

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

**«ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΡΟΤΕΡΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ
ΣΤΗΝ ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΧΑΛΥΒΩΝ
ΕΙΔΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ»**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

Θεόδωρος Πολίτης του Νικολάου (Α.Μ. 40245)

Νικόλαος Τούντας του Ιωάννη (Α.Μ. 42704)

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:

Δρ. Πανδώρα Π. Ψυλλάκη

Αιγάλεω, Νοέμβριος 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι η πειραματική ανάλυση των τριβολογικών ιδιοτήτων εργαλειοχάλυβα με εμπορική ονομασία “QRO 90”. Αρχικά, μελετήσαμε τις βασικές έννοιες της τριβολογίας και επιπλέον διερευνύσαμε την σημαντικότητα των θερμικών-επιφανειακών κατεργασιών και συγκεκριμένα την επίδραση της ενανθρακαζώτωσης στην μικροδομή και γενικά την τριβολογική συμπεριφορά των εργαλειοχαλύβων μέσα από επιστημονικά άρθρα ερευνητών, τα οποία αντλήθηκαν από διεθνή βάση δεδομένων. Επίσης, ο εργαλειοχάλυβας (QRO 90) υποβλήθηκε σε θερμική κατεργασία σκλήρυνσης και επιτύχαμε να δημιουργήσουμε τρία δοκίμια με τελικές τιμές σκληρότητας 40, 45 και 50 HRC. Σε όλα τα δοκίμια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τριβής ολίσθησης τύπου σφαίρας-δίσκου με κάθετα εφαρμοζόμενο φορτίο 1, 2, 5 και 10N, υπό σταθερή γραμμική ταχύτητα $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ και με ανταγωνιστικό υλικό σφαίρα αλουμίνας (Al_2O_3). Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών τριβής ολίσθησης, εξετάστηκαν τα εξής:

- (α) Η μικροδομή του εργαλειοχάλυβα.
- (β) Η εξέλιξη του συντελεστή τριβής.
- (γ) Η εξέλιξη του συντελεστή φθοράς.

ABSTRACT

The aim of this dissertation is the experimental analysis of the tribological properties of tool steel with trade name "QRO 90". First, we studied the basic ideas of tribology and furthermore we investigated the importance of heat-surface treatment and specifically the influence of nitrocarburising to the microstructure and generally the tribological behaviour of tool steels inside scientific researcher's articles, which abstracted from global database. Also, the tool steel (QRO 90) were subjected to heat treatment and we achieved to create three test specimens with final hardness values 40, 45 and 50 HRC. All the specimens were tested in a ball-on-disk apparatus with normal load 1, 2, 5 and 10N, under constant linear speed 200 mm*s-1 and alumina (Al₂O₃) were used as counterbody. With the termination of the experimental results were evaluated:

- a) The microstructure of the tool steel.
- b) The development of the friction coefficient.
- c) The development of the wear coefficient.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Τριβολογίας του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής, θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ειλικρινείς ευχαριστίες μας προς το πρόσωπο της Δρ. Πανδώρας Ψυλλάκη αφενός για την φιλοξενία στο εργαστήριο Τριβολογίας, όπου ελήφθησαν και οι πειραματικές μετρήσεις της εργασίας και αφετέρου για την αμέριστη συμπαράσταση, υπομονή και καθοδήγησή της.

Επιπρόσθετα, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον εργαστηριακό συνεργάτη MSc Αθανάσιο Μουρλά για τις υποδείξεις του, οι οποίες μας βοήθησαν να ολοκληρώσουμε τις πειραματικές μετρήσεις.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ - ABSTRACT	i
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	iv
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	5
1.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΟΙ	5
1.1.1. ΤΡΙΒΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ: ΤΡΙΒΗ ΚΑΙ ΦΘΟΡΑ	5
1.1.2. ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΕΣ	7
1.2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΡΟΣΦΑΤΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ	10
1.2.1. ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ	10
1.2.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	25
1.2.3. ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ	32
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	43
2.1. ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΥΛΙΚΟ	43
2.2. ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	44
2.3. ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΒΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	45
2.4. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ	46
3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	48
3.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ-ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	48
3.2. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ	49
3.3. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΦΘΟΡΑΣ	61
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	63
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	65

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελεί συνέχεια μιας σειράς πτυχιακών εργασιών, προπτυχιακού και μεταπτυχιακού επιπέδου, που έχουν εκπονηθεί στο Εργαστήριο Τριβολογίας του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ, από το 1998 έως σήμερα, στο αντικείμενο της επιφανειακής ενίσχυσης εργαλειοχαλύβων με τεχνικές διάχυσης και της συμπεριφοράς τους σε επιφανειακές φορτίσεις.

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να μελετηθούν οι τρόποι επιφανειακής ενίσχυσης εργαλειοχαλύβων, προκειμένου να αυξηθεί η μηχανική τους αντοχή, κύρια σε επιφανειακές μηχανικές καταπονήσεις. Ως συνέχεια των προγενέστερων εργασιών, επιλέχθηκε μια νέα κλάση χαλύβων με υψηλό ποσοστό κραματικών στοιχείων. Ο χάλυβας αυτός σκληρύνθηκε με θερμική κατεργασία και ελέγχθηκε η συμπεριφορά του σε τριβή. Παράλληλα, έγινε ανασκόπηση των πρόσφατων βιβλιογραφικών δεδομένων στο αντικείμενο της επιφανειακής ενίσχυσης με τεχνικές διάχυσης χαλύβων ειδικών ποιοτήτων.

Ο χάλυβας είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο. Η χρήση του είναι συχνή, από την αρχιτεκτονική και τη ναυπηγική μέχρι την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων. Ο χάλυβας είναι ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά υλικά και οι χαλυβουργίες (εργοστάσια παραγωγής χάλυβα) ανήκουν στις «βαριές βιομηχανίες».

Η ιστορία του χάλυβα ξεκινά γύρω στο 1000 π.Χ., όταν μεταλλουργοί της εποχής εκείνης άρχισαν να παράγουν χάλυβα συστηματικά με ενανθράκωση σπογγώδους σιδήρου. Σε παλαιότερες εποχές, η βιομηχανική παραγωγή μιας χώρας αξιολογούνταν από την παραγωγή της σε χάλυβα. Μια από τις τρεις Ευρωπαϊκές Κοινότητες που ιδρύθηκαν το 1957 ήταν και η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Άνθρακα και Χάλυβα.

Εάν πάμε στο σήμερα η ποικιλία των χαλύβων που διατίθενται στην αγορά για μηχανολογικές κατασκευές είναι ιδιαίτερος πλούσιος και καθιστά δύσκολη την επιλογή τους ακόμη και για μία σχετικά απλή κατασκευή. Όπως προαναφέραμε για

κάθε εφαρμογή, απλή ή μη θα πρέπει να είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε εκ των προτέρων τα χαρακτηριστικά που επιθυμούμε να προσδώσουμε σε αυτήν, τις φυσικές ιδιότητες και την μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα της εφαρμογής, όπως και τις διεργασίες με τις οποίες αυτός μπορεί να αποκτήσει τις απαιτούμενες ιδιότητες μέσω των διαδικασιών που θα του διαμορφώσουν το επιθυμητό σχήμα και φυσικά το οικονομικό κόστος. Μια παράλειψη ή μια λανθασμένη εκτίμηση μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές δαπάνες ή και σε σοβαρά ατυχήματα.

Χάλυβες καλούνται τα κράματα σιδήρου (Fe) και άνθρακα (C), με περιεκτικότητα σε άνθρακα κάτω του 2,0%, οι οποίοι παρασκευάζονται με εξανθράκωση του χυτοσιδήρου. Στη σύνθεση των χαλύβων συνδυάζονται με το σίδηρο διάφορα στοιχεία σε ποσοστιαίες αναλογίες που δεν ξεπερνούν κατά κανόνα το 5%. Συστατικά στοιχεία κάθε χάλυβα αποτελούν ο χαλκός (Cu) σε ποσοστά που κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 0,2% και 0,7%, το μαγγάνιο (Mn) σε ποσοστό μικρότερο του 1,65% και το πυρίτιο (Si) σε ποσοστό μεταξύ 0,1% και 0,7% και ενίοτε έως και 4% σε ειδικούς χάλυβες. Ο φωσφόρος (P), το θείο (S) και το οξυγόνο (O) αποτελούν επιβλαβείς ακαθαρσίες-ρύπους στη σύνθεση του χάλυβα, ο οποίος αποκτά αρνητικές ιδιότητες, όπως ψαθυρότητα (φωσφόρος), μαλακτότητα (θείο), δημιουργία ανεπιθύμητων ασυνεχειών – φυσαλίδων κατά την χύτευση (οξυγόνο). Για τον λόγο αυτό η περιεκτικότητα των στοιχείων αυτών στο χάλυβα πρέπει να κυμαίνεται σε ποσοστά κατά πολύ μικρότερα του 0,1%.

Με βάση τη χρήση υπάρχουν ορισμένες γενικές κατηγορίες χάλυβα (ανοξειδωτος, πυρίμαχος, κ.α. ειδικοί χάλυβες), αν και στην συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία θα επικεντωθούμε με τους χάλυβες εργαλείων-**εργαλειοχάλυβες**.

Οι **εργαλειοχάλυβες (tool steels)** αποτελούν ένα μικρό ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής χαλύβων. Εμπεριέχουν 0,6-1,4% άνθρακα (C) και διάφορα άλλα στοιχεία προσθήκης-κρματικά στοιχεία (Mn, Cr, V, W, Mo, Co, Ni και Si). Τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία προσθήκης έχουν έντονη χημική συγγένεια με τον άνθρακα είναι, δηλαδή, καρβιδιογόνα. Ο σχηματισμός σταθερών καρβιδίων παρεμποδίζει την ανάπτυξη του μεγέθους των κόκκων, κατά την ωστενιτοποίηση, συντελώντας στην επίτευξη υψηλής σκληρότητας. Η καταλληλότητά των εργαλειοχαλύβων προέρχεται από την χαρακτηριστική σκληρότητα, αντοχή στην τριβή-φθορά, υψηλή δυσθραυστότητα και εμβαπτότητα, καθώς και την ικανότητά

τους να διατηρούν μια αιχμή και την αντοχή τους σε παραμόρφωση κατά την διάρκεια υψηλών θερμοκρασιών. Αυτός επιλέγεται για κάθε εφαρμογή, με βάση τις πρέπουσες ιδιότητες για να εκτελέσει σωστά κάθε λειτουργία, αλλά παράλληλα να είναι και μια οικονομική επιλογή.

Ως επί το πλείστον, οι εργαλείοχάλυβες χρησιμοποιούνται γενικά, ύστερα από πρότερη θερμική κατεργασία και επιφανειακή. Οι **θερμικές κατεργασίες (heat treatment)** απευθύνονται στο συνολικό όγκο του υλικού, οι οποίες έχουν ως σκοπό τη σκλήρυνση τους, την ελάτωση ή και ολική απαλοιφή των παραμένουσων τάσεων, μέσα από τον έλεγχο του μεγέθους των κόκκων, που έχει ως αποτέλεσμα την διαμόρφωση των επιθυμητών ή άλλων ιδιοτήτων τους. Ενώ, οι **επιφανειακές κατεργασίες (surface treatment)** περιορίζονται σε μια εξωτερική στιβάδα του υλικού, που έχει εύρος της τάξεως μερικά μm έως και δέκατα του χιλιοστού (mm), και αφορούν την επιφανειακή σκλήρυνση κραματωμένων μετάλλων και μη, για την προστασία τους από διάβρωση και την τροποποίηση του ανάγλυφου της επιφανείας ή του χρωματισμού της.

Η παρούσα εργασία αποτελείται από τρία μέρη:

- Στο 1^ο θεωρητικό μέρος, καταρχάς γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των βασικών εννοιών και κρίσιμων όρων που αφορούν το αντικείμενο της μελέτης μας. Οι βασικές αυτές έννοιες έχουν αναλυθεί σε προγενέστερες εργασίες, αποτελούν αντικείμενο προπτυχιακών μαθημάτων που διδαχτήκαμε στο Τμήμα και εκτιμάμε ότι εκτενέστερη αναφορά δε θα συνέβαλε περαιτέρω. Ωστόσο, γίνεται αναλυτική καταγραφή των ερευνητικών αποτελεσμάτων που περιέχονται σε πρόσφατα επιστημονικά άρθρα (2011-σήμερα) για το θέμα. Ως πηγή αναζήτησης χρησιμοποιήθηκε η βάση Scopus® (τελευταία πρόσβαση: 31.07.2017).
- Το 2^ο μέρος αφορά στην περιγραφή των υλικών και των εργαστηριακών διατάξεων που χρησιμοποιήσαμε. Αναλύεται η θερμική κατεργασία στην οποία υποβλήθηκε ο χάλυβας που εξετάσαμε και περιγράφονται διεξοδικά τα πειραματικά μας αποτελέσματα, από την εξέταση της τριβολογικής συμπεριφοράς του χάλυβα αυτού σε δοκιμές τριβής σημειακής επαφής.

- Στο 3^ο μέρος, ανακεφαλαιώνονται τα κύρια συμπεράσματα της προκαταρκτικής αυτής εργαστηριακής διερεύνησης που κάναμε και καταγράφονται πιθανοί άξονες μελλοντικών πτυχιακών εργασιών στο θέμα της βελτίωσης ισχυρά κραματοποιημένων χαλύβων με τεχνικές διάχυσης.

Θεόδωρος Πολίτης

Νικόλαος Τούντας

Νοέμβριος 2017

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΟΙ

1.1.1. ΤΡΙΒΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ: ΤΡΙΒΗ ΚΑΙ ΦΘΟΡΑ

Το **τριβοςύστημα** [1] ορίζεται ως μία διάταξη στερεών σωμάτων, με συζυγείς επιφάνειες, που εφάπτονται άλλοτε σημειακά και άλλοτε επιφανειακά. Στο σύστημα μετέχουν επίσης τα προϊόντα της φθοράς που παραμένουν στην επιφάνεια επαφής, ενώ οι μηχανισμοί που ενεργοποιούνται και η έντασή τους επηρεάζονται από το περιβάλλον λειτουργίας (υγρασία, θερμοκρασία, λίπανση κ.λ.π).

Τριβοςυστήματα μπορούμε να αναγνωρίσουμε σχεδόν σε όλα τα μηχανολογικά σύνολα:

- Στροφαλοφόρος άξονας – Κουζινέτα
- Δίσκος – Τακάκι (Δισκόφρενο Οχήματος)

Η **τριβή** (friction) ορίζεται ως η αντίσταση στη σχετική κίνηση δύο ή περισσότερων σωμάτων που παραμένουν σε επαφή και έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας. Η ένταση της τριβής εκφράζεται μέσω του συντελεστή τριβής μ , ο οποίος είναι ο λόγος της δύναμης F_T που απαιτείται για τη διατήρηση ή την έναρξη της σχετικής κίνησης, προς τη δύναμη F_N που ασκείται κάθετα στην επιφάνεια επαφής των δύο σωμάτων.[1],[2]

Διακρίνουμε διάφορους τύπους τριβής, ανάλογα με τον τρόπο της σχετικής κίνησης των σωμάτων του τριβοςυστήματος:

- Τριβή λόγω κύλισης
- Τριβή λόγω ολίσθησης
- Τριβή λόγω δόνησης
- Τριβή λόγω μηχανικής διάβρωσης
- Τριβή λόγω πρόσκρουσης
- Τριβή λόγω παλινδρόμησης

Η **φθορά** (wear) ορίζεται ως η διαδικασία αφαίρεσης υλικού από επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή ή η αστοχία τους λόγω σχετικής κίνησης.

Η συμπεριφορά ενός υλικού σε φθορά, όπως και κατά την τριβή, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες στους οποίους παίρνουν μέρος διάφοροι μηχανισμοί, ανάλογα με τους οποίους διακρίνουμε στα ακόλουθα είδη:

- Φθορά πρόσφυσης
- Φθορά λείανσης
- Φθορά επιφανειακής κόπωσης
- Μηχανική διάβρωση
- Χημική διάβρωση

Η συνολική φθορά προκαλείται, κυρίως, από συνδυασμό πολλών μηχανισμών. Η φθορά αξιολογείται είτε βάσει του είδους της σχετικής κίνησης, είτε βάσει του μηχανισμού που την προκαλεί [3].

Οι τρεις κυριότεροι μηχανισμοί φθοράς:

- Φθορά λόγω **πρόσφυσης** (adhesive wear) υφίσταται όταν τμήματα των συνεργαζόμενων επιφανειών που ολισθαίνουν μεταξύ τους, αποκολλούνται από την μία και προσφύονται στην άλλη επιφάνεια.
- Φθορά λόγω απόξεσης ή **λείανσης** (abrasive wear), η οποία προκαλείται στην επιφάνεια ενός υλικού κατά την επαφή του με ένα σκληρότερο, που είτε είναι το ανταγωνιστικό υλικό, είτε είναι κάποιο άλλο σωματίδιο, ξένο ή για παράδειγμα προϊόν φθοράς των συνεργαζόμενων επιφανειών.
- Φθορά λόγω **επιφανειακής κόπωσης**, η οποία είναι και ο συχνότερα συναντώμενος μηχανισμός σε πραγματικά τριβοσυστήματα, αφού όλα τα μέρη των μηχανών καταπονούνται κάτω από περιοδικά εναλλασσόμενα φορτία.

Δύο σημαντικά μεγέθη για την εκτίμηση των επιπτώσεων της καταπόνησης στην κατασκευή, εκτός από την ποσότητα φθοράς, είναι [3]:

- Ο **ρυθμός φθοράς (V)**, δηλαδή η ποσότητα απομακρυνόμενου υλικού στη μονάδα του χρόνου.
- Ο **συντελεστής φθοράς (K)**, ο οποίος εκφράζει την ποσότητα της φθοράς (συνήθως του όγκου) ανά μονάδα κάθετα επιβαλλόμενου φορτίου και ανά μονάδα μήκους σχετικής κίνησης των συζυγών επιφανειών.

1.1.2.ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΕΣ

Οι εργαλειοχάλυβες [1] αποτελούν ένα μικρό ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής χαλύβων, όμως η σημασία τους στη βιομηχανία είναι τεράστια. Πρόκειται για σιδηρούχα κράματα, τα οποία περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό 0,6 - 1,4 % κ.β., καθώς και άλλα στοιχεία προσθήκης (κραματικά στοιχεία) που έχουν την τάση να σχηματίζουν καρβίδια, όπως Mn, Cr, V, W και Mo. Ο σχηματισμός των καρβιδίων έχει το πλεονέκτημα στην συγκεκριμένη περίπτωση ότι παρεμποδίζει την ανάπτυξη του μεγέθους των κόκκων, κατά την διαδικασία της θερμικής κατεργασίας, συντελώντας στην επίτευξη υψηλής σκληρότητας. Τα κραματικά στοιχεία προστίθενται για να προσδώσουν στο υλικό τις ιδιότητες που εμείς επιθυμούμε ανάλογα με την χρήση, την οποία το προορίζουμε και κατά κύριο λόγο να βελτιώσουν τις ακόλουθες ιδιότητες (Πίνακας 1.1) [4]:

- Μηχανική αντοχή σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών
- Δυνατότητα σκλήρυνσης σε χαλύβδινα τεμάχια μεγάλων διαστάσεων, χωρίς να εισάγεται στρέβλωσή τους, λόγω της θερμικής κατεργασίας.
- Δυσθραυστότητα
- Αντίσταση σε φθορά λόγω τριβής

Πίνακας 1.1: Επίδραση κραματικών στοιχείων στις ιδιότητες των εργαλειοχαλύβων

Ιδιότητες	Κραματοποιητικά στοιχεία (σειρά φθίνουσας πορείας στην επίδραση)
Σκληρότητα εν θερμώ	W, Mo, Co, V, Cr, Mn
Αντίσταση σε φθορά	V, W, Mo, Cr, Mn
Δυνατότητα σκλήρυνσης με θερμική κατεργασία	W, Mn, Mo, Cr, Si, Ni, V
Διαστασιακή σταθερότητα κατά τη βαφή	Mo, Cr, Mn
Δυσθραυστότητα	V, W, Mo, Mn, Cr

Η διάθεση τους στην αγορά γίνεται κυρίως ως προϊόντα θερμηλασίας, ως χυτά από χυτεύσεις ακριβείας και ως προϊόντα κονιομεταλλουργίας σε ανοπτημένη κατάσταση. Οι κύριες ιδιότητές τους που καθιστούν ελκυστική τη χρήση τους είναι η υψηλή σκληρότητα, η αντίσταση στην τριβή και τη φθορά, η καλή εμβαπτότητα, η καλή δυσθραυστότητα, η ικανότητα τους να διατηρούν μια αιχμή κατά την διάρκεια καταπονήσεων σε συνθήκες λειτουργίας, η αντοχή εν θερμώ και η αντοχή σε θερμικούς αιφνιδιασμούς. Για διαφορετικές εφαρμογές, υπάρχει απαίτηση για υψηλότερες τιμές κάποιων ιδιοτήτων τους, οι οποίες επιτυγχάνονται με θερμικές ή και με επιφανειακές κατεργασίες.

Οι εργαλειοχάλυβες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων διαμόρφωσης, καλουπιών χύτευσης, μητρών ψυχρής και θερμής κατεργασίας μετάλλων, δράπανων, εργαλείων ήλωσης, μερών αντλιών, κλπ.

Όσον αναφορά την τυποποίηση χαλύβων το πιο συνηθισμένο σύστημα τυποποίησης είναι το AISI (American Iron and Steel Institute). Η ταξινόμηση και η ονοματολογία τους στηρίζεται στον τύπο του μέσου βαφής και τη χημική σύσταση του εργαλειοχάλυβα (Πίνακας 1.2)[5]:

Πίνακας 1.2.:Βασικές κατηγορίες και ονοματολογία εργαλειοχαλύβων κατά AISI.

Κατηγορίες Εργαλειοχαλύβων	Συμβολισμός Τυποποίησης κατά AISI	Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά
Σκληρυνόμενοι στο νερό (water - hardening)	W	Εργαλειοχάλυβες χαμηλής εμβαπτότητας
Κατεργασίες εν ψυχρώ (cold-working)	O	Σκληρυνόμενοι σε λάδι (οίλ - hardening) Μέσης εμβαπτότητας
	A	Σκληρυνόμενοι στον αέρα, μέτριας κραματοποίησης , υψηλής εμβαπτότητας (air - hardening, medium alloy)
	D	Χάλυβες για μήτρες και εξαιρετικά υψηλή αντοχή σε φθορά-τριβή (υψηλού % C και Cr)
Αντίσταση σε αιφνιδιασμό (shock resisting)	S	Εργαλειοχάλυβες υψηλής αντοχής στην κρούση
Ταχυχάλυβες (high speed)	T	Πλούσιοι σε W (tungsten base)
	M	Πλούσιοι σε Mo (Molybdenum base)
Κατεργασίες εν θερμώ (hot-working)	H	H1-H19 Πλούσιοι σε Cr (chromium base)
		H20-H39 Πλούσιοι σε W (tungsten base)
		H40-H59 Πλούσιοι σε Mo (molybdenum base)
Καλούπια Χύτευσης (plastic mold)	P	
Χαμηλή Κραμάτωση- Ειδικοί σκοποί	L	
	F	

1.2.ΒΙΒΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΡΟΣΦΑΤΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΝ

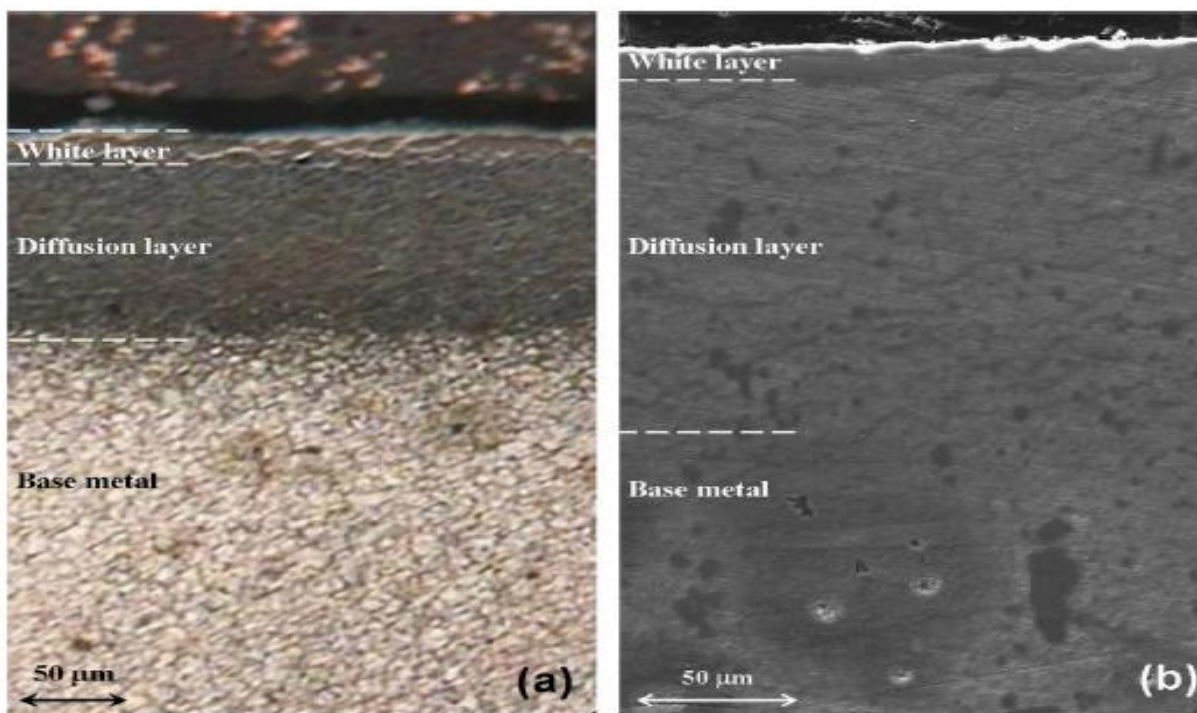
ΜΕΛΕΤΩΝ

Η δραστική βελτίωση της συμπεριφοράς των εργαλαιοχαλύβων σε επιφανειακή καταπόνηση, λόγω θερμοχημικών επιφανειακών κατεργασιών, κατεύθυνε το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών στην αναζήτηση της μικροδομής και των ιδιοτήτων τους, των τεχνικών διάχυσης και της τριβολογικής συμπεριφοράς των επιφανειακά κατεργασμένων εργαλαιοχαλύβων.[6]

1.2.1. ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ

Οι C. M. Karamboiki et al [4] εξέτασαν τους μηχανισμούς φθοράς κατά τη διάρκεια της ξηρής ολίσθησης δύο αντιπροσωπευτικών εργαλαιοχαλύβων, έναν με χαμηλότερο και έναν με υψηλότερο ποσοστό στοιχείων που σχηματίζουν καρβίδιο, ο ένας είναι χάλυβας AISI H13 θερμής κατεργασίας και ο άλλος χάλυβας ψυχρής κατεργασίας Cr-Mo-V. Πριν από την τριβολογική αξιολόγηση, και τα δύο υλικά υποβλήθηκαν αρχικά σε θερμική κατεργασία και στη συνέχεια επεξεργάστηκαν επιφανειακά μέσω υγρής ενανθρακαζώτωσης. Μια τέτοια διαδικασία οδήγησε στο σχηματισμό ενός παχύ λευκού στρώματος 10-15 μm, κοινό και για τις δύο ποιότητες χάλυβα και για όλες τις συνθήκες θερμικής επεξεργασίας (Σχ. 1 (a),(b)). Η συμπεριφορά τριβής ολίσθησης όλων των δειγμάτων μελετήθηκε σε συσκευή δοκιμής τριβής σφαίρας-δίσκου, επιτρέποντας συνεχή λειτουργία και καταγραφή των τιμών συντελεστή τριβής.

