

Κεφάλαιο 5^ο :

**Τριβολογική Συμπεριφορά του κράματος
Zn-10Al-1.5Cu**

5.1. Εισαγωγή

Η αντοχή στην τριβή αποτελεί μία από τις σημαντικότερες επιφανειακές ιδιότητες των υλικών και η φθορά λόγω τριβής αυτής. Η σημασία των επιφανειακών αυτών παραμέτρων οφείλεται στο ότι οι βιομηχανικές κατασκευές περιλαμβάνουν κινούμενα τμήματα που βρίσκονται σε σημειακή ή σε επιφανειακή επαφή. Η σχετική κίνηση των εφαιπτόμενων επιφανειών οδηγεί στη φθορά τους λόγω τριβολογικών μηχανισμών που μπορεί να είναι μηχανικής ή χημικής φύσεως ή συνδυασμός τους.

Με τον όρο τριβή ορίζουμε την αντίσταση που προβάλλεται κατά τη σχετική κίνηση σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή. Η τριβή εκφράζεται μέσω του συντελεστή τριβής (μ), ο οποίος ορίζεται από το λόγο της εφαιπτομενικής δύναμης (F_T), η οποία προκαλεί την έναρξη της κίνησης, προς τη δύναμη (F_N), η οποία ασκείται κάθετα στην επιφάνεια επαφής.

Ως φθορά ορίζεται η απομάκρυνση τεμαχιδίων από την επιφάνεια του ενός ή και των δύο υλικών, τα οποία βρίσκονται σε επαφή και σε σχετική κίνηση. Ανάλογα με τον μηχανισμό που υπεισέρχεται στο φαινόμενο της φθοράς διακρίνουμε τους εξής τέσσερις τύπους φθοράς: α) φθορά λόγω πρόσφυση, β) φθορά λόγω εκτριβής, γ) φθορά λόγω τριβομηχανικών αντιδράσεων, δ) φθορά λόγω επιφανειακής κόπωσης. Η φθορά ενός υλικού μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες και να επηρεάζεται από άλλα στοιχεία του τριβοσυστήματος, τα οποία μπορεί να είναι : α) εξεταζόμενο υλικό, β) το ανταγωνιστικό υλικό, γ) τα παραμένοντα στο σύστημα προϊόντα φθοράς δ) οι συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος όπως υγρασία και θερμοκρασία και ε) το διαβρωτικό ή οξειδωτικό περιβάλλον.

Το ανταγωνιστικό υλικό καθορίζει πολλές φορές και τον μηχανισμό με τον οποίο η διεργασία τριβής προκαλεί φθορά του υλικού αλλά και απώλεια μάζας. Η τοπογραφία της επιφάνειας των δύο υλικών, καθορίζει και την πραγματική επιφάνεια επαφής και συνεπώς επηρεάζει το μηχανισμό φθοράς τους κατά την τριβή. Η ύπαρξη προεξοχών μειώνει την επιφάνεια στη οποία διανέμεται το επιβαλλόμενο φορτίο, με αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης στα σημεία αυτά [1], τα οποία φθείρονται πρώτα και παρουσιάζουν ταχύτερη φθορά από τη μέση φθορά του υλικού. Τα παραγόμενα προϊόντα τριβής επηρεάζουν σημαντικά τον μηχανισμό τριβής και πολλές φορές αναφέρονται με τον όρο «το τρίτο σώμα του τριβοσυστήματος». Κατά την τριβή ένα μέρος τους απομακρύνεται από την διεπιφάνεια επαφής, λόγω της σχετικής κίνησης των ανταγωνιστικών επιφανειών. Το μέρος που παραμένει στην διεπιφάνεια παρεμβαίνει και κατά την διεργασία της τριβής.

Αν τα παραγόμενα προϊόντα τριβής έχουν μεγάλη σκληρότητα και μεγάλη πλαστικότητα, παρουσιάζουν την τάση να προσκολληθούν μηχανικά στις ανταγωνιστικές επιφάνειες, παρεμποδίζοντας την ελεύθερη ολίσθησή τους, με αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή τριβής σε κάποιες περιπτώσεις. Αντιθέτως, αν τα παραγόμενα προϊόντα τριβής έχουν μέτρια σκληρότητα, εικόνα ομαλή με στρογγυλές επιφάνειες τότε διευκολύνουν την τριβή και δρουν ως «λιπαντικό» δημιουργώντας δύο νέες επιφάνειες ολίσθησης έχοντας ως αποτέλεσμα την μείωση του συντελεστή τριβής. Η τρίτη και τελευταία περίπτωση είναι αν τα παραγόμενα προϊόντα τριβής έχουν υψηλή σκληρότητα και ακανόνιστη εικόνα τότε συνήθως συνεργούν στην φθορά των δύο ανταγωνιστικών υλικών, δρώντας ως αποξেসτικά οδηγώντας στην αύξηση του συντελεστή φθοράς του υλικού.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την τριβή, είναι το περιβάλλον. Τα υλικά που παρουσιάζουν τάση προς οξειδωση και κατά την τριβή θα παρουσιάσουν την τάση αυτή. Η επιβολή του φορτίου προκαλεί

πολλές φορές την πλαστική παραμόρφωση της επιφάνειας αυτών των υλικών με αποτέλεσμα την δημιουργία σημειακών ατελειών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος αποτελεί και αυτή παράμετρο στη διεργασία της τριβής. Η θερμοκρασία επαφής όμως των δύο υλικών είναι απόλυτα καθοριστική διότι επηρεάζει την δομομηχανική συμπεριφορά της επιφάνειας κυρίως των μεταλλικών υλικών.

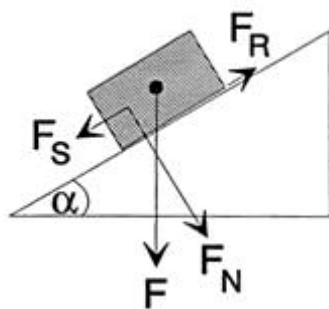
Παρόλο που η τριβή είναι ένα ιδιαίτερα γνωστό φαινόμενο, η συστηματική μελέτη της πραγματοποιείται για πρώτη φορά από το Leonardo da Vinci (1452 -1512),ο οποίος και διατυπώνει τους ακόλουθους νόμους:

1. Η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ δύο επαπτόμενων υλικών από ίδιο βάρος θα έχει το ίδιο μέγεθος, παρόλο που η επαφή μπορεί να έχει διαφορετικό μήκος και πλάτος.
2. Η τριβή παράγει διπλάσιο αποτέλεσμα, αν το βάρος του υλικού διπλασιασθεί.

Την θεωρία του Leonardo da Vinci συμπληρώνει το 1699 ο G. Amontons, ο οποίος μελετά την τριβή των στερεών χωρίς λίπανση. Ο ερευνητής αυτός προτείνει ότι η τριβή μεταξύ δύο υλικών σε επαφή είναι:

- α. ανεξάρτητη από την επιφάνεια επαφής και
- β. ανάλογη με την κάθετη δύναμη.

Η θεωρία του Amontons επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τον De la Hire (1732) και από τον Ελβετό μαθηματικό Leonard Euler (1750). Ο Euler ήταν ο πρώτος που έδειξε ότι ο συντελεστής τριβής εξαρτάται άμεσα από τη γωνία τριβής (Σχήμα 5.1). Ο συντελεστής τριβής δίδεται από τον λόγο της εφαπτομενικής δύναμης προς την κάθετη δύναμη $n = F_R/F_N$.



Εικόνα 5.1: Σχηματική απεικόνιση της εξάρτησης του συντελεστή τριβής από τη γωνία.

Σταθμό στην εξέλιξη της θεωρίας της τριβής αποτελούν οι μελέτες του C.A. Coulomb. Ο Coulomb επιβεβαίωσε τις προηγούμενες απόψεις με πειράματα μεγάλης ακρίβειας και συστηματοποίησε τη μηχανική της τριβής. Μάλιστα για το έργο του «Theorie des machines simples en ayant egard au frottement et a la roideur des cordages» κέρδισε βραβείο το 1785 από την Ακαδημία των Επιστημών στο Παρίσι. Οι παράμετροι που μελέτησε ο Coulomb σε σχέση με την τριβή ήταν:

- α. Η φύση των επιφανειών επαφής και οι επιστροφές τους
- β. Η πίεση που επικρατεί στην επιφάνεια επαφής
- γ. Το εμβαδόν των επιφανειών
- δ. Ο χρόνος επαφής των μελετώμενων επιφανειών
- ε. Η ταχύτητα μετακίνησης των επαπτόμενων επιφανειών
- στ. Η υγρασία της ατμόσφαιρας (δευτερευόντως).

Ο Coulomb εισήγαγε ένα καινούριο στοιχείο στη μελέτη της τριβής, θεωρώντας ότι η τριβή είναι ανεξάρτητη της σχετικής ταχύτητας κίνησης των τριβομένων επιφανειών. Το μοντέλο ερμηνείας του Coulomb είναι το ίδιο με του Amontons, δηλαδή αυτό των ανωμαλιών των τριβομένων επιφανειών που αλληλοσυμπλέκονται και δυσκολεύουν έτσι τη σχετική τους κίνηση. Σε σχέση με τις παραπάνω θεωρίες πολλές πειραματικές αποκλίσεις έχουν παρατηρηθεί. Για τον ανωτέρω λόγο, συνιστάται να μελετώνται οι μηχανισμοί τριβής του κάθε ζεύγους υλικών ανεξάρτητα.

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν δημοσιεύσεις που αφορούν την τριβολογική συμπεριφορά κραμάτων ψευδαργύρου. Η ερευνητική αυτή δραστηριότητα έχει αναπτυχθεί ραγδαία για την διασφάλιση υψηλής ποιότητας μεταλλικών υλικών επιφανειών ικανών να ανταπεξέλθουν στις έντονες καταπονήσεις λόγω τριβής. Ορισμένες ερευνητικές μελέτες παρατίθενται ακολούθως.

Ο Παναγόπουλος και οι συνεργάτες του [2] μελέτησαν την αντιτριβική συμπεριφορά της σύνθετης επικάλυψης Ψευδαργύρου- Κοβαλτίου (Zn-Co). Η μελέτη του αυτή έδειξε ότι ο συντελεστής τριβής της σύνθετης ηλεκτρολυτικής επικάλυψης Zn-4%wt.Co ήταν παρεμφερής με τον συντελεστή τριβής της ηλεκτρολυτικής επικάλυψης Zn-0.6%wt Co με ανταγωνιστικό υλικό ανοξειδωτο χάλυβα. Ο κύριος μηχανισμός φθοράς της επικάλυψης Zn-0.6%wt Co παρατηρήθηκε ότι είναι η πλαστική παραμόρφωση και συνάφεια των επιφανειακών στρωμάτων της επικάλυψης λόγω του οργώματος από την σκληρότερη ανοξειδωτη σφαίρα.

