



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Τριβολογική συμπεριφορά επικαλύψεων οξειδίων με
τεχνικές θερμικού ψεκασμού»**



ΠΑΠΟΥΛΑ ΑΡΤΕΜΙΣ

Αριθμός Μητρώου: **(461)272017057**

Επιβλέπων Καθηγητής: **Αθανάσιος Μουρλάς**

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

BACHELOR'S THESIS

« Tribological behavior of thermal-sprayed oxide coatings »



ΠΑΡΟΥΛΑ ΑΡΤΕΜΙΣ

Registration Number: **(461)272017057**

Supervisor: **Athanasios Mourlas**

AIGALEO, MARCH 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Τριβολογική συμπεριφορά επικαλύψεων οξειδίων με
τεχνικές θερμικού ψεκασμού**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/A	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΠΑΝΔΩΡΑ ΨΥΛΛΑΚΗ	Καθηγήτρια	
2	ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΤΟΣ	Καθηγητής	
3	ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΜΟΥΡΛΑΣ	Διδάσκων μέσω προγράμματος ΕΣΠΑ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Πάπουλα Άρτεμις του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου (461)272017057 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα:

Πάπουλα Άρτεμις



i. Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα κ. Αθανάσιο Μουρλά, Ακαδημαϊκό Υπότροφο του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών (Διδάσκων μέσω προγράμματος ΕΣΠΑ), της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, και την κα Ψυλλάκη Πανδώρα, Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για τη βοήθεια και τις πολύτιμες συμβουλές της.

Στη συνέχεια θα ήθελα να σταθώ στην πραγματοποίηση της πρακτικής μου άσκησης, ως μία υπέροχη εμπειρία που έλαβε χώρα στην Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία (Ε.Α.Β). Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους μηχανικούς του τμήματος ειδικών διεργασιών και τεχνολογίας υλικών των αεροσκαφών, τον κ. Στεργίου Βασίλη και τον κ. Σκαρβέλη Παναγιώτη, που με ανέλαβαν και με καθοδήγησαν στο πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Εξ' ίσου σημαντική και η συνεισφορά του κ. Ντέκα Κωνσταντίνου, υπευθύνου μηχανικού του συνεργείου θερμικών ψεκασμών, ο οποίος με εκπαίδευσε στη διεργασία των θερμικών ψεκασμών, συνεργαστήκαμε και εν τέλει κατασκευάσαμε τις επικαλύψεις, απαραίτητες για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ το σημαντικότερο κομμάτι σε όλα τα βήματα που έχω κάνει μέχρι σήμερα, την οικογένειά μου, η οποία με στήριξε όλα αυτά τα χρόνια και πίστεψε από την αρχή σε εμένα, καθώς ήταν παρούσα σε κάθε γεγονός της ζωής μου.

Αιγάλεω, Μάρτιος 2023

Πάπουλα Άρτεμις

ii. Περίληψη

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, αφορά στην μελέτη των τριβολογικών ιδιοτήτων, δηλαδή τη συμπεριφορά σε τριβή και φθορά, κεραμικών επικαλύψεων, που δημιουργήθηκαν με την τεχνική του θερμικού ψεκασμού.

Αρχικά δημιουργήθηκαν επικαλύψεις περιεκτικότητας 100% w/w ζirkονίας (ZrO_2) και 100% w/w αλουμίνιας (Al_2O_3), που έχουν πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών, με τη μέθοδο της θερμικής ατμοσφαιρικής εναπόθεσης ψεκασμού (Atmospheric Plasma Spraying-APS) σε υποστρώματα δομικού χάλυβα, ανοξειδωτού χάλυβα, αλουμινίου και τιτανίου, στις εγκαταστάσεις της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (E.A.B.).

Έπειτα εξετάστηκε η τριβολογική συμπεριφορά όλων των επικαλύψεων ZrO_2 και Al_2O_3 , με τη χρήση διατάξεων ελέγχου της τριβής και της φθοράς, τύπου α) στυλίσκου-δίσκου (Pin-On-Disc) και β) τριών σωμάτων (Three Body Abrasion), βάσει των προδιαγραφών ASTM G99 και G65 αντίστοιχα. Συγκεκριμένα για τη διάταξη τύπου pin-on-disc, ως ανταγωνιστικό υλικό χρησιμοποιήθηκε σφαίρα Al_2O_3 , η δε μελέτη πραγματοποιήθηκε για ταχύτητα ολίσθησης 20cm/sec, κάθετη φόρτιση 5N και για 20.000 κύκλους ολίσθησης.

Από την ανωτέρω μελέτη και συμπερασματικά, οι επικαλύψεις Al_2O_3 , εμφάνισαν υψηλότερο συντελεστή τριβής αλλά και υψηλότερη αντίσταση στη φθορά σε σύγκριση με τις επικαλύψεις ZrO_2 , ενώ ο κύριος μηχανισμός φθοράς για όλα τα συστήματα ήταν αυτός της λείανσης.

Λέξεις Κλειδιά: Αλουμίνια Al_2O_3 , Ατμοσφαιρικός ψεκασμός πλάσματος, Ζirkονία ZrO_2 , Κεραμικά υλικά, Τραχύτητα, Τριβολογία, Φθορά.

iii. Abstract

The research carried out during the preparation of the thesis concerns the study of the tribological properties, i.e. the behaviour in abrasion and wear, of ceramic coatings created by the thermal spray technique.

Initially, coatings containing 100% w/w zirconia (ZrO_2) and 100% w/w alumina (Al_2O_3), which have a variety of industrial applications, were created by the method of Atmospheric Plasma Spaying (Atmospheric Plasma Spaying-APS) on substrates of structural steel, stainless steel, aluminium and titanium, at the facilities of the Hellenic Aerospace Industry (HEA).

Then, the tribological behaviour of all ZrO_2 and Al_2O_3 coatings was investigated using 2 types abrasion control devices, a) Pin-On-Disc and b) Three Body Abrasion, based on ASTM G99 and G65 specifications respectively. Specifically for the pin-on-disc type assembly, Al_2O_3 sphere was used as the competing material and the study was carried out for a sliding speed of 20cm/sec, a vertical load of 5N and 20 000 sliding cycles.

From the above study and in conclusion, Al_2O_3 coatings, showed higher coefficient of friction and also higher wear resistance compared to ZrO_2 coatings, while the main wear mechanism for all systems was that of abrasion.

Key Words: Alumina Al_2O_3 , Atmospheric Plasma spraying, Zirconia ZrO_2 , Ceramic materials, Friction, Tribology, Wear.

Περιεχόμενα

i. Ευχαριστίες	i
ii. Περίληψη	ii
iii. Abstract	iii
iv. Λίστα Εικόνων	viii
v. Λίστα Διαγραμμάτων	x
vi. Λίστα Πινάκων	xii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	1
1.1. Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση	1
1.2. Στόχοι και μεθοδολογία έρευνας.....	4
1.3. Δομή της εργασίας.....	5
Κεφάλαιο 2ο: Τριβολογία	7
2.1. Πιστότητα επιφανειών.....	7
2.2. Τραχύτητα	9
2.2.1. Παράμετροι τραχύτητας.....	10
2.2.2. Προσδιορισμός της τραχύτητας-Τραχύμετρα	12
2.3. Τριβή	15
2.3.1. Είδη τριβής.....	17
2.3.2. Μέτρηση της τριβής	19
2.3.3. Η τριβή των κεραμικών υλικών.....	19
2.4. Φθορά	19
2.4.1. Κύριοι μηχανισμοί φθοράς.....	22
2.4.2. Φθορά των υλικών.....	26
2.4.3. Κόπωση	27
2.4.4. Αντιμετώπιση της φθοράς	30
2.4.5. Προστασία-Μείωση Φθοράς με επεξεργασία των επιφανειών	31
Κεφάλαιο 3ο: Επικαλύψεις Κεραμικών Υλικών	37
3.1.2. Πορώδες κεραμικών υλικών.....	39
3.1.3. Οξείδια.....	40
3.1.4. Καρβίδια.....	44
3.1.5. Νιτρίδια	44
3.1.6. Stalon.....	45

3.1.7.	Κεραμομεταλλικά σύνθετα.....	45
3.1.8.	Πυριτία	46
3.1.9.	Νανοκεραμικά και σύνθετα υλικά.....	46
3.2.	Επικαλύψεις.....	47
3.2.1.	Κεραμικές επικαλύψεις	47
3.2.2.	Επικαλύψεις Bonding	48
3.2.3.	Επικαλύψεις ζirkονίας ZrO_2	48
3.2.4.	Επικαλύψεις αλουμίνας Al_2O_3	48
3.2.5.	Πούδρες σύνθετων υλικών	50
3.2.6.	Ποιοτικός έλεγχος	50
3.2.6.1.	Καταστροφικές δοκιμές.....	50
3.2.6.2.	Μη καταστρεπτικές δοκιμές.....	50
Κεφάλαιο 4ο: Θερμικός Ψεκασμός		51
4.1.1.	Προετοιμασία υποστρώματος για τη μέθοδο ψεκασμού.....	57
4.1.2.	Η σημερινή του χρήση στη βιομηχανία.....	58
4.2.	Θερμικός ψεκασμός πλάσματος.....	59
4.2.1.	Ατμοσφαιρικός θερμικός ψεκασμός πλάσματος - APS.....	60
4.3.	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδου ατμοσφαιρικού θερμικού ψεκασμού πλάσματος	61
4.3.1.	Χαρακτηριστικά πλάσματος.....	62
Κεφάλαιο 5ο: Πειραματικό Μέρος		67
5.1.1.	Διαδικασία περάτωσης ατμοσφαιρικού θερμικού ψεκασμού πλάσματος δοκιμίων. 67	
5.1.2.	Εξοπλισμός του θερμικού ψεκασμού	67
5.1.3.	Προετοιμασία δοκιμίων πριν τον θερμικό ψεκασμό	71
5.1.4.	Στοιχεία των υλικών των δοκιμίων πριν και μετά τον ψεκασμό.....	72
5.1.5.	Στοιχεία και χαρακτηριστικά των επικαλύψεων	74
5.1.6.	Επικάλυψη αλουμίνας Al_2O_3	75
5.1.7.	Επικάλυψη Bonding για επίστρωση αλουμίνας Al_2O_3	75
5.1.8.	Επικάλυψη ζirkονίας ZrO_2	76
5.1.9.	Επικάλυψη Bonding για επίστρωση ζirkονίας ZrO_2	76
5.1.10.	Τελικά δοκίμια μετά τον θερμικό ψεκασμό	77
5.2.	Πειραματική διάταξη τριβομέτρου τύπου (Pin-On-Disk)	78
5.2.1.	Δοκιμή τριβής στη διάταξη (Pin-On-Disk)	79

5.2.2.	Τελικά δοκίμια έπειτα από τη δοκιμή τριβής στη διάταξη (Pin-On-Disk) και οπτική στερεοσκοπία.....	80
5.2.3.	Μετρήσεις.....	83
5.2.4.	Διαγράμματα	84
5.3.	Τραχύμετρο	88
5.3.1.	Προσδιορισμός του όγκου φθοράς με τραχύμετρο	89
5.3.2.	Μετρήσεις.....	89
5.3.3.	Διαγράμματα	95
5.4.	Πειραματική διάταξη τριβομέτρου τύπου (3ων Σωμάτων) ξηρής εκτριβής	98
5.4.1.	Δοκίμια έπειτα από δοκιμή τριβής στη διάταξη τριβομέτρου τύπου (3ων Σωμάτων).....	99
5.4.2.	Λήψη βάρους πριν και μετά την δοκιμή τριβής – Μετρήσεις.....	100
5.4.3.	Διάγραμμα	101
Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα		103
Βιβλιογραφία.....		105

iv. Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Μεγέθυνση πραγματικής επιφάνειας.....	9
Εικόνα 2: Υπολογισμός Ra απλής γεωμετρικής κατανομής.....	10
Εικόνα 3: Εφαπτομενικές επιφάνειες που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους δημιουργώντας τριβή T (N).....	15
Εικόνα 4: Μηχανισμοί Φθοράς υλικών	25
Εικόνα 5: Ένδειξη διαδικασίας θερμικού ψεκασμού και αναπαράσταση των κόκκων της πούδρας σε τετηκυία κατάσταση.	56
Εικόνα 6: Ένδειξη διαδικασίας Αμμοβολής	58
Εικόνα 7: Thermal Insulation Tapes.	61
Εικόνα 8: Διάταξη Thermal Spray Machine SULZER METCO.....	68
Εικόνα 9: Ρομποτικός Βραχίονας (Robot ELMO της εταιρείας ABB Robotics Sweden) για συγκράτηση και κίνηση του Injector.	68
Εικόνα 10: Powder feeder (Θέση 2 Δοχείων διαφορετικής χωρητικότητας και παροχή πούδρας).....	69
Εικόνα 11: Injector Plasma Spray Gun Oerlikon Metco F4MB-XL	69
Εικόνα 12: Ηλεκτρονικό τηλεχειριστήριο του ρομποτικού βραχίονα και του Plasma Spray.	70
Εικόνα 13: Χειρισμός αερίων και πουδρών κάθε προγράμματος θερμικού ψεκασμού. ..	70
Εικόνα 14: Αμμοβολή και η διάταξή της.....	71
Εικόνα 15: Καθαρισμός με ασετόν	71
Εικόνα 16: Στήριξη βεργών κατά την προετοιμασία τους για ατμοσφαιρικό ψεκασμό πλάσματος με πούδρα Ζιρκονίας.	72
Εικόνα 17. Ενδεικτικά η πούδρα Ζιρκονίας ZrO ₂ (204B-NS) της OERLIKON METCO	74
Εικόνα 18: Τελικά δοκίμια επικαλύψεων ζιρκονίας με λευκό χρώμα και αλουμίνας με γκρι, σε υποστρώματα (κατασκευαστικού χάλυβα, ανοξείδωτου χάλυβα, αλουμίνιο και τιτάνιο).....	77
Εικόνα 19: Τριβόμετρο τύπου Pin-On-Disk (CSM-Instruments).....	78
Εικόνα 20: Προετοιμασία δοκιμίων για την διαδικασία τριβής των δοκιμίων στη διάταξη (Pin-On-Disk).	80
Εικόνα 21: Δοκίμια αμέσως μετά τη τριβή στη διάταξη (Pin-On-Disk).	80

Εικόνα 22: Αποτελέσματα δοκιμών τριβής των δοκιμίων με επικαλύψεις ($ZrO_2-Al_2O_3$) αντίστοιχα – Εμφανή και τα ψήγματα φθοράς.	81
Εικόνα 23: Δοκίμια υποστρώματος κατασκευαστικού χάλυβα ($A_3:ZrO_2 - B_3:Al_2O_3$).	81
Εικόνα 24: Δοκίμια υποστρώματος ανοξειδωτού χάλυβα ($C_4:ZrO_2- D_4:Al_2O_3$).	82
Εικόνα 25: Δοκίμια υποστρώματος αλουμινίου ($E_4:ZrO_2- F_4:Al_2O_3$).	82
Εικόνα 26: Δοκίμια υποστρώματος τιτανίου ($G_4:ZrO_2- H_4:Al_2O_3$).	83
Εικόνα 27: Τραχύμετρο- Προφιλόμετρο Surtronic 3+ της εταιρείας Taylor Hobson Pneumo.	88
Εικόνα 28: Δοκίμιο τη στιγμή της τραχυμέτρησης.....	89
Εικόνα 29: Ένδειξη λήψης μετρήσεων δοκιμίου με τραχύμετρο.	89
Εικόνα 30: Διάταξη τριβομέτρου τύπου (3ων σωμάτων).	98
Εικόνα 31: Δοκιμή τριβής έπειτα από χρόνο a) 30sec και b) 300sec σε επίστρωση ζirkονίας.	99
Εικόνα 32: Δοκιμή τριβής έπειτα από χρόνο c) 30sec και d) 300sec σε επίστρωση αλουμίνιας.....	99
Εικόνα 33: Ενδεικτικά η λήψη μέτρησης βάρους δοκιμίου B_2 επικάλυψης (Al_2O_3) μετά την δοκιμή των 30sec.....	100

v. Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Κατηγορίες φθοράς.....	21
Διάγραμμα 2: Πάχος παραμορφωμένου στρώματος - Μέσο πάχος σωματιδίων φθοράς. ...	29
Διάγραμμα 3: Συγκεντρωτικό διάγραμμα με το συντελεστή τριβής (μ) των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO_2 & αλουμίνιας Al_2O_3 , σε υποστρώματα κατασκευαστικού χάλυβα (St), ανοξειδωτού χάλυβα (S.St), αλουμινίου (Al) και τιτανίου (Ti), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.....	84
Διάγραμμα 4: Συντελεστής τριβής μ των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO_2 & αλουμίνιας Al_2O_3 σε υπόστρωμα κατασκευαστικού χάλυβα (St), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.....	85
Διάγραμμα 5: Συντελεστής τριβής μ των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO_2 & αλουμίνιας Al_2O_3 σε υπόστρωμα ανοξειδωτού χάλυβα (S.St), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.	85
Διάγραμμα 6: Συντελεστής τριβής μ των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO_2 & αλουμίνιας Al_2O_3 σε υπόστρωμα αλουμινίου (Al), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.	86
Διάγραμμα 7: Συντελεστής τριβής μ των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO_2 & αλουμίνιας Al_2O_3 σε υπόστρωμα τιτανίου (Ti), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.....	86
Διάγραμμα 8: Συντελεστής τριβής (μ) της επικάλυψης ζirkονίας ZrO_2 σε υποστρώματα κατασκευαστικού χάλυβα (St), ανοξειδωτού χάλυβα (S.St), αλουμινίου (Al) και τιτανίου (Ti), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.	87
Διάγραμμα 9: Συντελεστής τριβής (μ) της επικάλυψης αλουμίνιας Al_2O_3 σε υποστρώματα κατασκευαστικού χάλυβα (St), ανοξειδωτού χάλυβα (S.St), αλουμινίου (Al) και τιτανίου (Ti), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.	87
Διάγραμμα 10: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (A ₃ :ZrO ₂ -St).....	91
Διάγραμμα 11: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (B ₃ :Al ₂ O ₃ -St).	91
Διάγραμμα 12: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (C ₄ :ZrO ₂ -S.St).....	92
Διάγραμμα 13: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (D ₄ : Al ₂ O ₃ -S.St).....	92
Διάγραμμα 14: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (E ₄ :ZrO ₂ -Al).....	93
Διάγραμμα 15: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (F ₄ : Al ₂ O ₃ -Al).	93
Διάγραμμα 16: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (G ₄ :ZrO ₂ -Ti).....	94
Διάγραμμα 17: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (H ₄ : Al ₂ O ₃ -Ti).	94

Διάγραμμα 18: Όγκος φθοράς $V(w)$ (mm^3) των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO_2 και αλουμίνας Al_2O_3 σε υποστρώματα κατασκευαστικού χάλυβα (St), ανοξειδωτου χάλυβα (S.St), αλουμινίου (Al) και τιτανίου (Ti), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.....	95
Διάγραμμα 19: Όγκος φθοράς $V(w)$ (mm^3) των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO_2 και αλουμίνας Al_2O_3 σε υπόστρωμα κατασκευαστικού χάλυβα (St), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.....	96
Διάγραμμα 20: Όγκος φθοράς $V(w)$ (mm^3) των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO_2 και αλουμίνας Al_2O_3 σε υπόστρωμα ανοξειδωτου χάλυβα (S.St), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.....	96
Διάγραμμα 21: . Όγκος φθοράς $V(w)$ (mm^3) των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO_2 και αλουμίνας Al_2O_3 σε υπόστρωμα αλουμινίου (Al), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.	97
Διάγραμμα 22: . Όγκος φθοράς $V(w)$ (mm^3) των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO_2 και αλουμίνας Al_2O_3 σε υπόστρωμα και τιτανίου (Ti), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.	97
Διάγραμμα 23: Απεικόνιση διαφοράς μάζας πριν & μετά την δοκιμή τριβής για κάθε επικάλυψη.....	101

vi. Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Ποιότητες επιφανειών κατά DIN 3141	11
Πίνακας 2: Συμβολισμός της διεύθυνσης μέτρησης ως προς τη διεύθυνση της επιφανειακής κατεργασίας.....	12
Πίνακας 3: Ενδεικτικές προδιαγραφές δοκιμών μέτρησης φθοράς και το πεδίο εφαρμογής τους.....	27
Πίνακας 4: Φυσικές ιδιότητες τυπικών κεραμικών υλικών.....	38
Πίνακας 5: Τεχνικές διεργασίες Θερμικού Ψεκασμού.....	53
Πίνακας 6: Οι πούδρες που χρησιμοποιήθηκαν και οι παράμετροί τους για θερμικό ψεκασμό.....	74
Πίνακας 7: Μέση τιμή των συντελεστών τριβής (μ).....	83
Πίνακας 8: Μετρήσεις του μέσου όγκου φθοράς της αύλακας από τη σφαίρα αλουμίνας του (Pin-On-Disk).....	90
Πίνακας 9: Μετρήσεις του όγκου φθοράς V και του μέγιστου βάθους κάθε αύλακας h_{max} του δοκιμίου με υπόστρωμα κατασκευαστικού χάλυβα.....	91
Πίνακας 10: Μετρήσεις του όγκου φθοράς V και του μέγιστου βάθους κάθε αύλακας h_{max} του δοκιμίου με υπόστρωμα ανοξειδωτού χάλυβα.....	92
Πίνακας 11: Μετρήσεις του όγκου φθοράς V και του μέγιστου βάθους κάθε αύλακας h_{max} του δοκιμίου με υπόστρωμα αλουμινίου.....	93
Πίνακας 12: Μετρήσεις του όγκου φθοράς V και του μέγιστου βάθους κάθε αύλακας h_{max} του δοκιμίου με υπόστρωμα τιτανίου.....	94
Πίνακας 14: Μετρήσεις βάρους (gr) με τον ζυγό ακριβείας έπειτα από τη δοκιμή τριβής στη διάταξη 3ων σωμάτων.....	100

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1. Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι επικαλύψεις χρησιμοποιούνται ευρέως στη μηχανική, ώστε η επιφάνεια των εφαρμογών-εξαρτημάτων να αποκτήσει τις επιθυμητές ιδιότητες (π.χ. αντίσταση σε διάβρωση, σε φθορά και στη θερμότητα). Οι επικαλύψεις θερμικού ψεκασμού εφαρμόζονται σε πολλούς τομείς, όπως στην αεροπορική βιομηχανία, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην μεταλλευτική βιομηχανία, στην βιομηχανία παραγωγής ενέργειας, σε νέα αλλά και σε επισκευασμένα τμήματα κινητήρων, συμπιεστών και αντλιών. Ο θερμικός ψεκασμός είναι ο γενικός όρος που χρησιμοποιείται για ένα σύνολο τεχνικών δημιουργίας μεταλλικών και μη μεταλλικών επικαλύψεων. Είναι η διαδικασία κατά την οποία, υλικά σε μορφή πούδρας, σύρματος ή ράβδου εισάγονται σε μια δέσμη υψηλής ενέργειας, εξαιρετικά υψηλής θερμοκρασίας και μεγάλης ταχύτητας, όπου τήκονται. Τα τηγμένα ή μερικώς τηγμένα σωματίδια επιταχύνονται και προσπίπτουν στην επιφάνεια του εξαρτήματος που προορίζεται για επικάλυψη. Οι συνήθεις τεχνικές κατηγοριοποιούνται σε τρεις κύριες ομάδες: ψεκασμός με φλόγα (flame spray), ψεκασμός με ηλεκτρικό τόξο (electric arc spray) και ψεκασμός πλάσματος (plasma arc spray).

Βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε γενικά ότι το βασικό πλεονέκτημα του θερμικού ψεκασμού είναι η μεγάλη ποικιλία υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή επικαλύψεων, καθώς επίσης πως έχει πραγματοποιηθεί έρευνα που αφορά στις επικαλύψεις Al_2O_3 και ZrO_2 .

Συγκεκριμένα, οι Jacob Shiby Mathew et al, έκαναν ανάμειξη την πούδρα ζιρκονίας με την αλουμίνα, σε ποσοστό Al_2O_3 -10% ZrO_2 w/w, τα εναπόθεσαν με ατμοσφαιρικό ψεκασμό πλάσματος, σε χάλυβα πάχους (1,5mm) και τα πάχη των επικαλύψεων ήταν 40μm και 70μm. Σύγκριναν τα αποτελέσματα των συντελεστών τριβής, της επικάλυψης αλουμίνης με την επικάλυψη της πρόσμιξης αλουμίνης-ζιρκονίας. Το πείραμα διεξήχθη σε τριβόμετρο τύπου pin-on-disk με ανταγωνιστικό υλικό το στυλίσκο αλουμίνης Al_2O_3 , περιφερειακής ταχύτητας (0,05 m/s) για (50 min), απόστασης (150 m) με σταθερό κάθετο φορτίο 0,8 N. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως με την προσθήκη της ZrO_2 και αλλαγή διάφορων τιμών ρεύματος τόξου, η μέση επιφανειακή τραχύτητα των επικαλύψεων

μειώθηκε έως και 40%. Η προσθήκη ζirkονίας στις σκόνες τροφοδοσίας αλουμίνιας δεν είχε καμία επίδραση στις τιμές του συντελεστή τριβής των επικαλύψεων. Το ποσοστό φθοράς της επικάλυψης Al_2O_3 -10% ZrO_2 που παρασκευάστηκε στα 180 A, μειώθηκε έως 3,6 φορές σε σύγκριση με την επικάλυψη 100% w/w Al_2O_3 . Η επίστρωση Al_2O_3 -10% ZrO_2 που εναποτέθηκε στα 220 A έδειξε την υψηλότερη ιδιότητα αντοχής στη φθορά. [11]

Ακόμα οι Liang et al. έδειξαν ότι οι συντελεστές τριβής του ZrO_2 -15 κ.β.% Al_2O_3 ήταν υψηλότερες από ό,τι για τη πρόσμιξη ZrO_2 -30 κ.β.% Al_2O_3 και κυμαινόταν στην περιοχή για μ από (0,2 έως 0,75), ανάλογα με τα φορτία και τις ταχύτητες ολίσθησης που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ οι ρυθμοί φθοράς των επιστρώσεων ZrO_2 , Al_2O_3 άλλαξαν από 15×10^{-6} έως $100 \times 10^{-6} \text{mm}^3/\text{Nm}$. [38]

Οι Kim et al. διαπίστωσαν ότι η ενσωμάτωση του CaF_2 στον Al_2O_3 -15 wt.% ZrO_2 μείωσαν τη μικροσκληρότητα και τους συντελεστές τριβής αλλά αύξησαν τους ρυθμούς φθοράς. Να σημειωθεί επίσης ότι οι συντελεστές τριβής της επίστρωσης Al_2O_3 -15 wt.% ZrO_2 κυμαινόταν στην περιοχή για μ από (0,4 έως 0,9), ανάλογα με τις παραμέτρους τριβολογικής δοκιμής. [39]

Οι Zhao et al. με τις δοκιμές τους έβγαλαν ως συμπέρασμα, πως οι συντελεστές τριβής και οι ειδικοί ρυθμοί φθοράς των επικαλύψεων με πρόσμιξη Al_2O_3 -15 wt.% ZrO_2 ήταν σε εύρος για μ από 0,40 έως 0,45 και $(5-18) \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{Nm}$, αντίστοιχα. [40]

Οι Yu et al. έδειξαν ότι οι μηχανικές ιδιότητες και η αντοχή στη φθορά των επικαλύψεων της πρόσμιξης Al_2O_3 -20 wt.% ZrO_2 βελτιώθηκαν με τήξη λέιζερ. [41]

Οι Zhang et al. έδειξε ότι ο συντελεστής τριβής του Al_2O_3 - 40 wt.% ZrO_2 η επικάλυψη ήταν 0,74, ενώ με την προσθήκη 3wt.% Y_2O_3 στην επίστρωση, ο συντελεστής τριβής μειώθηκε κατά 22%. Παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής τριβής της επίστρωσης Al_2O_3 - ZrO_2 ήταν υψηλότερη κατά 40%, ενώ το ποσοστό φθοράς ήταν περίπου 15% χαμηλότερο σε σύγκριση με το Al_2O_3 επίστρωση που ψεκάζεται με ίδιες παραμέτρους. [42]

Οι Dejang et al. έβγαλε πως η προσθήκη ζirkονίας ZrO_2 αύξησε το γ - Al_2O_3 κλάσμα φάσης και βελτίωσε την αντοχή στη θραύση, μείωσε τον συντελεστή τριβής και το ποσοστό φθοράς των επιστρώσεων. [43]

Οι Tingaud et al. παρατήρησε ότι ο συντελεστής τριβής ήταν ελαφρώς υψηλότερος, αλλά ο ρυθμός φθοράς ήταν έως και εννέα φορές χαμηλότερος όταν το ZrO_2 εισήχθη σε επιστρώσεις αλουμίνιας. [44]

Οι Δ. Κεκές, Π. Ψυλλάκη, Μ. Βαρδαβούλιας, χρησιμοποίησαν την τεχνική θερμικού ψεκασμού με καύσιμο οξυγόνο υψηλής ταχύτητας HVOF και δημιούργησαν επικαλύψεις πάχους (210-280-350 μ m), NiCrFeBSiC και WC-Co/Cr με προσθήκη κεραμομεταλλικού σύνθετου υλικού cermet, σε υποστρώματα AISI 304 ανοξειδωτού χάλυβα. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε τριβολογικές δοκιμές και βρέθηκε πως με την αποσύνθεση των σωματιδίων WC και οι μέγιστες τιμές αποτελεσματικής σκληρότητας αυξάνονται γραμμικά με την περιεκτικότητα σε cermet. Ο μέσος συντελεστής τριβής εξαρτάται από το κλάσμα cermet με τιμή $\mu_{max}=0,64$ σε περιεκτικότητα 50% WC-Co/Cu. [29]

Οι Π. Ψυλλάκη, Μ. Jeandin, Δ.Ι. Παντελής, χρησιμοποίησαν την τεχνική ατμοσφαιρικού θερμικού ψεκασμού πλάσματος APS και δημιούργησαν επικαλύψεις πάχους (450 μ m) από αλουμίνα Al_2O_3 και ενδιάμεσου στρώματος Bonding Ni-5% w/w Al πάχους (30 μ m), σε υπόστρωμα χυτοσιδήρου S.G. από φερριτική-περλιτική μήτρα, με κύρια χημική σύνθεση (w/w%: 3.6C, 2Si, Ni, 0.4 Mn) σκληρότητας 37 HRC Rockwell C, πάχους (6mm). Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε τριβολογικές δοκιμές με τριβόμετρο τύπου Pin-On-Disk, με ανταγωνιστικό υλικό από ένα δίσκο (αποσκληρυμένο και θερμοσκληρυμένο χάλυβα) εργαλείων D2, σκληρότητας 60 HRC και φορτία (50,100 και 160 N), και με ταχύτητα ολίσθησης 1,4 m/sec. Βρέθηκε πως ο συντελεστής τριβής μ παρουσίαζε αρχικά, μια περίοδο υψηλής διακύμανσης μεταξύ 0,45 και 0,55. Στη συνέχεια της δοκιμής παρέμεινε σταθερός. Ο ρυθμός φθοράς της αλουμίνιας αποτελούταν από 3 στάδια:

- Κατά τη διάρκεια του πρώτου, ο ρυθμός φθοράς μειώθηκε ραγδαία και η φθορά της επικάλυψης εξελισσόταν μέσω του μηχανισμού πρόσφυσης.
- Κατά τη διάρκεια του δεύτερου σταδίου, ο ρυθμός φθοράς παρέμεινε σχεδόν σταθερή και η φθορά της επικάλυψης πραγματοποιήθηκε μέσω ενός συνδυασμένου μηχανισμού φθοράς (στίλβωσης, τριβής και κόπωσης), ο οποίος οδήγησε στο σχηματισμό κυρίως μικρού μεγέθους θραύσματα τάξης μικρότερης των 1 μ m .

- Κατά τη διάρκεια του τελευταίου σταδίου, ο ρυθμός φθοράς αυξήθηκε ραγδαία μέχρι τη συνολική φθορά του κεραμικού στρώματος λόγω της "εύκολης" απομάκρυνσής, της πλήρως ραγισμένης εναπομείνουσας επίστρωσης.

Το αντίπαλο σώμα από χάλυβα εργαλείου D2 παρουσίασε επίσης έναν συνδυασμό μηχανισμών φθοράς. Εξαιτίας της αρχικής του τραχύτητας, οι προεξοχές της μεταλλικής επιφάνειας πλαστικοποιήθηκαν και λειάνθηκαν, ενώ τα υπολείμματα αλουμίνιας παγιδεύτηκαν στις κατώτερες περιοχές των προεξοχών, όπου ενεργοποίησαν τον μηχανισμό φθοράς με μικρο-λειάνσεις. [30]

1.2. Στόχοι και μεθοδολογία έρευνας

Σύμφωνα με τις παραπάνω μελέτες, ύστερα από τη σχετική βιβλιογραφική ανασκόπηση, στη διαδικασία παρατήρησης της τριβολογικής συμπεριφοράς των επικαλύψεων με την τεχνική εναπόθεσης θερμικού ψεκασμού, δεν έχει σημειωθεί η παρατήρηση αυτή σε επικαλύψεις καθαρών κεραμικών υλικών σε διάφορα μεταλλικά υποστρώματα όπως ανοξείδωτο και δομικού χάλυβα, αλουμινίου και τιτανίου, με συγκεκριμένες παραμέτρους.

Είναι αρκετά σημαντικό να αναλυθούν και αυτού του είδους οι εναποθέσεις υλικών ως μέσο αντιδιαβρωτικών και προστατευτικών επικαλύψεων για διάφορες χρήσεις καθώς όσο περισσότερες και στοχευμένες επιλογές έχουμε σε υλικά που συμμετέχουν σε επίπονες διεργασίες με διάφορες συνθήκες, θα μειώνονται και οι πιθανότητες αχρήστευσής τους.

Στόχος λοιπόν της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση της τριβολογικής συμπεριφοράς, δηλαδή υπό συνθήκες τριβής και φθοράς, των κεραμικών επικαλύψεων αλουμίνιας και ζirkονίας ξεχωριστά, που έχουν εναποτεθεί σε μεταλλικές επιφάνειες με ατμοσφαιρικό θερμικό ψεκασμό και έχουν εμπλακεί σε δοκιμές τριβής με συγκεκριμένο φορτίο και ταχύτητα υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες, αλλά και η σύγκρισή τους.

1.3. Δομή της εργασίας

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η δομή της διπλωματικής εργασίας και η εκ των προτέρων ερευνητική/βιβλιογραφική της υποδομή, που διερευνήθηκε για την αρχική σκέψη, δηλαδή της διερεύνησης της τριβολογικής συμπεριφοράς επικαλύψεων κεραμικών υλικών, με παραμέτρους όμως που δεν έχουν μελετηθεί, ώστε να καλυφθεί το ερευνητικό κενό στο πεδίο της τριβολογίας/μηχανικής επιφανειών.

Καθώς η παρούσα πειραματική εργασία κατατάσσεται στον τομέα της τριβολογίας/μηχανικής επιφανειών, γίνεται μία γενική αναφορά του συγκεκριμένου επιστημονικού πεδίου στο 2^ο κεφάλαιο, όπως και στους τομείς από τους οποίους αποτελείται, κυρίως της τριβής και της φθοράς.

Στην συνέχεια, στο 3^ο κεφάλαιο, αναλύονται οι τρόποι προστασίας των υλικών, μέσω κεραμικών επικαλύψεων, από τη φθορά λόγω τριβής και συγκεκριμένα υπό δυσμενείς συνθήκες. Ακόμα εμπεριέχονται οι μέθοδοι εναπόθεσής τους.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρατίθεται και αναλύεται συγκεκριμένα το είδος εναπόθεσης επικαλύψεων με τη μέθοδο θερμικού ψεκασμού, όπου επιλέχθηκε έπειτα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Στο επόμενο 5^ο κεφάλαιο αναλύεται η πειραματική διαδικασία, με τη δημιουργία επικαλύψεων σε δοκίμια με ατμοσφαιρικό ψεκασμό πλάσματος και συνεχίζει με τις κύριες δοκιμές τριβής-φθοράς, με χρήση πειραματικών διατάξεων του εργαστηρίου τριβολογίας/μηχανικής επιφανειών του Πανεπιστημίου. Ακόμα εμπεριέχονται οι πίνακες μετρήσεων και τα διαγράμματα που προέκυψαν και αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της εργασίας.

Τέλος στο 6^ο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα, έπειτα από την μελέτη των μετρήσεων υπό μορφή διαγραμμάτων, που αναπαράχθηκαν από τις πειραματικές δοκιμές για τις επικαλύψεις αλουμίνιας και ζirkονίας, περιλαμβάνοντας και τις μελλοντικές μελέτες, ως συνέχεια της παρούσας εργασίας.

Κεφάλαιο 2ο: Τριβολογία

Η **Τριβολογία**, ως κλάδος της επιστήμης και της τεχνολογίας, μελετά τη μηχανική στερεών, κυρίως σωμάτων, όπου βρίσκονται σε ταυτόχρονη σχετική κίνηση και επαφή. Ο 1^{ος} ορισμός της δόθηκε το 1966. Η σχετική επαφή ανάμεσα στις εφαιπτόμενες επιφάνειες των σωμάτων δυσχεραίνουν την μεταξύ τους κίνηση, η οποία προκειμένου να διατηρηθεί απαιτεί την κατανάλωση ενέργειας. Ενδιάμεσα στις εφαιπτόμενες επιφάνειες η δομική ακεραιότητα των υλικών των δύο σωμάτων φθείρεται και συνάδει σε απώλεια μάζας πρόωμη αστοχία και ταχεία ρωγμάτωση. Αυτό το φαινόμενο αποτελείται από την αντίδραση και των δύο εφαιπτόμενων σωμάτων τα οποία, είναι κατασκευασμένα από υλικά δεδομένων εγγενών ιδιοτήτων, εκτελούν δεδομένο είδος κίνησης και έχουν συγκεκριμένη γεωμετρία. [1]

Ο τομέας της Τριβολογίας ασχολείται με την τριβή, φθορά και την λίπανση των υλικών. Οι επιφάνειες των εξαρτημάτων αποτελούν διακριτές περιοχές του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένα, με ιδιότητες που ενδέχεται να διαφέρουν σημαντικά από εκείνες του αντίστοιχου συμπαγούς στερεού. Το γεγονός αυτό καθίσταται εμφανέστερο στην περίπτωση των μεταλλικών υλικών, λόγω των επιφανειακών στρωμάτων οξειδίων ή/και κράτυνσης (εργοσκληρύνσης) που δημιουργούνται σχετικά εύκολα κατά την κατασκευή ή/και τη χρήση. Αναλόγως του τρόπου δημιουργίας μιας επιφάνειας, σε αυτήν μπορούμε να αναγνωρίσουμε ατέλειες, ελαττώματα και υφές, οι οποίες είναι καθοριστικής σημασίας για την πιστότητα της επιφάνειας των κατεργαζόμενων τεμαχίων, καθώς και των εργαλείων κοπής, των τύπων χύτευσης και μητρών κατεργασίας. [2]

2.1. Πιστότητα επιφανειών

Ο όρος **πιστότητα επιφάνειας (surface integrity)** χρησιμοποιείται για την περιγραφή όχι μόνο των τοπολογικών (γεωμετρικών), φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών των επιφανειών, αλλά επίσης και των μηχανικών και μεταλλουργικών ιδιοτήτων τους. Η πιστότητα επιφάνειας, είναι μία σημαντική παράμετρος, που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν επιλέγεται μία τεχνική κατεργασίας καθώς επηρεάζει την αντοχή σε κόπωση, την αντίσταση σε διάβρωση και τη διάρκεια ζωής του παραγόμενου τεμαχίου. Διάφορα επιφανειακά ελαττώματα μπορεί να προκληθούν από ή και κατά τη διάρκεια της κατεργασίας ενός εξαρτήματος με αποτέλεσμα να οδηγήσουν σε επιφάνειες μη

αποδεκτής πιστότητας. Τα ελαττώματα αυτά προκαλούνται από ένα συνδυασμό παραγόντων, όπως (α) η πρώτη ύλη που εμπεριέχει ελαττώματα, (β) η μέθοδος με την οποία δημιουργήθηκε η επιφάνεια, και (γ) για με επαρκής έλεγχος των παραμέτρων κατεργασίας, που οδήγησε σε υψηλές τάσεις, θερμοκρασίες ή επιφανειακή παραμόρφωση. [2]

Τα κυριότερα επιφανειακά ελαττώματα (surface defects) [2]:

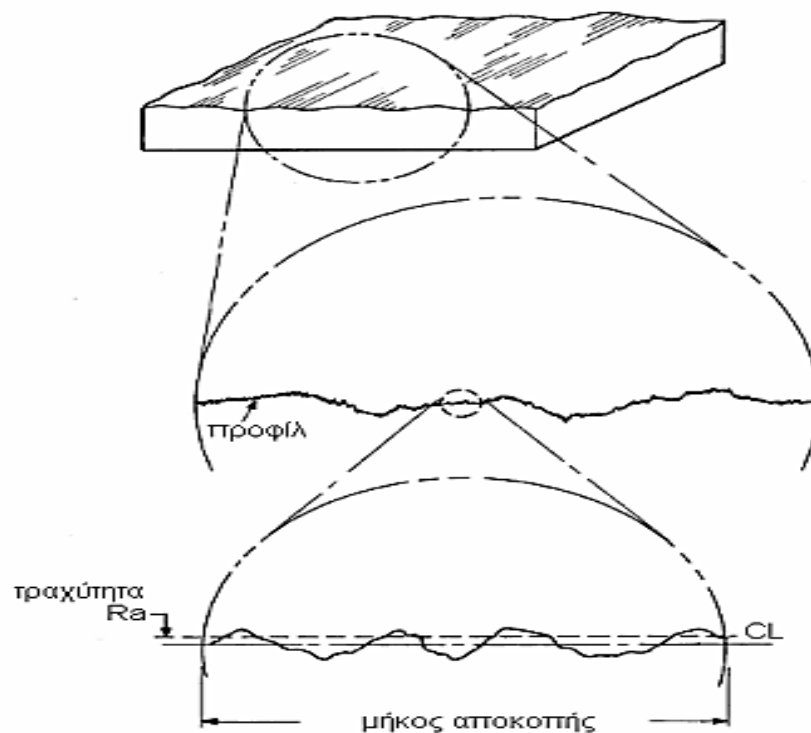
- Οι ρωγμές (cracks) ενδέχεται να είναι εξωτερικές ή εσωτερικές, και στην περίπτωση που για να γίνουν ορατές απαιτείται μεγέθυνση υψηλότερη από 10, αυτές καλούνται μικρορωγμές (microcracks).
- Τα εγκλείσματα (inclusions) είναι μικρού μεγέθους, μη μεταλλικά στοιχεία ή ενώσεις, τοπικά εντοπισμένα στον όγκο του μετάλλου.
- Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (heat-affected zone) αποτελεί τον όγκο του μετάλλου, ο οποίος υφίσταται κυκλικά θέρμανση χωρίς να προκληθεί τήξη του υλικού.
- Οι κρατήρες είναι αβαθείς κοιλότητες.
- Η περικρυσταλλική προσβολή (intergranular attack) είναι η εξασθένιση των ορίων των κόκκων, λόγω ψαθυροποίησης από τηγμένο μέταλλο και διάβρωση.
- Οι μεταλλουργικοί μετασχηματισμοί (metallurgical transformations) αφορούν τις αλλαγές της μικροδομής, οι οποίες προκαλούνται από εναλλαγές της θερμοκρασίας του υλικού. Οι αλλαγές αυτές μπορεί να αφορούν μετασχηματισμούς φάσεων, ανακρυστάλλωση, μείωση της περιεκτικότητας του κράματος σε κάποιο στοιχείο, απανθράκωση, ή ακόμη τήξη και επαναστερεοποίηση υλικού.
- Οι επιφανειακές κοιλότητες (laps), οι αναδιπλώσεις (folds) και οι γραμμές συγκολλήσεις (seams) υλικού αποτελούν επιφανειακά ελαττώματα που οφείλονται στην πλαστική ροή του υλικού κατά την κατεργασία του.
- Οι βελονισμοί (pits) είναι επιφανειακά μικρού βάθους ελαττώματα, που δημιουργούνται λόγω της προσβολής του υλικού από φυσικούς ή χημικούς παράγοντες.
- Οι εκτινάξεις (splatter) είναι μικρού μεγέθους σωματίδια τηγμένου υλικού, που επαναστερεοποιήθηκαν στην επιφάνεια κατά τη διάρκεια συγκόλλησης.

