



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ
ΗΡΩΩΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ 9, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ ΖΩΓΡΑΦΟΥ

Δρ. Πέτρος Ε. Τσακιρίδης, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

Τηλ: 210 772 2171, e-mail: ptsakiri@central.ntua.gr

Ημερομηνία: 30 Απριλίου 2025

ΕΚΘΕΣΗ ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΟΓΝΩΜΟΣΥΝΗΣ

- Προς:** κ. Σωτήριο Μπακαΐμη
Ειδικό Εφέτη Ανακριτή, Εφετείο Λάρισας
- Κοιν:** Εισαγγελέα Εφετών Λάρισας
- Θέμα:** - Αξιολόγηση Μηχανισμών Αστοχίας Μεταλλικών Τεμαχίων από το Θάλαμο Μηχανοδότησης της 2^{ης} Ηλεκτράμαξας της Υπ' Αριθμ. 63503 Εμπορικής Αμαξοστοιχίας

Αντικείμενο της παρούσας Τεχνικής Έκθεσης αποτελεί η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του εργαστηριακού ελέγχου, ο οποίος πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας, της Σχολής Μεταλλειολόγων-Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., σε εννέα (9) μεταλλικά τεμάχια, τόσο από την θραυσιγενή επιφάνεια του οπίσθιου τμήματος της 2^{ης} Ηλεκτράμαξας (με αριθμό 120 012), της υπ' αριθμ. 63503 εμπορικής αμαξοστοιχίας, όσο και από μεταλλικά μέρη-θραύσματα του οπίσθιου Θαλάμου Μηχανοδότησης της εν λόγω Ηλεκτράμαξας, ο οποίος αποκολλήθηκε κατά την διάρκεια του σιδηροδρομικού δυστυχήματος στην περιοχή Ευαγγελισμού Τεμπών Λάρισας.

Σκοπός των διενεργηθέντων πειραματικών δοκιμών ήταν:

- Η ταυτοποίηση των μεταλλικών τμημάτων - θραυσμάτων του οπίσθιου Θαλάμου Μηχανοδότησης της 2^{ης} Ηλεκτράμαξας (με αριθμό 120 012), τα οποία συλλέχθηκαν από την περιοχή του δυστυχήματος και μεταφέρθηκαν στον χώρο φύλαξης στην θέση "Κουλούρι" Λάρισας, μέσω των ανιχνευόμενων χημικών και μικροδομικών χαρακτηριστικών τους, αλλά και μέσω της συγκριτικής

αξιολόγησης των χαρακτηριστικών δομής και σύστασης των επιφανειακών αντιδιαβρωτικών επικαλύψεων των υπό εξέταση μεταλλικών θραυσμάτων.

- Ο μεταλλογραφικός έλεγχος των συλλεχθέντων μεταλλικών τεμαχίων, τόσο από το οπίσθιο τμήμα της 2^{ης} Ηλεκτράμαξας (με αριθμό 120 012), της υπ' αριθμ. 63503 εμπορικής αμαξοστοιχίας, όσο και από τα μεταλλικά μέρη-θραύσματα του οπίσθιου Θαλάμου Μηχανοδήγησης της εν λόγω Ηλεκτράμαξας, αναφορικά με την χημική σύσταση και την μικροδομή τους, ώστε να διερευνηθούν τα αίτια της αστοχίας (θραύσης-αποκόλλησης), μέσω του ανιχνευόμενου ρυθμού παραμόρφωσης, ο οποίος παραπέμπει σε φαινόμενα πρόσκρουσης ή ενδεχόμενης διάρρηξης λόγω εκτόνωσης υψηλής ταχύτητας.

Σύνταξη:

Π. Τσακιρίδης

Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κατάλογος Εικόνων – Σχημάτων	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1 Ιστορικό Ανάθεσης Εργασιών - Δειγματοληψίας	13
1.2 Μηχανική Καταπόνηση και Πλαστική Παραμόρφωση Μεταλλικών Υλικών.....	20
1.3 Παραμορφώσεις Υψηλής Ταχύτητας	23
1.3.1 Παραμόρφωση σε Συνθήκες Κρούσης.....	25
1.3.2 Παραμόρφωση σε Συνθήκες Έκρηξης/Εκτόνωσης Υψηλής Ταχύτητας.....	26
1.3.3 Εκτόνωση Τύπου Deflagration.....	29
1.4 Χαρακτηριστικά Παραμόρφωσης Χάλυβα σε Συνθήκες Υψηλής Ταχύτητας	31
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	37
2.1 Δειγματοληψία - Περιγραφή Δειγμάτων	37
2.2 Στερεοσκοπικό Μικροσκόπιο	46
2.3 Μεταλλογραφική Προετοιμασία	47
2.4 Οπτικό Μικροσκόπιο	48
2.5 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης.....	48
2.6 Σκληρότητα κατά Vickers (Hardness Vickers – HV).....	49
2.7 Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)	50
2.8 Θερμοβαρυνμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (TG-DTA)	51
3. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	52
3.1 Χαρακτηρισμός Δείγματος “H1”	52
3.2 Χαρακτηρισμός Δείγματος “H2”	68



3.3 Χαρακτηρισμός Δείγματος "K1a"	82
3.4 Χαρακτηρισμός Δείγματος "K1β"	95
3.5 Χαρακτηρισμός Δείγματος "K3"	108
3.6 Χαρακτηρισμός Δείγματος "K2"	123
3.7 Χαρακτηρισμός Δείγματος "K4"	137
3.8 Χαρακτηρισμός Δειγμάτων "H3 & K5"	150
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	157
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	162



ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ & ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνες

- Εικόνα 1:** Σιδηροδρομικό δυστύχημα στην περιοχή Ευαγγελισμού Τεμπών Λάρισας, 28 Φεβρουαρίου 2023. Διακρίνεται η 2η Ηλεκτράμαξα, με αριθμό 120 012, της υπ' αριθμ. 63503 εμπορικής αμαξοστοιχίας.....15
- Εικόνα 2:** Σιδηροδρομικό δυστύχημα στην περιοχή Ευαγγελισμού Τεμπών Λάρισας, 28 Φεβρουαρίου 2023. Διακρίνεται η 2η Ηλεκτράμαξα, με αριθμό 120 012, της υπ' αριθμ. 63503 εμπορικής αμαξοστοιχίας.....16
- Εικόνα 3:** Διακρίνονται η 2^η Ηλεκτράμαξα, με αριθμό 120 012, της υπ' αριθμ. 63503 εμπορικής αμαξοστοιχίας, όπως επίσης και τμήματα-θραύσματα του αποκολλημένου Θαλάμου Μηχανοδήγησης, φυλασσόμενα ως πειστήρια στη θέση “Κουλούρι” Λάρισας.....17
- Εικόνα 4:** Ηλεκτράμαξα Siemens Krauss -Maffei 120 012 (φωτ αρχείου)20
- Εικόνα 5:** Δείγμα “H1” (Ηλεκτράμαξα 1), από το πίσω και αριστερά τμήμα της αποκόλλησης.....38
- Εικόνα 6:** Δείγμα “H2” (Ηλεκτράμαξα 2), από το πίσω και δεξιά τμήμα της αποκόλλησης.....39
- Εικόνα 7:** Δείγμα “Κ1α” (Κόκπιτ 1α) από την αριστερή πλευρά της οροφής του Θαλάμου Μηχανοδήγησης40
- Εικόνα 8:** Δείγμα “Κ1β” (Κόκπιτ 1β) από την δεξιά πλευρά της οροφής του Θαλάμου Μηχανοδήγησης41



Εικόνα 9: Δείγμα “Κ2” (Κόκπιτ 2) από το εμπρόσθιο τμήμα του Θαλάμου Μηχανοδήγησης, δεξιά του ανεμοθώρακα (συγκριτικά με τον έτερο Θάλαμο Μηχανοδήγησης της εν λόγω Ηλεκτρομηχανής)	42
Εικόνα 10: Δείγμα “Κ3” (Κόκπιτ) από το εμπρόσθιο τμήμα του Θαλάμου Μηχανοδήγησης, με το λογότυπο της εταιρείας και τον αριθμό της Ηλεκτρομηχανής (120 012).....	43
Εικόνα 11: Δείγμα “Κ4” (Κόκπιτ 4) από το πάνω τμήμα της βάσης-προφυλακτήρα του Θαλάμου Μηχανοδήγησης (συγκριτικά με τον έτερο Θάλαμο Μηχανοδήγησης της εν λόγω Ηλεκτρομηχανής).....	44
Εικόνα 12: Δείγμα “Η3” (Ηλεκτράμαξα 3), από το πίσω και κάτω αριστερά τμήμα της Ηλεκτράμαξας, και αντίστοιχο Δείγμα “Κ5” (Κόκπιτ 5), τα οποία έχουν αποκοπεί πιθανότατα με οξυασετυλινική κοπή.....	45
Εικόνα 13: Δείγμα “Η1” (Ηλεκτράμαξα 1), από το πίσω και αριστερά τμήμα της αποκόλλησης.....	52
Εικόνα 14: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος “Η1”, από το πίσω και αριστερά τμήμα της αποκόλλησης.....	54
Εικόνα 15: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος “Η1”	55
Εικόνα 16: Μικρογραφίες OM, SEM και αναλύσεις EDS οργανικής επικάλυψης Δείγματος “Η1”	58
Εικόνα 17: Μακρο/μικρογραφίες στερεοσκοπικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης επιφάνειας θραύσης δείγματος “Η1”.....	63
Εικόνα 18: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος “Η1” στην περιοχή της θραύσης.....	65



Εικόνα 19: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "H1"	66
Εικόνα 20: Δείγμα "H2" (Ηλεκτράμαξα 2), από το πίσω και δεξιά τμήμα της αποκόλλησης	68
Εικόνα 21: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "H2"	70
Εικόνα 22: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "H2"	71
Εικόνα 23: Μικρογραφίες OM, SEM και αναλύσεις EDS οργανικής επικάλυψης Δείγματος "H2"	73
Εικόνα 24: Μακρο/μικρογραφίες στερεοσκοπικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης επιφάνειας θραύσης δείγματος "H2"	77
Εικόνα 25: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "H2" στην περιοχή της θραύσης	78
Εικόνα 26: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "H2"	79
Εικόνα 27: Δείγμα "K1α" (Κόκπιτ 1α) από την αριστερή πλευρά Οροφής του Θαλάμου Μηχανοδήγησης	82
Εικόνα 28: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "K1α"	84
Εικόνα 29: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "K1α"	85
Εικόνα 30: Μικρογραφίες OM, SEM και αναλύσεις EDS οργανικής επικάλυψης Δείγματος "K1α"	87
Εικόνα 31: Μακρο/μικρογραφίες στερεοσκοπικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης επιφάνειας θραύσης δείγματος "K1α"	90



Εικόνα 32: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος “Κ1α” στην περιοχή της θραύσης.....	92
Εικόνα 33: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος “Κ1α”.....	93
Εικόνα 34: Δείγμα “Κ1β” (Κόκπιτ 1β) από την δεξιά πλευρά της οροφής του Θαλάμου Μηχανοδήγησης	95
Εικόνα 35: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος “Κ1β”	97
Εικόνα 36: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος “Κ1β”.....	98
Εικόνα 37: Μικρογραφίες OM, SEM και αναλύσεις EDS οργανικής επικάλυψης Δείγματος “Κ1β”	100
Εικόνα 38: Μακρο/μικρογραφίες στερεοσκοπικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης επιφάνειας θραύσης δείγματος “Κ1β”.....	103
Εικόνα 39: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος “Κ1β” στην περιοχή της θραύσης.....	105
Εικόνα 40: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος “Κ1β”.....	106
Εικόνα 41: Δείγμα “Κ3” (Κόκπιτ) από το εμπρόσθιο τμήμα του Θαλάμου Μηχανοδήγησης, με το λογότυπο της εταιρείας και τον αριθμό της Ηλεκτρομηχανής (120 012).....	108
Εικόνα 42: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος “Κ3”	110
Εικόνα 43: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος “Κ3”	111
Εικόνα 44: Μικρογραφίες OM, SEM και αναλύσεις EDS οργανικής επικάλυψης Δείγματος “Κ3”	114



Εικόνα 45: Μακρο/μικρογραφίες στερεοσκοπικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης επιφάνειας θραύσης δείγματος "Κ3".....	117
Εικόνα 46: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "Κ3" στην περιοχή της θραύσης.....	119
Εικόνα 47: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "Κ3".....	120
Εικόνα 48: Δείγμα "Κ2" (Κόκπιτ 2) από το εμπρόσθιο τμήμα του Θαλάμου Μηχανοδήγησης.....	123
Εικόνα 49: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "Κ2".....	125
Εικόνα 50: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "Κ2".....	126
Εικόνα 51: Μικρογραφίες OM, SEM και αναλύσεις EDS οργανικής επικάλυψης Δείγματος "Κ2".....	128
Εικόνα 52: Μακρο/μικρογραφίες στερεοσκοπικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης επιφάνειας θραύσης δείγματος "Κ2".....	131
Εικόνα 53: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "Κ2" στην περιοχή της θραύσης.....	133
Εικόνα 54 Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "Κ2".....	134
Εικόνα 55: Δείγμα "Κ4" (Κόκπιτ 4) από το πάνω τμήμα της βάσης-προφυλακτήρα του Θαλάμου Μηχανοδήγησης.....	137
Εικόνα 56: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "Κ4".....	139
Εικόνα 57: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "Κ4".....	140
Εικόνα 58: Μικρογραφίες OM, SEM και αναλύσεις EDS οργανικής επικάλυψης Δείγματος "Κ4".....	142



Εικόνα 59: Μακρο/μικρογραφίες στερεοσκοπικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης επιφάνειας θραύσης δείγματος "K4"	145
Εικόνα 60: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "K4" στην περιοχή της θραύσης	147
Εικόνα 61: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "K4"	148
Εικόνα 62: Δείγμα "H3" (Ηλεκτράμαξα 3), από το πίσω και κάτω αριστερά τμήμα της Ηλεκτράμαξας, και αντίστοιχο Δείγμα "K5" (Κόκπιτ 5), τα οποία έχουν αποκοπεί πιθανότατα με οξυακετυλινική κοπή	150
Εικόνα 63: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "H3"	152
Εικόνα 64: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "K5"	153
Εικόνα 65: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "H3"	154
Εικόνα 66: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "K5"	155

Σχήματα

Σχήμα 1: Κατηγοριοποίηση ρυθμού παραμόρφωσης σύμφωνα με πραγματικά φορτία	25
Σχήμα 2: Ακτινοδιάγραμμα XRD δείγματος "H1"	56
Σχήμα 3: Ακτινοδιάγραμμα XRD αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης Δείγματος "H1"	60
Σχήμα 4: Διαφορική θερμική ανάλυση αντιδιαβρωτικής επικάλυψης Δείγματος "H1"	61



Σχήμα 5: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων Vickers παράλληλα στην διεύθυνση παραμόρφωσης Δείγματος "H1"	67
Σχήμα 6: Ακτινοδιάγραμμα XRD δείγματος "H2"	72
Σχήμα 7: Ακτινοδιάγραμμα XRD αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης Δείγματος "H2"	75
Σχήμα 8: Διαφορική θερμική ανάλυση αντιδιαβρωτικής επικάλυψης Δείγματος "H2"	75
Σχήμα 9: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων Vickers παράλληλα στην διεύθυνση παραμόρφωσης Δείγματος "H2"	80
Σχήμα 10: Ακτινοδιάγραμμα XRD δείγματος "K1α"	86
Σχήμα 11: Ακτινοδιάγραμμα XRD αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης Δείγματος "K1α"	88
Σχήμα 12: Διαφορική θερμική ανάλυση αντιδιαβρωτικής επικάλυψης Δείγματος "K1α"	89
Σχήμα 13: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων Vickers παράλληλα στην διεύθυνση παραμόρφωσης Δείγματος "K1α"	94
Σχήμα 14: Ακτινοδιάγραμμα XRD δείγματος "K1β"	99
Σχήμα 15: Ακτινοδιάγραμμα XRD αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης Δείγματος "K1β"	101
Σχήμα 16: Διαφορική θερμική ανάλυση αντιδιαβρωτικής επικάλυψης Δείγματος "K1β"	102
Σχήμα 17: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων Vickers παράλληλα στην διεύθυνση παραμόρφωσης Δείγματος "K1β"	107



Σχήμα 18: Ακτινοδιάγραμμα XRD δείγματος "K3"	113
Σχήμα 19: Ακτινοδιάγραμμα XRD αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης Δείγματος "K3"	115
Σχήμα 20: Διαφορική θερμική ανάλυση αντιδιαβρωτικής επικάλυψης Δείγματος "K3"	116
Σχήμα 21: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων Vickers παράλληλα στην διεύθυνση παραμόρφωσης Δείγματος "K3"	122
Σχήμα 22: Ακτινοδιάγραμμα XRD δείγματος "K2"	127
Σχήμα 23: Ακτινοδιάγραμμα XRD αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης Δείγματος "K2"	129
Σχήμα 24: Διαφορική θερμική ανάλυση αντιδιαβρωτικής επικάλυψης Δείγματος "K2"	130
Σχήμα 25: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων Vickers παράλληλα στην διεύθυνση παραμόρφωσης Δείγματος "K2"	135
Σχήμα 26: Ακτινοδιάγραμμα XRD δείγματος "K4"	141
Σχήμα 27: Ακτινοδιάγραμμα XRD αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης Δείγματος "K4"	143
Σχήμα 28: Διαφορική θερμική ανάλυση αντιδιαβρωτικής επικάλυψης Δείγματος "K4"	144
Σχήμα 29: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων Vickers παράλληλα στην διεύθυνση παραμόρφωσης Δείγματος "K4"	149
Σχήμα 30: Συγκριτικό Ακτινοδιάγραμμα XRD Δειγμάτων "H3" και "K5"	156



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορικό Ανάθεσης Εργασιών - Δειγματοληψίας

Στα πλαίσια της διενεργούμενης κυρίας ανακρίσεως και της διακρίβωσης των αιτιών και συνθηκών επέλευσης του διερευνώμενου σιδηροδρομικού δυστυχήματος στην περιοχή Ευαγγελισμού Τεμπών Λάρισας (Αριθμός Δικογραφίας: ΑΒΜ Φ2023/49), παραγγέλθηκε διενέργεια αυτοψίας κατά τα άρθρα 180 επ. ΚΠΔ από τους αρμόδιους ανακριτικούς υπαλλήλους της Διεύθυνσης Αντιμετώπισης Εγκλημάτων Εμπρησμού (ΔΑΕΕ) επί των φυλασσόμενων στη θέση “Κουλούρι” Λάρισας, Ηλεκτραμαξών και Επιβαταμαξών των αμαξοστοιχιών που ενεπλάκησαν στο διερευνώμενο ως άνω δυστύχημα. Η εν λόγω αυτοψία είχε στόχο να διαπιστωθεί αν τα υπολείμματα-συντρίμμια αυτών φέρουν, εσωτερικά ή/και εξωτερικά, ίχνη (στοιχεία-υπολείμματα) καύσης από φωτιά - πυρκαγιά ή έκρηξη, οφειλόμενη σε βίαιη ανάφλεξη - εκτόνωση ή έκρηξη οιασδήποτε μορφής αρωματικών-πτητικών υδρογονανθράκων (ή άλλου υλικού ικανού προς τούτο), ευρισκόμενου/ων σε ικανή ποσότητα είτε εντός Επιβαταμαξών της επιβατικής αμαξοστοιχίας IC-62, είτε στο βαγόνι του κυλικείου αυτής, είτε εντός των Ηλεκτρομηχανών των αμαξοστοιχιών και ειδικότερα εντός των Ηλεκτραμαξών της εμπορικής αμαξοστοιχίας 63503, καθώς και των Θαλάμων Μηχανοδήγησης.

Η ανωτέρω ανακριτική ενέργεια πραγματοποιήθηκε στην θέση “Κουλούρι” Λάρισας την Παρασκευή 7 Μαρτίου 2025, και συνεχίστηκε την επομένη ημέρα, Σάββατο 8 Μαρτίου 2025. Ακολούθως ορίστηκε να συνεχιστεί την Πέμπτη 13 Μαρτίου 2025, καθώς και για όσο χρόνο απαιτηθεί, ώστε να ολοκληρωθεί η εν λόγω ανακριτική πράξη.

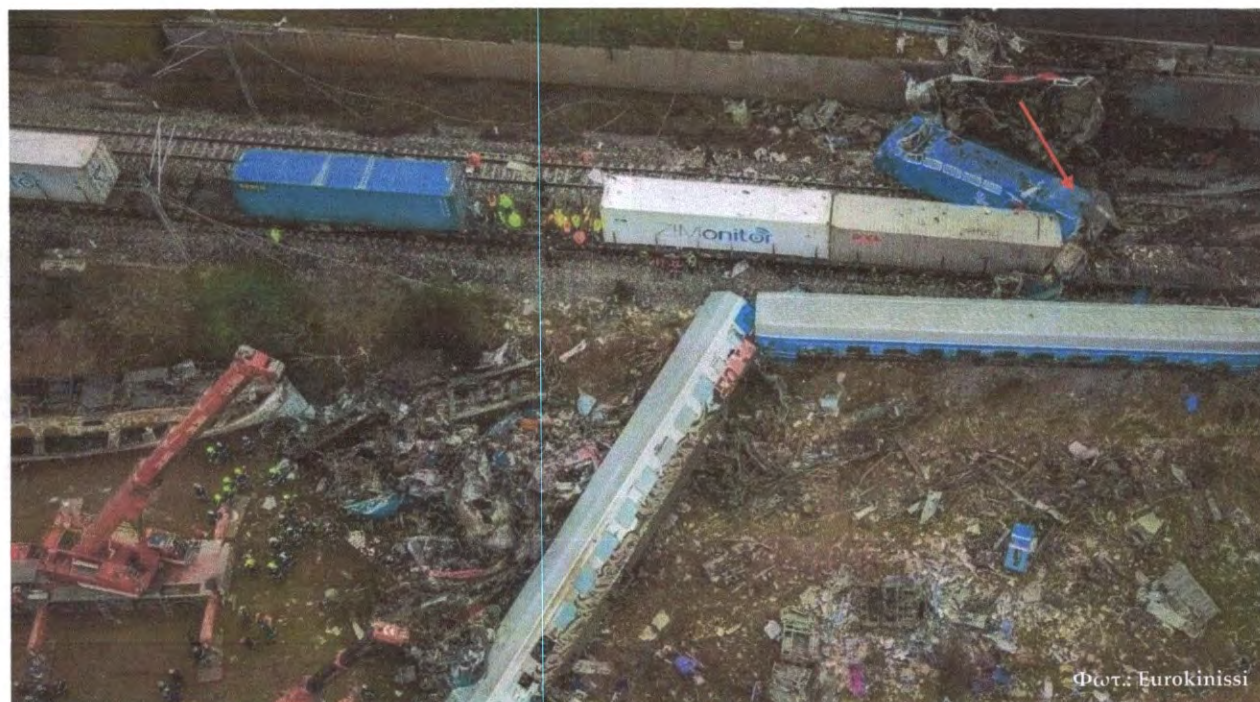
Επειδή σύμφωνα με τη διάταξη του άρθρου 182 ΚΠΔ, “κατά την αυτοψία μπορούν να προσληφθούν μάρτυρες ή πραγματογνώμονες, που ορκίζονται νομότυπα, για να γίνει ο καθορισμός πραγμάτων ή τόπων ή της ταυτότητας προσώπων ή για να δοθούν άλλα



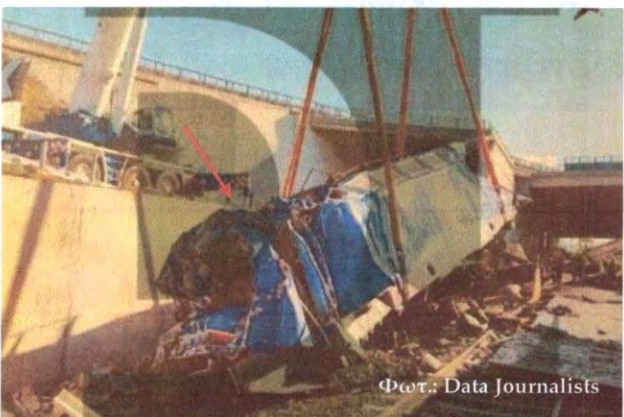
χρήσιμα στοιχεία” κρίθηκε σκόπιμη η παρουσία μου στην θέση “Κουλούρι” Λάρισας κατά την διενεργούμενη αυτοψία προκειμένου (σύμφωνα με υπ’ αριθμ. 130/10-3-2025 επείγουσα παραγγελία), στα πλαίσια της ανωτέρω διάταξης του άρθρου 182 ΚΠΔ, και αφού ήδη είχε πραγματοποιηθεί ο αρχικός έλεγχος των ως άνω πειστηρίων από τους ανακριτικούς υπαλλήλους της ΔΑΕΕ, να παράσχω προς αυτούς κάθε αναγκαία και χρήσιμη πληροφορία και σχετικό χρήσιμο στοιχείο για τον ανωτέρω σκοπό, για τον οποίο διενεργείται η αυτοψία και άπτεται εντός του Επιστημονικού μου Αντικειμένου. Επισημαίνεται δε, ότι ο υπογράφων την Πραγματογνωμοσύνη είχε ήδη οριστεί από τις Ανακριτικές Αρχές τον Ιούλιο του 2024, ως δικαστικός πραγματογνώμονας για τον μεταλλουργικό έλεγχο των στρεβλώσεων-παραμορφώσεων της εμπρόσθιας πλευράς εμπορευματοκιβωτίου που μετέφερε φορτάμαξα της ανωτέρω εμπορικής αμαξοστοιχίας, Μελέτη η οποία ολοκληρώθηκε και παραδόθηκε στις 15 Οκτωβρίου 2024.

Την Πέμπτη 13 Μαρτίου 2025, μετά την όρκιση μου ενώπιον του Εφέτη Ανακριτή κ. Σωτηρίου Μπακαΐμη, στο Ανακριτικό Γραφείο του Εφετείου Λάρισας και την μετάβασή μας, συνοδεία αστυνομικών του Τ.Τ. Τροχαίας Λάρισας στη θέση “Κουλούρι” Λάρισας, πραγματοποιήθηκε αυτοψία, σε συνεργασία με τους ανακριτικούς υπαλλήλους της ΔΑΕΕ, στο οπίσθιο Τμήμα της 2^{ης} Ηλεκτράμαξας (με αριθμό 120 012), της υπ’ αριθμ. 63503 εμπορικής αμαξοστοιχίας, όπως επίσης και στα συλλεχθέντα μεταλλικά μέρη-θραύσματα του οπίσθιου Θαλάμου Μηχανοδήγησης της εν λόγω Ηλεκτράμαξας, ο οποίος αποκολλήθηκε κατά την διάρκεια του σιδηροδρομικού δυστυχήματος (Εικόνες 1-3).

Αποφασίστηκε και πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία εννέα (9) συνολικά μεταλλικών δειγμάτων, τρία (3) από το οπίσθιο μέρος της εν λόγω Ηλεκτράμαξας (με αριθμό 120 012), με κωδικούς “H1, H2 και H3”, και έξι (6) από τα αποκολλημένα θραύσματα του οπίσθιου Θαλάμου Μηχανοδήγησης, με κωδικούς “K1α, K1β, K2, K3, K4 και K5”, τα



Εικόνα 1: Σιδηροδρομικό δυστύχημα στην περιοχή Ευαγγελισμού Τεμπών Λάρισας, 28 Φεβρουαρίου 2023. Διακρίνεται η 2η Ηλεκτράμαξα, με αριθμό 120 012, της υπ' αριθμ. 63503 εμπορικής αμαξοστοιχίας



Εικόνα 2: Σιδηροδρομικό δυστύχημα στην περιοχή Ευαγγελισμού Τεμπών Λάρισας, 28 Φεβρουαρίου 2023. Διακρίνεται η 2η Ηλεκτράμαξα, με αριθμό 120 012, της υπ' αριθμ. 63503 εμπορικής αμαξοστοιχίας



Εικόνα 3: Διακρίνονται η 2^η Ηλεκτράμαξα, με αριθμό 120 012, της υπ' αριθμ. 63503 εμπορικής αμαξοστοιχίας, όπως επίσης και τμήματα-θραύσματα του αποκολλημένου Θαλάμου Μηχανοδήγησης, φυλασσόμενα ως πειστήρια στη θέση "Κουλούρι" Λάρισας



οποία αφού σημάνθηκαν και αποκόπηκαν, μέσω κατάλληλης διαδικασίας, αδιατάρακτης σχετικά κοπής, χαμηλής αύξησης (τοπικά) της θερμοκρασίας, και αριθμήθηκαν ως άνω, παραδόθηκαν με πρωτόκολλο παράδοσης-παραλαβής στους αρμοδίους ανακριτικούς υπαλλήλους του Τμήματος Τροχαίας Λάρισας ώστε να φυλαχθούν και στη συνέχεια να μεταφερθούν με ασφαλή αστυνομική συνοδεία και να παραδοθούν αρμοδίως.

Ακολούθως, σύμφωνα με την υπ. αριθμ. 17/2025 διάταξη του κ. Εφέτη Ανακριτή του Εφετείου Λάρισας, στα πλαίσια διεξαγωγής της κυρίας ανακρίσεως, κατόπιν σχετικής ενημέρωσης για την άμεση και κατεπείγουσα διερεύνηση του πιθανού ενδεχομένου να μεταφερόταν από την εμπορική αμαξοστοιχία 63503, που ενεπλάκη στο διερευνώμενο σιδηροδρομικό δυστύχημα, ποσότητα οιασδήποτε μορφής αρωματικών-πτητικών υδρογονανθράκων, είτε εντός των Ηλεκτραμαξών αυτής, καθώς και των Θαλάμων Μηχανοδήγησης αυτών, είτε επί της ακολουθούσας 1ης Φορτάμαξας αυτής αναφορικά με το σιδηροδρομικό δυστύχημα στην περιοχή Ευαγγελισμού Τεμπών Λάρισας, ορίστηκε η διενέργεια “Προκαταρκτικής Πραγματογνωμοσύνης”, σύμφωνα με τη διάταξη του άρθρου 187 ΚΠΔ, το οποίο προβλέπει ότι “σε εξαιρετικά επείγουσες περιπτώσεις, και ιδίως όταν δεν είναι δυνατό να διοριστεί τακτικός πραγματογνώμονας, μπορεί να ανατεθεί σε ειδικό να ενεργήσει προκαταρκτική πραγματογνωμοσύνη”. Σύμφωνα με την εν λόγω διάταξη (17/2025) του κ. Εφέτη Ανακριτή του Εφετείου Λάρισας, το βασικό αντικείμενο της Προκαταρκτικής Πραγματογνωμοσύνης είναι να πιστοποιηθεί με ακρίβεια και επιστημονική πληρότητα αν τα συλλεχθέντα μεταλλικά δείγματα έχουν υποστεί θερμική καταπόνηση ή αλλοίωση από φωτιά-πυρκαγιά ή έκρηξη οφειλόμενη σε βίαιη εκτόνωση, ή ανάφλεξη, ή έκρηξη οιασδήποτε μορφής αρωματικών-πτητικών υδρογονανθράκων, ή όποιου άλλου στοιχείου ικανού προς αυτό.



Τα προς εξέταση εννέα (9) μεταλλικά τεμάχια, τρία (3) από το οπίσθιο μέρος της 2^{ης} Ηλεκτράμαξας (με αριθμό 120 012), της υπ' αριθμ. 63503 εμπορικής αμαξοστοιχίας, με κωδικούς "H1", "H2" και "H3", και έξι (6) από τα αποκολλημένα θραύσματα του οπίσθιου Θαλάμου Μηχανοδήγησης, με κωδικούς "K1α", "K1β", "K2", "K3", "K4" και "K5", μεταφέρθηκαν με ασφαλή αστυνομική συνοδεία και παραδόθηκαν αρμοδίως στο Πρωτοδικείο Αθηνών, στο 12^ο Ανακριτικό Γραφείο, πρώην Σχολή Ευελπίδων, Κτήριο 9, Γραφείο 117. Τα εν λόγω δείγματα παρελήφθησαν με πρωτόκολλο παράδοσης-παραλαβής την Δευτέρα 24 Μαρτίου 2025, μετά την όρκισή μου ενώπιον της Ανακρίτριας του 12^{ου} Τμήματος κας Νεκταρίας Ξελυσσακτή, παρουσία και της Γραμματέως κας Χρυσούλας Ζήση.

Σκοπός των διενεργηθέντων πειραματικών δοκιμών στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας, της Σχολής Μεταλλειολόγων-Μεταλλουργών Μηχανικών, του ΕΜΠ, ήταν ο πλήρης μεταλλογραφικός έλεγχος των ανωτέρων μεταλλικών τεμαχίων, αναφορικά με την χημική σύσταση και την μικροδομή τους, με στόχο τη διερεύνηση των αιτιών της αστοχίας/θραύσης (πρόσκρουση ή ενδεχόμενη διάρρηξη-αποκόλληση λόγω εκτόνωσης υψηλής ταχύτητας).

