



**Α.Τ.Ε.Ι. ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΘΕΜΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:**  
**Επικαλύψεις αλουμίνας και χρωμίας με θερμικό**  
**ψεκασμό πλάσματος.**



**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ:**

**ΧΡΗΣΤΟΣ ΜΙΧΑΛΟΣΤΑΜΟΥ**

**ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:**

**ΔΗΜΗΤΡΑ ΒΕΡΝΑΡΔΟΥ**

**ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2015**

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>5</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΔΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ.....</b>	<b>7</b>
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	7
1.2 ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΜΕ ΨΕΚΑΣΜΟ (SPRAYED COATINGS) .....	9
1.3 ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΙΣ ΜΕ ΘΕΡΜΙΚΟ ΨΕΚΑΣΜΟ_(THERMAL SPRAY COATING)...	9
1.4 ΨΕΚΑΖΟΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ .....	13
1.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΨΕΚΑΣΜΩΝ .....	16
1.5.1 Ψεκάσμος με χρήση φλόγας καύσης .....	16
1.5.2 Ψεκάσμος με χρήση ηλεκτρικού τόξου.....	17
1.5.3 Ψεκάσμος οξυακετυλινικής φλόγας με_υπερηχητικές ταχύτητες (HVOF).....	18
1.5.4 Ψεκάσμος πλάσματος (PLASMA SPRAY).....	19
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....</b>	<b>23</b>
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	23
2.2 ΔΑΥΛΟΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ .....	24
2.3 ΑΕΡΙΑ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ .....	26
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΘΕΣΗ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....</b>	<b>28</b>
3.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΨΕΚΑΣΜΟΥ .....	29
3.1.1 Ταχύτητα σάρωσης επιφάνειας.....	29
3.1.2 Απόσταση δαυλού - επιφάνειας .....	30
3.1.3 Γωνία ψεκάσμου .....	31
3.1.4 Δομή κόκκων σκόνης .....	32
3.1.5 Κινητική Ενέργεια .....	33
3.1.6 Ανθρώπινος παράγοντας.....	34
3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ .....	35
3.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΗ ΦΛΟΓΑ_ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	36
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ .....</b>	<b>41</b>
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	41
4.2 ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	41
4.3 ΠΟΡΩΔΕΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ .....	44
4.4 ΠΡΟΣΦΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	46

4.5 ΟΞΕΙΔΙΑ .....	47
4.6 ΑΤΗΚΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ.....	49
4.7 ΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΑ ΨΕΚΑΖΟΜΕΝΑ_ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ .....	49
4.8 ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ .....	50
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ .....</b>	<b>51</b>
5.1 ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	52
5.1.1 Δοκιμή Κάμψης ( <i>Bend Test</i> ) .....	52
5.1.2 Δοκιμή Αντοχής της Πρόσφυσης ( <i>Bond Test</i> ) .....	53
5.1.3 Δοκιμή Αντοχής σε διάτμηση.....	53
5.1.4 Δοκιμή χάραξης ( <i>SCRATCH TEST</i> ) .....	54
5.1.5 Μεταλλογραφικός έλεγχος .....	54
5.1.6 Σκληρότητα .....	55
5.1.7 Μικροσκληρότητα.....	55
5.1.8 Δοκιμή Αντοχής σε Οξείδωση .....	55
5.1.9 Δοκιμή Αντοχής σε έντονο θερμοκρασιακό περιβάλλον .....	56
5.2 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ .....	56
5.2.1 Θερμογραφία .....	56
5.2.2 Ολογραφία <i>Laser</i> .....	57
5.2.3 Έλεγχος με Υπερήχους .....	57
5.2.4 Ακουστική Μικροσκοπία Σάρωσης.....	58
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΝΔΕΣΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ</b>	
<b>ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ .....</b>	<b>59</b>
<b>ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</b>	
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 .....</b>	<b>61</b>
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	61
7.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ .....	63
7.2.1 Καθαρισμός-Απολίπανση.....	63
7.2.2 Τράχυνση-Αμμοβολή .....	64
7.2.3 Διαμόρφωση τελικής επιφάνειας .....	66
7.3 INCONELL 718 (ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ).....	67
7.4 ΣΚΟΝΕΣ ΨΕΚΑΣΜΟΥ (ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ) .....	68
7.4.1 Σκόνη Αλουμίνας ( $Al_2O_3$ , METCO 105) .....	68
7.4.2 Σκόνη Οξειδίου του χρωμίου ( $Cr_2O_3$ , METCO 106).....	71
7.4.3 Σκόνη NiCrAlY (AMDRY 962) ( <i>Bond Coat</i> ) .....	74
7.5 ΠΑΧΟΣ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ .....	77
7.6 ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ.....	79

7.7 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ .....	81
7.8 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ .....	86
7.9 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ_ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑΣ .....	87
7.10 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM) .....	93
7.11 ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ (THERMAL SHOCK) .....	96
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>102</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>104</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>106</b>

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αναμφισβήτητα η εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας για έναν φοιτητή είναι ένα συναρπαστικό και συνάμα ένα πρωτόγνωρο εγχείρημα μέσα στα έτη φοίτησης του στην Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών. Ωστόσο τα εφόδια που έχει αποκομίσει κάθε φοιτητής από την πορεία του στην σχολή, τον καθιστούν ικανό να αναλάβει ένα τόσο απαιτητικό εγχείρημα, όπως είναι η πτυχιακή εργασία.

Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας, που χρειάστηκε πολύς χρόνος και κυρίως υπομονή και επιμονή, συνεργαστήκαμε με την Αλουμίνιον Της Ελλάδος. Τα στάδια που ακολουθήθηκαν για την εκπόνηση της συγκεκριμένης πτυχιακής είναι τα προβλεπόμενα που ακολουθούνται για να διεξαχθεί μια έρευνα και να καταγραφούν τα αποτελέσματα της σε ένα κατανοητό έγγραφο που να γίνεται προσιτό και αντιληπτό και σε άτομα που δεν είναι τόσο ενημερωμένα για το συγκεκριμένο αντικείμενο. Τα προαναφερθέντα στάδια περιλαμβάνουν την έρευνα, την μελέτη, την συλλογή στοιχείων, την καταγραφή εργαστηριακών μετρήσεων και στο τελικό στάδιο την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Καθώς ο φοιτητής μεταβαίνει από το ένα στάδιο στο άλλο, αποκτά εμπειρίες και γνώσεις που θα του μείνουν αποτυπωμένες για μια ζωή. Αυτό συμβαίνει γιατί οι συγκεκριμένες γνώσεις και εμπειρίες αποκτήθηκαν με πολύ προσπάθεια και κόπο σε αντίθεση με τις πιο πολλές που του δίνονται έτοιμες.

Η παρούσα πτυχιακή αναφέρεται στις επικαλύψεις θερμικού ψεκασμού και ειδικότερα στις επικαλύψεις αλουμίνιας και χρωμίας. Η χρήση των επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού έχει ακόμα πολύ μέλλον γιατί οι επικαλύψεις αυτές μπορούν ταυτόχρονα να μειώσουν το βάρος των αντικειμένων και να παρέχουν αντιτριβική, αντιδιαβρωτική και αντιοξειδωτική ικανότητα σε διάφορα εξαρτήματα.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται ένα εξειδικευμένο θέμα το οποίο θα ήταν αδύνατο να μελετηθεί χωρίς την βοήθεια κάποιων ανθρώπων

που με προθυμία και θέληση μοιράστηκαν μαζί μου τις γνώσεις τους και τον ελεύθερο τους χρόνο.

Τέλος, πρέπει να τονίσω ότι η συγκεκριμένη πτυχιακή εκπονήθηκε με τέτοιο τρόπο που να γίνεται κατανοητή από τους περισσότερους ανθρώπους με την παράθεση εικόνων και με την χρήση απλής και κατανοητής φρασεολογίας.

**ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2015**

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΔΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ

### 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η δημιουργία επικαλύψεων στην επιφάνεια χρησιμοποιείται για τον περιορισμό της δράσης του περιβάλλοντος στην λειτουργία των μηχανολογικών εξαρτημάτων. Η φιλοσοφία της μεθόδου είναι η χρησιμοποίηση υλικών με μηχανικές ιδιότητες που να ανταποκρίνονται στις φορτίσεις και τις καταπονήσεις των εξαρτημάτων και στην προστασία αυτών από υλικά με αντοχή σε περιβάλλοντα διάβρωσης, οξειδωσης, τριβής και με χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Κατηγορίες υλικών που εξυπηρετούν αυτό το σκοπό είναι μέταλλα, κράματα μετάλλων, οξειδία μετάλλων, κεραμικά καθώς και πολυμερή. Το πάχος τους μπορεί να κυμαίνεται από μερικά μικρά (μm) μέχρι και μερικά χιλιοστά (mm) ,ανάλογα με τις απαιτήσεις της σχεδίασης και το είδος της παρεχόμενης προστασίας.

