



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ)

“ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ”

**ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ
& ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ
ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ (Al_2O_3) & ΤΙΤΑΝΙΑΣ (TiO_2)**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΝΟΜΑ:

ΞΙΦΑΡΑΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΠΤΥΧΙΟΥΧΟΣ ΣΧΟΛΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΕΡΟΠΟΡΙΑΣ (ΣΜΑ)

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Α. ΚΟΥΤΣΟΜΙΧΑΛΗΣ, Καθηγητής Σχολής Ικάρων

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ)

“ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ”

**ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ
& ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ
ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ (Al_2O_3) & ΤΙΤΑΝΙΑΣ (TiO_2)**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΝΟΜΑ:

ΞΙΦΑΡΑΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΠΤΥΧΙΟΥΧΟΣ ΣΧΟΛΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΕΡΟΠΟΡΙΑΣ (ΣΜΑ)

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Κ. ΚΟΛΛΙΑ, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Α. ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2020

*Αφιερώνεται
στην σύζυγο και την μικρή μου κόρη...*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u>	ΕΙΣΑΓΩΓΗ
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</u>	ΕΙΔΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</u>	ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</u>	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</u>	ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΣΤΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ ΤΗΣ ΠΟΛΕΜΙΚΗΣ ΑΕΡΟΠΟΡΙΑΣ
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</u>	ΑΠΟΘΕΣΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ ΤΙΤΑΝΙΑΣ
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7</u>	ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ - ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8</u>	ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΚΑΙ ΚΟΠΩΣΗ
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9</u>	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Περίληψη

Αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας, που εκπονήθηκε στα πλαίσια του ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών, είναι η μελέτη της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων των επικαλύψεων πλάσματος αλουμίνας (Al_2O_3) – τιτανίας (TiO_2).

Για την μελέτη των προαναφερθέντων επικαλύψεων πραγματοποιήθηκε η απόθεση της σκόνης Metco 101NS με ψεκασμό πλάσματος σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, πάνω σε ελάσματα και κυλινδρικά δοκίμια από αλουμίνιο. Τα ελάσματα χρησιμοποιήθηκαν σε δοκιμασίες εφελκυσμού ενώ τα κυλινδρικά δοκίμια σε δοκιμασίες κόπωσης.

Στα κεφάλαια 2, 3, 4 και 5 που αποτελούν το θεωρητικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιέχεται το αναγκαίο θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τις επιφανειακές κατεργασίες, με μεγαλύτερη έμφαση στο θερμικό ψεκασμό και πιο συγκεκριμένα τον ψεκασμό πλάσματος. Επιπροσθέτως γίνεται αναφορά σχετικά με τις κεραμικές επικαλύψεις και τις εφαρμογές τους στα αεροσκάφη της Πολεμικής Αεροπορίας. Αντίστοιχως, στο θεωρητικό κομμάτι, περιέχεται εκτενής αναφορά στις διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των επικαλύψεων.

Στα κεφάλαια 6, 7 και 8 που αποτελούν το πειραματικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιέχονται οι διαδικασίες απόθεσης της επικάλυψης, η μεταλλογραφική και μικροσκοπική ανάλυση των επικαλύψεων και οι δοκιμές εφελκυσμού και κόπωσης. Η απόθεση των επικαλύψεων έγινε στην ΠΥΡΟΓΕΝΕΣΙΣ Α.Β.Ε.Ε ενώ η μεταλλογραφική και η μικροσκοπική ανάλυση καθώς και οι δοκιμές εφελκυσμού και κόπωσης στο Εργοστάσιο Τηλεπικοινωνιακών και Ηλεκτρονικών μέσων της Πολεμικής Αεροπορίας (Ε.Τ.Η.Μ).

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με το κεφάλαιο 9 όπου παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των ευρημάτων καθώς και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τις πειραματικές διαδικασίες. Η επικάλυψη που αποτέθηκε στα υποστρώματα υποβάθμισε σε αξιοσημείωτο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες του συστήματος (υπόστρωμα – επίστρωμα) και πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε μεγαλύτερη υποβάθμιση, αυξανόμενου του πάχους της επικάλυψης.

Summary

The purpose of this dissertation, which was held due to my participation at IPP “Materials Science and Technology, is the study and analysis of microstructure and mechanical properties of Alumina (Al_2O_3) – Titania (TiO_2) plasma spray coatings.

In order study the aforementioned coatings, Metco 101NS powder was deposited via plasma spray technique under atmospheric conditions, on aluminum plates and cylinders. The plates were used in tensile tests while the cylindrical ones were used in fatigue tests.

Chapters 2, 3, 4 and 5, which are the theoretical part of this dissertation, contain the necessary theoretical background on surface treatments, with greater emphasis on thermal spraying and more specifically plasma spraying. In addition, there is a report on ceramic coatings and their applications in Hellenic Air Force’s aircrafts. Correspondingly, in the theoretical part, there is an extensive reference to the various methods used to coatings characterization.

Chapters 6, 7 and 8, which are the experimental part of this dissertation, contain the coating deposition procedures, the metallographic and microscopic analysis of the coatings, and the tensile and fatigue tests. The coatings were deposited in PYROGENESIS SA while the metallographic and microscopic analysis as well as the tensile and fatigue tests were held at the Factory of Telecommunication and Electronic means of the Hellenic Air Force (ETHM).

The dissertation is being completed with chapter 9 where the results of the findings are presented as well as the conclusions drawn from the experimental data. The coating applied to the substrates significantly degraded the mechanical properties of the system (substrate - coating) and more specifically a greater degradation was observed with increasing thickness of the coating.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	5
Summary.....	6
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΔΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ.....	15
2.1 Σκοπός επιφανειακών κατεργασιών.....	15
2.2 Ταξινόμηση επιφανειακών κατεργασιών.....	15
2.2.1 Επιφανειακές κατεργασίες τροποποίησης της επιφάνειας.....	16
2.2.1.1 Μηχανικές επιφανειακές κατεργασίες.....	16
2.2.1.2 Θερμικές επιφανειακές κατεργασίες.....	18
2.2.1.3 Θερμοχημικές επιφανειακές κατεργασίες.....	20
2.2.2 Επιφανειακές κατεργασίες με απόθεση υλικού.....	27
2.2.2.1 Εμβάπτιση σε λουτρό.....	27
2.2.2.2 Ηλεκτρολυτική απόθεση επικαλύψεων.....	31
2.2.2.3 Χημική απόθεση επικαλύψεων (Electroless Plating).....	36
2.2.2.4 Επιφανειακές κατεργασίες θερμικού ψεκασμού.....	37
2.2.2.5 Ψεκασμός με χρήση ακτινοβολίας Laser (Laser Spraying).....	46
2.2.2.6 Συμβατικές και Επιταξιακές Τεχνικές Εναπόθεσης υπό κενό.....	47
2.3 Συγκριτική παρουσίαση επικαλύψεων.....	58
2.4 Εφαρμογές των επικαλύψεων.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	63
3.1 Βασικές αρχές πλάσματος.....	63
3.2 Σχηματισμός πλάσματος.....	64
3.2.1 Σχηματισμός πλάσματος με ηλεκτρικό ρεύμα.....	64
3.2.2 Σχηματισμός πλάσματος μέσω μεταφοράς θερμότητας.....	66
3.2.3 Σχηματισμός πλάσματος με συμπίεση.....	66
3.2.4 Σχηματισμός πλάσματος με ακτινοβολία.....	66
3.3 Τυπική διάταξη ψεκασμού πλάσματος – Δαυλός πλάσματος.....	66
3.4 Παράμετροι λειτουργίας.....	69
3.5 Προετοιμασία επιφάνειας.....	72
3.5.1 Επιλογή μεθόδου πρόσφυσης.....	73
3.5.2 Ανάλυση καθαρισμού.....	73
3.5.3 Μηχανισμοί αμμοβολής.....	74
3.5.4 Υλικά αμμοβολής.....	74
3.5.5 Μασκάρισμα.....	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ	76
4.1 Γενικά περί ποιοτικού ελέγχου επικαλύψεων	76
4.2 Εφελκυσμός.....	77
4.3 Κόπωση.....	84
4.3.1 Καμπύλες S – N (καμπύλες Wöhler).....	86
4.3.2 Πειραματικός Προσδιορισμός των Καμπυλών S – N	88
4.3.3 Στατιστική Εξέταση της Κόπωσης.....	90
4.3.4 Η Επίδραση της Μέσης Τάσης	92
4.3.5 Πολυκυκλική (HCF) και Ολιγοκυκλική (LCF) Κόπωση.....	95
4.3.6 Κυκλική ή δυναμική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης	95
4.4 Τριβή.....	98
4.4.1 Βασικές έννοιες και ορισμοί	99
4.4.2 Περιγραφή του φαινομένου της τριβής.....	100
4.4.3 Επαφή πραγματικών επιφανειών	103
4.4.4 Επιφανειακή τοπογραφία	103
4.4.5 Μηχανισμός φαινομένου Τριβής.....	106
4.4.6 Το Τριβόσυστημα	108
4.4.6.1 Ιδιότητες των Υλικών που Επιδρούν στο Τριβόσυστημα.....	108
4.4.6.2 Παράμετροι Λειτουργίας του Τριβόσυστήματος.....	109
4.4.7 Φθορά	114
4.4.7.1 Είδη φθοράς.....	114
4.4.7.2 Δοκιμές Τριβής – Φθοράς	117
4.5 Κάμψη	119
4.6 Μεταλλογραφία – οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία.....	121
4.6.1 Οπτική Μικροσκοπία.....	128
4.6.2 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία.....	133
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΣΤΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ ΤΗΣ ΠΟΛΕΜΙΚΗΣ ΑΕΡΟΠΟΡΙΑΣ	139
5.1 Ταξινόμηση των Υλικών.....	139
5.2 Κεραμικά υλικά	141
5.2.1 Γενικά περί κεραμικών υλικών.....	141
5.2.2 Ταξινόμηση κεραμικών υλικών	142
5.2.3 Ιδιότητες κεραμικών υλικών	145
5.3 Το αλουμίνιο και τα οξειδία του (Αλουμίνια, Al ₂ O ₃)	147
5.3.1 Γενικά περί Αλουμίνιας	147
5.3.2 Ιδιότητες Αλουμίνιας.....	148

5.4 Το τιτάνιο και τα οξειδία του	151
5.4.1 Τιτανία	152
5.4.2 Ιδιότητες της τιτανίας.....	153
5.5 Κεραμικές επικαλύψεις στα αεροσκάφη της Πολεμικής Αεροπορίας	154
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΘΕΣΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ ΤΙΤΑΝΙΑΣ	168
6.1 Εισαγωγή	168
6.2 Δοκίμια (υποστρώματα).....	168
6.2.1 Διαστάσεις δοκιμίων	169
6.2.2 Χημική σύνθεση και μηχανικές ιδιότητες των Δοκιμίων	170
6.2.2.1 Ελάσματα διπλού T	170
6.2.2.2 Κυλινδρικά δοκίμια	171
6.3 Σκόνη Ψεκασμού	171
6.4 Απόθεση Επικαλύψεων.....	173
6.4.1 Αμμοβολή	173
6.4.2 Ψεκασμός των αμμοβολημένων δοκιμίων με bonding spray powder (bond coat)	174
6.4.3 Θερμικός ψεκασμός με χρήση ατμοσφαιρικού πλάσματος και παράμετροι ψεκασμού.....	175
6.5 Μέτρα προστασίας.....	177
6.5.1 Αποφυγή πυρκαγιάς και μέτρα προφύλαξης	177
6.5.2 Εξοπλισμός του συστήματος ψεκασμού με χρήση πλάσματος.....	177
6.5.3 Προστασία του προσωπικού	178
6.6 Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμίων	178
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ – ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	180
7.1 Εισαγωγή	180
7.2 Κοπή	181
7.3 Εγκιβωτισμός.....	181
7.4 Λείανση	182
7.5 Στίλβωση.....	182
7.6 Παρατήρηση της επικάλυψης σε οπτικό μικροσκόπι.....	183
7.7 Παρατήρηση της επικάλυψης σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.....	184
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΚΑΙ ΚΟΠΩΣΗ	187
8.1 Εφελκυσμός.....	187
8.1.1 Εφελκυσμός κυλινδρικού δοκιμίου από ΑΙ2007.....	188
8.1.2 Εφελκυσμός ελασμάτων διπλού T από ΑΙ2024	191
8.2 Κόπωση.....	205

8.3 Θραυστογραφία	208
8.3.1 Μικροσκοπική ανάλυση της εφελκυστικής θραύσης	208
8.3.2 Μικροσκοπική ανάλυση της θραύσης κόπωσης.....	212
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	214

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με θέμα «Μελετη Μικροδομης & Μηχανικης Συμπεριφορας Επικαλυψεων Πλασματος αλουμινας (Al_2O_3) & τιτανιας (TiO_2)» πραγματοποιήθηκε με την συνδρομή της εταιρείας ΠΥΡΟΓΕΝΕΣΙΣ Α.Β.Ε.Ε αλλά και του Εργοστασίου Τηλεπικοινωνιακών και Ηλεκτρονικών μέσων της Πολεμικής Αεροπορίας (Ε.Τ.Η.Μ).

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν με οποιοδήποτε τρόπο στην υλοποίησή της. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου κ. Μανωλάκο Δημήτριο Καθηγητή ΕΜΠ και κ. Κουτσομιχάλη Άγγελο Καθηγητή Σ.Ι που επέβλεπαν την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, για τις επιστημονικές γνώσεις και συμβουλές που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τον καιρό που εισήχθη η έννοια του πλάσματος το 1928 από τον Αμερικανό χημικό Irving Langmuir μέχρι και σήμερα, έχει παρατηρηθεί τεράστια χρησιμοποίηση του σε συνεχώς και περισσότερες εφαρμογές. Έτσι, λοιπόν, η αεροπορική βιομηχανία ψάχνοντας για ανθεκτικότερα υλικά και για τρόπους μείωσης του βάρους, στράφηκε προς τις επικαλύψεις θερμικού ψεκασμού και κυρίως τις επικαλύψεις πλάσματος. Οι προαναφερθείσες επικαλύψεις προσφέρονται για αντιτριβικές, για αντιδιαβρωτικές όσο και για αντιοξειδωτικές εφαρμογές.

Η συγκεκριμένη διπλωματική περιέχει μια εμπειριστατωμένη έρευνα για τις επικαλύψεις αλουμίνιας - τιτανίας. Για την εγγραφή της προηγήθηκε πρώτα, η εύρεση της κατάλληλης βιβλιογραφίας, καθώς και η συλλογή πληροφοριών από διάφορους εξειδικευμένους φορείς, όπως η E.A.B A.E. Το θεωρητικό μέρος περιορίζεται στα κεφάλαια 2, 3, 4 και 5, ενώ τα κεφάλαια 6, 7, και 8 αναφέρονται στο πειραματικό μέρος που ακολούθησε. Το θεωρητικό μέρος επεξηγεί τα φαινόμενα και τις διάφορες παραμέτρους που συναντώνται στο πειραματικό μέρος.

Το κεφάλαιο 2 αναφέρεται γενικά στις επιφανειακές κατεργασίες, τον σκοπό τους και την ταξινόμηση τους. Επιπρόσθετα γίνεται εκτενέστερη αναφορά στα διάφορα είδη επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού, στις διάφορες τεχνικές απόθεσης επικαλύψεων, καθώς και στους μηχανισμούς που εξηγούν το πως γίνονται οι αποθέσεις των παραπάνω επικαλύψεων στα διάφορα υποστρώματα.

Το κεφάλαιο 3 εξειδικεύεται στην μέθοδο θερμικού ψεκασμού με χρήση πλάσματος, στις διατάξεις που απαιτούνται για την απόθεση επικαλύψεων αυτού του τύπου καθώς και στις διάφορες διαδικασίες που διέπουν τον συγκεκριμένο τύπο θερμικού ψεκασμού.

Το κεφάλαιο 4 περιλαμβάνει τις κυριότερες τεχνικές χαρακτηρισμού των επικαλύψεων, κομμάτι των οποίων χρησιμοποιήθηκε και στο πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Το κεφάλαιο 5 περιέχει την ταξινόμηση των υλικών (ανόργανα και οργανικά) και γίνεται εκτενέστερη αναφορά στα κεραμικά υλικά και ειδικότερα στην αλουμίνα και στην τιτανία, οξειδία από τα οποία αποτελείται και η χρησιμοποιούμενη στο πειραματικό μέρος, σκόνη ψεκασμού πλάσματος. Στο τέλος του υπόψη κεφαλαίου αναγράφονται και διάφορες εφαρμογές των κεραμικών επικαλύψεων στα Αεροσκάφη της Πολεμικής Αεροπορίας.

Τα επόμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελούν το πειραματικό της μέρος. Πιο συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 6 περιγράφεται η πειραματική διάταξη ψεκασμού πλάσματος, οι διαστάσεις και οι διάφορες ιδιότητες των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν ως υποστρώματα, η σύνθεση

και οι ιδιότητες της κεραμικής σκόνης ψεκασμού (METCO 101NS) καθώς τα μέτρα ασφαλείας που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του ψεκασμού.

Στο κεφάλαιο 7 ακολούθησε ο χαρακτηρισμός των επικαλύψεων αλουμίνας – τιτανίας, ο οποίος έγινε με την χρήση οπτικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.

Στο κεφάλαιο 8 αναφέρονται οι μηχανικές ιδιότητες των επικαλύψεων πλάσματος αλουμίνας – τιτανίας. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού και κόπωσης σε επικαλυμμένα και μη δοκίμια.

Στο τελευταίο κεφάλαιο περιέχονται τα συμπεράσματα που μπορεί να εξαχθούν από τα δεδομένα που προέκυψαν από την πραγματοποίηση των προαναφερθέντων δοκιμών. Πιο συγκεκριμένα εξήχθησαν συμπεράσματα ως προς το αν επηρεάζει η επικάλυψη πλάσματος τις μηχανολογικές ιδιότητες του συστήματος (υπόστρωμα-επικάλυψη), και σε ποιο βαθμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΔΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ

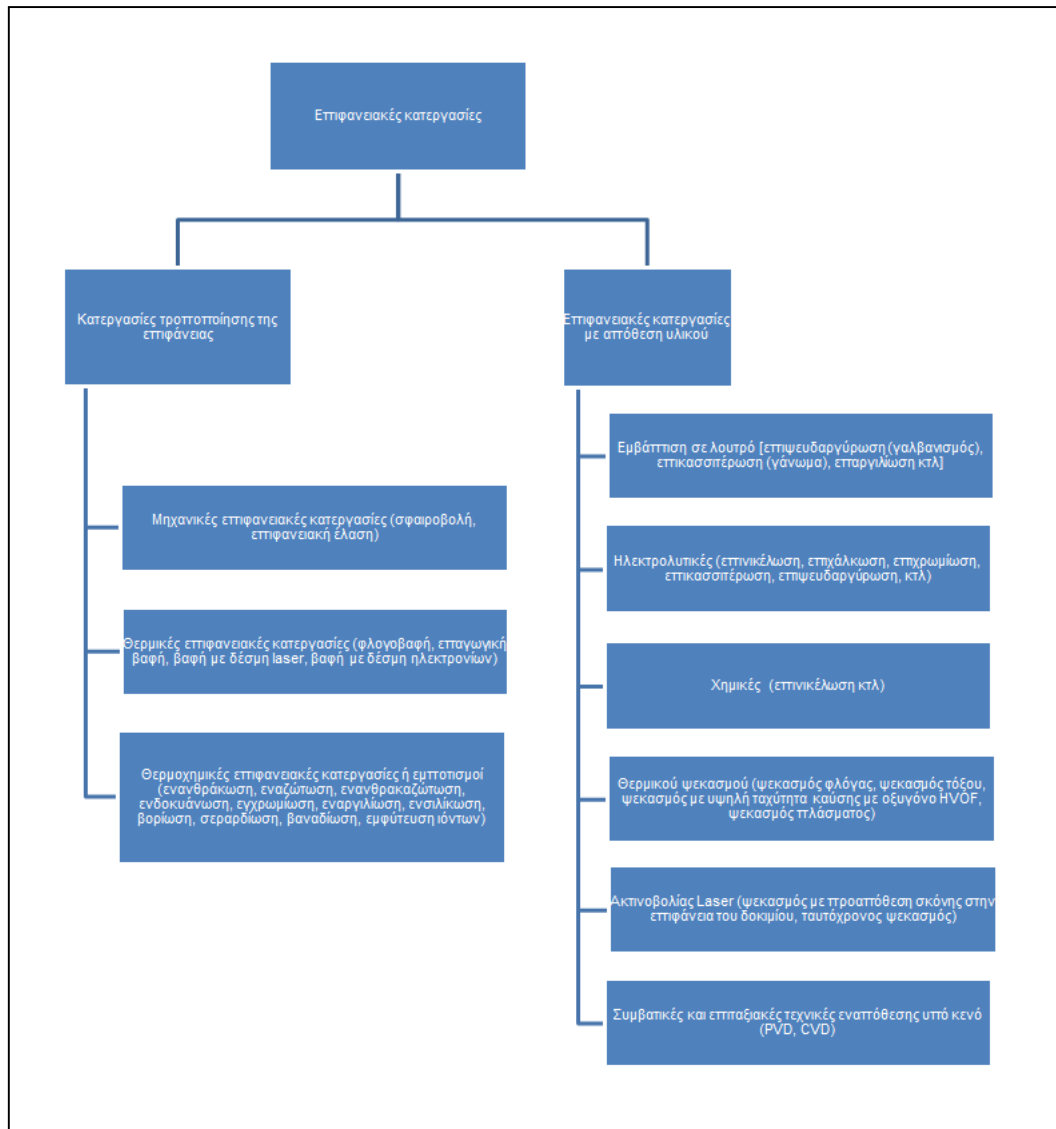
2.1 Σκοπός επιφανειακών κατεργασιών ^{[1][2]}

Επιφανειακή κατεργασία είναι η διαδικασία τροποποίησης της επιφάνειας ή εναπόθεσης υλικού πάνω σε ένα υπόστρωμα, με απώτερο σκοπό την βελτίωση των ιδιοτήτων του. Πιο συγκεκριμένα οι επιφανειακές κατεργασίες στοχεύουν στην τροποποίηση της μικροδομής και/ή της σύνθεσης της επιφάνειας του υποστρώματος, με σκοπό να αποκτήσει διαφορετικές ιδιότητες από τις ήδη υπάρχουσες όπως:

- Αύξηση της αντίστασης σε φθορά
- Αύξηση της αντίστασης σε οξείδωση και ξηρή διάβρωση
- Μείωση των απωλειών ενεργειακού περιεχομένου λόγω του φαινομένου της τριβής
- Καλύτερες ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες
- Βελτιωμένη θερμική μόνωση
- Καλύτερη αισθητική μορφή (υφή, χρώμα κ.τ.λ.)
- Βελτίωση λίπανσης
- Διόρθωση ανοχών

2.2 Ταξινόμηση επιφανειακών κατεργασιών ^[3]

Οι επιφανειακές κατεργασίες μπορούν να ταξινομηθούν με πολλούς τρόπους αναλόγως της παραμέτρου βάσει της οποίας γίνεται η ταξινόμηση. Στο σχήμα 2.1 απεικονίζεται ένα είδος ταξινόμησης των επιφανειακών κατεργασιών, αναλόγως με το αν είναι κατεργασίες τροποποίησης της ίδιας της επιφάνειας ή αν είναι κατεργασίες με απόθεση υλικού.



Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση Επιφανειακών Κατεργασιών

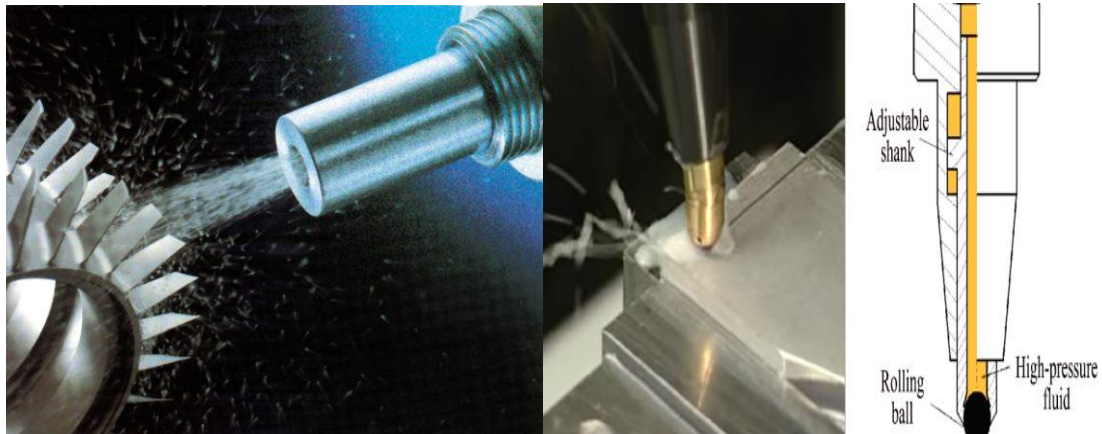
2.2.1 Επιφανειακές κατεργασίες τροποποίησης της επιφάνειας

Οι επιφανειακές κατεργασίες τροποποίησης της επιφάνειας επιτυγχάνουν την μεταβολή της κρυσταλλικής δομής ή/και της χημικής σύστασης της επιφάνειας, χωρίς εναπόθεση υλικού σ' αυτή.

2.2.1.1 Μηχανικές επιφανειακές κατεργασίες

Με τις μηχανικές επιφανειακές κατεργασίες εισάγονται επωφελή πεδία παραμενουσών τάσεων στην επιφάνεια του υλικού και η κρυσταλλική δομή

και η χημική σύσταση της επιφάνειας παραμένουν αμετάβλητες.



Εικόνα 2.1 και 2.2: Σφαιροβολή και Επιφανειακή έλαση [4]

Χαρακτηριστικότερα παραδείγματα τέτοιων κατεργασιών είναι η σφαιροβολή και η επιφανειακή έλαση

Σφαιροβολή (Shot peening)

Κατά τη σφαιροβολή, δέσμη ταχέως κινούμενων σφαιριδίων προσκρούει στην προς σκλήρυνση επιφάνεια και προκαλεί την πλαστική παραμόρφωση των επιφανειακών στρωμάτων του υλικού, γεγονός που οδηγεί σε μεταβολή του πεδίου των τάσεων [5]. Η εκτόξευση των σωματιδίων επιτυγχάνεται με επιτάχυνσή τους μέσα σε ρευστό μέσο, και μετά την πρόσκρουση τους στη μεταλλική επιφάνεια ανακυκλώνονται, προκειμένου να επαναληφθεί η σφαιροβολή.

Οι παράμετροι που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη σφαιροβολή είναι:

- Το υλικό και η διάμετρος των σφαιριδίων,
- Η κινητική τους ενέργεια κατά την εκτόξευση,
- Η γωνία πρόσπτωσης τους στην κατεργαζόμενη επιφάνεια (συνήθως 90°).

Με την κατάλληλη επιλογή των τιμών των ανωτέρω παραμέτρων, εισάγονται στα επιφανειακά στρώματα των μεταλλικών επιφανειών θλιπτικές εσωτερικές τάσεις οι οποίες

προκαλούν αύξηση της επιφανειακής σκληρότητας, βελτίωση της αντοχής του υλικού σε

κόπωση και αύξηση της αντοχής του σε διάβρωση υπό τάση. Παραλλαγή της σφαιροβολής αποτελεί η μέθοδος της ελεύθερης πτώσης σφαιριδίων, κατά την οποία τα σφαιρίδια αφήνονται από συγκεκριμένο ύψος και επιταχύνονται λόγω της βαρύτητας.

Στην ίδια αρχή με τη σφαιροβολή στηρίζεται και η αμμοβολή, η οποία όμως, κατά κύριο λόγο, χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό της επιφάνειας και την τροποποίηση της επιφανειακής τραχύτητας.

Επιφανειακή έλαση (Surface rolling) ^[6]

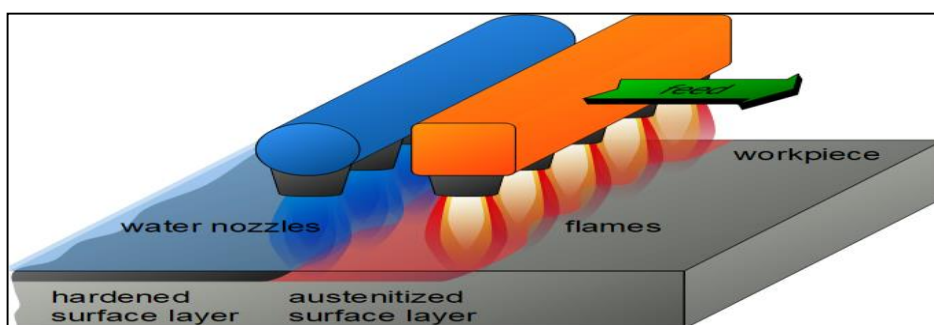
Η επιφανειακή έλαση είναι μια μηχανική επιφανειακή κατεργασία η οποία χρησιμοποιείται συνήθως σε χάλυβες ή όλκιμους χυτοσίδηρους κυρίως σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, ώστε να βελτιωθεί η αντοχή τους στην κόπωση. Η διαδικασία αυτή σκληραίνει και εισάγει θλιπτικές εναπομείνουσες τάσεις στην επιφάνεια του υλικού μέσω της εφαρμογής ελεγχόμενης τάσης, προκαλώντας έτσι μείωση της επιφανειακής εφελκυστικής τάσης που προκύπτει κατά την κυκλική φόρτιση.

2.2.1.2 Θερμικές επιφανειακές κατεργασίες ^[7]

Με τις θερμικές επιφανειακές κατεργασίες επιτυγχάνεται σκλήρυνση του επιφανειακού στρώματος του υλικού, ενώ το εσωτερικό τμήμα του παραμένει στα αρχικά επίπεδα σκληρότητας. Συνίστανται σε θέρμανση των επιφανειακών στρωμάτων σε θερμοκρασία $\theta \in (Ac3, Tm)$ και απότομη ψύξη (βαφή). Οι βασικές θερμικές επιφανειακές κατεργασίες είναι: η φλογοβαφή (επιφανειακή σκλήρυνση με φλόγιστρα), η επαγωγική επιφανειακή σκλήρυνση και ο βομβαρδισμός με δέσμες υψηλής πυκνότητας ενέργειας.

Φλογοβαφή (Flame hardening) ^[8]

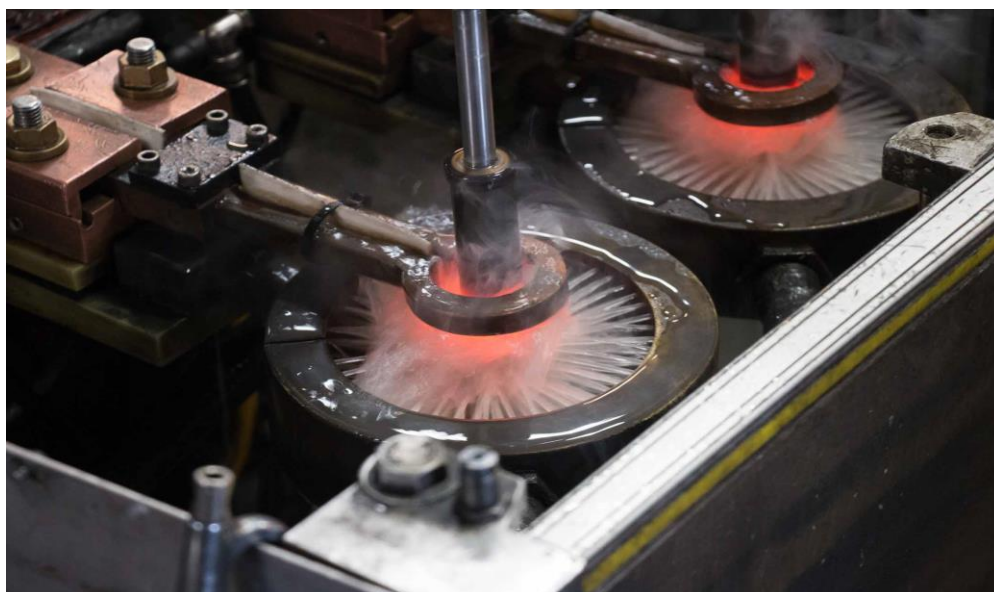
Κατά τη φλογοβαφή η προς κατεργασία επιφάνεια θερμαίνεται με τη βοήθεια φλόγας, που δημιουργείται από καύση μείγματος καυσίμου - οξυγόνου (π.χ. ασετυλίνη-οξυγόνο). Η θέρμανση πραγματοποιείται επιφανειακά και ακολουθείται από ψύξη, κατά την οποία συντελείται επιφανειακή βαφή. Φλογοβαφή συνιστάται σε αντικείμενα πολύπλοκης γεωμετρίας, σε χυτοσιδηρά εξαρτήματα και σε ορισμένες περιπτώσεις σε οδοντωτούς τροχούς.



Σχήμα 2.2: Φλογοβαφή

Επαγωγική βαφή (Induction hardening) ^[9]

Κατά την επαγωγική επιφανειακή θέρμανση, ο χάλυβας τοποθετείται στο εσωτερικό σπειροειδούς μαγνήτη, οι σπείρες του οποίου διαρρέονται από ρεύμα υψηλής συχνότητας (μέχρι 1 MHz). Το ισχυρό μαγνητικό πεδίο προκαλεί τη δημιουργία, στο χάλυβα, επιφανειακών ρευμάτων Foucault, τα οποία θερμαίνουν το μέταλλο, μέσω του φαινομένου Joule. Το βάθος διείσδυσης των δινορρευμάτων μειώνεται με αύξηση της συχνότητας του ρεύματος τροφοδοσίας του πηνίου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται, συνήθως, για εξαρτήματα μικρών διαστάσεων ή και απλής γεωμετρίας, μεγάλου αριθμού παραγωγής (π.χ. οδοντωτοί άξονες κιβωτίου ταχυτήτων στα αυτοκίνητα).



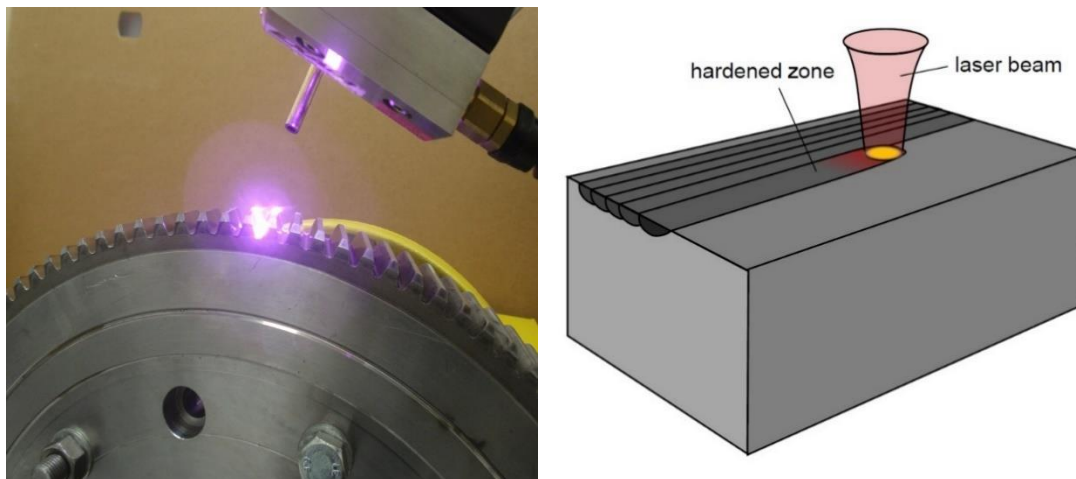
Εικόνα 2.3: Επαγωγική βαφή

Βομβαρδισμός με δέσμες υψηλής πυκνότητας ενέργειας (Laser, electron or ion surface hardening) ^[10]

Η τεχνική του βομβαρδισμού με δέσμες υψηλής πυκνότητας ενέργειας έχει αναπτυχθεί σχετικά πρόσφατα και συνίσταται στις δέσμες ηλεκτρονίων, ιόντων ή laser. Μέσω ειδικών συστημάτων εστίασης, παρέχεται η δυνατότητα εστίασης της δέσμης, υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, σε πολύ μικρές επιφάνειες.

Η ψύξη της επιφάνειας του υλικού είναι ταχεία και εξασφαλίζεται με αγωγή της θερμότητας διαμέσου του κύριου όγκου του υλικού. Πραγματοποιείται, δηλαδή, «αυτό-βαφή» της επιφάνειας. Η δέσμη ηλεκτρονίων και ιόντων εκπέμπεται υπό κενό και απορροφάται εύκολα από τη μεταλλική επιφάνεια. Αντιθέτως, η δέσμη laser δεν απαιτεί την εφαρμογή κενού, αλλά ανακλάται εύκολα από ανοιχτόχρωμες και λείες επιφάνειες. Προκειμένου να αυξηθεί η απορροφητική ικανότητα της επιφάνειας, καθίσταται απαραίτητη η κατάλληλη

προετοιμασία της (επικάλυψη με γραφίτη, αμμοβολή), πριν ακτινοβοληθεί με την δέσμη laser. Σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές επιφανειακής βαφής, η χρήση δεσμών υψηλής ενεργειακής πυκνότητας επιτρέπει την τοπική κατεργασία επιφανειακών στρωμάτων μικρού πάχους (από 0,1 έως 3 mm).



Σχήμα 2.3: Επιφανειακή σκλήρυνση με χρήση δέσμης Laser.

2.2.1.3 Θερμοχημικές επιφανειακές κατεργασίες ^[11]

Οι θερμοχημικές επιφανειακές κατεργασίες έχουν ως στόχο τον εμπλουτισμό της επιφάνειας του προς επεξεργασία αντικείμενου με κάποιο χημικό στοιχείο (C, N, Cr, B, Al, Zn και Si), μέσω του μηχανισμού της διάχυσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις αλλάζει η χημική σύσταση της επιφάνειας του αντικείμενου και η όλη διαδικασία επιτυγχάνεται σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες μέσω του μηχανισμού της διάχυσης. Το φαινόμενο περιγράφεται από το δεύτερο νόμο του Fick και το προς κατεργασία αντικείμενο τοποθετείται στον αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας, όπου βρίσκεται σε άμεση επαφή με το φορέα του στοιχείου διάχυσης που εισάγεται υπό τη μορφή σκόνης (pack cementation), αερίου ή τηγμένου άλατος. Οι πιο συχνά εφαρμοζόμενες θερμοχημικές κατεργασίες σε βιομηχανική κλίμακα είναι:

- Η ενανθράκωση (Carburizing)
- Η εναζώτωση (Nitriding)
- Η ενανθρακαζώτωση (Carbonitriding)
- Η βορίωση (Boronizing)

Ενανθράκωση (carburizing) ^[12]

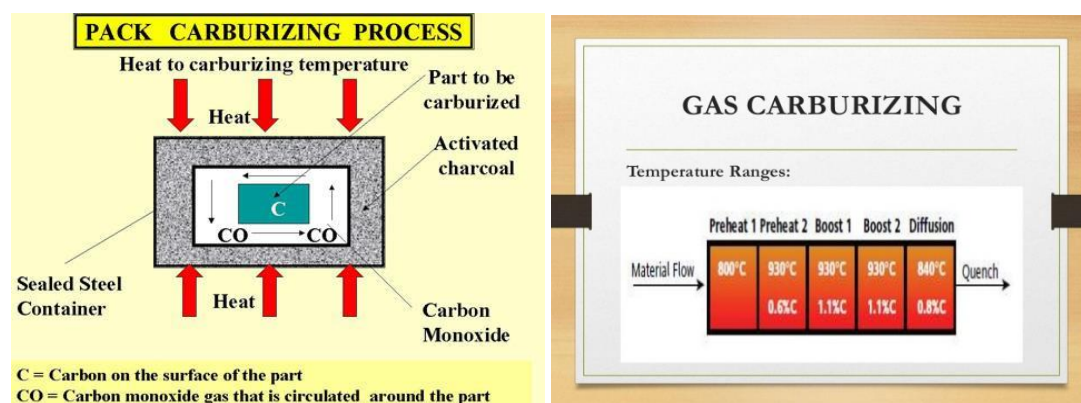
Η ενανθράκωση εφαρμόζεται κυρίως σε χάλυβες με χαμηλό ποσοστό άνθρακα (0,1-0,25 %) και επιτυγχάνεται σε δύο στάδια ως ακολούθως:

Στάδιο 1: Ο χάλυβας θερμαίνεται παρουσία ενανθρακωτικού μέσου σε θερμοκρασία πλήρους ωστενιτοποίησης (900-950° C). Τα άτομα άνθρακα διαχέονται στο πλέγμα του ωστενίτη, σε ορισμένο βάθος από την επιφάνεια, μέχρι την τιμή της μέγιστης διαλυτότητας σ' αυτόν. Ακολουθεί βραδεία απόψυξη μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Λόγω της παρατεταμένης θέρμανσης, σχηματίζονται κόκκοι μεγάλου μεγέθους, τόσο στον πυρήνα (φερρίτης+περλίτης), όσο και στην εμποτισμένη επιφάνεια (σεμεντίτης+περλίτης).

Στάδιο 2: Ακολουθεί βαφή που επιτελείται με την θέρμανση σε θερμοκρασία $\theta > A_{c3}$ και μετασχηματισμό του χονδρόκοκκου ωστενίτη του πυρήνα σε λεπτόκοκκο ωστενίτη. Εν συνεχεία πραγματοποιείται βαφή σε νερό και μετασχηματισμός του λεπτόκοκκου ωστενίτη του πυρήνα σε λεπτόκοκκο φερρίτη και μαρτενσίτη, ωστόσο η δομή της εμποτισμένης επιφάνειας παραμένει χονδρόκοκκη. Εκ των υστέρων γίνεται επαναθέρμανση σε θερμοκρασία $\theta \approx 760^\circ \text{C}$ και σχηματισμός λεπτόκοκκου ωστενίτη (ευτηκτοειδούς σύστασης) στην εμποτισμένη επιφάνεια. Ακολουθεί βαφή σε λάδι και μετασχηματισμός του λεπτόκοκκου ωστενίτη σε λεπτόκοκκο σκληρό μαρτενσίτη, ενώ ο μαρτενσίτης του πυρήνα υφίσταται επαναφορά.

Ως ενανθρακωτικά μέσα χρησιμοποιούνται:

- αέρια μίγματα H_2 , CO , CO_2 και υδρογονανθράκων (μεθάνιο, προπάνιο), τα συστατικά των οποίων κατά τη θέρμανση αντιδρούν μεταξύ τους, παρέχοντας τον απαιτούμενο άνθρακα για την ενανθράκωση. Τα λοιπά προϊόντα των αντιδράσεων αυτών απομακρύνονται από την κατεργαζόμενη επιφάνεια με ρεύμα αερίου.



Σχήμα 2.4: Μέθοδος στερεάς και αέριας ενανθράκωσης.

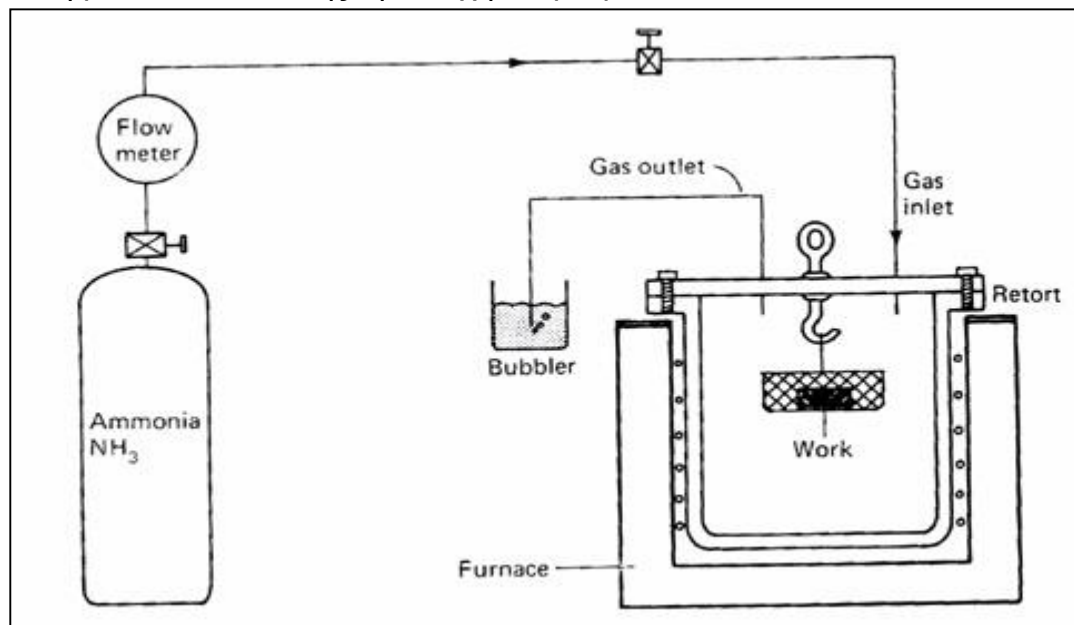
Αναλόγως του ενανθρακωτικού μέσου αλλά και των συνθηκών πραγματοποίησης της ενανθράκωσης διακρίνουμε τις παρακάτω μεθόδους:

- Στερεά ενανθράκωση (Pack Carburizing)
- Υγρά Ενανθράκωση (Liquid Carburizing)
- Αέρια Ενανθράκωση (Gas Carburizing)
- Ενανθράκωση εν κενώ (Vacuum Carburizing)
- Ενανθράκωση Πλάσματος (Plasma-Ion Carburizing)

Η πλειοψηφία των τεμαχίων που έχουν υποστεί ενανθράκωση υποβάλλονται σε αέρια ενανθράκωση χρησιμοποιώντας φυσικό αέριο, προπάνιο ή βουτάνιο. Οι ενανθρακώσεις εν κενώ ή πλάσματος είναι χρήσιμες λόγω της απουσίας οξυγόνου στην ατμόσφαιρα του φούρνου. Η στερεά και η αέρια ενανθράκωση έχουν μικρή εμπορική σημασία, αλλά εξακολουθούν να γίνονται περιστασιακά.

Εναζώτωση (nitriding) ^[13]

Η εναζώτωση είναι μια θερμοχημική κατεργασία εμπλουτισμού σε άζωτο μιας επιφανειακής ζώνης χάλυβα, βάθους έως 1mm. Η επιφανειακή σκλήρυνση επιτυγχάνεται χωρίς περαιτέρω βαφή του υλικού. Συνήθως, το απαιτούμενο για την κατεργασία άζωτο προέρχεται από τη διάσπαση αμμωνίας, σε αεροστεγές δοχείο, όπου τοποθετείται το προς κατεργασία υλικό. Ο σχηματισμός νιτριδίων προκαλεί διόγκωση και στρέβλωση του κρυσταλλικού πλέγματος του σιδήρου, εισάγοντας έτσι στη ζώνη κατεργασίας θλιπτικές τάσεις, οι οποίες βελτιώνουν την αντοχή του χάλυβα σε κόπωση. Με τη εναζώτωση βελτιώνεται επίσης, η αντοχή σε φθορά.



Σχήμα 2.5: Διαδικασία εναζώτωσης.

Παρακάτω παρατίθενται μερικά από τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εναζώτωσης:

Πλεονεκτήματα

- Αποφεύγονται οι ρωγμές ή οι στρεβλώσεις των τεμαχίων, γιατί δεν χρειάζεται βαφή μετά την εναζώτωση. Τα τεμάχια μπορούν να υποστούν τελική κατεργασία κοπής πριν από την εναζώτωση.

- Η σκληρότητα της επιφάνειας του εναζωτωμένου χάλυβα που επιτυγχάνεται είναι πολύ μεγάλη και κυμαίνεται από 1000-1100 H Vickers. Γενικά η σκληρότητα στην επιφάνεια εξαρτάται από το σχηματισμό ειδικών νιτροδίων. Υλικά με αλουμίνιο (που είναι το στοιχείο με τη μεγαλύτερη χημική συγγένεια προς το άζωτο) δείχνουν σε ελέγχους με χαμηλά φορτία (λόγω της λεπτής επιφάνειας σκληρότητας και η μέτρηση γίνεται κατά Vickers με μικρό φορτίο) την μεγαλύτερη επιφανειακή σκληρότητα. Στους κραματωμένους χάλυβες με χρώμιο βολφράμιο και βανάδιο η αύξηση της σκληρότητας είναι μικρότερη. Η αντοχή των τεμαχίων σε διάβρωση είναι αρκετά καλή όταν η εναζωτωμένη επιφάνεια αφήνεται όπως είναι, π.χ. χωρίς να στιλβωθεί. Επίσης και η αντοχή τους σε κόπωση είναι αρκετά καλή. Τα εναζωτωμένα εξαρτήματα αρκετές φορές υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενες καταπονήσεις. Απεδείχθη όμως ότι η αδυναμία κόπωσης δεν ξεκινά από την εναζωτομένη επιφάνεια του μετάλλου (εξωτερική επιφάνεια), αλλά από το σημείο επαφής εναζωτομένης στιβάδας και μη εναζωτομένης μάζας του υλικού. Τα επιφανειακά χαρακτηριστικά γνωρίσματα που οδηγούν σε συγκεντρώσεις τάσεων, όπως εγχοπές σπειρώματα και χαραγμάτα από κατεργασία τόνου, ρεκτιφιέ κ.α. έχουν μικρότερη επίδραση στα εναζωτωμένα υλικά παρά σ' αυτά που δεν έχουν εναζωτωθεί.

- Έχουν καλή αντίσταση στις φθορές από τριβές. Έχει αποδειχθεί ότι ένα πλήθος εξαρτημάτων με εναζωτομένη επιφάνεια και κάτω από συνθήκες ελαττωματικής λίπανσης και με σοβαρή αύξηση θερμοκρασίας σημείωσε μεγάλη διάρκεια ζωής.

- Η σκληρότητα των εναζωτωμένων τεμαχίων διατηρείται σε υψηλές σχετικά θερμοκρασίες (μέχρι περίπου 500° C), ενώ των ενανθρακωμένων τεμαχίων αρχίζει να πέφτει από τους 200° C μόνο. 51 Αυτή η διατήρηση της σκληρότητας κάνει τα υλικά να έχουν μεγάλη αξία, για πολλές εφαρμογές και ειδικά εκεί όπου η λίπανση μπορεί να είναι ελαττωματική.

Μειονεκτήματα

- Οι δαπάνες των εγκαταστάσεων εναζωτώσεως είναι μεγαλύτερες από τις δαπάνες για ενανθράκωση. Για το λόγο αυτό η εναζώτωση συμφέρει μόνο αν γίνεται για πολλά τεμάχια.

- Το βάθος εναζωτώσεως είναι μικρότερο από το βάθος ενανθράκωσης για τον ίδιο χρόνο θέρμανσης. Γενικά ο χρόνος κατεργασίας, η σύσταση του χάλυβα και η ποιότητα του λουτρού εναζωτώσεως επηρεάζουν σημαντικά το βάθος και την ποιότητα της εναζωτώσεως.

- Υπερθέρμανση εναζωτωμένου τεμαχίου έχει σαν συνέπεια την καταστροφή της σκληρής επιφανειακής του στιβάδας τελείως. Επομένως χρειάζεται επανάληψη της εναζωτώσεως.

Ενανθρακαζώτωση (Carbonitriding) ^[14]

Η ενανθρακαζώτωση είναι μια επιφανειακή θερμική κατεργασία όπου εισάγει άνθρακα και άζωτο στον ωστενίτη του χάλυβα. Αυτή η επεξεργασία είναι παρόμοια με τη ενανθράκωση στο ότι η σύσταση του ωστενίτη αλλάζει και η υψηλή σκληρότητα της επιφάνειας παράγεται εξαιτίας του σχηματισμού Μαρτενσίτη που δίνει η βαφή. Ωστόσο, επειδή το άζωτο αυξάνει τη σκληρότητα, η ενανθρακαζώτωση καθιστά δυνατή τη χρήση χαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα για να επιτευχθεί σκληρότητα επιφάνειας ίση με εκείνη που θα είχε ένας υψηλά κραματωμένος ενανθρακωμένος χάλυβας χωρίς την ανάγκη της ταχείας απόψυξης, αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μικρότερη παραμόρφωση καθώς και ελαχιστοποίηση πιθανότητας ρωγμών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η σκλή-ρυνση μπορεί να εξαρτάται από το σχηματισμό νιτριδίου. Αν και η διαδικασία της εναν-θράκωσης μπορεί να διεξαχθεί με ατμόσφαιρες αερίου ή λουτρό αλάτος, ο όρος «Εναν-θρακαζώτωση» συχνά αναφέρεται μόνο σε κατεργασία σε ατμόσφαιρα αερίου. Βασικά, η ενανθρακαζώτωση σε ένα λουτρό αλάτος είναι η ίδια με τη σκλήρυνση του λουτρού κυανιούχου. Και στις δύο διαδικασίες, το άζωτο ενισχύει τη εμβαπτότητα και την σκλη-ρότητα της επιφάνειας, αλλά εμποδίζει τη διάχυση του άνθρακα. Σε πολλές περιπτώσεις, η ενανθρακαζώτωση χονδρόκοκκων χαλύβων είναι πιο κατάλληλη από την ενανθρά-κωση λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών και των μικρότερων χρόνων κατεργασίας.

Όπως ο άνθρακας, έτσι και το άζωτο είναι «σταθεροποιητής» του ωστενίτη. Συνεπώς, μπορεί να διατηρηθεί σημαντικός ωστενίτης μετά την βαφή ενός ενανθρακωμένου τεμα-χίου. Εάν η διατηρούμενη περιεκτικότητα σε ωστενίτη είναι τόσο υψηλή ώστε να μειώνει τη σκληρότητα και την αντοχή στη φθορά, δύναται να ελεγχθεί με μείωση της περιε-κτικότητας σε αμμωνία της αέριας ενανθρακαζώτωσης είτε σε ολόκληρο τον κύκλο είτε κατά τη διάρκεια του τελευταίου τμήματος του κύκλου. Ένα άλλο αποτέλεσμα της υπερ-βολικής περιεκτικότητας σε άζωτο στην περίπτωση της ενανθρακαζώτωσης είναι το πο-ρώδες.

Κατά την επεξεργασία άτομα άνθρακα και αζώτου διαχέονται σε παραπλεγματικές θέσεις (άτομα παρεμβολής), σε θερμοκρασία ~850°C, σημαντικά υψηλότερη από τη θερμοκρασία εναζώτωσης, ~ 530°C, (έτσι ώστε

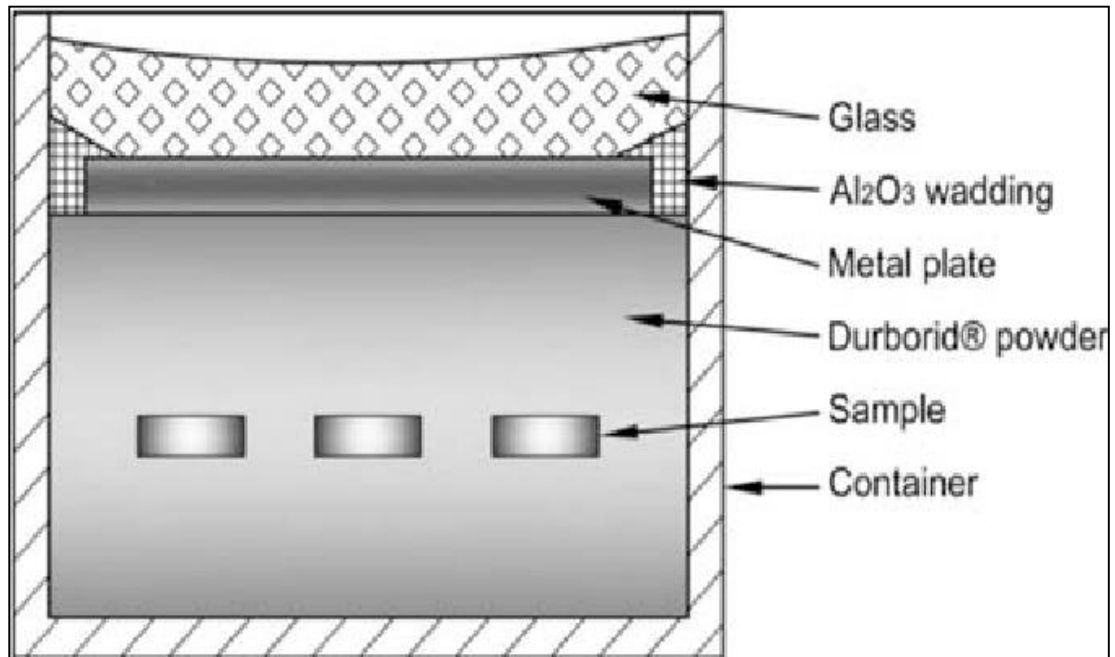
να διαλυθεί ο άνθρακας στον ωστενίτη), αλλά ελαφρά μικρότερη από τη θερμοκρασία ενανθράκωσης, ~ 950°C. Οι χρόνοι επεξεργασίας είναι επίσης μικρότεροι. Η ενανθρακαζώτωση είναι πιο οικονομική από την ενανθράκωση και επιπλέον μειώνονται οι στρεβλώσεις κατά την απόψυξη. Η χαμηλότερη θερμοκρασία επιτρέπει την απόψυξη σε λάδι ή ακόμη και σε πεπιεσμένο αέρα. Τυπικά το βάθος της ενανθρακαζώτωσης κυμαίνεται από 0.07 mm έως 0.5 mm. Μπορεί ακόμη να φθάσει έως 0.75 mm. Γενικά με την ενανθρακαζώτωση επιτυγχάνεται υψηλότερη σκληρότητα από ότι με την ενανθράκωση, 55-62 HRC. Μπορεί ακόμη να γίνει συνδυασμός ενανθράκωσης και ενανθρακαζώτωσης.

Τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν δόντια γραναζιών, άξονες, πείρους, ρουλεμάν, ροδέλες, δίσκους συμπλέκτη οχημάτων, εργαλεία και καλούπια.

Βορίωση (Boronizing)

Η επικάλυψη της βορίωσης εφαρμόζεται όταν οι απαιτήσεις στο χάλυβα για σκληρότητα και αντοχή σε τριβή και φθορά είναι μεγάλες. Η βορίωση είναι μια θερμοχημική επιφανειακή κατεργασία, όπου άτομα βορίου διαχέονται στο κρυσταλλικό πλέγμα του μετάλλου βάσης. Η δομή της βοριωμένης ζώνης αποτελείται από τη ζώνη ενώσεων και τη ζώνη διάχυσης, η οποία βρίσκεται ακριβώς κάτω από την εξωτερική ζώνη βορίωσης και προσδίδει ικανοποιητική μηχανική στήριξη στη ζώνη ενώσεων. Τα βορίδια του σιδήρου είναι υπεύθυνα για την αύξηση τόσο της επιφανειακής σκληρότητας και αποτελούν γενικά χημικά σταθερές και σκληρές ενώσεις. Τέλος, δεν πρέπει να παραλειφθεί η αναφορά στην πολύ καλή αντοχή σε κόπωση και σε διάβρωση που παρουσιάζουν πολλά βορίδια μετάλλων [15]. Η βορίωση μπορεί να λάβει χώρα τόσο σε στερεό, σε υγρό, όσο και σε αέριο μέσο. Κυρίως η βορίωση εκτελείται σε στερεά βοριωτικά μέσα. Η διαδικασία περιλαμβάνει συνήθως την θέρμανση του υποστρώματος σε μια θερμοκρασία ανάμεσα στους 800°C με 1000°C για συγκεκριμένη ώρα (1-12 ώρες) και στο κατάλληλο χημικό περιβάλλον. Μετά τη θέρμανση και παραμονή στη θερμοκρασία επεξεργασίας, ο χάλυβας ψύχεται

αργά και ήρεμα μέσα στον ίδιο το κλίβανο.



Σχήμα 2.6: Διαδικασία βορίωσης

Τα βορίδια του χάλυβα παρουσιάζουν ανώτερες τριβολογικές ιδιότητες σε σύγκριση με τα αντίστοιχα καρβίδια και νιτρίδια χαλύβων, κυρίως λόγω της ανώτερης σκληρότητας σε αντίθεση με τις άλλες δύο κατηγορίες, των οποίων η σκληρότητα είναι μικρότερη. Σε σύγκριση με τις επιφάνειες νιτρίδιων και καρβιδίων και άλλων επικαλύψεων οξειδίων, οι επιφάνειες βορίωσης παρέχουν πολύ υψηλότερη αντοχή σε θερμική κόπωση, οξείδωση, διάβρωση λόγω οξέων και υψηλή αντίσταση σε διάβρωση από ελαφρά υγρά μέταλλα.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η συγκολλησιμότητα των επεξεργασμένων επιφανειών, η διατήρηση των μηχανικών ιδιοτήτων σε υψηλές θερμοκρασίες, η αντιοξειδωτική προστατευτική δράση σε αλκαλικό περιβάλλον και το γεγονός ότι ο χάλυβας επιδέχεται (μετά την επεξεργασία της βορίωσης, δεδομένης της ίδιας τιμής θερμικής διαστολής της βοριωμένης ζώνης και του υποκείμενου χάλυβα) επιπλέον επιβελτίωση προς αύξηση των μηχανικών αντοχών. Εκτός από την υψηλή σκληρότητα, στα πλεονεκτήματα της τεχνικής συγκαταλέγεται η πολύ καλή πρόσφυση του στρώματος των βοριδίων λόγω της ιδιαίτερης «οδοντωτής» δομής που λαμβάνεται και η πολύ υψηλή προστασία που προσφέρει στο υποκείμενο μέταλλο έναντι διάβρωσης από τηγμένα μέταλλα.

Τα μειονεκτήματα της τεχνικής είναι η πολύ υψηλή θερμοκρασία κατεργασίας που πιθανά να εισάγει διαστασιακές στρεβλώσεις ή και ανεπιθύμητες μεταβολές στη μικροδομή του μετάλλου βάσης, η ευθραυστότητα του επιφανειακού στρώματος και η χαμηλή αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση. Στην επιφάνεια των κραμάτων που έχει γίνει βορίωση γενικά αναπτύσσεται μία στρώση βοριδίου (boride layer), η οποία αποτελείται συνήθως από δύο

υποστρώσεις, την εξωτερική που αποτελείται από FeB και είναι πλούσια σε βόριο και την εσωτερική που αποτελείται από Fe₂B. Εφόσον η φάση FeB είναι πιο σκληρή και έχει μεγαλύτερο συντελεστή θερμικής διαστολής σε σχέση με το Fe₂B μπορεί να παρατηρηθεί θραύση της διφασικής στρώσης βορίου.

Οι τεχνικές βορίωσης που χρησιμοποιούνται κυρίως στη βιομηχανία, ταξινομούνται αναλόγως του μέσου βορίωσης αλλά και των συνθηκών που πραγματοποιούνται. Πιο συγκεκριμένα είναι οι εξής: Pack boronizing, Paste boronizing, Liquid boronizing, Plasma boronizing, Laser boronizing. Πιο συγκεκριμένα το σχήμα 2.6 απεικονίζει την πρώτη μέθοδο.

2.2.2 Επιφανειακές κατεργασίες με απόθεση υλικού

Με τις επιφανειακές κατεργασίες με απόθεση υλικού επιτυγχάνεται η εναπόθεση πάνω στην υπό προστασία επιφάνεια, στρώματος άλλου υλικού (επίστρωση ή επικάλυψη).

2.2.2.1 Εμβάπτιση σε λουτρό

Οι επικαλύψεις εμβάπτισης λαμβάνονται από τη βύθιση ολόκληρου του αντικείμενου ή τμήματος αυτού μέσα στο λουτρό εμβάπτισης (λουτρό υλικού επίστρωσης). Ανάλογα με τον τύπο του υλικού επίστρωσης, η φυσική του κατάσταση μπορεί να είναι στερεά ή υγρή. Στην πρώτη περίπτωση, πριν αποθεθεί η επικάλυψη, το υλικό πρέπει να λειώσει. Μετά από την αφαίρεση από το λουτρό, το υλικό επίστρωσης ξεραίνεται ή στερεοποιείται πάνω στο αντικείμενο, διαμορφώνοντας την επικάλυψη. Οι κυριότερες επικαλύψεις με εμβάπτιση σε λουτρό είναι η Επιψευδαργύρωση (γαλβανισμός), η Επικασσιτέρωση (γάνωμα) και η Επαργιλίωση.

Επιψευδαργύρωση (γαλβανισμός) ^[16]

Ο ψευδάργυρος είναι ένα, σκληρό, κρυσταλλικό, στιλπνό και ασπρογάλαζο μέταλλο, το οποίο τρίβεται εύκολα. Είναι το μέταλλο που χρησιμοποιείται, κυρίως, για την αντιδιαβρωτική προστασία του σιδήρου και του χάλυβα. Οξειδώνεται πιο εύκολα από το σίδηρο, είναι αρκετά φθηνός και παρέχει πολύ καλή αντιδιαβρωτική προστασία, ιδιαίτερα σε βιομηχανικό και αστικό περιβάλλον. Διαβρώνεται, όμως, εύκολα σε περιβάλλον με υψηλή υγρασία (σχετική υγρασία πάνω από 70%) και στις περιπτώσεις αυτές αντικαθίσταται, συνήθως, από το κάδμιο. Περίπου το 40% της παγκόσμιας κατανάλωσης ψευδαργύρου χρησιμοποιείται για την αντιδιαβρωτική προστασία του χάλυβα καθώς η συμπεριφορά της επιφάνειας του ψευδαργύρου παίζει σημαντικό ρόλο έναντι της φθοράς εξαιτίας των καιρικών συνθηκών.

Η προστασία του χάλυβα αλλά και του σιδήρου με χρήση στρώματος ψευδαργύρου, βασίζεται σε δύο μηχανισμούς:

- Τα στρώματα ψευδαργύρου σχηματίζουν ένα πολύ συμπαγές φράγμα στο οξυγόνο, την υγρασία και τους όξινους ρυπαντές της ατμόσφαιρας, εμποδίζοντας έτσι την άμεση επαφή τους με το χάλυβα (ή απλά το σίδηρο). Η χαμηλή ταχύτητα φθοράς του ψευδαργύρου εξαρτάται από το γρήγορο σχηματισμό αλάτων ψευδαργύρου ή άλλων ενώσεων στην επιφάνειά του ως αποτέλεσμα της αντίδρασής του με την ατμόσφαιρα. Μερικά από τα άλατα αυτά μπορεί να είναι διαλυτά στο νερό με αποτέλεσμα να απομακρύνονται με τη βροχή ή τη δρόσο, αλλά τα περισσότερα απ'αυτά είναι ουσιαστικά αδιάλυτα στο νερό και σχηματίζουν ένα προστατευτικό στρώμα επιβραδύνοντας έτσι την ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα.

- Ο δεύτερος μηχανισμός είναι η καθοδική προστασία της χαλύβδινης επιφάνειας που προσφέρεται μέσω της διάτρησης του προστατευτικού στρώματος του ψευδαργύρου. Όπως αναφέρθηκε, η διάβρωση των μετάλλων είναι μια ηλεκτροχημική διαδικασία μεταξύ δύο διαφορετικών περιοχών της επιφάνειας, οι οποίες συμπεριφέρονται ως άνοδος και ως κάθοδος αντίστοιχα. Ροή ηλεκτρονίων λαμβάνει χώρα μεταξύ τέτοιων περιοχών με αποτέλεσμα την αποσύνθεση της ανόδου και την προστασία της κάθοδου. Στην περίπτωση του στρώματος ψευδαργύρου πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα, ο ψευδάργυρος αποτελεί την άνοδο που τείνει να διαλυτοποιηθεί όταν έρχεται σε επαφή με το νερό, ενώ η καθοδική επιφάνεια του χάλυβα προστατεύεται από τη διάβρωση (κανόνας της Θυσιαζόμενης ανόδου). Αν η απόσταση μεταξύ της ανοδικής και της καθοδικής περιοχής υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή, τότε θα λάβει χώρα κανονική δίβρωση του χάλυβα.

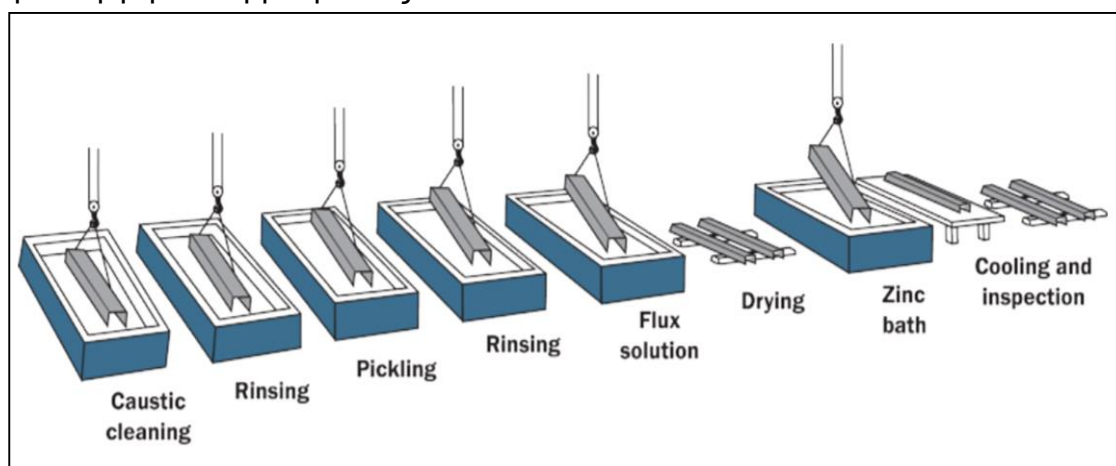


Εικόνα 2.4: Γαλβανισμός μεταλλικού αντικειμένου

Στη γενική διαδικασία γαλβανίσματος, τα τμήματα π.χ. του χάλυβα απολιπαίνονται σε αλκαλικό διάλυμα και εκπλύνονται σε ζεστό και κρύο νερό.

Η σκουριά και τα άλατα απομακρύνονται με βύθιση σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος 14%, που ακολουθείται από έκπλυση με νερό. Στη συνέχεια, τα τμήματα του μετάλλου εμβάπτιζονται σε υδατικό διάλυμα συνεχούς ροής που περιέχει χλωριούχο ψευδάργυρο και χλωριούχο αμμώνιο, και σε μερικές περιπτώσεις φθοριούχο νάτριο και/ή χλωριούχο κάλιο, νικέλιο. Σχηματίζεται λεπτό στρώμα, ξηραίνεται στους 75-120° C και εξασφαλίζει την επιφάνεια του χάλυβα από ρυπαντές έτσι ώστε να δημιουργηθούν όσο το δυνατό καλύτερες συνθήκες ύγρανσης κατά τη διάρκεια της μετέπειτα βύθισης σε τηγμένο ψευδάργυρο.

Η κυριότερη μέθοδος γαλβανισμού είναι η θερμή εμβάπτιση σε λουτρό (hot dip coatings): Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την εμβάπτιση του μετάλλου σε τηγμένο ψευδάργυρο. Το γαλβάνισμα με βύθιση εν θερμώ είναι μια σχετικά απλή διαδικασία κατά την οποία ο χάλυβας βυθίζεται σε λουτρό τετηγμένου ψευδαργύρου θερμοκρασίας 420 - 450 ° C.



Σχήμα 2.7: Γαλβανισμός με θερμή εμβάπτιση σε λουτρό.

Διακρίνονται δύο διαφορετικές διαδικασίες γαλβανίσματος εν θερμώ, οι οποίες δημιουργούν διαφορετικές επιφάνειες ψευδαργύρου. Αυτές είναι:

➤ Γαλβάνισμα κατά παρτίδα (στρώμα ψευδαργύρου πάχους 50-150 μm): Τα χαλύβδινα αντικείμενα, ξεχωριστά ή ανά ομάδες, βυθίζονται σε λουτρό τηγμένου ψευδαργύρου. Η βύθιση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός στρώματος ψευδαργύρου, το οποίο προκαλεί το σχηματισμό ενός μεγαλύτερου ή μικρότερου ποσού κράματος ψευδαργύρου - σιδήρου. Η στρώση ψευδαργύρου που πρόσκειται στην επιφάνεια του χάλυβα έχει τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε σίδηρο, συνήθως 30 % περίπου. Η μεσαία στρώση περιέχει 6-12 % σίδηρο και η πάνω στρώση είναι καθαρός ψευδάργυρος. Η εξωτερική στρώση έχει συνήθως μια σιλπινή, λαμπερή διακοσμητική εμφάνιση. Επειδή πολλές φορές το οξυγόνο και το μονοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας παγιδεύονται στον τηγμένο χάλυβα σχηματίζοντας οπές στη μεταλλική μήτρα, προστίθεται πυρίτιο (κατά τη διάρκεια του γαλβανίσματος) με τη μορφή

σιδηροπυριτίου με σκοπό την αποφυγή των ατελειών, την απόκτηση τηγμένου χάλυβα χωρίς αέρια και την αποξειδωση.

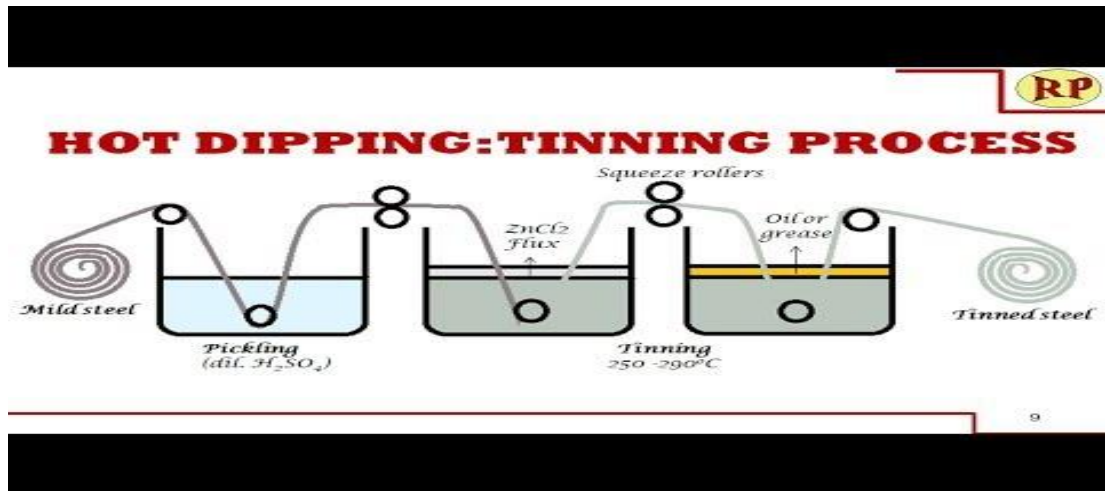
➤ Γαλβάνισμα συνεχούς ταινίας(στρώμα ψευδαργύρου πάχους 10-30 μm): Στην περίπτωση αυτή ο χάλυβας με τη μορφή μιας συνεχούς ταινίας ή σύρματος καθαρίζεται από τα έλαια, τη σκόνη και τη σκουριά με θέρμανση σε κλίβανο. Στο πρώτο στάδιο όλοι οι οργανικοί ρυπαντές καίγονται με οξείδωση στους 500° C περίπου. Η επιφάνεια οξειδώνεται σε μορφή οξειδίου του τρισθενούς σιδήρου. Στη συνέχεια η ταινία περνάει σε μια ζώνη αναγωγής (και ταυτόχρονα ψύξης) όπου εισάγεται υδρογόνο σε θερμοκρασία 900 ° C περίπου έτσι ώστε να προκύψει μια καθαρή χαλύβδινη επιφάνεια. Κατά τη διάρκεια της ψύξης μπορεί να λάβει χώρα μερική επανοξειδωση, αλλά αυτή εμποδίζεται από τη ροή αζώτου.

Το ολικό πάχος του στρώματος επιψευδαργύρωσης εξαρτάται από: (α) τον τύπο και την επιφανειακή σκληρότητα του υποστρώματος του χάλυβα. (β) τη σύνθεση της επιφάνειας του χάλυβα. (γ) το χρόνο βύθισης. (δ) τη θερμοκρασία γαλβανίσματος. (ε) τον όγκο του χαλύβδινου τμήματος.

Το πλεονέκτημα της επιψευδαργύρωσης με θερμή εμβάπτιση σε λουτρό είναι ότι είναι οικονομική διαδικασία και μπορεί να εφαρμοστεί σε μικρά χρονικά διαστήματα αλλά και σε υλικά τα οποία έχουν περίπλοκο σχήμα. Ωστόσο ένα από τα μειονεκτήματα της είναι ότι η εφαρμοσμένη επικάλυψη μπορεί να μην παρουσιάζει τόσο αξιόπιστη συνεκτικότητα με το υπόστρωμα, σε σχέση με άλλες μεθόδους επιψευδαργύρωσης.

Επικασσιτέρωση (γάνωμα)

Η επικασσιτέρωση εφαρμόζεται κυρίως σε μεταλλικά αντικείμενα με σκοπό την προστασία από οξείδωση και διάβρωση από οργανικά οξέα. Έχει πάρα πολλές εφαρμογές στην βιομηχανία τροφίμων στην κονσερβοποιία αλλά και στις ηλεκτρονικές συσκευές. Το λουτρό εμβάπτισης αποτελείται συνήθως από καθαρό Sn σε θερμοκρασία 280-300° C και το πάχος των επικαλύψεων που επιτυγχάνεται είναι της τάξεως των 5-30 μm. Όπως και στην περίπτωση της επιψευδαργύρωσης, πριν την εμβάπτιση στο λουτρό, πρέπει να προηγηθεί ο επιμελής καθαρισμός της επιφάνειας του προς εμβάπτιση υλικού.



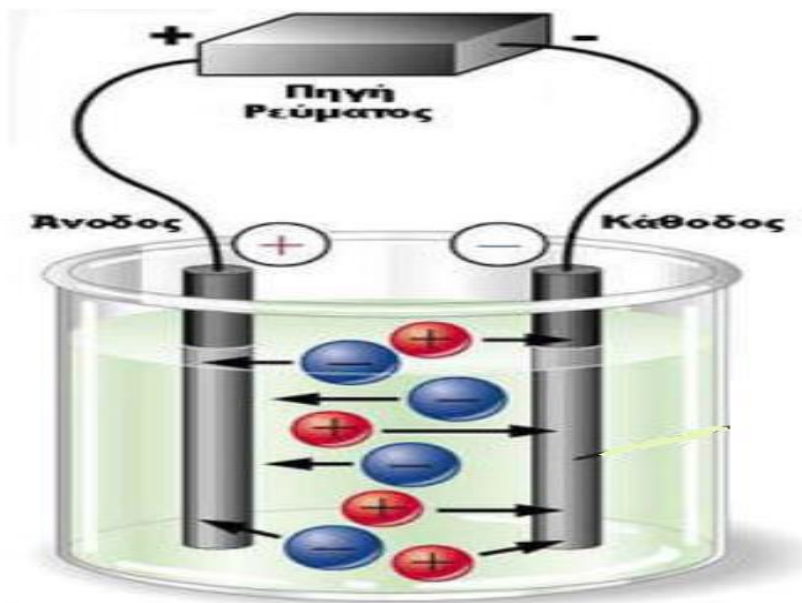
Σχήμα 2.8: Διαδικασία επικασιτέρωσης.

Επαργιλίωση

Το αργίλιο είναι το ισχυρότερο αποξειδωτικό και απαζωτικό στοιχείο και συντελεί σημαντικά στην αντίσταση του χάλυβα στη γήρανση. Στους κοινούς ανθρακοχάλυβες η ενσωμάτωση αργιλίου στην επιφάνειά τους (επαργιλίωση) αυξάνει την αντοχή τους σε οξείδωση σε υψηλή θερμοκρασία. Το λουτρό εμφάπτισης αποτελείται από καθαρό Al σε θερμοκρασία 650-700° C. Το πάχος των επικαλύψεων κυμένεται και συνήθως είναι μικρότερο από 50 μm.

2.2.2.2 Ηλεκτρολυτική απόθεση επικαλύψεων ^[17]

Η ηλεκτρολυτική απόθεση επικαλύψεων βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης. Η ηλεκτρόλυση είναι η ηλεκτροχημική διαδικασία, κατά την οποία προκαλούνται χημικές αντιδράσεις ως αποτέλεσμα της απορρόφησης ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση με τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, που λαμβάνουν χώρα στα γαλβανικά στοιχεία, οι ηλεκτρολύσεις συνιστούν πάντοτε μη αυθόρμητες διαδικασίες, αφού η πραγματοποίησή τους απαιτεί οπωσδήποτε προσφορά ενέργειας.



Σχήμα 2.9: Ηλεκτρολυτική Κυψελίδα

Μια ηλεκτρολυτική κυψελίδα (δηλαδή το ηλεκτροχημικό στοιχείο της ηλεκτρόλυσης) αποτελείται από ένα δοχείο, που περιέχει το ηλεκτρολυτικό λουτρό, δηλαδή ένα διάλυμα ή τήγμα ηλεκτρολύτη. Σ' αυτό εμβαπτίζονται δύο ηλεκτρόδια, κατασκευασμένα συνήθως είτε από ένα αδρανές μέταλλο (π.χ. Pt) είτε από το μέταλλο, που προέρχεται από την αναγωγή των κατιόντων του ηλεκτρολύτη. Τα δύο ηλεκτρόδια συνδέονται εξωτερικά μέσω μεταλλικού αγωγού με πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά την επιβολή ηλεκτρικής τάσης, τα ιόντα του ηλεκτρολύτη έλκονται από τα αντιθέτως προς αυτά φορισμένα ηλεκτρόδια.

Στο ηλεκτρόδιο που συνδέεται με το θετικό πόλο της ηλεκτρικής πηγής λαμβάνει χώρα οξειδωση, ενώ στο ηλεκτρόδιο που συνδέεται με τον αρνητικό πόλο λαμβάνει χώρα αναγωγή. Το ηλεκτρόδιο της οξειδωσης ονομάζεται άνοδος του, ενώ το ηλεκτρόδιο της αναγωγής ονομάζεται κάθοδος του κελιού, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.9.

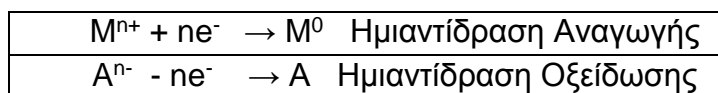
Μηχανισμός δημιουργίας ηλεκτρολυτικής επικάλυψης

Οι ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος βιομηχανικής επιμετάλλωσης και βασίζεται στις αρχές της ηλεκτρόλυσης που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Πιο συγκεκριμένα μια διάταξη ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης αποτελείται από ένα δοχείο (ηλεκτρολυτική κυψελίδα) το οποίο περιέχει το κατάλληλο ηλεκτρολυτικό λουτρό (μπάνιο), ανάλογα κάθε φορά με το είδος της επιμετάλλωσης που θα γίνει. Το λουτρό συνήθως, είναι υδατικό διάλυμα του άλατος του μετάλλου που πρόκειται να αποθεθεί. Έτσι, το άλας διίσταται στο νερό και βρίσκεται μέσα στην κυψελίδα με τη μορφή θετικών ιόντων (κατιόντα) μετάλλου και αρνητικών ιόντων (ανιόντα). Μέσα στο ηλεκτρολυτικό λουτρό είναι βυθισμένα τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της

καθόδου. Το ηλεκτρόδιο της ανόδου είναι συνδεδεμένο με το θετικό και το ηλεκτρόδιο της καθόδου με τον αρνητικό πόλο μιας πηγής συνεχούς ή παλμικού ρεύματος (PC ή PRC).

Η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος καθίσταται δυνατή λόγω της ύπαρξης των ιόντων μέσα στο διάλυμα. Με την εφαρμογή της τάσης στους πόλους της ηλεκτρολυτικής διάταξης τα ιόντα του μετάλλου μεταφέρονται μέσω του ηλεκτρολυτικού λουτρού προς την κάθοδο. Εκεί, προσλαμβάνουν ηλεκτρόνια και αποφορτίζονται (ανάγονται). Έτσι τα μεταλλικά άτομα αποτίθενται στην επιφάνεια της καθόδου και την επικαλύπτουν.

Από την άλλη μεριά, τα ανιόντα του άλατος κινούνται, λόγω της επίδρασης του ηλεκτρικού πεδίου προς την άνοδο. Εκεί αποδίδουν τα ηλεκτρόνια που τους περισσεύουν και αποφορτίζονται (οξειδώνονται). Δηλαδή μετατρέπονται σε ουδέτερα άτομα. Δηλαδή, το καθοδικό ηλεκτρόδιο είναι το υπόστρωμα και το ηλεκτρολυτικό διάλυμα είναι το υδατικό διάλυμα ενός άλατος του μετάλλου, M, που πρόκειται να αποτεθεί. Με την εφαρμογή κατάλληλης εξωτερικής τάσης V, στην κάθοδο λαμβάνει χώρα η αναγωγή του μεταλλικού ιόντος M^{n+} και κατά συνέπεια απόθεση M στην επιφάνεια της καθόδου. Οι ημιαντιδράσεις οξειδωσης και αναγωγής είναι οι ακόλουθες:



Επιπρόσθετα πρέπει να σημειωθεί ότι στις περισσότερες ηλεκτρολυτικές επιμεταλλώσεις η άνοδος αποτελείται από το μέταλλο M, το οποίο πρόκειται να αποτεθεί. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατόν, εκτός από την οξείδωση των των ανιόντων A^n να εκδηλωθεί και οξείδωση του μετάλλου M της ανόδου. Με αυτό το τρόπο η άνοδος μετατρέπεται σε κατιόντα M^{n+} και περνάει στο ηλεκτρολυτικό λουτρό.

Παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την δομή αλλά και τις ιδιότητες των παραγόμενων επικαλύψεων είναι οι κάτωθι:

- Η σύσταση του ηλεκτρολυτικού λουτρού, καθώς και η παρουσία οργανικών ή ανόργανων προσθέτων.
- Η φύση του υποστρώματος πάνω στο οποίο πραγματοποιείται η απόθεση.
- Οι επιβαλλόμενες συνθήκες ηλεκτρόλυσης, δηλαδή η πυκνότητα του ρεύματος απόθεσης, η θερμοκρασία του ηλεκτρολυτικού λουτρού, το pH του λουτρού και ο τρόπος ανάδευσής του. Επιπλέον η μορφή της πόλωσης της

ηλεκτρολυτικής κυψελίδας (DC,PC,PRC) διαδραματίζει μεγάλο ρόλο όσον αφορά την δομή και τις ιδιότητες των παραγόμενων επικαλύψεων.

Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά την σύσταση του ηλεκτρολυτικού λουτρού αλλά και την παρουσία οργανικών ή ανόργανων προσθέτων μέσα σε αυτό αναφέρονται τα εξής ^[18] :

Τα λουτρά που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρολυτικές επιμεταλλώσεις μπορεί να είναι:

➤ Όξινα διαλύματα: Αυτά τα διαλύματα χρησιμοποιούνται στην επινικέλωση, επιχάλκωση, επιψευδαργύρωση και επικασσιτέρωση και παρασκευάζονται από θειικά ή χλωριούχα άλατα του μετάλλου. Στην περίπτωση της επιχρωμίσωσης, παρασκευάζονται από χρωμικό οξύ. Τα διαλύματα αυτά αποτελούνται κυρίως από απλά ιόντα και σε αυτά μπορούν να εφαρμοστούν υψηλές πυκνότητες ρεύματος. Επίσης χαρακτηρίζονται και από υψηλές αποδόσεις ρεύματος

➤ Αλκαλικά διαλύματα: Τέτοιου είδους διαλύματα είναι τα κυανιούχα και χρησιμοποιούνται στην επιχάλκωση, επιψευδαργύρωση, επιχρύσωση, επικαδμίσωση κλπ. Στα διαλύματα αυτά περιέχονται πιο πολύπλοκα (σύμπλοκα) ιόντα, σε σχέση με τα όξινα διαλύματα. Στα αλκαλικά διαλύματα εφαρμόζονται χαμηλότερες πυκνότητες ρεύματος και παρουσιάζουν μικρότερες αποδόσεις ρεύματος.

➤ Σύνθετα διαλύματα: το είδος αυτών των διαλυμάτων έχει αναπτυχθεί τελευταία και είναι όξινα ή ουδέτερα. Τα σύνθετα όξινα διαλύματα περιέχουν σουλφαμικά για επιμετάλλωση Ni, Pb κ.α., φθοριοπυριτικά για επιμετάλλωση Sn, Pb, Ni, Zn και Cd. Τα σύνθετα ουδέτερα διαλύματα περιέχουν πυροφοσφορικά για επιμετάλλωση κυρίως Cu και τελευταία για επιμετάλλωση Sn, Zn, Pb και Ni.

Επιπρόσθετα, για την επιτυχημένη εφαρμογή μιας ηλεκτρολυτικής επικάλυψης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο συχνός έλεγχος και η σωστή συντήρηση των ηλεκτρολυτικών λουτρών. Πιο συγκεκριμένα προτείνονται τα κάτωθι:

➤ Ειδική κατεργασία με οξειδωτικά μέσα και ενεργό άνθρακα για να απομακρύνονται οι διάφορες ενώσεις που σχηματίζονται κατά την ηλεκτρόλυση.

➤ Φιλτράρισμα των ηλεκτρολυτικών λουτρών

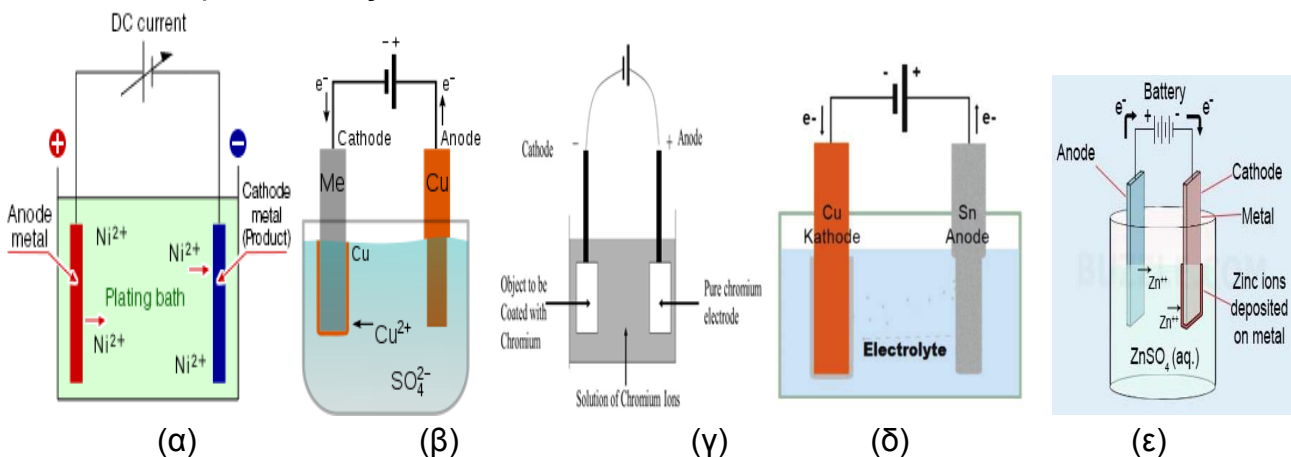
➤ Προληπτικά μέτρα αποφυγής μόλυνσης των λουτρών (καθαρισμός μετάλλων που πρόκειται να επιμεταλλωθούν, χρήση δεξαμενών διαμορφωμένων ώστε να είναι εύκολος ο καθαρισμός τους, προστασία δεξαμενών και ηλεκτροδίων με καλύμματα, για το χρονικό διάστημα που τελούν εκτός λειτουργίας).

Στα ηλεκτρολυτικά λουτρά προστίθενται πολύ συχνά πρόσθετα, που επηρεάζουν τα διάφορα χαρακτηριστικά των παραγόμενων επικαλύψεων. Πιο συγκεκριμένα τα πρόσθετα είναι οργανικές ή ανόργανες ενώσεις που ανάλογα με τη δράση τους διακρίνονται κυρίως σε:

- Λειαντικά, όταν βοηθούν ώστε η επικάλυψη να γίνει ομοιόμορφη και λεία.
- Στιλβωτικά, όταν προστίθενται για να γίνει η επικάλυψη στιλπνή.
- Διαβρέκτες, οι οποίοι επηρεάζουν την επιφανειακή τάση του λουτρού και εμποδίζουν το σχηματισμό βελονισμών στις επικαλύψεις.

Τα πρόσθετα χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες και η συγκέντρωσή τους στο διάλυμα κυμαίνεται από 10^{-4} μέχρι 10^{-2} M. Έχει αποδειχθεί ότι τα πρόσθετα επηρεάζουν τόσο τις φυσικές όσο και τις μηχανικές ιδιότητες των επικαλύψεων. Ο τρόπος με τον οποίο δρουν δεν έχει διευκρινιστεί πλήρως. Θεωρείται πολύ πιθανόν να προσροφώνται ή να εσωκλείνονται στην επικάλυψη. Στην περίπτωση ορισμένων στιλβωτικών πρόσθετων έχει διαπιστωθεί ότι αυτά προσροφώνται εκλεκτικά στην μεταλλική επιφάνεια κατά την διάρκεια της ηλεκτρόλυσης και μειώνουν το μέγεθος των κρυστάλλων του μετάλλου, δηλαδή το κάνουν να είναι μικροκρυσταλλικό και συνεπώς λείο και στιλπνό.

Στον πίνακα 2.1 περιέχονται οι συνθήκες ηλεκτρόλυσης αλλά και η σύνθεση του λουτρού ηλεκτρόλυσης για τις κυριότερες ηλεκτρολυτικές επιμεταλλώσεις. Επιπρόσθετα στο σχήμα 2.10 απεικονίζονται παραδείγματα σύνθεσης των ηλεκτρολυτικών κελιών για τις βασικότερες ηλεκτρολυτικές επιμεταλλώσεις.



Σχήμα 2.10.: Παραδείγματα ηλεκτρολυτικών κελιών (α) Επινικέλωσης (β) Επιχάλκωσης (γ) Επιχρωμίωσης (δ) Επικασσιτέρωσης (ε) Επιψευδαργύρωσης

Πίνακας 2.1: Συνθήκες ηλεκτρόλυσης και σύνθεση του λουτρού ηλεκτρόλυσης για τις κυριότερες ηλεκτρολυτικές επιμεταλλώσεις.

Τεχνική	Λουτρό ηλεκτρόλυσης	Συνθήκες ηλεκτρόλυσης	Παρατηρήσεις
Επιψευδαργύρωση	ZnCN+NaCN+NaOH	T=60-70°C i=2-4 A/dm ²	
Επικασσιτέρωση	Sn+NaOH	T=70-80°C i=1.5-2 A/dm ²	
Επιχάλκωση	CuCN+NaCN+KOH ή CuSO ₄ +H ₂ SO ₄	T=60-80°C i=2-5 A/dm ²	Το επίστρωμα Cu επικαλύπτεται συνήθως με λεπτό στρώμα Ni (προστασία από το H ₂ SO ₄) Προστασία σε διάβρωση.
Επινικέλωση	NiSO ₄ +NaCl+Βορικό οξύ	T=45-55°C i=2-5 A/dm ²	Πάχος επιστρώματος: 25-50 μm. Προστασία σε οξείδωση και για διακοσμητικούς σκοπούς.
Επιχρωμίωση	<u>Διακοσμητική</u> H ₂ CrO ₃ + H ₂ SO ₄	T=40-45°C i=10-20A/dm ²	Στιλπνό επίστρωμα Cr σε υπόστρωμα Cr. Πάχος επικάλυψης: 2.5-5 μm. Μικρή αντίσταση σε φθορά.
	<u>Σκληρή</u> H ₂ CrO ₃ + H ₂ SO ₄	T=50-55°C i=25-50A/dm ²	Πάχος επικάλυψης: 5-500 μm. Προστασία και διάβρωση

2.2.2.3 Χημική απόθεση επικαλύψεων (Electroless Plating) [19]

Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως ‘επιμετάλλωση χωρίς ρεύμα’ ή ‘επιμετάλλωση με εμβάπτιση’ ή ‘μη ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση’ και πραγματοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η δημιουργία μεταλλικού επιστρώματος είναι αποτέλεσμα χημικής αναγωγής ιόντων μετάλλου από το διάλυμα του. Το διάλυμα πρέπει να περιέχει ένα αναγωγικό μέσο και η επιφάνεια, που πάνω της γίνεται η απόθεση, να υποβοηθά την αναγωγή και να διατηρεί αυτή την ιδιότητα κατά την διάρκεια της απόθεσης. Μέταλλα που συνήθως επιμεταλλώνονται με αυτή την τεχνική είναι το νικέλιο, ο χαλκός, ο άργυρος, το κοβάλτιο και το παλλάδιο.