- Οι παραμένουσες τάσεις (residual stresses) της επιφάνειας προκαλούνται από την ανομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασιών και παραμορφώσεων.
- Η επιφανειακή πλαστική παραμόρφωση (surface plastic deformation) είναι μόνιμη παραμόρφωση της επιφάνειας, η οποία προκλήθηκε από υψηλές τάσεις εξαιτίας των δυνάμεων τριβής, της γεωμετρίας των εργαλείων και των μητρών διαμόρφωσης, φθαρμένων κοπτικών εργαλείων και των μεθόδων κατεργασίας.

2.2. Τραχύτητα

Η γνώση και ο έλεγχος της τραχύτητας μια επιφάνειας είναι πολύ σημαντικά στοιχεία, τόσο για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής μιας μεταλλικής κατασκευής, όσο και για το μη-καταστροφικό έλεγχο της κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. [4]

Η **Τραχύτητα (roughness)** ορίζεται από τις αποκλίσεις μικρής κλίμακας, που αφορούν το ύψος, το πλάτος και την απόσταση κατά μήκος τις επιφάνειας. Ακόμα σε μία επιφάνεια μπορούν να υπάρχουν ελαττώματα δομής και ατέλειες, κυματώσεις και συγκεκριμένη διεύθυνση κατεργασίας ή προσανατολισμού όπως στην (εικόνα 1). [2]



Εικόνα 1: Μεγέθυνση πραγματικής επιφάνειας. [4]

2.2.1. Παράμετροι τραχύτητας

Ο καθορισμός της μέσης γραμμής στα τραχύμετρα είναι πρακτικά ανέφικτος και γι' αυτό, ως σύστημα αναφοράς προτάθηκε η **Κεντρική Γραμμή (central line – CL)**, η οποία είναι μια ευθεία γραμμή, τέτοια ώστε τα αποκτώμενα εμβαδά μεταξύ αυτής και του πραγματικού περιγράμματος της κατανομής, προς τα άνω και προς τα κάτω, να είναι ίσα, για προκαθορισμένο μήκος δειγματοληψίας (L).

Τα κύρια μεγέθη της τραχύτητας σε ένα μήκος δειγματοληψίας με βάση την τεχνική προδιαγραφή ISO 4287 προσδιορίζονται παρακάτω ως εξής. [1]

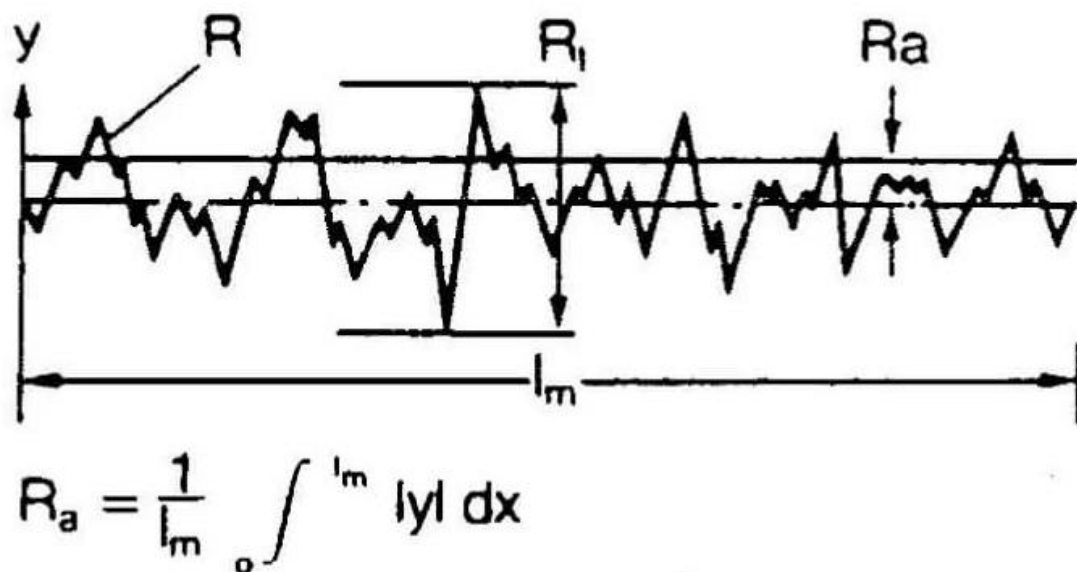
Η επιφανειακή Τραχύτητα αποτελείται από:

- **Μέση αριθμητική τραχύτητα (arithmetic mean value R_a ή R_{CLA}), ενδεικτικά η μέθοδος του υπολογισμού της απεικονίζεται στην (εικόνα 2):**

$$(1) \quad R_a = \frac{a+b+c+d+\dots}{n},$$

Όπου a, b, c, d, \dots τεταγμένες απολύτων τιμών και n πλήθος μετρούμενων τιμών.

$$(2) \quad \text{Αλλιώς } R_a = \frac{E_{ολ}}{L_{ολ}} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_{13}}{L_{ολ}},$$



Εικόνα 2: Υπολογισμός R_a απλής γεωμετρικής κατανομής. [4]

- **Μέση ενδεικνύομενη τραχύτητα (root mean square roughness R_q ή R_{rms}):**

$$(3) \quad R_q = \sqrt{\frac{a+b+c+d+\dots}{n}}$$

Το μέγιστο ύψος τραχύτητας (maximum roughness height, R_z) ορίζεται ως η υψομετρική διαφορά μεταξύ της βαθύτερης εσοχής και της υψηλότερης προεξοχής και αποτελεί μία ένδειξη της ποσότητας υλικού που θα πρέπει να απομακρυνθεί, προκειμένου να επιτύχουμε μία λεία επιφάνεια. Στον (πίνακα 1) εμφανίζονται οι τυποποιήσεις και τα είδη ποιότητας των επιφανειών έπειτα από κάποια κατεργασία. Ενδεικτικά διαιρώντας τις παραπάνω εξισώσεις ως R_q/R_a , προκύπτει ο λόγος, ο οποίος για τυπικές επιφάνειες που έχουν προκύψει από μηχανουργικές κατεργασίες είναι ίσος προς: (1,1 - κοπή), (1,2 - λείανση) και (1,4 - υπερλείανση) και ο συμβολισμός των μετρήσεών τους παρουσιάζεται στον (πίνακα 2). [2]

- **Μέγιστο Βάθος κατανομής (peak to valley height R_t) όπως φαίνεται στον (πίνακα 1) για κάθε είδος επιφάνειας :**

$$(4) \quad R_t = |\alpha| + |\beta|$$

Επιφάνεια-Σύμβολο	Ανώτερο επιτρεπτό βάθος ιχνών κατεργασίας R_t (μm)	Ονομασία επιφάνειας
1 	-	Ακατέργαστη μη επιμελημενη
2 	-	Ακατέργαστη επιμελημενη
3 	160 (250)	Εκχόνδρισης
4 	40	Εξομάλυνσης
5 	16	Λείανσης
6 	-	Βελτίωσης
7 	Σύμβολο ειδικής κατεργασίας	

Πίνακας 1: Ποιότητες επιφανειών κατά DIN 3141 [3]

- **Μέσο Βάθος κατανομής (average middle peak to valley height R_{tm}):**

$$(5) \quad R_{tm} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i + \sum_{i=1}^n b_i}{10}$$

=	Κατεργασία παράλληλα ως προς τη γραμμή που αντιστοιχεί στην κατατομή επιφάνειας στην οποία αναφέρεται το σύμβολο
⊥	Κατεργασία κάθετα ως προς τη γραμμή που αντιστοιχεί στην κατατομή επιφάνειας στην οποία αναφέρεται το σύμβολο
X	Κατεργασία υπό γωνία (σε αμφότερες τις διευθύνσεις) ως προς τη γραμμή που αντιστοιχεί στην κατατομή επιφάνειας στην οποία αναφέρεται το σύμβολο
P	Μη προσανατολισμένο ανάγλυφο, οφειλόμενο στην παρουσία βελονισμών λόγω διάβρωσης, προεξοχών, πορώδους ή σωματιδίων

Πίνακας 2: Συμβολισμός της διεύθυνσης μέτρησης ως προς τη διεύθυνση της επιφανειακής κατεργασίας.

2.2.2. Προσδιορισμός της τραχύτητας-Τραχύμετρα

Μέτρηση επιφανειακής τραχύτητας

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση και την καταγραφή της επιφανειακής τραχύτητας ονομάζονται τραχύμετρα ή προφιλόμετρα (surface profilometers).

Η κατατομή (profile) της επιφάνειας προσδιορίζεται με την ιχνηλάτηση των ανωμαλιών της, που λαμβάνουν χώρα κατά τη σάρωση της επιφάνειας σε μια ευθεία, με τη χρήση τεχνικών που προσδιορίζονται σε:

- μηχανικά (μηχανικά τραχύμετρα),
- ηλεκτρικά (ηλεκτρικά / μηχανικά τραχύμετρα),
- οπτικά (οπτικά προφιλόμετρα)

Ένα τραχύμετρο φέρει στυλίσκο που απολήγει σε ακίδα διαμαντιού (diamond stylus), ο οποίος κινείται σε ευθεία γραμμή επί της μετρούμενης επιφάνειας, καθώς επίσης και λογισμικό που επιτρέπει την περιοδική καταγραφή των μετρούμενων υψών της κατατομής. Το διάστημα που διανύεται από το στυλίσκο αναφέρεται ως μήκος δειγματοληψίας ή μήκος αποκοπής (cutoff) και κυμαίνεται από 0.08 έως 25 mm. Για τις περισσότερες μηχανολογικές εφαρμογές, το σύνθητες μήκος δειγματοληψίας είναι 0.8 mm. Ο γενικός κανόνας που ακολουθείται είναι ότι το μήκος αποκοπής θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να περιλαμβάνει 10-15 διαδοχικές ανωμαλίες του ανάγλυφου,

καθώς και την κυμάτωση της επιφάνειας. Προκειμένου να αναδειχθεί η τραχύτητα, το μετρούμενο ίχνος της κατακόρυφης κίνησης της ακίδας του τραχυμέτρου καταγράφεται σε μεγεθυμένο άξονα y (μερικές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο του οριζόντιου άξονα x). Η μεγέθυνση αυτή της κλίμακας του κατακόρυφου άξονα αποκαλείται ενίσχυση (gain), η αναγραφόμενη κατατομή είναι στρεβλωμένη σημαντικά και η επιφάνεια εμφανίζεται τραχύτερη από ό,τι είναι πραγματικά. Οι διατάξεις τραχυμέτρησης που χρησιμοποιούνται επιτρέπουν την αντιστάθμιση της όποιας κυμάτωσης της επιφάνειας, κι έτσι η τελική ένδειξη και η αναπαραγόμενη κατατομή αφορούν αποκλειστικά και μόνο την επιφανειακή τραχύτητα. Λόγω της δεδομένης ακτίνας καμπυλότητας της απόληξης της ακίδας διαμαντιού, η πορεία της διαφοροποιείται μερικώς από την πραγματική επιφάνεια και η μετρούμενη τιμή της τραχύτητας είναι χαμηλότερη. Συνήθως, η διάμετρος της ακίδας είναι 10 μm . Όσο μικρότερη είναι η διάμετρος της ακίδας και πιο λεία η μετρούμενη επιφάνεια, τόσο πιο πιστή είναι η αναπαραγωγή της κατατομής. [2]

Για τις συνήθεις μηχανολογικές επιφάνειες είναι της τάξης του δεκάτου του χιλιοστού (2,0-100 μm). Για μικρότερων διαστάσεων γεωμετρικές αποκλίσεις, της τάξης του νανομέτρου (nm), χρησιμοποιείται ο όρος Μικρο- ή Νανο-τραχύτητα, για να αποδώσει αποκλίσεις σε ατομική κλίμακα. [4]

Οι κατατομές μετρούνται και συγκρίνονται με τη βοήθεια υπολογιζόμενων γεωμετρικών παραμέτρων. Αυτές μπορεί να είναι απλά μέσες αποκλίσεις από κάποια γραμμή αναφοράς ή στατιστικές παράμετροι, όπως συναρτήσεις κατανομής υψών, η συνάρτηση αυτοσυσχετισμού κ.ά. Οι ηλεκτρικές μέθοδοι όμως αποδείχθηκαν ως οι πιο εύχρηστες και κατάλληλες για γρήγορη και αξιόπιστη αξιολόγηση της ποιότητας της επιφάνειας, γιατί έχουν την ικανότητα να δώσουν άμεσα την καταγραφή της κατατομής και τις αριθμητικές παραμέτρους της ποιότητας της επιφάνειας (τραχύμετρα).

Οι χρησιμοποιούμενες διατάξεις που μετατρέπουν τις μηχανικές μετατοπίσεις σε ηλεκτρικά σήματα ονομάζονται μοροτροπείς ή στοιχεία αντίληψης κ (pick-ups) και ανήκουν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Διατάξεις διαμόρφωσης φέρουσας συχνότητας.
- Διατάξεις τάσης ή έντασης.

Με κανένα σύστημα οργάνων η κατατομή που προκύπτει από τη μέτρηση δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί ακριβή αναπαράσταση της πραγματικής κατατομής της επιφάνειας εξ' αιτίας [4]:

- Ηλεκτρονικού θορύβου της συσκευής (παράσιτα).
- Παραμόρφωσης της μορφής, που προέρχεται από την έλλειψη γραμμικότητας σήματος εισόδου-εξόδου όλων των ηλεκτρονικών οργάνων.
- Στις διαστάσεις της ακίδας του στοιχείου αντίληψης με αποτέλεσμα η συσκευή να μην αντιλαμβάνεται ανωμαλίες μικρότερες από την ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας.

2.2.3. Αριθμητικές παράμετροι επιφανειών

Οι αριθμητικές παράμετροι υπολογισμού ιδιοτήτων επιφανειών είναι οι κάτωθι [4]:

- R_q : Τραχύτητα μέσης τιμής ή ενδεικνυόμενη τιμή τραχύτητας (RMS, σ).
- R_{ti} : Η μέγιστη υψομετρική διαφορά κορυφής-κοιλιάδας της κατατομής σε ένα μήκος δειγματοληψίας.
- R_y : η μεγαλύτερη από τις τιμές των R_{ti} .
- R_{tm} : μέσο μέγιστο βάθος. Για μετρήσεις χωρίς φίλτρο είναι $R_{ti}=R_y=R_{tm}$.
- R_v : το μέγιστο βάθος της ανωμαλίας κάτω από τη μέση γραμμή.
- R_p : βάθος οριζοντίωσης (levelling depth), το μεγαλύτερο ύψος του προφίλ πάνω από τη μέση γραμμή.
- R_{pm} : μέσο μέγιστο βάθος οριζοντίωσης.
- R_{3z} : ύψος τριών σημείων.
- R_z : ύψος δέκα σημείων, ή μέση υψομετρική διαφορά μεταξύ των πέντε υψηλότερων κορυφών και των πέντε χαμηλότερων κοιλάδων.
- Δ_q : μέση κλίση της κατατομής.
- λ_q : μέσο μήκος κύματος.
- R_{sk} : λοξότητα, μέτρο συμμετρίας της καμπύλης κατανομή των υψών των κορυφών ως προς τη μέση γραμμή.

$$(6) \quad R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \int_{-\infty}^{+\infty} y^3 p(y) dy$$

- R_{ku} : κύρτωση, στατιστικό χαρακτηριστικό της κυματομορφής της επιφάνειας.

$$(7) \quad R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \int_{-\infty}^{+\infty} y^4 p(y) dy$$

- HSC : αριθμός κορυφών ανά μονάδα μήκους (high spot count).

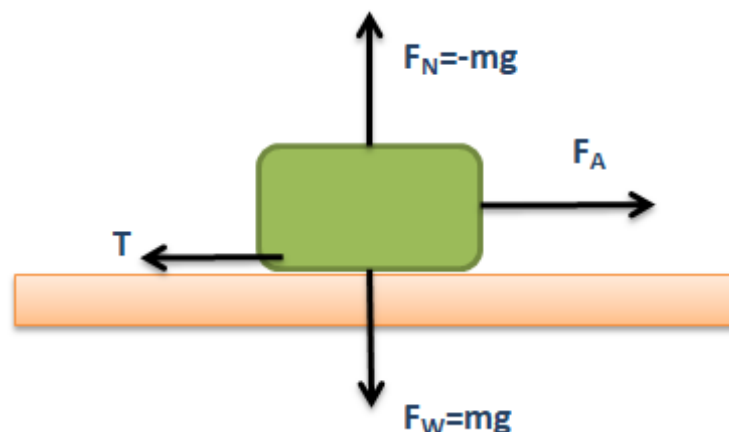
2.3.Τριβή

Τριβή (friction) είναι το φυσικό φαινόμενο που δημιουργείται, όταν τα δύο επαπτόμενα σώματα αντιστέκονται το ένα στην κίνηση του άλλου ή την τάση να κινηθεί έναντι του άλλου. Η τριβή των στερεών είναι αρκετά πολύπλοκο φαινόμενο καθώς εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους που δρουν επί του τριβικού συστήματος και μάλιστα στην πραγματική επιφάνεια επαφής και στα στρώματα του υλικού κάτω από αυτή, σε μικρό σχετικά βάθος και βασίζεται στους 3 νόμους του Νεύτωνα. [4]

Η **εσωτερική τριβή** παρατηρείται κατά την παραμόρφωση ενός σώματος με την εφαρμογή εξωτερικού φορτίου, περιορίζεται στο εσωτερικό του σώματος και περιγράφει την τριβή των μορίων μεταξύ τους. [4]

Η **εξωτερική τριβή / τριβή** αποτελεί το μακροσκοπικό φαινόμενο, κατά το οποίο δυο επαπτόμενα σώματα ανθίστανται στη μεταξύ τους κίνηση. [4]

Ο όρος χρησιμοποιείται και για την επαπτομενική δύναμη δύο σωμάτων (T) που ανθίσταται στη σχετική κίνηση, είναι παράλληλη της σχετικής ταχύτητας ($v_{\sigma(\alpha,\beta)}$) και έχει αντίθετη φορά όπως απεικονίζει η (εικόνα 3). [4]



Εικόνα 3: Εφαπτομενικές επιφάνειες που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους δημιουργώντας τριβή T (N). [4]

- **Συντελεστής τριβής μ** είναι αδιάστατο μέγεθος που εκφράζεται από το λόγο της τριβής T (Nt) προς την κάθετη στη διεύθυνση κίνησης συνιστώσα των εξωτερικών δυνάμεων N :

$$(8) \quad \mu = \frac{T}{N}$$

Όταν δεν υπάρχει σχετική κίνηση των δυο σωμάτων του τριβικού συστήματος και επιπλέον η συνιστώσα F_A , η παράλληλη της επιφάνειας επαφής, είναι μηδενική, τότε προφανώς δεν εμφανίζεται δύναμη τριβής [4]:

$$(9) \quad \mu_{\nu\sigma} = \frac{T}{N} = 0$$

Όταν σε σύστημα δυο σωμάτων που είναι σε επαφή ασκείται μόνο κάθετο φορτίο (ακίνητο τριβικό σύστημα), επιβληθεί βραδέως μια συνεχώς αυξανόμενη έλκουσα δύναμη F (Nt), το σύστημα θα τεθεί σε σχετική κίνηση μόλις η δύναμη πάρει μια οριακή τιμή F_{op} . [4]

- **Στατικός συντελεστής τριβής μ_{σ}** , ορίζεται ο συντελεστής τριβής γι' αυτή την οριακή δύναμη:

$$(10) \quad \mu_{\sigma} = \frac{T}{N} = \frac{F_{op}}{N}$$

- **Κινητικός ή κινηματικός συντελεστής τριβής μ_{κ}** , ορίζεται ο συντελεστής τριβής, όταν η έλκουσα δύναμη είναι υψηλότερη της οριακής τιμής:

$$(11) \quad \mu_{\kappa} = \frac{T}{N} = \frac{F}{N}, (F > F_{op})$$

Όταν σε ακίνητο σύστημα δυο σωμάτων εφαρμοσθεί δύναμη μικρότερη της οριακής ($0 < F < F_{op}$), δεν παρατηρείται μακροσκοπική κίνηση των σωμάτων, ωστόσο σε μικροσκοπικό επίπεδο λαμβάνουν χώρα μικροσκοπικές, εφαπτομενικές, αντιστρεπτές κινήσεις, προκαταρκτικές μετατοπίσεις. Η εμφανιζόμενη δύναμη τριβής καλείται μερική τριβή. [4]

Όταν το σώμα βρίσκεται σε κίνηση, η δύναμη τριβής ($F > F_{op}$), είναι ανεξάρτητη της σχετικής μετατόπισης s και οι προκαλούμενες παραμορφώσεις στην επιφάνεια τριβής περιορίζονται σε μικρό βάθος. [4]

Η μεταφορά μηχανικού έργου λόγω της τριβής ονομάζεται έλξη και η αναπτυσσόμενη δύναμη E ελκτική. Λόγω της ισότητας $|T| = |E|$ οι όροι έλξη και τριβή χρησιμοποιούνται αδιάκριτα. [4]

2.3.1. Είδη τριβής

Αναλόγως του τύπου της σχετικής κίνησης, ο συντελεστής τριβής και η δύναμη τριβής προσδιορίζονται ως [4]:

- Συντελεστής τριβής ολίσθησης / τριβή ολίσθησης.
- Συντελεστής τριβής κύλισης / τριβή κύλισης .
- Συντελεστής τριβής λόγω κίνησης σε ρευστό.

Τριβή ολίσθησης είναι η δύναμη που αντιστέκεται στην σχετική κίνηση των σωμάτων που εφάπτονται και βρίσκονται σε κίνηση. Λέγεται επίσης και κινητική τριβή. Η φορά της τριβής ολίσθησης είναι πάντα αντίθετη προς την κατεύθυνση της κίνησης των εφαπτόμενων επιφανειών. [4]

Τριβή κύλισης είναι όταν δύο αντίμορφες επιφάνειες βρίσκονται σε επαφή έχοντας σχετική κίνηση, κατά την οποία το ένα σώμα περιστρέφεται γύρω από στιγμιαίο κέντρο περιστροφής που βρίσκεται επί της επιφάνειας επαφής που μεταβάλλεται συνεχώς.

Σε σχέση με την τριβή ολίσθησης, η δύναμη που ανθίσταται στην κύλιση είναι πολύ μικρότερη. [4]

Βασικά χαρακτηριστικά της τριβής είναι τα εξής [4]:

- Οι εφαπτόμενες επιφάνειες σε ακινησία και εφαρμοζόμενη εφαπτομενική δύναμη $F_{εφ}$ μικρότερη μιας οριακής τιμής $F_{ορ}$ – δύναμη τριβής ίση και αντίθετη της $F_{εφ}$.
- Η δύναμη τριβής λειτουργεί πάντοτε αντίθετα προς το διάνυσμα της σχετικής ταχύτητας των επιφανειών.
- Η δύναμη τριβής είναι ανάλογη του φορτίου.
- Η δύναμη τριβής είναι ανεξάρτητη της φαινόμενης επιφάνειας επαφής.
- Η δύναμη τριβής είναι ανεξάρτητη της σχετικής ταχύτητας ολίσθησης.

- Η οποιαδήποτε μικρή εφαρμοζόμενη εφαπτομενική δύναμη (F) που προκαλεί αρχικά μικρομετατόπιση των επιφανειών (έως 1 μm) και εν συνεχεία, ερπυστική μετατόπιση (10^{-5} - 10^{-2} μm/sec).
- Οι επιφάνειες χωρίς μακροσκοπική ανισοτροπία, στις οποίες η διεύθυνση της δύναμης τριβής σχηματίζει γωνία ($\pm 2^\circ$) με τη διεύθυνση της ταχύτητας, ενώ σε περίπτωση προσανατολισμού των επιφανειακών χαρακτηριστικών της επιφάνειας η απόκλιση είναι μεγαλύτερη ($\pm 2^\circ - 6^\circ$).
- Για μέτριας σκληρότητας υλικά και μαλακά υλικά με σκληρή επικάλυψη και μικρά φορτία ισχύει η δύναμη τριβής είναι ανάλογη του κάθετου φορτίου:

$$(12) \quad T = \mu_k N$$

- Για πολύ μαλακά ή πολύ σκληρά υλικά και για μεγάλα φορτία ισχύει:

$$(13) \quad T = \mu_k N_p \quad (p = 0,65 - 1)$$

- Συνήθεις τεχνολογικές επιφάνειες, όπου η τριβή είναι ανεξάρτητη της φαινόμενης επιφάνειας.
- Εξαιρετικά λείες/ καθαρές επιφάνειες, όπου η τριβή τείνει να γίνει ανεξάρτητη του φορτίου, αλλά είναι ανάλογη της φαινόμενης επιφάνειας.
- Η δύναμη τριβής εξαρτάται από τη σχετική κίνηση των εφαπτόμενων σωμάτων.

Η τριβή παίζει σημαντικό ρόλο στις κατεργασίες, λόγω των δυνάμεων που αναπτύσσονται πάντοτε κατά τη σχετική κίνηση της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου και της επιφάνειας του εργαλείου κοπής ή της μήτρας διαμόρφωσης. Η τριβή οδηγεί σε απώλειες ενέργειας, με ταυτόχρονη παραγωγή θερμότητας, η οποία μπορεί να έχει επιβλαβή αποτελέσματα και παρεμποδίζει την ελεύθερη κίνηση των εφαπτόμενων επιφανειών, επηρεάζοντας σημαντικά την πλαστική ροή και την παραμόρφωση των υλικών, κατά τη διάρκεια κατεργασιών διαμόρφωσης. Η τριβή όμως χρησιμεύει σε καταστάσεις τις οποίες θέλουμε να υπάρχει σύσφιξη, συγκράτηση κλπ. [4]

Η μείωση της τριβής μπορεί να επιτευχθεί με:

- Την επιλογή υλικών που έχουν χαμηλή πρόσφυση, όπως τα καρβίδια και τα κεραμικά.
- Τη χρήση επικαλύψεων μικρού ή μεγάλου πάχους. [4]

2.3.2. Μέτρηση της τριβής

Ο συντελεστής τριβής συνήθως προσδιορίζεται πειραματικά, είτε κατά τη διάρκεια της πραγματικής κατεργασίας, είτε με πειράματα εργαστηριακής προσομοίωσης, χρησιμοποιώντας δοκίμια μικρών διαστάσεων, διαφόρων σχημάτων. Μία εργαστηριακή δοκιμή, η οποία βρίσκει ευρεία αποδοχή για την προσομοίωση κατεργασιών διαμόρφωσης συμπαγούς όγκου, είναι η δοκιμή συμπίεσης δακτυλίου (ring-compression test). [2]

2.3.3. Η τριβή των κεραμικών υλικών

Η μηχανική της τριβής των κεραμικών είναι παρόμοια με εκείνη των μετάλλων, γι' αυτό στη δύναμη τριβής σε διεπιφάνειες κεραμικών συνεισφέρουν τόσο ο μηχανισμός πρόσφυσης, όσο και αυτός της άروσης. Ωστόσο, συχνά, η πρόσφυση είναι λιγότερο σημαντική, εξαιτίας της υψηλής σκληρότητας των κεραμικών και κατά συνέπεια η πραγματική επιφάνεια επαφής μεταξύ των εφαιπτόμενων σωμάτων είναι χαμηλότερη. Η εκτριβή και η άροση γίνονται σημαντικές, ειδικά όταν κεραμικά ολισθαίνουν επί μαλακότερων υλικών. [2]

2.4. Φθορά

Η σημαντικότητα της φθοράς γίνεται εμφανώς αντιληπτή σε μία σειρά στοιχείων και εξαρτημάτων καταναλωτικών και εμπορικών προϊόντων, καθώς αυτά θα πρέπει, ανά διαστήματα, να αντικαθίστανται ή να επισκευάζονται. Οι πλάκες φθοράς, οι οποίες τοποθετούνται στις περιοχές υψηλής φόρτισης μητρών διαμόρφωσης και μηχανισμών ολίσθησης, αποτελούν σημαντικά εξαρτήματα αρκετών μηχανών κατεργασίας μετάλλων. Οι πλάκες αυτές, που καλούνται και αναλίσκόμενα στοιχεία, αναμένεται να εμφανίσουν φθορά, αλλά μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα κι έτσι να προληφθούν δαπανηρές εργασίες επιδιόρθωσης.

Παρότι, γενικά, η φθορά μεταβάλλει την επιφανειακή τοπογραφία του στοιχείου και ενδέχεται να προκαλέσει σοβαρή επιφανειακή βλάβη, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί έχει θετική επίδραση στη λειτουργία του εξαρτήματος κατά το αρχικό χρονικό διάστημα λειτουργίας μιας μηχανής, οι τοπικές προεξοχές των εφαιπτόμενων στερεών απομακρύνονται δημιουργώντας ψήγματα φθοράς. Από την άποψη αυτή, η φθορά υπό

ελεγχόμενες συνθήκες μπορεί να θεωρηθεί ως μία κατεργασία εξομάλυνσης ή λείανσης της επιφάνειας. Ακόμη και η γραφή με μολύβι ή κιμωλία βασίζεται στο μηχανισμό της φθοράς, τα ψήγματα της οποίας διαμορφώνουν το γραπτό κείμενο. [2]

Η φθορά μετράται ως [1]:

- Μεταβολή της μίας διάστασης του τριβικού στοιχείου (γραμμική φθορά), όπως στο παράδειγμα των συστημάτων πέδησης που προαναφέρθηκε.
- Μεταβολή του βάρους του στοιχείου με ζύγιση (φθορά μάζας), εάν το μέγεθός του σε συνδυασμό με την αναμενόμενη απώλεια μάζας το επιτρέπουν. Τα αποτελέσματα, ωστόσο, θα πρέπει πάντοτε να εξετάζονται σε συνδυασμό με τους μηχανισμούς τριβής και φθοράς, καθώς συχνά το απομακρυνόμενο υλικό δεν απομακρύνεται από την επιφάνεια, αλλά παραμένει στη διεπιφάνεια των δύο σωμάτων και ενίοτε προσκολλάται ισχυρά, με δεσμούς πρόσφυσης, στην επιφάνεια. Έτσι, το αποτέλεσμα της ζύγισης δεν είναι το απόλυτο ποσό μάζας που απομακρύνθηκε.
- Μεταβολή του όγκου σε εντοπισμένες περιοχές της επιφάνειας (όγκος φθοράς), συνήθως με τραχυμέτρηση σε ευθεία κάθετη στη διεύθυνση της ολίσθησης. Ένα τέτοιο παράδειγμα παρουσιάζεται στην Εικόνα Α.32. Η τραχυμέτρηση στην περιοχή της φθοράς λόγω τριβής ολίσθησης σημειακή φόρτιση, επέτρεψε να προσδιορισθεί το αντιπροσωπευτικό εμβαδόν της διατομής του υλικού που απομακρύνθηκε (0,0423 mm) από την επιφάνεια και το μέγιστο βάρος της φθοράς (56 μm). Λαμβάνοντας υπόψη το μήκος ολίσθησης, μπορεί εύκολα να βρεθεί ο όγκος του υλικού που απομακρύνθηκε.

Ο **ρυθμός φθοράς (wear rate)** είναι η ποσότητα του υλικού που απομακρύνεται W , ως μείωση του πάχους της μάζας ή του όγκου, ανά μονάδα χρόνου λειτουργίας t ή μήκους ολίσθησης s του τριβοσυστήματος [1]:

$$(14) \quad \dot{w} = \frac{w}{t} \quad \text{ή} \quad \dot{w} = \frac{w}{s}$$

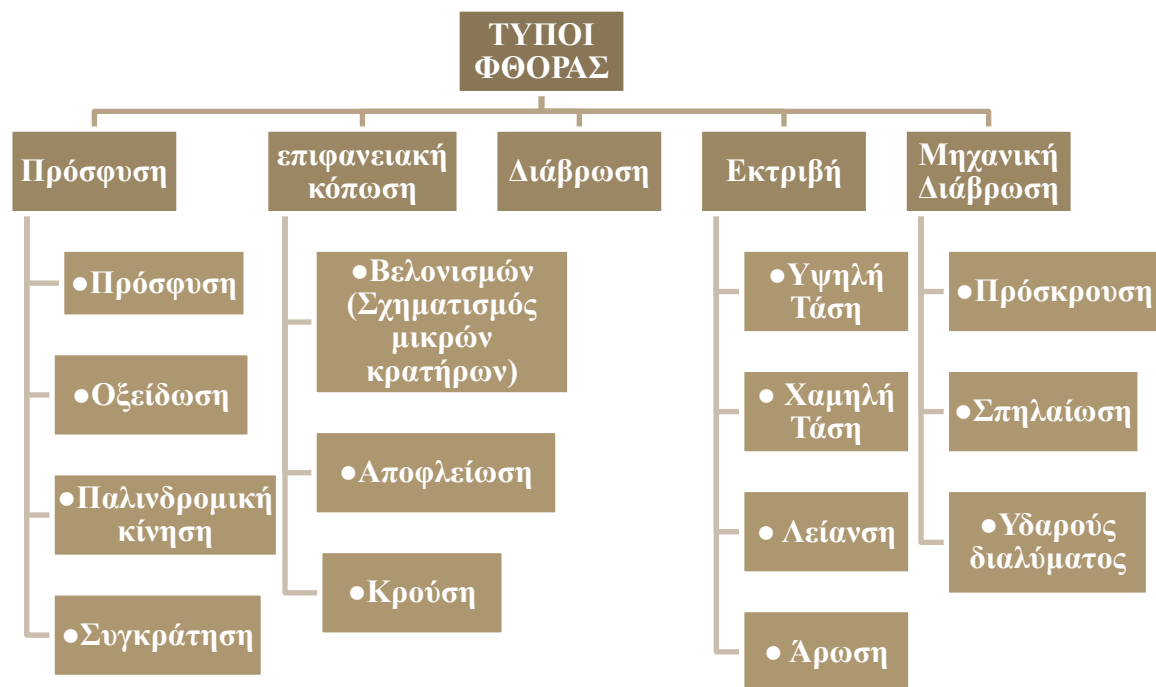
Ωστόσο, ένα τέτοιο μέγεθος δεν λαμβάνει υπόψη τη μηχανική φόρτιση της επιφάνειας που αποτελεί σημαντικό παράγοντα χαρακτηρισμού της δριμύτητας της φθοράς: υψηλότερες τιμές κάθετου φορτίου προκαλούν υψηλότερη φθορά του υλικού. [1]

Ο συντελεστής φθοράς k ($\text{mm}^3/\text{m}\cdot\text{N}$), (wear coefficient) ή ειδικός ρυθμός φθοράς (specific wear rate, k_s) είναι ο ανηγμένος παράγοντας της ποσότητας του υλικού που απομακρύνεται w , ανά μονάδα μήκους ολίσθησης s και ανά μονάδα κάθετα επιβαλλόμενου φορτίου F_N [1]:

$$(15) \quad k = \frac{w}{s \cdot F_N}$$

Απόδοση αντίστασης σε φθορά Q είναι ο συνολικός όγκος αφαιρούμενου υλικού ο οποίος είναι ανάλογος της αδιάστατης σταθεράς K , του επιβαλλόμενου φορτίου P , του μήκους ολίσθησης L και αντιστρόφως ανάλογος της σκληρότητας H , του ασθενέστερου υλικού κατασκευής από τα δύο υλικά του τριβοσυστήματος. Χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση υλικών για την ανθεκτικότητά τους σε επιφανειακές φορτίσεις [1]:

$$(16) \quad Q = K \cdot \frac{P \cdot L}{H}$$



Διάγραμμα 1: Κατηγορίες φθοράς.

2.4.1. Κύριοι μηχανισμοί φθοράς

Οι κύριοι μηχανισμοί φθοράς όπως εμφανίζονται συγκεντρωτικά στο (διάγραμμα 1) και ενδεικτικά στην (εικόνα 4) αναλύονται παρακάτω:

Φθορά λόγω Πρόσφυσης: Εάν σε στερεά που βρίσκονται σε επαφή, ασκηθεί επαπτομενική δύναμη, θα λάβει χώρα διάτμηση είτε στην αρχική διεπιφάνεια των δυο σωμάτων, είτε κατά μήκος μιας διαδρομής επάνω ή κάτω από αυτήν (και στις δύο περιπτώσεις, η ολίσθηση προκαλεί τη φθορά λόγω πρόσφυσης, αναφερόμενη και ως φθορά ολίσθησης). Σε αυτές τις περιπτώσεις ενδέχεται να ενεργοποιηθούν μηχανισμοί όπως η κράτυνση του υλικού στην περιοχή της τοπικής επαφής, η διάχυση μεταξύ των δύο σωμάτων και η διαλυτοποίηση σε στερεή κατάσταση των υλικών των δυο στερεών οι οποίοι έχουν ως αποτέλεσμα οι δεσμοί πρόσφυσης να είναι υψηλότερης μηχανικής αντοχής από τα μέταλλα των σωμάτων σε επαφή. Για το λόγο αυτό, κατά την ολίσθηση λαμβάνει χώρα θραύση εντός του ασθενέστερου στοιχείου του τριβουστήματος, η οποία οδηγεί στη δημιουργία ενός θραύσματος φθοράς που κατά κανόνα προσκολλάται στην επιφάνεια του σκληρότερου σώματος. Με την πρόοδο της ολίσθησης, το θραύσμα αποκολλάται και παραμένει στη διεπιφάνεια, σχηματίζοντας ένα ψήγμα φθοράς (wear particle). [2]

$$(17) \quad \dot{w} = K \frac{P \cdot V}{H}$$

Υπό δυσμενείς συνθήκες (π.χ. υψηλά φορτία, κάθετα στην επαφή), η ισχυρή πρόσφυση των τοπικών προεξοχών προκαλεί φθορά πρόσφυσης, η οποία γίνεται αντιληπτή στην επιφάνεια φθοράς ως αύλακα άροσης, ή επίχρισμα του ανταγωνιστικού υλικού ή αποσάθρωση και μπορεί να οδηγήσει σε παρεμπόδιση της κίνησης ή ακόμη και σε ανάσχεσή της. Σε αυτές τις περιπτώσεις η φθορά χαρακτηρίζεται ως δριμεία (severe wear). Στην περίπτωση επιφανειακών στρωμάτων οξειδίων, τα οποία αρκετές φορές δουν ως προστατευτικές επικαλύψεις, η φθορά είναι ήπια (mild wear) και το αποβαλλόμενο υλικό έχει τη μορφή σωματιδίων φθοράς μικρού μεγέθους. [2]

Η φθορά λόγω πρόσφυσης μπορεί να μειωθεί με τις ακόλουθες μεθόδους [2]:

- Επιλογή υλικών, τα οποία δεν αναπτύσσουν ισχυρούς δεσμούς πρόσφυσης.

- Χρήση υλικού υψηλότερης σκληρότητας για την κατασκευή του ενός μέλους του τριβικού ζεύγους (τριβοσυστήματος).
- Χρήση υλικών τα οποία οξειδώνονται εύκολα.
- Εναπόθεση σκληρών επικαλύψεων.
- Επιμετάλλωση της μίας επιφάνειας με υλικό χαμηλότερης σκληρότητας, όπως ο κασσίτερος, άργυρος, μόλυβδος ή το κάδμιο.
- Χρήση κατάλληλου λιπαντικού.