Επίσης πραγματοποιήθηκε ταυτοποίηση των μεταλλικών τμημάτων - θραυσμάτων του οπίσθιου Θαλάμου Μηχανοδήγησης της 2^{ης} Ηλεκτράμαξας, με αριθμό 120 012 (**Εικόνα 4**), τα οποία συλλέχθηκαν από την περιοχή του δυστυχήματος και μεταφέρθηκαν στον χώρο φύλαξης στην θέση "Κουλούρι" Λάρισας, μέσω των ανιχνευόμενων χημικών και μικροδομικών χαρακτηριστικών τους, αλλά και μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης των χαρακτηριστικών δομής και σύστασης των επιφανειακών αντιδιαβρωτικών επικαλύψεων των υπό εξέταση μεταλλικών θραυσμάτων.



Εικόνα 4: Ηλεκτράμαξα EuroSprinter Siemens Krauss -Maffei 120 012, Τύπος: ES64U4 (φωτ αρχείου)

1.2 Μηχανική Καταπόνηση και Πλαστική Παραμόρφωση Μεταλλικών Υλικών

Η μηχανική καταπόνηση είναι η εσωτερική δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας που αναπτύσσεται μέσα σε ένα σώμα όταν αυτό υποβάλλεται σε εξωτερικές δυνάμεις ή φορτία. Αποτελεί το μέτρο της "έντασης" που ασκείται στα άτομα του υλικού λόγω της προσπάθειάς του να αντισταθεί στην παραμόρφωση. Υπό την επίδραση μηχανικής καταπόνησης σε ένα σώμα-υλικό, λαμβάνει χώρα ανάπτυξη δυνάμεων ή ροπών με συνέπεια την παραμόρφωσή του, τόσο σε επίπεδο μικροκλίμακας (παραμόρφωση πλέγματος) όσο και σε επίπεδο μακροκλίμακας (αλλαγή διαστάσεων-σχήματος). Στην περίπτωση ενός μεταλλικού υλικού τα είδη της παραμόρφωσης είναι δύο. Η ελαστική (αντιστρεπτή) παραμόρφωση και η πλαστική (μόνιμη) παραμόρφωση. Όταν ένα



μεταλλικό υλικό υποβάλλεται σε μηχανική καταπόνηση, η εφαρμοζόμενη ενέργεια μεταφέρεται στα άτομα του υλικού, τα οποία είναι διατεταγμένα στο κρυσταλλικό πλέγμα.

Στην αρχική φάση (ελαστική περιοχή), τα άτομα μετατοπίζονται ελαφρώς από τις θέσεις ισορροπίας τους και η ενέργεια αποθηκεύεται ως ελαστική δυναμική ενέργεια. Τα άτομα βρίσκονται αρχικά σε θέσεις ισορροπίας μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Οι μετατοπίσεις είναι μικρές σε σχέση με τις ατομικές αποστάσεις, με συνέπεια να μην παραβιάζονται, ούτε να καταστρέφονται οι υφιστάμενοι μεταλλικοί δεσμοί, αλλά να παραμορφώνονται προσωρινά, όπως λειτουργεί ένα τυπικό "ελατήριο". Όταν η δύναμη αφαιρεθεί οι ενδοατομικές ελκτικές δυνάμεις επαναφέρουν τα άτομα στην αρχική τους θέση, με συνέπεια το υλικό να επανακτά το αρχικό του σχήμα. Η εν λόγω συμπεριφορά υπακούει στον Νόμο του Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$), μέσω του οποίου προσδιορίζεται η αντίσταση στην ελαστική παραμόρφωση (δυσκαμψία) ενός υλικού.

Ανεξάρτητα από το μέγεθος της ασκούμενης δύναμης, προκαλείται οπωσδήποτε έστω και μια μικρή παραμόρφωση (ακόμη και όταν δεν είναι ορατή, ή δεν είναι εφικτή η μέτρησή της με τα συνηθισμένα μέσα), καθώς τα άτομα στο κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού απορροφούν ενέργεια, λόγω της φόρτισης, και μετακινούνται σε σχέση με τις αρχικές τους θέσεις. Συνεπώς, η παρατηρούμενη παραμόρφωση αναπτύσσεται αρχικά σε υπο-μικροσκοπικό επίπεδο, στα άτομα ενός στερεού σώματος, στα οποία κατανέμεται το φορτίο των τάσεων, με συνέπεια την τελική μετακίνησή τους σε νέες θέσεις. Η εν λόγω παραμόρφωση γίνεται τελικά αντιληπτή και σε μακροσκοπικό επίπεδο, είτε μέσω των αισθήσεων, ή μέσω μετρητικών οργάνων, όταν τελικά παρατηρείται αλλαγή στις αρχικές διαστάσεις του σχήματος.



Η πλαστική-μόνιμη παραμόρφωση σε ένα μεταλλικό υλικό πραγματοποιείται όταν ξεπεραστεί το όριο διαρροής του, το σημείο δηλαδή μετάβασης από την ελαστική στη πλαστική συμπεριφορά του υλικού, το οποίο εμφανίζεται λίγο μετά τη γραμμική-ελαστική περιοχή, όπου ισχύει ο Νόμος του Hooke. Όταν ξεπεραστεί το όριο διαρροής του μεταλλικού υλικού-σώματος, η προσφερόμενη ενέργεια ξεπερνά τις ενδοατομικές δυνάμεις και προκαλεί μόνιμες μετατοπίσεις ατομικών επιπέδων, με συνέπεια να εκκινεί η πλαστική παραμόρφωση, η οποία είναι η μόνιμη, μη αντιστρέψιμη μεταβολή στο σχήμα ή τις διαστάσεις ενός υλικού. Τα άτομα στο κρυσταλλικό πλέγμα δεν επιστρέφουν στις αρχικές τους θέσεις όταν απομακρυνθεί το φορτίο, αλλά εμφανίζονται μόνιμες μετατοπίσεις επιπέδων ατόμων μέσα στο πλέγμα. Στην περίπτωση αυτή οι μεταλλικοί δεσμοί μεταξύ των ατόμων καταστρέφονται τοπικά και επανασχηματίζονται σε νέες θέσεις. Συνεπώς, κατά την πλαστική παραμόρφωση τα άτομα μετακινούνται μόνιμα. Πραγματοποιούνται μετακινήσεις ολόκληρων ατομικών επιπέδων, σε σχέση με άλλα, εντός του κρυσταλλικού πλέγματος, υπό την επίδραση εξωτερικής καταπόνησης. Η μετακίνηση αυτή γίνεται κατά μήκος συγκεκριμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων και διευθύνσεων, που ονομάζονται “Επίπεδα Ολίσθησης” (Slip Planes) και “Διευθύνσεις Ολίσθησης” (Slip Directions). Πρόκειται για τα πυκνά δομημένα με άτομα επίπεδα, με συνέπεια να απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να κινηθούν τα άτομα, καθώς οι αποστάσεις τους είναι μικρότερες. Η ολίσθηση δεν γίνεται ταυτόχρονα σε ολόκληρο το επίπεδο. Αρχικά δημιουργείται μια γραμμική ατέλεια στο πλέγμα (διαταραχή) η οποία κινείται σταδιακά, υπό την επίδραση του εξωτερικού εφαρμοζόμενου φορτίου. Η διαταραχή είναι μια ασυνέχεια στη διάταξη των ατόμων, η οποία επιτρέπει στο υλικό να παραμορφώνεται πλαστικά χωρίς να απαιτείται η μετακίνηση όλων των ατόμων ταυτόχρονα. Με αυτόν τον τρόπο η παρατηρούμενη πλαστική παραμόρφωση γίνεται σταδιακά, με χαμηλότερη ενεργειακή απαίτηση από ό,τι αν κινούνταν όλα τα άτομα ταυτόχρονα.



Υπό την επίδραση εξωτερικής τάσης, ένα επιπλέον ημιεπίπεδο ατόμων “εισέρχεται” στο κρυσταλλικό πλέγμα, καθώς αυτό συμπιέζεται, με συνέπεια την γένεση της διαταραχής, η οποία καθώς κινείται, μετακινεί σταδιακά τα άτομα γύρω της, αλλάζοντας τις θέσεις τους μόνιμα. Το αποτέλεσμα είναι ότι ολόκληρο το επίπεδο των ατόμων ολισθαίνει σε σχέση με ένα άλλο (ολίσθηση πλέγματος). Όταν ασκηθεί δύναμη, αυτό το ημιεπίπεδο κινείται από άτομο σε άτομο, παραμορφώνοντας διαδοχικά το κρυσταλλικό πλέγμα. Η παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος και κατά συνέπεια όλου του υλικού εξαπλώνεται σαν κύμα, αφήνοντας πίσω του μόνιμες αλλαγές στη διάταξη των ατόμων.

Συνεπώς, κατά την ελαστική παραμόρφωση, το σώμα το οποίο καταπονείται επανέρχεται στις αρχικές του διαστάσεις, μετά την απομάκρυνση του ασκούμενου φορτίου, όταν το τελικό φορτίο δεν υπερβαίνει μια μέγιστη τιμή, η οποία ταυτίζεται με το όριο ελαστικότητας του υλικού. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν η παρατηρούμενη παραμόρφωση διατηρείται και μετά την απομάκρυνση του φορτίου ονομάζεται πλαστική παραμόρφωση. Η τελική παραμόρφωση αποτελείται από ένα μέρος που χαρακτηρίζεται ως ελαστικό (εξαφανίζεται με την απομάκρυνση του φορτίου) και ένα μέρος που είναι μόνιμο (πλαστικό) και παραμένει στο υλικό. Τέλος, στην περίπτωση που η επαναφορά ενός σώματος στις αρχικές διαστάσεις δεν είναι άμεση, αλλά απαιτεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, τότε αναφέρεται ότι το σώμα παρουσιάζει συμπεριφορά ελαστικής αδράνειας.

1.3 Παραμορφώσεις Υψηλής Ταχύτητας

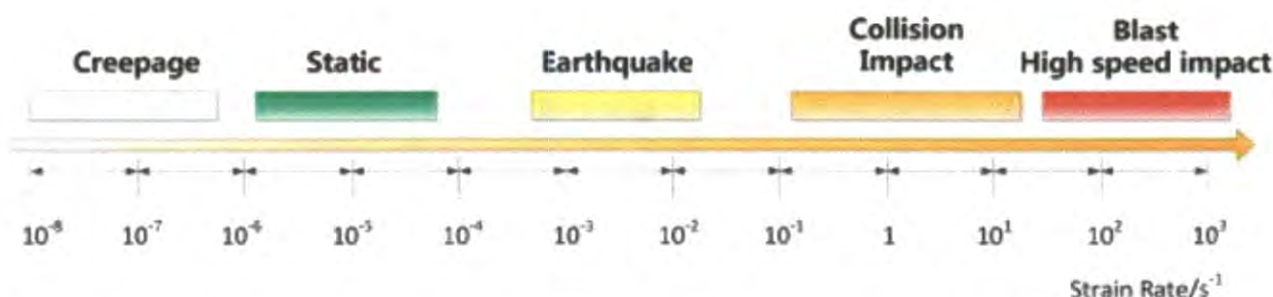
Ο ρυθμός παραμόρφωσης αναφέρεται στον ρυθμό μεταβολής της παραμόρφωσης σε σχέση με το χρόνο. Η αλλαγή του σχήματος-διαστάσεων είναι ένα μέτρο της παραμόρφωσης ενός υλικού και ο ρυθμός παραμόρφωσης περιγράφει πόσο γρήγορα



πραγματοποιείται αυτή η παραμόρφωση. Ειδικότερα, ο ρυθμός παραμόρφωσης ορίζεται ως το πηλίκο της παραμόρφωσης σε σχέση με το χρόνο. Αντιπροσωπεύει την αλλαγή της καταπόνησης ανά μονάδα χρόνου και τυπικά εκφράζεται σε μονάδες $\frac{1}{\text{χρόνο}}$ (συνήθως s^{-1}). Ένας υψηλότερος ρυθμός παραμόρφωσης υποδηλώνει ότι το υλικό παραμορφώνεται με μεγαλύτερη ταχύτητα.

Ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι μια σημαντική παράμετρος στη μελέτη των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς ενός υλικού, καθώς στις περισσότερες των περιπτώσεων τα υλικά παρουσιάζουν διαφορετικές μηχανικές αποκρίσεις, αναφορικά με τον ρυθμό καταπόνησης στον οποίο υπόκεινται. Στην περίπτωση των μεταλλικών υλικών παρατηρείται σκλήρυνση σε υψηλότερους ρυθμούς παραμόρφωσης, αύξηση του ορίου διαρροής και της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής τους, με ταυτόχρονη μείωση της ολκιμότητας-δυσθραυστότητάς τους.

Σε μια ημιστατική δοκιμή (quasi static), όπως είναι μια δοκιμή εφελκυσμού, ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι της τάξης των 10^{-3} - 10^{-4} ανά δευτερόλεπτο. Ο αντίστοιχος ρυθμός στην περίπτωση ενός πολύ πιο αργού φαινομένου, όπως για παράδειγμα ο ερπυσμός, είναι της τάξης των 10^{-7} ανά δευτερόλεπτο (**Σχήμα 1**). Για δυναμικά συμβάντα όπως είναι η κρούση, ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι της τάξης των 10/sec. Για γεγονότα πολύ υψηλής ταχύτητας, όπως η έκρηξη ή η εκτόνωση αερίου, είναι της τάξης των 10^3 - 10^4 ανά δευτερόλεπτο. Τέλος, στην περίπτωση παραμορφώσεων υπερυψηλής ταχύτητας (π.χ. πυρηνική έκρηξη), ο ρυθμός παραμόρφωσης μπορεί να είναι της τάξης των 10^7 ανά δευτερόλεπτο.



Σχήμα1: Κατηγοριοποίηση ρυθμού παραμόρφωσης σύμφωνα με πραγματικά φορτία

1.3.1 Παραμόρφωση σε Συνθήκες Κρούσης

Στην μηχανική των υλικών ο όρος “κρούση” χρησιμοποιείται στην περίπτωση που παραιτείται σύγκρουση μεταξύ δύο στερεών σωμάτων όταν αυτά έχουν αναπτύξει σχετική κίνηση μεταξύ τους. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σε αντίθεση με τις στατικές και με τις ημιστατικές καταπονήσεις το φαινόμενο της κρούσης παρουσιάζει δύο βασικά χαρακτηριστικά:

- ✓ Παρουσιάζει σημαντικά μικρότερη χρονική διάρκεια.
- ✓ Κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες από όλες τις άλλες που ενδεχομένως ασκούνται ταυτόχρονα στα σώματα, όπως για παράδειγμα η βαρύτητα.

Κατά την εξέλιξη των φαινομένων κρούσης, αν και η ορμή του συστήματος παραμένει σταθερή στις περισσότερες των περιπτώσεων, η μηχανική ενέργεια μεταξύ των σωμάτων που συμμετέχουν στην κρούση μεταβάλλεται. Σε όλες τις κατηγορίες κρούσεις ανιχνεύονται δύο βασικά στάδια ανάπτυξης:

- ✓ Κατά το πρώτο στάδιο, παρατηρείται παραμόρφωση των σωμάτων που έρχονται σε επαφή, έως ότου αποκτήσουν ίδια στιγμιαία ταχύτητα. Η ενέργεια που απαιτείται για την παραμόρφωσή τους προέρχεται από την αντίστοιχη αρχική κινητική τους ενέργεια, η οποία και μεταβάλλεται. Καθώς το φαινόμενο της



κρούσης πραγματοποιείται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, τα συμμετέχοντα σώματα δεν αλλάζουν θέση, με αποτέλεσμα η βαρυτική-δυναμική τους ενέργεια να παραμένει σταθερή.

- ✓ Κατά το δεύτερο στάδιο, ανάλογα με την ανάπτυξη των δυνάμεων και τον τρόπο παραμόρφωσης των σωμάτων που συμμετέχουν, αναπτύσσονται μηχανισμοί ελαστικής ή πλαστικής κρούσης

Κατά τη ανελαστική κρούση, η παραμόρφωση των σωμάτων του συστήματος είναι μόνιμη, γεγονός το οποίο υποδηλώνει ότι μέρος της αρχικής κινητικής ενέργειας καταναλώθηκε και μετατράπηκε είτε σε θερμότητα, η σε ενέργεια μόνιμης παραμόρφωσης. Κατά αναλογία με την ελαστική παραμόρφωση, τα ασκούμενα φορτία κατά τη διάρκεια της κρούσης είναι μεγαλύτερα του ορίου ελαστικότητας των συμμετεχόντων σωμάτων (ενός ή όλων) με συνέπεια να αναπτύσσονται μόνιμες-πλαστικές παραμορφώσεις. Κατά συνέπεια, ο τύπος της κρούσης, κατά την οποία μέρος της παρατηρούμενης κινητικής ενέργειας των συμμετεχόντων σωμάτων καταναλώνεται, ονομάζεται ανελαστική.

1.3.2 Παραμόρφωση σε Συνθήκες Έκρηξης/Εκτόνωσης Υψηλής Ταχύτητας

Κατά την διάρκεια μιας έκρηξης/εκτόνωσης αερίου, λαμβάνει χώρα η ανάπτυξη ενός υπερηχητικού (detonation) ή ενός υποηχητικού (deflagration) κύματος, το οποίο διαδίδεται μέσω του αέρα και ασκεί ακαριαία πίεση, παραπλήσιας φύσης με την αντίστοιχη του ανέμου, αλλά σημαντικά υψηλότερης έντασης, ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται τοπικά και αύξηση της θερμοκρασίας και ενδεχομένως εκδήλωση περιορισμένου εύρους φωτιάς. Πρόκειται για ένα δυναμικό φαινόμενο παραμόρφωσης (ελαστικής ή/και πλαστικής), καθώς το αναπτυσσόμενο φορτίο ασκείται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.



Συνεπώς ένα φαινόμενο έκρηξης/εκτόνωσης αερίου έχει ως αποτέλεσμα την ξαφνική, ταχεία απελευθέρωση ενέργειας που παράγει δυνητικά επιβλαβείς πιέσεις. Όταν για παράδειγμα ένα αέριο καύσιμο γεμίζει έναν χώρο, χρειάζεται να αναμιχθεί με μια συγκεκριμένη συγκέντρωση αέρα, ώστε να δημιουργήσει μια εκρηκτική ατμόσφαιρα. Όταν μια πηγή ανάφλεξης εισάγεται σε αυτή την εκρηκτική ατμόσφαιρα, δημιουργεί μια φλόγα που απομακρύνεται από το σημείο ανάφλεξης και διαστέλλει τα παραγόμενα αέρια πίσω από το μέτωπο της φλόγας. Όταν μια ανάφλεξη είναι περιορισμένη, δημιουργεί περιορισμό των διαστελλόμενων αερίων και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης. Η ταχύτητα της φλόγας μπορεί να είναι αρκετά αυξημένη ώστε να παράγει κύματα συμπίεσης, τα οποία οδηγούν σε μηχανικές καταπονήσεις υψηλού ρυθμού παραμόρφωσης. Το δυναμικό φορτίο σε μια τέτοια περίπτωση εξαρτάται τόσο από την πίεση που δημιουργείται, όσο και από το πόσο γρήγορα απελευθερώνεται ενέργεια. Οι εκρήξεις/εκτονώσεις αερίου κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την αναπτυσσόμενη ταχύτητα της φλόγας.

Το φαινόμενο της έκρηξης πραγματοποιείται σε τρία στάδια, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικό ρυθμό εξέλιξης. Κατά το 1^ο στάδιο πραγματοποιείται η οξείδωση, αντίδραση η οποία παρουσιάζει ρυθμό εξέλιξης της τάξης των "cm/sec". Στο 2^ο στάδιο λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της ανάφλεξης, ο ρυθμός ανάπτυξης του οποίου είναι της τάξης των "dm/sec". Τέλος στο 3^ο στάδιο πραγματοποιείται η έκρηξη, της οποίας ο ρυθμός εξέλιξης είναι της τάξης των "km/sec". Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση (ανάλογα με τα αίτια), υπάρχουν διάφορα είδη εκρήξεων (φυσική, χημική, πυρηνική, ηλεκτρική, μαγνητική, μηχανική έκρηξη). Οι εκρήξεις που πραγματοποιούνται μέσω της ανάφλεξης εύφλεκτων υλών ανήκουν στην κατηγορία των χημικών εκρήξεων (λόγω της αναπτυσσόμενης αντίδρασης οξείδωσης-καύσης).



Το αποτέλεσμα της έκρηξης είναι η δημιουργία ενός ωστικού κύματος, με φυγόκεντρη ανάπτυξη-διάδοση, σε σχέση με την εστία, με σχετικά σφαιρική συμμετρία. Το βασικότερο χαρακτηριστικό του αναπτυσσόμενου ωστικού κύματος είναι η ακαριαία αύξηση της πίεσης εντός του σφαιρικού χώρου που περικλείει την έκρηξη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι σχεδόν σε όλα τα είδη εκρήξεων, ο όγκος του ωστικού κύματος που καταλαμβάνει η ύλη που εκρήγνυται παρουσιάζει απότομη αύξηση. Αυτή η ακαριαία μεταβολή του όγκου που καταλαμβάνει η ύλη έχει ως αποτέλεσμα την απότομη διαφορά πίεσης, σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο, η οποία διαδίδεται με τη μορφή ωστικού κύματος και γι' αυτό το λόγο το φαινόμενο της έκρηξης είναι συνήθως καταστροφικό.

Η σημαντική μεταβολή των αναπτυσσόμενων δυνάμεων, σε μικρό χρονικό διάστημα υποδηλώνει υψηλό ρυθμό φόρτισης ή υψηλό ρυθμό καταπόνησης. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο ρυθμός παραμόρφωσης υπό ημι-στατική φόρτιση κυμαίνεται από 10^{-5} έως 10^{-1} s^{-1} , ενώ ο ρυθμός παραμόρφωσης υπό φόρτιση κρούσης/έκρηξης είναι σημαντικά υψηλότερος (10^2 έως 10^7 s^{-1}).

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης, η θερμοκρασία αυξάνεται σημαντικά, σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, λόγω της εκρηκτικής απελευθέρωσης ενέργειας. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί σημαντικές επιπτώσεις στις υλικές δομές. Στην έκρηξη, η ενέργεια απελευθερώνεται με τη μορφή θερμότητας και κύματος κρούσης. Αυτή η ενέργεια προκαλεί απότομες και μεγάλες αυξήσεις της θερμοκρασίας στο σημείο της έκρηξης. Η αναπτυσσόμενη θερμότητα επηρεάζει το υλικό κοντά στο σημείο της έκρηξης, δημιουργώντας ζώνες με υψηλές θερμοκρασίες που επηρεάζουν τη μικροδομή του υλικού. Οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να οδηγήσουν σε τήξη ή ανακρυστάλλωση του υλικού. Στις χημικές εκρήξεις



οι θερμοκρασίες συνήθως κυμαίνονται από μερικές χιλιάδες έως και, σε κάποιες περιπτώσεις, δεκάδες χιλιάδες βαθμούς Κελσίου. Η θερμότητα μπορεί να προκαλέσει σημαντική παραμόρφωση ή ακόμα και καταστροφή των υλικών γύρω από το σημείο της έκρηξης.

Ένας μεγάλος αριθμός πειραματικών δοκιμών έχει δείξει ότι η μηχανική συμπεριφορά των υλικών είναι συχνά διαφορετική, σε διαφορετικούς ρυθμούς παραμόρφωσης. Αναφορικά με την ανάπτυξη ενός μηχανισμού παραμόρφωσης υλικού, μόνο η ιδανική ελαστική παραμόρφωση μπορεί να θεωρηθεί ως παροδική απόκριση. Όλα τα είδη ανελαστικής παραμόρφωσης και αστοχίας (όπως αυτή που προκαλείται από την κίνηση διαταραχών, από την αύξηση των τάσεων κατά την διάρκεια των φαινομένων διάχυσης, ή την διαδικασία έναρξης και διάδοσης ρωγμής) είναι όλες μη μεταβατικές αποκρίσεις που πραγματοποιούνται με πεπερασμένο ρυθμό. Με άλλα λόγια, η μηχανική απόκριση των υλικών σχετίζεται ουσιαστικά με τους εφαρμοζόμενους ρυθμούς παραμόρφωσης. Επομένως, η διαφοροποίηση στην απόκριση των υλικών, υπό συνθήκες δυναμικής καταπόνησης, σχετίζεται με την επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης.

1.3.3 Εκτόνωση Τύπου Deflagration

Η εκτόνωση τύπου “deflagration” (κατάκαυση – ταχεία ανάφλεξη) είναι μια κατάσταση όπου η ταχύτητα της φλόγας είναι χαμηλότερη από την ταχύτητα του ήχου (≈ 343 m/sec). Η πραγματική ταχύτητα αυτού του τύπου εκτόνωσης μπορεί να κυμαίνεται από 1 m/sec ως 350 m/s. Διαφέρουν σημαντικά από τις εκρήξεις που διαδίδονται υπερηχητικά, με ταχύτητες έκρηξης στην περιοχή των km/s. Συνήθως η ταχύτητα φλόγας είναι μικρότερη από 100 m/s (≈ 357 km/h), η εκτόνωση της πίεσης είναι σταδιακή,



ενώ η θερμοκρασία αυξάνει απότομα και μπορεί να ξεπεράσει τους 2.000°C (ανάλογα με το καύσιμο).

Παρόλα αυτά, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η ταχύτητα διάδοσης στην εκτόνωση τύπου “deflagration” εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η αναλογία καυσίμου/αέρα, ο βαθμός περιορισμού (ανοιχτός ή κλειστός χώρος, όπως μια δεξαμενή ή ένα κτίριο), η ανάπτυξη τυρβώδους ροής και η πηγή ανάφλεξης.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση καύσης ατμών πτητικών υδρογοναθράκων τύπου βενζίνης, σε ανοικτό χώρο οι ταχύτητες διάδοσης της παραγόμενης φλόγας κυμαίνεται μεταξύ 10–50 m/s ($\approx 35 - 180 \text{ km/h}$). Αντίθετα, σε ημι-περιορισμένο χώρο, η ταχύτητα μπορεί να κυμανθεί μεταξύ 100–300 m/s ($\approx 360 - 1100 \text{ km/h}$). Σε ένα κλειστό χώρο με υψηλή συμπίεση υπάρχει ο κίνδυνος μετάβασης σε υπερηχητική ταχύτητα διάδοσης, ακόμα και μεγαλύτερη των 1.500 m/s ($\approx 5360 \text{ km/h}$).

Επίσης η ανάπτυξη φαινομένων τυρβώδους ροής παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ταχύτητα εκτόνωσης και γενικότερα στην ταχύτητα διάδοσης της καύσης, ειδικά όταν πρόκειται για πτητικούς υδρογονάνθρακες τύπου βενζίνης. Τα χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής (έντονοι στροβιλισμοί, αστάθεια στην κατεύθυνση και ταχύτητα της ροής), αυξάνει σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας και μάζας και ενισχύει τη μίξη των ατμών του καυσίμου με το οξυγόνο του αέρα. Όταν το καύσιμο και το οξυγόνο είναι πιο ομοιόμορφα αναμειγμένα, η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας αυξάνεται, με αποτέλεσμα να εκτονώνει μεγαλύτερη πίεση, πολύ πιο γρήγορα και να καλύπτει μεγαλύτερο όγκο σε λιγότερο χρόνο. Η ύπαρξη τέτοιων φαινομένων μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτητες εκτόνωσης 50–300 m/s (180–1100 km/h).



1.4 Χαρακτηριστικά Παραμόρφωσης Χάλυβα σε Συνθήκες Υψηλής Ταχύτητας

Η πλαστική παραμόρφωση του χάλυβα σε υψηλές ταχύτητες, όπως αυτή κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης/εκτόνωσης υψηλής ταχύτητας, αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο μελέτης στη μηχανική των υλικών και τη μεταλλουργία, κυρίως λόγω της συμπεριφοράς του υλικού υπό εξαιρετικά δυναμικές συνθήκες. Ο αναπτυσσόμενος μηχανισμός παραμόρφωσης σε υψηλές ταχύτητες, όπως αυτές που παρατηρούνται σε μια βίαιη εκτόνωση, σχετίζεται με την αυξημένη συγκέντρωση ενέργειας, καθώς παράγεται ένα ισχυρό κύμα κρουστικής πίεσης, το οποίο ασκείται σε μικρό χρονικό διάστημα στην εκτιθέμενη επιφάνεια. Λόγω της υψηλής έντασης και ταχύτητας της εφαρμοζόμενης δύναμης, τα άτομα στην εσωτερική δομή του χάλυβα μετατοπίζονται γρήγορα, προκαλώντας μόνιμη (πλαστική) παραμόρφωση. Αυτή η ταχεία παραμόρφωση συνοδεύεται και από την άνοδο της θερμοκρασίας, λόγω της θερμότητας που παράγεται από την παραμόρφωση. Σε κάποιες περιπτώσεις η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει σε τέτοια επίπεδα που να αλλάζουν οι ιδιότητες του υλικού (π.χ., μεταβολή της σκληρότητας). Αναφορικά με την αναπτυσσόμενη μικροδομή, οι υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης μπορεί να προκαλέσουν έντονες μεταβολές, με κυρίαρχες την εμφάνιση διδυμίων (δίδυμων κρυσταλλικών δομών), την ανάπτυξη ζωνών διάτμησης ή τον σχηματισμό ρωγμών

Οι δίδυμες κρυσταλλικές δομές (ή απλώς "διδυμίες") είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται σε μεταλλικά υλικά, όπως ο χάλυβας, ιδιαίτερα υπό συνθήκες υψηλών ταχυτήτων παραμόρφωσης και έντονων τάσεων. Οι διδυμίες αποτελούν μία μορφή παραμόρφωσης της κρυσταλλικής δομής του υλικού, η οποία επηρεάζει τόσο τις μηχανικές του ιδιότητες όσο και τη μικροδομή του. Είναι ειδικές ζώνες μέσα στο υλικό όπου η διάταξη των ατόμων αντιστρέφεται συμμετρικά ως προς ένα επίπεδο, το οποίο



ονομάζεται "επίπεδο διδυμίας". Αυτό σημαίνει ότι οι κρύσταλλοι σε αυτές τις ζώνες έχουν συμμετρική διάταξη, αλλά είναι προσανατολισμένοι με αντίθετο τρόπο. Ο μηχανισμός δημιουργίας διδυμιών σχετίζεται έντονα με το φαινόμενο της ανάπτυξης έντονων και απότομων παραμορφώσεων, όπως οι υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης, ή άλλων διαδικασιών κρούσης υπερυψηλής ταχύτητας. Επίσης σε χαμηλές θερμοκρασίες, σε συνθήκες ψυχρής παραμόρφωσης, η κίνηση των διαταραχών είναι περιορισμένη, με συνέπεια η διδυμία να γίνεται κυρίαρχος μηχανισμός παραμόρφωσης. Η εμφάνιση διδυμιών έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της αντοχής και της σκληρότητας, καθώς οι διδυμίες περιορίζουν την κίνηση των διαταραχών, ενισχύοντας έτσι το υλικό. Ταυτόχρονα η δημιουργία διδυμιών συνοδεύεται και από φαινόμενα ψαθυροποίησης, καθώς παρατηρείται ταυτόχρονη μείωση της αντίστοιχης ολκιμότητας του υλικού, με τελικό αποτέλεσμα τη μείωση της δυσθραυστότητάς του, ιδιαίτερα σε συνθήκες ακαριαίας πλαστικής παραμόρφωσης.

Οι ζώνες διάτμησης (shear bands) είναι λεπτές περιοχές μέσα σε ένα υλικό όπου λαμβάνει χώρα εντατική πλαστική παραμόρφωση λόγω διάτμησης. Η ανάπτυξη αυτών των ζωνών είναι ιδιαίτερα σημαντική σε μεταλλικά υλικά, όπως ο χάλυβας, και σχετίζεται με συνθήκες υψηλών ταχυτήτων παραμόρφωσης, όπως αυτές που προκαλούνται από κρούσεις, εκρήξεις ή ταχεία φόρτιση. Οι ζώνες διάτμησης είναι τοπικές περιοχές υψηλής παραμόρφωσης που σχηματίζονται σε ευθυγραμμισμένες διαδρομές μέσα στο υλικό. Χαρακτηρίζονται από έντονη τοπική πλαστική παραμόρφωση, καθώς αυτές οι ζώνες είναι περισσότερο παραμορφωμένες σε σύγκριση με την υπόλοιπη περιοχή του υλικού, αλλά και από υψηλή ταχύτητα διάτμησης, καθώς η παραμόρφωση μέσα στις ζώνες διάτμησης συμβαίνει σε πολύ μικρές χρονικές κλίμακες. Ο μηχανισμός δημιουργίας αυτών των ζωνών διάτμησης αναπτύσσεται όταν το υλικό υπόκειται σε ακραίες συνθήκες, ιδιαίτερα σε συνθήκες υψηλής ταχύτητας



παραμόρφωσης (δυναμικές συνθήκες), όπως για παράδειγμα σε κρούσεις υψηλής ταχύτητας ή εκρήξεις, όπου το υλικό δεν μπορεί να προσαρμοστεί ομοιόμορφα, οδηγώντας την ανάπτυξη τοπικών ζωνών, με έντονη παραμόρφωση. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι σε συνθήκες θερμικής αστάθειας και κατά την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας στις ζώνες διάτμησης, είναι δυνατόν να αναπτυχθούν φαινόμενα μείωσης των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, διευκολύνοντας περαιτέρω την παραμόρφωση σε αυτές τις περιοχές. Οι ζώνες διάτμησης μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις ιδιότητες του υλικού και κυρίως την δυσθραυστότητά του, καθώς μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία του υλικού μέσω δυναμικών καταπονήσεων, μέσω του μηχανισμού δημιουργίας και διάδοσης ρωγμών. Επίσης οι ίδιες οι ζώνες διάτμησης είναι δυνατόν να εξελιχθούν σε περιοχές ανάπτυξης ρωγμών, οδηγώντας τελικά σε θραύση του υλικού.