Από τις μετρήσεις μικροσκληρότητας βρέθηκε ότι η μικροδομή των δειγμάτων παίζει ρόλο στην αποτελεσματικότητα της ενανθρακαζώτωσης. Η λεπτή διασπορά καρβιδίων βαναδίου στην περίπτωση του AISI H13 ευνοεί στη διάχυση του αζώτου σε βάθος, ενώ η παρουσία ευτηκτικών χοντρών καρβιδίων χρωμίου στην περίπτωση χάλυβα Cr-Mo-V την αναστέλλει.

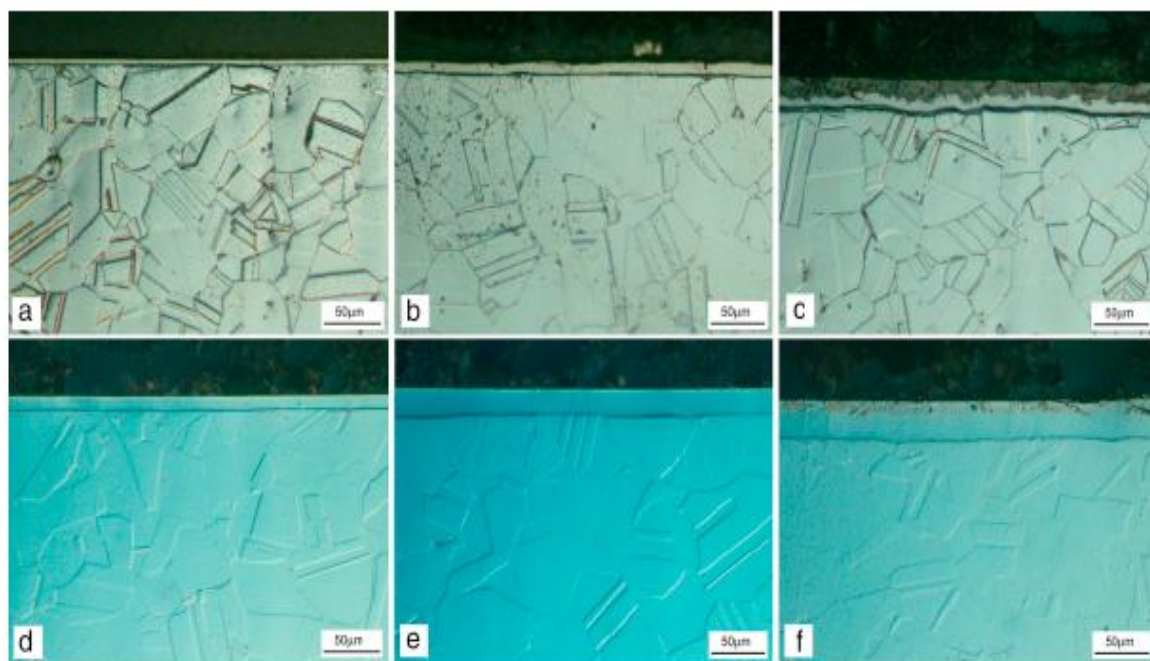


Σχ. 1. Τυπικές διατομές των δύο χαλύβων μετά από θερμική επεξεργασία και ενανθρακαζώτωση : (a) Οπτική μικρογραφία του AISI H13 και (b) SEM μικρογραφία του Cr-Mo-V (και οι δύο σκληρύνθηκαν σε 45 HRC) [4].

Ο συντελεστής ξηρής τριβής βρέθηκε να μην εξαρτάται ούτε από τη θερμική ή την επιφανειακή επεξεργασία. Παρέμεινε πρακτικά σταθερός κατά τη διάρκεια της ολίσθησης επιτυγχάνοντας τιμές 0,95 και 0,78 για τον χάλυβα AISI H13 και Cr-Mo-V, αντίστοιχα. Η θερμική επεξεργασία, τουλάχιστον για τις τιμές σκληρότητας που επιλέγονται σε αυτή τη μελέτη, δεν βρέθηκε να επηρεάζει ουσιαστικά το συντελεστή φθοράς. Ωστόσο, η ενανθρακαζώτωση μείωσε σημαντικά το συντελεστή φθοράς κατά 55 και 85%, για τους χάλυβες AISI H13 και Cr-Mo-V αντίστοιχα. Αυτή η δραστική μείωση πρέπει να αποδοθεί στην εξάλειψη της μικροχάραξης και της οξείδωσης μετά από την ενανθρακαζώτωση, που ήταν οι κύριοι μηχανισμοί φθοράς στην περίπτωση των χαλύβων που έχουν υποστεί μόνο θερμική επεξεργασία. Ο συντελεστής φθοράς και οι σχετικοί μηχανισμοί επηρεάστηκαν αρνητικά από την παρουσία χονδροειδών καρβιδίων χρωμίου στο μέταλλο. Ως εκ τούτου, σε περιπτώσεις όπου η συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτεί τη χρήση εργαλαιοχαλύβων με υψηλό ποσοστό χρωμίου, εάν η τελική λειτουργία

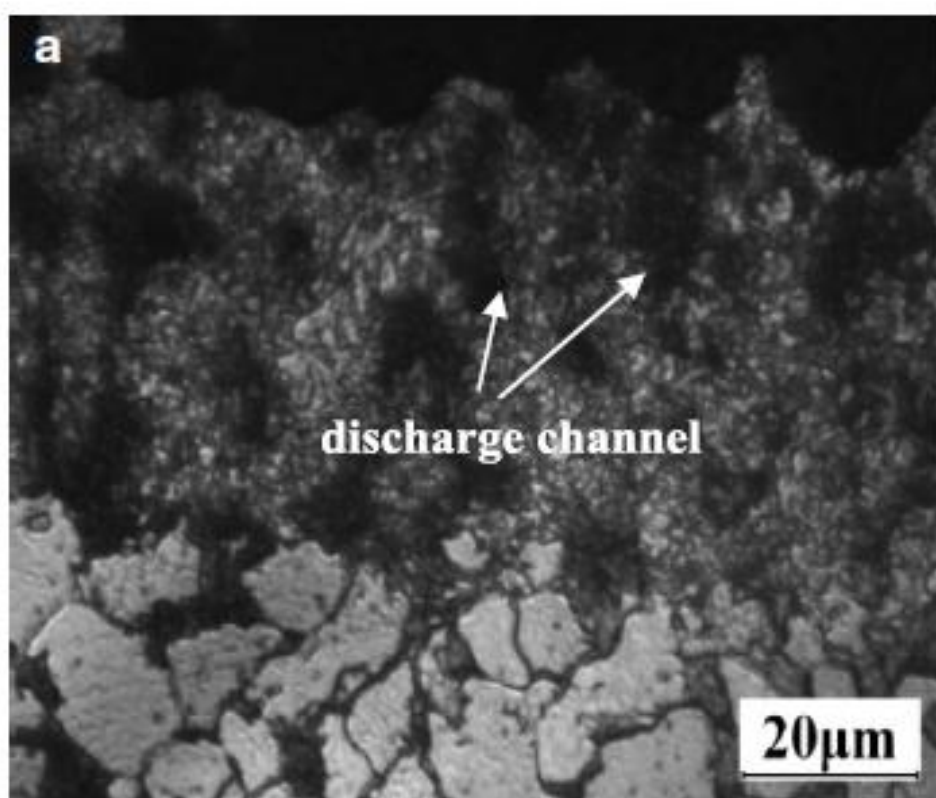
περιλαμβάνει επαφή και ολίσθηση, η επιφανειακή επεξεργασία του στοιχείου είναι απαραίτητη.

Οι F.A.P. Fernandes et al [7] μελέτησαν τον αποκαλούμενο «διογκωμένο ωστενίτη», τον υπερωστενιτικό ανοξειδωτο χάλυβα UNS S31254, μετά από εναζώτωση (PN) και ενανθρακαζώτωση (PNC), σε θερμοκρασίες μεταξύ 400°C και 500°C για 5 ώρες. Η ενανθρακαζώτωση παρήγαγε παχύτερα στρώματα από την εναζώτωση (Σχ. 2). Τα μεγενθυμένα επίπεδα του ωστενίτη στο κρυσταλλικό πλέγμα αυξήθηκαν με τη θερμοκρασία και ήταν ελαφρώς μικρότερα για τις στιβάδες με ενανθρακαζώτωση σε υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας (450°C και 500°C). Η υπολογιζόμενη επέκταση των επίπεδων, για τον ενισχυμένο ωστενίτη, έφτασαν το 7,4% και το 6,7% για τα εναζωτωμένα και τα ενανθρακαζωτωμένα στρώματα, αντίστοιχα.

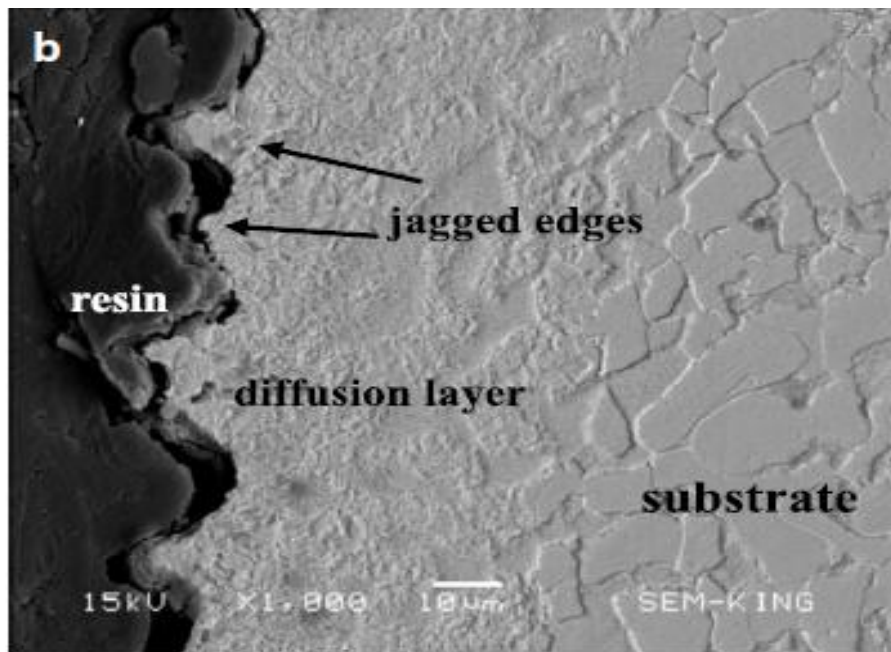


Σχ. 2. Οπτικές μικρογραφίες που δείχνουν διατομή των εναζωτωμένων στρωμάτων PN (a-c) και των ενανθρακαζωτωμένων PNC (d-f) που σχηματίζονται μετά από 5 ώρες στους 400°C (a και d), 450°C (b και e) και 500°C (c και f) [7].

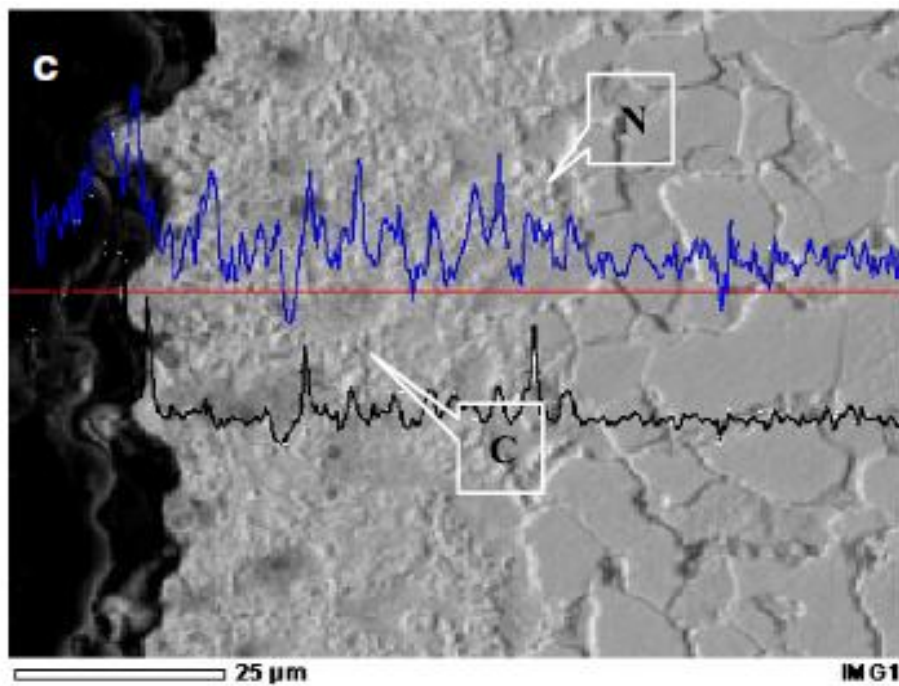
Οι Υ. Jiang et al [8] μελέτησαν τη διεξαγωγή ηλεκτρολυτικής ενανθρακαζώτωσης πλάσματος (PEN/C) στον χάλυβα Q235, σε ένα υδατικό διάλυμα ουρίας για να μελετήσουν την τροποποίηση των επιφανειακών του ιδιοτήτων. Η εξωτερική επιφάνεια (2-5 nm) αναλύθηκε χρησιμοποιώντας φασματοσκόπιο φωτοηλεκτρονίων ακτίνων Χ (XPS). Οι μορφολογίες της διατομής και της επιφάνειας διερευνήθηκαν χρησιμοποιώντας οπτικό μικροσκόπιο και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) εξοπλισμένο με φασματοσκόπιο διασκορπισμένης ενέργειας (EDS). (Σχ. 3 (α), (β), (γ)) (Σχ. 4)



Σχ. 3. (α) Μικροδιάταξη του στρώματος PEN / C [8].

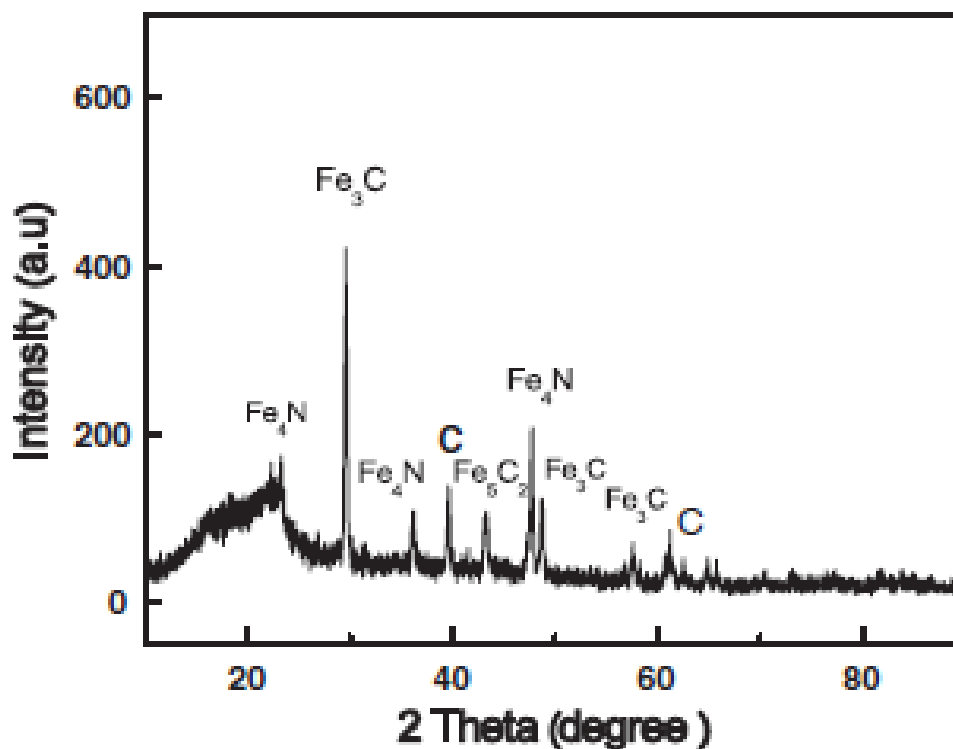


Σχ. 3. (β) SEM του στρώματος PEN / C [8].



Σχ. 3. (γ) EDS Γραμμές σάρωσης του δείγματος [8].

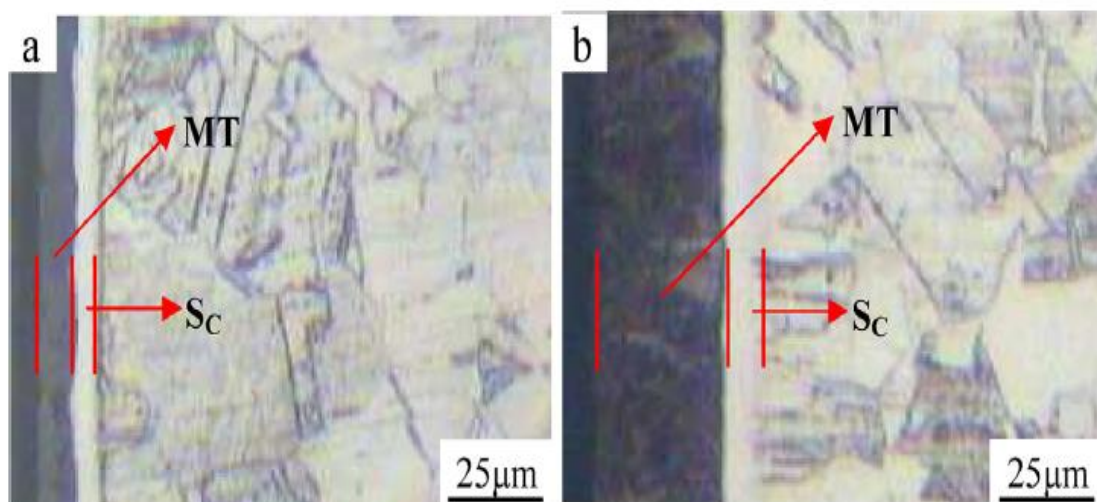
Η μικροδομή προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας ακτίνες Χ (XRD). (Σχ. 4)



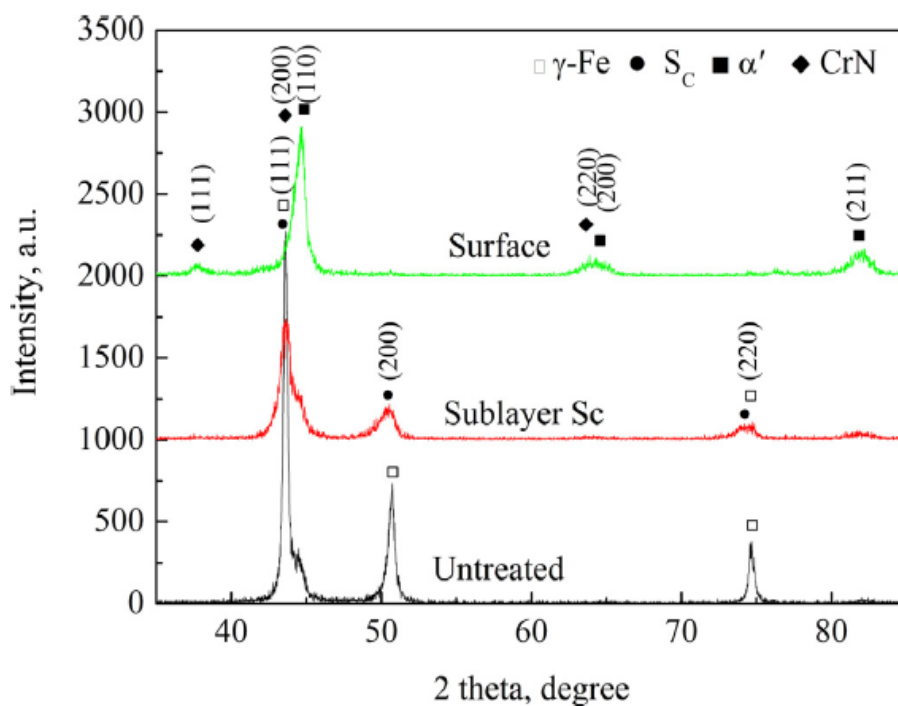
Σχ. 4. XRD της στρώσης PEN / C [8]

Η σκληρότητα και η τραχύτητα εκτιμήθηκαν χρησιμοποιώντας μετρητή σκληρότητας και μετρητή τραχύτητας. Η φθορά των δειγμάτων μετρήθηκε χρησιμοποιώντας μηχανισμό τριβής στυλίσκου-δίσκου και σε ξηρή κατάσταση. Επισημαίνεται ότι ο ηλεκτρολύτης ουρίας ιονίζεται σε συζευγμένους διπλούς δεσμούς που αποτελούνται από άνθρακα, άζωτο και οξυγόνο. Οι μικροπόροι κατανέμονται ομοιόμορφα στην επιφάνεια των δειγμάτων που ενανθρακαζώνονται. Καρβίδιο σιδήρου, νιτρίδιο σιδήρου, υδρογονάνθρακες C-C και οξειδίο σιδήρου σχηματίζονται στην εξωτερική επιφάνεια των δειγμάτων. Το περιεχόμενο του άνθρακα και του αζώτου στο στρώμα διάχυσης είναι υψηλότερο από εκείνο στο υπόστρωμα. Το στρώμα διάχυσης κυρίως περιέχει φάσεις σε Fe_3C και Fe_4N . Η μικροσκληρότητα του στρώματος διάχυσης είναι 3 έως 4 φορές υψηλότερη από αυτή του υποστρώματος. Η τραχύτητα της επιφάνειας αυξάνεται με το χρόνο. Η φθορά του δείγματος PEN/C βελτιώνεται σημαντικά και αυτό θα ενισχύσει τη διάρκεια ζωής του χάλυβα.

Οι H.T. Chen et al [9] μελέτησαν το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό που προκαλείται από την ενανθρακαζώτωση πλάσματος στον ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304. Οι οπτικές μικρογραφίες (Σχ. 5) και τα αποτελέσματα ακτίνων Χ, XRD (Σχ.6), δείχνουν τη δομή του στρώματος ενανθρακαζωτωμένου άνθρακα: το εξωτερικό στρώμα μαρτενσιτικού μετασχηματισμού και το εσωτερικό υπερκορεσμένο στρώμα ωστενίτη.



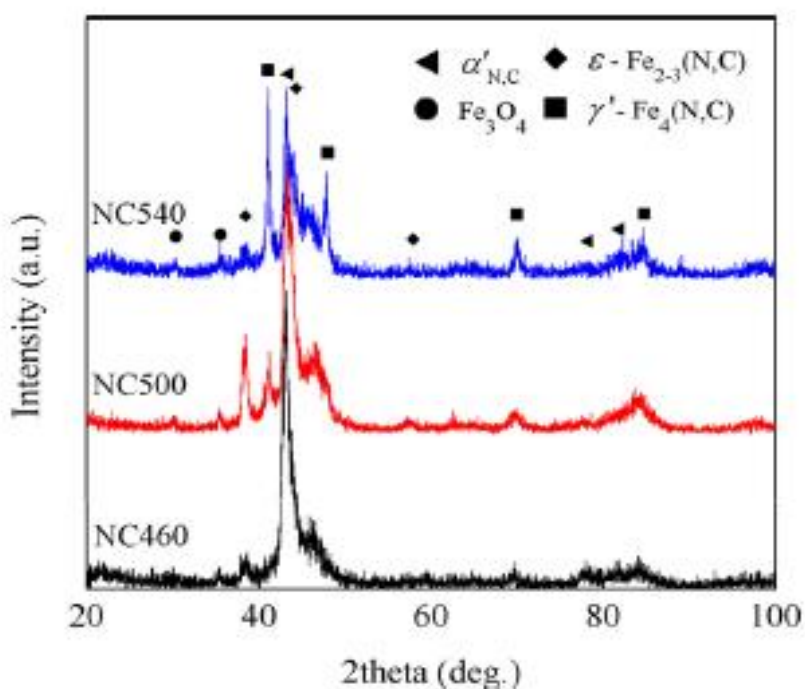
Σχ. 5. Οπτικές μικρογραφίες ενανθρακαζωτωμένων στρωμάτων που παράγονται σε χάλυβα AISI304 στους 460 ° C για διαφορετικούς χρόνους [9].



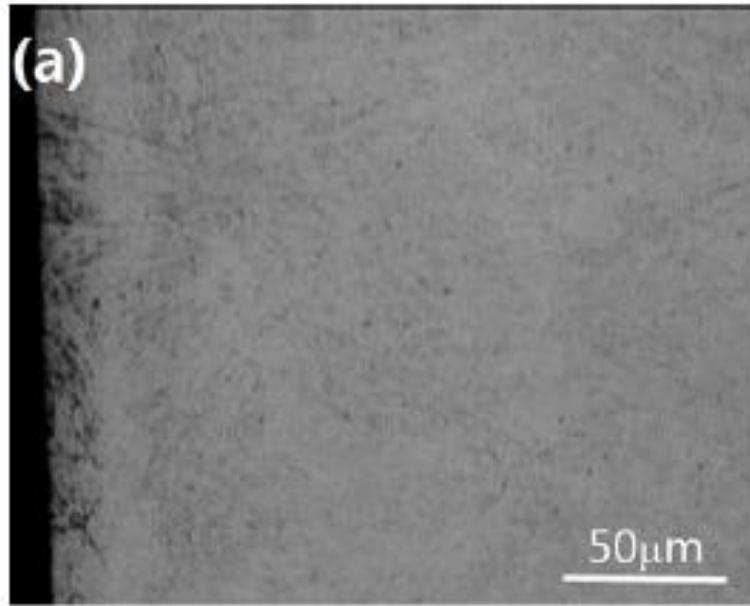
Σχ. 6. Σχέδια ακτίνων Χ του μη επεξεργασμένου και του ενανθρακαζωτωμένου χάλυβα AISI304 για 2 ώρες [9].

Ο αρχικός μετασχηματισμός της μικροδομής αποτελείται από φάση α-μαρτενσίτη και φάση τύπου NaCl MX (M ¼ Cr, Mn, Fe, Ni, X ¼ C, N). Το στρώμα μετασχηματισμού μαρτενσίτη έχει υψηλή σκληρότητα και καλή ολκιμότητα.

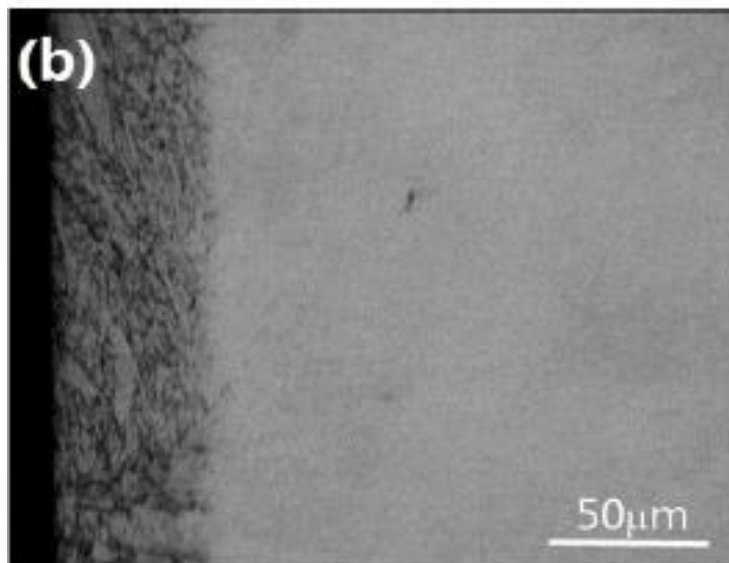
Οι C.S. Zhang et al [10] μελέτησαν την ενανθρακαζώτωση πλάσματος, σε διάφορες θερμοκρασίες, στην κλίμακα 460-540 °C, που εφαρμόστηκε σε χάλυβα M50NiL, προκειμένου να βελτιωθούν οι ιδιότητες φθοράς. Η θερμοκρασία ενανθρακαζώτωσης βελτιστοποιήθηκε για να ληφθούν οι καλύτερες ιδιότητες φθοράς. Τα προφίλ σύνθεσης φάσης, μικροδομής και μικροσκληρότητας των ενανθρακαζωτωμένων στρωμάτων του χάλυβα M50NiL, χαρακτηρίστηκαν με XRD (ακτίνες X) (Σχ. 7), οπτικό μικροσκόπιο και μετρήσεις μικροσκληρότητας Vickers (Σχ. 8 (a),(b),(c)) αντίστοιχα. Οι μετρήσεις των ιδιοτήτων τριβής και φθοράς και η ανάλυση των εμπλεκόμενων μηχανισμών φθοράς έγιναν με τριβόμετρο στυλίσκου - δίσκου και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) εξοπλισμένο με φασματοσκόπιο ενεργειακής διασποράς (EDS).



