



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)**

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

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

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΩΚΟΣ ΚΩΝ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Κ. ΚΟΛΛΙΑ

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούνιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

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

ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΚΑΨΣΙΤΕΡΟΥ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΩΚΟΣ ΚΩΝ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Γ. ΜΠΑΤΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. ΚΟΛΛΙΑ, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούνιος 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

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. κατά το ακαδημαϊκό έτος 2010 - 2011. Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν καθοριστικά στη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας:

- Την επιβλέπουσα, Αναπλ. Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών κυρία Κόλλια Κωνσταντίνα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο σημαντικό και ενδιαφέρον θέμα, που έχει πρακτική εφαρμογή και ιδιαίτερη σημασία τόσο για τη βιομηχανία όσο και για το Δίκτυο Μεταφοράς & Διανομής της Δ.Ε.Η. Η συνεχής επίβλεψη και καθοδήγησή της κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας μου έδωσε όραμα και έναυσμα για περαιτέρω μελέτη. Της είμαι ευγνώμων, για την αμέριστη ηθική και επιστημονική υποστήριξη που μου προσέφερε κατά το διάστημα της συνεργασίας μας.
- Τον κύριο Μανωλάκο Δημήτριο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών για τις συμβουλές του κατά την εκτέλεση του πειραματικού μέρους της παρούσας εργασίας, για την ηθική συμπαράσταση του, την άριστη συνεργασία μας και την πάντα ειλικρινή διάθεση που τον διακατείχε για βοήθεια.
- 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.
- Τον κύριο Σαριδάκη Νικόλαο, Διευθυντή του Κ.Δ.Ε.Π και τον κύριο Αντωνάτο Αλέξανδρο, Τομεάρχη του Τ.Μ.Μ.Δ.Ε., για την ηθική και υλική βοήθεια που μου προσέφεραν, την άριστη συνεργασία μας και την πάντα ειλικρινή διάθεση που τους διακατείχε για βοήθεια. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Φίκα Μιχάλη, Υποτομεάρχη του Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών, για την εμπιστοσύνη και κατανόηση που έδειξε προς το πρόσωπο μου κατά τη διάρκεια της μεταπτυχιακής μου εργασίας.
- Την Υποψήφια Διδάκτορα του Εργαστηρίου Γενικής Χημείας κυρία Δαρδαβίλα Μυρτώ για την πολύτιμη βοήθεια της και τις χρήσιμες συμβουλές που μου έδωσε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής και το εποικοδομητικό κλίμα συνεργασίας που υπήρχε. Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά όλους τους Υποψήφιους Διδάκτορες του Εργαστηρίου Γενικής Χημείας, οι οποίοι με περιέβαλαν με φιλικότητα καθώς και το προσωπικό του Οριζόντιου Εργαστηρίου για τη βοήθεια του στις παρατηρήσεις στο S.E.M.

- Το προσωπικό του Κ.Δ.Ε.Π. και ιδιαίτερα του Τ.Μ.Μ.Δ.Ε., κυρίως/ες Λουκά Τάκη, Τζώρτζη Αθανάσιο, Γκιούσια Γεώργιο, Τουράσογλου Στέλιο, Μπαρδαβίλλια Δώρα, Σκοπελίτη Νίκο και Σταμέλου Βάνα για την αμέριστη βοήθεια τους στην παρασκευή των δοκιμίων και στη διεξαγωγή των πειραμάτων, καθώς και την κυρία Μπούρα Δήμητρα για τη συμπαράσταση της. Επίσης, το προσωπικό του Τ.Η.Δ.Μ., κυρίως Κουραπά Θανάση και Αθανασόπουλο Σόλωνα για τις πολύτιμες πληροφορίες και το υλικό που μου διέθεσαν.
- Τους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Μαίρη, για την ανιδιοτελή αγάπη και αφοσίωση τους, την υποστήριξη τους, την παρότρυνση τους πάντα προς το καλύτερο, για την ευτυχία, την καλλιέργεια και το μέλλον μου, καθώς και την υπομονή τους καθ' όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.
- Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τη σύντροφό μου στη ζωή για την αμέριστη αγάπη και συμπαράσταση της, τη ψυχολογική και συναισθηματική υποστήριξη και την υπομονή της καθ' όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Με εκτίμηση,

Αλέξανδρος Κων. Σώκος
(Αθήνα, Ιούνιος 2011)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	viii
Abstract.....	x
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ - ΕΠΙΜΕΤΑΛΛΩΣΕΙΣ	
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Κατηγορίες Μεταλλικών Επικαλύψεων.....	2
1.3 Μικροκρυσταλλική Δομή των Μεταλλικών Επικαλύψεων.....	3
1.4 Ιδιότητες των Μεταλλικών Επικαλύψεων.....	4
1.5 Ηλεκτροχημικές ή Γαλβανικές Επιμεταλλώσεις.....	5
1.5.1 Εισαγωγή.....	5
1.5.2 Τεχνολογία Ηλεκτροαποθέσεων.....	5
1.5.3 Βασικές Αρχές Ηλεκτρολυτικών Επικαλύψεων.....	7
1.5.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την Ηλεκτρολυτική Επιμετάλλωση.....	9
1.5.4.1 Εφαρμοζόμενη Τάση κατά την Ηλεκτρολυτική Απόθεση.....	9
1.5.4.2 Ηλεκτρολυτικά Λουτρά.....	10
1.5.4.3 Έλεγχος- Συντήρηση Ηλεκτρολυτικών Λουτρών.....	10
1.5.4.4 Σταθεροποίηση του pH των Λουτρών.....	11
1.5.4.5 Πρόσθετα.....	11
1.5.4.6 Ηλεκτρόδια.....	11
1.5.5 Δημιουργία Ηλεκτρικής Διπλοστοιβάδας ‘Helmutz’.....	12
1.5.6 Σχηματισμός Στοιβάδας Διάχυσης ‘Nerst’.....	13
1.5.7 Μηχανισμός Ηλεκτροκρυστάλλωσης	14
1.6 Ηλεκτρολυτική Απόθεση Κασσιτέρου (Sn).....	16
1.6.1 Κασσίτερος (Sn).....	16

1.6.2	Επικασσιτέρωση.....	17
1.7	Κράματα Χαλκού (Cu).....	18
1.7.1	Κράμα Ορείχαλκου (Cu-Zn).....	18
1.7.2	Επίδραση της Μικρογραφικής Δομής στις Γενικές Ιδιότητες των Ορείχαλκων Συναρτήσσει των Φάσεων.....	22
1.7.3	Επίδραση της Μικρογραφικής Δομής στις Γενικές Ιδιότητες των Ορείχαλκων Συναρτήσσει του Μεγέθους των Κόκκων.....	23
1.8	Σύνθετες Ηλεκτρολυτικές Επικαλύψεις Μεταλλικής Μήτρας (MMCs).....	25
1.8.1	Εισαγωγή.....	25
1.8.2	Σύνθετα Υλικά.....	25
1.9	Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών	28
1.9.1	Σύνθετα Υλικά Μεταλλικής Μήτρας	28
1.9.2	Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας.....	29
1.9.3	Σύνθετα Υλικά Κεραμικής Μήτρας.....	30
1.10	Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών με Βάση το Έγκλεισμα.....	30
1.10.1	Σύνθετα Υλικά με Εγκλείσματα Υπό Μορφή Κόκκων.....	31
1.10.2	Σύνθετα Υλικά με Εγκλείσματα Υπό Μορφή Ινών.....	31
1.10.3	Πολυστρωματικά Σύνθετα Υλικά.....	32
1.11	Σύνθετες Ηλεκτρολυτικές Επικαλύψεις Μεταλλικής Μήτρας.....	32
1.12	Επίδραση της Συναπόθεσης του Ενισχυτικού Μέσου στις Ιδιότητες των Σύνθετων Υλικών.....	33
1.13	Επίδραση των Παραμέτρων της Ηλεκτρόλυσης στην Παρασκευή Σύνθετων Μεταλλικών Επικαλύψεων	35
1.13.1	Επίδραση της Σύστασης του Ηλεκτρικού Λουτρού Παρουσία Πρόσθετων.....	35
1.13.2	Επίδραση των Συνθηκών Ηλεκτρόλυσης.....	36
1.13.3	Επίδραση των Χαρακτηριστικών των Σωματιδίων.....	37
1.13.4	Επίδραση Έκλυσης Υδρογόνου.....	37

1.13.5 Επίδραση Έκλυσης Οξυγόνου.....	38
1.14 Τεχνική Προδιαγραφή Δ.Ε.Η. Ηλεκτρολυτικής Επικασσιτέρωσης.....	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.1 Εισαγωγή	44
2.2 Κατηγορίες Μηχανικών Δοκιμών.....	45
2.3 Μηχανές Δοκιμών.....	46
2.4 Μονοαξονικός Εφελκυσμός.....	46
2.4.1 Εισαγωγή.....	46
2.4.2 Διάγραμμα Τάσης(σ)-Παραμόρφωσης(ε).....	49
2.4.3 Διαστάσεις Δοκιμίων Εφελκυσμού.....	54
2.5 Δυσθραυστότητα.....	56
2.5.1 Εισαγωγή.....	56
2.5.2 Μαθηματικός Προσδιορισμός της Δυσθραυστότητας.....	56
2.5.3 Μέτρηση Δυσθραυστότητας - Δοκιμή Κρούσης.....	58
2.5.4 Εξάρτηση της Δυσθραυστότητας από τη Θερμοκρασία.....	60
2.6 Σκληρότητα και Μικροσκληρότητα	61
2.6.1 Εισαγωγή.....	61
2.6.2 Μικροσκληρότητα ‘Vickers’.....	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Εισαγωγή.....	68
3.2 Κοπή των Δοκιμίων.....	68
3.3 Προκατεργασία Μεταλλικών Επιφανειών.....	70
3.3.1 Λείανση και Στίλβωση.....	70
3.4 Πειραματική Διάταξη και Συνθήκες Παρασκευής των Ηλεκτρολυτικών Αποθεμάτων Κασσιτέρου.....	77

3.5	Εξοπλισμός - Μέθοδοι Προσδιορισμού της Δομής και Μορφολογίας της Επιφάνειας των Αποθεμάτων.....	82
3.5.1	Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (S.E.M.).....	82
3.5.2	Φασματοσκοπία Διερχόμενης Ενέργειας (E.D.S. ή E.D.A.X.).....	84
3.5.3	Οπτικό Μεταλλογραφικό Μικροσκόπιο	85
3.6	Εξοπλισμός - Μέθοδοι Προσδιορισμού των Μηχανικών Ιδιοτήτων των Αποθεμάτων	92
3.6.1	Δοκιμή Μονοαξονικού Εφελκυσμού	92
3.6.2	Δοκιμή Αντοχής σε Κρούση	97
3.6.3	Δοκιμή Μικροσκληρότητας των Επικαλύψεων κατά ‘Vickers’.....	101

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1	Εισαγωγή.....	105
4.2	Δομή και Μορφολογία της Επιφάνειας των Επικαλύψεων.....	105
4.3	Μηχανικές Ιδιότητες των Επικαλύψεων.....	119
4.3.1	Δοκιμή Μονοαξονικού Εφελκυσμού	119
4.3.2	Δοκιμή Αντοχής σε Κρούση	136
4.3.3	Μικροσκληρότητα των Επικαλύψεων κατά ‘Vickers’.....	138

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1	Εισαγωγή.....	144
5.2	Μελέτη Παρασκευής Απλών Ηλεκτρολυτικών Επικαλύψεων (Sn) και Σύνθετων Επικαλύψεων (Sn/TiO ₂).....	144
5.3	Μελέτη της Δομής και Μορφολογίας της Επιφάνειας των Επικαλύψεων	145
5.4	Μελέτη των Μηχανικών Ιδιοτήτων των Επικαλύψεων.....	147
5.5	Γενικό Συμπέρασμα.....	150
5.6	Μελλοντική Έρευνα - Προοπτικές.....	154

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	155
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	161

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων δεκαετιών, καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για την όσο το δυνατόν πληρέστερη μελέτη των κατασκευαστικών υλικών, μιας και τα νέα υλικά με βελτιωμένες ιδιότητες προστίθενται καθημερινά, στα ήδη χρησιμοποιούμενα, σε νέες εφαρμογές. Όσο καλύτερη γνώση υπάρχει για τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες των κατασκευαστικών υλικών, τόσο ανθεκτικότερες και συνάμα οικονομικότερες κατασκευές μπορούν να σχεδιαστούν και να υλοποιηθούν.

Με γνώμονα τα προαναφερόμενα, διερευνήθηκε η δομή και οι μηχανικές ιδιότητες ορειχάλκινων ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένων εξαρτημάτων που χρησιμοποιεί η Δ.Ε.Η. στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής της. Οι ακροδέκτες καλωδίων και οι σφιγκτήρες των ακροκιβωτίων, τα μεταλλικά εξαρτήματα των ακροκιβωτίων, οι ακροδέκτες γειώσεως και οι κύριες σταθερές και κινητές επαφές από τους μονοπολικούς και τριπολικούς ασφαλειοαποξεύκτες καθώς επίσης και μία σειρά από 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 το σκοπό της μελέτης αυτών των εξαρτημάτων, επικασσιτερώθηκαν ηλεκτρολυτικά με την εφαρμογή συνεχούς ρεύματος (D.C.) ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης. Τα δοκίμια αυτά παρασκευάστηκαν βάσει ανάλογων προδιαγραφών που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Ειδικότερα, μελετήθηκε η επίδραση του χρόνου απόθεσης του κασσιτέρου, του πάχους επικασσιτέρωσης, της γεωμετρίας του υποστρώματος, της προσθήκης TiO_2 , των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων. Ο χαρακτηρισμός της δομής και η μελέτη της μορφολογίας της επιφάνειας των επικαλύψεων πραγματοποιήθηκε με την τεχνική S.E.M. και με μεταλλογραφικό μικροσκόπιο και η διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων των επικαλύψεων περιλάμβανε δοκιμές εφελκυσμού, κρούσης και προσδιορισμό της μικροσκληρότητας κατά 'Vickers' των επικαλύψεων.

Από την αξιολόγηση των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης, προκύπτει ότι αύξηση του πάχους επικασσιτέρωσης στα ορειχάλκινα δοκίμια έχει ως αποτέλεσμα την ελάχιστη μείωση της αντοχής τους σε εφελκυσμό με εμφάνιση μικρότερης απορρόφησης ενέργειας, η οποία αποτελεί μέτρο της σκληρότητας. Επίσης, αύξηση του πάχους επικασσιτέρωσης φαίνεται πως αυξάνει τη ψαθυρότητα των ορειχάλκινων δοκιμίων, μειώνοντας τη μέγιστη παραμόρφωση τους υπό φόρτιση καθώς επίσης και τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Βάσει της μορφολογίας της επικασσιτέρωσης στα δοκίμια και των μηχανικών ιδιοτήτων τους, οι 2 ώρες εμφανίζονται ως ο καταλληλότερος χρόνος απόθεσης (t_{DC}). Σ' αυτό το χρόνο απόθεσης, διαπιστώθηκε πολύ καλή περιμετρικά απόθεση του κασσιτέρου και ομοιόμορφη γεωμετρικά επικάλυψη των δοκιμίων ενώ οι

μηχανικές τους ιδιότητες δεν παρουσίασαν ουσιαστική μεταβολή. Τέλος, ένα ακόμη στοιχείο που προκύπτει από τη μελέτη αυτή, σχετίζεται με τη σημαντική ομοιότητα που παρουσιάζουν στην παρασκευή, τη μορφολογία αλλά και τις μετρήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων τα περισσότερα απλά και σύνθετα ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένα δοκίμια, μεταξύ ίδιων χρόνων απόθεσης (t_{DC}).

ABSTRACT

The rapid technological developments of the last decades, gave the opportunity of extensive research and study in the field of constructive materials. As a result of this situation, new materials with improved properties are being introduced everyday leading to their use in new and pioneer applications. The better is the knowledge regarding the behavior and the properties of constructive materials, the toughest and the less inexpensive constructions can be designed and being implemented.

Having under consideration the above, research of the structure and the mechanical properties of brass fitments which have been electrodeposited with tin plating took place. Several usages of brass fitments which have been electrodeposited with tin plating is being made in the distribution and transmission network of the Public Power Corporation S.A. Such fitments include wire terminals, clampers and metallic fitments of terminal boxes, earth-ground terminals, main solid and mobile contacts of single and triple disconnectors and a variety of other fitments of the distribution network such as biscuits, burrs, screws, bolts, etc.

For the purposes of this research, tensile and impact brass specimens have been tin plated with direct current (D.C.) electrodeposition. These specimens were produced according to specific specifications in order to study their mechanical properties. Especially, it was analytically tested and examined the effect of time deposit (t_{DC}) of tin plating, the thickness of tin plating, the geometry of the substrate and the addition of TiO_2 , in the preparation and the mechanical properties of the specimens. The characterization of the structure and the surface morphology of the coatings was examined by S.E.M. (Scanning Electron Microscopy) technique and by metallographic microscope. The research of the mechanical properties of coatings included tensile tests, impact tests and microhardness versus the Vickers method.

From the present study, the evaluation of the results can lead to the conclusion that increase of tin plating thickness in brass specimens results in a minimum reduction of their tensile strength with less absorption of energy. In addition, increase of tin plating leads to more brittle brass specimens with reduction of their maximum deformation under load and their ability to absorb energy. The surface morphology of tin plating in the specimens and the results obtained regarding their mechanical properties have shown that 2 hours is an appropriate time deposit (t_{DC}) of tin plating in the specimens. At this time of deposit, specimens were produced with nice perimetric and geometrically uniformly tin plating deposits without substantial variation of their mechanical properties. Additionally, another important conclusion in most of the examined cases of this study is the significant similarity between the surface morphology and the measurements obtained regarding the mechanical properties of simple tin plated and composite Sn/ TiO_2 plated electrodeposited specimens, under the same time deposits (t_{DC}).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ - ΕΠΙΜΕΤΑΛΛΩΣΕΙΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ - ΕΠΙΜΕΤΑΛΛΩΣΕΙΣ

1.1 Εισαγωγή

Ως επιμετάλλωση ή μεταλλική επικάλυψη χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε μέθοδος επικάλυψης ή επιφανειακής επεξεργασίας, η οποία αποβλέπει στην απόθεση ενός στρώματος μετάλλου ή κράματος στην επιφάνεια κάποιου υλικού. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την προστασία των υλικών από τη διάβρωση, τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους (όπως είναι η σκληρότητα, η στιλπνότητα, κ.ά.), την αισθητική βελτίωση της εμφάνισής τους και την αποκατάσταση των διαστάσεων φθαρμένων αντικειμένων [1]. Ως κύριο μειονέκτημα των μεταλλικών επικαλύψεων μπορεί να αναφερθεί η εξαιρετικά δυσχερής επίτευξη μεταλλικών επικαλύψεων χωρίς ελαττώματα, πόρους, ασυνέχειες. Στην περίπτωση των γαλβανικών επιμεταλλώσεων, συχνά εκλύεται υδρογόνο το οποίο μπορεί να προκαλέσει ρωγμές στην επικάλυψη ενώ ταυτόχρονα οι υψηλές εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται στις επικαλύψεις προκαλούν επίσης ρωγμές. Η πρόσφυση τέλος της μεταλλικής επικάλυψης με το υποκείμενο μέταλλο (υπόστρωμα, substrate) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την προκατεργασία της επιφάνειας, π.χ. κατάλοιπα από τη φάση της απολίπανσης ή και της αποξειδωσης επιδρούν αρνητικά στην πρόσφυση. Παρόλα αυτά, η εφαρμογή των μεταλλικών επικαλύψεων είναι ευρύτατη.

Οι επιμεταλλώσεις ή μεταλλικές επικαλύψεις οδηγούν στην ανάπτυξη σύνθετων υλικών. Τα περισσότερα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη τεχνολογία, ανήκουν στην κατηγορία των σύνθετων υλικών. Τα υλικά αυτά έχουν μία περιοχή, συνήθως κοντά στην επιφάνειά τους, οι ιδιότητες της οποίας διαφέρουν σημαντικά από αυτές της υπόλοιπης μάζας τους και εξυπηρετούν τις χρήσεις για τις οποίες προορίζονται αυτά τα υλικά. Συνεπώς, τα επιμεταλλωμένα υλικά μπορούν να θεωρηθούν ως σύνθετα υλικά. Στα σύνθετα υλικά, το επιφανειακό στρώμα συνιστά την επικάλυψη, ενώ το επικαλυπτόμενο υλικό χαρακτηρίζεται ως υπόστρωμα. Η επιφάνεια του υποστρώματος υποβάλλεται εν γένει σε επιμελημένη κατεργασία καθαρισμού και προετοιμασίας, πριν από τη διαδικασία της επιμετάλλωσης, η οποία μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με το είδος του μετάλλου που πρόκειται να την επικαλύψει και την επιλεγόμενη μέθοδο επικάλυψης.

Οι ιδιότητες των υλικών, τα οποία έχουν υποβληθεί σε κατεργασία επιμετάλλωσης, δεν εξαρτώνται μόνο από τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος και του υλικού επικάλυψης, αλλά και από τη μέθοδο με την οποία πραγματοποιήθηκε η επικάλυψη και από την επίδραση που ασκεί το υπόστρωμα στην επικάλυψη και αντίστροφα. Καθοριστικό ρόλο στην συμπεριφορά των μεταλλικών

επικαλύψεων έχει η δομή και οι ιδιότητες της διεπιφάνειας επικάλυψης - υποστρώματος. Είναι προφανές ότι η επιτυχία μιας διαδικασίας επιμετάλλωσης συνδέεται άμεσα με την εξασφάλιση τέτοιων συνθηκών, ώστε να είναι ικανοποιητική η προσκόλληση του προς επικάλυψη μετάλλου στην επιφάνεια του υποστρώματος. Επομένως, εκείνο που ενδιαφέρει είναι να δημιουργηθεί μεγάλη συνάφεια ανάμεσα στα δύο μέταλλα, μεγάλη πρόσφυση, κάτι που επιτυγχάνεται με τη δημιουργία μικτού κρυσταλλου ανάμεσα στα δύο μέταλλα. Μικτοί κρυσταλλοί δε δημιουργούνται μεταξύ οποιωνδήποτε μετάλλων. Πρέπει οι ακτίνες των ιόντων τους, να μην παρουσιάζουν διαφορά σε μέγεθος πάνω από 15 % για να δημιουργηθούν μικτοί κρυσταλλοί με διείσδυση και πάνω από 8 % για να δημιουργηθούν μικτοί κρυσταλλοί με αντικατάσταση.

Η πρόσφυση θα είναι μεγαλύτερη όταν δημιουργούνται μικτοί κρυσταλλοί με αντικατάσταση, που έχουν μεγαλύτερη αντοχή και φέρνουν σε στενότερη επαφή και με ισχυρότερες δυνάμεις τα δύο μέταλλα. Στο μικτό κρυσταλλο με αντικατάσταση αντικαθίστανται ορισμένα ιόντα του ενός μετάλλου από το άλλο, ενώ στο μικτό κρυσταλλο με διείσδυση, διεισδύει αριθμός ιόντων του ενός μετάλλου στο κρυσταλλικό πλέγμα του άλλου, σε παραπλεγματικές άτακτες θέσεις. Αυτό δημιουργεί μία ενεργειακή αναβάθμιση και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να αποκολληθούν τα δύο μέταλλα. Αν τα μέταλλα δεν ικανοποιούν τον όρο, παρεμβάλλεται ένα μέταλλο ενδιάμεσης ακτίνας, ώστε ανά δύο ακτίνες να διαφέρουν κάτω του 8% [2]. Για τα περισσότερα μέταλλα που επιθυμείται να επιμεταλλωθούν χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό ο χαλκός.

1.2 Κατηγορίες Μεταλλικών Επικαλύψεων

Έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός μεθόδων μεταλλικών επικαλύψεων, χωρίς όμως να υπάρχει ενιαίος τρόπος ταξινόμησής τους. Έχουν προταθεί διάφορα σχήματα διάκρισής τους, χωρίς ωστόσο κανένα από αυτά να είναι απόλυτα ικανοποιητικό, αφού αρκετές από τις τεχνικές επιμετάλλωσης μπορούν κάλλιστα να ταξινομηθούν σε περισσότερες από μία κατηγορίες. Σύμφωνα πάντως με ένα ευρέως αποδεκτό σύστημα, οι επιμεταλλώσεις είναι δυνατόν να ταξινομηθούν ως ακολούθως:

- Ηλεκτροχημικές ή γαλβανικές επιμεταλλώσεις: Αυτές συνίστανται στην επικάλυψη ενός υλικού από ένα μέταλλο με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος. Τα σημαντικότερα μεταλλικά υλικά που επιμεταλλώνονται είναι τα σιδηρούχα υλικά, ο χαλκός, το νικέλιο, το χρώμιο, ο ψευδάργυρος, ο κασσίτερος, το κάδμιο και ο ορείχαλκος. Συνήθως, οι επιμεταλλώσεις διαμορφώνονται υπό μορφή πολλαπλών επιστρώσεων, όπως π.χ. ο συνδυασμός ορείχαλκος - χαλκός - νικέλιο - χρώμιο.
- Επιμεταλλώσεις με εμφύσηση σε τήγματα μετάλλων ή κραμάτων: Η μέθοδος αυτή είναι η παλαιότερη που εφαρμόστηκε για την επικάλυψη του σιδήρου ή των χαλύβων με ψευδάργυρο

(τεχνική γνωστή ως γαλβανισμός), με κασσίτερο (επικασσιτέρωση ή γάνωμα), με μόλυβδο και με αλουμίνιο.

- Επιμεταλλώσεις με χημικές μεθόδους: Αυτές συνίστανται στην πραγματοποίηση μιας απλής χημικής αντίδρασης ανάμεσα στο προς επικάλυψη μέταλλο και σε ένα άλλο μέταλλο, λιγότερο ηλεκτροθετικό από αυτό, το οποίο βρίσκεται με τη μορφή ιόντων σε υδατικό διάλυμα. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η επιχάλκωση του σιδήρου, η επινικέλωση, η επαργύρωση, η επιχρύσωση λιγότερο ευγενών μετάλλων.
- Επιμεταλλώσεις υπό κενό: Οι τεχνικές αυτής της κατηγορίας διακρίνονται σε φυσικές, όπως είναι η επιμετάλλωση με εξάχνωση σε κενό και σε χημικές, κατά τις οποίες πραγματοποιείται ορισμένη χημική αντίδραση στη φάση των ατμών, πολύ κοντά ή πάνω ακριβώς στην επιφάνεια του υποστρώματος. Το προϊόν της αντίδρασης είναι αυτό που δημιουργεί το στρώμα της επικάλυψης στην επιφάνεια του υποστρώματος, το οποίο μπορεί να είναι ένα μέταλλο, ένα κράμα, ένας ημιαγωγός ή μια πυρίμαχη ουσία.

Τέλος, αναφέρονται και ορισμένες ειδικές κατηγορίες επιμεταλλώσεων, όπως είναι οι επιμεταλλώσεις με επιφανειακή θερμική κατεργασία σε στερεό, υγρό ή αέριο περιβάλλον, οι επιμεταλλώσεις με επίχρισμα, το οποίο περιέχει μεταλλικές σκόνες εν αιώρηση σε κατάλληλο υγρό μέσο διασποράς που στη συνέχεια απομακρύνεται με εξάτμιση και οι επιμεταλλώσεις που εκτελούνται με εκτόξευση από “πιστολέτο”.

Η επιλογή μιας συγκεκριμένης μεθόδου επιμετάλλωσης είναι αποτέλεσμα της εκτίμησης μιας σειράς παραγόντων, οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι η συνάφεια του στρώματος της επικάλυψης με το υλικό του υποστρώματος, η φύση του υλικού που πρόκειται να αποθεθεί, η ταχύτητα πραγματοποίησης της απόθεσης, οι περιορισμοί που επιβάλλονται από τη φύση του υποστρώματος (π.χ. η ανώτατη θερμοκρασία, μέχρι την οποία αυτό μπορεί να πυρωθεί χωρίς να υποστεί αλλοιώσεις), ο βαθμός χημικής καθαρότητας του υποστρώματος, αφού από αυτόν θα εξαρτηθεί και η περιεκτικότητα σε προσμίξεις του στρώματος της επικάλυψης, καθώς και άλλοι που συνδέονται με τον εξοπλισμό, το κόστος και την ασφάλεια της μεθόδου.

1.3 Μικροκρυσταλλική Δομή των Μεταλλικών Επικαλύψεων

Η μικροκρυσταλλική δομή των μεταλλικών επικαλύψεων συνδέεται στενά με την τεχνική που επιλέχθηκε κατά την πραγματοποίησή τους. Στις ηλεκτρολυτικές επιμεταλλώσεις, η διαδικασία της ανάπτυξης των κρυστάλλων συντελείται κανονικά κατά στρώματα με τοποθέτηση των ατόμων σε συγκεκριμένες θέσεις της επιφάνειας του υποστρώματος. Η ευκινησία των ειδών, που αποτίθενται για

να σχηματίσουν το στρώμα της επικάλυψης, εξαρτάται από το ενυδάτωσης των ιόντων στο λουτρό της ηλεκτρόλυσης και ποικίλει ανάλογα με τον προσανατολισμό των κρυστάλλων.

Έχει όμως αποδειχτεί, ότι συχνά η διαδικασία της ηλεκτροαπόθεσης συνεπάγεται και κάποια ανακατάταξη των ατόμων του υποστρώματος στην επιφάνειά του. Στην πράξη πάντως, το υλικό που παράγεται από μία διαδικασία ηλεκτροκρυστάλλωσης, δεν αναπτύσσεται συνήθως κατά τρόπο ομοιόμορφο, είναι εν γένει πολυκρυσταλλικό, χαρακτηρίζεται από δενδριτική υφή και παρουσιάζει διαφόρων τύπων ασυνέχειες στην επιφάνειά του. Συνεπώς, εμφανίζονται σημαντικές διαφορές όσον αφορά στη μικροκρυσταλλική δομή των ηλεκτρολυτικών μεταλλικών αποθεμάτων, τα οποία είναι δυνατόν να εμφανίζονται από περίπου μονοκρυσταλλικά (π.χ. εκείνα που αποτίθενται πάνω σε μονοκρυσταλλικά υποστρώματα) μέχρι έντονα μικροκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά.

Η διαδικασία της δημιουργίας και της ανάπτυξης των κρυστάλλων επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία ορισμένων οργανικών ενώσεων στο λουτρό της ηλεκτρόλυσης. Έτσι, με τη βοήθεια κατάλληλων οργανικών προσθέτων, αποφεύγονται κατά τρόπο αποτελεσματικό, οι διάφορες ανεπιθύμητες μορφές ανάπτυξης των κρυστάλλων των ηλεκτρολυτικών μεταλλικών αποθεμάτων.

Η μικροκρυσταλλική δομή επηρεάζεται επίσης και από τη μορφολογία της επιφάνειας του υποστρώματος. Στις επιφάνειες με αρκετά μεγάλη τραχύτητα, ευνοείται η απόθεση στις ανυψωμένες περιοχές, με αποτέλεσμα τη λήψη αποθεμάτων με δενδριτική υφή. Επιπλέον, η κρυσταλλική δομή επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες, όπως είναι η θερμοκρασία του υποστρώματος, η παρουσία προσμίξεων, η γωνία πρόσπτωσης των αποτιθέμενων ειδών, κ.ά. [3].

1.4 Ιδιότητες των Μεταλλικών Επικαλύψεων

Οι ιδιότητες των μεταλλικών επικαλύψεων διαφέρουν εν γένει σημαντικά από τις ιδιότητες των ίδιων υλικών που παράγονται με τις συνήθεις μεταλλουργικές διαδικασίες. Οι επικαλύψεις είναι ενδεχόμενο να χαρακτηρίζονται από έντονες εσωτερικές μηχανικές τάσεις, να είναι εξαιρετικά μικροκρυσταλλικές, να εμφανίζουν υψηλού βαθμού προσανατολισμό προς ορισμένες κατευθύνσεις, να περιέχουν μεγάλη συγκέντρωση σημειακών αταξιών και διάφορες προσμίξεις και να παρουσιάζουν μακροπορώδες και μικροπορώδες. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά έχουν σημαντική επίπτωση στις φυσικές ιδιότητες του υλικού που τελικά προκύπτει, όπως είναι η αντοχή του στις μηχανικές καταπονήσεις, στη φθορά κατά τη λειτουργία του υπό φορτίο, καθώς επίσης και η αντοχή του στη διάβρωση και στην απότομη έκθεσή του σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

Οι ιδιότητες των υλικών οι οποίες επηρεάζονται από τις μεθόδους παρασκευής των επικαλύψεων, είναι κυρίως το μέτρο ελαστικότητας, τα όρια αντοχής στον εφελκυσμό, η θραύση και η φθορά, η σκληρότητα και η αντοχή στη διάβρωση.

1.5 Ηλεκτροχημικές ή Γαλβανικές Επιμεταλλώσεις

1.5.1 Εισαγωγή

Ως ηλεκτροχημική ή γαλβανική επιμετάλλωση (electroplating) χαρακτηρίζεται η καθοδική αποβολή μετάλλου στην επιφάνεια μεταλλικών υλικών από ηλεκτρολυτικά λουτρά τα οποία περιέχουν το προς απόθεση μέταλλο. Οι επιφάνειες πάνω στις οποίες γίνεται η επικάλυψη είναι κυρίως μεταλλικές και πριν χρησιμοποιηθούν έχουν υποστεί κατάλληλη κατεργασία. Τα σημαντικότερα μεταλλικά υλικά που επιμεταλλώνονται είναι τα σιδηρούχα υλικά, ο χαλκός και τα κράματά τους. Ως επιμεταλλώσεις χρησιμοποιούνται εκτός των ευγενών μετάλλων (Au, Pt) κυρίως τα εξής μέταλλα ή και κράματα: χαλκός, νικέλιο, χρώμιο, ψευδάργυρος, κάδμιο, κασσίτερος, κ.ά.

Η ηλεκτροχημική ή γαλβανική επιμετάλλωση είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος βιομηχανικής επιμετάλλωσης και χρησιμοποιείται κυρίως για την προστασία των μεταλλικών αντικειμένων από διάφορες χημικές δράσεις (οξειδωση της επιφάνειάς τους) και μηχανικές δράσεις, όπως είναι η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των εξαρτημάτων ηλεκτρικών συσκευών, πολεμικού υλικού κ.ά., για διακοσμητικούς λόγους με σκοπό τη βελτίωση της εμφάνισής τους, δηλαδή για την επικάλυψη διαφόρων μεταλλικών αντικειμένων, όπως είναι οι λαμαρίνες, οι προφυλακτήρες αυτοκινήτων, τα μεταλλικά έπιπλα, τα σκεύη οικιακής χρήσης, τα κοσμήματα κ.ά., αλλά και σε ειδικούς σκοπούς όπου απαιτείται να αποκτήσουν οι επιφάνειες ορισμένες μηχανικές ιδιότητες (σκληρότητα, στιλπνότητα) ηλεκτρικές ή μαγνητικές ιδιότητες κ.ά.

Όσον αφορά στην αντιδιαβρωτική ικανότητα των γαλβανικών επιμεταλλώσεων, αυτή εξαρτάται από την προκατεργασία της επιφάνειας, τις συνθήκες αποβολής στο λουτρό, το είδος και πάχος της επιμετάλλωσης και τη δομή της προστατευτικής στοιβάδας. Τα πάχη των σημαντικότερων επιμεταλλώσεων έχουν προτυποποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη τα ηλεκτροχημικά χαρακτηριστικά των επιμεταλλώσεων και τη προβλεπόμενη εφαρμογή. Για την τεχνολογία των γαλβανικών επιμεταλλώσεων υπάρχει εκτεταμένη βιβλιογραφία όπου αναφέρονται λεπτομέρειες για κάθε είδος επιμετάλλωσης (πυκνότητα ρεύματος, εξοπλισμός, συνθέσεις λουτρών, πρόσθετα κ.λ.π.).

1.5.2 Τεχνολογία Ηλεκτροαποθέσεων

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι βασικές αρχές της ηλεκτροαπόθεσης, η οποία ουσιαστικά ταυτίζεται με την τεχνική της ηλεκτρόλυσης όταν επιδιώκεται η απόθεση μεταλλικών κυρίως επικαλύψεων. Η ηλεκτρόλυση είναι το χημικό φαινόμενο που πραγματοποιείται όταν ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται από διάλυμα ή τήγμα ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης είναι το μέσο που άγει το ρεύμα, μέσω των ιόντων και κατά την διάρκεια της ηλεκτρόλυσης διασπάται. Η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης πραγματοποιείται συνήθως σε ειδικά διαμορφωμένα δοχεία τα οποία ονομάζονται

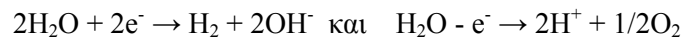
ηλεκτρολυτικά κελιά. Στα δοχεία αυτά τοποθετείται το διάλυμα ή το τήγμα ηλεκτρολύτη και βυθίζονται δύο ηλεκτρόδια (από μέταλλο ή γραφίτη) τα οποία ενώνονται με τους πόλους μιας ηλεκτρικής πηγής.

Στη μάζα των διαλυμάτων ή των τηγμάτων των ηλεκτρολυτών υπάρχουν ανιόντα και κατιόντα ελεύθερα να κινηθούν στο διάλυμα, κάτω από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, τα οποία και τελικά έλκονται από το θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο αντίστοιχα. Τα κατιόντα (θετικά φορτισμένα ιόντα) κινούνται προς το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο, το οποίο ονομάζεται κάθοδος και εκεί προσλαμβάνουν ηλεκτρόνια όπου και εξουδετερώνεται το φορτίο τους με αποτέλεσμα να μετατρέπονται σε ουδέτερα άτομα με μηδενικό ηλεκτρικό φορτίο. Η μετατροπή αυτή ονομάζεται αναγωγή. Από την άλλη, τα ανιόντα (αρνητικά φορτισμένα ιόντα) κινούνται προς το θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο, την άνοδο και εκεί αποβάλλοντας τα επιπλέον ηλεκτρόνια αποφορτίζονται και μετατρέπονται και αυτά σε ουδέτερα άτομα. Η μετατροπή αυτή ονομάζεται οξείδωση.

Τα ουδέτερα άτομα που προκύπτουν είτε ενώνονται μεταξύ τους είτε αντιδρούν με το νερό ή ακόμα και με τα ίδια τα ηλεκτρόδια. Οι αντιδράσεις αυτές πραγματοποιούνται στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων ή στην περιοχή γύρω από αυτά. Επομένως, οι ουσίες που δημιουργούνται είναι δυνατόν να προσροφηθούν στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, όπως για παράδειγμα όταν ηλεκτρολύονται αραιά οξέα στην επιφάνεια της καθόδου σχηματίζονται προσροφημένα άτομα υδρογόνου που ενώνονται και δίνουν υδρογόνο. Αυτός είναι και ο μηχανισμός με τον οποίο σχηματίζονται οι ηλεκτρολυτικές μεταλλικές επικαλύψεις. Τα μεταλλο-κατιόντα αποφορτίζονται στην κάθοδο, μετατρέπονται σε ουδέτερα άτομα και αυτά με τη σειρά τους ενώνονται και σχηματίζουν μεταλλικές επικαλύψεις.

Πολλές φορές όμως, οι ηλεκτρολυτικές αντιδράσεις είναι πιο πολύπλοκες. Κάθε ιόν για να αποβάλλει το φορτίο του (ή αλλιώς για να αναχθεί αν είναι κατιόν ή να οξειδωθεί αν είναι ανιόν), απαιτεί μια ορισμένη τάση, η οποία ανάλογα με το ιόν μπορεί να είναι μικρή ή μεγάλη και ονομάζεται τάση απόθεσης του ιόντος. Έτσι, σε ένα ηλεκτρολυτικό διάλυμα που υπάρχουν περισσότερα από ένα κατιόντα, με την επιβολή τάσης έλκονται όλα από την κάθοδο και αποφορτίζονται πρώτα εκείνα που έχουν την μικρότερη τάση απόθεσης, ενώ δεν αποφορτίζονται εκείνα για τα οποία η τάση είναι μικρότερη από αυτή που χρειάζεται για να αναχθούν.

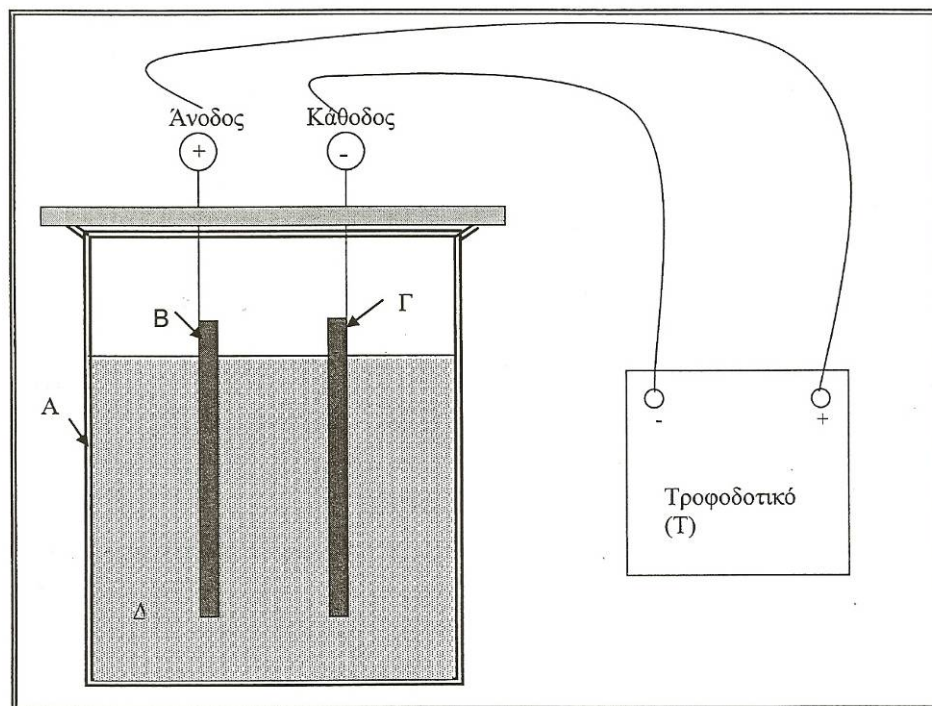
Εκτός όμως από τα ιόντα στην περιοχή γύρω από τα ηλεκτρόδια, υπάρχουν και τα μόρια του νερού (σε υδατικά διαλύματα). Αυτά είναι δυνατόν να αναχθούν ή να οξειδωθούν σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Αν λοιπόν η ηλεκτρική τάση που χρειάζονται τα ιόντα του διαλύματος για να αναχθούν ή να οξειδωθούν είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που χρειάζονται τα μόρια του νερού, τότε ανάγονται η οξειδώνονται τα μόρια του νερού.

1.5.3 Βασικές Αρχές Ηλεκτρολυτικών Επικαλύψεων

Για να γίνει η ηλεκτρολυτική επικάλυψη μίας μεταλλικής επιφάνειας είναι απαραίτητη η χρήση μίας διάταξης ηλεκτροαπόθεσης, ανάλογης με αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1. Η διάταξη αυτή αποτελείται από την ηλεκτρολυτική κυψελίδα (δοχείο), η οποία περιέχει το κατάλληλο ηλεκτρολυτικό διάλυμα (λουτρό), και τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου, τα οποία συνδέονται με μία πηγή συνεχούς ρεύματος (τροφοδοτικό).



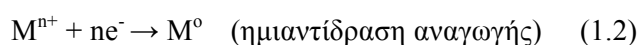
Σχήμα 1.1: Διάταξη ηλεκτροαπόθεσης αποτελούμενη: (Α) από την ηλεκτρολυτική κυψελίδα, (Β) την άνοδο, (Γ) την κάθοδο, (Δ) το ηλεκτρολυτικό διάλυμα και (Τ) το τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος.

Κατά τη διάρκεια της ηλεκτροαπόθεσης, τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου βρίσκονται εμβαπτισμένα μέσα στο ηλεκτρολυτικό διάλυμα (λουτρό). Η άνοδος συνδέεται με το θετικό πόλο της πηγής συνεχούς ρεύματος, ενώ η κάθοδος με τον αρνητικό πόλο. Το ηλεκτρολυτικό διάλυμα συνήθως αποτελείται από το υδατικό διάλυμα άλατος του μετάλλου που πρόκειται να αποθεθεί. Επίσης, το ηλεκτρολυτικό διάλυμα περιέχει άλατα τα οποία αυξάνουν την αγωγιμότητά του, ουσίες που ρυθμίζουν το pH καθώς και πρόσθετα, τα οποία επηρεάζουν ορισμένες ιδιότητες των επικαλύψεων, όπως την πρόσφυσή τους με το υπόστρωμα και την τραχύτητα. Το μεταλλικό άλας

δίσταται στο νερό σύμφωνα με την αντίδραση (1.1) με αποτέλεσμα να υπάρχουν στο ηλεκτρολυτικό διάλυμα κατιόντα του προς απόθεση μετάλλου.



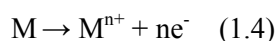
Εξαιτίας της πηγής συνεχούς ρεύματος εφαρμόζεται μία διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση των μεταλλικών ιόντων του διαλύματος προς την επιφάνεια της καθόδου. Στην επιφάνεια αυτή, εξελίσσεται η ημιαντίδραση αναγωγής (1.2), σύμφωνα με την οποία τα κατιόντα του μετάλλου (M^{n+}) ανάγονται προς ουδέτερα άτομα του μετάλλου (M^0) [4].



Αποτέλεσμα της ημιαντίδρασης αναγωγής είναι η απόθεση μεταλλικών ατόμων στην επιφάνεια της καθόδου, τα οποία με τη λήξη της διαδικασίας θα σχηματίσουν τη μεταλλική επικάλυψη της καθόδου. Τα ανιόντα του άλατος (A^{n-}), λόγω της επίδρασης του ηλεκτρικού πεδίου κινούνται προς την άνοδο, όπου και αποφορτίζονται, μετατρέπονται δηλαδή σε ουδέτερα άτομα A, σύμφωνα με την ημιαντίδραση οξειδωσης:



Στις περισσότερες ηλεκτρολυτικές επιμεταλλώσεις, η άνοδος αποτελείται από το μέταλλο το οποίο πρόκειται να αποτεθεί. Στην περίπτωση αυτή, λόγω της επίδρασης του ηλεκτρολυτικού διαλύματος, άτομα του μετάλλου της ανόδου (M) μετατρέπονται σε μεταλλικά κατιόντα (M^{n+}), εμπλουτίζοντας το ηλεκτρολυτικό διάλυμα με κατιόντα του προς απόθεση μετάλλου. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η μεταλλική άνοδος σταδιακά να διαλυτοποιείται:



Επομένως, σε ορισμένο αριθμό ιόντων μετάλλου M^{n+} που αποφορτίζονται και αποτίθενται στην κάθοδο αντιστοιχεί και σχεδόν ίσος αριθμός ατόμων μετάλλου M που οξειδώνονται και διαλυτοποιούνται στην άνοδο, με αποτέλεσμα η συγκέντρωση των ιόντων του μετάλλου στο λουτρό να παραμένει σχεδόν σταθερή στην επιθυμητή κάθε φορά τιμή.

Η διαδικασία της ηλεκτροαπόθεσης διέπεται από τους νόμους του Faraday [5, 6]. Σύμφωνα με το 1^ο Νόμο, *τα βάρη των σωμάτων που ελευθερώνονται στην άνοδο και την κάθοδο του ηλεκτρολυτικού κελιού είναι ανάλογα με την ποσότητα του ηλεκτρισμού που διέρχεται από τον ηλεκτρολύτη*. Το φορτίο

του ηλεκτρισμού είναι ίσο με το γινόμενο της έντασης του ρεύματος και του χρόνου που το ρεύμα αυτό διαρρέει το ηλεκτρολυτικό κύκλωμα. Η ποσότητα λοιπόν των σωμάτων που αποτίθενται στην άνοδο ή την κάθοδο είναι τόσο μεγαλύτερο όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του ρεύματος και όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος της ηλεκτρόλυσης.

Σύμφωνα με το 2^ο Νόμο του Faraday, *τα βάρη των σωμάτων που ελευθερώνονται στα ηλεκτρόδια από την ίδια ποσότητα ηλεκτρισμού είναι ανάλογα προς τα χημικά τους ισοδύναμα*. Από το νόμο αυτό, προκύπτει η σχέση (1.5) με βάση την οποία υπολογίζονται οι ποσότητες των μετάλλων ή άλλων στοιχείων που ελευθερώνονται στα ηλεκτρόδια. Επομένως, η μάζα (m) του στοιχείου που αποτίθεται κατά την ηλεκτροαπόθεση είναι ίση:

$$m = A \cdot I \cdot t / n \cdot F \quad (\text{Νόμος Faraday}) \quad (1.5)$$

όπου, m η μάζα του αποτιθέμενου μετάλλου, A το ατομικό βάρος του μεταλλικού στοιχείου, n το σθένος του, t ο χρόνος της ηλεκτρολυτικής διεργασίας (sec), F η σταθερά του Faraday (96.500 Cb) και I η ένταση του ρεύματος (A).

1.5.4 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Ηλεκτρολυτική Επιμετάλλωση

1.5.4.1 Εφαρμοζόμενη Τάση Κατά την Ηλεκτρολυτική Απόθεση

Για να πραγματοποιηθεί απόθεση πρέπει στους πόλους της ηλεκτρολυτικής διάταξης να εφαρμοστεί μία τάση (U). Για να εκδηλωθεί το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης, έχει αποδειχτεί ότι η τάση (U) θα πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη μιας συγκεκριμένης τιμής η οποία ονομάζεται τάση απόθεσης ή τάση διάσπασης (E) (Deposition Potential). Συνεπώς, στις ηλεκτρολυτικές επιμεταλλώσεις, το μέταλλο δεν μπορεί να αποτεθεί όταν η τάση που εφαρμόζεται στην πηγή είναι μικρότερη από την τάση απόθεσης. Η τάση απόθεσης είναι διαφορετική για κάθε ηλεκτροχημική αντίδραση και άρα εξαρτάται κάθε φορά από το διάλυμα και το προς απόθεση μέταλλο.

Όταν εκδηλωθεί το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης, οι μικρές ποσότητες των υλικών τα οποία αρχίζουν να αποτίθενται στα δύο ηλεκτρόδια δημιουργούν ένα γαλβανικό στοιχείο, το οποίο εμφανίζει δυναμικό αντίθετο από την εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πόλωση των ηλεκτροδίων. Για να ξεκινήσει η ηλεκτρόλυση θα πρέπει η τάση που εφαρμόζεται να είναι μεγαλύτερη από το δυναμικό του γαλβανικού στοιχείου που σχηματίζεται [7].

Μόλις αρχίσει να διαρρέει ηλεκτρικό ρεύμα την κυψελίδα, εμφανίζεται πτώση της τάσης, η οποία ασκείται στους πόλους της ηλεκτρολυτικής διάταξης. Η πτώση αυτή οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο της πόλωσης των ηλεκτροδίων, το οποίο δημιουργείται εξαιτίας της αύξησης της

συγκέντρωσης των ιόντων στις περιοχές του λουτρού γύρω από τα ηλεκτρόδια. Στην περίπτωση αυτή, για να περιοριστεί η πόλωση, πρέπει να μειωθεί η πυκνότητα του ρεύματος ή να αυξηθεί η θερμοκρασία του λουτρού. Η πόλωση των ηλεκτροδίων περιορίζεται και με την ανάδευση του λουτρού, μιας και με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο αριθμός των ιόντων που συγκεντρώνονται γύρω από τα ηλεκτρόδια. Επιπλέον, η πτώση της τάσης οφείλεται και στην ωμική πτώση τάσης ($I \cdot R$), η οποία εμφανίζεται κατά τη δημιουργία αγώγιμων στρωμάτων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων.

Κατά συνέπεια, η τάση (U) που θα πρέπει να εφαρμοστεί μεταξύ της ανόδου και της καθόδου για να γίνει η ηλεκτρόλυση, θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με:

$$U = E + \text{πόλωση ηλεκτροδίων} + I \cdot R$$

όπου, E η τάση απόθεσης ή διάσπασης, I η ένταση του ρεύματος και R η αντίσταση του ηλεκτρικού λουτρού.

Η διαφορά ανάμεσα στη θεωρητική τάση απόθεσης (E), για μια συγκεκριμένη ηλεκτροχημική αντίδραση και στην τάση (U) που πρέπει στην πραγματικότητα να εφαρμοστεί ονομάζεται υπέρταση. Η υπέρταση είναι συνήθως μεγαλύτερη όταν στα ηλεκτρόδια ελευθερώνονται αέριες ενώσεις και η τιμή της εξαρτάται από το υλικό με το οποίο έχουν κατασκευαστεί τα ηλεκτρόδια, καθώς και από την πυκνότητα του ρεύματος [8].

1.5.4.2 Ηλεκτρολυτικά Λουτρά

Τα λουτρά που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρολυτικές επιμεταλλώσεις είναι τριών ειδών. Πρόκειται για όξινα, αλκαλικά και σύνθετα διαλύματα. Στην επικασιτέρωση, χρησιμοποιούνται συνήθως όξινα διαλύματα που παρασκευάζονται από θειικά ή χλωριούχα άλατα του μετάλλου. Τα διαλύματα αυτά αποτελούνται κυρίως από απλά ιόντα και σε αυτά μπορούν να εφαρμοστούν υψηλές πυκνότητες ρεύματος. Επίσης, χαρακτηρίζονται και από υψηλές αποδόσεις ρεύματος.

1.5.4.3 Έλεγχος - Συντήρηση Ηλεκτρολυτικών Λουτρών

Είναι πολύ σημαντικό για την επιτυχία της ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης ο συχνός έλεγχος και η σωστή συντήρηση των ηλεκτρολυτικών λουτρών. Ο έλεγχος γίνεται από εξειδικευμένα εργαστήρια με χημικές αναλύσεις και άλλες μεθόδους. Στα λουτρά πρέπει να γίνονται ειδικές κατεργασίες με οξειδωτικά μέσα και ενεργό άνθρακα, για να απομακρύνονται οι διάφορες ενώσεις που σχηματίζονται κατά την ηλεκτρόλυση και τα μολύνουν. Επίσης, για τον καθαρισμό τους, πολλές φορές τα λουτρά φιλτράρονται. Εν γένει, πρέπει να λαμβάνονται προληπτικά μέτρα έτσι ώστε να μη μολύνονται τα

λουτρά. Τα πιο συνηθισμένα από αυτά περιλαμβάνουν τον καλό καθαρισμό των αντικειμένων που πρόκειται να επιμεταλλωθούν, τη χρησιμοποίηση εύχρηστων και εύκολων στον καθαρισμό και τη συντήρηση δεξαμενών ή δοχείων και την προστασία με ειδικά καλύμματα τόσο των δεξαμενών όσο και των ηλεκτροδίων, όταν δεν είναι σε λειτουργία.

1.5.4.4 Σταθεροποίηση του pH των Λουτρών

Η ρύθμιση του pH στα ηλεκτρολυτικά λουτρά γίνεται με την προσθήκη ειδικών διαλυμάτων τα οποία ονομάζονται ρυθμιστικά διαλύματα (buffers). Αυτά είναι διαλύματα που δεν επιτρέπουν απότομες μεταβολές του pH κατά την προσθήκη μικρών ποσοτήτων οξέων ή βάσεων. Με τα ρυθμιστικά διαλύματα αποφεύγεται η αύξηση του pH, λόγω της αναγωγής των ιόντων H_2 και κατά συνέπεια τη δημιουργία ιζημάτων. Η ρύθμιση του pH στα ηλεκτρολυτικά λουτρά γίνεται με την προσθήκη σε αυτά μικρών ποσοτήτων οξέων ή βάσεων.

1.5.4.5 Πρόσθετα

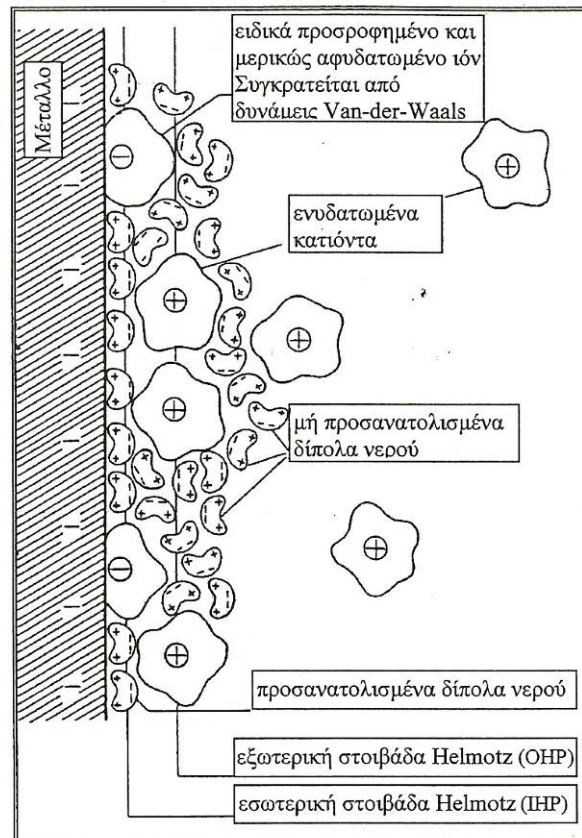
Πρόσθετα ονομάζονται οι ουσίες εκείνες οι οποίες προστιθέμενες στα ηλεκτρολυτικά λουτρά επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά των επικαλύψεων. Είναι ανόργανες ή οργανικές ενώσεις και ανάλογα με τη δράση τους διακρίνονται σε λειαντικά, στιλβωτικά και διαβρέκτες. Τα πρόσθετα χρησιμοποιούνται σε μικρές αναλογικά ποσότητες (η συγκέντρωσή τους στο διάλυμα κυμαίνεται από $10^{-4}M$ μέχρι $10^{-2}M$) και έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζουν τόσο τις φυσικές όσο και τις μηχανικές ιδιότητες των επικαλύψεων. Ο τρόπος με τον οποίο δρουν δεν έχει διευκρινιστεί πλήρως. Θεωρείται πολύ πιθανόν να προσροφώνται ή να εσωκλείονται στην επικάλυψη. Στην περίπτωση ορισμένων στιλβωτικών πρόσθετων, έχει διαπιστωθεί ότι προσροφώνται εκλεκτικά στην μεταλλική επιφάνεια κατά τη διάρκεια της ηλεκτρόλυσης και μειώνουν το μέγεθος των κρυστάλλων του μετάλλου κάνοντάς το μικροκρυσταλλικό και συνεπώς λείο και στιλπνό.

1.5.4.6 Ηλεκτρόδια

Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται διαλυτές άνοδοι, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από το ίδιο το μέταλλο που πρόκειται να αποτεθεί στην κάθοδο. Έτσι, με τη διάλυση, διατηρείται σταθερή η συγκέντρωση των ιόντων του μετάλλου στο λουτρό. Σπανιότερα χρησιμοποιούνται αδρανείς άνοδοι, οι οποίες δε διαλύονται στο ηλεκτρολυτικό λουτρό. Οι άνοδοι αυτές κατασκευάζονται από γραφίτη ή ανοξειδωτο χάλυβα. Στην περίπτωση αυτή, η συγκέντρωση των ιόντων του μετάλλου στο διάλυμα διατηρείται σταθερή με την προσθήκη διαλυτών ενώσεων του μετάλλου. Όσον αφορά τις καθόδους, στις ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις χρησιμοποιούνται τα προς επιμετάλλωση αντικείμενα και σε ορισμένες περιπτώσεις βοηθητικά ηλεκτρόδια [9].

1.5.5 Δημιουργία Ηλεκτρικής Διπλοστοιβάδας ‘Helmutz’

Κατά την εμβάπτιση των μεταλλικών ηλεκτροδίων (ανόδου και καθόδου) στο ηλεκτρολυτικό διάλυμα, σχηματίζονται στη διεπιφάνεια μετάλλου/διαλύματος διπλοστοιβάδες φορτίων (διπλοστοιβάδες Helmutz), με τα αρνητικά φορτία να βρίσκονται συνήθως στην πλευρά του μετάλλου και τα θετικά στην πλευρά του διαλύματος [10]. Το τμήμα της διπλοστοιβάδας που βρίσκεται προς την πλευρά του διαλύματος αποτελείται από δύο περιοχές, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2:



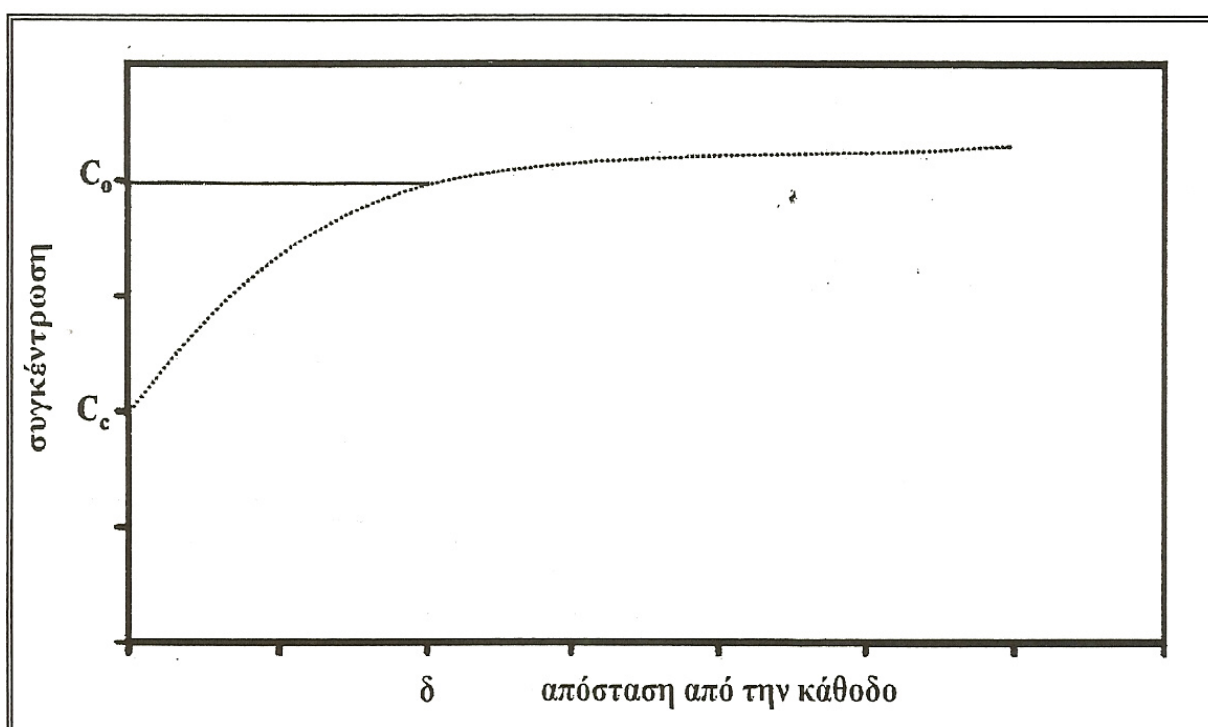
Σχήμα 1.2: Δομή μιας ηλεκτρισμένης διεπιφάνειας [10].

α) την εσωτερική στοιβάδα (Inner Helmutz Plane - IHP), η οποία βρίσκεται σε άμεση επαφή με το ηλεκτρόδιο και έχει πάχος περίπου ίσο με τη διάμετρο των μορίων του διαλύτη. Η στοιβάδα αυτή αποτελείται συνήθως από ένα μονομοριακό στρώμα προσανατολισμένων δίπολων μορίων του διαλύτη και από ειδικά προσροφημένα ιόντα.

β) την εξωτερική στοιβάδα (Outer Helmutz Plane - OHP), η οποία δε βρίσκεται σε άμεση επαφή με το ηλεκτρόδιο και καταλαμβάνεται από διαλυμένα ιόντα.

1.5.6 Σχηματισμός Στοιβάδας Διάχυσης ‘Nerst’

Μετά την έναρξη της διαδικασίας ηλεκτροαπόθεσης, μέσα στο ηλεκτρολυτικό διάλυμα και κοντά στην επιφάνεια της καθόδου, παρουσιάζεται μία διαβάθμιση στην συγκέντρωση των μεταλλικών ιόντων. Η συγκέντρωση των μεταλλικών ιόντων στην επιφάνεια της καθόδου είναι μικρότερη σε σύγκριση με τη συγκέντρωση των μεταλλικών ιόντων στον κύριο όγκο (bulk) του ηλεκτρολύτη όπως είναι εμφανές και στο Σχήμα 1.3. Το φαινόμενο αυτό είναι αποτέλεσμα της κατανάλωσης των μεταλλικών ιόντων στην επιφάνεια της καθόδου κατά τη διάρκεια της ηλεκτροαπόθεσης. Αυτή η διαβάθμιση της συγκέντρωσης εκτείνεται σε μία περιοχή πάχους δ γύρω από την επιφάνεια της καθόδου, η οποία ονομάζεται στοιβάδα διάχυσης του ‘Nerst’ [11, 12].



Σχήμα 1.3: Διαβάθμιση της συγκέντρωσης των μεταλλικών ιόντων κοντά στην επιφάνεια της καθόδου (όπου: C_0 και C_c , η συγκέντρωση των μεταλλικών ιόντων έξω από τη στοιβάδα διάχυσης και στην επιφάνεια της καθόδου, αντίστοιχα).

Η μεταφορά των μεταλλικών ιόντων από τον κυρίως όγκο του ηλεκτρολύτη προς τη στοιβάδα διάχυσης γίνεται κυρίως με ανάδευση. Μέσα στη στοιβάδα διάχυσης του ‘Nerst’ η μεταφορά των μεταλλικών ιόντων γίνεται μόνο με διάχυση. Έξω από τη στοιβάδα αυτή, η διάχυση είναι αμελητέα και η συγκέντρωση των μεταλλικών ιόντων διατηρείται σταθερή στην τιμή C_0 λόγω της ανάδευσης του διαλύματος. Το πάχος δ της στοιβάδας διάχυσης επηρεάζεται κυρίως από τις υδροδυναμικές συνθήκες που επικρατούν στο ηλεκτρολυτικό διάλυμα. Σε ένα σύστημα με μέτρια ανάδευση, το

πάχος της στοιβάδας διάχυσης είναι της τάξεως των 10-100 μm . Η αύξηση της ανάδευσης σε ένα διάλυμα μπορεί να προκαλέσει μείωση του πάχους της στοιβάδας διάχυσης.

1.5.7 Μηχανισμός Ηλεκτροκρυστάλλωσης

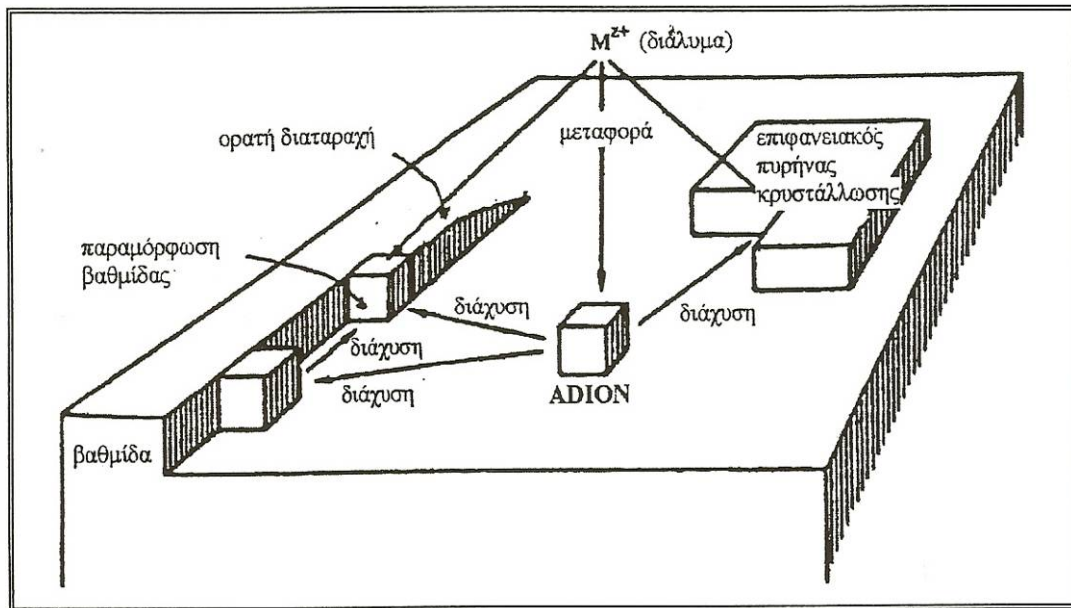
Αφού τα ενυδατωμένα μεταλλικά ιόντα του διαλύματος βρεθούν μέσω διάχυσης από τη στοιβάδα του 'Nerst' στο εξωτερικό επίπεδο της διπλοστοιβάδας του 'Helmutz', μία άλλη σύνθετη διαδικασία λαμβάνει χώρα μέχρι τα ιόντα αυτά να αποτεθούν στην επιφάνεια της καθόδου και να σχηματίσουν τη μεταλλική επικάλυψη. Η σύνθετη αυτή διαδικασία καλείται ηλεκτροκρυστάλλωση. Για την περιγραφή της διαδικασίας αυτής έχουν προταθεί τρία μοντέλα τα οποία επεξηγούν το μηχανισμό της ηλεκτροκρυστάλλωσης [13, 14].

Σύμφωνα με το πρώτο μοντέλο (Μοντέλο 1), η αφυδάτωση των μεταλλικών ιόντων γίνεται σταδιακά. Το ενυδατωμένο μεταλλικό ιόν μεταφέρεται από το εξωτερικό επίπεδο 'Helmutz' της διπλοστοιβάδας σε ένα τυχαίο σημείο της επιφάνειας της καθόδου (Σχήμα 1.4). Τότε λαμβάνει χώρα η πρώτη παραμόρφωση της στοιβάδας ενυδάτωσης του μεταλλικού ιόντος, χάνοντας ένα μόριο νερού. Στη θέση αυτή, το μερικώς ενυδατωμένο ιόν γειτονεύει με ένα μόνο μεταλλικό άτομο του υποστρώματος και τα ηλεκτρόνια του μετάλλου μπορούν να εξουδετερώσουν μερικώς το θετικό φορτίο του ιόντος. Ένα τέτοιο απορροφημένο, μερικώς εξουδετερωμένο και μερικώς ενυδατωμένο ιόν ονομάζεται 'προσ-ιόν' (adsorbed ion ή adion). Στη συνέχεια, για να ενσωματωθεί το 'προσ-ιόν' στο κρυσταλλικό πλέγμα πρέπει με επιφανειακή διάχυση να μεταφερθεί κατά μήκος της επιφάνειας του ηλεκτροδίου, μέχρι να φτάσει σε περισσότερο ευνοϊκή θέση για την ενσωμάτωσή του. Τέτοιες θέσεις είναι οι βαθμίδες των διαταραχών, οι παραμορφώσεις των βαθμίδων διαταραχών και οι οπές.

Κατά το δεύτερο μοντέλο (Μοντέλο 2), η μεταφορά του μεταλλικού ιόντος από το εξωτερικό επίπεδο της διπλοστοιβάδας του 'Helmutz' (OHP) γίνεται σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας της καθόδου, αλλά με σύγχρονη πλήρη αφυδάτωση του ιόντος. Ταυτόχρονα, τα μεταλλικά αυτά ιόντα αντιδρώντας με τα ηλεκτρόνια του κυκλώματος μετατρέπονται σε μεταλλικά άτομα. Αυτά προσροφώνται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου της καθόδου και αποκαλούνται 'προσ-άτομα' (adsorbed atoms ή adatoms). Για να ενσωματωθούν στο κρυσταλλικό πλέγμα της μεταλλικής επικάλυψης πρέπει να υποστούν και αυτά επιφανειακή διάχυση, μέχρι να φτάσουν σε ευνοϊκή θέση ενσωμάτωσης.

Τέλος, κατά το τρίτο μοντέλο (Μοντέλο 3), το μεταλλικό ιόν μετακινείται μέσα στην εξωτερική στοιβάδα 'Helmutz' (OHP) παράλληλα προς την επιφάνεια της καθόδου, έως ότου βρεθεί απέναντι από μία ευνοϊκή θέση κρυστάλλωσης (π.χ. βαθμίδα διαταραχών ή οπή). Σε αυτή την περίπτωση, η

ενσωμάτωση του μεταλλικού ιόντος στο κρυσταλλικό πλέγμα της επιφάνειας της καθόδου είναι άμεση και ταυτόχρονη με την αφυδάτωση και την αποφόρτιση του μεταλλικού ιόντος.



Σχήμα 1.4: Μηχανισμός ηλεκτροκρυστάλλωσης [14].

Η ωθούσα δύναμη για την επιφανειακή διάχυση, η οποία προβλέπεται από τα Μοντέλα 1 και 2 είναι η διαβάθμιση της συγκέντρωσης των ‘προσ-ιόντων’ και ‘προσ-ατόμων’, αντίστοιχα. Ανάλογα με τις συνθήκες, βραδύτερο στάδιο της ηλεκτροκρυστάλλωσης μπορεί να είναι είτε το στάδιο της μεταφοράς των ηλεκτρονίων από την εξωτερική στοιβάδα ‘Helmutz’ (OHP) στην επιφάνεια της καθόδου, είτε το στάδιο της επιφανειακής διάχυσης των ‘προσ-ιόντων’ ή των ‘προσ-ατόμων’. Όταν η επιφάνεια στην οποία πραγματοποιείται η καθοδική δράση δεν έχει μεγάλο αριθμό ευνοϊκών θέσεων ενσωμάτωσης των ‘προσ-ατόμων’, η επιφανειακή συγκέντρωση αυτών αυξάνεται. Η αύξηση αυτή της συγκέντρωσης των ‘προσ-ατόμων’ οδηγεί στο σχηματισμό με τυχαίο τρόπο συσσωματωμάτων, δηλαδή νέων φάσεων μικροσκοπικών διαστάσεων, τα οποία όταν το μέγεθος τους ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή ονομάζονται πυρήνες κρυστάλλωσης. Η ανάπτυξη προϋπαρχόντων κρυστάλλων και η πυρηνοποίηση νέων κρυστάλλων είναι ανταγωνιστικές διαδικασίες κατά την ηλεκτροκρυστάλλωση και επηρεάζονται από παράγοντες όπως ο ρυθμός επιφανειακής διάχυσης των προσροφημένων ειδών (‘προσ-ιόντων και ‘προσ-ατόμων’) και ο αριθμός τους. Πιο συγκεκριμένα, υψηλός ρυθμός επιφανειακής διάχυσης και μικρός αριθμός απορροφημένων ειδών ευνοεί την ανάπτυξη των προϋπαρχόντων κρυστάλλων. Αντίθετα, χαμηλοί ρυθμοί επιφανειακής διάχυσης και μεγάλος αριθμός απορροφημένων ειδών ευνοεί την πυρηνοποίηση νέων κρυστάλλων.

1.6 Ηλεκτρολυτική Απόθεση Κασσίτερου (Sn)

1.6.1 Κασσίτερος (Sn)

Ο κασσίτερος (Sn) είναι γνωστός από την αρχαιότητα με τη μορφή του κράματός του με χαλκό. Δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος στη φύση και βρίσκεται στα πυριγενή πετρώματα. Το σημαντικότερο ορυκτό του κασσίτερου είναι ο κασσιτερίτης (θειούχος κασσίτερος - SnS), ενώ τα άλλα ορυκτά του είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε κασσίτερο.

Επειδή η περιεκτικότητα σε κασσίτερο των ορυκτών του δεν είναι σημαντική, αρχικά εμπλουτίζεται με κατάλληλες διαδικασίες και μετά με αναγωγή σε διάφορους τύπους κλιβάνων λαμβάνεται ακάθατος κασσίτερος. Ακολούθως, λαμβάνεται καθαρός κασσίτερος, αφού απομακρυνθούν οι ξένες προσμίξεις με θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ εκείνες του σιδήρου, απομακρύνονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Ο κασσίτερος είναι μέταλλο αργυρόλευκο με έντονη λάμψη. Επίσης, είναι πολύ μαλακός και εύκολα κατεργάσιμος, με μικρή αντοχή στον εφελκυσμό. Παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στη διάβρωση. Η πυκνότητά του είναι περίπου ίση με 7300 Kg/m^3 . Έχει ειδικό βάρος 7,3, σημείο τήξης στους $232 \text{ }^\circ\text{C}$ και συντελεστή γραμμικής διαστολής 0,00027. Η φυσική του λάμψη δεν εξαφανίζεται ακόμη και μετά από μακροχρόνια αποθήκευση. Η εφελκυστική αντοχή του μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη μολύβδου και χαλκού ενώ ελαττώνεται όσο αυξάνει η θερμοκρασία. Ο κασσίτερος ανήκει στα πιο εύπλαστα μέταλλα και μπορεί να σφυρηλατηθεί, να συρματοποιηθεί και να ελαθεί εν ψυχρώ. Η διαμόρφωση με θέρμανση δεν εφαρμόζεται στον κασσίτερο επειδή στους $200 \text{ }^\circ\text{C}$ γίνεται εύθραυστος και ψαθυρός και τελικά θρυμματίζεται εντελώς. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ευαισθησία του κασσίτερου και στις χαμηλές θερμοκρασίες. Ο κασσίτερος είναι ευγενές στοιχείο σχεδόν όσο και το υδρογόνο, είναι πολύ ανθεκτικός στις ατμοσφαιρικές επιδράσεις, στα περισσότερα αλκάλια, αλογόνα και ενώσεις αλογόνων.

Όπως και ο ψευδάργυρος έτσι και ο κασσίτερος είναι μέταλλο που δεν οξειδώνεται εύκολα ούτε στον αέρα αλλά ούτε και στο νερό, γι' αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για επικαλύψεις μετάλλων (επικασσιτερώσεις). Είναι ελατός, περισσότερο από τον ψευδάργυρο, και όλκιμος. Από τον κασσίτερο κατασκευάζονται φύλλα και σύρματα. Κατασκευάζονται ακόμα λεπτότατα φύλλα, τα οποία επειδή δεν οξειδώνονται, χρησιμεύουν για τη συσκευασία τροφίμων (τυριών, βουτύρου, σοκολάτας κ.τ.λ.).

Ο κασσίτερος σχηματίζει με άλλα μέταλλα κράματα πολύ χρήσιμα, όπως ο μπρούντζος, το λευκό ή αντιτριβικό κράμα (αντιμόνιο - κασσίτερος), κράματα με το μόλυβδο, όπως το συγκολλητικό κράμα των λευκοσιδηρουργών, το συγκολλητικό κράμα των λεβητοποιιών και το συγκολλητικό κράμα των υδραυλικών. Λόγω της ανθεκτικότητάς του στο μαλακό νερό και σε νερό που περιέχει οξέα, ο κασσίτερος χρησιμοποιείται σε σωλήνες υδρεύσεων. Σε μορφή φύλλων χρησιμεύει στην επένδυση

δεξαμενών, σε μορφή λεπτών φύλλων (foils) για μονώσεις. Χρησιμεύει επίσης για μαλακές κολλήσεις (κασσιτεροκολλήσεις). Ο τετραχλωριούχος κασσίτερος χρησιμοποιείται στην υαλουργία και κυρίως για την κατασκευή θερμαντικού γυαλιού. Επίσης, το διοξείδιο του κασσίτερου χρησιμοποιείται στην υαλουργία, για τη στίλβωση μαρμάρου και διακοσμητικών λίθων και στο χρωματισμό κεραμικών προϊόντων. Τέλος, ο κασσίτερος χρησιμοποιείται στην επικασσιτέρωση λεπτών φύλλων σιδήρου (λευκοσίδηρος, τενεκές) και στην παρασκευή συγκολλητικών κραμάτων (π.χ. το «καλάι» είναι κράμα κασσίτερου και μολύβδου).

1.6.2 Επικασσιτέρωση

Για πολλά χρόνια, η επικασσιτέρωση γινόταν σχεδόν αποκλειστικά με θερμό γαλβανισμό (τηγμένο μέταλλο). Η ηλεκτρολυτική επικασσιτέρωση όμως εφαρμόζεται ευκολότερα σε μικρά αντικείμενα και δίνει ομοιόμορφες αποθέσεις. Το απαιτούμενο πάχος των αποθέσεων εξαρτάται από τις συνθήκες περιβάλλοντος στις οποίες πρόκειται να εκτεθούν οι επικασσιτερωμένες επιφάνειες. Όταν οι συνθήκες είναι έντονα διαβρωτικές χρησιμοποιούνται πάχη μέχρι και 80 μm ενώ όταν οι συνθήκες είναι ήπιες εφαρμόζονται πάχη 4 μm . Η ανθεκτικότητα των επικασσιτερωμένων επιφανειών στη διάβρωση αυξάνεται σημαντικά με παθητικοποίησή τους. Τα επικασσιτερωμένα αντικείμενα για να παθητικοποιηθούν, εμβαπτίζονται για μερικά δευτερόλεπτα σε διάλυμα χρωμικών ή φωσφορικών αλάτων.

Τα ηλεκτρολυτικά λουτρά επικασσιτέρωσης είναι είτε αλκαλικά είτε όξινα. Τα αλκαλικά, περιέχουν κασσιτερικό νάτριο ή κάλιο ενώ τα όξινα, περιέχουν θειικό ή φθοριοβορικό κασσίτερο. Σε όλα τα παραπάνω διαλύματα, ο κασσίτερος βρίσκεται με τη μορφή δισθενούς ιόντος (Sn^{2+}), το οποίο όμως εύκολα οξειδώνεται από το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα προς τετρασθενές ιόν κασσίτερου (Sn^{4+}) προκαλώντας έτσι προβλήματα στην καλή λειτουργία των λουτρών και την ποιότητα των αποθέσεων.

Τα αλκαλικά λουτρά επικασσιτέρωσης χρησιμοποιούνται κυρίως σε επικασσιτερώσεις μικρού πάχους και όπως αναφέρθηκε, περιέχουν κασσιτερικό νάτριο ή κάλιο. Το κασσιτερικό κάλιο, παρόλο που είναι ακριβότερο, χρησιμοποιείται σε μεγάλα λουτρά γιατί είναι σταθερότερο και δίνει μεγαλύτερες ταχύτητες απόθεσης. Όπως σε όλα τα αλκαλικά λουτρά, υπάρχει και εδώ το πρόβλημα του εγκλεισμού υδρογόνου στις επιμεταλλωμένες επιφάνειες, ιδιαίτερα όταν αυτές αποτελούνται από χάλυβες. Τα χαλύβδινα αντικείμενα, τα οποία επικασσιτερώνονται με αυτό τον τρόπο, στη συνέχεια υποβάλλονται σε θέρμανση σε θερμοκρασίες από 190 έως 210 °C. Ο χρόνος της θέρμανσης εξαρτάται από τον τύπο του χάλυβα και το πάχος της απόθεσης και κυμαίνεται από 2 έως 24 ώρες.

Οι αποθέσεις που προκύπτουν από τα όξινα διαλύματα είναι στιλπνότερες σε σύγκριση με αυτές που προκύπτουν από τα αλκαλικά. Τα όξινα λουτρά έχουν υψηλές αποδόσεις ρεύματος (σχεδόν 100 %)

και λειτουργούν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Προτιμώνται για επικασσιτερώσεις μεγάλου πάχους. Για τη βελτίωση της ποιότητας των αποθεμάτων γίνεται πολλές φορές χρήση οργανικών πρόσθετων, όπως π.χ. κρεζόλης, ζελατίνης, β-ναφθόλης, κ.ά.

