



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΟΠΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΑΔΑΜΑΝΤΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (DLC)

υπό

ΑΝΔΡΟΝΙΚΟΥ ΣΑΛΙΑΡΗ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2022

© 2022 Ανδρόνικος Σάλιαρης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Εμμανουήλ Μπουζάκης Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Αλέξης Κερμανίδης Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΚΟΠΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΑΔΑΜΑΝΤΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (DLC)

ΑΝΔΡΟΝΙΚΟΣ ΣΑΛΙΑΡΗΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2022

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Εμμανουήλ Μπουζάκης

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περίληψη

Η βελτιστοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς μηχανολογικών συστημάτων αποτελεί διαρκή και διαχρονική επιδίωξη. Μια μέθοδος για την αναβάθμιση των ιδιοτήτων επιφανειών είναι η επικάλυψη τους από λεπτό υμένα κατάλληλα επιλεγμένου υλικού. Στην παρούσα εργασία μελετάται η χρήση αδαμαντοειδούς άνθρακα (Diamond-Like Carbon - DLC) ως υλικό επικάλυψης. Τα οφέλη από την χρήση του αναδεικνύονται από έρευνες των τελευταίων ετών. Ο αδαμαντοειδής άνθρακας παρουσιάζει υψηλό όριο διαρροής και καλή τριβολογική συμπεριφορά. Συνήθεις εφαρμογές του, σε μηχανολογικά συστήματα, εμφανίζονται σε συστήματα μετάδοσης κίνησης και παραγωγής ισχύος υψηλής απόδοσης καθώς και σε εργαλεία κοπής. Στα συστήματα μετάδοσης κίνησης είναι επιθυμητή η όσο το δυνατόν χαμηλότερη παραγόμενη τριβή μεταξύ των κινούμενων επιφανειών. Σε στοιχεία μηχανών όπου αναπτύσσονται επαναλαμβανόμενα κρουστικά φορτία κύρια παράμετρος ελέγχου καθίσταται η σκληρότητα της επιφάνειας και στα εργαλεία κοπής το υψηλό όριο διαρροής του υλικού επικάλυψης και η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στην παρουσίαση εφαρμογών που υπόκεινται στις παραπάνω κατηγορίες, στις μεθόδους εναπόθεσης των επικαλύψεων και στις δοκιμές ελέγχου ποιότητας των παραγόμενων συστημάτων. Έπειτα, πραγματοποιείται αριθμητική ανάλυση της μηχανικής απόκρισης συστήματος χάλυβα ASTM A36 με επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα, με το προς μελέτη υλικό του υποστρώματος να αποτελεί κοινό κατασκευαστικό υλικό τμημάτων στοιχείων μηχανών και συνεργαζόμενων εξαρτημάτων σε σύνθετες διατάξεις. Η ανάλυση διεξάγεται με την διενέργεια δοκιμών επαναλαμβανόμενης κρούσης και χάραξης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για διάφορες φορτίσεις με σκοπό τον προσδιορισμό της αντοχής και της φθοράς του λεπτού στρώματος της επικάλυψης.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	σελ. 7
Κεφάλαιο 2. Στοιχεία Μηχανών με επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα	σελ. 8
2.1 Εισαγωγή	σελ. 8
2.2 Επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα σε συστήματα κύλισης	σελ. 8
2.3 Επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα σε roller follower	σελ. 11
Κεφάλαιο 3. Τμήματα κινητήρων με επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα	σελ. 15
3.1 Εισαγωγή	σελ. 15
3.2 Τριβολογική συμπεριφορά σε κιβώτια ταχυτήτων υπό ελαστο-υδροδυναμική λίπανση	σελ. 15
3.3 Τριβολογική συμπεριφορά κουζινέτων στροφαλοφόρου άξονα κινητήρα υπό ελαστο-υδροδυναμική λίπανση	σελ. 21
3.4 Τριβολογική συμπεριφορά στο δακτύλιο πιστονιού	σελ. 24
3.5 Συμπεράσματα	σελ. 26
Κεφάλαιο 4. Κατεργασίες Κοπής με επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα	σελ. 27
4.1 Εισαγωγή	σελ. 27
4.2 Κατεργασία Φρεζαρίσματος	σελ. 27
4.3 Κατεργασία Τόρνευσης	σελ. 33
4.4 Κατεργασία Διάτρησης	σελ. 40
4.5 Συμπεράσματα	σελ. 44
Κεφάλαιο 5. Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς συστήματος χάλυβα-αδαμαντοειδούς άνθρακα με χρήση υπολογιστικού μοντέλου	σελ. 45
5.1 Εισαγωγή	σελ. 45
5.2 Δοκιμή επαναλαμβανόμενης διείδυσης-κρούσης	σελ. 46
5.2.1 Δοκιμή επαναλαμβανόμενης διείδυσης	σελ. 46
5.2.2 Δοκιμή επαναλαμβανόμενης κρούσης	σελ. 50
5.3 Δοκιμή χάραξης	σελ. 54

5.3.1 Δοκιμή χάραξης με ελεγχόμενη επιβαλλόμενη διείδυση	σελ. 54
5.3.2 Δοκιμή χάραξης με ελεγχόμενο επιβαλλόμενο φορτίο	σελ. 57
5.4 Συμπεράσματα	σελ. 60
Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα - Προτάσεις	σελ. 61
Βιβλιογραφία	σελ. 62
Παράρτημα Α	σελ. 65
Παράρτημα Β	σελ. 66

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Στις περιπτώσεις όπου υπάρχει συμβατότητα και καλή συνάφεια μεταξύ υποστρώματος και επικάλυψης αδαμαντοειδούς άνθρακα (DLC) τα πλεονεκτήματα από την εφαρμογή λεπτών στρωμάτων της τάξης των μη είναι σημαντικά. Η μείωση των απωλειών τριβών και η αύξηση της διάρκειας ζωής ποικίλων μηχανικών συστημάτων κρίνεται καίρια από οικονομική σκοπιά. Επιπλέον θεμιτό αποτέλεσμα από την χρήση τους αποτελεί η δυνατότητα τροποποίησης και αναβάθμισης ευρέως διαδεδομένων υλικών σε σημαντικές εφαρμογές καθώς και η αυξημένη ποιότητα των επιφανειών. Παραδείγματα εφαρμογών αποτελούν μέρη κινητήρων οχημάτων και κοπτικά εργαλεία. Στο πλαίσιο της εργασίας αναλύονται βιβλιογραφικά σε διακριτά κεφάλαια εφαρμογές διαφόρων συστημάτων. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται λόγος για εφαρμογές σε στοιχεία μηχανών με γενική προσέγγιση. Στο Κεφάλαιο 3, εξειδικεύοντας το πεδίο των στοιχείων μηχανών, γίνεται αναφορά στην επικάλυψη γραναζιών και άλλων εξαρτημάτων που βρίσκονται σε συστήματα μετάδοσης κίνησης και μέρη κινητήρων. Το Κεφάλαιο 4 πραγματεύεται χρήσεις επικάλυψεων αδαμαντοειδούς άνθρακα σε κατεργασίες κοπής. Σε κάθε κεφάλαιο αναλύονται ο τρόπος και η διαδικασία εναπόθεσης της επικάλυψης και οι δοκιμές που διεξάγονται για την επιβεβαίωση και ποσοτικοποίηση των επιδράσεων της. Στο Κεφάλαιο 5, πραγματοποιείται υπολογιστική ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς συστήματος χάλυβα ASTM A36 με επικάλυψη λεπτού στρώματος αδαμαντοειδούς άνθρακα. Η ανάλυση επικεντρώνεται στον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής του στρώματος της επικάλυψης και στην φθορά που εμφανίζεται για διάφορους τύπους φόρτισης.

Κεφάλαιο 2. Στοιχεία Μηχανών με επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα

2.1 Εισαγωγή

Τα στοιχεία μηχανών αποτελούν καίρια τμήματα μηχανολογικών διατάξεων τα οποία φέρουν σημαντικά φορτία και μεταδίδουν κινήσεις. Η αύξηση της αντοχής τους και η μείωση των συντελεστών τριβών των επιφανειών τους κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για την δομική ακεραιότητα και την αποδοτικότερη λειτουργία των μηχανολογικών συστημάτων. Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται υπό γενική σκοπιά η επίδραση επικάλυψης αδαμαντοειδούς στα παραπάνω χαρακτηριστικά.

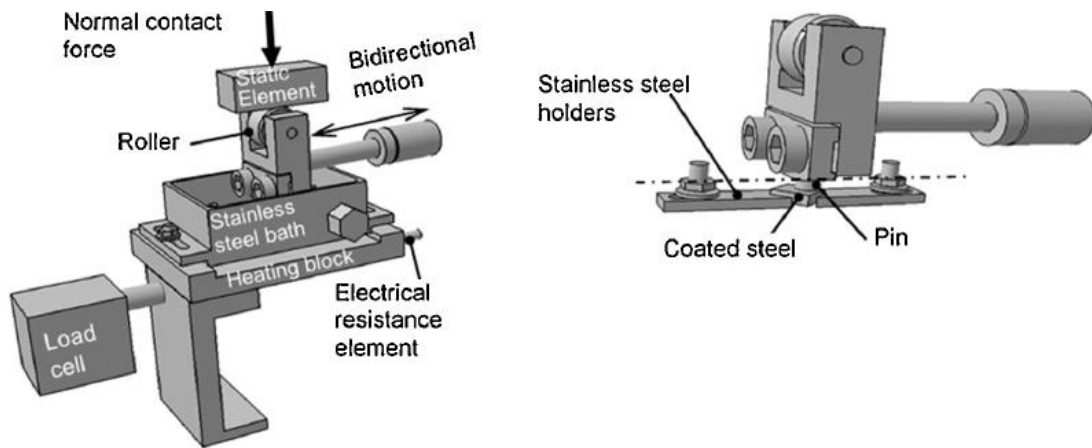
2.2 Επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα σε συστήματα κύλισης

Μελετάται η τριβολογική συμπεριφορά υδρογονοποιημένου αμόρφου άνθρακα (a-C:H) περιεκτικότητας 20% σε υδρογόνο σε υπόστρωμα AISI 52100 κινούμενων στοιχείων υπό συνεχή επαφή σε ξηρό περιβάλλον. Η εναπόθεση της επικάλυψης πραγματοποιείται με χημική εναπόθεση ατμού ενισχυμένης με πλάσμα (PECVD). Ως πηγή άνθρακα χρησιμοποιείται ασετυλίνη (C_2H_2). Στο θάλαμο επικάλυψης η θερμοκρασία διατηρείται κάτω από τους $200^{\circ}C$. Για την αποτελεσματικότερη συνάφεια μεταξύ των στρωμάτων, το υπόστρωμα επικαλύπτεται με ενδιάμεσο στρώμα χρωμίου (Cr) και έπειτα με στρώμα καρβιδίου του βολφραμίου (WC). Η εναπόθεση και των δύο ενδιάμεσων στρωμάτων συμβαίνει με διασκορπισμό μαγνήτρου. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι ιδιότητες του αδαμαντοειδούς άνθρακα όπως προσδιορίστηκαν από τους Solis κ.ά. (2016).

Επιφανειακή σκληρότητα (GPa)	22
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	180
Κρίσιμο Φορτίο (N)	80
Παραμένουσες Θλιπτικές Τάσεις (GPa)	1
Πάχος (μm)	2,8
Επιφανειακή Τραχύτητα (nm)	18±5

Πίνακας 2.1 Ιδιότητες στρώματος αδαμαντοειδούς άνθρακα

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής (και της τριβής) διεξάγεται δοκιμή χαλύβδινου πείρου σε πλάκα. Στην διάταξη αυτή μετράται η δύναμη της τριβής στο κελί φορτίου (load cell). Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι ιδιότητες του πείρου και της πλάκας και στον πίνακα 2.3 οι παράμετροι του πειράματος που διεξάγεται από τους Solis κ.ά. (2016). Η διάταξη που χρησιμοποιείται είναι το τριβόμετρο Cameron Plint TE77 που αναπαριστάται στην εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση δοκιμής πείρου σε πλάκα

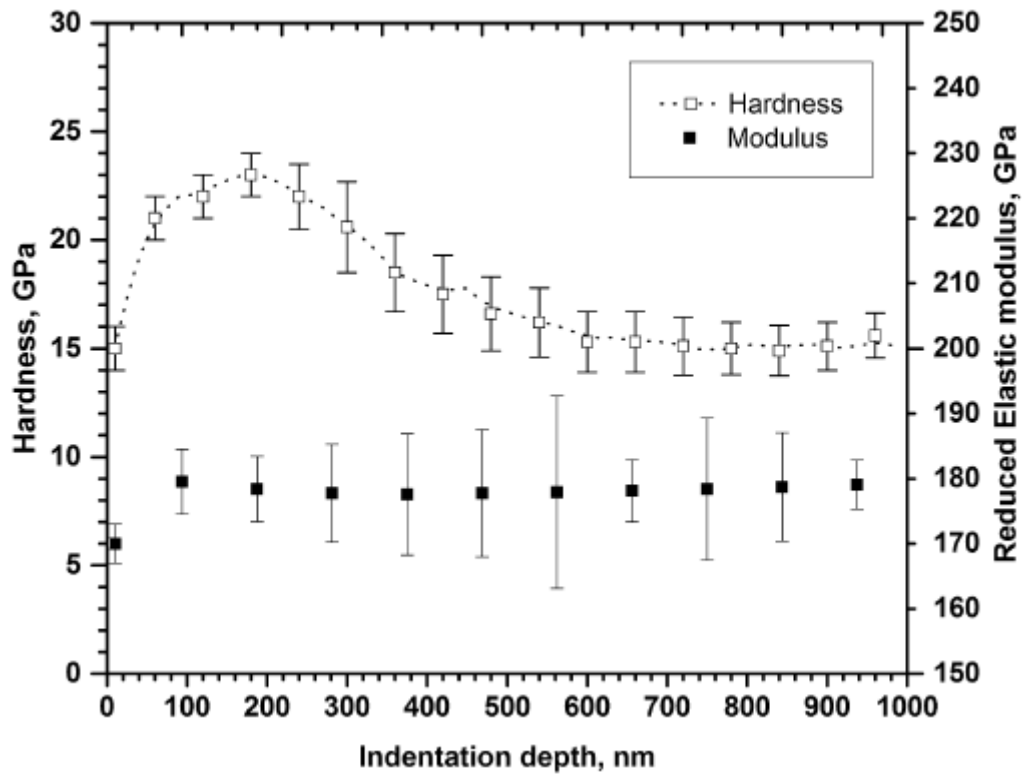
Τύπος	AISI 52100
Σκληρότητα (GPa)	11
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	180
Τραχύτητα επικαλυμμένης Πλάκας (nm)	18±5
Τραχύτητα Πείρου (nm)	28±2

Πίνακας 2.2 Ιδιότητες πείρου και πλάκας

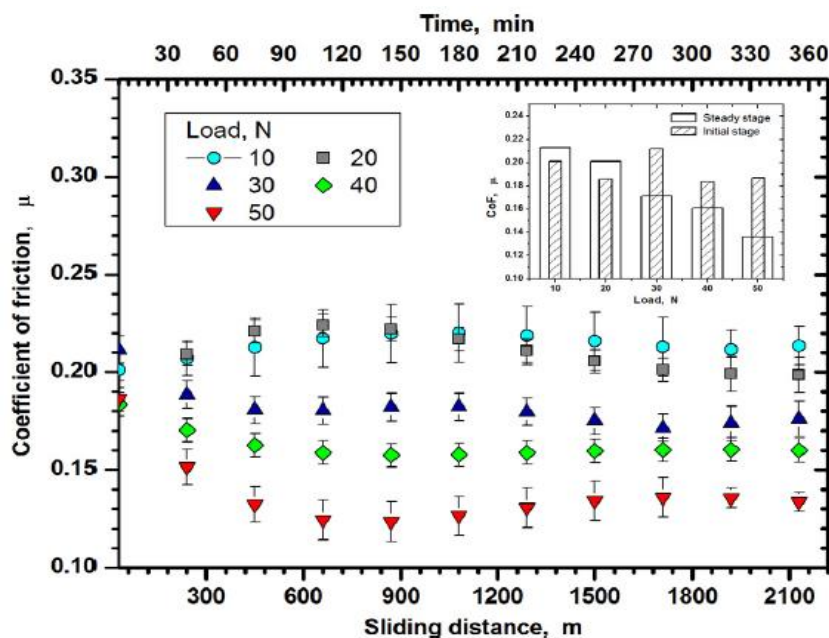
Φορτίο (N)	10	20	30	40	50
Μέγιστη Τάση (MPa)	110	140	160	170	190
Συχνότητα (Hz)	10	10	10	10	10
Μέση Ταχύτητα (m/s)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Θερμοκρασία (°C)	20±2	20±2	20±2	20±2	20±2
Σχετική Υγρασία (%)	35-50	35-50	35-50	35-50	35-50
Διάρκεια (hr)	6	6	6	6	6

Πίνακας 2.3 Παράμετροι δοκιμής

Στο Διάγραμμα 2.1 παρουσιάζεται η σκληρότητα της επικάλυψης ως προς το βάθος διείσδυσης όπως προκύπτει από δοκιμή νανοδιεισδύσεων. Στο διάγραμμα 2.2 παρατίθεται ο πειραματικά μετρούμενος συντελεστής ολίσθησης ως συνάρτηση της απόστασης ολίσθησης στην δοκιμή πείρου σε πλάκα για ταχύτητα 0,1 m/s. Το ένθετο διάγραμμα δείχνει τον μέσο συντελεστή ολίσθησης συναρτήσει του φορτίου για το πρώτο στάδιο και για σταθερές καταστάσεις συναρτήσει του φορτίου.



Διάγραμμα 2.1 Σκληρότητα επικάλυψης-Βάθος διείσδυσης από την εργασία των Solis κ.ά. (2016)

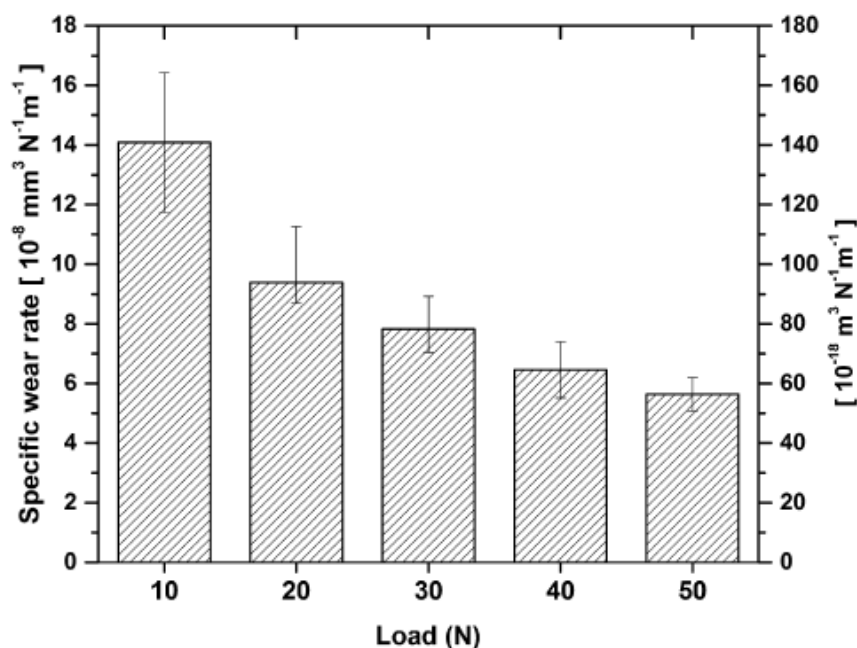


Διάγραμμα 2.2 Συντελεστής ολίσθησης-Απόσταση ολίσθησης από την εργασία των Solis κ.ά. (2016)

Η ποσοτικοποίηση της φθοράς της επικάλυψης προσδιορίζεται μέσω του υπολογισμού του ρυθμού φθοράς:

$$k=V_L/(SW) \quad (\text{mm}^3/\text{Nm})$$

όπου W: εφαρμοζόμενο φορτίο (N), S: απόσταση ολίσθησης (m) και V_L : όγκος που αποβάλλεται. Στο διάγραμμα 2.3 παρατίθεται ο ρυθμός φθοράς ως συνάρτηση του εφαρμοζόμενου φορτίου για ταχύτητα 0,1 m/s. Οι μπάρες παρουσιάζουν την τυπική απόκλιση από την μέση τιμή τριών διαφορετικών μετρήσεων.



Διάγραμμα 2.3 Ρυθμός φθοράς-Φορτίο για ταχύτητα 0,1 m/s από την εργασία των Solis κ.ά. (2016)

Από τα πειραματικά αποτελέσματα των Solis, Zhao κ.ά. παρατηρείται ότι πολύ κοντά στην εξωτερική επιφάνεια της επικάλυψης η σκληρότητα μεταβάλλεται μέχρι να σταθεροποιηθεί από βάθος 600 nm. Επίσης, ο συντελεστής τριβής εξαρτάται από την απόσταση ολίσθησης και παρουσιάζει διαφορετική κυρτότητα αναλόγως το εφαρμοζόμενο φορτίο. Ο συντελεστής φθοράς μειώνεται καθώς αυξάνεται το φορτίο.

2.3 Επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα σε ακόλουθο με τροχίσκο (roller follower)

Σε αυτή την εφαρμογή μελετάται υπολογιστικά η επίδραση επικάλυψης αδαμαντοειδούς άνθρακα (DLC) στην τριβολογική απόδοση και στην διάρκεια ζωής ακόλουθου με τροχίσκο σε σύστημα βαλβίδας (Valvetrain). Συγκεκριμένα υπολογίζεται η επίδραση της πυκνότητας και του μεγέθους των ανομοιομορφιών της επιφάνειας στις εφελκυστικές τάσεις της

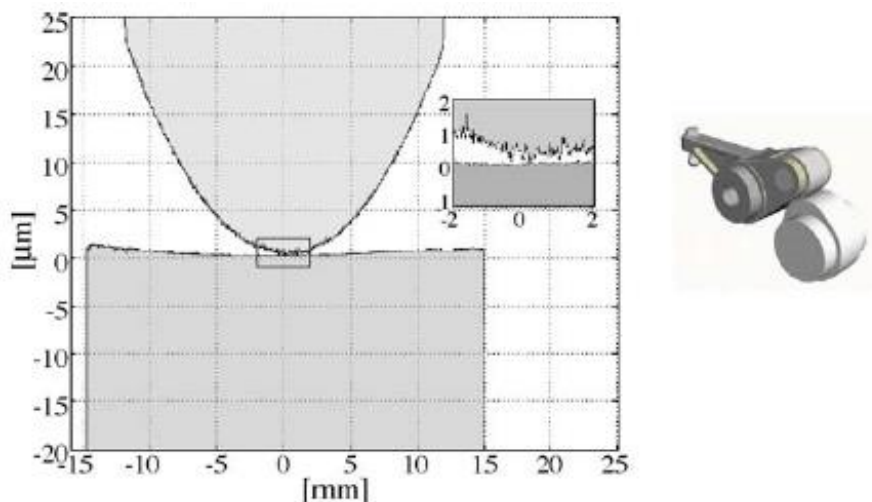
επικαλυμμένης επιφάνειας. Στην εικόνα 2.2 φαίνεται η τυπική μορφή ενός ακόλουθου με τροχίσκο κατασκευής της εταιρείας Misumi. Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζεται η κατάσταση επαφής του εκκεντροφόρου άξονα με το roller follower και στην εικόνα 2.4 αναπαριστάται σχηματικά η τραχύτητα επιφάνειας με περιοδικά κατανεμημένες ανομοιομορφίες όπως αποδίδονται στην εργασία των Lindholm, Björklund & Svahn, (2006). Λόγω της επιφανειακής τραχύτητας η μέγιστη κύρια τάση δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_1 = p_0(1-2\nu)(\alpha_0^2/3r^2)$$

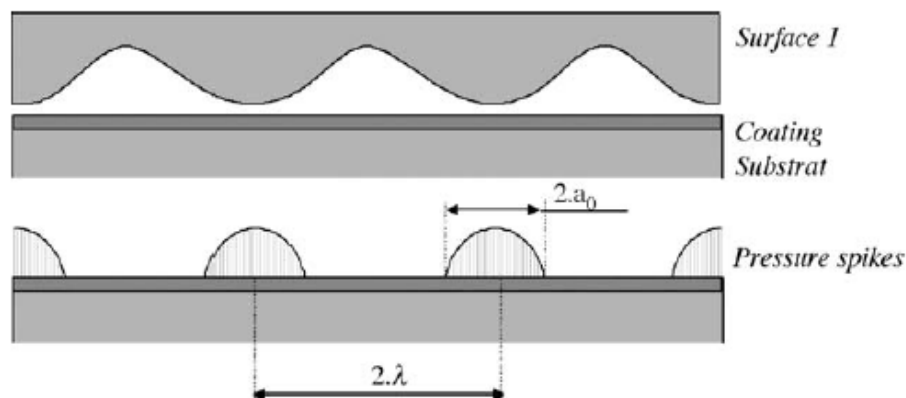
όπου p_0 : μέγιστη εξωτερική πίεση, ν : λόγος Poisson, α_0 : ακτίνα επαφής, r : ακτίνα ανομοιομορφίας.



Εικόνα 2.2 Τυπική μορφή ακόλουθου με τροχίσκο (πηγή: us.misumi-ec.com)



Εικόνα 2.3 Κατάσταση επαφής εκκεντροφόρου άξονα-ακόλουθου με τροχίσκο όπως παρουσιάζεται στην εργασία των Lindholm κ.ά. (2006)



Εικόνα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση τραχύτητας με περιοδικά κατανομημένες ανομοιομορφίες όπως παρουσιάζεται στην εργασία των Lindholm κ.ά. (2006)

Η πίεση κατανέμεται στην επιφάνεια της ανομοιομορφίας σύμφωνα με την σχέση:

$$p(r) = p_0 \sqrt{1 - \frac{r^2}{\alpha_0^2}}$$

με την μέγιστη εξωτερικά εφαρμοζόμενη πίεση (p_0) να τίθεται ίση με 1 GPa . Στους πίνακες 2.4 και 2.5 αναφέρονται οι παράμετροι του συστήματος που εισάγονται στο υπολογιστικό μοντέλο. Τα δεδομένα του πίνακα 2.4 είναι για ακτίνα επαφής α_0 μεγαλύτερου μεγέθους από το πάχος της επικάλυψης και στον πίνακα 2.5 για ακτίνα επαφής ίδιας συγκρίσιμου μεγέθους με το πάχος της επικάλυψης. Με t συμβολίζεται το πάχος της επικάλυψης, με E_c το μέτρο ελαστικότητας της επικάλυψης και με E_s το μέτρο ελαστικότητας του υποστρώματος.

