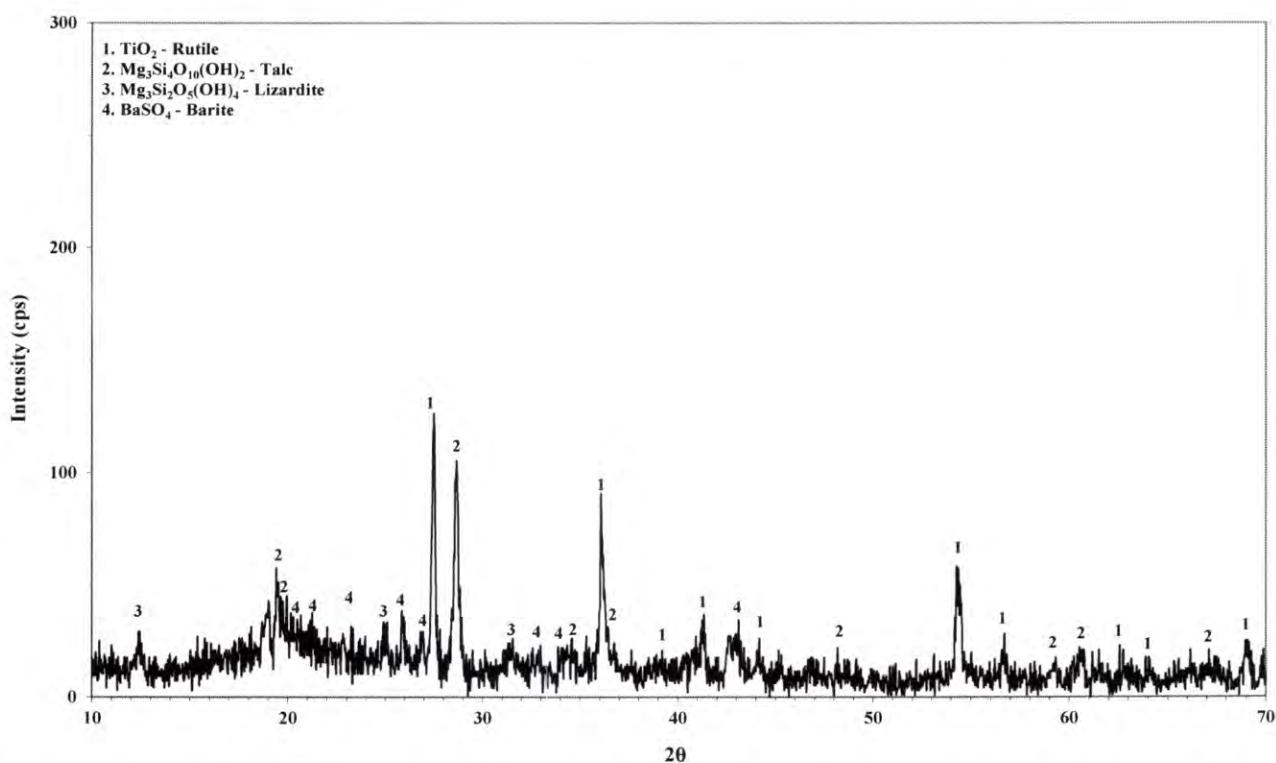


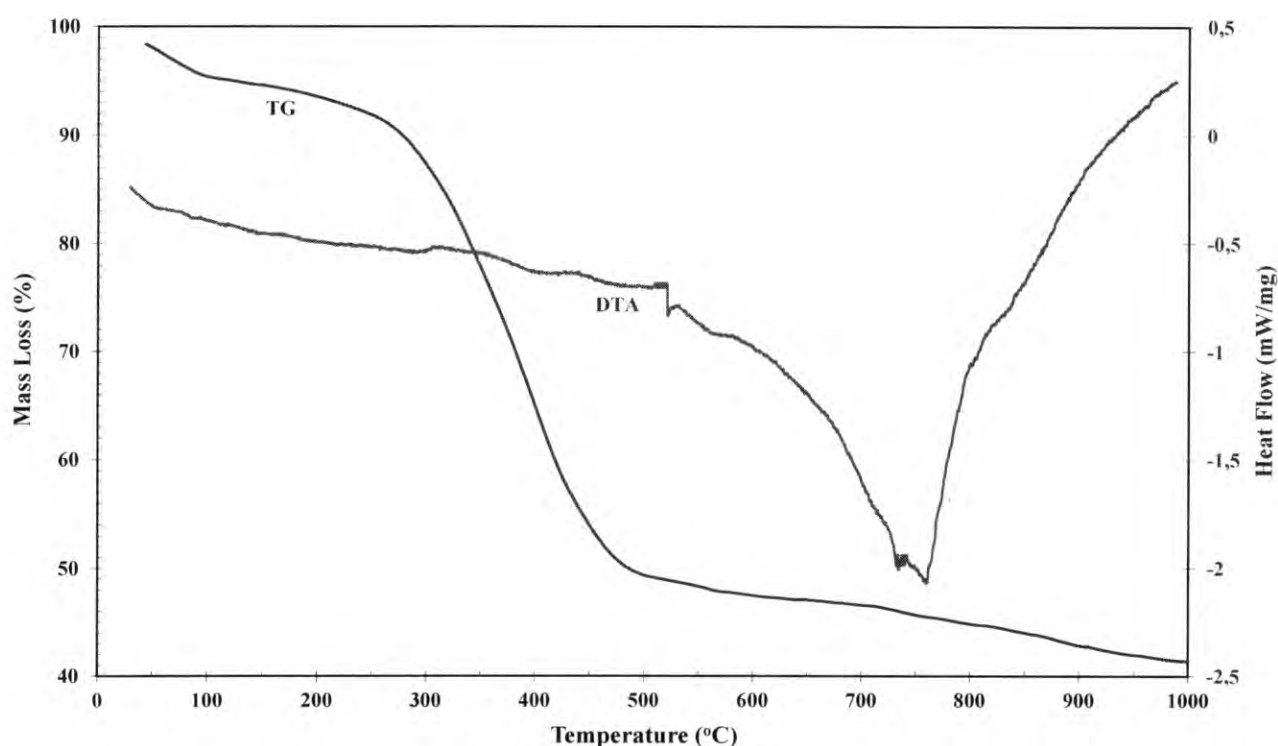
Το primer εμφανίζεται περισσότερο "τραχύ", με έντονη παρουσία fillers, η ενδιάμεση στρώση είναι περισσότερο ομοιογενής και μεγάλου πάχους, τα topcoat εμφανίζονται με πιο λεία υφή και λιγότερα fillers και τέλος το anti-graffiti coat με την μορφή πολύ λεπτού στρώματος, σχεδόν σαν film. Ανιχνεύτηκαν διάφοροι τύποι ανόργανων fillers, γεγονός το οποίο επιβεβαιώθηκε και από τα αποτελέσματα της μεθόδου Περίθλασης Ακτίνων "Χ" (Σχήμα 15). 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 15: Ακτινοδιάγραμμα XRD αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης Δείγματος "Κ1β"

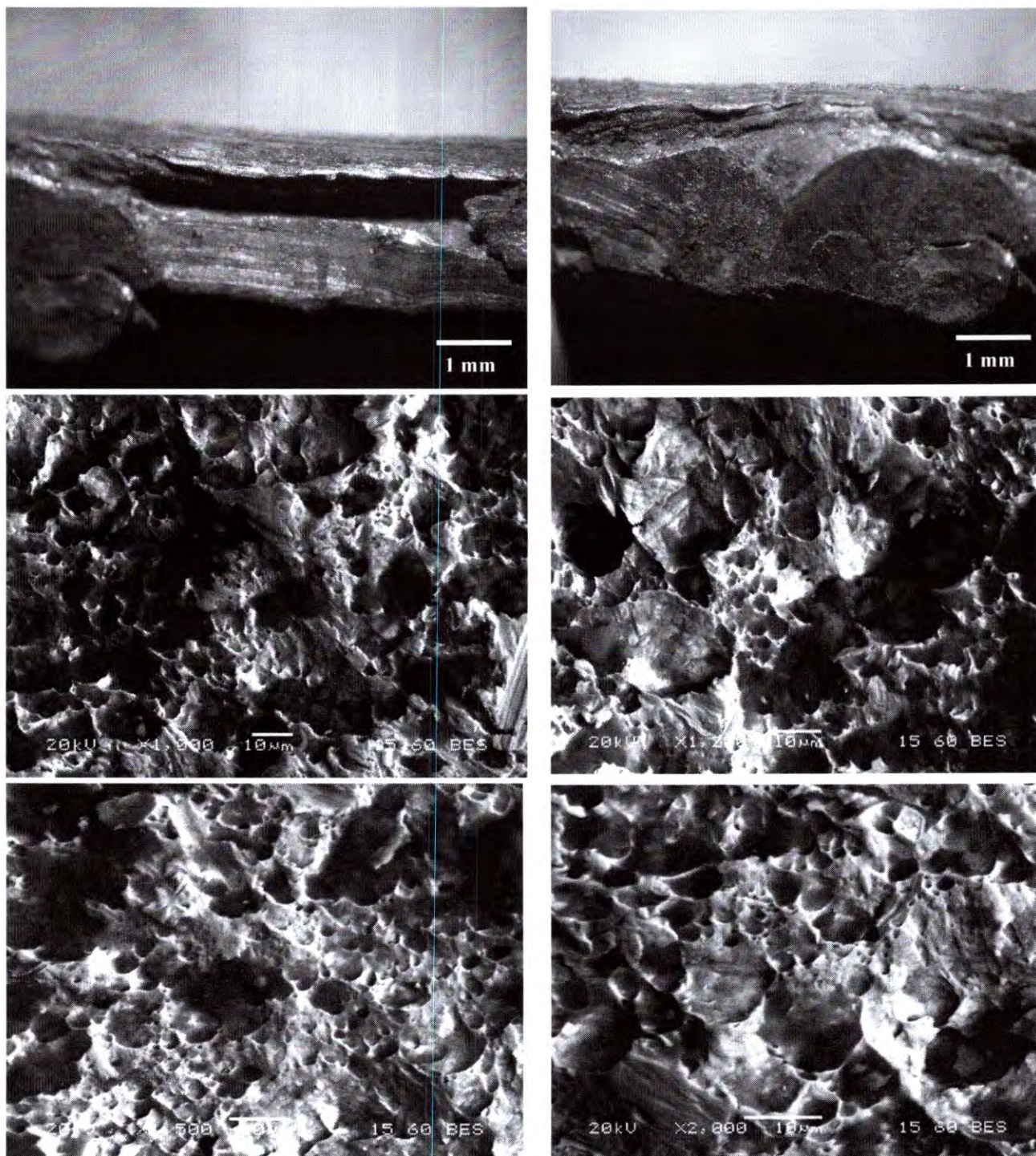
Στο Σχήμα 16 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα της εξέτασης της οργανικής αντιδιαβρωτικής επικάλυψης μέσω διαφορικής θερμικής ανάλυσης (TG-DTA), τα οποία είναι παραπλήσια με τα αντίστοιχα των Δειγμάτων "H1" και "H2". Και

σε αυτή την περίπτωση, 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 16: Διαφορική θερμική ανάλυση αντιδιαβρωτικής επικάλυψης Δείγματος “Κ1β”

Στην **Εικόνα 38** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση της επιφάνειας θραύσεως του Δείγματος “Κ1β” σε Στερεοσκοπικό και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης. Τα αποτελέσματα συμπίπτουν με τα αντίστοιχα των Δειγμάτων “Η1” και “Η2”, καθώς τα ανιχνευόμενα μικρογραφικά χαρακτηριστικά της θραυσίγενούς επιφάνειας υποδεικνύουν ότι το υλικό υπέστη σημαντική πλαστική παραμόρφωση πριν από τη θραύση (βασικό γνώρισμα της όλκιμης θραύσης).



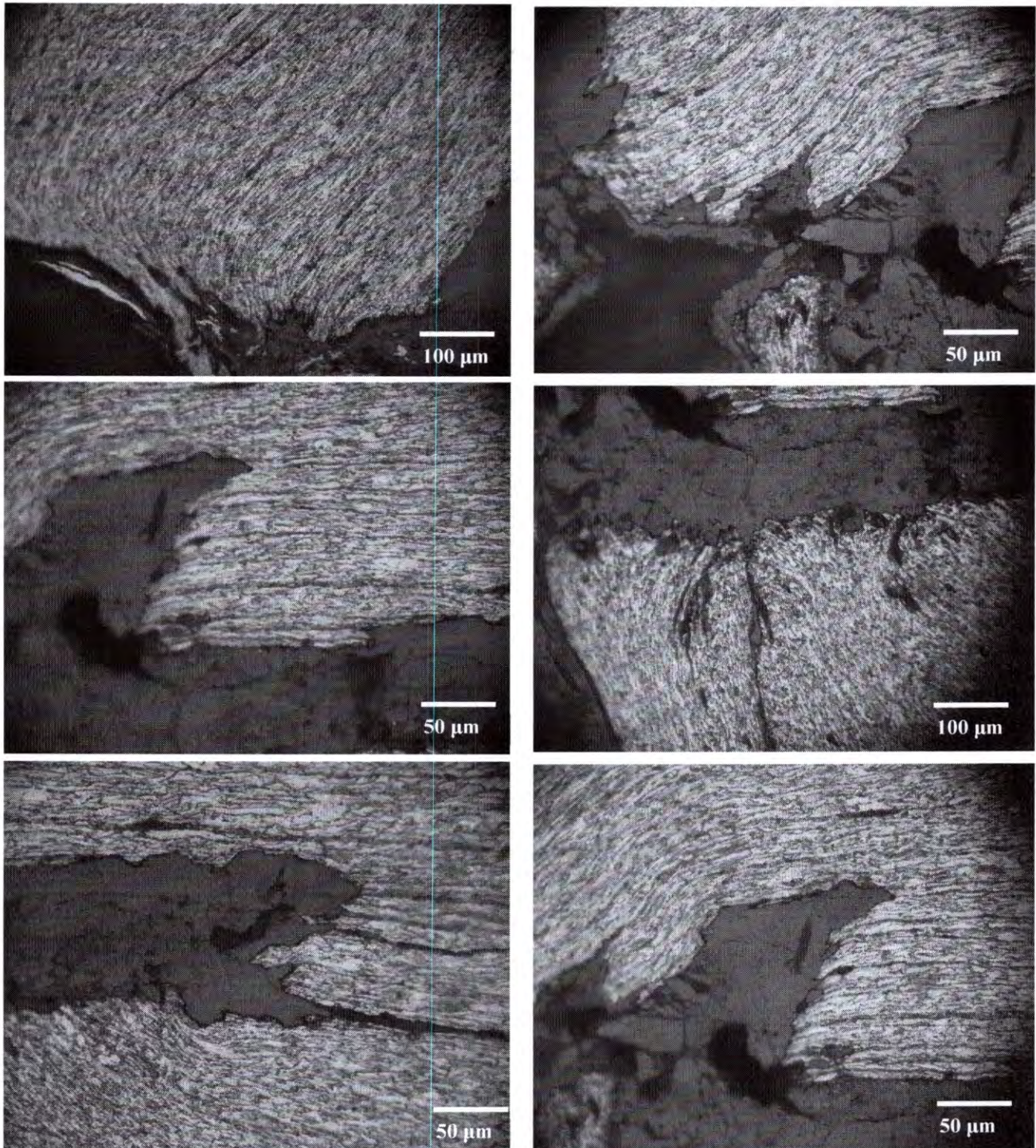
Εικόνα 38: Μακρο/μικρογραφίες στερεοσκοπικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης επιφάνειας θραύσης δείγματος "Κ1β"



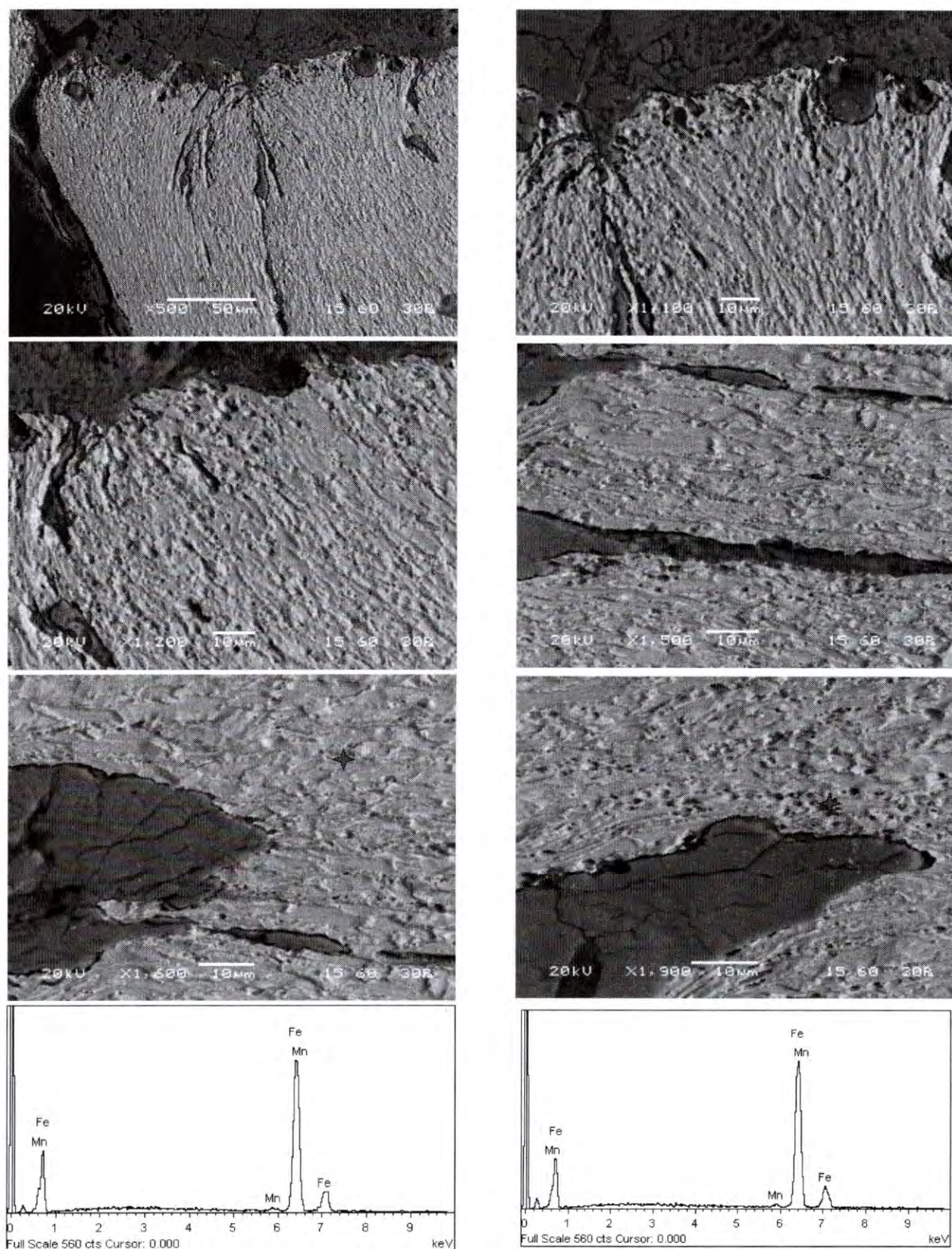
Σε όλες τις περιπτώσεις ανιχνεύονται, σε όλη την έκταση της επιφάνειας θραύσης, χαρακτηριστικές σφαιρικές ή ελλειπτικές μικροσκοπικές κοιλότητες (dimples), οι οποίες σχηματίζονται κατά την σταδιακή πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Αν το φορτίο εφαρμόζονταν με υψηλότερους ρυθμούς (σε συνθήκες υψηλής ταχύτητας 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 πιο τοπική και απότομη.

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από τις αντίστοιχες μικρογραφίες από την εξέταση των παραχθέντων στυλπνών 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 39-40**. Οι τομές έχουν πραγματοποιηθεί παράλληλα στην διεύθυνση της παραμόρφωσης-καταπόνησης με στόχο την διερεύνηση των αναπτυσσόμενων μικροδομικών χαρακτηριστικών της θραύσης.

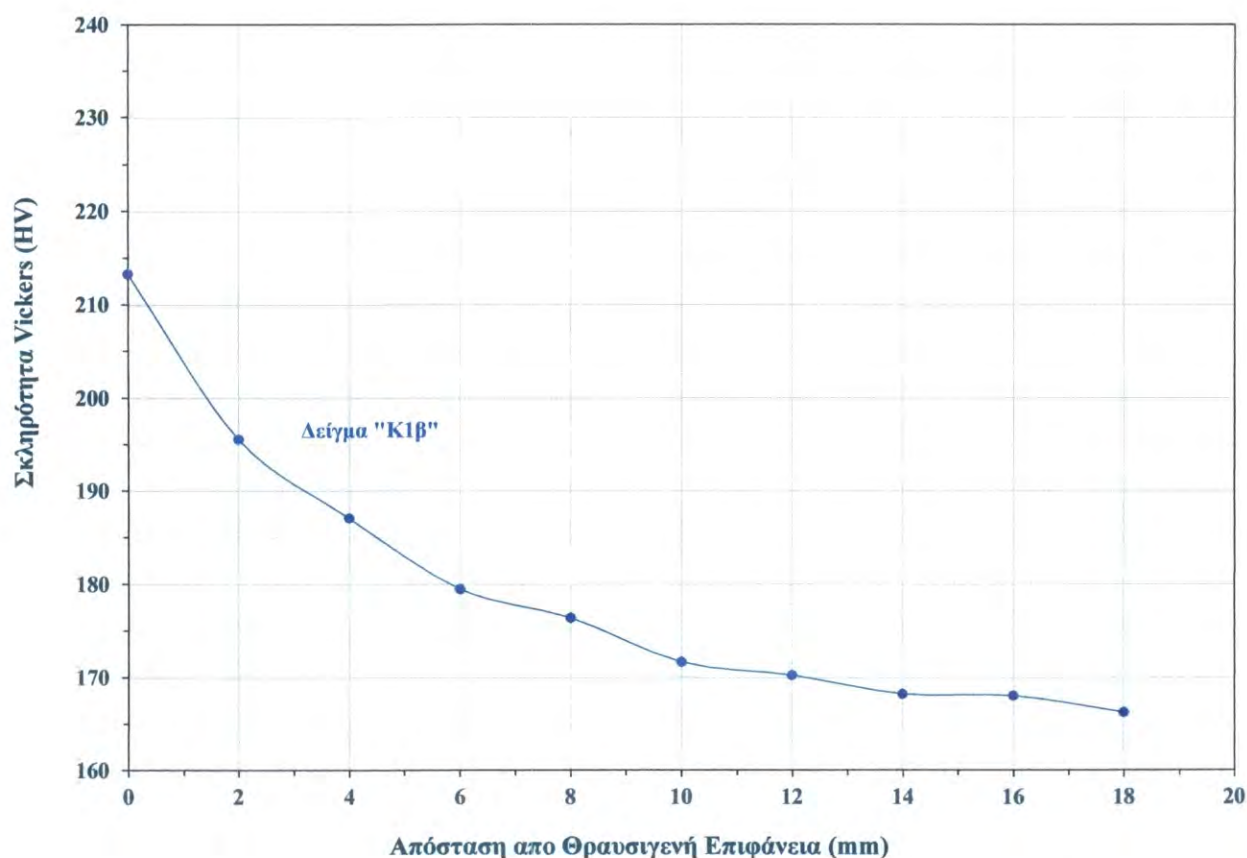
Και σε αυτή την περίπτωση δεν ανιχνευτήκαν χαρακτηριστικά που να υποδεικνύουν υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης (ανίχνευση διδυμίων, ζωνών διάτμησης, φαινόμενα τήξης ή ανακρυστάλλωσης, φαινόμενα spalling ή ύπαρξη έντονων ρωγματώσεων). Αντίθετα, παρατηρείται σημαντική πλαστική παραμόρφωση και επιμήκυνση των 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 17**).



Εικόνα 39: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος “Κ1β” στην περιοχή της θραύσης



Εικόνα 40: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "K1β"



Σχήμα 17: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων Vickers παράλληλα στην διεύθυνση παραμόρφωσης Δείγματος "Κ1β"

Η επιμήκυνση και άρα τα φαινόμενα ενδοτράχυνσης είναι περισσότερο έντονα στις περιοχές όπου το υλικό έχει υποστεί τη μεγαλύτερη παραμόρφωση, και κυρίως στα άκρα των δοκιμίων, όπου παρατηρείται και μείωση της διατομής (στην περιοχή της θραύσης). Στα σημεία αυτά, οι αναπτυσσόμενες διαταραχές στο κρυσταλλικό πλέγμα αρχίζουν να κινούνται και να συσσωρεύονται. Οι διαταραχές αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και λειτουργούν ως εμπόδια στην ολίσθηση των κόκκων, καθιστώντας την παραμόρφωση δυσκολότερη, με συνεπεία να προκαλείται αύξηση της σκληρότητας Vickers. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η αύξηση της σκληρότητας στην ζώνη θραύσης ήταν της τάξης του 25%.