Ο σχηματισμός ρωγματώσεων στον χάλυβα κατά τη διάρκεια μιας βίαιης εκτόνωσης είναι αποτέλεσμα των έντονων μηχανικών και θερμοδυναμικών συνθηκών που αναπτύσσονται. Οι εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης, οι τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων, οι θερμοκρασιακές αυξήσεις και τα εφελκυστικά κύματα που δημιουργούνται κατά την ανάκλαση των κυμάτων κρούσης συμβάλλουν στη δημιουργία μικρορωγμών και πορωδών ζωνών στον χάλυβα. Σε περιοχές όπου αναπτύσσονται ζώνες διάτμησης λόγω των ακραίων συνθηκών παραμόρφωσης, δημιουργούνται τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων. Αυτές οι συγκεντρώσεις προκαλούν τη δημιουργία μικρορωγμών κατά μήκος των ζωνών διάτμησης, καθώς οι κόκκοι του χάλυβα παραμορφώνονται έντονα. Οι εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται λόγω της ανάκλασης των κυμάτων κρούσης στις επιφάνειες του υλικού μπορούν να προκαλέσουν αποκόλληση και αποσύνθεση των επιφανειακών στρωμάτων. Οι τάσεις αυτές είναι συχνά υψηλότερες από την εφελκυστική αντοχή του υλικού, με



αποτέλεσμα να εμφανίζονται ρωγμές που ξεκινούν από την επιφάνεια και επεκτείνονται προς το εσωτερικό. Οι ταχείες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης δημιουργούν θερμικές καταπονήσεις, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε θερμική κόπωση και ρωγμές. Η κόπωση αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη στις ζώνες που επηρεάζονται περισσότερο από την έκρηξη, όπου και παρατηρείται απότομη διαφορά στη θερμική διαστολή. Οι υπάρχουσες μικροδομικές ατέλειες, όπως εγκλείσματα ή μικρορωγμές που υπάρχουν πριν την έκρηξη, μπορούν να μεγαλώσουν λόγω των υψηλών δυναμικών τάσεων. Οι ατέλειες αυτές λειτουργούν ως σημεία συγκέντρωσης τάσεων, επιτρέποντας την ταχεία ανάπτυξη ρωγμών. Επίσης, οι ακραίες συνθήκες παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της έκρηξης μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία μικροσκοπικών κενών ή κοιλοτήτων. Αυτά τα κενά σχηματίζονται συχνά στις ζώνες διάτμησης ή στα σημεία όπου οι κόκκοι αποκόπτονται από τη μήτρα λόγω της έντονης παραμόρφωσης. Οι υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης μπορούν να προκαλέσουν τοπικό διαχωρισμό των κόκκων ή των φάσεων στη μικροδομή, οδηγώντας σε σχηματισμό ασυνεχειών και πορώδων ζωνών. Αυτό είναι ιδιαίτερα συνηθισμένο σε κράματα χάλυβα που περιέχουν φάσεις ή εγκλείσματα με διαφορετικές μηχανικές ή θερμοδυναμικές ιδιότητες. Οι έντονες εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της έκρηξης μπορούν να οδηγήσουν σε αποσύνδεση των κόκκων σε μικροδομικό επίπεδο, δημιουργώντας πορώδη υφή. Αυτή η πορώδης υφή μειώνει την συνοχή της μικροδομής και μπορεί να αποτελέσει σημείο εκκίνησης ρωγμών. Οι ρωγμές και το πορώδες μειώνουν τη συνοχή του υλικού, οδηγώντας σε μείωση της αντοχής και της σκληρότητας του χάλυβα. Επίσης οι ρωγμές και το πορώδες αυξάνουν την πιθανότητα θραύσης του χάλυβα υπό μηχανικά φορτία, κάνοντάς τον πιο ευαίσθητο σε αστοχία. Τέλος οι ρωγμές που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της έκρηξης μπορούν να επεκταθούν γρήγορα υπό επακόλουθα φορτία, οδηγώντας σε αιφνίδια αστοχία του υλικού.



Ένα επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα στις περιπτώσεις πλαστικής παραμόρφωσης υψηλών ταχυτήτων είναι το φαινόμενο spalling (απόσχιση - αποφλοΐωση - θρυμματισμός). Συνολικά, το spalling αποτελεί ένα από τα κύρια φαινόμενα αστοχίας υλικών υπό συνθήκες έκρηξης και είναι σημαντικό για τη μελέτη της δυναμικής καταπόνησης και την ανάπτυξη υλικών με αντοχή σε ακραίες συνθήκες.

Το φαινόμενο spalling κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης αναφέρεται στην αποκόλληση ή την αποσύνθεση υλικού από την επιφάνεια μιας δομής ή ενός αντικειμένου, συνήθως λόγω έντονων δυναμικών φορτίων. Στην περίπτωση εκρήξεων, το spalling εμφανίζεται λόγω των κυμάτων κρούσης που διαδίδονται μέσα στο υλικό, προκαλώντας εφελκυστικές τάσεις που υπερβαίνουν την αντοχή του υλικού. Όταν συμβαίνει μια έκρηξη, ή μία έντονη εκτόνωση υψηλής ταχύτητας, λαμβάνει χώρα η δημιουργία κυμάτων κρούσης. Η έκρηξη παράγει κύματα κρούσης υψηλής πίεσης που διαδίδονται μέσα στο υλικό. Τα κύματα αυτά είναι αρχικά θλιπτικά. Όταν ανακλώνται σε επιφάνειες ή εσωτερικά όρια, όπως όρια κόκκων ή άλλες ατέλειες δομής του υλικού, δημιουργούν έντονες εφελκυστικές τάσεις. Εάν οι εφελκυστικές τάσεις ξεπεράσουν την εφελκυστική αντοχή του υλικού, τμήματα του υλικού αποσπώνται, δημιουργώντας ρωγμές και τελικά την αποκόλληση επιφανειακών στρωμάτων.

Το φαινόμενο spalling σε κοινό ανθρακούχο χάλυβα, μπορεί να εμφανιστεί υπό συγκεκριμένες συνθήκες, όπως σε περιπτώσεις εκρήξεων ή κρούσεων υψηλής έντασης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τμήματα του χάλυβα αποσπώνται ή απολεπίζονται λόγω της δημιουργίας και διάδοσης κυμάτων κρούσης που προκαλούν έντονες εφελκυστικές τάσεις. Κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης ή ισχυρής κρούσης, δημιουργούνται κύματα συμπίεσης που διαδίδονται στο υλικό. Όταν αυτά τα κύματα φτάνουν σε ελεύθερες επιφάνειες ή εσωτερικά όρια (π.χ. εσωτερικές ατέλειες ή μεταβολές στη μικροδομή),



μπορούν να ανακλαστούν και να μετατραπούν σε εφελκυστικά κύματα. Ο χάλυβας, αν και γενικά πολύ ανθεκτικός σε φαινόμενα συμπίεσης, έχει σχετικά χαμηλότερη αντοχή σε εφελκυστικές τάσεις. Οι τάσεις αυτές μπορούν να προκαλέσουν το σχηματισμό μικρορωγμών που, υπό ακραίες συνθήκες, μεγαλώνουν και οδηγούν στην αποκόλληση ή την αποσύνθεση επιφανειακών στρωμάτων του υλικού. Σε περιοχές όπου εντοπίζονται δομικές και μικροδομικές ατέλειες, η συγκέντρωση τάσεων μπορεί να οδηγήσει σε απότομη αποκόλληση τμημάτων, δημιουργώντας το φαινόμενο του spalling.



2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

2.1 Δειγματοληψία - Περιγραφή Δειγμάτων

Την Πέμπτη 13 Μαρτίου 2025, μετά την όρκισή μου ενώπιον του Εφέτη Ανακριτή κ. Σωτηρίου Μπακαϊμή, στο Ανακριτικό Γραφείο του Εφετείου Λάρισας και την μετάβασή μας, συνοδεία αστυνομικών του Τ.Τ. Τροχαίας Λάρισας στη θέση “Κουλούρι” Λάρισας, πραγματοποιήθηκε αυτοψία, σε συνεργασία με τους ανακριτικούς υπαλλήλους της ΔΑΕΕ, στο οπίσθιο τμήμα της 2^{ης} Ηλεκτράμαξας, με αριθμό 120 012, της υπ' αριθμ. 63503 εμπορικής αμαξοστοιχίας, όπως επίσης και στα συλλεχθέντα μεταλλικά μέρη-θραύσματα του οπίσθιου Θαλάμου Μηχανοδήγησης της εν λόγω Ηλεκτράμαξας, ο οποίος αποκολλήθηκε κατά την διάρκεια του σιδηροδρομικού δυστυχήματος. Αποφασίστηκε και πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία εννέα (9) συνολικά μεταλλικών δειγμάτων, τόσο από το οπίσθιο τμήμα της Ηλεκτράμαξας, όσο και από τα συλλεχθέντα τμήματα-θραύσματα του Θαλάμου Μηχανοδήγησης αυτής (Εικόνες 5-12). Τα τρία δείγματα (3) προέρχονταν από το οπίσθιο μέρος της εν λόγω Ηλεκτράμαξας (120 012), με κωδικούς “Η1”, “Η2” και “Η3”, ενώ τα υπόλοιπα έξι (6) προέρχονταν από τα αποκολλημένα θραύσματα του οπίσθιου Θαλάμου Μηχανοδήγησης, με κωδικούς “Κ1α”, “Κ1β”, “Κ2”, “Κ3”, “Κ4” και “Κ5”, τα οποία σημάνθηκαν και αποκόπηκαν, μέσω κατάλληλης διαδικασίας, αδιατάρακτης σχετικής κοπής, χαμηλής αύξησης (τοπικά) της θερμοκρασίας.

Σύμφωνα με την υπ. αριθμ. 17/2025 διάταξη του κ. Εφέτη Ανακριτή του Εφετείου Λάρισας, στα πλαίσια διεξαγωγής της κυρίας ανακρίσεως, κατόπιν σχετικής ενημέρωσης για την άμεση και κατεπείγουσα διερεύνηση του πιθανού ενδεχομένου να μεταφερόταν από την εμπορική αμαξοστοιχία 63503, που ενεπλάκη στο διερευνώμενο σιδηροδρομικό δυστύχημα, ποσότητα οιασδήποτε μορφής αρωματικών-πτητικών υδρο-



Εικόνα 5: Δείγμα "H1" (Ηλεκτράμαξα 1), από το πίσω και αριστερά τμήμα της αποκόλλησης



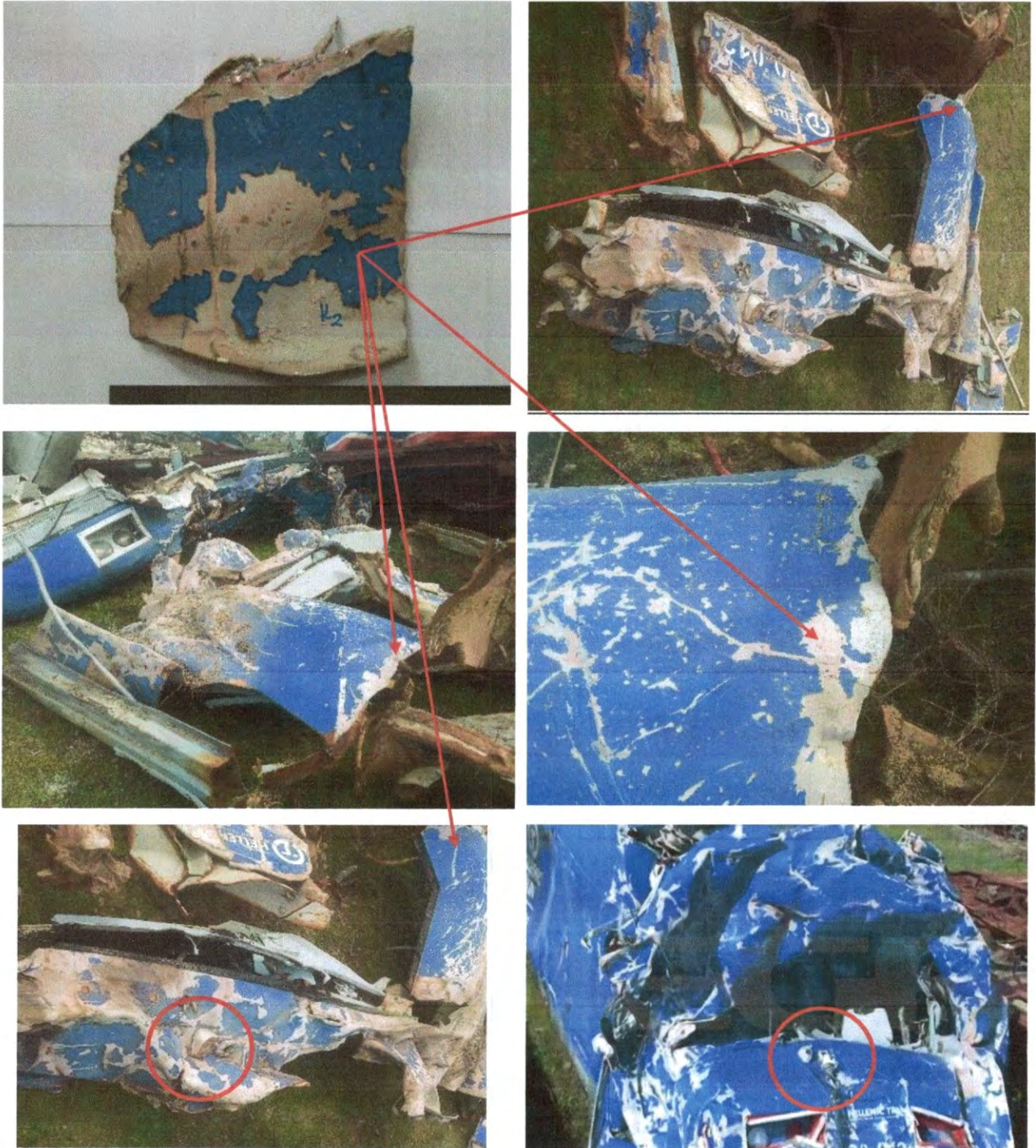
Εικόνα 6: Δείγμα "H2" (Ηλεκτράμαξα 2), από το πίσω και δεξιά τμήμα της αποκόλλησης



Εικόνα 7: Δείγμα "Κ1α" (Κόκπιτ 1α) από την αριστερή πλευρά της οροφής Θαλάμου Μηχανοδήγησης



Εικόνα 8: Δείγμα "Κ1β" (Κόκπιτ 1β) από την δεξιά πλευρά της οροφής του Θαλάμου Μηχανοδότησης



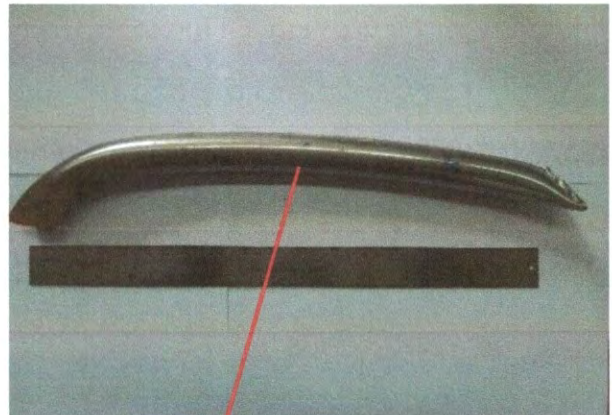
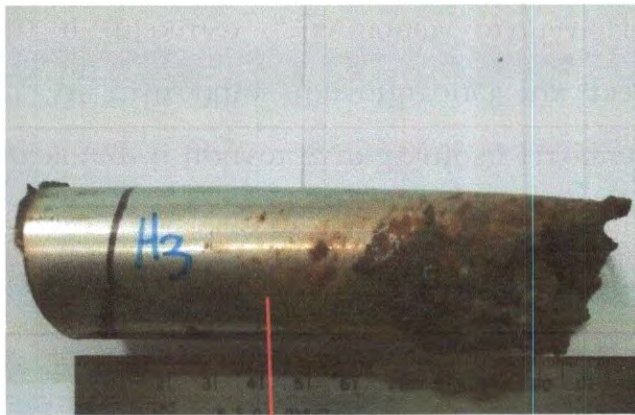
Εικόνα 9: Δείγμα "Κ2" (Κόκπιτ 2) από το εμπρόσθιο τμήμα του Θαλάμου Μηχανοδήγησης, δεξιά του ανεμοθώρακα (συγκριτικά με τον έτερο Θάλαμο Μηχανοδηγήσης της εν λόγω Ηλεκτρομηχανής)



Εικόνα 10: Δείγμα "Κ3" (Κόκπιτ) από το εμπρόσθιο τμήμα του Θαλάμου Μηχανοδήγησης, με το λογότυπο της εταιρείας και τον αριθμό της Ηλεκτρομηχανής (120 012)



Εικόνα 11: Δείγμα “K4” (Κόκπιτ 4) από το πάνω τμήμα της βάσης-προφυλακτήρα του Θαλάμου Μηχανοδήγησης (συγκριτικά με τον έτερο Θάλαμο Μηχανοδήγησης της εν λόγω Ηλεκτρομηχανής)



Εικόνα 12: Δείγμα “H3” (Ηλεκτράμαξα 3), από το πίσω και κάτω αριστερά τμήμα της Ηλεκτράμαξας, και αντίστοιχο Δείγμα “K5” (Κόκπιτ 5), τα οποία έχουν αποκοπεί πιθανότατα με οξυακετυλινική κοπή



γονανθράκων είτε εντός των Ηλεκτραμαξών αυτής, καθώς και των Θαλάμων Μηχανοδήγησης αυτών, είτε επί της ακολουθούσας 1^{ης} Φορτάμαξας αυτής αναφορικά με το σιδηροδρομικό δυστύχημα στην περιοχή Ευαγγελισμού Τεμπών Λάρισας, ορίστηκε η διενέργεια “Προκαταρκτικής Πραγματογνωμοσύνης”, αντικείμενο της οποίας ήταν να πιστοποιηθεί με ακρίβεια και επιστημονική πληρότητα αν τα συλλεχθέντα μεταλλικά δείγματα έχουν υποστεί θερμική καταπόνηση ή αλλοίωση από φωτιά-πυρκαγιά ή έκρηξη οφειλόμενη σε βίαιη εκτόνωση ή ανάφλεξη ή έκρηξη οιασδήποτε μορφής αρωματικών-πτητικών υδρογονανθράκων ή όποιου άλλου στοιχείου ικανού προς αυτό.

Τα προς εξέταση εννέα (9) μεταλλικά τεμάχια μεταφέρθηκαν με ασφαλή αστυνομική συνοδεία και παραδόθηκαν αρμοδίως στο Πρωτοδικείο Αθηνών, στο 12^ο Ανακριτικό Γραφείο, πρώην Σχολή Ευελπίδων, Κτήριο 9, Γραφείο 117. Τα εν λόγω δείγματα παρελήφθησαν με πρωτόκολλο παράδοσης-παραλαβής την Δευτέρα 24 Μαρτίου 2025, μετά την όρκισή μου ενώπιον της Ανακρίτριας του 12^{ου} Τμήματος κας Νεκταρίας Ξελυσσακτή, παρουσία και της Γραμματέως Χρυσούλας Ζήση.

2.2 Στερεοσκοπικό Μικροσκόπιο

Το στερεοσκοπικό μικροσκόπιο ρυθμιζόμενης εστίασης χρησιμοποιείται ως μέθοδος παρατήρησης και ερμηνείας των μορφολογικών χαρακτηριστικών αλλά και της μικροδομής των υπό μελέτη υλικών σε σχετικά χαμηλές μεγεθύνσεις. Η πηγή ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται είναι συνήθως λευκό φως, ενώ είναι ιδανικό για την παρατήρηση της δομής αλλά και την ανίχνευση ελαττωμάτων. Τα οπτικά του στοιχεία είναι κατασκευασμένα από ύαλο υψηλής διαπερατότητας, γεγονός το οποίο επιτρέπει την απόδοση των ειδώλων με υψηλή ανάλυση. Για την μικροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε στερεοσκοπικό μικροσκόπιο Zeiss Stemi DV4, του



Εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας, της Σχολής ΜΜΜ του Ε.Μ.Π. Πρόκειται για ένα οπτικό στερεοσκόπιο ειδικά σχεδιασμένο για χαμηλές αλλά και υψηλότερες μεγεθύνσεις ($\times 8 - \times 32$).

2.3 Μεταλλογραφική Προετοιμασία

Τα παραληφθέντα μεταλλικά τεμάχια εξετάστηκαν με την μορφή στιλπνών τομών (παράλληλα στην διεύθυνση της καταπόνησης), μετά από εγκιβωτισμό σε ρητίνη αργής πήξης. Για τη μεταλλογραφική παρατήρηση των δειγμάτων απαραίτητη είναι η προετοιμασία της επιφάνειας των, προς παρατήρηση, δοκιμίων με λείανση και στίλβωση, η οποία πραγματοποιήθηκε σε συσκευή λείανσης LaboPol-5 της Struers. Η συσκευή διαθέτει εύρος λειτουργίας γωνιακής ταχύτητας από 50 έως και 500 στροφές ανά λεπτό, ενώ για την ψύξη του δοκιμίου χρησιμοποιείται σύστημα παροχής νερού.

Η λείανση αποσκοπεί στην εξάλειψη των γεωμετρικών ανωμαλιών της εξεταζόμενης επιφάνειας, καθώς και στην απομάκρυνση των επιφανειακών στρωμάτων του υλικού, που ενδεχομένως να έχουν παραμορφωθεί ή αλλοιωθεί κατά τη διαδικασία της κοπής. Πραγματοποιήθηκε με χρήση λειαντικών χαρτιών από κόκκους καρβιδίου του πυριτίου (400 mesh, 800 mesh, 1000 mesh, 2000 mesh). Μετά το στάδιο της λείανσης ακολούθησε η διαδικασία της στίλβωσης. Σε αυτό το στάδιο, χρησιμοποιείται κατάλληλο ύφασμα στίλβωσης, πάνω στο οποίο απλώνεται αδαμαντόπαστα 6 μm και στην συνέχεια αντίστοιχη του 1 μm . Η λίπανση λαμβάνει χώρα με χρήση αλκοολούχου διαλύματος. Τέλος πραγματοποιήθηκε χημική προσβολή, η οποία είναι απαραίτητη στη μεταλλογραφία για την αποκάλυψη της μικροδομής ενός δοκιμίου και την παρατήρησή του στο οπτικό ή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Η μικροδομή αποκαλύπτεται με την επιλεκτική διαλυτοποίηση της δομής στα όρια των κόκκων, ξεκινώντας από την επιφάνεια και συνεχίζοντας προς το εσωτερικό. Οι διαφορές στον ρυθμό προσβολής των φάσεων αποκαλύπτουν τη μικρογραφική δομή. Κατά τη διάρκεια της προσβολής,



προσβάλλεται η περισσότερη ηλεκτροθετική ανοδική φάση, ενώ η ηλεκτροαρνητική δεν προσβάλλεται σχεδόν καθόλου.

2.4 Οπτικό Μικροσκόπιο

Η οπτική μικροσκοπία χρησιμοποιείται ως μέθοδος παρατήρησης και ερμηνείας της μικροδομής των υλικών και αποτελεί το βασικό εργαλείο της μεταλλογραφίας. Η πηγή ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται είναι συνήθως λευκό φως, η διακριτική ικανότητα είναι περίπου 1 μm , ενώ και το βάθος πεδίου είναι της ίδιας περίπου τάξης μεγέθους. Για την μικροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε οπτικό μικροσκόπιο JenaVert, του Εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας, της Σχολής ΜΜΜ του Ε.Μ.Π. Πρόκειται για ένα οπτικό μικροσκόπιο ειδικά σχεδιασμένο για μεταλλουργική παρατήρηση. Διαθέτει ενσωματωμένους φακούς 10x, 20x, 50x και 100x και προσοφθάλμιο φακό 10x. Επίσης, διαθέτει ενσωματωμένες θέσεις για τοποθέτηση οπτικών φίλτρων, τράπεζα δύο βαθμών ελευθερίας (x,y) και φωτισμό με λάμπα αλογόνου ισχύος 35W.

2.5 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope – SEM) χρησιμοποιείται για την παρατήρηση επιφανειών, σε συνδυασμό με τα κατάλληλο σύστημα μικροανάλυσης (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy – EDS), για τη στοιχειακή ανάλυση συγκεκριμένων περιοχών της υπό παρατήρηση εικόνας. Το βάθος πεδίου και η διακριτική ικανότητα-μεγέθυνση του SEM, είναι πολύ μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα μεγέθη του οπτικού-μεταλλογραφικού μικροσκοπίου. Μεγεθύνσεις της τάξης $\times 10000$ - $\times 30000$ είναι εντός των πρακτικών δυνατοτήτων ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Η λειτουργία του βασίζεται στην αλληλεπίδραση του, προς εξέταση, δείγματος με την προσπίπτουσα, σε αυτό, δέσμη ηλεκτρονίων. Η παραγόμενη



δέσμη των ηλεκτρονίων (πρωτογενή ηλεκτρόνια), διερχόμενη μέσα από μια σειρά μαγνητικών φακών, επιταχύνεται, συγκεντρώνεται και εστιάζεται πάνω στην εξεταζόμενη επιφάνεια του δοκιμίου. Η εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων, περνώντας μέσα από ζεύγη πηνίων σάρωσης, τα οποία την εκτρέπουν οριζόντια και κάθετα, σαρώνει μια τετραγωνική περιοχή της επιφάνειας του δοκιμίου. Τα εκπεμπόμενα από την επιφάνεια του δοκιμίου ηλεκτρόνια συλλέγονται και ενισχύονται, έτσι ώστε να δημιουργήσουν ένα οπτικό σήμα. Ο στοιχειακός αναλυτής EDS παρέχει ποιοτική και ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση της επιφάνειας του δείγματος, υπό την προϋπόθεση ο ατομικός αριθμός των στοιχείων να είναι μεγαλύτερος του 11. Οι εκπεμπόμενες από το δοκίμιο ακτίνες Χ, κατά την παρατήρηση σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, εισέρχονται σε φασματογράφο διασποράς ενέργειας, μέσω ενός παραθύρου από Be και συλλέγονται από έναν ηλεκτρονικό ανιχνευτή, ο οποίος είναι συνήθως ημιαγωγός Si με πρόσμιξη Li. Ο ανιχνευτής διεγείρεται ανάλογα με την ενέργεια των ακτίνων Χ, δημιουργώντας κάποιο χαρακτηριστικό ρεύμα. Με κατάλληλη διάταξη το ρεύμα αυτό ενισχύεται και καταγράφεται. Έπειτα από ανάλογη επεξεργασία των δεδομένων λαμβάνεται το φάσμα των παλμών, συναρτήσει της ενέργειας της ακτινοβολίας (σε keV). Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη, είναι τύπου Jeol 6380 LV.

2.6 Σκληρότητα κατά Vickers (Hardness Vickers – HV)

Η επίδραση μηχανικών ή και θερμικών φορτίων επιφέρει αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού κοντά στην επιφάνεια, από τις σημαντικότερες των οποίων είναι η αλλαγή της σκληρότητας. Για τη μέτρηση της σκληρότητας χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, με διαφορετικό υλικό διείσδυσης, διαφορετική κλίμακα επιβαλλόμενων φορτίων, αλλά και διαφορετικά μετρούμενα μεγέθη. Σύμφωνα με την μέθοδο Vickers, χρησιμοποιείται αδαμάντινη πυραμίδα με τετραγωνική βάση και γωνία κορυφής $\alpha=136^\circ$, στην οποία



εφαρμόζεται δύναμη “F” στη λειασμένη επιφάνεια του υλικού, για συγκεκριμένο χρόνο. Από το πηλίκο της δύναμης αυτής που χρησιμοποιήθηκε, προς την επιφάνεια του αποτυπώματος που προκλήθηκε προκύπτει το μέτρο της σκληρότητας. Για τη μέτρηση της σκληρότητας απαραίτητη προϋπόθεση είναι η επιφάνεια να είναι επίπεδη, γι’ αυτό προηγούνται οι διαδικασίες της λείανσης και της στίλβωσης. Πραγματοποιήθηκαν τουλάχιστον έξι μετρήσεις σκληρότητας σε κάθε δοκίμιο, ενώ το κάθε αποτύπωμα της πυραμίδας απείχε από το επόμενο περίπου $3d$, όπου d ο μέσος όρος των δύο διαγωνίων του σχηματιζόμενου ρόμβου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν παράλληλα στην διεύθυνση της παραμόρφωσης, ξεκινώντας από την θραυσιγενή επιφάνεια προς το εσωτερικό του δείγματος, με βήμα 1mm, φορτίο 98.07 Newton, για χρόνο 10 sec.

2.7 Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)

Η περίθλαση ακτίνων Χ (X-Ray Diffraction) χρησιμοποιείται ως μέθοδος μελέτης της κρυσταλλικής δομής στερεών υλικών, όπως επίσης και για την ταυτοποίηση των κρυσταλλικών φάσεων, στις οποίες κατανέμονται τα στοιχεία που απαρτίζουν το υλικό. Η μέθοδος ανάλυσης με περίθλαση ακτίνων Χ βασίζεται στην περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας ακτίνων Χ, γνωστού μήκους κύματος λ , επάνω στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος του εξεταζόμενου υλικού. Οι ακτίνες Χ παράγονται από μία λυχνία χαλκού. Η κάθοδος της λυχνίας αποτελείται από νήμα βολφραμίου και η άνοδος από χαλκό. Η διάταξη βρίσκεται σε κενό. Κατά την εφαρμογή τάσης στο νήμα βολφραμίου τα ηλεκτρόνια θερμαίνονται, διεγείρονται και υπό κενό οδηγούνται στην άνοδο χαλκού. Έτσι τα ηλεκτρόνια του Cu διεγείρονται, μεταπηδούν σε εξωτερικές στοιβάδες και κατά την επαναφορά τους στη θεμελιώδη στοιβάδα παράγουν φωτόνια μήκους κύματος ακτίνων Χ. Το περιθλασίμετρο διαθέτει γωνιόμετρο που περιστρέφει το δείγμα κατά γωνία θ , ενώ ο ανιχνευτής περιστρέφεται κατά γωνία 2θ για να λαμβάνει όλη την ακτινοβολία. Η σχέση μεταξύ γωνίας θ , του μήκους κύματος λ των ακτίνων Χ και της διαπλεγματικής απόστασης d , δίνεται από



την γνωστή εξίσωση Bragg. Το περιθλασίμετρο ακτίνων Χ της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη μελέτη, είναι τύπου Bruker D8-Focus (με λυχνία Cu ακτινοβολίας Kα μήκους κύματος 1.5405 Å).

2.8 Θερμοβαρυνμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (TG-DTA)

Η αρχή των θερμικών μεθόδων ανάλυσης βασίζεται στην εκμετάλλευση της αλλαγής των θερμικών περιεχομένων της ύλης ή ακόμη και των μεταβολών βάρους της ύλης, σε συνάρτηση με τη θερμική επεξεργασία που υφίσταται. Στη θερμοβαρυνμετρική ανάλυση (TG: Thermogravimetry) προσδιορίζεται η μεταβολή μάζας δείγματος που υποβάλλεται σε θερμική καταπόνηση σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο πρόγραμμα θερμοκρασιακής μεταβολής. Η μεταβολή μάζας επέρχεται όταν παράγονται πτητικά αέρια, όπως ατμός, διοξείδιο του άνθρακα και άλλες ενώσεις. Οι μετρήσεις διεξάγονται με τη βοήθεια του θερμοζυγού. Στην περίπτωση της διαφορικής θερμικής ανάλυσης (DTA: Differential Thermal Analysis), η αρχή της μεθόδου βασίζεται στο γεγονός ότι οι χημικές αντιδράσεις ή οι μετασχηματισμοί φάσεων μπορούν να παρακολουθηθούν μέσω των θερμοκρασιών όπου απορροφούν ή εκλύουν ποσά θερμότητας. Συγκεκριμένα, προσδιορίζεται η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του δείγματος προς μέτρηση και του δείγματος αναφοράς. Ως δείγμα αναφοράς χρησιμοποιείται συνήθως αλούμινα (Al_2O_3), η οποία είναι αδρανής στη θερμοκρασιακή περιοχή που διεξάγεται η μέτρηση. Τα δύο δείγματα υπόκεινται σε ένα προκαθορισμένο θερμοκρασιακό πρόγραμμα, παράλληλα με την θερμοβαρυνμετρική ανάλυση. Τόσο η θερμοβαρυνμετρική όσο και διαφορική θερμική ανάλυση (TG-DTA) διεξήχθησαν ταυτόχρονα σε θερμικό αναλυτή Setaram-Labsys. Το δείγμα τοποθετήθηκε σε κεραμικό χωνευτήριο και θερμάνθηκε από την θερμοκρασία δωματίου στους 1000 °C με ρυθμό θέρμανσης 10°C/min χρησιμοποιώντας αδρανή ατμόσφαιρα (He), υπό στατικές συνθήκες.

3. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Χαρακτηρισμός Δείγματος “H1”

Το υπό εξέταση Δείγμα “H1” αποσπάστηκε από την Ηλεκτράμαξα 120 012, από το πίσω και αριστερά τμήμα της αποκόλλησης (Εικόνα 13).



Εικόνα 13: Δείγμα “H1” (Ηλεκτράμαξα 1), από το πίσω και αριστερά τμήμα της αποκόλλησης

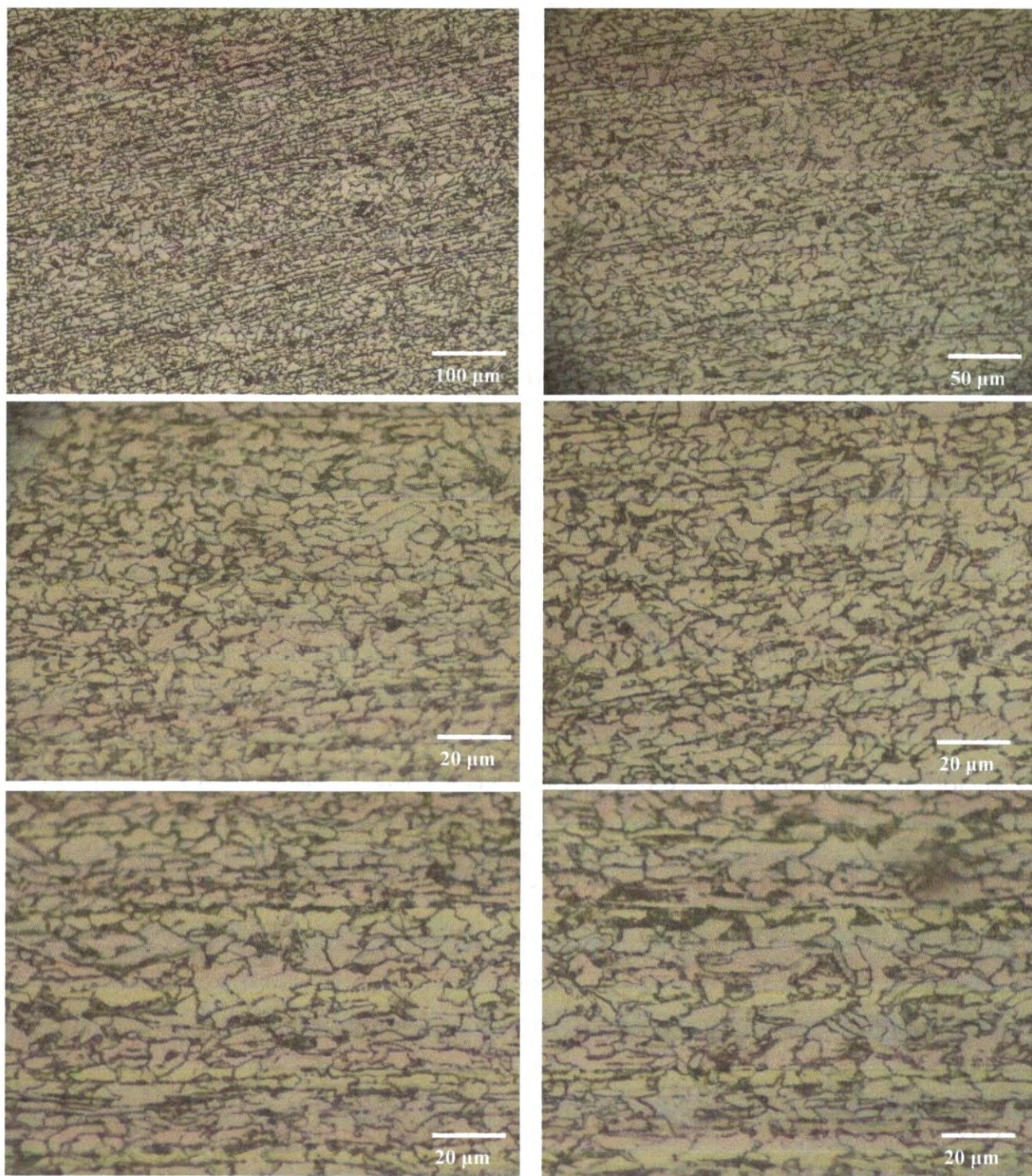
Κατά τον εργαστηριακό έλεγχο πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες δοκιμές:

- ✓ Έλεγχος Μικροδομής στο Οπτικό Μικροσκόπιο
- ✓ Έλεγχος Μικροδομής και Μικροανάλυση σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης
- ✓ Έλεγχος Σκληρότητας Vickers
- ✓ Περίθλαση Ακτίνων Χ
- ✓ Διαφορική Θερμική Ανάλυση Οργανικής Αντιδιαβρωτικής Επικάλυψης

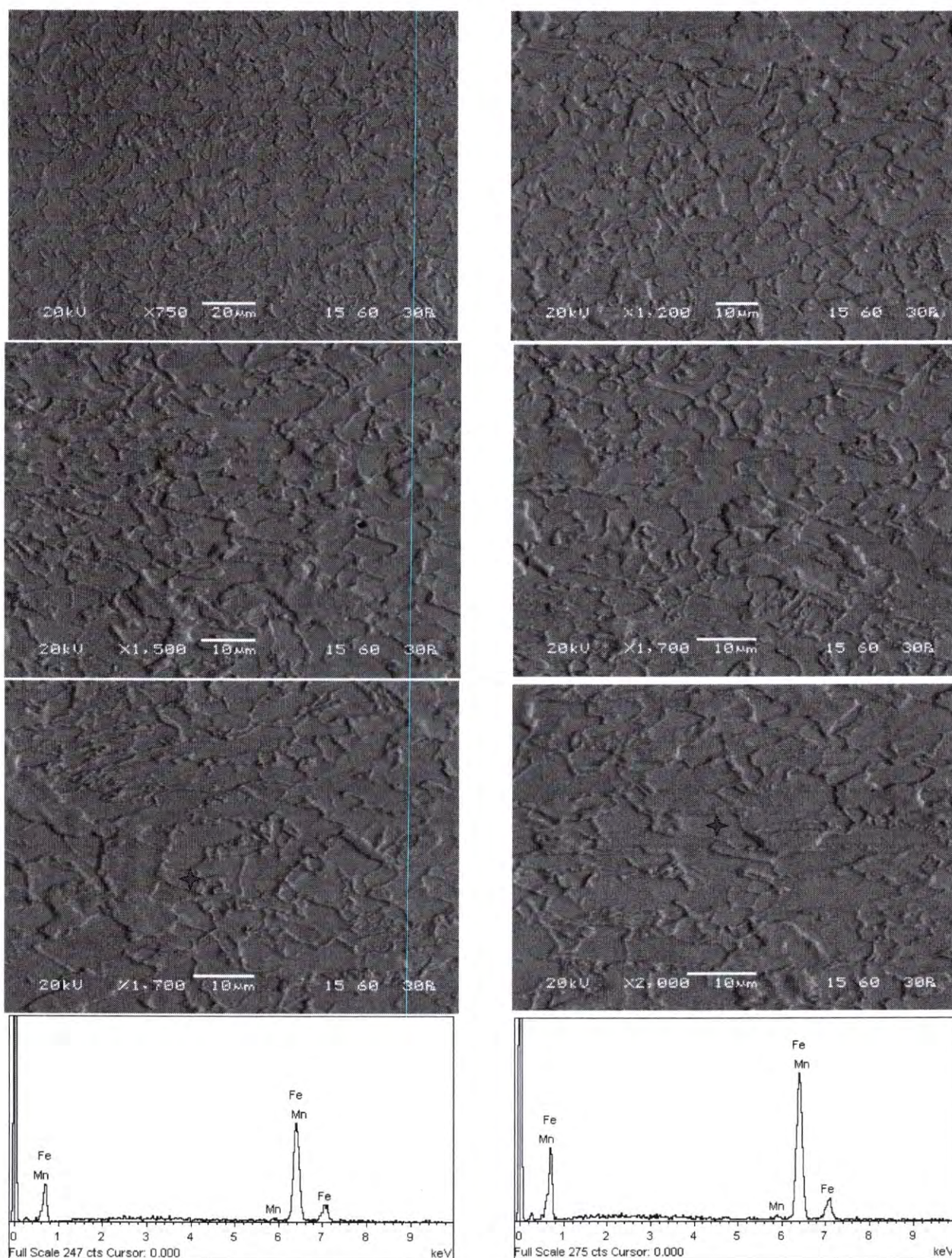


Αρχικά εξετάστηκε μια υγής περιοχή του παραληφθέντος δείγματος, η οποία δεν φαίνεται να είχε υποστεί μηχανική καταπόνηση και έφερε πλήρως την οργανική αντιδιαβρωτική επικάλυψη, με στόχο την μελέτη των χημικών και δομικών χαρακτηριστικών, τόσο του μεταλλικού υποστρώματος όσο και της επικάλυψης. Στις **Εικόνες 14 και 15** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση των παραχθέντων στιλπνών τομών σε Μεταλλογραφικό Οπτικό Μικροσκόπιο και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις, μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα πρόκειται για φερριτο-μπαινιτικό χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης, ο οποίος περιέχει περίπου 1.6% Mn. Η φάση του μπαινίτη (bainite) σχηματίζεται κατά τη θερμική κατεργασία (ιδίως με ενδιάμεση βαφή) και ελασματοποίηση σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες. Το μαγγάνιο σε αυτά τα ποσοστά παίζει σημαντικό ρόλο στη σταθεροποίηση της φερριτικής φάσης, ενώ καθυστερεί τον σχηματισμό του περλίτη επιτρέποντας το σχηματισμό μπαινίτη κατά την ισοθερμοκρασιακή βαφή.

Η μπαινιτική μικροδομή είναι ένας μία μετασταθής μικροδομή, η οποία προκύπτει από την ισοθερμοκρασιακή μετατροπή της ωστενιτικής φάσης σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες (συνήθως 250–550°C), μεταξύ της θερμοκρασίας σχηματισμού περλίτη και μαρτενσίτη. Είναι λεπτόκοκκη, και συνδυάζει χαρακτηριστικά σκληρότητας και ανθεκτικότητας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα πρόκειται για άνω μπαινίτη (upper bainite), ο οποίος είναι μια μορφή της μπαινιτικής μικροδομής που σχηματίζεται όταν η μετατροπή του ωστενίτη σε μπαινίτη γίνεται σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (περίπου 400°C έως 550°C). Είναι πιο όλκιμος αλλά λιγότερο σκληρός σε σύγκριση με τον κάτω μπαινίτη. Ανιχνεύτηκε περίπου 70% προευντηκτοειδής φερρίτης, ο οποίος εμφανίζεται με την μορφή σχετικά μεγάλου μεγέθους κόκκων ($\approx 15\text{--}20\ \mu\text{m}$), όπως επίσης και λεπτόκοκκος μπαινιτικός φερρίτης, ο οποίος αποτελεί την βασική φάση της μπαινιτικής μικροδομής,



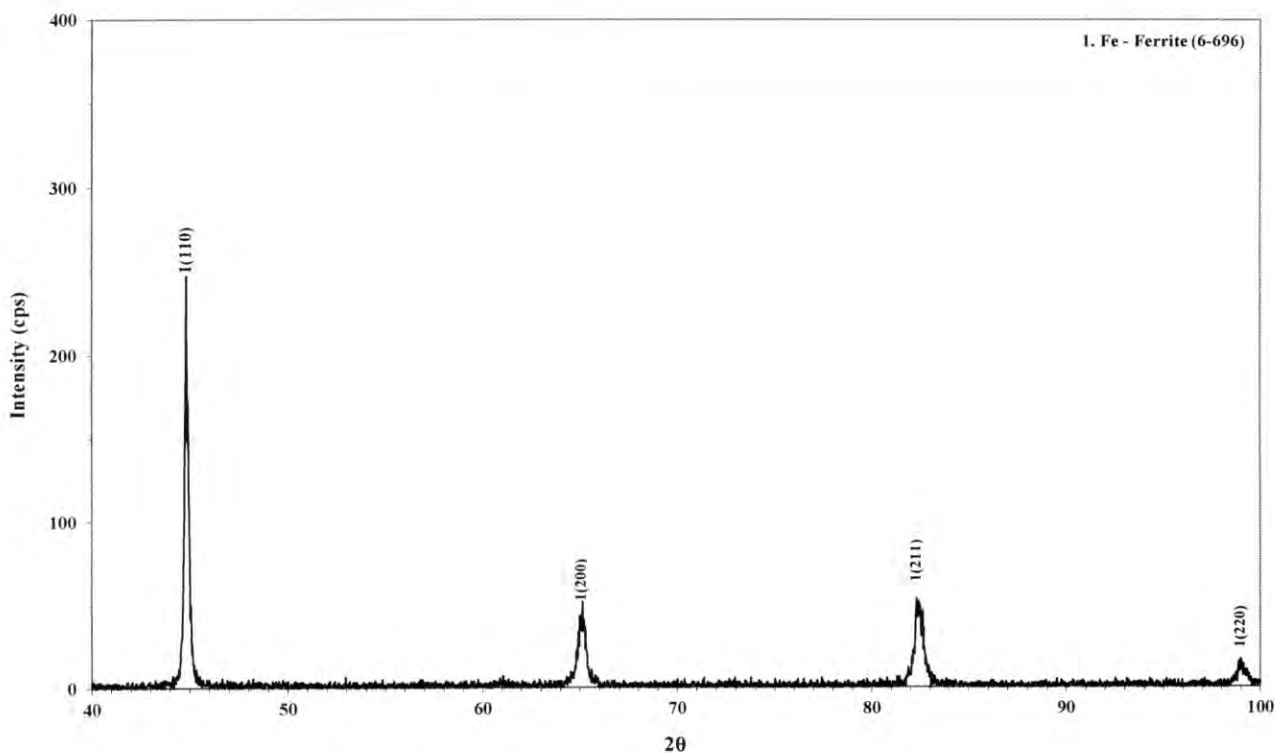
Εικόνα 14: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου Δείγματος "H1", από το πίσω και αριστερά τμήμα της αποκόλλησης



Εικόνα 15: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "H1"

με την μορφή λεπτών, επιμηκυμένων πλακιδίων φερρίτη, που σχηματίζεται κατά τη μετατροπή του ωστενίτη σε μπαινίτη. Επίσης ανιχνεύονται και καρβίδια του σιδήρου (κυρίως Fe_3C), τα οποία έχουν κατακρημνιστεί στα όρια κόκκων. Πρόκειται δηλαδή για χάλυβα σχετικά χαμηλού ποσοστού άνθρακα ($\approx 0.25\%$), ο οποίος περιέχει περίπου 1.6% Μn. Χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία και ειδικότερα στην αυτοκινητοβιομηχανία, καθώς παρουσιάζει καλή αντοχή σε εφελκυσμό και κρούση, καλή συγκολλησιμότητα, αλλά και δυνατότητα μετασχηματισμών φάσεων μέσω θερμικής κατεργασίας (π.χ. σχηματισμός μπαινίτη ή περλίτη).

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από την εξέταση των δοκιμίων με εφαρμογή της μεθόδου Περίθλασης Ακτίνων "Χ" (XRD). Σε όλες τις περιπτώσεις ανιχνεύονται οι χαρακτηριστικές κορυφές χωροκεντρωμένου (bcc) σιδήρου (**Σχήμα 2**).



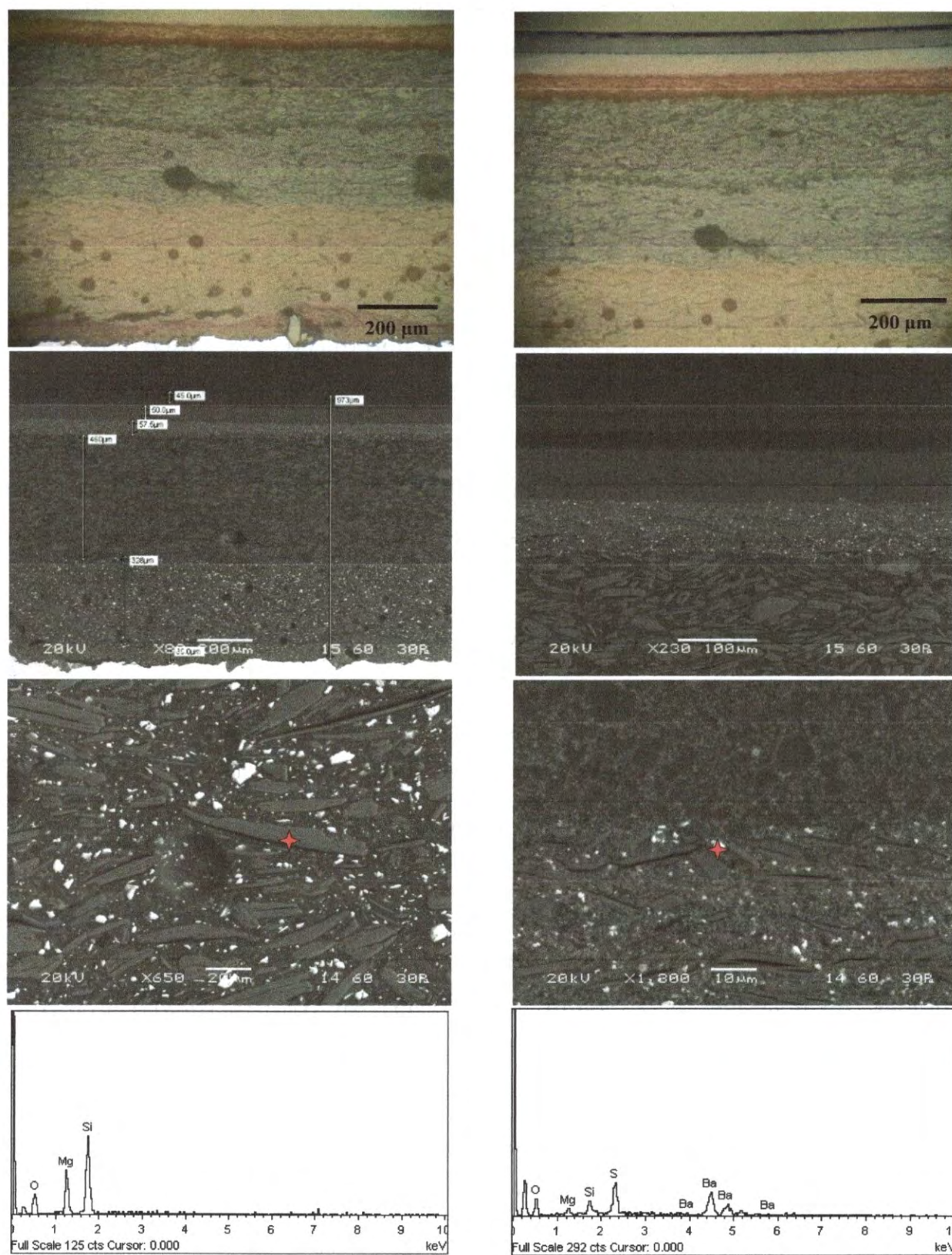
Σχήμα 2: Ακτινοδιάγραμμα XRD Δείγματος "H1"



Ο φερρίτης (α -Fe) είναι σχεδόν καθαρός σίδηρος, ο οποίος έχει χωροκεντρωμένη δομή (bcc). Η μέγιστη διαλυτότητα του C στο φερρίτη (τυχαίο στερεό διάλυμα του C στο πλέγμα του Fe) είναι 0.025% στους 723 °C. Η δημιουργία των κόκκων φερρίτη λαμβάνει χώρα κυρίως κατά τον μετασχηματισμό του γ -Fe (ωστενίτη), κατά την αργή απόψυξη ενός υποευτηκτοειδούς χάλυβα μεταξύ των θερμοκρασιών 910 °C και 723 °C (ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα).

Τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων, επιβεβαίωσαν τις παρατηρήσεις που προέκυψαν από την μεταλλογραφική εξέταση στο Οπτικό Μικροσκόπιο και στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης. Σε όλες τις περιπτώσεις η μέση τιμή της σκληρότητας, σε υγιή περιοχή του παραληφθέντος δείγματος, η οποία δεν φαίνεται να είχε υποστεί μηχανική καταπόνηση, ήταν της τάξης των 165-170 Vickers. Αν και το ποσοστό του άνθρακα είναι χαμηλό, οι σχετικά αυξημένες τιμές της σκληρότητας θα πρέπει να αποδοθούν στην ανιχνευόμενη μπαινιτική μικροδομή.

Στην **Εικόνα 16** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση της αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης στο Οπτικό και στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις, μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα το συνολικός πάχος της οργανικής επικάλυψης είναι της τάξης των 970-980 μm . Αποτελείται από πέντε στρώματα. Το πρώτο στρώμα, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το χάλυβα είναι “Αστάρι – Primer”, συνήθως εποξειδικής βάσης, και στοχεύει στην ανάπτυξη ισχυρών δυνάμεων συνάφειας με το μεταλλικό υπόστρωμα. Ταυτόχρονα προσφέρει και ισχυρή αντιδιαβρωτική προστασία, λόγω της παρουσίας προσθέτων (fillers). Το δεύτερο στρώμα είναι η “Ενδιάμεση Στρώση – Intermediate Coat” (είναι εποξειδικό ή υβριδικό), το οποίο στοχεύει στην ανάπτυξη υψηλών δυνάμεων πρόσφυσης με την τελική στρώση του ασταριού.

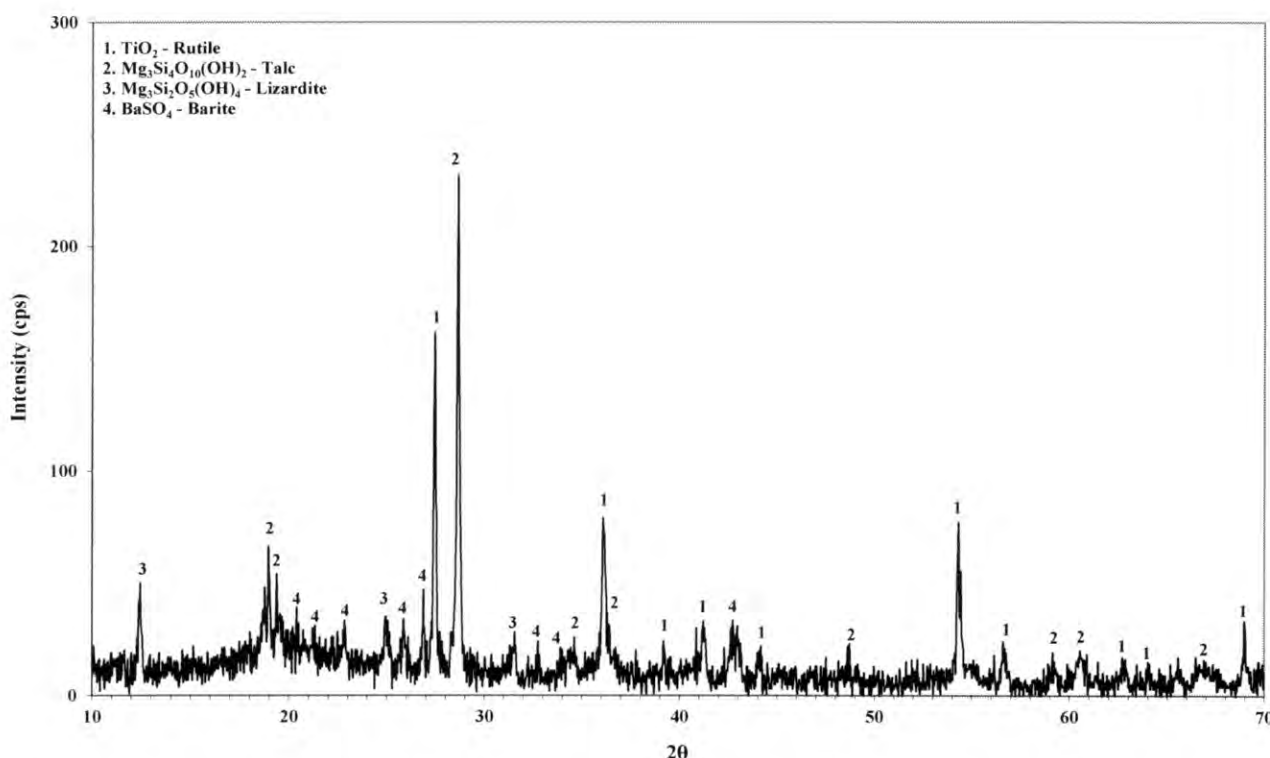


Εικόνα 16: Μικρογραφίες OM, SEM και αναλύσεις EDS οργανικής επικάλυψης Δείγματος "H1"



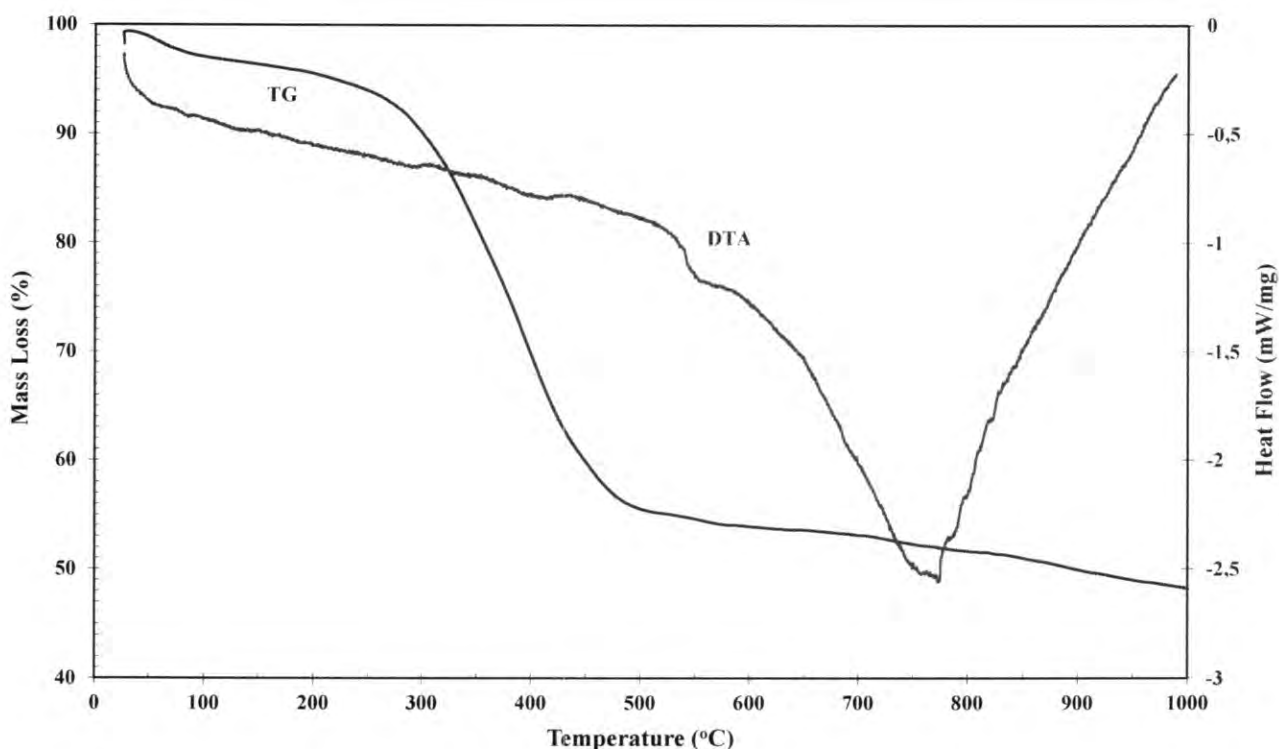
Το τρίτο και το τέταρτο στρώμα είναι η “Τελική Διακοσμητική Στρώση – Topcoat), η οποία παρουσιάζει ανθεκτικότητα σε μηχανική φθορά και UV ακτινοβολία, ενώ προσφέρει χρώμα και στιλπνότητα (συνήθως πολυουρεθανικό ή αλκυδικό). Τέλος, το πέμπτο στρώμα είναι το “Anti-Graffiti Coat”, το οποίο είναι μια υδρόφοβη / λιπόφοβη επικάλυψη. Από τα μικροδομικά χαρακτηριστικά της αντιδιαβρωτικής επικάλυψης, το primer εμφανίζεται περισσότερο “τραχύ”, με έντονη παρουσία fillers, η ενδιάμεση στρώση είναι περισσότερο ομοιογενής και μεγάλου πάχους, τα topcoat εμφανίζονται με πιο λεία υφή και λιγότερα fillers και τέλος το anti-graffiti πολύ λεπτό στρώμα, σχεδόν σαν film, είναι μια εξειδικευμένη προστατευτική στρώση που εφαρμόζεται στην εξωτερική επιφάνεια ενός συστήματος βαφής, με σκοπό να αποτρέπει την πρόσφυση χρωμάτων, μελανιών ή σπρέι, και να επιτρέπει τον εύκολο καθαρισμό, χωρίς φθορά της επικάλυψης. Ανιχνευτήκαν διάφοροι τύποι ανόργανων προσθέτων, όπως τάλκης (αύξηση όγκου, βελτίωση σταθερότητας και σκληρότητας βαφής, βελτίωση αντοχής στην τριβή), θεικό βάριο (βελτιωμένη κάλυψη, ανθεκτικότητα, σταθερότητα) και ρουτίλιο (βελτίωση της αντοχής στη διάβρωση, αντοχή στην τριβή και μηχανική φθορά).

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από την εξέταση της επικάλυψης με εφαρμογή της μεθόδου Περίθλασης Ακτίνων “X” (Σχήμα 3). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα ανιχνευτήκαν TiO_2 (Rutile), $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (Talc), $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (Lizardite) και BaSO_4 (Barite). Το TiO_2 Rutile συνδυάζεται συχνά με πληρωτικά (όπως BaSO_4 και Talc) για να ενισχύσει την απόδοση χωρίς να επηρεάζει τις βασικές ιδιότητες της επικάλυψης. Ο στόχος είναι η βελτίωση της σταθερότητας σε ακτινοβολία UV και της ανθεκτικότητας στις εξωτερικές συνθήκες, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα για καλύτερη μακροχρόνια προστασία.



Σχήμα 3: Ακτινοδιάγραμμα XRD αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης Δείγματος "H1"

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα της εξέτασης της οργανικής αντιδιαβρωτικής επικάλυψης μέσω διαφορικής θερμικής ανάλυσης (TG-DTA), η οποία αποκολλήθηκε με ελαφριά απόξεση. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η διαφορική θερμική ανάλυση είναι μια θερμοαναλυτική μεθοδολογία, κατά την οποία προσδιορίζεται η διαφορά της απαιτούμενης ενέργειας (θερμότητας) για την αύξηση της θερμοκρασίας ενός δείγματος. Κατά συνέπεια, μέσω αυτής της μεθοδολογίας προσδιορίζεται η ενέργεια που απαιτείται, ή που παράγεται από ένα δείγμα, όταν αυτό υφίσταται ένα φυσικό ή χημικό μετασχηματισμό, αλλά και η θερμοκρασία, ή το θερμοκρασιακό εύρος, στο οποίο πραγματοποιείται ο εν λόγω φυσικοχημικός μετασχηματισμός.