Factor 1	Χαμηλή τιμή	Μέση τιμή	Υψηλή τιμή
α_0 (μm)	12	20	28
E_c/E_s	0,3	0,5	0,7
t (μm)	1	1,5	2
λ (μm)	30	50	70

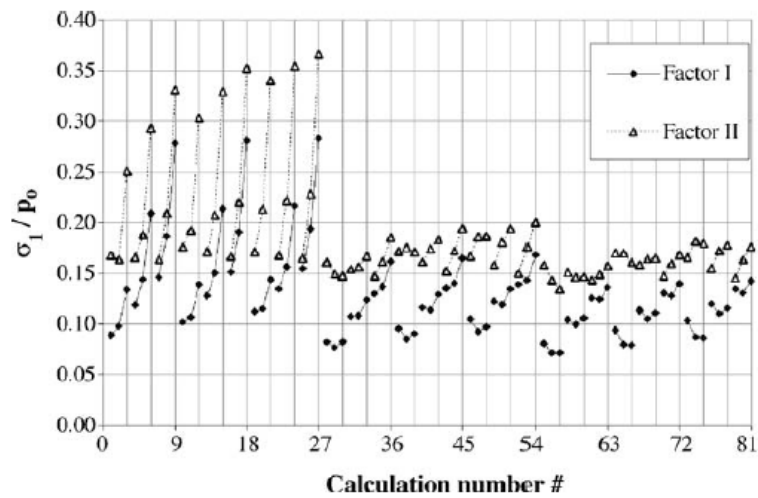
Πίνακας 2.4 Παράμετροι του συστήματος για ακτίνα επαφής μεγαλύτερου μεγέθους από το πάχος της επικάλυψης

Factor 2	Χαμηλή τιμή	Μέση τιμή	Υψηλή τιμή
α_0 (μm)	1,2	2	2,8
E_c/E_s	0,3	0,5	0,7
t (μm)	1	1,5	2
λ (μm)	3	5	7

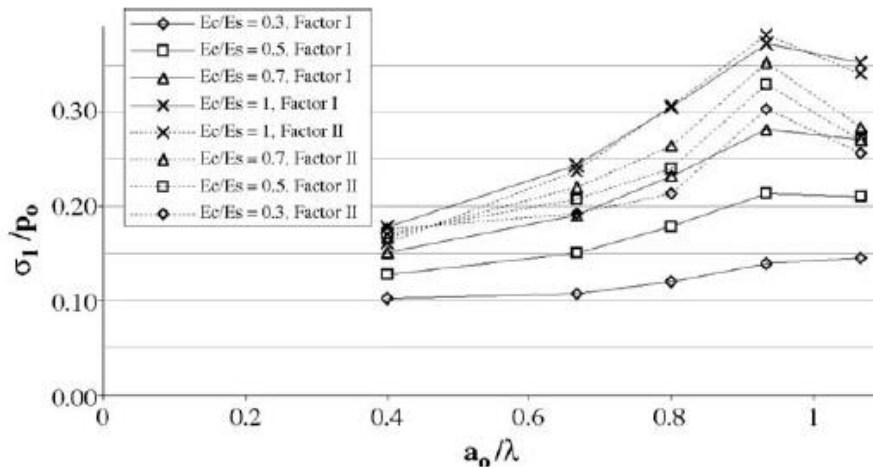
Πίνακας 2.5 Παράμετροι του συστήματος για ακτίνα επαφής συγκρίσιμου μεγέθους από το πάχος της επικάλυψης

Στο διάγραμμα 2.4 παρουσιάζεται γραφικά ο λόγος της μέγιστης ορθής τάσης (σ_1) προς την μέγιστη εξωτερικά εφαρμοζόμενη πίεση (p_0) για αυξανόμενο αριθμό επαναλήψεων και στο διάγραμμα 2.5 καταγράφεται ο ίδιος λόγος για αυξανόμενη ακτίνα επαφής α_0 όπως

καταγράφονται από τους Lindholm κ.ά (2006). Ως υπολογιστικό εργαλείο χρησιμοποιείται το Pro/Mechanica 2000i2.



Διάγραμμα 2.4 Λόγος μέγιστης ορθής τάσης (σ_1) προς την μέγιστη εξωτερικά εφαρμοζόμενη πίεση (p_0) για αυξανόμενο αριθμό επαναλήψεων από την εργασία των Lindholm κ.ά. (2006)



Διάγραμμα 2.5 Λόγος μέγιστης ορθής τάσης (σ_1) προς την μέγιστη εξωτερικά εφαρμοζόμενη πίεση (p_0) για αυξανόμενη ακτίνα επαφής a_0 από την εργασία των Lindholm κ.ά. (2006)

Παρατηρείται ότι, για μεγαλύτερο μήκος κύματος λ , ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας έχει μεγαλύτερη επίδραση στην τάση. Οι πυκνές, μικρές και αιχμηρές τραχύτητες οδηγούν σε υψηλότερες εφελκυστικές τάσεις στην επικάλυψη. Υψηλά μήκη κύματος με επίπεδα μέτωπα οδηγούν σε χαμηλές εφελκυστικές τάσεις.

Κεφάλαιο 3. Τμήματα κινητήρων με επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα

3.1 Εισαγωγή

Οι απώλειες ισχύος τριβών αντιπροσωπεύουν ένα ποσοστό των συνολικών απωλειών ισχύος στους κινητήρες των οχημάτων, οπότε η προσπάθεια ελαχιστοποίησης τους κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική λαμβάνοντας υπόψη την ευρεία χρήση αυτών των συστημάτων. Μέρη κινητήρων τα οποία επικαλύπτονται από την υπό εξέταση κατηγορία υλικών αποτελούν: τα γρανάζια του κιβωτίου των ταχυτήτων, τα κουζινέτα του στροφαλοφόρου άξονα, ο δακτύλιος του πιστονιού, τα γρανάζια του διαφορικού, η στρόφιγγα, οι βαλβίδες εισαγωγής καυσίμου, η αντλία του συστήματος εισαγωγής κ.ά. Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται μια πιο ειδική μελέτη των εφαρμογών σε στοιχεία μηχανών επικεντρώνοντας σε τμήματα κινητήρων. Στις παρακάτω υποενότητες αναλύονται οι τρεις πρώτες περιπτώσεις.

3.2 Τριβολογική συμπεριφορά σε κιβώτια ταχυτήτων υπό ελαστο-υδροδυναμική λίπανση

Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται επικαλύψεις αδαμαντοειδούς άνθρακα με βάση το ζirkόνιο (Zr). Ως υλικό υποστρώματος επιλέγεται ο χάλυβας AISI 5151 (16MnCr5) ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή γραναζιών και κιβωτίων ταχυτήτων. Το τριβολογικό προφίλ είναι υπέρθεση τριβών ολίσθησης και κύλισης.

Διαδικασία Εναπόθεσης: Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι ο διασκορπισμός μάγνητρου (magneton sputtering – MS) , υποκατηγορίας των μεθόδων φυσικής εναπόθεσης ατμού (physical vapor deposition – PVD), δυο καθόδων συνεχούς ρεύματος. Για τον καθαρισμό των επιφανειών από ακαθαρσίες χρησιμοποιείται αργό (Ar). Ως αντιδρών αέριο επιλέγεται ασετυλίνη (C₂H₂) και το ζirkόνιο παρέχεται από στόχους ζirkονίου πολύ υψηλής καθαρότητας (>99,5%). Ο θάλαμος εναπόθεσης βρίσκεται σε χαμηλή πίεση και σε θερμοκρασία 160-180°C. Τα προϊόντα που παράγονται είναι αδαμαντοειδής άνθρακας ZrCg (a:C-H/ZrCg) και νανοσύθετο a-C:H/ZrC. Στον πίνακα 3.1 παρατίθενται συνθήκες της διεργασίας που οδηγούν στην παραγωγή καθενός εκ των δύο σε μονάδα επικάλυψης CC800/9 της CemeCon AG, Wuerselen, Germany. Στον πίνακα 3.2 καταγράφονται οι ιδιότητες της επικάλυψης που προσδιορίζονται στην εργασία των Bobzin κ.ά. (2015).

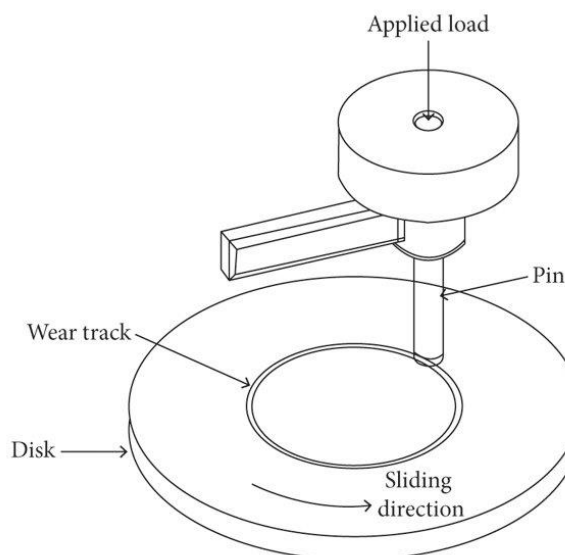
-	a:C-H/ZrCg	a-C:H/ZrC
Χρόνος (s)	9030	9030
Παροχή Αργού (l)	500 mPa (ρυθμιζόμενη μέσω πίεσης)	750 mPa (ρυθμιζόμενη μέσω πίεσης)
Παροχή Ασετυλίνης (cm ³ /min)	10-70	20-70
Πίεση (mPa)	500	750
Ισχύς συνεχούς ρεύματος (W)	2400-2000	2400
Δυναμικό εκκένωσης (V)	35-200	50-150
Συχνότητα (kHz)	250	250

Πίνακας 3.1 Παράμετροι διαδικασίας εναπόθεσης

Επικάλυψη	Σκληρότητα	Μέτρο Ελαστικότητας	Πάχος
a:C-H/ZrCg (ZrCg)	13,4±1,2	110±12	5
a-C:H/ZrC (nc-ZrC)	12±0	115±7	4,8

Πίνακας 3.2 Ιδιότητες επικαλύψεων DLC

Δοκιμή Τριβομέτρου Pin-on-disc



Εικόνα 3.1 Τριβόμετρο Pin-on-disc

(πηγή: Advances in Materials Science and Engineering Published by Hindawi)

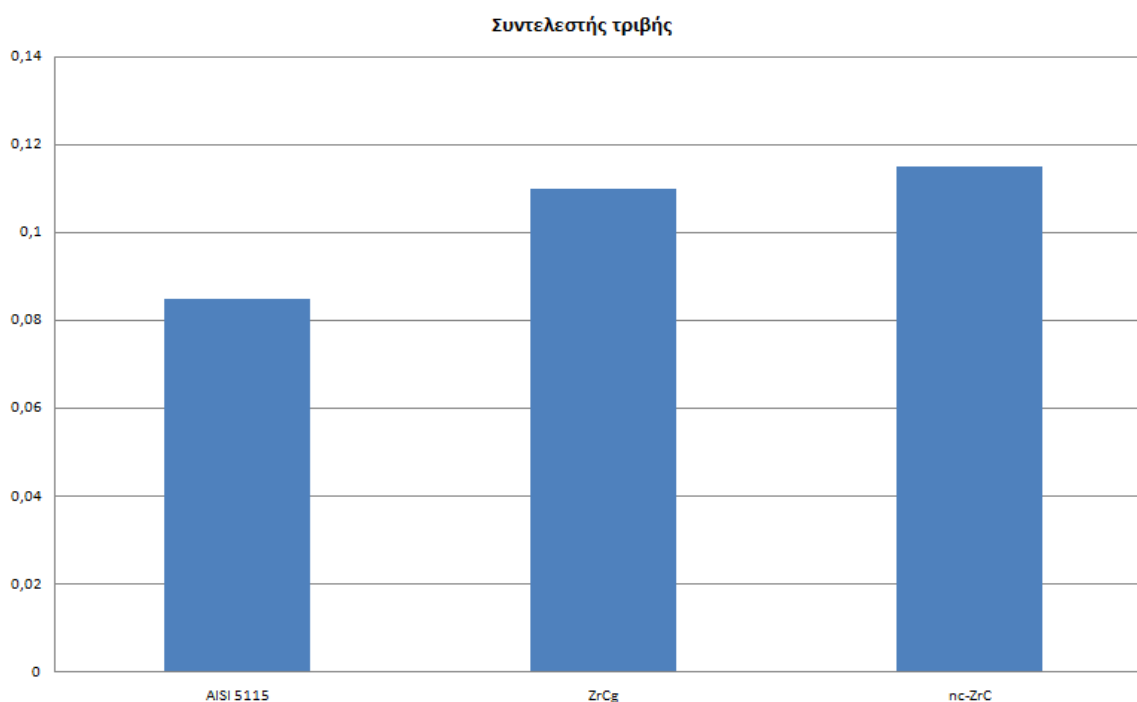
Η δοκιμή διεξάγεται σε τριβόμετρο Anton Paar Germany GmbH, Ostfildern-Scharnhausen, Germany. Στη διάταξη χρησιμοποιείται δίσκος σκληρυμένου χάλυβα AISI 5115 διαμέτρου 25 mm, επιφανειακής ποιότητας Ra=0,02 και ύψους 8 mm. Ο χαλύβδινος πείρος έχει

διάμετρο 6 mm και επιφανειακή ποιότητα $Ra=0,02$. Η σκληρότητα του δίσκου είναι 60 HRC. Στους πείρους, με επικάλυψη και χωρίς, ασκείται σταθερή δύναμη 10 N που αντιστοιχεί σε τάση 1200 MPa. Η διάταξη αυτή μετρά τον συντελεστή τριβής ολίσθησης. Ως παράγοντας λίπανσης επιλέγεται το MIN 100, το οποίο είναι πολύ κοινό σε συστήματα μετάδοσης κίνησης και κιβώτια ταχυτήτων. Στον πίνακα 3.3 φαίνονται οι παράμετροι της δοκιμής όπως διεξήχθη από τους Bobzin κ.ά. (2015).

Μέγιστη Τάση (MPa)	1200
Γραμμική Ταχύτητα (m/s)	0,1
Θερμοκρασία Λαδιού (°C)	100±5
Απόσταση (m)	1000

Πίνακας 3.3 Παράμετροι δοκιμής Pin-on-disc

Στο Διάγραμμα 3.1 παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις της προαναφερθείσας δοκιμής για τα στοιχεία χωρίς επικάλυψη, με επικάλυψη ZrCg και με επικάλυψη nc-ZrC.

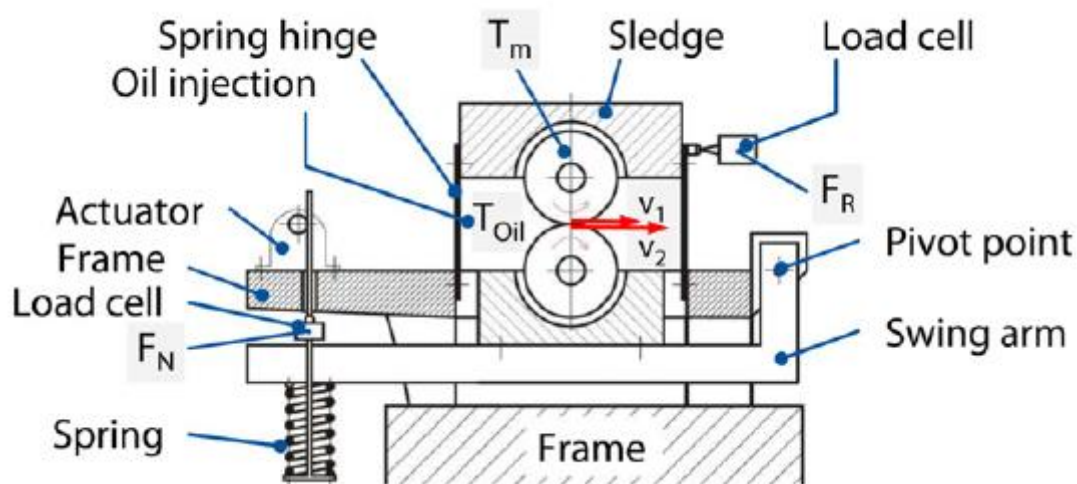


Διάγραμμα 3.1 Συντελεστές τριβής για την δοκιμή Pin-on-disc από τα αποτελέσματα των Bobzin κ.ά. (2015).

Παρατηρείται ότι η συνεισφορά της τριβής ολίσθησης είναι μικρότερη στην περίπτωση του χάλυβα χωρίς επικάλυψη. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζεται και για διαφορετικά λιπαντικά.

Twin-disc-test-rig

Σκοπός της δοκιμής αυτής είναι ο προσδιορισμός των απωλειών τριβών υπό την επίδραση λιπαντικών παραγόντων-επικάλυσης αδαμαντοειδούς άνθρακα σε κίνηση κύλισης/ολίσθησης μέσω του προσδιορισμού του συντελεστή τριβής.



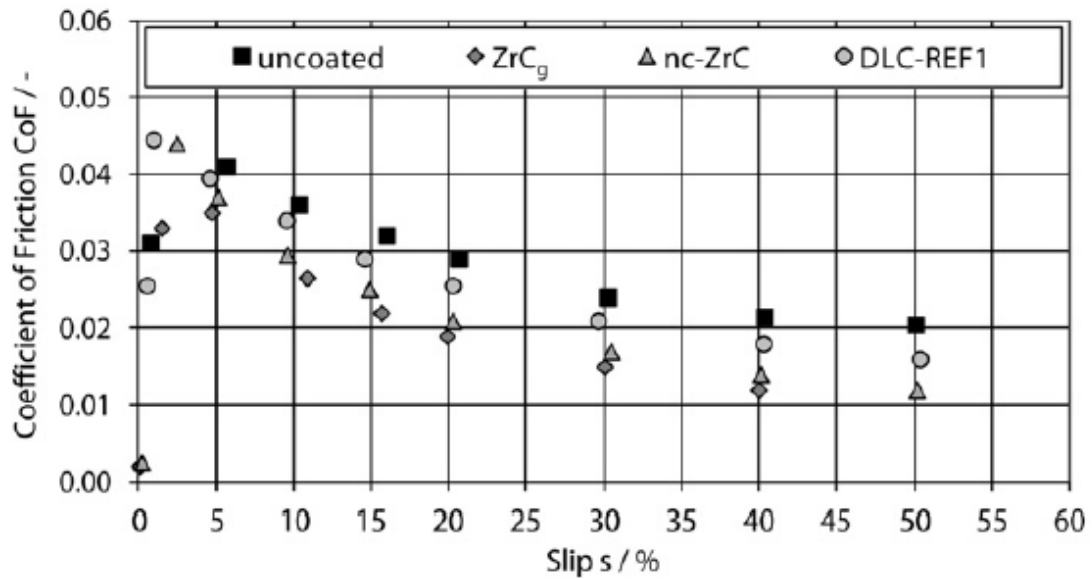
Εικόνα 3.2 Σχηματιστή αναπαράσταση δοκιμής με περιστρεφόμενο διπλό δίσκο που χρησιμοποιείται από τους Bobzin κ.ά. (2015)

Κάθε δίσκος κινείται ανεξάρτητα σε ταχύτητες 0-3500 rpm. Η απόσταση των κέντρων των αξόνων είναι 80 mm. Η σκληρότητα των δίσκων είναι 60 HRC και η επιφανειακή ποιότητα $R_a=0.03 \mu\text{m}$. Η δοκιμή αυτή προσεγγίζει σημαντικά την συμπεριφορά του πραγματικού κιβωτίου ταχυτήτων. Στον πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι λειτουργικές συνθήκες της.

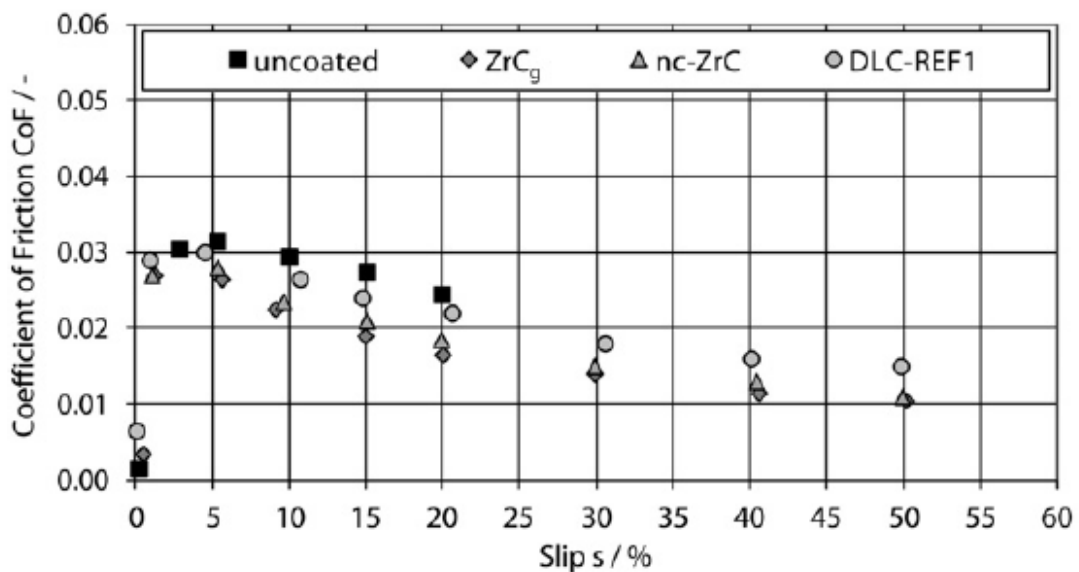
Μέγιστη τάση (MPa)	1200
Ταχύτητα δίσκου $v_{\Sigma}=v_{\delta\acute{\iota}\sigma\kappa\omicron\upsilon,1}+v_{\delta\acute{\iota}\sigma\kappa\omicron\upsilon,2}$ (m/s)	16
Ολίσθηση $s=(v_1+v_2)/v_1$ (%)	0..50
Θερμοκρασία λαδιού (°C)	40, 100

Πίνακας 3.4 Λειτουργικές συνθήκες δοκιμής με περιστρεφόμενο διπλό δίσκο

Στα διαγράμματα 3.2 και 3.3 παρουσιάζονται οι πειραματικά μετρούμενοι συντελεστές τριβής για την δοκιμή με περιστρεφόμενο διπλό δίσκο συναρτήσεως της ποσοστιαίας ολίσθησης για τις δύο διαφορετικές θερμοκρασίες λαδιού στην διάταξη του εικόνας 3.2.



Διάγραμμα 3.2 Συντελεστής τριβής-ολίσθηση κατά την δοκιμή περιστρεφόμενου διπλού δίσκου για $T_{oil}=40^{\circ}C$

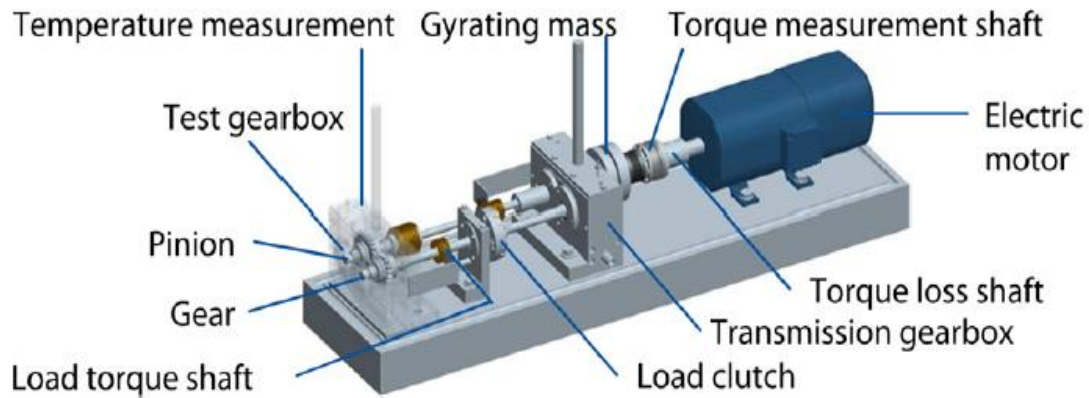


Διάγραμμα 3.3 Συντελεστής τριβής-ολίσθηση κατά την δοκιμή περιστρεφόμενου διπλού δίσκου για $T_{oil}=100^{\circ}C$

Παρατηρείται ότι όταν συμβαίνει ολίσθηση οι συντελεστές τριβών μειώνονται.

Gear efficiency test-rig

Η δοκιμή διεξάγεται για τον υπολογισμό των απωλειών τριβών κατά την επαφή των γραναζιών λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό τριβολογικό προφίλ. Αποτελεί ακριβής προσομοίωση της συμπεριφοράς του κιβωτίου ταχυτήτων. Σε συνάφεια με τα παραπάνω κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε λιπαντικό MIN 100.



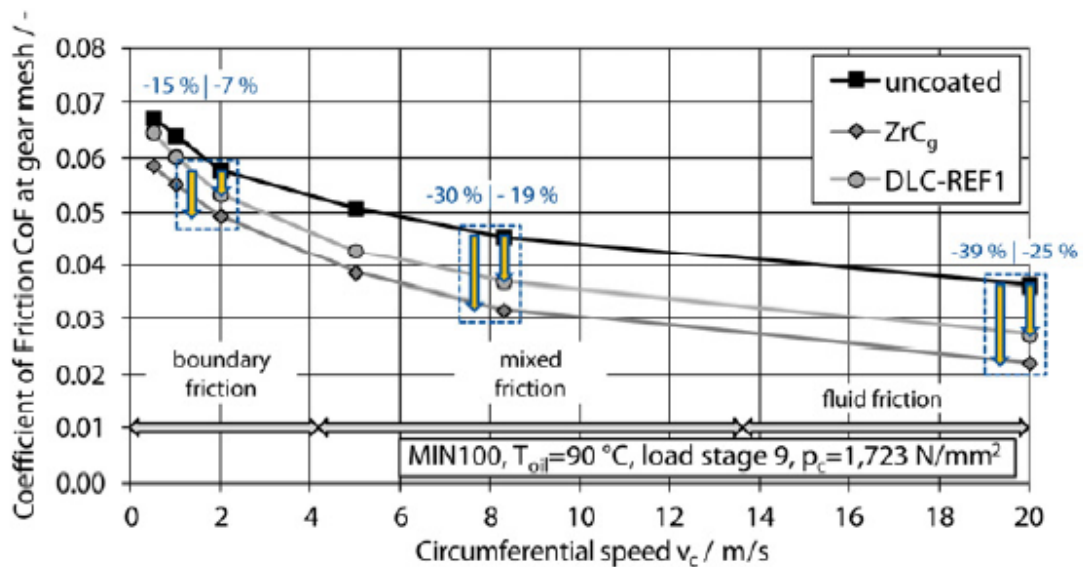
Εικόνα 3.3 Σχηματική αναπαράσταση της δοκιμής αποτελεσματικότητας γραναζιών που πραγματοποιείται στην εργασία των Bobzin κ.ά (2015)

Τα γρανάζια χαρακτηρίζονται από σκληρότητα 60 ± 2 HRC και επιφανειακή ποιότητα των τοιχωμάτων των δοντιών $Ra=0,2$ μm . Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται οι λειτουργικές συνθήκες της δοκιμής αυτής.