3.5 Χαρακτηρισμός Δείγματος "K3"

Το υπό εξέταση Δείγμα "K3" αποσπάστηκε από θραύσμα, από το εμπρόσθιο τμήμα του Θαλάμου Μηχανοδήγησης, το οποίο έφερε το λογότυπο της εταιρείας και τον αριθμό της ηλεκτρομηχανής (Εικόνα 41).



Εικόνα 41: Δείγμα "K3" (Κόκπιτ) από το εμπρόσθιο τμήμα του Θαλάμου Μηχανοδήγησης, με το λογότυπο της εταιρείας και τον αριθμό της Ηλεκτρομηχανής (120 012)

Κατά τον εργαστηριακό έλεγχο πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες δοκιμές:

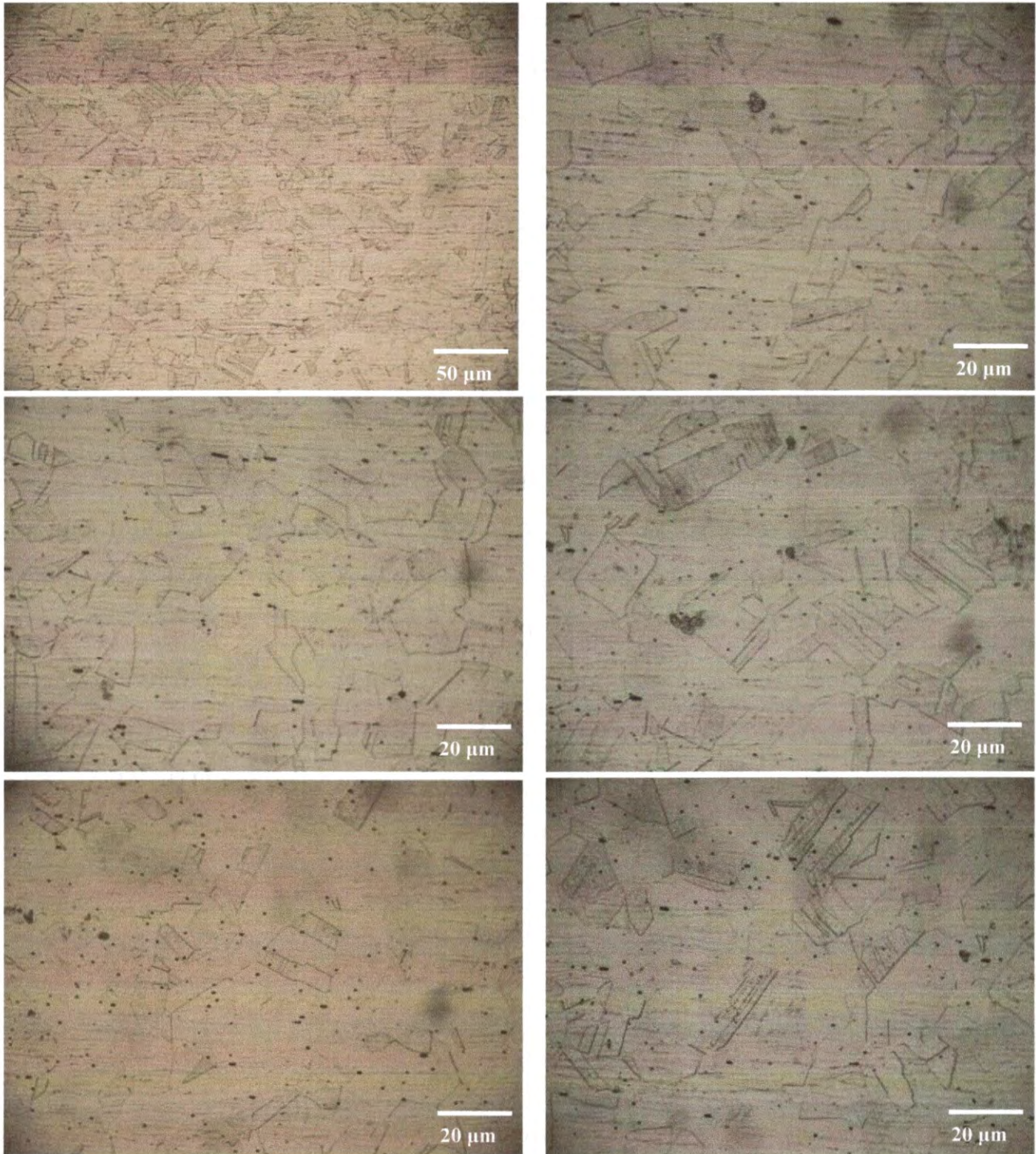
- ✓ Έλεγχος Μικροδομής στο Οπτικό Μικροσκόπιο
- ✓ Έλεγχος Μικροδομής και Μικροανάλυση σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης
- ✓ Έλεγχος Σκληρότητας Vickers
- ✓ Περίθλαση Ακτίνων Χ
- ✓ Διαφορική Θερμική Ανάλυση Οργανικής Αντιδιαβρωτικής Επικάλυψης



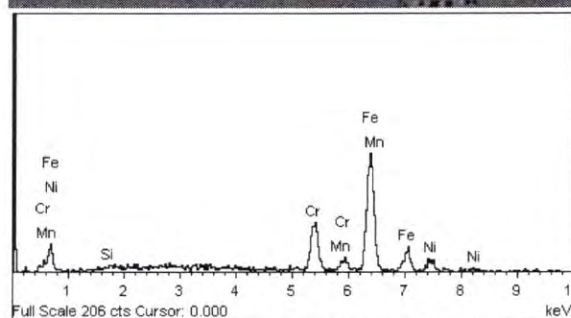
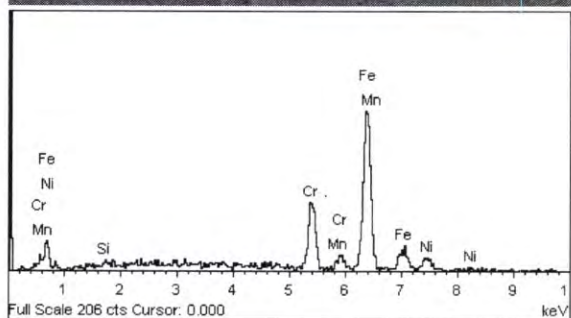
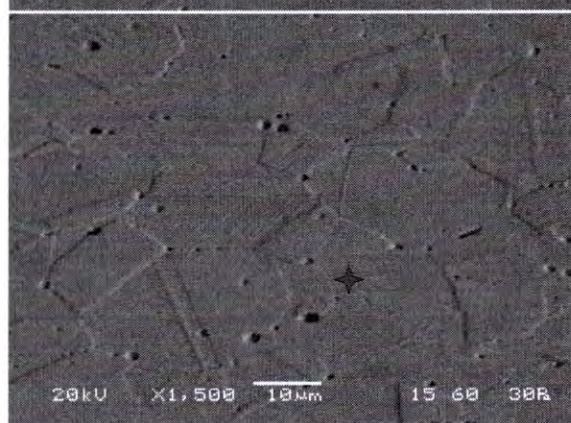
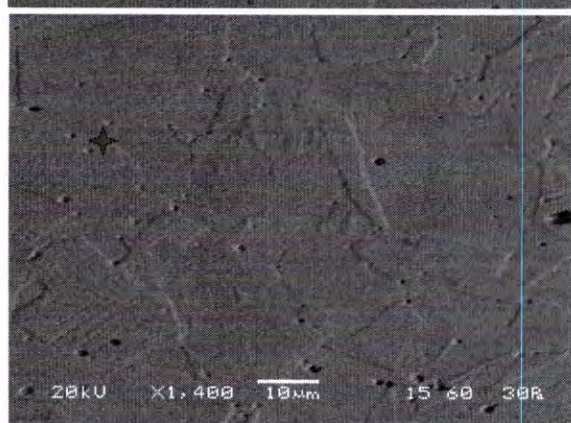
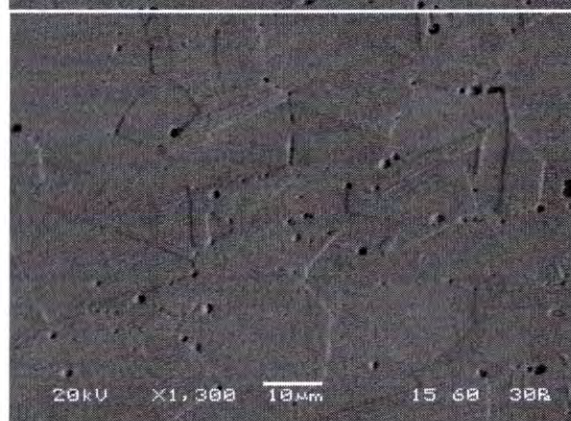
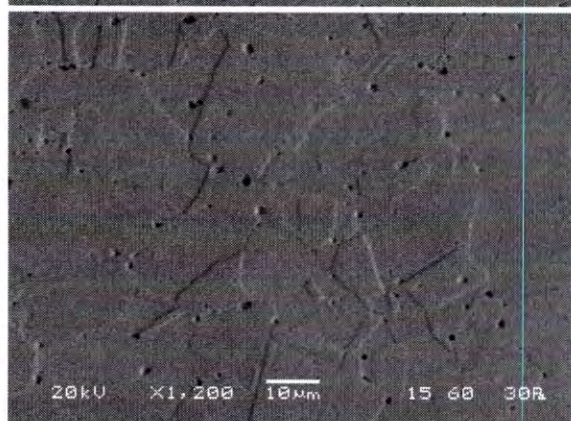
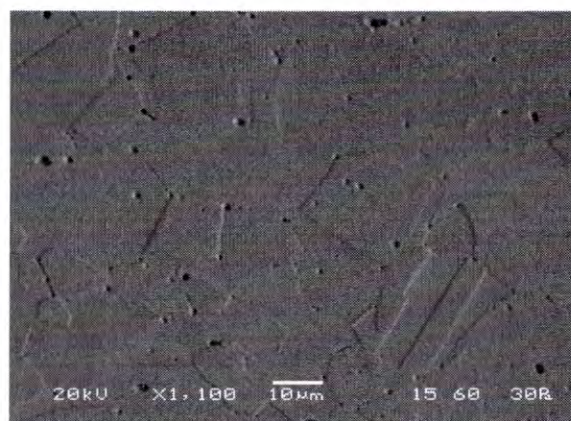
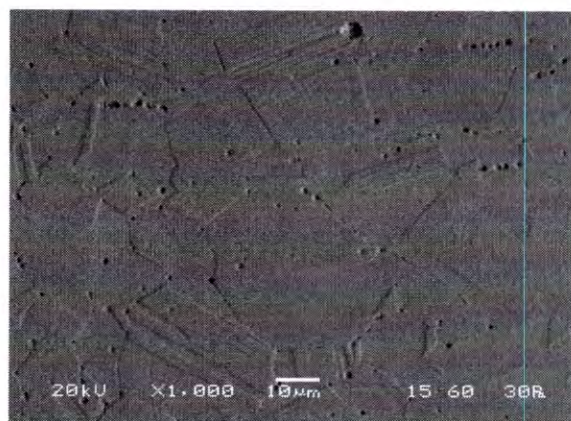
Αρχικά εξετάστηκε μια υγιάς περιοχή του παραληφθέντος δείγματος, η οποία δεν φαίνεται να είχε υποστεί μηχανική καταπόνηση και έφερε πλήρως την οργανική αντιδιαβρωτική επικάλυψη, με στόχο την μελέτη των χημικών και δομικών χαρακτηριστικών τόσο του μεταλλικού υποστρώματος όσο και της επικάλυψης. Στις **Εικόνες 42 και 43** 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).

Σε αυτή την περίπτωση πρόκειται για ανοξείδωτο ωστενιτικό χάλυβα, ο οποίος εκτός από χρώμιο περιέχει και νικέλιο της τάξης του 8-9%. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες (όπως οι AISI 304 ή AISI 316) χρησιμοποιούνται συστηματικά σε επιλεγμένα μέρη ηλεκτρομηχανών, κυρίως όταν απαιτούνται ιδιότητες αντοχής σε διάβρωση, θερμική σταθερότητα και καλή μηχανική συμπεριφορά. Ο ωστενιτικός χάλυβας δεν είναι το κυρίως δομικό υλικό του "σκελετού" της ηλεκτρομηχανής (που είναι συνήθως συγκολλητός ανθρακούχος χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης, όπως αυτός που ανιχνεύτηκε στα Δείγματα "H1", "H2", "K1α" και "K1β"), αλλά χρησιμοποιείται σε περιοχές που εκτίθενται σε υγρασία, καιρικές συνθήκες, ή απαιτούν ανθεκτικότητα & αισθητική.

Από τα αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων EDS προέκυψε ότι ο εν λόγω ανοξείδωτος χάλυβας, εκτός από σίδηρο, περιέχει χρώμιο ($\approx 18.0\%$), νικέλιο, ($\approx 8.5\%$), μαγγάνιο ($\approx 1.5\%$) και πυρίτιο ($\approx 0.7\%$). Η απουσία μολυβδαινίου υποδηλώνει ότι πιθανότητα πρόκειται για ανοξείδωτο ωστενιτικό χάλυβα AISI 304, ο οποίος παρουσιάζει όριο διαρροής της τάξης των 215 MPa, μέγιστη εφελκυστική αντοχή μεταξύ 550 και 750 MPa, και σημαντικά υψηλή ολκιμότητα ($\geq 40\%$).



Εικόνα 42: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "Κ3"



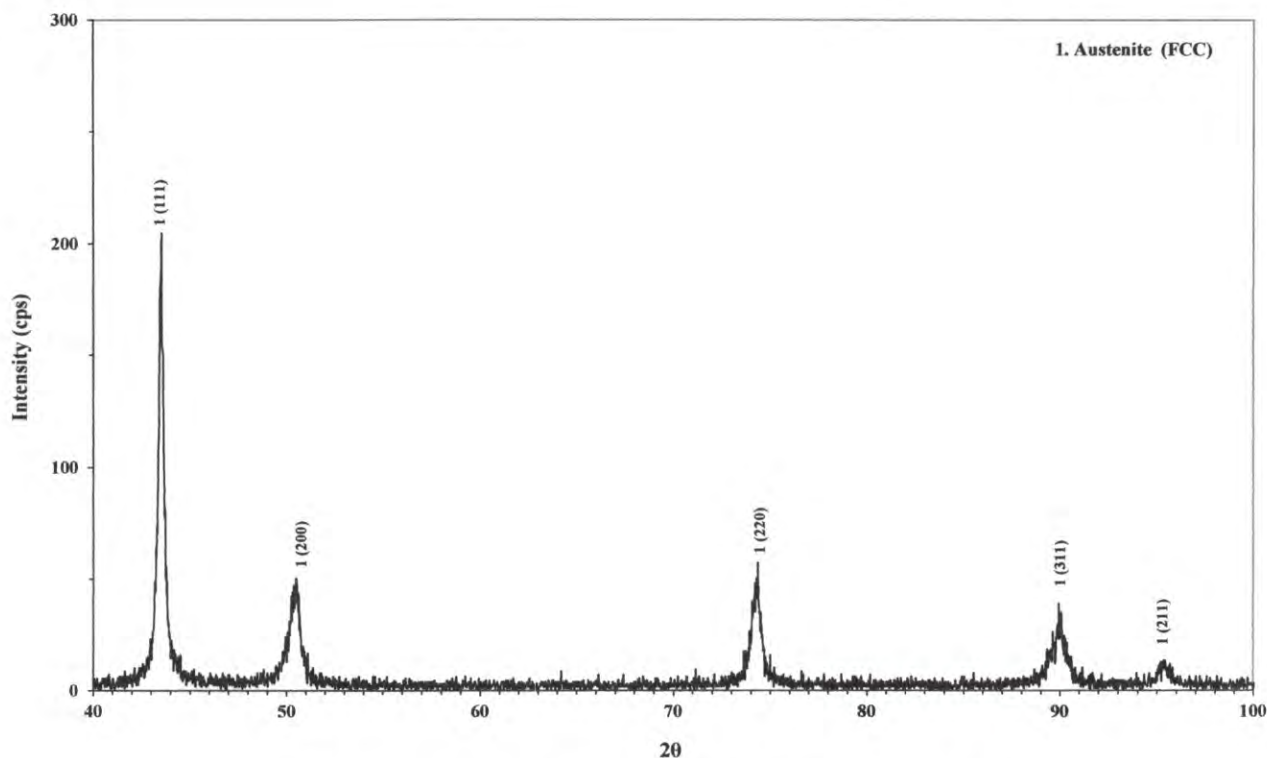
Εικόνα 43: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "K3"



Ανιχνεύτηκε πλήρης ωστενιτική δομή (απουσία φερρίτη). Η φάση του ωστενίτη (γ -Fe) είναι η κυρίαρχη φάση (δομή fcc - κυβικό εδροκεντρωμένο), η οποία εμφανίζεται με την μορφή ισοαξονικών κόκκων, μεγάλου σχετικά μεγέθους (30-50 μ m), κατά πάσα πιθανότητα λόγω ανακρυστάλλωσης. Το Cr και το Ni είναι πλήρως διαλυμένα στον ωστενίτη, σχηματίζοντας ομοιογενή στερεά διαλύματα. Επίσης ανιχνεύονται διδυμίες, εντός των κόκκων του ωστενίτη, με την μορφή επαναλαμβανόμενων ζωνών με ελαφρώς διαφορετικό προσανατολισμό από τον υπόλοιπο κόκκο, όπου το κρυσταλλικό πλέγμα παρουσιάζει συμμετρική ανάπτυξη σε σχέση με ένα κοινό επίπεδο. Η παρουσία των διδυμιών υποδεικνύει κατεργασία ανόπτησης κατά την παραγωγή και μορφοποίηση, ή παραμόρφωση εν ψυχρώ. Λόγω όμως της παρουσίας ισοαξονικών κόκκων ωστενίτη, οι οποίοι παρουσιάζουν περίπου ίδιο μέγεθος σε όλες τις κατευθύνσεις (δεν εμφανίζουν επιμήκυνση), η παρουσία των δίδυμων κρυστάλλων θα πρέπει να αποδοθεί σε θερμική κατεργασία ανόπτησης (annealing twins).

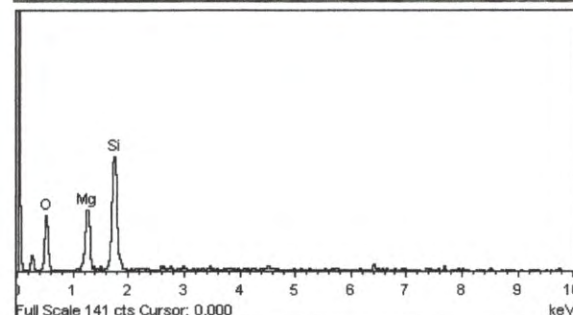
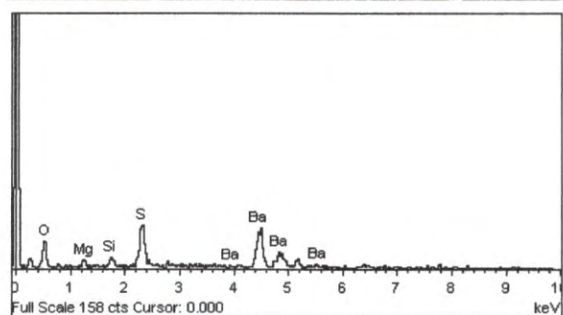
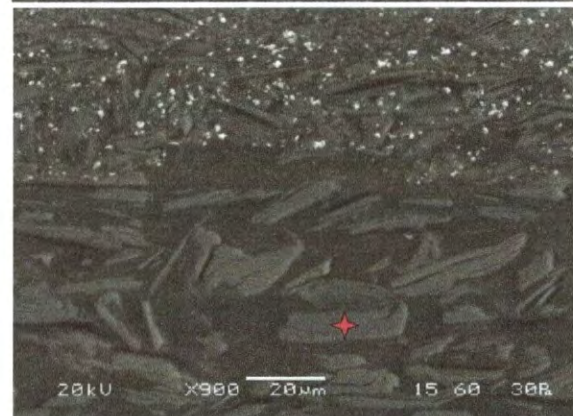
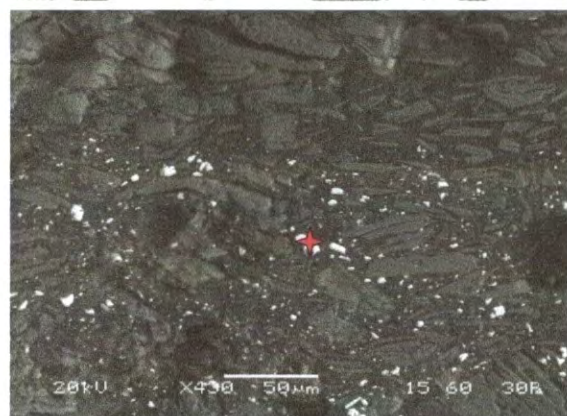
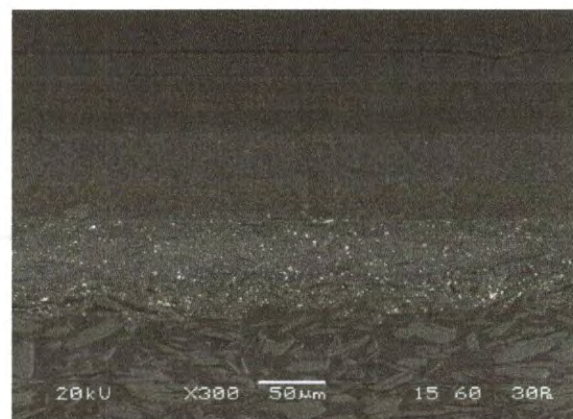
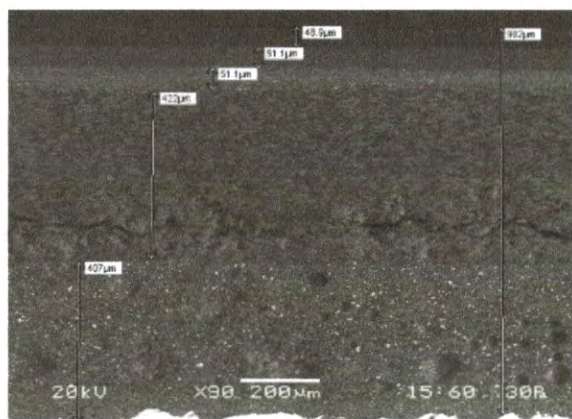
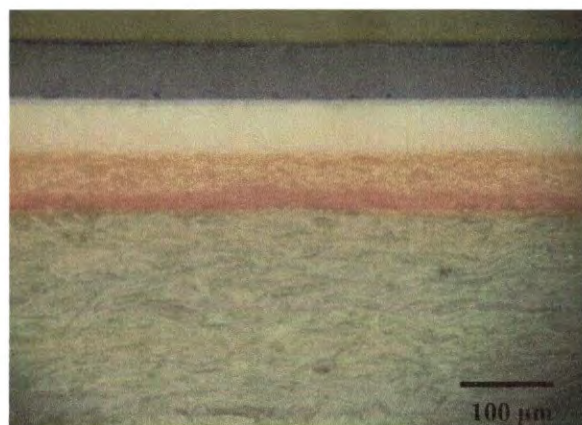
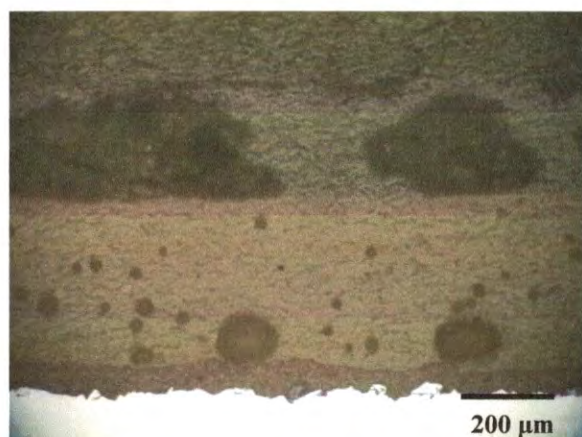
Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από την εξέταση των δοκιμίων με εφαρμογή της μεθόδου Περίθλασης Ακτίνων "X" (XRD). Σε όλες τις περιπτώσεις ανιχνεύονται οι χαρακτηριστικές κορυφές του εδροκεντρωμένου (fcc) σιδήρου (**Σχήμα 18**). Τα κύρια peaks της φάσης του ωστενίτη ανιχνεύονται σε γωνίες 2θ : 43.5°, 50.7°, 74.9°, και 90.7°.

Στην **Εικόνα 44** 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). Αν και ο χάλυβας είναι ωστενιτικής φύσης, η αντιδιαβρωτική επικάλυψη είναι παραπλήσια με τα προηγούμενα ελεγχθέντα δείγματα και παρουσιάζει τα ίδια δομικά χαρακτηριστικά.