Σχήμα 4: Διαφορική θερμική ανάλυση αντιδιαβρωτικής επικάλυψης Δείγματος “H1”

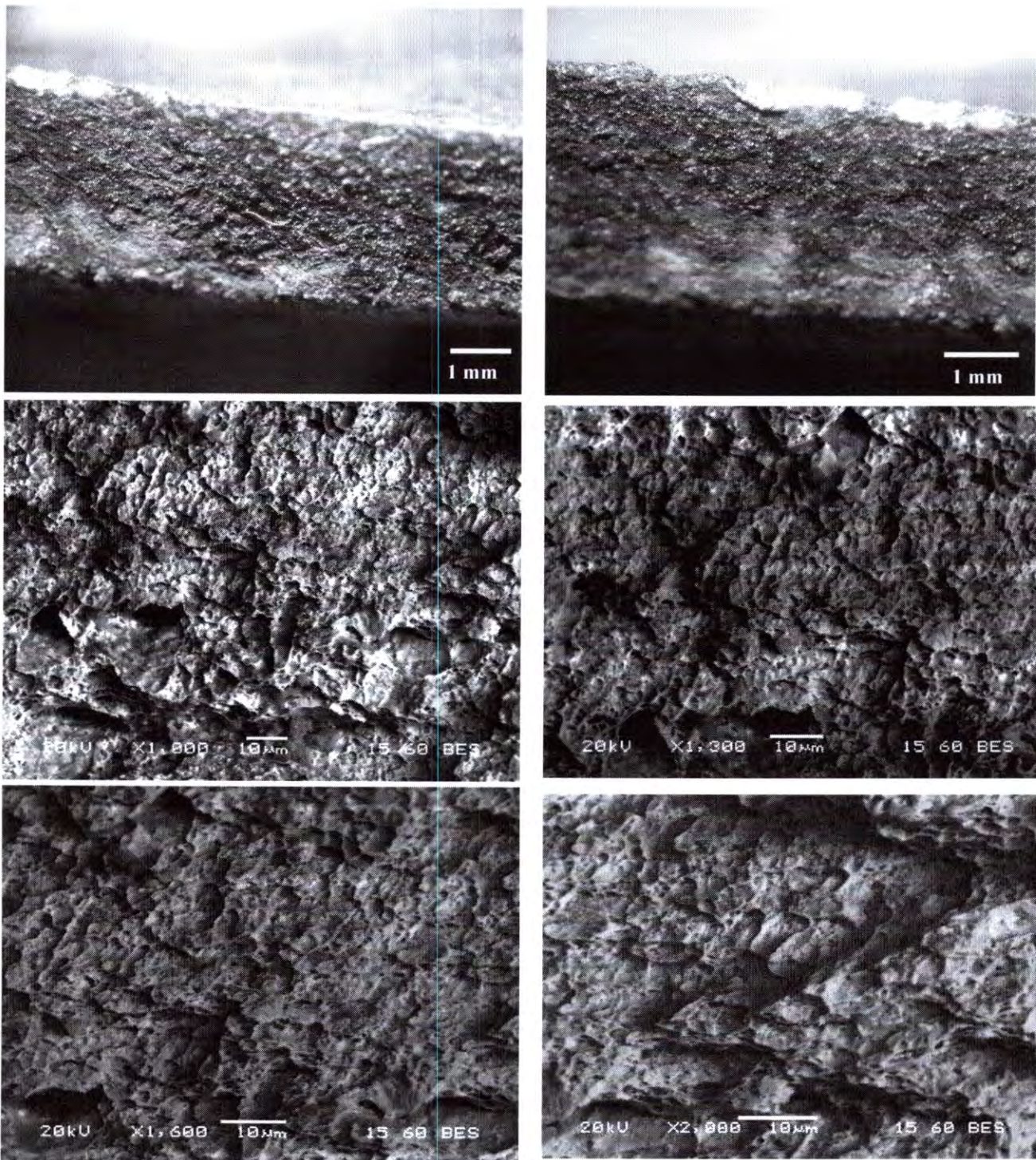
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα παρατηρείται μια πρώτη, σχετικά μικρή, απώλεια μάζας μέχρι την θερμοκρασία των 130° C, η οποία θα πρέπει να αποδοθεί στην εξάτμιση των περιεχόμενων πτητικών και υγρασίας. Η υπό εξέταση οργανική επικάλυψη παρουσιάζει θερμική σταθερότητα μέχρι το θερμοκρασιακό εύρος των 200 °C. Η έντονη αποικοδόμηση των οργανικών δομικών συστατικών της επικάλυψης ξεκινάει από την θερμοκρασία των 250 °C και ολοκληρώνεται στην θερμοκρασιακή περιοχή των 450 °C, όπου παρατηρείται μία συνολική απώλεια μάζας της τάξης του 45%. Με την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας πραγματοποιείται και η διάσπαση των περιεχόμενων ανόργανων συστατικών-fillers της επικάλυψης (κυρίως του τάλκη). Κατά συνέπεια, η θερμοκρασία στο υπό εξέταση τμήμα της Ηλεκτρομηχανής, όπου και παρατηρείται η αποκόλληση του Θαλάμου Μηχανοδήγησης, δεν αυξήθηκε σημαντικά, καθώς η υφή και η δομή της οργανικής αντιδιαβρωτικής επικάλυψης στην περιοχή της



αποκόλλησης παραμένει αναλλοίωτη και δεν φαίνεται να έχει υποστεί κάποιο θερμικό μετασχηματισμό.

Στην **Εικόνα 17** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση της επιφάνειας θραύσεως του Δείγματος "H1" σε Στερεοσκοπικό και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, τα ανιχνευόμενα μικρογραφικά χαρακτηριστικά της θραυσιγενούς επιφάνειας υποδεικνύουν ότι το υλικό υπέστη σημαντική πλαστική παραμόρφωση πριν από τη θραύση, κάτι που αποτελεί βασικό γνώρισμα της όλκιμης θραύσης. Σε όλες τις περιπτώσεις ανιχνεύονται, σε όλη την έκταση της επιφάνειας θραύσης, χαρακτηριστικές σφαιρικές ή ελλειπτικές μικροσκοπικές κοιλότητες (dimples), οι οποίες σχηματίζονται κατά την σταδιακή πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Από τον έλεγχο του μεγέθους των κοιλοτήτων προέκυψε ότι ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι σχετικά χαμηλός, καθώς το υλικό διαθέτει περισσότερο χρόνο ώστε να υποστεί πλαστική παραμόρφωση. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην σταδιακή, σχετικά χαμηλής ταχύτητας, παραμόρφωση του υλικού με συνέπεια να σχηματίζονται μεγαλύτερες κοιλότητες στις περιοχές πλαστικής παραμόρφωσης πριν τη θραύση (κατανομή παραμόρφωσης σε μεγαλύτερες περιοχές).

Αντίθετα αν το φορτίο εφαρμόζονταν με υψηλότερους ρυθμούς (σε συνθήκες υψηλής ταχύτητας δυναμικής φόρτισης), το υλικό δεν θα είχε αρκετό χρόνο να υποστεί την ίδια πλαστική παραμόρφωση. Οι κοιλότητες που θα σχηματίζονταν σε αυτή την περίπτωση θα ήταν μικρότερου μεγέθους (και πιο ρηχές), καθώς η παραμόρφωση θα ήταν περισσότερο τοπική και απότομη. Το υλικό δεν θα είχε χρόνο να απορροφήσει την ενέργεια της φόρτισης με συνέπεια η θραύση να εμφανίζονταν περισσότερο ψαθυρή, ακόμα και για όλκιμα υλικά. Τα μικρογραφικά χαρακτηριστικά των ανιχνευόμενων μικροσκοπικών κοιλοτήτων (dimples), παραπέμπουν σε έναν σχετικά συμμετρικό και τακτικό σχηματισμό.



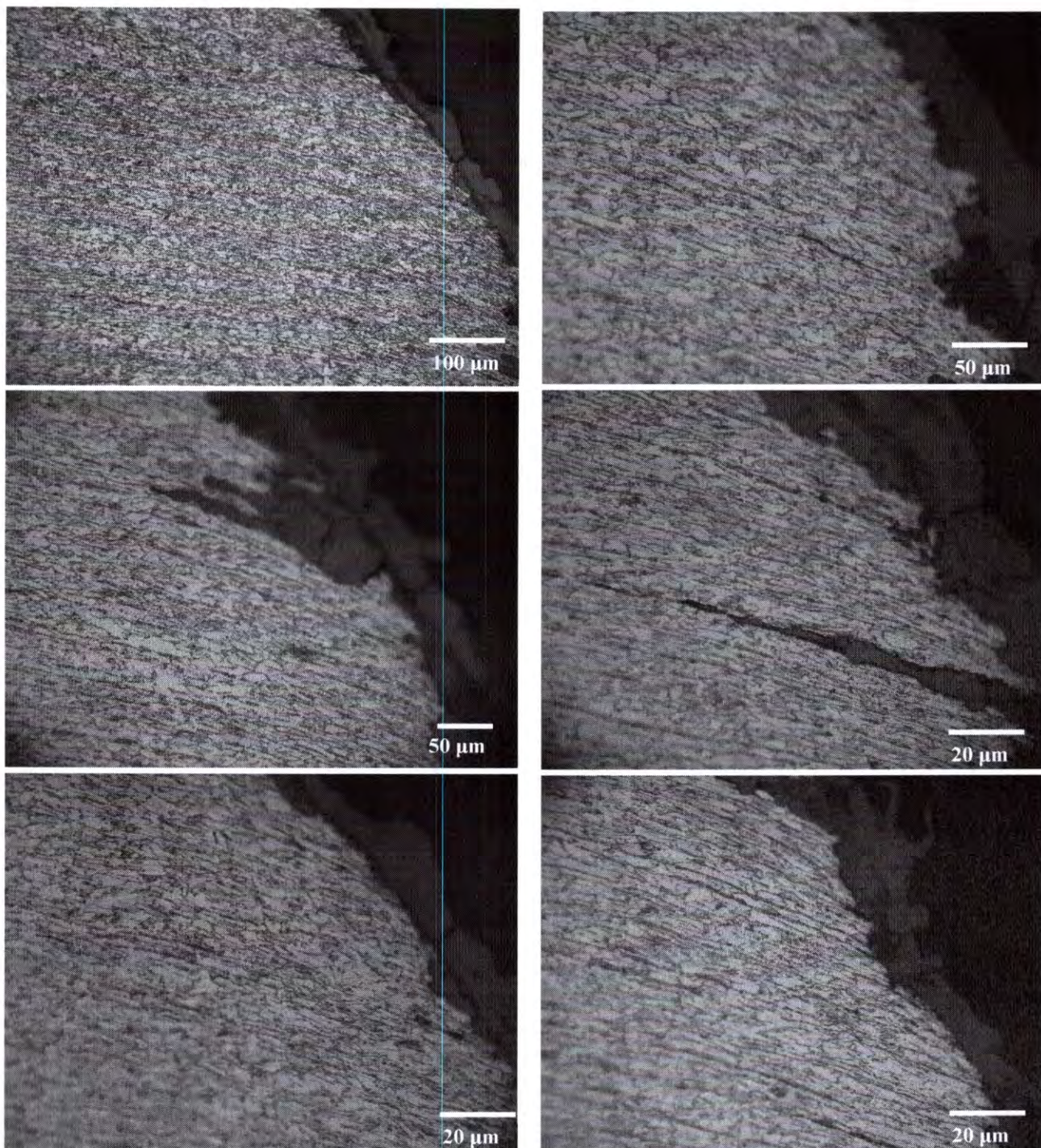
Εικόνα 17: Μακρο/μικρογραφίες στερεοσκοπικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης επιφάνειας θραύσης Δείγματος "H1"



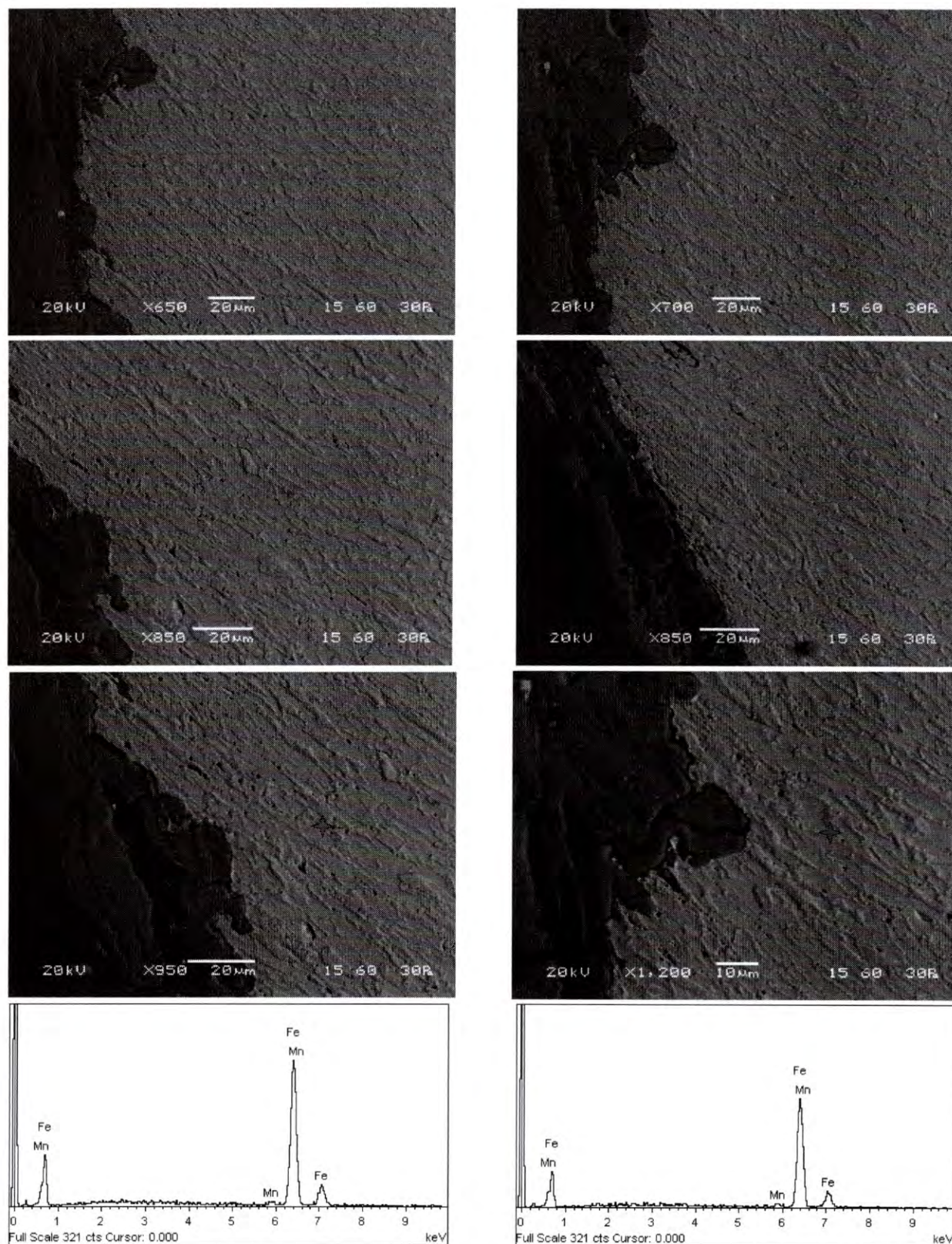
Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από τις αντίστοιχες μικρογραφίες από την εξέταση των παραχθέντων στιλπνών τομών σε Μεταλλογραφικό Οπτικό Μικροσκόπιο και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS), οι οποίες παρουσιάζονται στις **Εικόνες 18-19**. Οι τομές έχουν πραγματοποιηθεί παράλληλα στην διεύθυνση της παραμόρφωσης-καταπόνησης με στόχο την διερεύνηση των αναπτυσσόμενων μικροδομικών χαρακτηριστικών της θραύσης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα δεν ανιχνευτήκαν χαρακτηριστικά που να υποδεικνύουν υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης (ανίχνευση διδυμίων, ζωνών διάτμησης, φαινόμενα spalling ή ύπαρξη έντονων ρωγματώσεων). Παρατηρείται σημαντική πλαστική παραμόρφωση και επιμήκυνση των κόκκων του υλικού, χαρακτηριστικά που παραπέμπουν σε όλικμη θραύση, χαμηλού ρυθμού καταπόνησης. Καθώς το υλικό υφίσταται πλαστική παραμόρφωση, οι κόκκοι τείνουν να επιμηκύνονται προς την διεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου. Η επιμήκυνση αυτή είναι περισσότερο έντονη στις περιοχές όπου το υλικό έχει υποστεί τη μεγαλύτερη παραμόρφωση, και κυρίως στα άκρα των δοκιμίων, όπου παρατηρείται και μείωσης της διατομής (στην περιοχή της θραύσης).

Οι κόκκοι του υλικού εφελκύνονται και παραμορφώνονται προοδευτικά, καθώς η δομή του υλικού ανθίσταται στην θραύση. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά υποδεικνύουν χαμηλή σχετικά ταχύτητα παραμόρφωσης, καθώς σε υψηλότερες ταχύτητες επιβολής του φορτίου (υψηλός ρυθμός παραμόρφωσης), το υλικό δεν έχει αρκετό χρόνο να υποστεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Κατά συνέπεια, οι κόκκοι δεν θα προλάβαιναν να επιμηκυνθούν ή να παραμορφωθούν όπως στις χαμηλότερες ταχύτητες παραμόρφωσης.



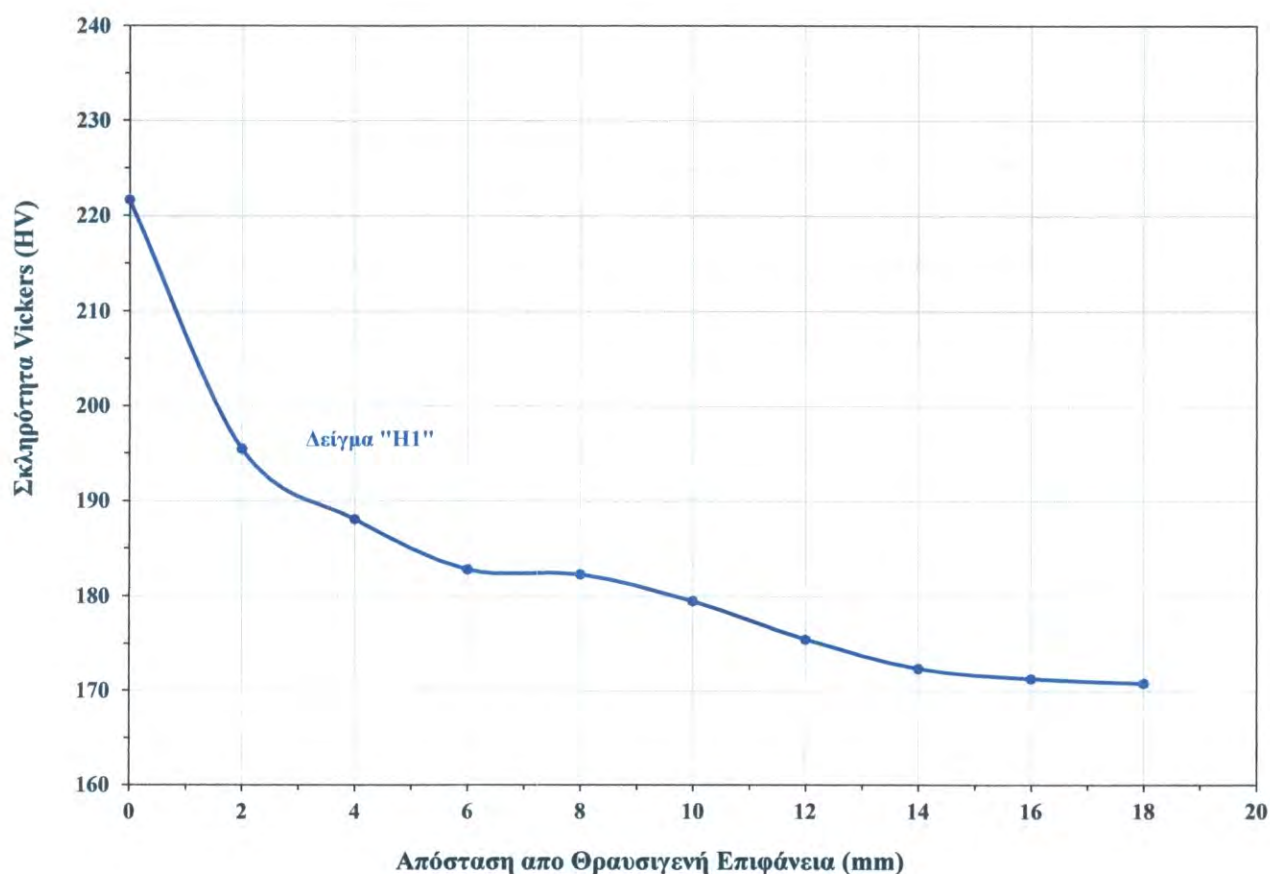
Εικόνα 18: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου Δείγματος "H1" στην περιοχή της θραύσης



Εικόνα 19: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "H1"



Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από τις αντίστοιχες μετρήσεις σκληρότητας Vickers, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν παράλληλα (κατά μήκος) στην διεύθυνση της ανιχνευόμενης παραμόρφωσης (Σχήμα 5). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μέσω της σκληρότητας Vickers προσδιορίζεται η αντίσταση ενός υλικού στην τοπική πλαστική παραμόρφωση. Η παρατηρούμενη αύξηση της σκληρότητας στην ζώνη θραύσης είναι της τάξης του 25%, καθώς λόγω της αναπτυσσόμενης πλαστικής παραμόρφωσης στην θραυσίγενή επιφάνεια και της παρατηρούμενης επιμήκυνσης των κόκκων προκαλείται το φαινόμενο της ενδοτράχυνσης, με τελικό αποτέλεσμα την τοπική αύξηση της αντοχής-σκληρότητας του υλικού.



Σχήμα 5: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων Vickers παράλληλα στην διεύθυνση παραμόρφωσης Δείγματος "H1"

3.2 Χαρακτηρισμός Δείγματος "H2"

Το υπό εξέταση Δείγμα "H2" αποσπάστηκε από την Ηλεκτράμαξα 120 012, από το πίσω και δεξιά τμήμα της αποκόλλησης (Εικόνα 20).



Εικόνα 20: Δείγμα "H2" (Ηλεκτράμαξα 2), από το πίσω και δεξιά τμήμα της αποκόλλησης

Κατά τον εργαστηριακό έλεγχο πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες δοκιμές:

- ✓ Έλεγχος Μικροδομής στο Οπτικό Μικροσκόπιο
- ✓ Έλεγχος Μικροδομής και Μικροανάλυση σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης
- ✓ Έλεγχος Σκληρότητας Vickers
- ✓ Περίθλαση Ακτίνων Χ
- ✓ Διαφορική Θερμική Ανάλυση Οργανικής Αντιδιαβρωτικής Επικάλυψης

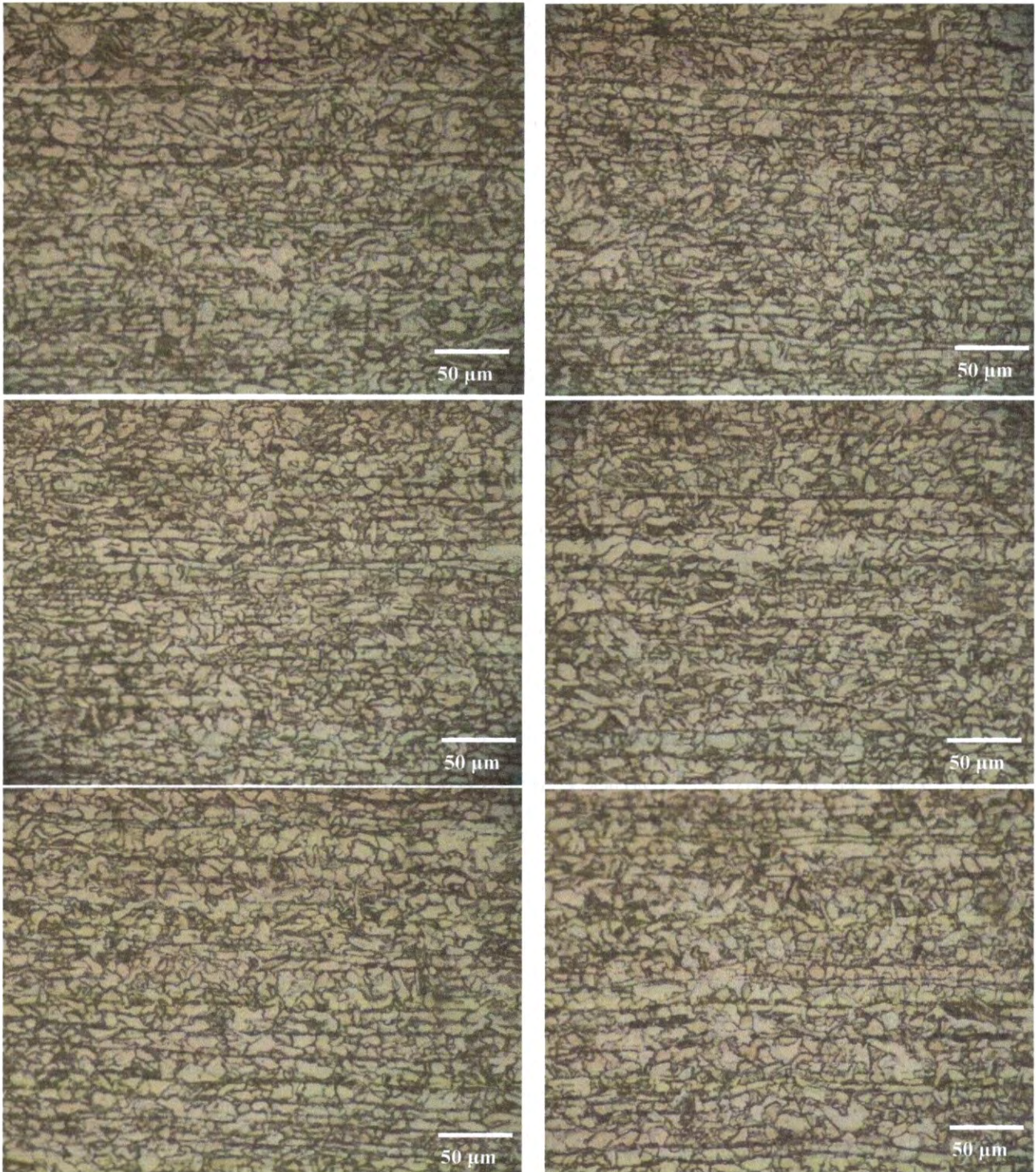


Αρχικά εξετάστηκε μια υγιής περιοχή του παραληφθέντος δείγματος, η οποία δεν φαίνεται να είχε υποστεί μηχανική καταπόνηση και έφερε πλήρως την οργανική αντιδιαβρωτική επικάλυψη, με στόχο την μελέτη των χημικών και δομικών χαρακτηριστικών τόσο του μεταλλικού υποστρώματος όσο και της επικάλυψης. Στις **Εικόνες 21 και 22** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση των παραχθέντων στιλπνών τομών σε Μεταλλογραφικό Οπτικό Μικροσκόπιο και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις, μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS).

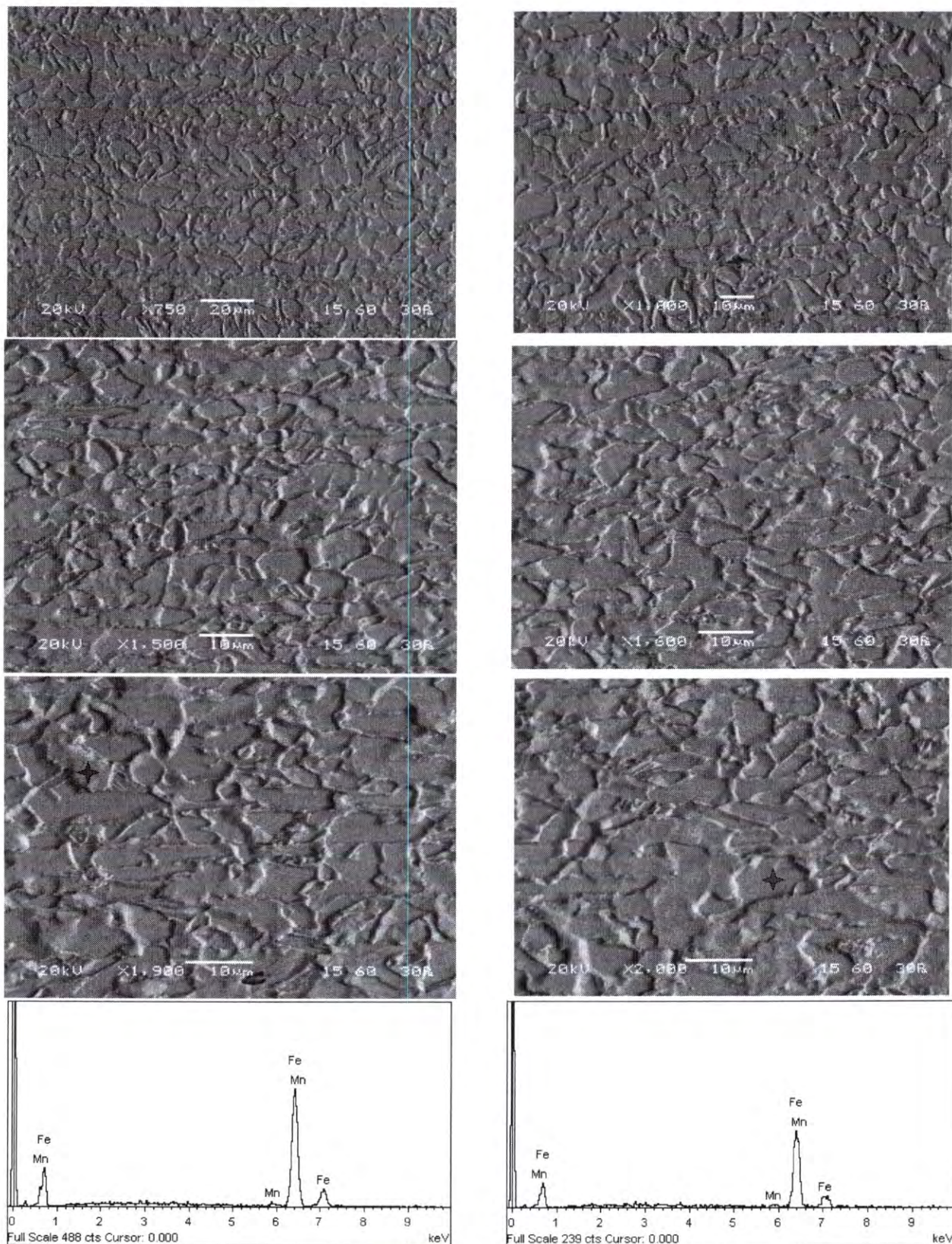
Όπως αναμενόταν, και σε αυτήν την περίπτωση πρόκειται για τον ίδιο φερριτομπαινιτικό χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης, ο οποίος ανιχνεύτηκε και στην περίπτωση του Δείγματος “H1”, σχετικά χαμηλού ποσοστού άνθρακα ($\approx 0.25\%$), ο οποίος περιέχει περίπου 1.6% Mn. Ο ανιχνευόμενος προευντηκτοειδής φερρίτης (της τάξης του 70%) εμφανίζεται με την μορφή σχετικά μεγάλου μεγέθους κόκκων ($\approx 15-20 \mu\text{m}$).

Επίσης ανιχνεύτηκε και λεπτόκοκκος μπαινιτικός φερρίτης, ο οποίος αποτελεί την βασική φάση της μπαινιτικής μικροδομής, με την μορφή λεπτών, επιμηκυμένων πλακιδίων. Τέλος, ανιχνεύονται και καρβίδια του σιδήρου (κυρίως σεμεντίτης Fe_3C , διαμεταλλική φάση του σιδήρου με τον άνθρακα), τα οποία αναπτύσσονται περικρυσταλλικά.

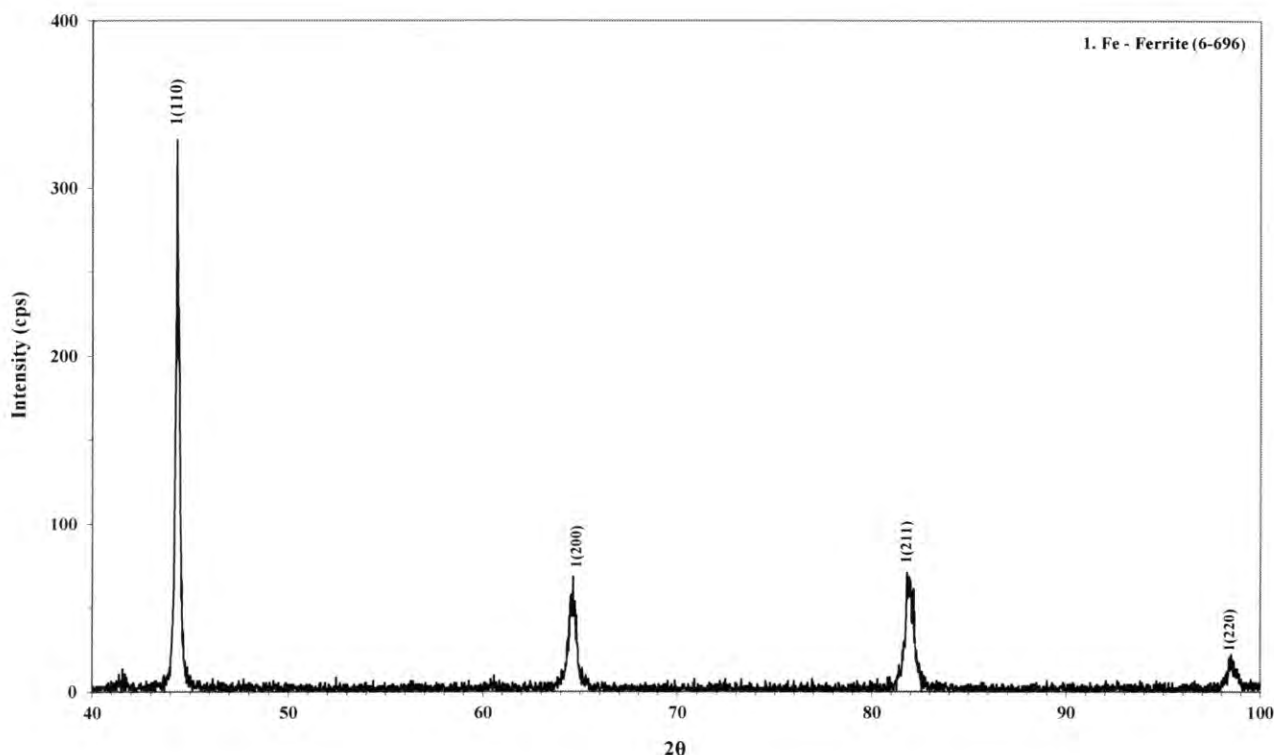
Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από την εξέταση των δοκιμίων με εφαρμογή της μεθόδου Περίθλασης Ακτίνων “Χ” (XRD). Σε όλες τις περιπτώσεις ανιχνεύονται οι χαρακτηριστικές κορυφές χωροκεντρωμένου (bcc) σιδήρου (**Σχήμα 6**).