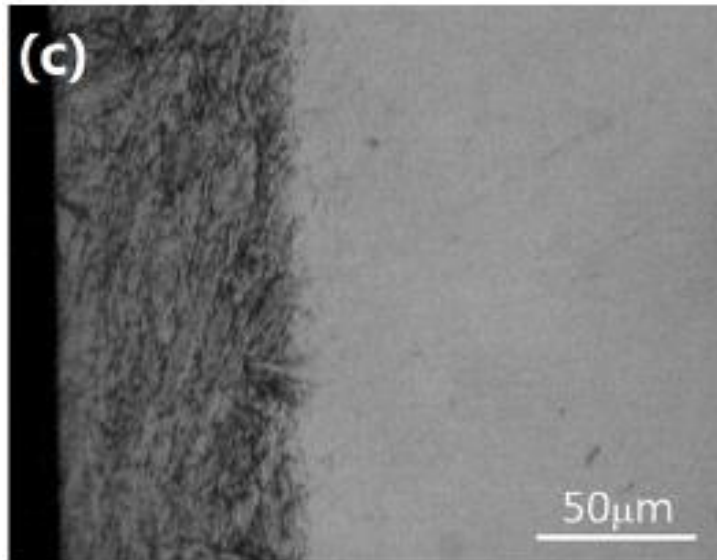
Σχ. 7. Διαγράμματα περίθλασης ακτίνων X, XRD, επιφανειακού στρώματος ενανθρακαζωτωμένου χάλυβα M50NiL σε διαφορετική θερμοκρασία για 4 ώρες [10].



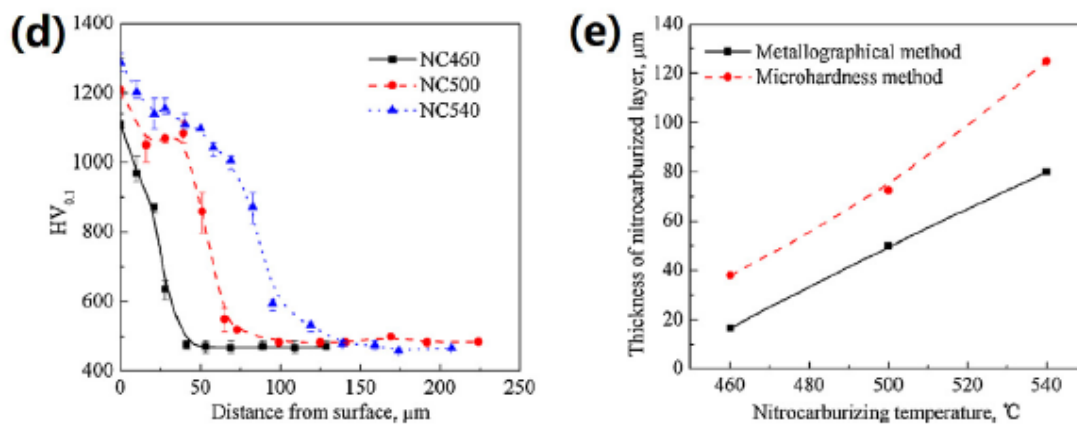
Σχ. 8. (a) Μικροδομή του ενανθρακαζωτωμένου χάλυβα M50NiL στους NC460 για 4 ώρες [10].



Σχ. 8. (b) Μικροδομή του ενανθρακαζωτωμένου χάλυβα M50NiL στους NC500 για 4 ώρες [10].



Σχ. 8. (c) Μικροδομή του ενανθρακαζωτωμένου χάλυβα M50NiL στους NC540 για 4 ώρες [10].

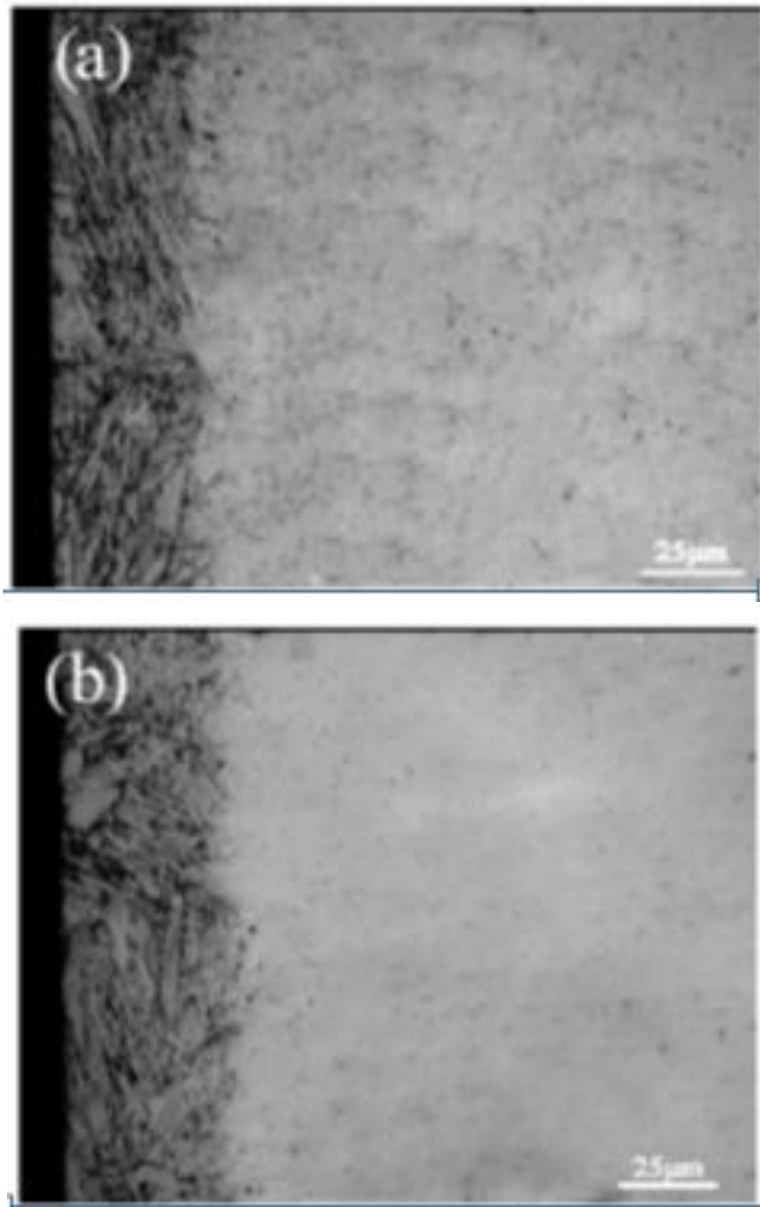


Σχ. 8. d) Προφίλ μικροσκληρότητας ενανθρακαζωτωμένου χάλυβα M50NiL και e) μεταβολές του πάχους στρώματος σε συνάρτηση με τις θερμοκρασίες ενανθρακαζώτωσης [10].

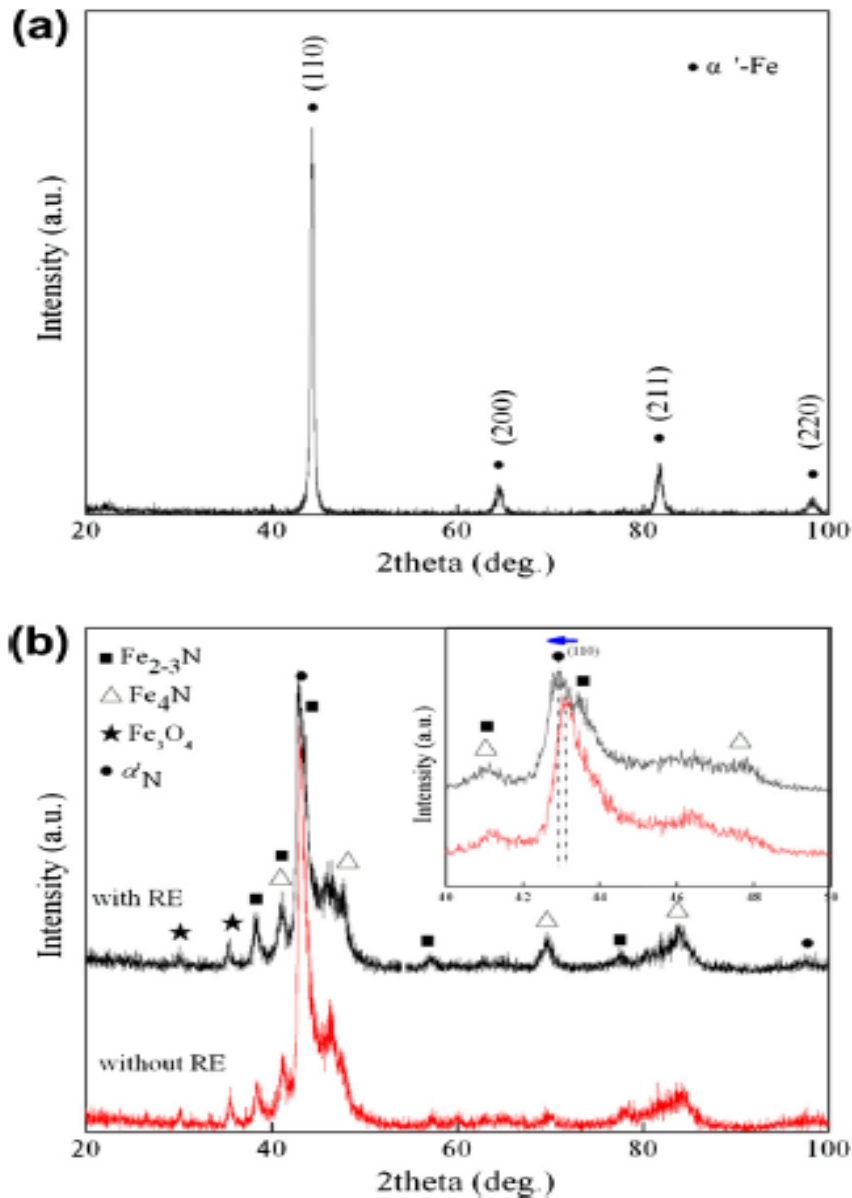
Τα αποτελέσματα ακτίνων Χ, XRD, (Σχ. 8 (d),(e)) δείχνουν ότι η ποσότητα της φάσης ϵ -Fe₂₋₃(N,C) αυξήθηκε καθώς η θερμοκρασία ενανθρακαζώτωσης αυξήθηκε από 460 ° C σε 500 ° C και έπειτα στους 540 ° C, ενώ η ποσότητα του γ' -Fe₄(N, C) αυξήθηκε καθώς η θερμοκρασία της επεξεργασίας αυξήθηκε. Η σκληρότητα των στρωμάτων με ενανθρακαζώτωση έδειξε μια προφανή βελτίωση σε συνδυασμό με την αυξανόμενη θερμοκρασία ενανθρακαζώτωσης και έλαβε τη μέγιστη

επιφανειακή σκληρότητα 1287 HV στους 540°C. Τα αποτελέσματα των δοκιμών φθοράς που έγιναν σε διάφορες ταχύτητες ολίσθησης έδειξαν ότι ο μηχανισμός φθοράς εξαρτάται από την ταχύτητα ολίσθησης και όχι από τη θερμοκρασία ενανθρακαζώτωσης. Με την αύξηση της ταχύτητας ολίσθησης, ο μηχανισμός φθοράς μετατρέπεται από οξείδωση σε φθορά λόγω λείανσης. Η βαθμιαία μείωση φθοράς του δείγματος που υπέστη ενανθρακαζώτωση στους 500°C, με την αύξηση της ταχύτητας ολίσθησης, έδειξε την εξαιρετική αντοχή στη φθορά υπό συνθήκες υψηλής ταχύτητας ολίσθησης. Ως εκ τούτου, οι 500°C μπορούν να επιλεγούν ως μια βέλτιστη θερμοκρασία ενανθρακαζώτωσης για τον χάλυβα M50NiL.

Οι Z. Sun et al [11] μελέτησαν, επίσης, το χάλυβα M50NiL που υποβλήθηκε σε ενανθρακαζώτωση πλάσματος στους 500 ° C, αλλά με και χωρίς προσθήκη σπανίων γαιών (RE). Το ενανθρακαζωτωμένο στρώμα χαρακτηρίστηκε από οπτικό μικροσκόπιο (Σχ. 9), ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης εξοπλισμένο με φασματοσκόπιο ενεργειακής διασποράς, με ακτίνες X (Σχ. 10), με δοκιμές σκληρότητας και με τριβόμετρο στυλίσκου - δίσκου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα άτομα σπάνιων γαιών RE μπορούν να διαχέονται στην επιφάνεια χάλυβα M50NiL και να αλλάζουν την μορφολογία της επιφάνειας του στρώματος με ενανθρακαζώτωση. Η ενσωμάτωση των ατόμων RE αυξάνει την επιφανειακή σκληρότητα του ενανθρακαζωτωμένου στρώματος (περίπου 130HV_{0.1} υψηλότερη), το πάχος στρώματος (περίπου 14% παχύτερο) και την περιεκτικότητα σε άνθρακα του τροποποιημένου στρώματος, αντίστοιχα. Οι ρυθμοί φθοράς των δειγμάτων με ενανθρακαζώτωση είναι σημαντικά χαμηλότεροι από εκείνους του μη-ενανθρακαζωτωμένου. Οι μηχανισμοί φθοράς των δειγμάτων με ενανθρακαζώτωση πλάσματος με και χωρίς προσθήκη RE είναι διαφορετικές κυρίως λόγω των διαφορών στην μορφολογία της επιφάνειας, της φάσης και της σκληρότητας του τροποποιημένου στρώματος.



Σχ. 9. Μικροδομή του επιφανειακού στρώματος των δειγμάτων χάλυβα M50NiL με ενανθρακαζώτωση (a) χωρίς RE και (b) με RE [11].

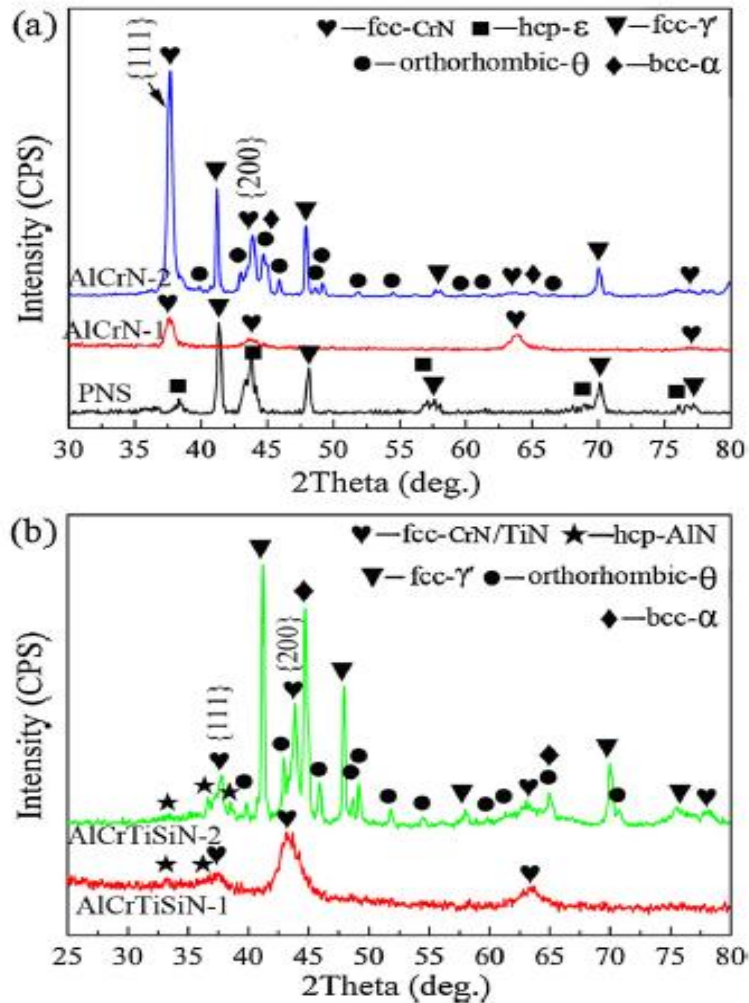


Σχ. 10. Διαγράμματα ακτινών Χ του (α) μη επεξεργασμένου δείγματος και (β) ενανθρακαζωτωμένων δειγμάτων με και χωρίς προσθήκη σπανίων γαιών [11].

Ο Cardey P.F. [12] αναφέρει ότι η ενανθρακαζώτωση οδηγεί στον σχηματισμό στην επιφάνεια ενός σύνθετου στρώματος (που ονομάζεται "λευκό στρώμα") αποτελούμενο από νιτρίδια γ' (Fe_4N) και ϵ ($\text{Fe}_{(2,3)}\text{N}$). Αυτό το μη-μεταλλικό στρώμα δίνει την τριβολογική συμπεριφορά στο ενανθρακαζωτωμένο στρώμα. Η επιτροπή θερμικής επεξεργασίας του CETIM (Τεχνικό Κέντρο Μηχανολογικών Βιομηχανιών) έχει πραγματοποιήσει αρκετές μελέτες από το 2010 σχετικά με τη φθορά και την τριβή της ενανθρακαζώτωσης. Αυτές οι μελέτες κατέδειξαν το ρόλο της αρχιτεκτονικής σύνθετου στρώματος (ποσοστό πόρωσης,

πάχος, αναλογία νιτριδίων γ' και ϵ , τραχύτητα...) στη μείωση της τριβής και της προστασίας από την φθορά. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι μερικές μεταεπεξεργασίες, όπως μετά-οξείδωση, στίλβωση ή εμποτισμός, επιτρέπουν την επίτευξη πολύ υψηλής τριβολογικής συμπεριφοράς.

Οι W. Chen et al [13] μελέτησαν τις επικαλύψεις AlCrN και AlCrTiSiN που παρήχθησαν στην επιφάνεια των χαλύβων T10 με ενανθρακαζώτωση πλάσματος με επίστρωση ιόντων πολλαπλών τόξων. Η σύγκριση των μικροδομών και των μηχανικών ιδιοτήτων των διπλών επικαλύψεων ερευνήθηκε με τη βοήθεια ακτίνων Χ, οπτικού μικροσκοπίου, ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και μικροσκοπίου ηλεκτρονίων σε συνδυασμό με μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι επικαλύψεις AlCrN με ανάπτυξη στηλών αποτελούνται κυρίως από νανοκρυσταλλικές φάσεις fcc- (Cr, Al) N με προτιμώμενο προσανατολισμό {111}, ενώ οι επικαλύψεις υπερπλέγματος και νανοσύνθεσης AlCrTiSiN με επίπεδη ανάπτυξη συνίστανται κυρίως από νανοκρυσταλλικές φάσεις fcc- (Cr,Al) N με τελειοποιημένο προσανατολισμό {100}, άμορφες φάσεις hcp-Al₂N και Si₃N₄. (Σχ. 11).



Σχ. 11. Τυπικά φάσματα ακτίνων Χ, XRD, των (α) επικαλύψεων διπλής όψεως AlCrN και (β) επικαλύψεων διπλής όψεως AlCrTiSiN [13].

Η επίστρωση διπλής όψης AlCrTiSiN παρουσιάζει υψηλότερη σκληρότητα, αντοχή πρόσφυσης, ικανότητα φόρτισης και χαμηλότερο συντελεστή τριβής σε σύγκριση με τις άλλες επικαλύψεις διπλής όψης, η οποία οφείλεται στην δομή υπερπλέγματος και τη νανοσύνθεσή της. Επιπλέον, αυτές οι βελτιωμένες ιδιότητες σχετίζονται με εμφάνιση της γ'-φάσης που παρέχει ισχυρό υποστηρικτικό αποτέλεσμα για τις επιστρώσεις AlCrN και AlCr-TiSiN. Ο κύριος μηχανισμός φθοράς των επικαλύψεων διπλής όψης χωρίς σύνθετο στρώμα είναι η φθορά και η φθορά λόγω τριβής, καθώς και η φθορά λόγω τριβοξειδωσης, ενώ ο κύριος μηχανισμός φθοράς των επικαλύψεων διπλής όψης με σύνθετο στρώμα είναι φθορά τριβοξειδωσης.

Οι D. Caliarì et al [14] μελέτησαν την αέρια ενανθρακαζώτωση σε συνδυασμό με μια μεταοξειδωτική επεξεργασία σαν μια ενδιαφέρουσα βιομηχανική διεργασία που αναπτύχθηκε προκειμένου να βελτιωθεί η φθορά και η αντοχή στη διάβρωση των εξαρτημάτων χάλυβα χαμηλού κράματος. Μελέτησαν τη μικροδομή που προκύπτει από μια θερμοχημική επεξεργασία, η οποία περιλαμβάνει στάδια εναζώτωσης, ενανθρακαζώτωσης και μεταοξειδώσεως, που εφαρμόζονται σε ένα βιομηχανικό στοιχείο 16MnCr5. Τόσο η θερμοκρασία εναζώτωσης όσο και της ενανθρακαζώτωσης άλλαζαν συστηματικά προκειμένου να μελετηθούν οι προκύπτουσες φάσεις στο στρώμα. Το βάθος του στρώματος μετρήθηκε με οπτικό μικροσκόπιο για να εκτιμηθεί η επίδραση που οφείλεται στις μεταβολές των μεταβλητών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ενανθρακαζώτωσης. Επιπλέον, διερεύνησαν τη μικροδομή μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, προκειμένου να εκτιμηθεί η ποσότητα και η κατανομή των φάσεων Fe-N-C. Μια αύξηση της θερμοκρασίας από 510 έως 550 ° C κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εναζώτωσης μέσα σε ατμόσφαιρα NH₃ προκαλεί υψηλότερο κλάσμα ενώσεων ε-Fe₂₋₃ (C, N). Αντίθετα, η ενανθρακαζώτωση σε 600 ° C αντί των 580 ° C με αέριο μείγμα NH₃ (50%), CO₂ και N₂ ευνοεί μεγαλύτερη ποσότητα νιτριδίων γ'-Fe₄ (C, N). Μία μεγαλύτερη ποσότητα πορώδους στο εξωτερικό μέρος της σύνθετης στιβάδας ευνοεί παχύτερο στρώμα οξειδίου που μπορεί να ληφθεί με τη διαδικασία μετά-οξειδώσεως.

1.2.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι A.R. Rastkar et al [15] μελέτησαν την εφαρμογή της ηλεκτρολυτικής ενανθρακαζώτωσης πλάσματος (PEN/C) στην επιφάνεια του ανθρακούχου χάλυβα με κεκορεσμένο ηλεκτρολύτη ουρίας σε κατάσταση βρασμού. Εκτός από τη γενική επίδραση της θερμοκρασίας του λουτρού, εξέτασαν επίσης σε αυτή τη διαδικασία, διαφορετικές εφαρμοζόμενες τάσεις ρεύματος και χρόνους επεξεργασίας. Για τον χαρακτηρισμό των επιφανειών που έχουν υποστεί επεξεργασία με PEN/C, χρησιμοποιήθηκαν η οπτική και η ηλεκτρονική μικροσκοπική σάρωση, οι δοκιμές ακτίνων X, μικροσκληρυνσης και στυλίσκου- δίσκου. Στις σύνθετες στρώσεις βρέθηκε μίγμα θ-(Fe₃C) και ε-(Fe₂₋₃N). Σε ορισμένες συνθήκες, παρατηρήθηκαν πυκνά στρώματα επιφανείας με ελάχιστο πορώδες στην επιφάνεια των δειγμάτων.

Η κατάσταση βρασμού είχε ως αποτέλεσμα τον ειδικό χαρακτήρα της επιφάνειας των σύνθετων στρωμάτων. Τα στρώματα αποτελούνταν από ορισμένες ανωμαλίες που αναπτύχθηκαν προς τα μέσα στα δείγματα και επηρέασαν τα χαρακτηριστικά των επιφανειακών στρωμάτων. Η μικροσκληρότητα των στρώσεων που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με PEN/C αυξήθηκε σε 1280 HV0.1, η οποία ήταν 3 έως 4 φορές υψηλότερη από εκείνη για μη επεξεργασμένο υλικό και υψηλότερη από αυτή που έλαβαν άλλοι ερευνητές (750 HV0.1). Η ενανθρακαζώτωση πλάσματος PEN/C μείωσε σημαντικά την φθορά του ανθρακούχου χάλυβα λόγω της αλλαγής της φθοράς λόγω πρόσφυσης του ακατέργαστου υλικού σε φθορά λόγω λείανσης των επεξεργασμένων επιφανειών. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής ήταν ο υψηλότερος ρυθμός ανάπτυξης των στρωμάτων με ενανθρακαζώτωση και μια σημαντική βελτίωση στην τριβολογική απόδοση των επεξεργασμένων δειγμάτων σε σύγκριση με τις παρόμοια προσανατολισμένες επιφανειακές επεξεργασίες.

Οι M. K. Zarchi et al [16] μελέτησαν τον απλό ανθρακούχο χάλυβα AISI 1020 στον οποίο έγινε ενανθρακαζώτωση σε ένα υδατικό διάλυμα ουρίας με την τεχνική ηλεκτρολυτικού πλάσματος στα 220V και 240V και επιτυχώς κατέληξαν στα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Το επιφανειακό στρώμα που σχηματίζεται στα δείγματα με αυτή την επεξεργασία σε 220V έχει το χαρακτηριστικό της φερριτικής ενανθρακαζώτωσης, δηλαδή το παραγόμενο επιφανειακό στρώμα σε αυτή την τάση αποτελείται από σύνθετο στρώμα και ζώνης διάχυσης. Τα επιφανειακά στρώματα των επεξεργασμένων δειγμάτων στα 240V αποτελούνται από σύνθετο στρώμα, μαρτενσιτικό στρώμα και ζώνη διάχυσης αντίστοιχα, δηλαδή ωστενιτική κατεργασία με ενανθρακαζώτωση.
- Το πάχος της σύνθετης στρώσης και το σκληρυνόμενο στρώμα κάτω από την επιφάνεια είναι πολύ ευαίσθητο στο χρόνο και στην τελική τάση και αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο χρόνος και η τάση.
- Η μεταβολή της σκληρότητας κάτω από το σύνθετο στρώμα στα δείγματα που υφίστανται κατεργασία με τάση 240V παρουσιάζει ομαλότερη μείωση σε σύγκριση με τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με τάση 220V, η οποία οφείλεται στην παρουσία μαρτενσιτικού στρώματος, μεταξύ του στρώματος της ένωσης και

του στρώματος διάχυσης, και επίσης στο υψηλότερο πάχος της στιβάδας διάχυσης σε αυτά τα δείγματα.

