μια ηλεκτροχημική δράση, η οποία εξελίσσεται από μία κατάσταση A προς μια κατάσταση B, είναι θερμοδυναμικά δυνατή μόνον όταν η μετάβαση από την κατάσταση A στην κατάσταση B συνοδεύεται από μείωση της ελεύθερης ενθαλπίας, ΔG , του συστήματος. Στην περίπτωση των ηλεκτροχημικών δράσεων, ισχύει:

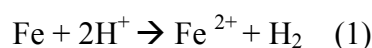
$$\Delta G = -n \cdot F \cdot E$$

Όπου n ο αριθμός των ηλεκτρονίων που ανταλλάσσονται κατά την αντίδραση, F η σταθερά του Faraday ίση με 96500 °C και, E το δυναμικό ισορροπίας μεταξύ των καταστάσεων A και B.

Η μετάβαση από το A στο B δεν είναι δυνατή παρά μόνον όταν η διαφορά των δυναμικών ισορροπίας μεταξύ των καταστάσεων B και A είναι αρνητική, δηλαδή όταν $E_A > E_B$. Η παραπάνω συνθήκη αν και αναγκαία δεν είναι ικανή για την πραγματοποίηση της δράσης $A \rightarrow B$. Πρέπει επιπλέον η ταχύτητα της δράσης να μην είναι αμελητέα [47,48].

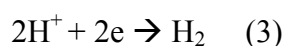
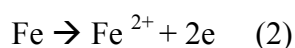
1.5.5.1 Ηλεκτροχημικές δράσεις

Όταν ένα μέταλλο, π.χ. ο σίδηρος βυθίζεται σε οξύ που δεν περιέχει διαλυμένο οξυγόνο, πραγματοποιείται μια αντίδραση διάλυσης του μετάλλου, η οποία μπορεί να γραφτεί:



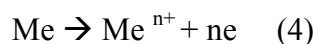
Σύμφωνα με την αντίδραση 1 ένα άτομο σιδήρου προσφέρει τα δύο ηλεκτρόνια σθένους που διαθέτει σε δύο ιόντα υδρογόνου και περνά στο διάλυμα υπό τη μορφή κατιόντος Fe^{2+} , με ταυτόχρονη έκλυση αερίου υδρογόνου.

Η παραπάνω αντίδραση μπορεί να γραφτεί με τη μορφή δύο ημιαντιδράσεων:

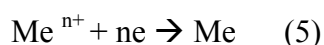


Η αντίδραση 2 αποτελεί αντίδραση οξείδωσης, κατά την οποία ένα άτομο σιδήρου του μεταλλικού πλέγματος περνά στο διάλυμα υπό τη μορφή ιόντων σιδήρου Fe^{2+} , δίνοντας δύο ηλεκτρόνια σθένους. Πρόκειται για ανοδική αντίδραση. Αντιθέτως, η αντίδραση 3 αποτελεί αντίδραση αναγωγής, κατά την οποία δύο ιόντα υδρογόνου H^+ , προσλαμβάνουν τα δύο ηλεκτρόνια της ανοδικής αντίδρασης, σχηματίζοντας ένα άτομο υδρογόνου. Πρόκειται για καθοδική αντίδραση.

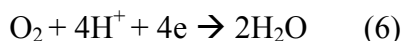
Ένα τμήμα μεταλλικού σιδήρου το οποίο υποβάλλεται στην παραπάνω διαδικασία ονομάζεται διπλό ηλεκτρόνιο, γιατί συμμετέχει ταυτόχρονα σε ανοδικά και καθοδική αντίδραση:



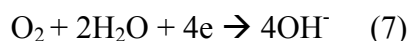
Αντίστοιχα, η αναγωγή των μεταλλικών ιόντων γίνεται ως εξής:



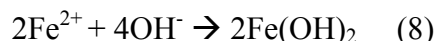
Αν το οξύ περιέχει διαλυμένο οξυγόνο, η ανοδική δράση παραμένει η ίδια, ενώ η καθοδική δράση γίνεται ως εξής:



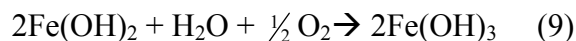
Σε ουδέτερο διάλυμα, στο οποίο υπάρχει διαλυμένο οξυγόνο, π.χ. διάλυμα ενός άλατος, το τελικό προϊόν διάβρωσης του σιδήρου είναι η σκουριά ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Η ανοδική αντίδραση τότε είναι η 3, ενώ η καθοδική παρουσιάζεται ακολούθως [47,48]:



Τα προϊόντα των δύο αυτών δράσεων, αντιδρούν μεταξύ τους σχηματίζοντας $\text{Fe}(\text{OH})_2$:

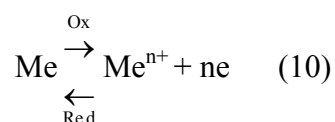


Το $\text{Fe}(\text{OH})_2$ που σχηματίζεται, επειδή είναι χημικά ασταθές, οξειδώνεται προς $\text{Fe}(\text{OH})_3$:



1.5.5.2 Δυναμικό ισορροπίας

Όταν σε έναν ηλεκτρολύτη που περιέχει ιόντα μετάλλου (Me^{n+}) βυθίσουμε ένα καθαρό και ομογενές μέταλλο Me τότε μεταξύ του μετάλλου και του διαλύματος πραγματοποιείται η εξής αντίδραση ισορροπίας:



Στην ισορροπία η ταχύτητα της αντίδρασης οξείδωσης Ox είναι η μισή με την ταχύτητα της αντίδρασης αναγωγής Red. Μέσα στο διάλυμα υπάρχει περίσσεια θετικών φορτίων (ιόντα Me^{n+}) και μέσα στο μέταλλο περίσσεια αρνητικών φορτίων (ηλεκτρόνια). Το μέταλλο αποτελεί ένα αντιστρεπτό ηλεκτρόδιο και καθώς το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία δεν πραγματοποιείται διάβρωση. Από τη σχέση του Nernst υπολογίζεται το δυναμικό ισορροπίας E που αναπτύσσεται μεταξύ του μετάλλου και του ηλεκτρολύτη

$$E = E_0 + \left(\frac{RT}{nF} \right) \cdot \ln \alpha_{\text{Me}^{n+}} \quad (11)$$

Όπου R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων ($8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$), T είναι η απόλυτη θερμοκρασία του συστήματος, n είναι ο αριθμός των ανταλασσομένων ηλεκτρονίων, F η σταθερά του Faraday (96500 C), $\alpha_{\text{Me}^{n+}}$ είναι η ενεργότητα των ιόντων Me^{n+} στον ηλεκτρολύτη και E_0 το πρότυπο δυναμικό του μετάλλου που αντιστοιχεί σε διάλυμα του οποίου η ενεργότητα των ιόντων Me^{n+} ισούται με την μονάδα. Θεωρώντας ότι η ενεργότητα ισοδυναμεί με την μοριακή συγκέντρωση σε θερμοκρασία 25°C και χρησιμοποιώντας δεκαδικούς λογάριθμους η εξίσωση 11 γίνεται:

$$E = E_0 + \left(\frac{0.059}{n} \right) \cdot \log |\text{Me}^{n+}| \quad (12)$$

Το δυναμικό E εκφράζεται σε Volt, αντιστοιχεί στην οξειδωτική δράση του μετάλλου Me και σχετίζεται με τη μεταβολή της ελεύθερης ενθαλπίας ΔG ως εξής:

$$\Delta G = nFE \quad (13)$$

Στην πράξη δεν είναι δυνατόν να μετρήσουμε απευθείας το δυναμικό ισορροπίας μεταξύ ενός μετάλλου και ενός διαλύματος άλατος του. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν χρησιμοποιήσουμε ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς στο οποίο μπορούμε να αναγάγουμε όλες τις μετρήσεις. Κατά σύμβαση θεωρούμε ότι το δυναμικό αναγωγής του υδρογόνου (αντίδραση 11), το οποίο χρησιμοποιείται ως δυναμικό αναφοράς, είναι μηδέν:



Έτσι λοιπόν το ηλεκτρόδιο αναφοράς πρέπει να είναι ένα ηλεκτρόδιο στο οποίο να πραγματοποιείται η αμφίδρομη αντίδραση οξείδωσης και αναγωγής του υδρογόνου. Ηλεκτρόδιο υδρογόνου κατασκευάζεται αν βυθίσουμε ένα κομμάτι πλατίνας σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος (1.2M) κορεσμένο σε αέριο υδρογόνου, υπό πίεση μιας ατμόσφαιρας. Η ενεργότητα των ιόντων του υδρογόνου είναι ίση με τη μονάδα και η αμφίδρομη αντίδραση 10 πραγματοποιείται στην επιφάνεια της πλατίνας χωρίς αυτή να αντιδρά [47,48].

1.5.5.3 Κινητική της διάβρωσης

Η ταχύτητα διάβρωσης δεν εξαρτάται από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Εξαρτάται, κυρίως, από το ρεύμα διάβρωσης, $i_{\text{διάβρωσης}}$, μετρούμενο σε A, μεταξύ των ηλεκτροδίων. Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, η απώλεια μάζας m , μετρούμενη σε g, του μετάλλου της ανόδου, με ατομικό βάρος a , σε χρόνο t , σε sec, δίνεται από τη σχέση:

$$M = A \cdot i_{\text{διάβρωσης}} \cdot \frac{t}{nF} \quad (15)$$

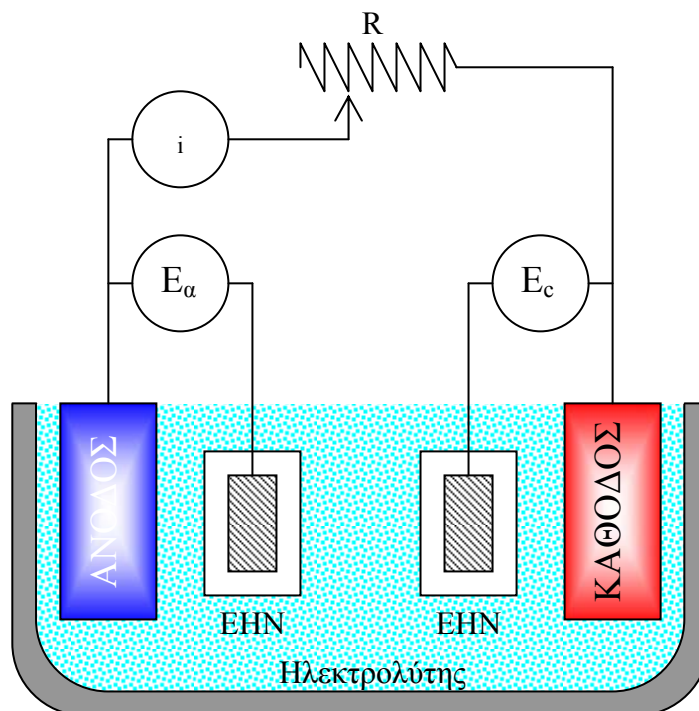
Όπου F η σταθερά του Faraday και n ο αριθμός των ηλεκτρονίων σθένους.

Στην πράξη και όταν το διάλυμα της ανόδου είναι ομοιογενές, εκφράζεται η ταχύτητα διάβρωσης ως απώλεια πάχους ετησίως σε mm ή ως απώλεια μάζας (σε mg) ανά τετραγωνικό δεκατόμετρο (dm^2) ημερησίως.

Το δυναμικό ισορροπίας των ηλεκτροδίων που αναφέρονται στον πίνακα 3 μετρήθηκαν σε ανοικτό κύκλωμα, δηλαδή το ρεύμα ήταν μηδενικό. Συνεπώς σε κάθε ηλεκτρόδιο τα ποσοστά της αναγωγής και της οξειδωσης ήταν ίσα, δηλαδή δεν πραγματοποιείτο διάβρωση. Προκειμένου να μελετηθεί η διάβρωση είναι ιδιαίτερα σημαντικό να είναι γνωστή η μεταβολή των δυναμικών των ηλεκτροδίων όταν κυκλοφορεί ρεύμα μεταξύ της ανόδου και της καθόδου, δηλαδή να είναι δυνατόν να μετρηθεί η μεταβολή του δυναμικού της ανόδου και της καθόδου σε συνάρτηση με το ρεύμα του στοιχείου. Το κύκλωμα που παρουσιάζεται στο σχήμα 4 επιτρέπει τέτοιου είδους μετρήσεις. Μέσα στον ηλεκτρολύτη μετράται η μεταβολή του δυναμικού ισορροπίας της ανόδου, E_a , και του δυναμικού ισορροπίας της καθόδου, E_c , ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς, το πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου, καθώς η αντίσταση, R , μειώνεται, δηλαδή το ρεύμα, i , αυξάνεται. Οι καμπύλες που λαμβάνονται με αυτό τον τρόπο ονομάζονται καμπύλες πόλωσης και έχουν τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 1.3 [47,48].

ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ	ΠΡΟΤΥΠΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΗΣ (V)
$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3\text{e}^-$ ←	+1,50
$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ ←	+ 1,23
$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^-$ ←	+1,19
$\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + \text{e}^-$ ←	+0,80
$4 \text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$ ←	+0,40
$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$ ←	+0,34
$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ ←	0
$\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$ ←	-0,13
$\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^-$ ←	-0,14
$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$ ←	-0,25
$\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^-$ ←	-0,40
$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ←	-0,44
$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^-$ ←	-0,74
$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$ ←	-0,76
$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$ ←	-1,67
$\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$ ←	-2,37
$\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + \beta$ ←	-2,71

Πίνακας 1.2: Πρότυπα δυναμικά ισορροπίας οξειδοαναγωγής στους 25°C



Σχήμα 1.4: Αρχή του κυκλώματος μέτρησης ανοδικών και καθοδικών καμπυλών πόλωσης (EHN = πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου)

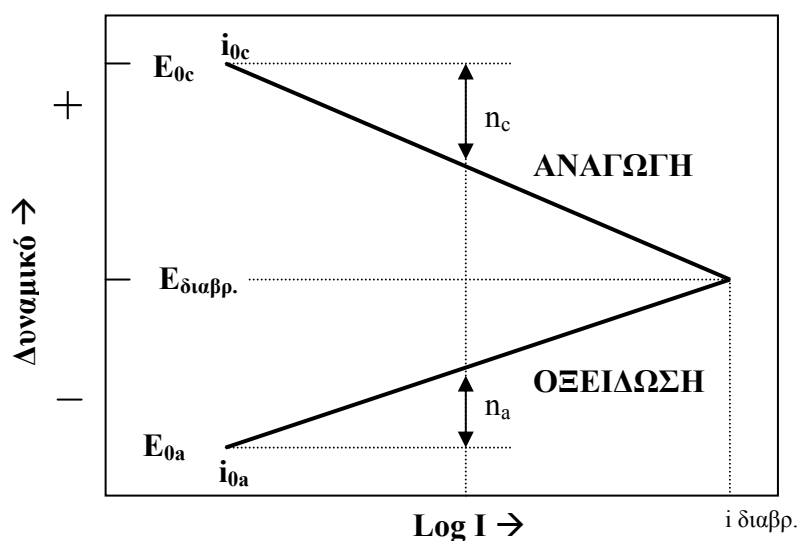
Για ρεύματα μεγαλύτερα της τιμής i_{0c} στην κάθοδο και i_{0a} στην άνοδο, το δυναμικό της καθόδου μειώνεται ξεκινώντας από την τιμή ισορροπίας σε ανοικτό κύκλωμα, E_{0c} και αυτό της ανόδου αυξάνεται ξεκινώντας από E_{0a} . Για ένα ρεύμα I , παράγεται μια καθοδική και μια ανοδική υπέρταση, η_c και η_a αντίστοιχα. Η μεταβολή της ανοδικής και καθοδικής υπέρτασης σε συνάρτηση με το ρεύμα, δίνεται από το νόμο του Tafel:

$$\eta = \beta \log \frac{i}{i_0} \quad (16)$$

όπου β η κλίση των καμπυλών πόλωσης.

Στις ανοδικές αντιδράσεις, δηλαδή στις οξειδώσεις, το β είναι θετικό, ενώ στις καθοδικές αντιδράσεις, δηλαδή στις αναγωγές, το β είναι αρνητικό. Οι τιμές του β εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρολύτη, και τη θερμοκρασία. Όταν η αντίσταση R (Σχήμα 1.4) είναι μηδέν, το καθοδικό και το ανοδικό δυναμικό ισορροπούν σε μια τιμή $E_{\text{διάβρωσης}}$, στην οποία αντιστοιχεί ένα ρεύμα διάβρωσης, $i_{\text{διάβρωσης}}$, του οποίου η πυκνότητα καθορίζεται από την τομή των καμπυλών πόλωσης (ευθείες Tafel, Σχήμα 1.3). Γενικά, οι ευθείες Tafel δεν τέμνονται, διότι το ρεύμα

διάβρωσης περιορίζεται από την αντίσταση του ηλεκτρολύτη. Ωστόσο, το ρεύμα διάβρωσης ορίζεται από την τομή των δύο καμπυλών πόλωσης.



Σχήμα 1.3: Καμπύλες ανοδικής και καθοδικής πόλωσης ηλεκτροδίων

Η σημασία αυτών των καμπυλών είναι σημαντική, διότι όσο μεγαλύτερες είναι οι απόλυτες τιμές του β τόσο μικρότερο είναι το ρεύμα διάβρωσης και συνεπώς η ταχύτητα διάβρωσης [47,48].

1.5.5.4 Παθητικοποίηση

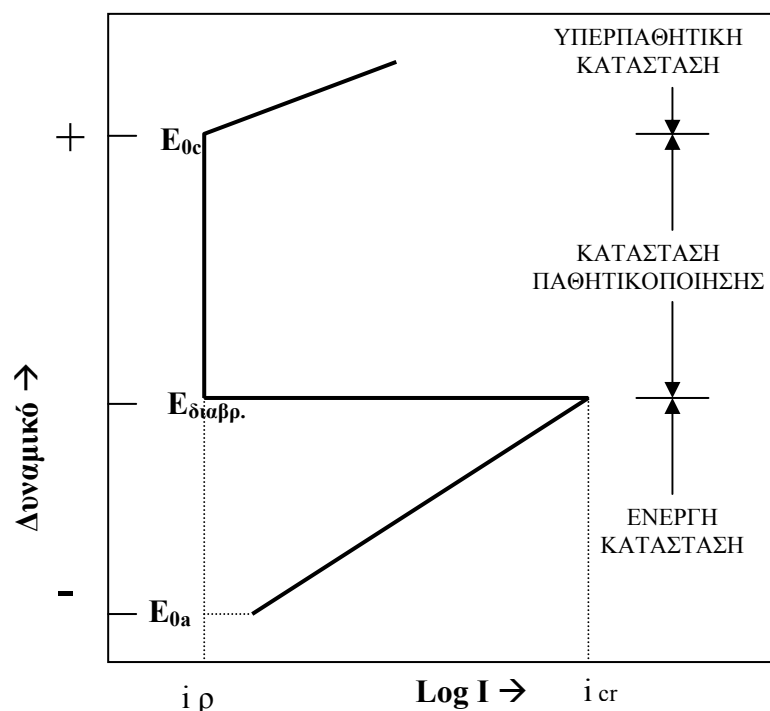
Κατά την διάβρωση ορισμένων μετάλλων και κραμάτων δεν παρατηρούνται τα παραπάνω φαινόμενα. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα παραμονής τους σε συγκεκριμένο διαβρωτικό περιβάλλον, η ταχύτητα διάβρωσης των μετάλλων αυτών γίνεται αμελητέα. Αν το κομμάτι του σιδήρου βυθιστεί σε αραιό διάλυμα οξέως, χωρίς προηγουμένως να έχει βυθιστεί σε πυκνό διάλυμα, η διάβρωση του επίσης δεν σταματήσει.

Η ερμηνεία αυτής της συμπεριφοράς έγκειται στο γεγονός ότι το ρεύμα διάβρωσης του μετάλλου μέσα στο διαβρωτικό περιβάλλον, π.χ. πυκνό διάλυμα οξέως, φθάνει σε πολύ υψηλές τιμές, με αποτέλεσμα το σχηματισμό στην επιφάνεια του, ενός στρώματος προϊόντων διάβρωσης που εμποδίζουν την περαιτέρω διάλυση του μετάλλου. Με τον τρόπο αυτό το μέταλλο παθητικοποιείται και η παραμονή του στο πυκνό ή σε αραιό διάλυμα του οξέος δεν επιφέρει περαιτέρω διάβρωση. Εάν καταστραφεί αυτό το στρώμα, η διάβρωση του μετάλλου συνεχίζεται. Σε αραιό διάλυμα οξέος δεν είναι δυνατός ο σχηματισμός ενός τέτοιου στρώματος και για το

λόγο αυτό η διάβρωση σε ένα τέτοιο διάλυμα δεν σταματά, δηλαδή το μέταλλο παραμένει ενεργό.

Στο παραπάνω παράδειγμα, ο λόγος των ρευμάτων διάβρωσης στην ενεργή κατάσταση του μετάλλου και μετά από την παθητικοποίησή του, είναι της τάξης του 5×10^4 . Από τα παραπάνω γίνεται σαφής η σημασία του φαινομένου της παθητικοποίησης για την προστασία από την διάβρωση. Ο σίδηρος παθητικοποιείται σε πολύ ειδικές συνθήκες και, σπάνια, χρησιμοποιείται σε αυτή την παθητικοποιημένη μορφή. Αντίθετα, άλλα μέταλλα και κράματα παθητικοποιούνται εύκολα και χρησιμοποιούνται ευρέως στη μορφή αυτή. Τέτοια είναι οι ανοξιδωτοί χάλυβες, τα κράματα νικελίου – χρωμίου (Inconel), τα κράματα κοβαλτίου – χρωμίου (Stellite), καθώς επίσης, και το τιτάνιο και τα κράματα του.

Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζεται η καμπύλη ανοδικής πόλωσης ενός παθητικοποιήσιμου κράματος. Όταν το δυναμικό διάβρωσης παίρνει τιμές μεγαλύτερες του δυναμικού E_{0a} , αλλά μικρότερες του δυναμικού E_F , που καλείται δυναμικό Flade, η σχέση δυναμικού – έντασης ρεύματος ακολουθεί το νόμο του Tafel, ενώ το ρεύμα διάβρωσης ελέγχεται από τις ανοδικές και καθοδικές υπερτάσεις. Όταν το ρεύμα παίρνει την κρίσιμη τιμή του (i_{cr}), τότε το δυναμικό παίρνει την τιμή Flade (E_F). Για τιμές δυναμικού μεγαλύτερες της E_F και έως μια τιμή E_t , το ρεύμα διάβρωσης σταθεροποιείται στην τιμή i_p , που αντιστοιχεί σε ένα ρεύμα διάβρωσης σε κατάσταση παθητικοποίησης. Όταν το δυναμικό υπερβεί την τιμή E_t , το κράμα περνά σε μια υπερπαθητική κατάσταση, το ρεύμα διάβρωσης αυξάνεται εκ νέου, ενώ το στρώμα παθητικοποίησης καταστρέφεται [47,48].



Σχήμα 1.5: Καμπύλη ανοδικής πόλωσης ενός παθητικοποιημένου κράματος

1.5.6 Προστασία από την οξείδωση και την υγρή διάβρωση

1.5.6.1 Σημασία και οικονομικές επιπτώσεις

Το φαινόμενο της διάβρωσης με τη συνολική του έννοια (υγρή διάβρωση και οξείδωση) ανεξάρτητα από τη μορφή και τον τρόπο εκδήλωσής του έχει πολύ σημαντικές επιπτώσεις σε οικονομικό επίπεδο. Θεωρείται ότι το 40% της παγκόσμιας παραγωγής μετάλλων σε ετήσια βάση χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση και επισκευή αστοχιών που οφείλονται στη διάβρωση [42]. Το ποσοστό αυτό δεν είναι υπερβολικό αν λάβουμε υπόψη ότι η διάβρωση μπορεί να αχρηστέψει μια κατασκευή χωρίς να προχωρήσει σε μεγάλη έκταση. Ως παράδειγμα αναφέρονται οι πτέρυγες αεροσκαφών όπου μείωση του πάχους κατά 10% επιβάλλει την αντικατάστασή τους [42].

Αν χρησιμοποιηθούν νομισματικές μονάδες για να εκφραστούν οι επιπτώσεις της διάβρωσης αξίζει να αναφερθεί ότι στις Η.Π.Α. το κόστος διάβρωσης για το 1995 ανήλθε σε 300 δισεκατομμύρια δολάρια [28]. Ανάλογες τιμές αναφέρουν και οι υπηρεσίες άλλων ανεπτυγμένων χωρών, ενώ τα πράγματα δεν βελτιώθηκαν στο παρόν.

Συνεπώς η προστασία από τη διάβρωση έχει ιδιαίτερη σημασία για την οικονομία. Αν ληφθούν υπόψη και οι κίνδυνοι που δημιουργούνται για τους εργαζομένους στη βιομηχανία, στη ναυτιλία, στις κατασκευές και αλλού από διαβρωμένο εξοπλισμό, διαβρωμένα μηχανήματα κλπ, όπως και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διάβρωσης, γίνεται εύκολα αντιληπτή η τεράστια ανάγκη που υφίσταται για την αποτελεσματική αντιμετώπισή της.

1.5.6.2 Τεχνικές προστασίας από την οξείδωση

Η προστασία των μεταλλικών υλικών από την οξείδωση επιτυγχάνεται κυρίως με την επιλογή του κατάλληλου κράματος. Έτσι στις περιπτώσεις κατασκευών που εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες όπως αγωγοί καυσαερίων, πτερύγια στροβιλομηχανών, τοιχώματα χημικών αντιδραστήρων κλπ αποφεύγονται οι συνηθισμένες λύσεις, αλλά χρησιμοποιούνται ανοξείδωτοι χάλυβες (χάλυβες με περιεκτικότητα σε Cr πάνω από 10,5%), υπερκράματα Ni-Cr ή Ni-Co κλπ [25, 32]. Στα κράματα αυτά πέρα από την αντοχή στη διάβρωση μεγάλη σημασία έχουν και οι μηχανικές ιδιότητες στη θερμοκρασία εφαρμογής, η αντοχή σε ερπυσμό και οι συντελεστής διαστολής τους δεδομένου ότι η μεταβολή των παραγόντων αυτών σε τόσο μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος μπορεί να είναι πολύ σημαντική.

Σε κάποιες περιπτώσεις επίσης η προστασία από την οξείδωση επιτυγχάνεται με κατάλληλες κεραμικές επικαλύψεις όπως η Al_2O_3 , η $ZrO_2-8\%Y_2O_3$, το TiO_2 κλπ [25]. Οι επικαλύψεις αυτές επειδή έχουν μικρή συνάφεια με τα μεταλλικά υποστρώματα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου δεν υπάρχει κίνδυνος φθοράς λόγω τριβής. Επίσης επειδή οι μηχανικές ιδιότητές τους και ο συντελεστής διαστολής διαφέρουν σημαντικά από αυτά των μετάλλων οι συνθήκες εφαρμογής τους είναι πιο περιορισμένες.

1.5.7. Τεχνικές προστασίας από την υγρή διάβρωση

Βασική προϋπόθεση για την προστασία από την υγρή διάβρωση είναι η εφαρμογή του κατάλληλου σχεδιασμού σε κάθε κατασκευή ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι παράγοντες εκείνοι που ευνοούν την υγρή διάβρωση (π.χ. η αποφυγή προεξοχών, κοιλοτήτων με στάσιμα υγρά, τμημά των υπό τάση κλπ). Ο σωστός σχεδιασμός όμως αν και επιβραδύνει το φαινόμενο δεν μπορεί να το αποτρέψει. Γι' αυτόν το λόγο η

προστασία από την υγρή διάβρωση πραγματοποιείται με τρεις μεθόδους [25, 26, 39, 40, 42]:

Προστασία με κατάλληλη παρέμβαση στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Προστασία με απομόνωση από το περιβάλλον.

Γαλβανική (ηλεκτροχημική) προστασία.

Οι παραπάνω μέθοδοι δεν διακόπτουν πλήρως την εξέλιξη της διάβρωσης. Ωστόσο όμως παρατείνουν σε πολύ μεγάλο βαθμό το χρόνο ζωής κάθε αντικειμένου, οπότε για ένα εύλογο χρονικό διάστημα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η διάβρωση αναστέλλεται.

Η παρέμβαση στο διαβρωτικό περιβάλλον συνίσταται συνήθως στην μείωση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας ροής του ηλεκτρολύτη, στην απομάκρυνση των οξειδωτικών ενώσεων και στη χρήση αναστολέων (inhibitors) που παρεμποδίζουν τις αντιδράσεις οξείδωσης ή αναγωγής. Σε κάθε περίπτωση βέβαια επιλέγεται η κατάλληλη τεχνική ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο αναφερόμαστε και με τις δυνατότητες που έχουμε να επέμβουμε. Η παρέμβαση στο διαβρωτικό περιβάλλον είναι στις περισσότερες περιπτώσεις μια φτηνή και εύκολη λύση. Πολλές φορές όμως δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί, ενώ γενικά δεν έχει τόσο δραστικά αποτελέσματα όπως οι άλλες μέθοδοι που θα αναφερθούν στη συνέχεια, γι' αυτό συχνά χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με αυτές.

Η απομόνωση από το περιβάλλον πραγματοποιείται επικαλύπτοντας το μεταλλικό υπόστρωμα με κατάλληλη επίστρωση (coating). Οι επιστρώσεις αυτές μπορεί να είναι οργανικές (π.χ. πολυμερικές βαφές-αλκυδικά, εποξειδικά κλπ χρώματα [27]), κεραμικές (σμάλτα, εμαγιέ, εφύαλωση) ή αδρανή μέταλλα (π.χ. για το χάλυβα άργυρος, νικέλιο, χρώμιο κλπ [25]). Η εφαρμογή επικαλύψεων είναι πολύ αποτελεσματική στις περισσότερες περιπτώσεις, αν και το κόστος είναι αρκετά υψηλό. Σε κάθε εφαρμογή βέβαια θα πρέπει να επιλεγεί η επικάλυψη εκείνη που εκδηλώνει τη μεγαλύτερη αντοχή στις συγκεκριμένες συνθήκες.

Η γαλβανική προστασία περιλαμβάνει δύο τεχνικές: την ανοδική και την καθοδική προστασία. Η ανοδική προστασία εφαρμόζεται σε μέταλλα που εκδηλώνουν ενεργητική παθητική συμπεριφορά, όπως ο σίδηρος [25]. Στην περίπτωση αυτή με κατάλληλη διάταξη εφαρμόζεται στο προς προστασία αντικείμενο υψηλό ρεύμα ή υψηλή τάση ώστε να περάσει στην παθητική περιοχή και ο ρυθμός διάβρωσης να ελαχιστοποιηθεί.

Η καθοδική προστασία μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε μέταλλο. Συνίσταται στην μετατροπή του αντικειμένου που θέλουμε να προστατεύσουμε σε κάθοδο ενός γαλβανικού στοιχείου. Αυτό έχει ως συνέπεια στην επιφάνεια του αντικειμένου να μη λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις οξειδωσης αλλά αναγωγής που δεν οδηγούν στη διάλυση του μεταλλικού υποστρώματος, με αποτέλεσμα αυτό να προστατεύεται.

Στην πράξη η καθοδική προστασία υλοποιείται είτε συνδέοντας το αντικείμενο που μας ενδιαφέρει με τον αρνητικό πόλο μιας εξωτερικής πηγής συνεχούς ρεύματος, είτε φέρνοντας το σε επαφή με ένα δραστικότερο μέταλλο (για το χάλυβα χρησιμοποιείται ο ψευδάργυρος, το μαγνήσιο ή το κάδμιο [25]). Στην περίπτωση αυτή σχηματίζεται γαλβανικό στοιχείο στο οποίο το αντικείμενο που θέλουμε να προστατεύσουμε αποτελεί την κάθοδο και το δραστικό μέταλλο την άνοδο που διαβρώνεται αδιάκοπα, γι' αυτό και ονομάζεται θυσιαζόμενη άνοδος και πρέπει να αντικαθίσταται τακτικά.

Η διάβρωση - ως προελέχθη - λαμβάνει χώρα, όταν άτομα οξυγόνου ενώνονται με άτομα του μετάλλου σχηματίζοντας οξείδια, που είναι υπεύθυνα για την εξασθένηση της δομής των μεταλλικών επιφανειών : μία επικάλυψη της επιφάνειας του χάλυβα π.χ με τσίγκο [ψευδάργυρο (γαλβάνισμα)] ο οποίος είναι πολύ καλός ηλεκτρονιοδότης, αντιδρά με το οξυγόνο προστατεύοντας το μέταλλο.

Μέθοδοι απόλυτης και οριστικής προστασίας των μετάλλων κατά της διάβρωσης, δεν υπάρχουν. Σήμερα μόνο να την επιβραδύνουμε μπορούμε και όχι να την αναστείλουμε.

Η αυστηρή τήρηση κάποιων κανόνων που η τεχνολογία μας παρέχει, είναι η μοναδική μέθοδος επιβράδυνσης της διάβρωσης. Οι μέθοδοι που εξασφαλίζουν την επιβράδυνση του φαινομένου, στοχεύουν στην εξάλειψη κάθε πιθανής δημιουργίας 'δυναμικού' διάβρωσης μεταξύ των μετάλλων και των παραγόντων διάβρωσης του περιβάλλοντος και βασίζονται α) σε επιφανειακές κατεργασίες, της μείωσης του δυναμικού διάβρωσης και β) στην επιφανειακή τους επικάλυψη με υλικά μικρότερων δυναμικών διάβρωσης, δίχως την μείωση δυναμικού τους. Μια παραπληροφόρηση ότι η θάλασσα είναι ένα διαβρωτικό περιβάλλον, πρέπει να ανασκευαστεί με βάση τα ανωτέρω αναφερθέντα. Οι διάφορες κατασκευές που τοποθετούνται κοντά στην θάλασσα λειτουργούν σε ειδικές κλιματολογικές συνθήκες, αλλά δεν είναι μόνο αυτές εξ άλλου μία ζώνη πλάτος 20 km από τις ακτές, θεωρείται θαλασσινό περιβάλλον.

Ο κίνδυνος διάβρωσης στις θαλάσσιες και παραθαλάσσιες περιοχές, οφείλονται σε

μια σειρά παραγόντων που συνδυαζόμενοι, λειτουργούν επιθετικά στο μέταλλο. Καθοριστικό ρόλο παίζει η θαλασσινή άμμος που μεταφέρεται από τον άνεμο και περιέχει 2 έντονα διαβρωτικά στοιχεία το NaCl (χλωριούχο νάτριο (αλάτι)) που δρα σαν ηλεκτρολύτης και το MgCl (χλωριούχο μαγνήσιο) που δρα υδρόφιλα, αιχμαλωτίζοντας υγροποιημένο ατμό ή υγρασία, που οξειδώνουν τα μέταλλα και αυξάνουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Ένα άλλο επικίνδυνο μέσο διάβρωσης επίσης είναι οι διάφοροι βιομηχανικοί ρύποι που μεταφέρονται με τον αέρα. Μελέτες που έχουν γίνει, αποδεικνύουν ότι μία προγραμματισμένη καθαριότητα των επιφανειών από κάθε είδος ρύπου, για την αποφυγή δημιουργίας μόνιμων ανομοιογενειών τρι-επιφανειών ή και πιθανών Γαλβανικών στοιχείων, προστατεύει τα μέταλλα.

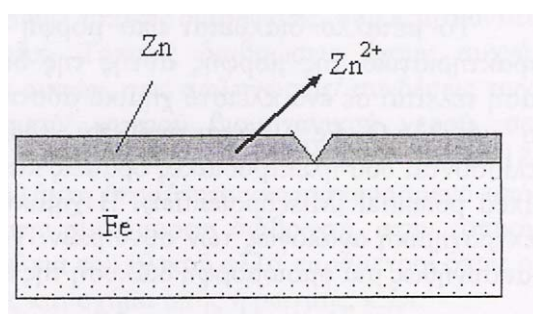
1.4.4 Μηχανισμοί προστασίας διάβρωσης του χάλυβα με Zn

Η προστασία του χάλυβα αλλά και του σιδήρου με χρήση στρώματος ψευδαργύρου, βασίζεται σε δύο μηχανισμούς:

Μηχανισμός 1^{ος}: Τα στρώματα Zn σχηματίζουν ένα πολύ συμπαγές φράγμα στο οξυγόνο, την υγρασία και τους όξινους ρυπαντές της ατμόσφαιρας, εμποδίζοντας έτσι την άμεση επαφή τους με το χάλυβα. Η χαμηλή ταχύτητα φθοράς του Zn εξαρτάται από το γρήγορο σχηματισμό αλάτων Zn ή άλλων ενώσεων στην επιφάνειά του ως αποτέλεσμα της αντίδρασής του με την ατμόσφαιρα. Μερικά από τα άλατα αυτά μπορεί να είναι διαλυτά στο νερό με αποτέλεσμα να απομακρύνονται με τη βροχή ή τη δρόσο, αλλά τα περισσότερα απ' αυτά είναι ουσιαστικά αδιάλυτα στο νερό και σχηματίζουν ένα προστατευτικό στρώμα επιβραδύνοντας έτσι την ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα.

Μηχανισμός 2^{ος}: Ο δεύτερος μηχανισμός είναι η καθοδική προστασία της χαλύβδινης επιφάνειας που πραγματοποιείται μέσω της διάβρωσης του προστατευτικού στρώματος του Zn. Όπως αναφέρθηκε, η διάβρωση των μετάλλων είναι μια ηλεκτροχημική διαδικασία μεταξύ δύο διαφορετικών περιοχών της επιφάνειας, οι οποίες συμπεριφέρονται ως άνοδος και ως κάθοδος ενός γαλβανικού στοιχείου. Η ροή ηλεκτρονίων λαμβάνει χώρα μεταξύ τέτοιων περιοχών με αποτέλεσμα την διάβρωση της ανόδου (Zn) και την προστασία της καθόδου (steel).

Στην περίπτωση του στρώματος Zn πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα, ο Zn αποτελεί την άνοδο που τείνει να διαλυτοποιηθεί όταν έρχεται σε επαφή με το νερό, ενώ η καθοδική επιφάνεια του χάλυβα προστατεύεται από τη διάβρωση (κανόνας της θυσιαζόμενης ανόδου). Αν η απόσταση μεταξύ της ανοδικής και της καθοδικής περιοχής υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή, τότε θα πραγματοποιηθεί διάβρωση του χάλυβα. Στο Σχήμα 1.6 απεικονίζονται οι περιορισμοί στην προστατευτική δράση του Zn σε μια επιφάνεια χάλυβα. Τα ιόντα Zn σχηματίζουν προστατευτικά άλατα τα οποία γεμίζουν τους πόρους της χαλύβδινης επιφάνειας μέχρι μια ορισμένη απόσταση από την άνοδο Zn [1,4,6].



Σχήμα 1.6: Καθοδική προστασία του χάλυβα

Είναι προφανές ότι στις χαλύβδινες επιφάνειες που καλύπτονται με Zn, η καθοδική προστασία θα εμποδίσει τη δημιουργία σκουριάς στο υπόστρωμα του χάλυβα σε αντίθεση με το τί μπορεί να συμβεί στο χάλυβα στην περίπτωση εφαρμογής οργανικών επιστρώματων με ελαττωματικές περιοχές.

Οι μέθοδοι γαλβανισμού, που είναι και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας, αφορούν τον πρώτο μηχανισμό προστασίας του χάλυβα μέσω επιστρώματος Zn.

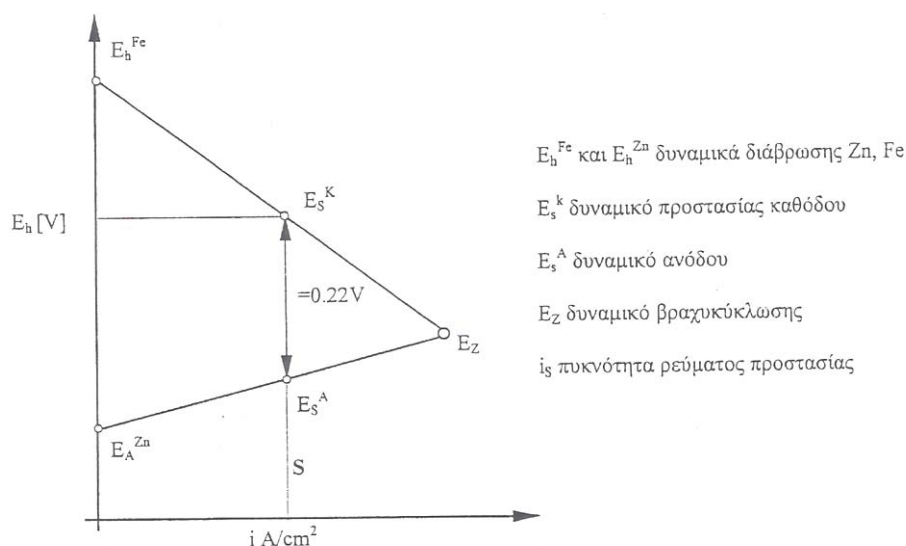
1.4.5 Μέθοδοι επιψευδαργύρωσης χάλυβα

Προετοιμασία

Στη γενική διαδικασία γαλβανισμού, τα τμήματα του χάλυβα απολιπαίνονται σε αλκαλικό διάλυμα και εκπλένονται σε ζεστό και κρύο νερό. Η σκουριά και τα άλατα απομακρύνονται με βύθιση σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος 14%, που ακολουθείται από έκπλυση με νερό. Στη συνέχεια, τα τμήματα του μετάλλου εμβαπτίζονται σε

υδατικό διάλυμα συνεχούς ροής που περιέχει χλωριούχο ψευδάργυρο και χλωριούχο αμμώνιο, και σε μερικές περιπτώσεις φθοριούχο νάτριο και / ή χλωριούχο κάλιο, νικέλιο ή δημήτριο. Σχηματίζεται λεπτό στρώμα, ξηραίνεται στους 75 - 120 °C και προστατεύει την επιφάνεια του χάλυβα από ρυπαντές έτσι ώστε να δημιουργηθούν όσο το δυνατό καλύτερες συνθήκες ύγρανσης κατά τη διάρκεια της μετέπειτα βύθισης σε τηγμένο Zn.

Με δεδομένο την επιφάνεια της σιδηράς κατασκευής που πρόκειται να προστατευτεί και τον επιθυμητό χρόνο προστασίας, εκτιμώντας την πυκνότητα ρεύματος προστασίας από το Σχήμα 1.7 μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε την μάζα του Zn που απαιτείται για την προστασία της κατασκευής.



Σχήμα 1.7: Μεταβολή δυναμικών κατά την καθοδική προστασία Fe μέσω θυσιαζόμενης ανόδου Zn. Πυκνότητα ρεύματος προστασίας –δυναμικό προστασίας. Ηλεκτρολύτης: θαλασσίνο νερό

Η εκτίμηση του δυναμικού προστασίας και της αντίστοιχης πυκνότητας ρεύματος απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Το δυναμικό προστασίας είναι το δυναμικό εκείνο στο οποίο πρακτικά το κράμα σιδήρου δεν διαβρώνεται. Σε δυναμικό μικρότερο το κράμα υπερπροστατεύεται, ενώ σε μεγαλύτερο προστατεύεται μερικά. Στην καθοδική προστασία πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψιν η συμπεριφορά της οργανικής επικάλυψης (χρώμα) που συνήθως χρησιμοποιείται ως αρχική προστασία. Με την χρησιμοποίηση της οργανικής επικάλυψης μπορεί να μειωθεί ο λόγος της ανοδικής προς την καθοδική περιοχή (πχ από 1/200 στο γυμνό χάλυβα σε 1/275 στον

επικαλυμμένο) και να χρησιμοποιηθεί μικρότερη πυκνότητα ρεύματος προστασίας [4,6].

Γαλβανισμός με βύθιση εν θερμώ (hot-dip galvanising)

Ο γαλβανισμός με βύθιση εν θερμώ είναι μια σχετικά απλή διαδικασία κατά την οποία ο χάλυβας βυθίζεται σε λουτρό τηγμένου Zn θερμοκρασίας 420 - 450 °C. Διακρίνονται δύο διαφορετικές διαδικασίες γαλβανισμού εν θερμώ, οι οποίες δημιουργούν διαφορετικές επιφάνειες Zn. Αυτές είναι:

- **γαλβανισμός κατά παρτίδα (στρώμα Zn πάχους 50-150 μm)**

- **γαλβανισμός συνεχούς ταινίας (στρώμα Zn πάχους 10-30 μm).**

Στην **πρώτη διαδικασία**, τα χαλύβδινα αντικείμενα, ξεχωριστά ή ανά ομάδες, βυθίζονται σε λουτρό τηγμένου Zn. Η βύθιση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός στρώματος, το οποίο προκαλεί το σχηματισμό ενός μεγαλύτερου ή μικρότερου ποσού κράματος Zn - Fe. Η στρώση Zn που πρόσκειται στην επιφάνεια του χάλυβα έχει τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε σίδηρο, συνήθως 30% περίπου. Η μεσαία στρώση περιέχει 6-12% σίδηρο και η πάνω στρώση είναι καθαρός Zn. Η εξωτερική στρώση έχει συνήθως μια στιλπνή, λαμπερή διακοσμητική εμφάνιση. Επειδή πολλές φορές το οξυγόνο και το μονοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας παγιδεύονται στον τηγμένο χάλυβα σχηματίζοντας οπές στη μεταλλική μήτρα, προστίθεται πυρίτιο (κατά τη διάρκεια του γαλβανισμού) με τη μορφή σιδηροπυριτίου με σκοπό την αποφυγή των ατελειών, την απόκτηση τηγμένου χάλυβα χωρίς αέρια και την αποξείδωση.

Η **δεύτερη διαδικασία**, του συνεχούς γαλβανισμού εν θερμώ, παράγει ένα αρκετά διαφορετικό επίστρωμα Zn. Στην περίπτωση αυτή ο χάλυβας με τη μορφή μιας συνεχούς ταινίας ή σύρματος καθαρίζεται από τα έλαια, τη σκόνη και τη σκουριά με θέρμανση σε κλίβανο. Στο πρώτο στάδιο όλοι οι οργανικοί ρυπαντές καίγονται με οξείδωση στους 500 °C περίπου. Η επιφάνεια οξειδώνεται σε μορφή οξειδίου του τρισθενούς σιδήρου. Στη συνέχεια η ταινία περνάει σε μια ζώνη αναγωγής (και ταυτόχρονα ψύξης) όπου εισάγεται υδρογόνο σε θερμοκρασία 900 °C περίπου, έτσι ώστε να προκύψει μια καθαρή χαλύβδινη επιφάνεια. Κατά τη διάρκεια της ψύξης

μπορεί να λάβει χώρα μερική επανοξειδωση, αλλά αυτή εμποδίζεται από τη ροή αζώτου.

Το ολικό πάχος του στρώματος Zn εξαρτάται από:

- (α) τον τύπο και την επιφανειακή σκληρότητα του υποστρώματος του χάλυβα
- (β) τη σύνθεση της επιφάνειας του χάλυβα
- (γ) το χρόνο βύθισης
- (δ) τη θερμοκρασία γαλβανισμού
- (ε) τον όγκο του χαλύβδινου τμήματος

με σημαντικότερες παραμέτρους τις δύο πρώτες.

Όσον αφορά στα καλύτερα αποτελέσματα σε συνδυασμό με οργανικά επιστρώματα, λαμβάνονται όταν το πάχος του στρώματος Zn είναι τουλάχιστον 15 μm , με προτιμητέα τιμή αυτή των 20 μm , έτσι ώστε να παρέχεται μακροχρόνια αντιδιαβρωτική προστασία ακόμα και όταν το χρώμα που έχει εφαρμοστεί, καταστραφεί με την πάροδο του χρόνου (τμηματικά ή και στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας). Πολύ λεπτά στρώματα Zn της τάξης των 2 - 10 μm , όπως αυτά που λαμβάνονται από ηλεκτροαπόθεση (επιψευδαργύρωση σε διάλυμα άλατος

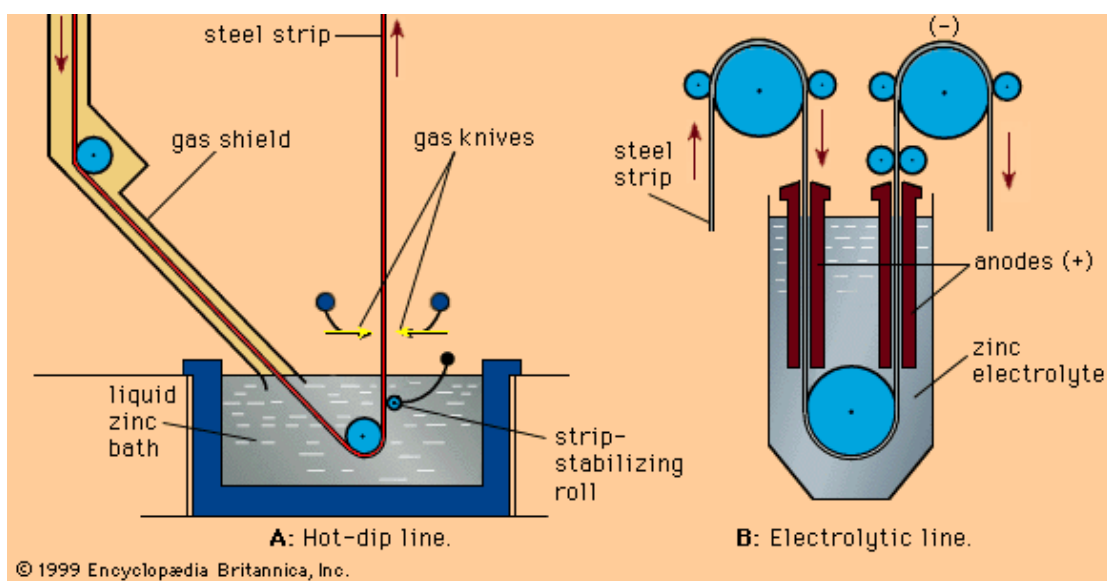


Εικόνα 1.11: (α) Γαλβανισμός εν θερμώ, (β) Επιφάνεια γαλβανισμένου αντικειμένου εν θερμώ

ψευδαργύρου), είναι ανεπαρκή για συνδυασμό με οργανικά επιστρώματα (οι συνδυασμοί αυτοί προορίζονται για τουλάχιστον 15χρονη παροχή προστασίας από τη διάβρωση) [1,5,6].

Γαλβανισμός με ηλεκτροαπόθεση (electroplating)

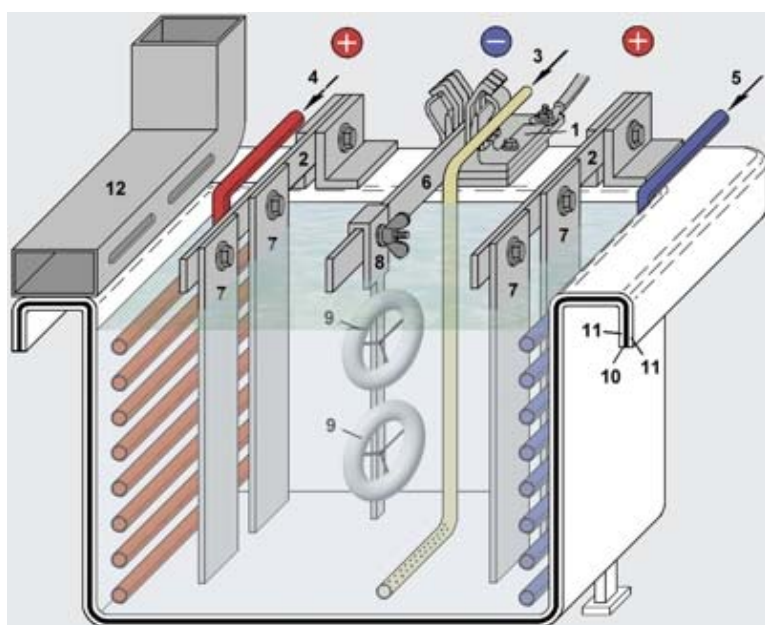
Η ηλεκτροαπόθεση είναι μια σημαντική διαδικασία γαλβανισμού κατά την οποία ένα στρώμα Zn αποτίθεται ηλεκτροχημικά σε μια επιφάνεια χάλυβα. Τα τμήματα που πρόκειται να επιστρωθούν, πρέπει πρώτα να απολιπανθούν και να προκατεργασθούν με καθαρισμό διοξείος έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια καθαρή και λεία επιφάνεια. Στο λουτρό ηλεκτροαπόθεσης ο χάλυβας αποτελεί την κάθοδο και ένα έλασμα ή μια ράβδος Zn την άνοδο. Ο Zn αποτίθεται ηλεκτρολυτικά από αλκαλικά κυανιούχα ή από όξινα θειικά λουτρά. Ακόμα, ως ηλεκτρολυτικά λουτρά, μπορεί να χρησιμοποιηθούν και διαλύματα πυροφωσφορικών ή φθοριοβορικών αλάτων. Κάτω από κατάλληλες συνθήκες τάσης και ρεύματος, ένα συμπαγές μη κραματοποιημένο στρώμα Zn θα αποτεθεί με πάχος από 2,5 μέχρι 15 μm . Για επίστρωση με μορφή ταινίας ή σύρματος ακολουθείται η όξινη διαδικασία σε ελαφρά ανυψωμένες θερμοκρασίες. Τα περισσότερα από τα επιψευδαργυρωμένα με ηλεκτρισμό ελάσματα παθητικοποιούνται μετά το λουτρό του Zn. Η παθητικοποίηση γίνεται με φωσφάτωση ή χρωμικοποίηση. Στο Σχήμα 1.8 παρουσιάζεται γαλβανισμός χαλύβδινου σύρματος με εμβάπτιση σε τήγμα Zn (A) και με ηλεκτρόλυση (B) [1,5,6].