Εικόνα 21: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου Δείγματος "H2"



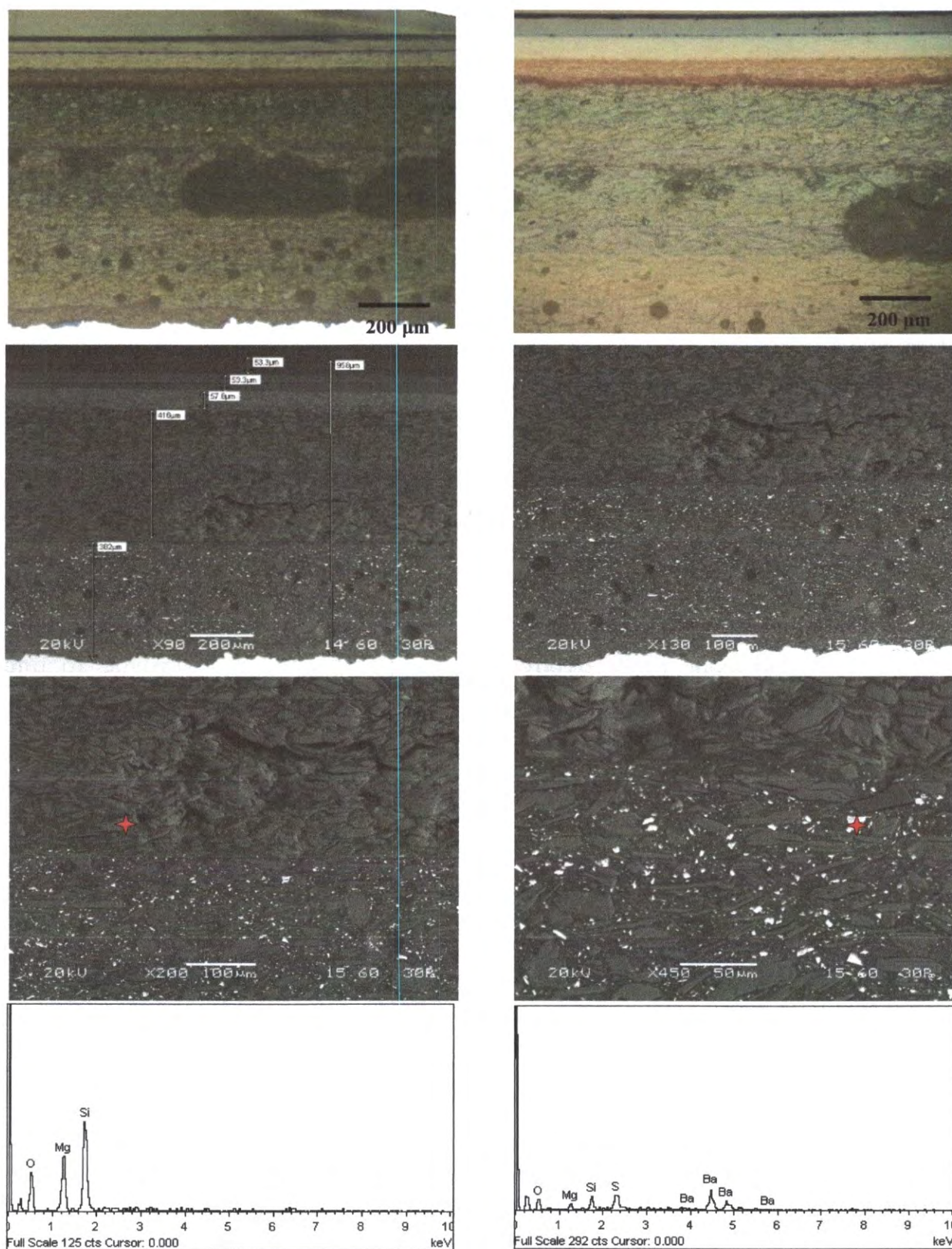
Εικόνα 22: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "H2"



Σχήμα 6: Ακτινοδιάγραμμα XRD Δείγματος "H2"

Τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων, επιβεβαίωσαν τις παρατηρήσεις που προέκυψαν από την μεταλλογραφική εξέταση στο Οπτικό Μικροσκόπιο και στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης. Σε όλες τις περιπτώσεις η μέση τιμή της σκληρότητας, σε υγιή περιοχή του παραληφθέντος δείγματος, η οποία δεν φαίνεται να είχε υποστεί μηχανική καταπόνηση, ήταν της τάξης των 165-170Vickers.

Στην **Εικόνα 23** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση της αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης στο Οπτικό και στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις, μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS).



Εικόνα 23: Μικρογραφίες OM, SEM και αναλύσεις EDS οργανικής επικάλυψης Δείγματος "H2"

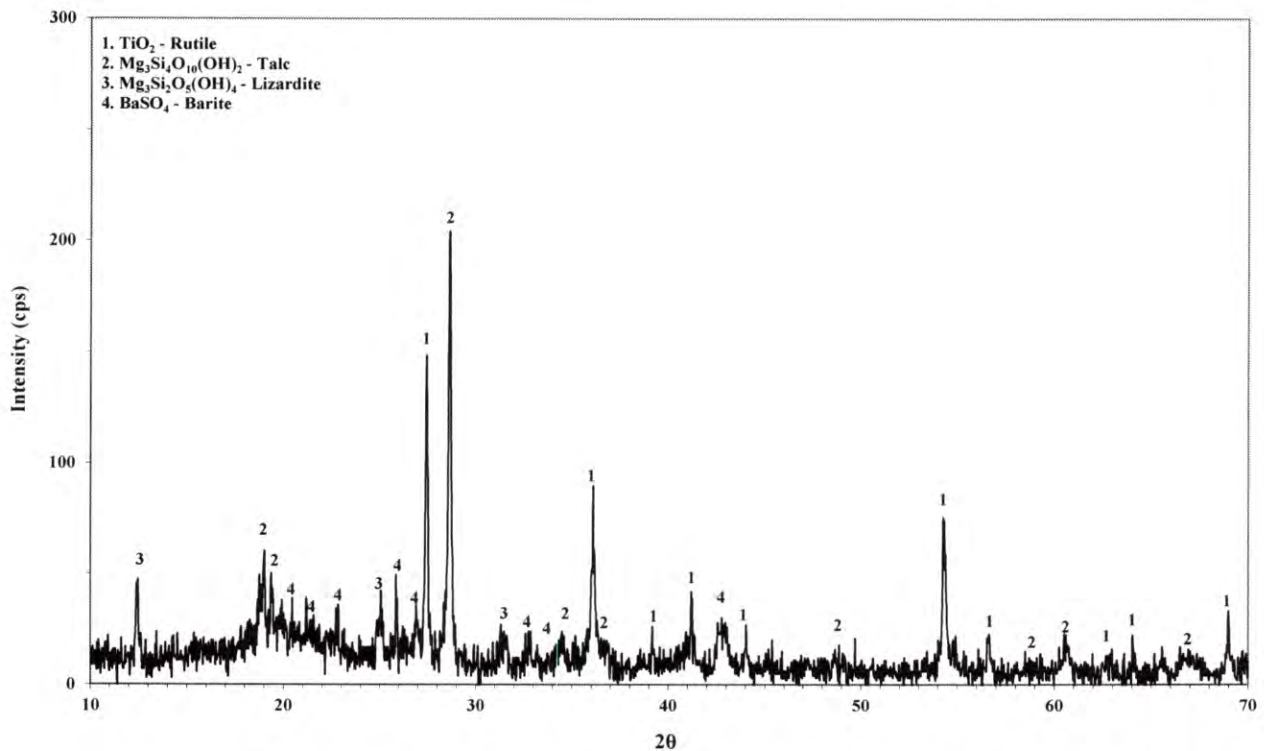


Και σε αυτή την περίπτωση πρόκειται για αντιδιαβρωτική επικάλυψη, πολλαπλών στρώματων με τα ίδια δομικά χαρακτηριστικά με τα αντίστοιχα του Δείγματος "H1".

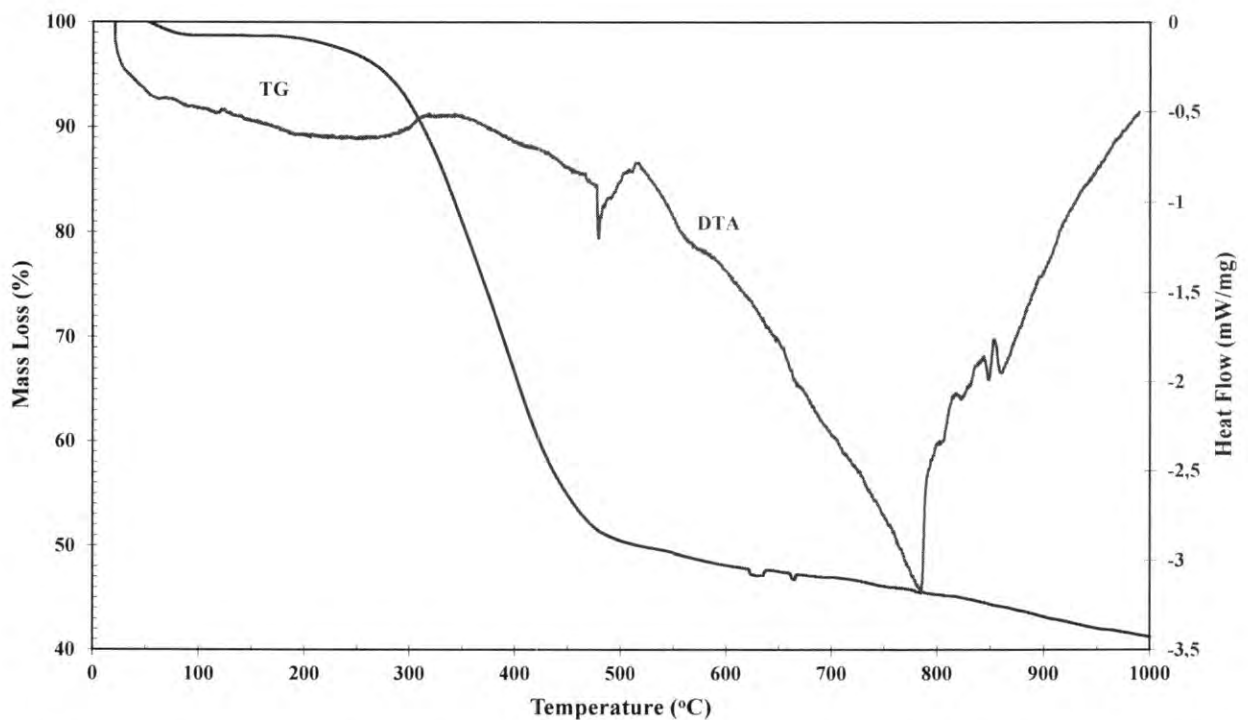
Το συνολικός πάχος της οργανικής επικάλυψης είναι της τάξης των 970-980 μm . Αποτελείται από πέντε στρώματα. Το πρώτο στρώμα, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το χάλυβα είναι "Αστάρι - Primer", το δεύτερο στρώμα είναι η "Ενδιάμεση Στρώση - Intermediate coat", το τρίτο και το τέταρτο στρώμα είναι η "Τελική Διακοσμητική Στρώση - Topcoat", ενώ το τελευταίο πέμπτο στρώμα είναι το "Anti-Graffiti Coat". Το 1^ο στρώμα (αστάρι) εμφανίζεται περισσότερο "τραχύ", με έντονη παρουσία fillers, η ενδιάμεση στρώση είναι περισσότερο ομοιογενής και μεγάλου πάχους, τα topcoat εμφανίζονται με πιο λεία υφή και λιγότερα fillers και τέλος το anti-graffiti έχει την μορφή ενός πολύ λεπτού στρώματος (film).

Ανιχνευτήκαν διάφοροι τύποι ανόργανων προσθέτων (fillers), γεγονός το οποίο επιβεβαιώθηκε και από τα αποτελέσματα της μεθόδου Περίθλασης Ακτίνων "X" (Σχήμα 7). Τα κύρια ανιχνευόμενα ορυκτολογικά συστατικά είναι TiO_2 (Rutile), $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (Talc), $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (Lizardite) και BaSO_4 (Barite).

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα της εξέτασης της οργανικής αντιδιαβρωτικής επικάλυψης μέσω διαφορικής θερμικής ανάλυσης (TG-DTA), τα οποία είναι παραπλήσια με τα αντίστοιχα του Δείγματος "H1". Η υπό εξέταση οργανική επικάλυψη παρουσιάζει θερμική σταθερότητα μέχρι το θερμοκρασιακό εύρος των 200 $^{\circ}\text{C}$, ενώ η έντονη αποικοδόμησή της ξεκινάει από την θερμοκρασία των 250 $^{\circ}\text{C}$ και ολοκληρώνεται στην θερμοκρασιακή περιοχή των 450 $^{\circ}\text{C}$, όπου παρατηρείται μία συνολική απώλεια μάζας της τάξης του 40-45%.



Σχήμα 7: Ακτινοδιάγραμμα XRD αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης Δείγματος "H2"



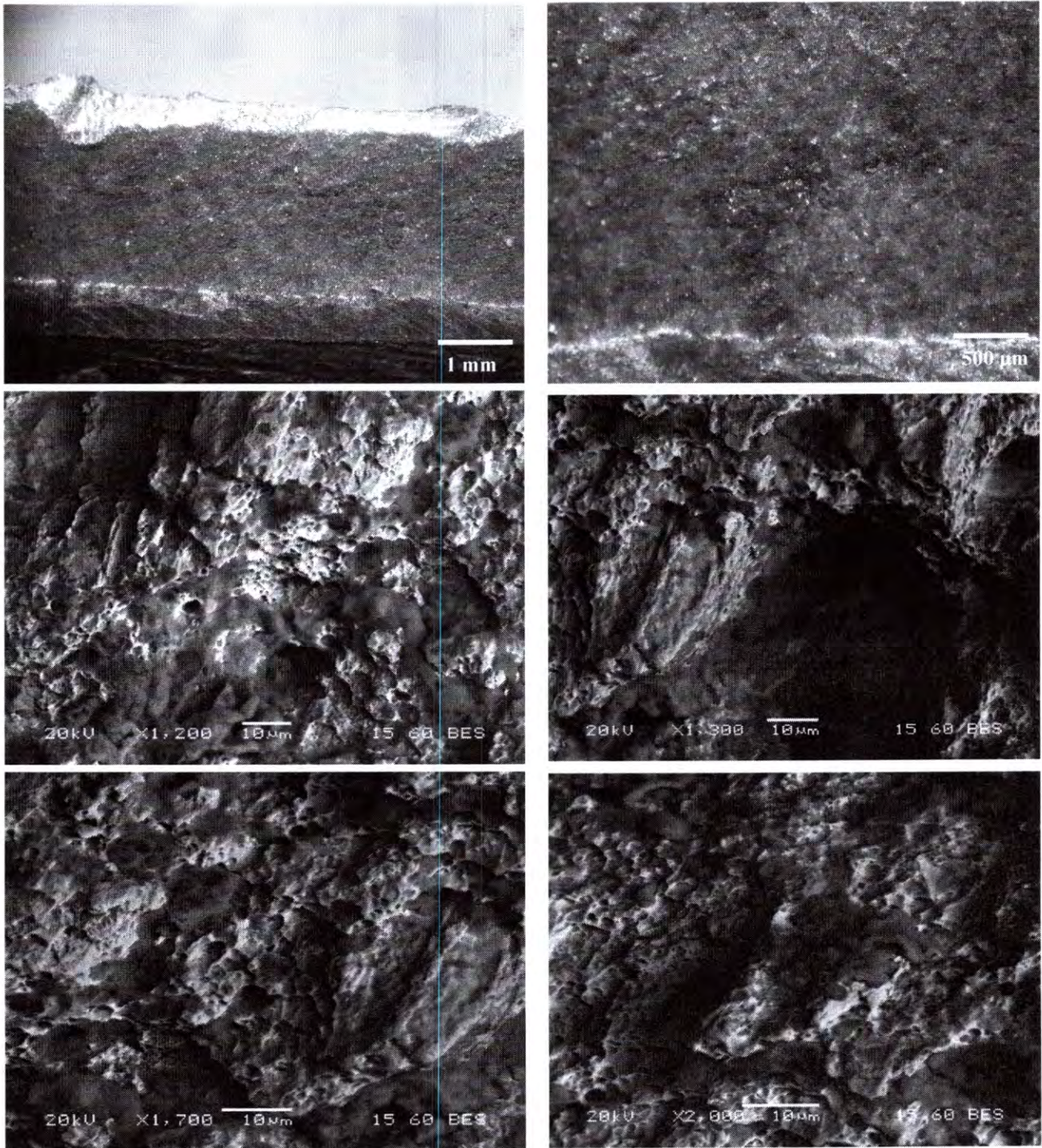
Σχήμα 8: Διαφορική θερμική ανάλυση αντιδιαβρωτικής επικάλυψης Δείγματος "H2"



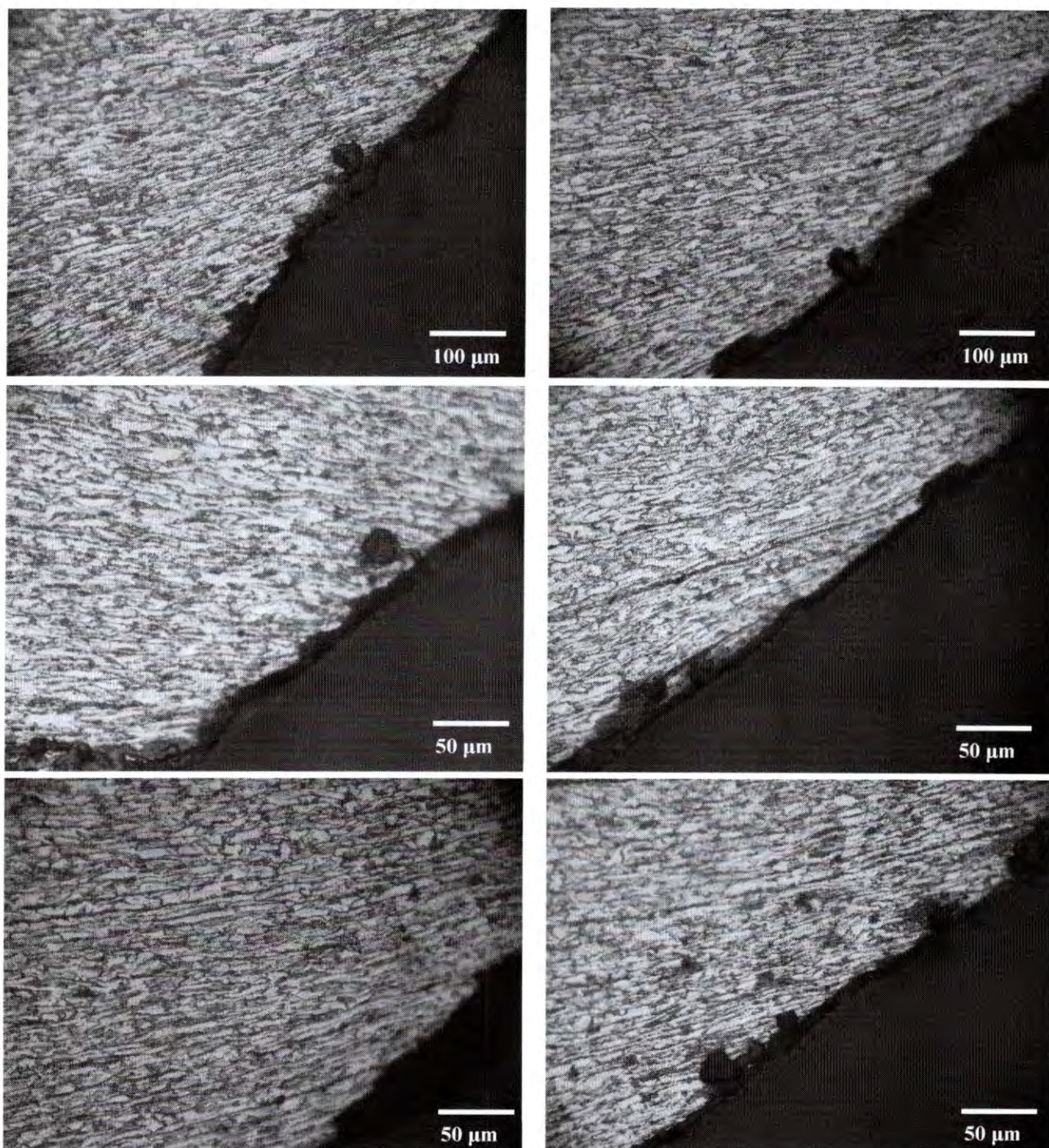
Στην **Εικόνα 24** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση της επιφάνειας θραύσεως του Δείγματος "H2" σε Στερεοσκοπικό και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, τα ανιχνευόμενα μικρογραφικά χαρακτηριστικά της θραυσιγενούς επιφάνειας υποδεικνύουν ότι το υλικό υπέστη σημαντική πλαστική παραμόρφωση πριν από τη θραύση, κάτι που αποτελεί βασικό γνώρισμα της όλκιμης θραύσης. Σε όλες τις περιπτώσεις ανιχνεύονται, σε όλη την έκταση της επιφάνειας θραύσης, χαρακτηριστικές σφαιρικές ή ελλειπτικές μικροσκοπικές κοιλότητες (dimples), οι οποίες σχηματίζονται κατά την σταδιακή πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Από τον έλεγχο του μεγέθους των κοιλοτήτων προέκυψε ότι ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι σχετικά χαμηλός, καθώς το υλικό διαθέτει περισσότερο χρόνο ώστε να υποστεί πλαστική παραμόρφωση.

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από τις αντίστοιχες μικρογραφίες από την εξέταση των παραχθέντων στιλπνών τομών σε Μεταλλογραφικό Οπτικό Μικροσκόπιο και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS), οι οποίες παρουσιάζονται στις **Εικόνες 25-26**. Οι τομές έχουν πραγματοποιηθεί παράλληλα στην διεύθυνση της παραμόρφωσης-καταπόνησης με στόχο την διερεύνηση των αναπτυσσόμενων μικροδομικών χαρακτηριστικών της θραύσης.

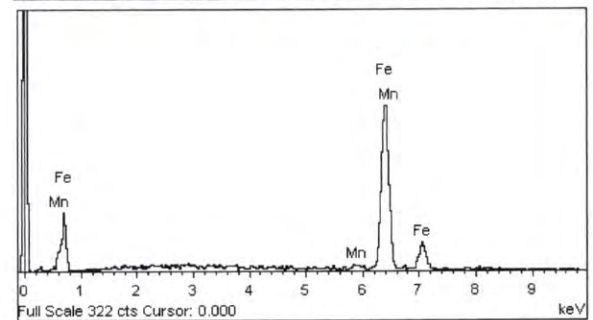
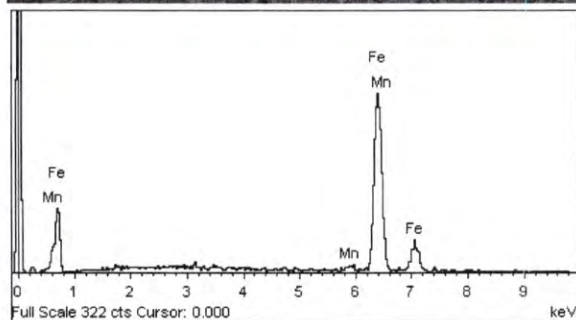
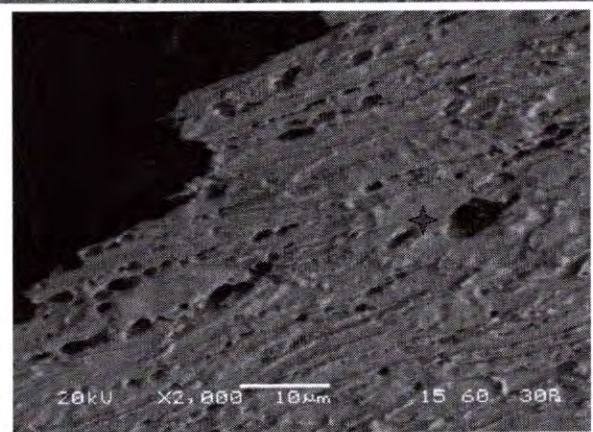
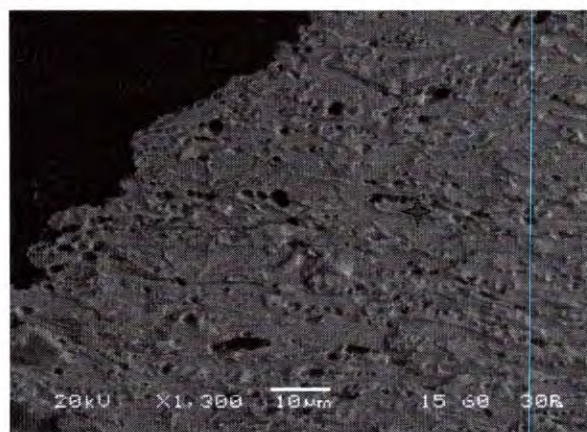
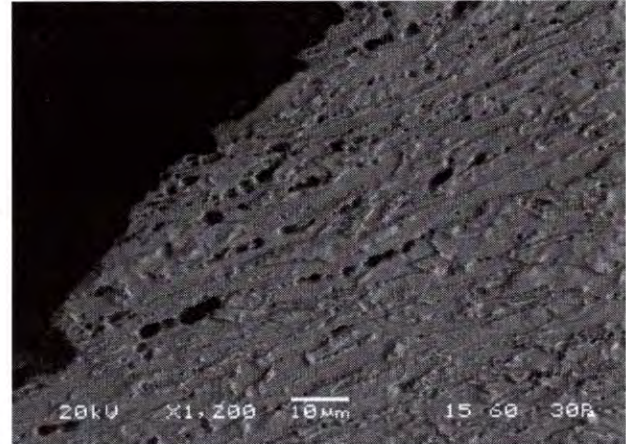
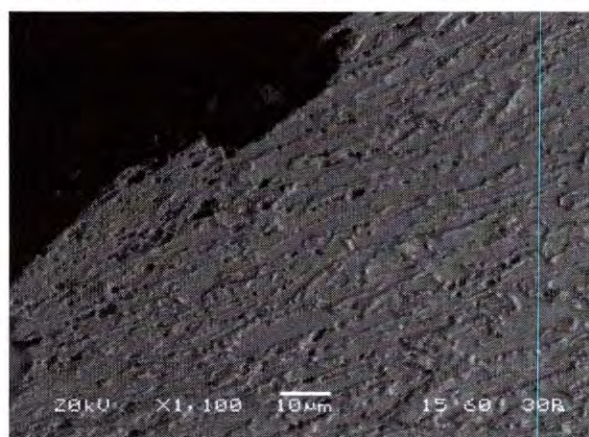
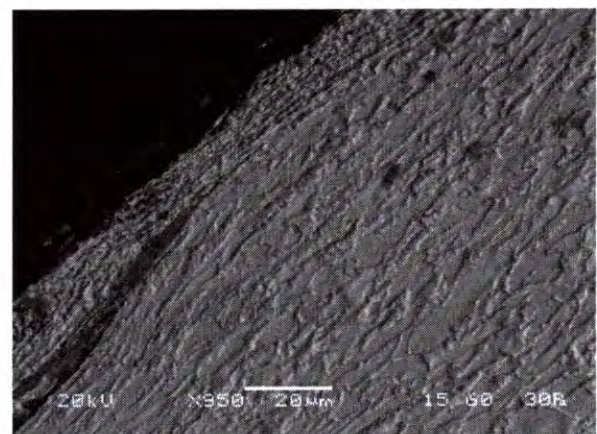
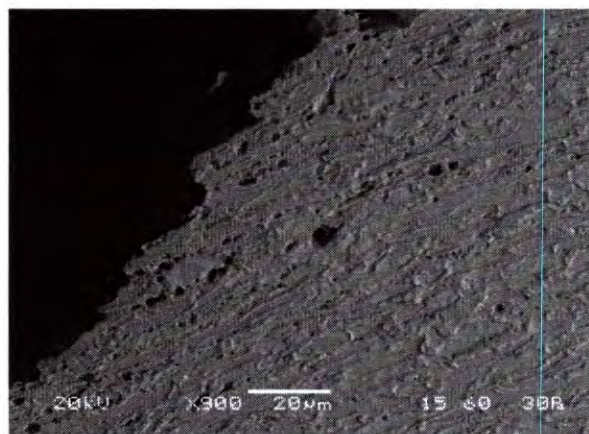
Και σε αυτή την περίπτωση δεν ανιχνευτήκαν χαρακτηριστικά που να υποδεικνύουν υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης (ανίχνευση διδυμίων, ζωνών διάτμησης, φαινόμενα τήξης ή ανακρυστάλλωσης, φαινόμενα spalling ή ύπαρξη έντονων ρωγματώσεων). Αντίθετα, παρατηρείται σημαντική πλαστική παραμόρφωση και επιμήκυνση των κόκκων του υλικού, χαρακτηριστικά που παραπέμπουν σε όλκιμη θραύση, χαμηλού ρυθμού καταπόνησης.



Εικόνα 24: Μακρο/μικρογραφίες στερεοσκοπικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης επιφάνειας θραύσης Δείγματος "H2"

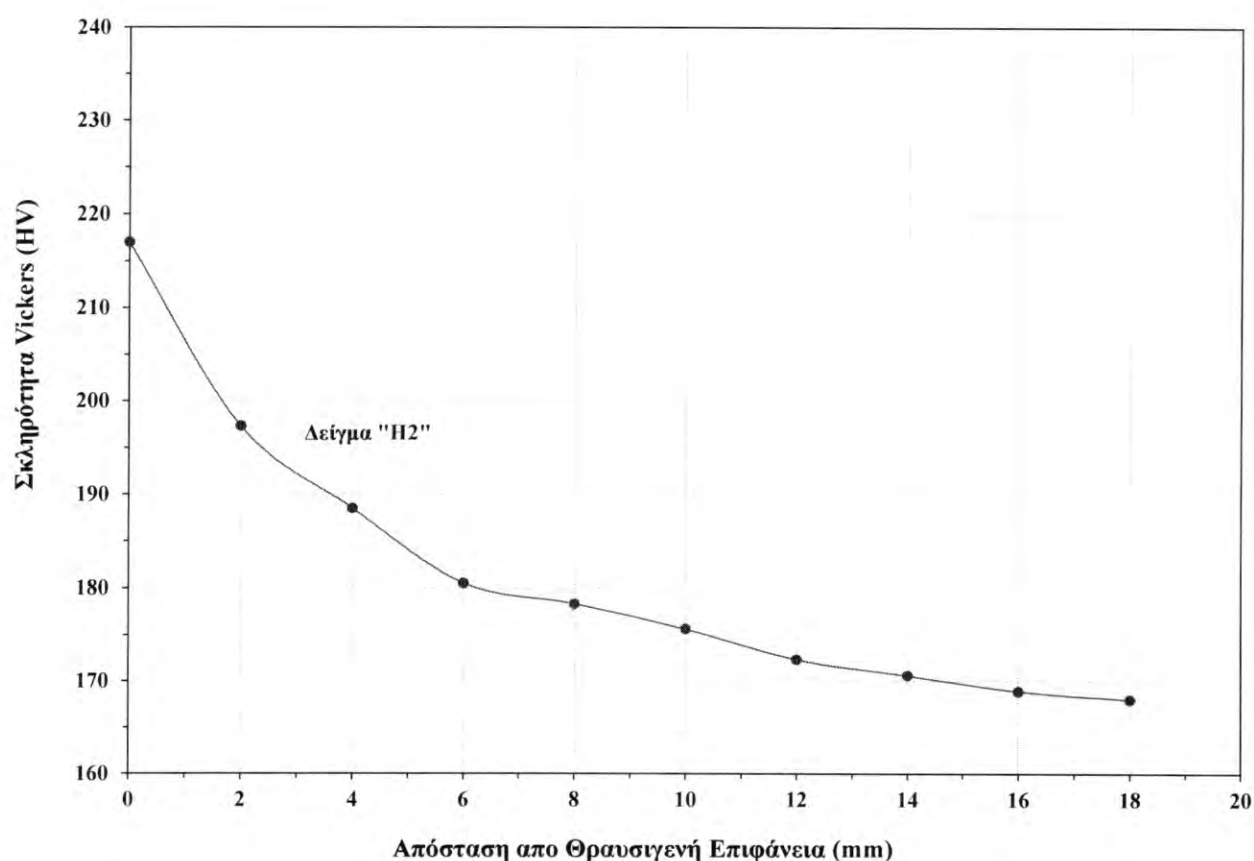


Εικόνα 25: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου Δείγματος "H2" στην περιοχή της θραύσης



Εικόνα 26: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "H2"

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από τις αντίστοιχες μετρήσεις σκληρότητας Vickers, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν παράλληλα (κατά μήκος) στην διεύθυνση της ανιχνευόμενης παραμόρφωσης (Σχήμα 9). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μέση τιμή της σκληρότητας Vickers, σε υγρή περιοχή του παραληφθέντος δείγματος, η οποία δεν φαίνεται να είχε υποστεί μηχανική καταπόνηση, ήταν της τάξης των 165-170 Vickers.