Ο Prasad [3] ερευνήσε την επίδραση της μερικής αντικατάσταση του χαλκού από το πυρίτιο στις φυσικές, μηχανικές και αντιτριβικές ιδιότητες του κράματος με βάση Zn-37.5Al. Συγκεκριμένα μελέτησε ιδιότητες όπως την πυκνότητα, την ηλεκτρική αγωγιμότητα, την σκληρότητα, την αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό και την ξηρή τριβή. Βρήκε λοιπόν, ότι τα κράματα με

πυρίτιο είχαν καλύτερη αντοχή στην τριβή από αυτά με τον χαλκό σε συνθήκες μικρή ταχύτητας τριβής.

Ο Pearl Lee και οι συνεργάτες του [4] ερεύνησαν την τριβή και την μικροδομή των κραμάτων Zn-Al-Si και Zn-Al-Cu. Οι μελετητές αυτοί σύγκριναν την αντιτριβική συμπεριφορά των κραμάτων αυτών σε συνθήκες λίπανσης με το SAE 660 κράμα φωσφορικού ορείχαλκου. Από τα πειραματικά τους αποτελέσματα κατέληξαν ότι τα θερμικός κατεργασμένα κράματα Zn-Al-Cu είχαν μικρότερο ρυθμό εκτριβής συγκρινόμενα με τα χυτά κράματα Zn-Al-Cu που είχαν υψηλότερο ρυθμό εκτριβής από τα κράματα Zn-Al-Si .

Ο Savaskan και οι συνεργάτες του [5] μελέτησαν την επίδραση του χαλκού στις μηχανικές και αντιτριβικές ιδιότητες μονοφασικών κραμάτων ψευδαργύρου- αλουμινίου -χαλκού. Οι ερευνητές αυτοί βρήκαν ότι η μικροσκληρότητα των κραμάτων αυτών αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού προσθήκης του χαλκού. Αντίθετα, η απώλεια μάζας κατά την τριβή μειώθηκε με την προσθήκη μεγαλύτερου ποσοστού χαλκού. Συνεπώς, η μεγαλύτερη αντοχή και η καλύτερη αντίσταση στην τριβή μπορεί να επιτευχθεί στα παραπάνω κράματα, με την μέγιστη προσθήκη χαλκού στο 2%.

Τα κράματα ψευδαργύρου βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην κατασκευαστική βιομηχανία και τον τελευταίο καιρό χρησιμοποιούνται εκτενώς στην μικρορομποτική. Ειδικότερα στις περιπτώσεις της μικρορομποτικής κατά την λειτουργία τους λαμβάνουν χώρα έντονα φαινόμενα τριβής και φθοράς. Σκοπός λοιπόν, του κεφαλαίου αυτού είναι η ενδελεχή μελέτη του φαινομένου της ξηρής τριβής στο κράμα Zn-10Al-1.5Cu .

5.2. Πειραματική διαδικασία

Για την μελέτη της τριβολογικής συμπεριφοράς των δοκιμίων του κράματος Zn-10Al-1.5Cu παρασκευάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια από το χυτό κράμα με διάμετρο 6cm και πάχους 0.5cm. στα δοκίμια διανοίχτηκε οπή διαμέτρου 7mm για την ομαλή προσαρμογή του στο όργανο μέτρησης.

Μετά την κυλινδρική κοπή και την κεντρική οπή τους, τα δοκίμια υπέστησαν μηχανική λείανση με λειαντικά χαρτιά (220-2000grit) καρβιδίου του πυριτίου (SiC) καθώς επίσης και στίλβωση με χρήση αδαμαντόπαστας. Η μέση τραχύτητα των δοκιμίων μετρήθηκε με την βοήθεια του προφίλομέτρου τύπου TIME TR320 VDH technology και βρέθηκε προσεγγιστικά να είναι 0.6μm. Η μέτρηση της μέσης τραχύτητας πραγματοποιήθηκε προκειμένου όλα τα δοκίμια να έχουν παραπλήσια επιφανειακή τραχύτητα και μορφολογία. Σε αυτό το σημείο θα ήταν χρήσιμο να αναφερθεί ότι η ύπαρξη επιφανειακής τραχύτητας συχνά επιδρά στην ανάπτυξη φαινομένων τριβής καθώς καθορίζει την «πραγματική» επιφάνεια επαφής ανάμεσα στα δύο ανταγωνιστικά υλικά.

Στη συνέχεια τα δοκίμια εισήλθαν σε κλίβανο αδρανούς αερίου (Ar) ώστε να υποστούν αποτατική ανόπτιση στους 200°C για δύο ώρες. Μετά το τέλος της αποτατικής ανόπτισης τα δοκίμια παρέμειναν σε αδρανή ατμόσφαιρα μέχρι η θερμοκρασία του κλιβάνου να φτάσει την τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.



Ακολουθως όλα τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε δοκιμές ξηρής τριβής με την βοήθεια ειδικής συσκευής ολίσθησης ακίδας επί δίσκου (pin-on-disk) όπως φαίνεται στην εικόνα. Τα δοκίμια προσαρμόζονται σε περιστρεφόμενη κεφαλή, η οποία στρέφεται με σταθερή ταχύτητα. Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων ξηρής τριβής ως ανταγωνιστικό υλικό χρησιμοποιήθηκε σφαίρα μαρτενσιτικού ανοξειδωτού χάλυβα (9%w.t C, 1%w.t Si, 1% w.t.Mn , 0.04%w.t.P, 0.03%w.t.S, 0.5%w.t.Ni, 0.7%w.t.Mo, 16%w.t.Cr, 79.83%w.t. Fe). Η επιλογή αυτού του ανταγωνιστικού υλικού έγινε λόγω της υψηλής σκληρότητας και της αυξημένης αντιδιαβρωτικής ικανότητας που διαθέτει. Η διάμετρος της σφαίρας ήταν 5.5mm με σκληρότητα περίπου 900HVN . Οι δοκιμές ξηρής τριβής έγιναν με διαφορετικά φορτία (1N, 5N και 10N) και με ταχύτητες (10,17,23 και 30cm/s) και απόσταση ολίσθησης έως 600m. Με την χρήση λογισμικού πραγματοποιήθηκε συνεχής καταγραφή του συντελεστή τριβής του ζεύγους των υλικών συναρτήσει της απόστασης ολίσθησης.

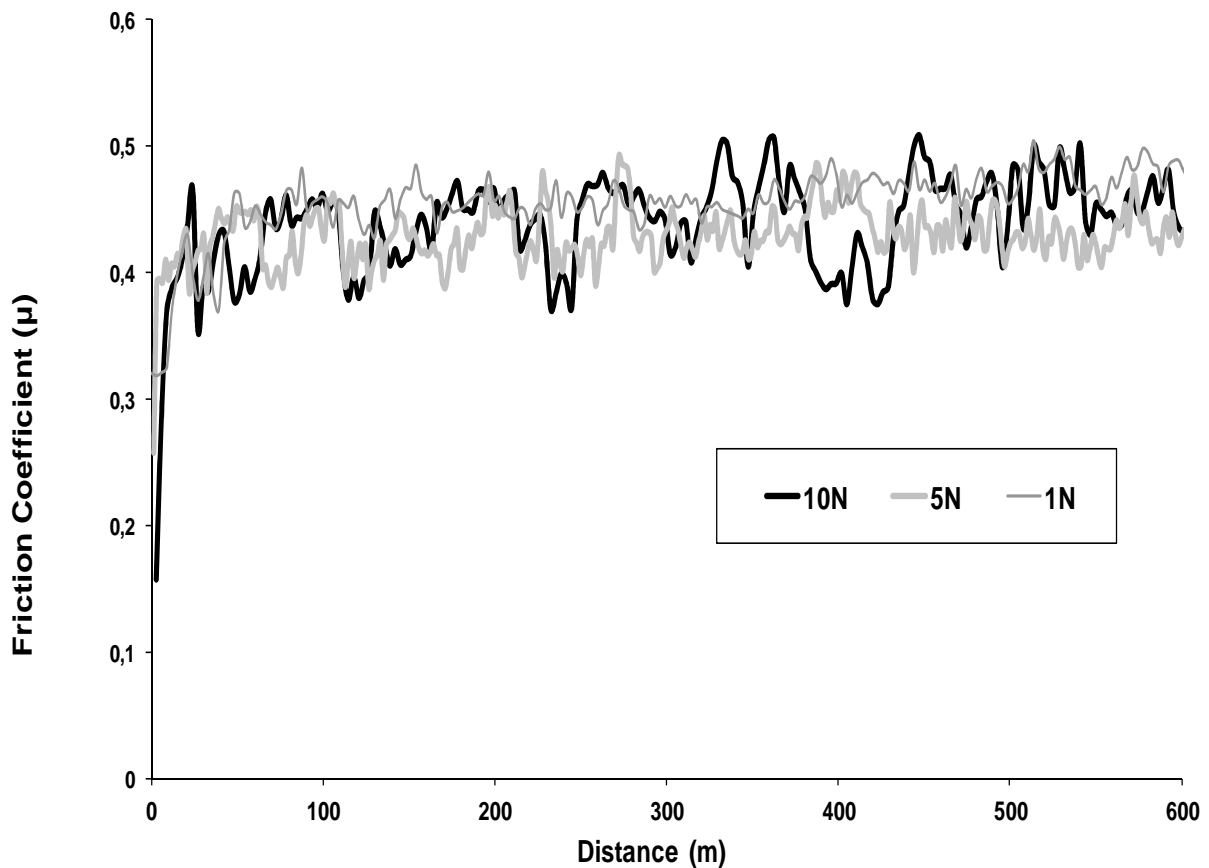
Ακριβώς πριν την δοκιμή, τόσο η σφαίρα μαρτενσιτικού ανοξειδωτού χάλυβα όσο και τα δοκίμια καθαρίζονταν με αιθανόλη και ακολουθούσε εμβάπτιση τους σε λουτρό υπερήχων με ακετόνη, προκειμένου να απομακρυνθούν σωματίδια του καρβιδίου του πυριτίου και γράσα, τα οποία πιθανότατα να υπήρχαν στην επιφάνεια λόγω της κοπής και της λείανσης. Πριν από κάθε πειραματική διαδικασία τριβής μετρήθηκαν τα δείγματα σε ζυγό ακριβείας για τον ακριβή καθορισμό του βάρους τους προκειμένου στην συνέχεια να μετρηθεί προσεγγιστικά η απώλεια βάρους του υλικού.