Σχήμα 1.8: Γαλβανισμός χαλύβδινου σύρματος: (A) με εμβάπτιση σε τήγμα ψευδαργύρου και (B) με ηλεκτρόλυση

Οι εγκαταστάσεις ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων περιλαμβάνουν τον γενικό εξοπλισμό και τον ειδικό εξοπλισμό, ο οποίος εξυπηρετεί συγκεκριμένες λειτουργίες. Στον γενικό εξοπλισμό (Σχήμα 1.9) περιλαμβάνονται οι δεξαμενές των ηλεκτρολυτικών λουτρών, τα συστήματα ψύξης και θέρμανσης των λουτρών, οι ανορθωτές, ο εξαερισμός, οι αντλίες και τα φίλτρα κ.α.

Στον ειδικό εξοπλισμό περιλαμβάνονται τα μηχανήματα απολίπανσης με ατμούς διαλυτών (vapour degreaser), τα συστήματα παραγωγής υπερήχων, τα δονητικά συστήματα κ.α.



Μέρη εγκατάστασης βιομηχανικού λουτρού επιψευδαργύρωσης

1. Σύνδεση καθόδου
2. Μπάρα ανόδου από χαλκό
3. Παροχή αέρα
4. Ρυθμιστής θέρμανσης
5. Ρυθμιστής ψύξης
6. Μηχανικά κινούμενη μπάρα
7. Κοιλίας σύνδεσης ανοδίων Zn
8. Βάση στήριξης αντικειμένων προς επιμετάλλωση (Rack)
9. Αντικείμενο προς επιψευδαργύρωση
10. Ατσάλινη δεξαμενή
11. Ελαστική επικάλυψη για αντοχή σε χημικά
12. Απαγωγός αερίων

Σχήμα 1.9: Σχηματική παράσταση βιομηχανικής εγκατάστασης ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων

Ανάλογα με το είδος και τις διαστάσεις των αντικειμένων προς επιμετάλλωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες εγκαταστάσεις.

Όταν τα προς επιμετάλλωση αντικείμενα είναι μεγάλων διαστάσεων τότε γίνεται χρήση κινητών βάσεων (racks) στις οποίες κρεμιούνται τα αντικείμενα στις φαίνεται στις εικόνες 1.12 και 1.13.



Εικόνα 1.12: Γαλβανισμός ηλεκτροαπόθεσης με χρήση κινητών βάσεων (rack plating)



Εικόνα 1.13: Βιομηχανικές εγκαταστάσεις για Γαλβανισμό ηλεκτροαπόθεσης με χρήση κινητών βάσεων (rack plating)

Οι βάσεις αυτές στις οποίες είναι κρεμασμένα τα προς επιμετάλλωση αντικείμενα κινούνται με την βοήθεια ενός κινητήρα. Αυτή η κίνηση βοηθάει στην ανάδευση των ηλεκτρολυτικών λουτρών, διαδικασία η οποία είναι απαραίτητη γιατί περιορίζει κατά πολύ το φαινόμενο της πόλωσης των ηλεκτροδίων.

Για αντικείμενα μικρών διαστάσεων (τα οποία δεν είναι δυνατό να κρεμαστούν) όπως για παράδειγμα κοχλίες, περικόχλια κ.α. η ηλεκτροαπόθεση επιτυγχάνεται με τη χρήση περιστρεφόμενου τυμπάνου (Εικόνα 1.14).

Τοποθετούνται τα προς επιμετάλλωση αντικείμενα σε ένα διάτρητο τύμπανο (εικόνα 1.14) το οποίο στην συνέχεια βυθίζεται στο λουτρό. Κατά την διάρκεια της επιμετάλλωσης το τύμπανο αυτό περιστρέφεται επιτυγχάνοντας έτσι την ανάδευση και την ομοιόμορφη απόθεση σε όλα τα αντικείμενα.



Εικόνα 1.14: Γαλβανισμός ηλεκτροαποθεσης με χρήση περιστρεφόμενου τυμπάνου (barrel plating)

Γαλβανισμός με ψεκασμό ψευδαργύρου (metal spraying with zinc)

Μεγάλα χαλύβδινα αντικείμενα, όπως τμήματα γέφυρας, γερανού κ.λ.π., δεν μπορούν να βυθιστούν σε λουτρό Zn εξαιτίας του μεγέθους τους. Αυτά τα αντικείμενα πρέπει να επιστρωθούν είτε με ψεκασμό μεταλλικού ψευδαργύρου είτε με εφαρμογή οργανικών επιστρωμάτων πλούσιων σε ψευδάργυρο. Η πρώτη από τις δύο αυτές μεθόδους περιλαμβάνει τη χρήση ενός ειδικά σχεδιασμένου πιστολιού ψεκασμού από το οποίο λεπτά σταγονίδια τηγμένου Zn εκτοξεύονται προς μια επιφάνεια χάλυβα που έχει εκτραχυνθεί. Συνήθως η θερμοκρασία εκτόξευσης του τηγμένου Zn είναι 3000°C και επιτυγχάνεται με φλόγα που προέρχεται από καύση μίγματος οξυγόνου και ακετυλενίου ή καύσιμου αερίου. Ακόμα και σ' αυτή την υψηλή θερμοκρασία, η θερμοχωρητικότητα των σταγόνων Zn είναι ανεπαρκής για να προκαλέσει τήξη της



Εικόνα 1.15: Γαλβανισμός με ψεκασμό ψευδαργύρου

επιφάνειας του χάλυβα και δεν σχηματίζεται κράμα Zn-Fe. Κατά το πέρασμα τους από την ατμόσφαιρα, οι σταγόνες Zn (διαμέτρου 10-100 μm) περιβάλλονται από μια λεπτή στρώση οξειδίου του Zn. Η πρόσκρουση των σταγόνων στο χάλυβα έχει ως αποτέλεσμα τη διάσπασή τους και ο τηγμένος Zn σχηματίζει ένα στρώμα που αποτελείται από Zn, οξείδιο του Zn και μικρές φυσαλίδες αέρα. Τα στρώματα αυτά έχουν πάχος 50-250 μm , αλλά συνήθως εφαρμόζονται στο πάχος των 100 μm . Επίσης, περιέχουν περίπου 35% φυσαλίδες ή πόρους, δηλαδή είναι στρώματα πορώδη. Η πορώδης φύση των στρωμάτων που σχηματίζονται με ψεκασμό Zn, ενεργοποιεί την αντίδραση μεταξύ του μετάλλου και του οξυγόνου, της υγρασίας και των όξινων ρυπαντών της ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια της έκθεσης. Στην πράξη πρέπει να σφραγίζονται αυτοί οι πόροι με εφαρμογή ενός ασταριού (wash or etch primer) ή ενός ειδικού στρώματος ασταριού από βινύλιο και αλουμίνιο. Εκτός από τις γνωστές από χρόνια μεθόδους γαλβανισμού έχουν εισαχθεί και δύο νέες μέθοδοι, η μέθοδος Galvalume και η μέθοδος Galvan που και οι δύο βασίζονται στα λουτρά Zn - Al. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί σύσταση λουτρού : Zn 43,5%, Al 55% και Si 1,5%, ενώ η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί 95% Zn και 5% Al. Οι μέθοδοι Galvalume και Galvan παρέχουν χρονικά πολύ καλύτερη αντιδιαβρωτική προστασία απ' ό,τι οι άλλες μέθοδοι γαλβανισμού [1,3-5].

1.5 Τεχνική της Ηλεκτροστίλβωσης

1.5.1 Γενικά

Η ηλεκτροστίλβωση είναι μια τεχνική η οποία βελτιώνει τη μικροσκοπική επιφάνεια ενός μεταλλικού αντικειμένου (περισσότερη αντανακλαστική ικανότητα) με την αφαίρεση μετάλλου από την επιφάνεια του μέσω μιας ηλεκτροχημικής διαδικασίας που είναι ουσιαστικά η αντιστροφή της ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης.

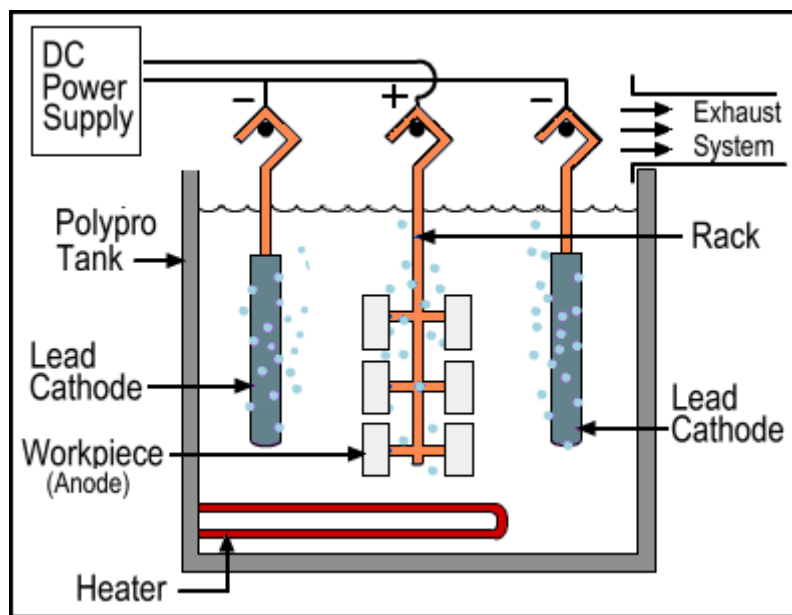
Η τεχνική αυτή συνήθως χρησιμοποιείται πριν την ηλεκτροαπόθεση για να επιτευχθεί ακόμα καλύτερη τελική επιφάνεια.

Κατά την διαδικασία αυτή το μέταλλο αφαιρείται από την επιφάνεια του αντικειμένου με την μορφή ιόντων. Η ηλεκτροχημεία και οι θεμελιώδεις αρχές της ηλεκτρόλυσης (νόμος του Faraday) αντικαθιστούν τις παραδοσιακές μηχανικές τεχνικές διαμόρφωσης μεταλλικών επιφανειών, συμπεριλαμβανομένης της λείανσης με τρόχισμα, της αφαίρεσης υλικού με κοπή ή εκτριβής και γυαλίσματος στο τελικό στάδιο του φινιρίσματος.

Η ηλεκτροστίλβωση πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός ηλεκτροχημικού κελιού (Σχήμα 1.9) στο οποίο το μεταλλικό αντικείμενο που πρόκειται να γυαλιστεί είναι η άνοδος. Μια κάθοδος (συνήθως από μόλυβδο⁴) διαμορφώνεται με την ανάλογη γεωμετρία της προς κατεργασία επιφάνειας και τα δύο βυθίζονται σε ένα θερμό λουτρό ηλεκτρολυτών (φωσφορικό και θεικό οξύ – που διατηρείται σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία⁵), και τους επιβάλλεται παράλληλα συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (DC). Το μέταλλο αφαιρείται με την μορφή ιόντων από την επιφάνεια του αντικειμένου που στιλβώνεται, και κατατίθενται στο λουτρό ως λεπτός πηλός μεταλλικών αλάτων. Η επιφάνεια του προς κατεργασία αντικειμένου κυριολεκτικά «διαλύεται», αφήνοντας μια εξαιρετικά καθαρή και γυαλισμένη επιφάνεια.

⁴ Στην περίπτωση στίλβωσης αλουμινίου οι κάθοδοι είναι συνήθως από ανοξείδωτο χάλυβα 316.

⁵ Ο ηλεκτρολύτης ποικίλλει ανάλογα με το προς κατεργασία μέταλλο. Για τα σιδηρούχα μέταλλα θα χρησιμοποιηθούν ένα μίγμα φωσφορικού οξέος – θεικού οξέος και πρόσθετες ουσίες ηλεκτρολυτών.



Σχήμα 1.9: Τυπική διάταξη ηλεκτροσίλβωσης

Κατά την διάρκεια της ηλεκτροσίλβωσης μαζί με την ηλεκτροχημική αφαίρεση του μετάλλου παρατηρείται και έκλυση αερίου οξυγόνου, κορεσμός της επιφάνειας με το διαλυμένο μέταλλο και την μεταβολή της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη. Το πολωμένο επιφανειακό στρώμα υπόκειται σε οξείδωση και έτσι προκύπτει η ηλεκτροχημική απομάκρυνση του μετάλλου. Κατά την διαδικασία, ένα επιφανειακό στρώμα με εναλλαγές στο πάχος του, καλύπτει τις επιφάνειες του μετάλλου. Έτσι, η ηλεκτρική αντίσταση είναι ελάχιστη όπου το επιφανειακό στρώμα είναι λεπτό, οδηγώντας σε αυξημένο ρυθμό μεταλλικής διάλυσης.

Με την διαδικασία αυτή αφαιρούνται επιλεκτικά αρχικά οι υψηλότερες μικροσκοπικές προεξοχές και εξομαλύνεται σταδιακά η επιφάνεια του αντικειμένου (Σχήμα 1.10).



Σχήμα 1.10: Επιφάνεια πριν και μετά την ηλεκτροσίλβωση

Το κλειδί για τη διαδικασία είναι η διαφορά στην πυκνότητα ρεύματος στην επιφάνεια. Επάνω στο μικροσκοπικό ανάγλυφο της επιφάνειας η πυκνότητα ρεύματος είναι μεγαλύτερη στα υψηλά σημεία έναντι των παρακείμενων κοιλάδων επιφάνειας που προστατεύονται από το οξυγόνο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.

Το ποσοστό της δράσης της αντίδρασης στίλβωσης είναι ανάλογο προς την πυκνότητα ρεύματος. Η αυξημένη πυκνότητα ρεύματος στα υψηλά σημεία αναγκάζει το μέταλλο να διαλυθεί γρηγορότερα και τείνει έτσι να ισοπεδώσει το υλικό επιφάνειας.

Η αφαίρεση μετάλλου από την επιφάνεια του αντικειμένου υπό καθορισμένες συνθήκες (την τάση, το ρεύμα, το χρόνο και τη θερμοκρασία) είναι ελεγχόμενη και μπορεί να κυμανθεί από 2,54 έως 63,5 μm .

Μετά από την ηλεκτροστίλβωση, η επιφάνεια του αντικειμένου μέσω μιας σειράς σταδίων ουδετεροποιείται, ξεπλένεται, καθαρίζεται και ξηραίνεται.

Το κύριο γνώρισμα της μεθόδου είναι η ότι προσδίδει στα μέταλλα μεγάλη ομαλότητα στην επιφάνεια τους αφού αφαιρούνται επιλεκτικά οι μικροσκοπικές ανωμαλίες.

Σύμφωνα με τα παραπάνω κατά την διάρκεια της ηλεκτροστίλβωσης αφαιρείται μέταλλο. Η τελική επιφάνεια του μετάλλου αποκαλύπτεται φωτεινή, καθαρή και μικροσκοπικά ομαλή. Ακόμη και οι τελικές επιφάνειες με πολύ καλό μηχανουργικό φινίρισμα θα παρουσιάσουν ατέλειες και μικροσκοπικές παραμορφώσεις.

1.5.2 Στάδια διαδικασίας Ηλεκτροστίλβωσης

Η ηλεκτροστίλβωση ολοκληρώνεται σε μία σειρά βημάτων χρησιμοποιώντας τις ειδικά σχεδιασμένες δεξαμενές, παρόμοιες με την ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση ή την υποβολή σε ανοδική οξείδωση. Τα μέρη που γυαλίζονται τοποθετούνται σε ράφια που κινούνται από δεξαμενή σε δεξαμενή. Τα τρία σημαντικά βήματα διαδικασίας του συστήματος είναι:

1. Προετοιμασία της επιφάνειας του μετάλλου

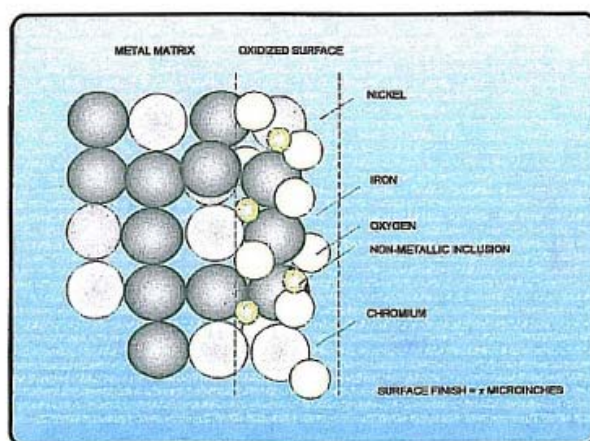
Πρέπει να αφαιρεθούν όλα τα έλαια, τα λιπαντικά, οι ρύποι, τα δακτυλικά αποτυπώματα, τα οξείδια, και άλλοι μολυσματικοί παράγοντες από την επιφάνεια.

2. Ηλεκτρολείανση

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται βελτίωση του ανάγλυφου της επιφάνειας, λείανση, στίλβωμα, παθητικοποίηση, αφαίρεση των επιφανειακών τάσεων, μειώνεται η τριβή, αυξάνεται η αντίσταση σε διάβρωση.

3. Αποθεραπεία

Αφαιρούνται τα χημικά υπολείμματα ή τα υποπροϊόντα της ηλεκτροστίλβωσης και πραγματοποιείται ξήρανση.



Σχήμα 1.11: Μήτρα ανοξειδωτου χάλυβα πριν από ηλεκτροστίλβωση

1.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Μεθόδων Επιψευδαργύρωσης

Τα στρώματα Zn σχηματίζουν ένα πολύ συμπαγές φράγμα στο οξυγόνο, την υγρασία και τους όξινους ρυπαντές της ατμόσφαιρας, εμποδίζοντας έτσι την άμεση επαφή τους με το χάλυβα. Ακόμα και στην περίπτωση που έχουμε ζημία της επίστρωσης Zn, με αποτέλεσμα να έλθει σε επαφή ο χάλυβας με την ατμόσφαιρα, ο Zn εξακολουθεί να προστατεύει το χάλυβα ώστε να μην έχουμε φαινόμενα διάβρωσης. Το φαινόμενο εξηγείται λόγω γαλβανικού φαινομένου που δημιουργείται μεταξύ χάλυβα και Zn, όπου αναλώνεται ο Zn προστατεύοντας το χάλυβα. Αυτή η “θυσία” του Zn είναι η ειδοποιός διαφορά μεταξύ του γαλβανισμού και το κυριότερο πλεονέκτημα της μεθόδου έναντι της επιφανειακής προστασίας με χρώματα [43-46].

Ο θερμός γαλβανισμός (εμβάπτιση σε τηγμένο μέταλλο) χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για την βιομηχανική παρασκευή βιομηχανικών, κατασκευαστικών και οικιακών υλικών, τα οποία χρειάζονται ισχυρή επίστρωση μετάλλου. Όταν όμως

απαιτείται να καλυφθούν ενώσεις, ή συγκολλήσεις, ή λεπτές και μικρές κατασκευές – και ιδιαίτερα όπου υπάρχουν αυστηρές προδιαγραφές ως προς τις διαστάσεις – η ηλεκτρολυτική επιψευδαργύρωση προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα. Η επιψευδαργύρωση δίνει εύκολα ομοιόμορφες αποθέσεις και δεν βουλώνει εσοχές ή τρύπες για βίδες κτλ. Σε μικρές κατασκευές, η ηλεκτρολυτική επιψευδαργύρωση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους εφαρμογής της, σε σύγκριση με το θερμό γαλβανισμό.

Ο γαλβανισμός με ψεκασμό Zn, υπερτερεί έναντι των άλλων μεθόδων στην εφαρμογή του σε μεγάλα χαλύβδινα αντικείμενα, όπως για παράδειγμα γερανοί, πυλώνες κτλ, των οποίων η επικάλυψη δεν θα ήταν εφικτή με την μέθοδο της ηλεκτρόλυσης ή της εμβάπτισης σε τήγμα Zn. Ωστόσο η μέθοδος μειονεκτεί στο γεγονός ότι η απευθείας επαφή του spray - Zn με την ατμόσφαιρα δημιουργεί πόρους στην επικαλυμμένη επιφάνεια των κατασκευών, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα της αντίδραση του μετάλλου και του οξυγόνου, της υγρασίας και των όξινων ρυπαντών της ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια της έκθεσης. Το πρόβλημα όμως αυτό αντιμετωπίζεται με την σφράγιση των πόρων με εφαρμογή ενός ασταριού [1,3,6].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Το πεδίο της επιστήμης των υλικών περιλαμβάνει τη διερεύνηση των σχέσεων που υπάρχουν μεταξύ των δομών και των ιδιοτήτων των υλικών. Αντίθετα, η τεχνολογία των υλικών, με βάση αυτή τη σχέση δομής-ιδιότητας, ασχολείται με τη σχεδίαση ή την τεχνολογία σχεδίασης της δομής του υλικού, ώστε να παράγει ένα προκαθορισμένο σύνολο ιδιοτήτων.

Όλα τα υλικά κατά τη χρήση τους εκτίθενται σε εξωτερικά ερεθίσματα τα οποία προκαλούν κάποιου είδους απόκριση. Η *ιδιότητα* είναι ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα του υλικού, που εκφράζει το είδος και το μέγεθος της απόκρισής του σε κάποιο συγκεκριμένο ερέθισμα. Γενικά οι ορισμοί των ιδιοτήτων δίνονται ανεξάρτητα από το σχήμα και το μέγεθος του υλικού. Ουσιαστικά όλες οι σημαντικές ιδιότητες των στερεών υλικών μπορούν να ομαδοποιηθούν σε έξι διαφορετικές κατηγορίες: μηχανικές, ηλεκτρικές, θερμικές, μαγνητικές, οπτικές και ιδιότητες φθοράς. Για κάθε μία υπάρχει ένα διαφορετικό είδος ερεθίσματος ικανό να προκαλέσει διαφορετικές αποκρίσεις.

- Οι μηχανικές ιδιότητες συσχετίζονται με την παραμόρφωση με ένα ασκούμενο φορτίο ή δύναμη. Σαν παραδείγματα αναφέρονται το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή.
- Στις ηλεκτρικές ιδιότητες, όπως είναι η ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα και η διηλεκτρική σταθερά, το ερέθισμα είναι ένα ηλεκτρικό πεδίο.
- Η θερμική συμπεριφορά των στερεών μπορεί να παρουσιαστεί βάσει της θερμοχωρητικότητας και της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας.
- Οι μαγνητικές ιδιότητες δείχνουν την απόκριση ενός υλικού στην εφαρμογή μαγνητικού πεδίου.
- Για τις οπτικές ιδιότητες, το ερέθισμα είναι η ηλεκτρομαγνητική (ή φωτεινή) ακτινοβολία. Ο δείκτης διάθλασης και η ανακλαστικότητα είναι αντιπροσωπευτικές οπτικές ιδιότητες.
- Τέλος, τα χαρακτηριστικά της φθοράς υποδηλώνουν τη χημική δραστηριότητα των υλικών [49].

2.2 Μηχανικές Δοκιμές

Ο υπολογισμός της συμπεριφοράς ενός μεταλλικού υλικού καθώς και ο προσδιορισμός των αποδεκτών καταπονήσεων είναι εφικτοί μόνο όταν είναι γνωστά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού. Δηλαδή θα πρέπει να είναι γνωστό από ποιο φορτίο και πέρα το υλικό θα παραμορφωθεί κατά αναντίστροφο τρόπο προκαλώντας αλλαγές στη γεωμετρία του και ποιο είναι το οριακό φορτίο που είναι δυνατόν να αντέξει πριν την οριστική του θραύση. Οι μηχανικές δοκιμές πρέπει να είναι απλές, αναπαραγωγίσιμες και τα αποτελέσματα ερμηνεύσιμα και αξιοποιήσιμα, κατά τον ίδιο τρόπο από όλους. Για το λόγο αυτό, εθνικοί οργανισμοί όπως η ASTM (American Society for Testing and Materials) και ο ISO (International Standardization Organization) κανονικοποιούν τις δοκιμές τους. Η κανονικοποίηση αυτή των δοκιμών αφορά στη γεωμετρία των δοκιμών και των ενδείξεων, στις συσκευές των δοκιμών και τη βαθμονόμηση τους, στις πειραματικές τεχνικές και στην αξιοποίηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Οι κυριότερες μηχανικές δοκιμές που χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό των υλικών είναι:

Η δοκιμή εφελκυσμού

Η δοκιμή θλίψης

Η δοκιμή κάμψης

Η δοκιμή δυσθραυστότητας

Η δοκιμή ερπυσμού

Η δοκιμή κόπωσης.

Οι δοκιμές ελέγχου των υλικών μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, τις καταστρεπτικές κατά τις οποίες έχουμε καταστροφή του δοκιμίου προκειμένου να προσδιορίσουμε το μέτρο κάποιας μηχανικής του ιδιότητας (αντοχής) και στις μη καταστρεπτικές στις οποίες δεν απαιτείται καταστροφή του δοκιμίου.

Οι δοκιμές αντοχής σε θλίψη, εφελκυσμό, κόπωση, ερπυσμό κρούση ανήκουν στην κατηγορία των καταστρεπτικών δοκιμών.

Δοκιμές διεισδυτικών υγρών, μαγνητικές, υπερήχων, ραδιογραφίες, ακτινοανάλυσης ανήκουν στην κατηγορία των μη καταστρεπτικών μεθόδων ελέγχου ενός υλικού.

2.3 Εφελκυσμός

2.3.1 Εισαγωγή

Εφελκυσμός είναι το φαινόμενο εκείνο που το δοκίμιο τείνει αρχικά να μηκυνθεί (αυξήσει το μήκος του) και μετά πιθανώς να διασπαστεί (υποστεί θραύση) υπό την επενέργεια δυο ίσων και αντίθετων δυνάμεων που επενεργούν στα αντίθετα άκρα του ή υπό την επενέργεια μιας δύναμης που επενεργεί στο ένα άκρο όταν το άλλο άκρο είναι πακτωμένο (σταθερά συνδεδεμένο) με κάποιο σώμα.

Η δοκιμή του εφελκυσμού είναι η συνηθέστερη μηχανική δοκιμή. Συνίσταται στην υποβολή δοκιμίου, του προς χαρακτηρισμό υλικού, σε εφελκυστική καταπόνηση κατά τη διάρκεια της οποίας καταγράφεται η προκαλούμενη επιμήκυνση Δl .

2.3.2 Εφαρμοζόμενα μεγέθη

A. Ορθή Τάση (σ)

Προκύπτει από το λόγο της εκάστοτε εφαρμοζόμενης δύναμης P προς την αρχική διατομή του δοκιμίου που συμβολίζεται με F . Επειδή η ορθή τάση προέρχεται από την αντίστοιχη εφελκυστική δύναμη, ονομάζεται ορθή εφελκυστική τάση και ισούται με:

$$\sigma = \frac{P}{F} \quad (\text{σε N/mm}^2)$$

2.3.3 Νόμος του Hooke

Η πλήρης μαθηματική διατύπωση του νόμου του Hooke είναι:

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF}$$

Ο νόμος του Hooke ισχύει εφόσον ισχύουν οι παρακάτω παραδοχές:

- Ο άξονας της ράβδου είναι ευθύγραμμος.
- Η δύναμη δρα στη διεύθυνση και στον άξονα της ράβδου και το σημείο εφαρμογής της είναι το κέντρο βάρους της διατομής.
- Οι τάσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στη διατομή.

- Στα θλιβόμενα μέρη δεν υπάρχει κίνδυνος λυγισμού.
- Όλες οι κατά μήκος ίνες της ράβδου επιμηκύνεται το ίδιο.
- Οι διατομές που είναι αρχικά επίπεδες και κάθετες στον άξονα της ράβδου παραμένουν έτσι και μετά την παραμόρφωση.
- Οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μικρότερες από την τάση αναλογίας του υλικού.

Δηλαδή ο νόμος του Hooke ισχύει μόνο εντός της γραμμικά ελαστικής περιοχής του διαγράμματος σ - ε .

Διαπιστώθηκε επίσης ότι ο νόμος του Hooke δεν ισχύει μόνο για εφελκυσμό αλλά και για θλίψη.

Με την παραδοχή που προαναφέρθηκε, ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις σε μια τυχαία διατομή της ράβδου κατανέμονται ομοιόμορφα σε αυτήν, η ορθή τάση σ είναι [40,50 53]:

$$\sigma = \frac{P}{F}$$

και η ανηγμένη παραμόρφωση ε από τη σχέση ορισμού της είναι:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Οπότε λαμβάνοντας υπόψη τις δυο προηγούμενες εξισώσεις ο νόμος του Hooke γράφεται:

$$\sigma = \varepsilon \times E$$

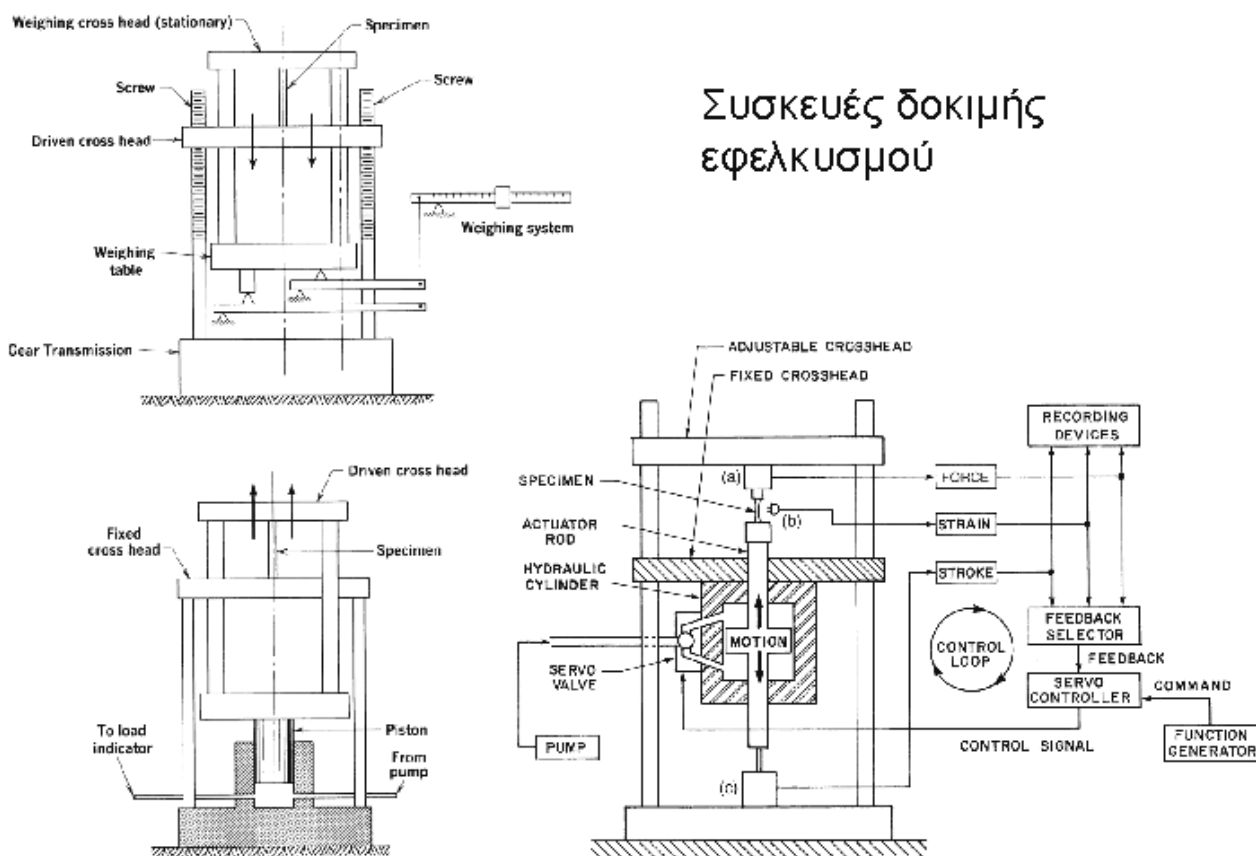
Δηλαδή: «η τάση είναι ανάλογη με την παραμόρφωση».

Το μέτρο ελαστικότητας E είναι ο συντελεστής αναλογίας μεταξύ της τάσης και της

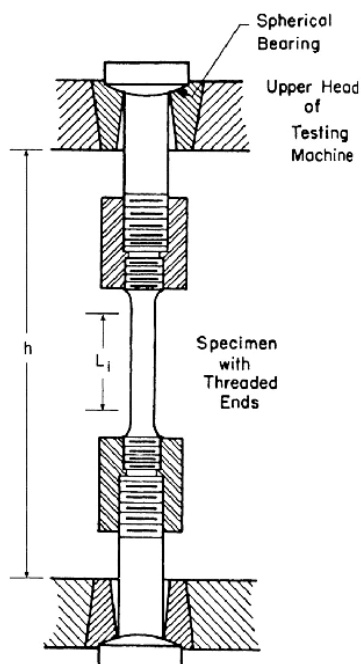
ανηγμένης παραμόρφωσης, οπότε: $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

2.3.4 Συσκευές Δοκιμής Εφελκυσμού

Οι συσκευές δοκιμής εφελκυσμού είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε, να προκαλούν την επιμήκυνση του υλικού με έναν σταθερό ρυθμό, να μετράνε το φορτίο που εφαρμόζεται στο υλικό, καθώς επίσης και τις προκαλούμενες επιμηκύνσεις (με τη βοήθεια του επιμηκυνσιόμετρου). Η δοκιμασία εφελκυσμού διαρκεί μικρό χρόνο και είναι καταστρεπτική, εφόσον το υλικό παραμορφώνεται μόνιμα και σπάει. Το εφαρμοζόμενο φορτίο και η αντίστοιχη επιμήκυνση καταγράφονται και σχεδιάζεται η λεγόμενη καμπύλη τάσης εφελκυσμού-παραμόρφωσης.



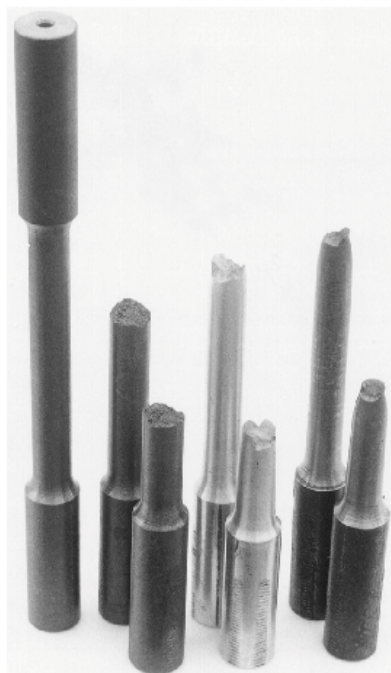
Εικόνα 2.1: Σχηματική παράσταση συσκευών δοκιμής εφελκυσμού



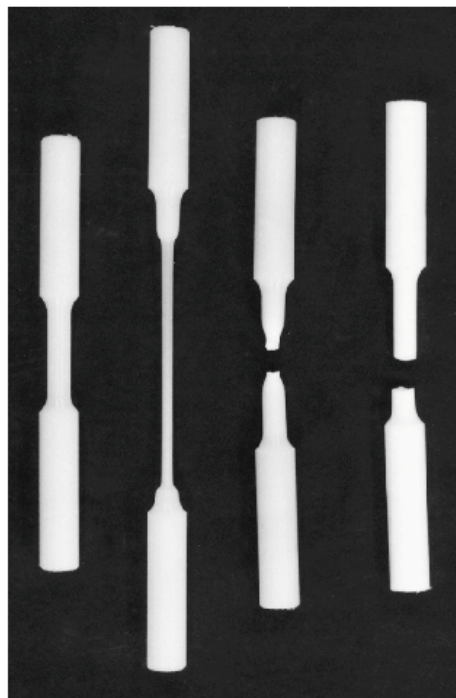
Εικόνα 2.2: Σχηματική παράσταση δοκιμίου εφελκυσμού

Τα δοκίμια εφελκυσμού είναι συνήθως ράβδοι κυκλικής διατομής ή ελάσματα τυποποιημένων διαστάσεων. Η επιμήκυνση μετράται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου που έχει σταθερή διατομή, ανάμεσα σε δύο χαραγές αναφοράς, που καθορίζουν το ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου. Τα άκρα του δοκιμίου, με τα οποία θα συγκρατηθεί στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού, έχουν ισχυρότερη διατομή για να προσδώσουν μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής με τις δαγκάνες, για την αποφυγή της θραύσης γύρω από τις δαγκάνες.

Συνήθως η μέτρηση γίνεται με σταθερή ταχύτητα [51-53].



Εικόνα 2.3: Μεταλλικά δοκίμια εφελκυσμού: πριν τη δοκιμή. Μετά τη δοκιμή: φαιός χυτοσίδηρος, κράμα αλουμινίου, έλαση εν θερμώ χάλυβας



Εικόνα 2.4: Πολυμερικά δοκίμια εφελκυσμού: πριν τη δοκιμή. Μετά τη δοκιμή: HDPE, Nylon, PTFE



Εικόνα 2.5: έλαση εν θερμώ χάλυβας (Διάμετρος=9mm) φαιός χυτοσίδηρος

Τα τυποποιημένα χαρακτηριστικά των κυλινδρικών δοκιμών εφελκυσμού κυκλικής διαμέτρου φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

Ευρώπη	$l_0=10 \cdot d_0$ ή $l_0=5 \cdot d_0$
Η.Π.Α.	$l_0=4 \cdot d_0$ με ή $l_0=2$ in ή $l_0=1/2$ in
Αγγλία	$l_0=3,54 \cdot d_0$ με ή $l_0=2$ in ή $l_0=0,564$ in

Πίνακας 2.1: Τυποποίηση διαστάσεων κυλινδρικών δοκιμών εφελκυσμού

Το απαιτούμενο φορτίο που παράγει μια ορισμένη επιμήκυνση καταγράφεται καθώς το δοκίμιο εφελκύεται με σταθερό ρυθμό. Προκύπτει έτσι η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης, που δίνεται στο Σχήμα 1. Η μηχανική τάση, f σε MPa (N/mm^2), ορίζεται ως:

$$f=F/A \quad (1)$$

όπου F (σε kN) είναι η δύναμη εφελκυσμού και A (σε mm^2) η αρχική διατομή του δοκιμίου.

Η παραμόρφωση είναι η αύξηση του μήκους του δοκιμίου ανά μονάδα μήκους δοκιμής. Η μηχανική παραμόρφωση, ϵ , ή ειδική επιμήκυνση ($\epsilon\%$), ορίζεται ως:

$$\epsilon=(l-l_0)/l_0=\Delta l/l_0 \quad (2)$$

όπου (l) το μήκος του δοκιμίου για δεδομένο φορτίο και (l_0) το αρχικό (μηδενική τάση) μήκος του δοκιμίου. Η καμπύλη του σχήματος, υποδιαιρείται σε δύο διακεκριμένες περιοχές:

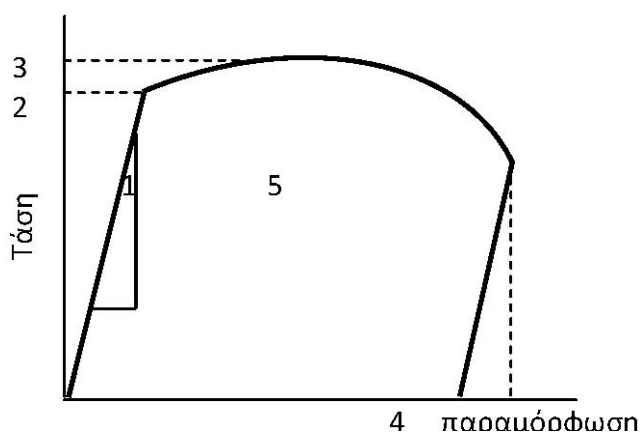
(1)Ελαστικής παραμόρφωσης και

(2)Πλαστικής παραμόρφωσης. Ελαστική χαρακτηρίζεται η προσωρινή παραμόρφωση που αναιρείται τελείως όταν πάψει να υπάρχει η αιτία (το φορτίο) που την προκάλεσε, το δε δοκίμιο επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Η ελαστική περιοχή της καμπύλης του σχήματος είναι το αρχικό γραμμικό της τμήμα. Πλαστική

είναι η μόνιμη παραμόρφωση που παραμένει και μετά την άρση της αιτίας που την προκάλεσε. Η πλαστική περιοχή είναι το μη γραμμικό τμήμα της καμπύλης και αρχίζει μόλις η ολική τάση υπερβεί το όριο ελαστικότητας. Το σχήμα 2.1 συνοψίζει τις βασικές μηχανικές ιδιότητες που προσδιορίζονται από ένα πείραμα εφελκυσμού. Η κλίση της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή είναι το μέτρο ελαστικότητας, E , ή μέτρο Young. Η γραμμικότητα της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή είναι η γραφική παράσταση του νόμου του Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

όπου E , το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό ή μέτρο Young.



Σχήμα 2.1: Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες που προσδιορίζονται από ένα πείραμα εφελκυσμού. 1. μέτρο ελαστικότητας, 2. όριο διαρροής, 3. αντοχή σε εφελκυσμό, 4. πλαστικότητα, 5. συνεκτικότητα.

Το μέτρο ελαστικότητας E εκφράζει την ακαμψία του υλικού, δηλαδή την αντίσταση σε ελαστική παραμόρφωση. Το όριο διαρροής, όπως και το E , έχει μεγάλη πρακτική σημασία. Εκφράζει την αντίσταση του υλικού σε μόνιμη παραμόρφωση και δείχνει την ευκολία με την οποία ένα μέταλλο μπορεί να μορφοποιηθεί. Ένας άλλος όρος πρακτικού ενδιαφέροντος είναι η εναπομένουσα τάση, που ορίζεται ως η τάση που παραμένει στο υλικό μετά την απομάκρυνση όλων των εφαρμοζόμενων φορτίων. Αυτό συμβαίνει συνήθως μετά από διάφορες θερμομηχανικές κατεργασίες.

Η μηχανική τάση συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι ενός μεγίστου, που ονομάζεται αντοχή σε εφελκυσμό. Μετά την αντοχή σε εφελκυσμό, το δοκίμιο αρχίζει να δημιουργεί «λαιμό», που ορίζεται ως ο εντοπισμός της παραμόρφωσης σε μια μικρή περιοχή του δοκιμίου και η μηχανική τάση στο διάγραμμα του σχήματος μειώνεται. Αυτή η μείωση της τάσης συμβαίνει διότι η μηχανική τάση και η παραμόρφωση ορίζονται σε σχέση με τις αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου. Η τάση συνεχίζει να αυξάνει μέχρι τη θραύση του δοκιμίου.

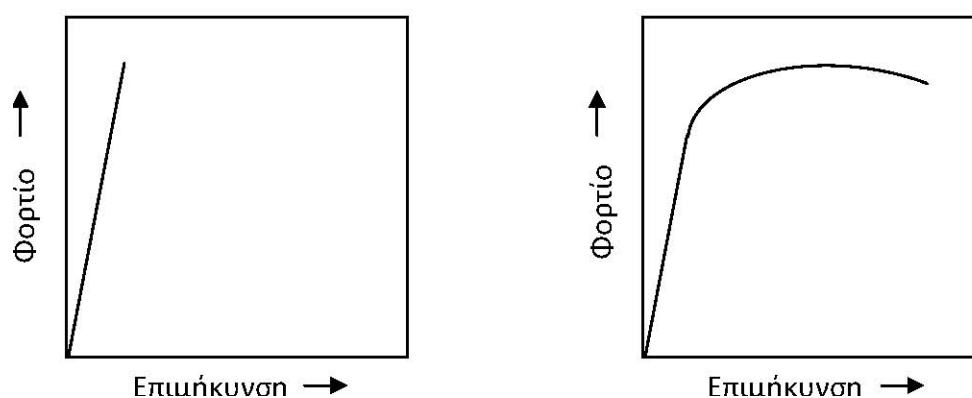
Μια άλλη σημαντική μηχανική ιδιότητα που προσδιορίζεται με τη δοκιμασία του εφελκυσμού είναι η πλαστικότητα, που εκφράζει το μέγεθος της πλαστικής παραμόρφωσης που μπορεί να υποστεί ένα υλικό χωρίς να θραυτεί. Η πλαστικότητα εκφράζεται είτε ως επί τοις εκατό επιμήκυνση κατά τη θραύση ή επί τοις εκατό μείωση της διατομής κατά τη θραύση. Ο συνδυασμός πλαστικότητας και αντοχής περιγράφεται από τον όρο συνεκτικότητα ή δυσθραυστότητα, η οποία προσδιορίζεται από την δοκιμή εφελκυσμού, ως το εμβαδόν της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης μέχρι το σημείο θραύσης. Η δυσθραυστότητα αποτελεί μέρος της απαιτούμενης ενέργειας ανά μονάδα όγκου για τη θραύση του υλικού και εκφράζει την ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια μέχρι τη θραύση [50-53].

2.3.5 Καμπύλες εφελκυσμού

Η καταγραφή της καμπύλης $F = f(\Delta l)$ ή $\sigma = f(\epsilon)$ είναι χαρακτηριστική κάθε μεταλλικού υλικού. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται δύο είδη καμπυλών εφελκυσμού που αντιστοιχούν στα δύο κύρια είδη δυνατής συμπεριφοράς των υλικών σε εφελκυσμό:

Στην περίπτωση που το υλικό συμπεριφέρεται ως όλκιμο, η μόνιμη παραμόρφωση που πραγματοποιείται συνοδεύεται συνήθως από σκλήρυνση του υλικού (Σχήμα 2β). Η συμπεριφορά αυτή χαρακτηρίζει την πλειονότητα μετάλλων και κραμάτων.

Στην περίπτωση που το υλικό συμπεριφέρεται ως ψαθυρό, δεν υπάρχει πλαστική περιοχή, διότι η θραύση επέρχεται πριν την παραμόρφωση (Σχήμα 2.2α). Παρατηρείται στον φαιό χυτοσίδηρο, σε χάλυβες μετά από βαφή και χωρίς ανόπτηση κ.λ.π.



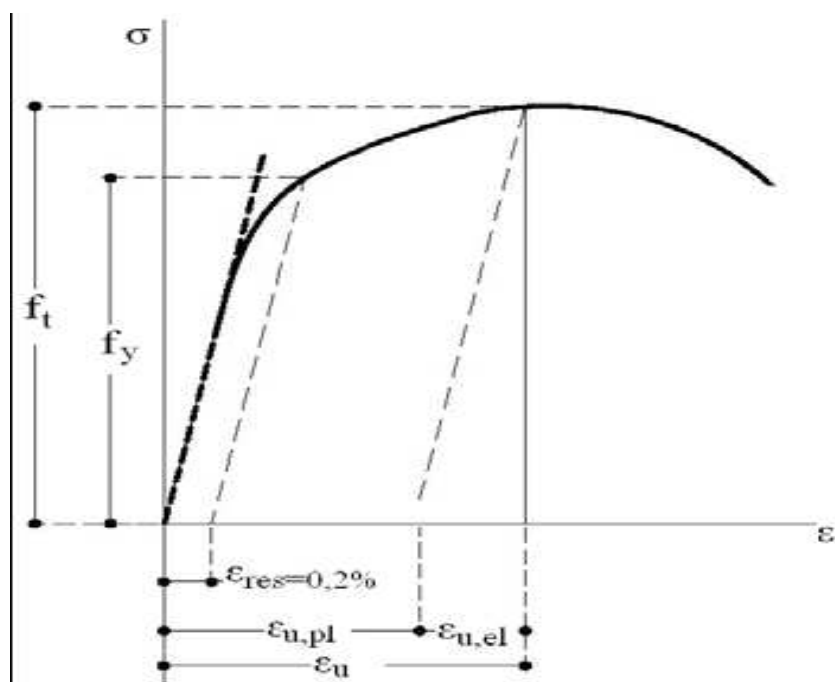
(α) (β) **Σχήμα 2.2:** Χαρακτηριστική συμπεριφορά σε εφελκυσμό: (α) συμπεριφορά ψαθυρού υλικού, (β) συμπεριφορά όλκιμου υλικού.

Το όριο διαρροής είναι συνήθως η μέγιστη τάση που επιτρέπεται να παραλάβει μια κατασκευή, διότι πέρα από αυτό υπάρχει μόνιμη παραμόρφωση. Για ασφάλεια χρησιμοποιείται ο λεγόμενος Συντελεστής Ασφαλείας, ο οποίος είναι πάντοτε μεγαλύτερος της μονάδας, ώστε να υποβαθμίσει το όριο διαρροής κατά συγκεκριμένο ποσοστό, ανάλογα με την κάθε περίπτωση. Κατά αυτό το τρόπο ελαττώνεται η πιθανότητα αστοχίας υλικού σε περίπτωση καταπόνησης που θα ξεπεράσει τη μέγιστη επιτρεπτή λόγω βλάβης, λάθους ή ατυχήματος.

Το όριο διαρροής δεν πρέπει να συγχέεται με το όριο καταστροφικής αστοχίας ενός υλικού. Ορισμένες φορές η υπέρβαση του ορίου διαρροής, τοπικά σε κάποιες θέσεις μιας κατασκευής, μπορεί να είναι αποδεκτή/επιτρεπτή. Πρέπει όμως να εξασφαλίζεται η ασφάλεια, ευστάθεια και λειτουργικότητα ολόκληρης της κατασκευής ως προς το μέγιστο φορτίο σχεδιασμού (π.χ. σεισμική φόρτιση).

Το όριο διαρροής εξαρτάται από τη φύση του υλικού και παίρνει διάφορες τιμές, από πολύ μικρές για κάποια πλαστικά, έως πολύ μεγάλες για υλικά όπως το τιτάνιο και διάφορα κράματα χάλυβα. Δεν έχουν όλα τα υλικά όριο διαρροής, παρά μόνο τα σχετικά όλκιμα, όπως τα μέταλλα, τα κράματα και τα πολυμερή. Τα ψαθυρά υλικά, όπως τα κεραμικά και τα μεγάλης σκληρότητας κράματα είναι δυνατόν να παρουσιάζουν ταχεία διάδοση ρωγμών και ψαθυρή αστοχία με θραύση αμέσως μόλις η τάση ξεπεράσει την ελαστική περιοχή.

Στο σχήμα 3α δίνεται ένα τυπικό διάγραμμα τάσεων -παραμορφώσεων σε εφελκυσμό, για χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος με διακριτό όριο διαρροής. Τέτοιο διάγραμμα παρουσιάζουν συνήθως οι χάλυβες κατηγορίας B500C.