Φθορά λόγω λείανσης: Αυτός ο τύπος φθοράς προκαλείται όταν μία σκληρή και τραχεία επιφάνεια, ή μία επιφάνεια που περιέχει σκληρά, προεξέχοντα σωματίδια, ολισθαίνει επί μιας άλλης επιφάνειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα σωματίδια της φθοράς να έχουν τη μορφή μικροσκοπικών αποβλήτων ή ακίδων, ενώ στην επιφάνεια του υλικού μικρότερης σκληρότητας τα ίχνη της φθοράς αναγνωρίζονται ως κοιλότητες ή χαραγές. Αυτός ο μηχανισμός φθοράς λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια κατεργασιών, όπως η λείανση, η στίλβωση, η κοπή με χρήση υπερήχων, δέσμης λειαντικών σωματιδίων ή η υδροκοπή. Σε αντίθεση με την μη επιθυμητή φθορά λόγω λείανσης, οι παράμετροι των κατεργασιών αυτών είναι πλήρως ελεγχόμενες, ώστε η αποβολή υλικού με το μηχανισμό αυτό να οδηγήσει σε επιφάνειες του επιθυμητού σχήματος. [2]

Υπάρχουν δύο τύποι φθοράς λόγω λείανσης [2]:

- Η **φθορά λόγω της επαφής δύο σωμάτων (two-body wear)**, η οποία εμφανίζεται μεταξύ δύο επιφανειών που ολισθαίνουν, ή μεταξύ λειαντικών (σκληρών σωματιδίων) και ενός συμπαγούς στερεού σώματος.
- Η **μηχανική διάβρωση (erosive wear)** όπου την συναντάμε κατά την ροή πολφών σε σωληνώσεις, ή όταν σωματίδια άμμου προσπίπτουν στην έλικα ενός πλοίου.

Η αντίσταση σε **φθορά λόγω λείανσης (abrasive-wear resistance)** των καθαρών μετάλλων και των κεραμικών είναι ευθέως ανάλογη της σκληρότητάς τους. Έτσι, αυτή η φθορά δύναται να μειωθεί με την αύξηση της σκληρότητας των υλικών (συνήθως με θερμική κατεργασία) ή με τη μείωση του κάθετου φορτίου. Τα φυσικά και τεχνητά ελαστομερή εμφανίζουν καλή αντίσταση σε απόξεση, διότι υπό την επίδραση του αποξεστικού σωματιδίου παραμορφώνονται ελαστικά και στη συνέχεια ανακτούν το

σχήμα τους. Υπό αυτές τις συνθήκες, χάλυβες ακόμη και μετά από σκλήρυνση έχουν πολύ μικρότερη διάρκεια ζωής. [2]

Η φθορά λόγω της επαφής τριών σωμάτων (three-body wear), εμφανίζεται όταν στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο επαπτόμενων στερεών σωμάτων που ολισθαίνουν παρεμβληθούν αποξεστικά σωματίδια, [2] δηλαδή τα παραγόμενα απόβλητα της τριβής επηρεάζουν σημαντικά το μηχανισμό τριβής ως "το τρίτο σώμα του τριβοσυστήματος". Κατά την τριβή, ένα μέρος τους απομακρύνεται από τη διεπιφάνεια επαφής (λόγω της σχετικής κίνησης των ανταγωνιστικών επιφανειών) και ένα μέρος τους παραμένει στη διεπιφάνεια και παρεμβαίνει στη διεργασία. [19]

Η φθορά λόγω διάβρωσης, αναφερόμενη και ως οξείδωση ή χημική φθορά, προκαλείται από τη χημική ή/και ηλεκτροχημική αντίδραση της επιφάνειας με το περιβάλλον, ενώ τα λεπτού διαμερισμού προϊόντα διάβρωσης της επιφάνειας αποτελούν και τα ψήγματα φθοράς. Εάν το στρώμα διάβρωσης καταστραφεί λόγω της ολίσθησης ή της εκτριβής, αναπτύσσεται νέο στρώμα αντίδρασης στην επιφάνεια και ο κύκλος αυτός δημιουργίας απομάκρυνσης προϊόντων διάβρωσης επαναλαμβάνεται. Διαβρωτικοί παράγοντες θεωρούνται (το νερό και το θαλασσινό νερό, τα οξέα και διάφορα χημικά) ως υγρά διαβρωτικά μέσα και (το οξυγόνο, το υδροθείο και το διοξείδιο του θείου) ως αέρια διαβρωτικά. [2]

Μείωση της **φθοράς λόγω διάβρωσης** επιτυγχάνεται με [2]:

- Επιλογή υλικών υψηλής αντίστασης σε προσβολή από περιβαλλοντικούς παράγοντες.
- Δημιουργία προστατευτικής επικάλυψης.
- Έλεγχο των περιβαλλοντικών παραγόντων.
- Μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας, ώστε να μειωθεί ο ρυθμός της χημικής αντίδρασης.

$$(18) \quad \dot{w} = K \cdot P^a \cdot V, \quad a > 1$$

Μείωση **φθοράς επιφανειακής κόπωσης** επιτυγχάνεται με [2]:

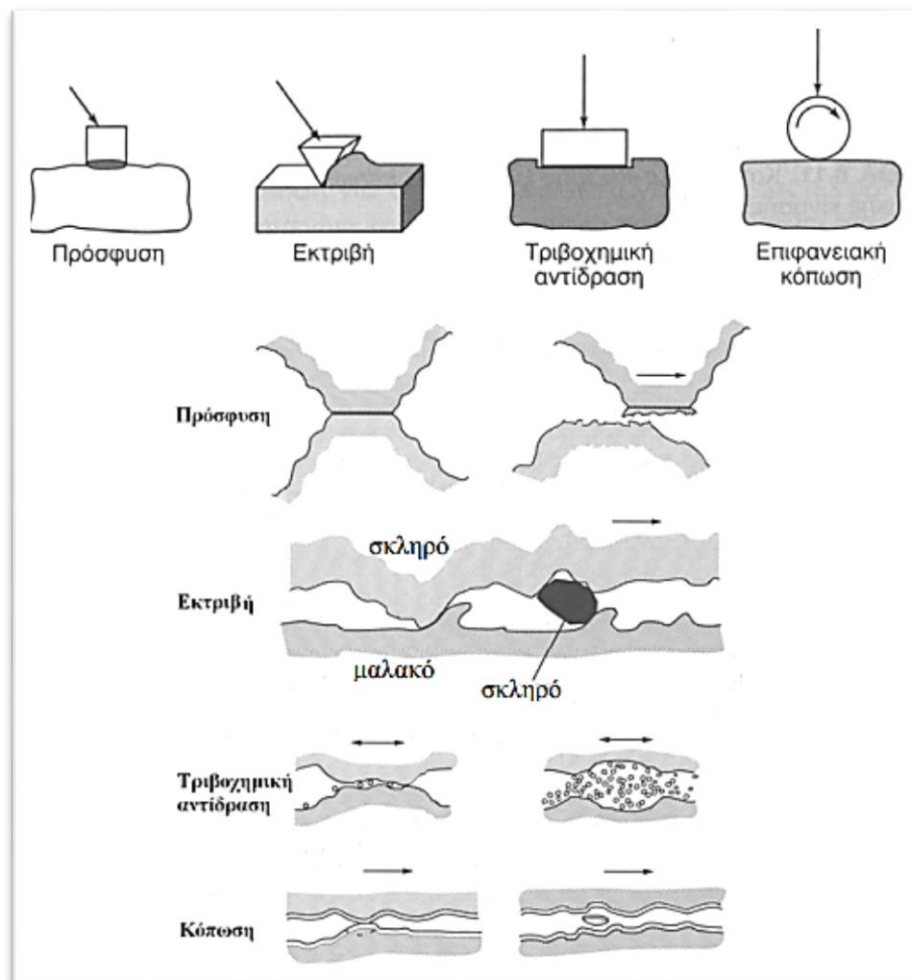
- Μείωση των τάσεων στην επιφάνεια επαφής
- Ελαχιστοποίηση των εναλλαγών θερμοκρασίας

- Βελτίωση της ποιότητας των υλικών, με την απομάκρυνση των ακαθαρσιών, των εγκλεισμάτων και άλλων ελαττωμάτων της μικροδομής, τα οποία θα μπορούσαν να αποτελέσουν σημεία τοπικής έναρξης της ρωγμάτωσης, ή περιοχές ταχύτερης διάδοσης της ρωγμής.

Επίσης κατά την κατεργασία υλικών μπορούν να δημιουργηθούν ακόμα [2]:

- **Μηχανική Διάβρωση (eresion)**, όπου προκαλείται από σωματίδια που αρχίζουν σε μία επιφάνεια φθορά απόξεσης.
- **Διάβρωση λόγω Παλινδρόμησης (fretting corrosion)**, όπου εμφανίζεται όταν οι επιφάνειες καταπονούνται εξαιτίας πολύ μικρών παλινδρομικών κινήσεων.

$$(19) \quad \dot{w} = K \cdot P \cdot V$$



Εικόνα 4: Μηχανισμοί Φθοράς υλικών. [19]

2.4.2. Φθορά των υλικών

Η **Φθορά των Κεραμικών** προκαλείται όταν ολισθαίνουν σε κάποια μεταλλική επιφάνεια εξαιτίας:

- Λείανσης.
- Κόπωσης.
- Χημικών αντιδράσεων της επιφάνειας.
- Του μικρού μεγέθους των (πλαστικών) παραμορφώσεων που μπορούν να αναλάβουν και της επιφανειακής (ψαθυρής) θραύσης τους.

Κατά την ολίσθηση, υλικό από την επιφάνεια του μεταλλικού σώματος ενδέχεται να μεταφερθεί στην κεραμική επιφάνεια και εκεί να οξειδωθεί. Κατά συνέπεια, η ολίσθηση θα γίνεται πλέον μεταξύ της επιφάνειας του μετάλλου και της επιφάνειας του οξειδίου του μετάλλου αυτού. [2]

Φθορά θερμοπλαστικών: Η συμπεριφορά σε φθορά των θερμοπλαστικών είναι παρόμοια με αυτή των μετάλλων. Η συμπεριφορά τους σε φθορά λόγω απόξεσης εξαρτάται εν μέρει από την ικανότητα του πολυμερούς να παραμορφωθεί ελαστικά και να ανακτήσει το σχήμα του, όπως συμβαίνει με τα φυσικά και τεχνητά ελαστομερή. Τα πολυϊμίδια, τα νάιλον, τα πολυανθρακικά, το πολυπροπυλένιο, οι ακετάλες και το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας αποτελούν αντιπροσωπευτικά πολυμερή με καλή αντίσταση σε φθορά. Τα υλικά αυτά χυτεύονται ή υφίστανται μηχανουργική κατεργασία, προκειμένου να παραχθούν οδοντωτοί τροχοί, τροχαλίες, αλυσοτροχοί και συναφή μηχανολογικά εξαρτήματα. Τα θερμοπλαστικά παράγονται από συστάσεις ευρέως φάσματος, όπου μπορούν να αναμιχθούν εσωτερικοί λιπαντές (όπως π.χ. πολυτετραφθοροαιθυλένιο, πυρίτιο, γραφίτης, σουλφίδιο του μολυβδαινίου και σωματίδια ελαστικού), οι οποίοι διασκορπίζονται σε όλο τον όγκο της μήτρας του πολυμερούς. [2]

Φθορά Ενισχυμένων Πλαστικών: Η αντίσταση σε φθορά των ενισχυμένων πλαστικών εξαρτάται από το είδος, την ποσότητα και τη διεύθυνση της ενίσχυσης εντός της μήτρας του πολυμερούς. Οι ίνες άνθρακα, υάλου και αραμιδίου βελτιώνουν την αντίσταση σε φθορά. Η φθορά συνήθως λαμβάνει χώρα με την αποσύνδεση των ινών από τη μήτρα, και αναφέρεται ως εκρίζωση ινών. Η φθορά είναι υψηλότερη όταν η διεύθυνση

ολίσθησης είναι παράλληλη με εκείνη των ινών, λόγω της ευκολότερης εκρίζωσής τους από τη μήτρα. Οι ίνες μεγάλου μήκους προκαλούν αύξηση της αντίστασης σε φθορά των συνθέτων, διότι η εκρίζωσή τους είναι δυσκολότερη και παρεμποδίζουν τη διάδοση έως την επιφάνεια των ρωγμών της μήτρας. [2]

Οι τεχνικές προδιαγραφές που υπάρχουν για να υλοποιηθούν οι δοκιμές μέτρησης φθοράς με την κάθε διαδικασία που λαμβάνουν χώρα τοποθετούνται στον παρακάτω (πίνακα 3).

ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ	ΤΙΤΛΟΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗΣ
ASTM G99 - 17:	Standard Test Method for Wear Testing with a Pin- on-Disk Apparatus
ASTM G176-03 (2017):	Standard Test Method for Ranking Resistance of Plastics to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test Cumulative Wear Method
ASTM G77-17:	Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test
ASTM G65-16:	Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/rubber Wheel Apparatus
ASTM G32-16:	Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus
ASTM E2789-10(2015):	Standard Guide for Fretting Fatigue Testing
ISO 28080:2011:	Hardmetals -Abrasion tests for hardmetals

Πίνακας 3: Ενδεικτικές προδιαγραφές δοκιμών μέτρησης φθοράς και το πεδίο εφαρμογής τους. [1]

2.4.3. Κόπωση

Η εξέταση φθαρμένων επιφανειών σε διατομή αποκαλύπτει έντονη παραμόρφωση του υλικού ακριβώς κάτω από τη φθαρμένη επιφάνεια. Για παράδειγμα, έχει αποδειχθεί ότι υπό συνθήκες έντονης ολίσθησης με συντελεστή τριβής κοντά στη μονάδα, υλικό εντός 0,1 [mm] της επιφάνειας μετατοπίζεται προς την κατεύθυνση ολίσθησης λόγω παραμόρφωσης που προκαλείται από τη δύναμη τριβής. Επίσης, κοντά στην επιφάνεια, η δομή των κόκκων εκτίθεται προς τα έξω και προσανατολίζεται παράλληλα με τη φθαρμένη επιφάνεια. Προφανώς κάτω από τους χαμηλότερους συντελεστές τριβής που επικρατούν στα λιπαντικά συστήματα, αυτή η επιφανειακή παραμόρφωση είναι μικρότερη ή να απουσιάζει. Οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από τη διάτμηση κατά

την ολίσθηση εμφανίζονται έως σε κάποιο βάθος κάτω από την επιφάνεια φτάνοντας τις ακραίες τιμές στην επιφάνεια. [8]

Το στέλεχος που προκαλείται από την ολίσθηση τελικά διασπά την αρχική δομή κόκκων στην επιφάνεια για να σχηματίσει κύτταρα εξάρθρωσης. Αυτά τα κύτταρα μπορούν να περιγραφούν ως περιοχές υπομικρών, σχετικά απαλλαγμένες από εξαρθήματα, οι οποίες διαχωρίζονται από περιοχές (τοιχώματα) εξαιρετικά μπερδεμένων εξαρθρώσεων. Μια κυτταρική δομή ακριβώς κάτω από φθαρμένες επιφάνειες μεταλλικών υλικών έχει παρατηρηθεί σε μελέτες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας μετάδοσης. Η νέα δομή βρέθηκε ότι είναι παρόμοια, αν όχι πανομοιότυπη, με τη δομή που εμφανίζεται σε βαριά κατεργασμένα μέταλλα. [8]

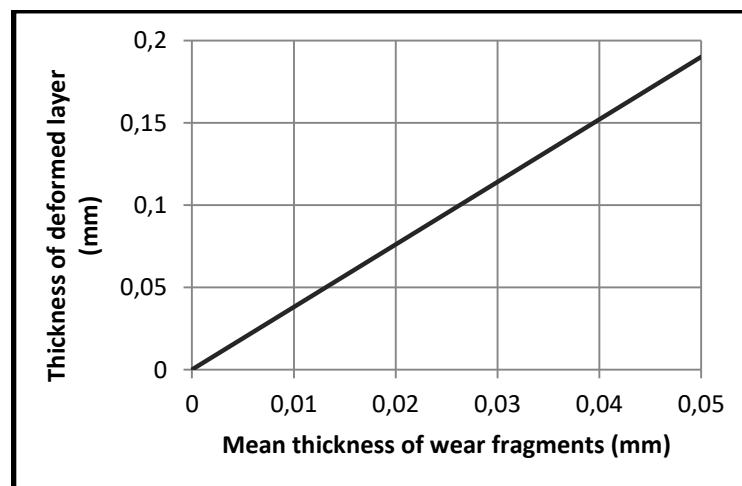
Τα υλικά ποικίλλουν πολύ ως προς την τάση τους να σχηματίζουν κυψέλες εξάρθρωσης, οι οποίες, σύμφωνα με τη γενική μεταλλουργική θεωρία, εξαρτώνται από την ενέργεια σφαλμάτων στοίβαξης, δηλαδή, η υψηλή ενέργεια σφαλμάτων στοίβαξης προάγει το σχηματισμό των κυττάρων. Για παράδειγμα, το αλουμίνιο, ο χαλκός και ο σίδηρος έχουν υψηλή ενέργεια σφάλματος στοίβαξης και επομένως σχηματίζουν εύκολα κυψέλες εξάρθρωσης. Στη διεπιφάνεια τα κύτταρα είναι επιμήκη προς την κατεύθυνση της ολίσθησης και είναι σχετικά λεπτά, που μοιάζουν με στρώματα επίπεδων πλακιδίων. Τα όρια των κυττάρων υψηλής ενέργειας είναι πιθανές περιοχές για σχηματισμό κενών και δημιουργίας ή επιβάρυνσης των ήδη υπάρχοντων ρωγμών. Ο σχηματισμός ενός σωματιδίου φθοράς μπορεί να ξεκινήσει στα τοιχώματα των κυψελών που είναι προσανατολισμένα κάθετα προς την κατεύθυνση ολίσθησης αφού η ρωγμή μπορεί να διαδοθεί κατά μήκος του ορίου της κυψέλης. Εναλλακτικά, η ρωγμή μπορεί να ξεκινήσει σε ένα αδύναμο σημείο κάτω από την επιφάνεια και στη συνέχεια να διαδοθεί στην επιφάνεια με αποτέλεσμα την απελευθέρωση ενός σωματιδίου φθοράς. [8]

Η **φθορά λόγω κόπωσης** (επιφανειακή κόπωση) προκαλείται όταν οι επιφάνειες υποβάλλονται σε κυκλική φόρτιση, όπως συμβαίνει στα έδρανα κύλισης ή σε κατεργασίες σφυρηλασίας και τα σωματίδια φθοράς σχηματίζονται μέσω μηχανισμών αποφλοΐωσης, απολέπισης ή διάβρωσης με βελονισμούς.

Η **θερμική κόπωση (thermal fatigue)** αποτελεί ένα άλλο είδος επιφανειακής κόπωσης, κατά την οποία οι επιφανειακές ρωγμές δημιουργούνται από τις θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται λόγω εναλλαγών της θερμοκρασίας, όπως συμβαίνει όταν η μήτρα

διαμόρφωσης χαμηλής θερμοκρασίας έρχεται, κατ' επανάληψη, σε επαφή με θερμά κατεργαζόμενα τεμάχια. Οι μεμονωμένες ρωγμές αναπτύσσονται και συνενώνονται, με αποτέλεσμα τη σταδιακή αποφλοίωση της επιφάνειας, με τρόπο ανάλογο με αυτόν της δημιουργίας κοιλοτήτων στους δρόμους. Στη θερμική κόπωση οφείλεται το φαινόμενο της ρωγμάτωσης εν θερμώ που απαντάται σε τύπους χύτευσης και μήτρες διαμόρφωσης εν θερμώ. [2]

Φθορά κόπωσης που προκαλείται από επιφανειακή ρωγμή: Ρωγμές και σχισμές έχουν συχνά παρατηρηθεί σε μικρογραφίες φθαρμένων επιφανειών. Μια πρωτογενής ρωγμή προέρχεται από την επιφάνεια σε κάποιο αδύναμο σημείο και διαδίδεται προς τα κάτω, κατά μήκος αδύναμων επιπέδων, όπως τα επίπεδα ολίσθησης ή τα όρια των κυψελών εξάρθρωσης. Μια δευτερεύουσα ρωγμή μπορεί να αναπτυχθεί από την πρωτογενή ρωγμή ή εναλλακτικά η πρωτογενής ρωγμή μπορεί να συνδεθεί με μια υπάρχουσα υποεπιφανειακή ρωγμή. Όταν η αναπτυσσόμενη ρωγμή φτάσει ξανά στην επιφάνεια, απελευθερώνεται ένα σωματίδιο φθοράς. Για το λόγο αυτό έχει βρεθεί ότι κατά τη διάρκεια της ολίσθησης χωρίς λίπανση, ιδιαίτερα της αμοιβαίας ολίσθησης, μπορεί να σχηματιστούν σωματίδια φθοράς λόγω της ανάπτυξης επιφανειακών ρωγμών. Τα επίπεδα αδυναμίας του υλικού που προσανατολίζονται παράλληλα προς την επιφάνεια, από τις διαδικασίες παραμόρφωσης και σχηματίζονται σωματίδια στρωτής φθοράς από μια επιφανειακή ρωγμή και είναι ανάλογα με το μέσο πάχος παραμορφωμένου στρώματος όπως δείχνει και στο (διάγραμμα 2), φτάνοντας σε ένα επίπεδο αδυναμίας, κατά τη διάρκεια της ολίσθησης. [2]



Διάγραμμα 2: Πάχος παραμορφωμένου στρώματος - Μέσο πάχος σωματιδίων φθοράς. [8]

Ακόμα γίνεται να δημιουργηθεί φθορά από υποεπιφανειακή ρωγμή όπου κατά τη διάρκεια της επαφής ολίσθησης μεταξύ δύο σωμάτων, μεγάλο μέρος της ζημιάς που προκαλείται στο υλικό κάθε σώματος συμβαίνει κάτω από τις επιφάνειες ολίσθησης. Μια φθαρμένη επιφάνεια μπορεί να παραμείνει αρκετά λεία και να μην διακρίνεται η ζημιά που έχει υποστεί εσωτερικά και λαμβάνουν χώρα διεργασίες που οδηγούν στο σχηματισμό ενός σωματιδίου φθοράς. [8]

2.4.4. Αντιμετώπιση της φθοράς

Είναι πολύ σημαντικό για αρκετούς λόγους όπως εξοικονόμηση και ποιότητα υλικών, οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια, να επιτυγχάνεται όσο τον δυνατόν μείωση της φθοράς σε κάθε διεργασία που συμμετέχει κάποια επιφάνεια. Ο παραπάνω σκοπός θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με τους παρακάτω τρόπους ξεχωριστά για κάθε είδος φθοράς.

- Η **φθορά χημικής διάβρωσης** μπορεί συνήθως να αντιμετωπιστεί με την κατάλληλη εκλογή υλικών και με τη σωστή μέθοδο προστασίας της επιφάνειας.
- Η **φθορά μηχανικής διάβρωσης** μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εκλογή αρκετά σκληρών υλικών και την αποφυγή της πρόσκρουσης σκληρών σωματιδίων στην επιφάνεια.
- Τη **φθορά κόπωσης επιφανείας** κυλιόμενων επαφών μπορούμε να αντιμετωπίσουμε με την κατάλληλη εκλογή υλικού, με τη θερμική κατεργασία, με το φινίρισμα της επιφάνειας και με τη χρησιμοποίηση των καταλλήλων επιπέδων καταπονήσεων.
- Τη **φθορά λείανσης**, όταν δεν υπάρχει φθορά πρόσφυσης, μπορούμε να την ελαττώσουμε κάνοντας τις επιφάνειες επαφής αρκετά λείες και παρεμποδίζοντας την είσοδο σκληρών ξένων σωματιδίων. (π.χ. κάνοντας σωστό φιλτράρισμα του λιπαντικού). Η φθορά λείανσης που αναπτύσσεται σαν αποτέλεσμα προγενέστερης φθοράς πρόσφυσης είναι ένα πολύ πολύπλοκο θέμα.
- Η **φθορά πρόσφυσης** είναι το πιο δύσκολο είδος φθοράς, τόσο για μελέτη, όσο και για έλεγχο. Η κατάλληλη εκλογή υλικών και η σωστή λίπανση μπορούν να περιορίσουν την φθορά.

Όπως παρατηρείται με τη σειρά, από τη φθορά χημικής διάβρωσης προς τη φθορά πρόσφυσης, για τα διάφορα είδη φθοράς, δυσχεραίνεται η μείωση των φαινομένων τους. [34]

2.4.5. Προστασία-Μείωση Φθοράς με επεξεργασία των επιφανειών

Σκλήρυνση επιφανείας: Συμπεριλαμβάνει μεθόδους όπως ενανθράκωση, εναζώτωση, ενδοκυάνωση, σκλήρωση με φλόγα, σκλήρωση με επαγωγή κ.λπ. Ακτίνες laser χρησιμοποιούνται επίσης ως πηγές θερμότητας για την επιφανειακή σκλήρωση μετάλλων και κεραμικών. Η σκλήρωση επιφανείας εισάγει παραμένουσες τάσεις στις επιφάνειες. Ο σχηματισμός μαρτενσίτη προκαλεί παραμένουσες τάσεις συμπίεσης στις επιφάνειες. Αυτές οι τάσεις είναι επιθυμητές διότι βελτιώνουν τον χρόνο κόπωσης με το να καθυστερούν την έναρξη των ρωγμών στα εξαρτήματα. [34]

Θερμικός ψεκασμός: Μ' αυτήν την μέθοδο επικαλύψεις όπως διάφορα μέταλλα και κράματα, καρβίδια και κεραμικά εφαρμόζονται στις μεταλλικές επιφάνειες με κάποιον εκτοξευτήρα υπό μορφή ρεύματος οξυγόνου – καυσίμου, ηλεκτρικό τόξο, πλάσμα κ.λπ. Το υλικό επικάλυψης μπορεί να είναι υπό μορφή σύρματος, ράβδου ή σκόνης, και τα σταγονίδια ή τα σωματίδια κτυπούν τις επιφάνειες προς επικάλυψη με ταχύτητες της τάξης των 100-1200 m/s. Οι επιφάνειες που θα υποστούν ψεκασμό (καταιωνισμό) πρέπει να καθαρισθούν και εκτραχυνθούν για βελτίωση της αντοχής του δεσμού, που εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη διαδικασία και τις χρησιμοποιούμενες τεχνικές. Η δομή της επικάλυψης μπορεί να είναι στρωματική και μπορεί να φέρει πόρους μέχρι 20% εξαιτίας του αέρα, και σωματίδια οξειδίων εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. [34]

Κατηγορίες θερμικού ψεκασμού είναι οι κάτωθι :

Πλάσματος: είτε συμβατικό, ή υψηλής ενέργειας, ή κενού. Αναπτύσσονται θερμοκρασίες 8.300°C και πολύ καλή αντοχή δεσμού με πολύ μικρή περιεκτικότητα σε οξείδια. Εκπυρσοκρότηση: όπου ελεγχόμενη έκρηξη λαμβάνει χώρα κάνοντας χρήση οξυγόνου – καυσίμου. Υψηλής ταχύτητας οξυγόνου – καυσίμου: ψεκασμός αερίου μεγάλης απόδοσης ανάλογης της εκπυρσοκρότησης. [34]

Τόξου σύρματος: όπου τόξο σχηματίζεται μεταξύ δύο αναλισκομένων ηλεκτροδίων, δίνει πολύ καλή αντοχή δεσμού και είναι η φθηνότερη. [34]

Ψεκασμός φλόγας με χρήση σύρματος: όπου η φλόγα οξυγόνου – καυσίμου λειώνει το σύρμα και το εναποθέτει στην επιφάνεια, σχηματίζεται δεσμός μεσαίας αντοχής, και η διαδικασία είναι φθηνή. [34]

Εναπόθεση ατμού: είναι μια διαδικασία στην οποία το υπόστρωμα υπόκειται σε χημικές αντιδράσεις με αέρια που περιέχουν ενώσεις των υλικών που πρόκειται να εναποτεθούν για να δώσει ένα στρώμα λίγων μικρών. Τα υλικά που εναποτίθενται μπορεί να είναι μέταλλα, κράμματα, καρβίδια, νιτρίδια, βορίδια, κεραμικά ή άλλα οξείδια. Το υπόστρωμα μπορεί να είναι μέταλλο, κράμα, πλαστικό, χαρτί, ή γυαλί. Τυπικές εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν κοπτικά εργαλεία, τρυπάνια, γλύφανα, φραζοδράπανα, καλούπια, έμβολα κοίλανσης και επιφάνειες που υπόκεινται σε φθορά. Η φυσική και η χημική εναπόθεση ατμών παρέχουν αποτελεσματικό έλεγχο της σύστασης της επικάλυψης, του πάχους και του αριθμού των πόρων. [34]

Φυσική εναπόθεση ατμού: εν κενώ η εξάτμιση τόξου, πιτσιλισμός, και εναπόθεση ιόντων. Κατά την εν κενώ εξάτμιση το μέταλλο που πρόκειται να εναποτεθεί εξατμίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες εν κενώ και εναποτίθεται στο υπόστρωμα που βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου ή λίγο υψηλότερα. Ομοιόμορφες επικαλύψεις μπορεί να σχηματισθούν σε πολύπλοκα σχήματα. Με την μέθοδο εξάτμισης τόξου το υλικό επικάλυψης (κάθοδος) εξατμίζεται με την βοήθεια ενός αριθμού εξατμιστών χρησιμοποιώντας ηλεκτρικά τόξα που δίνουν πλάσμα συνιστώμενο από ιονισμένο ατμό του υλικού προς επικάλυψη. Ο ατμός συμπυκνύεται στο υπόστρωμα (άνοδος) και το επικαλύπτει. Στις εφαρμογές αυτής της μεθόδου συμπεριλαμβάνονται επικαλύψεις ανθεκτικές στις υψηλές θερμοκρασίες που είναι επίσης ανθεκτικές στην οξείδωση. [34]

Μέθοδος sputtering: σ' αυτήν ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί ιονισμό αδρανούς αερίου (συνήθως αργού). Τα θετικά ιόντα βομβαρδίζουν το υλικό επικάλυψης (κάθοδος) και προκαλούν sputtering (εξαγωγή) των ατόμων. Αυτά τα άτομα κατόπιν συμπυκνούνται επί του κομματιού που θερμαίνεται προκειμένου να βελτιωθεί ο δεσμός. Με την μέθοδο του αντιδραστικού sputtering, το αδρανές αέριο αντικαθίσταται από ένα αντιδραστικό αέριο, όπως το οξυγόνο, που σ' αυτήν την περίπτωση τα άτομα οξειδώνονται και εναποτίθενται τα οξείδια. Καρβίδια και νιτρίδια επίσης εναποτίθενται με αντιδραστικό sputtering. Πολύ

λεπτές επικαλύψεις πολυμερούς μπορεί να εναποτεθούν σε μεταλλικά και πολυμερή υποστρώματα με το αντιδραστικό αέριο να προκαλεί πολυμερισμό του πλάσματος.

Εναπόθεση ιόντων: είναι συνδυασμός πιτσιλίσματος και εξάτμισης εν κενώ. Ένα ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί μια εκκένωση αναλαμπής δημιουργώντας κάποιο πλάσμα. Τα άτομα που έχουν υποστεί εξάτμιση σ' αυτήν την διαδικασία έχουν ιονισθεί μερικώς. [34]

Χημική εναπόθεση ατμών: είναι μια θερμοχημική διαδικασία. Σε μια τυπική εφαρμογή όπως κατά την επικάλυψη κοπτικών εργαλείων με νιτρίδιο του τιτανίου (TiN), τα εργαλεία τοποθετούνται σε έναν δίσκο γραφίτου και θερμαίνονται στους 950-1050°C σε ατμοσφαιρική πίεση σε μια αδρανή ατμόσφαιρα. Το τετραχλωρίδιο του τιτανίου (ατμός), υδρογόνο και άζωτο, εισάγονται μετέπειτα μέσα στον θάλαμο. Οι χημικές αντιδράσεις σχηματίζουν νιτρίδιο του τιτανίου στις επιφάνειες του εργαλείου. Για την επικάλυψη με καρβίδιο του τιτανίου, το μεθάνιο αντικαθιστά τα αέρια. Οι επικαλύψεις με χημική εναπόθεση ατμών είναι συνήθως πιο παχείς από αυτές που λαμβάνονται με φυσική εναπόθεση ατμών. Ένα τυπικό κύκλο για χημική εναπόθεση ατμών είναι μακροχρόνιο και συνίσταται τρεις ώρες θέρμανση, τέσσερις ώρες επικάλυψη, και έξι έως οκτώ ώρες ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου. Το πάχος της επικάλυψης εξαρτάται από την παροχή των αερίων που χρησιμοποιούνται, τον χρόνο και την θερμοκρασία. Είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή επικαλύψεων διαμαντιού. [34]

Εμφύτευση ιόντων: καθώς η ενέργεια των ατόμων ή ιόντων που χτυπούν την επιφάνεια αυξάνεται, αυξάνει και ο βαθμός ενδοδιάχυσης και ανάμιξης μεταξύ των ατόμων της επικάλυψης και των επιφανειακών στρωμάτων του υποστρώματος. Εάν ιόντα υψηλής ενεργείας χτυπούν κάποια επιφάνεια μπορούν να διεισδύσουν σε κάποιο βάθος και να αλλάξουν τις ιδιότητες του υλικού. Είναι μια μέθοδος τροποποίησης της επιφανείας. Τα χρησιμοποιούμενα ιόντα είναι κυρίως N^+ , N_2^+ , C^+ και B^+ , καθώς και τα μεταλλικά ιόντα: Ti^+ , Al^+ και Y^+ . Οι ενέργειές των είναι της τάξης των 50 μέχρι 200 KeV, δίδοντας βάθη διείσδυσης μικρότερα των 1μm. Εξαιτίας του μικρού βάθους του υλικού που επηρεάζεται από την εμφύτευση των ιόντων, αυτή η διαδικασία προκαλεί αμελητέα αλλαγή στις διαστάσεις ή το φινίρισμα της επιφανείας του υποστρώματος. Μπορεί να εφαρμοσθεί στα κεραμικά, στα μέταλλα και τα κεραμομέταλλα. Η εμφύτευση των ενεργητικών ιόντων αλλάζει την δομή της επιφανείας με δύο τρόπους: Μέσω της εισαγωγής των ειδών εμφύτευσης που σχηματίζουν στερεό διάλυμα ή ένωση, και λόγω

καταστροφής από ακτινοβολία δηλ. διαφοροποιείται η δομή λόγω της μετατόπισης των ατόμων, από τις συγκρούσεις των ιόντων. Η εμφύτευση ιόντων μειώνει σε πολλά υλικά τον βαθμό φθοράς λόγω ολίσθησης. Σε κάποια μέταλλα μειώνεται η τριβή και συνεπώς η φθορά λόγω μείωσης των επαπτομενικών δυνάμεων κατά την ολίσθηση. Σαν παράδειγμα αναφέρεται πως η εμφύτευση ιόντων Ti^+ μειώνει τον συντελεστή τριβής σε έδρανο ολίσθησης από χάλυβα από 0,6 σε 0,3, πιθανώς με τροποποίηση της σύνθεσης της επιφανείας, τα χαρακτηριστικά οξείδωσής της και την φύση του σχηματιζόμενου οξειδίου. Επίσης μειώνεται και ο βαθμός φθοράς. Εν τούτοις, εμφύτευση ιόντων N^+ μειώνει επίσης τον βαθμό φθοράς των σχετικά ελατών χαλύβων (αν και όχι των σκληρών μαρτενσιτικών χαλύβων), αν και δεν προκαλούν ελάττωση της τριβής. Σ' αυτήν την περίπτωση ο κύριος λόγος της αυξανόμενης αντίστασης στην φθορά είναι πιθανόν οι αλλαγές των μηχανικών ιδιοτήτων κοντά στην επιφάνεια, και ιδιαίτερα σκληρότης και βαθμός καταπόνησης από σκλήρωση. Μετρήσεις μικροσκληρότητας σε πολύ μικρά φορτία έχουν εμφανίσει αυξήσεις στην επιφανειακή σκληρότητα χαλύβων με εμφυτευμένο N^+ από 50 μέχρι 100%. Χάλυβες που περιέχουν σχηματιστές νιτριδίων (π.χ. αλουμίνιον, χρώμιον ή βανάδιον) παρουσιάζουν μεγαλύτερη επίδραση από άλλους. Ένα άλλο αποτέλεσμα της εμφύτευσης ιόντων που μπορεί να συντελέσει σε βελτίωση της τριβολογικής συμπεριφοράς είναι η εισαγωγή παραμενουσών τάσεων συμπίεσης στην επιφάνεια. [34]

Επιμετάλλωση: Προσδίδει αντίσταση στην φθορά και την διάβρωση, υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, καλύτερη εμφάνιση και ανακλαστικότητα. Κατά την ηλεκτροεπιμετάλλωση το κομμάτι (κάθοδος) επιμεταλλώνεται με κάποιο διαφορετικό μέταλλο (άνοδος) ενώ και τα δύο βρίσκονται σε κάποιο διάλυμα ηλεκτρολύτη υδατικής βάσης. Βασικά τα μεταλλικά ιόντα από την άνοδο απομακρύνονται κάτω από την διαφορά δυναμικού εξωτερικής πηγής ενώνονται με τα ιόντα του διαλύματος και εναποτίθενται στην κάθοδο. Όλα τα μέταλλα μπορεί να επιμεταλλωθούν σε πάχος από μερικά ατομικά στρώματα μέχρι 0,05 mm. Κοινά υλικά επιμετάλλωσης είναι το χρώμιο, το νικέλιο, το κάδμιο, ο χαλκός, ο ψευδάργυρος και ο κασσίτερος. Επιμετάλλωση με χρώμιο λαμβάνει χώρα, επιμεταλλώνοντας πρώτα το υπόστρωμα με χαλκό μετά με νικέλιο και μετά με χρώμιο. Επιμετάλλωση σκληρού χρωμίου λαμβάνει χώρα κατ' ευθείαν πάνω στο βασικό μέταλλο για να επιτευχθεί σκληρότητα 70 HRC. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την βελτίωση στην αντίσταση στην φθορά και την

διάβρωση, εργαλείων, στελεχών βανών, υδραυλικών αξόνων, χιτωνίων μηχανών ντήζελ και αεροπλάνων και για το γέμισμα φθαρμένων κομματιών. [34]

Επιμετάλλωση απουσία ρεύματος: λαμβάνει χώρα με χημικές αντιδράσεις χωρίς εξωτερική πηγή ηλεκτρισμού. Η περισσότερο συνήθης εφαρμογή χρησιμοποιεί το νικέλιο, αν και ο χαλκός χρησιμοποιείται επίσης. Το χλωρίδιο του νικελίου (ένα μεταλλικό άλας) ανάγεται με υποφωσφορώδες νάτριο, ως αναγωγικό φορέα, σε μεταλλικό νικέλιο που αργότερα εναποτίθεται στο κομμάτι. Η σκληρότητα του επιμεταλλωμένου νικελίου κυμαίνεται από 425 HV μέχρι 575 HV και μπορεί να επεξεργασθεί θερμικά μέχρι 1000 HV. Η επίστρωση νικελίου παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στην φθορά και την οξείδωση. [34]

[Κενή σελίδα]

Κεφάλαιο 3ο: Επικαλύψεις Κεραμικών Υλικών

3.1. Δομή κεραμικών υλικών

Τα κεραμικά είναι ενώσεις μεταλλικών και μη-μεταλλικών στοιχείων. Η ετυμολογία του ονόματός τους ανάγεται στο αρχαίο-ελληνικό κέραμος (ο πηλός) και στο παράγωγο κεραμικός (παραγόμενος από πηλό). Λόγω του μεγάλου αριθμού δυνατών συνδυασμών στοιχείων, υπάρχει μεγάλη ποικιλία διαθέσιμων κεραμικών, κατάλληλων για αρκετές καταναλωτικές και βιομηχανικές εφαρμογές όπως τα υλικά που εμφανίζονται στον (πίνακα 4). Ιστορικά η πρώτη χρήση κεραμικών υλικών για παραγωγή σκευών και τούβλων χρονολογείται περί το 4000 π.Χ. Σήμερα, αποκτούν συνεχώς μεγαλύτερο ενδιαφέρον ως υλικά για εργαλεία και μήτρες, συστήματα θέρμανσης και εξαρτήματα αυτοκινήτων όπως επενδύσεις εξατμίσεων, σπινθηριστές (αλλιώς μπουζί), επιστρώσεις πιστονιών και χιτώνια κυλίνδρων.