Με κριτήριο ακριβώς το πάχος τους, οι επικαλύψεις ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες : **τις λεπτές και τις παχιές επικαλύψεις.**

Η χρήση επικαλύψεων σε διάφορα υλικά αποτελεί έναν κλάδο της τεχνολογίας υλικών με αυξανόμενη εφαρμογή τα τελευταία χρόνια τόσο σε βιομηχανική κλίμακα όσο και στην καθημερινή ζωή. Οι επικαλύψεις χρησιμοποιούνται κυρίως για προστασία υλικών από διάβρωση, φθορά και τριβή με σκοπό την αύξηση του χρόνου ζωής τους, για αυτό έχουν επικρατήσει με το χαρακτηρισμό προστατευτικές επικαλύψεις. Άλλες συνήθεις εφαρμογές αποτελούν η βελτίωση διαφόρων μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών όπως η σκληρότητα, το μέτρο ελαστικότητας, η αντοχή σε θραύση και η αντοχή σε εφελκυσμό, για αντικατάσταση υλικών στρατηγικής σημασίας, για βελτίωση εμφάνισης υλικών και στη διακοσμητική.

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

Η επιλογή της μεθόδου σε σχέση με το είδος των ιδιοτήτων που θέλουμε να έχει το επικαλυπτόμενο σύστημα είναι πολύ σημαντική διότι ενδέχεται πολλές φορές ένα υλικό να δύναται να επικαλυφθεί με διαφορετικές μεθόδους, η κάθε μια από τις οποίες να του προσδίδει διαφορετικά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, οι επικαλύψεις αλουμινίου μπορούν να παρασκευαστούν τόσο με τη μέθοδο της εν θερμό εμβάπτισης (θερμή επαλουμινίωση, HOT DIP ALUMINIZING) όσο και με την μέθοδο της χημικής απόθεσης ατμών. Ακόμα δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου μια μέθοδος επικάλυψης προτιμάται έναντι μιας άλλης για θέματα κόστους, ασφάλειας, αξιοπιστίας, εύκολης χρήσης και φιλικότητας προς το περιβάλλον.

Οι επικαλύψεις χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες : τις **μεταλλικές** και τις **μη μεταλλικές**. Οι μέθοδοι επικάλυψης είναι οι εξής :

- Επικαλύψεις με ψεκασμό (Sprayed Coating)
- Ηλεκτρολυτικές αποθέσεις (Electroplating)
- Επικαλύψεις με θερμή εμβάπτιση
- Επικάλυψη με απόθεση σε κενό (Vacuum Coating)

Στην εργασία θα εξεταστούν μόνο οι επικαλύψεις με ψεκασμό.



## **1.2 ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΜΕ ΨΕΚΑΣΜΟ (Sprayed Coatings)**

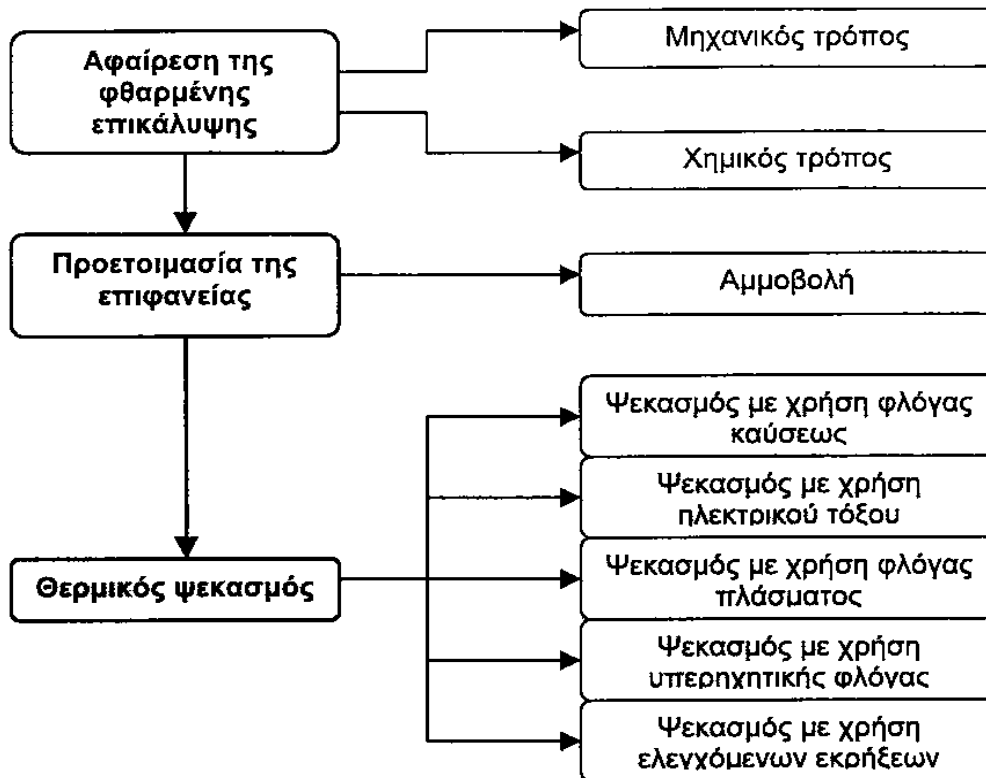
Η τεχνική επικάλυψης με ψεκασμό περιλαμβάνει την θέρμανση ενός μετάλλου (ή κεραμικού), μέχρι να τακεί καθώς αυτό περνάει μέσα από μια πηγή θερμότητας, και την απόθεσή του πάνω σε ένα υπόστρωμα. Τα υγρά σωματίδια του μετάλλου (ή του κεραμικού) παραμορφώνονται κατά την πρόσκρουσή τους στο υπόστρωμα εξασφαλίζοντας την καλή πρόσφυσή τους.