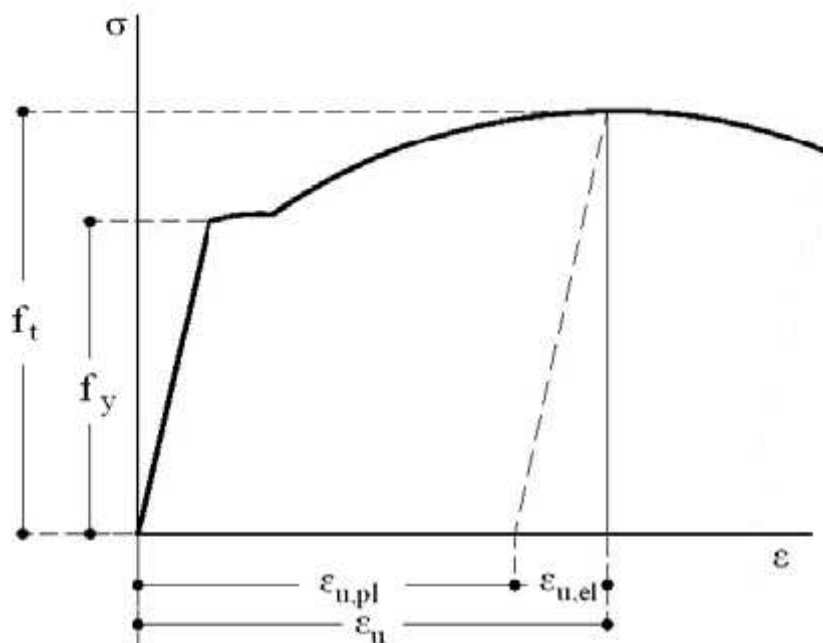


Σχήμα 2.3 α: Τυπικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων για χάλυβα με διακριτό όριο διαρροής. $\epsilon_{u,pl}$: πλαστική παραμένουσα παραμόρφωση υπό το μέγιστο φορτίο ϵ_u : συνολική παραμόρφωση υπό το μέγιστο φορτίο $\epsilon_{u,el}$: ελαστική παραμόρφωση αντιστοιχούσα στο μέγιστο φορτίο

Η συνολική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο, ϵ_u , διαφέρει από την ανηγμένη παραμόρφωση μετά τη θραύση, ϵ_5 . Συγκεκριμένα, η μέτρηση της ϵ_u γίνεται μακριά από την περιοχή θραύσης και από τις αρπάγες, ενώ η μέτρηση της ϵ_5 γινόταν εκατέρωθεν της θραύσης επί συνολικού μήκους $5d$. Στο ίδιο δοκίμιο η τιμή της ϵ_5 είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη της τιμής της ϵ_u .

Στην περίπτωση που είναι αδύνατο να καθοριστεί με ακρίβεια το όριο διαρροής, διότι η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή πραγματοποιείται προοδευτικά, έχει οριστεί, συμβατικά, το όριο διαρροής να αντιστοιχεί στην καταπόνηση που επιφέρει μόνιμη παραμόρφωση 0,2%. Η τιμή $f_{0,2\%}$ λαμβάνεται ως τομή, μιας ευθείας παράλληλης προς την ευθεία της ελαστικής περιοχής ή της εφαπτομένης στην αρχή της καμπύλης f - ϵ για παραμόρφωση 0,2%, και της καμπύλης εφελκυσμού.

Η ανυπαρξία διακριτού ορίου διαρροής (βλ. και Σχήμα 2.3β) μπορεί να οφείλεται συνήθως στην κατεργασία (π.χ. ψυχρή διαμόρφωση, προβλήματα κατά τη θερμική κατεργασία) ή σε ιδιαιτερότητες της χημικής σύστασης κ.α.



Σχήμα 2.3 β: Προσδιορισμός ορίου διαρροής για χάλυβα με μη διακριτό όριο διαρροής

Γενικά, τα κράματα είναι ανθεκτικότερα, αλλά λιγότερο όλκιμα από τα καθάρτα μέταλλα. Η θερμοκρασία, οι προσμίξεις, η προηγούμενη κατεργασία του υλικού, η ταχύτητα φόρτισης του υλικού και το μέγεθος των κόκκων επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο κράματα και μέταλλα. Το όριο διαρροής και η μέγιστη τάση σε εφελκυσμό αυξάνονται σημαντικά στις χαμηλές θερμοκρασίες και ελαττώνονται αυξανόμενης της θερμοκρασίας. Επίσης, γενικά, το μέτρο ελαστικότητας ελαττώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας, εφόσον η δομή του υλικού δεν αλλάζει.

Τέλος, πολλές φορές σε διάφορα κράματα ή σε διάφορους τύπους χαλύβων παρατηρείται διαφορετικής μορφής καμπύλη $\sigma=f(\epsilon)$, στη γειτονιά του σημείου διαρροής, δηλαδή κατά το πέρασμα από την ελαστική στην πλαστική περιοχή, παρουσιάζεται μια ασυνέχεια του σημείου διαρροής και εμφανίζεται ένα ανώτερο και ένα κατώτερο σημείο διαρροής. Το φαινόμενο αυτό πολλές φορές οφείλεται στην ύπαρξη διαταραχών στις διαχωριστικές επιφάνειες των κόκκων [50-53].

2.4 Σκληρομέτρηση

2.4.1 Εισαγωγή

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. Η σκληρότητα είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι η διείσδυση του σκληρού υλικού αναφοράς.

Συνήθως στις δοκιμές σκληρότητας εφαρμόζουμε σταθερή δύναμη σε μια αιχμή για καθορισμένο χρόνο. Το πηλίκο της δύναμης που χρησιμοποιήθηκε προς την επιφάνεια του αποτυπώματος που προκλήθηκε, μας δίνει το μέτρο της σκληρότητας.

Οι τιμές της σκληρότητας χρησιμοποιούνται ως κριτήριο για την σύγκριση των υλικών, το σχεδιασμό των μηχανικών και των θερμικών κατεργασιών τους, τον έλεγχο της ποιότητας και τις τιμές άλλων ιδιοτήτων τους.

Για τη μέτρηση της σκληρότητας χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι (Brinell, Vickers, Rockwell C και B), με διαφορετικό υλικό διεισδυτή, κλίμακα επιβαλλόμενων φορτίων και μετρούμενα μεγέθη [50,51,53].

2.4.2 Σκληρότητα Brinell

Κατά τη μέθοδο αυτή μια σφαίρα ορισμένης διαμέτρου (συνήθως 10mm) πιέζεται με ορισμένο βάρος που μπορεί να φτάσει έως 3000 kp πάνω στη μεταλλική επιφάνεια και μετά την απομάκρυνσή της μετράται το ίχνος της εντύπωσης με μεγεθυντικό φακό ο οποίος έχει κλίμακα μέτρησης. Μετρούνται οι δύο κάθετοι διάμετροι και ο μέσος όρος αποτελεί τη διάμετρο. Η σκληρότητα Brinell (HB) υπολογίζεται τότε από τον τύπο:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

όπου: P: Το εφαρμοζόμενο φορτίο (kp)

D: Η διάμετρος της σφαίρας (mm)

d: Η μέση διάμετρος του αποτυπώματος (mm)

παρόλο που είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός διαμέτρων σφαιρών και διάφορα φορτία ανάλογα με τη σκληρότητα και το πάχος του υλικού επειδή το μέγεθος του φορτίου και η διάμετρος της σφαίρας επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων σαν πρότυπη θεωρείται η μέτρηση με σφαίρα διαμέτρου 10mm, φορτίο 3000 kp και διάρκεια φόρτισης 10-15 sec. Ετσι όπου δεν αναφέρεται οτιδήποτε άλλο νοούνται οι παραπάνω συνθήκες . Για τον υπολογισμό

της σκληρότητας κατά Brinell χρησιμοποιούνται είτε ο παραπάνω τύπος, είτε πίνακες που δίνουν την τιμή της σκληρότητας από τη μέση διάμετρο του αποτυπώματος για τις αντίστοιχες διαμέτρους σφαίρας και βάρη. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για μετρήσεις σκληροτήτων πάνω από 630 HB διότι τότε παραμορφώνεται η σφαίρα. Μάλιστα πάνω από 450 η σφαίρα πρέπει να είναι από συντηγμένο καρβίδιο. Μια πολύ χρήσιμη ιδιότητα της σκληρότητας Brinell είναι η σχέση της με την αντοχή σε εφελκυσμό των μεταλλικών υλικών. Για τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες και για ελαφρά έως μέση κραμάτωση ισχύει κατά προσέγγιση η σχέση:

$$\text{Αντοχή σε εφελκυσμό : } (T.S.) = \frac{HB}{3}$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση αυτή και τους πίνακες αντιστοιχίας είναι δυνατόν να υπολογιστεί κατά προσέγγιση η αντοχή σε εφελκυσμό ενός χάλυβα με σκληρομέτρηση κατά Brinell, χωρίς να χρειαστεί δοκιμή εφελκυσμού που απαιτεί και χρόνο αλλά και την καταστροφή του αντικειμένου η οποία πολλές φορές δεν είναι δυνατή. Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι κατά τη μέτρηση της σκληρότητας το πάχος του δοκιμίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερο από το βάθος της εντύπωσης και η απόσταση μεταξύ εντυπώσεων ή από την άκρη του δοκιμίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 2 1/2 φορές η διάμετρος της εντύπωσης [40,50,51,53].

2.4.3 Σκληρότητα Vickers

Η μέθοδος σκληρομέτρησης κατά Vickers χρησιμοποιεί σαν εντυπωτή αδαμαντοπυραμίδα τετραγωνικής βάσης και γωνίας κορυφής 136°. Τα βάρη που χρησιμοποιούνται είναι από 1-120 Kp. Η εντύπωση κατά τη σκληρομέτρηση αυτή έχει σχήμα τετραγώνου και με κατάλληλο μικροσκόπιο μετρούνται οι διαγώνιοί του, υπολογίζεται η μέση τιμή του μήκους των διαγωνίων (L) και στη συνέχεια η σκληρότητα Vickers από τον τύπο:

$$HV = 1.8544 \frac{P}{L^2} \quad (\text{όπου } P \text{ το φορτίο})$$

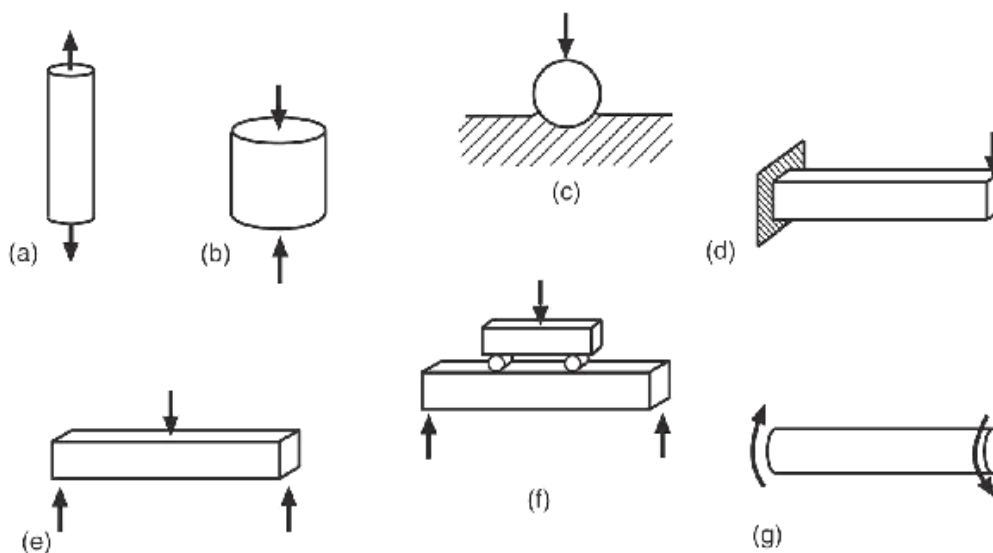
Κατά τη μέτρηση Vickers το πάχος του δοκιμίου πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην παρουσιάζεται εξόγκωμα από την πίσω πλευρά της μέτρησης και οπωσδήποτε το πάχος δεν μπορεί να είναι μικρότερο από το $1\frac{1}{2}$ του μήκους της διαγωνίου της εντύπωσης [40,50-53].

2.4.4 Δοκιμή μικροσκληρότητας

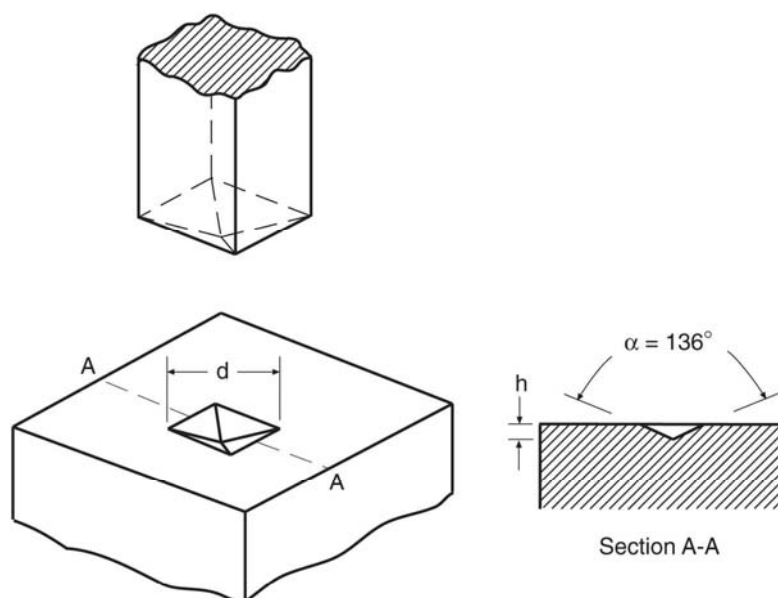
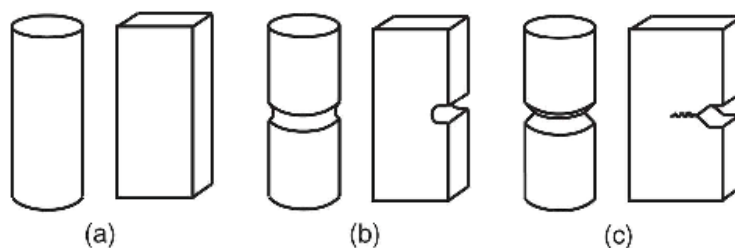
Ο όρος μικροσκληρομέτρηση αναφέρεται στη μέτρηση της σκληρότητας με χρήση πολύ μικρών φορτίων δηλαδή 1gr- 1 kgf και επιτρέπει την μελέτη της σκληρότητας σε μία πολύ μικρή περιοχή του υλικού. Δίνει δηλαδή την δυνατότητα του προσδιορισμού της σκληρότητας ενός κόκκου ή μίας πολύ λεπτής επιφάνειας. Ο χρησιμοποιούμενος εντυπωτής είναι η αδαμαντοπυραμίδα της μεθόδου Vickers (πυραμίδα από διαμάντι με τετραγωνική βάση) ή ο εντυπωτής KNOOP ο οποίος είναι ρομβοεδρική αδαμαντοπυραμίδα με βάση ρόμβο με λόγο διαγωνίων 7:1 και γωνίες κορυφής $172^{\circ} 30'$ και 130° αντίστοιχα. Οι διαστάσεις του αποτυπώματος που δημιουργείται επειδή το μέγεθός του είναι πολύ μικρό μετρούνται με μικροσκόπιο. Η μέθοδος χρησιμοποιείται όταν απαιτείται πολύ μικρό μέγεθος εντύπωσης, π.χ. σε επιφανειακά στρώματα, λεπτά υλικά, σκληρότητα μεταλλουργικών φάσεων, σκληρότητα κοντά στο άκρο κοπτικών εργαλείων. Η σκληρότητα στην κλίμακα Vickers (HVN) προκύπτει αν διαιρέσουμε το επιβαλλόμενο φορτίο $P(Kp)$ με την επιφάνεια της κοιλότητας του αποτυπώματος $s(mm^2)$ διαγωνίου $d(mm^2)$. Έχουμε δηλαδή :

$$HV = \frac{P(kp)}{s(mm^2)} = \frac{2 \cdot P \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{L^2} = 1.8544 \cdot \frac{P}{L^2} \quad (\text{όπου } P \text{ το φορτίο})$$

Για κάθε συσκευή από τις προαναφερόμενες υπάρχουν λεπτομερή εγχειρίδια χρήσης τα οποία ο κάθε φοιτητής μπορεί να χρησιμοποιήσει μετά από συνεννόηση με τον υπεύθυνο της ομάδας του προκειμένου να δουλέψει με μεγαλύτερη ασφάλεια και αποτελεσματικότητα [40,50-53].



(a) Δοκιμή εφελκυσμού, (b) δοκιμή θλίψης, (c) indentation test (σκληρότητα), (d) κάμψη δοκού, (e) κάμψη τριών σημείων, (f) κάμψη τεσσάρων σημείων και (g) στρέψη



Vickers hardness test, ακίδα από διαμάντι, πυραμίδα με τετράγωνη βάση

2.4.5 Μέθοδος Rockwell

Οι μέθοδοι Rockwell διαφέρουν από τις προηγούμενες στο ότι ο προσδιορισμός της σκληρότητας στηρίζεται στη μέτρηση του βάθους διείσδυσης του διεισδυτή και όχι της διαμέτρου ή της διαγωνίου του αποτυπώματος.

Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου Rockwell είναι το ότι φέρει βαθμονομημένη κλίμακα ανάγνωσης που δίνει απευθείας τη μέτρηση του βάθους του αποτυπώματος σε μονάδες σκληρότητας Rockwell. Το γεγονός αυτό καθιστά τη μέθοδο αυτή απλή και γρήγορη.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι Rockwell, που χρησιμοποιούν διαφορετική γεωμετρία διεισδυτή και τιμή επιβαλλόμενου φορτίου, βλ. Πίνακα 2.2.

Μέθοδος	Τύπος διεισδυτή	Ολικό Φορτίο (kgf)	Εφαρμογές
B	Σφαίρα(D=1.588mm)	100	Ανοπτημένοι χάλυβες, ορείχαλκοι
C	Κώνος	150	Σκληροί χάλυβες, Ti
A	Κώνος	60	Πολύ σκληρά υλικά
D	Κώνος	100	Σκληροί χάλυβες λεπτού πάχους
E	Σφαίρα(D=3.175mm)	100	Πολύ μαλακά υλικά (Χράματα Al, Mg, χυτοσίδηρος)
F	Σφαίρα(D=1.588mm)	60	Μαλακά υλικά (Al, Cu, μπρούντζος)
L	Σφαίρα(D=6.350mm)	60	Pb, πλαστικά
N	Κώνος	15/30/45	Λεπτά δείγματα

Πίνακας 2.2: Μέθοδοι σκληρομέτρησης κατά Rockwell

Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες είναι οι μέθοδοι Rockwell B με σφαιρικό διεισδυτή από σκληρυμένο χάλυβα σταθερής διαμέτρου 1/16'' (1,588 mm) και χρησιμοποιείται για μετρήσεις μικρών τιμών σκληρότητας και Rockwell C με κωνικό διεισδυτή με γωνία κορυφής 120° και σφαιρικό άκρο διαμέτρου 0.2mm, για μετρήσεις σκληρότητας σκληρών υλικών.

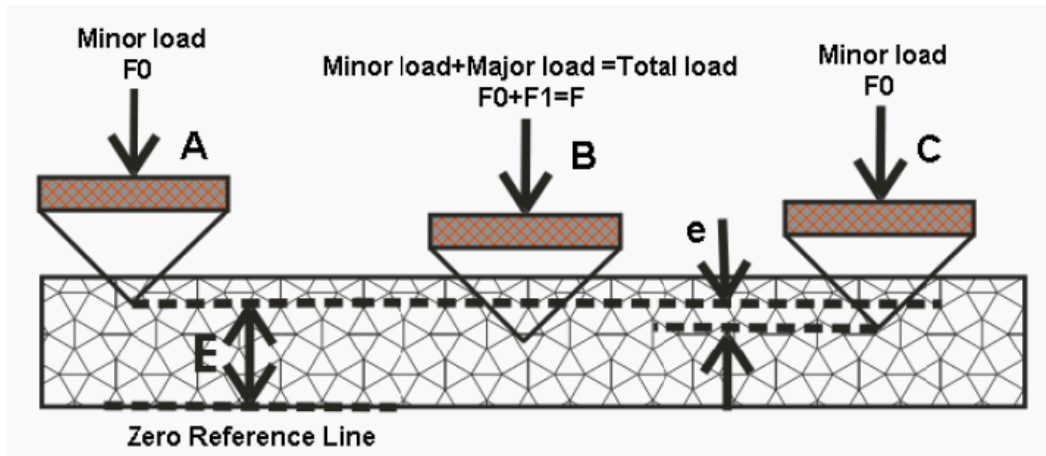
Ως σκληρότητα κατά Rockwell (HR) ορίζεται το βάθος διείσδυσης z του διεισδυτή, μετρημένο με μονάδα μέτρησης τα μm , δηλ. η σκληρότητα κατά Rockwell είναι μήκος, ενώ στις προηγούμενες μεθόδους η σκληρότητα έχει μονάδες τάσης.

Το φορτίο επιβάλλεται σε δύο στάδια:

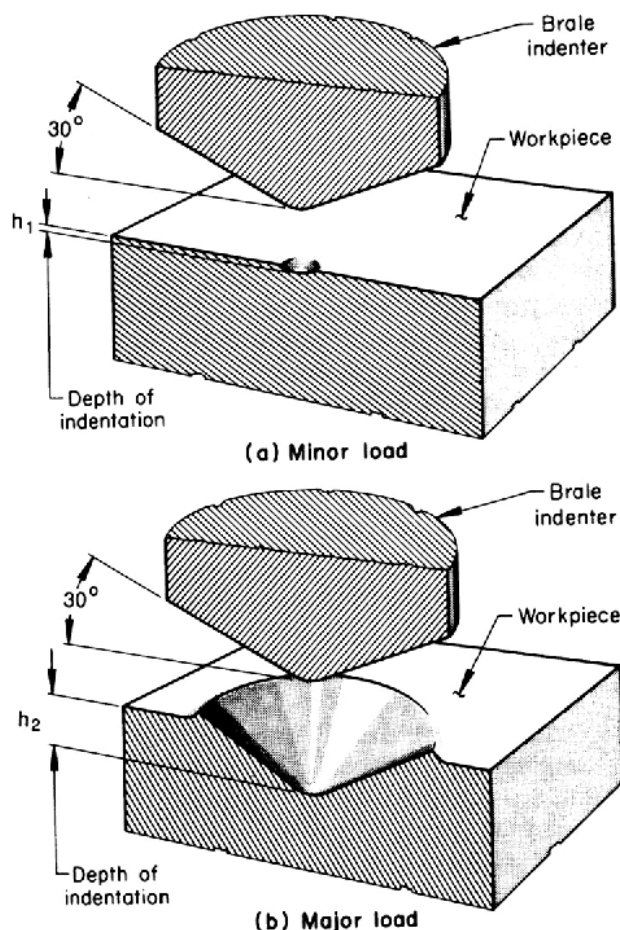
Στο πρώτο στάδιο (προφόρτιση), επιβάλλεται φορτίο $F_0=10\text{kgf}$ (98 N), οπότε δημιουργείται κοιλότητα με Δ_0 που έχει σκοπό την ισοπέδωση τυχόν τοπικών ανωμαλιών.

Στο δεύτερο στάδιο (φόρτιση) επιβάλλεται πρόσθετο φορτίο F_1 , το οποίο εφαρμόζεται για 20-30s, με τελική διείσδυση Δ . Ανάλογα με την μέθοδο, το αντίστοιχο συνολικό φορτίο F είναι 100 kgf (981 N) στην Rockwell **B** και 150 kgf (1471 N) στη Rockwell

Στην συνέχεια απομακρύνεται και επανέρχεται στη δύναμη προφόρτισης F_0 . Ο διεισδυτής οπισθοχωρεί και διατηρείται μια παραμένουσα διείσδυση Δ_p , όπου $\Delta_0 < \Delta_p < \Delta$. Η σκληρότητα υπολογίζεται από και διαβάζεται απευθείας στην βαθμονομημένη κλίμακα του οργάνου.



Σχήμα 2.4: Μέθοδος Rockwell



Σχήμα 2.5: Σκληρομέτρηση Rockwell $HRX=M-\Delta h/0.002$

Για την ονοματολογία της μεθόδου Rockwell χρησιμοποιούνται οι χαρακτήρες HR. Για παράδειγμα 45 HRC σημαίνει ότι το υλικό έχει σκληρότητα 45 κατά την κλίμακα C.

Για να μην επηρεάζεται η μέτρηση από την αντίσταση του υποστηρίγματος του δοκιμίου, πρέπει το πάχος του δοκιμίου να είναι 10 φορές μεγαλύτερο από το βάθος του αποτυπώματος στη Rockwell C και 15 φορές από το βάθος του αποτυπώματος στη Rockwell B. (Οι προδιαγραφές δίνουν το ελάχιστο επιτρεπτό πάχος των δοκιμίων, ανάλογα με τη μέθοδο μέτρησης και την τιμή σκληρότητας).

2.4.6 Συσχέτιση αριθμών σκληρότητας

Αν και υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα στη συσχέτιση της σκληρότητας μεταξύ των διαφόρων μεθόδων που χρησιμοποιούνται, στην πράξη με την εφαρμογή

ημιεμπειρικών τύπων και με σφάλμα της τάξης του $\pm 10\%$ είναι δυνατή η συσχέτιση της σκληρότητας που προσδιορίζεται με τη μέθοδο Brinell με αυτήν της μεθόδου Rockwell.

Η σχέση που εφαρμόζεται στην περίπτωση τιμών Rockwell B μεταξύ 35 και 100, είναι η παρακάτω:

$$HB = \frac{7300}{130 - HRB}$$

Υπάρχουν στην βιβλιογραφία διαγράμματα, που συσχετίζουν τις σκληρότητες ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την συσχέτιση αυτή πρέπει να αξιολογούνται με προσοχή. Οι προδιαγραφές δίνουν την αντιστοιχία των σκληροτήτων μετά από μετρήσεις με διαφορετικές μεθόδους (ASTM E140). Οι μετατροπές ισχύουν για συγκεκριμένα κράματα.

2.4.7 Συσχέτιση σκληρότητας με αντοχή σε εφελκυσμό.

Ο προσδιορισμός της σκληρότητας διείδυσης είναι δυνατόν να συσχετιστεί με τον κατά προσέγγιση προσδιορισμό της αντοχής σε εφελκυσμό (σ_T) του υλικού.

Ο συσχετισμός αυτός εφαρμόζεται στις περιπτώσεις εκείνες που ο προσδιορισμός με το πείραμα του εφελκυσμού είτε είναι ανέφικτος είτε δύσκολος.

Οι προσεγγιστικές σχέσεις που εφαρμόζονται για τις βασικές κατηγορίες μεταλλικών υλικών ενδιαφέροντος δομικού είναι :

-Χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα για σκληρότητα 120 -175 HB $\sigma_T = 0,34 HB (kg/mm^2)$

-Χαλκός, ορείχαλκος, μπρούτζος.

-Ανοπτημένος $\sigma_T = 0,55 HB (kg/mm^2)$

-Σκληρυμένος με παραμόρφωση $\sigma_T = 0,40 HB$

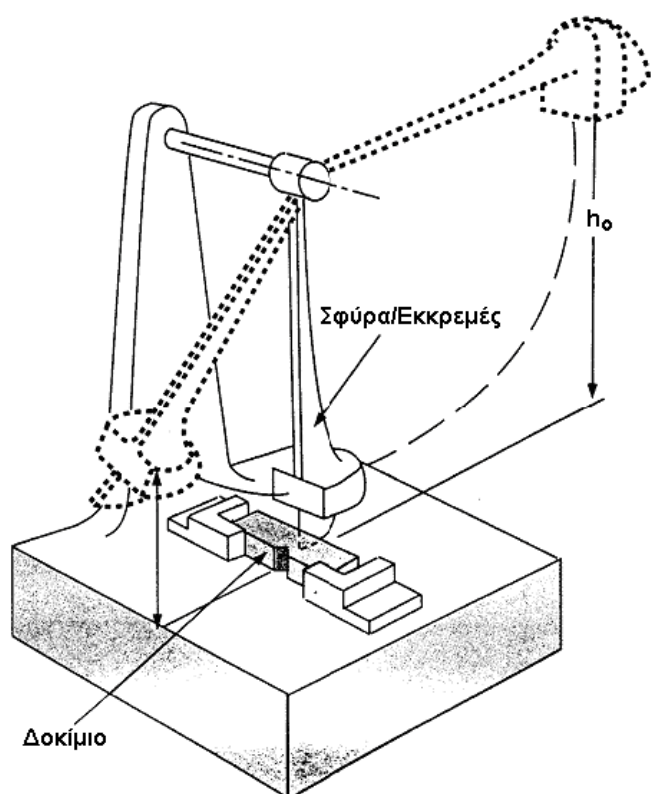
-Αλουμίνιο και κράματα αλουμινίου για HB μεταξύ 20 – 25 $\sigma_T = 0,33 -0,36 HB$

Ντουραλουμίνιο $\sigma_T = 0,36 HB$

2.5 Δοκιμή Κρούσης

Σκοπός της δοκιμής κρούσης είναι ο προσδιορισμός της απορροφούμενης ενέργειας κατά τη θραύση δοκιμίου από κρουστικό φορτίο και καθορισμός ενός μέτρου της στερρότητας (ποσό ενέργειας που απορροφάται από το υλικό μέχρι τη θραύση). Αυτό επιτρέπει μια ποιοτική ή συγκριτική εκτίμηση της συμπεριφοράς των υλικών υπό παρόμοιες συνθήκες, για τις οποίες οι στατικές δοκιμές δεν παρέχουν πληροφορίες.

Πειραματικά, η στερρότητα μετρείται με δοκιμές όπου το δοκίμιο κρούεται με το αιωρούμενο άκρο εκκρεμούς που έχει διαμορφωθεί σε σφύρα προκαθορισμένης γεωμετρίας. Η μέγιστη γωνία απόκλισης του εκκρεμούς μετά τη θραύση επιτρέπει τον προσδιορισμό της ενέργειας που έχασε το εκκρεμές, η οποία ισούται με εκείνη που απορρόφησε το δοκίμιο κατά τη θραύση του.



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

α αρχική γωνία μεταξύ βραχίονα και κατακορύφου α' γωνία μεταξύ βραχίονα και κατακορύφου μετά την κρούση **h** ύψος πτώσης σφύρας

(συνήθεις τιμές: **h=800–1600mm**) **m** προσπίπτουσα μάζα (συνήθης τιμή: **m=30kg**)

A μήκος βραχίονα εκκρεμούς (συνήθεις τιμές: **A=400–800mm**) υ ταχύτητα κρούσης

$$[=\sqrt{2gl(1-\cos\alpha)}]$$

W απορροφούμενη ενέργεια κρούσης, ίση με: **Wmg/(cosα-cosα')**

Σχήμα 2.6: Μηχανή δοκιμών κρούσης

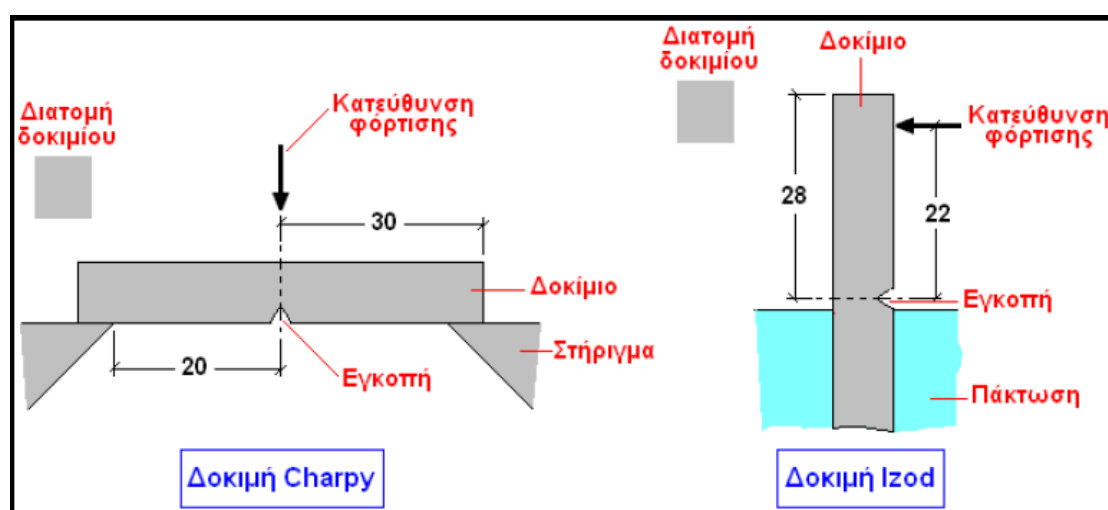
Οι δοκιμές κρούσης είναι οι εξής, η δοκιμή Charpy (χρησιμοποιείται κυρίως στην Ευρώπη). και η δοκιμή Izod (χρησιμοποιείται κυρίως σε ΗΠΑ και Αγγλία), οι οποίες διαφέρουν κυρίως στον τρόπο στήριξης του δοκιμίου. Η μηχανή εκτέλεσης των δοκιμών κρούσης είναι ένα μηχανικό εκκρεμές του οποίου η αιωρούμενη μάζα αφήνεται από καθορισμένο ύψος έτσι ώστε στο κατώτερο σημείο της τροχιάς της να

έχει την ταχύτητα που ορίζουν οι κανονισμοί. Η μηχανή είναι εφοδιασμένη με άντυγα, ο δείκτης της οποίας παρασύρεται από το βραχίονα του εκκρεμούς και δίνει την απορροφούμενη ενέργεια σε $Kp \cdot m$.

Τα δοκίμια είναι πρισματικές ράβδοι τετραγωνικής διατομής $1 \times 1 \text{ cm}^2$ που φέρουν στη μία πλευρά τους εγκοπή βάθους 2mm. Η εγκοπή αυτή έχει σκοπό τη δημιουργία συγκεντρώσεως τάσεων στην περιοχή αυτή έτσι ώστε αφενός μεν να υπάρχουν συνθήκες σχετικώς ψαθυρής θραύσεως και αφετέρου να είναι προκαθορισμένη η θέση της διατομής θραύσεως. Οι εγκοπές έχουν σχήμα U, V, Π ή οπής κλείθρου. Από αυτές η τελευταία έχει το σχετικό πλεονέκτημα ότι παρουσιάζει περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή των υψηλών τάσεων στην περιοχή της.

Κατά τη δοκιμή Charpy το δοκίμιο στηρίζεται ως αμφιέριστη δοκός, με απόσταση μεταξύ των στηρίξεων, 40mm. Η ακμή της σφύρας προσκρούει στην πλευρά του δοκιμίου απέναντι από εκείνη που έχει την εγκοπή έτσι ώστε η εγκοπή να βρίσκεται στην περιοχή των εφελκόμενων ινών. Στη δοκιμή Charpy η ταχύτητα κρούσης της σφύρας είναι 5,75 m/sec.

Κατά τη δοκιμή Izod το δοκίμιο πακτώνετε σε κατάλληλο σύστημα αρπαγών έτσι ώστε το κέντρο της εγκοπής να συμπίπτει με το όριο πακτώσεως. Η σφύρα προσκρούει σε μια τομή του δοκιμίου που βρίσκεται 22mm πάνω από την πάκτωση, με ταχύτητα 3,75m/sec. Στη δοκιμή αυτή η επιφάνεια επαφής σφύρας δοκιμίου βρίσκεται στην ίδια πλευρά του δοκιμίου που βρίσκεται και η εγκοπή, ώστε πάλι να καταπονείται εφελκυστικά η περιοχή της εγκοπής.



Σχήμα 2.7: Γεωμετρία και διάταξη δοκιμίων στις δοκιμές κρούσης Charpy και Izod

Η εγκοπή έχει διάφορες μορφές και διαστάσεις. Στη δοκιμή Charpy, η εγκοπή είναι μορφής V, U ή Ω με διάφορα βάθη (2, 3 ή 5mm), ενώ στη δοκιμή Izod έχει μορφή V με στρογγυλεμένο άκρο ($r=0,25\text{mm}$) και βάθος 2mm.

Κατά τους κανονισμούς (DIN 50115 και ASTM E-23 για μεταλλικά υλικά, DIN 53453 και ASTM E-23 για πολυμερή υλικά) εκτελούνται τουλάχιστον τρεις δοκιμές κρούσεως με τη μία ή την άλλη μέθοδο και ως μέτρο της στερεότητας του υλικού ορίζεται ο μέσος όρος της απορροφούμενης ενέργειας ανά μονάδα ελαχίστης διατομής σε Kpm/mm^2 . (Για τις εκπαιδευτικές ανάγκες του εργαστηρίου, έγινε από μία μέτρηση για κάθε δοκιμή) Η δοκιμή ολοκληρώνεται με έλεγχο της μορφής της επιφάνειας θραύσεως του δοκιμίου για να καθορισθεί το είδος της θραύσεως αναλόγως του αν επικρατούν λείες και στιλπνές ή ανώμαλες και κοκκώδεις επιφάνειες [40,54,55,56].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Εισαγωγή

Στο σημείο αυτό θα γίνει η περιγραφή της διαδικασίας παρασκευής ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων ψευδαργύρου σε χαλύβδινα δοκίμια κρούσης και εφελκυσμού με συνθήκες συνεχούς ρεύματος. Επίσης θα γίνει αναλυτική περιγραφή των της προετοιμασίας και των διεργασιών που πραγματοποιήθηκαν στα παραπάνω δοκίμια ώστε να μπορέσουν να γίνουν οι μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού, κρούσης και μικροσκληρότητας οι οποίες έλαβαν χώρα στα εργαστήρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και στον Τομέα Μηχανικών, Μεταλλουργικών Δοκιμών και Ελέγχων (Τ.Μ.Μ.Δ.Ε.) του Κέντρου Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων της Δ.Ε.Η. Α.Ε. (Κ.Δ.Ε.Π.) σύμφωνα με τις αντίστοιχες τεχνικές προδιαγραφές της ΔΕΗ.

3.2 Προετοιμασία Δοκιμών

Κοπή

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή δοκιμών και στο οποίο πραγματοποιήθηκε ηλεκτρολυτική επιψευδαργύρωση είναι ο απλός χάλυβας κατασκευών (St 37). Τα υλικό αρχικά ήταν σε μορφή ράβδων με κυλινδρική και τετραγωνική διατομή από τις οποίες κόπηκαν και παρασκευάστηκαν δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης με κατάλληλη διαμόρφωση (συγκεκριμένων διαστάσεων) σύμφωνα με τις αντίστοιχες προδιαγραφές.

Η κατεργασία και η διαμόρφωση των δοκιμών αυτών έγινε στο παρασκευαστήριο και στο μηχανουργείο των εργαστηρίων του Κ.Δ.Ε.Π.

Τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν για τον σκοπό αυτό ήταν:

Ο δισκοτόμος Unitom – 5 της Struers και ο λεπτοτόμος Accutom – 5 (εικόνα 3.1 και 3.2 Εργαστήριο Μεταλλογραφίας του Κ.Δ.Ε.Π.). Με την επιλογή κατάλληλου κοπτικού τροχού (ανάλογα με την σκληρότητα και το είδος του υλικού). Ο δίσκος που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από καρβίδια του πυριτίου (SiC), οξείδια του

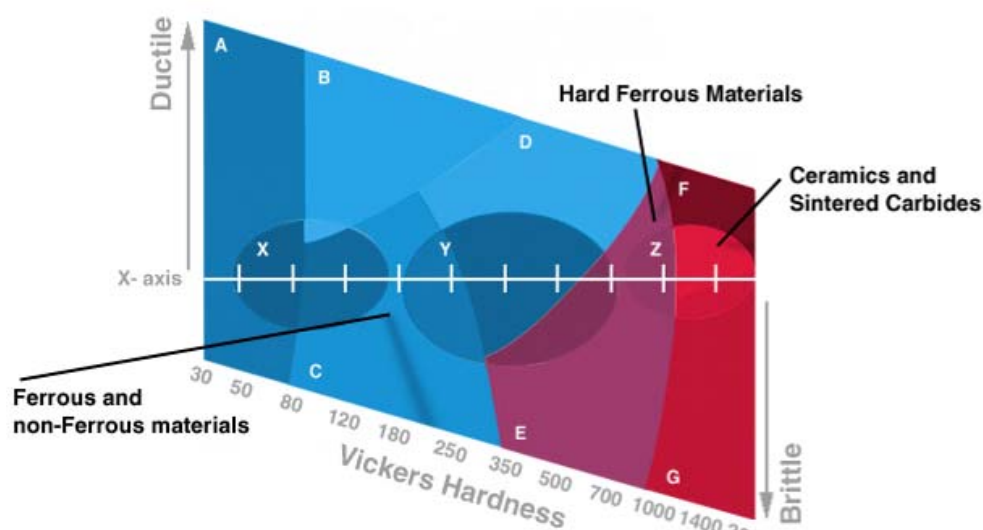
αλουμινίου (Al_2O_3), κυβικό νιτρίδιο του βορίου (CBN) και διαμαντόσκονη με συνδετικό υλικό βακελίτη.



Εικόνα 3.1: Δισκοτόμος Unitom – 5 (Εργαστήριο Μεταλλογραφίας - Κ.Δ.Ε.Π.)



Εικόνα 3.2: Λεπτοτόμος Accutom – 5 (Εργαστήριο Μεταλλογραφίας - Κ.Δ.Ε.Π.)



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα επιλογής δίσκου κοπής

Στην συνέχεια τα δοκίμια διαμορφώθηκαν κατάλληλα στο μηχανουργείο του Κ.Δ.Ε.Π. σύμφωνα με τις προδιαγραφές που αναφέρονται σε διαμόρφωση δοκιμίων εφελκυσμού και κρούσης.

Απολίπανση – Αποξείδωση

Προκατεργασία Υποστρώματος

Η ποιότητα μιας επιμετάλλωμένης επιφάνειας εξαρτάται τόσο από την εφαρμοζόμενη μέθοδο και τις συνθήκες που επικρατούν στην διάρκεια της διεργασίας όσο και από την κατάσταση του υποστρώματος.

Τις περισσότερες φορές οι επιφάνειες περιέχουν ακαθαρσίες, λίπη, οξειδία τα οποία πρέπει να απομακρυνθούν.

Η προκατεργασία περιλαμβάνει λείανση και στίλβωση (μηχανική και χημική), απολίπανση με οργανικούς διαλύτες ή γαλακτωματοποιητές, αλκαλικό καθαρισμό και αποξείδωση.

Ως υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκαν τα παραπάνω δοκίμια κατάλληλα διαμορφωμένα για εφελκυσμό και κρούση, σύμφωνα με το πρότυπο. Το σχήμα των δοκιμίων φαίνεται παρακάτω (εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3: Δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης (Υλικό St37)

Τα δοκίμια πριν από την διαδικασία ηλεκτροαπόθεσης, υποβλήθηκαν σε μηχανική λείανση και στίλβωση με ειδική στίλβωτική διάταξη στο μηχανουργείο του Κ.Δ.Ε.Π. Η προκατεργασία των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Πρώτα στα εργαστήρια του Τομέα Μηχανικών, Μεταλλουργικών Δοκιμών και Ελέγχων (Τ.Μ.Μ.Δ.Ε.) και στο μηχανουργείο του Κ.Δ.Ε.Π. της Δ.Ε.Η. όπου πραγματοποιήθηκε λείανση και στίλβωση και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε καθαρισμός των δοκιμίων στο Εργαστήριο Γενικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Κατά το πρώτο στάδιο για την λείανση και στίλβωση έγινε χρήση της αυτόματης συσκευής λείανσης – στίλβωσης TegraPol – 25 της Struers με την εφαρμοσμένη κεφαλή Struers TegraForce – 5 σε συνεργασία με την δοσομετρική συσκευή ειδικών λειαντικών υγρών TegraDoser – 5. Η συσκευή αυτή έχει την δυνατότητα να πραγματοποιεί λειάνσεις με μεγάλη ακρίβεια και ομοιομορφία σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου. Μέσα από μία πληθώρα προγραμμάτων (τα οποία προτείνει η εταιρεία κατασκευής της συσκευής – αλλά και άλλων τα οποία μπορεί να δημιουργήσει ο χειριστής) είναι δυνατή η επεξεργασία σχεδόν όλων των υλικών.

Το κάθε πρόγραμμα αποτελείται από διάφορα στάδια στα οποία αλλάζει η εφαρμοζόμενη δύναμη στο προς λείανση δοκίμιο, το λειαντικό μέσο, το είδος του λιπαντικού υγρού και ο χρόνος. Σε κάθε στάδιο του προγράμματος (διακοπή

λειτουργίας της συσκευής) πραγματοποιείται σχολαστικός καθαρισμός των δοκιμίων με νερό και αιθυλική αλκοόλη. Αυτό γίνεται για να μην «μολυνθούν» τα λειαντικά μέσα από τυχόν υπολείμματα – απόβλητα λείανσης του προηγούμενου σταδίου.



Εικόνα 3.4: Συσκευή αυτόματης λείανσης – στίλβωσης TegraPol – 25 της Struers (Εργαστήρια Τομέα Μηχανικών, Μεταλλουργικών Δοκιμών και Ελέγχων – Κ.Δ.Ε.Π.)

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα προγράμματα αυτόματης λείανσης – στίλβωσης της παραπάνω συσκευής. Για την λείανση των δοκιμίων έγινε χρήση του προγράμματος «Steel Long».

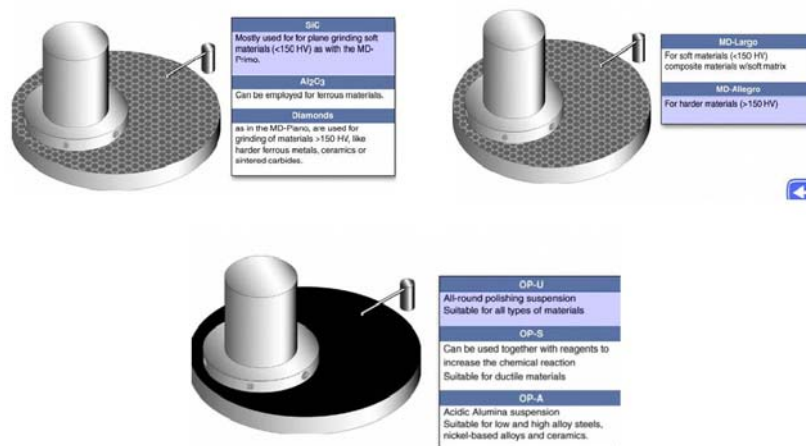
Για τα δοκίμια κρούσης, λόγω της γεωμετρίας τους, έγινε χρήση της μηχανής λείανσης RotoPol – 35 της Struers. Στην συσκευή αυτή η λείανση πραγματοποιείται «χειροκίνητα» με χρήση λειαντικών χαρτιών σύμφωνα με το πρότυπο FEPA.

<i>Λειαντικά Χαρτιά (Πρότυπο FEPA)</i>	<i>Μέγεθος κόκκων (μm)</i>
80	196
120	120
180	75
220	65
320	46
500	30
800	21,8
1000	18,3
1200	15,2
2400	10
4000	5

Πίνακας 3.1: Λειαντικά Χαρτιά - Πρότυπο FEPA



Εικόνα 3.5: Συσκευή αυτόματης λείανσης – στίλβωσης RotoPol – 35 της Struers (Εργαστήρια Τομέα Μηχανικών, Μεταλλουργικών Δοκιμών και Ελέγχων – Κ.Δ.Ε.Π.)



Σχήμα 3.2: Κεφαλές λείανσης συσκευής TegraPol – 25 της Struers

Αντίστοιχα τα δοκίμια εφελκυσμού κατά το πρώτο στάδια λειάνθηκαν με την βοήθεια οριζόντιου τόρνου (Μηχανουργείο Κ.Δ.Ε.Π.) και η λείανση έγινε χειροκίνητα με χρήση λειαντικών χαρτιών.

Σκοπός των παραπάνω είναι η μείωση της επιφανειακής τραχύτητας των δοκιμίων ώστε να είναι δυνατή η ομοιόμορφη επικάλυψη της επιφάνειας τους.

Κατά το δεύτερο στάδιο καθαρισμού των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν χημικές και μηχανικές κατεργασίες λείανσης και στίλβωσης.

Αρχικά έγινε καθαρισμός λουτρό υπερήχων με τα παρακάτω στάδια:

- Με ακετόνη για 3 λεπτά
- Με απιονισμένο νερό για 3 λεπτά
- Με Τριχλωροαιθυλαίνιο για 1 λεπτό
- Με απιονισμένο νερό για 3 λεπτά

Ακολούθησε ανοδική διάλυση σε διάλυμα NaOH 2M σε ρεύμα πυκνότητας 6A/dm² για ένα λεπτό, έκπλυση με θερμό νερό 65°C για 15 sec και εμβάπτηση σε 10% w/w H₂SO₄ για 10 sec.



Εικόνα 3.6: Συσκευή καθαρισμού υπερήχων (Εργαστήριο Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.)

Τέλος τα δοκίμια ζυγίστηκαν στην ηλεκτρονική ζυγαριά του Εργαστηρίου Γενικής Χημείας.

Πειραματική Διάταξη – Παρασκευή Ηλεκτρολυτικών Αποθεμάτων Ψευδαργύρου

Για την πραγματοποίηση της διαδικασίας ηλεκτροαπόθεσης Zn χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρολυτικό κελί σε διάταξη βιομηχανικού προτύπου, χωρητικότητας 2000ml από πολυπροπυλένιο υπό καθεστώς συνεχούς ρεύματος (Εικόνα 3.7) και χρήση βιομηχανικού λουτρού όξινης επιψευδαργύρωσης (1750ml).



Εικόνα 3.7: Ηλεκτρολυτικό κελί επιψευδαργύρωσης (Εργαστήριο Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.)

Για ηλεκτρόδια ανόδου χρησιμοποιήθηκαν πλάκες από καθαρό Zn. Το κελί τοποθετήθηκε επάνω σε μαγνητικό αναδευτήρα CAT M26 (250-300 στροφές) για την απομάκρυνση του παραγόμενου υδρογόνου από την επιφάνεια των δοκιμίων.

Ως πηγή συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιήθηκε γαλβανοστάτης της εταιρείας «XENON» PS 533. Η συσκευή αυτή διαθέτει ενσωματωμένο αμπερόμετρο και βολτόμετρο με ψηφιακή ένδειξη.

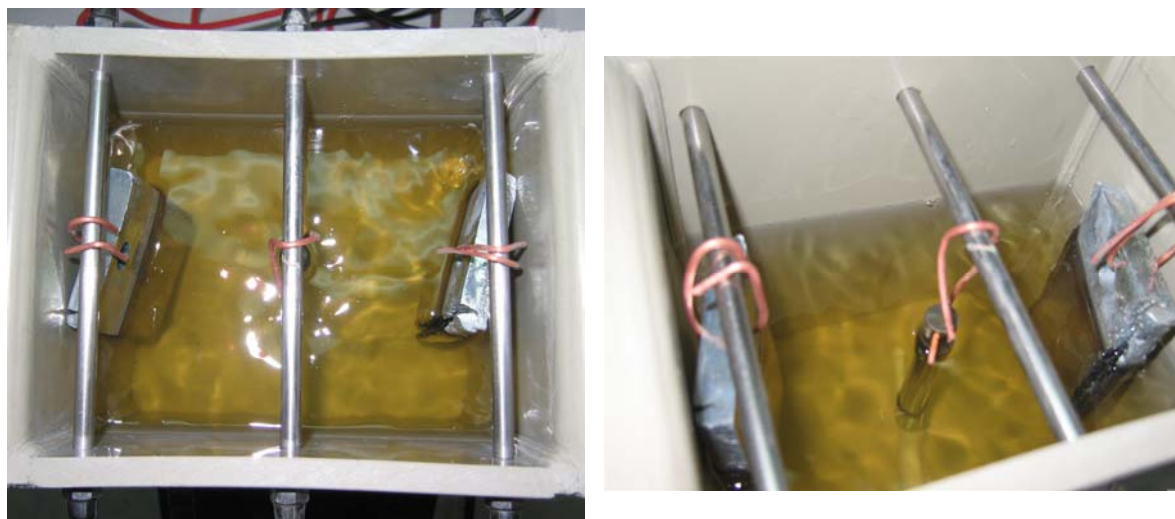
Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας παρασκευάστηκαν απλές ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις ψευδαργύρου σε δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης σε συνθήκες συνεχούς ρεύματος.

Η θερμοκρασία για την παρασκευή των ηλεκτρολυτικών αυτών επικαλύψεων ήταν μεταξύ 18 – 25 °C και η πυκνότητα ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ίση με 4A/dm².

Το ρεύμα υπολογίστηκε, για τα δοκίμια της κρούσης να είναι $I_k=0,92A$ και για τα δοκίμια του εφελκυσμού $I_e=0,97A$. Για να επιτευχθεί πάχος επιμετάλλωσης max 35-40μm, για χαλύβδινα εξαρτήματα των διαστάσεων αυτών, (σύμφωνα με την Τεχνική Περιγραφή της ΔΕΗ ΧΚ-11.01/11.11.87, GR-182 Ηλεκτρολυτική επιψευδαργύρωση αντικειμένων από σίδηρο ή χάλυβα) υπολογίστηκε ότι ο χρόνος της ηλεκτροαπόθεσης πρέπει να είναι 40 λεπτά.

Ως ηλεκτρόδια εργασίας (κάθοδος) χρησιμοποιήθηκαν τα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης από χάλυβα όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (στη μέση της ενδιάμεσης μπάρας του ηλεκτρολυτικού κελιού). Το εμβαδόν της ελεύθερης επιφάνειας των δοκιμίων εφελκυσμού και κρούσης μετρήθηκε να είναι 0,248 dm² και 0,230 dm² αντίστοιχα.