Οι πίστες τριβής των δοκιμίων του κράματος Zn-10Al-1.5Cu και της ανταγωνιστικής σφαίρας εξετάστηκαν με την βοήθεια Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM) Jeol 6100 που ήταν συνδεδεμένο με

μικροαναλυτή στοιχείων (EDAX). Τα προϊόντα τριβής (δέβρη) συλλέχτηκαν για να πραγματοποιηθεί ανάλυσή τους με τη χρήση Περιθλασίμετρου Ακτίνων-Χ D5000 Siemens. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα πειράματα διεξήχθησαν πέντε φορές για να εξασφαλιστεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αποτελούν τον μέσο όρο των τιμών που προέκυψαν.

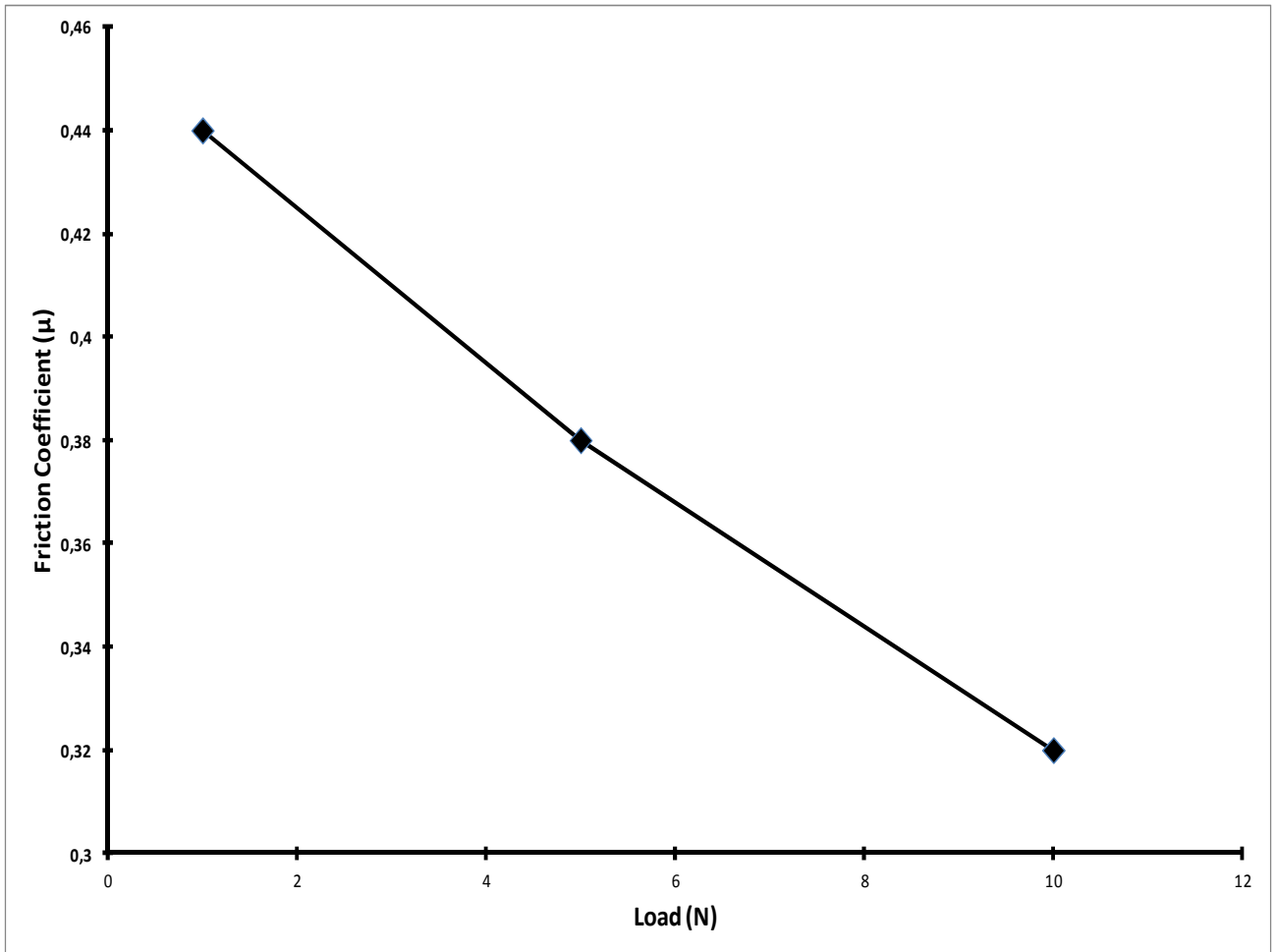
5.3 Αποτελέσματα και Συζήτηση.

Στην εικόνα 5.2 παρουσιάζεται ο συντελεστής τριβής (μ) του ζεύγους ων υλικών, κράματος ψευδαργύρου- ανοξείδωτος χάλυβας σαν συνάρτηση της απόστασης ολίσθησης. Το διάγραμμα αυτό αφορά πειράματα που τελέστηκαν έχοντας σταθερή ταχύτητα ολίσθησης (30cm/s) και απόστασή ολίσθησης 600m, ενώ αντίθετα το φορτίο μεταβάλετε σε 1N, 5N και 10N αντίστοιχα.



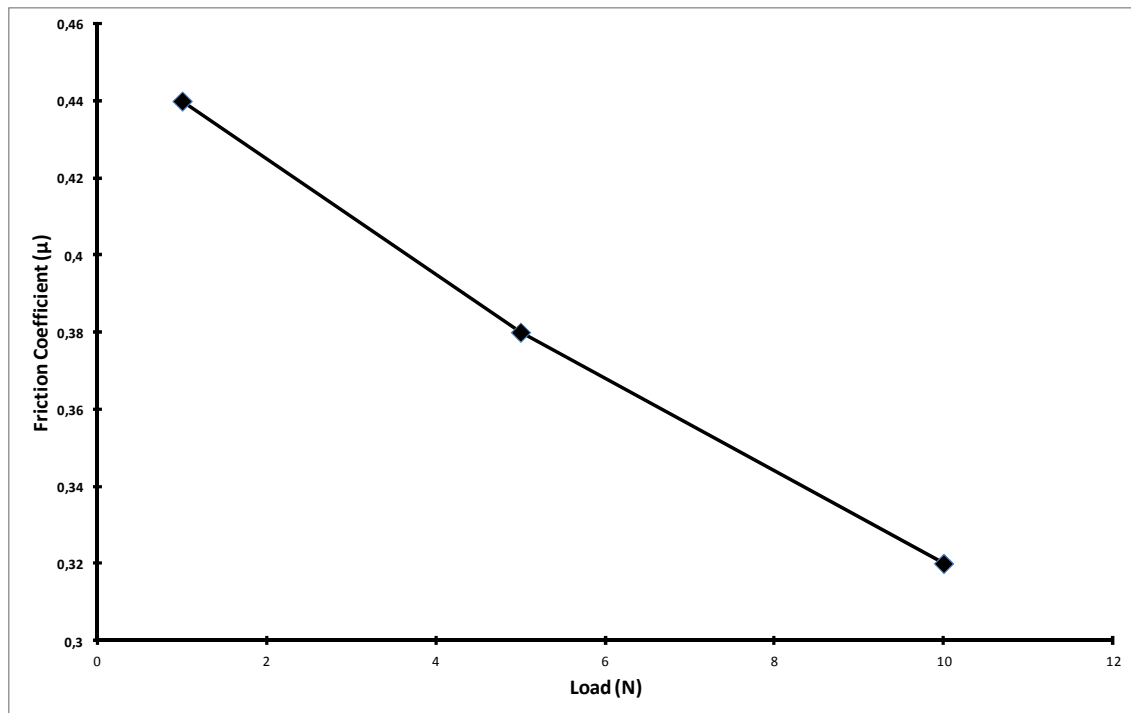
Εικόνα 5.2 : Συντελεστής τριβής του κράματος Zn-10Al-1.5Cu σε συνάρτηση με τον χάλυβα για επιβαλλόμενο φορτίο 10N, 5N και 1N

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα, ο συντελεστής του παραπάνω ζεύγους είναι της τάξεως του 0.42 και για τις τρεις περιπτώσεις του κάθετα επιβαλλόμενα φορτίου. Συνεπώς εμφανίζεται μία σταθερή αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ανταγωνιστικών υλικών γεγονός που μας υποδεικνύει και σταθερή απώλεια βάρους του τριβοσυστήματος. Παρατηρούνται μικρές αυξομειώσεις του συντελεστή τριβής η οποίες πιθανότατα να οφείλονται στη παρουσία της δέβρης στην διεπιφάνεια και των δύο ανταγωνιστικών υλικών. Αυτό το φαινόμενο προκάλεσε και το «όργωμα» της επιφάνεια του κράματος ψευδαργύρου από τον ανοξειδωτο χάλυβα.