- Οι ιδιότητες φθοράς των δειγμάτων με ενανθρακαζώτωση βελτιώθηκαν σημαντικά σε σχέση με το μη επεξεργασμένο δείγμα. Τα δείγματα που επεξεργάστηκαν σε 240V, λόγω του σχηματισμού του μαρτενσιτικού υποστρώματος, παρουσίασαν καλύτερες ιδιότητες φθοράς από εκείνες που επεξεργάστηκαν σε 220V.
- Η αντοχή στη διάβρωση των δειγμάτων με ενανθρακαζώτωση αυξήθηκε σε σχέση με τα μη επεξεργασμένα δείγματα. Τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία στα 240V έδειξαν κάπως καλύτερες αντιδιαβρωτικές ιδιότητες σε σύγκριση με τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία 220V.

Οι G. Park et al [17] μελέτησαν την επίδραση της εναζώτωσης πλάσματος (PN) και της ενανθρακαζώτωσης στα στρώματα ανοξειδωτού χάλυβα ψεκασμένου με HVOF. Οι ανοξειδωτοί χάλυβες 316 (ωστενιτικός), 17-4HP (σκληρυνόμενος με καθίζηση) και 410 (μαρτενσιτικός) εναζωτώθηκαν με πλάσμα και ενανθρακαζωτώθηκαν χρησιμοποιώντας ένα μίγμα αερίου $N_2 + H_2$ και το μείγμα αερίου που περιέχει C_2H_2 , αντίστοιχα, στους 550°C. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εναζώτωση πλάσματος PN και η ενανθρακαζώτωση παράγαν ένα σχετικά παχύ εναζωτωμένο στρώμα αποτελούμενο από ένα σύνθετο στρώμα και ένα γειτονικό στρώμα διάχυσης αζώτου, ανάλογα με τις κρυσταλλικές δομές των επικαλυμμένων με HVOF ανοξειδωτων χαλύβων. Επίσης, το βάθος διάχυσης του αζώτου αυξήθηκε όταν προστέθηκε μικρή ποσότητα C_2H_2 (διαδικασία εναθρακαζώτωσης πλάσματος). Η εναζώτωση πλάσματος PN και η ενανθρακαζώτωση είχαν ως αποτέλεσμα όχι μόνο την αύξηση της επιφανειακής σκληρότητας αλλά και τη βελτίωση της φέρουσας ικανότητας των επικαλυμμένων με HVOF ανοξειδωτων χαλύβων λόγω του σχηματισμού φάσεων CrN, Fe_3N και Fe_4N . Επίσης, ο ανοξειδωτος χάλυβας 410, ψεκασμένος με HVOF και εναζωτωμένος με πλάσμα είχε μία ανώτερη επιφανειακή μικροσκληρότητα και ικανότητα φόρτισης λόγω του σχηματισμού $Cr_{23}C_6$ στην επιφάνεια του.

Οι C. Hu et al [18] μελέτησαν την επίδραση της θερμοκρασίας στις τριβολογικές επιδόσεις του ενανθρακαζωτωμένου με ιόντα, στρώματος χάλυβα 42MnCr52, υπό λίπανση λαδιού CD15W-40. Βρέθηκε ότι η ενανθρακαζωτωμένη με ιόντα στοιβάδα, έχει καλύτερες επιδόσεις τριβής και αντίστασης στη φθορά από την απλή επιφάνεια, υπό διαφορετικές θερμοκρασίες. Ειδικά κάτω από την υψηλότερη θερμοκρασία των 150 °C, ο συντελεστής τριβής και το πλάτος ουλών φθοράς του ενανθρακαζωτωμένου με ιόντα στρώματος, είναι 36% μικρότερη από εκείνη της απλής επιφάνειας αντίστοιχα, πράγμα που δείχνει ότι το ενανθρακαζωτωμένο με ιόντα στρώμα, μπορεί να έχει εξαιρετική απόδοση τριβής, αντοχής στη φθορά και αντίστασης αποξέσεως κάτω από τη σχετικά υψηλότερη θερμοκρασία.

Οι A.D. Anjos et al [19] μελέτησαν την ενανθρακαζώτωση πλάσματος χαμηλής θερμοκρασίας προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας και του χρόνου επεξεργασίας στη μικροδομή, τις μηχανικές ιδιότητες και την κινητική ανάπτυξη των επεξεργασμένων στρωμάτων μαρτενσιτικού ανοξειδωτού χάλυβα AISI 420. Η ενανθρακαζώτωση πλάσματος διεξήχθη με την τροφοδοσία ρεύματος DC σε ένα μίγμα 71% N₂ + 18% H₂ + 10% Ar + 1% CH₄, σε θερμοκρασίες 300, 350, 400 και 450 °C και χρόνους 2, 4, 6 και 12 ώρες. Η εφαρμοζόμενη τάση αιχμής, ο ρυθμός ροής αερίου και η πίεση διατηρήθηκαν σταθερά στα 600 V, 3,32 x 10⁻⁶ Nm³ *s⁻¹ και 400 Pa, αντίστοιχα. Τα δείγματα παρατηρήθηκαν με οπτικό μικροσκόπιο, μετρήσεις ακτίνων X και μετρήσεις μικροσκληρότητας. Ελήφθη μέγιστη επιφανειακή σκληρότητα 1280 ± 16 HV_{0.3} για δείγματα που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία για 4 ώρες στους 400 °C. Η ανάπτυξη του ενανθρακαζωτωμένου στρώματος είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου επεξεργασίας και ακολουθεί το νόμο Arrhenius, με ενέργεια ενεργοποίησης 76 kJ.mol⁻¹.

Ο I. Lee [20] μελέτησε την επεξεργασία ενανθρακαζώτωσης πλάσματος (PNC) των δειγμάτων χάλυβα SNCM220 που υποβλήθηκαν σε κατεργασία με ψύξη και σκλήρυνση (QT) που διεξήχθη στους 570 °C για 5 ώρες με εξοπλισμό εναζώτωσης πλάσματος. Η ενανθρακαζώτωση πλάσματος PNC, σε ένα μείγμα αερίου N₂: H₂: CH₄ (85, 13,75, 1,25 % κατά όγκο) παρήγαγε ένα σύνθετο στρώμα αποτελούμενο κυρίως από φάση ε-Fe₂₋₃(N,C) στην επιφάνεια του χάλυβα

SNCM220. Το πάχος της σύνθετης στρώσης μειώθηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας σε CH₄ όταν η σύσταση N₂ σταθεροποιήθηκε στο 85%. Η ποσότητα της φάσης ε-Fe₂₋₃ (N, C) στην σύνθετη στιβάδα αυξήθηκε με αυξανόμενη περιεκτικότητα αερίου CH₄ έως 1,25% κατ'όγκο. Όταν υπήρχε περισσότερο από 1,5% CH₄ στο μείγμα αερίων, άρχισε να σχηματίζεται η φάση σεμεντίτη, η οποία μείωσε το πάχος της σύνθετης στρώσης. Η επεξεργασία με ενανθρακαζώτωση αερίου (GCN) διεξήχθη στους 860 ° C για 2 ώρες ακολουθούμενη από ψύξη μέσω ελαίου στους 130 ° C και σκλήρυνση στους 180 ° C για 2 ώρες. Η επεξεργασία με ενανθρακαζώτωση αερίου GCN παρήγαγε ένα σκληρυνθέν στρώμα με δομή μαρτενσίτη που περιείχε υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (0,6% κατά βάρος). Το αποτελεσματικό βάθος (550 HV0.3) ήταν περίπου 300 μm. Σε σύγκριση με την ενανθρακαζώτωση αερίου GCN, ο χάλυβας SNCM220 που είχε υποστεί επεξεργασία με ενανθρακαζώτωση πλάσματος PNC και σκλήρυνση QT είχε υψηλότερη σκληρότητα επιφάνειας (κατά 150-200 HV0.1), αλλά χαμηλότερη σκληρότητα κοντά στην επιφάνεια και σκληρότητα βάθους (κατά 300-400 HV0.1). Ωστόσο, η επεξεργασία με ενανθρακαζώτωση πλάσματος PNC του χάλυβα SNCM220 που έχει υποστεί κατεργασία με σκλήρυνση QT έδειξε καλύτερη αντοχή στη φθορά. Αυτό οφειλόταν σε χαμηλότερο συντελεστή τριβής, σε σύγκριση με το αποτέλεσμα της επεξεργασίας ενανθρακαζώτωσης αερίου GCN. Ως εκ τούτου, στο εγγύς μέλλον, αναμένεται ότι η επεξεργασία ενανθρακαζώτωσης αερίου θα μπορούσε να αντικατασταθεί από τη συνδυασμένη διαδικασία ενανθρακαζώτωσης πλάσματος + σκλήρυνση QT για την κατασκευή εξαρτημάτων οχημάτων.

Οι I. Velkavrh et al [21] μελέτησαν τις επιφάνειες χάλυβα με ενανθρακαζώτωση οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές τριβολογικής μορφοποίησης λόγω των ωφέλιμων ιδιοτήτων ολίσθησης τους. Ένα τυπικό πεδίο εφαρμογής μπορεί να βρεθεί σε μηχανές κάμψης όπου το ενανθρακαζωτωμένο στρώμα μπορεί να αντέξει μαζική απώλεια όγκου και να αποτρέψει την πρόσφυση του υλικού εργασίας. Ωστόσο, κάτω από συνθήκες ολίσθησης που δεν έχουν λίπανση, μπορεί να συμβεί απότομη αστοχία της στιβάδας με ενανθρακαζώτωση, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα την έντονη αύξηση της τριβής και της φθοράς. Προκειμένου να χαρακτηριστούν οι μηχανισμοί φθοράς των επιφανειών με

ενανθρακαζώτωση κάτω από συνθήκες ολίσθησης χωρίς λίπανση, πραγματοποιήθηκε μια εργαστηριακή κλίμακα. Διερευνήθηκαν διαφορετικές διεργασίες ενανθρακαζώτωσης, συμπεριλαμβανομένων της ενανθρακαζώτωσης πλάσματος, αερίου και άλατος. Οι δοκιμές ολίσθησης DIN 100Cr6 σφαίρας- δίσκου, σφαίρα που ολισθαίνει έναντι ενανθρακαζωτωμένης πλάκας, διεξήχθησαν σε πιέσεις επαφής τυπικές για μηχανές κάμψης. Η αξιολόγηση της φθοράς πραγματοποιήθηκε με συμβολόμετρο λευκού φωτός με μετρήσεις της τοπογραφίας φθοράς και επακόλουθο υπολογισμό του μέσου βάθους φθοράς. Έχει παρατηρηθεί έντονη επίδραση της διαδικασίας ενανθρακαζώτωσης στη συμπεριφορά τριβής και φθοράς. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να συσχετιστεί με τη μικροδομή του σύνθετου στρώματος.

Οι D. Caliarì et al [22], μελέτησαν την ανάπτυξη και τη βελτιστοποίηση της αερίας φερριτικής οξυ-ενανθρακαζώτωσης, εφαρμοζόμενης σε βιομηχανικό στοιχείο 38CrMo4 με κυλινδρική διατομή. Ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στη βελτίωση της αντοχής στη διάβρωση από το σπρέι άλατος, σε σχέση με τις απαιτήσεις σκληρότητας και τον χρόνο. Έχουν εφαρμοσθεί αρκετές αλλαγές στην επεξεργασία αναφοράς, με τροποποίηση του χρόνου και της θερμοκρασίας κάθε φάσης της διαδικασίας, καθώς και του μείγματος αερίων και της ροής της ατμόσφαιρας ενανθρακαζώτωσης. Έχει επιτευχθεί επεξεργασία με μικρότερο χρόνο, σε σχέση με τη διαδικασία αναφοράς, η οποία επιτρέπει την απόκτηση αντοχής στη διάβρωση με ψεκασμό άλατος έως 96 ώρες και την τήρηση των απαιτήσεων σκληρότητας.

Οι V. Doan et al [23] μελέτησαν τις επιπτώσεις των επιφανειακών τεχνολογιών στην αντοχή του χάλυβα ISO 42CrMo4, που χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή όπλων, όσον αφορά στην προσπάθεια αντικατάστασης των σκληρών επιχρωμιωμένων επιφανειών που προκαλούν οικολογικά ζητήματα. Μετά την ψύξη και τη σκλήρυνση, τα πειραματικά δείγματα υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με τεχνολογίες ενανθρακαζώτωσης (tenifer), σκληρής επιχρωμίωσης και τεχνολογίες εναζώτωσης πλάσματος. Η εναζώτωσης πλάσματος διεξήχθη με διαφορετικό μίγμα αερίων στους 500°C (διαδικασία εναζώτωσης πλάσματος) για

15 ώρες. Η δοκιμή φθοράς με βάση την αρχή στυλίσκου-δίσκου πραγματοποιήθηκε για να αξιολογηθεί ο συντελεστής τριβής και ο ρυθμός φθοράς. Τα αποτελέσματα συμπληρώθηκαν με δοκιμή επιφανειακής σκληρότητας και μεταλλογραφική αξιολόγηση. Τα αποτελέσματα του πειράματος επισημαίνουν ότι η ενανθρακαζώτωση και η εναζώτωση πλάσματος βελτιώνουν την αντίσταση στην φθορά καλύτερα από την σκληρή επιχρωμίωση.

Οι A. Yenilmez et al [24] μελέτησαν τους ωστενιτικούς ανοξειδωτούς χάλυβες οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες όπως η χημεία, τα τρόφιμα, η υγεία και το διάστημα, λόγω της τέλει αντοχής τους στη διάβρωση. Ωστόσο, πέραν της αντοχής στη διάβρωση, απαιτούνται τα μηχανικά και τριβολογικά χαρακτηριστικά όπως η αντοχή στη φθορά και την τριβή, για να είναι κατάλληλη για την παραγωγή και την κατασκευή αυτού του τύπου μηχανών, εξοπλισμού και μηχανικών εξαρτημάτων. Σε αυτή τη μελέτη εφαρμόστηκε φερριτική (FNC) και ωστενιτική (ANC) ενανθρακαζώτωση σε δείγματα ανοξειδωτού χάλυβα AISI 316, με τέλεια αντοχή στη διάβρωση, στο περιβάλλον πλάσματος κατά το καθορισμένο χρονικό διάστημα (4 ώρες) και ατμόσφαιρα με σταθερό αέριο μίγμα. Προκειμένου να αποκατασταθεί η αντοχή στη διάβρωση, η οποία επιδεινώθηκε μετά από νέα ενανθρακαζώτωση, εφαρμόστηκε διαδικασία μεταοξειδώσεως πλάσματος (45 λεπτά). Μετά την διπλή επεξεργασία, εξετάστηκαν οι δομικές αναλύσεις των δειγμάτων με τις μεθόδους XRD και SEM, η ανάλυση διάβρωσης με τη μέθοδο πόλωσης και η σκληρότητα επιφανείας με τη μέθοδο μικροσκληρότητας. Στο τέλος, η επιφανειακή σκληρότητα του ανοξειδωτού χάλυβα AISI 316 αυξήθηκε με τη μέθοδο της ενανθρακαζώτωσης, αλλά η αντοχή στη διάβρωση επιδεινώθηκε με ενανθρακαζώτωση FNC (570°C) και ANC (670°C). Με την μεταοξειδωτική επεξεργασία, διαπιστώθηκε ότι η αντοχή στη διάβρωση έγινε καλύτερη και προσέγγισε την τιμή της πριν από τη διαδικασία.

1.2.3. ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ

Οι C.E. Foerster et al [25] μελέτησαν τη διαδικασία ενανθρακαζώτωσης σε χάλυβα AISI 304 με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα σε ατμόσφαιρα

εναζώτωσης (98: 2 - N₂: CH₄) και σε θερμοκρασία 300°C, η οποία σχημάτισε ένα ρηχό τροποποιημένο στρώμα αζώτου και ωστενιτικού άνθρακα. Η σκληρότητα αυξάνεται από τη αρχική τιμή από ~ 5 GPa έως περίπου 11 GPa στην περιοχή κοντά στην επιφάνεια, ενώ η επιφανειακή σκλήρυνση μείωσε τη φθορά κατά συντελεστή πέντε. Αυτή η βελτίωση είναι διαθέσιμη σε χρόνο 0,5 ώρας αλλά και για μεγαλύτερο χρόνο ενανθρακαζώτωσης (έως 4 ώρες), η οποία δεν προκαλεί πρόσθετη βελτίωση φθοράς. Αυτή η χαμηλή θερμοκρασία και η σύντομη διαδικασία ενανθρακαζώτωσης (0,5 ώρα) αποκαλύπτει πρακτική συνάφεια όταν είναι απαραίτητο ένα πολύ λεπτό σκληρό τροποποιημένο στρώμα σε συνύπαρξη με σκληρή επιφάνεια, που είναι ανθεκτική στη φθορά.

Οι F. Mahzoon et al [26] μελέτησαν την ανάπτυξη ενός κατάλληλου μηχανήματος στο εργαστήριο για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς της φθοράς του ακατέργαστου 316L ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα και των δειγμάτων που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με ηλεκτρολυτική μέθοδο ενανθρακαζώτωσης πλάσματος υπό διαφορετικούς συνδυασμούς κυκλικής φόρτισης και πίεσης επαφής. Καταγράφηκαν οι κύκλοι θραύσης ως συνάρτηση της τάσης κάμψης, ενώ ταυτόχρονα εφαρμόστηκε μία σταθερή πίεση επαφής. Ως αποτέλεσμα, τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με ενανθρακαζώτωση πλάσματος PEN / C παρουσίασαν υψηλότερη αντίσταση (περίπου 40% για φορτίο επαφής 15,6 N και περίπου 60% για φορτίο επαφής 25 N) υπό την εφαρμογή ταυτόχρονης κυκλικής τάσης και πίεσης επαφής. Επίσης, αποδείχθηκε ότι, κάτω από μία σειρά συνδυασμένων καταπονήσεων από κόπωση και φθορά, τα δείγματα παρουσιάζουν μια καλύτερη διάρκεια ζωής από τις συνθήκες εκτέλεσης δοκιμών φθοράς ή κόπωσης χωριστά και αυτό το αποτέλεσμα ήταν πολύ πιο εμφανές για τα δείγματα που είχαν υποστεί επεξεργασία με ενανθρακαζώτωση πλάσματος PEN/C. Οι τιμές βαρυμετρικής απώλειας βάρους στη δοκιμή κόπωσης-φθοράς μετρήθηκαν επίσης, σε διαστήματα 5000 έως 300.000 κύκλων (με την τάση επαφής = 6,25 MPa και την τάση κάμψης = 87 MPa). Τα αποτελέσματα έδειξαν καλύτερη αντοχή στη φθορά για την κατεργασμένη επιφάνεια στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας.

Οι F. Mahzoon et al [27] μελέτησαν το μηχανισμό φθοράς των ηλεκτρολυτικά ενανθρακαζωτωμένων σε πλάσμα (PEN/C), δειγμάτων από ανοξείδωτο χάλυβα 316L μετά από δοκιμή φθοράς στυλίσκου-δίσκου. Μελετήθηκε η επιφανειακή μορφολογία των δειγμάτων μετά την εφαρμογή της μεθόδου ενανθρακαζώτωσης πλάσματος PEN/C, χρησιμοποιώντας τεχνική ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Οι ολισθαίνουσες τροχιές που προέκυψαν από τις δοκιμές φθοράς στα επεξεργασμένα δείγματα δεν έδειξαν σημάδια πλαστικής παραμόρφωσης και φθοράς λόγω πρόσφυσης, αλλά τα σωματίδια φθοράς του ολισθητήρα παγιδεύτηκαν στους μικροκρατήρες της επιφάνειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτός ο μηχανισμός μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω την τριβολογική απόδοση του συστήματος αυξάνοντας την αντίσταση στη φθορά και μειώνοντας την τριβή. Συνεπώς, οι επιφάνειες που έχουν υποστεί επεξεργασία με ενανθρακαζώτωση πλάσματος PEN/C φέρεται ότι έχουν την πιθανότητα να περιορίσουν τους μηχανισμούς φθοράς μετάλλου-μετάλλου σε μικροκλίμακα, εάν οι πιέσεις επαφής είναι αρκετά χαμηλές.

Ο U. Sudjadi [28] μελέτησε την επιφανειακή σκλήρυνση σε κοχλία (C = 0,01%) σε θερμοκρασία 400°C για 5 και 6 ώρες με ενανθρακαζώτωση πλάσματος. Ο στόχος αυτού του πειράματος ήταν να αναζητηθεί ένα επιφανειακό υλικό κοχλίων που να είναι πιο ανθεκτικό στην τριβή και να έχει καλύτερη ομοιομορφία στην επιφάνεια, μεγαλύτερη σκληρότητα και υψηλότερη αντοχή στη διάβρωση. Η ενανθρακαζώτωση έγινε στους κοχλίες σε θερμοκρασία 400°C, με μια παραλλαγή των χρόνων ενανθρακαζώτωσης 5 και 6 ωρών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέση σκληρότητα των δειγμάτων πριν από την ενανθρακαζώτωση ήταν 136.08 kgf / mm². Μετά από την ενανθρακαζώτωση σε θερμοκρασία 400°C για 5 ώρες, η μέση σκληρότητα των δειγμάτων ήταν 199,1 kgf/mm². Μετά από ενανθρακαζώτωση σε θερμοκρασία 400°C για 6 ώρες, η μέση σκληρότητα των δειγμάτων ήταν 201,12 kgf/mm². Οι μήτρες στο υλικό βάσης ήταν φερρίτης, ωστενίτης και περλίτης.

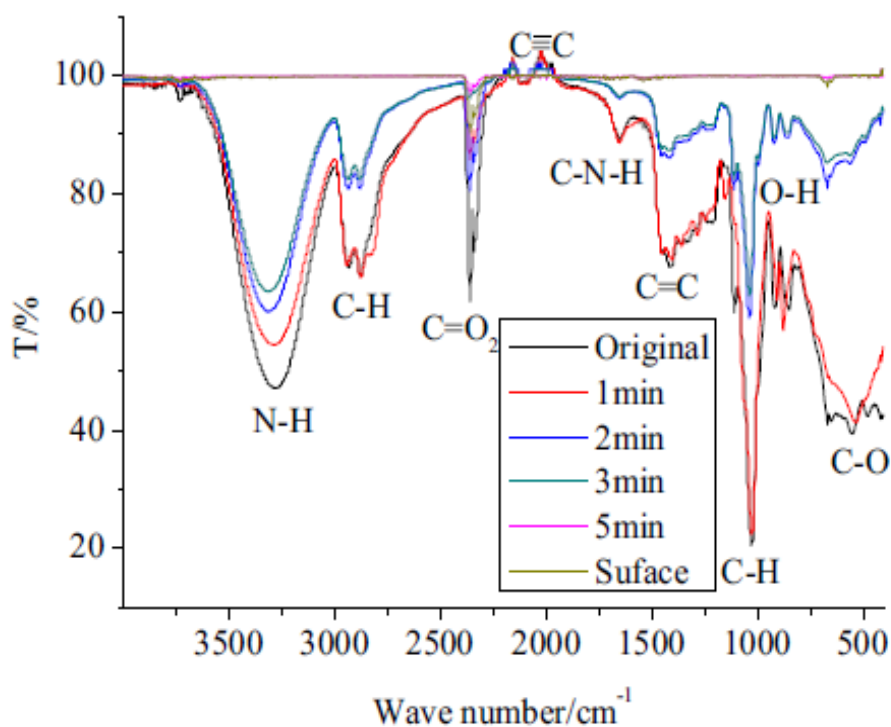
Ο ίδιος μελετητής [29] μελέτησε την επιφανειακή σκλήρυνση σε κοχλία (C = 0,071%) που έχει πραγματοποιηθεί ενανθρακαζώτωση πλάσματος με συσκευή ραδιοσυχνότητας (RF). Ορισμένα στοιχεία του κοχλία καθαρίστηκαν με

απεσταγμένο νερό. Ο τύπος του υλικού ήταν χάλυβας χαμηλού άνθρακα, συγκέντρωσης άνθρακα 0,071%. Μετά από αυτό το εξάρτημα καθαρίστηκε με ακετόνη. Το φυσικό στρώμα οξειδίου στην επιφάνεια του υλικού χαράχθηκε με HF για 1 έως 3 λεπτά. Το εξάρτημα καθαρίστηκε και πάλι με απεσταγμένο νερό. Στη συνέχεια το εξάρτημα ψεκάστηκε με αέριο άζωτο. Μετά από αυτό, το εξάρτημα σκληρύνθηκε στην επιφάνεια του υλικού με ενανθρακαζώτωση πλάσματος RF σε θερμοκρασία 400 ° C, για 7 ώρες. Το δείγμα 1 ήταν πριν την ενανθρακαζώτωση. Το δείγμα 2 ήταν δείγμα μετά από ενανθρακαζώτωση σε θερμοκρασία 400°C, επί 7 ώρες. Στη συνέχεια το εξάρτημα κόπηκε με μηχανή κοπής σε δείγματα για να παρατηρηθεί η μικροδομή του. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν, γυαλίστηκαν και χαράχτηκαν για τη παρατήρηση της μικροδομής τους με οπτικό μικροσκόπιο. Η επιφανειακή σκληρότητα των δειγμάτων δοκιμάστηκε με συσκευή μικροσκοπική σκληρότητας O.M.A.G Vickers, MHX 10. Η παρακολούθηση των δειγμάτων ήταν 300 grf και η παρακολούθηση των χρόνων ήταν 15 δευτερόλεπτα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η σκληρότητα του δείγματος πριν την ενανθρακαζώτωση ήταν 154,5 Kgf / mm², αφού το δείγμα ενανθρακαζωτώθηκε σε θερμοκρασία 400 ° C για 7 ώρες, η μέγιστη σκληρότητα στην επιφάνεια αυξήθηκε έως 205,6 Kgf / mm². Οι μήτρες στο υλικό βάσης ήταν ωστενίτης, φερρίτης και περλίτης.