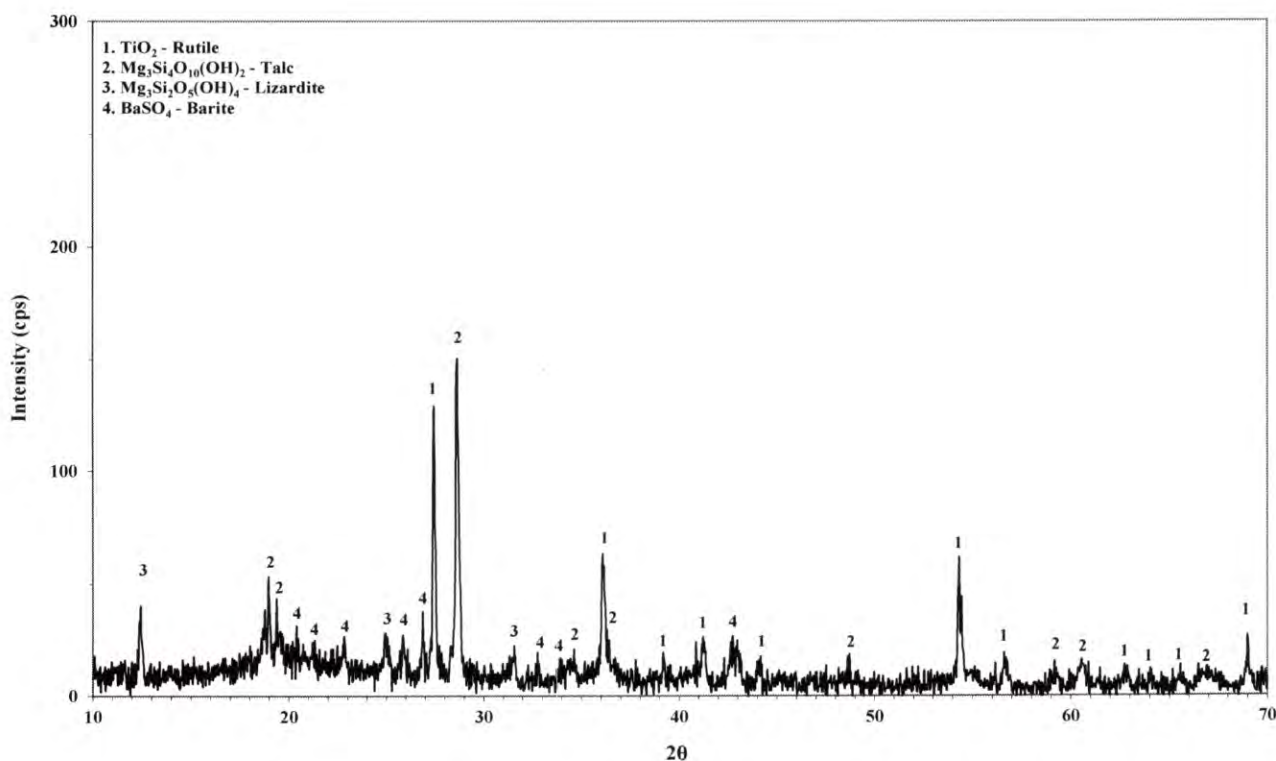


Σχήμα 18: Ακτινοδιάγραμμα XRD δείγματος "Κ3"

Και σε αυτή την περίπτωση, 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 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 ως ένα πολύ λεπτό στρώμα-film. Ανιχνευτήκαν διάφοροι τύποι ανόργανων προσθέτων (fillers), γεγονός το οποίο επιβεβαιώθηκε και από τα αποτελέσματα της μεθόδου Περίθλασης Ακτίνων "Χ" (Σχήμα 19). 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).



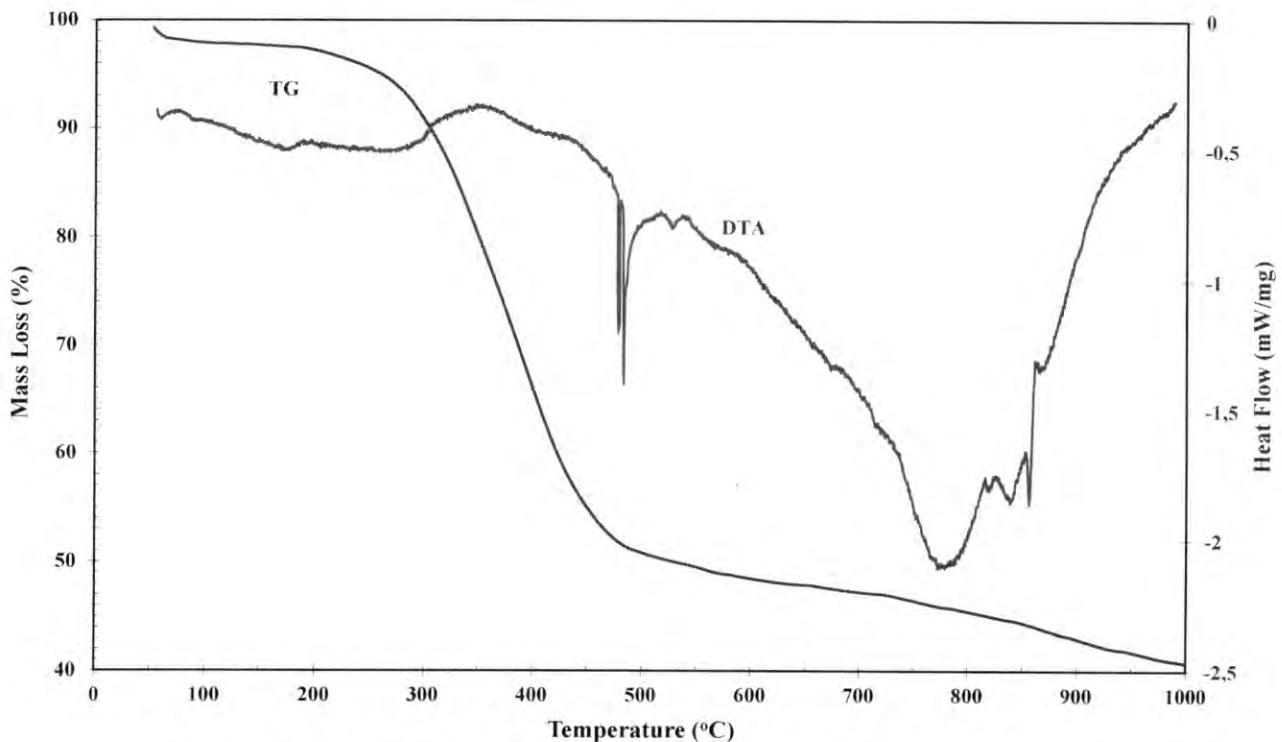
Εικόνα 44: Μικρογραφίες OM, SEM και αναλύσεις EDS οργανικής επικάλυψης Δείγματος "K3"



Σχήμα 19: Ακτινοδιάγραμμα XRD αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης Δείγματος “Κ3”

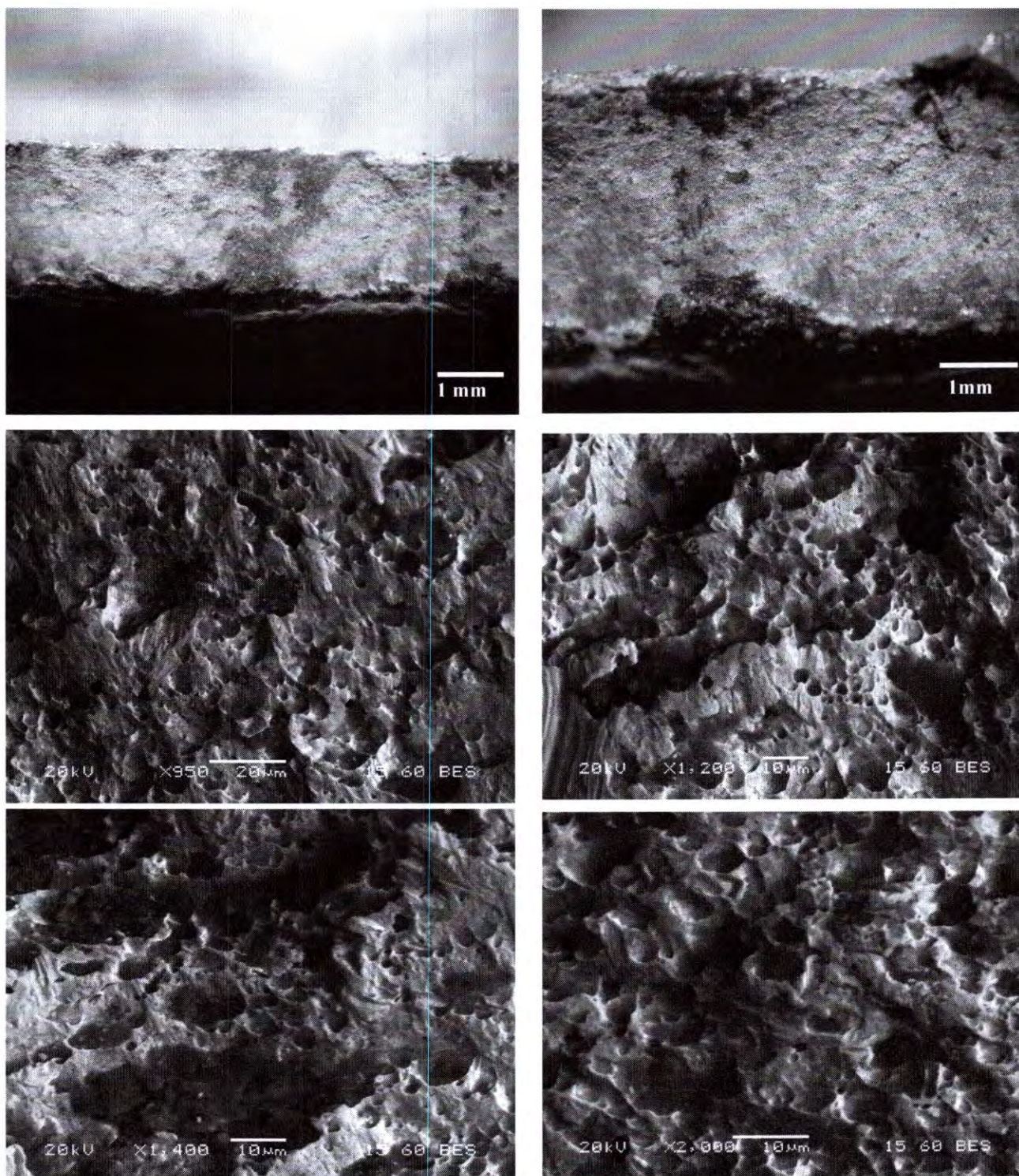
Στο Σχήμα 20 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα της εξέτασης της οργανικής αντιδιαβρωτικής επικάλυψης μέσω διαφορικής θερμικής ανάλυσης (TG-DTA), τα οποία είναι παραπλήσια με τα αντίστοιχα των Δειγμάτων “Η1”, “Η2”, “Κ1α” και “Κ1β”, στα οποία ανιχνεύτηκε φερριτο-μπαινιτικός χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης.

Πρόκειται για τον ίδιο τύπο επικάλυψης, η οποία 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 20: Διαφορική θερμική ανάλυση αντιδιαβρωτικής επικάλυψης Δείγματος "K3"

Στην **Εικόνα 45** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση της επιφάνειας θραύσεως του Δείγματος "K3" σε Στερεοσκοπικό και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης. Τα αποτελέσματα συμπίπτουν με τα αντίστοιχα των Δειγμάτων H1", "H2", "K1α" και "K1β", καθώς τα ανιχνευόμενα μικρογραφικά χαρακτηριστικά της θραυσίγενους επιφάνειας υποδεικνύουν ότι το υλικό υπέστη σημαντική πλαστική παραμόρφωση πριν από τη θραύση (βασικό γνώρισμα της όλκιμης θραύσης). Ανιχνεύονται μικροσκοπικές κενές περιοχές στη μάζα του μετάλλου, οι οποίες συνήθως ξεκινούν γύρω από εγκλείσματα ή από τα όρια των κόκκων. Καθώς η παραμόρφωση συνεχίζεται, οι μικροκοιλότητες μεγαλώνουν και ενώνονται. Η περιοχή μεταξύ των μικροκοιλοτήτων παραμορφώνεται πλαστικά, δίνοντας στην επιφάνεια θραύσης μια τραχιά ή ινώδη όψη.



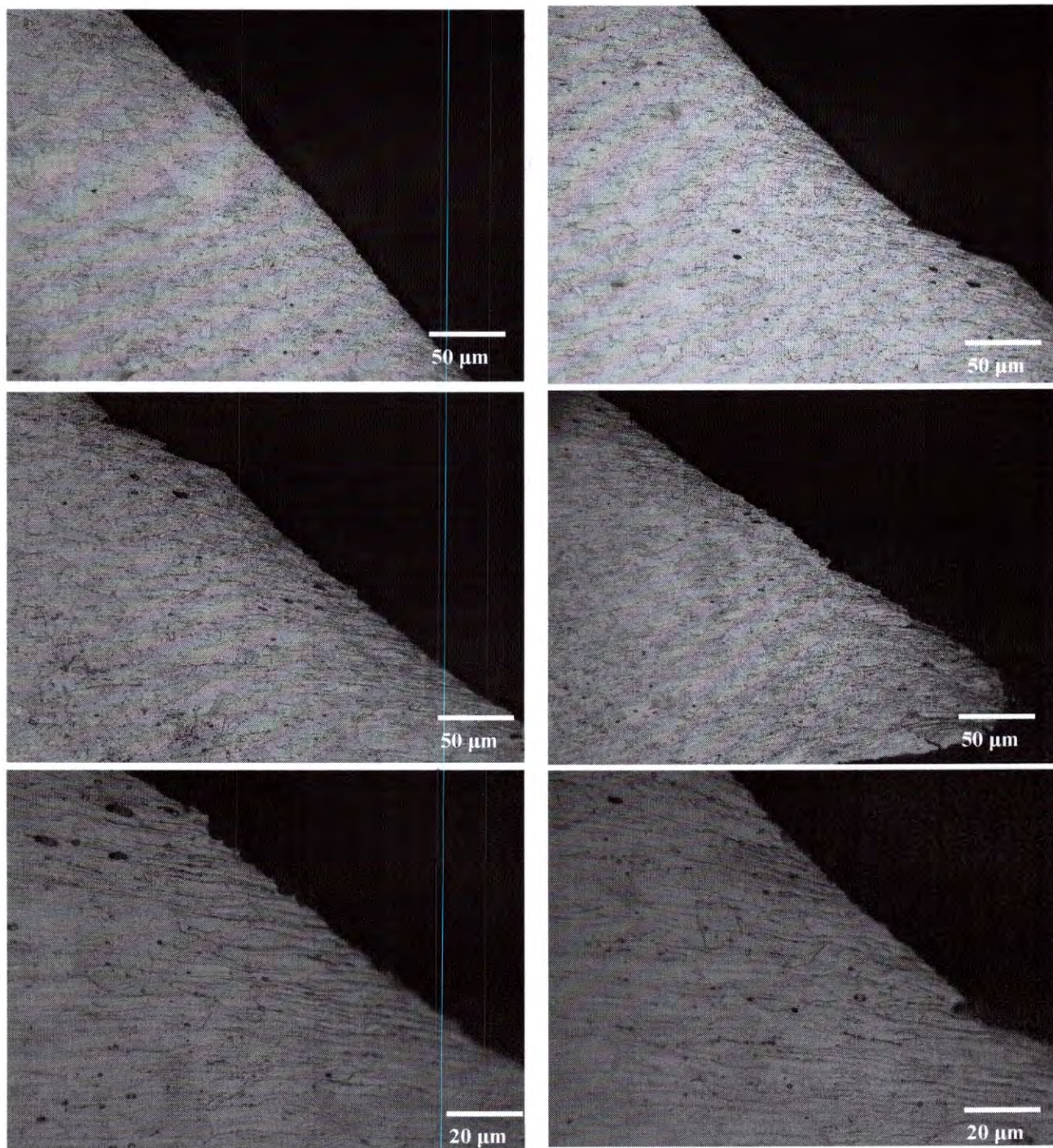
Εικόνα 45: Μακρο/μικρογραφίες στερεοσκοπικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης επιφάνειας θραύσης δείγματος "Κ3"



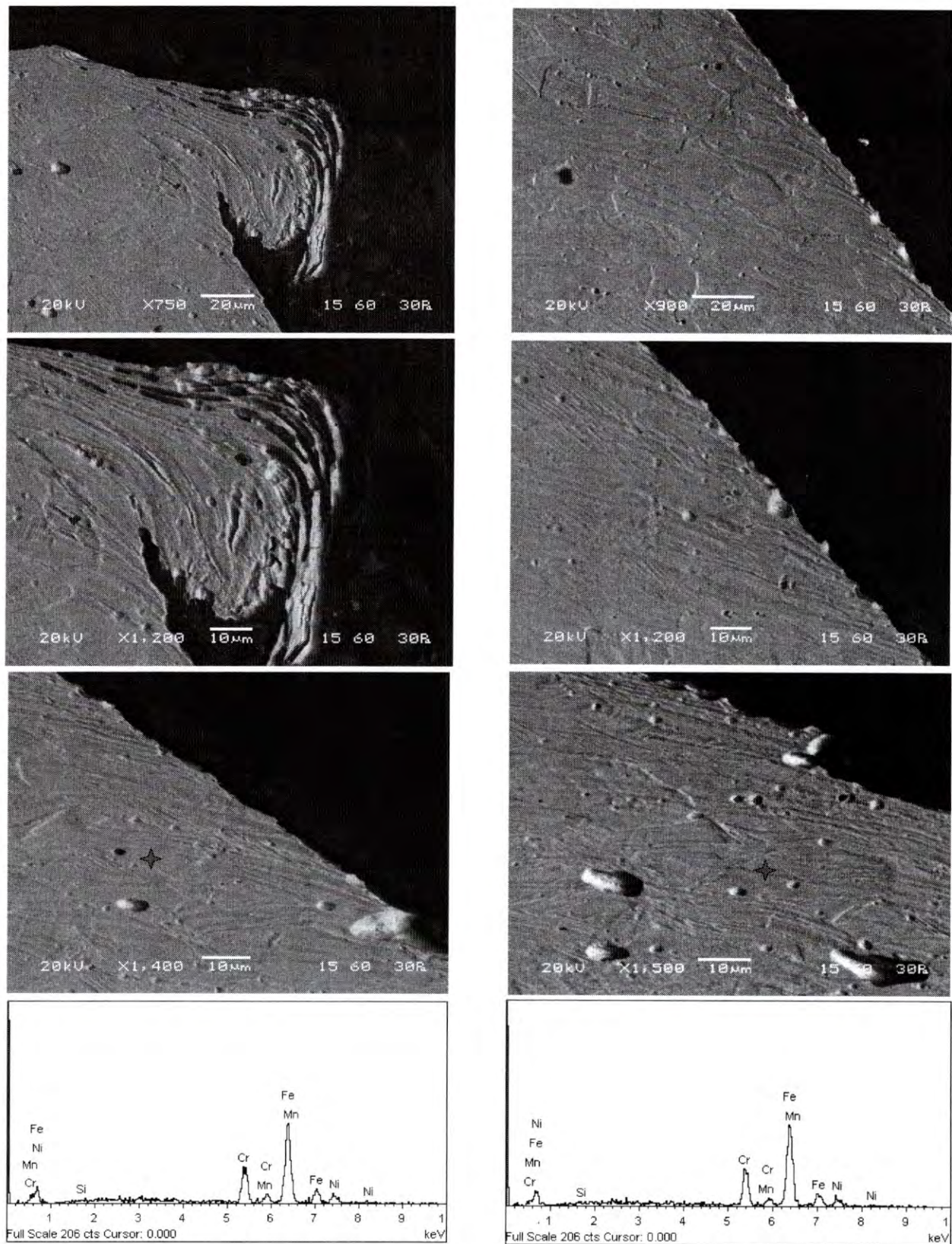
Σε όλες τις περιπτώσεις ανιχνεύονται, σε όλη την έκταση της επιφάνειας θραύσης, χαρακτηριστικές σφαιρικές ή ελλειπτικές μικροσκοπικές κοιλότητες (dimples), οι οποίες σχηματίζονται κατά την σταδιακή πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Από τον έλεγχο του μεγέθους των κοιλοτήτων προέκυψε ότι ο ρυθμός παραμόρφωσης 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 46-47**. 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 όλκιμη θραύση συνδέεται άμεσα με τη παραμόρφωση των κόκκων (grain deformation) του υλικού, καθώς η διαδικασία της πλαστικής παραμόρφωσης επηρεάζει σημαντικά την αναπτυσσόμενη μικροδομή (ιδιαίτερα τους κόκκους). Καθώς το υλικό υφίσταται πλαστική παραμόρφωση, οι κόκκοι τείνουν να επιμηκύνονται προς την διεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου.



Εικόνα 46: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "Κ3" στην περιοχή της θραύσης



Εικόνα 47: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "K3"

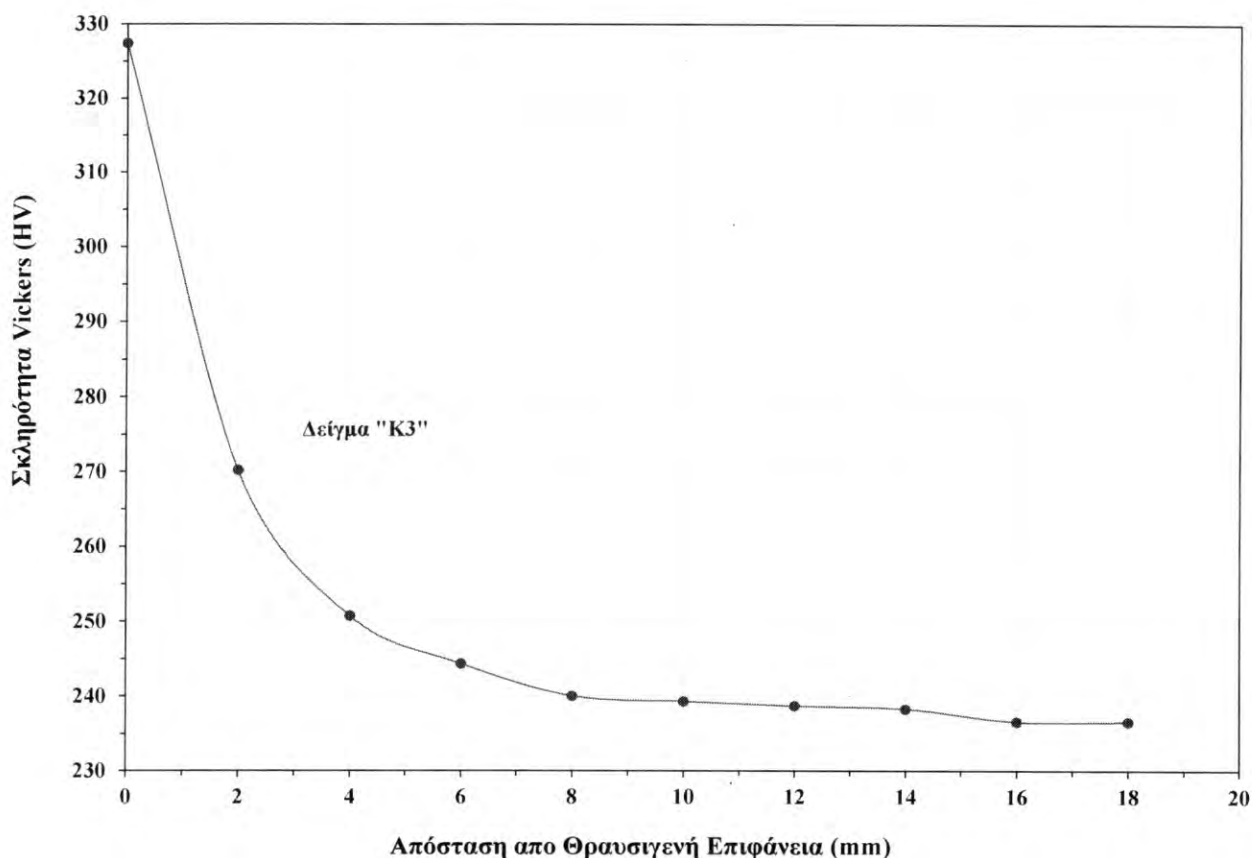


Η επιμήκυνση αυτή είναι περισσότερο έντονη στις περιοχές όπου το υλικό έχει υποστεί τη μεγαλύτερη παραμόρφωση, και κυρίως στα άκρα των δοκιμών, όπου παρατηρείται και μείωση της διατομής (στην περιοχή της θραύσης). Οι κόκκοι του υλικού εφελκύνονται και παραμορφώνονται προοδευτικά, καθώς η δομή του υλικού ανθίσταται στην θραύση.

Κατά την παραμόρφωση, οι κόκκοι υπόκεινται σε φαινόμενα ολίσθησης ή περιστροφής, με συνέπεια να αλλάζουν θέση σε σχέση με τους γειτονικούς κόκκους, καθώς προσπαθούν να προσαρμοστούν στην εφαρμογή του εξωτερικού φορτίου. Η ολίσθηση συμβαίνει κυρίως κατά μήκος ορισμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων, όπου η δομή είναι σχετικά ασθενέστερη και επιτρέπει την κίνηση των κόκκων.