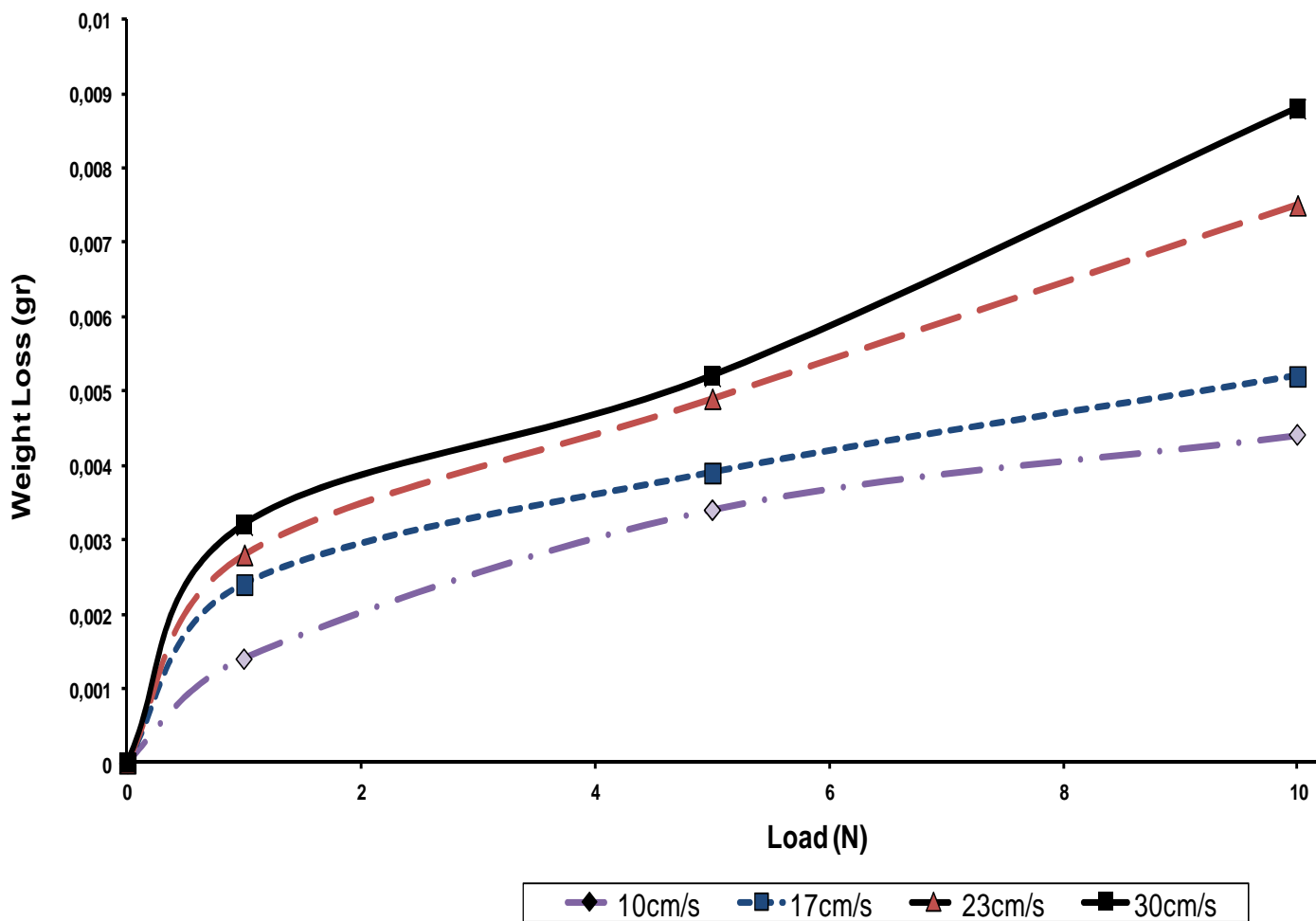
Εικόνα 5.3 : Συντελεστής Τριβής του κράματος Zn-10Al-1.5Cu για Ταχύτητα 10cm/s και επιβαλλόμενο φορτίο 10N, 5N και 1N

Στην εικόνα 5.3 παρατηρείται ότι και για μικρότερη ταχύτητα ολίσθησης της τάξης του 10cm/s και για απόσταση ολίσθησης να εξακολουθεί να είναι σταθερή στα 600m μεταβαλλόντας μόνο το φορτίο σε 1N, 5N και 10N , ο συντελεστής τριβής ολίσθησης εμφανίζει μια μικρή διαφορά. Κατά μέσο όρο ο συντελεστής τριβής μεταβάλλεται οριακά σε μια τιμή της τάξης του 0.45 έχοντας έντονες αυξομειώσεις η οποίες πιθανότατα να οφείλονται στη ύπαρξη της δέβρης στην διεπιφάνεια του υλικού της οποίας ο ρόλος εξηγήθηκε προηγούμενα.



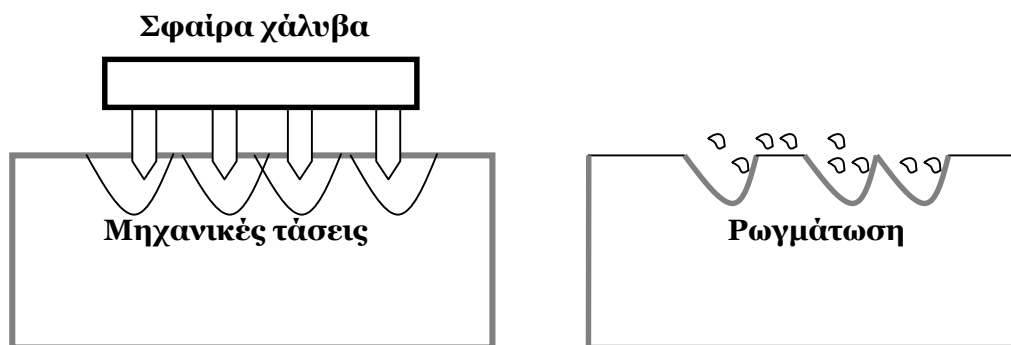
Εικόνα 5.4: Διάγραμμα συντελεστή τριβής σε συνάρτηση με το επιβαλλόμενο φορτίο για σταθερή απόσταση ολίσθησης 600m και ταχύτητα 30cm/sec.

Στην εικόνα 5.4 εμφανίζεται το διάγραμμα του συντελεστή τριβής σε συνάρτηση με το επιβαλλόμενο φορτίο έχοντας διατηρήσει σταθερή την απόσταση ολίσθησης στα 600m και την ταχύτητα 30cm/sec. Παρατηρείται ότι η αύξηση του συντελεστή τριβής είναι σχεδόν γραμμική σε σχέση με το επιβαλλόμενο φορτίο. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η απώλεια μάζας, έχοντας σταθερή ταχύτητα και μεταβάλλοντας το φορτίο, μειώνεται για σταθερή απόσταση ολίσθησης.



Εικόνα 5.5 : Διάγραμμα Ρυθμού φθοράς του κράματος Zn-10Al-1.5Cu συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου για σταθερές ταχύτητες ολίσθησης.

Ειδικότερα παρατηρούμε ότι για μεγαλύτερες τιμές επιβαλλόμενου φορτίου, υπάρχει σημαντική αύξηση του ρυθμού φθοράς. Η αύξηση του φορτίου οδηγεί στην εισαγωγή μηχανικών τάσεων (εικόνα 5.6) στο μαλακότερο υλικό, οι οποίες μόλις υπερβούν το όριο θραύσης λαμβάνει χώρα ρωγμάτωση και απολέπιση υλικού. Στην εικόνα 5.5 εμφανίζεται περισσότερη απώλεια βάρους σε συνάρτηση με την ταχύτητα ολίσθησης για μεταβαλλόμενο επιβαλλόμενο φορτίο. Παρατηρείται επιπρόσθετα ότι για τις ταχύτητες των 23cm/s και 30cm/s αντίστοιχα, είναι μεγαλύτερη η απώλεια μάζας σε σύγκριση με τις ταχύτητες των 10cm/s και 17cm/s.



Εικόνα 5.6. Ανάπτυξη μηχανικών τάσεων με την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου – ρωγμάτωση και απολέπιση υλικού.

Η παραπάνω παρατήρηση έρχεται σε απόλυτη συμφωνία με το νόμο του Archard, κατά τον οποίο, ο ρυθμός φθοράς είναι ανάλογος του κάθετου επιβαλλόμενου φορτίου [10-12].

$$Q = (K * W * L) / H \quad (5.1), \quad \text{όπου:}$$

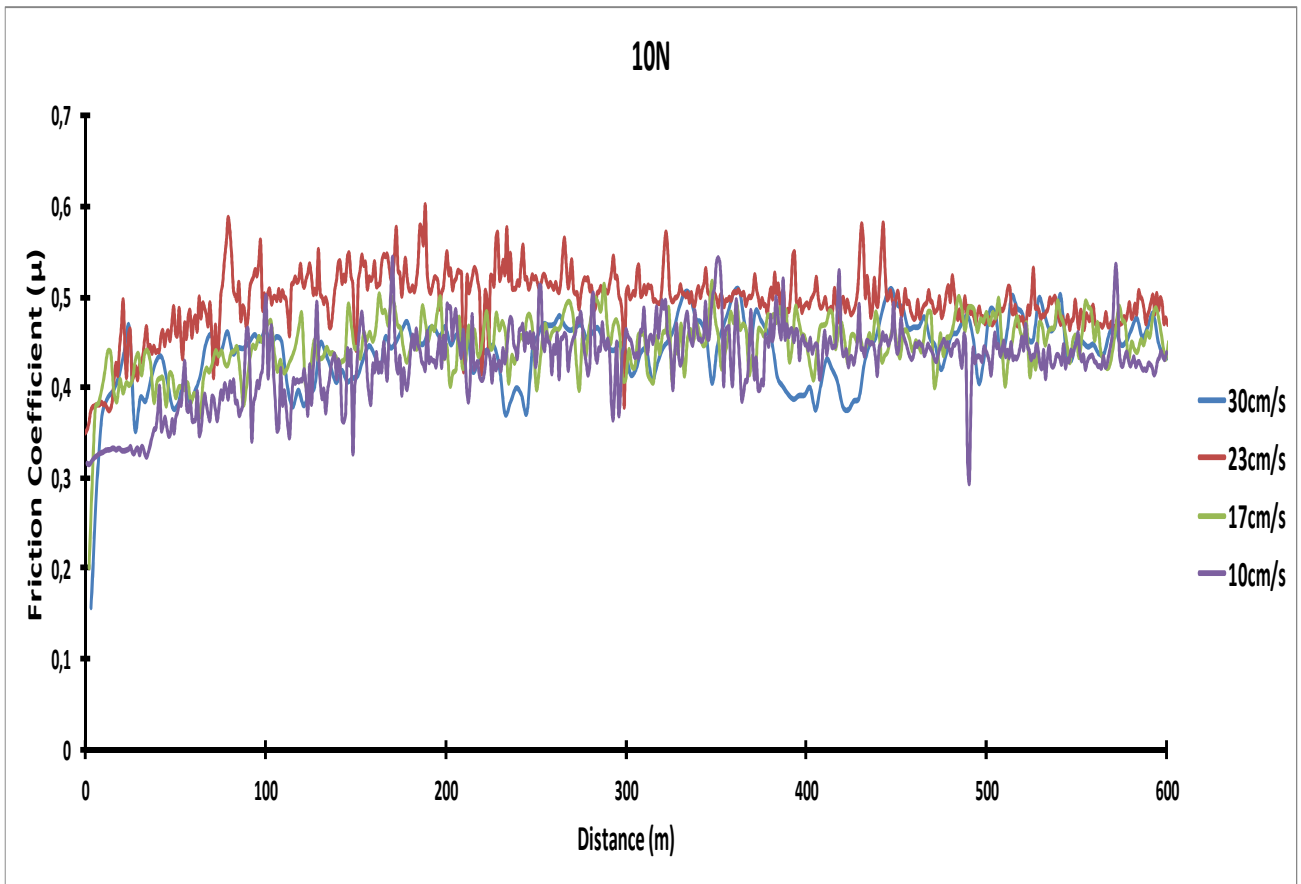
Q είναι ο ρυθμός φθοράς του εξεταζόμενου υλικού