Οι μη ηλεκτρολυτικές διεργασίες επιμεταλλώσεων κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, τις αυτοκαταλυόμενες και τις μη καταλυόμενες. Οι μη καταλυόμενες διεργασίες πρόκειται για επιμεταλλώσεις όπου το αποτιθέμενο μέταλλο δεν καταλύει την αντίδραση αντικατάστασης, ή αναγωγής. Οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζουν ένα ανώτερο όριο στο πάχος αποθέματος που μπορεί να πετύχουν.

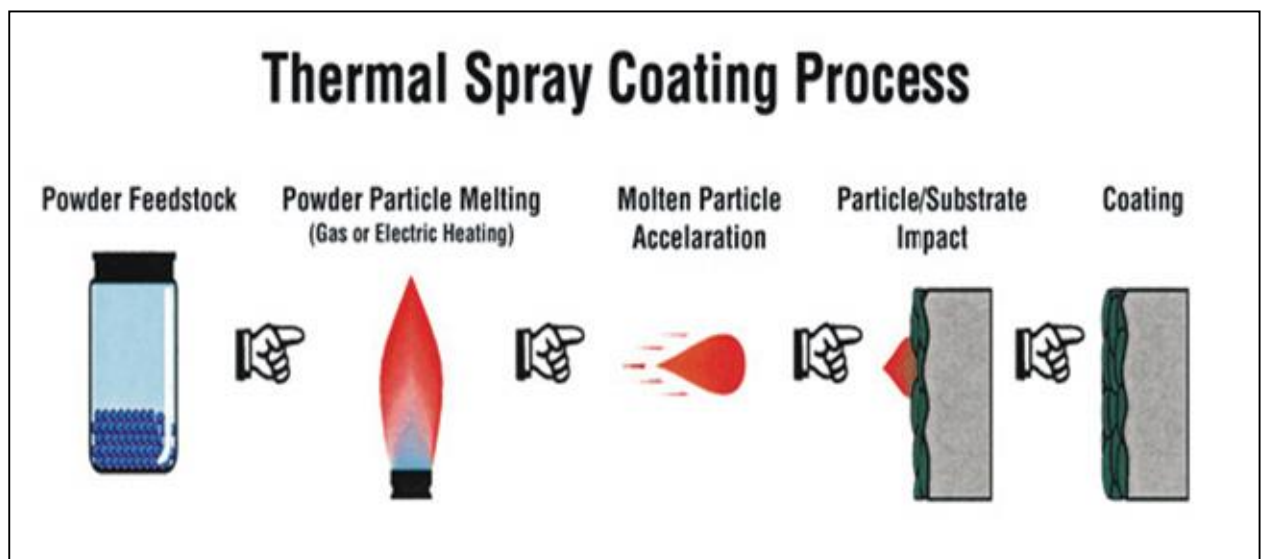
Αντιθέτως στις αυτοκαταλυόμενες διεργασίες η αντίδραση αναγωγής που λαμβάνει χώρα καταλύεται από το μέταλλο ή το κράμα που αποτίθεται. Άρα διατηρώντας την τροφοδοσία των μεταλλοίωντων και του αναγωγικού μέσου, συνεχίζονται και οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια. Τα αποθέματα που λαμβάνονται παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα αντίστοιχα που λαμβάνονται με τις μη καταλυόμενες διεργασίες καθώς:

➤ Η απόθεση δεν σταματά αμέσως μόλις το αντικείμενο καλυφθεί από το αποτιθέμενο μέταλλο.

- Τα μεταλλικά ιόντα του διαλύματος παύουν να ανάγονται μόλις σταματήσει η απόθεση στο αντικείμενο.
- Επιτυγχάνεται απόθεση μόνο στο προς επιμετάλλωση αντικείμενο και όχι σε όλες τις επιφάνειες που είναι σε επαφή με το λουτρό.

2.2.2.4 Επιφανειακές κατεργασίες θερμικού ψεκασμού.

Οι κατεργασίες αυτές συνίσταται στον ψεκασμό της προς επικάλυψη επιφάνειας με μόρια υλικού που βρίσκονται σε μια τηγμένη κατάσταση λόγω της θέρμανσης τους. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ειδικοί ψεκαστήρες (spray gun) όπου το μέταλλο εισάγεται, λιώνεται και επιταχύνεται προς το υπόστρωμα. Το υπόστρωμα βρίσκεται σε τέτοια θερμοκρασία (<200°C) όπου τα τηγμένα σωματίδια στερεοποιούνται ταχύτατα λόγω της μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς ψεκαζόμενου υλικού και περιβάλλοντος, προσδίδοντας άριστη πρόσφυση μεταξύ υποστρώματος - επίστρωσης. Το υλικό επίστρωσης μπορεί να βρίσκεται υπό μορφή σκόνης (powder), κεραμικής ράβδου (ceramic-rod), σύρματος (wire) ή τηγμένων υλικών (molten materials).



Σχήμα 2.11: Διαδικασία δημιουργίας επικαλύψεων με τεχνική θερμικού ψεκασμού όπου το υλικό επίστρωσης βρισκόταν υπό την μορφή σκόνης

Οι επιφανειακές κατεργασίες θερμικού ψεκασμού ταξινομούνται ανάλογα με το αν γίνεται χρήση φλόγας ή ηλεκτρικής ενέργειας και ανάλογα με την πηγή τήξης του υλικού επίστρωσης, όπως απεικονίζεται στον κάτωθι πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Ταξινόμηση επιφανειακών κατεργασιών θερμικού ψεκασμού με βάση την πηγή τήξης του υλικού επίστρωσης.

Επιφανειακές κατεργασίες θερμικού ψεκασμού	Θερμικός ψεκασμός με χρήση φλόγας	Λιωμένο μέταλλο (Molten metal)
		Σκόνη (Powder)
		Σύρμα (Wire)
		Κεραμική ράβδος (Ceramic rod)
		Εκτόνωση (Detonation gun)
		Υπερηχητική φλόγα (High Velocity Oxygen Fuel-HVOF)
	Θερμικός ψεκασμός με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας	Ηλεκτρικό τόξο (Electric arc)
		Πλάσμα (Plasma)

Ψεκασμός φλόγας καύσης με χρήση τηγμένου μετάλλου (Molten metal flame spraying)

Στην υπόψη θερμική διαδικασία ψεκασμού, το μεταλλικό υλικό που πρόκειται να ψεκαστεί είναι σε τηγμένη μορφή. Από καιρό έχει αναγνωρισθεί ότι τα ρευστά μπορούν να χωριστούν στα πολύ λεπτά σωματίδια από την ροή αερίου υψηλής ταχύτητας που προκαλείται από ένα ακροφύσιο.

Η πρώτη τεχνική ψεκασμού που αναπτύχθηκε ήταν το αποτέλεσμα πειραμάτων στην οποία το τηγμένο μέταλλο εισρέει σε μια συνεχή ροή αερίων υψηλής ταχύτητας. Η κύρια συσκευή αποτελούνταν από ένα συμπιεστή που παρέχει αέρα σε ένα θερμαινόμενο ελικοειδή σωλήνα. Ο θερμός αέρας χρησιμοποιήθηκε για να διατηρήσει σταθερή την ατμοσφαιρική πίεση σε μια χοάνη που γέμιζε με το τηγμένο μέταλλο και το εκτίναζε προς μια κατάλληλα προετοιμασμένη επιφάνεια. Το σύστημα αυτό ήταν ογκώδες, πρωτόγονο και αναποτελεσματικό, παρόλα αυτά όμως βοήθησε στην ανάπτυξη ενός φορητού και φιλικού προς το χρήστη εξοπλισμού.

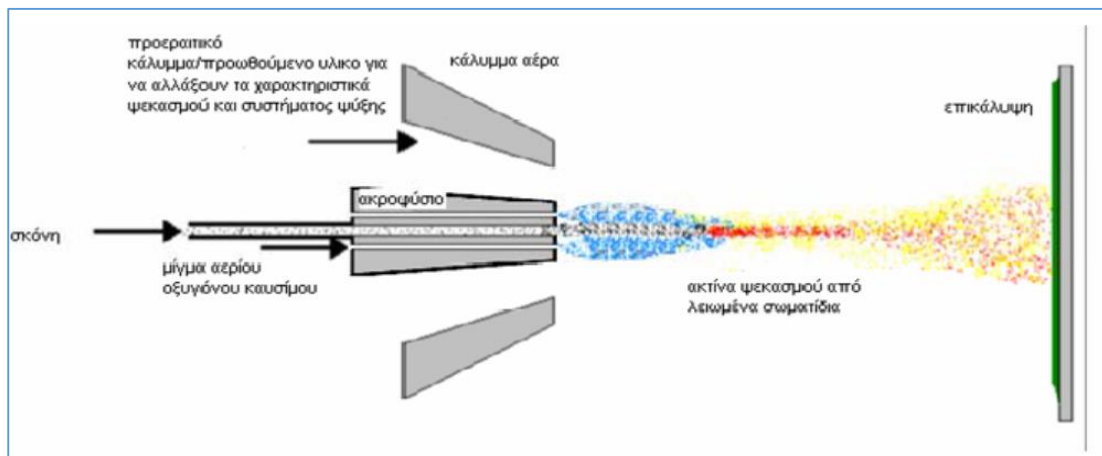
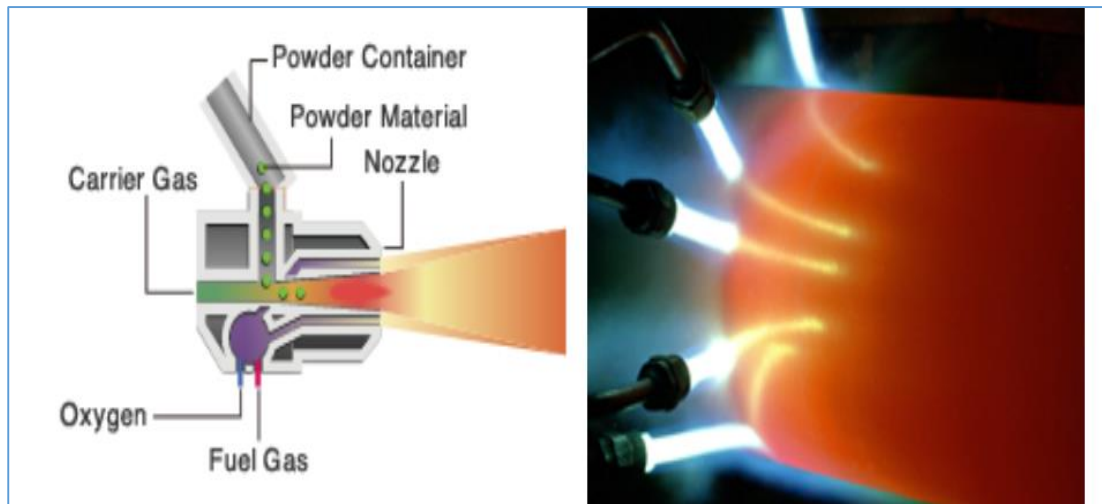
Στη συνέχεια αναπτύχθηκε μία τεχνική η οποία αποτελούνταν από ένα δαυλό, ένα φούρνο, ένα συμπιεστή και μια παροχή καυσίμου. Ο δαυλός είχε πολλές βαλβίδες αέρα και αερίων, ένα θάλαμο θέρμανσης (καυστήρας), ακροφύσιο, λαβή και το δοχείο με το τηγμένο μέταλλο. Το δοχείο ήταν ογκώδες έχοντας τη δυνατότητα να αποθηκεύσει 1,8 kg τηγμένου μετάλλου. Το δοχείο βρίσκεται πάνω από το θάλαμο θέρμανσης ενώ συμπιεσμένος αέρας εισέρχεται στον καυστήρα εντείνοντας την φλόγα. Η λαβή βρίσκεται έξω και προς τα κάτω από το δοχείο. Το μέταλλο βγήκε το δοχείο μέσω ενός μπροστινού στομίου όπου κατευθύνθηκε σε ένα ακροφύσιο. Συμπιεσμένος αέρας περιβάλλει το ακροφύσιο, ωθώντας το τηγμένο μέταλλο στην επιφάνεια επικάλυψης.

Η διαδικασία επικάλυψης με τηγμένο μέταλλο έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Πλεονεκτήματα είναι: η χρήση φθηνών πρώτων υλών και αερίων και ο σχεδιασμός του δαυλού είναι πολύ βασικός. Αξιοσημείωτα μειονεκτήματα είναι: η πολυπλοκότητα χρήσης του δαυλού καθώς μπορεί να

κρατηθεί μόνο σε οριζόντια θέση, υψηλό επίπεδο συντήρησης λόγω της οξειδωσης και της διάβρωσης του τηγμένου μετάλλου και η περιορισμένη χρήση μόνο σε μέταλλα με χαμηλό σημείο τήξης. Αυτή η μέθοδος θερμικού ψεκασμού βρίσκει εφαρμογή στην κατασκευή καλουπιών, μασκών και γενικά σχημάτων στην βιομηχανία πλαστικών, με την χρήση ειδικών κραμάτων βισμούθιου χαμηλού σημείου τήξης.

Ψεκασμός φλόγας καύσης με χρήση σκόνης (Powder flame spraying)

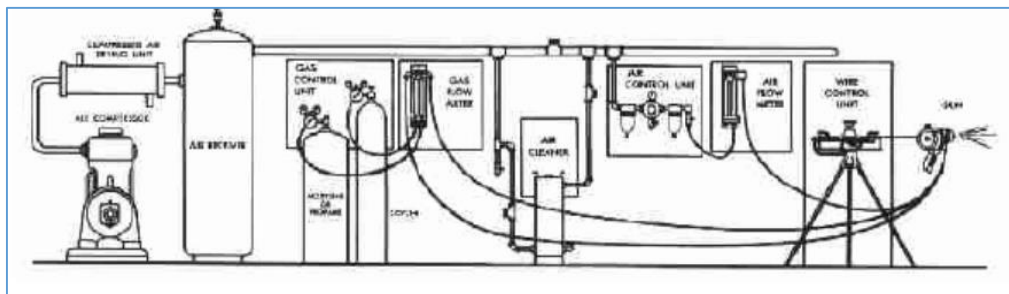
Στον ψεκασμό φλόγας καύσης με χρήση σκόνης το υλικό που ψεκάζεται είναι σε μορφή σκόνης. Αρχικά πραγματοποιείται εισαγωγή της σκόνης μέσω ενός κεντρικού σωλήνα στο ακροφύσιο στο οποίο λειώνει και μεταφέρεται από τα εξερχόμενα αέρια καύσιμα στην επιφάνεια εργασίας. Δυστυχώς, αυτή η διαδικασία παράγει επιστρώματα υψηλά σε οξειδία και κενό περιεχόμενο που πλησιάζει το 20% κατ'όγκο. Εντούτοις, η ποιότητα της επικάλυψης μπορεί να βελτιωθεί με τη παροχή αέρα στο ακροφύσιο μέσω ενός μικρού jet, το οποίο μειώνει την πίεση σε ένα θάλαμο πίσω από το ακροφύσιο. Αυτή η αίθουσα συνδέεται με το σωλήνα παροχής σκόνης. Η διαδικασία αυτή αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1930. Το ποσό σκόνης που μπορεί να μεταφερθεί από ένα ρεύμα αερίων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες συμπεριλαμβανομένων και των χαρακτηριστικών της σκόνης. Εάν ο αέρας δεν χρησιμοποιείται τότε η πυκνότητα του υποστηριζόμενου αερίου επηρεάζει την παροχή σκόνης. Για οποιαδήποτε σκόνη υπάρχει μια βέλτιστη ποσότητα που μπορεί να μεταφερθεί από ένα αέριο ρεύμα και εξαρτάται από την ταχύτητα και τον όγκο των χρησιμοποιούμενων αερίων. Άλλοι κρίσιμοι παράγοντες για τον καθορισμό της ποσότητας αυτής είναι οι μετρητές ροής και πίεσης λόγω της προφανούς σπουδαιότητάς τους. Οι ταχύτητες των σωματιδίων είναι σχετικά μικρές (<100 m/s) και οι δεσμοί που αναπτύσσονται είναι λιγότερο ισχυροί σε σχέση με αυτούς των διαδικασιών υψηλότερης ταχύτητας. Τα επίπεδα πορώδους είναι υψηλά ενώ αντίστοιχα η συνεκτικότητα είναι γενικά χαμηλή. Ο ρυθμός ψεκασμού κυμαίνεται συνήθως στα 0,5 έως 9 kg/h για όλα τα υλικά εκτός από αυτά με χαμηλό σημείο τήξης όπου ο ρυθμός αυξάνεται.



Σχήμα 2.12: Θερμικός ψεκασμός με χρήση φλόγας καύσεως και τροφοδοσία σκόνης

Ψεκασμός φλόγας καύσης με χρήση σύρματος (Wire flame spraying)

Η θερμική διαδικασία ψεκασμού φλόγας καύσης με τροφοδοσία σύρματος γνωστή στο παρελθόν ως διαδικασία επιμετάλλωσης, ψεκασμού φλόγας και ψεκασμού μετάλλων εφευρέθηκε αρχικά το 1910 από τον Schoorp στην Ελβετία.

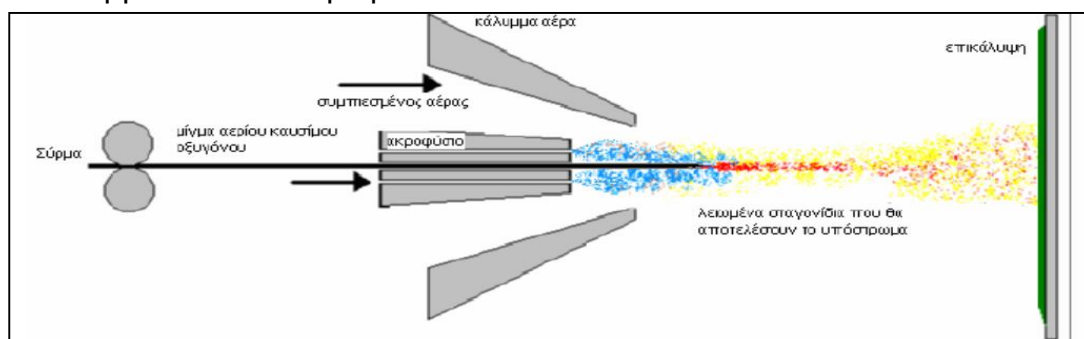


Σχήμα 2.13: Θερμικός ψεκασμός με χρήση φλόγας καύσεως και τροφοδοσία σύρματος

Η διαδικασία ψεκασμού φλόγας είναι βασικά ο ψεκασμός του λειωμένου μετάλλου (τα κεραμικά και τα μείγματά τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ράβδους ή σε σύνθετη συρματινή μορφή) επάνω σε μια επιφάνεια για να

παρέχει το επίστρωμα. Το υλικό με μορφή καλωδίων λειώνει σε μια φλόγα (συνήθως οξυακετυλινική φλόγα) και ψεκάζεται χρησιμοποιώντας το συμπιεσμένο αέρα για να διαμορφώσει έναν λεπτό ψεκασμό. Όταν ο ψεκασμός έρχεται σε επαφή με την έτοιμη επιφάνεια ενός υλικού που θα αποτελέσει το υπόστρωμα, τα λεπτά λειωμένα σταγονίδια σταθεροποιούν γρήγορα τη διαμόρφωση ενός επιστρώματος.

Αυτή η διαδικασία ψεκασμού φλόγας καλείται "κρύα διαδικασία" (σχετικά με το υλικό του υποστρώματος που χρησιμοποιείται) καθώς η θερμοκρασία υποστρώματος μπορεί να κρατηθεί χαμηλή κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας αποφεύγοντας τη ζημία, τις μεταλλουργικές αλλαγές και τη διαστρέβλωση στο υλικό του υποστρώματος. Αυτή η διαδικασία ψεκασμού φλόγας έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στο παρελθόν κι εξακολουθείται να χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα για την εργασία στοιχείων μηχανών και για τη δημιουργία αντιδιαβρωτικών επιστρωμάτων.



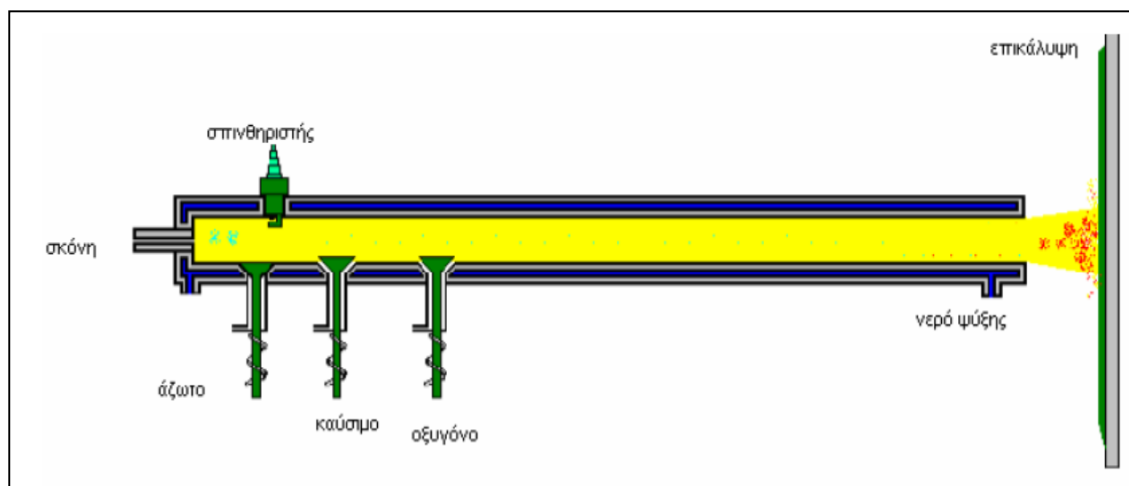
Σχήμα 2.14: Απεικόνιση τμημάτων διάταξης θερμικού ψεκασμού με χρήση φλόγας καύσεως και τροφοδοσία σύρματος

Ψεκασμός φλόγας καύσης με τροφοδοσία κεραμικής ράβδου (Ceramic rod flame spraying)

Κατά τον ψεκασμό φλόγας καύσης με τροφοδοσία κεραμικής ράβδου, το υλικό που ψεκάζεται είναι με μορφή κεραμικής ράβδου. Η τεχνική αυτή προέκυψε από την απαίτηση για δημιουργία πυρίμαχων επικαλύψεων καθώς ο ψεκασμός φλόγας με χρήση σκόνης, εξαιτίας της πορώδους φύσης του, στερούνταν την ακεραιότητα και την προστασία που απαιτούνταν. Η αρχή της λειτουργίας της μεθόδου είναι παρόμοια με αυτή του ψεκασμού με χρήση σύρματος (η φλόγα του ακροφυσίου είναι ομόκεντρη στο σύρμα ή τη ράβδο προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ομοιόμορφη θέρμανση). Η μόνη διαφοροποίηση έγκειται ως προς τους οδηγούς κυλίνδρους όπου απαραίτητη ήταν η ανάπτυξη ειδικών νέων κυλίνδρων για την ώθηση των ράβδων. Οι ταχύτητες των σωματιδίων και στις δυο μεθόδους (σύρμα και ράβδος) είναι περίπου ίδιες (~185 m/s) ενώ οι πυκνότητες των επικαλύψεων έχουν μετρηθεί σε περίπου 95% κατ'όγκο. Οι κεραμικές ράβδοι είναι στα 61 cm (24 in) μήκος και υπάρχουν σε τρεις διαμέτρους 1/8, 3/16 και 1/4 in.

Ψεκασμός φλόγας καύσης με εκτόνωση (Detonation gun flame spraying)

Το πυροβόλο όπλο που χρησιμοποιείται στο θερμικό ψεκασμό με εκτόνωση, αποτελείται βασικά από ένα μακρύ σωλήνα με κρύο νερό, ο οποίος περιέχει βαλβίδες εισαγωγής για τα αέρια και τη σκόνη, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15: Θερμικός ψεκασμός με χρήση φλόγας καύσεως με εκτόνωση

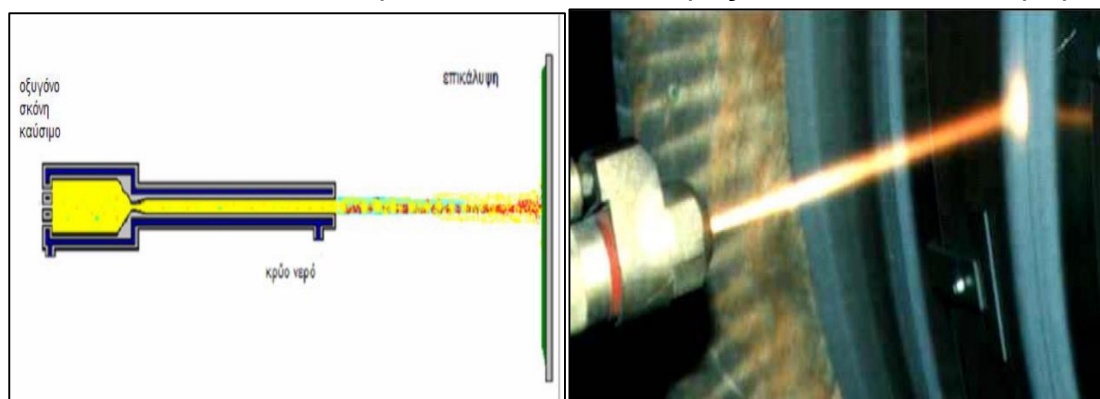
Το οξυγόνο και τα καύσιμα (συνήθως ασετυλίνη) τροφοδοτούνται στο σωλήνα μαζί με ποσότητα σκόνης. Η διαδικασία ξεκινάει από ένα μετρικό σύστημα αερίων/σκόνης που υπολογίζει και μεταφέρει την κατάλληλη ποσότητα μίγματος στο θάλαμο καύσης. Το προκύπτων κρουστικό κύμα από την έναυση της καύσης μέσω ηλεκτρικού σπινθήρα (spark plug) επιταχύνει τα σωματίδια σκόνης κατά μήκος του σωλήνα έως το υπόστρωμα σε ταχύτητες μεγαλύτερες από 731 m/sec και επιτυγχάνει θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 4.000°C (7.232°F). Οι μεγάλες πιέσεις (~1MPa), που αναπτύσσονται λόγω της εκτόνωσης, κλείνουν τις βαλβίδες ελέγχου των αερίων έως ότου η πίεση στο θάλαμο καύσης εξισωθεί. Όταν αυτό απαιτείται, η παραπάνω διαδικασία (ένας κύκλος) μπορεί να επαναληφθεί 4 έως 8 φορές το δευτερόλεπτο. Κάθε εκτόνωση εναποθέτει ένα πυκνό, μερικά μικρόμετρα παχύ (διαμέτρου περίπου 2,54 cm) στρώμα υπολειμμάτων της καύσης μέσα στο θάλαμο εκτόνωσης. Η επανάληψη της διαδικασίας παράγει παχύτερα στρώματα υπολειμμάτων. Γι' αυτό το λόγο μεταξύ δυο κύκλων υπάρχει ένα διάστημα εισαγωγής αζώτου (nitrogen purge) για την εκκαθάριση των υπολειμμάτων αυτών.

Οι επικαλύψεις εκτόνωσης χαρακτηρίζονται από άριστη πυκνότητα και πρόσφυση καθώς και χαμηλό επίπεδο οξειδίων. Βρίσκουν εφαρμογή στην βιομηχανία επεξεργασίας σκληρών υλικών, κυρίως καρβιδίων, σε επιφάνειες υποκειμένες σε "επιθετική φθορά". Τέλος, η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται

από υψηλό θόρυβο (>150 dBA) οπότε κρίνεται απαραίτητη η χρήση ηχητικής μόνωσης στην εγκατάσταση για τον περιορισμό των εκπομπών θορύβου.

Ψεκασμός με χρήση υπερηχητικής φλόγας (High Velocity Oxygen Fuel - HVOF)

Ο ψεκασμός με χρήση υπερηχητικής φλόγας (HVOF) είναι μια διαδικασία ψεκασμού φλόγας καύσης με υψηλή ταχύτητα. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό από οξυγόνο και διάφορα αέρια καύσιμα όπως υδρογόνο, προπάνιο, προπυλένιο και κηροζίνη. Στο θάλαμο καύσης, τα υποπροϊόντα καύσης διογκώνονται και εξωθούνται έξω μέσω ενός στομίου μικρής διαμέτρου (8 έως 9 mm) με πολύ υψηλές ταχύτητες (>1400 m/s). Οι σκόνες που ψεκάζονται μέσω HVOF εγχέονται αξονικά μέσα στα διογκωμένα θερμά αέρια τα οποία προωθούνται προς τα εμπρός,



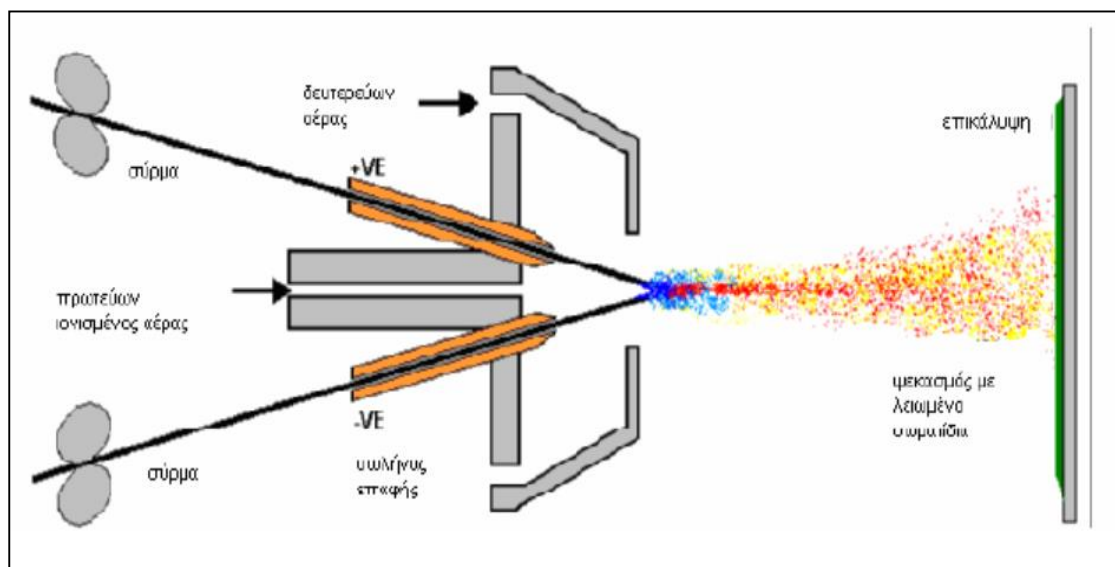
Εικόνα 2.5: Ψεκασμός υπερηχητικής φλόγας (HVOF)

θερμαίνονται και επιταχύνονται σε μια επιφάνεια προς διαμόρφωση της επικάλυψης. Οι ταχύτητες των αερίων υπερβαίνουν το 1 Mach ενώ οι θερμοκρασίες αγγίζουν τους 2500°C έως 3100°C. Ο ρυθμός εναπόθεσης υλικού με τροφοδοσία σκόνης αλλά και σύρματος κυμαίνεται από 2.3 έως 14 kg/h. Μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν ο χαμηλός ρυθμός εναπόθεσης και η οξειδωση των σωματιδίων κατά τον ψεκασμό. Οι μελλοντικές προσπάθειες εστιάζουν στην ανάπτυξη πιο παχιών επικαλύψεων και στον καλύτερο έλεγχο της διαδικασίας του ψεκασμού και κυρίως του χρόνου έκθεσης στον ατμοσφαιρικό οξυγόνο.

Ψεκασμός με χρήση ηλεκτρικού τόξου (Electric Arc Spraying)

Η διαδικασία αυτή διαφέρει από τις άλλες διαδικασίες θερμικού ψεκασμού καθώς δεν υπάρχει καμία εξωτερική πηγή θερμότητας όπως σε οποιαδήποτε διαδικασία ψεκασμού φλόγας καύσης. Η θέρμανση και η τήξη

λαμβάνουν χώρα όταν τα δύο ηλεκτρικά αντίθετα φορτισμένα σύρματα (που εμπεριέχουν το υλικό επίστρωσης) έρθουν σε επαφή με τέτοιο τρόπο ώστε ένα ελεγχόμενο ηλεκτρικό τόξο δημιουργείται στην διατομή τους. Το τηγμένο μέταλλο ψεκάζεται και προωθείται προς την επιφάνεια κατεργασίας μέσω αεριωθούμενων συστημάτων συμπιεσμένου αέρα ή αερίων. Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται με την δημιουργία του ηλεκτρικού τόξου είναι της τάξεως των 5000° C και ο ρυθμός ψεκασμού φτάνει τα 50 kg/h για πηγή ρεύματος 450 A.



Σχήμα 2.16: Ψεκασμός με χρήση ηλεκτρικού τόξου

Οι βασικές παράμετροι όσον αφορά την ποιότητα των σχηματιζόμενων επικαλύψεων είναι η τάση και η ένταση του ρεύματος, η διάμετρος και η ταχύτητα τροφοδοσίας του σύρματος, η πίεση διοχέτευσης του αέρα, η απόσταση του ακροφυσίου από το υπόστρωμα και η ταχύτητα προώθησης του πιστολιού. Το πλεονέκτημα του ψεκασμού με χρήση τόξου είναι το υψηλό ποσοστό απόθεσής του κάνοντας τα υλικά ανθεκτικά σε διάβρωση επιστρώματα ψευδάργυρου ή αλουμινίου, οι χαμηλές τρέχουσες δαπάνες, η ευχρηστότητα για μεγάλες περιοχές ψεκασμού και για υψηλά ποσοστά παραγωγής.

Ψεκασμός με χρήση πλάσματος (Plasma Spraying)

Οι ψεκασμοί με πλάσμα ξεκίνησαν το 1939 και στα μέσα της δεκαετίας του '60 αντικατέστησαν σχεδόν ολοκληρωτικά τους ψεκασμούς με φλόγα και με τόξο, κυρίως σε εφαρμογές για προστασία από φθορά, διάβρωση και οξείδωση. Είναι η σημαντικότερη από τις μεθόδους επικάλυψης με ψεκασμό. Το υλικό υπό μορφή σκόνης τήκεται λόγω της ενέργειας πλάσματος (θερμό

ιονισμένο αέριο), που δημιουργείται με το πέρασμα ενός αερίου από ηλεκτρικό τόξο το οποίο σχηματίζεται μεταξύ δύο μη αναλώσιμων ηλεκτροδίων.

Για το σχηματισμό του πλάσματος συνήθως χρησιμοποιούνται αργό, ήλιο, υδρογόνο, άζωτο και άλλα αέρια κατά περίπτωση. Οι τιμές του ρεύματος και της τάσης διαφέρουν για κάθε όπλο ψεκασμού πλάσματος ανάλογα με τον σχεδιασμό των ηλεκτροδίων, τις ροές και το είδος των αερίων. Επίσης, το όπλο λειτουργεί συνήθως σε ενέργειες στην περιοχή των 20 – 100KW, ενώ η θερμοκρασία του πλάσματος κυμαίνεται από 6.000 – 11.100°C και στην έξοδο του πλάσματος φτάνει τους 5500 °C. Είναι δηλαδή πολύ υψηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης οποιουδήποτε δύστηκτου υλικού. Η ταχύτητα ψεκασμού είναι της τάξης των 240 – 550 m/s.

Plasma Spray Process

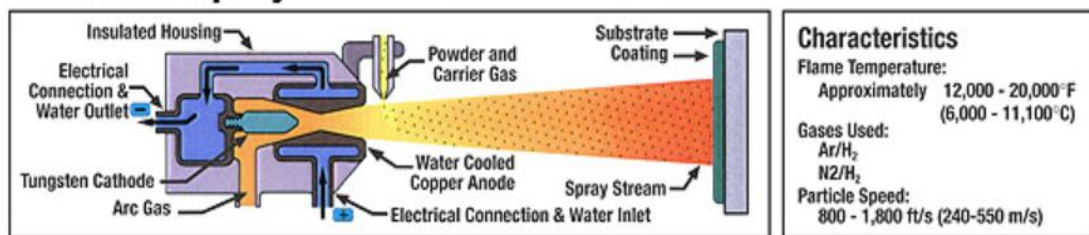
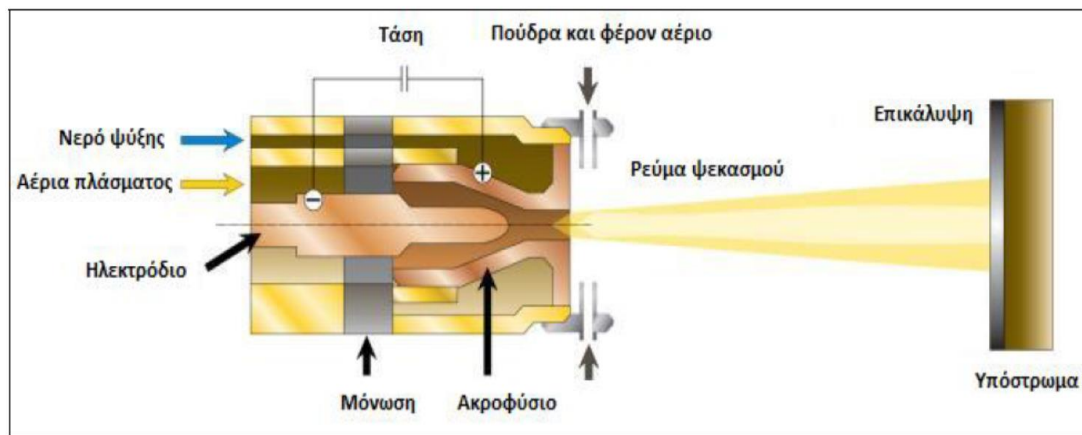


Photo Courtesy of Westaim Ambeon

Σχήμα 2.17: Διαδικασία ψεκασμού πλάσματος



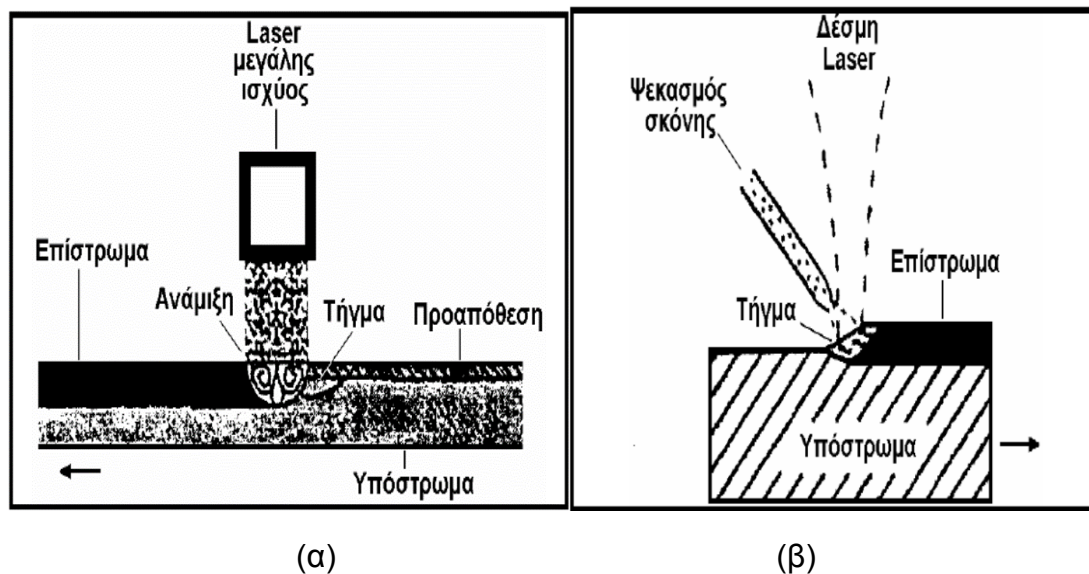
Σχήμα 2.18: Διάταξη ψεκασμού πλάσματος

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του ψεκασμού πλάσματος σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους θερμικού ψεκασμού (φλόγας και τόξου) είναι η ποιότητα της επικάλυψης. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά του είναι το κόστος του αντίστοιχου εξοπλισμού. Ο ψεκασμός με χρήση πλάσματος μπορεί να διαχωριστεί σε ψεκασμό πλάσματος υπό συνθήκες περιβάλλοντος και ψεκασμό πλάσματος υπό ειδικές συνθήκες περιβάλλοντος. Η υπόψη διαδικασία θερμικού ψεκασμού αναλύεται πλήρως στο κεφάλαιο 3 της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.2.2.5 Ψεκασμός με χρήση ακτινοβολίας Laser (Laser Spraying)

Οι υψηλής ισχύος διατάξεις laser μπορούν να παράγουν υψηλής ενεργητικότητας και κατευθυντικότητας ακτινοβολίες που χρησιμεύουν στην εναπόθεση επικαλύψεων. Το υπό εναπόθεση υλικό, σε μορφή σκόνης ή σύρματος, εναποτίθεται στο υποστρώμα μέσω της διαδικασίας τήξης του. Η τήξη επιτυγχάνεται με την χρήση ακτινοβολίας laser ισχύος $10^4 - 10^6 \text{ W/cm}^2$. Ο προαναφερθέν ψεκασμός μπορεί να επιτευχθεί είτε με προαπόθεση σκόνης στην επιφάνεια του τεμαχίου είτε με ταυτόχρονο ψεκασμό σκόνης, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.19. Στην πρώτη περίπτωση η δέσμη laser σαρώνει την επιφάνεια του υποστρώματος η οποία φέρει προαποτιθειμένη σκόνη επ' αυτής. Επέρχεται τήξη της σκόνης, που οδηγεί σε ανάμειξη των υλικών επιθέματος και υποστρώματος. Στην δεύτερη περίπτωση η δέσμη laser προκαλεί τήξη της επιφάνειας του υποστρώματος μέσα στην οποία καταλήγει το ψεκαζόμενο υλικό. Η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται από επαναληψιμότητα, δυνατότητα αυτοματοποίησης και ευχέρεια κατεργασίας πολύπλοκων γεωμετριών.

Οι επικαλύψεις που αποτίθενται με την χρήση ακτινοβολίας laser είναι εξαιρετικά πυκνές, και η μικροδομή τους χαρακτηρίζεται από την απουσία ρωγμών και μικροπορώδους. [20]



Σχήμα 2.19: Διάταξη ψεκασμού με χρήση ακτινοβολίας laser (α) με προαπόθεση σκόνης στην επιφάνεια του τεμαχίου και (β) με ταυτόχρονο ψεκασμό σκόνης

2.2.2.6 Συμβατικές και Επιταξιακές Τεχνικές Εναπόθεσης υπό κενό

Οι υπόψη Τεχνικές ταξινομούνται στην Φυσική Εναπόθεση Ατμών και στην Χημική Εναπόθεση Ατμών, όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

Φυσική Εναπόθεση Ατμών Physical Vapor Deposition (PVD)

Οι επιφανειακές κατεργασίες με φυσική εναπόθεση ατμών (PVD) είναι ατομιστικές διαδικασίες εναπόθεσης λεπτών υμενίων κατα τις οποίες το προς εναπόθεση υλικό εξαχνώνεται από την στερεά ή υγρή κατάσταση στην μορφή ατόμων ή μορίων, και μεταφέρεται υπό την μορφή ατμών μέσω κενού (ή χαμηλής πίεσης αδρανούς αερίου ή πλάσματος) στο υπόστρωμα, όπου και συμπυκνώνεται. Σε αντίθεση με τις τεχνικές CVD δεν λαμβάνει χώρα καμία χημική αντίδραση. Οι υπόψη τεχνικές χρησιμοποιούνται κυρίως για την εναπόθεση λεπτών υμενίων με πάχος από μερικά nm έως κάποια μm. Ωστόσο με τις τεχνικές αυτές είναι δυνατή η εναπόθεση πολυστρωματικών και πιο παχιών επικαλύψεων. Το σχήμα και το μέγεθος των υποστρωμάτων ποικίλει και μπορεί να είναι από πολύ μεγάλα έως πολύ μικρά με πολύπλοκες γεωμετρίες. Ο ρυθμός εναπόθεσης κυμαίνεται από 1-10nm / sec. Για την επίτευξη υψηλής ποιότητας υμενίων απαιτείται η δημιουργία συνθηκών υψηλού κενού (high vacuum).

Πίνακας 2.3: Συνθήκες κενού

Συνθήκες κενού			
Όρια Πιέσεων	Rough	High	Ultra High
mbar	atm- $1,33 \times 10^{-3}$	$1,33 \times 10^{-3}$ - $1,33 \times 10^{-8}$	$1,33 \times 10^{-8}$ - $1,33 \times 10^{-12}$
Torr	atm - 10^{-3}	10^{-3} - 10^{-8}	10^{-8} - 10^{-12}
Pa	atm-0,133	0,133 - $1,33 \times 10^{-6}$	$1,33 \times 10^{-6}$ - $1,33 \times 10^{-10}$

Οι PVD τεχνικές ταξινομούνται στις ακόλουθες τεχνικές:

- Εξάχνωση υπό κενό (vacuum deposition, evaporation).
- Εξαέρωση πλάσματος ή ιοντοβολή ή καθοδικός θρυμματισμός (sputter deposition).
- Παλμική εναπόθεση με laser (pulse laser deposition)
- Ιοντική επιμετάλλωση (ion plating).

Εξάχνωση υπό κενό (vacuum deposition, evaporation)

Η εξάχνωση υπό κενό είναι η διαδικασία PVD όπου όπου το υλικό από μια πηγή θεμικής εξάχνωσης (είτε ηλεκτρική αντίσταση είτε δέσμη ηλεκτρονίων) διαχέεται μέσα στο θάλαμο που βρίσκεται υπό κενό και εναποτίθεται στο υπόστρωμα μέσω της διαδικασίας της συμπύκνωσης.

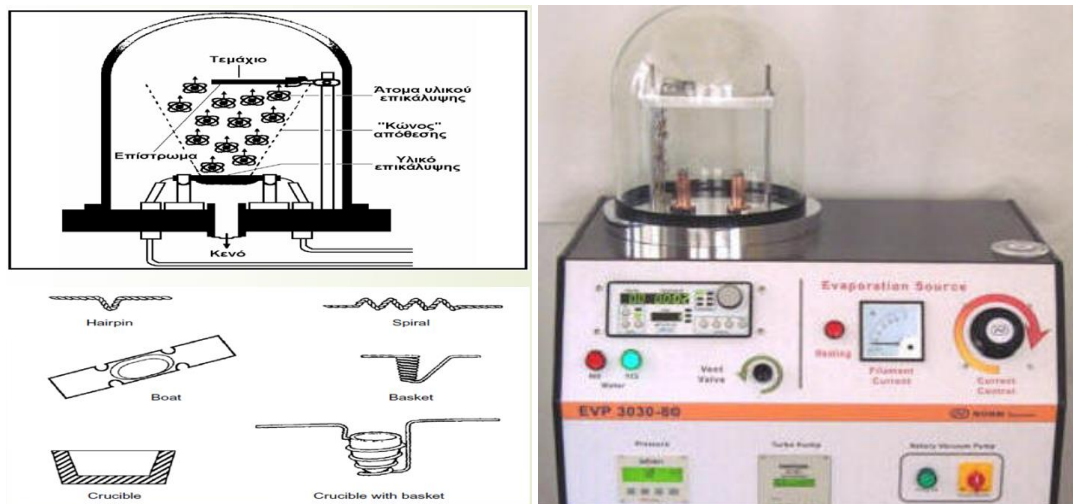
Το κενό μέσα στο θάλαμο πρέπει να είναι της τάξεως των 10^{-4} Torr (ή καλύτερο) ώστε τα άτομα ή μόρια από την πηγή εξάχνωσης να εναποτίθενται

στο υπόστρωμα χωρίς ενδιάμεσες συγκρούσεις με εναπομείναντα μόρια του αερίου. Αν όμως απαιτείται η απόλυτη καθαρότητα του σχηματιζόμενου υμενίου τότε η εξάχνωση υπό κενό μπορεί να γίνει και στα 10^{-7} mbar ή ακόμα και στα 10^{-9} mbar

Τα είδη εξάχνωσης υπό κενό είναι η εξάχνωση με θέρμανση από διάταξη ηλεκτρικής αντίστασης (thermal evaporation) και η εξάχνωση με θέρμανση από δέσμη ηλεκτρονίων (EBE, Electron Beam Evaporation).

Για υλικά που εξαχνώνονται κάτω από τους 1500°C χρησιμοποιείται η πρώτη μέθοδος, ενώ για υλικά που εξαχνώνονται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1500°C χρησιμοποιείται η δεύτερη.

Όσον αφορά την εξάχνωση με θέρμανση από διάταξη ηλεκτρικής αντίστασης, η εξάχνωση του προς εναπόθεση υλικού γίνεται σε θάλαμο κενού με τη βοήθεια πηγής θερμότητας (αντίστασης). Η εναπόθεση γίνεται με συμπύκνωση των παραγομένων ατμών κατά την πρόσπτωσή τους στην επιφάνεια υποστρώματος.

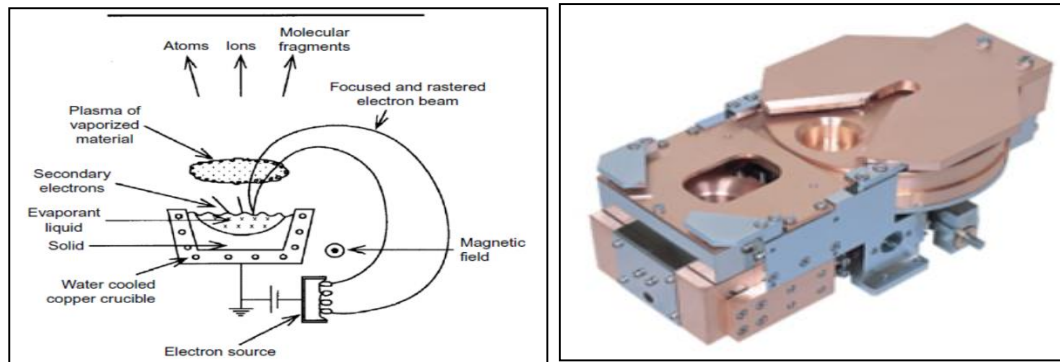


Σχήμα 2.20: Απεικόνιση της λειτουργίας μιας τυπικής διάταξης PVD thermal evaporation.

Τα τυπικά υλικά που χρησιμοποιούνται για αντιστάσεις είναι το βολφράμιο, το ταντάλιο και το μολυβδαίνιο και εφαρμόζονται σε αυτά μεγάλη ένταση ρεύματος (εκατοντάδες Amperes) και χαμηλή διαφορά δυναμικού (<10V).

Με την χρήση τους οι ιδιότητες των αντιστάσεων υποβαθμίζονται λόγω της αντίδρασης τους με τα εκάστοτε υλικά προς εξάχνωση, και γι' αυτό πρέπει να αλλάζονται ώστε να αποφευχθεί το ενδεχόμενο μόλυνσης της εναποτιθέμενης επικάλυψης/ υμενίου.

Η δεύτερη τεχνική εξάχνωσης υπό κενό είναι η Εξάχνωση με θέρμανση από δέσμη ηλεκτρονίων (EBE). Στην εξάχνωση με θέρμανση από δέσμη ηλεκτρονίων την τήξη και εξάχνωση του προς εναπόθεση υλικού προκαλεί δέσμη ηλεκτρονίων που παράγεται με θερμιονική εκπομπή από ένα νήμα (συνήθως W) στο οποίο έχει εφαρμοστεί διαφορά δυναμικού της τάξεως των 10-20 kV.



Σχήμα 2.21: Απεικόνιση της λειτουργίας μιας τυπικής διάταξης PVD Electron Beam Evaporation

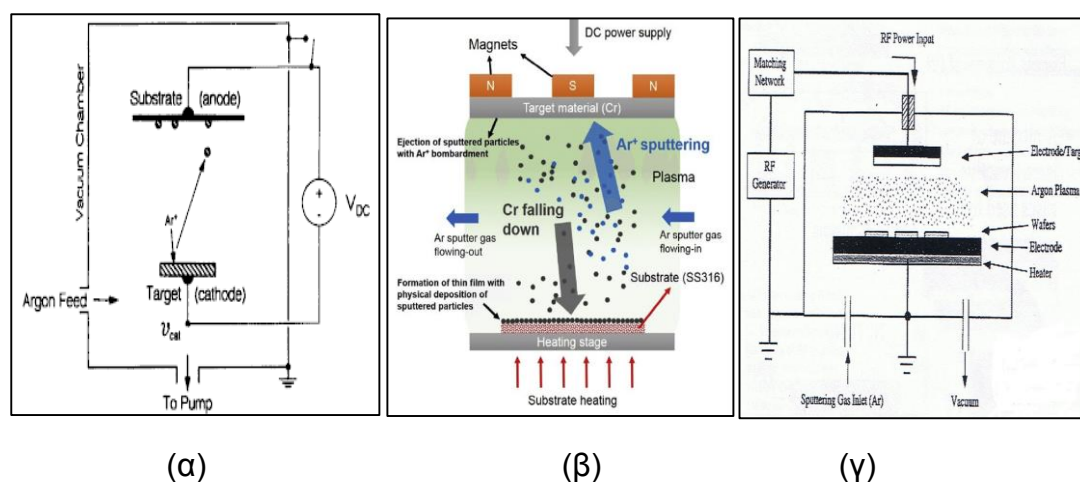
Η δέση των ηλεκτρονίων κατευθύνεται υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου προς τον στόχο. Πιο συγκεκριμένα η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε θερμική μετά την πρόσκρουση στην επιφάνεια του στόχου. Έτσι δημιουργείται τοπικά σε μια επιφάνεια διαμέτρου 1-2 mm μια μικρή λίμνη αναβράζοντος υλικού που εξατμίζεται. Οι ατμοί συμπυκνώνονται στο υπόστρωμα και σχηματίζεται το λεπτό υμένιο. Το δοχείο στο οποίο περιέχεται το προς εξάχνωση υλικό είναι συνήθως από Cu και ψύχεται ώστε να περιοριστεί η πιθανότητα εξάχνωσης του υλικού του ίδιου του δοχείου και επιμόλυνσης του σχηματιζόμενου υμενίου.

Ένα χαρακτηριστικό των θαλάμων εναπόθεσης είναι η σχετικά μεγάλη απόσταση μεταξύ του προς εξάχνωση υλικού και του υποστρώματος. Η απόσταση αυτή εξασφαλίζει ότι το υπόστρωμα δεν θα επηρεαστεί από την θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται και επίσης αφήνει επαρκή χώρο στον θάλαμο για την ποικίλη χωροταξική διεύθυνση του υποστρώματος αλλά και για την τοποθέτηση ειδικών διατάξεων shutters που απομονώνουν το υπόστρωμα από το προς εναπόθεση υλικό. Η παρακολούθηση της θερμοκρασίας υποστρώματος γίνεται με τοποθέτηση θερμοστοιχείων στην διάταξη συγκράτησης του υποστρώματος που ωστόσο δεν δίνει πάντα αξιόπιστες τιμές αφού πολλές φορές το υπόστρωμα είναι θερμικά μη αγωγίμο. Ωστόσο πολλές φορές τέτοια θερμοστοιχεία μπορούν να εισαχθούν στο ίδιο το υπόστρωμα με πιο αξιόπιστες τιμές T.

Η παρακολούθηση της μάζας, του ρυθμού εναπόθεσης και του παχους του εναποτιθέμενου υμενίου επιτυγχάνεται με πιεζοκρυσταλλικό ταλαντωτή. Ο πιεζοκρυστάλλος βρίσκεται μέσα στο θάλαμο εξάχνωσης, στην ίδια περιοχή με το υπόστρωμα και δέχεται τα ίδια άτομα που συμπυκνώνονται και πάνω στο υπόστρωμα. Η εναποτιθέμενη στρώση αλλάζει τον όγκο του κρυστάλλου και άρα και τη συχνότητα του ταλαντωτή. Από τη μεταβολή της συχνότητας προσδιορίζεται το πάχος του εναποτιθέμενου υμενίου. Ο έλεγχος και η παρακολούθηση της θερμοκρασίας της πηγής εξάχνωσης είναι πολύ δύσκολος. Εφόσον ο ρυθμός εναπόθεσης εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία της πηγής εξάχνωσης, συμπεραίνουμε ότι ο έλεγχος του ρυθμού εναπόθεσης είναι κάτι πολύ δύσκολο ως αδύνατο. Αντιθέτως στην μέθοδο MBE (Molecular Beam Epitaxy) αυτός ο έλεγχος επιτυγχάνεται λόγω των knudsen cells.

Εξαέρωση πλάσματος ή ιοντοβολή ή καθοδικός θρυμματισμός (sputter deposition)

Αποτελεί την πιο εμπορική μη θερμική τεχνική παραγωγής ημιαγωγικών στρωμάτων. Η Ιοντοβολή είναι μια διαδικασία εγχάραξης, η οποία αλλάζει τις φυσικές ιδιότητες μιας επιφάνειας. Στο θάλαμο κενού τοποθετείται ο στόχος από το υλικό που πρόκειται να εναποθεθεί και απέναντι του το υπόστρωμα.



Σχήμα 2.22: Απεικόνιση της λειτουργίας τυπικών διατάξεων (α) DC Sputtering (β) Magnetron Sputtering (γ) RF sputtering

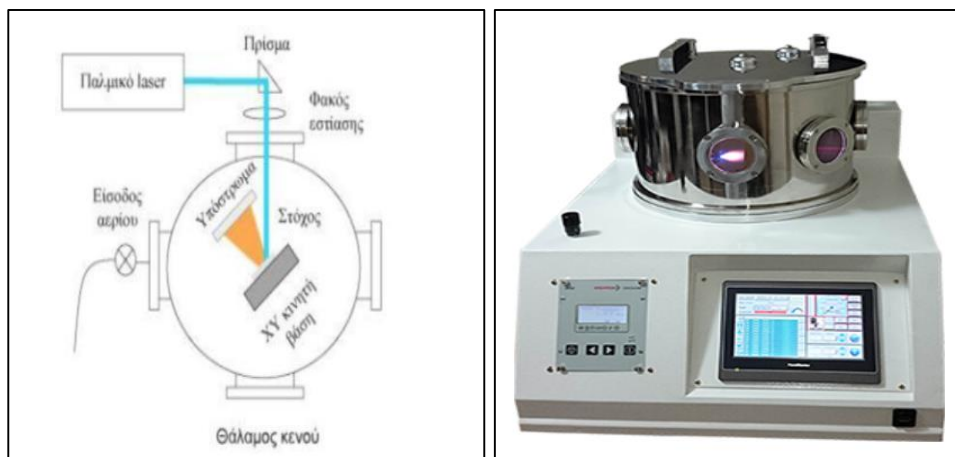
Στο στόχο εφαρμόζεται αρνητικό δυναμικό (γι' αυτό το λόγο αποτελεί τη κάθοδο) και στο υπόστρωμα θετικό. Μετά τη δημιουργία κενού μέσα στο θάλαμο εισέρχεται αέριο, συνήθως αργό Ar, επειδή είναι σχετικά φθινό σε σχέση με τα άλλα ευγενή αέρια. Σκοπός της εισαγωγής του αερίου στο θάλαμο κενού είναι η δημιουργία πλάσματος. Λόγω του ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται προς την άνοδο και προκαλούν μέσω αλληπάλληλων κρούσεων με τα άτομα του αερίου αύξηση του βαθμού ιονισμού, δηλαδή δημιουργούνται περισσότερα ιόντα. Τα ιόντα με τη σειρά τους «χτυπούν» την κάθοδο, απελευθερώνουν περισσότερα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια, ενώ μεταφέρουν μέρος της ενέργειάς τους στα ουδέτερα άτομα που βρίσκονται στην επιφάνεια του στόχου. Τα άτομα του στόχου, λόγω μεταφοράς ορμής, γίνονται πτητικά και μεταφέρονται σε μορφή ατμών στην επιφάνεια του υποστρώματος σχηματίζοντας λεπτά υμένα

- DC sputtering: χρησιμοποιείται τροφοδοσία συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης [εικόνα 2.25(α)].
- RF sputtering: Σε αυτή την περίπτωση η τροφοδοσία είναι εναλασσόμενου ρεύματος με συχνότητα στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων (για στόχους ανεξαρτήτως αν είναι αγωγάμοι ή όχι) [εικόνα 2.25(γ)]

- Magnetron sputtering: Χρήση ισχυρών μαγνητικών πεδίων (ταυτοχρόνως με το ηλεκτρικό πεδίο) για την επίτευξη χωρικού περιορισμού του πλάσματος και την βελτίωση της ομοιομορφίας του παραγόμενου υμενίου. [εικόνα 2.25(β)]
- Reactive DC or RF sputtering: παραλλαγή των παραπάνω με χρήση χημικά ενεργού στοιχείου (πχ οξυγόνο για την εναπόθεση οξειδίου ή αλογόνων για την παραγωγή αλογονιδίων)

Παλμική εναπόθεση με laser (Pulse Laser Deposition, PLD)

Στην παλμική εναπόθεση με laser μια δέσμη ακτινοβολίας (συνήθως υπεριώδους) προερχόμενη από ένα σύστημα laser υψηλής ενέργειας εστιάζεται με τη βοήθεια φακών και μέσω του παραθύρου εισόδου του θαλάμου εναπόθεσης, πάνω στην επιφάνεια του στόχου υπό γωνία 45° .

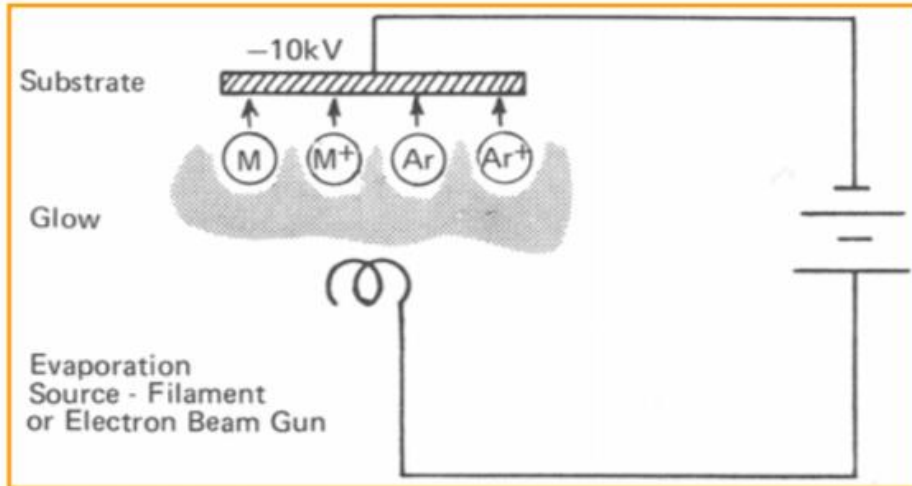


Σχήμα 2.23: Απεικόνιση της λειτουργίας τυπικής διάταξης PVD PLD καθώς και μιας σχετικής συσκευής.

Για να εξασφαλιστεί η ομοιόμορφη αποδόμηση του στόχου ένας τρόπος είναι με σάρωση του στόχου από τη δέσμη του laser και ένας άλλος τρόπος είναι ο ίδιος ο στόχος να περιστρέφεται ή/και να μετακινείται. Απέναντι από το στόχο και σε απόσταση 3-5cm τοποθετείται το υπόστρωμα, πάνω στο οποίο θα γίνει η εναπόθεση του υλικού. Το υπόστρωμα στηρίζεται σε μια διάταξη, η οποία έχει τη δυνατότητα να το θερμαίνει ομοιόμορφα. Η θερμοκρασία του υποστρώματος κυμαίνεται από *RT* (Room Temperature-Θερμοκρασία Περιβάλλοντος) έως τους 800°C . Το φαινόμενο της εναπόθεσης δεν περιλαμβάνει μόνο την φυσική αλληλεπίδραση laser-στόχου από την επίδραση της υψηλής ενέργειας παλμικής ακτινοβολίας πάνω στο στερεό στόχο αλλά το σχηματισμό πλάσματος από σωματίδια υψηλών ενεργειών και ακόμη, τη μεταφορά του αποδομημένου υλικού μέσω του πλάσματος πάνω στην επιφάνεια του θερμαινόμενου υποστρώματος.

Ιοντική επιμετάλλωση (ion plating)

Η Ιοντική Επιμετάλλωση (Ion Plating) είναι μια υβριδική μέθοδος η οποία είναι συνδυασμός του Sputtering και της εξάχνωσης υπό κενό.



Σχήμα 2.24: Απεικόνιση της λειτουργίας τυπικής διάταξης PVD Ion Plating.

Σε αυτή την περίπτωση μέρος των παραγόμενων σωματιδίων ιονίζεται πριν φθάσει στο υπόστρωμα. Ο ιονισμός των σωματιδίων επιτυγχάνεται συνηθέστερα με δημιουργία πλάσματος. Στην περίπτωση της ιοντικής επιμετάλλωσης με τη βοήθεια πλάσματος, τα ιόντα επιταχύνονται λόγω του υψηλού αρνητικού δυναμικού (10KV) που εφαρμόζεται στο υπόστρωμα. Τα επιταχυνόμενα ιόντα και τα υψηλής ενέργειας ουδέτερα άτομα λόγω των φαινομένων ανταλλαγής φορτίου μέσα στο πλάσμα εναποτίθενται στην επιφάνεια του υποστρώματος με ένα εύρος ενεργειών.

Χημική Εναπόθεση Ατμών Chemical Vapor Deposition (CVD)

Η χημική εναπόθεση ατμών είναι μια αμιγώς χημική διαδικασία ανάπτυξης λεπτών υμενίων πάνω σε διάφορα υλικά. Κατά την μέθοδο αυτή, λαμβάνει χώρα μια σειρά χημικών αντιδράσεων μεταξύ υλικών που καλούνται πρόδρομα υλικά (precursors) και βρίσκονται συνήθως στην αέρια φάση. Η απαιτούμενη ενέργεια για την πραγματοποίηση των χημικών αντιδράσεων παρέχεται μέσω θέρμανσης του υποστρώματος στην περίπτωση του κλασσικού C.V.D. Υπάρχουν όμως και παραλλαγές της μεθόδου, οι οποίες αναφέρονται παρακάτω.

Οι αντιδράσεις λοιπόν αυτές πραγματοποιούνται στο εσωτερικό ενός αντιδραστήρα κενού, ο οποίος αποτελεί κεντρικό τμήμα της πειραματικής διάταξης. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι αντιδραστήρες κενού είναι συστήματα τα οποία διαιρούνται σε τέσσερα επιμέρους τμήματα.

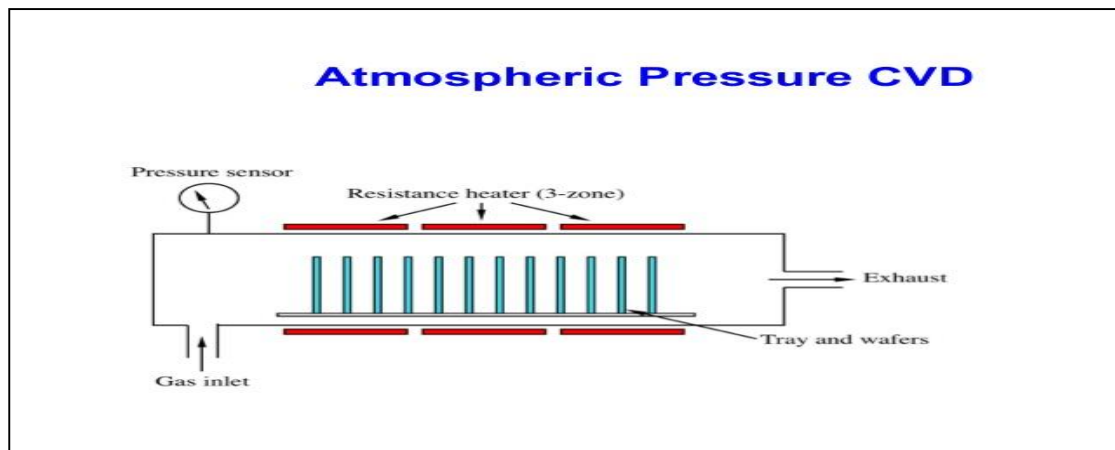
- Το δοχείο του αντιδραστήρα, στο οποίο αναπτύσσεται το υλικό.
- Τη διάταξη ανάμειξης των πρόδρομων υλικών.
- Την πηγή θερμότητας ή ηλεκτρικής ενέργειας, που οδηγεί στην έναρξη των χημικών αντιδράσεων.
- Το σύστημα απαγωγής των αερίων.

Τα παραπροϊόντα της μεθόδου θεωρούνται δηλητηριώδη, εύφλεκτα και διαβρωτικά με συνέπεια να απαιτείται η ανάπτυξη μιας ελεγχόμενης διαδικασίας απομάκρυνσης τους. [21]

Επίσης τα τοιχώματα των αντιδραστήρων είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε με την κατάλληλη ρύθμιση να θερμαίνονται ή να ψύχονται. Με την ψύξη των τοιχωμάτων μειώνεται η συσσωμάτωση και τα προβλήματα προσμίξεων που παρουσιάζονται από αποθέσεις στα τοιχώματα. Με τη θέρμανση εξάλλου, μειώνονται οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασιακές βαθμίδες (επιτυγχάνεται σταθερή τιμή της θερμοκρασίας σε όλο τον αντιδραστήρα) και κατά συνέπεια εμποδίζεται η δημιουργία περιπλοκών δευτερευουσών ανωστικών ροών που παρεμποδίζουν την εναπόθεση του υλικού. [22] Η δημιουργία κενού κρίνεται απαραίτητη για να μειώνεται η πίεση του αερίου τόσο όσο τα αεριοποιημένα άτομα να έχουν μεγάλη μέση ελεύθερη διαδρομή εντός του δοχείου του αντιδραστήρα και να μη μπορούν να δημιουργήσουν μέσω συγκρούσεων με το περιβάλλον αέριο κάποιο ανεπιθύμητο ίζημα. Επιπρόσθετα με την δημιουργία κενού μειώνεται το επίπεδο «μόλυνσης» του υμενίου και ελέγχονται καλύτερα οι συνθήκες ανάπτυξής του.

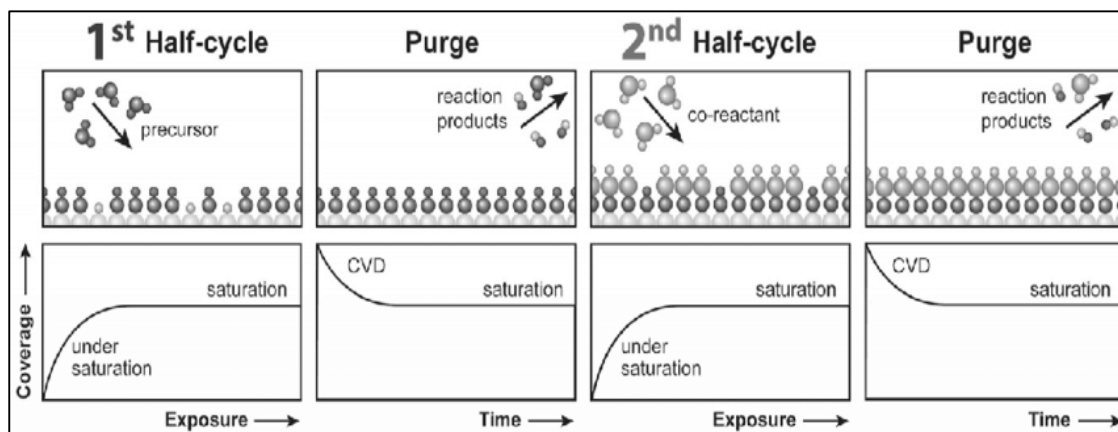
Ειδικότερα η διαδικασία της χημικής εναπόθεσης ατμών (C.V.D) ξεκινά με τη μεταφορά των πρόδρομων υλικών εντός του αντιδραστήρα, τη διάχυση και την προσρόφηση μέρους αυτών από την επιφάνεια. Στη συνέχεια με την εφαρμογή της κατάλληλης ενέργειας ξεκινά η χημική αντίδραση μεταξύ τους, η οποία μπορεί να λάβει χώρα τόσο στην επιφάνεια του υποστρώματος όσο και στον αέριο χώρο πάνω από την επιφάνεια. Συγκροτείται επομένως κρυσταλλικό πλέγμα και αρχίζει η δημιουργία στερεών λεπτών υμενίων. Τελικό στάδιο της διαδικασίας αποτελεί η εκρόφηση των παραπροϊόντων της αντίδρασης, η αέρια μεταφορά και απομάκρυνση τους από τον χώρο της αντίδρασης. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της C.V.D που χρησιμοποιούνται ευρέως.

- AP-C.V.D (Atmospheric Pressure CVD). Η διαδικασία της εναπόθεσης γίνεται σε περιβάλλον ατμοσφαιρικής πίεσης.



Σχήμα 2.25: Απεικόνιση της λειτουργίας τυπικής διάταξης AP-CVD.

- AL-C.V.D (Atomic Layer CVD). Η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως Atomic Layer Epitaxy και ως Atomic Layer Deposition (ALD). Χαρακτηριστικό της AL-C.V.D είναι η ύπαρξη δυο πρόδρομων υλικών (π.χ. Al (CH₃)₃ και H₂O) τα οποία συμπληρώνουν το ένα το άλλο και εισάγονται εναλλακτικά εντός του δοχείου του αντιδραστήρα.

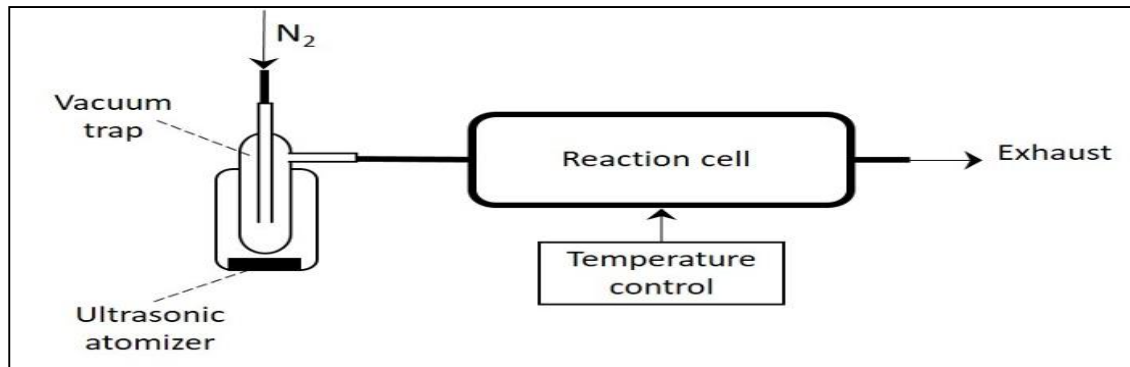


Σχήμα 2.26: Στάδια ανάπτυξης λεπτών υμενίων με την τεχνική AL-CVD.

Κανονικά, ένα από τα δύο πρόδρομα υλικά θα προσροφηθεί στην επιφάνεια του υποστρώματος, χωρίς όμως να μπορεί να αντιδράσει όταν απουσιάζει το δεύτερο υλικό. Καταφέρνει όμως να καλύψει μέρος της επιφάνειας η ανάπτυξη δε του υμενίου αρχίζει μόνο μετά την εισαγωγή και του δεύτερου πρόδρομου υλικού. Για αυτό το λόγο, με τη συγκεκριμένη διαδικασία εναπόθεσης επιτυγχάνεται έλεγχος του πάχους του υμενίου μέσω του αριθμού των κύκλων (επαναλήψεων εισαγωγής) των πρόδρομων υλικών. Η AL-CVD επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο του πάχους και της ομοιομορφίας του υμενίου.

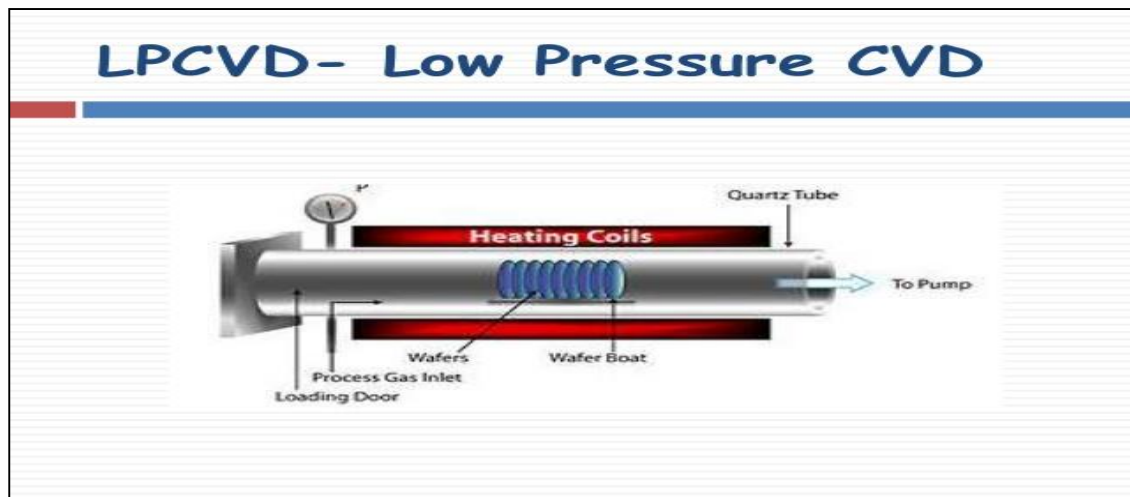
- AA-CVD (Aerosol Assisted CVD ή AA-CVD). Σε αυτή την διαδικασία τα πρόδρομα υλικά μεταφέρονται στο υπόστρωμα μέσω υγρού / αερίου aerosol

και διεγείρονται με τη βοήθεια υπερήχων. Η AA-CVD είναι κατάλληλη στην περίπτωση μη πτητικών πρόδρομων υλικών.



Σχήμα 2.27: Απεικόνιση τυπικής διάταξης AA-CVD

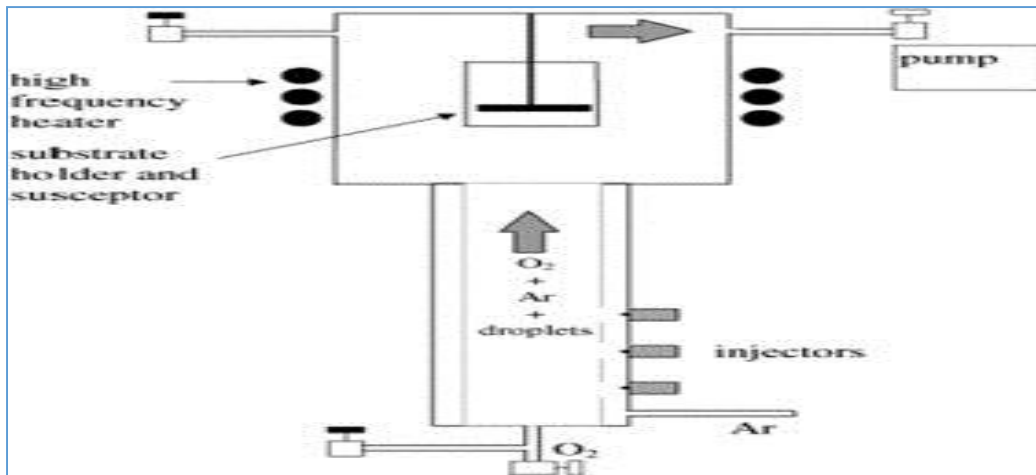
- LP-CVD (Low Pressure CVD). Η εναπόθεση γίνεται σε χαμηλές πιέσεις (κάτω της ατμοσφαιρικής) με σκοπό την εξάλειψη των ανεπιθύμητων αντιδράσεων της αέριας φάσης και τη βελτίωση της ομοιομορφίας του υμενίου σε όλη την επιφάνεια του υποστρώματος.



Σχήμα 2.28: Απεικόνιση τυπικής διάταξης LP-CVD.

Ο ρυθμός εναπόθεσης καθορίζεται κυρίως από την ταχύτητα της αντίδρασης των πρόδρομων υλικών. [23]

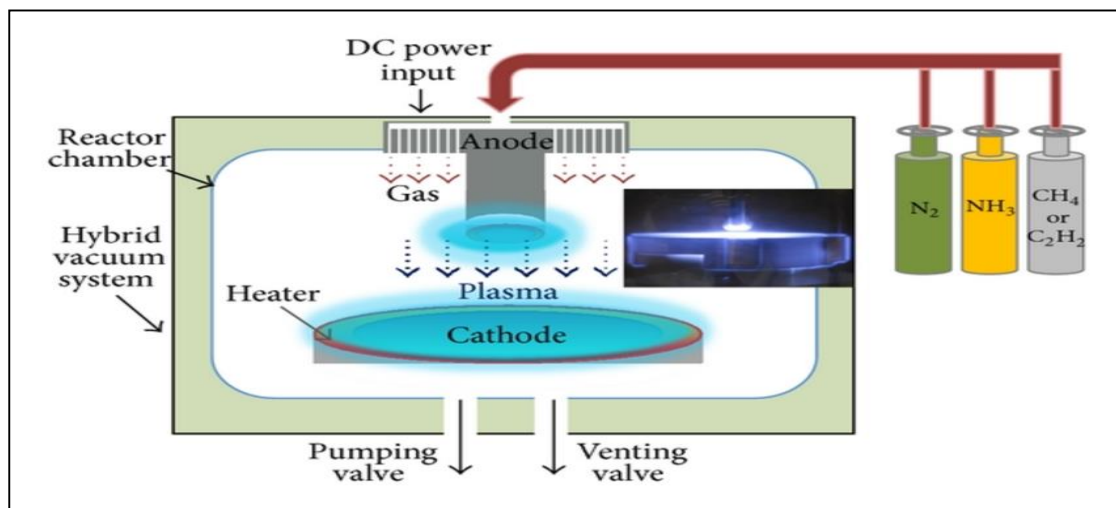
- MO-CVD (Metal Organic CVD) Βασίζεται σε ορφανό-μεταλλικά υλικά



Σχήμα 2.29: Απεικόνιση τυπικής διάταξης MO-CVD.

όπως είναι το αιθοξείδιο του τανταλίου ($Ta(OC_2H_5)_5$) για την παραγωγή Ta_2O_5 . Στην περίπτωση που γίνεται κάτω από υπερύψηλό κενό καλείται Metal Organic Molecular Beam Epitaxy (Οργανομεταλλική επιταξία μοριακής δέσμης MOMBE).

- PE-CVD (Plasma Enhanced CVD). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τη δημιουργία πλάσματος ως το μέσο βελτίωσης του ρυθμού της χημικής αντίδρασης μεταξύ των πρόδρομων υλικών.



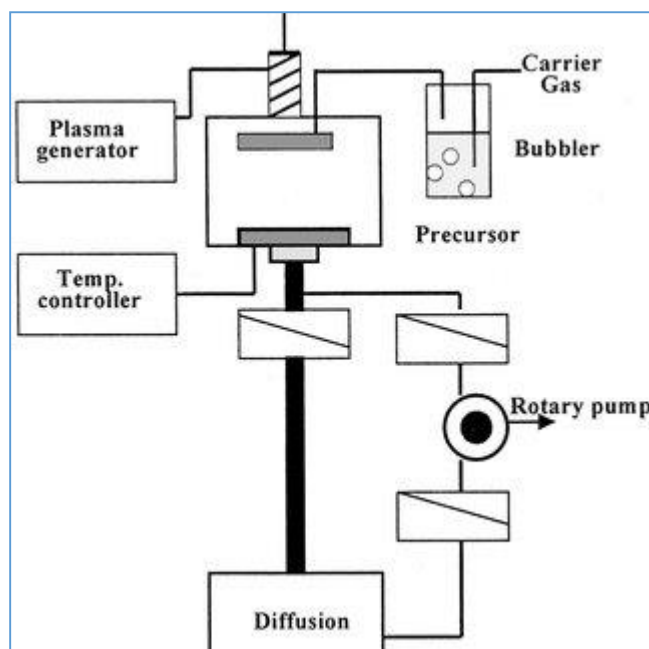
Σχήμα 2.30: Απεικόνιση τυπικής διάταξης PE-CVD.

Με την εφαρμογή εναλλασσόμενου πεδίου υψηλής συχνότητας δημιουργείται το πλάσμα, το οποίο ιονίζει τα άτομα του αερίου και παράγει ιόντα και ηλεκτρόνια. Η PECVD χρησιμοποιείται στην παραγωγή ημιαγωγών λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών εναπόθεσης στις οποίες λειτουργεί.

- RT-CVD (Rapid Thermal CVD). Χαρακτηριστικό γνώρισμα της διαδικασίας αυτής είναι η θέρμανση του υποστρώματος με τη χρήση

θερμαντικών λαμπτήρων ή ακόμη και με αλλά μέσα. Πιστεύεται ότι η θέρμανση μόνο του υποστρώματος αντί του αερίου ή των τοιχωμάτων του δοχείου αντίδρασης συντελεί στη μείωση των ανεπιθύμητων αντιδράσεων αέριας φάσης, που μπορούν να οδηγήσουν στο σχηματισμό σωματιδίων.

- RPE –CVD (Remote Plasma Enhanced CVD). Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει αρκετές ομοιότητες με την PE-CVD με τη μόνη διαφορά ότι το υπόστρωμα πάνω στο οποίο θα εναποθεθεί το υλικό δεν βρίσκεται στη περιοχή της εκκένωσης του πλάσματος.



Σχήμα 2.31: Απεικόνιση τυπικής διάταξης RPE-CVD.

Αυτό επιτρέπει τη λειτουργία της μεθόδου σε χαμηλές τιμές θερμοκρασίας ακόμη και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

- UHV-CVD (Ultra High Vacuum CVD). Η εναπόθεση γίνεται σε χαμηλές πιέσεις της τάξης των 1 έως 10Pa (Pascals).

- L-CVD (Laser Induced CVD). Η διάσπαση των μορίων στην επαγόμενη από laser χημική εναπόθεση ατμών, μπορεί να ενεργοποιηθεί:

1. Θερμικά (πυρολυτικό LCVD) όπου είτε το πρόδρομο υλικό είτε το υπόστρωμα θερμαίνεται τοπικά απορροφώντας την ενέργεια της δέσμης του laser και κατά συνέπεια έχουμε τη διάσπαση ή τη θερμική ενεργοποίηση των αντιδράσεων στην επιφάνεια του υποστρώματος. Για τη διαδικασία αυτή γίνεται χρήση κυρίως laser εκπομπής στην υπέρυθη περιοχή του φάσματος.

2. Μη Θερμικά (φωτολυτικό LCVD). Η χημική αντίδραση προωθείται από την επενέργεια φωτονίων υψηλής ενέργειας που παράγονται συνήθως με laser υπεριώδους ακτινοβολίας. Η ενέργεια της δέσμης του laser απορροφάται από τα αντιδρώντα, τα οποία φωτοδιασπώνται ή/και αντιδρούν φωτοχημικά μεταξύ τους στο υπόστρωμα. Πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι η εναπόθεση γίνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Πρακτικά γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελούν οι χαμηλοί ρυθμοί εναπόθεσης και η περιορισμένη διάθεση των κατάλληλων πρόδρομων ουσιών.

3. Με συνδυασμό των δυο παραπάνω τρόπων (φωτοφυσικό LCVD).

Γενικότερα η μέθοδος της χημικής εναπόθεσης με ατμούς (CVD) παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως είναι ο μεγάλος ρυθμός εναπόθεσης, η εξαιρετική πρόσφυση, η δυνατότητα ελέγχου της στοιχειομετρίας ή ακόμη και της κρυσταλλικής δομής των επιστρώσεων. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα επικάλυψης μεγάλων επιφανειών και ο έλεγχος της ομοιομορφίας του πάχους των λεπτών υμενίων. Υπάρχουν όμως και μειονεκτήματα όπως είναι οι απαιτούμενες υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες προκαλούν αλλαγή στις μηχανικές ιδιότητες πολλές φορές δε και θερμική καταστροφή στα μεταλλικά υποστρώματα. Επιπλέον λόγω του περιορισμένου αριθμού πρόδρομων υλικών δεν είναι δυνατή η εναπόθεση οποιουδήποτε υλικού. Τέλος η χρήση διαβρωτικών και τοξικών αντιδραστηρίων αυξάνει την πιθανότητα να επηρεαστεί το υπόστρωμα, το οποίο πρέπει να είναι καθαρό και προστατευμένο από την ύπαρξη ανεπιθύμητων σωματιδίων που μπορούν να δράσουν ως καταστρεπτικοί παράγοντες στη χημική σύσταση του επιστρώματος. Στις μέρες μας η πλειοψηφία των εταιρειών που ασχολούνται με την ανάπτυξη λεπτών υμενίων χρησιμοποιούν τη μέθοδο της χημικής εναπόθεσης ατμών με σκοπό την εναπόθεση λεπτών υμενίων πάνω σε επιφάνειες υλικών για την προστασία τους από φθορά και διάβρωση. Επιπλέον η CVD παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας λεπτών υμενίων με συγκεκριμένες ιδιότητες σε αντίθεση με άλλες μεθόδους. Η ικανότητα της CVD να ελέγχει τη μικροδομή και/ή τη χημική σύσταση του εναποτιθέμενου υλικού την καθιστά ιδιαίτερα σημαντική για ορισμένες εφαρμογές, όπως είναι η εναπόθεση επικαλύψεων και ο σχηματισμός σύνθετων υλικών, σφαιρικών εξαρτημάτων, συνθετικών διαμαντιών, καταλυτών, πολυκρυσταλλικών και άμορφων υλικών και διάφορων διηλεκτρικών με υψηλό συντελεστή διηλεκτρικής σταθεράς k . Η πλειοψηφία των παραπάνω υλικών χρησιμοποιείται στη βιομηχανία των ημιαγωγών και των ηλεκτρονικών για την παραγωγή συστημάτων όπως για παράδειγμα φωτοβολταϊκών, οπτο-ηλεκτρονικών συσκευών κ.α. [24]

2.3 Συγκριτική παρουσίαση επικαλύψεων [25]

Στον πίνακα 2.4, περιέχονται συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κυριότερων ειδών επικαλύψεων καθώς και των επιφανειακών κατεργασιών από τις οποίες προήρθαν.

Πίνακας 2.4: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαφόρων ειδών επικαλύψεων καθώς και των επιφανειακών κατεργασιών από τις οποίες προήρθαν

Είδος επιφανειακής κατεργασίας από όπου προήλθε η επικάλυψη		Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Εμβάπτιση σε λουτρό		<ul style="list-style-type: none"> • Η σχετικά υψηλή θερμοκρασία του λουτρού εξασφαλίζει διεπιφάνεια επικάλυψης/ υποστρώματος με πολύ καλή πρόσφυση 	<ul style="list-style-type: none"> • Απαιτείται ο πρότερος πολύ καλός καθαρισμός της προς επικάλυψη επιφάνειας
Ηλεκτρολυτική απόθεση		<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλή σκληρότητα • Χαμηλή τριβή • Επεξεργασία χαμηλής θερμοκρασίας • Εφαρμόσιμη σε ευρύ φάσμα μεταλλικών υποστρωμάτων • Παχιά επιστρώματα 	<ul style="list-style-type: none"> • Φτωχή ομοιομορφία πάχους σε σύνθετα εξαρτήματα • Κίνδυνος αστοχίας επικαλύψεων λόγω έκλυσης υδρογόνου. • Δεν είναι εφαρμόσιμη για μόνωση των υποστρωμάτων • Πιθανές περιβαλλοντικές ανησυχίες όσον αφορά τα λουτρά επένδυσης
Χημική απόθεση		<ul style="list-style-type: none"> • Διαδικασία χαμηλής θερμοκρασίας • Περισσότερο ανθεκτική στην διάβρωση σε σύγκριση με τις ηλεκτρολυτικές • Μπορούν να επικαλυφθούν ομοιόμορφα σύνθετα σχήματα • Μπορούν να επικαλυφθούν τα περισσότερα μέταλλα και μερικοί μονωτές 	<ul style="list-style-type: none"> • Ακριβότερη μέθοδος σε σύγκριση με την ηλεκτρολυτική
Θερμικός ψεκασμός	Με χρήση φλόγας	<ul style="list-style-type: none"> • Απλός σχεδιασμός της διαδικασίας και ευκολία χρήσης • Ο εξοπλισμός είναι φορητός και κατάλληλος για χειροκίνητη λειτουργία χωρίς αυτοματισμούς • Η εκπαίδευση που απαιτείται για την τεχνική είναι μικρής έκτασης • Τα επίπεδα σκόνης και καπνού είναι μικρότερα από ότι στον ψεκασμό ηλεκτρικού τόξου και τα επίπεδα θορύβου είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα του ψεκασμού με υπερηχητική φλόγα. • Είναι εύκολος ο ψεκασμός υποστρωμάτων με πολύπλοκη γεωμετρία λόγω της φορητότητας της διάταξης • Το κόστος του εξοπλισμού είναι κατά πολύ μικρότερο από το αντίστοιχο κόστος του ψεκασμού πλάσματος και υπερηχητικής φλόγας. 	<ul style="list-style-type: none"> • Οι επικαλύψεις έχουν την τάση να παρουσιάζουν υψηλό πορώδες (10-20% V/V) και χαμηλότερη συνεκτικότητα με το υπόστρωμα, σε σύγκριση με τις άλλες τεχνικές θερμικού ψεκασμού • Ο ψεκασμός απαιτεί να γίνεται στο οπτικό πεδίο (όπως σε όλες τις τεχνικές θερμικού ψεκασμού) του χειριστή και για αυτό τον λόγο είναι αδύνατη η εναπόθεση σε εσωτερικές κοιλότητες εξαρτημάτων • Υπάρχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις υγιεινής και ασφάλειας που προστατεύουν τον χειριστή από την σκόνη και τους καπνούς. Επιπρόσθετα πρέπει να προσεχθεί η χρήση και η αποθήκευση των έφλεκτων αερίων.