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 προλαβαίνουν να επιμηκυνθούν ή να παραμορφωθούν όπως στις χαμηλότερες ταχύτητες παραμόρφωσης. Το γεγονός αυτό θα οδηγούσε σε εμφάνιση χαρακτηριστικών ψαθυρής θραύσης, καθώς η ενέργεια δεν διαχέεται σε μεγάλη περιοχή του υλικού.

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από τις αντίστοιχες μετρήσεις σκληρότητας Vickers, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν παράλληλα (κατά μήκος) στην διεύθυνση της ανιχνευόμενης παραμόρφωσης (**Σχήμα 21**). 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 230 Vickers.



Σχήμα 21: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων Vickers παράλληλα στην διεύθυνση παραμόρφωσης Δείγματος "K3"

Λόγω της αναπτυσσόμενης πλαστικής παραμόρφωσης στην θραυσίγενη 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 ήταν της τάξης του 35%.

3.6 Χαρακτηρισμός Δείγματος "K2"

Το υπό εξέταση Δείγμα "K2" αποσπάστηκε από θραύσμα από το εμπρόσθιο τμήμα του Θαλάμου Μηχανοδήγησης, δεξιά του ανεμοθώρακα (Εικόνα 48).



Εικόνα 48: Δείγμα "K2" (Κόκπιτ 2) από το εμπρόσθιο τμήμα 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 σχετικά υγιής περιοχή του παραληφθέντος δείγματος, με στόχο την μελέτη των χημικών και δομικών χαρακτηριστικών τόσο του μεταλλικού υποστρώματος όσο και της επικάλυψης. Στις Εικόνες 49 και 50 παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση των παραχθέντων στυλπνών τομών σε

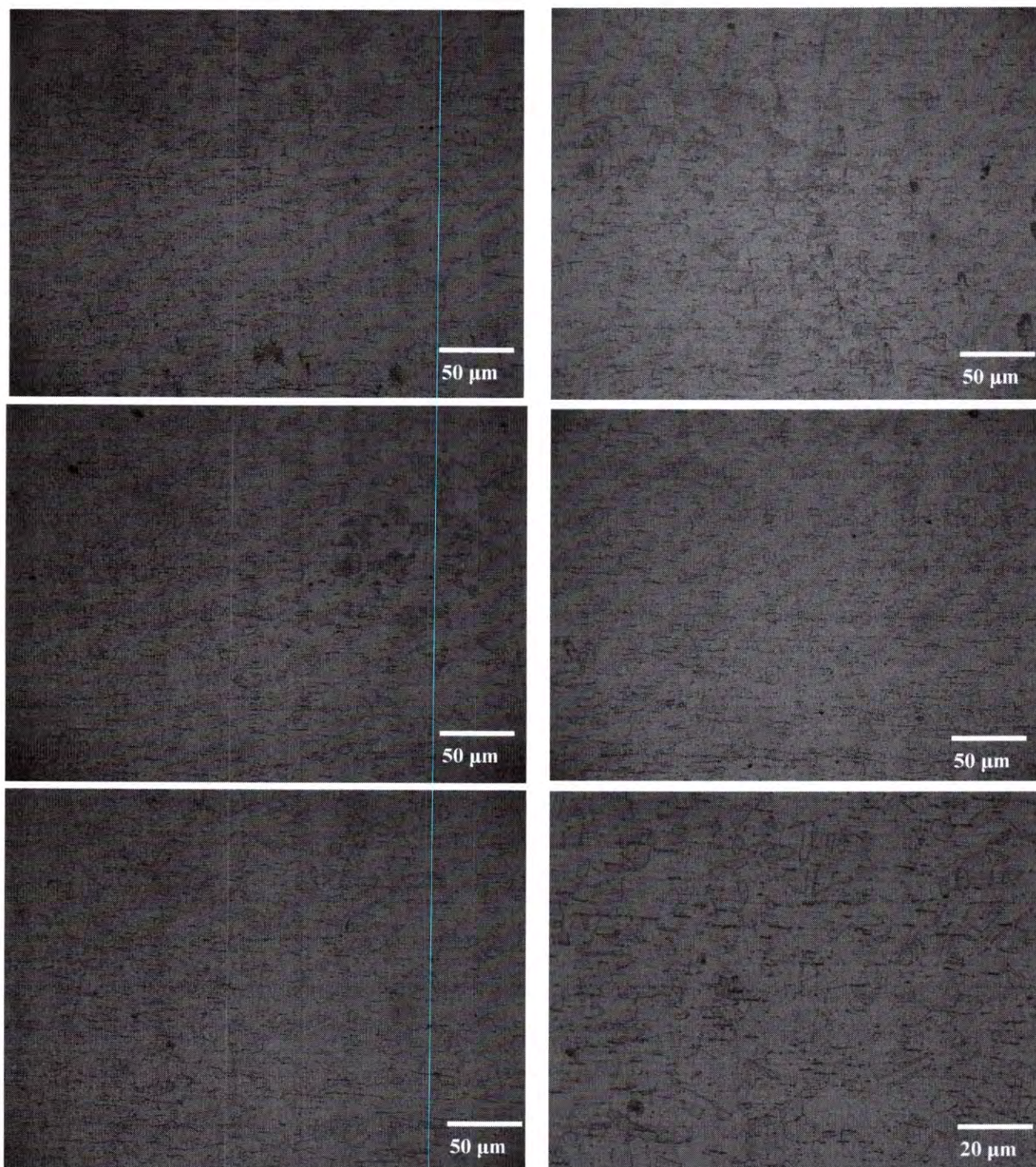


Μεταλλογραφικό Οπτικό Μικροσκόπιο και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις, μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS).

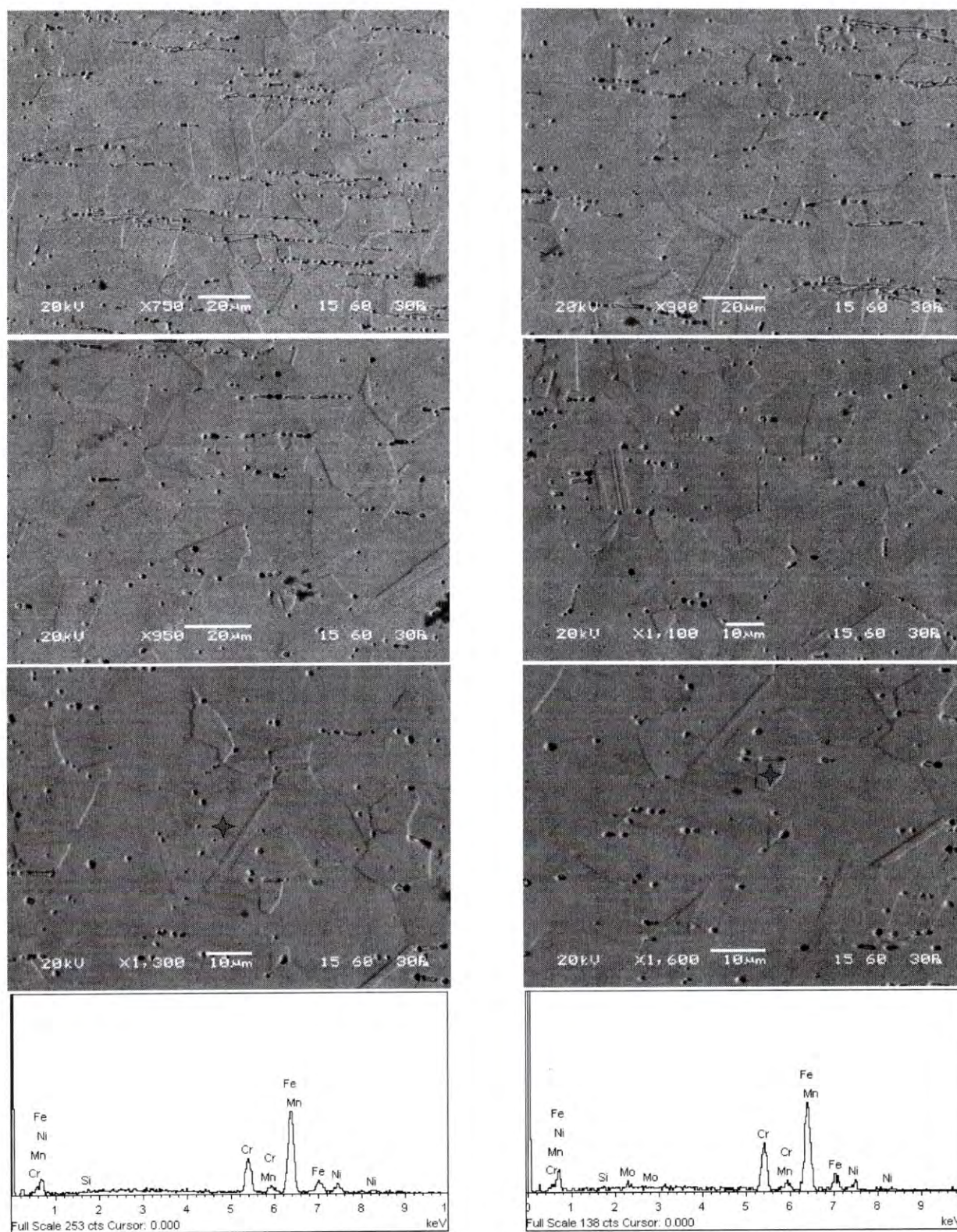
Όπως αναμενόταν, καθώς το δείγμα πάρθηκε από το εμπρόσθιο τμήμα του Θαλάμου Μηχανοδήγησης, πρόκειται για τον ίδιο ανοξείδωτο ωστενιτικό χάλυβα, πιθανότατα AISI 304, ο οποίος ανιχνεύτηκε και στην περίπτωση του Δείγματος “Κ3”, το οποίο έφερε το λογότυπο της εταιρείας και τον αριθμό της Ηλεκτρομηχανής. Από τα αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων EDS προέκυψε ότι, εκτός από σίδηρο, περιέχεται χρώμιο ($\approx 18.0\%$), νικέλιο, ($\approx 8.5\%$), μαγγάνιο ($\approx 1.5\%$) και πυρίτιο ($\approx 0.7\%$), ενώ δεν ανιχνεύτηκε μολυβδαίνιο.

Ανιχνεύτηκε πλήρης ωστενιτική δομή (απουσία φερρίτη). Το Cr και το Ni είναι πλήρως διαλυμένα στον ωστενίτη, σχηματίζοντας ομοιογενή στερεά διαλύματα. Επίσης ανιχνεύονται διδυμίες, εντός των κόκκων του ωστενίτη, με την μορφή επαναλαμβανόμενων ζωνών με ελαφρώς διαφορετικό προσανατολισμό από τον υπόλοιπο κόκκο, όπου το κρυσταλλικό πλέγμα παρουσιάζει συμμετρική ανάπτυξη σε σχέση με ένα κοινό επίπεδο, υποδεικνύοντας κατεργασία ανόπτησης κατά την παραγωγή - διαμόρφωση.

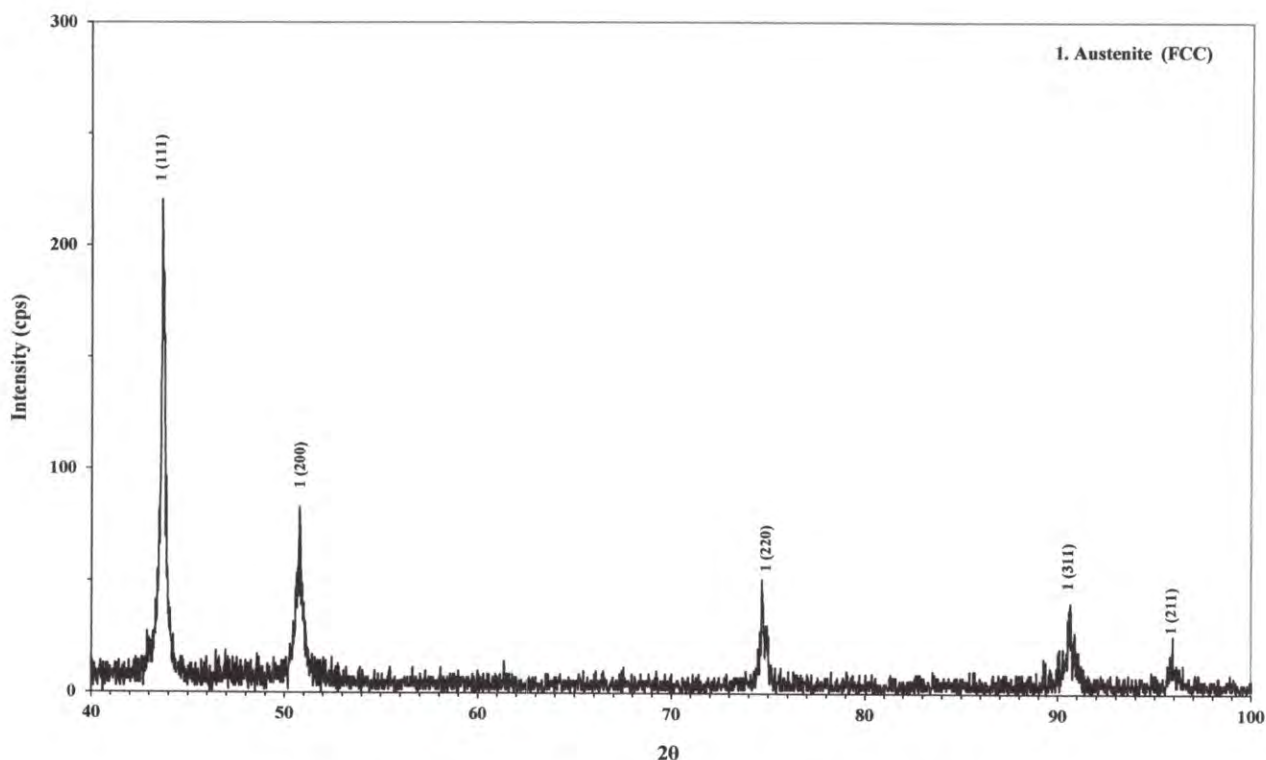
Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από την εξέταση των δοκιμίων με εφαρμογή της μεθόδου Περίθλασης Ακτίνων “Χ” (XRD). Σε όλες τις περιπτώσεις ανιχνεύονται οι χαρακτηριστικές κορυφές του εδροκεντρωμένου (fcc) σιδήρου (Σχήμα 22).



Εικόνα 49: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "K2"



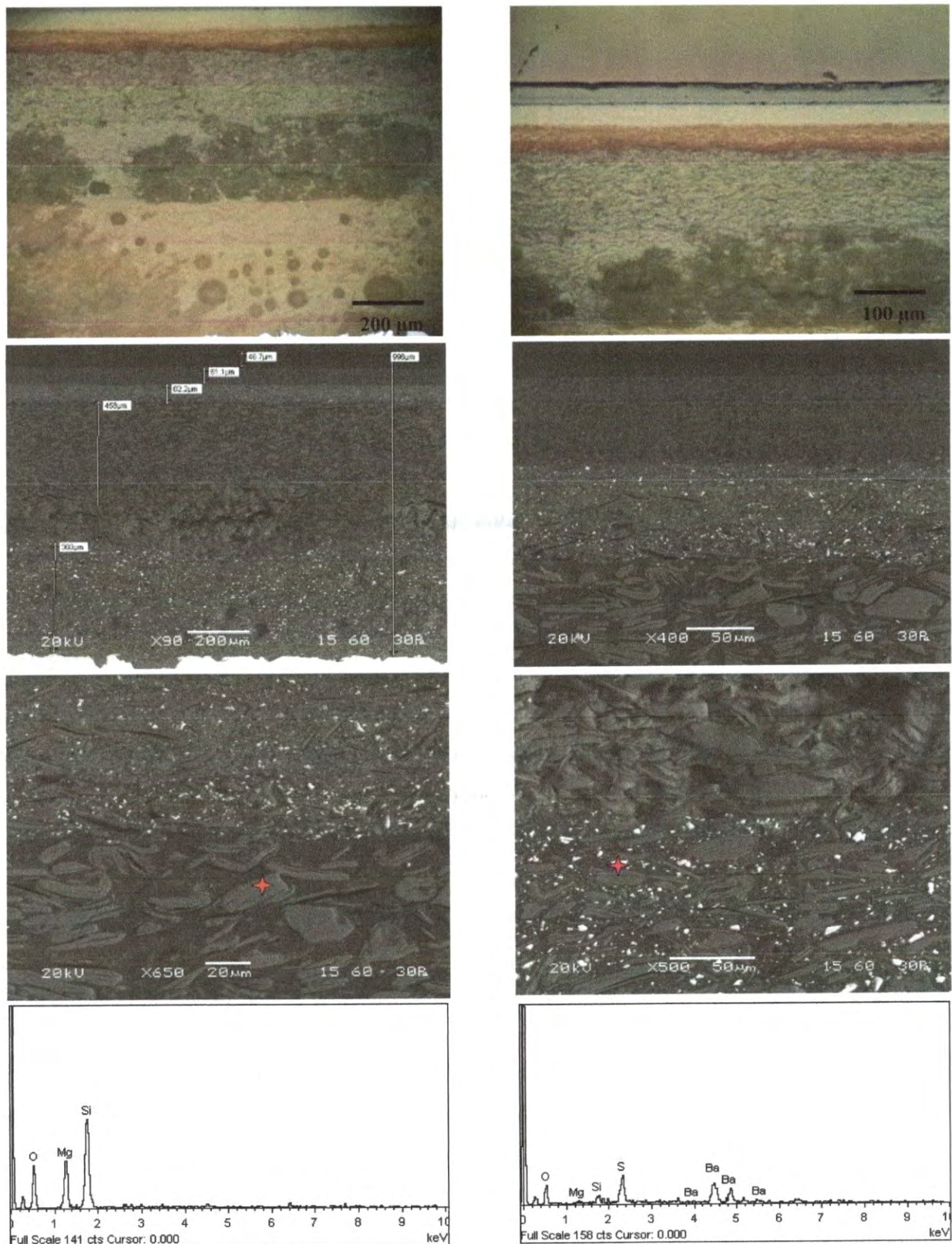
Εικόνα 50: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "K2"



Σχήμα 22: Ακτινοδιάγραμμα XRD δείγματος "K2"

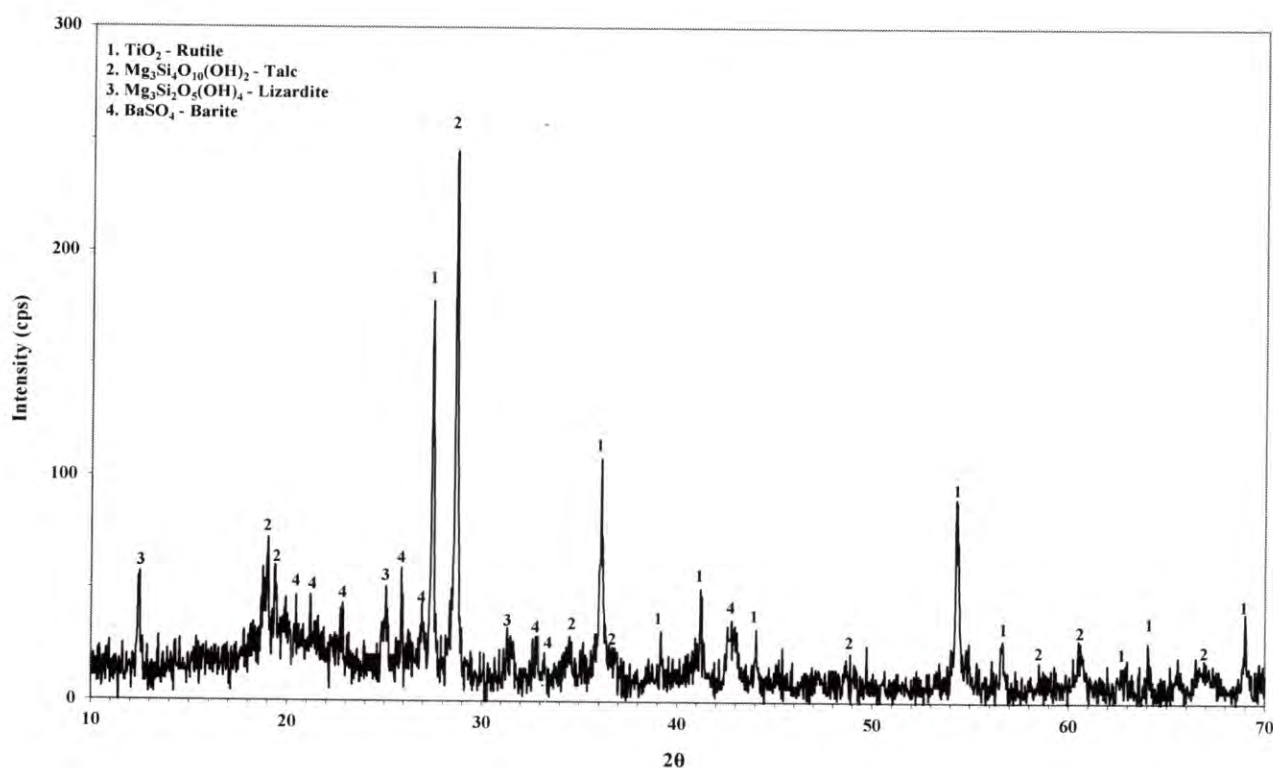
Στην **Εικόνα 51** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση της αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης στο Οπτικό και στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις, μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS). Αν και ο χάλυβας είναι ωστενιτικής φύσης, η αντιδιαβρωτική επικάλυψη είναι παραπλήσια με τα προηγούμενα δείγματα και παρουσιάζει τα ίδια δομικά χαρακτηριστικά.

Το συνολικός πάχος της οργανικής επικάλυψης είναι της τάξης των 980-1000 μm . Ανιχνεύτηκαν πέντε διαφορετικές στρώσεις οργανικών επικαλύψεων. Το πρώτο στρώμα, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το χάλυβα είναι "Αστάρι - Primer", το δεύτερο στρώμα είναι η "Ενδιάμεση Στρώση - Intermediate Coat", ενώ το τρίτο και το τέταρτο στρώμα είναι η "Τελική Διακοσμητική Στρώση - Topcoat).