Στην ηλεκτρολυτική επικασσιτέρωση, για επικασσιτερώσεις μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιούνται άνοδοι από κασίτερο, ενώ για μικρότερης κλίμακας χρησιμοποιούνται άνοδοι από χάλυβα. Οι άνοδοι από κασίτερο αποτελούν την οικονομικότερη λύση για τη διατήρηση της περιεκτικότητας του λουτρού σε κασίτερο - στο απαραίτητο για την ομαλή λειτουργία επίπεδο - μιας και τα κασιτερικά άλατα είναι ακριβά. Επιπλέον, η χρήση τέτοιων ανόδων επιβάλλεται στα όξινα - θειικά λουτρά, για να αποφευχθεί η συγκέντρωση λάσπης στις ανοδικές περιοχές. Η λειτουργία όμως των λουτρών, στα οποία χρησιμοποιούνται άνοδοι από κασίτερο, επηρεάζεται σημαντικά από φαινόμενα πόλωσης της ανόδου, σχηματισμού τετρασθενούς κασιτέρου και αύξησης του pH. Από την άλλη μεριά, η χρήση χαλύβδινων ανόδων προκαλεί ταχύτερη διάσπαση του λουτρού, ενώ οι καθοδικές αποδόσεις ρεύματος είναι χαμηλότερες.

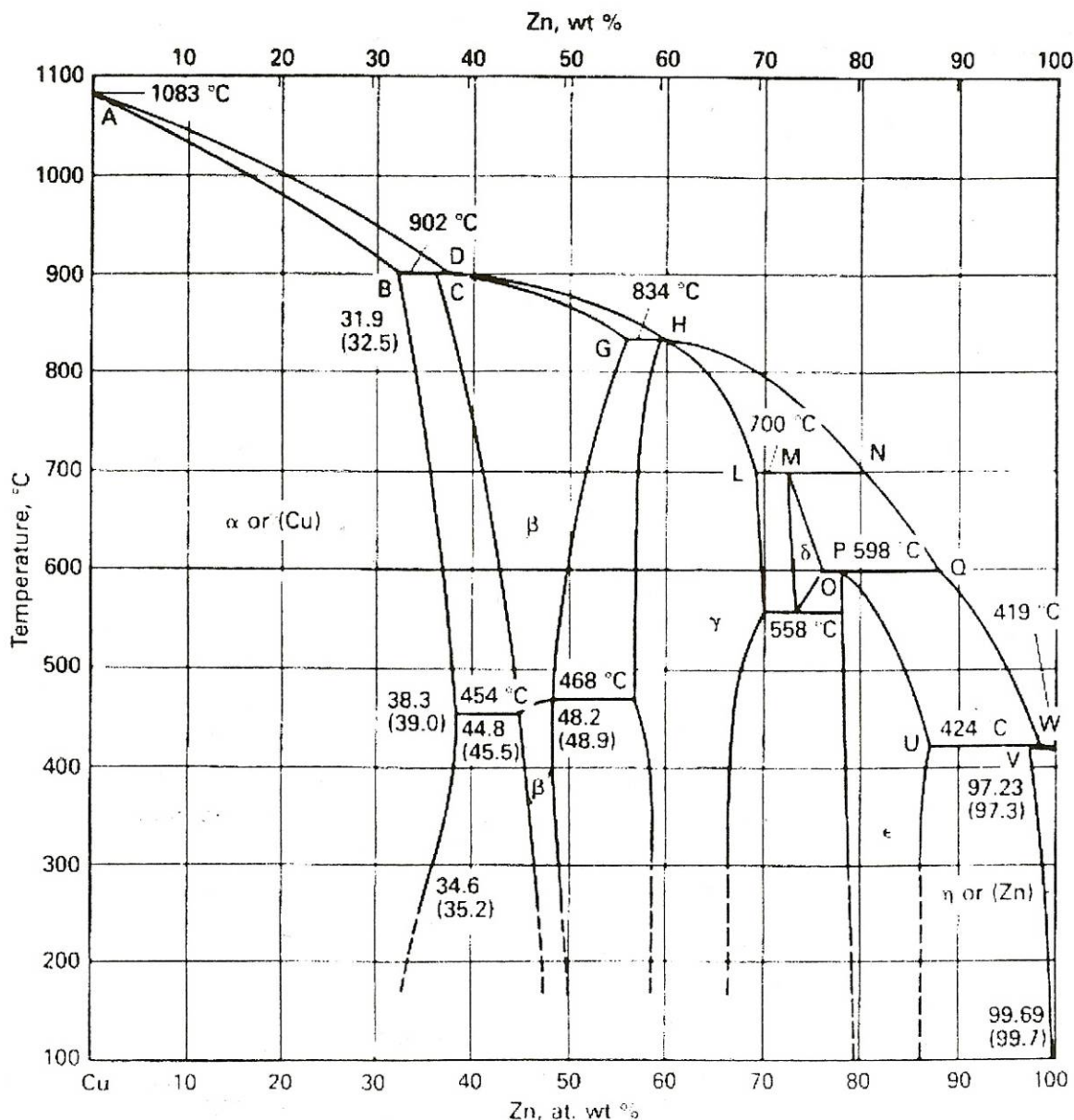
Η επικάλυψη μεταλλικών επιφανειών με κασίτερο χρησιμοποιείται ευρύτατα στην αντιδιαβρωτική προστασία της συσκευασίας των τροφίμων (κουτιά κονσέρβας κλπ.), λόγω της μη τοξικότητας του μετάλλου και των προϊόντων διάβρωσής του. Επίσης, τα προϊόντα αυτά δεν αλλοιώνουν τη γεύση των τροφίμων.

1.7 Κράματα Χαλκού (Cu)

1.7.1 Κράμα Ορείχαλκου (Cu - Zn)

Από το διάγραμμα φάσεων του ορείχαλκου είναι γνωστό ότι για ορείχαλκους με περιεκτικότητα Zn μέχρι 68 % συναντάμε διαδοχικά τις τρεις φάσεις α , β και γ . Η φάση α (Zn: 0-39%) έχει καλή πλαστικότητα εν ψυχρώ, η φάση β (Zn: 46-51%) έχει καλή πλαστικότητα εν θερμώ η οποία ελαττώνεται εν ψυχρώ, ενώ η γ (Zn: 56-68%) λόγω της κρυσταλλικής της δομής είναι εύθραυστη. Γι' αυτό το λόγο στην πράξη χρησιμοποιούνται δύο είδη ορείχαλκου. Ο ορείχαλκος α με Zn: 5-39% και ο ορείχαλκος $\alpha + \beta$ με Zn: 40-45%. Οι ορείχαλκοι οι οποίοι αποτελούνται μόνο από β φάση ή $\beta + \gamma$, δηλαδή με περιεκτικότητα σε Zn > 46 %, δεν έχουν πρακτική εφαρμογή λόγω της ευθραυστότητάς τους.

Οι ορείχαλκοι διατηρούν γενικά τις βασικές καλές μηχανικές ιδιότητες του χαλκού, είναι δε φθηνότεροι λόγω του περιεχόμενου ψευδάργυρου. Το σημείο τήξης μειώνεται όπως φαίνεται από το διάγραμμα φάσεων (Σχήμα 1.5). Η σκληρότητα του κράματος αυξάνει με την αύξηση της περιεκτικότητας Zn, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.6. Επίσης, φαίνεται η πτώση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Οι ορείχαλκοι δεν είναι κατάλληλοι για ηλεκτρικές εφαρμογές.

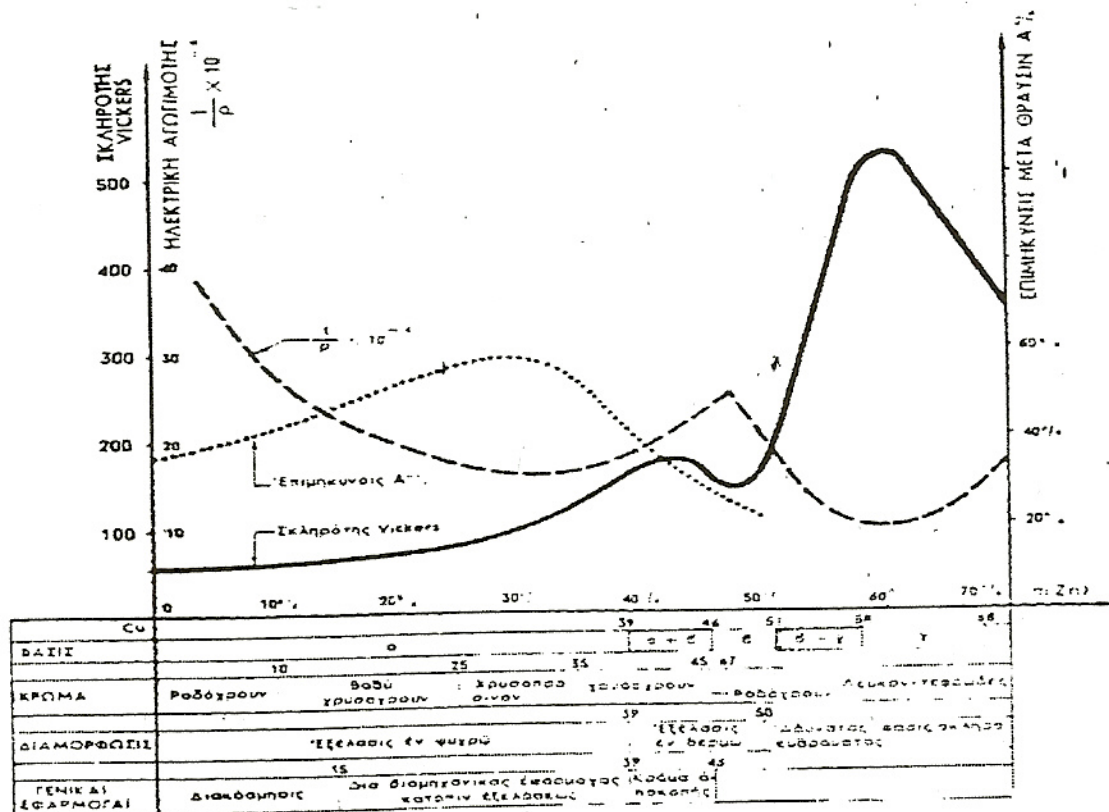


Σχήμα 1.5: Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος (Cu - Zn) [15].

Το χρώμα των ορείχαλκων μεταβάλλεται συναρτήσει της περιεκτικότητας σε Zn. Αυξανόμενου του ποσοστού σε Zn, το χρώμα των ορείχαλκων μεταβάλλεται από κόκκινο σε κίτρινο. Η ικανότητα στην πλαστική διαμόρφωση είναι μεγάλη και μεταβάλλεται συναρτήσει της περιεκτικότητας σε Zn, ενώ γίνεται μέγιστη για ορείχαλκο με περιεκτικότητα σε Zn μέχρι 28 - 30 %. Το κράμα αυτό εμφανίζει τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες για εξέλαση με κοίλανση, απ' όλα τα μη σιδηρούχα κράματα. Με περαιτέρω αύξηση της περιεκτικότητας σε Zn, η σκληρότητα ελαττώνεται ενώ η ολκιμότητα συνεχίζεται αυξανόμενη.

Οι ορείχαλκοι α διαμορφώνονται εύκολα εν ψυχρώ, ενώ εν θερμώ πρέπει να μην περιέχουν μόλυβδο. Οι ορείχαλκοι $\alpha + \beta$ έχουν πολύ καλύτερες ιδιότητες στην διαμόρφωση εν θερμώ, γι' αυτό

και η διέλαση για ράβδους και σωλήνες εφαρμόζονται στους ορείχαλκους $\alpha + \beta$. Η εξέλαση των ορείχαλκων α γίνεται με ενδιάμεσες ανοπτήσεις.



Σχήμα 1.6: Επίδραση της περιεκτικότητας Zn στη σκληρότητα του ορείχαλκου [16].

Οι τυπικοί ορείχαλκοι, σύμφωνα με τις σύγχρονες προδιαγραφές, καθορίζονται βάσει της σύνθεσης τους. Στον Πίνακα 1.1, δίνονται οι τύποι των ορείχαλκων και τα σχετικά μηχανικά χαρακτηριστικά τους σύμφωνα με τις γαλλικές προδιαγραφές AFNOR.

Οι ορείχαλκοι U-Z10, U-Z15, U-Z28 χρησιμοποιούνται στη διακοσμητική και την αρχιτεκτονική σε κάγκελα, κοσμήματα, νομίσματα, έργα τέχνης, μουσικά όργανα. Επίσης, απ’ αυτή την κατηγορία κατασκευάζονται σωλήνες εναλλακτών θερμότητας λόγω της καλής τους θερμικής αγωγιμότητας και της αντοχής τους στη διάβρωση.

Ο ορείχαλκος U-Z33 είναι τυπικός ορείχαλκος για εξέλαση με κοίλανση. Πρέπει να είναι όμως αυξημένης καθαρότητας και το σύνολο των ακαθαρσιών να μην ξεπερνάει το 0,15 %. Η έλαση γίνεται εν θερμώ (725 - 850 °C) μέχρι 7 mm πάχος. Ακολουθεί ψυχρή έλαση με ανοπτήσεις στους 620 °C για μία ώρα. Τα ελάσματα χρησιμοποιούνται για κατασκευή καλύκων, ψυγείων αυτοκινήτων.

Ό ρ ε ί ζ α λ κ ο ι															
ΤΥΠΟΣ	Ανάλυση			Ανοπτη μένος		1/4 σκληρός		1/2 σκληρός		3/4 σκληρός		4/4 σκληρός		Σκληρότης ελατηρίου	
	Cu	Zn		R	A ⁰ / ₀	R	A ⁰ / ₀	R	A ⁰ / ₀	R	A ⁰ / ₀	R	A ⁰ / ₀	R	A ⁰ / ₀
α	U-Z10	90	10		25	40	32	20	36	15	40	12	43	10	
	U-Z15	85	15		27	45	33	25	38	18	42	13	45	10	
	U-Z28	72	28		30	53	34	33	40	22	45	14	50	10	
	U-Z33	67	33		30	53	34	35	40	20	45	12	50	8	58
	U-Z36	64	36		31	48	35	32	42	16	47	10	53	7	60
β + γ	U-Z40	60	40		32	45	39	20	44	12	49	8	56	6	62
	U-Z39 Pb1	59	39.5	Pb=1.5	38	40							58	5	

Πίνακας 1.1: Τύποι ορείχαλκων με τα σχετικά μηχανικά χαρακτηριστικά τους σύμφωνα με τις γαλλικές προδιαγραφές AFNOR [17].

Ο ορείχαλκος α + β φάσης τύπου U-Z40 ονομάζεται στο εμπόριο ορείχαλκος MUNTZ. Χρησιμοποιείται για σωλήνες εναλλακτών θερμότητας, κοχλίες, περικόχλια και άλλα τμήματα μηχανών καθώς και σε διακοσμητικά τεμάχια.

Στους ορείχαλκους με περιεκτικότητα σε Zn > 10% και ακόμα περισσότερο με Zn > 20%, παρατηρείται συχνά το φαινόμενο της εργοδιάβρωσης. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε διάβρωση από την υγρή ατμόσφαιρα του αέρα στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, όταν ο ορείχαλκος βρίσκεται υπό την επιρροή τάσεων. Οι τάσεις αυτές μπορεί να προέρχονται από εξωτερικές δυνάμεις, αλλά μπορεί να προκύπτουν και εσωτερικές τάσεις λόγω ενδοτράχυνσης.

Η διάβρωση αυτή γίνεται με την προσβολή του ψευδαργύρου περικρυσταλλικά, δηλαδή κατά μήκος των ορίων των κόκκων. Η διάβρωση αυτή είναι ταχύτετη όταν υπάρχει αμμωνιακή ατμόσφαιρα ή ατμόσφαιρα αλάτων υδραργύρου. Το σοβαρό αυτό πρόβλημα μπορεί να αποφευχθεί αρκεί μετά από την πλαστική παραμόρφωση να γίνει αποτατική ανόπτηση (στους 275 °C) για μισή ώρα. Η ανόπτηση αυτή μειώνει τις εσωτερικές τάσεις χωρίς να ελαττώνει την σκληρότητα.

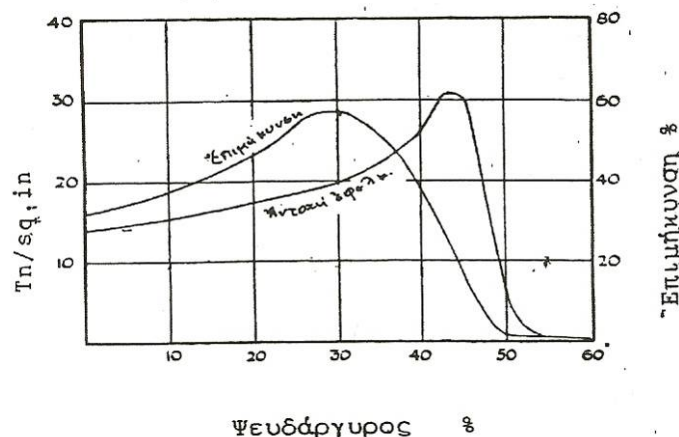
Ένα άλλο συχνό φαινόμενο αστοχίας ορειχάλκινων εξαρτημάτων, π.χ. σωλήνων που έρχονται σε επαφή με υγρό περιβάλλον, είναι η αποψευδαργύρωση του ορειχάλκινου κράματος. Παρατηρείται δηλαδή σταδιακή διάλυση του ψευδαργύρου του ορείχαλκου, μέσα σε υγρό, η οποία γίνεται αντιληπτή με την

εμφάνιση 'κρατήρων' στην επιφάνεια του μετάλλου. Αυτό οφείλεται στην εκλεκτική διάβρωση του ψευδαργύρου (ηλεκτρόλυση) έναντι του χαλκού, ο οποίος θεωρείται ευγενέστερο μέταλλο. Η σποψευδαργύρωση αντιμετωπίζεται με προσθήκη μικρών ποσοτήτων κασσιτέρου (1 %) ή αρσενικού (0,01 - 0,20 %) μέσα στο κράμα. Η προσθήκη αλουμινίου σε ποσοστό περίπου 2 % έχει θετική επίδραση στην αντοχή στη διάβρωση.

1.7.2 Επίδραση της Μικρογραφικής Δομής στις Γενικές Ιδιότητες των Ορείχαλκων Συναρτήσκει των Φάσεων

Ανάλογα με τη περιεκτικότητα του ορείχαλκου σε ψευδάργυρο έχουμε αλλαγή της μικροδομής, με αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του κράματος. Η εξάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων των ορείχαλκων από την περιεκτικότητα των διαφόρων φάσεων συνίσταται στα εξής:

- Η αντοχή σε εφελκυσμό (tensile strength) αυξάνει όσο αυξάνει η περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο. Ανεβαίνει απότομα με την εμφάνιση της β -φάσης και φτάνει σ' ένα μέγιστο σε μία σύνθεση που αντιστοιχεί χονδρικά σε ίσα μέρη από α -φάση και β -φάση, ενώ ξαναμειώνεται απότομα κατά την εμφάνιση της γ -φάσης.
- Η επιμήκυνση (elongation) αυξάνει σε ένα μέγιστο και αρχίζει να πέφτει πάλι προτού η σύνθεση φτάσει το όριο του διαλύματος της α -φάσης. Πέφτει αισθητά καθώς το ποσοστό της β -φάσης αυξάνει. Τέλος, η επιμήκυνση είναι πολύ μικρή όταν υπάρχει η γ -φάση.
- Η σκληρότητα αυξάνει σημαντικά με την παρουσία της β -φάσης και ακόμα περισσότερο με την παρουσία της γ -φάσης.

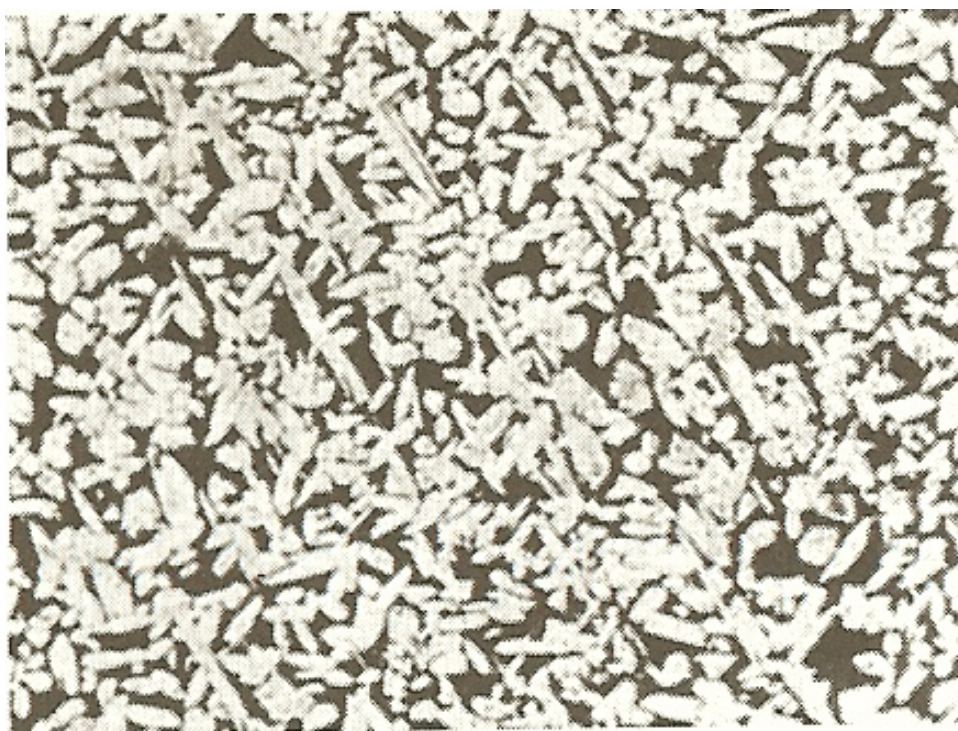


Σχήμα 1.7: Επίδραση της περιεκτικότητας Zn στην αντοχή σε εφελκυσμό και στην επιμήκυνση του ορείχαλκου [18].

Η α -φάση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αντίσταση σε κρούση. Η ιδιότητα αυτή ελαχιστοποιείται αν υπάρχει η β -φάση, ενώ το κράμα γίνεται πολύ εύθραυστο όταν υπάρχει και η γ -φάση (Zn: 58 - 63 %).

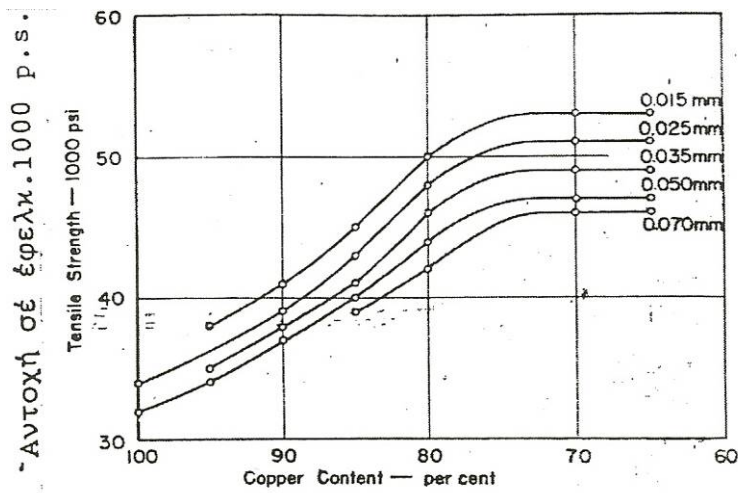
1.7.3 Επίδραση της Μικρογραφικής Δομής στις Γενικές Ιδιότητες των Ορείχαλκων Συναρτήσει του Μεγέθους των Κόκκων

Χαρακτηριστική μορφή ορείχαλκου με αναλογία Cu:Zn ίση με 60:40 μετά από χύτευση και μετά από διέλαση, παρουσιάζεται στη φωτογραφία που ακολουθεί. Η ανοιχτόχρωμη περιοχή αντιστοιχεί στην α -φάση και η σκουρόχρωμη περιοχή αντιστοιχεί στη β -φάση. Κόκκοι κυτταροειδούς μορφής συνήθως σχηματίζονται μόνο μετά από ενδοτράχυνση και εν συνεχεία ανακρυσταλλωτική απόπτωση.

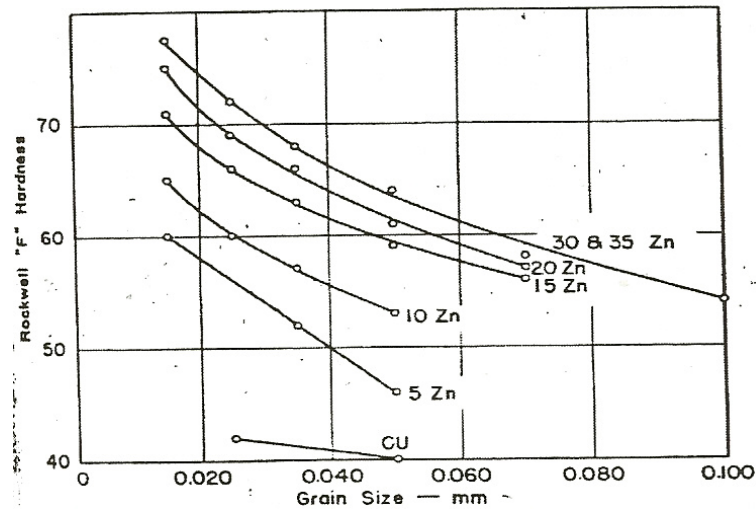


Σχήμα 1.8: Μικρογραφία χυτού ορείχαλκου με αναλογία Cu:Zn ίση με 60:40, φάσης $\alpha + \beta'$, όπου η α -φάση είναι ανοιχτόχρωμη και η β' -φάση σκουρόχρωμη (x70) [19].

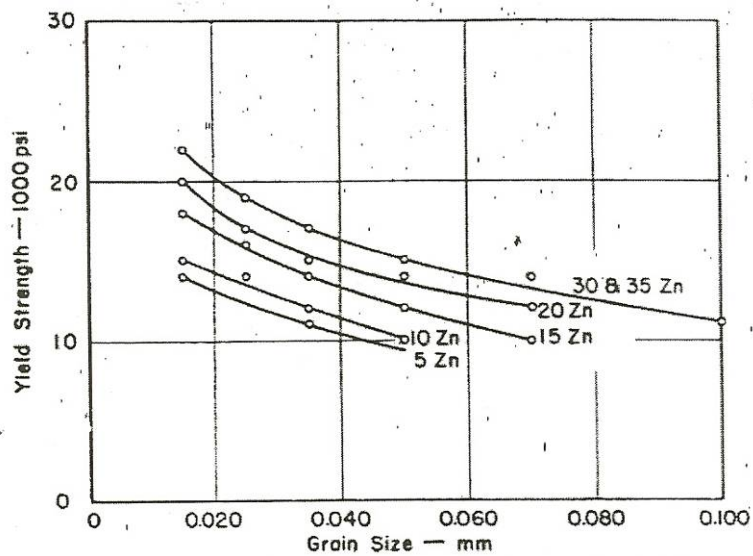
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι μηχανικές ιδιότητες διαφόρων ορείχαλκων συναρτήσει του μεγέθους των κόκκων. Είναι χαρακτηριστικό ότι το μέγεθος των κόκκων δεν επιδρά στον καθαρό χαλκό που δείχνει μικρή αλλαγή στην αντοχή του για τις συνήθεις τιμές του μεγέθους των κόκκων. Η επίδραση του μεγέθους των κόκκων στην αντοχή εφελκυσμού γίνεται περισσότερο εμφανής στους ορείχαλκους και όσο ο ψευδάργυρος αυξάνει έως 20 %. Από το σημείο εκείνο και μετά παραμένει σταθερή για περιεκτικότητα ψευδαργύρου μέχρι 35 % (Σχήμα 1.9). Στο Σχήμα 1.10, παρουσιάζεται η εξάρτηση της σκληρότητας από το μέγεθος των κόκκων, που είναι παρόμοια με αυτήν της αντοχής σε εφελκυσμό.



Σχήμα 1.9: Αντοχή σε εφελκυσμό συναρτήσει της περιεκτικότητας Cu και του μεγέθους των κόκκων [20].

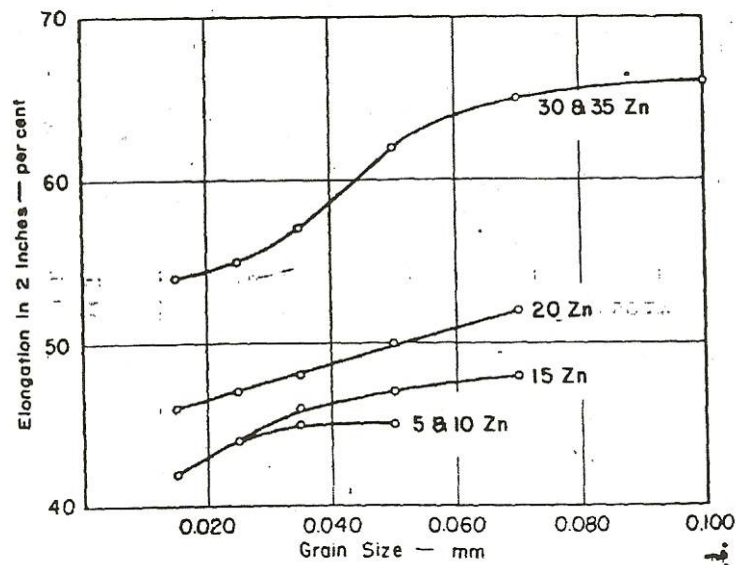


Σχήμα 1.10: Σκληρότητα συναρτήσει του μεγέθους των κόκκων διάφορων ορείχαλκων [21].



Σχήμα 1.11: Όριο διαρροής συναρτήσει του μεγέθους των κόκκων διάφορων ορείχαλκων [22].

Από το Σχήμα 1.12, συνεπάγεται πως η επιμήκυνση αυξάνει με το μέγεθος κόκκων. Η επιμήκυνση μαζί με την αντοχή σε εφελκυσμό αποτελούν τα κριτήρια της ελαστικότητας και γενικότερα η ελαστικότητα μεγαλώνει όσο αυξάνει η διάμετρος των κόκκων.



Σχήμα 1.12: Επιμήκυνση συναρτήσει του μεγέθους των κόκκων διάφορων ορείχαλκων [23].

1.8 Σύνθετες Ηλεκτρολυτικές Επικαλύψεις Μεταλλικής Μήτρας (MMCs)

1.8.1 Εισαγωγή

Τα σύνθετα υλικά αναπτύχθηκαν με σκοπό τη δημιουργία προϊόντων με εξειδικευμένο συνδυασμό ιδιοτήτων. Τα υλικά αυτά επιτρέπουν την εξοικονόμηση πόρων, με την αντικατάσταση μέρους των πολύτιμων φυσικών πρώτων υλών με άλλες φθηνότερες, διατηρώντας όμως στο τελικό προϊόν τις ιδιότητες των συστατικών που έχουν αντικατασταθεί.

Τα σύνθετα υλικά:

- Αποτελούνται από δύο ή περισσότερα υλικά με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, τα οποία μπορούν να διαχωριστούν με χρήση μηχανικών μεθόδων.
- Παράγονται με ανάμειξη των επιμέρους υλικών και ελεγχόμενη διασπορά του ενός στο εσωτερικό του άλλου.
- Συνήθως δε διαλύονται το ένα στο άλλο και είναι δυνατόν να εντοπιστεί διεπιφάνεια μεταξύ των συστατικών τους.
- Αποκτούν νέες ιδιότητες, βελτιωμένες συγκρινόμενες με εκείνες των συστατικών τους.

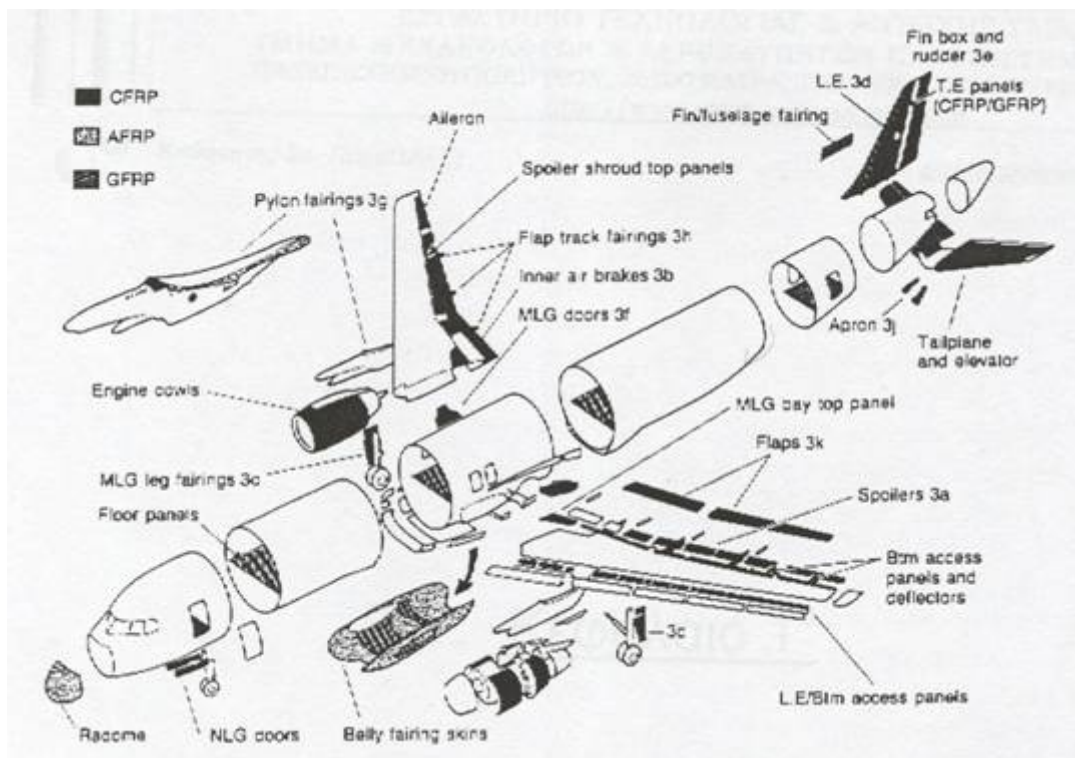
1.8.2 Σύνθετα Υλικά

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν μία πολύ σημαντική κατηγορία των μηχανολογικών υλικών που έχει στη διάθεσή του ο σχεδιαστής μηχανικός. Μάλιστα, τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μία άνοδος του

ποσοστού των υλικών αυτών σε διάφορες κατασκευές, διότι τα σύνθετα υλικά προσφέρουν ένα μοναδικό συνδυασμό ιδιοτήτων και περισσότερη ευελιξία στο σχεδιασμό σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά όπως τα μέταλλα.

Υπάρχουν κάποια χαρακτηριστικά που συνδέουν όλα τα σύνθετα υλικά. Γενικά, το κύριο χαρακτηριστικό όλων των σύνθετων υλικών είναι η ανισοτροπία. Επομένως, οι ιδιότητες των υλικών αυτών διαφέρουν σημαντικά στις διάφορες διευθύνσεις προσανατολισμού. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα, η ανισοτροπία, δίνει τεράστιες δυνατότητες κατά το σχεδιασμό, γι'αυτό και τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές αλλά και σε κατασκευές υψηλής τεχνολογίας, κυρίως στους τομείς της αεροναυπηγικής και αεροδιαστημικής τεχνολογίας.

Τα σύγχρονα σύνθετα υλικά αποτελούνται κυρίως από ίνες υψηλής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας που βρίσκονται μέσα σε κατάλληλα επιλεγμένες μήτρες. Οι εξαιρετικές τιμές των μηχανικών τους ιδιοτήτων ανά μονάδα βάρους, οδηγούν σε μεγάλη οικονομία στις κατασκευές. Ένα επιπλέον πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα ενίσχυσης συγκεκριμένων μόνο διευθύνσεων της κατασκευής οι οποίες παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος των εξωτερικών φορτίων, όπου η ανάλυση τάσεων έχει δείξει ότι είναι οι πιο επικίνδυνες να αστοχήσουν. Αυτή η δυνατότητα των σύνθετων υλικών, προσφέρει εξαιρετική ευελιξία κατά το σχεδιασμό και την επιλογή των ιδιοτήτων.



Σχήμα 1.13: Χρήση των συνθέτων υλικών στην αεροπορική βιομηχανία.

Η μηχανική συμπεριφορά των ενισχυμένων με συνεχείς, μακριές και παράλληλες ίνες σύνθετων υλικών, εξαρτάται από την ικανότητα του δεσμού που αναπτύσσεται μεταξύ τους, να μεταφέρει τα εξωτερικά φορτία. Η καλύτερη πάντως εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των ινών γίνεται όταν αυτές είναι τοποθετημένες παράλληλα στη διεύθυνση του επιβαλλόμενου φορτίου. Τέλος, καθοριστικό ρόλο στην εν γένει συμπεριφορά των σύνθετων υλικών έχει η διαδικασία παραγωγής τους.

Τα σύνθετα υλικά συνδυάζουν τις ιδιότητες των συστατικών που τα απαρτίζουν με σκοπό τη σύνθεση ενός υλικού με βελτιωμένες τριβολογικές, οπτικές, χημικές, ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες. Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται συνήθως από δύο φάσεις:

- τη μήτρα (matrix), η οποία μπορεί να είναι είτε μέταλλο, είτε κεραμικό είτε πολυμερές.
- το ενισχυτικό υλικό, το οποίο μπορεί να είναι είτε μέταλλο, είτε πολυμερές είτε κεραμικό. Το ενισχυτικό υλικό μπορεί να είναι σε μορφή κόκκων (particulate), ινών (fibres) ή να αποτελείται από στρώματα (laminar) [24].

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το κριτήριο που χρησιμοποιείται. Επομένως, αν το είδος της ενίσχυσης είναι το κριτήριο διαχωρισμού, τότε είναι δυνατόν να διακρίνουμε τα παρακάτω είδη. Συγκεκριμένα, υπάρχουν σύνθετα με:

- Μακριές - συνεχείς ίνες μέσα στη μήτρα οι οποίες μπορεί να είναι παράλληλες προσανατολισμένες ή τυχαίου προσανατολισμού.
- Μικρού μήκους ίνες και πάλι προσανατολισμένες ή τυχαία διασκορπισμένες μέσα στη μήτρα.
- Κόκκους, όπως σφαιρίδια, επίπεδα, ελλειψοειδή, κενά κ.ά.
- Διασπορές που είναι σαν τους κόκκους αλλά έχουν διάμετρο μικρότερη των 10^{-8} m.
- Δομές σε στρωματώσεις.
- Αλληλοδιαχέομενα δίκτυα.
- Πολλές φάσεις, δηλαδή μία μήτρα και εγκλείσματα περισσότερων του ενός είδους.

Αν όμως χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο διαχωρισμού το υλικό της μήτρας, τότε έχουμε τα εξής είδη συνθέτων:

- Πολυμερικής Μήτρας
- Μεταλλικής Μήτρας
- Κεραμικής Μήτρας

Οι ιδιότητες και η δομή τόσο της ενίσχυσης όσο και της μήτρας αποτελούν τις κύριες συνιστώσες ενός σύνθετου υλικού.

1.9 Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών

Η πιο συνηθισμένη μορφή σύνθετων υλικών προκύπτει με την προσθήκη μιας φάσης στο εσωτερικό της μήτρας. Η φύση της μήτρας μπορεί να δώσει το όνομα σε ολόκληρη κατηγορία σύνθετων συστημάτων. Με βάση τη μήτρα, τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες.

1.9.1 Σύνθετα Υλικά Μεταλλικής Μήτρας

Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας έχει επικεντρωθεί γύρω από το μαγνήσιο, το αλουμίνιο και το τιτάνιο. Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται ως μήτρες είναι ισοτροπικά, συνήθως ελατά και με την προσθήκη κατάλληλης ενισχυτικής φάσης οδηγούν σε συστήματα με πλήθος εφαρμογών. Οι ιδιότητες των σύνθετων συστημάτων μεταλλικής μήτρας επηρεάζονται από τη μηχανική και θερμική καταπόνηση στο στάδιο παρασκευής τους, η οποία καθορίζει τη μικροδομή των συστημάτων αυτών. Αυτά τα υλικά παρουσιάζουν καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, μηδενική απορρόφηση υγρασίας, αντοχή σε κρούσεις και μεγάλη θερμοκρασιακή αντοχή. Τα βασικότερα μειονεκτήματά τους είναι το μεγάλο βάρος τους, το υψηλό κόστος τους και η πολυπλοκότητα της κατασκευής τους [25].

Η απαίτηση για παραγωγή σύνθετων υλικών τα οποία να είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες, δημιούργησε νέες ανάγκες οι οποίες καλύπτονται μόνο από μερικά μέταλλα ή κράματά τους με αποτέλεσμα να αναπτυχθεί η τεχνολογία των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας. Τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας βρίσκουν συνεχώς αυξανόμενες εφαρμογές στη βιομηχανία και κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική και τη βιομηχανία παραγωγής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας είναι [26]:

- Η ολκιμότητα και οι καλύτερες μηχανικές αντοχές των μετάλλων, που συμβάλλουν στη βελτίωση των αντίστοιχων ιδιοτήτων του σύνθετου, αυξάνοντας τη σταθερότητα και το όριο ελαστικότητάς του.
- Η υψηλή τιμή θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας,
- Η αυξημένη αντίσταση των νέων υλικών στην προσβολή και τη διάβρωση από διάφορους διαλύτες,
- Η ευκολία που παρουσιάζει η μεταλλική μήτρα σε επίπεδο συγκολλήσεων και λειάνσεων.

Εντούτοις, τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα που δυσχεραίνουν την εφαρμογή τους, όπως η αυξημένη πυκνότητα σε σχέση με τα αντίστοιχα σύνθετα πολυμερικής μήτρας και κατά συνέπεια η αύξηση του βάρους τους, η δυσκολία

παρασκευής τους με τη χρήση συγκεκριμένων τεχνικών που αυξάνει και το κόστος κατασκευής τους.

Όσον αφορά τις κατηγορίες που ταξινομούνται τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας, η σημαντικότερη παράμετρος είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μέσου ενίσχυσης, αφού η μήτρα μπορεί να είναι ένα μέταλλο ή ένα κράμα μετάλλων. Οι κυριότερες τρεις κατηγορίες είναι οι ακόλουθες [27].

- Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας ενισχυμένα με σωματίδια. Το μέσο ενίσχυσης είναι σωματίδια, με μέγεθος μεγαλύτερο του 1 μm και μικρότερο των 40 μm , που βρίσκονται ομοιόμορφα διεσπαρμένα στη μήτρα. Το κατ' όγκο ποσοστό των σωματιδίων στη μήτρα κυμαίνεται μεταξύ 5 - 40 %.
- Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας ενισχυμένα με διεσπαρμένα μικροσωματίδια (Dispersion Hardened Metal Matrix Composites (MMCs)). Το μέσο ενίσχυσης είναι μικροσωματίδια, με μέγεθος μικρότερο του 1 μm , που βρίσκονται ομοιόμορφα διεσπαρμένα στη μήτρα. Το κατ' όγκο ποσοστό των σωματιδίων στη μήτρα κυμαίνεται μεταξύ 1 - 15 %.
- Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες (Fibre Reinforced MMCs). Το ενισχυτικό μέσο σε αυτή την περίπτωση είναι υπό τη μορφή ινών, μήκους 0,1 - 250 μm , ενώ το κατ' όγκο ποσοστό τους στη μεταλλική μήτρα μπορεί να φτάσει το 70 %.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι παρασκευής σύνθετων μεταλλικών επικαλύψεων σε βιομηχανική κλίμακα, με εφαρμογή διαφορετικής τεχνολογίας ανάλογα με τη χρήση που προορίζεται το κάθε υλικό. Οι βασικότερες βιομηχανικές μέθοδοι είναι η διέλαση (extrusion), η εμβάπτιση σε υγρή φάση (liquid phase impregnation), η χημική απόθεση σε αέρια φάση (chemical vapor deposition), η χημική απόθεση σε φάση πλάσματος (plasma vapor deposition), η συγκαταβύθιση (coprecipitation), ο ψεκασμός τηγμένου μετάλλου (metal spray deposition), η επιφανειακή κατεργασία με ακτίνες λέιζερ (Laser Surface Treatment) και η ηλεκτρολυτική απόθεση (electrodeposition).

1.9.2 Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα σύνθετα υλικά με τις περισσότερες εφαρμογές. Για την παρασκευή τους, συνήθως χρησιμοποιούνται θερμοπλαστικές ή θερμοσκληρυνόμενες πολυμερικές μήτρες. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες πολυμερίζονται σε θερμοκρασίες δωματίου και οι ιδιότητές τους βελτιώνονται στις υψηλές θερμοκρασίες. Οι μήτρες ακόρεστου πολυεστέρα ήταν ο πρώτος τύπος θερμοσκληρυνόμενου πολυμερούς που

χρησιμοποιήθηκε και παραμένουν ακόμη και σήμερα ιδιαίτερα δημοφιλείς λόγω του χαμηλού κόστους τους, ειδικά εφόσον ενισχυθούν με ίνες γυαλιού.

Ένας άλλος τύπος θερμοσκληρυνόμενου είναι οι εποξειδικές ρητίνες. Ο όρος εποξειδική ρητίνη αναφέρεται σε μια κατηγορία πολυμερών που παρασκευάζονται από ένα εποξειδικό μονομερές με μια διαδικασία δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας δύο μονομερή, ένα εποξειδικό και ένα μη εποξειδικό, αντιδρούν σχηματίζοντας ένα προπολυμερές χαμηλού μοριακού βάρους, το οποίο έχει μορφή παχύρρευστου υγρού. Στο δεύτερο στάδιο (πολυμερισμός) το προπολυμερές αντιδρά με το τρίτο συστατικό (σκληρυντής) και αποκτά δομή πλέγματος. Οι ρητίνες αυτές δεν απορροφούν νερό, δεν συρρικνώνονται ιδιαίτερα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες μέχρι 1600 °C [28].

1.9.3 Σύνθετα Υλικά Κεραμικής Μήτρας

Ως κεραμικά υλικά χαρακτηρίζονται ανόργανα στερεά, που είναι χημικές ενώσεις μετάλλων και αμέταλλων στοιχείων. Ο όρος κεραμικό, υποδηλώνει υλικό που έχει υποστεί κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες (ψήσιμο), διαδικασία που σηματοδοτεί και την μέθοδο παρασκευής του. Τα κεραμικά είναι πυρίμαχα, δε διαβρώνονται και γενικά είναι χημικώς αδρανή. Οι ιδιότητες αυτές οφείλονται στη σταθερότητα των ατομικών δεσμών των κεραμικών και ως προς αυτές πλεονεκτούν έναντι των πολυμερών και των μετάλλων. Τα κεραμικά χρησιμοποιούνται και ως μονωτικά υλικά καθώς παρουσιάζουν χαμηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Ο μονωτικός χαρακτήρας τους οφείλεται στην απουσία ηλεκτρονίων αγωγιμότητας. Όσον αφορά στις μηχανικές τους ιδιότητες, είναι σκληρά αλλά εύθραυστα και μη εύπλαστα υλικά, ενώ παρουσιάζουν μικρή αντοχή στον εφελκυσμό.

Κεραμικά τα οποία χρησιμοποιούνται ως μήτρες, είναι τα SiC, Si₃N₄, Al₂O₃, ZrO₂ και τα κεραμικά γυαλιά. Τα σύνθετα κεραμικής μήτρας χαρακτηρίζονται από εξαιρετική αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες, ενώ η προσθήκη κατάλληλης ενισχυτικής φάσης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενδοεπιφανειών, οι οποίες καθιστούν το σύστημα λιγότερο εύθραυστο σε σχέση με την κεραμική μήτρα [29].

1.10 Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών με Βάση το Έγκλεισμα

Χρησιμοποιώντας ως κριτήριο τη μορφή των εγκλεισμάτων, τα σύνθετα ταξινομούνται στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

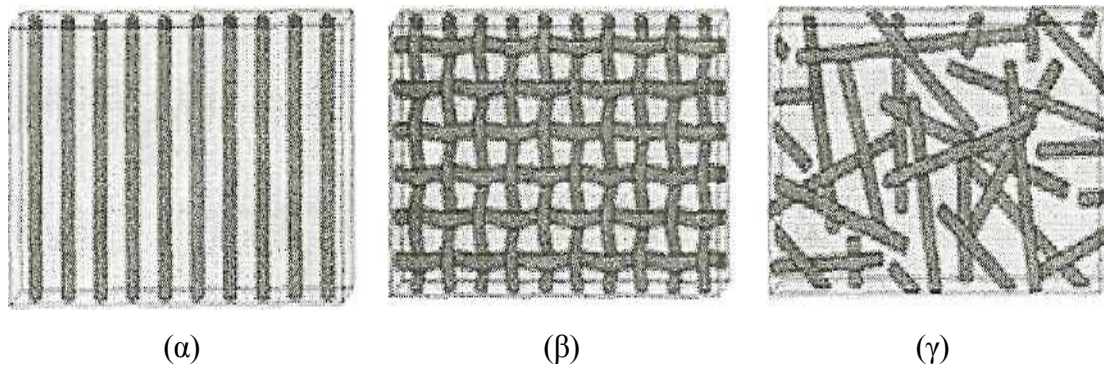
1.10.1 Σύνθετα Υλικά με Εγκλείσματα Υπό Μορφή Κόκκων

Τα υλικά αυτά αποτελούνται από κόκκους ενός ή περισσοτέρων υλικών σε διάφορες μήτρες. Ιδιαίτερη σημασία για τα κοκκώδη προσθετικά έχει η κατανομή του μεγέθους των κόκκων. Το μέγεθος των σωματιδίων επηρεάζει τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού γι' αυτό και η γνώση της κατανομής του μεγέθους είναι αναγκαία. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και τα σύνθετα υλικά με εγκλείσματα υπό μορφή σκόνης. Το χαρακτηριστικό αυτών των υλικών είναι ότι εμφανίζουν σχετική ομοιομορφία στο μέγεθος και το σχήμα και κυμαίνονται σε μικρότερα μεγέθη σε σχέση τα σύνθετα κοκκώδη ενισχυτικής φάσης.

Τα σύνθετα κόκκων ή σκονών εμφανίζουν συνήθως ισότροπες ιδιότητες λόγω της τυχαίας διασποράς των εγκλεισμάτων στο μητρικό υλικό. Η χρησιμοποίηση ανόργανων πληρωτικών υπό μορφή κόκκων οδηγεί σε σύνθετα συστήματα χαμηλού κόστους και προκαλεί αύξηση της αντοχής σε κρούσεις και μείωση της αντοχής στη θερμοκρασία. Τα σύνθετα υλικά με οργανικά πληρωτικά υπό μορφή κόκκων δίνουν τη δυνατότητα χρήσης τους σε υψηλές θερμοκρασίες ενώ οι διηλεκτρικές και μηχανικές τους ιδιότητες τα καθιστούν κατάλληλα για πλήθος εφαρμογών [30].

1.10.2 Σύνθετα Υλικά με Εγκλείσματα Υπό Μορφή Ινών

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα σύνθετα υλικά που αποτελούνται από εγκλείσματα με τη μορφή ινών. Οι ίνες αποτελούν το συνηθέστερο πληρωτικό μέσο των πολυμερικών μητρών. Το είδος και το μήκος της ίνας, η κατανομή των ινών, η επιφανειακή γεωμετρία και η διατομή της ίνας είναι μερικές από τις μεταβλητές που διαμορφώνουν την ποικιλία των σύνθετων υλικών αυτής της κατηγορίας. Οι δυνατότητες για επιπλέον γεωμετρικές μεταβλητές μέσω της διαφορετικής διεύθυνσης στο χώρο εξαρτώνται από το μήκος των ινών, ενώ για μικρού μήκους ίνες μπορεί να υπάρξει και τυχαίος προσανατολισμός. Ο προσανατολισμός των ινών μπορεί να είναι σε μια διεύθυνση, σε πλέγμα ή τυχαίος (Σχήμα 1.14).



Σχήμα 1.14: Προσανατολισμός ινών (α) σε μία διεύθυνση, (β) σε πλέγμα, (γ) τυχαίος.

Οι ίνες, ανάλογα με τη σύνθεση τους, μπορούν να ταξινομηθούν σε ανόργανες και οργανικές. Οι ανόργανες ίνες (ίνες γυαλιού, ίνες μετάλλου κ.α.) είναι θερμοανθεκτικές, άκαμπτες και παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις, καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα σε χημικές προσβολές. Οι οργανικές ίνες (αραμιδικές ίνες, ίνες άνθρακα, κυτταρινικές ίνες κ.α.) είναι γενικά χαμηλού βάρους, ευλύγιστες (παρουσιάζουν υψηλά μέτρα ελαστικότητας) και εμφανίζουν μεγάλη θερμοκρασιακή αντοχή [31].

1.10.3 Πολυστρωματικά Σύνθετα Υλικά

Στα συνθετικά υλικά αυτού του τύπου, η μήτρα και το έγκλεισμα έχουν τη μορφή φύλλων ή στρωμάτων. Ο συνδυασμός αυτός τους προσδίδει διάφορα πλεονεκτήματα όπως αντοχή, ακαμψία, ελαφρότερη κατασκευή, θερμική και ακουστική μόνωση. Χαρακτηριστική περίπτωση αυτής της κατηγορίας είναι οι ασπίδες των αρχαίων Ελλήνων, οι οποίες κατασκευάζονταν από αλεπάλληλα στρώματα μετάλλου και δέρματος. Άλλες περιπτώσεις αυτής της κατηγορίας είναι τα σύνθετα που προκύπτουν από επίστρωση πλαστικού σε διάφορα υλικά, οι ύαλοι ασφαλείας κ.ά.

1.11 Σύνθετες Ηλεκτρολυτικές Επικαλύψεις Μεταλλικής Μήτρας

Με τον όρο ηλεκτρολυτική συναπόθεση περιγράφεται η διαδικασία ενσωμάτωσης στη μεταλλική μήτρα αδρανών σωματιδίων τα οποία βρίσκονται ομογενώς διεσπαρμένα στο ηλεκτρολυτικό λουτρό κατά τη διαδικασία της ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης. Η ευελιξία της ηλεκτρολυτικής συναπόθεσης ως μεθόδου παρασκευής σύνθετων αποθεμάτων μεταλλικής μήτρας και τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει έναντι των άλλων μεθόδων, την κατατάσσει σε πολύ ανταγωνιστική θέση σε σχέση με τις άλλες βιομηχανικές μεθόδους παρασκευής σύνθετων επικαλύψεων.

Η συναπόθεση των σωματιδίων γίνεται συνήθως με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι με την παραδοσιακή τεχνική της ηλεκτρολυτικής συναπόθεσης, κατά την οποία τα σωματίδια διατηρούνται ομογενώς διεσπαρμένα στο λουτρό της επιμετάλλωσης με την επιβολή μαγνητικής ανάδευσης και ενσωματώνονται στο μεταλλικό απόθεμα συμπαρασυρόμενα από τα μεταλλικά ιόντα που ανάγονται στην κάθοδο. Ο δεύτερος τρόπος υλοποιείται με την τεχνική της κατακάθισης, κατά την οποία τα σωματίδια υφίστανται έντονη ανάδευση και στη συνέχεια καθιζάνουν στην καθοδική επιφάνεια και εγκλείονται στο απόθεμα κατά την αναγωγή του μετάλλου. Στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνονται υψηλότερα ποσοστά ενσωμάτωσης. Πάντως, η ηλεκτρολυτική συναπόθεση μπορεί να συνδυαστεί και με άλλες τεχνικές που αφορούν κυρίως στην προκατεργασία του ενισχυτικού μέσου πριν την εισαγωγή του στο λουτρό με σκοπό τη βελτίωση της συναπόθεσης και των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού.

Η πρώτη απόπειρα ηλεκτρολυτικής συναπόθεσης έγινε από τους C. G. Fink και J. D. Prince, όταν το 1928 με συναπόθεση σωματιδίων γραφίτη σε μεταλλική μήτρα χαλκού, επιτυγχάνουν την παραγωγή αυτολιπαινόμενων επικαλύψεων χαλκού [32]. Η προσπάθεια αυτή δεν είχε την αναμενόμενη αποδοχή και έτσι η επόμενη αναφορά σύνθετης ηλεκτρολυτικής επικάλυψης έγινε το 1962 όταν ο Spenceley [33] πρότεινε το σύστημα Ni/SiC με σκοπό τη βελτίωση των τριβολογικών ιδιοτήτων του μετάλλου. Ουσιαστικά, το πρώτο σύνθετο υλικό μεταλλικής μήτρας που χρησιμοποιήθηκε ευρέως στη βιομηχανία είναι το σύστημα Al/SiC, το οποίο και παρασκευάστηκε το 1983 και χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή μηχανικών μερών μηχανών ντίζελ [34]. Μετέπειτα, από τους A. Muller και H. Hahn έγιναν επιτυχείς προσπάθειες συναπόθεσης κεραμικών κόνεων ZrO_2 με μέσο μέγεθος σωματιδίων της τάξης των 10 nm για την παρασκευή Ni/ZrO₂ [35].

Η ηλεκτρολυτική συναπόθεση αδρανών σωματιδίων σε μεταλλική μήτρα παρουσιάζει συνεχώς αυξανόμενο επιστημονικό αλλά και βιομηχανικό ενδιαφέρον λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει έναντι των άλλων τεχνικών συναπόθεσης. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου συνδέονται με τις σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες εφαρμογής της μεθόδου και το χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας της, τη δυνατότητα παραγωγής μεγάλου αριθμού σύνθετων επικαλύψεων επιλέγοντας διαφορετικούς τύπους ενισχυτικού μέσου, τη δυνατότητα επιλογής ελεγχόμενων συνθηκών οι οποίες επιτρέπουν την παρασκευή αποθεμάτων με συγκεκριμένη κρυσταλλική οργάνωση και κατ' επέκταση καθορισμένες ιδιότητες, την παραγωγή σύνθετων επικαλύψεων ελεγχόμενου πάχους ακόμα και σε επιφάνειες με πολύπλοκο σχήμα, αλλά και σύνθετων πολυστρωματικών επικαλύψεων και επικαλύψεων κραματικής μήτρας.

1.12 Επίδραση της Συναπόθεσης του Ενισχυτικού Μέσου στις Ιδιότητες των Σύνθετων Υλικών

Η ηλεκτρολυτική συναπόθεση κάποιου ενισχυτικού μέσου στη μεταλλική μήτρα προκαλεί σημαντικές μεταβολές στις ιδιότητες της μεταλλικής μήτρας και διευρύνει το πεδίο εφαρμογής των υλικών. Οι σύνθετες επικαλύψεις, ανάλογα με το είδος και τις ιδιότητες του συναποτιθέμενου ενισχυτικού υλικού κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες, εκ των οποίων αυτές που έχουν μελετηθεί περισσότερο και κρίνονται οι σημαντικότερες είναι οι σύνθετες επικαλύψεις με αυξημένη σκληρότητα και βελτιωμένη τριβολογική συμπεριφορά, οι σύνθετες επικαλύψεις με αντιδιαβρωτικές και αντιοξειδωτικές ιδιότητες, και οι αυτολιπαινόμενες σύνθετες επικαλύψεις μεταλλικής μήτρας. Τα τελευταία χρόνια, παρασκευάζονται σύνθετες ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις με αυξημένη καταλυτική δράση.

Οι σύνθετες μεταλλικές επικαλύψεις με αυξημένη σκληρότητα και βελτιωμένη τριβολογική συμπεριφορά παρασκευάζονται με ομοιόμορφη συναπόθεση στη μεταλλική μήτρα, σωματιδίων με εξαιρετικές θερμομηχανικές ιδιότητες, όπως είναι συνήθως τα σωματίδια καρβιδίων ή οξειδίων, π.χ. σωματίδια ZrO_2 , TiO_2 , SiO_2 , SiC , WC , TiC κ.ά. Τα σωματίδια αυτά δεν αντιδρούν με τη μεταλλική μήτρα αλλά είναι πιθανό να υποστούν επιφανειακές μετατροπές κατά τη διάρκεια της ηλεκτρολυτικής συναπόθεσης. Τα σύνθετα αυτά υλικά εμφανίζουν βελτιωμένες ιδιότητες σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, με αποτέλεσμα οι ιδιότητές τους να διατηρούνται ακόμα και σε θερμοκρασίες κοντά στο σημείο τήξης της μεταλλικής μήτρας [36].

Η ισοτροπία των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού, εξαρτάται άμεσα από το ποσοστό και την ομοιόμορφη διασπορά του ενισχυτικού υλικού στη μεταλλική μήτρα, μιας και το ενισχυτικό μέσο είναι αυτό που υφίσταται το μεγαλύτερο μέρος των φορτίσεων και αντιστέκεται στις καταπονήσεις που μεταφέρονται μέσω της μεταλλικής μήτρας. Επιπλέον, η ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων καθυστερεί την εκτεταμένη μεταφορά των παραμορφώσεων στη μεταλλική μήτρα, με αποτέλεσμα το υλικό να είναι ανθεκτικότερο στις πλαστικές παραμορφώσεις [37, 38].

Στις σύνθετες επικαλύψεις μεταλλικής μήτρας με αντιδιαβρωτικές και αντιοξειδωτικές ιδιότητες η συναπόθεση σωματιδίων στη μεταλλική μήτρα αποδείχθηκε ότι βελτιώνει την συμπεριφορά του υλικού σε διαβρωτικό περιβάλλον. Ήδη από το 1960 η ενσωμάτωση αδρανών σωματιδίων αλούμινας ή θεικού βαρίου σε μεταλλική μήτρα χρωμίου, οδήγησε στην παραγωγή επικαλύψεων με αυξημένη αντιδιαβρωτική προστασία. Αρκετά καλή συμπεριφορά μετά από έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον υψηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο, επέδειξαν και τα συστήματα Ni/Al_2O_3 , Ni/SiC , Co/Cr_2C_3 [39, 40]. Μάλιστα, τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν αντοχή στην οξείδωση και τη διάβρωση ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες, διότι αφενός μεν τα συναποτιθέμενα σωματίδια είναι συμβατά με τη μεταλλική μήτρα, αφετέρου τα προϊόντα οξείδωσης που δημιουργούνται είναι θερμοδυναμικά σταθερά [41].

Τέλος, στις σύνθετες επικαλύψεις μεταλλικής μήτρας με αυτολιπαινόμενες ιδιότητες, διαπιστώθηκε ότι η εισαγωγή στη μεταλλική μήτρα στερεού λιπαντικού υλικού μειώνει σημαντικά το συντελεστή τριβής και οδηγεί στην παραγωγή επικαλύψεων με αυτολιπαινόμενες ιδιότητες. Σωματίδια που χρησιμοποιήθηκαν ως ενισχυτικό μέσο, με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα είναι τα σωματίδια MoS_2 , WC , SiC , Cr_3C_2 αλλά και πολυμερικά σωματίδια όπως το PRFE (polytetrafluoroethylene) και PCMF (polycarbon - monofluoride) [42]. Η ικανότητα αυτολίπανσης των επιφανειών αυτών, συνίσταται στο γεγονός ότι κατά την επιβολή δυνάμεων τριβής τα επιφανειακά στρώματα του στερεού λιπαντικού αποδεσμεύονται από το σώμα της

μήτρας και καλύπτουν την επιφάνεια, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό το συντελεστή τριβής. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται και τα σωματίδια που βρίσκονται μέσα στη μεταλλική μήτρα αποδεσμεύονται σταδιακά, καθώς η μήτρα φθείρεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο συντελεστής τριβής και η απώλεια υλικού λόγω φθοράς [43].

1.13 Επίδραση των Παραμέτρων της Ηλεκτρόλυσης στην Παρασκευή Σύνθετων Μεταλλικών Επικαλύψεων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και προηγούμενα στο Κεφάλαιο 1, στην ηλεκτροαπόθεση των απλών μετάλλων, οι παράμετροι της ηλεκτρόλυσης παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της δομής και των ιδιοτήτων των αποθεμάτων. Η μελέτη της επίδρασης αυτής γίνεται πιο πολύπλοκη στην περίπτωση των σύνθετων ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων, όπου η εισαγωγή του ενισχυτικού μέσου στο λουτρό επηρεάζει σε πολύ σημαντικό βαθμό τη διαδικασία της ηλεκτροαπόθεσης. Οι βασικότερες παράμετροι που μελετώνται κατά την ηλεκτρολυτική απόθεση σύνθετων υλικών είναι:

- Η σύσταση του ηλεκτρολυτικού λουτρού και η παρουσία προσθέτων.
- Οι επιβαλλόμενες συνθήκες ηλεκτρόλυσης, όπως η πυκνότητα ρεύματος, η θερμοκρασία, το pH, η μορφή πόλωσης της ηλεκτρολυτικής κυψελίδας, δηλαδή η εφαρμογή συνεχούς (D.C.) ή παλμικού ρεύματος (P.C.) και ο τρόπος ανάδευσης του λουτρού.
- Τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων, όπως ο τύπος, το μέγεθος και το σχήμα τους, οι ιδιότητές τους, η συγκέντρωσή τους στο λουτρό και ο τρόπος που διατηρούνται σε αιώρηση στο λουτρό.
- Η έκλυση υδρογόνου.

1.13.1 Επίδραση της Σύστασης του Ηλεκτρολυτικού Λουτρού Παρουσία Προσθέτων

Η σύσταση του ηλεκτρολυτικού λουτρού που χρησιμοποιείται σε μια ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση σύνθετου υλικού, είναι πολύ βασική παράμετρος τόσο γιατί επιδρά στη ποιότητα των επικαλύψεων όσο και στο ποσοστό της συναποτιθέμενης φάσης. Σύνθετα συστήματα που αποτίθενται σε διαφορετικούς τύπους λουτρών, δίνουν διαφορετικούς ρυθμούς συναπόθεσης, ενώ για ορισμένους τύπους λουτρών η συναπόθεση μπορεί να είναι αδύνατη. Οι μεταβολές στη σύσταση ενός λουτρού που έχουν μελετηθεί είναι κυρίως ποιοτικές, ενώ μικρότερη επίδραση ασκούν οι ποσοτικές μεταβολές [44].

Καθοριστικό ρόλο στη σύσταση του λουτρού, έχει η γήρανσή του και οι αλλοιώσεις που επέρχονται στη σύστασή του μετά από συγκεκριμένες χρήσεις. Η γήρανση επηρεάζει ορισμένα

συστήματα μετάλλου - σωματιδίων και ελέγχεται με διάφορες πειραματικές μετρήσεις ενώ όπου κρίνεται αναγκαίο γίνεται αναγέννησή του λουτρού. Επίσης, σπουδαίο ρόλο στη δημιουργία συνθηκών πραγματοποίησης μιας ηλεκτρολυτικής συναπόθεσης, παίζει η παρουσία προσθέτων στο ηλεκτρολυτικό λουτρό. Η παρουσία των προσθέτων επιδρά με διαφορετικό μηχανισμό, ανάλογα με το σύστημα, αλλά εν γένει αυξάνει τα ποσοστά συναπόθεσης [45, 46]. Έχουν πάντως καταγραφεί και περιπτώσεις, όπου η χρήση προσθέτων στο ηλεκτρολυτικό λουτρό μειώνουν το ποσοστό συναπόθεσης εξαιτίας της προσρόφησής τους στην καθοδική επιφάνεια [47].

1.13.2 Επίδραση των Συνθηκών Ηλεκτρόλυσης

Η πυκνότητα του ρεύματος απόθεσης επηρεάζει σημαντικά τη διαδικασία την συναπόθεσης των σωματιδίων στη μεταλλική μήτρα και γι' αυτό το λόγο έχει μελετηθεί. Αν και κάθε σύστημα μετάλλου-σωματιδίου είναι ένα ξεχωριστό σύστημα και επηρεάζεται σημαντικά από το είδος του σωματιδίου, έχει γενικά παρατηρηθεί ότι αύξηση της πυκνότητας ρεύματος έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του ποσοστού συναπόθεσης των σωματιδίων [48]. Είναι βέβαια προφανές, ότι ο τρόπος αλληλεπίδρασης ποσοστού ενσωμάτωσης και πυκνότητας ρεύματος είναι διαφορετικός για κάθε σύστημα και επηρεάζεται και από τις άλλες παραμέτρους της ηλεκτρολυτικής απόθεσης. Μία από αυτές τις παραμέτρους αποτελεί το pH του ηλεκτρολυτικού λουτρού, το οποίο μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις ιδιότητες της επιφάνειας των σωματιδίων και κατά συνέπεια και τη συναπόθεσή τους. Η θερμοκρασία του ηλεκτρολυτικού λουτρού, δεν έχει αποδειχθεί να επηρεάζει σημαντικά το ποσοστό συναπόθεσης των σύνθετων αποθεμάτων.

Οι υδροδυναμικές συνθήκες που επικρατούν στο ηλεκτρολυτικό λουτρό επιμετάλλωσης επηρεάζουν σημαντικά τόσο το ποσοστό των συναποτιθέμενων σωματιδίων όσο και την ποιότητα των παραγόμενων αποθεμάτων. Οι υδροδυναμικές συνθήκες αφορούν στον τρόπο ανάδευσης του ηλεκτρολυτικού λουτρού αλλά και στον τρόπο κίνησης της καθόδου. Η ανάδευση του ηλεκτρολυτικού λουτρού, στην περίπτωση των σύνθετων ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων επιδρά σε μεγάλο βαθμό στο ποσοστό της συναπόθεσης. Ο βαθμός ανάδευσης του λουτρού, πρέπει να διατηρείται σε συγκεκριμένα όρια, αφού έντονες συνθήκες ανάδευσης είναι πιθανό να αναστείλουν τη συναπόθεση, απομακρύνοντας τα σωματίδια από την καθοδική επιφάνεια, ενώ αντίθετα πολύ ήπιες συνθήκες μπορεί να οδηγήσουν σε μη ομοιογενή διασπορά των σωματιδίων στο λουτρό, με συνέπεια τη συσσωμάτωση και κατακρήμνισή τους [49].

Πάντως, πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, η μη ύπαρξη επαρκούς υλικού στη διεθνή βιβλιογραφία σε ό,τι αφορά την επίδραση των παραμέτρων της ηλεκτρόλυσης σε

σύνθετα αποθέματα μήτρας κασσίτερου, με αποτέλεσμα η παρασκευή τους με προσθήκη σωματιδίων TiO_2 για τους σκοπούς της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας να μελετάται εξολοκλήρου από την αρχή.

1.13.3 Επίδραση των Χαρακτηριστικών των Σωματιδίων

Ο σημαντικότερος ίσως παράγοντας, που καθορίζει τη δομή και τις ιδιότητες του σύνθετου αποθέματος είναι το ενισχυτικό μέσο. Στην περίπτωση χρήσης σωματιδίων ως ενισχυτικό μέσο, οι παράγοντες που καθορίζουν το ποσοστό ενσωμάτωσής τους στη μεταλλική μήτρα είναι η συγκέντρωση τους στο λουτρό, το μέγεθος, το σχήμα τους και οι επιφανειακές τους ιδιότητες. Σχετικά με την επίδραση της καθεμίας από αυτές τις παραμέτρους στο ποσοστό ενσωμάτωσης έχουν γίνει πολλές μελέτες σε διαφορετικά συστήματα μετάλλου -σωματιδίων. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τη συγκέντρωση των σωματιδίων στο ηλεκτρολυτικό λουτρό, οι περισσότεροι ερευνητές και για όλα σχεδόν τα συστήματα διαπίστωσαν ότι το ποσοστό ενσωμάτωσης στη μεταλλική μήτρα, αυξάνει με αύξηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων στο λουτρό [50].

Καθοριστικό ρόλο παίζει επίσης και το μέγεθος των σωματιδίων, για το οποίο έχει παρατηρηθεί ότι το ποσοστό ενσωμάτωσης αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων. Οι *Garcia et al* μελετώντας το σύστημα Ni/SiC κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι σωματίδια μέσης διαμέτρου $5\mu m$, ενσωματώνονται με μεγαλύτερη ευκολία στη μεταλλική μήτρα απ' ότι σωματίδια μέσης διαμέτρου $0,3\mu m$ [51, 52].

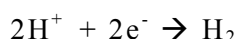
Σε ότι αφορά το σχήμα των σωματιδίων, η επιστημονική μελέτη είναι περιορισμένη, παρόλα αυτά έχει παρατηρηθεί ότι το σχήμα των σωματιδίων επιδρά στον τρόπο προσρόφησης των σωματιδίων στην κάθοδο, στην προσρόφηση των ιόντων στην επιφάνειά τους καθώς επίσης και στην ευστάθεια της αιώρησής τους στο λουτρό. Βέβαια, το σχήμα των σωματιδίων διαφοροποιείται ανάλογα με το μέγεθός τους και τη δημιουργία συσσωματωμάτων [53, 54].

1.13.4 Επίδραση Έκλυσης Υδρογόνου

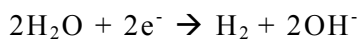
Η έκλυση υδρογόνου είναι πολύ κοινό φαινόμενο και συναντάται στις ηλεκτρολύσεις υδατικών διαλυμάτων οξέων ή βάσεων. Η αντίδραση της έκλυσης του υδρογόνου έχει μελετηθεί ευρύτατα για μια μεγάλη ποικιλία διαλυμάτων και υλικών ηλεκτροδίων, δεδομένου ότι παρουσιάζει τόσο θεωρητικό ενδιαφέρον, λόγω της συμβολής των μελετών αυτών στην κατανόηση διαφόρων ηλεκτροδιακών δράσεων, όσο και τεχνολογικό. Η σημασία αυτού του φαινομένου στην πράξη οφείλεται στο γεγονός ότι αποτελεί την καθοδική δράση σε κελιά ηλεκτρόλυσης του νερού και σε ορισμένα χλωριο-αλκαλικά κελιά.

Συχνά, η υπέρταση υδρογόνου αποτελεί μεγάλο μέρος της συνολικά παρατηρούμενης σε ένα σύστημα υπέρτασης, οπότε η γνώση του φαινομένου επιτρέπει τη μείωσή της και κατά συνέπεια την εξοικονόμηση ενέργειας. Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις ηλεκτροαπόθεσης μετάλλων επιβάλλεται η αύξησή της για να γίνει δυνατή η απόθεση μετάλλων με δυναμικό απόθεσης ηλεκτραρνητικότερο από εκείνο της έκλυσης υδρογόνου.

Η δράση της έκλυσης του υδρογόνου πραγματοποιείται κατά διαφόρους τρόπους ανάλογα με την οξύτητα ή αλκαλικότητα του ηλεκτρολυτικού διαλύματος. Σε όξινα διαλύματα η συνολική καθοδική δράση έκλυσης υδρογόνου είναι η ακόλουθη:



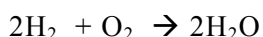
Σε ουδέτερα ή αλκαλικά διαλύματα ισχύει:



Η ταχύτητα έκλυσης υδρογόνου εξαρτάται από το μεταλλικό ηλεκτρόδιο στο οποίο πραγματοποιείται η έκλυση. Επίσης, η τιμή της έκλυσης υδρογόνου εξαρτάται τόσο από το μεταλλικό ηλεκτρόδιο όσο και από το ποσό της πυκνότητας του ρεύματος. Μια άλλη παράμετρος η οποία επηρεάζει την έκλυση υδρογόνου είναι η τιμή του pH του λουτρού.

1.13.5 Επίδραση Έκλυσης Οξυγόνου

Η ανοδική έκλυση οξυγόνου είναι σχεδόν εξίσου σημαντική με τη δράση καθοδικής έκλυσης υδρογόνου. Οι δύο δράσεις συνιστούν τη διεργασία της ηλεκτρολυτικής διάσπασης του νερού σύμφωνα με τη συνολική δράση:



Η υπέρταση οξυγόνου αποτελεί σημαντικό μέρος της συνολικής υπέρτασης σε ένα κελί ηλεκτρόλυσης νερού και επηρεάζει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη βιομηχανική ηλεκτρολυτική παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου. Επίσης, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο πρακτικά σε όλες τις ανοδικές διεργασίες κατά τις ηλεκτρολύσεις υδατικών διαλυμάτων και κατά τις ηλεκτρολυτικές δράσεις οξειδωσης ανόργανων και οργανικών ουσιών.

Η αντίδραση της έκλυσης του οξυγόνου μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους ανάλογα με τη σύνθεση του διαλύματος που ηλεκτρολύεται. Σε αλκαλικά διαλύματα η πιθανότερη πηγή παραγωγής οξυγόνου είναι τα υδροξυλιόντα, σύμφωνα με την αντίδραση:



Σε όξινα διαλύματα, όπου η συγκέντρωση των OH^- είναι μικρή πραγματοποιείται η αντίδραση:



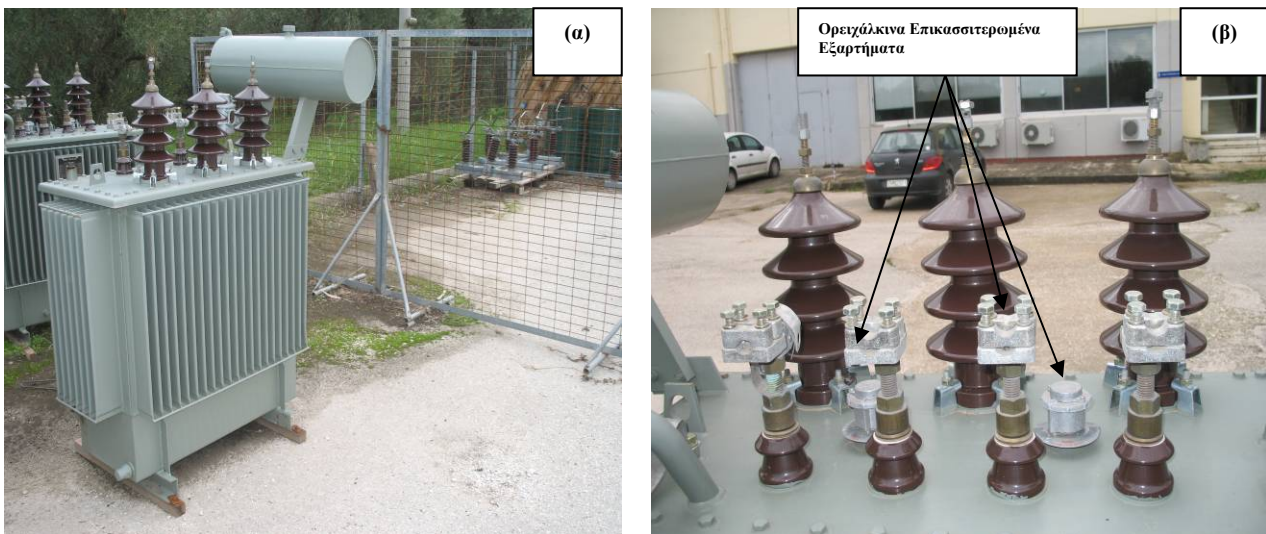
Σε ουδέτερα διαλύματα η έκλυση οξυγόνου προέρχεται είτε από αποφόρτιση OH^- είτε από αναγωγή μορίων νερού, ανάλογα με το ποια από τις δύο αντιδράσεις απαιτεί τη μικρότερη ενέργεια κάτω από τις συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες.

Ο μηχανισμός της έκλυσης οξυγόνου δεν έχει διευκρινιστεί απόλυτα και γενικά χαρακτηρίζεται από έλλειψη αξιόπιστων δεδομένων που οφείλεται στην πολυπλοκότητα της διαδικασίας της έκλυσης οξυγόνου εξαιτίας της αναπόφευκτης πραγματοποίησης παράπλευρων και δευτερογενών αντιδράσεων. Σε πειραματικές συνθήκες είναι εξαιρετικά δύσκολο να κατασκευαστεί ένα αντιστρεπτό ηλεκτρόδιο οξυγόνου, με συνέπεια το δυναμικό ισορροπίας της αντίδρασης (1.6) να μη μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά αλλά να υπολογίζεται συνήθως μόνο θεωρητικά.

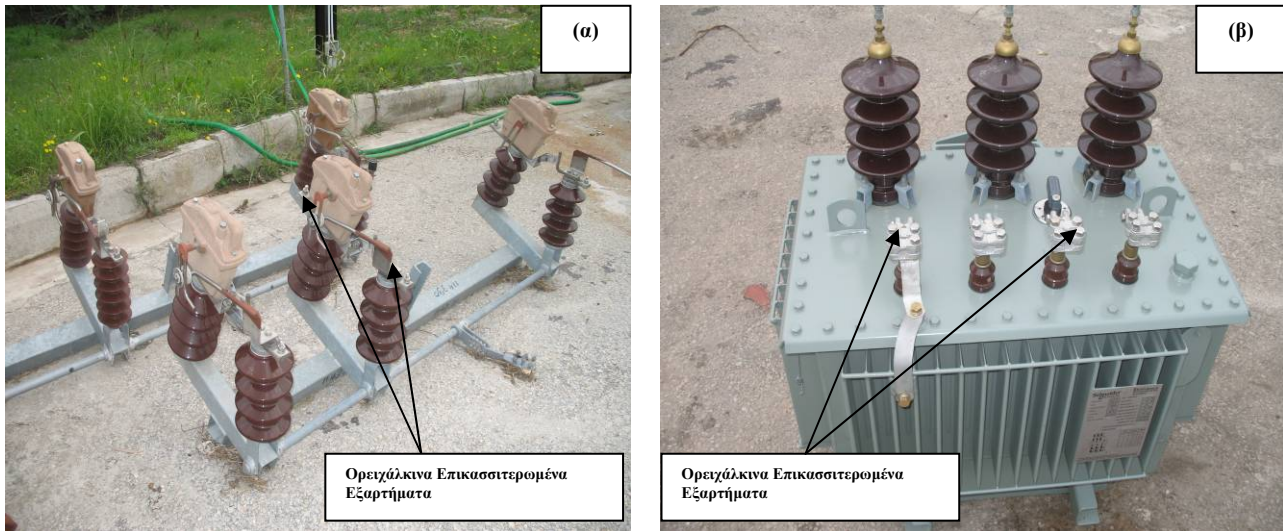
1.14 Τεχνική Προδιαγραφή Δ.Ε.Η. Ηλεκτρολυτικής Επικασσιτέρωσης

Παρασκευάστηκαν με ηλεκτρολυτική επικασσιτέρωση υπό καθεστώς συνεχούς ρεύματος (Direct Current, D.C.) ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα, με σκοπό τη διερεύνηση της δομής και των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Ορειχάλκινα εξαρτήματα, ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένα, χρησιμοποιεί ευρέως η Δ.Ε.Η. στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής της. Οι ακροδέκτες καλωδίων και οι σφιγκτήρες των ακροκιβωτίων, τα μεταλλικά εξαρτήματα των ακροκιβωτίων, οι ακροδέκτες γειώσεως και οι κύριες σταθερές και κινητές επαφές από τους μονοπολικούς και τριπολικούς ασφαλειοαποζεύκτες καθώς επίσης και μία σειρά από 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. και παρουσιάζονται στα Σχήματα 1.15, 1.16 και 1.17 όπως επίσης και στα Σχέδια 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 και 1.5 που απεικονίζονται στο Παράρτημα. Η ηλεκτρολυτική επικασσιτέρωση των εξαρτημάτων αυτών γίνεται κυρίως για την προστασία τους από τη διάβρωση και τη ρηγμάτωση (season cracking).