Τάση στον κύκλο βήματος (MPa)	1273
Περιφερειακή ταχύτητα (m/s)	0.5, 1, 2, 5, 8, 20
Θερμοκρασία λαδιού ($^{\circ}\text{C}$)	90

Πίνακας 3.5 Λειτουργικές συνθήκες δοκιμές αποτελεσματικότητας γραναζιών

Στο διάγραμμα 3.4 παρουσιάζεται ο συντελεστής τριβής συναρτήσει της περιφερειακής ταχύτητας για τις περιπτώσεις γραναζιών με επικάλυψη ZrC_g και χωρίς επικάλυψη.



Διάγραμμα 3.4 Συντελεστής τριβής-Περιφερειακή ταχύτητα για την δοκιμή αποτελεσματικότητας γραναζιών από την εργασία των Bobzin κ.ά (2015)

Από τα παραπάνω διαγράμματα των Bobzin κ.ά (2015) παρατηρείται ότι για οποιαδήποτε ταχύτητα περιστροφής και τριβολογική συνθήκη ο συντελεστής τριβών των γραναζιών με επικάλυψη είναι μικρότερος. Αναφορικά, για $v=2$ m/s συμβαίνει μείωση του συντελεστή τριβής με την χρήση αδαμαντοειδούς άνθρακα (DLC) κατά 15%. Για $v=8$ m/s εμφανίζεται 30% και για $v=20$ m/s μείωση 39%.

3.3 Τριβολογική συμπεριφορά κουζινέτων στροφαλοφόρου άξονα κινητήρα υπό ελαστο-υδροδυναμική λίπανση

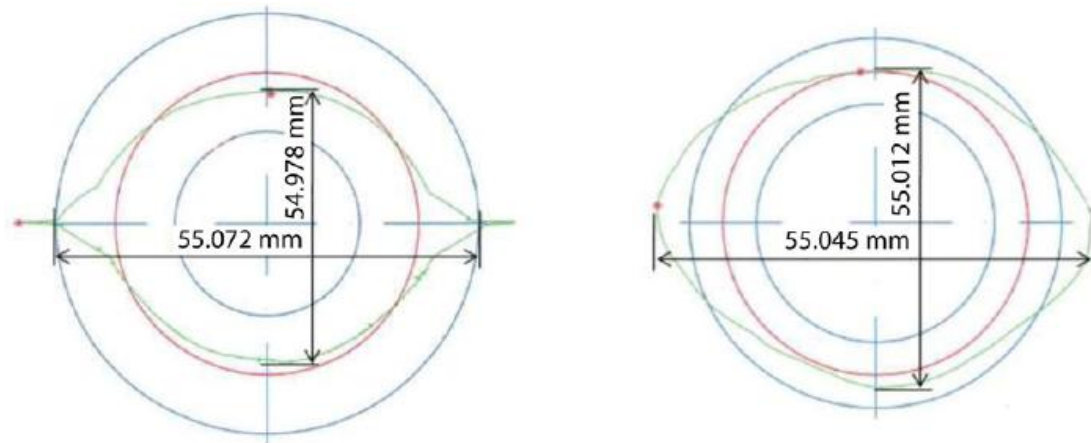
Το στροφαλοφόρο σύστημα κατασκευάζεται κοινώς από χάλυβα AISI 4137. Οπότε, το υλικό αυτό, επιλέγεται ως υπόστρωμα στο ελεγχόμενο σύστημα. Ο χάλυβας υπόκειται σε βαφή και επαναφορά ώστε η σκληρότητα του να γίνει 80 HV. Επικαλύπτεται με αδαμαντοειδή άνθρακα ZrCg (a:C-H/ZrCg) και νανοσύθετο a-C:H/ZrC. Η επικάλυψη τους γίνεται με διασκορπισμό μαγνήτρου (magnetron sputtering) με την διαδικασία που περιγράφηκε στην υποενότητα 3.2. Σκοπός της διάταξης είναι η μείωση των τριβών στις φορτιζόμενες επιφάνειες των κουζινέτων του στροφαλοφόρου άξονα. Η δοκιμή διεξάγεται σε κινητήρα τύπου M271. Στον πίνακα 3.6 καταγράφονται τα χαρακτηριστικά των δύο τύπων κουζινέτων που εξετάζονται και αναπαρίστανται στην εικόνα 3.4 για τον τύπο του κινητήρα αυτού και στον πίνακα 3.7 τα χαρακτηριστικά των επικαλύψεων όπως καταγράφονται στην εργασία των Bobzin και Brögelmann (2016).

Ιδιότητες	Στάνταρ Κουζινέτο	Πρωτότυπο Κουζινέτο
Υλικό	42CrMo4 QTP	42CrMo4 QTP
Βάθος (mm)	20	20
Γεωμετρία (mm)	550,72-54,978	55,045-55,012

Πίνακας 3.6 Χαρακτηριστικά κουζινέτων

Επικάλυψη	Πάχος (μm)	Σκληρότητα (GPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)
ZrCg	7,2	12±1	115±8
nc-ZrC	4,8	13,4±1,2	110±12

Πίνακας 3.7 Χαρακτηριστικά επικαλύψεων



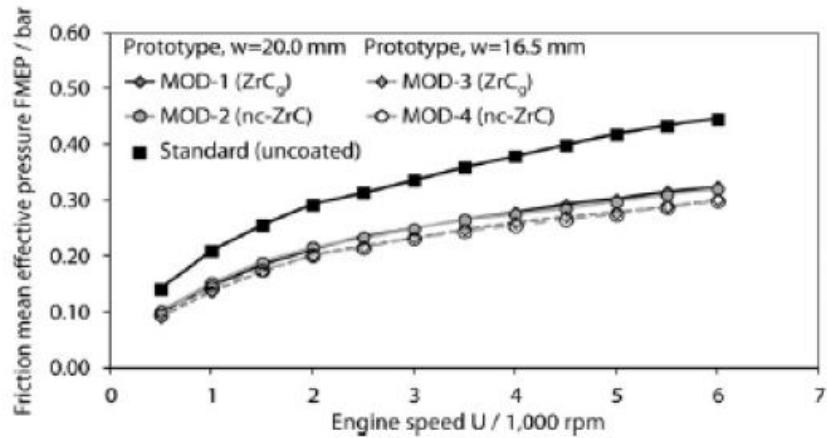
Εικόνα 3.4 Σχηματική αναπαράσταση των κουζινέτων που χρησιμοποιούνται στην εργασία των Bobzin και Brögelmann (2016)

Η δοκιμή διεξάγεται στην προαναφερθείσα μηχανή, προσδεμένη σε στάντα τράπεζα δοκιμών, με χαρακτηριστικά που αναγράφονται στον πίνακα 3.8.

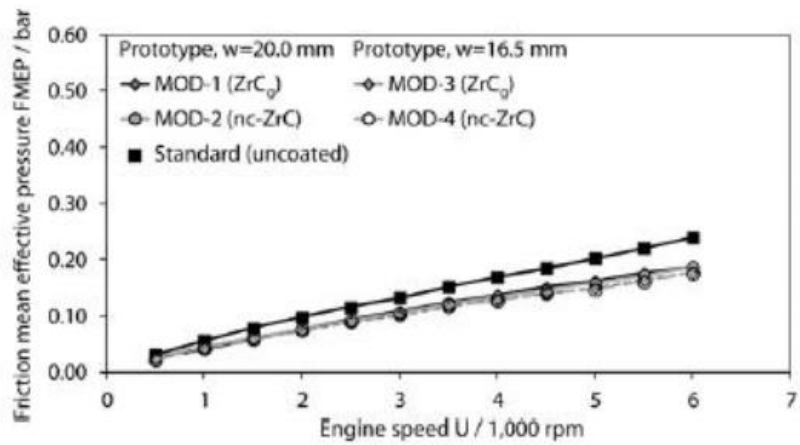
Τύπος	4-κύλινδρος βενζινοκινητήρας M271
Διάμετρος Κυλίνδρου	85 mm
Όγκος Εμβολισμού	1,8 L
Λόγος Συμπίεσσης	8.5:1
Ονοματική Ισχύς	135 kW @ 5500 rpm
Μέγιστη Ροπή	250 Nm @ 2800 rpm

Πίνακας 3.8 Χαρακτηριστικά κινητήρα

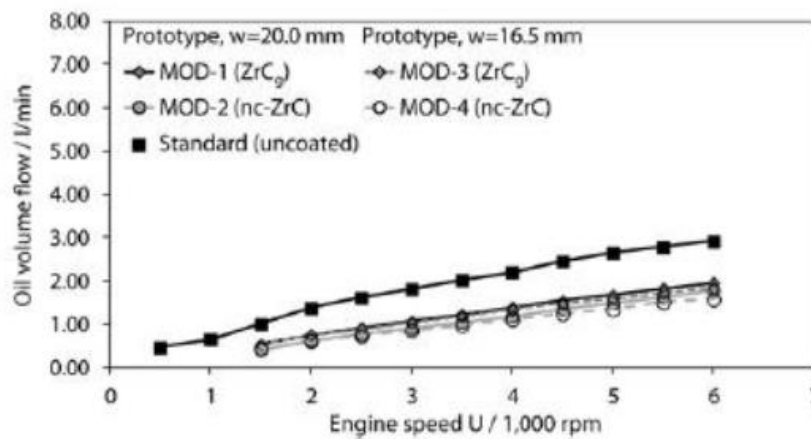
Στα διαγράμματα 3.5 και 3.6, των Bobzin και Brögelmann (2016), παρουσιάζεται η μέση πίεση τριβών (f_{mep}) συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής για θερμοκρασίες λαδιού 35°C και 90°C αντίστοιχα. Ομοίως, στο διάγραμμα 3.7 αναλύεται η παροχή λαδιού συναρτήσει των στροφών του κινητήρα για θερμοκρασία λαδιού 35°C. Στο διάγραμμα 3.8 απεικονίζεται η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία στα κουζινέτα συναρτήσει των στροφών του κινητήρα για θερμοκρασία λαδιού 35°C.



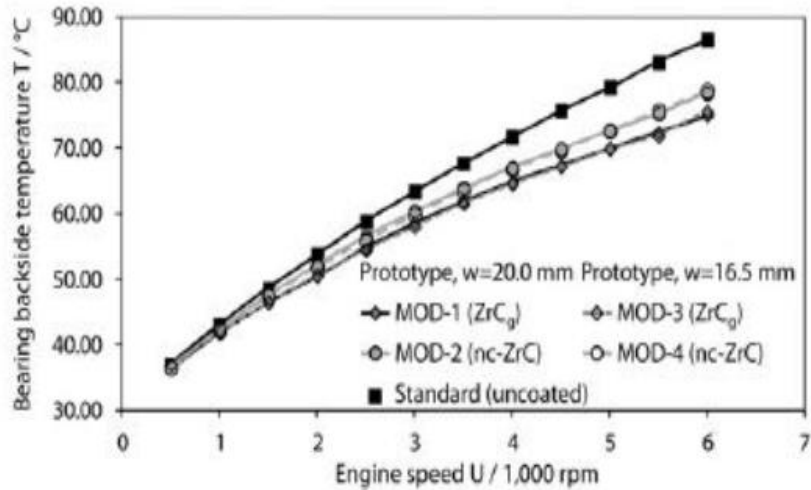
Διάγραμμα 3.5 Μέση πίεση τριβών-ταχύτητα περιστροφής μηχανής για $T_{oil}=35^{\circ}C$ από την εργασία των Bobzin και Brögelmann (2016)



Διάγραμμα 3.6 Μέση πίεση τριβών-ταχύτητα περιστροφής μηχανής για $T_{oil}=90^{\circ}C$ από την εργασία των Bobzin και Brögelmann (2016)



Διάγραμμα 3.7 Παροχή λαδιού-Στροφές κινητήρα για $T_{oil}=35^{\circ}C$ από την εργασία των Bobzin και Brögelmann (2016)



Διάγραμμα 3.8 Θερμοκρασία κουζινέτων-Στροφές κινητήρα για $T_{oil}=35^{\circ}\text{C}$ από την εργασία των Bobzin και Brögelmann (2016)

Παρατηρείται ότι με την επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα με βάση το ζirkόνιο στο σύστημα του στροφαλοφόρου άξονα συμβαίνει σημαντική αναβάθμιση της διάταξης. Και για τις δύο περιπτώσεις κουζινέτων για τις διαφορετικές επικαλύψεις οι απώλειες πίεσης τριβών είναι μικρότερες από ότι στο στοιχείο χωρίς επικάλυψη. Η επικάλυψη με ZrCg παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα. Επίσης, η χρήση των επικαλύψεων μειώνει σημαντικά την απαιτούμενη παροχή λαδιού καθιστώντας την λειτουργία του οχήματος πιο οικονομική και πιο οικολογική. Παρομοίως, η επικάλυψη ZrCg απαιτεί χαμηλότερη παροχή. Τέλος, με την χρήση των επικαλύψεων η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία των κουζινέτων μειώνεται με την διαφορά να γίνεται σημαντική στις υψηλές στροφές. Το στοιχείο με επικάλυψη nc-ZrC αναπτύσσει υψηλότερες θερμοκρασίες από το στοιχείο με επικάλυψη ZrCg.

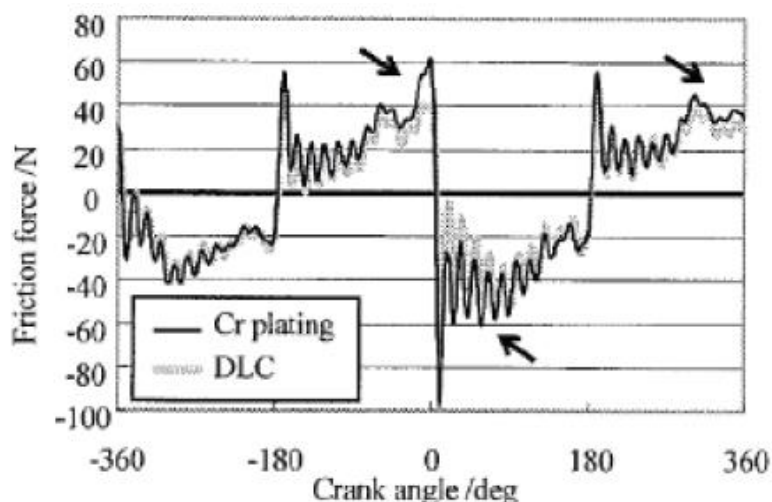
3.4 Τριβολογική συμπεριφορά στο δακτύλιο πιστονιού

Στους δακτυλίους των πιστονιών αναπτύσσονται σημαντικές τριβές κατά την λειτουργία της μηχανής και κατά συνέπεια θερμοκρασίες, καταπονώντας την κατασκευή και πιθανώς οδηγώντας της σε αστοχία. Οπότε, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική η προσπάθεια μείωσης τους.

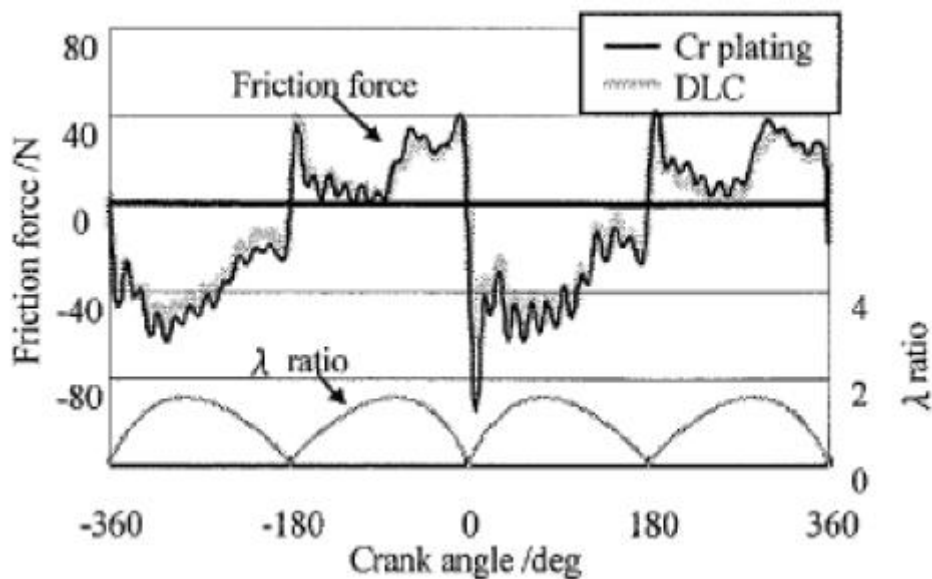


Εικόνα 3.5 Σχηματική αναπαράσταση τυπικού πιστονιού (πηγή: Hollywood Chrysler Jeep)

Στην υποενότητα αυτή μελετάται η επίδραση της επικάλυψης αδαμαντοειδούς άνθρακα (DLC) στις αναπτυσσόμενες τριβές στα compression και oil rings συγκρινόμενες με τις παραγόμενες σε αντίστοιχο πιστόνι με συμβατική επένδυση επίστρωση χρωμίου (Cr). Επιλέγεται η επικάλυψη των δακτυλίων του πιστονιού με τετραεδρικό αδαμαντοειδή άνθρακα (ta-C). Η εναπόθεση γίνεται με επίστρωση ιόντων τόξου. Στην δομή αυτή επικρατεί η μικροδομή του διαμαντιού και το υλικό αυτό εμφανίζει την μέγιστη σκληρότητα, αντοχή και διακρίνεται από την πιο λεία επιφάνεια. Για τον προσδιορισμό των τριβών διεξάγεται στατική δοκιμή εκκίνησης μονοκύλινδρης βενζινομηχανής. Η μηχανή λιπαίνεται με κοινό λάδι βενζινομηχανής. Στο διάγραμμα 3.9 παρουσιάζεται η παραγόμενη τριβή μεταξύ πιστονιού και διαμέτρου του κυλίνδρου στο compression ring σε κάθε σημείο του κύκλου λειτουργίας και στο διάγραμμα 3.10 παρουσιάζεται το αντίστοιχο φαινόμενο στο oil ring με λ να είναι το σχετικό πάχος του στρώματος λίπανσης όπως εμφανίζονται στην εργασία του Kano (2014). Ως σχετικό πάχος στρώματος λίπανσης (λ) ορίζεται ο λόγος του ελάχιστου πάχους στρώματος προς την επιφανειακή τραχύτητα των πλευρών του πιστονιού.



Διάγραμμα 3.9 Τριβή-Γωνία στροφάλου στο compression ring από τον Kano (2014)



Διάγραμμα 3.10 Τριβή-Γωνία στροφάλου στο oil ring από την εργασία του Kano (2014)

Παρατηρείται ότι η χρήση επικάλυψης αδαμαντοειδούς άνθρακα (DLC) μειώνει σε κάθε περίπτωση τις αναπτυσσόμενες τριβές. Η λίπανση αμβλύνει την διαφορά στην περιοχή που υπάρχει. Στο compression ring η διαφορά είναι αρκετά σημαντική με τις μέγιστες εμφανιζόμενες τριβές να είναι σημαντικά μικρότερες.

3.5 Συμπεράσματα

Η χρήση επικάλυψης αδαμαντοειδούς άνθρακα (DLC) προσφέρει σημαντική μείωση στις απώλειες ισχύος σε γρανάζια και τμήματα κινητήρων. Η εφαρμογή τους κρίνεται κρίσιμη, εκ του αποτελέσματος, για τον σχεδιασμό συστημάτων παραγωγής ισχύος και μετάδοσης κίνησης υψηλής απόδοσης. Η μείωση των τριβών για το σύστημα του κιβωτίου ταχυτήτων και των κουζινέτων του στροφαλοφόρου άξονα συμβαίνει μέχρι και κατά το 1/3. Ο αδαμαντοειδής άνθρακας προστατεύει από την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών και φθοράς στα παραπάνω συστήματα. Έτσι αυξάνονται η διάρκεια ζωής, η αξιοπιστία και το κόστος λειτουργίας των κινητήρων. Εν κατακλείδι, η τεχνολογία αυτή δύναται να συνδράμει στην σύγχρονη επιτακτική ανάγκη για βελτιστοποίηση της απόδοσης των συμβατικών κινητήρων. Σημειώνεται ότι οι θερμοκρασίες που επικρατούν στον θάλαμο επικάλυψης (760-180°C) δεν επηρεάζουν τις ιδιότητες του σκληρυμένου χάλυβα υποστρώματος.

Κεφάλαιο 4. Κατεργασίες Κοπής με επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα

4.1 Εισαγωγή

Οι κατεργασίες κοπής αποτελούν την πιο ευρέως διαδεδομένη κατηγορία διεργασιών επεξεργασίας στερεών υλικών. Παράμετροι ελέγχου είναι η ποιότητα των προϊόντων όπως η τραχύτητα των επιφανειών και η διαστατική ακρίβεια καθώς και τα μεγέθη που καθορίζουν την αποτελεσματική λειτουργία του κοπτικού εργαλείου όπως οι δυνάμεις κοπής, η επιφανειακή φθορά και η διάρκεια ζωής του. Η υψηλή σκληρότητα, ο χαμηλός συντελεστής τριβής, η υψηλή θερμική αγωγιμότητα και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής καθιστούν τον αδαμαντοειδή άνθρακα κατάλληλο για χρήση σε κοπτικά εργαλεία. Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμές κατεργασιών κοπής, αντλούμενα από την βιβλιογραφία, που αποδεδειγμένα παρουσιάζουν κατάλληλη συνάφεια της επικάλυψης με τα εκάστοτε υποστρώματα και βελτιώνουν τα υπό μελέτη χαρακτηριστικά του εργαλείου και τεμαχίου. Αυτές οι εφαρμογές κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες: φρεζάρισμα, τórνευση και διάτρηση.

4.2 Κατεργασία Φρεζαρίσματος

Η κατεργασία του φρεζαρίσματος αποτελεί την κοινότερη κατεργασία κοπής. Εφαρμόζεται για πλήθος γεωμετριών κατεργαζόμενων τεμαχίων. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της κρίνεται καίρια για την βιομηχανία κατασκευής εξαρτημάτων. Σε αυτήν την υποενοότητα τα επενδυμένα κοπτικά εργαλεία είναι καρβίδια και σκληρομέταλλα (cemented carbides). Αναλύονται κοπές κραμάτων αλουμινίου και του κράματος Inconel 718 (με βάση το νικέλιο εμπλουτισμένο με κύριο κραματικό στοιχείο το χρώμιο). Τα κράματα αλουμινίου, που εξετάζονται, με κύρια κραματικά στοιχεία τα πυρίτιο, χαλκό και μαγνήσιο χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία και ναυπηγική αντίστοιχα. Η διατήρηση της αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες του Inconel 718 το καθιστά κατάλληλο για την κατασκευή μηχανών αεριοπρώθησης αέρια και διαστημικά οχήματα.

Κράματα Αλουμινίου

Για την επεξεργασία κραμάτων αλουμινίου τα κοπτικά εργαλεία κατασκευάζονται από καρβίδιο βολφραμίου «τσιμεντομένο» σε κοβάλτιο (WC-Co). Η εναπόθεση της επικάλυψης γίνεται με εκκένωση τόξου σε κενό με κάθοδο γραφίτη υψηλής καθαρότητας. Ο τύπος αδαμαντοειδούς άνθρακα που διαμορφώνεται είναι μη υδρογονούχος άμορφος. Η εφαρμογή επικαλύψεων αδαμαντοειδούς άνθρακα στα κράματα αλουμινίου καλύπτει την ανάγκη χρήσης λίπανσης των εργαλείων χωρίς επικάλυψη. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα κατεργαζόμενα τεμάχια κράματος αλουμινίου που εξετάζονται και οι χημικές τους συστάσεις.

Κράμα
Si-Al (22% Al – εξισορρόπηση Si)
Si-Al (σε ίσες περιεκτικότητες)
Μπρούτζινο Αλουμίνιο (9-15%Al, 3-5%Fe, 1-2,5Ni, 1-2,5Mn, ίχνη Ti-B-Pb, εξισορρόπηση Cu)
AlMg2.5
AlCu4.5Si12

Πίνακας 4.1 Εξεταζόμενα τεμάχια κραμάτων αλουμινίου

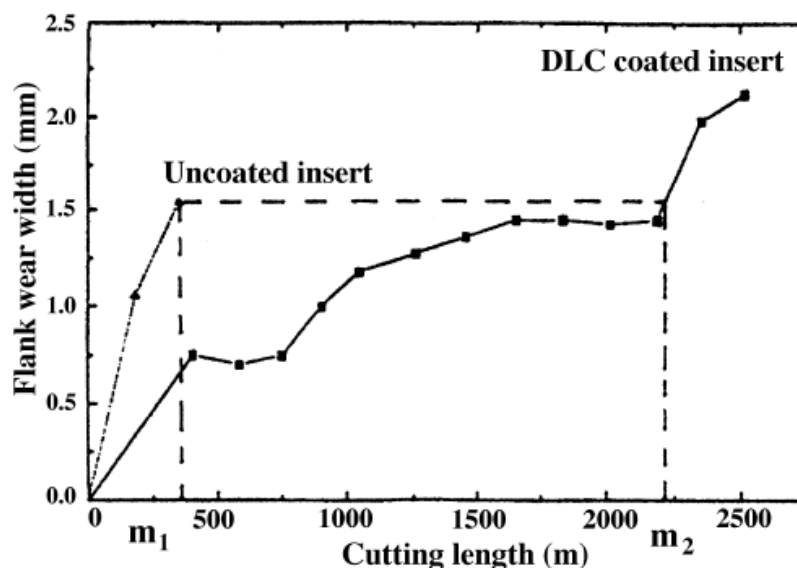
Στα κράματα Si-Al και μπρούτζινο αλουμινίου γίνεται εναπόθεση ενδιάμεσου στρώματος Ti/TiC για την επίτευξη αποτελεσματικής προσκόλλησης των επιφανειών. Χωρίς αυτό οι επιφάνειες αποκολλούνται αυτόματα. Τα πειράματα κοπής τους διεξάγονται σε γραμμή παραγωγής πιστονιών. Για αυτά τα υλικά, μελετάται η επίδραση της επικάλυψης στην διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων. Για τα κράματα AlMg2.5 και AlCu4.5Si12 διεξάγεται πειραματική μελέτη των τριβολογικών ιδιοτήτων της επικάλυψης.