Τα κεραμικά διακρίνονται σε:

- **Συμβατικά ή παραδοσιακά κεραμικά** χρησιμοποιούνται σε διακοσμητικά αντικείμενα (π.χ. πορσελάνες, κεραμικά βάζα), πλακάκια, τούβλα, σωλήνες αποχέτευσης, και λειαντικούς τροχούς
- **Βιομηχανικά κεραμικά**, γνωστά επίσης ως υψηλής τεχνολογίας ή λεπτόκοκκα κεραμικά τα οποία χρησιμοποιούνται σε (εξαρτήματα αυτοκινήτων, στροβιλοκινητήρες, δομικά στοιχεία και εξαρτήματα αεροδιαστημικών κατασκευών, εναλλάκτες θερμότητας, ημιαγωγούς, διατάξεις στεγανοποίησης, προσθετικά μέλη και κοπτικά εργαλεία). Είναι αρκετά πολύπλοκες οι δομές των κεραμικών κρυστάλλων, καθώς εμπεριέχονται διάφορα άτομα διαφορετικών μεγεθών. Οι δεσμοί μεταξύ αυτών των ατόμων είναι γενικά ομοιοπολικοί ή ιοντικοί και εξαιτίας αυτού, έχουν πολύ μεγαλύτερη αντοχή από τους μεταλλικούς δεσμούς με συνέπεια πως οι ιδιότητες όπως η σκληρότητα και η θερμική ηλεκτρική αντίσταση είναι σημαντικά υψηλότερες. Τα κεραμικά υλικά είναι διαθέσιμα είτε ως μονοκρυστάλλοι, είτε σε πολυκρυσταλλική μορφή. Η αντοχή και οι ιδιότητες των κεραμικών υλικών εξαρτώνται από το μέγεθος των κόκκων τους, για αυτό όσο μικρότερο είναι το μέγεθος κόκκων (λεπτόκοκκα κεραμικά), τόσο υψηλότερη είναι η αντοχή και δυσθραυστότητα του υλικού. [2]

Ceramic		Density [kg/m ³]	Hardness [Vickers]	Max service temperature [°C]	Specific heat [J/kgK]	Thermal conductivity [W/mK]	Tensile Modulus [GPa]
Alumina		3900	1500-1650	1800	920	28-35	330-400
Sapphire (hard form of Alumina)		3985	2500-3000	1800-1950	753	41,9	-
Aluminium nitride		3250	1200	1200	800	165	-
Boron Carbided (hot pressed)		2450	3200	700-800	950	27-36	440-470
Boron nitride (hot pressed)		1800	very soft	950-1200	780	15-33	20-100
Silicon carbide	(hot pressed)	3150	2400-2800	1500-1650	670-710	90-160	350-440
	(reaction bonded)	3100	2500-3500	1400-1650	670-710	200	410
Silicon nitride	(hot pressed)	3110	1700-2200	1100-1650	680-800	15-43	280-310
	(reaction bonded)	2400	800-1000	1200-1500	690	10-16	170-220
Sialon		3240	1650-1800	1500	620-710	20	280-300
Zirkonia stab. With MgO		5740	1200	2200	470	1,3	200

Πίνακας 4: Φυσικές ιδιότητες τυπικών κεραμικών υλικών. [8]

3.1.1. Φθορά και τριβή κεραμικών υλικών

Τα κεραμικά είναι μια ειδική κατηγορία υλικών που περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα σκληρών πυρίμαχων ανόργανων ενώσεων, οι οποίες σχηματίζονται με θέρμανση του υλικού βάσης σε μορφή σκόνης σε υψηλή θερμοκρασία όπου συμβαίνει πυροσυσσώματωση ή αντίδραση στερεάς κατάστασης. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ένα υλικό που έχει ανώτερη σκληρότητα, καλή χημική αντοχή και, σε ορισμένες περιπτώσεις, πολύ μεγαλύτερη αντοχή στη φθορά από τα περισσότερα μέταλλα. Ένα παράδειγμα της ανώτερης αντοχής στη φθορά των κεραμικών έναντι των πιο παραδοσιακών υλικών μπορεί να απεικονιστεί από ένα συγκρότημα στροφείου και έκκεντρον κινητήρα εσωτερικής καύσης. Αυτό το συγκεκριμένο συγκρότημα είναι μια κύρια αιτία προβλημάτων φθοράς του κινητήρα λόγω του συνδυασμού της αυξημένης θερμοκρασίας, της ολίσθησης και των υψηλών τάσεων επαφής. Πειραματικές μετρήσεις

του βάθους φθοράς στα μαξιλάρια βραχιόνων από πυροσυσσωματωμένο σίδηρο και νιτρίδιο του πυριτίου. Η αντικατάσταση των μεταλλικών μαξιλαριών από νιτρίδιο πυριτίου τα μαξιλάρια έχουν προκαλέσει την ουσιαστική παύση της φθοράς μετά από μια αρχική περίοδο φθοράς. Εκτός από τη βελτίωση της τριβολογικής απόδοσης, τα κεραμικά διατηρούν τις φυσικές τους ιδιότητες (σκληρότητα, αντοχή) σε υψηλές θερμοκρασίες. Ως εκ τούτου, υποστηρίζονται ως τα νέα υλικά ρουλεμάν, παρά το γεγονός ότι η διαδικασία κατασκευής που απαιτείται είναι πολύ πιο δύσκολη από αυτή των μετάλλων. Τα κεραμικά που χρησιμοποιούνται για ρουλεμάν ή εξαρτήματα ανθεκτικά στη φθορά αποτελούνται συνήθως από οξείδια, νιτρίδια ή καρβίδια αλουμινίου, πυριτίου και άλλων μετάλλων. Μια λίστα τυπικών κεραμικών με τις φυσικές τους ιδιότητες. Τα τριβολογικά χαρακτηριστικά των κεραμικών είναι πολύπλοκα και εξαρτώνται από τους ακόλουθους παράγοντες: σύνθεση και ιδιότητες υλικού, συνθήκες ολίσθησης (ταχύτητα, φορτίο και θερμοκρασία), το περιβάλλον και τον τύπο της πρόσφυσης. συχνά ταξινομούνται ως «οξείδια», «καρβίδια» ή «νιτρίδια» και αυτή η ταξινόμηση αντανάκλαται από σημαντικές διαφορές στους μηχανισμούς τριβής και φθοράς. Μερικά κεραμικά, π.χ. το οξείδιο του αλουμινίου, αποτελούνται κυρίως από ένα καθαρό υλικό στο οποίο προστίθενται μικρές ποσότητες πρόσθετων για την προώθηση της πυροσυσσωμάτωσης. Άλλα κεραμικά είναι σύνθετα κεραμικά με μηχανικά και τριβολογικά χαρακτηριστικά που δεν μπορούν να εξηγηθούν με όρους ενός μόνο υλικού. Για παράδειγμα, το sialon είναι ένα στερεό διάλυμα οξειδίου του αργιλίου και νιτρίδιου του πυριτίου. Το μερικώς σταθεροποιημένο ζirkόνιο (PSZ) είναι το ζirkόνιο που περιέχει μια μικρή ποσότητα σταθεροποιητή όπως μαγνήσιο ή ύτριο. [8]

3.1.2. Πορώδες κεραμικών υλικών

Οι πόροι αποτελούν το πιο σημαντικό ελάττωμα δομής στα πολυκρυσταλλικά κεραμικά. Η παρουσία πόρων είναι αρνητική επίπτωση για της μηχανικές ιδιότητες των κεραμικών αντικειμένων καθώς οι πόροι αποτελούν αρχικά σημεία όπου μπορούν να αναπτυχθούν ρωγμές. Η μηχανική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας, μειώνονται καθώς αυξάνεται το πορώδες. Ένας από τους λόγους όπου τα κεραμικά υλικά εμφανίζουν ψαθυρή συμπεριφορά κατά τον εφελκυσμό είναι η παρουσία πόρων. Καθώς κατά την μαζική παραγωγή κεραμικών εξαρτημάτων για την ίδια χρήση, η κατανομή μεγέθους πόρων και το ολικό πορώδες θα διαφέρουν από κομμάτι σε κομμάτι, αντίστοιχα θα διαφέρουν και οι μηχανικές τους ιδιότητες. Η μεταβλητότητα αυτή εκφράζεται με τις κατανομές Weibull.

Αντίθετα, η παρουσία πόρων μπορεί να είναι ευεργετική ως προς την αντοχή σε θερμικούς αιφνιδιασμούς. Σε ορισμένες εφαρμογές όπως η διήθηση θερμών τηγμάτων μετάλλων η αιωρούμενων σωματιδίων από αέρια, είναι επιθυμητή η ύπαρξη πόρων και μάλιστα διασυνδεδεμένων μεταξύ τους. Αν ένα υλικό δεν έχει πόρους, η πυκνότητά του είναι ίση με την θεωρητική του πυκνότητα γ . Ένα υλικό με πόρους έχει πυκνότητα μικρότερη της θεωρητικής. Οι πόροι σε ένα υλικό μπορούν να είναι είτε διασυνδεδεμένοι, είτε «κλειστοί».

Το φαινόμενο πορώδες (apparent porosity) είναι το ποσοστό του συνολικού όγκου του υλικού το οποίο καταλαμβάνεται από διασυνδεδεμένους πόρους. Διασυνδεδεμένοι ή «ανοικτούς πόροι είναι αυτοί που παρέχουν διόδους και «κανάλια» μέσω των οποίων μπορούν να διέλθουν υγρά και αέρια. Το φαινόμενο πορώδες είναι μέτρο της διαπερατότητας (permeability) ενός υλικού, δηλαδή της ευκολίας με την οποία υγρά ή αέρια μπορούν να ρέυσουν μέσα από το υλικό και είναι πολύ σημαντική ιδιότητα των πορωδών κεραμικών.

Ένα άλλο μέτρο του πορώδους είναι το πραγματικό πορώδες (true porosity). Η τιμή του περιλαμβάνει τον όγκο τόσο των κλειστών όσο και των διασυνδεδεμένων πόρων. [45]

3.1.3. Οξείδια

Κεραμικά οξειδίων είναι τα υλικά τα οποία έχουν δημιουργηθεί από διάφορα στοιχεία του περιοδικού πίνακα από ενώσεις με το οξυγόνο. Μερικά από αυτά είναι το οξείδιο (αλουμινίου Al_2O_3 , ασβεστίου CaO , βηρυλλίου BeO , δημητρίου CeO_2 , ζirkονίου ZrO_2 , θορίου ThO_2 , μαγνησίου MgO , ουρανίου UO_2 , τιτανίου TiO_2 , Χρωμίου Cr_2O_3) και ενώσεις όπως $MgAl_2O_4$, CSZ, YSZ. Παρακάτω αναλύονται πιο συγκεκριμένα τα οξείδια αλουμίνιας και ζirkονίας που μας ενδιαφέρουν στην παρούσα εργασία εξαιτίας του πειραματικού μέρους.

Αλουμίνια (alumina). Ορυκτό οξείδιο αλουμινίου (Al_2O_3) γνωστό επίσης με τις ονομασίες corundum (κορούδιο) ή emery. [2] Προέλευση από το χημικό στοιχείο Αργίλιο ή Αλουμίνιο. Βρίσκεται στη σειρά 2, ομάδα 13 του περιοδικού πίνακα. Το αλουμίνιο είναι το τρίτο πιο άφθονο στοιχείο στο φλοιό της Γης, υπολειπόμενο του οξυγόνου και του πυριτίου. Είναι το πιο άφθονο μέταλλο. Το αλουμίνιο εμφανίζεται στη

φύση μόνο σε ενώσεις, ποτέ ως καθαρό μέταλλο. Η απομάκρυνση του αλουμινίου από τις ενώσεις του είναι αρκετά δύσκολη. [26]

Φυσικές ιδιότητες: Το αλουμίνιο είναι ένα μέταλλο που μοιάζει με ασήμι και έχει μια ελαφρώς γαλαζωπή απόχρωση. Έχει σημείο τήξης 660°C και σημείο βρασμού $2.327\text{-}2.450^{\circ}\text{C}$. Η ατομική του μάζα 26,98. Η πυκνότητά του είναι $2,708\text{ gr/cm}^3$. Το αλουμίνιο είναι όλκιμο και εύπλαστο. Το αλουμίνιο είναι άριστος αγωγός του ηλεκτρισμού και έχει χαμηλό κόστος. [26]

Χημικές ιδιότητες: Στον υγρό αέρα, συνδυάζεται αργά με το οξυγόνο σχηματίζοντας οξείδιο του αργιλίου. Το οξείδιο του αλουμινίου σχηματίζει μια πολύ λεπτή, υπόλευκη επίστρωση στο μέταλλο αλουμινίου. Η επίστρωση εμποδίζει το μέταλλο να αντιδράσει περαιτέρω με το οξυγόνο και προστατεύει το μέταλλο από περαιτέρω διάβρωση (σκουριά). Το αλουμίνιο είναι ένα αρκετά ενεργό μέταλλο. Αντιδρά με πολλά καυστικά οξέα και με αλκάλια. Ένα αλκάλιο είναι μια χημική ουσία με ιδιότητες αντίθετες από εκείνες ενός οξέος. Είναι ασυνήθιστο για ένα στοιχείο να αντιδρά τόσο με οξέα όσο και με αλκάλια. Τέτοια στοιχεία λέγονται αμφοτερικά. Το αλουμίνιο αντιδρά επίσης γρήγορα με το καυτό νερό. Σε μορφή σκόνης, παίρνει γρήγορα φωτιά όταν εκτίθεται σε φλόγα. [26]

Η **αλουμίνα** είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο κεραμικό οξείδιο, είτε σε καθαρή μορφή είτε ως πρώτη ύλη για ανάμειξη με άλλα οξείδια. Έχει υψηλή σκληρότητα και μέτρια αντοχή. Αν και υπάρχει στη φύση, περιέχει μεταβαλλόμενες ποσότητες προσμείξεων και έχει ανομοιομορφες ιδιότητες ως επακόλουθο, να διαφοροποιείται η απόδοσή της. Σήμερα πλέον, τα οξείδια αλουμινίου, καρβίδια πυριτίου και τα περισσότερα άλλα κεραμικά κατασκευάζονται σχεδόν στο σύνολό τους με συνθετικές μεθόδους, οπότε η ποιότητά τους μπορεί να ελέγχεται και να διατηρείται σε σταθερά υψηλό επίπεδο. Συνθετικό οξείδιο αλουμινίου παράγεται από το 1893, με σύντηξη τηγμένου βωξίτη (μετάλλευμα οξειδίου του αλουμινίου το οποίο αποτελεί την κυριότερη πηγή αλουμινίου), ριניσμάτων σιδήρου και οπτάνθρακα (coke), σε ηλεκτρικές καμίνους. Αφού ψυχθεί, το προϊόν θρυμματίζεται και διαχωρίζεται κατά μέγεθος περνώντας από τυποποιημένα κόσκινα. Το οξείδιο αλουμινίου μπορεί να αναμειγνύεται με μικρές ποσότητες άλλων κεραμικών όπως οξείδιο τιτανίου και καρβίδιο τιτανίου. Τα mullite και spinel είναι δομές οι οποίες περιέχουν αλουμίνα και διάφορα άλλα οξείδια και

χρησιμοποιούνται ως πυρίμαχα υλικά για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες της αλουμίνας είναι κατάλληλες κυρίως για εφαρμογές όπως ηλεκτρική και θερμική μόνωση, κατασκευή κοπτικών εργαλείων και λειαντικά υλικά. [2]

Χαρακτηριστικά Αλουμίνας: Υψηλή σκληρότητα, μέτρια αντοχή ευρύτερα χρησιμοποιούμενο κεραμικό κοπτικά εργαλεία λειαντικά ηλεκτρική και θερμική μόνωση. [2]

Ζιρκονία (zirconia). Είναι ένα λευκόχρωμο οξείδιο του ζιρκονίου (ZrO_2) με καλή δυσθραυστότητα, καλή θερμική αντίσταση, φθορά και διάβρωση, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και χαμηλό συντελεστή τριβής. [2] Έχει προέλευση από το χημικό στοιχείο ζιρκόνιο το οποίο είναι μέταλλο με ατομικό αριθμό 40 και ατομικό βάρος 91,224, θερμοκρασία τήξης $1.852 \pm 2^\circ C$, θερμοκρασία βρασμού $4.377^\circ C$ και πυκνότητα $6,52 \text{ gr/cm}^3$. Ανήκει στην ομάδα της 2ης κύριας σειράς των στοιχείων μετάπτωσης και δεν συναντάται σχεδόν ποτέ χωρίς προσμείξεις στη φύση. Η βασική μέθοδος βιομηχανικής παρασκευής ζιρκονίου είναι η μέθοδος Kroll, κατά την οποία το ζιρκόνιο ανάγεται από μαγνήσιο από τη χλωριούχο ένωση του. Ωστόσο, επειδή βρίσκεται σχεδόν πάντα μαζί με το στοιχείο Άφνιο (Hf), ο διαχωρισμός τους είναι ιδιαίτερα δυσχερής. [27]

Φυσικές ιδιότητες: Το ζιρκόνιο είναι αργυρόλευκο μέταλλο με ισχυρή λάμψη, μέσης πυκνότητας και σκληρότητας και πολύ ανθεκτικό τόσο στη διάβρωση όσο και στη θερμότητα. Οι φυσικές (και χημικές) του ιδιότητες μοιάζουν πολύ με αυτές του τιτανίου (Ti).

Χημικές ιδιότητες: Το ζιρκόνιο όταν είναι συνεκτικό δεν είναι ιδιαίτερα δραστικό μέταλλο, καθώς δεν διαβρώνεται ούτε προσβάλλεται από αραιά οξέα και καυστικά αλκάλια. Όταν βρίσκεται σε λεπτό διαμερισμό (υπό μορφή κόνεως) αναφλέγεται αιφνίδια στον αέρα δημιουργώντας κινδύνους πυρκαγιάς. Λόγω της υψηλής αντοχής του στη διάβρωση και τη θερμότητα, χρησιμοποιείται για την κατασκευή ειδικών βαλβίδων και αντλιών. Επειδή, επίσης, δεν απορροφά νετρόνια, χρησιμοποιείται πάρα πολύ στις επενδύσεις και τις σωληνώσεις των ατομικών αντιδραστήρων, από τις οποίες όμως πρέπει να είναι τελείως απαλλαγμένο από το άφνιο. Το οξείδιό του χρησιμοποιείται ως πυρίμαχο υλικό για την κατασκευή προτύπων (καλουπιών) χυτών αντικειμένων και για την επένδυση κλιβάνων υψηλών θερμοκρασιών. Τα ορυκτά του και

ιδιαίτερα το ζirkόνιο είναι πολύτιμοι ή ημιπολύτιμοι λίθοι. Χρησιμοποιείται επίσης, για την παρασκευή ειδικών κραμάτων. στην οδοντιατρική για στεφάνες (θήκες), γέφυρες και εμφυτεύματα. [27]

Η **μερικώς σταθεροποιημένη ζirkονία** (partially stabilized zirconia, PSZ) έχει υψηλότερη αντοχή και δυσθραυστότητα και μεγαλύτερη αξιοπιστία ως προς την απόδοση, συγκριτικά με τη ζirkονία. Παράγεται με νόθευση ζirkονίας με οξείδια ασβεστίου, πυριτίου ή νησίου αυτή η διαδικασία παράγει ένα υλικό με λεπτόκοκκα σωματίδια ζirkονίας τετραγωνικής δομής σε κυβικό πλέγμα. Η τυπική εφαρμογή της ζirkονίας είναι στην κατασκευή μητρών για θερμή διέλαση μετάλλων, ενώ χάντρες ζirkονίας χρησιμοποιούνται ως μέσο λείανσης και στίλβωσης για επιστρώσεις αεροδιαστημικών συστημάτων, αστάρια αυτοκινήτων, υλικά αφής και ποιοτικές λείες εκτυπώσεις σε εύκαμπτες συσκευασίες τροφίμων. Δύο σημαντικά χαρακτηριστικά του PSZ είναι ο υψηλός συντελεστής θερμικής διαστολής (περίπου 20% χαμηλότερος το αυτόν του χυτοσιδήρου) και η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (περίπου στο 1/3 αυτής άλλων κεραμικών). Για τον λόγο αυτό, το PSZ είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για εξαρτήματα θερμικών κινητήρων όπως χιτώνια κυλίνδρων και αντιτριβικοί δακτύλιοι βαλβίδων, τα οποία συμβάλλουν στη διαφύλαξη της ακεραιότητας της συνολικής δομής ενός κινητήρα από χυτοσίδηρο. Μία άλλη μορφή ζirkονίας γνωστή ως TTZ (transformation-toughened zirconia) έχει υψηλότερη δυσθραυστότητα, λόγω της παρουσίας διεσπαρμένων δύσθραυστων φάσεων στη μήτρα κεραμικού.

Χαρακτηριστικά Ζirkονίας: Υψηλή αντοχή και δυσθραυστότητα, θερμική διαστολή κοντά σε αυτή του χυτοσιδήρου κατάλληλη για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών όπως π.χ. υλικά επένδυσης καμίνων μεταλλουργίας, εξαρτήματα αεριοθούμενων κινητήρων και επένδυση πυρηνικών καυσίμων. [2]

3.1.4. Καρβίδια

Τα **καρβίδια** τυπικά χρησιμοποιούνται σε κοπτικά εργαλεία, υλικά για μήτρες, και ως λειαντικό μέσο κυρίως σε λειαντικούς τροχούς. Ορισμένα κοινά καρβίδια είναι τα ακόλουθα:

- Καρβίδιο βολφραμίου (WC): η δομή του αποτελείται από σωματίδια καρβιδίου βολφραμίου με κοβάλτιο ως συνδετικό υλικό. Η ποσότητα του συνδετικού υλικού έχει σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του καρβιδίου για παράδειγμα, η δυσθραυστότητα αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κοβάλτιο, ενώ μειώνονται η σκληρότητα, η αντοχή και η αντίσταση σε φθορά.
- Καρβίδιο τιτανίου (TiC): περιέχει νικέλιο και μολυβδαίνιο ως συνδετικό υλικό και δεν είναι τόσο δύσθραυστο όσο το Καρβίδιο βολφραμίου.
- Καρβίδιο πυριτίου (SiC): επιδεικνύει καλή αντίσταση σε φθορά (οπότε είναι κατάλληλο για χρήση ως λειαντικό), θερμικό αιφνιδιασμό και διάβρωση. Έχει χαμηλό συντελεστή τριβής και διατηρεί την αντοχή του σε υψηλές θερμοκρασίες (οπότε είναι κατάλληλο για εξαρτήματα θερμικών μηχανών με υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας). Συνθετικό καρβίδιο πυριτίου παράγεται (από το 1891, από πυριτική άμμο, οπτάνθρακα (coke) και μικρές ποσότητες χλωριούχου νατρίου και πριονιδιού η μέθοδος είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται για παραγωγή συνθετικής αλουμίνας. [2]

3.1.5. Νιτρίδια

Τα **Νιτρίδια (nitrides)** είναι ακόμα μία υποομάδα των κεραμικών και κατατάσσονται σε:

- Κυβικό βοριονιτρίδιο (CBN): είναι το δεύτερο σκληρότερο υλικό μετά το διαμάντι και βρίσκει ειδικές εφαρμογές, κυρίως σε κοπτικά εργαλεία και ως λειαντικό σε τροχούς λείανσης. Δεν βρίσκεται στη φύση και παρήχθη συνθετικά για πρώτη φορά κατά τη δεκαετία του 1970, χρησιμοποιώντας τεχνικές παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται για παραγωγή συνθετικού διαμαντιού.
- Νιτρίδιο τιτανίου (TiN): χρησιμοποιείται ευρέως ως επίστρωση σε κοπτικά εργαλεία και βελτιώνει τη διάρκεια ζωής τους λόγω χαμηλής τριβής.

- Νιτρίδιο πυριτίου (Si₃N₄): επιδεικνύει αυξημένη αντίσταση σε ερπυσμό σε υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλή θερμική διαστολή και υψηλή θερμική αγωγιμότητα, οπότε είναι ανθεκτικό σε θερμικό αιφνιδιασμό. Είναι κατάλληλο για δομικά στοιχεία με υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας όπως εξαρτήματα κινητήρων αυτοκινήτων και αεριοστροβίλων, κυλίνδρους σε ακολουθητές εκκέντρων (cam-follower rollers), ακροφύσια αμμοβολής και εξαρτήματα για τη βιομηχανία χαρτιού. [2]

3.1.6. Sialon

Το όνομά του **Sialon** προκύπτει από τους όρους silicon, aluminum, oxygen και nitrogen, αποτελείται από νιτρίδιο πυριτίου με διάφορες προσθήκες οξειδίου αλουμινίου, οξειδίου πυριτίου και καρβιδίου τιτανίου. Έχει υψηλότερη αντοχή και αντίσταση σε θερμικό αιφνιδιασμό απ' ό,τι το νιτρίδιο πυριτίου και χρησιμοποιείται κυρίως ως υλικό εργαλείων κοπής. [2]

3.1.7. Κεραμομεταλλικά σύνθετα

Τα **κεραμομεταλλικά σύνθετα υλικά (cermets)** είναι συνδυασμοί μιας φάσης κεραμικού ενωμένης με μία φάση μετάλλου. Πρωτοπαρουσιάστηκαν τη δεκαετία του 1960 και είναι επίσης γνωστά ως μαύρα κεραμικά (black ceramics) ή κεραμικά θερμικής συμπίεσης (hot-pressed ceramics). Συνδυάζουν την υψηλή αντίσταση σε οξείδωση των κεραμικών (σε υψηλές θερμοκρασίες) με τη δυσθραυστότητα, την αντίσταση σε θερμικό αιφνιδιασμό και την ολκιμότητα των μετάλλων. Μία κοινή εφαρμογή των cermets είναι σε κοπτικά εργαλεία, με τυπική σύσταση 70% Al₂O₃ και 30% της άλλα κεραμομεταλλικά σύνθετα περιέχουν διάφορα οξείδια, καρβίδια και νιτρίδια. Τα cermets έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών, όπως ακροφύσια αεριοθούμενων κινητήρων, φρένα αεροσκαφών, και ηλεκτρικοί αντιστάτες πυκνωτές για κυκλώματα που μπορεί να παρουσιάσουν υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Τα cermets αντιμετωπίζονται ως σύνθετα υλικά και μπορούν να χρησιμοποιούνται σε διάφορους συνδυασμούς κεραμικών και μεταλλικών υλικών που δένονται με τεχνικές κονιομεταλλουργίας. [2]

3.1.8. Πυριτία

Άφθονη στη φύση, η **πυριτία (silica)** είναι ένα πολυμορφικό υλικό, δηλαδή μπορεί να έχει διαφορετικές κρυσταλλικές δομές. Η κυβική δομή συναντάται σε πυρίμαχα τούβλα, τα οποία χρησιμοποιούνται σε καμίνους για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Τα περισσότερα γυαλιά περιέχουν πάνω από 50% πυριτία. Η πλέον κοινή μορφή πυριτίας είναι ο χαλαζίας, ένας σκληρός λειαντικός κρύσταλλος εξαγωνικής δομής χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές επικοινωνιών και ειδικότερα σε κυκλώματα ταλαντωτών σταθερής συχνότητας, επειδή έχει πιεζοηλεκτρική συμπεριφορά. [2]

Τα **πυριτικά άλατα (silicates)** είναι προϊόντα αντίδρασης της πυριτίας με οξείδια αλουμινίου, μαγνησίου, ασβεστίου, καλίου, νατρίου και σιδήρου ενδεικτικά παραδείγματα είναι ο πηλός, ο αμιάντος, η mica και οι πυριτύαλοι. Το πυριτικό άλας λιθίου-αλουμινίου έχει πολύ χαμηλή θερμική διαστολή και θερμική αγωγιμότητα και καλή αντίσταση σε θερμικό αιφνιδιασμό. Ωστόσο, έχει επίσης πολύ χαμηλή αντοχή και διάρκεια ζωής υπό συνθήκες κόπωσης, οπότε είναι κατάλληλο μόνο για μη δομικές εφαρμογές, όπως π.χ. καταλυτικοί μετατροπείς, αναγεννητές συστημάτων μετάδοσης και εξαρτήματα εναλλακτών θερμότητας. [2]

3.1.9. Νανοκεραμικά και σύνθετα υλικά

Αποσκοπώντας στη βελτίωση της ολκιμότητας και των κατασκευαστικών ιδιοτήτων τους, το μέγεθος σωματιδίων στα κεραμικά έχει μειωθεί με χρήση διάφορων τεχνικών, οι συνηθέστερες εκ των οποίων είναι συμπύκνωση αέριου, παρασκευές λύματος-πηκτώματος και σύνθεση με καύση. Γνωστά ως νανοκεραμικά ή νανοφασικά κεραμικά (nanophase ceramics), η δομή αυτών των υλικών αποτελείται από συστάδες ατόμων, με κάθε συστάδα να περιέχει χιλιάδες άτομα. Ο έλεγχος του μεγέθους σωματιδίων, της κατανομής τους και των ακαθαρσιών είναι σημαντικοί παράγοντες στα νανοκεραμικά, τα οποία επιδεικνύουν ολκιμότητα σε σημαντικά χαμηλότερες θερμοκρασίες απ' ό,τι τα συμβατικά κεραμικά, ενώ ταυτόχρονα είναι περισσότερο ανθεκτικά και ευκολότερα στην κατασκευή και κατεργασία, δίνοντας λιγότερα ελαττώματα. Βρίσκουν εφαρμογές σε εξαρτήματα αυτοκινήτων (π.χ. βαλβίδες, διακόπτες τύπου rocker arm, στροφεία στροβιλοϋπερπληρωτών και χιτώνια κυλίνδρων), καθώς και σε εξαρτήματα αεριοθούμενων κινητήρων. Νανοκρυσταλλικά σωματίδια δεύτερης φάσης (σε τάξη μεγέθους 100 nm ή μικρότερα) και ίνες χρησιμοποιούνται επίσης ως ενισχύσεις σε

σύνθετα υλικά, προσδίδοντας σε αυτά βελτιωμένες ιδιότητες όπως καλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και αντίσταση σε ερπυσμό. [2]

3.2.Επικαλύψεις

Οι επικαλύψεις διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες (λεπτές και παχιές) επικαλύψεις ιδίως αν χρειάζεται να επιδείξουν κάποια επιφάνεια ή τμήμα ενός εξαρτήματος και δημιουργούνται από βασική πρώτη ύλη πούδρα ή από σύρμα.

- **Λεπτές επικαλύψεις:** Το πάχος των λεπτών επικαλύψεων είναι μικρότερο του (1 μ m). Οι επικαλύψεις αυτές έχουν πολύ καλή πρόσφυση με το υπόστρωμα και μικρό πορώδες, δηλαδή εγκλωβισμό αέρα ή κενού σε κοιλότητες, Χρησιμοποιούνται για προστασία από οξείδωση, διάβρωση και εκτριβή, αλλά και για ηλεκτρική μόνωση, αγωγιμότητα και μαγνητική μόνωση. Ακόμη, βρίσκουν εφαρμογές στη δημιουργία διακοσμητικών επιφανειών. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για απόθεση λεπτών επικαλύψεων είναι κυρίως η χημική και φυσική εναπόθεση ατμών, η συγκόλληση και η θερμή εμβάπτιση.
- **Παχιές επικαλύψεις:** Οι παχιές επικαλύψεις έχουν μεγαλύτερο του (1 μ m) πάχος. Παρουσιάζουν υψηλότερο πορώδες από τις λεπτές, έχουν μεγάλη τραχύτητα στην επιφάνειά τους και για να υπάρχει ικανοποιητική πρόσφυση μεταξύ του υποστρώματος και της επικάλυψης, πρέπει να έχει υποστεί κατάλληλη προετοιμασία το υπόστρωμα ή και να προσθέτεται ένα ενδιάμεσο στρώμα (Bonding). Συνήθως αποτελούνται από διαδοχικές στρώσεις και το πλεονέκτημά τους είναι η θερμική μόνωση που εμφανίζουν και οφείλεται τόσο στο πορώδες τους όσο και στο πάχος τους. Συχνά οι παχιές επικαλύψεις εμφανίζουν ρωγματώσεις, μικρορωγματώσεις και οξείδια που υποβαθμίζουν την αντοχή τους σε διάβρωση γιατί το οξυγόνο εισχωρεί εύκολα στο εσωτερικό τους. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την απόθεση των παχιών επικαλύψεων είναι ο θερμικός ψεκασμός, η θερμική εμβάπτιση και η χρήση γαλβανικών στοιχείων. [32]

3.2.1. Κεραμικές επικαλύψεις

Τα κεραμικά υλικά όπως η αλουμίνα και η ζirkονία εφαρμόζονται επί ενός υποστρώματος σε θερμοκρασία δωματίου με τη χρήση συνδετικών ουσιών και, στη

συνέχεια, υφίστανται έψηση, ώστε να τηχθεί το υλικό της επίστρωσης. Συχνά, εναποτίθενται με τεχνικές θερμικού ψεκασμού και οι δημιουργούμενες επιστρώσεις δρουν ως θερμικοί φραγμοί για την παράταση της ζωής διαφόρων μεταλλικών εξαρτημάτων: πτερύγια στροβίλων, εξαρτήματα DizeI-κινητήρων, μήτρες διέλασης εν θερμώ και ακροφύσια πυραυλοκινητήρων. Χρησιμοποιούνται επίσης σε εφαρμογές, όπου απαιτείται ηλεκτρική αντίσταση ικανή να ανταπεξέλθει σε επαναλαμβανόμενες εκκενώσεις τόξου.

3.2.2. Επικαλύψεις Bonding

Οι ενδιάμεσες επικαλύψεις Bonding χρησιμοποιούνται ανάμεσα από το υπόστρωμα και την κύρια επικάλυψη με σκοπό την καλύτερη πρόσφυση της κύριας επικάλυψης πάνω στο υπόστρωμα και είναι δεδομένο από την εταιρεία του κάθε κατασκευαστή τι είδος bonding χρειάζεται για κάθε πούδρα.

3.2.3. Επικαλύψεις ζιρκονίας ZrO_2

Για τις επιστρώσεις θερμικού ψεκασμού που χρησιμοποιούνται με σκοπό την αύξηση του χρόνου ζωής των εξαρτημάτων, που εκτίθενται σε λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες, η κατάλληλη επικάλυψη είναι η ζιρκονία με τεχνική θερμικού ψεκασμού πλάσματος σε μεταλλικά υποστρώματα, γεγονός που οφείλεται στα καλά χαρακτηριστικά θερμικής μόνωσης και αντίστασης σε κρούσης. Ωστόσο, η επικάλυψη αυτή είναι ακατάλληλη για εφαρμογές φθοράς και κρούσης λόγω της χαμηλής σκληρότητάς του. [37]

Εφαρμογές των επικαλύψεων ZrO_2 σε: έμβολα και κεφαλές καύσης μηχανών αυτοκινήτων, βαλβίδες, πτερύγια εξαεριστήρων και συμπιεστών, στοιχεία στεγάνωσης αεριοστροβίλων. [2]

3.2.4. Επικαλύψεις αλουμίνας Al_2O_3

Το οξείδιο του αλουμινίου (αλουμίνα) είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κεραμικά μηχανικής. Είναι ένα σκληρό, ανθεκτικό στη φθορά υλικό που είναι χημικά αδρανές και σταθερό σε υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, οι ποιότητες υψηλής καθαρότητας (δηλαδή η λευκή αλουμίνα) παρουσιάζουν εξαιρετική ηλεκτρική μόνωση (διηλεκτρικά χαρακτηριστικά) και θερμική αγωγιμότητα. Ως αποτέλεσμα αυτών των

εξαιρετικών ιδιοτήτων και του χαμηλού κόστους της, η αλουμίνα βρίσκει τη χρήση της σε πολλές εφαρμογές μηχανικής. Το υλικό διατίθεται σε μορφή σκόνης σε μια σειρά μεγεθών και χημικών. Συνήθως εφαρμόζεται με ατμοσφαιρικό ψεκασμό πλάσματος, αυτό το υλικό έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές που απαιτούν αντοχή σε λειαντικά, ολισθαίνοντα και διαβρωτικά φθορά, όπως επιθέματα φθοράς, δακτυλίους στεγανοποίησης, επενδύσεις κ.λπ.

Οι επικαλύψεις οξειδίου του αλουμινίου έχουν λάβει μεγάλη προσοχή λόγω των καλών μηχανικών και τριβολογικών τους ιδιοτήτων, της υψηλής αντοχής στη θερμική υποβάθμιση και διάβρωση και της χαμηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας τους. Αυτές οι εξαιρετικές ιδιότητες επιτρέπουν στην αλουμίνα να χρησιμοποιείται σε διάφορους τομείς όπως η προστασία από τη φθορά ή τη διάβρωση μεταλλικών επιφανειών. Ωστόσο, παρά την υψηλή σκληρότητά τους, οι επικαλύψεις αλουμίνας είναι εύθραυστες και έχουν σχετικά υψηλούς συντελεστές τριβής σε συνθήκες ξηρής ολίσθησης. [11]

- Σκληρό, ανθεκτικό στη φθορά.
- Εξαιρετικές διηλεκτρικές ιδιότητες από συχνότητες DC έως GHz..
- Αντέχει σε ισχυρές προσβολές οξέων και αλκαλίων σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Καλή θερμική αγωγιμότητα.
- Εξαιρετική ικανότητα μεγέθους και σχήματος.
- Υψηλή αντοχή και ακαμψία.
- Διαθέσιμο σε καθαρότητα κυμαίνεται από 94%, σύνθεση εύκολα επιμεταλλώσιμη, έως 99,8% για τις πιο απαιτητικές εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες. [13]

Η αλουμίνα υψηλής καθαρότητας χρησιμοποιείται για ηλεκτρικές, θερμικές και βιοϊατρικές εφαρμογές όπως υψηλή τάση και μόνωση υψηλής θερμοκρασίας, σε σταθεροποιητές τεμαχίων ετερογενούς συγκόλλησης, σε επαγωγικά πηνία, ως υπόστρωμα για ηλεκτρονικά εξαρτήματα και για ιατρικά εμφυτεύματα. Οι επικαλύψεις με βάση το οξείδιο του αλουμινίου δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις κρούσης ή κρουστικής φόρτισης. [2]

3.2.5. Πούδρες σύνθετων υλικών

Μια κόνις ή αλλιώς πούδρα (powder) αποτελείται από (μικρού μεγέθους) σωματίδια. Οι κεραμικές κόνιες συντίθεται από την μείωση μεγέθους (λειοτρίβηση) των επί μέρους κεραμικών πρώτων υλών. Οι ανεπιθύμητες προσμίξεις διαχωρίζονται και οι τυχόν επί μέρους διάφορες κόνιες αναμιγνύονται για να παράξουν την τελική επιθυμητή σύσταση. [45]

3.2.6. Ποιοτικός έλεγχος

Ο ποιοτικός έλεγχος ως προς την αντοχή πρόσφυσης των επικαλύψεων στα υποστρώματα είναι αδύνατον να γίνει προς το παρόν ωστόσο μπορούν να γίνουν καταστροφικές και μη καταστρεπτικές δοκιμές στο σύνολο τους συστήματος υποστρώματος - επικάλυψης.

3.2.6.1. Καταστροφικές δοκιμές

Οι καταστροφικοί έλεγχοι που μπορούν να γίνουν στα δοκίμια είναι:

- Δοκιμή χάραξης, αντοχής και κάμψης.
- Δοκιμή αντοχής σε διάτμηση, πρόσφυση και οξείδωση.
- Σκληρότητας-Μικροσκληρότητα
- Μεταλλογραφικός έλεγχος

3.2.6.2. Μη καταστρεπτικές δοκιμές

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι που μπορούν να γίνουν στα δοκίμια είναι:

- Ακουστική μικροσκοπία σάρωσης
- Θερμογραφία
- Έλεγχος με υπερήχους
- Ολογραφία Laser

Κεφάλαιο 4ο: Θερμικός Ψεκασμός

4.1. Θερμικός ψεκασμός

Οι τεχνικές επίστρωσης για την προστασία των υλικών των υποστρωμάτων από το εξωτερικό περιβάλλον, χρησιμοποιούνται από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα με αρκετά πιο εξελιγμένες μεθόδους. Οι προηγμένες μέθοδοι επίστρωσης όχι μόνο προστατεύουν το υπόστρωμα αλλά ενισχύουν την απόδοση του και έχουν πολλαπλά οφέλη όπως προστασία από τη διάβρωση, μείωση της φθοράς, επιτυγχάνουν την επιθυμητή τριβή προκαλώντας την επιθυμητή σκληρότητα, ατμοσφαιρική αδράνεια, εναπόθεση του επιθυμητού υλικού πάνω από το υπόστρωμα και ενίσχυση του υλικού του υποστρώματος κ.λπ. [15]

Επιπλέον εφαρμογές συμμετέχουν στην αντικατάσταση υλικών στρατηγικής σημασίας, στη βελτίωση διαφόρων μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών (όπως η σκληρότητα, το μέτρο ελαστικότητας, η αντοχή σε θραύση και η αντοχή σε εφελκυσμό), στη βελτίωση παρουσίας των υλικών και στη διακοσμητική.

Με τον όρο επικάλυψη ή επίστρωση ονομάζεται οποιαδήποτε μέθοδος απόθεσης υλικού στην επιφάνεια ενός άλλου. Επειδή τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την απόθεση είναι συνήθως τα μέταλλα, η τεχνική αυτή ονομάζεται επιμετάλλωση. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την απόθεση και τελικά θα δώσει την επικάλυψη ονομάζεται επίστρωμα, ενώ το υλικό πάνω στο οποίο γίνεται η απόθεση χαρακτηρίζεται σαν υπόστρωμα. Για τη δημιουργία επιστρωμάτων και υποστρωμάτων χρησιμοποιούνται μεταλλικά, κεραμικά και πλαστικά υλικά, οπότε το νέο υλικό που σχηματίζεται ανήκει στην κατηγορία των σύνθετων. [23]

Θερμικός ψεκασμός (thermal spraying): Είναι μία σειρά κατεργασιών, στις οποίες επιστρώσεις διαφόρων μετάλλων, κραμάτων, καρβιδίων, κεραμικών και πολυμερών εναποτίθενται σε επιφάνειες μετάλλων με τη χρήση ακροφυσίου ψεκασμού, το οποίο οδηγεί ρεύμα αερίων που θερμαίνονται με φλόγα οξυγόνου/καύσιμου αερίου, με ηλεκτρικό τόξο ή με τόξο πλάσματος. Οι πρώτες εφαρμογές του θερμικού ψεκασμού, τη δεκαετία του 1910, αφορούσαν την εναπόθεση μετάλλων, κι έτσι ο όρος θεωρήθηκε ταυτόσημος με τον ψεκασμό μετάλλου (metallizing). Οι προς επίστρωση επιφάνειες, αρχικά, καθαρίζονται από έλαια και ρύπους και στη συνέχεια τραχύνονται, π.χ. με

αμμοβολή, ώστε να βελτιωθεί η αντοχή της πρόσφυσης. Το υλικό της επίστρωσης τροφοδοτείται με τη μορφή σύρματος, ράβδου ή κόνεως, και, στη συνέχεια, σταγονίδια ή σωματίδιά του προσπίπτουν στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και στερεοποιούνται, συγκρατούμενα στην επιφάνεια.