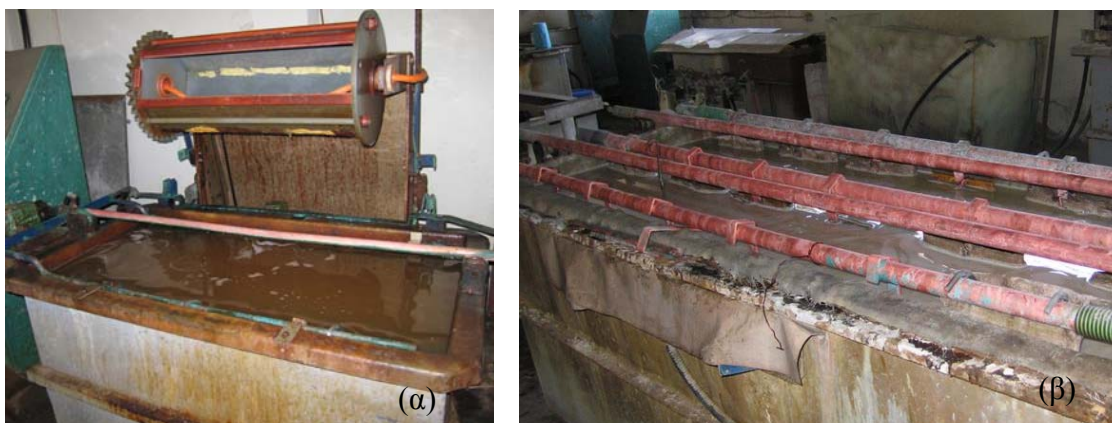




Εικόνα 3.8: Ηλεκτρολυτικό κελί για την παρασκευή επικαλύψεων ψευδαργύρου σε χαλύβδινα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης

Προκειμένου να μελετηθούν οι μηχανικές ιδιότητες των επικαλύψεων ψευδαργύρου και η επίδραση της μεθόδου που εφαρμόζεται, πραγματοποιήθηκαν ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις ψευδαργύρου σε πραγματικές συνθήκες βιομηχανίας στις εγκαταστάσεις της εταιρείας ΣΤΑΛΚΟ ΑΒΕ (Βιομηχανία Ηλεκτρολογικού Εξοπλισμού) που βρίσκεται την Α΄ ΒΙ.ΠΕ. Βόλου.

Παρασκευάστηκαν δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης με την μέθοδο κινούμενης μπάρας (rack plating) και την μέθοδο περιστρεφόμενου τυμπάνου (barrel plating) χρησιμοποιώντας το ίδιο βιομηχανικό λουτρό όξινης επιψευδαργύρωσης που χρησιμοποιήθηκε και στο εργαστήριο.



Εικόνα 3.9: Διάταξη για την παρασκευή ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων ψευδαργύρου εργοστάσιο της ΣΤΑΛΚΟ, (α) Barrel plating, (β) Rack plating.



Εικόνα 3.10: Εργοστάσιο ΣΤΑΛΚΟ - Αεροφωτογραφία (Α' Βιομηχανική Περιοχή Βόλου)

Τελικά με τις βιομηχανικές μεθόδους επιμεταλλώσεως που πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του εργοστασίου της ΣΤΑΛΚΟ ΑΒΕ επιτεύχθηκε πάχος επιμετάλλωσης από 20μm έως και 62μm.

Σε 4 δοκίμια εφελκυσμού και 2 κρούσης δεν έγινε καμία ηλεκτρολυτική απόθεση ψευδαργύρου ώστε να μπορέσει να γίνει συγκριτική αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων και της δομής τους με τα υπόλοιπα δοκίμια.



Εικόνα 3.11: Φωτογραφία δοκιμίων πριν και μετά την επιμεταλλώση

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συνοπτικά οι διαδικασίες ηλεκτρολυτικής επιμεταλλώσεως και οι χρόνοι απόθεσης στα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης.

Κωδικός	Δοκίμιο	Μέθοδος Ηλεκτροαπόθεσης	Χρόνος Απόθεσης (min)
No2	εφελκυσμού	-	-
No3	εφελκυσμού	-	-
No5	εφελκυσμού	-	-
No6	εφελκυσμού	-	-
EA	εφελκυσμού	Εργαστήριο (rack)	42
EB	εφελκυσμού	Εργαστήριο (rack)	42
ESB1	εφελκυσμού	Stalco (barrel)	35
ESB2	εφελκυσμού	Stalco (barrel)	35
ESB3	εφελκυσμού	Stalco (barrel)	45
ESB4	εφελκυσμού	Stalco (barrel)	45
ESL1	εφελκυσμού	Stalco (rack)	30
ESL2	εφελκυσμού	Stalco (rack)	30
ESL3	εφελκυσμού	Stalco (rack)	45
K _I	κρούσης	-	-
K _{II}	κρούσης	-	-
KA	κρούσης	Εργαστήριο (rack)	42
KB	κρούσης	Εργαστήριο (rack)	45
KSB1	κρούσης	Stalco (barrel)	35
KSB2	κρούσης	Stalco (barrel)	35
KSB3	κρούσης	Stalco (barrel)	45
KSB4	κρούσης	Stalco (barrel)	45
KSB5	κρούσης	Stalco (barrel)	45
KSL1	κρούσης	Stalco (rack)	30
KSL2	κρούσης	Stalco (rack)	30
KSL3	κρούσης	Stalco (rack)	45

Πίνακας 3.2: Κωδικοποίηση δοκιμών – μέθοδοι επιμετάλλωσης

3.3 Μέθοδοι Χαρακτηρισμού δομής και επιφάνειας επικαλύψεων

3.3.1 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM – EDAX)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope) χρησιμεύει για την παρατήρηση επιφανειών, με τη βοήθεια μιας δέσμης ηλεκτρονίων μικρής διαμέτρου η οποία σαρώνει μια ορθογώνια περιοχή του δοκιμίου. Παράλληλα σαρώνει και μια αντίστοιχη επιφάνεια φθορίζουσας οθόνης που βρίσκεται στο άκρο ενός καθοδικού σωλήνα (όπως συμβαίνει και στην οθόνη της τηλεόρασης).

Τα ηλεκτρόνια της δέσμης προσκρούοντας στην επιφάνεια του δοκιμίου διεγείρουν μια μικρή μάζα γύρω από το σημείο της σύγκρουσης, προκαλώντας έτσι μια δευτερογενή εκπομπή ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας. Η ένταση των ηλεκτρονίων αυτών σχετίζεται κυρίως με τη κλίση της επιφάνειας του δοκιμίου ως προς την προσπίπτουσα αρχική δέσμη. Η ένταση της δέσμης που προσπίπτει πάνω στην οθόνη μεταβάλλεται ανάλογα με την ένταση της δέσμης των δευτερογενών ηλεκτρονίων. Έτσι έχουμε τον σχηματισμό ενός ανάγλυφου στη φθορίζουσα οθόνη το οποίο αντιπροσωπεύει την επιφάνεια του δοκιμίου. Η εικόνα αυτή μπορεί να φωτογραφηθεί (αυτό συμβαίνει όταν η σάρωση της επιφάνειας είναι αρκετά αργή ώστε να προσβάλει το φιλμ).

Τα κύρια μέρη ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου είναι:

Η στήλη του μικροσκοπίου.

Ο θάλαμος κενού του δοκιμίου.

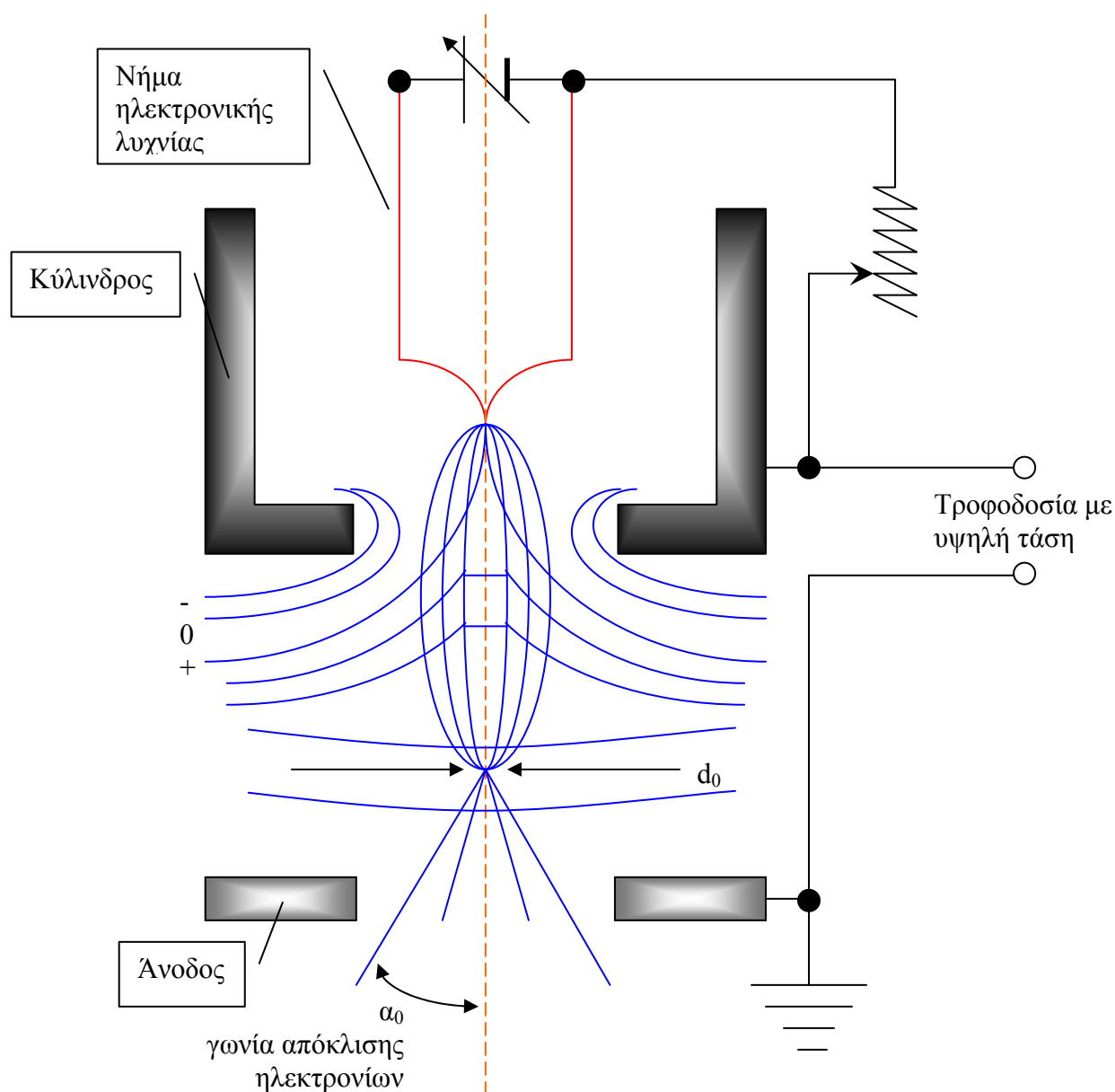
Το σύστημα λειτουργίας του κενού.

Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου.

Το σύστημα εικόνας.

Τα ηλεκτρόνια παράγονται από ένα νήμα βολφραμίου διαμέτρου 0,25 mm ανάλογο με αυτό που έχουν οι κοινοί λαμπτήρες πυρακτώσεως, αλλά πιο μικρό σε μήκος. Στα δύο άκρα του εφαρμόζεται μια μικρή τάση, έτσι ώστε να διαρρέετε από ένα μικρό ρεύμα και λόγω του φαινομένου Joule θερμαίνεται στους 2500°C. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η περιοχή γύρω από το νήμα να γεμίσει ηλεκτρόνια (θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων). Το νήμα αυτό που χρησιμεύει ως κάθοδος, βρίσκεται στο πάνω μέρος της στήλης του μικροσκοπίου μέσα στο οποίο επικρατεί υψηλό κενό. Η άνοδος

βρίσκεται σε χαμηλότερη στάθμη της στήλης του μικροσκοπίου και έλκει πολύ ισχυρά τα ηλεκτρόνια που παράγονται από το νήμα. Έτσι τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται προς την άνοδο και στη συνέχεια κινούνται ευθύγραμμα προς την επιφάνεια του δοκιμίου που βρίσκεται στο κάτω μέρος της στήλης.



Σχήμα 3.3: Σχηματική παράσταση του ηλεκτρονιοβόλου του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Για να επιτευχθεί η συμπίκνωση του ηλεκτρονικού νέφους σε δέσμη ηλεκτρονίων το νήμα περιβάλλεται από ένα κύλινδρο αρνητικά φορτισμένο ως προς αυτό, ο οποίος δρα ως πλέγμα και εστιάζει τα ηλεκτρόνια σε μια κηλίδα διαμέτρου d_0 , ακριβώς απάνω από την άνοδο που είναι μια μεταλλική πλάκα, γυαλισμένη τέλεια, με μια οπή

στο κέντρο της για τη διέλευση της ηλεκτρονικής δέσμης. Μια από τις κυριότερες παραμέτρους του ηλεκτρονιοβόλου είναι η φωτεινότητα β που είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος. Άλλοι τύποι νήματος μπορεί να κατασκευάζονται από εξαβορίδιο του λανθανίου που εξασφαλίζει υψηλή τιμή φωτεινότητας.

Όταν οι προς παρατήρηση επιφάνειες έχουν λειανθεί προσεκτικά μπορούν να παρατηρηθούν από δέκα έως σαράντα χιλιάδες φορές, ενώ ένα οπτικό μικροσκόπιο μπορεί να μεγεθύνει από πενήντα έως χίλιες διακόσες φορές. Το πλεονέκτημα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου έναντι του οπτικού δεν είναι μόνο η μεγάλη μεγέθυνση που επιτυγχάνει, αλλά το μεγάλο βάθος πεδίου. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να μπορούμε να εξετάζουμε επιφάνειες με μεγάλο ανάγλυφο, όπως είναι αυτές που προέρχονται από θραύση.

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μπορεί να συνεργαστεί με συσκευή σημειακής ανάλυσης, μικροαναλυτής στοιχείων (EDAX).

3.3.2 Προετοιμασία των δειγμάτων

Η προετοιμασία των δειγμάτων για παρατήρηση έγινε ανάλογα με την προετοιμασία που γίνεται για το οπτικό μικροσκόπιο [58]. Αρχικά λοιπόν κόβεται το κατάλληλο δείγμα. Αν χρειάζεται, τοποθετείται σε δισκίο πολυμερικής ρητίνης με την βοήθεια ειδικής συσκευής εγκιβωτισμού και κατόπιν υφίσταται λείανση.



Εικόνα 3.12: Συσκευή εγκιβωτισμού LaboPress – 3 της Struers

Αν τα παρασκευάσματα πρόκειται να αναλυθούν σε μικροαναλυτή πρέπει η επιφάνειά τους να έχει υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα [58]. Γι' αυτό το λόγο μετά τη

λείανση και τη χημική προσβολή επικαλύπτονται με ένα λεπτό στρώμα αγωγίμου υλικού π.χ. άνθρακα που εξαχνώνεται σε διάταξη βολταϊκού τόξου. Το πάχος της επικάλυψης είναι της τάξης των 200Å για να μην επηρεάζει την ευαισθησία του οργάνου.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας και συγκεκριμένα για την μελέτη της μορφολογίας της επιφάνειας των ηλεκτρολυτικών αποθεμάτων ψευδαργύρου χρησιμοποιήθηκε το μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης FEI – QUANTA 200, συνδυασμένο με σύστημα μικροανάλυσης (E.D.S. – Energy Dispersive Spectrometer) της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.



Εικόνα 3.13: S.E.M. FEI – QUANTA 200 Με σύστημα μικροανάλυσης EDAX (Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.)

3.4 Οπτικό Μεταλλογραφικό Μικροσκόπιο

3.4.1 Γενικά

Η παλαιότερη τεχνική που χρησιμοποιείται στην πράξη για το χαρακτηρισμό των υλικών είναι η οπτική μικροσκοπία. Η μέθοδος αυτή ανήκει στις λεγόμενες καταστροφικές μεθόδους, δεδομένου ότι για την εκτέλεσή της είναι αναγκαία η απόσπαση από το προς χαρακτηρισμό υλικό ενός δείγματος διαστάσεων μερικών cm^2 .

Η οπτική μικροσκοπία επιτρέπει τη μεγέθυνση της εικόνας ενός αντικειμένου μέχρι που 1000 φορές ώστε να γίνει δυνατή η παρατήρηση των λεπτομερειών της επιφάνειάς του [40]. Όπως είναι προφανές οι δυνατότητές της είναι πολύ περιορισμένες. Χάρη όμως στο γεγονός ότι είναι ταχεία, φτηνή και απλούστατη χρησιμοποιείται σχεδόν σε κάθε ερευνητική εργασία ως προκαταρκτική πηγή πληροφοριών.

Το όργανο που χρησιμοποιείται για την τεχνική αυτή είναι το οπτικό (μεταλλογραφικό) μικροσκόπιο [40]. Λευκό φως που παράγεται από κατάλληλη πηγή εστιάζεται και ανακλάται στην επιφάνεια του προς εξέταση υλικού. Το είδωλο που δημιουργείται από το ανακλώμενο φως μεγεθύνεται με κατάλληλο σύστημα φακών και οδηγείται στο μάτι του παρατηρητή. Στα σύγχρονα μικροσκόπια η παρατήρηση δεν γίνεται άμεσα, αλλά με κατάλληλη οπτοηλεκτρονική διάταξη (κάμερα) ώστε η εικόνα να προβάλλεται σε οθόνη υπολογιστή και η λήψη φωτογραφιών να είναι εύκολη και ανέξοδη.

3.4.2. Προετοιμασία των δοκιμίων

Η προετοιμασία των δοκιμίων για οπτική μικροσκοπία περιλαμβάνει τρία στάδια [48]:

1. Κοπή του δοκιμίου: Σκοπός της είναι το δοκίμιο να χωρέσει στην τράπεζα στηρίξεως του οργάνου. Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται και τοποθέτηση του αντικειμένου σε δισκίο από πολυμερική ρητίνη ώστε να είναι ευκολότερος ο χειρισμός του, όπως και στην περίπτωση παρατήρησης με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (λείανση, στήριξη κλπ) .

2. Λείανση της προς παρατήρηση επιφάνειας: Πραγματοποιείται είτε με μηχανικές ή ηλεκτροχημικές μεθόδους και αποσκοπεί στην εξάλειψη των γεωμετρικών ανωμαλιών της επιφάνειας. Για τη μηχανική λείανση χρησιμοποιούνται λειαντικά χαρτιά με σκληρούς κόκκους από SiC ή Al₂O₃, των οποίων η αποξεστική δράση εξαλείφει τις επιφανειακές ανωμαλίες που έχουν μέγεθος μεγαλύτερο του μέσου μεγέθους των λειαντικών κόκκων. Χρησιμοποιώντας λειαντικά χαρτιά με ολοένα και μικρότερους κόκκους η λείανση γίνεται πιο λεπτομερής. Το τελικό στάδιο της λείανσης ονομάζεται στίλβωση και περιλαμβάνει λείανση με ειδικό ύφασμα με τη βοήθεια κολλοειδούς αιωρήματος ή κατάλληλης αλοιφής Al₂O₃ ή διαμαντιού.

Χημική προσβολή: Η λεία μεταλλική επιφάνεια που προέκυψε από το προηγούμενο στάδιο εμβαπτίζεται για μερικά συνήθως δευτερόλεπτα σε κατάλληλο διάλυμα οξέων. Το διάλυμα αυτό αντιδρά με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα με τα ενεργειακά αναβαθμισμένα άτομα της μεταλλικής επιφάνειας, με αποτέλεσμα να διαβρώνονται "εκλεκτικά" τα όρια των κόκκων. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται αντίθεση στην επιφάνεια και εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά της μικροδομής της. Σε ειδικές περιπτώσεις εκτός από τη χημική προσβολή χρησιμοποιείται και η ηλεκτρολυτική προσβολή.

Για την μελέτη της μορφολογίας της επιφάνειας των ηλεκτρολυτικών αποθεμάτων ψευδαργύρου χρησιμοποιήθηκε εκτός από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο και το οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο Zeiss Axiotech HAL 100 του Εργαστηρίου Μεταλλογραφίας Δ.Ε.Η. Κ.Δ.Ε.Π. (Εικόνα 3.14).

Για την αποκάλυψη της μικροδομής του υλικού ώστε να γίνει δυνατή η παρατήρηση των δοκιμίων χάλυβα St37 έγινε χημική προσβολή με χρήση αντιδραστηρίου NITAL 5% (προκύπτει από την διάλυση 1,5 – 5ml HNO₃ 1,4Mol/lit σε 100ml αιθυλικής αλκοόλης). Ο χρόνος προσβολής για το κάθε δοκίμιο ήταν μεταξύ 20-30sec. Μετά την χημική προσβολή τα δοκίμια καθαρίστηκαν με απιονισμένο νερό, αλκοόλη και στην συνέχεια ακολούθησε στέγνωμα.



Εικόνα 3.14: Μεταλλογραφικό Μικροσκόπιο Zeiss Axiotech HAL 100 (Εργαστήριο Μεταλλογραφίας Δ.Ε.Η. – Κ.Δ.Ε.Π.)

3.5 Μέθοδοι Προσδιορισμού Μηχανικών Ιδιοτήτων επικαλύψεων

3.5.1 Δοκιμή Εφελκυσμού

Η αντοχή των χαλύβδινων επιψευδαργυρωμένων δοκιμίων σε εφελκυσμού δοκιμάστηκε στην μηχανή εφελκυσμού TIME GROUP INC τύπος WDW – 50E (Εικόνα 3.15), μέγιστου φορτίου 50KN του εργαστηρίου Τεχνολογίας Κονιαμάτων της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

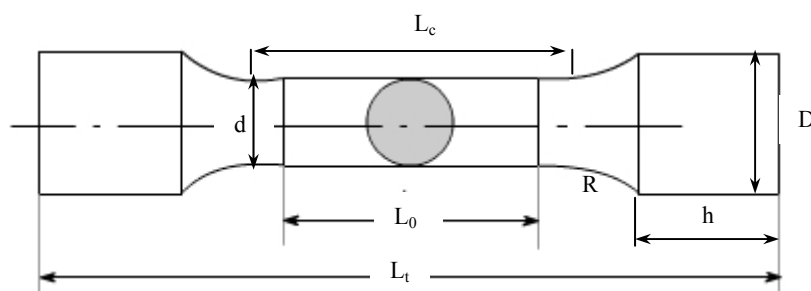
Οι δοκιμές εφελκυσμού έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ENOT EN 10002.01/2001 και DIN 50125.



Εικόνα 3.15: Μηχανή Εφελκυσμού WDW – 50E (Εργαστήριο Τεχνολογίας Κονιαμάτων της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.)

Πραγματοποιήθηκε η δοκιμή εφελκυσμού σε 9 δοκίμια επιψευδαργυρωμένα και σε 4 τα οποία δεν είχαν επικάλυψη. Οι δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διατομής $d=8\text{mm}$ και η διαμόρφωση τους έγινε στο μηχανουργείο του Κέντρου Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων της Δ.Ε.Η.

Οι διαστάσεις των δοκιμών αυτών φαίνονται παρακάτω.



$$L_0 = 5d, \quad D = d+4, \quad L_c = 6d, \quad h \approx 30, \quad L_t \approx 70+6d \text{ (min.)}, \quad R = \text{min. } 4$$

Σχήμα 3.4: Σχηματική παράσταση διαμορφωμένων δοκιμών εφελκυσμού

Το εμβαδόν της διατομής S_0 των δοκιμών υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή των διαμέτρων d των δοκιμών. Στη συνέχεια με τη βοήθεια ειδικής συσκευής έγινε σήμανση του μήκους L_0 .

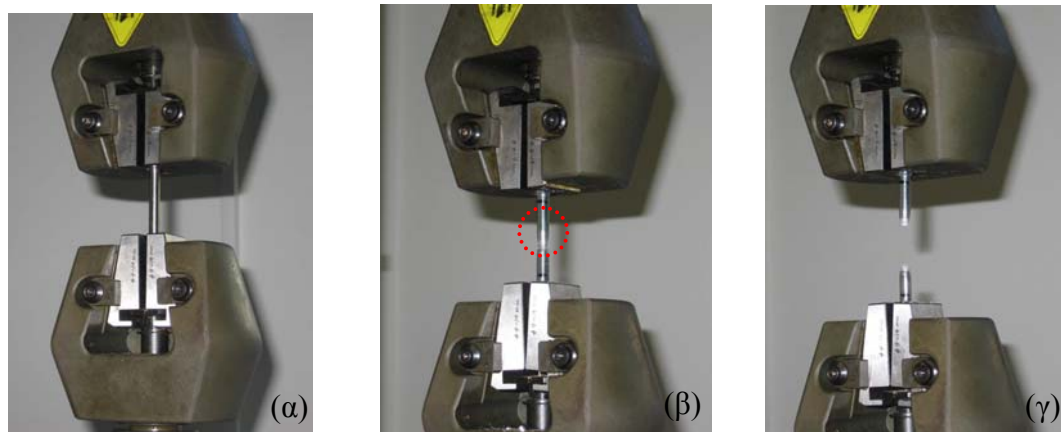
Το L_0 για κυλινδρικά δοκίμια υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$$

Το κάθε δοκίμιο ξεχωριστά δοκιμάστηκε στην μηχανή εφελκυσμού με ταχύτητα φόρτισης ίση με 20mm/min μέχρι την θραύση του. Μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής συναρμολογήθηκαν τα δύο σπασμένα τεμάχια του κάθε δοκιμίου ώστε να μετρηθεί το ολικό τους μήκος L_u . Η ανοιγμένη επιμήκυνση θραύσεως υπολογίστηκε από την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon_\theta = \frac{(L_u - L_0)}{L_0}$$

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ένα δοκίμιο κατά την διάρκεια της δοκιμής εφελκυσμού (Εικόνα 3.15β), διακρίνεται η δημιουργία λαιμού λίγο πριν τη θραύση.



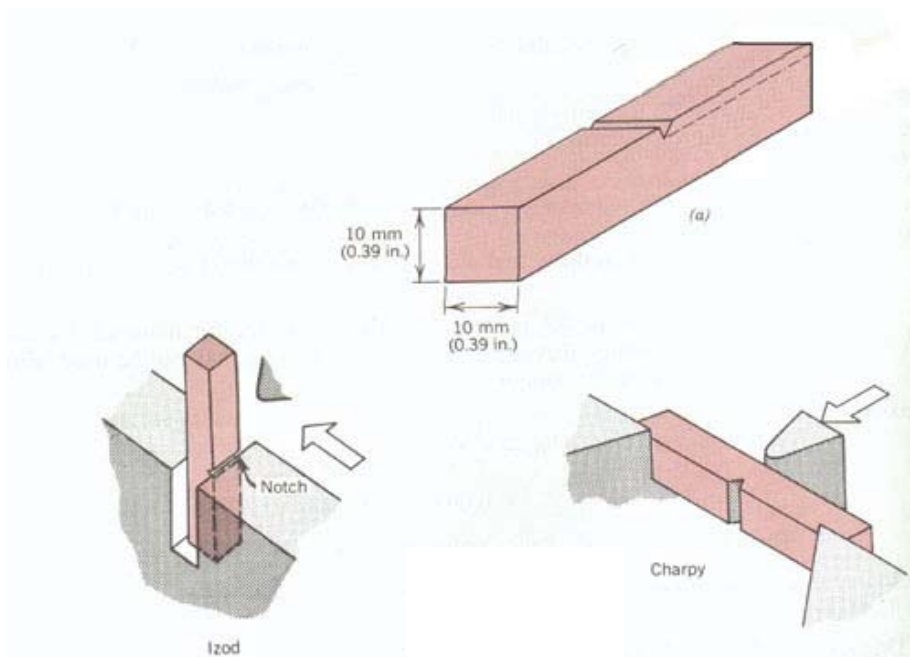
Εικόνα 3.15: Δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό (α) αρχή φόρτισης, (β) δημιουργία λαιμού, (γ) θραύση δοκιμίου

3.5.2 Δοκιμή Αντοχής σε Κρούση

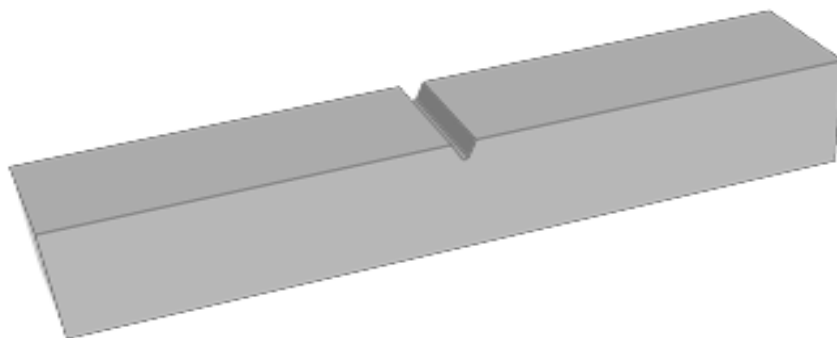
Η μέτρηση της ενέργειας που αποθηκεύεται στο δοκίμιο κατά την θραύση του μπορεί να μετρηθεί με την βοήθεια των δοκιμών κατά Charpy και κατά Izod. Η διαφορά των δύο αυτών μεθόδων είναι στον τρόπο στήριξης των δοκιμίων και στην ταχύτητα κρούσεως. Στην μέθοδο δοκιμής Izod το ένα άκρο του δοκιμίου είναι πακτωμένο (πρόβολος) ενώ στην μέθοδο δοκιμής Charpy το δοκίμιο συγκρατείται στα δύο άκρα του (αμφιέριστος δοκός).

Και οι δύο μέθοδοι βασίζονται στην μέτρηση του μηχανικού έργου που χρειάζεται για τη θραύση τυποποιημένων δοκιμίων στα οποία έχει γίνει κατάλληλη εγκοπή με την βοήθεια ειδικής συσκευής η οποία διασφαλίζει την τυποποίηση της εγκοπής αυτής.

Τα διάφορα είδη εγκοπών φαίνονται στο Σχήμα 3.7.



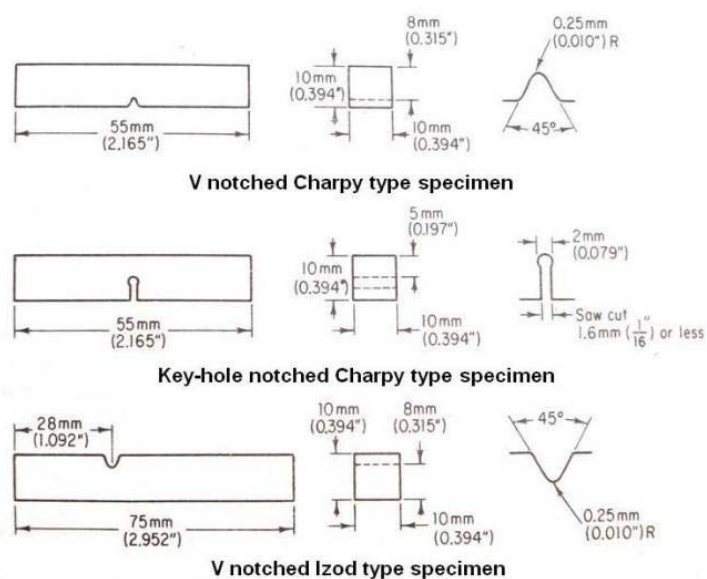
Σχήμα 3.5: Σχηματική παράσταση στήριξης δοκιμίων κρούσης



Σχήμα 3.6: Σχηματική παράσταση δοκιμίου κρούσης

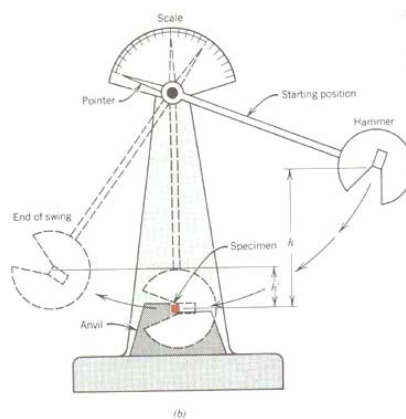


Εικόνα 3.16: Συσκευή RMU για την διαμόρφωση εγκοπής «V» σε δοκίμια κρούσης (Εργαστήριο Αντοχής Υλικών Δ.Ε.Η. – Κ.Δ.Ε.Π.)



Σχήμα 3.7: Διάφοροι τύποι εγκοπών για την δοκιμή κρούσης

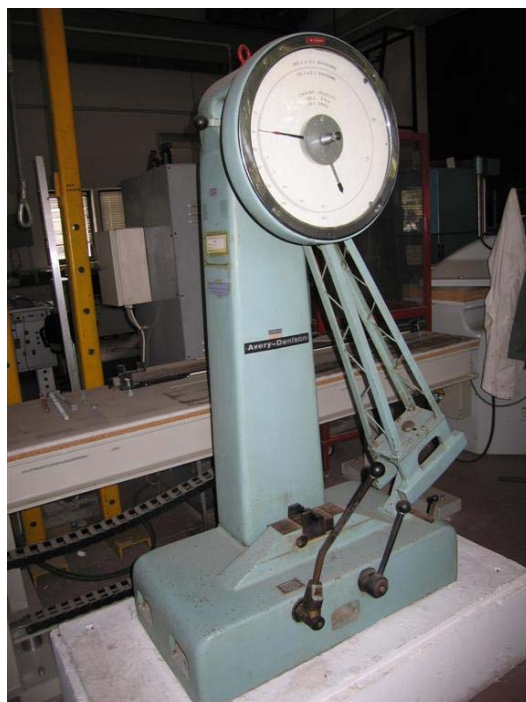
Για την θραύση των δοκιμών χρησιμοποιείται μία σφύρα (εκκρεμές). Το απαιτούμενο για τη θραύση μηχανικό έργο υπολογίζεται από τη διαφορά της δυναμικής ενέργειας μεταξύ της τελικής και της αρχικής θέσης της σφύρας.



Σχήμα 3.8: Σχηματική παράσταση Συσκευής δοκιμής κρούσης

Η δοκιμές αντοχής σε κρούση (δυσθραυστότητας) πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Κέντρου Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων της Δ.Ε.Η. με τη χρήση της μηχανής κρούσης Avery Denison (300 J) με τη μέθοδο Charpy (Εικόνα 3.17). Οι δοκιμές κρούσης έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 10045.01.

Η δοκιμή κρούσης έγινε σε 6 δοκίμια επιψευδαργυρωμένα με διαφορετικές μεθόδους και σε 2 τα οποία δεν είχαν επικάλυψη. Οι δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τετραγωνικής διατομής 10X10mm και η διαμόρφωση τους έγινε στο μηχανουργείο του Κέντρου Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων της Δ.Ε.Η.



Εικόνα 3.17: Μηχανή κρούσης Avery Denison (300J) (Εργαστήριο Αντοχής Υλικών Δ.Ε.Η. – Κ.Δ.Ε.Π.)

Από τις θέσεις της σφύρας πριν και μετά την θραύση του δοκιμίου υπολογίζεται το έργο που καταναλώνεται. Η ενέργεια που έχει απορροφηθεί κατά την θραύση μας βοηθάει στην εκτίμηση της δυσθραυστότητας του υλικού. Τα όλκιμα υλικά (μεγάλη απορρόφηση ενέργειας) χαρακτηρίζονται από μεγάλη δυσθραυστότητα σε αντίθεση με τα ψαθυρά υλικά (μικρή απορρόφηση ενέργειας) τα οποία χαρακτηρίζονται από μικρή δυσθραυστότητα.

3.5.3 Δοκιμή Μικροσκληρότητας (Vickers)

Ο προσδιορισμός της μικροσκληρότητας των επικαλύψεων έγινε στο εργαστήριο Μεταλλογραφίας του Κέντρου Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων της Δ.Ε.Η. με την χρήση μικροσκληρομέτρου της Struers, μοντέλο Duramin – 10/20 με την μέθοδο Vickers (Εικόνα 3.18). Η διάταξη του μικροσκληρομέτρου φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 3.18: Μικροσκληρόμετρο Struers, μοντέλο Duramin – 10/20 (Εργαστήριο Μεταλλογραφίας Δ.Ε.Η. – Κ.Δ.Ε.Π.)

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με σταθερό χρόνο υποβολής φορτίου (10sec) και ίδιο φορτίο (100p) για όλα τα δείγματα ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Σε κάθε δείγμα έγιναν 15 μετρήσεις σε διάφορες περιοχές της επιφάνειας τους και σε όλες τις πλευρές και υπολογίστηκε η μέση τιμή τους ώστε να έχουμε μεγαλύτερη αξιοπιστία στο αποτέλεσμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι δοκιμές, οι μέθοδοι ελέγχου, και τα αποτελέσματα τους, που πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να γίνει η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων επικαλύψεων ψευδαργύρου σε υπόστρωμα χάλυβα (St37).

4.2 Μελέτη της Δομής και της Μορφολογίας επιφανειών

Για την μελέτη της δομής και της μορφολογίας της επιφάνειας των επικαλύψεων έγινε χρήση, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, της τεχνικής της οπτικής μικροσκοπίας. Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης FEI – QUANTA 200, συνδυασμένο με σύστημα μικροανάλυσης (E.D.S. – Energy Dispersive Spectrometer) της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και το Μεταλλογραφικό Μικροσκόπιο Zeiss Axiotech HAL 100 του Εργαστήριο Μεταλλογραφίας Δ.Ε.Η. – Κ.Δ.Ε.Π.

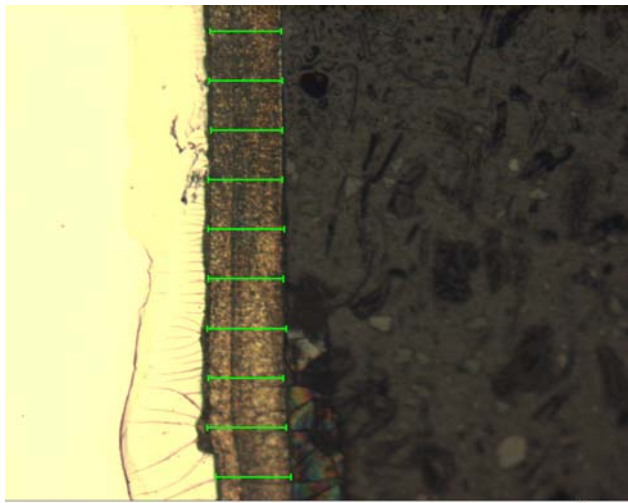
Τα δοκίμια τα οποία εξετάστηκαν με τις παραπάνω μεθόδους ήταν αυτά της κρούσης με επικάλυψη ψευδαργύρου με διαφορετικές μεθόδους απόθεσης (εργαστηριακά και βιομηχανικά).

Για τον προσδιορισμό της σύστασης των επικαλύψεων έγινε στοιχειακή χημική ανάλυση EDAX με την βοήθεια μικροαναλυτή που βρίσκεται ενσωματωμένος στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

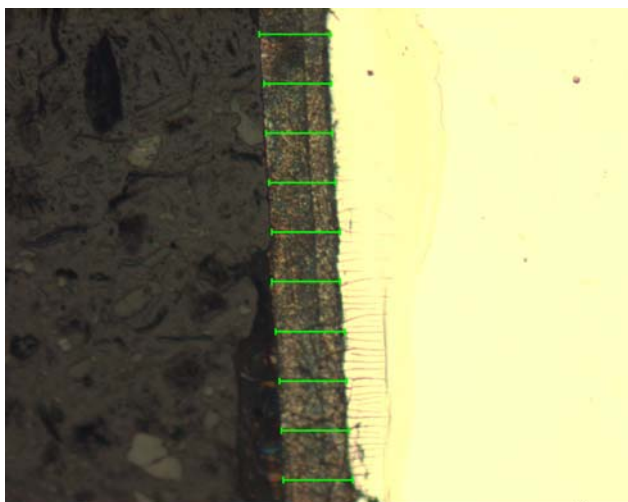
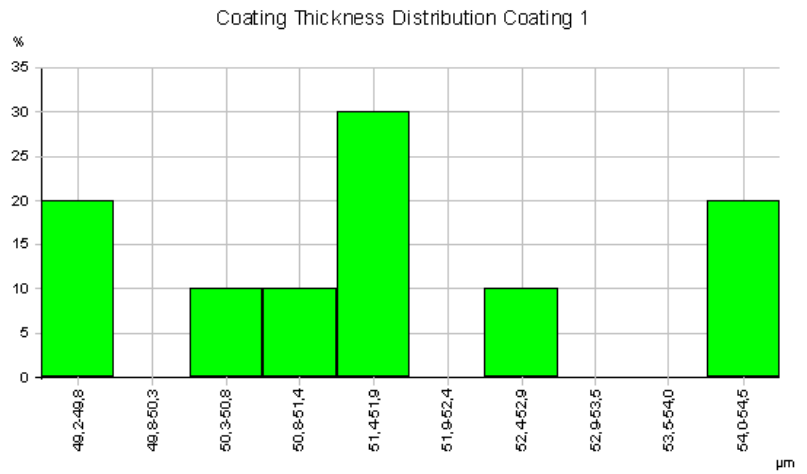
Με την βοήθεια του οπτικού μεταλλογραφικού μικροσκοπίου Zeiss Axiotec σε συνδυασμό με την ενσωματωμένη σε αυτό κάμερα υψηλής ανάλυσης και τη χρήση του λογισμικού a4i της Aquinto, μετρήθηκε το μέσο πάχος επιψευδαργύρωσης στα δοκίμια κρούσης με κωδικούς (KA, KB, KSB2 και KSL1).

Το αποτέλεσμα των μετρήσεων αυτών βασίζεται στον οπτικό υπολογισμό της μέσης τιμής του πάχους (10 μετρήσεις) μίας επιλεγμένης περιοχής. Για τον υπολογισμό αυτό επιλέχθηκαν τυχαία 5 περιοχές. Οι φωτογραφίες των διάφορων αυτών περιοχών του κάθε δοκιμίου καθώς και κάποια στατιστικά στοιχεία των μετρήσεων φαίνονται παρακάτω.

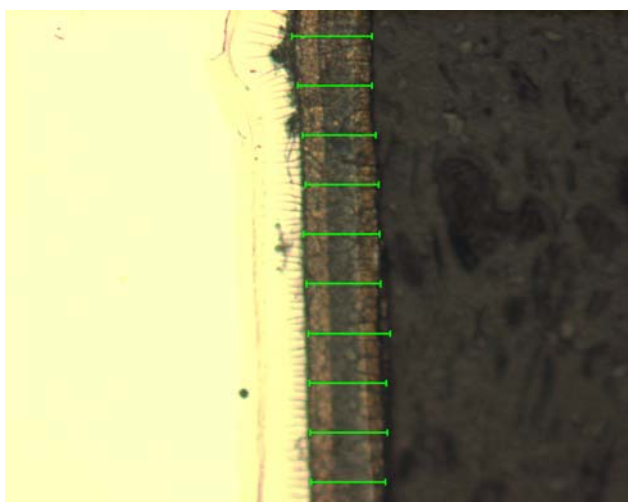
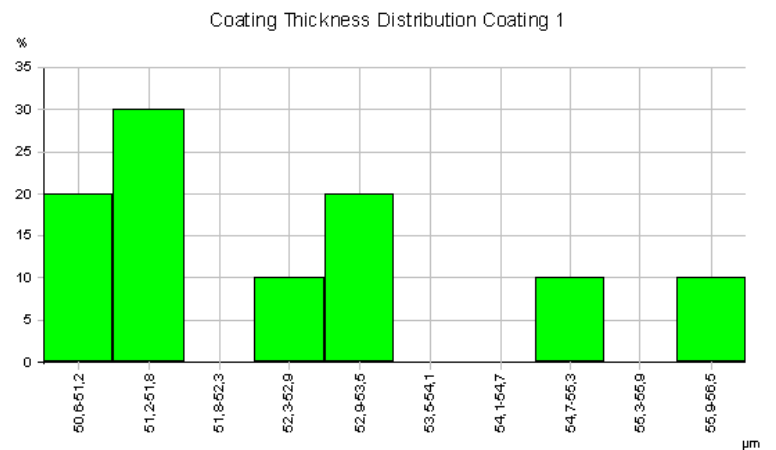
Δοκίμιο κρούσης ΚΑ



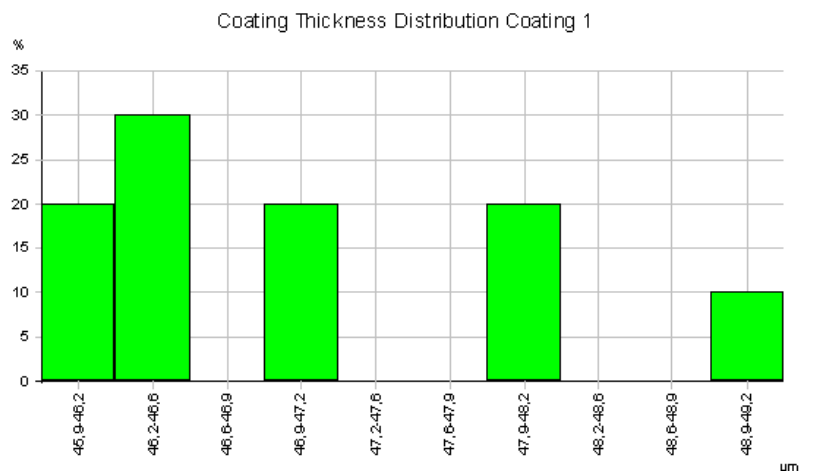
Περιοχή 1

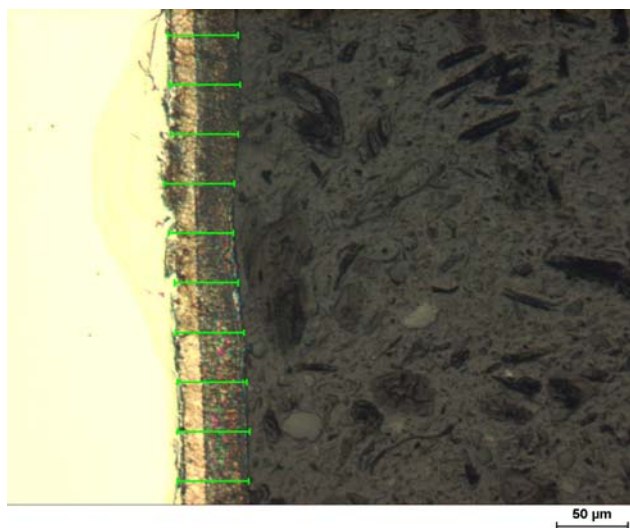


Περιοχή 2

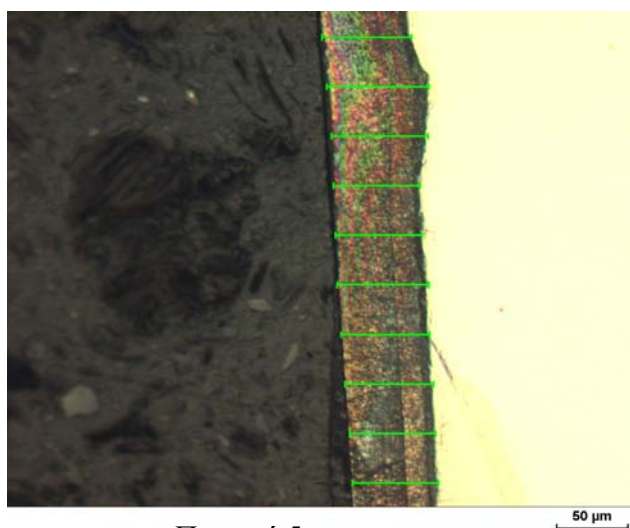
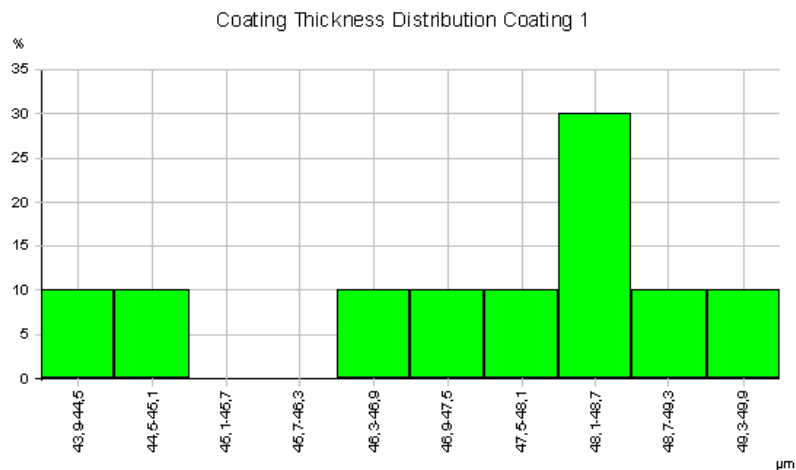


Περιοχή 3

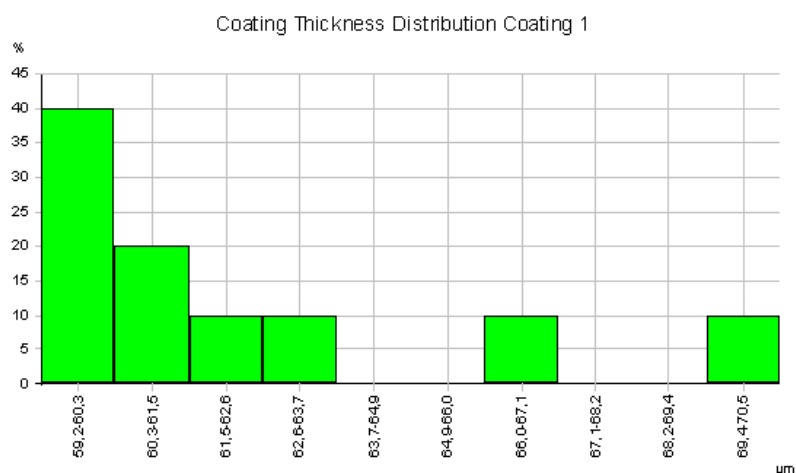




Περιοχή 4

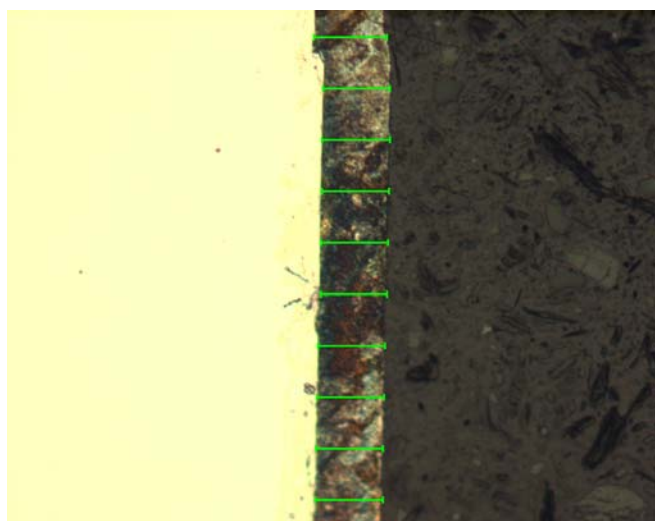


Περιοχή 5

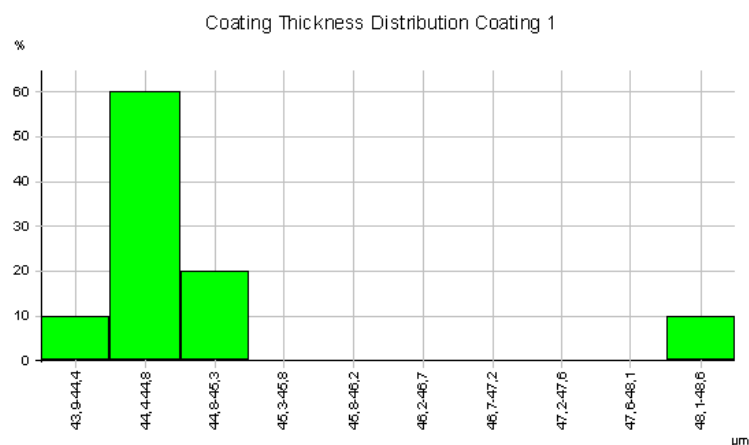


Δοκίμιο κρούσης ΚΑ	Μέση τιμή (Mean)	Τυπική Απόκλιση (StdDev)	Ελάχιστη τιμή (Minimum)	Μέγιστη τιμή (Maximum)
<i>Περιοχή 1</i>	μm	μm	μm	μm
Πάχος Επικάλυσης:	52	2	49	55
<i>Περιοχή 2</i>				
Πάχος Επικάλυσης:	53	2	51	57
<i>Περιοχή 3</i>				
Πάχος Επικάλυσης:	47	1	46	49
<i>Περιοχή 4</i>				
Πάχος Επικάλυσης:	47	2	44	50
<i>Περιοχή 5</i>				
Πάχος Επικάλυσης:	62	3	59	71
Μέση τιμή Πάχους:	52,2 μm			