Η τεχνική προδιαγραφή της Δ.Ε.Η. ΧΚ 11.04/10.03.88 (ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ/23.10.92), επισημαίνει τις ελάχιστες απαιτήσεις που οφείλουν να ικανοποιούν τα ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένα εξαρτήματα προτού αυτά παραδοθούν προς χρήση στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής της. Επιπλέον, περιλαμβάνει πληροφορίες που αφορούν διεθνείς και ευρωπαϊκούς κανονισμούς - προδιαγραφές που σχετίζονται με τις ηλεκτρολυτικές επικασσιτερώσεις, καθώς και σημαντικές πληροφορίες σχετικές με τον έλεγχο και τις απαιτήσεις των δοκιμών που εφαρμόζονται στα ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένα εξαρτήματα, έτσι ώστε να γίνει η αξιολόγησή τους.

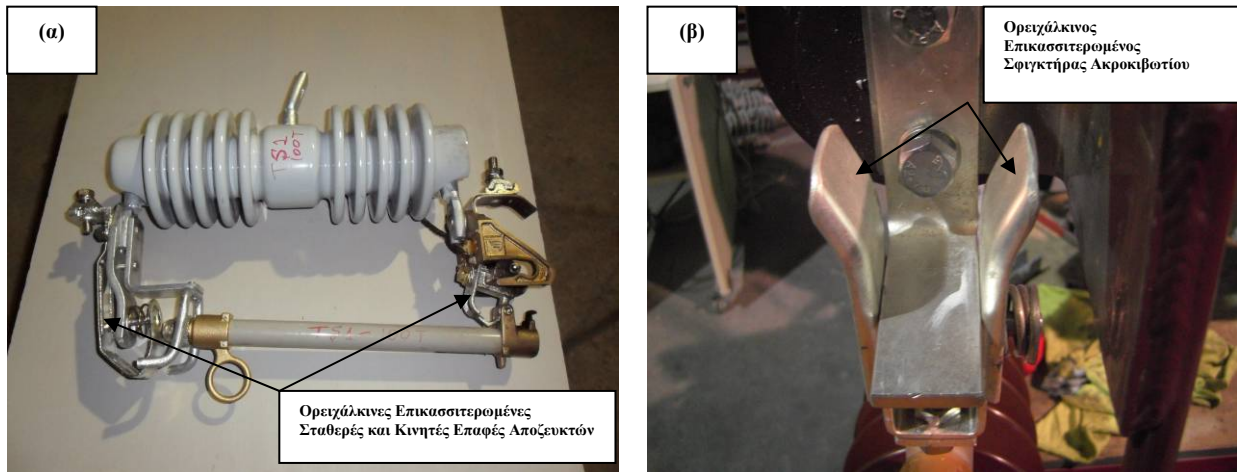


Σχήμα 1.15 (α) & (β): Μετασχηματιστής μέσης - χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής της Δ.Ε.Η., ορειχάλκινα εξαρτήματα του οποίου είναι επικασσιτερωμένα.



Σχήμα 1.16 (α) & (β): Τριπολικός αποζεύκτης και μετασχηματιστής χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής της Δ.Ε.Η., ορειγάλκινα εξαρτήματα των οποίων είναι επικασσιτερωμένα.

Όσον αφορά το πάχος της επικάλυψης, η παράγραφος 6.1.2.1 της τεχνικής προδιαγραφής της Δ.Ε.Η. ΧΚ 11.04/10.03.88 (ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ/23.10.92), προβλέπει οι επικασσιτερώσεις να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις των Πινάκων 1.2 & 1.3 αναφορικά με το ελάχιστο πάχος σε ουσιώδεις επιφάνειες. *Ουσιώδης επιφάνεια*, κατά την τεχνική προδιαγραφή της Δ.Ε.Η. ΧΚ 11.04/10.03.88 (ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ/23.10.92) καλείται το μέρος του αντικειμένου που καλύπτεται από την επιμετάλλωση και για το οποίο η επιμετάλλωση αυτή είναι ουσιώδης για τη λειτουργικότητα και την εμφάνισή του.



Σχήμα 1.17 (α) & (β): Σταθερές, κινητές επαφές αποζευκτών και σφιγκτήρας ακροκιβωτίου από ορείχαλκο. Τα εξαρτήματα αυτά έχουν υποστεί επικασσιτερώση και χρησιμοποιούνται στο δίκτυο διανομής της Δ.Ε.Η.

Η παράγραφος 6.1.1 της τεχνικής προδιαγραφής της Δ.Ε.Η. ΧΚ 11.04/10.03.88 (ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ/23.10.92) καθορίζει τις απαιτήσεις κατασκευής για την επίτευξη επικασσιτερώσεων

επιθυμητής ποιότητας. Στο πλαίσιο αυτών των απαιτήσεων θα πρέπει οι επικασσιτερώσεις να έχουν τη χαρακτηριστική για τη διαδικασία που ακολουθείται εμφάνιση, η οποία θα είναι ομοιόμορφη στο βαθμό που το μέταλλο της βάσης το επιτρέπει, θα έχουν καλή πρόσφυση και θα είναι απαλλαγμένες από φυσαλίδες, βελονισμούς (pits), αποφλοιωμένες περιοχές, στερεοποιημένες σταγόνες μετάλλου και μη επικαλυμμένες περιοχές. Οι επικασσιτερωμένες επιφάνειες, δεν πρέπει να εμφανίζουν περιοχές χωρίς επικάλυψη ή περιοχές απαλλαγμένες από γράσα ή έλαια. Επίσης, τα επικασσιτερωμένα αντικείμενα θα πρέπει να είναι καθαρά και χωρίς κακώσεις.

Δείκτης	Συνθήκες Χρήσης	Παρατηρήσεις
SC4	πολύ δριμεία έκθεση	Χρήση στο ύπαιθρο σε εξαιρετικά διαβρωτικές συνθήκες ή σε επαφή με τρόφιμα ή ποτά, σε δοχεία νερού, σε θαλάσσιο περιβάλλον, με παρουσία ελαφρών οξέων κ.ο.κ.
SC3	Δριμεία έκθεση	Χρήση στο ύπαιθρο σε κοινικές συνθήκες, με παρουσία υγρασίας ή σε ελαφρά βιομηχανική ατμόσφαιρα
SC2	Μέτρια έκθεση	Χρήση σε εσωτερικό χώρο με ελαφρές συμπυκνώσεις υδρατμών.
SC1	Ελαφρά έκθεση	Χρήση σε εσωτερικό χώρο ξηρό ή περιπτώσεις που απαιτείται διευκόλυνση της κασσιτεροκόλλησης.

Πίνακας 1.2: Ο δείκτης επικασσιτέρωσης του κάθε μεταλλικού εξαρτήματος καθορίζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες χρήσης του, όπως φαίνεται και στον Πίνακα [55].

Συνθήκες χρήσης	Κωδικός ταξινόμησης	Ελάχιστο τοπικό πάχος (μm)	Ελάχιστο μέσο πάχος (μm)
SC4	Cu / Sn 30	30	45
SC3	Cu / Sn 15	15	20
SC2	Cu / Sn 8	8	12
SC1	Cu / Sn 5	5	8
SC1	Cu / Sn 5f	5	8

Πίνακας 1.3: Ελάχιστα τοπικά και μέσα πάχη (μm) επικασσιτέρωσης μεταλλικών εξαρτημάτων χαλκού και κραμάτων του ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες χρήσης αυτών [56].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2
**ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ
& ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ & ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Για τους μηχανικούς, αποτελεί προτεραιότητα να γνωρίζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιήσουν, διαφορετικά δεν μπορούν να υπολογίσουν τη συμπεριφορά ενός μεταλλικού υλικού ούτε και τις αποδεκτές καταπονήσεις του. Πρέπει δηλαδή να γνωρίζουν 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 αναγκαίες πληροφορίες για τη συμπεριφορά των υλικών, παρέχονται κυρίως από την πειραματική έρευνα. Μέσα από την πειραματική έρευνα επιτυγχάνεται η καλύτερη κατανόηση και η βαθύτερη κριτική εκτίμηση των επιστημονικών δεδομένων που καθοδηγούν τον μηχανικό στη μελέτη και στη σχεδίαση των κατασκευών.

Επομένως, η γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών παίζει έναν από τους σπουδαιότερους ρόλους στον υπολογισμό των μηχανικών αντοχών μιας κατασκευής και στην επιλογή των υλικών από τα οποία θα κατασκευασθεί και έχει άμεση σχέση με το κόστος της. Ο προσδιορισμός των επικίνδυνων ορίων φορτίσεως των διαφόρων υλικών σε όλες τις δυνατές καταπονήσεις και στη συνέχεια ο καθορισμός των ασφαλών ορίων φορτίσεως σε κάθε περίπτωση αποτελούν στοιχεία απαραίτητα για την κατάλληλη και ορθή χρήση των υλικών στους διάφορους κλάδους της μηχανικής. Γι' αυτό και πραγματοποιούνται μηχανικές δοκιμές στα υλικά με σκοπό τον προσδιορισμό των βασικών μηχανικών ιδιοτήτων τους, οι οποίες διεξάγονται σε Εργαστήρια Αντοχής Υλικών και ακολουθούνται διαδικασίες, που καθορίζονται από τους ισχύοντες διεθνείς κανονισμούς τυποποίησης.

Η τυποποίηση έχει μεγάλη σημασία για όλους τους συντελεστές της παραγωγής και της εκμεταλλεύσεως των παραγόμενων πρώτων υλών από τη Βιομηχανία. Ξεκίνησε το 1881 στη Γερμανία και αφορούσε στην τυποποίηση των διατομών του χάλυβα των σιδηρών κατασκευών. Η τυποποίηση επιτρέπει την ομοιομορφία στους ελέγχους και τις μετρήσεις των υλικών, με σκοπό την παραγωγή προϊόντων με σταθερές και υψηλής ποιότητας ιδιότητες. Επιτυγχάνεται όταν οι έλεγχοι γίνονται βάσει ορισμένων κανόνων (προτύπων) και οι μετρήσεις διεξάγονται με όργανα που έχουν ρυθμιστεί βάσει ενός κοινού μεγέθους του λεγόμενου προτύπου αναφοράς. Η σύνταξη και έκδοση ενός προτύπου (standard), αποτελεί την τυποποίηση (standardization).

Οι μηχανικές δοκιμές πρέπει να είναι απλές, αναπαραγωγήσιμες και τα αποτελέσματα ερμηνεύσιμα και αξιοποιήσιμα, κατά τον ίδιο τρόπο απ' όλους. Για το λόγο αυτό, εθνικοί οργανισμοί όπως η ASTM, η ACNOR, ο ISO, ομογενοποιούν τις δοκιμές τους. Η ομογενοποίηση αυτή των δοκιμών αφορά στη γεωμετρία των δοκιμίων και των ενδείξεων, στις συσκευές των δοκιμών και τη βαθμονόμησή τους, στις πειραματικές τεχνικές και στην αξιοποίηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Σχεδόν όλες οι βιομηχανικές χώρες διαθέτουν οργάνωση τυποποίησης. Ενδεικτικές περιπτώσεις τέτοιων προτύπων αποτελούν αυτά της Γερμανικής Βιομηχανίας (Deutsche Industrie Normen) που είναι γνωστά με τα αρχικά στοιχεία DIN, τα Αμερικανικά Πρότυπα (American Society for Testing and Materials) με αρχικά στοιχεία A.S.T.M. και τα Βρετανικά Πρότυπα (British Standards) με αρχικά στοιχεία B.S. Στην Ελλάδα οι κανονισμοί που ακολουθούνται είναι κυρίως οι γερμανικοί κανονισμοί τυποποίησης DIN, οι ελληνικοί ΕΛΟΤ, καθώς και οι Αμερικανικοί A.S.T.M.

2.2 Κατηγορίες Μηχανικών Δοκιμών

Οι μηχανικές δοκιμές ή δοκιμασίες των υλικών έχουν ως σκοπό τον έλεγχο των μηχανικών τους ιδιοτήτων και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει τις καταστρεπτικές μεθόδους (άμεσοι μέθοδοι), στις οποίες απαιτείται καταστροφή του δοκιμίου και στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι (έμμεσοι μέθοδοι), στις οποίες δεν απαιτείται καταστροφή του δοκιμίου.

Στην κατηγορία των δοκιμών με καταστροφή του δοκιμίου ανήκουν οι μηχανικές δοκιμές που έχουν ως αντικειμενικό στόχο τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Οι πιο συνηθισμένες δοκιμές αυτής της κατηγορίας είναι η δοκιμή εφελκυσμού και θλίψεως, η δοκιμή σκληρότητας, η δοκιμή κρούσης, η δοκιμή κόπωσης και η δοκιμή ερπυσμού.

Στην κατηγορία των μη καταστρεπτικών μεθόδων διαπιστώνεται αν το εξεταζόμενο τεμάχιο, όπως π.χ. ένα χυτό αντικείμενο ή η ραφή κάποιας συγκόλλησης άξονα ή δοχείου, περιέχει ρωγμές ή πόρους, που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, χωρίς όμως να καταστραφεί το εν λόγω τεμάχιο. Οι πιο συνηθισμένες δοκιμές αυτής της κατηγορίας είναι οι μαγνητικές δοκιμές ελέγχου ρωγμών μαγνητικών υλικών (π.χ. κοινοί χάλυβες, κράματα Fe-Ni, κ.λ.π.), οι δοκιμές με διεισδυτικά υγρά για τον εντοπισμό ρωγμών κυρίως σε μη μαγνητικά υλικά (π.χ. κράματα αλουμινίου, ανοξείδωτοι ωστενιτικοί χάλυβες, κ.λ.π.), οι υδροστατικές μέθοδοι ελέγχου μεταλλικών δοχείων, λεβήτων, και τέλος οι δοκιμές που περιλαμβάνουν ελέγχους δομικών ατελειών (π.χ. μακρο- και μικροπορώδες σε χυτά αντικείμενα) με υπέρηχους, ραδιογραφία (ακτίνες γ) και ακτινανάλυση (ακτίνες X).

2.3 Μηχανές Δοκιμών

Ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών τόσο στη Βιομηχανία όσο και στο Εργαστήριο μπορεί να γίνει με τη βοήθεια κατάλληλων μηχανών ελέγχου. Οι μηχανές αυτές διακρίνονται ανάλογα με τον τύπο του επιβαλλόμενου φορτίου σε δύο κυρίως κατηγορίες. Σ' εκείνες που επιβάλλουν στατικό και σε εκείνες που επιβάλλουν δυναμικό φορτίο, που αντίστοιχα αναφέρονται ως στατικές και δυναμικές.

Οι στατικές μηχανές περιλαμβάνουν εκείνες που για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών εφαρμόζουν στατικά φορτία εφελκυσμού, θλίψεως, κάμψεως, διατμήσεως και στρέψεως ή συνδυασμό όλων αυτών ανάλογα με το είδος της εφαρμοζόμενης καταπονήσεως. Τα κύρια μέρη των μηχανών αυτών είναι δύο και αποτελούνται από το σύστημα εφαρμογής του φορτίου στο δοκίμιο και το σύστημα των μηχανισμών μετρήσεως του φορτίου. Επιπλέον, υπάρχουν και διάφορα άλλα δευτερεύοντα εξαρτήματα, που συνοδεύουν κάθε μηχανή, όπως αρπάγες για την τοποθέτηση του υπό εξέταση δοκιμίου, συστήματα μετρήσεως της ταχύτητας, επιβολής του φορτίου, καταγραφής, απορροφήσεως των κραδασμών κλπ., ανάλογα με τον τρόπο σχεδιασμού και τις δυνατότητες μετρήσεως κάθε μηχανής.

Οι δυναμικές μηχανές ελέγχου έχουν σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε το υπό εξέταση δοκίμιο να δέχεται φορτία ταχέως μεταβαλλόμενα ή επαναλαμβανόμενα (δυναμικά φορτία). Διακρίνονται σε μηχανές κρούσεως (κρουστικά φορτία) και σε μηχανές κοπώσεως (επαναλαμβανόμενα φορτία). Οι μηχανές κρούσεως χρησιμοποιούν συνήθως δοκίμια με εγκοπές, τα δε εφαρμοζόμενα κρουστικά φορτία έχοντας πολύ μεγάλη κινητική ενέργεια μπορούν να εξασκηθούν με τη βοήθεια ενός ταλαντευόμενου εκκρεμούς, ενός κινητήριου τροχού ή ακόμη και με την πτώση ενός βάρους πάνω στα δοκίμια. Οι μηχανές αυτές έχουν τη δυνατότητα μετρήσεως της εφαρμοζόμενης και της απορροφούμενης ενέργειας, που είναι και το χαρακτηριστικό μετρούμενο στοιχείο των δοκιμών κρούσεως. Οι μηχανές κοπώσεως έχουν τη δυνατότητα εφαρμογής στατικού και επαναλαμβανόμενου φορτίου και σύστημα μετρήσεως του αριθμού των εναλλαγών του επαναλαμβανόμενου φορτίου, διακρίνονται δε σε μηχανές κοπώσεως από κάμψη, στρέψη, αξονική τάση ή και συνδυασμό όλων αυτών, ανάλογα με τον επιθυμητό τρόπο καταπονήσεως.

2.4 Μονοαξονικός Εφελκυσμός

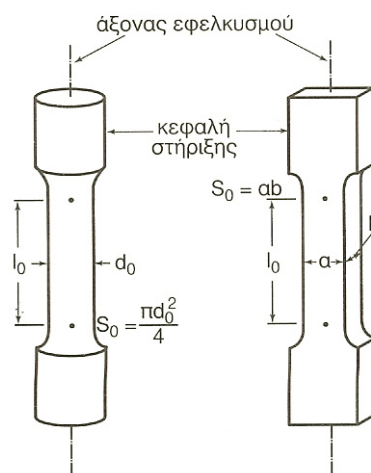
2.4.1 Εισαγωγή

Η δοκιμή του απλού μονοαξονικού εφελκυσμού (simple tension test) είναι ίσως η συνηθέστερη μηχανική δοκιμή και σπουδαιότερη όσον αφορά στον όγκο των παρεχόμενων πληροφοριών σχετικά

με το ελεγχόμενο υλικό. Συνίσταται στην υποβολή δοκιμίου, του προς χαρακτηρισμό υλικού, σε εφελκυστική καταπόνηση με προοδευτικά αυξανόμενο αξονικό φορτίο, μέχρι τη θραύση του. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, καταγράφονται ταυτόχρονα τόσο οι τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου, όσο και οι αντίστοιχες μεταβολές του μήκους του δοκιμίου, με αποτέλεσμα να προσδιορίζεται και η προκαλούμενη επιμήκυνση Δl . Με τη δοκιμή αυτή κατασκευάζεται το διάγραμμα τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) και προσδιορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

Στη δοκιμή αυτή, δοκίμια διαμορφωμένα ή μη, κατασκευασμένα από το υλικό που πρόκειται να ελεγχθεί, τοποθετούνται σε ειδικές μηχανές εφελκυσμού και καταπονούνται με αξονικό φορτίο μέχρι το διαχωρισμό τους σε δύο μέρη. Με τη δοκιμή του εφελκυσμού προσδιορίζονται τα παρακάτω μεγέθη: το όριο αναλογίας σ_A , το όριο ελαστικότητας σ_e , το όριο διαρροής σ_A , η αντοχή σε εφελκυσμό (τάση θραύσης) R_m , το φορτίο θραύσεως F_m , η ολκιμότητα D , η επιμήκυνση Δl , το μέτρο ελαστικότητας του Young E , η ελαστική ανάπαλση R_e , η στερρότητα U , ο λόγος του Poisson ν .

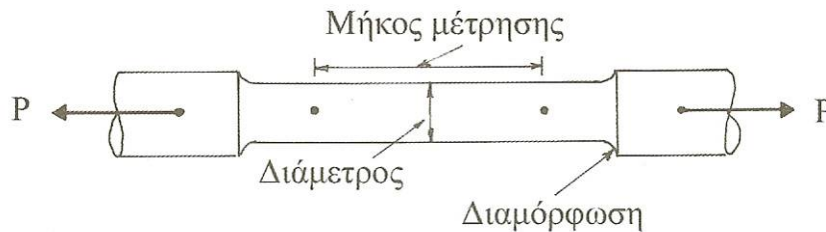
Από πλευράς αντοχής, ενδιαφέρει η μηχανική συμπεριφορά του υλικού και όχι του συγκεκριμένου δοκιμίου που εφελκύεται. Έτσι, για να είναι οι μετρήσεις ανεξάρτητες από τις διαστάσεις του δοκιμίου, οι τιμές του φορτίου ανάγονται στην αρχική διατομή του και οι αντίστοιχες επιμηκύνσεις σε ένα αρχικό μήκος πάνω στο δοκίμιο που χαρακτηρίζεται με την ονομασία μήκος μέτρησης (gauge length) L_0 του δοκιμίου. Τα δοκίμια εφελκυσμού είναι συνήθως ράβδοι κυκλικής διατομής ή ελάσματα τυποποιημένων διαστάσεων, κατάλληλα διαμορφωμένα (Σχήμα 2.1). Η γεωμετρία και η διαμόρφωση αυτή των δοκιμίων επιτρέπει τη μείωση της συγκέντρωσης των τάσεων που προκαλείται από την απότομη αλλαγή της διατομής στην περιοχή αυτή.



Σχήμα 2.1: Γεωμετρία των δοκιμίων που χρησιμοποιούνται στις δοκιμές εφελκυσμού [57].

Η επιμήκυνση μετράται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου που έχει σταθερή διατομή, ανάμεσα σε δύο χαραγές αναφοράς, που καθορίζουν το μήκος μέτρησης ή ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου (L_0) (Σχήμα

2.2). Τα άκρα του δοκιμίου με τα οποία θα συγκρατηθεί στις αρπαγές της μηχανής εφελκυσμού έχουν ισχυρότερη διατομή.



Σχήμα 2.2: Μήκος μέτρησης ή ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου (L_0) [58].

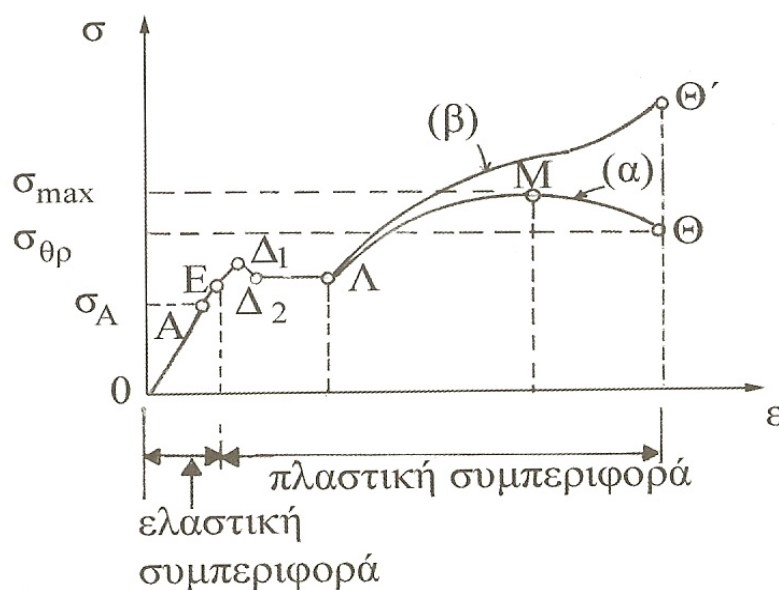
Με την παραδοχή ότι οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι μακροσκοπικά ομοιόμορφες στο μήκος μέτρησης και στη διατομή του δοκιμίου, ορίζεται η συμβατική τάση και η συμβατική παραμόρφωση. Η συμβατική ορθή τάση (nominal stress) είναι ο λόγος:

$$\sigma = F/A_0 \quad (2.1)$$

όπου A_0 είναι το εμβαδόν της αρχικής διατομής του δοκιμίου και F οι τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου. Η συμβατική ορθή παραμόρφωση (nominal strain) είναι ο λόγος:

$$\varepsilon = \Delta L/L_0 \quad (2.2)$$

όπου $\Delta l = L - L_0$ είναι η διαφορά του αρχικού από το τελικό μήκος μέτρησης του δοκιμίου. Με τα ζεύγη των τιμών αυτών κατασκευάζεται το διάγραμμα συμβατικών τάσεων - συμβατικών παραμορφώσεων ($\sigma - \varepsilon$), όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 2.3 (Καμπύλη α).



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων ($\sigma - \varepsilon$) για μαλακό χάλυβα [59].

Έχει αποδειχθεί ότι τα μετρούμενα μεγέθη στις δοκιμές εφελκυσμού, επηρεάζονται από την μορφή και τις διαστάσεις του δοκιμίου. Για το λόγω αυτό απαιτείται τυποποίηση των δοκιμίων ώστε να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα των δοκιμών. Στην ηπειρωτική Ευρώπη, ισχύουν δύο είδη δοκιμίων, τα μακρού τύπου και τα βραχέως τύπου. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι μηχανών εφελκυσμού. Όλες οι μηχανές είναι έτσι κατασκευασμένες ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη και κεντρική μονοαξονική φόρτιση του δοκιμίου.

2.4.2 Διάγραμμα Τάσης (σ) - Παραμόρφωσης (ϵ)

Από ένα πείραμα εφελκυσμού, από το διάγραμμα φορτίου (F) - επιμήκυνσης (Δl) προκύπτει το αντίστοιχο των τάσεων και των παραμορφώσεων. Από αυτό προσδιορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες, όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας, το όριο αναλογίας, το όριο διαρροής, η αντοχή θραύσεως κ.ά. Με βάση το διάγραμμα ($\sigma - \epsilon$) τα υλικά διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, στα όλκιμα και στα ψαθυρά. Όλκιμα (ductile) ονομάζονται τα υλικά εκείνα που παρουσιάζουν σημαντικές παραμορφώσεις μέχρι τη θραύση τους. Αντίθετα, τα υλικά που σπάζουν εύκολα ονομάζονται ψαθυρά (brittle). Γνωστά όλκιμα υλικά είναι ο μαλακός (δομικός) χάλυβας, το αλουμίνιο, ο χαλκός κ.ά. Στην κατηγορία των ψαθυρών υλικών υπάγονται ο χυτοσίδηρος, το γυαλί, το σκυρόδεμα κ.ά. Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων ($\sigma - \epsilon$) για το μαλακό χάλυβα.

Μελετώντας το διάγραμμα αυτό διακρίνεται ένα ευθύγραμμο τμήμα ΟΑ που απεικονίζει την ελαστική συμπεριφορά του υλικού. Ένα σώμα συμπεριφέρεται ελαστικά όταν κατά την αποφόρτισή του δίνει ακριβώς το ίδιο διάγραμμα όπως και κατά την φόρτιση, με αντίθετη φορά διαγραφής, έτσι ώστε όταν η τάση μηδενιστεί το σώμα να επανέλθει στις αρχικές του διαστάσεις. Για το ΟΑ ισχύει η σχέση:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.3)$$

όπου είναι η απλή μορφή του γενικευμένου νόμου του Hooke για τον μονοαξονικό εφελκυσμό σε ομογενές και ισότροπο υλικό. Ο συντελεστής αναλογίας E μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων, ονομάζεται μέτρο ελαστικότητας (Young Modulus), ισούται με την κλίση της ευθείας ΟΑ και είναι πάντα $E > 0$. Η τάση σ_A που αντιστοιχεί στο σημείο Α του διαγράμματος ονομάζεται όριο αναλογίας (Proportional Limit). Η περιοχή από το Ο μέχρι το Α λέγεται και περιοχή της γραμμικής ελαστικότητας. Από το σημείο Α και μετά, το διάγραμμα καμπυλώνεται και η σχέση τάσεων - παραμορφώσεων παύει να είναι γραμμική. Συνεχίζουν όμως να υπάρχουν στο υλικό μόνο ελαστικές παραμορφώσεις που εξαφανίζονται μετά την αποφόρτιση. Η τάση του σημείου Ε ονομάζεται όριο ελαστικότητας (Elastic Limit). Για πολλά όλκιμα υλικά και ειδικότερα για τους χάλυβες, το όριο ελαστικότητας δύσκολα προσδιορίζεται αφού η τιμή του είναι πολύ κοντά στο όριο αναλογίας.

περιοχή. Το μέτρο της ονομάζεται μέτρο ελαστικής αναπάλσεως (Modulus of Resilience) και δίνεται από τη Σχέση 2.5 και ισούται με το εμβαδόν της πρώτης τριγωνικής περιοχής.

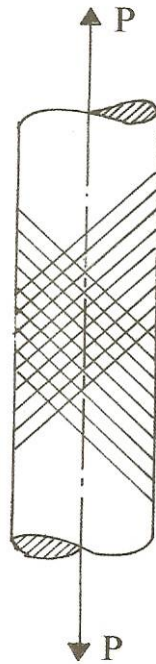
$$R_e = 1/2 \varepsilon_A \cdot \sigma_A \quad (2.5)$$

Το εμβαδόν του τριγώνου ΚΛΙ, περιοχή 2, εκφράζει το ποσό της ενέργειας που αποδίδεται στο περιβάλλον από το παραμορφούμενο υλικό κατά την αποφόρτισή του και ονομάζεται υπερελαστική ανάπαυση. Τέλος, το ποσό της παραμορφωσιακής ενέργειας που απορροφάται από το υλικό μέχρι τη θραύση του καλείται στερερότητα (Fracture Toughness) και το μέτρο της δίνεται από το εμβαδόν του τμήματος κάτω από την καμπύλη $\sigma_\pi - \varepsilon_\pi$ [62].

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4 αυξάνοντας την εξωτερική φόρτιση, το διάγραμμα καμπυλώνεται ακόμη περισσότερο και οι πλαστικές παραμορφώσεις μεγαλώνουν. Αυτό συμβαίνει μέχρι το σημείο Δ_1 όπου παρατηρείται μία απότομη πτώση που σταματάει στο Δ_2 . Από το σημείο αυτό μέχρι το Λ η αύξηση της παραμόρφωσης γίνεται σχεδόν χωρίς καμία αύξηση της τιμής της τάσης και το υλικό διαρρέει. Οι τάσεις που αντιστοιχούν στα σημεία Δ_1 και Δ_2 ονομάζονται ανώτερο και κατώτερο όριο διαρροής (Upper and Lower Yield Point) αντίστοιχα. Το τμήμα του διαγράμματος από το σημείο Δ_1 μέχρι το Λ απεικονίζει τη διαρροή του υλικού.

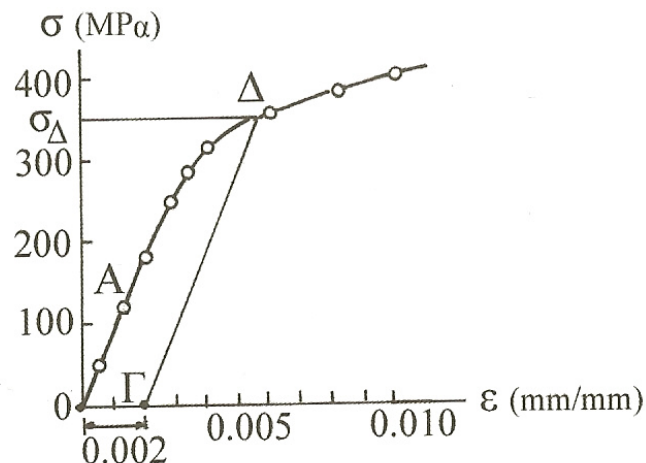
Όταν το υλικό διαρρέει πάνω στη λεία επιφάνεια του δοκιμίου εντοπίζονται μερικές πλάγιες γραμμές, με γωνία περίπου 45° , ως προς τη διεύθυνση φόρτισης, οι οποίες είναι ορατές ακόμη και με γυμνό μάτι, Σχήμα 2.5. Οι γραμμές αυτές είναι τα ίχνη (πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου), των επιπέδων (ή ζωνών ολίσθησης) του υλικού και δείχνουν ότι η διαρροή του προκαλείται από τις αναπτυσσόμενες μέγιστες διατμητικές τάσεις, που όπως είναι γνωστό από τη θεωρία, εμφανίζονται κατά 45° ως προς τον άξονα του δοκιμίου. Οι λεπτές αυτές λουρίδες ονομάζονται «Ζώνες Lüders» και η ολίσθησή τους εμφανίζεται όταν οι διατμητικές τάσεις αρχίζουν και υπερνικούν τις δυνάμεις συνοχής μεταξύ γειτονικών επιπέδων. Το σημείο Δ_1 συμπίπτει με την εμφάνιση των πρώτων ζωνών ολίσθησης και η ολοκλήρωσή τους επέρχεται στο κατώτερο όριο διαρροής. Από τα δύο όρια διαρροής εκείνο που παρουσιάζει σταθερή τιμή είναι το κατώτερο και αυτό χρησιμοποιείται σχεδόν πάντοτε στη δοκιμή του εφελκυσμού.

Όμως οι δύο τιμές του ορίου διαρροής εμφανίζονται μόνο στους μαλακούς χάλυβες. Για τα όλκιμα υλικά που παρουσιάζουν μία ομαλή μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή όπως είναι π.χ. το αλουμίνιο ή ο χαλκός, το όριο διαρροής ορίζεται όπως δείχνει το Σχήμα 2.6. Αν δηλαδή από το σημείο Γ , που αντιστοιχεί σε πλαστική παραμόρφωση ίση με 0,002 ή 0,2%, χαραχτεί παράλληλη ευθεία προς την ευθεία OA , τότε η τάση που αντιστοιχεί στο σημείο τομής Δ της ευθείας με το διάγραμμα, ορίζεται ως συμβατικό ή πρακτικό όριο διαρροής.



Σχήμα 2.5: Κατά τη διαρροή του υλικού εντοπίζονται μερικές πλάγιες γραμμές, με γωνία περίπου 45° , ως προς τη διεύθυνση φόρτισης (Ζώνες Lüders).

Τα ψαθυρά υλικά στον εφελκυσμό σπάζουν απότομα, με αποχωρισμό του δοκιμίου, κατά επίπεδα κάθετα προς τη διεύθυνση φόρτισης. Η θραύση επέρχεται αμέσως μετά τη διαρροή, με ελάχιστες ή σχεδόν καθόλου πλαστικές παραμορφώσεις και γι' αυτό το όριο διαρροής τους λαμβάνεται ίσο με το όριο θραύσης.

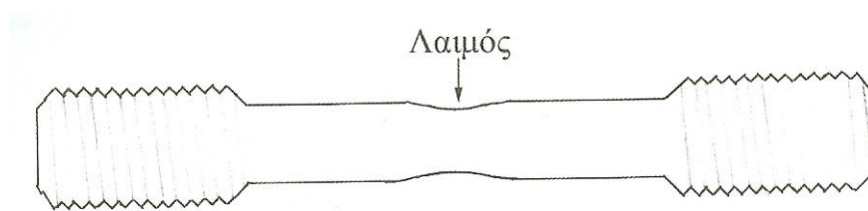


Σχήμα 2.6: Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης όλκιμων υλικών, όπου παρουσιάζεται ομαλή μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή [63].

Όπως προκύπτει από τα προαναφερόμενα, από το όριο διαρροής και μετά, το δοκίμιο εισέρχεται στην πλαστική περιοχή. Η συνολική του παραμόρφωση, σε κάθε φόρτιση, αποτελείται από ένα ελαστικό μέρος (που δεν υπάρχει μετά την αποφόρτιση) και ένα πλαστικό που αντιστοιχεί σε παραμένονσα

πλαστική παραμόρφωση. Επιπλέον, από το κατώτερο όριο διαρροής μέχρι το Λ το δοκίμιο συνεχίζει να επιμηκύνεται με μηδενική σχεδόν αύξηση του εξωτερικού φορτίου. Φορτίζοντας το δοκίμιο πέρα από το σημείο Λ παρατηρείται ότι η αύξηση της παραμόρφωσης απαιτεί και πάλι ανάλογη αύξηση της τάσης. Το φαινόμενο κατά το οποίο απαιτείται συνεχής αύξηση των τάσεων για μεγαλύτερες παραμορφώσεις ονομάζεται κράτυνση του υλικού (strain hardening).

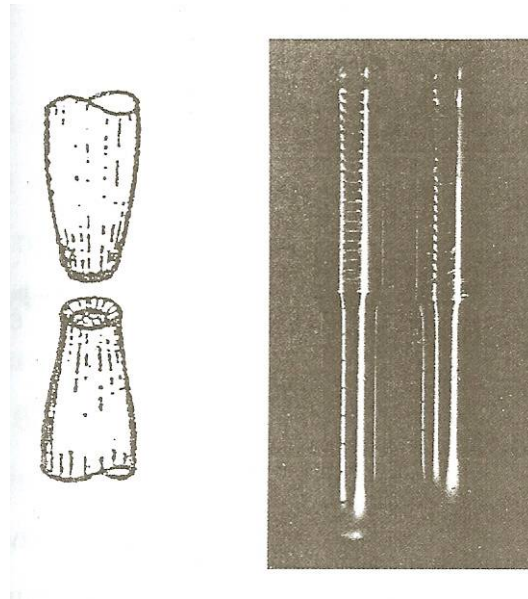
Στην περιοχή κράτυνσης, το δοκίμιο απορροφά ενέργεια (ποσοστό από το έργο των εξωτερικών δυνάμεων που επενεργούν σ' αυτό) με αποτέλεσμα το υλικό να καθίσταται ισχυρότερο. Ταυτόχρονα όμως με τη διαδικασία αυτή συμβαίνει και μείωση της διατομής του δοκιμίου, που το καθιστά ασθενέστερο. Όπως διαπιστώνεται από την καμπύλη (α) του Σχήματος 2.3 του διαγράμματος, η συμβατική τάση φθάνει σε μια μέγιστη τιμή, που αντιστοιχεί στο σημείο M και μετά μικραίνει. Στο σημείο M μάλιστα επέρχεται μία αστάθεια των παραμορφώσεων, δηλαδή συγκέντρωσή τους σε μια περιοχή μόνο του δοκιμίου, με αποτέλεσμα τη ραγδαία μείωση της διατομής στην ίδια περιοχή και τη δημιουργία τοπικής στένωσης στο δοκίμιο. Η στένωση αυτή ονομάζεται λαιμός (Σχήμα 2.7). Η αρχική άνοδος της συμβατικής τάσης αμέσως μετά το σημείο Λ , οφείλεται στην ταχύτερη αύξηση της αντοχής από την ελάττωση της διατομής.



Σχήμα 2.7: Δοκίμιο με εμφανή τη δημιουργία τοπικής στένωσης (λαιμού).

Αυτό συμβαίνει μέχρι το σημείο M , όπου ο ρυθμός κρατύνσεως εξουδετερώνει το ρυθμό στενώσεως της διατομής. Κατόπιν όμως υπερισχύει η στένωση με αποτέλεσμα το δοκίμιο να οδηγείται στη θραύση. Ο σχηματισμός του λαιμού έχει ως αποτέλεσμα την εκκίνηση μιας διαδικασίας ανακατανομής των πραγματικών τάσεων και παραμορφώσεων στο εσωτερικό του δοκιμίου. Από τη στιγμή που αρχίζει ο λαιμός, η παραμόρφωση συνεχίζεται μόνο πολύ κοντά στην περιοχή του ενώ στις υπόλοιπες περιοχές του δοκιμίου σχεδόν σταματά να εμφανίζεται. Ταυτόχρονα, εξαιτίας της δημιουργίας του λαιμού η κατανομή των τάσεων στην περιοχή αυτή παύει να είναι μονοαξονική και γίνεται τριαξονική. Κατά το στάδιο της δημιουργίας του λαιμού, οι τάσεις $\sigma_{11} > \sigma_{22} > \sigma_{33}$ είναι όλες εφελκυστικές, με συνέπεια η μέγιστη διατμητική τάση να είναι μικρότερη από καθεμιά από τις κύριες τάσεις. Μόλις η μέγιστη από αυτές, δηλαδή η σ_{11} , λάβει την κρίσιμη για το υλικό τιμή, δημιουργείται εσωτερικά στο δοκίμιο ρωγμή κάθετη προς τη διεύθυνση της σ_{11} και αρχίζει η θραύση του με αποχωρισμό. Έχει αποδειχθεί όμως ότι μόλις εμφανισθεί η πρώτη ρωγμή, τότε οι εγκάρσιες τάσεις σ_{22} και σ_{33} γίνονται θλιπτικές, και επομένως η μέγιστη διατμητική τάση αποκτά μεγαλύτερη τιμή από την

σ_{11} . Συνεπώς, η θραύση συνεχίζει να γίνεται πλέον με ολίσθηση, με αποτέλεσμα ο διπλός αυτός τρόπος θραύσης να δίνει στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου τη μορφή ‘κυπέλλου - κώνου’ (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8: Απεικόνιση της χαρακτηριστικής μορφής ‘κυπέλλου - κώνου’ στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου [64].

Αντίθετα στο διάγραμμα πραγματικών τάσεων και παραμορφώσεων (Σχήμα 2.3), η καμπύλη β είναι αύξουσα. Δεν πρόκειται βέβαια για μια διαφορετική μεταβολή της κρατυνόμενης συμπεριφοράς του υλικού, (από το Λ και μετά), αλλά απλά και μόνο για το γεγονός ότι η κατασκευή της καμπύλης α έγινε με αναγωγή των μετρήσεων (που καταγράφηκαν από το πείραμα) στα αρχικά γεωμετρικά μεγέθη του δοκιμίου, θεωρώντας ότι αυτά παρέμειναν σταθερά σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Έτσι εξηγείται η παρατηρούμενη απόκλιση των δύο διαγραμμάτων. Η απόκλιση μεταξύ των δύο διαγραμμάτων γίνεται όλο και μεγαλύτερη καθώς το δοκίμιο προχωράει προς τη θραύση του (Σχήμα 2.3 - Σημεία Θ και Θ’).

2.4.3 Διαστάσεις Δοκιμίων Εφελκυσμού

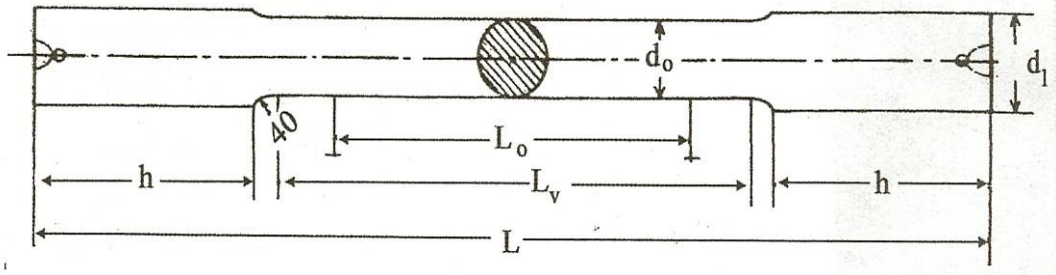
Έχει διαπιστωθεί ότι οι μετρήσεις για τα φορτία και τις επιμηκύνσεις που λαμβάνονται σ’ ένα πείραμα εφελκυσμού εξαρτώνται τόσο από τη μορφή όσο και από τις διαστάσεις του δοκιμίου. Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα των δοκιμών, θα πρέπει μεταξύ του μήκους μέτρησης L_0 και της διαμέτρου D_0 , της κυκλικής διατομής του κυλινδρικού δοκιμίου ή του εμβαδού της διατομής A για πρισματικά δοκίμια, να υπάρχει σταθερή αναλογία.

Η διατομή του δοκιμίου μπορεί να είναι κυκλική με διάμετρο D για κυκλικά δοκίμια ή ορθογωνική με εμβαδό διατομής A για πρισματικά δοκίμια. Στην Ηπειρωτική Ευρώπη ισχύουν δύο τύποι δοκιμίων, τα μακρού τύπου και τα βραχέως τύπου, των οποίων το μήκος μέτρησης L_0 δίνεται από τις σχέσεις:

$$L_o = 10D \text{ ή } L_o = 11,3\sqrt{A}, \text{ για μακρά δοκίμια}$$

$$L_o = 5D \text{ ή } L_o = 5,65\sqrt{A}, \text{ για βραχέα δοκίμια}$$

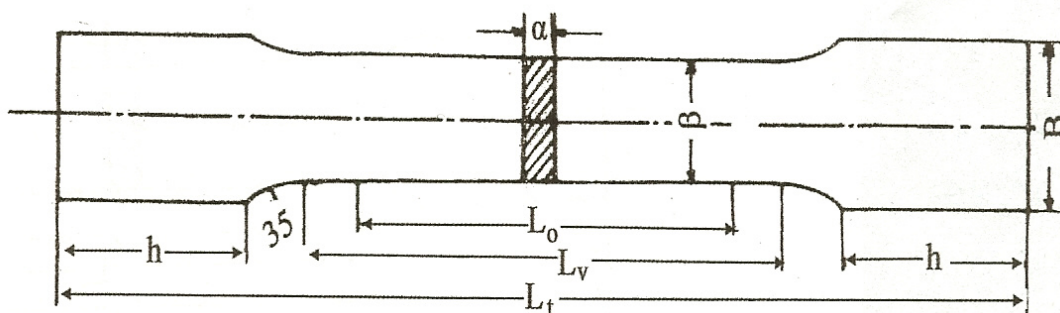
Στη συνέχεια, δίνονται το σχήμα και οι διαστάσεις (σε mm) μεταλλικών κυλινδρικών και πρισματικών δοκιμών (διαμορφωμένα με κεφαλές ή μη), σύμφωνα με τις Γερμανικές Προδιαγραφές DIN 50125.



Σχήμα 2.9: Γεωμετρία μεταλλικού κυλινδρικού δοκιμίου εφελκυσμού.

Διάμετρος δοκιμίου d _o	Διάμετρος κεφαλής d ₁	Μήκος κεφαλής h	Βραχέα δοκίμια			Μακρά δοκίμια		
			Μήκος μέτρησης L _o	Μήκος δοκιμής L _v	Ολικό μήκος L _t	Μήκος μέτρησης L _o	Μήκος δοκιμής L _v	Ολικό μήκος L _t
6	8	25	30	36	95	60	66	125
8	10	30	40	48	115	80	88	155
10	12	35	50	60	140	100	110	190
12	15	40	60	72	160	120	132	220
14	17	45	70	84	180	140	154	250
16	20	50	80	96	205	160	176	285
18	22	55	90	108	230	180	190	310
20	24	60	100	120	250	200	220	350
25	30	70	125	150	300	250	275	425

Πίνακας 2.1: Διαστάσεις μεταλλικών κυλινδρικών δοκιμών εφελκυσμού [65].



Σχήμα 2.10: Γεωμετρία μεταλλικού πρισματικού δοκιμίου εφελκυσμού.

Πάχος δοκιμίου a	Πλάτος δοκιμίου b	Πλάτος κεφαλής B	Μήκος κεφαλής h	Εμβαδό εγκάρσιας διατομής F ₀ mm ²	Βραχεία δοκίμια			Μακρά δοκίμια		
					Μήκος μέτρησης L ₀	Μήκος δοκιμής L _v	Όλικό μήκος L _t	Μήκος μέτρησης L ₀	Μήκος δοκιμής L _v	Όλικό μήκος L _t
					5	10	15	30	50	40
5	16	22	30	80	50	65	155	100	115	205
6	20	27	50	120	60	80	210	120	140	270
7	22	29	50	154	70	90	220	140	160	290
8	25	33	60	200	80	105	260	160	185	340
10	25	33	60	250	90	115	275	180	205	360
10	31	40	70	310	100	130	300	200	230	400
12	26	34	70	312	100	125	300	200	225	400
15	30	40	70	450	120	150	325	240	270	445
18	30	40	70	540	130	160	335	260	290	465

Πίνακας 2.2: Διαστάσεις μεταλλικών πρισματικών δοκιμίων εφελκυσμού [66].

2.5 Δυσθραυστότητα

2.5.1 Εισαγωγή

Η δυσθραυστότητα εκφράζει την ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια πριν τη θραύση του. Μετράται μέσω της αντίστασης του υλικού στη βίαιη διάδοση των ρωγμών και επιτρέπει να προβλεφθεί ο βαθμός στον οποίο ένα υλικό συμπεριφέρεται ως όλκιμο ή ψαθυρό. Είναι σύνθετη μηχανική ιδιότητα, αφού αποδίδει συγχρόνως την ικανότητα ενός υλικού να υφίσταται πλαστική παραμόρφωση, πριν από τη θραύση (δηλαδή να έχει σημαντική ολκιμότητα) και να αντέχει σε μεγάλα φορτία, δηλαδή να έχει υψηλό όριο θραύσης. Η ολκιμότητα και το όριο θραύσης είναι δύο ιδιότητες που σπάνια συμβαδίζουν στο ίδιο υλικό σε ικανοποιητικό βαθμό. Όσα μέταλλα κατέχουν έναν ικανοποιητικό συνδυασμό των δύο ιδιοτήτων είναι δύσθραυστα και το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης είναι μεγάλο. Επομένως, η δυσθραυστότητα είναι το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης και εκφράζει τη μηχανική ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει η μονάδα όγκου του υλικού μέχρι να θραυστεί.

Για τη θραύση ενός δύσθραυστου υλικού πρέπει να καταναλωθεί ένα μεγάλο ποσό ενέργειας, της οποίας το μεγαλύτερο μέρος πηγαίνει στην πλαστική παραμόρφωση, δηλαδή στην αλλαγή σχήματος του υλικού. Αντίθετα, για τη θραύση ενός εύθραυστου υλικού δε χρειάζεται μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, γιατί κατά κανόνα η ολκιμότητα του είναι μικρή, ώστε δεν παραμορφώνεται.

2.5.2 Μαθηματικός Προσδιορισμός της Δυσθραυστότητας

Έστω η καμπύλη εφελκυσμού ενός ψαθυρού (Σχήμα 2.11(α)) και ενός όλκιμου υλικού (Σχήμα 2.11(β)). Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη $\sigma = f(\epsilon)$ παριστάνει την ενέργεια που δαπανήθηκε ανά μονάδα όγκου του υλικού μέχρι τη θραύση του και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$W = \int_0^A \sigma d\varepsilon$$

αλλά $\sigma = \frac{F}{S_0}$ και $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ και άρα:

$$W = \int_{l_0}^{l_f} \frac{F}{S_0} d\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right) \quad (2.6)$$

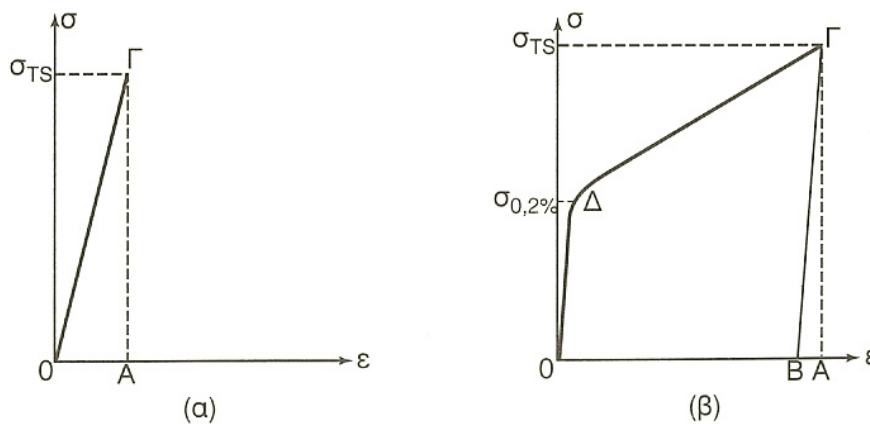
και δεδομένου ότι ισχύει $\Delta l_f = l_f - l_0$ (l_0 : το αρχικό μήκος του δοκιμίου & l_f : το τελικό μήκος του δοκιμίου μετά τη θραύση του), η εξίσωση 2.6 γράφεται:

$$W = \int_0^{\Delta l_f} \frac{l}{S_0 l_0} F d(\Delta l)$$

όπου Δl_f η επιμήκυνση του δοκιμίου, μετρημένη αμέσως μετά τη θραύση. Επειδή ο αρχικός όγκος του δοκιμίου είναι $V_0 = S_0 \cdot l_0$ προκύπτει:

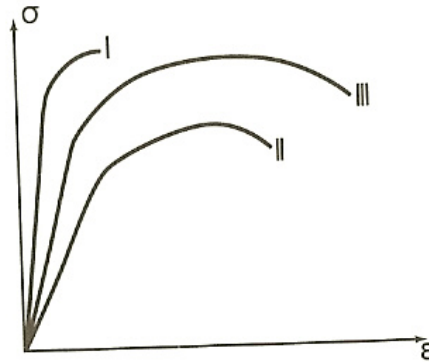
$$W = \frac{1}{V_0} \int_0^{\Delta l_f} F d(\Delta l)$$

Σε ένα ψαθυρό υλικό (Σχήμα 2.11(α)), το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη εφελκυσμού επιτρέπει (ΟΓΑ τρίγωνο) την εκτίμηση της προσδιδόμενης ενέργειας πριν τη θραύση, ενώ σε ένα όλκιμο υλικό η ενέργεια αυτή είναι δυνατόν να εκτιμηθεί κατά προσέγγιση υπολογίζοντας το εμβαδόν S του πολυγώνου ΟΔΓΑ (Σχήμα 2.11(β)). Η ενέργεια που παριστάνει το εμβαδόν του τριγώνου ΒΓΑ και αφορά στην ελαστική παραμόρφωση των δύο τμημάτων του θραυσθέντος δοκιμίου, είτε αφαιρείται είτε κρίνεται αμελητέα ως προς τη συνολική ενέργεια που αντιστοιχεί στο εμβαδόν S . Κατά συνέπεια, η δυσθραυστότητα των όλκιμων υλικών, όπως είναι τα περισσότερα μέταλλα και κράματα, εξαρτάται όχι μόνο από την ολκιμότητα -μετρούμενη επί της τελικής επιμήκυνσης ε_f μέχρι τη θραύση- αλλά συγχρόνως και από το όριο διαρροής σ_y και την αντοχή σε εφελκυσμό (σ_{TS}) [67].



Σχήμα 2.11: Καμπύλες εφελκυσμού (α) ψαθυρού και (β) όλκιμου υλικού.

Το Σχήμα 2.12 παρουσιάζει σχηματικά τρεις καμπύλες εφελκυσμού για τρία υλικά (I, II και III). Το υλικό I παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό αλλά είναι το περισσότερο εύθραυστο. Το υλικό II, το οποίο παρουσιάζει τη μικρότερη αντοχή και το μικρότερο όριο διαρροής, έχει ωστόσο μεγαλύτερη δυσθραυστότητα από το υλικό I. Το υλικό III, μολονότι έχει ενδιάμεση αντοχή σε εφελκυσμό, είναι το λιγότερο εύθραυστο.



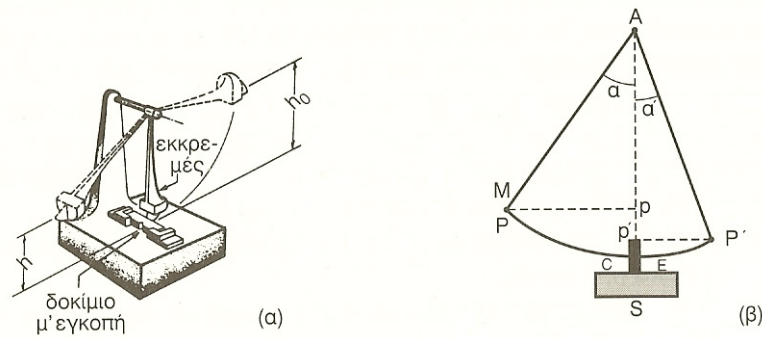
Σχήμα 2.12: Καμπύλες εφελκυσμού τριών υλικών διαφορετικής δυσθραυστότητας.

2.5.3 Μέτρηση Δυσθραυστότητας - Δοκιμή Κρούσης

Παρότι το διάγραμμα του εφελκυσμού είναι πολύ χρήσιμο για να μελετηθεί η δυσθραυστότητα, δεν αποτελεί εύχρηστο εργαλείο για τον πειραματικό προσδιορισμό της, κι αυτό κυρίως διότι ο εφελκυσμός είναι στατική δοκιμή και συνεπάγεται ότι η φόρτιση είναι μικρότερης ταχύτητας από την ταχύτητα με την οποία μπορούν να μετακινηθούν οι διαταραχές. Στην πράξη, οι κατασκευές υφίστανται σύνθετες δυναμικές φορτίσεις.

Ο συνήθης έλεγχος της δυσθραυστότητας των υλικών γίνεται μέσω της δοκιμής κρούσης. Σκοπός της δοκιμής κρούσεως είναι ο προσδιορισμός της στερρότητας των υλικών υπό δυναμική φόρτιση. Αυτό επιτρέπει μία ποιοτική ή συγκριτική εκτίμηση της συμπεριφοράς των υλικών υπό παρόμοιες συνθήκες, για τις οποίες οι στατικές δοκιμές δεν παρέχουν πληροφορίες. Η συνηθέστερη δοκιμή κρούσεως πραγματοποιείται σε διάταξη ‘Charpy’, ενώ και η διάταξη ‘Izod’ αποτελεί μία εναλλακτική επιλογή.

Στη διάταξη ‘Charpy’ (Σχήμα 2.13(α)), μία μάζα m σχήματος σφύρας στερεωμένη στο βραχίονα εκκρεμούς, μπορεί να αιωρείται σε κάθετο επίπεδο γύρω από οριζόντιο άξονα A (Σχήμα 2.13(β)). Το δοκίμιο στερεωμένο σε υποστήριγμα δέχεται χτύπημα από την αιωρούμενη σφύρα όταν αυτή περάσει από τη χαμηλότερη θέση της τροχιάς της. Όταν το εκκρεμές χτυπά το δοκίμιο τότε το τελευταίο κατέχει κινητική ενέργεια ίση με τη δυναμική ενέργεια που κατείχε στην αρχική του θέση (υψηλότερη θέση της τροχιάς του).



Σχήμα 2.13: Σχηματική αναπαράσταση της δοκιμής ‘Charpy’.

Έστω α η αρχική γωνία που σχηματίζει ο βραχίονας ως προς τη θέση ισορροπίας και α' η γωνία του βραχίονα μετά την κρούση του επί του δοκιμίου στη θέση P' , τότε η ενέργεια W που απορροφάται κατά τη θραύση του δοκιμίου αποτελεί μέτρο της δυσθραυστότητάς του.

$$W = mg (h_0 - h) \quad (2.7)$$

$$W = mgl (\sin \alpha' - \sin \alpha) \quad (2.8)$$

όπου m η μάζα του εκκρεμούς, l το μήκος του βραχίονα και g η επιτάχυνση της βαρύτητας ($9,81\text{m/s}^2$). Η ταχύτητα κρούσης δίνεται από τη σχέση:

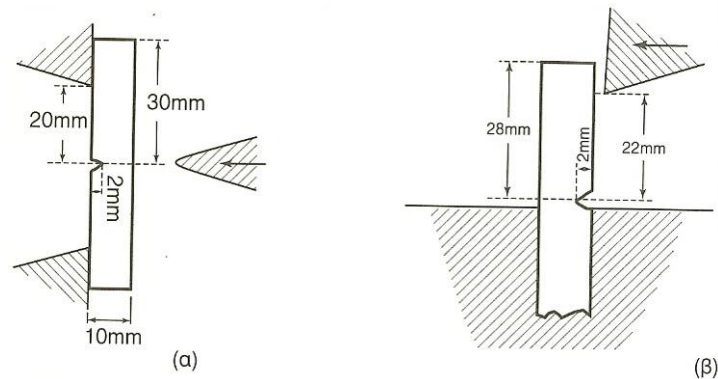
$$U = [2gl (1 - \sin \alpha)]^{1/2} \quad (2.9)$$

και η τιμή της συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 4,5 και 5,5 m/s. Το μήκος του βραχίονα l είναι από 400 έως 800 mm και το ύψος πτώσης της σφύρας h_0 μεταξύ 800 και 1600 mm. Μία συνηθισμένη τιμή του βάρους της σφύρας είναι 30 kg. Η δοκιμή ‘Charpy’ χρησιμοποιείται κυρίως στην Ευρώπη ενώ η δοκιμή ‘Izod’ χρησιμοποιείται στις ΗΠΑ και την Αγγλία και εφαρμόζεται κυρίως για μη μεταλλικά υλικά (π.χ. πολυμερή) [68].

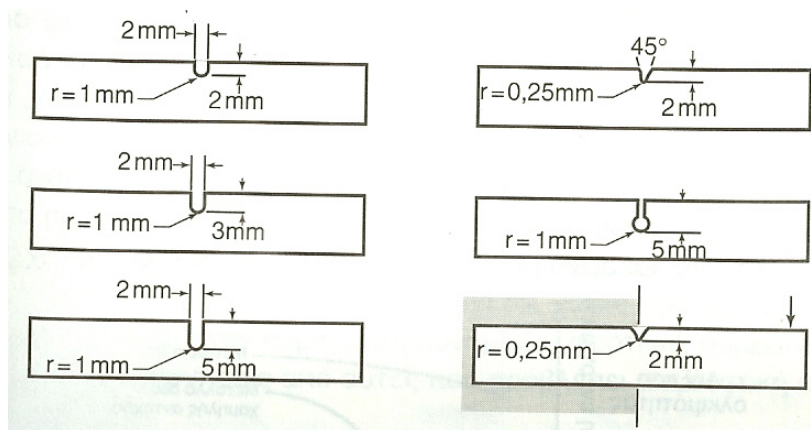
Για την πραγματοποίηση της δοκιμής, τα εξεταζόμενα υλικά θα πρέπει να έχουν συγκεκριμένη γεωμετρία και στήριξη. Πρόκειται για ορθογώνια παραλληλεπίπεδα δοκίμια διατομής 10mm x 10mm, στο μέσο των οποίων δημιουργείται κατάλληλη εγκοπή για την εισαγωγή εσωτερικών τάσεων. Τα δοκίμια της δοκιμής ‘Charpy’ (Σχήμα 2.14(α)) έχουν μήκος 55 ή 60 mm και στηρίζονται και στα δύο άκρα, έτσι ώστε το άνοιγμα ανάμεσα στα στηρίγματα της μηχανής να είναι 40 mm. Η πρόσκρουση του εκκρεμούς γίνεται στην απέναντι από την εγκοπή έδρα. Τα δοκίμια της δοκιμής ‘Izod’ (Σχήμα 2.14(β)) είναι πρόβολοι και η κρούση γίνεται στο άκρο του προβόλου, από την πλευρά της εγκοπής.

Στη δοκιμή ‘Charpy’, η εγκοπή έχει σχήμα V ή U. Το σχήμα U αναπαράγει ηπιώτερες συνθήκες συγκέντρωσης τάσεων. Δοκίμια με εγκοπή σχήματος V δίνουν χαμηλότερες τιμές δυσθραυστότητας

από εκείνες των δοκιμών με εγκοπή U. Στο Σχήμα 2.15 φαίνονται οι συνήθεις γεωμετρίες εγκοπής για δοκίμια μέτρησης της δυσθραυστότητας.



Σχήμα 2.14: Γεωμετρία και στήριξη δοκιμών για μέτρηση της δυσθραυστότητας σε διάταξη (α) ‘Charpy’ και (β) ‘Izod’.

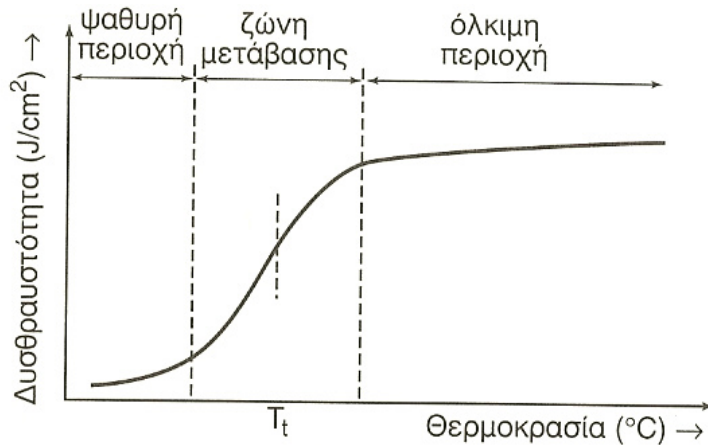


Σχήμα 2.15: Συνήθεις γεωμετρίες εγκοπών σε δοκίμια μέτρησης της δυσθραυστότητας.

2.5.4 Εξάρτηση της Δυσθραυστότητας Από τη Θερμοκρασία

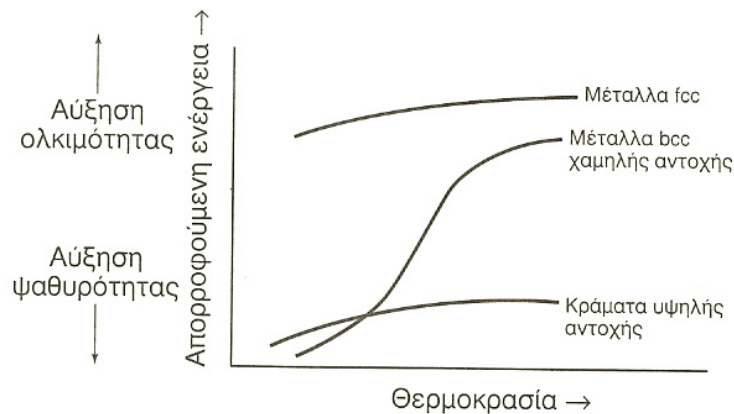
Ο μηχανισμός θραύσης ενός μετάλλου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη θερμοκρασία. Γενικά, σε χαμηλές θερμοκρασίες, πολύ μικρότερες της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, η θραύση των μετάλλων και των κραμάτων πραγματοποιείται με ψαθυρό τρόπο, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες η θραύση συμβαίνει με όλκιμο τρόπο.

Ο μηχανισμός μετάβασης από τη ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά, με την αύξηση της θερμοκρασίας, βασίζεται στη θεωρία των διαταραχών. Η κίνηση των διαταραχών είναι θερμικά ενεργοποιήσιμη διεργασία. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, κάποια από τα δυνατά συστήματα ολίσθησης αδρανοποιούνται - ‘πάγωμα’ των διαταραχών - παρεμποδίζοντας την πλαστική παραμόρφωση του υλικού.



Σχήμα 2.16: Γενική μορφή της καμπύλης δυσθραυστότητας - θερμοκρασίας.

Για κάθε μέταλλο, υπάρχει μία θερμοκρασιακή περιοχή (T_t) μετάβασης από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά (Σχήμα 2.16). Η καμπύλη του Σχήματος 2.16 ονομάζεται καμπύλη μετάβασης της δυσθραυστότητας. Η έκταση της ζώνης μετάβασης ποικίλλει για τα διάφορα μέταλλα (Σχήμα 2.17) και η θερμοκρασία μετάβασης εξαρτάται από τις πειραματικές συνθήκες (ταχύτητα επιβολής φορτίου, γεωμετρία δοκιμίου, γεωμετρία εγκοπής, μέγεθος κόκκων υλικού, ποσοστό ακαθαρσιών κ.λ.π.). Στα μέταλλα 'b.c.c.', το φαινόμενο μετάβασης είναι έντονο (π.χ. κοινοί χάλυβες), ενώ στα μέταλλα 'f.c.c.' (π.χ. κράματα Al), λιγότερο γιατί αυτά έχουν υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά τη θραύση τους, η οποία ελαττώνεται βαθμιαία και αργά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας (Σχήμα 2.17) [69].



Σχήμα 2.17: Επίδραση της θερμοκρασίας στη δυσθραυστότητα ορισμένων μετάλλων και κραμάτων.

2.6 Σκληρότητα & Μικροσκληρότητα

2.6.1 Εισαγωγή

Με τον όρο "σκληρότητα" (Hardness, H) μιας μεταλλικής επιφάνειας εκφράζεται η ολική αντίσταση που προβάλλει η ύλη σε κάθε προσπάθεια μόνιμης παραμόρφωσης της επιφάνειάς της. Η σκληρότητα αποτελεί μία μηχανική ιδιότητα των μετάλλων και η μέτρησή της

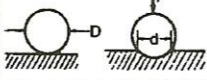

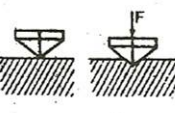

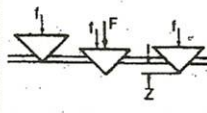
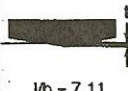
πραγματοποιείται κατά προσέγγιση στην επιφάνεια του μετάλλου, σε αντίθεση με τις μετρήσεις της μηχανικής αντίστασης, οι οποίες γίνονται στο εσωτερικό της μάζας του. Στη βιβλιογραφία, με τον όρο σκληρότητα ορίζεται η αντίσταση ενός υλικού στη διείδυση ενός άλλου υλικού σκληρότερου από το πρώτο [70].

Η παραμόρφωση της επιφάνειας μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, όπως με μηχανική τριβή, διείδυση, κοπή και δημιουργία ράβδωσης ή αποτυπώματος με τη βοήθεια ειδικών 'εισαγωγέων', οι οποίοι αποτελούνται συνήθως από ιδιαίτερα σκληρά μέταλλα. Επομένως, για την μέτρηση της σκληρότητας χρησιμοποιούνται διειδυτές με σκληρότητα παρόμοια με αυτή του διαμαντιού, το οποίο είναι το σκληρότερο υλικό που συναντάται στη φύση.

Η πρώτη αναφορά για τον προσδιορισμό της σκληρότητας των υλικών εμφανίζεται το 1832, όταν ο Γερμανός ορυκτολόγος F. Mohs, παρατηρεί τις ραβδώσεις που δημιουργούνται κατά τη χάραξη των υλικών μεταξύ τους και προσπαθεί να συσχετίσει τη σκληρότητα με την κρυσταλλική τους δομή. Προτείνει λοιπόν την πρώτη εμπειρική κλίμακα σκληρότητας (κλίμακα Mohs), που περιλαμβάνει μια σειρά δέκα ορυκτών, τα οποία αντιστοιχούν σε σκληρότητα Mohs (HM) από το 1 έως το 10 (το 1 αντιστοιχεί στον τάλκη και το 10 στο διαμάντι). Όμως, η μέθοδος Mohs σύντομα χαρακτηρίζεται ως ανεπαρκής για τον ευκρινή διαχωρισμό μετάλλων με παραπλήσια σκληρότητα και αντικαθίσταται από διάφορες άλλες τεχνικές (μέθοδοι Brinell, Knoop, Rockwell και Vickers), οι οποίες βασίζονται κυρίως στην παραμόρφωση της επιφάνειας με τη δημιουργία αποτυπώματος (Πίνακας 2.3).

Με την τεχνική δημιουργίας αποτυπώματος, επιτυγχάνεται η μόνιμη παραμόρφωση της μεταλλικής επιφάνειας με τη διείδυση ενός 'εισαγωγέα' καθορισμένου γεωμετρικού σχήματος: σφαιρικού (μέθοδος Brinell), κωνικού (μέθοδος Rockwell), πυραμιδικού με τετραγωνική βάση (μέθοδος Vickers) ή με ρομβική βάση (μέθοδος Knoop). Ο προσδιορισμός του βάθους διείδυσης του 'εισαγωγέα' επιτυγχάνεται με τη βοήθεια οπτικού μικροσκοπίου, το οποίο φέρει ειδική διάταξη για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης δύναμης που πρέπει να εφαρμοστεί, προκειμένου να παραχθεί αποτύπωμα με σαφές περίγραμμα.

Όταν οι μετρήσεις σκληρότητας γίνονται με την εφαρμογή πολύ μικρών φορτίων, της τάξης των μερικών δεκάδων γραμμαρίων (5 - 1000g), τότε αυτές καλούνται μικροσκληρομετρήσεις. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι μέτρησης μικροσκληρότητας είναι κατά Vickers και κατά Knoop. Η μικροσκληρομέτρηση επιτρέπει τη μελέτη της σκληρότητας σε μια πολύ μικρή περιοχή του υπό εξέταση υλικού όπως για παράδειγμα, τον προσδιορισμό της σκληρότητας ενός κόκκου διαμέτρου μερικών δεκάδων μικρομέτρων ή μεταλλουργικής φάσης (π.χ. εναπομένων ωστενίτης) ή μιας πολύ λεπτής επιφάνειας [71].

ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ	ΦΟΡΤΙΟ (F)	ΑΡΧΗ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ
Brinell	Σφαίρα σκληρού χάλυβα ή καρβιδίου με διάμετρο 10mm	500 ή 3000kg		Διάμετρος αποτυπώματος (d)	$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Πυραμίδα διαμαντιού τετραγωνικής βάσης με γωνία κορυφής 136° 	σκληρομέτρηση 5-100kg μικροσκληρομέτρηση 5-1000g		Διαγώνιος αποτυπώματος (d)	$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$
Rockwell C	Κώνος διαμαντιού με γωνία κορυφής 120° 	προφόρτιση (f) 10kg φόρτιση (F) 150kg		Βάθος αποτυπώματος (z)	HRC = f(z)
Rockwell B	Σφαίρα σκληρού χάλυβα με διάμετρο 1,59mm	προφόρτιση (f) 10kg φόρτιση (F) 100kg	Ίδια αρχή με την Rockwell C	Βάθος αποτυπώματος (z)	HRB = f(z)
Knoop	Πυραμίδα από διαμάντι  l/b = 7,11 b/t = 4,00	5-1000g	Ίδια αρχή με την Vickers	Διαγώνιος αποτυπώματος (l)	$KHN = \frac{14,2 F}{l^2}$

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά των κυριότερων μεθόδων μέτρησης της σκληρότητας.

Η μέτρηση της μικροσκληρότητας σε μεταλλικά υλικά είναι χρήσιμη για μια σειρά εφαρμογών για τις οποίες η μέτρηση μακρο-σκληρότητας δεν ενδείκνυται. Τέτοιες εφαρμογές σχετίζονται με μετρήσεις σε πολύ λεπτά φύλλα μετάλλου (π.χ. χιτώνια συστροφής), σε μικρά δοκίμια όπως μικροεξαρτήματα ηλεκτρονικής, εντοπισμός και μέτρηση του βάθους βαφής ενός μετάλλου (π.χ. στοιχεία σύνδεσης ράουλων, πείροι, ράβδοι, δόντια γραναζιών κ.λ.π.) στα πλαίσια ελέγχου της διαδικασίας σκλήρυνσης, καταγραφή των διακυμάνσεων της σκληρότητας κατά μήκος της τομής ενός υλικού (π.χ. συγκολλημένου δοκιμίου) κ.λ.π.

Η διαδικασία της μέτρησης είναι παρεμφερής με αυτή της μέτρησης μακρο-σκληρότητας, όπως περιγράφεται στα αντίστοιχα πρότυπα, με τη διαφορά ότι το μέγεθος του διεισδυτή είναι πολύ μικρότερο και η αντίχενυση για μέτρηση του αποτυπώματος του διεισδυτή γίνεται με οπτικό μικροσκόπιο υψηλής ανάλυσης [72].

2.6.2 Μικροσκληρότητα ‘Vickers’

Η μέτρηση της μικροσκληρότητας κατά *Vickers* είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος και χρησιμοποιείται συχνότερα. Η μέθοδος *Vickers* για την μέτρηση της μικροσκληρότητας είναι παρεμφερής της μεθόδου *Brinell*. Θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστη και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου τα δοκίμια είναι λεπτά και από πολύ σκληρό υλικό, όπως επίσης και σε αυτά που έχουν δεχθεί οποιαδήποτε επιφανειακή θερμική κατεργασία και η επιφάνειά τους έχει καταστεί πολύ σκληρή. Βασίζεται στην αργή επιβολή ενός φορτίου, μέσω ενός αδαμάντινου διεισδυτή, σε ένα δοκίμιο το οποίο έχει υποστεί πολύ καλή λείανση. Ο διεισδυτής έχει σχήμα κανονικής τετραγωνικής πυραμίδας με γωνία απέναντι εδρών 136°. Το φορτίο κυμαίνεται από 1 έως 120 Kg και ο χρόνος εφαρμογής του είναι περίπου 10 έως 15 δευτερόλεπτα. Τα τυποποιημένα σκληρόμετρα *Vickers* έχουν σύστημα αυτόματης επιβολής και απελευθέρωσης του επιλεγόμενου κάθε φορά φορτίου.

Η σκληρότητα (H) ορίζεται από το λόγο της δύναμης - πίεσης (P) που ασκεί ο ‘εισαγωγέας’ προς το εμβαδόν της επιφάνειας του αποτυπώματος (M). Αν η δύναμη - πίεση (P) μετριέται σε Kp και το εμβαδόν της επιφάνειας του αποτυπώματος (M) σε mm², τότε η σκληρότητα υπολογίζεται από τον τύπο:

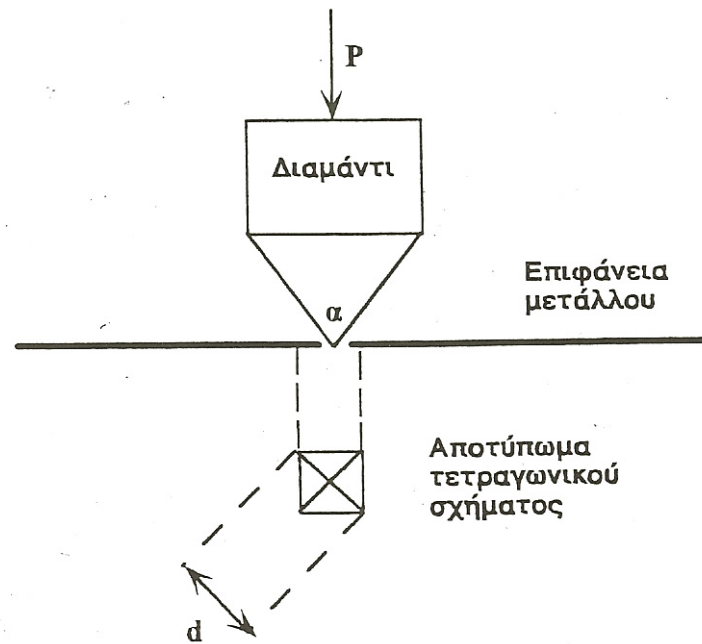
$$H = P / M \quad (\text{Kp/mm}^2)$$

Το εμβαδόν (M) της επιφάνειας του τετραγωνικού αποτυπώματος υπολογίζεται γεωμετρικά με τη βοήθεια του τύπου:

$$M = d^2 / [2 \cdot \sin(a/2)] \quad (\text{mm}^2)$$

όπου *d* η διαγώνιος του τετραγωνικού αποτυπώματος σε mm. Από τις δύο ανωτέρω σχέσεις, προκύπτει ο γενικός τύπος προσδιορισμού της σκληρότητας κατά *Vickers*, $HV = 1.8544 \times P / d^2$ (Kp/mm²).

Τα προς έλεγχο δοκίμια θα πρέπει να έχουν εξαιρετικά λείες επιφάνειες και για το λόγο αυτό υπόκεινται σε κατάλληλη μεταλλογραφική προετοιμασία (λείανση και στίλβωση) όπως αυτή περιγράφεται στα αντίστοιχα πρότυπα (ASTM E3-01). Μία σημαντική λεπτομέρεια της διαδικασίας σχετίζεται με την επιφάνεια σκληρομέτρησης, η οποία και θα πρέπει να είναι επίπεδη και παράλληλη προς τη βάση του δοκιμίου. Για την εκτέλεση της δοκιμής μικροσκληρότητας ακολουθούνται οι αντίστοιχες προδιαγραφές (π.χ. ΕΛΟΤ EN ISO 6507/2000, ΕΛΟΤ EN ISO 14271 κ.λ.π.).



Σχήμα 2.18: Αρχή προσδιορισμού της μικροσκληρότητας μεταλλικής επιφάνειας με τη μέθοδο ‘Vickers’.

Η επιλογή της περιοχής μικροσκληρομέτρησης καθώς επίσης και η μέτρηση των διαγώνιων του αποτυπώματος του διεσδυτή γίνεται με τη βοήθεια μικροσκοπίου υψηλής ευκρίνειας. Η μέτρηση της μικροσκληρότητας του δοκιμίου γίνεται από την μέτρηση των διαστάσεων του αποτυπώματος μέσω ενός ενσωματωμένου συστήματος φωτισμού και μεγεθυντικών φακών. Η σκληρότητα κατά ‘Vickers’ δίνεται υπό την μορφή 800HV/10, που δηλώνει σκληρότητα 800 ‘Vickers’ με χρήση φορτίου 10 g. Στο Σχήμα 2.19 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός διεσδυτή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μικροσκληρότητας κατά ‘Vickers’ και η φωτογραφία ενός τυπικού αποτυπώματος του διεσδυτή.

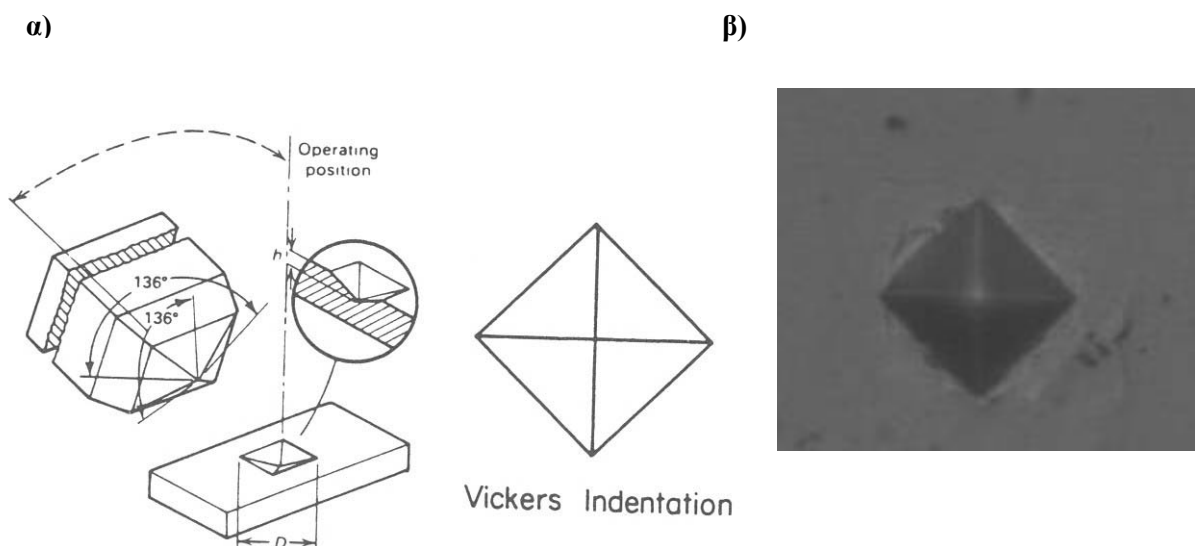
Η σκληρότητα ‘Vickers’ (Vickers Diamond Pyramid Hardness) προκύπτει από το λόγο του εφαρμοζόμενου φορτίου P (kp) προς την επιφάνεια του αποτυπώματος του διεσδυτή s (mm^2), με διαγώνιο d και δίνεται από τη Σχέση 2.10:

$$HV = \frac{P \text{ (kp)}}{s \text{ (mm}^2\text{)}} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = \frac{1.8544 P}{d^2} \quad (2.10)$$

όπου: P = το εφαρμοζόμενο φορτίο

d = ο αριθμητικός μέσος όρος των δύο διαγώνιων d_1 και d_2 σε mm

HV = η σκληρότητα κατά ‘Vickers’



**Σχήμα 2.19: α) Σχηματικό διάγραμμα ενός διεισδυτή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μικροσκληρότητας ‘Vickers’ [73].
β) Φωτογραφία ενός τυπικού αποτυπώματος του διεισδυτή κατά τη μέτρηση μικροσκληρότητας ‘Vickers’ σε ένα μέταλλο.**

Η σκληρότητα ‘Vickers’ είναι σταθερή μέσα σε μία μεγάλη περιοχή μεταβολής του φορτίου P , από 1 έως 120 Kp, με την προϋπόθεση ότι η γωνία α της κορυφής είναι 136° . Γι’ αυτό και η μέθοδος αυτή θεωρείται ως η πιο αντικειμενική και επιστημονική. Η δοκιμή ‘Vickers’ δίνει παραπλήσια αποτελέσματα με τη δοκιμή ‘Brinell’. Σε χαμηλές σκληρότητες η αριθμητική τιμή της σκληρότητας ‘Brinell’ και της σκληρότητας ‘Vickers’ συμπίπτει, ενώ σε μεγαλύτερες σκληρότητες η σκληρότητα ‘Brinell’ εκφράζεται με μικρότερους αριθμούς επειδή η σφαίρα της παραμορφώνεται ελαφρά. Αυτό δε συμβαίνει με τη διαμαντένια πυραμίδα της δοκιμής ‘Vickers’.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ‘Vickers’ είναι οι ιδιαίτερα αξιόπιστες μετρήσεις, η χρήση μόνο ενός τύπου διεισδυτή, η δυνατότητα μέτρησης της σκληρότητας σκληρών, μαλακών ακόμα και κεραμικών υλικών. Μειονεκτήματα της μεθόδου μπορούν να θεωρηθούν το μεγάλο κόστος αγοράς αντίστοιχων συσκευών, καθώς και η ανάγκη για πολύ καλή προετοιμασία - λείανση των δοκιμίων.