Είδος επιφανειακής κατεργασίας από όπου προήλθε η επικάλυψη		Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Θερμικός ψεκασμός	Με χρήση υπερηχητικής φλόγας	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλότερη πυκνότητα (μικρότερο πορώδες) επικαλύψεων λόγω της υψηλότερης ταχύτητας πρόσκρουσης των σωματιδίων <ul style="list-style-type: none"> Καλύτερη αντίσταση στην τριβή λόγω του ότι οι επικαλύψεις είναι σκληρότερες και ανθεκτικότερες Υψηλότερη σκληρότητα λόγω της χαμηλότερης αποδόμησης των καρβιδικών φάσεων Βελτιωμένη αντίσταση στην διάβρωση λόγω του μικρότερου πορώδους Καλύτερη συνεκτικότητα με το υπόστρωμα Μικρότερη περιεκτικότητα σε οξειδία λόγω της χρονολογικά μικρότερης έκθεσης των σωματιδίων στις περιβαντολογικές συνθήκες <ul style="list-style-type: none"> Επικαλύψεις μεγαλύτερου πάχους λόγω μικρότερων εναπομεινουσών τάσεων Ανάπτυξη λείων επιφανειών λόγω της υψηλότερης ταχύτητας πρόσκρουσης 	<ul style="list-style-type: none"> Μεγάλη πολυπλοκότητα διεργασίας και εξάρτηση των ιδιοτήτων και της μικροδομής της επικάλυψης από πλειάδα μεταβλητών <ul style="list-style-type: none"> Το μέγεθος της σκόνης περιορίζεται στα 5-60 μm Απαιτείται έμπειρο προσωπικό υψηλής κατάρτισης για την διασφάλιση της υψηλής ποιότητας των επικαλύψεων και της ασφαλούς λειτουργίας της διάταξης. Η χειροκίνητη λειτουργία της διάταξης δεν είναι προτεινόμενη και συνήθως χρησιμοποιείται αυτοματοποιημένη λειτουργία <ul style="list-style-type: none"> Δεν μπορεί να επιτευχθεί η εναπόθεση επικαλύψεων σε εσωτερικές κοιλότητες κυλινδρικών επιφανειών γιατί η υπόψη τεχνική απαιτεί οπτική επαφή και απόσταση ψεκασμού 150-300mm
	Ηλεκτρικού τόξου	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλότερο ρυθμός εναπόθεσης συγκριτικά με τις άλλες τεχνικές θερμικού ψεκασμού (15 kg/hg ή μεγαλύτερη) Η τεχνική επιτυγχάνει επικαλύψεις χαμηλού κόστους σε σύγκριση με τον ψεκασμό πλάσματος και με υπερηχητικής φλόγας. Αυτό συμβαίνει λόγω του κόστους για λιγότερη ενέργεια, του υψηλού ρυθμού εναπόθεσης και του μικρότερου κόστους των αναλωσίμων (σύρμα) Η ισχύς που απαιτείται από την διάταξη είναι χαμηλή (5-10 kW), συγκριτικά με την αντίστοιχη που απαιτείται στον ψεκασμό πλάσματος και υπερηχητικής φλόγας (50 kW) Δεν απαιτούνται υψηλά επίπεδα εκπαίδευσης του χειριστή Η χαμηλή θερμότητα του υποστρώματος καθιστά την τεχνική ιδανική για την επιμετάλλωση θερμικά ευαίσθητων υποστρωμάτων όπως των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (πυκνωτές κτλ) Είναι δυνατός ο ψεκασμός δύο διαφορετικών συρμάτων με αποτέλεσμα την δημιουργία σύνθετων επικαλύψεων <ul style="list-style-type: none"> Μεγαλύτερη συνεκτικότητα των επικαλύψεων με το υπόστρωμα, συγκριτικά με εκείνων του ψεκασμού φλόγας Χαμηλότερα επίπεδα πορώδους, συγκριτικά με τον ψεκασμό φλόγας Η τεχνική δεν απαιτεί τη χρήση έφλεκτων αερίων και δεν δημιουργείται πλάσμα υψηλής ενέργειας με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζονται τόσα θέματα υγιεινής και ασφάλειας 	<ul style="list-style-type: none"> Η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ψεκασμό μόνο ηλεκτρικά αγώγιμων υλικών τα οποία διατίθενται σε μορφή σύρματος <ul style="list-style-type: none"> Παράγονται μεγάλες ποσότητες σκόνης και καπνού και για αυτό τον λόγο ο χειριστής πρέπει να φοράει κατάλληλα μέσα ατομικής προστασίας Η ποιότητα των επικαλύψεων δεν είναι τόσο όσο αυτή των επικαλύψεων που προέρχονται από ψεκασμό πλάσματος και υπερηχητικής φλόγας <ul style="list-style-type: none"> Οι επικαλύψεις περιέχουν μεγαλύτερο ποσοστό πορώδους και οξειδίων και έχουν μικρότερη συνεκτικότητα με το υπόστρωμα, συγκριτικά με τις αντίστοιχες που προέρχονται από ψεκασμό πλάσματος και υπερηχητικής φλόγας

Είδος επιφανειακής κατεργασίας από όπου προήλθε η επικάλυψη		Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Θερμικός ψεκασμός	Πλάσματος	<ul style="list-style-type: none"> Μπορούν να εναποτεθούν σχεδόν όλα τα υλικά, τα οποία διατίθενται σε μορφή σκόνης Υψηλότερης ποιότητας επικαλύψεις συγκριτικά με τις άλλες τεχνικές θερμικού ψεκασμού Ως υποστρώματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά υλικά όπως μέταλλα, κεραμικά, πλαστικά, γυαλί και σύνθετα υλικά Η υψηλή θερμοκρασία του πλάσματος κάνει την τεχνική αυτή ιδανική για μέταλλα και κεραμικά όπως <i>ZrO₂</i>, <i>B₄C</i> και <i>W</i>, που χαρακτηρίζονται από υψηλό σημείο τήξης Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σκόνη με ευρύτερο μέγεθος (5-100μm) συγκριτικά με την αντίστοιχη που χρησιμοποιείται στον ψεκασμό υπερηχητικής φλόγας 	<ul style="list-style-type: none"> Ο εξοπλισμός για τον ατμοσφαιρικό ψεκασμό πλάσματος στοιχίζει πιο πολύ από τον αντίστοιχο για τον ψεκασμό ηλεκτρικού τόξου ή υπερηχητικής φλόγας. Ωστόσο ο εξοπλισμός για τον ψεκασμό πλάσματος κενού, μικρής πίεσης και ελεγχόμενης ατμόσφαιρας είναι ο πιο ακριβός συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους θερμικού ψεκασμού Το πιστόλι θερμικού ψεκασμού φθείρεται σχετικά γρήγορα και πιο συγκεκριμένα τα εσωτερικά ηλεκτρόδια. Αυτό απαιτεί την συνεχή αντικατάστασή τους και τον περιοδικό ποιοτικό έλεγχο ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα των επικαλύψεων Οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μπορεί να οδηγήσουν στην αποσύνθεση των καρβιδίων ή στην υπερβολική οξειδωση (στην περίπτωση του ατμοσφαιρικού ψεκασμού πλάσματος) με αποτέλεσμα την πιθανή δημιουργία καρβιδικών επικαλύψεων με χαμηλότερη σκληρότητα ή μεταλλικών επικαλύψεων με υψηλότερα ποσοστά οξειδίων (συγκριτικά με τον ψεκασμό υπερηχητικής φλόγας) Η τεχνική δεν ενδείκνυται για χειροκίνητη λειτουργία και απαιτεί την χρήση αυτοματοποιημένης διάταξης

2.4 Εφαρμογές των επικαλύψεων

Η εφαρμογή προστατευτικών επικαλύψεων είναι μια από τις μεθόδους προστασίας και πρόσδωσης επιφανειακών ιδιοτήτων στα εξαρτήματα, ή αλλιώς υποστρώματα. Ένα επίστρωμα, προκειμένου να προστατεύσει αποτελεσματικά ένα μέταλλο από διάβρωση πρέπει να είναι συνεχές, συνεκτικό και αδρανές ως προς το διαβρωτικό περιβάλλον. Επίσης, θα πρέπει να παρουσιάζει καλή συνάφεια με το υπόστρωμα και να μη σχηματίζει εύθραυστες ενώσεις με αυτό, λόγω διάχυσης σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τέλος, οι συντελεστές θερμικής διαστολής επιστρώματος και υποστρώματος δεν θα πρέπει να διαφέρουν σημαντικά, ώστε το σύστημα τους να μη δρα ανομοιόμορφα στις τυχόν θερμοκρασιακές μεταβολές. Παρόλο που οι επικαλύψεις κατά κύριο λόγο στοχεύουν στην επιφανειακή ενίσχυση του υποστρώματος, (δικαίως το σύστημα επί-υπόστρωμα θεωρείται ως μια ιδιόμορφη κατηγορία σύνθετων πολυστρωματικών υλικών), πολλές είναι γενικά οι εφαρμογές τους ώστε να καλύπτονται οι σύγχρονες απαιτήσεις. Στο πίνακα 2.5 παρατίθενται κάποιες από αυτές, κυρίως όσον αφορά τις επικαλύψεις θερμικού ψεκασμού.

Πίνακας 2.5: Εφαρμογές διαφόρων ειδών επικαλύψεων

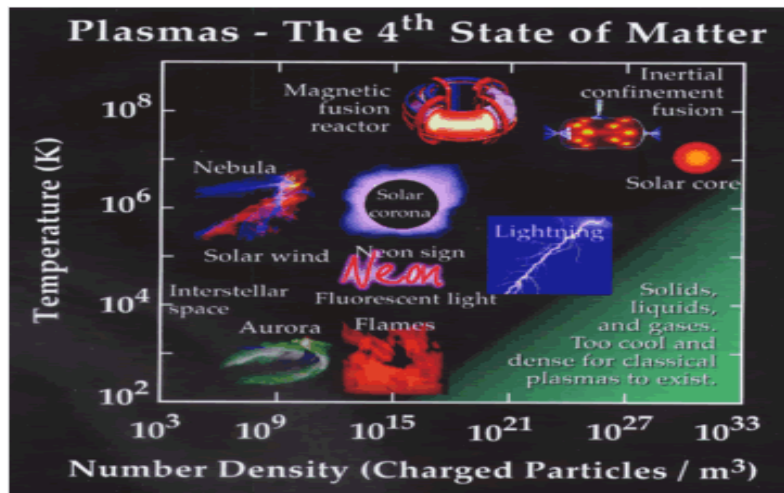
Είδος επιφανειακής κατεργασίας από όπου προήλθε η επικάλυψη		Εφαρμογές
Εμβάπτιση σε λουτρό		<ul style="list-style-type: none"> Εφαρμογές σε σύρματα, πλαίσια και ελάσματα χάλυβα (πχ επιψευδαργύρωση) για προστασία από την διάβρωση Εφαρμογές στην βιομηχανία τροφίμων και την κονσερβοποιεία (πχ επικασσιτέρωση) για απροστασία από οξείδωση και διάβρωση από οργανικά οξέα Εφαρμογές επικαλύψεων σε κοινούς ανθρακοχάλυβες για αντοχή ενάντια στην οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και για την αντίσταση στην γήρανση (πχ επαργιλίωση)
Χημική απόθεση		<ul style="list-style-type: none"> Επιχάλκωση χαλύβδινων συρμάτων ή φύλλων Χάλκινες επικαλύψεις που χρησιμοποιούνται σαν βιοκτόνα για την καταπολέμηση των μικροοργανισμών που αναπτύσσονται σε σωληνώσεις νερού, ντεπόζιτα και πισίνες Χημικές επικαλύψεις νικελίου χρησιμοποιούνται στην χαλυβουργία για την παραγωγή ανοξειδωτων κραμάτων όπως είναι τα σύρματα ηλεκτρικών αντιστάσεων
Θερμικός ψεκασμός	Φλόγας	<ul style="list-style-type: none"> Προστασία από φθορά και διάβρωση Επισκευή αξόνων Επικαλύψεις μικρών τμημάτων
	Υπερηχητικής φλόγας	<ul style="list-style-type: none"> Επικαλύψεις καρβιδίων για προστασία από φθορά (τα καρβίδια δεν διασπώνται όπως στο ψεκασμό πλάσματος) Σύνθετες κεραμομεταλλικές επικαλύψεις με βάση το WC Επικαλύψεις WC & Co σε εξαρτήματα αεριοστροβίλων για προστασία από φθορά και διάβρωση Επικαλύψεις Ni-Cr για αντίσταση στην οξείδωση Επικαλύψεις Al_2O_3 και TiO_2 για εφαρμογές κατά της φθοράς Αντικατάσταση σκληρής επιχρωμίωσης
	Ηλεκτρικού τόξου	<ul style="list-style-type: none"> Επικαλύψεις μεταλλικών (αγώγιμα στερεά σύρματα) και σύνθετων υλικών (γεμιστά σύρματα που έχουν μεταλλικό περίβλημα και στο εσωτερικό σκόνη)
	Πλάσμα	<ul style="list-style-type: none"> Επικαλύψεις θερμικής μόνωσης (thermal barrier coatings TBC) Επικαλύψεις προστασίας από φθορά και διάβρωση Επικαλύψεις κεραμικών βιολικών για εμφυτεύματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

3.1 Βασικές αρχές πλάσματος

Το πλάσμα είναι η πιο κοινή κατάσταση ύλης. Το πλάσμα στα αστέρια και στο υπόλοιπο διάστημα αποτελεί πάνω από το 99% του ορατού κόσμου και πιθανόν το μεγαλύτερο ποσοστό από το μη ορατό. Οι διάφορες καταστάσεις της ύλης που υπάρχουν στη γη είναι η στερεά, όπου τα μόρια σχηματίζουν πλέγμα, η υγρή, στην οποία τα μόρια κινούνται ελεύθερα σε μικρές αποστάσεις και η αέρια, όπου τα μόρια μπορούν να κινηθούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Ο Sir William Crookes, Άγγλος φυσικός, το 1879 προσδιόρισε μια τέταρτη κατάσταση ύλης, που την αποκαλούμε πλάσμα. Η λέξη 'πλάσμα' χρησιμοποιήθηκε πρώτα από τον Δρ. Irving Langmuir, Αμερικανό φυσικό, το 1929 για να περιγράψει το ιονισμένο αέριο. Έτσι, λοιπόν, στη φάση του πλάσματος τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια κινούνται ανεξάρτητα σε μεγάλες αποστάσεις. [1] [2] [3] [4] [5] [6]

Σε ένα συνηθισμένο αέριο, κάθε άτομο περιέχει έναν ίσο αριθμό θετικών και αρνητικών ιόντων. Τα θετικά ιόντα βρίσκονται στον πυρήνα και περιβάλλονται από έναν ίσο αριθμό ηλεκτρονίων (αρνητικά ιόντα) και έτσι κάθε άτομο είναι ηλεκτρικά «ουδέτερο». Ένα αέριο γίνεται πλάσμα όταν η προσθήκη θερμότητας ή άλλης ενέργειας προκαλεί την απελευθέρωση μερικών ηλεκτρονίων από έναν ικανοποιητικά μεγάλο αριθμό ατόμων. Συνεπώς, τα άτομα φορτίζονται θετικά και τα ηλεκτρόνια κινούνται ελεύθερα. Εξαιτίας αυτών των ατόμων, το προκύπτον αέριο ιονίζεται προκαλώντας σημαντικές αλλαγές στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του. Στην περίπτωση αυτή το αέριο είναι πλάσμα. Σε πολλές περιπτώσεις, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των φορτισμένων και των ουδέτερων μορίων είναι σημαντικές στον καθορισμό της συμπεριφοράς και της χρησιμότητας του πλάσματος: ο τύπος των ατόμων σε ένα πλάσμα, η αναλογία των ιονισμένων προς των ουδέτερων μορίων και οι ενέργειες των μορίων οδηγούν στην ύπαρξη ενός ευρύ φάσματος των τύπων, των χαρακτηριστικών και των συμπεριφορών του πλάσματος. Αυτές οι μοναδικές συμπεριφορές, τα καθιστούν χρήσιμα σε ένα μεγάλο και αυξανόμενο αριθμό εφαρμογών σημαντικών στις ζωές μας και στον κόσμο γύρω από εμάς.



Εικόνα 3.1: Το πλάσμα σε διάφορες θερμοκρασίες και πυκνότητες

3.2 Σχηματισμός πλάσματος [7]

Ο σχηματισμός πλάσματος μπορεί να επιτευχθεί με τους κάτωθι τρόπους:

- Με ηλεκτρικό ρεύμα
- Μέσω μεταφοράς θερμότητας
- Με συμπίεση
- Με ακτινοβολία

3.2.1 Σχηματισμός πλάσματος με ηλεκτρικό ρεύμα

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος σχηματισμού πλάσματος είναι αυτός όπου γίνεται χρήση ηλεκτρικού ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα αδρανές αέριο (π.χ. αργό) διοχετεύεται μεταξύ δυο ηλεκτροδίων, μιας ανόδου και μιας καθόδου. Μια ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων αυτόματα μετατρέπει το αδρανές αέριο σε αγωγίμο. Κατά την εκκένωση, ηλεκτρόνια της καθόδου, αποκτούν υψηλή κινητική ενέργεια κατά την κίνηση τους προς την άνοδο. Κατά την πορεία τους συγκρούονται με άτομα του αδρανές αερίου, υποκινώντας τον ιονισμό τους. Ακολούθως, τα νέο-σχηματιζόμενα θετικά ιόντα επιταχύνονται προς την κάθοδο, ενισχύοντας την ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Η ανωτέρω τεχνική δημιουργίας πλάσματος μπορεί να διαχωριστεί περαιτέρω, αναλόγως με την μορφή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται σε:

- Συνεχούς ρεύματος εκκένωση (dc discharge mode)
- Εναλλασσόμενου ρεύματος εκκένωση (ac discharge mode)
- Παλμική μορφή (impulse mode)

Στη συνεχούς ρεύματος εκκένωση το ρεύμα διοχετεύεται στην περιοχή εκκένωσης του αερίου μέσω μεταλλικών ηλεκτροδίων ενώ στην εναλλασσόμενου ρεύματος εκκένωση τα ηλεκτρόδια χωρίζονται από την περιοχή του αερίου με στερεό μονωτικό υλικό. Γενικά τα αέρια είναι αρκετά καλοί μονωτές. Αυτό έχει ως συνέπεια το ότι για την έναρξη μιας εκκένωσης είναι απαραίτητη η παρουσία ελεύθερων φορτίων. Σε πολλές περιπτώσεις το ίδιο το αέριο δημιουργεί αυτά τα φορτία μέσω αυτό-εκκένωσης. Διαφορετικά το πλάσμα εκκινείται από έναν παλμό υψηλής συχνότητας, για παράδειγμα από ένα σπινθήρα που ιονίζει το αέριο, και δημιουργεί ικανοποιητικό αριθμό φορτίων για τη συντήρηση της ηλεκτρικής εκκένωσης.

Σε μικρής τάξης ρεύματα επικρατεί η εκκένωση σκότους ή Townsend discharge. Χαρακτηριστικό της είναι η έλλειψη φωταύγειας, η μικρή μετατόπιση πεδίων και η σχεδόν σταθερή τάση. Αυξανόμενου του ηλεκτρικού ρεύματος επικρατεί περιοχή φορτίου χώρου. Είναι περιοχή ελλείψεως φορέων και μοιάζει ουσιαστικά με ένα διπολικό στρώμα φορτίων, στην οποία τα δέσμια φορτία δεν εξουδετερώνονται και στην οποία υπάρχει μείωση της τάσης. Ανάλογα με την τιμή του ρεύματος, δύο μηχανισμοί διακρίνονται, η εκκένωση αίγλης (glow discharge) και η εκκένωση τόξου (arc discharge).

➤ Εκκένωση αίγλης: Λαμβάνει χώρα σε αραιά αέρια πίεσης $1 - 10^4$ Pa σε μικρής τάξης ρεύματα $0,1 - 100$ mA. Δημιουργεί χαρακτηριστικά φωταύγειας μεταξύ των ηλεκτροδίων τα οποία διαχωρίζονται σε ανοιχτόχρωμα και σκουρόχρωμα μέρη. Πριν από την εκκένωση αίγλης υπάρχει ισχυρή περιοχή έλλειψης φορτίου, γνωστή ως πτώση καθόδου (cathode fall). Στην περιοχή αυτή τα ηλεκτρόνια αποκτούν την ενέργεια που απαιτείται για ιονισμό. Η μετάβαση στην περιοχή αυτή από την εκκένωση συνοδεύεται από πτώση τάσης. Το εύρος της πτώσης τάσης κυμαίνεται από 100 έως 300 V. Όσο αυξάνεται το ηλεκτρικό ρεύμα, η πτώση καθόδου σταθεροποιείται στη μικρότερη τιμή της τάσης, ενώ όταν η κάθοδος καλυφθεί ολόκληρη από το φως αίγλης, η πτώση καθόδου και η πυκνότητα ρεύματος αρχίζουν και αυξάνονται. Η εκκένωση αίγλης δεν έχει ιδιαίτερη σημασία για την κατεργασία ψεκασμού πλάσματος.

➤ Εκκένωση τόξου: Σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος η τελευταία περιοχή εκκένωσης αίγλης, όπου αυξάνεται η τάση, αντικαθίσταται από την εκκένωση τόξου. Η κάθοδος του τόξου αποκτά υψηλή θερμοκρασία που οδηγεί σε εκπομπή ηλεκτρονίων. Στην περιοχή της καθόδου δημιουργείται μικρή πτώση τάσης (10 έως 50 V) και μια αρκετά στενή περιοχή καθώς εκεί κινείται ένα φωτεινό σημείο με πολύ υψηλή πυκνότητα ρεύματος περίπου 10^7 A/cm². Υπεύθυνα για τη διατήρηση της θερμοκρασίας της καθόδου και της εκπομπής ηλεκτρονίων είναι τα ιόντα που προσκρούουν στην επιφάνεια της. Η θέρμανση της καθόδου συμπληρώνεται από εκπομπή ηλεκτρονίων που δημιουργείται από το ελεύθερο πεδίο των ιόντων που ρέουν ήδη προς την κάθοδο.

3.2.2 Σχηματισμός πλάσματος μέσω μεταφοράς θερμότητας

Η δημιουργία πλάσματος μέσω μεταφοράς θερμότητας επιτυγχάνεται σε φούρνο πλάσματος όπου ωστόσο οι θερμοκρασίες φτάνουν έως τους 3500 K, με αποτέλεσμα ο βαθμός ιονισμού είναι αρκετά μικρός, της τάξης του 1 %.

3.2.3 Σχηματισμός πλάσματος με συμπίεση

Η δημιουργία πλάσματος με συμπίεση επιτυγχάνεται σε βαλλιστικό συμπιεστή όπου ένα πιστόνι επιταχύνεται με τη βοήθεια προωθητικού αερίου. Η κινητική ενέργεια του πιστονιού μετατρέπεται σε θερμότητα με αδιαβατική συμπίεση. Η συμπίεση μπορεί να επιτευχθεί και μέσω κρουστικού κύματος το οποίο δημιουργείται με την έκρηξη μιας διαχωριστικής μεμβράνης μεταξύ των περιοχών χαμηλής και υψηλής πίεσης του συμπιεστή. Μπορούν να επιτευχθούν θερμοκρασίες μέχρι 50000 K για μικρό όμως χρονικό διάστημα.

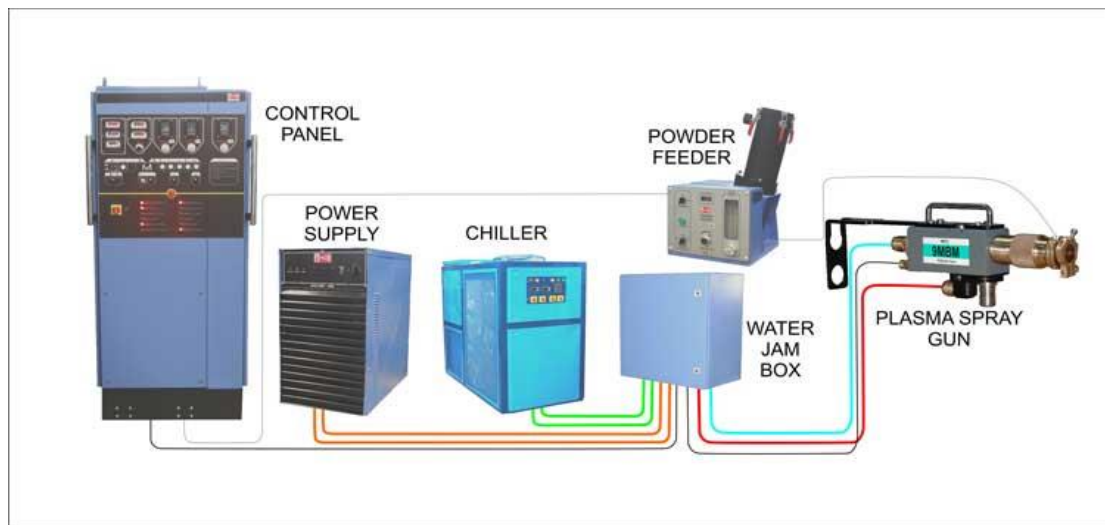
3.2.4 Σχηματισμός πλάσματος με ακτινοβολία

Η δημιουργία πλάσματος με ακτινοβολία επιτυγχάνεται μέσω της αλληλεπίδρασης του αερίου με την ενέργεια ακτινοβολίας ηλεκτρονίων, πρωτονίων ή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ο τρόπος αυτός είναι αρκετά διαδεδομένος στα λεγόμενα αστροφυσικά πλάσματα. Σε γεννήτρια ηλεκτρικής δέσμης πλάσματος, εστιάζεται δέσμη ηλεκτρονίων σε αραιό αέριο και μέσω εκρηκτικού ιονισμού δημιουργείται πλάσμα. Αντίστοιχος ιονισμός των αερίων μπορεί να επιτευχθεί με χρήση ισχυρής ακτινοβολίας laser.

3.3 Τυπική διάταξη ψεκασμού πλάσματος – Δαυλός πλάσματος^[8]

Μια τυπική διάταξη ψεκασμού πλάσματος αποτελείται από:

- Έναν εξοπλισμό ο οποίος ελέγχει ηλεκτρονικά την παροχή της μάζας
- Έναν σταθμό ελέγχου της διαδικασίας
- Ένα σύστημα παροχής μάζας αερίου
- Ένα σύστημα ψύξης ύδατος κλειστών βρόγχων
- Ένα τροφοδότη σκονών και
- Ένα δαυλό πλάσμα

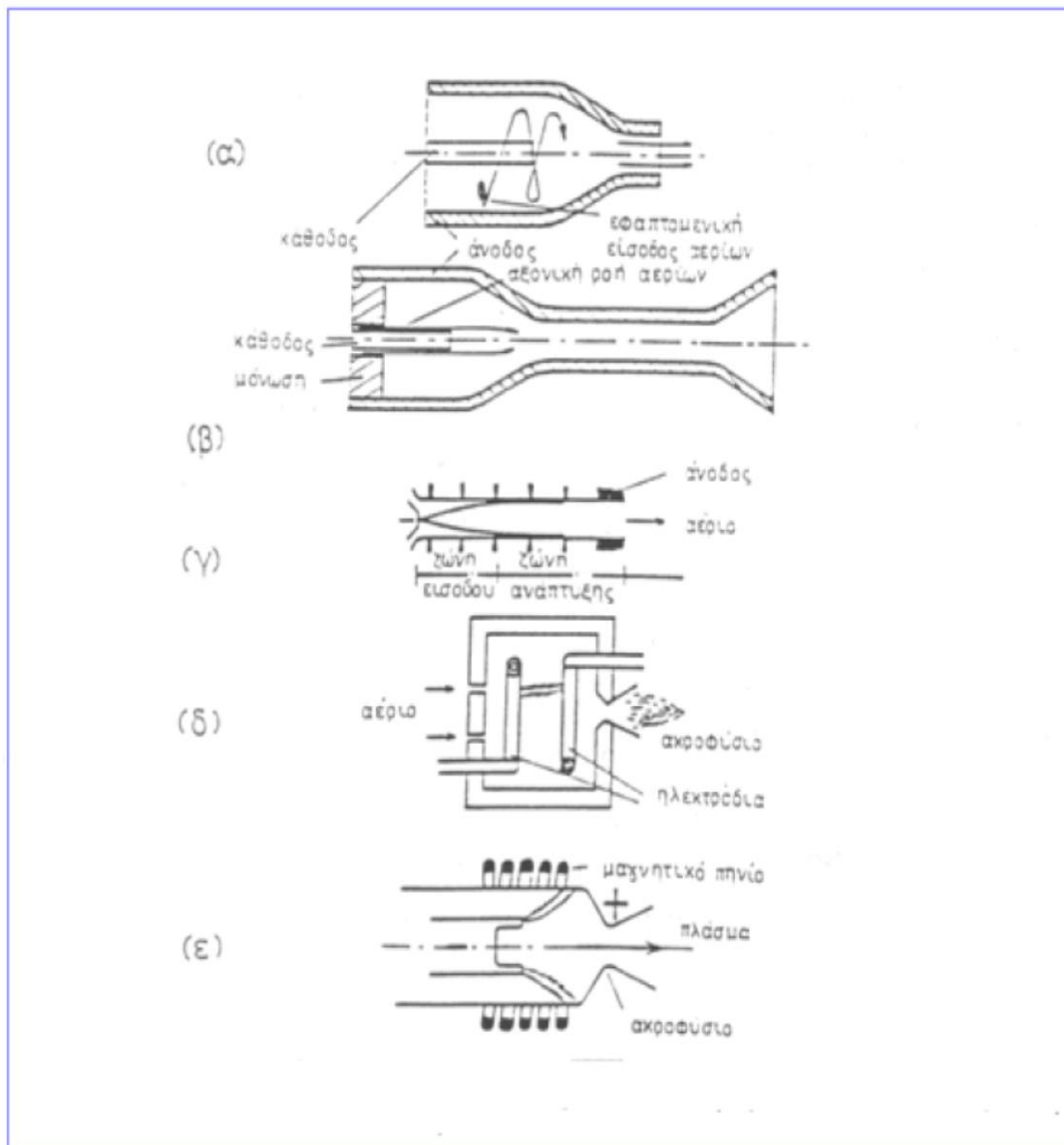


Εικόνα 3.2: Τυπική διάταξη ψεκασμού πλάσματος

Ένα αρχικό αδρανές αέριο, όπως το αργό, εγχέεται μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων στο δαυλό, όπου ιονίζεται για να διαμορφωθεί, έτσι, ένα πλάσμα υψηλής ταχύτητας. Η κεραμική σκόνη εγχέεται στο πλάσμα και κατατίθεται στη συνέχεια επάνω στο συστατικό. Να σημειωθεί ότι τα ηλεκτρόδια μεταξύ των οποίων περνά το αδρανές αέριο ψύχονται συνεχώς μέσω υγρού που κυλά σε δύο κλειστούς βρόγχους.

Η κεραμική σκόνη φέρεται από ένα ρεύμα αδρανούς αερίου και εγχέεται στη φλόγα είτε εσωτερικά μέσα στο ακροφύσιο, είτε εξωτερικά του ακροφυσίου. Η φλόγα επιταχύνει τα μόρια, τα οποία λειώνουν από την υψηλή θερμοκρασία του και μετατρέπονται σε λειωμένα σταγονίδια. Αυτά τα σταγονίδια ωθούνται έπειτα επάνω στην επιφάνεια-υπόστρωμα, όπου σταθεροποιούνται και συσσωρεύονται για να διαμορφώσουν το επίστρωμα.

Το πρώτο σχέδιο δαυλού πλάσματος αναφέρεται από τον Gage (1957), ο οποίος δημιούργησε ηλεκτρικό τόξο ανάμεσα σε ραβδοειδή κάθοδο και κυλινδρική άνοδο. Η ροή του αερίου εξέτεινε το μήκος του τόξου μέσα στην άνοδο, η οποία πρέπει να ψύχεται δραστικά. Υπάρχουν αρκετά είδη δαυλών πλάσματος τα οποία απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3.3: Τύποι δαυλών πλάσματος: α) σταθεροποίηση τόξου με περιστροφική εισροή αερίων, β) σταθεροποίηση τόξου από αξονική είσοδο αερίων, γ) σταθεροποίηση τόξου στα τοιχώματα, δ) αυτοσταθεροποιούμενο τόξο, ε) εξωτερική σταθεροποίηση τόξου

Το σχηματιζόμενο τόξο μπορεί να χωριστεί σε 3 ζώνες:

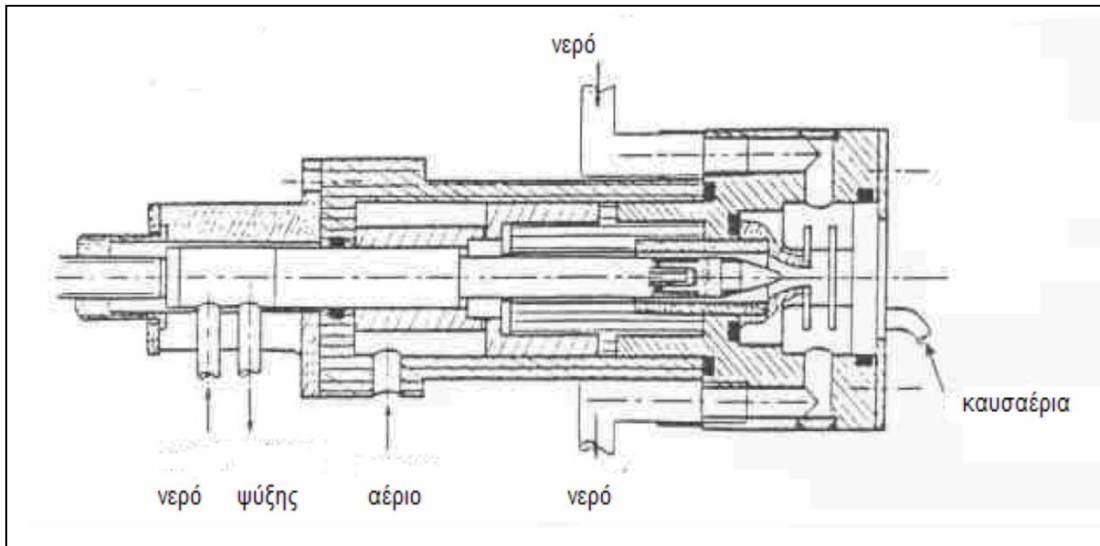
- Ζώνη ανόδου: Χαρακτηρίζεται από τον σχηματισμό ενός υδροδυναμικού οριακού στρώματος κατά μήκος του τόξου.
- Ενδιάμεση ζώνη: Λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις, μεταξύ του υδροδυναμικού οριακού στρώματος και ενός θερμικού οριακού στρώματος.
- Ζώνη τυρβώδους ροής: Το τόξο διασπάται σε δευτερεύοντα τόξα.

Για να μειωθούν οι απώλειες από τα τοιχώματα της ανόδου, πρέπει το μήκος του τόξου να περιλαμβάνει μόνο τις δύο πρώτες ζώνες. Αυτό επιτυγχάνεται με τον σχεδιασμό της ανόδου.

Όσον αφορά τις καθόδους, αυτές χωρίζονται σε δύο είδη τα οποία είναι τα εξής:

- Θερμού τύπου οι οποίες κατασκευάζονται από βολφράμιο, άνθρακα ή μολυβδαίνιο και χρησιμοποιούνται σε μη οξειδωτικές συνθήκες.
- Ψυχρού τύπου οι οποίες κατασκευάζονται από χαλκό .

Οι απώλειες στην κάθοδο είναι αμελητέες μπροστά σε αυτές τις ανόδου. Μια τυπική μορφή ενός σύγχρονου δαυλού πλάσματος είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 3.4: Δαυλός πλάσματος συνεχούς ρεύματος (DC plasma gun)

3.4 Παράμετροι λειτουργίας

Οι παράμετροι λειτουργίας κατά τον ψεκασμό πλάσματος καθορίζουν τα χαρακτηριστικά των σχηματιζόμενων επικαλύψεων και πιο συγκεκριμένα διακρίνονται σε:

➤ Αέριο πλάσματος: Το πιο συνηθισμένο αέριο που χρησιμοποιείται είναι το άζωτο (N_2) γιατί εκτός του γεγονότος του ότι είναι οικονομικό, προσφέρει και την μέγιστη μεταφορά θερμότητας στα σωματίδια. Ωστόσο χρησιμοποιείται με προσθήκη 5-10 % υδρογόνου ως αέριο πλάσματος. Αν όμως υπάρχει αντίδραση μεταξύ του υδρογόνου και του υλικού που ψεκάζεται, χρησιμοποιούμε αργό αντί για υδρογόνο, ώστε να αποφευχθεί κάθε πιθανή αντίδραση, χωρίς όμως να αλλάξουμε αναλογία. Για την μέγιστη αποτελεσματικότητα και για το ελάχιστο κόστος πρέπει να χρησιμοποιείται άζωτο με 5-10% υδρογόνο εκτός και αν το τελευταίο δημιουργεί προβλήματα.

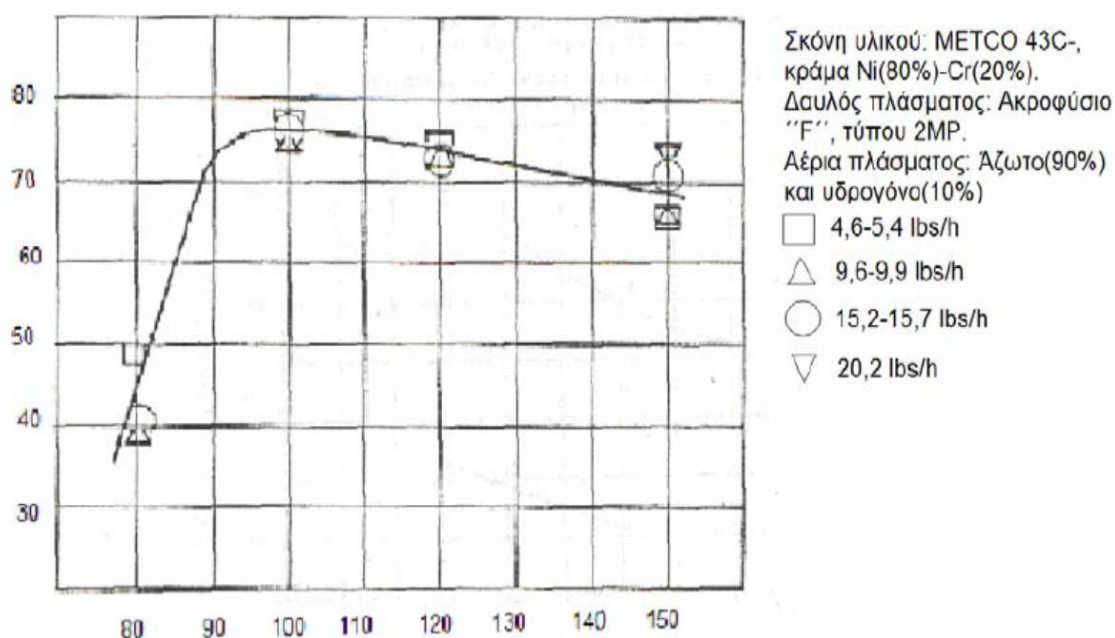
➤ Τροφοδοτούμενη ενέργεια: Η επιλογή του αερίου πλάσματος καθορίζει την πτώση τάσεως ανά μονάδα μήκους του σχηματιζόμενου τόξου. Η κατασκευή καθώς και η ταχύτητα του αερίου καθορίζουν το μήκος του σχηματιζόμενου τόξου. Κατά συνέπεια η ηλεκτρική τάση καθορίζεται από τον δαύλο και το αέριο πλάσματος. Γενικά για τα περισσότερα υποστρώματα απαιτείται μια ισχύς της τάξεως των 15-30KW. Αν ωστόσο ψεκάσουμε με

μεγαλύτερη ισχύ πετυχαίνουμε την ταχύτερη απόθεση του υλικού με ταυτόχρονη αύξηση της απόδοσης του δαυλού. Αξίζει επίσης να αναφέρουμε ότι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο αέριο του πλάσματος εξαρτάται από την σχέση ανάμεσα στην ένταση του ρεύματος και στην ποσότητα του αερίου.

➤ Τροφοδοσία σκόνης ψεκαζομένου υλικού: Η ταχύτητα με την οποία αποτίθεται η σκόνη στο υπόστρωμα παίζει μεγάλο ρόλο στη διαμόρφωση της δομής του επιστρώματος και της απόδοσης της απόθεσης.

Απόδοση απόθεσης = βάρος τροφοδοτούμενης σκόνης στο δαυλό / βάρος αποτιθέμενης σκόνης σαν επίστρωμα

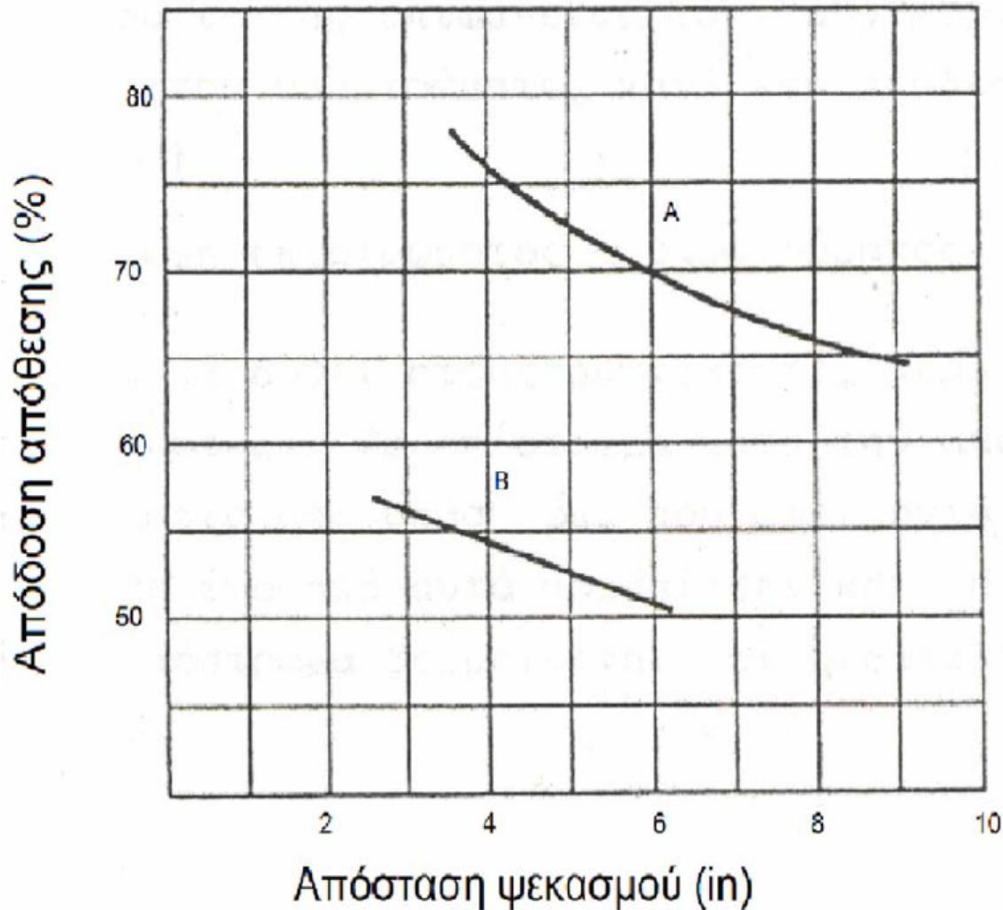
Για παράδειγμα, αν η σκόνη αποτίθεται γρηγορότερα απ' ότι μπορεί να θερμανθεί στο δαυλό, τότε έχουμε δραστική μείωση της απόδοσης αλλά και ανεπιθύμητους κόκκους μέσα στο επίστρωμα. Στην αντίθετη περίπτωση έχουμε υπέρμετρη αύξηση του κόστους.



Σχήμα 3.1: Μεταβολή της απόδοσης απόθεσης συναρτήσει της ροής του φέροντος αερίου

➤ Ταχύτητα σάρωσης του υποστρώματος και η απόσταση του δαυλού απ' αυτό: Η ταχύτητα σάρωσης του υποστρώματος, καθώς και η απόσταση από αυτό επηρεάζουν την θερμοκρασία κάτω από την οποία γίνεται η επίστρωση. Τις πιο πολλές φορές μια απόσταση 10-15cm είναι ικανοποιητική. Όταν απαιτείται δημιουργία σημαντικού πάχους επιστρώματος, τότε ρυθμίζουμε την ταχύτητα σάρωσης έτσι ώστε να σχηματίζονται πολλές στρώσεις του αποτιθέμενου υλικού.

A: #62 σκόνη τανταλίου, ρυθμός τροφοδοσίας 13,5 lbs/h, ακροφύσιο δαυλού "E", αέρια πλάσματος: άζωτο και υδρογόνο
 B: #101 σκόνη αλουμίνας, ρυθμός τροφοδοσίας 3,6 lbs/h, ακροφύσιο δαυλού "C", αέρια πλάσματος: άζωτο και υδρογόνο



Σχήμα 3.2: Η ικανότητα απόθεσης σκόνης αλουμίνας και τανταλίου σε συνάρτηση με την απόσταση ψεκασμού

➤ Γωνία ψεκασμού: Η γωνία ψεκασμού είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κάθετης στην επιφάνεια του εξαρτήματος και της διεύθυνσης της ταχύτητας των σωματιδίων. Η βέλτιστη γωνία ψεκασμού είναι από 45° – 90° . Μεταξύ αυτών των γωνιών δεν παρουσιάζεται μεγάλη αύξηση του πορώδους. Αντιθέτως όταν αυτή η γωνία είναι μικρότερη των 45° εμφανίζεται το φαινόμενο της σκίασης κατά το οποίο τα σταγονίδια που ψεκάζονται πρώτα εμποδίζουν την εξάπλωση των μετέπειτα. Αυτό το γεγονός έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλού ποσοστού πορώδους. Αν αντιθέτως η γωνία αυτή πλησιάζει τις 90° δεν εξαπλώνονται ικανοποιητικά με αποτέλεσμα το μικρό ποσοστό συνοχής του παραγόμενου επιστρώματος.

➤ Έλεγχος της θερμοκρασίας : Μία ακόμη παράμετρος είναι ο θερμοκρασιακός έλεγχος. Γενικά τα τηγμένα σωματίδια που προσπίπτουν στο υπόστρωμα μπορούν σε αρκετές περιπτώσεις να του αλλάξουν την δομή του. Για αυτόν τον λόγο λαμβάνονται κάποια μέτρα προστασίας. Πρώτον, πραγματοποιείται προθέρμανση του υποστρώματος έτσι ώστε να ελεγχθεί η διαστολή του κατά τον ψεκασμό. Εκτός από τον έλεγχο αυτόν πετυχαίνεται και η απομάκρυνση τυχόν επιφανειακής υγρασίας. Όπως είχε αναφερθεί παραπάνω αυτή η προθέρμανση συντελεί εξίσου στη καλύτερη πρόσφυση υποστρώματος–επιστρώματος.

➤ Ελεγχόμενη ατμόσφαιρα ψεκασμού: Η ελεγχόμενη ατμόσφαιρα ψεκασμού είναι πολύ σημαντική για την επιτυχία μιας επικάλυψης. Η δομή των επιστρωμάτων ψεκασμού δεν βελτιώνεται εάν ο ψεκασμός γίνει σε αδρανή ατμόσφαιρα εκτός και αν η επεξεργασία γίνει σε σημαντική θερμοκρασία. Επιστρώματα τα οποία δημιουργούνται κάτω από ατμοσφαιρικές συνθήκες και υφίστανται θερμική επεξεργασία, δεν παρουσιάζουν δραστική μεταβολή στην πυκνότητα τους ή στις φυσικές τους ιδιότητες. Αντιθέτως, όταν ο ψεκασμός γίνεται σε ατμοσφαιρικές συνθήκες χωρίς κάποια θερμική επεξεργασία, τα επιστρώματα παρουσιάζουν αποκόλληση λόγω των οξειδίων που δημιουργούνται κατά την επαφή των σταγόνων με την ατμόσφαιρα. Όταν ο ψεκασμός γίνεται σε αδρανή ατμόσφαιρα χωρίς κάποιου είδους θερμική κατεργασία, δημιουργούνται επιστρώματα που δεν έχουν οξειδία αλλά μια μικρή αποκόλληση είναι αναπόφευκτη. Τέλος, η χρησιμοποίηση ελεγχόμενης ατμόσφαιρας επιτρέπει τον ψεκασμό υλικών που οξειδώνονται και δεν μπορούν να ψεκασθούν στη ατμόσφαιρα.

3.5 Προετοιμασία επιφάνειας

Η προετοιμασία της επιφάνειας είναι πάρα πολύ βασική διαδικασία για την επιτυχή απόθεση του επιστρώματος πάνω στο υπόστρωμα. Για τον λόγο αυτό πρέπει να ακολουθηθεί η παρακάτω διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1) Η καθαριότητα της επιφάνειας του υποστρώματος έχει τεράστια σημασία γιατί η παρουσία σκόνης ή άλλων ακαθαρσιών στο υπόστρωμα επηρεάζουν αρνητικά την πρόσφυση του επιστρώματος.

2) Για να πετυχαίνεται αυτή η πρόσφυση πρέπει να γίνει τράχυνση του υποστρώματος ώστε να δημιουργηθεί μικροσκοπικός δεσμός μεταξύ υποστρώματος - επιστρώματος. Δεν είναι λίγα όμως τα υλικά τα οποία πετυχαίνουν αυτό τον δεσμό χωρίς προηγούμενη τράχυνση του υποστρώματος και τα οποία ονομάζονται αυτοπροσφυόμενα (self-bonding).

3) Το σχήμα του υποστρώματος κατά τον ψεκασμό έχει τεράστια σημασία γιατί αφού κάνουμε τον ψεκασμό και αφήνουμε το προϊόν μας να ψυχθεί, εμφανίζονται θερμικές τάσεις που ανάλογα με το σχήμα ποικίλουν. Για

παράδειγμα σε μια κυλινδρική επιφάνεια δεν παρατηρούνται τέτοιου είδους τάσεις. Σε μια οριζόντια επιφάνεια ωστόσο, παρατηρούνται τέτοιες τάσεις στα άκρα της, που προκαλούν απολέπιση (spalling) του επιστρώματος. Γι' αυτό το λόγο στις επίπεδες επιφάνειες συνίσταται περαιτέρω τράχυνση στα άκρα του επιστρώματος. Η τράχυνση επιφανειών επιτυγχάνεται με αμμοβολή, με την οποία εξασφαλίζονται τα ακόλουθα:

- α) αύξηση της επιφάνειας πρόσφυσης του επιστρώματος
- β) τοπικός περιορισμός των αναπτυσσόμενων τάσεων
- γ) δημιουργία πτυχώσεων στο επίστρωμα

Επομένως ένα επίστρωμα πρέπει να αντέχει και στις τάσεις που θα του επιβληθούν κατά την διάρκεια λειτουργίας του αλλά και στις εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την απόθεση. Οι τάσεις που δημιουργούνται κατά το φινίρισμα μπορεί να είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στη διάρκεια λειτουργίας του, και γι' αυτό το λόγο πρέπει να δοθούν και σε αυτές ιδιαίτερη προσοχή.

3.5.1 Επιλογή μεθόδου πρόσφυσης

Οι μέθοδοι πρόσφυσης είναι οι παρακάτω:

- Προθέρμανση υποστρώματος
- Τράχυνση της επιφάνειας του υποστρώματος
- Απόθεση σε λείο υπόστρωμα ενός αυτοπροσφυόμενου επιστρώματος

Ο όρος «αυτοπροσφυόμενο» χρησιμοποιείται για συγκεκριμένη θερμοκρασία και συγκεκριμένα για αυτή του περιβάλλοντος. Αυτό συμβαίνει γιατί για κάθε υπόστρωμα υπάρχει μια θερμοκρασία στην οποία ένα συγκεκριμένο ψεκαζόμενο υλικό καθίσταται αυτοπροσφυόμενο.

Συμπερασματικά, η καλύτερη μέθοδος πρόσφυσης είναι η επιλογή ενός αυτοπροσφυόμενου συνδετικού επιστρώματος. Μόνο στην περίπτωση που αυτή η μέθοδος δεν είναι επιτεύξιμη χρησιμοποιούμε τις άλλες δύο μεθόδους. Συνήθως, επειδή ο καθαρισμός της επιφάνειας είναι αναντικατάστατος, χρησιμοποιούμε τράχυνση σε συνδυασμό με αυτοπροσφυόμενο υλικό.

3.5.2 Ανάλυση καθαρισμού

Στην επιφάνεια του υποστρώματος υπάρχουν επιφανειακά οξειδία και άλλες ακαθαρσίες οι οποίες πρέπει να απομακρυνθούν ώστε να πετύχουμε την μέγιστη πρόσφυση. Το κυριότερο πρόβλημα που εμφανίζεται στα περισσότερα υλικά είναι η απομάκρυνση του λίπους (λαδιού). Αυτό το λίπος προέρχεται είτε μετά από μηχανουργική κατεργασία είτε ως μέσο συντήρησης. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το φαινόμενο, θερμαίνεται πρώτα το υπόστρωμα σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτή που θα αναπτυχθεί κατά την διάρκεια του

ψεκασμού, ώστε να εξέλθουν τα λάδια από το εσωτερικό του. Αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε υλικά τα οποία αντέχουν την θερμική καταπόνηση, δεδομένου ότι ο υπολειπόμενος άνθρακας στους πόρους δε δρά δυσμενώς στη πρόσφυση. Η απολίπανση με εξάτμιση λαδιού (vapor phase degreasing) είναι το πρώτο βήμα καθαρισμού κι αν αυτή η μέθοδος δεν είναι αποτελεσματική τότε το εξάρτημα πλένεται μηχανικά σε υγρό διαλύτη.

Η διαδικασία καθαρισμού μπορεί να μην γίνεται τόσο επιμελώς, όταν αυτή θα ακολουθείται από αμμοβολή κι αυτό συμβαίνει γιατί με την αμμοβολή το εναπομένον λάδι μεταφέρεται στην επιφάνεια με αποτέλεσμα να μην έχει τις ίδιες αρνητικές συνέπειες. Αν κατά την διάρκεια του ψεκασμού εμφανιστεί λάδι στην επιφάνεια του υποστρώματος, τότε πρέπει να διακοπεί ο ψεκασμός, να απομακρυνθεί το επίστρωμα και να γίνει ο ψεκασμός από την αρχή. Μετά τον ψεκασμό και την τράχυνση και πριν την απόθεση πρέπει να αποφεύγεται η επαφή των δοκιμίων με οτιδήποτε μπορεί να προκαλέσει την μόλυνση τους. Τα δοκίμια δεν πρέπει να πιάνονται με το χέρι γιατί με αυτόν τον τρόπο αποτίθεται λίπος στην επιφάνεια τους και τέλος πρέπει να πραγματοποιείται η επικάλυψη εντός 24 ωρών, αλλιώς υπάρχει κίνδυνος οξειδωσης της επιφάνειας.

3.5.3 Μηχανισμοί αμμοβολής

A) Μηχανές αναρρόφησης

Με αυτόν τον μηχανισμό πετυχαίνουμε την ανακύκλωση του υλικού της αμμοβολής, τροφοδοτώντας αυτό το υλικό που βρίσκεται σε ένα σιλό τροφοδοσίας, μέσα σε ένα σωλήνα αναρρόφησης τύπου “ventouri”. Στην συνέχεια το υλικό παραλαμβάνεται από ένα ρεύμα αέρα και μεταφέρεται στο ακροφύσιο.

B) Μηχανές υψηλής πίεσης

Αυτές οι μηχανές χρησιμοποιούνται για μεγάλα εξαρτήματα και πιο συγκεκριμένα όταν το υλικό αμμοβολής είναι σφαιρίδια σιδήρου.

Γ) Μέτρα ασφαλείας

Τα προστατευτικά γυαλιά είναι ένας τρόπος για να αποφευχθεί ο τραυματισμός των ματιών. Συνίσταται η αποφυγή χρήσης άμμου για καθαρισμό, σε εσωτερικούς χώρους, διαδικασία η οποία προηγείται της αμμοβολής .

3.5.4 Υλικά αμμοβολής

Ως υλικά αμμοβολής χρησιμοποιούνται:

A) Άμμος: Συνίσταται μόνο στα μεγάλα δομικά εξαρτήματα και για εξωτερικούς χώρους.

B) Σφαιρίδια Σιδήρου: Το συνηθέστερο υλικό κατασκευής τους είναι ο χυτοσίδηρος ο οποίος έχει υποστεί κατάτμηση για να γίνει κυκλικός για τράχυνση επιφανειών. Υπάρχουν τυποποιημένα μεγέθη σφαιριδίων ανάλογα με την περίπτωση. Για παράδειγμα όταν έχουμε επιστρώματα μικρού πάχους

μέχρι 0.005 in (= 0.127mm) και σχετικά μαλακά όπως Al,Cu τότε χρησιμοποιούνται σφαιρίδια SAE G-25 έως G-40. Για παχύτερα υλικά χρησιμοποιούνται SAE G-18 έως G-25. Ωστόσο με αυτή την μέθοδο επιβάλλονται έντονες τάσεις στην επιφάνεια των υποστρωμάτων.

Γ) Οξειδίο αλουμινίου: Είναι το πιο διαδεδομένο υλικό αμμοβολής γιατί προκαλεί την μικρότερη συγκέντρωση τάσεων. Πιο συγκεκριμένα έχει μεγάλη σκληρότητα και μπορεί να τραχύνει ακόμα και επιφάνειες σκληρών χαλύβων. Η πίεση λειτουργίας πρέπει να είναι μεταξύ 75-80 psi.

Δ) Καρβίδιο του πυριτίου: Το υλικό αυτό δυστυχώς προσκολλάται στην επιφάνεια με αποτέλεσμα την μόλυνση της. Γι' αυτό το λόγο δεν συνίσταται για επιστρώματα πλάσματος.

3.5.5 Μασκάρισμα

Το μασκάρισμα (masking) χρησιμοποιείται όταν πρέπει να επικαλυφθεί ένα συγκεκριμένο τμήμα μιας επιφάνειας και ακολούθως δεν είναι απαραίτητη η αμμοβολή όλης της επιφάνειας. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Με τον 1^ο τρόπο καλύπτεται η επιφάνεια που δεν πρέπει να αμμοβοληθεί με μια μεταλλική κατασκευή η οποία εκτός του γεγονότος του ότι δεν είναι ευέλικτη, είναι και ευάλωτη στην αμμοβολή. Με τον 2^ο τρόπο η επιφάνεια που δεν πρέπει να υποστεί αμμοβολή καλύπτεται με λαστιχένιες ταινίες. Η διαδικασία του μασκαρίσματος πρέπει να γίνεται και πριν την χρήση πλάσματος. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται ειδικές ταινίες οι οποίες αντέχουν στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια του ψεκασμού. Ένας άλλος τρόπος μασκαρίσματος είναι η χρήση κατάλληλου υγρού το οποίο εμποδίζει την πρόσφυση του επιστρώματος με το υπόστρωμα. Πιο συγκεκριμένα επαλείφεται η επιφάνεια που δεν πρέπει να επικαλυφθεί με το παχύρρευστο υγρό και στην συνέχεια μετά το πέρας του ψεκασμού με χρήση πλάσματος, αφαιρείται τόσο το υγρό όσο και το επίστρωμα το οποίο έπεσε πάνω σε αυτό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ

4.1 Γενικά περί ποιοτικού ελέγχου επικαλύψεων ^[1]

Η ευρεία βιομηχανική παραγωγή και χρήση προϊόντων από κεραμικά και άλλα υλικά και οι υψηλές απαιτήσεις της σύγχρονης τεχνολογίας για τη σύνθεση νέων υλικών με ιδιαίτερες φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες, έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη και εφαρμογή ποικίλων μεθόδων ανάλυσης και χαρακτηρισμού υλικών προκειμένου να καθοριστεί και να διασφαλιστεί η ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων. Έτσι, ο ποιοτικός έλεγχος των επικαλύψεων γίνεται με βάση τις ακόλουθες δύο ειδών τεχνικές:

- Καταστροφικές Μέθοδοι Ελέγχου (Destructive Testing, DT). Είναι οι μέθοδοι εκείνες στις οποίες είναι αναγκαία, για τον χαρακτηρισμό του υλικού, η απόσπαση από αυτό δείγματος καθορισμένων διαστάσεων. Οι μη - μηχανικές καταστροφικές μέθοδοι, συνήθως, κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το είδος της δέσμης που χρησιμοποιείται ως πηγή ανάλυσης αλλά και τον τύπο αλληλεπίδρασης δέσμης-υλικού.
- Μη Καταστροφικές Μέθοδοι Ελέγχου (Non - Destructive Testing, NDT). Ως μη καταστροφικές δοκιμές ελέγχου θεωρούνται αυτές που η εφαρμογή τους δεν επηρεάζει την ακεραιότητα ή τη λειτουργικότητα των προς έλεγχο αντικειμένων. Αν και τις περισσότερες φορές με τις μεθόδους NDT δεν είναι δυνατόν να μετρηθούν άμεσα οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών, ωστόσο με αυτές μπορούν να εντοπισθούν εύκολα μακρο- και μικροσκοπικές ατέλειες του υλικού (π.χ. ρωγμές, πόροι) που ευθύνονται για την πρόωρη αστοχία του. Οι μέθοδοι NDT χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην παραγωγική διαδικασία, γιατί βοηθούν στη διάγνωση των καίριων ελλειψμάτων του προϊόντος και οδηγούν στη βελτιστοποίηση των συνθηκών κατασκευής τους. Στους πίνακες 4.1 και 4.2 περιέχονται οι κύριες καταστροφικές και μη μέθοδοι χαρακτηρισμού των επικαλύψεων, αντίστοιχα:

Πίνακας 4.1: Καταστροφικές Μέθοδοι χαρακτηρισμού

Καταστροφικές Μέθοδοι χαρακτηρισμού	
Φωτο-ηλεκτρομαγνητικές	Οπτική μικροσκοπία, Μικροσκοπία Laser (SLM,Raman), Ακουστική μικροσκοπία, Φωτοη/κή φασματοσκοπία – X (XPS), Φασματοσκοπία Mossbauer
Ηλεκτρονικές	Ηλεκτρονική μικροσκοπία (SEM,TEM), Ηλεκτρονική μικροανάλυση – X (EPMA,EDS), Φασματοσκοπία Auger (AES)
Περίθλαση	Περίθλαση ακτίνων – X (XRD), Περίθλαση ηλεκτρονίων (ED), Περίθλαση νετρονίων (ND)
Ατομικές-ιοντικές	Φασματομετρία μάζας δευτερογενών ιόντων (SIMS), Ιοντική μικροσκοπία πεδίου (FIM)

Θερμικές	Διαφορική θερμική ανάλυση, Διαφορική θερμοδομετρική ανίχνευση (DSC), Θερμοβαρυτική ανάλυση (TGA)
Μηχανικές	Στατικές (πχ εφελκυσμός), Δυναμικές (πχ κόπωση), Άλλες (φθορά, τριβή), Μετρήσεις Τάσεων
Χημικές	Διάβρωση

Πίνακας 4.2: Μη Καταστροφικές Μέθοδοι χαρακτηρισμού

Μη Καταστροφικές Μέθοδοι χαρακτηρισμού	
Οπτικές	Πχ στερεοσκοπία, ανάλυση εικόνας κτλ
Ραδιογραφίες	Ραδιογραφία ακτίνων Χ, Ραδιογραφία ακτίνων γ
Μηχανικές	Πχ σκληρομέτρηση, τραχυμέτρηση κτλ
Μαγνητικές	
Θερμογραφία	
Φθορίζοντα-Διεσδυτικά υγρά	
Ολογραφία	
Υπέρηχοι	
Δινορρεύματα	

Παρακάτω θα γίνει εκτενής αναφορά στις πιο διαδεδομένες μεθόδους χαρακτηρισμού των υλικών και ειδικότερα των διαφόρων ειδών επικαλύψεων.

4.2 Εφελκυσμός

Ένας μεγάλος αριθμός υλικών κατά την διάρκεια του λειτουργικού χρόνου ζωής τους, υπόκεινται σε διάφορες δυνάμεις και καταπονήσεις. Σύνθετα και μεταλλικά υλικά όπως τα σύνθετα οργανικής μήτρας (OMC's) και τα κράματα αλουμινίου βρίσκουν εφαρμογή στις πτέρυγες των αεροσκαφών ή τον χάλυβα που χρησιμοποιείται στην κατασκευή αξόνων αυτοκινήτων. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά αυτών των υλικών, έτσι ώστε οποιαδήποτε καταπόνηση να μην ξεπερνάει τα αντίστοιχα όρια θραύσης τους. Συνεπώς, η μελέτη των υλικών αυτών κάτω από συνθήκες τεχνητής καταπόνησης (εφελκυσμός, θραύση, σκληρότητα, κόπωση) είναι υψίστης σημασίας σε υλικά που κατά την λειτουργία τους υφίστανται τέτοιες τάσεις.

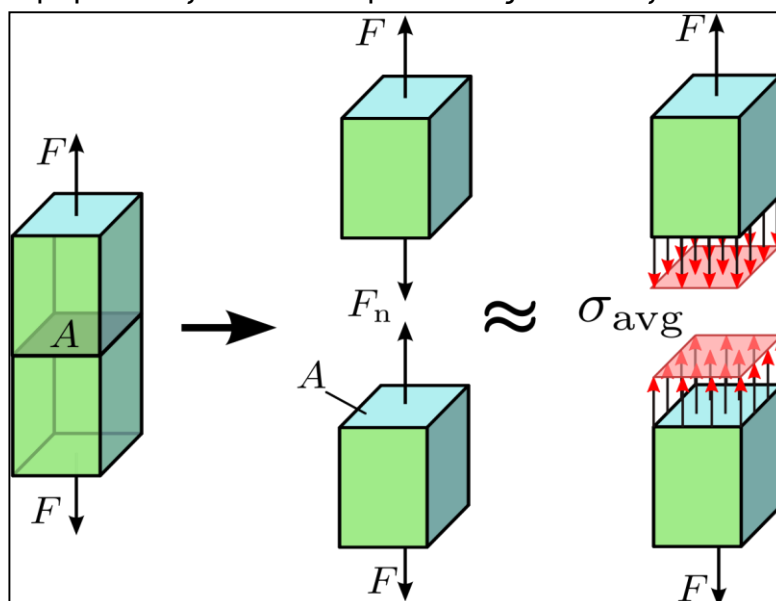
Η δοκιμή εφελκυσμού ανήκει σε μία από τις βασικότερες δοκιμές ελέγχου των υλικών. Χρησιμοποιείται κυρίως για τον προσδιορισμό της αντοχής και της ολκιμότητας των υλικών (χάλυβας, μη σιδηρούχα μέταλλα, σύνθετα υλικά). Η αντοχή αντιπροσωπεύει ένα μέτρο δυνάμεων που χρειάζεται να εφαρμοστούν στο υλικό, ώστε να υπερνικηθούν οι εσωτερικές ελκτικές δυνάμεις (δεσμοί) μεταξύ των ατόμων ή των μορίων που το κρατάνε συνεχές.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές πρέπει να είναι σε θέση να ανταποκρίνονται σε επιδράσεις αρκετά μεγάλων δυνάμεων (φορτίων). Η

πιθανή επερχόμενη πλαστική παραμόρφωση του υλικού (λόγω τάσεων) δεν πρέπει να πλησιάζει σε επικίνδυνα όρια ώστε να οδηγούμαστε σε θραύση. Στον ευρύτερο χώρο της τεχνολογίας υλικών, υπάρχουν συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες που χρειάζονται ανάλογα με την περίπτωση εφαρμογής. Μερικές φορές το υλικό πρέπει να είναι όλκιμο (*ductile*), να μπορεί δηλαδή να επιμηκυνθεί εύκολα, και ελατό (*malleable*), να μπορεί να συμπιεστεί και να ελαθεί εύκολα. Γενικά, τα υλικά παρουσιάζουν αυτές τις ιδιότητες σε μικρό ή μεγάλο βαθμό, οι οποίες περιλαμβάνονται στον όρο ελαστικότητα (*elasticity*).

Στις δοκιμές υλικών οι δύο βασικές έννοιες που χρησιμοποιούνται είναι αυτές της τάσης και της παραμόρφωσης. Με την έννοια τάση (*stress*) εννοούμε το επιβαλλόμενο φορτίο (στατικό ή μεταβαλλόμενο) το οποίο ασκείται ομοιόμορφα σε μία κάθετη διατομή ή επιφάνεια ενός σώματος, ενώ παραμόρφωση (*strain*) είναι το αποτέλεσμα αυτής της επιβολής φορτίου στο σχήμα και στις διαστάσεις του υλικού.

Η συνηθέστερη ίσως μηχανική δοκιμή τάσης - παραμόρφωσης είναι ο εφελκυσμός. Συνήθως, ένα δοκίμιο παραμορφώνεται μέχρι την θραύση του αυξάνοντας σταδιακά το επιβαλλόμενο φορτίο που εφαρμόζεται μονοαξονικά κατά μήκος του μεγάλου άξονα του δοκιμίου όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.1.

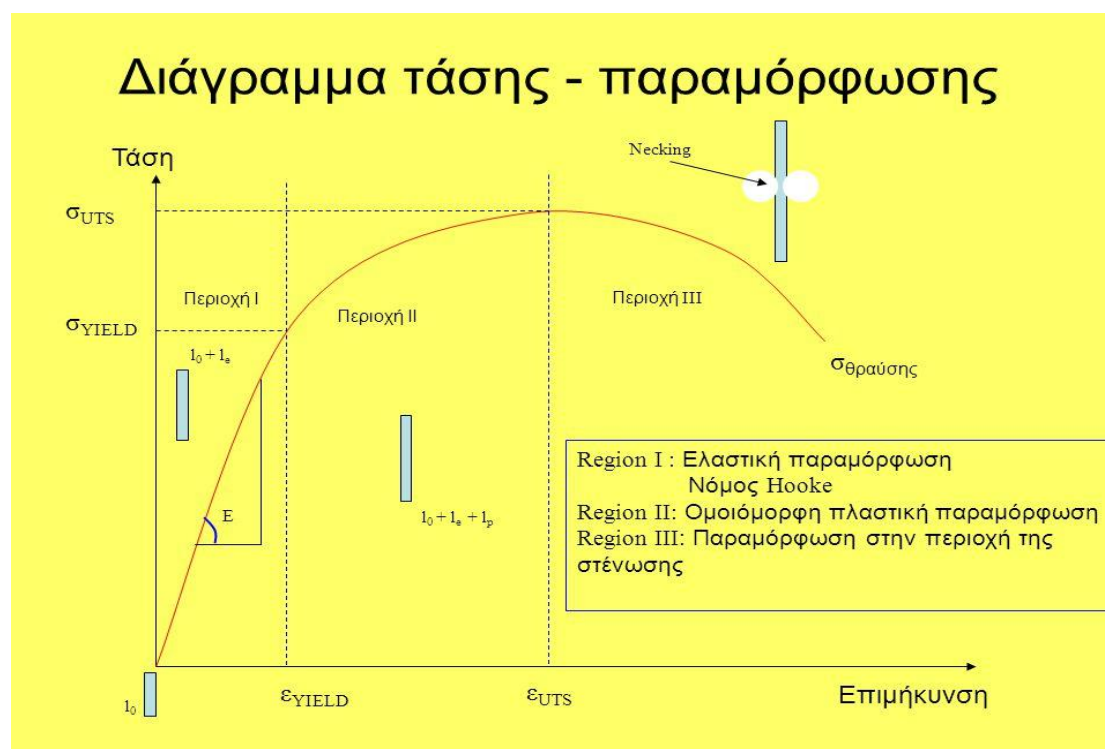


Σχήμα 4.1: Δοκιμή Εφελκυσμού

Η συμπεριφορά ενός μετάλλου όταν υποβάλλεται σε εφελκυσμό χωρίζεται σε δύο περιοχές, την περιοχή της ελαστικής και την περιοχή της πλαστικής περιοχής. Και για τις δύο περιπτώσεις κατασκευάζονται διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης, όπου η τάση εφελκυσμού (*tensile stress*) ή μηχανική τάση, σ , ορίζεται ως η δύναμη εφελκυσμού που ενεργεί κάθετα στη μονάδα επιφάνειας ενώ η παραμόρφωση (*strain*), ϵ , παριστάνει τη σχετική % επιμήκυνση που εμφανίζεται εξαιτίας αυτής της τάσης. Κατά τη δοκιμή αυτή εξετάζεται η συμπεριφορά του υλικού σε μονοαξονική, ομοιόμορφη καθ' όλη τη διατομή,

εφελκυστική καταπόνηση για την επίτευξη της οποίας απαιτείται ομοιογενής επιβολή της δύναμης. Καθώς όμως αυτό δεν ισχύει κοντά στα σημεία συγκράτησης του δοκιμίου, πρέπει να καθορίζεται ένα μήκος μέτρησης l_0 μακριά από τα σημεία συγκράτησης και όχι πολύ μεγάλο σε σχέση με το συνολικό ενεργό μήκος.

Το Σχήμα 4.2 απεικονίζει ένα τέτοιο λαμβανόμενο διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης σε συνθήκες μονοαξονικής παραμόρφωσης. Στα αρχικά στάδια της παραμόρφωσης, η τάση μεταβάλλεται γραμμικά με την παραμόρφωση. Σε αυτήν την περιοχή, μόλις τερματιστεί η εφαρμογή της τάσης κάθε παραμόρφωση θεωρείται ελαστική καθώς το δείγμα επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση (ίδιες διαστάσεις). Στην περίπτωση όμως που συνεχιστεί η εφαρμογή του φορτίου, η παραμόρφωση συνεχίζεται και η καμπύλη γίνεται μη γραμμική. Σε αυτό το σημείο αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση η οποία προκαλεί μία μόνιμη επιμήκυνση, η οποία δεν μπορεί να επανέλθει στην αρχική της κατάσταση με τον τερματισμό της επιβολής του φορτίου.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης

Όπως αναφέρθηκε πρωτίτερα, το δοκίμιο υποβάλλεται σε μια σταθερά αυξανόμενη δύναμη και συγχρόνως υπολογίζεται η επιμήκυνση $\Delta l = l - l_0$ όπου l_0 το αρχικό μήκος του δοκιμίου και l το εκάστοτε μήκος του δοκιμίου.

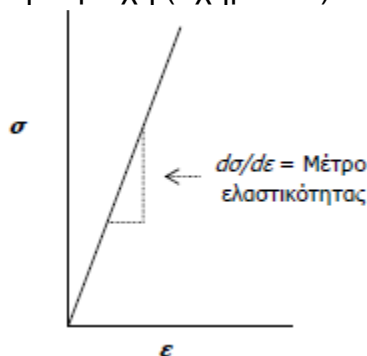
Η συμβατική τάση ορίζεται ως το πηλίκο της εφαρμοζόμενης δύναμης F προς την αρχική διατομή του δοκιμίου A_0 , δηλαδή $\sigma = F/A_0$. Η συμβατική τάση υπολογίζεται σε Pascal (Pa) ($1\text{MPa} = 1\text{ N/mm}^2$). Η συμβατική παραμόρφωση

ορίζεται ως το πηλίκο της εκάστοτε επιμήκυνσης προς το αρχικό μήκος $\epsilon = \Delta l / l_0$, όπου ϵ η παραμόρφωση (mm/mm ή %).

Ανάλογα με τα συμβατικά μεγέθη ορίζονται και τα πραγματικά μεγέθη. Η πραγματική τάση s ορίζεται ως το πηλίκο της δύναμης F προς την εκάστοτε (τρέχουσα) διατομή του δοκιμίου A , δηλαδή $s = F/A$ και η πραγματική παραμόρφωση e ως το πηλίκο της επιμήκυνσης προς το τρέχον μήκος l , δηλαδή $e = \Delta l / l$. Τα συμβατικά και πραγματικά μεγέθη συνδέονται με τις σχέσεις $e = \ln(1 + \epsilon)$ και $s = \sigma(1 + \epsilon)$

Επίσης, ισχύει $l_0 \times A_0 = A$ καθώς ισχύει η αρχή της ισόογκης παραμόρφωσης (δεν έχουμε αποβολή υλικού). Το αποτέλεσμα της δοκιμής είναι το συμβατικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα παραμόρφωσης μαζί με την θερμοκρασία εκτέλεσης της δοκιμής είναι οι δύο βασικότεροι παράγοντες που επιδρούν στην αντοχή των υλικών.

Κατά την δοκιμή εφελκυσμού το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά, αν μετά την πλήρη αποφόρτιση εξαλείφονται όλες οι μεταβολές στο σχήμα και στο όγκο του. Αυτή η συμπεριφορά γίνεται αντιληπτή στο σχήμα 4.2 ως η περιοχή που η σχέση μεταξύ τάσης παραμόρφωσης είναι αναλογική. Η σχέση που ερμηνεύει την αναλογία αυτή είναι της μορφής $\sigma = E \times \epsilon$ και είναι γνωστή ως νόμος του Hooke. Η σταθερά E ονομάζεται μέτρο ελαστικότητας (*elasticity modulus*) ή μέτρο του Young (*Young's modulus*) του υλικού και ορίζεται από την κλίση της καμπύλης σ - ϵ στην ελαστική περιοχή (σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Μέτρο ελαστικότητας ως κλίση της καμπύλης σ - ϵ στην ελαστική περιοχή.

Υπό την επίδραση της ίδιας της τάσης σε κάποιο δοκίμιο, η παραμόρφωση είναι τόσο μικρότερη όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας. Το μέτρο ελαστικότητας είναι μια σταθερά του υλικού. Για περίπου ισότροπα υλικά επηρεάζεται ουσιαστικά μόνο από τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Υλικά με ανομοιογενή σύσταση όπως π.χ. ο χυτοσίδηρος με τις συγκεντρώσεις γραφίτη που εμφανίζει ή ινώδη σύνθετα υλικά με προσανατολισμό των ενισχυτικών ινών τους εμφανίζουν εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας από τον τρόπο φόρτισης.

Η μεγαλύτερη τιμή της τάσης για την οποία η παραμόρφωση είναι ακόμα ελαστική ονομάζεται όριο ελαστικότητας σ_E (*elastic limit*). Η τιμή του ορίου ελαστικότητας εξαρτάται όχι μόνο από το υλικό, αλλά και από τον τρόπο

παρασκευής του δοκιμίου, την προηγούμενη κατεργασία, την παρουσία προσμίξεων καθώς επίσης και από τις συνθήκες δοκιμής.

Κατά την εφαρμογή εφελκυστικής τάσης σε μεταλλικό δοκίμιο (π.χ κατά τον άξονα z), η ελαστική επιμήκυνση και η αντίστοιχη παραμόρφωση ε_z παρατηρούνται κατά τον άξονα z . Το αποτέλεσμα αυτής της επιμήκυνσης είναι η εμφάνιση συρρίκνωσης στις πλάγιες διευθύνσεις (x και y) κάθετα στην εφαρμοζόμενη τάση. Εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μονοαξονική και το υλικό ισότροπο, τότε $\varepsilon_x = \varepsilon_y$. Ο λόγος των εγκάρσιων παραμορφώσεων προς την αξονική παραμόρφωση ορίζει ένα σημαντικό μέγεθος που ονομάζεται λόγος Poisson (ν) και δίδεται από την σχέση: $\nu = -\varepsilon_x/\varepsilon_z = -\varepsilon_y/\varepsilon_z$

Το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω εξίσωση υποδηλώνει ότι το ν είναι πάντοτε θετικό καθώς τα ε_x και ε_y έχουν πάντοτε αντίθετα πρόσημα. Για πολλά μέταλλα και κράματα η τιμή του λόγου Poisson κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.25 και 0.35. Είναι προφανές ότι όσο μικρότερος ο αριθμός Poisson τόσο μεγαλύτερες είναι οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

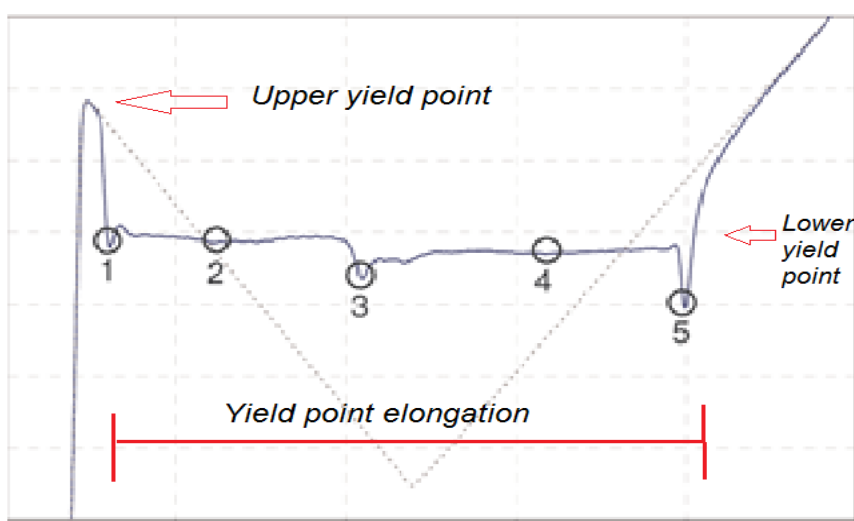
Όταν ξεπεραστεί το όριο ελαστικότητας, εισερχόμαστε στην περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης όπου το μέταλλο μετά την απομάκρυνση της τάσης διατηρεί ένα ποσοστό μόνιμης παραμόρφωσης.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων μετάλλων, η ελαστική περιοχή παραμόρφωσης περιορίζεται σε τιμές τις τάξεως του 0.005. Καθώς το υλικό παραμορφώνεται πέρα του σημείου αυτού, ο νόμος του Hook παύει να ισχύει και εμφανίζεται μόνιμη, μη ανακτήσιμη ή αλλιώς πλαστική παραμόρφωση. Η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή είναι βαθμιαία στα περισσότερα μέταλλα, ενώ εμφανίζεται και κάποια καμπύλωση με την έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης.

Σε ατομικό επίπεδο, η πλαστική παραμόρφωση πραγματοποιείται όταν επέρχεται σπάσιμο των δεσμών γειτονικών ατόμων και στον ανασχηματισμό τους μεταξύ νέων γειτόνων, καθώς μεγάλος αριθμός ατόμων ή μορίων κινούνται σε σχέση του ενός ως προς τον άλλο. Με την αφαίρεση της τάσης τα άτομα ή μόρια δεν επιστρέφουν στις αρχικές τους θέσεις. Στην περίπτωση όπου έχουμε κρυσταλλικά στερεά, η παραμόρφωση συντελείται μέσω μιας διεργασίας όπου ονομάζεται *ολίσθηση*. Η πλαστική παραμόρφωση σε μη κρυσταλλικά στερεά εμφανίζεται με την μορφή μηχανισμού ιξώδους ροής.

Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζονται τρία χαρακτηριστικά μεγέθη όπου εξάγονται από τα διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης. Το σημείο θραύσης (fracture point), ΣΘΡΑΥΣΗΣ, αντιπροσωπεύει την τάση όπου επέρχεται πλήρη θραύση του μετάλλου. Την μέγιστη τάση, σ_{UTS} , όπου ονομάζεται μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (*ultimate tensile strength*) και υποδηλώνει το μέγιστο φορτίο όπου μπορεί να υποστεί το μέταλλο και τέλος το σημείο μεταξύ της περιοχής I και II όπου αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση και ονομάζεται όριο διαρροής (*offset yield point*) ή ενδοτικό σημείο ενώ η αντίστοιχη τάση ονομάζεται τάση διαρροής (σ_E ή σ_{YIELD}).

Σε μερικά υλικά όπως για παράδειγμα στον χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, η στιγμή που η τάση φτάνει το όριο διαρροής φαίνεται χαρακτηριστικά στο διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης. Ως όριο διαρροής (σ_y) ορίζεται η τάση για την οποία παρά την αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης του δοκιμίου η ένδειξη του φορτίου παραμένει προς στιγμή σταθερή ή πέφτει. Η ανωμαλία αυτή εμφανίζεται μόνο σε λίγα υλικά και για ειδικές συνθέσεις υλικών. Ως ένδειξη της εισόδου στην πλαστική περιοχή είναι η εμφάνιση (ιδίως σε καλά λειασμένες επιφάνειες) ζωνών διαρροής που ονομάζονται ζώνες *Luders*. Οι ζώνες αυτές συνδέονται με την διέλευση από την μεταβατική περιοχή μεταξύ ελαστικής και πλαστικής περιοχής. Μετά το τέλος της περιοχής αυτής ακολουθεί μια νέα ανοδική πορεία του διαγράμματος σ - ϵ (κράτυση).



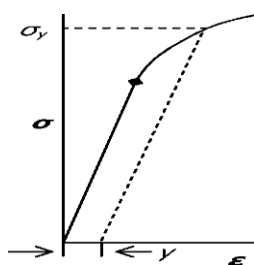
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης όπου απεικονίζονται τα άνω και κάτω όρια διαρροής καθώς και η επιμήκυνση του ορίου διαρροής

Το φορτίο όπου παρουσιάζεται μία απότομη πτώση ονομάζεται ΑΝΩ ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (Upper yield point). Το μερικώς μεταβαλλόμενο φορτίο ονομάζεται ΚΑΤΩ ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (Lower yield point) ενώ η επιμήκυνση σε αυτό το μερικό μεταβαλλόμενο φορτίο καλείται επιμήκυνση ορίου διαρροής (*Yield point elongation*). Στο άνω σημείο διαρροής εμφανίζεται μια διακριτή ταινία παραμορφωμένου μετάλλου, συχνά εμφανής, στα σημεία όπου υπάρχει συσσώρευση τάσης. Ταυτόχρονα, με τον σχηματισμό της ταινίας παρουσιάζεται μία πτώση στην τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου (κάτω όριο διαρροής). Η ταινία εξελίσσεται με την σειρά κατά μήκος του δοκιμίου δημιουργώντας την επιμήκυνση του ορίου διαρροής. Σε πολλές περιπτώσεις, υπάρχει περίπτωση εμφάνισης αρκετών ταινιών σε παραπάνω από ένα σημείο σε σημεία όπου υπάρχει συσσώρευση τάσης. Οι ταινίες αυτές εμφανίζουν γωνία 45° με τη διεύθυνση εφαρμογής της τάσης. Όταν έχουν σχηματιστεί αρκετές ταινίες *Luders*, η καμπύλη κατά μήκος της επιμήκυνσης του ορίου διαρροής είναι ακανόνιστη όπου κάθε αυξομείωση υποδηλώνει τον σχηματισμό

μιας νέας ταινίας. Όταν οι ταινίες έχουν καλύψει όλο το μήκος του δείγματος η καμπύλη αυξάνει με την παραμόρφωση και σηματοδοτεί το τέλος της επιμήκυνσης του ορίου διαρροής.

Το ποσοστό της ελαστικής παραμόρφωσης στη συνολική παραμόρφωση εξαρτάται από το υλικό και την κράτυνση που εμφανίζει. Κράτυνση ονομάζεται η ιδιότητα του υλικού να απαιτεί αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης για να εμφανίσει περαιτέρω παραμόρφωση. Μετά την αποφόρτιση και το μηδενισμό της τάσης μπορούμε να μετρήσουμε την παραμένουσα παραμόρφωση στο δοκίμιο.

Στις περιπτώσεις δοκιμών μετάλλων όπου το όριο διαρροής δεν διακρίνεται χαρακτηριστικά στο διάγραμμα σ - ϵ , ορίζεται ως συμβατικό όριο διαρροής σ_y τάση εκείνη όπου μετά την πλήρη αποφόρτιση του δοκιμίου αφήνει μια παραμένουσα παραμόρφωση $y\%$.



Σχήμα 4.5: Απεικόνιση υπολογισμού συμβατικού ορίου διαρροής σ_y .

Ο υπολογισμός του συμβατικού ορίου διαρροής σε τέτοιες περιπτώσεις πραγματοποιείται με τον ορισμό ενός συγκεκριμένου βαθμού παραμόρφωσης. Συνήθως, στις Η.Π.Α ορίζεται μία παραμόρφωση της τάξης του 0,2 ή 0,1% ($\epsilon = 0,002$ ή $0,001$) ενώ για το Ηνωμένο Βασίλειο είναι της τάξης του 0,1 ή 0,5%. Στο διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης φέρεται μια ευθεία παράλληλη προς το γραμμικό τμήμα της καμπύλης και η οποία αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη παραμόρφωση. Η τάση που αντιστοιχεί στην τομή αυτής της ευθείας και της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης, καθώς η τελευταία κάμπτεται κατά την είσοδο της στην πλαστική περιοχή, ορίζεται και ως αντοχή διαρροής (σ_y).

Η εμφάνιση μιας μέγιστης καταπόνησης στο δοκίμιο με επακόλουθη πτώση φορτίου και δημιουργία λαιμού στο δοκίμιο οφείλεται στο ότι η κράτυνση του υλικού και η μεταβολή (μείωση) της φέρουσας διατομής του δοκιμίου επηρεάζουν κατ' αντίστροφο τρόπο τη δημιουργούμενη παραμόρφωση. Το μέγιστο φορτίο αντιστοιχεί στη φόρτιση, στην οποία οι επιδράσεις αυτές εξισορροπούν η μια την άλλη. Από το σημείο αυτό και μετά ο ρυθμός σμίκρυνσης της διατομής του δοκιμίου γίνεται μεγαλύτερος από την κράτυνση που μπορεί να εμφανίσει το υλικό με αποτέλεσμα να έχουμε εμφάνιση μέγιστου από πλευράς τάσεων και περαιτέρω παραμόρφωση (στην περιοχή του σχηματιζόμενου λαιμού) με φθίνουσα τάση.

Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (*ultimate tensile strength*) είναι το μέγιστο εμφανιζόμενο φορτίο ανηγμένο στην αρχική διατομή. Δεν μπορεί συνεπώς να χαρακτηριστεί ως αντοχή θραύσης. Μόνο για ψαθυρά υλικά (π.χ. χυτοσίδηρος, σκληρυμένος χάλυβας, κεραμικά) συμπίπτουν η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό με την τάση θραύσης. Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό δεν χαρακτηρίζει κατά τρόπο μονοσήμαντο τη συμπεριφορά του υλικού σε εφελκυσμό, αλλά δίνει ένα μέτρο της μέσης αντίστασης του στην παραμόρφωση.

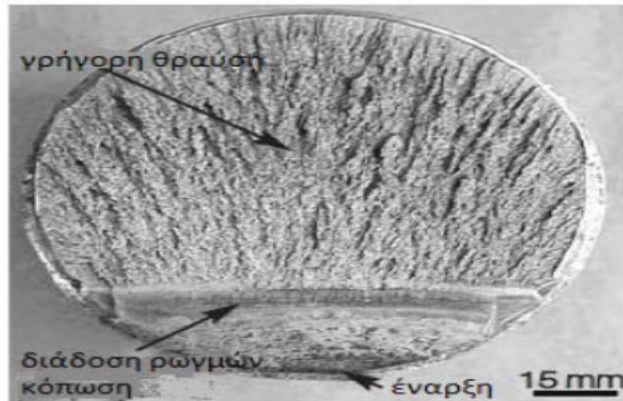
4.3 Κόπωση

Είναι ευρέως γνωστό, ήδη από το 1830, ότι μία από τις σημαντικότερες και πιο καταστρεπτικές καταπονήσεις στα μέταλλα είναι αυτή των επαναλαμβανόμενων ή χρονικά μεταβαλλόμενων τάσεων. Οι τάσεις αυτές, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, καταπονούν το υλικό σε εφελκυσμό και θλίψη και η μέγιστη τιμή τους δεν ξεπερνά το όριο διαρροής του υλικού. Η αστοχία αυτή που οφείλεται στην επίδραση των δυναμικών καταπονήσεων ονομάζεται κόπωση (*fatigue*). Η κόπωση είναι η κυριότερη μορφή αστοχίας που παρουσιάζεται στα μέταλλα και αφορά επίπεδα τάσεων σημαντικά χαμηλότερα από αυτά που επηρεάζουν ο εφελκυσμός και η διαρροή σε στατική φόρτιση. Η ιδιαιτερότητα της σημαίνεται και στο γεγονός ότι με την πρόοδο της τεχνολογίας βρήκαν εφαρμογή νέα τεχνικά υλικά σε κατασκευές όπως ο διωστήρας στις μηχανές εσωτερικής καύσης, το αμορτισέρ των αυτοκινήτων, τα πτερύγια των αεροσκαφών κ.ά τα οποία υπόκεινται κατά κύριο λόγο σε δυναμικές και κυμαινόμενες τάσεις. Έτσι, η κόπωση κρίνεται ακόμα μεγαλύτερης σημασίας αφού αποτελεί τη συχνότερη αιτία αστοχίας στις σύγχρονες κατασκευές.

Η κόπωση είναι από τις πιο επικίνδυνες περιπτώσεις αστοχίας των υλικών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι είναι εσωτερική και εμφανίζεται χωρίς προειδοποίηση. Η κόπωση στο υλικό μπορεί να διαπιστωθεί μετά την εκδήλωσή της από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των επιφανειών θραύσης. Οι ενδείξεις αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Η περιοχή γύρω από την έναρξη της ρωγμής είναι λεία. Αυτό οφείλεται στην τριβή των επιφανειών του ρήγματος μεταξύ τους, όσο αυτό προχωράει σταδιακά και αυξάνεται κατά τη λειτουργία.
- Αναπτύσσονται ακτινικές γραμμές που ξεκινούν από το σημείο έναρξης της ρωγμής.
- Σχηματίζονται γραμμώσεις με τη μορφή ομόκεντρων κύκλων (*striations*) με κέντρο το σημείο έναρξης της ρωγμής. Με βάση την απόσταση μεταξύ των γραμμώσεων μπορεί να εκτιμηθεί με καλή προσέγγιση η ταχύτητα διάδοσης του ρήγματος στο υλικό.
- Στο τελικό στάδιο θραύσης η μορφή της επιφάνειας εξαρτάται από τον τρόπο θραύσης. Όταν η ρωγμή εξαπλώνεται με όλκιμο τρόπο, η επιφάνεια έχει ανώμαλη εμφάνιση, καθώς η διατομή μειώνεται σε τέτοιο βαθμό που δε μπορεί να ανεχτεί τα εφαρμοζόμενα φορτία.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά φαίνονται και στην εικόνα 4.1.

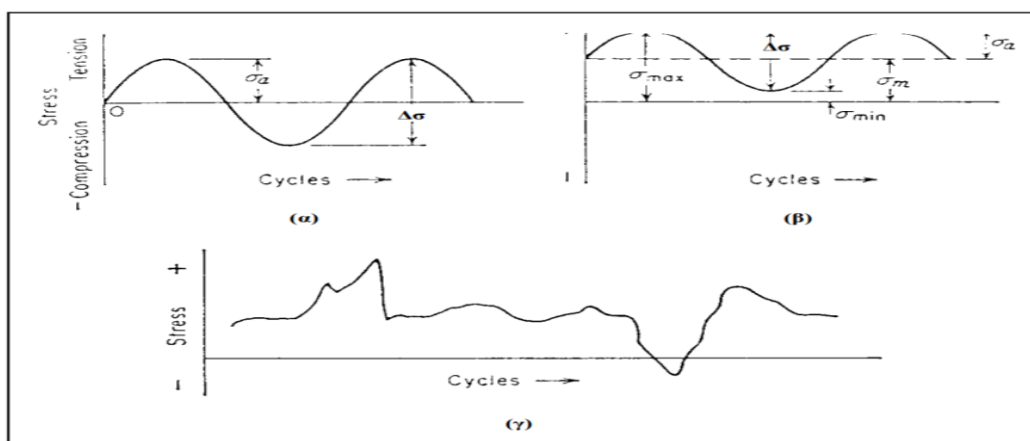


Εικόνα 4.1: Χαρακτηριστικά επιφάνειας θραύσης από κόπωση

Εκτός από την κυκλική κόπωση που αναφέρθηκε παραπάνω, διακρίνουμε και τα παρακάτω βασικά είδη κόπωσης:

- Κόπωση διάβρωσης: προκαλείται από κυμαινόμενα φορτία με παράλληλη παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος.
- Κόπωση φθοράς: προκαλείται από τριβές και μικρές κινήσεις μεταξύ εξαρτημάτων.
- Θερμική κόπωση: οφείλεται σε εναλλασσόμενη φόρτιση συνδεδεμένη με θερμικές μεταβολές του υλικού
- Ηχητική ή ακουστική κόπωση: δημιουργείται από εναλλασσόμενα φορτία με υψηλή συχνότητα που προκαλείται από στροβιλοκινητήρες ή ελικοφόρους.

Το Σχ.4.6 δείχνει μερικούς χαρακτηριστικούς τύπους δυναμικών καταπονήσεων, δηλαδή μεταβολής της τάσης σαν συνάρτηση των κύκλων φόρτισης (δηλ. του χρόνου).