Εικόνα 51: Μικρογραφίες OM, SEM και αναλύσεις EDS οργανικής επικάλυψης Δείγματος "K2"

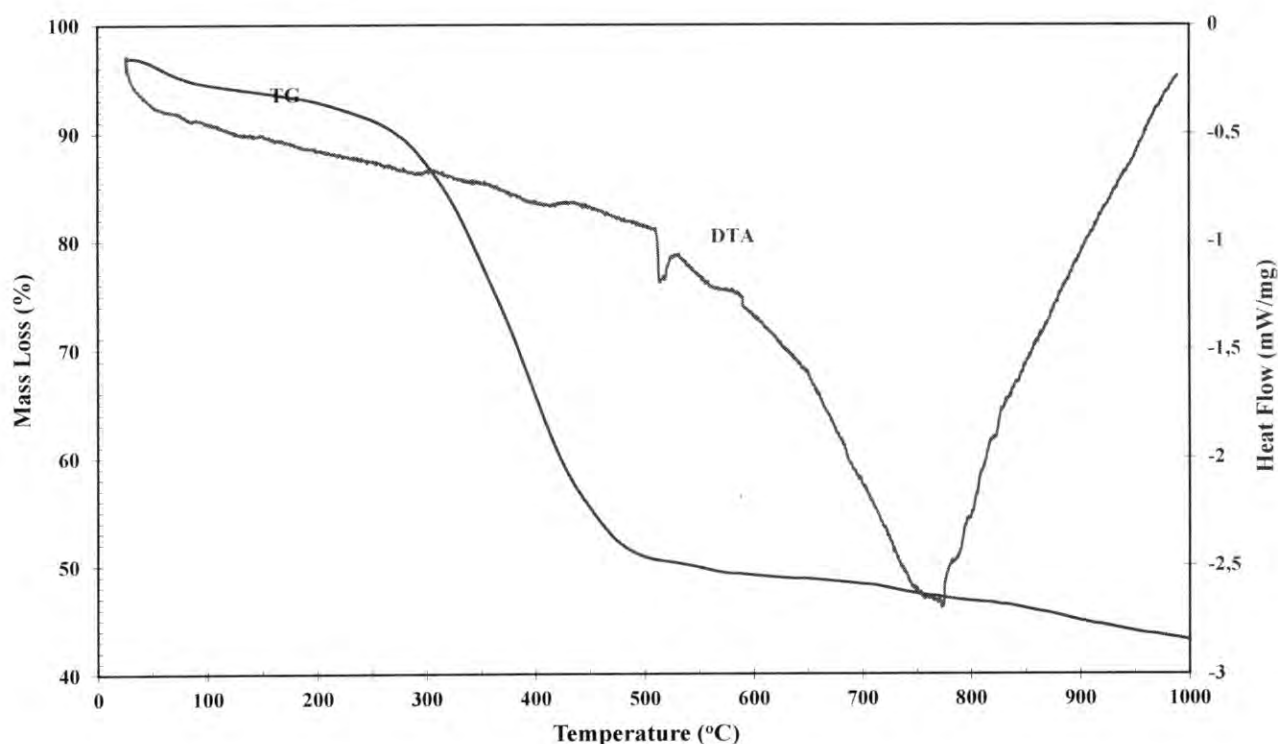
Το τελευταίο πέμπτο στρώμα είναι το "Anti-Graffiti Coat". Το primer εμφανίζεται περισσότερο "τραχύ", με έντονη παρουσία fillers, η ενδιάμεση στρώση είναι περισσότερο ομοιογενής και μεγάλου πάχους, τα topcoat εμφανίζονται με πιο λεία υφή και λιγότερα fillers και τέλος το anti-graffiti coat έχει την μορφή λεπτού στρώματος-υμενίου (film). Ανιχνευτήκαν διάφοροι τύποι ανόργανων προσθέτων (fillers), γεγονός το οποίο επιβεβαιώθηκε και από τα αποτελέσματα της μεθόδου Περίθλασης Ακτίνων "X" (Σχήμα 23). 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 23: Ακτινοδιάγραμμα XRD αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης Δείγματος "K2"

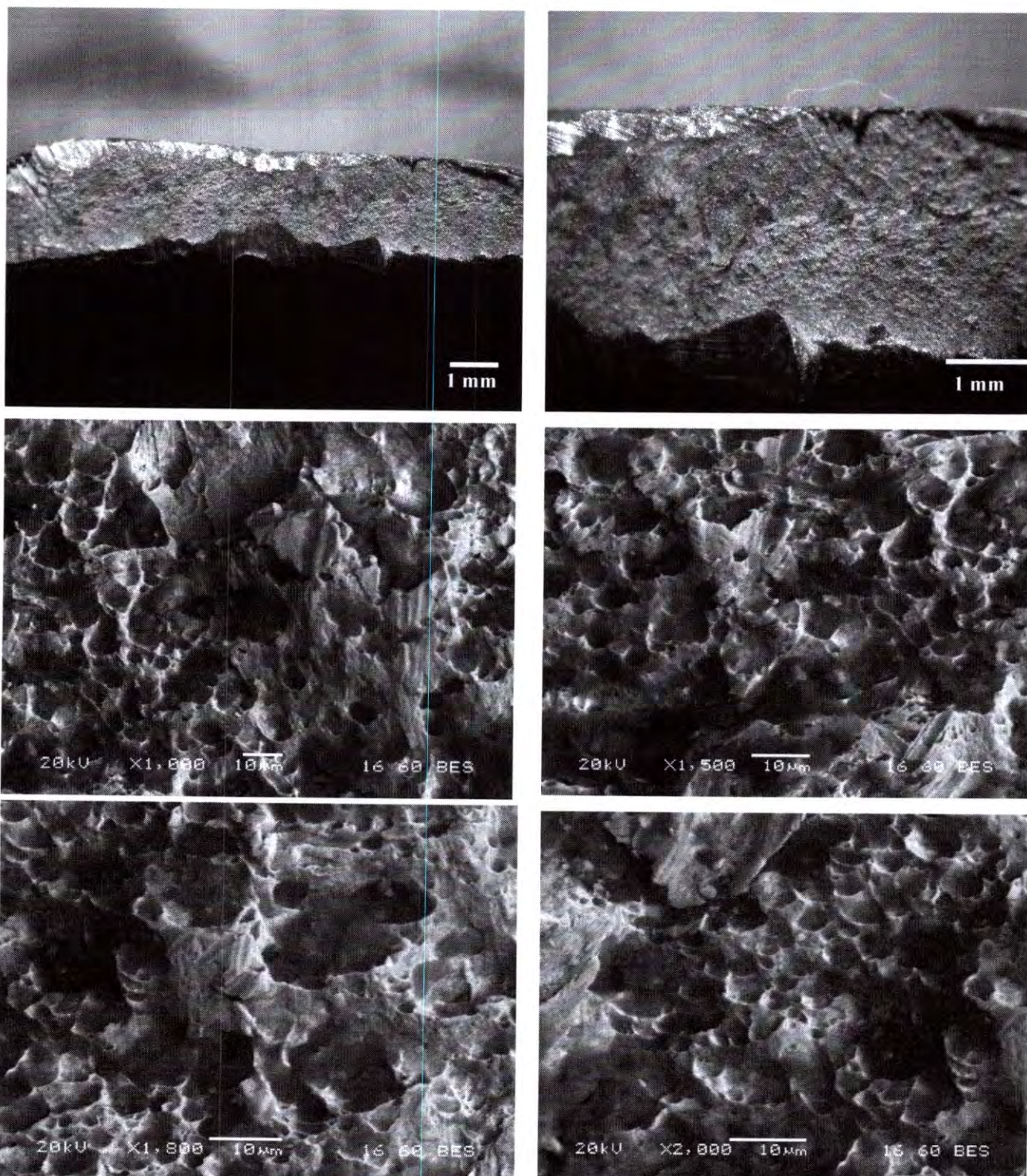
Στο Σχήμα 24 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα της εξέτασης της οργανικής αντιδιαβρωτικής επικάλυψης μέσω διαφορικής θερμικής ανάλυσης (TG-DTA), τα οποία είναι παραπλήσια με τα αντίστοιχα του Δείγματος "K3". Πρόκειται για

τον ίδιο τύπο επικάλυψης, η οποία 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 24: Διαφορική θερμική ανάλυση αντιδιαβρωτικής επικάλυψης Δείγματος "K2"

Στην **Εικόνα 52** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση της επιφάνειας θραύσεως του Δείγματος "K2" σε Στερεοσκοπικό και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης. Τα αποτελέσματα συμπίπτουν με τα αντίστοιχα του Δείγματος "K3", 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).



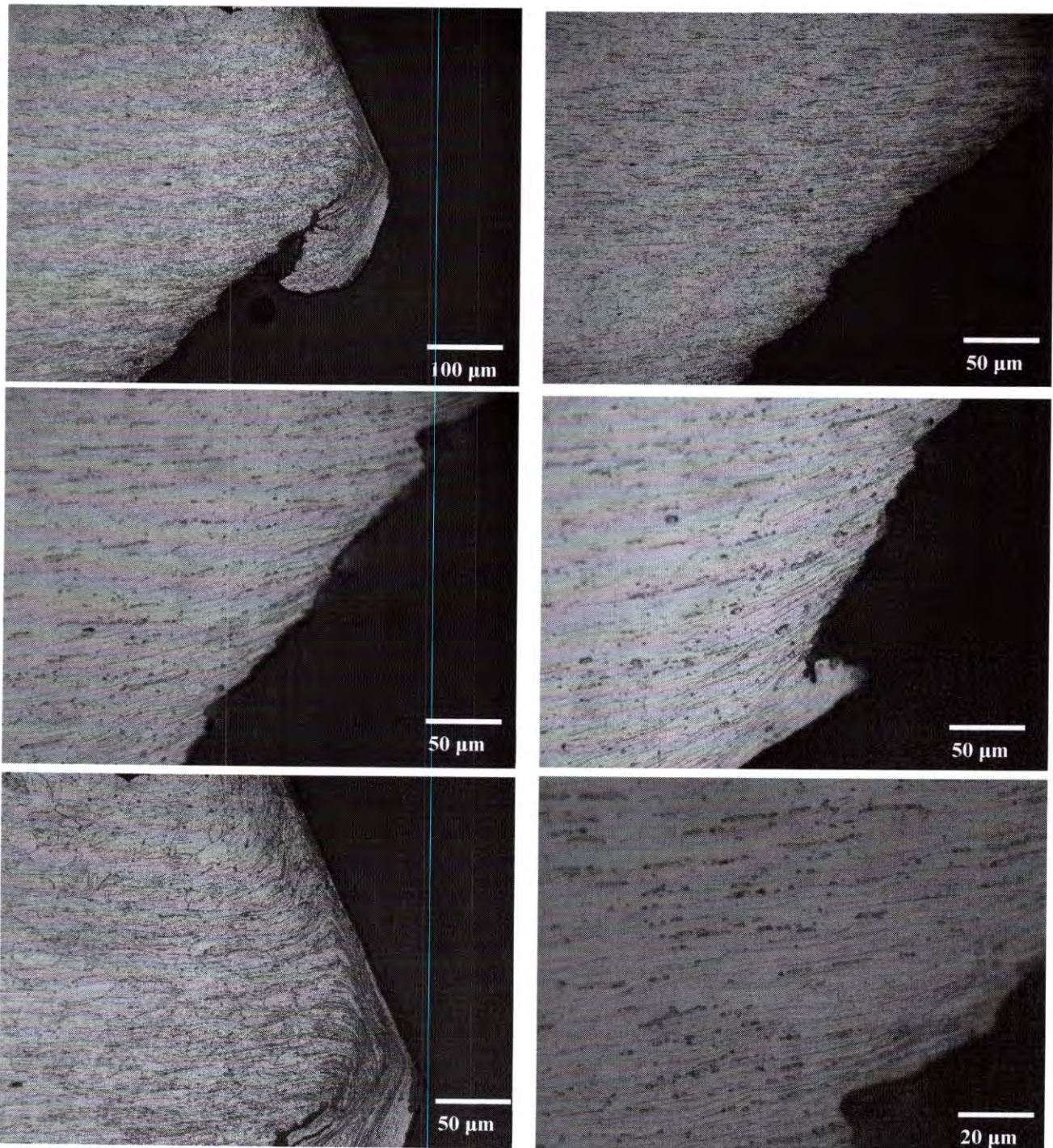
Εικόνα 52: Μακρο/μικρογραφίες στερεόσκοπικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης επιφάνειας θραύσης δείγματος "K2"



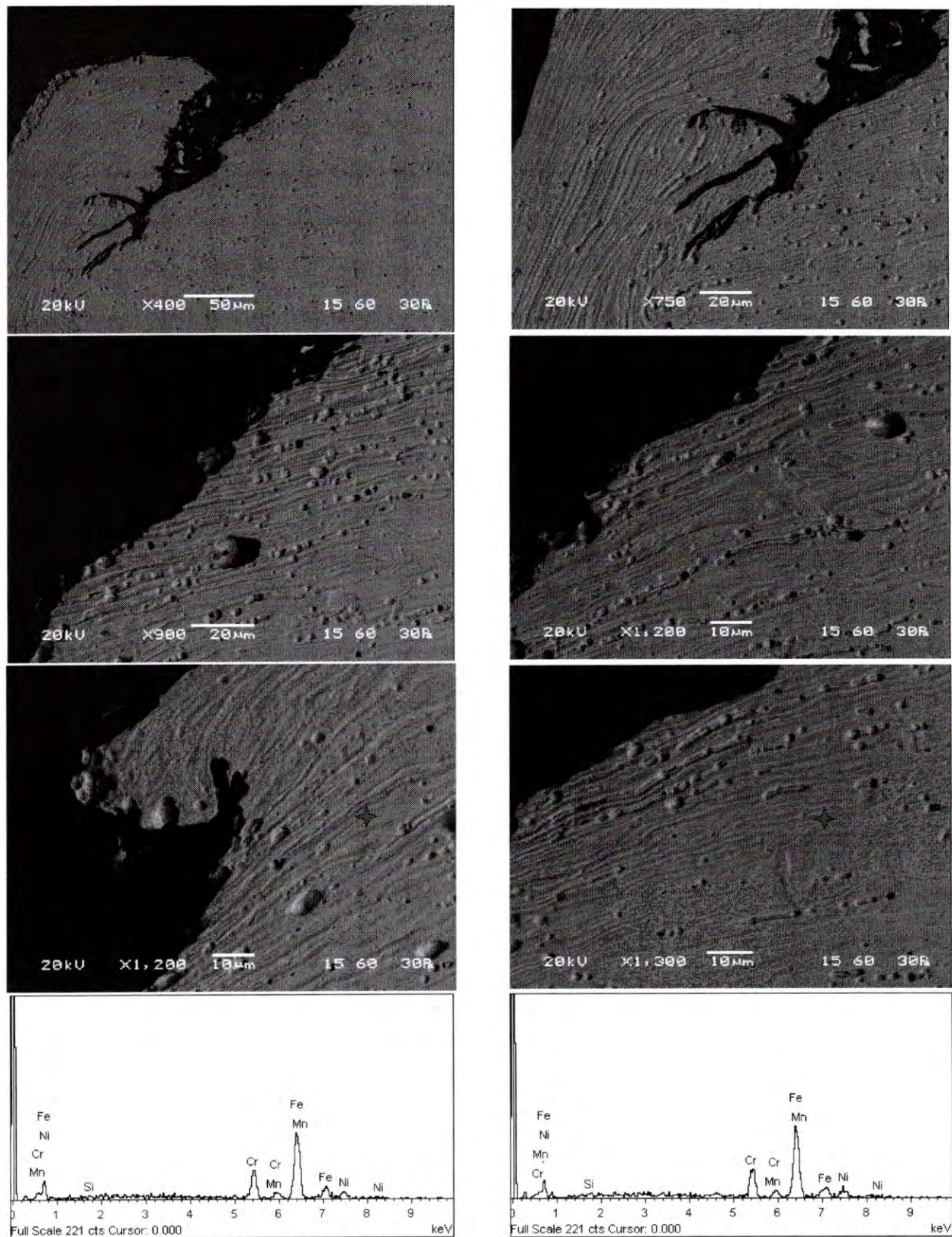
Σε όλες τις περιπτώσεις ανιχνεύονται σε όλη την έκταση της επιφάνειας θραύσης χαρακτηριστικές σφαιρικές ή ελλειπτικές μικροσκοπικές κοιλότητες (dimples), οι οποίες παραπέμπουν σε έναν σχετικά συμμετρικό και τακτικό σχηματισμό και αναπτύσσονται κατά την σταδιακή πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Από τον έλεγχο του μεγέθους των κοιλοτήτων προέκυψε ότι ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι σχετικά χαμηλός, καθώς το υλικό διαθέτει περισσότερο χρόνο ώστε να υποστεί πλαστική παραμόρφωση. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σε υψηλότερους ρυθμούς παραμόρφωσης οι κοιλότητες που θα σχηματίζονταν θα ήταν μικρότερου μεγέθους (και πιο ρηχές), περισσότερο ακανόνιστες, καθώς η παραμόρφωση θα ήταν πιο τοπική και απότομη, υποδεικνύοντας μια περισσότερη ψαθυρή θραύση.

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 53-54**. 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 53: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "K2" στην περιοχή της θραύσης

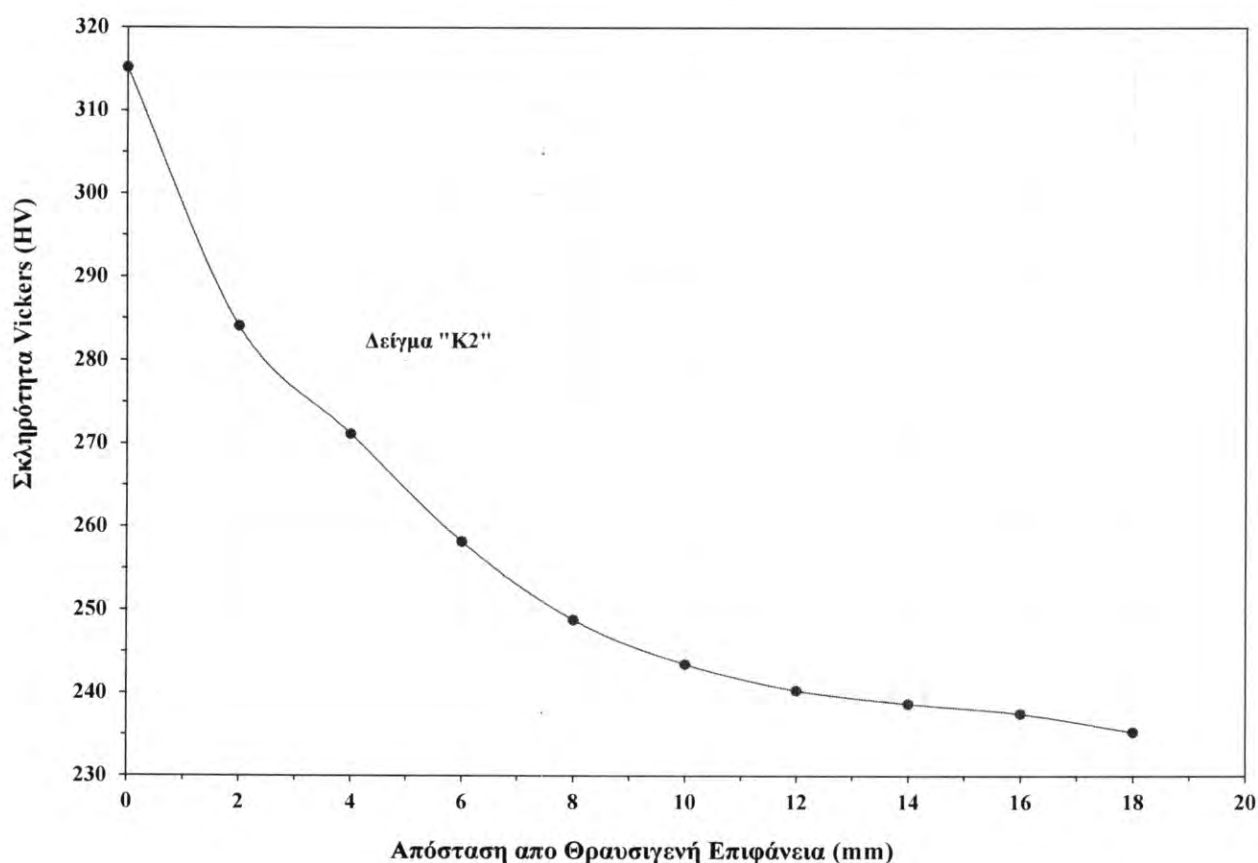


Εικόνα 54 Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "K2"



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 μείωση της διατομής (στην περιοχή της θραύσης).

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 25).



Σχήμα 25: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων Vickers παράλληλα στην διεύθυνση παραμόρφωσης Δείγματος "K2"



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 230 Vickers. Λόγω της αναπτυσσόμενης πλαστικής παραμόρφωσης στην θραυστιγενή επιφάνεια και της παρατηρούμενης επιμήκυνσης των κόκκων, προκαλείται τοπική αύξηση της αντοχής-σκληρότητας του υλικού (ενδοτράχυνση). Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η αύξηση της σκληρότητας στην ζώνη θραύσης ήταν της τάξης του 35%.

3.7 Χαρακτηρισμός Δείγματος "Κ4"

Το υπό εξέταση Δείγμα "Κ4" αποσπάστηκε, από θραύσμα από το πάνω τμήμα της βάσης-προφυλακτήρα του Θαλάμου Μηχανοδήγησης (Εικόνα 55).



Εικόνα 55: Δείγμα "Κ4" (Κόκπιτ 4) από το πάνω τμήμα της βάσης-προφυλακτήρα 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 σχετικά υγιής περιοχή του παραληφθέντος δείγματος, με στόχο την μελέτη των χημικών και δομικών χαρακτηριστικών, τόσο του μεταλλικού

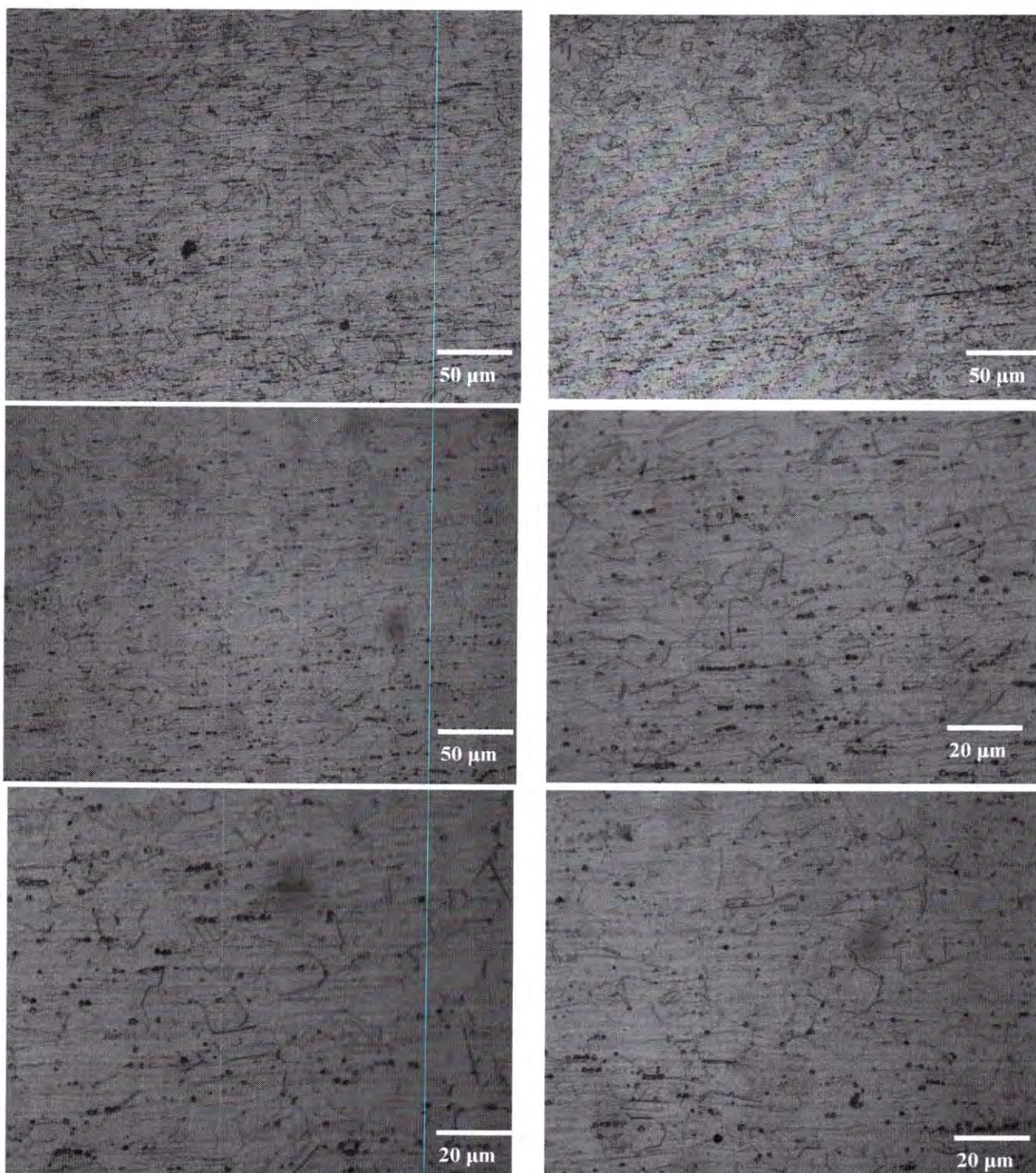


υποστρώματος όσο και της επικάλυψης. Στις **Εικόνες 56 και 57** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση των παραχθέντων στιλπνών τομών σε Μεταλλογραφικό Οπτικό Μικροσκόπιο και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις, μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS).

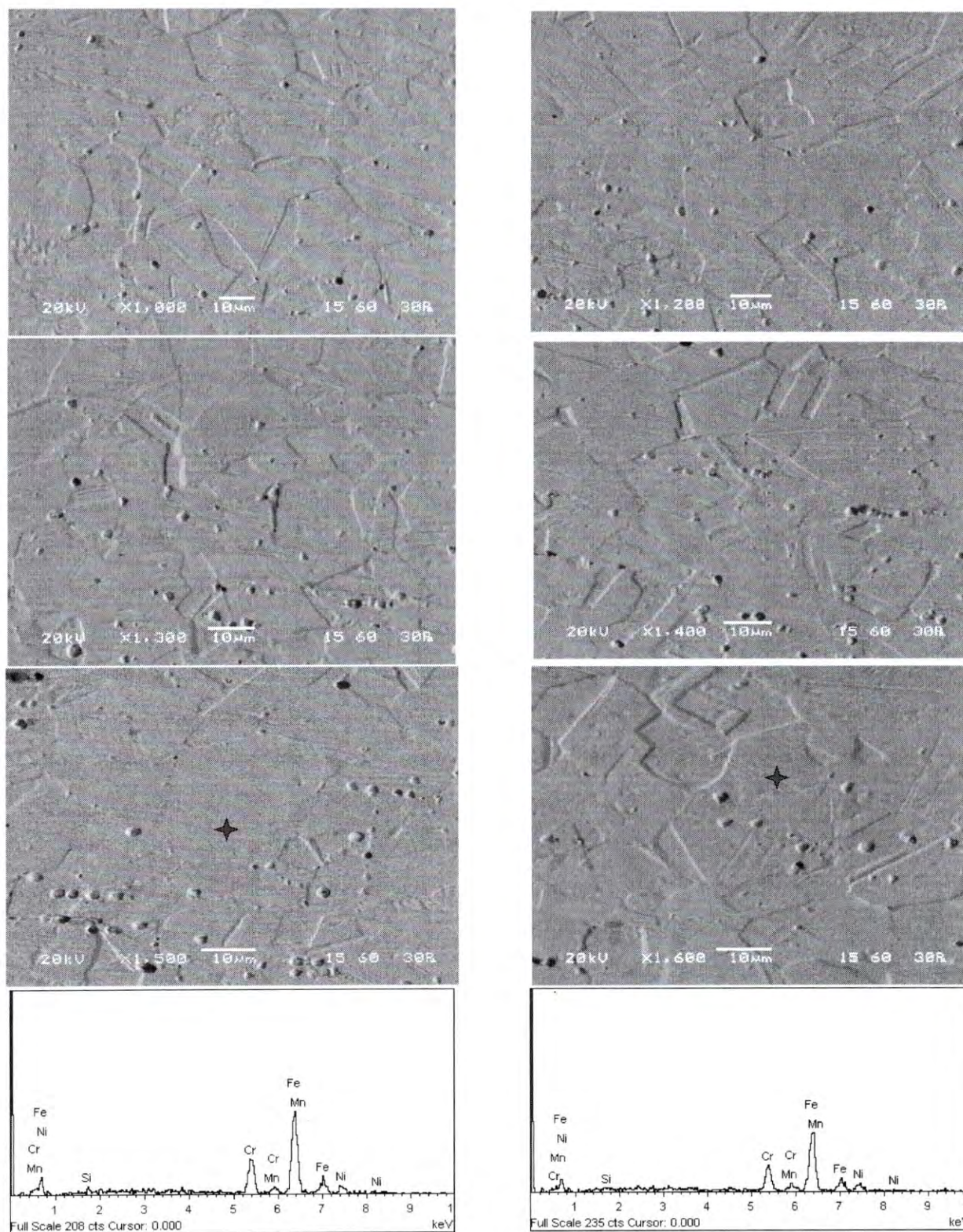
Πρόκειται για τον ίδιο ανοξείδωτο ωστενιτικό χάλυβα (πιθανότατα AISI 304), ο οποίος ανιχνεύτηκε και στην περίπτωση του Δείγματος “K3”, το οποίο έφερε το λογότυπο της εταιρείας και τον αριθμό της Ηλεκτρομηχανής. Από τα αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων EDS προέκυψε ότι, εκτός από σίδηρο, περιέχεται χρώμιο ($\approx 18.0\%$), νικέλιο, ($\approx 8.5\%$), μαγγάνιο ($\approx 1.5\%$) και πυρίτιο ($\approx 0.7\%$), ενώ δεν ανιχνεύτηκε μολυβδαίνιο.