Η δοκιμή της σκληρομέτρησης είναι μεγάλης σπουδαιότητας, γιατί εκτός από τον προσδιορισμό της σκληρότητας, παρέχει και μία μη καταστροφική ταχεία προσεγγιστική μέθοδο προσδιορισμού της αντοχής σε εφελκυσμό ενός υλικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ & ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ & ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

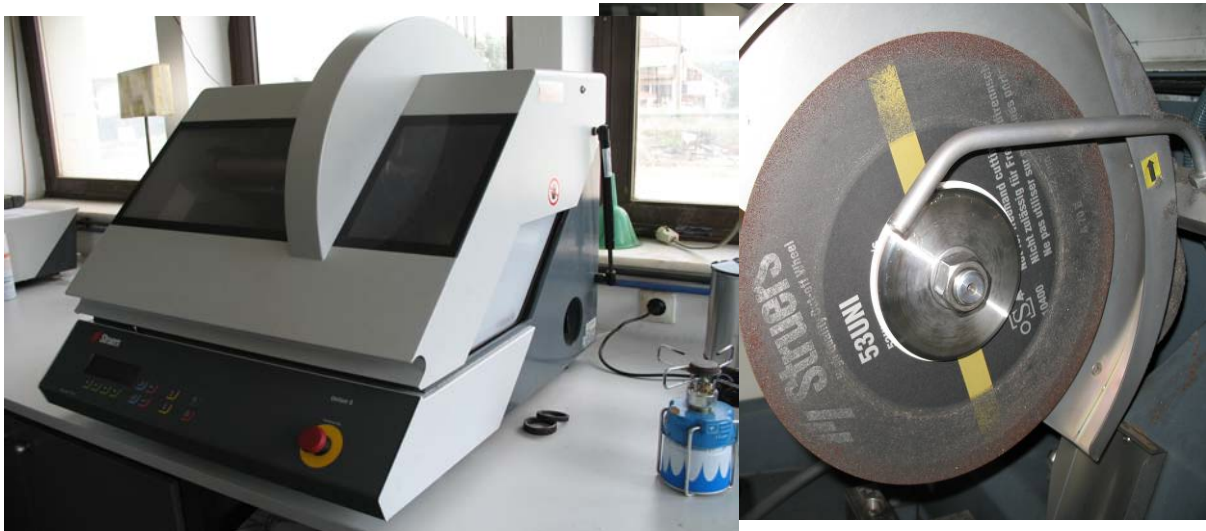
3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της διαδικασίας παρασκευής των ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων κασσίτερου σε ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης με συνθήκες συνεχούς ρεύματος. Επιπλέον, παρουσιάζεται ο εξοπλισμός, οι προκατεργασίες που απαιτούνται της παρασκευής των ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων κασσίτερου και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της δομής των επικαλύψεων και της μορφολογίας της επιφάνειάς τους. Τέλος, στα πλαίσια της μελέτης των μηχανικών ιδιοτήτων των επικαλύψεων, παρουσιάζεται ο εξοπλισμός, η προετοιμασία, οι διεργασίες που έγιναν για την πραγματοποίηση των μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού, κρούσης και μικροσκληρομέτρησης, οι οποίες τελέστηκαν στη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και στον Τομέα Μηχανικών, Μεταλλουργικών Δοκιμών & Ελέγχων (Τ.Μ.Μ.Δ.Ε.) του Κέντρου Δοκιμών Ερευνών & Προτύπων (Κ.Δ.Ε.Π.) της Δ.Ε.Η, με τη χρήση των ανάλογων προβλεπόμενων προδιαγραφών.

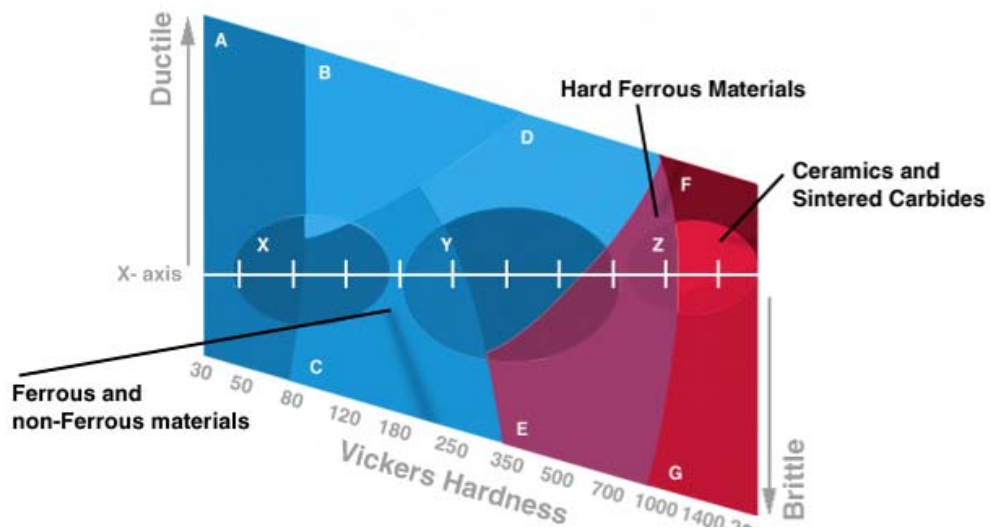
3.2 Κοπή των Δοκιμίων

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε και πάνω στο οποίο παρασκευάστηκαν οι ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις κασσίτερου ήταν ορειχάλκος, με περιεκτικότητα 57,5 % κ.β. σε Cu, 39,1 % κ.β. σε Zn, 2,9 % κ.β. σε Pb, 0,26 % κ.β. σε Fe, 0,14 % κ.β. σε Sn, 0,020 % κ.β. σε Sb και 0,064 % κ.β. σε Ni. Η προμήθεια του ορειχάλκου έγινε με τη μορφή κυλινδρικών και τετραγωνικών ράβδων, από τις οποίες κόπηκαν και διαμορφώθηκαν δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης αντίστοιχα, συγκεκριμένης γεωμετρίας και διαστάσεων, βάσει των ανάλογων προβλεπόμενων προδιαγραφών.

Για την κοπή και διαμόρφωση των δοκιμίων εφελκυσμού και κρούσης έγινε χρήση της δισκοτόμου συσκευής Unitom - 5 της STRUERS του Εργαστηρίου Μεταλλογραφίας του Κ.Δ.Ε.Π. (Σχήμα 3.1(α)). Η επιλογή του κοπτικού τροχού έγινε με βάση το είδος αλλά και τη σκληρότητα του προς κοπή υλικού, με τη βοήθεια και του διαγράμματος του Σχήματος 3.1(β). Επιλέχτηκε δίσκος κοπής για φερριτικά και μη φερριτικά υλικά που είναι αναλώσιμος και αποτελείται από τα σωματίδια που φαίνονται και στο Σχήμα 3.1(γ). Ο συγκεκριμένος δίσκος, αποτελείται από τα σωματίδια του λειαντικού-αποξεστικού μέσου και από το συνδετικό υλικό. Ως αποξεστικά μέσα χρησιμοποιούνται: καρβίδιο του πυριτίου (SiC), οξείδιο του αλουμινίου (Al₂O₃), κυβικό νιτρίδιο του βορίου (CBN) και διαμαντόσκονη. Ως συνδετικό υλικό χρησιμοποιείται βακελίτης ή μέταλλο.



Σχήμα 3.1(α): Δίσκος κοπής του μηχανήματος κοπής δοκιμίων Unitom - 5.



Σχήμα 3.1(β): Διάγραμμα επιλογής δίσκου κοπής για το μηχανήμα κοπής δοκιμίων Unitom - 5.



Σχήμα 3.1(γ): Δίσκος κοπής του μηχανήματος κοπής δοκιμίων Unitom - 5 από βακελίτη.

Αφού κόπηκαν τα υπό διαμόρφωση ορειχάλκινα δοκίμια σε κατάλληλες διαστάσεις, εν συνεχεία παραδόθηκαν στο μηχανουργείο του Κ.Δ.Ε.Π. ώστε να διαμορφωθούν κατάλληλα σε δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης με σαφείς εντολές διαμόρφωσης, όπως καταγράφονται στα έντυπα με την εντολή διαμόρφωσης ΕΦΕΛΚ / ΜΔ 002 / 1 Ε.Α.Υ. και ΚΡΟΥΣ 002 / 1 LabB2 του Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών (Ε.Α.Υ.) του Τ.Μ.Μ.Δ.Ε.

3.3 Προκατεργασία Μεταλλικών Επιφανειών

Η ποιότητα μιας επιμεταλλωμένης επιφάνειας (καλή μηχανική αντοχή, καλή πρόσφυση κ.λ.π.) δεν εξαρτάται μόνο από τις συνθήκες που επικρατούν στη διάρκεια της επικάλυψης, αλλά και από την κατάσταση της μεταλλικής επιφάνειας που επιμεταλλώνεται.

Στην επιφάνεια των διαφόρων μεταλλικών, υπό επεξεργασία, υλικών και εξαρτημάτων, υπάρχουν οξειδία, λιπαρές ουσίες, λάδια και άλλες ουσίες που πρέπει να απομακρυνθούν πριν την επιμετάλλωση. Αν οι ουσίες αυτές δεν απομακρυνθούν, παρεμβάλλονται ανάμεσα στη μεταλλική επιφάνεια και στο μέταλλο που αποτίθεται, με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται καλή πρόσφυση του μετάλλου στην επιφάνεια και το μεταλλικό στρώμα που αποτίθεται, αποκολλάται εύκολα. Γι' αυτό τα μεταλλικά αντικείμενα είναι απαραίτητο να καθαρίζονται καλά πριν επιμεταλλωθούν.

Ο απαιτούμενος βαθμός καθαρότητας της επιφάνειας εξαρτάται κάθε φορά από το είδος της διεργασίας επιμετάλλωσης που θα ακολουθήσει. Στις επιμεταλλώσεις που χρησιμοποιούνται όξινα ή ουδέτερα διαλύματα, αρκεί απλά η απομάκρυνση των λιπαρών ουσιών. Αντίθετα, κατά τις επιμεταλλώσεις σε αλκαλικά διαλύματα, π.χ. στα κυανιούχα μπάνια, τα αντικείμενα πρέπει να καθαρίζονται σχολαστικά.

Οι διεργασίες καθαρισμού χωρίζονται σε γενικές και ειδικές. Συνήθως, κατά την εφαρμογή των γενικών μεθόδων, μαζί με τις ακαθαρσίες απομακρύνεται και μέρος του βασικού μετάλλου. Στην κατηγορία των διεργασιών αυτών περιλαμβάνονται και οι τεχνικές της λείανσης και της στίλβωσης των επιφανειών, όπως είναι η μηχανική στίλβωση, η περιστροφική στίλβωση, η χημική στίλβωση και η ηλεκτροστίλβωση. Οι ειδικές διεργασίες καθαρισμού εφαρμόζονται για την απομάκρυνση ειδικών τύπων ακαθαρσιών, χωρίς η μεταλλική επιφάνεια να αλλοιώνεται.

3.3.1 Λείανση και Στίλβωση

Μετά την παραλαβή των ορειχάλκινων δοκιμίων εφελκυσμού και κρούσης από το μηχανουργείο του Κ.Δ.Ε.Π., ακολούθησε το στάδιο της λείανσης και στίλβωσής τους. Η προκατεργασία των επιφανειών πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο, υλοποιήθηκε στον Τομέα Μηχανικών, Μεταλλουργικών Δοκιμών & Ελέγχων (Τ.Μ.Μ.Δ.Ε.) και στο Μηχανουργείο του Κέντρου Δοκιμών Ερευνών & Προτύπων (Κ.Δ.Ε.Π.) της Δ.Ε.Η, όπου και πραγματοποιήθηκε η λείανση και στίλβωση των δοκιμίων. Η επιφάνειά τους υπέστη την κατάλληλη επεξεργασία, έτσι ώστε να επιτευχθεί η

καλύτερη δυνατή πρόσφυση της επικάλυψης του κασσιτέρου στα ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης.

Αρχικά, η λείανση - στίλβωση διενεργήθηκε στη συσκευή αυτόματης λείανσης - στίλβωσης δοκιμίων STRUERS TegraPol - 25 με την εφαρμοσμένη κεφαλή STRUERS TegraForce - 5 και σε συνεργασία με τη δοσομετρική συσκευή ειδικών υγρών λείανσης TegraDoser - 5 (Σχήμα 3.2). Η χρήση της κεφαλής εξασφαλίζει την παραλληλότητα των πλευρών έδρασης αλλά και τον έλεγχο των δοκιμίων. Η συσκευή TegraDoser - 5 δίνει τη δυνατότητα να πραγματοποιείται αυτόματη λείανση - στίλβωση μέσω ανάλογων προγραμμάτων.



Σχήμα 3.2: Συσκευή αυτόματης λείανσης - στίλβωσης δοκιμίων STRUERS TegraPol - 25 με τα παρελκόμενα STRUERS TegraForce - 5 και TegraDoser - 5.

Ανάλογα με το είδος του υλικού του δοκιμίου γίνεται η επιλογή του αντίστοιχου προγράμματος. Στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί, φαίνονται αναλυτικά τα προγράμματα που διαθέτει η συσκευή ανάλογα με το είδος του υλικού. Αυτό το πρώτο στάδιο της αυτόματης λείανσης - στίλβωσης πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλογραφίας του Κ.Δ.Ε.Π. και επιλέχθηκε το πρόγραμμα 'Alum_Copper' που χρησιμοποιείται για ορειχάλκινα δοκίμια, όπως αυτά που μελετήθηκαν για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Το κάθε πρόγραμμα αποτελείται από διάφορα στάδια. Στο κάθε στάδιο η δύναμη που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, το λειαντικό μέσο, η ποσότητα και το είδος του λιπαντικού υγρού που χρησιμοποιείται και ο χρόνος που διαρκεί, είναι συγκεκριμένα και διαφέρουν ανάλογα με το πρόγραμμα που έχει επιλεχτεί. Στον Πίνακα 3.2 που ακολουθεί φαίνονται τα λειαντικά μέσα και τα αντίστοιχα υγρά που χρησιμοποιούνται από τη συσκευή.

Υλικό	Ονομασία Προγράμματος	Υποκατηγορίες
Αλουμίνιο, Χαλκός, Ορείχαλκος	Alum_Copper	Copper_6
		Copper_3
		Alum_6
		Alum_3
Μαλακός Χάλυβας	Soft steel	Soft3
		Soft6
Ανοξειδωτος Χάλυβας	Stainless steel	Stainless steel 6
Χάλυβας	Steel	Steel Short 3
		Steel Short 6
		Steel Long 3
		Steel Long 6

Πίνακας 3.1: Προγράμματα αυτόματης λείανσης - στίλβωσης της συσκευής TegraDoser - 5.

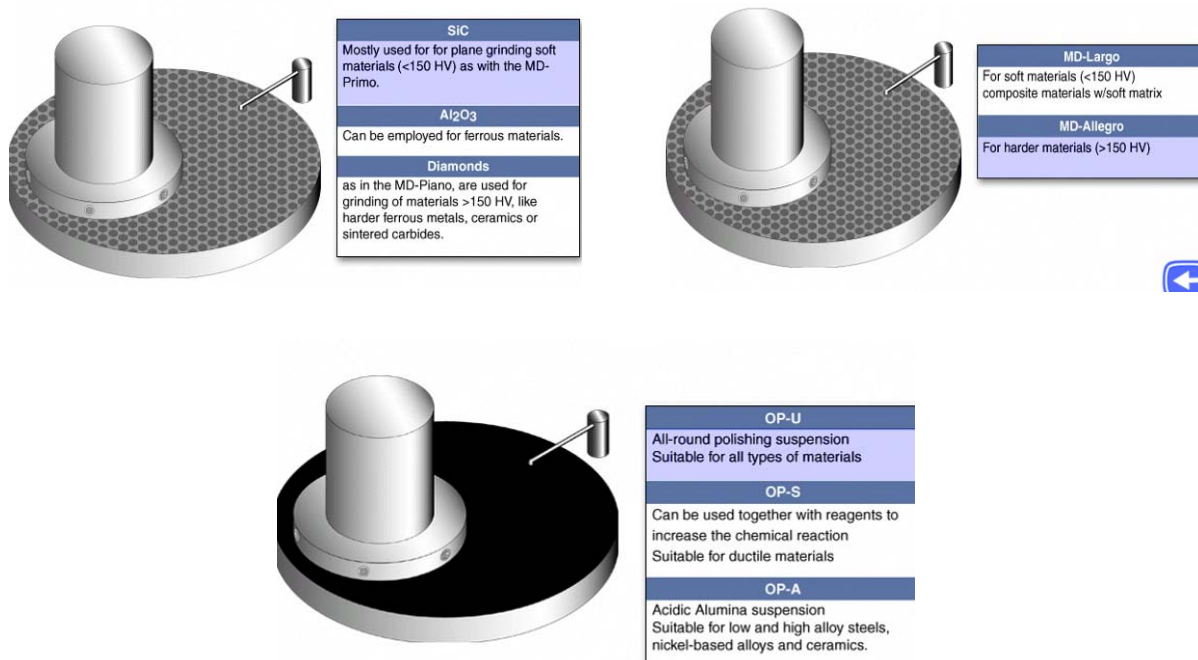
Σε όλα τα στάδια του κάθε προγράμματος και μεταξύ αυτών, διενεργείται σχολαστικός καθαρισμός του δοκιμίου πρώτα με νερό και μετά με αιθυλική αλκοόλη. Στο Σχήμα 3.3, παρουσιάζονται εικονικά οι κεφαλές λείανσης της συσκευής STRUERS TegraPol - 25, όπου αναλόγως του προγράμματος επιλογής εφαρμόζονται διαφορετικά λειαντικά μέσα και ειδικά λιπαντικά υγρά.

Στάδιο	Λειαντικό Μέσο	Ειδικό Λιπαντικό Υγρό
1 ^ο	MD Piano 220	Νερό
2 ^ο	MD Allegro	Dia Pro Allero/Largo
3 ^ο	MD Lagro	Dia Pro Allero/Largo
4 ^ο	MD Plus	Dia Pro Plus
5 ^ο	MD Dac	Dia Pro Dac
6 ^ο	MD Chem	OP - S Suspension

Πίνακας 3.2: Λειαντικά μέσα & ειδικά λιπαντικά υγρά της συσκευής TegraDoser - 5.

Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκε για τη λείανση των δοκιμών κρούσης και η μηχανή λείανσης STRUERS RotoPol - 35 (Σχήμα 3.4), έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή λείανσή τους στα σημεία εκείνα όπου υπήρχαν περιορισμοί και δυσκολίες εξαιτίας της γεωμετρίας τους. Στη συγκεκριμένη λειαντική μηχανή διενεργείται η λείανση εκείνων των δοκιμών που οι διαστάσεις τους δεν επιτρέπουν τον εγκιβωτισμό τους και κατ' επέκταση τη χρήση της αυτόματης συσκευής λείανσης - στίλβωσης δοκιμών STRUERS TegraPol - 25. Η λείανσή τους έγινε χειροκίνητα, χρησιμοποιώντας μία σειρά από λειαντικά χαρτιά (γυαλόχαρτα). Τα τελευταία, τοποθετήθηκαν κατά σειρά, με αριθμούς κατά το πρότυπο FEPA N^ο 80 - 120 - 220 - 320 - 500 - 800 - 1200 - 4000, ενώ ταυτόχρονα ελέγχονταν η παραλληλότητα των πλευρών έδρασης των δοκιμών. Με τη διαδικασία αυτή μειώνεται η

επιφανειακή τραχύτητα των δοκιμίων, ώστε να είναι δυνατή η ομοιόμορφη επικάλυψη της επιφάνειάς τους.



Σχήμα 3.3: Κεφαλές λείανσης της συσκευής STRUERS TegraPol - 25 [74].



Σχήμα 3.4: Συσκευή λείανσης STRUERS RotoPol - 35 με εφαρμοσμένη κεφαλή STRUERS RotoForce - 4.

Κατά τη λείανση των δοκιμίων, αυτά τοποθετούνται κατά μήκος της ακτίνας του κυκλικού λειαντικού χαρτιού μέχρι να σχηματιστεί, μια ομοιόμορφη σειρά γραμμών. Στη συνέχεια, τοποθετούνται κάθετα μέχρι να εξαφανιστεί η πρώτη σειρά γραμμών και να δημιουργηθεί μια νέα. Μόλις σχηματιστεί η νέα σειρά, γίνεται αλλαγή του λειαντικού χαρτιού, τοποθετείται το αμέσως επόμενο και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου εξαφανιστούν - ελαχιστοποιηθούν οι γραμμές.

Για την αποφυγή φαινομένων αύξησης της θερμοκρασίας, λόγω τριβής, αλλά και για τυχόν δημιουργία χαρακιών, λόγω ρινισμάτων, υπάρχει ένα σύστημα συνεχούς διαβροχής του λειαντικού χαρτιού με νερό.

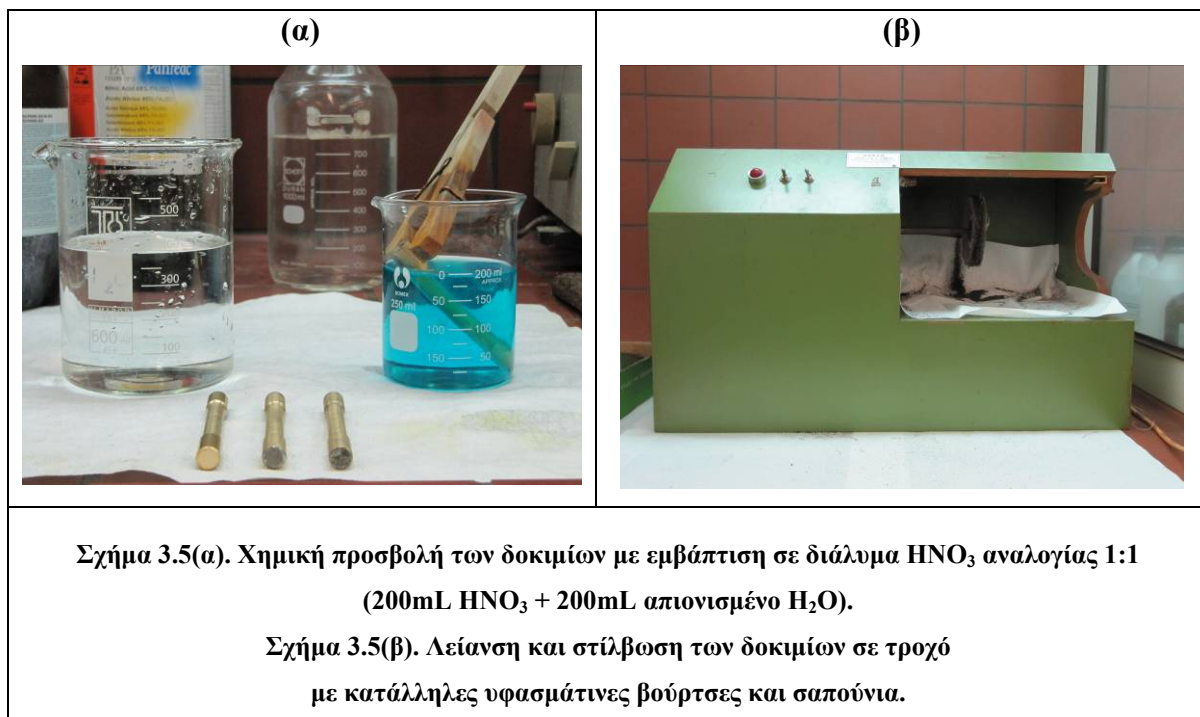
Τα λειαντικά χαρτιά χαρακτηρίζονται από έναν αριθμό, ο οποίος αντιστοιχεί σε ένα μέγεθος κόκκου του λειαντικού μέσου. Στον Πίνακα 3.3, παρουσιάζεται η αντιστοιχία των αριθμών που χαρακτηρίζουν τα λειαντικά χαρτιά με το μέσο μέγεθος κόκκων του λειαντικού, σύμφωνα με το πρότυπο FEPA.

Λειαντικά Χαρτιά (Αριθμός κατά FEPA)	Μέγεθος Κόκκων (μm)
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 3.3: Αντιστοιχία των αριθμών που χαρακτηρίζουν τα λειαντικά χαρτιά με το μέσο μέγεθος κόκκων του λειαντικού μέσου, σύμφωνα με το πρότυπο FEPA.

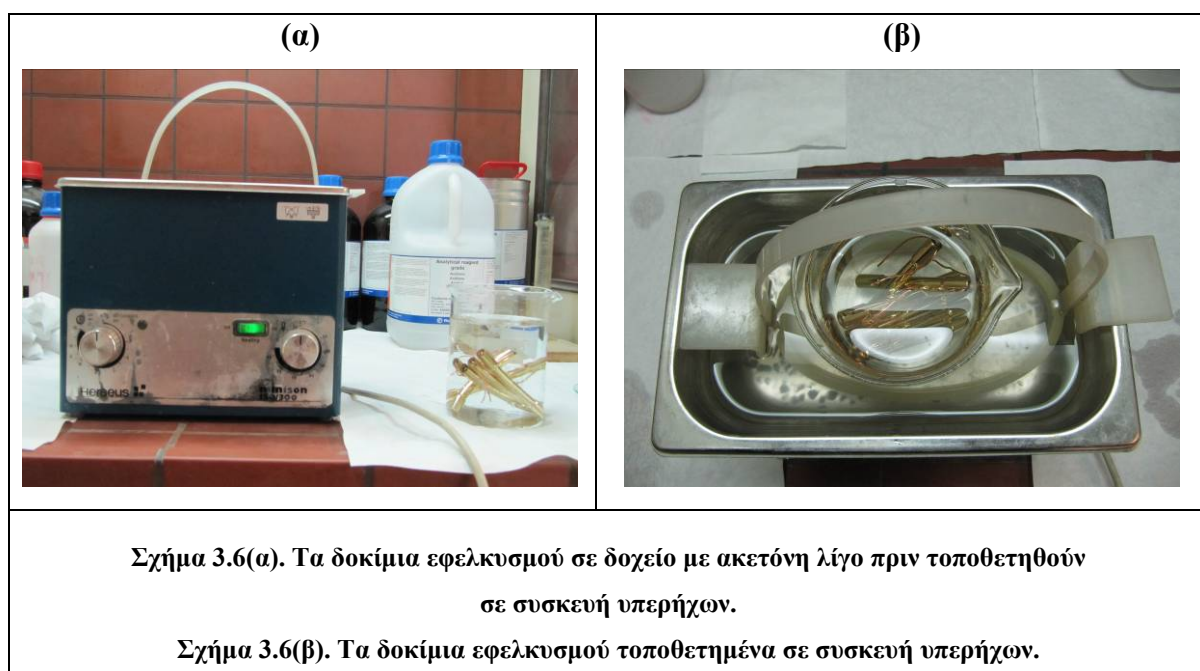
Όσον αφορά τα δοκίμια εφελκυσμού, το πρώτο στάδιο της λείανσή τους πραγματοποιήθηκε με τη χρήση οριζόντιου τόρνου στο μηχανουργείο του Κ.Δ.Ε.Π., όπου η λείανση έγινε χειροκίνητα τοποθετώντας κατά σειρά τα λειαντικά χαρτιά N° 80 - 120 - 220 - 320 - 500 - 800 - 1200 - 4000, με χαμηλή ταχύτητα περιστροφής για να ελέγχεται η παραλληλότητα των πλευρών έδρασης των δοκιμίων.

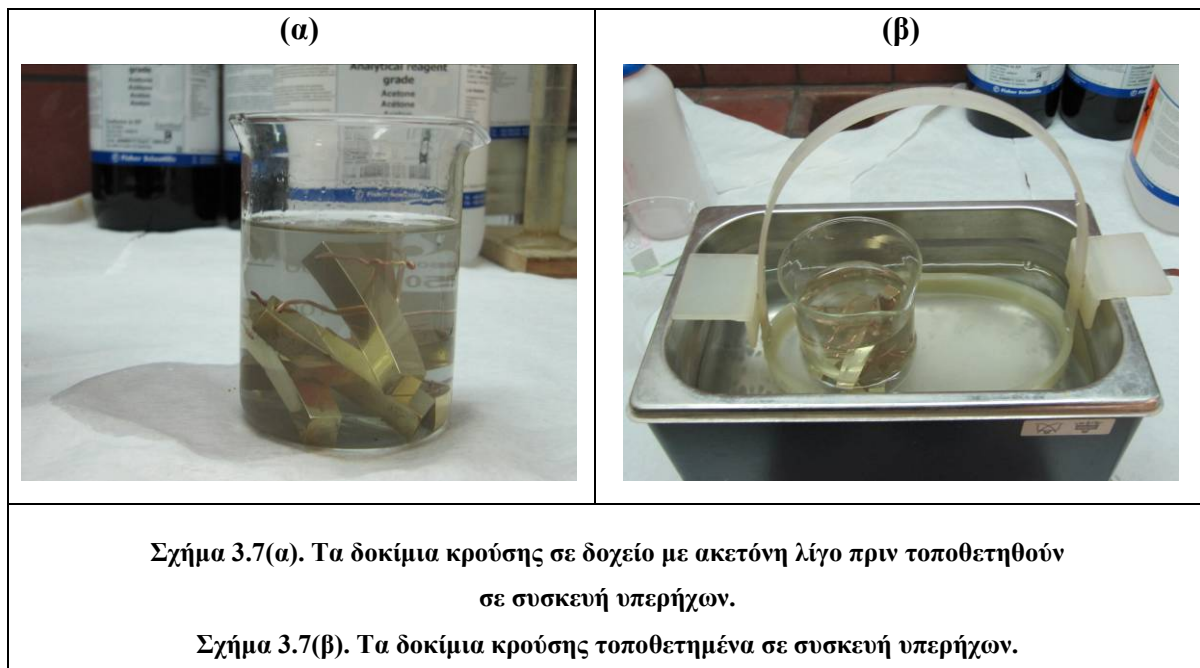
Το δεύτερο στάδιο καθαρισμού των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Γενικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και περιλάμβανε μηχανικές και χημικές κατεργασίες λείανσης και στίλβωσής τους. Αρχικά, τα δοκίμια προσβλήθηκαν χημικά με εμβάπτιση σε διάλυμα



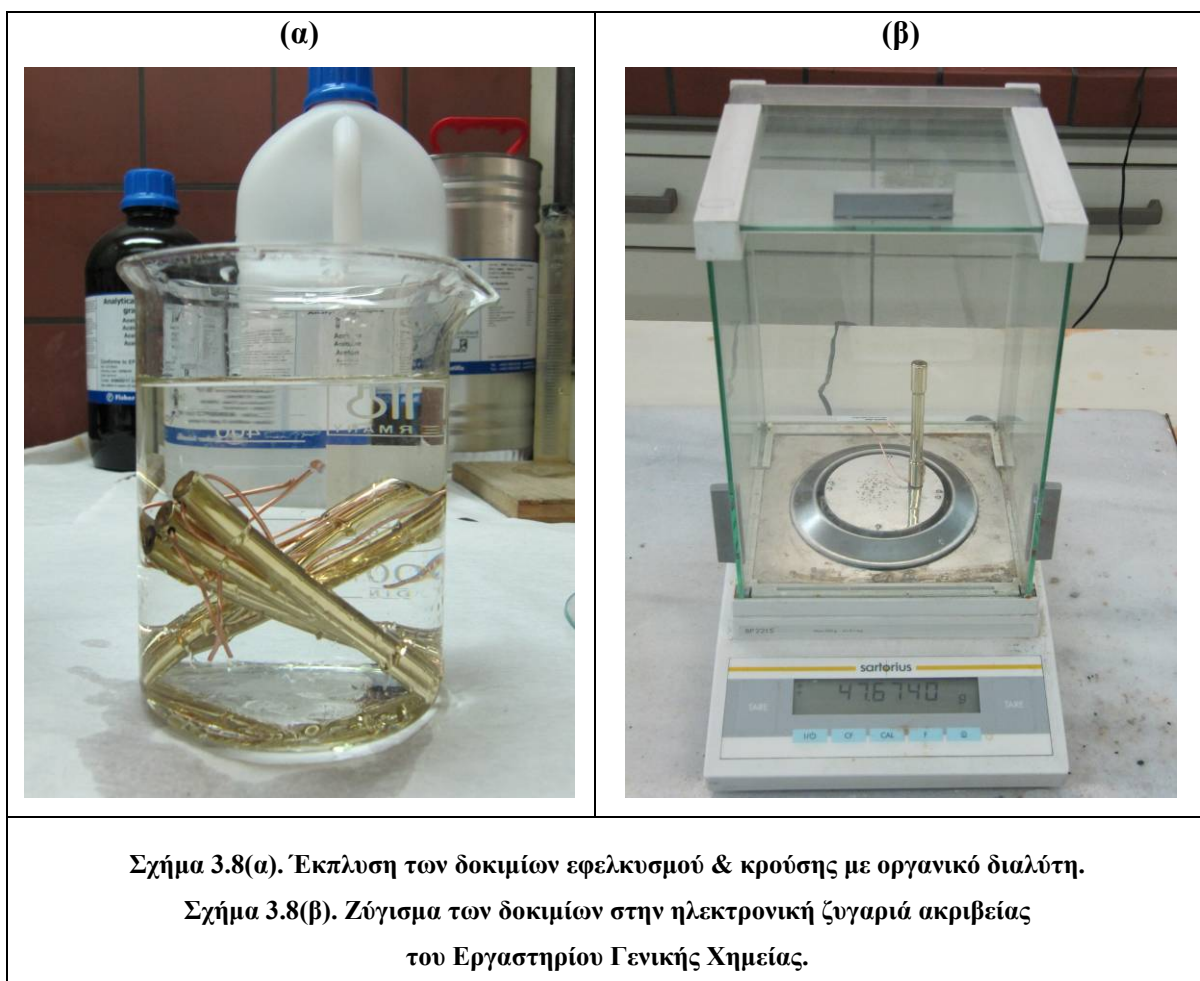
HNO_3 αναλογίας 1:1 (200 mL HNO_3 + 200 mL απιονισμένο H_2O) και στη συνέχεια λειάνθηκαν και στίλβώθηκαν σε τροχό με κατάλληλες υφασμάτινες βούρτσες και σαπούνια για τον περιορισμό της επιταξιακής δράσης του υποστρώματος στις πρώτες μόνο φάσεις ανάπτυξης του αποθέματος (Σχήμα 3.5(α) & 3.5(β)).

Για την απομάκρυνση και των τελευταίων υπολειμμάτων που συσσωρεύονταν στην επιφάνεια των δοκιμίων από τις προηγούμενες κατεργασίες, τα τελευταία τοποθετήθηκαν σε συσκευή υπερήχων με ακετόνη και απιονισμένο νερό για χρονικό διάστημα 3 mn, για να ακολουθήσει η έκπλυσή τους με οργανικό διαλύτη (Σχήμα 3.6(α), 3.6(β), 3.7(α) & 3.7(β) & 3.8(α)).



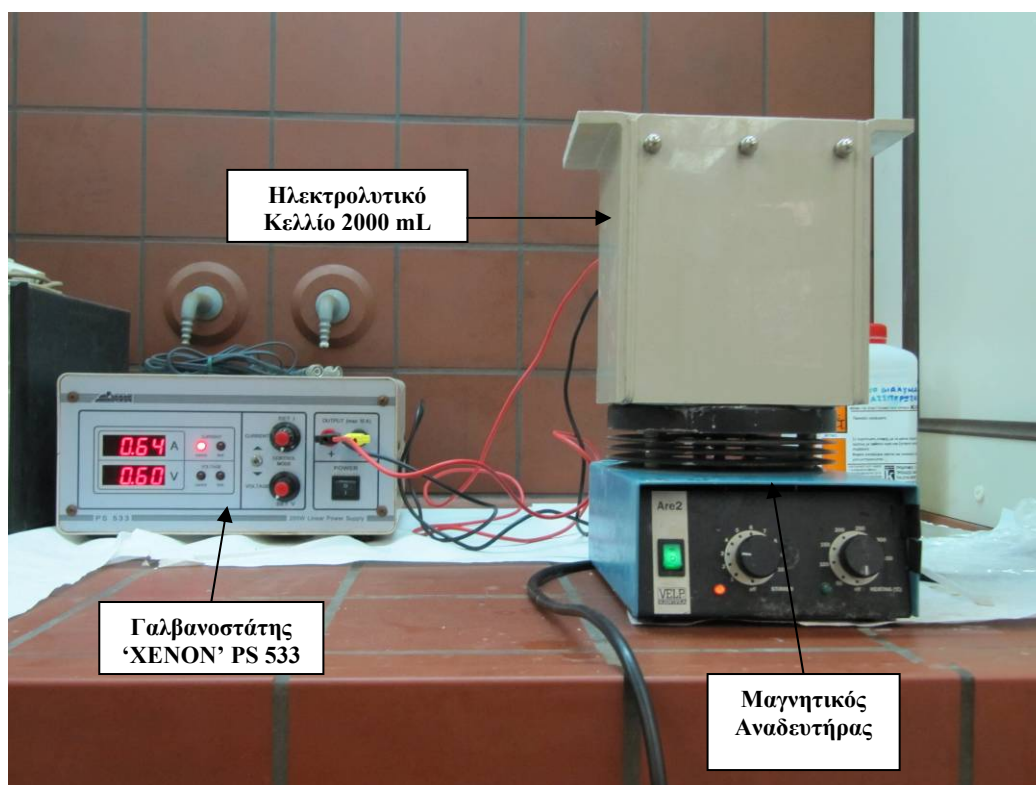


Μετάπειτα, ακολούθησε στέγνωμα των δοκιμίων και ζύγισμά τους στην ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας του Εργαστηρίου Γενικής Χημείας (Σχήμα 3.8(β)).



3.4 Πειραματική Διάταξη & Συνθήκες Παρασκευής των Ηλεκτρολυτικών Αποθεμάτων Κασσιτέρου

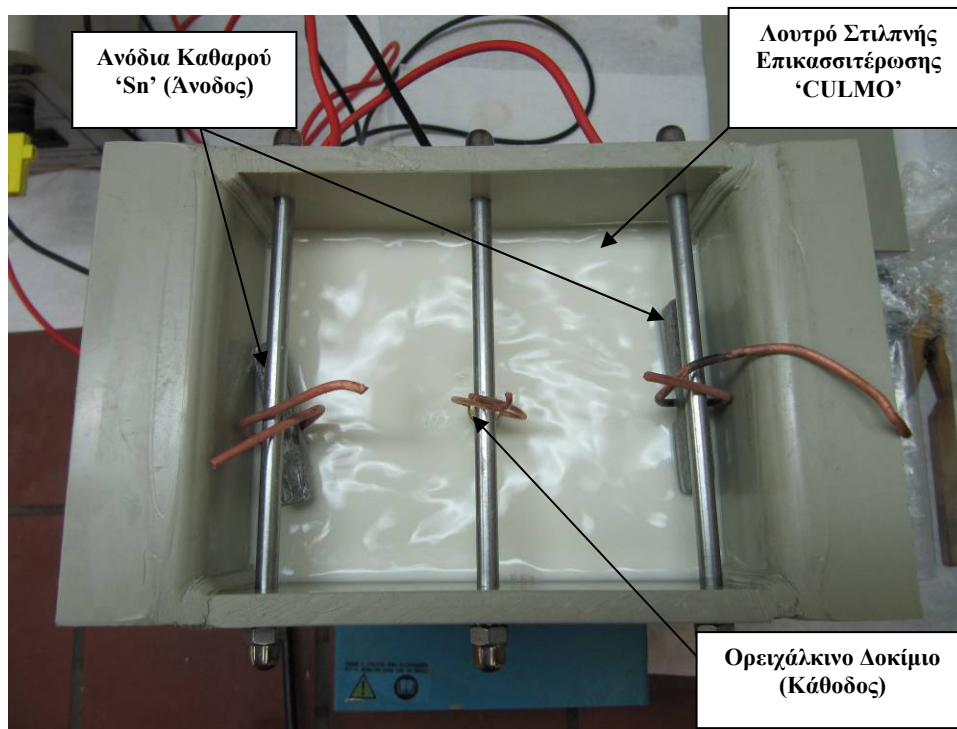
Η παρασκευή των ηλεκτρολυτικών αποθεμάτων του κασσιτέρου πραγματοποιήθηκε σε διάταξη βιομηχανικού προτύπου, υπό καθεστώς συνεχούς ρεύματος. Η διάταξη αυτή αποτελείται από το ηλεκτρολυτικό κελίο (κυψελίδα) χωρητικότητας 2000 mL από πολυπροπυλένιο, το οποίο περιείχε ως ηλεκτρολυτικό διάλυμα (λουτρό) ένα βιομηχανικό λουτρό στιλπνής επικασσιτέρωσης (λουτρό στιλπνής επικασσιτέρωσης CULMO) και τα ηλεκτρόδια ανόδου από καθαρό Sn. Ως πηγή συνεχούς ρεύματος (τροφοδοτικό) χρησιμοποιήθηκε γαλβανοστάτης της εταιρείας ‘XENON’ PS 533, που διέθετε ενσωματωμένο αμπερόμετρο και βολτόμετρο ψηφιακής ένδειξης (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9: Απεικόνιση της ηλεκτρολυτικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των επικαλύψεων κασσιτέρου στα ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μελέτης, παρασκευάστηκαν απλές αλλά και σύνθετες ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις κασσιτέρου σε δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης, σε συνθήκες συνεχούς ρεύματος. Στο ηλεκτρολυτικό κελίο, χρησιμοποιήθηκε ποσότητα 1750 mL από το βιομηχανικό λουτρό στιλπνής επικασσιτέρωσης ‘CULMO’ τόσο στις απλές όσο και στις σύνθετες ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις κασσιτέρου. Για την παρασκευή των σύνθετων επικαλύψεων χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια TiO_2 τύπου ανατάση και μέσης διαμέτρου 4,23 μm . Επιλέχθηκε η θερμοκρασία για την παρασκευή των ηλεκτρολυτικών αποθεμάτων κασσιτέρου να είναι μεταξύ 18 - 25°C, που αποτελεί και τη συνηθέστερη βιομηχανική πρακτική, ενώ η πυκνότητα του ρεύματος απόθεσης ήταν ίση με 2,5

A/dm^2 . Επίσης, για την ηλεκτρολυτική επικασσιτέρωση των δοκιμίων κρούσης και εφελκυσμού η ένταση του ρεύματος υπολογίστηκε στα 0,58 A και 0,64 A, αντίστοιχα. Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων διατηρήθηκαν σταθερές τόσο οι συνθήκες εφαρμογής του συνεχούς ρεύματος όσο και η γεωμετρία του ηλεκτρολυτικού κελλίου, έτσι ώστε να αποφευχθεί η πιθανή εμφάνιση αποκλίσεων στα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 3.10: Απεικόνιση του ηλεκτρολυτικού κελλίου που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των επικαλύψεων κασσίτερου στα ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης.

Για την παρασκευή των απλών ηλεκτρολυτικών αποθεμάτων κασσίτερου, εφαρμόστηκε μαγνητική ανάδευση στον πυθμένα της κυβελίδας με ταχύτητα 250 rpm για να επιτευχθεί ομοιογενής διασπορά του ηλεκτρολύτη και να διατηρηθούν τα σωματίδια σε αιώρηση μέσα στο λουτρό. Με στόχο τα σωματίδια TiO_2 να διατηρηθούν σε αυξημένη αιώρηση και σε υψηλή ομοιογενή διασπορά μέσα στο ηλεκτρολυτικό λουτρό, κατά την παρασκευή των σύνθετων ηλεκτρολυτικών αποθεμάτων κασσίτερου, εφαρμόστηκε ισχυρή μηχανική ανάδευση (7600 rpm).

Ως ηλεκτρόδια εργασίας (WE) (κάθοδος) χρησιμοποιήθηκαν τα ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης, κατάλληλα προσδεμένα με σύρμα χαλκού στη μέση της ενδιάμεσης μπάρας του ηλεκτρολυτικού κελλίου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.10. Η προκύπτουσα ελεύθερη επιφάνεια απόθεσης για τα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης είχε εμβαδόν ίσο με $0,248 dm^2$ και $0,23 dm^2$, αντίστοιχα.

Ως ηλεκτρόδια μέτρησης (CE) (άνοδος) χρησιμοποιήθηκαν δύο ορθογώνιες πλάκες υψηλής καθαρότητας σε κασσίτερο ($\approx 99,9\%$), οι οποίες ήταν τοποθετημένες στο εσωτερικό τοίχωμα του ηλεκτρολυτικού κελλίου και είχαν ύψος περίπου ίσο με το μισό του ύψους του κελλίου. Η συνολική επιφάνεια της ανόδου είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή της καθόδου προκειμένου να διευκολύνεται η διάλυσή της και να αποφεύγονται φαινόμενα πόλωσης της κυψελίδας.



Σχήμα 3.11: Απεικόνιση της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των απλών επικαλύψεων κασσιτέρου στα ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης.

Η επιλογή του πάχους h_{Sn} , των μακροσκοπικών και μικροσκοπικών χαρακτηριστικών των επικαλύψεων κασσιτέρου που παρασκευάστηκαν, έγινε κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα αποθέματα να ικανοποιούν τις απαιτήσεις κατασκευής τους, σύμφωνα με τις οδηγίες της τεχνικής προδιαγραφής της Δ.Ε.Η. ΧΚ 11.04/10.03.88 (ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ/23.10.92). Προκειμένου να μελετηθούν οι μηχανικές ιδιότητες των επικαλύψεων κασσιτέρου και η επίδραση του πάχους της επιμετάλλωσης σ' αυτές, εξετάστηκαν τρεις διαφορετικοί χρόνοι απόθεσης, $t_{DC} = 50 \text{ mn}, 2 \text{ h}, 3 \text{ h}$. Για τον ακριβή προσδιορισμό των εκλεκτικών προσανατολισμών του μετάλλου, υπολογίστηκε ότι το πάχος των υπό εξέταση δοκιμίων έπρεπε να είναι τουλάχιστον $50 \mu\text{m}$. Τελικά, επιλέχτηκε το πάχος των αποθεμάτων στα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης να είναι μεγαλύτερο από $70 \mu\text{m}$, έτσι ώστε να μελετηθούν τόσο η

δομή και η ποιότητα των επικαλύψεων για μεγαλύτερα πάχη, όσο και οι μηχανικές ιδιότητες των επικαλύψεων κασσιτέρου και η επίδραση του πάχους σ' αυτές.

Συνολικά παρασκευάστηκαν και μελετήθηκαν δώδεκα δοκίμια εφελκυσμού και εννέα δοκίμια κρούσης (Σχήμα 3.12). Σε έξι από τα δοκίμια εφελκυσμού και σε έξι από τα δοκίμια κρούσης έγινε ηλεκτρολυτική απόθεση κασσιτέρου. Σε άλλα τέσσερα δοκίμια εφελκυσμού και σε δύο δοκίμια κρούσης πραγματοποιήθηκε σύνθετη απόθεση Sn/TiO₂. Τέλος, σε δύο ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού και ένα κρούσης δεν έγινε ηλεκτρολυτική απόθεση κασσιτέρου, αλλά διατηρήθηκαν ως είχαν για να γίνει συγκριτική αξιολόγηση της δομής και των μηχανικών ιδιοτήτων τους με τα υπόλοιπα δοκίμια.



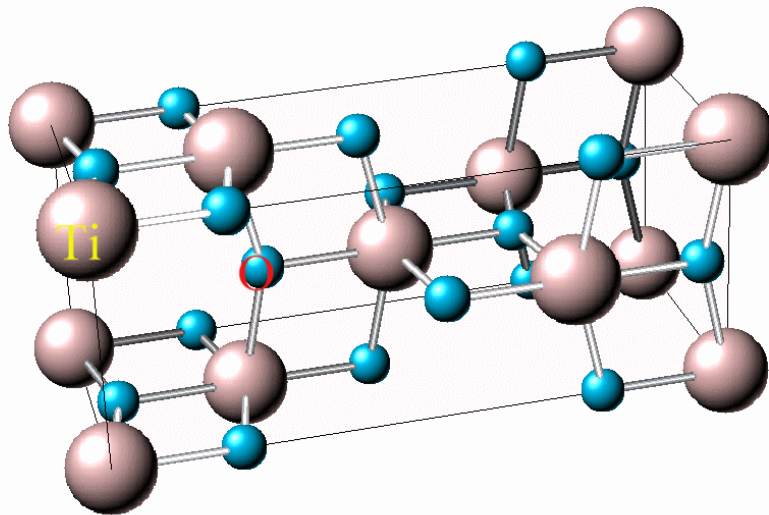
Σχήμα 3.12: Δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης.

Για την παρασκευή των σύνθετων αποθεμάτων χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια TiO₂, της ομάδας IVA του περιοδικού πίνακα και η ενισχυτική φάση που συναποτέθηκε ήταν σε μορφή στερεής σκόνης τιτανίας (TiO₂) της εταιρείας Alfa Aesar. Η τιτανία (TiO₂) είναι μία ημιαγώγιμη ουσία που χρησιμοποιείται σε ποικίλες εφαρμογές. Παρουσιάζει υψηλή φωτοαγωγιμότητα και χρησιμοποιείται στην κατασκευή διάφορων ελαφρών κραμάτων και ανοξείδωτων χαλύβων. Συναντάται κρυσταλλογραφικά σε τρεις κύριες δομές πολυμορφισμού με διαφορετική διεύθυνση των ατόμων στο χώρο: ρουτηλίου, ανατάση και μπρουκίτη. Η σκόνη τιτανίας (TiO₂) η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, είχε τη δομή ανατάση, της οποίας η κρυσταλλογραφική δομή δίνεται στο Σχήμα 3.13.

Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζεται η κωδικοποίηση αυτών και οι συνθήκες ηλεκτρολυτικής επικάλυψης του κάθε δοκιμίου.

Κωδικός Δοκιμίου	Ηλεκτρολυτική Επικάλυψη Sn	Ηλεκτρολυτική Επικάλυψη Sn/TiO ₂	Χρόνος Απόθεσης (t _{DC})	Ποκνότητα Ρεύματος J (A/dm ²)
DE1	NAI	OXI	50 mn	2,5
DE2	NAI	OXI	2 h	2,5
DE3	NAI	OXI	2 h	2,5
DE4	NAI	OXI	50 mn	2,5
DE5	NAI	OXI	3 h	2,5
DE6	NAI	OXI	3 h	2,5
DE7	OXI	NAI (15g TiO ₂)	2 h	2,5
DE8	OXI	NAI (15g TiO ₂)	2 h	2,5
DE9	OXI	NAI (15g TiO ₂)	50 mn	2,5
DE10	OXI	NAI (30g TiO ₂)	2 h	2,5
DE Brass (1),(2)	OXI	OXI	-	-
DK1	NAI	OXI	50 mn	2,5
DK2	NAI	OXI	2 h	2,5
DK3	NAI	OXI	2 h	2,5
DK4	NAI	OXI	50 mn	2,5
DK5	NAI	OXI	3 h	2,5
DK6	NAI	OXI	3 h	2,5
DK7	OXI	NAI (15g TiO ₂)	2 h	2,5
DK10	OXI	NAI (30g TiO ₂)	2 h	2,5
DK Brass	OXI	OXI	-	-

Πίνακας 3.4: Κωδικοποίηση δοκιμίων και συνθήκες ηλεκτρολυτικής επικάλυψης του κάθε δοκιμίου.



Σχήμα 3.13: Τρισδιάστατο κρυσταλλικό πλέγμα τιτανίας με δομή ανατάση, όπου οι γαλάζιες σφαίρες απεικονίζουν τα άτομα του οξυγόνου και οι γκρι τα άτομα του τιτανίου.

3.5 Εξοπλισμός - Μέθοδοι Προσδιορισμού της Δομής & Μορφολογίας της Επιφάνειας των Αποθεμάτων

3.5.1 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (S.E.M.)

Η ηλεκτρονική μικροσκοπία είναι μία τεχνική προσδιορισμού των δομικών χαρακτηριστικών των αποθεμάτων των μετάλλων και της μορφολογίας της επιφάνειάς τους. Η ευρεία εφαρμογή της οφείλεται στη δυνατότητα εκπομπής δέσμης ηλεκτρονίων με πολύ μικρό μήκος κύματος ($\lambda < 1\text{\AA}$), γεγονός το οποίο μπορεί να επιτρέψει ακόμα και τη διάκριση των ατόμων του μεταλλικού πλέγματος και την απεικόνισή τους στη συνέχεια σε οθόνη. Η δέσμη ηλεκτρονίων παράγεται εξαιτίας της εκπομπής ηλεκτρονίων από θερμαινόμενη κάθοδο βολφραμίου στην κορυφή μιας στήλης που βρίσκεται υπό κενό, καθώς διέρχεται από ένα επιταχυντή σταθερής τάσης οπότε και αποκτά σταθερό μήκος κύματος. Στη συνέχεια η δέσμη των ηλεκτρονίων απομεγεθύνεται καθώς περνά μέσα από φακούς - συμπτυκνωτές και χτυπά το δείγμα με διάμετρο της τάξης των 2 - 10 nm.

Στην περίπτωση των μεταλλικών υλικών, με την πρόσπτωση της δέσμης πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου τα ηλεκτρόνια είτε περιθλώνται είτε διαθλώνται από τα άτομα του πλέγματος, με αποτέλεσμα η ηλεκτρονική μικροσκοπία να διακρίνεται σε δύο κυρίως κλάδους:

- Την ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (S.E.M.), η οποία εκμεταλλευόμενη την ανακλώμενη δευτερογενή δέσμη ηλεκτρονίων επιτρέπει τη μελέτη της μορφολογίας της επιφάνειας.
- Την ηλεκτρονική μικροσκοπία διείσδυσης (T.E.M.), η οποία εκμεταλλευόμενη την διερχόμενη δέσμη ηλεκτρονίων επιτρέπει τη μελέτη της εσωτερικής δομής.

Συγκεκριμένα η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (S.E.M.) χρησιμοποιείται για την μελέτη της μορφολογίας της επιφάνειας των υλικών. Η εφαρμογή της τεχνικής αυτής βασίζεται στην εκπομπή δευτερογενούς δέσμης ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας (250 eV), όπου κατά την πρόσπτωση αυτών στα διάφορα μέρη του εξεταζόμενου δείγματος μετατρέπονται σε εικόνα με τη βοήθεια κατάλληλου συστήματος μαγνητικών φακών. Οι μεγεθύνσεις που μπορούν να επιτευχθούν εξαρτώνται από τη διακριτική ικανότητα του κάθε συγκεκριμένου οργάνου και κυμαίνονται μεταξύ 10 και 3×10^5 φορές, ενώ μπορεί να μελετηθεί επιφανειακό στρώμα βάθους περίπου 5 \AA .

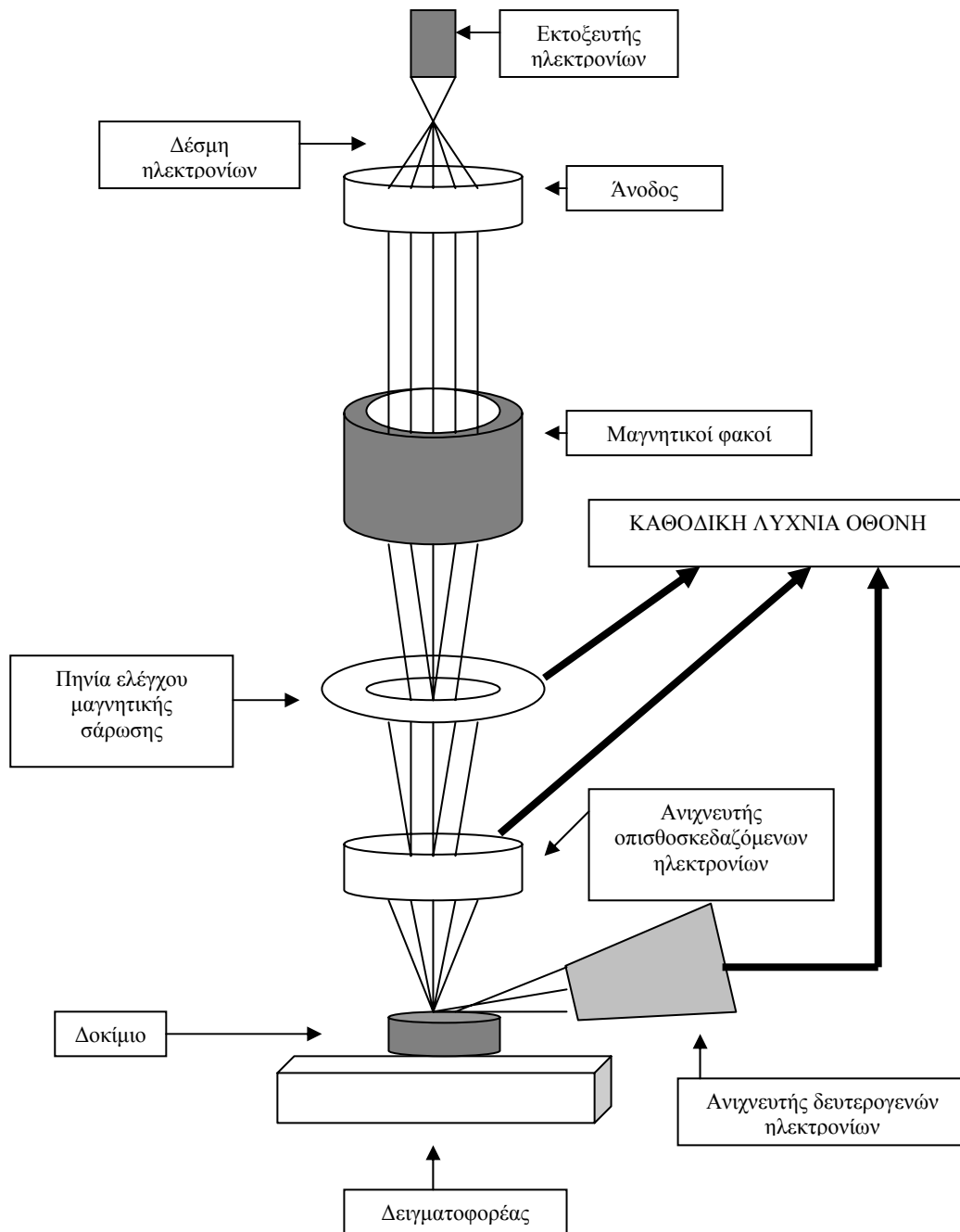
Η λειτουργία του S.E.M. στηρίζεται στις αλληλεπιδράσεις του προς εξέταση δείγματος και της προσπίπτουσας σε αυτό δέσμης ηλεκτρονίων. Οι βασικές διατάξεις που υπάρχουν στο μικροσκόπιο είναι το σύστημα παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων, το σύστημα κατεύθυνσης της δέσμης, το σύστημα πληροφοριών και τέλος το σύστημα κενού. Τα βασικά στάδια λειτουργίας ενός μικροσκοπίου είναι:

- Αρχικά, σχηματίζεται μια δέσμη ηλεκτρονίων από την πηγή η οποία επιταχύνεται προς το δείγμα μέσω ενός θετικού ηλεκτρικού δυναμικού.
- Μετέπειτα, χρησιμοποιώντας μεταλλικά ανοίγματα, ηλεκτρομαγνητικούς φακούς και πηνία

σάρωσης, επιτυγχάνεται μία λεπτή εστιασμένη μονοχρωματική δέσμη η οποία σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος.

- Οι αλληλεπιδράσεις δέσμης δείγματος καταγράφονται από ανιχνευτές και μετατρέπονται σε εικόνα.

Τα παραπάνω στάδια ισχύουν για όλους τους τύπους ηλεκτρονικών μικροσκοπίων. Στο Σχήμα 3.14 παρατίθεται το σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας ενός S.E.M. [75, 76].



Σχήμα 3.14: Σχηματικό διάγραμμα S.E.M.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η μικροσκοπία S.E.M. χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της μορφολογίας της επιφάνειάς των ηλεκτρολυτικών αποθεμάτων Sn και Sn/TiO₂. Η τεχνική αυτή είναι μη καταστροφική για τα υπό εξέταση δείγματα, απαραίτητη προϋπόθεση είναι όμως είναι τα δοκίμια να έχουν καταστεί αγωγίμα. Στο Σχήμα 3.15 απεικονίζεται το μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης που χρησιμοποιήθηκε στη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., συνδυασμένο με ένα σύστημα μικροανάλυσης (E.D.S. - Energy Dispersive Spectrometer) για την παρατήρηση των δοκιμίων εφελκυσμού και κρούσης. Ήταν της εταιρείας FEI και συγκεκριμένα το μοντέλο QUANTA 200.



Σχήμα 3.15: Το S.E.M. της εταιρείας FEI - QUANTA 200 με σύστημα μικροανάλυσης EDAX, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

3.5.2 Φασματοσκοπία Διερχόμενης Ενέργειας (E.D.S. ή EDAX)

Η φασματοσκοπία διερχόμενης ενέργειας αποτελεί μία ιδιαίτερη χρήσιμη μέθοδο ποιοτικής και ποσοτικής ανάλυσης των υλικών. Η βασική αρχή της στηρίζεται στη συλλογή και ανίχνευση της ακτινοβολίας-X, που εκπέμπεται από ένα δοκίμιο, κατά τη μελέτη του με την τεχνική S.E.M. Το σύστημα EDAX δε λειτουργεί αυτόνομα, αλλά σε συνδυασμό με το S.E.M. Συνίσταται από έναν ανιχνευτή, συνήθως από πυρίτιο, ο οποίος τοποθετείται πολύ κοντά στο δείγμα, έτσι ώστε να συλλέγει το μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό της ακτινοβολίας-X που εκπέμπεται από το υπό μελέτη δοκίμιο.

Κατά την ανάλυση, το δείγμα βομβαρδίζεται από μία δέσμη ηλεκτρονίων μέσα στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Τα ηλεκτρόνια που βομβαρδίζουν το δείγμα συγκρούονται με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του δείγματος και τα απομακρύνουν από τη θέση τους. Οι κενές αυτές θέσεις

καταλαμβάνονται από ηλεκτρόνια μεγαλύτερης ενεργειακής στοιβάδας. Όταν τα ηλεκτρόνια αυτά μεταπίπτουν στις ενεργειακά ασθενέστερες θέσεις αποβάλλουν ένα ποσό ενέργειας με την μορφή ακτίνων-X. Ο παλμός που δημιουργείται ενισχύεται και μεταφέρεται σε ένα πολυκάναλο αναλυτή όπου κάθε κανάλι αντιπροσωπεύει και ένα διαφορετικό ποσό ενέργειας ακτίνων-X. Μετέπειτα, ο ανιχνευτής ταξινομώντας τα διάφορα σήματα ανάλογα με την έντασή τους, παράγει ένα ιστόγραμμα της ενέργειας της ακτινοβολίας-X που ανιχνεύεται. Τα δεδομένα αυτά συγκρίνονται με δεδομένα πρότυπων δειγμάτων που βρίσκονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και προκύπτει η χημική ανάλυση του δείγματος. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αδυναμία της να ανιχνεύσει στοιχεία με μικρό ατομικό αριθμό ($Z < 5$), ωστόσο η ακρίβεια της μεθόδου είναι αρκετά υψηλή, δίνοντας σφάλματα της τάξης του $\pm 1 - 3 \%$ [77, 78].

Πρέπει να σημειωθεί, ότι η ποσότητα της ενέργειας που ελευθερώνεται από το μεταφερόμενο ηλεκτρόνιο εξαρτάται από τη στοιβάδα από την οποία φεύγει και σε ποια τελικά αυτό καταλήγει. Επίσης, τα άτομα κάθε στοιχείου εκπέμπουν μοναδικές ποσότητες ενέργειας κατά την μετακίνησή τους. Μετρώντας τα ποσά της ενέργειας που εμφανίζονται στις ακτίνες-X που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια του βομβαρδισμού με δέσμη ηλεκτρονίων, είναι δυνατό να προσδιοριστεί η ταυτότητα των ατόμων αυτών.

Το αποτέλεσμα που δίνει το EDAX είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Αυτό το φάσμα είναι η γραφική απεικόνιση της συχνότητας των ακτίνων-X που εκπέμπεται από κάθε επίπεδο. Η γραφική αυτή απεικόνιση περιλαμβάνει κορυφές που αντιστοιχούν στα ενεργειακά επίπεδα που περιλαμβάνουν περισσότερες ακτίνες-X. Κάθε κορυφή είναι μοναδική για κάθε άτομο και αντιστοιχεί σε μοναδικό στοιχείο. Η υψηλότερη κορυφή στο διάγραμμα δείχνει ότι υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση ενός στοιχείου στο μελετώμενο δείγμα.

3.5.3 Οπτικό Μεταλλογραφικό Μικροσκόπιο

Το οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο αποτελεί το πιο σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη της μεταλλογραφίας. Ενώ το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης (T.E.M.) και το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (S.E.M.) ξεπερνούν δύο από τους σημαντικότερους περιορισμούς του οπτικού μικροσκοπίου που σχετίζονται με την ανάλυση και το βάθος του πεδίου, εντούτοις δεν έχουν καταφέρει να μειώσουν τη σημασία του. Οι περιορισμοί των μικροσκοπίων T.E.M. και S.E.M. αποτελούν τα ισχυρά σημεία του οπτικού μικροσκοπίου και αντίστροφα, έτσι ώστε οι τεχνικές οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας να είναι συμπληρωματικές και όχι ανταγωνιστικές.

Σε κάθε μελέτη υλικών, η πιο σωστή διαδικασία είναι η αρχή της εξέτασης να γίνει πρώτα σε μακροσκοπικό επίπεδο, πριν προχωρήσει σε μικροσκοπικές λεπτομέρειες. Η απλή οπτική εξέταση, ίσως μακροσκοπικής προσβολής, πρέπει να προηγείται της μεγέθυνσης. Όλες οι παρατηρήσεις στο

μικροσκόπιο πρέπει να ξεκινάνε με μια μικρή μεγέθυνση, η οποία θα ακολουθηθεί σταδιακά από μεγαλύτερες μεγεθύνσεις, έτσι ώστε να εκτιμηθούν ικανοποιητικά τα βασικά χαρακτηριστικά της μικροδομής. Με αυτόν τον τρόπο, τα συνήθη ή μη χαρακτηριστικά της δομής μπορούν να διακριθούν και να αναγνωρισθεί η σπουδαιότητά τους.

Η οπτική μικροσκοπία έχει άπειρες εφαρμογές. Η πιο σημαντική εφαρμογή της είναι ο καθορισμός των δομικών φάσεων και η σύσταση της κύριας μάζας του μετάλλου. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι τόσο μεγάλης σπουδαιότητας, επειδή η δομή και η σύσταση του υλικού, έχει πολύ μεγάλη επίδραση στις ιδιότητες και την συμπεριφορά του. Στη μελέτη με το οπτικό μικροσκόπιο, η επιφάνεια ενός κατάλληλα προετοιμασμένου δοκιμίου εξετάζεται είτε πριν από προσβολή, είτε μετά από προσβολή ή και στις δύο καταστάσεις. Συγκεκριμένα συστατικά μπορούν να παρατηρηθούν πιο εύκολα αν είναι απλώς γυαλισμένη η επιφάνεια, επειδή δε σκιαγραφούνται με τη χημική προσβολή. Εγκλείσματα, νιτρίδια, ορισμένα καρβίδια και ενδομεταλλικές φάσεις μπορούν να παρατηρηθούν και χωρίς χημική προσβολή.

Εκτός από τα εγκλείσματα, οι υπόλοιπες φάσεις μπορούν να εξεταστούν με μεγαλύτερη ευκολία αν κατά τη διάρκεια το τελικού σταδίου γυαλισματος επέλθει κάποιος βαθμός αποκατάστασης της επιφάνειας του δοκιμίου. Το δοκίμιο πρέπει να είναι σωστά προετοιμασμένο, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σωστή παρατήρηση της μικροδομής, χωρίς επιπλοκές από σφάλματα (artifacts). Τα δοκίμια τα οποία αντιδρούν στο πολωμένο φως, όπως τα υλικά με μη κυβικές δομές, γενικά εξετάζονται χωρίς χημική προσβολή.

Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις η χημική προσβολή πρέπει γίνεται για είναι δυνατή η παρατήρηση της μικροδομής. Αρχικά, χρησιμοποιείται ένα διάλυμα προσβολής γενικής χρήσης, για την αποκάλυψη των ορίων των κόκκων και των φάσεων που υπάρχουν και στη συνέχεια ακολουθεί επιλεκτική προσβολή των φάσεων που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Υπάρχουν αμέτρητες μικροσκοπικές τεχνικές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρατήρηση της μικροδομής των υλικών. Αυτές οι τεχνικές παράγουν εικόνες οι οποίες έχουν την ανάλυση και την αντίθεση που είναι απαραίτητη για την παρατήρηση των μικροσκοπικών δομικών λεπτομερειών.

Τα οπτικά μικροσκόπια διαφέρουν πολύ σε κόστος και ικανότητες. Για τη μελέτη των μετάλλων χρησιμοποιείται ανακλώμενο φως. Τα οπτικά μικροσκόπια ταξινομούνται σε 'όρθια' και 'ανεστραμμένα', αυτοί οι όροι αναφέρονται στον προσανατολισμό του γυαλισμένου επιπέδου του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της παρατήρησης. Ακολουθούν πληροφορίες των βασικών εξαρτημάτων ενός οπτικού μικροσκοπίου.

- Το σύστημα φωτισμού

Μία ποικιλία από πηγές φωτός είναι διαθέσιμες για το οπτικό μικροσκόπιο. Οι χαμηλής τάσης λάμπες βολφραμίου, είναι συνήθως αρκετά καλές για παρατήρηση αλλά δεν παρέχουν αρκετή ένταση για την φωτογράφιση. Οι λυχνίες βολταϊκού τόξου ξένου, προτιμώνται λόγω της μεγάλης τους έντασης και της ομοιοτήτάς τους με το φως της ημέρας. Επίσης, πολύ συχνή είναι η χρήση λαμπτήρων νήματος πυρακτώσεως βολφραμίου - αλογόνου.

- Ο συγκεντρωτικός φακός

Ένας ρυθμιζόμενος φακός ελεύθερος από σφαιρική παρέκκλιση και κόμη, τοποθετείται μπροστά από τη φωτεινή πηγή για να εστιάσει το φως στο επιθυμητό σημείο, στην οπτική διαδρομή. Ένα διάφραγμα πεδίου τοποθετείται μπροστά από αυτόν τον φακό για να μειώσει την εσωτερική ακτινοβολία και τις αντανάκλασεις μέσα στο μικροσκόπιο. Ένα δεύτερο ρυθμιζόμενο διάφραγμα κάμερας, το διάφραγμα οπής, τοποθετείται στη διαδρομή του φωτός πριν από τον κάθετο φωτιστή. Το άνοιγμα ή το κλείσιμο του διαφράγματος αλλάζει την ποσότητα του φωτός και την γωνία του κώνου φωτός που εισέρχεται στον αντικειμενικό φακό. Η βέλτιστη ρύθμιση για αυτήν την οπή ποικίλει ανάλογα με τον αντικειμενικό φακό και είναι ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην αντίθεση της εικόνας, την ακρίβεια και το βάθος του πεδίου. Καθώς η μεγέθυνση μεγαλώνει, το διάφραγμα της οπής μειώνεται. Το άνοιγμα αυξάνει την οξύτητα της εικόνας, αλλά μειώνει την αντίθεση. Το κλείσιμο της οπής λειτουργεί αντίστροφα.

- Τα φίλτρα φωτός

Χρησιμοποιούνται για να τροποποιήσουν το φως, για πιο εύκολη παρατήρηση, καλύτερη ποιότητα στις φωτογραφίες ή για την αλλαγή της αντίθεσης.

- Ο αντικειμενικός φακός

Σχηματίζει την πρωταρχική εικόνα της μικροδομής και είναι το πιο σημαντικό εξάρτημα του οπτικού μικροσκοπίου. Ο αντικειμενικός φακός συλλέγει όσο το δυνατόν περισσότερο φως από το δοκίμιο και συνδυάζει αυτό το φως για να παράγει την εικόνα. Το αριθμητικό άνοιγμα του αντικειμενικού φακού (NA), ένα μέτρο της ικανότητας του φακού να συγκεντρώνει φως, ορίζεται ως:

$$(NA) = n \cdot \sin \alpha$$

όπου n ο μικρότερος δείκτης διάθλασης του υλικού (αέρας ή λάδι) ανάμεσα στο δοκίμιο και τον φακό και α η μισή γωνία των περισσότερο πλάγιων ακτινών φωτός, οι οποίες εισέρχονται στο προστινό φακό του αντικειμενικού. Η ικανότητα συλλογής φωτός αυξάνεται με το α . Οι

αντικειμενικοί φακοί συνήθως τοποθετούνται σε περιστρεφόμενη πλάκα, η οποία μπορεί να συγκρατήσει τέσσερις με έξι αντικειμενικούς φακούς.

- Ο προσοφθάλμιος φακός

Μεγεθύνει την πρωταρχική εικόνα που παράγεται από τον αντικειμενικό φακό. Το μάτι μπορεί να χρησιμοποιήσει την πλήρη ανάλυση του αντικειμενικού φακού. Το μικροσκόπιο παράγει ένα κατ'έμφαση είδωλο του δοκιμίου, στο σημείο της πιο ευκρινής όρασης, περίπου στα 250 mm από το μάτι. Ο προσοφθάλμιος μεγεθύνει αυτή την εικόνα, επιτρέποντας την επίτευξη χρήσιμων μεγεθύνσεων. Ο τυπικός προσοφθάλμιος έχει πεδίο όρασης διαμέτρου 24 mm. Οι προσοφθάλμιοι είναι συνήθως εξοπλισμένοι με διάφορα πλέγματα, τετραγωνίδια για την εύρεση, την μέτρηση, αρίθμηση ή σύγκριση των μικροδομών. Ο προσοφθάλμιος μεγαλώνει το πλέγμα και την πρωταρχική εικόνα. Και οι δύο εικόνες πρέπει να εστιαστούν ταυτόχρονα.

Συνήθως, χρησιμοποιείται ένας προσοφθάλμιος μεγέθυνσης $\times 10$. Η συνολική μεγέθυνση βρίσκεται με τον πολλαπλασιασμό της μεγέθυνσης του αντικειμενικού φακού, M_o , με τη μεγέθυνση του προσοφθάλμιου, M_e . Εάν χρησιμοποιείται σύστημα μεταβλητού εστιακού μήκους, τότε η μεγέθυνση πρέπει να μεταβληθεί ανάλογα.

- Η αντικειμενοφόρος πλάκα

Μία μηχανική πλάκα παρέχεται για την εστίαση και την μετατόπιση του δοκιμίου, το οποίο τοποθετείται πάνω στην πλάκα και στερεώνεται με κλιπς. Η γυαλισμένη επιφάνεια τοποθετείται κάτω από την οπή για την παρατήρηση. Ωστόσο, δεν είναι δυνατόν να παρατηρηθεί το σύνολο της επιφάνειας και σε υψηλές μεγεθύνσεις είναι δυνατόν να μη μπορεί να γίνει καλή εστίαση, λόγω της απόστασης λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση, το δοκίμιο τοποθετείται πάνω σε ολισθητήριο και αυτό πάνω στην πλάκα. Επειδή η γυαλισμένη επιφάνεια πρέπει να είναι κάθετη στην ακτίνα φωτός, χρησιμοποιείται πηλός ανάμεσα στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου και το ολισθητήριο. Ένα κομμάτι από τσιγαρόχαρτο τοποθετείται πάνω από τη γυαλισμένη επιφάνεια και το δοκίμιο πιέζεται πάνω στον πηλό (πλαστελίνη).

Η πλάκα πρέπει να είναι αρκετά σταθερή και χωρίς δονήσεις. Η κίνησή της ελέγχεται κατά τους άξονες x και y με μικρόμετρα και πρέπει να είναι απαλή και ακριβής. Πολλές πλάκες έχουν κλίμακες μέτρησης των αποστάσεων κατά τον άξονα x και y . Επίσης, υπάρχουν πλάκες που επιτρέπουν και την κυκλική κίνηση.

Συχνά πάντως παρουσιάζονται πολλές ατέλειες στους φακούς ως αποτέλεσμα των νόμων την αντανάκλασης και της διάθλασης. Ο δείκτης διάθλασης ενός φακού ποικίλει με το μήκος κύματος του φωτός και το μήκος εστίασης με τον δείκτη διάθλασης. Οπότε, το μήκος εστίασης αλλάζει για

διαφορετικά χρώματα φωτός. Μία διαφορετική εικόνα για κάθε μήκος κύματος εστιάζεται σε διαφορετικές αποστάσεις από τον φακό. Αυτή είναι η κατά μήκος χρωματική παρέκκλιση.

Επιπλέον, η μεγέθυνση ποικίλει με το μήκος εστίασης, μεταβάλλοντας έτσι το μέγεθος της εικόνας. Αυτή είναι η παράπλευρη χρωματική παρέκκλιση. Αυτές οι διαφορές πρέπει να εξαλειφθούν για την παραγωγή έγχρωμων φωτογραφιών. Επειδή η επίπεδη επιφάνεια της βέλτιστης εστίασης είναι καμπύλη, χρησιμοποιούνται προσοφθάλμιοι με ίση αλλά αντίθετη καμπυλότητα για την παραγωγή μιας επίπεδης εικόνας.

Για να γίνουν ορατές οι μικροδομικές λεπτομέρειες, το οπτικό σύστημα πρέπει να παρέχει αρκετά καλή ανάλυση, αναλυτική ισχύ και καλή αντίθεση εικόνας. Εάν η ανάλυση είναι αποδεκτή αλλά υπάρχει έλλειψη αντίθεσης δεν θα είναι δυνατή η παρατήρηση των λεπτομερειών. Γενικά, η ικανότητα ανάλυσης δύο σημείων ή γραμμών οι οποίες διαχωρίζονται από μία απόσταση d είναι συνάρτηση του μήκους κύματος, λ , του προσπίπτοντος φωτός και του αριθμητικού ανοίγματος, NA , του αντικειμενικού φακού.

$$d = k \cdot \lambda / NA$$

όπου το k είναι 0,5 ή 0,61. Η παραπάνω εξίσωση δεν περιέχει άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την ανάλυση όπως ο βαθμός διόρθωσης των αντικειμενικών φακών και η οπτική οξύτητα του μικροσκοπίου. Βασίζεται σε συνθήκες οι οποίες δεν υπάρχουν στην μεταλλογραφία, όπως αυτοφωτιζόμενα σημεία, τέλεια ασπρόμαυρη αντίθεση, εξέταση διερχόμενης δέσμης φωτός, μία ιδανική σημειακή φωτεινή πηγή και σε απουσία ατελειών των φακών.

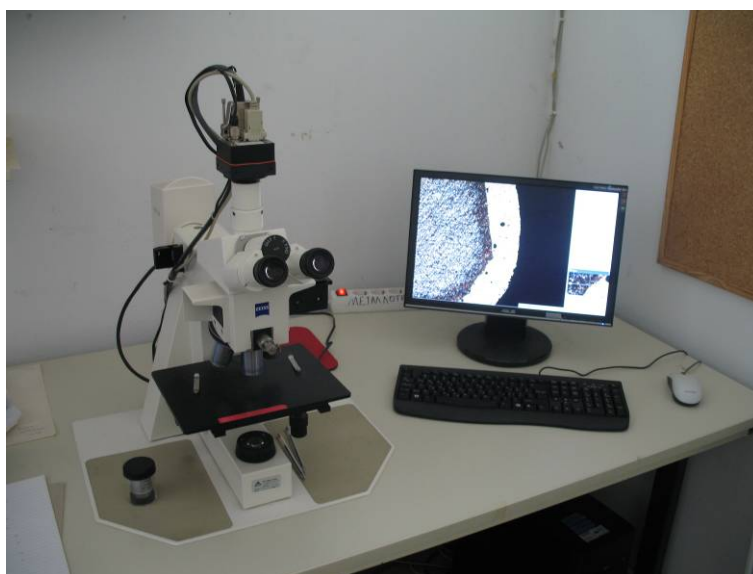
Το βάθος πεδίου είναι ένας ακόμη παράγοντας που έχει σημαντικό ρόλο στην καθαρότητα των οπτικών παρατηρήσεων σε ένα οπτικό μικροσκόπιο. Με τον όρο βάθος πεδίου χαρακτηρίζεται η απόσταση κατά μήκος του οπτικού άξονα πάνω από την οποία οι λεπτομέρειες της εικόνας παρατηρούνται με αρκετή καθαρότητα. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάλυση επηρεάζουν και το βάθος του πεδίου, αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση. Οπότε πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός ανάμεσα σ' αυτές τις δύο παραμέτρους, ο οποίος γίνεται όλο και πιο δύσκολος καθώς η μεγέθυνση μεγαλώνει. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο είναι προτιμότερη μία πολύ μικρή προσβολή για την παρατήρηση σε πολύ μεγάλες μεγεθύνσεις. Το βάθος πεδίου, T_f , μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση [79]:

$$T_f = [\lambda \cdot (\sqrt{n^2} - \sqrt{NA^2})] / NA^2$$

όπου n είναι ο δείκτης διάθλασης του μέσου ανάμεσα στο δοκίμιο και τον αντικειμενικό ($n \approx 1$ για τον αέρα), το λ είναι το μήκος κύματος του φωτός και το NA είναι το αριθμητικό άνοιγμα.

Για τη μελέτη της μορφολογίας της επιφάνειας των επικασιτερώσεων και τις μετρήσεις του πάχους τους χρησιμοποιήθηκε, συμπληρωματικά, εκτός του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (S.E.M.) και οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο. Τα παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλογραφίας του Κ.Δ.Ε.Π. με χρήση του μεταλλογραφικού μικροσκοπίου Zeiss Axiotech HAL 100 (Σχήμα 3.16), κατάλληλου για μικρογραφικούς ($\times 50 \div \times 1000$) και μακρογραφικούς ελέγχους ($\times 12,5 \div \times 50$) και ταυτόχρονη χρήση του λογισμικού a4i της AQUINTO που το συνοδεύει.

Η παρατήρηση των δοκιμίων στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο έγινε αμέσως μετά τη λείανση - στίλβωσή τους και αφού προηγήθηκε χημική προσβολή τους. Η τελευταία ήταν απαραίτητη, έτσι ώστε οι εξεταζόμενες επιφάνειες να δώσουν τη δυνατότητα αποκάλυψης όλων των πληροφοριών της μορφολογίας της επιφάνειας των επικασιτερώσεων και να είναι εφικτές οι μετρήσεις του πάχους τους.