Οι ταχύτητες των σωματιδίων, συνήθως, κυμαίνονται από 150 έως 1000 m/s, αλλά ενδέχεται να είναι και υψηλότερες για ειδικές εφαρμογές, ενώ οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 3000°C έως 8000°C. Οι επιστρώσεις θερμικού ψεκασμού είναι σκληρές και υψηλής αντίστασης σε φθορά, έχουν στρωματική δομή, αλλά και σημαντικό πορώδες (έως 20%) εξαιτίας της παγίδευσης αέρα και σωματιδίων οξειδίου. Η αντοχή της πρόσφυσης με το υπόστρωμα εξαρτάται από τη συγκεκριμένη μέθοδο που χρησιμοποιείται και είναι, κατά βάση, μηχανικής φύσεως, γι' αυτό και είναι σημαντική η τράχυνση της επιφάνειας πριν τον ψεκασμό. Σπανιότερα, η πρόσφυση ενισχύεται από παράγοντες μεταλλουργικής φύσεως. Η αντοχή της πρόσφυσης κυμαίνεται από 7 έως 80 MPa, εξαρτώμενη, από την εφαρμοζόμενη τεχνική. [2]

Τυπικές εφαρμογές θερμικού ψεκασμού αφορούν σε εξαρτήματα κινητήρων αεροσκαφών (όπως εκείνα που επιδέχονται εργασίες επισκευής φθαρμένων στοιχείων) καθώς οι απαιτήσεις τριβής και φθοράς στα αεροδιαστημικά συστήματα υπαγορεύονται από προβλήματα περιορισμού της διάρκειας ζωής τους. Μια πρόκληση είναι το ευρύ φάσμα τάσεων επαφής και ταχυτήτων ολίσθησης για διάφορες κινητές διατάξεις. Μια άλλη πρόκληση είναι οι ακραίες συνθήκες λειτουργίας ειδικότερα σε ένα αεροσκάφος που υφίσταται περιοδικές αλλαγές υγρασίας σε διάφορα υψόμετρα, ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, λειαντική φθορά από ηλεκτροστατικά προσελκόμενη σκόνη, ακροφύσια κινητήρων και πυραύλων, κατασκευές, δοχεία καυσίμων, δεξαμενές αποθήκευσης. [31]

Ακόμα σε ένα αυτοκίνητο, ο θερμικός ψεκασμός, εφαρμόζεται στους στροφαλοφόρους άξονες, στα ακροφύσια έγχυσης καυσίμου, στα ελατήρια εμβόλων και σε μονάδες του κινητήρα. Επιπλέον, η τεχνική βρίσκει εφαρμογή σε πετροχημικές βιομηχανίες και σε βιομηχανίες αερίων, για την επιδιόρθωση φθαρμένων στοιχείων και την ανάκτηση της διαστατικής ακρίβειας στοιχείων, τα οποία δεν μπορούν να υποβληθούν σε μηχανουργική κατεργασία ή να μορφοποιηθούν με ορθό τρόπο. Η πηγή ενέργειας σε κατεργασίες θερμικού ψεκασμού μπορεί είτε να προέρχεται από χημική καύση, είτε να είναι ηλεκτρική. [2]

Υπάρχουν **διάφορες μέθοδοι επίστρωσης** με καύση ή ηλεκτρική εκκένωση όπως εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον (πίνακα 5) [1]:

- Η καύση εμπεριέχει την χρήση φλόγας, την φλόγα υψηλής ταχύτητας και την κάννη εκτόνωσης.
- Ενώ η ηλεκτρική εκκένωση εμπεριέχει το τόξο σύρματος, το πλάσμα (σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, εν κενώ και υψηλής συχνότητας) και το τόξο μεταφερόμενου πλάσματος.

Είδος ψεκασμού	Είδος επικάλυψης	Πηγή θερμότητας	Θερμοκρασία φλόγας (°C)	Ταχύτητα αερίου (Mts/sec)	Πορώδες %	Πρόσφυση επικάλυψης (MPa)
Πλάσμα	Πούδρα	Φλόγα πλάσματος	12000-16000	500-600	45048	40-70
Ψεκασμός Τόξου σύρματος	Σύρμα	Ηλεκτρικό τόξο	5000-6000	<300	45204	28-41
Ψεκασμός φλόγας με σύρμα	Σύρμα	Καύση Oxy-Fuel	3000	<300	45204	14-21
Υψηλής ταχύτητας φλόγας	Σύρμα	Καύση Oxy-Gas Fuel	3200	1200	44958	>70

Πίνακας 5: Τεχνικές διεργασίες Θερμικού Ψεκασμού. [33]

Τεχνικές ψεκασμού με καύση:

- **Ψεκασμός με χρήση φλόγας καύσης (combustion flame spraying):** Η φλόγα καύσης δημιουργείται με ανάφλεξη μίγματος οξυγόνου-ακετυλενίου και το προς εναπόθεση υλικό εισάγεται με τη μορφή σκόνης ή σύρματος. Παρότι είναι η οικονομικότερη των τεχνικών θερμικού ψεκασμού, οι χρήσεις της περιορίζονται σε εφαρμογές, όπου το υψηλό πορώδες ή το υψηλό ποσοστό οξειδίων (10-15%) στο επίστρωμα, δεν επιδρούν αρνητικά στη συγκεκριμένη εφαρμογή. [1]
- **Ψεκασμός με φλόγα υψηλής ταχύτητας (high velocity combustion spraying ή high velocity oxygen flame, HVOF):** Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνονται πολύ υψηλή ταχύτητα ψεκασμού και σχετικά χαμηλή θερμοκρασία (< 4.500°C), ενώ τα λαμβανόμενα επιστρώματα έχουν χαμηλό πορώδες (1-2%). [1]
- **Ψεκασμός με χρήση κάννης εκτόνωσης (detonation gun spraying, D-gun):** Η θερμότητα παρέχεται μέσω ελεγχόμενων εκρήξεων εύφλεκτου μίγματος οξυγόνου

- ακετυλενίου. Εφαρμόζεται για τον ψεκασμό μεταλλικών ή κεραμικών κόνεων, ή μεταλλικών συρμάτων και το πορώδες των επικαλύψεων είναι ελάχιστο. [1]
- **Θερμικός ψεκασμός μεταλλικής κόνεως (thermal metal powder spraying):** Η τεχνική είναι παρόμοια με εκείνη του θερμικού ψεκασμού σύρματος, με τη διαφορά ότι το τροφοδοτούμενο μέταλλο είναι υπό μορφή κόνεως. [2]
- **Θερμικός ψεκασμός σύρματος (thermal wire spraying):** Φλόγα οξυγόνου ακετυλενίου προκαλεί την τήξη του σύρματος που εναποτίθεται στην επιφάνεια. Η πρόσφυση είναι μέσης αντοχής, αλλά η τεχνική είναι σχετικά οικονομική. [2]

Τεχνικές ψεκασμού με χρήση ηλεκτρικού ρεύματος:

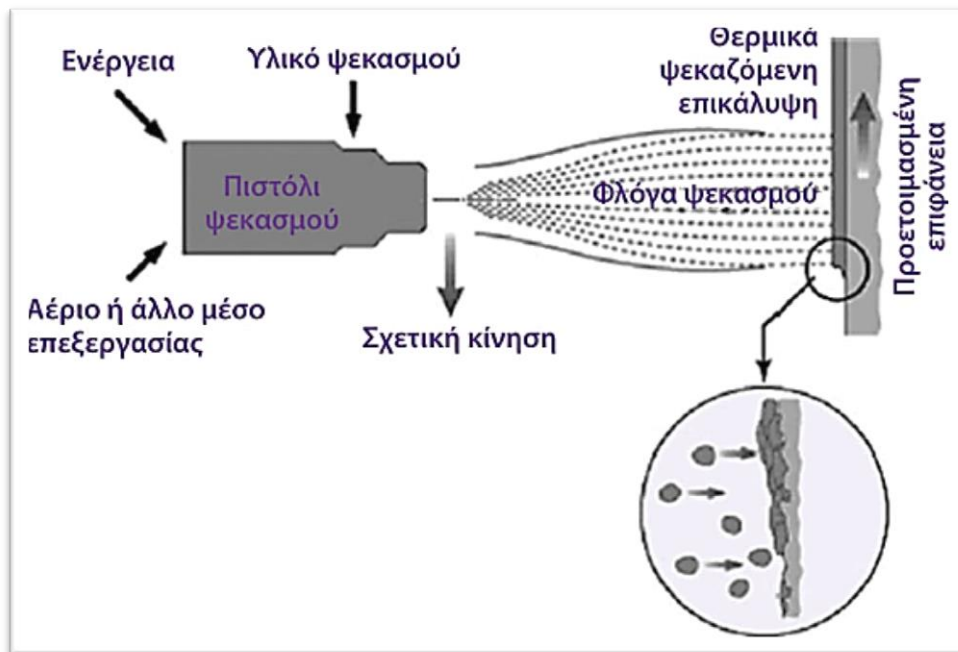
- **Ψεκασμός σύρματος με δημιουργία ηλεκτρικού τόξου (arc wire spraying):** Η τεχνική περιορίζεται σε εφαρμογές στις οποίες το προς εναπόθεση υλικό είναι αγωγίμο. Δύο αναλισκόμενα ηλεκτρόδια θερμαίνονται στο ένα άκρο και τήκονται. Με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα, το τηγμένο υλικό οδηγείται προς την επιφάνεια του υποστρώματος. Οι λαμβανόμενες επικαλύψεις έχουν υψηλό πορώδες (10-20%) και υψηλό ποσοστό οξειδίων (10-20%), αλλά καλή πρόσφυση με το υπόστρωμα. [1]
- **Τόξο διπλού σύρματος (twin-wire arc):** Το τόξο σχηματίζεται μεταξύ δύο καταναλισκόμενων συρμάτων, ο δεσμός πρόσφυσης έχει καλή αντοχή και πρόκειται για τη λιγότερο δαπανηρή τεχνική. [2]
- **Ψεκασμός με χρήση πλάσματος χαμηλής πίεσης (low-pressure plasma spray, LPPS) και ψεκασμός με χρήση πλάσματος υπό κενό (vacuum plasma spray):** Οι παραγόμενες επιστρώσεις, και με τις δύο τεχνικές, παρουσιάζουν πολύ υψηλή αντοχή πρόσφυσης και πολύ χαμηλά ποσοστά πυρώδους και επιφανειακών οξειδίων. [2] Σε χαμηλές πιέσεις, το πλάσμα γίνεται μεγαλύτερο σε διάμετρο και μήκος και μέσω της χρήσης συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου, επιτυγχάνεται υψηλότερη ταχύτητα αερίου. Επειδή ο ψεκασμός LPPS/VPS πραγματοποιείται σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα ή σε κενό, εξαλείφεται η αλληλεπίδραση των τηγμένων σωματιδίων και του αέρα. Το κόστος είναι υψηλότερο, αλλά η απουσία οξυγόνου και η δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλότερες θερμοκρασίες υποστρώματος οδηγεί στην παραγωγή πιο αέριο σκόνη επικάλυψη ατμόσφαιρα συνεχές ρεύμα δέσμη ψεκασμού πλάσματος. [16], [17]

- **Ψεκασμός με χρήση πλάσματος (plasma spraying):** Η περιοχή θερμοκρασιών της τάξης των 8300°C δημιουργείται από υψηλής ενέργειας πλάσμα, συμβατικό ή υπό κενό, και οι λαμβανόμενες επιστρώσεις εμφανίζουν καλή αντοχή πρόσφυσης και πολύ χαμηλό ποσοστό περιεχομένων οξειδίων. [2]

Μικροδομή επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού: Στην περίπτωση της πλήρους τήξης, τα σωματίδια έχουν ιξώδη συμπεριφορά και κατά την πρόσκρουσή τους στην επιφάνεια του υποστρώματος ρέουν και στερεοποιούνται σε δισκία (splats) όπως εμφανίζεται στην (εικόνα 5). Εάν η θερμική ενέργεια που φέρουν είναι υψηλή, σχηματίζονται δισκία ομαλού περιγράμματος (disk splat), με λόγο όψεως (aspect ratio) που τείνει στη μονάδα. Εάν η κινητική ενέργεια που φέρουν είναι υψηλή, με την πρόσκρουση αποκόπτονται τμήματα της περιφέρειας και με τη στερεοποίηση σχηματίζονται δισκία ακανόνιστου περιγράμματος (splash splat).

Στην περίπτωση μερικής τήξης λαμβάνει χώρα πλαστική παραμόρφωση του αν τη του όγκου του σωματιδίου υψηλής θερμοκρασίας, ενώ στη σπάνια περίπτωση που τα σωματίδια δεν έχουν υποστεί τήξη, αυτά είτε αναπηδούν προς την περιοχή υψηλής θερμοκρασίας, είτε εγκλωβίζονται στη μικροδομή της αναπτυσσόμενης επικάλυψης.

Η ιδιαιτερότητα της δομής των επιστρωμάτων θερμικού ψεκασμού οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η εναπόθεση, προκειμένου να γίνει η επικάλυψη με πάχος από 100 έως 400 μm. Το σύστημα ψεκασμού μετακινείται παράλληλα προς την επιφάνεια του υποστρώματος, όπου προσκρούουν ένα προς ένα τα σωματίδια σε τετηκυία κατάσταση και στερεοποιούνται ταχύτατα, δημιουργώντας μια μονοσωματιδιακή στρώση. Το επιθυμητό πάχος της επικάλυψης επιτυγχάνεται με επανάληψη της διαδικασίας του ψεκασμού και τη δημιουργία επάλληλων στρώσεων που δίδουν στην επικάλυψη στρωματική δομή (lamellar structure). [1]



Εικόνα 5: Ένδειξη διαδικασίας θερμικού ψεκασμού και αναπαράσταση των κόκκων της πούδρας σε τετρηκία κατάσταση. [12]

Η τελική δομή των επικαλύψεων χαρακτηρίζεται από τη συνύπαρξη τηγμένων και επαναστεροποιημένων ή, μερικές φορές, άτηκτων σωματιδίων, ενώ στην περίπτωση ψεκασμού μεταλλικής κόνεως, ενδέχεται να λάβει χώρα και μερική οξειδωσή τους. Επιπλέον, λόγω της κατανομής του μεγέθους των ψεκαζόμενων σωματιδίων, της τυχαιότητας άφιξής τους στη στερεή επιφάνεια και της τιμής του ιξώδους τους στην τετρηκία κατάσταση, η κάλυψη της κάθε στρώσης από την επόμενη ενδέχεται να μην είναι πλήρης, με αποτέλεσμα την εμφάνιση πορώδους (porosity) τόσο μεταξύ των σωματιδίων, όσο και μεταξύ των διαδοχικών στρώσεων. Τέλος, λόγω της συστολής κατά τη στερεοποίηση και την επακόλουθη ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, συχνά τα στεροποιημένα σωματίδια της επιφανειακής στρώσης εμφανίζουν ρωγμές. Σε αντίθεση με τη μέθοδο της επιγόμωσης, η θερμοκρασία του υποστρώματος δεν αυξάνεται σημαντικά και μετά την εναπόθεση δεν δημιουργείται διακριτή θερμικά επηρεασμένη ζώνη. [1]

Τα άτηκτα σωματίδια είναι οι κόκκοι της πούδρας όπου δεν έχουν τηχθεί πλήρως κατά την διάρκεια του ψεκασμού και υπάρχουν αυτούσια ενδιάμεσα στα στρώματα της επικάλυψης. Πιθανή αιτία μπορεί να είναι το ίδιο το μέγεθος ορισμένων κόκκων, που επειδή είναι μεγαλύτεροι από το σύνολο της πούδρας, δεν πρόλαβαν να τηχθούν κατά την παραμονή τους μέσα στη φλόγα ψεκασμού υπερηχητικής φλόγας. Τα σωματίδια αυτά

βρίσκονται ακέραια μέσα στην δομή της επικάλυψης προξενώντας ανομοιομορφία ως προς την δομή και το μέγεθος. Συνέπεια αυτού είναι η δημιουργία ασυνεχειών, καθώς ευνοείται η δημιουργία κενών μεταξύ αυτών και των σταγονιδίων που στερεοποιούνται πλησίον τους, από τις οποίες ενδέχεται να έχουμε γένεση ρωγμών κατά την καταπόνηση των εξαρτημάτων. Επίσης, καθώς το σύστημα ψύχεται μέχρι την θερμοκρασία του περιβάλλοντος έχουμε την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων και την υποβάθμιση των ιδιοτήτων της επικάλυψης. Μειωμένη είναι επίσης και η πρόσφυση που παρουσιάζουν τα σωματίδια αυτά με το υλικό που τα περιβάλλει. Το ποσοστό των άτηκτων σωματιδίων που παρατηρούνται σε μια επιφάνεια μπορεί να ελεγχθεί και να περιοριστεί χρησιμοποιώντας ομοιόμορφη πούδρα και δαυλό κατάλληλης ισχύος που να παρέχει την απαιτούμενη για τη τήξη των κόκκων θερμότητα. Απαραίτητη είναι η ορθή ρύθμιση της πίεσης και της παροχής του αερίου-φορέα αλλά και ο προσανατολισμός των αγωγών διοχέτευσης της πούδρας στη φλόγα. [23]

4.1.1. Προετοιμασία υποστρώματος για τη μέθοδο ψεκασμού

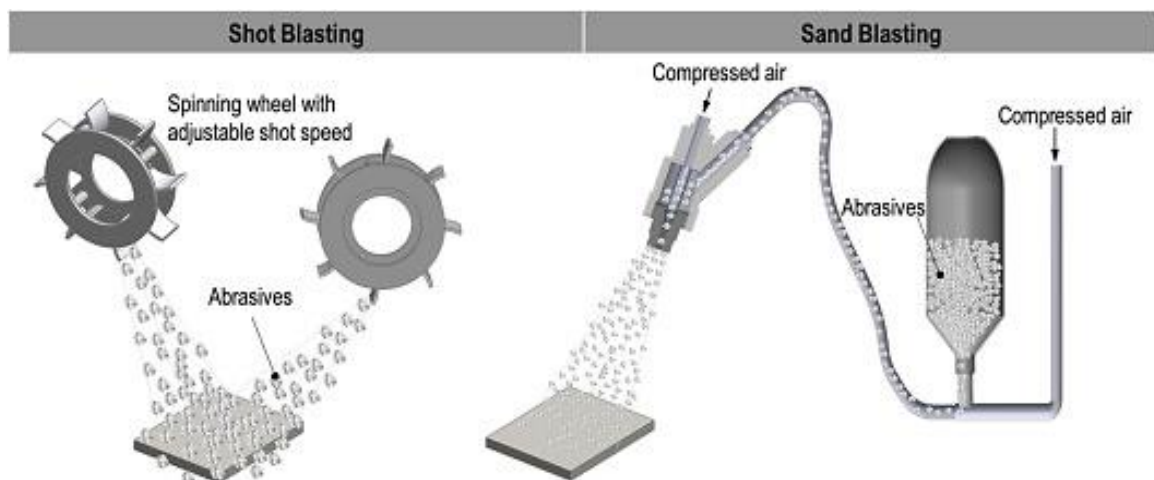
Για να έχουμε μία επιτυχημένη επικάλυψη με την τεχνική θερμικού ψεκασμού, είναι πολύ σημαντικό μέρος της διαδικασίας, η κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας του υποστρώματος. Αρχικά η επιφάνεια θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν καθαρή. Αυτό το επιτυγχάνουμε με αφαίρεση της φθαρμένης επιφάνειας με μηχανική ή χημική διεργασία, εάν έχει ήδη χρησιμοποιηθεί το αντικείμενο αυτό, με την αμμοβολή και με το πέρασμα με ασετόν, ώστε να φύγουν ότι σκόνες, λιπίδια κλπ έχουν μείνει στην επιφάνεια προς επίστρωση. Η διαδικασία αυτή να έχει γίνει το πολύ έως και 1 ώρα πριν τον ψεκασμό, εάν και μόνο δεν την έχει ακουμπήσει γυμνό χέρι και βρίσκεται σε καθαρό περιβάλλον.

Αμμοβολή (abrasive blasting): Η λειαντική αμμοβολή ή η αμμοβολή είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη διαδικασία αφαίρεσης υλικού. Είναι η διαδικασία προώθησης λειαντικών σωματιδίων (άμμου, γυαλί) από μια μηχανή εκτόξευσης (shot blasting, sand blasting) χρησιμοποιώντας τη δύναμη του πεπιεσμένου αέρα. Τρία βασικά εξαρτήματα αποτελούν τη διάταξη αμμοβολής: αεροσυμπιεστής, μηχανή εκτόξευσης και το λειαντικό σώμα. Ο συμπιεστής πρέπει να παράγει επαρκή πίεση αέρα και όγκο για να μεταφέρει το λειαντικό από το μηχάνημα εκτόξευσης στην επιφάνεια που εκτοξεύεται. Ο καθαρισμός πραγματοποιείται ως άμεσο αποτέλεσμα του πόσο αποτελεσματικά μετακινείται ο αέρας από τον συμπιεστή προς την επιφάνεια. Ένας περιορισμός σε ένα μόνο μέρος μειώνει τον

ρυθμό παραγωγής ολόκληρου του συστήματος. Η αμμοβολή είναι πολύ χρήσιμη για φινίρισμα μίας επιφάνειας με το κατάλληλο υλικό και διάμετρο κόκκου. Οι εφαρμογές λειαντικής αμμοβολής χωρίζονται σε 3 κατηγορίες:

- Προετοιμασία επιφανειών,
- Καθαρισμός επιφανειών και
- Φινίρισμα.

Η αμμοβολή λειτουργεί όπως φαίνεται στην (εικόνα 6) και πριν το θερμικό ψεκασμό είναι απαραίτητη καθώς αφαιρεί τα ανεπιθύμητα υλικά και αυξάνει τη τραχύτητα της επιφάνειάς τους για να επιτευχθεί καλύτερη προσκόλληση μεταξύ της επίστρωσης και του μεταλλικού υποστρώματος. Ο καθαρισμός με αμμοβολή σε υπάρχουσες μεταλλικές κατασκευές αφαιρεί παλιό χρώμα, σκουριά και άλλους ρύπους. [20]



Εικόνα 6: Ένδειξη διαδικασίας Αμμοβολής. [21]

4.1.2. Η σημερινή του χρήση στη βιομηχανία

Η τεχνική του θερμικού ψεκασμού δημιουργήθηκε με σκοπό να καλυφθούν κάποιες βασικές ανάγκες στη βιομηχανία και σε μηχανικές εφαρμογές. Μερικοί λόγοι δημιουργίας του είναι η εξοικονόμηση υλικών, η μείωση κόστους των επιχειρήσεων και εκπομπής ρύπων, καθώς και απαλλαγή από περιττά απορρίμματα στη φύση για την προστασία του περιβάλλοντος. Οι τρόποι με τους οποίους επιτυγχάνονται τα παραπάνω είναι οι εξής:

- Συντήρηση τεμαχίων σε επιμέρους κατασκευές χωρίς να χρειάζεται ολική ανακατασκευή ή αγορά νέων προϊόντων,
- Αύξηση απόδοσης κινητήρων αεροσκαφών έπειτα από αναβάθμισή τους, επομένως καλύτερη καύση με λιγότερες εκπομπές, [15]
- Βελτίωση ποιότητας επιφανειών σε σωληνώσεις (φυσικού αερίου, πλοίων, κλπ),
- Μεγιστοποίηση αντοχής μεταλλικών κατασκευών,
- Αντιδιαβρωτικές ιδιότητες,
- Θερμομονωτικές επιστρώσεις επιφανειών για καλύτερο έλεγχο της θερμότητας.

Γενικά η τεχνική θερμικού ψεκασμού έχει χαμηλό κόστος και υψηλό ποσοστό εναπόθεσης. Επίσης εφαρμόζεται σε ποικιλία υλικών για διάφορα υποστρώματα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως για επιστρώσεις αρκετών κομματιών και σε μεγάλες επιφάνειες και πάχη. [15]

4.2. Θερμικός ψεκασμός πλάσματος

Στο εσωτερικό της κάννης ψεκασμού, μεταξύ δύο μη αναλυσκόμενων ηλεκτροδίων προκαλείται ηλεκτρική εκκένωση υψηλής τάσης, από γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Αδρανές αέριο συνήθως, αργό ή μίγμα αργού με άζωτο, ήλιο ή υδρογόνο διοχετεύεται μεταξύ των ηλεκτροδίων, θερμαίνεται και ιονίζεται πλήρως. Το πλάσμα υψηλής θερμοκρασίας που δημιουργείται, εξέρχεται από το ακροφύσιο της κάννης με τη μορφή φλόγας υψηλής θερμοκρασίας και ταχύτητας, ενώ το προς εναπόθεση υλικό με τη μορφή κόνεως τροφοδοτείται κάθετα προς τη φλόγα του πλάσματος. [1] Ο θερμικός ψεκασμός πλάσματος γίνεται με τη βοήθεια μιας τάσης συνεχούς ρεύματος, παράγεται υψηλής θερμοκρασίας αέριο πλάσμα όπου λειτουργεί ως πηγή θερμότητας για την τήξη των κόκκων της πούδρας καθώς εγχέεται στο ακροφύσιο και στη συνέχεια αποβάλλεται με φόρα προς την επιλεγόμενη επιφάνεια. [14]

Ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο λαμβάνει χώρα ο ψεκασμός, διακρίνονται στις παρακάτω παραλλαγές της τεχνικής του **θερμικού ψεκασμού πλάσματος (plasma spray)**:

- Ψεκασμός με χρήση πλάσματος ραδιοσυχνοτήτων (Radio frequency plasma spraying). Η τεχνική εφαρμόζεται κατά κανόνα για τη δημιουργία επικαλύψεων οξειδίων. [1]

- Ατμοσφαιρικός ψεκασμός πλάσματος,
- Ψεκασμός πλάσματος χαμηλής πίεσης,
- Ψεκασμός πλάσματος εν κενώ,
- Ψεκασμός σε περιβάλλον αργού,
- Ψεκασμός πλάσματος υπό ελεγχόμενη ατμόσφαιρα.

4.2.1. Ατμοσφαιρικός θερμικός ψεκασμός πλάσματος - APS

Η τεχνολογία ψεκασμού πλάσματος υπό ελεγχόμενη ατμόσφαιρα (Controlled Atmosphere Plasma Spray, CAPS), αποτελεί σήμερα την πλέον προηγμένη τεχνολογία ψεκασμού πλάσματος διεθνώς καθώς είναι ευρωπαϊκής (κατά μεγάλο ποσοστό γαλλικής) προέλευσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στο τέλος του 1995 λειτουργούσαν μόνο τέσσερις μονάδες CAPS σε ολόκληρο τον κόσμο, από τις οποίες τρεις στην Ευρώπη και μία στην Ιαπωνία (και καμία στην Αμερική). [23]

Κατά τον ψεκασμό σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, τα τηγμένα σωματίδια κινούνται με μεγάλες ταχύτητες (200 – 400m/sec) δημιουργώντας πυκνά επιστρώματα. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η εισχώρηση (ανάμιξη) αέρα στη φλόγα πλάσματος, που προκαλεί ελαφρά ψύξη και επιβράδυνση της φλόγας με συνέπεια τη μερική οξείδωση μεταλλικών κόνεων. Η συγκεκριμένη μέθοδος ενδείκνυται για την απόθεση κεραμικών επιστρωμάτων καθώς και μεταλλικών επιστρωμάτων εφόσον το ποσοστό οξειδίων τους διατηρείται σε ανεκτά επίπεδα. Στην τεχνική ψεκασμού σε περιβάλλον αργού, διοχετεύεται ένα ρεύμα αργού γύρω από την φλόγα πλάσματος και το υποστρώμα, παρέχοντας προστασία έναντι της αρνητικής επίδρασης που έχει η τυχόν ανάμιξη του αέρα στο πλάσμα. Τέλος, ο ψεκασμός σε χαμηλή πίεση ή σε κενό ελαχιστοποιεί τα προβλήματα, που σχετίζονται με την είσοδο αέρα στη φλόγα πλάσματος. Οι ταχύτητες των σωματιδίων είναι μεγαλύτερες (της τάξης των 400 – 600m/sec) και η φλόγα πλάσματος μακρύτερη με αποτέλεσμα τα παραγόμενα επιστρώματα να χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα, μεγάλη καθαρότητα και πολύ καλή πρόσφυση. Η χρήση θαλάμου κενού επιτρέπει την θέρμανση του υποστρώματος σε υψηλές θερμοκρασίες βελτιώνοντας περαιτέρω την πρόσφυση επιστρώματος – υποστρώματος με αλληλοδιάχυση στοιχείων μεταξύ τους. Επίσης, η απουσία οξυγόνου δίνει πυκνές επικαλύψεις με πολύ μικρό ποσοστό περιεχομένων οξειδίων. [23]

Υπάρχουν κάποιοι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή πρόσφυσης, τις μηχανικές ιδιότητες και την αντοχή στη διάβρωση της επικαλυπτόμενης επιφάνειας που παράγεται με τη μέθοδο θερμικού ψεκασμού πλάσματος οι οποίοι είναι:

- Απόσταση ακροφύσιου από το υπόστρωμα,
- Αριθμός περασμάτων επίστρωσης,
- Εφαρμοσμένος σπινθήρας ρεύμα,
- Θερμοκρασία προθέρμανσης,
- Προετοιμασία υποστρώματος,
- Καλό μασκάρισμα/μόνωση (masking) των επιφανειών προς ψεκασμό με ειδικές θερμομονωτικές ταινίες της (εικόνας 7), όπου αντέχουν έως και 480°C αναλόγως, καθώς αν ο ψεκασμός ξεφύγει σε άλλο σημείο, θα αρχίσει να αποκολλάται και στην συνέχεια θα φύγει και η επικάλυψη από την επιζητούμενη επιφάνεια. [14]



Εικόνα 7: Thermal Insulation Tapes. [24]

4.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδου ατμοσφαιρικού θερμικού ψεκασμού πλάσματος

Κάθε μέθοδος παρουσιάζει θετικά και αρνητικά ζητήματα, έτσι λοιπόν και στον ατμοσφαιρικό ψεκασμό πλάσματος έχουμε δύο όψεις όπου καταγράφονται παρακάτω.

Το **πλεονέκτημα** της τεχνικής του ψεκασμού πλάσματος είναι η δυνατότητα χρήσης διαφόρων τιμών θερμοκρασίας φλόγας και ταχύτητας σωματιδίων. Η ποικιλία αυτή επιτρέπει την ευρύτερη επιλογή υλικών και μεγέθους σωματιδίων. Επιπλέον, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών της τεχνικής μπορούν να ψεκαστούν και να αποτεθούν κεραμικά

υλικά με υψηλό σημείο τήξης, όπως το ύτριο-σταθεροποιημένη ζirkονία για εφαρμογές θερμικής μόνωσης. Θεωρείται κατάλληλη και οικονομική τεχνική επιφανειακής κατεργασίας για διάφορες χρήσεις: προστασία από φθορά και διάβρωση και επικαλύψεις που δρουν ως υποκατάστατο των βιολογικών ιστών (π.χ. υδροξυαπατίτης). Είναι σημαντικά χρήσιμος στην επισκευή ή κατασκευή αεροπορικών συστημάτων όπως θάλαμος καύσης με επίστρωση θερμικού φραγμού APS, bond coat NiCrAlY, top coat $ZrO_2 + Y_2 O_3$ υψηλής ποιότητας όπως και για ένα ευρύ γκάμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των επιστρώσεων επιφάνειες έλξης, επιστρώσεις θερμικού φραγμού σε θαλάμους καύσης στροβίλου, πτερύγια και λεπίδες, βιοσυμβατός υδροξυαπατίτης, επιστρώσεις για εμφυτεύματα και κεραμικές επικαλύψεις σε ρολά εκτύπωσης. [17], [18]

Μειονέκτημα στη χρήση του ατμοσφαιρικού θερμικού ψεκασμού πλάσματος θα μπορούσε να είναι η εμπλοκή των αερίων για την παραγωγή καύσης όπου αυξάνουν το κόστος και τον κίνδυνο για κάποια διαρροή και πιθανή έκρηξη εάν και εφόσον δεν έχει γίνει ορθή συντήρηση των μηχανημάτων, των σωληνώσεων και βαλβίδων ή ακόμα και από κάποια λανθασμένη ανθρώπινη παρέμβαση. Όμως πλέον στα σύγχρονα μηχανήματα εισάγονται ρομποτικοί βραχίονες και αυτοματισμοί με τους οποίους μειώνεται η ανθρώπινη παρέμβαση αλλά και οι πιθανότητες για κάποιο λάθος ή ατύχημα. Για οποιοδήποτε λόγο υπάρξει κάποιο πρόβλημα, το μηχάνημα σταματάει τη λειτουργία του και βγάζει ένδειξη λάθους ή ενημερώνει (πχ. Αν δεν υπάρχει παροχή αερίου ή πούδρας, αν δεν είναι ασφαλισμένη η πόρτα εισαγωγής στον χώρο, κλπ). Επίσης η ασθενή σύνδεση μεταξύ επικάλυψης και υποστρώματος εξαιτίας "άτελής" πρόσφυσης και ακαθαρσιών, οι μικρορωγμές, ο μη πλήρης έλεγχος της μικροδομής, αλλαγές φάσεων λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που παράγεται και ανομοιομορφία στην πυκνότητα της επικάλυψης που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία της επικάλυψης, θα μπορούσαν ακόμα να προστεθούν στα βασικά του μειονεκτήματα.

4.3.1. Χαρακτηριστικά πλάσματος

Το πλάσμα είναι ένα αγωγίμο αέριο που περιέχει ιόντα, ηλεκτρόνια και ουδέτερα μόρια. Δημιουργείται με ηλεκτρικό τόξο, όπου κάποια ηλεκτρόνια επιταχύνονται από την κάθοδο στην άνοδο μέσα σε περιβάλλον αερίου. Αν η κινητική ενέργεια των

ηλεκτρονίων είναι αρκετά υψηλή, κρούσεις τους με τα ουδέτερα άτομα μπορούν να οδηγήσουν σε ιονισμό, δίνοντας θετικά φορτισμένα ιόντα που επιταχύνονται προς την κάθοδο. Σε αυτή την κατάσταση κινήσεων και κρούσεων υψηλής ενέργειας, γίνεται ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ ανόδου και καθόδου, οπότε δημιουργείται το πλάσμα. Τα συνηθισμένα αέρια αποτελούνται από χωριστά μόρια, ενώ το πλάσμα αποτελείται από τα ίδια αέρια, που διαλύθηκαν και χωρίστηκαν έτσι ώστε μερικά ηλεκτρονικά φορτισμένα σωματίδια να διασπαστούν σε θετικά και αρνητικά ιόντα. Τα φορτισμένα σωματίδια διαθέτουν υψηλές ποσότητες κινητικής ενέργειας και έχουν υψηλή θερμοκρασία. Αυτή η κινητική ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί σε άλλα σωματίδια με την μορφή θερμότητας. Το αέριο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή πλάσματος είναι μοριακό, οπότε οι θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται κατά τη διάσπαση και αντίστοιχα οι ενέργειες που μεταφέρονται μέσω αυτού, είναι αρκετά υψηλότερες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την διέγερση του αερίου δεν παίζει ρόλο μόνο ο ιονισμός του αλλά προηγείται η διάσπαση των μορίων του σε άτομα. Κατά συνέπεια επιτυγχάνεται μεταφορά ενέργειας μέσω συγκρούσεων σε άλλα σωματίδια. Οι ταχύτητες στα συμβατικά όπλα πλάσματος είναι υποηχητικές, αλλά μπορούν να δημιουργηθούν και υπερηχητικές με χρήση κατάλληλων 24 ακροφυσίων. Οι θερμοκρασίες στον πυρήνα του πλάσματος μπορεί να ξεπερνούν τους 30.000°C. [23]

Δαύλος Πλάσματος: Στην εφαρμογή του πλάσματος στην απόθεση επικαλύψεων, ο ιονισμός του αερίου πραγματοποιείται μέσα σε ένα δαυλό. Αυτός αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια : μία κάθοδο κωνικής μορφής από βολφράμιο και μία άνοδο κυλινδρικής μορφής από χαλκό που περιβάλλει την κάθοδο σχηματίζοντας ένα ακροφύσιο, συγκλίνον ή αποκλίνον ανάλογα με τις απαιτήσεις του ψεκασμού. Για την προστασία της ανόδου από τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται υπάρχει εσωτερικό κύκλωμα κυκλοφορίας νερού. [23]

Η λειτουργία του δαυλού, η ισχύς του οποίου κυμαίνεται μεταξύ 30 και 80 KW και σε ορισμένες περιπτώσεις στα 120 KW, ξεκινά με τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού τόξου μεταξύ ανόδου και καθόδου. Κατόπιν διοχετεύεται το αέριο, το οποίο ιονίζεται και αναφλέγεται από το τόξο. Η είσοδος του αερίου μπορεί να γίνει είτε αξονικά, είτε με τη βοήθεια στροβίλων. Η δεύτερη περίπτωση ευνοεί τη σταθερότητα του τόξου και περιστρέφει την ανοδική ρίζα του περιορίζοντας τη διάβρωση της ανόδου. Εξαιτίας της αδράνειάς του το αέριο εξέρχεται του στομίου του δαυλού με τη μορφή φλόγας, η

θερμοκρασία της οποίας ανέρχεται στους 20.000 °K. Τα χαρακτηριστικά της φλόγας εξαρτώνται από το χρησιμοποιούμενο αέριο, αλλά και από τη διάταξη του ακροφυσίου (μικρότερο ακροφύσιο συνεπάγεται υψηλότερες θερμοκρασίες). [23]

Μετρήσεις των χαρακτηριστικών της φλόγας καθώς αυτή εξέρχεται του δαυλού με τη χρήση θερμοστοιχείων, φασματοσκοπικών μεθόδων και διατάξεων Laser επιτρέπουν τη διαίρεση αυτής σε τρεις περιοχές:

- Τον πυρήνα που εκτείνεται σε απόσταση 10 – 12mm και αναπτύσσονται θερμοκρασίες της τάξης των 12.000 – 15.000 °K.
- Μία μεταβατική περιοχή σε απόσταση 100mm όπου παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας στους 3.000 °K.
- Σε μία περιοχή όπου έχουμε συνεχή πτώση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας της φλόγας.

Η χρήση του συστήματος ψύξης επιδρά και στη μορφοποίηση της φλόγας. Το αέριο που διέρχεται πλησίον των τοιχωμάτων ψύχεται με αποτέλεσμα να μην ιονίζεται και να μην είναι αγωγίμο. Δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο που περικυκλώνουν και οριοθετούν τη φλόγα με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας, της πίεσης και της ταχύτητάς της. Ο όλος εξοπλισμός περιλαμβάνει και το σύστημα τροφοδοσίας της σκόνης που πρόκειται να ψεκασθεί. Η παροχή αυτής γίνεται διαμέσου αγωγών διαμέτρου 2mm, με τη βοήθεια κάποιου αδρανούς αερίου. Η σκόνη μπορεί να διοχετευθεί είτε εσωτερικά είτε εξωτερικά του δαυλού υπό διαφορετικές γωνίες, ανάλογα με τις απαιτήσεις για παραμονή στην πηγή της θερμότητας και επιτάχυνση των σωματιδίων. [23]

Για μεγαλύτερη ασφάλεια και καλύτερα αποτελέσματα η λειτουργία του δαυλού είναι πλήρως αυτοματοποιημένη. Οπότε με ρύθμιση μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή παραμέτρων όπως τάση ρεύματος, παροχή αερίου πλάσματος και παροχή σκόνης είναι δυνατή η πραγματοποίηση του ψεκασμού. [23]

Αέρια του Πλάσματος: Για τον μεταλλοψεκασμό με τη μέθοδο του πλάσματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστατικά του πλάσματος μονατομικά και διατομικά αέρια. Το αργό και το ήλιο είναι τα μονατομικά αέρια που χρησιμοποιούνται συχνότερα. Με τα μονατομικά αέρια είναι δυνατή η παροχή ικανής θερμικής ενέργειας για τις

περισσότερες εφαρμογές. Φλόγες που προέρχονται από πολυατομικά αέρια έχουν μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο. Δεν απελευθερώνουν μόνο ενέργεια ιονισμού, αλλά επιπλέον ενέργεια μοριακής διάσπασης. Ο συνδυασμός των αερίων που αποτελούν το πλάσμα επηρεάζει την ποιότητα του πλάσματος. Η ποιότητα των ίδιων των αερίων είναι όμοια με αυτή του πλάσματος συγκολλήσεων με χαμηλό ποσοστό υγρασίας και οξυγόνου. [23]

Τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα αέρια και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους είναι τα εξής:

- Το άζωτο χρησιμοποιείται ευρύτατα διότι είναι φθηνό, και επιτρέπει υψηλούς ρυθμούς ψεκασμού και βαθμούς απόθεσης. Η διάρκεια ζωής του ακροφυσίου του δαυλού είναι μικρότερη απ' ό τι με ένα μονατομικό αέριο, αλλά αυτός ο παράγοντας μπορεί να αντισταθμιστεί από το χαμηλότερο κόστος του αερίου αυτού.
- Το αργό παρέχει πλάσμα με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Χρησιμοποιείται για τον ψεκασμό υλικών, στα οποία η χρήση αζώτου και υδρογόνου θα επιδρούσε αρνητικά. Με αργό ψεκάζονται συνήθως καρβίδια και κράματα υψηλών θερμοκρασιών. Η χρήση του συναντάται συχνά σε αεροπορικές εφαρμογές.
- Το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως δευτερεύον αέριο σε ποσοστά από 5 έως 25 %, με άζωτο ή αργό. Η προσθήκη υδρογόνου ανεβάζει την τάση του τόξου και κατ' επέκταση το θερμικό περιεχόμενο του τόξου. Το υδρογόνο όμως, μπορεί να έχει καταστροφικά αποτελέσματα σε ορισμένα μέταλλα τα 27 οποία τείνουν να το απορροφούν όταν βρίσκονται σε τηγμένη μορφή.
- Το ήλιο χρησιμοποιείται συνήθως ως δευτερεύον αέριο σε συνδυασμό με αργό, ειδικά όταν το υπόστρωμα είναι τιτάνιο. Επίσης, τείνει να αυξάνει την τάση του τόξου.