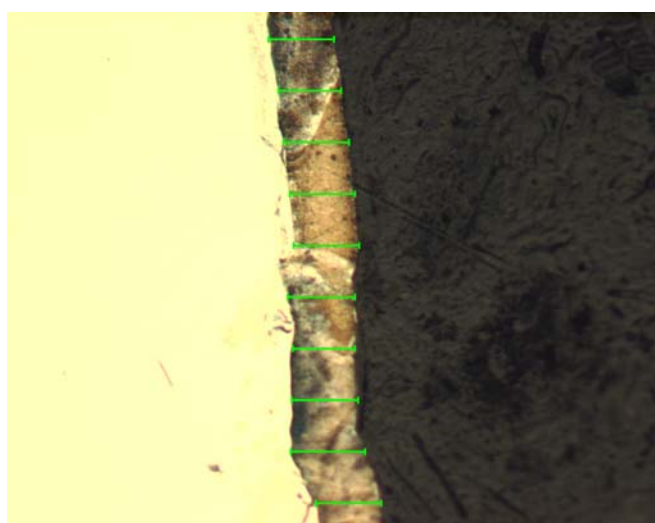
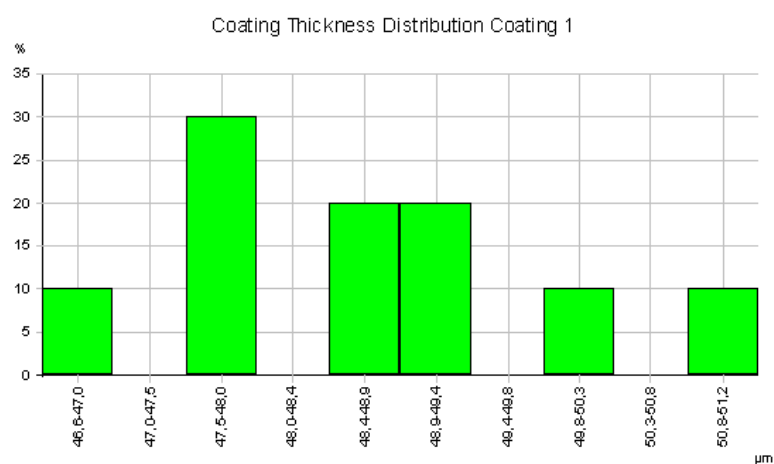
Δοκίμιο κρούσης ΚΒ



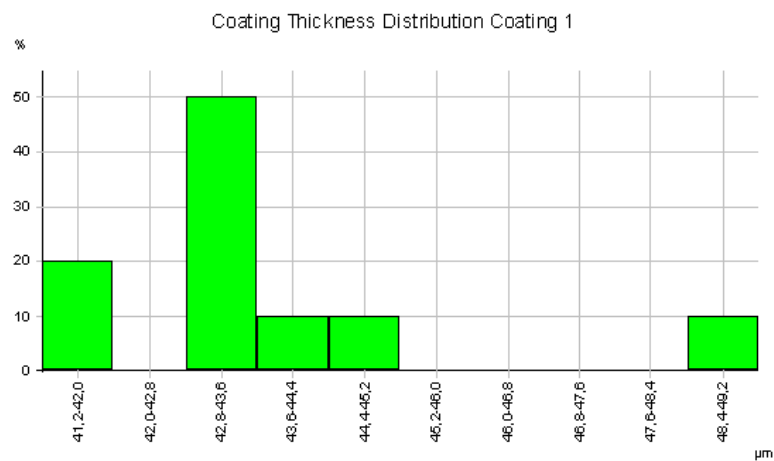
Περιοχή 1

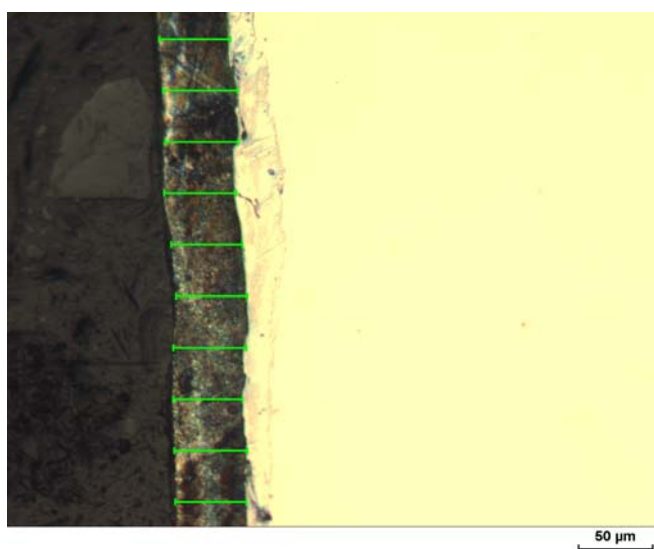


Περιοχή 2

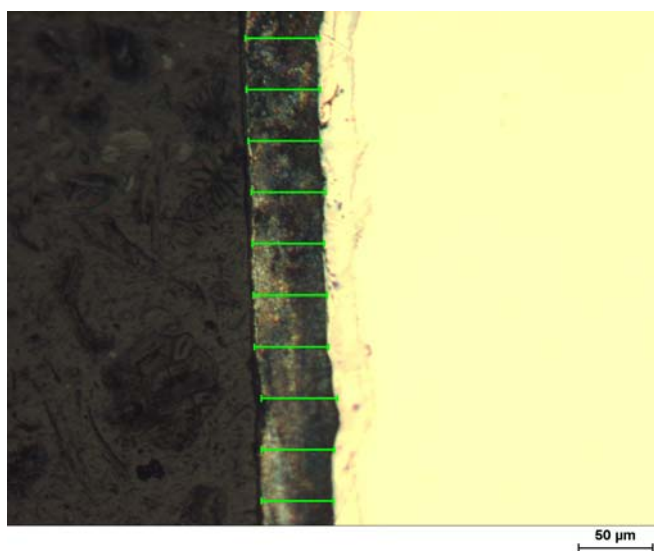
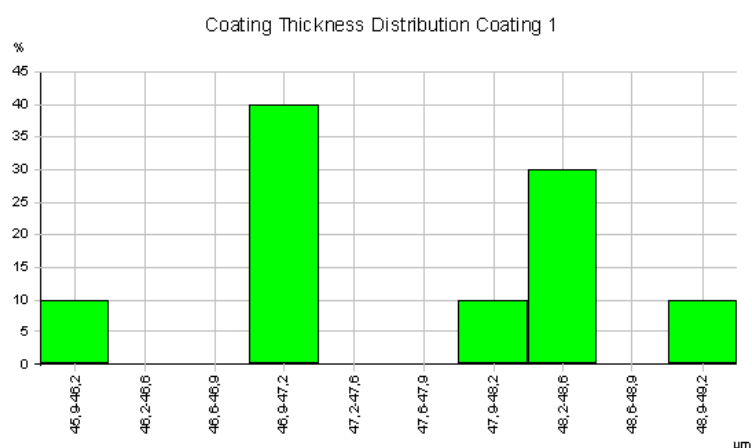


Περιοχή 3

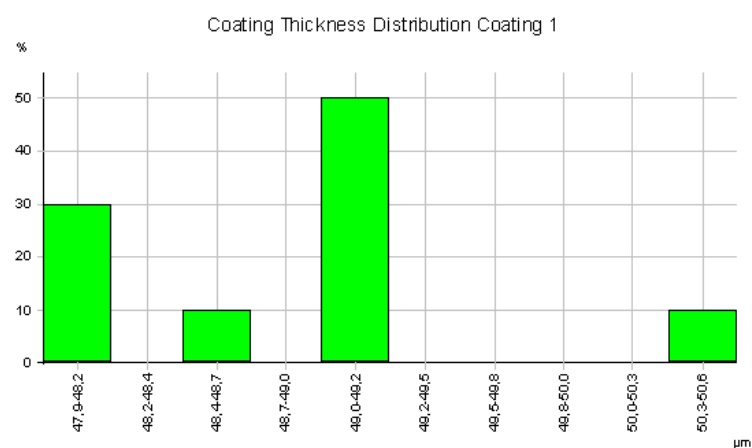




Περιοχή 4

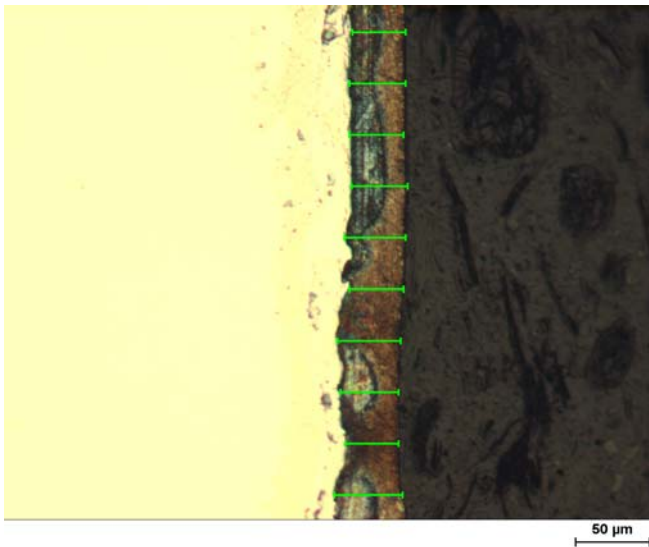


Περιοχή 5

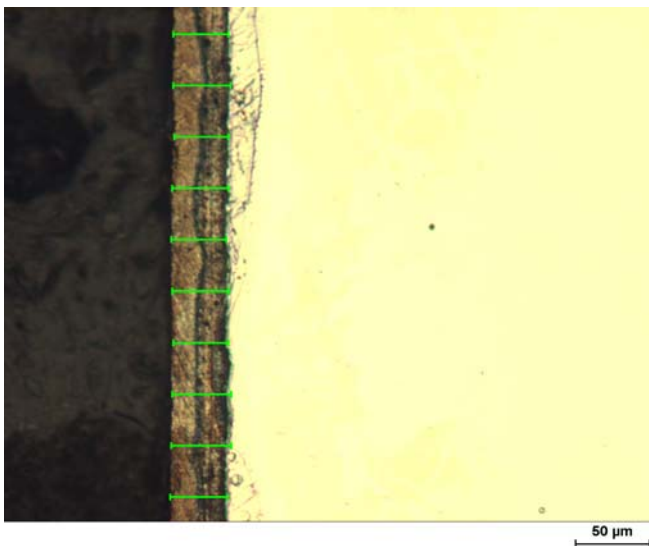
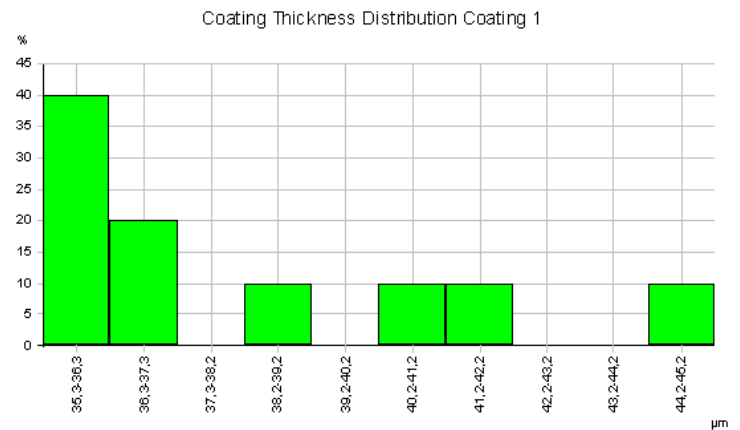


Δοκίμιο κρούσης KB	Μέση τιμή (Mean)	Τυπική Απόκλιση (StdDev)	Ελάχιστη τιμή (Minimum)	Μέγιστη τιμή (Maximum)
<i>Περιοχή 1</i>	μm	μm	μm	μm
Πάχος Επικάλυσης:	45	1	44	49
<i>Περιοχή 2</i>				
Πάχος Επικάλυσης:	49	1	47	51
<i>Περιοχή 3</i>				
Πάχος Επικάλυσης:	44	2	41	49
<i>Περιοχή 4</i>				
Πάχος Επικάλυσης:	48	1	46	49
<i>Περιοχή 5</i>				
Πάχος Επικάλυσης:	49	1	48	51
Μέση τιμή Πάχους:	47 μm			

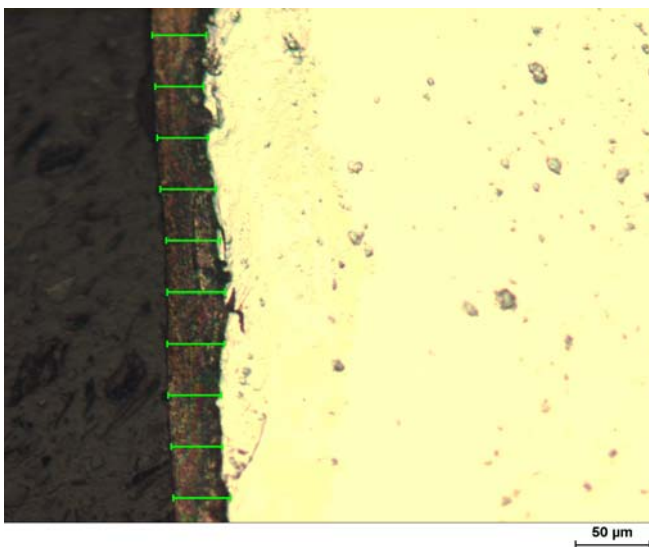
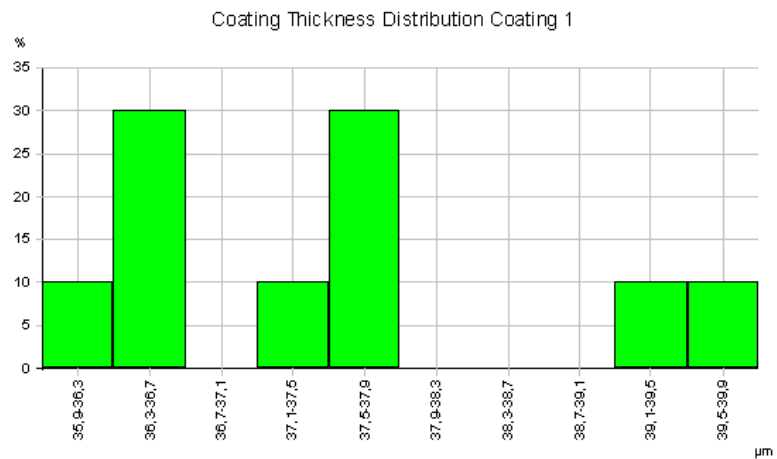
Δοκίμιο κρούσης KSB2



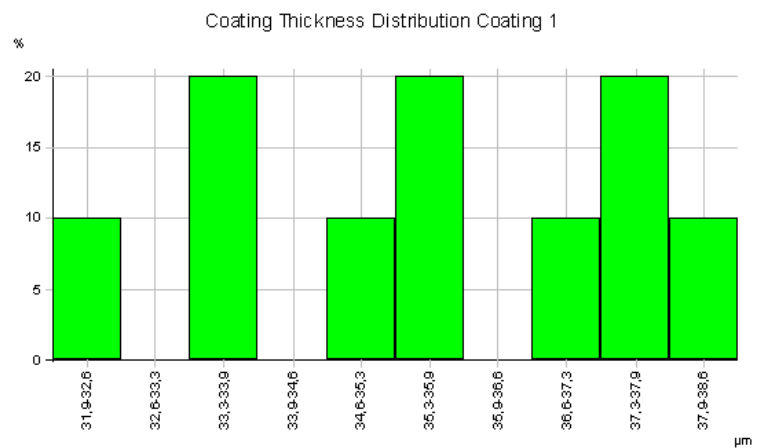
Περιοχή 1

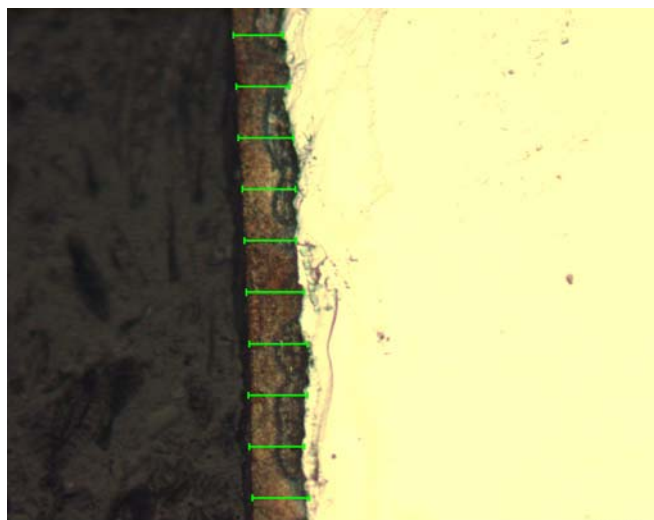


Περιοχή 2

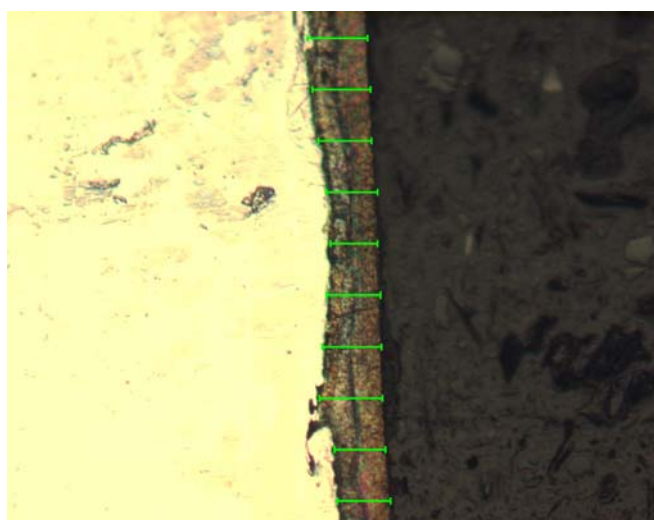
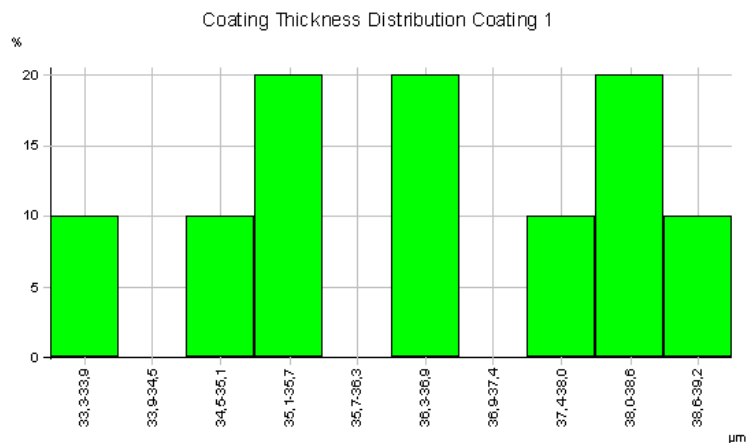


Περιοχή 3

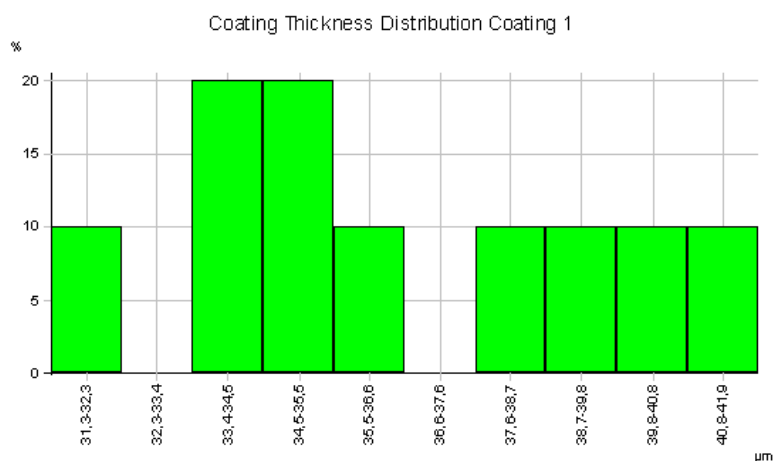




Περιοχή 4

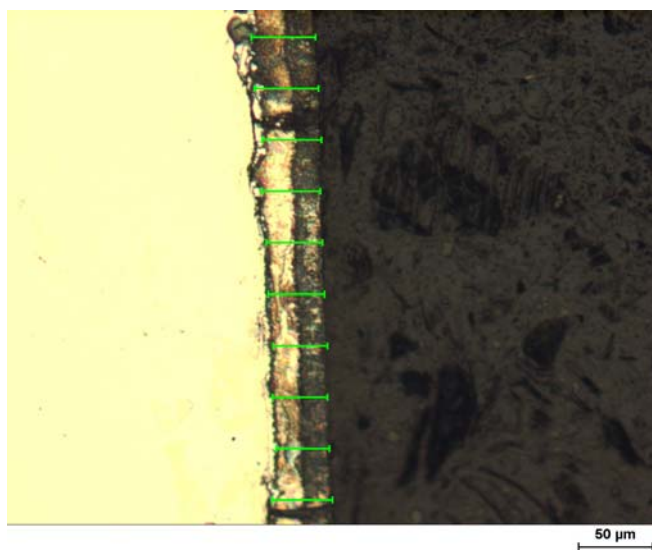


Περιοχή 5

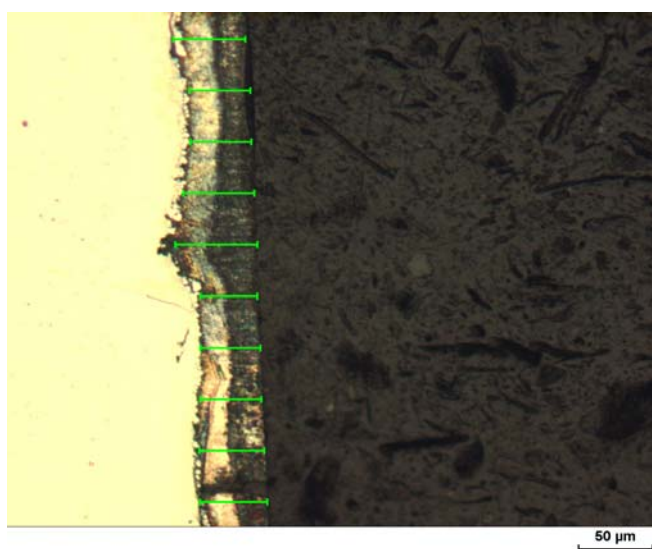
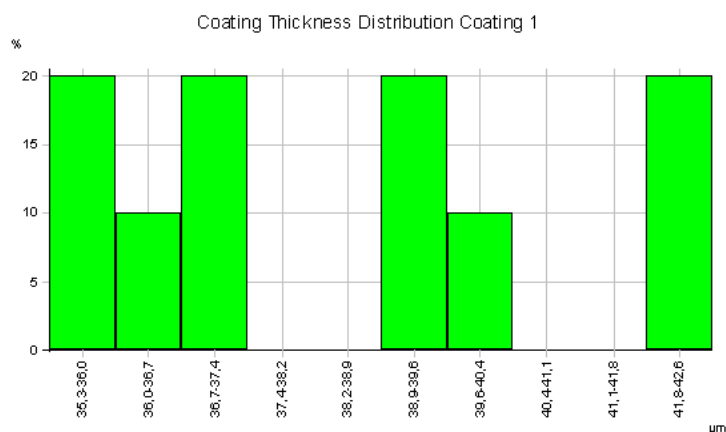


Δοκίμιο κρούσης KSB2	Μέση τιμή (Mean)	Τυπική Απόκλιση (StdDev)	Ελάχιστη τιμή (Minimum)	Μέγιστη τιμή (Maximum)
Περιοχή 1	μm	μm	μm	μm
Πάχος Επικάλυσης:	38	3	35	45
Περιοχή 2				
Πάχος Επικάλυσης:	38	1	36	40
Περιοχή 3				
Πάχος Επικάλυσης:	36	2	32	39
Περιοχή 4				
Πάχος Επικάλυσης:	37	2	33	39
Περιοχή 5				
Πάχος Επικάλυσης:	37	3	31	42
Μέση τιμή Πάχους:	37,2 μm			

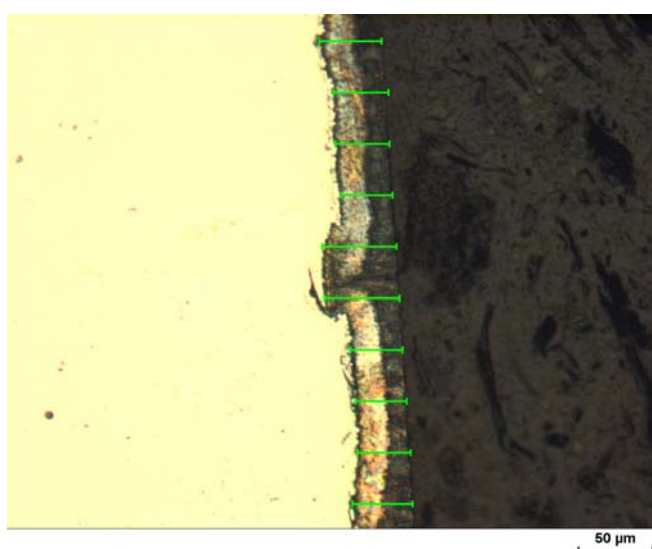
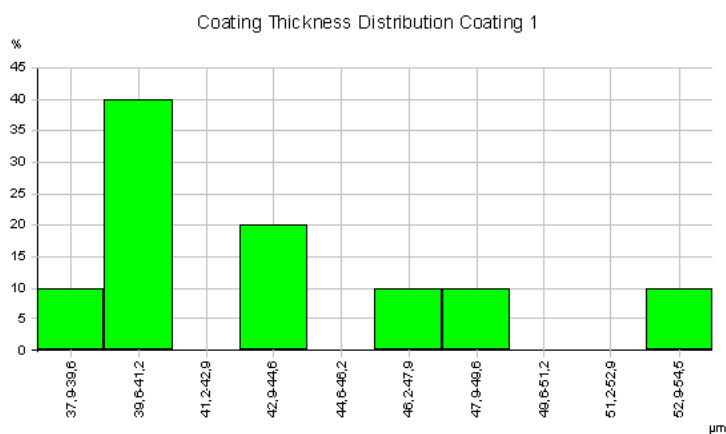
Δοκίμιο κρούσης KSL2



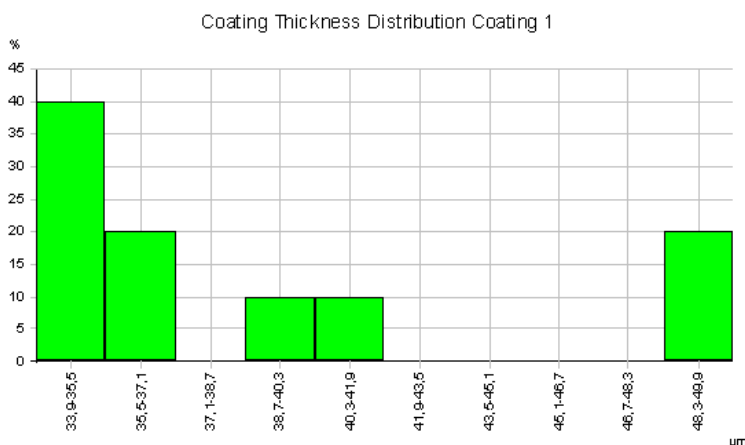
Περιοχή 1

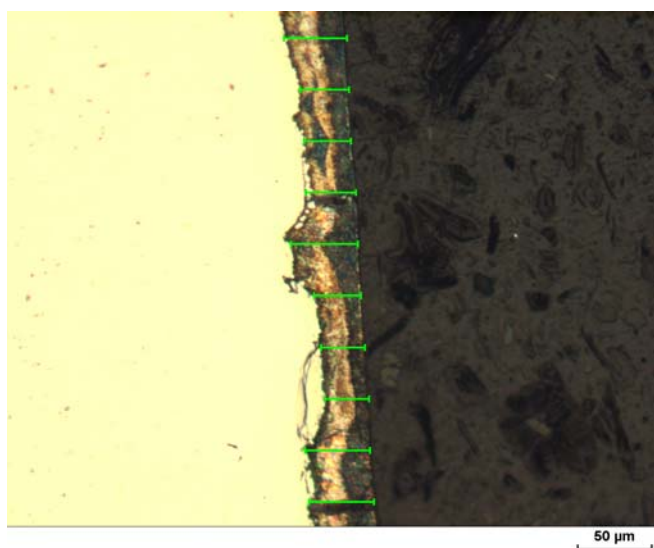


Περιοχή 2

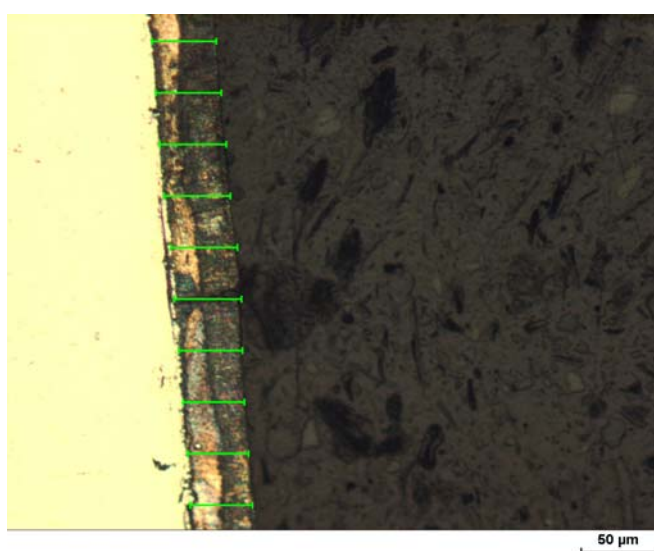
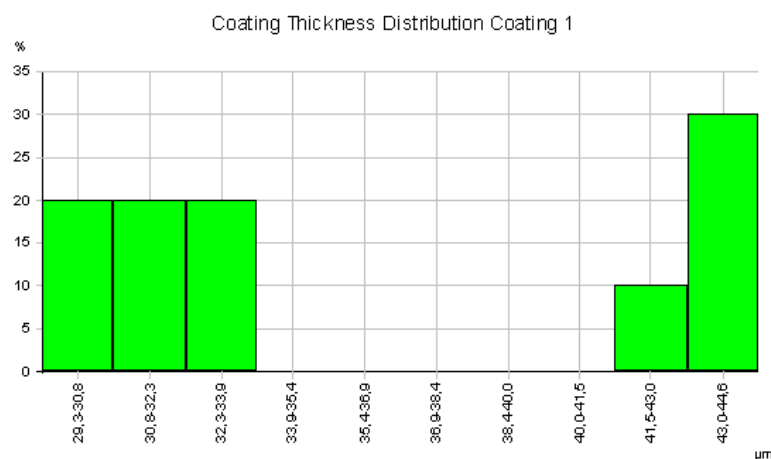


Περιοχή 3

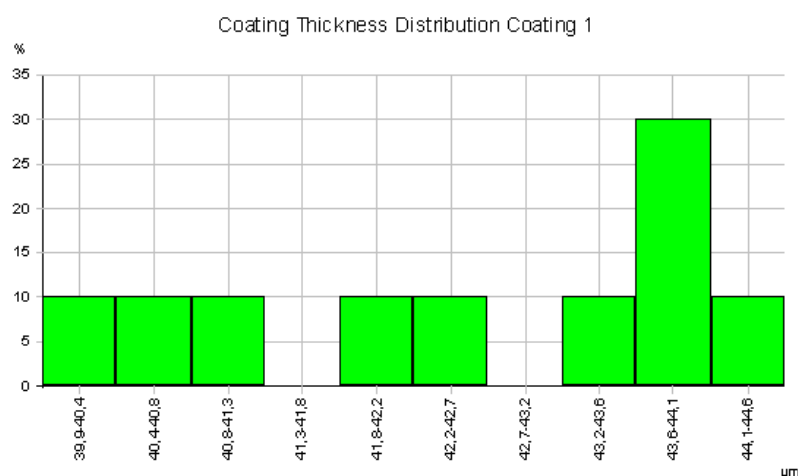




Περιοχή 4



Περιοχή 5



Δοκίμιο κρούσης KSL1	Μέση τιμή (Mean)	Τυπική Απόκλιση (StdDev)	Ελάχιστη τιμή (Minimum)	Μέγιστη τιμή (Maximum)
Περιοχή 1	μm	μm	μm	μm
Πάχος Επικάλυψης:	39	2	35	43
Περιοχή 2				
Πάχος Επικάλυψης:	44	5	38	55
Περιοχή 3				
Πάχος Επικάλυψης:	39	6	34	50
Περιοχή 4				
Πάχος Επικάλυψης:	36	6	29	45
Περιοχή 5				
Πάχος Επικάλυψης:	43	2	40	45
Μέση τιμή Πάχους:	40,2 μm			

Στον Παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά το μέσο πάχος των δοκιμίων κρούσης ανάλογα με την μέθοδο επιψευδαργύρωσης και τον χρόνο.

<i>Κωδικός Δοκιμίου κρούσης</i>	<i>Μέση τιμή Πάχους Επιψευδαργύρωσης (μm)</i>	<i>Χρόνος Απόθεσης (min)</i>	<i>Μέθοδος</i>
<i>KA</i>	52,2	42	Εργαστήριο (rack)
<i>KB</i>	47,0	42	Εργαστήριο (rack)
<i>KSB2</i>	37,2	35	Stalco (barrel)
<i>KSL1</i>	40,2	35	Stalco (rack)

Επιπρόσθετα το πάχος της επιψευδαργύρωσης μετρήθηκε και με τη βοήθεια της φορητής συσκευής MICROTEST IV automatic Mitutoyo (Magnetic Coating Thickness Gauge) (εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Μαγνητική φορητή συσκευή μέτρησης πάχους MICROTEST IV automatic (Εργαστήριο Μεταλλογραφίας Δ.Ε.Η. – Κ.Δ.Ε.Π.)

Πραγματοποιήθηκαν 15 μετρήσεις στην επιφάνεια του κάθε δοκιμίου εφελκυσμού και κρούσης σε διάφορες περιοχές. Οι πίνακες με τις μετρήσεις αυτές βρίσκονται στο παράρτημα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά οι μέσες τιμές του πάχους επιψευδαργύρωσης των δοκιμίων κρούσης και εφελκυσμού. Παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις που πάρθηκαν με την χρήση του φορητού αυτού οργάνου δεν διαφέρουν πολύ από αυτές του οπτικού μεταλλογραφικού μικροσκοπίου.

	<i>Κωδικός Δοκιμίου Κρούσης</i>								
<i>A/A Μετρήσεων</i>	KA	KB	KSB1	KSB2	KSB3	KSB4	KSB5	KSL1	KSL3
M.O. (μm)	53	49	37	37	58	58	62	39	45

	<i>Κωδικός Δοκιμίου Εφελκυσμού</i>								
<i>A/A Μετρήσεων</i>	EA	EB	ESB1	ESB2	ESB3	ESB4	ESL1	ESL2	ESL3
M.O. (μm)	51	49	29	29	20	62	25	24	45

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα μετρήσεων πάχους επιψευδαργύρωσης

Από τον 2^ο Νόμο του Faraday υπολογίστηκε ότι για να πετύχουμε στα δοκίμια μας το πάχος επιψευδαργύρωσης των 35–40μm (είναι το απαιτούμενο πάχος επιψευδαργύρωσης που προβλέπει η Τεχνική Προδιαγραφή της Δ.Ε.Η. Χ.Κ. 11.01/11.11.87 – GR182 Ηλεκτρολυτική Επιψευδαργύρωση Αντικειμένων από Σίδηρο ή Χάλυβα), χρειαζόμαστε θεωρητικά χρόνο απόθεσης 40min.

Οι χρόνοι απόθεσης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή των δοκιμίων κρούσης και εφελκυσμού ήταν από 35 μέχρι 42min.

Σημειώνουμε εδώ ότι πραγματοποιήθηκε επιψευδαργύρωση σε δοκίμια εφελκυσμού (ESB3 και ESB4) και κρούσης με χρήση βιομηχανικής μεθόδου (barell) και χρόνο απόθεσης 45min. Τα πάχη επιψευδαργύρωσης που μετρήθηκαν με τη χρήση της φορητής μαγνητικής συσκευής ήταν περίπου 55μm για τα δοκίμια κρούσης και 50μm για τα δοκίμια εφελκυσμού. Από μακροσκοπική παρατήρηση φαίνεται ότι η ποιότητα της επιφάνειας δεν είναι καλή. Τα δοκίμια παρουσίασαν «ξεφλούδισμα» σε πολλές περιοχές της επιφάνειας τους (Εικόνα 4.2).

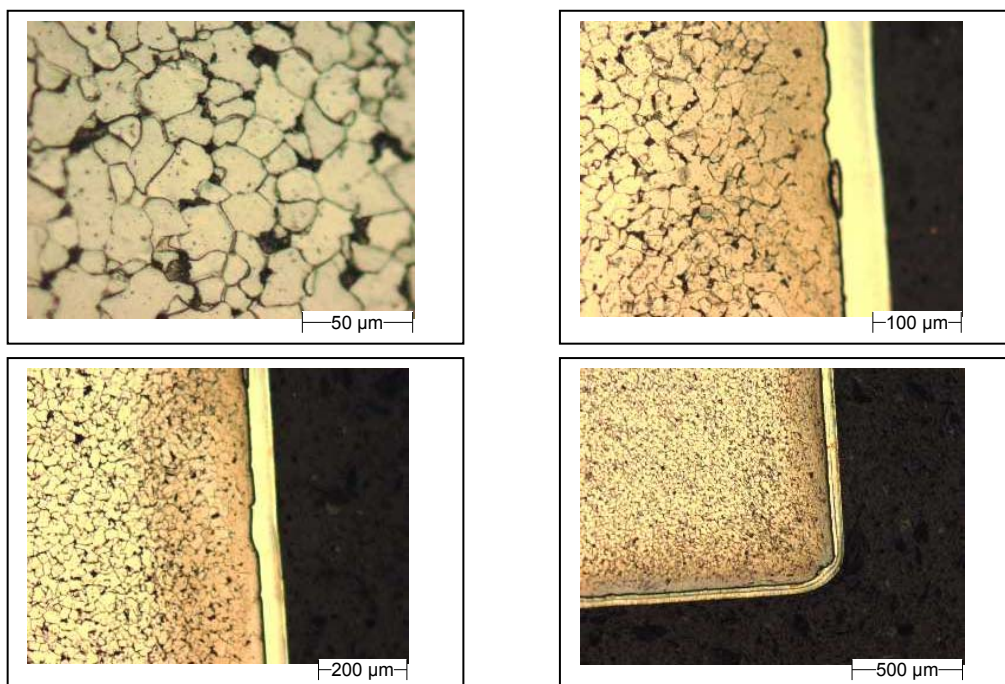
Στην μακροσκοπική φωτογραφία που ακολουθεί φαίνονται τα δείγματα αυτά και οι περιοχές στις οποίες δεν πέτυχε η πρόσφυση της επιψευδαργύρωσης.



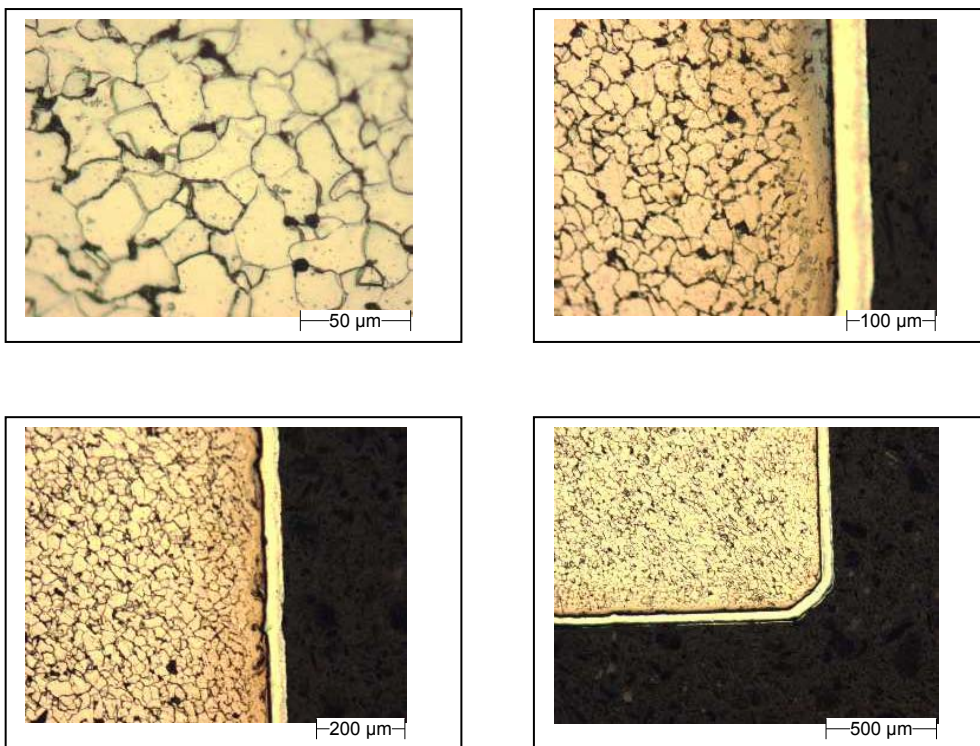
Εικόνα 4.2: Επιψευδαργυρωμένα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης (χρόνος απόθεσης 45min, μέθοδος επιψευδαργύρωσης – βιομηχανική «barrel plating»)

Η μικροδομή του υποστρώματος που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στα επόμενα μεταλλογραφήματα.

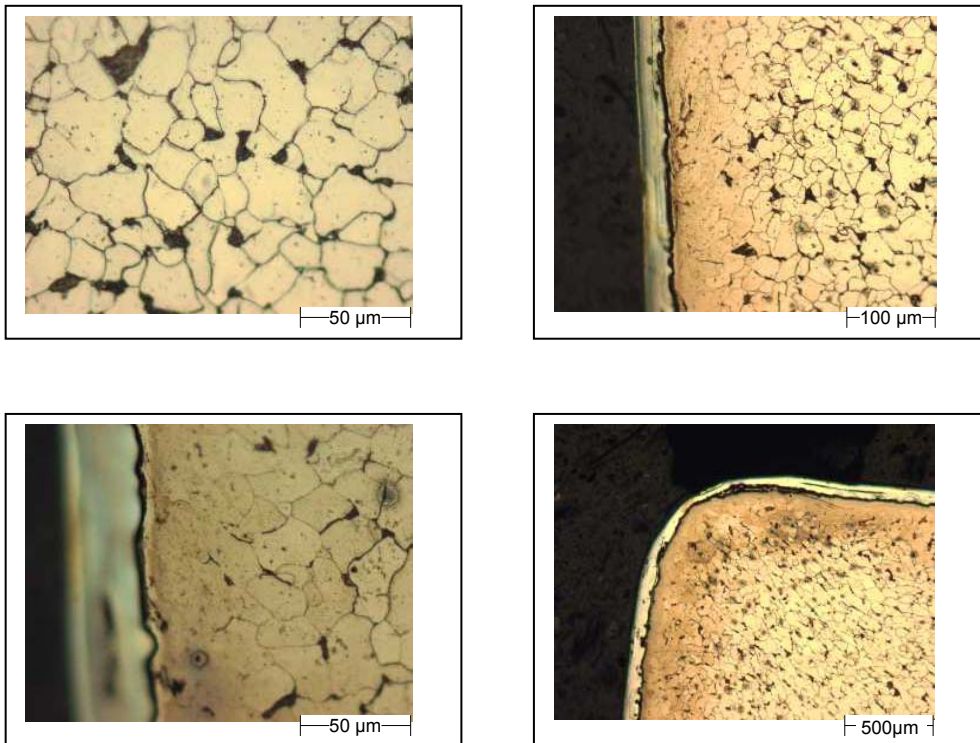
Η επιφάνεια αφού λειάνθηκε και σιλβώθηκε (με την διαδικασία που έχει είδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 3) εμβαπτίστηκε 20-30sec σε αντιδραστήριο NITAL 5%, ώστε να αποκαλυφθεί η μικροδομή του μετάλλου.



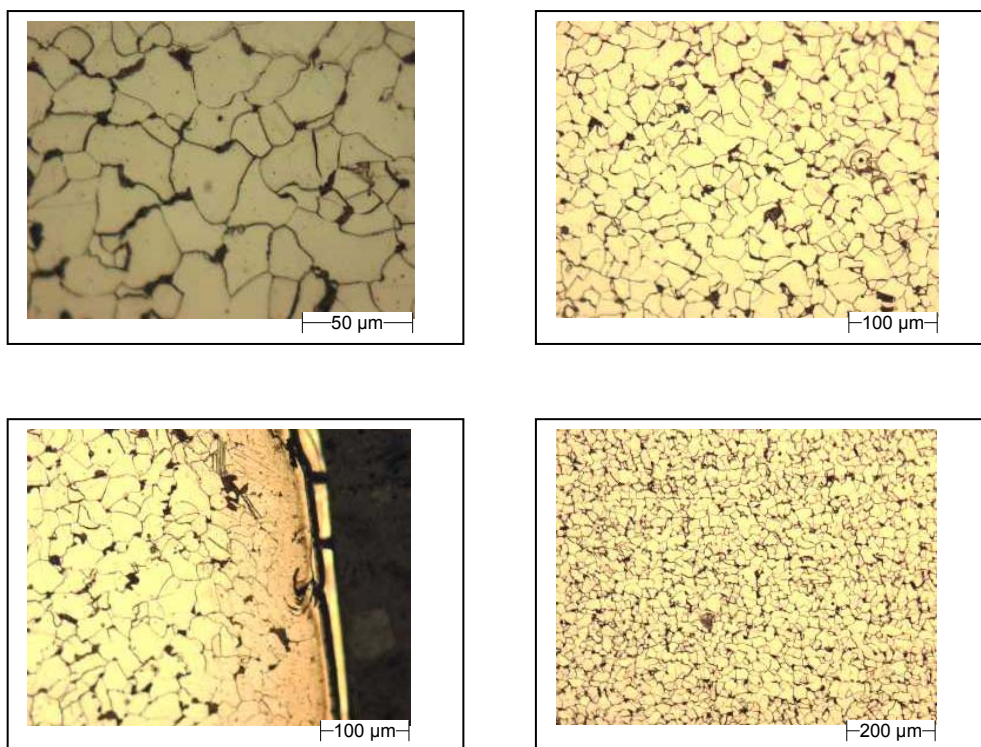
Εικόνα 4.3: Δείγμα ΚΑ. Χαρακτηριστική δομή υποστρώματος St37 (Προενηκητσειδής Φερρίτης με ελάχιστο περλίτη)



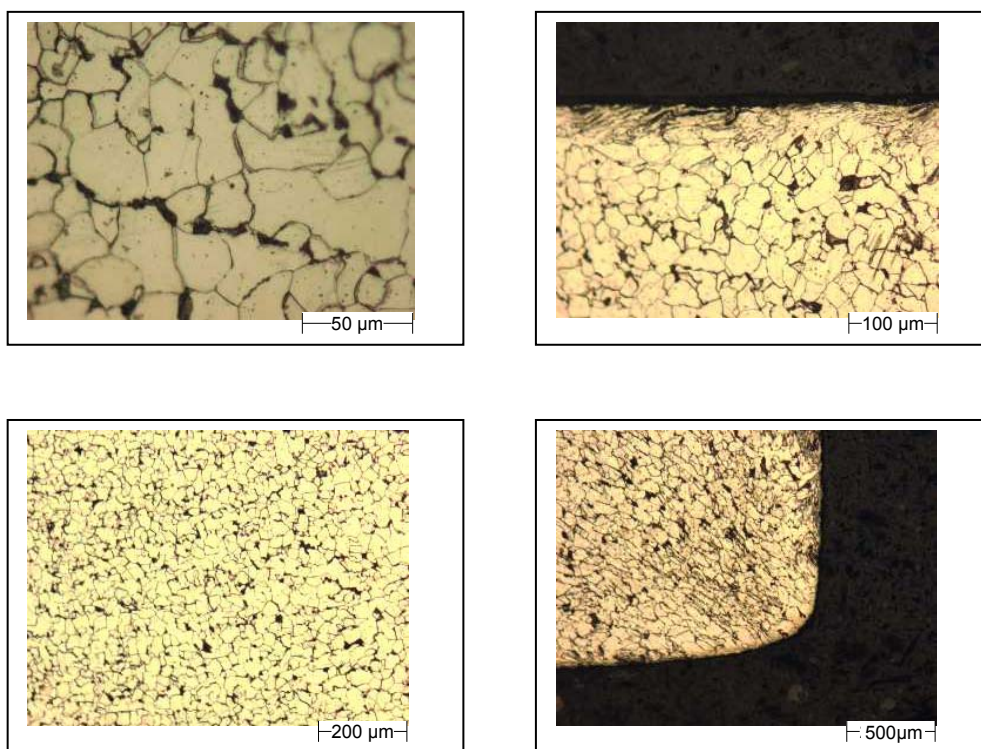
Εικόνα 4.4: Δείγμα KB. Χαρακτηριστική δομή υποστρώματος St37 (Προευτηκτοειδής Φερρίτης με ελάχιστο περλίτη)



Εικόνα 4.5: Δείγμα KSB2. Χαρακτηριστική δομή υποστρώματος St37 (Προευτηκτοειδής Φερρίτης με ελάχιστο περλίτη)



Εικόνα 4.6: Δείγμα KSL1. Χαρακτηριστική δομή υποστρώματος St37 (Προετηκτοειδής Φερρίτης με ελάχιστο περλίτη)



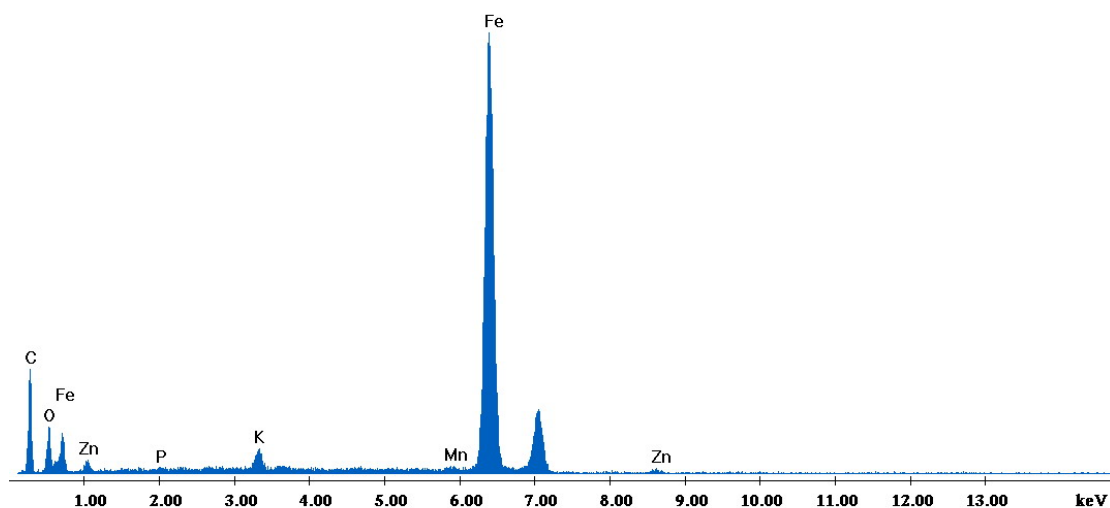
Εικόνα 4.7: Δείγμα KSL2. Χαρακτηριστική δομή υποστρώματος St37 (Προετηκτοειδής Φερρίτης με ελάχιστο περλίτη)

Η δομή που εμφανίζει το υπόστρωμα είναι η χαρακτηριστική δομή του St37 που αποτελείται από προευτηκτοειδής φερρίτης με ελάχιστο περλίτη.

Με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (S.E.M.) και του στοιχειακού μικροαναλυτή (E.D.A.X.) ελέγχθηκε η σύσταση του υποστρώματος στα δοκίμια κρούσης. Ελέγχθησαν τα δοκίμια κρούσης KA, KB και KSL6 τα οποία εμφάνισαν μεγάλες διαφορές στην ενέργεια που απορρόφησαν κατά τη δοκιμή κρούσης ($E_{KA}=140J$, $E_{KB}=42J$ και $E_{KSL6}=10J$).