Κοπή κραμάτων αλουμινίου-πυριτίου (Si-Al)

Στον πίνακα 4.2 καταγράφονται οι συνθήκες κοπής του μπρούτζινο αλουμινίου και στο διάγραμμα 4.1 μετριέται η πλευρική φθορά του κοπτικού εργαλείου με το μήκος κοπής σύμφωνα με την εργασία των Dai, Zhou, Yuan, Ding, & Fu (2000).

Ταχύτητα Κοπής (m/min)	113
Πρόωση (mm/στροφή)	0,21
Βάθος Κοπής (mm)	0,5
Περιβάλλον	Ξηρό

Πίνακας 4.2 Συνθήκες κοπής κραμάτων μπρούτζινο αλουμινίου



Διάγραμμα 4.1 Πλευρική φθορά κοπτικού εργαλείου-Μήκος κοπής κατά την κοπή μπρούτζινο αλουμινίου από την εργασία των Dai κ.ά. (2000)

Στον πίνακα 4.3 καταγράφονται οι συνθήκες κοπής του κράματος πυριτίου-αλουμινίου ίσων περιεκτικοτήτων της δοκιμής των Dai κ.ά. (2000)

Ταχύτητα Κοπής (m/min)	220
Πρόωση (mm/στροφή)	0,4
Βάθος Κοπής (mm)	1,95-4,25
Περιβάλλον	Ξηρό

Πίνακας 4.3 Συνθήκες κοπής κραμάτων μπρούτζινου αλουμινίου

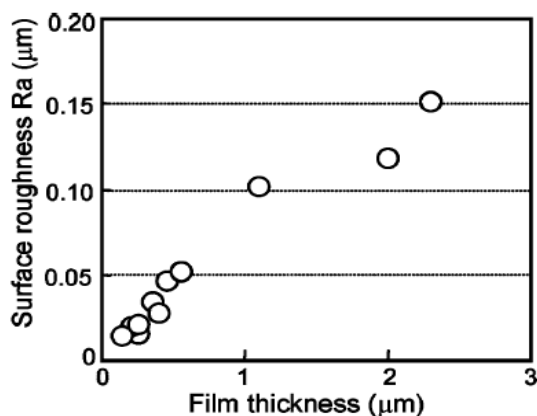
Ο αριθμός των τεμαχίων που εξεργάστηκαν σε αυτήν την περίπτωση αυξήθηκε κατά 150%. Στην περίπτωση κοπής του μπρούτζινο αλουμινίου το εργαλείο με επικάλυψη καταλήγει στην ίδια φθορά με το χωρίς επικάλυψη εργαλείο σε επταπλάσιο μήκος κοπής. Για το κράμα Si-22%Al δεν παρατηρείται πλεονέκτημα από την χρήση επικάλυψης αδαμαντοειδούς άνθρακα.

Κράματα AlMg2.5 και AlCu4.5Si12

Για τον προσδιορισμό των τριβολογικών ιδιοτήτων των κραμάτων AlMg2.5 και AlCu4.5Si12 διεξάγονται δοκιμές πείρου-σε-δίσκο και φρεζάρισμα. Στον πίνακα 4.4 καταγράφονται οι ιδιότητες της επικάλυψης και στο διάγραμμα 4.2 η εμφανιζόμενη επιφανειακή τραχύτητα ως συνάρτηση του πάχους της επικάλυψης όπως μετρούνται στην εργασία των Fukui, Okida, Omori, Moriguchi & Tsuda (2004).

Σκληρότητα (GPa)	59
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	532
Περιεκτικότητα σε H ₂	<4%

Πίνακας 4.4 Ιδιότητες επικάλυψης DLC



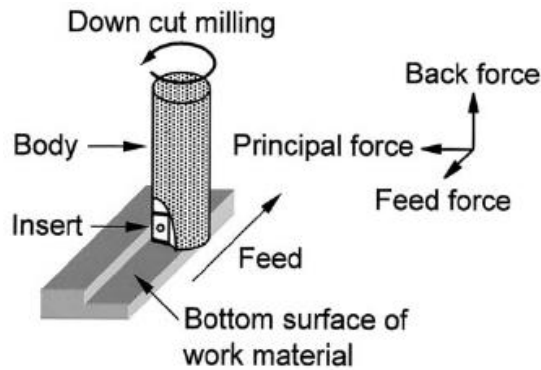
Διάγραμμα 4.2 Επιφανειακή τραχύτητα ως συνάρτηση του πάχους της επίστρωσης από την εργασία των Fukui κ.ά. (2004)

Κατά την δοκιμή πείρου-σε-δίσκο, ο δίσκος αποτελείται από υπόστρωμα σκληρομετάλλου WC-Co επενδυμένο με DLC. Η εργαζόμενη επιφάνεια έχει υποστεί λείανση με αποτέλεσμα η επιφανειακή τραχύτητα να είναι 0,001 μm. Ο εργαζόμενος πείρος είναι σφαιρικής γεωμετρίας διαμέτρου 6 mm με εφαρμοζόμενο φορτίο 1 N. Η δοκιμή διεξάγεται σε θερμοκρασία 193 K με σχετική υγρασία 65%. Η ταχύτητα περιστροφής της σφαιρικής

γεωμετρίας είναι 500 rev/min με ακτίνα διαδρομής 1 mm. Η δοκιμή διαρκεί 20 λεπτά (10000 περιστροφές). Στον πίνακα 4.5 καταγράφονται οι συνθήκες διεξαγωγής της κατεργασίας κοπής των Fukui κ.ά. (2004).

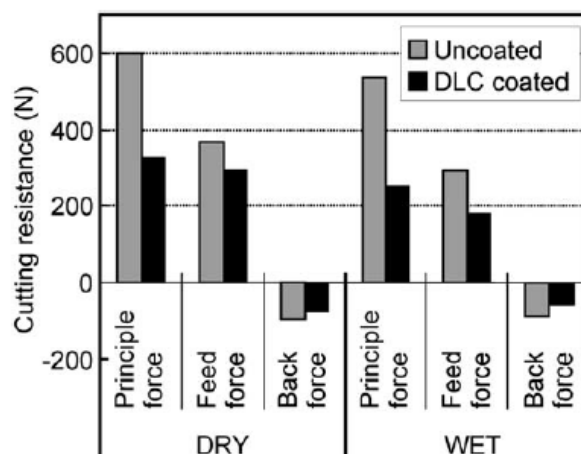
Κύρια ταχύτητα κοπής (m/min)	300
Πρόωση (mm/rev)	0,15
Αξονικό βάθος κοπής (mm)	5
Ακτινικό βάθος κοπής (mm)	5

Πίνακας 4.5 Παράμετροι κατεργασίας κοπής

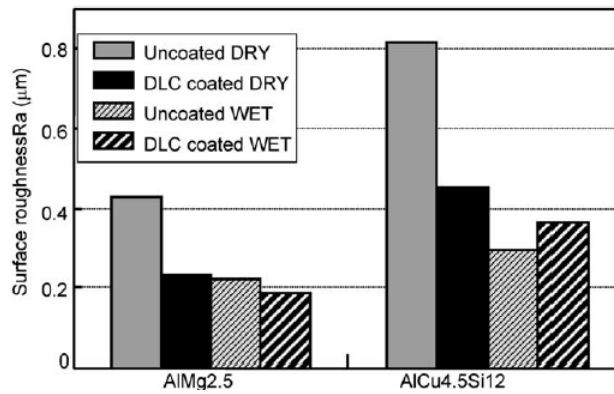


Εικόνα 4.1 Σχηματική αναπαράσταση κατεργασίας φρεζαρίσματος που χρησιμοποιούν οι Fukui κ.ά. (2004)

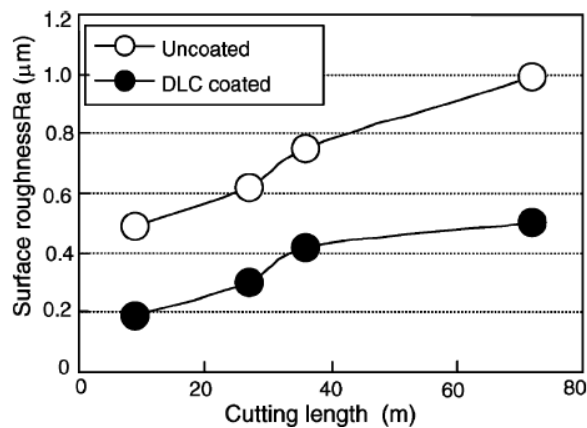
Στο διάγραμμα 4.3 παρουσιάζονται οι δυνάμεις κοπής κατά το φρεζάρισμα του κράματος AlMg2.5 για κοπτικά εργαλεία με και χωρίς επικάλυψη για ξηρό και υγρό περιβάλλον. Οι τιμές των δυνάμεων παρουσιάζονται ως η μέση τιμή των μετρήσεων για τρεις οδόντες κατά την κοπή. Στο διάγραμμα 4.4 παρατίθεται η μετρούμενη επιφανειακή τραχύτητα για κάθε τύπο κατεργαζόμενου υλικού και συνθήκης λίπανσης. Στο διάγραμμα 4.5 καταγράφεται η διαφοροποίηση της επιφανειακής τραχύτητας με το μήκος κοπής κατά το φρεζάρισμα του κράματος AlCu4.5Si12 σε ξηρό περιβάλλον.



Διάγραμμα 4.3 Δυνάμεις κοπής κατά το φρεζάρισμα από την εργασία των Fukui κ.ά. (2004)



Διάγραμμα 4.4 Επίδραση της επικάλυψης DLC στην επιφανειακή τραχύτητα για ξηρό περιβάλλον και με λίπανση από την εργασία των Fukui κ.ά. (2004)



Διάγραμμα 4.5 Επιφανειακή τραχύτητα-Μήκος κοπής κατά το φρεζάρισμα AlCu4.5Si12 σε ξηρό περιβάλλον από την εργασία των Fukui κ.ά. (2004)

Από τα παραγόμενα αποτελέσματα των Fukui κ.ά. (2004) γίνεται φανερό ότι με την χρήση επικάλυψης αδαμαντοειδούς άνθρακα οι κύριες δυναμεις κοπής μειώνονται κατά το ήμισυ. Παρόμοια μείωση επιδεικνύει και η επιφανειακή τραχύτητα και στα δύο κράματα. Παράλληλα, λόγω της χαμηλής τραχύτητας αποφεύγεται η διαμόρφωση ψευδοκοπής. Τέλος, η προσομοίωση δείχνει χαμηλότερες αναπτυσσόμενες δυνάμεις και θερμοκρασίες.

Κοπή Inconel 718

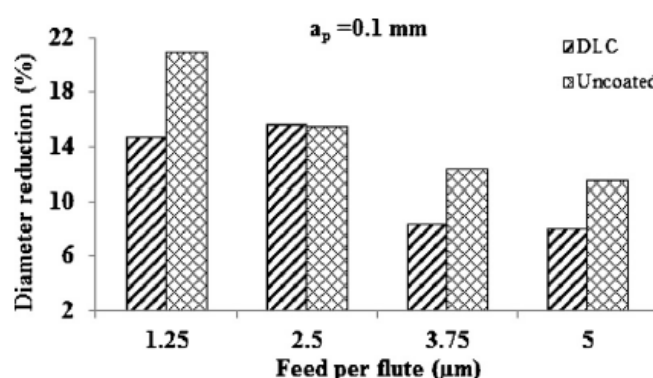
Σε αυτήν την εφαρμογή μελετάται η κατεργασιμότητα του Inconel 718 με επένδυση αδαμαντοειδούς άνθρακα σε κοπτικό εργαλείο καρβιδίου σε ξηρό περιβάλλον για διαφορετικές προώσεις και βάθη κοπής κατά το μικροφρεζάρισμα. Η περαιτέρω επεξεργασία των επιφανειών μετά το μικροφρεζάρισμα είναι δύσκολη οπότε κρίνεται σημαντική η παραγωγή επιφανειών με βέλτιστες παραμέτρους. Στον πίνακα 4.6

καταγράφονται κάποιες μηχανικές ιδιότητες του Inconel 718 που κατεργάζεται στην εργασία των Uzun, Aslantas & Bedir (2015).

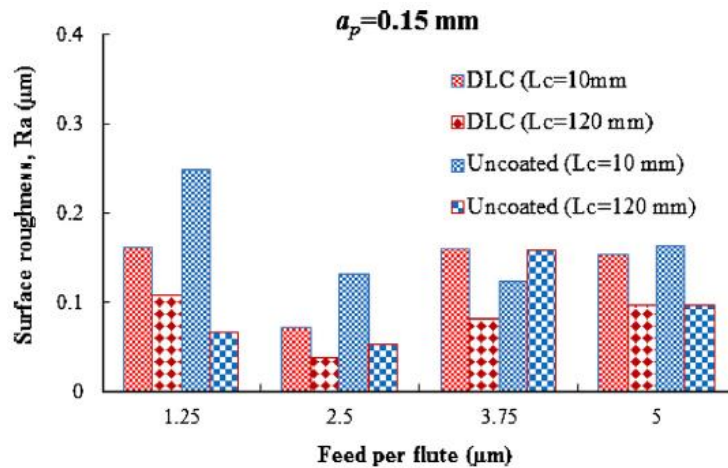
Σκληρότητα (HRC)	46
Όριο θράυσης (MPa)	1344
Όριο διαρροής (MPa)	1137
Μέγιστη παραμόρφωση (%)	21
Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	11,4
Πυκνότητα (g/cm ³)	8,2

Πίνακας 4.6 Μηχανικές ιδιότητες για το Inconel 718

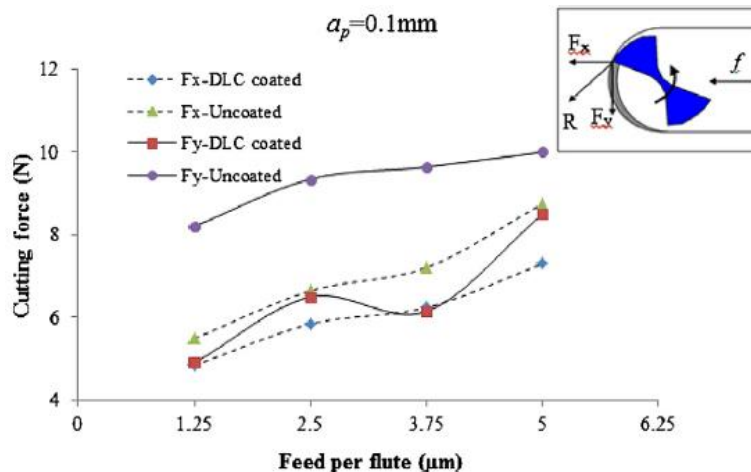
Η μικροκοπή διεξάγεται σε διάταξη με ακτίνα κοπτικού εργαλείου 760 μ m, δύο οδόντες, γωνία έλικας 30°, γωνία αποβλήτου $\alpha=0$ και γωνία ελεύθερης επιφάνειας $\gamma=6^\circ$. Το πάχος της επικάλυψης είναι 1 μ m. Η κύρια ταχύτητα κοπής είναι 20000 rpm. Συνήθης αστοχία κατά την κατεργασία αυτή είναι η πλευρική φθορά των δοντιών του κοπτικού εργαλείου και η αποκόλληση κομματιών από την ακμή του εργαλείου. Η φθορά προσδιορίζεται από την μείωση της διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου. Μετράται με σάρωση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM) και με παρατήρηση των κατεργασμένων επιφανειών. Στο διάγραμμα 4.6 καταγράφεται η ποσοστιαία μείωση της διαμέτρου σε σχέση με την πρόωση ανά οδόντα για βάθος κοπής 0,1 mm για κοπτικά εργαλεία με και χωρίς επικάλυψη. Στο διάγραμμα 4.7 παρουσιάζεται η επιφανειακή τραχύτητα συναρτήσει της πρόωσης ανά οδόντα για βάθος κοπής 0,15 mm και διαφορετικά μήκη κοπής για κοπτικά με και χωρίς επικάλυψη. Στο διάγραμμα 4.8 διακρίνονται οι δυνάμεις κοπής σε συνάρτηση της πρόωσης ανά οδόντα για μήκος κοπής 10 mm, βάθος κοπής 0,1 mm για εργαλεία με επικάλυψη και χωρίς όπως καταγράφονται από τους Uzun κ.ά. (2015).



Διάγραμμα 4.6 Μείωση διαμέτρου-Πρόωση ανά οδόντα για βάθος κοπής 0,1 mm από την εργασία των Uzun κ.ά. (2015)



Διάγραμμα 4.7 Επιφανειακή τραχύτητα- Πρόωση ανά οδόντα για βάθος κοπής 0,15 mm και μήκη κοπής 10 και 120 mm από την εργασία των Uzun κ.ά. (2015)



Διάγραμμα 4.8 Δυνάμεις κοπής- Πρόωση ανά οδόντα για βάθος κοπής 0,1 mm από την εργασία των Uzun κ.ά. (2015)

Παρατηρείται ότι με την εφαρμογή επικάλυψης αδαμαντοειδούς άνθρακα οι δυνάμεις κοπής που ασκούνται στο κοπτικό εργαλείο μειώνονται σημαντικά. Η φθορά του κοπτικού εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά ειδικά για μικρές και μεγάλες προώσεις. Η επιφανειακή ποιότητα των προϊόντων βελτιώνεται επίσης σε μικρότερο όμως βαθμό με την αύξηση της πρόωσης.

4.3 Κατεργασία Τόρνευσης

Η τόνρευση αποτελεί μια από τις βασικότερες κατεργασίες κοπής. Κατεργάζεται κυρίως τεμάχια κυκλικής διατομής και πιο περίπλοκες διατομές μόνο μετωπικά. Σε αυτήν την υποενότητα γίνεται αναφορά στην μελέτη εφαρμογών επικάλυψης αδαμαντοειδούς

άνθρακα (DLC) σε διάφορα υποστρώματα κατά την κατεργασία κοπής της τόννευσης και των χαρακτηριστικών και συγκριτικών πλεονεκτημάτων τους έναντι των συμβατικών εργαλείων κοπής χωρίς επικάλυψη. Παρουσιάζεται η εφαρμογή επικάλυψης κοπτικού εργαλείου υποστρώματος κεραμικού υλικού $Al_2O_3/TiCN$ στην κατεργασία σκληρυμένου χάλυβα AISI 52100 το οποίο αποτελεί κατασκευαστικό υλικό τμημάτων μηχανών και συστημάτων μετάδοσης κίνησης. Επίσης, αναλύονται η κατεργασία κράματος Al 7075, δομικού υλικού τμημάτων αεροσκαφών και η κατεργασία πλαστικού ενισχυμένου με ίνες γυαλιού (GFRP) με ποικίλες εφαρμογές σε κατασκευές δεξαμενών και μερών οχημάτων.

Κοπή σκληρυμένου χάλυβα 52100

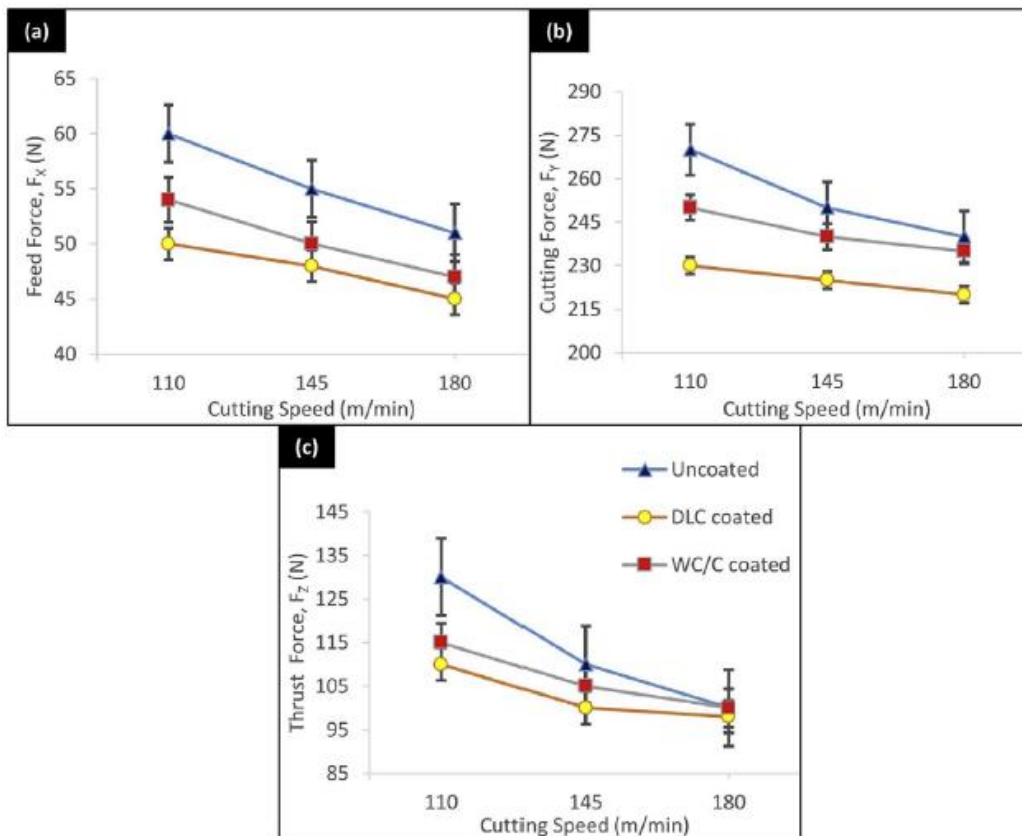
Γίνεται μελέτη της εφαρμογής επικάλυψης αδαμαντοειδούς άνθρακα σε υπόστρωμα $Al_2O_3/TiCN$ κεραμικού υλικού στην τόννευση χάλυβα AISI 52100 σκληρότητας 62 HRC. Η εναπόθεση της επικάλυψης συμβαίνει με διασκορπισμό (sputtering). Το πάχος της προσδιορίζεται ότι είναι 2 μm σε κάθε περίπτωση της δοκιμής που διεξάγεται. Η δοκιμή που διεξάγεται για τον υπολογισμό των παραμέτρων κοπής είναι η περιφερική τόννευση για διαφορετικές κύριες ταχύτητες κοπής και προώσεις. Σε κάθε περίπτωση η διάρκεια της είναι 5 min και το βάθος κοπής 0,5 mm. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο έχει διάμετρο 80 mm και μήκος 500 mm. Στον πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι τιμές της κύριας ταχύτητας κοπής και της πρόωσης για κάθε διεξαγωγή της δοκιμής που γίνεται από τους Kumar, Majumber, Khan & Patel (2020).

A.A. δοκιμής	Κύρια ταχύτητα κοπής (m/min)	Ταχύτητα πρόωσης (mm/rev)
1	110	0,12
2	145	0,12
3	180	0,12
4	110	0,16
5	110	0,20

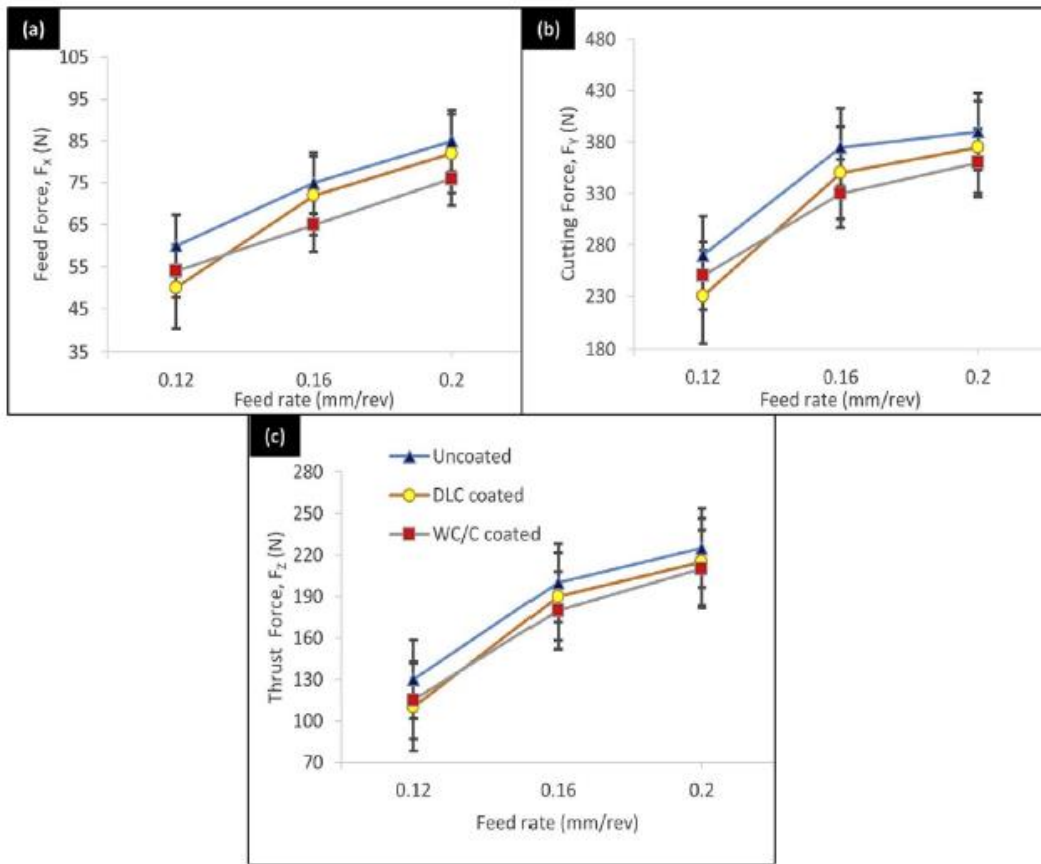
Πίνακας 4.7 Ταχύτητα κοπής και πρόωσης για κάθε διεξαγωγή της τόννευσης

Τα αποτελέσματα από την κοπή με επικάλυψη DLC συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την διεξαγωγή κοπών με τις ίδιες παραμέτρους για κοπτικό εργαλείο χωρίς επικάλυψη και με επικάλυψη καρβιδίου του βολφραμίου σε άνθρακα (WC/C) που προσφέρεται ως εναλλακτική του αδαμαντοειδούς άνθρακα. Η επικάλυψη του γίνεται με την ίδια μέθοδο που πραγματοποιήθηκε η επικάλυψη του αδαμαντοειδούς άνθρακα. Σημειώνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις η σκληρότητα των επικαλύψεων είναι μικρότερες από του κοπτικού. Η μέση επιφανειακή τραχύτητα (R_a) των τεμαχίων που έχουν υποστεί κατεργασία μετράται 0,12 μm με την εφαρμογή DLC, 0,32 μm για το εργαλείο χωρίς επικάλυψη και 0,15 μm με χρήση της επικάλυψης WC/C. Στα διαγράμματα 4.9 καταγράφονται οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής συναρτήσει των κύριων ταχυτήτων για ταχύτητα πρόωσης 0,12 mm/rev. Στα διαγράμματα 4.10 παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής σε συνάρτηση με τις ταχύτητες πρόωσης για κύρια ταχύτητα 110 m/min. Ομοίως, στα διαγράμματα 4.11 παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες

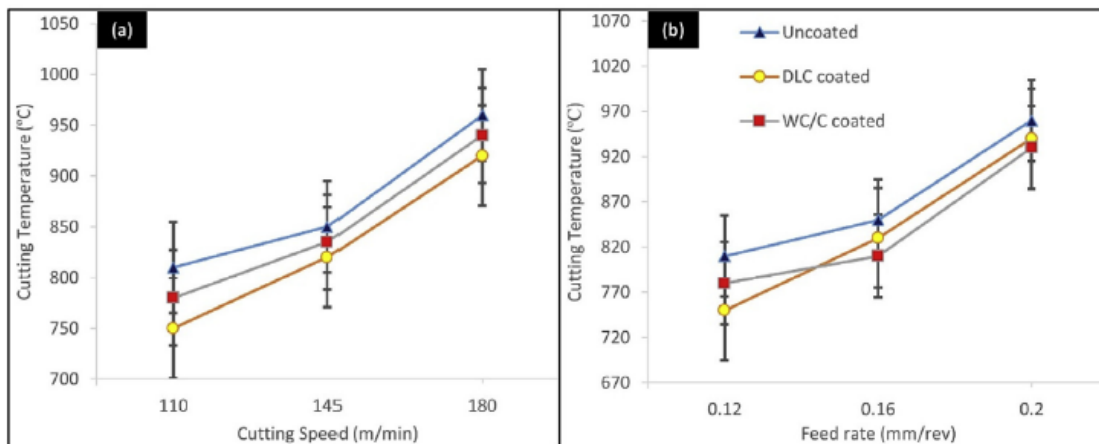
θερμοκρασίες κατά την κοπή σε συνάρτηση των ταχυτήτων κοπής και πρόωσης. Η θερμοκρασία μετράται στην επιφάνεια αποβλήτου κάθε λεπτό και η θερμοκρασία που εμφανίζεται στο διάγραμμα αποτελεί τον μέσο όρο των μετρήσεων. Παρατίθενται τα διαγράμματα 4.9 – 4.11 από την εργασία των Kumar κ.ά. (2020).