Απόθεση επιστρωμάτων με χρήση πλάσματος: Η απόθεση επιστρωμάτων από ρεύμα σωματιδίων τηγμένου μετάλλου ή κεραμικού αναπτύχθηκε αρχικά με τη χρήση φλογών καύσης, εντός των οποίων το προς ψεκασμό υλικό τροφοδοτείται υπό μορφή σκόνης, σύρματος ή ράβδου. Κατά την δεκαετία του 1960 εμφανίστηκαν οι πρώτες συσκευές ψεκασμού επιστρωμάτων με χρήση πλάσματος. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου ψεκασμού με χρήση πλάσματος έναντι της μεθόδου ψεκασμού με χρήση φλόγας

είναι η μεγαλύτερη ταχύτητα των σωματιδίων (μέχρι 500 m/sec) και οι υψηλότερες θερμοκρασίες, οι οποίες επιτρέπουν την τήξη ακόμα και των πλέον δύστηκτων υλικών. [23]

Ψεκασμός με χρήση πλάσματος: Ο ψεκασμός επιστρωμάτων με χρήση πλάσματος διαφέρει σημαντικά από άλλες επιφανειακές κατεργασίες και διακρίνεται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- Η πηγή ενέργειας είναι απομακρυσμένη από το υπόστρωμα.
- Τα ψεκαζόμενα σωματίδια αντιδρούν χημικά και φυσικά με το περιβάλλον κατά την κίνησή τους από την πηγή ενέργειας (δαυλός πλάσματος) μέχρι το υπόστρωμα.
- Το επίστρωμα δομείται σωματίδιο – σωματίδιο.
- Τα σωματίδια ψύχονται ταχέως μετά την άφιξή τους (πρόσκρουση) στο υπόστρωμα (splat cooling).
- Το αποτιθέμενο επίστρωμα χαρακτηρίζεται από στρωματοειδή μορφή.

Προκειμένου να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες ψεκασμού διαφόρων επιστρωμάτων, ώστε αυτά να έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες, πρέπει να επιλυθούν διάφορα προβλήματα, όπως η μελέτη των φυσικών νόμων που διέπουν τη μέθοδο και ο προσδιορισμός των ορίων εφαρμογής της μεθόδου. [23]

Με την ανάπτυξη νέων τεχνικών μέτρησης, όπως η Ανεμομετρία Doppler με Laser (Laser Doppler Anemometry) ή η εν πτήση πυρομέτρηση (in flight pyrometry) και με την αυτοματοποίηση των μεθόδων φασματοσκοπίας είναι δυνατή η στατιστική παρακολούθηση των σωματιδίων κατά την πορεία τους μέσα στο δαυλό πλάσματος και κατόπιν προς το υπόστρωμα. Με τον τρόπο αυτό είναι πλέον δυνατός ο συσχετισμός των φυσικών ιδιοτήτων των επιστρωμάτων πλάσματος με την θερμοκρασία στην επιφάνεια του υποστρώματος και την ταχύτητα των σωματιδίων κατά την πρόσκρουσή τους με το υπόστρωμα. [23]

Κεφάλαιο 5ο: Πειραματικό Μέρος

Με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε, προέκυψε πως δεν έχει διερευνηθεί η τριβολογική συμπεριφορά των σύνθετων επικαλύψεων οξειδίων ατμοσφαιρικού ψεκασμού πλάσματος με αναλογίες (100%w/w) αλουμίνα Al_2O_3 και (100%w/w) ζirkονία ZrO_2 , σε διάφορα μεταλλικά υποστρώματα (κατασκευαστικού χάλυβα, ανοξείδωτου χάλυβα, αλουμινίου και τιτανίου).

5.1.1. Διαδικασία περάτωσης ατμοσφαιρικού θερμικού ψεκασμού πλάσματος δοκιμίων

Η διαδικασία για το θερμικό ψεκασμό και εύρεσης υλικών των δοκιμίων για τα πειράματα, πραγματοποιήθηκαν στην Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία στο πλαίσιο της πρακτικής μου άσκησης σε συνεργασία με τους υπεύθυνους Μεταλλουργούς του τμήματος ειδικών διεργασιών και τεχνολογίας υλικών και από τον μηχανικό του συνεργείου θερμικού ψεκασμού. [22]

5.1.2. Εξοπλισμός του θερμικού ψεκασμού

Για τον ατμοσφαιρικό ψεκασμό των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η διάταξη:

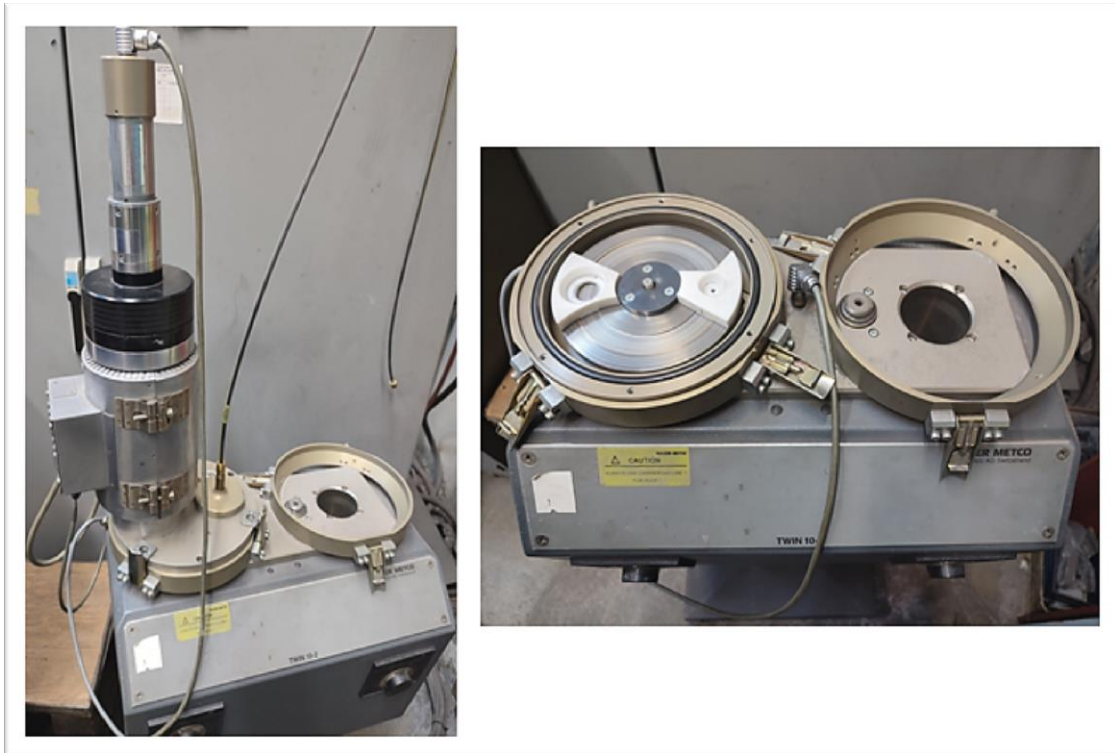
- Όπως παρατηρούμε η διαδικασία του θερμικού ψεκασμού λαμβάνει χώρα σε ένα ειδικά διαμορφωμένο χώρο με δυνατό εξαερισμό και μονωτικό υλικό για την ακτινοβολία όπως διακρίνεται στην (εικόνα 8).
- SULZER METCO AG με Serial Number.SM970025, Τύπος: Panelmate, Χρονολογίας 1997, Ηλεκτρικής τάσης 230V, Συχνότητας: 50HZ, Ισχύς: 0,2KW, Βάρος: 150kg, CH-5610 Wohlen, Rigackertr.16, της (εικόνας 9).
- Ο powder feeder της (εικόνας 10) είναι σημαντικό να καθαρίζεται καλά έπειτα από κάθε ψεκασμό ώστε να μην αναμειγνύονται οι πούδρες μέσα στο δοχείο, να ασφαρίζεται σωστά κάθε μέρος και να επιλέγονται τα κατάλληλα καπάκια L/L, NL/NL για την κάθε πούδρα.



Εικόνα 8: Διάταξη Thermal Spray Machine SULZER METCO. [22]

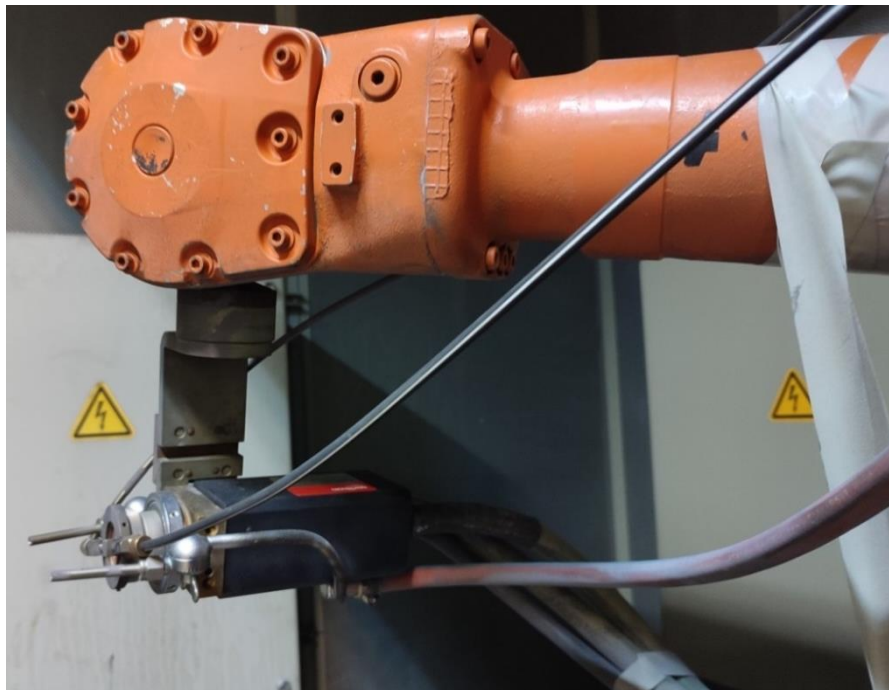


Εικόνα 9: Ρομποτικός Βραχίονας (Robot ELMO της εταιρείας ABB Robotics Sweden) για συγκράτηση και κίνηση του Injector. [22]



Εικόνα 10: Powder feeder (Θέση 2 Δοχείων διαφορετικής χωρητικότητας και παροχή πούδρας). [12] , [22]

- Στον injector Plasma Spray Gun της (εικόνας 11) να επιλέγεται η κατάλληλη απόσταση για την κάθε πούδρα και οι διάμετρος στο σωληνάκι ψεκασμού (1.5, 1.8, 2 mm).



Εικόνα 11: Injector Plasma Spray Gun Oerlikon Metco F4MB-XL [22]

- Η κίνηση του τραπεζιού γίνεται περιστροφικά ή και υπό γωνία, ενώ ο ρομποτικός βραχίονας έχει κίνηση και στους 3 άξονες (x,y,z) μέσω τηλεχειριστηρίου όπως βλέπουμε στην παρακάτω (εικόνα 12):



Εικόνα 12: Ηλεκτρονικό τηλεχειριστήριο του ρομποτικού βραχίονα και του Plasma Spray. [22]

- Οι ταινίες χρησιμοποιούνται για να προστατεύουν και να στηρίζουν τα σωληνάκια εξαγωγής αέρα και καυσίμου.
- Από τον παρακάτω υπολογιστή (εικόνα 13) καθορίζεται το πρόγραμμα για τον ψεκασμό της κάθε πούδρας, τις παροχές και τις αναλογίες των αερίων.



Εικόνα 13: Χειρισμός αερίων και πουδρών κάθε προγράμματος θερμικού ψεκασμού. [22]

5.1.3. Προετοιμασία δοκιμίων πριν τον θερμικό ψεκασμό

Τα δοκίμια πριν υποβληθούν στη διαδικασία ψεκασμού, έπρεπε να καθαριστούν καλά, να περαστούν με αμμοβολή όπως φαίνεται στην (εικόνα 14) και έπειτα να καθαριστούν με ασετόν όπως στην (εικόνα 15):



Εικόνα 14: Αμμοβολή και η διάταξή της. [22]



Εικόνα 15: Καθαρισμός με ασετόν. [22]

5.1.4. Στοιχεία των υλικών των δοκιμών πριν και μετά τον ψεκασμό

Αρχικά το μεταλλικό υλικό που ζητήθηκε για τα υποστρώματα ήταν υπό τη μορφή δοκιμών πλάτους 40mm και πάχους περίπου από (2 έως 5) mm. Μετά τον θερμικό ψεκασμό κόπηκαν με τροχό σε διαστάσεις 40x40mm². Στηρίχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σταθερές και να μην υπάρχει ταλάντωση κατά τον ψεκασμό και να ψεκαστούν ομοιόμορφα σύμφωνα με ένα πανομοιότυπο πρόγραμμα άλλου τεμαχίου κάποιου κινητήρα (εικόνα 16).

Διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν διευκρινίζονται ως εξής:

- Για τον ψεκασμό όλων των πουδρών τα αέρια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το υδρογόνο, αργκόν και το άζωτο.
- Η απόσταση του injector από τη βέργα ήταν 140mm.
- Η κλίση ψεκασμού του injector από τη βέργα ήταν 90°.
- Η τοποθέτηση στο τραπέζι και η στήριξη έγινε με σφιγκτήρες.



Εικόνα 16: Στήριξη βεργών κατά την προετοιμασία τους για ατμοσφαιρικό ψεκασμό πλάσματος με πούδρα Ζιρκονίας.

[22]

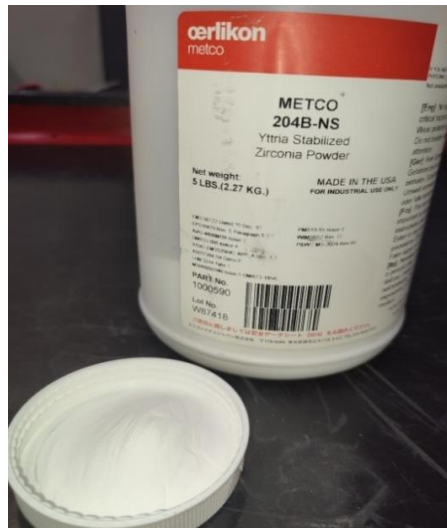
Στον παρακάτω (πίνακα 10) παρουσιάζονται τα δεδομένα με τις διαστάσεις, τα πάχη, τα υλικά των υποστρωμάτων, τις πούδρες των επιστρώσεων και των ενδιάμεσων στρωμάτων.

Τυποποίηση δοκιμίων	ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΒΕΡΓΑΣ & ΠΑΧΟΣ (mm)	BONDING & ΠΑΧΟΣ (mm)	ΕΠΙΣΤΡΩΜΑ ΠΟΥΔΡΑΣ & ΠΑΧΟΣ (mm)	ΤΕΛΙΚΟ ΠΑΧΟΣ (mm)
A	Κατασκευαστικός Χάλυβας 4130 (3,4544)	Pac 9620 AM (0,1524)	ΖΙΡΚΟΝΙΑ METCO 204 B-NS (0,1524)	3,7592
B	Κατασκευαστικός Χάλυβας 4130 (3,4544)	Metco 450 NS (0,1524)	ΑΛΟΥΜΙΝΑ METCO 101 NS (0,1778)	3,7846
C	Ανοξείδωτος Χάλυβας AMS 5540 (2,2352)	Pac 9620 AM (0,2286)	ΖΙΡΚΟΝΙΑ METCO 204 B-NS (0,0508)	2,5146
D	Ανοξείδωτος Χάλυβας AMS 5540 (2,2352)	Metco 450 NS (0,1778)	ΑΛΟΥΜΙΝΑ METCO 101 NS (0,127)	2,54
E	Αλουμίνιο 2024 (4,8768)	Pac 9620 AM (0,1524)	ΖΙΡΚΟΝΙΑ METCO 204 B-NS (0,1524)	5,1816
F	Αλουμίνιο 2024 (4,8768)	Metco 450 NS (0,1778)	ΑΛΟΥΜΙΝΑ METCO 101 NS (0,127)	5,1816
G	Τιτάνιο HSB 168 (2,3114)	Pac 9620 AM (0,2286)	ΖΙΡΚΟΝΙΑ METCO 204 B-NS (0,0508)	2,5908
H	Τιτάνιο HSB 168 (2,3114)	Metco 450 NS (0,1778)	ΑΛΟΥΜΙΝΑ METCO 101 NS (0,1524)	2,6416

Πίνακας 10. Στοιχεία βεργών πριν και μετά τον θερμικό ψεκασμό. [12] , [22]

5.1.5. Στοιχεία και χαρακτηριστικά των επικαλύψεων

Τα στοιχεία των πούδρων για τις παραμέτρους ψεκασμού τους βρίσκονται στον (πίνακα 6) και ενδεικτικά προβάλλεται η (εικόνα 15) της πούδρας από ζirkονία.



Εικόνα 17. Ενδεικτικά η πούδρα Ζirkονίας ZrO_2 (204B-NS) της OERLIKON METCO. [12] , [22]

Plasma Spray Parametres									
ΠΟΥΔΡΕΣ	GUN TYPE	Plasma Gas (slpm)		Current (AMP)	Voltage (V)	Noozle (mm)	Injector		
		Argon	H ₂				Diametre (mm)	Angle (°)	Distance (mm)
ZIPKONIA METCO 204 B-NS	F4-MB	35	12	600	75	6	1,8	90	6
Pac 9620 AM	F4-MB	75	12	600	75	6	1,5	90	6
ΑΛΟΥΜΙΝΑ METCO 101 NS	F4-MB	38	14	600	75	6	1,8	90	6
Metco 450 NS	F4-MB	50	11	600	75	6	1,5	90	6
ΠΟΥΔΡΕΣ	Carr. Gas		Powder Feeder			Manipulation			Version
	Type	Flow (slpm)	Suct./Spr.	Dig.setting	Rate (g/min)	(mm)	Speed (m/min)	STEP (mm/pass)	
ZIPKONIA METCO 204 B-NS	Ar	2,6	NL/NL	30	45	120	75	4	33770
Pac 9620 AM	Ar	3,1	L/L	20	40	140	75	4	34312
ΑΛΟΥΜΙΝΑ METCO 101 NS	Ar	3,2	L/L	57	50	120	75	4	34764
Metco 450 NS	Ar	3,5	L/L	-	Power disc 25% rpm	140	75	4	-

Πίνακας 6: Οι πούδρες που χρησιμοποιήθηκαν και οι παράμετροί τους για θερμικό ψεκασμό. [12] , [22]

5.1.6. Επικάλυψη αλουμίνας Al_2O_3

Για τη δημιουργία της επικάλυψης αλουμίνας χρησιμοποιήθηκε η πούδρα (Metco 101NS).

Metco 101NS: Οι σκόνες τιτανίας-αλουμίνας 3% έχουν σχεδιαστεί για να αυξάνουν τη σκληρότητα των σκληρών, ανθεκτικών στην τριβή και διάβρωση υλικών οξειδίου του αλουμινίου με την προσθήκη μικρής ποσότητας (2 έως 4%) τιτανίας. Αυτά τα υλικά παράγουν πυκνές, λείες επικαλύψεις για εφαρμογές που απαιτούν αντοχή στη φθορά και σκληρότητα. Οι επιστρώσεις του Metco 101NS έχουν καλή αντοχή σε τριβή, φθορά ολίσθησης, τριβή και οξείδωση έως περίπου 1100 °C. Οι επικαλύψεις είναι πιο σκληρές από αυτές που παράγονται από σκόνες αλουμίνας υψηλής καθαρότητας (λευκές). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλά περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων των περισσότερων οξέων και αλκαλίων. Η επικάλυψη αυτή είναι κατάλληλη για ηλεκτρική μόνωση, προστασία από τριβή και φθορά και προστασία από διάβρωση στερεών σωματιδίων. [12]

5.1.7. Επικάλυψη Bonding για επίστρωση αλουμίνας Al_2O_3

Για τη δημιουργία της επικάλυψης του ενδιάμεσου στρώματος, με σκοπό την επικάλυψη της αλουμίνας χρησιμοποιήθηκε η πούδρα (Metco 450NS).

Metco 450NS: είναι ένα υλικό (Ni5Al) γενικής χρήσης για την αποκατάσταση φθαρμένων ή κατεργασμένων εξαρτημάτων. Χρησιμοποιούνται της ως επιστρώσεις συγκόλλησης για βιομηχανικές εφαρμογές που καθορίζονται από OEM και γενικές βιομηχανικές εφαρμογές κάτω από επιστρώσεις της κεραμικά και αποξεστικά με συμπιεστή. Οι επικαλύψεις αλουμινίου νικελίου έχουν καλή αντοχή στην οξείδωση έως και 800 °C. Το Metco 450NS παρουσιάζει εξώθερμη αντίδραση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ψεκασμού και θεωρείται αυτοκόλλητο με χαλύβδινα υποστρώματα. Αυτές οι σκόνες είναι μηχανικά επενδυμένα σύνθετα αλουμινίου και νικελίου. Το Metco 450NS έχει σχεδιαστεί για εφαρμογή με χρήση ατμοσφαιρικού ψεκασμού πλάσματος ή σκόνης καύσης του Thermospray. [12]

5.1.8. Επικάλυψη ζirkονίας ZrO_2

Για τη δημιουργία της επικάλυψης ζirkονίας χρησιμοποιήθηκε η πούδρα (Metco 204B-NS).

Metco 204B-NS: Οι σκόνες ζirkονίας με σταθεροποιημένο ύτριο Y ($8Y_2O_3-ZrO_2$) που κατασκευάζονται με τη διαδικασία HOSP™ της Metco συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των προκραματοποιημένων, συντηγμένων και θρυμματισμένων σκονών μαζί με το ελεύθερης ροής, σταθερό σχήμα των αποξηραμένων με ψεκασμό σκονών. Η συμύκνωση μέσω της διαδικασίας Metco HOSP™ εξασφαλίζει υψηλή απόδοση απόθεσης κατά τη διαδικασία επίστρωσης, μειώνοντας τον χρόνο εφαρμογής και τα απόβλητα υπερβολικού ψεκασμού. Οι πούδρες είναι σφαιροειδείς με εξαιρετική ροή, χημική ομοιογένεια και δομική σταθερότητα. Οι συνθέσεις κατασκευάζονται από πρώτες ύλες υψηλής καθαρότητας και παράγουν επιστρώσεις που παρέχουν μακροχρόνια, αξιόπιστη εξυπηρέτηση. Οι επικαλύψεις αυτού του υλικού θα είναι σχεδόν λευκές. [12]

5.1.9. Επικάλυψη Bonding για επίστρωση ζirkονίας ZrO_2

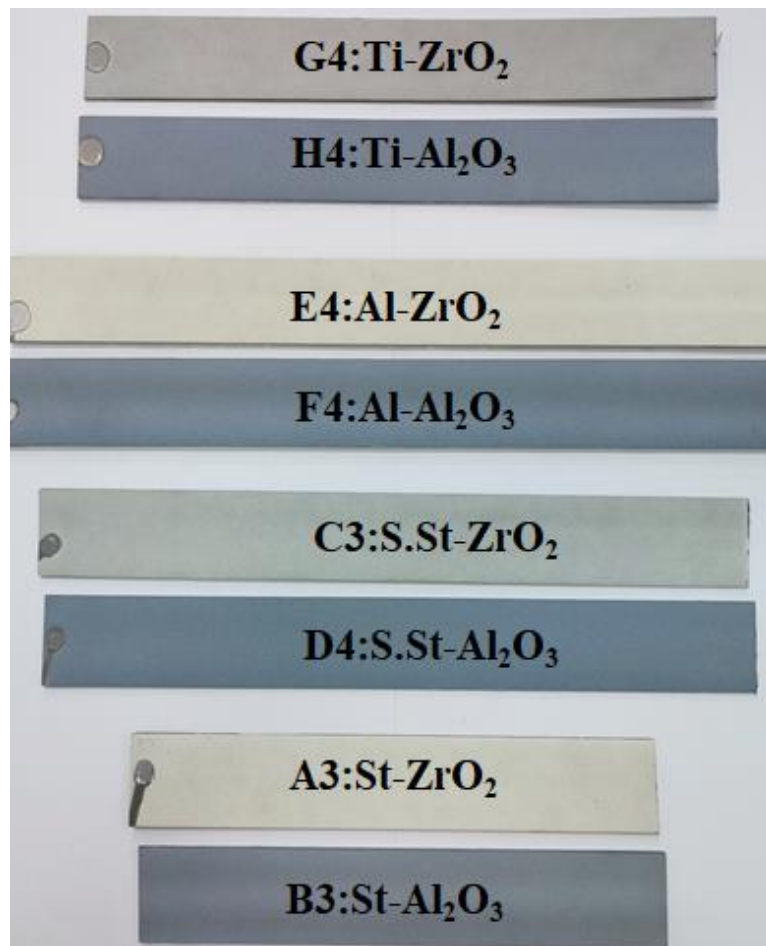
Για τη δημιουργία της επικάλυψης του ενδιάμεσου στρώματος, με σκοπό την επικάλυψη της ζirkονίας χρησιμοποιήθηκε η πούδρα (Amdry 962).

Amdry 962: Τα κράματα NiCrAlY είναι μια οικογένεια υλικών επίστρωσης με θερμικό ψεκασμό που είναι γνωστά για την εξαιρετική τους αντοχή στην οξείδωση και τη θερμή διάβρωση. Οι επικαλύψεις αυτών των υλικών χρησιμοποιούνται ως συγκολλητικές επικαλύψεις για κεραμικές επικαλύψεις ή από μόνες τους για να αντιστέκονται στη διάβρωση σε θερμοκρασίες έως 980 °C εάν εφαρμοστούν με ατμοσφαιρικό ψεκασμό πλάσματος (APS) ή έως 1050 °C εάν εφαρμοστούν χρησιμοποιώντας σπρέι πλάσματος ελεγχόμενης ατμόσφαιρας HVOF ή ChamPro (LPPS, LVPS ή VPS). Το χρώμιο και το αλουμίνιο σε αυτές τις επικαλύψεις παρέχουν προστασία μέσω του σχηματισμού μιας κλίμακας οξειδίου. Η προσθήκη υτρίου βελτιώνει την πρόσφυση αυτού του στρώματος οξειδίου. Αυτή η πυκνή, καλά προσκολλημένη κλίμακα είναι κρίσιμη για την παρατεταμένη διάρκεια ζωής των συστημάτων κεραμικής επίστρωσης υψηλής θερμοκρασίας, όπως οι επικαλύψεις θερμικού φραγμού και τα κεραμικά λειαντικά συστήματα. Η αλουμίνα δρα ως φράγμα διάχυσης οξυγόνου που βοηθά στην ελαχιστοποίηση της οξείδωσης του δεσμού. Η κλίμακα οξειδίου του χρωμίου είναι

ευεργετική για την καταπολέμηση της θερμής διάβρωσης και της θείωσης. Σε αυτές τις εφαρμογές, οι υψηλότερες αναλογίες χρωμίου προς αλουμίνιο είναι συνήθως καλύτερες για τον σχηματισμό κλίμακας οξειδίου του χρωμίου. Η πούδρα Amdry 962 χρησιμοποιείται για πολλές εφαρμογές που απαιτούν αντοχή στην οξείδωση σε υψηλή θερμοκρασία. [12]

5.1.10. Τελικά δοκίμια μετά τον θερμικό ψεκασμό

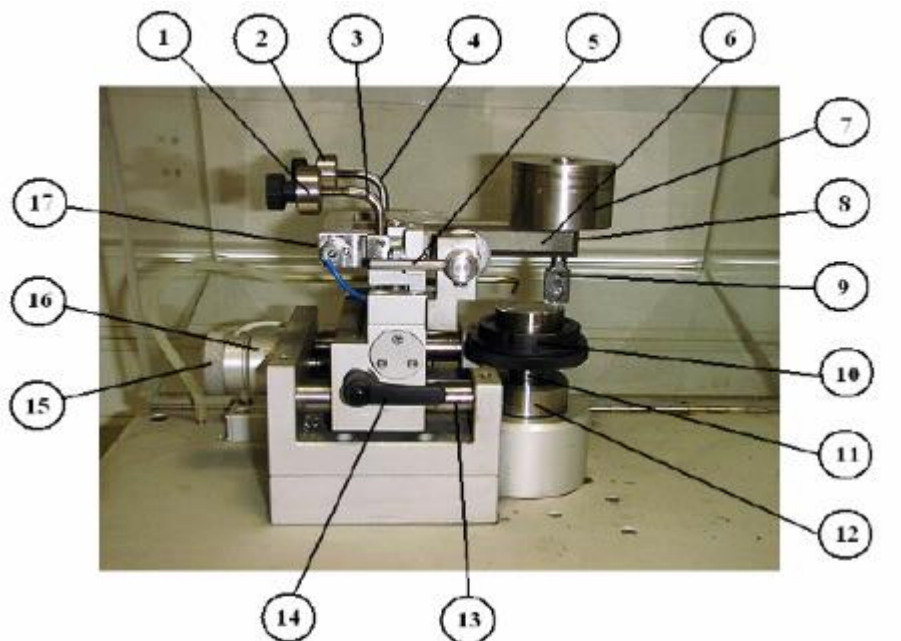
Τα δοκίμια όπου δημιουργήθηκαν έπειτα τη διαδικασία του ατμοσφαιρικού ψεκασμού παρουσιάζονται στην (εικόνα 18). Τα ανοιχτόχρωμα δοκίμια έχουν την επικάλυψη ζirkονίας ενώ τα σκουρόχρωμα την επικάλυψη αλουμίνιας.



Εικόνα 18: Τελικά δοκίμια επικαλύψεων ζirkονίας με λευκό χρώμα και αλουμίνιας με γκρι, σε υποστρώματα (κατασκευαστικού χάλυβα, ανοξείδωτου χάλυβα, αλουμίνιο και τιτάνιο). [22]

5.2. Πειραματική διάταξη τριβομέτρου τύπου (Pin-On-Disk)

Για τη λήψη μετρήσεων του συντελεστή τριβής ολίσθησης μ μέσω τριβολογικών δοκιμών στα δοκίμια με τις επικαλύψεις κεραμικών οξειδίων Ζιρκονίας και Αλουμίνας (ZrO_2 και Al_2O_3), χρησιμοποιήθηκε το Τριβόμετρο TRB³ της εταιρείας (CSM-Instruments) τύπου Pin-On-Disk (Εικόνα 19), σύμφωνα με το πρότυπο ASTM G-99, , του ιδρύματος Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (ΠΑ.Δ.Α), στο χώρο του εργαστηρίου Τριβολογίας, υπό την επίβλεψη έμπειρου διδακτικού προσωπικού.



- | | |
|-----------------------------------|---|
| 1. Αντίβαρα | 10. Τσοκ |
| 2. Αντίβαρα | 11. Δευτερεύουσα Ατρακτος |
| 3. Βάση αντίβαρων | 12. Πρωτεύουσα Ατρακτος |
| 4. Βάση αντίβαρων | 13. Βαθμονομημένος άξονας σε mm |
| 5. Εκκεντρο ρύθμισης | 14. Ασφαλιστικός μοχλός |
| 6. Στέλεχος Δυναμόμετρου | 15. Στρόφαλο Ρύθμισης Ακτίνας Αύλακας |
| 7. Βαριδι | 16. Βερνιέρος |
| 8. Ασφαλιστικός κοχλίας Στυλίσκου | 17. Αισθητήρας μέτρησης δύναμης τριβής LVDT |
| 9. Στυλίσκος | |

Εικόνα 19: Τριβόμετρο τύπου Pin-On-Disk (CSM-Instruments). [25] , [36]

Το παραπάνω Τριβόμετρο (εικόνα 19) εμπεριέχει τα εξής:

- Ακριβώς βαθμονομημένες μετρήσεις τριβής και φθοράς.
- Σταθερό σημείο επαφής και χωρίς παρασιτική τριβή.
- Μεταβλητά μεγέθη και σχήματα δειγμάτων.

- Αυτόματη απενεργοποίηση (μήκος διαδρομής / συντελεστής τριβής).
- Δοκιμή σε υγρά και ελεγχόμενη υγρασία.
- Δοκιμές συμβατές με DIN 50324 και ASTM (G133 και G99). [26]
- Πακέτο λογισμικού για τη συλλογή δεδομένων και τον έλεγχο του οργάνου μέσω H/Y, με γραφική απεικόνιση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, συντελεστές τριβής και φθοράς, διάρκεια ζωής ολίσθησης κ.λπ. [25]

5.2.1. Δοκιμή τριβής στη διάταξη (Pin-On-Disk)

Για τη διεκπεραίωση του πειράματος χρήστηκε αναγκαίο:

- Κατάλληλο λογισμικό (Tribox 2.0), όπου μέσω αισθητήρων μετέφερε τις λήψεις των μετρήσεων στον υπολογιστή.
- Πρότυπα δοκίμια στερέωσης/στήριξης με κόλλα (δυνατού κρατήματος) των δοκιμίων με τις επικαλύψεις.
- Για το πλήρη οριζόντιο επίπεδο του στελέχους του δυναμομέτρου, η χρήση αλφαδιού με φουσαλίδα.
- Μετρητικό ρολόι για να μπορούμε να στερεώσουμε το δοκίμιο σε οριζόντιο επίπεδο, ανάλογα με την επιφάνειά του, στη θέση του τσοκ ώστε να αποφύγουμε τυχόν κραδασμούς που είναι επιβλαβείς για τη διάταξη (εικόνα 20).
- Βαρίδι, για το επιβαλλόμενο φορτίο των 5N.
- Τσιμούχα από λάστιχο, κάτω από την τοποθέτηση του βαριδίου για την απορρόφηση κραδασμών.
- Ανταγωνιστικό υλικό (σφαιρίδιο) αλουμίνας DG Al_2O_3 διαμέτρου 6mm.
- Πινέλο, για την απομάκρυνση της σκόνης από πούδρα που δημιουργήθηκε από τη φθορά της κάθε επικάλυψης λόγω αντίστασης από το ανταγωνιστικό υλικό σφαίρα αλουμίνας DG Al_2O_3 .



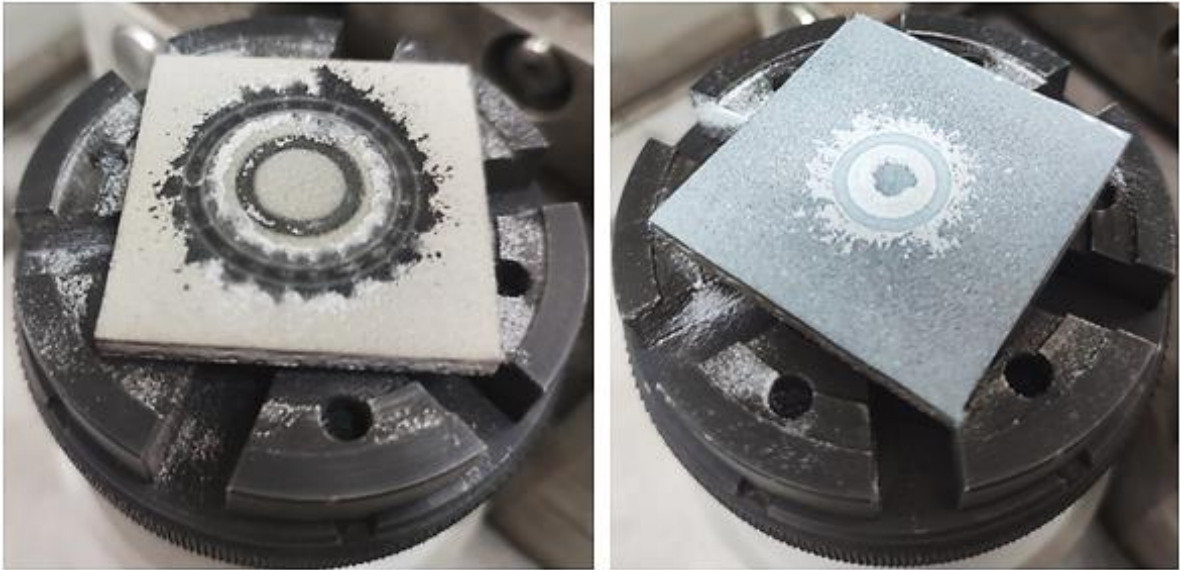
Εικόνα 20: Προετοιμασία δοκιμίων για την διαδικασία τριβής των δοκιμίων στη διάταξη (Pin-On-Disk).

5.2.2. Τελικά δοκίμια έπειτα από τη δοκιμή τριβής στη διάταξη (Pin-On-Disk) και οπτική στερεοσκοπία.

Για τη μακροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων με τις επικαλύψεις κεραμικών οξειδίων ζirkονίας και αλουμίνιας (ZrO_2 και Al_2O_3), χρησιμοποιήθηκε το στερεοσκόπιο του ιδρύματος Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (ΠΑ.Δ.Α), στο χώρο του εργαστηρίου Τριβολογίας, υπό την επίβλεψη έμπειρου διδακτικού προσωπικού.



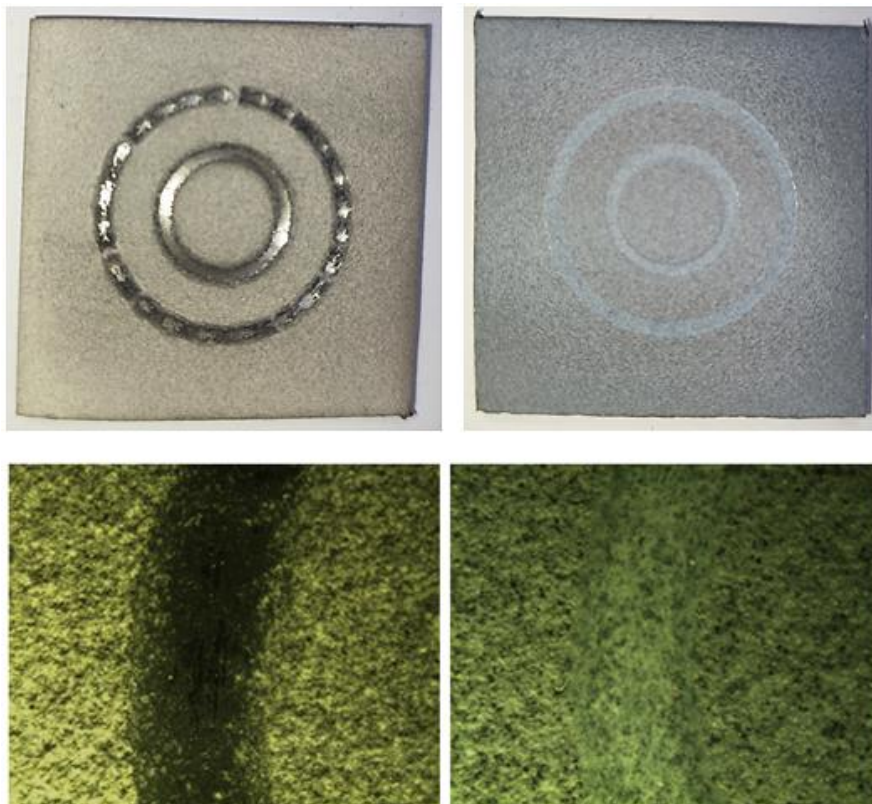
Εικόνα 21: Δοκίμια αμέσως μετά τη τριβή στη διάταξη (Pin-On-Disk).



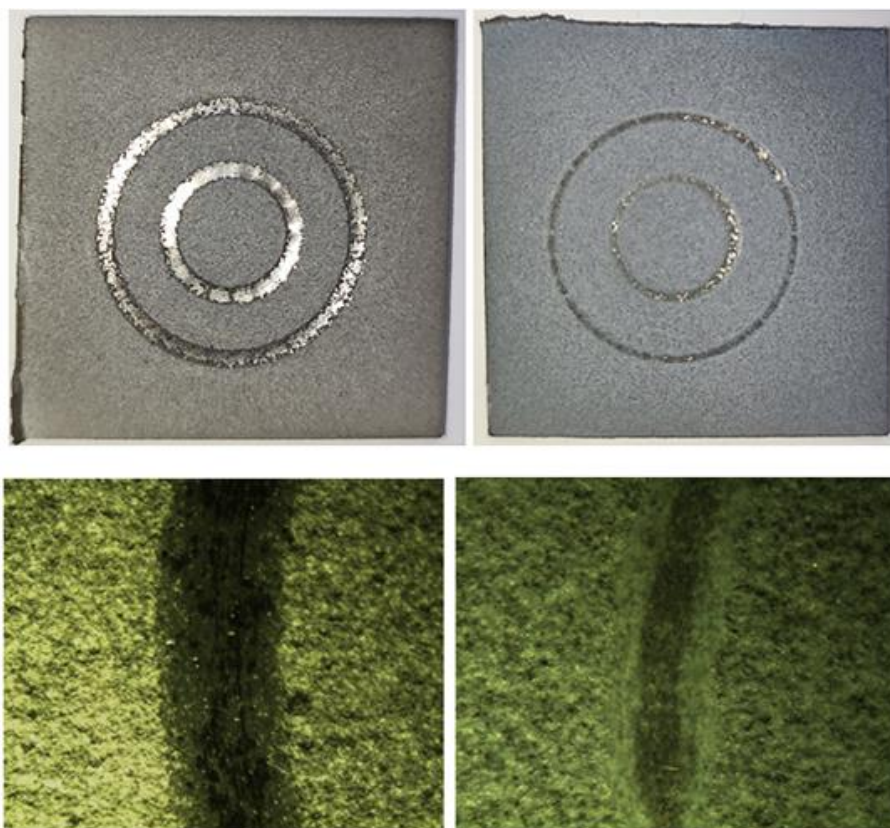
Εικόνα 22: Αποτελέσματα δοκιμών τριβής των δοκιμών με επικαλύψεις ($ZrO_2-Al_2O_3$) αντίστοιχα – Εμφανή και τα ψήγματα φθοράς.