Ανιχνεύτηκε πλήρης ωστενιτική δομή (απουσία φερρίτη). Το Cr και το Ni είναι πλήρως διαλυμένα στον ωστενίτη, σχηματίζοντας ομοιογενή στερεά διαλύματα. Επίσης ανιχνεύονται διδυμίες, εντός των κόκκων του ωστενίτη, με την μορφή επαναλαμβανόμενων ζωνών με ελαφρώς διαφορετικό προσανατολισμό από τον υπόλοιπο κόκκο, όπου το κρυσταλλικό πλέγμα παρουσιάζει συμμετρική ανάπτυξη σε σχέση με ένα κοινό επίπεδο, υποδεικνύοντας κατεργασία ανόπτησης, κατά την διαδικασία παραγωγής - διαμόρφωσης.

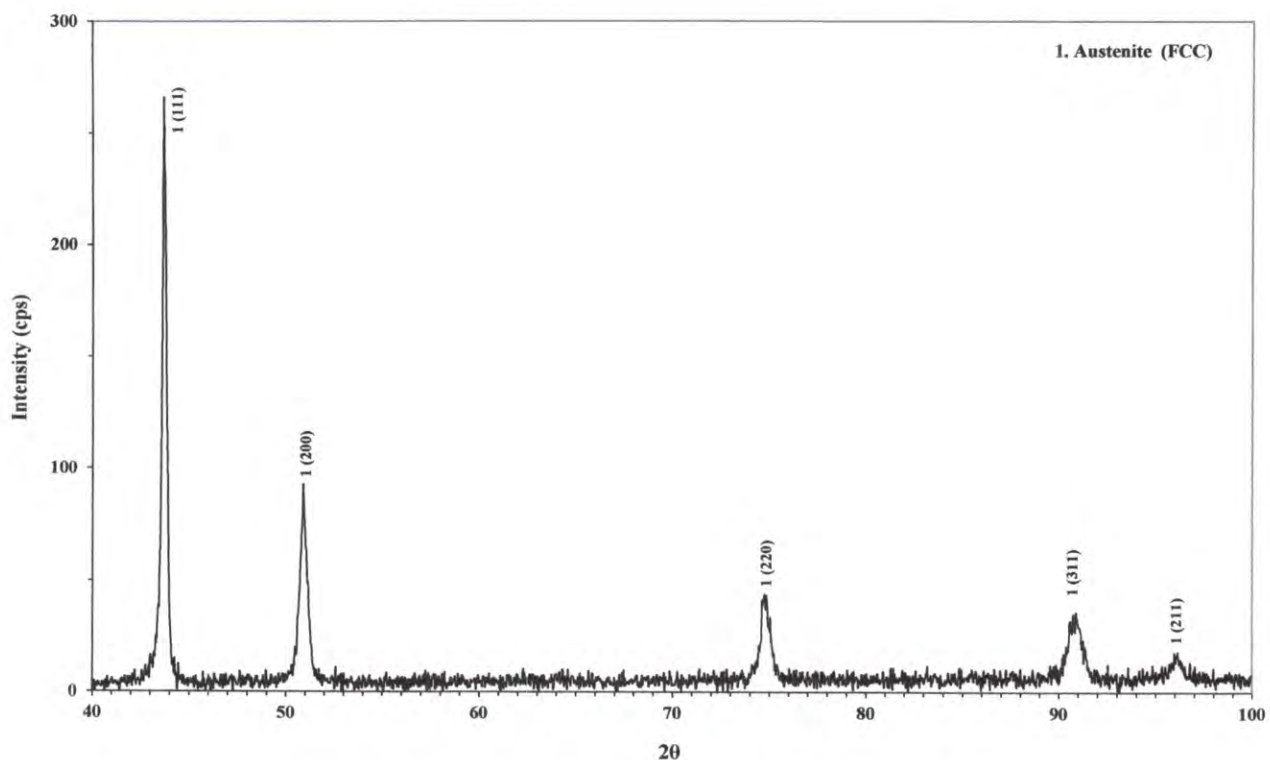
Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από την εξέταση των δοκιμίων με εφαρμογή της μεθόδου Περίθλασης Ακτίνων “Χ” (XRD). Σε όλες τις περιπτώσεις ανιχνεύονται οι χαρακτηριστικές κορυφές του εδροκεντρωμένου (fcc) σιδήρου (**Σχήμα 26**).



Εικόνα 56: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "K4"



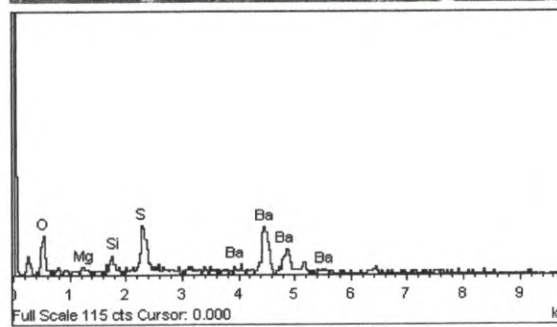
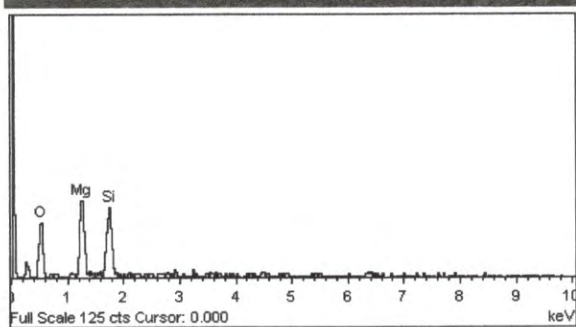
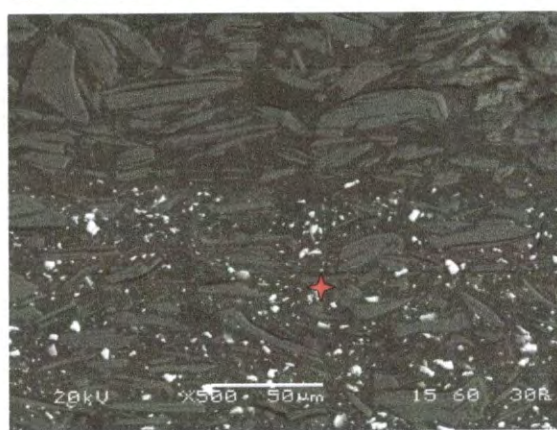
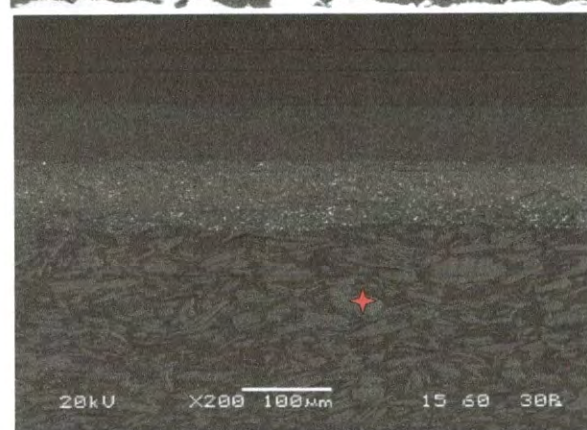
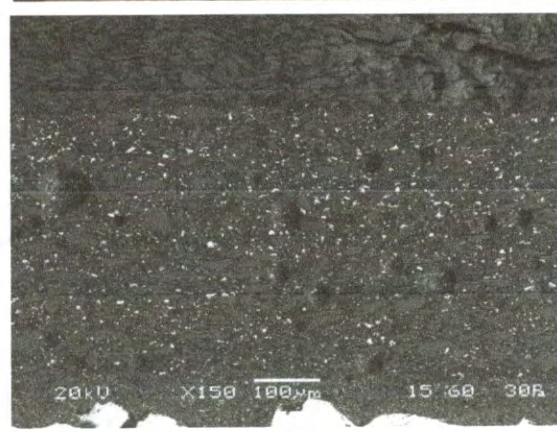
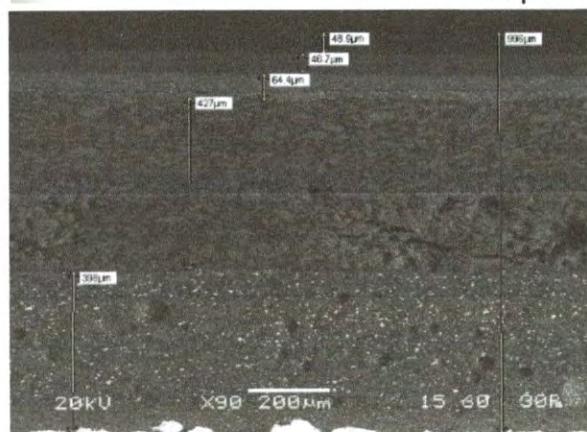
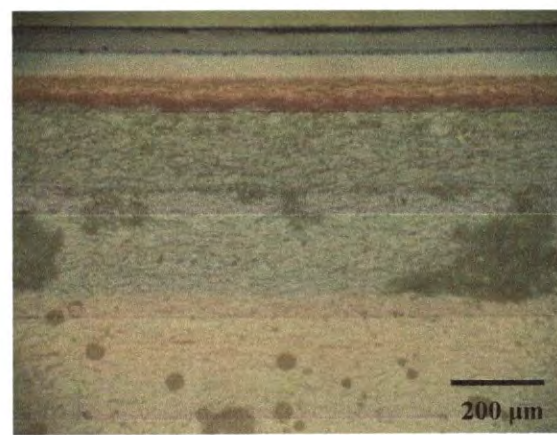
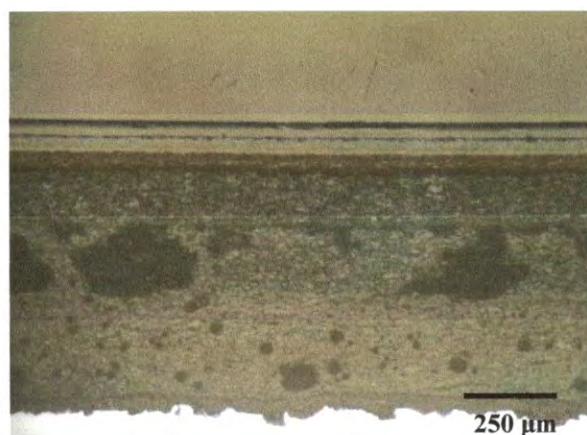
Εικόνα 57: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "K4"



Σχήμα 26: Ακτινοδιάγραμμα XRD δείγματος "K4"

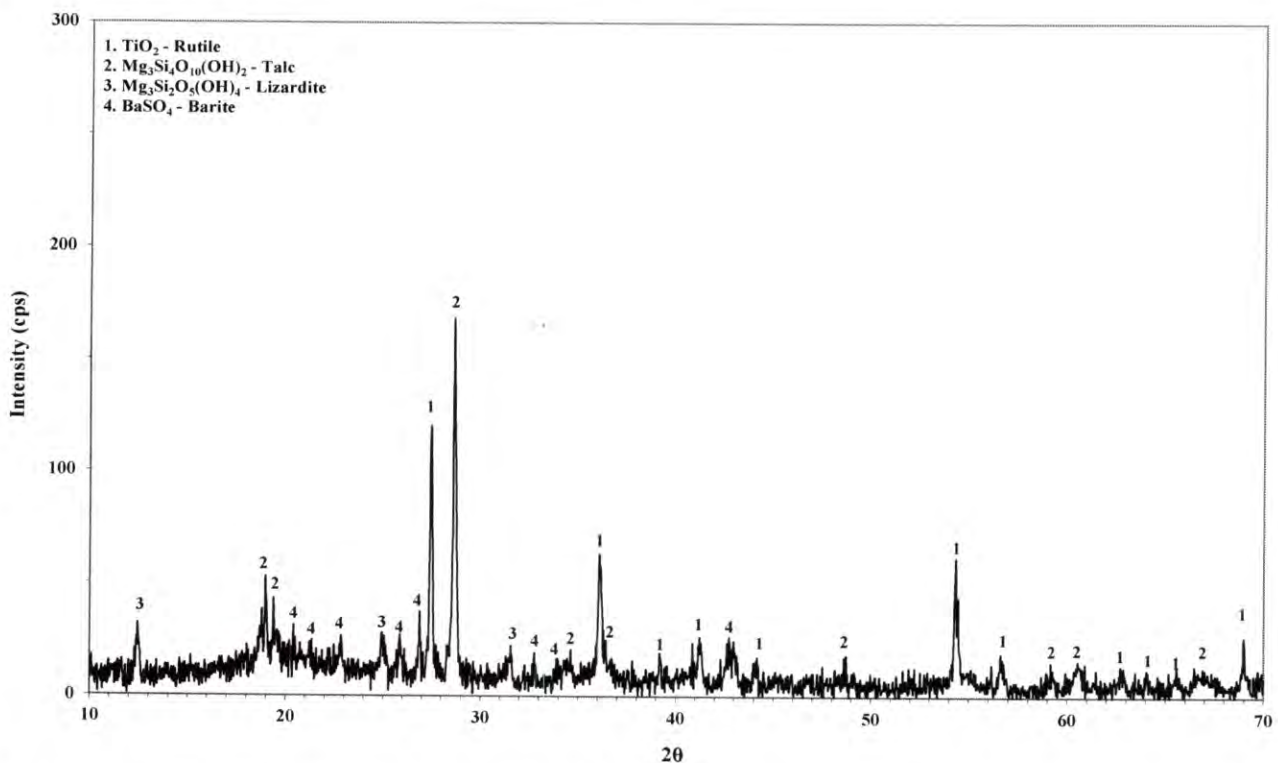
Στην **Εικόνα 58** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση της αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης στο Οπτικό και στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις, μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS). Αν και ο χάλυβας είναι ωστενιτικής φύσης, η αντιδιαβρωτική επικάλυψη είναι παραπλήσια με τα προηγούμενα δείγματα και παρουσιάζει τα ίδια δομικά χαρακτηριστικά.

Το συνολικός πάχος της οργανικής επικάλυψης είναι της τάξης των 980-1000 μm . Ανιχνεύτηκαν πέντε διαφορετικά διαδοχικά στρώματα οργανικών επικαλύψεων. Το πρώτο στρώμα, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το χάλυβα είναι "Αστάρι - Primer", το δεύτερο στρώμα είναι η "Ενδιάμεση Στρώση - Intermediate Coat", ενώ το τρίτο και το τέταρτο στρώμα είναι η "Τελική Διακοσμητική Στρώση - Topcoat".



Εικόνα 58: Μικρογραφίες OM, SEM και αναλύσεις EDS οργανικής επικάλυψης Δείγματος "K4"

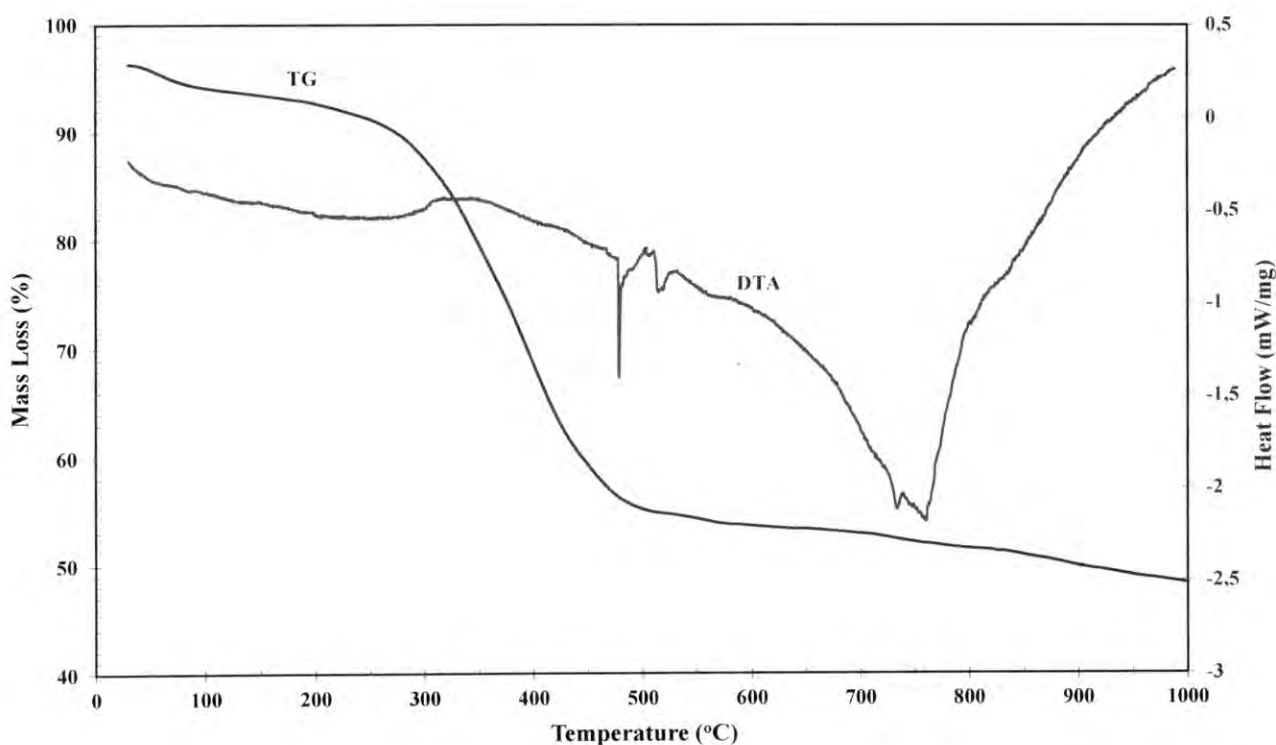
Το τελευταίο πέμπτο στρώμα είναι το “Anti-Graffiti Coat”. Το primer εμφανίζεται περισσότερο “τραχύ”, με έντονη παρουσία fillers, η ενδιάμεση στρώση είναι περισσότερο ομοιογενής και μεγάλου πάχους, τα topcoat εμφανίζονται με πιο λεία υφή και λιγότερα fillers και τέλος το anti-graffiti coat έχει τη μορφή πολύ λεπτού στρώματος (film). Ανιχνευτήκαν διάφοροι τύποι ανόργανων προσθέτων-πληρωτικών (fillers), γεγονός το οποίο επιβεβαιώθηκε και από τα αποτελέσματα της μεθόδου Περίθλασης Ακτίνων “X” (Σχήμα 27). 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 27: Ακτινοδιάγραμμα XRD αντιδιαβρωτικής οργανικής επικάλυψης Δείγματος “K4”

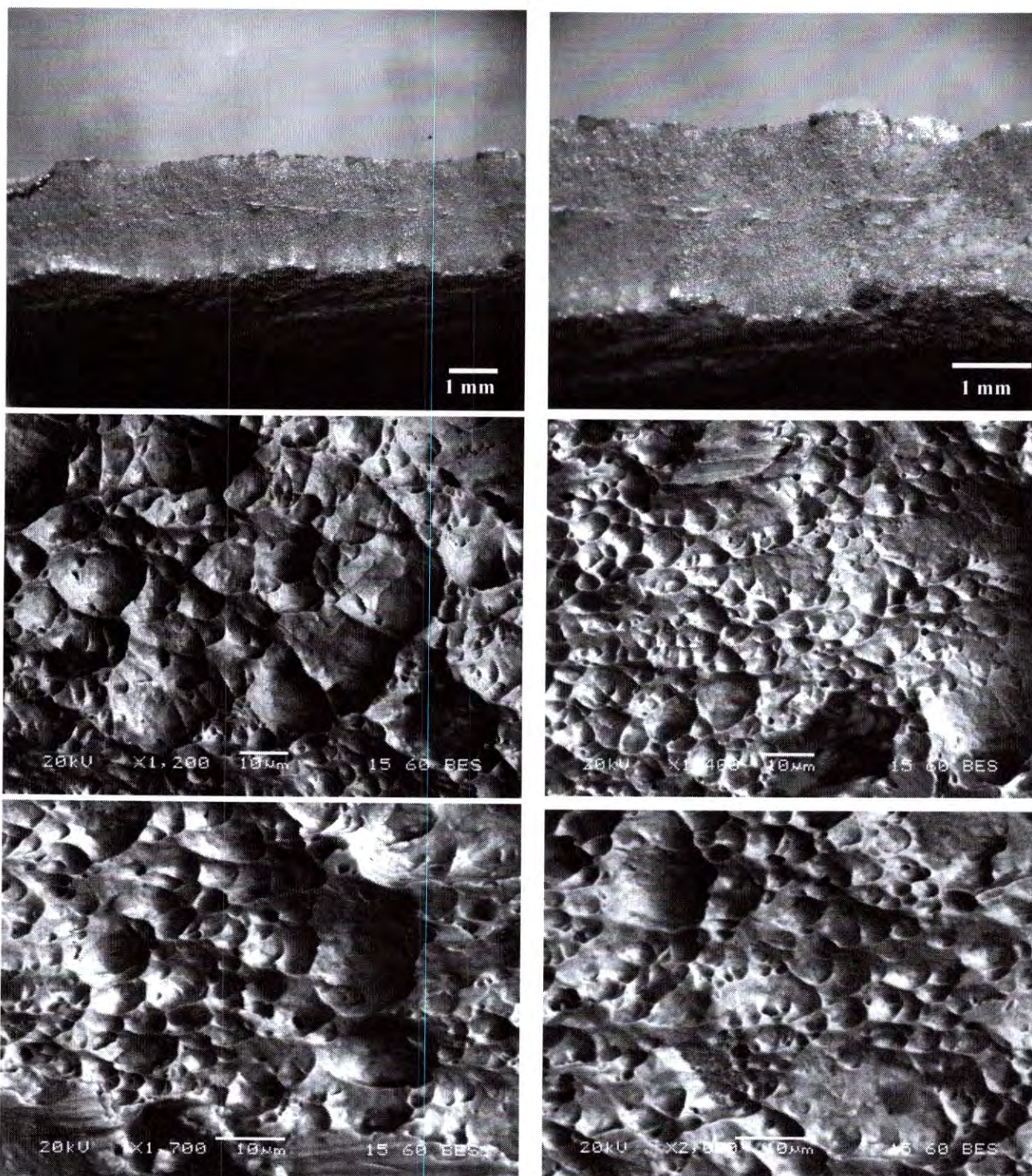
Στο Σχήμα 28 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα της εξέτασης της οργανικής αντιδιαβρωτικής επικάλυψης μέσω διαφορικής θερμικής ανάλυσης (TG-DTA), τα οποία είναι παραπλήσια με τα αντίστοιχα του Δείγματος “K3”. Πρόκειται για

τον ίδιο τύπο επικάλυψης, η οποία 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 28: Διαφορική θερμική ανάλυση αντιδιαβρωτικής επικάλυψης Δείγματος "K4"

Στην **Εικόνα 59** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση της επιφάνειας θραύσεως του Δείγματος "K4" σε Στερεοσκοπικό και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης. Τα αποτελέσματα συμπίπτουν με τα αντίστοιχα του Δείγματος "K3", 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 59: Μακρο/μικρογραφίες στερεοσκοπικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης επιφάνειας θραύσης δείγματος "K4"