Διαγράμματα 4.9 Δυνάμεις κοπής-Ταχύτητα κοπής για ταχύτητα πρόωσης 0,12 mm/rev από την εργασία των Kumar κ.ά. (2020)



Διαγράμματα 4.10 Δυνάμεις κοπής-Ταχύτητα πρόωσης για κύρια ταχύτητα κοπής 110 m/min από την εργασία των Kumar κ.ά. (2020)



Διαγράμματα 4.11 α) Θερμοκρασία-Ταχύτητα κοπής για ταχύτητα πρόωσης 0,12 mm/rev, β) Θερμοκρασία-Ταχύτητα πρόωσης για ταχύτητα κοπής 110 m/min από την εργασία των Kumar κ.ά. (2020)

Παρατηρείται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις με την χρήση της επικάλυψης αδαμαντοειδούς άνθρακα οι δυνάμεις κοπής και οι θερμοκρασίες διατηρούνται σε χαμηλότερες τιμές από ότι στις άλλες περιπτώσεις με την επικάλυψη WC/C να επιδεικνύει καλύτερη συμπεριφορά για υψηλές ταχύτητες πρόωσης. Στις υψηλές ταχύτητες η φθορά προσεγγίζει την αντίστοιχη τιμή, για το εργαλείο με επικάλυψη, του εργαλείου χωρίς επικάλυψη. Όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα κοπής τόσο καλύτερη είναι η προστασία του εργαλείου.

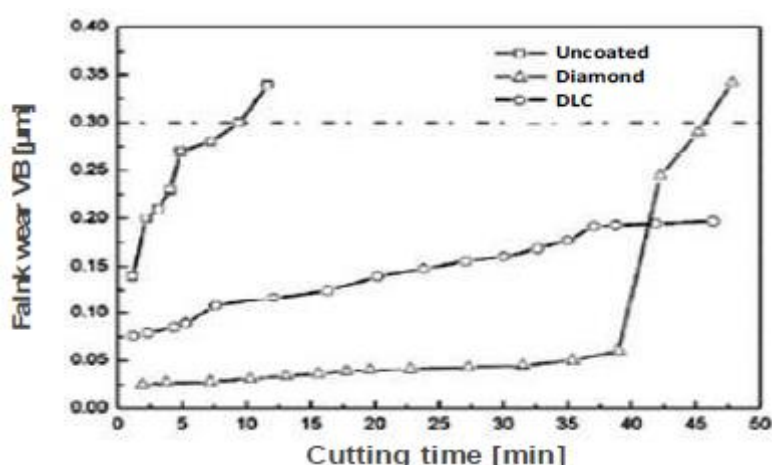
Κοπή GFRP

Μελετάται η φθορά κοπτικού εργαλείου καρβιδίου του βολφραμίου «τσιμεντομένο» σε κοβάλτιο (WC-Co) κατά την τόννευση πλαστικού ενισχυμένου με ίνες (GFRP) περιεκτικότητας 75% σε ίνες. Η φθορά του συγκρίνεται για τις περιπτώσεις όπου γίνεται στο κοπτικό εργαλείο εναπόθεση στρώματος αδαμαντοειδούς άνθρακα (DLC), στρώματος διαμαντιού και για το εργαλείο χωρίς επικάλυψη. Η εναπόθεση πραγματοποιείται με την μέθοδο της εκκένωσης τόξου σε κενό (vacuum arc discharge). Το πάχος των επικαλύψεων είναι 10 μm. Στον πίνακα 4.8 παρουσιάζονται οι παράμετροι της τόννευσης όπως διεξάγονται από τους Folea, Roman & Lupulescu (2010).

Κύρια ταχύτητα κοπής (m/min)	250
Ταχύτητα πρόωσης (mm/rev)	0,1
Βάθος κοπής (mm)	1
Περιβάλλον	ξηρό

Πίνακας 4.8 Παράμετροι τόννευσης

Στο διάγραμμα 4.12 γίνεται η σύγκριση της διάρκειας ζωής για τις τρεις περιπτώσεις εργαλείων που χρησιμοποιούν οι Folea κ.ά. (2010)



Διάγραμμα 4.12 Πλευρική φθορά- Διάρκεια κοπής από την εργασία των Folea κ.ά. (2010)

Το εργαλείο με επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα εμφανίζει την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Κοπή Al 7075

Μελετάται η κατεργασιμότητα του κράματος Al 7075 με την χρήση επικάλυψης αδαμαντοειδούς άνθρακα στο κοπτικό εργαλείο. Το κράμα αυτό χρησιμοποιείται στην αεροδιαστημική, σε μεταφορές και σε κατασκευές όπου απαιτείται αντοχή, διάρκεια ζωής και χαμηλό βάρος και στον πίνακα 4.13 αναφέρεται η χημική σύσταση του κατεργαζόμενου κράματος και στον πίνακα 4.14 οι μηχανικές του ιδιότητες όπως καταγράφονται από τους Mustafa και Tanju (2010).

Στοιχείο	Al	Cu	Mn	Si	Ti	Zn	Cr
Σύσταση	βάση	2	0,3	0,13	0,2	0,5	0,28

Πίνακας 4.13 Χημική σύσταση κράματος Al 7075

Όριο θραύσης (MPa)	Όριο διαρροής (MPa)	Επιμήκυνση (%)	Πυκνότητα (kg/m³)	Σκληρότητα (HB)
570	505	11	2800	160

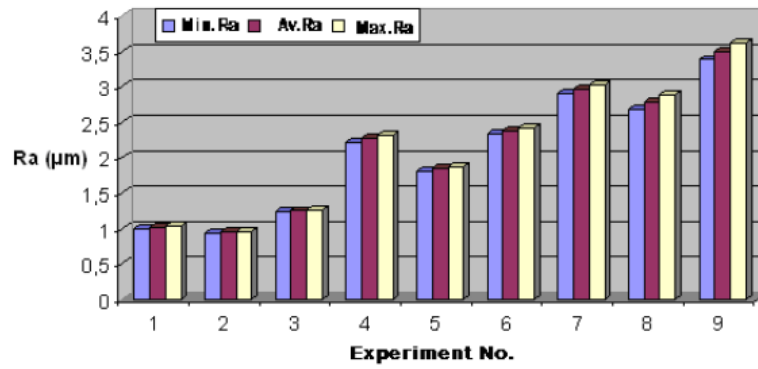
Πίνακας 4.14 Μηχανικές ιδιότητες κράματος Al 7075

Με την διεξαγωγή κοπής περιφερικής τόννευσης μετράται πειραματικά η επιφανειακή τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας του κράματος Al 7075, οι θερμοκρασίες και οι δυνάμεις κοπής. Το τεμάχιο έχει διάμετρο 50 mm και μήκος 220 mm. Η δοκιμή διεξάγεται σε τρία στάδια τα οποία αναφέρονται στον πίνακα 4.15.

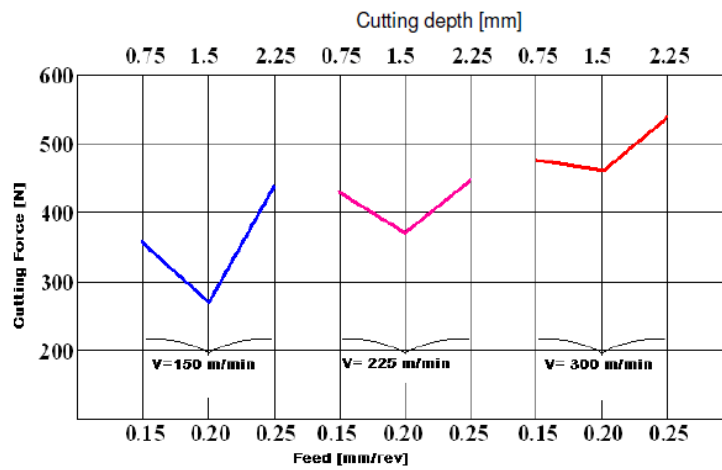
Παράμετροι	Ταχύτητα πρόωσης (mm/rev)	Ταχύτητα κοπής (m/min)	Βάθος κοπής (mm)
Στάδιο 1	0,15	150	0,75
Στάδιο 2	0,2	225	1,5
Στάδιο 3	0,25	300	2,25

Πίνακας 4.15 Παράμετροι διεξαγωγής κοπής τόννευσης

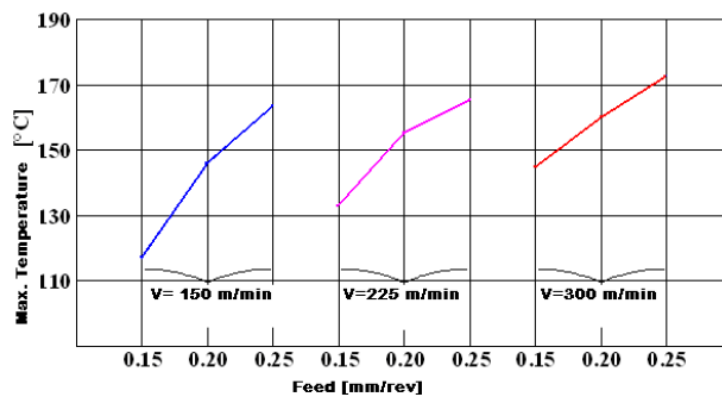
Στο διάγραμμα 4.13 παρουσιάζεται η επιφανειακή τραχύτητα του κατεργασμένου τεμαχίου σε κάθε στάδιο για αυξανόμενο αριθμό πειραμάτων. Στο διάγραμμα 4.14 καταγράφονται οι δυνάμεις κοπής σε συνάρτηση με την ταχύτητα πρόωσης για δεδομένες ταχύτητες και βάθη κοπής. Στο διάγραμμα 4.15 αναφέρεται η μέγιστη εμφανιζόμενη θερμοκρασία συναρτήσει της ταχύτητα πρόωσης για διαφορετικές ταχύτητες κοπής. Τα αποτελέσματα παρατίθενται από την εργασία των Mustafa και Tanju (2010).



Διάγραμμα 4.13 Τραχύτητα επιφάνειας-Αριθμός πειραμάτων από την εργασία των Mustafa και Tanju (2010)



Διάγραμμα 4.14 Δυνάμεις κοπής-Ταχύτητα πρόωσης για διάφορες ταχύτητες κοπής από την εργασία των Mustafa και Tanju (2010)



Διάγραμμα 4.15 Μέγιστη θερμοκρασία-Ταχύτητα πρόωσης για διάφορες ταχύτητες κοπής από την εργασία των Mustafa και Tanju (2010)

4.4 Κατεργασία Διάτρησης

Η διάτρηση αποτελεί μια ακόμα σημαντική κατεργασία κοπής. Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζεται η μελέτη της εφαρμογής επικάλυψης αδαμαντοειδούς άνθρακα σε κοπτικό εργαλείο καρβιδίου στην διάτρηση κράματος αλουμινίου-πυριτίου (Al-Si) σε υψηλές ταχύτητες. Η εναπόθεση της επικάλυψης γίνεται με μέθοδο φυσικής εναπόθεσης ατμού (PVD) σε θερμοκρασία 150°C για τρεις ώρες. Με την χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου και μικροσκοπίας συγκεντρωμένων δεσμών ιόντων (focused ion beam), το πάχος της επικάλυψης του αδαμαντοειδούς άνθρακα είναι 0,5 μm. Στον πίνακα 4.15 καταγράφεται η σύσταση του καρβιδίου του εξεταζόμενου υλικού του υποστρώματος. Το υλικό του υποστρώματος χρησιμοποιείται για κατασκευή κοπτικών εργαλείων για κατεργασίες κοπής με υψηλή ταχύτητα όπου για την φθορά ευθύνεται κυρίως η υψηλή θερμοκρασία. Στον πίνακα 4.16 καταγράφονται μερικές ιδιότητες του υποστρώματος, στον πίνακα 4.17 αναλύεται η χημική σύσταση του κατεργαζόμενου κράματος και στον πίνακα 4.18 αναφέρονται μερικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του κατεργαζόμενου κράματος που χρησιμοποιούνται στην εργασία των Martins, Almeida Magalhaes Júnior, Rubens Gonçaves Carneiro, Cheikh Talibouya Ba & Ferreira Vieira (2022).

Στοιχείο	W	C	Si	Cr	Mo	Fe	Ni	Co	Nb	Ti
Περιεκτικότητα (%)	92,4	1,9	0,34	0,02	0,02	2,34	0,31	1,09	0,11	0,02

Πίνακας 4.15 Χημική σύσταση υποστρώματος εργαλείου κοπής

Πυκνότητα (g/cm ³)	Σκληρότητα (HV ₃₀)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Διάμετρος κόκκου (μm)
14,9	1580	219	1±0,1

Πίνακας 4.16 Ιδιότητες υποστρώματος

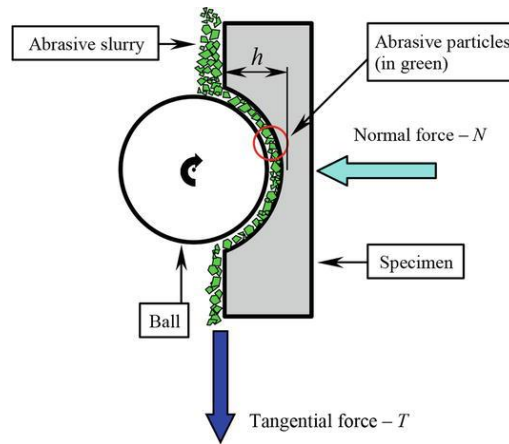
Στοιχείο	Al	Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Ni	Pb	Sn
Περιεκτικότητα (%)	86,8	7,76	3,11	0,74	0,36	0,4	,56	0,03	0,05	0,02

Πίνακας 4.17 Χημική σύσταση κατεργαζόμενου τεμαχίου

Όριο θραύσης (MPa)	320
Όριο διαρροής (MPa)	160
Επιμήκυνση (%)	3,6
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	70
Λόγος Poisson	0,34
Σκληρότητα (HV)	85
Θερμοκρασία τήξης (°C)	573
Πυκνότητα (g/cm ³)	2,8

Πίνακας 4.18 Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες κατεργαζόμενου τεμαχίου

Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της κοπής διεξάγονται οι τριβολογικές δοκιμές: μικρό-αποξεστικό τεστ (micro abrasive test) για τον υπολογισμό του συντελεστή φθοράς και δοκιμή πείρου-σε-δίσκο (pin-on-disc test) για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής. Στην συνέχεια, για τον προσδιορισμό της ποιότητας των οπών πραγματοποιείται διάτρηση.



Εικόνα 4.2 Σχηματική απεικόνιση micro abrasive test (πηγή: IntechOpen)

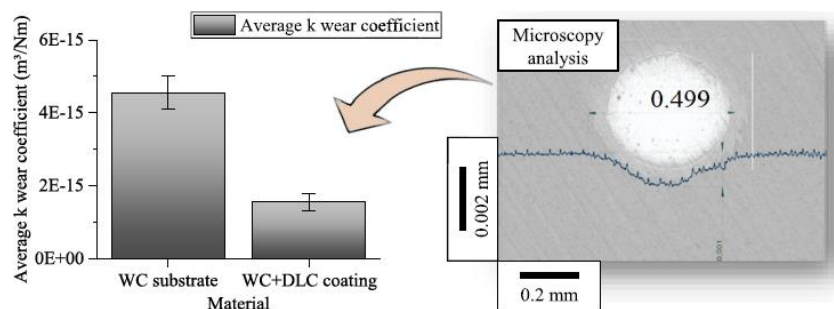
Στον πίνακα 4.19 αναφέρονται οι παράμετροι διεξαγωγής του micro abrasive test και στο διάγραμμα 4.16 απεικονίζεται ο μέσος συντελεστής φθοράς k , όπως προκύπτει από μικροσκοπική ανάλυση, για τα εργαλεία με επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα και χωρίς, από τον μέσο όρο τριών μετρήσεων από τους Martins κ.ά. (2022). Ο συντελεστής φθοράς δίνεται από την σχέση:

$$k = b^4 / (D^2 N t W)$$

όπου b : εξωτερική διάμετρος καλύμματος, D : διάμετρος της σφαίρας, N : περιστροφική ταχύτητα, t : χρόνος ολίσθησης και W : εφαρμοζόμενο φορτίο.

Εφαρμοζόμενο φορτίο (N)	0.4
Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	1000
Διάμετρος σφαίρας (mm)	25
Χρόνος ολίσθησης (min)	5
Εργαζόμενη απόσταση (h σε mm)	10

Πίνακας 4.19 Παράμετροι διεξαγωγής του micro abrasive test



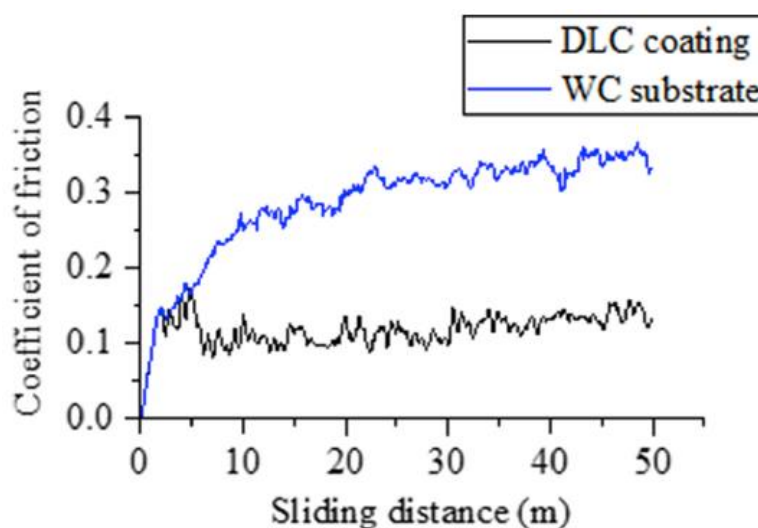
Διάγραμμα 4.16 Μέσος συντελεστής φθοράς για κάθε εργαλείο

Για την δοκιμή του πείρου-σε-δίσκο, ο πείρος είναι σφαιρικής γεωμετρίας διαμέτρου 6 mm από χάλυβα AISI 52100. Ο δίσκος αποτελείται από το ίδιο καρβίδιο που κατασκευάζεται και

το υπόστρωμα. Στον πίνακα 4.20 αναφέρονται οι παράμετροι διεξαγωγής της δοκιμής αυτής των Martins κ.ά. (2022). Στο διάγραμμα 4.17 παρουσιάζεται ο μετρούμενος συντελεστής τριβής, από την δοκιμή αυτή, σε συνάρτηση με την απόσταση ολίσθησης για τα εργαλεία με και χωρίς επικάλυψη.

Εφαρμοζόμενο φορτίο (N)	6
Περιστροφική ταχύτητα (rpm)	300
Απόσταση που διανύεται (m)	50

Πίνακας 4.20 Παράμετροι διεξαγωγής του pin-on-disc test



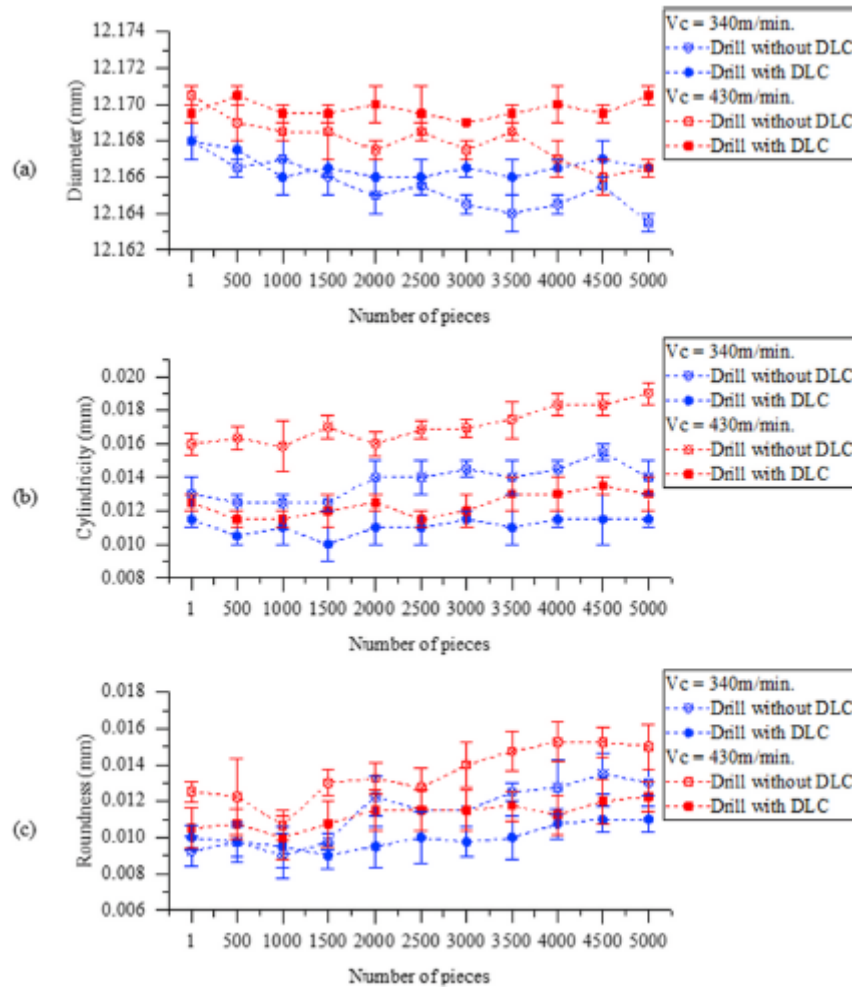
Διάγραμμα 4.17 Συντελεστής τριβής-Απόσταση ολίσθησης κατά την δοκιμή pin-on-disc από την εργασία των Martins κ.ά. (2022)

Παρατηρείται ότι στην περίπτωση του εργαλείου με επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα ο συντελεστής τριβής παραμένει κατά μέσο όρο σταθερός, ενώ για το εργαλείο χωρίς επικάλυψη αυξάνεται μονοτονικά σε όλη την διάρκεια την δοκιμής.

Στον πίνακα 4.21 αναφέρονται οι παράμετροι διεξαγωγής των διατρήσεων. Οι διατρήσεις πραγματοποιούνται για δύο συνθήκες κοπής. Στα διαγράμματα 4.18 παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις της διαμέτρου, της κυλινδρικότητας και της στρογγυλότητας των παραγόμενων οπών καθώς αυξάνεται ο αριθμός των τεμαχίων όπως μετρούνται από τους Martins κ.ά. (2022) για αυξανόμενο αριθμό παραγόμενων τεμαχίων με κάθε τεμάχιο να περιέχει τέσσερις οπές.

Περίπτωση	Βάθος κοπής (mm)	Πρόωση (mm/rev)	Ταχύτητα κοπής (m/min)	Περιστροφή (rpm)
1	10	0,36	340	9500
2	10	0,36	430	11300

Πίνακας 4.21 Παράμετροι διεξαγωγής διατρήσεων



Διάγραμμα 4.18 Διακύμανση ποιοτικών χαρακτηριστικών διαμορφούμενων σπών κατά τον αυξανόμενο αριθμό τεμαχίων από την εργασία των Martins κ.ά. (2022)

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η διακύμανση των ποιοτικών χαρακτηριστικών εντείνεται στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Ως συμπέρασμα των παραπάνω προκύπτουν ότι υπάρχει καλή μεταλλουργική συμβατότητα αδαμαντοειδούς άνθρακα-καρβιδίου. Το σύστημα εμφανίζει καλή συμπεριφορά έναντι της φθοράς, μείωση του συντελεστή τριβών και καλύτερη ποιότητα παραγόμενων επιφανειών.

4.5 Συμπεράσματα

Στις περιπτώσεις υποστρωμάτων που εξετάστηκαν, δηλαδή των υλικών των εργαλείων, η επικάλυψη και το υπόστρωμα παρουσιάζουν επαρκή συνάφεια. Όπου μελετάται η φθορά των κοπτικών εμφανίστηκε μείωση στον ρυθμό της και αύξηση στην διάρκεια ζωής τους. Οι δυνάμεις κοπής και οι συντελεστές τριβής επίσης εμφανίζουν σημαντική μείωση. Κατά την κατεργασία με χρήση κοπτικών με επένδυση αδαμαντοειδούς άνθρακα στο σύστημα συμβαίνει αυτολίπανση μειώνοντας την ανάγκη εισροής λιπαντικού ή καθιστώντας την περιττή. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των κατεργασμένων επιφανειών βελτιώνονται σημαντικά και η μαζική παραγωγή τεμαχίων παρουσιάζει μικρή διακύμανση από τα επιθυμητά κατά την αυξανόμενη παραγωγή τεμαχίων. Οπότε, οι κοινότερες κατεργασίες κοπής επωφελούνται σημαντικά από την χρήση εργαλείων με επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα (DLC).