Σχήμα 4.6: Τύποι δυναμικών καταπονήσεων

Το Σχ.4.6α απεικονίζει μία πλήρως αναστρεφόμενη δυναμική καταπόνηση ημιτονοειδούς μορφής. Η ημιτονοειδής δυναμική καταπόνηση

είναι μία εξιδανικευμένη κατάσταση, η οποία πολύ σπάνια συναντάται σε πραγματικές εφαρμογές. Ωστόσο, σε επίπεδο εργαστηριακού πειράματος, μπορεί εύκολα να επιτευχθεί με έναν άξονα ο οποίος περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα και καταπονείται από ένα σταθερό καμπτικό φορτίο (“περιστρεφόμενος πρόβολος”). Σε αυτόν τον τύπο δυναμικής καταπόνησης η απόλυτη τιμή της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης είναι ίσες μεταξύ τους, δηλαδή $|\sigma_{\max}| = |\sigma_{\min}|$, όπου $\sigma_{\max} > 0$ (εφελκυστική) και $\sigma_{\min} < 0$ (θλιπτική). Το Σχ.4.6β απεικονίζει μία περιοδική δυναμική καταπόνηση στην οποία $|\sigma_{\max}| \neq |\sigma_{\min}|$. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα του Σχ. 4.6β τόσο η $\sigma_{\max} > 0$ όσο και η $\sigma_{\min} > 0$ (δηλ. εφελκυστικές). Ωστόσο, θα μπορούσε κάλλιστα η σ_{\max} να είναι εφελκυστική και η σ_{\min} θλιπτική, ή ακόμη να είναι και οι δύο θλιπτικές. Τέλος, το Σχ. 4.6γ δείχνει μία ακανόνιστη ή τυχαία δυναμική καταπόνηση, η οποία δεν εμφανίζει καμία απολύτως περιοδικότητα. Στην πραγματικότητα τέτοιας μορφής δυναμικές καταπονήσεις εμφανίζονται στις περισσότερες εφαρμογές. Για παράδειγμα, το Σχ. 4.6γ θα μπορούσε να αντιστοιχεί στη δυναμική καταπόνηση που δέχεται το φτερό ενός αεροσκάφους, όταν χτυπηθεί από ένα ξαφνικό και ισχυρό ρεύμα ανέμου.

Μία δυναμική καταπόνηση μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο “συνιστώσες”: μία μέση (ή “σταθερή”) τάση σ_m και μία μεταβαλλόμενη τάση σ_a . Επίσης, στην ανάλυση μιας δυναμικής καταπόνησης πρέπει να λάβουμε υπόψη και το εύρος της τάσης, $\Delta\sigma$. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.6β, το εύρος τάσης ορίζεται σαν η αλγεβρική διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη τάση: $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$. Αντίθετα, η μεταβαλλόμενη τάση, σ_a , ορίζεται σαν το μισό του εύρους $\Delta\sigma$, δηλαδή: $\sigma_a = \Delta\sigma/2 = [\sigma_{\max} - \sigma_{\min}]/2$.

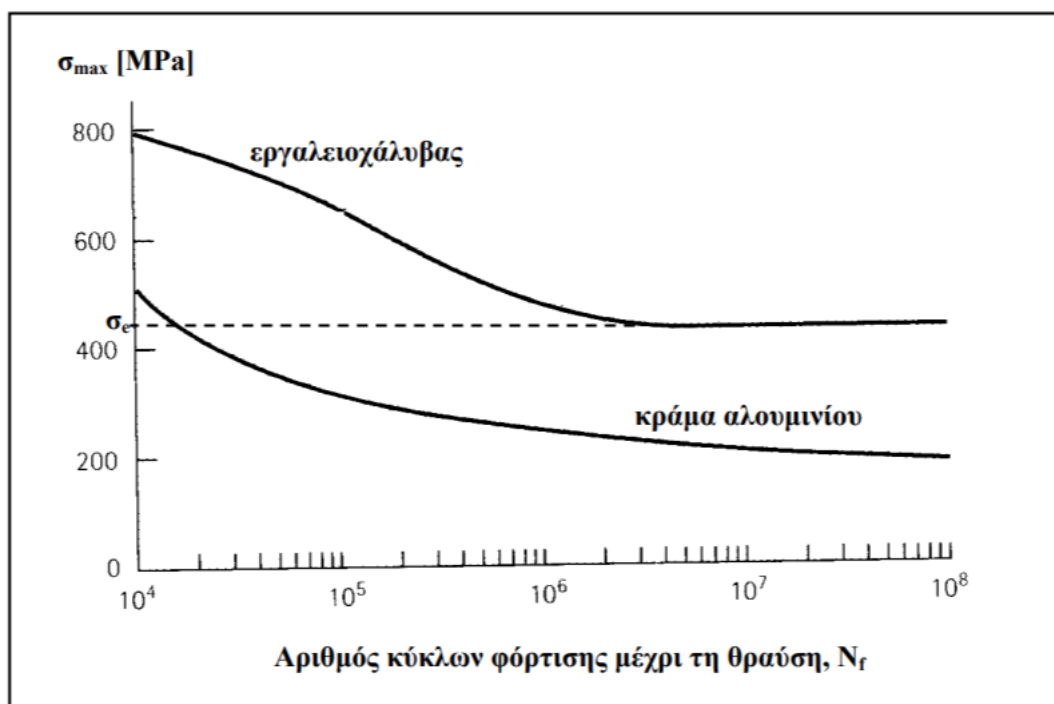
Η μέση τάση, σ_m , είναι ο αλγεβρικός μέσος όρος της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης του κύκλου φόρτισης δηλαδή: $\sigma_m = [\sigma_{\max} + \sigma_{\min}]/2$. Επίσης, πολύ συχνά στην ανάλυση προβλημάτων δυναμικών καταπονήσεων και κόπωσης χρησιμοποιούνται δύο ακόμη μεγέθη. Το ένα είναι η αναλογία τάσεων (stress ratio), η οποία ορίζεται ως $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$. Το άλλο μέγεθος είναι η αναλογία εύρους τάσεων (amplitude ratio), που ορίζεται ως εξής: $A = \sigma_a / \sigma_m = [1-R]/[1+R]$.

4.3.1 Καμπύλες S – N (καμπύλες Wöhler).

Η βασική μορφή με την οποία υπάρχουν διαθέσιμα στη βιβλιογραφία πειραματικά δεδομένα, σχετικά με την συμπεριφορά μεταλλικών υλικών σε κόπωση, είναι οι καμπύλες S – N ή, όπως είναι πιο γνωστές, οι καμπύλες Wöhler. Οι καμπύλες αυτές σχεδιάζονται σε διαγράμματα που στον κατακόρυφο άξονα έχουν ένα μέγεθος “S” σχετιζόμενο με την τάση (συνηθέστερα κάποιο από τα σ_a , σ_{\max} ή σ_{\min}), ενώ στον οριζόντιο άξονα δείχνουν τον αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση, δηλαδή την διάρκεια ζωής σε κόπωση N_f , του υλικού. Ο άξονας του αριθμού κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση σχεδόν πάντοτε είναι εκφρασμένος σε λογαριθμική (log) κλίμακα. Κάθε καμπύλη S – N ενός υλικού ισχύει για την συγκεκριμένη τιμή μέσης τάσης (σ_m) και αναλογίας τάσεων (R) στην οποία έχουν διεξαχθεί οι αντίστοιχες δοκιμές κόπωσης. Εάν για το ίδιο υλικό πραγματοποιηθούν δοκιμές κόπωσης

με διαφορετική τιμή σ_m ή/και R , η καμπύλη $S - N$ που θα προκύψει δεν θα είναι ίδια με την προηγούμενη.

Συνήθως, οι περισσότερες καμπύλες $S - N$ των μεταλλικών υλικών προέρχονται από δοκιμές περιστρεφόμενου προβόλου, όπου $\sigma_m = 0$. Ωστόσο στις περισσότερες πραγματικές εφαρμογές ισχύει ότι $\sigma_m \neq 0$. Ένα τυπικό διάγραμμα αυτού του είδους φαίνεται στο Σχ. 4.7, στο οποίο υπάρχουν δύο καμπύλες $S-N$: μία που είναι χαρακτηριστική για σιδηρούχα κράματα (χάλυβες) και μία για μη σιδηρούχα κράματα (π.χ. κράματα αλουμινίου).



Σχήμα 4.7: Καμπύλες Wöhler για σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα.

Αξίζει να προσέξει κανείς ότι οι καμπύλες $S-N$ αναφέρονται σε θραύση λόγω κόπωσης μετά από έναν αρκετά μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης, δηλαδή για $N_f > 10^4$ κύκλους. Στις περιπτώσεις αυτές οι τάσεις σε μακροσκοπικό επίπεδο είναι ελαστικές, με αποτέλεσμα μακροσκοπικά να μην προκαλείται πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Η κόπωση αυτού του είδους ονομάζεται πολυκυκλική κόπωση (high cycle fatigue – HCF).

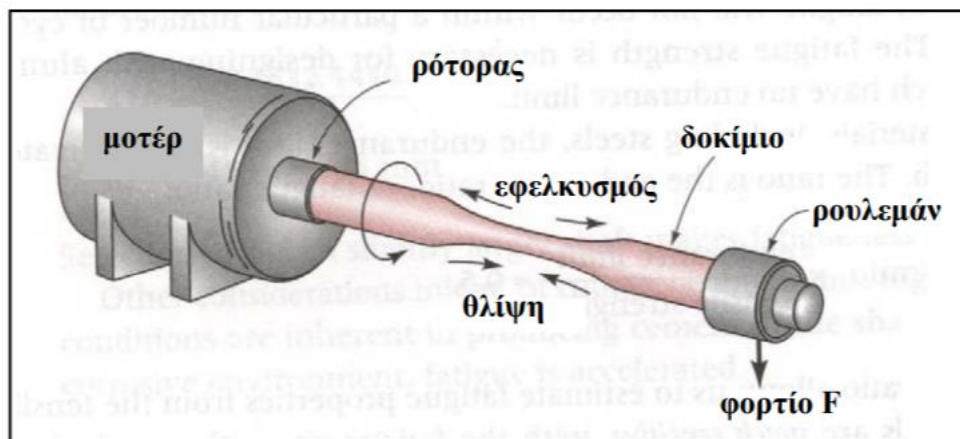
Όταν οι εφαρμοζόμενες τάσεις ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού, με συνέπεια αυτό σε κάθε κύκλο φόρτισης να υφίσταται ένα ποσοστό ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης, τότε η διάρκεια ζωής σε κόπωση μειώνεται σημαντικά ($N_f < 10^4$ κύκλοι). Επειδή στις περιπτώσεις αυτές είναι δύσκολο να εκφραστεί η δυναμική καταπόνηση σε όρους τάσης, οι δοκιμές κόπωσης διεξάγονται έτσι, ώστε σε κάθε κύκλο φόρτισης να προσδίδεται στο υλικό ένα προκαθορισμένο ποσοστό ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης, παρά μία προκαθορισμένη μεταβολή τάσης. Αυτό το είδος κόπωσης ονομάζεται ολιγοκυκλική κόπωση (low cycle fatigue – LCF).

Η πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει από τις καμπύλες του σχήματος 4.7 είναι ότι, η διάρκεια ζωής σε κόπωση (δηλ. ο αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση) αυξάνεται όσο μειώνεται η εφαρμοζόμενη τάση. Μία δεύτερη παρατήρηση έχει να κάνει με τη μορφή των καμπυλών. Σε μεταλλικά υλικά μεγάλης πρακτικής σημασίας, όπως οι χάλυβες και το τιτάνιο, υπάρχει μία χαρακτηριστική τιμή τάσης (σ_e) κάτω από την οποία η καμπύλη γίνεται οριζόντια. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μικρότερη από σ_e , τότε ουσιαστικά το υλικό έχει άπειρη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Με άλλα λόγια δεν κινδυνεύει να υποστεί θραύση λόγω κόπωσης. Για αυτό και η τάση σ_e ονομάζεται όριο διαρκούς αντοχής σε κόπωση (endurance limit). Στο παράδειγμα του εργαλειοχάλυβα του Σχ. 4.7 το όριο διαρκούς αντοχής είναι $\sigma_e = 410 \text{ MPa}$. Η συμπεριφορά αυτή δεν εμφανίζεται σε όλα τα μεταλλικά υλικά. Τα περισσότερα μη σιδηρούχα κράματα, όπως τα κράματα αλουμινίου, μαγνησίου, χαλκού, κ.α., δεν εμφανίζουν όριο διαρκούς αντοχής. Αυτό το χαρακτηριστικό, απεικονίζεται στο σχήμα 4.7 στην καμπύλη για το κράμα αλουμινίου, η οποία δεν γίνεται οριζόντια σε καμία τάση αλλά τείνει ασυμπτωτικά προς τον άξονα N_f όσο μειώνεται η εφαρμοζόμενη τάση. Αυτό πρακτικά μεταφράζεται στο ότι τα κράματα με τη συγκεκριμένη συμπεριφορά πάντοτε έχουν μία πεπερασμένη διάρκεια ζωής σε κόπωση, άσχετα με το πόσο μικρή είναι η εφαρμοζόμενη τάση. Για παράδειγμα, το κράμα αλουμινίου του Σχήματος 4.7 κάποια στιγμή, έστω και μετά από πάρα πολλούς κύκλους φόρτισης, θα υποστεί θραύση λόγω κόπωσης, ακόμα και για πολύ μικρού μεγέθους εναλλασσόμενες τάσεις. Στις περιπτώσεις αυτές, για να μπορεί να ορισθεί μία τάση σαν αντοχή του υλικού σε κόπωση και να χρησιμοποιηθεί για την σχεδιομελέτη κατασκευών, έχει καθιερωθεί η χρήση της συμβατικής αντοχής σε κόπωση (fatigue strength). Η συμβατική αντοχή σε κόπωση είναι η τάση εκείνη, για την οποία το υλικό θα έχει μία προκαθορισμένη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Συνήθως επιλέγεται μία μεγάλη διάρκεια ζωής της τάξεως των $5 \times 10^7 - 10^8$ κύκλων φόρτισης. Έτσι, το κράμα αλουμινίου του Σχήματος 4.7 έχει συμβατική αντοχή σε κόπωση για διάρκεια ζωής 5×10^7 κύκλους ίση με 220 MPa , ενώ η συμβατική του αντοχή σε κόπωση για διάρκεια ζωής 10^8 κύκλους είναι ίση με 200 MPa .

4.3.2 Πειραματικός Προσδιορισμός των Καμπυλών S – N

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές με τις οποίες μπορεί να διερευνηθεί πειραματικά η συμπεριφορά ενός υλικού σε εναλλασσόμενες καταπονήσεις, δηλαδή σε κόπωση. Περισσότερο οικεία είναι πιθανότατα αυτή που πραγματοποιείται σε συνήθη δοκίμια εφελκυσμού. Υπάρχουν τύποι μηχανών εφελκυσμού που διαθέτουν την δυνατότητα εκτέλεσης δοκιμών κόπωσης, εξασκώντας προκαθορισμένη εναλλασσόμενη φόρτιση στο δοκίμιο. Στις πλέον σύγχρονες μηχανές εφελκυσμού – κόπωσης υπάρχει η δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένου τύπου δυναμικής καταπόνησης (π.χ. ημιτονοειδής) καθώς και των χαρακτηριστικών αυτής (π.χ. σ_{\max} και σ_{\min} , σ_m , κτλ), γεγονός που επιτρέπει την μελέτη της συμπεριφοράς σε κόπωση σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών

δυναμικής καταπόνησης. Ένας εναλλακτικός τύπος δοκιμής κόπωσης, που έχει βρει πολύ μεγάλη πρακτική εφαρμογή, είναι η δοκιμή περιστρεφόμενου προβόλου (rotating cantilever beam test). Η πειραματική διάταξη της δοκιμής αυτής είναι σχετικά απλή και απεικονίζεται στο Σχ. 4.8.



Σχήμα 4.8: Δοκιμή περιστρεφόμενου προβόλου

Στη δοκιμή υποβάλλεται δοκίμιο κυλινδρικής γεωμετρίας του υπό εξέταση υλικού. Το ένα άκρο του δοκιμίου συγκρατείται σε έναν ρότορα που συνδέεται με έναν ηλεκτρικό κινητήρα, ενώ στο άλλο άκρο τοποθετείται ένα εγκάρσιο φορτίο, ασκώντας έτσι κάμψη στο δοκίμιο. Καθώς ο ρότορας τίθεται σε περιστροφική κίνηση το δοκίμιο αρχίζει να υποβάλλεται σε μία εναλλασσόμενη καταπόνηση.

Όπως είναι γνωστό από την θεωρία κάμψης δοκών, οι μέγιστες τάσεις αναπτύσσονται στις εξωτερικές επιφάνειες της δοκού. Έτσι και στην περίπτωση του περιστρεφόμενου προβόλου, ένα σημείο του υλικού που βρίσκεται στην επάνω επιφάνεια δέχεται την μέγιστη εφελκυστική τάση. Μετά από περιστροφή 90° το σημείο αυτό έρχεται σε μία θέση όπου η τάση μηδενίζεται. Μετά από περιστροφή άλλων 90° , (δηλαδή συνολικά 180° από την αρχή) το σημείο έρχεται στην κάτω επιφάνεια, όπου εκεί δέχεται την μέγιστη θλιπτική τάση. Σε κάθε περιστροφή του δοκιμίου επαναλαμβάνεται η ίδια πλήρως αναστρεφόμενη δυναμική καταπόνηση, η οποία μάλιστα για την συγκεκριμένη δοκιμή κόπωσης έχει ημιτονοειδή μορφή με μέση τάση $\sigma_m = 0$ και $R = -1$. Η μέγιστη και η ελάχιστη τάση που καταπονούν το δοκίμιο υπολογίζονται από τη σχέση: $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} = [10,18 LF] / D^3$, όπου L και D το μήκος και η διάμετρος του δοκιμίου, αντίστοιχα και F το επιβαλλόμενο εξωτερικό φορτίο. Έτσι, μεταβάλλοντας κατάλληλα τα L, F και D μπορεί να παραχθεί ένα πολύ μεγάλο πλήθος διαφορετικών δυναμικών καταπονήσεων.

Η συνήθης διαδικασία για τον καθορισμό μίας καμπύλης S – N ξεκινά υποβάλλοντας το πρώτο δοκίμιο σε μία υψηλή τάση, στην οποία περιμένουμε ότι το δοκίμιο θα υποστεί θραύση μετά από μικρό αριθμό κύκλων φόρτισης. Συνήθως, για το πρώτο αυτό δοκίμιο, η τάση που επιλέγεται ισοδυναμεί με τα

2/3 της μέγιστης αντοχής του υλικού σε εφελκυσμό (σ_{UTS}). Τα επόμενα δοκίμια υποβάλλονται σε όλο και μικρότερες τάσεις και καταγράφεται ο αριθμός κύκλων στον οποίο αστοχούν με θραύση. Η δοκιμή συνεχίζεται με τον ίδιο τρόπο, μέχρις ότου ένα ή δύο δοκίμια να μην έχουν αστοχήσει μετά από έναν προκαθορισμένο μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης, π.χ. μετά από 10^7 κύκλους. Τότε σαν όριο διαρκούς αντοχής του υλικού ορίζεται η υψηλότερη τάση στην οποία το δοκίμιο δεν αστόχησε. Στα μεταλλικά υλικά που δεν εμφανίζουν όριο διαρκούς αντοχής, οι δοκιμές τερματίζονται όταν το δοκίμιο αντέξει σε έναν πολύ μεγάλο αριθμό κύκλων, π.χ. 10^8 - 5×10^8 κύκλους, χωρίς να σπάσει. Η τιμή της τάσης που χρησιμοποιήθηκε στο δοκίμιο αυτό λαμβάνεται τότε σαν η συμβατική αντοχή του υλικού σε κόπωση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, για τον καθορισμό μίας καμπύλης S – N χρησιμοποιούνται συνολικά από 8 έως 12 δοκίμια του υλικού.

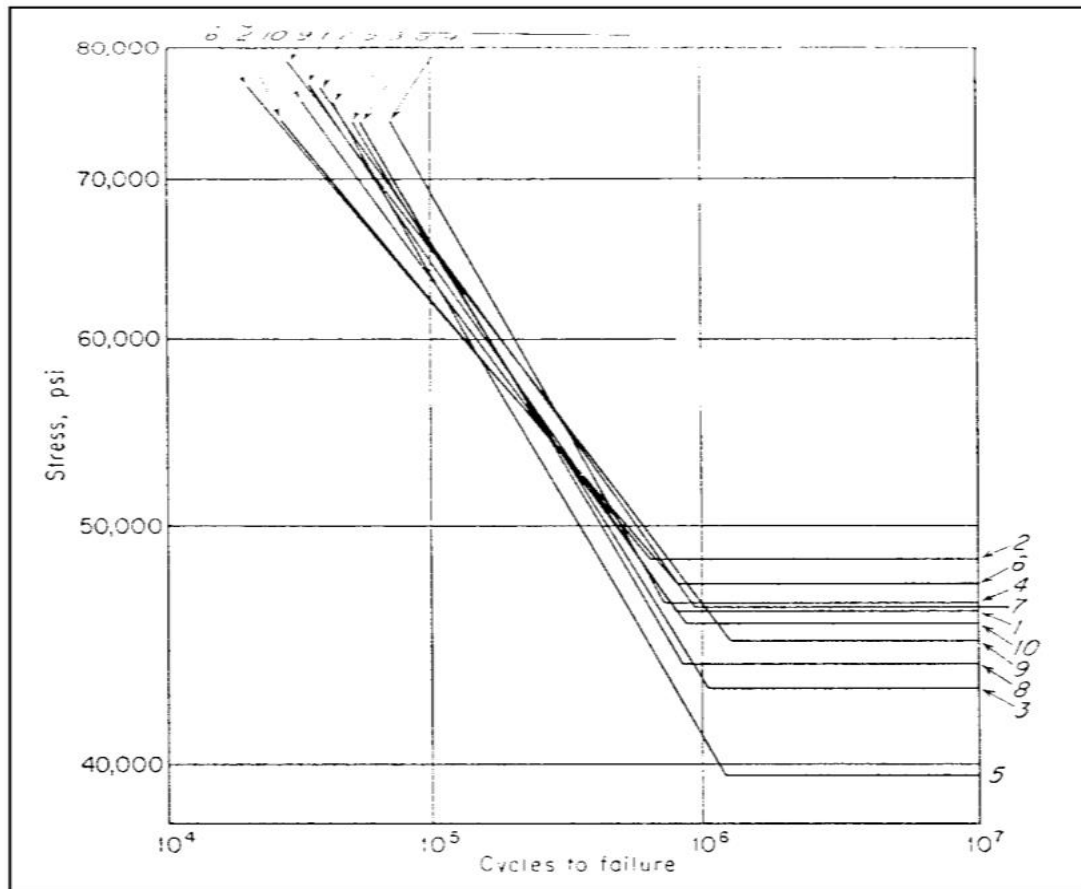
Εκείνο που έχει εξαιρετική σημασία να γνωρίζουμε, είναι ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης σε ένα συγκεκριμένο υλικό εμφανίζουν μεγάλη διασπορά (scatter). Δηλαδή, εάν πάρουμε αρκετά δοκίμια από το ίδιο υλικό και τα υποβάλλουμε σε δοκιμές κόπωσης με ακριβώς τις ίδιες συνθήκες (σ_{max} , σ_{min} , σ_m , κ.τ.λ.) θα παρατηρήσουμε ότι η διάρκεια ζωής τους σε κόπωση (δηλ. ο αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι να σπάσουν) θα είναι αρκετά διαφορετικός από δοκίμιο σε δοκίμιο. Για αυτό το λόγο τα αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης υποβάλλονται σε κατάλληλη στατιστική επεξεργασία, προκειμένου να καταστούν αξιόπιστα και ασφαλή και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν δεδομένα ενός υλικού, κατά το στάδιο σχεδίου μελέτης μίας κατασκευής.

4.3.3 Στατιστική Εξέταση της Κόπωσης

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενως, τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης σε ένα συγκεκριμένο υλικό παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά, τόσο όσον αφορά τη διάρκεια ζωής, όσο και το όριο διαρκούς αντοχής του υλικού. Κατά συνέπεια και τα δύο αυτά μεγέθη, N_f και σ_e , είναι στατιστικές ποσότητες και ως τέτοιες πρέπει να αντιμετωπίζονται. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι η καμπύλη S – N ενός υλικού, που προκύπτει με την διαδικασία που είδαμε προηγουένως, δηλαδή με την διενέργεια δοκιμών κόπωσης σε ένα πλήθος 8 – 12 δοκιμίων, περιγράφει μία “μέση” συμπεριφορά του υλικού σε κόπωση, από την οποία θα πρέπει να αναμένουμε αρκετά μεγάλες αποκλίσεις.

Για να γίνει πιο κατανοητή η μεγάλη στατιστική διασπορά που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης, που πραγματοποιούνται με ακριβώς τις ίδιες συνθήκες σε δοκίμια από το ίδιο υλικό, έχει ενδιαφέρον να εξετάσουμε το πείραμα του Ransom, που πραγματοποιήθηκε το 1952. Ο Ransom χρησιμοποίησε μία ράβδο από έναν χάλυβα, από την οποία έκοψε και κατασκεύασε 100 πανομοιότυπα δοκίμια κόπωσης, τα οποία στη συνέχεια χώρισε σε 10 ομάδες (10 δοκίμια ανά ομάδα). Κάθε ομάδα δοκιμίων υπεβλήθη σε δοκιμές κόπωσης με ακριβώς τις ίδιες συνθήκες. Επομένως, για κάθε ομάδα

δοκιμίων προέκυψε η αντίστοιχη καμπύλη S – N. Οι δέκα συνολικά καμπύλες S – N που προέκυψαν με τον τρόπο αυτό φαίνονται στο σχήμα 4.9.

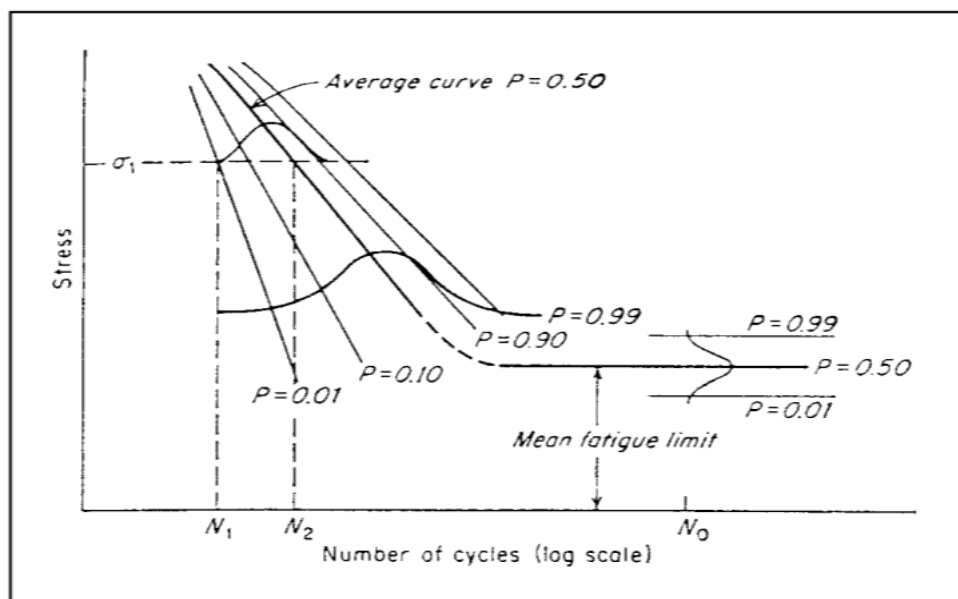


Σχήμα 4.9: Καμπύλες S-N που προέκυψαν μετά από πανομοιότυπη δοκιμή κόπωσης σε 100 ίδια δοκίμια.

Η εικόνα του σχήματος 4.9 δικαίωσε τις υποψίες του Ransom. Πραγματικά, οι δέκα καμπύλες S – N όχι μόνο δεν συμπίπτουν μεταξύ τους, αλλά αντίθετα εμφανίζουν μεγάλες διαφορές, τόσο ως προς την διάρκεια ζωής για κάποια δεδομένη τιμή τάσης, όσο και ως προς το όριο διαρκούς αντοχής.

Οι αποκλίσεις είναι σημαντικές, δεδομένου μάλιστα ότι όλα τα δοκίμια προέρχονται όχι μόνο από το ίδιο υλικό, αλλά και από την ίδια ράβδο, που σημαίνει ότι είχαν υποστεί ακριβώς τις ίδιες θερμικές, μηχανικές ή άλλες κατεργασίες κατά την παραγωγή της ράβδου. Το πείραμα του Ransom καταδεικνύει ακόμα τις πολύ σοβαρές, έως και καταστροφικές, συνέπειες που μπορεί να έχει η αγνόηση αυτής της “στατιστικής” πλευράς της κόπωσης. Για παράδειγμα, εάν για ένα υλικό υπήρχε διαθέσιμη μόνο η καμπύλη S – N No. 2 του Σχ. 4.9, τότε ένας μηχανικός που θα έκανε τη σχεδιομελέτη για μία κατασκευή από το συγκεκριμένο υλικό θα έπαιρνε ως δεδομένο ότι $\sigma_e = 324$ MPa. Θα θεωρούσε λοιπόν δικαιολογημένα ότι, εάν η τάση που θα καταπονήσει την κατασκευή κατά τη λειτουργία της δεν πρόκειται να υπερβεί τα 324 MPa, η κατασκευή του θα είχε “άπειρη” διάρκεια ζωής σε κόπωση. Η

πράξη όμως μπορεί να τον διέψευδε, καθώς το υλικό στην πραγματικότητα μπορεί να ακολουθούσε την καμπύλη No. 5 και να είχε πραγματικό όριο διαρκούς αντοχής μόλις 269 MPa, με αποτέλεσμα κάποια στιγμή να αστοχούσε λόγω κόπωσης. Με βάση όλα τα παραπάνω, γίνεται σαφές ότι τα δεδομένα για την συμπεριφορά ενός υλικού σε κόπωση πρέπει να εμπεριέχουν και πληροφορία σχετικά με το με πόση πιθανότητα (probability) είναι ακριβή και αξιόπιστα. Για να εξηγήσουμε καλύτερα το θέμα αυτό θα χρησιμοποιήσουμε το διάγραμμα του Σχήματος 4.10.



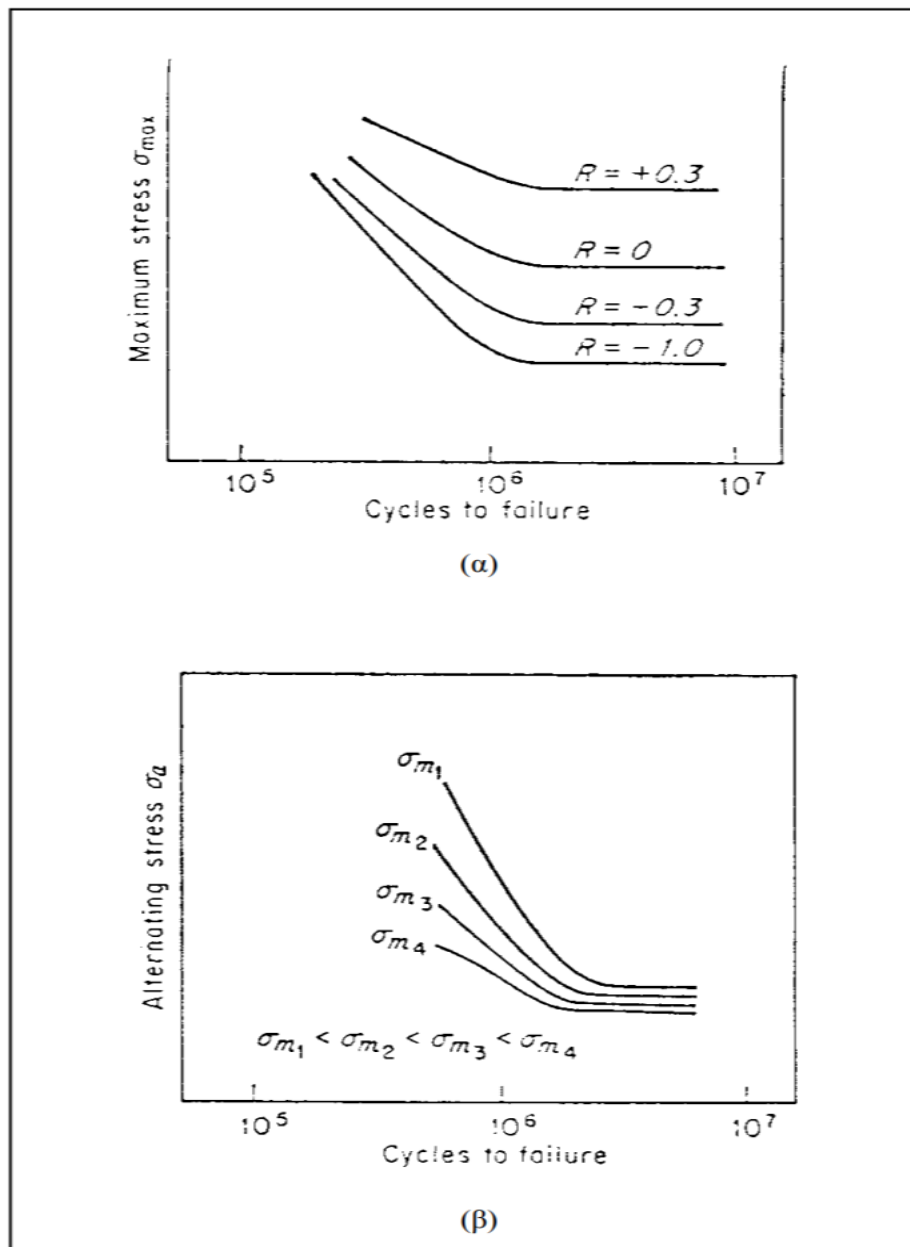
Σχήμα 4.10: Καμπύλες S-Νίδιου υλικού όπου κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο πιθανότητας P

Το διάγραμμα αυτό περιέχει διάφορες καμπύλες S – N ενός συγκεκριμένου υλικού, όπου κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο πιθανότητας P. Για να παραχθεί ένα διάγραμμα αυτού του είδους απαιτείται ένα τεράστιο πλήθος δοκιμών του υλικού, που συνήθως φτάνει ή και ξεπερνά τα 1000 συνολικά δοκίμια, καθώς επίσης και η πραγματοποίηση αντίστοιχου αριθμού δοκιμών κόπωσης. Επομένως, το κόστος για την δημιουργία ενός τέτοιου διαγράμματος είναι αρκετά υψηλό. Αυτός είναι και ο λόγος που πλήρη διαγράμματα σαν αυτό του Σχ. 4.10 υπάρχουν ελάχιστα στην πραγματικότητα και αφορούν υλικά που χρησιμοποιούνται σε πολύ κρίσιμες εφαρμογές.

4.3.4 Η Επίδραση της Μέσης Τάσης

Τα περισσότερα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα κόπωσης στη βιβλιογραφία έχουν προκύψει από δοκιμές κόπωσης με πλήρως αναστρεφόμενους κύκλους φόρτισης, για τους οποίους ισχύει ότι $\sigma_m = 0$. Ωστόσο, στις περισσότερες πραγματικές εφαρμογές η μέση τάση δεν ισούται με το μηδέν. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορούν να

καθοριστούν οι καμπύλες S – N όταν $\sigma_m \neq 0$. Το Σχ. 4.11 δείχνει τους δύο πιο συνήθεις τρόπους παρουσίασης των δεδομένων κόπωσης στις περιπτώσεις αυτές.



Σχήμα 4.11: (α) Καμπύλες S-N (σ_{max} - Nf) για συγκεκριμένες τιμές R, (β) Καμπύλες S-N (σ_a - Nf) για συγκεκριμένες τιμές σ_m

Στο Σχ. 4.11(α) οι καμπύλες S – N παρουσιάζονται σε ένα διάγραμμα μέγιστης τάσης (σ_{max}) – αριθμών κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση (Nf), όπου κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε μία σταθερή τιμή $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$. Όταν $R = -1$ η τάση είναι πλήρως αναστρεφόμενη ($\sigma_{max} = -\sigma_{min}$) και επομένως η μέση τάση $\sigma_m = 0$. Όσο το R γίνεται πιο θετικό, που ισοδυναμεί με το ότι η μέση τάση σ_m αυξάνεται,

το όριο διαρκούς αντοχής του υλικού αυξάνεται. Το Σχ. 4.11(β) δείχνει τα ίδια δεδομένα, εκφρασμένα όμως σε ένα διάγραμμα εύρους τάσης (σ_a) – αριθμών κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση (N_f), όπου κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε μία σταθερή μέση τάση σ_m . Όσο η μέση τάση σ_m αυξάνεται, τόσο μικρότερο πρέπει να είναι το εύρος τάσης σ_a για να επιτευχθεί μία συγκεκριμένη διάρκεια ζωής σε κόπωση N_f . Έχουν αναπτυχθεί διάφορα μαθηματικά μοντέλα τα οποία περιγράφουν τη συσχέτιση μεταξύ της μέσης τάσης (σ_m) και του εύρους τάσης (σ_a), για μία προκαθορισμένη διάρκεια ζωής του υλικού σε κόπωση. Τα τρία πιο διαδεδομένα από τα μοντέλα αυτά είναι το παραβολικό μοντέλο Gerber, το γραμμικό μοντέλο Goodman και το γραμμικό μοντέλο Soderberg. Τα συγκεκριμένα μοντέλα χρησιμοποιούνται για να απαντήσουν στο εξής θέμα: εμείς έχουμε δεδομένα κόπωσης για ένα υλικό, τα οποία έχουν καθοριστεί από δοκιμές κόπωσης με πλήρως αναστρεφόμενη τάση. Δηλαδή έχουμε δεδομένα για δυναμική καταπόνηση με: $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$, $R = -1$, $\sigma_m = 0$, $\sigma_a = \Delta[\sigma_{\max} - \sigma_{\min}]/2 = [\sigma_{\max} - (-\sigma_{\max})]/2 = \sigma_{\max}$.

Από τα δεδομένα αυτά γνωρίζουμε το όριο διαρκούς αντοχής (σ_e) του υλικού (για την πλήρως αναστρεφόμενη δυναμική καταπόνηση) και γνωρίζουμε και τη διάρκεια ζωής σε κόπωση του υλικού N_f για κάθε εφαρμοζόμενη τάση (από την καμπύλη $S - N$). Εάν σε μία κατασκευή, στην οποία θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε το υλικό αυτό, η μέση τάση είναι $\sigma_m \neq 0$, τότε πόσο πρέπει να είναι το εύρος της τάσης $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$, έτσι ώστε για μία συγκεκριμένη εφαρμοζόμενη τάση να έχω την ίδια διάρκεια ζωής σε κόπωση, όπως θα είχα εάν $\sigma_m = 0$; Ακριβώς στο ερώτημα αυτό προσπαθούν να δώσουν απάντηση τα μοντέλα Gerber, Goodman και Soderberg, το καθένα με τον δικό του τρόπο. Η μαθηματική διατύπωση των μοντέλων αυτών απεικονίζεται στην εικόνα 4.2

<u>Παραβολικό μοντέλο Gerber:</u>	$\sigma_a = \sigma_e \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{UTS}} \right)^2 \right]$
<u>Γραμμικό μοντέλο Goodman:</u>	$\sigma_a = \sigma_e \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{UTS}} \right) \right]$
<u>Γραμμικό μοντέλο Soderberg:</u>	$\sigma_a = \sigma_e \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_o} \right) \right]$

Εικόνα 4.2: Μαθηματική διατύπωση μοντέλων Gerber, Goodman και Soderberg

όπου σ_e το όριο διαρκούς αντοχής του υλικού που βρέθηκε στις δοκιμές πλήρως αναστρεφόμενης τάσης, σ_{UTS} η μέγιστη αντοχή εφελκυσμού του υλικού και σ_o το όριο διαρροής του υλικού (σε μονοτονικό εφελκυσμό). Συγκρίνοντας τα παραπάνω μοντέλα με πειραματικά αποτελέσματα, έχει παρατηρηθεί ότι το παραβολικό μοντέλο Gerber βρίσκεται σε καλύτερη συμφωνία με πειραματικά

αποτελέσματα από δοκιμές σε όλκιμα μέταλλα. Ωστόσο, λόγω της στατιστικής διασποράς των αποτελεσμάτων και επειδή πειραματικά αποτελέσματα σε δοκίμια με εγκοπές συμφωνούν καλύτερα με το γραμμικό μοντέλο Goodman, έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται το μοντέλο Goodman περισσότερο στο μηχανολογικό σχεδιασμό.

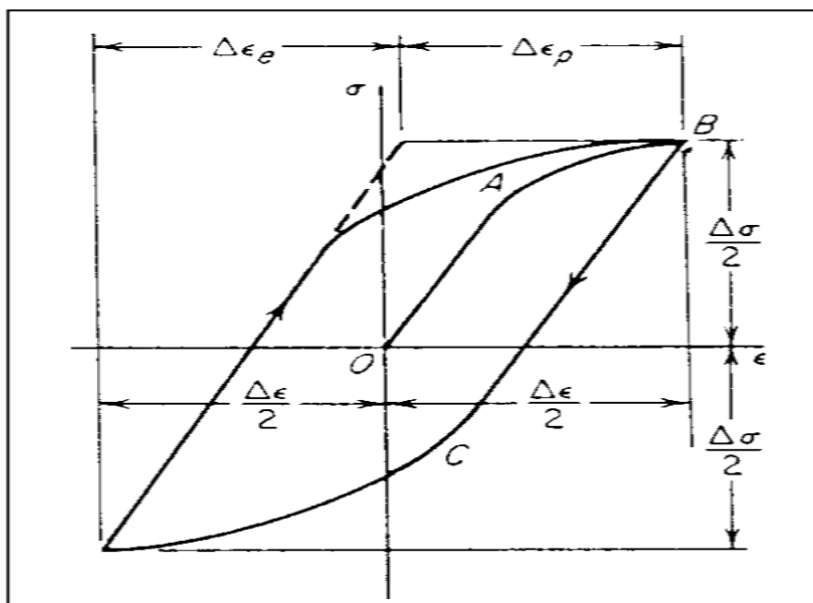
4.3.5 Πολυκυκλική (HCF) και Ολιγοκυκλική (LCF) Κόπωση

Όπως προαναφέρθηκε, κατά την πολυκυκλική κόπωση (high cycle fatigue – HCF) το επίπεδο των εναλλασσόμενων τάσεων που αναπτύσσονται στο υλικό βρίσκεται γενικά κάτω από ότι μακροσκοπικό όριο διαρροής του υλικού. Η καταπόνηση, δηλαδή, που υφίσταται το υλικό είναι ελαστικής φύσεως. Είδαμε ακόμη ότι η πολυκυκλική κόπωση χαρακτηρίζεται από διάρκεια ζωής σε κόπωση (αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση) της τάξεως $N_f > 10^4$ κύκλων. Συνήθως οι καμπύλες S – N που προκύπτουν από δοκιμές κόπωσης των μεταλλικών υλικών αναφέρονται σε συνθήκες πολυκυκλικής κόπωσης.

Η μαθηματική σχέση που περιγράφει μία καμπύλη S – N σε καθεστώς πολυκυκλικής κόπωσης ονομάζεται νόμος του Basquin. Αντίθετα, όταν οι αναπτυσσόμενες στο υλικό χρονικά μεταβαλλόμενες τάσεις υπερβαίνουν το μακροσκοπικό όριο διαρροής, τότε σε κάθε κύκλο φόρτισης το υλικό υφίσταται ένα ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης. Στην κατάσταση αυτή η διάρκεια ζωής σε κόπωση είναι γενικά χαμηλότερη των 10^4 κύκλων φόρτισης και έτσι αυτό το είδος κόπωσης ονομάζεται ολιγοκυκλική κόπωση (low cycle fatigue – LCF). Χαρακτηριστικές περιπτώσεις αυτού του είδους συναντώνται σε εφαρμογές όπου το υλικό αντιμετωπίζει επαναλαμβανόμενες τάσεις θερμικής προέλευσης. Στις περιπτώσεις αυτές είναι φανερό ότι οι τάσεις προέρχονται από τις επαναλαμβανόμενες συστολές και διαστολές του υλικού, γεγονός που υποδεικνύει ότι εδώ η κόπωση προκύπτει περισσότερο λόγω της επαναλαμβανόμενης πλαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό, παρά λόγω των επαναλαμβανόμενων τάσεων.

4.3.6 Κυκλική ή δυναμική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης

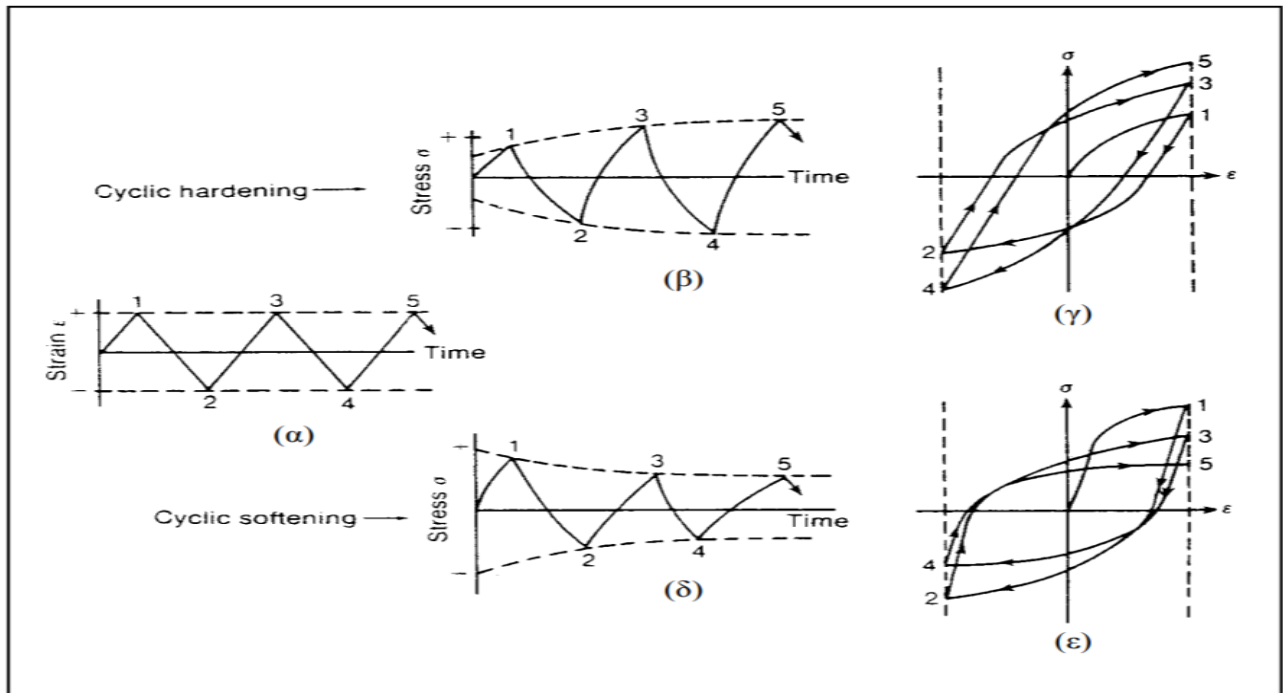
Το Σχ. 4.12 δείχνει την κυκλική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης που προκύπτει όταν υποβάλλουμε ένα δοκίμιο του υλικού που εξετάζουμε σε κυκλική φόρτιση, με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούμε σταθερή την παραμόρφωση του δοκιμίου σε κάθε κύκλο.



Σχήμα 4.12: Κυκλική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης με διατήρηση σταθερής παραμόρφωσης

Δηλαδή, σε μία δοκιμή αυτού του είδους υποβάλλουμε το δοκίμιο σε εναλλασσόμενους κύκλους εφελκυσμού και θλίψης, φροντίζοντας ώστε σε κάθε κύκλο να προκαλείται η ίδια συνολική (ελαστική + πλαστική) παραμόρφωση στο δοκίμιο. Το εύρος της συνολικής παραμόρφωσης $\Delta\epsilon$, που διατηρείται σταθερό σε κάθε κύκλο κατά τη δοκιμή, αποτελείται από μία συνιστώσα ελαστικής παραμόρφωσης ($\Delta\epsilon_e$) και μία συνιστώσα πλαστικής παραμόρφωσης ($\Delta\epsilon_p$): $\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p = (\Delta\sigma/E) + \Delta\epsilon_p = \text{σταθερό}$.

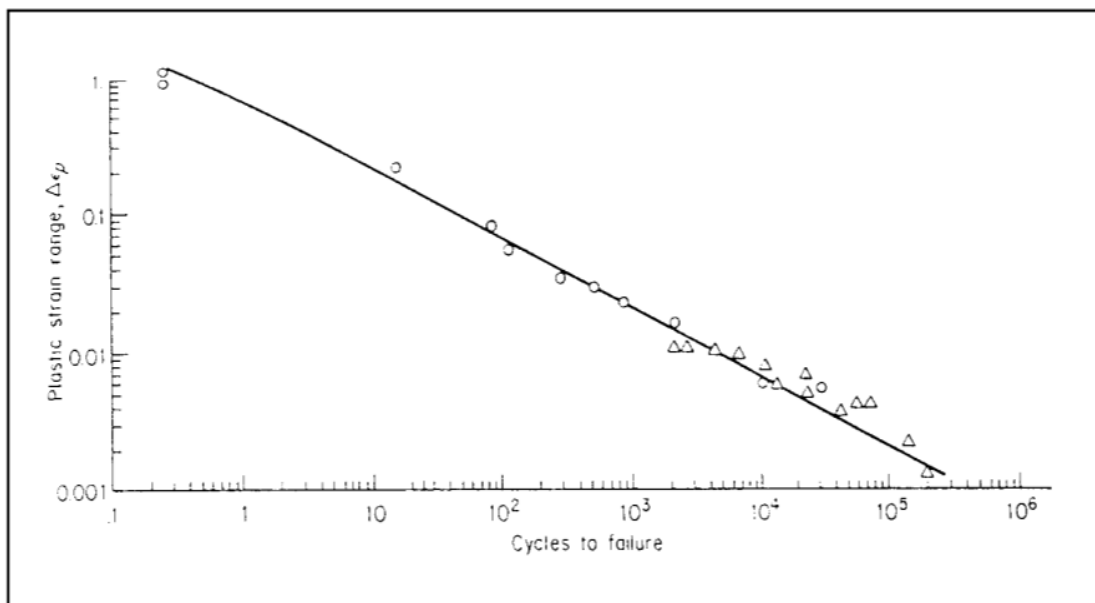
Επειδή η πλαστική παραμόρφωση είναι μη αντιστρεπτή διεργασία και προκαλεί μόνιμες μεταβολές στη μικροδομή του υλικού, η κυκλική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης μεταβάλλεται από κύκλο σε κύκλο. Για παράδειγμα, η εργοσκληρύνηση που υφίστανται τα μεταλλικά υλικά όταν δέχονται πλαστικές παραμορφώσεις θα οδηγούσε σε κυκλική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης σαν αυτή του Σχ. 4.13(γ). Το Σχ. 4.13(α) δείχνει την μεταβολή της συνολικής παραμόρφωσης που επιβάλλεται στο δοκίμιο σε κάθε κύκλο και όπως βλέπουμε το εύρος της συνολικής (ελαστικής + πλαστικής) παραμόρφωσης $\Delta\epsilon = \epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}$ διατηρείται εσκεμμένα σταθερό σε κάθε κύκλο. Όσον αφορά την διακύμανση της τάσης σε κάθε κύκλο, εδώ εμφανίζονται συνήθως δύο είδη συμπεριφοράς. Το ένα είδος αφορά την περίπτωση που το υλικό εργοσκληρύνεται, κάτι που δείχνει το Σχ. 4.13(β). Όπως φαίνεται, όταν το υλικό εμφανίζει αυτή τη συμπεριφορά, τότε το εύρος της τάσης $\Delta\sigma$ αυξάνεται από κύκλο σε κύκλο.



Σχήμα 4.13: Απεικόνιση της αύξησης και της μείωσης της αντοχής του υλικού κατά την κυκλική καταπόνηση.

Ωστόσο αφού το $\Delta\sigma$ αυξάνεται σε κάθε κύκλο [λόγω $\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p = (\Delta\sigma/E) + \Delta\varepsilon_p = \text{σταθερό}$], τότε επίσης σε κάθε κύκλο αυξάνεται η ελαστική συνιστώσα της συνολικής παραμόρφωσης και αντίστοιχα μειώνεται η πλαστική συνιστώσα (αφού $\Delta\varepsilon = \text{σταθερό}$). Ακριβώς αυτή η συμπεριφορά παριστάνεται στο Σχ. 4.13(γ). Το δεύτερο είδος συμπεριφοράς αφορά την περίπτωση όπου το υλικό εμφανίζει μείωση αντοχής κατά την κυκλική καταπόνηση. Η περίπτωση αυτή φαίνεται στο Σχ. 4.13 (δ), όπου παρατηρείται μείωση του εύρος της τάσης $\Delta\sigma$, από κύκλο σε κύκλο. Έτσι, σε κάθε κύκλο μειώνεται η ελαστική συνιστώσα της συνολικής παραμόρφωσης και αντίστοιχα αυξάνεται η πλαστική συνιστώσα (αφού και πάλι η συνολική παραμόρφωση $\Delta\varepsilon = \text{σταθερή}$). Η συμπεριφορά αυτή απεικονίζεται στην κυκλική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης του Σχ. 4.13(ε).

Ο συνηθέστερος τρόπος παρουσίασης πειραματικών αποτελεσμάτων σε συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης είναι με διαγράμματα σαν αυτό του Σχ. 4.14, όπου στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το εύρος της πλαστικής παραμόρφωσης $\Delta\varepsilon_p$ σε λογαριθμική κλίμακα, ενώ στον οριζόντιο άξονα βάζουμε τον αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση N_f , επίσης σε λογαριθμική κλίμακα.



Σχήμα 4.14: Αποτελέσματα δοκιμών ολιγοκυκλικής κόπωσης σε δοκίμια ανοξείδωτου χάλυβα 304.

Σε τέτοια μορφή διαγράμματα τα πειραματικά αποτελέσματα συνήθως σχηματίζουν μία ευθεία γραμμή. Για την μαθηματική περιγραφή της σχέσης μεταξύ διάρκειας ζωής σε ολιγοκυκλική κόπωση N_f και εύρους πλαστικής παραμόρφωσης $\Delta\epsilon_p$ χρησιμοποιείται ο νόμος Coffin – Manson: $\Delta\epsilon_p/2 = C (2N_f)^b$ όπου το C είναι μία σταθερά, η οποία για τα περισσότερα μεταλλικά υλικά ισούται με την παραμόρφωση θραύσης (εκφρασμένη σε τιμές πραγματικής παραμόρφωσης) σε απλό εφελκυσμό. Ο εκθέτης b στα περισσότερα μεταλλικά υλικά κυμαίνεται παίρνει τιμές μεταξύ του $-0,5$ και του $-0,7$.

4.4 Τριβή

Η τεχνολογική σημασία της τριβής είχε γίνει αντιληπτή από τον άνθρωπο πολλά χιλιάδες χρόνια πριν, αλλά η επιστημονική της αξιολόγηση είναι κατά πολύ νεότερη. Όπως γνωρίζουμε, ένα πολύ μεγάλο μέρος της ολικής ενεργειακής παραγωγής της ανθρωπότητας αναλώνεται σε τριβές. Αντικείμενο της σύγχρονης τεχνολογίας αποτελεί η μείωση της τριβής με σχεδίαση και κατάλληλα υλικά και λιπαντικά. Η τριβή έχει άλλες φορές ανεπιθύμητες ενέργειες, όπως τριβικές ταλαντώσεις, προβλήματα υπερθέρμανσης κι ανάγκη για αποτελεσματική ψύξη, κι άλλες επιθυμητές, όπως οι τριβικές ταλαντώσεις στα μουσικά όργανα, η συγκόλληση δια τριβής κ.α. [2]

4.4.1 Βασικές έννοιες και ορισμοί

Σε κάθε σύστημα, το οποίο είναι φυσικό και υπάρχει κίνηση, θα αναπτυχθεί και μια αντίσταση, η οποία ονομάζεται τριβή. Το αποτέλεσμα αυτής της αντίστασης είναι η τροποποίηση της κίνησης, η έκλυση ενέργειας προς το περιβάλλον και η απώλεια ύλης (φθορά). [3]

Έννοιες και ορισμοί που σχετίζονται με την τριβή είναι οι ακόλουθοι:

- Στατική τριβή: Κίνηση τριβής, όταν η ταχύτητα κίνησης δεν επηρεάζει τις διαδικασίες ενεργοποίησης και τη δομή του τριβοσυστήματος και θεωρείται αμελητέα, ενώ συγχρόνως το τριβικό ζεύγος ελέγχει την απώλεια ενέργειας και τις άλλες διαδικασίες κατά την διάρκεια της τριβής.

- Κινητική τριβή: Κίνηση τριβής, όπου σε αντίθεση με την στατική τριβή, η ταχύτητα της κίνησης επηρεάζει τις διαδικασίες ενεργοποίησης και τη δομή του τριβοσυστήματος. Η ροή της διαχεόμενης ενέργειας και η σύσταση ελέγχουν την ένταση της τριβής, τη φθορά λόγω απώλειας θερμότητας και άλλα φαινόμενα κατά την διάρκεια της τριβής, όπως ηλεκτρικά και χημικά.

- Τριβολογικές δοκιμές: Στον καθορισμό των δοκιμών αυτών ανιχνεύεται το μέγεθος της τριβής και των προκαθορισμένων τριβολογικών και διαγνωστικών παραμέτρων. Επιπλέον, στον έλεγχο των δοκιμών, ανιχνεύονται μεμονωμένες τριβολογικές και διαγνωστικές παράμετροι.

Ο μηχανισμός της τριβής είναι ένα αρκετά πολύπλοκο φαινόμενο και επηρεάζεται σημαντικά από την μηχανική της επαφή (δηλαδή τον αριθμό σωμάτων, την επιφανειακή τοπογραφία, τις ιδιότητες των σωμάτων κ.α.), αλλά και τη φυσικοχημεία της (δηλαδή την επιφανειακή ενέργεια, τα οξειδία, τη χημική σύνθεση των επιφανειών κ.α.) Αλληλεπιδρώσεις επιφάνειες που βρίσκονται σε σχετική κίνηση αποτελούν το τριβικό σύστημα ή τριβοσύστημα. Ένα τριβικό σύστημα μπορεί να βρίσκει διάφορες εφαρμογές. Οι κυριότερες ομάδες εφαρμογής τριβικών συστημάτων είναι οι ακόλουθες:

1. Οδήγηση ή μετάδοση κίνησης, με εφαρμογές στα έδρανα ολίσθησης και κύλισης, στους ολισθητήρες, σε άξονες και άτρακτους, σε ανθρώπινες αρθρώσεις, σε κυλίνδρους-έμβολα Μ.Ε.Κ. κ.α.

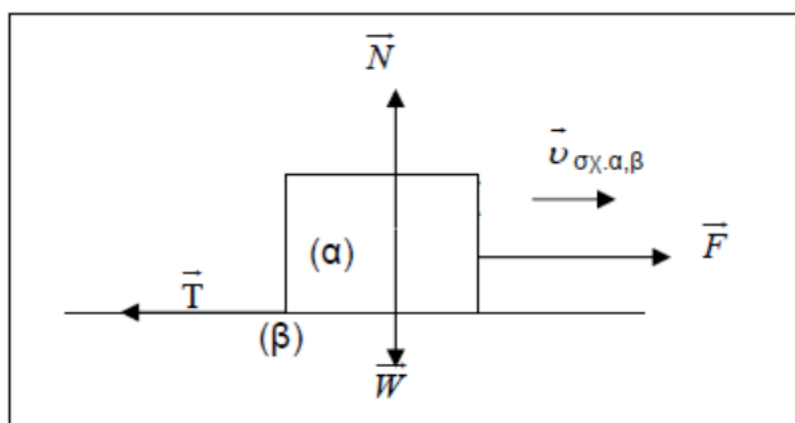
2. Μεταφορά έργου ή ισχύος, με εφαρμογές σε οδοντοτροχούς, ιμαντοκινήσεις, αλυσοκινήσεις, κινήσεις με δίσκους τριβής, υδραυλοκινήσεις κ.α.

3. Παραγωγή και μετάδοση πληροφορίας, με εφαρμογή σε ωρολογιακούς μηχανισμούς, σε συστήματα εκτύπωσης-γραφής, σε συλλέκτες κινητήρων κ.α.

4. Διαμόρφωση υλικού, με εφαρμογές σε εξέλαση, ολκή, κάμψη, χύτευση και σχοινοπλοκή.

4.4.2 Περιγραφή του φαινομένου της τριβής

Εξωτερική τριβή ή αλλιώς τριβή (friction) ονομάζεται το φαινόμενο, όπου σε δύο επαπτόμενα σώματα, το ένα ανθίσταται στην κίνηση ή την τάση να κινηθεί. Εσωτερική τριβή ενός υλικού ονομάζεται τριβή που εμφανίζεται μεταξύ των μορίων ενός σώματος κατά την παραμόρφωσή του. Η τριβή των στερεών σωμάτων είναι ένα αρκετά πολύπλοκο φαινόμενο, το οποίο εξαρτάται από πολλές παραμέτρους που δρουν επάνω στο τριβικό σύστημα. Η τριβή χαρακτηρίζεται από την αναπτυσσόμενη επαπτομενική δύναμη της τριβής T , η οποία ανθίσταται στη σχετική κίνηση των σωμάτων κι έχει διεύθυνση αντίθετη αυτής της σχετικής ταχύτητας των σωμάτων. Συντελεστής τριβής είναι ο λόγος της τριβής προς την κάθετη προς τη διεύθυνση κίνησης συνιστώσα των εξωτερικών δυνάμεων που δρουν πάνω στις τριβόμενες επιφάνειες, δηλαδή $\mu = T/N$.



Σχήμα 4.15: Απλουστευμένο τριβικό σύστημα

Η κινητική τριβή είναι ανεξάρτητη του μεγέθους της σχετικής μετατόπισης και προκαλεί παραμορφώσεις στην επιφάνεια επαφής, περιοριζόμενες βέβαια σε σχετικά πολύ μικρό βάθος. Ανάλογα με τη σχετική κίνηση των δύο επαπτόμενων σωμάτων διακρίνεται η κινητική τριβή σε τριβή ολίσθησης και τριβή κύλισης. Στην τριβή κύλισης το ένα από τα δύο σώματα περιστρέφεται γύρω από ένα στιγμιαίο κέντρο περιστροφής που βρίσκεται στην επιφάνεια επαφής των δύο σωμάτων και η οποία συνεχώς μεταβάλλεται.

Η τριβή ολίσθησης μεταξύ στερεών σωμάτων χωρίζεται σε τρία είδη:

- Ξηρή τριβή: Εμφανίζεται μεταξύ των επαπτόμενων επιφανειών δύο στερεών σωμάτων όταν δεν παρεμβάλλεται κάποιο υγρό ή λίπος και στον ατμοσφαιρικό αέρα, που παρεμβάλλεται μεταξύ τους δεν αναπτύσσονται ισχυρές αεροδυναμικές πιέσεις. Για την μείωσή της γίνεται χρήση στερεών λιπαντικών.

- Υγρή τριβή: Εμφανίζεται μεταξύ των επαπτόμενων επιφανειών δύο στερεών σωμάτων, όταν μεταξύ τους παρεμβάλλεται λεπτό στρώμα υγρού

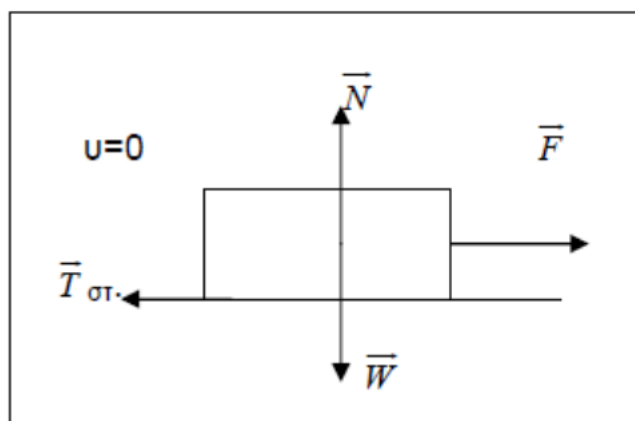
ή αερίου, το οποίο δεν επιτρέπει την επαφή και φθορά των λοφίσκων της τραχύτητας.

- Ημιυγρή τριβή: Είναι μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ της ξηρής και υγρής τριβής ολισθήσεως. Στη θέση επαφής των σωμάτων υπάρχει υγρό ή αέριο, αλλά οι δυναμικές και στατικές πιέσεις που αναπτύσσονται δεν είναι ισχυρές και δεν αρκούν για να απομακρύνουν όσο χρειάζεται το ένα σώμα από το άλλο κι έτσι υπάρχει κίνδυνος επαφής των τραχυτήτων των επιφανειών τους και συνεπώς φθορά.

Όταν ένα σώμα βίσκεται πάνω σε οριζόντιο επίπεδο κι ασκούμε σε αυτό δύναμη \vec{F} , τότε αν το σώμα δεν μετακινείται, σημαίνει ότι υπάρχει τριβή μεταξύ του σώματος κι επιπέδου. Την τριβή αυτήν την ονομάζουμε στατική τριβή $T_{\sigma\tau}$ και για όσο το σώμα μένει ακίνητο ισχύει: $T_{\sigma\tau} = F$.

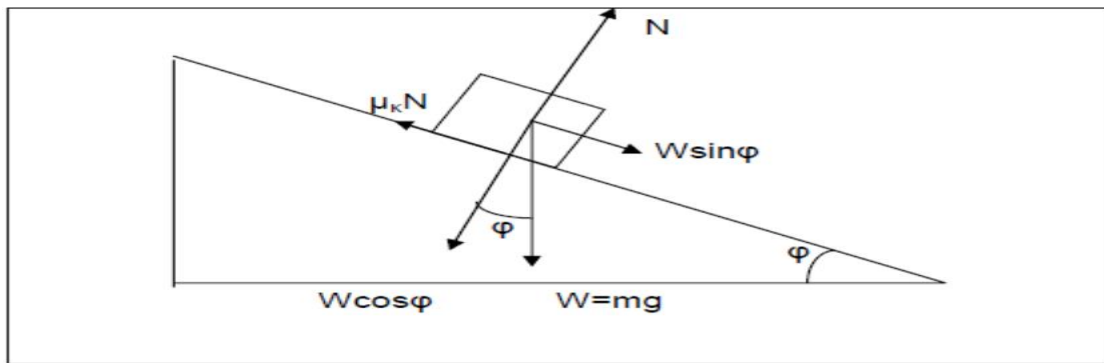
Αυξάνοντας το μέτρο της δύναμης \vec{F} , αυξάνεται και η $\vec{T}_{\sigma\tau}$. Όταν η \vec{F} γίνει τόση (π.χ \vec{F}_1 .) ώστε να αρχίσει η ολίσθηση του σώματος, τότε θα έχουμε: $T_{\sigma\tau} = T_{\sigma\tau(\max)} = F_1$. Ισχύει: $T_{\sigma\tau(\max)} = \mu_s N$, όπου μ_s ο συντελεστής στατικής τριβής και N η κάθετη δύναμη που δέχεται το σώμα από το επίπεδο. Το σώμα αρχίζει την ολίσθηση όταν $T_{\sigma\tau(\max)} = \mu_s N \leq \vec{F}$. Άρα για να μην έχουμε ολίσθηση πρέπει $T < T_{\sigma\tau(\max)}$ ή $T < \mu_s N$.

Ο συντελεστής στατικής τριβής μ_s είναι λίγο μεγαλύτερος από τον συντελεστή ολίσθησης μ .



Σχήμα 4.16: Στατική τριβή σε τριβικό σύστημα

Στην περίπτωση κεκλιμένου επιπέδου (σχ.4.17), θεωρώντας ότι το σώμα ολισθαίνει υπό σταθερή ταχύτητα έχουμε: $\vec{\Sigma F} = \vec{F} + \vec{T} = W \sin \varphi - \mu N = W \sin \varphi - \mu W \cos \varphi = ma = 0 \Rightarrow \mu = \tan \varphi$



Σχήμα 4.17: Τριβικό σύστημα σε κεκλιμένο επίπεδο

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται μέσω της γωνίας ϕ και δεν εξαρτάται από την μάζα και το μέγεθος του ολισθαίντος σώματος ή την επιφάνεια επαφής. Η κλασσική θεώρηση του φαινομένου της τριβής μπορεί γενικά να συνοψιστεί στους εξής νόμους, οι οποίοι είναι γνωστοί ως νόμοι του Coulomb και του Amontons:

1. Όταν οι επαπτόμενες επιφάνειες είναι ακίνητες και η εφαρμοζόμενη επαπτομενική δύναμη έχει τιμή μικρότερη κάποιας συγκεκριμένης τιμής, η δύναμη τριβής είναι ίση και αντίθετη της.
2. Η δύναμη τριβής δρα πάντοτε αντίθετα προς το διάνυσμα της σχετικής ταχύτητας των επιφανειών.
3. Η δύναμη τριβής είναι ανάλογη του φορτίου.
4. Η δύναμη τριβής είναι ανεξάρτητη της επιφάνειας επαφής.
5. Η δύναμη τριβής είναι ανεξάρτητη της σχετικής ταχύτητας ολίσθησης.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται διάφορες τιμές του συντελεστή τριβής ολίσθησης για διάφορα μέταλλα και οξειδιά τους [4]

Πίνακας 4.3: Τιμές του συντελεστή τριβής ολίσθησης για διάφορα μέταλλα και οξειδιά τους

Μέταλλο	Σκληρότητα (kp/mm^2)		Συντελεστής τριβής μ_k	
	Μέταλλο	Οξειδίο	Μετ.-Μετ	Οξειδ.-Οξειδ
Χρυσός	20	-	2	-
Άργυρος	26	-	1	0,8
Κασσίτερος	5	1650	1	1
Αλουμίνιο	15	1800	1,2	0,8
Ψευδάργυρος	35	200	0,8	1,2
Χαλκός	40	130	1,6	0,8
Σίδηρος	120	150	0,6	1
Χρώμιο	800	-	-	0,4

4.4.3 Επαφή πραγματικών επιφανειών

Είναι απαραίτητο κατά την επαφή πραγματικών επιφανειών να γίνει διάκριση δύο επιφανειών :

- Ονομαστική επιφάνεια επαφής A_0 , η οποία είναι η φαινόμενη επιφάνεια επαφής
- Πραγματική επιφάνεια επαφής A_r , όπου είναι το άθροισμα των πραγματικών μικροσκοπικών επιφανειών επαφής.

Έχει προκύψει ότι κάτω υπό συνθήκες ελαστικής παραμόρφωσης, η πραγματική επιφάνεια είναι περίπου ανάλογη του φορτίου N . Συγκεκριμένα: $A_r = \kappa(N/E)^c$, με $4/5 < c < 44/55$, κ τη σταθερά του υλικού και E το μέτρο ελαστικότητας.

Ο ολικός αριθμός των μικροεπαφών είναι σχεδόν ανάλογος του φορτίου, αλλά το μέσο μέγεθός της μικροεπαφής είναι περίπου ανεξάρτητο από το φορτίο. Με μεγάλη πραγματική επιφάνεια επαφής A_r και υπό ελαφρά φορτία, η ορθή τάση στις επιφανειακές ανωμαλίες είναι ελαστική. Αυξανόμενου, όμως, του φορτίου, οι ορθές τάσεις αυξάνονται και τελικά στις επιφανειακές ανωμαλίες επικρατεί η πλαστική παραμόρφωση. Λόγω αυτής της πλαστικής παραμόρφωσης στις πιο ισχυρές φορτιζόμενες επιφανειακές ανωμαλίες, η προσέγγιση των μορίων των δύο επιφανειών είναι τόση, έτσι ώστε να αναπτύσσονται μοριακές δυνάμεις που δρουν διά μέσου της επιφάνειας αλληλεπαφής A_r και δημιουργούν δεσμούς πρόσφυσης.

4.4.4 Επιφανειακή τοπογραφία

Όπως είναι γνωστό, δεν υπάρχει στην πραγματικότητα απολύτως λεία επιφάνεια στερεού σώματος. Πάντοτε υπάρχουν ανωμαλίες που εξαρτώνται από τον τρόπο κατασκευής της, τη λειτουργία της, τον τρόπο επαφής της με άλλα σώματα, τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του υλικού κ.α. Ο όρος ποιότητα της επιφάνειας περιλαμβάνει τα φυσικοχημικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Μικροσκοπική παρατήρηση τομής επιφάνειας μακροσκοπικά λείας, αποδεικνύει ότι η επιφάνεια δεν είναι απόλυτα λεία. Υπάρχει συνεχής εναλλαγή εξάρσεων και βυθίσεων που τα χαρακτηριστικά τους προσδιορίζονται από τη μέθοδο κατεργασίας της επιφάνειας (κοπή, λείανση, τόννευση). Ως τραχύτητα ορίζεται η λεπτή ανομοιομορφία (αποκλίσεις) που σχηματίζεται στην επιφάνεια ενός αντικειμένου και αποτελεί βασικό κριτήριο της ποιότητας μιας κατεργασμένης επιφάνειας και επομένως κρίσιμο μέγεθος προδιαγραφών για επιφάνειες που έχουν υποστεί κατεργασία. Η τραχύτητα οφείλεται στην κινηματική της κατεργασίας (σχετική κίνηση του εργαλείου - τεμαχίου), στο υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, στη γεωμετρική μορφή του κοπτικού εργαλείου, στις συνθήκες κατεργασίας (ταχύτητα κοπής, πρόωση, βάθος κοπής), στο υγρό κοπής, στην κατάσταση της εργαλειομηχανής (ακρίβεια) και στις ταλαντώσεις

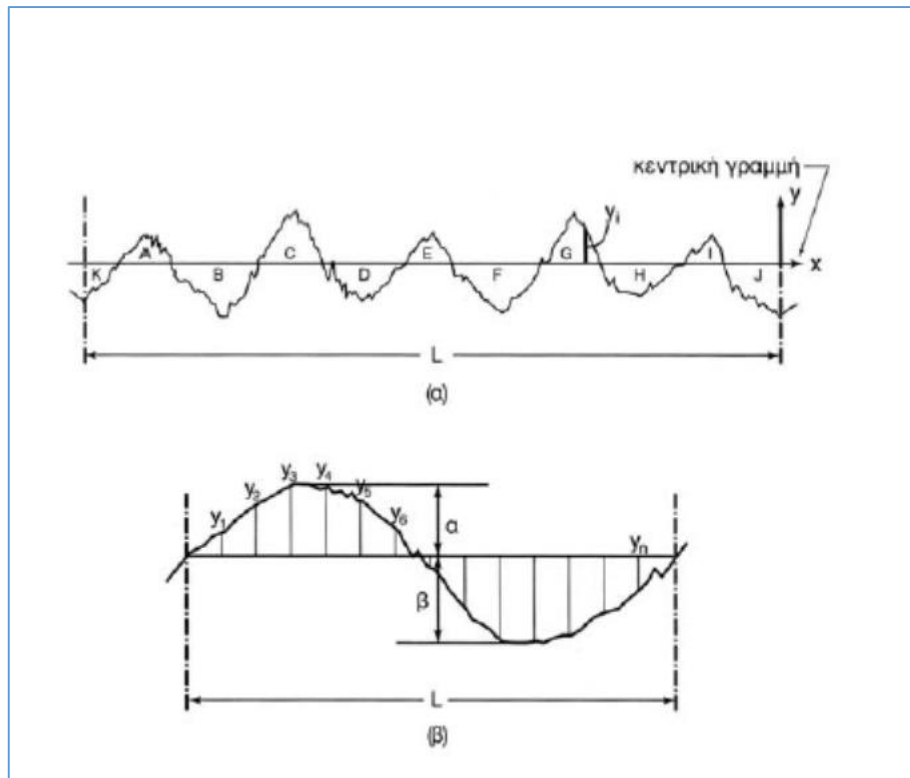
του συστήματος. Η ανωτέρω μηχανική ιδιότητα μπορεί να έχει επιδράσεις στην κατεργαστικότητα του μετάλλου, στις απαιτήσεις ανοχών του κατεργαζόμενου τεμαχίου, στις συνθήκες επαφής(τριβή, φθορά, λίπανση) σε περιπτώσεις συνεργαζόμενων επιφανειών, στην κατάστασηροής των ρευστών σε τοιχώματα, στους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας και στην αντίσταση σε διάβρωση.

Έχουν προταθεί πολυάριθμοι παράμετροι για την μέτρηση της τραχύτητας, οι οποίοι κατατάγονται σε τρεις κατηγορίες δλδ παράμετροι ύψους, παράμετροι μήκους και υβριδικές παράμετροι, οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι οι παράμετροι ύψους. Τα μεγέθη που θα πρέπει να οριστούν για την μέτρηση της τραχύτητας είναι το μήκος δειγματοληψίας ή αποκοπής L_c , το μήκος μέτρησης L_n και η γραμμή αναφοράς. Το μήκος δειγματοληψίαςείναι ένα τυποποιημένο μήκος της επιφάνειας που επιτρέπει την μέτρηση της τραχύτητας της επιφάνειας χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη άλλα είδη επιφανειακών ανωμαλιών. Λείες επιφάνειες απαιτούν μικρό μήκος δειγματοληψίας, ενώ τραχείες επιφάνειες μεγαλύτερο.

Το μήκος μέτρησης L_n είναι το ελάχιστο δυνατό μήκος που μπορεί να μετρήσει το τραχύμετρο και το οποίο επιτρέπει τη μέτρηση της τραχύτητας επιφάνειας χωρίς να λαμβάνονται υπόψη άλλα είδη επιφανειακών ανωμαλιών. Είναι πάντα ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους δειγματοληψίας. Η μέτρηση οφείλεται να είναι αντιπροσωπευτική για όλη την επιφάνεια του τεμαχίου. Η γραμμή αναφοράς ή κεντρική γραμμή [σχήμα 4.18(α)]είναι μια γραμμή παράλληλη προς τη γενική κατεύθυνση του πραγματικού περιγράμματος της επιφάνειας, τέτοια ώστε τα αποκτόμενα εμβαδά μεταξύ αυτής και του πραγματικού περιγράμματος, προς τα άνω και προς τα κάτω να είναι ίσα για προκαθορισμένο μήκος δειγματοληψίας L_c . Οι κυριότεροι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της τραχύτητας απεικονίζονται στον πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Κυριότεροι παράμετροι για την μέτρηση της τραχύτητας

Μέση τραχύτητα R_a	Ενδεικνυόμενη τραχύτητα R_q	Μέγιστη τραχύτητα R_z ή R_{max}
$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L y dx$ $R_a = \frac{ y_1 + y_2 + \dots + y_n }{n}$	$R_q = \left\{ \frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx \right\}^{1/2}$ $R_q = \sqrt{\frac{(y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2)}{n}}$	$R_z = a + \beta $



Σχήμα 4.18: α) Ορισμός κεντρικής γραμμής, β) Προσδιορισμός παραμέτρων ύψους

Με βάση την προδιαγραφή ISO, για την μέτρηση της τραχύτητας χρησιμοποιούνται εκτός από τις παραπάνω κι άλλες παράμετροι, όπως το μέγιστο ύψος κορυφής R_p , το μέγιστο βάθος κοιλάδας R_v , η κυρτότητα R_{ku} κ.τ.λ. Πρέπει να αναφερθεί ότι όσο οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι χαρακτηρισμού της επιφανειακής τοπογραφίας παραμένουν ατελείς, τόσο ενθαρρύνεται η προσπάθεια υιοθέτησης νέων μεθόδων μέτρησης ή εισαγωγής παραμέτρων χαρακτηρισμού. Γι αυτό τον σκοπό έχουν χρησιμοποιηθεί πειραματικά:

- Ανεμόμετρα laser βασιζόμενα στο φαινόμενο Doppler για τον ακριβή προσδιορισμό μεγέθους και σχήματος των επιφανειακών ανωμαλιών.
- Η χρήση πνευματικών γεφυρών Wheatstone για την μέτρηση της τραχύτητας.
- Η έννοια των επιφανειακών μοτίβων και η χρήση συνδιασμού τους για την μέτρηση της τραχύτητας.
- Η προσπάθεια διερεύνησης της επιφανειακής τοπογραφίας με την εισαγωγή της έννοιας των κλασματωσμάτων και του συσχετισμού των κλασικών παραμέτρων με τα κλασματωσματικά χαρακτηριστικά της.

Σήμερα, τα όργανα που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της τραχύτητας είναι τα προφιλόμετρα και τα τραχύμετρα. Ο λεπτός και σκληρός στυλίσκος, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από διαμάντι και υπάρχει σ' αυτά τα όργανα κινείται πάνω στην εξεταζόμενη επιφάνεια και ανιχνεύει τις επιφανειακές ανωμαλίες, ενώ ταυτόχρονα διάφορα ηλεκτρικά, μηχανικά, οπτικά ή

ηλεκτρονικά συστήματα μεγενθύνουν και καταγράφουν τις κινήσεις του στυλίσκου.

4.4.5 Μηχανισμός φαινομένου Τριβής

Κατά καιρούς, έχουν αναπτυχθεί διάφορες θεωρίες σχετικά με τη φύση του φαινομένου της τριβής. Ακολούθως παρουσιάζονται οι πιο αντιπροσωπευτικές:

α) Μηχανική θεωρία. Το έργο της τριβής αναλώνεται για την ανύψωση των επιφανειακών ανωμαλιών της μιας επιφάνειας πάνω από τις ανωμαλίες της άλλης. Αυτή η θεωρία παρουσιάζει πολλά αδύνατα σημεία, καθώς προκύπτουν πολύ μικροί συντελεστές τριβής, που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Ωστόσο, μπορεί να αποδώσει με καλή προσέγγιση την πραγματικότητα μόνο για πολύ τραχείες και σκληρές (απαραμόρφωτες) επιφάνειες. Αλλά και πάλι, δε μπορεί να εξηγήσει την δια τριβής παραγόμενη θερμότητα.

β) Μοριακή θεωρία. Το έργο τριβής αναλώνεται για την υπερνίκηση των δυνάμεων, που οφείλονται σε μοριακή έλξη μεταξύ των δύο στερεών. Εξίσου αυτή η θεωρία παρουσιάζει πολλά σημεία η ανακρίβεια των οποίων έχει αποδειχθεί πειραματικά πχ:

- Οδηγεί σε τριβή ανεξάρτητη της τραχύτητας.
- Δεν μπορεί να εξηγήσει την ανάπτυξη θερμικών δεσμών όταν η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος είναι πολύ χαμηλή.
- Άρση του φορτίου που προκαλεί τις ελαστικές παραμορφώσεις δεν οδηγεί στη μείωση των δυνάμεων πρόσφυσης κι έτσι προκύπτουν θεωρητικές τιμές τριβής πολύ διαφορετικές από τις πειραματικές.

γ) Θεωρία Διείσδυσης. Το έργο τριβής αναλώνεται για να παραμορφωθεί (πλαστικά) ορισμένος όγκος υλικού του ενός σώματος (του μαλακότερου) εξ' αιτίας της διείσδυσης των επιφανειακών ανωμαλιών του άλλου σώματος μέσα στη μάζα του. Κι εδώ, προκύπτουν γενικά μικροί συντελεστές τριβής, αφού δε λαμβάνεται υπ' όψη ο σχηματισμός πρόσθιου μετωπικού χείλους, που αυξάνει σημαντικά την αντίσταση ολίσθησης, όταν υπάρχει πλαστική παραμόρφωση. Προφανώς, η θεωρία της διείσδυσης, ή μηχανισμός άρωσης όπως ονομάζεται, δε μπορεί να ερμηνεύσει την τριβή όταν η διείσδυση είναι αμελητέα (πολύ λείες επιφάνειες και κατά συνέπεια μεγάλη πραγματική επιφάνεια επαφής Ar, ίδια σκληρότητα των στοιχείων του τριβοσυστήματος κ.λ.π.).

δ) Μοριο-μηχανική θεωρία. Αποτελεί συνδυασμό και των τριών παραπάνω θεωριών. Σήμερα, είναι σχεδόν γενικά αποδεκτή, αφού βέβαια διευκρινίστηκαν αρκετά σκοτεινά σημεία και βελτιώθηκε σε βαθμό, που να μπορεί να ερμηνεύσει ικανοποιητικά από άποψη ποιοτική τα παρατηρούμενα φαινόμενα. Ωστόσο, δεν είναι ακόμη εφικτός ο θεωρητικός υπολογισμός του συντελεστή τριβής δεδομένων υλικών, που λειτουργούν υπό δεδομένες συνθήκες. Ο μόριο-μηχανικός μηχανισμός της τριβής είναι εξαιρετικά περίπλοκο φαινόμενο. Για λόγους απλότητας, χωρίς όμως να αλλοιώνεται η

ακρίβεια της ανάλυσης, θεωρείται, ότι σε ένα τριβικό σύστημα με πραγματικές επιφάνειες, ένα μόνο σώμα είναι τραχύ και το άλλο απολύτως λείο. Η κατάσταση περιγράφεται ως εξής:

- Το φορτίο παραλαμβάνεται μόνο από την πραγματική επιφάνεια A_g , η οποία περιορίζεται σε μικρό αριθμό σημείων (μικροεπαφές) και είναι προφανώς πολύ μικρότερη από την ονομαστική επιφάνεια επαφής A_o .

- Σε κάθε μικροεπαφή μπορεί να υπάρξει είτε μόνο ελαστική, είτε ελαστική και στη συνέχεια πλαστική παραμόρφωση (θα εξαρτηθεί από το κριτήριο παραμόρφωσης ψ).

- Στις μικροεπαφές αναπτύσσονται δεσμοί πρόσφυσης που, ανάλογα με τη φύση του υλικού, οφείλονται σε δυνάμεις μοριακές, ιοντικές, ή χημικού δεσμού και διακρίνονται σε δυνάμεις μικρής ή μεγάλης εμβέλειας.

Η τριβή οφείλεται αποκλειστικά σε αλληλεπίδραση των επιφανειακών ανωμαλιών.

Στα διάφορα στάδια σχηματισμού και θραύσης μιας μικροεπαφής παρατηρούνται οι επιμέρους διαδικασίες:

(α) Ελαστική παραμόρφωση της επιφανειακής ανωμαλίας ή και ανύψωση της επάνω από τις ανωμαλίες της άλλης επιφάνειας,

(β) Πλαστική παραμόρφωση της επιφανειακής ανωμαλίας,

(γ) Άρωση και

(δ) Διατμητική θραύση των δεσμών πρόσφυσης.

Η μόριο-μηχανική θεωρία προτείνει για το συντελεστή τριβής μ_k την απλούστερη σχέση: $\mu_k = \frac{\tau_\theta}{\sigma_\Delta} + \tan \varphi + \frac{\pi}{2} \theta$.

Δηλαδή, δέχεται ότι στη δημιουργία της δύναμης τριβής συμμετέχουν και οι τρεις μηχανισμοί εξίσου (μοριακός, μηχανικός και διείδυσης). Συνήθως: $\varphi < 5^\circ$, $\tan \varphi < 0.1$, $\tan \theta < 0.05$ οπότε ο δεύτερος και τρίτος όρος παραλείπονται και προκύπτει η βασική σχέση της μοριακής θεωρίας: $\mu_k \approx \tau_\theta / \sigma_\Delta$. Οι συντελεστές τριβής που προκύπτουν από τους υπολογισμούς αυτούς είναι γενικά μεγάλοι και υποθέτουν ισχυρές δυνάμεις επιφανειακής πρόσφυσης. Οποιαδήποτε μικρή αύξηση της T έχει σαν άμεσο αποτέλεσμα αύξηση της A_g και για καθαρή μεταλλική επιφάνεια θα προκύψει δεσμός αυξημένης αντοχής. Τέλος, σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαπίστωση ότι η πραγματική επιφάνεια επαφής A_g , (υπό κάθετο μόνο φορτίο N), είναι η ίδια είτε οι επιφάνειες είναι καθαρές, είτε όχι (επιφανειακά στρώματα, ρύπος, λιπαντικό) και αρχίζει να αυξάνεται κατά τον ίδιο τρόπο με την αύξηση του φορτίου. Όταν η επιφάνεια δεν είναι όμως καθαρή, η A_g παύει να αυξάνεται και αρχίζει ολίσθηση, σχετικά πολύ πριν από την καθαρή επιφάνεια.

4.4.6 Το Τριβόςστημα

Το μηχανικό σύστημα που αποτελείται από αλληλεπιδράσεις επιφάνειες σε σχετική κίνηση ονομάζεται τριβικό σύστημα ή τριβοσύστημα. Η κυριότερη ομάδα εφαρμογής τριβικών συστημάτων είναι η υποστήριξη της κίνησης, με τη βοήθεια διαφόρων μορφών στοιχείων έδρασης [5]. Άλλες ομάδες εφαρμογών είναι η μεταφορά μηχανικού έργου, η μεταφορά πληροφοριών και η διαμόρφωση υλικών. Η αλληλεπίδραση των στοιχείων που αποτελούν το τριβικό σύστημα είναι εξαιρετικά πολύπλοκη. Παραγωγή θερμότητας, μεταβολή της μάζας στοιχείων (φθορά ή μεταφορά υλικού από τη μια επιφάνεια στην άλλη), μεταβολή της χημικής τους σύστασης, οξειδωση, ροή λιπαντικού, μεταβολή γεωμετρίας είναι μερικές μόνο από τις παραμέτρους που θα έπρεπε να ληφθούν υπ' όψη σε μια πλήρη έκφραση του συστήματος. Ο τεχνολογικός σκοπός του τριβοσυστήματος θέτει επίσης ορισμένα όρια τιμών των παραμέτρων έξω από τα οποία το σύστημα δε λειτουργεί ικανοποιητικά.

Η θερμική ενέργεια παράγεται μέσα στο τριβικό σύστημα από μετατροπή μέρους του μηχανικού έργου, ή και εισάγεται στο σύστημα από το περιβάλλον. Μπορεί, επίσης, να οφείλεται σε χημικά, ηλεκτρικά ή άλλα φαινόμενα που γίνονται μέσα στο τριβικό σύστημα. Η παραγόμενη θερμότητα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του τριβικού συστήματος και λόγω της, έτσι αναπτυσσόμενης, διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον, αναπτύσσεται ροή θερμότητας. Η συμπεριφορά του τριβικού συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από τις μεταβολές των θερμικών παραμέτρων.

Η ύλη, σαν μεταβλητή του τριβικού συστήματος, σημαίνει κυρίως μεταβολές της μάζας λόγω φθοράς, δηλαδή, αφαίρεση μάζας από το ένα ή και από τα άλλα στοιχεία του συστήματος, μεταφορά μεταξύ τους ή απώλεια μάζας στο περιβάλλον. Μπορεί, επίσης, να σημαίνει μεταβολή γεωμετρίας λόγω παραμορφώσεων.

Η πιο απλή περίπτωση τριβοσυστήματος είναι ένα σύστημα απλής επαφής, η οριακή εκείνη κατάσταση στην οποία περιέρχεται το σύστημα όταν η σχετική ταχύτητα των στοιχείων τείνει να μηδενιστεί.

4.4.6.1 Ιδιότητες των Υλικών που Επιδρούν στο Τριβόςστημα

Η τριβολογική συμπεριφορά μιας επιφάνειας εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη. Γι' αυτό, ο προσδιορισμός της φύσης αυτής της εξάρτησης, ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη της συμπεριφοράς των επιφανειών και της αλληλεπίδρασης τους, αποτέλεσε σημαντική προσπάθεια.

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την συμπεριφορά των επιφανειών αυτών ανήκουν σε δύο γενικές κατηγορίες:

- *Ιδιότητες όγκου:* σχετίζονται με τα επαπτόμενα σώματα στο σύνολό τους. Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν το όριο διαρροής, οι παράμετροι σκληρότητας, οι ελαστικές παράμετροι (μέτρο ελαστικότητας, μέτρο διάτμησης και η αποταμιευμένη ελαστική ενέργεια κατά την επαφή), και οι παράμετροι ψαθυρότητας. Οι θερμικές ιδιότητες του υλικού αποκτούν σημασία μόνο όταν από το τριβικό ζεύγος παράγονται μεγάλα ποσά θερμότητας.

- *Ιδιότητες επιφανείας (ποιότητα επιφάνειας):* σχετίζονται μόνο με τις ίδιες τις επαπτόμενες επιφάνειες. Οι σπουδαιότερες είναι η χημική δραστηριότητά της (δηλαδή η τάση της να αντιδρά χημικά με το περιβάλλον και να σχηματίζει επιφανειακό στρώμα διαφορετικής σύνθεσης από το υποκείμενο υλικό) και η ικανότητά της να απορροφά μόρια από το περιβάλλον. Σημαντικό χαρακτηριστικό είναι, επίσης, η επιφανειακή ενέργεια, δηλαδή, το έργο που πρέπει να δαπανηθεί για τη δημιουργία νέας επιφάνειας (με απομάκρυνση του επιφανειακού στρώματος μορίων).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι πολύ δύσκολος ο συσχετισμός της συμπεριφοράς του υλικού με κάποια παράμετρο, καθώς επίσης και η εύρεση υλικού για μια εφαρμογή με προδιαγεγραμμένες ιδιότητες. Είναι, για παράδειγμα, αδύνατο, να βρεθεί μαλακό μέταλλο με υψηλό σημείο τήξης (ιδεώδες υλικό για την κατασκευή τριβέων), ή αντίστροφα σκληρό μέταλλο με χαμηλή επιφανειακή ενέργεια (υψηλή φθορά).

4.4.6.2 Παράμετροι Λειτουργίας του Τριβοσυστήματος

A. Τα Υλικά

Γενικά, οι ιδιότητες των επιφανειών των στοιχείων του τριβικού συστήματος, είτε αυτές είναι μέταλλα είτε αμέταλλα, επηρεάζονται σημαντικά από την παρουσία επιφανειακών στρωμάτων, αφού αυτά παρεμβάλλονται μεταξύ των δύο επιφανειών και τροποποιούν τις επικρατούσες συνθήκες.

Τα Μέταλλα

Τα μεταλλικά υλικά παρουσιάζουν το μεγαλύτερο τριβολογικό ενδιαφέρον καθώς αποτελούν τα κύρια υλικά των τεχνολογικών κατασκευών. Η ολίσθηση των μεταλλικών επιφανειών επιτελείται, κατά κανόνα, παρουσία λιπαντικού. Όμως, διάφοροι λόγοι επιβάλλουν, πολλές φορές, την ξηρή επαφή μεταξύ τους (βλάβη στο σύστημα λίπανσης, εξάτμιση του ήδη υπάρχοντος λιπαντικού λόγω υψηλής θερμοκρασίας, παρουσία λιπαντικού προκαλεί λειτουργικά προβλήματα). Ο συντελεστής τριβής ολίσθησης είναι συνήθως $\mu_k=0.1 - 0.3$, ενώ τείνει να μειωθεί με το χρόνο, καθώς προκαλείται φθορά και απομάκρυνση των επιφανειακών στρωμάτων.

Στα μέταλλα παρατηρείται μεγάλη ποικιλία τριβικών χαρακτηριστικών ανάλογα με το βαθμό καθαρότητας της επιφάνειας και είναι σημαντική η γνώση του είδους και του πάχους του υφιστάμενου επιφανειακού στρώματος. Καθαρές μεταλλικές επιφάνειες

δηλαδή απαλλαγμένες από ρύπους και προσροφούμενα αέρια, πετυχαίνουμε με τους εξής τρόπους:

- Δημιουργία νέας επιφάνειας με αφαίρεση υλικού (κοπή, λείανση, στίλβωση)
- Χρήση ισχυρού αλκαλικού διαλύματος και εν συνεχεία απεσταγμένου νερού ή πλύση με συμπύκνωμα ατμών καθαρού οργανικού διαλύτη.
- Με το πείραμα διαβροχής, ελέγχεται η παρουσία ρύπων καθώς το νερό διαβρέχει την καθαρή επιφάνεια αλλά όχι και αυτή με ρύπο.

Προκειμένου όμως να γίνει εφικτή η ύπαρξη απολύτως καθαρών επιφανειών, δηλαδή απαλλαγμένες και από τα στρώματα οξειδίων, πρέπει αυτές να υποστούν τα εξής: να θερμανθούν και να βομβαρδιστούν με ιόντα υπό συνθήκες υψηλού κενού. Στη συνέχεια, να εκτελεστούν τα πειράματα τριβής χωρίς ελάττωση του κενού. Οι συντελεστές τριβής που προκύπτουν, είναι πολύ υψηλοί ($\mu_k > 100$), ενώ μειώνονται σημαντικά όταν το σύστημα έρθει σε επαφή με το οξυγόνο. Κατά την ολίσθηση δύο καθαρών μεταλλικών επιφανειών, η τριβή εξαρτάται από τη φύση των εφαιπτόμενων μετάλλων. Δύο είναι, γενικά, οι τύποι τριβικής συμπεριφοράς:

(α) Βαριά τριβική συμπεριφορά όπου εκδηλώνονται τα εξής χαρακτηριστικά:

- Υψηλός συντελεστής τριβής: $\mu_k = 0.9-2.0$
- Έντονη διακύμανση της τριβής
- Ίχνη έντονης φθοράς (άρωσης) με ακανόνιστα χείλη αυλάκων
- Μεταφορά υλικού διαμέσω των επιφανειών με τη μορφή μεγάλων συσσωματωμάτων (διαμέτρου $d > 50 \mu\text{m}$).