Από την (Εικόνα 22), φαίνεται πως στο τέλος της δοκιμής έχουν φθαρεί αρκετά οι επικαλύψεις και κυρίως της ζirkονίας με βάση το υλικό όπου έχει αφαιρεθεί.

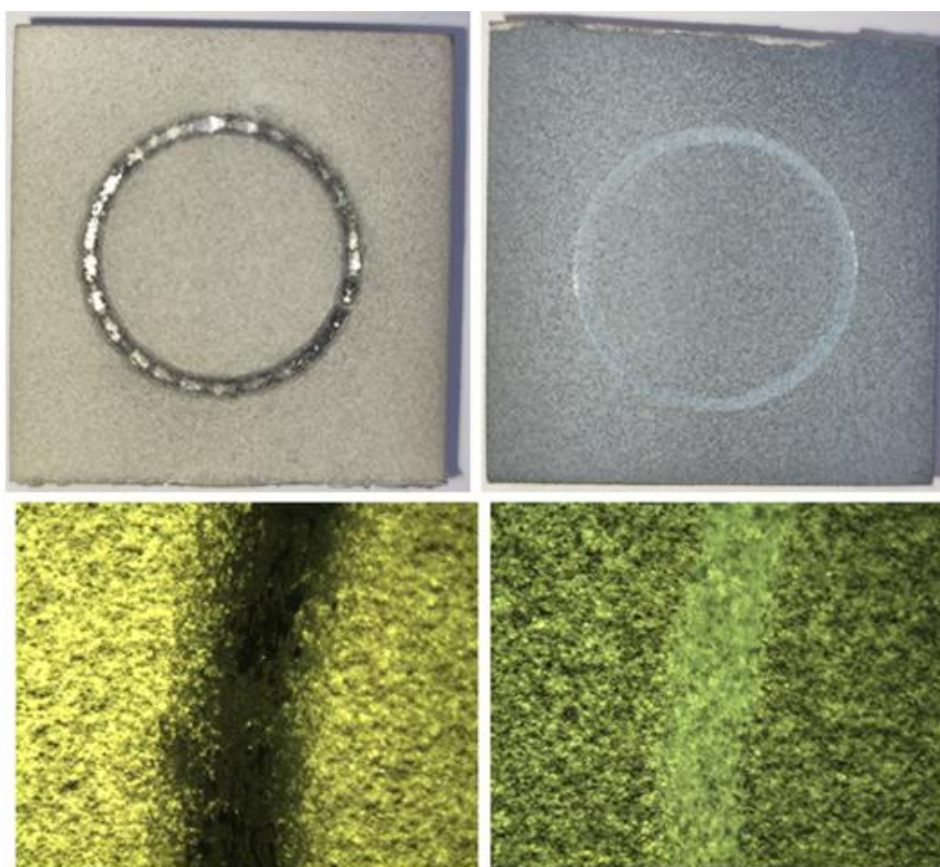
Παρακάτω εμφανίζονται στις (εικόνες 23,24,25 και 26) τα δοκίμια μετά τη δοκιμή στο τριβόμετρο και πιο προσεκτικά η παρατήρηση των αυλακώσεων από το στερεοσκόπιο.



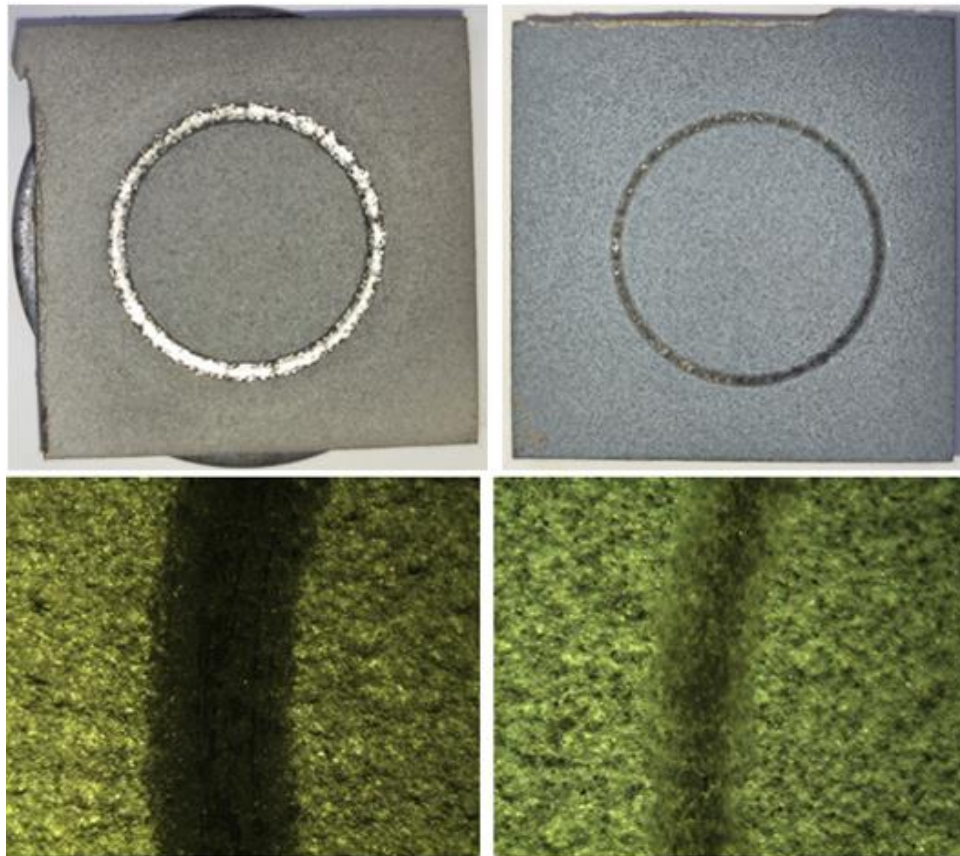
Εικόνα 23: Δοκίμια υποστρώματος κατασκευαστικού χάλυβα ($A_3:ZrO_2 - B_3:Al_2O_3$).



Εικόνα 24: Δοκίμια υποστρώματος ανοξειδωτού χάλυβα ($C_4:ZrO_2 - D_4:Al_2O_3$).



Εικόνα 25: Δοκίμια υποστρώματος αλουμινίου ($E_4:ZrO_2 - F_4:Al_2O_3$).



Εικόνα 26: Δοκίμα υποστρώματος τιτανίου ($G_4:ZrO_2 - H_4:Al_2O_3$).

5.2.3. Μετρήσεις

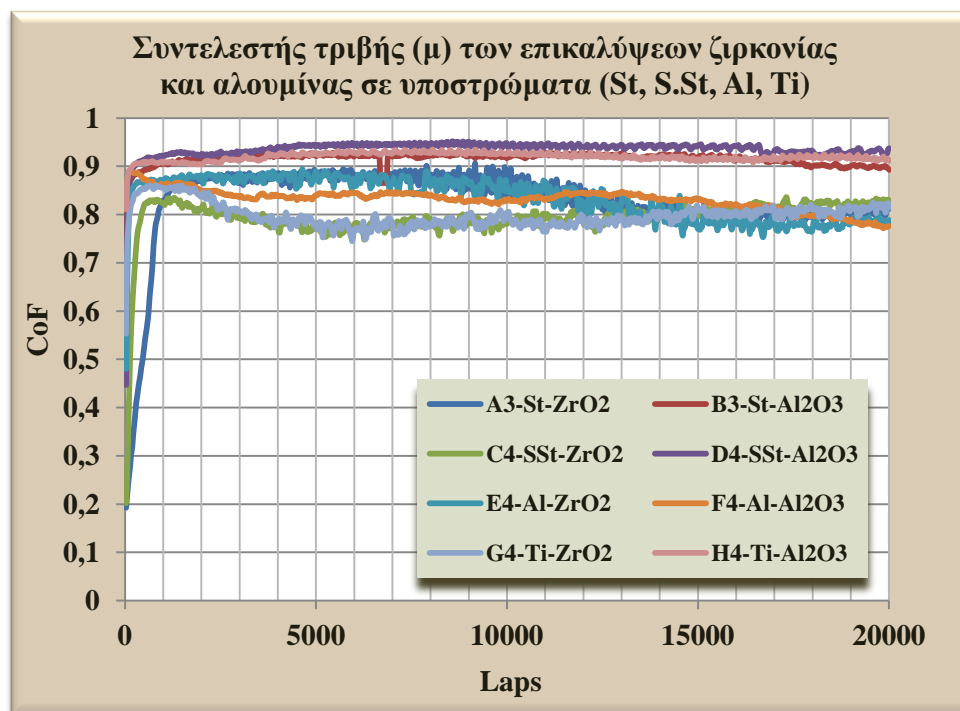
Ενδεικτικά στον παρακάτω (πίνακα 7) έχει καταχωρηθεί η μέση τιμή των συντελεστών τριβής κάθε επικάλυψης.

Μέσος συντελεστής τριβής (μ)							
A3	B3	C4	D4	E4	F4	G4	H4
St-ZrO ₂	St-Al ₂ O ₃	SSt-ZrO ₂	SSt-Al ₂ O ₃	Al-ZrO ₂	Al-Al ₂ O ₃	Ti-ZrO ₂	Ti-Al ₂ O ₃
0,88	0,92	0,77	0,94	0,87	0,84	0,78	0,93

Πίνακας 7: Μέση τιμή των συντελεστών τριβής (μ).

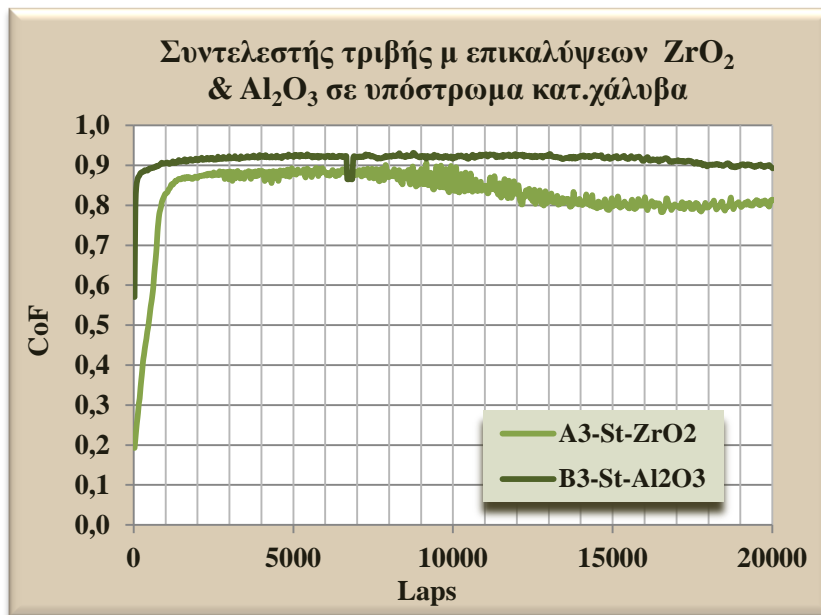
5.2.4. Διαγράμματα

Από τις παραπάνω μετρήσεις των δοκιμών, προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα που αναφέρονται στον συντελεστή τριβής των επικαλύψεων ζirkονίας και αλουμίνιας. Με τα διαγράμματα αυτά μπορεί να γίνει εμφανή η σύγκριση μεταξύ των επικαλύψεων (ZrO_2 και Al_2O_3) των διαφορετικών υποστρώματων (κατασκευαστικού χάλυβα, ανοξείδωτου χάλυβα, αλουμινίου και τιτανίου).

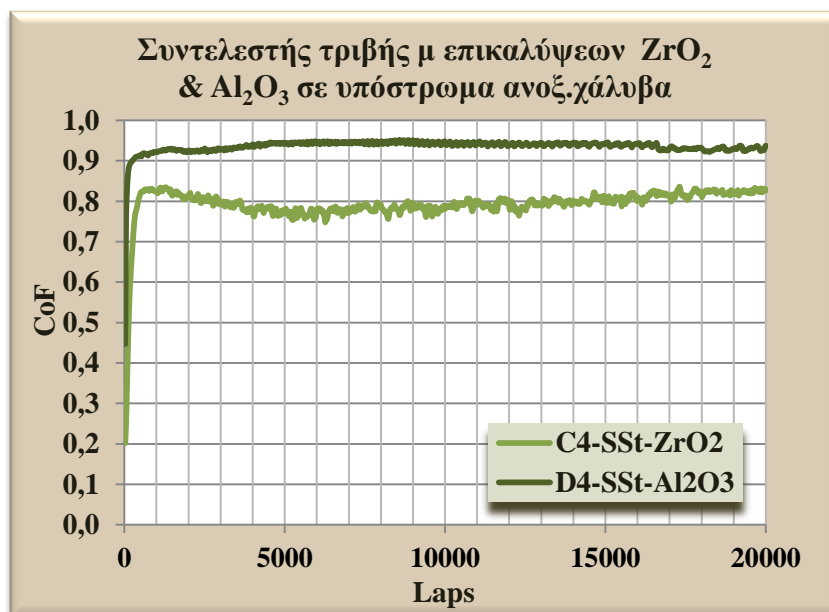


Διάγραμμα 3: Συγκεντρωτικό διάγραμμα με το συντελεστή τριβής (μ) των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO_2 & αλουμίνιας Al_2O_3 , σε υποστρώματα κατασκευαστικού χάλυβα (St), ανοξείδωτου χάλυβα (S.St), αλουμινίου (Al) και τιτανίου (Ti), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.

Στο παραπάνω (διάγραμμα 3) εμφανώς διακρίνουμε ότι στην επικάλυψη της αλουμίνιας έχουμε υψηλότερο συντελεστή τριβής. Ενώ βέβαια μια διαφορά υπάρχει στην επικάλυψη αλουμίνιας με υπόστρωμα αλουμινίου όπου ο συντελεστής τριβής βρίσκεται λίγο πιο χαμηλά από τους συντελεστές τριβής των επικαλύψεων ζirkονίας με υποστρώματα κατασκευαστικού χάλυβα και αλουμινίου. Γενικά και οι 2 όμως επικαλύψεις κυμαίνονται ανάμεσα στις τιμές 0,77-0,99.

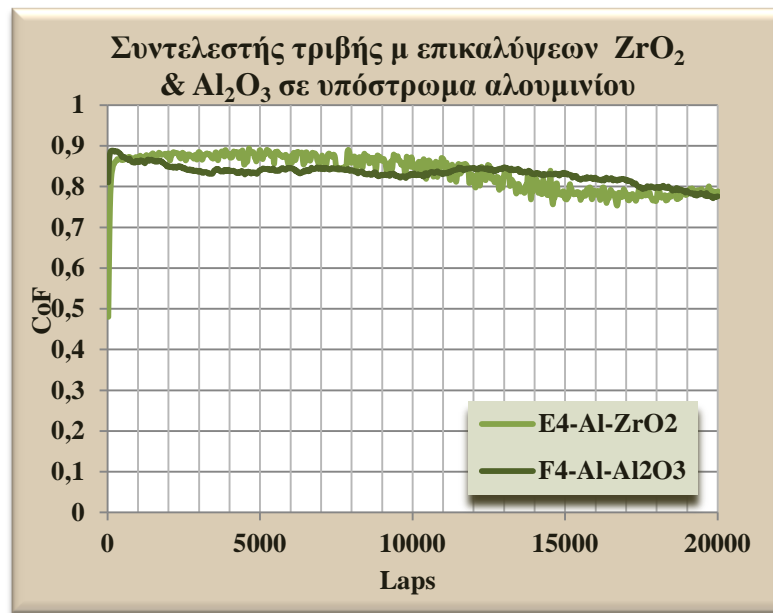


Διάγραμμα 4: Συντελεστής τριβής μ των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO₂ & αλουμίνας Al₂O₃ σε υπόστρωμα κατασκευαστικού χάλυβα (St), συναρτήσε του αριθμού περιστροφών.

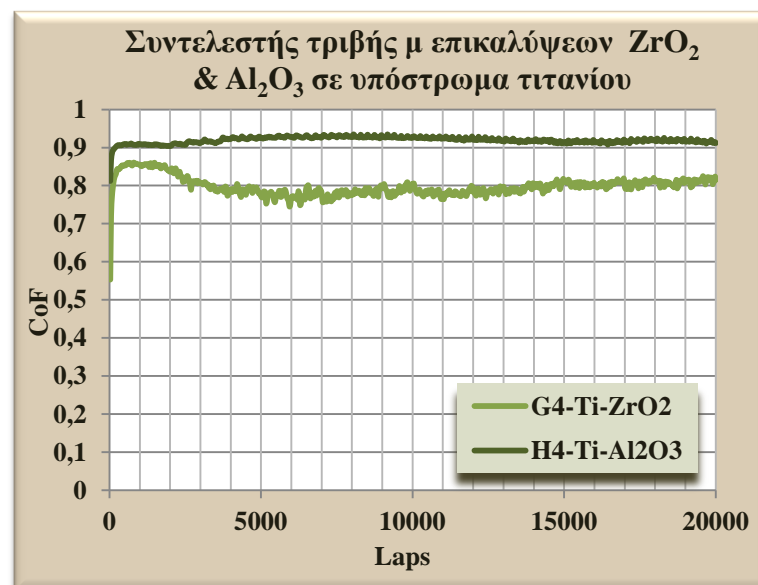


Διάγραμμα 5: Συντελεστής τριβής μ των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO₂ & αλουμίνας Al₂O₃ σε υπόστρωμα ανοξειδωτου χάλυβα (S.St), συναρτήσε του αριθμού περιστροφών.

Παρατηρούμε πως και στα δύο (διαγράμματα 4 και 5) εμφανίζεται υψηλότερος συντελεστής τριβής στην επικάλυψη της αλουμίνας σε σύγκριση με το συντελεστή της επικάλυψης ζirkονίας.

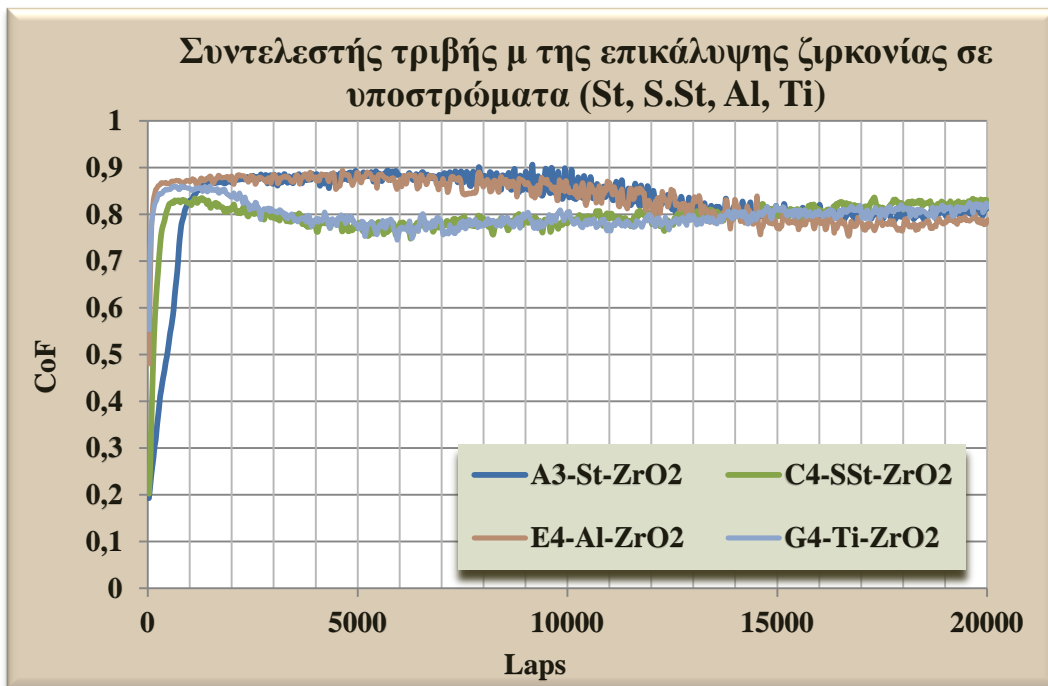


Διάγραμμα 6: Συντελεστής τριβής μ των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO_2 & αλουμίνιας Al_2O_3 σε υπόστρωμα αλουμινίου (Al), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.

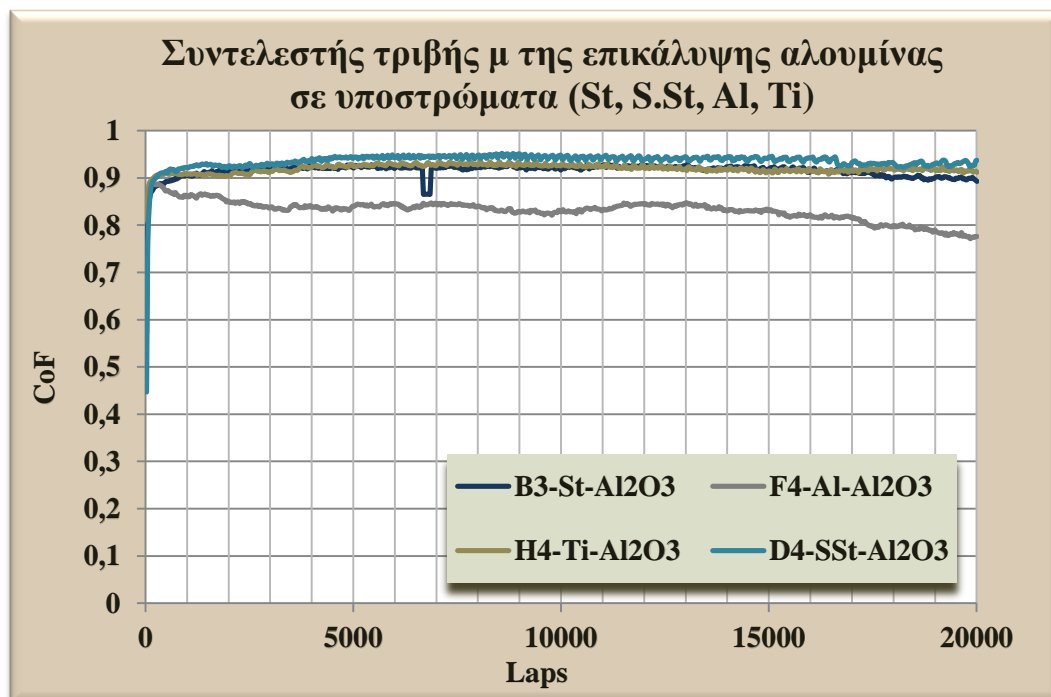


Διάγραμμα 7: Συντελεστής τριβής μ των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO_2 & αλουμίνιας Al_2O_3 σε υπόστρωμα τιτανίου (Ti), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.

Παρατηρούμε πως και στα δύο (διαγράμματα 6 και 7) έχουμε υψηλό συντελεστή τριβής για μ από (0,75 έως 0,93). Στα δοκίμια με υπόστρωμα αλουμινίου έχουμε μία εναλλαγή του συντελεστή τριβής και των 2 επικαλύψεων αλουμίνιας και ζirkονίας αλλά οι τιμές τους είναι αρκετά κοντινές μεταξύ τους. Ακόμα στο (διάγραμμα 6) έχουμε μία πτώση του συντελεστή τριβής και στις 2 επικαλύψεις, ενώ στο (διάγραμμα 7) οι τιμές του συντελεστή παραμένουν σταθερές.



Διάγραμμα 8: Συντελεστής τριβής (μ) της επικάλυψης ζirkονίας ZrO_2 σε υποστρώματα κατασκευαστικού χάλυβα (St), ανοξείδωτου χάλυβα (S.St), αλουμινίου (Al) και τιτανίου (Ti), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.



Διάγραμμα 9: Συντελεστής τριβής (μ) της επικάλυψης αλουμίνιας Al_2O_3 σε υποστρώματα κατασκευαστικού χάλυβα (St), ανοξείδωτου χάλυβα (S.St), αλουμινίου (Al) και τιτανίου (Ti), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.

Στο (διάγραμμα 8) με επικάλυψη ζirkονίας βλέπουμε στην αρχή οι 2 συντελεστές των δοκιμών με υποστρώματα κατασκευαστικού χάλυβα και αλουμινίου έχουν υψηλότερη

τιμή, αλλά στη συνέχεια προχωρούν μαζί με τους συντελεστές των άλλων δοκιμίων με υποστρώματα ανοξειδωτού χάλυβα και αλουμινίου. Στο (διάγραμμα 9) με επικαλύψεις αλουμίνιας, υπάρχει μία μικρή διαφοροποίηση του συντελεστή τριβής του δοκιμίου με υπόστρωμα αλουμίνιο ως προς την τιμή του της κλίμακας -0,1 από τους υπόλοιπους.

5.3. Τραχύμετρο

Για τη λήψη μετρήσεων προφιλόμετρων της τραχύτητας, έπειτα από τις τριβολογικές δοκιμές στο τριβόμετρο τύπου Pin-On-Disk, από τα δοκίμια με τις επικαλύψεις κεραμικών οξειδίων ζirkονίας και αλουμίνιας (ZrO_2 και Al_2O_3), χρησιμοποιήθηκε το τραχύμετρο Surtronic 3+ (εικόνα 27) της εταιρείας Taylor Hobson Pneumo, του ιδρύματος Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (ΠΑ.Δ.Α), στο χώρο του εργαστηρίου Τριβολογίας, υπό την επίβλεψη έμπειρου διδακτικού προσωπικού.

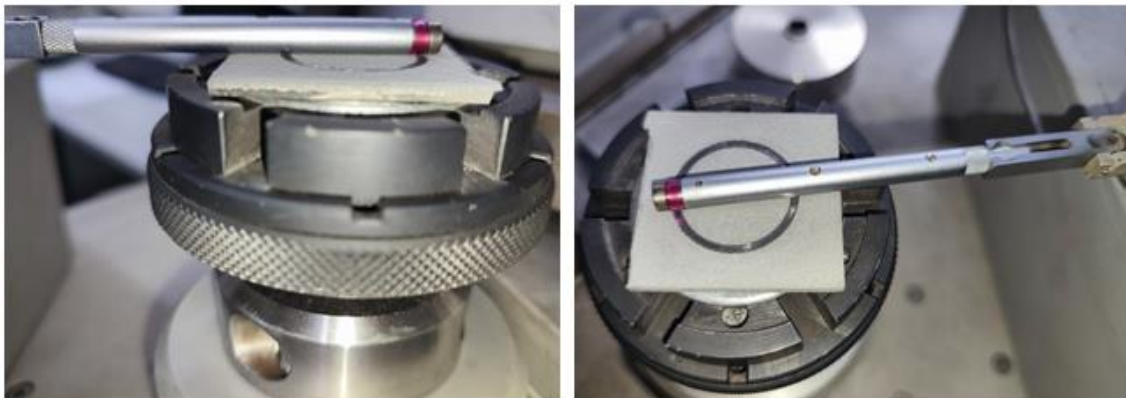


Εικόνα 27: Τραχύμετρο- Προφιλόμετρο Surtronic 3+ της εταιρείας Taylor Hobson Pneumo. [4]

5.3.1. Προσδιορισμός του όγκου φθοράς με τραχύμετρο

Για τη διεκπεραίωση του πειράματος χρήστηκε αναγκαίο:

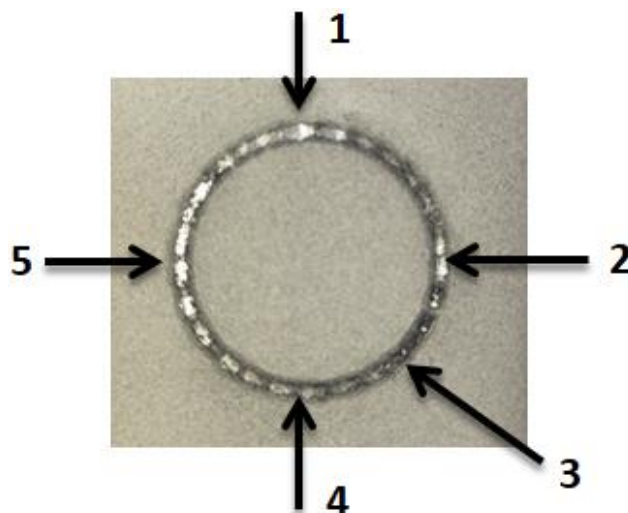
- Το κατάλληλο λογισμικό (TalyProfile), όπου μέσω αισθητήρων μετέφερε τις λήψεις των μετρήσεων στον υπολογιστή.
- Η διάταξη του τριβομέτρου τύπου Pin-On-Disk για την σταθερή στήριξη των δοκιμίων όπως φαίνεται και στην (εικόνα 28).



Εικόνα 28: Δοκίμιο τη στιγμή της τραχυμέτρησης.

5.3.2. Μετρήσεις

Για κάθε δοκίμιο έγιναν 5 διαφορετικές λήψεις μέτρησης σε κάθε διαφορετικό σημείο της αύλακας όπως φαίνεται στην (εικόνα 29) και ο προσδιορισμός του όγκου φθοράς στον (πίνακα 8).



Εικόνα 29: Ένδειξη λήψης μετρήσεων δοκιμίου με τραχύμετρο.

Επικάλυψη	ZrO₂	Al₂O₃	ZrO₂	Al₂O₃	ZrO₂	Al₂O₃	ZrO₂	Al₂O₃
Κωδικός	A3	B3	C4	D4	E4	F4	G4	H4
Υπόστρωμα	St	St	S.St	S.St	Al	Al	Ti	Ti
Φορτίο (N)	5	5	5	5	5	5	5	5
R(mm)	12	12	12	12	12	12	12	12
V (mm³)	20,538	3,743	18,602	4,620	15,351	1,345	8,529	3,553

Πίνακας 8: Μετρήσεις του μέσου όγκου φθοράς της αύλακας από τη σφαίρα αλουμίνιας του (Pin-On-Disk).

Οι όγκοι υπολογίστηκαν με βάση τον τύπο:

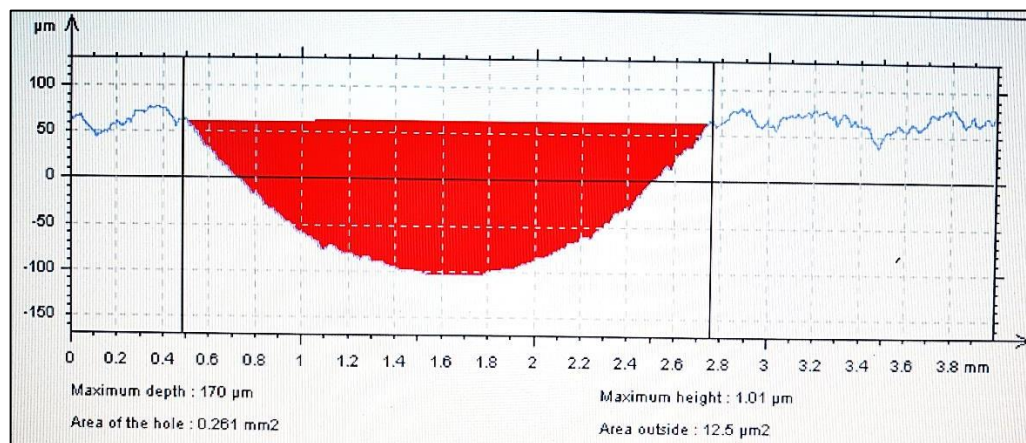
$$(20) \quad V = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \bar{S}$$

Όπου R η ακτίνα σε (mm) και \bar{S} το μέσο εμβαδό της αύλακας σε (mm²).

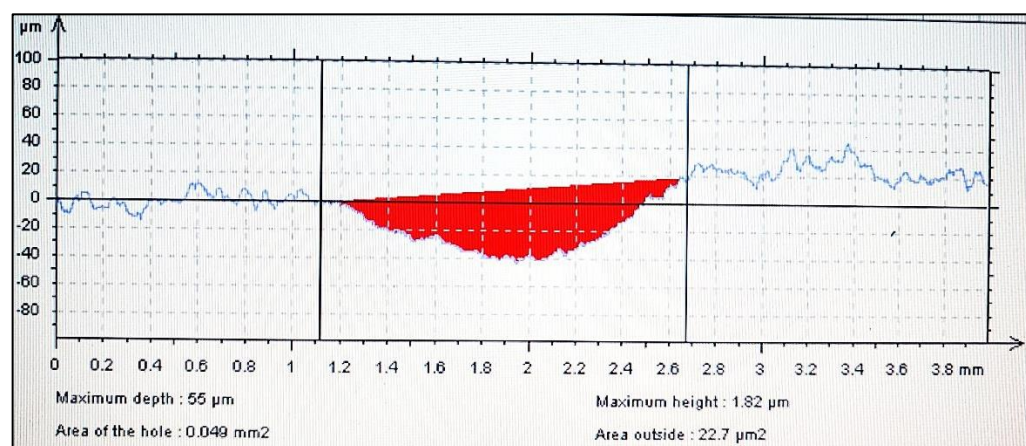
Οι μετρήσεις του όγκου φθοράς και του μέγιστου βάθους κάθε αύλακας φαίνονται στους (πίνακες 9,10,11 και 12) και προσδιορίστηκαν από τα παρακάτω προφίλ των (διαγραμμάτων 10,11,12,13,14,15,16 και 17) για κάθε αύλακα της επιφάνειας των 8 δοκιμίων σε (μm²) και (mm²), όπου σε κάποια έγινε μετατροπή των μονάδων σε (mm²), που δημιουργήθηκε από την πίεση που ασκούσε η σφαίρα αλουμίνιας του τριβομέτρου (Pin-On-Disk). Για κάθε δοκίμιο όπου έγιναν 5 λήψεις του προφίλ κάθε επιφάνειας και τα εμβαδά S. Ενδεικτικά εμφανίζονται 1 για κάθε δοκίμιο.

Υλικό	Κατασκευαστικός Χάλυβας			
	ΖΙΡΚΟΝΙΑ ZrO_2		ΑΛΟΥΜΙΝΑ Al_2O_3	
Επικάλυψη	ΖΙΡΚΟΝΙΑ ZrO_2		ΑΛΟΥΜΙΝΑ Al_2O_3	
Κωδικός δοκιμίων	A3		B3	
Φορτίο (N)	5		5	
R(mm)	12		12	
Μετρήσεις	h (μm)	S (μm ²)	h (μm)	S (μm ²)
1	170	261000	51,1	43600
2	203	313000	44,2	47000
3	192	278000	56,7	56100
4	174	245000	56,2	52500
5	182	265000	55	49000
MO	184,2	272400	52,64	49640
h(mm)&S(mm ²)	1,842	0,2724	0,5264	0,04964
V (mm ³)	20,5385		3,7428	

Πίνακας 9: Μετρήσεις του όγκου φθοράς V και του μέγιστου βάθους κάθε αύλακας h_{max} του δοκιμίου με υπόστρωμα κατασκευαστικού χάλυβα.



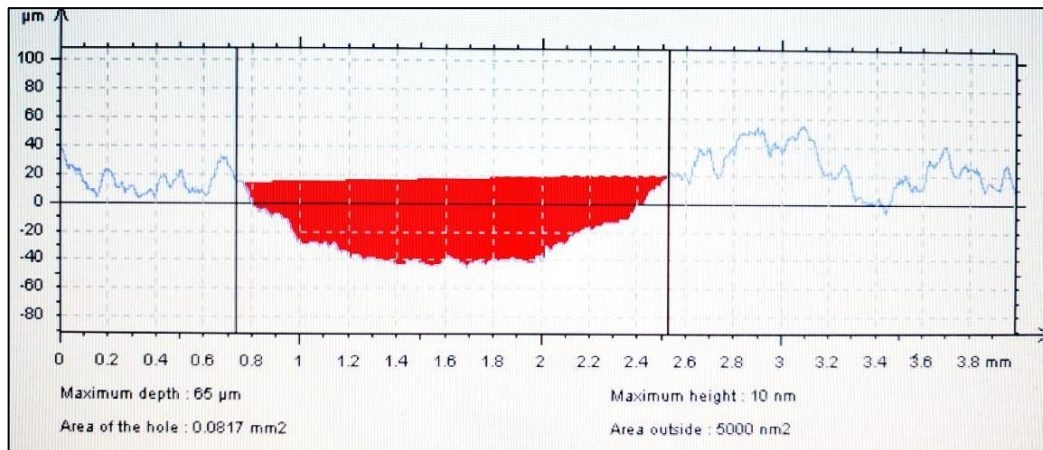
Διάγραμμα 10: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (A₃:ZrO₂-St).



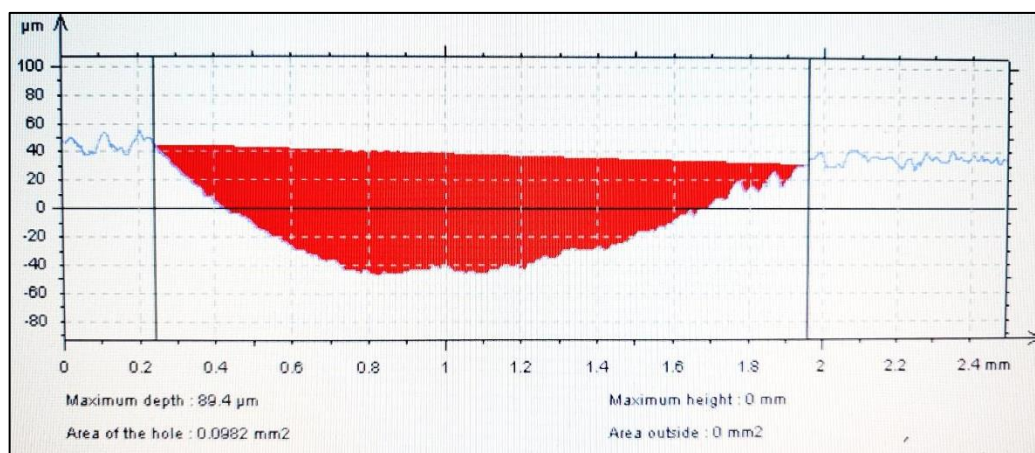
Διάγραμμα 11: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (B₃:Al₂O₃-St).

Υλικό	Ανοξειδωτος Χάλυβας			
	ΖΙΡΚΟΝΙΑ ZrO_2		ΑΛΟΥΜΙΝΑ Al_2O_3	
Επικάλυψη	ΖΙΡΚΟΝΙΑ ZrO_2		ΑΛΟΥΜΙΝΑ Al_2O_3	
Κωδικός δοκιμίων	C4		D4	
Φορτίο (N)	5		5	
R(mm)	12		12	
Μετρήσεις	h (μm)	S (μm ²)	h (μm)	S (μm ²)
1	66,7	88300	47,1	37642
2	97,1	116000	80,1	69600
3	108	141000	89,4	98200
4	65	817000	64,2	48700
5	59,9	71300	63	52200
MO	79,34	246720	68,76	61268,4
h(mm)&S(mm ²)	0,7934	0,24672	0,6876	0,0612684
V (mm ³)	18,6022		4,6195	

Πίνακας 10: Μετρήσεις του όγκου φθοράς V και του μέγιστου βάθους κάθε αύλακας h_{max} του δοκιμίου με υπόστρωμα ανοξειδωτου χάλυβα.



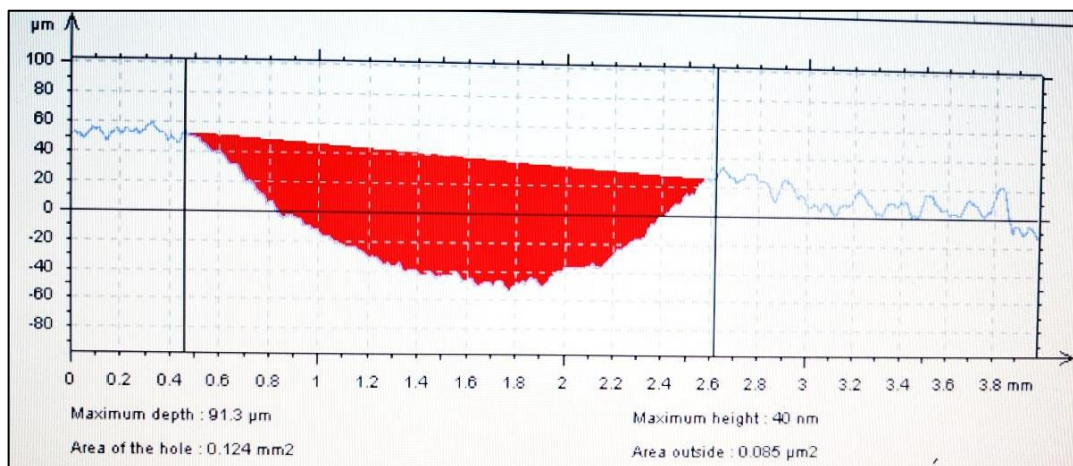
Διάγραμμα 12: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (C₄:ZrO₂-S.St).



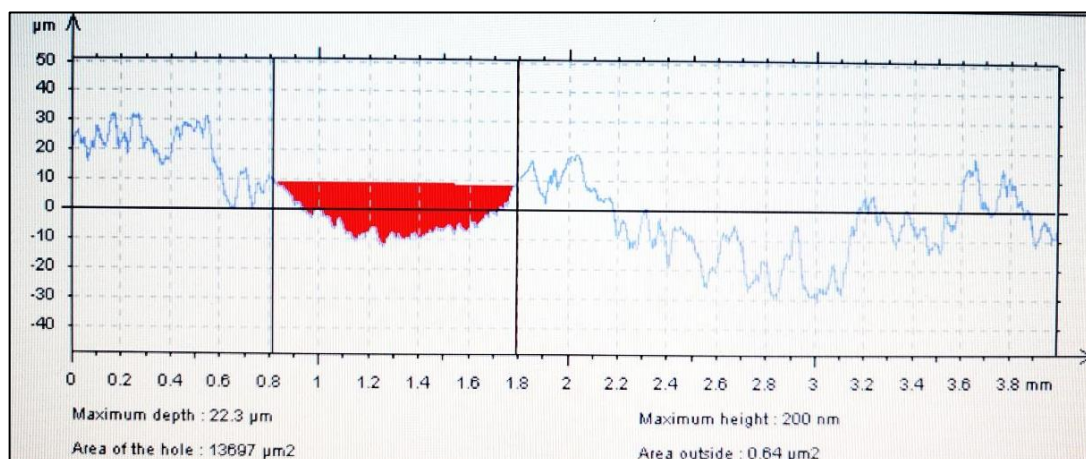
Διάγραμμα 13: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (D₄: Al₂O₃-S.St).