Κεφάλαιο 5. Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς συστήματος χάλυβα-αδαμαντοειδούς άνθρακα με χρήση υπολογιστικού μοντέλου

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η μηχανική συμπεριφορά (φθορά και κόπωση) συστήματος χάλυβα κατασκευών ASTM A36 με επικάλυψη αδαμαντοειδούς άνθρακα (DLC). Ο χάλυβας, που λειτουργεί ως υπόστρωμα στο προς μελέτη σύστημα, αποτελεί κοινό δομικό υλικό τμημάτων μηχανών και συστημάτων που αποτελούνται από την συνεργασία στοιχείων μηχανών όπως γρανάζια, κοχλίες, πιστόνια και έδρανα. Για την μοντελοποίηση των εφαρμογών αυτών διεξάγονται δοκιμές επαναλαμβανόμενης διείδυσης/κρούσης σφαίρας και χάραξης. Η διάμετρος της σφαίρας για την δοκιμή επαναλαμβανόμενης διείδυσης/κρούσης είναι 2 mm. Για την δοκιμή χάραξης, προσομοιώνεται το εργαλείο χάραξης ως κώνος Rockwell με ακτίνα βάσης 2 mm και εμβαδόν κωνικής περιφέρειας, που δέχεται την φόρτιση, 4,4 mm². Οι προσομοιώσεις διεξάγονται σε λογισμικό ANSYS. Από την βιβλιογραφία (Fujisawa, Zhang, Li & Kim 2018; Holmberg κ.ά. 2008; Sujitno κ.ά 2019), επιλέγονται οι παρακάτω παράμετροι του συστήματος. Ως υλικό της σφαίρας και της κωνικής ακμής το διαμάντι με ιδιότητες που καταγράφονται στον πίνακα 5.1. Οι δοκιμές εκτελούνται για δύο τύπους επικάλυψης αδαμαντοειδούς άνθρακα με υπόστρωμα από κοινό υλικό. Στον πίνακα 5.2 αναφέρονται οι ιδιότητες των υλικών των στρωμάτων επικάλυψης DLC_E39 και DLC_E73. Καθένας από τους τύπους επικαλύψεων εμφανίζει επαρκή συνάφεια με το υπόστρωμα, με τις δύο επιφάνειες να καθορίζονται ως συνδεδεμένες. Στον πίνακα 5.3 παρατίθενται οι ιδιότητες του υλικού υποστρώματος. Η ορθογωνική πλάκα έχει διαστάσεις μήκους 80 mm, πλάτους 20 mm και πάχους 10 mm για την δοκιμή επαναλαμβανόμενης κρούσης/διείδυσης. Για την δοκιμή χάραξης η πλάκα έχει διαστάσεις μήκους 12 mm, πλάτους 4 mm και πάχους 2 mm. Το πάχος του στρώματος της επικάλυψης θέτεται 1 μm. Οι δοκιμές διεξάγονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 22°C.

Πυκνότητα (kg/m ³)	3530
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	1140
Λόγος Poisson	0,07

Πίνακας 5.1 Ιδιότητες σφαίρας-κωνικής ακμής

Ιδιότητες	Υλικό	
	DLC_E39	DLC_E73
Πυκνότητα (kg/m ³)	2200	2350
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	39	73
Λόγος Poisson	0,22	0,22
Όριο διαρροής (GPa)	5	13
Όριο θραύσης (GPa)	8	21

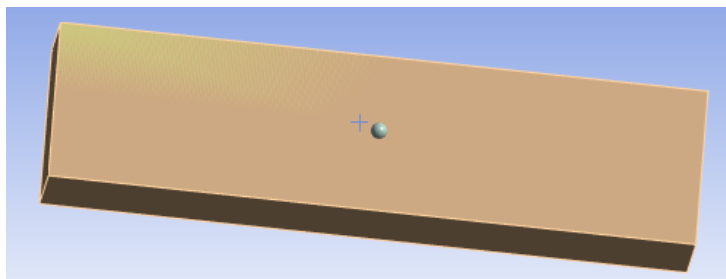
Πίνακας 5.2 Ιδιότητες επικαλύψεων DLC_E39 και DLC_E73

Πυκνότητα (kg/m ³)	7850
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	200
Λόγος Poisson	0,3
Όριο διαρροής (MPa)	250
Όριο θραύσης (MPa)	450

Πίνακας 5.3 Ιδιότητες υποστρώματος χάλυβα ASTM A36

5.2 Δοκιμή επαναλαμβανόμενης διείδυσης-κρούσης

Στην εικόνα 5.1 παρουσιάζεται η διάταξη του συστήματος στο περιβάλλον ANSYS. Η σφαίρα τοποθετείται στο μέσο της πλάκας. Η δοκιμή διεξάγεται, για την ίδια γεωμετρία, δύο φορές. Στην πρώτη χρησιμοποιείται ως παράμετρος εισόδου η μετατόπιση-διείσδυση της σφαίρας κάθετα στο τεμάχιο και στην δεύτερη η εφαρμοζόμενη δύναμη στην σφαίρα σε διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια του τεμαχίου. Σε κάθε περίπτωση, η χρονική περίοδος φόρτισης και αποφόρτισης διαρκεί 0,02 δευτερόλεπτα. Η φθορά της επικάλυψης ξεκινά από την περιοχή που εφάπτεται του κάτω μέρους της σφαίρας και εξαπλώνεται περιφερικά. Η μέτρηση της επιφάνειας που αστοχεί καταγράφεται για διάφορους αριθμούς επαναλήψεων.



Εικόνα 5.1 Αναπαράσταση γεωμετρίας για την δοκιμή επαναλαμβανόμενης κρούσης-διείσδυσης

5.2.1 Δοκιμή επαναλαμβανόμενης διείδυσης

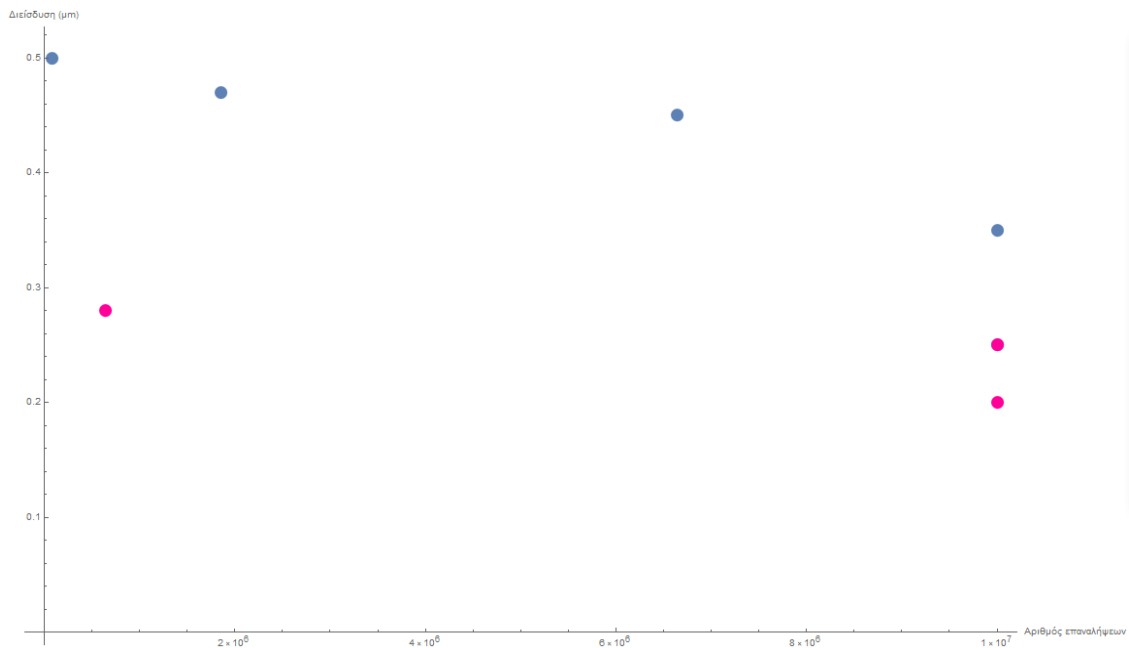
Σε αυτή την περίπτωση τίθεται ως παράμετρος εισόδου η διείδυση της σφαίρας στο σύστημα υποστρώματος-επικάλυψης. Η διαδικασία εκτελείται για διάφορες τιμές διείδυσης με σκοπό τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής και η φθορά καταγράφεται για τις τιμές 0,25 μm, 0,5 μm και 0,75 μm. Η έκταση της φθοράς του αδαμαντοειδούς άνθρακα στην επιφάνεια του τεμαχίου σημειώνεται σε συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων. Στους πίνακες 5.4 και 5.5 καταγράφεται η διάρκεια ζωής για τα στρώματα DLC_E39 και DLC_E73 αντίστοιχα. Στους πίνακες 5.6-5.9 παρουσιάζεται το εμβαδόν της περιοχής στην επιφάνεια της επικάλυψης που αστοχεί, για καθένα από τους δύο τύπους επικαλύψεων, για τις επιβαλλόμενες τιμές διεισδύσεων σε συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων. Για διείδυση 0,35 μm τα δοκιμαζόμενα τεμάχια με τις επικαλύψεις DLC_E39 και για 0,25 μm DLC_E73 εμφανίζουν πρακτικά άπειρη διάρκεια ζωής που ερμηνεύεται εδώ ως μη εμφάνιση αστοχίας σε 1 εκατομμύρια επαναλήψεις.

Διείσδυση (μm)	Διάρκεια ζωής (αριθμός επαναλήψεων)
0,25	10^7
0,35	10^7
0,45	$6,6461 \times 10^6$
0,47	$1,85525 \times 10^6$
0,5	77260

Πίνακας 5.4 Διάρκεια ζωής κατά την επαναλαμβανόμενη διείσδυση για την επικάλυψη DLC_E39

Διείσδυση (μm)	Διάρκεια ζωής (αριθμός επαναλήψεων)
0,2	10^7
0,25	10^7
0,28	$6,3759 \times 10^5$
0,35	0

Πίνακας 5.5 Διάρκεια ζωής κατά την επαναλαμβανόμενη διείσδυση για την επικάλυψη DLC_E73



Διάγραμμα 5.1 Διάρκεια ζωής κατά την επαναλαμβανόμενη διείσδυση για τα στρώματα DLC_E39 (μπλε) και DLC_E73 (ροζ)

Διείσδυση (μm)	Επιφάνεια φθοράς (mm ²)	
	DLC_E39	DLC_E73
0,25	0	0
0,5	0	0,3
0,75	12	17,9

Πίνακας 5.6 Επιφάνεια φθοράς συναρτήσει της επιβαλλόμενης διείσδυσης για 1 επανάληψη

Διείσδυση (μm)	Επιφάνεια φθοράς (mm ²)	
	DLC_E39	DLC_E73
0,25	0	0
0,5	0	11,5
0,75	26,7	39,9

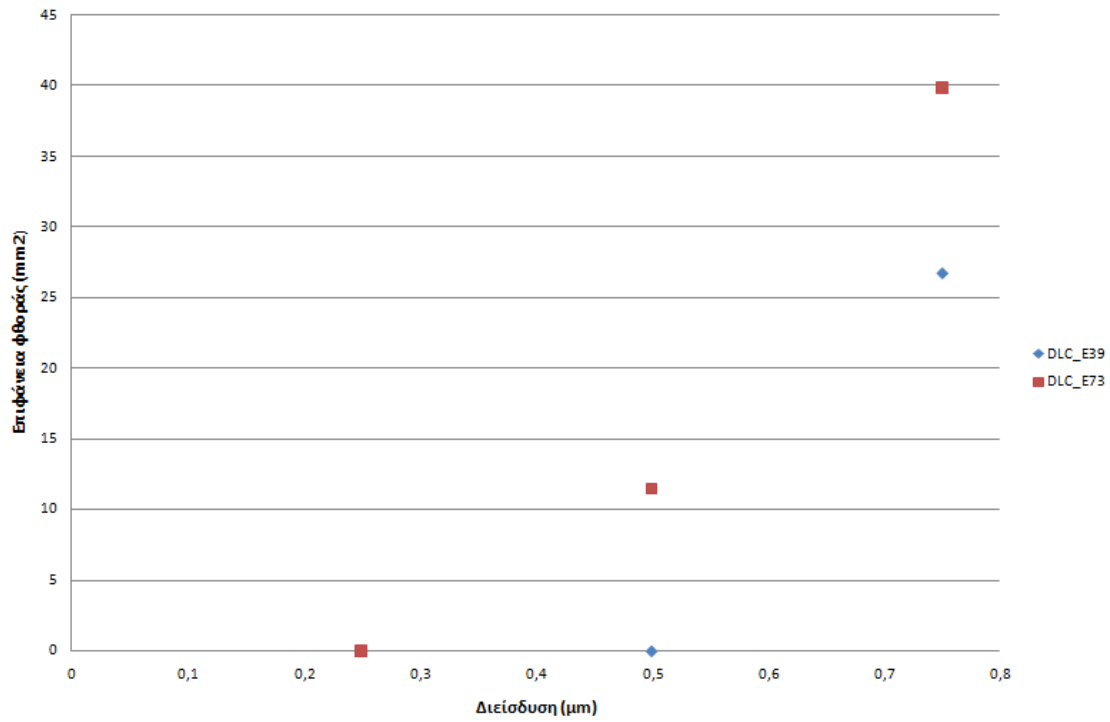
Πίνακας 5.7 Επιφάνεια φθοράς συναρτήσει της επιβαλλόμενης διείσδυσης για 200 επαναλήψεις

Διείσδυση (μm)	Επιφάνεια φθοράς (mm ²)	
	DLC_E39	DLC_E73
0,25	0	0
0,5	0	18,9
0,75	31,4	44,8

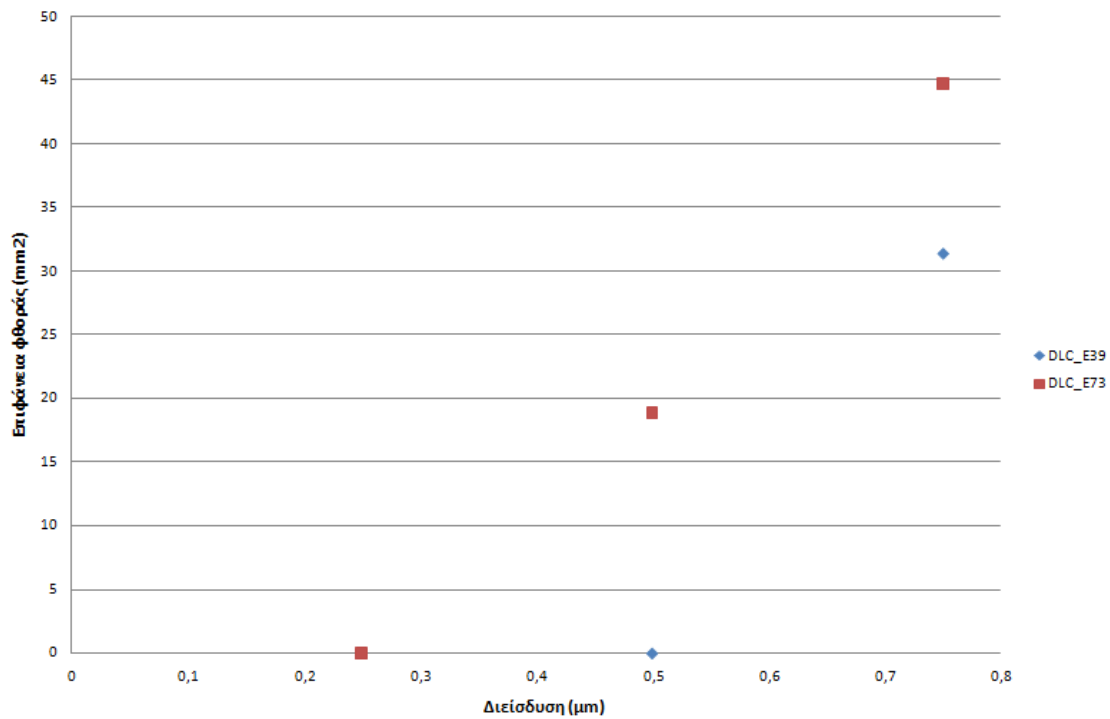
Πίνακας 5.8 Επιφάνεια φθοράς συναρτήσει της επιβαλλόμενης διείσδυσης για 2000 επαναλήψεις

Διείσδυση (μm)	Επιφάνεια φθοράς (mm ²)	
	DLC_E39	DLC_E73
0,25	0	0
0,5	14,9	24,8
0,75	36,9	51,6

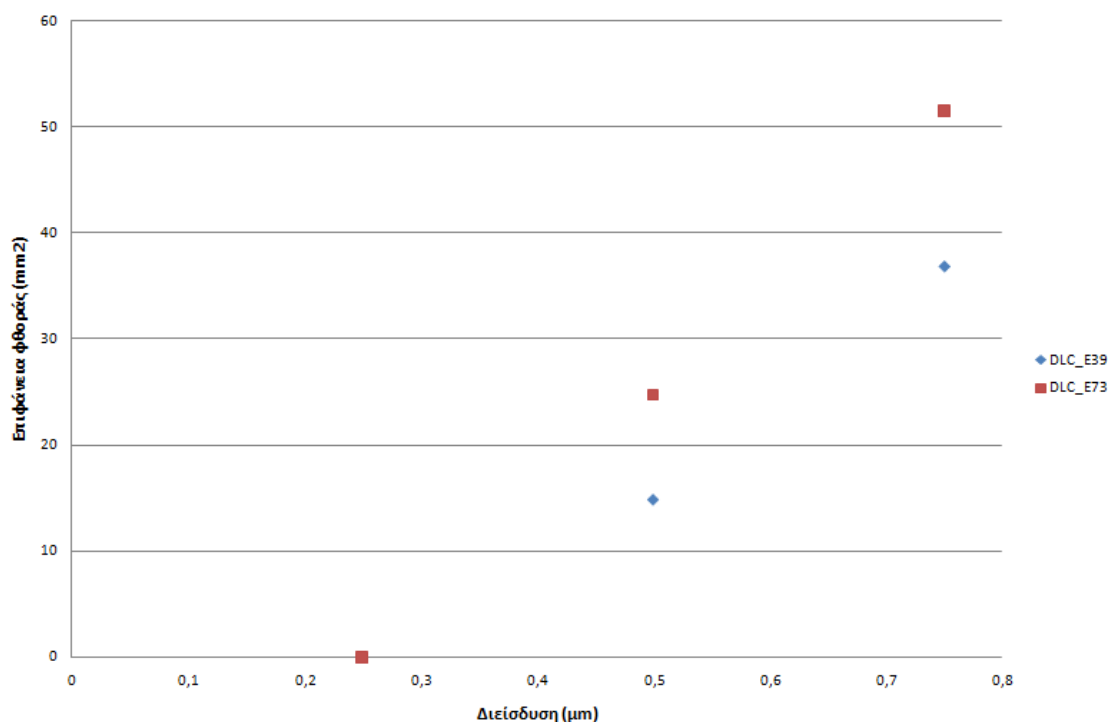
Πίνακας 5.9 Επιφάνεια φθοράς συναρτήσει της επιβαλλόμενης διείσδυσης για 200000 επαναλήψεις



Διάγραμμα 5.2 Επιφάνεια φθοράς - επιβαλλόμενη διείσδυση για 200 επαναλήψεις



Διάγραμμα 5.3 Επιφάνεια φθοράς - επιβαλλόμενη διείσδυση για 2000 επαναλήψεις



Διάγραμμα 5.4 Επιφάνεια φθοράς - επιβαλλόμενη διείσδυση για 200000 επαναλήψεις

5.2.2 Δοκιμή επαναλαμβανόμενης κρούσης

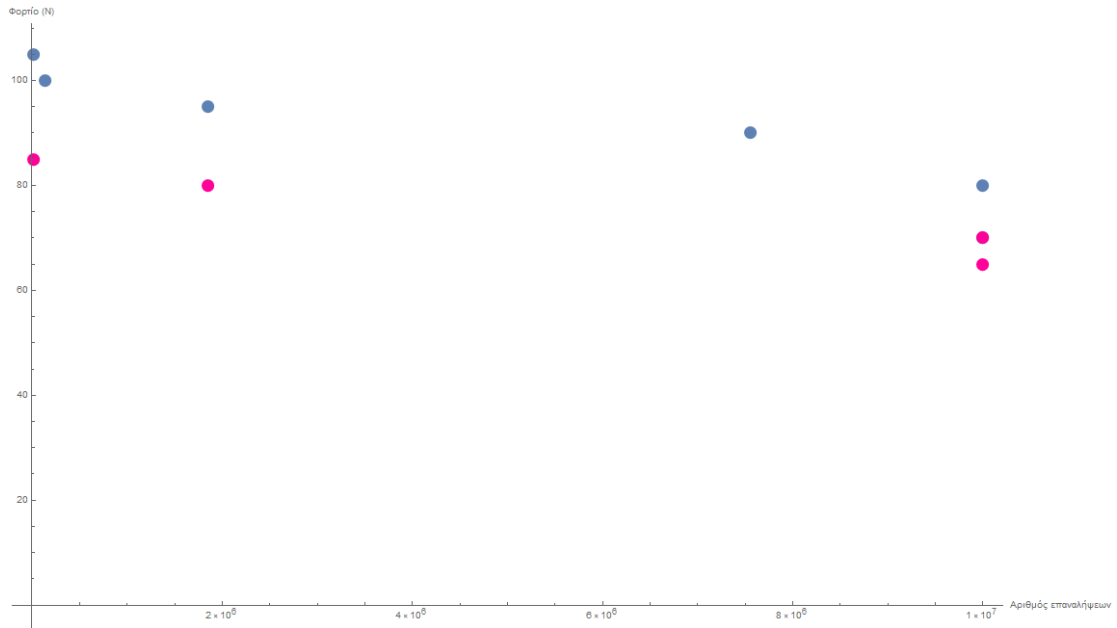
Με παρόμοια μέθοδο, τίθεται ως παράμετρος εισόδου η δύναμη με την οποία προσκρούει η σφαίρα στην επιφάνεια του συστήματος υποστρώματος-επικάλυψης. Η διαδικασία εκτελείται με σκοπό τον προσδιορισμό της αντοχής σε κόπωση των στρωμάτων επικάλυψης και η φθορά σημειώνεται για τις τιμές 70N, 80N, 100N, 120N και 140N. Ομοίως, η επιφανειακή φθορά της επικάλυψης, κάθε τύπου, υπολογίζεται για δεδομένους αριθμούς επαναλήψεων. Στους πίνακες 5.10 και 5.11 παρουσιάζεται η διάρκεια ζωής για τα στρώματα DLC_E39 και DLC_E73 αντίστοιχα. Στους πίνακες 5.12-5.16 αναγράφεται η επιφανειακή φθορά του στρώματος της επικάλυψης, σε κάθε σύστημα, για τους διάφορους αριθμούς επαναλήψεων για τις παραπάνω τιμές φόρτισης.