(β) Ήπια τριβική συμπεριφορά όπου:

- Χαμηλότερος συντελεστής τριβής: $\mu_k = 0.3-0.7$
- Σταθερή τριβή με χαρακτηριστικά κανονικής παλμοποίησης
- Πολυάριθμα ίχνη ελαφράς άρωσης,
- Μεταφορά υλικού με μικρού μεγέθους κόκκους ($d < 25 \mu\text{m}$).

Κατά κανόνα, βαριά τριβική συμπεριφορά παρατηρείται κατά την ολίσθηση επιφανειών από το ίδιο ή παρόμοιο υλικό (με εξαίρεση τα σκληρά μέταλλα Fe, Cr, Ni). Επίσης παρατηρείται, όταν ένα από τα στοιχεία του τριβικού συστήματος είναι πολύ μαλακό υλικό ανεξάρτητα από τη φύση του άλλου. Τότε, ψήγματα της επιφάνειας του μαλακού μετάλλου επικολλώνται στην επιφάνεια του σκληρού, σύντομα το επικαλύπτουν πλήρως και στη συνέχεια, το μαλακό υλικό ολισθαίνει επί του ίδιου. Κάποια πιο σκληρά μέταλλα (Τιτάνιο, Ζιρκόνιο) εμφανίζουν την ίδια συμπεριφορά, η οποία επιτείνεται από την παρουσία υγρασίας, καθώς αυτή ενεργεί σαν ελαφρό λιπαντικό (τα μαλακά μέταλλα δεν επηρεάζονται το ίδιο).

Έχει παρατηρηθεί, ότι σε κάποιους συνδυασμούς μετάλλων υπάρχει κάποιο οριακό φορτίο, κάτω από το οποίο ποτέ δε παρατηρείται βαριά τριβική συμπεριφορά. Αυτό το φορτίο είναι αναγκαίο, για να θραυθούν και να

απομακρυνθούν τα επιφανειακά στρώματα οξειδίων. Επίσης, έχει παρατηρηθεί σε κάποιους συνδυασμούς μετάλλων, όπως χαλκού επί χάλυβα, ενώ η τριβική συμπεριφορά είναι οριακή μεταξύ βαριάς και ήπιας. Εξελίσσεται δε σε βαριά, όταν η επαφή είναι συγκεντρωμένη (ο λόγος A_r / A_o είναι μεγάλος). Ειδική τριβική συμπεριφορά παρουσιάζουν τα κράματα. Τα μονοφασικά κράματα συμπεριφέρονται ως καθαρά μέταλλα με τριβικές ιδιότητες ανάλογες του κύριου συστατικού τους. Τριβικά συστήματα από το ίδιο μονοφασικό κράμα δίνουν υψηλή τριβή και καταστροφή της επιφάνειας. Τα πολυφασικά κράματα έχουν τελείως διαφορετική συμπεριφορά, συχνά με χαμηλούς συντελεστές τριβής. Καλές συνθήκες ολίσθησης επιτυγχάνονται με κράματα ενός σκληρού, κατά μεγάλο ποσοστό, κι ενός μαλακού μετάλλου (η μαλακή φάση δρα σαν λιπαντικό).

Τα Αμέταλλα

Ενώ τα μέταλλα αποτελούν, από άποψη τριβικών ιδιοτήτων, μια λίγο πολύ ομοιογενή ομάδα, τα αμέταλλα περιλαμβάνουν μεγάλη ποικιλία υλικών μερικά από τα οποία έχουν και τριβολογική χρήση (αδάμας, ελαστικό, σκυρόδεμα, δέρμα, γραφίτης, ξύλο, πάγος, πλαστικά, κ.λ.π.). Παρά τη μεγάλη αυτή ποικιλία, τα αμέταλλα παρουσιάζουν μάλλον ομοιόμορφη τριβική συμπεριφορά με μικρές αποκλίσεις.

- Αλίπαντα αμέταλλα που ολισθαίνουν επί του ίδιου υλικού παρουσιάζουν $\mu_k=0.3-0.4$ (για $u_s=1-100$ cm/s) και $\mu_k=0.4-0.6$ (για χρόνο στάσης $t_s=1-100$ s).
- Η βλάβη της επιφάνειας επαφής είναι μέτρια και γενικά μικρότερη από την παρατηρούμενη σε μέταλλα συγκρίσιμης σκληρότητας.
- Η παρουσία ρύπου είναι λιγότερο σημαντική. Δεν υπάρχει στις περισσότερες περιπτώσεις θέμα οξειδίων και προσροφημένων επιφανειακών στρωμάτων, ενώ ειδικές συνθήκες που επηρεάζουν σημαντικά την τριβή των μετάλλων έχουν μικρή επίδραση στην τριβή των αμετάλλων.
 - Η παρουσία υγρασίας μειώνει το συντελεστή τριβής κατά $\Delta\mu\approx 0.1$.
 - Υπό καλές συνθήκες λίπανσης, ενώ τα μέταλλα παρουσιάζουν γενικά $\mu_k=0.04-0.1$, τα αμέταλλα δίνουν συντελεστές τριβής ελαφρά μεγαλύτερους του $\mu_k=0.1$.

Οι ιδιότητες τριβικών ζευγών μετάλλου - αμετάλλου και αμετάλλου - αμετάλλου εξαρτώνται κυρίως από τις ιδιότητες του μαλακότερου υλικού (μηχανισμός «επάλειψης»).

Τα αμέταλλα ακολουθούν γενικά τους κλασσικούς νόμους της τριβής με μικρές μόνο αποκλίσεις οφειλόμενες στη δομή ορισμένων αμετάλλων και τις μηχανικές τους ιδιότητες (π.χ. υλικά πολύ ελαστικά, φυλλώδη, PTFE (τέφλον) και νιτρίδιο του βορίου).

Β. Τα Επιφανειακά Στρώματα και το Λιπαντικό

Αποτελεσματική μείωση της τριβής μπορούμε να επιτύχουμε αποτρέποντας την επαφή των δυο στερεών επιφανειών, με την παρεμβολή μεταξύ τους ενός τρίτου, συνήθως ρευστού, στρώματος λιπαντικού. Όταν το πάχος αυτού είναι μεγαλύτερο του μέγιστου ύψους των επιφανειακών ανωμαλιών, h_{max} , οι δύο επιφάνειες του τριβοσυστήματος δεν έρχονται σε επαφή μεταξύ τους και η τριβή οφείλεται σε αλληλεπίδραση της κάθε επιφάνειας με το λιπαντικό. Αν το πάχος του λιπαντικού είναι μικρότερο, προστίθενται σ' αυτό χημικές ουσίες με ειδικά χαρακτηριστικά (λιπαρά οξέα, χλώριο, θείο). Αποτέλεσμα των οποίων είναι η δημιουργία ενός λεπτού προστατευτικού επιφανειακού στρώματος.

Η χρήση κατάλληλων επιφανειακών στρωμάτων, μπορεί να έχει ευεργετικά αποτελέσματα στη συμπεριφορά των τριβικών συστημάτων. Το πρόβλημα όμως είναι ότι φθείρονται και απομακρύνονται εύκολα. Η αντικατάστασή τους επιτυγχάνεται με δύο τρόπους, όπως περιγράφεται στο εξής:

α) το μαλακό μέταλλο τοποθετείται σαν χωριστή φάση στο κράμα του σκληρότερου. Με την τριβή το σκληρό υλικό της επιφάνειας φθείρεται και το μαλακό δημιουργεί επιφανειακό στρώμα (π.χ. κράματα χαλκού- μολύβδου) και

β) το επιφανειακό στρώμα δημιουργείται χημικά, ενώ το λιπαντικό περιέχει ειδικά πρόσθετα που αντικαθιστούν τα μόρια του φθειρόμενου επιφανειακού στρώματος. Υπερβολική χημική δραστηριότητα του λιπαντικού μπορεί να προκαλέσει φυσικά, έντονη διάβρωση των επιφανειών.

Η τριβή μειώνεται, επίσης, όταν η επιφάνεια καλυφθεί με φυλλώδη υλικά (όπως ο γραφίτης ή το θειούχο μολυβδαίνιο), όμως είναι δύσκολη η πρόσφυσή τους στα υποκείμενα στερεά. Χρησιμοποιούνται κυρίως σαν λιπαντικές κόνεις. Η δημιουργία πολύ σκληρών επιφανειών, με διάφορους τρόπους, είναι επίσης μια μέθοδος μείωσης της τριβής (αλλά κυρίως της φθοράς). Όμως μ' αυτό τον τρόπο αναπόφευκτα δημιουργείται πολύ ψαθυρή επιφάνεια με καταστροφικές συνήθως συνέπειες.

Όλα αυτά τα επιφανειακά στρώματα, αλλά και τα οξειδία του ίδιου του μετάλλου παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερη διατμητική τάση θραύσης από το μεταλλικό υπόστρωμα.

Γ. Η Τραχύτητα των Επιφανειών

Έχει παρατηρηθεί ότι για πολύ μικρές τραχύτητες, η τριβή φθίνει με την τραχύτητα (μοριακός μηχανισμός της τριβής), ενώ για πολύ μεγάλες τραχύτητες η τριβή αυξάνει με την τραχύτητα (μηχανικός μηχανισμός της τριβής). Όταν επιπλέον τα στοιχεία του τριβικού συστήματος παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά σκληρότητας, επειδή επικρατεί ο μηχανισμός άρωσης και οι επιφανειακές ανωμαλίες του σκληρού στοιχείου διεισδύουν στη μάζα του μαλακού, η τριβή

αυξάνει περίπου ανάλογα με την τραχύτητα. Εάν το τριβικό ζεύγος λιπαίνεται, η τραχύτητα δυσχεραίνει τη λειτουργία του λιπαντικού στρώματος, με συνέπεια την αύξηση της τριβής.

Δ. Η Σχετική Ταχύτητα και ο Χρόνος Στάσης

Σύμφωνα με τον κλασσικό νόμο του Coulomb, η τριβή είναι ανεξάρτητη από τη σχετική ταχύτητα ολίσθησης, παραδοχή που οδηγεί σε πολύ απλοποιημένα μοντέλα. Επιπλέον, επειδή στην επιφάνεια επαφής συμβαίνουν και πλαστικές παραμορφώσεις, είναι λογικό να υποθεθεί ότι ο συντελεστής τριβής μ_s πρέπει να εξαρτάται κι από το χρόνο που έμεινε σε ακινησία και υπό φορτίο (χρόνος στάσης t_s) το τριβικό ζεύγος, πριν από την έναρξη της ολίσθησης. Πειραματική εξέταση της συνάρτησης $\mu_k = \mu_k(u_s)$, για πολλά υλικά και ευρύ φάσμα ταχυτήτων, δείχνει ότι μάλλον η διάκριση σε κινηματικό και στατικό συντελεστή τριβής είναι εσφαλμένη και ότι, απλούστατα, ο μ_s κατά την κλασσική αντίληψη είναι μάλλον ο μ_{s0} (όπως περιγράφεται από τα επόμενα μοντέλα):

$$\mu_{s0} = \lim_{t \rightarrow 0} \mu_s(t_s) = \lim_{u \rightarrow 0} \mu_s(u_s)$$

Με βάση αυτή την αντίληψη, μπορεί να διαμορφωθεί ένα μη γραμμικό μαθηματικό μοντέλο που θα περιγράψει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη λειτουργία του τριβοσυστήματος.

Ε. Το διεπιφανειακό ηλεκτρικό δυναμικό

Πειράματα τριβής μεταλλικών επιφανειών μέσα σε ηλεκτρολύτες έχουν δείξει ότι η τριβή εξαρτάται από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των επιφανειών. Η μεταβολή της τριβής, στην περίπτωση αυτή, συνοδεύεται και από αντίστοιχη μεταβολή του ρυθμού φθοράς των τριβόμενων επιφανειών.

ΣΤ. Η επιφανειακή θερμοκρασία

Η πραγματική επιφάνεια επαφής A_r , παρά του μικρού μεγέθους της, επιδρά σημαντικά στην αύξηση της θερμοκρασίας μεταξύ των στοιχείων του τριβικού συστήματος. Το έργο των δυνάμεων τριβής, λόγω των πλαστικών παραμορφώσεων των επιφανειακών εξάρσεων, μετατρέπεται κυρίως σε θερμότητα και διαχέεται προς το περιβάλλον (εφόσον βέβαια η θερμοκρασία του είναι μικρότερη απ' αυτή της A_r).

Η θερμοκρασία στην σημειακή επαφή των επιφανειακών ανωμαλιών υπερβαίνει κατά πολύ το σημείο τήξης των υλικών που αποτελούν το τριβικό ζεύγος, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη δεσμών σύντηξης μεταξύ τους. Η επαφή των επιφανειών αυτών είναι στιγμιαία (διαρκεί λίγα msec) και έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία, έντονα θερμοκρασιακά μεταβατικών, φαινομένων, τις θερμοκρασιακές αναλαμπές.

4.4.7 Φθορά

Φθορά ονομάζεται η ανεπιθύμητη (ή όχι) αφαίρεση υλικού από την επιφάνεια ενός σώματος με μηχανική δράση. Η φθορά, η παλαιότητα και η αστοχία (θραύση) είναι οι τρεις τρόποι με τους οποίους όλα τα εξαρτήματα χάνουν τη χρησιμότητά τους. Μολονότι η φθορά είναι γενικά ένα αρνητικό φαινόμενο υπάρχουν εν τούτοις πολλές πρακτικές χρήσεις της, όπως η παραγωγή επιφανειών (λιμάρισμα, χρήση λειαντικών χαρτιών και τροχών κ.α.), η γραφή, η διατήρηση οξειών ακμών (στα κοπτικά εργαλεία) και η διαγνωστική χρήση της φθοράς.

Το φυσικό φαινόμενο της φθοράς αντιδιαστέλλεται της ποσότητας του αφαιρέντος υλικού που ονομάζεται ποσότητα φθοράς, ή χάριν συντομίας φθορά. Η ποσότητα της φθοράς μετράται από την μείωση μιας διαστάσεως του στοιχείου του τριβοσυστήματος (γραμμική φθορά) ή από την μείωση της μάζας του (μάζα φθοράς). Ρυθμός φθοράς ονομάζεται η ποσότητα φθοράς που μετράται στη μονάδα του χρόνου. Η φθορά ενός υλικού οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως το εξεταζόμενο υλικό, το ανταγωνιστικό υλικό (υλικό αναφοράς), τα παραμένοντα προϊόντα της φθοράς, την υγρασία, την θερμοκρασία, τη λίπανση κ.α. Έχουν παρατηρηθεί αρκετές πειραματικές παρατηρήσεις που να περιγράφουν τη φθορά των υλικών, όπως:

- Ο ρυθμός φθοράς σε συνηθισμένα τριβικά ζεύγη είναι γρηγορότερος απ' αυτόν στην περίπτωση του ατομικού μηχανισμού φθοράς.
- Η απομάκρυνση υλικού γίνεται κατά πεπερασμένα συσσωματώματα πολύ μεγαλύτερων διαστάσεων απ' αυτές του ατομου.
- Όταν δύο σώματα έρχονται σε επαφή γίνεται αλληλεπίδραση μεταξύ τους (π.χ. επαφή με ή χωρίς πρόσφυση και διάτμηση κ.τ.λ.)

4.4.7.1 Είδη φθοράς

Η φθορά των υλικών γίνεται κυρίως με συγκεκριμένο τρόπο και γι' αυτόν το λόγο υπάρχουν πολλές ερευνητικές προσπάθειες κατάταξης των μορφών φθοράς σε συγκεκριμένους τύπους. Συνήθως συνυπάρχουν περισσότεροι από ένας τύπος φθοράς, γεγονός που προκαλεί σύγχυση σε διεθνή βιβλιογραφία. Οι υφιστάμενες κατατάξεις τύπων φθοράς χρησιμοποιούν διάφορα κριτήρια, όπως:

- την αιτία που προκαλείται η φθορά
- αποτελέσματα της φθοράς
- τις τεχνολογικές συνέπειες της φθοράς

Ανάλογα με τον τρόπο σχετικής κίνησης των δύο υλικών που βρίσκονται σε επαφή, διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Φθορά λόγω ολίσθησης: Εμφανίζεται όταν οι επαπτόμενες επιφάνειες ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη είτε με την παρουσία στη διεπιφάνεια

αποξεστικών σωματιδίων ή λιπαντικού είτε χωρίς. Συναντάται κυρίως σε μηχανές που ορισμένα μέρη βρίσκονται σε σχετική κίνηση.

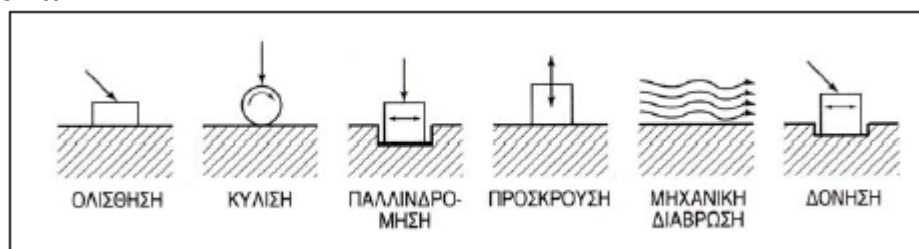
2. Φθορά λόγω κύλισης: Παρατηρείται κατά την κύλιση μιας σφαίρας ή κυλίνδρου σε μια στερεή επιφάνεια. Είναι ο τύπος φθοράς που ευθύνεται για την καταστροφή εδράνων των οποίων η λειτουργικότητα εξαρτάται από την κίνηση ρουλεμάν.

3. Φθορά λόγω παλλινδρομής: Δημιουργείται λόγω παλλινδρομικών κινήσεων υψηλής συχνότητας και μικρής έντασης. Οι κινήσεις αυτές συναντώνται σε οποιαδήποτε κοινή μηχανή.

4. Φθορά λόγω πρόσκρουσης: Οφείλεται σε πρόσκρουση στερεών σωματιδίων, σταγόνων ή υγρών εκτοξευμάτων πάνω σε μια επιφάνεια. Παρουσία ηλεκτρολυτών επιταχύνει το φαινόμενο λόγω δράσης χημικής διάβρωσης.

5. Φθορά λόγω μηχανικής διάβρωσης: Λαμβάνει μέρος στην επιφάνεια του υλικού από στερεά σωματίδια μεταφερόμενα από κάποιο ρευστό, υγρό ή αέριο.

6. Φθορά λόγω δόνησης: Προκαλείται στις διεπιφάνειες των υλικών που βρίσκονται σε επαφή όταν αυτά υποβάλλονται σε ταυτόχρονη φόρτιση παλλινδρομής και ολίσθησης. Συναντάται κυρίως σε επιφάνειες που συνδέονται εν ξηρώ, όπως για παράδειγμα άξονες και έδρανα συνδετικών δακτυλίων.



Σχήμα 4.19: Είδη φθοράς ανάλογα με τη σχετική κίνηση των δύο υλικών που βρίσκονται σε επαφή

Οι τέσσερις βασικοί τύποι φθοράς κατά Rabinowitz είναι οι παρακάτω:

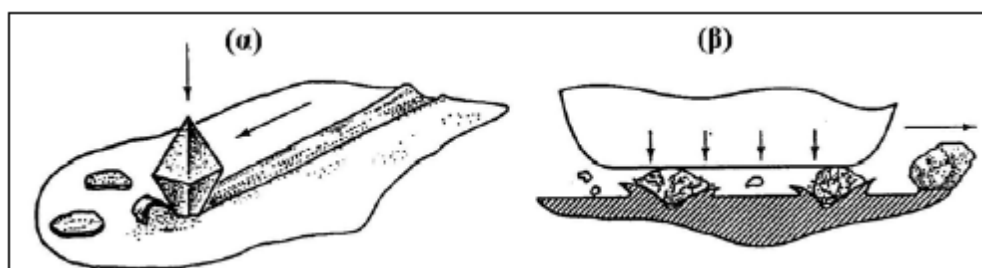
1. Φθορά πρόσφυσης (adhesive wear): Ονομάζεται η καταστροφή που προκαλείται όταν δύο επιφάνειες βρίσκονται σε επαφή υπό φορτίο και σε σχετική κίνηση μεταξύ τους χωρίς την παρουσία λιπαντικού μέσου. Τα ψήγματα της μιας λείας επιφάνειας αποκολλώνται κατά τη διάρκεια της μιας σχετικής κίνησης και προσκολλώνται στην άλλη. Στη συνέχεια τα ψήγματα αυτά μπορεί να αποκολληθούν εκ νέου και να προσκολληθούν στη μητρική επιφάνεια ή να παραμείνουν στο σύστημα.

Η φθορά πρόσφυσης οφείλεται στις ισχυρές δυνάμεις που αναπτύσσονται όταν τα άτομα των δύο επιφανειών πλησιάσουν πολύ μεταξύ τους. Τότε κατά την ολίσθηση πρέπει να θραυσθούν οι δεσμοί πρόσφυσης, οι οποίοι έχουν σχηματιστεί στην περιοχή της πραγματικής επιφάνειας επαφής A_r .

Υπάρχει μια μικρή πιθανότητα η θραύση αυτή να γίνει εντός ενός εκ των δύο στοιχείων του τριβικού ζεύγους κι όχι ακριβώς στην επιφάνεια αλληλεπαφής. Ως αποτέλεσμα είναι η μεταφορά ενός ψήγματος από τη μία επιφάνεια στην

άλλη. Η σταθερά κ, που ονομάζεται και σταθερά φθοράς, εκφράζει την πιθανότητα σχηματισμού ψήγματος φθοράς από ένα δεσμό πρόσφυσης κι εξαρτάται από τον συνδιασμό υλικών του τριβικού ζεύγους. Δίνεται απ' την σχέση: $k = \frac{3HV}{Fx}$, όπου V ο όγκος του υλικού που έχει φθαρεί με την εφαρμογή φορτίου F κατά την ολίσθηση σε απόσταση x και H η σκληρότητα της επιφάνειας που έχει φθαρεί.

2. Λειαντική φθορά ή φθορά εκτριβής (abrasive wear): Είναι η μορφή φθοράς που παρατηρείται όταν μια τραχεία σκληρή επιφάνεια ή μια μαλακή επιφάνεια που περιέχει σκληρά ψήγματα, ολισθαίνει επί μιας πιο μαλακής επιφάνειας με αποτέλεσμα τη δημιουργία αύλακα άρωσης επί της μαλακότερης επιφάνειας. Το υλικό απομακρύνεται από την αύλακα με τη μορφή γενικά ελεύθερων ψηγμάτων φθοράς. Υπάρχουν δύο είδη λειαντικής φθοράς, χαμηλών και υψηλών θερμοκρασιών. Η διαχωριστική θερμοκρασία σε αυτά τα δύο είδη είναι 482°C. Άλλη διάκριση της φθοράς εκτριβής είναι σε εκτριβή χαμηλής έντασης ή ήπια εκτριβή (low stress abrasion or scratching abrasion), όπου τα σκληρά σωματίδια πιέζονται στη φθειρόμενη επιφάνεια με μικρή δύναμη και προκαλούν απόξεση (scratching) της επιφάνειας (σχήμα 4.20 α) και σε εκτριβή υψηλής έντασης (high stress abrasion), όπου τα σκληρά σωματίδια πιέζονται με μεγάλη δύναμη προκαλώντας απόξεση, πλαστική παραμόρφωση, αλλά και μικρές αποκολλήσεις (σχήμα 4.20 β).



Σχήμα 4.20:α) Ήπια εκτριβή, β) Εκτριβή υψηλής έντασης .

3. Διαβρωτική φθορά (Corrosive wear): Αυτό το είδος φθοράς συναντάται όταν η ολίσθηση γίνεται μέσα σε διαβρωτικό περιβάλλον. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει σχετική κίνηση στο σύστημα, τα προϊόντα της διάβρωσης σχηματίζουν επιφανειακό στρώμα στα στοιχεία του τριβικού ζεύγους με αποτέλεσμα την επιβράδυνση και τελικά τη διακοπή της περαιτέρω διάβρωσης. Όταν όμως υπάρχει σχετική κίνηση, το επιφανειακό στρώμα απομακρύνεται φθειρόμενο και η διάβρωση συνεχίζεται. Το πρόβλημα της διάβρωσης απασχολεί όλα τα τεχνικά υλικά με διαφορετικούς μηχανισμούς. Τα μέταλλα βρίσκονται στη φύση κυρίως με μορφή οξειδίων τους. Όντας τα περισσότερα μέταλλα θερμοδυναμικά ασταθή, κατά την επαφή τους με το περιβάλλον, οξειδώνονται τείνοντας να υποβαθμιστούν ενεργειακά, οπότε και μεταπίπτουν στην αρχική ευσταθή τους κατάσταση. Αντίθετα, τα κεραμικά είναι πιο ευσταθή στα συνθήκη διαβρωτικά περιβάλλοντα.

4. Φθορά επιφανειακής κόπωσης(Surface fatigue wear): Παρατηρείται κατά την επαναλαμβανόμενη ολίσθηση ή κύλιση επί της ίδιας τροχιάς. Η επαναλαμβανόμενη φόρτιση-αποφόρτιση προκαλεί επιφανειακά ή εσωτερικά ρήγματα, τα οποία συνενώνονται και οδηγούν στην απομάκρυνση μεγάλων θραυσμάτων τα οποία αφήνουν στην επιφάνεια εικόνα αποφλοΐωσης (pitting). Αυτού του είδους φθορά αποτελεί τον κύριο τρόπο αστοχίας των τριβοσυστημάτων κύλισης (όπως σφαιροτριβείς).

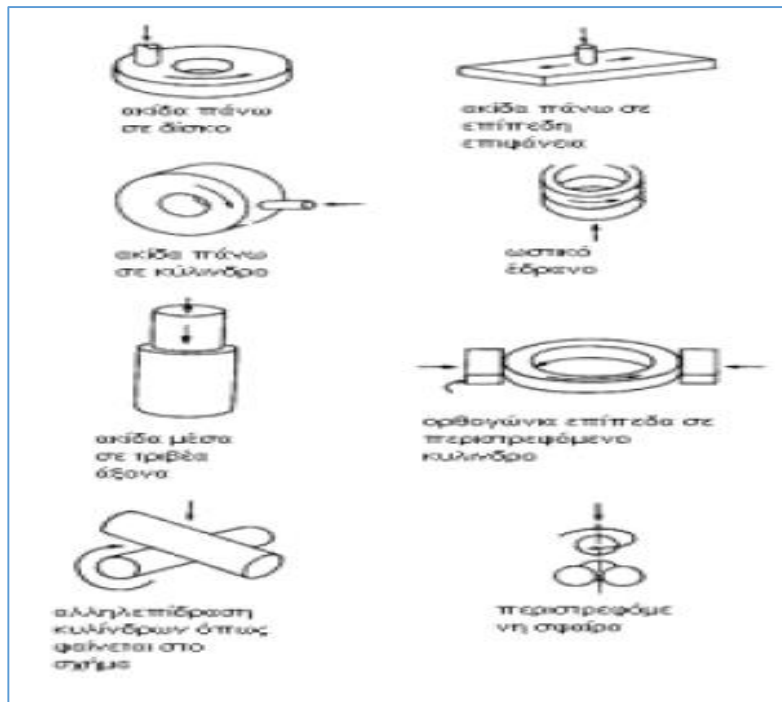
Πέρα των παραπάνω τεσσάρων ειδών φθοράς, ως τύποι φθοράς ταξινομούνται κι άλλα φαινόμενα, τα οποία αναφέρονται παρακάτω. Βέβαια, υπάρχει αμφισβήτηση όσον αφορά την κατάταξη των φαινομένων αυτών ως τύποι φθοράς.

- Παλμική αστοχία (fretting): Παρατηρείται όταν στο τριβικό ζεύγος υπάρχει επαπτομενική παλινδρομική μετατόπιση μικρού πλάτους. Στις επιφάνειες που φθείρονται εμφανίζονται κοιλότητες κι εσοχές που περιβάλλονται από τα προϊόντα της φθοράς. Παλαιότερα αναφέρεται κι ως Παλμική Διάβρωση (fretting corrosion) αφού η παλμική φθορά επιτείνεται από φαινόμενα διάβρωσης. Τότε, οι μεταλλικές επιφάνειες σχηματίζουν ενδιάμεσο στρώμα οξειδίου, το οποίο αστοχεί ψαθυρά. Έτσι, συσσωρεύονται οξειδία ανάμεσα στις φθειρόμενες επιφάνειες. Στερεά λιπαντικά ή μαλακά μεταλλικά επιστρώματα μειώνουν τη φθορά, ενώ το αντίθετο αποτέλεσμα έχουν σκληρά επιστρώματα, αφού αυξάνουν τη φθορά κόπωσης της επιφάνειας.

- Σπηλαίωση (cavitation): Όταν ένα μέρος του ρευστού βρίσκεται υπό εφελκυστική τάση μπορεί να αρχίσει βρασμός και να παραχθεί ατμός σε θερμοκρασία περιβάλλοντος αν μειωθεί αρκετά η πίεση. Έπειτα, οι φυσαλίδες μπορούν να εισέλθουν σε περιοχές υψηλής πίεσης του ρευστού κι έτσι προσκρούουν στα τοιχώματα αναπτύσσοντας ισχυρές μηχανικές κρούσεις. Η σπηλαίωση συνδέεται με τη φθορά κόπωσης. Τα σκληρά, αλλά μη ψαθυρά υλικά παρουσιάζουν και υψηλή αντοχή σε σπηλαίωση.

4.4.7.2 Δοκιμές Τριβής – Φθοράς

Ο κύριος στόχος των δοκιμών αυτών είναι ο έλεγχος. Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της τριβής ονομάζονται τριβόμετρα [6]. Οι δοκιμές τριβής-φθοράς καταλαμβάνουν πολύ σημαντικό ποσοστό στην εξήγηση του φαινομένου της φθοράς, μέσω της ανάλυσης και της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων τα οποία αντλούνται από αυτές. Η κατηγοριοποίηση των δοκιμών αυτών είναι η εξής: δοκιμές εργαστηρίου, προσομοίωσης και πλήρους κλίμακας.



Σχήμα 4.21: Διατάξεις τριβικών ζευγών που συναντώνται στα τριβόμετρα

Η μέτρηση των τριβολογικών ιδιοτήτων γίνεται με διάφορα μέσα όπως:

- Οπτικό μικροσκόπιο το οποίο είναι το πιο συνηθισμένο όργανο παρατήρησης επιφανειών, αφού με αυτό αποκαλύπτονται όλες οι λεπτομέρειες των θέσεων και των πληροφοριών ύπαρξης διαφόρων στοιχείων (ρύποι, οξειδία, κτλ). Ωστόσο αυτή η μέθοδος έχει κάποια μειονεκτήματα τα οποία συνοψίζονται ως εξής: α) το οπτικό μικροσκόπιο δεν μπορεί να διακρίνει υψομετρικές διαφορές, αφού η μεγεθυντική του ικανότητα είναι περιορισμένη, β) οι παρεχόμενες πληροφορίες για την ποιότητα της επιφάνειας είναι ποιοτικές και όχι ποσοτικές, γ) κάθε φορά παρατηρείται ένα συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειας, με αποτέλεσμα την ανικανότητα εξαγωγής συμπερασμάτων που αφορούν το σύνολο της επιφάνειας, δ) τέλος η χρήση του ορατού φωτός περιορίζει την διαχωριστική ικανότητα της μεθόδου σε $0.25\mu\text{m}$.

- Το συμβολόμετρο και το συμβολομετρικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιούνται για ανάλυση επιφανειακής τοπογραφίας.

- Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό είδωλο της επιφάνειας, επιτυγχάνει πολύ καλύτερη ανάλυση από το οπτικό μικροσκόπιο. Για την παρατήρηση μιας επικάλυψης χρησιμοποιείται συνήθως η λοξοτομία, με την οποία γίνεται τομή της επιφάνειας υπό γωνία. Μέσω αυτής της διαδικασίας βγαίνουν χρήσιμα συμπεράσματα, όπως η κατανομή της μορφής της επιφάνειας (προφίλομετρία) καθώς και η τραχύτητα της εξεταζόμενης επιφάνειας (τραχυμετρία).

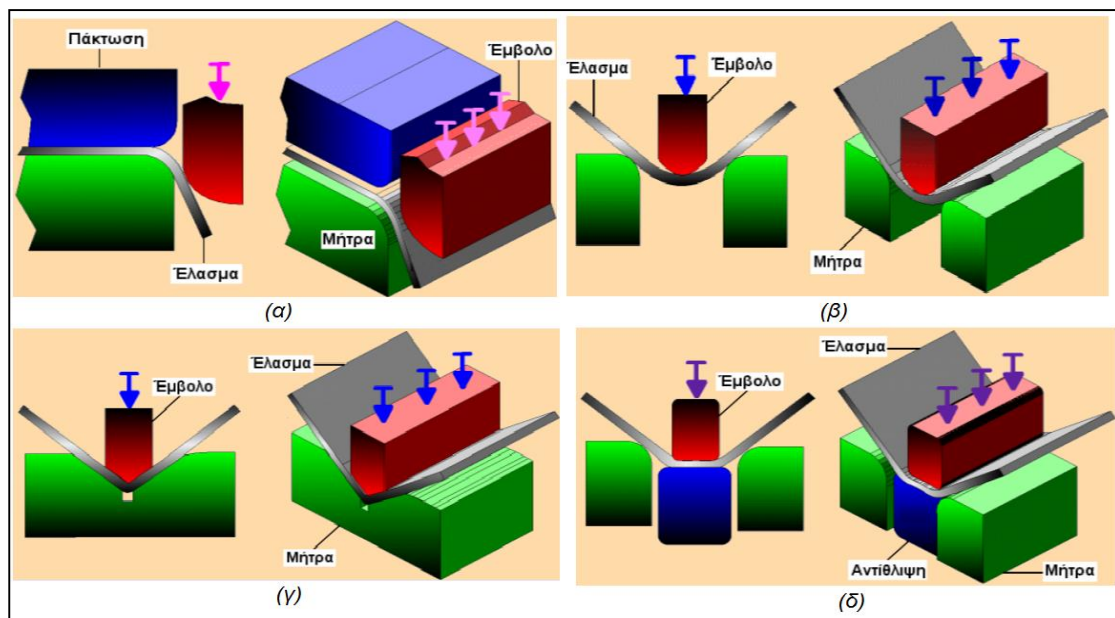
- Παράθλαση ακτίνων-Χ με την οποία η εξεταζόμενη επιφάνεια διαπερνάται από δέσμη ακτίνων-Χ, η οποία φθάνοντας πάνω στην επιφάνεια, παραθλάται.

- Μικροανάλυση ακτίνων-Χ ή δέσμης ηλεκτρονίων, όπου όλη η εξεταζόμενη επιφάνεια διαπερνάται από δέσμη ακτίνων-Χ ή δέσμη ηλεκτρονίων. Ενώ η παράθλαση ακτίνων-Χ δίνει πληροφορίες για την κρυσταλλογραφική δομή του υλικού της επιφάνειας, η μικροανάλυση ακτίνων-Χ παρέχει πληροφορίες για την χημική σύσταση του σημείου όπου προσπίπτει η δέσμη.

Για να μετρηθεί η σκληρότητα της επιφάνειας ενός σώματος χρησιμοποιούνται τα μικροσκληρόμετρα. Για να επιτευχθεί αυτό, επιβάλλονται στη επιφάνεια πολύ μικρά φορτία. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να μετρηθεί η σκληρότητα ενός κόκκου της επιφάνειας, που η διάμετρος του δεν ξεπερνάει τα μερικά δεκάδες μικρόμετρα.

4.5 Κάμψη

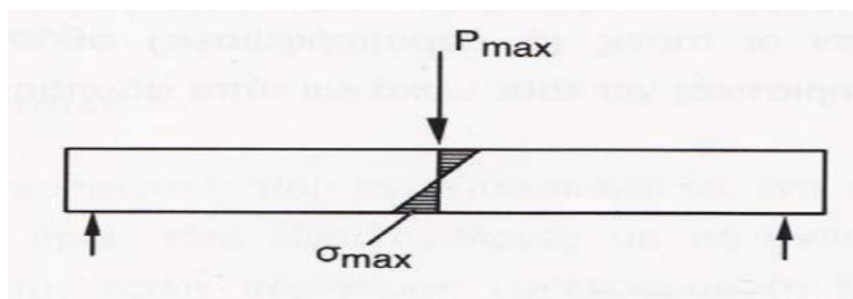
Κάμψη είναι η ομοιόμορφη μόνιμη παραμόρφωση υλικού υπό τη μορφή ελάσματος ή ταινίας, η οποία επιτυγχάνεται με περιστροφή τμήματος αυτού περί ευθύγραμμο άξονα που βρίσκεται στο ουδέτερο επίπεδο της διατομής του και είναι κάθετος σ' αυτή. Τα κυριότερα είδη κάμψης απεικονίζονται στο σχήμα 4.22:



Σχήμα 4.22: α) Κάμψη προβόλου, β) Ελεύθερη κάμψη γ) Κάμψη-V δ) Κάμψη-U

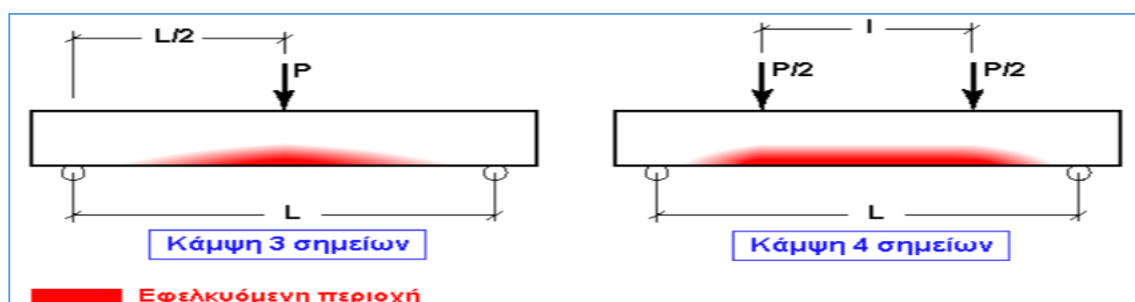
Η μηχανική δοκιμή της καθαρής κάμψης αποτελεί μία εκ των βασικότερων μηχανικών δοκιμών που πραγματοποιούνται σε μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά. Ο επιθετικός προσδιορισμός "καθαρή" δηλώνει την ύπαρξη

αποκλειστικά και μόνο καμπτικών ροπών στην φορτισμένη δοκό, με τελικό αποτέλεσμα την κάμψη της και την ανάπτυξη ορθών μηχανικών τάσεων, οι οποίες δεν οφείλονται σε αξονικά φορτία, αλλά σε καμπτικές ροπές, γι' αυτό και καλούνται καμπτικές τάσεις ή ορθές τάσεις λόγω κάμψης. Η αντοχή σε κάμψη ορίζεται ως η μέγιστη εφελκυστική τάση που υπολογίζεται σε δοκίμιο υπό κάμψη, υποθέτοντας γραμμική κατανομή των τάσεων καθ' ύψος της διατομής, κατά τη στιγμή της θραύσης του δοκιμίου (σχήμα 4.23).



Σχήμα 4.23: Αντοχή σε κάμψη

Εδώ τα φορτία, είτε είναι συγκεντρωμένα είτε συνεχή, περιλαμβάνονται σε ένα μόνον επίπεδο που περιέχει και τον ευθύγραμμο άξονα του σώματος. Η κάμψη σε ένα τμήμα του φορέα χαρακτηρίζεται σαν καθαρή ή γενική αν στο τμήμα αυτό εμφανίζονται αντίστοιχα μόνο καμπτικές ροπές ή καμπτικές ροπές και τέμνουσες δυνάμεις. Χαρακτηριστικό στην κάμψη είναι ότι ο αρχικά ευθύγραμμος άξονας του φορέα παίρνει καμπύλη μορφή με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ταυτόχρονα εφελκυσμός και θλίψη στις κατώτερες και ανώτερες αντίστοιχα ίνες του φορέα. Η μέγιστη βύθιση του φορέα ονομάζεται βέλος κάμψης. Παραδείγματα κάμψης παρατηρούνται στις πλάκες των οικοδομών, στα δοκάρια, στους προβόλους, στα δόντια των οδοντωτών τροχών, στους μοχλούς κλπ. Οι συνηθέστερες δοκιμές κάμψης είναι η δοκιμή κάμψης τριών σημείων (3-point bending test) και η δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων (4-point bending test), οι οποίες απεικονίζονται και στο σχήμα 4.24.



Σχήμα 4.24: Σχηματική αναπαράσταση κάμψης 3 σημείων και κάμψης 4 σημείων

Κατά τη διάρκεια της κάμψης λαμβάνουν χώρα τα εξής φαινόμενα:

- Στη φορτιζόμενη (άνω) περιοχή του δοκιμίου αναπτύσσεται θλιπτική εντατική κατάσταση (βράχυνση μήκους, μέγιστη στην ακρότατη ίνα και βαθμιαία αυξανόμενη προς το εσωτερικό του δοκιμίου).
- Στην αφόρτιστη (κάτω) περιοχή του δοκιμίου αναπτύσσεται εφελκυστική εντατική κατάσταση (επιμήκυνση, μέγιστη στην ακρότατη ίνα και βαθμιαία μειούμενη προς το εσωτερικό του δοκιμίου).
- Στο διαμήκη ουδέτερο άξονα του δοκιμίου (διάμηκες επίπεδο συμμετρίας) δεν παρατηρείται μεταβολή (επιμήκυνση ή βράχυνση) μήκους.
- Η πιο επικίνδυνη περιοχή ως προς την πιθανότητα αστοχίας (θραύση) του υλικού είναι η εφελκυστική περιοχή.

Η κάμψη είναι ευρύτατα δημοφιλής ως μηχανική δοκιμή αφού η γεωμετρία του δοκιμίου είναι η απλούστερη δυνατή και η διάταξη της δοκιμής είναι εύκολα υλοποιήσιμη (ειδικά για κάμψη τριών σημείων).

4.6 Μεταλλογραφία – οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία

Ο μεταλλογραφικός έλεγχος αποτελεί την παρατήρηση σε μικροσκόπιο (οπτικό ή ηλεκτρονικό) και κατ' επέκταση τη μελέτη των ιδιοτήτων της δομής της επικάλυψης. Τα δοκίμια στα οποία διενεργείται, πρέπει να είναι μικρών διαστάσεων και να έχουν υποστεί κατάλληλη προετοιμασία. Αυτή περιλαμβάνει τα εξής διαδοχικά στάδια:

- Κοπή,
- Εγκιβωτισμός,
- Λείανση,
- Στίλβωση και
- Εφαρμογή κατάλληλου αντιδραστηρίου.

Κοπή

Πριν από οποιαδήποτε άλλη διαδικασία για την αποκάλυψη της δομής, κόπτεται το δοκίμιο στο κατάλληλο μέγεθος. Η μικροδομή είναι πολύ ευαίσθητη σε αλλαγή κατά την διαδικασία της κοπής παρά σε κάποιο άλλο βήμα της προετοιμασίας. Η αλλαγή μπορεί να επέλθει από υπερβολική θερμότητα, μηχανική παραμόρφωση ή και τα δύο. Οι λεγόμενες «τεχνητές μικροδομές» που προκύπτουν σ' αυτήν την περίπτωση είναι πιθανόν να μην επιτρέψουν την αποκάλυψη της πραγματικής δομής. Εάν συμβεί κάτι τέτοιο, πρέπει η ζώνη παραμόρφωσης να αφαιρεθεί με μεγάλη προσοχή, με την χρήση λειαντικού τροχού εκχόνδρισης. Η καλύτερη τεχνική κοπής του χάλυβα είναι ο αποξεστικός τροχός. Παρέχει επιφάνειες που είναι λείες, με ελάχιστη παραμόρφωση, και δεν παρουσιάζονται αλλαγές στην δομή από υπερθέρμανση. Τα δοκίμια τέμνονται με τροχούς από αλούμινα (Al_2O_3), με την απαιτούμενη ελαστικότητα του

συνδετικού υλικού. Το δοκίμιο διατηρείται κρύο κατά την διάρκεια της κοπής, με την συνεχή ροή λαδιού, διαλυτού στο νερό.



Εικόνα 4.3: Αποξεστικός τροχός

Επιλέγεται η δύναμη κοπής που θα εφαρμοστεί, καθώς και η σκληρότητα του υλικού κοπής. Προτιμάται τροχός ο οποίος αποσυντίθεται γρήγορα και αποκαλύπτει νέους κοπτικούς κόκκους. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στην δύναμη κοπής, στην αφθονία του ψυκτικού υγρού και στην σταθερή συγκράτηση του δοκιμίου κατά την διάρκεια της κοπής, όλες οι παραπάνω παράμετροι επηρεάζουν την τελική δομή του υλικού που θα παρατηρηθεί στο μικροσκόπιο.

Εγκιβωτισμός

Μετά την κοπή των δοκιμίων στο κατάλληλο μέγεθος ακολουθεί ο εγκιβωτισμός τους. Για τον εγκιβωτισμό του δοκιμίου επιλέγεται ένα υλικό που μπορεί να χυτευθεί, έτσι ώστε να μην επηρεασθεί η επιφάνεια του δοκιμίου από θερμότητα ή πίεση. Συνήθως χρησιμοποιούνται εποξικά υλικά. Το δοκίμιο τοποθετείται μέσα σε ένα ειδικό κυλινδρικό καλούπι, προστίθεται το κατάλληλο μίγμα και μετά από κάποιο χρονικό διάστημα στερεοποιείται η ρητίνη. Εν συνεχεία αφαιρείται το καλούπι από το δοκίμιο το οποίο είναι πλέον έτοιμο για τις περαιτέρω διεργασίες.



Εικόνα 4.4: Χρησιμοποιούμενες διατάξεις και απεικόνιση εγκιβωτισμένων δοκιμίων

Λείανση-Στίλβωση

Η μηχανική κατεργασία της λείανσης αποσκοπεί στην απομάκρυνση υλικού από την επιφάνεια του δείγματος μέχρι την εμφάνιση μιας δομής, είτε ιδανικής, είτε απλά αποδεκτής, για την εξέταση της στο μικροσκόπιο. Η ιδανική λείανση εξαλείφει το κατεστραμμένο ή παραμορφωμένο υλικό της επιφάνειας του δοκιμίου, ενώ εισάγει σε πολύ μικρό βαθμό νέα παραμόρφωση. Η συσκευή λείανσης αποτελείται από μια επίπεδη κυκλική επιφάνεια, η οποία περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα, πάνω στην οποία προσαρτίζεται το κατάλληλο χαρτί λείανσης. Ταυτόχρονα, πέφτει συνεχώς νερό στην περιοχή λείανσης, τόσο για το ξέπλυμα των ρινισμάτων (μετάλλου και ρητίνης), όσο και για την ψύξη των δοκιμίων.

Τα λειαντικά χαρτιά που χρησιμοποιούνται είναι κατασκευασμένα από SiC και φέρουν διαφορετική τραχύτητα, δηλαδή διαφορετικό grit-αριθμό κόκκων/ in². Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται διαδοχικά, μειωμένης της τραχύτητας, τα χαρτιά grit 220, 400, 600, 800, 1000, 2000. Αρχικά, για γρηγορότερα αποτελέσματα, τοποθετείται στη βάση το χονδροκόκκο λειαντικό χαρτί, grit 220. Στο δοκίμιο, καθ' όλη τη διαδικασία λείανσης του, ασκείται σταθερή, ομοιόμορφη πίεση προκειμένου να μην σχηματισθούν καμπύλες ή διαφορετικά επίπεδα στην επιφάνεια του.

Επίσης, κάθε φορά, κατά τη λείανση σε ένα χαρτί, διατηρείται η κατεύθυνση λείανσης σταθερή, για να μην αφαιρεθεί η επικάλυψη. Στη συνέχεια, το λειαντικό χαρτί αντικαθίσταται από το αμέσως μικρότερης τραχύτητας (grit 400) και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία. Θα πρέπει να προσεχθεί, ότι το δοκίμιο πρέπει να στραφεί κατά γωνία 90° σε σχέση με την προηγούμενη θέση του. Αυτό αποσκοπεί στην εξάλειψη των χαράξεων που

έχουν προκύψει από την προηγούμενη λείανση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι και το πιο λεπτόκοκκο χαρτί, προσέχοντας την εναλλαγή της θέσης του δοκιμίου κατά γωνία 90° κάθε φορά και τη διατήρησή αυτής, κατά τη διάρκεια χρήσης κάθε χαρτιού. Θα πρέπει να σημειωθεί πως, όσο μικρότερη είναι η τραχύτητα των λειαντικών χαρτιών, τόσο μικρότερη θα πρέπει να είναι και η δύναμη που συγκρατεί το δοκίμιο στην επιφάνεια του χαρτιού. Μετά το πέρας της διαδικασίας θα πρέπει να επιτευχθεί μια επίπεδη επιφάνεια με τις λιγότερες δυνατές αλλοιώσεις, οι οποίες μπορούν εύκολα να εξαφανιστούν με την επακόλουθη στίλβωση, το συντομότερο δυνατό.



Εικόνα 4.5: Συσκευή για λείανση και στίλβωση

Κατά τη χρήση του τελευταίου λειαντικού χαρτιού (grit 2000), παρά της ιδιαίτερα λεπτόκοκκης μορφής του, έμειναν ίχνη κάποιων χαράξεων. Αυτές οι χαράξεις έχουν την κατεύθυνση κίνησης του δοκιμίου κατά την τελευταία περιστροφή. Επειδή είναι πολύ λεπτές, μπορούν να απομακρυνθούν με τη στίλβωση του δοκιμίου. Η συσκευή στίλβωσης αποτελείται από μια αποσπώμενη, επίπεδη, κυκλική πλάκα που περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα και έχει προσαρμοσμένο πάνω της ειδικό ύφασμα. Η επιφάνεια στίλβωσης τροφοδοτείται κατά τακτά χρονικά διαστήματα, με υγρό στίλβωσης (αντί για αδαμαντόπαστα). Αυτό το υγρό είναι ειδικό για την αφαίρεση των χαράξεων, όπως και η πάστα διαμαντιού. Ταυτόχρονα όμως, υγραίνει και αποτρέπει την θέρμανση του υφάσματος και κατ' επέκταση την υπερθέρμανση και χάραξη του δοκιμίου. Ανάλογα με την εφαρμογή χρησιμοποιείται η πλάκα με το επιθυμητό είδος υφάσματος. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιούνται δύο είδη πλάκας. Αρχικά χρησιμοποιείται πλάκα, που φέρει ύφασμα με ίνες μήκους 6 μm και εν συνεχεία, ύφασμα μήκους ινών 3 μm, προκειμένου να επιτευχθεί στίλβωση μεγαλύτερου βαθμού. Το δοκίμιο που πρόκειται να στίλβωθεί ξεπλένεται με νερό, προκειμένου να απομακρυνθούν τυχόν ρινίσματα. Στην αρχή της διαδικασίας, το δοκίμιο τοποθετείται στην περιφέρεια του δίσκου όπου η ακτίνα (και η ταχύτητα περιστροφής), είναι μεγαλύτερη, οπότε και η στίλβωση γίνεται γρηγορότερα. Σταδιακά, το δοκίμιο τείνει ακτινικά προς το κέντρο του δίσκου, όπου η στίλβωση γίνεται με

βραδύτερο ρυθμό. Κατά τη διάρκεια της στίλβωσης ελέγχεται τακτικά η επιφάνεια του δοκιμίου για τα αποτελέσματά της, καθώς επίσης προστίθεται υγρό στιλβώσεως. Μετά το πέρας της διαδικασίας, το δοκίμιο ξεπλένεται με οινόπνευμα για την απομάκρυνση του υγρού στιλβώσεως. Κατόπιν, ξεπλένεται με άφθονο νερό και ακολουθεί στέγνωμα με χρήση αέρα. Ακολουθεί προσβολή του δοκιμίου με κατάλληλο αντιδραστήριο (Nital), προκειμένου να γίνει περισσότερο ευδιάκριτη η διαφορά υποστρώματος και επιστρώματος, κατά την παρατήρηση του δοκιμίου στο μικροσκόπιο.

Εφαρμογή κατάλληλου αντιδραστηρίου.

Η χημική προσβολή χρησιμοποιείται στην μεταλλογραφία, για την αποκάλυψη της μικροδομής ενός δοκιμίου και την παρατήρηση του στο οπτικό μικροσκόπιο. Το δοκίμιο, για να είναι κατάλληλο για χημική προσβολή, πρέπει να έχει μια προσεκτικά γυαλισμένη επίπεδη επιφάνεια, από υλικό ελεύθερο από τις αλλαγές που μπορεί να προκλήθηκαν από επιφανειακή παραμόρφωση, από ροή των υλικών ή από γρατσουινές. Παρ' ότι μερικές πληροφορίες μπορούν να συλλεχθούν από το γυαλισμένο δοκίμιο, η μικροδομή συνήθως αποκαλύπτεται (γίνεται ορατή) μόνο μετά από χημική προσβολή. Μόνο χαρακτηριστικά, τα οποία παρουσιάζουν διαφορά στην αντανάκλαση τους 10% ή περισσότερο, είναι δυνατόν, να είναι ορατά χωρίς χημική προσβολή. Αυτό ισχύει για μικροδομικά χαρακτηριστικά με μεγάλες χρωματικές διαφορές ή μεγάλες διαφορές στην σκληρότητα, οι οποίες προκαλούν τον σχηματισμό ανάγλυφης επιφάνειας. Ρωγμές, πόροι, οπές και μη μεταλλικά εγκλείσματα μπορούν επίσης να παρατηρηθούν χωρίς χημική προσβολή. Ένα δοκίμιο, το οποίο είναι μόνο γυαλισμένο συχνά, δεν αποκαλύπτει την μικροδομή του, διότι το φως αντανάκλαται προς όλες τις κατευθύνσεις ομοιόμορφα. Το ανθρώπινο μάτι δεν μπορεί να ξεχωρίσει πολύ μικρές διαφορές στην αντανάκλαση, οπότε πρέπει να δημιουργηθεί στην εικόνα αντίθεση (contrast). Παρ' ότι αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως χημική προσβολή (etching), δεν αναφέρεται πάντα στην επιλεκτική χημική διαλυτοποίηση, των διαφόρων δομικών χαρακτηριστικών. Οι μεταλλογραφικές μέθοδοι αντίθεσης συμπεριλαμβάνουν ηλεκτροχημικές και χημικές τεχνικές προσβολής.

Η προσβολή είναι κατά κύριο λόγο μια ελεγχόμενη διαδικασία διάβρωσης η οποία είναι αποτέλεσμα της ηλεκτρολυτικής αντίδρασης ανάμεσα σε επιφάνειες του δοκιμίου με διαφορετικό δυναμικό. Τα διαλύματα που χρησιμοποιούνται για την χημική προσβολή έχουν αναπτυχθεί κυρίως με την μέθοδο της δοκιμής και του λάθους, με κάποια βοήθεια από την γνώση της συμπεριφοράς του υλικού κατά την διάρκεια της διάβρωσης. Η προσβολή συμβαίνει με ηλεκτρολυτική δράση σε δομικές διαφοροποιήσεις στην επιφάνεια του δοκιμίου. Η ηλεκτρολυτική δράση προέρχεται από τοπικές φυσικές ή χημικές ετερογένειες, οι οποίες καθιστούν κάποια χαρακτηριστικά ανοδικά και άλλα καθοδικά κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες προσβολής. Τα χημικά διαλύματα προσβολής παράγουν μεταλλογραφική αντίθεση είτε μέσω τις

κρυσταλλικές έδρες (δηλαδή τα όρια προσβάλλονται με μεγαλύτερη ταχύτητα λόγω των διαφοροποιήσεων στον κρυσταλλογραφικό τους προσανατολισμό), η οποία παράγει βαθμίδες στα όρια των κόκκων και διαφορές αντανakλαστικότητας είτε με την προσβολή ορίων κόκκων ή ορίων φάσεων, η οποία προκαλεί αυλακώσεις. Η επιλεκτική διαλυτοποίηση φάσεων είναι πιο δύσκολο να επιτευχθεί, καθώς απαιτεί μια επιλεκτική χημική αντίδραση.

Τα καθιερωμένα χημικά προσβολής έχουν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά. Τα διαλύματα αυτά έχουν συνήθως τρία κύρια συστατικά: ένα διαβρωτικό μέσο (όπως υδροχλωρικό οξύ), μετατροπέα (όπως το οινόπνευμα) που μειώνει τον ιονισμό και ένα οξειδωτικό μέσο (όπως το υπεροξειδίο του υδρογόνου). Σε ορισμένα διαλύματα το ένα συστατικό έχει ταυτόχρονα δύο από τις παραπάνω λειτουργίες, όπως το νιτρικό οξύ στο Nital.

Στα ηλεκτρολυτικά διαλύματα προσβολής, το ασκούμενο ρεύμα παίζει τον ρόλο του οξειδωτικού μέσου. Η χρήση του οξειδωτικού μέσου στα διαλύματα πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά και καθώς το διαλυμένο οξυγόνο στο νερό της βρύσης, αυξάνει τον ρυθμό διαλυτοποίησης, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται στην Παρασκευή των διαλυμάτων αποσταγμένο νερό. Με τα καθαρά μέταλλα και τα μονοφασικά κράματα, διαφορά δυναμικού παράγεται ανάμεσα στους κόκκους που έχουν διαφορετικό προσανατολισμό, ανάμεσα στα όρια των κόκκων και το εσωτερικό τους, ανάμεσα στις ακαθαρσίες και την μητρική φάση ή ανάμεσα σε βαθμίδες συγκέντρωσης στα μονοφασικά κράματα.

Στην περίπτωση των δι-φασικών ή πολύ-φασικών κραμάτων, οι διαφορές δυναμικού παρουσιάζονται επίσης ανάμεσα σε φάσεις με διαφορετική σύσταση. Αυτές οι διαφορές δυναμικού χρησιμοποιούνται για να παράγουν ελεγχόμενη διαλυτοποίηση. Η μικροδομή αποκαλύπτεται με την επιλεκτική διαλυτοποίηση της δομής, ξεκινώντας από την επιφάνεια και συνεχίζοντας προς το εσωτερικό. Οι διαφορές στον ρυθμό προσβολής αποκαλύπτουν την δομή. Κατά την διάρκεια της προσβολής, προσβάλλεται η περισσότερο ηλεκτροθετική ανοδική φάση, ενώ η ηλεκτροαρνητική δεν προσβάλλεται σχεδόν καθόλου. Καθώς η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο φάσεις μεγαλώνει, ο χρόνος προσβολής πρέπει να ελεγχθεί προσεκτικά, για να μην υπάρξουν φαινόμενα υπερβολικής διάβρωσης (overetching).

Εξαιτίας του μεγέθους του δυναμικού, ανάμεσα σε διαφορετικές φάσεις, τα διπλά κράματα συνήθως προσβάλλονται πιο γρήγορα απ' ό,τι τα καθαρά μέταλλα και τα μονοφασικά κράματα. Η απρόσβλητη καθοδική φάση είναι υπερυψωμένη και φαίνεται φωτεινή, ειδικά αν έχει σχετικά μεγάλο μέγεθος. Η ανοδική φάση έχει υποχωρήσει κάτω από το αρχικό επίπεδο της γυαλισμένης επιφάνειας και φαίνεται να έχει τραχιά επιφάνεια ανάλογα με το διάλυμα και την σύσταση του κράματος. Η επιφανειακή τραχύτητα θα παρουσιάζει το ανοδικό συστατικό σκοτεινό. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στον χρόνο προσβολής. Καθώς μεγαλώνει η μεγέθυνση στο μικροσκόπιο ο βαθμός προσβολής πρέπει να μειωθεί. Η προσβολή των μονοφασικών καθαρών μετάλλων και κραμάτων συμβαίνει χωρίς την βοήθεια των μεγάλων διαφορών δυναμικού που υπάρχουν

στα διφασικά κράματα. Οι διαφορές δυναμικού ανάμεσα στα όρια των κόκκων και στο εσωτερικό τους είναι μικρότερες και ασκούν λιγότερη επιρροή στην προσβολή. Οι ακαθαρσίες οι οποίες επικάθονται στα όρια των κόκκων μπορούν να βελτιώσουν αισθητά την απόδοση της προσβολής. Στα μονοφασικά κράματα και τα καθαρά μέταλλα ένα διάλυμα μπορεί να προσβάλλει τα όρια των κόκκων ή επιλεκτικά να διαλύσει διαφορετικά προσανατολισμένους κόκκους, το οποίο παράγει προσβολή αντίθεσης κόκκων. Το φως που πέφτει κάθετα στα επίπεδα των κόκκων θα αντανakλαστεί με διαφορετικές γωνίες, παράγοντας αντίθεση γκρι επιπέδων στους διαφορετικά προσανατολισμένους κόκκους. Οπότε, όταν προσβάλλονται μονοφασικά κράματα, ορισμένοι κόκκοι φαίνονται ανοιχτόχρωμοι και φωτεινοί ενώ άλλοι είναι πιο σκουρόχρωμοι με διαφορετικές αποχρώσεις του γκριζου. Το φαινόμενο αυτό εξαρτάται από την γωνία που σχηματίζει ο κάθε κόκκος με το προσπίπτων φως. Οι κόκκοι που είναι κάθετοι στο προσπίπτων φως παρουσιάζονται φωτεινοί, ενώ αυτοί που σχηματίζουν γωνία σκοτεινοί. Η σκοτεινότητα των κόκκων εξαρτάται από την γωνία των εδρών τους. Πολλά διαλύματα είναι μίγματα οξέων με κάποιον διαλύτη όπως το νερό.

Γενικά, η σύσταση των διαλυμάτων προσβολής δεν είναι κρίσιμη. Αλλά η αποτελεσματικότητα του διαλύματος μπορεί να επηρεασθεί από την σειρά ανάμειξης των χημικών, την καθαρότητά τους ή τυχόν αλλαγές λόγω 'γήρανσής' τους. Η χημική προσβολή των δοκιμίων είναι μία απλή διαδικασία. Τα αποτελέσματα της χρήσης απλών, γνωστών διαλυμάτων σε συνηθισμένα μέταλλα είναι συνήθως προβλέψιμα και μπορούν να αναπαραχθούν, έστω και με μικρές αλλαγές στην σύσταση, τον χρόνο ή την θερμοκρασία. Όταν κάποιο ασυνήθιστο κράμα ή μέταλλο πρόκειται να υποστεί προσβολή, πρέπει πρώτα να επιλεγεί το κατάλληλο αντιδραστήριο. Στη βιβλιογραφία είναι διαθέσιμη μεγάλη ποικιλία αντιδραστηρίων συμπεριλαμβανομένου οξέων, βάσεων, μιγμάτων διαλυμάτων, λιωμένα άλατα και αέρια. Οι περισσότερες φόρμουλες έχουν προκύψει εμπειρικά. Επειδή η σύσταση και ο τρόπος χρήσης τους μπορεί να τροποποιηθεί πολύ εύκολα, είναι χρήσιμα και για υλικά άλλα εκτός από αυτά για τα οποία προτείνονται. Ο ρυθμός προσβολής καθορίζεται κυρίως από τον βαθμό διαχωρισμού του αντιδραστηρίου και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Και τα δύο συχνά επηρεάζονται από μικρές προσθήκες από άλλα χημικά. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί γιατί πολλές φόρμουλες περιέχουν μικρές ποσότητες από ουσίες των οποίων η σημασία δεν γίνεται αμέσως εμφανής. Η σταθερότητα πολλών διαλυμάτων προσβολής είναι περιορισμένη. Τα δυναμικά οξειδωσης – αναγωγής ποικίλουν με τον χρόνο. Τα χημικά αντιδραστήρια συνήθως αναμειγνύονται σε μικρές ποσότητες, γενικά 50 - 200mL και τοποθετούνται σε ρηχά δοχεία. Συνήθως εμβαπτίζεται το δοκίμιο μέσα στο διάλυμα. Το δοκίμιο συγκρατείται πάντοτε με λαβίδες, ποτέ με τα χέρια, και ανακινείται ελαφρά, έτσι ώστε τα προϊόντα της αντίδρασης να μην επικαθίσουν πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου. Οι χρόνοι προσβολής ποικίλουν από μερικά δευτερόλεπτα έως μερικές ώρες. Όταν δεν δίνονται οδηγίες, η πρόοδος κρίνεται από την εμφάνιση της επιφάνειας κατά την διάρκεια της προσβολής. Η

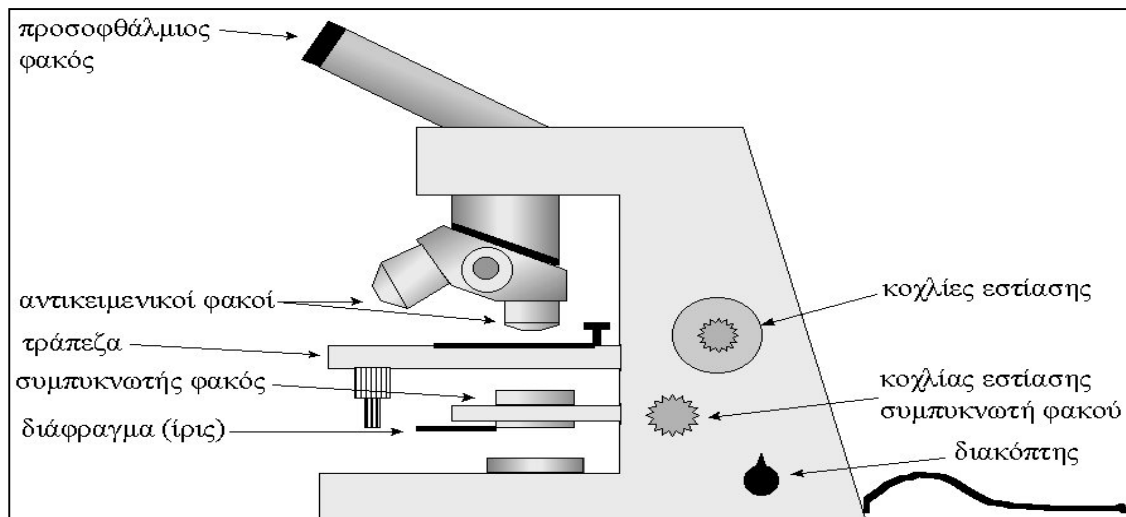
επιφάνεια θα γίνει, συνήθως, λιγότερο αντανakλαστική (πιο θολή) καθώς η προσβολή προχωράει. Η θερμοκρασία προσβολής και ο χρόνος προσβολής είναι πολύ στενά συνδεδεμένα. Η αύξηση της θερμοκρασίας συνήθως επιτρέπει μείωση της διάρκειας. Ωστόσο, αυτό μπορεί να μην είναι συνετό, επειδή η αντίθεση μπορεί να μη είναι ομαλή όταν ο ρυθμός προσβολής γίνεται πολύ γρήγορος. Τις περισσότερες φορές η προσβολή γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Οι πηγές σφαλμάτων είναι πολλές, ειδικά στην ηλεκτροχημική προσβολή. Τα σφάλματα στην προσβολή μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένη ερμηνεία της μικροδομής. Για παράδειγμα, ιζήματα από τα διαλύματα προσβολής και πλυσίματος μπορεί να μεταφραστούν ως μια επιπλέον φάση. Με το τέλος της χημικής ή ηλεκτροχημικής προσβολής, το δοκίμιο πρέπει να ξεπλένεται σε καθαρό νερό έτσι ώστε να απομακρυνθούν τα χημικά και να σταματήσει η αντίδραση. Στη συνέχεια ξεπλένεται με οινόπνευμα και στεγνώνεται σε ρεύμα θερμού αέρα. Το οινόπνευμα επιταχύνει το στέγνωμα και εμποδίζει την δημιουργία λεκέδων από το νερό.

Όταν τα γυαλισμένα και χημικά προσβεβλημένα δοκίμια πρόκειται να διατηρηθούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα, πρέπει να προστατευθούν από την ατμοσφαιρική διάβρωση. Οι συσκευές αποξήρανσης είναι ο πιο προσιτός τρόπος αποθήκευσης των δοκιμίων, παρότι μερικές φορές χρησιμοποιούνται πλαστική επίστρωση ή ταινία σελοφάν.

4.6.1 Οπτική Μικροσκοπία

Το οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο αποτελεί πιο σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη της μεταλλογραφίας. Ενώ, το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης (TEM) και το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) ξεπερνούν δύο από τους σημαντικότερους περιορισμούς του οπτικού μικροσκοπίου-την ανάλυση και το βάθος του πεδίου-δεν έχουν καταφέρει να μειώσουν την σημασία του. Όντως, οι περιορισμοί των μικροσκοπίων TEM και SEM αποτελούν τα ισχυρά σημεία του οπτικού μικροσκοπίου και αντίστροφα, έτσι ώστε οι τεχνικές οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας να είναι συμπληρωματικές και όχι ανταγωνιστικές. Σε κάθε μελέτη υλικών, η πιο σωστή διαδικασία είναι η αρχή της εξέτασης να γίνει πρώτα σε μακροσκοπικό επίπεδο, πριν προχωρήσει σε μικροσκοπικές λεπτομέρειες. Η απλή οπτική εξέταση, ίσως μακροσκοπικής προσβολής, πρέπει να προηγείται της μεγέθυνσης. Όλες οι παρατηρήσεις στο μικροσκόπιο πρέπει να ξεκινάνε με μια μικρή μεγέθυνση όπως αυτή των 100X, η οποία θα ακολουθηθεί σταδιακά από μεγαλύτερες μεγεθύνσεις, έτσι ώστε να εκτιμηθούν ικανοποιητικά τα βασικά χαρακτηριστικά της μικροδομής. Με αυτόν τον τρόπο, τα συνήθη ή μη χαρακτηριστικά της δομής μπορούν να διακριθούν και να αναγνωρισθεί η σπουδαιότητά τους.

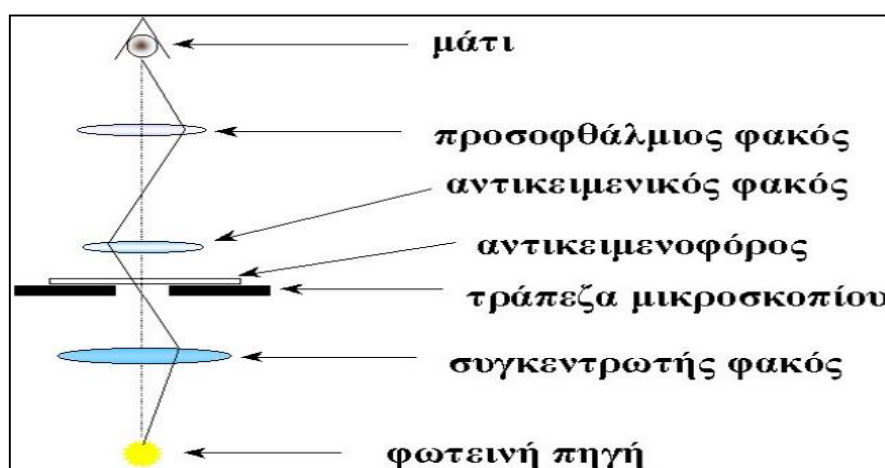


Σχήμα 4.25: Διάταξη οπτικού μικροσκοπίου

Η οπτική μικροσκοπία έχει άπειρες εφαρμογές. Η πιο σημαντική εφαρμογή της είναι ο καθορισμός των δομικών φάσεων και η σύσταση της κύριας μάζας του μετάλλου. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι τόσο μεγάλης σπουδαιότητας, επειδή η δομή και η σύσταση του υλικού, έχει πολύ μεγάλη επίδραση στις ιδιότητες και την συμπεριφορά του. Στην μελέτη με το οπτικό μικροσκόπιο, η επιφάνεια ενός κατάλληλα προετοιμασμένου δοκιμίου εξετάζεται είτε προσβολή, είτε μετά από προσβολή ή και στις δύο καταστάσεις. Συγκεκριμένα συστατικά μπορούν να παρατηρηθούν πιο εύκολα αν είναι απλώς γυαλισμένη η επιφάνεια, επειδή δεν σκιαγραφούνται με την χημική προσβολή. Εγκλείσματα, νιτρίδια, ορισμένα καρβίδια και ενδομεταλλικές φάσεις μπορούν να παρατηρηθούν και χωρίς χημική προσβολή. Εκτός από τα εγκλείσματα, οι υπόλοιπες φάσεις μπορούν να εξεταστούν με μεγαλύτερη ευκολία αν κατά την διάρκεια το τελικού σταδίου γυαλίσματος επέλθει κάποιος βαθμός αποκατάστασης της επιφάνειας του δοκιμίου. Το δοκίμιο πρέπει να είναι σωστά προετοιμασμένο, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σωστή παρατήρηση και μετάφραση της μικροδομής, χωρίς επιπλοκές από σφάλματα (artifacts). Τα δοκίμια τα οποία αντιδρούν στο πολωμένο φως, όπως τα υλικά με μη-κυβικές δομές, γενικά εξετάζονται χωρίς χημική προσβολή. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις η χημική προσβολή πρέπει γίνει, για είναι δυνατή η παρατήρηση της μικροδομής. Αρχικά χρησιμοποιείται ένα διάλυμα προσβολής γενικής χρήσης, για την αποκάλυψη των ορίων των κόκκων και των φάσεων που υπάρχουν και στην συνέχεια ακολουθεί επιλεκτική προσβολή των φάσεων που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Υπάρχουν αμέτρητες μικροσκοπικές τεχνικές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρατήρηση της μικροδομής των υλικών, και αυτές οι τεχνικές παράγουν εικόνες οι οποίες έχουν την ανάλυση και την αντίθεση που είναι απαραίτητη για την παρατήρηση των μικροσκοπικών δομικών λεπτομερειών.

Τα οπτικά μικροσκόπια διαφέρουν πολύ σε κόστος και ικανότητες. Για την μελέτη των μετάλλων χρησιμοποιείται ανακλώμενο φως. Τα οπτικά μικροσκόπια ταξινομούνται σε 'όρθια' και 'ανεστραμμένα', αυτοί οι όροι αναφέρονται στον προσανατολισμό του γυαλισμένου επιπέδου του δοκιμίου κατά την διάρκεια της παρατήρησης.

- Το σύστημα φωτισμού: Μια ποικιλία από πηγές φωτός είναι διαθέσιμες για το οπτικό μικροσκόπιο. Οι χαμηλής τάσης λάμπες βολφραμίου, είναι συνήθως αρκετά καλές για παρατήρηση αλλά δεν παρέχουν αρκετή ένταση για την φωτογράφιση. Οι λυχνίες βολταϊκού τόξου ξένου, προτιμώνται λόγω της μεγάλης τους έντασης και την ομοιότητα με το φως της ημέρας. Επίσης πολύ συχνή είναι η χρήση λαμπτήρων νήματος πυρακτώσεως βολφραμίου- αλογόνου.



Σχήμα 4.26: Εξαρτήματα οπτικού μικροσκοπίου

- Ο συγκεντρωτικός φακός: Ένας ρυθμιζόμενος φακός ελεύθερος από σφαιρική παρέκκλιση και κόμη, τοποθετείται μπροστά από την φωτεινή πηγή για να εστιάσει το φως στο επιθυμητό σημείο, στην οπτική διαδρομή. Ένα διάφραγμα πεδίου τοποθετείται μπροστά από αυτόν τον φακό για να μειώσει την εσωτερική ακτινοβολία και τις αντανάκλασεις μέσα στο μικροσκόπιο. Ένα δεύτερο ρυθμιζόμενο διάφραγμα κάμερας, το διάφραγμα οπής, τοποθετείται στην διαδρομή του φωτός πριν από τον κάθετο φωτιστή. Το άνοιγμα ή το κλείσιμο αυτό του διαφράγματος αλλάζει την ποσότητα του φωτός και την γωνία του κώνου φωτός που εισέρχεται στον αντικειμενικό φακό. Η βέλτιστη ρύθμιση για αυτήν την οπή ποικίλει ανάλογα με τον αντικειμενικό φακό και είναι ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην αντίθεση της εικόνας, την ακρίβεια και το βάθος του πεδίου. Καθώς η μεγέθυνση μεγαλώνει, το διάφραγμα της οπής μειώνεται. Το άνοιγμα αυξάνει την οξύτητα της εικόνας, αλλά μειώνει την αντίθεση. Το κλείσιμο της οπής λειτουργεί αντίστροφα.

- Τα φίλτρα φωτός χρησιμοποιούνται για να τροποποιήσουν το φως, για πιο εύκολη παρατήρηση, καλύτερη ποιότητα στις φωτογραφίες ή για την αλλαγή της αντίθεσης.

- Ο αντικειμενικός φακός σχηματίζει την πρωταρχική εικόνα της μικροδομής και είναι το πιο σημαντικό εξάρτημα του οπτικού μικροσκοπίου. Ο αντικειμενικός φακός συλλέγει όσον το δυνατόν περισσότερο φως από το δοκίμιο και συνδυάζει αυτό το φως για να παράγει την εικόνα. Το αριθμητικό άνοιγμα του αντικειμενικού φακού (NA), ένα μέτρο της ικανότητας του φακού να συγκεντρώνει φως, ορίζεται ως: $NA = n \sin \alpha$: όπου n ο μικρότερος δείκτης διάθλασης του υλικού (αέρας ή λάδι) ανάμεσα στο δοκίμιο και τον φακό, και α είναι η μισή γωνία των περισσότερο πλάγιων ακτινών φωτός οι οποίες εισέρχονται στο μπροστινό φακό του αντικειμενικού. Η ικανότητα συλλογής φωτός αυξάνεται με το α . Οι αντικειμενικοί φακοί συνήθως τοποθετούνται σε μία περιστρεπτή πλάκα, η οποία μπορεί να συγκρατήσει τέσσερις με έξη αντικειμενικούς φακούς.

- Ο προσοφθάλμιος φακός, μεγεθύνει την πρωταρχική εικόνα που παράγεται από τον αντικειμενικό φακό. Το μάτι μπορεί να χρησιμοποιήσει την πλήρη ανάλυση του αντικειμενικού φακού. Το μικροσκόπιο παράγει ένα κατ'έμφαση είδωλο του δοκιμίου, στο σημείο της πιο ευκρινής όρασης, γενικά 250 mm από το μάτι. Ο προσοφθάλμιος μεγεθύνει αυτή την εικόνα, επιτρέποντας την επίτευξη χρήσιμων μεγεθύνσεων. Ο τυπικός προσοφθάλμιος έχει πεδίο όρασης διαμέτρου 24 mm. Απλά προβλήματα όρασης όπως η μυωπία μπορούν να εξομαλυνθούν με την χρήση της ρύθμισης λεπτής εστίασης. Προβλήματα όρασης όπως ο αστιγματισμός δεν μπορούν να διορθωθούν από το μικροσκόπιο και είναι απαραίτητη η χρήση γυαλιών. Οι προσοφθάλμιοι είναι συνήθως εξοπλισμένοι με διάφορα πλέγματα, τετραγωνίδια για την εύρεση, την μέτρηση, αρίθμηση ή σύγκριση των μικροδομών. Ο προσοφθάλμιος μεγαλώνει το πλέγμα και την πρωταρχική εικόνα. Και οι δύο εικόνες πρέπει να εστιαστούν ταυτόχρονα. Συνήθως χρησιμοποιείται ένας προσοφθάλμιος μεγέθυνσης 10 X. Η συνολική μεγέθυνση βρίσκεται με τον πολλαπλασιασμό της μεγέθυνσης του αντικειμενικού φακού, M_0 , με την μεγέθυνση του προσοφθάλμιου, M_e . Εάν χρησιμοποιείται επίσης σύστημα μεταβλητού εστιακού μήκους (zoom system), η μεγέθυνση πρέπει να μεταβληθεί ανάλογα.

- Η αντικειμενοφόρος πλάκα. Μια μηχανική πλάκα παρέχεται για την εστίαση και την μετατόπιση του δοκιμίου, το οποίο τοποθετείται πάνω στην πλάκα και στερεώνεται με κλιπ. Η γυαλισμένη επιφάνεια τοποθετείται κάτω από την οπή για την παρατήρηση. Ωστόσο, δεν είναι δυνατόν να παρατηρηθεί το σύνολο της επιφάνειας και σε υψηλές μεγεθύνσεις είναι δυνατόν να μην μπορεί να γίνει καλή εστίαση, λόγω της απόστασης λειτουργίας. Το δοκίμιο τοποθετείται πάνω σε ολισθητήριο πάνω στην πλάκα. Επειδή η γυαλισμένη επιφάνεια πρέπει να είναι κάθετη στην ακτίνα φωτός, χρησιμοποιείται πηλός ανάμεσα στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου και το ολισθητήριο. Ένα κομμάτι από τσιγαρόχαρτο τοποθετείται πάνω από την γυαλισμένη επιφάνεια και το

δοκίμιο πιέζεται πάνω στον πηλό (πλαστελίνη). Η πλάκα πρέπει να είναι αρκετά σταθερή και χωρίς δονήσεις. Η κίνησή της ελέγχεται από x - και y - micrometers πρέπει να είναι απαλή και ακριβής. Πολλές πλάκες έχουν κλίμακες μέτρησης των αποστάσεων x - και y -. Επίσης υπάρχουν πλάκες που επιτρέπουν και την κυκλική κίνηση.

Πολλές ατέλειες των φακών είναι αποτελέσματα των νόμων της αντανάκλασης και της διάθλασης. Ο δείκτης διάθλασης ενός φακού ποικίλει με το μήκος κύματος του φωτός, και το μήκος εστίασης με τον δείκτη διάθλασης. Οπότε το μήκος εστίασης αλλάζει για διαφορετικά χρώματα φωτός. Μια διαφορετική εικόνα για κάθε μήκος κύματος εστιάζεται σε διαφορετικές αποστάσεις από τον φακό. Αυτή είναι η κατά μήκος χρωματική παρέκκλιση Επιπλέον, η μεγέθυνση ποικίλει με το μήκος εστίασης, μεταβάλλοντας έτσι το μέγεθος της εικόνας. Αυτή είναι η παράπλευρη χρωματική παρέκκλιση. Αυτές οι διαφορές πρέπει να εξαιρεθούν για την παραγωγή έγχρωμων φωτογραφιών. Επειδή η επίπεδη επιφάνεια της βέλτιστης εστίασης είναι καμπύλη, χρησιμοποιούνται προσοφθαλμιοί με ίση αλλά αντίθετη καμπυλότητα για την παραγωγή μιας επίπεδης εικόνας.

Για να γίνουν ορατές οι μικροδομικές λεπτομέρειες, το οπτικό σύστημα πρέπει να παρέχει αρκετά καλή ανάλυση, αναλυτική ισχύ και καλή αντίθεση εικόνας. Εάν η ανάλυση είναι αποδεκτή αλλά υπάρχει έλλειψη αντίθεσης δεν θα είναι δυνατή η παρατήρηση των λεπτομερειών. Γενικά, η ικανότητα ανάλυσης δύο σημείων ή γραμμών οι οποίες διαχωρίζονται από μία απόσταση d είναι συνάρτηση του μήκους κύματος, λ , του προσπίπτοντος φωτός και του αριθμητικού ανοίγματος, NA, του αντικειμενικού φακού. $d = \lambda/NA$ όπου το k είναι 0.5 ή 0.61. Η υπόψη εξίσωση δεν περιέχει άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την ανάλυση όπως ο βαθμός διόρθωσης των αντικειμενικών φακών και η οπτική οξύτητα του μικροσκοπίου. Βασίστηκε στην εργασία του Abbe κάτω από συνθήκες οι οποίες δεν υπάρχουν στην μεταλλογραφία, όπως αυτοφωτιζόμενα σημεία, τέλεια ασπρόμαυρη αντίθεση, εξέταση διερχόμενης δέσμης φωτός, μια ιδανική σημειακή φωτεινή πηγή και απουσία ατελειών των φακών. Για φως μήκους κύματος περίπου 0.55 μm , η απαιτούμενη μεγέθυνση είναι 1100 το NA του αντικειμενικού. Αυτή είναι η αρχή του κανόνα 1000NA για την μέγιστη χρήσιμη μεγέθυνση. Οποιαδήποτε μεγέθυνση μεγαλύτερη από 1000Na θεωρείται άχρηστη.

Βάθος πεδίου είναι η απόσταση κατά μήκος του οπτικού άξονα πάνω από την οποία οι λεπτομέρειες της εικόνας παρατηρούνται με αρκετή καθαρότητα. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάλυση επηρεάζουν και το βάθος του πεδίου, αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση. Οπότε πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός ανάμεσα σ' αυτές τις δύο παραμέτρους, ο οποίος γίνεται όλο και πιο δύσκολος καθώς η μεγέθυνση μεγαλώνει. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο είναι προτιμότερη μια πολύ μικρή προσβολή για την παρατήρηση σε πολύ μεγάλες μεγεθύνσεις. Το βάθος πεδίου, T_f , μπορεί να εκτιμηθεί από: T_f

$= \frac{\lambda \sqrt{n^2 - NA^2}}{NA^2}$, όπου n είναι ο δείκτης διάθλασης του μέσου ανάμεσα στο δοκίμιο και τον αντικειμενικό ($n \sim 1.0$ για τον αέρα), το λ είναι το μήκος κύματος του φωτός και το NA είναι το αριθμητικό άνοιγμα.

4.6.2 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία

Η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM) είναι μία από τις σύγχρονες και ευέλικτες μεθόδους ανάλυσης της μικροδομής μεγάλου αριθμού υλικών.

Σε αντίθεση με το οπτικό μικροσκόπιο, το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) παρουσιάζει διακριτική ικανότητα σε μεγαλύτερες μεγενθύνσεις, μεγαλύτερο βάθος πεδίου και δυνατότητα μικροανάλυσης ακτίνων-χ.

Πίνακας 4.5: Συγκριτικές δυνατότητες του οπτικού μικροσκοπίου με το SEM και το TEM.

Τύπος Μικροσκοπίου	Διακριτική Ικανότητα	Μέγιστη χρήσιμη μεγένθυση
Οπτικό	0.2 μm (200 nm)	1,000X
SEM	100 \AA (10 nm)	20,000 X
TEM	10 \AA (1 nm)	200,000 X

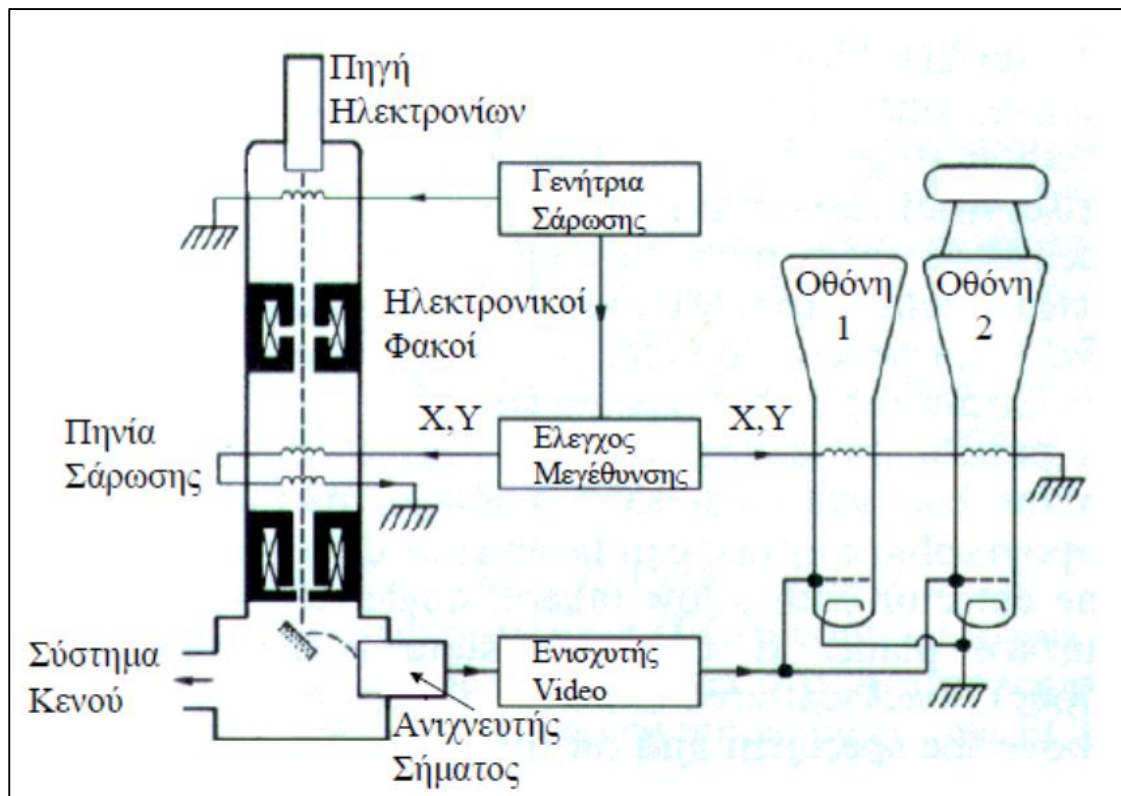
Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα όργανο που λειτουργεί όπως περίπου και ένα οπτικό μικροσκόπιο μόνο που χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας αντί για φως, για να εξετάσει αντικείμενα σε λεπτομερή κλίμακα. Τα ηλεκτρόνια λόγω της κυματικής τους φύσης μπορούν να εστιαστούν όπως και τα φωτεινά κύματα αλλά σε πολύ μικρότερη επιφάνεια (π.χ. κόκκος υλικού). Η δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος με το οποίο αλληλεπιδρά. Από την αλληλεπίδραση αυτή προκύπτουν πληροφορίες σε σχέση με τα άτομα των στοιχείων που απαρτίζουν το εξεταζόμενο υλικό. Από τα άτομα των στοιχείων εκπέμπονται κυρίως δευτερογενή (secondary) και οπισθοσκεδαζόμενα (backscattered) ηλεκτρόνια καθώς και ακτίνες Χ. Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Έτσι το SEM δίνει πληροφορίες που αφορούν κυρίως στη μορφολογία και στη σύσταση της επιφανείας. Εφαρμόζοντας ένα σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτίνων Χ που δημιουργούνται στην επιφάνεια από την προσπίπτουσα δέσμη, μπορεί να γίνει ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση του υλικού. Επομένως το SEM χρησιμοποιείται για την εξέταση μικροδομής στερεών δειγμάτων και για να δίνει εικόνες υψηλού βαθμού διεύθυνσης.

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης χρησιμοποιεί μία λεπτή δέσμη ηλεκτρονίων (ενέργειας από 0 έως 50 keV), η οποία, αφού περάσει από μία ακολουθία δύο ή τριών φακών εστίασης, οι οποίοι είναι συνδυασμένοι με κατάλληλα διαφράγματα, καταλήγει να έχει διάμετρο 2 - 10 nm. Η λεπτή αυτή δέσμη κατευθύνεται, με τη βοήθεια ενός πηνίου οδήγησης, έτσι ώστε να σαρώνει με περιοδικό τρόπο την προς μελέτη επιφάνεια του δείγματος. Η

προσπίπτουσα δέσμη προκαλεί την εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων (SE = Secondary Electrons), με ενέργειες 2 έως 5 eV, και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BSE = Back-Scattered Electrons), με ενέργειες που κυμαίνονται από την ενέργεια των ηλεκτρονίων της δέσμης μέχρι περίπου 50 eV. Εκπέμπονται επίσης ηλεκτρόνια που έχουν υποστεί ελαστική σκέδαση ή χαμηλή απώλεια ενέργειας, καθώς και ακτίνες X αλλά και φωταύγεια. Τα προηγούμενα σήματα, αλλά κυρίως τα σήματα δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων, ενισχύονται και στη συνέχεια διαμορφώνουν την ένταση μίας εξωτερικής (ανεξάρτητης) καθοδικής δέσμης η οποία προσπίπτει σε φθορίζουσα οθόνη ακολουθώντας την ίδια σάρωση η οποία οδηγεί τη δέσμη του μικροσκοπίου. Το αποτέλεσμα είναι η μεγεθυμένη απεικόνιση, στη φθορίζουσα οθόνη, της επιφάνειας του δείγματος που σαρώνει η δέσμη του μικροσκοπίου. Ανάλογα με την επιλογή του σήματος που θα χρησιμοποιηθεί για την αναπαραγωγή της εικόνας, αναδεικνύονται διαφορετικά χαρακτηριστικά του δείγματος, δεδομένου ότι τόσο η παραγωγή δευτερογενών ηλεκτρονίων όσο και ο συντελεστής οπισθοσκέδασης εξαρτώνται από τις τοπικές τιμές της γωνίας πρόσπτωσης (τοπογραφικά χαρακτηριστικά), τον μέσο ατομικό αριθμό (πληροφορίες για τη σύνθεση) και τον κρυσταλλικό προσανατολισμό (κρυσταλλογραφικά χαρακτηριστικά). Επισημαίνεται ότι τα μικροσκόπια αυτού του τύπου μπορούν να ανιχνεύσουν την στοιχειακή (χημική) ανάλυση των ατομικών στοιχείων που απαρτίζουν το δείγμα, με την ανάλυση των ακτίνων -X που εκπέμπονται κατά την μεταπήδηση των ηλεκτρονίων σε στάθμεις χαμηλότερης ενέργειας. Τα μικροσκόπια αυτού του τύπου διαθέτουν επίσης μηχανισμό δημιουργίας κενού αφού με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η αλληλεπίδραση του αέρα με την συγκεκριμένου προσανατολισμού δέσμη ηλεκτρονίων.

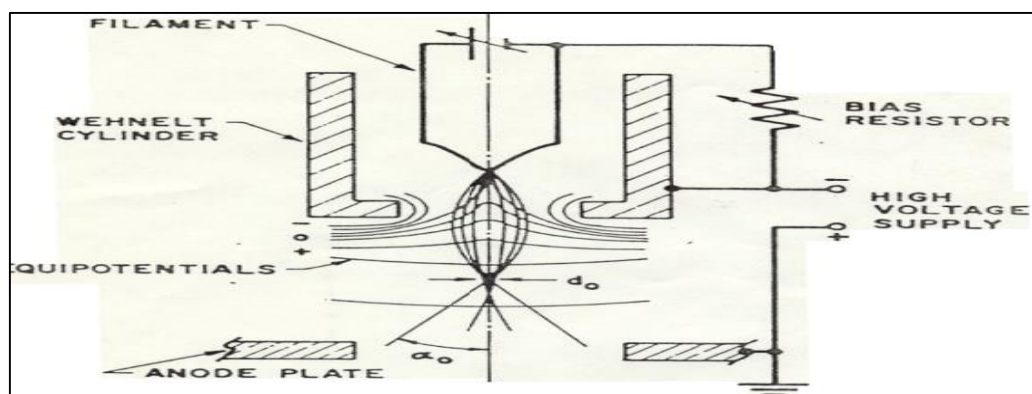
Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.27, τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια σάρωσης αποτελούνται από:

- Την στήλη του μικροσκοπίου
- Τον θάλαμο του δοκιμίου
- Το σύστημα δημιουργίας κενού
- Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου
- Το σύστημα εικόνας



Σχήμα 4.27: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης

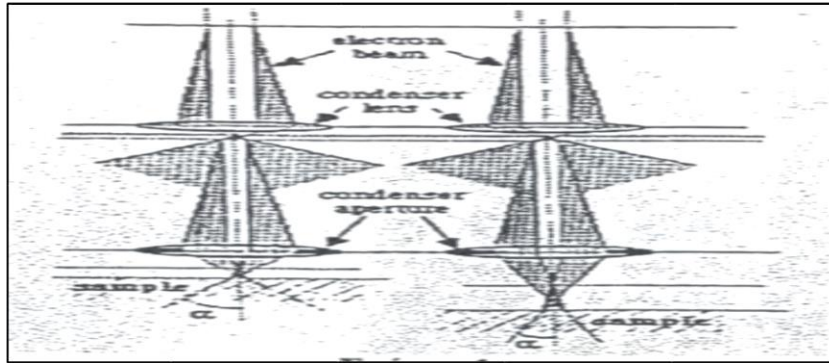
- Διάταξη εκπομπής ηλεκτρονίων: Η ηλεκτρονική δέσμη προέρχεται από ένα νήμα βολφραμίου (χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά) το οποίο λειτουργεί σαν κάθοδος. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόζεται στην διάταξη ένα ισχυρό δυναμικό το οποίο προκαλεί την θέρμανση του νήματος και την επιτάχυνση των ηλεκτρονίων (θερμιονική εκπομπή) από την κάθοδο προς την άνοδο (θετικά φορτισμένη σε σχέση με το νήμα) και εν συνεχεία στο δείγμα όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.28 παρακάτω.