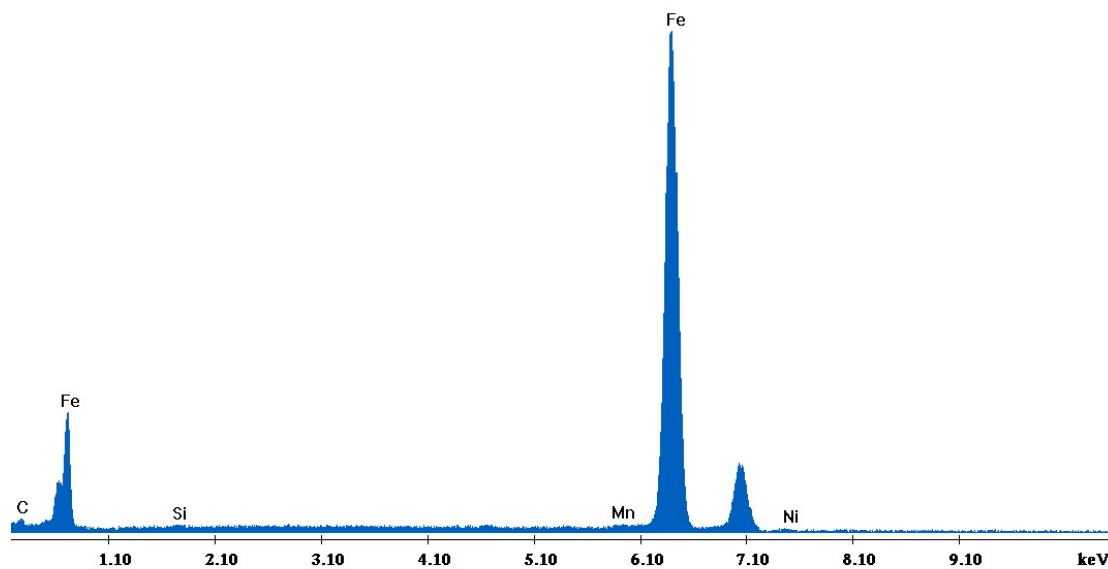
Βρέθηκε ότι το δοκίμιο KA έχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα από τα άλλα δύο και επιπλέον έδειξε να υπάρχει και κάλιο, όπως φαίνεται και από τα αντίστοιχα διαγράμματα EDAX (Σχήματα 4.1, 4.2 και 4.3).

Label A: Chlorite (Nrm.%= 38.86, 20.96, 34.83, 1.14, 3.84, 0.28)



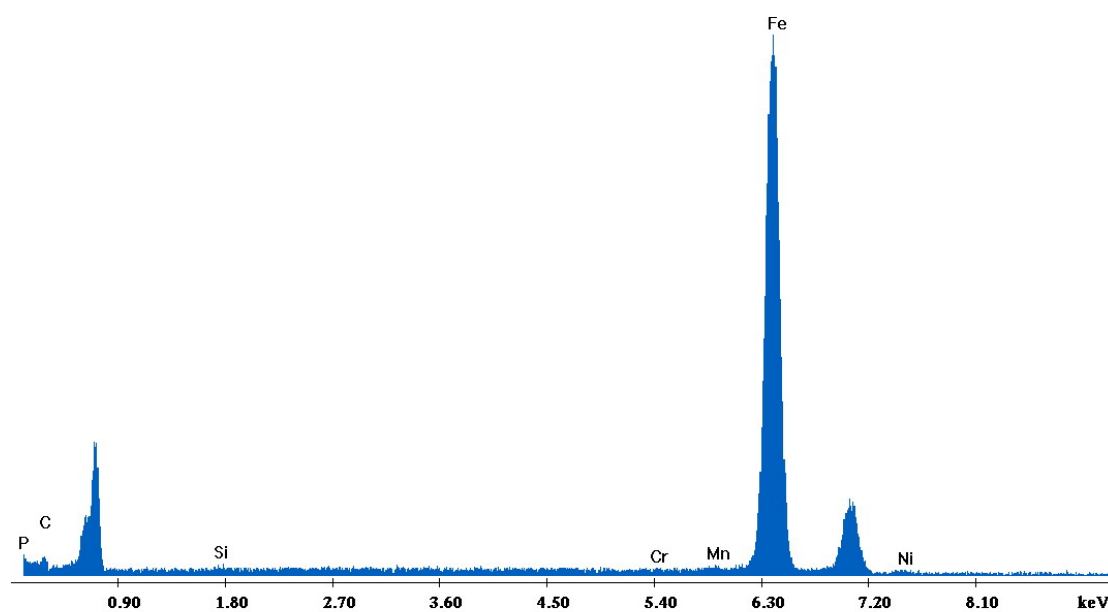
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα EDAX της επιφάνειας θραύσης του δοκίμιου κρούσης KA. (Παρουσίασε εικόνα όλκιμης θραύσης, αντοχή σε κρούση 140J)

Label A: Chlorite (Nrm.%= 38.86, 20.96, 34.83, 1.14, 3.84, 0.28)

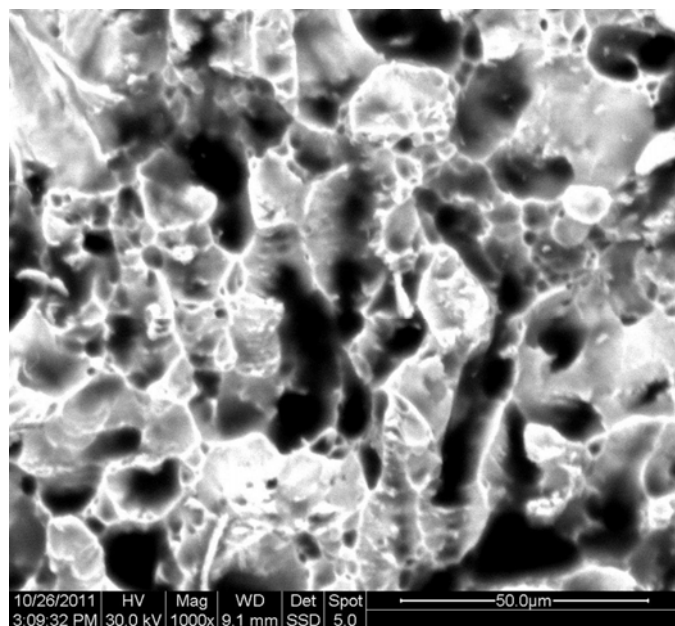
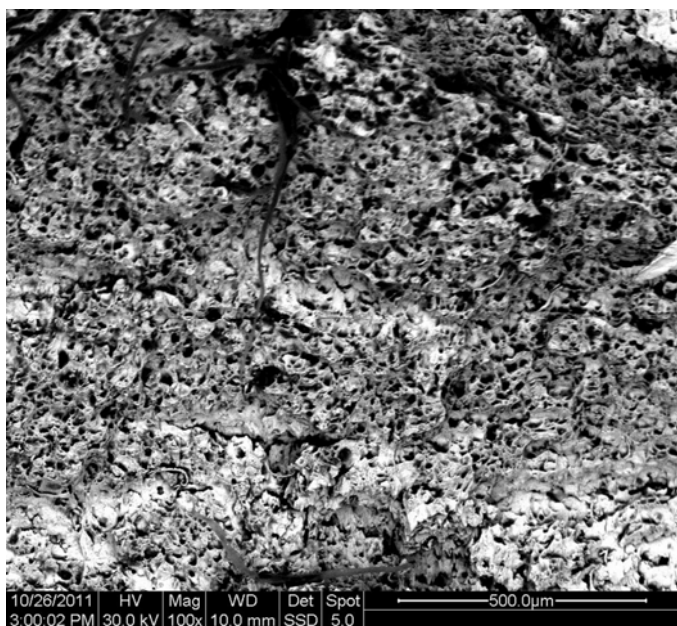


Σχήμα 4.2: Διάγραμμα EDAX της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου κρούσης KB. (Παρουσίασε εικόνα ψαθυρής θραύσης, αντοχή σε κρούση 42J)

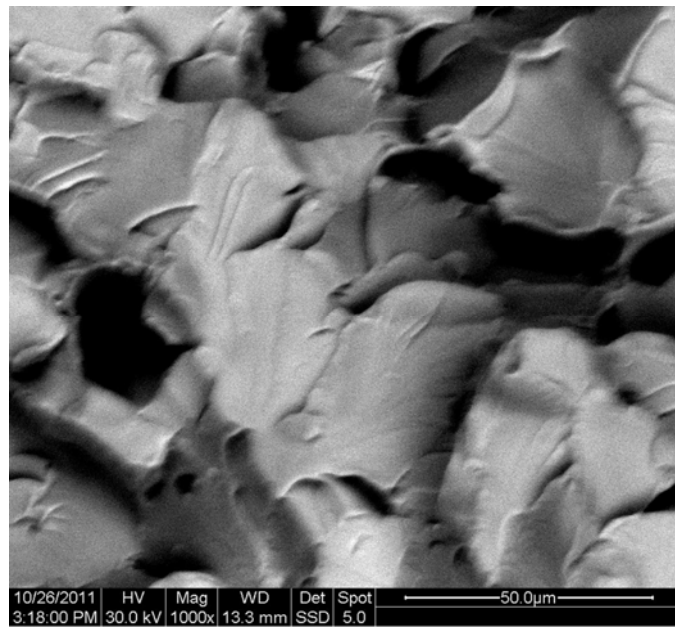
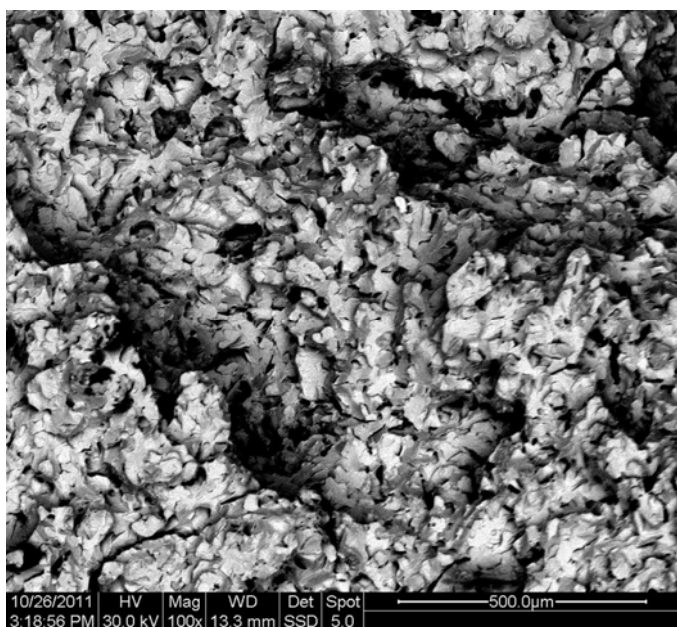
Label A: Chlorite (Nrm.%= 38.86, 20.96, 34.83, 1.14, 3.84, 0.28)



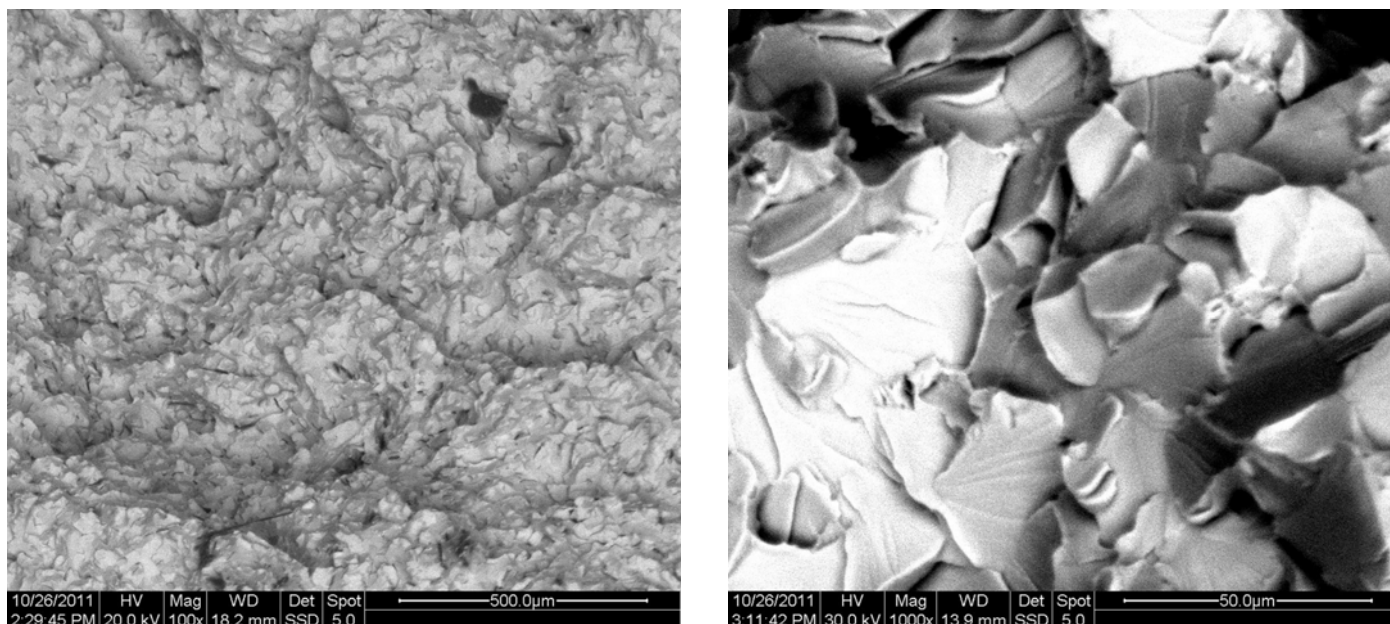
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα EDAX της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου κρούσης KSL6. (Παρουσίασε εικόνα ψαθυρής θραύσης, αντοχή σε κρούση 10J)



Εικόνα 4.8: Φωτογραφία της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου κρούσης KA (SEM). (Παρουσίασε εικόνα όλκιμης θραύσης, αντοχή σε κρούση 140J)



Εικόνα 4.9: Φωτογραφία της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου κρούσης KB (SEM). (Παρουσίασε εικόνα ψαθυρής θραύσης, αντοχή σε κρούση 42J)



Εικόνα 4.10: Φωτογραφία της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου κρούσης KSL6 (SEM). (Παρουσίασε εικόνα ψαθυρής θραύσης, αντοχή σε κρούση 10J)

4.3 Μηχανικές Ιδιότητες

4.3.1 Αντοχή σε Εφελκυσμό

Για τον έλεγχο της αντοχής σε εφελκυσμό δοκιμάστηκαν 9 δοκίμια επιψευδαργυρωμένα με διαφορετικές μεθόδους και 4 τα οποία δεν είχαν επικάλυψη. Οι δοκίμια αυτά ήταν κυλινδρικής διατομής με διάμετρο 8mm.

Οι παραπάνω έλεγχοι αντοχής σε εφελκυσμό πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Κονιαμάτων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. με τη χρήση της μηχανής εφελκυσμού WDW-50E μέγιστου φορτίου 50KN, της εταιρείας TIME GROUP INC. Οι δοκιμές εφελκυσμού έγιναν προοδευτικά αυξανόμενο φορτίο, με ταχύτητα ίση με 20mm/min, μέχρι τη θραύση τους.

Με την βοήθεια του λογισμικού της μηχανής έγινε καταγραφή των τιμών του επιβαλλόμενου φορτίου (F_m), οι μεταβολές του μήκους των δοκιμίων (Δl) καθώς και

η λήψη διαγραμμάτων τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ). Έτσι ήταν δυνατός ο προσδιορισμός του ορίου διαρροής, της αντοχής σε εφελκυσμό, κ.α.

Τα παρακάτω διαγράμματα Σχήματα 4.4, 4.5, 4.6 και 4.7 αφορούν τα χαλύβδινα δοκίμια Νο2 και Νο3 τα οποία δεν έχουν υποστεί ηλεκτρολυτική επιψευδαργύρωση.

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι τα δοκίμια αυτά παρουσιάζουν ομοιομορφία ως προς την εφελκυστική συμπεριφορά τους έως τη θραύση τους.

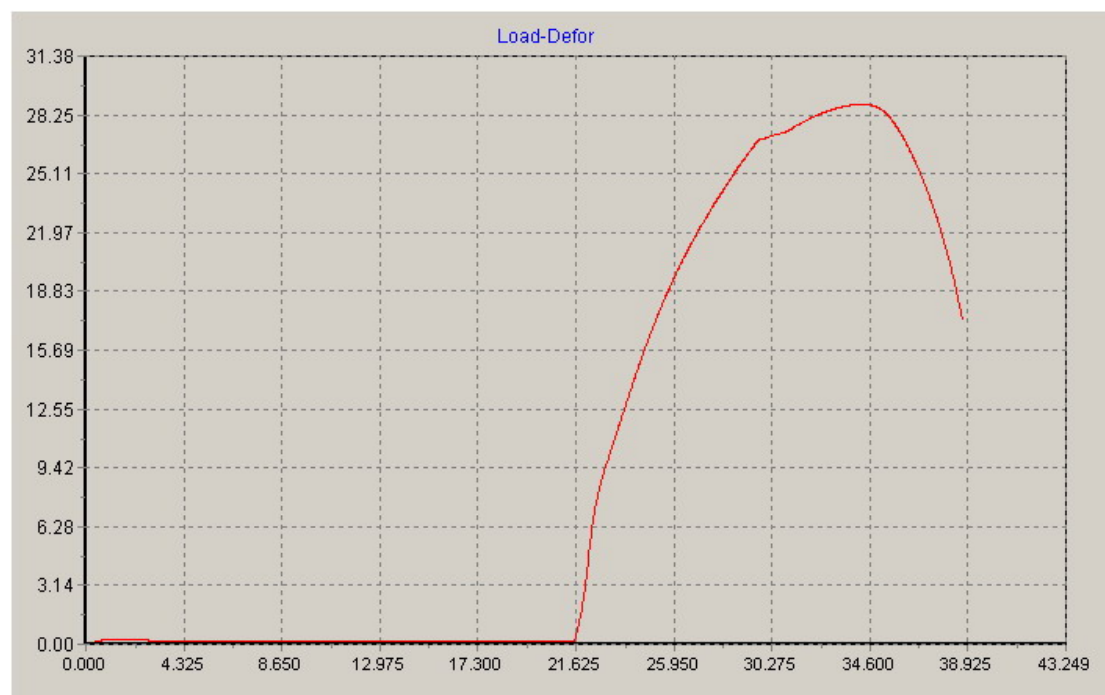
Από τα διαγράμματα του σχήματος 4.4 και 4.6 φαίνεται το φορτίο θραύσης (F_{mfr}) το οποίο είναι ίσο με 28,81KN και 28,60KN για τα δοκίμια Νο2 και Νο3 αντίστοιχα.

Από τα διαγράμματα του σχήματος 4.5 και 4.7 και με τη βοήθεια του παρακάτω τύπου προσδιορίζεται η αντοχή σε εφελκυσμό (R_m).

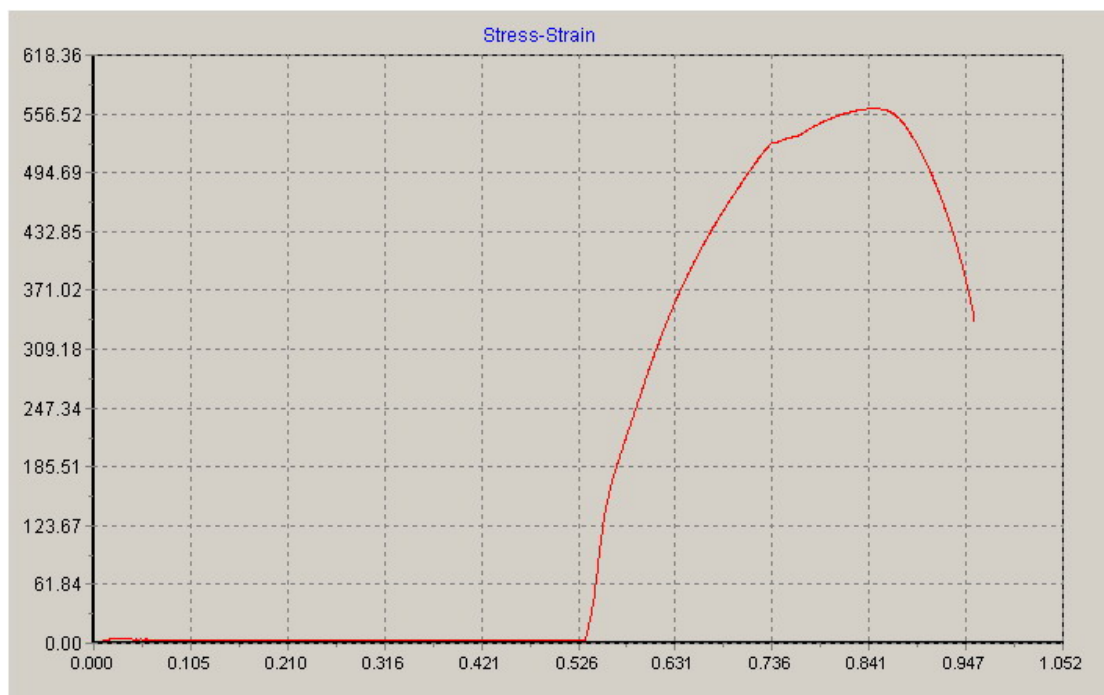
$$R_m = \frac{F_{mfr}}{S_0}$$

Για το δοκίμιο Νο2 η αντοχή σε εφελκυσμό (R_m) είναι 562,1 MPa και για το δοκίμιο Νο3 είναι 566,4 MPa.

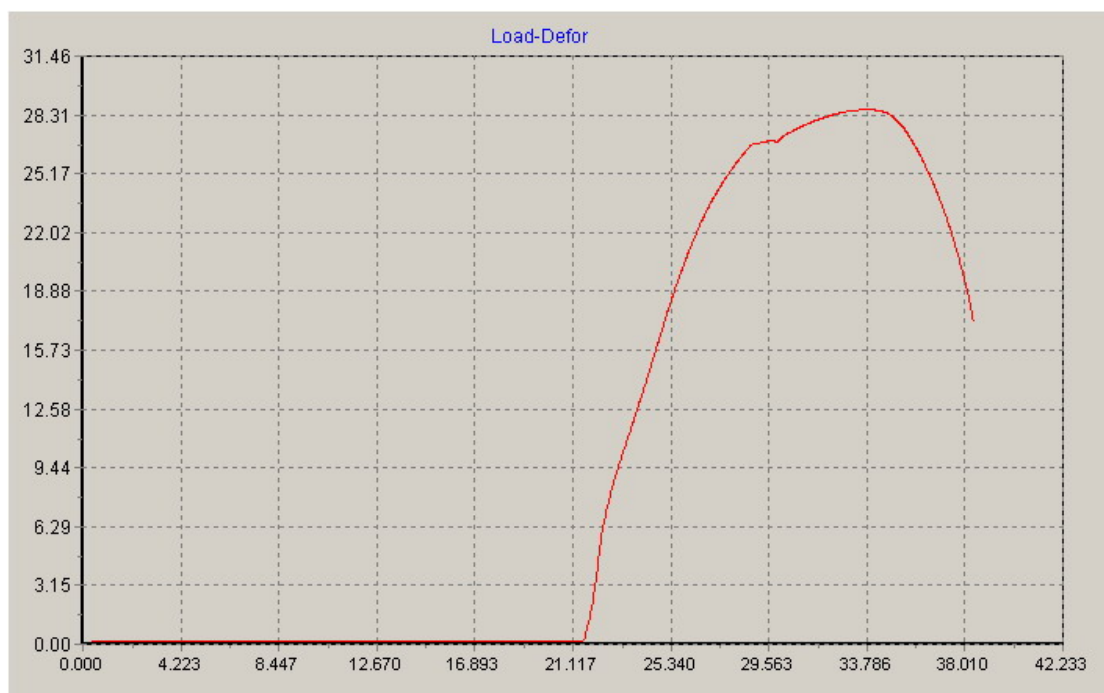
Στον πίνακα 4.2 που ακολουθεί φαίνονται όλα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον εφελκυσμό των δοκιμίων.



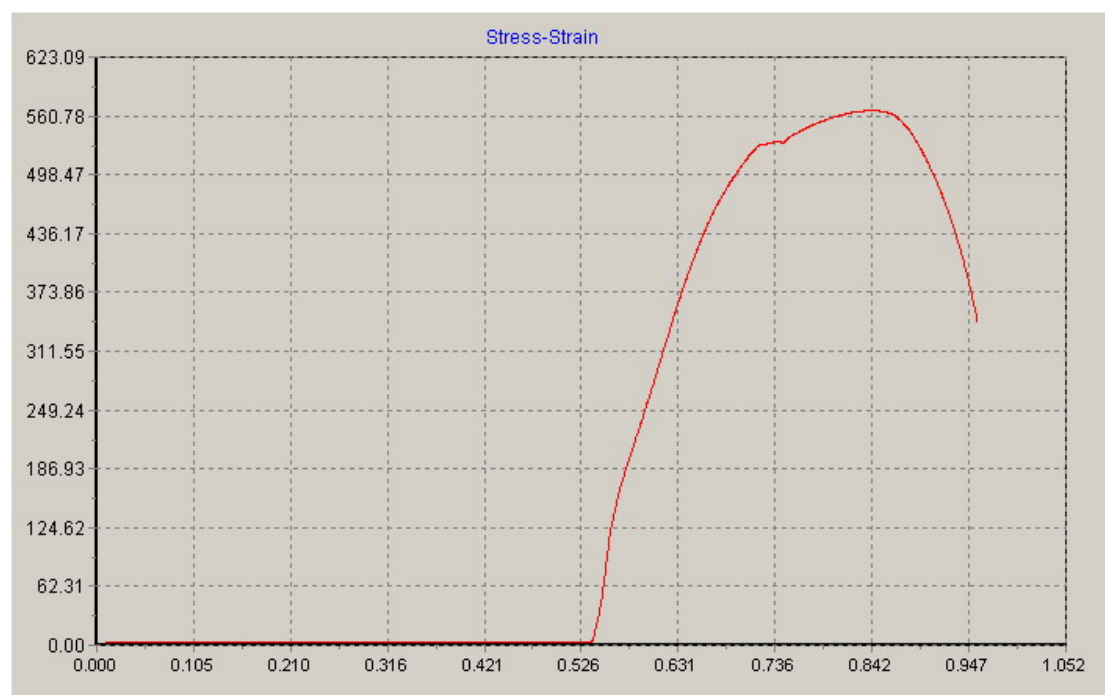
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα φορτίου (F_m) – επιμήκυνσης (Δl) (δοκίμιο Νο2 χωρίς επιψευδαργύρωση)



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ) (δοκίμιο No2 χωρίς επιψευδαργύρωση)



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα φορτίου (F_m) – επιμήκυνσης (Δl) (δοκίμιο No3 χωρίς επιψευδαργύρωση)



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ) (δοκίμιο Νο3 χωρίς επιψευδαργύρωση)

Δοκίμιο	Χρόνος Απόθεσης (min)	Επικάλυψη Zn (μm)	Μέση διάμετρος d (mm)	Διατομή $S_0(\text{mm}^2)$	L_0 (mm)	L_u (mm)	Επιμήκυνση (%)	Επιμήκυνση Δl (mm)	Φορτίο Θραύσης F_{mfr} (KN)	Αντοχή σε Εφελκ. (R_m) (MPa)
No2	-	OXI	8,08	51,25	40,45	46,91	15,97	6,46	28,81	562,1
No3	-	OXI	8,02	50,49	40,15	47,26	17,71	7,11	28,60	566,4
No5	-	OXI	8,00	50,24	40,05	47,63	18,93	7,58	28,83	573,8
No6	-	OXI	8,00	50,20	40,03	47,47	18,58	7,44	28,57	569,1
EA	42	51	8,07	51,12	40,40	47,30	17,09	6,90	28,76	562,6
EB	42	49	8,10	51,46	40,53	48,30	19,17	7,77	29,37	570,7
ESB1	35	29	8,05	50,87	40,30	47,96	19,01	7,66	28,97	569,5
ESB2	35	29	8,05	50,91	40,31	47,34	17,43	7,03	29,12	572,0
ESB3	45	20	8,06	51,04	40,36	47,75	18,30	7,39	28,86	565,5
ESB4	45	62	8,11	51,63	40,60	48,05	18,36	7,45	28,98	561,3
ESL1	30	25	8,08	51,21	40,43	47,47	17,41	7,04	28,66	559,7
ESL2	30	24	8,06	50,95	40,33	47,14	16,88	6,81	28,55	560,3
ESL3	45	45	8,11	51,67	40,61	47,67	17,37	7,06	29,41	569,1

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα μετρήσεων σε δοκίμια εφελκυσμού

Η μέση τιμή της αντοχής σε εφελκυσμό (R_m) των δοκιμίων που δεν έχουν επικάλυψη ψευδαργύρου υπολογιστικά 567,9MPa και η μέση τιμή του φορτίου θραύσης (F_{mfr}) = 28,70KN. Τα αποτελέσματα από την δοκιμή σε εφελκυσμό των δοκιμίων Νο2, Νο3, Νο5 και Νο6 τα οποία δεν έχουν επικάλυψη παρουσιάζουν σημαντική προσέγγιση μεταξύ τους.

Επίσης υπολογίστηκε η επιμήκυνση θραύσεως (ολκιμότητα) για τα δοκίμια αυτά από 15,97% έως και 18,93%, τιμές που προσεγγίζουν το ποσοστό ολκιμότητας που ενδεικτικά δίνεται στην βιβλιογραφία (15 – 18 %) για το υλικό St37. Οι τιμές της αντοχής σε εφελκυσμό των δοκιμίων αυτών φαίνεται να είναι λίγο μεγαλύτερες από αυτές που αναφέρονται στην βιβλιογραφία για το υλικό St37 (360-510MPa).

Παρατηρώντας τις επιφάνειες θραύσης των δοκιμίων Νο2, Νο3, Νο5 και Νο6 φαίνεται να παρουσιάζουν όλκιμη θραύση (Εικόνα 4.11, 4.12 και 4.13). Η χαρακτηριστική μορφή «κόνου – κρατήρα» είναι εμφανής στην περιοχή θραύσης (χαρακτηριστικό της πλαστικής παραμόρφωσης η οποία προηγείται της θραύσης σε όλκιμα υλικά).



Εικόνα 4.11: Δοκίμιο Νο6 (χωρίς επιψευδαργύρωση) μετά τη θραύση του

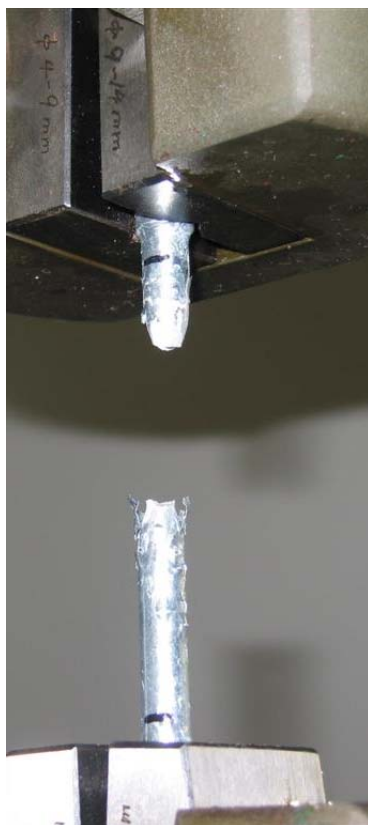


Εικόνα 4.12: Δοκίμια χωρίς επιψευδαργύρωση μετά τη θραύση (χαρακτηριστική μορφή «κώνου – κρατήρα»)



Εικόνα 4.13: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου Νο6 χωρίς επιψευδαργύρωση (χαρακτηριστική μορφή «κώνου – κρατήρα»)

Παρατηρώντας το δοκίμιο ESL3 μετά την δοκιμή του εφελκυσμού φαίνεται η επικάλυψη να μην είχε καθόλου καλή πρόσφυση στο υπόστρωμα (Εικόνα 4.14).



Εικόνα 4.14: Επιψευδαργγρωμένα δοκίμια ESL3 μετά τη θραύση του



Εικόνα 4.15: Επιψευδαργγρωμένα δοκίμια μετά τη δοκιμή εφελκυσμού

Παρατηρούμε και εδώ τη χαρακτηριστική μορφή «κώνου – κρατήρα» που είναι εμφανής στην περιοχή θραύσης (Εικόνα 4.15). Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 4.2 η αντοχή σε εφελκυσμό του δοκιμίου αυτού δεν διαφοροποιείται από αυτή που είχαν τα δοκίμια χωρίς επιμετάλλωση. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν επιτεύχθηκε καλή

πρόσφυση της επικάλυψης με το υπόστρωμα οπότε η επικάλυψη δεν φαίνεται να επηρέασε την μηχανική συμπεριφορά του δοκιμίου.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί αντιμετωπίστηκε μεγάλη δυσκολία στον ακριβή έλεγχο των συνθηκών επιψευδαργύρωσης στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Δεν ήταν δυνατός ο ακριβής έλεγχος της έντασης του ρεύματος λόγω του μικρού μεγέθους και του μικρού αριθμού των δοκιμίων σε συνδυασμό με το μεγάλο μέγεθος των δεξαμενών επιμετάλλωσης του εργοστασίου. Για να επιτευχθεί μία ικανοποιητική επιφάνεια επιμετάλλωσης πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές και έγινε η επιμετάλλωση των δοκιμίων ταυτόχρονα με άλλα μεγαλύτερα αντικείμενα στο ίδιο μπάνιο ώστε να ρυθμίσουμε την ένταση του ρεύματος. Το ίδιο συνέβη και με στην εφαρμογή της μεθόδου του περιστρεφόμενου τυμπάνου. Τα προς επιμετάλλωση δοκίμια τοποθετήθηκαν στο τύμπανο μαζί με κοχλίες παρόμοιων διαστάσεων.

Τα δοκίμια EA και EB στα οποία πραγματοποιήθηκε επιψευδαργύρωση στο εργαστήριο (πάχος επιψευδαργύρωσης 49 – 51μm, χρόνος απόθεσης 42min) με απόλυτα ελεγχόμενες συνθήκες (εικόνα 4.16), φαίνονται να παρουσιάζουν μία μικρή μείωση της αντοχής τους σε εφελκυσμό (μέση τιμή 566,6MPa) συγκρινόμενα με τα δοκίμια τα οποία δεν έχουν επιψευδαργυρωθεί (μέση τιμή 567,9MPa). Αυτό φαίνεται και από την σύγκριση των διαγραμμάτων τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ) (Σχήμα 4.12)



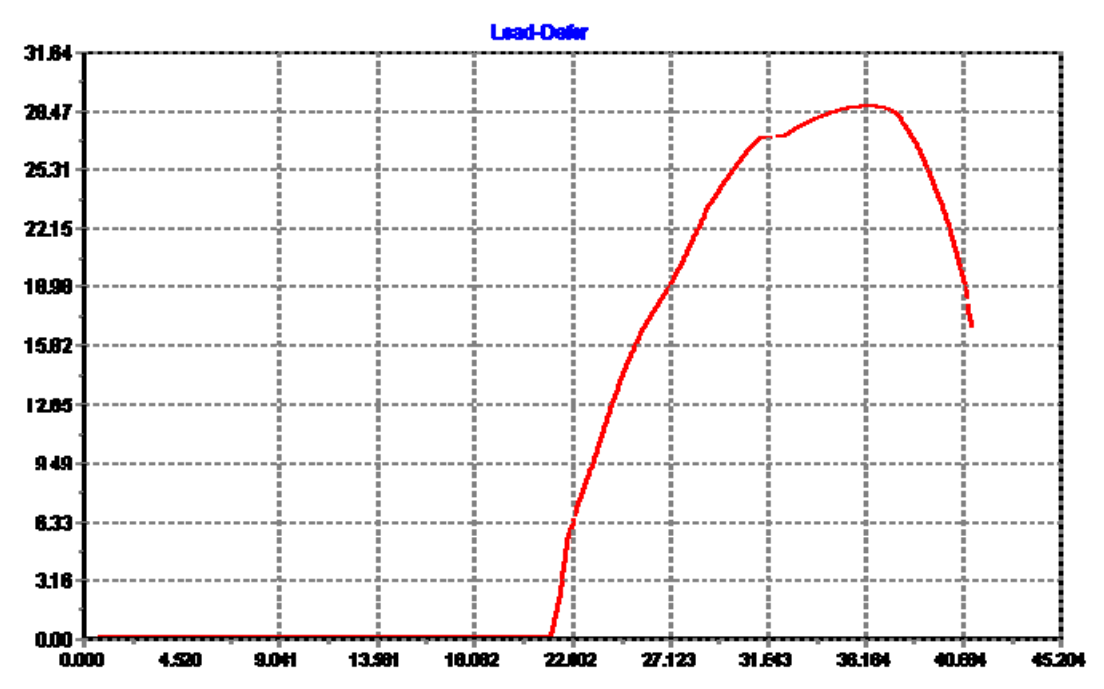
Εικόνα 4.16: Δοκίμιο EA μετά τη δοκιμή εφελκυσμού

Παρατηρούμε και εδώ τη χαρακτηριστική μορφή «κώνου – κρατήρα» που είναι εμφανής στην περιοχή θραύσης (Εικόνα 4.17).

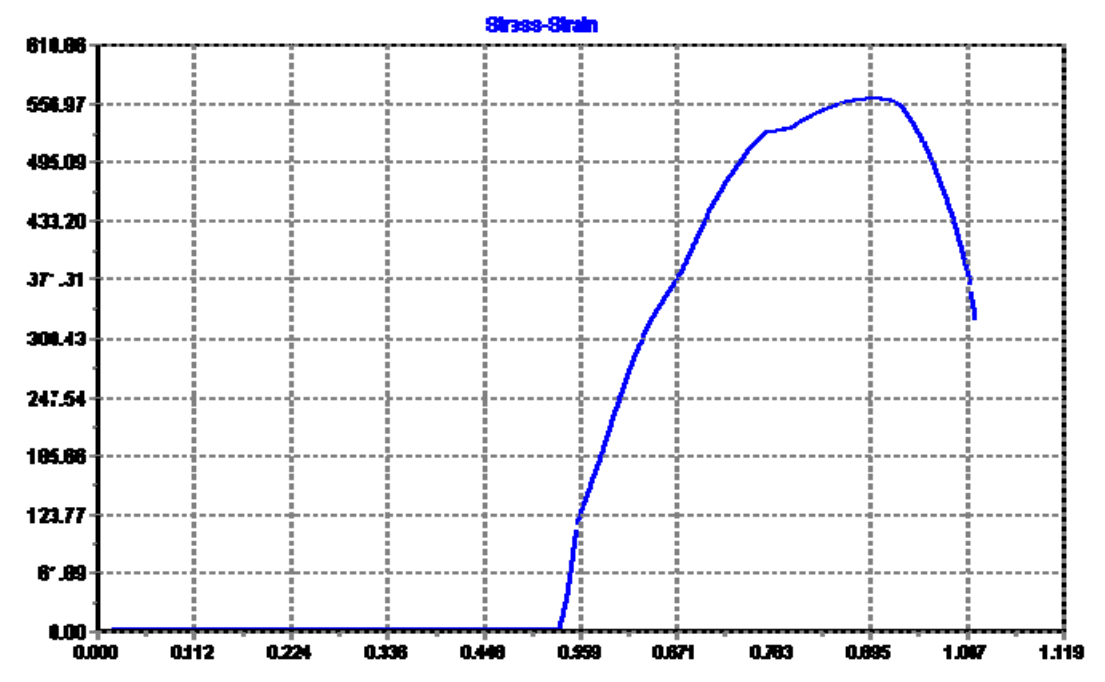


Εικόνα 4.17: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου ΕΑ (πάχος επιψευδαργύρωσης 51 μm) (χαρακτηριστική μορφή «κώνου – κρατήρα»)

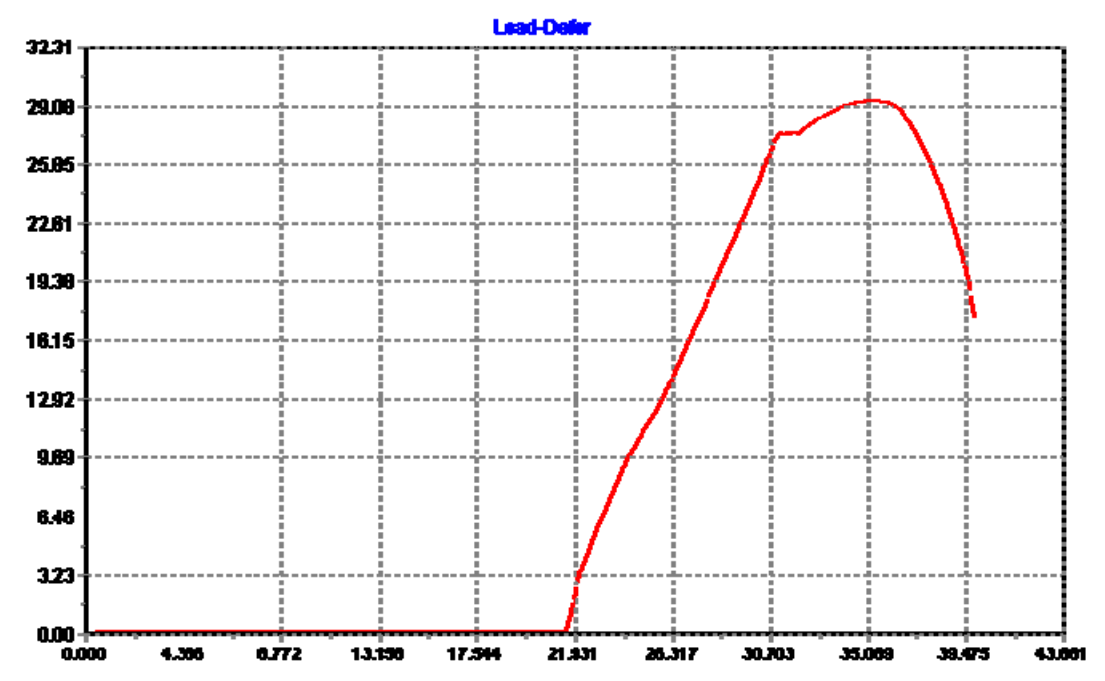
Τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.8, 4.9, 4.10 και 4.11 αφορούν τα δοκίμια ΕΑ και ΕΒ που έχουν υποστεί ηλεκτρολυτική επιψευδαργύρωση πάχους 49 – 51 μm με χρόνο απόθεσης 42 λεπτά.



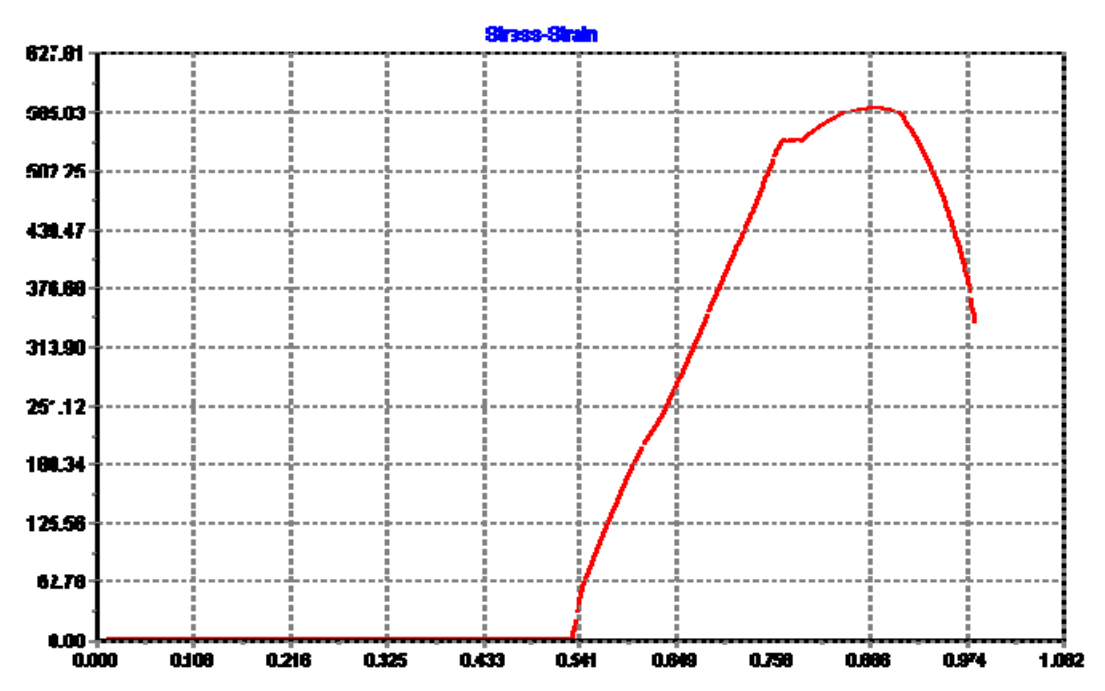
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα φορτίου (F_m) – επιμήκυνσης (Δl) (δοκίμιο ΕΑ πάχος επιψευδαργύρωσης 51 μm)



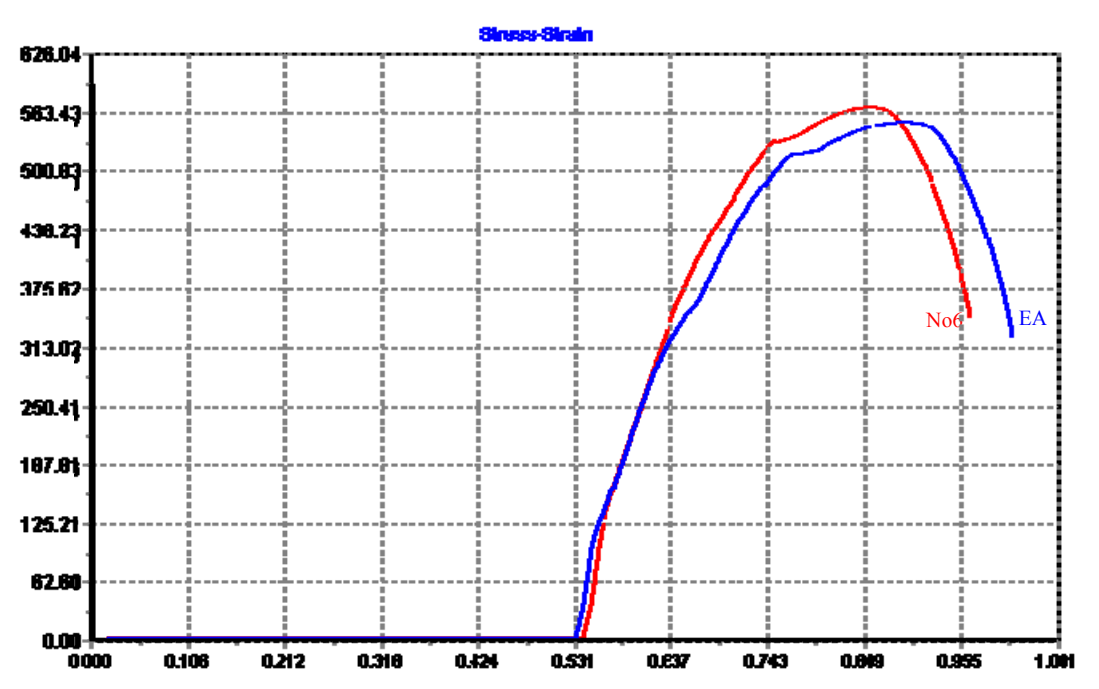
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ) (δοκίμιο ΕΑ πάχος επιψευδαργύρωσης 51 μm)



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα φορτίου (F_m) – επιμήκυνσης (Δl) (δοκίμιο ΕΒ πάχος επιψευδαργύρωσης 49 μm)



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ) (δοκίμιο EB πάχος επιψευδαργύρωσης 49 μm)

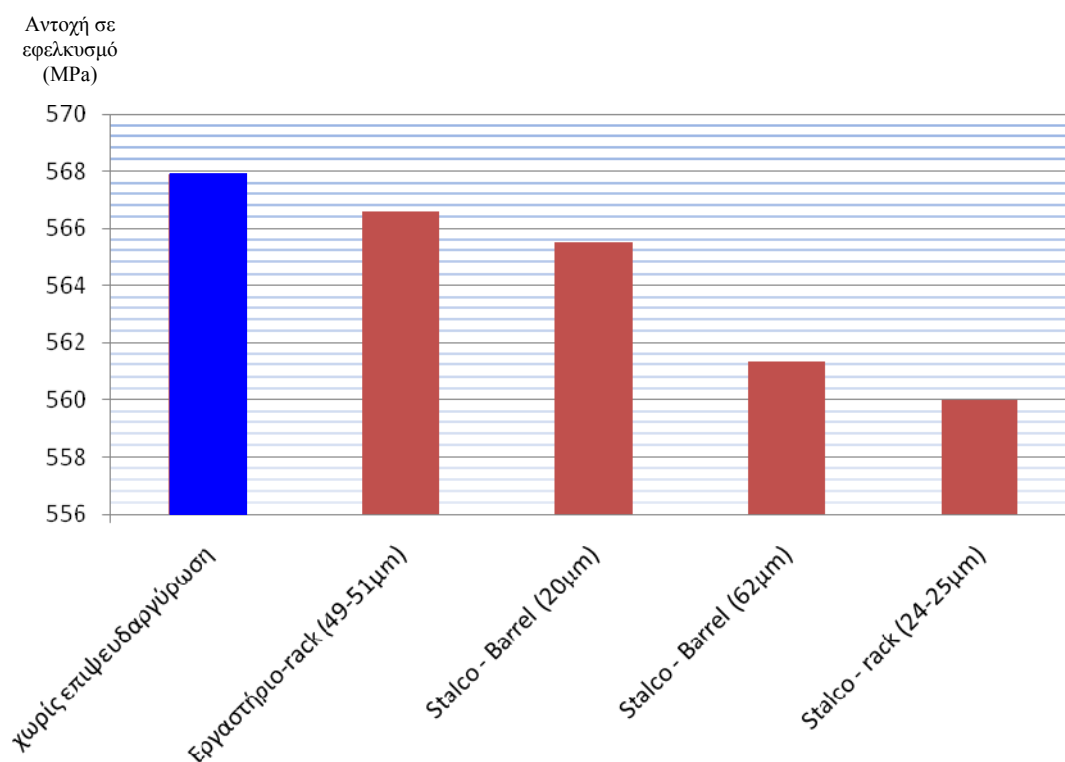


Σχήμα 4.12: Σύγκριση Διαγραμμάτων τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ) (δοκίμια No6 χωρίς επιψευδαργύρωση και EA με πάχος επιψευδαργύρωσης 51 μm)

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων (Πίνακας 4.2) τα δοκίμια τα οποία επιψευδαργυρώθηκαν στο εργαστήριο (rack plating) με πάχος 49-51 μm φαίνεται να έχουν μια ελάχιστη μείωση της αντοχής τους σε εφελκυσμό σε σχέση με τα δοκίμια τα οποία δεν έχουν επιμεταλλωθεί. Τα δοκίμια τα οποία επιψευδαργυρώθηκαν σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις (rack plating) με πάχος 24-25 μm εμφανίζουν αισθητά μεγαλύτερη μείωση της αντοχής τους σε εφελκυσμό. Στις ίδιες βιομηχανικές εγκαταστάσεις με χρήση όμως περιστρεφόμενου τυμπάνου (barrel plating) παρατηρούμε επίσης μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό (σε σχέση πάντα με τα δοκίμια τα οποία δεν έχουν υποστεί επιμετάλλωση), η μείωση αυτή φαίνεται να είναι μεγαλύτερη με την αύξηση του πάχους επιψευδαργύρωσης.

Σχετικά με την επιμήκυνση θραύσεως (%) (ολκιμότητα) των δοκιμίων με επικάλυψη ψευδαργύρου και χωρίς δεν παρατηρείται καμία διαφορά. Το ποσοστό ολκιμότητας παραμένει περίπου στο 18% για όλα τα δοκίμια.

Όλα τα παραπάνω φαίνονται συνοπτικά στο διάγραμμα του Σχήματος 4.13.



Σχήμα 4.13: Σύγκριση τιμών αντοχής σε εφελκυσμό

Τα διαγράμματα φορτίου (F_m) – επιμήκυνσης (Δl) και τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ) από τις δοκιμές των δοκιμίων ESB1 – ESB4 και ESL1 – ESL3 παρατίθενται στο παράρτημα.