Σχήμα 9: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων Vickers παράλληλα στην διεύθυνση παραμόρφωσης Δείγματος "H2"

Κατά την διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης, οι κόκκοι τείνουν να επιμηκύνονται προς την διεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου. Η επιμήκυνση αυτή είναι περισσότερο έντονη στις περιοχές όπου το υλικό έχει υποστεί τη μεγαλύτερη



παραμόρφωση (άκρα των δοκιμίων), όπου παρατηρείται και μείωσης της διατομής. Λόγω της αναπτυσσόμενης πλαστικής παραμόρφωσης στην θραυστική επιφάνεια και της παρατηρούμενης επιμήκυνσης των κόκκων προκαλείται το φαινόμενο της ενδοτράχυνσης, γεγονός το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την τοπική αύξηση της αντοχής-σκληρότητας του υλικού. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η αύξηση της σκληρότητας στην ζώνη θραύσης και σε αυτή την περίπτωση είναι της τάξης του 30%

3.3 Χαρακτηρισμός Δείγματος “Κ1α”

Το υπό εξέταση Δείγμα “Κ1α” αποσπάστηκε από το αριστερό πλευρικό τμήμα του θραύσματος της οροφής του Θαλάμου Μηχανοδήγησης (Εικόνα 27).



Εικόνα 27: Δείγμα “Κ1α” (Κόκπιτ 1α) από την αριστερή πλευρά Οροφής του Θαλάμου Μηχανοδήγησης

Κατά τον εργαστηριακό έλεγχο πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες δοκιμές:

- ✓ Έλεγχος Μικροδομής στο Οπτικό Μικροσκόπιο
- ✓ Έλεγχος Μικροδομής και Μικροανάλυση σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης
- ✓ Έλεγχος Σκληρότητας Vickers
- ✓ Περίθλαση Ακτίνων Χ
- ✓ Διαφορική Θερμική Ανάλυση Οργανικής Αντιδιαβρωτικής Επικάλυψης

Αρχικά εξετάστηκε μια υγιής περιοχή του παραληφθέντος δείγματος, η οποία δεν φαίνεται να είχε υποστεί μηχανική καταπόνηση και έφερε πλήρως την οργανική αντιδιαβρωτική επικάλυψη, με στόχο την μελέτη των χημικών και δομικών χαρακτηριστικών τόσο του μεταλλικού υποστρώματος όσο και της επικάλυψης.



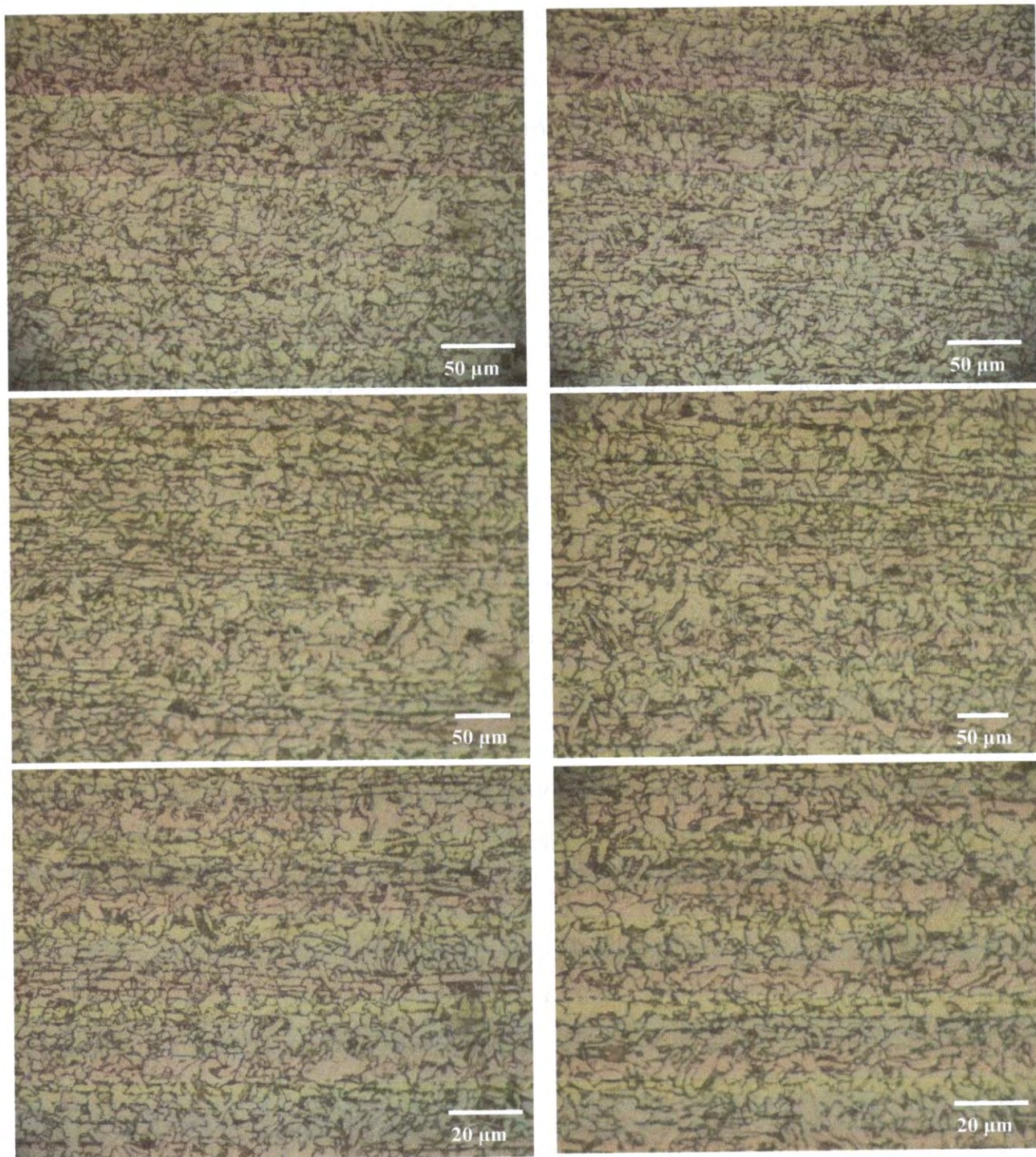
Στις Εικόνες 28 και 29 παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση των παραχθέντων στιλπνών τομών σε Μεταλλογραφικό Οπτικό Μικροσκόπιο και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις, μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS).

Επιβεβαιώνεται ότι πρόκειται για τον ίδιο τύπο χάλυβα που ανιχνεύτηκε στο κύριο σώμα της Ηλεκτράμαξας (στην περιοχή της αποκόλλησης: Δείγματα "H1" και "H2").

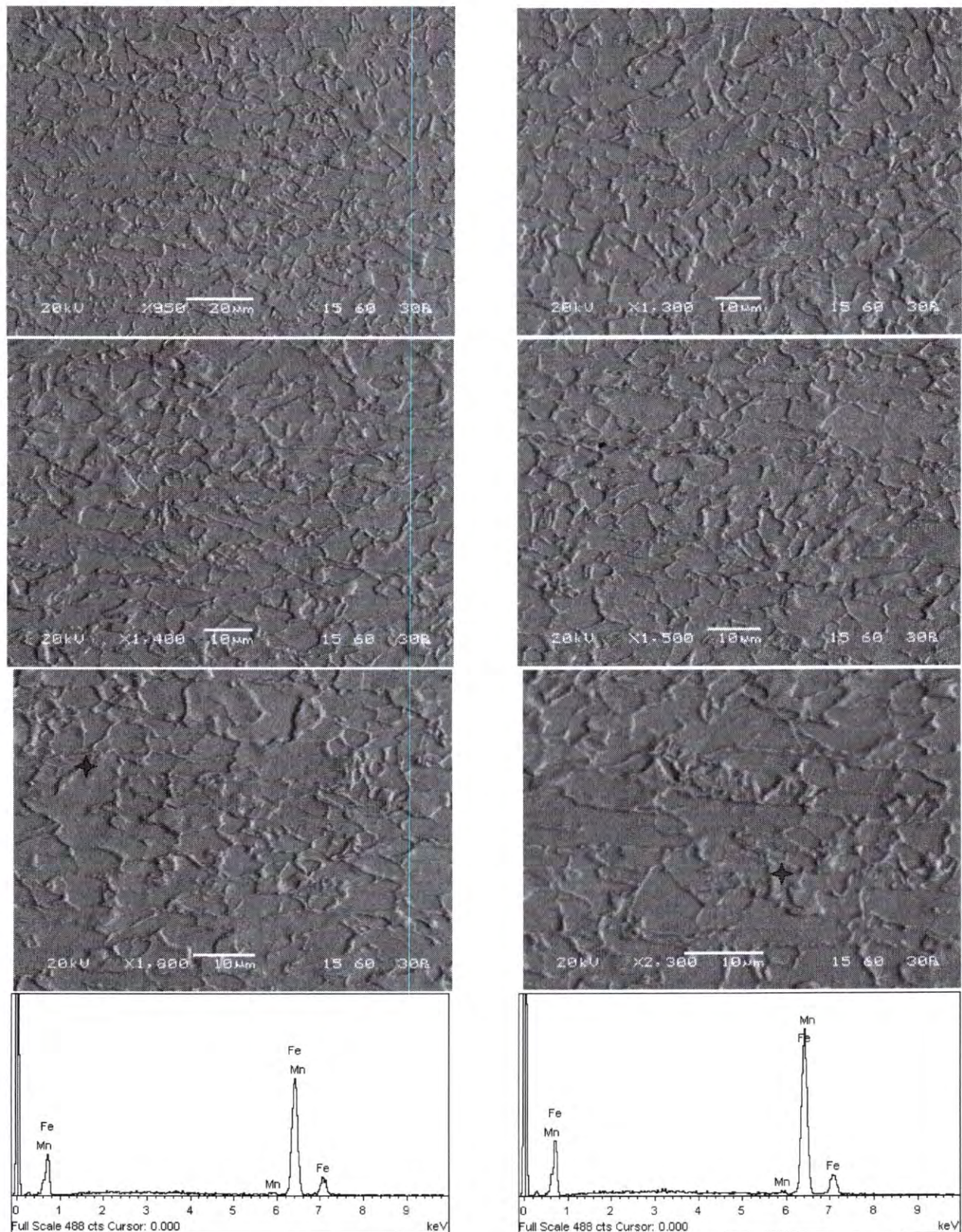
Είναι ο ίδιος φερριτο-μπαινιτικός χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης, σχετικά χαμηλού ποσοστού άνθρακα ($\approx 0.25\%$), ο οποίος περιέχει περίπου 1.6% Mn. Ο παρατηρούμενος προευνθηκτοειδής φερρίτης, είναι της τάξης του 70% , και εμφανίζεται με την μορφή σχετικά μεγάλου μεγέθους κόκκων ($\approx 15-20 \mu\text{m}$). Ταυτοποιείται η ύπαρξη λεπτόκοκκου μπαινιτικού φερρίτη, ο οποίος αποτελεί την βασική φάση της μπαινιτικής μικροδομής, με την μορφή λεπτών, επιμηκυμένων πλακιδίων. Επίσης ανιχνεύονται και καρβίδια του σιδήρου (κυρίως σεμεντίτης Fe_3C), τα οποία εντοπίζονται στα όρια των κόκκων.

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από την εξέταση των δοκιμίων με εφαρμογή της μεθόδου Περίθλασης Ακτίνων "Χ" (XRD). Σε όλες τις περιπτώσεις ανιχνεύονται οι χαρακτηριστικές κορυφές χωροκεντρωμένου (bcc) σιδήρου (Σχήμα 10).

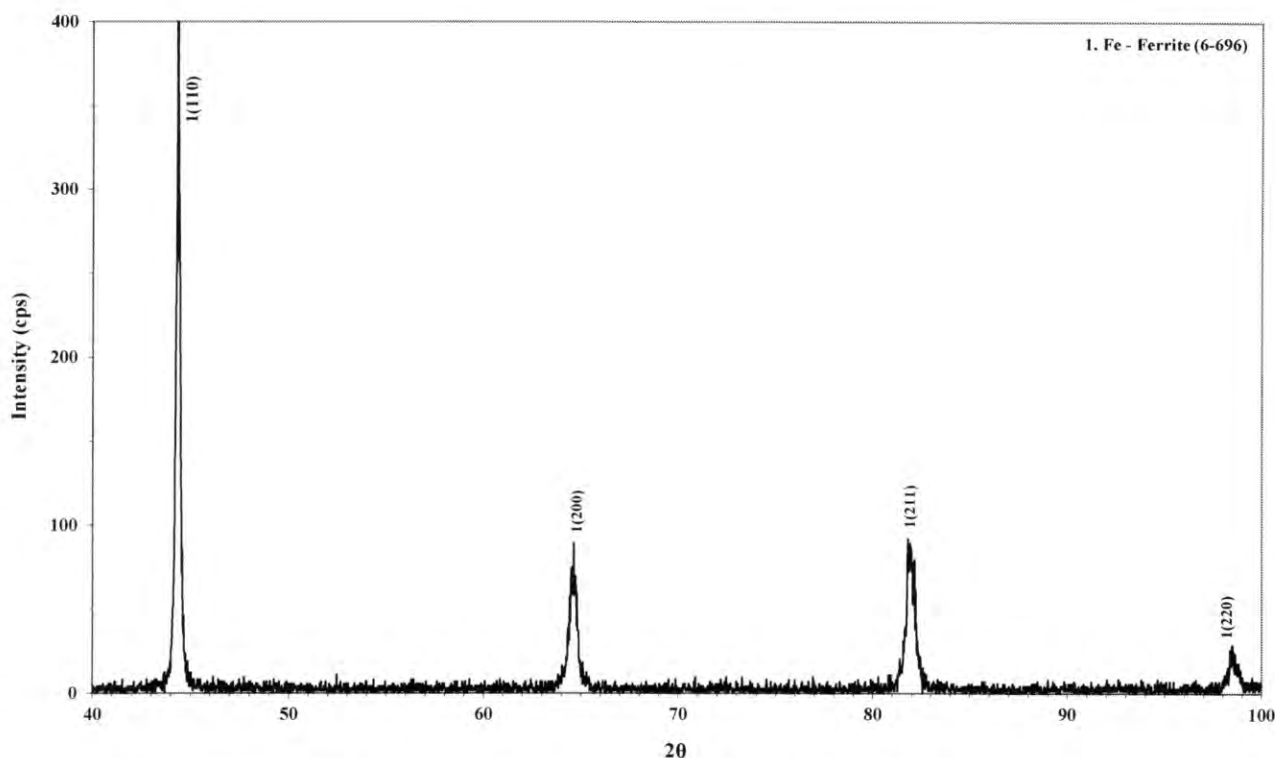
Επίσης τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων, επιβεβαίωσαν τις παρατηρήσεις που προέκυψαν από την μεταλλογραφική εξέταση στο Οπτικό Μικροσκόπιο και στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης. Σε όλες τις περιπτώσεις η μέση τιμή της σκληρότητας, σε υγιή περιοχή του παραληφθέντος δείγματος, η οποία δεν φαίνεται να είχε υποστεί μηχανική καταπόνηση, ήταν της τάξης των 165-170 Vickers.



Εικόνα 28: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "Κ1α"



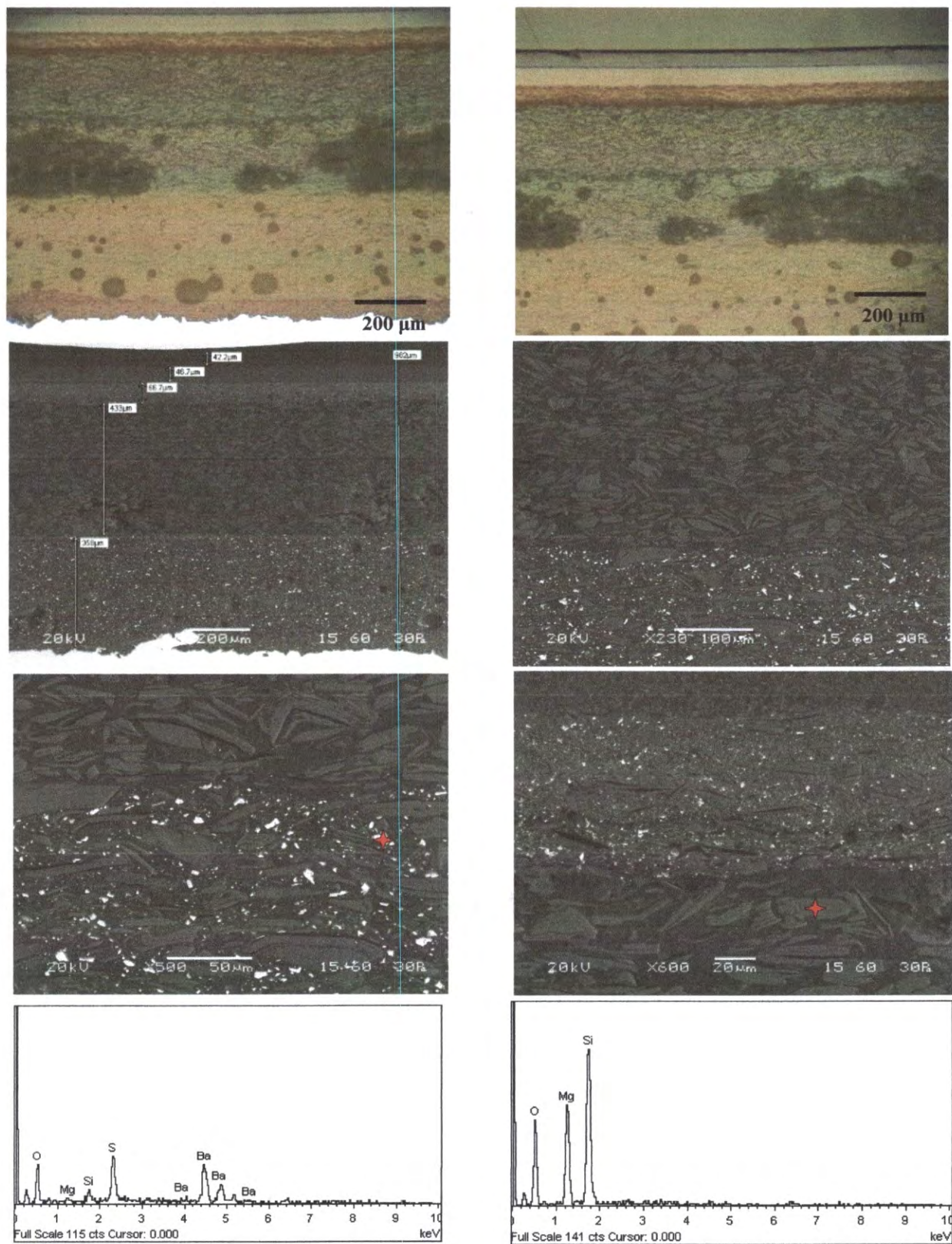
Εικόνα 29: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "Κ1α"



Σχήμα 10: Ακτινοδιάγραμμα XRD δείγματος “K1α”

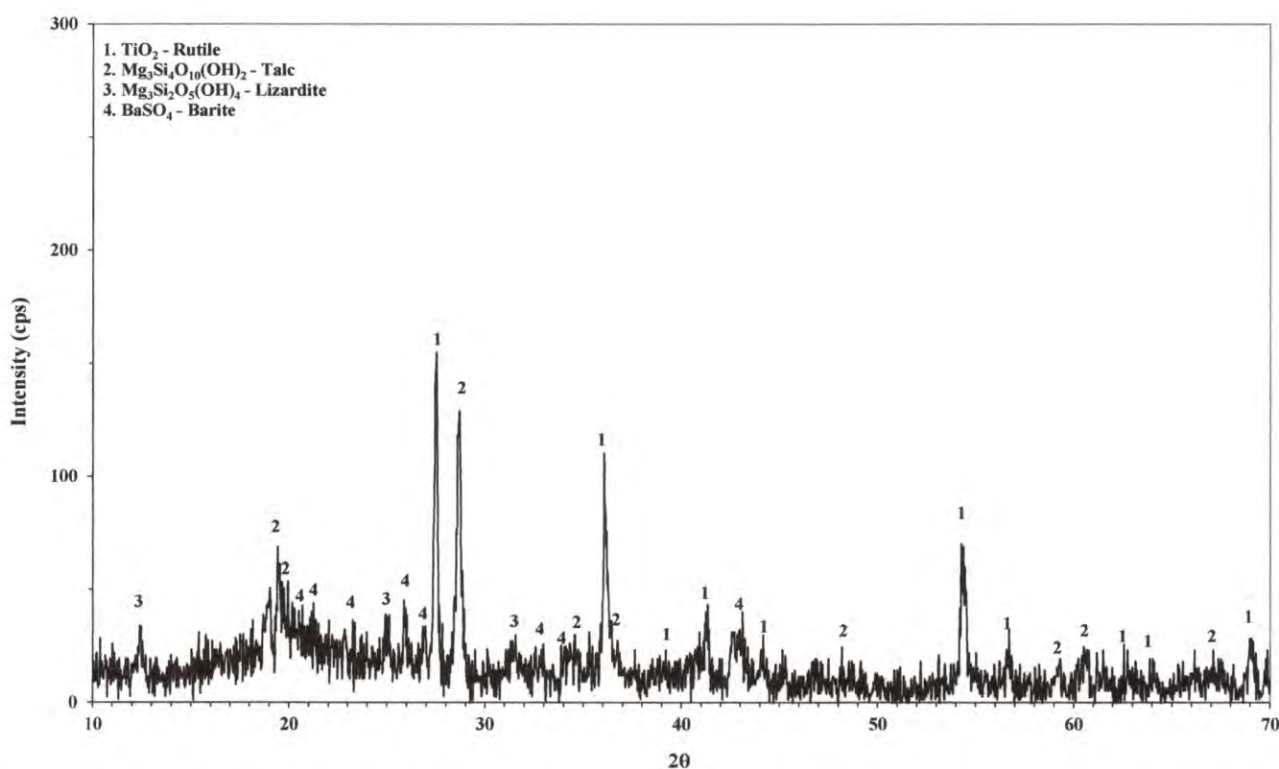
Στην **Εικόνα 30** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση της αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης στο Οπτικό και στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις, μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται ότι πρόκειται για την ίδια αντιδιαβρωτική επικάλυψη, με τα ίδια δομικά χαρακτηριστικά, που ανιχνεύτηκαν και στην περίπτωση των Δειγμάτων “H1” και “H2”.

Το συνολικός πάχος της οργανικής επικάλυψης είναι της τάξης των 970-980 μm . Αποτελείται από πέντε στρώματα. Το πρώτο στρώμα, “Αστάρι - Primer”, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το χάλυβα, το δεύτερο στρώμα, η “Ενδιάμεση Στρώση - Intermediate Coat”, το τρίτο και το τέταρτο στρώμα, τα οποία είναι η “Τελική Διακοσμητική Στρώση - Topcoat), ενώ το τελευταίο πέμπτο στρώμα είναι το “Anti-Graffiti Coat”.



Εικόνα 30: Μικρογραφίες OM, SEM και αναλύσεις EDS οργανικής επικάλυψης Δείγματος "K1a"

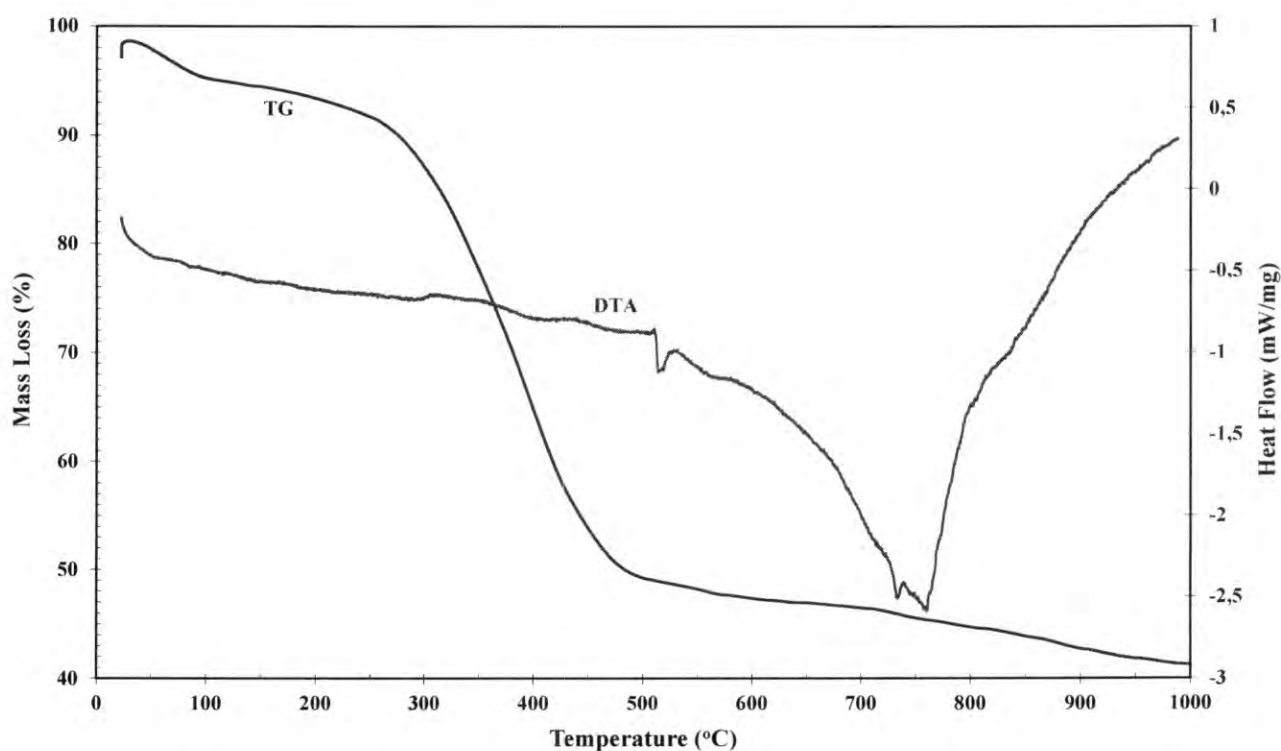
Το 1^ο στρώμα (primer) εμφανίζεται περισσότερο "τραχύ", με έντονη παρουσία fillers, η ενδιάμεση στρώση είναι περισσότερο ομοιογενής και μεγάλου πάχους, τα topcoat εμφανίζονται με πιο λεία υφή και λιγότερα fillers και τέλος το anti-graffiti coat, ένα πολύ λεπτό στρώμα, σχεδόν σαν film. Ανιχνεύτηκαν διάφοροι τύποι ανόργανων πληρωτικών προσθέτων (fillers), γεγονός το οποίο επιβεβαιώθηκε και από τα αποτελέσματα της μεθόδου Περίθλασης Ακτίνων "Χ" (Σχήμα 11). Τα κύρια ανιχνευόμενα ορυκτολογικά συστατικά είναι TiO_2 (Rutile), $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (Talc), $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (Lizardite) και BaSO_4 (Barite).



Σχήμα 11: Ακτινοδιάγραμμα XRD αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης Δείγματος "Κ1α"

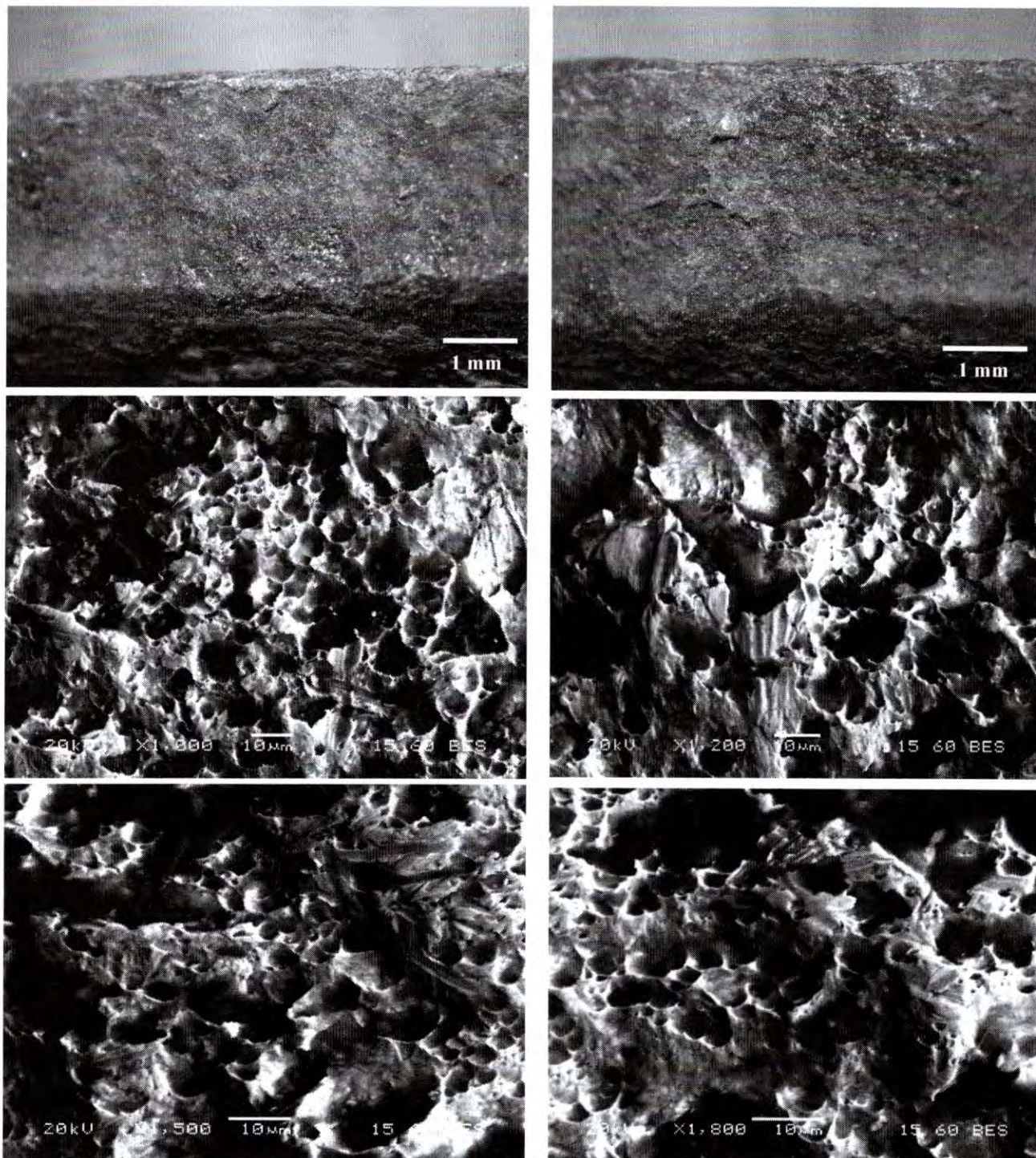
Στο Σχήμα 12 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα της εξέτασης της οργανικής αντιδιαβρωτικής επικάλυψης μέσω διαφορικής θερμικής ανάλυσης (TG-DTA), τα οποία είναι παραπλήσια με τα αντίστοιχα των Δειγμάτων "Η1" και "Η2". Η

υπό εξέταση οργανική επικάλυψη παρουσιάζει θερμική σταθερότητα μέχρι το θερμοκρασιακό εύρος των 200 °C, ενώ η έντονη αποικοδόμησή της ξεκινάει από την θερμοκρασία των 250 °C και ολοκληρώνεται στην θερμοκρασιακή περιοχή των 450 °C, όπου παρατηρείται μία συνολική απώλεια μάζας της τάξης του 45%.



Σχήμα 12: Διαφορική θερμική ανάλυση αντιδιαβρωτικής επικάλυψης Δείγματος “Κ1α”

Στην **Εικόνα 31** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση της επιφάνειας θραύσεως του Δείγματος “Κ1α” σε Στερεοσκοπικό και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης. Τα αποτελέσματα συμπίπτουν με τα αντίστοιχα των Δειγμάτων “Η1” και “Η2”, καθώς τα ανιχνευόμενα μικρογραφικά χαρακτηριστικά της θραυσιγενούς επιφάνειας υποδεικνύουν ότι το υλικό υπέστη σημαντική πλαστική παραμόρφωση πριν από τη θραύση (βασικό γνώρισμα της όλκιμης θραύσης).