Σχήμα 4.28: Τυπική διάταξη εκπομπής ηλεκτρονίων

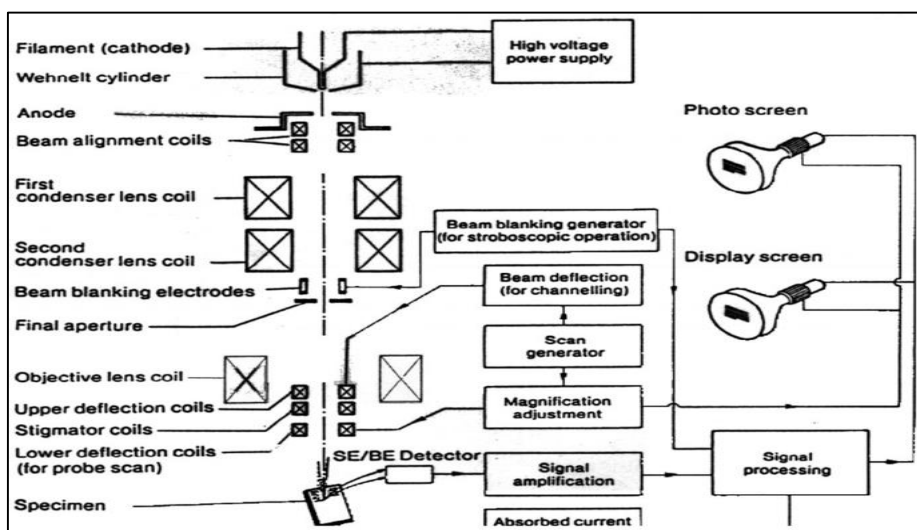
- Μαγνητικοί φακοί: Στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης χρησιμοποιούνται φακοί οι οποίοι δεν έχουν σχέση με τους αντίστοιχους στο

Οπτικό μικροσκόπιο αφού δεν είναι από γυαλί, αλλά είναι κυλινδρικοί μαγνητικοί φακοί οι οποίοι έχουν σαν σκοπό την συγκέντρωση της δέσμης των ηλεκτρονίων σε μια κηλίδα μικρότερης διαμέτρου. Η ύπαρξη αυτών των φακών είναι απαραίτητη επειδή ουσιαστικά επαναπροσδιορίζουν την κατεύθυνση των μη αξονικών ηλεκτρονίων. Μια τυπική διάταξη των προαναφερθέντων φακών απεικονίζεται στο σχήμα 4.29.



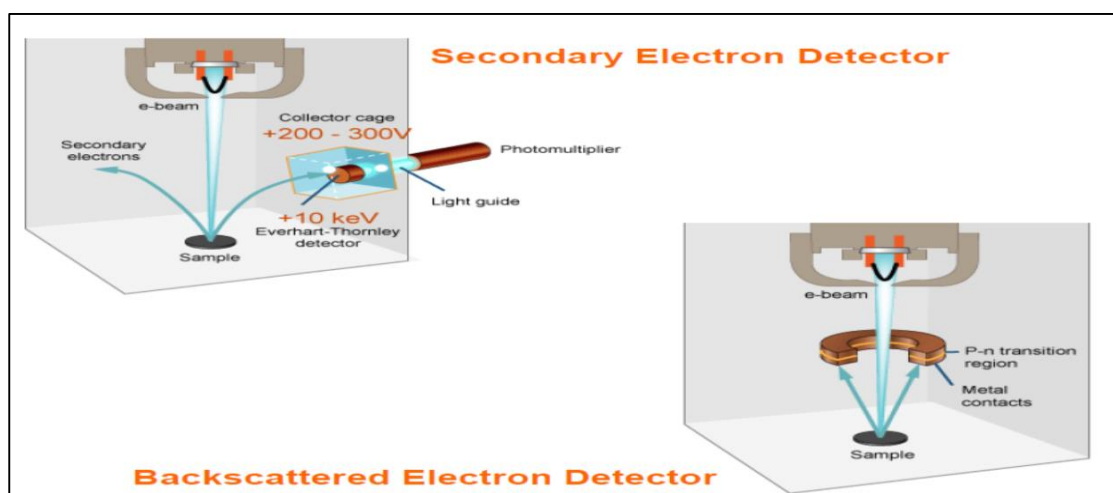
Σχήμα 4.29: Λειτουργία μαγνητικών φακών

- Διαδρομή δέσμης ηλεκτρονίων στην στήλη του μικροσκοπίου: Η παραγόμενη από το ηλεκτρονιοβόλο δέσμη ηλεκτρονίων διέρχεται μέσα από δύο συγκεντρωτικούς φακούς (condenser lens) οι οποίοι συμβάλλουν στην σύγκλιση της δέσμης ηλεκτρονίων, και ύστερα από ένα αντικειμενικό φακό (objective lens) ο οποίος συγκεντρώνει την δέσμη σε ένα συγκεκριμένο σημείο του δείγματος. Η σάρωση της επιφάνειας του δείγματος επιτυγχάνεται με τη βοήθεια πηνίων σάρωσης τα οποία μετακινούν την δέσμη των ηλεκτρονίων στο επιθυμητό σημείο εστίασης. Η χωροταξική διάταξη των ανωτέρω απεικονίζεται στο σχήμα 4.30.



Σχήμα 4.30: Σχηματική απεικόνιση στήλης μικροσκοπίου SEM

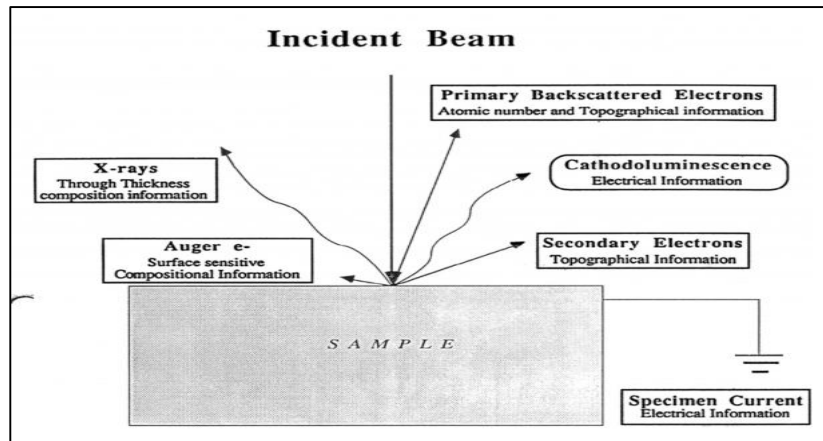
- Αλληλεπίδραση δέσμης ηλεκτρονίων με το δείγμα: Όταν η δέσμη των ηλεκτρονίων (πρωτογενή ηλεκτρόνια) χτυπάει την επιφάνεια του δείγματος τότε τα ηλεκτρόνια συγκρούονται ελαστικά με τον πυρήνα του ατόμου (ειδικά σε μεγάλα άτομα) και σκεδάζονται προς οποιαδήποτε κατεύθυνση χωρίς σημαντική απώλεια της ενέργειάς τους (κρατούν το 50 με 80% της αρχικής ενέργειας). Εκείνα τα ηλεκτρόνια που σκεδάζονται προς τα πίσω με γωνία 180° λέγονται οπισθοσκεδαζόμενα (Backscattered electrons, BSE) και η ανίχνευση τους επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας ως ανιχνευτή τον ημιαγωγό στερεάς κατάστασης (solid state semiconductor) σχήματος donut, ο οποίος είναι προσαρμοσμένος στην έξοδο της κολώνας (σχήμα 4.31).



Σχήμα 4.31: Διατάξεις ανίχνευσης δευτερεύοντων και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων.

Ωστόσο εκτός από την παραπάνω ελαστική σκέδαση, κατά την σύγκρουση της δέσμης των πρωτογενών ηλεκτρονίων με τα ηλεκτρόνια του ατόμου παρατηρείται ότι μερικά από τα χαλαρά συγκρατούμενα ηλεκτρόνια μπορεί να φύγουν από το άτομο, και αυτά ονομάζονται δευτερογενή ηλεκτρόνια. Η ανίχνευση των δευτερογενών ηλεκτρονίων γίνεται με την βοήθεια ενός πλέγματος (σχήμα 4.31) με θετικό δυναμικό που βρίσκεται μπροστά από τον ανιχνευτή και έλκει τα αρνητικά ηλεκτρόνια τα οποία μετρώνται από τους κτύπους που παράγουν στον ανιχνευτή. Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της μορφολογίας της επιφάνειας. Η διακύμανση στην ένταση των ηλεκτρονίων επηρεάζει την φωτεινότητα ενός καθοδικού σωλήνα (CRT), ο οποίος σαρώνεται συγχρονισμένα με την δέσμη ηλεκτρονίων. Με αυτόν τον τρόπο παράγεται η εικόνα της επιφάνειας στην οθόνη του καθοδικού σωλήνα.

Όπως απεικονίζεται και από το σχήμα 4.32, εκτός από την παραγωγή οπισθοσκεδαζόμενων και δευτερογενών ηλεκτρονίων παρατηρείται και η παραγωγή ηλεκτρονίων Auger καθώς και ακτίνες X.



Σχήμα 4.32: Αλληλεπίδραση δέσμης ηλεκτρονίων-δείγματος.

Η δημιουργία των ακτίνων X είναι αποτέλεσμα της ενέργειας που εκλύεται κατά την μεταπήδηση των ηλεκτρονίων σε στάθμες χαμηλότερης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα όταν φεύγει ένα ηλεκτρόνιο από εσωτερική στοιβάδα, τότε ένα ηλεκτρόνιο από υψηλότερη ενεργειακή στοιβάδα καλύπτει το κενό πέφτοντας στην χαμηλότερη στοιβάδα και εκπέμποντας την διαφορά ενεργείας σαν ακτίνες X. Η ενέργεια αυτών των ακτίνων είναι χαρακτηριστική της μετάπτωσης και κατά συνέπεια του ατόμου. Αντίστοιχα τα ηλεκτόνια Auger παράγονται όταν η εκλυόμενη ακτινοβολία X κατά την έξοδο της από το δείγμα προκαλέσει την εκδίωξη άλλων ηλεκτρονίων από τις στοιβάδες που ήταν εντοπισμένα.

Συμπερασματικά τα δευτερογενή και οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση της επιφάνειας του δείγματος, ενώ η ανίχνευση των ακτίνων X χρησιμεύει στην ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση του υλικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΣΤΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ ΤΗΣ ΠΟΛΕΜΙΚΗΣ ΑΕΡΟΠΟΡΙΑΣ

5.1 Ταξινόμηση των Υλικών ^[1]

Τα υλικά ταξινομούνται καταρχήν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα ανόργανα και τα οργανικά υλικά. Στα οργανικά υλικά ανήκουν τα πολυμερή ή πλαστικά. Τα ανόργανα υποδιαιρούνται σε δύο μεγάλες υποκατηγορίες τα μεταλλικά υλικά και τα κεραμικά υλικά. Ακόμη, ως δύο επιπλέον τύποι υλικών, λόγω της μεγάλης βιομηχανικής τους σημασίας, θα μπορούσαν να θεωρηθούν τα σύνθετα υλικά και τα ηλεκτρονικά υλικά, τα οποία μπορούν να υπαχθούν εν γένει στις προηγούμενες κατηγορίες ανάλογα με τη φύση τους.

- Πολυμερή (ή πλαστικά υλικά): Τα πολυμερή υλικά αποτελούνται από οργανικές μακρομοριακές αλυσίδες ή δίκτυα. Οσον αφορά στη δομή τους τα περισσότερα είναι μη κρυσταλλικά, υπάρχουν όμως και πολυμερή που αποτελούνται από κρυσταλλικές και μη κρυσταλλικές περιοχές. Η κρυσταλλικότητα όμως στα πολυμερή είναι τελείως διαφορετική από αυτήν των ανόργανων υλικών και αφορά στην κανονική διευθέτηση των μακρομοριακών αλυσίδων τους. Είναι χαμηλής πυκνότητας υλικά που εύκολα αποσυντίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες. Η μηχανική αντοχή αυτών των υλικών διαφέρει σημαντικά ανάμεσά τους, ενώ εν γένει είναι μη καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Τα πλαστικά υλικά είναι αυτά που αναπτύχθηκαν ταχύτερα με αποτέλεσμα ο ρυθμός ανάπτυξής τους να έχει μειωθεί τα τελευταία χρόνια. Η τάση γενικά στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη νέων πολυμερών είναι η ανάμειξη και η κραματοποίηση διαφόρων πολυμερών με σκοπό τη δημιουργία υλικών με συνδυασμένες βελτιωμένες ιδιότητες.

- Μεταλλικά υλικά: Είναι ανόργανες ενώσεις που περιλαμβάνουν ένα ή περισσότερα μεταλλικά στοιχεία. Πολλές φορές περιλαμβάνουν και κάποια μη μεταλλικά στοιχεία όπως συμβαίνει σε ορισμένα κράματα. Τα μεταλλικά υλικά διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες τα μέταλλα και τα κράματα. Τόσο τα μέταλλα όσο και τα κράματα μπορούμε να τα υποδιαιρέσουμε επίσης σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε σίδηρο: τα σιδηρούχα μέταλλα και κράματα που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο όπως είναι οι χυτοσίδηροι και οι χάλυβες και τα μη σιδηρούχα μέταλλα και κράματα που δεν περιέχουν σίδηρο ή περιέχουν μικρή περιεκτικότητα σε σίδηρο, όπως είναι το αργίλιο, ο ψευδάργυρος, το τιτάνιο, το νικέλιο, ο χαλκός. Μη μεταλλικά υλικά που περιέχονται στα κράματα είναι ο άνθρακας, το άζωτο και το οξυγόνο. Τα μεταλλικά υλικά έχουν κανονική περιοδική κρυσταλλική δομή και γενικά είναι

καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και της θερμότητας. Έχουν γενικά καλές αντοχές που μπορούν σε μερικές περιπτώσεις να τη διατηρούν και σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Η τάση στην έρευνα για αυτά τα υλικά είναι η δημιουργία νέων κραμάτων και υπερκραμάτων βασισμένων κυρίως στο νικέλιο που να έχουν μεγαλύτερες αντοχές στη θερμοκρασία και τη διάβρωση. Οι βελτιωμένες αυτές ιδιότητες των νέων κραμάτων μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την απόδοση των μηχανών. Επιπλέον, αναπτύσσονται συνεχώς νέες διεργασίες παραγωγής όπως είναι η ισοστατική συμπίεση εν θερμώ ή οι τεχνικές ταχείας στερεοποίησης.

- Κεραμικά υλικά: Τα κεραμικά υλικά είναι ανόργανα υλικά αποτελούμενα από μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά χημικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Μπορεί να είναι είτε κρυσταλλικά, είτε μη κρυσταλλικά, ενώ πολύ συχνή είναι η δομή στην οποία μια κρυσταλλική φάση είναι διεσπαρμένη σε μια μη κρυσταλλική. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η μεγάλη αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και η ψαθυρότητά τους. Γενικά, είναι ελαφρά, αλλά πολύ σκληρά υλικά και έχουν μεγάλη αντοχή στη θερμότητα, στη φθορά και στη διάβρωση. Συνήθως είναι καλοί μονωτές. Οι εφαρμογές τους είναι πάρα πολλές: χρησιμοποιούνται ως εξαρτήματα μηχανών και ιδιαίτερα όπου απαιτείται υψηλή αντοχή στη θερμότητα ή στη φθορά ή ως κοπτικά εργαλεία, είναι τα υλικά με τα οποία επενδύονται οι κλίβανοι υψηλών θερμοκρασιών της χαλυβουργίας π.χ., βρίσκουν πλείστες χημικές, βιολογικές και βιοϊατρικές εφαρμογές, ενώ πολύ σημαντικός είναι ο τομέας των ηλεκτρονικών εφαρμογών. Στο χώρο των κεραμικών ταχύτατη είναι η ανάπτυξη σε ορισμένα κεραμικά με βελτιωμένες ιδιότητες όπως τα καρβίδια, νιτρίδια ή και οξειδία, ενώ παράλληλα ολοένα και νέες εφαρμογές ιδιαίτερα στον τομέα των υψηλών θερμοκρασιών και των ηλεκτρονικών εφαρμογών ανευρίσκονται για αυτά τα υλικά. Παράλληλα, οι τεχνικές παραγωγής τόσο των κόνεων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των προϊόντων, όσο και των ίδιων των τελικών προϊόντων συνεχώς εξελίσσονται με σκοπό να μειώσουν κάποια εγγενή μειονεκτήματα των κεραμικών όπως η ευθραυστότητά τους.

- Ηλεκτρονικά υλικά: Είναι μια πολύ σημαντική κατηγορία υλικών από άποψη εφαρμογών. Το πιο σημαντικό υλικό είναι το πυρίτιο, ενώ η τάση της έρευνας είναι η διαρκής σμίκρυνση αυτών των προϊόντων που συνοδεύεται από την κατάλληλη τροποποίηση των ιδιοτήτων τους ώστε να πληρούν τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις της ηλεκτρονικής βιομηχανίας. Η ανάπτυξη στον τομέα του πυριτίου και των ημιαγωγών τα τελευταία χρόνια είναι τεράστια. Οι ραγδαίες εξελίξεις στο τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών και εν γένει στην ηλεκτρονική βιομηχανία πυροδοτούν και τις εξελίξεις στο χώρο αυτών των υλικών.

- Σύνθετα υλικά: Τα σύνθετα υλικά είναι μίγματα δύο ή περισσοτέρων υλικών, εκ των οποίων το ένα αποτελεί τη μήτρα μέσα στην οποία είναι διεσπαρμένο ένα ή περισσότερα υλικά τα οποία είναι πληρωτικά υλικά ή υλικά ενίσχυσης. Για παράδειγμα ένα τέτοιο υλικό θα μπορούσε να αποτελείται από ίνες που συνδέονται μεταξύ τους με μια ρητίνη. Τα σύνθετα μπορούν να είναι

διαφόρων τύπων: για παράδειγμα μπορούν να αποτελούνται από ίνες ή από σωματίδια διεσπαρμένα σε μια μήτρα. Η μήτρα μπορεί να είναι είτε μεταλλική, είτε κεραμική, είτε πολυμερική και το ίδιο μπορεί να ισχύει για τις ίνες και τα σωματίδια. Με αυτόν το τρόπο συνδυάζονται πολύ καλά οι ιδιότητες των υλικών και παράγονται προϊόντα με απολύτως επιθυμητές ιδιότητες που μπορεί να είναι εξαιρετικές αντοχές σε συνδυασμό με χαμηλό βάρος, ή μεγάλη αντίσταση στη διάβρωση κ.λ.π. Ο κύριος τύπος των υλικών αυτών στις προηγμένες βιομηχανικές εφαρμογές είναι τα υλικά τα ενισχυμένα με ίνες. Τα ενισχυμένα με ίνες πολυμερή βρίσκουν αλματώδη ανάπτυξη, ενώ πολύ σημαντικά για αεροναυπηγικές εφαρμογές είναι τα ενισχυμένα με ίνες (π.χ. άνθρακα) κεραμικά.

5.2 Κεραμικά υλικά

5.2.1 Γενικά περί κεραμικών υλικών

Η έννοια κεραμικό στο παρελθόν είχε συνδεθεί αποκλειστικά με την τέχνη ή την τεχνική της παραγωγής αντικειμένων αγγειοπλαστικής. Σήμερα, με την ευρύτερη δυνατή οπτική γωνία, μπορούμε να ορίσουμε ως κεραμικό υλικό οποιοδήποτε ανόργανο μη μεταλλικό υλικό. Ένας τέτοιος ορισμός όμως περικλείει και τα φυσικά ορυκτά τα οποία δεν συμπεριλαμβάνονται στην κατηγορία των κεραμικών παρότι σε πολλές περιπτώσεις έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τα σύγχρονα προηγμένα ή τεχνικά κεραμικά. Για παράδειγμα το φυσικά απαντώμενο ή συνθετικό διαμάντι ή ζαφείρι είναι ιδιαίτερης σημασίας σε πολλές οπτικές εφαρμογές. Πάντως, γενικά, θεωρούνται ως κεραμικά μόνο εκείνα τα υλικά που έχουν κατασκευαστεί από τον άνθρωπο. Συνεπώς, σύμφωνα με ένα πιο ακριβή ορισμό κεραμικό υλικό είναι οποιοδήποτε ανόργανο μη μεταλλικό υλικό που έχει υποστεί κάποια θερμική κατεργασία. Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό, τα κεραμικά υλικά καλύπτουν ένα ευρύτατο φάσμα χημικών και ορυκτολογικών συστάσεων με αποτέλεσμα να εμφανίζουν πολυποίκιλες μηχανικές, ηλεκτρικές, ηλεκτρονικές, μαγνητικές και οπτικές ιδιότητες βρίσκοντας ένα πλήθος εφαρμογών.

Στην αρχαιοελληνική γλώσσα, ο όρος κεραμικό δηλώνει την εψημένη άργιλο, δηλαδή θερμικά κατεργασμένο (με έψηση) υλικό που προέρχεται από αργιλικές πρώτες ύλες. Τα υλικά αυτά είναι κατά κύριο λόγο οξειδία οι χημικοί δεσμοί των οποίων μπορεί να είναι είτε ιοντικοί είτε ομοιοπολικοί. Οι γενικές τους ιδιότητες εξαρτώνται από το είδος των δεσμών αυτών και την αρχιτεκτονική του ατόμου που προκύπτει.

Στους αρχαίους πολιτισμούς, ακατέργαστες κεραμικές πρώτες ύλες αλλά και εψημένη άργιλος χρησιμοποιήθηκαν στη διακοσμητική και την οικοδομική. Οι κεραμικές κατασκευές είναι οι μακροβιότερες κατασκευές του ανθρώπου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η μεγάλη πυραμίδα της

Γκίζας (4η χιλιετηρίδα π.Χ), ο Παρθενώνας (5ος αιώνας π.Χ), το μεγάλο Σινικό Τείχος (3ος αιώνας π.Χ).

5.2.2 Ταξινόμηση κεραμικών υλικών

Πίνακας 5.1: Κατάταξη κεραμικών υλικών

	Κατηγορία	Είδος υλικού	Τυπικές χρήσεις
Παραδοσιακά κεραμικά	Προϊόντα αγγειοπλαστικής	Πορσελάνη σκληρή και μαλακή, φαγεντιανά, πυροχρώματα	Είδη εστίασεως, πλακίδια, είδη υγιεινής, ηλεκτρικοί μονωτήρες.
	Προϊόντα κεραμουργείας	Πηλός	Τούβλα, κεραμίδια, πλακίδια δαπέδου, σωλήνες αποχέτευσης.
	Κοπτικά, Λειαντικά	Αλούμινα, καρβίδια πυριτίου, βολφραμίου, αργιλίου, οξυκαρβίδια και οξυνιτρίδια, διαμάντι	Εργαλεία κοπής και λείανσης κυρίως σκληρών μετάλλων.
	Πυρίμαχα	Αλούμινα, πυριτικά αργιλοπυριτικά, μαγνησία, χρωμίτης, σπινέλιος.	Επενδύσεις φούρνων, καλούπια για χύτευση μετάλλων.
	Γυαλιά	Κοινό γυαλί, υαλοκεραμικά υαλώματα.	Φυάλες, γυάλινα είδη, υαλοπίνακες, εφυσωμένα αντικείμενα.
	Τσιμέντα	Υδραυλική κονία από άβεστο-αλουμίνα-πυριτία.	Δομικά προϊόντα
Προηγμένα	Τεχνικά ή μηχανολογικά κεραμικά	Οξειδία, καρβίδια, νιτρίδια, βορίδια, σύνθετα κεραμικά.	Σε πολλούς τομείς των νέων τεχνολογιών
	Ηλεκτρονικά κεραμικά		

Σήμερα, ο όρος κεραμικό, όπως προαναφέρθηκε, συμπεριλαμβάνει ένα πολύ μεγαλύτερο πλήθος υλικών. Έτσι, εκτός από τα παραδοσιακά κεραμικά που κατασκευάζονται από αργιλική πρώτη ύλη, γυαλιά, οξειδία, καρβίδια, νιτρίδια, βορίδια, καθώς επίσης το τσιμέντο και το σκυρόδεμα χαρακτηρίζονται, επίσης, κεραμικά υλικά. Τα κεραμικά τα οποία απευθύνονται στις σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές ονομάζονται προηγμένα κεραμικά σε αντιδιαστολή με τα παραδοσιακά κεραμικά των οποίων οι εφαρμογές έγκεινται στους παραδοσιακούς τομείς (κατασκευαστικός τομέας, οικιακή χρήση κ.λπ.). Πράγματι, είναι εντυπωσιακή η εξάπλωση της χρήσης των κεραμικών τα τελευταία 10 χρόνια, αντικαθιστώντας, μάλιστα, τα μέταλλα σε πολλές από τις χρήσεις τους. Κοπτικά εργαλεία από κεραμικά αλουμίνας-πυριτίας (Sialon) ή συμπαγή αλούμινα παρουσιάζουν καλύτερες ιδιότητες κοπής και από τα καλύτερα μεταλλικά εργαλεία. Αρκετά από τα προηγμένα κεραμικά εμφανίζουν υψηλή αντιτριβική αντοχή, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή των αιχμηρών άκρων κοπτικών εργαλείων, των οποίων αυξάνουν τη διάρκεια ζωής κατά 10 φορές. Είναι αδρανή υλικά και πολλά από αυτά παρουσιάζουν συμβατότητα με τους ανθρώπινους ιστούς (βιοσυμβατότητα) και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τεχνητών συνδέσμων (βιοκεραμικά). Λόγω των υψηλών σημείων τήξης τους χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες: εναλλάκτες, αεροτουρμπίνες, κινητήρες, εξατμίσεις κ.λπ. Πολύ καλά καθιερωμένες στην αγορά είναι η χρήση των κεραμικών στον χώρο της μικροηλεκτρονικής: υποστρώματα κυκλωμάτων, πυκνωτές, πιεζοηλεκτρικά, ημιαγωγοί, υπεραγωγοί, αισθητήρες, κ.λπ κατασκευάζονται από κεραμικό υλικό.

Εξαιτίας αυτής της αλματώδους ανάπτυξης των κεραμικών και της διείσδυσής τους σε σύγχρονους τεχνολογικούς τομείς, έγινε αναγκαία η διάκρισή τους σε δύο μεγάλες κατηγορίες (πίνακας 5.1):

➤ **Στα παραδοσιακά κεραμικά** στα οποία υπάγονται τα προϊόντα που βασίζονται στην άργιλο, τα πυρίμαχα και τα προϊόντα της υαλουργίας. Με βάση τον ορισμό των κεραμικών και το τσιμέντο ανήκει σε αυτά, όμως διαχωρίζεται στην πράξη από τα κεραμικά και εξετάζεται ιδιαίτερα λόγω της μεγάλης τεχνολογικής σημασίας του. Πολλές φορές τα πυρίμαχα θεωρούνται ότι αποτελούν ιδιαίτερη κατηγορία διαφοροποιούμενη από τα παραδοσιακά κεραμικά, δηλαδή ότι είναι ένας ενδιάμεσος κλάδος ανάμεσα στα παραδοσιακά και τα προηγμένα κεραμικά. Η συνήθης όμως πρακτική είναι να συμπεριλαμβάνονται στα παραδοσιακά κεραμικά. Ανάμεσα στα προϊόντα που ανήκουν στα παραδοσιακά κεραμικά, τα προϊόντα υαλουργίας είναι αυτά που έχουν τον μεγαλύτερο όγκο παραγωγής διεθνώς ακολουθούμενα από τα προϊόντα αγγειοπλαστικής. Σημαντικός σε όγκο παραγωγής είναι επίσης ο κλάδος των πλακιδίων και των δομικών προϊόντων (τούβλα, κεραμίδια) Πολύ σημαντικός κλάδος είναι και αυτός των πυριμάχων. Τα πυρίμαχα είναι υλικά κατασκευών με την ιδιότητα να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες και να διατηρούν τις φυσικές τους ιδιότητες σε περιβάλλον φούρνου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται πολύ σε κατασκευές που απαιτείται να αντέχουν σε θερμικά

σοκ, φυσική φθορά και διαβρωτικά χημικά που σχετίζονται με την παραγωγή σιδήρου και χάλυβα, τήξη χαλκού και αλουμινίου, παρασκευή γυαλιού και κεραμικών και παρόμοιων άλλων διεργασιών. Τα πιο κοινά πυρίμαχα κατασκευάζονται από φυσικά ορυκτά υλικά. Έτσι από άποψη σύστασης τα πυρίμαχα διακρίνονται σε προϊόντα αργιλικά, μαγνησιακά, αργιλομαγνησιακά, χρωμιτικά, χρωμομαγνησιακά, δολομιτικά, πυριτικά, κ.λπ. Πιο εξειδικευμένα πυρίμαχα συνθέτονται από οξειδία μετάλλων ή άνθρακα, γραφίτη ή καρβίδια του πυριτίου. Γενικά, η χρήση χημικώς παρασκευασμένων συνθετικών ή υψηλής καθαρότητας οξειδίων έχει αυξηθεί σε αντιστοιχία με την χρήση τους σε αυξανόμενη θερμοκρασία που απαιτείται σε πολλές εφαρμογές. Γενικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλές συνθέσεις πυριμάχων σε μεγάλη ποικιλία σχημάτων και μορφών σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Τα δύο τρίτα όλων των πυριμάχων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία είναι τούβλα ή άλλα ψημένα σχήματα. Το υπόλοιπο ένα τρίτο έχει τη μορφή μονολιθικών υλικών όπως χυτά, πλαστικά και εκτοξευμένα μίγματα. Τα υλικά αυτά τοποθετούνται απευθείας στο φούρνο και ψήνονται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του φούρνου. Κονιάματα που αποτελούνται από κόκκους με πλαστικοποιητές, θεωρούνται επίσης μονολιθικά πυρίμαχα και χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση πυριμάχων τούβλων. Πυρίμαχα μονωτικά υλικά, σε διάφορες μορφές και σχήματα, χρησιμοποιούνται επίσης πολύ συχνά σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών για να μειώσουν την απώλεια θερμότητας.

➤ **Στα προηγμένα κεραμικά** τα οποία έχουν αναπτυχθεί με πολύ μεγάλους ρυθμούς, ιδιαίτερα κατά τα τελευταία χρόνια. Συνήθως η παραγωγή τους είναι σχετικά περιορισμένη σε όγκο, αλλά τα προϊόντα έχουν μεγάλη προστιθέμενη αξία. Διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα προηγμένα κεραμικά για μηχανικές, θερμικές, βιολογικές, χημικές κ.λπ. εφαρμογές και τα προηγμένα κεραμικά για ηλεκτρονικές εφαρμογές. Ο κλάδος των ηλεκτρονικών κεραμικών είναι ο πιο ανεπτυγμένος, καλά καθιερωμένος στην αγορά με πλείστες εφαρμογές και με τον μεγαλύτερο όγκο παραγωγής. Αντίθετα ο κλάδος των κεραμικών για μηχανικές κτλ εφαρμογές είναι σε φάση διαρκούς εξέλιξης διεισδύοντας συνέχεια σε νέες αγορές. Η εγγενής ευθραστότητα των κεραμικών και η περιορισμένη αξιοπιστία τους στις μηχανικές κατασκευές ήταν οι κύριοι λόγοι αυτής της καθυστερημένης σχετικά διείσδυσης στην αγορά. Πολλές φορές, παρά τις εξαιρετικές ιδιότητες που μπορεί να παρουσιάζει ένα κεραμικό είναι δύσκολο ως ανέφικτο να αντικαταστήσει ένα μέταλλο το οποίο έχει πολύ περισσότερο προβλεπόμενη συμπεριφορά και αξιοπιστία. Σε αυτές τις περιπτώσεις έχουν αναπτυχθεί τεχνικές για τη δημιουργία κεραμικών επικαλύψεων του μεταλλικού υλικού της εφαρμογής αντί αντικατάστασή του. Οι κεραμικές επικαλύψεις υπάγονται και αυτές στα προηγμένα κεραμικά. Επιπλέον έχουν αναπτυχθεί νέα σύνθετα υλικά που ενσωματώνουν μεταλλικά ή κεραμικά σωματίδια ή ίνες που ενισχύουν τις μηχανικές ιδιότητες. Οι κεραμικές επικαλύψεις και τα σύνθετα υλικά είναι εντονότατα αναπτυσσόμενοι κλάδοι που προσφέρουν λύσεις σε πολύ δύσκολες και απαιτητικές

καταστάσεις. Τα προηγμένα κεραμικά μπορεί να είναι είτε υψηλής καθαρότητας μονοφασικά υλικά ή και πολυφασικά υλικά. Σε πλείστες περιπτώσεις το κεραμικό αντικείμενο αποτελείται από ένα καθαρό οξείδιο. Τα πιο συνηθισμένα οξείδια που χρησιμοποιούνται είναι η αλούμινα (Al_2O_3), η ζirkονία (ZrO_2), η μαγνησία (MgO), η τιτανία (TiO_2), η βηρυλλία (BeO), ο σπινέλιος ($MgO \cdot Al_2O_3$) κτλ. Πολύ συνηθισμένα είναι επίσης τα μονοφασικά κεραμικά από κάποιο καρβίδιο, νιτρίδιο ή βορίδιο τα οποία έχουν γενικά καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τα οξείδια κεραμικά και χρησιμοποιούνται περισσότερο όταν απαιτούνται καλές αντοχές και μεγαλύτερη αξιοπιστία. Ανάμεσα σε αυτά το πιο διαδεδομένο είναι το καρβίδιο του πυριτίου ακολουθούμενο από το νιτρίδιο του πυριτίου, καρβίδιο του βολφραμίου, νιτρίδιο του αλουμινίου κ.α. Μια νεότερη κατηγορία μη οξειδίων κεραμικών είναι τα SiAlONs με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες αποτελούμενα από μικτούς κρυστάλλους που περιέχουν Si, Al, O και N. Τα ηλεκτρονικά κεραμικά είναι ένας τεράστιος κλάδος υλικών. Συνήθως είναι οξείδια με μικτούς κρυστάλλους που περιλαμβάνουν αρκετά στοιχεία και με συστάσεις αριστοποιημένες ώστε να μεγιστοποιείται η τιμή μιας επιθυμητής ιδιότητας. Έτσι έχουμε πιεζοηλεκτρικά κεραμικά, μαγνητικά κεραμικά, κεραμικά με αυξημένη ιοντική αγωγιμότητα που χρησιμοποιούνται σε αισθητήρες ή στα κελία καυσίμων, κεραμικούς πυκνωτές, υπεραγώγιμα κεραμικά κτλ.

Σε γενικές γραμμές η διεργασία παραγωγής και οι τεχνικές ελέγχου είναι παρόμοιες και για τις δυο αυτές μεγάλες κατηγορίες κεραμικών. Τα κεραμικά παράγονται συνήθως με μορφοποίηση μιας σκόνης, που αποτελεί την πρώτη ύλη, στο επιθυμητό σχήμα με διάφορες τεχνικές που θα αναπτυχθούν στα επόμενα κεφάλαια και εν συνεχεία μετά την κατάλληλη προετοιμασία (π.χ. ξήρανση) έψηση του συσσωματώματος στην κατάλληλη θερμοκρασία για να επιτευχθεί η δομική διασύνδεση των κόκκων του αρχικού υλικού και το σώμα να αποκτήσει την απαραίτητη μηχανική αντοχή. Σε εξειδικευμένες περιπτώσεις μόνο η παραγωγή μπορεί να γίνει με χύτευση τήγματος του υλικού. Αυτό συμβαίνει κυρίως στην περίπτωση των γυαλιών και των υαλοκεραμικών. Ειδικός εξοπλισμός και πολύ ακριβές τεχνικές υψηλής τεχνολογίας μπορούν να απαιτηθούν όταν πρόκειται να παραχθεί κάποιο αντικείμενο με εξειδικευμένες ιδιότητες, ιδιαίτερες απαιτήσεις και πολύ αυστηρές προδιαγραφές. Πάντως, αυτοματισμοί και σύγχρονος τεχνολογικός εξοπλισμός χρησιμοποιείται σήμερα για την παραγωγή υψηλής ποιότητας παραδοσιακών κεραμικών.

5.2.3 Ιδιότητες κεραμικών υλικών

Τα κεραμικά, γενικά έχουν ιδιαίτερες χαρακτηριστικές ιδιότητες που σχετίζονται με τη δομή τους, αν και η γενίκευση αυτή, μπορεί να οδηγήσει σε παραπλάνηση δεδομένης της ευρύτητας του ορισμού των κεραμικών.

Ευθραυστότητα: Η ιδιότητα αυτή διαπιστώνεται από την εμπειρία του καθενός, όταν αφήσει ένα γυάλινο σκεύος ή ένα πιάτο να πέσει. Η αιτία λόγω της οποίας τα κεραμικά είναι εύθραυστα, εντοπίζεται στον μικτό ιοντικό - ομοιοπολικό

δεσμό που συνδέει τα άτομα που συνθέτουν το υλικό. Σε υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από τη θερμοκρασία μετατροπής γυαλιού) το γυαλί δεν συμπεριφέρεται πλέον ως εύθραυστο υλικό, αλλά ως ιξώδες (παχύρρευστο) υγρό. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το γυαλί μπορεί να μορφοποιηθεί σε πολύπλοκα σχήματα. Επομένως, η σωστή περιγραφή της ιδιότητας αυτής είναι ότι τα περισσότερα κεραμικά είναι εύθραυστα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά όχι απαραίτητα σε υψηλές θερμοκρασίες.

Μικρή ηλεκτρική και θερμική αγωγή: Στα κεραμικά τα ηλεκτρόνια σθένους συγκρατούνται στο δεσμό και δεν είναι ελεύθερα όπως στην περίπτωση σύνδεσης των μετάλλων. Στα μέταλλα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια (ηλεκτρονιακό νέφος) είναι εκείνα που σε μεγάλο βαθμό προσδιορίζουν τις ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες. Το διαμάντι, π.χ., που ταξινομείται στα κεραμικά, έχει την υψηλότερη θερμική ιδιότητα από κάθε γνωστό υλικό. Ο μηχανισμός αγωγής, στην περίπτωση αυτή, αποδίδεται στα φωνόνια (phonons) και όχι στα ηλεκτρόνια. Τα κεραμικά μπορούν, επίσης, να έχουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Δύο παραδείγματα που αντιτίθενται στη συμβατική γνώση ότι τα κεραμικά είναι μονωτές ή ότι έχουν μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι το κεραμικό οξειδίο Re_2O_3 το οποίο έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου όμοια με εκείνη του Cu , και το μικτό κεραμικό οξειδίο, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, το οποίο είναι υπεραγωγός και έχει μηδενική αντίσταση σε θερμοκρασία κάτω από 92K.

Αντοχή σε θλίψη (compressive strength): Τα κεραμικά έχουν πολύ μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη από ό,τι σε εφελκυσμό, ενώ τα μέταλλα έχουν συγκρίσιμες αντοχές σε θλίψη και εφελκυσμό. Η διαφορά αυτή είναι ενδιαφέρουσα, όταν χρησιμοποιούνται εξαρτήματα κεραμικών σε εφαρμογές που φέρουν φορτίο. Είναι απαραίτητο να θεωρήσει κανείς την κατανομή των τάσεων στο κεραμικό για να βεβαιωθεί ότι είναι θλιπτικές. Τα κεραμικά, γενικά, έχουν χαμηλό βαθμό δυσθραυστότητας, αν και, συνδυάζοντάς τα σε σύνθετα υλικά, μπορεί να αναβαθμιστεί πολύ αυτή η ιδιότητα.

Χημική αδράνεια (chemical insensitivity): Τα κεραμικά είναι, συνήθως, σταθερά σε σκληρό χημικό και θερμικό περιβάλλον. Για παράδειγμα, το γυαλί Pyrex χρησιμοποιείται ευρέως στα χημικά εργαστήρια, ιδιαίτερα γιατί είναι ανθεκτικό σε πολύ διαβρωτικές χημικές ενώσεις, αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες (δεν μαλακώνει μέχρι τους 1100K) και ανθίσταται σε θερμικά σοκ, επειδή έχει μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής ($33 \cdot 10^{-7} \text{K}^{-1}$). Χρησιμοποιείται, επίσης, και σε σκεύη έψησης φούρνου.

Διαφάνεια (transparency). Πολλά κεραμικά είναι διαφανή επειδή έχουν μεγάλο ενεργειακό χάσμα (Eg). Ως παράδειγμα μπορεί να αναφερθούν οι ύαλοι από σάπφειρο που καλύπτουν τα ρολόγια, οι πολύτιμοι λίθοι, οι οπτικές ίνες κλπ. Οι οπτικές ίνες γυαλιού έχουν μια διαπερατότητα > 96%. Τα μέταλλα είναι διαφανή στο ορατό φως, όταν είναι πολύ λεπτά, τυπικά < 0,1 μm .

Παρότι είναι πιθανό να βρεθεί κάποιο κεραμικό που να δείχνει μια ασυνήθιστη συμπεριφορά, οι ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι σε

πολλές περιπτώσεις διαφορετικές από εκείνες που παρουσιάζουν τα μέταλλα και τα πολυμερή.

5.3 Το αλουμίνιο και τα οξείδια του (Αλουμίνα, Al_2O_3) ^[2]

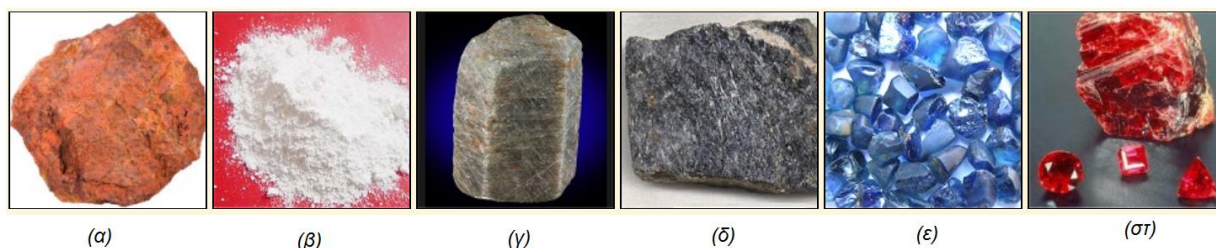
5.3.1 Γενικά περί Αλουμίνας

Το αργίλιο αποτελεί το 8% του εξωτερικού φλοιού της Γης και είναι το τρίτο σε αφθονία χημικό στοιχείο μετά το οξυγόνο (47%) και το πυρίτιο (28%), ενώ ο σίδηρος είναι το τέταρτο σε αφθονία στοιχείο (5%). Το οξείδιό του είναι ευρύτερα γνωστό ως αλουμίνα (alumina) και σπανιότερα ως αργιλία. Στις συνήθεις μορφές του το οξείδιο αυτό είναι ένα σκληρό και δύσκαμπτο στερεό, πολύ καλός αγωγός της θερμότητας και εξαιρετικός μονωτής του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι κρύσταλλοι του οξειδίου του αργιλίου χαρακτηρίζονται από ισχυρούς ιοντικούς δεσμούς. Το οξείδιο του αργιλίου είναι πρακτικώς αδιάλυτο στο νερό και εξαιρετικά δύστηκτο (σημείο τήξεως 2072°C). Λεπτό και συνεκτικό στρώμα οξειδίου του αργιλίου (τυπικό πάχος: 4 nm) σχηματίζεται στην επιφάνεια του μεταλλικού αργιλίου. Το στρώμα αυτό προστατεύει το αργίλιο από περαιτέρω οξείδωση και σταθεροποιεί το μέταλλο στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον παρά τη μεγάλη χημική δραστηριότητά του.

Η ονομασία αλουμίνα (alumina) προέρχεται από τη λατινική ονομασία alum-en (-inis) της στύψης ή στυπτηρίας, $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$, μιας ουσίας γνωστής στους αρχαίους Έλληνες και Ρωμαίους την οποία παρασκεύαζαν με επεξεργασία ενός ορυκτού (αλουνίτης, γνωστός κατά την αρχαιότητα ως "στυπτηριάτης λίθος": $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$). Η στυπτηρία έχει την ιδιότητα να ξηραίνει και να συστέλλει τους ιστούς, προκαλώντας αιμόσταση και οι ιατροί της εποχής τη χρησιμοποιούσαν κυρίως για τη θεραπεία τραυμάτων. Μεγάλες ποσότητες στυπτηρίας χρησιμοποιούσαν επίσης στη βαφή υφασμάτων ως πρόστυμμα (mordant), δηλαδή ως ουσία που σχηματίζει δυσδιάλυτες ενώσεις με φυσικά οργανικά χρώματα με αποτέλεσμα την προσκόλληση και σταθεροποίηση της βαφής στις ίνες του υφάσματος. Σήμερα, ως "στυπτηρίες" χαρακτηρίζονται τα μικτά θειικά άλατα με τον γενικό τύπο $M(I)M'(III)(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$, όπου M(I) κατιόν της ομάδας των αλκαλίων (εκτός από το Li) ή το αμμώνιο και M'(III) τρισθενές μεταλλικό κατιόν (κυρίως Al, Cr και Fe). Τα περισσότερα από τα άλατα αυτά κρυσταλλώνονται εύκολα παρέχοντας ευμεγέθεις και συχνά διαυγείς κρυστάλλους.

Για τον ίδιο λόγο, ονομάστηκε αλουμίνιο (aluminium και στις ΗΠΑ: aluminum) το αντίστοιχο μέταλλο, ονομασία που έχει επικρατήσει και στην καθημερινή ελληνική γλώσσα (π.χ. "Αλουμίνιο της Ελλάδος", "προϊόντα αλουμινίου"). Με τον όρο αλουμίνιο γίνεται αναφορά στο μέταλλο και με τον όρο αργίλιο (από την ελληνική ονομασία των πλούσιων σε αργίλιο πετρωμάτων: άργιλος) γίνεται αναφορά στο στοιχείο και στις ενώσεις του (έτσι, π.χ. το $Al_2(SO_4)_3$ αναφέρεται ως θειικό αργίλιο και το Al_2O_3 αναφέρεται ως οξείδιο του αργιλίου).

Οι φυσικές ιδιότητες και η χημική δραστηριότητα της αλουμίνας εξαρτώνται από τον τρόπο παρασκευής και επεξεργασίας της. Έτσι, αλουμίνα που έχει παρασκευασθεί στο εργαστήριο με σχετικώς ήπια θέρμανση (<900°C) υδροξειδίου του αργιλίου, διαλύεται εύκολα σε διαλύματα ισχυρών οξέων και βάσεων (επαμφοτερίζον οξείδιο). Ωστόσο, αν πυρακτωθεί σε υψηλές θερμοκρασίες και αφυδατωθεί πλήρως, η διαλυτοποίησή της καθίσταται πλέον δυσχερέστατη. Η αλουμίνα ευκολότερα διαλύεται στο υδροφθορικό οξύ (ο σχηματισμός σταθερών συμπλόκων Al-F διευκολύνει τη διαλυτοποίησή της) και το φωσφορικό οξύ, αλλά και σε τήγματα ισχυρών βάσεων ή σε πυκνά διαλύματά τους με θέρμανση υπό πίεση. Το οξείδιο του αργιλίου είναι ένα από τα σκληρότερα κεραμικά υλικά, ενώ είναι εξαιρετικώς διαδεδομένο υπό τη μορφή διάφορων πετρωμάτων και ορυκτών, όπως ο βωξίτης, το κυριότερο ορυκτό-μετάλλευμα αλουμινίου κύρια συστατικά του οποίου είναι διάφορες μορφές ένυδρης αλουμίνας. Η αλουμίνα σε σχεδόν καθαρή μορφή βρίσκεται στο ορυκτό κορούνδιο (corundum).



Εικόνα 5.1:Μορφές Al₂O₃ και ορυκτών του: (α) Τυπική μορφή βωξίτη, κύριο μέταλλευμα αλουμίνας και αλουμινίου με περιεκτικότητα σε Al₂O₃ στην περιοχή 40-60%. Το κοκκινωπό χρώμα του οφείλεται στη σχετικώς μεγάλη περιεκτικότητά του σε Fe₂O₃. (β) Καθαρό Al₂O₃, αλουμίνα, προϊόν λαμβανόμενο από τον βωξίτη. (γ) Κορούνδιο, σχεδόν καθαρό Al₂O₃, από τα σκληρότερα ορυκτά, το οποίο χαράσσεται μόνο από τον αδάμαντα. (δ) Σμύριδα, μια μορφή κορουνδίου, από τα καλύτερα υλικά λείανσης. (ε) Σάπφειροι (ζαφείρια), πολύτιμοι λίθοι, κρυσταλλική μορφή κορουνδίου με γαλάζιο χρώμα οφειλόμενο σε ίχνη Fe(II,III) (>0,1%) και Ti(IV). (στ) Ρουβίνιο (ρουμπίνι), πολύτιμος λίθος, κρυσταλλική μορφή κορουνδίου με κόκκινο χρώμα οφειλόμενο σε ίχνη (>1%) Cr(III).

Η σμύριδα (emery) αποτελεί μια ακάθαρτη μορφή κορουνδίου. Κρυσταλλικές μορφές της αλουμίνας είναι οι πολύτιμοι λίθοι σάπφειρος (sapphire, ζαφείρι) και ρουβίνιο (ruby, ρουμπίνι), οι οποίοι αποτελούν διαυγείς κρυσταλλικές παραλλαγές του κορουνδίου, όπου ίχνη διαφόρων στοιχείων παρέχουν χαρακτηριστικούς χρωματισμούς.

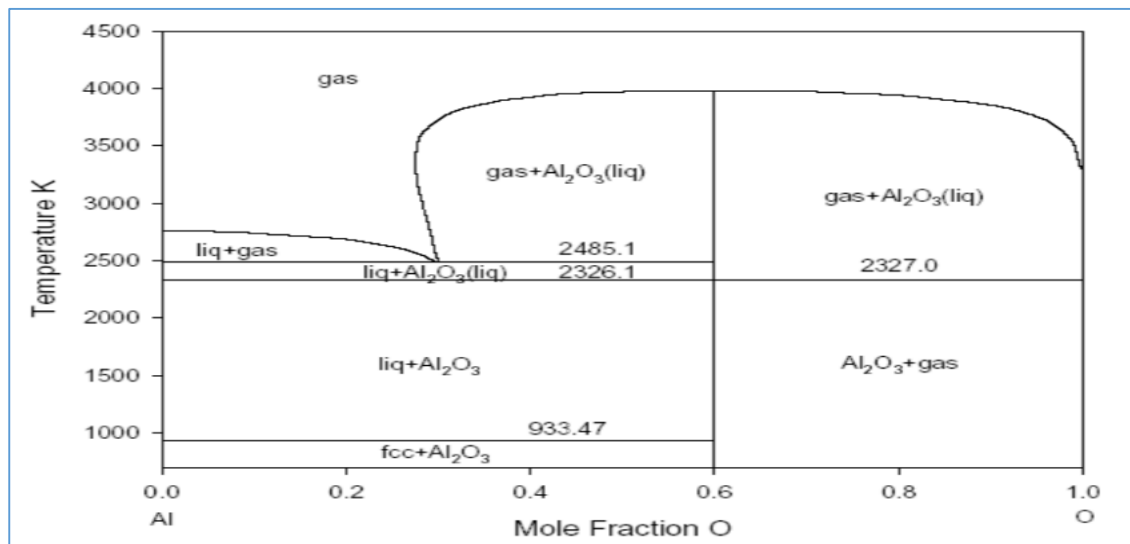
5.3.2 Ιδιότητες Αλουμίνας

Η αλούμινα αποτελεί ένα από τα πιο ευρέως μελετημένα οξείδια. Επιγραμματικά, οι γνωστές ιδιότητες της είναι ^[3] :

- Σκληρό υλικό, με υψηλή αντίσταση σε φθορά και σε αποσάθρωση (erosion).

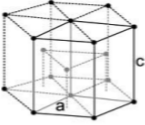
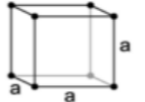
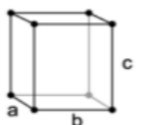
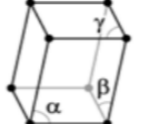
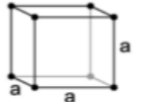
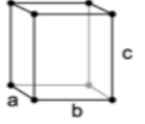
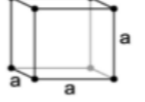
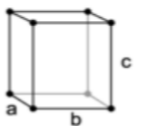
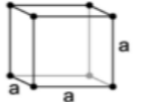
- Υψηλή ηλεκτρική μόνωση.
- Χημικώς σταθερή σε όξινο και αλκαλικό περιβάλλον.
- Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.
- Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών καθώς είναι θερμοδυναμικά σταθερή μέχρι και τους 1600°C (α φάση).

Στην τεχνολογία των επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού οι πλέον γνωστές από τις εφαρμογές των επικαλύψεων αλούμινας αφορούν την προστασία από την φθορά και την φθορά λόγω ροής (erosion), καθώς και με ηλεκτρική και θερμική μόνωση. Οι ιδιότητες της αλούμινας οφείλονται στον ισχυρό ιοντικό δεσμό της. Η αλούμινα είναι δυνατόν να βρίσκεται σε πολλές διαφορετικές φάσεις, οι οποίες όμως μετασχηματίζονται στην α-φάση σε υψηλές θερμοκρασίες. Η α-αλούμινα είναι η πλέον σκληρή φάση, ενώ οι εξαιρετικές διηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητές της την καθιστούν ιδανική για πλήθος εφαρμογών. Οι διαφορετικές μετασταθείς φάσεις της αλούμινας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Το διάγραμμα φάσεων στο σύστημα Al-O φαίνεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Το διάγραμμα φάσεων στο σύστημα Al-O.

Πίνακας 5.2: Οι διαφορετικές φάσεις της αλούμινας

Φάση	Σύστημα	Σχέδιο μοναδιαίας κυψελίδας	Σχόλια
α	Εξαγωνική hcp		Κορούνδιο
γ	Παραμορφωμένη ccp		Μετασταθής, προκύπτει από την ταχεία ψύξη της α φάσης
δ	Τετραγωνική ή ορθορομβική	$a \neq b \neq c$ 	Έχει ανιχνευθεί σε εναποτεθειμένη επικάλυψη πούδρας α - Al_2O_3
θ	Μονοκλινής	$\alpha \neq 90^\circ$ $\beta, \gamma = 90^\circ$ 	Μετάπτωση φάσης από την α στην θ στους 1100-1150 °C.
η	Παραμορφωμένη ccp		
κ	ορθορομβική	$a \neq b \neq c$ 	
χ	κυβική		
κ	ορθορομβική	$a \neq b \neq c$ 	
χ	κυβική		

5.4 Το τιτάνιο και τα οξειδιά του

Το τιτάνιο ανακαλύφθηκε το 1791 από το William Gregor, ο οποίος ήταν ένας ερασιτέχνης χημικός που εξέτασε μια ποσότητα άμμου από το τοπικό ποτάμι και με την χρήση ενός μαγνήτη απέσπασε ένα μαύρο υλικό (τον ιλμενίτη), από το οποίο απομάκρυνε τον σίδηρο με επεξεργασία με υδροχλωρικό οξύ. Το υπόλειμμα το οποίο διαλυόταν με δυσκολία σε πυκνό θειικό οξύ, ήταν το ακάθαρτο οξειδίο ενός καινούριου στοιχείου .

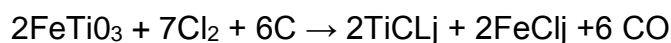
Ο Gregor προχώρησε στην ανακάλυψη των αντιδράσεων, οι οποίες αποτέλεσαν την βάση για την παραγωγή αυτού του νέου στερεού το οποίο ονομάστηκε διοξειδίο του τιτανίου (TiO_2). Τέσσερα χρόνια αργότερα ο Γερμανός χημικός M. H. Klaproth εργαζόμενος ανεξάρτητα ανακάλυψε το ίδιο οξειδίο σε ένα δείγμα μεταλλεύματος σήμερα γνωστό σαν ρουτίλιο (rutile) και ονόμασε το μέταλλο του οξειδίου του τιτανίου. Η ιδέα αυτή προήλθε από την ελληνική μυθολογία όπου οι Τιτάνες ήταν τα παιδιά του Ουρανού και της Γής τα οποία καταδικάστηκαν να ζουν αιώνια στα έγκατα της γης.

Το τιτάνιο ανήκει στην IVB ομάδα του περιοδικού συστήματος (2° από τα μέταλλα μεταπτώσεως) και συναντάται σε ποσοστό 0.63% στα γεωλογικά πετρώματα. Από τα μέταλλα μεταπτώσεως, αυτό μαζί με τον Fe και το Mn είναι αυτά που απαντώνται συχνότερα. Ο λόγος για τον οποίο δεν γνωρίζαμε στο παρελθόν αρκετά πράγματα σχετικά με την χημεία του οφειλόταν μάλλον στο γεγονός των τεραστίων δυσκολιών που υπήρχαν σε σχέση με την παρασκευή δειγμάτων μετάλλου υψηλής καθαρότητας. Τα δυο πιο κύρια ορυκτά του τιτανίου είναι ο ιλμενίτης και το ρουτίλιο .

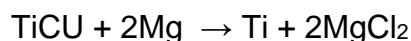
Για βιώσιμες μεθόδους παραγωγής αυτού του μετάλλου από τα ορυκτά οξειδιά του, θα πρέπει να υπερπηδηθούν δυο σημαντικά προβλήματα. Το πρώτο είναι ότι η αναγωγή με άνθρακα δεν είναι δυνατή λόγω του σχηματισμού ανεπιθύμητων καρβιδίων και ακόμα κατά την αναγωγή με Na, Ca ή Mg δεν απομακρύνεται όλο το O_2 . Το δεύτερο πρόβλημα έχει σχέση με την υψηλή δραστηριότητα του μετάλλου σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η παρασκευή του να γίνεται απουσία αέρα για να μην μολυνθεί με O_2 .

Το 1932 ο Wilhelm Kroll κατάφερε να παράγει τιτάνιο με αναγωγή του $TiCl_4$ παρουσία ασβεστίου και αργότερα παρουσία μαγνησίου ή νατρίου. Το κόστος όμως αυτής της διεργασίας κατέστησε αποτρεπτική την όποια βιομηχανική παραγωγή του μετάλλου. Εν τούτοις όμως, επειδή το τιτάνιο έχει πολύ μικρή πυκνότητα και σε συνδυασμό με την πολύ καλή μηχανική του αντοχή σε σχέση με το βάρος του, είτε στην καθαρή του μορφή, είτε σαν κράμα παρουσία μικρών ποσοτήτων άλλων μετάλλων όπως Al ή Sn, η χαμηλή σε κόστος παρασκευή του, αποτέλεσε απόλυτη ανάγκη.

Στη παρασκευή του με τη μέθοδο Kroll ο ιλμενίτης ή το ρουτίλιο θερμαίνεται παρουσία χλωρίου και άνθρακα :



Το παραγόμενο TiCl₄ διαχωρίζεται με απόσταξη από το FeCl₃ και από άλλες ακαθαρσίες και κατόπιν ανάγεται παρουσία Mg σε έναν ερμητικά κλεισμένο φούρνο και σε αδρανή ατμόσφαιρα Ar στους 950-1150°C.



Το MgCl₂ και οποιαδήποτε περίσσεια Mg απομακρύνεται με πλύσεις με νερό και αραιό υδροχλωρικό οξύ ή με απόσταξη. Το καθαρό τιτάνιο κατόπιν κονιορτοποιείται και καθαρίζεται με βασιλικό νερό πριν τηχθεί σε ατμόσφαιρα Ar ή υπό κενό και μορφοποιείται σε πλινθώματα. Η χρήση του Na έναντι του Mg απαιτεί μικρές αλλαγές στην βασική διαδικασία αλλά καταλήγει σε καθαρότερο κοκκώδες πλέον προϊόν. Το τιτάνιο καθώς και όλα τα μέταλλα που ανήκουν σε αυτήν την ομάδα είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας και του ηλεκτρισμού αλλά όχι πιο αγωγιμα υλικά σε σχέση με άλλα μέταλλα. Οι ενθαλπίες τήξης και εξάτμισης είναι επίσης αυξημένες πράγμα που οφείλεται κυρίως στο επιπλέον ηλεκτρόνιο της στοιβάδας το οποίο προκαλεί έναν ισχυρότερο μεταλλικό δεσμό. Οι μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία άλλων στοιχείων όπως O, N και C τα οποία έχουν σαν αποτέλεσμα να αυξάνουν την ψαθυρότητα του μετάλλου. Αν θερμανθούν σε υψηλές θερμοκρασίες αντιδρούν ακαριαία με μη μεταλλικά στοιχεία όπως O, H. Ίσως το πιο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό είναι η αντίσταση του στην διάβρωση, η οποία οφείλεται στον σχηματισμό ενός πυκνού υμενίου οξειδίου στην εξωτερική επιφάνεια του μετάλλου το οποίο δρα προστατευτικά. Η παρουσία οξειδωτικών μέσων όπως του νιτρικού οξέος συχνά ελαττώνει την δραστηριότητα των μετάλλων αφού ενθαρρύνει τον σχηματισμό του προστατευτικού υμενίου του οξειδίου. Χρησιμοποιείται κυρίως στις βιομηχανίες αεροσκαφών για την παραγωγή αεροκινητήρων αλλά και κομματιών της ατράκτου καθώς επίσης για τον εξοπλισμό σκαφών θαλάσσης πέρα από την ευρεία χρήση του στην χημική βιομηχανία. Η παγκόσμια παραγωγή του σήμερα αγγίζει τους 105 τόνους/χρόνο (45000 τόνους μόνο στην Αμερική), με κυρίαρχο τρόπο κατασκευής του την μέθοδο Kroll.

5.4.1 Τιτανία

Κατά την τελευταία δεκαετία, η αντιμετώπιση των προβλημάτων φθοράς εστιάστηκε στην ανάπτυξη σκληρών υμενίων τα οποία προσφέρουν υψηλή αντιτριβική προστασία. Σε βιομηχανική κλίμακα, τεράστια εφαρμογή βρίσκει η δημιουργία λεπτών επιστρωμάτων οξειδίου του τιτανίου (τιτανίας). Η τιτανία η αλλιώς το διοξείδιο του τιτανίου με χημικό ορισμό (TiO₂) είναι μία σκόνη σκούρου γκρι χρώματος, χημικώς αδρανής, μη τοξική και φιλική προς το περιβάλλον, εύκολα παρασκευάσιμη σε μεγάλες ποσότητες και μάλιστα με χαμηλό κόστος αγοράς. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν την τιτανία ένα από τα πιο σημαντικά, από πρακτικής άποψης, υλικά προς εκμετάλλευση. Η τιτανία ως το φυσικό οξείδιο του τιτανίου, συνήθως συναντάται σε τρεις κρυσταλλικές

μορφές, όπως είναι αυτή του ρουτιλίου (τετραγωνική συμμετρία), αυτή του ανατάση (ορθογωνική συμμετρία) και του βρουκίτη. Οι φυσικές ιδιότητες της τιτανίας παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 5.3. Οι κρυσταλλικές φάσεις της τιτανίας είναι μη τοξικές και αδιάλυτες στο νερό, ενώ έχουν το ίδιο σημείο τήξης και βρασμού καθότι και ο ανατάσης και ο βρουκίτης μετατρέπονται σε ρουτίλιο μετά τους 950 °C. Πέραν των αναφερθέντων ιδιοτήτων που παρατίθενται στον πίνακα, η τιτανία χαρακτηρίζεται και από υπερυδροφιλικές και φωτοκαταλυτικές ιδιότητες.

Πίνακας 5.3: Φυσικές ιδιότητες τιτανίας

Μοριακό βάρος:	79,87 g/mol
Πυκνότητα:	4,23 – 3,84 g/ml
Σημείο τήξης:	1850 °C
Σημείο βρασμού:	2500 °C
Διαλυτότητα στο νερό (20 °C):	0,01 g/100 g H ₂ O
Τοξικότητα:	Όχι

Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα που εμφανίζει είναι η υψηλή σκληρότητά της, η πολύ καλή πρόσφυση επιστρώματος - υποστρώματος, η καλή αντοχή σε εκτριβή και σε θερμικούς αιφνιδιασμούς, ο χαμηλός συντελεστής τριβής και η καλής ποιότητας επιφάνεια των λαμβανόμενων επιστρωμάτων. Τα σημαντικότερα των μειονεκτημάτων είναι η σχετικά χαμηλή αντοχή τους σε διάβρωση σε όξινο περιβάλλον και η σχετικά υψηλή θερμοκρασία (450 °C) στην οποία θα πρέπει να διατηρείται το υπόστρωμα κατά την απόθεση, προκειμένου το λαμβανόμενο επίστρωμα να έχει μικροδομή κατάλληλη για αντιτριβικές εφαρμογές, γεγονός που περιορίζει το εύρος των υλικών που μπορούν να επιστρωθούν, χωρίς κίνδυνο αλλοίωσης των αρχικών τους χαρακτηριστικών.

Την τελευταία δεκαετία αναπτύσσεται μια νέα κατηγορία υμενίων με διαδοχικές στρώσεις μετάλλου/κεραμικού, τα οποία εμφανίζουν καλύτερες ιδιότητες, κυρίως οπτικές και μηχανικές, από τα υλικά που συνιστούν τις στοιχειώδεις στρώσεις. Οι μέχρι τώρα επιστημονικές έρευνες περιορίζονται στη μελέτη των λαμβανόμενων δομών με διάφορες τεχνικές απόθεσης.

5.4.2 Ιδιότητες της τιτανίας

Η τιτανία είναι ένα εξαιρετικά χρήσιμο κατασκευαστικό υλικό σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών. Έχει μια καλή αναλογία αντοχής και βάρους, αντίσταση διάβρωσης στα οξειδωτικά μέσα, αυξανόμενη απόδοση με τη θερμοκρασία, και είναι μη μαγνητικό υλικό. Κατέχει σημαντικό ρόλο στη βιομηχανία καθώς είναι το λιγότερο δαπανηρό υλικό αν συγκρίνει κανείς το κόστος της κατασκευής και της συντήρησης μιας μονάδας από τιτανίο με μία που είναι από άλλο υλικό.

Το διοξείδιο του τιτανίου λόγω της φωτεινότητας και του πολύ υψηλού δείκτη διάθλασής ($n = 2,7$) χρησιμοποιείται ως χρωστική ουσία σε διηλεκτρικούς καθρέφτες και μερικούς πολύτιμους λίθους, σε χρώματα, επιστρώσεις,

πλαστικά, μελάνια, τρόφιμα, φάρμακα (δηλ. χάπια και ταμπλέτες) καθώς επίσης και στις περισσότερες οδοντόπαστες. Η πιο σημαντική χημική ιδιότητα της τιτανίας είναι η άριστη αντίστασή της στη διάβρωση. Είναι σχεδόν τόσο ανθεκτική όσο ο λευκόχρυσος, αντιστέκεται στην οξειδωση από υγρά και αέρια χλωρίου, αλλά και στην οξειδωση που προκαλεί το θαλασσινό νερό. Η τιτανία δεν είναι διαλυτή στο νερό αλλά είναι διαλυτή σε συγκέντρωση οξέων. Μια άλλη ιδιότητα είναι η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες κατά τις οποίες λειτουργεί σαν προστατευτικό στρώμα για την υπόλοιπη μάζα του υλικού απέναντι στη διάβρωση. Αυτό το στρώμα οξειδίων αδρανοποιεί το υλικό, πράγμα το οποίο οδηγεί σε μια προστασία ενάντια στην περαιτέρω διαδικασία διάβρωσης εφ' όσον διατηρείται αυτό το στρώμα. Όμως, ο σχηματισμός λεπτών στρωμάτων αδρανοποίησης στο τιτάνιο δεν σημαίνει τη διακοπή των διαδικασιών διάβρωσης. Ακόμη παρουσιάζει μεγάλο βαθμό αντοχής ως προς το βάρος του και έχει δύναμη κάμψης της τάξης μεγαλύτερη το 1000 MPa. Επίσης η τιτανία δεν αντιδρά με το αλκάλιο και με τα περισσότερα οξέα.

Ακόμη ο συντελεστής ελαστικότητας, ο οποίος αντιστοιχεί στην ακαμψία ενός υλικού, συνδέεται με τον τρόπο που αναπτύσσονται οι δυνάμεις μεταξύ των ατόμων και οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με τις αποστάσεις μεταξύ των ατόμων των στοιχείων στη κρυσταλλική δομή. Μια σύγκριση μεταξύ των δύο κρυσταλλικών δομών της τιτανίας έχει οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η εξαγωνική δομή μέγιστης πυκνότητας (HCP) παρουσιάζει υψηλότερες τιμές συντελεστή ελαστικότητας από την χωροκεντρομένη κυβικού πλέγματος δομή (BCC). Έτσι, η τιτανία από διάφορα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζει συντελεστές ελαστικότητας με τιμές κοντά στα 55-105 GPa.

5.5 Κεραμικές επικαλύψεις στα αεροσκάφη της Πολεμικής Αεροπορίας

Η Αεροπορική Βιομηχανία είναι από τις πρώτες βιομηχανίες που υιοθέτησαν εξ αρχής τις επικαλύψεις θερμικού ψεκασμού. Σε έναν αεροπορικό κινητήρα υπάρχουν εκατοντάδες 'κρίσιμα' υλικά πάνω στα οποία έχουν εναποτεθεί επικαλύψεις θερμικού ψεκασμού. Αυτό συμβαίνει γιατί οι επικαλύψεις αυτές μπορούν να προσδώσουν στο υπόστρωμα επιφανειακές ιδιότητες που πριν δεν είχε, όπως είναι η αντίσταση στη φθορά πρόσφυσης και εκτριβής, στην παλμική φθορά, στις απότομες εναλλαγές θερμοκρασίας και στην οξειδωση.

Η διαδικασία θερμικού ψεκασμού με χρήση πλάσματος εφαρμόζεται ευρέως για την απόθεση επικαλύψεων κυρίως στα παρακάτω τμήματα των α/φών:

- Στηρίγματα ακροφυσίων (nozzle support)
- Αεροστεγή σφραγίσματα συμπιεστή (compressor air seals)
- Κελύφη εισαγωγής αέρα στο fan (fan inlet cases)
- Αναστροφείς ώσης (thrust reverser)
- Μηχανισμοί μετάδοσης κίνησης (transition ducts-gears)

- Κελύφη συμπιεστή (compressor cases)
- Διαφράγματα στροβίλου (turbine bafflers)
- Πτερύγια της πρώτης βαθμίδας του συμπιεστή χαμηλής πίεσης (fan blades)
- Θάλαμοι καύσης (combustion chambers)
- Σταθεροποιητές φλόγας καύσεως (flame holder)
- Πτερύγια στροβίλου όλων των βαθμίδων (turbine blades)
- Πτερύγια ακροφυσίων εκτόνωσης (exhaust nozzle flaps)
- Σταθερά και κινητά πτερύγια του συμπιεστή όλων των βαθμίδων (compressor stators and compressor blades)
- Κελύφη στροβίλου (turbine cases)
- Τμήματα ακροφυσίων (nozzle segments)

Με την χρήση των επικαλύψεων επιτυγχάνεται:

- αύξηση του χρόνου ζωής των μηχανικών εξαρτημάτων,
- μείωση των εξόδων για ανταλλακτικά,
- μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα μεταξύ δύο διαδοχικών συντηρήσεων,
- καλύτερη χρήση των μηχανών
- υψηλότερη παραγωγικότητα και
- υψηλότερη ποιότητα των παραγομένων προϊόντων.

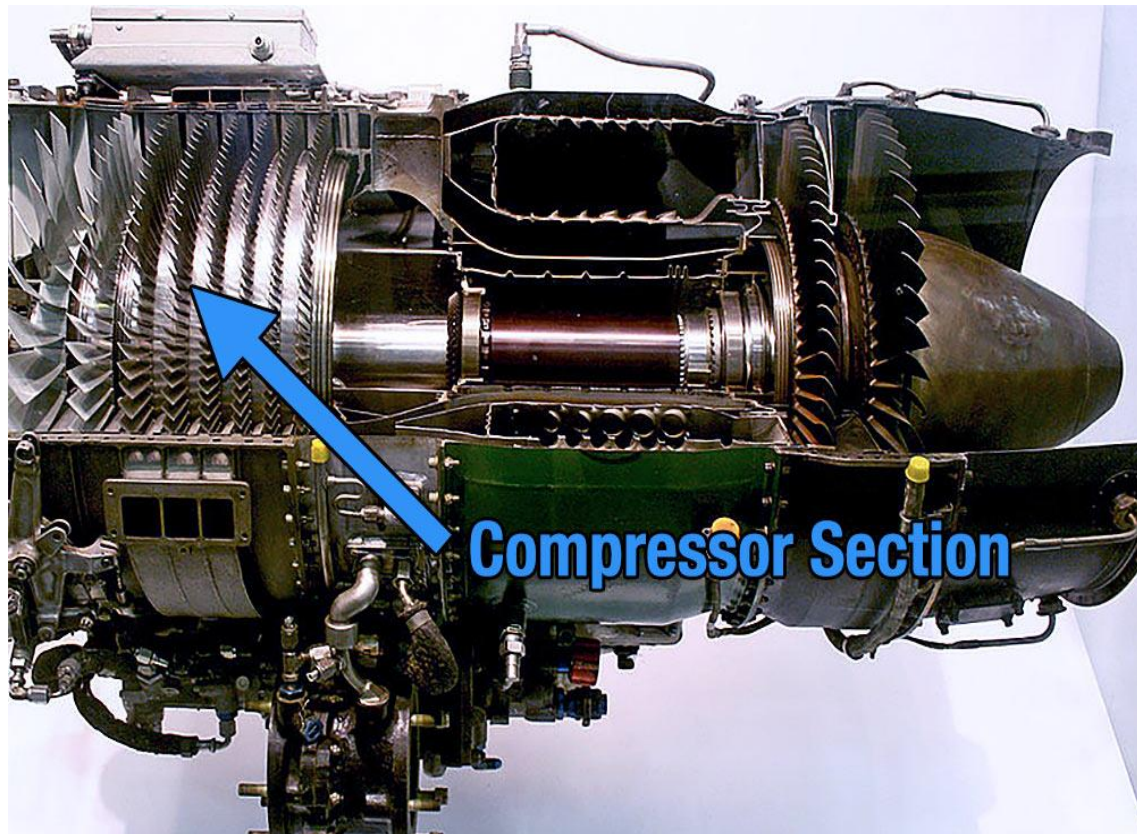
Συνεπώς στα θερμά τμήματα του στροβιλοκινητήρα που λειτουργούν σε θερμοκρασία άνω των 1000 °C, με τις επικαλύψεις, οι θερμοκρασίες των τοιχωμάτων δεν ξεπερνούν εν τέλει τους 100 °C. Αυτή η θερμοκρασιακή μείωση αυξάνει το χρόνο ζωής των εξαρτημάτων και συγχρόνως, επιτρέπει να λειτουργούν οι στροβιλομηχανές σε υψηλότερη θερμοκρασία αυξάνοντας έτσι την απόδοσή τους .

Οι επικαλύψεις πλάσματος χρησιμοποιούνται και για την προστασία τμημάτων του α/φους τα οποία βρίσκονται έξω από τον κινητήρα. Αξίζει να αναφερθούν τα εξής:

- τα επιστρώματα στα κιβώτια ταχυτήτων μαγνησίου παρέχουν προστασία ενάντια στο καυτό πετρέλαιο και τη διάβρωση
- προστατεύουν τις επιφάνειες αλουμινίου και μαγνησίου από την ατμοσφαιρική διάβρωση και την υπεριώδη ακτινοβολία.
- χρησιμοποιούνται για να προστατεύσουν τα συγκροτήματα γρναζιών του συστήματος προσγείωσης των αεροσκαφών, όπως τα έμβολα των γρναζιών προσγείωσης.

Στους παρακάτω πίνακες περιέχονται τα βασικά τμήματα των αεριοστροβίλων καθώς και το είδος των επικαλύψεων που συναντώνται σε αυτά.

- Συμπιεστής



Εικόνα 5.2: Εσωτερικό τμήμα συμπιεστή.

Πίνακας 5.4: Εφαρμογές των επικαλύψεων σε τμήματα του συμπιεστή

Τμήμα	Υπόστρωμα	Είδος επικάλυψης	Στόχος
Πτερύγια Συμπιεστού	Κάλυμμα στα τακάκια και στη ρίζα των πτερυγίων	Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία από την υπερφόρτιση και την παλμική φθορά υψηλής συχνότητας
Σύνδεσμοι πτερυγίων, Έδρανα	Αντιτριβικές επιφάνειες	Χαλκός- Νικέλιο- Ίνδιο	Προστασία από την απόξεση
Άξονας Συμπιεστού	Τμήμα έδρασης στροφαλοφόρου άξονα	Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία από την παλμική φθορά
Κωνικοί οδοντοτροχοί, Κιβώτιο ταχυτήτων	Αντιτριβικές επιφάνειες	Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία από την παλμική φθορά

Τμήμα	Υπόστρωμα	Είδος επικάλυψης	Στόχος
Πτερύγια Συμπιεστού	Αεροτομές	Βολφράμιο - Καρβίδιο του Τιτανίου - Βολφραμιούχο καρβίδιο- Νιτρικό Τιτάνιο	Προστασία από την διάβρωση των μορίων
Δίσκοι και Άξονες	Διαμορφωτήρας	Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία από την παλμική φθορά
Πολλαπλοί σύνδεσμοι διαστολής εξαεριστήρα	Τελικές επιφάνειες	Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία από την φθορά λόγω ολίσθησης και την παλμική φθορά
Σωλήνας στον στάτορα	Αυλάκια των στεγανωτικών δακτυλίων	Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία από την παλμική φθορά
Στροφεία και Διαχύτες	Επιφάνεια των πτερυγίων	Βολφράμιο - καρβίδιο του Τιτανίου - Βολφραμιούχο καρβίδιο- Νιτρικό Τιτάνιο	Προστασία από την διάβρωση των μορίων

- Γρανάζια και άλλα εξαρτήματα



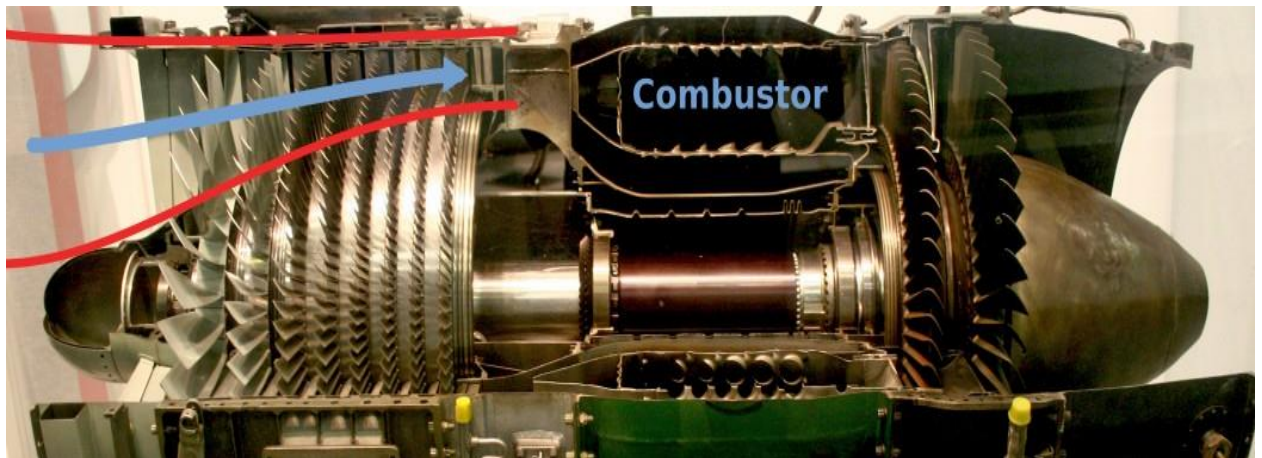
Εικόνα 5.3: Γρανάζια και εξαρτήματα στο εσωτερικό του αεροστρόβιλου.

Πίνακας 5.5: Εφαρμογές επικαλύψεων στα γρανάζια και στα εξαρτήματα του αεροστρόβιλου.

Τμήμα	Υπόστρωμα	Είδος επικάλυψης	Σκοπός
Μεταλλική στεφάνη και στεγανωτικός δακτύλιος εδράνων	Δακτυλιοειδής επιφάνεια του στεγανωτικού δακτυλίου	Καρβίδιο του Χρωμίου, Βολφραμιούχο καρβίδιο	Να εμποδίσει την φθορά ολίσθησης ανάμεσα στις δύο επιφάνειες
Θήκες εδράνων και συγκροτήματα στεγανωτικών δακτυλίων	Επιφάνεια του στεγανωτικού δακτυλίου	Καρβίδιο του Χρωμίου, Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία από τη φθορά ολίσθησης

Τμήμα	Υπόστρωμα	Είδος επικάλυψης	Σκοπός
Θήκες στεγανωτικών δακτυλίων των εδράνων	Δευτερογενής μεταλλική επιφάνεια των στεγανωτικών δακτυλίων	Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία από παλμική φθορά
Σφήνες που στηρίζουν το κιβώτιο ταχυτήτων, αντιτριβικοί δακτύλιοι και λαβές	Επιφάνεια εδράνων	Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία από παλμική φθορά
Αντλία μεταφοράς λαδιού στα γρανάζια	Κουζινέτο του στροφέα	Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία από παλμική φθορά
Σωλήνες αποστράγγισης λαδιού	Επιφάνεια του στεγανωτικού δακτυλίου	Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία από παλμική φθορά
Ψύκτρες	Μαχαιρωτές άκρες και πρόσοψη	Βολφραμιούχο καρβίδιο, καρβίδιο του Χρωμίου, οξειδίο του Αλουμινίου	Προστασία από τη φθορά λόγω τριβής

- Θάλαμος καύσης



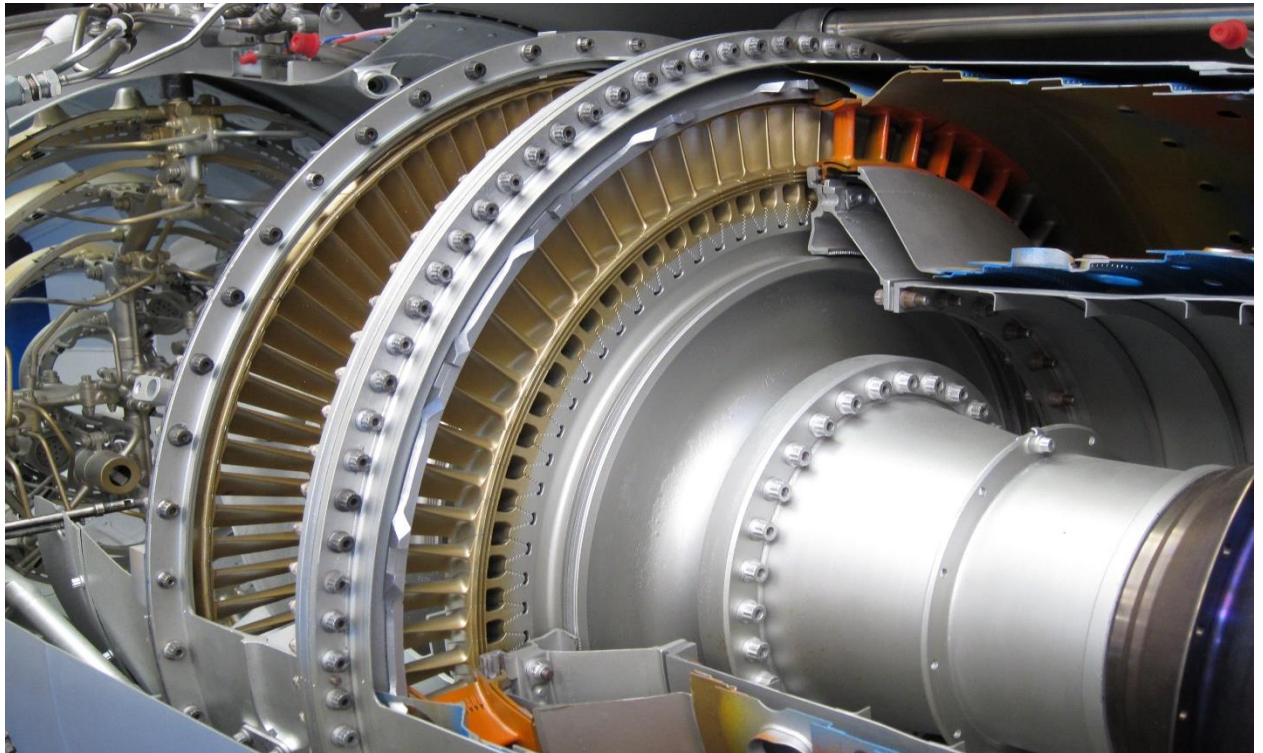
Εικόνα 5.4: Εσωτερικό τμήμα θαλάμου καύσεως.

Πίνακας 5.6: Εφαρμογές επικαλύψεων σε τμήματα του θαλάμου καύσεως.

Τμήμα	Υπόστρωμα	Είδος επικάλυψης	Στόχος
Αντιτριβικοί δακτύλιοι και σφήνες στο θάλαμο καύσης	Επιφάνεια εδράνων	Καρβίδιο του Χρωμίου, Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία από παλμική φθορά
Περικόχλιο ακροφυσίου έγχυσης καυσίμου	Επιφάνεια εδράνων	Καρβίδιο του Χρωμίου	Προστασία από παλμική φθορά
Στροφέιο αντλίας καυσίμου	Επιφάνεια εδράνων	Καρβίδιο του Χρωμίου	Αποτρέπει τη χαλάρωση του ακροφυσίου
Συγκρότημα θαλάμου καύσης	Εσωτερικές επιφάνειες	Καρβίδιο του Χρωμίου	Παρέχει θερμική μόνωση
Συσφικτήρας θαλάμου καύσης	Επιφάνεια συγκράτησης της φλόγας	Καρβίδιο του Χρωμίου	Προστασία από παλμική φθορά
Εσωτερική ενίσχυση σωλήνων στο θάλαμο καύσης	Εξωτερική επιφάνεια	Καρβίδιο του Χρωμίου	Προστασία από παλμική φθορά
Συγκρότημα υποστήριξης	Επιφάνειες εδράνων	Καρβίδιο του Χρωμίου	Προστασία από παλμική φθορά

Τμήμα	Υπόστρωμα	Είδος επικάλυψης	Στόχος
θαλάμου καύσεως			

- Στρόβιλος



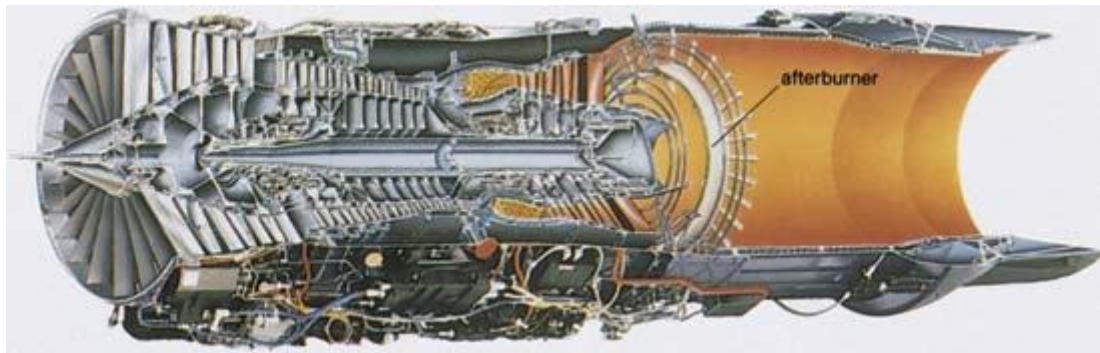
Εικόνα 5.5: Εσωτερικό τμήμα στρόβιλου.

Πίνακας 5.7: Εφαρμογές επικαλύψεων στον στρόβιλο.

Τμήμα	Υπόστρωμα	Είδος επικάλυψης	Στόχος
Διχαλωτοί σύνδεσμοι και ωστικά κυρτώματα ατράκτου	Αντιτριβικές επιφάνειες	Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία από παλμική φθορά
Πτερύγια Στροβίλου	Ακάλυπτα ακροπτερύγια	Ισχυρό κεραμικό μείγμα κράματος Κοβαλτίου	Προστασία από τη φθορά λόγω τριβής
Εξωτερικοί αεροφράχτες	Στεγανωτική επιφάνεια	Κράμα Κοβαλτίου, Θερμικά φράγματα	Δημιουργία επιφάνειας ανθεκτικής στην τριβή, προστασία από τη διάβρωση

Τμήμα	Υπόστρωμα	Είδος επικάλυψης	Στόχος
Πτερύγια ρότορα και στάτορα	Αεροτομές	Κράμα Κοβαλτίου, θερμικά φράγματα	Προστασία από την οξειδωση και θερμική μόνωση
Πτερύγια ρότορα	Στην άκρη του καλυμμένου ακροπτερυγίου	Ισχυρό κεραμικό μείγμα κράματος Κοβαλτίου	Προστασία από τη φθορά τριβής
Κάλυμμα του στάτορα	Φλάτζα καλύμματος	Καρβίδιο του Χρωμίου, ισχυρό κεραμικό μείγμα κράματος Κοβαλτίου	Προστασία από παλμική φθορά
Πτερύγια στάτορα	Εσωτερικά τακάκια	Καρβίδιο του Χρωμίου, ισχυρό κεραμικό μείγμα κράματος Κοβαλτίου	Προστασία από παλμική φθορά
Στεγανωτικοί δακτύλιοι και μεταλλικές στεφάνες	Δακτυλιοειδής επιφάνεια	Καρβίδιο του Χρωμίου, ισχυρό κεραμικό μείγμα κράματος Κοβαλτίου	Προστασία από παλμική φθορά
Πτερύγια ρότορα	Εγκοπες καλύμματος	Ισχυρό κεραμικό μείγμα κράματος Κοβαλτίου, Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία παλμικής φθοράς σε θερμοκρασία άνω των 538 °C
Αεροδυναμικές σφήνες και αντιτριβικοί δακτύλιοι στο τμήμα εξαγωγής των καυσαερίων	Αντιτριβικές επιφάνειες	Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία από παλμική φθορά

- Σύστημα μετάκαυσης



Εικόνα 5.6: Σύστημα μετάκαυσης.

Πίνακας 5.8: Εφαρμογές επικαλύψεων στο σύστημα μετάκαυσης.