Σχήμα 3.16: Μεταλλογραφικό Μικροσκόπιο Zeiss Axiotech HAL 100.

Χημική προσβολή, με κατάλληλο χημικό αντιδραστήριο, των δοκιμίων που πρόκειται να υποστούν μεταλλογραφική παρατήρηση γίνεται, εν γένει, ώστε να αποκαλυφτεί η δομή του υλικού και να καταστεί δυνατός ο μεταλλογραφικός μικροσκοπικός έλεγχος μέσω της οπτικής αντίθεσης που δημιουργείται μεταξύ των συστατικών του μετάλλου. Η χημική προσβολή είναι ηλεκτροχημική διεργασία που συνίσταται στην εκλεκτική επίθεση μέσω διάβρωσης επί των διαφορετικών συστατικών μερών (φάσεων, κρυστάλλων κ.λ.π.) του μετάλλου τα οποία αντιδρώντας διαφορετικά δημιουργούν την επιθυμητή οπτική αντίθεση.

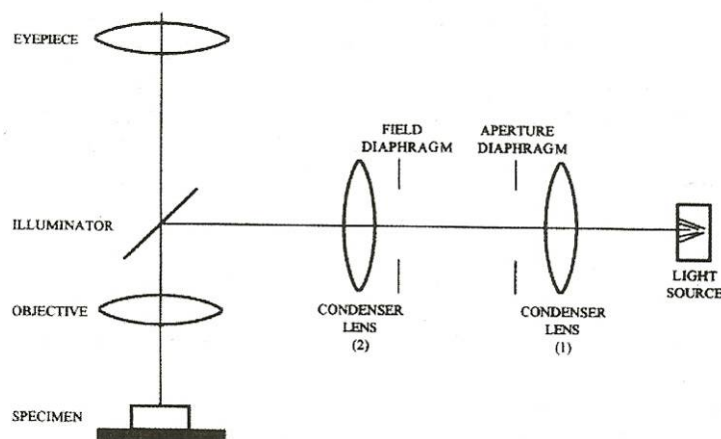
Η επιλογή και χρήση των αντιδραστηρίων γίνεται σύμφωνα με αντίστοιχα πρότυπα και βιβλιογραφικά δεδομένα. Συνηθέστερα χρησιμοποιούνται υδατικά ή αλκοολικά διαλύματα οξέων, βάσεων ή μίγματα

αυτών. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να γίνει και διαδοχική προσβολή με δύο ή περισσότερα αντιδραστήρια.

Προκειμένου να καταστεί εφικτή η μελέτη της επιφάνειας των δοκιμίων κρούσης, που εξετάστηκαν στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, αυτά προσβλήθηκαν χημικά με υδατικό διάλυμα κατάλληλο για προσβολή ορειχάλκινων επιφανειών, αποτελούμενο από 2 g $K_2Cr_2O_7$, 8 mL H_2SO_4 , 4 mL NaCl (κορεσμένο διάλυμα) και 100 g H_2O [80]. Ο χρόνος προσβολής του κάθε δοκιμίου κρούσης ήταν μεταξύ 10 με 15 mn, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η προσβολή έγινε χρησιμοποιώντας μία μεταλλική λαβίδα στην άκρη της οποίας ήταν τυλιγμένο βαμβάκι, το οποίο διαβρέχτηκε με το αντιδραστήριο και στη συνέχεια απλώθηκε πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Μετά τη χημική προσβολή ακολούθησε έκπλυση των δοκιμίων με νερό και αλκοόλη. Ορισμένα αντιδραστήρια είναι αδιάλυτα στο νερό, οπότε η αρχική έκπλυση του δοκιμίου με νερό εξυπηρετεί σε πρώτο στάδιο στην απομάκρυνση της πλεονάζουσας ποσότητας του αντιδραστηρίου και ακολούθως η έκπλυση με αλκοόλη απομακρύνει ποσοτικά το διάλυμα της χημικής προσβολής.

Έπειτα, ακολούθησε στέγνωμα των δοκιμίων, στάδιο απαραίτητο μιας και υπολείμματα των αντιδραστηρίων της χημικής προσβολής που εκκρίνονται από πόρους ή ρωγμές του υλικού ενδέχεται να αποκαλύψουν φαινομενικές δομές που ουδεμία σχέση έχουν με την πραγματική δομή του υπό εξέταση υλικού.



Σχήμα 3.17: Το οπτικό σύστημα του μεταλλογραφικού μικροσκοπίου Zeiss Axiotech HAL 100.

Αμέσως μετά τη διαδικασία της χημικής προσβολής και το στέγνωμα των δοκιμίων διενεργήθηκε ο μεταλλογραφικός έλεγχος της επιφάνειας των επικασσιτερώσεων και οι μετρήσεις του πάχους τους. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στην τράπεζα του μικροσκοπίου στην κατάλληλη θέση για παρατήρηση μέσω του συστήματος αντικειμενικού και προσοφθάλμιου φακού. Μέσω του αντικειμενικού φακού

καθορίστηκαν η μεγέθυνση, το βάθος εστίασης, η απόσταση εργασίας και το ονομαστικό διάφραγμα που με τη σειρά του καθορίζει την ικανότητα για συγκέντρωση φωτός και τη διακριτικότητά του. Η επιλογή του καταλληλότερου αντικειμενικού φακού έγινε επιλέγοντας κάποιον, κατά περίπτωση, από τον περιστρεφόμενο φορέα τους. Ο προσοφθάλμιος φακός απλά μεγεθύνει την εικόνα που παράγεται από τον αντικειμενικό. Το οπτικό σύστημα παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 3.17).

3.6 Εξοπλισμός - Μέθοδοι Προσδιορισμού των Μηχανικών Ιδιοτήτων των Αποθεμάτων

3.6.1 Δοκιμή Μονοαξονικού Εφελκυσμού

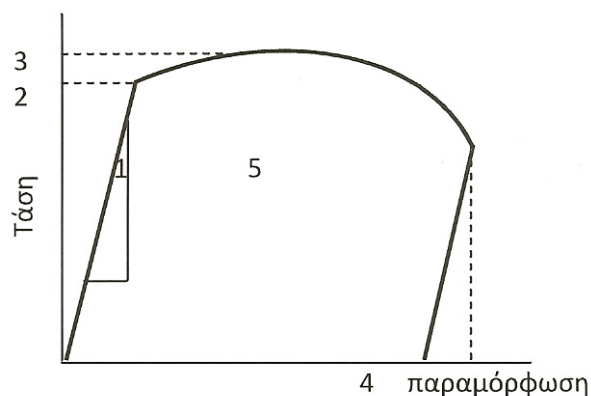
Εφελκυσμός ονομάζεται η καταπόνηση δοκιμίου, όταν οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις F , που είναι ίσες και αντίθετες, ενεργούν κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου, τείνουν δε να αυξήσουν το μήκος του. Η δοκιμή εφελκυσμού συνίσταται στην υποβολή του δοκιμίου, του προς χαρακτηρισμό υλικού, σε εφελκυστική καταπόνηση κατά τη διάρκεια της οποίας καταγράφεται η προκαλούμενη επιμήκυνση (Δl).

Οι μηχανές εφελκυσμού είναι κατασκευασμένες κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προκαλούν την επιμήκυνση του υλικού με έναν σταθερό ρυθμό, να μετρούν το φορτίο που εφαρμόζεται στο υλικό καθώς επίσης και τις προκαλούμενες επιμηκύνσεις (με τη βοήθεια του επιμηκυνσιόμετρου). Η δοκιμή του εφελκυσμού διαρκεί μικρό χρόνο και είναι καταστρεπτική, εφόσον το υλικό παραμορφώνεται μόνιμα και σπάει.

Για την περιγραφή της συμπεριφοράς ενός υλικού σε εφελκυστικά φορτία απαιτείται η κατασκευή του αντίστοιχου διαγράμματος και για να γίνει αυτό πρέπει να είναι γνωστή η ακριβής σχέση μεταξύ των τάσεων και των παραμορφώσεων. Η σχέση όμως αυτή διαφέρει από υλικό σε υλικό, ακόμη και αν αυτά ανήκουν στην ίδια κατηγορία (όλκιμα ή ψαθυρά) και δεν εκφράζεται πάντοτε υπό μορφή μιας γνωστής συνάρτησης. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο, πολλές φορές, να γίνεται η υπόθεση ότι τα υλικά συμπεριφέρονται με εξιδανικευμένο τρόπο και έτσι επιλύονται κάποια σύνθετα προβλήματα σχετικά με την αντοχή τους. Συνήθως, η εξιδανίκευση της συμπεριφοράς των υλικών βασίζεται σε δύο παραδοχές. Η πρώτη, δέχεται ότι η ελαστική και η πλαστική περιοχή διαχωρίζονται απόλυτα μεταξύ τους στο όριο διαρροής (τα όρια αναλογίας και ελαστικότητας συμπίπτουν με το όριο διαρροής). Στη δεύτερη, η σχέση τάσεων - παραμορφώσεων υποτίθεται γραμμική ακόμα και στην ελαστική περιοχή.

Στο Σχήμα 3.18 που ακολουθεί, συνοψίζονται οι 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 του Young. Η γραμμικότητα της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή είναι η γραφική παράσταση του νόμου του Hooke.

Το μέτρο ελαστικότητας, E , εκφράζει την ακαμψία του υλικού, δηλαδή την αντίσταση σε ελαστική παραμόρφωση. Το όριο διαρροής, όπως και το μέτρο ελαστικότητας, 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.



Σχήμα 3.18: Βασικές μηχανικές ιδιότητες που προσδιορίζονται από ένα πείραμα εφελκυσμού – 1. Μέτρο ελαστικότητας, 2. Όριο διαρροής, 3. Αντοχή σε εφελκυσμό, 4. Πλαστιμότητα, 5. Δυσθραυστότητα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.18, η μηχανική τάση συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι ενός μεγίστου, το οποίο προσδιορίζει την αντοχή σε εφελκυσμό. Μετά την αντοχή σε εφελκυσμό, στο δοκίμιο αρχίζει να δημιουργείται τοπική στένωση (λαιμός), που ορίζεται ως ο εντοπισμός της παραμόρφωσης σε μία 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 αυξάνεται μέχρι τη θραύση του δοκιμίου.

Μία άλλη σημαντική ιδιότητα που προσδιορίζεται με τη δοκιμή του εφελκυσμού είναι η πλαστιμότητα, που εκφράζει το μέγεθος της πλαστικής παραμόρφωσης που μπορεί να υποστεί ένα υλικό χωρίς να θραυστεί. Η πλαστιμότητα εκφράζεται είτε ως επί τοις εκατό επιμήκυνση κατά τη θραύση ή επί τοις εκατό μείωση της διατομής κατά τη θραύση. Ο συνδυασμός πλαστιμότητας και αντοχής περιγράφεται από τον όρο συνεκτικότητα ή δυσθραυστότητα, η οποία προσδιορίζεται από τη 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.

Η δοκιμή εφελκυσμού των επικασσιτερωμένων ορειχάλκινων δοκιμίων που παρασκευάστηκαν για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε στη μηχανή εφελκυσμού WDW-50E, μέγιστου φορτίου 50 kN, της εταιρείας TIME GROUP INC (Σχήμα 3.19) στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Κονιαμάτων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Να επισημανθεί, ότι οι δοκιμές εφελκυσμού των δοκιμίων έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 10002.01 / 2001 και DIN 50125.

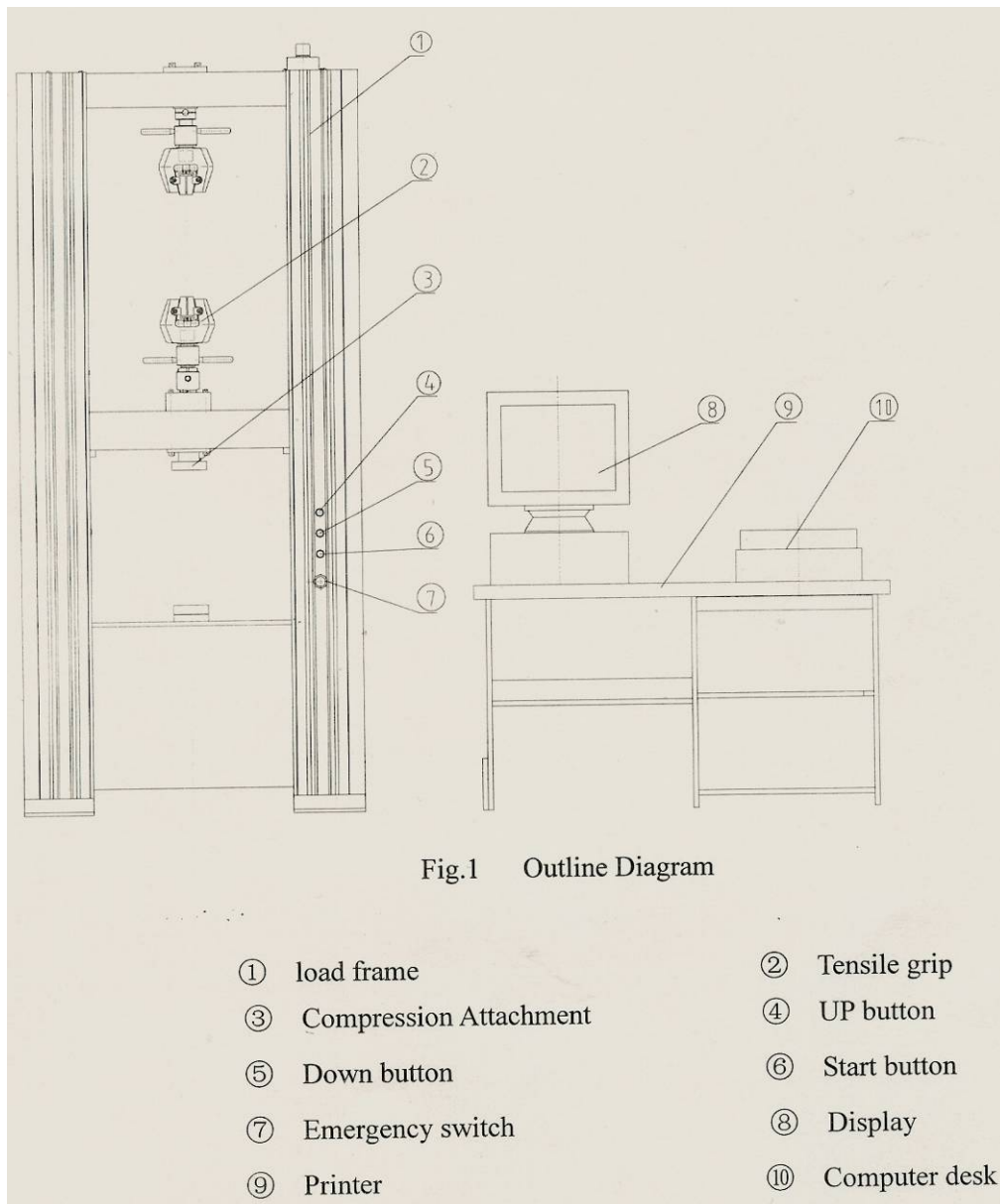


Σχήμα 3.19: Μηχανή εφελκυσμού WDW-50E, μέγιστου φορτίου 50 kN, της εταιρείας TIME GROUP INC., του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Κονιαμάτων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Η μηχανή εφελκυσμού WDW-50E είναι έτσι κατασκευασμένη ώστε να εξασφαλίζει την ομοιόμορφη μονοαξονική φόρτιση του δοκιμίου και διαθέτει σύστημα καταγραφής του φορτίου (F_m) συναρτήσει της επιμήκυνσης (Δl), του ελεύθερου μήκους του δοκιμίου, ενώ ταυτόχρονα είναι συνδεδεμένη με Η/Υ. Το σύστημα συγκρατήσεως των δοκιμίων αποτελείται από δύο ειδικές αρπάγες οι οποίες δέχονται δοκίμια με κυλινδρικές κεφαλές ανάλογης διαμέτρου με τα εξεταζόμενα.

Για τη μέτρηση των φορτίων διαθέτει σύστημα δύο δεικτών, από τους οποίους μόνον ο ένας παρακολουθεί και δείχνει τις διακυμάνσεις του φορτίου που επιβάλλεται από τις αρπάγες της εφελκυστικής μηχανής ελέγχου στο δοκίμιο. Ο δεύτερος δείκτης συμπαρασύρεται από τον πρώτο, μόνο όμως κατά τη φορά της αύξησης του φορτίου. Όταν το φορτίο μειώνεται (όπως στην περίπτωση

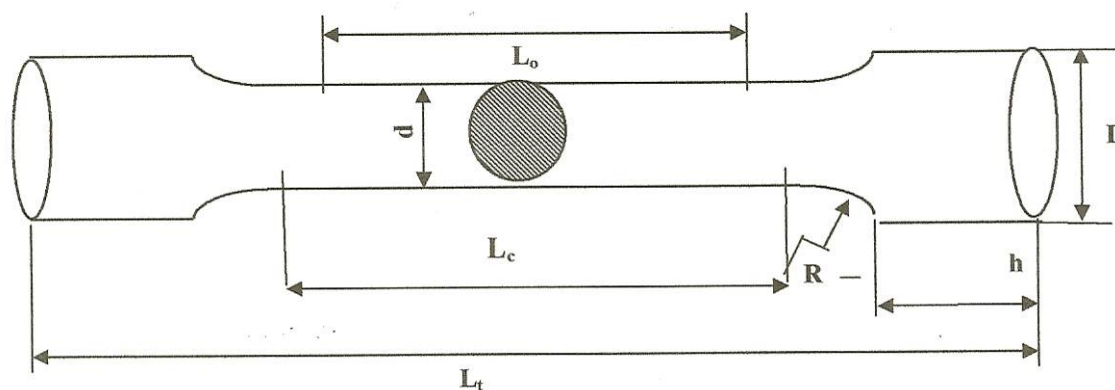
της φυσικής διαρροής ή της θραύσης), ο δεύτερος δείκτης παραμένει ακινητοποιημένος στη μεγαλύτερη ένδειξη (ανώτερο φορτίο διαρροής ή φορτίο θραύσης) και επιτρέπει έτσι την ακριβή ανάγνωση της ζητούμενης αυτής χαρακτηριστικής τιμής του φορτίου. Σχηματική αναπαράσταση της μηχανής εφελκυσμού WDW-50E που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των επικασσιτερωμένων ορειχάλκινων δοκιμίων δίνεται στο Σχήμα 3.20, όπου φαίνονται όλα τα επιμέρους εξαρτήματα που την αποτελούν.



Σχήμα 3.20: Σχηματική αναπαράσταση της μηχανής εφελκυσμού WDW-50E, όπου φαίνονται όλα τα επιμέρους εξαρτήματα και μηχανήματα που την αποτελούν.

Παρασκευάστηκαν δέκα επικασσιτερωμένα δοκίμια εφελκυσμού τα οποία και δοκιμάστηκαν μαζί με άλλα δύο δοκίμια με κωδικούς DE Brass (1) και DE Brass (2) όπου δεν είχαν επικάλυψη, στη μηχανή εφελκυσμού WDW-50E. Τα δοκίμια εφελκυσμού ήταν κυλινδρικής διατομής ($d = 8 \text{ mm}$) και η

κατασκευή τους έγινε με το αντίστοιχο έντυπο εντολής κατασκευής δοκιμών εφελκυσμού ΕΦΕΛΚ / ΜΔ 002 / 1 του Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών (Ε.Α.Υ.) του Κέντρου Δοκιμών Ερευνών & Προτύπων (Κ.Δ.Ε.Π.). Τα στοιχεία και οι διαστάσεις των διαμορφωμένων δοκιμών εφελκυσμού απεικονίζονται στο Σχήμα 3.21 όπως και οι ανοχές στις καθορισμένες διαστάσεις του κάθε δοκιμίου θα πρέπει να είναι σύμφωνες με τον Πίνακα 3.5.



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

Σχήμα 3.21: Στοιχεία διαμορφωμένων δοκιμών εφελκυσμού. Οι διαστάσεις αναφέρονται σε mm.

Τα κυλινδρικά δοκίμια εφελκυσμού πρέπει να ακολουθούν μία καμπύλη μετάπτωσης από το λαιμό προς τα δύο τους άκρα, όπως στο Σχήμα 3.21.

Ονομασία	Ονομαστική Εγκάρσια Διάσταση 'x'	Ανοχή Κατεργασίας ως προς την Ονομαστική Διάσταση ⁽¹⁾	Ανοχή Σχήματος ⁽²⁾
Διάμετρος κατεργασμένου δοκιμίου κυκλικής διατομής	$3 < x < 6$	$\pm 0,06$	0,03
	$6 < x < 10$	$\pm 0,075$	0,04
	$10 < x < 18$	$\pm 0,09$	0,04
	$18 < x < 30$	$\pm 0,105$	0,05
Σημειώσεις: ⁽¹⁾ Οι ανοχές αυτές εφαρμόζονται αν η ονομαστική τιμή της εγκάρσιας διατομής (S_0) εισαχθεί στους υπολογισμούς χωρίς να τη μετρήσουμε.			
⁽²⁾ Μέγιστη απόκλιση μεταξύ μετρήσεων μιας συγκεκριμένης εγκάρσιας διάστασης κατά μήκος ολόκληρου του μήκους (L_c) του δοκιμίου.			

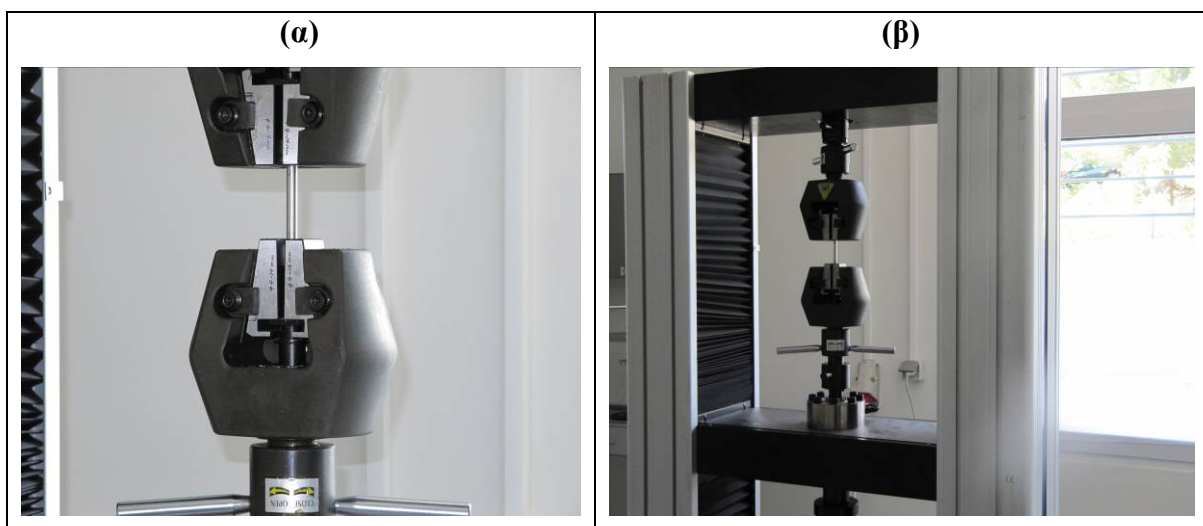
Πίνακας 3.5: Ανοχές των εγκάρσιων διαστάσεων των δοκιμών εφελκυσμού (Τεχνική Οδηγία ΕΦΕΛΚ / ΜΔ 002/ Ε.Α.Υ.).

Για τον προσδιορισμό του εμβαδού της αρχικής διατομής τους (S_0) χρησιμοποιήθηκε η ονομαστική διάμετρος τους με δεδομένο ότι ικανοποιούσαν τις ανοχές που δίνονται στον Πίνακα 3.5. Αρχικά, μετρήθηκε η διάμετρος (d) των έντεκα κυλινδρικών δοκιμίων σε τρία σημεία, στο μέσον και στα δύο άκρα. Έπειτα, τοποθετήθηκαν σε ειδική μικροσυσκευή στήριξης όπου χαράχτηκαν στον οριζόντιο

άξονα με πόντα και έγινε η σήμανσή τους με ακρίβεια $\pm 1\%$ του $L_o = 5,65 \sqrt{S_0}$ (για κυλινδρικά δοκίμια). Μετέπειτα, τοποθετήθηκε κάθε ένα ξεχωριστά στις σιαγόνες της μηχανής εφελκυσμού WDW-50E και επιλέχθηκε η ταχύτητα φόρτισης να διατηρηθεί σταθερή σε ολόκληρη τη διάρκεια της δοκιμής και ίση με 20 mm/mn, έως τη θραύση του κάθε δοκιμίου. Στη συνέχεια, επανασυναρμολογήθηκαν τα δύο σπασμένα τεμάχια τους στην ειδική μικροσυσκευή στήριξης μέσω σφινγκτήρα και καταμετρήθηκε το ολικό μήκος τους (L_u), οπότε η ανηγμένη επιμήκυνση θραύσεως υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$\varepsilon_{\theta} = (L_u - L_o) / L_o \quad (3.1)$$

Τα μετρούμενα μεγέθη κατά τη διάρκεια των δοκιμών ήταν το επιβαλλόμενο φορτίο (F_m) και η αντίστοιχη επιμήκυνση (Δl) του κάθε δοκιμίου. Επίσης, καταγράφηκε και η καμπύλη $F_m = f(\Delta l)$. Οι δοκιμές εφελκυσμού εκτελέστηκαν σε θερμοκρασία δωματίου. Στο Σχήμα 3.22 φαίνονται διαδοχικές φάσεις από τον εφελκυσμό του δοκιμίου DE10.

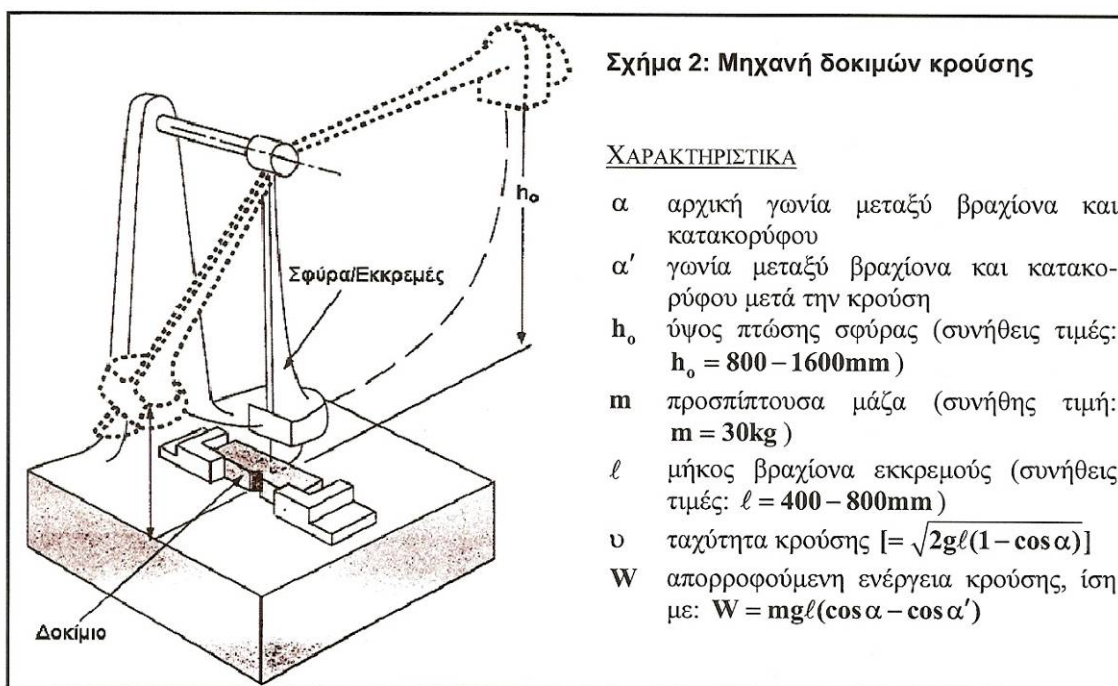


Σχήμα 3.22 (α) & (β): Διαφορετικά χρονικά στιγμιότυπα από τον εφελκυσμό του δοκιμίου DE10.

3.6.2 Δοκιμή Αντοχής σε Κρούση

Η μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών σε κρουστικά φορτία, γίνεται με τη μέτρηση της παραμορφωσιακής ενέργειας που αποθηκεύεται στο δοκίμιο κατά τη θραύση του. Ο έλεγχος της γίνεται μέσω τυποποιημένης δοκιμής κρούσης με τη βοήθεια μηχανής εκκρεμούς σφύρας. Δύο διαφορετικές μέθοδοι εφαρμόζονται για τη δοκιμή κρούσης. Η μέθοδος δοκιμής κατά Charpy και η μέθοδος δοκιμής κατά Izod. Οι δοκιμές αυτές διαφέρουν μεταξύ τους, αφενός μεν στο τρόπο στήριξης του δοκιμίου και αφετέρου στην ταχύτητα κρούσεως.

Οι δύο ανωτέρω μέθοδοι βασίζονται στη μέτρηση του μηχανικού έργου, που χρειάζεται για τη θραύση ενός τυποποιημένων διαστάσεων δοκιμίου στο οποίο έχει γίνει κατάλληλη χαραγή σχήματος 'V'. Στην περίπτωση της δοκιμής Charpy, το δοκίμιο συγκρατείται στα δύο άκρα του ως αμφιέριστος δοκός, ενώ στην περίπτωση της δοκιμής Izod, το δοκίμιο είναι πακτωμένο από το ένα άκρο στο άλλο (πρόβολος). Το όργανο που χρησιμοποιείται ονομάζεται εκκρεμές και για τη θραύση του δοκιμίου χρησιμοποιεί μία βαριά σφύρα (Σχήμα 3.23). Η διαφορά της δυναμικής ενέργειας μεταξύ της τελικής και της αρχικής θέσης της σφύρας (ύψος h_0 από τη θέση του δοκιμίου) δίνει και το απαιτούμενο για τη θραύση μηχανικό έργο.



Σχήμα 3.23: Σχηματική αναπαράσταση μηχανής δοκιμών κρούσης.

Οι μετρήσεις αντοχής σε κρούση (δυσθραυστότητας) των επικασσιτερωμένων ορειχάλκινων δοκιμίων κρούσης που παρασκευάστηκαν για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο Charpy στη μηχανή κρούσης Avery Denison (300 J) (Σχήμα 3.24) του Ε.Α.Υ. του Κ.Δ.Ε.Π., όπου είναι πιστοποιημένο από το Ε.ΣΥ.Δ. στις συγκεκριμένες δοκιμές κρούσης. Να επισημανθεί, ότι οι δοκιμές κρούσης των δοκιμίων έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 10045.01.

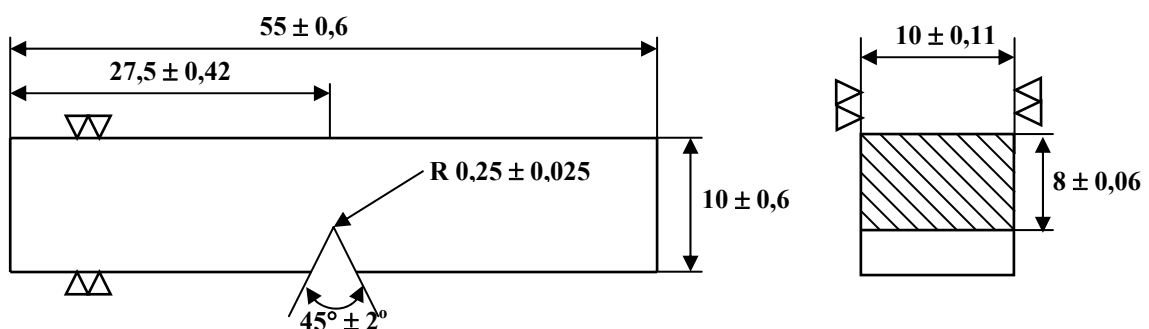
Παρασκευάστηκαν οχτώ επικασσιτερωμένα δοκίμια κρούσης τα οποία και δοκιμάστηκαν μαζί με άλλο ένα δοκίμιο με κωδικό 'DK Brass' όπου δεν είχε επικάλυψη, στη μηχανή κρούσης Avery Denison (300 J). Τα δοκίμια κρούσης ήταν τετραγωνικής διατομής (10 mm × 10 mm) και στο μέσον τους διαμορφώθηκε εγκοπή για την εξασφάλιση της συγκέντρωσης των τάσεων, χρησιμοποιώντας τη συσκευή διαμόρφωσης εγκοπών κρούσης RMU με οδοντωτό κανόνα σχηματισμού εγκοπής 'V'. Η κατασκευή των δοκιμίων κρούσης έγινε με το αντίστοιχο έντυπο εντολής κατασκευής δοκιμίων ΚΡΟΥΣ 002/1 LabB2 του Ε.Α.Υ. του Κ.Δ.Ε.Π.

Τα στοιχεία και οι διαστάσεις των διαμορφωμένων δοκιμών κρούσης απεικονίζονται στο Σχήμα 3.25 όπως και οι ανοχές στις καθορισμένες διαστάσεις του κάθε δοκιμίου θα πρέπει να είναι σύμφωνες με τον Πίνακα 3.6.



Σχήμα 3.24: Μηχάνη κρούσης Avery Denison (300 J) του Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών του Κ.Α.Ε.Π.

Ατέλειες ή αποκλίσεις από τις σωστές διαστάσεις των εγκοπών οδηγούν σε πολύ σημαντικά πειραματικά σφάλματα. Γι' αυτό το λόγο ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται κατά τη διαδικασία κατασκευής της εγκοπής.



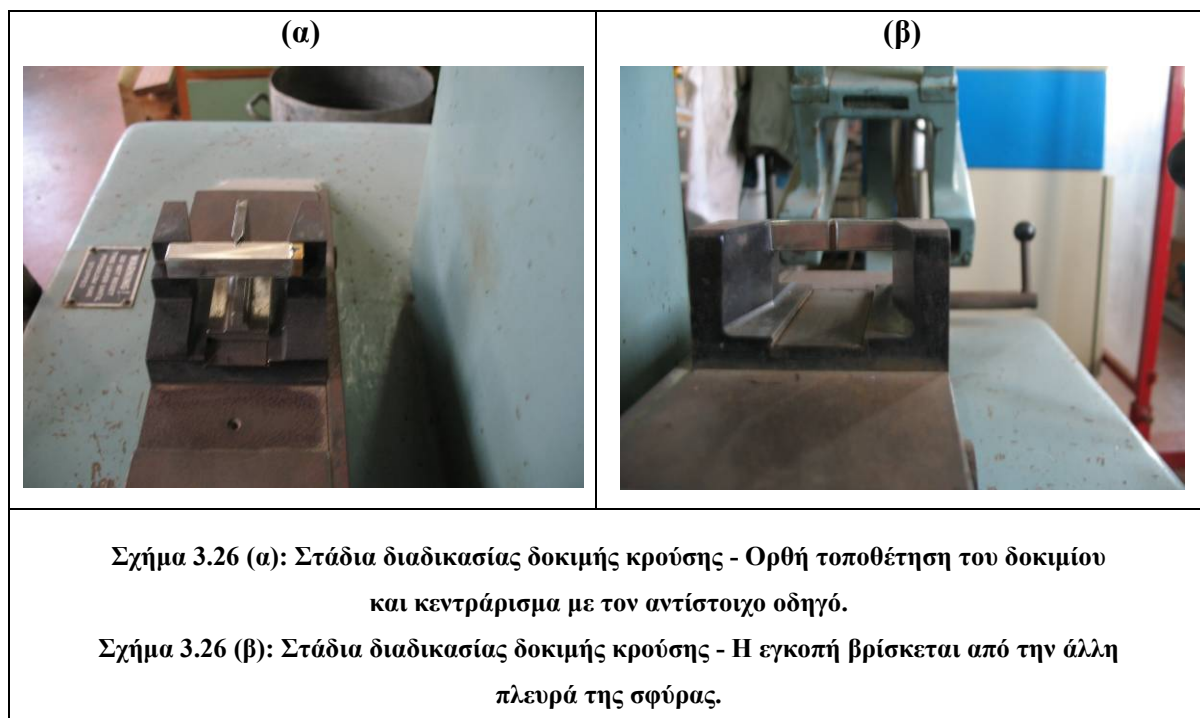
Σχήμα 3.25: Στοιχεία διαμορφωμένων δοκιμών κρούσης. Οι διαστάσεις αναφέρονται σε mm.

Το έργο που καταναλώνεται για τη θραύση του δοκιμίου, προσδιορίζεται από τις θέσεις που παίρνει η σφύρα πριν και μετά τη θραύση του δοκιμίου. Η μηχανή δοκιμασίας σε κρούση έχει ένα δείκτη, που κινείται μαζί με τη σφύρα, ο οποίος δείχνει το έργο που καταναλώνεται κάθε φορά για τη θραύση του

δοκιμίου. Η δυσθραυστότητα του υλικού εκτιμάται από την τιμή της απορροφούμενης ενέργειας. Στο Σχήμα 3.26 φαίνονται διαδοχικές φάσεις από τη δοκιμή κρούσης του δοκιμίου DK10.

Προσδιορισμός	Εγκοπή τύπου 'V'		ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ	
	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗ	ΑΝΟΧΕΣ		
Μήκος	55 mm	$\pm 0,60$ mm	54,4	55,6
Ύψος	10 mm	$\pm 0,60$ mm	9,4	10,6
Πλάτος Τυποποιημένο δοκίμιο	10 mm	$\pm 0,11$ mm	9,89	10,11
Δοκίμιο μειωμένης τομής	7,5 mm	$\pm 0,11$ mm	7,39	7,61
Δοκίμιο μειωμένης τομής	5 mm	$\pm 0,06$ mm	4,94	5,06
Γωνία εγκοπής	45°	$\pm 2^\circ$	43	47
Ύψος κάτω από την εγκοπή	8 mm	$\pm 0,06$ mm	7,94	8,06
Ακτίνα καμπυλότητας στη βάση της εγκοπής	0,25 mm	$\pm 0,025$ mm	0,225	0,275
Απόσταση επιπέδου συμμετρίας εγκοπής από τα άκρα του δοκιμίου	27,5 mm	$\pm 0,42$ mm	27,08	27,92
Γωνία μεταξύ επιπέδου συμμετρίας της εγκοπής και διαμήκη άξονα του δοκιμίου	90°	$\pm 2^\circ$	88	92
Γωνία μεταξύ εφαπτόμενων διαμηκών επιφανειών του δοκιμίου.	90°	$\pm 2^\circ$	88	92

Πίνακας 3.6: Ανοχές σε προδιαγραμμένες διαστάσεις δοκιμίου κρούσης (Τεχνική Οδηγία ΚΡΟΥΣ 002/1 LabB2).



Ανάλογα με το ποσό ενέργειας, που δαπανάται κατά τη θραύση στο πλαίσιο της δοκιμής κρούσης, τα τεχνικά υλικά διακρίνονται σε όλκιμα και ψαθυρά. Τα όλκιμα υλικά απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας ($> 100\text{J}$) κατά τις πρότυπες δοκιμές κρούσης, χαρακτηρίζονται δηλαδή από μεγάλη δυσθραυστότητα. Τα ψαθυρά υλικά απορροφούν μικρά ποσά ενέργειας ($< 40 - 50\text{J}$) κατά την κρούση, χαρακτηρίζονται δηλαδή από μικρή σχετικά δυσθραυστότητα.

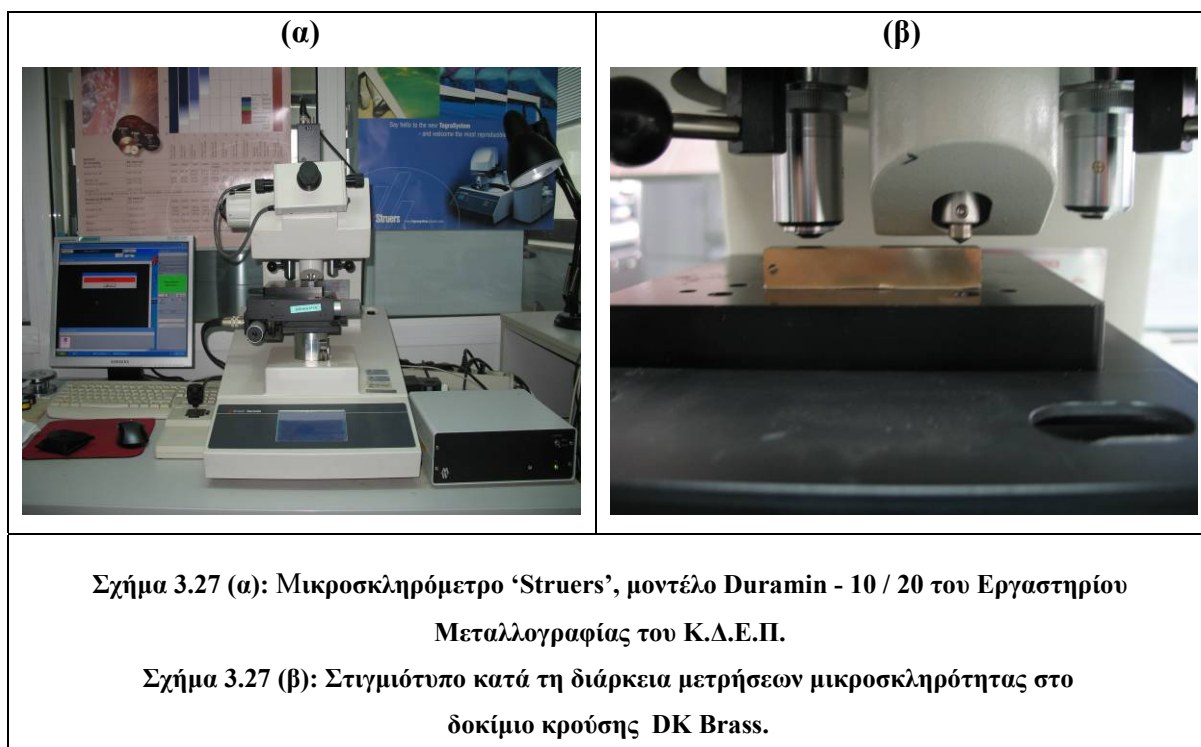
3.6.3 Δοκιμή Μικροσκληρότητας των Επικαλύψεων κατά 'Vickers'

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2 (Παράγραφος 2.6.1), με τον όρο σκληρότητα ορίζεται η αντίσταση ενός υλικού στη διείσδυση ενός άλλου υλικού σκληρότερου από το πρώτο. Η μέτρηση της σκληρότητας γίνεται συνήθως με τη χρήση ενός εισαγωγέα - διεισδυτή με σκληρότητα παρόμοια με αυτή του διαμαντιού, το οποίο είναι το σκληρότερο υλικό που συναντάται στη φύση. Όταν οι μετρήσεις σκληρότητας γίνονται με την εφαρμογή πολύ μικρών φορτίων, της τάξης των μερικών δεκάδων γραμμαρίων (5 - 1000 g), τότε αυτές καλούνται μικροσκληρομετρήσεις. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι μέτρησης μικροσκληρότητας είναι κατά Vickers (HV) και κατά Knoop (HK). Η μικροσκληρομέτρηση επιτρέπει τη μελέτη της σκληρότητας σε μια πολύ μικρή περιοχή του υλικού. Επιτρέπει για παράδειγμα, τον προσδιορισμό της σκληρότητας ενός κόκκου, διαμέτρου μερικών δεκάδων μικρομέτρων ή μιας πολύ λεπτής επιφάνειας.

Η διαδικασία της μέτρησης είναι παρεμφερής με αυτήν της μέτρησης σκληρότητας με τη διαφορά ότι το μέγεθος του διεισδυτή είναι πολύ μικρότερο και η ανίχνευση του αποτυπώματος του διεισδυτή γίνεται με όργανα μέτρησης υψηλής ανάλυσης (οπτικό μικροσκόπιο) [81]. Ο διεισδυτής που χρησιμοποιείται έχει σχήμα πυραμίδας με τετράγωνη βάση και είναι πολύ μικρός.

Η μέτρηση μικροσκληρότητας κατά Vickers είναι πιο διαδεδομένη και χρησιμοποιείται συχνότερα. Είναι χρήσιμη στα μέταλλα για μια σειρά εφαρμογών για τις οποίες η μέτρηση σκληρότητας δεν ενδείκνυται, όπως για μετρήσεις σε πολύ λεπτά φύλλα μετάλλου, για τη μέτρηση του βάθους βαφής ενός μετάλλου και τη μέτρηση της σκληρότητας κατά μήκος της τομής ενός δείγματος για να μετρηθούν οι διακυμάνσεις της σκληρότητας του υλικού.

Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, ο προσδιορισμός της μικροσκληρότητας των αποθεμάτων, απλών και σύνθετων, πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Vickers, σε μικροσκληρόμετρο της εταιρείας 'Struers', μοντέλο Duramin - 10 / 20 (Σχήμα 3.27), με τα αντίστοιχα πλακίδια αναφοράς και διεισδυτή κατάλληλο για μετρήσεις μικροσκληρότητας κατά Vickers. Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από ένα μικροσκληρόμετρο προσαρτημένο σε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο και ολόκληρη η διάταξη συνδέεται με Η/Υ στην οθόνη του οποίου γίνεται η επεξεργασία του αποτυπώματος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλογραφίας του Κέντρου Δοκιμών Ερευνών & Προτύπων (Κ.Δ.Ε.Π.) της Δ.Ε.Η. Α.Ε. και η δοκιμή μικροσκληρότητας είναι πιστοποιημένη από τον Ε.ΣΥ.Δ.



Σχήμα 3.27 (α): Μικροσκληρόμετρο ‘Struers’, μοντέλο Duramin - 10 / 20 του Εργαστηρίου Μεταλλογραφίας του Κ.Δ.Ε.Π.

Σχήμα 3.27 (β): Στιγμιότυπο κατά τη διάρκεια μετρήσεων μικροσκληρότητας στο δοκίμιο κρούσης DK Brass.

Τα μετρούμενα δοκίμια έπρεπε να έχουν εξαιρετικά λείες επιφάνειες και για το σκοπό αυτό υποβλήθηκαν σε κατάλληλη μεταλλογραφική προετοιμασία (λείανση και στίλβωση). Επίσης, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε τα δοκίμια να είναι επίπεδα και οι επιφάνειές τους να είναι παράλληλες.

Ο προσδιορισμός της περιοχής μικροσκληρομέτρησης καθώς επίσης και η μέτρηση των διαγώνιων του αποτυπώματος του διεισδυτή έγινε με τη βοήθεια μικροσκοπίου υψηλής ευκρίνειας. Επιπλέον, ο προσδιορισμός του βάθους εισαγωγής του διεισδυτή διευκολύνθηκε από το οπτικό μικροσκόπιο υψηλής ευκρίνειας του μικροσκληρομέτρου Duramin - 10 / 20, το οποίο διαθέτει ειδική διάταξη για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης δύναμης που έπρεπε να εφαρμοστεί, προκειμένου να παραχθεί αποτύπωμα με σαφές περίγραμμα.

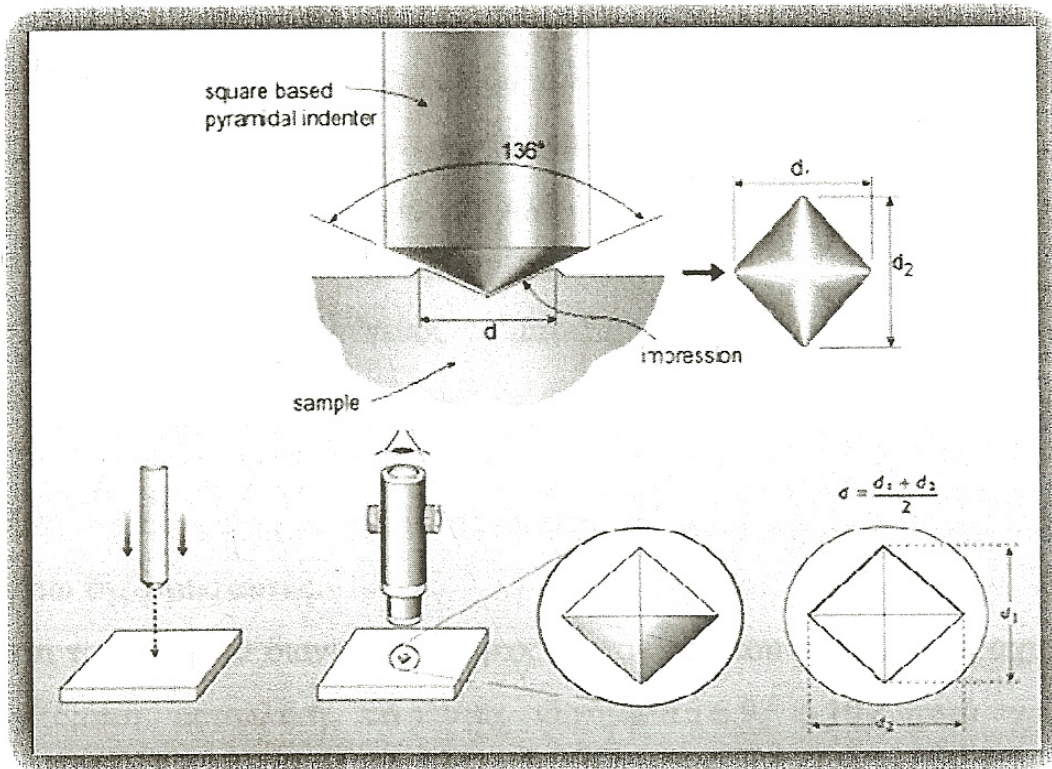
Η σκληρότητα κατά Vickers (Vickers Diamond Pyramid Hardness) προκύπτει από το λόγο του εφαρμοζόμενου φορτίου προς την επιφάνεια του αποτυπώματος του διεισδυτή και δίνεται από τον τύπο του Πίνακα 3.7.

Σε όλες τις μετρήσεις μικροσκληρότητας που πραγματοποιήθηκαν το επιβαλλόμενο φορτίο (F) και ο χρόνος επιβολής του ($t_{int.}$) διατηρήθηκαν σταθερά, ώστε να είναι μεταξύ τους συγκρίσιμα τα αποτελέσματα όλων των δοκιμίων και επομένως να μπορεί να μετρηθεί η μικροσκληρότητά τους με ακρίβεια. Προκειμένου μάλιστα να προσδιοριστεί η μικροσκληρότητα των αποθεμάτων των δοκιμίων με τη μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία, από κάθε απόθεμα - δοκίμιο ελήφθησαν αρκετές μετρήσεις (12 ή και περισσότερες μετρήσεις από κάθε δοκίμιο), για να υπολογιστεί τελικά η μέση τιμή HV.

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
A	Γωνία μεταξύ των απέναντι επιφανειών στην κορυφή της τετραγωνικής πυραμίδας 136° .
F	Δύναμη φόρτισης σε N.
d	Αριθμητικός μέσος όρος των δύο διαγωνίων d_1 και d_2 σε mm (Σχήμα 3.28).
HV	<p style="text-align: center;">Φορτίο Δοκιμής</p> <p>Σκληρότητα κατά Vickers = Σταθερά \times $\frac{\text{Φορτίο Δοκιμής}}{\text{Εμβαδόν Επιφανείας Αποτυπώματος}}$</p> $= 0,102 \times \frac{2F \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d^2}$
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Σταθερά = $1 / g_n = 1 / 9,80665 \approx 0,102$	

Πίνακας 3.7: Σύμβολα και τύπος υπολογισμού μέτρησης μικροσκληρότητας.

Να σημειωθεί ότι η σταθερά 0,102 προκύπτει από τη διαίρεση του $1 / 9,80665$, όπου 9,80665 είναι ο παράγοντας μετατροπής από kgf σε N.



Σχήμα 3.28: Προσδιορισμός της μικροσκληρότητας των αποθεμάτων με τη μέθοδο Vickers.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

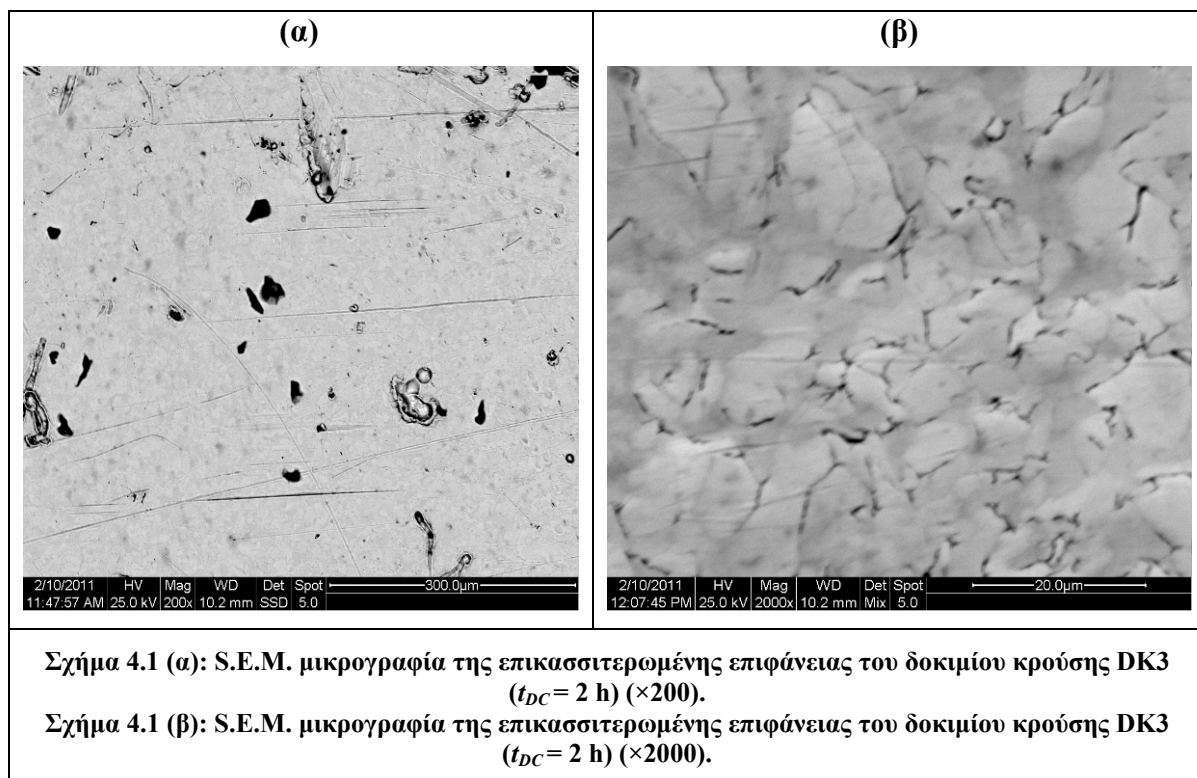
4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων που αφορούν στην παρασκευή και την μελέτη τόσο των απλών ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων κασσιτέρου όσο και των σύνθετων επικαλύψεων Sn/TiO₂ σε ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης με την επιβολή συνεχούς ρεύματος. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η δομή και η μορφολογία της επιφάνειας των επικαλύψεων με χρήση των μικρογραφιών τους τόσο από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (S.E.M.) όσο και από το οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο. Επιπλέον, με τη βοήθεια της φασματοσκοπίας διερχόμενης ενέργειας (EDAX), σε επιλεγμένα δοκίμια, πραγματοποιήθηκε σημειακή ανάλυση για την επιτόπια ταυτοποίηση των στοιχείων καθώς και χαρτογράφηση στοιχείων για την εκτίμηση του ποσοστού ενσωμάτωσης των σωματιδίων στη μήτρα κασσιτέρου. Τέλος, στα πλαίσια της μελέτης των μηχανικών ιδιοτήτων των επικαλύψεων παρουσιάζονται οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα από τις μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού, κρούσης και μικροσκληρομέτρησης.

4.2 Δομή & Μορφολογία της Επιφάνειας των Επικαλύψεων

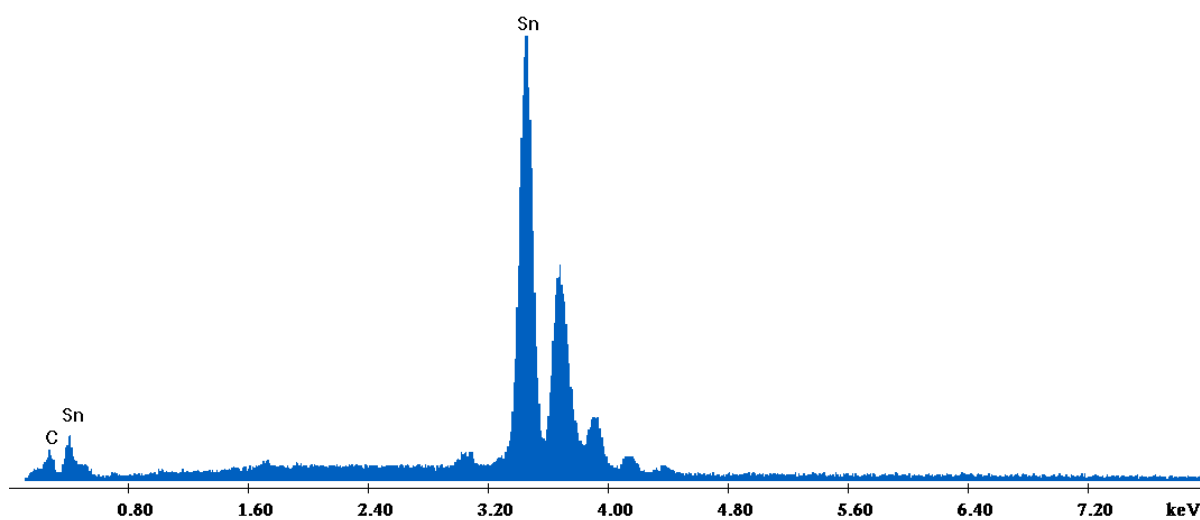
Η μελέτη της μορφολογίας της επιφάνειας των επικαλύψεων πραγματοποιήθηκε με την τεχνική της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (S.E.M.) και με οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο [82]. Ελήφθησαν μικρογραφίες της επιφάνειας των δοκιμίων καθώς και κάθετων τομών τους. Αρχικά, εξετάστηκε από ένα δοκίμιο κρούσης με απλή επικάλυψη κασσιτέρου για τους τρεις διαφορετικούς χρόνους απόθεσης, $t_{DC} = 50$ mn, 2 h, 3 h και πιο συγκεκριμένα τα δοκίμια με κωδικούς DK3, DK4 και DK6. Μετέπειτα, εξετάστηκε και ένα δοκίμιο εφελκυσμού με απλή επικάλυψη κασσιτέρου, με κωδικό DE6 και χρόνο απόθεσης, $t_{DC} = 3$ h.

Επίσης, έγινε στοιχειακή ανάλυση EDAX των προαναφερθέντων δοκιμίων κρούσης και εφελκυσμού από την οποία διαπιστώθηκε η υψηλή περιεκτικότητα (Sn: 98,38 % κ.β. για $t_{DC} = 50$ mn, Sn: 96,29 % κ.β. για $t_{DC} = 2$ h, Sn: 97,97 % κ.β. για $t_{DC} = 3$ h) σε κασσίτερο της επιφάνειας των δοκιμίων σε όλες τις μετρήσεις που έγιναν [82], όπως πιστοποιείται και από τα αντίστοιχα διαγράμματα στα Σχήματα 4.2, 4.4, 4.7. Ελήφθησαν αναλύσεις από διάφορα σημεία της επιφάνειας των δοκιμίων (spot analyses).

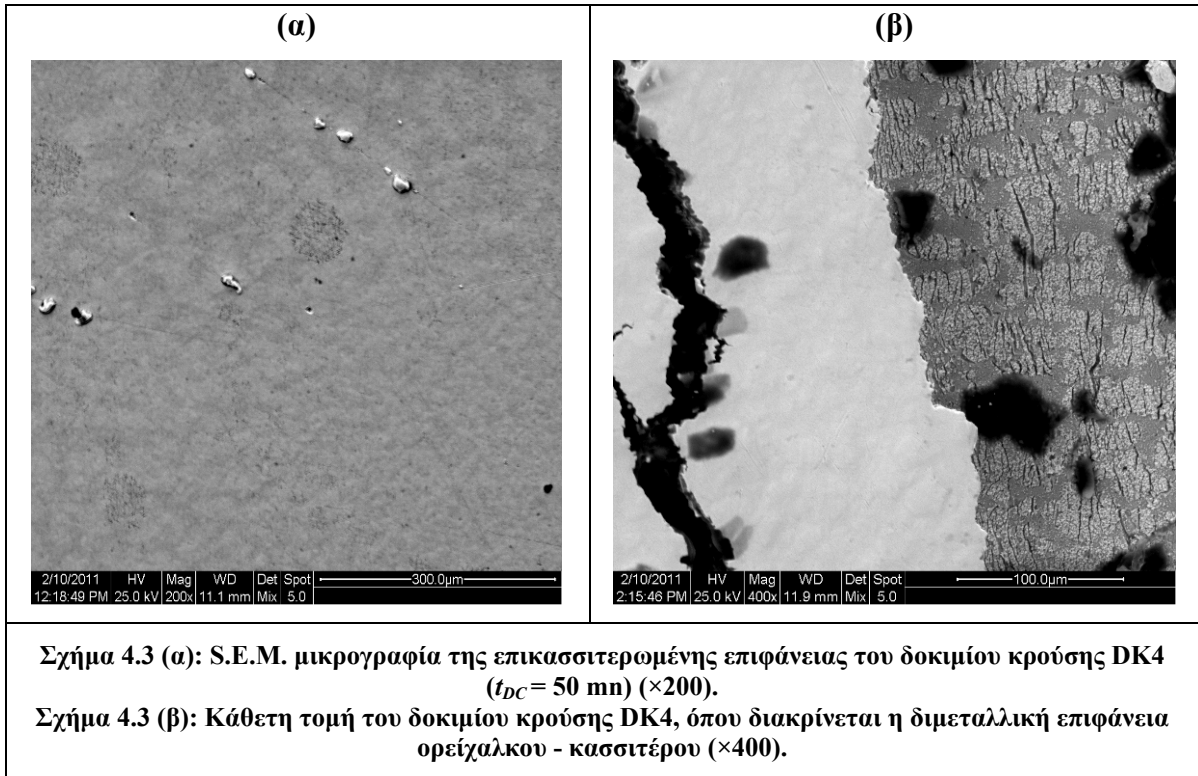


C:\EDS\USRI\Kolliatalex_10022011\DK3 x 200_map.spc

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

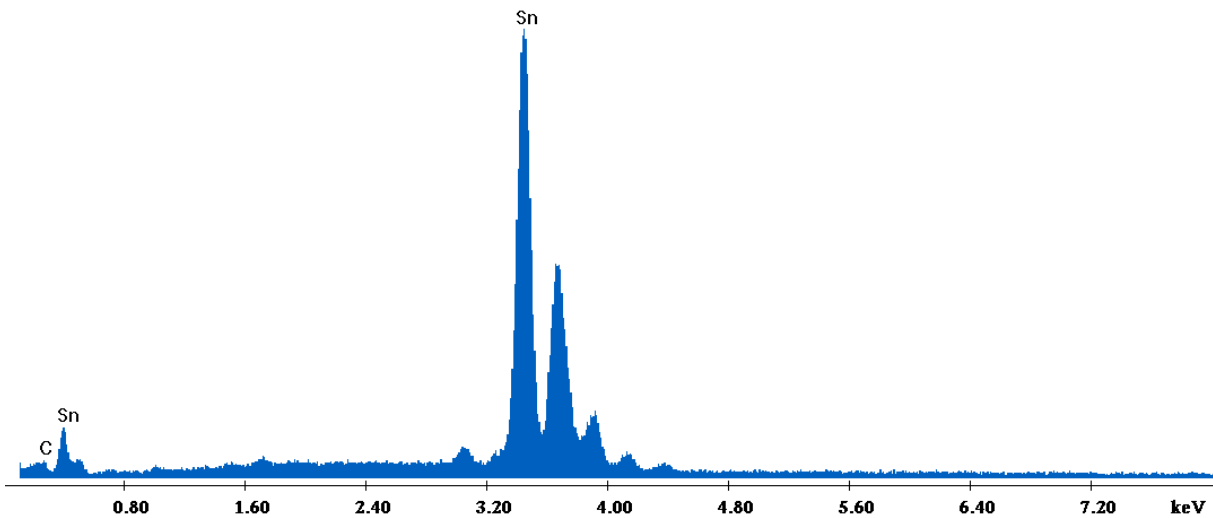


Σχήμα 4.2: Διάγραμμα EDAX της επικασσιτερωμένης επιφάνειας του δοκιμίου κρούσης DK3 ($t_{DC} = 2$ h).



C:\EDS\USRI\Kolliatalex_10022011\DK4 x 200_map.spc

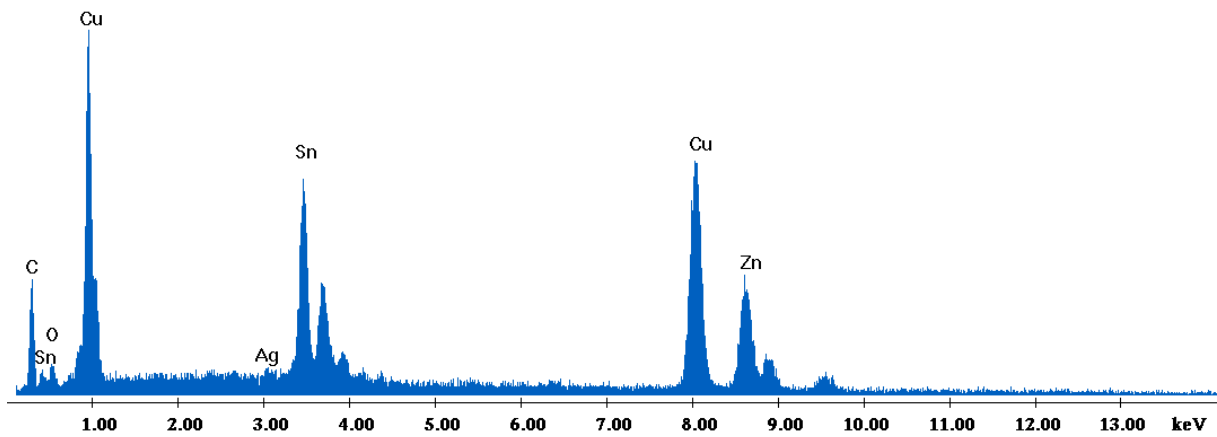
Label A: Chlorite (Nrm.%= 38.86, 20.96, 34.83, 1.14, 3.84, 0.28)



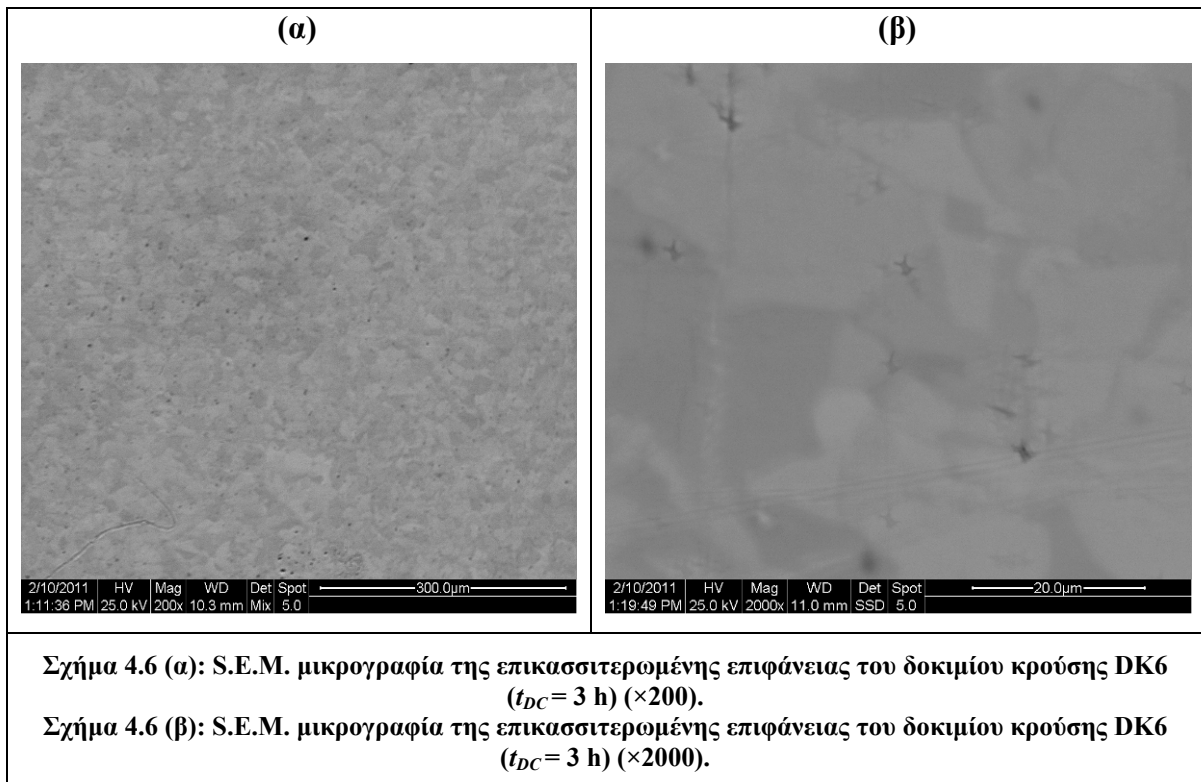
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα EDAX της επικασσιτερωμένης επιφάνειας του δοκιμίου κρούσης DK4 ($t_{DC} = 50$ mn).

C:\EDS\USR\Kollia\alex_10022011\DK4 x 200_spot_Cu.spc

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

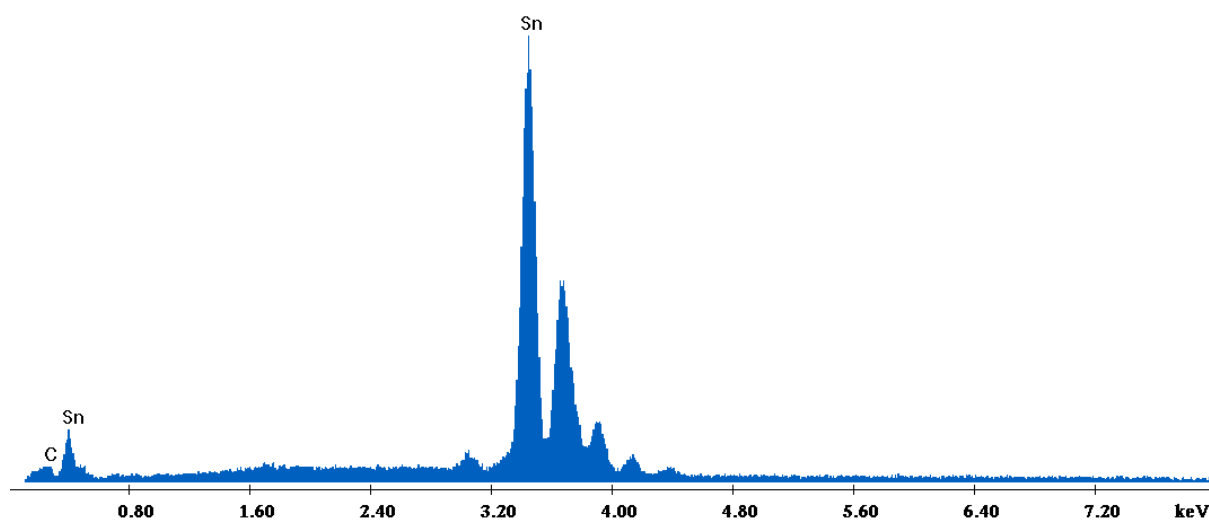


Σχήμα 4.5: Διάγραμμα EDAX της κάθετης τομής του δοκιμίου κρούσης DK4, όπου διακρίνονται τα στοιχεία της διμεταλλικής επιφάνειας, ορείχαλκος (Cu-Zn) και Sn.

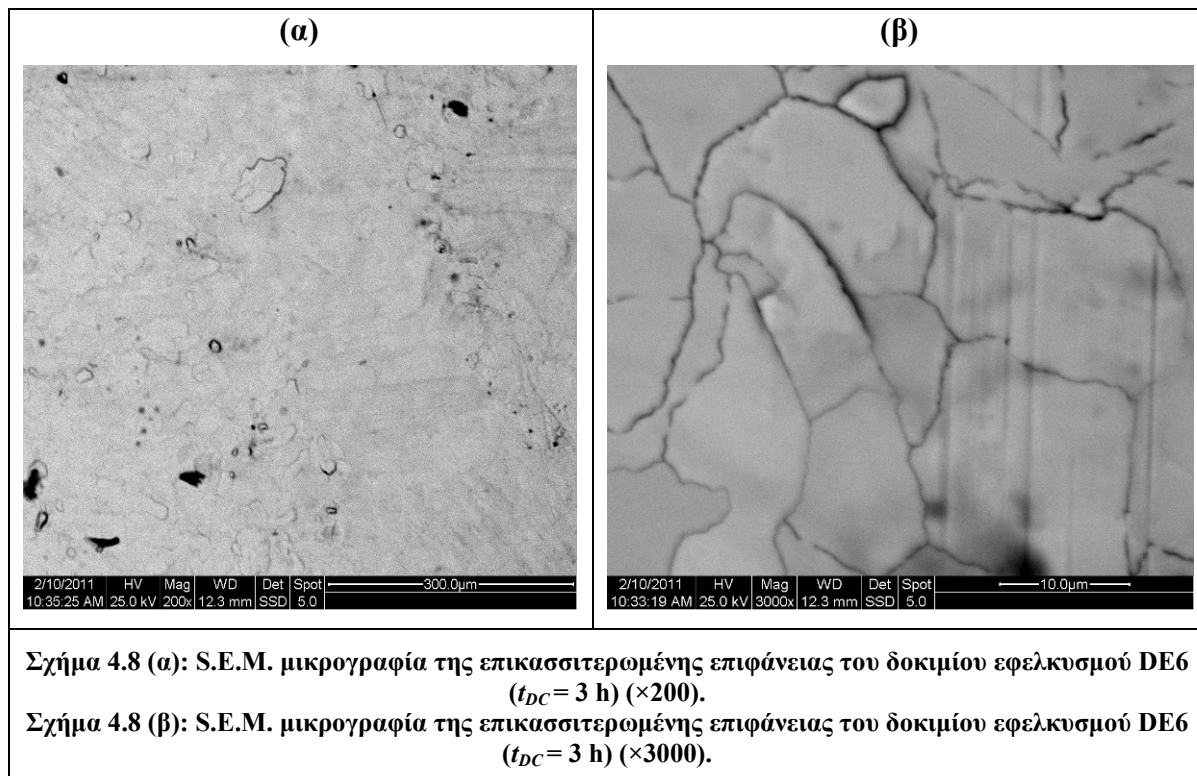


C:\EDS\USR\Kollia\alex_10022011\DK6 x 200_map.spc

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

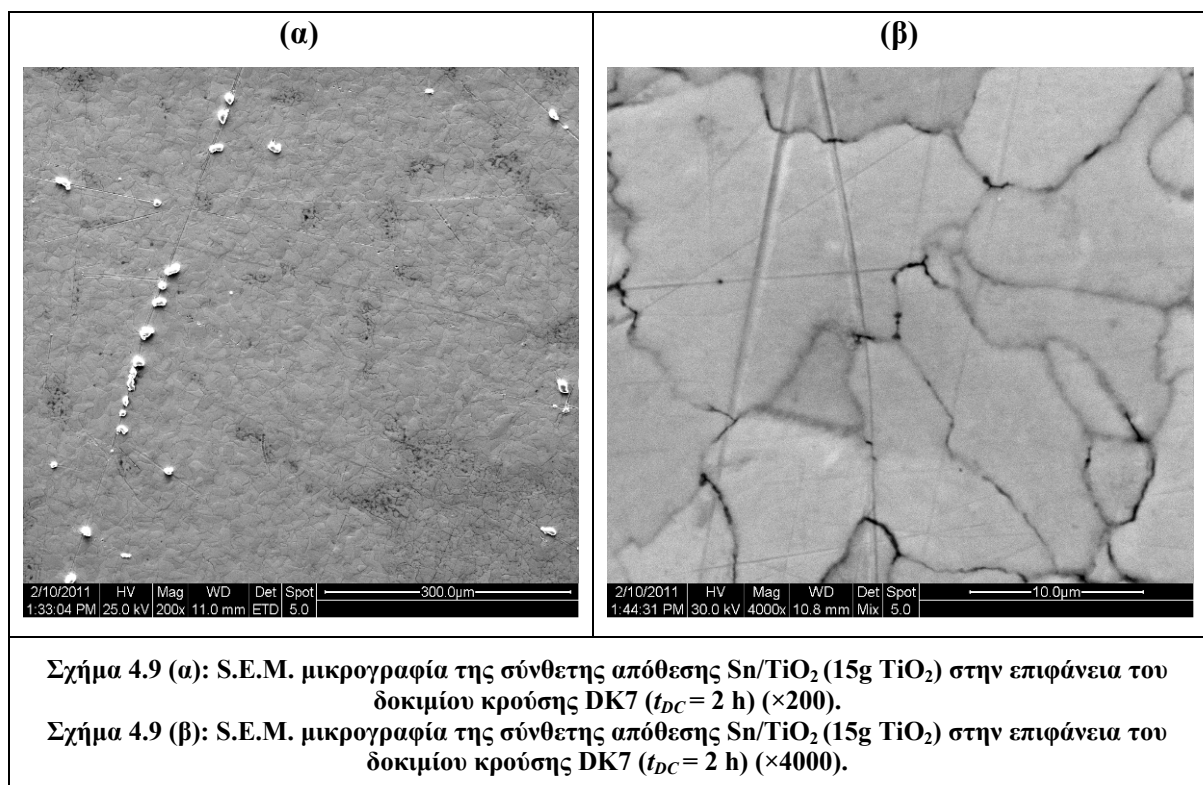


Σχήμα 4.7: Διάγραμμα EDAX της επικασιτερωμένης επιφάνειας του δοκιμίου κρούσης DK6 ($t_{DC} = 3$ h).



Από τις S.E.M. μικρογραφίες (Σχήματα 4.1(α), 4.1(β), 4.3(α), 4.6(α), 4.6(β), 4.8(α) και 4.8(β)) φαίνεται η μορφολογία της επιφάνειας του κασσιτέρου στα δοκίμια κρούσης και εφελκυσμού που εξετάστηκαν. Διαπιστώνεται η ομοιόμορφη και συμπαγής απόθεση του κασσιτέρου επί του ορειχάλκινου υποστρώματος. Επιπρόσθετα, η μικρογραφία του Σχήματος 4.3(β) είναι χαρακτηριστική, μιας και η λήψη της στην κάθετη τομή του δοκιμίου κρούσης DK4, επιτρέπει τη διάκριση της διμεταλλικής επιφάνειας ορειχάλκου - κασσιτέρου, σε μεγέθυνση ($\times 400$). Αντίστοιχα, στο Σχήμα 4.5, από το διάγραμμα EDAX της κάθετης τομής του δοκιμίου κρούσης DK4, επίσης διακρίνονται τα στοιχεία της διμεταλλικής επιφάνειας, ορείχαλκου - κασσιτέρου.

Όσον αφορά στις σύνθετες αποθέσεις Sn/TiO₂ στα δοκίμια κρούσης και εφελκυσμού DK7, DK10, DE9 και DE10, φαίνεται και από τα αντίστοιχά τους διαγράμματα EDAX (Σχήματα 4.10, 4.12, 4.14 και 4.16 αντίστοιχα), να μην πιστοποιείται η ύπαρξη TiO₂ παρά μόνο του Sn. Αυτό πιθανότατα να οφείλεται στη χαμηλή συγκέντρωση σωματιδίων TiO₂ που προστέθηκαν στο ηλεκτρολυτικό λουτρό επικασσιτέρωσης.



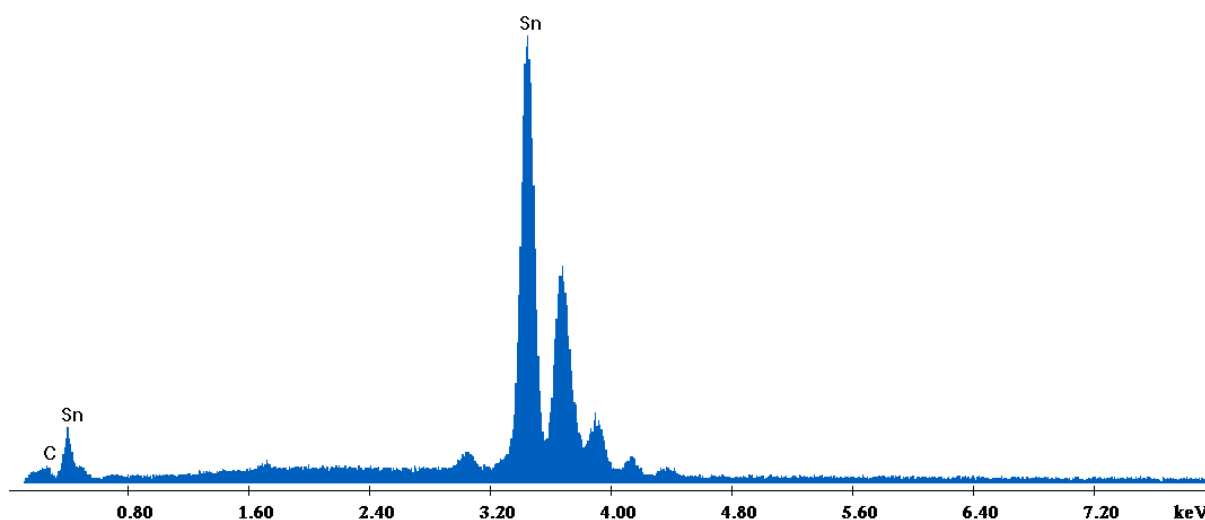
Πάντως, για διαφορετικά συστήματα ισχύουν διαφορετικές σχέσεις μεταξύ συγκέντρωσης σωματιδίων και ποσοστού ενσωμάτωσής τους, δηλαδή σε άλλα συστήματα παρατηρείται γραμμική σχέση, αλλού παρατηρείται η ύπαρξη μέγιστου και αλλού γραμμική σχέση μέχρι ενός σημείου κορεσμού. Παρόλα αυτά, ο πιο σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό του ποσοστού ενσωμάτωσης των σωματιδίων είναι τα χαρακτηριστικά των ίδιων των σωματιδίων, δηλαδή το είδος

τους, η συγκέντρωσή τους στο ηλεκτρολυτικό λουτρό, το μέγεθός τους, το σχήμα τους και η επιφανειακή τους φόρτιση [83, 84].

Η δομή των σωματιδίων και αν αυτή επιτρέπει τη θετική, αρνητική ή καθόλου φόρτιση των σωματιδίων φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στον καθορισμό του ποσοστού ενσωμάτωσής τους όπως διαπιστώθηκε και σε μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε συστήματα συναπόθεσης αλούμινας σε επικάλυψη χαλκού [85]. Όμως και η επιφανειακή φόρτιση των σωματιδίων επηρεάζει αρκετά τα φαινόμενα συναπόθεσης. Πιο συγκεκριμένα, τα σωματίδια που εμφανίζουν επιφανειακή φόρτιση διατηρούνται σε αιώρηση λόγω της μεταξύ τους άπωσης που δεν ευνοεί τη συσσωμάτωση. Επίσης, η θετική επιφανειακή φόρτιση αυξάνει τη συναπόθεση αφού τα θετικά φορτισμένα σωματίδια έλκονται από την κάθοδο και αποτίθενται σε μεγάλο βαθμό.