W είναι το επιβαλλόμενο κάθετο φορτίο

L είναι η απόσταση ολίσθησης

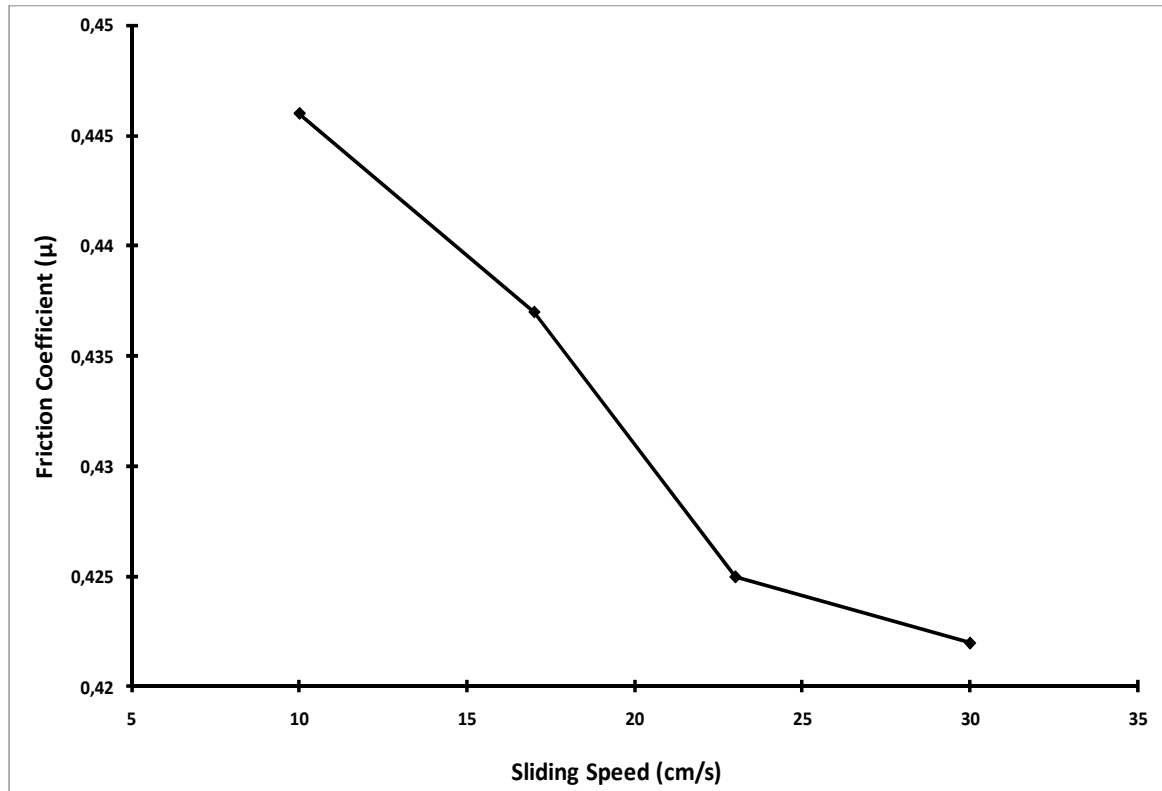
H είναι η σκληρότητα του μαλακότερου υλικού

K είναι μια χαρακτηριστική σταθερά του υλικού, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση $K = (3H * V) / P * L$, όπου H είναι η σκληρότητα, P είναι το επιβαλλόμενο κάθετο φορτίο, L είναι η απόσταση ολίσθησης και V είναι ο φθειρόμενος όγκος που υπολογίζεται από την πυκνότητα και την απώλεια μάζας του υλικού.



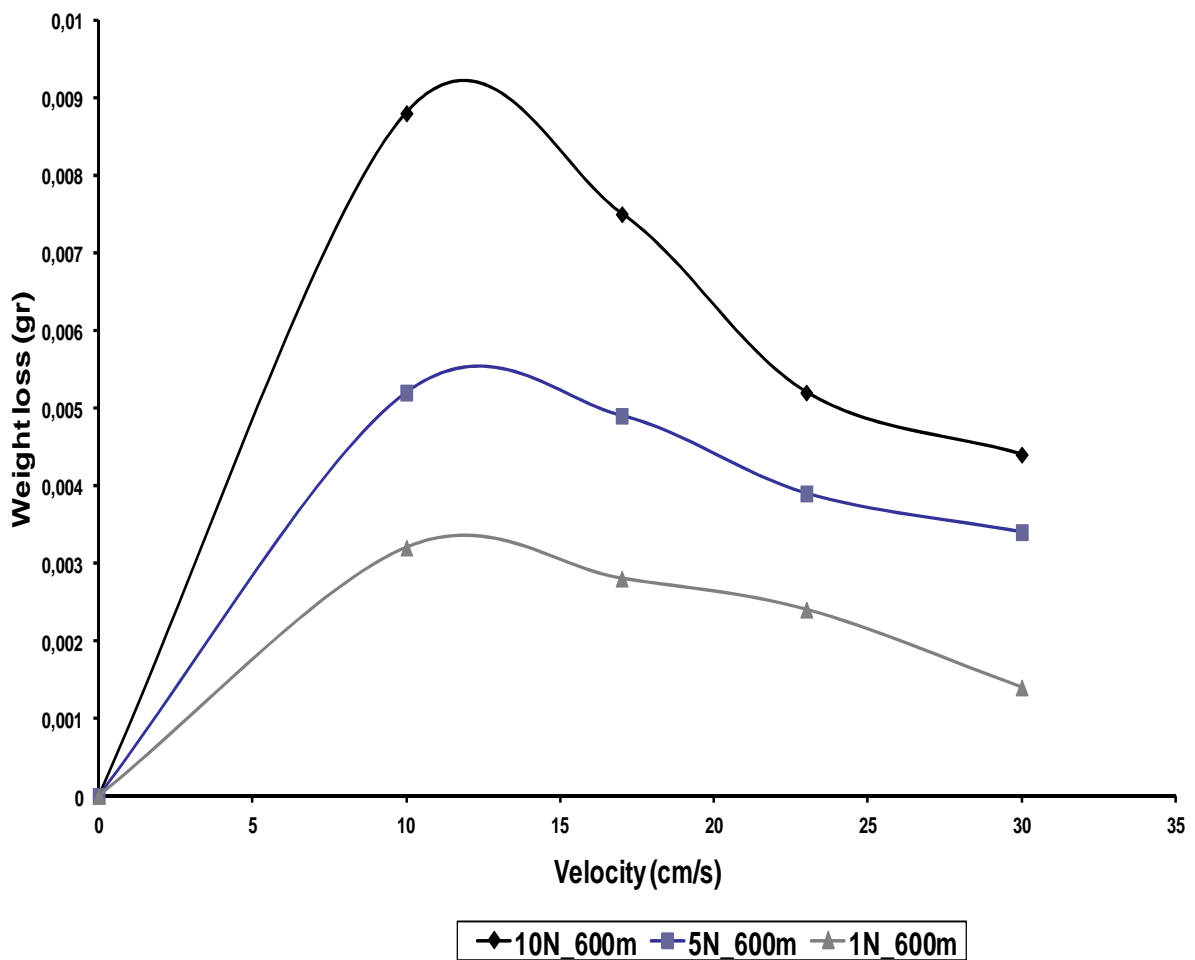
Εικόνα 5.7: Συντελεστής τριβής του κράματος Zn-10Al-1.5Cu για σταθερό επιβαλλόμενο φορτίο 10N και ταχύτητα ολίσθησης 30cm/sec, 23cm/s, 17cm/s και 10cm/s.

Στην εικόνα 5.7 εμφανίζεται ο συντελεστής τριβής μεταξύ του κράματος ψευδαργύρου και του ανοξείδωτου χάλυβα για ταχύτητα ολίσθησης που μεταβάλλεται στις ακόλουθες τιμές των 30cm/s, 23cm/s, 17cm/s και 10cm/s. Από το διάγραμμα της εικόνας 5.7 παρατηρείται να υπάρχουν έντονες αυξομειώσεις του συντελεστή τριβής που οφείλονται στην παρουσία της δέβρης μεταξύ των δύο ανταγωνιστικών υλικών.



Εικόνα 5.8: Διάγραμμα συντελεστή τριβής του κράματος Zn-10Al-1.5Cu συναρτήσει της ταχύτητας ολίσθησης.

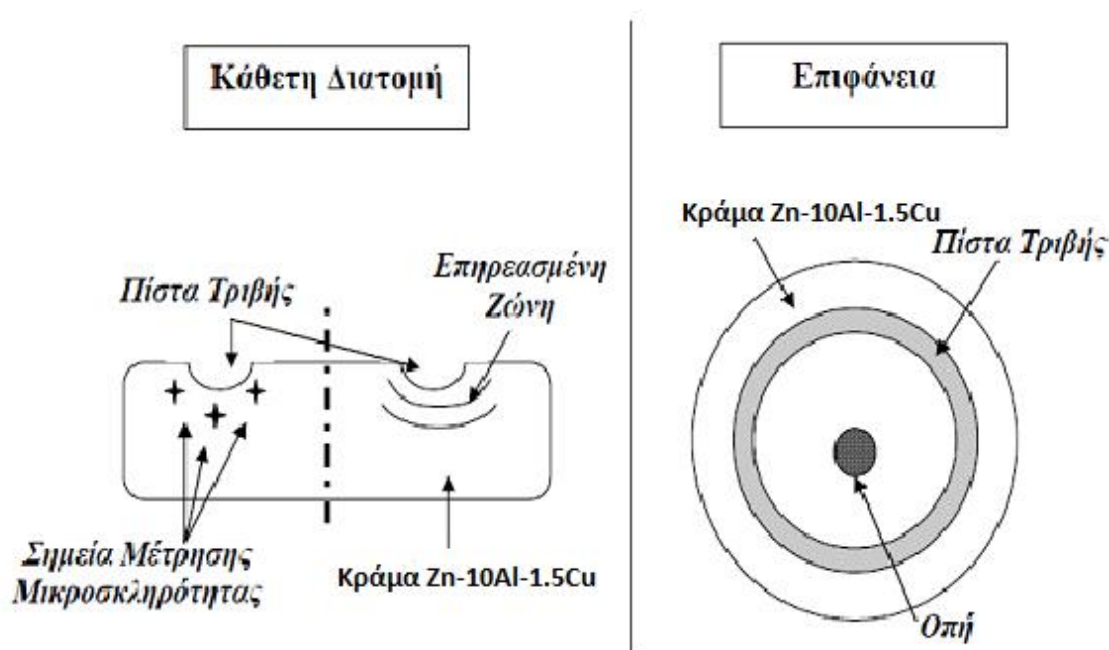
Στην εικόνα 5.8, η σχέση μεταξύ του συντελεστή τριβής των δύο ανταγωνιστικών υλικών σε συνάρτηση με την ταχύτητα ολίσθησης, παρουσιάζεται. Όταν η ταχύτητα ολίσθησης αυξάνεται, ο συντελεστή τριβής μειώνεται αντιστοίχως. Η μείωση του συντελεστή τριβής μπορεί να εξηγηθεί με βάση την θεωρία του Khruschov's [10]. Οι ερευνητές αυτοί πρότειναν ότι η σκλήρωση τουλάχιστον μίας από τις επιφάνειες των δύο ανταγωνιστικών υλικών προκαλεί μείωση του συντελεστή τριβής του τριβόσυστήματος.