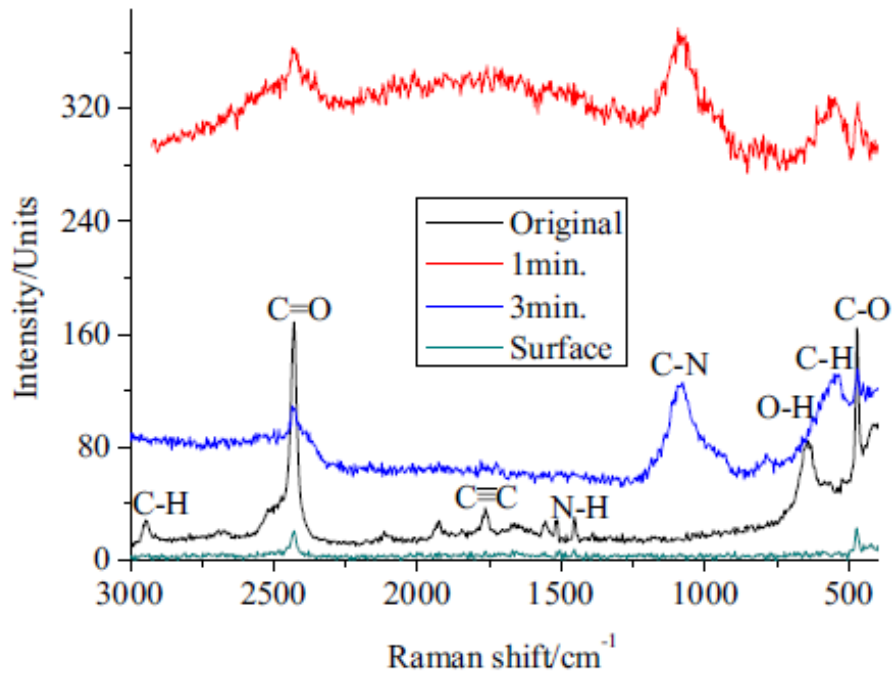
Οι E. Troell et al [30] μελέτησαν τις διαδικασίες εναζώτωσης σε συνδυασμό με την κατάλληλη επιλογή χάλυβα για την εύκολη κατασκευή εξαρτημάτων με χαμηλή τριβή και υψηλές ιδιότητες φθοράς. Η εναζώτωση και η ενανθρακαζώτωση εφαρμόστηκαν σε ένα ευρύ φάσμα χαλύβων για να αξιολογηθούν οι επιδράσεις στο σύνθετο στρώμα, τη ζώνη διάχυσης και, κατά συνέπεια, η συνολική επίπτωση στην κόπωση και τις τριβολογικές ιδιότητες. Η αντικατάσταση της ενανθράκωσης με διαδικασίες εναζώτωσης έγινε σε οδοντωτούς τροχούς. Το επίπεδο παραμόρφωσης είναι μεγαλύτερο για σκληρυνόμενους τροχούς σε σχέση με τους τροχούς με εναζώτωση. Επιπλέον, φαίνεται ότι υπάρχει μικρότερη διάσπαση στο επίπεδο παραμόρφωσης μεταξύ των τροχών με εναζώτωση σε δεδομένου βαθμού χάλυβα, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι στρεβλώσεις θα ήταν ευκολότερο να προβλεφθούν και να αντισταθμιστούν σε σύγκριση με τους σκληρυμένους τροχούς. Η επίδραση του χάλυβα και της διαδικασίας εναζώτωσης αξιολογήθηκε με δοκιμές φθοράς. Σε

λιπαρές συνθήκες οι τριβολογικές ιδιότητες ήταν αρκετά παρόμοιες για όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν. Το αποτέλεσμα σε ξηρές συνθήκες οδήγησε σε χαμηλότερη τριβή, σε χαμηλότερα φορτία, για μερικούς από τους χάλυβες με εναζώτωση και / ή με ενανθρακαζώτωση σε σύγκριση με τον σκληρυμένο χάλυβα 16MnCr5.

Οι Y. Jiang et al [31] μελέτησαν την απορρόφηση και την μετάβαση των ενώσεων στην επιφάνεια του χάλυβα Q235, με ενανθρακαζώτωση πλάσματος (PEN / C) σε υδατικό διάλυμα, που περιέχει τριαιθυλαμίνη, γλυκερόλη και διττανθρακικό νάτριο, για 5-15 λεπτά. Για την παρατήρηση της εξέλιξης των ενώσεων χρησιμοποιήθηκαν το φασματοσκόπο Raman (Σχ. 13) και το φασματόμετρο υπέρυθρου μετασχηματισμού Fourier (FTIR) (Σχ. 12). Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) χρησιμοποιήθηκε για την εξέταση της μορφολογίας της επιφάνειας του Q235. Υποδεικνύεται ότι οι δεσμοί σε C - C και C - N αναπτύσσονται από απλό δεσμό σε διπλούς και τριπλούς δεσμούς.



Σχ. 12. Ανάλυση FTIR σε επεξεργασία PEN / C [31].

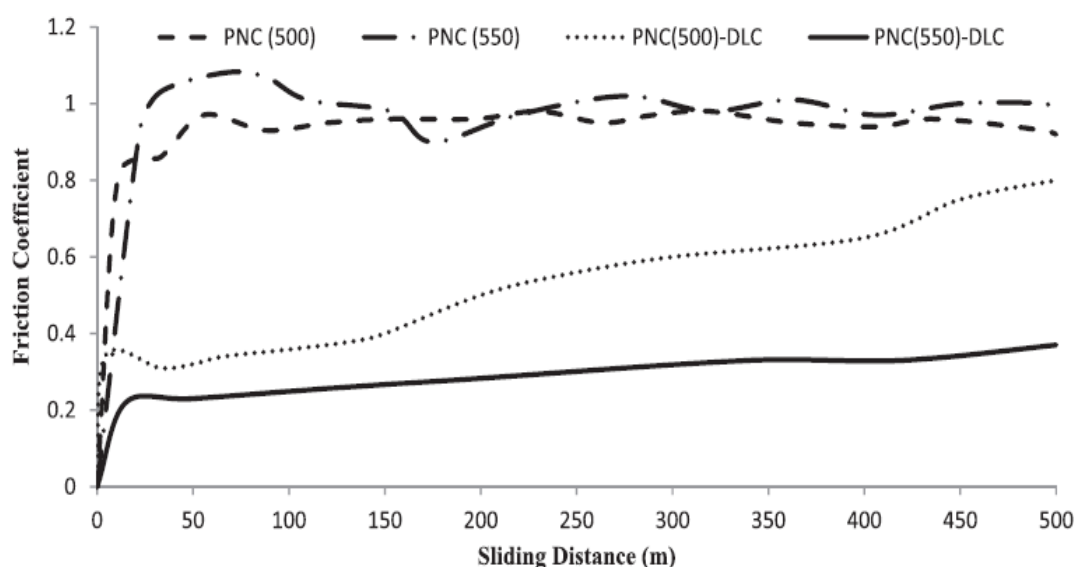


Σχ. 13. Φασματοσκοπία Raman σε επεξεργασία PEN / C [31].

Η μέγιστη σκληρότητα των 4,76 GPa με τον αντίστοιχο συντελεστή Young 107,91 GPa, λαμβάνεται στο ηλεκτρολυτικό στρώμα ενανθρακαζώτωσης πλάσματος, ενώ η σκληρότητα στο υπόστρωμα είναι 1,79 με τον αντίστοιχο συντελεστή Young να είναι 59,76 GPa λόγω της ενίσχυσης του νιτριδίου και του καρβιδίου. Επίσης εμφανίζεται τριβή κόπωσης λόγω επαφή αντί για φθορά λόγω λείανσης στην επιφάνεια με ενανθρακαζώτωση πλάσματος PEN/C.

Οι M. Ebrahimi et al [32] μελέτησαν την ενανθρακαζώτωση πλάσματος (PNC) ως μέθοδος προ-εναπόθεσης για την παραγωγή ενός διεπιφανειακού στρώματος που βελτιώνει την πρόσφυση των μεμβρανών DLC (Diamond-like carbon). Οι μεμβράνες DLC (Diamond-like carbon) είναι επικαλύψεις για την αύξηση της αντοχής σε φθορά ενός υλικού. Μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας PNC στην πρόσφυση των μεμβρανών DLC. Με βάση τις παρατηρήσεις αυτής της μελέτης, συμπεραίνεται ότι η ενανθρακαζώτωση πλάσματος στους 500 ° C και στους 550 ° C, έχει θετική επίδραση στην πρόσφυση ταινιών DLC στον χάλυβα AISI 4140. Η μεμβράνη DLC που αναπτύχθηκε στο δείγμα PNC (550) έδειξε καλύτερη πρόσφυση από εκείνη του δείγματος PNC (500). Αυτό μπορεί να αποδοθεί στον πιο αποτελεσματικό μηχανισμό αλληλοσύνδεσης στις επιφάνειες. Το δείγμα PNC (550) -

DLC έδειξε χαμηλότερο συντελεστή τριβής συγκριτικά με το δείγμα PNC (500) –DLC (Σχ. 14). Αυτό μπορεί να αποδοθεί στη γραφίτοποίηση του φιλμ DLC κατά τη διάρκεια της δοκιμής φθοράς. Η τραχύτητα της επιφάνειας του ενανθρακαζωμένου δείγματος ήταν καθοριστική για αντοχή στη φθορά, των φιλμ DLC σε εξωτερικά φορτία. Η υψηλότερη τραχύτητα της ενανθρακαζωμένης επιφάνειας προκάλεσε υψηλότερη πρόσφυση σε μεμβράνες DLC και χαμηλότερο ποσοστό φθοράς.



Σχ. 14. Παραλλαγές του συντελεστή τριβής ως συνάρτηση της ολισθαίνουσας απόστασης για τα δείγματα με ενανθρακαζώτωση πλάσματος και τις μεμβράνες DLC [32].

Οι ίδιοι μελετητές [33] μελέτησαν την επίδραση της θερμοκρασίας και της ροής του υδρογόνου στη συμπεριφορά φθοράς των ταινιών DLC (diamond like carbon), χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία RSM (response surface methodology). Οι ταινίες DLC εναποτέθηκαν σε ενανθρακαζωμένο χάλυβα AISI4140 με τη μέθοδο DC PACVD, από 60-120 ° C και σε μια ατμόσφαιρα υδρογόνου εύρους 0-40 sccm. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο συνδυασμός σχετικά υψηλής θερμοκρασίας απόθεσης και χαμηλής ροής υδρογόνου ή χαμηλής θερμοκρασίας εναπόθεσης και η υψηλής ροής υδρογόνου παράγουν φιλμ DLC με χαμηλή ταχύτητα φθοράς και χαμηλό συντελεστή τριβής.

Οι M. BELAID et al [34] μελέτησαν τη διαδικασία ενανθρακαζώτωσης σε λουτρό άλατος που παράγει ένα σύνθετο στρώμα αποτελούμενο κυρίως από ε-φάση για ένα χρόνο βελτιστοποίησης 6 ωρών στην επιφάνεια του βιομηχανικού εργαλειοχάλυβα τύπου AISI 02. Υψηλότερος χρόνος (8 ώρες) οδηγεί στο σχηματισμό μιας διπλής φάσης αποτελούμενης από τις δύο φάσεις $\epsilon\text{-Fe}_3(\text{N}, \text{C})$ και $\gamma\text{-Fe}_4(\text{N}, \text{C})$. Μια μετα-οξειδωτική επεξεργασία μειώνει το πάχος της σύνθεσης του στρώματος και αλλάζει τη μορφολογία του νιτριδίου του σιδήρου που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας ενανθρακαζώτωσης. Τα δείγματα με συνδυασμένες επεξεργασίες, ενανθρακαζώτωσης και μετα-οξείδωσης, δείχνουν αύξηση της επιφανειακής σκληρότητας σε σύγκριση με αυτά με ενανθρακαζώτωση μόνο. Εάν η πρόσφυση και η σταθερότητα της στρώσης οξειδίου που σχηματίζεται είναι αμφισβητήσιμες κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, η αντοχή στη φθορά και στη διάβρωση θα βελτιωθεί παρόλα αυτά χάρη στην αναπλήρωση των πόρων που σχηματίζονται με τη διαδικασία της μετά-οξείδωσης.

Οι S. P. Brühl et al [35] είχαν σαν σκοπό αυτής της μελέτης την επιλογή μιας κατάλληλης επιφανειακής επεξεργασίας για την ενίσχυση της αντοχής στη φθορά των εκκεντροφόρων των κινητήρων. Ο εκκεντροφόρος είναι ένα μέρος ενός πετρελαιοκινητήρα που λειτουργεί κάτω από στρέψη, κόπωση και φθορά. Συνήθως κατασκευάζονται με χύτευση, σφυρηλάτηση ή μηχανική κατεργασία από σφυρήλατο ράβδο από χάλυβες χαμηλής κραματοποίησης και στις περισσότερες περιπτώσεις οι κατεργασμένες επιφάνειες σβήνουν και σκληρύνουν με επαγωγική θέρμανση. Μετά από αυτό, σε πολλές περιπτώσεις, για να αντέξει τις προσπάθειες που επιβάλλονται στις επιφάνειες και να βελτιώσει τις ιδιότητες της τριβολογίας και της κόπωσης, η βιομηχανία χρησιμοποίησε εδώ και δεκαετίες, τις θερμοχημικές τεχνολογίες όπως το λουτρό άλατος ή τις διαδικασίες εναζώτωσης και ενανθρακαζώτωσης.

Μελετήθηκαν οι επιδράσεις της εναζώτωσης πλάσματος και της ενανθρακαζώτωσης πλάσματος, στην τριβολογική συμπεριφορά του χάλυβα SAE 1045HM3 που προτάθηκε για την παραγωγή εκκεντροφόρων. Μετά τις επεξεργασίες πλάσματος, μετρήθηκε η μεταβολή στην τραχύτητα της επιφάνειας. Τα τροποποιημένα στρώματα μελετήθηκαν με τεχνικές ακτίνων X και το πάχος τους

με οπτικό μικροσκόπιο. Η ζώνη διάχυσης αξιολογήθηκε με προσδιορισμούς μικροσκληρότητας Vickers. Δοκιμασίες τριβολογίας διεξήχθησαν με διάταξη σφαίρας-δίσκου χρησιμοποιώντας σφαίρα WC.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα δείγματα με εναζώτωση πλάσματος παρουσιάζουν την καλύτερη τριβολογική συμπεριφορά σε σύγκριση με τα ενανθρακαζωτωμένα. Επίσης, η επιρροή της τραχύτητας που παράγεται από τις θερμοχημικές διεργασίες φαίνεται να είναι σημαντική.

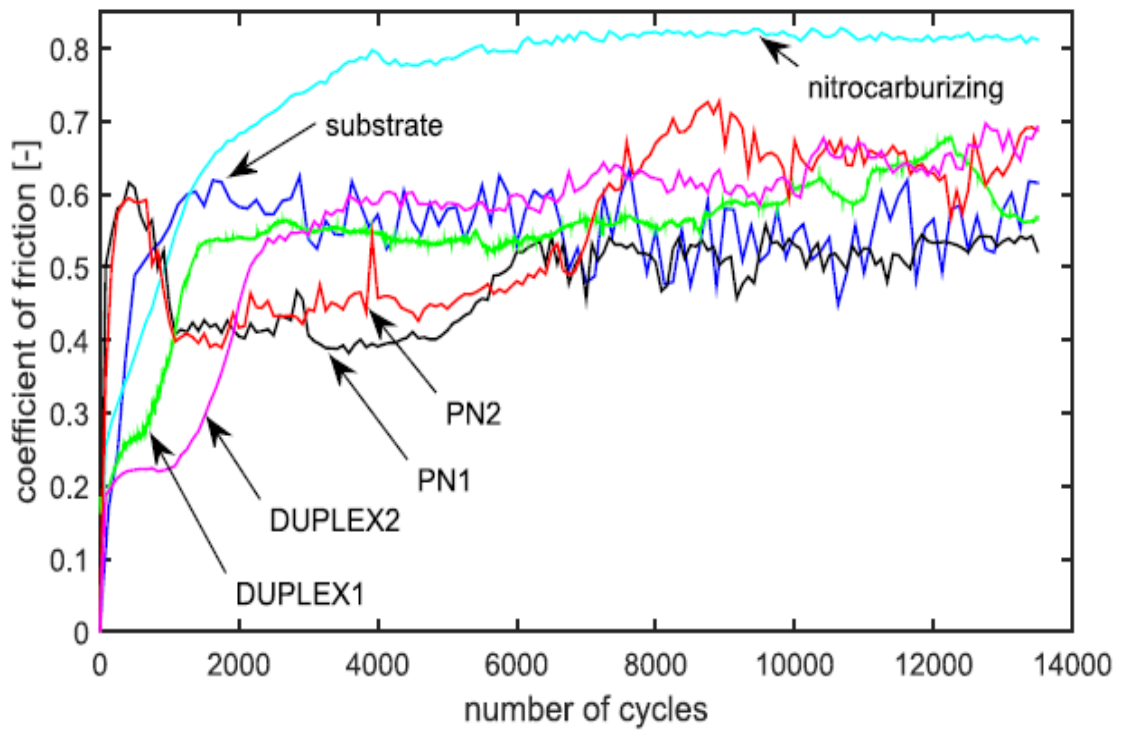
Παρόλο που και οι δύο επεξεργασίες πλάσματος έχουν εφαρμοστεί για πολλά χρόνια και έχουν αναφερθεί ξεχωριστά στην επιστημονική βιβλιογραφία, δεν υπήρχαν πληροφορίες που να συγκρίνουν αυτές τις δύο επεξεργασίες για τους χάλυβες άνθρακα και επίσης δεν υπάρχει τίποτα για την τριβολογία στις λιπαρές συνθήκες των εναζωτωμένων και ενανθρακαζωτωμένων χαλυβων άνθρακα. Στην πραγματικότητα, δεν αποδεικνύεται ότι το πορώδες της στοιβάδας με ενανθρακαζώτωση είναι ευεργετικό για την αντοχή στη φθορά σε λιπαρές συνθήκες. Σε αυτό το έγγραφο, αποδείχθηκε ότι τουλάχιστον στις δοκιμασμένες συνθήκες, δεν υφίσταται. Για αυτό το είδος εφαρμογών συνιστάται συνήθως η ενανθρακαζώτωση αερίου ή πλάσματος, αν και το τροποποιημένο στρώμα είναι πορώδες. Αυτό το έγγραφο επιχειρεί να αποδείξει ότι η εναζώτωσης μπορεί να είναι καλύτερη από την ενανθρακαζώτωση, ακόμα και με λεπτότερο λευκό στρώμα.

Οι Z. Zheng et al [36] μελέτησαν γκρίζο χυτοσίδηρο υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με φερριτική ενανθρακαζώτωση σε χαμηλή θερμοκρασία. Εξετάστηκαν οι τριβολογικές ιδιότητες ολίσθησης του ακατέργαστου γκρι χυτοσίδηρου υψηλής ισοδύναμης περιεκτικότητας σε άνθρακα και του γκρι χυτοσίδηρου υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα μετά από ενανθρακαζώτωση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο φθοράς του γκρι χυτοσίδηρου, που δεν έχει υποστεί επιφανειακή κατεργασία(ενανθρακαζώτωση), με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, ήταν φθορά λόγω πρόσφυσης με ήπια φθορά λείανσης κάτω από χαμηλό φορτίο, και με σοβαρή φθορά λείανσης υπό υψηλό φορτίο. Το μοντέλο φθοράς του φερριτικού ενανθρακαζωτωμένου γκρι χυτοσίδηρου υψηλού ισοδυναμού άνθρακα ήταν ήπια φθορά λόγω πρόσφυσης

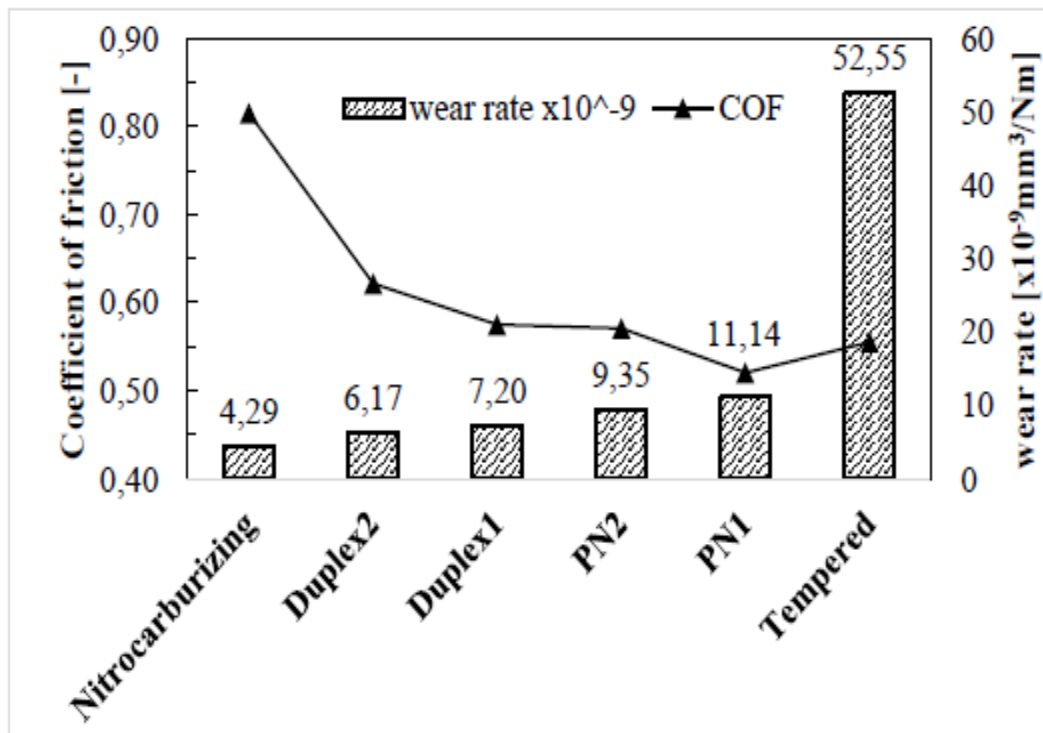
κάτω από χαμηλό φορτίο, εκτός από την φθορά λόγω πρόσφυσης, που συνοδεύεται από ήπια φθορά λείανσης υπό υψηλό φορτίο.

Οι I. Velkavrh et al [37] σε αυτή τη μελέτη, υπέβαλαν τα υποστρώματα εργαλειοχάλυβα σε ενανθρακαζώτωση πλάσματος σε διαφορετικές παραμέτρους επεξεργασίας και στη συνέχεια τα έλεγξαν τριβολογικώς υπό συνθήκες ολίσθησης χωρίς λιπαντικό. Παρατηρήθηκε ότι οι μικρομηχανικές ιδιότητες του στρώματος (πάχος, σκληρότητα, τραχύτητα, επιφανειακή τοπογραφία) επηρεάζουν έντονα την τριβολογική συμπεριφορά της επιφάνειας με ενανθρακαζώτωση και μπορούν να προσαρμοστούν μέσω της ρύθμισης των παραμέτρων της ενανθρακαζώτωσης έτσι ώστε να επιτευχθούν πολύ ευνοϊκές συμπεριφορές φθοράς και τριβής.

Οι V.Doan et al [38] μελέτησαν την επίδραση της επεξεργασίας με εναζώτωση πλάσματος, την ενανθρακαζώτωση και τη διπλή αζωτούχο / μαγγανιοφωσφορούχο επεξεργασία, στην αντίσταση φθοράς του υποστρώματος του χάλυβα C45. Η δοκιμή φθοράς σφαίρας- δίσκου διεξήχθη για να αξιολογηθεί ο συντελεστής τριβής και η ταχύτητα φθοράς χρησιμοποιώντας το τριβόμετρο BRUKER UMT-3. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η ενανθρακαζώτωση έδωσε την καλύτερη αντοχή στη φθορά. Η χειρότερη αντίσταση στη φθορά ήταν με εναζώτωση πλάσματος. Η επικάλυψη με φωσφορούχο μαγγάνιο επέτρεψε τη μείωση του συντελεστή τριβής (Σχ. 15) με ενισχυμένη αντοχή στη φθορά (Σχ. 16) σε σχέση με το εναζωτωμένο στρώμα. Οι επιφανειακές επεξεργασίες βελτιώνουν επίσης την ανομοιόμορφη φθορά της επιφάνειας που έχει σκληρυνθεί.



Σχ. 15. Μεταβολή του συντελεστή τριβής [38].



Σχ. 16. Συντελεστής τριβής και συντελεστής φθοράς [38].

Οι D.Toboła et al [39] μελέτησαν δύο εργαλειοχάλυβες, τον Sverker 21 (AISI D2) και τον Vanadis 6. Ο πρώτος ανήκει στους παραδοσιακούς χάλυβες, ο δεύτερος χαρακτηρίζεται ως προηγμένης μεταλλουργίας χάλυβας (P/M). Υπάρχουν δύο βασικές επιλογές βελτίωσης των επιφανειών θερμικώς επεξεργασμένων εργαλειοχαλύβων ψυχρής κατεργασίας:

Μηχανική κατεργασία όπως η λείανση, ή αλλιώς χημική τροποποίηση όπως η εναζωτωση. Η τελευταία επηρεάζεται όχι μόνο από τη φύση του χημικού παράγοντα, αλλά και από τη διάχυση αυτού του παράγοντα μέσω του χάλυβα. Εστιάζουμε πρώτα στον αριθμό και τη σειρά εργασιών που εκτελούνται στις χαλύβδινες επιφάνειες: στρέψη + λείανση (T + B), στρέψη + αζώτωση (T + N) και στρέψη + λείανση + αζώτωση (T + B + N). Οι μελετητές έκαναν τριβολογικά πειράματα στυλίσκου-δίσκου για τον προσδιορισμό της τριβής λόγω λείανσης και της φθοράς. Η αξιολόγησή των τριβολογικών ιδιοτήτων αυτών των δύο χαλύβων ψυχρών κατεργασιών, οδηγούν στη βελτίωση της κατασκευής τους. Και για τους δύο χάλυβες, η εναζώτωση δίνει καλύτερα αποτελέσματα όταν προηγείται η λείανση. Το ανώτερο επιφανειακό στρώμα επιτρέπει στη συνέχεια ευκολότερη και βαθύτερη λήψη αζώτου. Η ομοιογένεια που ορίζεται ως έλλειψη διαφοροποίησης πάχους του αζωτούχου στρώματος είναι πολύ καλύτερη για την τεχνολογία T + B + N και για τους δύο χάλυβες μας από ό,τι για οποιεσδήποτε εναλλακτικές διαδικασίες κατασκευής τους. Οι συνέπειες για την αντοχή των χαλύβων ψυχρής κατεργασίας είναι εμφανείς και οδηγούν σε σημαντική μείωση φθοράς. Η προτεινόμενη βελτίωση ισχύει όχι μόνο για εργαλειοχάλυβες αλλά επίσης για κράματα τιτανίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΥΛΙΚΟ

Στην παρούσα εργασία, τα υλικά που μελετήθηκαν σε δοκιμή τριβής ολίσθησης είναι ο εργαλειοχάλυβας με εμπορική ονομασία: **QRO-90**, ο οποίος χρησιμοποιείται για εργαλεία θερμής κατεργασίας. Στον **πίνακα 2.1**, φαίνεται η χημική του σύσταση και παρακάτω οι ιδιότητες του. [40]

Πίνακας 2.1. Χημική ανάλυση εξεταζόμενου εργαλειοχαλύβα.

% κ.β.	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
QRO-90	0.38	0.30	0.75	2.6	2.25	0.9

Ο QRO-90 προσεγγίζει το χάλυβα AISI H13. Οι ιδιότητες που τον καθιστούν ελκυστικό για θερμηλασία είναι:

- Καλό επίπεδο σκληρότητας και ολκιμότητας
- Ομοιομορφία και υψηλό επίπεδο μηχανουργικής κατεργασιμότητας
- Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και αντίσταση σε θερμική κόπωση
- Πολύ καλή αντοχή στη βαφή
- Εξαιρετική αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία
- Εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα
- Καλές ιδιότητες θερμικής επεξεργασίας

2.2. ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

Ο εξεταζόμενος εργαλειοχάλυβας υπαίσκει κατάλληλη θερμική κατεργασία, προκειμένου να ληφθούν, τρία δοκίμια τελικής σκληρότητας 40, 45 και 50 HRC. Κάθε κατεργασία αποτελείται από τα εξής στάδια:

- a) Δύο στάδια προθέρμανσης
- b) Ωστενιτοποίηση
- c) Τρία στάδια επαναφορών

Οι χρόνοι και οι θερμοκρασίες των κατεργασιών πάρθηκαν από τα αντίστοιχα διαγράμματα TTT και CCT του υλικού βάσει της προσδωκόμενης τιμής σκληρότητας.

Στον **Πίνακα 2.2**, παρουσιάζονται οι συνθήκες θερμικής κατεργασίας.

Πίνακας 2.2. Συνθήκες θερμικών κατεργασιών του QRO-90.