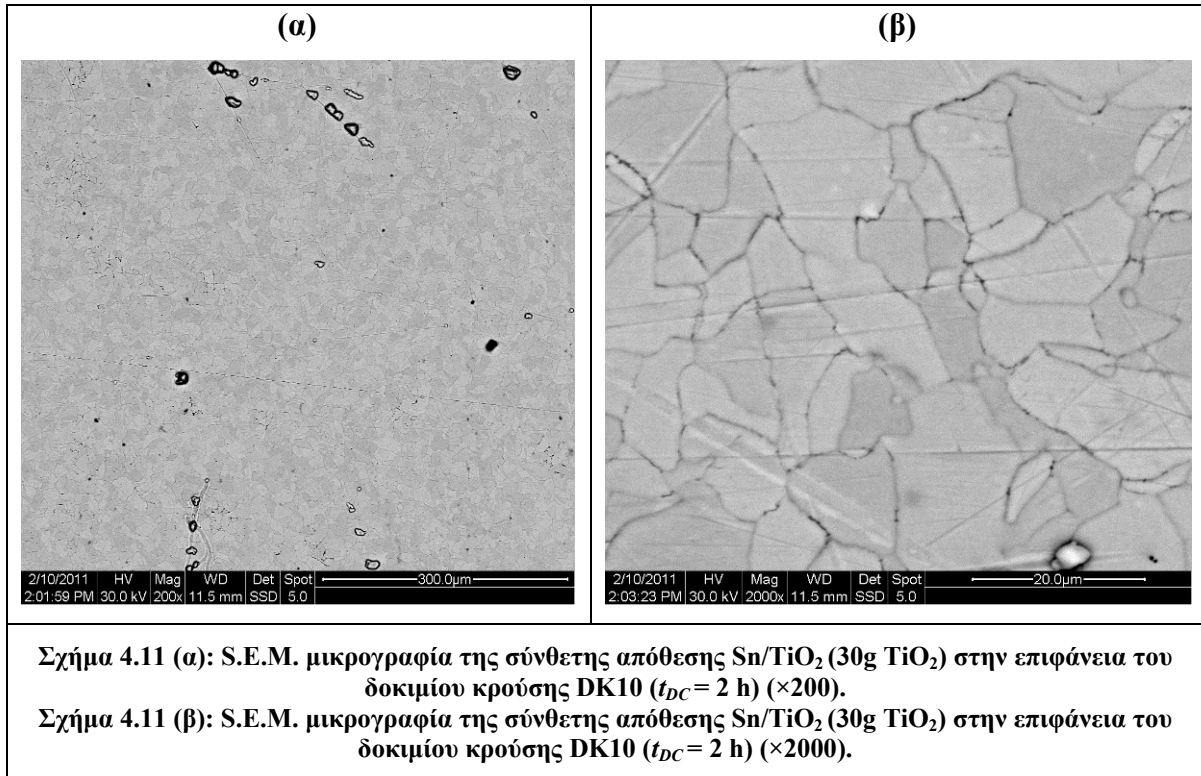
C:\EDS\USRI\Kollialalex_10022011\DK7 x 200_map.spc

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



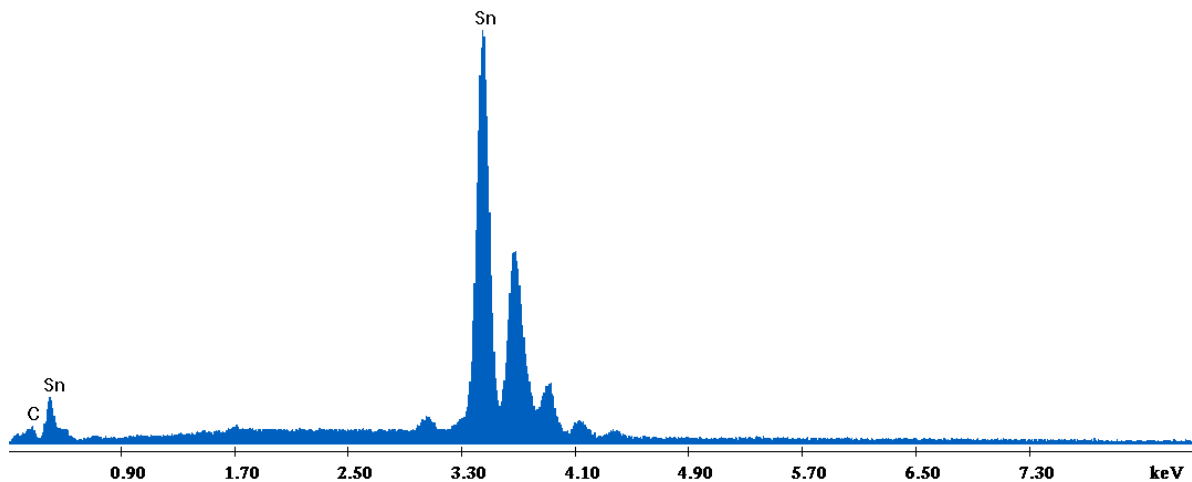
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα EDAX στην επιφάνεια σύνθετης απόθεσης Sn/TiO₂ (15g TiO₂) του δοκιμίου κρούσης DK7 ($t_{DC} = 2$ h).

Επιπλέον, για τις σύνθετες αποθέσεις Sn/TiO₂ στα δοκίμια κρούσης και εφελκυσμού DK7, DK10, DE9 και DE10, διαπιστώνεται και από τις S.E.M. μικρογραφίες (Σχήματα 4.9(α), 4.9(β), 4.11(α), 4.11(β), 4.13(α), 4.13(β), 4.15(α) και 4.15(β) αντίστοιχα), η αρκετά ομοιόμορφη και συμπαγής απόθεση του κασσιτέρου επί του ορειχάλκινου υποστρώματος.

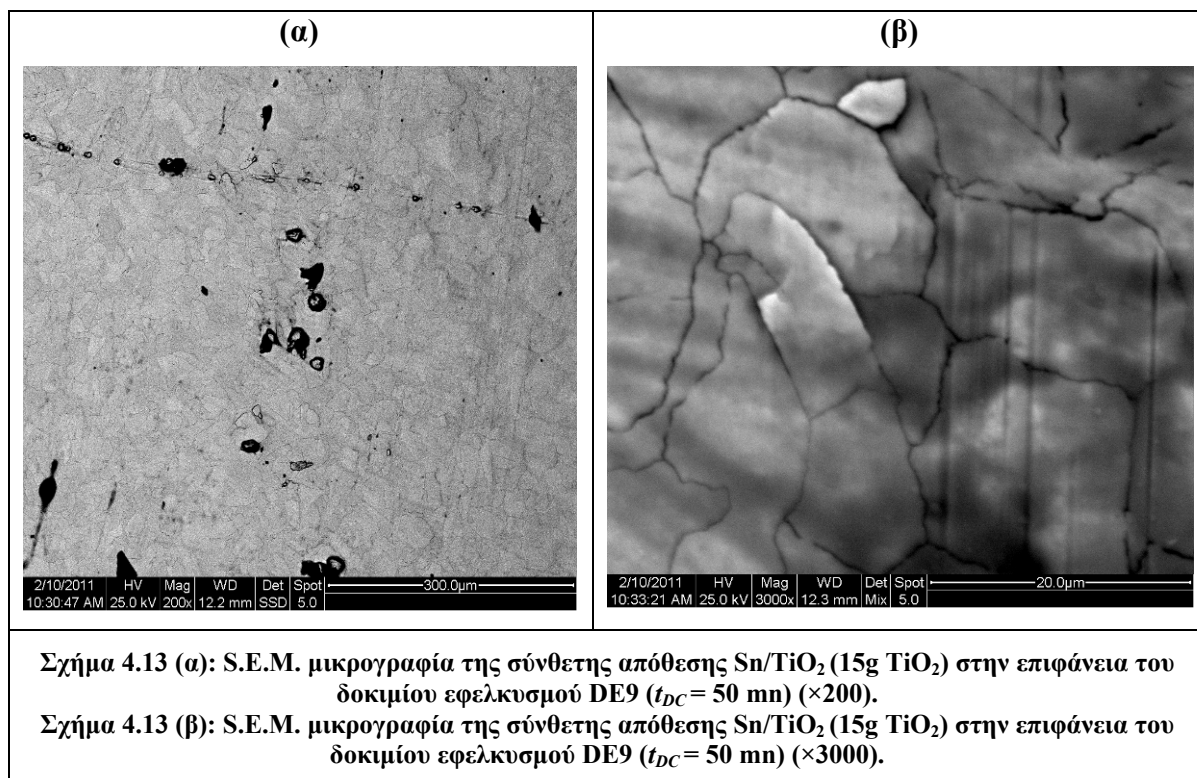


C:\EDS\USR\Kolliatalex_10022011\DK10 x 200_map.spc

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

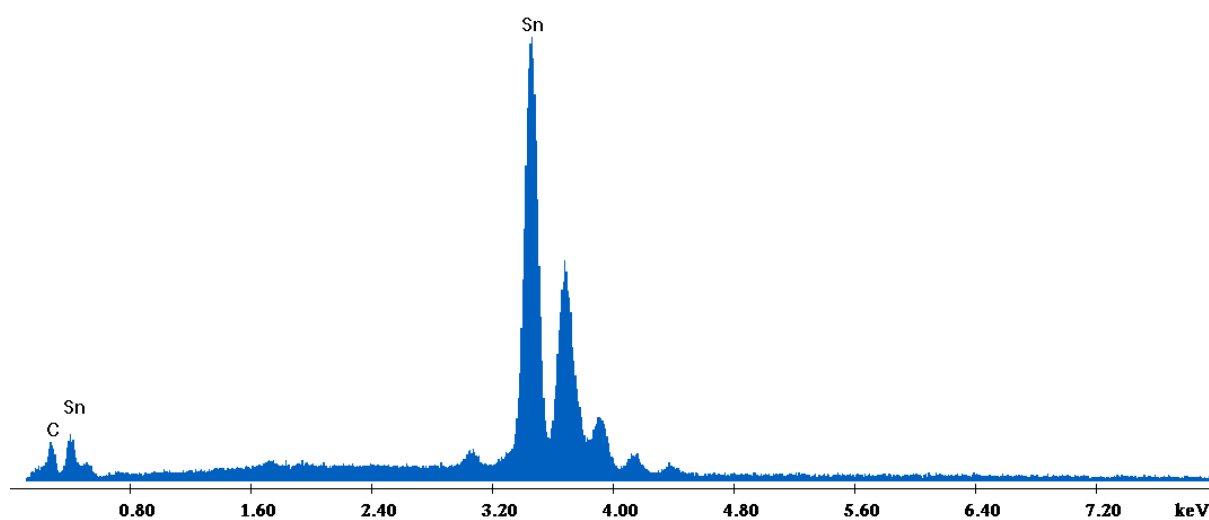


Σχήμα 4.12: Διάγραμμα EDAX στην επιφάνεια σύνθετης απόθεσης Sn/TiO₂ (30g TiO₂) του δοκιμίου κρούσης DK10 ($t_{DC} = 2$ h).

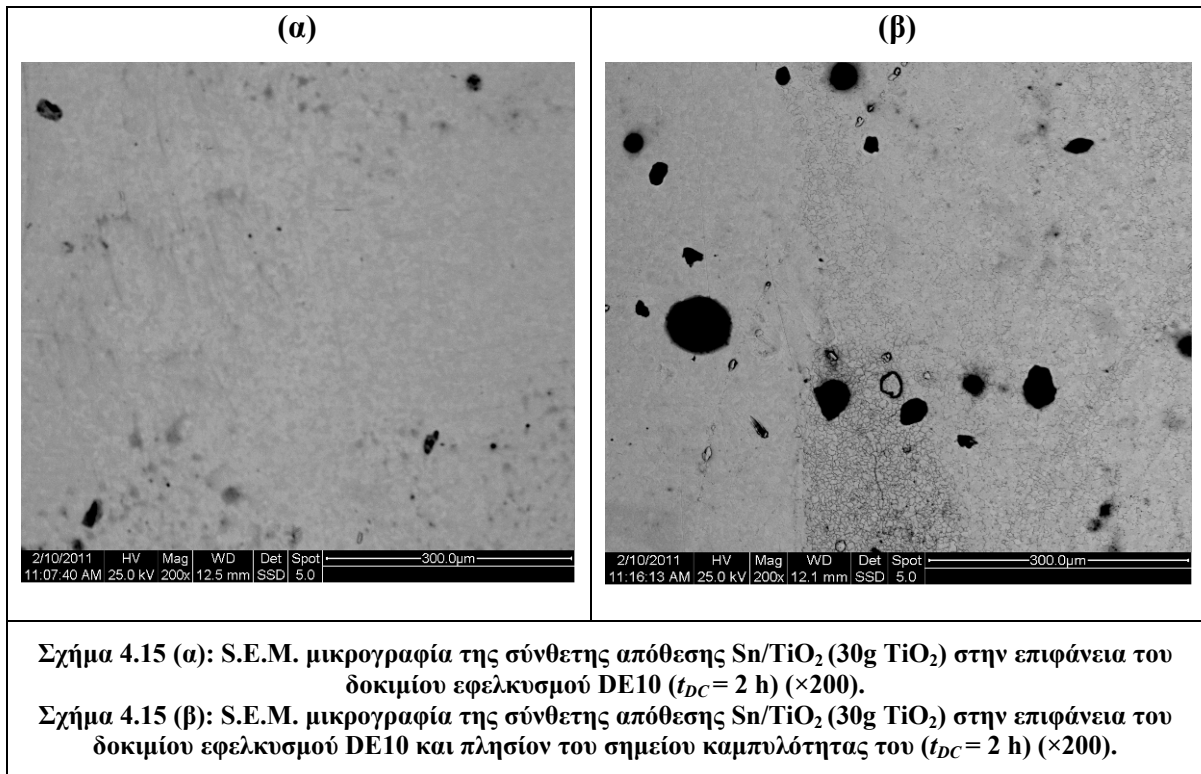


C:\EDS\USRI\Kolliatalex_10022011\DE9_x400_center_map_001.spc

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

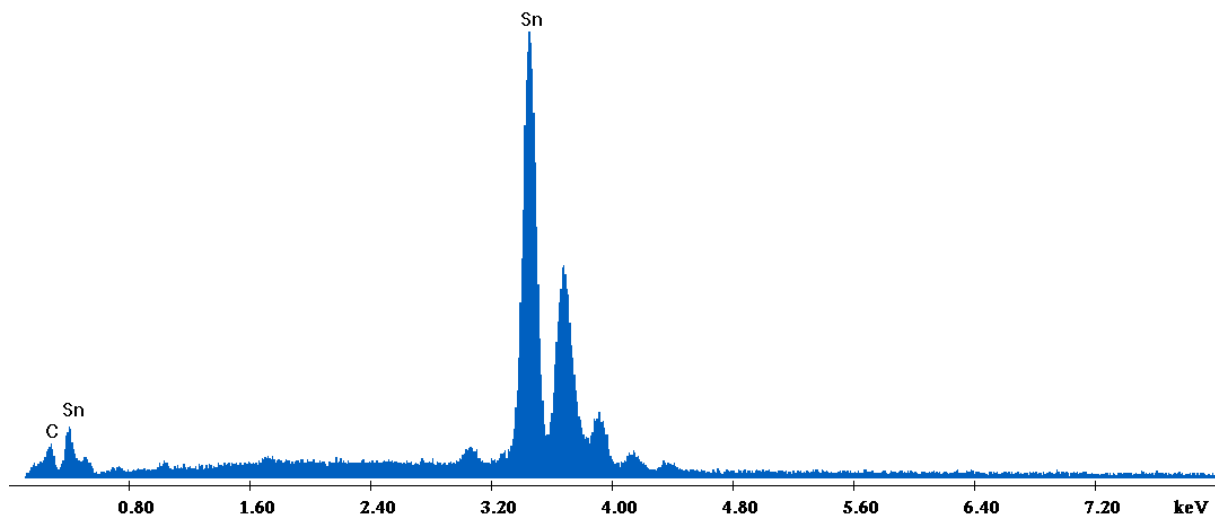


Σχήμα 4.14: Διάγραμμα EDAX στην επιφάνεια σύνθετης απόθεσης Sn/TiO₂ (15g TiO₂) του δοκιμίου εφελκυσμού DE9 ($t_{DC} = 50$ mn).



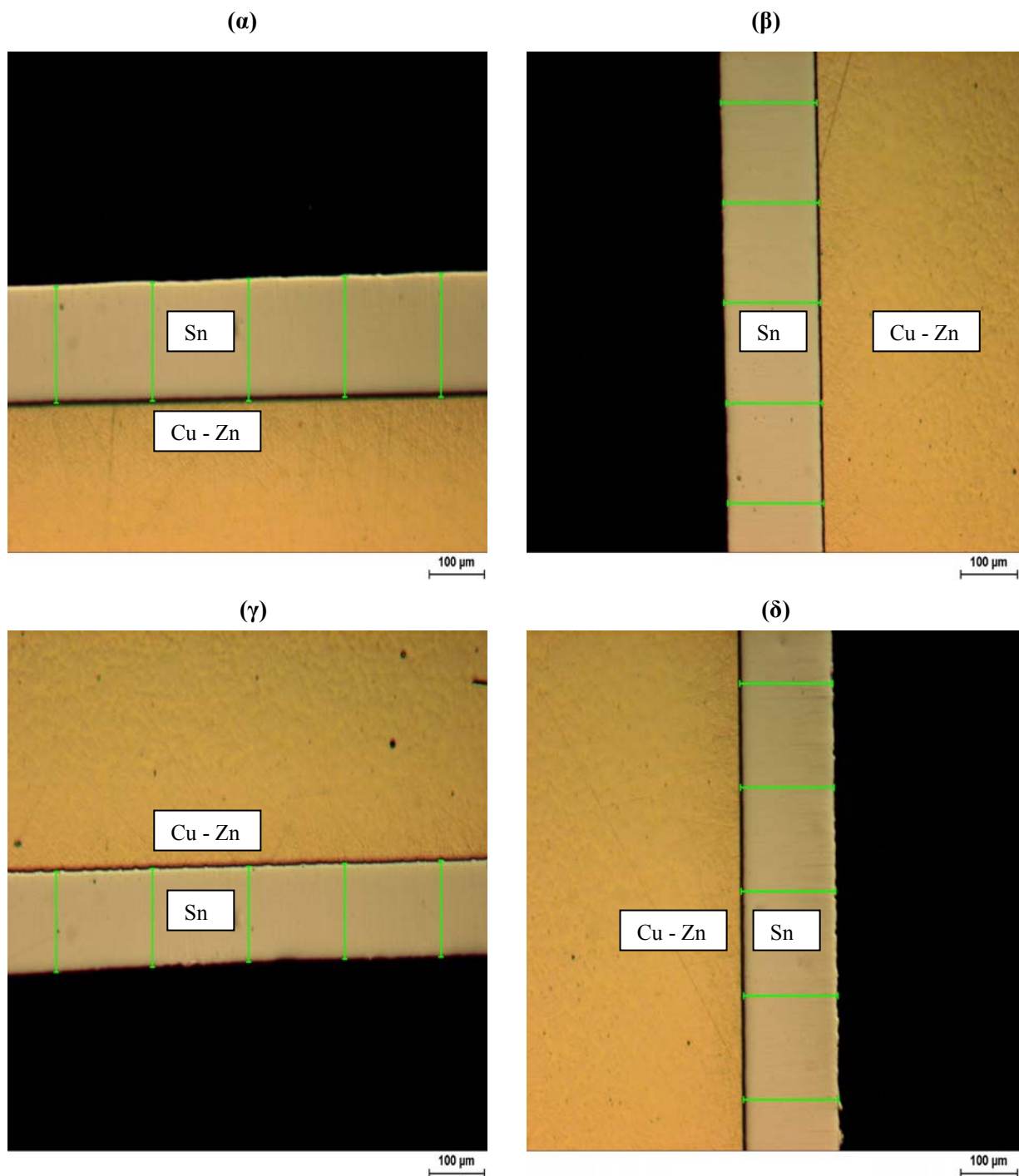
C:\EDS\USR\Kollialalex_10022011\DE10_x200_center_map_001.spc

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

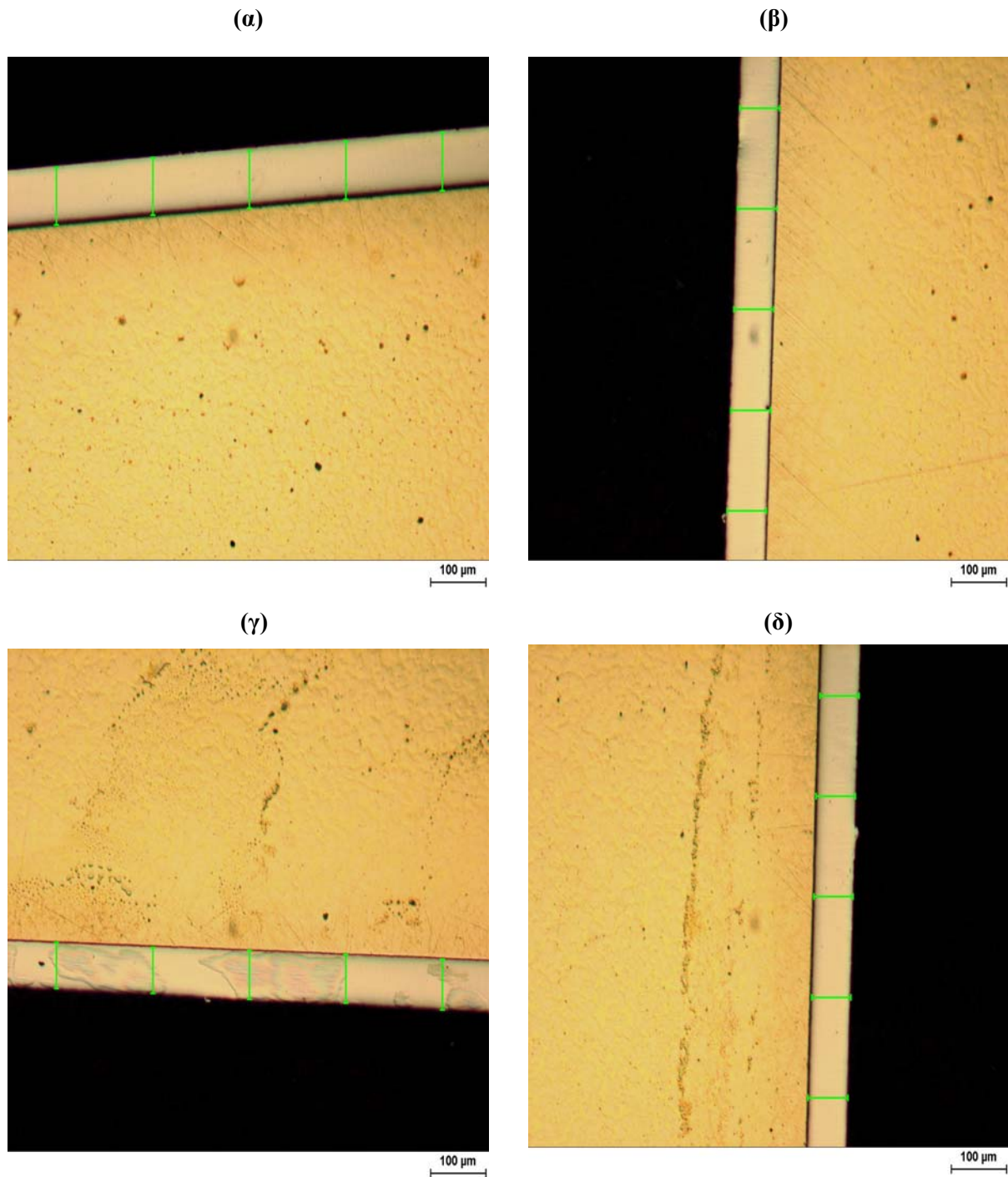


Σχήμα 4.16: Διάγραμμα EDAX στην επιφάνεια σύνθετης απόθεσης Sn/TiO₂ (30g TiO₂) του δοκιμίου εφελκυσμού DE10 ($t_{DC} = 2$ h).

Επιπρόσθετα, και από την οπτική μελέτη των επιφανειών των επικασσιτερωμένων δοκιμίων κρούσης που έγινε μέσω του μεταλλογραφικού μικροσκοπίου, διαπιστώθηκε η πολύ καλή περιμετρικά απόθεση του κασσιτέρου και η ομοιόμορφη γεωμετρικά επικάλυψη των δοκιμίων, όπως διακρίνεται και από τις μικρογραφίες των Σχημάτων 4.17, 4.18 και 4.19. Η λήψη ψηφιακών μικρογραφιών πραγματοποιήθηκε από κάμερα υψηλής ανάλυσης ενσωματωμένη στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο Zeiss Axiotec και με χρήση του λογισμικού a4i της AQUINTO.

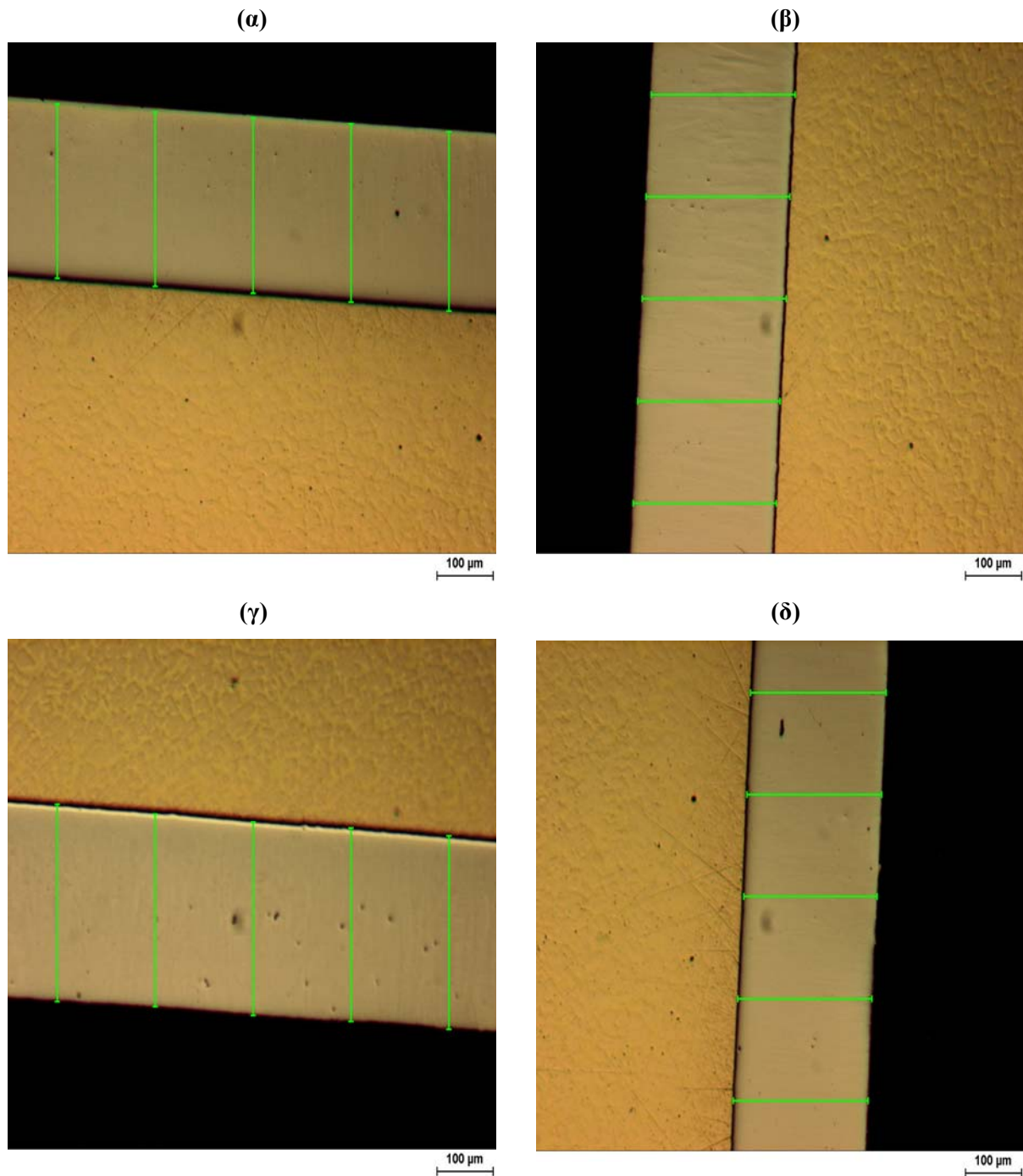


Σχήμα 4.17 (α) - (δ): Μικρογραφίες δοκιμίου κρούσης DK3 ($t_{DC} = 2$ h), όπου φαίνεται η πολύ καλή περιμετρικά απόθεση του κασσιτέρου και η ομοιόμορφη γεωμετρικά επικάλυψη του.



Σχήμα 4.18 (α) - (δ): Μικρογραφίες δοκιμίου κρούσης DK4 ($t_{DC} = 50 \text{ mn}$), όπου φαίνεται η πολύ καλή περιμετρικά απόθεση του κασσιτέρου και η ομοιόμορφη γεωμετρικά επικάλυψη του.

Στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο με χρήση του λογισμικού a4i της AQUINTO έγιναν και μετρήσεις του πάχους επικασσιτέρωσης, για τα δοκίμια με κωδικοποίηση DK1, DK2, DK3, DK4, DK5, DK6, DK7 και DK10. Στις μικρογραφίες των Σχημάτων 4.17, 4.18 και 4.19 είναι εμφανή τα πράσινα ευθύγραμμα τμήματα που χρησιμοποιήθηκαν από το λογισμικό για τη διαδικασία μέτρησης του πάχους επικασσιτέρωσης (h_{Sn}).



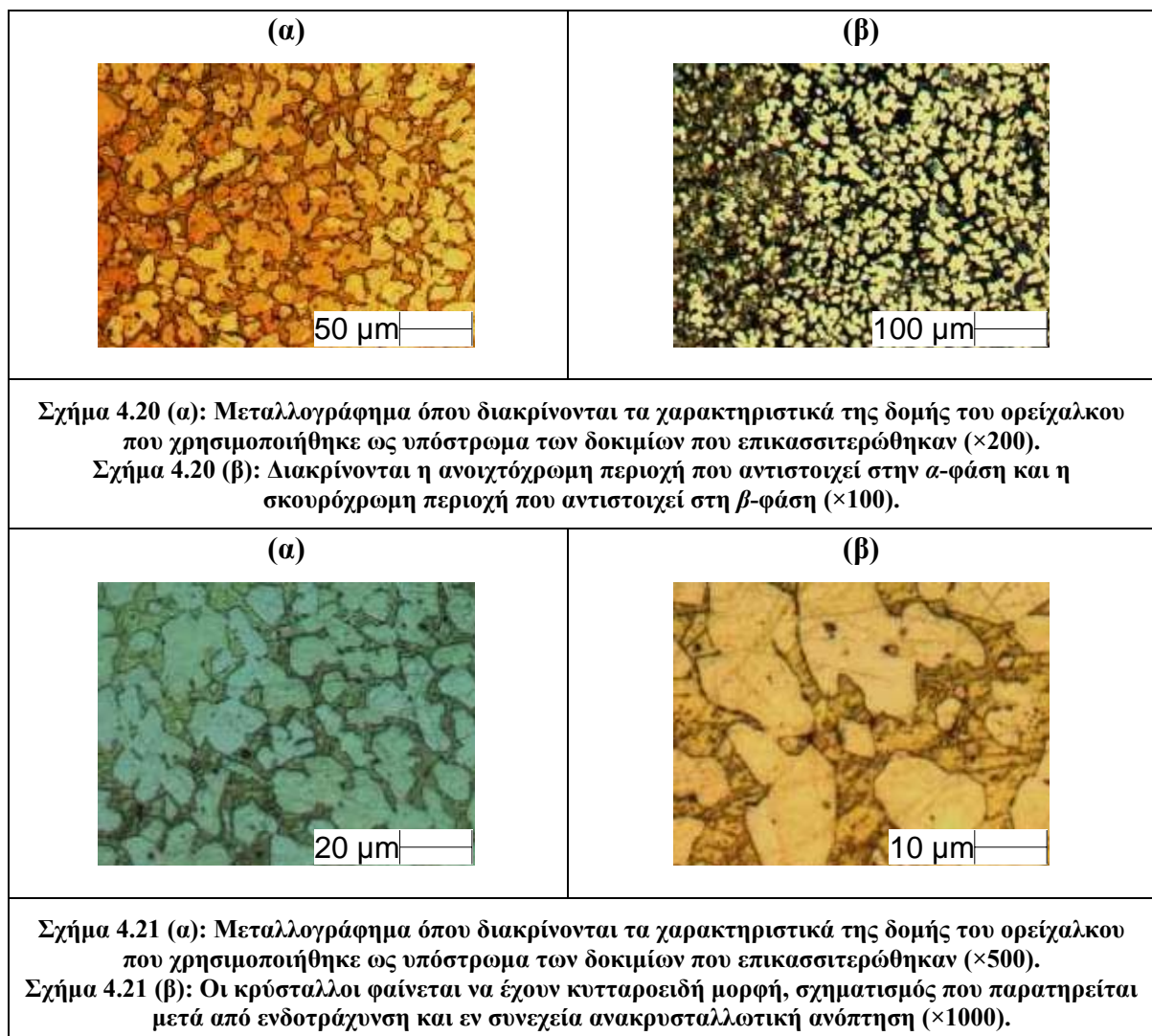
Σχήμα 4.19 (α) - (δ): Μικρογραφίες δοκιμίου κρούσης DK6 ($t_{DC} = 3$ h), όπου φαίνεται η πολύ καλή περιμετρικά απόθεση του κασσιτέρου και η ομοιόμορφη γεωμετρικά επικάλυψη του.

Οι μετρήσεις απέδειξαν πως το πάχος της επικάλυψης μεταβάλλεται ανάλογα με το χρόνο απόθεσης t_{DC} του κασσιτέρου στα δοκίμια. Τα πάχη επικασσιτέρωσης όλων των δοκιμίων κρούσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Υπολογίστηκε, από το 2^ο νόμο του Faraday, ότι για να επιτευχθεί στα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης πάχος επικασσιτέρωσης 50 μm , τιμή που καλύπτει το ελάχιστο προβλεπόμενο τοπικό πάχος της τεχνικής προδιαγραφής της Δ.Ε.Η. ΧΚ 11.04/10.03.88 (ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ/23.10.92) για εξαρτήματα ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, θεωρητικά ο χρόνος απόθεσης του κασσιτέρου είναι 40 mn. Για τη μελέτη όλων των δοκιμίων που επικασσιτερώθηκαν,

επιλέχθηκαν, όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, χρόνοι απόθεσης $t_{DC} = 50$ mn, 2 h και 3 h που έδωσαν αντίστοιχα πάχη επικασσιτερώσεων κατά μέσο όρο $71 \mu\text{m}$, $155 \mu\text{m}$ και $238 \mu\text{m}$, επιβεβαιώνοντας και πειραματικά το νόμο του Faraday.

Κωδικός Δοκιμίου - Επικάλυψη	Χρόνος Απόθεσης (t_{DC})	Πάχος Επικασσιτερώσης (μm)
DK1 - Sn	50 mn.	$70 \pm 1,0$
DK2 - Sn	2 h	$152 \pm 3,0$
DK3 - Sn	2 h	$150 \pm 3,0$
DK4 - Sn	50 mn.	$71 \pm 1,0$
DK5 - Sn	3 h	$236 \pm 4,0$
DK6 - Sn	3 h	$240 \pm 5,0$
DK7 - Sn/TiO ₂ (15g TiO ₂)	2 h	$158 \pm 2,0$
DK10 - Sn/TiO ₂ (30g TiO ₂)	2 h	$161 \pm 1,0$

Πίνακας 4.1: Μετρήσεις του πάχους επικασσιτερώσης των δοκιμίων κρούσης.



Στα μεταλλογραφήματα των Σχημάτων 4.20 (α), (β) και 4.21 (α), (β) εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά της μικροδομής του ορείχαλκου που χρησιμοποιήθηκε ως υπόστρωμα των δοκιμών που επικασσιτερώθηκαν. Πρόκειται για το συχνότερο χρησιμοποιούμενο διφασικό κράμα του MUNTZ, το οποίο περιέχει $Zn \approx 40\%$. Διακρίνονται η ανοιχτόχρωμη περιοχή που αντιστοιχεί στην α -φάση και η σκουρόχρωμη περιοχή που αντιστοιχεί στη β -φάση. Επίσης, οι κρύσταλλοι φαίνεται να έχουν κυτταροειδή μορφή, σχηματισμός που παρατηρείται μετά από ενδοτράχυνση και εν συνεχεία ανακρυσταλλωτική ανόπτηση [86, 87].

4.3 Μηχανικές Ιδιότητες των Επικαλύψεων

4.3.1 Δοκιμή Μονοαξονικού Εφελκυσμού

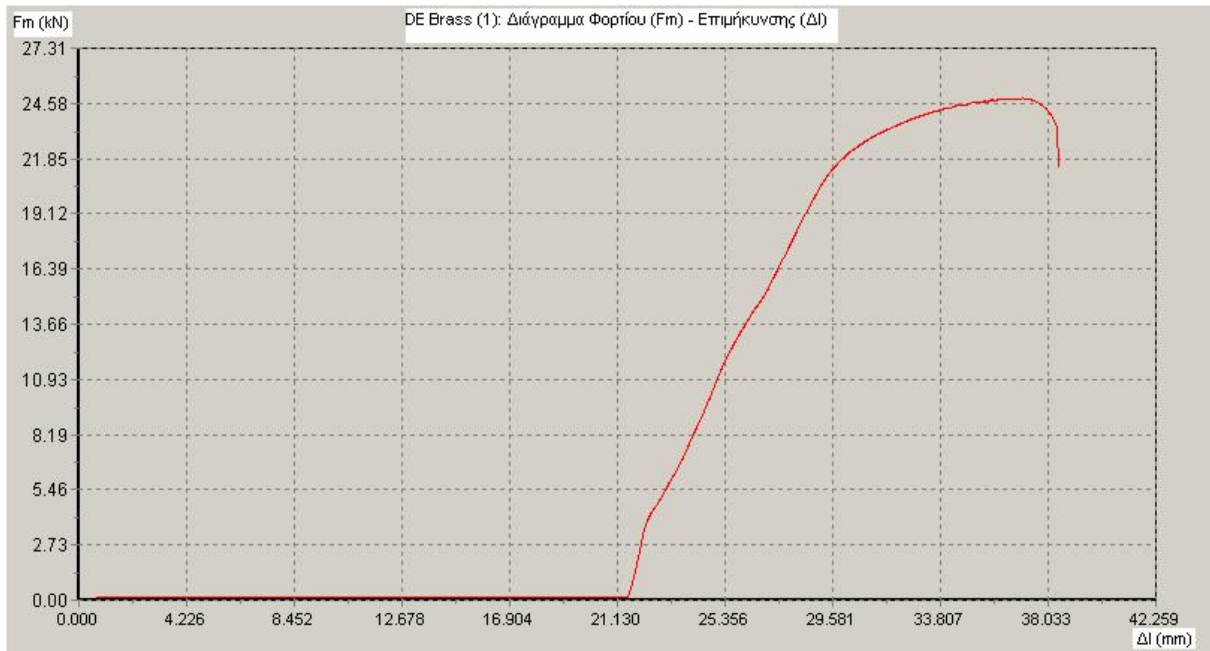
Συνολικά δοκιμάστηκαν και μελετήθηκαν δώδεκα δοκίμια εφελκυσμού. Σε έξι από τα δοκίμια εφελκυσμού έγινε ηλεκτρολυτική απόθεση κασσιτέρου ενώ σε άλλα τέσσερα δοκίμια εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε σύνθετη απόθεση Sn/TiO_2 . Τέλος, σε δύο ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού δεν έγινε ηλεκτρολυτική απόθεση κασσιτέρου, αλλά διατηρήθηκαν ως είχαν για να γίνει συγκριτική αξιολόγησή τους με τα υπόλοιπα δοκίμια.

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στη μηχανή εφελκυσμού WDW-50E, μέγιστου φορτίου 50 kN, της εταιρείας TIME GROUP INC., στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Κονιαμάτων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Στα δοκίμια εφελκυσμού ασκήθηκε προοδευτικά αυξανόμενο αξονικό φορτίο, με ταχύτητα φόρτισης ίση με 20 mm/min, μέχρι τη θραύση τους. Η θερμοκρασία στο εργαστήριο κυμαινόταν μεταξύ 19 - 22 °C.

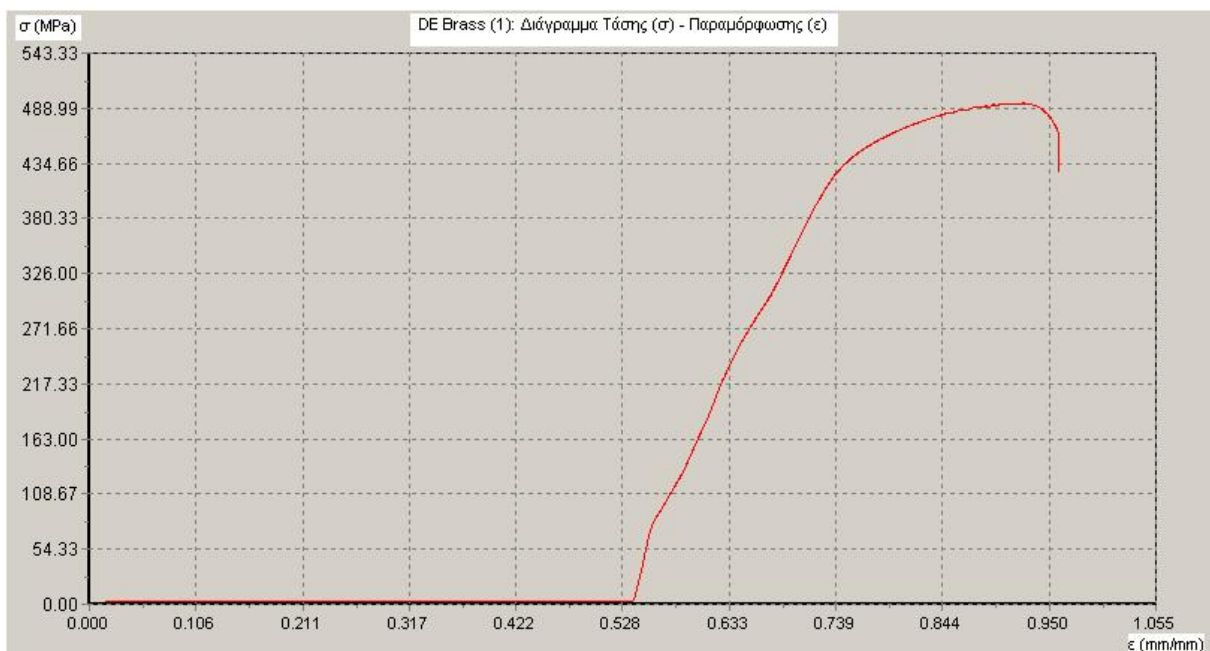
Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, καταγράφονταν ταυτόχρονα, τόσο οι τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου (F_m) όσο και οι αντίστοιχες μεταβολές του μήκους του δοκιμίου (Δl) (επιμήκυνσεις), αφού η μηχανή εφελκυσμού WDW-50E διαθέτει και λογισμικό καταγραφής και αποτύπωσης του διαγράμματος $F_m - \Delta l$. Επιπλέον, καταγράφηκαν για όλα τα δοκίμια και τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ε) από τα οποία προσδιορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες, όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας, το όριο διαρροής, η αντοχή σε εφελκυσμό κ.ά. Το σύνολο των διαγραμμάτων αυτών παρουσιάζεται στις επόμενες σελίδες.

Τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.22, 4.23, 4.24 και 4.25 αφορούν τα δύο ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού (DE Brass (1) & DE Brass (2)) που δεν έχουν υποστεί ηλεκτρολυτική επικασσιτέρωση. Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.22 και 4.24 απεικονίζεται το επιβαλλόμενο φορτίο (F_m) συναρτήσει της επιμήκυνσης (Δl) ενώ στο 4.23 και 4.25 απεικονίζεται η τάση (σ) συναρτήσει της παραμόρφωσης (ε). Όπως είναι φανερό από τα αντίστοιχα διαγράμματα, τόσο οι καμπύλες φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) όσο και οι καμπύλες τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ε) των δύο ορειχάλκινων

δοκιμίων, παρουσιάζουν σημαντική ομοιομορφία ως προς τη εφελκυστική συμπεριφορά τους, έως τη θραύση τους.



Σχήμα 4.22: Διάγραμμα επιβαλλόμενου φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) για το δοκίμιο DE Brass (1).



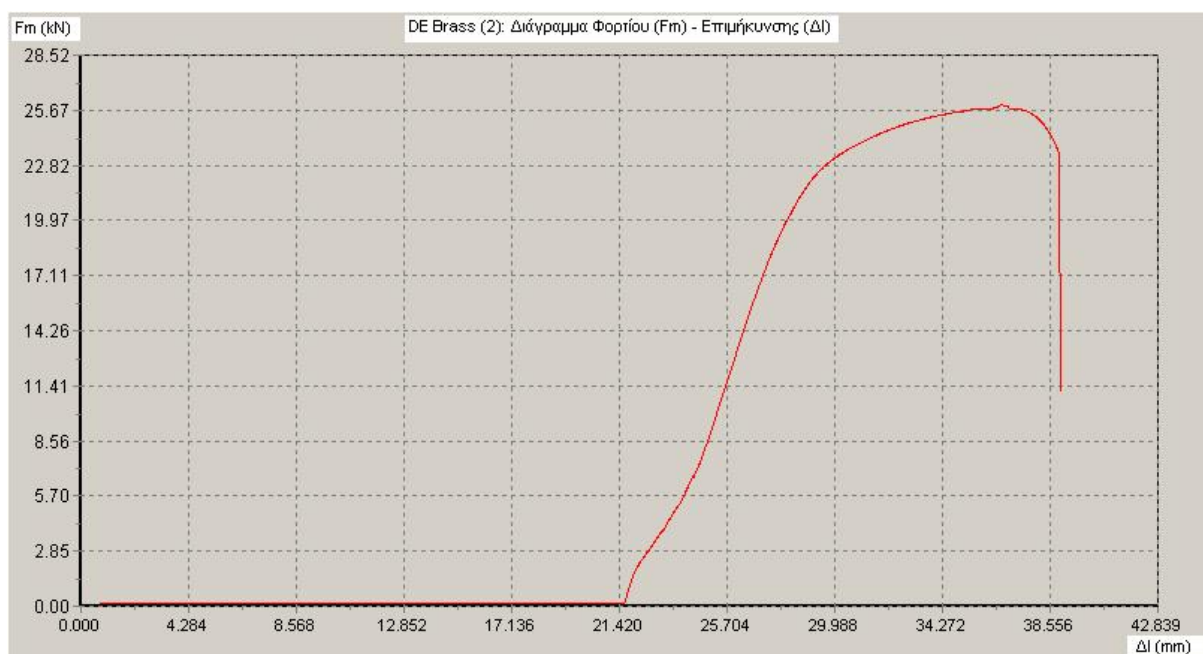
Σχήμα 4.23: Διάγραμμα τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) για το δοκίμιο DE Brass (1).

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.23 και 4.25, η μηχανική τάση συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι ενός μεγίστου, το οποίο προσδιορίζει την αντοχή σε εφελκυσμό (R_m). Μετά την αντοχή σε εφελκυσμό, στο δοκίμιο αρχίζει να δημιουργείται τοπική στένωση (λαιμός), που ορίζεται ως ο εντοπισμός της παραμόρφωσης σε μία μικρή περιοχή του δοκίμιου 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 αυξάνεται μέχρι τη θραύση του δοκιμίου.

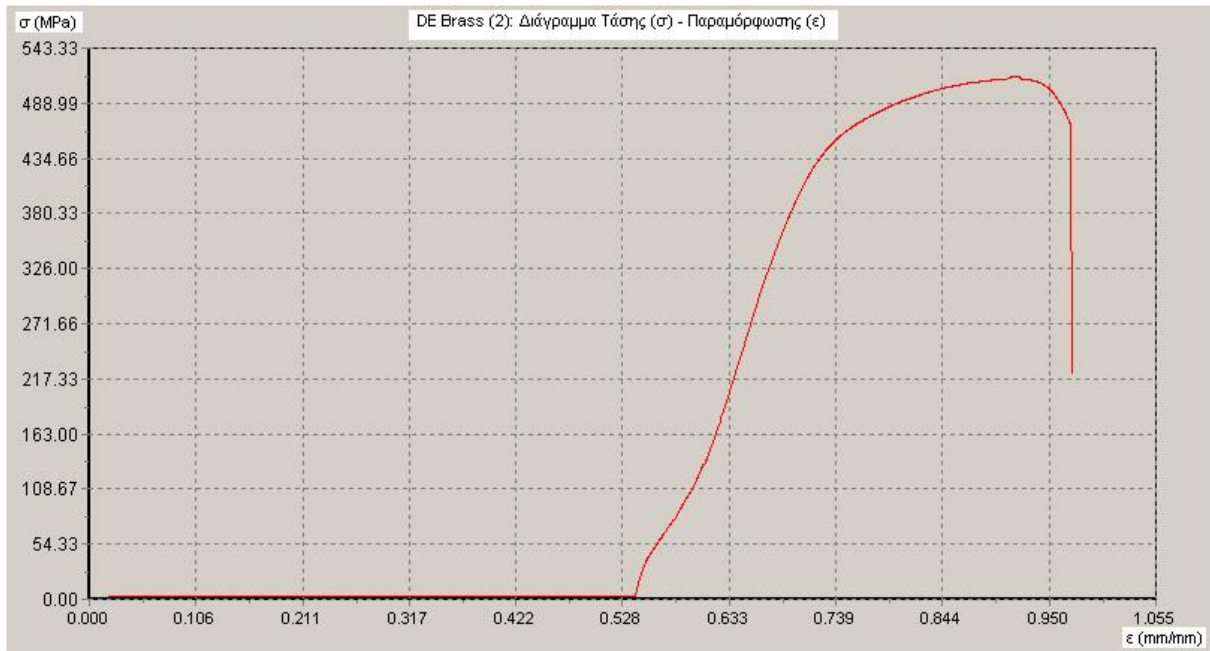
Επιπλέον, από το διάγραμμα του Σχήματος 4.22 και 4.24, φαίνεται το φορτίο θραύσης ($F_{mfr.}$) για τα δοκίμια DE Brass (1) και DE Brass (2), το οποίο είναι ίσο με 24,83 kN και 25,93 kN, αντίστοιχα. Ομοίως, από τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.23 και 4.25, είναι προφανές οι σχεδόν παρόμοιες τιμές που λαμβάνουν τα δύο δοκίμια ως προς τη μέγιστη τάση και παραμόρφωση.

Επίσης, από τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.22 και 4.24 μπορεί να υπολογιστεί η αντοχή σε εφελκυσμό (R_m) των δύο δοκιμίων. Είναι το πηλίκο του μέγιστου επιβαλλόμενου φορτίου ($F_{mfr.}$) προς την αρχική διατομή (S_o) του κάθε δοκιμίου.



Σχήμα 4.24: Διάγραμμα επιβαλλόμενου φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) για το δοκίμιο DE Brass (2).

Στον Πίνακα 4.2 και 4.3, παρουσιάζονται συγκεντρωμένες οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα των μηχανικών ιδιοτήτων που προκύπτουν από τον εφελκυσμό όλων των δοκιμίων. Για τα δοκίμια DE Brass (1) και DE Brass (2) η αντοχή σε εφελκυσμό (R_m) υπολογίστηκε στα 494 MPa και 515 MPa, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές παρουσιάζουν σημαντική προσέγγιση μεταξύ τους και ταυτόχρονα έρχονται σε συμφωνία με την αντίστοιχη τιμή που ενδεικτικά δίνεται από τη βιβλιογραφία [88] για ορείχαλκο, των 518 MPa. Παρομοίως, η επιμήκυνση θραύσεως (ολκιμότητα) για τα δοκίμια DE Brass (1) και DE Brass (2) υπολογίστηκε 12,23 % και 11,80 %, αντίστοιχα, τιμές που προσεγγίζουν το αντίστοιχο ποσοστό επιμήκυνσης που ενδεικτικά δίνεται στη βιβλιογραφία [89] για τον ορείχαλκο (≈ 10 %).



Σχήμα 4.25: Διάγραμμα τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) για το δοκίμιο DE Brass (2).

Επιπρόσθετα, από τις καμπύλες των διαγραμμάτων των Σχημάτων 4.23 και 4.25 προκύπτει η σχετικά μικρή ολκιμότητα που παρουσιάζει ο ορείχαλκος των δοκιμίων DE Brass (1) και DE Brass (2), μιας και εμφανίζεται μικρό στάδιο πλαστικής παραμόρφωσης σε αυτά.

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	DE1	DE2	DE3	DE4	DE5	DE6
ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ	Sn	Sn	Sn	Sn	Sn	Sn
ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ (mn)	50	120	120	50	180	180
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)	8,11 8,10 8,13	8,34 8,38 8,32	8,35 8,37 8,38	8,13 8,15 8,10	8,32 8,30 8,28	8,54 8,49 8,56
Μ.Ο. ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ (mm)	8,11	8,35	8,37	8,13	8,30	8,53
ΜΗΚΟΣ (mm)	91,00	92,08	92,60	92,37	91,50	91,90
ΔΙΑΤΟΜΗ (S_0) (mm ²)	51,66	54,76	55,02	51,91	54,11	57,15
ΑΡΧΙΚΟ ΜΗΚΟΣ (L_0) (mm)	40,60	41,81	40,51	40,71	41,56	42,71
ΤΕΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ (L_u) (mm)	42,75	44,09	42,68	42,91	43,66	(*)
ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ ΘΡΑΥΣΕΩΣ (%)	5,30	5,45	5,36	5,40	5,05	(*)
ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ (Δl) (mm)	32,59	35,58	32,29	31,65	37,37	(*)
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ ($F_{mfr.}$) (kN)	24,51	26,15	24,61	25,08	23,55	(*)
ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (MPa)	475,00	480,00	445,00	485,00	430,00	(*)
ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ (R_m) (MPa)	475,00	480,00	445,00	485,00	435,00	(*)
(*) Θραύση δοκιμίου εκτός ορίων επισήμανσης.						

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα μετρήσεων των δοκιμών εφελκυσμού (DE1 - DE6).

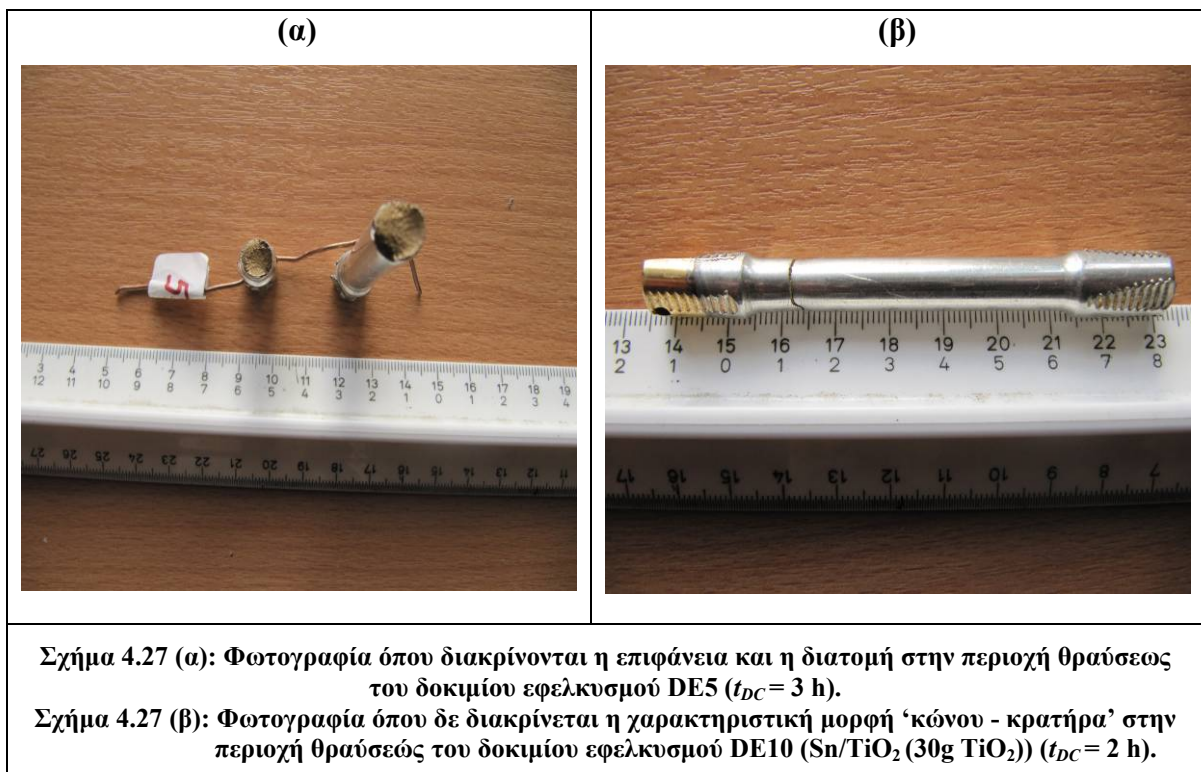
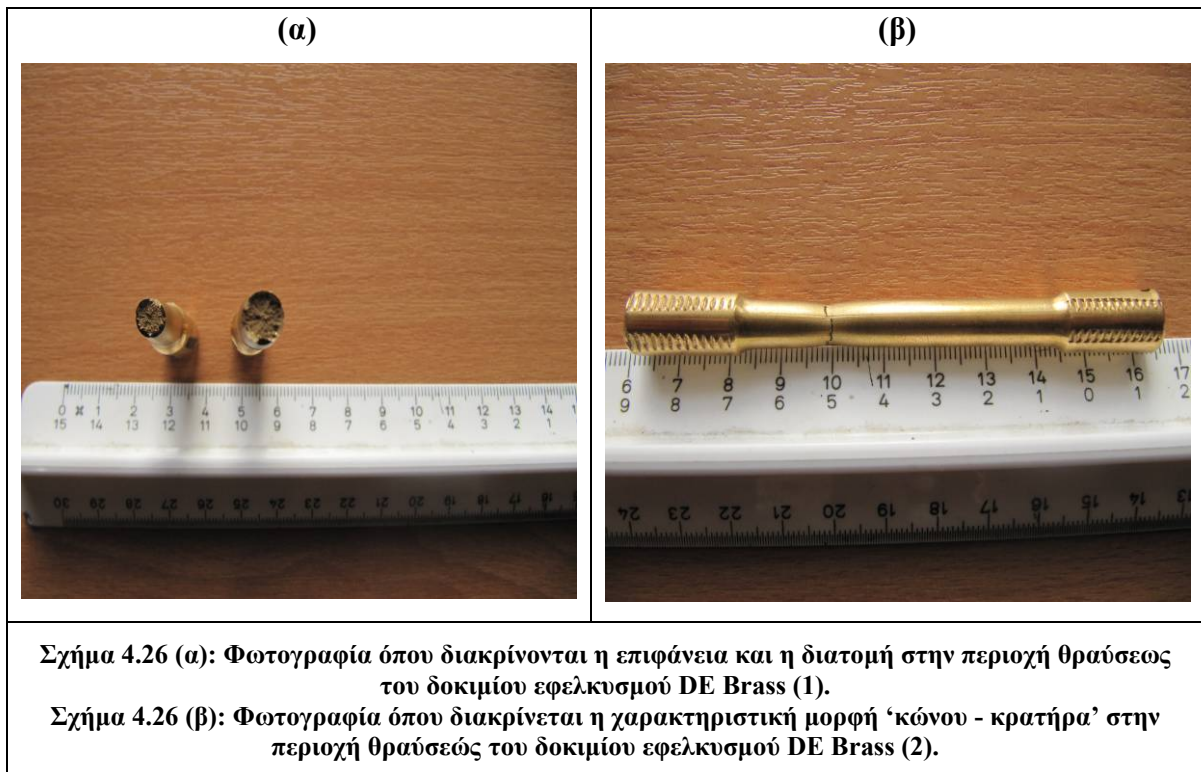
Τα συμπεράσματα από την παρατήρηση των δοκιμών εφελκυσμού DE Brass (1) και DE Brass (2) μετά τη θραύση τους, συνηγορούν σε ήπια όλκιμη θραύση τους. Στις φωτογραφίες του Σχήματος 4.26 (α) και (β) διακρίνονται οι επιφάνειες και οι διατομές στην περιοχή θραύσεώς τους. Τα δύο δοκίμια φαίνεται να παρουσιάζουν τη χαρακτηριστική μορφή ‘κόνου - κρατήρα’, ενώ διαπιστώνεται και η παρουσία της στένωσης της διατομής (λαιμός), χαρακτηριστικό της πλαστικής παραμόρφωσης που προηγείται της θραύσης για τα όλκιμα υλικά. Οι επιφάνειες τους είναι αντίστοιχα κοίλες και κυρτές στα δύο κομμάτια της θραύσης κι έχουν θαμπή όψη (ματ). Επιπλέον, μικροσκοπικά οι επιφάνειες θραύσης των δύο δοκιμών παρουσιάζουν κοκκώδη όψη που αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα όλκιμης θραύσης.

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	DE7	DE8	DE9	DE10	DE Brass (1)	DE Brass (2)
ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ	Sn/TiO ₂ (15 gr)	Sn/TiO ₂ (15 gr)	Sn/TiO ₂ (15 gr)	Sn/TiO ₂ (30 gr)	-	-
ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ (mn)	120	120	50	120	-	-
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)	8,37 8,39 8,37	8,29 8,31 8,30	8,27 8,25 8,26	8,25 8,27 8,28	8,00 7,99 8,00	7,98 8,00 7,99
Μ.Ο. ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ (mm)	8,38	8,30	8,26	8,27	8,00	7,99
ΜΗΚΟΣ (mm)	91,44	91,58	92,28	91,21	91,64	91,48
ΔΙΑΤΟΜΗ (S ₀) (mm ²)	55,15	54,11	53,58	53,71	50,24	50,11
ΑΡΧΙΚΟ ΜΗΚΟΣ (L ₀) (mm)	41,96	41,56	41,36	41,41	40,05	40,00
ΤΕΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ (L _u) (mm)	43,02	44,20	43,53	43,51	44,95	44,72
ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ ΘΡΑΥΣΕΩΣ (%)	2,53	6,35	5,27	5,07	12,23	11,80
ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ (Δl) (mm)	35,21	35,47	33,40	37,31	38,42	38,91
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ (F _{mfr.}) (kN)	21,02	23,41	24,27	23,81	24,83	25,93
ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (MPa)	335,00	435,00	405,00	430,00	480,00	510,00
ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ (R _m) (MPa)	380,00	435,00	455,00	445,00	485,00	515,00

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα μετρήσεων των δοκιμών εφελκυσμού (DE7 - DE10 & DE Brass (1), (2)).

Τα συμπεράσματα από την παρατήρηση των υπόλοιπων δοκιμών εφελκυσμού (DE1 έως DE5 & DE7 έως DE10) μετά τη θραύση τους, συνηγορούν στη μη όλκιμη θραύση τους. Στις φωτογραφίες του Σχήματος 4.27 (α) και (β) διακρίνονται οι επιφάνειες και οι διατομές στην περιοχή θραύσεώς τους σε δύο εκ των δοκιμών εφελκυσμού, του DE5 και DE10. Δε φαίνεται να παρουσιάζουν τη χαρακτηριστική μορφή ‘κόνου - κρατήρα’, αλλά ούτε και διαπιστώνεται η παρουσία της στένωσης της διατομής (λαιμός), χαρακτηριστικό της πλαστικής παραμόρφωσης που προηγείται της θραύσης για τα όλκιμα υλικά. Αντίθετα, διαπιστώνεται ο ψαθυρός αποχωρισμός του υλικού στις δύο επιφάνειες θραύσης, όπου δεν παρουσιάζεται σημαντική παραμόρφωση, με συναρμολόγηση των δύο κομματιών που προέκυψαν από τη θραύση. Με τον τρόπο αυτό φαίνεται να αναπαράγεται ακριβώς το

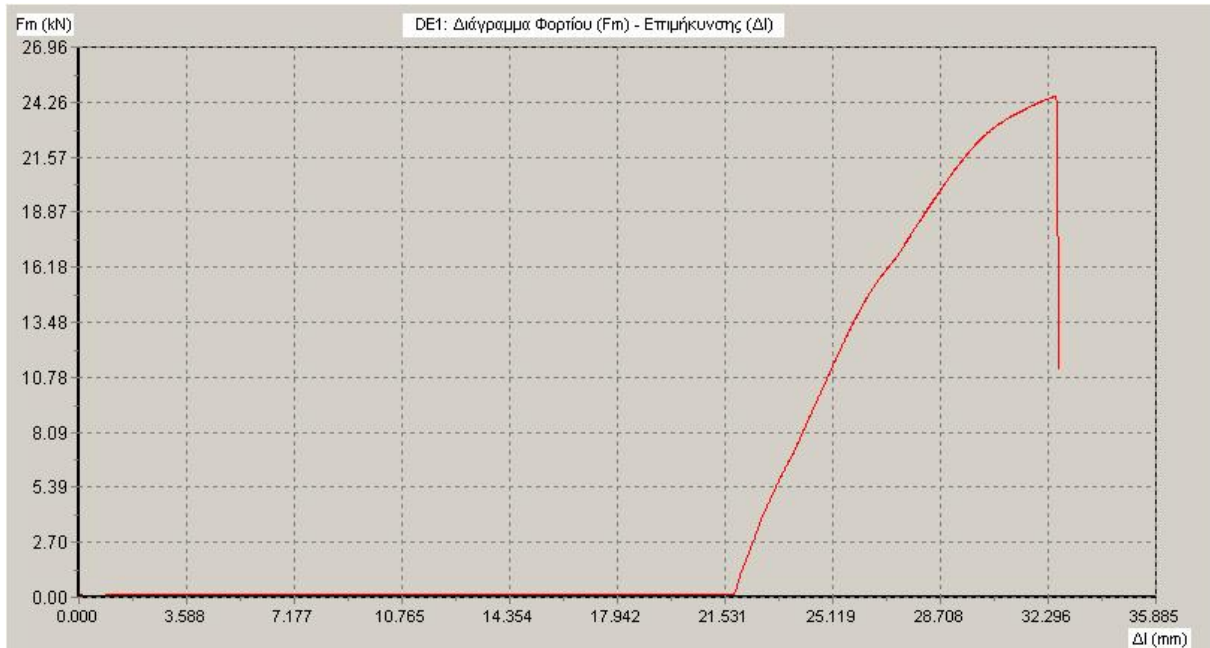
αρχικό σχήμα των δοκιμίων που έσπασαν. Επιπλέον, μικροσκοπικά οι θραυσίγενής επιφάνειες των δύο δοκιμίων παρουσιάζουν στυλπή και σχεδόν επίπεδη μορφολογία που αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα ψαθυρής θραύσης.



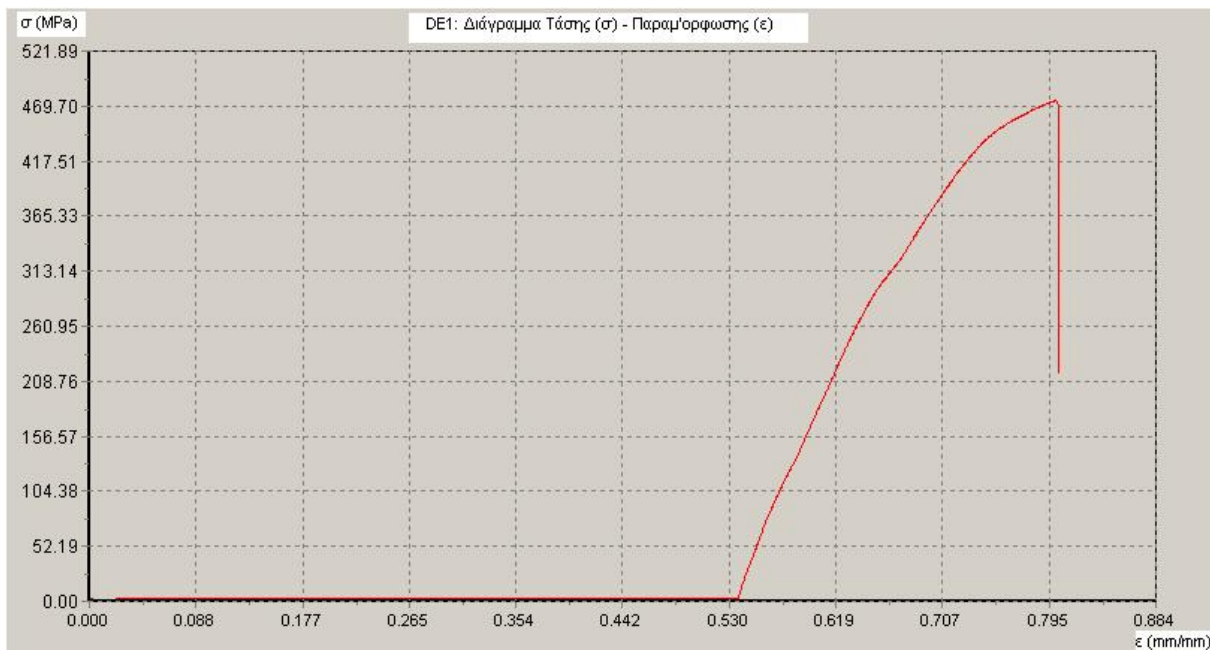
Τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.28, 4.29, 4.30 και 4.31 αφορούν τα δοκίμια εφελκυσμού DE1 και DE4 που έχουν υποστεί ηλεκτρολυτική επικασιτιέρωση ($t_{DC} = 50$ mn). Τόσο οι καμπύλες φορτίου

(F_m) - επιμήκυνσης (Δl) όσο και οι καμπύλες τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ε) των δύο δοκιμίων, παρουσιάζουν σημαντική ομοιομορφία ως προς τη εφελκυστική συμπεριφορά τους, έως τη θραύση τους.

Από το διάγραμμα του Σχήματος 4.28 και 4.30, φαίνεται το φορτίο θραύσης για τα δοκίμια DE1 και DE4 να είναι ίσο με 24,51 kN και 25,08 kN, αντίστοιχα. Ομοίως, από τα διαγράμματα 4.29 και 4.31, προκύπτουν σχεδόν παρόμοιες τιμές ως προς τη μέγιστη τάση και παραμόρφωση για τα δύο δοκίμια.

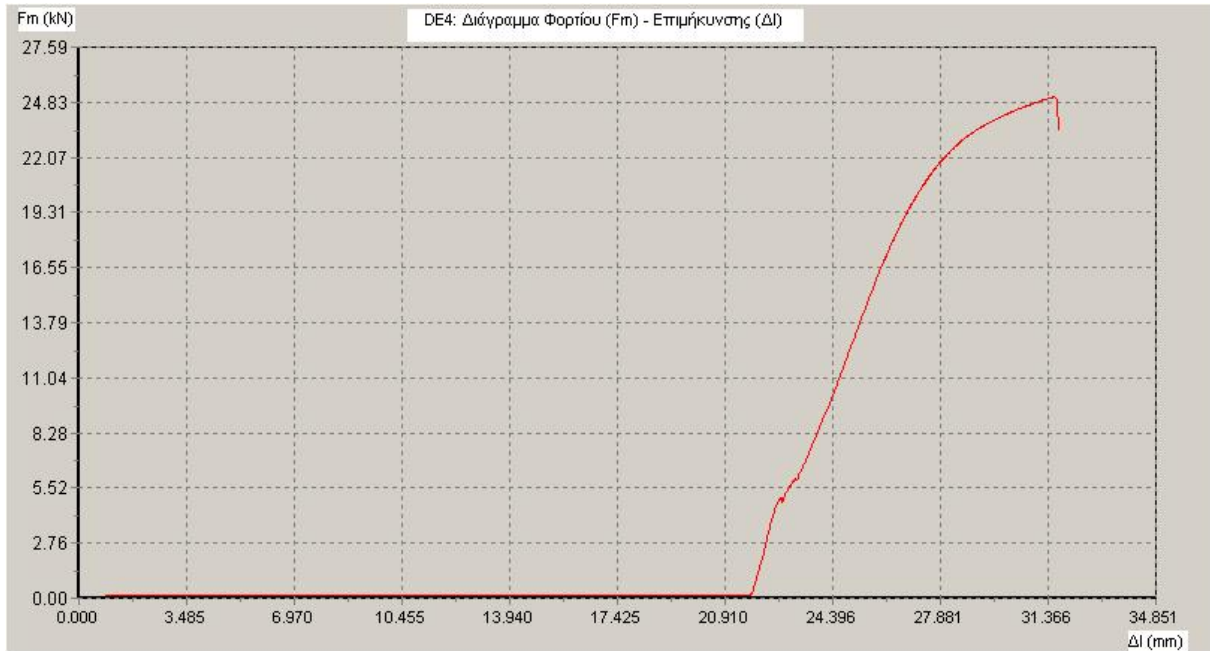


Σχήμα 4.28: Διάγραμμα επιβαλλόμενου φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) για το δοκίμιο DE1 ($S_n / t_{DC} = 50$ mm).

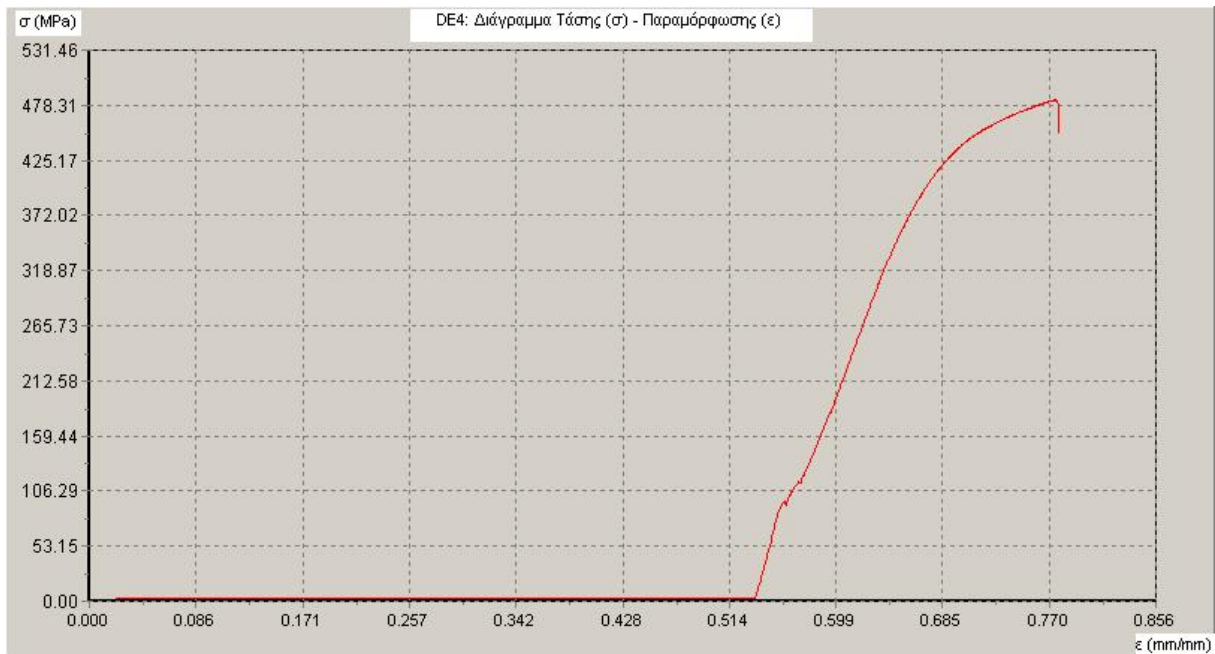


Σχήμα 4.29: Διάγραμμα τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ε) για το δοκίμιο DE1 ($S_n / t_{DC} = 50$ mm).

Για τα δοκίμια DE1 και DE4 η αντοχή σε εφελκυσμό (R_m) υπολογίστηκε στα 475 MPa και 485 MPa, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι πολύ κοντά αριθμητικά μεταξύ τους. Παρομοίως, η επιμήκυνση θραύσεως των δύο συγκεκριμένων δοκιμίων υπολογίστηκε 5,30 % και 5,40 %, αντίστοιχα.



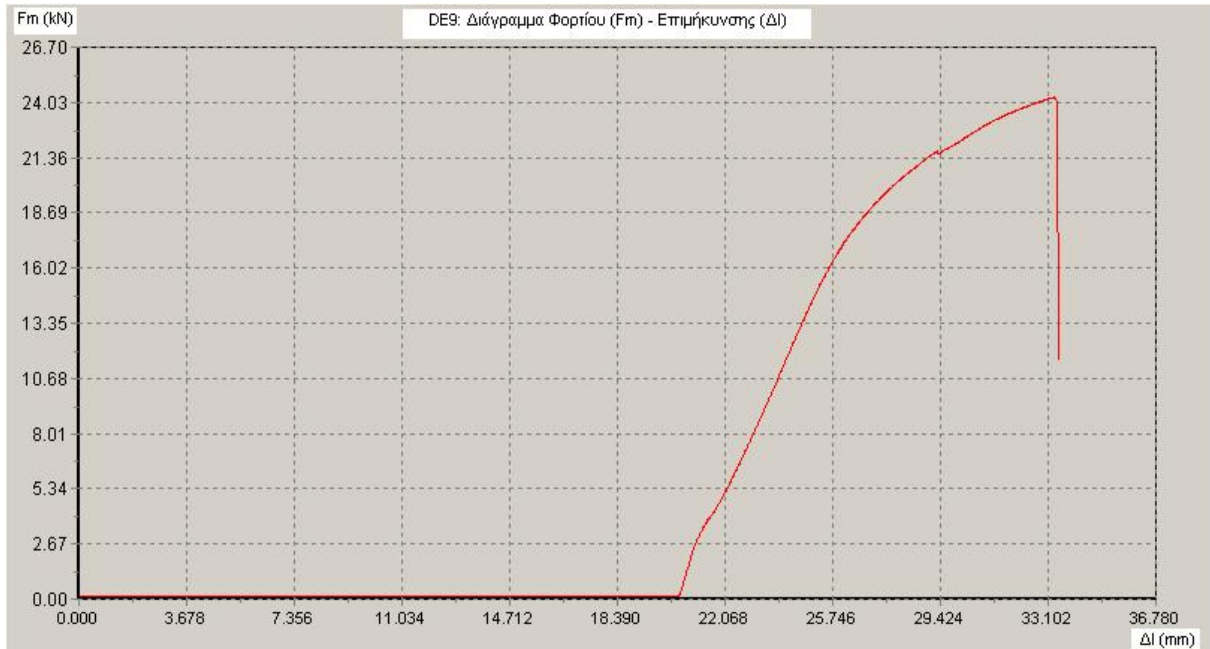
Σχήμα 4.30: Διάγραμμα επιβαλλόμενου φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) για το δοκίμιο DE4 ($S_n / t_{DC} = 50 \text{ mm}$).



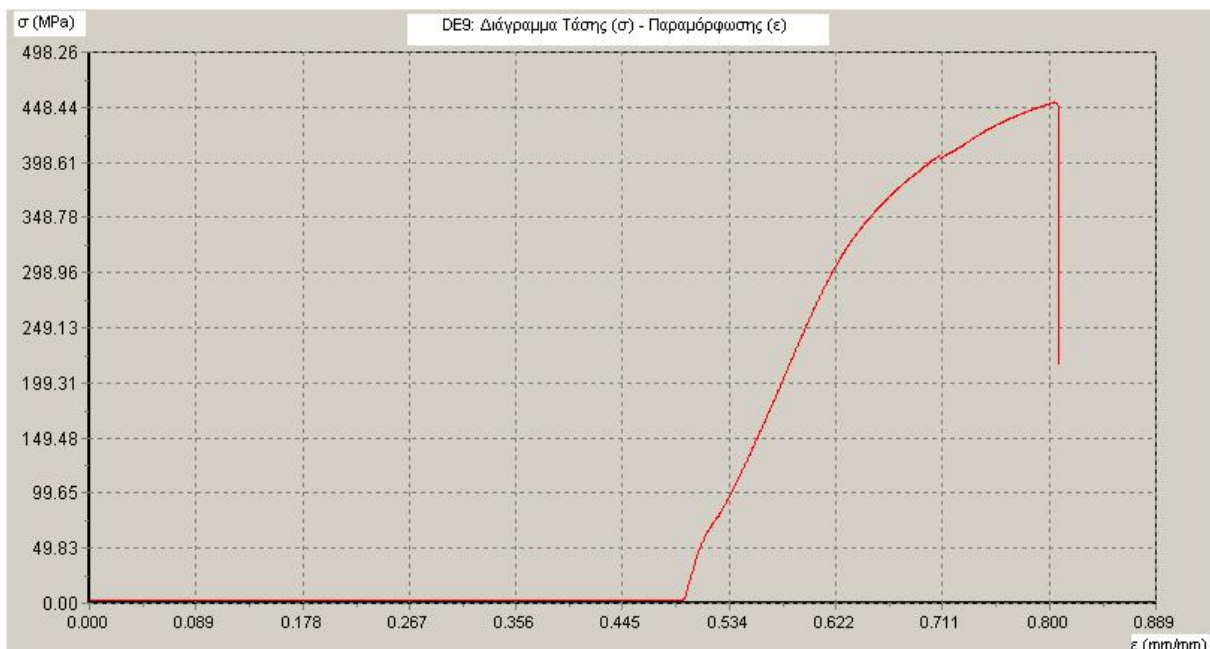
Σχήμα 4.31: Διάγραμμα τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) για το δοκίμιο DE4 ($S_n / t_{DC} = 50 \text{ mm}$).

Τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.32 και 4.33 παρουσιάζουν αντίστοιχα τις καμπύλες φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) και τις καμπύλες τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) του δοκιμίου DE9, το οποίο έχει

υποστεί σύνθετη ηλεκτρολυτική επικασιτέρωση (Sn/TiO_2) για $t_{DC} = 50$ mn. Συγκρίνοντας τη καμπύλη φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) και τη καμπύλη τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) του με αυτές των δοκιμών DE1 και DE4 (όπου επίσης $t_{DC} = 50$ mn), διαπιστώνεται η παρόμοια εφελκυστική συμπεριφορά τους, έως τη θραύση τους.



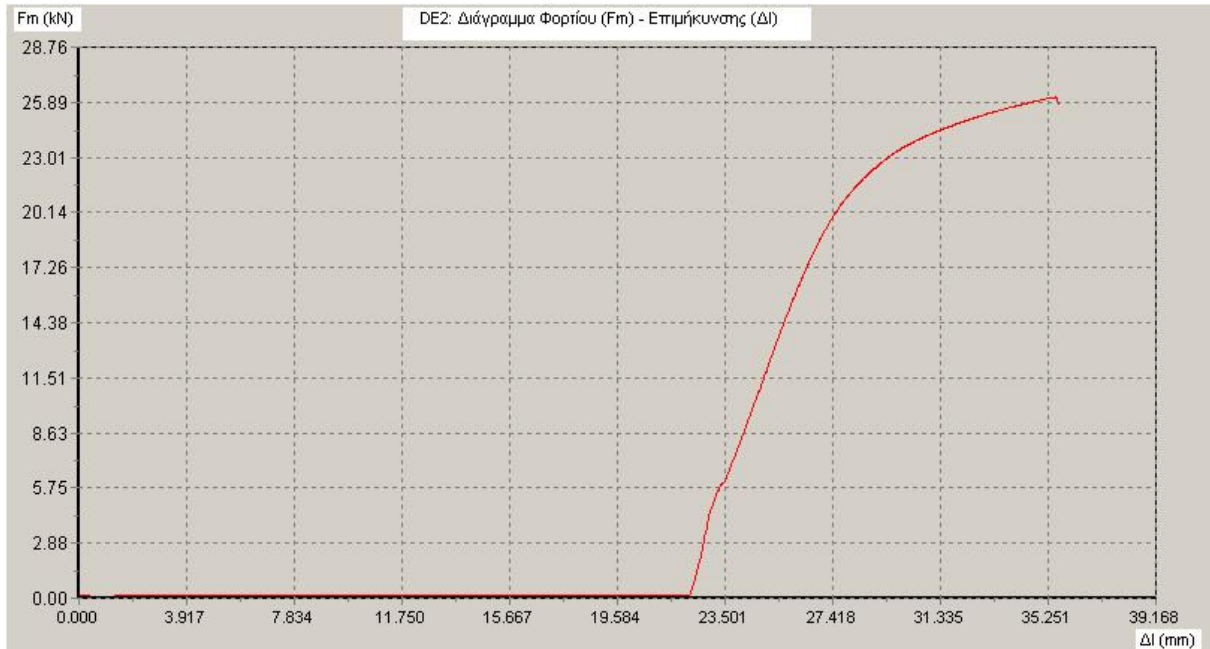
Σχήμα 4.32: Διάγραμμα επιβαλλόμενου φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) για το δοκίμιο DE9 (Sn/TiO_2 (15 gr) - $t_{DC} = 50$ mn).