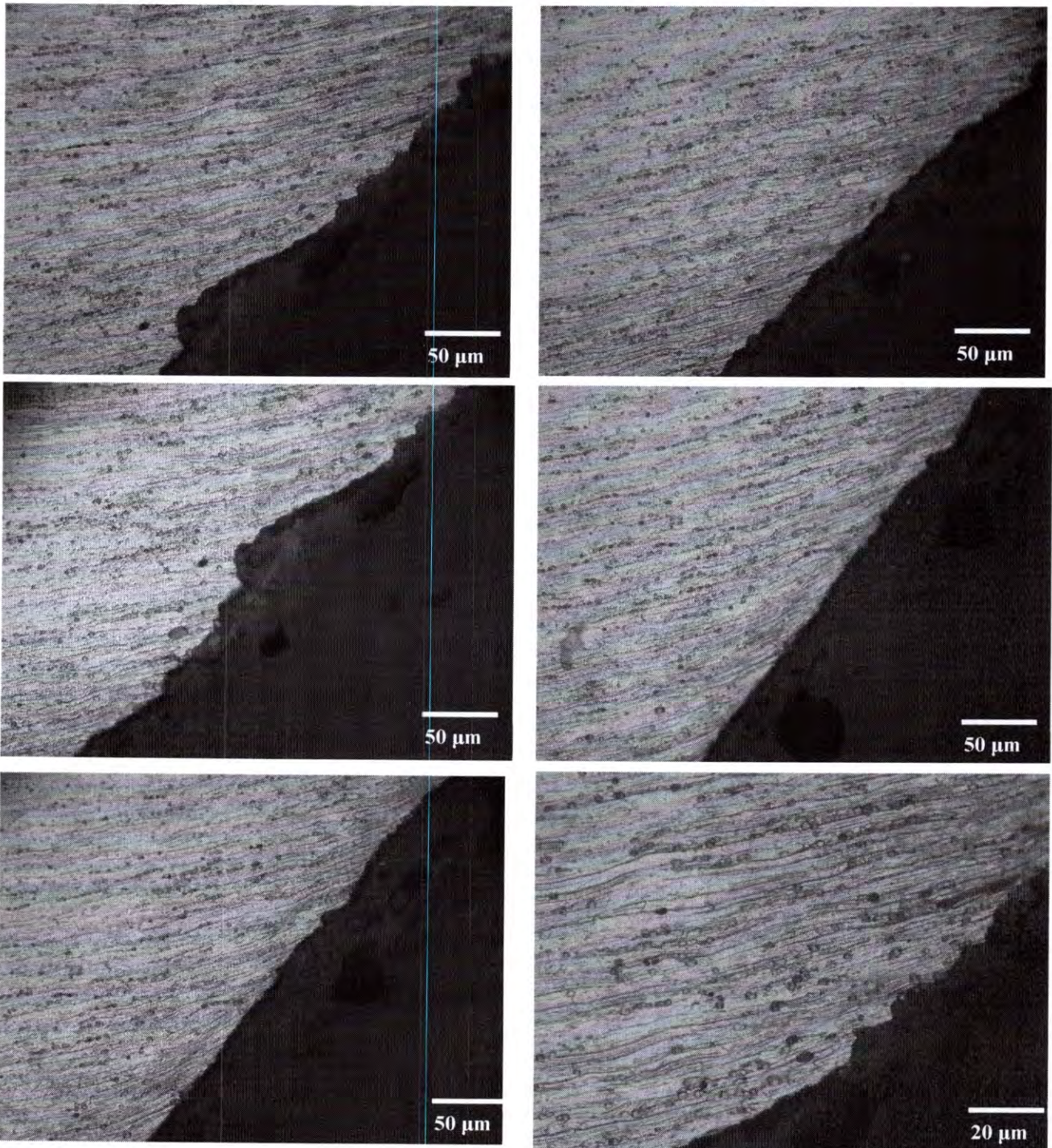


Σε όλες τις περιπτώσεις ανιχνεύονται, σε όλη την έκταση της επιφάνειας θραύσης, χαρακτηριστικές σφαιρικές ή ελλειπτικές μικροσκοπικές κοιλότητες (dimples), οι οποίες παραπέμπουν σε έναν σχετικά συμμετρικό και τακτικό σχηματισμό και αναπτύσσονται κατά την σταδιακή πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Από τον έλεγχο του μεγέθους των κοιλοτήτων προέκυψε ότι ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι σχετικά χαμηλός.

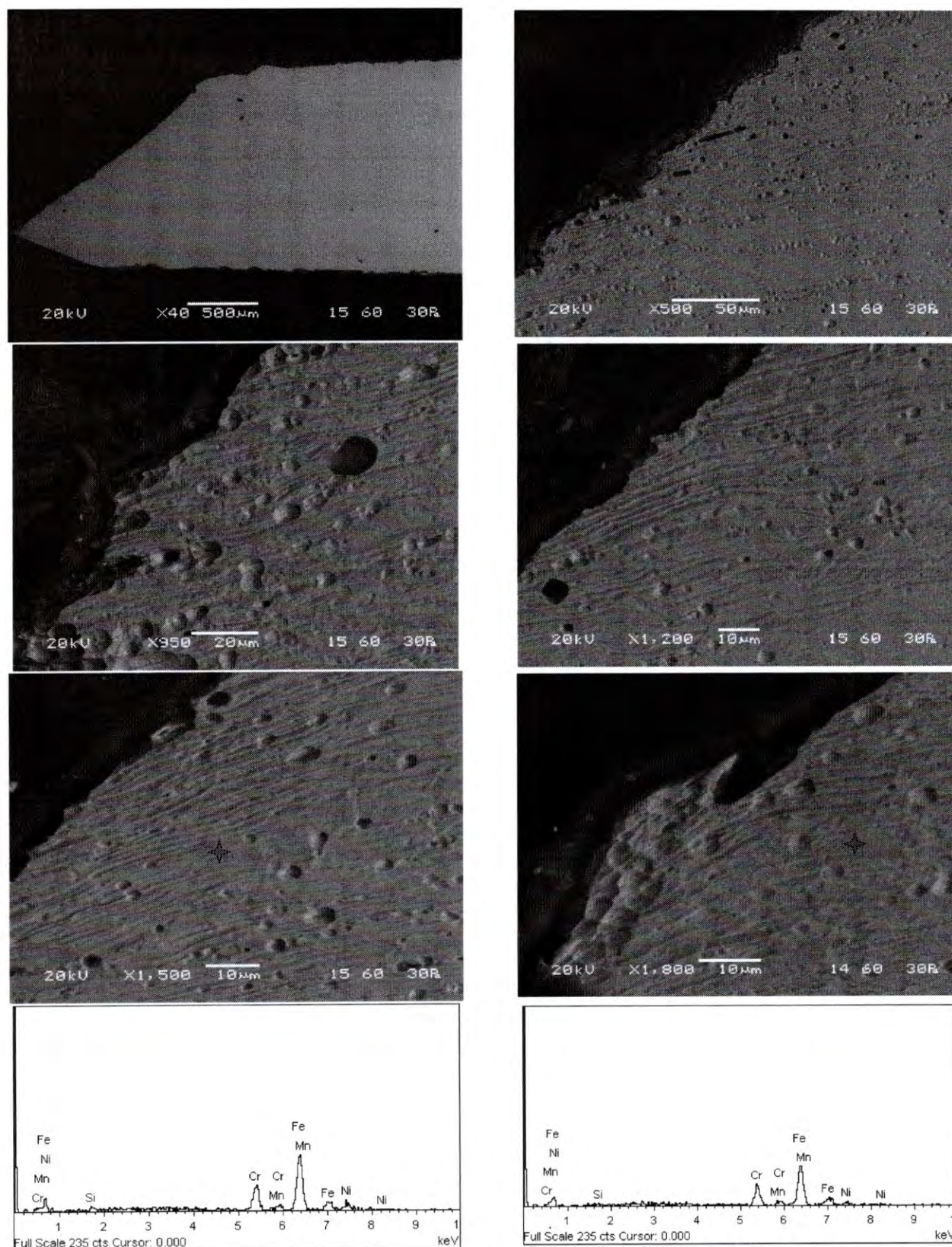
Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από τις αντίστοιχες μικρογραφίες από την εξέταση των παραχθέντων στιλπνών τομών σε Μεταλλογραφικό Οπτικό Μικροσκόπιο και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS), οι οποίες παρουσιάζονται στις **Εικόνες 60-61**. 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 επιμήκυνση είναι περισσότερο έντονη στις περιοχές όπου το υλικό έχει υποστεί τη μεγαλύτερη παραμόρφωση, και κυρίως στα άκρα των δοκιμίων, όπου παρατηρείται και μείωση της διατομής (στην περιοχή της θραύσης).

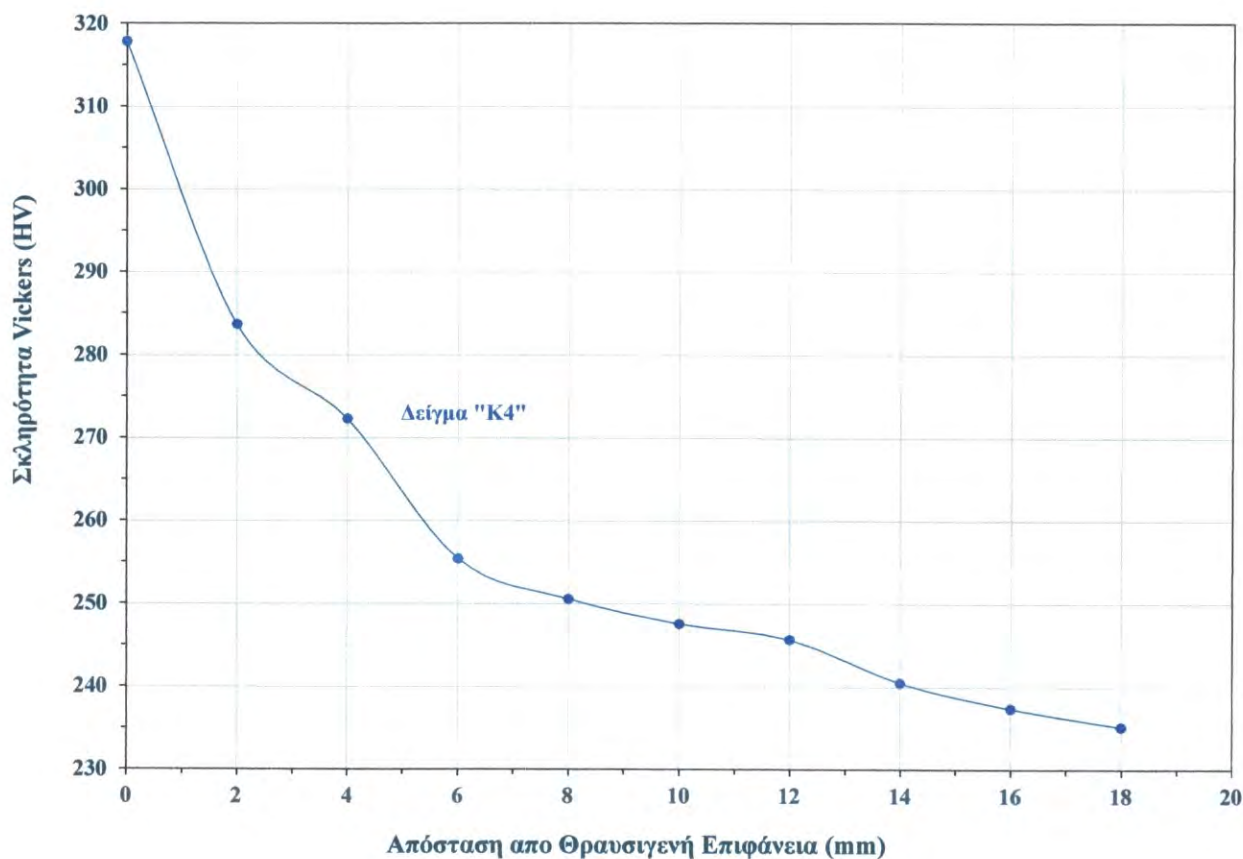


Εικόνα 60: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "K4" στην περιοχή της θραύσης



Εικόνα 61: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "K4"

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 29).



Σχήμα 29: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων Vickers παράλληλα στην διεύθυνση παραμόρφωσης Δείγματος "K4"

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 230 Vickers. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η αύξηση της σκληρότητας στην ζώνη θραύσης ήταν της τάξης του 35%.

3.8 Χαρακτηρισμός Δειγμάτων "H3 & K5"

Το Δείγμα "H3" αποσπάστηκε από το πίσω και κάτω αριστερά τμήμα της Ηλεκτράμαξας 120 012, ενώ το Δείγμα "K5" συλλέχθηκε από την αριστερή πλαϊνή πλευρά του τμήματος της οροφής του Θαλάμου Μηχανοδήγησης. Τα εν λόγω Δείγματα ήταν ενωμένα και έχουν αποκοπεί πιθανότατα με οξυακετυλινική κοπή, κατά την διαδικασία απομάκρυνσης των συντριμμίων στο πεδίο (Εικόνα 62).



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

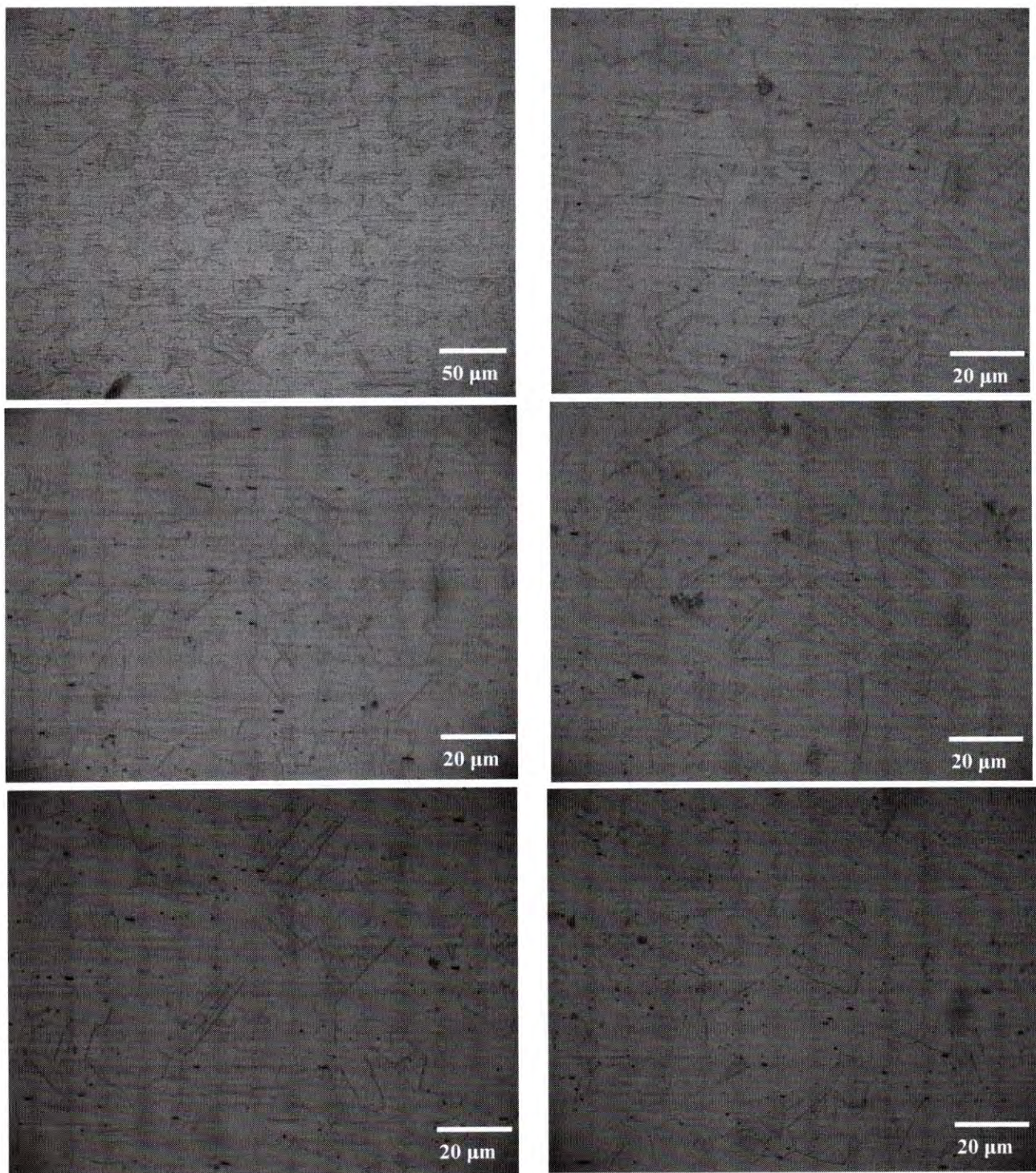


Κατά τον εργαστηριακό έλεγχο πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες δοκιμές:

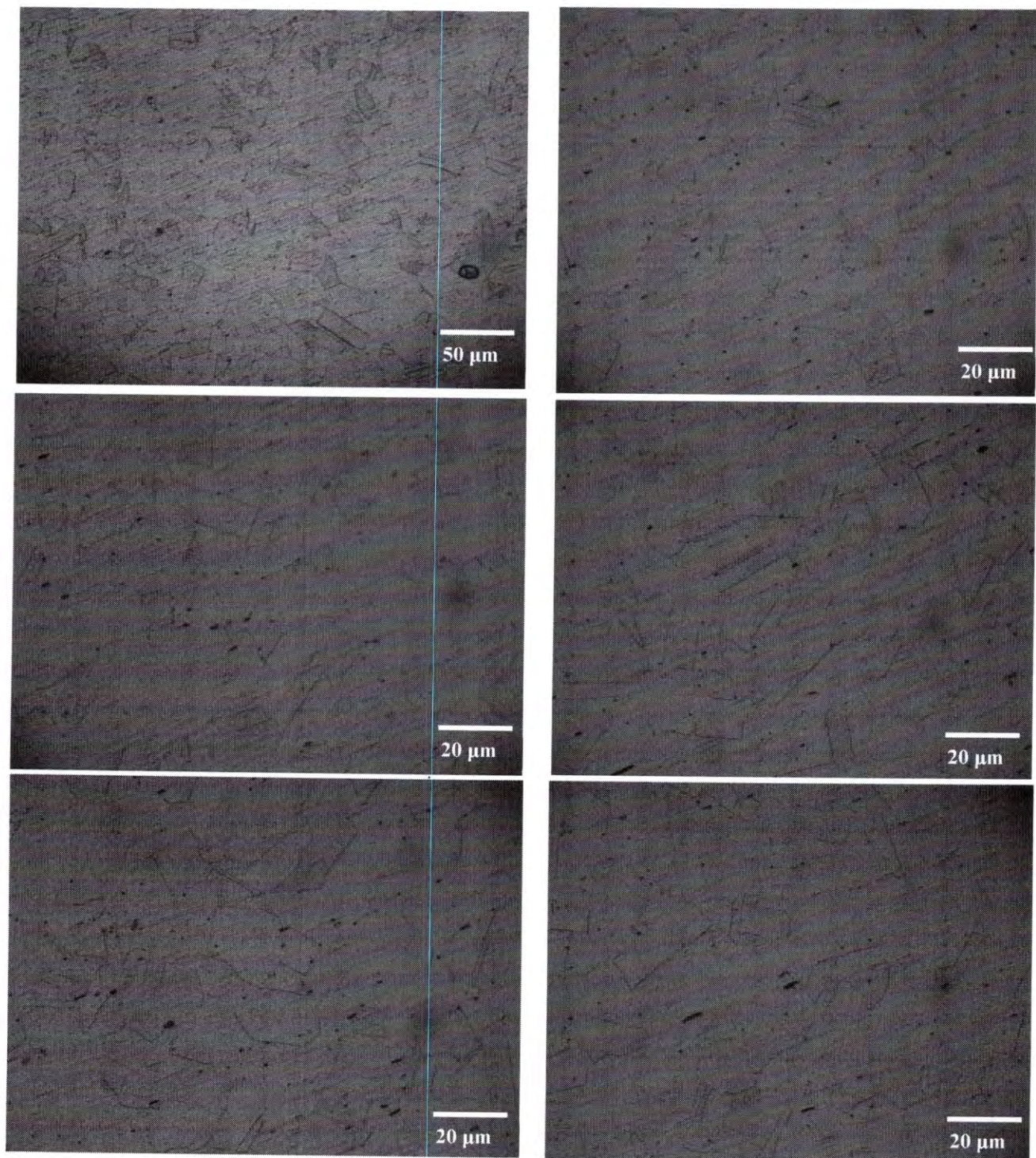
- ✓ Έλεγχος Μικροδομής στο Οπτικό Μικροσκόπιο
- ✓ Έλεγχος Μικροδομής και Μικροανάλυση σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης
- ✓ Έλεγχος Σκληρότητας Vickers
- ✓ Περίθλαση Ακτίνων Χ

Εξετάστηκε μια υγιής περιοχή των παραληφθέντων δειγμάτων με στόχο την μελέτη των δομικών και μικροδομικών χαρακτηριστικών τους. Στις **Εικόνες 63-66** 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).

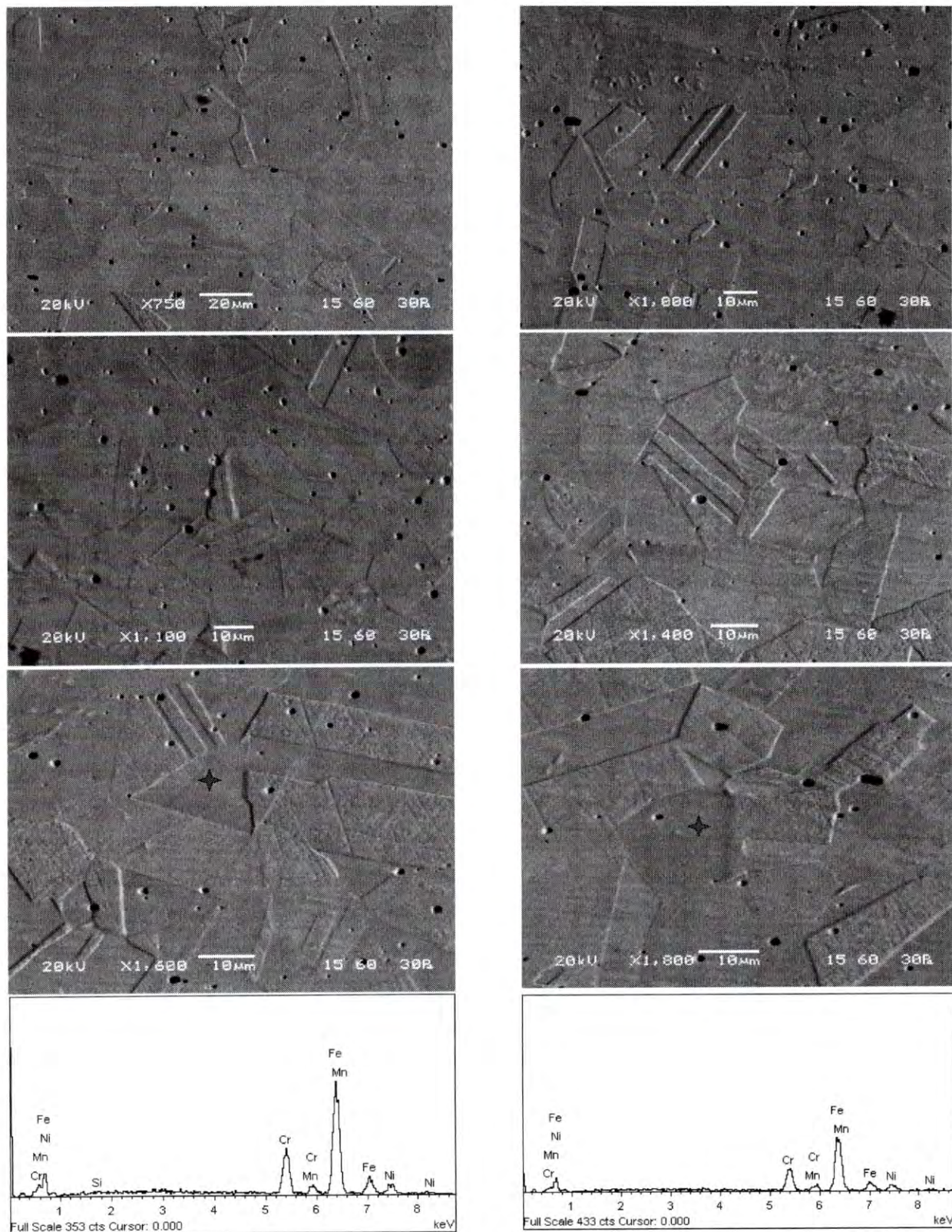
Και στις δύο περιπτώσεις πρόκειται για τον ίδιο ανοξείδωτο ωστενιτικό χάλυβα παραπλήσιο με αυτόν που ανιχνεύτηκε και στην περίπτωση του Δείγματος "Κ3", το οποίο έφερε το λογότυπο της εταιρείας και τον αριθμό της Ηλεκτρομηχανής. Από τα αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων EDS προέκυψε ότι ο εν λόγω ανοξείδωτος χάλυβας, εκτός από σίδηρο, περιέχει χρώμιο ($\approx 18.0\%$), νικέλιο, ($\approx 8.5\%$), μαγγάνιο ($\approx 1.5\%$), πυρίτιο ($\approx 0.7\%$). Η απουσία μολυβδαινίου υποδηλώνει ότι πρόκειται για ανοξείδωτο ωστενιτικό χάλυβα, πιθανότατα της κατηγορίας AISI 304. Ανιχνεύτηκε πλήρης ωστενιτική δομή (απουσία φερρίτη). Το Cr και το Ni είναι πλήρως διαλυμένα στον ωστενίτη, σχηματίζοντας ομοιογενή στερεά διαλύματα. Επίσης ανιχνεύονται διδυμίες, εντός των κόκκων του ωστενίτη, με την μορφή επαναλαμβανόμενων ζωνών με ελαφρώς διαφορετικό προσανατολισμό, υποδεικνύοντας κατεργασία ανόπτησης κατά την διαδικασία παραγωγής - διαμόρφωσης.