Φορτίο (N)	Διάρκεια ζωής (αριθμός επαναλήψεων)
70	10^7
80	10^7
90	$7,555 \times 10^6$
95	$1,84555 \times 10^6$
100	132515
105	10805

Πίνακας 5.10 Διάρκεια ζωής κατά την επαναλαμβανόμενη κρούση για την επικάλυψη DLC_E39

Φορτίο (N)	Διάρκεια ζωής (αριθμός επαναλήψεων)
65	10^7
70	10^7
80	$1,8536 \times 10^6$
85	11350

Πίνακας 5.11 Διάρκεια ζωής κατά την επαναλαμβανόμενη κρούση για την επικάλυψη DLC_E73



Διάγραμμα 5.5 Διάρκεια ζωής κατά την επαναλαμβανόμενη διείσδυση για τα στρώματα DLC_E39 (μπλε) και DLC_E73 (ροζ)

Αριθμός Επαναλήψεων	Επιφάνεια φθοράς (mm ²)	
	DLC_E39	DLC_E73
$3,7056 \times 10^6$	0	0,1
$7,8392 \times 10^6$	0	1,9
$1,1402 \times 10^7$	0	6

Πίνακας 5.12 Επιφάνεια φθοράς συναρτήσει των αριθμών επαναλήψεων για επιβαλλόμενο φορτίο 80 N

Αριθμός Επαναλήψεων	Επιφάνεια φθοράς (mm ²)	
	DLC_E73	DLC_E73
200	0	4,5
2000	0	5,6
200000	3,6	10,4

Πίνακας 5.14 Επιφάνεια φθοράς στρώματος DLC_E73 συναρτήσει των αριθμών επαναλήψεων για επιβαλλόμενο φορτίο 100 N

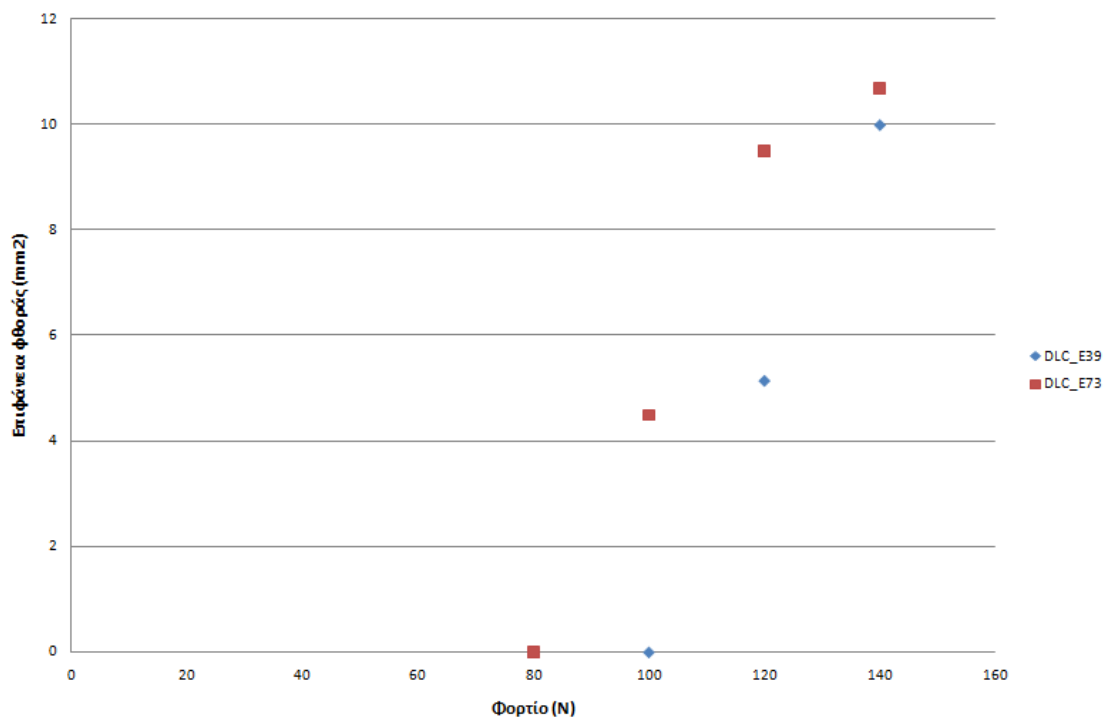
Αριθμός Επαναλήψεων	Επιφάνεια φθοράς (mm ²)	
	DLC_E39	DLC_E73
200	5,15	9,5
2000	9	10,3
200000	12,5	17,4

Πίνακας 5.15 Επιφάνεια φθοράς συναρτήσει των αριθμών επαναλήψεων για επιβαλλόμενο φορτίο 120 N

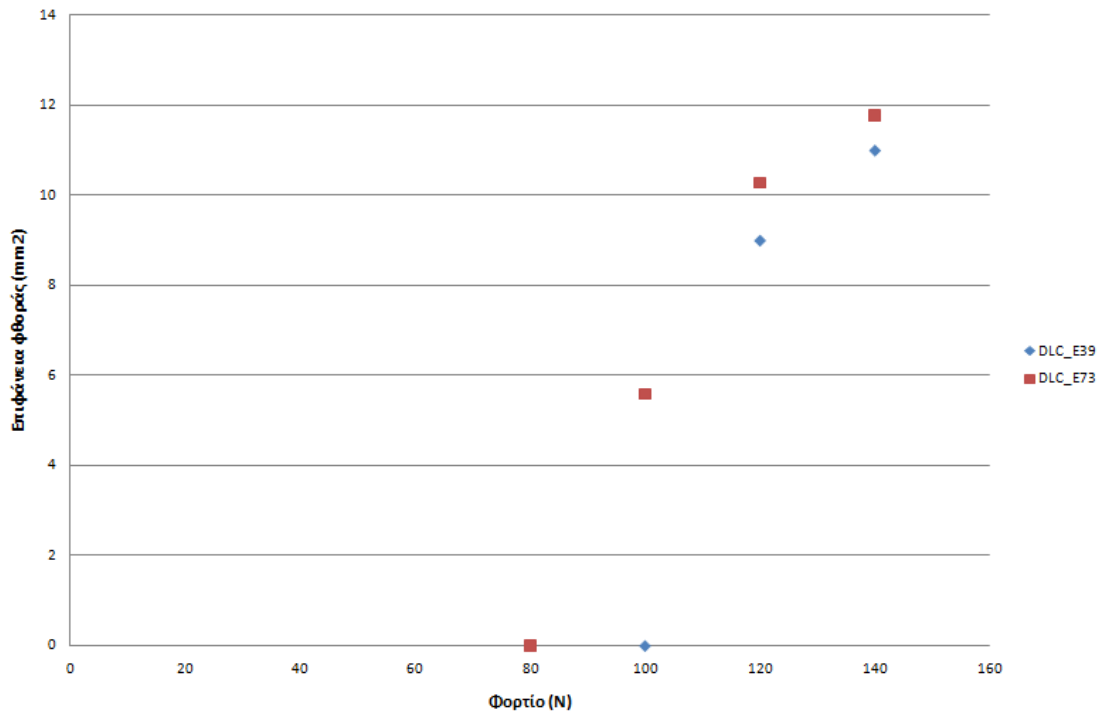
Αριθμός Επαναλήψεων	Επιφάνεια φθοράς (mm ²)	
	DLC_E39	DLC_E73
200	10	10,7
2000	11	11,8
200000	18,6	18,95

Πίνακας 5.16 Επιφάνεια φθοράς συναρτήσει των αριθμών επαναλήψεων για επιβαλλόμενο φορτίο 140 N

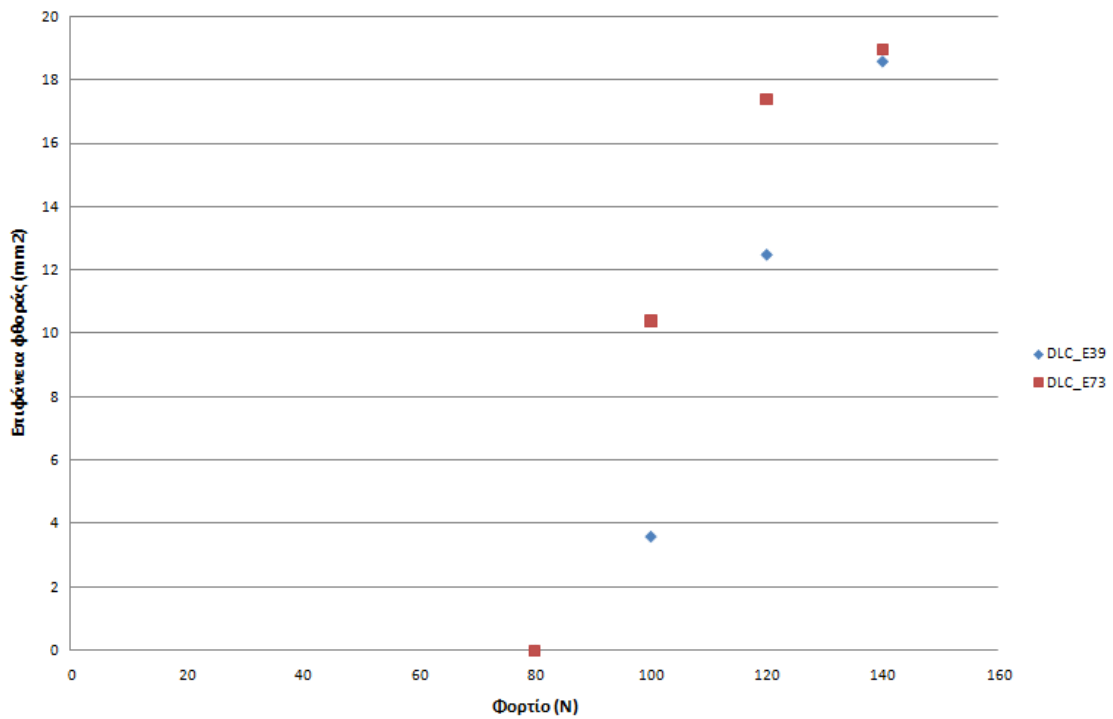
Για το φορτίο των 70 N δεν εμφανίζεται φθορά στο σύστημα σε 1×10^7 επαναλήψεις.



Διάγραμμα 5.6 Επιφάνεια φθοράς - επιβαλλόμενο φορτίο για 200 επαναλήψεις



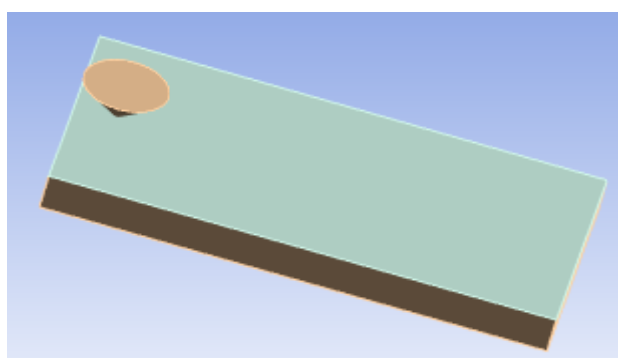
Διάγραμμα 5.7 Επιφάνεια φθοράς - επιβαλλόμενο φορτίο για 2000 επαναλήψεις



Διάγραμμα 5.8 Επιφάνεια φθοράς - επιβαλλόμενο φορτίο για 200000 επαναλήψεις

5.3 Δοκιμή χάραξης

Στην εικόνα 5.2 παρουσιάζεται η διάταξη του συστήματος. Η ακμή τοποθετείται σε απόσταση 1 mm από την άκρη του τεμαχίου. Με ανάλογο τρόπο η δοκιμή πραγματοποιείται δύο φορές. Την πρώτη με παράμετρο εισόδου την μετατόπιση του κώνου και την δεύτερη με επιβαλλόμενο φορτίο που ασκείται στο τεμάχιο μέσω της επιφάνειας του κώνου. Η ακμή κινείται κατά το μήκος της πλάκας με ταχύτητα 8 mm/s. Σε κάθε επανάληψη η κωνική ακμή διανύει απόσταση 8 mm κατά το μήκος του τεμαχίου. Η αστοχία του αδαμαντοειδούς άνθρακα του στρώματος της επικάλυψης εμφανίζεται και επεκτείνεται στην διεύθυνση κάθετα της διεύθυνσης κίνησης της κωνικής ακμής. Με την διεξαγωγή της δοκιμής καθορίζεται η κόπωση της επικάλυψης και μετράται το πλάτος του στρώματος του υλικού που αστοχεί, για τους δύο τύπους στρωμάτων σε υψηλές φορτίσεις, για 100 και 10000 επαναλήψεις.



Εικόνα 5.2 Αναπαράσταση γεωμετρίας για την δοκιμή χάραξης

5.3.1 Δοκιμή χάραξης με ελεγχόμενη επιβαλλόμενη διείσδυση

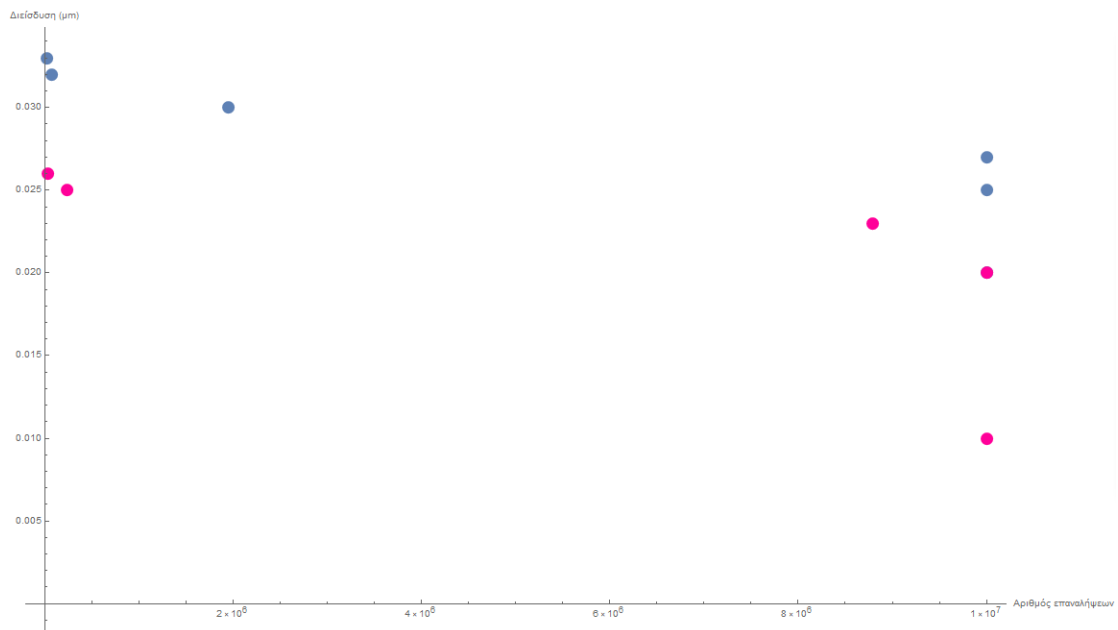
Η δοκιμή πραγματοποιείται για ποικίλες επιβαλλόμενες διεισδύσεις. Καταγράφεται η διάρκεια ζωής των στρωμάτων επικάλυψης για διάφορες τιμές. Στον πίνακα 5.17 παρουσιάζονται τα παραπάνω μεγέθη για το στρώμα DLC_E39 και στον πίνακα 5.18 για το στρώμα DLC_E73. Ο έλεγχος της φθοράς των επικαλύψεων πραγματοποιείται για τις τιμές 0,02 μm, 0,03 μm, 0,04 μm και 0,05 μm. Στον πίνακα 5.19 καταγράφεται το πλάτος του στρώματος που αστοχεί για 100 επαναλήψεις και στον πίνακα 5.20 για 10000 επαναλήψεις.

Διείσδυση (μm)	Διάρκεια ζωής (αριθμός επαναλήψεων)
0,02	10 ⁷
0,025	10 ⁷
0,027	10 ⁷
0,03	1,9461x10 ⁶
0,032	73784
0,033	15500
0,035	0

Πίνακας 5.17 Διάρκεια ζωής στην χάραξη με επιβαλλόμενη διείσδυση για την επικάλυψη DLC_E39

Διείσδυση (μm)	Διάρκεια ζωής (αριθμό επαναλήψεων)
0,01	10^7
0,02	10^7
0,023	$8,7938 \times 10^6$
0,025	$2,3238 \times 10^5$
0,026	35516
0,027	0

Πίνακας 5.18 Διάρκεια ζωής στην χάραξη με επιβαλλόμενη διείσδυση για την επικάλυψη DLC_E73



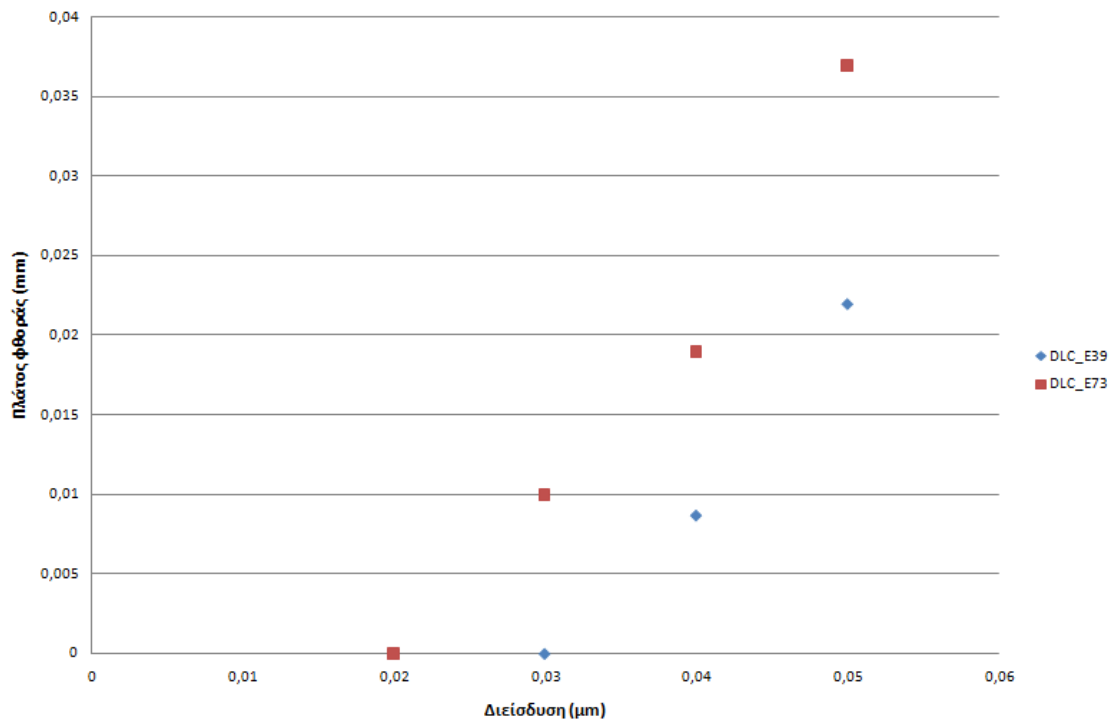
Διάγραμμα 5.9 Διάρκεια ζωής κατά την δοκιμή χάραξης με επιβαλλόμενη διείσδυση για τα στρώματα DLC_E39 (μπλε) και DLC_E73 (ροζ)

Διείσδυση (μm)	Πλάτος φθοράς (mm)	
	DLC_E39	DLC_E73
0,02	0	0
0,03	0	0,01
0,04	0,0087	0,019
0,05	0,022	0,037

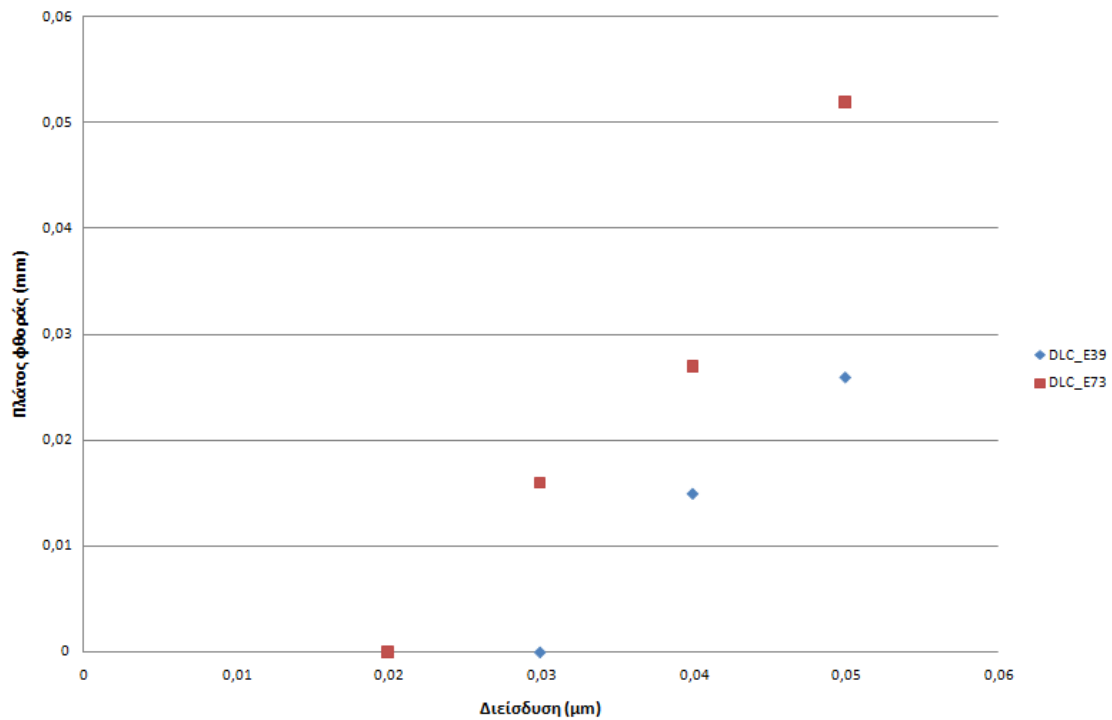
Πίνακας 5.19 Πλάτος φθοράς συναρτήσει της επιβαλλόμενης διείσδυσης για 100 επαναλήψεις

Διείσδυση (μm)	Πλάτος φθοράς (mm)	
	DLC_E39	DLC_E73
0,02	0	0
0,03	0	0,016
0,04	0,015	0,027
0,05	0,026	0,052

Πίνακας 5.20 Πλάτος φθοράς συναρτήσει της επιβαλλόμενης διείσδυσης για 10000 επαναλήψεις



Διάγραμμα 5.10 Πλάτος φθοράς – επιβαλλόμενη διείσδυση για 100 επαναλήψεις



Διάγραμμα 5.11 Πλάτος φθοράς – επιβαλλόμενη διείσδυση για 10000 επαναλήψεις

5.3.2 Δοκιμή χάραξης με ελεγχόμενο επιβαλλόμενο φορτίο

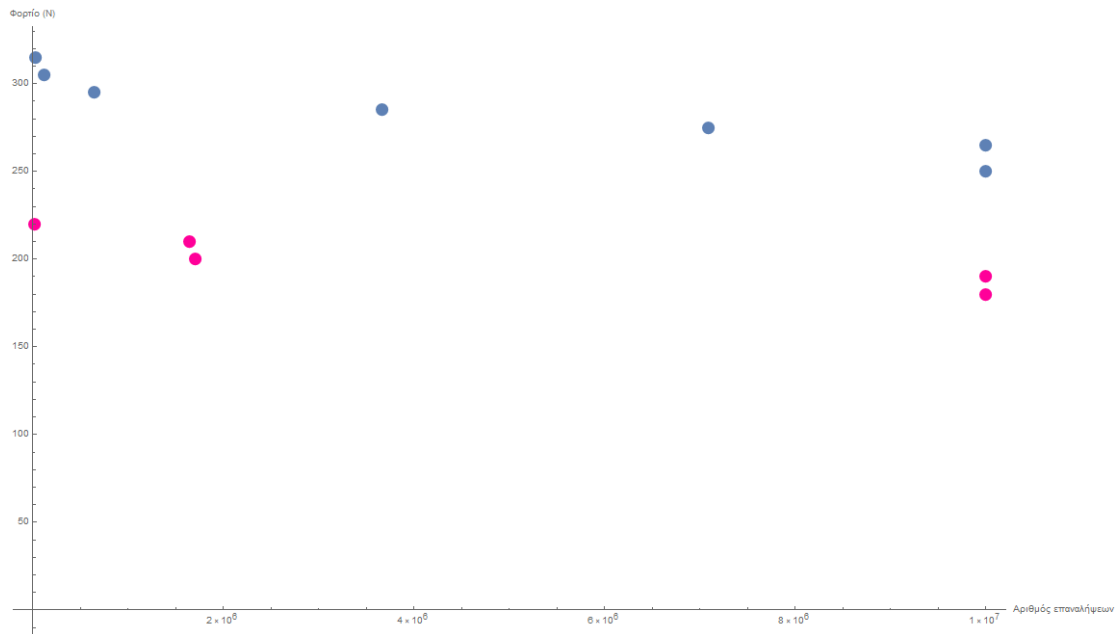
Η δοκιμή πραγματοποιείται για διάφορα επιβαλλόμενα φορτία για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής των επικαλύψεων. Στον πίνακα 5.21 παρουσιάζεται η διάρκεια ζωής του στρώματος DLC_E39 και στον πίνακα 5.22 του στρώματος DLC_E73. Η φθορά των στρωμάτων καταγράφεται για τις τιμές 200 N, 225 N, 250 N, 275 N, 300 N, 325 N και 350 N. Στον πίνακα 5.23 καταγράφεται το πλάτος του στρώματος που αστοχεί για 100 επαναλήψεις και στον πίνακα 5.24 για 10000 επαναλήψεις.

Φορτίο (N)	Διάρκεια ζωής (αριθμός επαναλήψεων)
250	10^7
265	10^7
275	$7,084 \times 10^6$
285	$3,66 \times 10^6$
295	$6,3807 \times 10^5$
305	$1,177 \times 10^5$
315	22928
325	0

Πίνακας 5.21 Διάρκεια ζωής στην χάραξη με επιβαλλόμενο φορτίο για την επικάλυψη DLC_E39

Φορτίο (N)	Διάρκεια ζωής (αριθμός επαναλήψεων)
190	10^7
200	$1,6994 \times 10^6$
210	$1,6424 \times 10^6$
215	53215
220	17697
225	0

Πίνακας 5.22 Διάρκεια ζωής στην χάραξη με επιβαλλόμενο φορτίο για την επικάλυψη DLC_E73



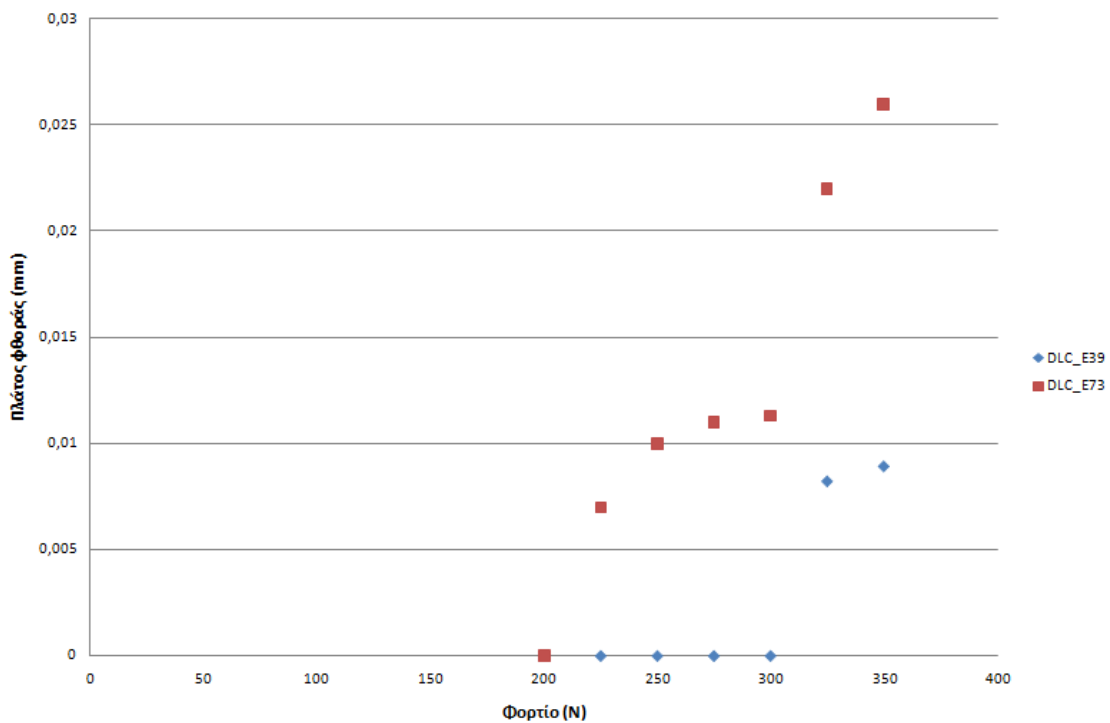
Διάγραμμα 5.12 Διάρκεια ζωής κατά την δοκιμή χάραξης με επιβαλλόμενο φορτίο για τα στρώματα DLC_E39 (μπλε) και DLC_E73 (ροζ)

Φόρτιση (N)	Πλάτος φθοράς (mm)	
	DLC_E39	DLC_E73
200	0	0
225	0	0,007
250	0	0,01
275	0	0,011
300	0	0,0113
325	0,0082	0,022
350	0,0089	0,026