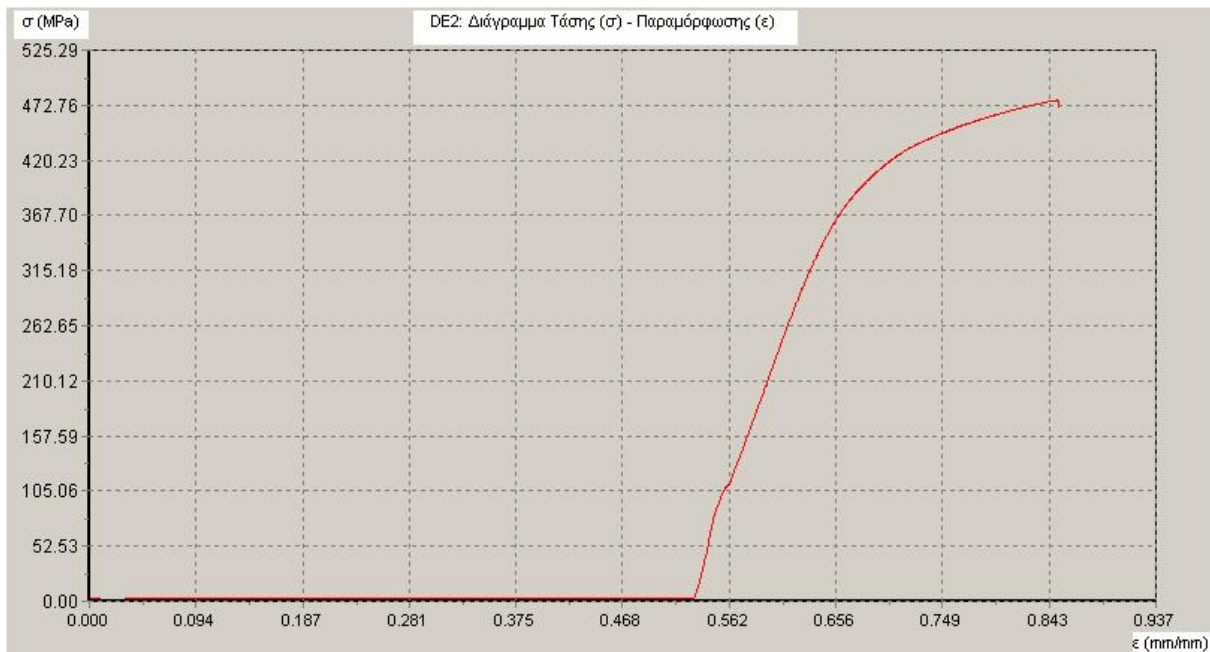
Σχήμα 4.33: Διάγραμμα τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) για το δοκίμιο DE9 (Sn/TiO_2 (15 gr) - $t_{DC} = 50$ mn).

Η αντοχή σε εφελκυσμό (R_m) υπολογίστηκε στα 455 MPa για το δοκίμιο DE9. Η τιμή αυτή είναι ελάχιστα χαμηλότερη από αυτές των δοκιμών DE1 και DE4. Όσον αφορά την επιμήκυνση θραύσεως του δοκιμίου DE9 αυτή υπολογίστηκε στο 5,27 %.

Τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.34, 4.35, 4.36 και 4.37 αφορούν τα δοκίμια εφελκυσμού DE2 και DE3 που έχουν υποστεί απλή ηλεκτρολυτική επικασσιτέρωση ($t_{DC} = 50$ mn). Οι καμπύλες φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) και οι καμπύλες τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) των δύο δοκιμίων, παρουσιάζουν εξίσου σημαντική ομοιομορφία ως προς τη εφελκυστική συμπεριφορά τους, έως τη θραύση τους.



Σχήμα 4.34: Διάγραμμα επιβαλλόμενου φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) για το δοκίμιο DE2 ($S_n / t_{DC} = 2$ h).

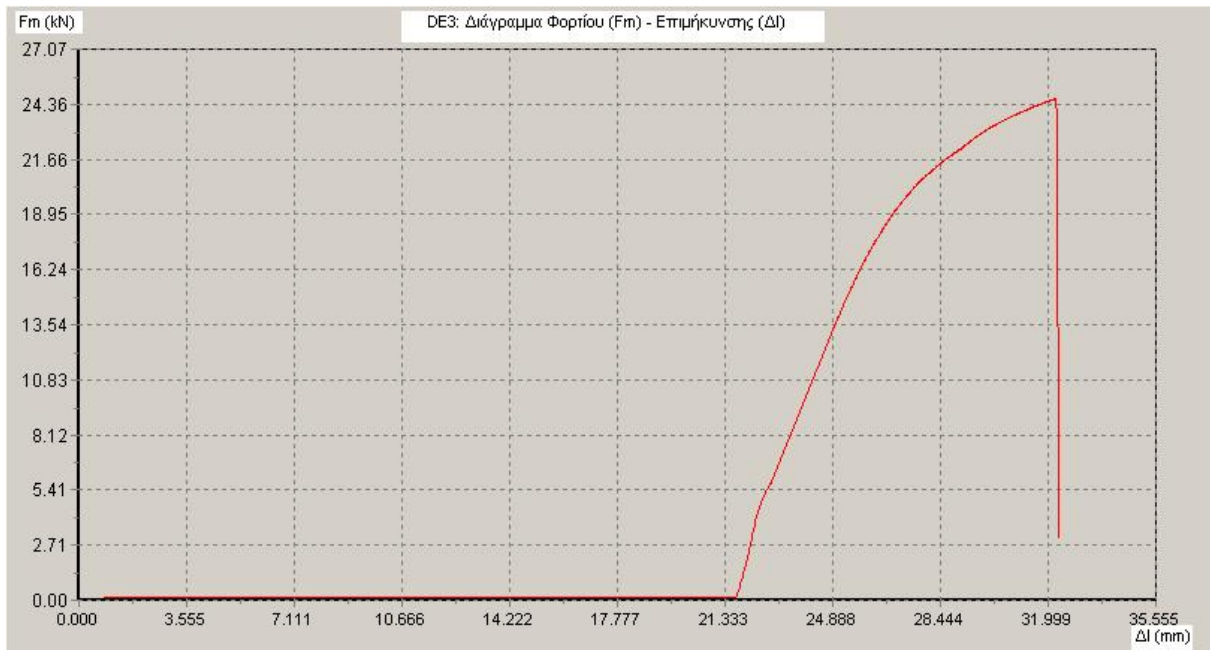


Σχήμα 4.35: Διάγραμμα τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) για το δοκίμιο DE2 ($S_n / t_{DC} = 2$ h).

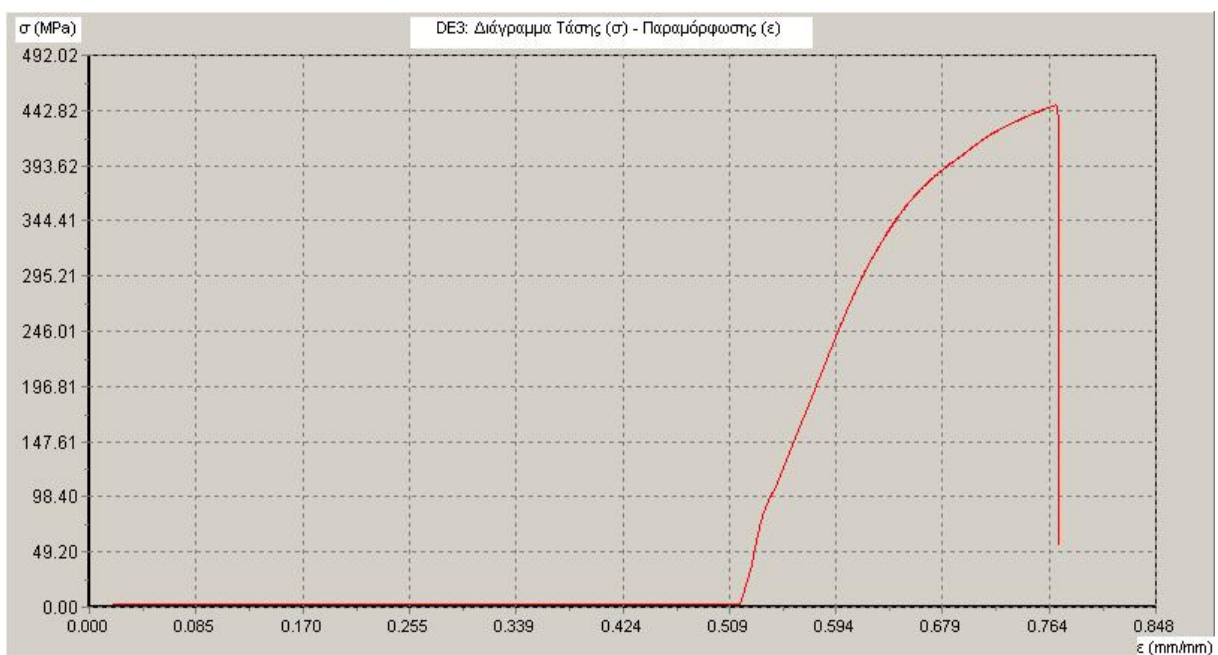
Από τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.34 και 4.36, το φορτίο θραύσης για τα δοκίμια DE2 και DE3 δίνεται ίσο με 26,15 kN και 24,61 kN, αντίστοιχα. Από τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.35 και 4.37,

προκύπτει αριθμητικά μία ελάχιστη απόκλιση ως προς τη μέγιστη τάση και παραμόρφωση για τα δύο δοκίμια.

Αντίστοιχα, για τα δοκίμια DE2 και DE3 η αντοχή σε εφελκυσμό (R_m) υπολογίστηκε στα 480 MPa και 445 MPa, αντίστοιχα, όπου και εδώ είναι φανερή μία μικρή αριθμητική απόκλιση. Η επιμήκυνση θραύσεως των δύο συγκεκριμένων δοκιμίων υπολογίστηκε 5,45 % και 5,36 % αντίστοιχα.

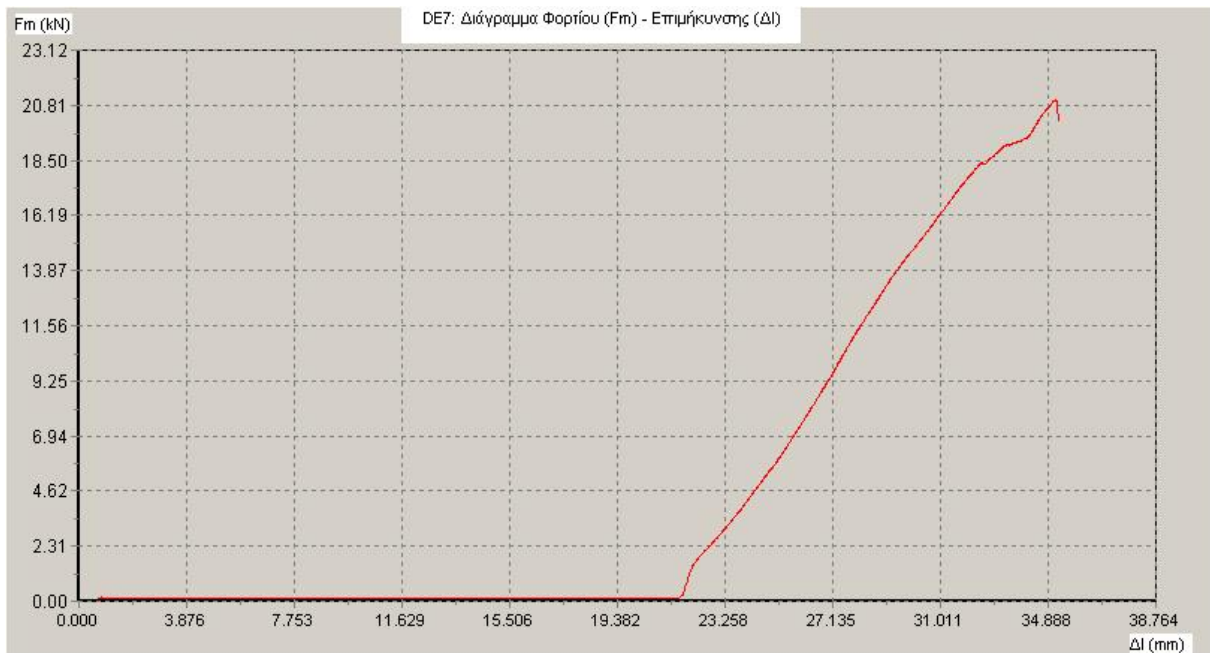


Σχήμα 4.36: Διάγραμμα επιβαλλόμενου φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) για το δοκίμιο DE3 ($S_n / t_{DC} = 2$ h).

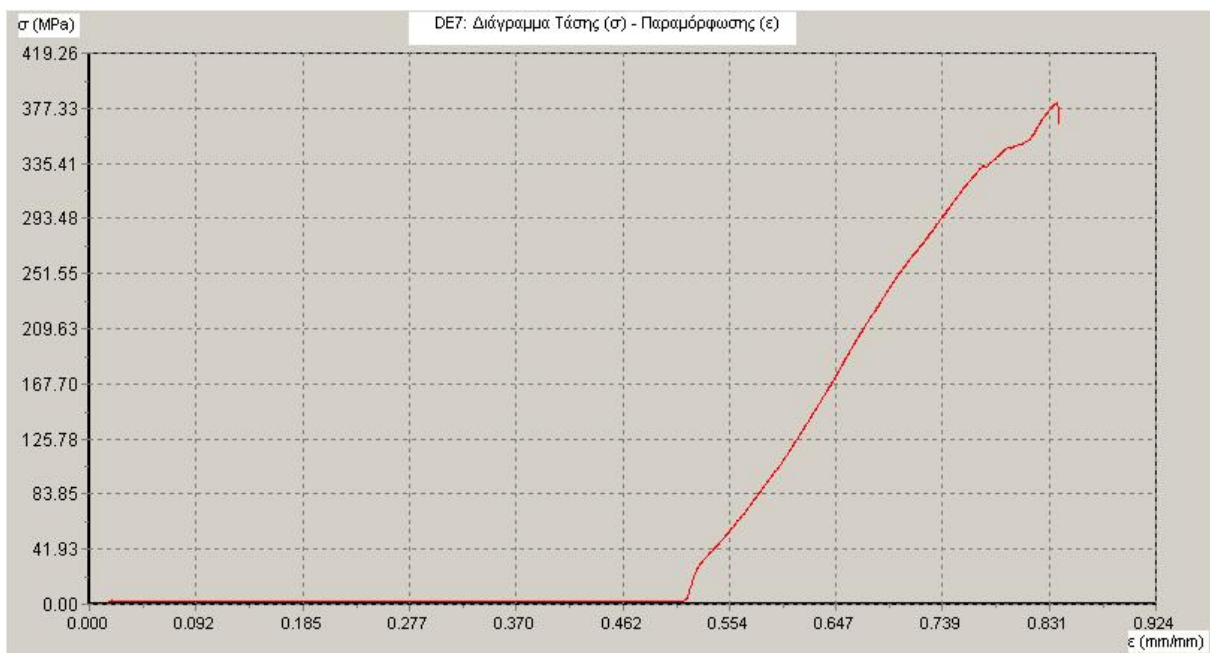


Σχήμα 4.37: Διάγραμμα τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) για το δοκίμιο DE3 ($S_n / t_{DC} = 2$ h).

Τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.38, 4.39, 4.40 και 4.41 παρουσιάζουν αντίστοιχα τις καμπύλες φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) και τις καμπύλες τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ε) των δοκιμίων DE7 και DE8, τα οποία έχουν υποστεί σύνθετη ηλεκτρολυτική επικασιτέρωση (Sn/TiO_2) για $t_{DC} = 2$ h. Συγκρίνοντας τις καμπύλες φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) και τις καμπύλες τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ε) τους με αυτές των δοκιμίων DE2 και DE3 (όπου επίσης $t_{DC} = 2$ h), διαπιστώνεται σημαντική ομοιότητα στην εφελκυστική συμπεριφορά τους, έως τη θραύση τους.

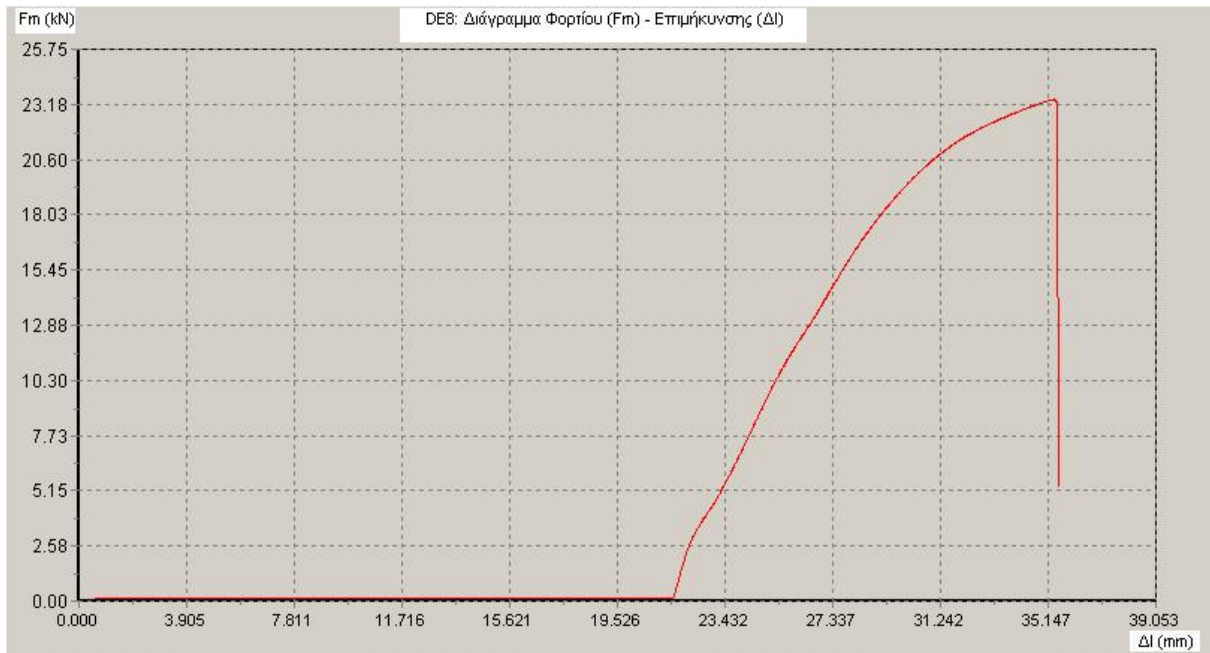


Σχήμα 4.38: Διάγραμμα επιβαλλόμενου φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) για το δοκίμιο DE7 (Sn/TiO_2 (15 gr) - $t_{DC} = 2$ h).

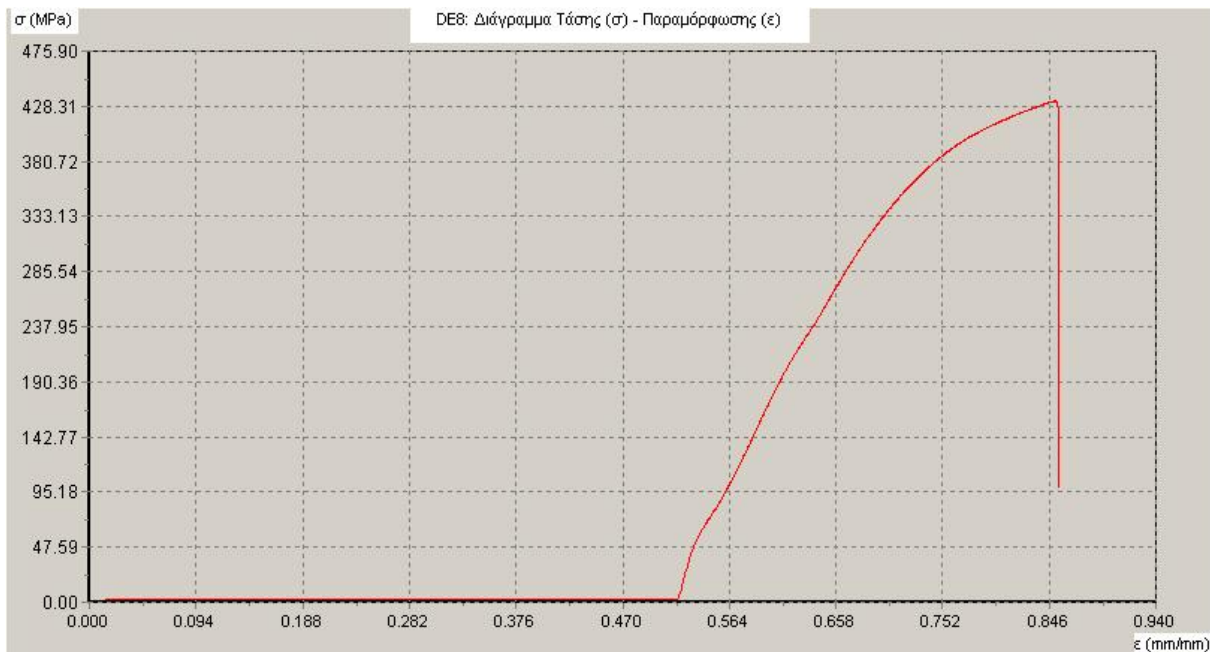


Σχήμα 4.39: Διάγραμμα τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ε) για το δοκίμιο DE7 (Sn/TiO_2 (15 gr) - $t_{DC} = 2$ h).

Για τα δοκίμια DE7 και DE8 η αντοχή σε εφελκυσμό (R_m) υπολογίστηκε στα 380 MPa και 435 MPa. Οι τιμές αυτές είναι χαμηλότερες από αυτές των δοκιμίων DE2 και DE3. Όσον αφορά την επιμήκυνση θραύσεως των δοκιμίων DE7 και DE8 αυτή υπολογίστηκε στο 2,53 % και 6,35 %, αντίστοιχα.



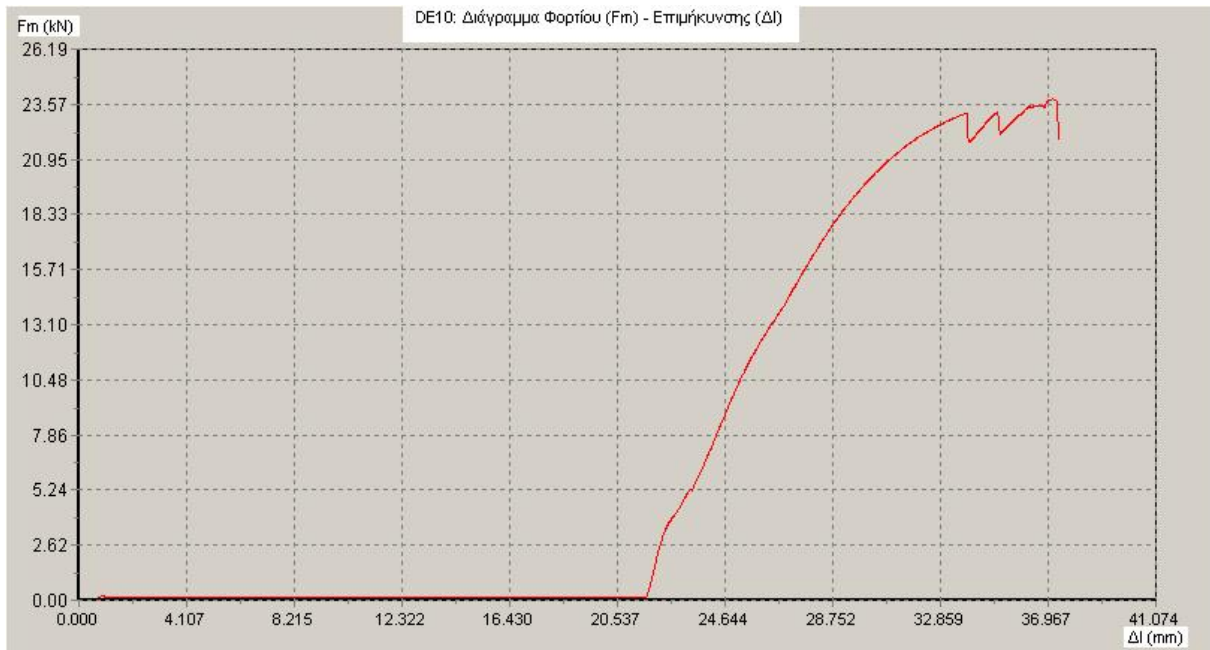
Σχήμα 4.40: Διάγραμμα επιβαλλόμενου φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) για το δοκίμιο DE8 (Sn/TiO₂ (15 gr) - $t_{DC} = 2$ h).



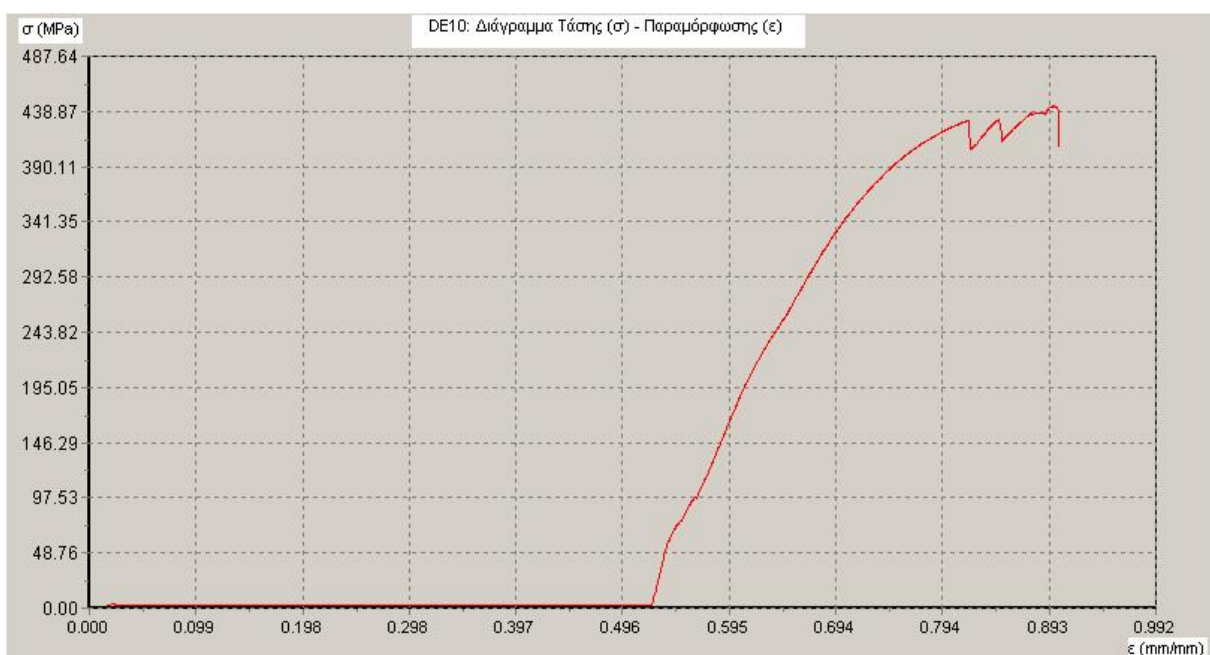
Σχήμα 4.41: Διάγραμμα τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) για το δοκίμιο DE8 (Sn/TiO₂ (15 gr) - $t_{DC} = 2$ h).

Θα πρέπει να επισημανθεί σε αυτό το σημείο, ότι εξαιτίας του χαμηλού ποσοστού της επιμήκυνσης θραύσεως (2,53 %) για το δοκίμιο DE7, η μέτρηση δε θεωρείται αξιόπιστη. Για μικρές επιμηκύνσεις

(<5%), μία μέτρηση θεωρείται αξιόπιστη όταν η απόσταση της περιοχής θραύσης από το πλησιέστερο μαρκάρισμα δεν είναι μικρότερη του $1/3 \times L_0$. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται αφού κατά τον υπολογισμό του τελικού μήκους του δοκιμίου (L_u) μετά τη θραύση, θα πρέπει η δοκιμή εφελκυσμού να εξασφαλίζει ότι η θραύση γίνεται σε περιοχή του δοκιμίου που καταπονείται σε καθαρό εφελκυσμό, έτσι ώστε να μην έχουν επηρεαστεί οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού από άλλες επιδράσεις που δημιουργούν οι περιοχές στήριξης του δοκιμίου στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού.



Σχήμα 4.42: Διάγραμμα επιβαλλόμενου φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) για το δοκίμιο DE10 (Sn/TiO₂ (30 gr) - $t_{DC} = 2$ h).



Σχήμα 4.43: Διάγραμμα τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ) για το δοκίμιο DE10 (Sn/TiO₂ (30 gr) - $t_{DC} = 2$ h). Με αυτή τη διαδικασία κατά τη μέτρηση του τελικού μήκους του δοκιμίου (L_u) μετά τη θραύση αποφεύγεται απώλεια πλαστικής παραμόρφωσης.

Τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.42 και 4.43 παρουσιάζουν αντίστοιχα τις καμπύλες φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) και τις καμπύλες τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) του δοκιμίου DE10, το οποίο έχει υποστεί και αυτό σύνθετη ηλεκτρολυτική επικασιτέρωση (Sn/TiO₂) για $t_{DC} = 2$ h, αλλά με προσθήκη διπλάσιας ποσότητας TiO₂ (30 gr έναντι 15 gr στα δοκίμια DE7 και DE8). Συγκρίνοντας τη καμπύλη φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) και τη καμπύλη τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) του με αυτές των δοκιμίων DE7 και DE8 (όπου επίσης $t_{DC} = 2$ h), διαπιστώνονται και σε αυτή την περίπτωση ομοιότητες στην εφελκυστική συμπεριφορά τους, έως τη θραύση τους.

Η αντοχή σε εφελκυσμό (R_m) υπολογίστηκε στα 445 MPa για το δοκίμιο DE10. Η τιμή αυτή είναι ελάχιστα υψηλότερη από αυτή του δοκιμίου DE7 και αριθμητικά πολύ κοντά σε αυτή του DE8. Όσον αφορά την επιμήκυνση θραύσεως του δοκιμίου DE10 αυτή υπολογίστηκε στο 5,07 %.

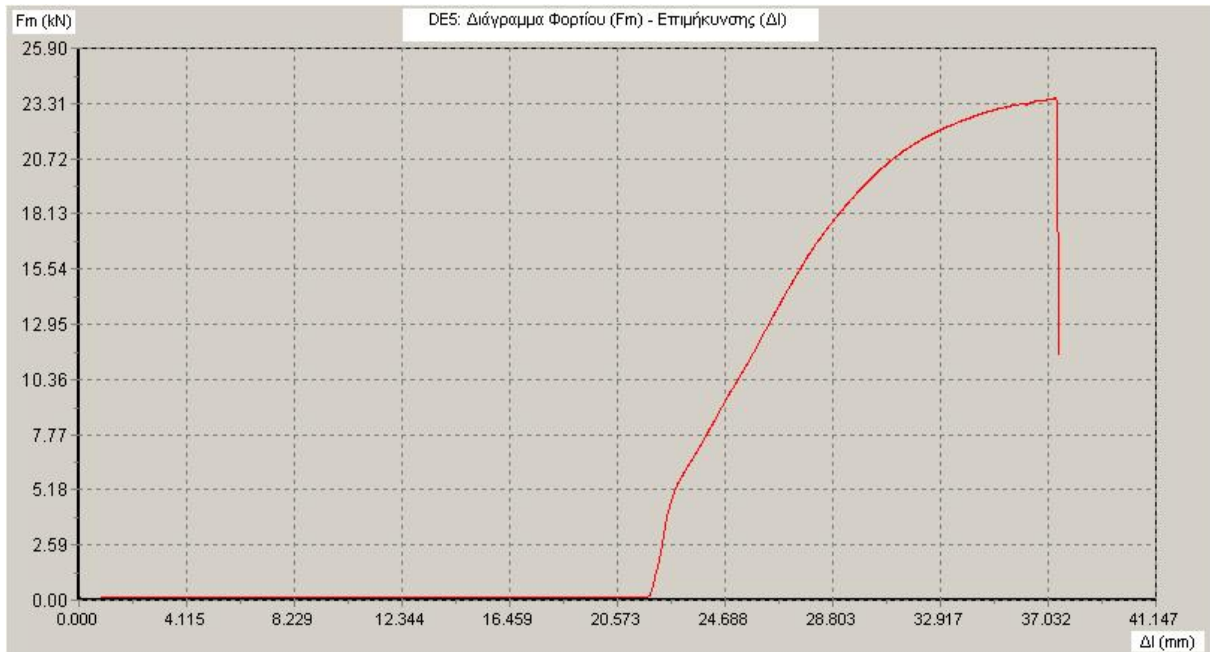
Τέλος, τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.44 και 4.45 αφορούν το δοκίμιο DE5 που έχει υποστεί απλή ηλεκτρολυτική επικασιτέρωση για $t_{DC} = 3$ h. Η καμπύλη φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) και η καμπύλη τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) του παρουσιάζουν παρόμοια εφελκυστική συμπεριφορά έως τη θραύση τους, με τις αντίστοιχες των δοκιμίων DE1, DE2, DE3 και DE4.

Επίσης, από το διάγραμμα του Σχήματος 4.44, το φορτίο θραύσης για το δοκίμιο DE5 είναι ίσο με 23,55 kN ενώ η αντοχή του σε εφελκυσμό (R_m) μετρήθηκε στα 435 MPa και η επιμήκυνση θραύσεως του υπολογίστηκε ίση με 5,05 %, τιμές που σε σχέση με τις αντίστοιχες των δοκιμίων DE1, DE2, DE3 και DE4 είναι ελαφρώς χαμηλότερες, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.2.

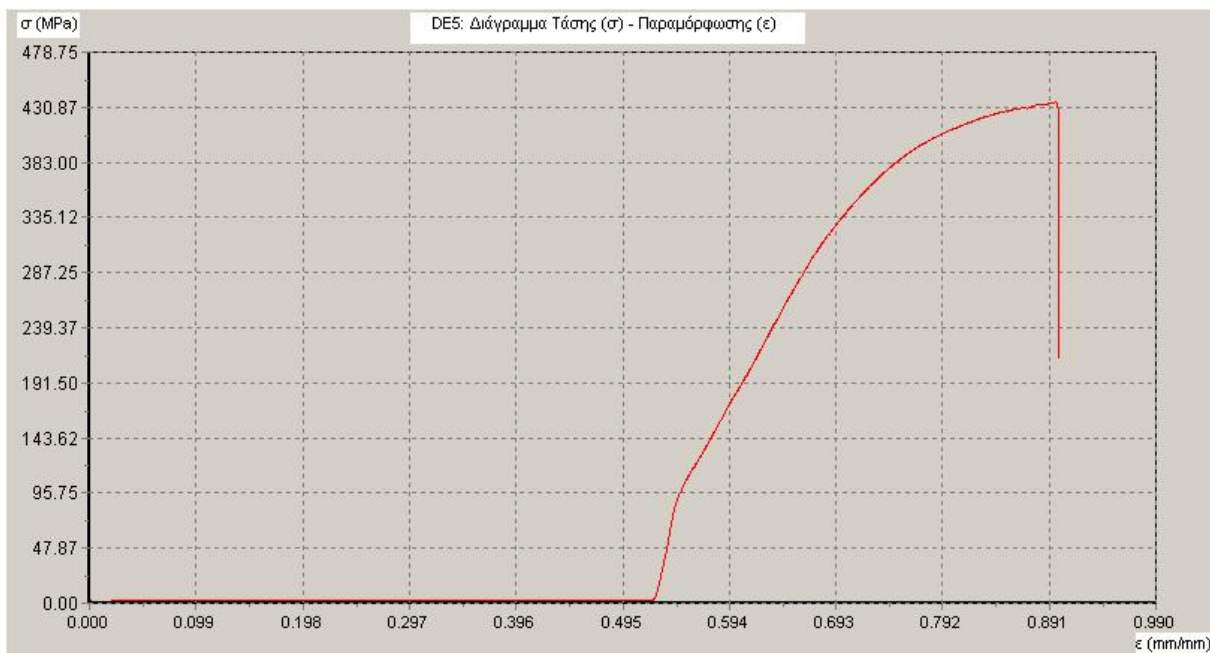
Να σημειωθεί, ότι παρά την ύπαρξη κα δεύτερου δοκιμίου (DE6) παρασκευασμένου στις ίδιες συνθήκες με το DE5, δεν κατέστη δυνατή η μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του που θα προέκυπταν από τη δοκιμή εφελκυσμού, αφού η θραύση του κατά την εκτέλεση της δοκιμής πραγματοποιήθηκε εκτός των ορίων της περιοχής επισήμανσης, δηλαδή σε μη ανεκτή περιοχή μετρήσεων, οπότε και η δοκιμή απορρίφθηκε. Όταν η θραύση του δοκιμίου συντελείται σε περιοχή εκτός των ορίων επισήμανσης θεωρείται ότι η καταπόνηση στην περιοχή αυτή δεν είναι ένας απλός εφελκυσμός, αλλά λόγω της επίδρασης της στήριξης, η κατάσταση έντασης (στην περιοχή αυτή) είναι σύνθετη και αγνώστου μορφής.

Ένα επιπλέον στοιχείο που προκύπτει από τους Πίνακες 4.2 και 4.3 είναι η σημαντική αριθμητική προσέγγιση που υπάρχει μεταξύ του ορίου διαρροής και της τάσης θραύσης (αντοχή σε εφελκυσμό,

R_m) στα περισσότερα απλά και σύνθετα ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένα δοκίμια εφελκυσμού που μελετήθηκαν. Σε κάποιες περιπτώσεις δοκιμίων οι ίσες και σε κάποιες άλλες οι σχεδόν ίσες τιμές μεταξύ του ορίου διαρροής και της τάσης θραύσης τους, αποδεικνύουν τη ψαθυρή θραύση που παρουσίασαν τα απλά και σύνθετα ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένα δοκίμια εφελκυσμού. Η θραύση τους επέρχεται αμέσως μετά τη διαρροή, με ελάχιστες ή σχεδόν καθόλου πλαστικές παραμορφώσεις και γι' αυτό το όριο διαρροής τους λαμβάνεται στα περισσότερα δοκίμια περίπου ίσο με τη τάση θραύσης και ο αποχωρισμός τους γίνεται απότομα κατά επίπεδα κάθετα προς τη διεύθυνση φόρτισης.



Σχήμα 4.44: Διάγραμμα επιβαλλόμενου φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) για το δοκίμιο DE5 ($S_n / t_{DC} = 3$ h).



Σχήμα 4.45: Διάγραμμα τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) για το δοκίμιο DE5 ($\text{Sn} / t_{DC} = 3 \text{ h}$).

Αξιολογώντας τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα των Πινάκων 4.2 και 4.3 καθώς και όλων των παραπάνω διαγραμμάτων για το σύνολο των δοκιμίων εφελκυσμού που μελετήθηκαν, προκύπτουν ουσιώδη και πρακτικής φύσεως συμπεράσματα που αφορούν τη μηχανική συμπεριφορά των τελευταίων.

Οι καμπύλες τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) των δοκιμίων που παρουσιάστηκαν παραπάνω, διακρίνονται σε διάφορα τμήματα που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές ιδιότητες των κραμάτων επικασσιτερωμένου ορείχαλκου και τα οποία χαρακτηρίζουν. Έτσι λοιπόν, τα διαγράμματα τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) παρουσιάζουν μία αρχική μη γραμμική περιοχή (Toe Region) που ακολουθείται από μία γραμμική περιοχή, κατά την οποία η συμπεριφορά του κράματος θεωρείται ότι είναι ελαστική, δηλαδή το κράμα επανέρχεται στο αρχικό του σχήμα εάν σταματήσει η εφαρμογή της δύναμης. Σε αυτή την περιοχή ισχύει ο Νόμος του Hooke, σύμφωνα με τον οποίο η παραμόρφωση παρουσιάζει γραμμική σχέση με την εφαρμοζόμενη δύναμη. Η τάση και η παραμόρφωση σχετίζονται με μία γραμμική σταθερά η οποία αποκαλείται μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο Young.

Σε ένα σημείο των καμπύλων, που καλείται όριο αναλογίας (Limit of Proportionality), τα διαγράμματα καμπυλώνονται και δεν ισχύει πια ο Νόμος του Hooke. Ακολουθεί ένα μέγεθος τάσης, το οποίο αποκαλείται όριο ελαστικότητας (Yield Point), πέραν του οποίου η παραμόρφωση είναι μόνιμη. Η περιοχή αυτή καλείται πλαστική. Στην περιοχή αυτή υπάρχει σημαντική απώλεια ενέργειας. Αυξανόμενης της τάσης περιγράφεται η ύπαρξη του ορίου διαρροής, πέρα από το οποίο διαπιστώνεται πολύ μικρή αύξηση των παραμορφώσεων με μικρή αύξηση των τάσεων τόσο στα απλά όσο και σύνθετα επικασσιτερωμένα δοκίμια εφελκυσμού. Αυξανόμενης της φόρτισης αναπτύσσεται η τάση θραύσης, στην οποία προκαλείται θραύση των δοκιμίων εφελκυσμού, τα οποία έχουν επιμηκυνθεί μέχρι την επιμήκυνση θραύσης.

Κατά τη θραύση των δοκιμίων ακούστηκε χαρακτηριστικός ήχος που οφείλεται στην απελευθέρωση ενέργειας. Το μέγιστο φορτίο ή μέγιστη τάση είναι το φορτίο ή η τάση που αναπτύσσονται αντίστοιχα σε αυτό το σημείο και θεωρούνται έκφραση της αντοχής του υλικού. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, παρατηρήθηκε ότι η αντοχή σε εφελκυσμό των απλά επικασσιτερωμένων δοκιμίων (DE1 - DE5) υφίσταται μία ελάχιστη μείωση (από 20 MPa έως 70 MPa) σε σχέση με την αντοχή των ορειχάλκινων δοκιμίων (Πίνακας 4.2 & 4.3: DE Brass (1) και DE Brass (2)). Παρομοίως, η αντοχή σε εφελκυσμό των σύνθετων επικαλυμμένων δοκιμίων Sn/TiO₂ (DE7 - DE10) φαίνεται να εμφανίζει ελάχιστα μεγαλύτερη μείωση (από 50 MPa έως 80 MPa) σε σχέση με την αντοχή των ορειχάλκινων δοκιμίων (Πίνακας 4.3: DE Brass (1) και DE Brass (2)). Επιπλέον, διαπιστώνεται πως η αντοχή σε εφελκυσμό τόσο των απλών όσο και των σύνθετων επικασσιτερωμένων δοκιμίων παρουσιάζει μία

πτωτική τάση όσο ο χρόνος απόθεσης της επικασσιτέρωσης (t_{DC}) έχει μεγαλύτερη διάρκεια, δηλαδή όσο το πάχος επικασσιτέρωσης αυξάνεται πάνω στα ορειχάλκινα δοκίμια.

Αντίστοιχα, προκύπτει για την επιμήκυνση θραύσεως (%) τόσο των απλών όσο και των σύνθετων επικασσιτερωμένων δοκιμίων, μία πτώση στην τιμή της (από 5,65 % έως 6,95 %) σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που μετρήθηκε για τα ορειχάλκινα δοκίμια (Πίνακας 4.2 & 4.3: DE Brass (1) και DE Brass (2)).

Εν τέλει, από τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού προκύπτει ότι αύξηση του πάχους επικασσιτέρωσης στα ορειχάλκινα δοκίμια έχει ως αποτέλεσμα την ελάχιστη μείωση της αντοχής τους σε εφελκυσμό με εμφάνιση μικρότερης απορρόφησης ενέργειας, η οποία αποτελεί μέτρο της σκληρότητας. Επίσης, αύξηση του πάχους επικασσιτέρωσης φαίνεται πως αυξάνει τη ψαθυρότητα των ορειχάλκινων δοκιμίων, μειώνοντας τη μέγιστη παραμόρφωση τους υπό φόρτιση καθώς επίσης και τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας.

4.3.2 Δοκιμή Αντοχής σε Κρούση

Η μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών σε κρουστικά φορτία γίνεται με τη μέτρηση της ενέργειας που αποθηκεύεται στο δοκίμιο κατά τη θραύση του. Το όργανο που χρησιμοποιείται ονομάζεται εκκρεμές και για τη θραύση του δοκιμίου χρησιμοποιεί μία βαριά σφύρα. Η διαφορά της δυναμικής ενέργειας μεταξύ της τελικής και της αρχικής θέσης της σφύρας δίνει και το απαιτούμενο για τη θραύση μηχανικό έργο.

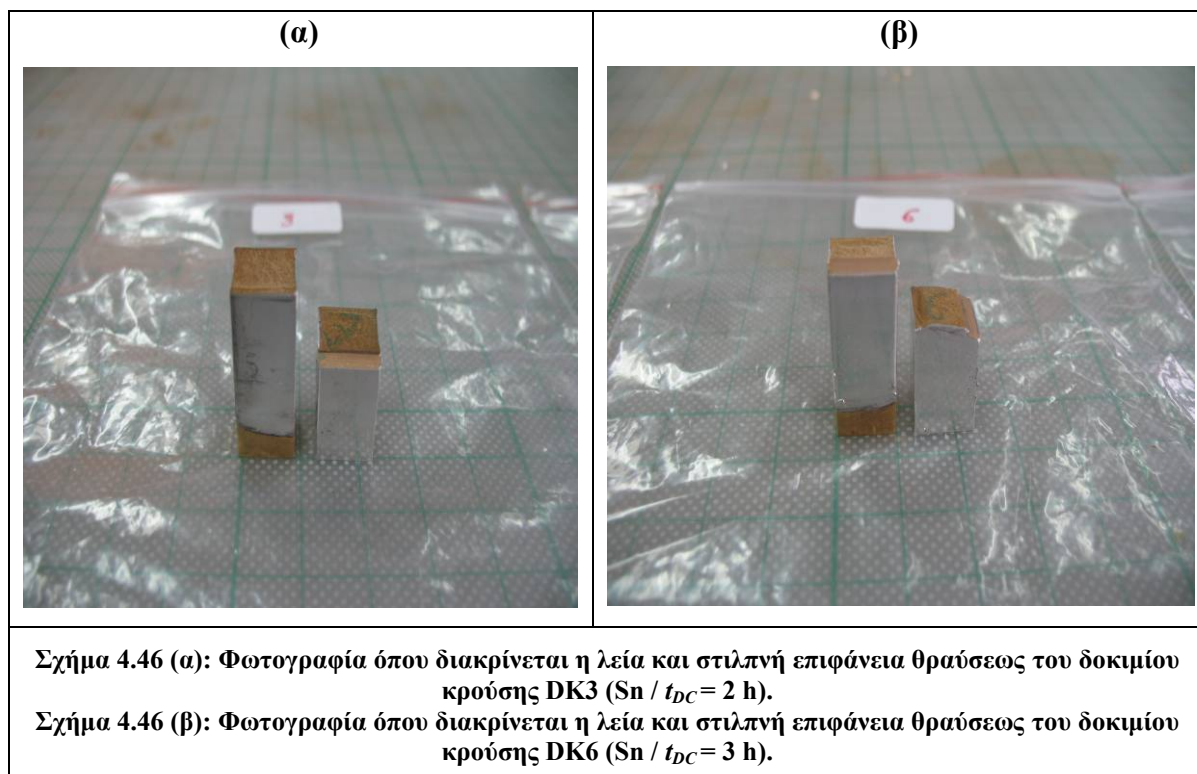
Συνολικά, παρασκευάστηκαν οχτώ επικασσιτερωμένα δοκίμια κρούσης τα οποία και δοκιμάστηκαν μαζί με άλλο ένα δοκίμιο με κωδικό DK Brass όπου δεν είχε επικάλυψη, στη μηχανή κρούσης Avery Denison (300 J). Τα δοκίμια κρούσης ήταν τετραγωνικής διατομής (10 mm x 10 mm) και στο μέσον τους διαμορφώθηκε εγκοπή για την εξασφάλιση της συγκέντρωσης των τάσεων, χρησιμοποιώντας τη συσκευή διαμόρφωσης εγκοπών κρούσης RMU με οδοντωτό κανόνα σχηματισμού εγκοπής 'V'. Στον Πίνακα 4.4, συνοψίζονται οι μετρήσεις αντοχής σε κρούση για το σύνολο των δοκιμίων.

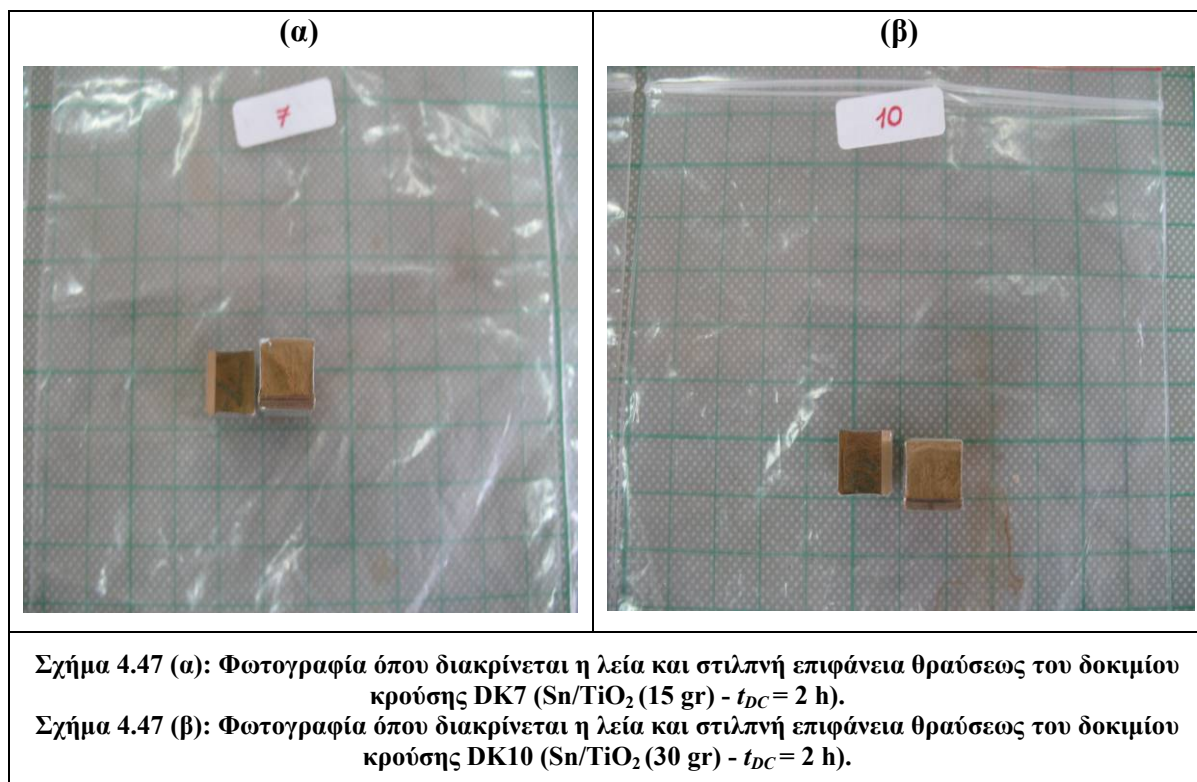
Οι μετρήσεις αντοχής σε κρούση πραγματοποιήθηκαν σε διάταξη 'Charpy'. Παρόλο που δε διαπιστώθηκε αξιόλογη μεταβολή της απορροφημένης ενέργειας κρούσης, μεταξύ των απλά επικασσιτερωμένων δοκιμίων αλλά ούτε και των σύνθετων δοκιμίων με επικάλυψη Sn/TiO₂, εντούτοις προκύπτει η ελάχιστη μείωσή της όσο το πάχος της επικασσιτέρωσης αυξάνεται. Στο δοκίμιο DK Brass δεν είχε γίνει επικάλυψη, γι' αυτό και μετρήθηκαν υψηλότερες τιμές απορροφημένης ενέργειας κρούσης σε σχέση με τα υπόλοιπα επικασσιτερωμένα δοκίμια, μιας και ο κασσίτερος είναι σημαντικά μαλακότερος από τον ορείχαλκο, προσδίδοντας αυτήν την ιδιότητα του και στην επιφάνεια των επικασσιτερωμένων δοκιμίων, όπως προκύπτει και από τις μετρήσεις.

Κωδικός Δοκιμίου - Επικάλυψη	Χρόνος Απόθεσης (t_{DC})	Πάχος Επικασσιτέρωσης (μm)	Αντοχή σε Κρούση (J)
DK1 - Sn	50 mn.	$70 \pm 1,0$	10,0
DK2 - Sn	2 h	$152 \pm 3,0$	8,0
DK3 - Sn	2 h	$150 \pm 3,0$	8,0
DK4 - Sn	50 mn.	$71 \pm 1,0$	10,0
DK5 - Sn	3 h	$236 \pm 4,0$	6,0
DK6 - Sn	3 h	$240 \pm 5,0$	6,0
DK7 - Sn/TiO ₂ (15g TiO ₂)	2 h	$158 \pm 2,0$	8,0
DK10 - Sn/TiO ₂ (30g TiO ₂)	2 h	$161 \pm 1,0$	8,0
DK Brass	-	-	11,0

Πίνακας 4.4: Μετρήσεις αντοχής σε κρούση (J).

Αμέσως μετά τη δοκιμή κρούσης, εξετάστηκε η μορφή της επιφάνειας θραύσης όλων των δοκιμίων κρούσης. Από την εξέταση αυτή διαπιστώθηκε η λεία και στιλπνή επιφάνεια θραύσης αυτών, γεγονός που αποτελεί ένδειξη ψαθυρής θραύσης. Στα Σχήματα 4.46 και 4.47 παρουσιάζονται ενδεικτικά χαρακτηριστικές φωτογραφίες των επιφανειών θραύσης των δοκιμίων DK3, DK6, DK7 και DK10. Παρατηρείται πλήρης διαχωρισμός των δοκιμίων σε δύο τμήματα. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη μεγάλη αρχική δυναμική ενέργεια της σφύρας κρούσης αλλά και στον τρόπο στήριξης των δοκιμίων.





4.3.3 Μικροσκληρότητα των Επικαλύψεων κατά ‘Vickers’

Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας των επικαλύψεων, απλών και σύνθετων, πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο Vickers (HV, σε kp/mm^2) σε μικροσκληρόμετρο της εταιρείας ‘Struers’, μοντέλο Duramin - 10 / 20. Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από ένα μικροσκληρόμετρο προσαρτημένο σε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο και ολόκληρη η διάταξη συνδέεται με H/Y στην οθόνη του οποίου γίνεται η επεξεργασία του αποτυπώματος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλογραφίας του Κέντρου Δοκιμών Ερευνών & Προτύπων (Κ.Δ.Ε.Π.) της Δ.Ε.Η. Α.Ε.

Μετρήσεις ως προς τη μικροσκληρότητα έγιναν στις επικαλύψεις των επιφανειών των δοκιμίων κρούσης εξαιτίας της γεωμετρίας των τελευταίων, που διευκόλυναν την πραγματοποίηση αυτών των μετρήσεων. Σε όλες τις μετρήσεις μικροσκληρότητας που πραγματοποιήθηκαν το επιβαλλόμενο φορτίο (F) και ο χρόνος επιβολής του ($t_{im.}$) διατηρήθηκαν σταθερά, ώστε να είναι μεταξύ τους συγκρίσιμα τα αποτελέσματα όλων των δοκιμίων. Επιλέχτηκε το φορτίο επιβολής να είναι 100 p και ο χρόνος επιβολής αυτού 10 sec. έτσι ώστε κάθε αποτύπωμα να έχει μέγεθος επαρκές και οι μετρήσεις μικροσκληρότητας να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής. Ο προσδιορισμός της περιοχής μικροσκληρομέτρησης καθώς επίσης και η μέτρηση των διαγώνιων του αποτυπώματος του διεισδυτή έγινε με τη βοήθεια μικροσκοπίου υψηλής ευκρίνειας.

Προκειμένου μάλιστα να προσδιοριστεί η μικροσκληρότητα των αποθεμάτων των δοκιμίων με τη μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία, από κάθε απόθεμα - δοκίμιο ελήφθησαν αρκετές μετρήσεις (12 ή και περισσότερες μετρήσεις από κάθε δοκίμιο), για να υπολογιστεί τελικά η μέση τιμή HV. Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν και στις τέσσερις έδρες του κάθε δοκιμίου κρούσης και έγιναν σε σημεία τους που απείχαν αρκετά μεταξύ τους ώστε να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις από τις γειτονικές τους.

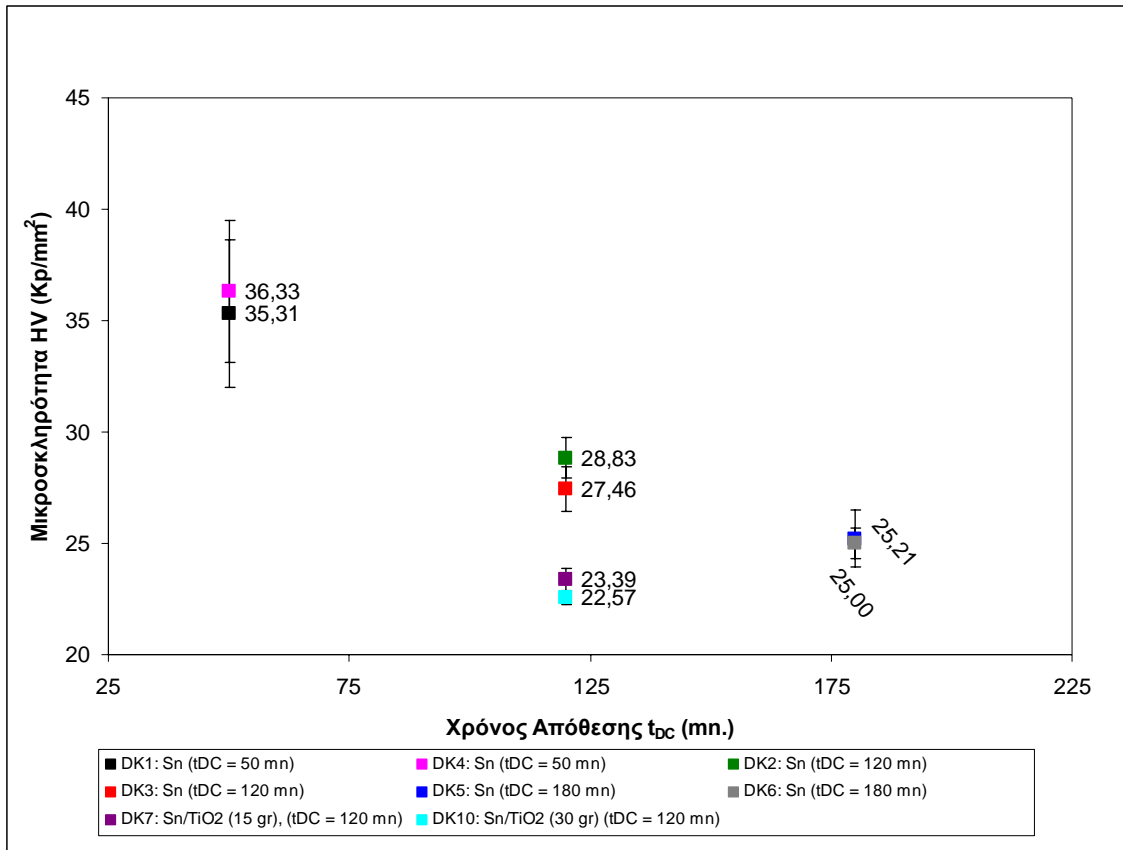
Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις μικροσκληρότητας στην επιφάνεια των δοκιμίων κρούσης των απλών και σύνθετων επικαλύψεων συνοψίζονται στον Πίνακα 4.5, όπου υπάρχει και η τιμή της τυπικής απόκλισης των μετρήσεων. Στον Πίνακα 4.5 δίνεται η μέση τιμή μικροσκληρότητας HV για κάθε δοκίμιο, ενώ στο διάγραμμα του Σχήματος 4.48 απεικονίζονται οι τιμές μικροσκληρότητας συναρτήσει του χρόνου απόθεσης (t_{DC}) του κάθε δοκιμίου. Οι αναλυτικές μετρήσεις μικροσκληρότητας των δοκιμίων (12 ή και περισσότερες μετρήσεις για κάθε δοκίμιο) επισυνάπτονται στο Παράρτημα.

Από τις μετρήσεις της μικροσκληρότητας, προέκυψε για τα απλά επικασσιτερωμένα δοκίμια κρούσης που παρασκευάστηκαν σε συνθήκες συνεχούς ρεύματος ότι αύξηση του πάχους επικασσιτέρωσης προκαλεί μείωση στην τιμή της σκληρότητας κατά Vickers των επικαλύψεων. Για τα σύνθετα δοκίμια με επικάλυψη Sn/TiO₂ που παρασκευάστηκαν σε συνθήκες συνεχούς ρεύματος, φαίνεται η προσθήκη σωματιδίων TiO₂ να επηρεάζει ελάχιστα τη σκληρότητα των επικαλύψεων κατά Vickers, για τις συγκεκριμένες ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν. Τα δοκίμια DK7 και DK10, με σύνθετη επικάλυψη, εμφανίζουν πάντως ελάχιστα μικρότερη σκληρότητα σε σχέση με τα απλά επικασσιτερωμένα δοκίμια DK2 και DK3 με τα οποία έχουν ίδιο χρόνο απόθεσης (2 h).

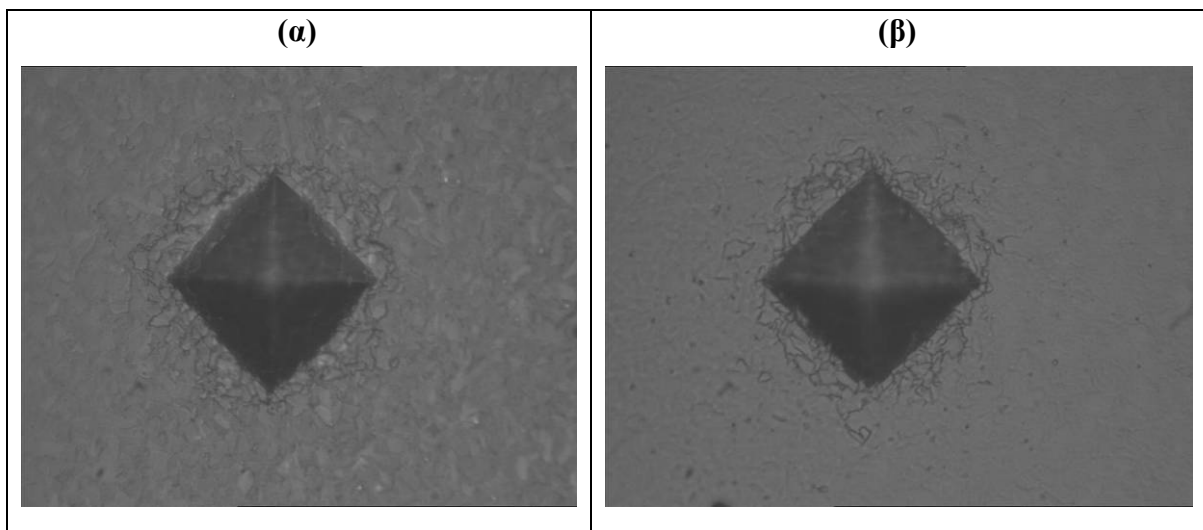
Κωδικός Δοκιμίου - Επικάλυψη	Χρόνος Απόθεσης (t_{DC})	Πάχος Επικασσιτέρωσης (μm)	Μικροσκληρότητα κατά 'Vickers' Μέση Τιμή (HV) (Kp/mm^2)
DK1 - Sn	50 mn.	70 ± 1,0	35,51 ± 2,0
DK2 - Sn	2 h	152 ± 3,0	28,83 ± 0,5
DK3 - Sn	2 h	150 ± 3,0	27,46 ± 0,4
DK4 - Sn	50 mn.	71 ± 1,0	36,33 ± 2,3
DK5 - Sn	3 h	236 ± 4,0	25,21 ± 0,6
DK6 - Sn	3 h	240 ± 5,0	25,00 ± 0,5
DK7 - Sn/TiO ₂ (15g TiO ₂)	2 h	158 ± 2,0	23,39 ± 0,3
DK10 - Sn/TiO ₂ (30g TiO ₂)	2 h	161 ± 1,0	22,57 ± 0,2
DK Brass	-	-	170,33 ± 7,6

Πίνακας 4.5: Μετρήσεις μικροσκληρότητας κατά 'Vickers'.

Επίσης, από το διάγραμμα του Σχήματος 4.48 φαίνεται ότι τις μεγαλύτερες τιμές μικροσκληρότητας έχουν τα δοκίμια DK1 και DK4. Τα δοκίμια αυτά έχουν απλές επικαλύψεις κασσιτέρου με χρόνο απόθεσης $t_{DC} = 50$ mn. και άρα το μικρότερο πάχος επικασσιτέρωσης σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια που οι χρόνοι απόθεσης ήταν μεγαλύτεροι.



Σχήμα 4.48: Μεταβολή της μικροσκληρότητας κατά Vickers των απλών και σύνθετων επικαλύψεων συναρτήσει του χρόνου απόθεσης (t_{DC}).

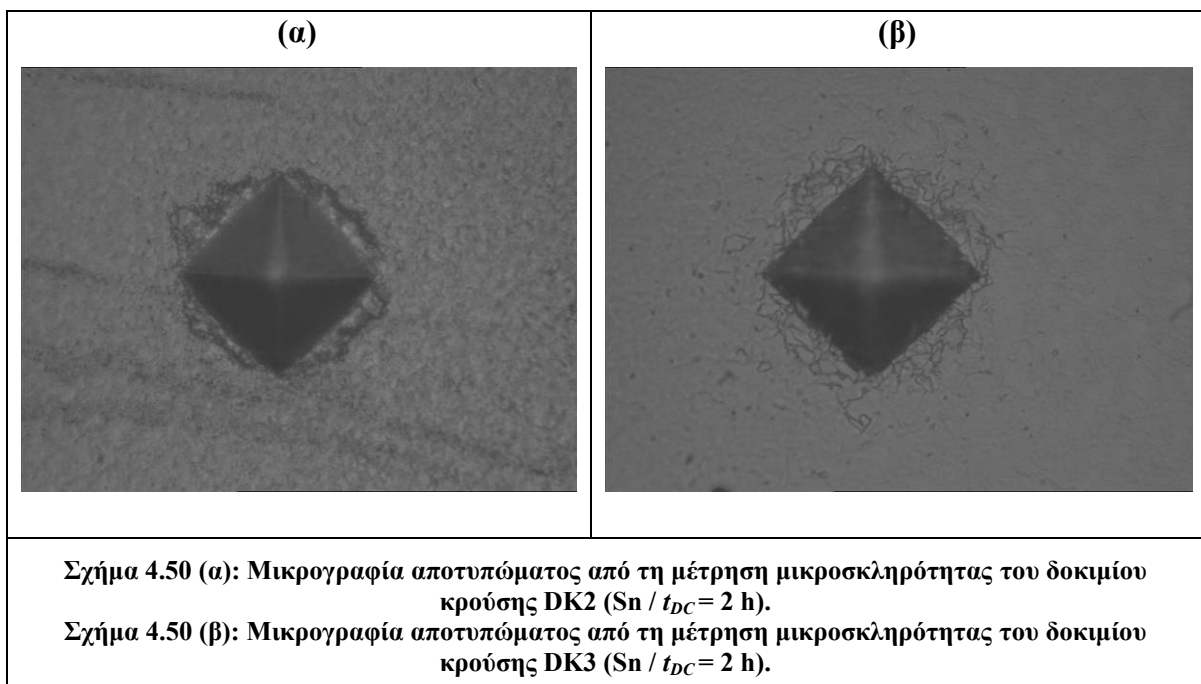


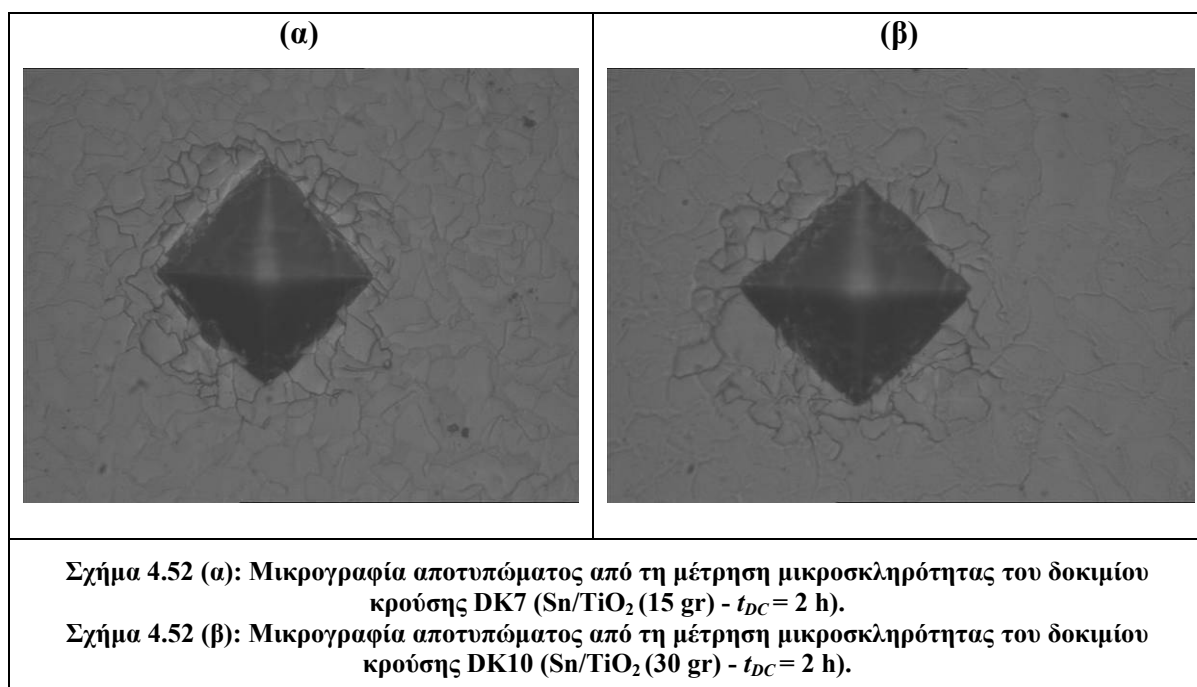
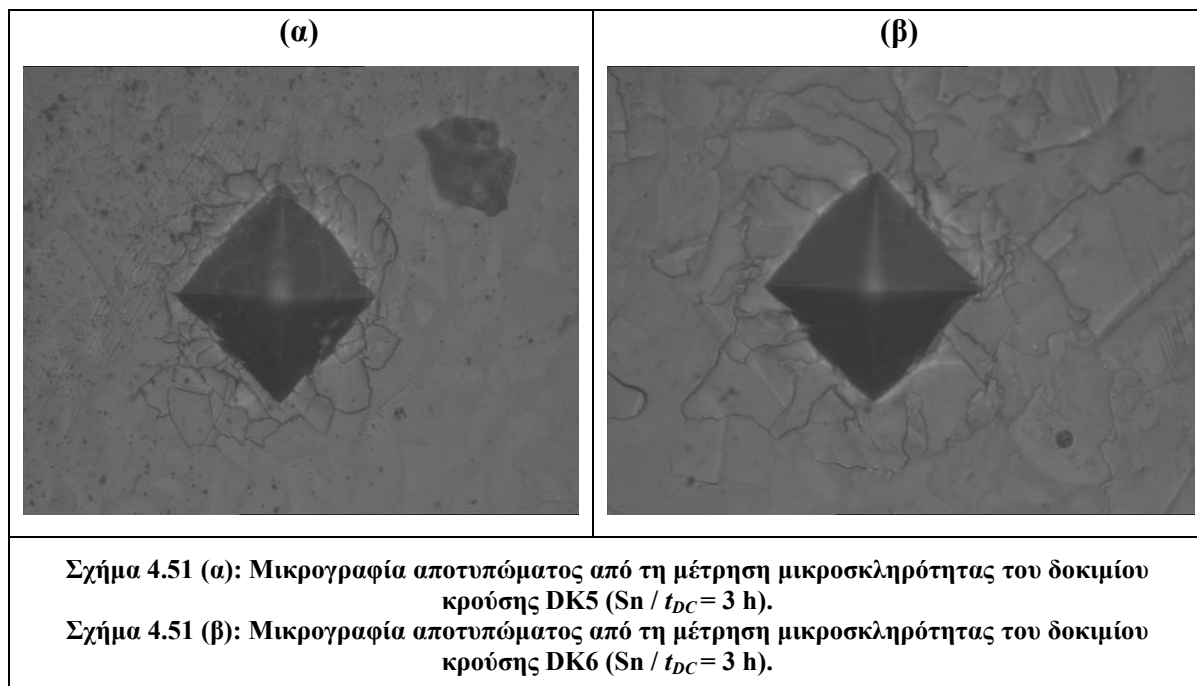
Σχήμα 4.49 (α): Μικρογραφία αποτυπώματος από τη μέτρηση μικροσκληρότητας του δοκιμίου κρούσης DK1 ($S_n / t_{DC} = 50 \text{ mn}$).
Σχήμα 4.49 (β): Μικρογραφία αποτυπώματος από τη μέτρηση μικροσκληρότητας του δοκιμίου κρούσης DK4 ($S_n / t_{DC} = 50 \text{ mn}$).

Για χρόνους απόθεσης μεγαλύτερους ($t_{DC} = 2 \text{ h}$ και $t_{DC} = 3 \text{ h}$) τα δοκίμια DK2, DK3, DK5 και DK6 αντίστοιχα εμφανίζουν τιμές μικροσκληρότητας μεταξύ 25 και 29 Kp/mm². Επιπλέον, στο δοκίμιο DK Brass δεν έχει γίνει επικάλυψη με αποτέλεσμα να μετρηθεί υψηλότερη τιμή σκληρότητας σε σχέση με τα υπόλοιπα επικασσιτερωμένα δοκίμια, της τάξεως των 170 Kp/mm², όπως διαπιστώνεται και στον Πίνακα 4.5. Αυτό συμβαίνει, μιας και ο κασσίτερος είναι σημαντικά μαλακότερος από τον ορείχαλκο, προσδίδοντας αυτήν την ιδιότητα του και στην επιφάνεια των επικασσιτερωμένων δοκιμίων, όπως προκύπτει και από τις μετρήσεις. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος απόθεσης του κασσιτέρου στην επιφάνεια των δοκιμίων και άρα και μεγαλύτερο το πάχος της επικασσιτέρωσης, τόσο μειώνεται και η σκληρότητα των επιφανειών των δοκιμίων.

Στα Σχήματα 4.49, 4.50, 4.51 και 4.52 παρουσιάζονται μικρογραφίες αποτυπωμάτων από τις μετρήσεις μικροσκληρότητας των δοκιμίων DK1, DK2, DK3, DK4, DK5, DK6, DK7 και DK10, οι οποίες τραβήχτηκαν από τη ψηφιακή κάμερα που διαθέτει ενσωματωμένη το οπτικό μικροσκόπιο του μικροσκληρόμετρου ‘Struers Duramin - 10 / 20’, του Εργαστηρίου Μεταλλογραφίας του Κ.Δ.Ε.Π.

Στην περίπτωση των απλών ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων κασσιτέρου και με σκοπό να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα, παρασκευάστηκαν από δύο δοκίμια στις ίδιες συνθήκες, και όπως φανερώνουν και οι μετρήσεις μικροσκληρότητας που παρατίθενται στον Πίνακα 4.5, παρουσιάζεται πολύ καλή επαναληψιμότητα των τιμών μικροσκληρότητας μεταξύ τους.





ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα όλων των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και γίνεται συνολική εκτίμηση τους. Αρχικά, γίνεται αξιολόγηση της παρασκευής τόσο των απλών ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων κασσιτέρου όσο και των σύνθετων επικαλύψεων Sn/TiO₂ σε ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης με την επιβολή συνεχούς ρεύματος. Στη συνέχεια, γίνεται παρουσίαση της δομής και της μορφολογίας της επιφάνειας των επικαλύψεων με χρήση των μικρογραφιών τους τόσο από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (S.E.M.) όσο και από το οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο. Επιπλέον, με τη βοήθεια της φασματοσκοπίας διερχόμενης ενέργειας (EDAX), σε επιλεγμένα δοκίμια, πραγματοποιήθηκε σημειακή ανάλυση για την επιτόπια ταυτοποίηση των στοιχείων καθώς και χαρτογράφηση στοιχείων για την εκτίμηση του ποσοστού ενσωμάτωσης των σωματιδίων στη μήτρα κασσιτέρου. Τέλος, στα πλαίσια της μελέτης των μηχανικών ιδιοτήτων των επικαλύψεων παρουσιάζονται οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα από τις μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού, κρούσης και μικροσκληρομέτρησης.

5.2 Μελέτη Παρασκευής Απλών Ηλεκτρολυτικών Επικαλύψεων (Sn) & Σύνθετων Επικαλύψεων (Sn/TiO₂)

Η παρασκευή των ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων του κασσιτέρου πραγματοποιήθηκε σε διάταξη βιομηχανικού προτύπου, υπό καθεστώς συνεχούς ρεύματος. Παρασκευάστηκαν απλές αλλά και σύνθετες ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις κασσιτέρου σε δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης. Για την παρασκευή των ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρολυτικό κελίο με ποσότητα 1750 mL από το βιομηχανικό λουτρό στιλπνής επικασσιτέρωσης 'CULMO' και στις απλές αλλά και στις σύνθετες ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις κασσιτέρου. Επιλέχθηκε η θερμοκρασία για την παρασκευή των ηλεκτρολυτικών αποθεμάτων κασσιτέρου να είναι μεταξύ 18 - 25°C, που αποτελεί και τη συνηθέστερη βιομηχανική πρακτική, ενώ η πυκνότητα του ρεύματος απόθεσης ήταν ίση με 2,5 A/dm². Επίσης, για την ηλεκτρολυτική επικασσιτέρωση των δοκιμίων κρούσης και εφελκυσμού η ένταση του ρεύματος υπολογίστηκε στα 0,58 A και 0,64 A, αντίστοιχα. Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων διατηρήθηκαν σταθερές τόσο οι συνθήκες εφαρμογής του συνεχούς ρεύματος όσο και η γεωμετρία του ηλεκτρολυτικού κελίου, έτσι ώστε να αποφευχθεί η πιθανή εμφάνιση αποκλίσεων στα πειραματικά δεδομένα.

Ως ηλεκτρόδια εργασίας (WE) (κάθοδος) χρησιμοποιήθηκαν τα ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης, κατάλληλα προσδεμένα με σύρμα χαλκού στη μέση της ενδιάμεσης μπάρας του ηλεκτρολυτικού κελλίου. Η προκύπτουσα ελεύθερη επιφάνεια απόθεσης για τα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης είχε εμβαδόν ίσο με $0,248 \text{ dm}^2$ και $0,23 \text{ dm}^2$ αντίστοιχα.

Ως ηλεκτρόδια μέτρησης (CE) (άνοδος) χρησιμοποιήθηκαν δύο ορθογώνιες πλάκες υψηλής καθαρότητας σε κασσίτερο ($\approx 99,9 \%$), οι οποίες ήταν τοποθετημένες στο εσωτερικό τοίχωμα του ηλεκτρολυτικού κελλίου και είχαν ύψος περίπου ίσο με το μισό του ύψους του κελλίου. Η συνολική επιφάνεια της ανόδου είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή της καθόδου προκειμένου να διευκολύνεται η διάλυσή της και να αποφεύγονται φαινόμενα πόλωσης της κυψελίδας.

Για την παρασκευή των απλών ηλεκτρολυτικών αποθεμάτων κασσίτερου, εφαρμόστηκε μαγνητική ανάδευση στον πυθμένα της κυψελίδας με ταχύτητα 250 rpm για να επιτευχθεί ομοιογενής διασπορά του ηλεκτρολύτη και να διατηρηθούν τα σωματίδια σε αιώρηση μέσα στο λουτρό. Τόσο στα δοκίμια εφελκυσμού όσο και στα δοκίμια κρούσης, η ηλεκτρολυτική επικασσιτέρωση ήταν επιτυχής, παρά τη σύνθετη γεωμετρία των δοκιμίων. Επίσης, διαπιστώθηκε η επίτευξη πιο ομοιόμορφης επικασσιτέρωσης στα δοκίμια κρούσης όταν οι έδρες αυτών τοποθετήθηκαν υπό γωνία 45° σε σχέση με τις ανόδους (τις ορθογώνιες πλάκες κασσίτερου), παρά όταν οι έδρες τους ήταν παράλληλες ως προς τις ανόδους.

Για την παρασκευή των σύνθετων επικαλύψεων χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια TiO_2 τύπου ανατάση και μέσης διαμέτρου $4,23 \mu\text{m}$. Με στόχο τα σωματίδια TiO_2 να διατηρηθούν σε αυξημένη αιώρηση και σε υψηλή ομοιογενή διασπορά μέσα στο ηλεκτρολυτικό λουτρό, κατά την παρασκευή των σύνθετων ηλεκτρολυτικών αποθεμάτων κασσίτερου, εφαρμόστηκε μηχανική ανάδευση στο εσωτερικό της κυψελίδας με ταχύτητα 7600 rpm για τουλάχιστον 12 ώρες πριν από κάθε απόθεση. Και σε αυτή την περίπτωση, η σύνθετη ηλεκτρολυτική επικάλυψη (Sn/TiO_2) ήταν επιτυχής τόσο στα δοκίμια εφελκυσμού όσο και στα δοκίμια κρούσης παρά τη σύνθετη γεωμετρία τους. Κοινή διαπίστωση, η επίτευξη πιο ομοιόμορφης επιμετάλλωσης στα δοκίμια κρούσης όταν οι έδρες αυτών τοποθετήθηκαν υπό γωνία 45° σε σχέση με τις ανόδους (τις ορθογώνιες πλάκες κασσίτερου), παρά όταν οι έδρες τους ήταν παράλληλες ως προς τις ανόδους.