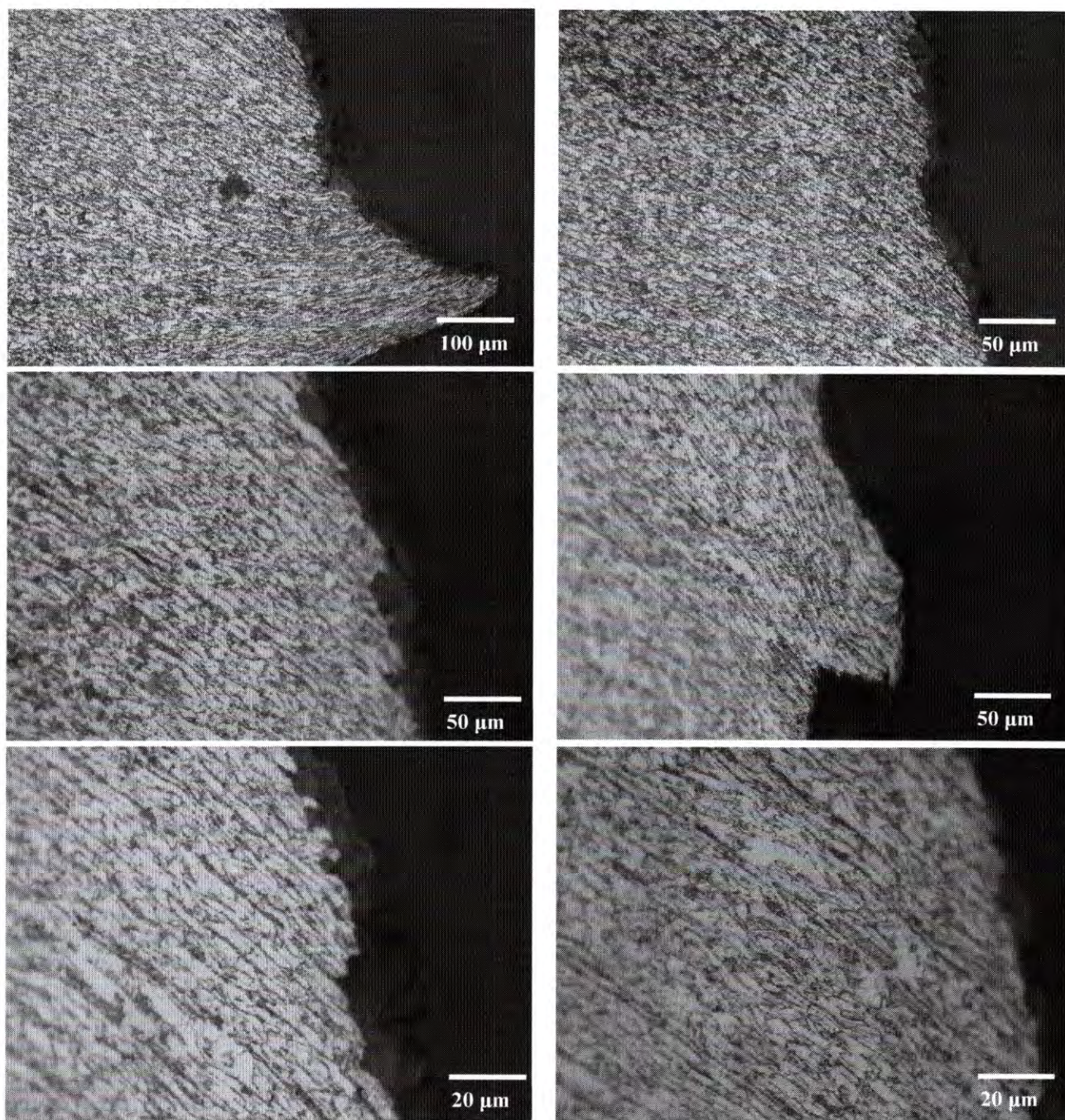
Εικόνα 31: Μακρο/μικρογραφίες στερεοσκοπικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης επιφάνειας θραύσης δείγματος "Κ1α"



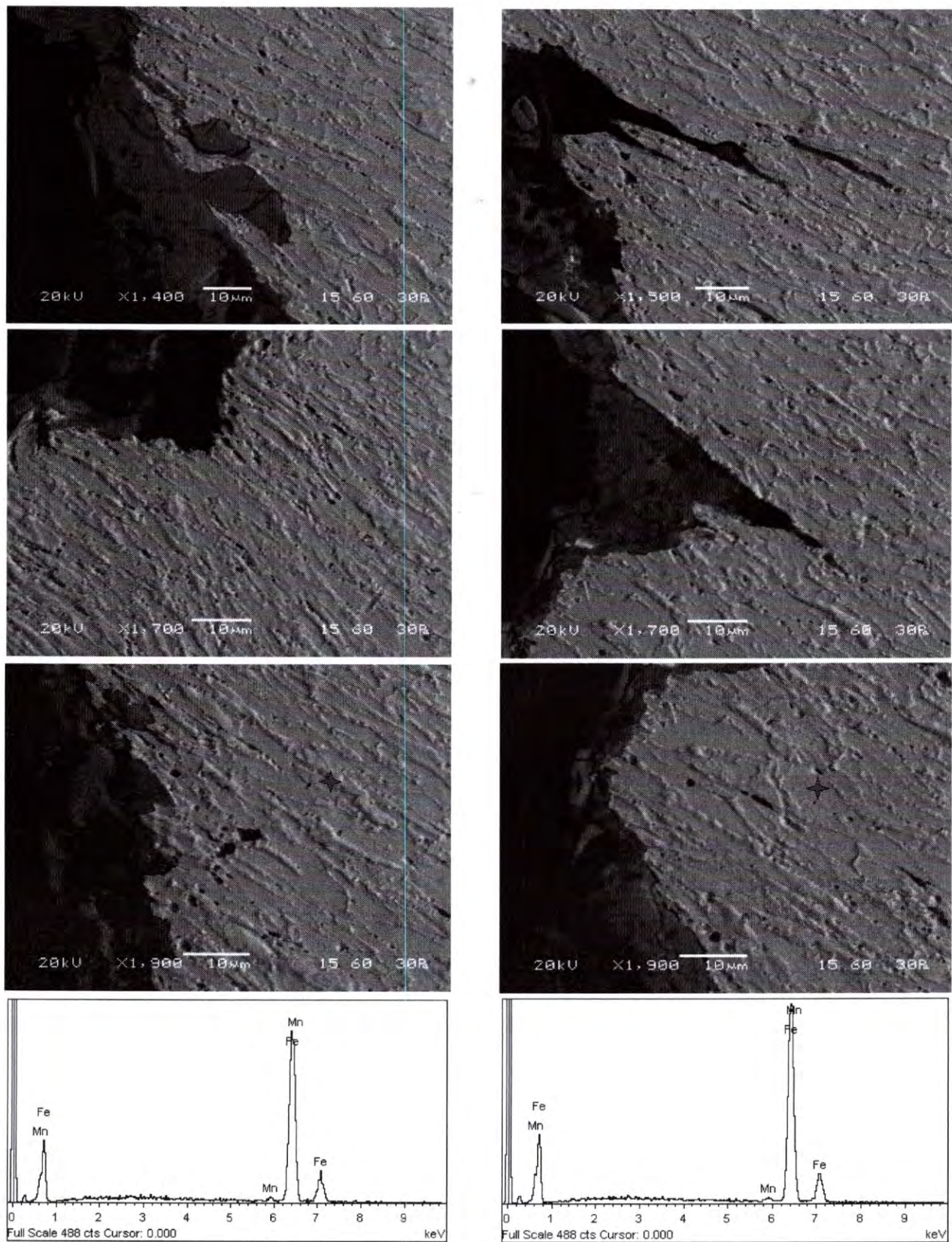
Σε όλες τις περιπτώσεις ανιχνεύονται, σε όλη την έκταση της επιφάνειας θραύσης, χαρακτηριστικές σφαιρικές ή ελλειπτικές μικροσκοπικές κοιλότητες (dimples), οι οποίες σχηματίζονται κατά την σταδιακή πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Από τον έλεγχο του μεγέθους των κοιλοτήτων προέκυψε ότι ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι σχετικά χαμηλός, καθώς το υλικό διαθέτει περισσότερο χρόνο ώστε να υποστεί πλαστική παραμόρφωση.

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από τις αντίστοιχες μικρογραφίες από την εξέταση των παραχθέντων στιλπνών τομών σε Μεταλλογραφικό Οπτικό Μικροσκόπιο και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS), οι οποίες παρουσιάζονται στις **Εικόνες 32-33**. Οι τομές έχουν πραγματοποιηθεί παράλληλα στην διεύθυνση της παραμόρφωσης-καταπόνησης με στόχο την διερεύνηση των αναπτυσσόμενων μικροδομικών χαρακτηριστικών της θραύσης. Και σε αυτή την περίπτωση δεν ανιχνευτήκαν χαρακτηριστικά που να υποδεικνύουν υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης (ανίχνευση διδυμίων, ζωνών διάτμησης, φαινόμενα τήξης ή ανακρυστάλλωσης, φαινόμενα spalling ή ύπαρξη έντονων ρωγματώσεων). Αντίθετα, παρατηρείται σημαντική πλαστική παραμόρφωση και επιμήκυνση των κόκκων του υλικού, χαρακτηριστικά που παραπέμπουν σε όλκιμη θραύση, χαμηλού ρυθμού καταπόνησης.

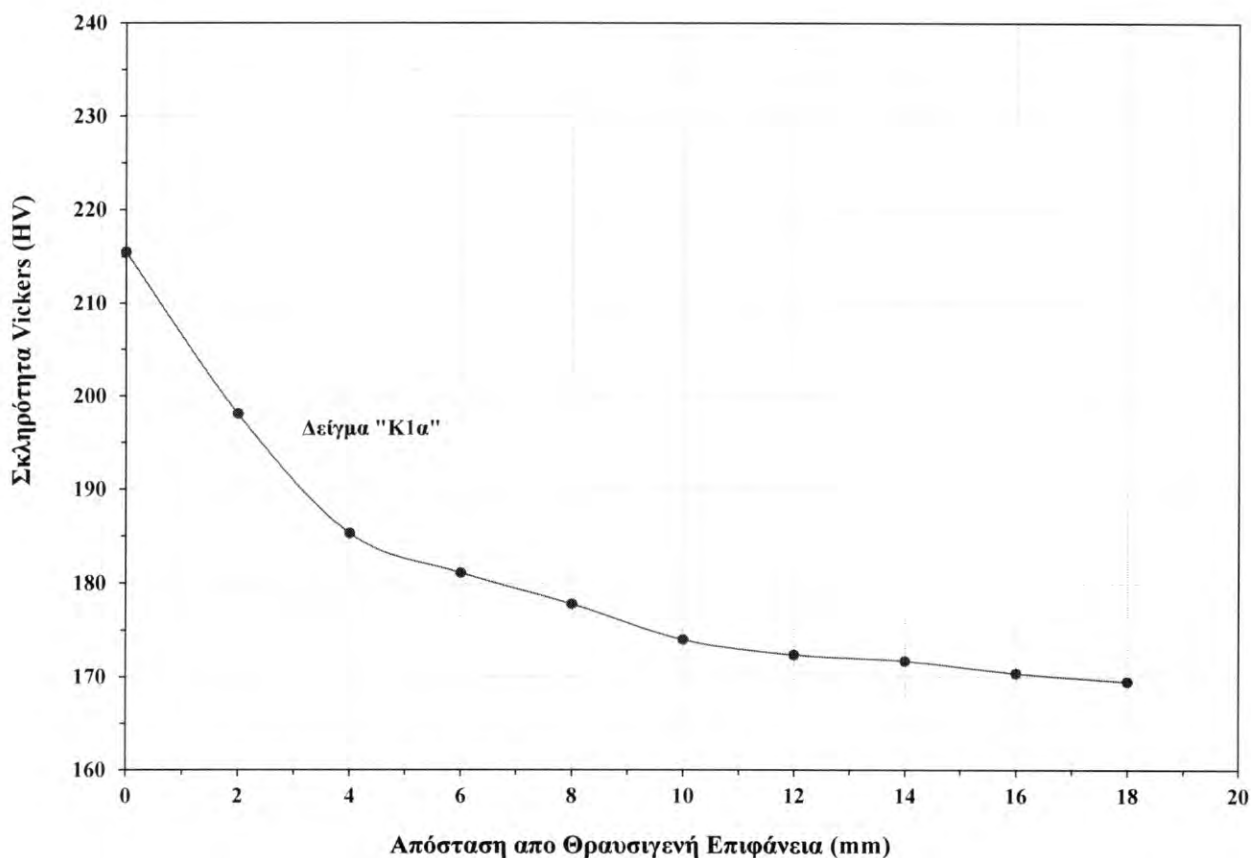
Η ενδοτράχυνση που υφίσταται το υλικό κατά την παραμόρφωσή του επιβεβαιώθηκε και από τις αντίστοιχες μετρήσεις σκληρότητας Vickers, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν παράλληλα (κατά μήκος) στην διεύθυνση της ανιχνευόμενης παραμόρφωσης (**Σχήμα 13**).



Εικόνα 32: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος “Κ1α” στην περιοχή της θραύσης



Εικόνα 33: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "Κ1α"



Σχήμα 13: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων Vickers παράλληλα στην διεύθυνση παραμόρφωσης Δείγματος "Κ1α"

Επισημαίνεται ότι η μέση τιμή της σκληρότητας Vickers, σε υγιή περιοχή του παραληφθέντος δείγματος, η οποία δεν φαίνεται να είχε υποστεί μηχανική καταπόνηση, ήταν της τάξης των 165-170 Vickers. Λόγω της αναπτυσσόμενης πλαστικής παραμόρφωσης στην θραυσιγενή επιφάνεια και της παρατηρούμενης επιμήκυνσης των κόκκων προκαλείται το φαινόμενο της ενδοτράχυνσης, γεγονός το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την τοπική αύξηση της αντοχής-σκληρότητας του υλικού. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η αύξηση της σκληρότητας στην ζώνη θραύσης και σε αυτή την περίπτωση είναι της τάξης του 25%.

3.4 Χαρακτηρισμός Δείγματος "Κ1β"

Το υπό εξέταση Δείγμα "Κ1β" αποσπάστηκε, από το δεξιό πλευρικό τμήμα του τμήματος-θραύσματος της οροφής του Θαλάμου Μηχανοδήγησης (Εικόνα 34).



Εικόνα 34: Δείγμα "Κ1β" (Κόκπιτ 1β) από την δεξιά πλευρά της οροφής του Θαλάμου Μηχανοδήγησης

Κατά τον εργαστηριακό έλεγχο πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες δοκιμές:

- ✓ Έλεγχος Μικροδομής στο Οπτικό Μικροσκόπιο
- ✓ Έλεγχος Μικροδομής και Μικροανάλυση σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης
- ✓ Έλεγχος Σκληρότητας Vickers
- ✓ Περίθλαση Ακτίνων Χ
- ✓ Διαφορική Θερμική Ανάλυση Οργανικής Αντιδιαβρωτικής Επικάλυψης

Αρχικά εξετάστηκε μια υγιής περιοχή του παραληφθέντος δείγματος, η οποία δεν φαίνεται να είχε υποστεί μηχανική καταπόνηση και έφερε πλήρως την οργανική αντιδιαβρωτική επικάλυψη, με στόχο την μελέτη των χημικών και δομικών χαρακτηριστικών, τόσο του μεταλλικού υποστρώματος όσο και της επικάλυψης.

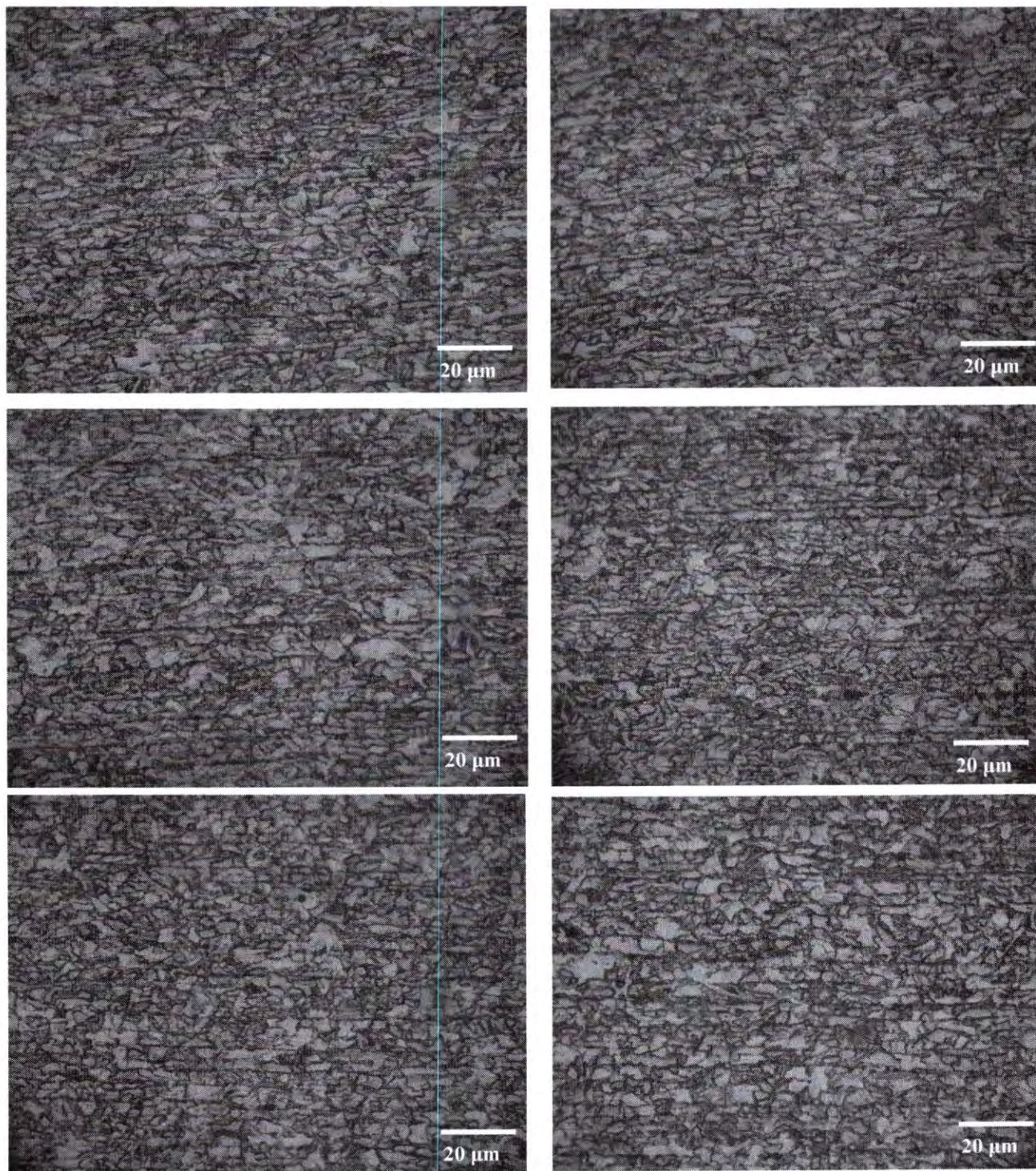


Στις **Εικόνες 35 και 36** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση των παραχθέντων στιλπνών τομών σε Μεταλλογραφικό Οπτικό Μικροσκόπιο και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις, μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS).

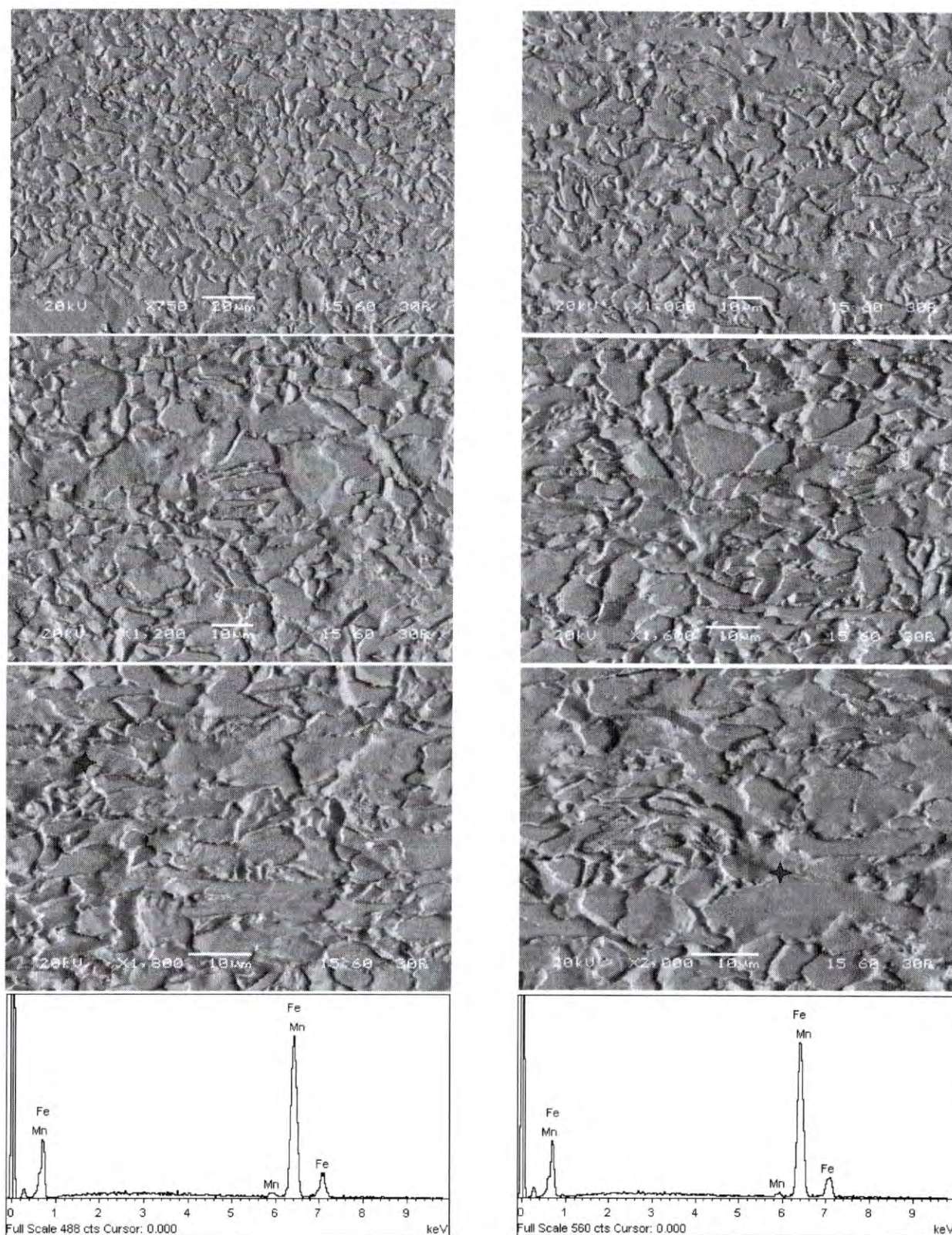
Και σε αυτή την περίπτωση επιβεβαιώνεται ότι πρόκειται για τον ίδιο τύπο χάλυβα που ανιχνεύτηκε στο κύριο σώμα της Ηλεκτράμαξας στην περιοχή της αποκόλλησης (Δείγματα “H1” και “H2”). Είναι ο ίδιος φερριτο-μπαινιτικός χάλυβας, χαμηλής κραμάτωσης, σχετικά χαμηλού ποσοστού άνθρακα ($\approx 0.25\%$), ο οποίος περιέχει περίπου 1.6% Mn. Το ποσοστό του ανιχνευόμενου προευντηκτοειδούς φερρίτης είναι της τάξης του 70% , το δε μέσο μέγεθος των κόκκων του είναι της τάξης των $15-20\ \mu\text{m}$. Ταυτόχρονα ανιχνεύτηκε και λεπτόκοκκος μπαινιτικός φερρίτης, ο οποίος αποτελεί την βασική φάση της μπαινιτικής μικροδομής, με την μορφή λεπτών, επιμηκυμένων πλακιδίων. Τα περιεχόμενα καρβίδια του σιδήρου (κυρίως σεμεντίτης Fe_3C), ανιχνεύτηκαν να αναπτύσσονται περικρυσταλλικά, στα όρια των κόκκων.

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από την εξέταση των δοκιμίων με εφαρμογή της μεθόδου Περίθλασης Ακτίνων “Χ” (XRD). Σε όλες τις περιπτώσεις ανιχνεύονται οι χαρακτηριστικές κορυφές χωροκεντρωμένου (bcc) σιδήρου (**Σχήμα 14**).

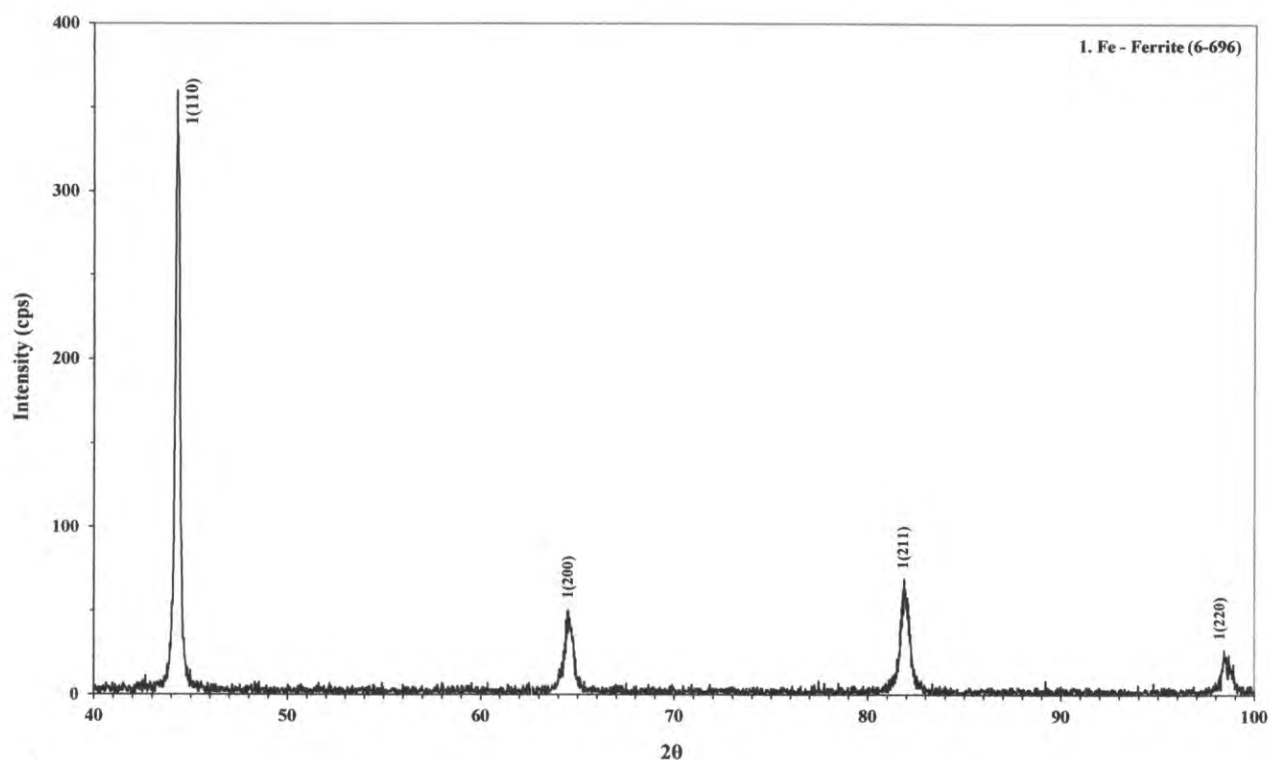
Οι παρατηρήσεις που προέκυψαν από την μεταλλογραφική εξέταση στο Οπτικό Μικροσκόπιο και στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης επιβεβαιώθηκαν και από τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων Vickers. Σε όλες τις περιπτώσεις η μέση τιμή της σκληρότητας, σε υγιή περιοχή του παραληφθέντος δείγματος, η οποία δεν φαίνεται να είχε υποστεί μηχανική καταπόνηση, ήταν της τάξης $165-170\ \text{Vickers}$.



Εικόνα 35: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος “Κ1β”

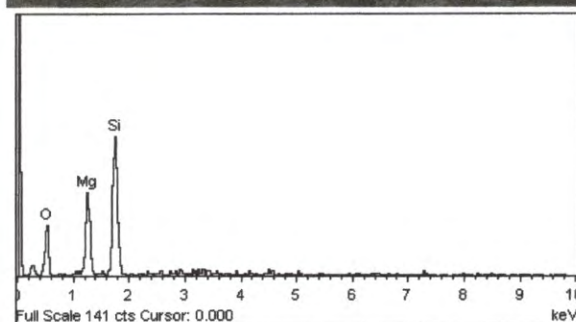
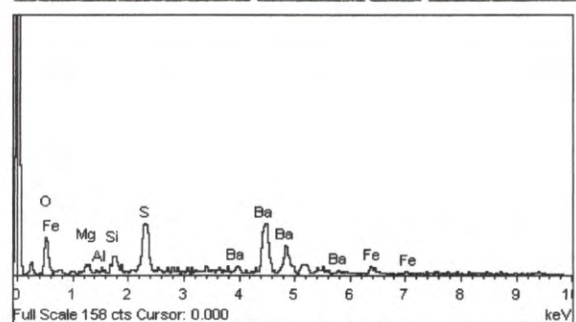
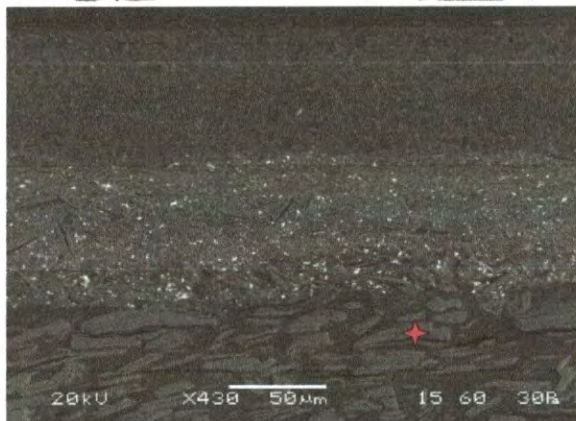
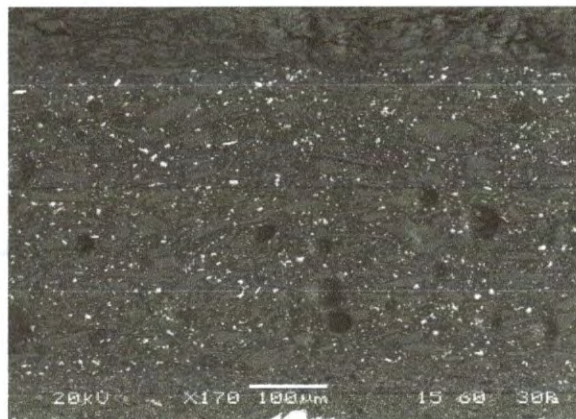
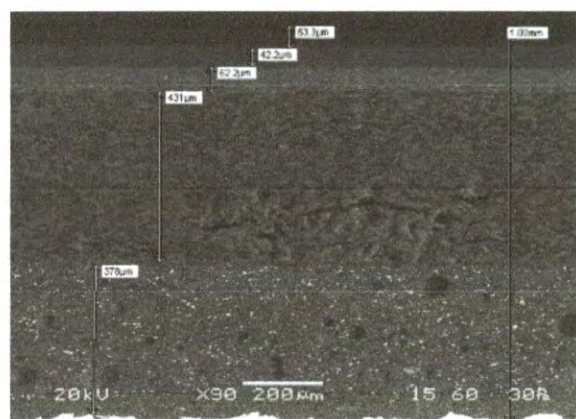
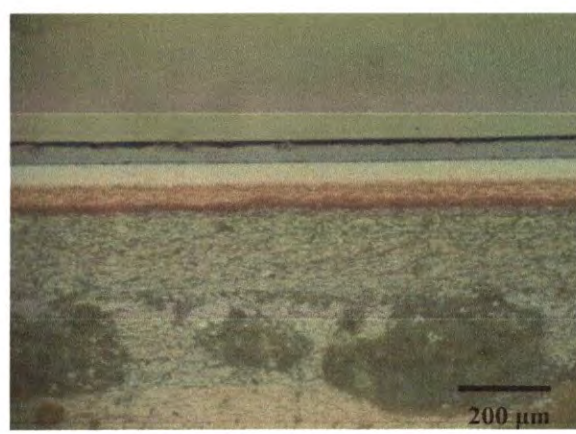
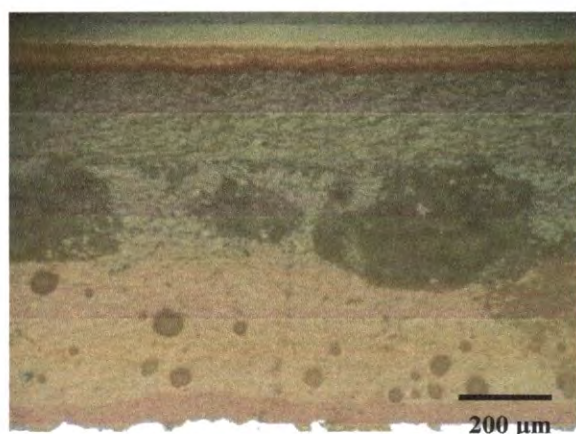


Εικόνα 36: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "K1β"



Σχήμα 14: Ακτινοδιάγραμμα XRD δείγματος “Κ1β”

Στην **Εικόνα 37** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση της αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης στο Οπτικό και στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις, μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS). Και σε αυτή την περίπτωση επιβεβαιώνεται ότι πρόκειται για την ίδια αντιδιαβρωτική επικάλυψη, με τα ίδια δομικά χαρακτηριστικά, που ανιχνεύτηκε στα Δείγματα “H1” και “H2”, από το κύριο σώμα της Ηλεκτράμαξας, στην περιοχή της αποκόλλησης. Το συνολικός πάχος της οργανικής επικάλυψης είναι της τάξης των 970-980 μm . Αποτελείται από πέντε στρώματα. Το πρώτο στρώμα, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το χάλυβα είναι το “Αστάρι - Primer”, το δεύτερο στρώμα είναι η “Ενδιάμεση Στρώση – Intermediate Coat”, το τρίτο και το τέταρτο στρώμα είναι η “Τελική Διακοσμητική Στρώση – Topcoat”, ενώ το τελευταίο πέμπτο στρώμα είναι το “Anti-Graffiti Coat”.



Εικόνα 37: Μικρογραφίες OM, SEM και αναλύσεις EDS οργανικής επικάλυψης Δείγματος "Κ1β"