Εικόνα 5.9 : Διάγραμμα ρυθμού φθοράς του κράματος Zn-10Al-1.5Cu για σταθερό επιβαλλόμενο φορτίο συναρτήσει της ταχύτητας ολίσθησης.

Στην παραπάνω εικόνα 5.9 παρουσιάζεται ο ρυθμός φθορας για σταθερή απόσταση ολίσθησης, μεταβάλλοντας την ταχύτητα. Είναι εμφανές ότι για επιβαλλόμενο φορτίο 10N ο ρυθμός φθοράς είναι αισθητά μεγαλύτερος συγκρινόμενος με το επιβαλλόμενο φορτίο του 1N. Επίσης παρατηρείται ότι και για το επιβαλλόμενο φορτίο των 5N και 10N αντίστοιχα η καμπύλη παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά σε κάθε μεταβολή της ταχύτητας ολίσθησης. Η παρατήρηση αυτή θα μπορούσε να αποδοθεί στο γεγονός, ότι η αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου πιθανόν να οδήγησε σε ενδοτράχυνση των επιφανειακών στοιβάδων των δυο ανταγωνιστικών υλικών. Το παραπάνω

φαινόμενο παρατηρήθηκε για τις δεδομένες τιμές της ταχύτητας ολίσθησης. Έχει παρατηρηθεί ότι αν αυξηθεί σημαντικά η ταχύτητα ολίσθησης και κατ' επέκταση η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια του τριβουσυστήματος, σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα οξειδίου [13] το οποίο μειώνει την πραγματική επιφάνεια επαφής του τριβουσυστήματος. Αυτό έχει ως συνέπεια την μείωση του ρυθμού φθοράς.

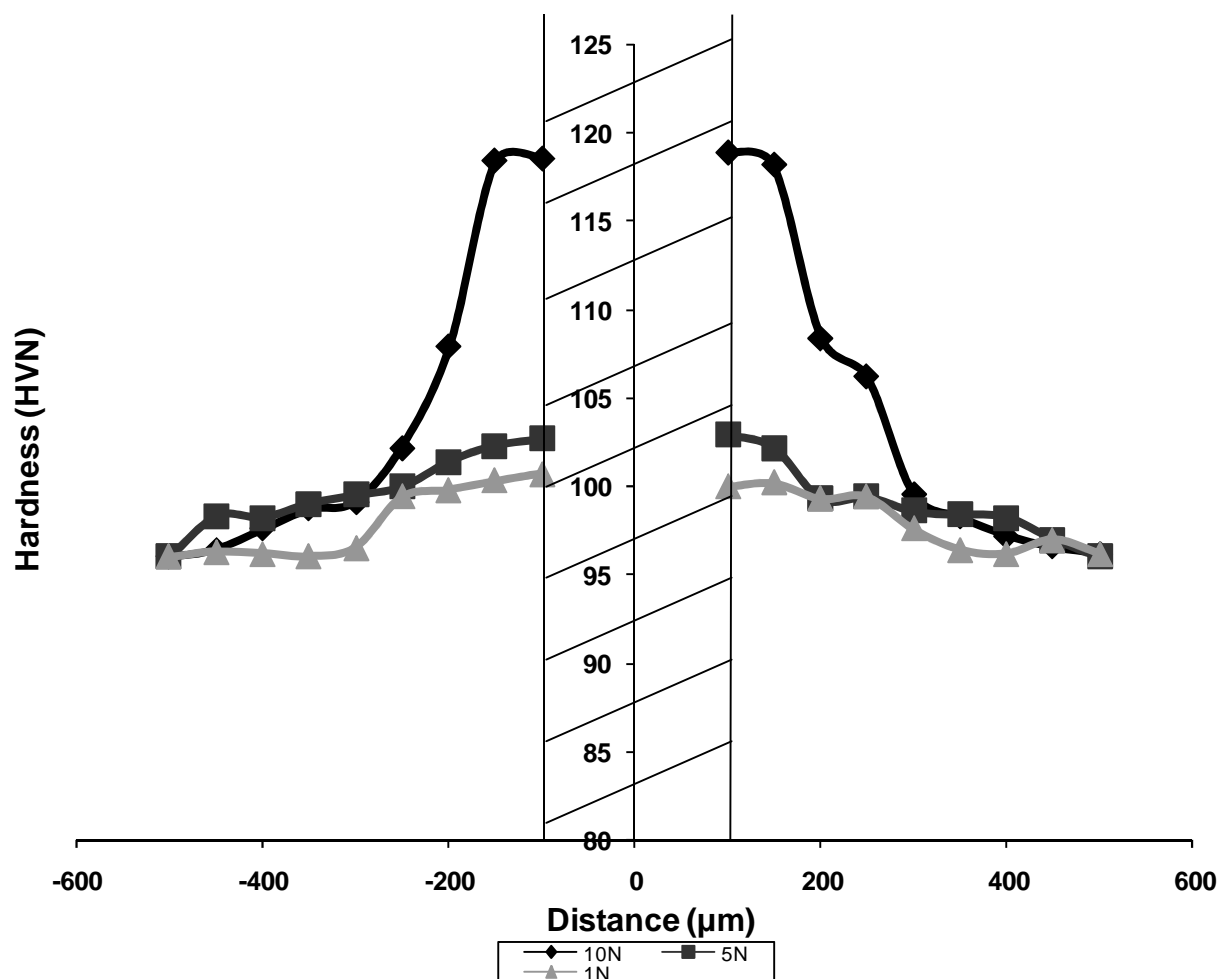


Εικόνα 5.10 : Μετρήσεις μικροσκληρότητας στην επηρεασμένη ζώνη λόγω τριβής-φθοράς του κράματος Zn-10Al-1.5Cu.

Έχοντας υπόψη την παραπάνω παρατήρηση θα μπορούσε να λεχθεί, ότι σύμφωνα με τη θεωρία των Khruschov και Babichev [10], η αύξηση της επιφανειακής σκληρότητας, τουλάχιστον μίας εκ των δύο ανταγωνιστικών επιφανειών, οδηγεί σε μείωση του συντελεστή τριβής.

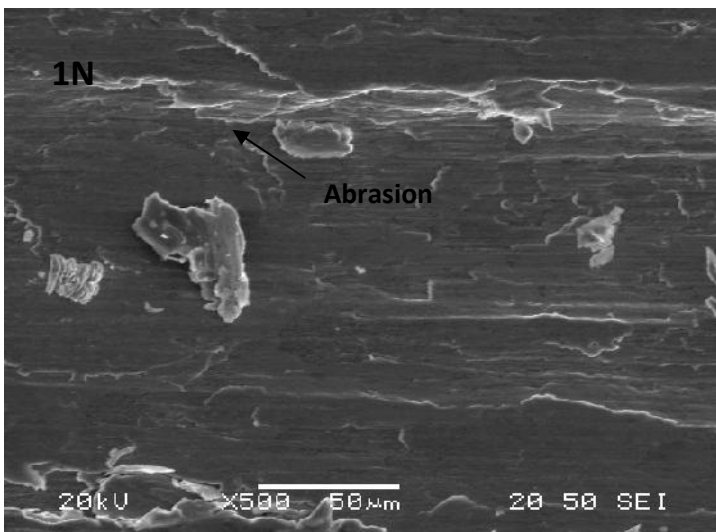
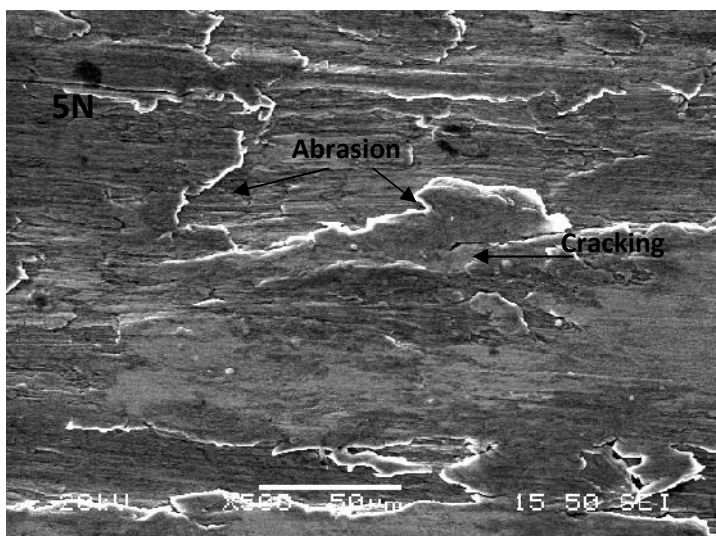
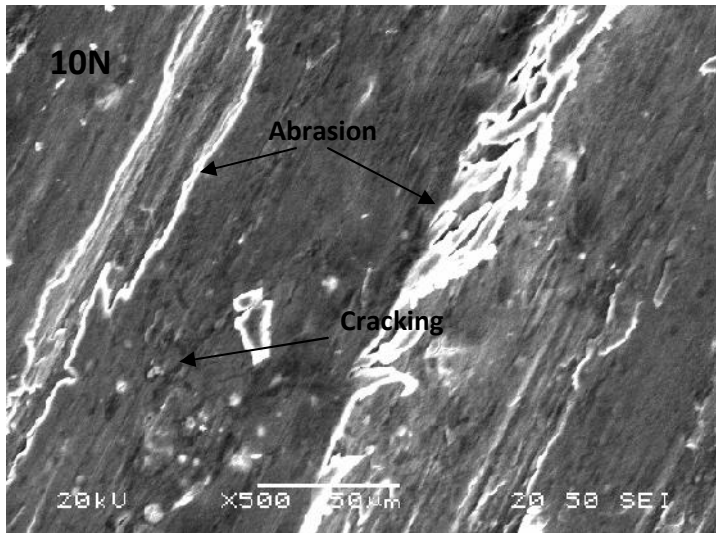
Ωστόσο, άλλος ένας παράγοντας που ενδέχεται να επέδρασε στην μεταβολή του συντελεστή τριβής είναι η αποκόλληση μικρών σωματιδίων από τις επιφανειακές στοιβάδες των δυο υλικών, λόγω φαινομένων κόπωσης [14]. Τα

σωματίδια αυτά είναι γνωστά ως δέβρη [15]. Η σχηματισθείσα δέβρη πιθανόν “εγκλωβίζεται” στην διεπιφάνεια των δύο υλικών που υπόκεινται σε τριβή, μειώνοντας την πραγματική επιφάνεια επαφής και κατ’ επέκταση τον συντελεστή τριβής (Σχήμα 5.10).