4.3.2 Αντοχή σε Κρούση

Για τον έλεγχο της αντοχής σε δυσθραυστότητα δοκιμάστηκαν 6 δοκίμια επιψευδαργυρωμένα με διαφορετικές μεθόδους και 2 τα οποία δεν είχαν επικάλυψη. Οι δοκίμια αυτά ήταν τετραγωνικής διατομής 10X10mm.

Οι παραπάνω έλεγχοι αντοχής σε κρούση (δυσθραυστότητας) πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Κέντρου Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων της Δ.Ε.Η. με τη χρήση της μηχανής κρούσης Avery Denison (300 J) με τη μέθοδο Charpy. Οι δοκιμές κρούσης έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 10045.01.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών φαίνονται στον Πίνακα 4.3 που ακολουθεί.

<i>Κωδικός Δοκιμίου</i>	<i>Πάχος Επιψευδαργύρωσης (μm)</i>	<i>Αντοχή σε κρούση (J)</i>	<i>Χρόνος Απόθεσης (min)</i>	<i>Μέθοδος</i>
K _I και K _{II}	0	143 – 145	-	-
KA	52,2 – 53,0	140	42	Εργαστήριο (rack)
KB	47,0 – 49,0	42	45	Εργαστήριο (rack)
KSB1 και KSB2	37,0 – 37,5	141	35	Stalco (barrel)
KSL1	39,0 – 40,2	135	30	Stalco (rack)
KSL2	-	48	30	Stalco (rack)

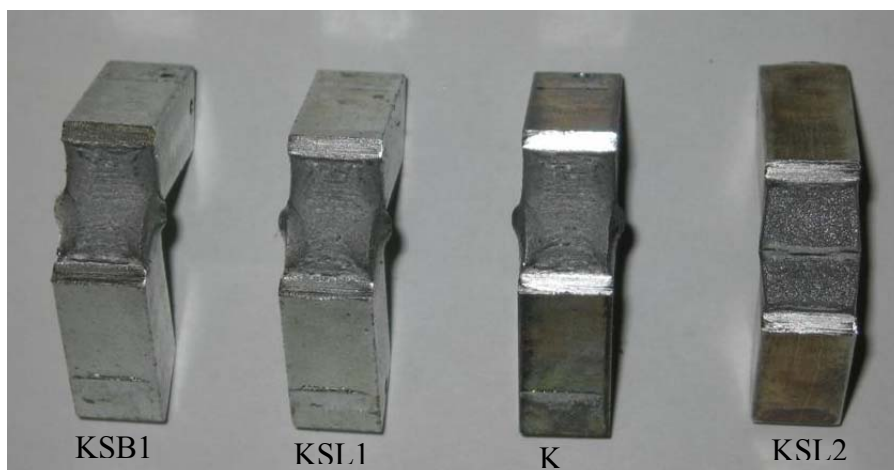
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα αντοχής σε κρούση με τη μέθοδο Charpy

Μεγαλύτερες τιμές απορροφημένης ενέργειας φαίνεται να έχουν τα δοκίμια τα οποία δεν είχαν επικάλυψη ψευδαργύρου. Φαίνεται ακόμα ότι έχουμε μία μικρή μείωση της ενέργειας αυτής όσο αυξάνει το πάχος της επιμετάλλωσης (από 3J μέχρι και 10J).

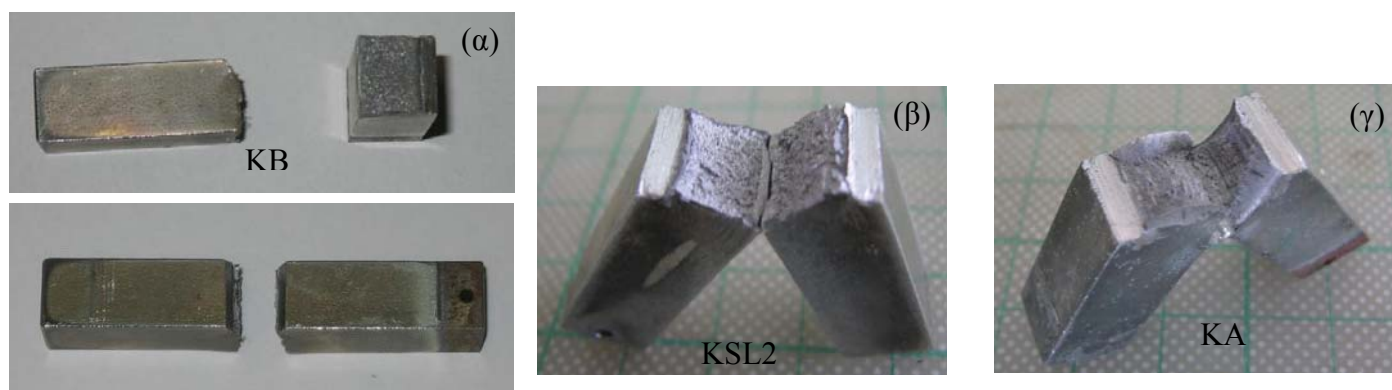
Αυτό συμβαίνει γιατί ο ψευδάργυρος είναι σημαντικά μαλακότερος από τον χάλυβα. Φαίνεται ότι η επιφάνεια του επιψευδαργυρωμένου χάλυβα να αποκτά διαφορετική μηχανική συμπεριφορά (υποβαθμισμένη) από αυτή του καθαρού χάλυβα.

Το δοκίμιο KB (το οποίο έχει παρασκευαστεί με τις ίδιες συνθήκες με το δοκίμιο KA) παρουσιάζει σημαντικά μειωμένη αντοχή σε κρούση από τα υπόλοιπα δοκίμια. Αυτό φαίνεται και από την επιφάνεια θραύσης.

Όπως φαίνεται και στις παρακάτω μακρο-φωτογραφίες όλα τα δοκίμια παρουσιάζουν μία όλκιμη συμπεριφορά εκτός από το δοκίμιο KB το οποίο φαίνεται να είναι ψαθυρό.



Εικόνα 4.19: Δοκίμια μετά τη δοκιμή κρούσης



Σχήμα 4.20: Δοκίμιο KB και KA μετά τη δοκιμή κρούσης. Ψαθυρή (α) και όλκιμη θραύση (γ)



Σχήμα 4.21: Δοκίμιο KSB2 (Επιφάνεια θραύσης)

4.3.3 Μέτρηση Μικροσκληρότητας Vickers

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφαλαίο ο προσδιορισμός της μικροσκληρότητας των επικαλύψεων έγινε στο εργαστήριο Μεταλλογραφίας του Κέντρου Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων της Δ.Ε.Η. με την χρήση μικροσκληρομέτρου της Struers, μοντέλο Duramin – 10/20 με την μέθοδο Vickers.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην επιφάνεια των κρούσης. Ο χρόνος υποβολής φορτίου (10sec) και το φορτίο (100p) διατηρήθηκαν σταθερά για όλα τα δείγματα ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Σε κάθε δείγμα έγιναν 15 μετρήσεις σε διάφορες περιοχές της επιφάνειας τους και σε όλες τις πλευρές και υπολογίστηκε η μέση τιμή τους ώστε να έχουμε μεγαλύτερη αξιοπιστία στο αποτέλεσμα.

Στον Πίνακα 4.4 που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων μικροσκληρότητας και Vickers που πραγματοποιήθηκαν στις επικαλύψεις ψευδαργύρου.

<i>Κωδικός Δοκιμίου</i>	<i>Πάχος Επιψευδαργύρωσης (μm)</i>	<i>Μικροσκληρότητα κατά Vickers (HV)</i>	<i>Χρόνος Απόθεσης (min)</i>	<i>Μέθοδος</i>
KA	52,2 – 53,0	116,06	42	Εργαστήριο (rack)
KB	47,0 – 49,0	111,97	45	Εργαστήριο (rack)
KSB2	37,0 – 37,5	61,53	35	Stalco (barrel)
KSL1	39,0 – 40,2	101,25	30	Stalco (rack)
KSL2	-	83,97	30	Stalco (rack)

Πίνακας 4.4: Μετρήσεις μικροσκληρότητας κατά Vickers σε επικαλύψεις Zn

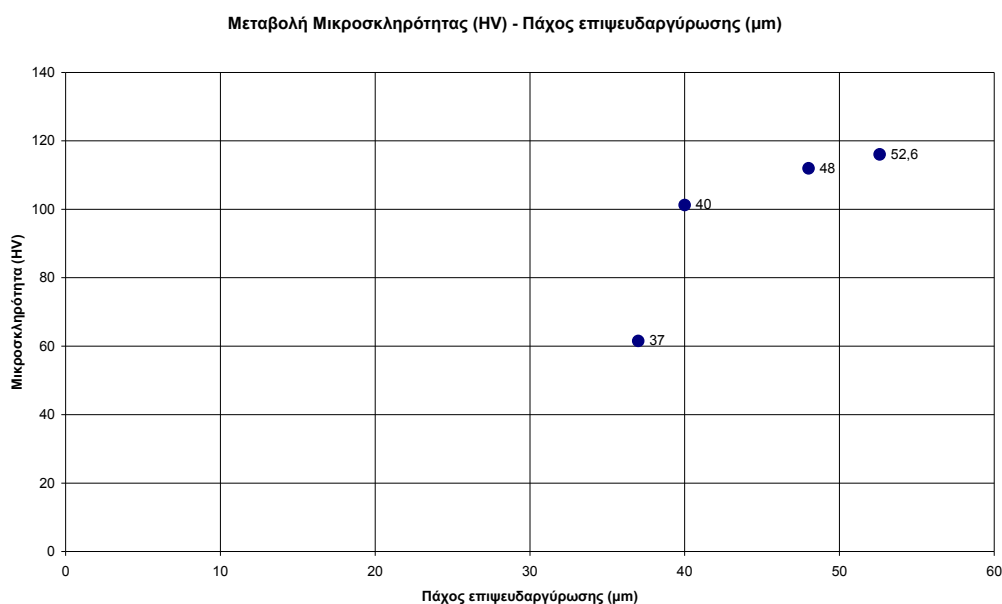
Για τον ορθότερο χαρακτηρισμό του υποστρώματος πραγματοποιήθηκαν μία σειρά μετρήσεων της μικροσκληρότητας όλων των δοκιμών κρούσης. Στον Πίνακα 4.5 που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών.

Η τιμή της μικροσκληρότητας στις επικαλύψεις ψευδαργύρου φαίνεται να αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος των επικαλύψεων (Σχήμα 4.14).

	<i>Κωδικός Δοκιμίου</i>				
<i>A/A</i> <i>Μετρήσεων</i>	KA	KB	KSB2	KSL1	KSL2
1	210,5	199,2	206,9	200,3	195,0
2	211,8	199,5	207,8	197,2	191,7
3	209,2	195,5	206,6	200,8	199,5
4	210,5	196,1	206,6	197,2	201,6
5	210,0	195,2	207,5	197,1	195,2
M.O.	210,4	197,1	207,08	198,52	196,6

Πίνακας 4.5: Μετρήσεις Μικροσκληρότητας δοκιμίων κρούσης (σε τομή υποστρώματος St37) κατά Vickers (HV) – (Φορτίο δοκιμής 300ρ, χρόνος επιβολής φορτίου 10sec)

Παρατηρούμε ότι τα δοκίμια KB και KSL2 φαίνονται να έχουν μια διαφοροποίηση στην τιμή της σκληρότητας του υποστρώματος σε σχέση με τα υπόλοιπα. Παρουσιάζουν ελαφρά μικρότερες τιμές. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της δοκιμής σε κρούση στην οποία η αντοχή το δύο αυτών δοκιμίων είναι κατά πολύ μικρότερη από τα υπόλοιπα.



Σχήμα 4.14: Μεταβολή μικροσκληρότητας (HV) επικαλύψεων Zn συναρτήσει του πάχους απόθεσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα συμπεράσματα των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης. Θα αξιολογηθούν και θα συνεκτιμηθούν τα αποτελέσματα της μορφολογίας των επικαλύψεων, οι μηχανικές τους ιδιότητες ανάλογα με το πάχος των επικαλύψεων και τον τρόπο απόθεσης τους.

5.2 Μελέτη δομής και Μορφολογίας επιφανειών

Με τη χρήση οπτικής μικροσκοπίας μελετήθηκε η δομή και η μορφολογία τόσο των ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων ψευδαργύρου αλλά τόσο και για το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε (St37).

Τα δοκίμια που μελετήθηκαν ήταν αυτά της κρούσης εξ' αιτίας του σχήματος τους. Ελήφθησαν φωτογραφίες από τις κάθετες τομές τους, αφού πρώτα έγινε η κατάλληλη μορφοποίηση και κατεργασία των δοκιμίων. Εξετάστηκε αρχικά η μορφολογία του υποστρώματος αφού πρώτα έγινε προσβολή των επιφανειών με κατάλληλο αντιδραστήριο ώστε να αποκαλυφθεί η μικροδομή του. Από τα μεταλλογραφήματα που έγιναν σε όλα τα δοκίμια κρούσης φαίνεται ότι το υπόστρωμα εμφανίζεται να έχει χαρακτηριστική δομή St37. Αποτελείται από Προευτηκτοειδής Φερρίτης με ελάχιστο περλίτη (Εικόνες 4.3 – 4.7, Κεφάλαιο 4).

Επίσης από την οπτική μελέτη των επιψευδαργυρωμένων επιφανειών (κάθετες τομές) των δοκιμίων κρούσης, διαπιστώθηκε η ομοιόμορφη απόθεση του ψευδαργύρου στις επιφάνειες. Οι μετρήσεις του πάχους των επικαλύψεων ψευδαργύρου, που έγιναν με την βοήθεια εξειδικευμένου προγράμματος του μεταλλογραφικού μικροσκοπίου, έδειξαν ότι αυτό μεταβάλλεται ανάλογα με το χρόνο απόθεσης του ψευδαργύρου στις επιφάνειες των δοκιμίων.

Η ορθότητα των αποτελεσμάτων της μέτρησης πάχους επαληθεύτηκαν και από τις μετρήσεις που έγιναν με τη χρήση της μαγνητικής φορητής συσκευής μέτρησης πάχους.

Υπολογίστηκε από το 2^ο νόμο του Faraday ότι χρειάζεται χρόνος απόθεσης 40 λεπτά για να επιτύχουμε πάχος επιψευδαργύρωσης 45μm (τιμή που καλύπτει τις ελάχιστες απαιτήσεις πάχους επιψευδαργύρωσης, της Τεχνικής Προδιαγραφής της Δ.Ε.Η. ΧΚ 11.01/11.11.87 – GR182 Ηλεκτρολυτική Επιψευδαργύρωση Αντικειμένων από Σίδηρο ή Χάλυβα).

Οι χρόνοι απόθεσης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή των δοκιμίων κρούσης και εφελκυσμού ήταν από 30 μέχρι 45min δίνοντας επικαλύψεις από 24μm μέχρι 62μm επιβεβαιώνοντας και πειραματικά το νόμο του Faraday.

Εκτός από διαφορετικούς χρόνους απόθεσης εφαρμόστηκαν και διαφορετικές τεχνικές επιψευδαργύρωσης στα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης. Πραγματοποιήθηκαν επιψευδαργύρωσεις στο εργαστήριο με χρήση μπάρας (rack plating) και σε συνθήκες βιομηχανίας στις εγκαταστάσεις της εταιρείας ΣΤΑΛΚΟ ΑΒΕ. Εκεί παρασκευάστηκαν επιμεταλλωμένα δοκίμια με χρήση της τεχνικής με κινούμενη μπάρα (rack plating) αλλά και με την τεχνική του περιστρεφόμενου τυμπάνου (barrel plating).

Στα δοκίμια εφελκυσμού ESB3 και ESB4 στα οποία πραγματοποιήθηκε επιψευδαργύρωση με χρήση βιομηχανικής μεθόδου (barrel) και χρόνο απόθεσης 45min, τα πάχη επιψευδαργύρωσης που μετρήθηκαν με τη χρήση της φορητής μαγνητικής συσκευής ήταν περίπου 55μm. Από μακροσκοπική παρατήρηση φάνηκε ότι η ποιότητα της επιφάνειας δεν είναι καλή. Τα δοκίμια παρουσίασαν «ξεφλούδισμα» σε πολλές περιοχές της επιφάνειας τους (Εικόνα 4.2, Κεφάλαιο 4). Την ύπαρξη της «κακής» αυτής πρόσφυσης ενισχύουν και τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών (δοκιμή εφελκυσμού).

Αντιμετωπίστηκε μεγάλη δυσκολία στον ακριβή έλεγχο των συνθηκών επιψευδαργύρωσης στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις τόσο για την παρασκευή επικαλύψεων στα δοκίμια κρούσης όσο και στου εφελκυσμού. Δεν ήταν δυνατός ο ακριβής έλεγχος της έντασης του ρεύματος λόγω του μικρού μεγέθους και του μικρού αριθμού των δοκιμίων σε συνδυασμό με το μεγάλο μέγεθος των δεξαμενών επιμετάλλωσης του εργοστασίου. Για να επιτευχθεί μία ικανοποιητική επιφάνεια επιμετάλλωσης πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές και έγινε η επιμετάλλωση των δοκιμίων ταυτόχρονα με άλλα μεγαλύτερα αντικείμενα στο ίδιο μπάνιο ώστε να ρυθμίσουμε την ένταση του ρεύματος. Το ίδιο συνέβη και με στην εφαρμογή της

μεθόδου του περιστρεφόμενου τυμπάνου. Τα προς επιμετάλλωση δοκίμια τοποθετήθηκαν στο τύμπανο μαζί με κοχλίες παρόμοιων διαστάσεων.

5.3 Μηχανικών Ιδιοτήτων

Δοκιμή εφελκυσμού

Πραγματοποιήθηκε δοκιμή εφελκυσμού αρχικά σε 4 χαλύβδινα δοκίμια που δεν είχαν υποστεί ηλεκτρολυτική επιψευδαργύρωση και τα οποία παρουσίασαν μεγάλη ομοιομορφία ως προς την συμπεριφορά τους σε εφελκυσμό γεγονός που επιβεβαιώνεται από τις καμπύλες φορτίου (F_m) – επιμήκυνσης (Δl) και τάσης (σ) – παραμόρφωσης.

Υπολογίστηκε ότι η μέση τιμή της αντοχής σε εφελκυσμό (R_m) των δοκιμίων που δεν έχουν επικάλυψη ψευδαργύρου είναι 567,9MPa και η μέση τιμή του φορτίου θραύσης (F_{mfr}) = 28,70KN.

Επίσης υπολογίστηκε η επιμήκυνση θραύσεως (ολκιμότητα) για τα δοκίμια αυτά από 15,97% έως και 18,93%, τιμές που προσεγγίζουν το ποσοστό ολκιμότητας που ενδεικτικά δίνεται στην βιβλιογραφία (15 – 18 %) για το υλικό St37. Οι τιμές της αντοχής σε εφελκυσμό των δοκιμίων αυτών φαίνεται να είναι λίγο μεγαλύτερες από αυτές που αναφέρονται στην βιβλιογραφία για το υλικό St37 (360-510MPa).

Οι επιφάνειες θραύσης των δοκιμίων No2, No3, No5 και No6 παρουσίασαν όλκιμη θραύση (Εικόνα 4.11, 4.12 και 4.13, Κεφάλαιο 4). Η χαρακτηριστική μορφή «κώνου – κρατήρα» είναι εμφανής στην περιοχή θραύσης (χαρακτηριστικό της πλαστικής παραμόρφωσης η οποία προηγείται της θραύσης σε όλκιμα υλικά), ενώ διαπιστώθηκε και η παρουσία της στένωσης της διατομής (λαιμός) επίσης χαρακτηριστικό της πλαστικής παραμόρφωσης.

Ελέγχθηκαν ακόμα 9 δοκίμια επιψευδαργυρωμένα με διαφορετικές μεθόδους και διαφορετικά πάχη.

Παρατηρήθηκε σημαντική ομοιότητα της μηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμίων με ίδιο πάχος επιψευδαργύρωσης.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων (Πίνακας 4.2, Κεφάλαιο 4) παρατηρήθηκε ότι η αντοχή σε εφελκυσμό των επιψευδαργυρωμένων δοκιμίων υφίσταται μία μικρή μείωση σε σχέση με αυτή των χαλύβδινων δοκιμίων τα οποία δεν έχουν επιψευδαργυρωθεί.

Επίσης διαπιστώθηκε ότι η αντοχή σε εφελκυσμό των επιψευδαργυρωμένων δοκιμίων εμφανίζει μία πτωτική τάση όσο το πάχος επιψευδαργύρωσης αυξάνει. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται εντονότερο στα δοκίμια που επιψευδαργυρώθηκαν με τη μέθοδο του περιστρεφόμενου τυμπάνου.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω δεν παρατηρείται καμία διαφορά στις τιμές της επιμήκυνσης θραύσεως (%) (ολκιμότητα) των δοκιμίων με επικάλυψη ψευδαργύρου. Το ποσοστό ολκιμότητας παραμένει περίπου στο 18% για όλα τα δοκίμια.

Ένα ακόμα στοιχείο που προκύπτει από τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού στα επιψευδαργυρωμένα δοκίμια με ίδια πάχη επικάλυψης, είναι ότι παρουσίασαν σημαντική ομοιομορφία ως προς την εφελκυστική τους συμπεριφορά έως την θραύση τους.

Τελικά από τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού προκύπτει ότι όσο αυξάνουμε το πάχος της απόθεσης ψευδαργύρου στην επιφάνεια των δοκιμίων έχουμε σαν αποτέλεσμα μία μικρή μείωση της αντοχής τους σε εφελκυσμό χωρίς όμως να παρατηρείται σημαντική μεταβολή στις τιμές της ολκιμότητας.

Δοκιμή κρούσης

Σε διάταξη Charpy πραγματοποιήθηκε έλεγχος της αντοχής σε δυσθραυστότητα. Δοκιμάστηκαν 6 δοκίμια επιψευδαργυρωμένα με διαφορετικές μεθόδους και 2 από καθαρό χάλυβα χωρίς επικάλυψη.

Μεγαλύτερες τιμές απορροφημένης ενέργειας εμφάνισαν τα δοκίμια τα οποία δεν είχαν επικάλυψη ψευδαργύρου. Παρατηρήθηκε μία μικρή μείωση της ενέργειας αυτής όσο αυξάνει το πάχος της επιμετάλλωσης (από 3J μέχρι και 10J).

Αυτό συμβαίνει γιατί ο ψευδάργυρος είναι σημαντικά μαλακότερος από τον χάλυβα. Φαίνεται ότι η επιφάνεια του επιψευδαργυρωμένου χάλυβα να αποκτά διαφορετική μηχανική συμπεριφορά (υποβαθμισμένη) από αυτή του καθαρού χάλυβα.

Μετά τη δοκιμή κρούσης εξετάστηκαν οι επιφάνειες θραύσης των δοκιμίων και διαπιστώθηκε ότι πρόκειται για όλκιμες θραύσεις. Δεν υπήρχε πλήρης διαχωρισμός των δοκιμίων σε δύο τμήματα, εκτός το δοκίμιο KB (το οποίο έχει παρασκευαστεί με τις ίδιες συνθήκες με το δοκίμιο KA) και επιπλέον παρουσιάζει σημαντικά μειωμένη αντοχή σε κρούση από τα υπόλοιπα δοκίμια (Πίνακας 4.3, Κεφάλαιο 4).

Μέτρηση Μικροσκληρότητας

Πραγματοποιήθηκαν σε κάθε δείγμα 15 μετρήσεις σε διάφορες περιοχές της επιφάνειας του και σε όλες τις πλευρές και υπολογίστηκε η μέση τιμή τους ώστε να έχουμε μεγαλύτερη αξιοπιστία στο αποτέλεσμα.

Η τιμή της μικροσκληρότητας στις επικαλύψεις ψευδαργύρου αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος των επικαλύψεων (Σχήμα 4.14, Κεφάλαιο4).

Επίσης μετρήσεις μικροσκληρότητας έγιναν και στο υπόστρωμα για τον ορθότερο χαρακτηρισμό του. Στα δοκίμια KB και KSL2 παρατηρήθηκε να έχουν μια διαφοροποίηση στην τιμή της σκληρότητας του υποστρώματος σε σχέση με τα υπόλοιπα. Παρουσιάζουν ελαφρά μικρότερες τιμές. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της δοκιμής σε κρούση στην οποία η αντοχή το δύο αυτών δοκιμίων είναι κατά πολύ μικρότερη από τα υπόλοιπα.

5.4 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω έχουμε ότι η αύξηση του πάχους της επιψευδαργύρωσης στα χαλύβδινα δοκίμια είχε σαν αποτέλεσμα την μικρή μείωση της αντοχής τους σε εφελκυσμό και την μικρή μείωση της απορρόφησης ενέργειας. Παρατηρούμε δηλαδή μία πολύ μικρή υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

Στα διάφορα χαλύβδινα εξαρτήματα ηλεκτρομηχανολογικών εφαρμογών που απαιτείται η εφαρμογή της ηλεκτρολυτικής επιψευδαργύρωσης ως μέσο προστασίας από τη διάβρωση, οι μηχανικές τους ιδιότητες υποβαθμίζονται σε βαθμό που δεν μπορούν να επηρεάσουν την ομαλή λειτουργία τους ακόμα και όταν το πάχος της επιψευδαργύρωσης είναι πάνω από το προδιαγραφόμενο. Η απουσία της προστασίας αυτής από τη διάβρωση θα έχει μεγαλύτερη επίπτωση στην υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων από την υποβάθμιση που προκαλεί η ύπαρξη του προστατευτικού στρώματος ψευδαργύρου.

5.5 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκαν οι μηχανικές ιδιότητες χαλύβδινων δοκιμίων εφελκυσμού και κρούσης τα οποία είχαν επιψευδαργυρωθεί σύμφωνα με την Τεχνική

Προδιαγραφή της Δ.Ε.Η. Χ.Κ. 11.01/11.11.87 – GR182 Ηλεκτρολυτική Επιψευδαργύρωση Αντικειμένων από Σίδηρο ή Χάλυβα.

Μία μελλοντική πρόταση έρευνας θα μπορούσε να περιλαμβάνει δοκιμές σχετικά με την διαβρωτική προστασία που παρέχουν οι ηλεκτρολυτικές αποθέσεις ψευδαργύρου ανάλογα με το πάχος επιψευδαργύρωσης και με διαφορετικές μεθόδους. Θα ήταν σκόπιμο να γίνουν ηλεκτρικές μετρήσεις γραμμικής πόλωσης Tafel σε επιψευδαργυρωμένα δοκίμια που θα έχουν εκτεθεί σε διάφορα διαβρωτικά περιβάλλοντα ανάλογα με αυτά που συναντάει στην πράξη ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός του δικτύου της Δ.Ε.Η. (στον Ελλαδικό χώρο).

Στην συνέχεια θα μπορούσαν να γίνουν δοκιμές στις μηχανικές τους ιδιότητες.

Τέλος σημαντική θα ήταν η προσφορά στην βιομηχανία, μιας μελέτης σχετικά με την δυνατότητα δημιουργίας μίας σύνθετης ηλεκτρολυτικής επικάλυψης ψευδαργύρου η οποία να μπορεί να βελτιώνει κάποιες από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού ή ακόμα και να επιτυγχάνει την ίδια η και μεγαλύτερη αντιδιαβρωτική προστασία με μικρότερα πάχη επιμετάλλωσης.

Για το σκοπό αυτό είναι αναγκαίο να παρασκευαστεί ένα μεγάλο πλήθος δοκιμίων για κάθε περίπτωση ώστε να επιτευχθεί καλύτερη επανάληψημότητα στις μετρήσεις και να μπορέσουν έτσι να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Γενικής Χημείας του Τομέα Χημικών Επιστημών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και σε συνεργασία με το Κέντρο Δοκιμών Ερευνών & Προτύπων (Κ.Δ.Ε.Π.) της Δ.Ε.Η.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω την μεγάλη μου χαρά και ευχαρίστηση για την πολύ σημαντική συνεργασία που είχα με την Αναπλ. Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών κυρία Κόλλια Κωνσταντίνα και επιβλέπουσα της παρούσας μελέτης.

Θα ήταν σημαντική παράλειψη να μην αναφέρω και να μην ευχαριστήσω την Υποψήφια Διδάκτορα του Εργαστηρίου Γενικής Χημείας κυρία Δαρδαβίλα Μυρτώ, που οι παρεμβάσεις της κατά τη διάρκεια της συγγραφής της παρούσας εργασίας έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο και υπήρξαν πηγές εξαιρετικής βοήθειας και κουράγιου. Τον κύριο Μπατή Γεώργιο, Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στη διάθεση της μηχανής εφελκυσμού WDW-50E, την άριστη συνεργασία μας και την πάντα ειλικρινή διάθεση που τον διακατείχε για βοήθεια.

Επιθυμώ ακόμα να ευχαριστήσω το προσωπικό του Κέντρου Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων της Δ.Ε.Η. και ιδιαίτερα τον κύριο Σαριδάκη Νικόλαο, Διευθυντή του Κ.Δ.Ε.Π για την διάθεση των εργαστηρίων και την παροχή επιστημονικών συμβούλων καθώς επίσης και τον κύριο Αντωνάτο Αλέξανδρο, Τομεάρχη του Τ.Μ.Μ.Δ.Ε. για την άριστη συνεργασία του και στην εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην διάθεση των συσκευών και των μετρητικών οργάνων του τομέα που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη αυτή.

Το προσωπικό του Τ.Μ.Μ.Δ.Ε., κυρίους/ες Λουκά Τάκη, Τζώρτζη Αθανάσιο Σώκο αλέξανδρο για την αμέριστη βοήθεια τους στην παρασκευή και προετοιμασία των δοκιμίων και στη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό της εταιρείας ΣΤΑΛΚΟ ΑΒΕ και ιδιαίτερα τον κύριο Κουκόλη Πέτρο, προϊστάμενο μου και Διευθύνοντα

Σύμβουλο της εταιρείας ΣΤΑΛΚΟ ΑΒΕ, για την βοήθεια και κατανόηση που έδειξε προς το πρόσωπο μου κατά τη διάρκεια της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου Αθηνά και Νικόλαο καθώς επίσης και την σύζυγο μου Κατερίνα για την αμέριστη συμπαράσταση τους καθ' όλη την διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος. Η παρότρυνση, η στήριξη και η υπομονή τους βοήθησε καταλυτικά στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Προστασία από τη διάβρωση γαλβανισμένων πυλώνων της ΔΕΗ με χρήση οργανικών επιστρωμάτων, Διπλωματική εργασία, Μάνη Σοφία, Αθήνα 1997
2. Υλικά, Διάβρωση και Προστασία (Θεωρία και Ασκήσεις), Δ. Κ. Υφαντής, Καθηγητής ΕΜΠ, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2008
3. Ηλεκτρολυτική επιψευδαργύρωση με παλμικό ρεύμα, Διπλωματική εργασία Παναγιώτη Νικολάου, Αθήνα 2002
4. Handbook of Galvanizers Association
5. Προχωρημένες Εργαστηριακές Ασκήσεις, ΔΠΜΣ Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών, Άσκηση 9, Αθήνα Φεβρουάριος 2010
6. Τεχνολογία Επιμεταλλώσεων, Ν. Σ. Σπυρέλλης, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1997
7. [H. Föll, "A brief history of steel".](#)
8. J.-P. Birat, "Alternative ways of making steel: Retrospective and prospective..." *La Revue de Métallurgie – CIT*, année 101 (2006), n° 11, pp. 937–955.
9. [International Iron and Steel Institute, "About steel"](#)
10. Κ. Ρ. Παπαζήσης, Τα ονόματα των χημικών στοιχείων, Σαββάλας, Αθήνα, 2000.
11. F. H Brussels, 1999.
12. D. A. Scott, Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals, Getty Museum, Singapore, 1991.
13. Β. Αργυροπούλου, Α. Μαλέα, Γ. Παναγιάρης, Α. Στασινού, Τεχνολογία Υλικών 1ου Κύκλου και Α' Τάξη 2ου Κύκλου-Συντήρηση Έργων Τέχνης-Αποκατάσταση, ΟΕΔ Αθήνα, 1999.
14. Α. Αναγνωστόπουλος, Σύγχρονη Ανόργα 1990.
15. Λ. Μούσουλος, Μεταλλουργία Μολύβδου - Ψευδαργύρου-Καδμίου, Αθήνα, 1976.
16. Κ. Α. Μανωλκίδης, Στοιχεία Ανοργάνου Χημείας, Γρηγορόπουλος, Α
17. Α. Λεγάκις, Δομικά Υλικά, Ευγενίδιο Ίδρυμα, Αθήνα, 1997.
18. http://www.chem.uoa.gr/quali/quali_C03_Zn.htm
19. CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, London, 1999-2000.

20. Zinc Guide, International Zinc Association, Brussels, 2000.
21. Toxicological Profile for Zinc, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for toxic Substances.
22. DIN 50900.2, Corrosion of Metals – Terms – Electrochemical Terms, 1984.
23. ISO 8044, Corrosion of Metals and Alloys – Vocabulary, 1989.
24. ΕΛΟΤ 1288.01, Διάβρωση μετάλλων – ορολογία – γενικές έννοιες, 1991.
25. M.G. Fontana, Corrosion Engineering, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1986.
26. E. Mattson, Basic Corrosion Technology for Scientists and Engineers, 2nd ed., IOM Communications, London, 1996.
27. Δ. Κ. Υφαντής, Διάβρωση -Προστασία -Οργανικές επικαλύψεις, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1988.
28. J.R. Davis (Ed.) Corrosion: Understanding the Basics, ASM International, New York, 2000.
29. A. Mottana, R. Crespi, G. Liborio, The Macdonald Encyclopedia on Rocks and Minerals, Macdonald & Co, London, 1983.
30. M. F. Ashby, D. R. H. Jones, Engineering Materials I, 3rd ed., Elsevier, London, 2005.
31. I. G. Wright, High Temperature Corrosion, in ASM Handbook, Vol. 13- Corrosion, ASM International, New York, 1996.
32. J.R. Davis (Ed.), Heat-Resistant Materials, ASM International, New York, 1997.
33. F. J. Claus, Engineer's guide to high temperature materials, Addison-Wesley Publishing Co., 1969.
34. G. Y. Lai, High temperature corrosion of engineering alloys, ASM International, New York, 1990.
35. N. Birks, G.H. Meier, Introduction to high temperature oxidation of metals, Edward Arnold, 1983.
36. Ι. Ν. Μαρκόπουλος, Εισαγωγή στην Ηλεκτροχημεία, University Studio Press, Θεσσαλονίκη, 1990.

37. Ν. Α. Κατσάνος, Φυσικοχημεία – Βασική Θεώρηση, Παπαζήσης, Αθήνα, 1993.
38. Ν. Κουλουμπή, Γ. Χρυσουλάκης, Θεωρητική Ηλεκτροχημεία, 2^η έκδ., Συμεών, Αθήνα, 1992.
39. Ι. Γ. Αντωνόπουλος, Μεταλλογνωσία, 2^η έκδ., University Studio Press, Θεσσαλονίκη, 1995.
40. Γ. Χρυσουλάκης, Δ. Παντελής, Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών, Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996.
41. American Galvanizers Association, Hot-Dip Galvanizing for Corrosion Protection of Steel Products, Colorado, 2000.
42. Θ. Σκουλικίδης, Π. Βασιλείου, Διάβρωση και Προστασία Υλικών, 2^η έκδ., Συμεών, Αθήνα, 2000.
43. K. Saito et al., “R&D of Superconducting Cavities at KEK,” Proc. 4th SRF Workshop, 1989.
44. H. Hocheng, P.S. Kao, and Y.F. Chen, Electropolishing of 316L Stainless Steel for Anticorrosion Passivation, 2000.
45. Bhuyan, A.; Gregory, B.; Lei, H.; Seow Yuen Yee; Gianchandani, Y.B., “Pulse and DC Electropolishing of Stainless Steel for Stents and Other Devices” Article Issue , Oct. 30 2005.
46. Vidal R, West AC. Copper electropolishing in concentrated phosphoric acid. J. Electrochem. Soc., 142, 1995, 2682.
47. The principles of engineering materials, Craig R. Barret, William D. Nix, Alan S. Tetelman.
48. An introduction to electrochemical corrosion testing for practicing engineers and scientists, W. Stephen Tait, Ph.D.
49. www.wikipedia.org
50. Π. Νικολόπουλος, «Σημειώσεις - Μηχανικές Ιδιότητες Υλικών», Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πάτρα, 2005.
51. Γ. Τσαμασφύρος «Μηχανική Παραμορφωσίμων σωμάτων Ι», Εκδ. Συμμετρία, Αθήνα 1990.

52. Παπαδημητρίου « Μεταλλοτεχνία », Εκδ. ΕΜΠ.
53. Ε.Γ. Μαρκέτου « Τεχνική Μηχανική τόμος 2 », Εκδ. Συμμετρία, Αθήνα 1998]
54. Α. Τριανταφύλλου, Δομικά Υλικά, 8^η εκδ, Πάτρα, 2008.
55. Α. Κορωναίος, Γ. Πουλάκος, Τεχνικά Υλικά, Τόμος 4, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006.
56. Α. Κορωναίος, Γ. Πουλάκος, Τεχνικά Υλικά, Τόμος 3, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005.
57. J. Verhoeven, Scanning Electron Microscopy, in ASM Handbook, Vol. 10-
Materials Characterization, ASM International, New York, 2000.
58. Π. Ρεντζεπέρης, Εισαγωγή στην κρυσταλλοδομή και τη φυσική των ακτίνων
Χ-Τόμος 1, Γιαχούδης-Γιαπούλης, Θεσσαλονίκη, 1985.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Ι: Μετρήσεις Μικροσκληρότητας επικαλύψεων Zn κατά Vickers (HV) - (Φορτίο δοκιμής 100ρ, χρόνος επιβολής φορτίου 10sec)

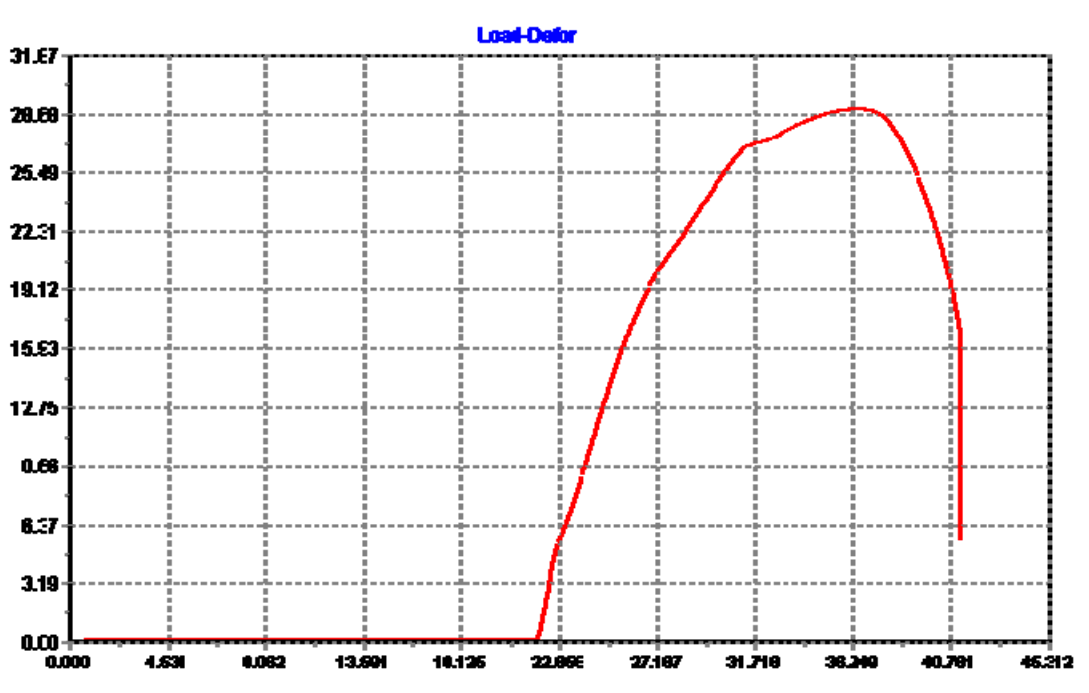
	<i>Κωδικός Δοκιμίου</i>				
<i>A/A Μετρήσεων</i>	KA	KB	KSB2	KSL1	KSL2
1	107,30	110,50	61,90	114,70	81,70
2	120,10	112,10	55,80	103,50	88,30
3	134,20	108,10	61,90	91,30	80,10
4	125,80	120,10	60,70	108,90	89,10
5	110,50	114,70	62,40	100,60	88,20
6	123,90	110,50	61,10	90,70	80,00
7	106,50	108,90	64,70	102,00	88,30
8	108,90	105,00	62,90	93,20	81,50
9	115,60	111,00	60,70	106,50	82,00
10	114,70	109,20	60,80	95,60	81,50
11	124,20	110,10	63,40	102,10	80,30
12	109,60	120,00	63,30	109,30	88,40
13	106,10	120,10	60,30	103,50	89,00
14	114,20	109,20	61,40	95,00	80,10
15	119,30	110,10	61,70	101,80	81,10
M.O.	116,06 ±	111,97	61,53	101,25	83,97

Πίνακας II: Μετρήσεις Πάχους επικάλυψης Zn σε δοκίμια κρούσης (Μαγνητική Μέθοδος)

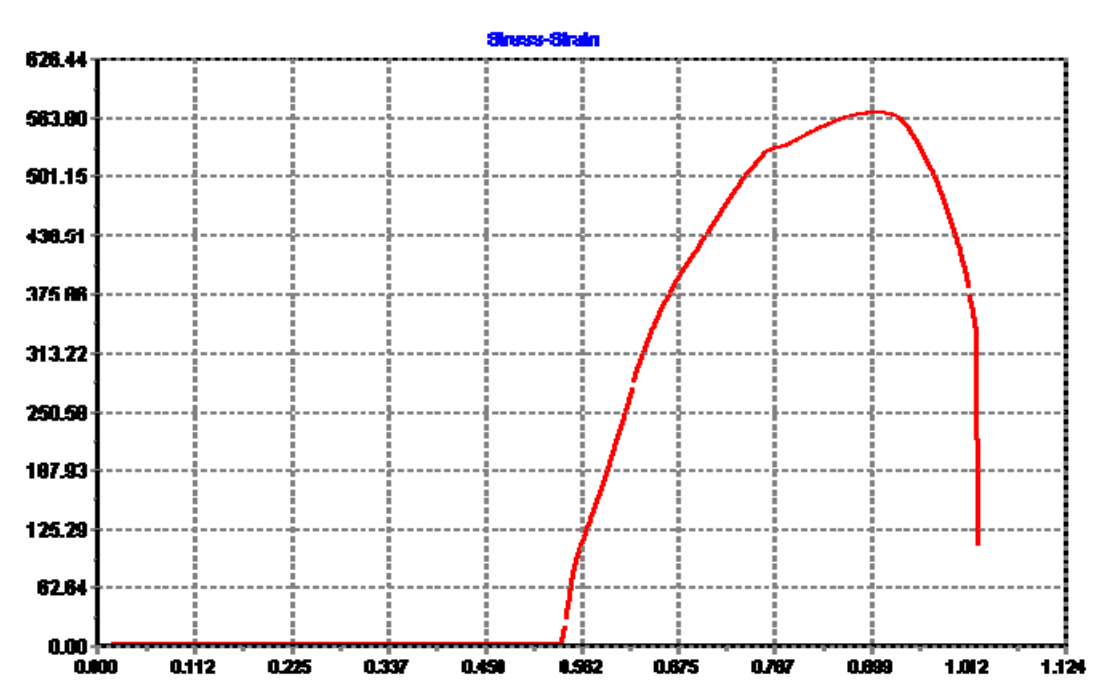
<i>A/A</i> <i>Μετρήσεων</i>	<i>Κωδικός Δοκιμίου</i>					
1	KA	KB	KSB1	KSB2	KSL1	
2	55	46	39	39	41	
3	50	51	36	37	35	
4	53	48	37	36	35	
5	54	51	36	39	38	
6	53	49	38	37	40	
7	53	48	39	40	36	
8	55	48	39	39	42	
9	53	50	35	38	40	
10	55	52	35	35	39	
11	52	51	36	38	39	
12	52	48	35	35	39	
13	52	47	39	38	38	
14	55	52	38	36	42	
15	51	49	37	35	35	
M.O.	53	49	37	37	39	

Πίνακας III: Μετρήσεις Πάχους επικάλυψης Zn σε δοκίμια Εφελκυσμού (Μαγνητική Μέθοδος)

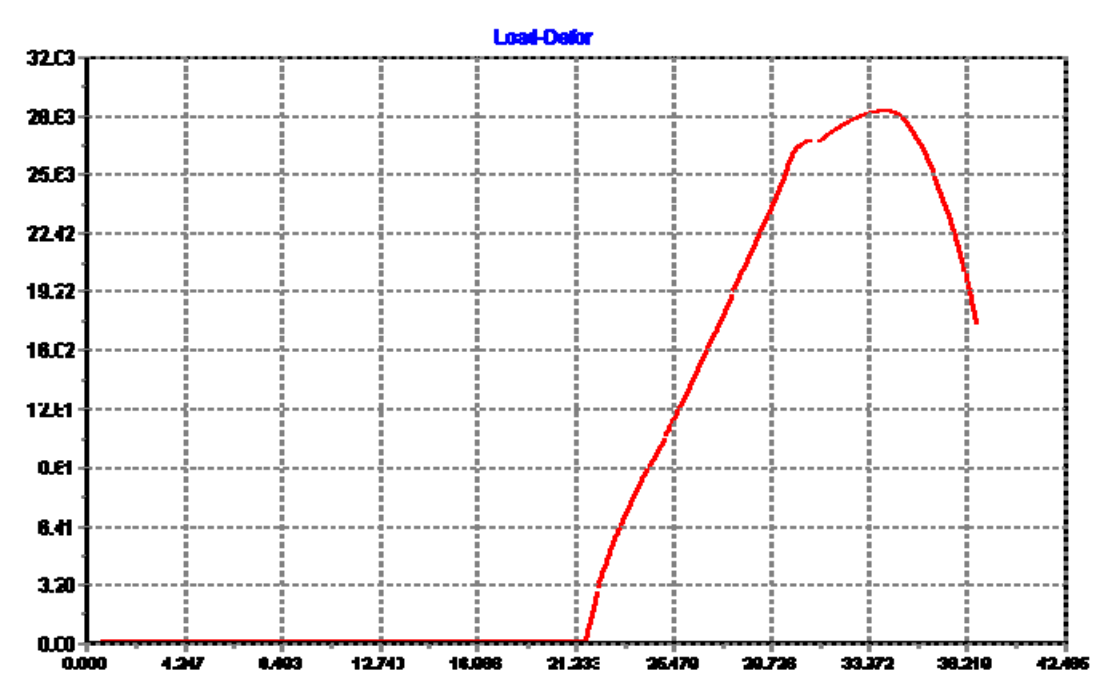
<i>A/A</i> <i>Μετρήσεων</i>	<i>Κωδικός Δοκίμιου</i>					
	EA	EB	ESB1	ESB2	ESL1	ESL2
1	52	50	30	34	25	20
2	53	49	28	29	22	35
3	52	50	35	29	23	25
4	50	48	30	32	30	20
5	48	50	29	30	30	32
6	51	50	29	32	22	23
7	50	49	27	30	21	20
8	50	49	30	26	36	23
9	49	49	24	25	22	30
10	51	48	32	29	25	22
11	53	49	25	29	24	20
12	55	49	26	27	28	19
13	54	50	31	29	25	35
14	52	51	25	28	22	23
15	50	50	30	31	23	20
M.O.	51	49	29	29	25	24



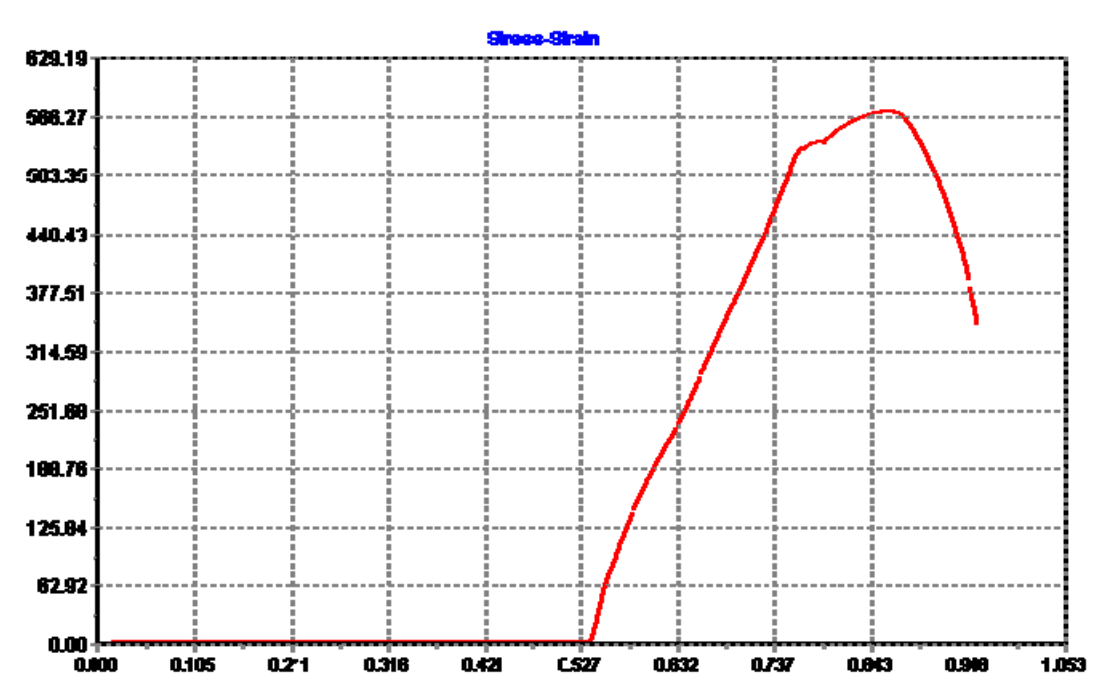
Σχήμα Ι: Διάγραμμα φορτίου (F_m) – επιμήκυνσης (Δl) (δοκίμιο ESB1 πάχος επιψευδαργύρωσης 29 μm)



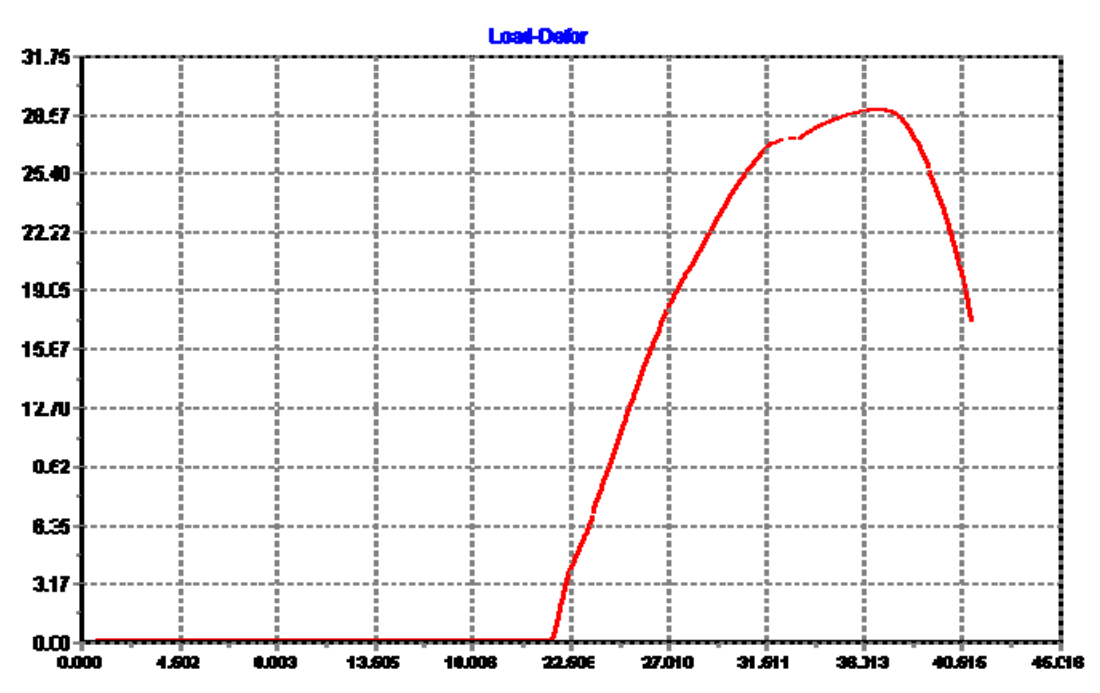
Σχήμα ΙΙ: Διάγραμμα τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ) (δοκίμιο ESB1 πάχος επιψευδαργύρωσης 29 μm)