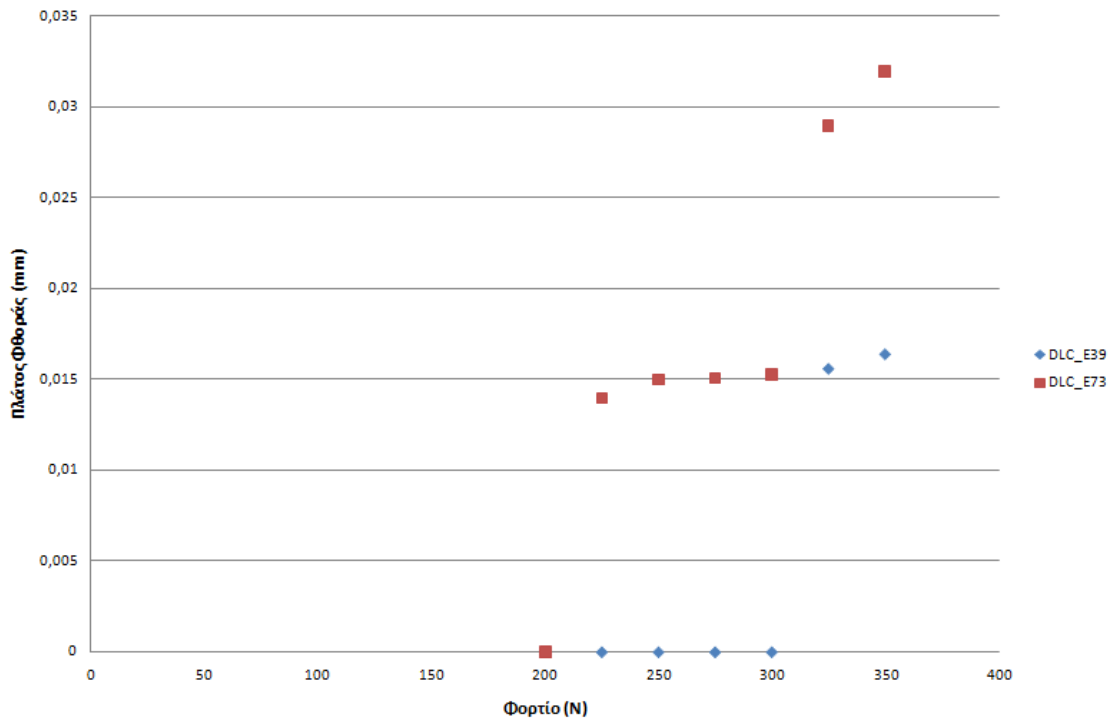
Πίνακας 5.23 Πλάτος φθοράς συναρτήσει της επιβαλλόμενης φόρτισης για 100 επαναλήψεις

Φόρτιση (N)	Πλάτος φθοράς (mm)	
	DLC_E39	DLC_E73
200	0	0
225	0	0,014
250	0	0,015
275	0	0,0151
300	0	0,0153
325	0,0156	0,029
350	0,0164	0,032

Πίνακας 5.24 Πλάτος φθοράς συναρτήσει της επιβαλλόμενης φόρτισης για 10000 επαναλήψεις



Διάγραμμα 5.13 Πλάτος φθοράς – επιβαλλόμενο φορτίο για 100 επαναλήψεις



Διάγραμμα 5.14 Πλάτος φθοράς – επιβαλλόμενο φορτίο για 10000 επαναλήψεις

5.4 Συμπεράσματα

Για την δοκιμή χάραξης, το σύστημα δεν παρουσιάζει φθορά στο στρώμα της επικάλυψης αδαμαντοειδούς άνθρακα για διείδυση μέχρι 0,02 μm για το στρώμα DLC_E73 και 0,027 μm για το στρώμα DLC_E39. Για την περίπτωση της επαναλαμβανόμενης κρούσης σφαίρας το ανώτατο φορτίο για την αποφυγή εμφάνισης φθοράς είναι 80 N για το στρώμα από DLC_39 και 70 N για το στρώμα από DLC_73. Στην περίπτωση της επαναλαμβανόμενης διείδυσης της σφαίρας η φθορά αποφεύγεται για διείδυση μέχρι 0,35 μm για την επικάλυψη DLC_E39 και μέχρι 0,25 μm για την DLC_E73. Κατά την δοκιμή χάραξης η εμφάνιση φθοράς αποτρέπεται για σταθερό επιβαλλόμενο φορτίο 265 N μέσω της κωνικής επιφάνειας για το στρώμα DLC_E39 και 190 N για το DLC_E3. Σε κάθε περίπτωση, το λεπτό στρώμα της επικάλυψης DLC_39 παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή στην φθορά από το αντίστοιχο της επικάλυψης DLC_73. Ελλείψει σχετικής βιβλιογραφίας στο αντικείμενο, με τις ίδιες παραμέτρους μελέτης δεν δύναται να πραγματοποιηθεί ενδελεχής έλεγχος των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Συγκρίνοντας με την διαθέσιμη βιβλιογραφία, όπως με την εργασία των Holmberg κ.ά. (2008) προκύπτει ότι η συμπεριφορά των αποτελεσμάτων είναι ακριβής ωστόσο δεν βρίσκεται μέτρο σύγκρισης για τα αριθμητικά αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα - Προτάσεις

Η εφαρμογή λεπτών στρωμάτων αδαμαντοειδούς άνθρακα (DLC) ως υμένας επικάλυψης προσδίδει αρκετά πλεονεκτήματα. Επενδυμένα γρανάζια, τμήματα κινητήρων (στροφαλοφόρος άξονας, δακτύλιος πιστονιού κ.ά.) και συστήματα κύλισης εν γένει εμφανίζουν σημαντική μείωση τριβών αυξάνοντας την συνολική απόδοση του συστήματος. Επιπλέον, στον τομέα των κατεργασιών παρατηρείται σημαντική βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των κοπτικών εργαλείων και των κατεργαζόμενων επιφανειών. Συγκεκριμένα, στο σύστημα κοπτικό εργαλείο – τεμάχιο αναπτύσσονται μικρότερες δυνάμεις από τις αντίστοιχες σε σύστημα με κοπτικό εργαλείο χωρίς επικάλυψη. Παράλληλα, η φθορά του κοπτικού εργαλείου συμβαίνει με μικρότερο ρυθμό. Τόσο κατά τις κατεργασίες κοπής όσο και στα συστήματα μετάδοσης κίνησης μειώνεται ή εξαλείφεται η ανάγκη χρήσης παραγόντων λίπανσης, γεγονός που συνεπάγεται περιβαλλοντικό όφελος. Τα στρώματα αδαμαντοειδούς άνθρακα (DLC) εμφανίζουν επαρκή συνάφεια με ποικίλα υλικά υποστρώματος με εκτεταμένο πεδίο εφαρμογών. Χάλυβες και κράματα αλουμινίων, κοινά κατασκευαστικά υλικά στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην αεροναυπηγική, καθώς και άλλα με διάφορες εφαρμογές επιδεικνύουν συμβατότητα και συνάφεια με στρώμα αδαμαντοειδούς άνθρακα. Κατά την διεξαγωγή δοκιμών επαναλαμβανόμενης κρούσης και δοκιμών χάραξης υποστρώματος κατασκευαστικού χάλυβα με επικάλυψη στρώματος αδαμαντοειδούς άνθρακα πάχους 1 μm καταγράφεται η αντοχή της επένδυσης στην φθορά. Κατά την διεξαγωγή της δοκιμής επαναλαμβανόμενης κρούσης τα στρώματα DLC_39 και DLC_73 χαρακτηρίζονται από πρακτικά άπειρη διάρκεια ζωής για μέγιστη επιβαλλόμενη φόρτιση 80 N και 70 N αντίστοιχα καθώς και για μέγιστη επιβαλλόμενη διείσδυση 0,35 μm και 0,25 μm. Κατόπιν διεξαγωγής δοκιμής χάραξης η μέγιστη επιβαλλόμενη φόρτιση στην κωνική επιφάνεια κώνου Rockwell για την αποφυγή εμφάνισης φθοράς στα στρώματα DLC_39 και DLC_73 ανέρχεται στα 265 N και 190 N αντίστοιχα και για σταθερή επιβαλλόμενη διείσδυση για τιμές 0,027 μm και 0,02 μm. Η επικάλυψη DLC_39 πάχους 1 μm εμφανίζει σε κάθε περίπτωση φόρτισης μικρότερη έκταση φθοράς από ότι η επικάλυψη DLC_73 ίδιου πάχους.

Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στην διεξαγωγή των προσομοιώσεων χαρακτηρίζονται ως ιδανικά. Οι επιφάνειες είναι λείες και δεν υπάρχουν ατέλειες όπως αρχικές ρωγμές. Η ανάλυση της κόπωσης και της φθοράς των στρωμάτων αδαμαντοειδούς άνθρακα βασιίζεται σε στοιχεία που αντλούνται από την βιβλιογραφία. Η διεξαγωγή των αντίστοιχων δοκιμών σε πειραματικό περιβάλλον κρίνεται σημαντική για τον καθορισμό ακριβούς βάσεως αναφοράς και άντλησης δεδομένων για περαιτέρω υπολογιστική ανάλυση. Σε μεταγενέστερο στάδιο, η παρούσα ανάλυση μπορεί να αποτελέσει την βάση για την κατασκευή μοντέλων που προσεγγίζουν σε μεγαλύτερο βαθμό ένα πραγματικό σύστημα, όπως με την εισαγωγή επιφανειακής τραχύτητας κυματομορφής και αρχικής ρωγμής μεγέθους των ορίων ανοχών των κοινών μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου. Επίσης, δύναται να πραγματοποιηθεί επέκταση της ανάλυσης για διαφορετικά υλικά υποστρώματος και με έλεγχο της συνάφειας μεταξύ υποστρώματος και επικάλυψης.

Βιβλιογραφία

- Abdollah, M.F.B., Yamaguchi, Y., Akao, T., Inayoshi, N., Miyamoto, N., Tokoroyama, T., & Umehara, N. (2012). *Deformation–wear transition map of DLC coating under cyclic impact loading*. Elsevier: Wear 274– 275 (2012) 435– 441
- Alaboodi, A.S., & Hussain, Z. (2019). *Finite element modeling of nano-indentation technique to characterize thin film coatings*. Journal of King Saud University – Engineering Sciences: Journal of King Saud University – Engineering Sciences 31 (2019) 61–69
- Bobzin, K., Brögelmann, T., Stahl, K., Stemplinger, J.P., Mayer, J., & Hinterstoißer, M. (2015). *Influence of wetting and thermophysical properties of diamond-like carbon coatings on the frictional behavior in automobile gearboxes under elasto-hydrodynamic lubrication*. Elsevier: Surface & Coatings Technology 284 (2015) 290–301
- Bobzin, K., & Brögelmann, T. (2016). *Minimizing Frictional Losses in Crankshaft Bearings of Automobile Powertrain by Diamond-like Carbon Coatings under Elasto-hydrodynamic Lubrication*. Elsevier: Surface & Coatings Technology 290 (2016) 100–109
- Bouzakis, E. (2020). *Fatigue Endurance Assessment of DLC Coatings on High-Speed Steels at Ambient and Elevated Temperatures by Repetitive Impact Tests*. MDPI: Coatings 2020, 10, 547
- Bouzakis, K.D., Charalampous, P., Skordaris, G., Dimofte, F., Ene, N.M., Ehinger, R., Gardner, S., Modrzejewski, B.S., & Fetty, J.R. (2015). *Fatigue and adhesion characterization of DLC coatings on steel substrates by perpendicular and inclined impact tests*. Elsevier: Surface & Coatings Technology 275 (2015) 207–213
- Brzezinka, T.L., Rao, J., Paiva, J.M., Kohlscheen, J., Fox-Rabinovich, G.S., Veldhuis, S.C., & Endrino, J.L. (2019). *DLC and DLC-WS₂ Coatings for Machining of Aluminium Alloys*. MDPI: Coatings 2019, 9, 192
- Bunshah, R.F. (2001). *HANDBOOK OF HARD COATINGS Deposition Technologies, Properties and Applications*. Park Ridge, New Jersey, U.S.A.: Noyes Publications
- Dai, M., Zhou, K., Yuan, Z., Ding, Q., & Fu, Z. (2000). *The cutting performance of diamond and DLC-coated cutting tools*. Elsevier: Diamond and Related Materials 9 2000. 1753-1757
- Folea, M., Roman, A., & Lupulescu, N.B. (2010). *An Overview Of DLC Coatings On Cutting Tools Performance*. ResearchGate: Academic Journal of Manufacturing Engineering · January 2010
- Fujisawa, N., Zhang, T.F., Li, O.L., & Kim, K.H. (2018). *Substrate-independent stress–strain behavior of diamond-like carbon thin films by nanoindentation with a spherical tip*. Journal of Materials Research: Journal of Materials Research ,Volume 33 , Issue 6 , 28 March 2018 , pp. 699 - 708

- Fukui, H., Okida, J., Omori, N., Moriguchi, H., & Tsuda, K. (2004). *Cutting performance of DLC coated tools in dry machining aluminum alloys*. Elsevier: Surface & Coatings Technology 187 (2004) 70- 76
- Holmberg, K., Ronkainen, H., Laukkanen, A., Wallin, K., Erdemir, A., & Eryilmaz, O. (2008). *Tribological analysis of TiN and DLC coated contacts by 3D FEM modelling and stress Simulation*. Elsevier: Wear 264 (2008) 877–884
- Kano, M. (2014). *Diamond-Like Carbon Coating Applied to Automotive Engine Components*. Tribology Online: Tribology Online, 9, 3 (2014) 135-142
- Klocke, F. (2011). *Manufacturing processes 1*. Springer
- Kumar, C.H., Majumder, H., Khan, A., & Patel, S.K. (2020). *Applicability of DLC and WC/C low friction coatings on Al₂O₃/TiCN mixed ceramic cutting tools for dry machining of hardened 52100 steel*. Elsevier: Ceramics International 46 (2020) 11889–11897
- Lindholm, P., Björklund, S., & Svahn, F. (2006). *Method and surface roughness aspects for the design of DLC coatings*. Elsevier: Wear 261 (2006) 107–111
- Liu, L., Wang, T., Huang, J., He, Z., Yi, Y., & Du, K. (2016). *Diamond-like carbon thin films with high density and low internal stress deposited by coupling DC/RF magnetron sputtering*. Elsevier: Diamond & Related Materials 70 (2016) 151-158
- Martins, P.S., Almeida Magalhaes Júnior, P.A., Rubens Gonçalves Carneiro, J., Cheikh Talibouya Ba, E., & Ferreira Vieira, V. (2022). *Study of Diamond-Like Carbon coating application on carbide substrate for cutting tools used in the drilling process of an Al–Si alloy at high cutting speeds*. Elsevier: Wear 498-499 (2022) 204326
- McMaster, S.J., Liskiewicz, T.M., Neville, A., & Beake, B.D. (2020). *Probing fatigue resistance in multi-layer DLC coatings by micro- and nanoimpact: Correlation to erosion tests*. Elsevier: Surface & Coatings Technology 402 (2020) 126319
- Mustafa, A., & Tanju, K. (2010). *Investigation of the machinability of the Al 7075 alloy using DLC coated cutting tools*. Academic Journal: Scientific Research and Essays Vol. 6(1), pp. 44-51, 4 January, 2011
- Solis, J., Zhao, H., Wang, C., Verduzco, J.A., Bueno, A.S., & Neville, A. (2016). *Tribological performance of an H-DLC coating prepared by PECVD*. Elsevier: Applied Surface Science 383 (2016) 222–232
- Sujitno, T., Mulyani, E., Suprpto, Andriyanti, W., Suharlan, D., & Malau, V. (2019). *Effect of Diamond-Like Carbon Thin Film on the Fatigue Strength of AISI 4340 Steel*. SciencePG: Advances in Materials 2019; 8(1): 21-26
- Sundaram, V.S. (2006). *Diamond like carbon film as a protective coating for high strength steel and titanium alloy*. Elsevier: Surface & Coatings Technology 201 (2006) 2707–2711
- Ucun, I., Aslantas, K., & Bedir, F. (2015). *The performance Of DLC-coated and uncoated ultra-fine carbide tools in micromilling of Inconel 718*. Elsevier: Precision Engineering 41 (2015) 135–144

- Wang, L., Liu, Y., Chen, H., & Wang, M. (2022). *Modification Methods of Diamond like Carbon Coating and the Performance in Machining Applications: A Review*. MDPI: Coatings 2022, 12, 224
- Weikert, T., Wartzack, S., Baloglu, M.V., Willner, K., Gabel, S., Merle, B., Pineda, F., Walczak, M., Marian, M., Rosenkranz, A., & Tremmel, S. (2021). *Evaluation of the surface fatigue behavior of amorphous carbon coatings through cyclic nanoindentation*. Elsevier: Surface & Coatings Technology 407 (2021) 126769
- Xiao, Y., Shi, W., Han, Z., Luo, J., & Xu, L. (2016). *Residual stress and its effect on failure in a DLC coating on a steel substrate with rough surfaces*. Elsevier: Diamond & Related Materials 66 (2016) 23–35
- Ziegltrum, A., Lohner, T., & Stahl, K. (2017). *TEHL Simulation on the Influence of Lubricants on the Frictional Losses of DLC Coated Gears*. MDPI: Lubricants 2018, 6, 17

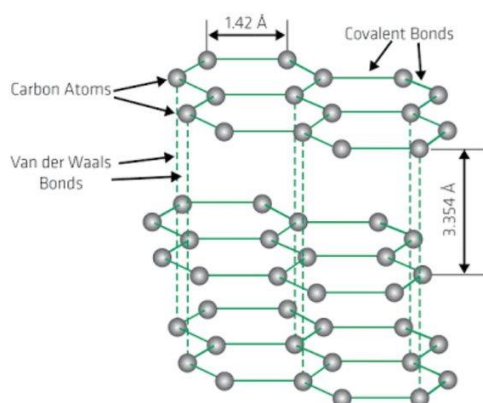
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Τύποι αδαμαντοειδούς άνθρακα (DLC)

Ο αδαμαντοειδής άνθρακας (DLC) είναι μια μετασταθή κατάσταση κυρίως άμορφου άνθρακα. Αποτελείται από την σύνθεση τριών μερών, τριών διαφορετικών διαμορφώσεων. Τα μέρη αυτά είναι η sp^2 διαμόρφωση (γραφίτης), η sp^3 διαμόρφωση (διαμάντι) και το μέρος του υδρογόνου. Ο χαρακτηρισμός της άμορφης κατάστασης προσδιορίζεται όταν στο υλικό κυριαρχεί η sp^2 διαμόρφωση. Αντίστοιχα, η τετραεδρική κατάσταση χαρακτηρίζεται από την κυριαρχία της sp^3 διαμόρφωσης. Ο αδαμαντοειδής άνθρακας ονομάζεται μη υδρογονούχος όταν η περιεκτικότητα του σε υδρογόνο είναι μικρότερη του 5%. Ομοίως, λέγεται υδρογονούχος όταν η περιεκτικότητα σε υδρογόνο είναι μεγαλύτερη του 5%. Στον πίνακα Α.1 παρατίθενται οι βασικές μορφές αδαμαντοειδούς άνθρακα με τον σύντομο χαρακτηρισμό τους.

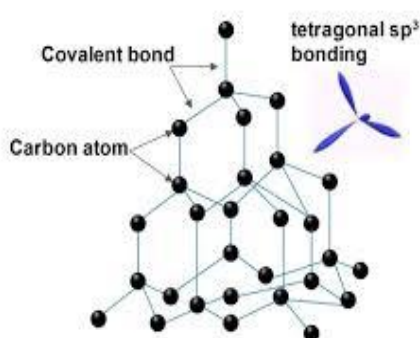
Τύπος DLC	Περιγραφή
ta-C:H	Τετραεδρική δομή, υδρογονούχος
a-C:H	Άμορφος άνθρακας, υδρογονούχος
a-C:Me	Άμορφος άνθρακας, μη υδρογονούχος με έγχυση μετάλλου
a-C:H:Me	Άμορφος άνθρακας, υδρογονούχος με έγχυση μετάλλου
a-C:H:X	Άμορφος άνθρακας, υδρογονούχος με προσθήκη μη μεταλλικών στοιχείων

Πίνακας Α1 Τύποι αδαμαντοειδούς άνθρακα DLC

Σημείωση: Το σύμβολο Me αναπαριστά ένα μέταλλο όπως W,Ti,Zr. Το σύμβολο X αναπαριστά ένα μη μεταλλικό στοιχείο όπως Si,O,N,F,B.



Εικόνα Α1. Διαμόρφωση sp^2 (γραφίτη)
(πηγή: quora.com)



Εικόνα Α2. Διαμόρφωση sp^3 (διαμάντι)
(πηγή: diva-portal.com)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. Μέθοδοι εναπόθεσης επικάλυψης

Οι μέθοδοι επικάλυψης λεπτού στρώματος υλικού σε διαφορετικό υλικό υποστρώματος συμβαίνει με την χρήση δύο βασικών και γενικών μεθόδων, της φυσικής εναπόθεσης αερίου (physical vapor deposition - PVD) και της χημικής εναπόθεσης αερίου (chemical vapor deposition- CVD). Η μέθοδος φυσικής εναπόθεσης αποτελεί την πιο κοινή.

PVD

Η μέθοδος φυσικής εναπόθεσης συμβαίνει κυρίως στο θερμοκρασιακό εύρος 160-600°C, με τις περισσότερες εφαρμογές να πραγματοποιούνται γύρω στους 160 °C, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλή καταπόνηση του υποστρώματος. Η πίεση στον θάλαμο εναπόθεσης προσεγγίζει το κενό. Η σύνδεση των επιφανειών γίνεται με φυσικό τρόπο οπότε απαιτείται επεξεργασία καθαρισμού της προς επικάλυψη επιφάνειας ώστε η σύνδεση να είναι αποτελεσματική. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά ευέλικτη ως προς την ποικιλία των υποστρωμάτων που επενδύονται εφόσον δεν απαιτείται χημική αντιδραστικότητα μεταξύ των υλικών. Η μέθοδος χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες: θερμική εναπόθεση ή κενού (vacuum /thermal evaporation), εναπόθεση εκκένωσης τόξου (arc discharge evaporation) και διασκορπισμός (sputtering).

Θερμική εναπόθεση

Το υλικό επικάλυψης εξατμίζεται από μια θερμική πηγή (αντίσταση ή δέσμη ηλεκτρονίων) υπό πίεση θαλάμου 10^{-3} - 10^{-6} Pa. Τα εξατμισμένα άτομα συγκρούονται στην επιθυμητή επιφάνεια. Λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας του υποστρώματος το αέριο στερεοποιείται και προσκολλάται. Η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται από υψηλούς ρυθμούς εναπόθεσης. Χρησιμοποιείται κυρίως όπου στόχος είναι το οπτικό αποτέλεσμα εφόσον δεν προσδίδει καλές μηχανικές ιδιότητες.

Εναπόθεση εκκένωσης τόξου

Το προς επικάλυψη υλικό εξατμίζεται και ιονίζεται μέσω ηλεκτρικού τόξου σε κενό. Τα ιόντα κινούνται προς τον φορτισμένο στόχο που λειτουργεί ως κάθοδος. Η μέθοδος χαρακτηρίζεται από υψηλά ποσοστά ιονισμού με αποτέλεσμα να παράγονται στρώματα μεγάλου πάχους με καλή συνεκτικότητα. Το υλικό επικάλυψης πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγώγιμο.

Διασκορπισμός

Σε θάλαμο υπό χαμηλή πίεση, αδρανές αέριο (συνήθως Ar) που βρίσκεται εντός πλάσματος ιονίζεται εφαρμόζοντας υψηλό δυναμικό. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα ωθούνται προς τον στόχο, που λειτουργεί ως κάθοδος, διώχνοντας με κρούση τις επιφανειακές ακαθαρσίες. Έπειτα, εισάγεται το αέριο επεξεργασίας υπό πίεση 0,1-1 Pa. Σε δυναμικό -1 έως -5 V παράγεται πλάσμα μέσω της εκκένωσης. Το πλάσμα προσκολλάται στο υπόστρωμα που λειτουργεί ως άνοδος. Η μέθοδος είναι καθολικά εφαρμόσιμη αφού η εξάτμιση δεν γίνεται θερμικά και το σημείο τήξης των υλικών δεν σχετίζεται στην διαδικασία. Η μέθοδος χωρίζεται σε συνεχούς ρεύματος για ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό και σε διασκορπισμό RF όπου δημιουργείται πεδίο εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής συχνότητας. Ο διασκορπισμός μαγνήτρου χρησιμοποιεί μαγνήτες για τον προσανατολισμό του πλάσματος στην επιθυμητή κατεύθυνση.

CVD

Στη μέθοδο αυτή, το υλικό επικάλυψης σχηματίζεται απευθείας πάνω στην επιφάνεια του υποστρώματος με χημική αντίδραση. Η πίεση στον θάλαμο εναπόθεσης είναι μεταξύ 10^3 - 10^5 Pa και η θερμοκρασία κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 450-1100°C ανάλογα με την θερμοκρασία που απαιτείται για την ενεργοποίηση της χημικής αντίδρασης. Λόγω των διαφορετικών θερμικών αγωγιμοτήτων, από την ψύξη του συστήματος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, το πεδίο των παραμενουσών τάσεων είναι εν γένει θλιπτικό. Η μέθοδος χωρίζεται σε τρεις υποκατηγορίες: υψηλής θερμοκρασίας (HT-CVD 900-1100°C), μέσης θερμοκρασίας (MT-CVD 700-900°C) και ενεργοποίηση με ενίσχυση πλάσματος (PECVD 450-600°C).

Υψηλής θερμοκρασίας

Η τεχνική αυτή παρουσιάζει προϊόν με υψηλό επίπεδο συνοχής μεταξύ των επιφανειών λόγω της εύκολης μεταφοράς υλικού διαμέσου τους. Το σύστημα χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή στην φθορά λόγω του σχετικά μεγάλου πάχους και της υψηλής σκληρότητας του στρώματος επικάλυψης. Από την άλλη, η μέθοδος είναι προβληματική στην επικάλυψη σκληρυμένων χαλύβων από την επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών, οι οποίες προκαλούν και μείωση στην αντοχή του υποστρώματος.

Μέσης θερμοκρασίας

Σε αυτή την περίπτωση, η θερμική καταπόνηση είναι μικρότερη σε σχέση με την διαδικασία υπό υψηλή θερμοκρασία. Επίσης εμφανίζονται χαμηλότερες παραμένουσες τάσεις.

Ενεργοποίηση με ενίσχυση πλάσματος

Η θερμική ενέργεια που προσφέρεται σε αυτή την περίπτωση δεν επαρκεί για να επιτευχθεί η ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης. Το ενεργειακό υπόλοιπο παρέχεται από ηλεκτρική εκκένωση παλμικού πλάσματος. Το σχηματιζόμενο πεδίο των παραμενουσών τάσεων είναι θλιπτικό. Τα παραγόμενα συστήματα αυτής της τεχνικής έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη από ότι συμβαίνει στις άλλες περιπτώσεις. Τα κοπτικά εργαλεία που κατασκευάζονται με αυτή την μέθοδο εμφανίζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Είναι η καταλληλότερη, από τις παραπάνω, για παραγωγή πολύ λεπτών στρωμάτων της τάξης των nm.

Στην περίπτωση της εναπόθεσης αδαμαντοειδούς άνθρακα (DLC) οι πιο κοινώς χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι ο διασκορπισμός, η εναπόθεση εκκένωσης τόξου και η ενεργοποίηση με ενίσχυση πλάσματος. Για την διαδικασία της εναπόθεσης αδαμαντοειδούς άνθρακα, ως πηγή άνθρακα, συνήθως χρησιμοποιείται ασετυλίνη (C_2H_2) και μεθάνιο (CH_4).