	QRO90-40		QRO90-45		QRO90-50	
	1ο δοκίμιο		2ο δοκίμιο		3ο δοκίμιο	
Επίπεδα Κατεργασίας	Θερμοκρασία (°C)	Παραμένον Χρόνος(min)	Θερμοκρασία (°C)	Παραμένον Χρόνος(min)	Θερμοκρασία (°C)	Παραμένον Χρόνος(min)
1η Προθέρμανση	650	30	650	30	650	30
2η Προθέρμανση	850	30	850	30	850	30
Στάδιο Ωστενιτοποίησης	1050	40	1050	40	1050	40
1 ^η Επαναφορά	580	120	550	120	550	120
2 ^η Επαναφορά	650	120	640	120	610	120
3 ^η Επαναφορά	610	120	610	120	580	120
Τελική Σκληρότητα	40 HRC		45 HRC		50 HRC	

2.3. ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΒΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Οι δοκιμές τριβής ολίσθησης πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τριβολογίας, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. της ΣΤΕΦ του Α.Ε.Ι.ΠΕΙΡΑΙΑΤ.Τ.

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε τριβόμετρο της εταιρείας CSM Instruments (Σχήμα 2.1), το οποίο είναι τύπου σφαίρας-δίσκου (pin on disk) (Σχήμα 2.2). Ως ανταγωνιστικό υλικό χρησιμοποιήθηκε σφαίρα κονιομεταλλουργίας αλουμίνιας (Al_2O_3), της εταιρείας Sandoz, με διάμετρο 6 mm. Οι ιδιότητές της φαίνονται τον **Πίνακα 2.3**.

Πίνακας 2.3. Ιδιότητες του ανταγωνιστικού υλικού.

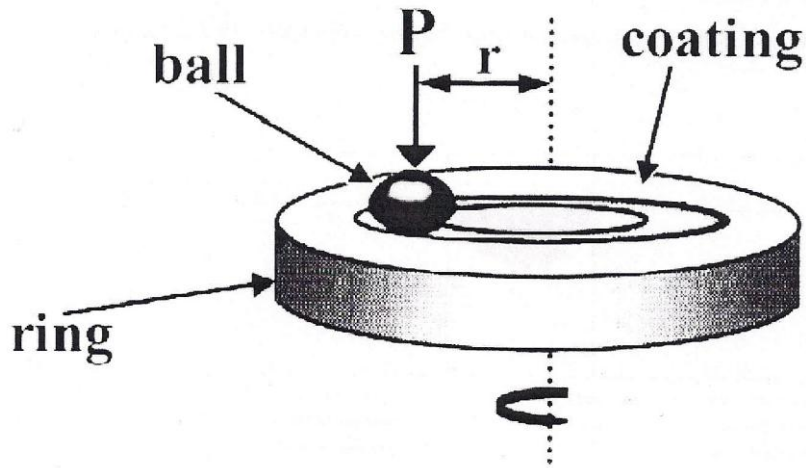
	Al_2O_3
Πυκνότητα, $g.cm^{-3}$	3,90
Φαινόμενο πορώδες, %	<0,5
Μέτρο ελαστικότητας, GPa	365
Λόγος Poisson	0,25
Σκληρότητα, GPa	15,7

Για κάθε δοκίμιο έγιναν 4 σειρές πειραμάτων, με την επιβολή κάθετου φορτίου 1, 2, 5 και 10 N, υπό σταθερή γραμμική ταχύτητα περιστροφής ίση $200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σχετική υγρασία 25%. Για κάθε δοκιμή, η συνολική απόσταση ολίσθησης ήταν 8000m και σε κάποια πραγματοποιήσαμε 10000 m για διερευνητικούς σκοπούς.



Σχήμα 2.1. Τριβόμετρο CSM

(Εργ. Τριβολογίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε./Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.)



Σχήμα 2.2. Σκαρίφημα της δοκιμής τριβής ολίσθησης τύπου σφαίρας-δίσκου.
(*pin-on-disk*)

2.4. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ

Για το χαρακτηρισμό της επιφάνειας και της μικροδομής, όπως και των επιφανειών φθοράς, κάναμε χρήση του στερεοσκοπίου LW Scientific Z2 και του οπτικού μικροσκοπίου της εταιρείας Meiji ML7000 (Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.).

Η μέτρηση των αρχικών μικρογεωμετρικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας των δοκιμίων, έγινε με τη χρήση μηχανικού φορητού τραχυμέτρου Taylor – Hobson Surtronic 3+ (Σχήμα 2.3, Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.), με το οποίο εμβαδομετρήσαμε και την αύλακα φθοράς (Σχήμα 2.4) στις δοκιμές τριβής ολίσθησης, για να υπολογισθεί ο όγκος του απορριπτόμενου υλικού-γρεζιού (**V**), βάσει της σχέσης:

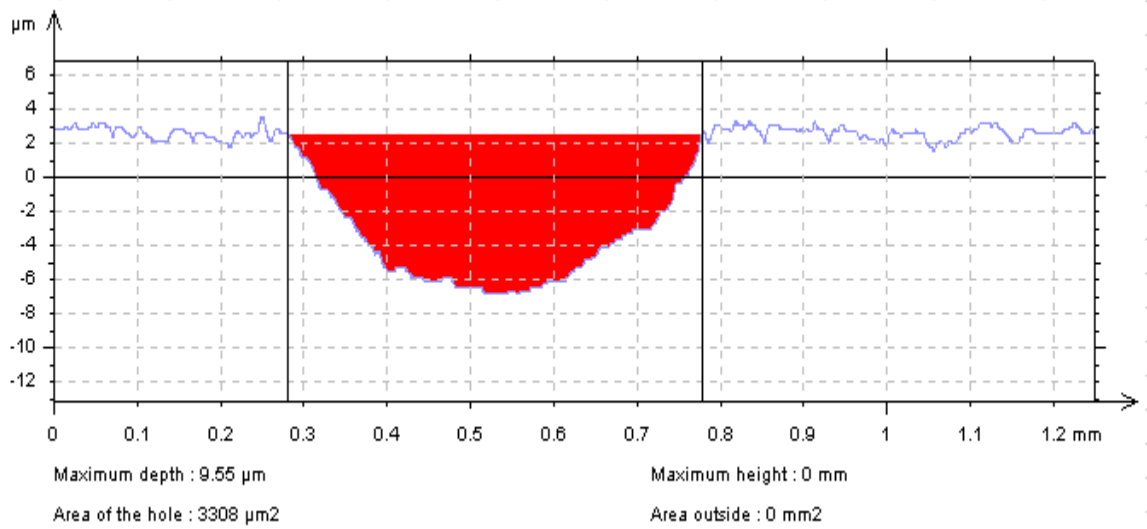
$$V = E_s \times 2\pi R \quad (2.1)$$

”

Όπου : E_s , το εμβαδόν της κάθετης τομής της αύλακας ολίσθησης και
 R , η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς ολίσθησης.



Σχήμα 2.3. Μηχανικό φορητό τραχύμετρο Taylor - Hobson Surtronic 3+
(Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.)



Σχήμα 2.4. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα εμβαδομέτρησης της κάθετης τομής της
αύλακας ολίσθησης για τον υπολογισμό του όγκου φθοράς.

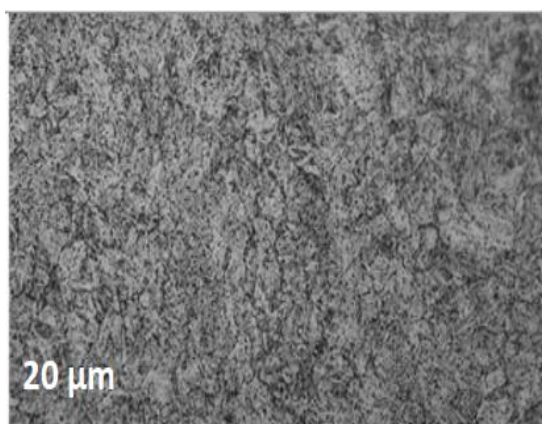
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο, παραθέτονται τα αποτελέσματα των δοκιμών τριβής, των μετρήσεων, από τα οποία παρήχθησαν συμπεράσματα για την επίδραση θερμικής κατεργασίας σκλήρυνσης (βαφής) σε κυλινδρικά δοκίμια εργαλειοχαλύβων, καθώς και στην συμπεριφορά τους σε τριβή ολίσθησης και στη συνεπαγόμενη φθορά.

3.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ-ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Ο εργαλειοχάλυβας **QRO 90** είναι χάλυβας θερμηλασίας με εξαιρετικές επιδόσεις (αντοχή, διαστασιακή σταθερότητα κ.λ.π.) σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Κατατάσσεται στην κατηγορία των χρώμιο-μολυβδένιο-βαναδιούχων χαλύβων, χωρίς ωστόσο να μπορεί να αντιστοιχηθεί ευθέως με κάποια τυποποιημένη κλάση. Επιπρόσθετα της καλής μηχανικής συμπεριφοράς σε υψηλές θερμοκρασίες, ο QRO 90 εμφανίζει ικανοποιητική αντοχή σε εκτριβή και είναι κατάλληλος για την δημιουργία μητρών μορφοποίησης αλουμινίου, χαλκού και ορείχαλκου. Ακόμα παρουσιάζει λεπτόκκοκη μικροδομή και υψηλή διασπορά λεπτομερών καρβιδίων (Σχήμα 3.1.), ενώ η θερμική του κατεργασία γίνεται με μαρτενσιτικό μετασχηματισμό.[40]



Σχήμα 3,1: Μικρογραφία του οπτικού μικροσκοπίου του δοκιμίου QRO 90

3.2. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ

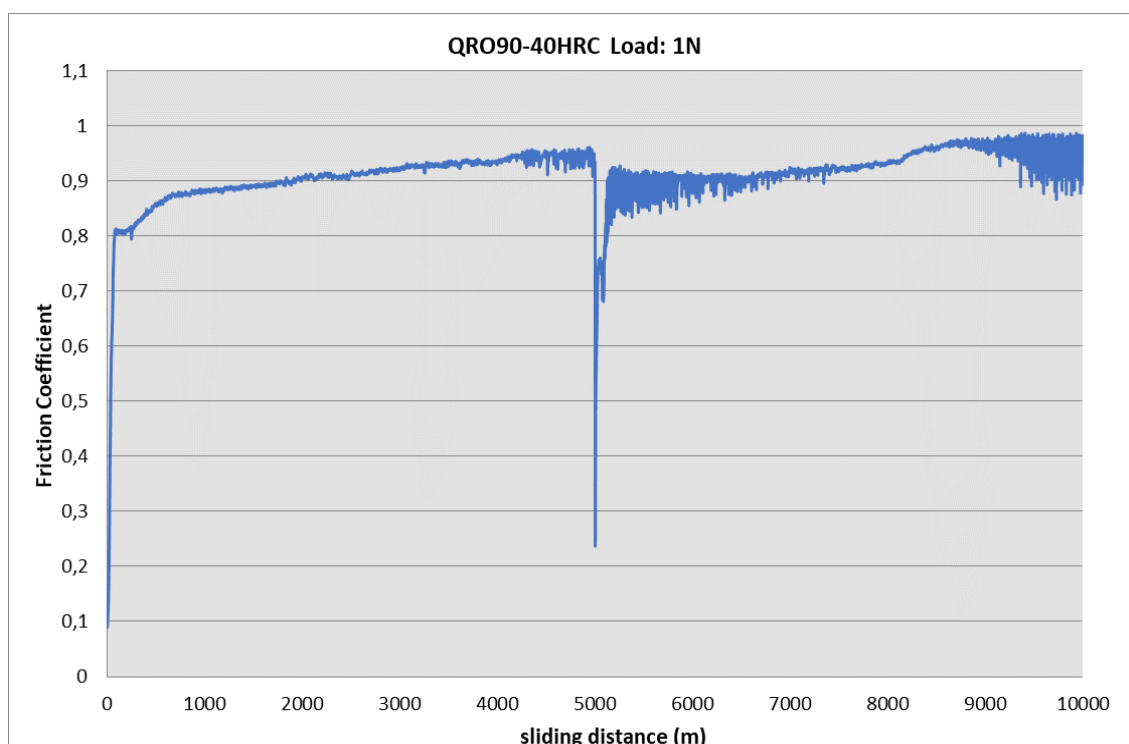
Η διαρκής καταγραφή του συντελεστή τριβής μ για καθεμία από τις τρεις καταστάσεις σκλήρυνσης του εργαλειοχάλυβα, μας επέτρεψε μια πολυπαραμετρική μελέτη κατά την ολίσθηση του, με σκοπό να γίνει πιο κατανοητό ποιες παράμετροι επηρεάζουν την λειτουργία των τριβοσυστημάτων μας.

Για αυτόν τον λόγο πραγματοποιήθηκαν οι εξής συνδιασμοί:

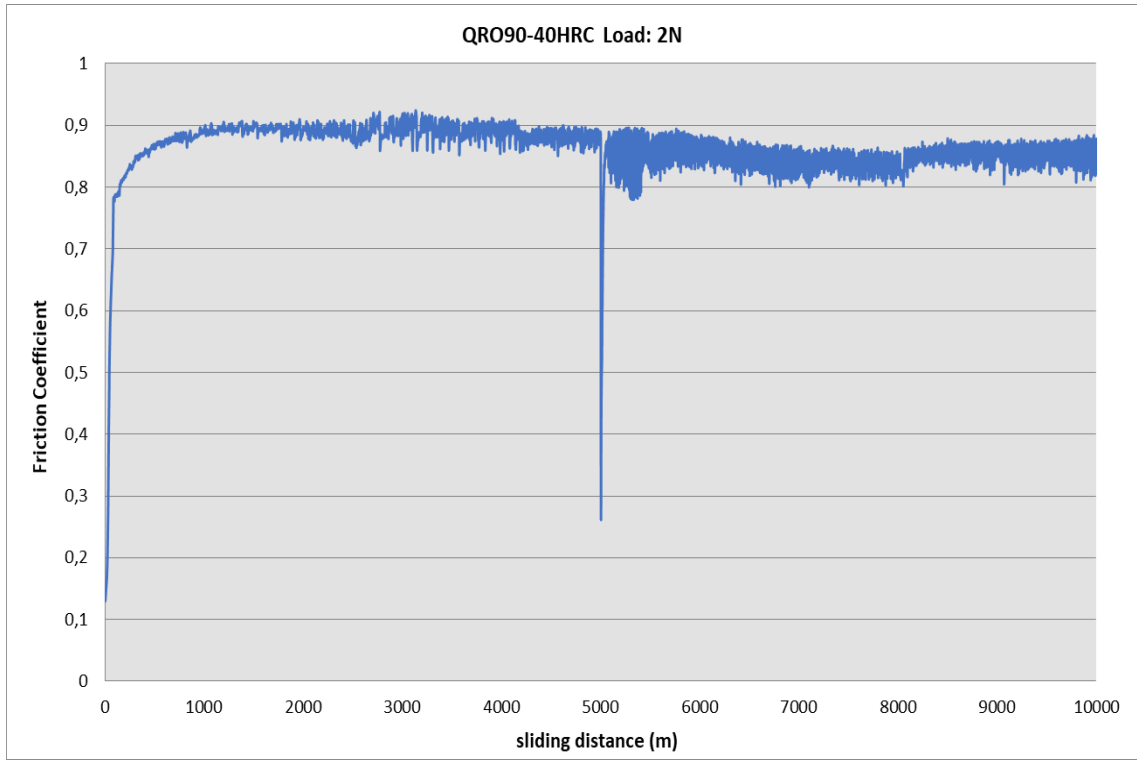
1. Παρατηρήσαμε την εξέλιξη του συντελεστή τριβής συναρτήσει της απόστασης ολίσθησης για δεδομένο κάθετο φορτίο και σκληρότητα (Σχ. 3,2-3,4). Κάποια διαγράμματα εμφανίζουν απότομες και για μικρά χρονικά διαστήματα έντονες βυθίσεις, επειδή διακόπταμε την πειραματική διαδικασία (στα 5 ή 4 χιλιόμετρα). Επίσης από το διάγραμμα του 40 HRC για τα 10N δεν λαμβάνουμε ασφαλή συμπεράσματα για τον συντελεστή επειδή ο στυλίσκος του ανταγωνιστή βρισκόταν υπό κλίση κατά την διάρκεια του πειράματος και ο ρυθμός φθοράς της αύλακας δεν συμβάδιζε με το εφαρμοζόμενο φορτίο που εμείς εξ' αρχής επιλέξαμε.
2. Τα διαγράμματα που προέκυψαν ήταν του μέσου συντελεστή τριβής συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου, αλλά και συναρτήσει της σκληρότητας του υλικού.
Έτσι, διαπιστώσαμε ότι ο μέσος συντελεστής παραμένει σχετικά σταθερός και κυμαίνεται από 0,85-0,95, για όλες τις ποιότητες και τα φορτία που εφαρμόσθηκαν, εκτός από τον χάλυβα των 50HRC για το φορτίο του 1N που έχει τιμή 0,45 (Σχ. 3,5 , 3,6).
3. Επιπρόσθετα η δραστική μείωση του συντελεστή τριβής στην περίπτωση κυρίως του QRO90-50 HRC για 1N, αλλά και δευτερευόντως στους 45,50 HRC για 2N σε μικρότερο βαθμό, μπορεί να οφείλεται στο ότι κατά την εξέλιξη της πειραματικής διαδικασίας οι τροχιές που διαγράφει η μύτη του στυλίσκου μειώνουν την τραχύτητα της αύλακας και την κάνουν πιο λεία με αποτέλεσμα την επερχόμενη μείωση του συντελεστή τριβής.

Ακόμα, στην περίπτωση του QRO90-45 HRC για 1N (Σχ.3,7) παρατηρούμε ένα παράδειγμα συστηματικά ισχυρής διασποράς του συντελεστή τριβής από 0,74-1,02 για μεγάλη απόσταση ολίσθησης-χρονικό διάστημα που οφείλεται στο ότι λόγω της φθοράς-απομάκρυνσης μαλακών επιφανειακών στρωμάτων μεταλλικής φάσης εμφανίστηκαν τα λεπτομεροί καρβίδια (το φαινόμενο ξεκινά μετά το 1χιλ.), τα οποία είναι πλαστικά παραμορφωμένα λόγω αδυναμίας θραύσης τους από τη χαμηλής έντασης επιβολή κάθετου φορτίου, με αποτέλεσμα ο στυλίσκος να ταλαντεύεται πάνω στην επιφάνεια του υλικού.

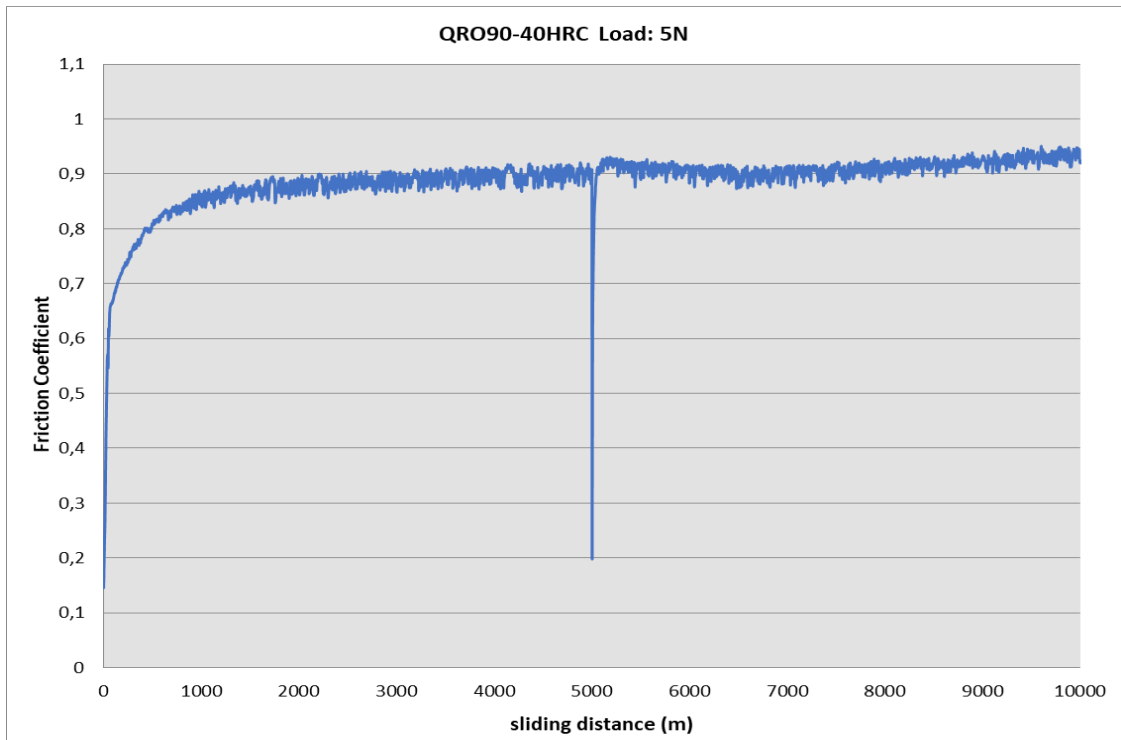
Όσον αναφορά τον όγκο φθοράς λόγω της τριβής ολίσθησης υπολογίσθηκε με τον τρόπο που αναφέραμε και στο κεφάλαιο 2.4. Όπως προείπαμε οι δοκιμές έγιναν για ένα συνολικό μήκος ολίσθησης 8.000 m, απλά εξελίχθηκε μέχρι τα 10.000 m για διερευνητικούς σκοπούς και σταματούσε ανά 4.000 ή 5.000 m για να προσδιορισθεί ο όγκος φθοράς και να καθαρίσουμε το αποβληθέν υλικό της φθοράς από την επιφάνεια. Έτσι, ως αποτέλεσμα έχουμε τα διαγράμματα του όγκου φθοράς για κάθε ποιότητα χάλυβα συναρτήσει της απόστασης ολίσθησης (Σχ.3,8).



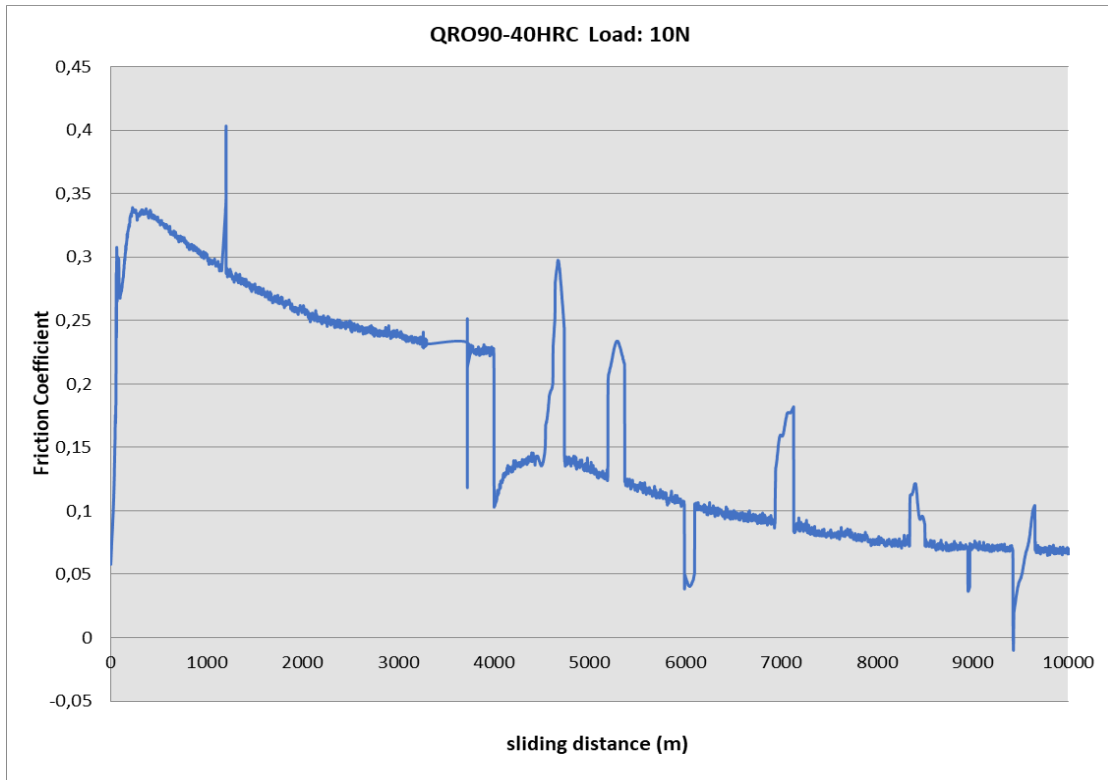
(α)



(β)

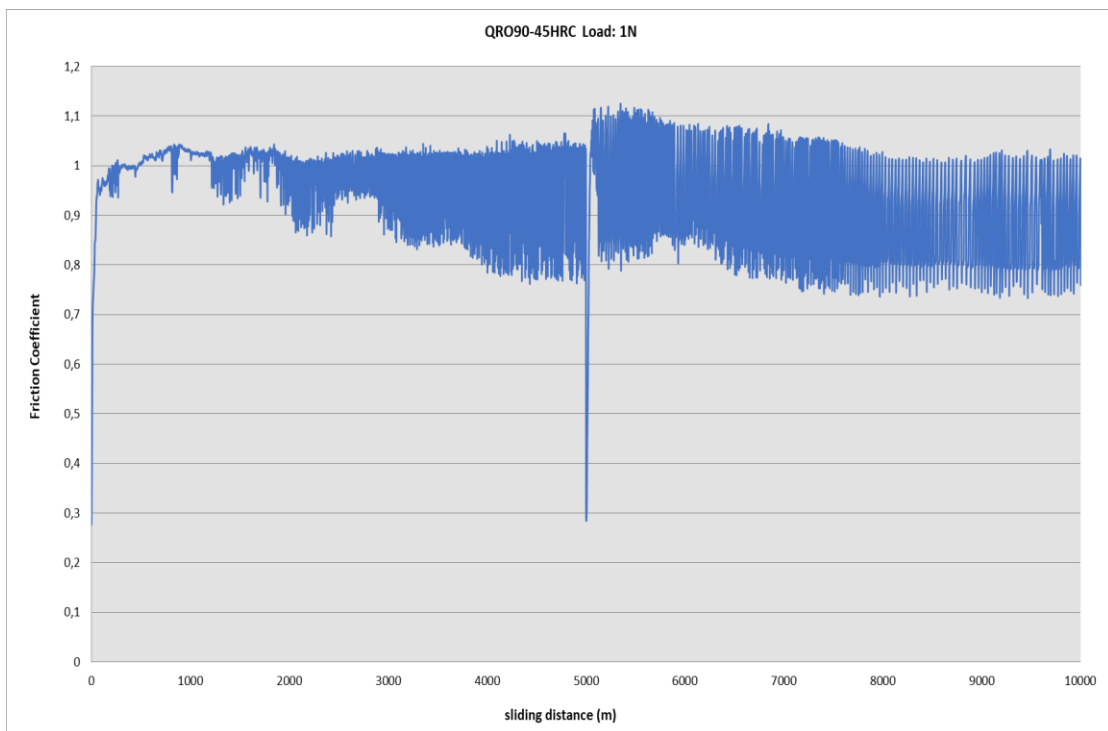


(γ)