Τμήμα	Υπόστρωμα	Είδος επικάλυψης	Σκοπός
Ψεκαστήρες	Αντιτριβικές επιφάνειες	Καρβίδιο του Χρωμίου	Προστασία από παλμική φθορά
Θάλαμος καύσης	Εσωτερική επιφάνεια	Θερμικά φράγματα	Παροχή θερμικής μόνωσης
Στεγανωτικοί δακτύλιοι, τμήματα ακροφυσίου και των διατάξεων flap	Αντιτριβικές επιφάνειες, επιφάνεια πρόσκρουσης της φλόγας	Καρβίδιο του Χρωμίου, θερμικά φράγματα	Προστασία από παλμική φθορά Παροχή θερμικής μόνωσης
Συγκρότημα ενίσχυσης ακροφυσίου	Αντιτριβικές επιφάνειες	Καρβίδιο του Χρωμίου	Προστασία από παλμική φθορά
Στροφέιο αντλίας καυσίμου	Κουζινέτα του στροφείου	Βολφραμιούχο καρβίδιο	Προστασία από την ολίσθηση

Στη συνέχεια, παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας αναφορικά με τις εφαρμογές που έχει κάθε σκόνη επικάλυψης που χρησιμοποιείται σε αεροσκάφος καθώς και οι ιδιότητες που προσδίδουν:

Πίνακας 5.9: Συγκεντρωτικός πίνακας με τις εφαρμογές των επικαλύψεων στα αεροσκάφη

Σκόνη	Εμπορική ονομασία σκόνης	Ιδιότητες σκόνης	Εξαρτήματα
Κράμα WC - Kb	M 72 FNS, 20	Αντίσταση στη φθορά στις χαμηλές θερμοκρασίες (Σ.Τ.: 1260 °C) Αντίσταση στη φθορά των λειαντικών κόκκων Ανθεκτικές σκληρές επιφάνειες Αντοχή στη διάβρωση εξαιτίας των τριβών Αντοχή στη διάβρωση των σωματιδίων – μορίων Άηκτα σωματίδια λιγότερα του 5% Πορώδες λιγότερο του 2% Πυκνότητα 14,5 Μικρο – μακρο σκληρότητα	Εξωτερικό flap του Ακροφυσίου εξαγωγής, Ακροαξόνιο του ρότορα του συμπιεστή, δίσκος του ρότορα του συμπιεστή, στρόφαλος του LPT, stg 1 και 2, εμπρόσθιο πλαίσιο στήριξης των εδράνων του στροβίλου
Κράμα Ni-Cr-Cb-Ti-Mb-W-Al	Amdry Rene 80, 13	Μπορεί να αξιοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλο μέταλλο ως συγκόλληση ενεργοποιημένης διάχυσης	Φλάντζα υποστήριξης, άξονας του HPT
Κράμα Al ₂ O ₃	M 101BNS	Αντοχή και στη φθορά και στην θερμότητα (Σ.Τ.: 2010 °C) Καλή αντοχή στην τριβή και στην πρόσκρουση Όχι μεγάλη απόδοση ως TBC Αντίσταση στη διάβρωση των μορίων στις χαμηλές θερμοκρασίες Εξαιρετικά σκληρές Χαμηλές τριβικές ιδιότητες Χημικά σταθερή Μεγάλη πυκνότητα αντοχή στο έντονο διαβρωτικό περιβάλλον Πολύ καλή αντοχή σε θερμικό σοκ	
Κράμα Ni-Cr-Mb-Nb-Ta-Al-Ti-C	Inconel 718, Cl. B	Για ειδικές εφαρμογές, όπως ανανεωμένες επιφάνειες και μεγάλα διάκενα Αντοχή στη φθορά Μπορεί να αξιοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλο μέταλλο ως συγκόλληση ενεργοποιημένης διάχυσης	Άξονας του στροβίλου υψηλής πίεσης HPT
Υψηλής περιεκτικότητας κράμα Cr	T800 (M 68FNS1)	Αντίσταση στη φθορά στις υψηλές θερμοκρασίες Αντοχή στη διάβρωση ειδικά σε νιτρικά, όξινα και χλωριδιοσιδηρούχα περιβάλλοντα Θερμική κατεργασία μετά τον ψεκασμό στους 1175 °C αυξάνει την αντίσταση στη φθορά, εξαλείφει το πορώδες Ιδανική για κρίσιμες αντιδιαβρωτικές εφαρμογές	Υποστήριγμα του στεγανωτικού δακτυλίου του HPT, πίσω μέρος του σταθερού στεγανωτικού δακτυλίου της φλάντζας του στάτορα του LPT, μεταλλική στεφάνη
Σύνθετο Ni-Cr-Al ή σύνθετο Ni-Al	M 443NS or M 450NS	Πολύ ανθεκτική στην οξείδωση και στα διαβρωτικά αέρια στις υψηλές θερμοκρασίες Πολύ καλή πρόσφυση Μεγάλη πυκνότητα Μικρό πορώδες Μικρό ποσοστό οξειδίων	Σταθερός στεγανωτικός δακτύλιος του LPT, άξονας στροφέιου συμπιεστή υψηλής πίεσης (HPC), συγκρότημα μεταλλικής στεφάνης, έδρανο κωνικών γραναζιών, οδηγά πτερύγια εισόδου, πλαίσιο συμπιεστή

Σκόνη	Εμπορική ονομασία σκόνης	Ιδιότητες σκόνης	Εξαρτήματα
Y ₂ O ₃ Σταθεροποιημένη ZrO ₂	M 204BNS, 8	Χημική ομοιογένεια Δομική σταθερότητα Υψηλή καθαρότητα Ομοιόμορφη τήξη σωματιδίων Φράγματα υψηλών θερμοκρασιών (TBC) Αντίσταση στις θερμικές κυκλικές τάσεις	Εσωτερική ενίσχυση του θαλάμου κάυσης, εξωτερική ενίσχυση του θαλάμου κάυσης, θόλος του θαλάμου καύσης, Αποκλίνων στεγανωτικός δακτύλιος, αποκλίνων flap, ακροφύσιο LPT, ακροφύσιο εκκένωσης για ενίσχυση της καύσης
Υψηλής περιεκτικότητας κράμα Kb-Mb-Cr	M 66FNS, 12	Αντίσταση στην διάβρωση ειδικά σε μη οξειδωτικά και αναγωγικά περιβάλλοντα Αντίσταση στην οξείδωση Εξαιρετική αντοχή στη φθορά Αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 750 °C) Κατάλληλη ειδικά όπου η λίπανση είναι ανεπαρκής ή απουσιάζει αφού έχει χαμηλό συντελεστή τριβής Θερμική κατεργασία μετά τον ψεκασμό στους 1175 οC αυξάνει την αντίσταση στη φθορά, εξαλείφει το πορώδες	Εξωτερική γραμμή υποστήριξης του θαλάμου καύσης, πτερύγια του ρότορα του συμπιεστή, σταθερά πτερύγια
Κράμα Al-Bronze	M 51FNS	Μέτρια αντοχή έναντι της οξείδωσης, της φθοράς και της διάβρωσης λόγω τριβής στις χαμηλές θερμοκρασίας Σ.Τ.: 1040 °C Εύκολα κατεργάσιμη	Πτερύγια στροφείου έλικας, τομείς πτερυγίων στάτορα συμπιεστή, επιπρόσθετο κιβώτιο γρναζιών του προσαρμογές του πλαισίου της έλικας, συγκρότημα του σώματος της ενισχυτικής αντλίας καυσίμου
Κράμα Cr ₂ C ₃ -Ni-Cr	M 81VFNS	Καλή λειαντική ικανότητα Αντίσταση στη διάβρωση μορίων, σπληαίωση, φθορά τριβής στο εύρος άνω των 815 οC Καλή αντοχή στη διάβρωση των ζεστών αερίων Καλή αντοχή στη διάβρωση και οξείδωση πάνω από τους 900 °C	Στεγανωτικοί δακτύλιοι, αποκλίνων flap, υποστήριγμα του εσωτερικού ακροφυσίου του HPT, πρωτεύων flap στεγανωτικός δακτύλιος του ρότορα του HPC
Al-Si-Polyester	M601NS	Έλεγχος ανοχών των κατεργαζόμενων εξαρτημάτων Υψηλή λειαντική ικανότητα με ουσιώδη απουσία φθοράς στις κορυφές των πτερυγίων Εξαιρετική αντίσταση στην οξείδωση σε θερμοκρασίες άνω των 345 °C Καλή αντοχή στο θερμικό σοκ Αρχίζει να μαλακώνει στους 425 °C Η σκληρότητα μειώνεται με την ένταση του ρεύματος	Μπροστινή θήκη συμπιεστή χαμηλής πίεσης (LPC), παρέμβυσμα ελαίου αέρα, οδηγά πτερύγια εισόδου συμπιεστή, συγκρότημα οδηγών πτερυγίων εξόδου, συγκρότημα θηκών των πτερυγίων του LPC, στεγανωτικός δακτύλιος του LPC
Κράμα WC-Co	M 73FNS1, 25	Μεγάλη σκληρότητα Μεγάλη αντοχή στη φθορά λόγω τριβής (χάρη στο Co) Προστασία έναντι φθοράς ολίσθησης (εφαρμογές όπου απαιτείται μικρός συντελεστής τριβής)	Κέλυφος συμπιεστού πτερύγια stg. 1-2, εξωτερικό flap ακροφυσίου εξαγωγής

Σκόνη	Εμπορική ονομασία σκόνης	Ιδιότητες σκόνης	Εξαρτήματα
		Προστασία έναντι στη φθορά σφρηλάττησης, λείανση και φθορά λόγω τριβής Να μην χρησιμοποιείται σε θερμοκρασίες άνω των 500 °C ή σε διαβρωτικό περιβάλλον	
Σκόνη Al	M 54NS, 10	Μη μαγνητικές Θερμικά και ηλεκτρικά αγωγίμες Αντοχή σε διάβρωση και στους κραδασμούς Ικανές να παρέχουν κάλυψη από ραδιοσυχνότητες	Εσωτερικό τμήμα του κελύφους του συμπιεστή
Y ₂ O ₃ - ZrO ₂	M 204BNS, 8	Χημική ομοιογένεια Δομική σταθερότητα Υψηλή καθαρότητα Ομοιόμορφη τήξη σωματιδίων Φράγματα υψηλών θερμοκρασιών (TBC) Αντίσταση στις θερμικές κυκλικές τάσεις	Εσωτερική /εξωτερική διάμετρος θαλάμου καύσεως
Κράμα Co	M 45CNS	Αντιτριβικές Αντιδιαβρωτικές	Δαχτυλίδι υποστήριξης, Περιστρεφόμενος στεγανωτικός δακτύλιος , εξωτερικά flaps, συγκρατητήρας της φλάντζας, δακτύλιος στήριξης σταθερού καλύμματος
Cu-Ni-In	M 58NS	Πυκνές επικαλύψεις Ανθεκτικές στη διάβρωση και το γδάρισμα της τριβής Σημείο τήξης 1150 °C	Πτερύγια συμπιεστή χαμηλής πίεσης (LPC)
Σύνθετο Ni- Aluminide	M 404NS	Υψηλή πυκνότητα Αντοχή έναντι της οξειδωσης στις υψηλές θερμοκρασίες άνω των 650 °C Αντοχή στο θερμικό σοκ Αντοχή στην τριβή Καλή επιλογή για θερμοκρασίες κάτω των 650 °C Σημείο τήξης 1650 °C	Δαχτυλίδι ψεκασμού
Κράμα Ni- Γραφίτη	M 307NS	Αυτολιπόμενο Κατάλληλο για χρήση στον τομέα του συμπιεστή Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μείωση της τριβής στα έδρανα Περιοχή λειτουργίας περίπου άνω των 480 °C	Στεγανωτικός δακτύλιος ελαίου του Νο.1 εδράνου, εμπρόσθιο πλαίσιο στήριξης των εδράνων του στροβίλου
Mb	M 63NS	Πυκνές Σκληρές Ανθεκτικές στη φθορά Αντιδιαβρωτικές Οξειδώνεται εύκολα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 350 °C	Κιβώτιο κύριων οδηγών γρναζιών
Σύρμα καθαρού μολυβδαίνιου	Sprabond	Χρησιμοποιείται για ψεκασμό μόνο με χρήση φλόγας, κατάλληλο για χρήση στον τομέα του συμπιεστή	Κύριος οριζόντιος άξονας μεταφοράς ισχύος, θήκη εισαγωγής αέρα στον συμπιεστή

Σκόνη	Εμπορική ονομασία σκόνης	Ιδιότητες σκόνης	Εξαρτήματα
Σύρμα Al 90%κ.β., χαλκός 9%κ.β., σίδηρος 1%κ.β.	Sprabronze AA	Χρησιμοποιείται για ψεκασμό μόνο με χρήση φλόγας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της τριβής στα έδρανα	Κιβώτια εδράνων, θήκη υποστηρίγματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΘΕΣΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ ΤΙΤΑΝΙΑΣ

6.1 Εισαγωγή

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας που εκπονήθηκε, είναι η πειραματική μελέτη δοκιμίων αλουμινίου, τα οποία έχουν επικαλυφθεί με τη διαδικασία του ατμοσφαιρικού πλάσματος, με σκόνη Αλουμίνας (Al_2O_3) και 3% Τιτανίας (TiO_2).

Η πειραματική μελέτη περιλαμβάνει την διαδικασία ψεκασμού με την μέθοδο του ατμοσφαιρικού πλάσματος (APS), καθώς και πειραματικές μετρήσεις σε δοκιμές εφελκυσμού και κόπωσης, οι οποίες θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια.

6.2 Δοκίμια (υποστρώματα)

Για να πραγματοποιηθεί το πειραματικό μέρος της παρούσας Διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δοκίμια τα οποία απεικονίζονται στις εικόνες 6.1 & 6.2:

- Ελάσματα μορφής διπλού T από κράμα αλουμινίου ($Al2024$) για δοκιμές εφελκυσμού
- Κυλινδρικά δοκίμια από κράμα αλουμινίου ($Al2007$) για δοκιμές κόπωσης



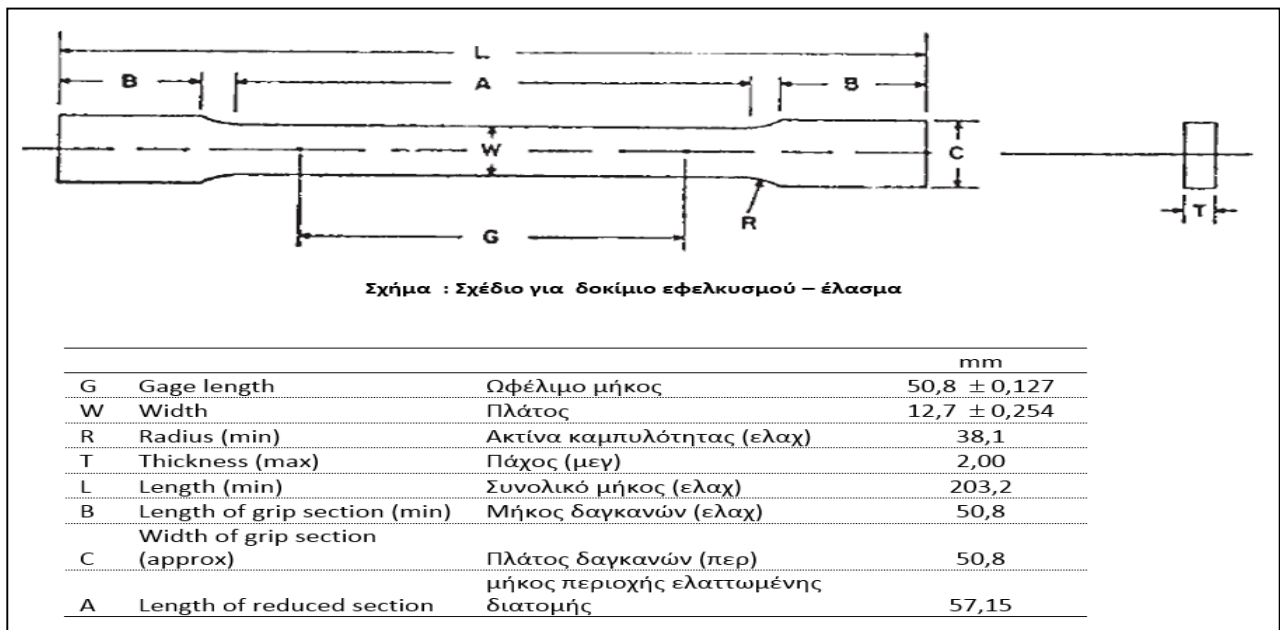
Εικόνα 6.1: Ελάσματα μορφής διπλού T από κράμα αλουμινίου ($Al2024$)



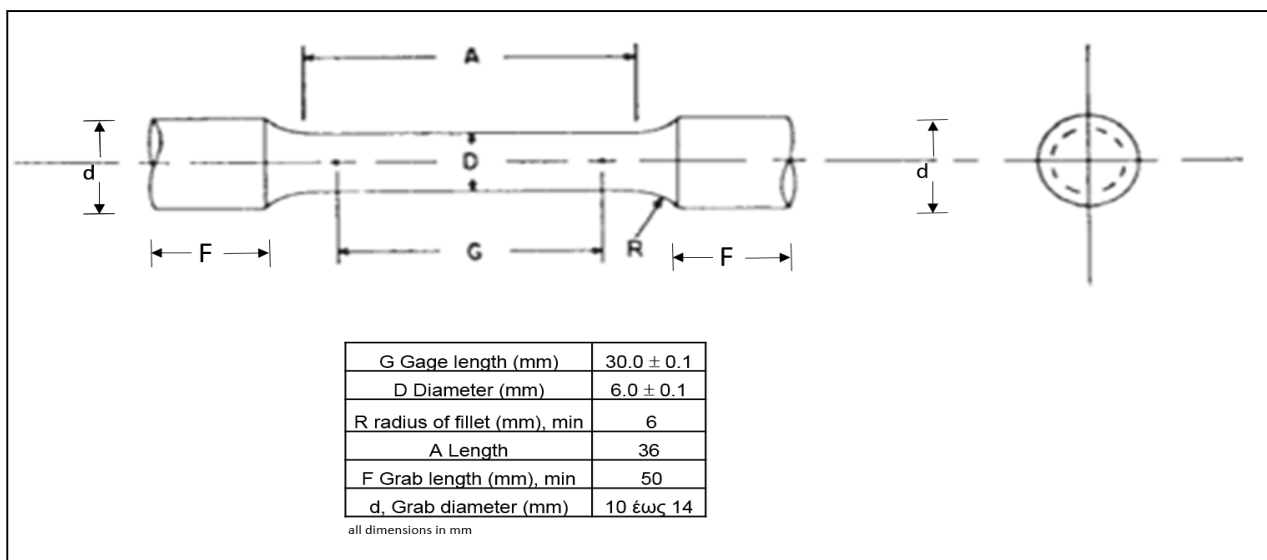
Εικόνα 6.2: Κυλινδρικά δοκίμια από κράμα αλουμινίου (Al2007)

6.2.1 Διαστάσεις δοκιμίων

Τα δοκίμια έχουν μορφοποιηθεί κατάλληλα ώστε να είναι συμβατά με τις δοκιμαστικές συσκευές στις οποίες θα τοποθετηθούν, με απώτερο σκοπό τον χαρακτηρισμό τους. Στα σχήματα 6.1 & 6.2 απεικονίζονται τα μηχανολογικά σχέδια των προαναφερθέντων υλικών μέσα στα οποία εκτός των διαστάσεων τους, αναγράφονται και οι επιτρεπόμενες ανοχές.



Σχήμα 6.1: Διαστάσεις ελασμάτων διπλού T από κράμα αλουμινίου (Al2024)



Σχήμα 6.2: Διαστάσεις κυλινδρικών δοκιμίων από κράμα αλουμινίου (Al2007)

6.2.2 Χημική σύνθεση και μηχανικές ιδιότητες των Δοκιμίων

6.2.2.1 Ελάσματα διπλού T

Τα ελάσματα που έχουν την μορφή διπλού T αποτελούνται από κράμα αλουμινίου Al 2024 το οποίο έχει ως κύριο στοιχείο πρόσμιξης τον Cu όπως απεικονίζεται και στον κάτωθι πίνακα.

Πίνακας 6.1: Χημική σύνθεση Al 2024.

Chemical Composition (weight %)										
Weight (%)	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other
min.	Bal			3.80	0.30	1.20				
max.	Bal	0.50	0.50	4.90	0.90	1.80	0.10	0.25	0.15	0.05

Οι μηχανικές ιδιότητες του Al 2024 απεικονίζονται στον πίνακα 6.2 και εξαρτώνται από την θερμική κατεργασία που έχουν υποστεί.

Πίνακας 6.2: Μηχανικές ιδιότητες Al 2024.

Mechanical Properties				
	Thickness (mm)	Tensile Strength ksi (MPa)	Yield Strength ksi (MPa)	Elongation %
Temper				
0-Sheet & plate	0.010-0.499 (0.25-12.44)	32.0 (max) (220)	14.0 (max) (96)	12
T3-Flat Sheet	0.008-0.249 (0.203-6.32)	63-64 (434-441)	42 (289)	10-15
T351-Plate*	0.250-4.000 (6.35-101.60)	64-57 (441-393)	42-41 (289-282)	12-4
T4-Coiled Sheet	0.010-0.125 (0.254-3.16)	62 (427)	40 (276)	12-15
T81-Flat Sheet	0.010-0.249 (0.254-6.32)	67 (462)	58 (400)	5
T851-Plate	0.250-1.499 (6.35-38.07)	67-66 (462-455)	58-57 (400-393)	5

6.2.2.2 Κυλινδρικά δοκίμια

Τα κυλινδρικά δοκίμια αποτελούνται από κράμα αλουμινίου Al2007, του οποίου το κύριο κραμματικό στοιχείο είναι ο Cu σε αναλογία 3,3-4,6%. Η χημική σύνθεση καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες (αναλόγως της θερμικής κατεργασίας που έχει υποστεί) του υπόψη κράματος απεικονίζονται στους πίνακες 6.3 και 6.4 αντίστοιχα.

Πίνακας 6.3: Χημική σύνθεση Al 2007.

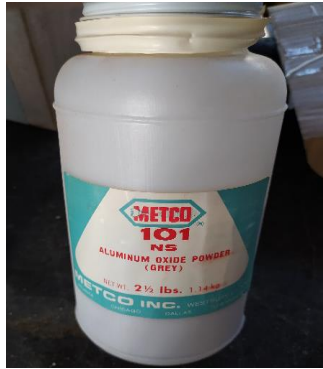
CHEMICAL COMPOSITION												
%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Bi	Sn	Pb
min.	-	-	3,3	0,50	0,40	-	-	-	-	-	-	0,8
max.	0,80	0,80	4,60	1,00	1,80	0,10	0,20	0,80	0,20	0,20	0,20	1,50

Πίνακας 6.4: Μηχανικές ιδιότητες Al 2007

MECHANICAL PROPERTIES ACCORDING TO DIN EN 754-2 (DRAWN)					
Material Condition	Dimensions in mm	Tensile Strength	Yield Point	Ultimate Strain	Hardness
	Diameter Wrench Size	[N/mm ²]	[N/mm ²]	A5 in [%]	[HB]
T3	30 - 80	340 - 370	220 - 250	7	90 - 100
T4	< 80	min. 370	min. 250	8	95
T4511	80 - 200	min. 340	min. 220	8	95
	200 - 250	min. 330	min. 210	7	95

6.3 Σκόνη Ψεκασμού

Για την πραγματοποίηση της επικάλυψης των δοκιμών στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση της σκόνης ψεκασμού METCO 101 NS (εικόνα 6.3). Η συγκεκριμένη σκόνη έχει ως κύριο συστατικό το οξείδιο του αλουμινίου (Al₂O₃) και ως στοιχείο πρόσμιξης 3% οξείδιο του τιτανίου (TiO₂). Οι σκόνες αυτού του τύπου έχουν σχεδιαστεί για να αυξάνουν περαιτέρω την αντοχή (σε διάβρωση, τριβή κτλ) των υλικών που αποτελούνται από οξείδιο του αλουμινίου, προσθέτοντας μικρό ποσοστό (2-4%) τιτανίας. Αυτές οι σκόνες οδηγούν στην δημιουργία πυκνών και λείων επικαλύψεων που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν αντοχή στην τριβή αλλά και ικανοποιητική δυσθραυστότητα.



Εικόνα 6.3: Σκόνη Ψεκασμού METCO 101 NS

Τυπικές χρήσεις και εφαρμογές της METCO 101NS αναγράφονται παρακάτω:

- Σε υδραυλικά συστήματα σε βαλβίδες τύπου πεταλούδας (butterfly valves).
- Σε εργαλεία/συσσκευές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υφασμάτων.
- Σε εφαρμογές που απαιτούν ηλεκτρική μόνωση.
- Σε διηλεκτρικές εφαρμογές.

Στον πίνακα 6.5 περιέχονται τα κύρια χαρακτηριστικά της METCO 101NS συμπεριλαμβανομένης της χημικής της σύνθεσης και του μεγέθους των σωματιδίων της.

Πίνακας 6.5: Ιδιότητες METCO 101NS

Classification	Ceramic, metallic oxide		
Chemical formula	Al₂O₃ 3TiO₂		
Manufacture	Fused and crushed		
Morphology	Angular / blocky		
Purpose	Wear / Abrasion resistance, electrical insulation		
Service Temperature	≤1100°C (2010°F)		
Melting point	2040°C (3700°F)		
Process	Atmospheric Plasma Spray or Combustion Powder Thermospray		
Chemical Composition	Al₂O₃ :94 %	Fe₂O₃ :1 %	Others : ---
	TiO₂ :2.5 %	MgO : ---	
	SiO₂ :2 %	CaO : ---	
Particle Size Distribution	Nominal Range μm	-45 +11	
	Color	Grey	
	Morphology	Angular / Blocky	

6.4 Απόθεση Επικαλύψεων

Όπως προαναφέρθηκε στην παρ.6.1 τα δοκίμια επικαλύφθηκαν με την μέθοδο του ατμοσφαιρικού πλάσματος με την κεραμική σκόνη METCO 101NS η οποία αποτελείται από Αλουμίνα (Al₂O₃) και 3% Τιτανία (TiO₂).

6.4.1 Αμμοβολή

Πριν από τον ψεκασμό τους, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κατεργασία αμμοβολής. Η συγκεκριμένη διαδικασία λαμβάνει χώρα προκειμένου να απομακρυνθούν τα οξειδία και να τραχυνθεί η επιφάνεια των ελασμάτων και δοκιμίων όπως εξάλλου αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3. Η διάταξη αμμοβολής αποτελείται από ένα θάλαμο αμμοβολής (blast cabinet) Guyson Euroblast 7 sf και από ένα dust collector 70/3 D/C (3 Phase, 400 V). Τα σωματίδια εκτριβής ήταν σκόνη Al₂O₃ μεγέθους Grit 120. Η υπόψη διάταξη απεικονίζεται στην εικόνα 6.4



Εικόνα 6.4: Διάταξη όπου πραγματοποιήθηκε η αμμοβολή των δοκιμίων.

6.4.2 Ψεκασμός των αμμοβολημένων δοκιμίων με bonding spray powder (bond coat)

Μετά την αμμοβολή των δοκιμίων ακολούθησε ο θερμικός ψεκασμός (με plasma spray) τους με την κεραμική σκόνη Metco 404NS, η οποία αποτελείται από Νικέλιο με στοιχείο πρόσμιξης το Αλουμίνιο σε ποσοστό 20%. Ο ψεκασμός των δοκιμίων με αυτήν την ενδιάμεση στρώση (bond coat) έχει ως σκοπό την καλύτερη πρόσφυση της τελικής επικάλυψης πάνω στο υπόστρωμα. Πιο συγκεκριμένα, επειδή το υπόστρωμα και η κυρίως επικάλυψη παρουσιάζουν διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής, επιβάλλεται η χρήση μιας συνδετικής επικάλυψης η οποία εξομαλύνει την προαναφερθείσα διαφορά. Εκτός όμως από την εξομάλυνση της διαφοράς των θερμικών ιδιοτήτων του υποστρώματος και της κυρίως επικάλυψης, η ενδιάμεση επικάλυψη (bond coat) συμβάλλει και στην εξομάλυνση των διαφορών που παρατηρούνται και στις μηχανικές ιδιότητες των προαναφερθέντων επιφανειών.

6.4.3 Θερμικός ψεκασμός με χρήση ατμοσφαιρικού πλάσματος και παράμετροι ψεκασμού.

Ο ψεκασμός των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με την χρήση του SG-100 Plasma Spray Gun της Praxair που είναι προσαρμοσμένο πάνω σε ρομποτικό βραχίονα της εταιρείας KUKA όπως απεικονίζεται στην εικόνα 6.5 και 6.6. Το όπλο ψεκασμού Praxair SG-100 διαθέτει ηλεκτρόδιο ανόδου, καθόδου καθώς και δακτύλιο προσαρμογής της ροής των αδρανών αερίων για τη δημιουργία του πλάσματος στο εσωτερικό του. Εξωτερικά των ηλεκτροδίων υπάρχει σύστημα ψύξης για την προστασία αυτών αλλά και των μεταλλικών μερών του όπλου από τις πολύ υψηλές θερμοκρασίες του πλάσματος. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά το θερμικό ψεκασμό, γίνεται χρήση συστήματος ψύξης κλειστού βρόγχου ώστε να υπάρχει επαρκής ψύξη του όπλου με σκοπό την αποφυγή της τήξης του. Η κυκλοφορία του νερού ψύξης επιτυγχάνεται με μονάδα διανομής η οποία είναι συνδεδεμένη με την κεντρική μονάδα ελέγχου του συστήματος ψεκασμού. Σκοπός της κεντρικής μονάδας ελέγχου της διάταξης της συσκευής είναι η ρύθμιση της έντασης του ρεύματος που περνάει από τα ηλεκτρόδια και του ρυθμού ροής των αδρανών αερίων (Ar , H_2) που δημιουργούν το πλάσμα. Η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται στο σύστημα από πηγή συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης. Για την έναυση του όπλου χρησιμοποιείται για μικρό χρονικό διάστημα εναλλασσόμενο ρεύμα το οποίο δημιουργεί σπινθήρα στο εσωτερικό της ανόδου λόγω της πρόσκρουσης των ατόμων του αδρανούς αερίου μεταξύ τους καθώς εναλλάσσεται το δυναμικό. Η φλόγα του πλάσματος δημιουργείται από μίγμα δύο αερίων, αργό και υδρογόνο.



Εικόνα 6.5: Διάταξη της συσκευής ψεκασμού με χρήση πλάσματος για τα κυλινδρικά δοκίμια



Εικόνα 6.6: Διάταξη της συσκευής ψεκασμού με χρήση πλάσματος για τα δοκίμια διπλού T.

Οι χρησιμοποιούμενες παράμετροι ψεκασμού περιέχονται στον κάτωθι πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.6: Παράμετροι ψεκασμού.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΣΚΟΝΗΣ METCO 101NS			
ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΨΕΚΑΣΜΟΥ			
Ρομποτικός βραχίονας (μοντέλο, εταιρεία, άξονες κίνησης):			KR15/2, KUKA, 6
Όπλο ψεκασμού (μοντέλο, εταιρεία):			SG-100, Praxair
ΑΕΡΙΑ			
Πίεση:	Πρωτεύον αέριο, αργό (Ar):	psi:	120
	Δευτερεύον αέριο, υδρογόνο (H ₂):	psi:	9
	Φέρον αέριο (carrier), αργό (Ar):	psi:	10
ΙΣΧΥΣ ΜΟΝΑΔΟΣ			
	Ένταση ρεύματος τόξου:	A:	500
	Τάση τόξου:	V:	60-70
ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΣΚΟΝΗΣ			
	Ροή σκόνης:	g/min:	5
ΨΕΚΑΣΜΟΣ			
	Απόσταση ψεκασμού:	mm:	140
	Ταχύτητα όπλου:	mm/sec:	96
	Ακτίνα κάλυψης:	mm/step:	6

6.5 Μέτρα προστασίας

Δεδομένου ότι ο ψεκασμός με χρήση πλάσματος καθώς και οι εργασίες που τον συνοδεύουν (όπως είναι η αμμοβολή) είναι αρκετά επικίνδυνες για την ανθρώπινη υγεία, είναι απαραίτητο να τηρηθούν κάποιοι βασικοί κανόνες.

Παρακάτω αναφέρονται οι κίνδυνοι που συνεπάγεται ένας ψεκασμός με τη χρήση πλάσματος, καθώς και τα μέτρα προφύλαξης που μπορούν να ληφθούν.

6.5.1 Αποφυγή πυρκαγιάς και μέτρα προφύλαξης

Οι μεταλλικές σκόνες, τα στερεά σε λεπτό διαμερισμό, πρέπει να αντιμετωπίζονται σαν εκρηκτικά. Προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος από εκρήξεις σκόνης πρέπει να παρέχεται ο κατάλληλος αερισμός στα δωμάτια που πραγματοποιείται ο ψεκασμός. Γι' αυτό το λόγο υπάρχει πάνω από το θάλαμο όπου λαμβάνει χώρα ο ψεκασμός, διάταξη που ανανεώνει τον αέρα. Η σκόνη που δημιουργείται κατά τον ψεκασμό μπορεί να συγκρατείται από ένα αποκονιωτή υγρού τύπου ή αλλιώς, όπως ονομάζεται ευρέως, «καταρράκτης νερού». Σε αυτή τη διάταξη διοχετεύεται απιονισμένο νερό και χρησιμεύει και για την ψύξη του χώρου.

Ο χώρος εργασίας θα πρέπει να διατηρείται καθαρός προκειμένου να αποφευχθεί η συσσώρευση μεταλλικών σκονών, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή σε περιοχές όπως ρωγμές στο πάτωμα, στο πάνω μέρος των δωματίων ψεκασμού, στις δοκούς, όπου μπορεί να συγκεντρωθεί σκόνη. Στους χώρους που πραγματοποιείται ο ψεκασμός δεν πρέπει να αποθηκεύονται υλικά όπως χαρτί, ξύλο, στουπί και διάφορα διαλυτικά καθαρισμού τα οποία μπορεί να πάρουν φωτιά εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια ενός ψεκασμού.

6.5.2 Εξοπλισμός του συστήματος ψεκασμού με χρήση πλάσματος

Σε αυτή τη μέθοδο ψεκασμού αναπτύσσονται υψηλές εντάσεις ρεύματος και τάσεις που μπορεί να επιφέρουν κάποια ηλεκτρική καταστροφή. Γι' αυτό το λόγο πρέπει να πραγματοποιείται περιοδικός έλεγχος των καλωδίων, της μόνωσης, των σωλήνων που μεταφέρουν αέρια, νερό και σκόνη. Οποιοδήποτε ελάττωμα ή σφάλμα του εξοπλισμού πρέπει να διορθώνεται ή να αντικαθίσταται αμέσως. Καμία όμως από τις προσπάθειες επιδιορθώσεις ή αντικατάσταση εξαρτημάτων δεν πρέπει να γίνεται προτού αποσυνδεθεί όλο το σύστημα.

Η πηγή ενέργειας και το όπλο ψεκασμού πρέπει να καθαρίζονται συχνά προκειμένου να αποφευχθεί η συγκέντρωση μεταλλικής σκόνης που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα.

6.5.3 Προστασία του προσωπικού

Για την προστασία των ματιών κατά τη διάρκεια του ψεκασμού θα πρέπει ο χειριστής να φοράει ειδική μάσκα. Η μάσκα προφυλάσσει από την υπέρυθρη και υπεριώδη ακτινοβολία καθώς και τα αιωρούμενα σωματίδια. Ωστόσο στην δική μας πειραματική διάταξη όπου ο ψεκασμός πραγματοποιήθηκε σε κλειστό ειδικά διαμορφωμένο χώρο, με την χρήση ρομποτικού βραχίονα, δεν απαιτήθηκε η χρήση μάσκας.

Όλο το προσωπικό στην περιοχή του ψεκασμού πρέπει να προστατεύει την ακοή του, αν η έκθεση σε ηχορύπανση υπερβαίνει κάποια καθορισμένα όρια. Η επίδραση του θορύβου εξαρτάται από το πόσο δυνατός είναι, αλλά και από τη διάρκεια του. Επειδή ο ψεκασμός πλάσματος προκαλεί υπερβολικό θόρυβο, κρίνεται απαραίτητη η χρήση ειδικών προστατευτικών για τα αυτιά, ή μόνωση του χώρου εργασίας.

Επίσης και αναλόγως της χρησιμοποιούμενης διάταξης ψεκασμού, κατά τη διάρκεια του ψεκασμού πρέπει να χρησιμοποιείται κατάλληλος ρουχισμός που εξαρτάται από το μέγεθος, τη φύση και την τοποθεσία διεκπεραίωσης της εργασίας. Όταν η εργασία γίνεται σε περιορισμένο χώρο, ο ρουχισμός πρέπει να είναι ανθεκτικός στη φωτιά και να χρησιμοποιούνται γάντια από δέρμα ή λάστιχο. Η στολή θα πρέπει να είναι κατασκευασμένη από ειδικό πυρίμαχο υλικό.

Ακόμη, πρέπει να τονιστεί ότι από τη στιγμή που η διαδικασία είναι αυτοματοποιημένη λόγω του ρομποτικού βραχίονα (όπως αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην δική μας περίπτωση), που στηρίζει το πιστόλι πλάσματος, υπάρχει και θάλαμος έξω από αυτόν που λαμβάνει χώρα ο ψεκασμός και κατά τη διάρκεια του ψεκασμού θα ήταν ορθό οι παρευρισκόμενοι να βρίσκονται εκτός αυτού, αφού κλειδώνει εξασφαλίζοντας την ηχομόνωση του χώρου και την προστασία από τα επικίνδυνα αέρια.

Τέλος, οι φιάλες που τροφοδοτούν τη διάταξη με το πρωτεύον και δευτερεύον αέριο, βρίσκονται εκτός του θαλάμου και είναι στερεωμένες με αλυσίδες.

6.6 Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμών

Ο πίνακας 6.7 περιέχει το σύνολο των δοκιμών που επικαλύφθηκαν και εκ των υστέρων χρησιμοποιήθηκαν για τις διάφορες μεθόδους χαρακτηρισμού τους.

Πίνακας 6.7: Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμών

Τύπος δοκιμίου (δοκιμασία)	Αριθμός δοκιμίου	Υλικό κατασκευής δοκιμίου	Επικάλυψη	Πάχος επικάλυψης (μm)
Κυλινδρικό δοκίμιο (κόπωση)	#1	Αλουμίνιο 2007	Αλουμίνα με 3% τιτανία	98

Τύπος δοκιμίου (δοκιμασία)	Αριθμός δοκιμίου	Υλικό κατασκευής δοκιμίου	Επικάλυψη	Πάχος επικάλυψης (μm)
			(METCO 101NS)	
Κυλινδρικό δοκίμιο (κόπωση)	#2	Αλουμίνιο 2007	Αλουμίνια με 3% τιτανία (METCO 101NS)	101
Κυλινδρικό δοκίμιο (κόπωση)	#3	Αλουμίνιο 2007	Αλουμίνια με 3% τιτανία (METCO 101NS)	147
Κυλινδρικό δοκίμιο (κόπωση)	#4	Αλουμίνιο 2007	Αλουμίνια με 3% τιτανία (METCO 101NS)	203
Κυλινδρικό δοκίμιο (κόπωση)	#5	Αλουμίνιο 2007	Αλουμίνια με 3% τιτανία (METCO 101NS)	199
Κυλινδρικό δοκίμιο (κόπωση)	#6	Αλουμίνιο 2007	Αλουμίνια με 3% τιτανία (METCO 101NS)	51
Κυλινδρικό δοκίμιο (κόπωση)	#7	Αλουμίνιο 2007	Αλουμίνια με 3% τιτανία (METCO 101NS)	202
Κυλινδρικό δοκίμιο (κόπωση)	#8	Αλουμίνιο 2007	Αλουμίνια με 3% τιτανία (METCO 101NS)	200
Κυλινδρικό δοκίμιο (κόπωση)	#9	Αλουμίνιο 2007	Αλουμίνια με 3% τιτανία (METCO 101NS)	98
Κυλινδρικό δοκίμιο (κόπωση)	#10	Αλουμίνιο 2007	Αλουμίνια με 3% τιτανία (METCO 101NS)	99
Έλασμα διπλού T (εφελκυσμός)	#1	Αλουμίνιο 2024	Αλουμίνια με 3% τιτανία (METCO 101NS)	102 (51 σε κάθε πλευρά)
Έλασμα διπλού T (εφελκυσμός)	#2	Αλουμίνιο 2024	Αλουμίνια με 3% τιτανία (METCO 101NS)	198 (99 σε κάθε πλευρά)
Έλασμα διπλού T (εφελκυσμός)	#3	Αλουμίνιο 2024	Αλουμίνια με 3% τιτανία (METCO 101NS)	300 (150 σε κάθε πλευρά)
Έλασμα διπλού T (εφελκυσμός)	#4	Αλουμίνιο 2024	Αλουμίνια με 3% τιτανία (METCO 101NS)	402 (201 σε κάθε πλευρά)

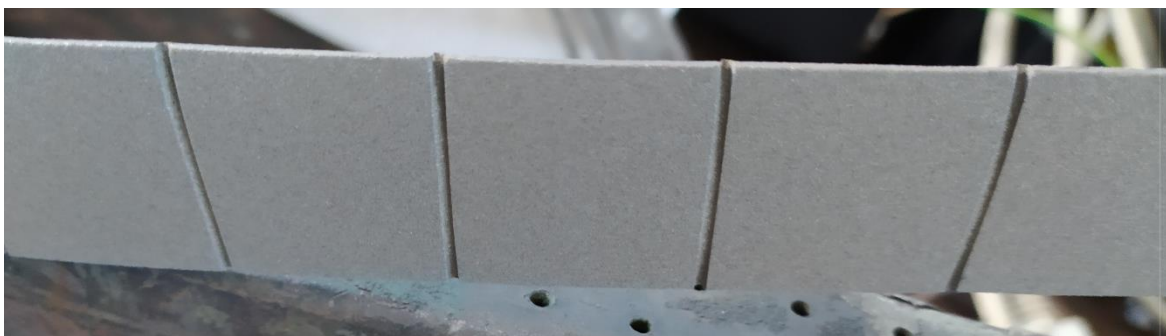
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ – ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

7.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να μελετηθεί και να ελεγχθεί η ποιότητα της επικάλυψης είναι απαραίτητη η παρατήρηση της στο οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM).

Η μεταλλογραφική εξέταση ενός δοκιμίου γίνεται με σκοπό την μικροσκοπική έρευνα του, ώστε να μελετηθούν και να κατανοηθούν οι αρχές που διέπουν τη διαμόρφωση και τον έλεγχο της δομής των μετάλλων και του τρόπου με τον οποίο η δομή επηρεάζει τις ιδιότητες καθώς και να επισημανθούν τυχόν ατέλειες του. Για την μελέτη της επικάλυψης χρησιμοποιήθηκε ξεχωριστό κομμάτι από έλασμα ανοξείδωτου χάλυβα SAE 316L (πάχους 1.25 mm), στο οποίο εναποτέθηκε επικάλυψη πλάσματος Αλουμίνας (Al_2O_3) και 3% Τιτανίας (TiO_2) με πάχος 250 μm (εικόνα 7.1).

Η μελέτη που θα αναπτυχθεί σε αυτό το κεφάλαιο εστιάζει, κυρίως, στην ανάλυση της επικάλυψης, σε ότι αφορά στα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της. Το υπόστρωμα δεν αποτελεί κεντρικό σημείο της μικροσκοπικής και μεταλλογραφικής μελέτης καθώς αποτελείται από κοινό χάλυβα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.



Εικόνα 7.1: Έλασμα ανοξείδωτου χάλυβα SAE 316L (πάχους 1.25 mm), στο οποίο εναποτέθηκε επικάλυψη πλάσματος Αλουμίνας (Al_2O_3) και 3% Τιτανίας (TiO_2) με πάχος 250 μm.

Για την παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο ακολουθήθηκε η τυπική διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμίων δηλ. κοπή, εγκιβωτισμός, λείανση και στίλβωση. Η κοπή των δοκιμίων έλαβε χώρα σε δισκοτόμο της STRUERS και η φορά του κοπτικού τροχού (SiO_2) έγινε με τρόπο ώστε να συναντά – κατά την περιστροφή του- πρώτα την επικάλυψη και μετά το (χαλύβδινο) υπόστρωμα προεπιμένου να αποφευχθεί (σε περίπτωση αντιθέτου) η ανάπτυξη τάσεων απόκόλλησης που δυνητικά θα μπορούσαν είτε να οδηγήσουν σε τοπικές αποφλοιώσεις είτε καταστροφή του επικαλυμμένου δοκιμίου.

Ο μεταλλογραφικός έλεγχος με το οπτικό μικροσκόπιο (STRUERS) αλλά και με το αντίστοιχο ηλεκτρονικό (JeOL) πραγματοποιήθηκε στο Εργοστάσιο Τηλεπικοινωνιακών και Ηλεκτρονικών μέσων της Πολεμικής Αεροπορίας (ΕΤΗΜ).

7.2 Κοπή

Η κοπή του επικαλυμμένου χαλύβδινου ελάσματος πραγματοποιήθηκε στη διάταξη που απεικονίζεται στην εικόνα 7.2.



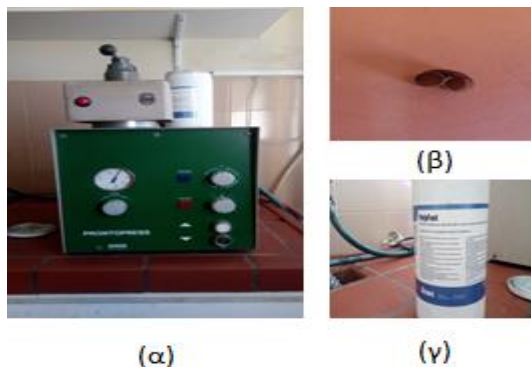
Εικόνα 7.2: Διάταξη (δισκοτόμος) για την διεργασία της κοπή δοκιμίων.

Πιο συγκεκριμένα η κοπή εκτελέστηκε με αργό ρυθμό και με παράλληλη εφαρμογή ψυκτικού μέσου (σαπουνέλαιο), ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία σπινθήρων λόγω τριβής. Αυτό είναι απαραίτητο γιατί αφενός παρέχει στο χειριστή τη δυνατότητα της συνεχούς οπτικής επαφής των επιφανειών του τροχού και του μετάλλου και αφετέρου εμποδίζει την υπερθέρμανση της περιοχής της κοπής, γεγονός που θα οδηγούσε σε μετασχηματισμό των φάσεων του μετάλλου (αλλαγή δομής). Η περιστροφή του κοπτικού δίσκου γινόταν με τέτοιο τρόπο ώστε η επικάλυψη να βρίσκεται πάντοτε σε συμπίεση, έτσι ώστε να αποφευχθεί η καταστροφή της από πιθανή αποκόλληση.

7.3 Εγκιβωτισμός

Στην συνέχεια τα κοπέντα επικαλυμμένα δοκίμια, εγκιβωτίστηκαν με ψυχρό εγκιβωτισμό σε πολυεστερική μη αγώγιμη ρητίνη και ορισμένα με θερμό εγκιβωτισμό. Αρχικά, τα δοκίμια καθαρίστηκαν και απολιπάνθηκαν. Έπειτα παρασκευάστηκε το μίγμα της ρητίνης, όπου για κάθε 10 ml ρητίνης χρειάστηκαν έξι σταγόνες καταλύτη. Στη συνέχεια, το μίγμα αυτό αποχύθηκε σε κυλινδρικό καλούπι, στον αφαιρούμενο πάτο του οποίου είχε τοποθετηθεί το

δείγμα. Μετά από 50min, χρόνος που απαιτείται για την σκλήρυνση της ρητίνης, το εγκιβωτισμένο δοκίμιο απομακρύνθηκε από το καλούπι.



Εικόνα 7.2 (α) Συσκευή θερμού εγκιβωτισμού ρητίνης (β) στήριξη δοκιμίου (γ) ρητίνη θερμού εγκιβωτισμού

Για τον θερμό εγκιβωτισμό χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη συσκευή (STRUERS Prontoprss) με ειδική ρητίνη θερμού εγκιβωτισμού (Polyfast). Για 3,5 min με συνεχή εφαρμοσμένη δύναμη ίση με 30kN σε θερμοκρασία 180°C το δοκίμιο και η ρητίνη έγιναν συμπαγές σώμα. Στην συνέχεια, ήταν απαραίτητη η ψύξη του δοκιμίου για 1,5 min μέσα στην συσκευή προτού ξεκινήσει η διαδικασία λείανσης.

7.4 Λείανση

Η πρότερη επαφή της επιφάνειας του δείγματος με τον τροχό κατά την διάρκεια της κοπής, αλλοίωσε την δομή της σε κάποιο βαθμό. Το αλλοιωμένο στρώμα απομακρύνθηκε χρησιμοποιώντας σταδιακά λειαντικούς τροχούς με λεπτότερους λειαντικούς κόκκους.

Για τη λείανση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου (SiC) που είχαν μέγεθος 180-240-320-400-600-800-1000 grit και 1200 grit. Κατά τη διάρκεια της λείανσης ήταν απαραίτητη η συνεχόμενη παροχή νερού, για τον καθαρισμό και την ψύξη του δοκιμίου.

Η λείανση πραγματοποιήθηκε για 3 λεπτά με κάθε δίσκο διαφορετικού μεγέθους, προκειμένου να εξασφαλιστεί η εξάλειψη της ζώνης παραμόρφωσης, μετακινώντας το δοκίμιο κάθετα στη φορά της κυκλικής κίνησης του δίσκου, από την άκρη προ το κέντρο.

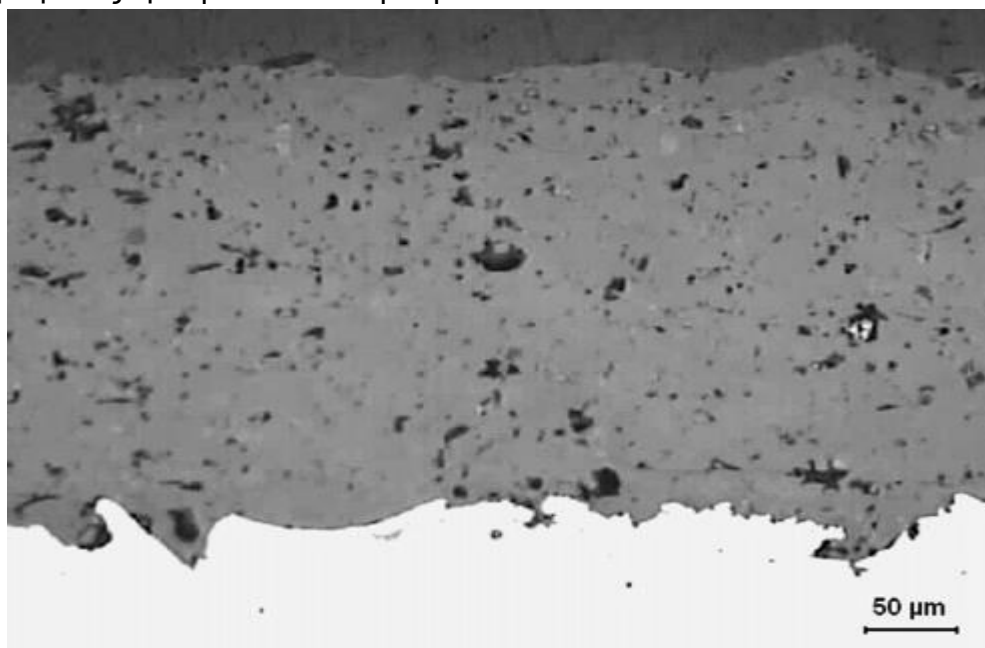
7.5 Στίλβωση

Η στίλβωση του δείγματος έγινε αρχικά με εναιώρημα αλουμίνας σε κατάλληλο ύφασμα με χρήση απιονισμένου νερού ως λιπαντικού υγρού. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε διαμαντόπαστα (1 μm) σε περιστρεφόμενο δίσκο αλουμινίου, ο οποίος έφερε κατάλληλο ύφασμα στίλβωσης, που λιπαινόταν με κατάλληλο υγρό (diamond extender oil). Η ταχύτητα περιστροφής του δίσκου ήταν 300 RPM. Το δείγμα μετά την στίλβωση δεν προσβλήθηκε με κατάλληλο χημικό αντιδραστήριο καθόσον η δομή του ήταν ευκρινής.

7.6 Παρατήρηση της επικάλυψης σε οπτικό μικροσκόπιο

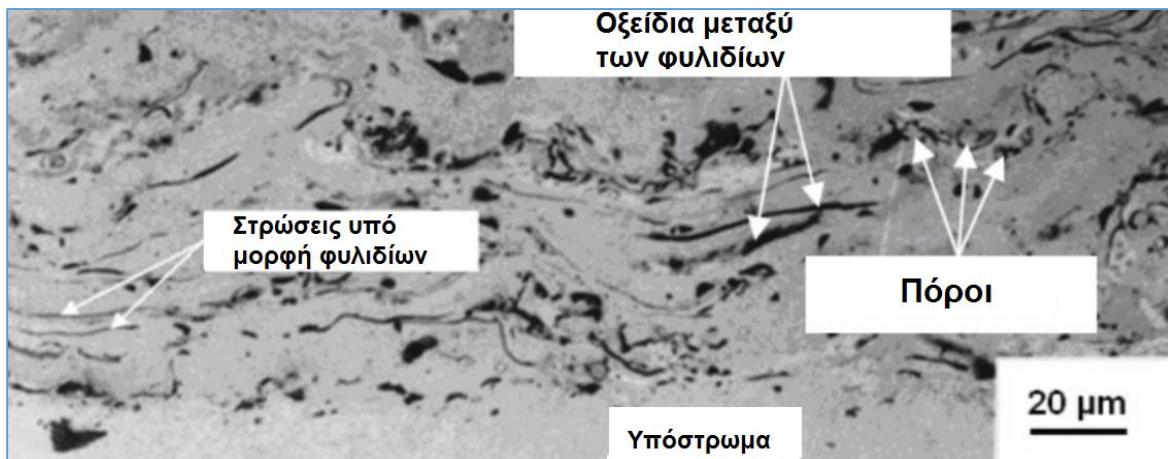
Στην εικόνα 7.3 απεικονίζεται εγκάρσια τομή της επικάλυψης αλουμίνας – τιτανίας πάνω σε υπόστρωμα του χάλυβα SAE 316L. Επιπρόσθετα διακρίνεται η ύπαρξη της συνδετικής επικάλυψης (bond coat) από Ni-Al. Η κεραμική επικάλυψη αλουμίνας – τιτανίας χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη πορώδους το οποίο μετρήθηκε μεταλλογραφικά σε 7% και το οποίο δημιουργείται όταν οι τηγμένοι κόκκοι της αλουμίνας - τιτανίας προσκρούουν στην επιφάνεια του υποστρώματος και εγκλωβίζουν αέρα.

Η διεπιφάνεια της επικάλυψης $Al_2O_3-TiO_2$ και του συνδετικού επιστρώματος κρίθηκε ικανοποιητική.



Εικόνα 7.3: Εγκάρσια τομή της επικάλυψης αλουμίνας – τιτανίας σε υπόστρωμα χάλυβα SAE 316L (μεγένθυση x150)

Η παρουσία των πόρων επιδρά θετικά μεν στην εκτόνωση των ρωγμών που εξαπλώνονται μέσω μηχανικών φορτίων, αρνητικά δε είτε ως σημεία έναρξης ρωγμών είτε ως θέσεις προσβολής εξωτερικού περιβάλλοντος (πχ διαβρωτικά μέσα) κυρίως μέσω τυχόν συννεούμενων πόρων. Η ενδιάμεση επικάλυψη Ni-Al εμφανίζει ικανοποιητική διεπιφάνεια με το κεραμικό, αλλά όχι τόσο καλή διεπιφάνεια με το υπόστρωμα χάλυβα.

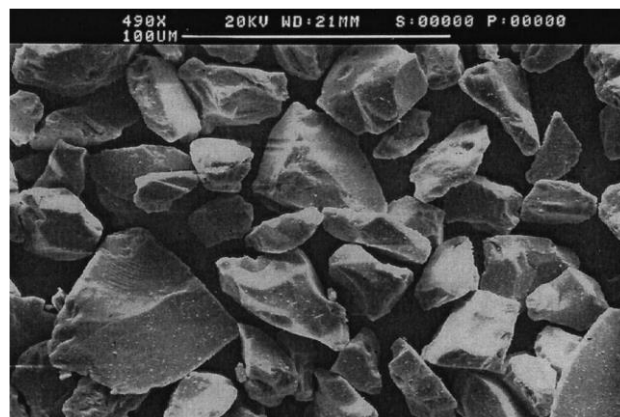


Εικόνα 7.4: Μικροδομή της συνδετικής επικάλυψης Ni-20Al σε υπόστρωμα χάλυβα SAE 316L

Στην εικόνα 7.4 απεικονίζεται η εγκάρσια τομή της συνδετικής επικάλυψης Ni-20Al, όπου παρατηρούνται στρώσεις υπό μορφή φυλλιδίων, που δημιουργούνται από την πλάτυνση των τηγμένων κόκκων Ni-Al με την πρόσκρουσή τους, κατά τον ψεκασμό, στην επιφάνεια του υποστρώματος. Επίσης παρατηρείται η ύπαρξη οξειδίων ανάμεσα στις διάφορες στρώσεις του επιστρώματος. Ο σχηματισμός των οξειδίων αποδίδεται στην αντίδραση των τηγμένων σωματιδίων Ni-Al με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, κατά την διάρκεια του ψεκασμού. Επιπρόσθετα από την εικόνα 7.4 δεν γίνεται ευδιάκριτη η παρουσία άηκτων σωματιδίων ή μικρορωγμών.

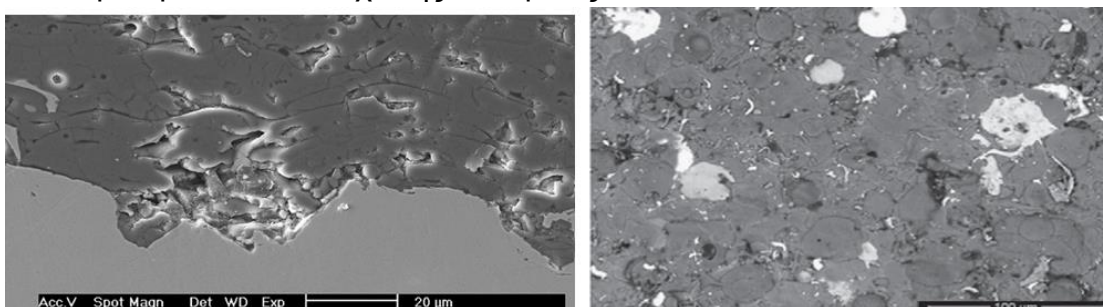
7.7 Παρατήρηση της επικάλυψης σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

Πριν μελετηθεί η επικάλυψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας στο SEM, πραγματοποιήθηκε παρατήρηση της κεραμικής σκόνης που χρησιμοποιήθηκε για τον ψεκασμό πλάσματος, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 7.5.

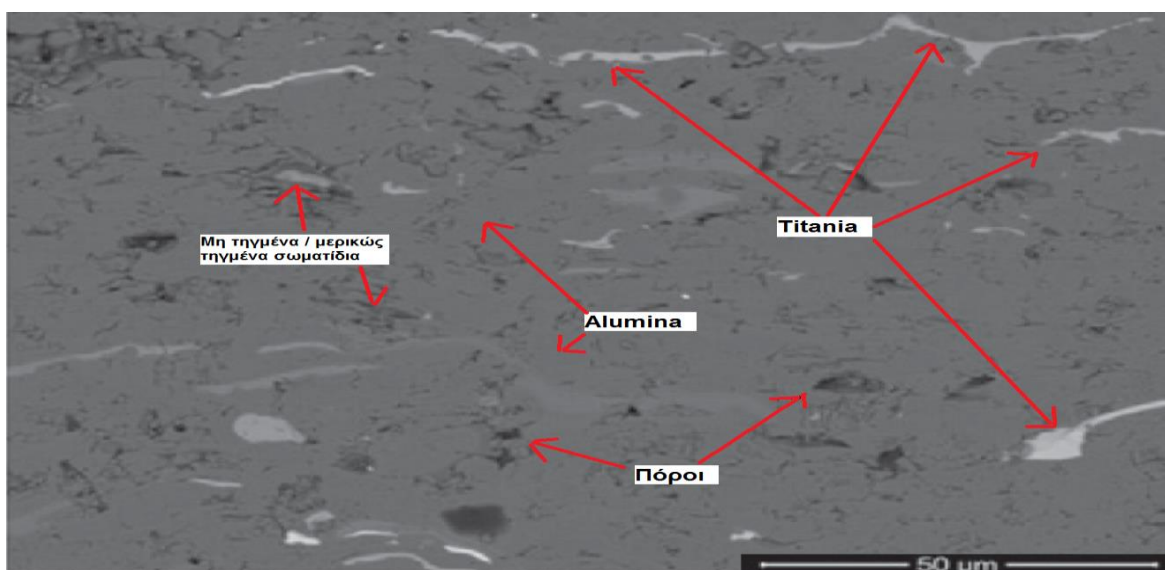


Εικόνα 7.5: Μικρογραφία SEM (20KV) σκόνης Αλουμίνας (Al_2O_3) και 3% Τιτανίας (TiO_2) [METCO 101NS]

Στην εικόνα 7.6 παρουσιάζεται η εγκάρσια τομή της κεραμικής επικάλυψης αλουμίνας - 3% τιτανίας και φαίνονται οι κόκκοι της και το κυματοειδές τοπογραφικό της ανάγλυφο, λόγω της απόθεσης. Η μικροδομή έχει την τυπική μικροδομή επικαλύψεων πλάσματος δηλ. αποτελείται από στρώσεις που δημιουργούνται κατά την πρόσπτωση των τηγμένων σωματιδίων της επικάλυψης ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$) στην επιφάνεια του υποστρώματος. Με φωτεινότερο χρωματισμό απεικονίζονται τα σωματίδια της τιτανίας και με σκουρότερο τα αντίστοιχα της αλουμίνας.



Εικόνα 7.6: Μορφολογία εγκάρσιας τομής της επικάλυψης πλάσματος Αλουμίνας (Al_2O_3) και 3% Τιτανίας (TiO_2)



Εικόνα 7.7: Μικροδομή της επικάλυψης πλάσματος Αλουμίνας (Al_2O_3) και 3% Τιτανίας (TiO_2)

Η εικόνα 7.7 απεικονίζει την μικροδομή της επικάλυψης αλουμίνας τιτανίας όπου παρατηρείται το ότι τα τηγμένα σωματίδια τιτανίας ξεχωρίζουν λόγω του ότι είναι φωτεινότερα από τα αντίστοιχα της αλουμίνας. Επίσης γίνεται αντιληπτή η παρουσία πορώδους αλλά και μη τηγμένων ή μερικώς τηγμένων σωματιδίων.

Με μικροσκληρόμετρο (Κnoop) και υπό φορτίο 10N μετρήθηκε η σκληρότητα της επικάλυψης και βρέθηκε ίση με 730 ± 100 HK. Η

δυσθραυτότητα της επικάλυψης (K_{Ic}) υπολογίσθηκε με την μέθοδο εφαρμογής φορτίου (P) 60Kg στην επιφάνεια της επικάλυψης και βρέθηκε ίση με 1.5 MPa m^{1/2} με χρήση της ημιεμπειρικής [1, 2].

$$K_{Ic} = \frac{0.079P}{\alpha^{3/2} \log\left(\frac{4.5a}{c}\right)} \text{ για } 0.22 \leq a/c \leq 1.66$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΚΑΙ ΚΟΠΩΣΗ

8.1 Εφελκυσμός

Σκοπός της πραγματοποίησης των δοκιμών εφελκυσμού είναι:

- Για το κυλινδρικό δοκίμιο, ο καθορισμός του ορίου αντοχής σε εφελκυσμό, ώστε να επιβληθεί το κατάλληλο φορτίο στην μετέπειτα δοκιμή κόπωσης.
- Για τα ελάσματα διπλού T, ο καθορισμός και η εκτίμηση της επίδρασης των επικάλυψεων καθώς και του πάχους τους, στις εφελκυστικές ιδιότητες των δοκιμών.

Ο εφελκυσμός των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο Εργοστάσιο Τηλεπικοινωνιακών και Ηλεκτρονικών μέσων της Πολεμικής Αεροπορίας. Όλες οι δοκιμές έγιναν σε ατμοσφαιρικές συνθήκες και σε θερμοκρασία 25°C. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των δοκιμών εφελκυσμού είναι η MTS 810 Material Test System (εικόνα 8.1).



Εικόνα 8.1: Διάταξη δοκιμών εφελκυσμού MTS 810 Material Test System

8.1.1 Εφελκυσμός κυλινδρικού δοκιμίου από Al2007

Η πρώτη δοκιμή εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε σε ένα κυλινδρικό δοκίμιο (βλ. Κεφ 6.2) από κράμμα αλουμινίου (Al2007), το οποίο δεν είχε επικαλυφθεί με την σκόνη METCO 101 NS. Το κυλινδρικό δοκίμιο τοποθετήθηκε κεντρικά κι απόλυτα ομοαξονικά προς τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου όπως απεικονίζεται στην εικόνα 8.2.



Εικόνα 8.2: Εφελκυσμός κυλινδρικού δοκιμίου το οποίο δεν έχει επικαλυφθεί με την σκόνη METCO 101 NS

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, η καταγραφή του διαγράμματος τάσεων-ανηγγμένης παραμόρφωσης έγινε αυτόματα από τον υπολογιστή που ήταν συνδεδεμένος με τη μηχανή δοκιμής.

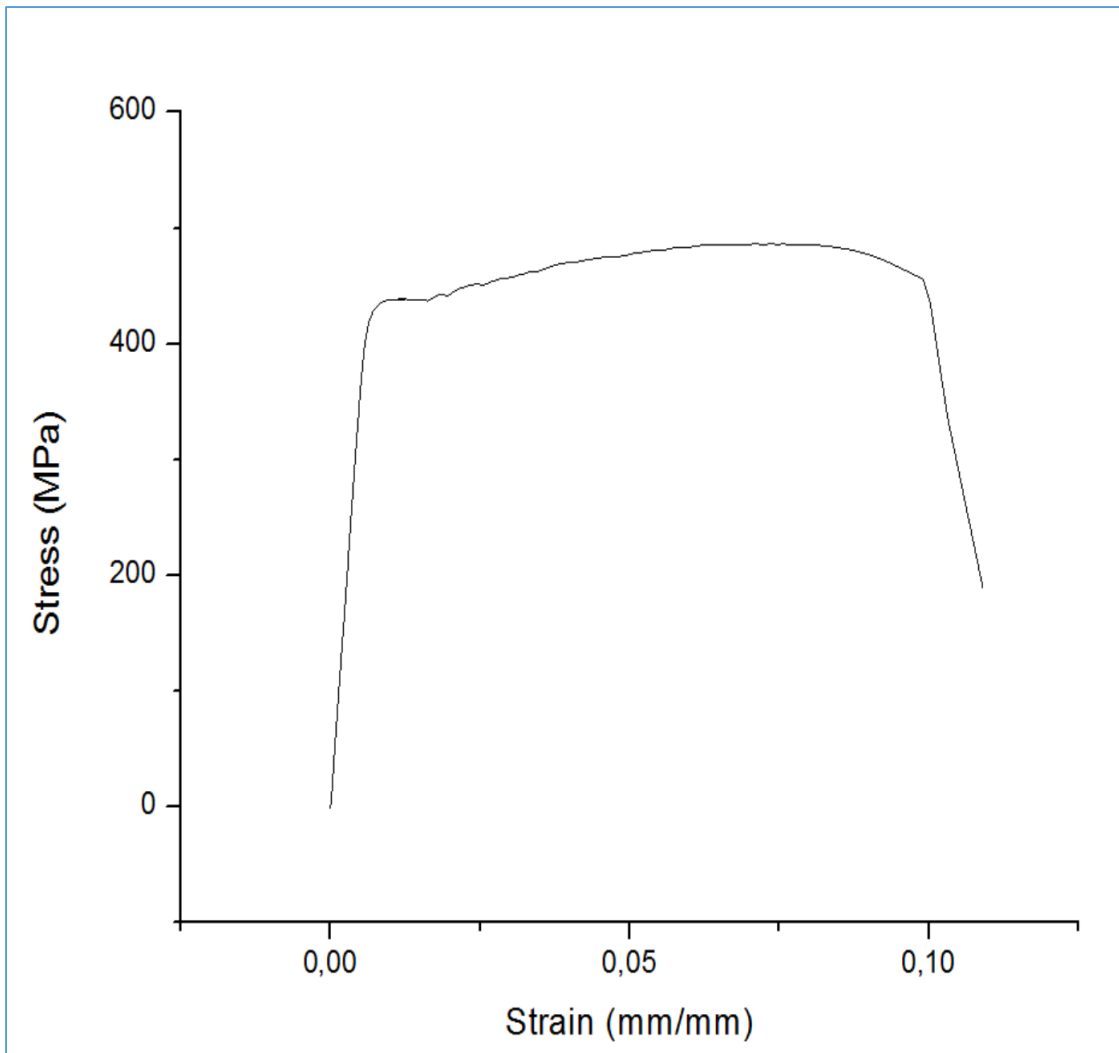
Κατά την πραγματοποίηση πειραμάτων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Μήκος: αρχικό-30mm
- Διάμετρος (στο λαιμό): αρχική-6.01mm, τελική-5.81mm
- Εμβαδόν Διατομής: αρχικό-28.274 mm² , τελικό-26.512 mm²
- Πάχος επικάλυψης: 0 mm

Στον πίνακα 8.1 περιέχονται όλες οι τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης που προέκυψαν κατά την δοκιμή και στο σχήμα 8.1 το αντίστοιχο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης.

Πίνακας 8.1: Τιμές σ-ε που προέκυψαν ύστερα από δοκιμή εφελκυσμού κυλινδρικού δοκιμίου χωρίς επικάλυψη

A/A	σ (Mpa)	ε (mm/mm)	A/A	σ (Mpa)	ε (mm/mm)	A/A	σ (Mpa)	ε (mm/mm)	A/A	σ (Mpa)	ε (mm/mm)
1	-1.171599	2.28882E-05	41	443.0775	0.01872711	81	476.3082	0.04917755	121	485.3615	0.07936707
2	16.29588	0.000315857	42	440.8408	0.01950073	82	477.1603	0.04993286	122	485.5745	0.0801178
3	33.76335	0.000544739	43	443.7165	0.0202652	83	478.0124	0.0506836	123	485.042	0.08088227
4	51.23083	0.000782776	44	446.3792	0.02102966	84	478.4384	0.05143433	124	484.9355	0.08163758
5	68.6983	0.001020813	45	448.1898	0.02178955	85	479.2905	0.05218506	125	484.7224	0.08239289
6	86.16578	0.001249695	46	449.1484	0.02255402	86	479.9295	0.05294495	126	484.2964	0.0831482
7	103.6333	0.001483154	47	450.8526	0.0233139	87	480.3556	0.05369568	127	483.8704	0.08390351
8	121.2072	0.001721191	48	451.3851	0.02406921	88	480.6751	0.05445099	128	483.2313	0.08465424
9	138.6747	0.001968384	49	451.2786	0.02484284	89	481.1012	0.0552063	129	482.4858	0.08540497
10	156.1422	0.002229309	50	450.9591	0.02562561	90	481.2076	0.05596619	130	482.1662	0.08615571
11	173.6097	0.002471924	51	452.5567	0.02639465	91	481.7402	0.05671692	131	481.2076	0.08691102
12	191.3967	0.002709961	52	454.1544	0.02714996	92	483.0183	0.05747681	132	480.4621	0.08766633
13	208.8641	0.002938843	53	455.539	0.02792359	93	483.3378	0.05823212	133	479.184	0.08842164
14	226.3316	0.003153992	54	456.7106	0.02868347	94	483.4443	0.05898743	134	478.2254	0.08919068
15	243.7991	0.003392029	55	456.6041	0.02944336	95	483.4443	0.05974274	135	477.1603	0.08994599
16	261.3731	0.003643799	56	457.2431	0.0302124	96	483.7639	0.06050263	136	475.6692	0.09070587
17	278.8405	0.003881836	57	458.5212	0.03096771	97	484.616	0.06125336	137	474.178	0.09146576
18	296.308	0.004119873	58	460.0124	0.03171845	98	485.1485	0.06200409	138	472.687	0.09222565
19	313.7755	0.004362488	59	460.6514	0.03247833	99	485.3615	0.06275482	139	470.9828	0.09298096
20	331.243	0.004605103	60	462.036	0.03323822	100	485.5745	0.06350556	140	469.2786	0.09374543
21	348.7104	0.004856873	61	462.2491	0.03399353	101	485.468	0.06425629	141	467.3615	0.09451905
22	366.1779	0.005131531	62	462.6751	0.03474884	102	485.468	0.06501116	142	465.6573	0.09528809
23	383.6454	0.005419922	63	464.0597	0.03550415	103	485.3615	0.06576691	143	463.6337	0.0960434
24	401.1129	0.005813599	64	465.4443	0.03625488	104	485.468	0.06651764	144	461.7165	0.09682617
25	418.5804	0.006413269	65	467.1485	0.03700562	105	485.468	0.06726837	145	459.5863	0.09757691
26	428.2727	0.007164002	66	468.4266	0.03777008	106	485.5745	0.06802368	146	457.8822	0.09832764
27	433.0656	0.007914734	67	468.9591	0.0385437	107	485.681	0.06878357	147	455.752	0.09908295
28	436.0479	0.008665467	68	469.9177	0.03930817	108	485.468	0.06954804	148	435.7283	0.1002319
29	437.8585	0.009416199	69	470.5568	0.04006348	109	485.894	0.07029877	149	336.888	0.103093
30	438.391	0.01019897	70	470.7698	0.04081879	110	486.3201	0.0710495	150	189.2665	0.1090485
31	437.326	0.01095429	71	471.0893	0.04158325	111	486.0006	0.07180023			
32	438.8171	0.01173248	72	471.9414	0.04234314	112	485.894	0.07255554			
33	437.965	0.0125061	73	472.687	0.04310303	113	486.1071	0.07331543			
34	438.4976	0.01132843	74	473.2195	0.04385376	114	486.2136	0.07407074			
35	438.391	0.01406708	75	473.9651	0.04460907	115	485.7875	0.07482605			
36	438.0715	0.01484528	76	474.4976	0.04537354	116	486.3201	0.07557678			
37	437.6455	0.01563721	77	474.9236	0.04613343	117	485.894	0.07633667			
38	437.1129	0.01640625	78	475.0301	0.04689331	118	485.894	0.07709198			
39	439.9887	0.01717072	79	475.3497	0.04767151	119	485.894	0.07785187			
40	441.9058	0.01794434	80	475.5627	0.04842224	120	485.894	0.0786026			

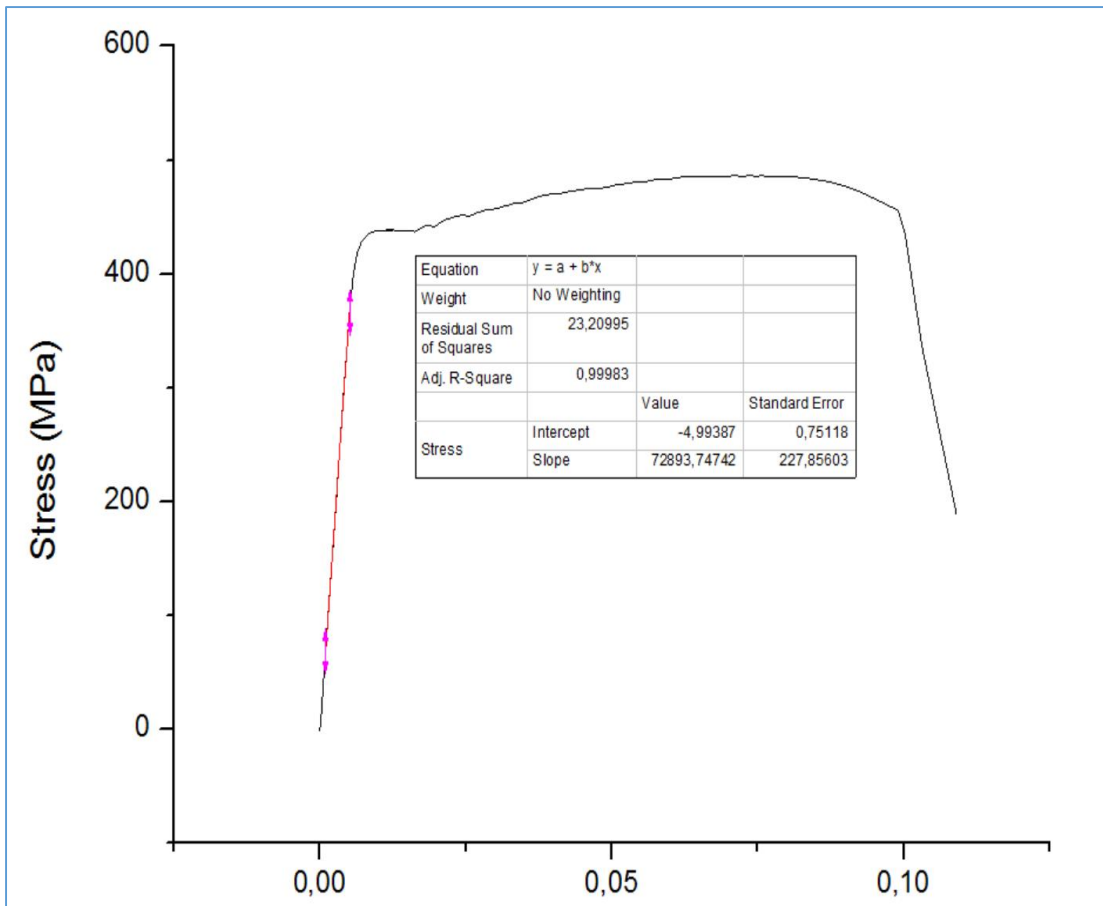


Σχήμα 8.1: Διάγραμμα σ-ε δοκιμής εφελκυσμού κυλινδρικού δοκιμίου χωρίς επικάλυψη

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το Al 2007 από το διάγραμμα τάσεων- ανηγμένων παραμορφώσεων είναι τα εξής:

- Αντοχή εφελκυσμού: $\sigma_{UTS}=486.53$ MPα
- Παραμόρφωση στο σημείο UTS: $\epsilon_{UTS}=7.211 \cdot 10^{-2}$ mm/mm
- Μέτρο Ελαστικότητας $E=72893.7$ MPα

Η εύρεση του μέτρου ελαστικότητας E έγινε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για τα σημεία του διαγράμματος που ανήκουν στην ελαστική περιοχή, όπως εξάλλου απεικονίζεται στο σχήμα 8.2.



Σχήμα 8.2: Εύρεση μέτρου ελαστικότητας κυλινδρικού δοκιμίου Al 2007, χωρίς επικάλυψη.

Το μέτρο ελαστικότητας (κλίση της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2=0,99983$), υπολογίστηκε σε $E=72.89$ GPa, τιμή η οποία είναι σε συμφωνία με τα βιβλιογραφικά δεδομένα για το υλικό αυτό.

8.1.2 Εφελκυσμός ελασμάτων διπλού T από Al2024

Όπως αναγράφεται στο κεφάλαιο 6, έχει προηγηθεί η επικάλυψη τεσσάρων ελασμάτων διπλού T από Al2024, με επικάλυψη αλουμίνας τιτανίας (METCO 101NS) με πάχη 50,100,150 και 200 μm σε κάθε πλευρά. Αρχικά πραγματοποιήθηκε δοκιμή εφελκυσμού σε μη επικαλυμμένο δοκίμιο, δοκιμή η οποία κατέληξε στα κάτωθι αποτελέσματα.

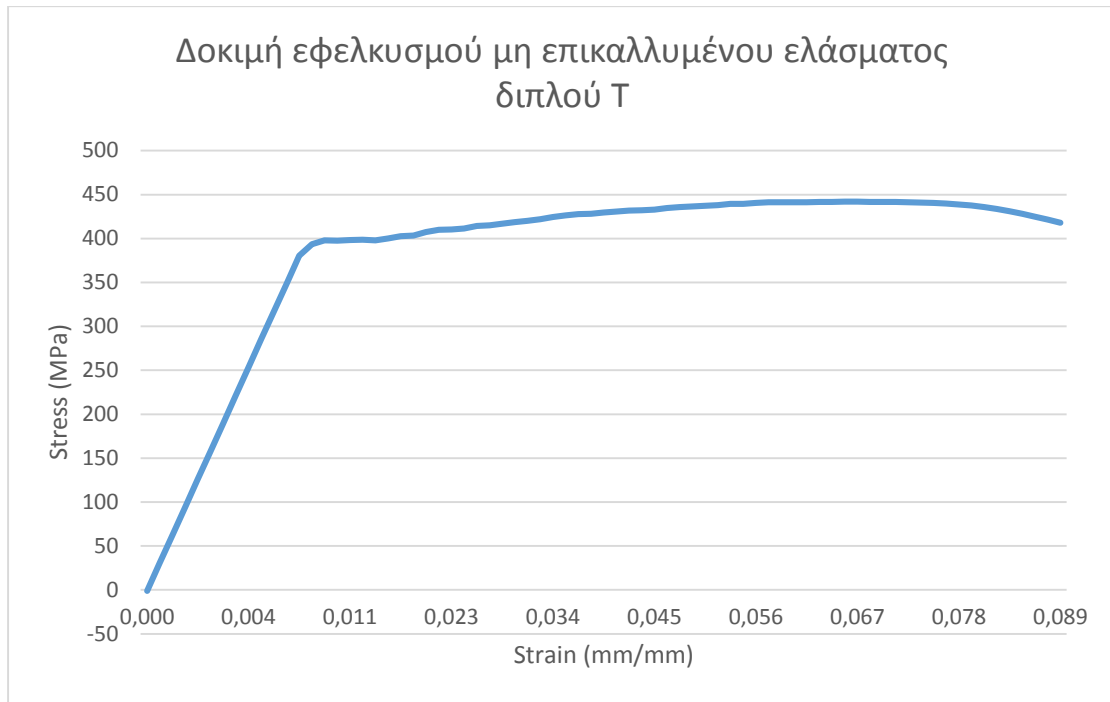
Δοκίμιο No.0

- Μήκος: 50.8 mm
- Πλάτος: 12.7 mm
- Πάχος: 2 mm
- Πάχος επικάλυψης: 0 mm

Στον πίνακα 8.2 περιέχονται οι τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης που προέκυψαν κατά την δοκιμή και στο σχήμα 8.3 το αντίστοιχο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης.

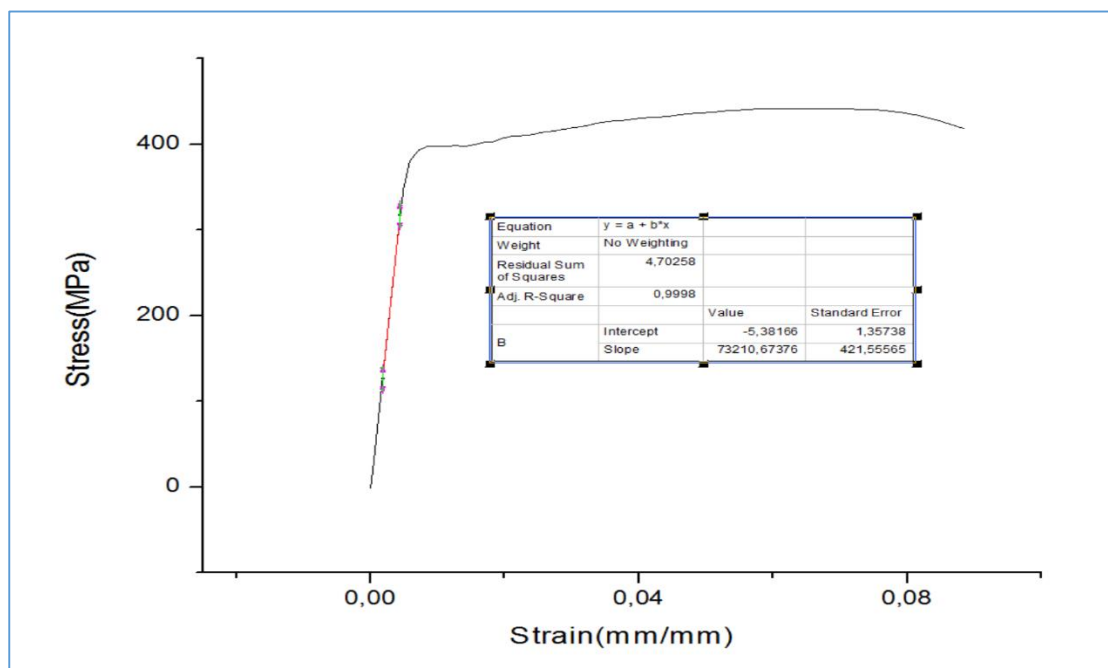
Πίνακας 8.2: Τιμές σ-ε που προέκυψαν ύστερα από δοκιμή εφελκυσμού ελάσματος διπλού T χωρίς επικάλυψη

σ (Mpa)	ε (mm/mm)	σ (Mpa)	ε (mm/mm)
-1.06509	2.08074E-05	430.8773636	0.0405537
30.69395455	0.000495217	431.7487273	0.041939482
62.453	0.000928012	432.1360909	0.043337736
94.21209091	0.001348322	433.0074545	0.044706864
126.0679091	0.00178944	434.5567273	0.046076
157.827	0.002247204	435.7186364	0.047440964
189.8764545	0.002671675	436.6869091	0.048814255
221.6355455	0.003083663	437.3647273	0.050187545
253.4913636	0.003528942	437.9456364	0.051560836
285.2504545	0.003965898	439.398	0.052938291
317.0094545	0.004415339	439.4948182	0.054311582
348.7685455	0.004927202	440.56	0.055684873
380.5276364	0.005830245	441.2377273	0.057049836
393.696	0.007195213	441.3345455	0.058414809
398.0531818	0.008560181	441.2377273	0.0597881
397.5690909	0.009958445	441.3345455	0.061153064
398.15	0.011369182	441.5281818	0.062530518
398.5372727	0.012788255	441.7218182	0.063907973
397.8595455	0.014215645	441.8187273	0.065272936
399.9897273	0.015609745	441.9155455	0.066650391
402.7977273	0.017024645	441.625	0.068023682
403.3786364	0.018422909	441.7218182	0.069396973
407.4452727	0.019808682	441.7218182	0.070774427
409.866	0.021194455	441.2377273	0.072151882
410.2532727	0.0225844	440.9472727	0.073529336
411.4151818	0.023995136	440.6567273	0.074902627
414.1263636	0.025385082	439.8821818	0.076275918
415.0946364	0.026766691	438.6234545	0.077640882
416.8374545	0.028152464	437.4614545	0.079010018
418.774	0.029525755	435.6218182	0.080383309
420.2264545	0.030903209	433.7820909	0.081769082
421.8724545	0.0322765	431.0709091	0.083150691
424.6804545	0.033641473	428.1661818	0.084528145
426.3264545	0.035039727	424.8740909	0.085926409
427.7789091	0.036421345	421.4851818	0.087312182
428.263	0.037802955	417.8057273	0.088706282
429.7154545	0.039184573		



Σχήμα 8.3: Διάγραμμα σ-ε δοκιμής εφελκυσμού ελάσματος διπλού T χωρίς επικάλυψη

Η εύρεση του μέτρου ελαστικότητας E έγινε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για τα σημεία του διαγράμματος που ανήκουν στην ελαστική περιοχή (πρβλ. σχήμα 8.4).



Σχήμα 8.4: Εύρεση μέτρου ελαστικότητας ελάσματος διπλού T από Al2024, χωρίς επικάλυψη.

Το μέτρο ελαστικότητας (κλίση της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων, με συντελεστή συσχέτισης $R^2=0,9998$) υπολογίσθηκε σε $E=73.2$ GPa, τιμή η οποία πλησιάζει την αντίστοιχη βιβλιογραφικών δεδομένων [1] για το υλικό αυτό.

Έπειτα από την δοκιμή εφελκυσμού στο μη επικαλυμμένο δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού στα επικαλυμμένα δοκίμια κατά τις οποίες προέκυψαν τα κάτωθι αποτελέσματα.

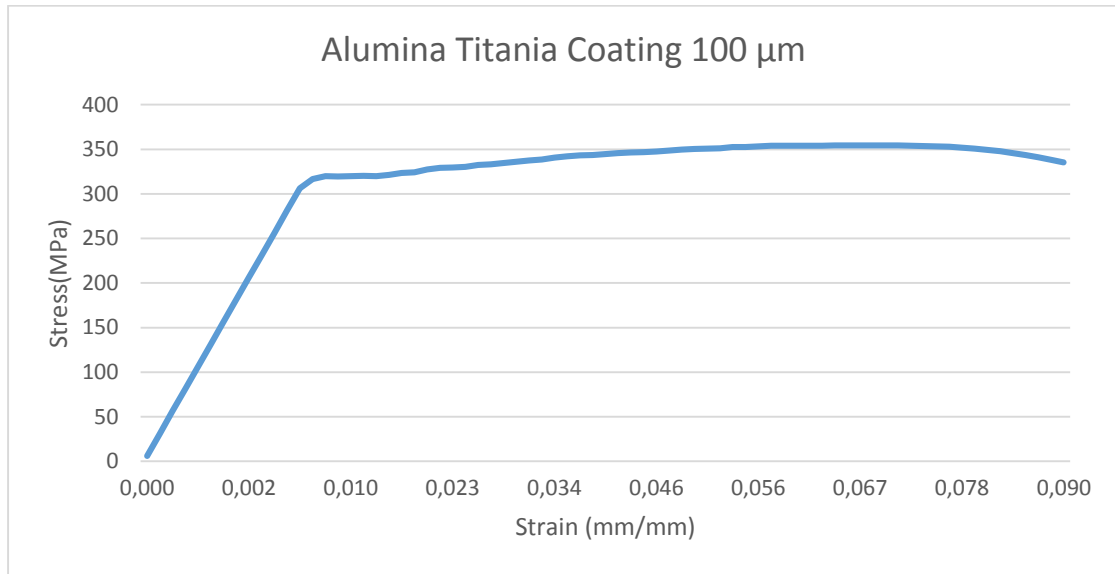
Δοκίμιο No.1

- Μήκος: 50.8 mm
- Πλάτος: 12.7 mm
- Πάχος υποστρώματος: 2 mm
- Πάχος επικάλυψης: 102 μm (51 σε κάθε πλευρά)

Στον πίνακα 8.3 περιέχονται οι τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης που προέκυψαν κατά την δοκιμή και στο σχήμα 8.5 το αντίστοιχο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης.

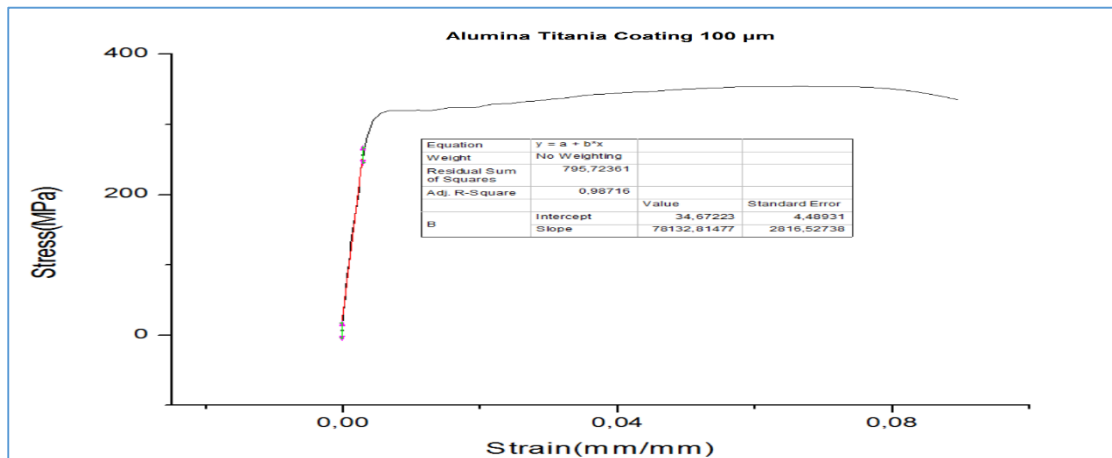
Πίνακας 8.3: Τιμές σ-ε που προέκυψαν ύστερα από δοκιμή εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη Αλουμίνιας – τιτανίας 100 μm

σ (Mpa)	ε (mm/mm)	σ (Mpa)	ε (mm/mm)	σ (Mpa)	ε (mm/mm)
6.161346457	0.000179193	330.3489621	0.024795136	353.9075161	0.059214809
31.16846815	4.78291E-06	332.4837509	0.026185082	353.8312813	0.0605881
56.17559055	0.000328012	333.2461704	0.027566691	353.9075161	0.061953064
81.18274875	0.000448322	334.6184681	0.028952464	354.0599857	0.063330518
106.2660702	0.00088944	336.1433071	0.030325755	354.2124553	0.064707973
131.2732283	0.001047204	337.2869721	0.031703209	354.2887616	0.066072936
156.2090193	0.001471675	338.5830351	0.0330765	354.3649964	0.067450391
181.2161775	0.001883663	340.7940587	0.034441473	354.1362205	0.068823682
206.2994989	0.002328942	342.0901217	0.035839727	354.2124553	0.070196973
231.3066571	0.002465898	343.2337867	0.037221345	354.2124553	0.071574427
256.3137437	0.002915339	343.6149606	0.038602955	353.8312813	0.072951882
281.3209019	0.003427202	344.7586256	0.039984573	353.602577	0.074329336
306.1280601	0.004330245	345.6735147	0.0413537	353.373801	0.075702627
316.4968504	0.005495213	346.3596278	0.042739482	352.7639227	0.077075918
319.9277022	0.006860181	346.6646385	0.044137736	351.7727989	0.078440882
319.5465283	0.008258445	347.3507516	0.045506864	350.8578382	0.079810018
320.003937	0.009669182	348.5706514	0.046876	349.4093057	0.081183309
320.3088762	0.010988255	349.4855404	0.048240964	347.9607015	0.082569082
319.6752326	0.012415645	350.2479599	0.049614255	345.8259127	0.083950691
321.3525412	0.013809745	350.781675	0.050987545	343.5387258	0.085328145
323.5635648	0.015224645	351.2390838	0.052360836	340.9465283	0.086726409
324.0209735	0.019222909	352.3826772	0.053738291	338.2780959	0.088112182
327.2230494	0.020608682	352.458912	0.055111582	335.3808876	0.089506282
329.1291339	0.021994455	353.2976378	0.056484873		
329.434073	0.0233844	353.8312813	0.057849836		



Σχήμα 8.5: Διάγραμμα σ-ε δοκιμής εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη αλουμίνιας – τιτανίας 100 μm

Η εύρεση του μέτρου ελαστικότητας E έγινε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για τα σημεία του διαγράμματος που ανήκουν στην ελαστική περιοχή και βρέθηκε ίση με 78.13 GPa με συντελεστή συσχέτισης $R^2=0,987$, όπως εξάλλου απεικονίζεται στο σχήμα 8.6.



Σχήμα 8.6: Εύρεση μέτρου ελαστικότητας ελάσματος διπλού T από Al2024, με επικάλυψη 100 μm.

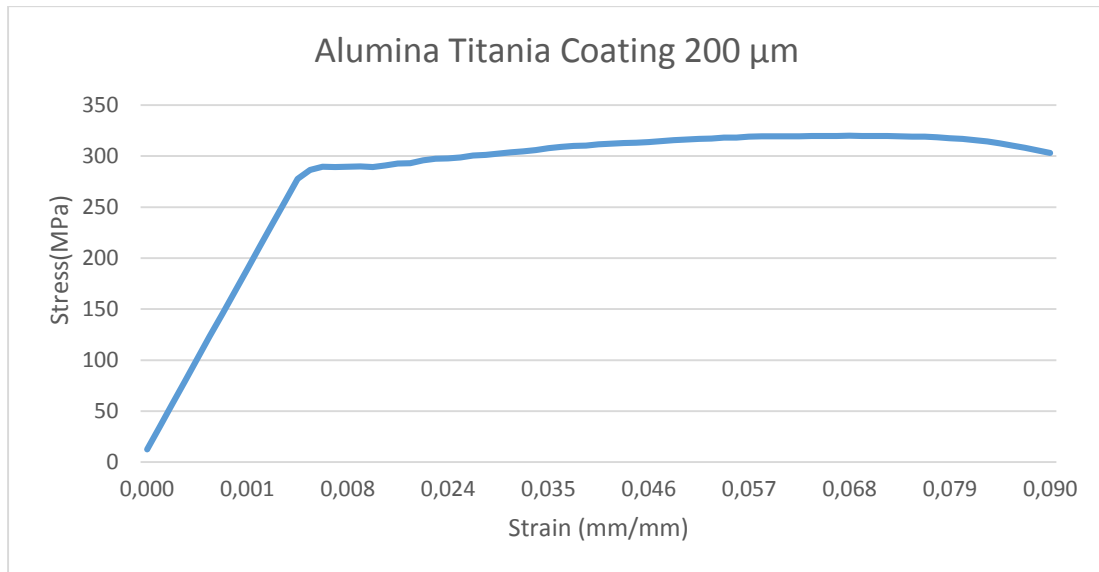
Δοκίμιο Νο.2

- Μήκος: 50.8 mm
- Πλάτος: 12.7 mm
- Πάχος υποστρώματος: 2 mm
- Πάχος επικάλυψης: 198 μm (99 σε κάθε πλευρά)

Στον πίνακα 8.4 περιέχονται οι τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης που προέκυψαν κατά την δοκιμή και στο σχήμα 8.7 το αντίστοιχο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης.

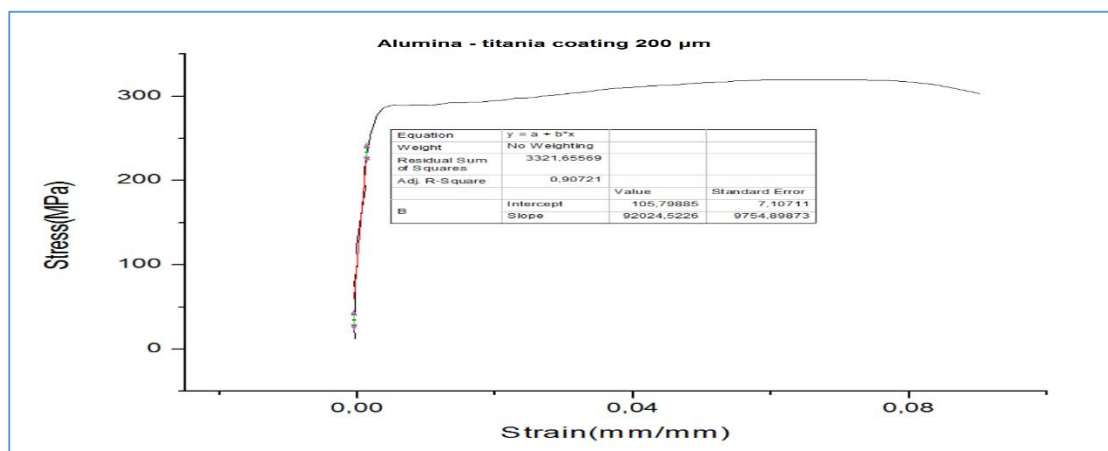
Πίνακας 8.4: Τιμές σ-ε που προέκυψαν ύστερα από δοκιμή εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη Αλουμίνιας – Τιτανίας 200 μm

σ (Mpa)	ε (mm/mm)	σ (Mpa)	ε (mm/mm)
12.45252	0.0003792	312.2058	0.0421537
34.58272	0.0005048	312.8129	0.0435395
56.71291	0.00057	313.0829	0.0449377
78.84314	0.0004517	313.69	0.0463069
101.0408	1.056E-05	314.7696	0.047676
123.171	0.0001528	315.5792	0.049041
145.2381	0.0002717	316.2539	0.0504143
167.0683	0.0006837	316.7263	0.0517875
189.2659	0.0011289	317.131	0.0531608
211.3962	0.0009659	318.1431	0.0545383
233.5263	0.0014153	318.2105	0.0559116
255.6566	0.0019272	318.9528	0.0572849
277.6098	0.0028302	319.425	0.0586498
286.5857	0.0037952	319.4925	0.0600148
289.6219	0.0051602	319.425	0.0613881
289.2845	0.0065584	319.4925	0.0627531
289.6893	0.0079692	319.6274	0.0641305
289.9592	0.0091883	319.7623	0.065508
289.3984	0.0106156	319.8299	0.0668729
290.6828	0.0120097	319.8973	0.0682504
292.6394	0.0134246	319.6949	0.0696237
293.0442	0.0174229	319.7623	0.070997
295.8779	0.0214087	319.7623	0.0723744
297.5647	0.0227945	319.425	0.0737519
297.8346	0.0241844	319.2226	0.0751293
298.6442	0.0255951	319.0202	0.0765026
300.5334	0.0269851	318.4805	0.0778759
301.2081	0.0283667	317.6034	0.0792409
302.4225	0.0297525	316.7937	0.08061
303.772	0.0311258	315.5118	0.0819833
304.784	0.0325032	314.2298	0.0833691
305.931	0.0338765	312.3406	0.0847507
307.8877	0.0352415	310.3166	0.0861281
309.0346	0.0366397	308.0226	0.0875264
310.0467	0.0380213	305.6611	0.0889122
310.384	0.039403	303.0972	0.0903063
311.3961	0.0407846		



Σχήμα 8.7: Διάγραμμα σ-ε δοκιμής εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη αλουμίνιας – τιτανίας 200 μm

Η εύρεση του μέτρου ελαστικότητας E έγινε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για τα σημεία του διαγράμματος που ανήκουν στην ελαστική περιοχή και βρέθηκε ίση με 92 GPa με συντελεστή συσχέτισης $R^2=0,907$, όπως εξάλλου απεικονίζεται στο σχήμα 8.8.