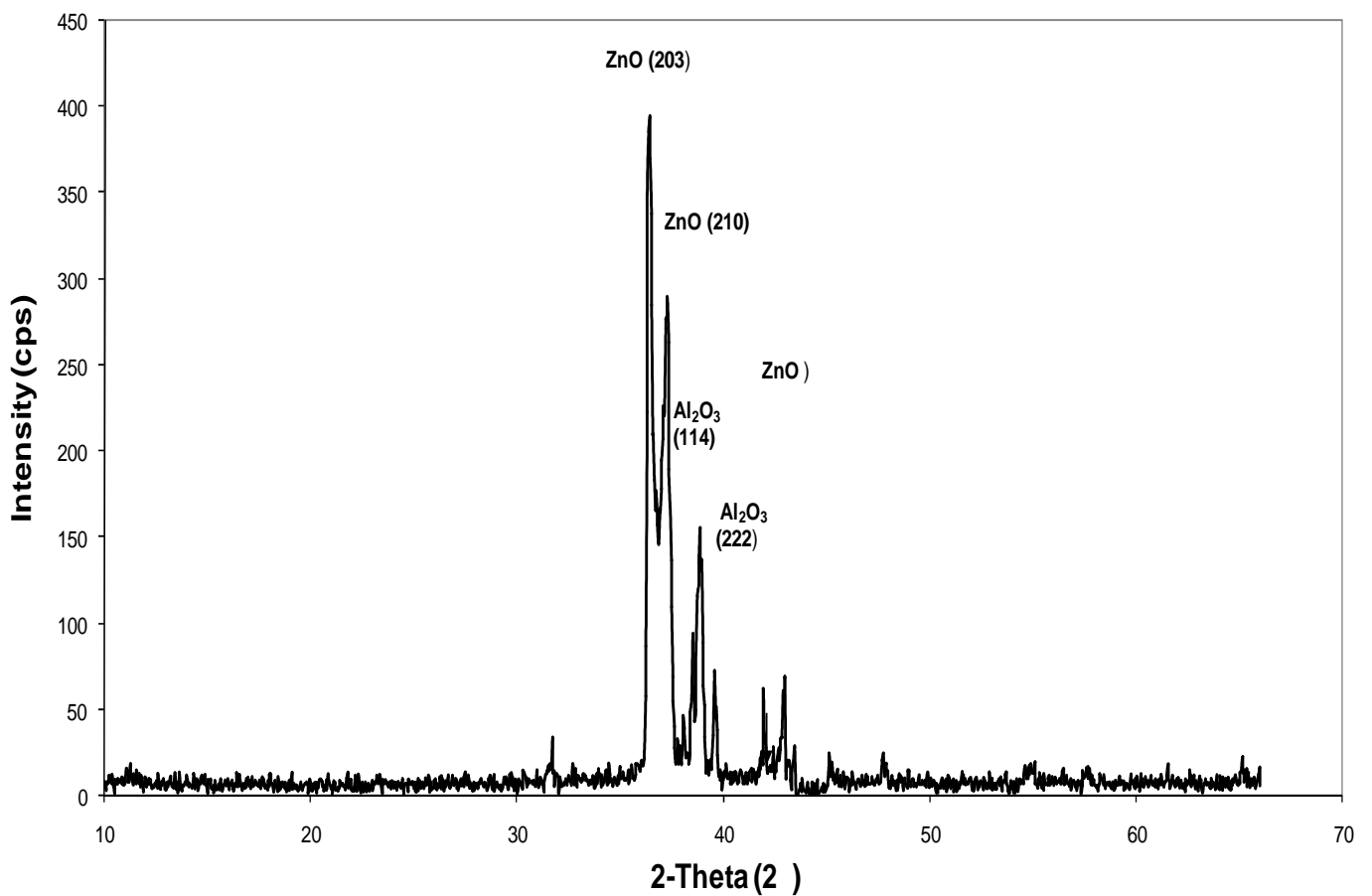
Εικόνα 5.11 : Διάγραμμα μικροσκληρότητας δεξιά και αριστερά της πίστας τριβής του κράματος Zn-10Al-1.5Cu για επιβαλλόμενο φορτίο 10N, 5N και 1N .

Στην παραπάνω εικόνα 5.11 παρατίθεται η μεταβολή της μικροσκληρότητας δεξιά και αριστερά της πίστας τριβής σε απόσταση από την πίστα τριβής 500μm σε συνάρτηση με το επιβαλλόμενο φορτίο. Στο διάγραμμα αυτό εμφανίζεται αισθητή αύξηση της μικροσκληρότητας για το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο, γεγονός που πιθανότατα να οφείλεται στην έντονη ενδοτράχυνση του υλικού μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης που εμφανίζεται στην τριβή και στις εξωτερικές στοιβάδες του υλικού.



Εικόνα 5.12 :Εσωτερική περιοχή της πίστας τριβής του κράματος Zn-10Al-1.5Cu για επιβαλλόμενο φορτίο 10N, 5N και 1N.

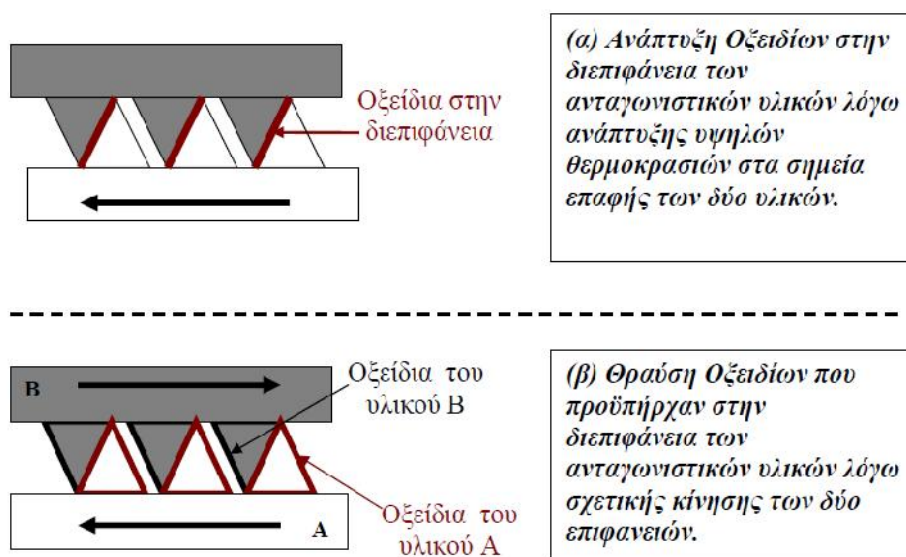
Στην εικόνα 5.12 εμφανίζεται η πίστα τριβής των δοκιμίων για επιβαλλόμενο φορτίο 10N, 5N και 1N αντίστοιχα. Στη πίστα τριβής με επιβαλλόμενο φορτίο 10N και 5N παρουσιάζεται έντονη πλαστική παραμόρφωση και απόξεση στην διεπιφάνεια του υλικού. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η μικροσκληρότητα του ανοξείδωτου χάλυβα είναι περίπου 900HVN σε σύγκριση με την μικροσκληρότητα του κράματος ψευδαργύρου που είναι περίπου 96 HVN και δημιουργεί εκτενή πίεση στην επιφάνεια του κράματος και προκαλεί πλαστική παραμόρφωση και τοπικές ρωγμές. Η επιφάνεια τριβής του κράματος χαρακτηρίζεται κυρίως από έντονες κηλίδες και ρωγμές που σχετίζονται άμεσα με το ότι τα κομμάτια του κράματος του ψευδαργύρου αποκολλούνται και επικάθονται στο ανταγωνιστικό υλικό (χάλυβα). Αυτή η παρατήρηση υποδηλώνει την έντονη πρόσφυση λόγω τριβής από το κράμα ψευδαργύρου στον ανοξείδωτο χάλυβα και την αποκόλληση δέβρης από το υλικό προς τριβή στο ανταγωνιστικό υλικό.



Εικόνα 5.13: Ακτινοδιάγραμμα δέβρης για επιβαλλόμενο φορτίο 10N, ταχύτητας ολίσθησης 30cm/s και απόσταση ολίσθησης 600m .