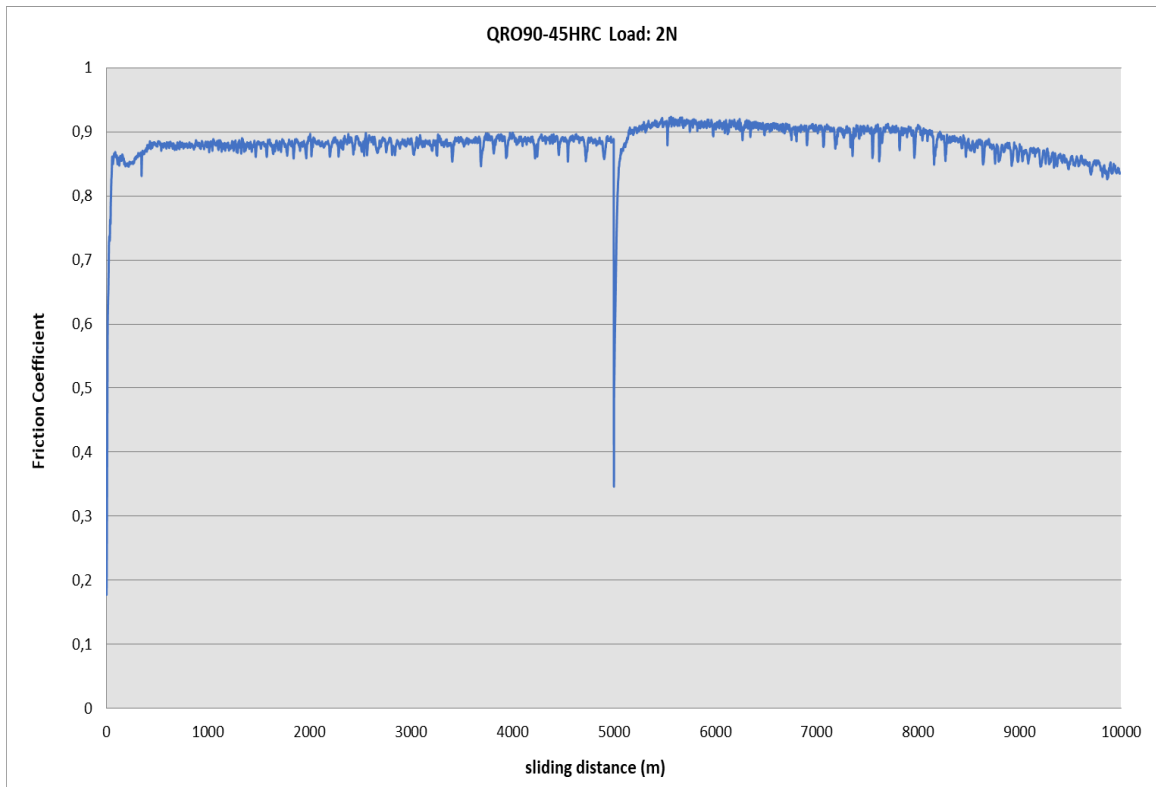


(δ)

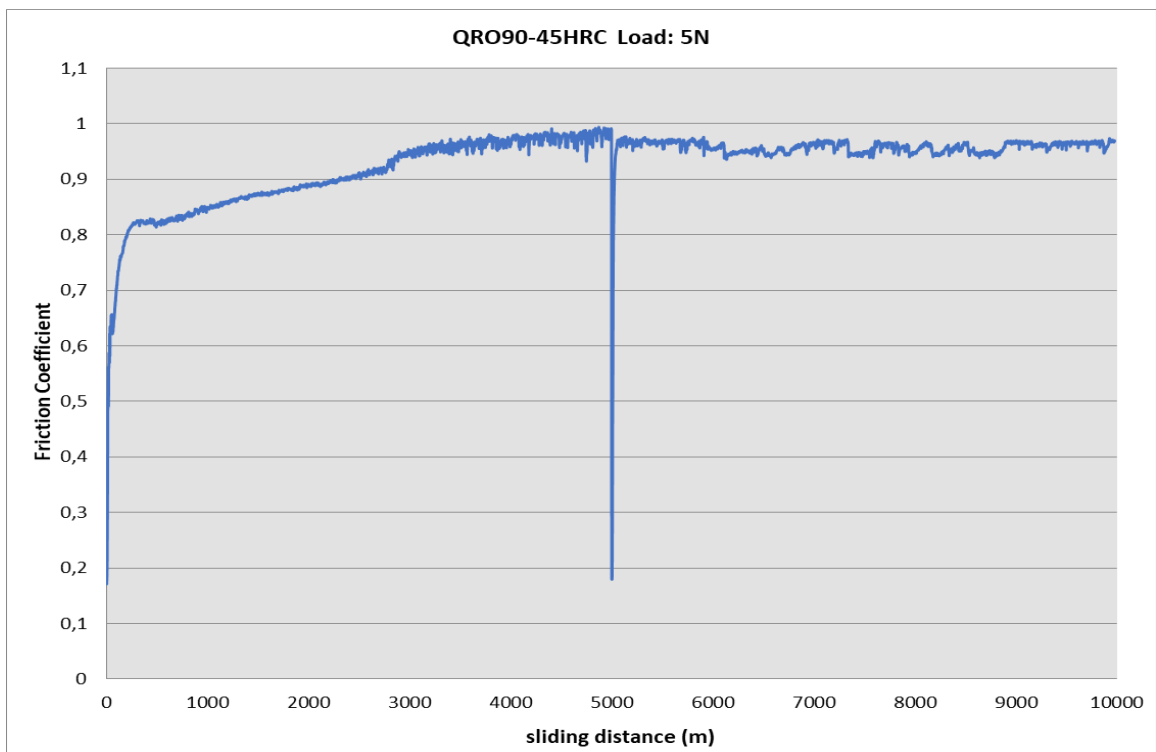
Σχήμα 3,2 : Εξέλιξη συντελεστή τριβής QRO90 στα 40 HRC συναρτήσει της απόστασης ολίσθησης για: α)1N β)2N γ)5N δ)10N



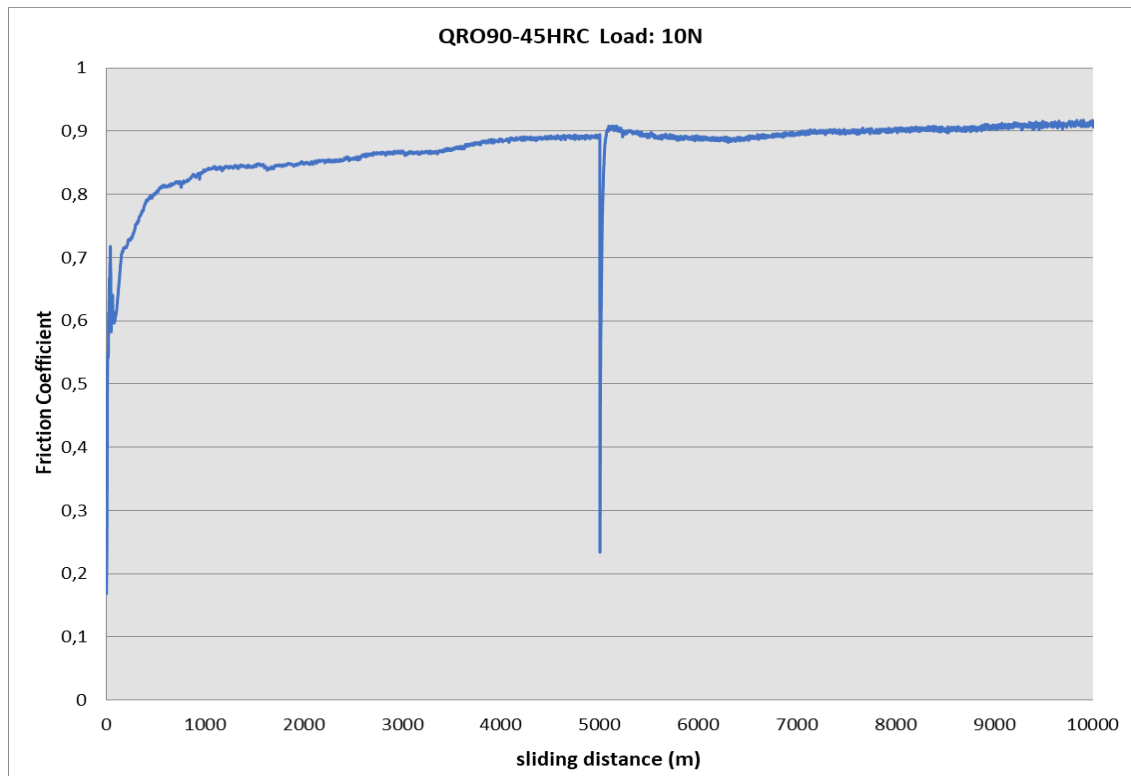
(α)



(β)

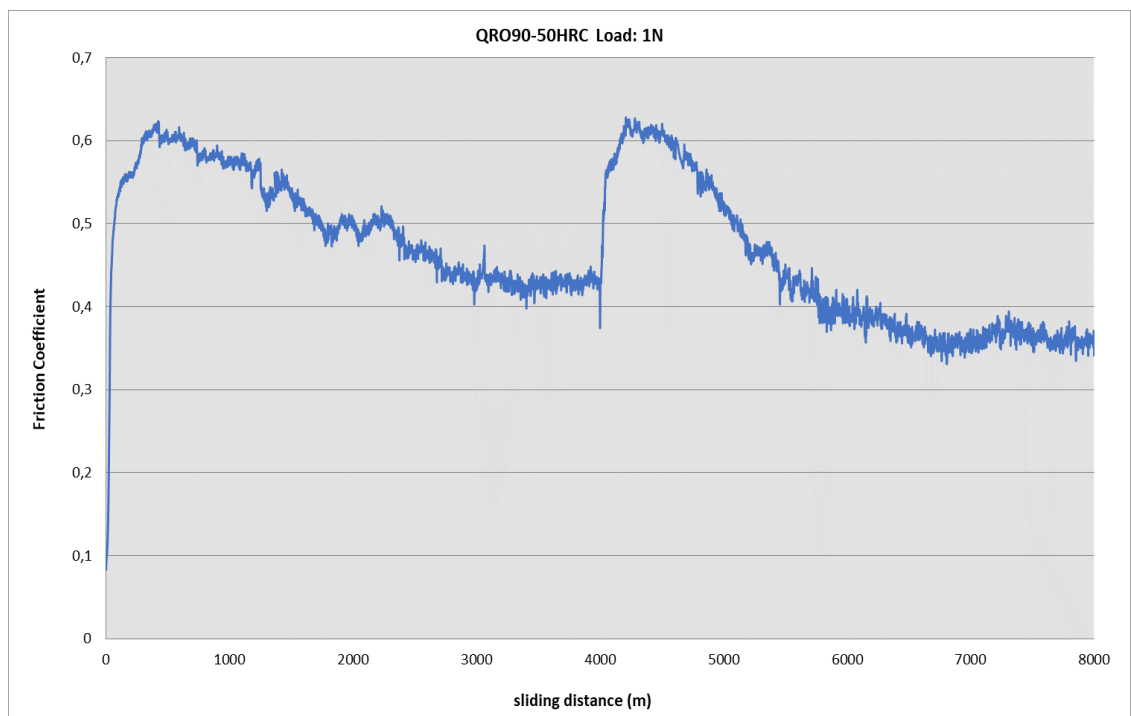


(γ)

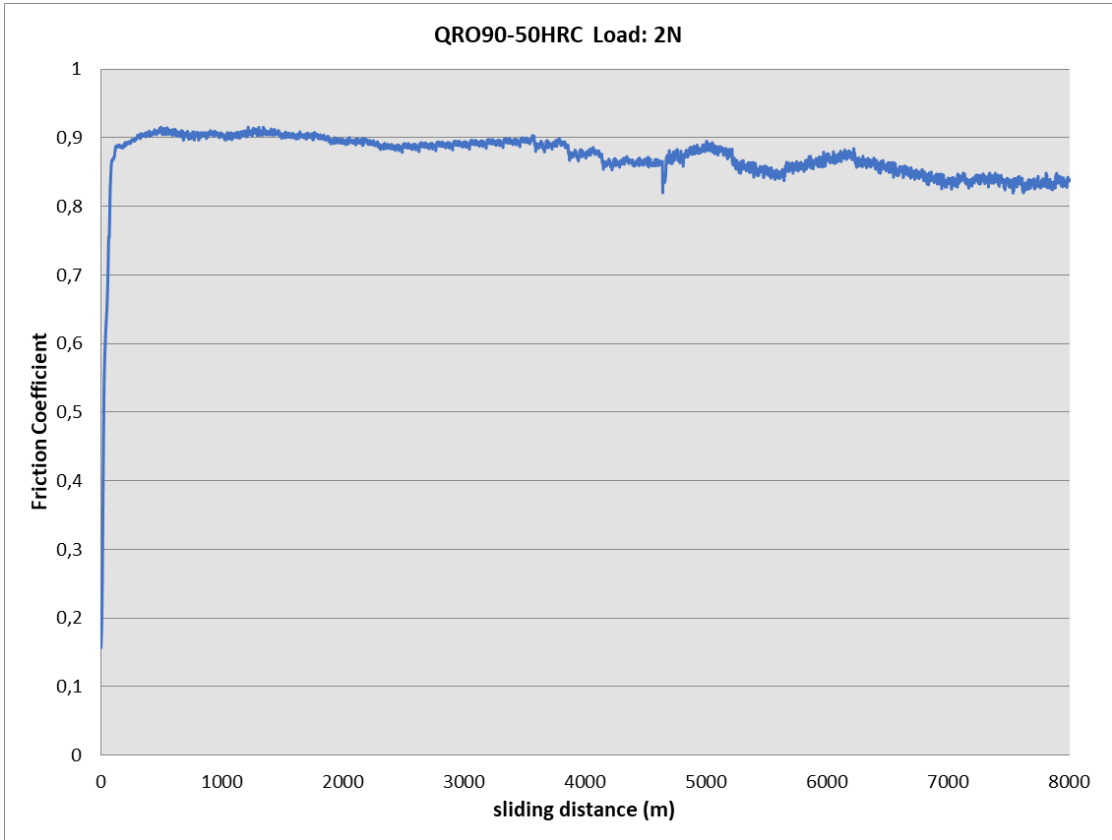


(δ)

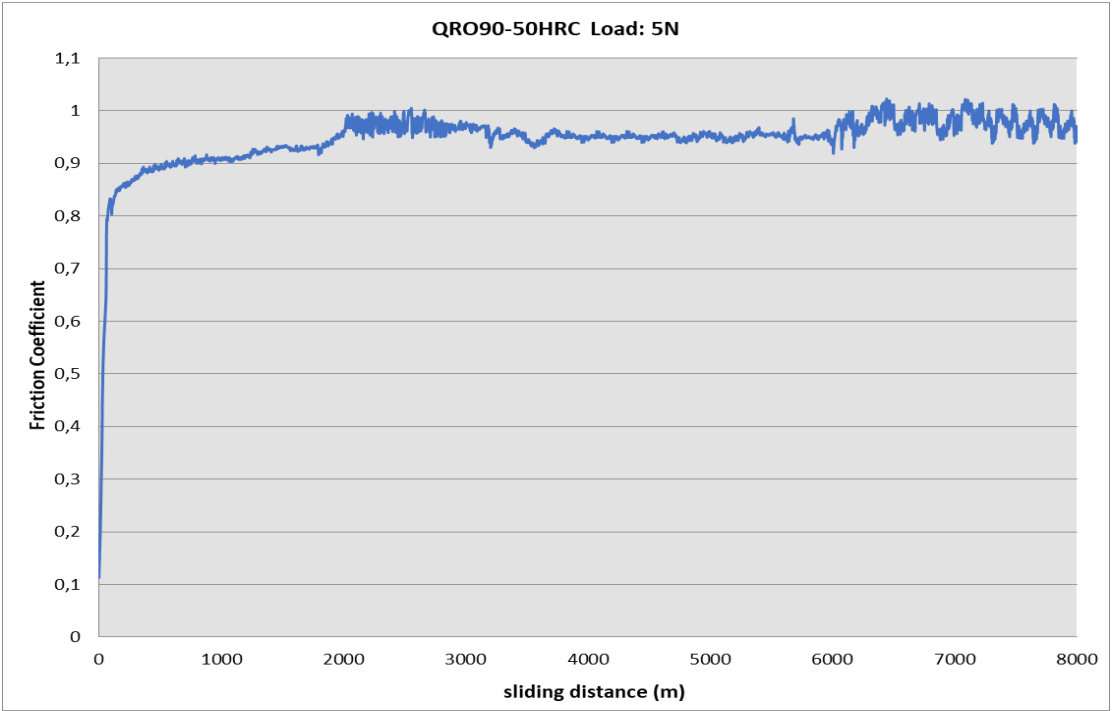
Σχήμα 3,3 : Εξέλιξη συντελεστή τριβής QRO90 στα 45 HRC συναρτήσει της απόστασης ολίσθησης για: α)1N β)2N γ)5N δ)10N



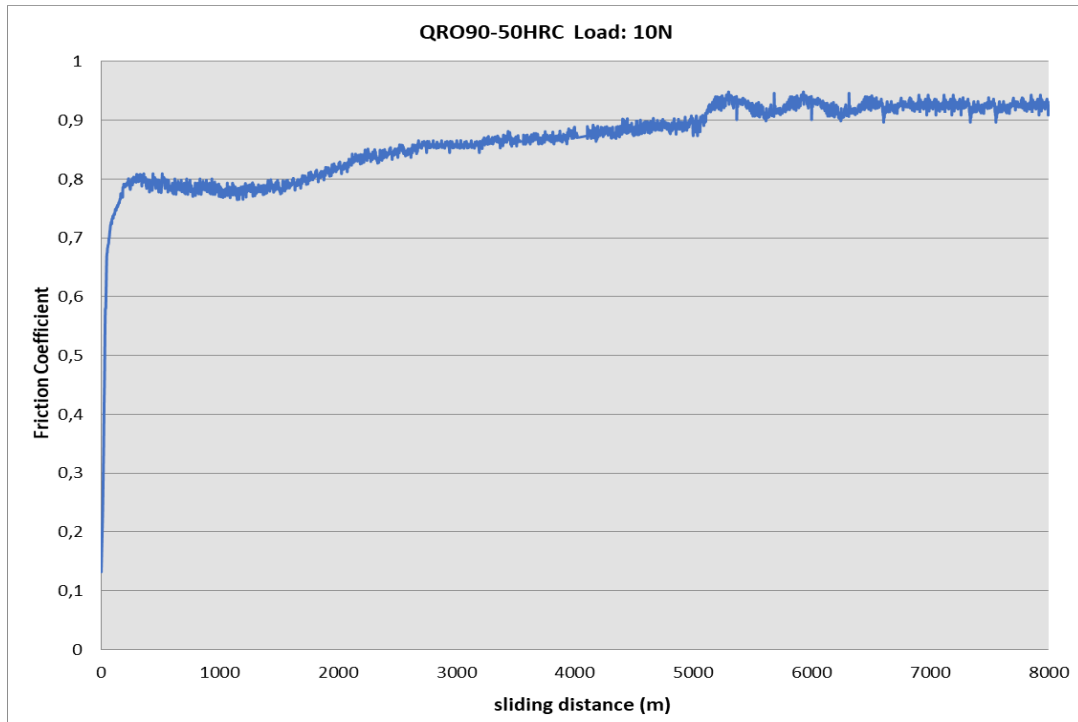
(α)



(β)

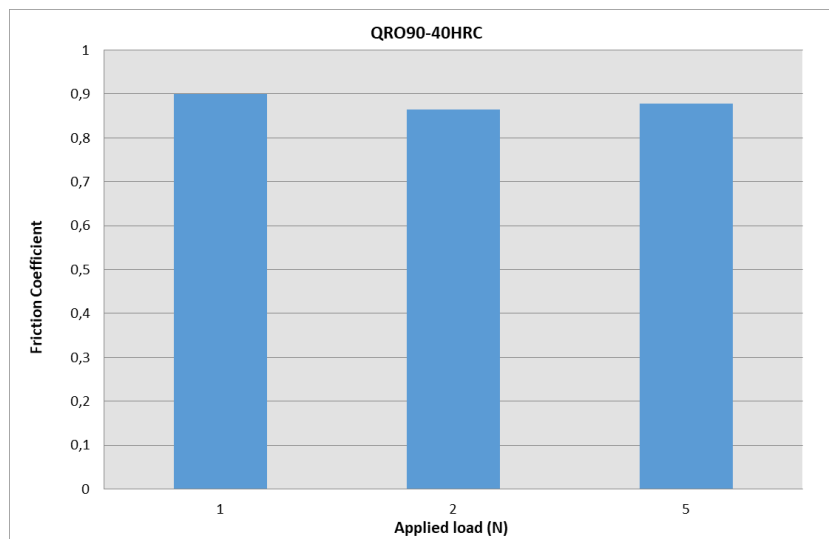


(γ)

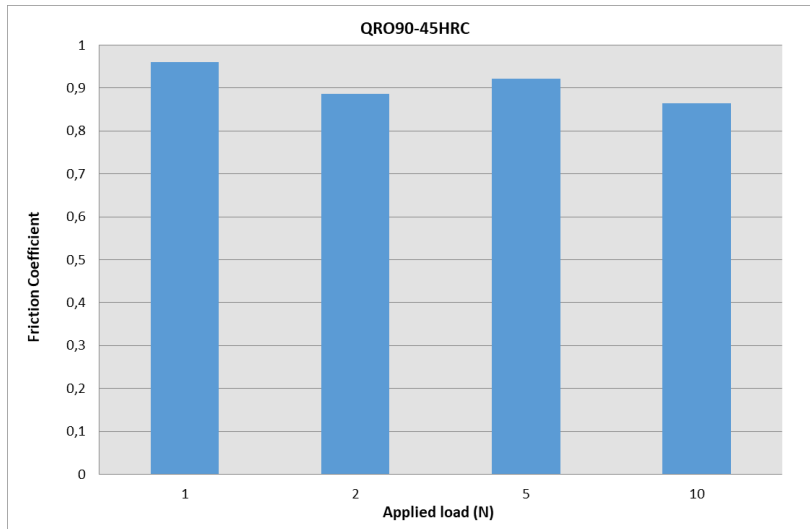


(δ)

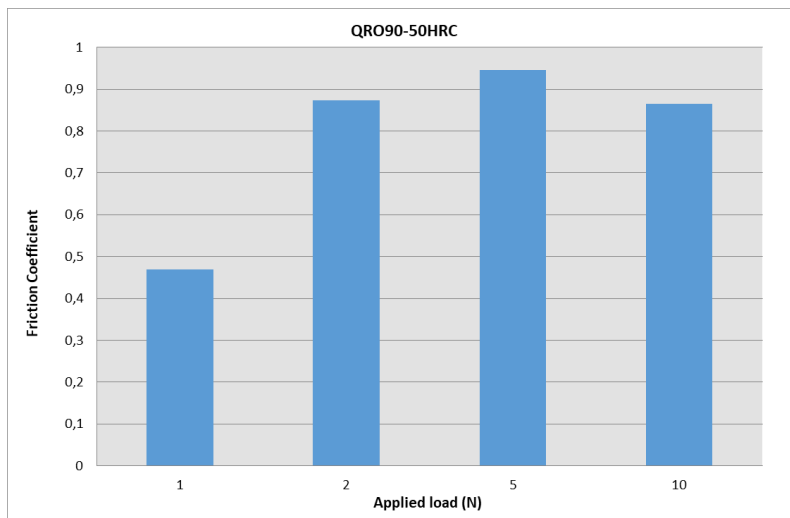
Σχήμα 3,4 : Εξέλιξη συντελεστή τριβής QRO90 στα 50 HRC συναρτήσει της απόστασης ολίσθησης για: α)1N β)2N γ)5N δ)10N



(α)

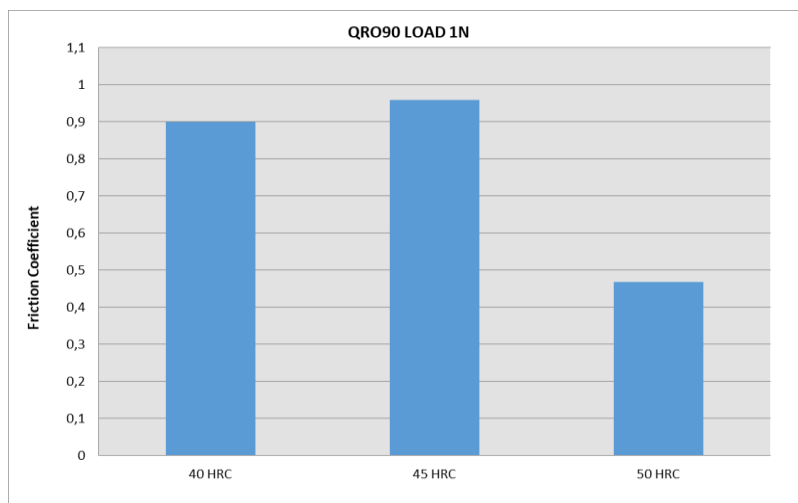


(β)

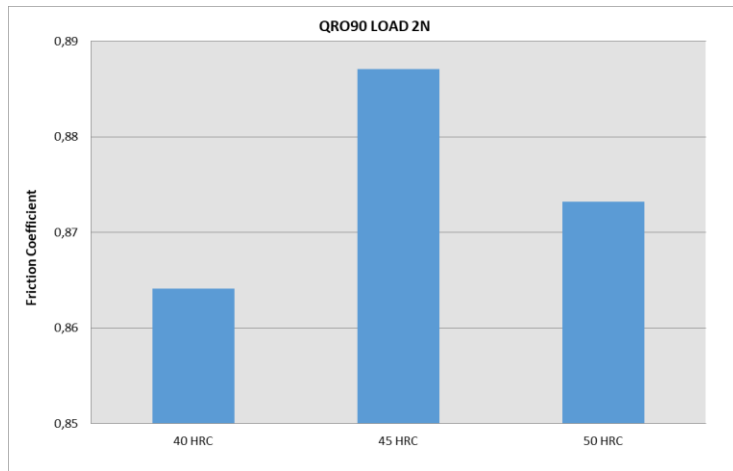


(γ)

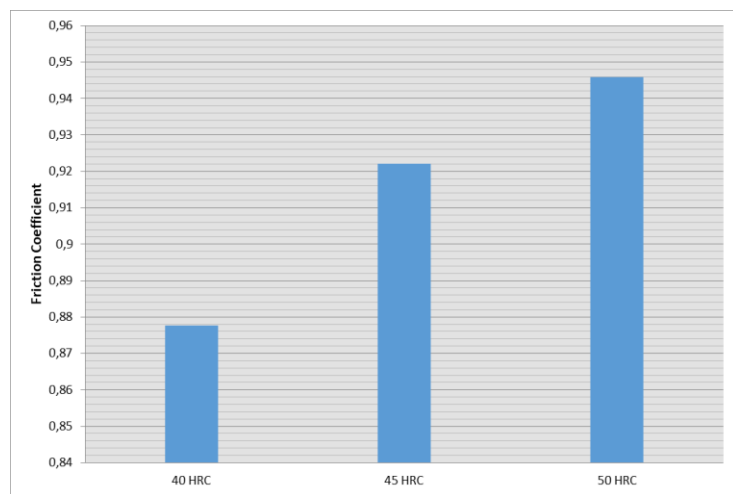
Σχήμα 3,5: Μέσος συντελεστή τριβής του QRO90 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου για: (α) 40HRC (β) 45HRC (γ) 50HRC



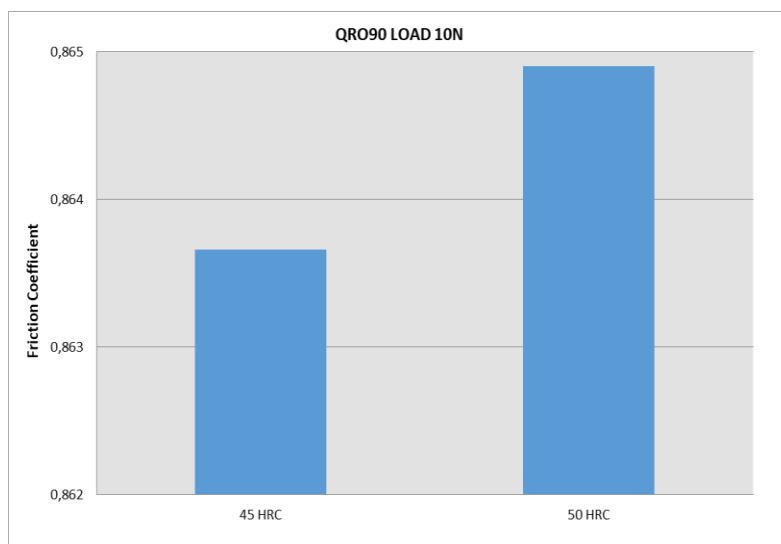
(α)