Σχήμα 8.8: Εύρεση μέτρου ελαστικότητας ελάσματος διπλού T από Al₂O₃, με επικάλυψη 200 μm.

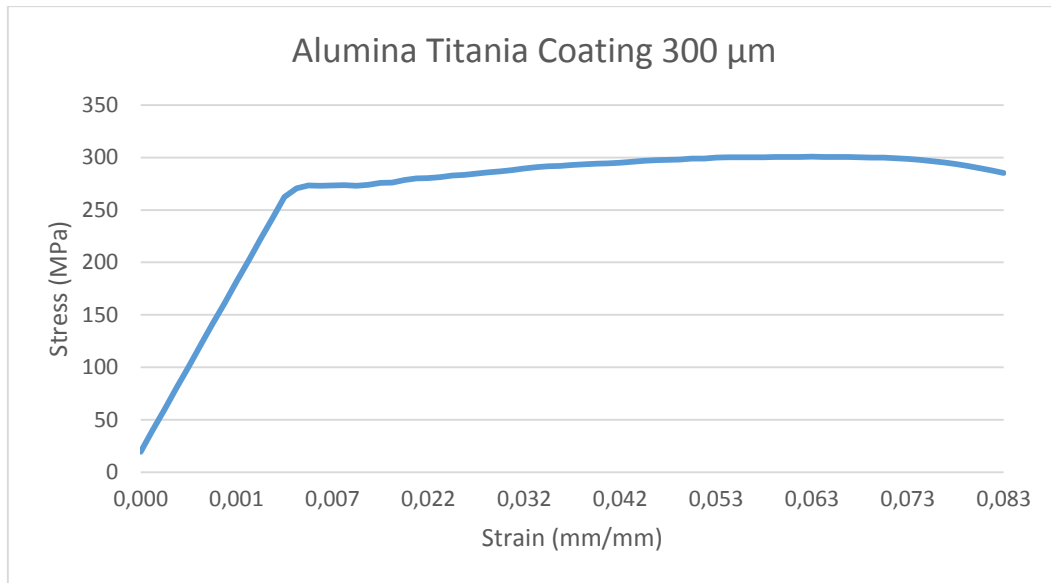
Δοκίμιο No.3

- Μήκος: 50.8 mm
- Πλάτος: 12.7 mm
- Πάχος υποστρώματος: 2 mm
- Πάχος επικάλυψης: 300 μm (150 σε κάθε πλευρά)

Στον πίνακα 8.5 περιέχονται οι τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης που προέκυψαν κατά την δοκιμή και στο σχήμα 8.9 το αντίστοιχο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης.

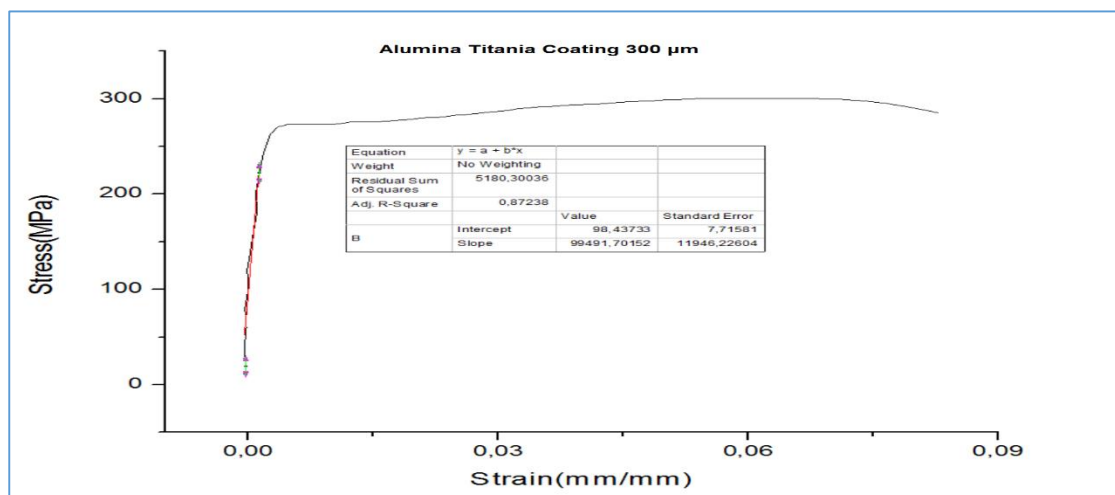
Πίνακας 8.5: Τιμές σ-ε που προέκυψαν ύστερα από δοκιμή εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη Αλουμίνιας – Τιτανίας 300 μm

σ (Μpa)	ε (mm/mm)	σ (Μpa)	ε (mm/mm)
19.42432935	0.0003479	296.7222379	0.04499171
39.72726163	0.0004631	297.3412356	0.04625161
60.03019449	0.0002495	297.7745514	0.04751151
80.33315641	0.0004144	298.1459152	0.04877141
100.6979542	9.688E-06	299.0743827	0.05003513
121.0009161	0.0001402	299.1362767	0.05129503
141.245936	0.00024924	299.8172264	0.05255493
161.0736685	0.00062721	300.2504841	0.05380719
181.4384663	0.00103573	300.3123781	0.05505946
201.7414282	0.00088615	300.2504841	0.05631936
222.044332	0.00129848	300.3123781	0.05757162
242.3472939	0.00176808	300.436166	0.05883534
262.4878786	0.00259655	300.5599539	0.06009906
270.5226682	0.00348185	300.621906	0.06135132
273.3081288	0.00473411	300.6838	0.06261504
272.998659	0.00601692	300.49806	0.06387494
273.3700227	0.00731118	300.5599539	0.06513484
273.6175986	0.00842959	300.5599539	0.06639856
273.1031523	0.00973912	300.2504841	0.06766228
274.0814493	0.01101812	300.0648023	0.068926
275.8765485	0.01231619	299.8790623	0.0701859
276.2479122	0.01598432	299.3839106	0.0714458
278.6476329	0.01964099	298.579231	0.07269806
280.1951562	0.02091234	297.8363873	0.07395415
280.442732	0.02218752	296.660344	0.07521405
281.1855176	0.02348178	295.4842425	0.0764854
282.9187228	0.02475696	293.7510373	0.07775293
283.5377205	0.02602449	291.8941023	0.07901665
284.6518699	0.02729584	289.7895334	0.08029946
285.8898653	0.02855574	287.6230705	0.08157081
286.8183909	0.02981946	285.2708676	0.0828498
287.8706463	0.03107936		
289.6657455	0.03233163		
290.7180009	0.03361443		
291.6465265	0.03488197		
291.9559963	0.0361495		
292.8845219	0.03741704		
293.6273075	0.03867312		
294.1843531	0.03994448		
294.4319871	0.04122728		
294.9890327	0.04248336		
295.9794523	0.04373945		



Σχήμα 8.9: Διάγραμμα σ-ε δοκιμής εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη αλουμίνιας – τιτανίας 300 μm

Η εύρεση του μέτρου ελαστικότητας E έγινε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για τα σημεία του διαγράμματος που ανήκουν στην ελαστική περιοχή και βρέθηκε ίση με 99.4 GPa με συντελεστή συσχέτισης $R^2=0,872$, όπως εξάλλου απεικονίζεται στο σχήμα 8.10.



Σχήμα 8.10: Εύρεση μέτρου ελαστικότητας ελάσματος διπλού T από Al2024, με επικάλυψη 300 μm.

Δοκίμιο No.4

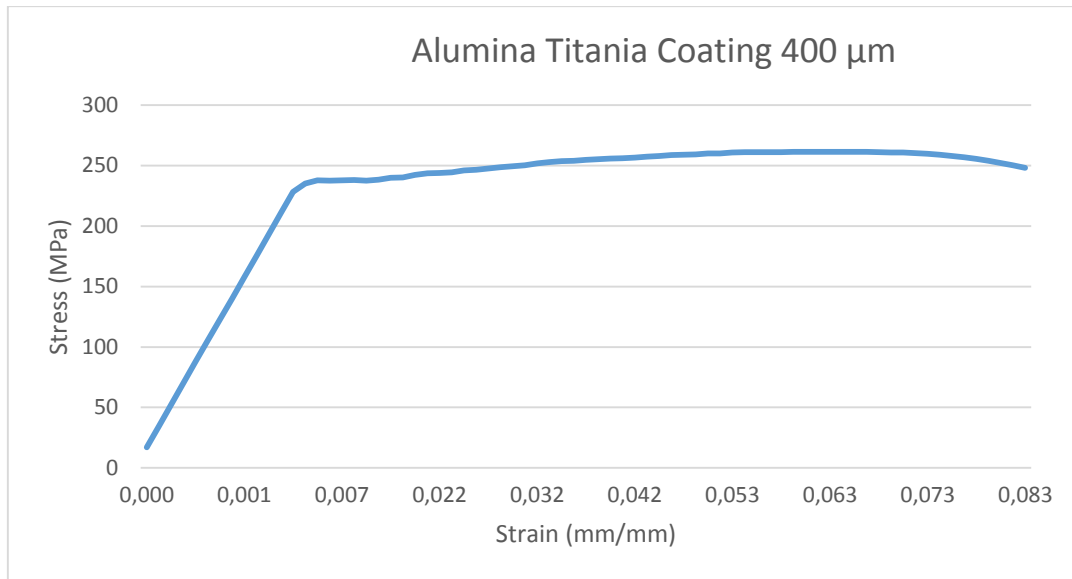
- Μήκος: 50.8 mm
- Πλάτος: 12.7 mm
- Πάχος υποστρώματος: 2 mm

- Πάχος επικάλυψης: 402 μm (201 σε κάθε πλευρά)

Στον πίνακα 8.6 περιέχονται οι τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης που προέκυψαν κατά την δοκιμή και στο σχήμα 8.11 το αντίστοιχο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης.

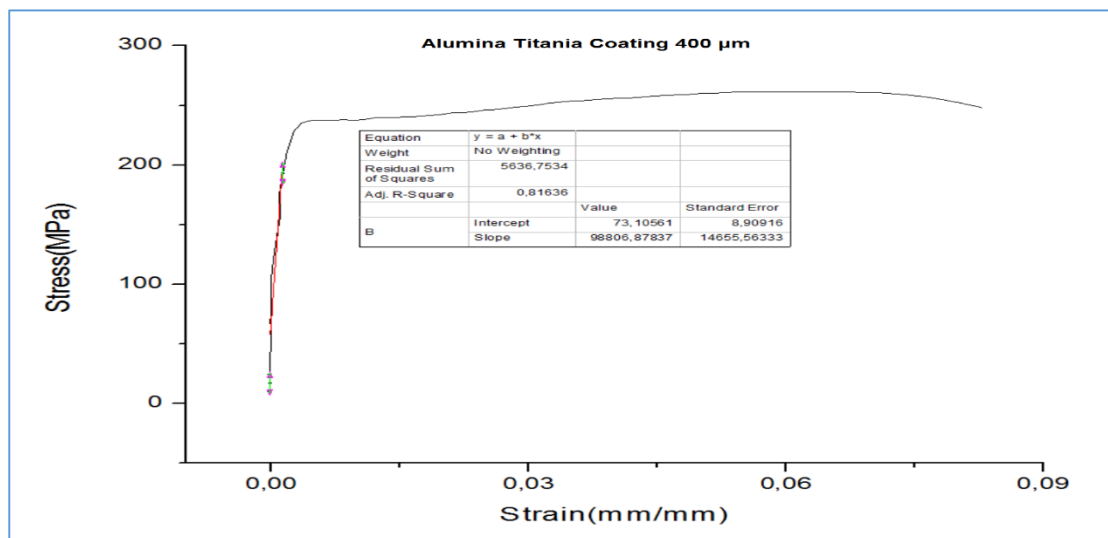
Πίνακας 8.6: Τιμές σ - ϵ που προέκυψαν ύστερα από δοκιμή εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη Αλουμίνιας – Τιτανίας 400 μm

σ (Mpa)	ϵ (mm/mm)	σ (Mpa)	ϵ (mm/mm)
16.89072	0.00012	256.5122	0.042483
34.54544	0.00015	257.3734	0.043739
52.20017	8.3E-05	258.0193	0.044992
69.85492	0.00014	258.5576	0.046252
87.56344	3.2E-06	258.9344	0.047512
105.2182	4.7E-05	259.2573	0.048771
122.8226	0.000249	260.0647	0.050035
140.0641	0.000627	260.1185	0.051295
157.7726	0.001036	260.7106	0.052555
175.4273	0.000886	261.0874	0.053807
193.082	0.001298	261.1412	0.055059
210.7368	0.001768	261.0874	0.056319
228.2503	0.002597	261.1412	0.057572
235.2371	0.003482	261.2488	0.058835
237.6592	0.004734	261.3565	0.060099
237.3901	0.006017	261.4104	0.061351
237.7131	0.007311	261.4642	0.062615
237.9283	0.00843	261.3027	0.063875
237.481	0.009739	261.3565	0.065135
238.3317	0.011018	261.3565	0.066399
239.8927	0.012316	261.0874	0.067662
240.2156	0.015984	260.9259	0.068926
242.3023	0.019641	260.7644	0.070186
243.648	0.020912	260.3338	0.071446
243.8632	0.022188	259.6341	0.072698
244.5091	0.023482	258.9882	0.073954
246.0163	0.024757	257.9655	0.075214
246.5545	0.026024	256.9428	0.076485
247.5234	0.027296	255.4357	0.077753
248.5999	0.028556	253.821	0.079017
249.4073	0.029819	251.9909	0.080299
250.3223	0.031079	250.107	0.081571
251.8833	0.032332	248.0616	0.08285
252.7983	0.033614		
253.6057	0.034882		
253.8748	0.036149		
254.6822	0.037417		
255.3281	0.038673		
255.8125	0.039944		
256.0278	0.041227		



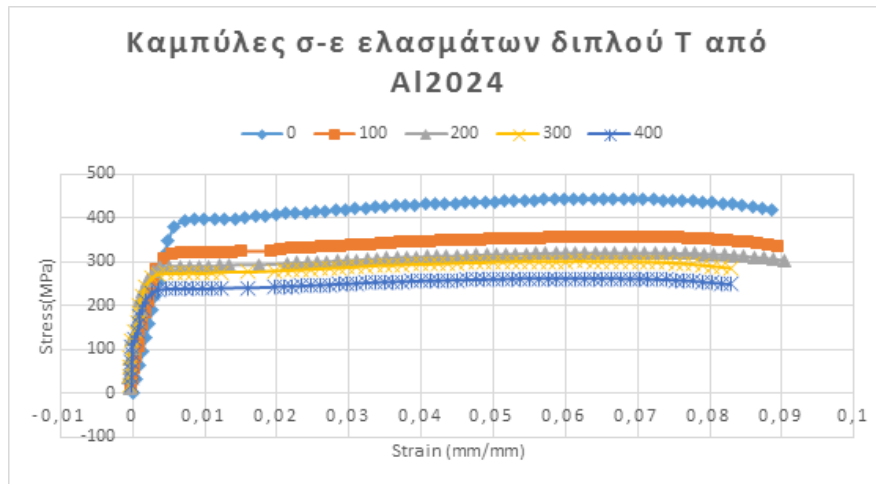
Σχήμα 8.11: Διάγραμμα σ-ε δοκιμής εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη αλουμίνιας – τιτανίας 400 μm

Η εύρεση του μέτρου ελαστικότητας E έγινε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για τα σημεία του διαγράμματος που ανήκουν στην ελαστική περιοχή και βρέθηκε ίση με 98.8 GPa με συντελεστή συσχέτισης $R^2=0,8136$, όπως εξάλλου απεικονίζεται στο σχήμα 8.12.



Σχήμα 8.12: Εύρεση μέτρου ελαστικότητας ελάσματος διπλού T από Al2024, με επικάλυψη 400 μm.

Στο σχήμα 8.13 απεικονίζονται όλες οι καμπύλες σ-ε που προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού των ελασμάτων Al2024.



Σχήμα 8.13: Καμπύλες σ-ε που προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού των ελασμάτων Al2024.

Από το παραπάνω σχήμα γίνεται αντιληπτό ότι με την αύξηση του πάχους της κεραμικής επικάλυψης παρατηρείται μείωση στην τιμή της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό και στην τιμή του ορίου διαρροής. Αντιθέτως, με την αύξηση του πάχους της κεραμικής επικάλυψης, παρατηρείται οριακή αύξηση του μέτρου ελαστικότητας.

Το εξετασθέν σύστημα, υπόστρωμα (Al 2024) + επικάλυψη (αλουμίνα – τιτανία) αποτελείται από ένα μεταλλικό υπόστρωμα, το οποίο έχει επικαλυφθεί εκατέρωθεν με κεραμική επικάλυψη και κατά συνέπεια μπορεί να χαρακτηριστεί ως στρωματοειδές σύνθετο υλικό. Είναι γνωστό ότι η παρακάτω εξίσωση ισχύει για στρωματοειδή σύνθετα υλικά, όταν φορτίζονται παράλληλα (εφελκυστικά) προς τις στρώσεις [2]: $E_{cs} = E_s V_s + E_c V_c$,

όπου ο δείκτης cs καθορίζει το σύνθετο (επικαλυμμένο) σύστημα, V_c και V_s είναι, αντίστοιχα, τα κλάσματα όγκου της επικάλυψης και του υποστρώματος στο σύνθετο σύστημα, και E_c και E_s είναι τα μέτρα ελαστικότητας της επικάλυψης και του υποστρώματος αντίστοιχα.

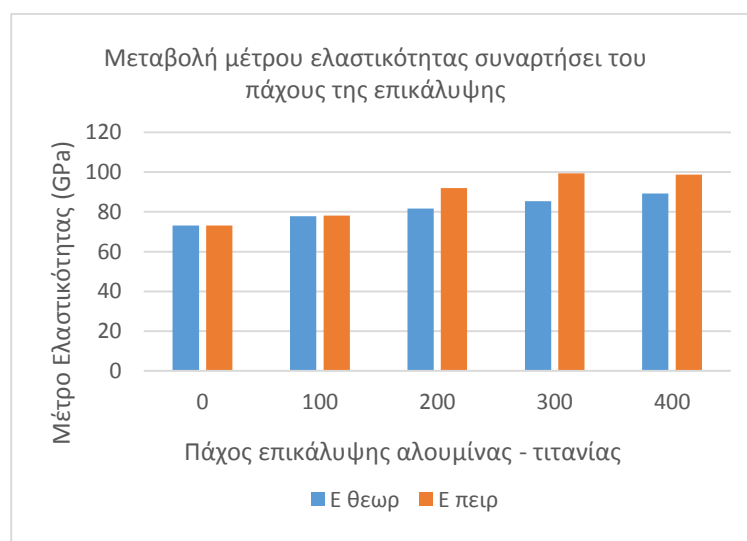
Ο πίνακας 8.7 παραθέτει τη θεωρητική (υπολογισθείσα) τιμή του μέτρου ελαστικότητας του συστήματος για τα διάφορα πάχη της κεραμικής επικάλυψης αλουμίνας τιτανίας. Για τον υπολογισμό των μέτρων ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες τιμές: $E_s = 73.1 \text{ GPa}$ [1] για το κράμα Al2024 και $E_c = 168 \text{ GPa}$ [3].

Πίνακας 8.7: Υπολογισμός θεωρητικού μέτρου ελαστικότητας του συστήματος και σύγκριση με το πειραματικό.

Δοκίμιο No.	Κράμα Al2024 (mm)	πάχος επικάλυψης (μm)	πάχος επικάλυψης (mm)	Πάχος Al2024 +Al ₂ O ₃ – TiO ₂ (mm)	Vs	Vc	E _{CSθεωρ}	E _{CSπειρ}
0	2	0	0.00	2	1.00	0.00	73.1	73.2
1	2	102	0.102	2.102	0,95	0,05	77.8	78.13
2	2	198	0.198	2.198	0,91	0,09	81.641	92.02
3	2	300	0.3	2.3	0,87	0,13	85.43	99.4
4	2	402	0.402	2.402	0,83	0,17	89,23	98.8

Παρατηρείται ότι και η θεωρητική και πειραματική τιμή του μέτρου ελαστικότητας αυξάνει με την αύξηση του πάχους της επικάλυψης (με εξαίρεση το παχύτερο δοκίμιο). Η διαφορά ανάμεσα στις θεωρητικές και πειραματικές τιμές μπορεί να αποδοθεί στο πορώδες της επικάλυψης και σε τυχόν παραμένουσες τάσεις.

Στο σχήμα 8.14 απεικονίζεται η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου συστήματος Al2024 + Al₂O₃ – TiO₂, συναρτήσει του πάχους της επικάλυψης. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι το μέτρο ελαστικότητας του εξετασθέντος συστήματος αυξάνει αυξανόμενου του πάχους της επικάλυψης.



Σχήμα 8.14: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας ελάσματος διπλού T από Al2024, συναρτήσει του πάχους της επικάλυψης αλουμίνιας – τιτανίας.

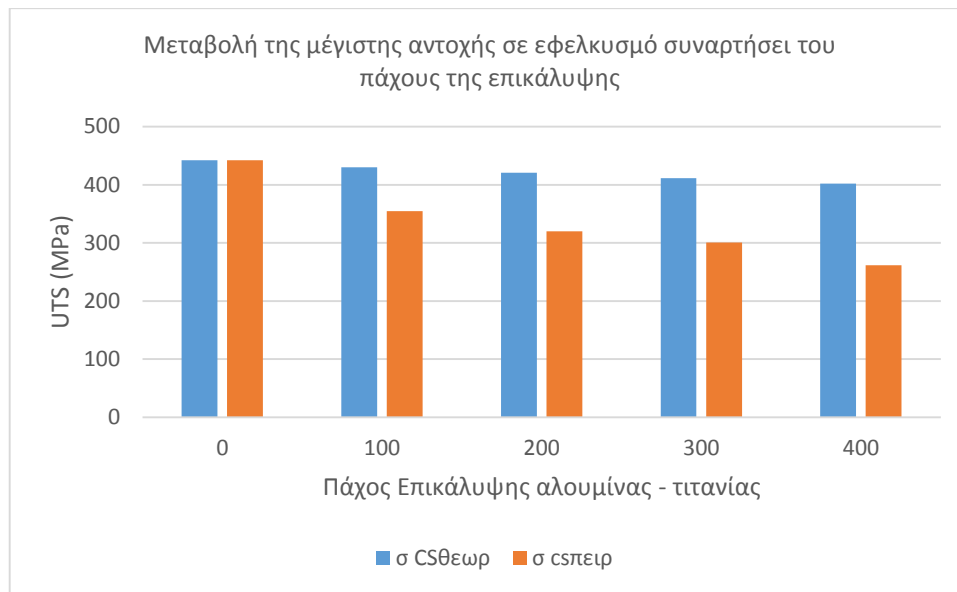
Με όμοιο τρόπο όπως υπολογίστηκαν οι θεωρητικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας, μπορεί να υπολογισθεί η αντοχή σε εφελκυσμό του επιστρωμένου συστήματος από τη σχέση: $\sigma_{UTS,cs} = \sigma_{UTS,s} V_s + \sigma_{UTS,c} V_c$ όπου ο δείκτης cs καθορίζει το σύνθετο (επικαλυμμένο) σύστημα, V_c και V_s είναι, αντίστοιχα, τα κλάσματα όγκου της επικάλυψης και του υποστρώματος στο σύνθετο σύστημα, και $\sigma_{UTS,c}$ και $\sigma_{UTS,s}$ είναι οι αντοχές σε εφελκυσμό της επικάλυψης και του υποστρώματος αντίστοιχα.

Ειδικότερα ο πίνακας 8.8 παραθέτει τη θεωρητική (υπολογισθείσα) τιμή της εφελκυστικής αντοχής του συστήματος Al2024 + Al₂O₃ – TiO₂ για τα διάφορα πάχη της κεραμικής επικάλυψης. Για τον υπολογισμό των μέτρων ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες τιμές: $\sigma_{UTS,s} = 441.9$ MPa για το κράμα Al2024 με βάση την πειραματική τιμή και $\sigma_{UTS,c} = 206,85$ MPa.

Πίνακας 8.8: Υπολογισμός θεωρητικής αντοχής σε εφελκυσμό του συστήματος και σύγκριση με την πειραματική

Δοκίμιο No.	Κράμα Al2024 (mm)	πάχος επικάλυψης (μm)	πάχος επικάλυψης (mm)	Πάχος Al2024 +Al ₂ O ₃ – TiO ₂ (mm)	Vs	Vc	$\sigma_{CS\theta\epsilon\omega\rho}$	$\sigma_{CS\tau\epsilon\iota\rho}$
0	2	0	0.00	2	1.00	0.00	441.9	441.9
1	2	102	0.102	2.102	0,95	0,05	430.1	354.36
2	2	198	0.198	2.198	0,91	0,09	420.7	319.9
3	2	300	0.3	2.3	0,87	0,13	411.34	300.68
4	2	402	0.402	2.402	0,83	0,17	401.9	261.46

Όπως παρατηρείται στο σχήμα 8.15, με την αύξηση του πάχους παρατηρείται μείωση της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγείται από το ότι οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την απόθεση των επικαλύψεων πλάσματος, μειώνουν αισθητά τις εφελκυστικές ιδιότητες του συστήματος (υπόστρωμα-επικάλυψη), σε σύγκριση με το υπόστρωμα (Al2024) που δεν υποβλήθηκε σε τέτοιες συνθήκες.



Σχήμα 8.15: Μεταβολή μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό ελάσματος διπλού T από Al2024, συναρτήσει του πάχους της επικάλυψης αλουμίνιας – τιτανίας.

8.2 Κόπωση

Στόχος των δοκιμών κόπωσης ήταν η μελέτη της επίδρασης της κεραμικής επικάλυψης $Al_2O_3-TiO_2$ στην συμπεριφορά του υποστρώματος Al2007 σε κυκλικές φορτίσεις.

Ειδικότεροι στόχοι των δοκιμών κόπωσης στην παρούσα διπλωματική είναι:

- Ο προσδιορισμός των κύκλων φόρτισης έως την αστοχία (αντοχή σε κόπωση) των δοκιμίων (επικαλυμμένων και μη) αλουμινίου Al2007, τα οποία υπόκεινται κάτω από συγκεκριμένη τάση φόρτισης.
- Η εκτίμηση της επίδρασης της επικάλυψης πλάσματος (αλουμίνιας - τιτανίας) στην αντοχή σε κόπωση του δοκιμίων, σε σύγκριση με τα μη επικαλυμμένα.
- Η διερεύνηση της τυχόν επίπτωσης του πάχους της επικάλυψης στα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης.

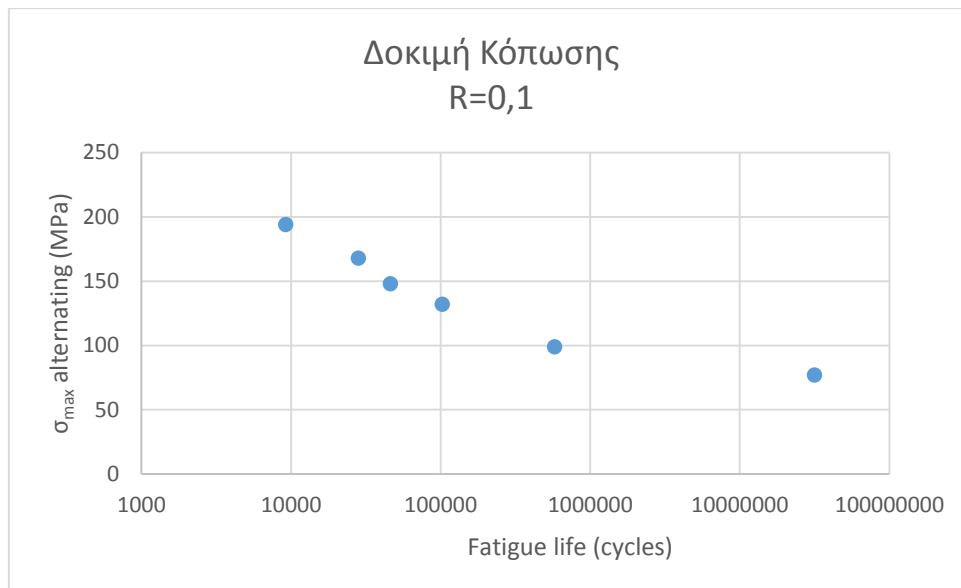
Η δοκιμή κόπωσης (όπως και η αντίστοιχη του εφελκυσμού) πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τηλεπικοινωνιακών και Ηλεκτρονικών μέσων της Πολεμικής Αεροπορίας, χρησιμοποιώντας την συσκευή MTS 810 Material Test System (εικόνα 8.1). Η αναλογία τάσεων ($R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$) διατηρήθηκε στην τιμή 0,1 κατά την διάρκεια όλων των δοκιμών, κατά συνέπεια οι δοκιμές κόπωσης αφορούσαν αξονική εφελκυστική κόπωση (tensile – tensile fatigue). Η συχνότητα των κύκλων φόρτισης, σύμφωνα με μια μερίδα επιστημόνων, δεν επηρεάζει την αντοχή των δοκιμίων σε κόπωση αλλά ουσιαστικά επιδρά μόνο στον χρόνο εκτέλεσης των δοκιμών. Με δεδομένο αυτή

την θεώρηση, η οποία δεν έχει ούτε αποδειχτεί αλλά ούτε καταρριφθεί, μοναδικό κριτήριο για την επιλογή της καταλληλότερης συχνότητας είναι η ομαλή διεξαγωγή των δοκιμών. Πιο συγκεκριμένα η συχνότητα διατηρήθηκε ίση με 4000rpm σε όλες τις δοκιμές με σκοπό την διεκπεραίωση των δοκιμών σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα. Η επιλογή των τιμών μέγιστης τάσης (σ_{max}) έγινε ύστερα από την δοκιμή κόπωσης αριθμού μη επικαλυμμένων κυλινδρικών δοκιμών (as received), με γνώμονα την δυνατότητα συγκεκριμένου χρόνου δοκιμών ένεκα φόρτου εργασιών διερευνήσεων αεροπορικού υλικού. Η μη ύπαρξη μεγάλου αριθμού δοκιμών κόπωσης δεν επέτρεψε την διεξαγωγή περισσότερων (πχ περισσότερων του ενός ανά εύρος τάσης κάτι που δεν επέτρεψε την μέτρηση τυχόν σφάλματος μετρήσεων ή του εύρους μετρήσεων ανά τάση).

Αρχικά υποβλήθηκαν σε δοκιμή κόπωσης έξι κυλινδρικά δοκίμια τα οποία δεν είχαν επικαλυφθεί με επικάλυψη αλουμίνιας – τιτανίας (METCO 101 NS) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 8.9 και στο διάγραμμα 8.16 (καμπύλη Wöhler)

Πίνακας 8.9: Τιμές S-N της καμπύλης Wöhler για έξι κυλινδρικά δοκίμια (από Al2007) χωρίς επικάλυψη αλουμίνιας - τιτανίας

Παράμετροι:				
R=0.1				
f = 66.66 Hz = 4000 rpm				
No.	Διάμετρος (mm)	σ_{max} (MPa)	Διάρκεια δοκιμής	Κύκλοι φόρτισης (Αντοχή)
1	5,95	194	3.3'	13200
2	5,91	168	8'	32263
3	6,03	148	11.53'	46120
4	6,02	132	31.3'	125389
5	6	99	169.5'	677896
6	5,97	77	7905'	31622776

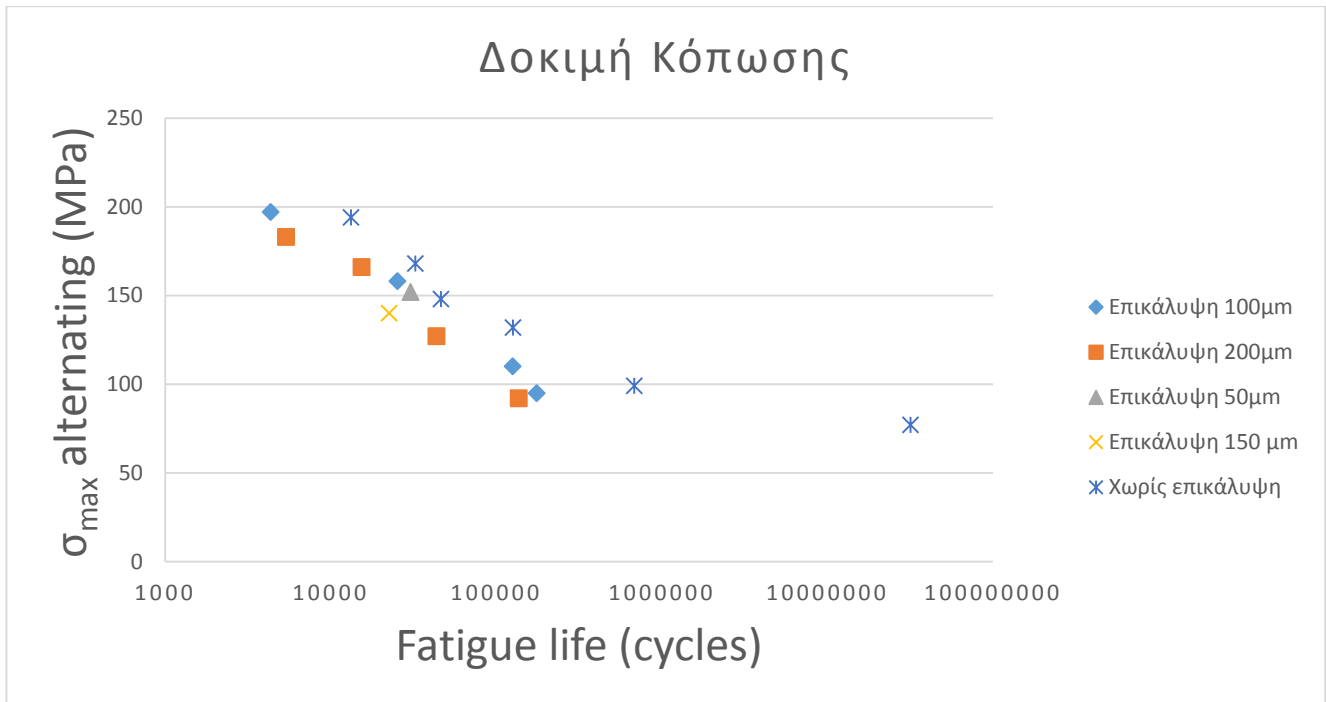


Σχήμα 8.16: Καμπύλη S-N (Wöhler) κυλινδρικών δοκιμών χωρίς επικάλυψη

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές κόπωσης των 10 επικαλυμμένων κυλινδρικών δοκιμών (Al2007) παρουσιάζονται στον πίνακα 8.10. Επισημαίνεται ότι οι τιμές εύρους τάσεων καθώς και συχνότητας κυκλικών φορτίσεων παρέμειναν οι ίδιες με τις προγενέστερες δοκιμές στα χωρίς επικάλυψη δοκίμια (as received).

Πίνακας 8.10: Τιμές S-N της καμπύλης Wöhler για τα επικαλυμμένα κυλινδρικά δοκίμια (από Al2007) με διάφορα πάχη επικάλυψης αλουμίνιας - τιτανίας

<u>Παράμετροι:</u>				
R=0.1				
f = 66.66 Hz = 4000 rpm				
	Πάχος επικάλυψης (μm)	σ_{max} alternating (Mpa)	Διάρκεια δοκιμής	N (cycles)
No.1	98	197	1.1'	4330
No.2	101	95	43.7'	174749
No.3	147	140	5.61'	22455
No.4	203	183	1.33'	5346
No.5	199	127	10.8'	43283
No.6	51	152	7.6'	30210
No.7	202	166	3.8'	15333
No.8	200	92	34'	135923
No.9	99	158	6.3'	25220
No.10	99	110	31.2'	124962



Σχήμα 8.17: Καμπύλη S-N (Wöhler) κυλινδρικών δοκιμών με και χωρίς επικάλυψη αλουμίνιας-τιτανίας

Στο σχήμα 8.17 απεικονίζονται οι τιμές των κύκλων φόρτισης στις οποίες επέρχεται η θραύση για συγκεκριμένες μέγιστες τάσεις (σ_{max}) και για όλα τα κυλινδρικά δοκίμια που δοκιμάστηκαν, είτε είχαν επικάλυψη είτε δεν είχαν. Από τα δεδομένα του σχήματος 8.17 μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι τα επικαλυμμένα δοκίμια αλουμινίου παρουσίασαν υποβαθμισμένα χαρακτηριστικά αντοχής σε κόπωση σε σύγκριση με τα μη επικαλυμμένα δοκίμια. Επιπρόσθετα διαφαίνεται ότι αυξανόμενου του πάχους της επικάλυψης, υποβαθμίζονται περαιτέρω τα χαρακτηριστικά αντοχής σε κόπωση.

8.3 Θραυστογραφία

Η θραυστογραφία πραγματοποιήθηκε στο Οπτικό και Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM), τα οποία βρίσκονται στο ΕΤΗΜ. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε 2 επικαλυμμένα δοκίμια (1 έλασμα Al2024 και ένα κυλινδρικό Al2007) ώστε να διερευνηθεί η επίδραση και η συμπεριφορά της επικάλυψης στην θραύση. Τα επικαλυμμένα δοκίμια τα οποία παρατηρήθηκαν είναι το έλασμα No.2 και το κυλινδρικό No.5.

8.3.1 Μικροσκοπική ανάλυση της εφελκυστικής θραύσης

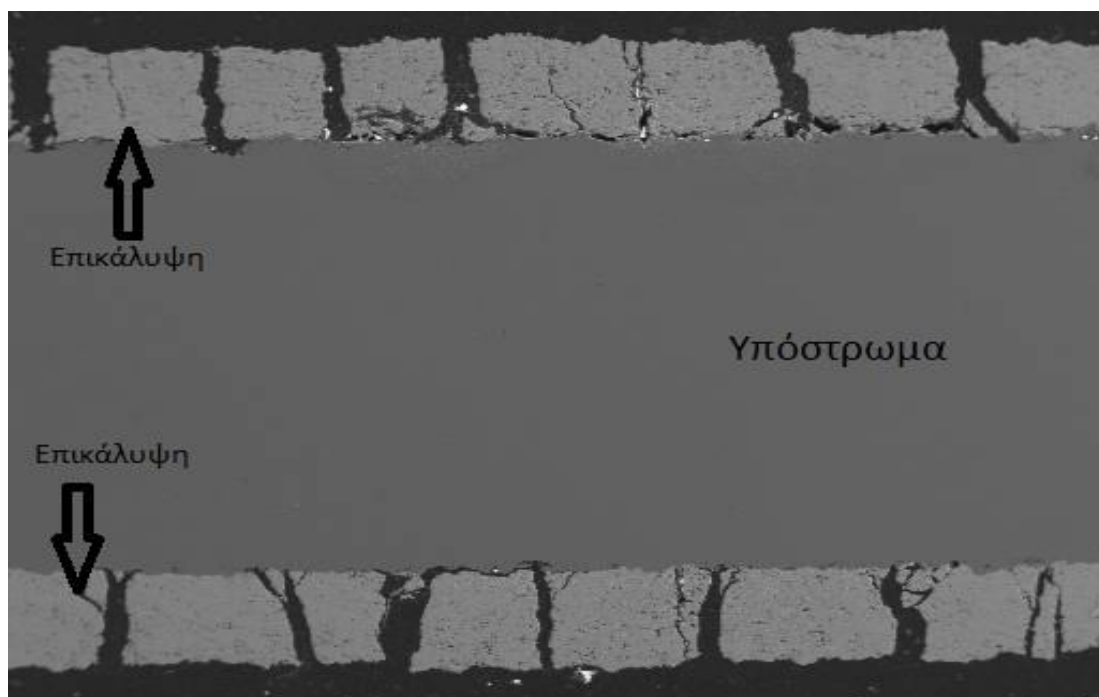
Κατά την διάρκεια της δοκιμής εφελκυσμού κοντά στο όριο διαροής του Al παρατηρήθηκε ρωγμάτωση της κεραμικής επικάλυψης η οποία εξελίχθηκε ταχέως οδηγώντας στην αρχή του πλαστικού σταδίου σε αποφλοίωση. Ειδικότερα μακροσκοπικά εμφανείς ρωγμές κάθετες προς τον άξονα

εφελκυσμού ξεκίνησαν να σχηματίζονται στο τέλος της γραμμικής περιοχής του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης και όσο εκτυλισσόταν η διαδικασία του εφελκυσμού όλο και περισσότερες ρωγμές δημιουργούνταν συνοδευόμενες και από έντονη αποφλοίωση της επικάλυψης. Το γεγονός ότι η διαδικασία έναρξης των ρωγμών πραγματοποιήθηκε πολύ πριν το υπόστρωμα Al 2007 φτάσει στο όριο θραύσης του, οφείλεται στην ψαθυρή φύση της επικάλυψης.

Αντίστοιχες παρατηρήσεις έκαναν και οι Lihe Qian et al. [4], οι οποίοι διαπίστωσαν έναρξη εμφάνισης εφελκυστικών ρωγματώσεων σε παραμορφώσεις ~0.128%, ενώ ανάλογες μελέτες από τη NASA [5] κατέδειξαν εφελκυστικές ρωγματώσεις στην επιφάνεια θερμομονωτικών επικαλύψεων με ψεκασμό πλάσματος, οι οποίες δημιουργήθηκαν για παραμορφώσεις 0.196%.

Στα εργαστήρια του ΕΤΗΜ και με τη χρήση του στερεοσκοπίου και του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου μελετήθηκε το δοκίμιο μετά από την διαδικασία εφελκυσμού, στην οποία είχε υποβληθεί.

Η εικόνα 8.3 παρουσιάζει την εγκάρσια τομή του επικαλυμμένου ελάσματος μετά τη δοκιμή εφελκυσμού σε περιοχή με έντονη επιφανειακή ρωγματώση.



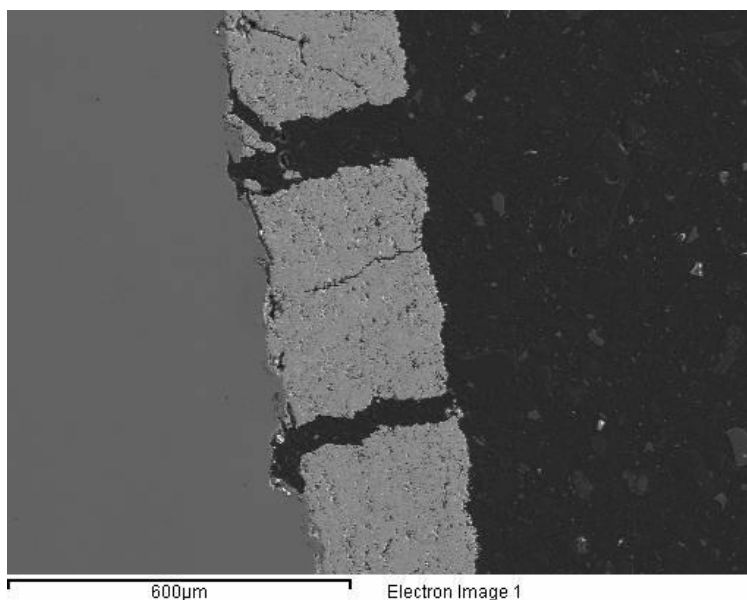
Εικόνα 8.3: Εγκάρσια τομή επικαλυμμένου (200 μm) ελάσματος Al2024 (No.2) μετά την δοκιμή εφελκυσμού [x450].

Στην ανωτέρω εικόνα, διακρίνονται εγκάρσιες ρωγματώσεις, οι οποίες οφείλονται στις υψηλές παραμορφώσεις του εφελκυσμού. Οι ρωγματώσεις αυτές είναι κάθετες στη διεπιφάνεια επικάλυψης – υποστρώματος, πράγμα το οποίο είναι ενδεικτικό της ψαθυρής συμπεριφοράς της κεραμικής επικάλυψης αλουμίνιας τιτανίας.

Η περιοχή αυτή δεν είναι στο σημείο θραύσης. Διακρίνονται οι ρωγμές που έχουν σχηματισθεί και έχουν αναπτυχθεί μέχρι το υπόστρωμα και το γεγονός ότι η επικάλυψη έχει χωρισθεί σε τμήματα εκ των οποίων αρκετά είναι έτοιμα για αποφλοίωση. Σημειωτέον ότι σε αυτή τη φωτογραφία δεν παρατηρείται εκτεταμένη αποφλοίωση γιατί το επιλεγμένο σημείο μελέτης είναι σε ασφαλή απόσταση από το σημείο θραύσης.

Η έναρξη των ρωγμών, κυρίως, πραγματοποιήθηκε στην ελεύθερη επιφάνεια της επικάλυψης και αυτό μπορεί να αποδειχθεί από τον τρόπο σύμφωνα με τον οποίο διακλαδίζονται οι ρωγμές μέχρι το υπόστρωμα. Όταν οι επιφανειακά σχηματισθείσες ρωγμές πλησιάζουν την διεπιφάνεια επικάλυψης - υποστρώματος διακλαδώνονται και ορισμένες εξ αυτών τείνουν να κινηθούν παράλληλα κατά μήκος της διεπιφάνειας προκαλώντας διεπιφανειακή αποκόλληση που βαθμιαία μπορεί να οδηγήσει σε αποφλοίωση της επικάλυψης. Ο πολλαπλασιασμός των ρωγμών γίνεται με εκκίνηση πάντα από την επιφάνεια με αποτέλεσμα προϊούσης της δοκιμής να μειώνεται η απόσταση μεταξύ των σχηματιζόμενων ρωγμών.

Όπως προαναφέρθηκε η επικάλυψη κατατμήθηκε απόδειξη ότι δεν ακολουθεί την πλαστική παραμόρφωση του υποστρώματος. Τα διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας μεταξύ υποστρώματος και επικάλυψης οδηγούν στην ανάπτυξη σημαντικών διατμητικών τάσεων στην διεπιφάνεια με συνέπεια την απώλεια της πρόσφυσης και, τελικά, την αποφλοίωση της επικάλυψης (βλ. εικόνα 8.4).



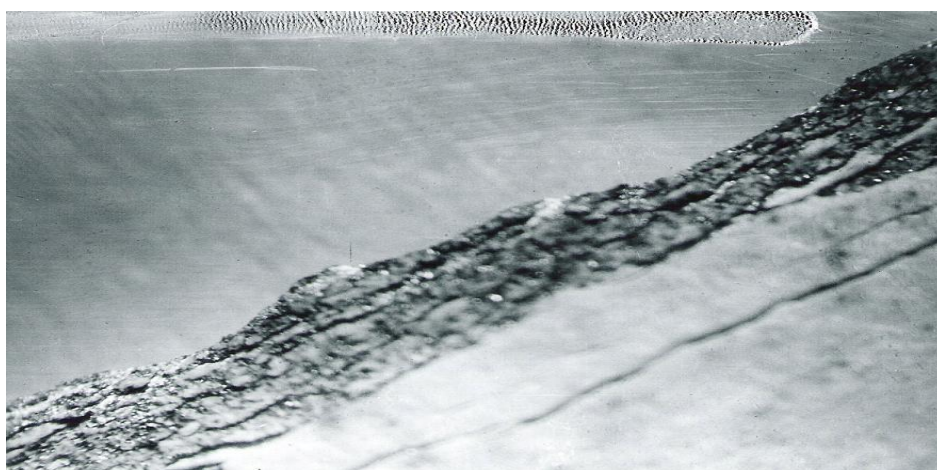
Εικόνα 8.4: Μεγέθυνση της εικόνας 8.3 (α) x300 (β) x500

Στην εικόνα 8.5 διακρίνονται οι ρωγματώσεις οι οποίες είναι κάθετες στον άξονα του εφελκυσμού. Επίσης, παρατηρείται αποφλοίωση της κεραμικής αλλά και της ενδιάμεσης μεταλλικής συνδετικής επικάλυψης (Ni-Al) και ορισμένες φορές αποκαλύπτεται η επιφάνεια του υποστρώματος.



Εικόνα 8.5: Κάτοψη της ρωγματωμένης επιφάνειας $Al_2O_3-TiO_2$, μετά τον εφελκυσμό, στην περιοχή της θραύσης [x50]

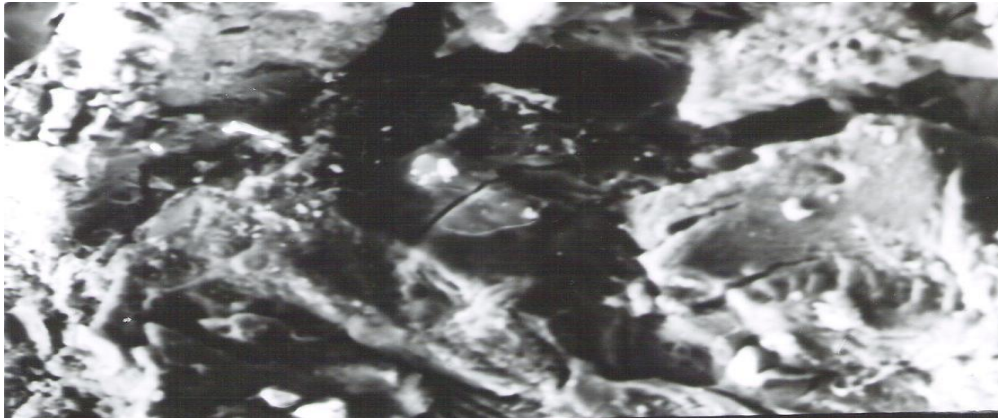
Στην εικόνα 8.6, είναι εμφανής η αποφλοίωση στην περιοχή της θραύσης, η οποία αποδίδεται στις πολύ ισχυρές τάσεις που αναπτύχθηκαν στη διεπιφάνεια και οι οποίες ξεπερνούν την τάση πρόσφυσης της επικάλυψης στο υπόστρωμα.



Εικόνα 8.6: Κάτοψη στην περιοχή της θραύσης [x40]

Στην εικόνα 8.7 δίδεται η κάτοψη της επικάλυψης $Al_2O_3-TiO_2$ σε μεγάλη μεγέθυνση όπου μπορούν να διακριθούν μικρορωγματώσεις, οι οποίες

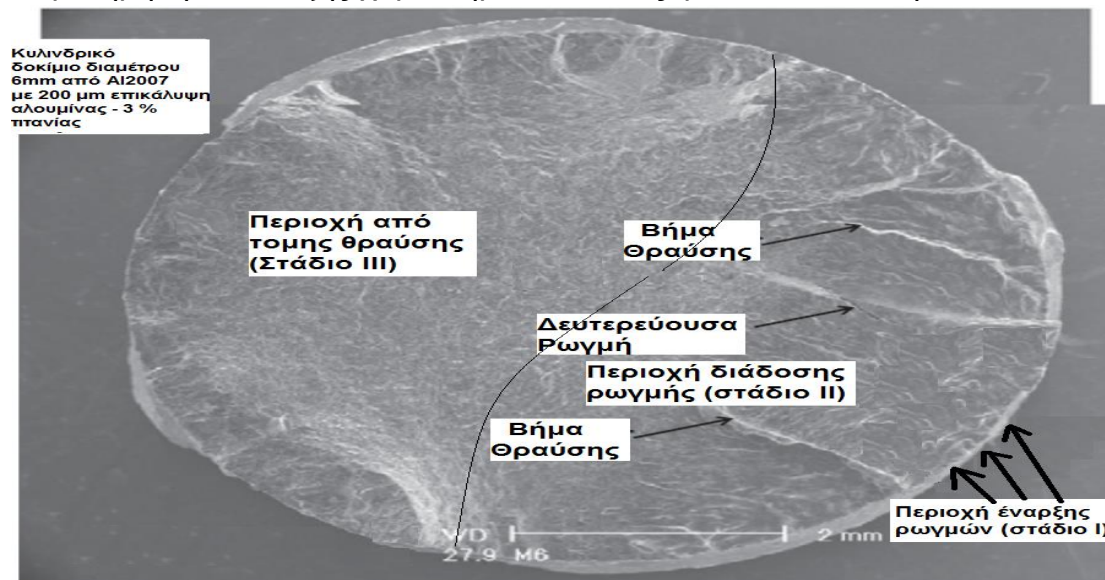
αποδίδονται στην ταχεία ψύξη της κεραμικής επικάλυψης κατά την απόθεση της σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Ενδεχομένως αυτές οι επιφανειακές μικρορωγματώσεις να επιδρούν στην ψαθυρή ρωγμάτωση υπό εφελκυστικά φορτία στην επικάλυψη..



Εικόνα 8.7: Εσωτερικό της ρωγμάτωσης στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο [x3000]

8.3.2 Μικροσκοπική ανάλυση της θραύσης κόπωσης

Ύστερα από προσεκτική μελέτη κατά μήκος όλης της θραυστογενούς επιφάνειας του κυλινδρικού δοκιμίου Νο. 5 (200 μm πάχος επικάλυψης) το οποίο αστόχησε ύστερα από 43283 κύκλους ($R=0.1$, $f=4000\text{rpm}$), παρατηρήθηκαν τα εξής χαρακτηριστικά όπως φαίνονται και στην εικόνα 8.8:

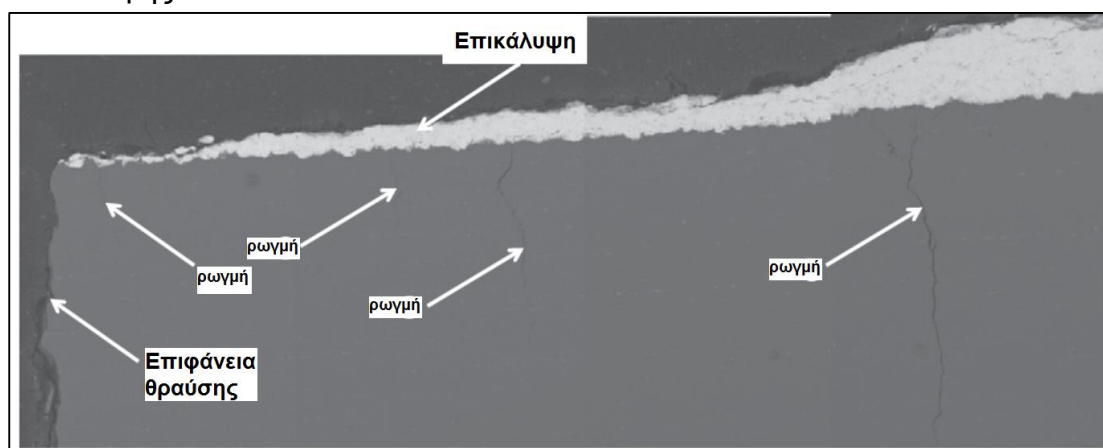


Εικόνα 8.8: Γενική φωτογραφία κυλινδρικού δοκιμίου Νο.5 όπου φαίνονται τα στάδια θραύσης του

Στην ανωτέρω εικόνα γίνεται αντιληπτό ότι η αστοχία του δοκιμίου συνέβη ως αποτέλεσμα της πυρήνωσης και της ταυτόχρονης διάδοσης πολλών ρωγμών, που πιθανόν ξεκίνησαν από την διεπιφάνεια επικάλυψης - υποστρώματος. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι η περιοχή

γρήγορης αστοχίας (στάδιο III-απότομη θραύση) ξεκινάει από το κέντρο του δοκιμίου, αλλά και από το γεγονός ότι υπάρχουν κάποιες περιοχές (βήματα θραύσης) οι οποίες διαχωρίζουν τις ζώνες διάδοσης ρωγμών. Στη συνέχεια αυτές οι μικροεστίες ρωγμών ενώνονται σε ένα ενιαίο μέτωπο (στάδιο II – επέκταση της ρωγμής) που οδηγεί στην αστοχία.

Η ανάλυση της διατομής του δοκιμίου όπως αυτή απεικονίζεται στην εικόνα 8.9 καταδεικνύει την ύπαρξη αρκετών πρωτεύοντων ρωγμών που διατρέχουν το υπόστρωμα και είναι παράλληλες στην επιφάνεια της θραύσης. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει την πυρήνωση και την ταυτόχρονη διάδοση ρωγμών, η συνδυασμένη δράση των οποίων οδηγεί στην θραύση από κόπωση. Επίσης είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το πάχος της επικάλυψης πλησίον της επιφάνειας θραύσης έχει μειωθεί αισθητά, λόγω της απολέπισης (delamination) που προηγήθηκε εξαιτίας των εκτεταμένων ρωγματώσεων της επικάλυψης.



Εικόνα 8.9: Διατομή κυλινδρικού δοκιμίου όπου απεικονίζεται η επικάλυψη και η επιφάνεια θραύσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την μελέτη της μικροδομής και της μηχανικής συμπεριφοράς επικαλύψεων ατμοσφαιρικού πλάσματος Αλουμίνας (Al_2O_3) - Τιτανίας (TiO_2) σε δοκίμια (ελάσματα και κυλινδρικά) από αλουμίνιο 2024 και 2007. Τα βασικά συμπεράσματα της παρούσης εργασίας είναι τα ακόλουθα:

1. Οι επικαλύψεις πλάσματος είναι εξαιρετικά διαδεδομένες στην αεροπορική βιομηχανία καθώς χαρακτηρίζονται από ευκολία και ευελιξία στην απόθεση, σημαντική πρόσφυση με το υπόστρωμα, πολλαπλές δυνατότητες επιλογής υποστρωμάτων και επικαλύψεων.
2. Στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτέθηκε επικάλυψη Al_2O_3 -3% TiO_2 (αλουμίνας – τιτανίας) με ψεκασμό με χρήση πλάσματος σε υποστρώματα Al2007 και Al2024 με ενδιάμεση συνδετική επικάλυψη Ni-20%Al που επίσης αποτέθηκε με χρήση πλάσματος.
3. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα ελάσματα διπλού T από Al2024 για τις δοκιμές εφελκυσμού και δέκα κυλινδρικά δοκίμια από Al2007 για τις δοκιμές κόπωσης, με επικάλυψη Αλουμίνας (Al_2O_3) - Τιτανίας (TiO_2). Τα πάχη των επικαλύψεων για τα ελάσματα ήταν 50, 100, 150 & 200 μm (σε κάθε πλευρά) ενώ τα πάχη των κυλινδρικών δοκιμίων ήταν 50, 100, 100, 100, 100, 150, 200, 200, 200, 200 μm . Επίσης χρησιμοποιήθηκαν και μη επικαλυμμένα δοκίμια με σκοπό την σύγκριση με τα επικαλυμμένα αλλά και με σκοπό τον καθορισμό των παραμέτρων της δοκιμής κόπωσης.
4. Η κεραμική επικάλυψη αλουμίνας – τιτανίας χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη πορώδους το οποίο μετρήθηκε μεταλλογραφικά σε 7% και το οποίο δημιουργείται όταν οι τηγμένοι κόκκοι της αλουμίνας - τιτανίας προσκρούουν στην επιφάνεια του υποστρώματος και εγκλωβίζουν αέρα.
5. Η μεταλλογραφική εξέταση του ενδιάμεσου επιστρώματος κατέδειξε την παρουσία οξειδίων με τη μορφή φυλλιδίων. Ο σχηματισμός των οξειδίων αποδίδεται στην αντίδραση των τηγμένων σωματιδίων Ni-Al με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, κατά την διάρκεια του ψεκασμού. Επιπρόσθετα, δεν παρατηρήθηκε παρουσία άτηκτων σωματιδίων ή μικρορωγμών.
6. Από τις δοκιμές εφελκυσμού παρατηρήθηκε ότι το μέτρο ελαστικότητας του επιστρωμένου συστήματος αυξάνει (οριακά) με την αύξηση του πάχους της επικάλυψης Αλουμίνας (Al_2O_3) - Τιτανίας (TiO_2). Η αύξηση

αυτή ερμηνεύεται και από την θεωρητική αντιμετώπιση του επιστρωμένου συστήματος ως στρωματοειδούς σύνθετου υλικού το οποίο φορτίζεται παράλληλα προς τις στρώσεις του. Μπορεί να ερμηνευτεί και εμπειρικά με το γεγονός ότι η κεραμική επικάλυψη σε αλουμινένιο επίστρωμα επιφέρει κατά κάποιο τρόπο την ψαθυροποίηση του συστήματος.

7. Οι θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές του μέτρου ελαστικότητας του συστήματος $Al_2O_3 + Al_2O_3 - TiO_2$ (υπολογισθείσες θεωρώντας τα επικαλυμμένα δοκίμια ως στρωματοειδή εφελκυσόμενα παράλληλα με τις στρώσεις) παρουσίασαν διαφορές με τις αντίστοιχες πειραματικές. Η απόκλιση αυτή αποδίδεται κυρίως σε εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται στην επικάλυψη κατά την απόθεση της, αλλά και σε πόρους που ενυπάρχουν στη δομή της επικάλυψης
8. Η παρουσία της επικάλυψης $Al_2O_3-TiO_2$ σε υπόστρωμα Al_2O_3 επέφερε μείωση της αντοχής του σε εφελκυσμό. [1]
9. Η εφελκυστική αντοχή (σ_{TS}) των επικαλυμμένων δοκιμίων Al με $Al_2O_3-TiO_2$ μειώνεται με την αύξηση του πάχους της επικάλυψης. Οι θεωρητικές τιμές της εφελκυστικής αντοχής (υπολογισθείσες θεωρώντας τα επικαλυμμένα δοκίμια ως στρωματοειδή εφελκυσόμενα παράλληλα με τις στρώσεις) ακολουθούν την ίδια τάση δηλ. ελαφρά μείωση της $\sigma_{TS,ΘΕΩΡ}$ συναρτήσεως του πάχους της επικάλυψης.
10. Στα δοκίμια τα οποία αστόχησαν λόγω της δοκιμής εφελκυσμού εντοπίστηκαν εγκάρσιες ρωγματώσεις, οι οποίες οφείλονται στις υψηλές παραμορφώσεις του εφελκυσμού. Οι ρωγματώσεις αυτές είναι κάθετες στη διεπιφάνεια επικάλυψης – υποστρώματος, πράγμα το οποίο είναι ενδεικτικό της ψαθυρής συμπεριφοράς της κεραμικής επικάλυψης. Οι εγκάρσιες αυτές ρωγματώσεις σταματούν στη διεπιφάνεια, γεγονός που φανερώνει την τάση για αποφλοιώση που έχει η κεραμική επικάλυψη.
11. Κατά τις δοκιμές κόπωσης των κυλινδρικών δοκιμίων διαπιστώθηκε ότι με την αύξηση του πάχους της επικάλυψης Αλουμίνας (Al_2O_3) - Τιτανίας (TiO_2), υποβαθμίζονται περαιτέρω τα χαρακτηριστικά του συστήματος όσον αφορά την αντοχή σε κόπωση. Πιθανή εξήγηση του ανωτέρω φαινομένου μπορεί να είναι λόγω της ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών οι οποίες οδηγούν στην δημιουργία και διάδοση μικρορωγμών που εντοπίστηκαν σε μικροσκοπικές φωτογραφίες της επιφάνειας της κεραμικής επικάλυψης [2]. Η μείωση της αξονικής αντοχής σε κόπωση των επικαλυμμένων δοκιμίων συγκριτικά με τα μη επικαλυμμένα φαίνεται να επηρεάζεται από την παρουσία πορώδους στη δομή της

επικάλυψης Αλουμίνας (Al_2O_3) - Τιτανίας (TiO_2). [3]. Η μείωση της αντοχής σε κόπωση επηρεάζεται και από την τράχυνση της διεπιφάνειας υποστρώματος επικάλυψης ένεκα της αμμοβολής για την απόθεση της επικάλυψης. Η τραχυμένη διεπιφάνεια παρέχει εγκοπές που λειτουργούν ως συγκεντρωτές τάσεων, που δρουν ως πιθανά σημεία για την πυρήνωση των ρωγμών. [4] [5]

12. Η θραυστογραφική ανάλυση των επικαλυμμένων δοκιμίων κόπωσης επιβεβαίωσε ότι η αστοχία συνέβη ως αποτέλεσμα έναρξης και ταυτόχρονης διάδοσης πολλών ρωγμών, που εντοπίστηκαν να εκκινούν από την διεπιφάνεια επικάλυψης - υποστρώματος.
13. Το γενικό συμπέρασμα που εξάγεται από την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι ότι η επικάλυψη πλάσματος Αλουμίνας (Al_2O_3) - Τιτανίας (TiO_2) σε υποστρώματα αλουμινίου υποβάθμισε σε αξιοσημείωτο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες του συστήματος (υπόστρωμα-επικάλυψη), παρόλο που οι ιδιότητες επιφανείας (υψηλή σκληρότητα, αντοχή στην φθορά, χαμηλή τριβή) θεωρούνται βελτιωμένες [6].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κεφάλαιο 2

1. <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/surface-engineering>,
2. Σημειώσεις επιφανειακών κατεργασιών 2019, Μανωλάκος Δημήτριος, Καθηγητής ΕΜΠ
3. Σημειώσεις επιφανειακών κατεργασιών 2019, Μανωλάκος Δημήτριος, Καθηγητής ΕΜΠ
4. Xian LUO Qi-yang TAN , Ning MO, Yu YIN, Yan-qing YANG, Wyman ZHUANG, Ming-xing ZHANG, Effect of deep surface rolling on microstructure and properties of AZ91 magnesium alloy,sciencedirect.com
5. Ι. Χρυσουλάκης, Δ. Παντελής, «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», Παπασωτηρίου 1996
6. Effect of surface rolling on fatigue behavior of a pearlitic ductile cast iron, Journal of Materials Engineering and Performance, O. Maluf, M. T. Milan, D. Spinell
7. Σημειώσεις επιφανειακών κατεργασιών 2019, Μανωλάκος Δημήτριος, Καθηγητής ΕΜΠ
8. Θερμικές κατεργασίες, Ενότητα Α:Επιφανειακές κατεργασίες για μηχανολογικές εφαρμογές, Δρ Πανδώρα Ψυλλάκη, ΤΕΙ Πειραιά, 2013
9. Διπλωματική εργασία βασικές γνώσεις περί μετάλλων και θερμικές κατεργασίες, Καζαδέλης Ιωάννης, ΤΕΙ Σερρών
10. Ι. Χρυσουλάκης, Δ. Παντελής, «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», Παπασωτηρίου 1996
11. Σημειώσεις επιφανειακών κατεργασιών 2019, Μανωλάκος Δημήτριος, Καθηγητής ΕΜΠ
12. Σημειώσεις επιφανειακών κατεργασιών 2019, Μανωλάκος Δημήτριος, Καθηγητής ΕΜΠ
13. Ι. Χρυσουλάκης, Δ. Παντελής, «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», Παπασωτηρίου 1996
14. Ι. Χρυσουλάκης, Δ. Παντελής, «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», Παπασωτηρίου 1996
15. Suwattananont, 2004
16. Προστασία από τη διάβρωση γαλβανισμένων πυλώνων της ΔΕΗ με χρήση οργανικών επιστρωμάτων, Διπλωματική εργασία, Μάνη Σοφία, Αθήνα 1997, Ηλεκτρολυτική επιψευδαργύρωση με παλμικό ρεύμα, Διπλωματική εργασία Παναγιώτη Νικολάου, Αθήνα 2002
17. Τεχνολογία Επιμεταλλώσεων. Αικ.Ι. Χαραλάμπους Καθηγήτρια ΕΜΠ, Κων/να Κόλλια Καθηγήτρια ΕΜΠ, Ελ. Μάλλιου Δρ Χημικού Μηχανικός, Αθήνα 1997, Επίδραση των συνθηκών ηλεκτρόλυσης και της παρουσίας λειαντικού και στιλβωτικού πρόσθετου στην δομή και τις ιδιότητες σύνθετων μεταλλικών επικαλύψεων, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία Ανδρόνικου Ευγενούλα, Επιβλέπουσα Κ.Κόλλια καθηγήτρια ΕΜΠ, Σημειώσεις Μαθήματος «Ιδιότητες Επιφανειών και Διεπιφανειών» στα πλαίσια του ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών, Κ.Κόλλια καθηγήτρια ΕΜΠ
18. Τεχνολογία Επιμεταλλώσεων. Αικ.Ι. Χαραλάμπους Καθηγήτρια ΕΜΠ, Κων/να Κόλλια Καθηγήτρια ΕΜΠ, Ελ. Μάλλιου Δρ Χημικού Μηχανικός, Αθήνα 1997
19. <https://www.chemeng.ntua.gr/courses/dpm/pdf-files/25-rigaki-electroless%20plating-2005-6.pdf>
20. Laser coating and thermal spraying - process basics and coating properties P. Vuoristo, J. Tuominen, J. Nurminen, Tampere University of Technology, Institute of

Materials Science, Tampere / FI Central Ostrobothnian Technology Centre KETEK, Kokkola / FI

21. Διπλωματική Εργασία Α. Σαράντη, “Ανάπτυξη Λεπτών Υμενίων Ta, TaOx και TiCNy με Παλμική Εναπόθεση με Laser. Μέθοδος Μείωσης των Σωματιδίων με τη χρήση δευτέρου παλμικού Laser”, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ (2002)
22. Διπλωματική Εργασία Ν. Μπρίλη, “Μελέτη Στοιχείων Αίσθησης Υδρογόνου, βασισμένων σε Λεπτά Υμένια Οξειδίου του Ψευδαργύρου (ZnO)”, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ (2004)
23. Διπλωματική Εργασία Ι. Φασάκη, “Ανάπτυξη Λεπτών Υμενίων ZnO και NiO με τη Μέθοδο της Παλμικής Εναπόθεσης με Laser και Οπτικός και Δομικός Χαρακτηρισμός τους”, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ (2005)
24. Μεταπτυχιακή Εργασία Μ. Σταματάκη, “ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ NiO ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΠΑΛΜΙΚΗΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΜΕ LASER (PLD) ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥΣ, ΕΜΠ (2006)
25. <http://www.Aeromac.com.sg/thermalsprayadv.html>

Κεφάλαιο 3

1. www.spacescience.org/ExploringSpace/PlasmaStateOfMatter/1.html,
2. “Plasma Science Report”, 1995 (Contents and overview)
www.nap.edu/readingroom/books/plasma/contents.html
3. www.nap.edu/readingroom/books/plasma/contents.html,
4. www.gordonengland.co.uk/tsc.html
5. www.plasmacoalition.org/applications.htm,
6. www.plasmas.org/basics.html
7. Διδακτορική διατριβή ανάπτυξη ναοκρυσταλλικών επικαλύψεων με τεχνικές θερμικού ψεκασμού, Ζώης Π. Δημήτριος, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων 2010
8. Διπλωματική εργασία Μελέτη Μηχανικής και Τριβολογικής Συμπεριφοράς Κεραμικής Επικάλυψης Πλάσματος Χρωμίας (Cr₂O₃) σε Χάλυβα, Μακρυγιάννη – Κούμπου, 2006, Σχολή Ικάρων

Κεφάλαιο 4

1. [Επιστήμη και Τεχνολογία Μεταλλικών Υλικών Χρυσουλάκης, Παντελής, Εκδόσεις Παπασωτηρίου]
2. Σ.Αντωνίου, “Τριβολογία”, Πειραιάς 1994 (σελ 1.1)
3. B.V.Protopopon, “Structural and Energetic Principles of the Standardization of Tribological Tests”, Surf & Coatings Technology, 43/44 (1990) 898-906, Η Czichos. Tribology :ElsevierPubl.Co 1978
4. Σ.Αντωνίου, “Τριβολογία”, Πειραιάς 1994 (σελ 3.2-3.95)
5. Σ. Αντωνίου, «Τριβολογία», Πειραιάς 1994
6. B.V.Protopopon, “Structural and Energetic Principles of the Standardization of Tribological Tests”, Surf & Coatings Technology, 43/44 (1990) 898-906

Κεφάλαιο 5

1. Σημειώσεις μαθήματος «Κεραμικά» Α.Τσετσέκου, Αθήνα 2017
2. http://195.134.76.37/chemicals/chem_Al2O3.htm
3. Διδακτορική διατριβή «Ανάπτυξη ναοκρυσταλλικών επικαλύψεων με τεχνικές θερμικού ψεκασμού» Ζώης Π.Δημήτριος, Ιωάννινα,2010

Κεφάλαιο 7

1. Y. Liu, T. Fischer, A. Dent, Surf. Coat. Technol. 167 (2003) 68–76
2. A.F. Evans, T.R. Wilshaw, Acta. Met. 24 (1976) 939

Κεφάλαιο 8

1. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA2024T3>
2. Jones (1975)
3. Pavitra Bansal, Nitin P. Pature, Alexandre Vasiliev, Acta Materialia 51 (2003) 2959–2970
4. Lihe Qian, Shijie Zhu, Yutaka Kagawa, Takahiro Kubo, *Tensile damage evolution behavior in plasma-sprayed thermal barrier coating system*, Surface and coatings technology 173 (2003) 178-184
5. D. Al-Anazi, M. S. J. Hashmi, B. S. Yilbas, *Three-point bend testing of HVOF AMDRY 9954 coating on Ti-6Al-4V alloy*, Journal of Material Processing Technology 174 (2006) 204-210

Κεφάλαιο 9

1. R.H. Oskouei [†], R.N. Ibrahim, [Materials and Design 39 \(2012\) 294–302](#)
2. E.S. Puchi-Cabrera, M.H. Staia, J. Lesage, D. Chicot, J.G. La Barbera-Sosa, E.A. Ochoa-Pérez, Surface & Coatings Technology 201 (2006) 2038–2045
3. H.J.C. Voorwald, L. F. S. Vieira, M. O. H. Cioffi, Procedia Engineering 2 (2010) 331–340
4. E.S. Puchi-Cabrera, M.H. Staia, J. Lesage, D. Chicot, J.G. La Barbera-Sosa, E.A. Ochoa-Pérez, Surface & Coatings Technology 201 (2006) 2038–2045
5. E.S. Puchi-Cabrera, M.H. Staia, Y.Y. Santana, E.J. Mora-Zorrilla, J. Lesage, D. Chicot, J.G. La Barbera-Sosa, E. Ochoa-Pérez, C.J. Villalobos-Gutierrez, Surface & Coatings Technology 220 (2013) 122–130
6. R.H. Oskouei, R.N. Ibrahim, Materials and Design 39 (2012) 294–302

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση Επιφανειακών Κατεργασιών.....	16
Σχήμα 2.2: Φλογοβαφή.....	18
Σχήμα 2.3: Επιφανειακή σκλήρυνση με χρήση δέσμης Laser.....	20
Σχήμα 2.4: Μέθοδος στερεάς και αέριας ενανθράκωσης.....	21
Σχήμα 2.5: Διαδικασία εναζώτωσης.....	22
Σχήμα 2.6: Διαδικασία βορίωσης.....	26
Σχήμα 2.7: Γαλβανισμός με θερμή εμβάπτιση σε λουτρό.....	29
Σχήμα 2.8: Διαδικασία επικασσιτέρωσης.....	31
Σχήμα 2.9: Ηλεκτρολυτική Κυψελίδα.....	32
Σχήμα 2.10 : Παραδείγματα ηλεκτρολυτικών κελιών (α) Επινικέλωσης (β) Επιχάλκωσης (γ) Επιχρωμίωσης (δ) Επικασσιτέρωσης (ε) Επιψευδαργύρωσης.....	35
Σχήμα 2.11: Διαδικασία δημιουργίας επικαλύψεων με τεχνική θερμικού ψεκασμού όπου το υλικό επίστρωσης βρισκόταν υπό την μορφή σκόνης.....	37
Σχήμα 2.12: Θερμικός ψεκασμός με χρήση φλόγας καύσεως και τροφοδοσία σκόνης.....	40
Σχήμα 2.13: Θερμικός ψεκασμός με χρήση φλόγας καύσεως και τροφοδοσία σύρματος ...	40
Σχήμα 2.14: Απεικόνιση τμημάτων διάταξης θερμικού ψεκασμού με χρήση φλόγας καύσεως και τροφοδοσία σύρματος.....	41
Σχήμα 2.15: Θερμικός ψεκασμός με χρήση φλόγας καύσεως με εκτόνωση.....	42
Σχήμα 2.16: Ψεκασμός με χρήση ηλεκτρικού τόξου.....	44
Σχήμα 2.17: Διαδικασία ψεκασμού πλάσματος.....	45
Σχήμα 2.18: Διάταξη ψεκασμού πλάσματος.....	45
Σχήμα 2.19: Διάταξη ψεκασμού με χρήση ακτινοβολίας laser (α) με προαπόθεση σκόνης στην επιφάνεια του τεμαχίου και (β) με ταυτόχρονο ψεκασμό σκόνης.....	46
Σχήμα 2.20: Απεικόνιση της λειτουργίας μιας τυπικής διάταξης PVD thermal evaporation.	48
Σχήμα 2.21: Απεικόνιση της λειτουργίας μιας τυπικής διάταξης PVD Electron Beam Evaporation.....	49
Σχήμα 2.22: Απεικόνιση της λειτουργίας τυπικών διατάξεων (α) DC Sputtering.....	50
(β) Magnetron Sputtering (γ) RF sputtering.....	50
Σχήμα 2.23: Απεικόνιση της λειτουργίας τυπικής διάταξης PVD PLD καθώς και μιας σχετικής συσκευής.....	51
Σχήμα 2.24: Απεικόνιση της λειτουργίας τυπικής διάταξης PVD Ion Plating.....	52
Σχήμα 2.25: Απεικόνιση της λειτουργίας τυπικής διάταξης AP-CVD.....	54
Σχήμα 2.26: Στάδια ανάπτυξης λεπτών υμενίων με την τεχνική AL-CVD.....	54
Σχήμα 2.27: Απεικόνιση τυπικής διάταξης AA-CVD.....	55
Σχήμα 2.28: Απεικόνιση τυπικής διάταξης LP-CVD.....	55
Σχήμα 2.29: Απεικόνιση τυπικής διάταξης MO-CVD.....	56

Σχήμα 2.30: Απεικόνιση τυπικής διάταξης PE-CVD.....	56
Σχήμα 2.31: Απεικόνιση τυπικής διάταξης RPE-CVD.	57
Σχήμα 3.1: Μεταβολή της απόδοσης απόθεσης συναρτήσει της ροής του φέροντος αερίου	70
Σχήμα 3.2: Η ικανότητα απόθεσης σκόνης αλουμίνας και τανταλίου σε συνάρτηση με την απόσταση ψεκασμού	71
Σχήμα 4.1: Δοκιμή Εφελκυσμού.....	78
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.....	79
Σχήμα 4.3: Μέτρο ελαστικότητας ως κλίση της καμπύλης σ-ε στην ελαστική περιοχή.....	80
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης όπου απεικονίζονται τα άνω και κάτω όρια διαρροής καθώς και η επιμήκυνση του ορίου διαρροής	82
Σχήμα 4.5: Απεικόνιση υπολογισμού συμβατικού ορίου διαρροής σγ.....	83
Σχήμα 4.6: Τύποι δυναμικών καταπονήσεων	85
Σχήμα 4.7: Καμπύλες Wöhler για σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα.	87
Σχήμα 4.8: Δοκιμή περιστρεφόμενου προβόλου	89
Σχήμα 4.9: Καμπύλες S-N που προέκυψαν μετά από πανομοιότυπη δοκιμή κόπωσης σε 100 ίδια δοκίμια.....	91
Σχήμα 4.10: Καμπύλες S-N ίδιου υλικού όπου κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο πιθανότητας P	92
Σχήμα 4.11: (α) Καμπύλες S-N(σ _{max} - N _f) για συγκεκριμένες τιμές R, (β) Καμπύλες S-N(σ _a - N _f) για συγκεκριμένες τιμές σ _m	93
Σχήμα 4.12: Κυκλική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης με διατήρηση σταθερής παραμόρφωσης.....	96
Σχήμα 4.13: Απεικόνιση της αύξησης και της μείωσης της αντοχής του υλικού κατά την κυκλική καταπόνηση.	97
Σχήμα 4.14: Αποτελέσματα δοκιμών ολιγοκυκλικής κόπωσης σε δοκίμια ανοξειδώτου χάλυβα 347.....	98
Σχήμα 4.15: Απλουστευμένο τριβικό σύστημα.....	100
Σχήμα 4.16: Στατική τριβή σε τριβικό σύστημα.....	101
Σχήμα 4.17: Τριβικό σύστημα σε κεκλιμένο επίπεδο	102
Σχήμα 4.18: α) Ορισμός κεντρικής γραμμής, β) Προσδιορισμός παραμέτρων ύψους	105
Σχήμα 4.19: Είδη φθοράς ανάλογα με τη σχετική κίνηση των δύο υλικών που βρίσκονται σε επαφή.....	115
Σχήμα 4.20: α) Ηπια εκτριβή, β) Εκτριβή υψηλής έντασης	116
Σχήμα 4.21: Διατάξεις τριβικών ζευγών που συναντώνται στα τριβόμετρα.....	118
Σχήμα 4.22: α) Κάμψη προβόλου, β) Ελεύθερη κάμψη γ) Κάμψη-V δ) Κάμψη-U	119
Σχήμα 4.23: Αντοχή σε κάμψη	120
Σχήμα 4.24: Σχηματική αναπαράσταση κάμψης 3 σημείων και κάμψης 4 σημείων	120
Σχήμα 4.25: Διάταξη οπτικού μικροσκοπίου	129

Σχήμα 4.26: Εξαρτήματα οπτικού μικροσκοπίου.....	130
Σχήμα 4.27: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.....	135
Σχήμα 4.28: Τυπική διάταξη εκπομπής ηλεκτρονίων	135
Σχήμα 4.29: Λειτουργία μαγνητικών φακών	136
Σχήμα 4.30: Σχηματική απεικόνιση στήλης μικροσκοπίου SEM.....	136
Σχήμα 4.31: Διατάξεις ανίχνευσης δευτερεύοντων και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων.	137
Σχήμα 4.32: Αλληλεπίδραση δέσμης ηλεκτρονίων-δείγματος.....	138
Σχήμα 5.1: Το διάγραμμα φάσεων στο σύστημα Al-O.	149
Σχήμα 6.1: Διαστάσεις ελασμάτων διπλού T από κράμα αλουμινίου (Al2024).....	169
Σχήμα 6.2: Διαστάσεις κυλινδρικών δοκιμίων από κράμα αλουμινίου (Al2007)	170
Σχήμα 8.1: Διάγραμμα σ-ε δοκιμής εφελκυσμού κυλινδρικού δοκιμίου χωρίς επικάλυψη	190
Σχήμα 8.2: Εύρεση μέτρου ελαστικότητας κυλινδρικού δοκιμίου Al 2007, χωρίς επικάλυψη.	191
Σχήμα 8.3: Διάγραμμα σ-ε δοκιμής εφελκυσμού ελάσματος διπλού T χωρίς επικάλυψη .	193
Σχήμα 8.4: Εύρεση μέτρου ελαστικότητας ελάσματος διπλού T από Al2024, χωρίς επικάλυψη.....	193
Σχήμα 8.5: Διάγραμμα σ-ε δοκιμής εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη αλουμίνιας – τιτανίας 100 μm	195
Σχήμα 8.6: Εύρεση μέτρου ελαστικότητας ελάσματος διπλού T από Al2024, με επικάλυψη 100 μm.....	195
Σχήμα 8.7: Διάγραμμα σ-ε δοκιμής εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη αλουμίνιας – τιτανίας 200 μm	197
Σχήμα 8.8: Εύρεση μέτρου ελαστικότητας ελάσματος διπλού T από Al2024, με επικάλυψη 200 μm.....	197
Σχήμα 8.9: Διάγραμμα σ-ε δοκιμής εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη αλουμίνιας – τιτανίας 300 μm	199
Σχήμα 8.10: Εύρεση μέτρου ελαστικότητας ελάσματος διπλού T από Al2024, με επικάλυψη 300 μm.....	199
Σχήμα 8.11: Διάγραμμα σ-ε δοκιμής εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη αλουμίνιας – τιτανίας 400 μm	201
Σχήμα 8.12: Εύρεση μέτρου ελαστικότητας ελάσματος διπλού T από Al2024, με επικάλυψη 400 μm.....	201
Σχήμα 8.13: Καμπύλες σ-ε που προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού των ελασμάτων Al2024.....	202
Σχήμα 8.14: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας ελάσματος διπλού T από Al2024, συναρτήσει του πάχους της επικάλυψης αλουμίνιας – τιτανίας.	203
Σχήμα 8.15: Μεταβολή μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό ελάσματος διπλού T από Al2024, συναρτήσει του πάχους της επικάλυψης αλουμίνιας – τιτανίας.	205
Σχήμα 8.16: Καμπύλη S-N (Wöhler) κυλινδρικών δοκιμίων χωρίς επικάλυψη.....	207

Σχήμα 8.17: Καμπύλη S-N (Wöhler) κυλινδρικών δοκιμίων με και χωρίς επικάλυψη αλουμίνας-τιτανίας	208
---	-----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 και 2.2: Σφαιροβολή και Επιφανειακή έλαση [4].....	17
Εικόνα 2.3: Επαγωγική βαφή	19
Εικόνα 2.4: Γαλβανισμός μεταλλικού αντικειμένου	28
Εικόνα 2.5: Ψεκασμός υπερηχητικής φλόγας (HVOF)	43
Εικόνα 3.1: Το πλάσμα σε διάφορες θερμοκρασίες και πυκνότητες	64
Εικόνα 3.2: Τυπική διάταξη ψεκασμού πλάσματος.....	67
Εικόνα 3.3: Τύποι δαυλών πλάσματος: α) σταθεροποίηση τόξου με περιστροφική εισροή αερίων, β) σταθεροποίηση τόξου από αξονική είσοδο αερίων, γ) σταθεροποίηση τόξου στα τοιχώματα, δ) αυτοσταθεροποιούμενο τόξο, ε) εξωτερική σταθεροποίηση τόξου	68
Εικόνα 3.4: Δαυλός πλάσματος συνεχούς ρεύματος (DC plasma gun)	69
Εικόνα 4.1: Χαρακτηριστικά επιφάνειας θραύσης από κόπωση.....	85
Εικόνα 4.2:Μαθηματική διατύπωση μοντέλων Gerber, Goodmankαι Soderberg.....	94
Εικόνα 4.3: Αποξεστικός τροχός.....	122
Εικόνα 4.4: Χρησιμοποιούμενες διατάξεις και απεικόνιση εγκιβωτισμένων δοκιμίων	123
Εικόνα 4.5: Συσκευή για λείανση και στίλβωση	124
Εικόνα 5.1:Μορφές Al ₂ O ₃ και ορυκτών του.....	148
Εικόνα 5.2: Εσωτερικό τμήμα συμπιεστή.	156
Εικόνα 5.3: Γρανάζια και εξαρτήματα στο εσωτερικό του αεριοστρόβιλου.	158
Εικόνα 5.4: Εσωτερικό τμήμα θαλάμου καύσεως.	160
Εικόνα 5.5: Εσωτερικό τμήμα στροβίλου.....	161
Εικόνα 5.6: Σύστημα μετάκαυσης.	163
Εικόνα 6.1: Ελάσματα μορφής διπλού T από κράμα αλουμινίου (Al2024)	168
Εικόνα 6.2: Κυλινδρικά δοκίμια από κράμα αλουμινίου (Al2007)	169
Εικόνα 6.3: Σκόνη Ψεκασμού METCO 101 NS.....	172
Εικόνα 6.4: Διάταξη όπου πραγματοποιήθηκε η αμμοβολή των δοκιμίων.	174
Εικόνα 6.5: Διάταξη της συσκευής ψεκασμού με χρήση πλάσματος για τα κυλινδρικά δοκίμια	175
Εικόνα 6.6: Διάταξη της συσκευής ψεκασμού με χρήση πλάσματος για τα δοκίμια διπλού T.	176

Εικόνα 7.1: Έλασμα ανοξειδωτου χάλυβα SAE 316L (πάχους 1.25 mm), στο οποίο εναποτέθηκε επικάλυψη πλάσματος Αλουμίνας (Al_2O_3) και 3% Τιτανίας (TiO_2) με πάχος 250 μm	180
Εικόνα 7.2: Διάταξη (δισκοτόμος) για την διεργασία της κοπή δοκιμίων.....	181
Εικόνα 7.2 (α) Συσκευή θερμού εγκιβωτισμού ρητίνης (β) στήριξη δοκιμίου (γ) ρητίνη θερμού εγκιβωτισμού	182
Εικόνα 7.3: Εγκάρσια τομή της επικάλυψης αλουμίνας – τιτανίας σε υπόστρωμα χάλυβα SAE 316L (μεγένθυση x150)	183
Εικόνα 7.4: Μικροδομή της συνδεδετικής επικάλυψης Ni-20Al σε υπόστρωμα χάλυβα SAE 316L	184
Εικόνα 7.5: Μικρογραφία SEM (20KV) σκόνης Αλουμίνας (Al_2O_3) και 3% Τιτανίας (TiO_2) [METCO 101NS]	184
Εικόνα 7.6: Μορφολογία εγκάρσιας τομής της επικάλυψης πλάσματος Αλουμίνας (Al_2O_3) και 3% Τιτανίας (TiO_2)	185
Εικόνα 7.7: Μικροδομή της επικάλυψης πλάσματος Αλουμίνας (Al_2O_3) και 3% Τιτανίας (TiO_2).....	185
Εικόνα 8.1: Διάταξη δοκιμών εφελκυσμού MTS 810 Material Test System.....	187
Εικόνα 8.2: Εφελκυσμός κυλινδρικού δοκιμίου το οποίο δεν έχει επικαλυφθεί με την σκόνη METCO 101 NS.....	188
Εικόνα 8.3: Εγκάρσια τομή επικαλυμμένου (200 μm) ελάσματος Al2024 (No.2) μετά την δοκιμή εφελκυσμού [x450].....	209
Εικόνα 8.4: Μεγένθυση της εικόνας 8.3 (α) x300 (b) x500.....	210
Εικόνα 8.5: Κάτοψη της ρωγματωμένης επιφάνειας $Al_2O_3-TiO_2$, μετά τον εφελκυσμό, στην περιοχή της θραύσης [x50]	211
Εικόνα 8.6: Κάτοψη στην περιοχή της θραύσης [x40].....	211
Εικόνα 8.7: Εσωτερικό της ρωγμάτωσης στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο [x3000]	212
Εικόνα 8.8: Γενική φωτογραφία κυλινδρικού δοκιμίου No.5 όπου φαίνονται τα στάδια θραύσης του.....	212
Εικόνα 8.9: Διατομή κυλινδρικού δοκιμίου όπου απεικονίζεται η επικάλυψη και η επιφάνεια θραύσης.....	213

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Συνθήκες ηλεκτρόλυσης και σύνθεση του λουτρού ηλεκτρόλυσης για τις κυριότερες ηλεκτρολυτικές επιμεταλλώσεις.....	36
Πίνακας 2.2: Ταξινόμηση επιφανειακών κατεργασιών θερμικού ψεκασμού με βάση την πηγή τήξης του υλικού επίστρωσης.....	38
Πίνακας 2.3: Συνθήκες κενού.....	47
Πίνακας 2.4: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαφόρων ειδών επικαλύψεων καθώς και των επιφανειακών κατεργασιών από τις οποίες προήρθαν	59
Πίνακας 2.5: Εφαρμογές διαφόρων ειδών επικαλύψεων	62
Πίνακας 4.1: Καταστροφικές Μέθοδοι χαρακτηρισμού.....	76
Πίνακας 4.2: Μη Καταστροφικές Μέθοδοι χαρακτηρισμού	77
Πίνακας 4.3: Τιμές του συντελεστή τριβής ολίσθησης για διάφορα μέταλλα και οξειδιά τους	102
Πίνακας 4.4: Κυριότεροι παράμετροι για την μέτρηση της τραχύτητας	104
Πίνακας 4.5: Συγκριτικές δυνατότητες του οπτικού μικροσκοπίου με το SEM και το TEM.	133
Πίνακας 5.1: Κατάταξη κεραμικών υλικών	142
Πίνακας 5.2: Οι διαφορετικές φάσεις της αλούμινας	150
Πίνακας 5.3: Φυσικές ιδιότητες τιτανίας.....	153
Πίνακας 5.4: Εφαρμογές των επικαλύψεων σε τμήματα του συμπιεστή	156
Πίνακας 5.5: Εφαρμογές επικαλύψεων στα γρανάζια και στα εξαρτήματα του αεριοστρόβιλου.	158
Πίνακας 5.6: Εφαρμογές επικαλύψεων σε τμήματα του θαλάμου καύσεως.	160
Πίνακας 5.7: Εφαρμογές επικαλύψεων στον στρόβιλο.....	161
Πίνακας 5.8: Εφαρμογές επικαλύψεων στο σύστημα μετάκαυσης.	163
Πίνακας 5.9: Συγκεντρωτικός πίνακας με τις εφαρμογές των επικαλύψεων στα αεροσκάφη	164
Πίνακας 6.1: Χημική σύνθεση Al 2024.....	170
Πίνακας 6.2: Μηχανικές ιδιότητες Al 2024.....	170
Πίνακας 6.3: Χημική σύνθεση Al 2007.....	171
Πίνακας 6.4: Μηχανικές ιδιότητες Al 2007	171
Πίνακας 6.5: Ιδιότητες METCO 101NS	173
Πίνακας 6.6: Παράμετροι ψεκασμού.....	176
Πίνακας 6.7: Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμών	178
Πίνακας 8.1: Τιμές σ-ε που προέκυψαν ύστερα από δοκιμή εφελκυσμού κυλινδρικού δοκιμίου χωρίς επικάλυψη	189
Πίνακας 8.2: Τιμές σ-ε που προέκυψαν ύστερα από δοκιμή εφελκυσμού ελάσματος διπλού T χωρίς επικάλυψη.....	192

Πίνακας 8.3: Τιμές σ-ε που προέκυψαν ύστερα από δοκιμή εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη Αλουμίνιας – τιτανίας 100 μm	194
Πίνακας 8.4: Τιμές σ-ε που προέκυψαν ύστερα από δοκιμή εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη Αλουμίνιας – Τιτανίας 200 μm	196
Πίνακας 8.5: Τιμές σ-ε που προέκυψαν ύστερα από δοκιμή εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη Αλουμίνιας – Τιτανίας 300 μm	198
Πίνακας 8.6: Τιμές σ-ε που προέκυψαν ύστερα από δοκιμή εφελκυσμού ελάσματος διπλού T με επικάλυψη Αλουμίνιας – Τιτανίας 400 μm	200
Πίνακας 8.7: Υπολογισμός θεωρητικού μέτρου ελαστικότητας του συστήματος και σύγκριση με το πειραματικό.....	203
Πίνακας 8.8: Υπολογισμός θεωρητικής αντοχής σε εφελκυσμό του συστήματος και σύγκριση με την πειραματική	204
Πίνακας 8.9: Τιμές S-N της καμπύλης Wöhler για έξι κυλινδρικά δοκίμια (από Al2007) χωρίς επικάλυψη αλουμίνιας - τιτανίας	206
Πίνακας 8.10: Τιμές S-N της καμπύλης Wöhler για τα επικαλυμμένα κυλινδρικά δοκίμια (από Al2007) με διάφορα πάχη επικάλυψης αλουμίνιας - τιτανίας	207