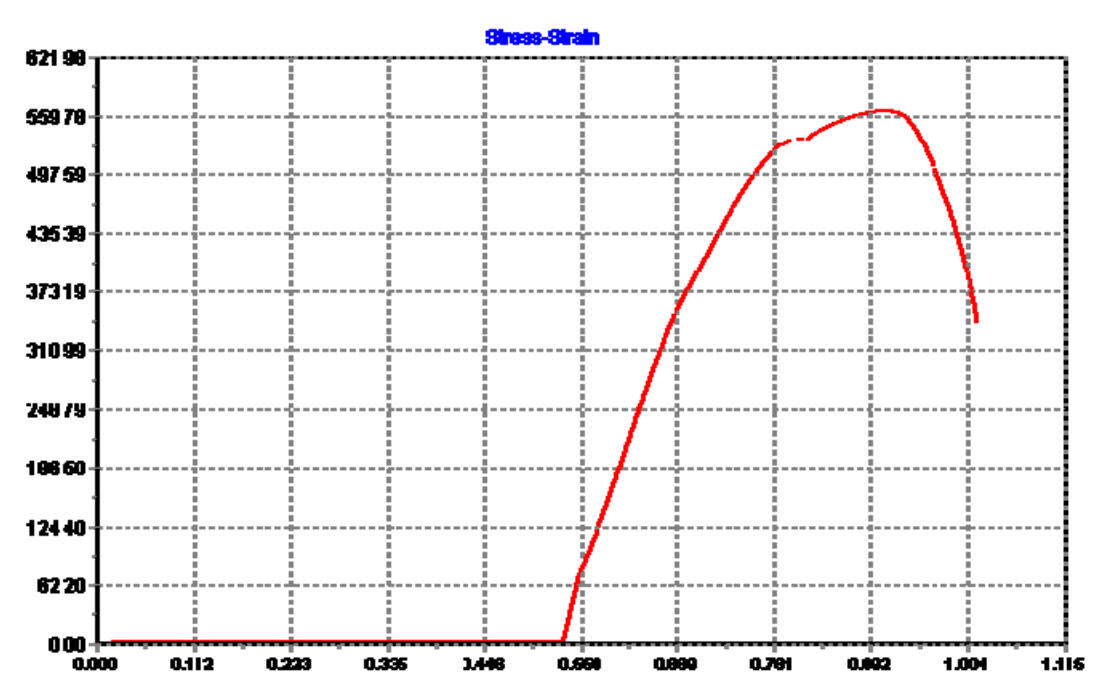
Σχήμα III: Διάγραμμα φορτίου (F_m) – επιμήκυνσης (Δl) (δοκίμιο ESB2 πάχος επιψευδαργύρωσης 29 μ m)



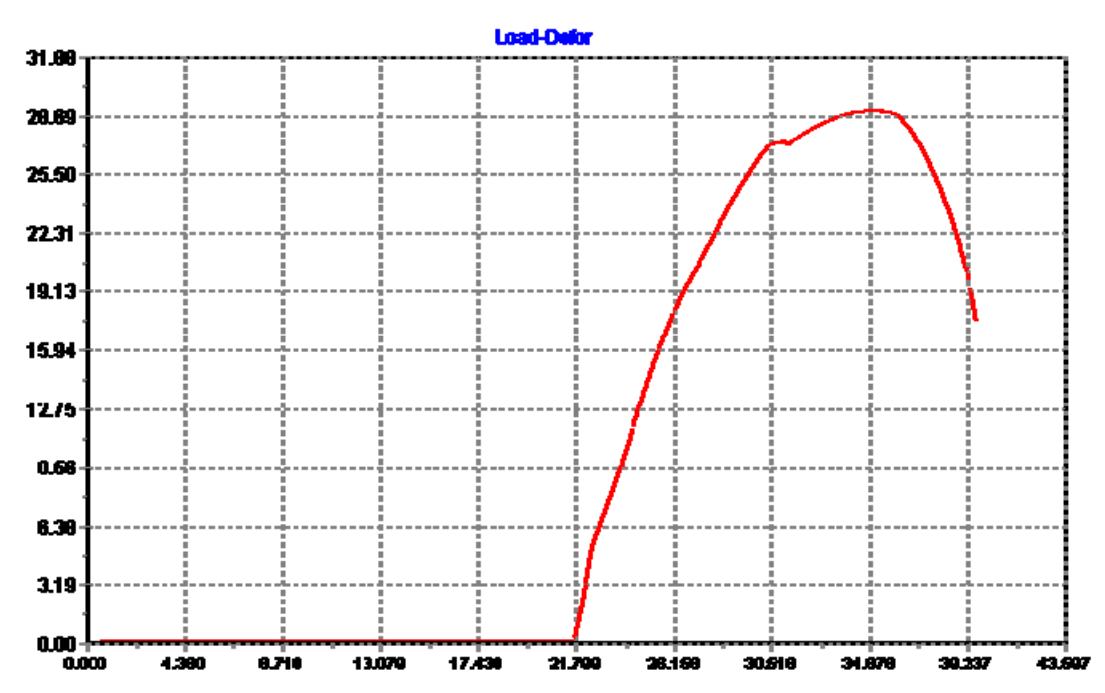
Σχήμα IV: Διάγραμμα τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ) (δοκίμιο ESB2 πάχος επιψευδαργύρωσης 29 μ m)



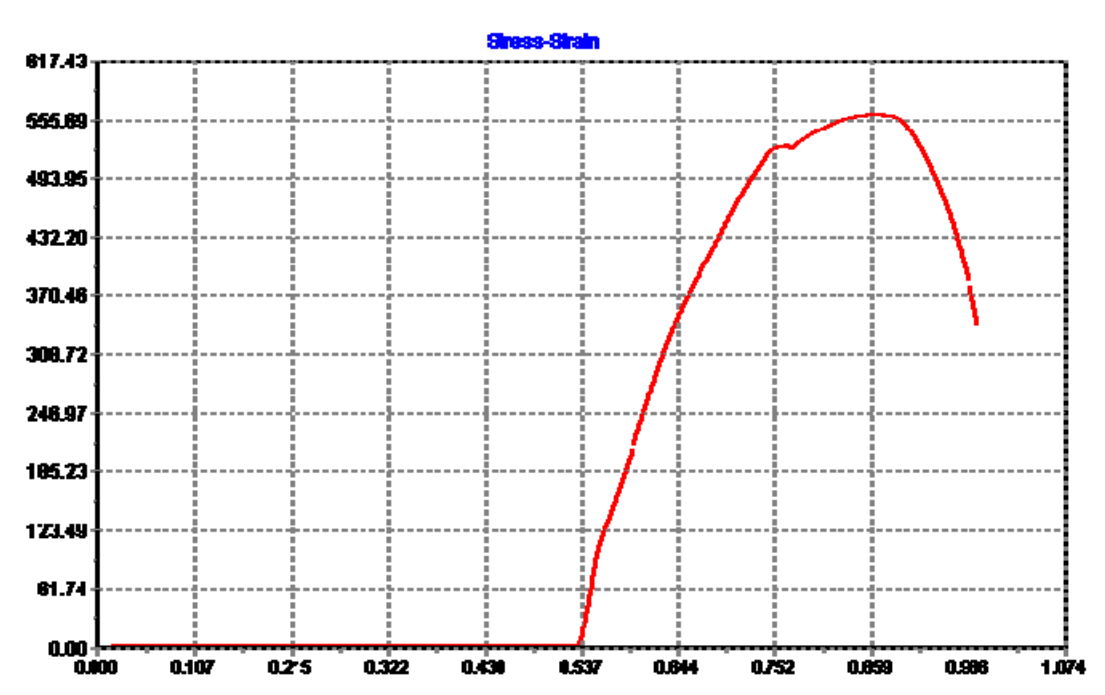
Σχήμα V: Διάγραμμα φορτίου (F_m) – επιμήκυνσης (Δl) (δοκίμιο ESB3 πάχος επιψευδαργύρωσης 20μm)



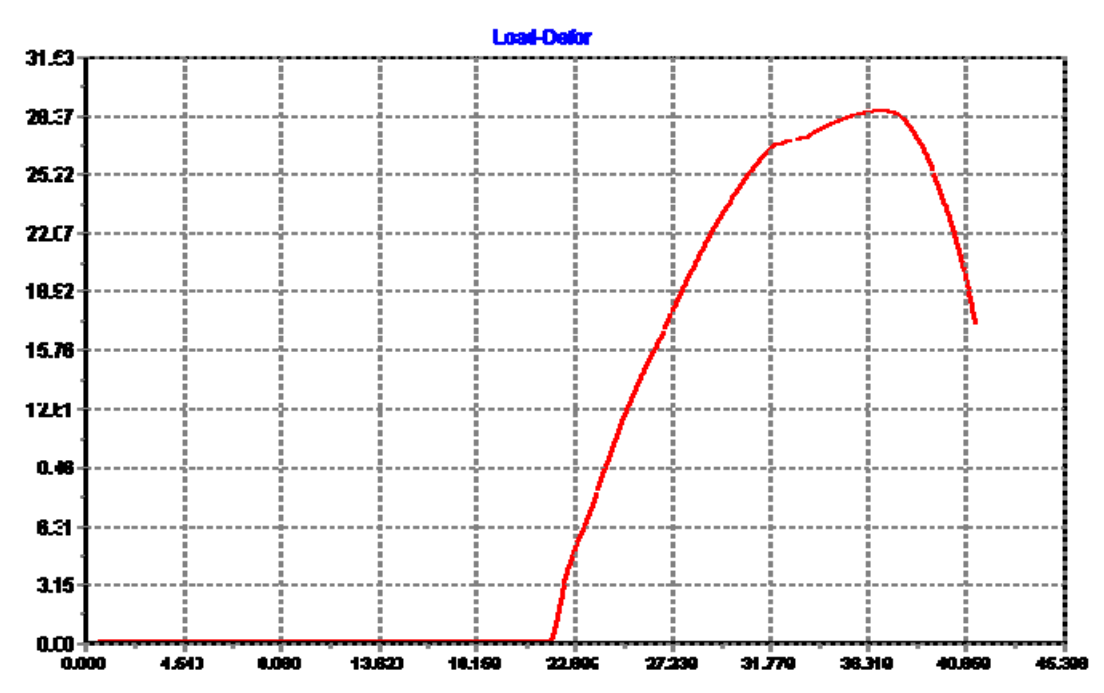
Σχήμα VI: Διάγραμμα τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ε) (δοκίμιο ESB3 πάχος επιψευδαργύρωσης 20μm)



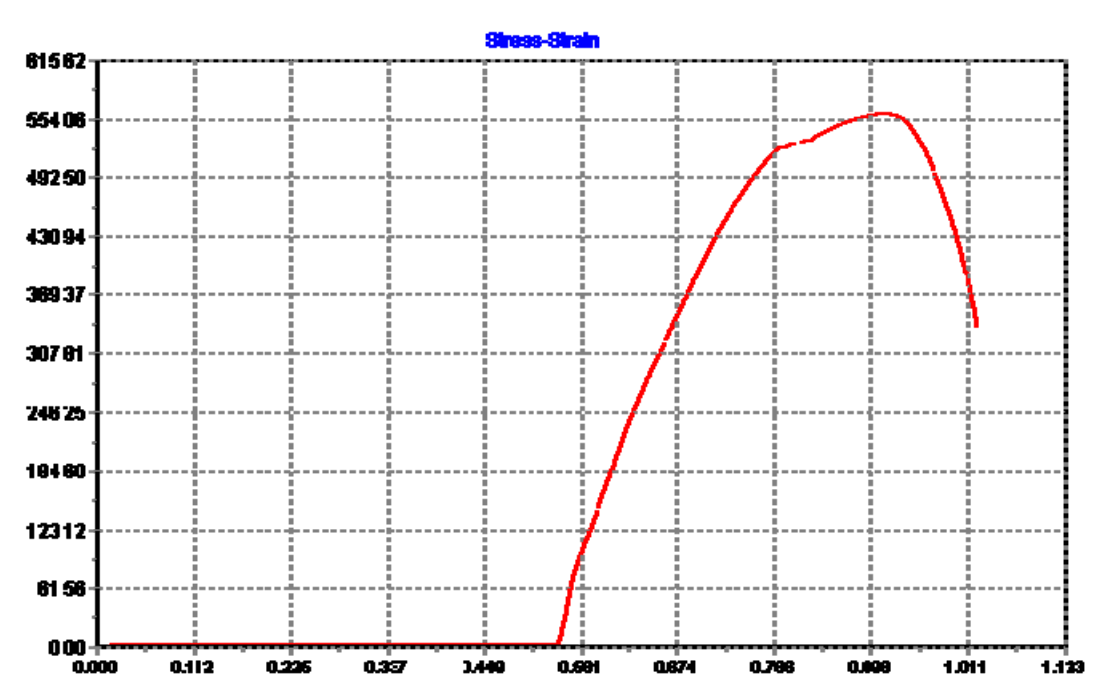
Σχήμα VII: Διάγραμμα φορτίου (F_m) – επιμήκυνσης (Δl) (δοκίμιο ESB4 πάχος επιψευδαργύρωσης 62μm)



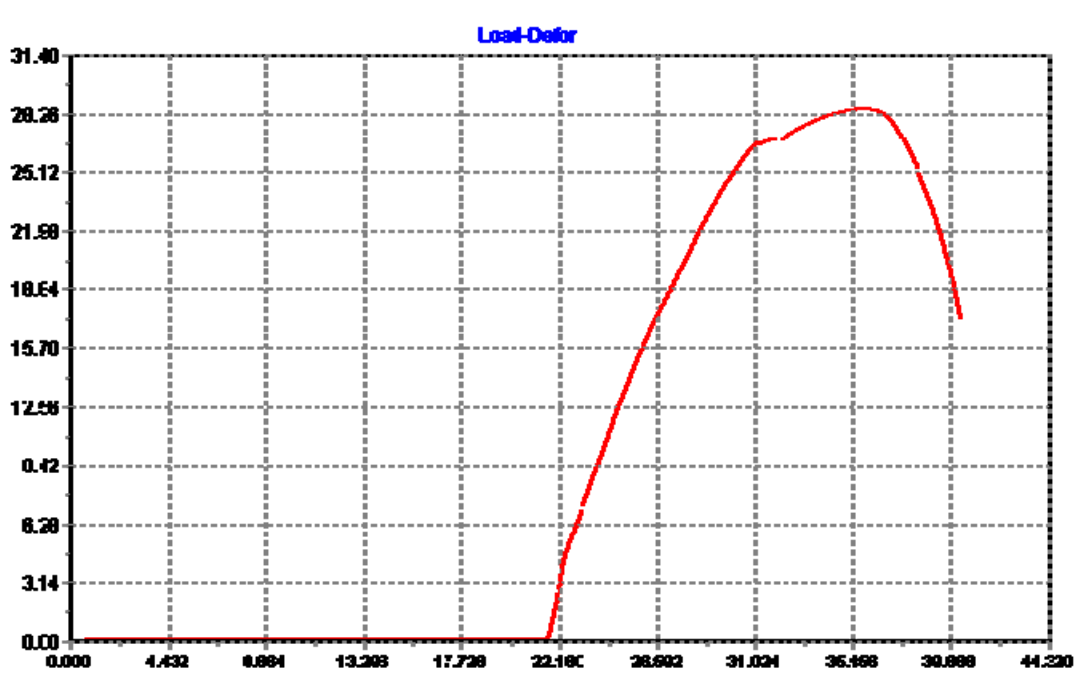
Σχήμα VIII: Διάγραμμα τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ε) (δοκίμιο ESB4 πάχος επιψευδαργύρωσης 62μm)



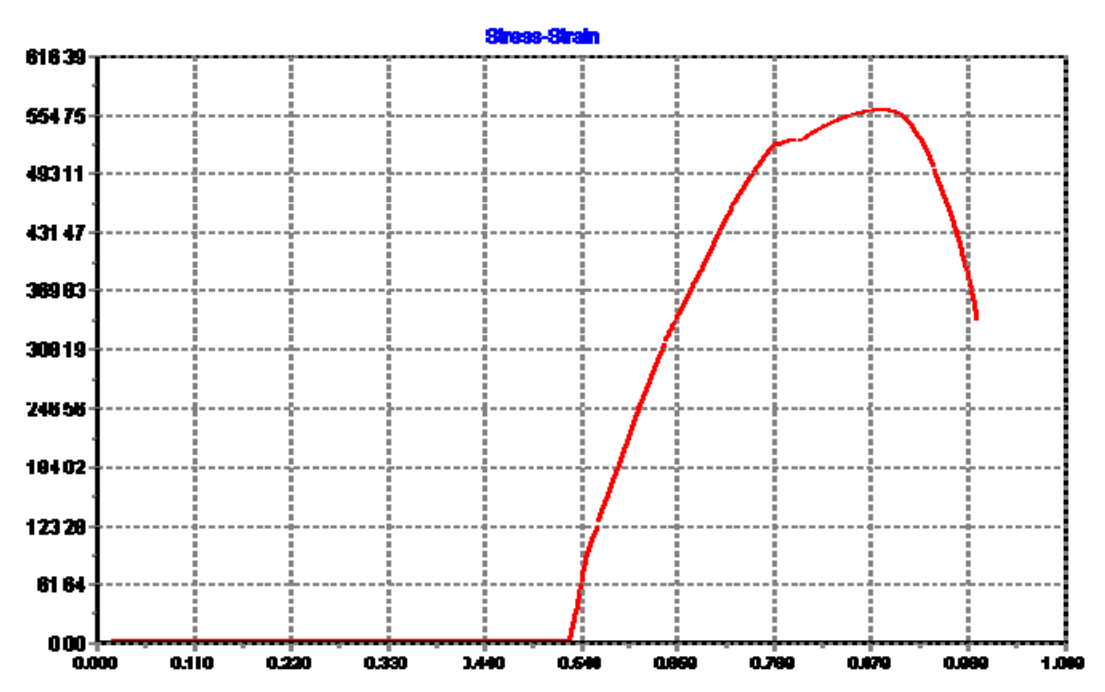
Σχήμα ΙΧ: Διάγραμμα φορτίου (F_m) – επιμήκυνσης (Δl) (δοκίμιο ESL1 πάχος επιψευδαργύρωσης 24 μ m)



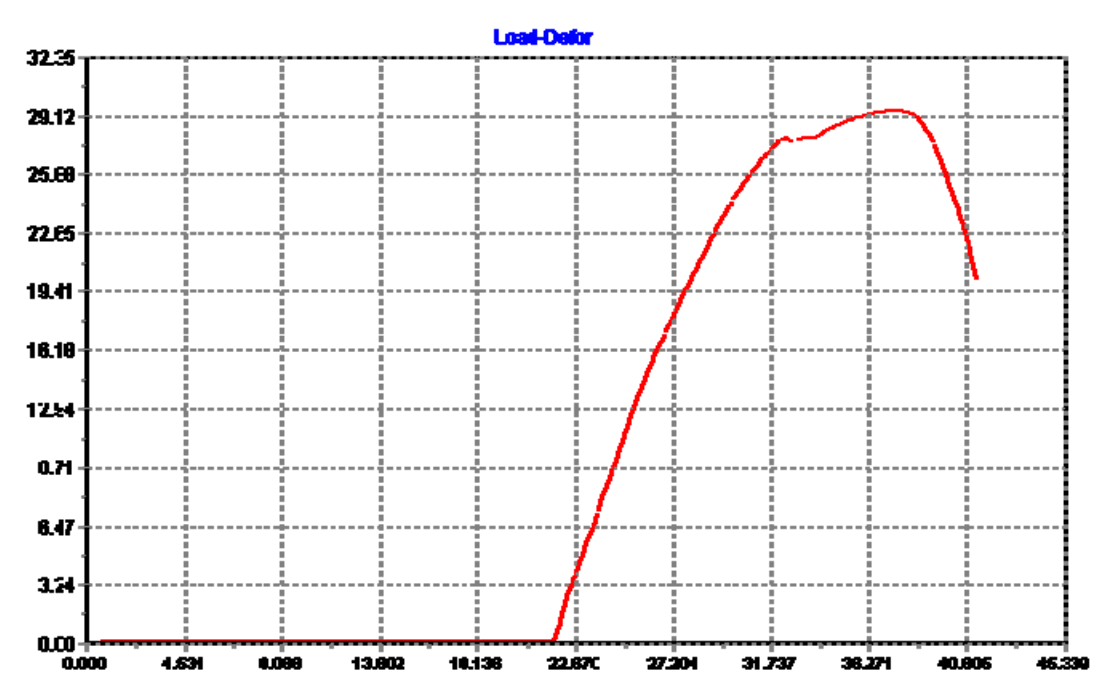
Σχήμα Χ: Διάγραμμα τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ) (δοκίμιο ESL1 πάχος επιψευδαργύρωσης 24 μ m)



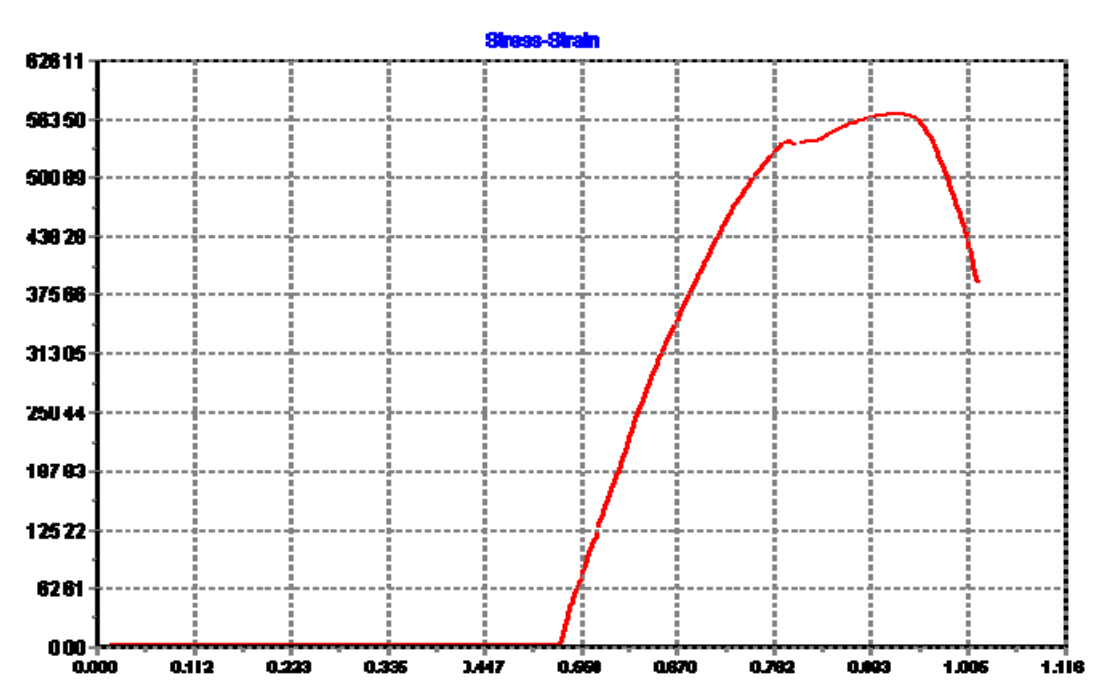
Σχήμα XI: Διάγραμμα φορτίου (F_m) – επιμήκυνσης (Δl) (δοκίμιο ESL2 πάχος επιψευδαργύρωσης 25 μ m)



Σχήμα XII: Διάγραμμα τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ) (δοκίμιο ESL2 πάχος επιψευδαργύρωσης 25 μ m)



Σχήμα XIII: Διάγραμμα φορτίου (F_m) – επιμήκυνσης (Δl) (δοκίμιο ESL3 πάχος επιψευδαργύρωσης 45 μ m)



Σχήμα XVI: Διάγραμμα τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ) (δοκίμιο ESL3 πάχος επιψευδαργύρωσης 45 μ m)

ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ ΔΕΗ

ΧΚ 11-01/11.11.87

(GR-182)

ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗ ΕΠΙΨΕΥΔΑΡΓΥΡΩΣΗ
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΣΙΔΗΡΟ Η ΧΑΛΥΒΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ
2. ΛΕΞΕΙΣ - ΚΛΕΙΔΙΑ
3. ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ
4. ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ - ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ
5. ΟΡΙΣΜΟΙ
6. ΔΟΚΙΜΕΣ
 - 6.1. Απαιτήσεις
 - 6.2. Δειγματοληψία
 - 6.3. Περιγραφή Δοκιμών
7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ - ΣΧΕΔΙΑ

1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

Η ηλεκτρολυτική επιψευδαργύρωση εφαρμόζεται σε αντικείμενα από Σίδηρο ή Χάλυβα, με σκοπό την προστασία τους από τη διάβρωση.
 Με τον όρο "Επιχειρήση", όπως αναφέρεται, εννοείται η ΔΕΗ.

2. ΔΕΞΕΙΣ - ΚΑΙΣΙΔΙΑ

Επιμετάλλωση, Ηλεκτρολυτική, επιψευδαργύρωση, μέταλλο, επιφάνεια.

3. ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

3.1. Η Προδιαγραφή αυτή εφαρμόζεται σε καταργασμένα αντικείμενα από Σίδηρο ή Χάλυβα. Δεν καλύπτει την ηλεκτρολυτική επιψευδαργύρωση σε χαλύβδινα σύρματα ή λαμαρίνες (ακατέργαστες).

4. ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ-ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ

- ISO 2081-1973 (E) Metallic coatings - Electroplated coatings of Zinc on iron or steel.
- ISO 1463-1982 (E) Metallic and oxide coatings.
Measurement of coating thickness - Microscopical method
- ISO 3768 - 1976 (E) Metallic coatings - Neutral Salt Spray Test (NSS)
- ASTM B183-79 : Preparation of low-carbon steel for electroplating
- ASTM B242-54 : Preparation of high - carbon steel for electroplating
- ASTM B254-79 : Preparation of and electroplating on stainless steel
- ASTM B320-60 : Preparation of iron castings for electroplating
- ASTM B322-68 : Cleaning metals prior to electroplating
- ASTM B495-75 : Measurement of coating thicknesses by the magnetic method : Nonmagnetic coatings on magnetic basis metals
- ASTM B504-82 Measurement of thickness of metallic coatings by the coulometric method
- ASTM B568-79 : Coating thickness by X-ray spectrometry
- ASTM B571-79 : Adhesion of metallic coatings
- ASTM B533-78 : Electrodeposited coatings of Zinc on iron and Steel

Σημείωση : Αν υπάρχει αντίφαση, μεταξύ των παραπάνω Κανονισμών και της παρούσας, θα υπερισχύει η τελευταία.

- 2 -

5. ΟΡΙΣΜΟΙ

5.1. Ουσιώδης επιφάνεια :

Είναι το μέρος του αντικειμένου που καλύπτεται από την επιμετάλλωση και για το οποίο η επιμετάλλωση αυτή είναι ουσιώδης για τη λειτουργικότητα και /ή την εμφάνισή του.

Όταν δεν είναι σαφές ποιά επιφάνεια είναι ουσιώδης, αυτή πρέπει να επισημαίνεται στα σχέδια ή να καθορίζεται στο κείμενο της αντίστοιχης Προδιαγραφής του συγκεκριμένου υλικού.

Σημείωση : Όταν οι ουσιώδεις επιφάνειες είναι τέτοιες ώστε να μην είναι εύκολο να ελεγχθεί το προδιαγραφόμενο πάχος επιψευδαργύρωσης, όπως σπειρώματα, τρύπες, βαθειές εγκοπές, βάσεις γωνιών και παρόμοιες επιφάνειες, θα πρέπει να προβλεφθεί, στην αντίστοιχη Προδιαγραφή του αντικειμένου παχύτερη απόθεση στις επιφάνειες εκείνες του υλικού όπου υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα πρόσβασης ή ειδικές τεχνικές, όπως βοηθητικά διπολικά ηλεκτρόδια ή αγώγιμα προστατευτικά καλύμματα κλπ.

5.2. Παρτίδα (για τους σκοπούς της δειγματοληψίας) :

Το σύνολο των ηλεκτρολυτικά επιψευδαργυρωμένων αντικειμένων του ίδιου είδους που έχουν παραχθεί σύμφωνα μ' αυτή την Προδιαγραφή, από τον ίδιο Προμηθευτή στον ίδιο χρόνο ή περίπου στον ίδιο χρόνο κάτω από τις ίδιες ακριβώς συνθήκες.

6. ΔΟΚΙΜΕΣ

6.1. Απαιτήσεις

6.1.1. Απαιτήσεις κατασκευής

6.1.1.1. Η επικάλυψη θα είναι πρακτικά καθαρός Ψευδάργυρος που παράγεται με ηλεκτρολυτική απόθεση.

6.1.1.2. Ελαττώματα της επιφάνειας του μετάλλου της βάσης όπως αμυχές, πορίδες, βελονισμοί (PITS), γκλεισμάτα, ρωγμές, αποτυπώματα ελάστρου ή αποτυπώματα μήτρας, μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την εμφάνιση και την απόδοση των επικαλύψεων, που γίνονται σ' αυτήν, ακόμα κι' αν έχουν τηρηθεί οι καλύτερες πρακτικές ηλεκτρολυτικής επιψευδαργύρωσης.

6.1.1.3. Για τον καθαρισμό του μετάλλου της βάσης, πρέπει να χρησιμοποιούνται οι τεχνικές που αναφέρονται στους κανονισμούς ASTM B 183, B 240, B 254, B 320 και B 322 (1983 ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS).

6.1.1.4. Οι χάλυβες υψηλής αντοχής (μεγαλύτερης από 1500N/MM^2) δεν θα επιψευδαργυρώνονται ηλεκτρολυτικά, εκτός αν προδιαγράφεται διαφορετικά.

6.1.1.5. Όλα τα χάλυβδινα αντικείμενα, που έχουν υποστεί μεγάλη παραμόρφωση "εν ψυχρώ" καθώς και τα χάλυβδινα αντικείμενα που έχουν αντοχή σε εφελκυσμό τουλάχιστον 1000N/MM^2 και έχουν τερνευθεί ή κατεργασθεί μηχανικά ή διαμορφωθεί "εν ψυχρώ" ή ισιωθεί "εν ψυχρώ", θα υποστούν καλή αποτελεσματική ανόπτηση πριν την επιψευδαργύρωση.

Θερμοκρασία ανοπτήσεως μπορεί να ληφθεί η υψηλότερη δυνατή κάτω από το όριο της θερμοκρασίας επαναφοράς και χρόνος παραμονής 30 MIN ή θερμοκρασία $190^{\circ}\text{C}-2$ και χρόνος παραμονής τουλάχιστον μία ώρα.

Όταν οι χάλυβες είναι ενανθρακωμένοι, βαμμένοι με φλόγα ή βαμμένοι επαγωγικά, η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη (π.χ. 170°C) και ο χρόνος παραμονής τουλάχιστον μία ώρα.

- 3 -

6.1.1.6. Για την απαλειφή της ευθραυστότητας λόγω του Υδρογόνου μετά την επιψευδαργύρωση σε χάλυβες υψηλής αντοχής παρατίθεται ο ακόλουθος Πίνακας.

Π Ι Ν Α Κ Α Σ Ι

Αντοχή σε εφελκυσμό N / MM ²	Μέγιστο πάχος διατομής του αντικειμένου MM	Ελάχιστος χρόνος παραμονής στους 190 - 210 ^o C H
1000-1150	μικρότερο από 12	2
	12 έως 25	4
	μεγαλύτερο από 25	8
1150-1400	μικρότερο από 12	4
	12 έως 25	12
	25 έως 40	24 (Έναρξη της θέρμανση μέσα σε 16H από την επιψευδαργύ- ρωση απαιτείται πειραματικός προσδιο- ρισμός.)
	μεγαλύτερο από 40	

6.1.2. Φυσικές απαιτήσεις

6.1.2.1. Πάχος ηλεκτρολυτικής επιψευδαργύρωσης

Το ελάχιστο πάχος ηλεκτρολυτικής επιψευδαργύρωσης σε ουσιαστικές επιφάνειες δίνεται από τον Πίνακα II.

Π Ι Ν Α Κ Α Σ Ι Ι

Συνθήκες χρήσεως	Κωδικός	Σύμβολο	Ελάχιστο Πάχος (μm)
Πολύ δριμεία έκθεση	4	Fe/Zn 40	40
Δριμεία έκθεση	3	Fe/Zn 25	25
Μέτρια έκθεση	2	Fe/Zn 12	12
Ελαφρά Έκθεση	1	Fe/Zn 5	5

Σημείωση

Οι ανοχές στις διαστάσεις των περιουσιωμένων κοχλιοτομημένων αντικειμένων, όπως περικόχλια, κοχλίες, ξυλοκοχλίες και παρόμοια εξαρτήματα σύσφιξης, δεν επιτρέπουν κανονικά την εφαρμογή πάχους επιψευδαργύρωσης, πολύ μεγαλύτερου από 8 μm.

Αν απαιτείται επικάλυψη μεγαλύτερου πάχους, πρέπει να ληφθεί υπόψη το πάχος της προβλεπόμενης επικάλυψης, στη φάση της κατασκευής των κοχλιοτομημένων τεμαχίων.

. / .

6.1.2.2. Πρόσφυση

Η πρόσφυση της επιψευδαργύρωσης πρέπει να είναι τέτοια, ώστε όταν η επιψευδαργύρωση εξετάζεται σύμφωνα με την παράγραφο 6.3.2, να μη δείξει αποκόλληση από το μέταλλο της βάσης.

6.1.2.3. Στιλπνότητα :

Αν δεν προδιαγράφεται κάτι διαφορετικό, τα αντικείμενα πρέπει να είναι στιλπνά. Αν κριθεί αναγκαίο θα παρασχεθεί στην Επιχείρηση Δείγμα για έλεγχο πριν την έναρξη της παραγωγής σε σειρά.

6.1.2.4. Ποιότητα εργασίας

Η τελική επιφάνεια των επιψευδαργυρωμένων αντικειμένων θα είναι ομοιόμορφη στην εμφάνιση και απαλλαγμένη από ορατά ελαττώματά της επικάλυψης, όπως φουσάλιδες, βελονισμοί, τραχύτητα, κόμποι, καψίματα, ρωγμές, μη επικαλυμμένες επιφάνειες ή άλλα ελαττώματα, που επηρεάζουν την λειτουργία της επιψευδαργύρωσης.

Η επιψευδαργυρωμένη επιφάνεια πρέπει να είναι καθαρή και να μην παρουσιάζει αποχρωματισμένες περιοχές.

Όμως, επιφανειακές κηλίδες ή ελαφρός αποχρωματισμός, που είναι αποτέλεσμα κάποιων εργασιών ξήρανσης ή ανόπτησης, για απαλειφή ευθραυστότητας λόγω του Υδρογόνου, είναι αποδεκτά.

Σε αντικείμενα, όπου χρειάζεται επισήμανση η θέση της θα καθορίζεται από την Επιχείρηση.

Τα αντικείμενα εξετάζονται οπτικά για τη συμφωνία τους, με τις απαιτήσεις αυτής της παραγράφου.

6.2. Δειγματοληψία

Τα δοκίμια θα λαμβάνονται τυχαία από κάθε Παρτίδα, που υπόκειται σε επιθεώρηση.

Ο αριθμός των δοκιμών, καθώς και ο μέγιστος αποδεκτός αριθμός ελαττωματικών, φαίνεται στους πιο κάτω Πίνακες.

Π Ι Ν Α Κ Α Σ Ι Ι Ι
(Για μη καταστροφικές δοκιμές)

Μέγεθος Παρτίδας	Αριθμός Δοκιμών (τεμ.)	Αποδεκτός αριθμ. ελαττωματικών
1 έως 8	Όλα	0
9 έως 90	8	0
91 έως 280	32	1
281 έως 500	50	2
501 έως 1200	80	3
1201 έως 3200	125	5
3201 έως 10.000	200	7
10001 έως 35.000	315	10
πάνω από 35.000	500	14

- 5 -

Π Ι Ν Α Κ Α Σ Ι V
(Για καταστροφικές δοκιμές)

Μέγεθος Παρτίδας (Τεμ.)	Αριθμός Δοκιμών (Τεμ.)	Αποδεκτός αριθμός ελαττωματικών
2 έως 25	2	0
26 έως 1200	13	1
1201 έως 35000	32	2
πάνω από 35000	55	3

Σημείωση

Η δυνατότητα αποδοχής μίας Παρτίδας, που ελέγχεται, καθορίζεται από τον αριθμό των ελαττωματικών τεμαχίων για κάθε δοκιμή ξεχωριστά, δηλαδή, ο αποδεκτός αριθμός ελαττωματικών δεν έχει αθροιστική έννοια.

Αν χρησιμοποιούνται ειδικά δοκίμια, που αντιπροσωπεύουν τα επιψευδαργυρωμένα αντικείμενα, σε κάποια δοκιμή, τα δοκίμια αυτά θα είναι σύμφωνα με τις απαιτήσεις της παραγγελίας της Επιχείρησης, αναφορικά με τη φύση, το μέγεθος, τον αριθμό και τον τρόπο καταργασίας τους.

6.3. Περιγραφή Δοκιμών6.3.1. Πάχος επικάλυψης6.3.1.1. Μέθοδος της μικροσκοπικής εξέτασης τομής

Η μέθοδος δεν χρησιμοποιείται για πάχη μικρότερα από 8μm, αν υπάρχει καταλληλότερη μέθοδος.

Η μέτρηση γίνεται με τη βοήθεια βαθμονομημένου προσοφθάλμιου μικρόμετρου ή με προβολή της εικόνας σε γυάλινη οθόνη (ή και φωτογράφηση) και στη συνέχεια μέτρηση με βαθμονομημένη κλίμακα.

Η μεγαλύτερη αξιοπιστία και ακρίβεια επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση του προσοφθάλμιου μικρόμετρου.

Η όλη διαδικασία της μέτρησης, πρέπει να είναι τέτοια, ώστε το σφάλμα να μην είναι μεγαλύτερο από $\pm 10\%$ ή 1 μm, όποιο είναι μεγαλύτερο.

Η μέθοδος είναι σύμφωνη με τον Κανονισμό ISO 1463-82 (E).

6.3.1.2. Μαγνητική μέθοδος

Χρησιμοποιούνται βαθμονομημένες συσκευές, που βασίζονται στην έλξη μεταξύ ενός μαγνήτη και του μετάλλου της βάσης, όπως αυτή επηρεάζεται από το πάχος της επικάλυψης ή στην αντίσταση που παρουσιάζει η επικάλυψη στη διέλευση της μαγνητικής ροής προς το μέταλλο.

Η όλη διαδικασία της μέτρησης πρέπει να είναι τέτοια, ώστε το σφάλμα να βρίσκεται στα όρια του $\pm 10\%$ της πραγματικής τιμής.

Η μέθοδος είναι σύμφωνη με τον Κανονισμό ASTM B499-75.

6.3.1.3. Κουλομετρική μέθοδος ή μέθοδος της ανοδικής διάλυσης, σύμφωνα με τον Κανονισμό ASTM B 504-82.6.3.1.4. Φασματομετρία ακτίνων X, σύμφωνα με τον Κανονισμό ASTM B565-79.

. / .

- 6 -

6.3.1.5. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες μέθοδοι μέτρησης πάχους, με την προϋπόθεση ότι το σφάλμα τους είναι μικρότερο του $\pm 10\%$.

6.3.2. Δοκιμή Πρόσφυσης

Από τις δοκιμές, που αναφέρονται παρακάτω, ο Επιθεωρητής εκτελεί όσες μπορούν να εκτελεσθούν στο συγκεκριμένο υλικό και όσες κατά την κρίση του είναι αρκετές για να βεβαιώσουν την καλή ποιότητα της πρόσφυσης της επιμετάλλωσης.

6.3.2.1. Δοκιμή πρόσφυσης με τριβή (BURNISHING TEST, ASTM B 571-79)

Επιψευδαργυρωμένη επιφάνεια με εμβαδόν 5 cm^2 περίπου τρίβεται με εργαλείο, το οποίο έχει λεία άκρη, για 15 SEC περίπου. Τέτοιο κατάλληλο εργαλείο, είναι μία ράβδος από χάλυβα, με διάμετρο 6 mm και λείο, ημισφαιρικό άκρο. Η πίεση θα είναι αρκετή, για να τρίβει την επικάλυψη κάθε φορά, αλλά όχι τόσο ισχυρή, ώστε να τη σκάβει. Φυσσαλίδες, ανύψωση ή αποκόλληση δεν επιτρέπεται να εμφανισθούν.

6.3.2.2. Δοκιμή πρόσφυσης με κοίλανση (DRAW TEST, ASTM B 571-79)

Κατάλληλο δοκίμιο διαμέτρου περίπου 60 mm διαμορφώνεται σε σχήμα κύπελλου με χείλη, με διάμετρο 38 mm και βάθος 18 mm, με τη χρήση ομάδας συναρμολογούμενων μητρών, σε μία κοινή τυπωτική πρέσσα. Η διεξόδυση, με την αρσενική μήτρα, μπορεί να συνεχισθεί μέχρι τη θραύση του κυπέλλου. Η πρόσφυση της επιψευδαργύρωσης μπορεί να ελεγχθεί άμεσα ή με συνδυασμό με άλλη δοκιμή. Εάν υπάρχει αποφλοιωση, απολέπιση ή απώλεια επαφής της επιψευδαργύρωσης, η πρόσφυση της είναι ανεπαρκής.

6.3.2.3. Δοκιμή πρόσφυσης με αποφλοιωση (PEEL TEST)

Η Δοκιμή αυτή περιγράφεται στη παραγρ. 11 του ASTM B571-79.

7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ - ΣΧΕΔΙΑ

7.1. Κατάλογος Παραρτημάτων

7.1.1. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Κατάλογος στοιχείων μηχανογράφησης της Προδιαγραφής.

7.1.2. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Διάρκεια ζωής της Επιψευδαργύρωσης.

7.1.3. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

Πληροφορίες για τη μέθοδο ηλεκτρολυτικής Επιψευδαργύρωσης

7.2. Κατάλογος Σχεδίων

Δεν υπάρχουν.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 (7.1.1. της ΧΚ 11.01.)

Κατάλογος στοιχείων μηχανογράφησης της Προδιαγραφής.

1. Κατάλογος των Δοκιμών
 - Δοκιμή πάχους επικάλυψης (5.3.1)
 - Δοκιμή πρόσφυσης (6.3.2)
2. Κωδικός αριθμός των κυριότερων Κανονισμών
 - 2.1. ISO 2081 - 1973 (Ε)
 - 2.2. ASTM B 633 - 78
 - 2.3. ASTM B 571 - 79

ΧΠ/ΑΑ/ φα/4.8.87

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 (7.1.2 της ΧΚ11.01.)

Διάρκεια ζωής της επιψευδαργύρωσης

Η διάρκεια ζωής της επιψευδαργύρωσης, εξαρτάται από το πάχος της και τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Παρακάτω δίνεται ο μέσος όρος μετρήσεων (που έγιναν από Διεθνείς Οργανισμούς) του ρυθμού φθοράς της επιψευδαργύρωσης για καθαρά συγκριτική χρήση.

Π Ι Ν Α Κ Α Σ Ι

<u>Εκθεση σε ατμόσφαιρα</u>	<u>Ρυθμός φθοράς της επιψευδαργύρωσης</u>
Βιομηχανική	5,6 μΜ/έτος
Αστική μη βιομηχανική ή θαλάσσια	1,5 μΜ/έτος
Ημιαστική	1,3 μΜ/έτος
Αγροτική	0,8 μΜ/έτος
Εσωτερικού χώρου	σημαντικά μικρότερος από 0,5 μΜ/έ

ΧΠ/ΑΚ/φα/4/8.87

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 (7.1.3 της ΧΚ.Π.Ο.Ι.)

Πληροφορίες για τη μέθοδο ηλεκτρολυτικής επιψευδαργύρωσης

1. Χρόνος επιψευδαργύρωσης

Οποιοδήποτε προδιαγραφόμενο πάχος ηλεκτρολυτικής επιψευδαργύρωσης μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιητικά, μόνον όταν ελέγχονται η πυκνότητα του ρεύματος και ο χρόνος επιψευδαργύρωσης. Το μέσο πάχος επιψευδαργύρωσης, που απαιτείται για να εξασφαλίζεται το προδιαγραφόμενο ελάχιστο πάχος, εξαρτάται από το σχήμα του τεμαχίου το σχήμα και τη θέση των ανοδικών ηλεκτροδίων και την ικανότητα επικαθήσεως του διαλύματος.

Για να παραχθεί επι παραδείγματι αποτελεσματική επιψευδαργύρωση με ελάχιστο πάχος 25 μm, σε δξίνο ή κυανιούχο λουτρό, απαιτούνται περίπου 1,5 AH ανά DM².

Για να επιτευχθεί μέσο πάχος 38μm (50% περισσότερο από 25 μm), απαιτούνται περίπου 2,25 AH ανά DM².

Όταν επιψευδαργυρώνεται ταυτόχρονα μεγάλος αριθμός τεμαχίων, θα πρέπει να αυξηθεί ο χρόνος επιψευδαργύρωσης, για να εξασφαλισθεί το Προδιαγραφόμενο πάχος, σε τμήματα που τροφοδοτούνται με μικρότερη από τη μέση πυκνότητα ρεύματος. Για περίπλοκα σχήματα θα απαιτούνται μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα

2. Οδηγίες για την επίτευξη συμφωνίας με την Προδιαγραφή

Ζυμιστατά να ακολουθούνται οι παρακάτω οδηγίες :

- 2.1. Να διατηρείται κανονικός έλεγχος όλων των διαλυμάτων, να επιθεωρείται ο εξοπλισμός σε κανονικά χρονικά διαστήματα και να αποδίδεται ιδιαίτερη προσοχή στις ηλεκτρικές επαφές και στην ακρίβεια των οργάνων.
- 2.2. Να διατηρεί ο Προμηθευτής το δικό του τμήμα επιθεώρησης και να εφαρμόζει τις απαιτούμενες από την Προδιαγραφή μεθόδους ελέγχου, ώστε να ανακαλύπτει αμέσως την πηγή των ανωμαλιών. Για εργασίες που συνεχίζονται χωρίς διακοπή για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα, η ποιότητα της Επιψευδαργύρωσης σε κάθε τεμάχιο θα πρέπει να ελέγχεται, τουλάχιστον δύο φορές από κάθε διαδοχικό χειριστή, αφού υπερνικηθούν οι αρχικές δυσκολίες.
- 2.3. Ο Προμηθευτής τηρεί δικό του επίπεδο απαιτήσεων, τουλάχιστον 10% πάνω από το επίπεδο της προδιαγραφής.

Χημική Σύσταση Χαλύβων

Standard	Steel grade	Mass fracture of elements, %											Al max min
		C	Mn	Si	S	P	Mo	V	Cr	Ni	Cu	Ti	
					max								
API 5L PSL 1	B	≤0,28	≤1,2	-	0,030	0,030						0,040	
	X42	≤0,28	≤1,3	-	0,030	0,030						0,040	
	X52	≤0,28	≤1,4	-	0,030	0,030						0,040	
ASTM A106 / ASTM A53	A	≤ 0,22	0,27- 0,90	0,17- 0,39	0,030	0,030	≤ 0,15	0,08	0,40	0,40	0,40		
	B	≤0,27	0,29- 1,06	0,17- 0,40	0,030	0,030	≤ 0,15	0,08	0,40	0,40	0,40		
	C	0,25- 0,32	0,50- 1,06	0,17- 0,41	0,030	0,030	≤ 0,15	0,08	0,40	0,40	0,40		
ASTM A179	K 01200	0,06- 0,18	0,27- 0,63	-	0,035	0,035							
ASTM A192	K 01201	0,06- 0,18	0,27- 0,63	≤0,25	0,035	0,035							
ASTM A210	A-1	max 0,27	max 0,93	min 0,1	0,035	0,035							
	C	max 0,35	0,29- 1,06	min 0,1	0,035	0,035							
ASTM A213	T5	max 0,15	0,3- 0,6	max 0,5	0,025	0,025	0,45- 0,65		4,0- 6,0				
	T11	0,05- 0,15	0,3- 0,6	0,5- 1,0	0,025	0,025	0,44- 0,65		1,0- 1,5				
	T22	0,05- 0,15	0,3- 0,6	max 0,5	0,025	0,025	0,87- 1,13		1,9- 2,6				
ASTM A333	6	max 0,30	0,29- 1,06	min 0,1	0,025	0,025							
ASTM A334	6	max 0,30	0,29- 1,06	min 0,1	0,025	0,025							
DIN 17175	St. 35-8	≤ 0,17	0,40- 0,80	0,15- 0,35	0,025	0,030			0,30	0,30	0,25		
	St. 45-8	≤ 0,21	0,40- 1,20	0,15- 0,35	0,025	0,030			0,30	0,30	0,25		
	13CrMo44	0,10- 0,18	0,40- 0,70	0,10- 0,35	0,035	0,035	0,45- 0,65		0,7- 1,1				

EN 10216-2	P235GH	≤ 0,16	0,40- 1,20	≤0,35	0,025	0,030	≤ 0,08	0,02	0,30	0,30	0,30		0,02
	P265GH	≤ 0,20	0,50- 1,40	≤ 0,40	0,025	0,030	≤ 0,08	0,02	0,30	0,30	0,30		0,02
	16Mo3	0,12- 0,20	0,40- 0,90	≤0,35	0,025	0,030	≤ 0,08	0,02	0,30	0,30	0,30		0,02
	13CrMo4- 5	0,10- 0,18	0,4- 0,70	0,10- 0,35	0,035	0,035	0,45- 0,65	0,7- 1,1					
EN 10216-1	P195TR1	≤ 0,13	≤0,70	≤0,35	0,020	0,025	≤ 0,08	0,02	0,30	0,30	0,30		
	P195TR2	≤ 0,13	≤0,70	≤0,35	0,020	0,025	≤ 0,08	0,02	0,30	0,30	0,30		0,02
	P235TR1	≤ 0,16	0,40- 1,20	≤0,35	0,020	0,025	≤ 0,08	0,02	0,30	0,30	0,30		
	P235TR2	≤ 0,16	0,40- 1,20	≤0,35	0,020	0,025	≤ 0,08	0,02	0,30	0,30	0,30		0,02
	P265TR1	≤ 0,20	0,50- 1,40	≤ 0,40	0,020	0,025	≤ 0,08	0,02	0,30	0,30	0,30		
	P265TR2	≤ 0,20	0,50- 1,40	≤ 0,40	0,020	0,025	≤ 0,08	0,02	0,30	0,30	0,30		0,02
DIN 1629	St. 37-0	0,09- 0,15	0,35- 0,65	0,17- 0,35	0,040	0,040			0,30	0,30	0,30		
	St. 44-0	0,16- 0,21	0,35- 0,65	0,17- 0,35	0,040	0,040			0,30	0,30	0,30		
	St. 52-0	0,17- 0,22	1,30- 1,60	0,35- 0,55	0,040	0,035			0,30	0,30	0,30		0,02
DIN 1630	St. 37-4	0,09- 0,15	0,35- 0,65	0,17- 0,35	0,040	0,040			0,30	0,30	0,30		0,02
	St. 44-4	0,15- 0,2	0,40- 0,65	0,17- 0,35	0,040	0,040			0,30	0,30	0,30		0,02
	St. 52-4	0,17- 0,22	1,30- 1,60	0,35- 0,55	0,040	0,035			0,30	0,30	0,30		0,02
EN 10210-1- 2	S235JRH / St. 37-2	0,09- 0,15	0,35- 0,65	0,17- 0,35	0,040	0,040			0,30	0,30	0,30		
	St. 37-3	0,09- 0,15	0,35- 0,65	0,17- 0,35	0,040	0,040			0,30	0,30	0,30		0,02
	St. 44-2	0,16- 0,21	0,35- 0,65	0,17- 0,35	0,040	0,040			0,30	0,30	0,30		
	S275J2H / St. 44-3	0,15- 0,2	0,35- 0,65	0,17- 0,35	0,040	0,040			0,30	0,30	0,30		0,02
	S355J2H / St. 52-3	0,17- 0,22	1,30- 1,60	0,35- 0,55	0,040	0,040			0,30	0,30	0,30		0,02
DIN 2391	St. 35	≤ 0,17	0,40- 0,80	0,15- 0,35	0,250	0,030			0,30	0,30	0,25		
	St. 45	≤ 0,21	0,40- 1,20	0,15- 0,35	0,025	0,030			0,30	0,30	0,25		

	St. 52	0,17- 0,22	1,30- 1,60	0,35- 0,55	0,040	0,035			0,30	0,30	0,30		0,02
EN	E235	≤0,17	≤1,2	≤0,35	0,025	0,025							
10305-1	E355	0,17- 0,22	1,30- 1,60	0,35- 0,55	0,040	0,035			0,30	0,30	0,30		0,02
UNI 8863	Fe 330	≤0,17	≤0,65	-	0,040	0,040							