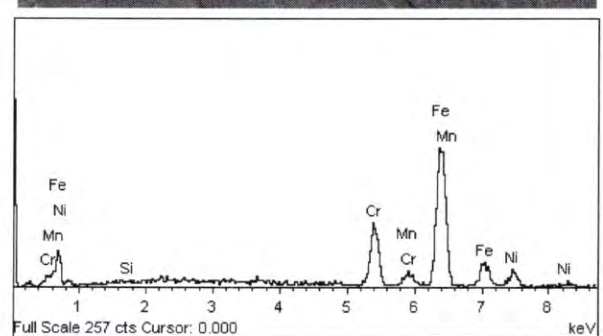
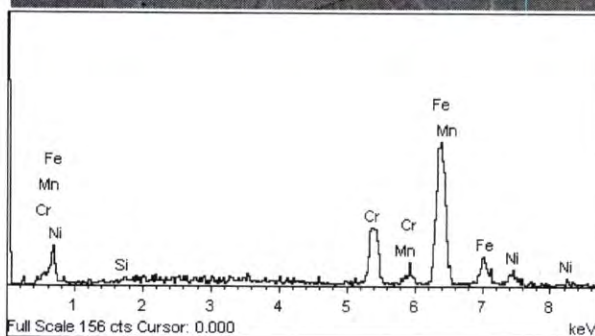
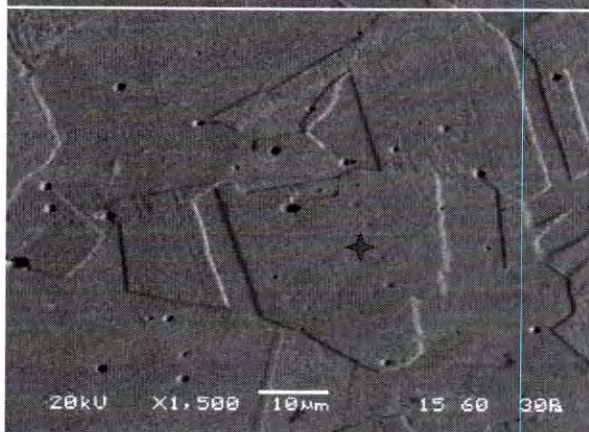
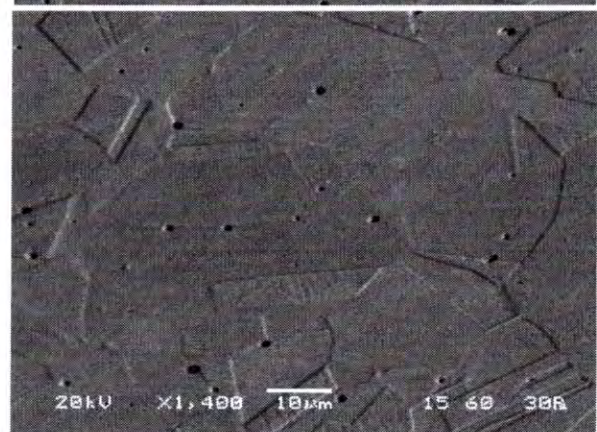
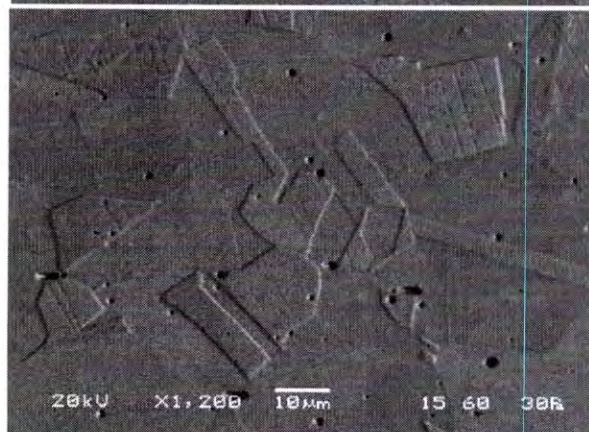
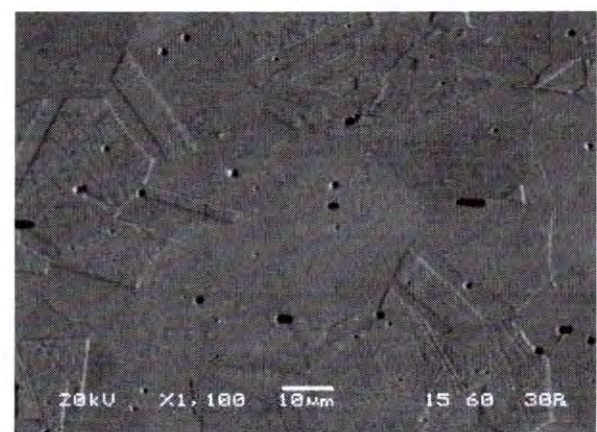
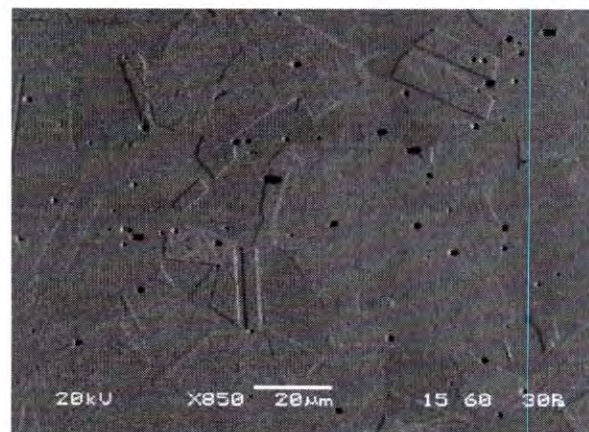
Εικόνα 63: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "H3"



Εικόνα 64: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου δείγματος "K5"

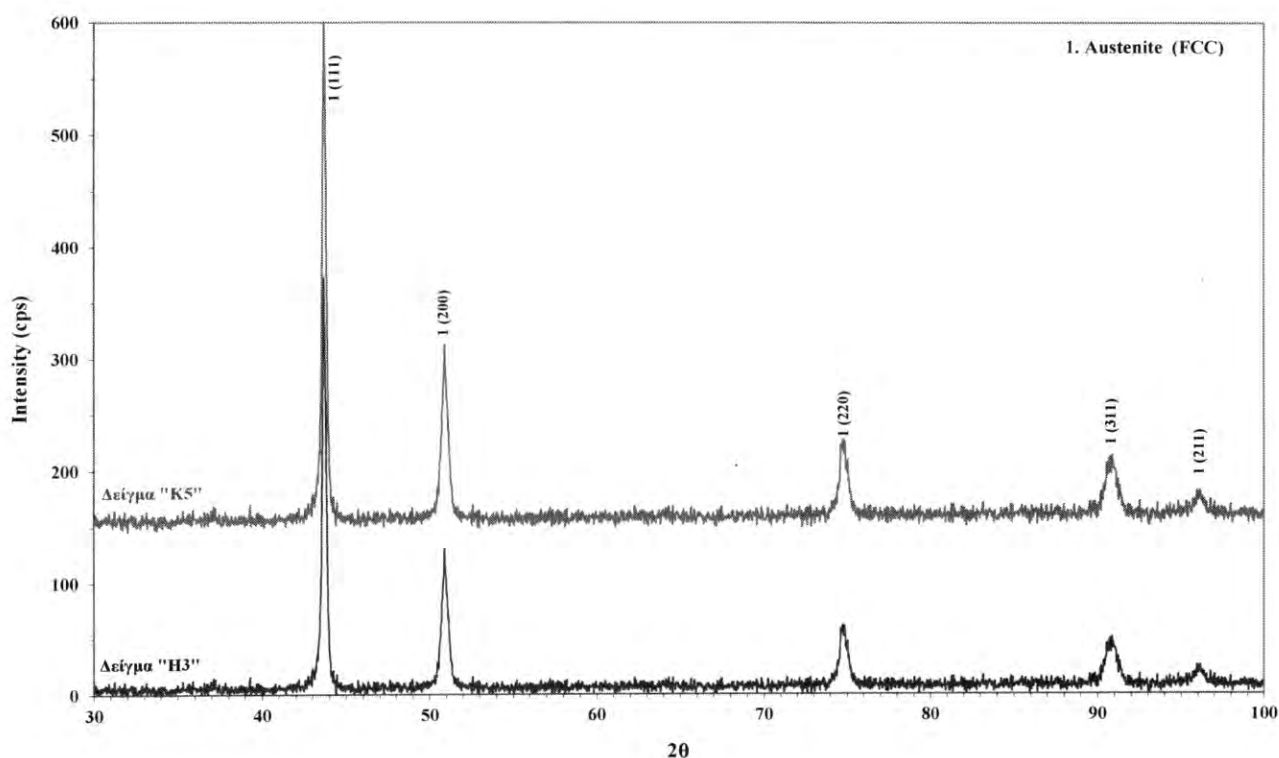


Εικόνα 65: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "H3"



Εικόνα 66: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS Δείγματος "K5"

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από την εξέταση των δοκιμίων με εφαρμογή της μεθόδου Περίθλασης Ακτίνων "Χ" (XRD). Και στις δύο περιπτώσεις ανιχνεύονται οι χαρακτηριστικές κορυφές του εδροκεντρωμένου (fcc) σιδήρου (Σχήμα 30).



Σχήμα 30: Συγκριτικό Ακτινοδιάγραμμα XRD Δειγμάτων "H3" και "K5"

Τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων, επιβεβαίωσαν τις παρατηρήσεις που προέκυψαν από την μεταλλογραφική εξέταση στο Οπτικό Μικροσκόπιο και στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρήθηκαν παραπλήσιες τιμές σκληρότητας, της τάξης των 230 Vickers.



4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με την υπ. αριθμ. 17/2025 διάταξη του Εφετείου Λάρισας, στα πλαίσια διεξαγωγής της κυρίας ανακρίσεως, ορίστηκε η διενέργεια “Προκαταρκτικής Πραγματογνωμοσύνης”, βασικό αντικείμενο της οποίας ήταν:

- I. 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.
- II. 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 συλλεχθέντα μεταλλικά θραύσματα, 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.

Για τον σκοπό αυτό αποφασίστηκε και πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία εννέα (9) συνολικά μεταλλικών δειγμάτων, τόσο από την θραυσιγενή επιφάνεια του οπίσθιου τμήματος της 2^{ης} Ηλεκτράμαξας, όσο και από μεταλλικά θραύσματα του οπίσθιου Θαλάμου Μηχανοδότησης της εν λόγω Ηλεκτράμαξας, ο οποίος αποκολλήθηκε κατά την διάρκεια του σιδηροδρομικού δυστυχήματος στην περιοχή Ευαγγελισμού Τεμπών Λάρισας. Τα τρία δείγματα (3) προέρχονταν από το οπίσθιο μέρος της εν λόγω Ηλεκτράμαξας (120 012), με κωδικούς “H1”, “H2” και “H3”, ενώ τα υπόλοιπα έξι (6)



προέρχονταν από τα αποκολλημένα θραύσματα του οπίσθιου Θαλάμου Μηχανοδότησης, με κωδικούς "Κ1α", "Κ1β", "Κ2", "Κ3", "Κ4" και "Κ5".

Από τη συνεκτίμηση όλων των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τους εργαστηριακούς ελέγχους, εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το υλικό κατασκευής των Δειγμάτων "Η1", "Η2", τα οποία προέρχονταν από το οπίσθιο μέρος της Ηλεκτράμαξας (120 012) στην περιοχή της αποκόλλησης, όπως επίσης και των Δειγμάτων "Κ1α" και "Κ1β", από τα πλευρικά τμήματα του θραύσματος της οροφής του Θαλάμου Μηχανοδότησης, είναι φερριτο-μπαινιτικός χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης, σχετικά χαμηλού ποσοστού άνθρακα ($\approx 0.25\%$), ο οποίος περιέχει περίπου 1.6% Μn, με μια μέση τιμή σκληρότητας της τάξης των 165-170 Vickers. Σε όλες τις περιπτώσεις ανιχνεύτηκε περίπου 70% προευτηκτοειδής φερρίτης, με την μορφή σχετικά μεγάλου μεγέθους κόκκων ($\approx 15-20 \mu\text{m}$), λεπτόκοκκος μπαινιτικός φερρίτης, με την μορφή λεπτών, επιμηκυμένων πλακιδίων φερρίτη, αλλά και καρβίδια του σιδήρου (κυρίως Fe_3C), τα οποία έχουν κατακρημνιστεί στα όρια κόκκων.
- Στην περίπτωση των Δειγμάτων "Κ2", "Κ3" και "Κ4", από τα συλλεχθέντα θραύσματα, ανιχνεύτηκε ανοξειδωτος ωστενιτικός χάλυβας, ο οποίος εκτός από χρώμιο περιέχει και νικέλιο της τάξης του $8-9\%$. Επισημαίνεται ότι το Δείγμα "Κ3" αποσπάστηκε από θραύσμα, από το εμπρόσθιο τμήμα του Θαλάμου Μηχανοδότησης, το οποίο έφερε το λογότυπο της εταιρείας και τον αριθμό της ηλεκτρομηχανής. Πρόκειται για ανοξειδωτο ωστενιτικό χάλυβα, πιθανότατα της κατηγορίας AISI 304, ο οποίος, εκτός από σίδηρο, περιέχει χρώμιο ($\approx 18.0\%$), νικέλιο, ($\approx 8.5\%$), μαγγάνιο ($\approx 1.5\%$) και πυρίτιο ($\approx 0.7\%$). Ο ίδιος τύπος χάλυβας ανιχνεύτηκε και στην περίπτωση των Δειγμάτων "Η3" και "Κ5".



- Σε όλες τις περιπτώσεις, τα εξετασθέντα δείγματα "H1", "H2", "K1α", "K1β", "K2", "K3" και "K4", είναι επικαλυμμένα με οργανική αντιδιαβρωτική επικάλυψη, πάχους περίπου 980-1000 μm, η οποία αποτελείται από πέντε διακριτά στρώματα. Το πρώτο στρώμα, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το χάλυβα είναι "Αστάρι – Primer", και στοχεύει στην ανάπτυξη ισχυρών δυνάμεων συνάφειας με το μεταλλικό υπόστρωμα. Το δεύτερο στρώμα είναι η "Ενδιάμεση Στρώση – Intermediate Coat", το οποίο στοχεύει στην ανάπτυξη υψηλών δυνάμεων πρόσφυσης με την τελική στρώση του ασταριού. Το τρίτο και το τέταρτο στρώμα είναι η "Τελική Διακοσμητική Στρώση – Topcoat), η οποία παρουσιάζει ανθεκτικότητα σε μηχανική φθορά και UV ακτινοβολία, ενώ προσφέρει το τελικό χρώμα και την τελική στιλπνότητα. Τέλος, το πέμπτο στρώμα είναι το "Anti-Graffiti Coat", το οποίο είναι μια υδρόφοβη / λιπόφοβη επικάλυψη. Ανιχνευτήκαν διάφοροι τύποι ανόργανων προσθέτων, όπως τάλκης (αύξηση όγκου, βελτίωση σταθερότητας και σκληρότητας βαφής, βελτίωση αντοχής στην τριβή), θειικό βάριο (βελτιωμένη κάλυψη, ανθεκτικότητα, σταθερότητα) και ρουτίλιο (βελτίωση της αντοχής στη διάβρωση, αντοχή στην τριβή και μηχανική φθορά).
- Από τα αποτελέσματα της διαφορικής θερμικής ανάλυσης (TG-DTA) προέκυψε ότι σε όλες τις περιπτώσεις, η αντιδιαβρωτική οργανική επικάλυψη παρουσιάζει θερμική σταθερότητα μέχρι το θερμοκρασιακό εύρος των 200 °C. Η έντονη αποικοδόμηση των οργανικών δομικών συστατικών 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%. Με την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας πραγματοποιείται και η διάσπαση των περιεχόμενων ανόργανων συστατικών-fillers της επικάλυψης (κυρίως του τάλκη). Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η θερμοκρασία δεν αυξήθηκε σημαντικά, καθώς η υφή της οργανικής επικάλυψης στην περιοχή της θραύσης παραμένει



αναλλοίωτη και δεν φαίνεται να έχει υποστεί κάποιο θερμικό μετασχηματισμό, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί την ακεραιότητά της (σταθερό πάχος, υψηλή συνάφεια με το υπόστρωμα) σε απόσταση σχετικά μικρή, σε σχέση με την περιοχή της θραύσης, γεγονός το οποίο δεν συνάδει με την ύπαρξη ισχυρού ωστικού κύματος, υψηλής πίεσης ή υψηλής θερμοκρασίας.

- Τα ανιχνευόμενα μικρογραφικά χαρακτηριστικά της θραυσιγενούς επιφάνειας των συλλεχθέντων δειγμάτων υποδεικνύουν ότι το υλικό υπέστη σημαντική πλαστική παραμόρφωση πριν από τη θραύση, χαρακτηριστικό το οποίο 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 κοιλιοτήτων προέκυψε ότι ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι σχετικά χαμηλός, καθώς το υλικό διαθέτει περισσότερο χρόνο ώστε να υποστεί πλαστική παραμόρφωση. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώθηκε και από τα αποτελέσματα της σκληρότητας Vickers, τα οποία υποδεικνύουν την ύπαρξη εκτεταμένης ζώνης πλαστικής παραμόρφωσης (ενδοτράχυνση).
- Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από τις αντίστοιχες μικρογραφίες σε στιλπνές τομές, στην διεύθυνση της παραμόρφωσης, καθώς δεν ανιχνευτήκαν χαρακτηριστικά που να υποδεικνύουν υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης (ανίχνευση διδυμιών, ζωνών διάτμησης, φαινόμενα τήξης ή ανακρυστάλλωσης, φαινόμενα spalling ή ύπαρξη έντονων ρωγματώσεων). Παρατηρείται σημαντική πλαστική παραμόρφωση και επιμήκυνση των κόκκων του υλικού, χαρακτηριστικά που παραπέμπουν σε όλκιμη θραύση, χαμηλού ρυθμού καταπόνησης. Η επιμήκυνση αυτή είναι περισσότερο έντονη στις περιοχές όπου το υλικό έχει υποστεί τη μεγαλύτερη παραμόρφωση, και κυρίως στα άκρα των



συλλεχθέντων δοκιμίων, όπου παρατηρείται και σταδιακή μείωση της διατομής (στην περιοχή της θραύσης). Σε υψηλότερες ταχύτητες επιβολής του φορτίου (υψηλός ρυθμός παραμόρφωσης), το υλικό δεν θα είχε αρκετό χρόνο να υποστεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Κατά συνέπεια, οι κόκκοι δεν θα προλάβαιναν να επιμηκυνθούν ή να παραμορφωθούν σημαντικά όπως στις χαμηλότερες ταχύτητες παραμόρφωσης. Η πολύ υψηλή ταχύτητα παραμόρφωσης θα οδηγούσε σε εμφάνιση χαρακτηριστικών ψαθυρής θραύσης, καθώς στην περίπτωση αυτή, η ενέργεια δεν θα μπορούσε να διαχυθεί σε μεγάλη περιοχή του υλικού.

- Συμπερασματικά, και σύμφωνα με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ελέγχων, τα μικροδομικά και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των εξετασθέντων μεταλλικών Δειγμάτων και των αντίστοιχων οργανικών αντιδιαβρωτικών επικαλύψεων, τόσο από την θραυσιγενή επιφάνεια του οπίσθιου τμήματος της 2^{ης} Ηλεκτράμαξας (με αριθμό 120 012), όσο και από τα συλλεχθέντα μεταλλικά μέρη-θραύσματα του οπίσθιου Θαλάμου Μηχανοδήγησης, ο οποίος αποκολλήθηκε κατά την διάρκεια του σιδηροδρομικού δυστυχήματος στην περιοχή Ευαγγελισμού Τεμπών Λάρισας, υποδεικνύουν χαμηλή σχετικά ταχύτητα παραμόρφωσης, χωρίς σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας, χαρακτηριστικά τα οποία δεν συνάδουν με την ύπαρξη ωστικού κύματος από φαινόμενα έκρηξης/υψηλής ταχύτητας εκτόνωσης αερίου.



5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ashby M, Shercliff H, Cebon D, Υλικά: Μηχανική, Επιστήμη, Επεξεργασία & Σχεδιασμός, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2011.

Askeland DR, Wright WJ, Υλικά, Δομή, Ιδιότητες και Τεχνολογικές Εφαρμογές, Εκδόσεις Τζιόλα, 2017

Arsenault R. J., Plastic Deformation of Materials, Treatise on Materials Science and Technology, Elsevier, 1st Edition, 2013

Bai Y.L., Bai J., Li H.L., Ke F.J., Xia M.F., Damage evolution, localization and failure of solids subjected to impact loading, International Journal of Impact Engineering, 24 (2000), pp. 685-701

Balagansky I., Karanik Y., Agureikin V., Vinogradov A., Balagansky A., Fracture behavior of explosively loaded spherical molded steel shells, Theor. Appl. Fract. Mech., 36 (2) (2001), pp. 165-173

Clyne T. W., Campbell J. E., Testing of the Plastic Deformation of Metals, Cambridge University Press; 1st edition, 2021

DIN EN 1127-1, Explosive atmospheres – Explosion prevention and protection – Part 1: Basic concepts and methodology, 2019

Euser, V.K., Jones, D.R., Martinez, D.T., Valdez, J.A., Trujillo, C.P., Cady, C.M., Fensin, S.J. The effect of microstructure on the dynamic shock response of 1045 steel, (2023) Acta Materialia, 250, art. no. 118874

Fickett W., Davis W.C., Detonation: Theory and Experiment, Dover Publications, Mineola, N.Y., 2000



McDonald B., Bornstein H., Langdon G., Curry R., Daliri A., Orifici A., Experimental response of high strength steels to localised blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, 115 (2018), pp. 106-119

Micallef K., Fallah A.S., Pope D.J., Louca L.A., Dynamic performance of simply supported rigid plastic circular thick steel plates subjected to localized blast loading, *Int J Mech Sci*, 65 (1) (2012), pp. 177-191

Li, C., Yang, K., Tang, X.C., Lu, L., Luo, S.N., Spall strength of a mild carbon steel: Effects of tensile stress history and shock-induced microstructure, (2019) *Materials Science and Engineering: A*, 754, pp. 461-469

Li J.Q., Xu X.Z., Duan Y., Ren H.L., Fracture mechanism of steel plate loaded by explosive-induced shock waves, *Eng Fail Anal*, 101 (2019), pp. 243-256

Liang M., Li X., Lu F., Improved method used to investigate the dynamic shear failure of AISI 1045 steel cylinder under blast loading, *Int. J. Appl. Mech.*, 08 (01) (2016), p. 1650003,

Lowe T.C., Valiev R.Z., *Investigations and Applications of Severe Plastic Deformation* 1st Edition, Springer, 1st edition, 2000

Neel, C., Gibbons, S., Abrahams, R., House, J., Shock and Spall in the Low-alloy Steel AF9628, *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 6(2020), pp. 64-77

Odeshi, A.G., Al-Ameer, S., Bassim, M.N., Effect of high strain rate on plastic deformation of a low alloy steel subjected to ballistic impact, *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163 (2005), pp. 385-391

Wang X. Y, Wang S.S., Ma F., Experimental study on the expansion of metal cylinders by detonation, *International Journal of Impact Engineering*, 114 (2018), pp. 147-152



Wu T.Y., Jiang N., Zhou C.B., Luo X.D., Sun J.S., Evaluate of anti-explosion for high-pressure gas steel pipeline subjected to ground explosion, J Constr Steel Res, 177 (2021), Article 106429

Yang, K., Li, C., Zhao, X.J., Liang, Y.X., Luo, S.N., Cai, Y., Impact-induced twinning and phase transition in a medium carbon steel, Journal of Alloys and Compounds, 881 (2021), art. no. 160421

Yang, Y., Wang, H., Wang, C., Yang, L., Effects of the Phase Interface on Spallation Damage Nucleation and Evolution in Dual-Phase Steel, Steel Research International, 91 (2020), art. no. 1900583