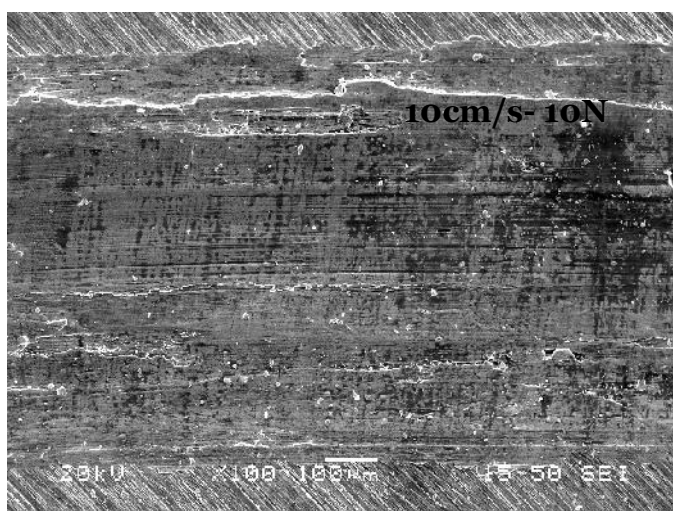
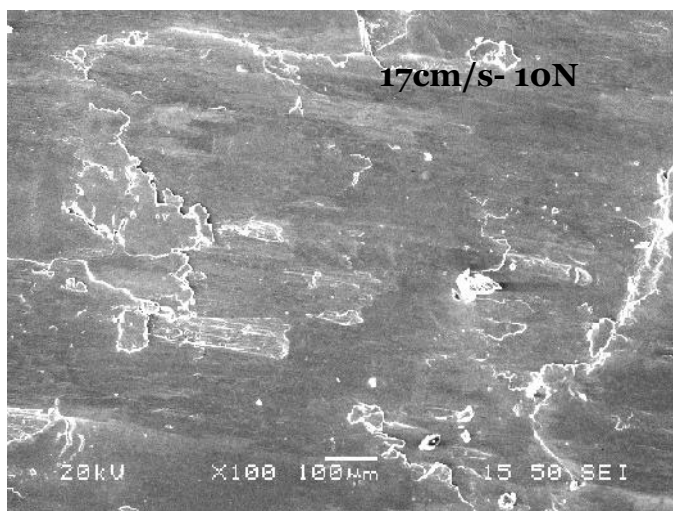
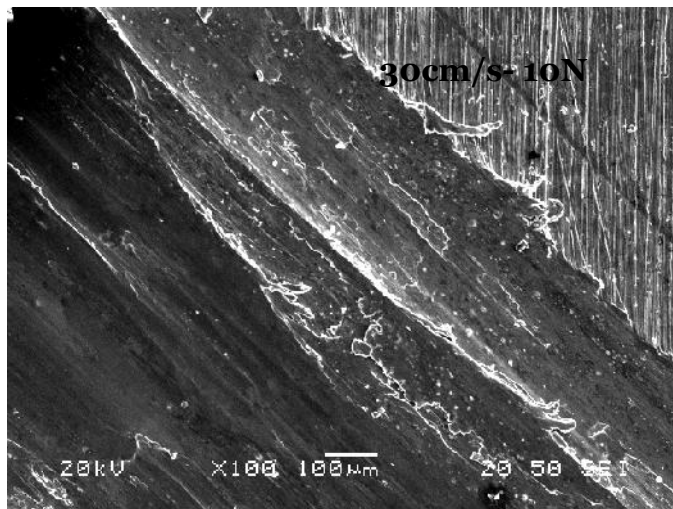
Στο ακτινοδιάγραμμα της εικόνας 5.13 παρουσιάζεται η χημική σύσταση της δέβρης που συλλέκτηκε κατά την διάρκεια των πειραμάτων τριβής υπό συνθήκες: ταχύτητα ολίσθησης 30cm/s, επιβαλλόμενο φορτίο 10N και απόσταση ολίσθησης 600m. Ταυτοποιώντας το ακτινοδιάγραμμα της δέβρης εμφανίζεται η παρουσία οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) και οξειδίου του αλουμινίου (Al₂O₃) που οφείλεται στο τριβοσύστημα του ανταγωνιστικού υλικού με το κράμα ψευδαργύρου.

Ο σχηματισμός ZnO και Al₂O₃ στα προϊόντα της δέβρης πιθανόν να οφείλεται στην τοπική οξείδωση του κράματος ψευδαργύρου κατά τη διαδικασία ξηρής τριβής των δυο υλικών. Έχει αποδειχθεί [16] ότι κατά την ξηρή τριβή δυο υλικών, δύναται τοπικά να αναπτυχθούν υψηλές θερμοκρασίες λόγω της ανάπτυξης υψηλών μηχανικών τάσεων στην επιφάνεια των δυο υλικών. Οι επικρατέστεροι μηχανισμοί οξειδωτικής τριβής [17] δίδονται στην εικόνα 5.13.



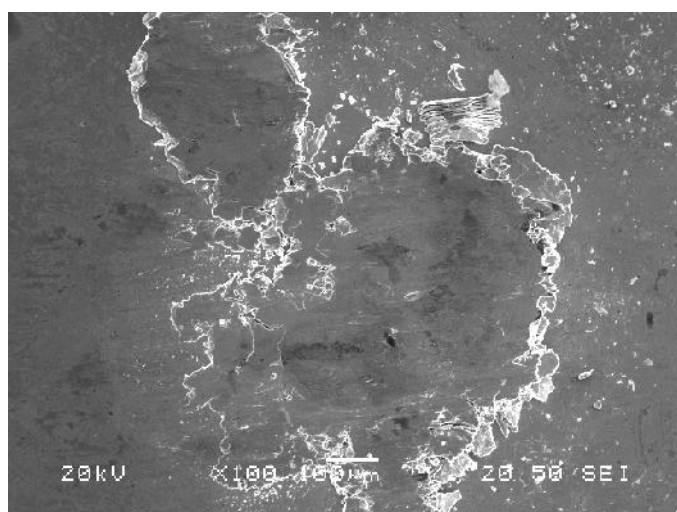
Εικόνα 5.14 : Επικρατέστεροι μηχανισμοί οξειδωτικής τριβής-φοράς: (α) ανάπτυξη οξειδίων λόγω μηχανικών τάσεων, (β) θραύση επιφανειακών οξειδίων λόγω φαινομένων τριβής.

Το γεγονός ότι δεν ανιχνεύθηκαν σωματίδια από την σφαίρα του ανοξειδωτου χάλυβα καθώς και της ενδομεταλλικής ένωσης CuZn₄ στη δέβρη, δεν σημαίνει ότι δεν παρατηρείται φθορά του ανταγωνιστικού υλικού ή αποκόλληση των ενδομεταλλικών ενώσεων. Ενδεχομένως, η περιεκτικότητα των ανωτέρω σωματιδίων ανά μονάδα όγκου της παραχθείσας δέβρης να είναι σχετικά μικρή, οπότε να μην καθίσταται δυνατή η ανίχνευση τους με την τεχνική της περίθλασης ακτίνων-X.



Εικόνα 5.15 : Εσωτερική περιοχή πίστας τριβής του κράματος Zn-10Al-1.5Cu για επιβαλλόμενο φορτίο και ταχύτητες ολίσθησης 30cm/s, 17cm/s και 10cm/s .

Η παρουσία πλαστικής παραμόρφωσης και τοπικού “οργώματος” παρατηρείται έντονα στην επιφάνεια του κράματος αλουμινίου. Η συνύπαρξη των δυο ανωτέρω μηχανισμών τριβής θεωρείται αναγκαία, καθώς προκειμένου να επέλθει θραύση και αποκόλληση επιφανειακών στοιβάδων του κράματος θα πρέπει να έχει προηγηθεί έντονη πλαστική παραμόρφωσή τους. Είναι δε γνωστόν, ότι για να επέλθει θραύση σε ένα κρυσταλλικό μεταλλικό υλικό λόγω άσκησης μηχανικών τάσεων, προϋποθέτονται τα ακόλουθα στάδια: (α) υπέρβαση του ορίου διαρροής (β) μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή (γ) υπέρβαση του ορίου θραύσης.



Εικόνα 5.16 : Τυπική επιφάνεια σφαίρας ανοξειδωτού χάλυβα, κατόπιν τριβής ολίσθησης με κράματος Zn-10Al-1.5Cu.

Η φθορά πρόσφυσης εμφανίζεται, όταν δυο υλικά είναι σε επαφή και μεταξύ τους σχηματίζονται ενώσεις σε ατομική κλίμακα. Οι ενώσεις αυτές προέρχονται από την ψυχρή συγκόλληση των προεξοχών των δυο επιφανειών, λόγω της ανάπτυξης υψηλών μηχανικών τάσεων, που υπερβαίνουν το όριο διαρροής τουλάχιστον ενός εκ των δύο υλικών. Υπό την επίδραση όμως της ολίσθησης οι ενώσεις αυτές θραύονται (εικόνα 5.14).

5.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η αντιτριβική συμπεριφορά του κράματος ψευδαργύρου Zn-10Al-1.5Cu με ανταγωνιστικό υλικό ανοξειδωτο χάλυβα και εξάχθηκαν τα παρακάτω συμπεράσματα :

1. Ο συντελεστής τριβής του κράματος ψευδαργύρου αυξάνεται όταν αυξάνεται και το επιβαλλόμενο φορτίο διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα ολίσθησης.
2. Για σταθερή τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου, ο συντελεστής τριβής μειώθηκε συναρτήσει της αύξησης της ταχύτητας ολίσθησης.

3. μ μ
 μ μ
.
4. μ - μ ,
 μ μ μ .
5. μ μ - μ
 μ
 μ .
6. μ
 μ μ
 μ .
7. μ μ - μ μ .
8. μ
.

5.5. Αναφορές

- [1]. C.N. Panagopoulos, K.G. Georgarakis, S. Petroutsakou, *J. Mater. Process. Techn.*, 160 (2005) 234-244
- [2]. B.K. Prasad, *Mater. Charact.* 44 (2000) 301
- [3]. M.D. Hanna, J. T. Carter, M.S. Rashid, *Wear*, 203-204 (1997) 11-21
- [4]. P. Pearl Lee, T. Savaskan, E. Laufer, *Wear*, 117 (1987) 79-89
- [5]. T. Savaskan, A.P. Hekimoglu, G. Purcek, *Trib. Inter.* 37 (2004) 45-50
- [6]. M.T. Abou El-khair, A. Daoud, A. Ismail, *Mat. Let.* , 58 (2004) 1754-1760
- [7]. Gahr KHZ. *Microstructure and wear of materials*. Oxford : Elsevier, 1987
- [8]. J. Halling, *Principle of Tribology*. Great Britain : Macmillan Education Ltd, 1989
- [9]. E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials*, 2nd Edition, Wiley-Interscience Publication, New York, 1995, p. 194.
- [10]. E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials* 2nd Edition, Wiley Interscience Publication, New York, 1995, p. 287.
- [11]. L.J. Yang, *Composites Sci. Technol.* 63 (2003) 575–583.
- [12]. A.D. Sarkar, *Wear of Metals*, Pergamon Press, UK, 1976, p. 39.
- [13]. M.G. Fontana, *Corrosion Engineering*, 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1987, p. 107.
- [14]. Καθ. Χρ. Ν. Παναγόπουλος, *Τεχνολογία Επιφανειών*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, p. 4.12
- [15]. Καθ. Χρ. Ν. Παναγόπουλος, *Τεχνολογία Επιφανειών*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, p. 4.9
- [16]. E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials* 2nd Edition, Wiley Interscience Publication, New York, 1995, p. 287
- [17] M.G. Fontana, *Corrosion Engineering*, 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1987, p. 107.