(β)

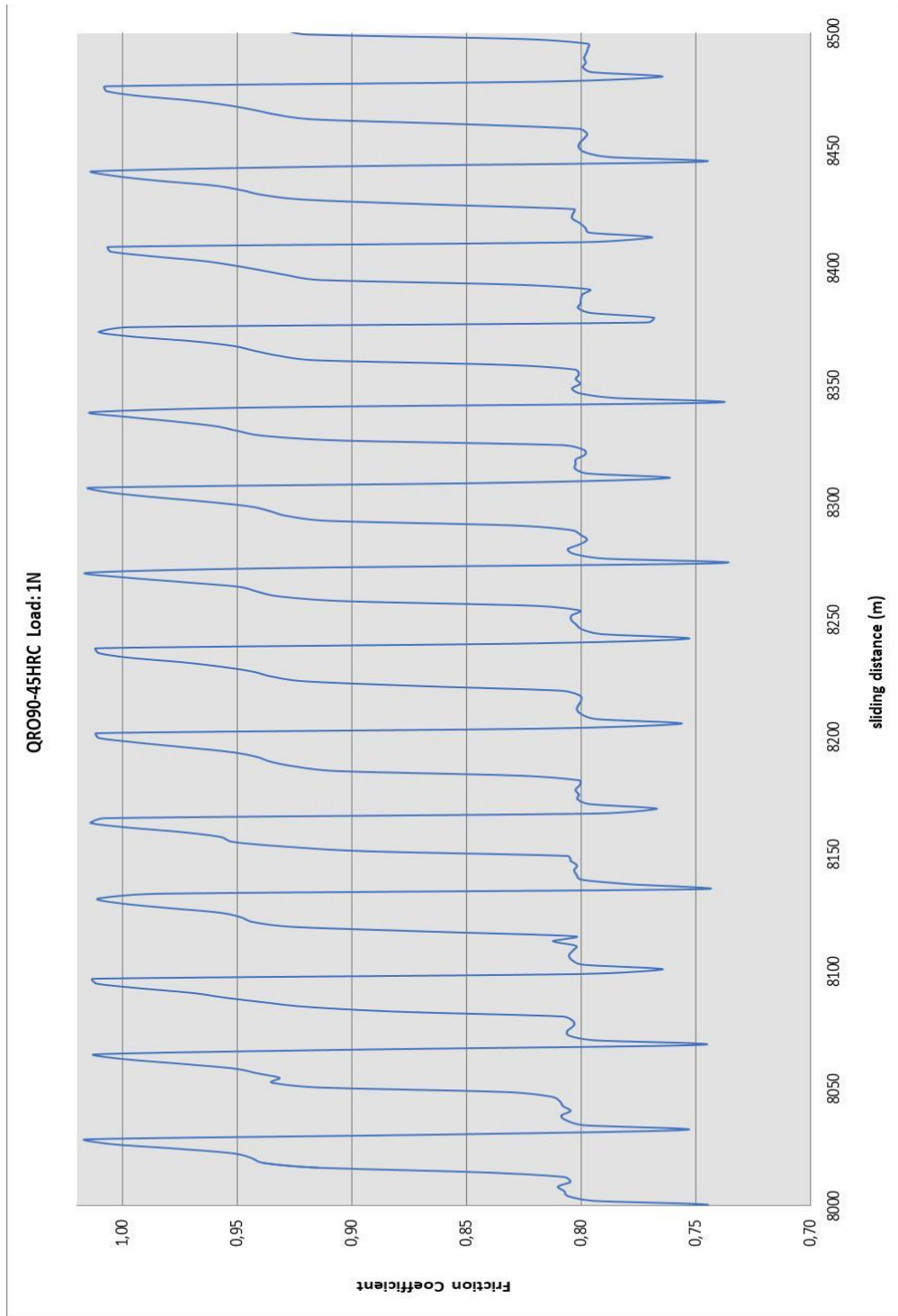


(γ)

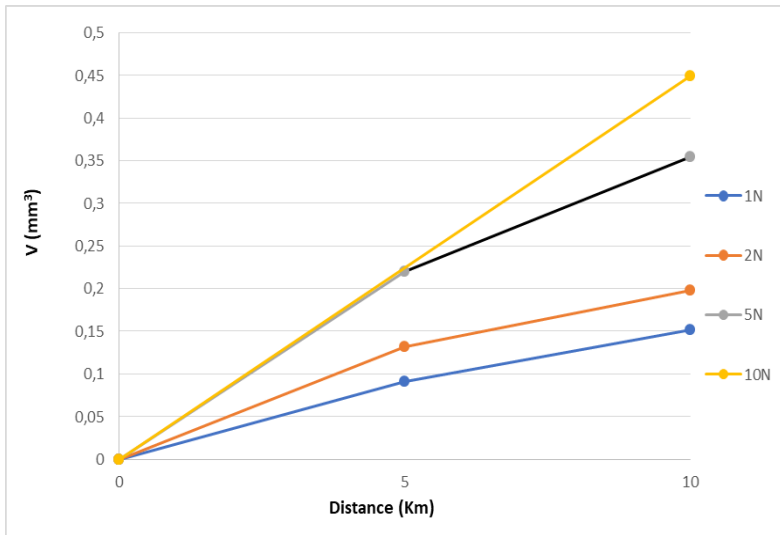


(δ)

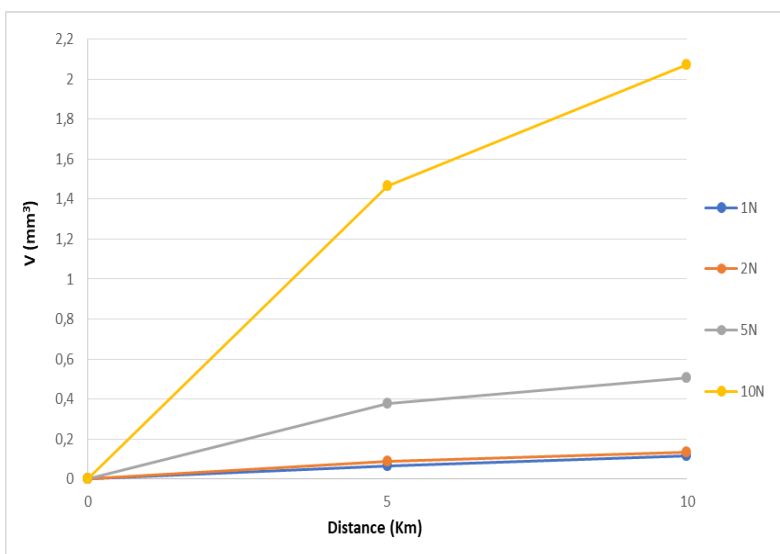
Σχήμα 3,6: Μέσος συντ. τριβής του QRO90 συναρτήσει της σκληρότητας για: (α) 1N, (β) 2N, (γ) 5N, (δ) 10N.



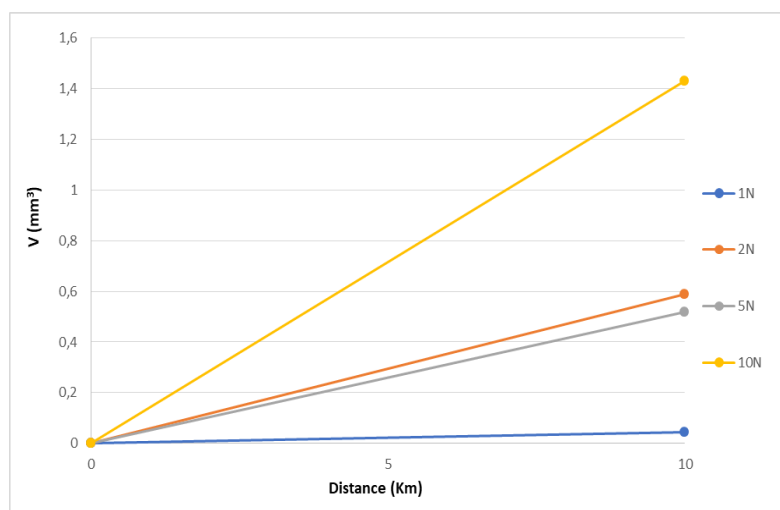
Σχήμα 3,7: Παράδειγμα μεγάλης διακύμανσης του συντελεστή τριβής για μεγάλους χρόνους ολίσθησης(45HRC:1N)



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 3,8 : Εξέλιξη όγκου φθοράς για (α) 40, (β) 45 και (γ) 50 HRC συναρτήσει της απόστασης ολίσθησης για κάθετο φορτίο 1N, 2N, 5N και 10N.

3.3 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΦΘΟΡΑΣ

Εκτός από τον όγκο φθοράς, ένα σημαντικό μέγεθος για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός τριβοσυστήματος είναι ο συντελεστής φθοράς. Πρόκειται για ανηγμένο μέτρο φθοράς ενός τριβοσυστήματος και δίνεται από τη εξής σχέση:

$$K = V/F \times \chi \quad (3.1)$$

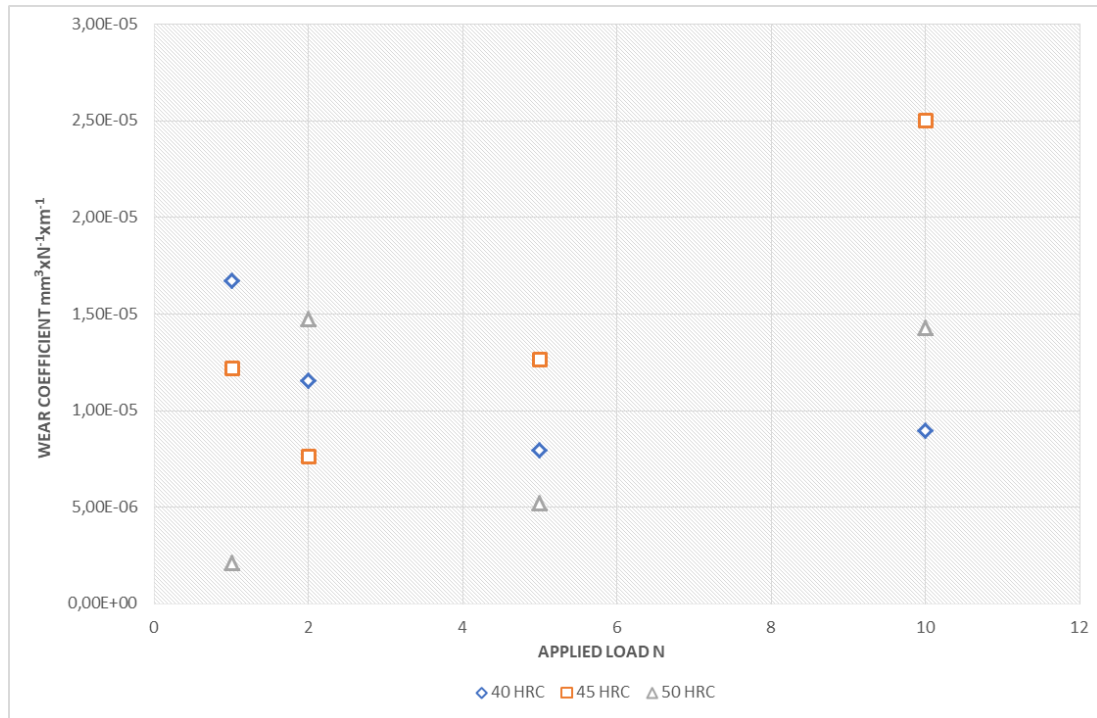
Όπου: **V** ο όγκος του απομακρυθέντος υλικού, mm³

F το κάθετο στην επιφάνεια επαφής επιβαλλόμενο φορτίο, N

χ η αντίστοιχη διανυθείσα απόσταση ολίσθησης, m

Μετά από εκτενής υπολογισμούς κατά την χρήση της παραπάνω σχέσης παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν γενικά αξιοσημείωτες μεταβολές στον συντελεστή φθοράς μεταξύ των τριών διαφορετικά σκληρυμένων υλικών. Αυτό μπορούμε να το διαπιστώσουμε γραφικά μέσω του διαγράμματος μεταβολής του συντελεστή φθοράς συναρτήσει του κάθετου φορτίου των δοκιμών για τις σκληρότητες 40,45 και 50 HRC του χάλυβα (Σχ. 3,9). Παρόλα αυτά διαπιστώνουμε κάποιες διαφορές μεταξύ των χάλυβων με διαφορετικές σκληρότητες, αλλά και με διαφορετικά επιβαλλόμενα φορτία. Πιο συγκεκριμένα:

- Ο QRO90-45 HRC κυμαίνεται μεταξύ $7,65 \times 10^{-6}$ έως $2,50 \times 10^{-5}$, ο οποίος παρουσιάζει την μεγαλύτερη διασπορά μεταξύ των τιμών του, λόγω της πιθανής εμφάνισης του καρβιδίου.
- Ο QRO90-40 HRC κυμαίνεται μεταξύ $7,92 \times 10^{-6}$ έως $1,67 \times 10^{-5}$.
- Ο QRO90-50 HRC κυμαίνεται μεταξύ $2,13 \times 10^{-6}$ έως $1,47 \times 10^{-5}$.



Σχήμα3,9: Διαγράμμα μεταβολής του συντελεστή φθοράς συναρτήσει του κάθετα εφαρμοζόμενου φορτίου του χάλυβα QRO90 για σκληρότητες: (α) 40 HRC, (β) 45 HRC και (γ) 50 HRC.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, μελετήσαμε την επίδραση που είχε η μικροδομή και η θερμική κατεργασία στην τριβολογική συμπεριφορά του εργαλειοχάλυβα με την εμπορική ονομασία QRO90.

Τα κύρια συμπεράσματα είναι τα εξής:

- Ο συντελεστής τριβής για όλες σχεδόν τις σκληρότητες του εργαλειοχάλυβα μας βρέθηκε σταθερός και συνέκλινε στο 0,85-0,95.
- Ο συντελεστής φθοράς του εργαλειοχάλυβα μας δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την θερμική κατεργασία σκλήρυνσης.
- Ο μηχανισμός φθοράς που προκύπτει είναι της λείανσης με πλαστική παραμόρφωση.
- Στον QRO90-45 αποκαλύπτονται τα καρβίδια, που δημιουργούνται από την πλαστική παραμόρφωση τους, λόγω της απομάκρυνσης των επιφανειακών στρωμάτων της μεταλλικής φάσης και επηρεάζουν έντονα τις τριβολογικές ιδιότητες και συγκεκριμένα τον μηχανισμό τριβής. Έτσι εμφανίζονται οι ισχυρές διακυμάνσεις του συντελεστή τριβής.
- Ο συντελεστής φθοράς διαμορφώθηκε στις τιμές μεταξύ $7,92 \times 10^{-6}$ - $1,67 \times 10^{-5}$ για τα 40 HRC, $7,65 \times 10^{-6}$ - $2,50 \times 10^{-5}$ για τα 45HRC και $2,13 \times 10^{-6}$ - $1,47 \times 10^{-5}$ για τα 50HRC.
- Ο συντελεστής τριβής παρόμοια με τον φθοράς δεν επηρεάστηκε ιδιαίτερα από την θερμικά κατεργασία.
- Για να πετύχουμε με την θερμική κατεργασία τις προαναφερθείσες σκληρότητες είχαμε 2 στάδια προθέρμανσης στους 650 το πρώτο και 850 το δεύτερο για 30 λεπτά, ωστενιτοποίηση στους 1050 για 40 λεπτά και 3 επαναφορές, με την πρώτη στους 580 για 40 HRC και 550 για 45,50 HRC. Την δεύτερη 650 για 40 HRC, 640 για 45 HRC και 610 για 50HRC. Η τρίτη 610 για 40,45 HRC και 580 για 50 HRC. Όλες οι επαναφορές πραγματοποιήθηκαν για 120 λεπτά.

Τέλος, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας είναι ελπιδοφόρα και δίνουν το έναυσμα για την περαιτέρω εξέλιξη της σχετικής έρευνας. Μερικοί από τους άξονες της περαιτέρω έρευνα στο θέμα, θα μπορούσαν να είναι:

- ✓ Η εξέταση της επίδρασης επιφανειακής κατεργασίας ενανθρακαζώτωσης στην περαιτέρω αύξηση της διάρκειας ζωής του συγκεκριμένου χάλυβα, όταν δέχεται επιφανειακή φόρτιση.
- ✓ Η εξέταση της λειτουργίας του χάλυβα στην κραματωμένη του μορφή. Δηλαδή σε τι απόσταση από την επιφάνεια μπορούν τα κραματοποιητικά στοιχεία να δημιουργήσουν καρβίδια στον χάλυβα.
- ✓ Η έρευνα της λειτουργίας του εργαλειοχάλυβα και σε άλλες τριβικές διατάξεις πέρα από την σημειακή επαφή που υπήρχε στο τριβόμετρο τύπου σφαίρας/δίσκου (pin-on-disk).
- ✓ Ακόμα ενδιαφέρον θα είχε η εκτέλεση των πειραμάτων με σύγκριση του ανταγωνιστικού υλικού με τον επιφανειακά ενανθρακαζωτωμένο χάλυβα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δ. Γ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», Παπασωτηρίου, Αθήνα 1996.
- [2] Σ. Αντωνίου, «Τριβολογία», Σημειώσεις, Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Τμήμα Μηχανολογίας, Πειραιάς 1995 .
- [3] Δρ. Π. Ψυλλάκη, “ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΟΥΣ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ”, ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ-Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΤ, Μάρτιος 2013.
- [4] C. M. Karamboiki , A. Mourlas , P. Psyllaki , J. Sideris, “Influence of microstructure on the sliding wear behavior of nitrocarburized tool steels”, *Wear* 303,2013, 560-568.
- [5]<http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/6%20SIDHROUXA%20OKRAMATAw.pdf>
- [6] Δρ. Π. Ψυλλάκη, “ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ”, ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ-Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΤ, Μάρτιος 2013.
- [7] *F.A.P. Fernandes, L.C. Casteletti, J. Gallego*, “Microstructure of nitrided and nitrocarburized layers produced on a superaustenitic stainless steel” *j mater res technol.* 2013;2(2):158–164
- [8] Y. Jiang, T. Geng, Y. Bao, Y. Zhu, “Electrolyte–electrode interface and surface characterization of plasma electrolytic nitrocarburizing”, *Surface & Coatings Technology*, 216, (2013), 232–236
- [9] H.T. Chen, M.F. Yan, S.S. Fu, “Martensite transformation induced by plasma nitrocarburizing on AISI304 austenitic stainless steel”, *Vacuum* 105 (2014) 33-38
- [10] C.S. Zhang, M.F. Yan, Z. Sun, Y.X. Wang, Y. You, B. Bai, L. Chen, Z. Long, R.W. Li, “Optimizing the mechanical properties of M50NiL steel by plasma nitrocarburizing”, *Applied Surface Science*, 315, (2014), 28–35
- [11] Z. Sun, C.S. Zhang, M.F. Yan, “Microstructure and mechanical properties of M50NiL steel plasma nitrocarburized with and without rare earths addition”, *Materials and Design*, 55, (2014), 128–136

- [12] [Cardey, P.-F.](#) “Tribological performance of nitrocarburising: Influence of the compound layer and interests of post-treatments”, European Conference on Heat Treatment 2015 and 22nd Heat Treatment and Surface Engineering from Tradition to Innovation Congress, IFHTSE 2015; Venice; Italy; 20 May 2015 through 22 May 2015; Code 124811
- [13] W. Chen, J. Zheng, Y. Lin, S. Kwon, S. Zhang, “Comparison of AlCrN and AlCrTiSiN coatings deposited on the surface of plasma nitrocarburized high carbon steels”, *Applied Surface Science*, 332, (2015), 525–532
- [14] D. Caliarì, [G. Timelli](#), [T. Salata](#), [S. Maestri](#), [G. Cavagnini](#), “Microstructural investigation of oxynitrocarburized components processed at different temperatures”, [Materials Science Forum](#), Volume 879, 2017, Pages 268-273
- [15] A.R. Rastkar, B. Shokri, “Surface modification and wear test of carbon steel by plasma electrolytic nitrocarburizing”, *Surface and Interface Analysis*, Volume 44, Issue 3, March 2012, Pages 342-351
- [16] *M.K. Zarchi, M.H. Shariat, S.A. Dehghan, S. Solhjo, “Characterization of nitrocarburized surface layer on AISI 1020 steel by electrolytic plasma processing in an urea electrolyte”, j mater res technol. 2013;2(3):213–220*
- [17] G. Park, G. Bae, K. Moon, C. Lee, “Effect of Plasma Nitriding and Nitrocarburizing on HVOF-Sprayed Stainless Steel Coating”, *Journal of Thermal Spray Technology*, December 2013, Volume 22, Issue 8, pp 1366–1373
- [18] C. Hu, F. Qi, M. Lu, G. [Wang, Q.](#) Liu, X. [Sun](#), “Effect of temperature on tribological performances of ion nitrocarburized layer of 42MnCr52 steel”, [Advanced Materials Research](#), Volume 750-752, 2013, Pages 389-392
- [19] A.D. Anjos, C.J. Scheuer, S.F. Brunatto, R.P. Cardoso, “Low-temperature plasma nitrocarburizing of the AISI 420 martensitic stainless steel: Microstructure and process kinetics”, *Surface and Coatings Technology*, Volume 275, 15 August 2015, Pages 51–57
- [20] I. Lee, “Plasma nitrocarburizing techniques with quenching and tempering for manufacture of vehicle parts”, *Journal of Korean Institute of Metals and Materials*, Volume 53, Issue 6, 1 June 2015, Pages 398-405

- [21] I. Velkavrh, A. Trausmuth, M.R. Ripoll, W. Kunze, J. Glück, K. Lingenhöle, P. Orth, A. Diem, E. Badisch, "Damage mechanisms of plasma, gas and salt bath nitrocarburized steel in lab-scale sliding test", *Key Engineering Materials*, Volume 674, 2016, Pages 152-158
- [22] D. Caliari, G. Timelli, T. Salata, S. Maestri, "Development and optimization of an oxynitrocarburizing treatment", *European Conference on Heat Treatment 2015 and 22nd Heat Treatment and Surface Engineering from Tradition to Innovation Congress, IFHTSE 2015; Venice; Italy; 20 May 2015 through 22 May 2015; Code 124811*
- [23] T.V. Doan, D. Kusmič, M. Pospíchal, Q.D. Tran, V.T. Nguyen, "Friction and wear behaviour of 42CrMo4 steel treated by tenifer, hard chrome and plasma nitriding technologies", *Manufacturing Technology*, Volume 17, Issue 2, 2017, Pages 168-174
- [24] A. Yenilmez, M. Karakan, I. Çelik, "Improving by postoxidation of corrosion resistance of plasma nitrocarburized AISI 316 stainless steels", *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, Volume 123, Issue 1, 1 January 2017, Article number 9
- [25] C.E. Foerster, A. Assmann, S.L.R. da Silva, F.C. Nascimento, C.M. Lepienski, J.L. Guimarães, A.L. Chinelatto, "AISI 304 nitrocarburized at low temperature: Mechanical and tribological properties" *Surface & Coatings Technology* 204 (2010) 3004–3008
- [26] F. Mahzoon, S.A. [Behgozin](#), [M.E. Bahrololoom](#), [S. Javadpour](#), "Study the fatigue-wear behavior of a plasma electrolytic nitrocarburized (PEN/C) 316L stainless steel", [Journal of Materials Engineering and Performance](#), Volume 21, Issue 8, August 2012, Pages 1751-1756
- [27] F. Mahzoon, S.A. Behgozin, N.A. Kazerooni, M.E. Bahrololoom, "Study the wear mechanism of a plasma electrolytic nitrocarburised (PEN/C) 316L austenitic stainless steel", [Iranian Journal of Materials Science and Engineering](#), Volume 10, Issue 3, September 2013, Pages 22-26
- [28] U. [Sudjadi](#), "A study of surface hardening on local bolts (C = 0.01%) at a temperature of 400°C for 5 and 6 hours with nitrocarburizing using RF- plasma apparatus", [Advanced Materials Research](#), Volume 970, 2014, Pages 235-239

- [29] U. Sudjadi, "Characterization of local bolt (C= 0.071%) after surface hardened at a temperature of 400 °C for 7 hours with RF-plasma nitrocarburizing apparatus", [Applied Mechanics and Materials](#), Volume 575, 2014, Pages 446-451
- [30] E. [Troell](#), [S. Haglund](#), [N. Hawsho](#), [S. Sevim](#), [A. Åström](#), [H. Jespersen](#), "Properties and performance of nitrided and nitrocarburized steels", Proceedings - European Conference on Heat Treatment and 21st IFHTSE Congress 2014, Pages 29-36
- [31] Y. Jiang, Y. Bao, K. Yang "Formation and friction behavior of plasma electrolytically nitrocarburized surface layers on Q235 steel" *Surface & Coatings Technology* 269 (2015) 324–328
- [32] M. Ebrahimi, F. Mahboubi, M.R.N. Jamal, "Wear behavior of DLC film on plasma nitrocarburized AISI 4140 steel by pulsed DC PACVD: Effect of nitrocarburizing temperature", *Diamond & Related Materials* 52 (2015) 32–37
- [33] M. Ebrahimi , F. Mahboubia, M.R.N. Jamal, "RSM base study of the effect of deposition temperature and hydrogen flow on the wear behavior of DLC films", *Tribology International*, 91,(2015), 23–31
- [34] M. BELAID, M.L. FARES, F. BOUKARI, "Tribological behavior of nitrocarburized (tenifer) followed By post-oxidizing industrial tool steel aisi 02 type", *22ème Congrès Français de Mécanique Lyon, 24 au 28 Août 2015*
- [35] S.P. Brühl, A. Cabo, W. Tuckart, G. Prieto, "Tribological behaviour of nitrided and nitrocarburized carbon steel used to produce engine parts", Volume 68, Issue 1, 8 February 2016, Pages 125-133
- [36] Z. Zheng, R. Chen, X. Gu, C. Wang, Y. Zhao, Q. Chen, "Tribological properties of high carbon equivalent gray cast iron after ferritic nitrocarburizing", *Mocaxue Xuebao/Tribology* , Volume 37, Issue 1, 1 January 2017, Pages 115-120
- [37] I. [Velkavrh](#), [F. Ausserer](#), [S. Klien](#), [J. Voyer](#), [A. Diem](#), [A. Trausmuth](#), [M.R. Ripoll](#), [E. Badisch](#), [W. Kunze](#), [J. Glück](#), [K. Lingenhölle](#), "Optimisation of plasma nitrocarburising for reducing wear in dry sliding contacts", *Engineering Materials*, Volume 721 KEM, 2017, Pages 389-393
- [38] T.V. Doan, D. Kusmič, M. Pospíchal, D. Dobrocký, "Improvement of wear resistance for C45 steel using plasma nitriding, nitrocarburizing and nitriding/manganese phosphating duplex treatment", 4th International Conference Recent

Trends in Structural Materials IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 179 (2017) 012017

[39] D. Tobota, W. Brostow, K. Czechowski, P. Rusek, "Improvement of wear resistance of some cold working tool steels", ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2017.

[40] Uddeholm QRO90 Supreme, Τεχνικό εγχειρίδιο, 6^η έκδοση(2011)