Υλικό	Αλουμίνιο			
Επικάλυψη	ΖΙΡΚΟΝΙΑ ZrO_2		ΑΛΟΥΜΙΝΑ Al_2O_3	
Κωδικός δοκιμίων	E4		F4	
Φορτίο (N)	5		5	
R(mm)	12		12	
Μετρήσεις	h (μm)	S (μm^2)	h (μm)	S (μm^2)
1	183	302000	22,3	13697
2	146	225000	29,7	22507
3	91,3	124000	24,6	13718
4	116	154000	24,5	16616
5	137	213000	28,5	22624
MO	134,66	203600	25,92	17832,4
h(mm)&S(mm ²)	1,3466	0,2036	0,2592	0,0178324
V (mm ³)	15,3511		1,3445	

Πίνακας 11: Μετρήσεις του όγκου φθοράς V και του μέγιστου βάθους κάθε αύλακας h_{max} του δοκιμίου με υπόστρωμα αλουμινίου.



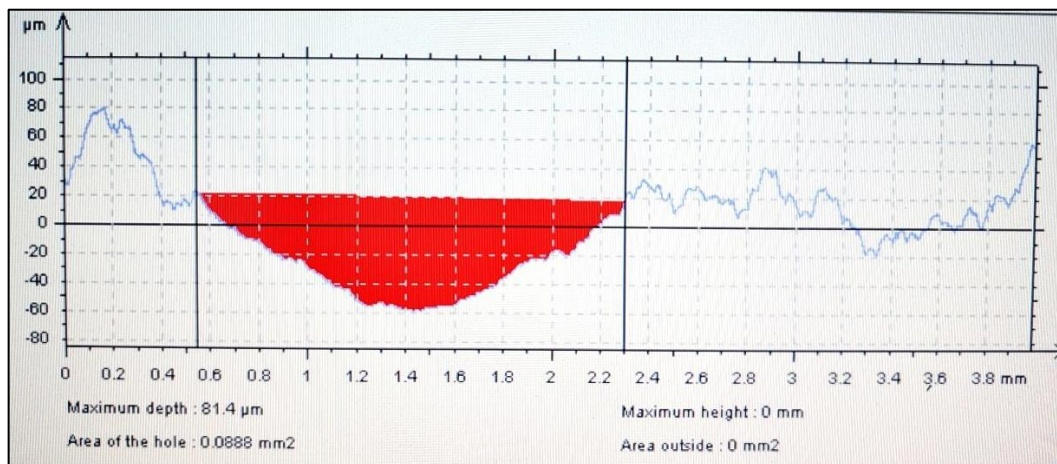
Διάγραμμα 14: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (E₄:ZrO₂-Al).



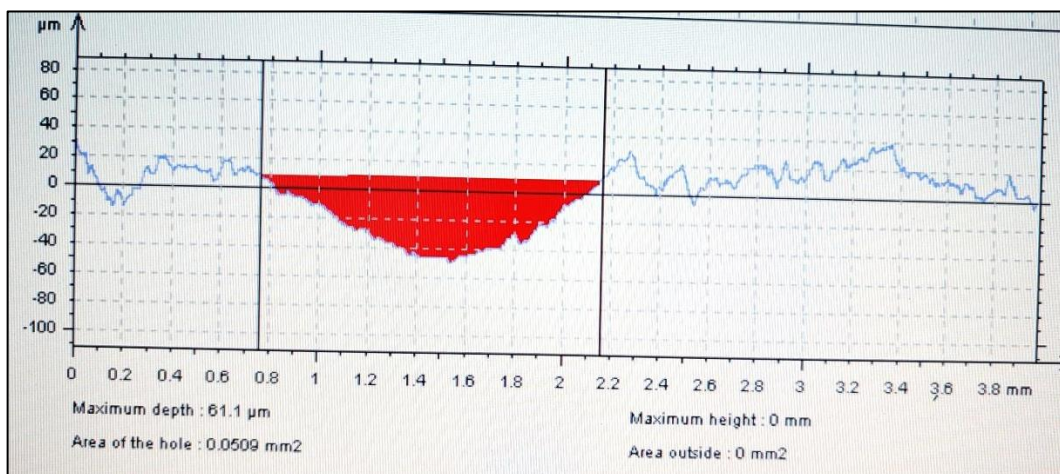
Διάγραμμα 15: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (F₄: Al₂O₃-Al).

Υλικό	Τιτάνιο			
Επικάλυψη	ΖΙΡΚΟΝΙΑ ZrO_2		ΑΛΟΥΜΙΝΑ Al_2O_3	
Κωδικός δοκιμίων	G4		H4	
Φορτίο (N)	5		5	
R(mm)	12		12	
Μετρήσεις	h (μm)	S (μm ²)	h (μm)	S (μm ²)
1	85,6	93800	57,7	47000
2	81,4	88800	61,1	50900
3	104	118000	56	40500
4	91,8	107000	48,8	39500
5	128	158000	67,7	57700
MO	98,16	113120	58,26	47120
h(mm)&S(mm ²)	0,9816	0,11312	0,5826	0,04712
V (mm ³)	8,5290		3,5528	

Πίνακας 12: Μετρήσεις του όγκου φθοράς V και του μέγιστου βάθους κάθε αύλακας h_{max} του δοκιμίου με υπόστρωμα τιτανίου.



Διάγραμμα 16: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (G₄:ZrO₂-Ti).

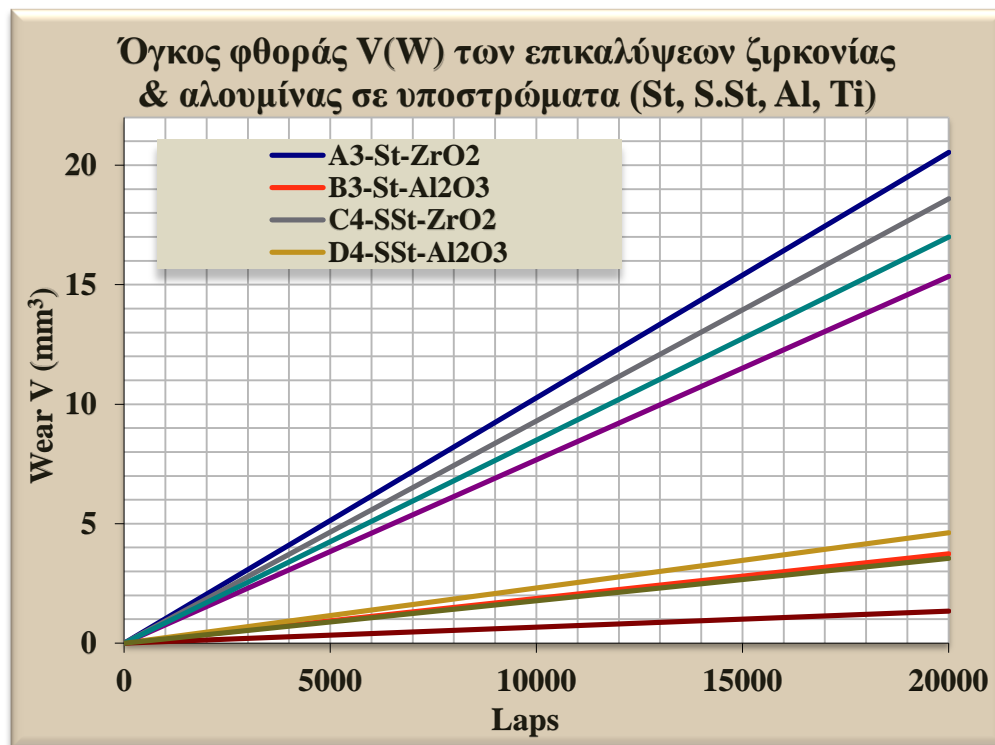


Διάγραμμα 17: Προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου με κωδικό (H₄: Al₂O₃-Ti).

Παραπάνω απεικονίζονται το προφίλ κάθε επιφάνειας όλων των δοκιμών. Οι αυλακώσεις με κόκκινο χρώμα είναι τα αποτυπώματα από τις τριβολογικές δοκιμές όπου άφησε το ανταγωνιστικό υλικό της διάταξης του Pin-On-Disk, η σφαίρα αλουμίνιας. Οι επικαλύψεις αυτές χωρίς ειδική κατεργασία επιφανείας εμφανίζουν υψηλή τραχύτητα μετά τον ψεκασμό τους. Είναι δύσκολο να διακρίνουμε ακριβώς το βάθος της αύλακας αλλά και το εμβαδό της, καθώς δεν γνωρίζουμε συγκεκριμένα από ποιο σημείο αρχίζει να δημιουργείται το βάθος της.

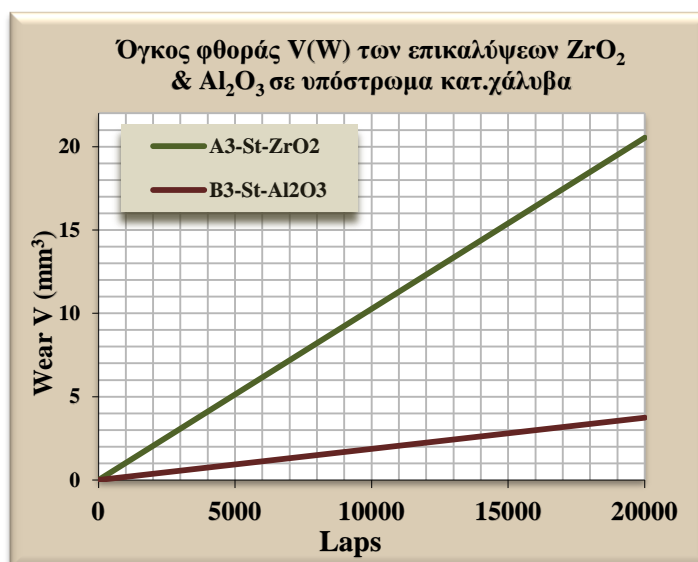
5.3.3. Διαγράμματα

Από τις παραπάνω μετρήσεις των δοκιμών με τη διάταξη του τραχυμέτρου, προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα που αναφέρονται του Όγκου Φθοράς $V(w)$ (mm^3) των αυλακώσεων, στις επικαλύψεις ζirkονίας και αλουμίνιας, που δημιουργήθηκαν έπειτα από τη διαδικασία τριβής ολίσθησης που έγινε στη διάταξη του τριβομέτρου. Με τα διαγράμματα αυτά μπορεί να γίνει εμφανή η σύγκριση του όγκου φθοράς, μεταξύ των επικαλύψεων (ZrO_2 και Al_2O_3), των διαφορετικών υποστρωμάτων (κατασκευαστικού χάλυβα, ανοξειδωτού χάλυβα, αλουμινίου και τιτανίου) κάθε δοκιμίου.

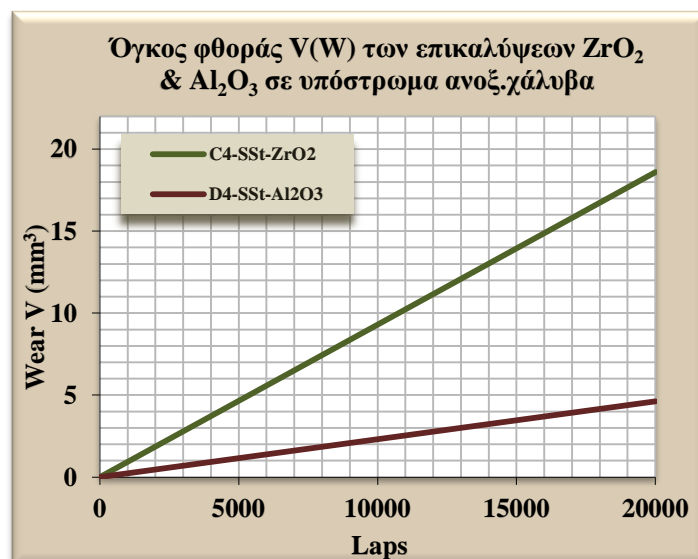


Διάγραμμα 18: Όγκος φθοράς $V(w)$ (mm^3) των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO_2 και αλουμίνιας Al_2O_3 σε υποστρώματα κατασκευαστικού χάλυβα (St), ανοξειδωτού χάλυβα (S.St), αλουμινίου (Al) και τιτανίου (Ti), συναρτήσεως του αριθμού περιστροφών.

Στο συγκεντρωτικό (διάγραμμα 18) εμφανίζεται πως η περισσότερη φθορά έχει δημιουργηθεί στην επίστρωση της ζιρκονίας. Επίσης η φθορά είναι διαφορετική σε κάθε επικάλυψη καθώς οι ευθείες δεν συμπίπτουν η μία πάνω στην άλλη. Ακόμα παρατηρούμε πως η επίστρωση της αλουμίνας υπέστη λιγότερη φθορά άρα λιγότερη αφαίρεση υλικού της επικάλυψής της, σε σύγκριση με την ζιρκονία.



Διάγραμμα 19: Όγκος φθοράς $V(w)$ (mm^3) των επικαλύψεων ζιρκονίας ZrO_2 και αλουμίνας Al_2O_3 σε υπόστρωμα κατασκευαστικού χάλυβα (St), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.

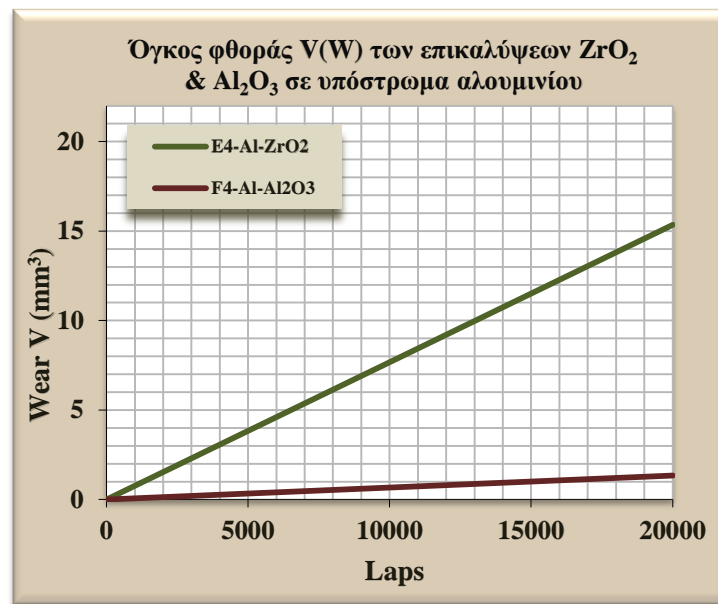


Διάγραμμα 20: Όγκος φθοράς $V(w)$ (mm^3) των επικαλύψεων ζιρκονίας ZrO_2 και αλουμίνας Al_2O_3 σε υπόστρωμα ανοξειδωτού χάλυβα (S.St), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.

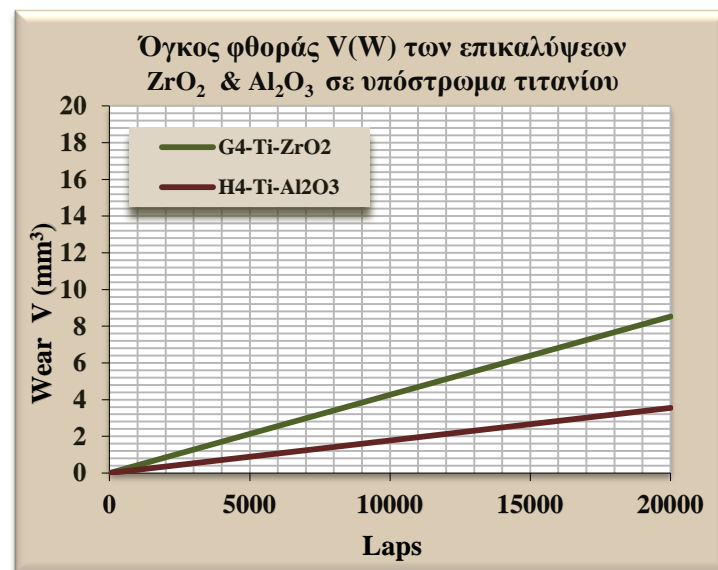
Ο όγκος υλικού που αφαιρέθηκε κατά τη διάρκεια της τριβής στο δοκίμιο A_3 όπως εμφανίζεται στο (διάγραμμα 19) με επίστρωση ζιρκονίας είναι $20,54 \text{ mm}^3$ και του

δοκιμίου B₃ με επίστρωση αλουμίνας είναι 3,74 mm³, άρα σχεδόν 5 φορές περισσότερη, από την φθορά της αλουμίνας.

Ο όγκος υλικού που αφαιρέθηκε κατά τη διάρκεια της τριβής στο δοκίμιο C₄ όπως εμφανίζεται στο (διάγραμμα 20) με επίστρωση ζirkονίας είναι 18,6 mm³ και του δοκιμίου D₄ με επίστρωση αλουμίνας είναι 4.62 mm³, άρα σχεδόν 4 φορές περισσότερη, από την φθορά της αλουμίνας.



Διάγραμμα 21: . Όγκος φθοράς V(w) (mm³) των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO₂ και αλουμίνας Al₂O₃ σε υπόστρωμα αλουμινίου (Al), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.



Διάγραμμα 22: . Όγκος φθοράς V(w) (mm³) των επικαλύψεων ζirkονίας ZrO₂ και αλουμίνας Al₂O₃ σε υπόστρωμα και τιτανίου (Ti), συναρτήσει του αριθμού περιστροφών.

Ο όγκος υλικού που αφαιρέθηκε κατά τη διάρκεια της τριβής στο δοκίμιο E₄ όπως εμφανίζεται στο (διάγραμμα 21) με επίστρωση ζirkονίας είναι 15.35 mm³ και του δοκιμίου F₄ με επίστρωση αλουμίνιας είναι 1.34 mm³, άρα σχεδόν 11 φορές περισσότερη, από την φθορά της αλουμίνιας.

Ο όγκος υλικού που αφαιρέθηκε κατά τη διάρκεια της τριβής στο δοκίμιο G₄ όπως εμφανίζεται στο (διάγραμμα 22) με επίστρωση ζirkονίας είναι 8.53 mm³ και του δοκιμίου H₄ με επίστρωση αλουμίνιας είναι 3,55 mm³, άρα σχεδόν 2.5 φορές περισσότερη, από την φθορά της αλουμίνιας.

5.4.Πειραματική διάταξη τριβομέτρου τύπου (3ων Σωμάτων) ξηρής εκτριβής

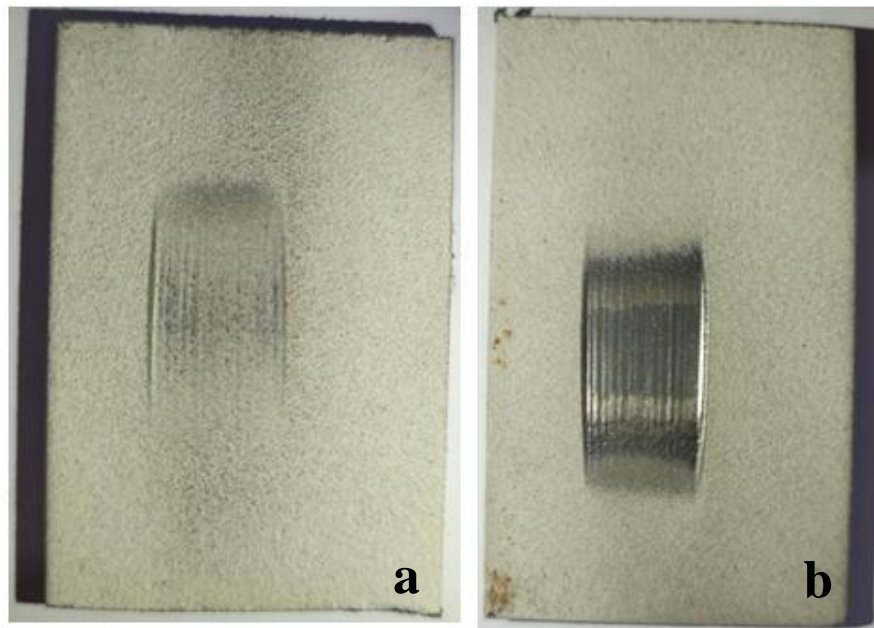
Τα δοκίμια κατασκευαστικού χάλυβα διαστάσεων (40x60mm) με επικαλύψεις ζirkονίας και αλουμίνιας, υποβλήθηκαν σε τριβολογικές δοκιμές στη διάταξη (3ων σωμάτων) ξηρής εκτριβής της (εικόνας 30) σύμφωνα με την προδιαγραφή ISO 28080:2011, η οποία περιλαμβάνει τις προδιαγραφές κατά ASTM G65, G105 και B611, του ιδρύματος Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (ΠΑ.Δ.Α), στο χώρο του εργαστηρίου Τριβολογίας, υπό την επίβλεψη έμπειρου διδακτικού προσωπικού. [36]



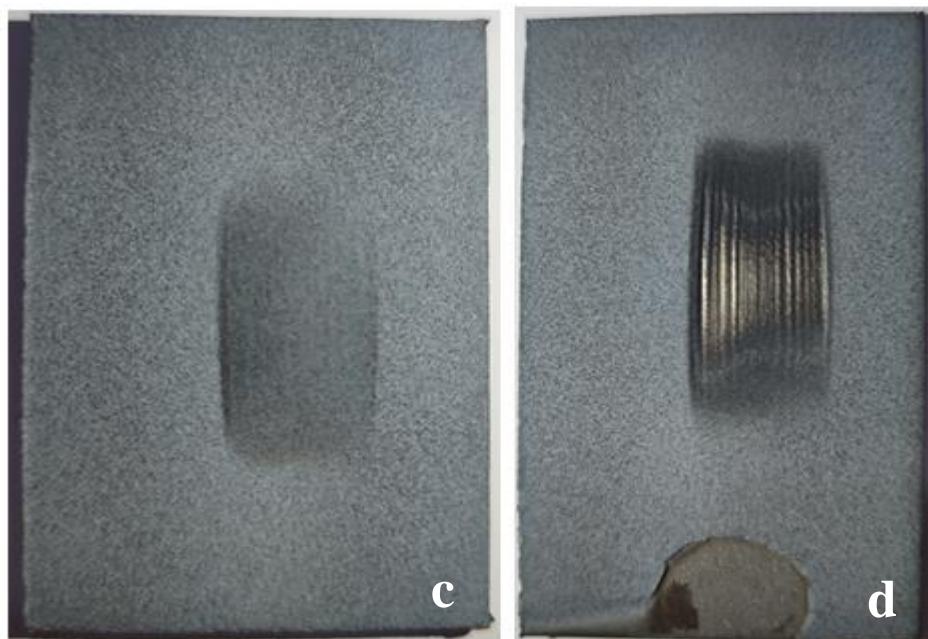
Εικόνα 30: Διάταξη τριβομέτρου τύπου (3ων σωμάτων).

Η λειτουργία της παραπάνω διάταξης είναι ενώ περιστρέφεται ο κυκλικός δίσκος, που είναι υπενδεδυμένος με ελαστικό, εφαπτομενικά της επιφάνειας του δοκιμίου, πιέζοντάς την με φορτίο 130Nt, να εισχωρεί η σκόνη πυριτίου ενδιάμεσα και να λειτουργεί ως 3^ο λειαντικό σώμα που φθείρει την επιφάνεια που θέλουμε.

5.4.1. Δοκίμια έπειτα από δοκιμή τριβής στη διάταξη τριβομέτρου τύπου (3ων Σωμάτων)



Εικόνα 31: Δοκιμή τριβής έπειτα από χρόνο a) 30sec και b) 300sec σε επίστρωση ζιρκονίας.

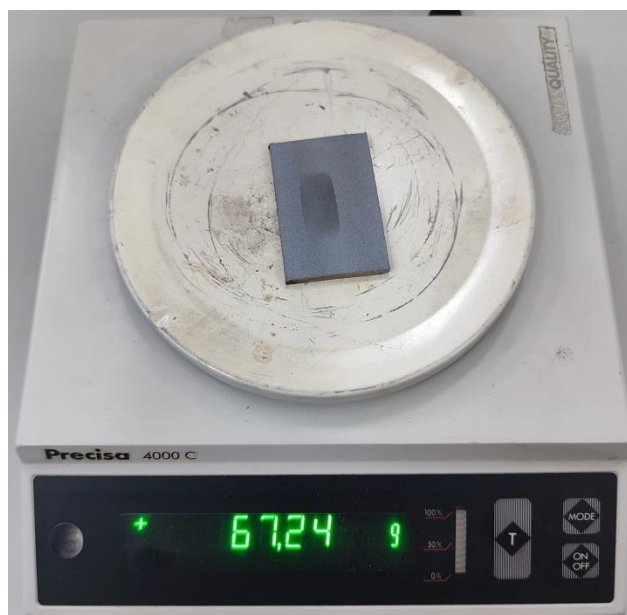


Εικόνα 32: Δοκιμή τριβής έπειτα από χρόνο c) 30sec και d) 300sec σε επίστρωση αλουμίνιας.

Προφανώς εμφανίζεται μεγαλύτερη φθορά στη δοκιμή των 5 λεπτών και στις δύο επικαλύψεις των (εικόνων 31 και 32). Συγκριτικά στη δοκιμή διαρκείας 30 δευτερολέπτων παρατηρείται βαθύτερη φθορά στην επικάλυψη της ζirkονίας του δοκιμίου A₂, από του δοκιμίου B₂.

5.4.2. Λήψη βάρους πριν και μετά την δοκιμή τριβής – Μετρήσεις

Οι μετρήσεις βάρους σε (gr) που έγιναν σε καθένα από τα δοκίμια (A₁, A₂, B₁, B₂) για να υπολογιστεί η μείωση μάζας, από την φθορά που δημιουργήθηκε λόγω τριβής, έγιναν στις παρακάτω ζυγαριά ακριβείας της (εικόνας 33).



Εικόνα 33: Ενδεικτικά η λήψη μέτρησης βάρους δοκιμίου B₂ επικάλυψης (Al₂O₃) μετά την δοκιμή των 30sec.

Παρακάτω βρίσκεται ο συγκεντρωτικός (πίνακας 13) με τις παραμέτρους του πειράματος και τα βάρη των δοκιμίων πριν και μετά τη κάθε δοκιμή τριβής.

Κατασκευαστικός χάλυβας			ΖΙΡΚΟΝΙΑ ZrO ₂		ΑΛΟΥΜΙΝΑ Al ₂ O ₃	
Κωδικός δοκιμίων			A2	A1	B2	B1
Τριβόμετρο 3ων Σωμάτων κατά ASTM G65	Βάρος (gr)	Αρχ	68,08	77,26	67,27	78,27
		Τελ	67,94	76,82	67,24	78,09
		Διαφορά	0,14	0,44	0,03	0,18
	Ταχ.Περ ω (rpm/min)		200	200	200	200
	Κύκλους		100	1000	100	1000
	Χρόνος (sec)		30	300	30	300
	Φορτίο (N)		130	130	130	130

Πίνακας 13: Μετρήσεις βάρους (gr) με τον ζυγό ακριβείας έπειτα από τη δοκιμή τριβής στη διάταξη 3ων σωμάτων.

5.4.3. Διάγραμμα

Από τις παραπάνω μετρήσεις των δοκιμών, προέκυψε το παρακάτω (διάγραμμα 23) που αναφέρεται στο αφαιρούμενο υλικό, με τη μέτρηση του βάρους W (gr) κάθε δοκιμίου διαστάσεων (40x60 mm), με ζυγαριά ακριβείας (0,01gr), από τις επικαλύψεις Ζιρκονίας και Αλουμίνας, κατά το πρότυπο ASTM G65 έπειτα από εμπλοκή σε διαδικασία τριβής με την πειραματική διάταξη 3ων Σωμάτων. Με το διάγραμμα αυτό μπορεί να γίνει εμφανή η σύγκριση φθοράς, μεταξύ των επικαλύψεων (ZrO_2 και Al_2O_3) υποστρώματος κατασκευαστικού χάλυβα.



Διάγραμμα 23: Απεικόνιση διαφοράς μάζας πριν & μετά την δοκιμή τριβής για κάθε επικάλυψη.

Από το παραπάνω (διάγραμμα 23) συμπεραίνουμε πως οι επικαλύψεις της ζιρκονίας και στις δύο δοκιμές των 30 και 300 δευτερολέπτων έχουν μεγαλύτερη μείωση του βάρους τους άρα και μεγαλύτερη φθορά λόγω τριβής τους από τη διάταξη, από την επικάλυψη της αλουμίνας.

Ακόμα η διαφορά μείωσης της μάζας στη δοκιμή των 30 και 300 δευτερολέπτων αντίστοιχα, για κάθε επικάλυψη ξεχωριστά, είναι:

- Για την επικάλυψη ZrO_2 στα δοκίμια B₂-B₁ (για 30 sec:0,14 gr και για 300 sec:0,44 gr)
- Για την επικάλυψη Al_2O_3 στα δοκίμια A₂-A₁ (για 30 sec:0,03 gr και για 300 sec:0,18 gr).

[Κενή σελίδα]

Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα εργασία αποτέλεσε κίνητρο ενασχόλησης και διερεύνησης της τριβολογικής συμπεριφοράς κεραμικών επικαλύψεων αλουμίνας και ζirkονίας, που έχουν εναποτεθεί στις επιφάνειες μεταλλικών υποστρωμάτων δομικού και ανοξειδωτού χάλυβα, αλουμινίου και τιτανίου, με την τεχνική εναπόθεσης του ατμοσφαιρικού ψεκασμού πλάσματος.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση, λειτούργησε ως κατευθυντήριο όργανο για την διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας και οδήγησε τη πειραματική διαδικασία σε σπουδαίο επίπεδο προς ανάλυση.

Έπειτα από τη δημιουργία των επικαλύψεων, τη διεξαγωγή των δοκιμών τριβής και φθοράς, την όλη μελέτη που πραγματοποιήθηκε και των τελικών αποτελεσμάτων που αποκαλύφθηκαν μέσω των τελικών μετρήσεων υπό μορφή γραφημάτων, καταλήγουμε στα παρακάτω συνοπτικά συμπεράσματα.

Τα ψήγματα φθοράς που δημιουργήθηκαν κατά την διαδικασία τριβής στη διάταξη τύπου pin-on-disk, αρχικά αποτέλεσαν την πρώτη γενική εικόνα σύγκρισης των δύο κεραμικών επικαλύψεων. Η ποσότητα των ψηγμάτων φθοράς, που βρισκόντουσαν στην επιφάνεια των δοκιμίων της επικάλυψης ζirkονίας, έπειτα από τις δοκιμές, ήταν εμφανώς μεγαλύτερη από την ποσότητα ψηγμάτων φθοράς της επικάλυψης αλουμίνας. Αυτό δηλαδή σημαίνει πως η φθορά που προκλήθηκε στην επικάλυψη ζirkονίας ήταν μεγαλύτερη. Επιπροσθέτως η επικάλυψη αλουμίνας παρουσίασε υψηλότερο συντελεστή τριβής μ.

Η καινοτόμος ιδέα, το να προσδιοριστεί ο όγκος φθοράς από την αύλακα που δημιούργησε η σφαίρα αλουμίνας στη διάταξη τύπου pin-on-disk, με τη βοήθεια του τραχυμέτρου, όπου ήταν δυνατή η εμφάνιση του προφίλ της τομής κάθε επιφάνειας άρα και η επιφάνεια των τομών των αυλακώσεων, έδειξε πως η επικάλυψη της αλουμίνας παρουσίασε χαμηλότερο όγκο αποβαλλόμενου υλικού άρα χαρακτηρίζεται ως πιο ανθεκτική στη φθορά λείανσης.

Σχετικά με τις δοκιμές στη διάταξη προσδιορισμού της φθοράς συστήματος τριών σωμάτων, συγκρίνοντας τις μάζες αποβαλλόμενου υλικού, η επικάλυψη αλουμίνας

παρουσίασε χαμηλότερη μάζα αποβαλλόμενου υλικού άρα και πάλι χαρακτηρίζεται ως πιο ανθεκτική στη φθορά λείανσης όπως και ήταν προβλεπόμενο από τις πληροφορίες του κατασκευαστή της πούδρας αλουμίνιας.

Τέλος παρατηρήθηκε πως δεν επηρεάζεται η ανθεκτικότητα της επικάλυψης από το υπόστρωμα καθώς όλα τα δοκίμια με τις κοινές επικαλύψεις παρουσίασαν παρόμοιες ιδιότητες.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα μπορούσαν να γίνουν περαιτέρω διερευνητικές διαδικασίες όπως:

- Δημιουργία μεικτών επικαλύψεων αλουμίνιας Al_2O_3 και ζιρκονίας ZrO_2 .
- Επιλογή διαφορετικών παραμέτρων στις διατάξεις τριβής και φθοράς (φορτίο, μήκος ολίσθησης, χρόνος και ταχύτητα).
- Εξέταση/χαρακτηρισμός των επικαλύψεων με τις μεθόδους της περίθλασης ακτινών X και της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM).
- Προσδιορισμός του πορώδους κάθε επικάλυψης.
- Μετρήσεις σκληρότητας και μικρο-σκληρότητας των επικαλύψεων.

Βιβλιογραφία

- [1] Μηχανική Επιφανειών και Εφαρμογές: Τριβολογία, Στοιχεία Μηχανών και Επιφανειακές Κατεργασίες, Πανδώρα Π. Ψυλλάκη-Παντελής Νικολακόπουλος . Εκδόσεις Τζιόλα (Ελλάδα 2021).
- [2] Manufacturing – Engineering and Technology, Serope Kalpakjian, Steven R.Schmid, Εκδόσεις Τζιόλα 7η Έκδοση, (Ελλάδα 2020).
- [3] Μεταλλογνωσία, Γεώργιος Κ. Τριανταφυλλίδης, Εκδόσεις Τζιόλα 3η Έκδοση, (Ελλάδα 2014-2016).
- [4] PDF. Α.Μουρλάς, Σημειώσεις Μαθήματος Μηχανικής Επιφανειών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.
- [5] <http://gr.lksteelpipe.com/4130-alloy-steel-bar>
- [6] Mechanical properties of metals and alloys: <https://doi.org/10.1016/B978-075067509-3/50025-7>
- [7] Κεραμικά υλικά: <https://www.preciseceramic.com/blog/types-and-applications-of-all-kinds-of-ceramic-materials/>
- [8] Engineering Tribology, Third Edition, Gwidon W, Stachowiak, Andrew W, Batchelor, USA (2005) Elsevier Inc Butterworth-Heinemann.
- [9] Handbook of Surface Treatments and coatings, Tribology in Practice Series, HEF Groupe coordinated by Michel Cartier, M J Neale, T A Polak, M Priest, London (2003).
- [10] TRIBOLOGY SERIES, 44 Editor: D. Dowson, EXPERIMENTAL METHODS IN TRIBOLOGY Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor Grazyna B. Stachowiak, (2004) Elsevier.
- [11] Improvement of the Tribological Properties of Alumina Coatings by Zirconia, Addition Jacob Shiby Mathew , Liutauras Marcinauskas, Mitjan Kalin, Romualdas Keželis, Žydrunas Kavaliauskas, Giedrius Gecevičius and Vytautas Capas, Switzerland 2021.
- [12] Powders for Plasma Spray: <https://mymetco-europe.oerlikon.com/en-us/>
- [13] <http://www accuratus.com/alumox.html>
- [14] Corrosion resistance and hydrophilic properties of plasma sprayed Ni+5% Al coatings Mojtaba Rezaee Hajideh a , Mohammadreza Farahani, Mohammadjavad Pakravan b , Ali Shahmirzalo, Heliyon (2019) e01920. Elsevier.

- [15] Potential applications of thermal spray coating for I.C. engine tribology: A Review Sonia, R.S. Walia , N.M. Suri, Sumit Chaudhary , and Ankit Tyagi, (2021).
- [16] Davis 2004 J.R. Davis, Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International, USA, 2004, pp. 3-13, 78, 80-82.
- [17] Dorfman 2002M. R. Dorfman, Thermal spray processes, Advanced Materials & Processes, vol. 160(8), 2002, pp. 47-49.
- [18] [Struers] www.struers.com, Metallographic preparation of thermal spray coatings, Struers, Application notes.
- [19] Χρυσουλάκης κ.ά. 1996] Γ. Χρυσουλάκης, Δ. Παντελής, «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα 1996.
- [20] Abrasive Blasting Systems, Dave Hansel, Clemco Industries Corp, San Francisco.
- [21] Tribology and Fundamentals of Abrasive Machining Processes, Bahman Azarhoushang, Ioan D. Marinescu, W. Brian Rowe, Boris Dimitrov, Hitoshi Ohmori, 3th Edition, 2022.
- [22] Υλικό από Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία Α.Ε, Σχηματάρι 2022.
- [23] Πτυχιακή εργασία: Επικαλύψεις αλουμίνας και χρωμίας με θερμικό ψεκασμό πλάσματος, Χρ. Μιχαλοστάμου, Ηράκλειο 2015.
- [24] <https://www.indiamart.com/proddetail/thermal-insulation-tapes-12723865748.html>.
- [25] <https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/trb3-pin-on-disk-tribometer/>.
- [26] G 99 – 04 Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus.
- [27] <http://www.chemistryexplained.com/elements/A-C/Aluminum.html>.
- [28] <http://www.chemistryexplained.com/elements/T-Z/Zirconium.html>.
- [29] Μικρομηχανισμοί φθοράς σύνθετων επικαλύψεων WC-Co/Cr - NiCrFeBSiC. Μέρος I: Ξηρή Ολίσθηση, Δ. Κεκές, Π. Ψυλλάκη, Μ. Βαρδαβούλιας, 2014.
- [30] Μικροδομή και μηχανισμοί φθοράς της επικάλυψης αλουμίνας με θερμικό Ψεκασμό, Π. Ψυλλάκη, Μ. Jeandin, Δ.Ι. Παντελής, 2001.
- [31] Τριβολογικές επικαλύψεις για αεροδιαστημικές εφαρμογές και η περίπτωση των επικαλύψεων ψεκασμού πλάσματος WC-Co, Α. Κουτσομιχάλης, Ν. Βαξεβανίδης, Γ. Πετρόπουλος, Ε. Χατζάκη, Α. Μουρλάς, Σ. Αντωνίου, 2009.
- [32] Πτυχιακή εργασία: «Τριβολογική συμπεριφορά επικαλύψεων αλουμινίου: Al₂O₃ και Al-Si-Polyester», Κ. Τράκα, Τ.Ε.Ι Πειραιά, Αιγάλεω 2010.

- [33] A Review on Thermal Spray Coating Processes, Sagar Amin, Hemant Panchal, International Journal of Current Trends in Engineering & Research (IJCTER),2016.
- [34] Σημειώσεις από Τ.Ε.Ι Μακεδονίας, του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών και Βιομηχανικής Σχεδίασης,
- [35] <https://www.semicore.com/news/94-what-is-dc-sputtering>
- [36] Πτυχιακή εργασία: «Κατασκευή πειραματικής συσκευής ξηρής εκτριβής», Ε. Τουκάι, Τ.Ε.Ι Πειραιά, Αιγάλεω 2014.
- [37] Microstructure and properties of Al₂O₃-ZrO₂ composite coatings prepared by air plasma spraying Yi-da Chena, Yong Yanga, Zhen-hua Chua, Xue-guang Chena, Lei Wanga, Zhe Liua, Yan-chun Donga, Dian-ran Yana, Jian-xin Zhanga, Zhi-long Kang, 2018.
- [38] Friction and wear behaviour of ZrO₂-Al₂O₃ composite coatings deposited by air plasma spraying: Correlation with physical and mechanical properties. Liang, B, Zhang, G, Liao, H, Coddet, C, Ding, C. Surf. Coat. Technol. 2009, 203, 3235–3242.
- [39] Effects of the sliding conditions on the tribological behaviour of atmospheric plasma sprayed Al₂O₃-15 wt.% ZrO₂-CaF₂ composite coating. Kim, S, Hannul, P, Lee, W. Surf. Coat. Technol. 2012, 210, 27–134.
- [40] Properties of Al₂O₃-40 wt.% ZrO₂ composite coatings from ultra-fine feedstocks by atmospheric plasma spraying. Zhao, X, An, Y, Chen, J, Zhou, H, Yin, B. Wear 2008, 265, 1642–1648.
- [41] Laser remelting of plasma-sprayed nanostructured Al₂O₃ 20 wt.% ZrO₂ coatings onto 316L stainless steel. Yu, J, Wang, Y, Zhou, F, Wang, L, Pan, Z. Appl. Surf. Sci. 2018, 431, 112–121.
- [42] Microstructure and properties of Al₂O₃-ZrO₂-Y₂O₃ composite coatings prepared by plasma spraying, Zhang, X, Wang, Y, Sun, W, Yang, Y, Zhang, C, Ma, Y, Cui, Y, Zhao, C, Wang, L, Dong, Y, et al. J. Therm. Spray Technol. 2020, 29, 967–978.
- [43] Fabrication and properties of plasma-sprayed Al₂O₃/ZrO₂ composite coatings. Dejang, N, Limpichaipanit, A, Watcharapasorn, A, Wirojanupatump, S, Niranatlumpong, P, Jiansirisomboon, S. J. Therm. Spray Technol. 2011, 20, 259–1268.
- [44] Tingaud, O.; Bertrand, P.; Bertrand, G. Microstructure and tribological behavior of suspension plasma sprayed Al₂O₃ and Al₂O₃-YSZ composite coatings. Surf. Coat. Technol. 2010, 205, 1004–1008.

- [45] Υλικά, δομή και τεχνολογικές εφαρμογές, Donald R, Wendelin J, Εκδόσεις Τζιόλα, 2018.