5.3 Μελέτη της Δομής & Μορφολογίας της Επιφάνειας των Επικαλύψεων

Η μελέτη της μορφολογίας της επιφάνειας των επικαλύψεων πραγματοποιήθηκε με την τεχνική της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (S.E.M.) και με οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο. Ελήφθησαν μικρογραφίες της επιφάνειας των δοκιμίων καθώς και κάθετων τομών τους. Αρχικά, εξετάστηκε από ένα δοκίμιο κρούσης με απλή επικάλυψη κασσίτερου για τρεις διαφορετικούς

χρόνους απόθεσης, $t_{DC} = 50$ mn, 2 h, 3 h και πιο συγκεκριμένα τα δοκίμια με κωδικούς DK3, DK4 και DK6. Μετέπειτα, εξετάστηκε και ένα δοκίμιο εφελκυσμού με απλή επικάλυψη κασσιτέρου, με κωδικό DE6 και χρόνο απόθεσης, $t_{DC} = 3$ h.

Από τις S.E.M. μικρογραφίες φαίνεται η μορφολογία της επιφάνειας του κασσιτέρου στα δοκίμια κρούσης και εφελκυσμού που εξετάστηκαν. Διαπιστώνεται η ομοιόμορφη και συμπαγής απόθεση του κασσιτέρου επί του ορειχάλκινου υποστρώματος. Επίσης, έγινε στοιχειακή ανάλυση EDAX των προαναφερθέντων δοκιμίων κρούσης και εφελκυσμού από την οποία διαπιστώθηκε η υψηλή περιεκτικότητα (Sn: 98,38 % κ.β. για $t_{DC} = 50$ mn, Sn: 96,29 % κ.β. για $t_{DC} = 2$ h, Sn: 97,97 % κ.β. για $t_{DC} = 3$ h) σε κασσίτερο της επιφάνειας των δοκιμίων σε όλες τις μετρήσεις που έγιναν. Ελήφθησαν αναλύσεις από διάφορα σημεία της επιφάνειας των δοκιμίων (spot analyses).

Όσον αφορά τις σύνθετες αποθέσεις Sn/TiO₂, στα δοκίμια κρούσης και εφελκυσμού DK7, DK10, DE9 και DE10 διαπιστώνεται επίσης από τις S.E.M. μικρογραφίες η αρκετά ομοιόμορφη και συμπαγής απόθεση Sn/TiO₂ επί του ορειχάλκινου υποστρώματος. Όμως, από τη στοιχειακή ανάλυση EDAX που πραγματοποιήθηκε στα προαναφερθέντα με σύνθετες αποθέσεις Sn/TiO₂ δοκίμια κρούσης και εφελκυσμού, προέκυψε τελικά να μην πιστοποιείται η ύπαρξη TiO₂ παρά μόνο του Sn. Αυτό πιθανότατα να οφείλεται στη χαμηλή συγκέντρωση σωματιδίων TiO₂ που προστέθηκαν στο ηλεκτρολυτικό λουτρό επικασσιτέρωσης.

Επιπρόσθετα, και από την οπτική μελέτη των επιφανειών των επικασσιτερωμένων δοκιμίων κρούσης που έγινε μέσω του μεταλλογραφικού μικροσκοπίου, διαπιστώθηκε η πολύ καλή περιμετρικά απόθεση του κασσιτέρου και η ομοιόμορφη γεωμετρικά επικάλυψη των δοκιμίων. Στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο έγιναν και μετρήσεις του πάχους επικασσιτέρωσης όλων των δοκιμίων κρούσης. Οι μετρήσεις απέδειξαν πως το πάχος της επικάλυψης μεταβάλλεται ανάλογα με το χρόνο απόθεσης t_{DC} του κασσιτέρου στα δοκίμια. Υπολογίστηκε, από το 2^ο νόμο του Faraday, ότι για να επιτευχθεί στα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης πάχος επικασσιτέρωσης 50 μ m, τιμή που καλύπτει το ελάχιστο προβλεπόμενο τοπικό πάχος της τεχνικής προδιαγραφής της Δ.Ε.Η. ΧΚ 11.04/10.03.88 (ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ/23.10.92) για εξαρτήματα ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, θεωρητικά ο χρόνος απόθεσης του κασσιτέρου είναι 40 mn. Για τη μελέτη όλων των δοκιμίων που επικασσιτερώθηκαν, επιλέχθηκαν χρόνοι απόθεσης $t_{DC} = 50$ mn, 2 h και 3 h που έδωσαν αντίστοιχα πάχη επικασσιτερώσεων κατά μέσο όρο 71 μ m, 155 μ m και 238 μ m, επιβεβαιώνοντας και πειραματικά το νόμο του Faraday.

Τέλος, από τα μεταλλογραφήματα που πραγματοποιήθηκαν έγιναν φανερά τα χαρακτηριστικά της μικροδομής του ορειχάλκου που χρησιμοποιήθηκε ως υπόστρωμα των δοκιμίων που επικασσιτερώθηκαν. Πρόκειται για διφασικό κράμα ορειχάλκου, δηλαδή περιέχει δύο διαφορετικές

φάσεις α και β' ($\alpha + \beta'$ ορείχαλκοι). Πιο συγκεκριμένα, από τη μελέτη των σχετικών μεταλλογραφημάτων φαίνεται ότι πρόκειται για το συχνότερο χρησιμοποιούμενο διφασικό κράμα του MUNTZ, το οποίο περιέχει $Zn \approx 40\%$. Διακρίνονται η ανοιχτόχρωμη περιοχή που αντιστοιχεί στην α -φάση και η σκουρόχρωμη περιοχή που αντιστοιχεί στη β -φάση. Το κράμα αυτό είναι σκληρό και όχι ιδιαίτερα όλκιμο, λόγω της ύπαρξης της φάσης β' . Επίσης, από την εξέταση των μεταλλογραφημάτων, οι κρύσταλλοι φαίνεται να έχουν κυτταροειδή μορφή, σχηματισμός που παρατηρείται μετά από ενδοτράχυνση και εν συνεχεία ανακρυσταλλωτική ανόπτηση.

5.4 Μελέτη των Μηχανικών Ιδιοτήτων των Επικαλύψεων

Δοκιμή Εφελκυσμού: Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δοκιμών εφελκυσμού, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα σε σχέση με τη μηχανική συμπεριφορά τόσο των δοκιμών εφελκυσμού, στα οποία έγινε ηλεκτρολυτική απόθεση κασσιτέρου, όσο και των δοκιμών εφελκυσμού στα οποία πραγματοποιήθηκε σύνθετη απόθεση Sn/TiO_2 . Επιπλέον, σε δύο ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού δεν έγινε ηλεκτρολυτική απόθεση κασσιτέρου, αλλά διατηρήθηκαν ως είχαν για να γίνει συγκριτική αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς τους με τα υπόλοιπα δοκίμια εφελκυσμού. Με σκοπό μάλιστα να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα, πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων για τα απλά επικασσιτερωμένα δοκίμια, όπου παρατηρήθηκε πολύ καλή επαναληψιμότητα τόσο στην παρασκευή των επικαλύψεων τους όσο και των μετρήσεων των μηχανικών ιδιοτήτων τους.

Καταρχήν, τα δύο ορειχάλκινα δοκίμια εφελκυσμού που δεν είχαν υποστεί ηλεκτρολυτική επικασσιτέρωση παρουσίασαν σημαντική ομοιομορφία ως προς τη εφελκυστική συμπεριφορά τους, έως τη θραύση τους, όπως φανερώνουν οι καμπύλες φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) και οι καμπύλες τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) αυτών. Επιπλέον, η αντοχή τους σε εφελκυσμό (R_m) υπολογίστηκε στα 494 MPa και 515 MPa, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές παρουσιάζουν σημαντική προσέγγιση μεταξύ τους και ταυτόχρονα έρχονται σε συμφωνία με την αντίστοιχη τιμή που ενδεικτικά δίνεται στη βιβλιογραφία για τον ορείχαλκο (518 MPa). Παρομοίως, η επιμήκυνση θραύσεως (ολκιμότητα) για τα δύο δοκίμια υπολογίστηκε 12,23 % και 11,80 % αντίστοιχα, τιμές που προσεγγίζουν το αντίστοιχο ποσοστό επιμήκυνσης που ενδεικτικά δίνεται στη βιβλιογραφία για τον ορείχαλκο ($\approx 10\%$).

Επιπρόσθετα, από τις καμπύλες τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) των δύο ορειχάλκινων δοκιμών προκύπτει η σχετικά μικρή ολκιμότητα που παρουσιάζει το συγκεκριμένο κράμα ορείχαλκου, μιας και εμφανίζεται μικρό στάδιο πλαστικής παραμόρφωσης στα αντίστοιχα διαγράμματα τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ). Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται και από την οπτική παρατήρηση των δύο ορειχάλκινων δοκιμών μετά τη θραύση τους, όπου επιβεβαιώνεται μία ήπια όλκιμη θραύση τους. Τα δύο δοκίμια φαίνεται να παρουσιάζουν τη χαρακτηριστική μορφή 'κόνου - κρατήρα', ενώ διαπιστώνεται και η παρουσία της στένωσης της διατομής ('λαιμός'), χαρακτηριστικό της πλαστικής

παραμόρφωσης που προηγείται της θραύσης για τα όλκιμα υλικά. Οι επιφάνειες τους είναι αντίστοιχα κοίλες και κυρτές στα δύο κομμάτια της θραύσης κι έχουν θαμπή όψη (ματ). Επιπλέον, μικροσκοπικά οι επιφάνειες θραύσης των δύο δοκιμίων παρουσιάζουν κοκκώδη όψη που αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα όλκιμης θραύσης.

Ένα ακόμη στοιχείο που διαπιστώνεται από τις μετρήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων εφελκυσμού που παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.2 και 4.3 (Κεφάλαιο 4), σχετίζεται με τη σημαντική ομοιότητα που προκύπτει στις μετρήσεις μεταξύ ίδιων χρόνων απόθεσης (t_{DC}) στα περισσότερα απλά και σύνθετα ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένα δοκίμια εφελκυσμού. Επίσης, από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, παρατηρήθηκε ότι η αντοχή σε εφελκυσμό των απλά επικασσιτερωμένων δοκιμίων (DE1 - DE5) υφίσταται μία ελάχιστη μείωση (από 20 MPa έως 70 MPa) σε σχέση με την αντοχή των ορειχάλκινων δοκιμίων που δεν είχαν υποστεί ηλεκτρολυτική επικασσιτέρωση (DE Brass (1) και DE Brass (2)). Παρομοίως, η αντοχή σε εφελκυσμό των σύνθετων δοκιμίων με επικάλυψη Sn/TiO₂ (DE7 - DE10) φαίνεται να εμφανίζει ελάχιστα μεγαλύτερη μείωση (από 50 MPa έως 80 MPa) σε σχέση με την αντοχή των ορειχάλκινων δοκιμίων (DE Brass (1) και DE Brass (2)). Ακόμη, διαπιστώνεται πως η αντοχή σε εφελκυσμό τόσο των απλών όσο και των σύνθετων επικασσιτερωμένων δοκιμίων παρουσιάζει μία πτωτική τάση όσο ο χρόνος απόθεσης της επικασσιτέρωσης (t_{DC}) έχει μεγαλύτερη διάρκεια, δηλαδή όσο το πάχος επικασσιτέρωσης αυξάνεται πάνω στα ορειχάλκινα δοκίμια.

Αντίστοιχα, προκύπτει για την επιμήκυνση θραύσεως (%) τόσο των απλών όσο και των σύνθετων επικασσιτερωμένων δοκιμίων, μία πτώση στην τιμή της (από 5,65 % έως 6,95 %) σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που μετρήθηκε για τα ορειχάλκινα δοκίμια (DE Brass (1) και DE Brass (2)). Το φορτίο θραύσης, τόσο των απλών όσο και των σύνθετων επικασσιτερωμένων δοκιμίων, φαίνεται να εμφανίζει μία ελάχιστη πτώση στην τιμή του όσο ο χρόνος απόθεσης (t_{DC}) αυξάνεται, ενώ λαμβάνει ελάχιστα χαμηλότερες τιμές σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που μετρήθηκε για τα ορειχάλκινα δοκίμια (DE Brass (1) και DE Brass (2)).

Επίσης, οι καμπύλες φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) και οι καμπύλες τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ε) των απλών και σύνθετων ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένων δοκιμίων εφελκυσμού παρουσίασαν σημαντική ομοιομορφία ως προς τη εφελκυστική συμπεριφορά τους, έως τη θραύση τους, μεταξύ των δοκιμίων με ίδιους χρόνους απόθεσης (t_{DC}).

Ένα επιπλέον στοιχείο που προκύπτει από τους Πίνακες 4.2 και 4.3 (Κεφάλαιο 4) είναι η σημαντική αριθμητική προσέγγιση που υπάρχει μεταξύ του ορίου διαρροής και της τάσης θραύσης (αντοχή σε εφελκυσμό, R_m) στα περισσότερα απλά και σύνθετα ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένα δοκίμια εφελκυσμού που μελετήθηκαν. Σε κάποιες περιπτώσεις δοκιμίων οι ίσες και σε κάποιες άλλες οι

σχεδόν ίσες τιμές μεταξύ του ορίου διαρροής και της τάσης θραύσης τους, αποδεικνύουν τη ψαθυρή θραύση που παρουσίασαν τα απλά και σύνθετα ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένα δοκίμια εφελκυσμού. Η θραύση τους επέρχεται αμέσως μετά τη διαρροή, με ελάχιστες ή σχεδόν καθόλου πλαστικές παραμορφώσεις και γι' αυτό το όριο διαρροής τους λαμβάνεται στα περισσότερα δοκίμια περίπου ίσο με τη τάση θραύσης και ο αποχωρισμός τους γίνεται απότομα κατά επίπεδα κάθετα προς τη διεύθυνση φόρτισης.

Στη μη όλκιμη θραύση των απλών και σύνθετων ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένων δοκιμίων εφελκυσμού συνηγορεί και η οπτική παρατήρηση τους μετά τη θραύση τους, όπου δεν έγινε διακριτή η χαρακτηριστική μορφή 'κόνου - κρατήρα', αλλά ούτε και διαπιστώθηκε η παρουσία της στένωσης της διατομής ('λαιμός'), χαρακτηριστικό της πλαστικής παραμόρφωσης που προηγείται της θραύσης για τα όλκιμα υλικά. Αντίθετα, διαπιστώθηκε ο ψαθυρός αποχωρισμός του υλικού στις δύο επιφάνειες θραύσης, όπου δεν παρουσιάζεται σημαντική παραμόρφωση, με συναρμολόγηση των δύο κομματιών που προέκυψαν από τη θραύση. Με τον τρόπο αυτό φαίνεται να αναπαράγεται ακριβώς το αρχικό σχήμα των δοκιμίων που έσπασαν. Επιπλέον, μικροσκοπικά οι θραυσιγενείς επιφάνειες των δύο δοκιμίων παρουσιάζουν στιλπνή και σχεδόν επίπεδη μορφολογία που αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα ψαθυρής θραύσης.

Εν τέλει, από τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού προκύπτει ότι αύξηση του πάχους επικασσιτέρωσης στα ορειχάλκινα δοκίμια έχει ως αποτέλεσμα την ελάχιστη μείωση της αντοχής τους σε εφελκυσμό με εμφάνιση μικρότερης απορρόφησης ενέργειας, η οποία αποτελεί μέτρο της σκληρότητας. Επίσης, αύξηση του πάχους επικασσιτέρωσης φαίνεται πως αυξάνει τη ψαθυρότητα των ορειχάλκινων δοκιμίων, μειώνοντας τη μέγιστη παραμόρφωση τους υπό φόρτιση καθώς επίσης και τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας.

Δοκιμή Κρούσης: Οι μετρήσεις αντοχής σε κρούση πραγματοποιήθηκαν σε διάταξη 'Charpy'. Παρόλο που δε διαπιστώθηκε αξιόλογη μεταβολή της απορροφημένης ενέργειας κρούσης, μεταξύ των απλών επικασσιτερωμένων δοκιμίων αλλά ούτε και των σύνθετων δοκιμίων με επικάλυψη Sn/TiO₂, εντούτοις προκύπτει η ελάχιστη μείωσή της όσο το πάχος της επικασσιτέρωσης αυξάνεται. Στο δοκίμιο DK Brass δεν είχε γίνει επικάλυψη, γι' αυτό και μετρήθηκαν υψηλότερες τιμές απορροφημένης ενέργειας κρούσης σε σχέση με τα υπόλοιπα επικασσιτερωμένα δοκίμια, μιας και ο κασσίτερος είναι σημαντικά μαλακότερος από τον ορείχαλκο, προσδίδοντας αυτήν την ιδιότητα του και στην επιφάνεια των επικασσιτερωμένων δοκιμίων, όπως προκύπτει και από τις μετρήσεις.

Αμέσως μετά τη δοκιμή κρούσης, εξετάστηκε η μορφή της επιφάνειας θραύσης όλων των δοκιμίων κρούσης. Από την εξέταση αυτή διαπιστώθηκε η λεία και στιλπνή επιφάνεια θραύσης αυτών, γεγονός που αποτελεί ένδειξη ψαθυρής θραύσης. Τα δοκίμια διαχωρίστηκαν πλήρως σε δύο τμήματα. Το

φαινόμενο αυτό οφείλεται στη μεγάλη αρχική δυναμική ενέργεια της σφύρας κρούσης, αλλά και στον τρόπο στήριξης των δοκιμίων.

Μικροσκληρομέτρηση: Μετρήσεις ως προς τη μικροσκληρότητα έγιναν στις επικαλύψεις των επιφανειών των δοκιμίων κρούσης εξαιτίας της γεωμετρίας των τελευταίων, που διευκόλυναν την πραγματοποίηση αυτών των μετρήσεων. Σε όλες τις μετρήσεις μικροσκληρότητας που πραγματοποιήθηκαν το επιβαλλόμενο φορτίο (F) και ο χρόνος επιβολής του ($t_{int.}$) διατηρήθηκαν σταθερά, ώστε να είναι μεταξύ τους συγκρίσιμα τα αποτελέσματα όλων των δοκιμίων. Επιλέχτηκε το φορτίο επιβολής να είναι 100 p και ο χρόνος επιβολής αυτού 10 sec έτσι ώστε κάθε αποτύπωμα να έχει μέγεθος επαρκές και οι μετρήσεις μικροσκληρότητας να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής.

Από τις μετρήσεις της μικροσκληρότητας, προέκυψε για τα απλά επικασσιτερωμένα δοκίμια κρούσης που παρασκευάστηκαν σε συνθήκες συνεχούς ρεύματος ότι αύξηση του πάχους επικασσιτέρωσης προκαλεί μείωση στην τιμή της σκληρότητας κατά Vickers των επικαλύψεων. Για τα σύνθετα δοκίμια με επικάλυψη Sn/TiO₂ που παρασκευάστηκαν σε συνθήκες συνεχούς ρεύματος, φαίνεται η προσθήκη σωματιδίων TiO₂ να επηρεάζει ελάχιστα τη σκληρότητα των επικαλύψεων κατά Vickers, για τις συγκεκριμένες ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν. Τα δοκίμια DK7 και DK10, με σύνθετη επικάλυψη, εμφανίζουν πάντως ελάχιστα μικρότερη σκληρότητα σε σχέση με τα απλά επικασσιτερωμένα δοκίμια DK2 και DK3 με τα οποία έχουν ίδιο χρόνο απόθεσης (2 h). Επιπλέον, στο δοκίμιο DK Brass δεν είχε γίνει επικάλυψη με αποτέλεσμα να μετρηθεί υψηλότερη τιμή σκληρότητας σε σχέση με τα υπόλοιπα επικασσιτερωμένα δοκίμια.

5.5 Γενικό Συμπέρασμα

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής διερευνήθηκε η μέθοδος παρασκευής, η δομή, η μορφολογία και οι μηχανικές ιδιότητες ορειχάλκινων ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένων δοκιμίων ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τα ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένα εξαρτήματα ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που χρησιμοποιεί η Δ.Ε.Η. στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής της. Η έρευνα αυτή βασίστηκε στην τεχνική προδιαγραφή της Δ.Ε.Η. XK 11.04/10.03.88 (ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ/23.10.92) που επισημαίνει τις ελάχιστες απαιτήσεις που οφείλουν να ικανοποιούν αυτά ως προς τη μορφολογία και το πάχος επικάλυψης προτού παραδοθούν προς χρήση.

Από τη διερεύνηση αυτή διαπιστώθηκε ότι τόσο στα δοκίμια εφελκυσμού όσο και στα δοκίμια κρούσης η απλή ηλεκτρολυτική επικασσιτέρωση υπό καθεστώς συνεχούς ρεύματος ήταν επιτυχής, παρά τη σύνθετη γεωμετρία των δοκιμίων, με χρήση του βιομηχανικό λουτρό στιλπνής επικασσιτέρωσης 'CULMO' και για τις συγκεκριμένες συνθήκες εφαρμογής. Αντίστοιχα, αν και παρασκευαστικά έδειχναν εξίσου επιτυχής και οι σύνθετες ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις Sn/TiO₂, εντούτοις από τη στοιχειακή ανάλυση EDAX που πραγματοποιήθηκε στα δοκίμια κρούσης και

εφελκυσμού με σύνθετες αποθέσεις Sn/TiO₂, προέκυψε τελικά να μην πιστοποιείται η ύπαρξη TiO₂ παρά μόνο του Sn. Αυτό πιθανότατα να οφείλεται στη χαμηλή συγκέντρωση σωματιδίων TiO₂ που προστέθηκαν στο ηλεκτρολυτικό λουτρό επικασσιτέρωσης. Επίσης, δεν παρατηρήθηκε στα συγκεκριμένα δοκίμια και καμία αξιόλογη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Από την άλλη, η στοιχειακή ανάλυση EDAX των απλά ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένων δοκιμίων κρούσης και εφελκυσμού έδειξε υψηλή περιεκτικότητα σε κασσίτερο της επιφάνειας των δοκιμίων σε όλες τις μετρήσεις που έγιναν. Ελήφθησαν αναλύσεις από διάφορα σημεία της επιφάνειας των δοκιμίων (spot analyses). Ένα επιπλέον στοιχείο που αξίζει αναφοράς, σχετίζεται με τη διαπίστωση επίτευξης πιο ομοιόμορφης επικασσιτέρωσης στα δοκίμια κρούσης όταν οι έδρες αυτών τοποθετήθηκαν υπό γωνία 45° σε σχέση με τις ανόδους (τις ορθογώνιες πλάκες κασσίτερου), παρά όταν οι έδρες τους ήταν παράλληλες ως προς τις ανόδους.

Από τις S.E.M. μικρογραφίες των δοκιμίων κρούσης και εφελκυσμού προκύπτει η ομοιόμορφη και συμπαγής απόθεση του κασσίτερου επί του ορειχάλκινου υποστρώματος. Επιπρόσθετα, και από την οπτική μελέτη των επιφανειών των επικασσιτερωμένων δοκιμίων κρούσης που έγινε μέσω του μεταλλογραφικού μικροσκοπίου, διαπιστώθηκε η πολύ καλή περιμετρικά απόθεση του κασσίτερου και η ομοιόμορφη γεωμετρικά επικάλυψη των δοκιμίων. Στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο έγιναν και μετρήσεις του πάχους επικασσιτέρωσης όλων των δοκιμίων κρούσης. Οι μετρήσεις απέδειξαν πως το πάχος της επικάλυψης μεταβάλλεται ανάλογα με το χρόνο απόθεσης t_{DC} του κασσίτερου στα δοκίμια.

Για τη μελέτη όλων των δοκιμίων που επικασσιτερώθηκαν, επιλέχτηκαν τέτοιοι χρόνοι απόθεσης t_{DC} ώστε τα αντίστοιχα πάχη επικασσιτερώσεων να καλύπτουν το ελάχιστο προβλεπόμενο τοπικό πάχος των 50 μm της τεχνικής προδιαγραφής της Δ.Ε.Η. ΧΚ 11.04/10.03.88 (ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ/23.10.92) για εξαρτήματα ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Η επιτυχής παρασκευή ηλεκτρολυτικών επικασσιτερώσεων με πάχη μεγαλύτερα από αυτά που προέβλεπε η τεχνική προδιαγραφή της Δ.Ε.Η. ήταν πολύ σημαντική επίτευξη διότι είναι γνωστό πως οι επικαλύψεις κασσίτερου επί ορειχάλκινων υποστρωμάτων ενισχύουν την αντοχή σε διάβρωση και την αντοχή σε φθορά αποκόλλησης των ορειχάλκινων εξαρτημάτων. Έτσι, όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος επικασσιτέρωσης τόσο τα ορειχάλκινα επικασσιτερωμένα εξαρτήματα ενισχύονται έναντι του φαινομένου της εργοδιάβρωσης, αλλά και του πολύ συχνού φαινομένου αστοχίας της αποψευδαργύρωσης του ορειχάλκινου κράματος, όταν τα ορειχάλκινα εξαρτήματα έρχονται σε επαφή με το υγρό περιβάλλον. Και τα δύο παραπάνω φαινόμενα αστοχίας εμφανίζονται πολύ συχνά στα ορειχάλκινα επικασσιτερωμένα εξαρτήματα του δικτύου μεταφοράς και διανομής της Δ.Ε.Η. συντελώντας σε μεγάλο βαθμό στη σταδιακή φθορά και εν τέλει αστοχία τους.

Επιπλέον, τα ορειχάλκινα επικασσιτερωμένα εξαρτήματα του δικτύου μεταφοράς και διανομής της Δ.Ε.Η. εξαιτίας της αδιάκοπης χρήσης τους αλλά και του περιβάλλοντος λειτουργίας τους, οφείλουν

να έχουν και αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες εκτός από ενισχυμένο πάχος επικασσιτέρωσης. Έτσι λοιπόν, από τα αποτελέσματα των μετρήσεων των μηχανικών ιδιοτήτων, παρατηρήθηκε ότι η αντοχή σε εφελκυσμό των απλά επικασσιτερωμένων δοκιμίων υφίσταται μία ελάχιστη μείωση (από 20 MPa έως 70 MPa) σε σχέση με την αντοχή των ορειχάλκινων δοκιμίων που δεν είχαν υποστεί ηλεκτρολυτική επικασσιτέρωση. Παρομοίως, η αντοχή σε εφελκυσμό των σύνθετων δοκιμίων με επικάλυψη Sn/TiO₂ φαίνεται να εμφανίζει ελάχιστα μεγαλύτερη μείωση (από 50 MPa έως 80 MPa) σε σχέση με την αντοχή των μη ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένων ορειχάλκινων δοκιμίων. Ακόμη, διαπιστώνεται πως η αντοχή σε εφελκυσμό τόσο των απλών όσο και των σύνθετων επικασσιτερωμένων δοκιμίων παρουσιάζει μία πτωτική τάση όσο ο χρόνος απόθεσης της επικασσιτέρωσης (t_{DC}) έχει μεγαλύτερη διάρκεια, δηλαδή όσο το πάχος επικασσιτέρωσης αυξάνεται πάνω στα ορειχάλκινα δοκίμια. Αντίστοιχα, προκύπτει για την επιμήκυνση θραύσεως (%) τόσο των απλών όσο και των σύνθετων επικασσιτερωμένων δοκιμίων, μία πτώση στην τιμή της (από 5,65 % έως 6,95 %) σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που μετρήθηκε για τα αμιγώς ορειχάλκινα δοκίμια. Το φορτίο θραύσης, τόσο των απλών όσο και των σύνθετων επικασσιτερωμένων δοκιμίων, φαίνεται να εμφανίζει μία ελάχιστη πτώση στην τιμή του όσο ο χρόνος απόθεσης (t_{DC}) αυξάνει, ενώ λαμβάνει ελάχιστα χαμηλότερες τιμές σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που μετρήθηκε για τα αμιγώς ορειχάλκινα δοκίμια.

Επίσης, οι καμπύλες φορτίου (F_m) - επιμήκυνσης (Δl) και οι καμπύλες τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) των απλών και σύνθετων ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένων δοκιμίων εφελκυσμού παρουσίασαν σημαντική ομοιομορφία ως προς τη εφελκυστική συμπεριφορά τους, έως τη θραύση τους, μεταξύ των δοκιμίων με ίδιους χρόνους απόθεσης (t_{DC}).

Από τις μετρήσεις αντοχής σε κρούση παρόλο που δε διαπιστώθηκε αξιολογη μεταβολή της απορροφημένης ενέργειας κρούσης, μεταξύ των απλά επικασσιτερωμένων δοκιμίων αλλά ούτε και των σύνθετων δοκιμίων με επικάλυψη Sn/TiO₂, εντούτοις προκύπτει η ελάχιστη μείωσή της όσο το πάχος της επικασσιτέρωσης αυξάνεται.

Από τις μετρήσεις της μικροσκληρότητας, προέκυψε για τα απλά επικασσιτερωμένα δοκίμια κρούσης ότι αύξηση του πάχους επικασσιτέρωσης προκαλεί μείωση στην τιμή της σκληρότητας κατά Vickers των επικαλύψεων. Για τα σύνθετα δοκίμια με επικάλυψη Sn/TiO₂ φαίνεται η προσθήκη σωματιδίων TiO₂ να επηρεάζει ελάχιστα τη σκληρότητα των επικαλύψεων κατά Vickers, για τις συγκεκριμένες ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν.

Εν τέλει, και μετά από αξιολόγηση των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης, προκύπτουν ουσιώδη και πρακτικής φύσεως συμπεράσματα που αφορούν την παρασκευή και τις μηχανικές ιδιότητες των ορειχάλκινων ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένων δοκιμίων. Πρώτα απ' όλα,

αύξηση του πάχους επικασιτέρωσης στα ορειχάλκινα δοκίμια έχει ως αποτέλεσμα την ελάχιστη μείωση της αντοχής τους σε εφελκυσμό με εμφάνιση μικρότερης απορρόφησης ενέργειας, η οποία αποτελεί μέτρο της σκληρότητας. Επίσης, αύξηση του πάχους επικασιτέρωσης φαίνεται πως αυξάνει τη ψαθυρότητα των ορειχάλκινων δοκιμίων, μειώνοντας τη μέγιστη παραμόρφωση τους υπό φόρτιση καθώς επίσης και τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Βάσει της μορφολογίας της επικασιτέρωσης στα δοκίμια και των μηχανικών ιδιοτήτων τους, οι 2 ώρες εμφανίζονται ως ο καταλληλότερος χρόνος απόθεσης (t_{DC}). Σ' αυτό το χρόνο απόθεσης, διαπιστώθηκε πολύ καλή περιμετρικά απόθεση του κασιτέρου και ομοιόμορφη γεωμετρικά επικάλυψη των δοκιμίων ενώ οι μηχανικές τους ιδιότητες δεν παρουσίασαν ουσιαστική μεταβολή. Τέλος, ένα ακόμη στοιχείο που προκύπτει από τη μελέτη αυτή, σχετίζεται με τη σημαντική ομοιότητα που παρουσιάζουν στην παρασκευή, τη μορφολογία αλλά και τις μετρήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων τα περισσότερα απλά και σύνθετα ηλεκτρολυτικά επικασιτερωμένα δοκίμια, μεταξύ ίδιων χρόνων απόθεσης (t_{DC}).

5.6 Μελλοντική Έρευνα - Προοπτικές

Ολοκληρώνοντας την αποτίμηση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας επισημαίνεται η θετική επίδραση χρόνου απόθεσης (t_{DC}) 2 ωρών, που προσδίδει πάχη επικασιτέρωσης της τάξεως των 155 μm , στην ηλεκτρολυτική επικασιτέρωση ορειχάλκινων εξαρτημάτων, προστατεύοντας τα για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα από το φαινόμενο της εργοδιάβρωσης και της αποψευδαργύρωσης του ορειχάλκινου κράματος, χωρίς ταυτόχρονα να μειώνεται σημαντικά η μηχανική τους αντοχή. Παρά το γεγονός ότι στην περίπτωση των απλών ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων κασσιτέρου και με σκοπό να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα παρασκευάστηκαν από δύο δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης στις ίδιες συνθήκες, εντούτοις απαιτείται και περαιτέρω διερεύνηση με διεξαγωγή περισσότερων πειραμάτων, χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους παρασκευής ηλεκτρολυτικών επικασιτερώσεων σε ορειχάλκινα δοκίμια και πραγματοποιώντας υπό τις ίδιες συνθήκες τις μηχανικές δοκιμές. Σαφώς, και στην περίπτωση των σύνθετων αποθέσεων Sn/TiO₂, απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός πειραμάτων, αφού σε κάποιες συνθήκες μόνο μία σειρά δοκιμών εφελκυσμού και κρούσης παρασκευάστηκαν και μετρήθηκαν.

Επίσης, αν και παρασκευαστικά έδειξαν εξίσου επιτυχίες και οι σύνθετες ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις Sn/TiO₂, εντούτοις από τη στοιχειακή ανάλυση EDAX που πραγματοποιήθηκε στα δοκίμια κρούσης και εφελκυσμού με σύνθετες αποθέσεις Sn/TiO₂, προέκυψε τελικά να μην πιστοποιείται η ύπαρξη TiO₂ παρά μόνο του Sn. Κατά συνέπεια, θα ήταν εποικοδομητική περαιτέρω έρευνα με προσθήκη υψηλότερων συγκεντρώσεων σωματιδίων TiO₂ ή αλλαγής των συνθηκών μηχανικής ανάδευσης στο ηλεκτρολυτικό κελίο, με σκοπό το καλύτερο διασκορπισμό και την ουσιαστικότερη ενσωμάτωση των σωματιδίων στα δοκίμια ή ακόμη και με τη χρήση άλλων σωματιδίων τα οποία πιθανότατα να συναποτίθενται καλύτερα με το Sn στον ορείχαλκο, βελτιώνοντας τις μηχανικές ιδιότητες και προσφέροντας ικανοποιητική αντοχή σε διαβρωτικά περιβάλλοντα.

Μία μελλοντική πρόταση έρευνας θα μπορούσε να περιλαμβάνει ηλεκτρικές μετρήσεις γραμμικής πόλωσης Tafel, σε δοκίμια απλών ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων κασσιτέρου ή και σύνθετων ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων Sn/TiO₂ που θα έχουν εκτεθεί σε διαβρωτικό περιβάλλον, με πάχη επικασιτέρωσης όμοια με αυτά που παρασκευάστηκαν σε αυτή την εργασία, με σκοπό τη διερεύνηση του μηχανισμού της διάβρωσης και την παρακολούθηση και τον έλεγχο της στην πράξη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ν. Σπυρέλλης, 'Τεχνολογία Επιμεταλλώσεων', Αθήνα, 1997, σελ. 87-88
- [2] Π. Βασιλείου, Θ. Σκουλικίδης, 'Διάβρωση και Προστασία Υλικών', Εκδ. Συμεών, Αθήνα, 2000
- [3] Ν. Σπυρέλλης, 'Τεχνολογία Επιμεταλλώσεων', Αθήνα, 1997, σελ. 92-94
- [4] Ν. Σπυρέλλης, 'Τεχνολογία Επιμεταλλώσεων', Αθήνα, 1997, σελ. 99
- [5] Ν. Σπυρέλλης, 'Τεχνολογία Επιμεταλλώσεων', Αθήνα, 1997, σελ. 23
- [6] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, 'Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών', Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996, σελ. 509
- [7] Ν. Σπυρέλλης, 'Τεχνολογία Επιμεταλλώσεων', Αθήνα, 1997, σελ. 100
- [8] Ν. Σπυρέλλης, 'Τεχνολογία Επιμεταλλώσεων', Αθήνα, 1997, σελ. 101 - 102
- [9] Ν. Σπυρέλλης, 'Τεχνολογία Επιμεταλλώσεων', Αθήνα, 1997, σελ. 104, 106
- [10] J.O.M. Bockris, A.K.N. Reddy, 'Modern Electrochemistry', Vol. 2, Third Edition, Plenum Press, 1977, σελ. 623 - 639
- [11] P.H. Rieger, 'Electrochemistry', Second Edition, Chapman & Hall, New York, 1994, σελ. 158 - 159
- [12] M. Aroyo, Plat. Surf., 85 {8}, (1998) 69
- [13] J.O.M. Bockris, A.K.N. Reddy, 'Modern Electrochemistry', Vol. 2, Third Edition, Plenum Press, 1977, σελ. 1175 - 1182
- [14] Ν. Κουλουμπή, Γ. Χρυσουλάκης, 'Θεωρητική Ηλεκτροχημεία', Δεύτερη Έκδοση, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1992, σελ. 127 - 132
- [15] W. D. Callister, Jr. 'Materials Science and Engineering: An Introduction', 7th Edition, John Willey and Sons, 2007
- [16] Κ. Ι. Γιαννόπουλος, 'Μελέτη Μικροδομής και Ιδιοτήτων Μολυβδούχων Ορείχαλκων', Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2000, σελ. 67
- [17] Κ. Ι. Γιαννόπουλος, 'Μελέτη Μικροδομής και Ιδιοτήτων Μολυβδούχων Ορείχαλκων', Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2000, σελ. 68
- [18] Κ. Ι. Γιαννόπουλος, 'Μελέτη Μικροδομής και Ιδιοτήτων Μολυβδούχων Ορείχαλκων', Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2000, σελ. 82
- [19] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, 'Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών', Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996, σελ. 551
- [20] Κ. Ι. Γιαννόπουλος, 'Μελέτη Μικροδομής και Ιδιοτήτων Μολυβδούχων Ορείχαλκων', Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2000, σελ. 84
- [21] Κ. Ι. Γιαννόπουλος, 'Μελέτη Μικροδομής και Ιδιοτήτων Μολυβδούχων Ορείχαλκων', Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2000, σελ. 85

- [22] Κ. Ι. Γιαννόπουλος, 'Μελέτη Μικροδομής και Ιδιοτήτων Μολυβδούχων Ορείχαλκων', Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2000, σελ. 85
- [23] Κ. Ι. Γιαννόπουλος, 'Μελέτη Μικροδομής και Ιδιοτήτων Μολυβδούχων Ορείχαλκων', Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2000, σελ. 84
- [24] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, 'Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών', Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996
- [25] Hull D., Clyne T.W., 'An Introduction to Composite Materials', Cambridge University Press, 1981
- [26] Comprehensive Composite Materials, Volume 3: 'Metal Matrix Composites', Volume Editor T.W. Clyne, Series Editors: A. Kelly and C. Zweben, Pergamon, Oxford UK, 2000
- [27] M. Taya, R. J. Arsenault, 'Metal Matrix Composites - Thermomechanical Behavior', Pergamon Press, 1989, σελ. 1 - 8, 17, 101 - 109, 113 - 173, 160 - 161, 177 - 207
- [28] Schwartz M. M., 'Composite Materials Handbook', McGraw-Hill, 1984
- [29] Chawla K. K. 'Composites Materials', Science and Engineering, Springer, 1987
- [30] Ι. Δεληγκιόζη, 'Παρασκευή και Χαρακτηρισμός Σύνθετων Ηλεκτρολυτικών Επικαλύψεων Νικελίου με Οξειδία Μετάλλων της Ομάδας '4' του Περιοδικού Πίνακα', Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2009, σελ. 40
- [31] Ι. Δεληγκιόζη, 'Παρασκευή και Χαρακτηρισμός Σύνθετων Ηλεκτρολυτικών Επικαλύψεων Νικελίου με οξειδία Μετάλλων της Ομάδας '4' του Περιοδικού Πίνακα', ΕΜΠ, Αθήνα, 2009, σελ. 40 - 41
- [32] C. G.Fick, J. D. Prince, Trans. Electrochem., Soc., 54, (1982), 10
- [33] G. D. Spenceley, BISRA Report, MW/INT & 10, (1962), 10
- [34] M. Ohring, Engineering Materials Science, Academic Press, USA, 1995, σελ. 471 - 472, 484 - 486
- [35] Muller, H. Hahn. 'Synthesis and Characterization of Nanocrystalline Ni/ZrO₂ Composite Coating', Elsevier Science Ltd. Nano Structured Materials, Vol. 12, 1999, σελ. 259 - 262
- [36] J. P. Celis, J. R. Roos, Reviews on Coatings and Corrosion, Vol. 1 - 4, (1982), 30
- [37] J. P. Roos, J. P. Celis, J. Fransaer, C. Buelens, JOM, 42 (11), (1990), 60
- [38] G. R. Lakshminarayanan, E. S. Chen, F. K. Sauter, Plat. Surf. Fin, 63, (1976), 38
- [39] V. O. Nwoko, L. L. Shreir, Corrossion, 31, (1975), 252
- [40] B. P. Cameron, J. A. Carew, J. Foster, Proc. 10th Inter. Congr. Metal Finishing, (1980), 21
- [41] F. K. Sautter, J. Electrochem. Soc., 110 (6), (1963), 557
- [42] K. Naitoh, S. Matsumura, K. Araki, Proc. 10th Inter. Congr. Metal Finishing, (1980), 224

- [43] W. F. Smith, 'Principles of Materials Science and Engineering', McGraw Hill Inc., 3rd Edition, (1996), σελ. 69 - 91, 767 - 768
- [44] M. Ghouse, M. Viswanathan, E. G. Ramachandran, Metal Finishing, 78 (4), (1980), 44
- [45] T. W. Tomaszewski, R. J. Claus, H. Brown, Proc. Amer. Electroplaters Soc., 50, (1963), 169
- [46] V. P. Greco, W. Baldauf., Plating, 55, (1968), 250
- [47] O. Berkh, A. Bodnevas, J. Zahavi, Plat. Surf. Finish., 82, 11, (1995), 62
- [48] M. Ghouse, M. Viswanathan, E. G. Ramachandran, Metal Finishing, 78, 4, (1980), 44
- [49] R. V. Williams, P. W. Martin, Proc. 6th Congress Metal Finishing, (1964), 182
- [50] Μ. Στρουμπούλη, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 2006
- [51] I. Garcia, A. Conde, G. Langelaan, J. Fransaer, J. P. Celis, Corrosion Science, 45 (2003), 1173
- [52] I. Garcia, J. Fransaer, J. P. Celis, Surf. Coat. Techn., 148, (2001), 171
- [53] E. J. Podlaha, D. Landolt, J. Electrochem. Soc., 139, (1992), 413
- [54] P. K. N. Barlett, Industrial Training Report AKZO, Arnhem, (1980), σελ. 10
- [55] Τεχνική Προδιαγραφή ΔΕΗ Χ.Κ. 11.04/10.03.88 (ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ /23.10.92), Σελ. 2
- [56] Τεχνική Προδιαγραφή ΔΕΗ Χ.Κ. 11.04/10.03.88 (ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ /23.10.92), Σελ. 3
- [57] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, 'Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών', Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996, σελ. 154
- [58] Β. Δ. Κωνσταντέλλος, 'Πειραματική Αντοχή των Υλικών', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2009, σελ. 30
- [59] Β. Δ. Κωνσταντέλλος, 'Πειραματική Αντοχή των Υλικών', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2009, σελ. 34
- [60] Β. Δ. Κωνσταντέλλος, 'Πειραματική Αντοχή των Υλικών', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2009, σελ. 34 - 36
- [61] Β. Δ. Κωνσταντέλλος, 'Πειραματική Αντοχή των Υλικών', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2009, σελ. 37
- [62] Β. Δ. Κωνσταντέλλος, 'Πειραματική Αντοχή των Υλικών', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2009, σελ. 37 - 38
- [63] Β. Δ. Κωνσταντέλλος, 'Πειραματική Αντοχή των Υλικών', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2009, σελ. 40
- [64] Β. Δ. Κωνσταντέλλος, 'Πειραματική Αντοχή των Υλικών', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2009, σελ. 43
- [65] Β. Δ. Κωνσταντέλλος, 'Πειραματική Αντοχή των Υλικών', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2009, σελ. 64

- [66] Β. Δ. Κωνσταντέλλος, ‘Πειραματική Αντοχή των Υλικών’, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2009, σελ. 65
- [67] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, ‘Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών’, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996, σελ. 164 - 165
- [68] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, ‘Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών’, Αθήνα, 1996, σελ. 166
- [69] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, ‘Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών’, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996, σελ. 168
- [70] ELOT EN ISO 4516: Metallic and Other Coating - Vickers and Knoop Micro Hardness Tests (June 2002)
- [71] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, ‘Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών’, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996, σελ. 219
- [72] <http://www.mee-inc.com/microhar.html>
- [73] B. L. Bramfitt, A. O. Benschoter, ‘Metallographer’s Guide, Practices and Procedures for Irons and Steels’, ASM International, 2002
- [74] <http://www.struers.com>
- [75] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, ‘Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών’, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996, σελ. 599 - 601
- [76] P. J. Goodhew, F. J. Humphreys, ‘Electron Microscopy and Analysis, 2nd Ed., Taylor & Francis Inc., (1988), σελ. 106 - 110, 154 - 166
- [77] S. Yoshimura, S. Chida, E. Sato, N. Kubota, ‘Metal Finishing’, 84, (1986), 39
- [78] J. F. Shackelford, ‘Introduction to Material Science for Engineers, 4th Ed., Prentice Hall, (1996), σελ. 152 - 158, 555 - 557
- [79] ‘Σημειώσεις Εργαστηρίου Φυσικής Μεταλλουργίας’, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας - Εργαστήριο Υλικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- [80] ASM Handbook Committee, ‘Metallography and Microstructures’, Vol. 9, USA, (1985), σελ. 401
- [81] <http://www.mee-inc.com/microhar.html>
- [82] Α. Σώκος, Μ.Μ. Δαρδαβίλα, Κ. Κόλλια, ‘Πρακτικά 8^{ου} Πανελληνίου Επιστημονικού Συνεδρίου Χημικής Μηχανικής’, Θεσσαλονίκη, 26 - 28 Μαΐου 2011, (Υπεβλήθη)
- [83] Fengyan Hou, Wei Wang, Hetong Guo, ‘Effect of the Dispersibility of ZrO₂ Nanoparticles in Ni - ZrO₂ Electroplated Nanocomposite Coatings on the Mechanical Properties of Nanocomposite Coatings’, Applied Surface Science 252 (2006), σελ. 3812 - 3817
- [84] Wei Wang, Feng - Yang Hou, Hui Wang, He-Tong Guo, ‘Fabrication and

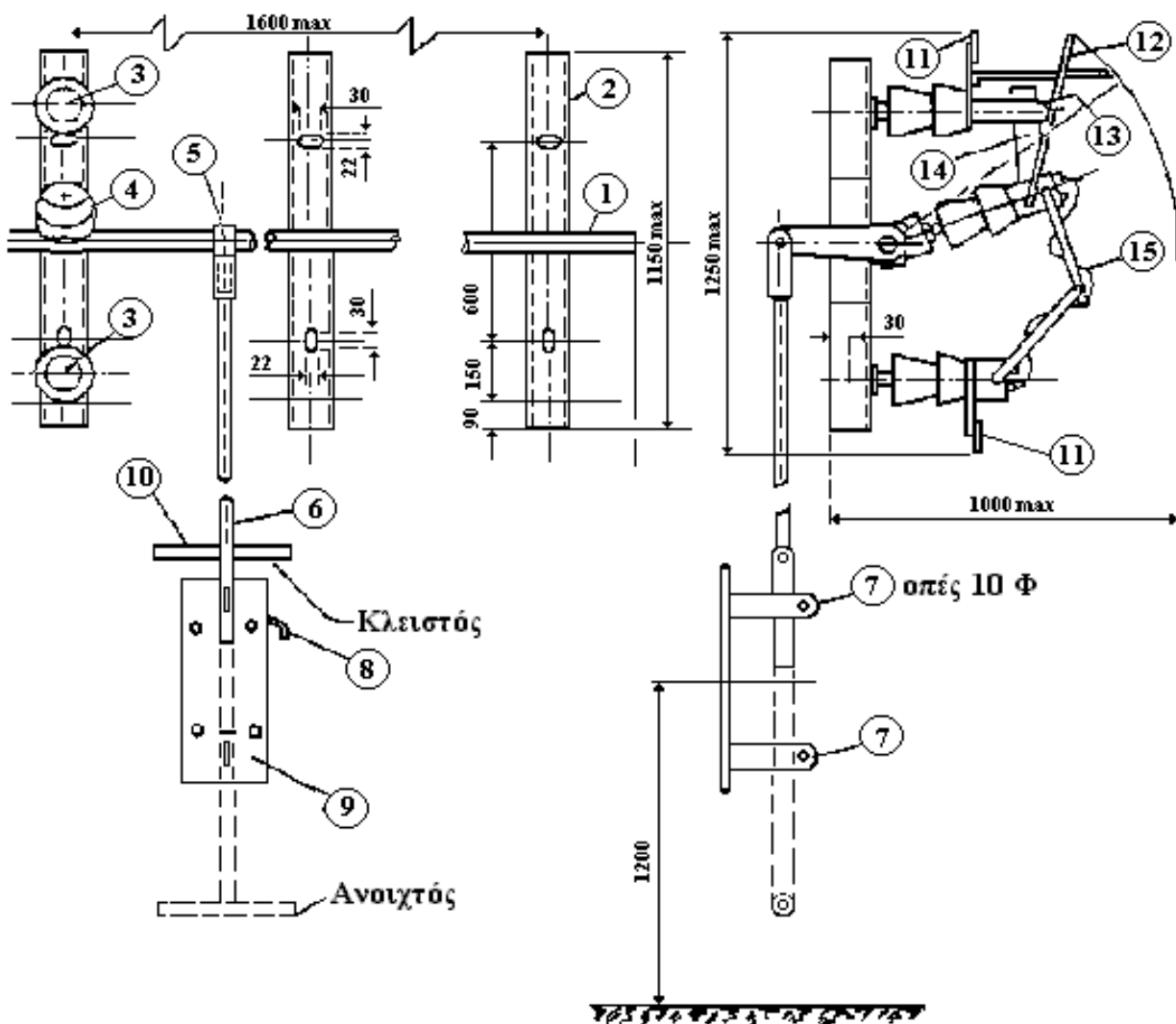
- Characterization of Ni - ZrO₂ Composite Nano-coatings by Pulse Electrodeposition’
Scripta Materiala 53, (2005), σελ. 613
- [85] Μαγκανάρης, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2000
- [86] ASM Handbook Committee, ‘Metallography and Microstructures’, Vol. 9, USA
(1985)
- [87] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, ‘Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών
Υλικών’, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996, σελ. 551 - 552
- [88] Ν. Ανδριανόπουλος, Ε. Κυριακίδης, Κ. Λιακόπουλος, ‘Πειραματική Αντοχή
Των Υλικών’, Αθήνα, 1991, σελ. 270
- [89] Κ. Δέρβος, Π. Βασιλείου, ‘Εισαγωγή στα Υλικά’, Αθήνα, 2005
- [90] A. Brenner, ‘Electrodeposition of Alloys’, Vol. 1, Academic Press, New York and
London, 1963
- [91] A. Bard, L. Faulkner, ‘Electrochemical Methods Fundamentals and Applications’, New
York, 1980
- [92] J. Dini, ‘Electrodeposition, The Materials Science of Coatings and Substrates’, Noues
Publications
- [93] Κ. Καγκιράκης, ‘Προστασία των Μετάλλων εκ της Διαβρώσεως’, Αθήνα, 1972
- [94] Iowa State University, ‘Scanning Electron Microscopy’, Materials Science and
Engineering Department
- [95] Κ. Stein, Π. Μακρής, ‘Ανάλυση Μηχανολογικών Καταστροφών’, Εκδόσεις
Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1993
- [96] Α. Ε. Καρατζαλής, Σημειώσεις για το μάθημα ‘Μεταλλοτεχνία’ του Τμήματος
Μηχανικών Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων,
Ιωάννινα, 2007
- [97] Γ. Παπανικολάου, ‘Σύνθετα Υλικά’, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, 2004
- [98] Δ. Κ. Υφαντής, ‘Υλικά, Διάβρωση και Προστασία’, Σχολή Χημικών Μηχανικών,
Ε.Μ.Π., Αθήνα, Νοέμβριος 2008
- [99] Α. Λεκάτου, ‘Εισαγωγή στη Διάβρωση και Προστασία των Μετάλλων’, Τμήμα
Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα, 2005
- [100] Γ. Δ. Παπαδημητρίου, ‘Γενική Μεταλλογνωσία Ι’, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων
Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1989

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΗ

ΔΔ-310/30.08.06

(παράγραφος 9.2.1)



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1 Κοινός άξονας | 9 Πλάκα βάσης του χειρωτηρίου |
| 2 Βάση | 10 Λαβή του χειρωτηρίου |
| 3 Σταθερός μονωτήρας | 11 Ακροδέκτης (Cu 70 & 90 mm ²) |
| 4 Κινητός μονωτήρας | 12 Βοηθητικές επαφές |
| 5 Μηχανικός σύνδεσμος | 13 Κύριες σταθερές επαφές |
| 6 Ράβδοι χειρισμού | 14 Κύρια κινητή επαφή |
| 7 θέσεις λουκέτων | 15 Εύκαμπτος αγωγός |
| 8 Ακροδέκτης (Cu-35 mm ²) | |

Σημείωση: Η κάθε βάση του τριπολικού αποζεύκτη δεν θα φέρει ένα ζεύγος οβάλ οπών, όπως φαίνεται στο παρόν Σχέδιο, αλλά δύο (2) ζεύγη οβάλ οπών (βλ. παρ. 5.2.3.1 και Σχέδιο Νο 7).

ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ

ΑΡ. ΣΧΕΔΙΟΥ

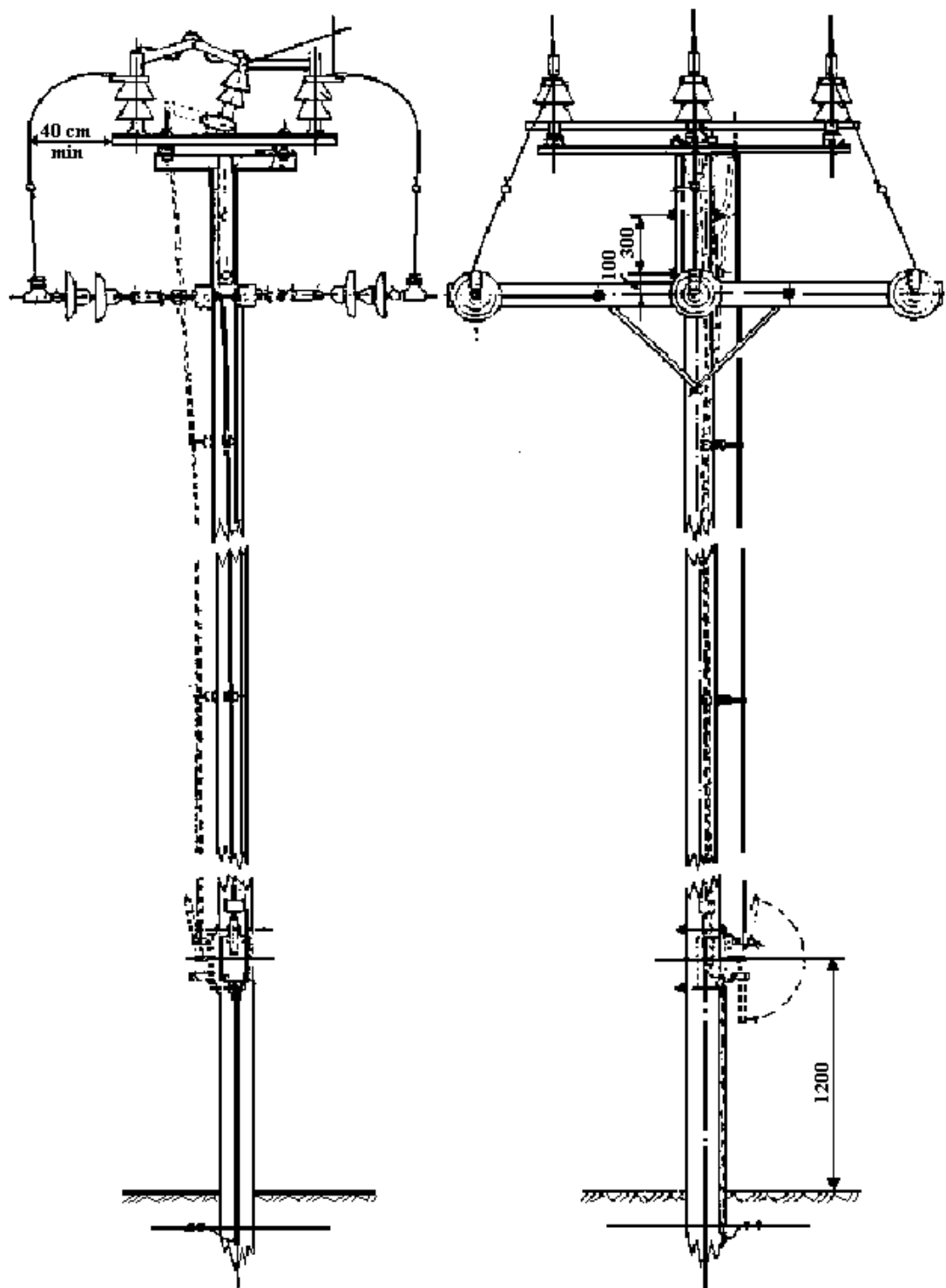
ΤΡΙΠΟΛΙΚΟΣ ΑΠΟΖΕΥΚΤΗΣ 20 kV
ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ

1.1

ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΗ

ΔΔ-310/30.08.06

(παράγραφος 9.2.2)



ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ

ΑΡ. ΣΧΕΔΙΟΥ

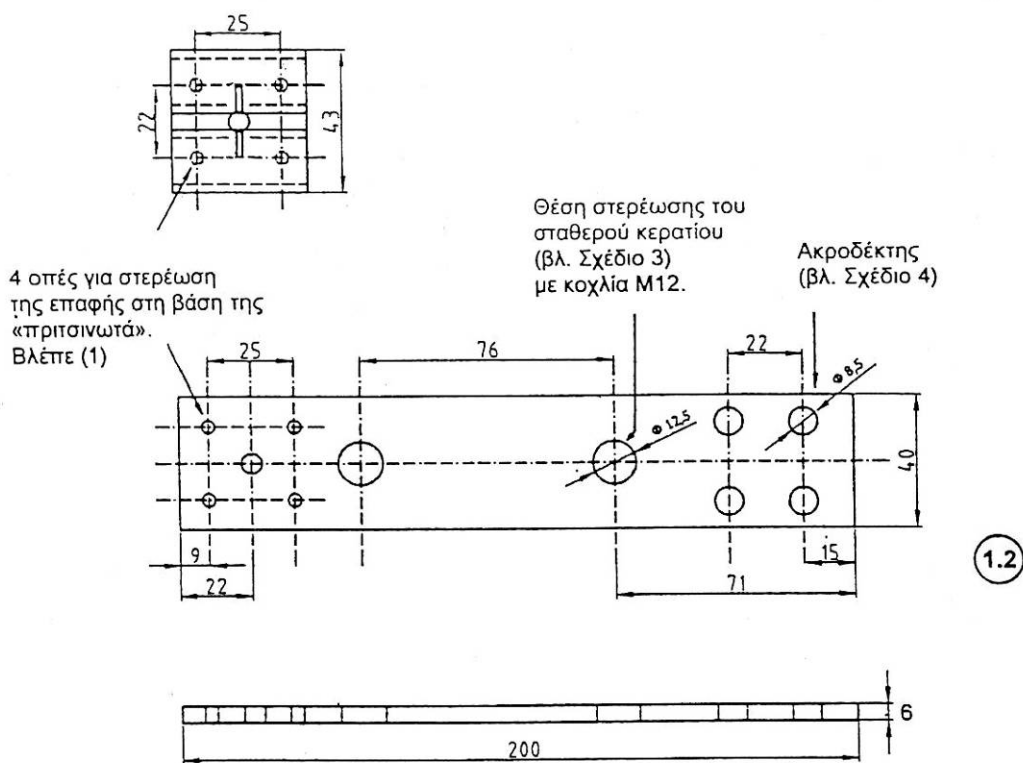
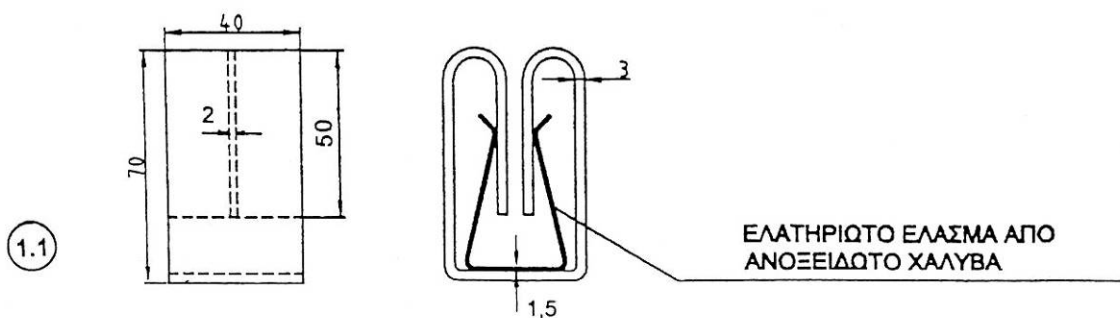
ΤΡΙΠΟΛΙΚΟΣ ΑΠΟΖΕΥΚΤΗΣ 20 kV
ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ

1.2

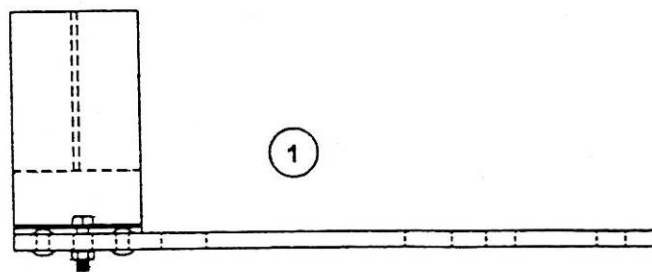
ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΗ

ΔΔ-310/30.08.06

(παράγραφος 9.2.3)



Α/Α	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΥΛΙΚΟ
1	Σταθερή επαφή	
1.1	Επαφή	Χαλκός επικασσιτερωμένος
1.2	Βάση στήριξης επαφής	Χαλκός επικασσιτερωμένος



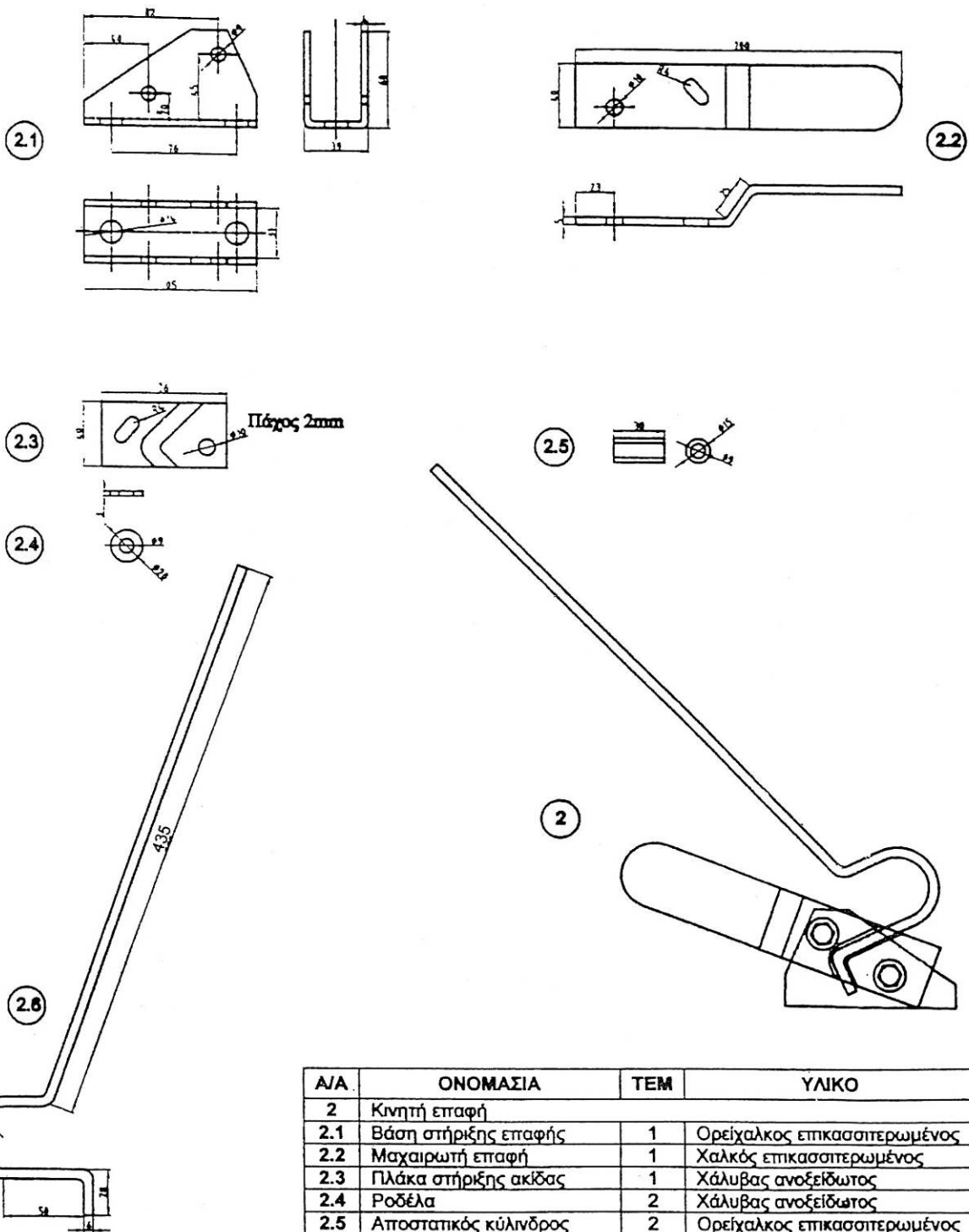
ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ

ΑΡ. ΣΧΕΔΙΟΥ

ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΡΙΠΟΛΙΚΟΥ ΑΠΟΖΕΥΚΤΗ

1.3

ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΗ
 ΔΔ-310/30.08.06
 (παράγραφος 9.2.4)



Α/Α	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΤΕΜ	ΥΛΙΚΟ
2	Κινητή επαφή		
2.1	Βάση στήριξης επαφής	1	Ορείχαλκος επικασσιτερωμένος
2.2	Μαχαιρωτή επαφή	1	Χάλυβας επικασσιτερωμένος
2.3	Πλάκα στήριξης ακίδας	1	Χάλυβας ανοξείδωτος
2.4	Ροδέλα	2	Χάλυβας ανοξείδωτος
2.5	Αποστατικός κύλινδρος	2	Ορείχαλκος επικασσιτερωμένος
2.6	Κεράτσο απόσβεσης τόξου	1	Χάλυβας ανοξείδωτος

ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ

ΑΡ. ΣΧΕΔΙΟΥ

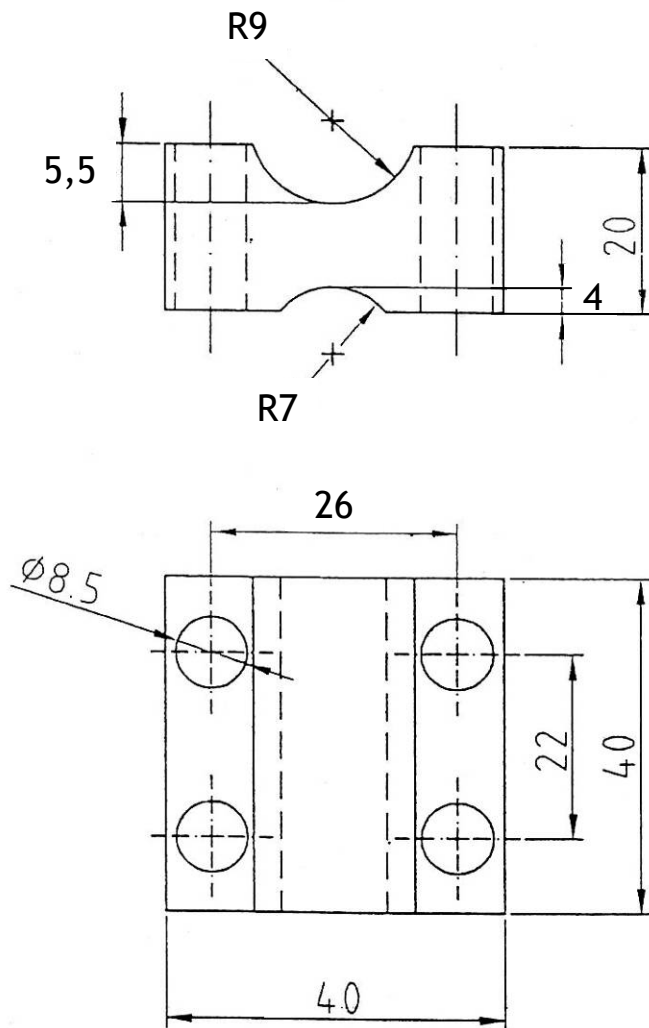
ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΡΙΠΟΛΙΚΟΥ ΑΠΟΖΕΥΚΤΗ

1.4

ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΗ

ΔΔ-310/30.08.06

(παράγραφος 9.2.6)

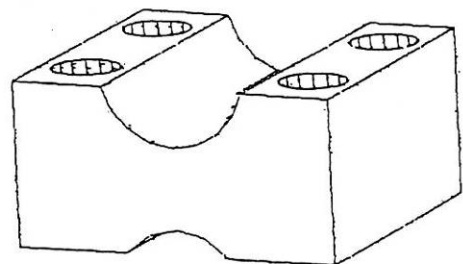


4

Α/Α	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΥΛΙΚΟ
4	Ιππέας ακροδέκτη σύνδεσης	Ορείχαλκος επικαθίστιερωμένος

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

1. Η σύσφιξη του ακροδέκτη θα γίνεται με κοχλίες M8 από ανοξείδωτο χάλυβα.
2. Εναλλακτικά, ο ιππέας του ακροδέκτη μπορεί να είναι διμερής, δηλαδή να αποτελείται από δύο (2) τμήματα, με μήκος 20 mm έκαστο.



ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ

ΑΡ. ΣΧΕΔΙΟΥ

ΑΚΡΟΔΕΚΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΣ

1.5

ΣΥΝΤΑΧΘΗΚΕ:

Μ. ΦΙΚΑΣ
Υπεύθυνος Εργαστηρίου

ΚΩΔΙΚΟΣ: ΕΦΕΛΚ/ΜΔ 002/2 Ε.Α.Υ.

ΕΚΔΟΣΗ: 05

ΕΓΚΡΙΘΗΚΕ:

Α.ΑΝΤΩΝΑΤΟΣ
Τομάρχης ΤΜΜΔΕ

ΗΜ/ΝΙΑ: 03.10.2005

Σελίδα 167 από 167

ΑΡ. ΑΙΤΗΣΕΩΣ

ΠΡΩΤ. ΚΔΕΠ

ΔΟΚΙΜΙΑ

ΣΧΗΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ:

ΥΛΙΚΟ:

ΤΕΜΑΧΙΑ: 5

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ: EN 10002.01/2001

ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ

ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ:

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΛΗΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ:

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ Τ:

20 °C

ΣΧ. ΥΓΡΑΣΙΑ RH:

47 %

ΜΗΧΑΝΗ:

WDW-50E 50 KN

Ταχύτητα Απομάκρυνσης: 20 mm/min

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ

A/A	1	2	3	4	5	ΑΒΕΒΑΙΟ ΤΗΤΑ	ΠΡΟΔ. ΤΙΜΕΣ
ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	DE1	DE2	DE3	DE4	DE5		
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)	8,11 8,10 8,13	8,34 8,38 8,32	8,35 8,37 8,38	8,13 8,15 8,10	8,32 8,30 8,28		
Μ.Ο. ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ (mm)	8,11	8,35	8,37	8,13	8,30		
ΜΗΚΟΣ (mm)	91,00	92,08	92,60	92,37	91,50		
ΠΑΧΟΣ (mm)	-	-	-	-	-		
Μ.Ο. ΠΑΧΟΥΣ (mm)	-	-	-	-	-		
ΠΛΑΤΟΣ (mm)	-	-	-	-	-		
Μ.Ο. ΠΛΑΤΟΥΣ (mm)	-	-	-	-	-		
ΔΙΑΤΟΜΗ (mm ²)	51,66	54,76	55,02	51,91	54,11		
ΑΡΧΙΚΟ ΜΗΚΟΣ (mm)	40,60	41,81	40,51	40,71	41,56		
ΤΕΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ (mm)	42,75	44,09	42,68	42,91	43,66		
ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ (%)	5,30	5,45	5,36	5,40	5,05		
Μ. Τ. ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗΣ (%)	-						
ΦΟΡΤΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (N)	-	-	-	-	-		
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ (N)	24.510	26.150	24.610	25.080	23.550		
ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (N/mm ²)	475,00	480,00	445,00	485,00	430,00		
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ (N/mm ²)	475,00	480,00	445,00	485,00	435,00		
Μ.Τ. ΤΑΣΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ (N/mm ²)	-						

ΤΟΠΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ: Εργαστήριο
Κονιαμάτων Σχολής Χημ. Μηχ.
Ε.Μ.Π.ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ:
10.05.2011 & 19.05.2011ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ:
ΣΩΚΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΣΥΝΤΑΧΘΗΚΕ:

Μ. ΦΙΚΑΣ
Υπεύθυνος Εργαστηρίου

ΚΩΔΙΚΟΣ: ΕΦΕΛΚ/ΜΔ 002/2 Ε.Α.Υ.

ΕΚΔΟΣΗ: 05

ΕΓΚΡΙΘΗΚΕ:

Α.ΑΝΤΩΝΑΤΟΣ
Τομέαρχης ΤΜΜΔΕ

ΗΜ/ΝΙΑ: 03.10.2005

Σελίδα 168 από 168

ΑΡ. ΑΙΤΗΣΕΩΣ

ΠΡΩΤ. ΚΔΕΠ

ΔΟΚΙΜΙΑ

ΣΧΗΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ:

ΥΛΙΚΟ:

ΤΕΜΑΧΙΑ: 5

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ: EN 10002.01/2001

ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ

ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ:

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΛΗΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ:

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ T:

20 °C

ΣΧ. ΥΓΡΑΣΙΑ RH:

47 %

ΜΗΧΑΝΗ:

WDW-50E 50 KN

Ταχύτητα Απομάκρυνσης: 20 mm/min

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ

A/A	6	7	8	9	10	ΑΒΕΒΑΙΟ ΤΗΤΑ	ΠΡΟΔ. ΤΙΜΕΣ
ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	DE6	DE7	DE8	DE9	DE10		
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)	8,54	8,37	8,29	8,27	8,25		
	8,49	8,39	8,31	8,25	8,27		
	8,56	8,37	8,30	8,26	8,28		
Μ.Ο. ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ (mm)	8,53	8,38	8,30	8,26	8,27		
ΜΗΚΟΣ (mm)	91,90	91,44	91,58	92,28	91,21		
ΠΑΧΟΣ (mm)	-	-	-	-	-		
Μ.Ο. ΠΑΧΟΥΣ (mm)	-	-	-	-	-		
ΠΛΑΤΟΣ (mm)	-	-	-	-	-		
Μ.Ο. ΠΛΑΤΟΥΣ (mm)	-	-	-	-	-		
ΔΙΑΤΟΜΗ (mm ²)	57,15	55,15	54,11	53,58	53,71		
ΑΡΧΙΚΟ ΜΗΚΟΣ (mm)	42,71	41,96	41,56	41,36	41,41		
ΤΕΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ (mm)	Θ.Ε. (*)	43,02	44,20	43,53	43,51		
ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ (%)	-	2,53	6,35	5,27	5,07		
Μ. Τ. ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗΣ (%)	-						
ΦΟΡΤΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (N)	-	-	-	-	-	(*) Θ.Ε.: Θραύση εκτός ορίων επισήμανσης	
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ (N)	-	21.020	23.410	24.270	23.810		
ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (N/mm ²)	-	335,00	435,00	405,00	430,00		
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ (N/mm ²)	-	380,00	435,00	455,00	445,00		
Μ.Τ. ΤΑΣΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ (N/mm ²)	-						

ΤΟΠΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ: Εργαστήριο
Κονιαμάτων Σχολής Χημ. Μηχ.
Ε.Μ.Π.ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ:
10.05.2011 & 19.05.2011ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ:
ΣΩΚΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΣΥΝΤΑΧΘΗΚΕ:

Μ. ΦΙΚΑΣ
Υπεύθυνος Εργαστηρίου

ΚΩΔΙΚΟΣ: ΕΦΕΛΚ/ΜΔ 002/2 Ε.Α.Υ.

ΕΚΔΟΣΗ: 05

ΕΓΚΡΙΘΗΚΕ:

Α.ΑΝΤΩΝΑΤΟΣ
Τομάρχης ΤΜΜΔΕ

ΗΜ/ΝΙΑ: 03.10.2005

Σελίδα 169 από 169

ΑΡ. ΑΙΤΗΣΕΩΣ

ΠΡΩΤ. ΚΔΕΠ

ΔΟΚΙΜΙΑ

ΣΧΗΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ:

ΥΛΙΚΟ:

ΤΕΜΑΧΙΑ: 2

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ: EN 10002.01/2001

ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ

ΘΕΣΗ ΛΗΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ:

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΛΗΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ:

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ T:

20 °C

ΣΧ. ΥΓΡΑΣΙΑ RH:

47 %

ΜΗΧΑΝΗ:


WDW-50E 50 KN

Ταχύτητα Απομάκρυνσης: 20 mm/min

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ

A/A	11	12	13	14	15	ΑΒΕΒΑΙΟ ΤΗΤΑ	ΠΡΟΔ. ΤΙΜΕΣ
ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	DE Brass (1)	DE Brass (2)					
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)	8,00 7,99 8,00	7,98 8,00 7,99					
Μ.Ο. ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ (mm)	8,00	7,99					
ΜΗΚΟΣ (mm)	91,64	91,48					
ΠΑΧΟΣ (mm)	-	-	-	-	-		
Μ.Ο. ΠΑΧΟΥΣ (mm)	-	-	-	-	-		
ΠΛΑΤΟΣ (mm)	-	-	-	-	-		
Μ.Ο. ΠΛΑΤΟΥΣ (mm)	-	-	-	-	-		
ΔΙΑΤΟΜΗ (mm ²)	50,24	50,11					
ΑΡΧΙΚΟ ΜΗΚΟΣ (mm)	40,05	40,00					
ΤΕΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ (mm)	44,95	44,72					
ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ (%)	12,23	11,80					
Μ. Τ. ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗΣ (%)	-						
ΦΟΡΤΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (N)	-	-	-	-	-		
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ (N)	24.830	25.930					
ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (N/mm ²)	480,00	510,00					
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ (N/mm ²)	485,00	515,00					
Μ.Τ. ΤΑΣΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ (N/mm ²)	-						

ΤΟΠΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ: Εργαστήριο
Κονιαμάτων Σχολής Χημ. Μηχ.
Ε.Μ.Π.ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ:
10.05.2011 & 19.05.2011ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ:
ΣΩΚΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ:	ΕΝΤΥΠΟ ΠΡΩΤΟΓΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΡΟΥΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ		
ΣΥΝΤΑΧΘΗΚΕ:	Μ. ΦΙΚΑΣ Υπεύθυνος Εργαστηρίου	ΚΩΔΙΚΟΣ: ΚΡΟΥΣ 002/2 Ε.Α.Υ.	ΕΚΔΟΣΗ: 06
ΕΓΚΡΙΘΗΚΕ:	Α. ΑΝΤΩΝΑΤΟΣ Τομάρχης ΤΜΜΔΕ	ΗΜ/ΝΙΑ: 01.10.08	ΣΕΛΙΔΑ 170 ΑΠΟ 170

ΠΡΩΤ.ΠΕΛΑΤΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΔΕΠ
-------------	--------------------------------

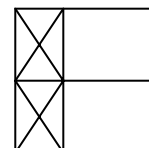
ΔΟΚΙΜΙΑ

ΜΟΡΦΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ:	ΥΛΙΚΟ:	ΤΕΜΑΧΙΑ: 5	ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ: EN 10045.01
-----------------	--------	------------	------------------------------------

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ Τ:	15°C
ΣΧ. ΥΓΡΑΣΙΑ RH:	42 %
ΜΗΧΑΝΗ :	AVERY DENISON 300 J
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ:	300 J
ΕΙΔΟΣ ΕΓΚΟΠΗΣ :	V


ΕΛΕΓΧΟΣ : **GO**
ΕΓΚΟΠΗΣ : **NOT GO**



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ

A/A	1	2	3	4	5	ΑΒΕΒΑΙ- ΟΤΗΤΑ	ΠΡΟΔΙΑΓΡΑ- ΦΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ
ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	DK1	DK2	DK3	DK4	DK5		
ΜΗΚΟΣ (mm)	55,02	55,19	55,48	55,12	55,58		
ΥΨΟΣ (mm)	9,97	10,15	10,17	10,01	10,32		
ΠΛΑΤΟΣ (mm)	9,98	10,09	10,14	9,96	10,25		
ΔΙΑΤΟΜΗ (mm ²)	-	-	-	-	-		
ΟΝ.ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΗΧΑΝΗΣ ΤΥΠΟΣ ΕΓΚΟΠΗΣ V	KV300	KV300	KV300	KV300	KV300		
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ (J)	10,00	8,00	8,00	10,00	6,00		
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (J)	-						
ΠΕΡΙΟΧΗ & ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	-	-	-	-	-		
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	-	-	-	-	-		

ΤΟΠΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ: ΕΡΓ. ΑΝΤΟΧΗΣ ΥΛΙΚΩΝ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ: 19.01.2011	ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ: ΣΩΚΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ
--	--	---

ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ:	ΕΝΤΥΠΟ ΠΡΩΤΟΓΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΡΟΥΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ		
ΣΥΝΤΑΧΘΗΚΕ:	Μ. ΦΙΚΑΣ Υπεύθυνος Εργαστηρίου	ΚΩΔΙΚΟΣ: ΚΡΟΥΣ 002/2 Ε.Α.Υ.	ΕΚΔΟΣΗ: 06
ΕΓΚΡΙΘΗΚΕ:	Α. ΑΝΤΩΝΑΤΟΣ Τομάρχης ΤΜΜΔΕ	ΗΜ/ΝΙΑ: 01.10.08	ΣΕΛΙΔΑ 171 ΑΠΟ 171

ΠΡΩΤ.ΠΕΛΑΤΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΔΕΠ
-------------	--------------------------------

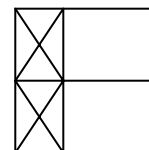
ΔΟΚΙΜΙΑ

ΜΟΡΦΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ:	ΥΛΙΚΟ:	ΤΕΜΑΧΙΑ: 4	ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ: EN 10045.01
-----------------	--------	------------	------------------------------------

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ Τ:	15°C
ΣΧ. ΥΓΡΑΣΙΑ RH:	42 %
ΜΗΧΑΝΗ :	AVERY DENISON 300 J
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ:	300 J
ΕΙΔΟΣ ΕΓΚΟΠΗΣ :	V

ΕΛΕΓΧΟΣ : **GO**
ΕΓΚΟΠΗΣ : **NOT GO**



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ

A/A	6	7	8	9	10	ΑΒΕΒΑΙ- ΟΤΗΤΑ	ΠΡΟΔΙΑΓΡΑ- ΦΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ
ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	DK6	DK7	DK10	DK Brass			
ΜΗΚΟΣ (mm)	55,30	55,25	55,23	55,30			
ΥΨΟΣ (mm)	10,31	9,81	10,08	10,07			
ΠΛΑΤΟΣ (mm)	10,22	10,14	10,08	9,84			
ΔΙΑΤΟΜΗ (mm ²)	-	-	-	-			
ΟΝ.ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΗΧΑΝΗΣ ΤΥΠΟΣ ΕΓΚΟΠΗΣ V	KV300	KV300	KV300	KV300			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ (J)	6,00	8,00	8,00	11,00			
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (J)	-						
ΠΕΡΙΟΧΗ & ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	-	-	-	-			
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	-	-	-	-			

ΤΟΠΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ: ΕΡΓ. ΑΝΤΟΧΗΣ ΥΛΙΚΩΝ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ: 19.01.2011	ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ: ΣΩΚΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ
---------------------------------------	-----------------------------------	--