Στην περίπτωση των μετάλλων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σαν επικάλυψη (η πηγή της θερμότητας είναι ηλεκτρικό τόξο), τα μέταλλα τροφοδοτούνται σε μορφή σύρματος ή σκόνης. Στην περίπτωση όμως των κεραμικών που είναι δύστηκτα, η πηγή της θερμότητας είναι πλάσμα και τα κεραμικά τροφοδοτούνται σε μορφή σκόνης.

Η δομή των επιστρωμάτων με ψεκασμό είναι στρωματοειδής και χημικά ανομοιογενής. Η πρόσφυση μεταξύ επιστρώματος και υποστρώματος οφείλεται σε μηχανικά και μεταλλουργικά αίτια. Τα επιστρώματα αυτά είναι πορώδη και έχουν μικρή ολκιμότητα.

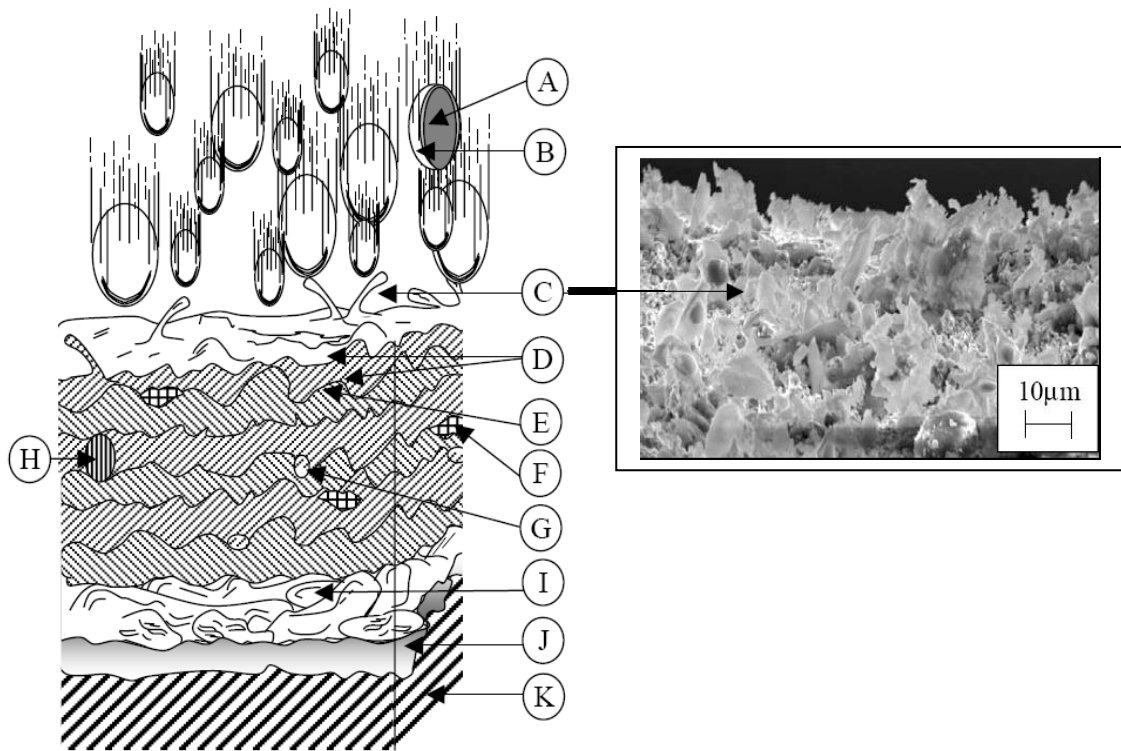
## **1.3 ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΙΣ ΜΕ ΘΕΡΜΙΚΟ ΨΕΚΑΣΜΟ (Thermal Spray Coating)**

Θερμικός ψεκασμός ("Thermal Spraying"), είναι το γενικό όνομα μιας σειράς διαδικασιών επίστρωσης, στις οποίες το υλικό της επίστρωσης θερμαίνεται αστραπιαία σε θερμό αέριο περιβάλλον και ταυτόχρονα εκτοξεύεται με υψηλή ταχύτητα πάνω στην κατάλληλα προετοιμασμένη επιφάνεια του υποστρώματος, όπου και δομείται το επιθυμητό επίστρωμα.



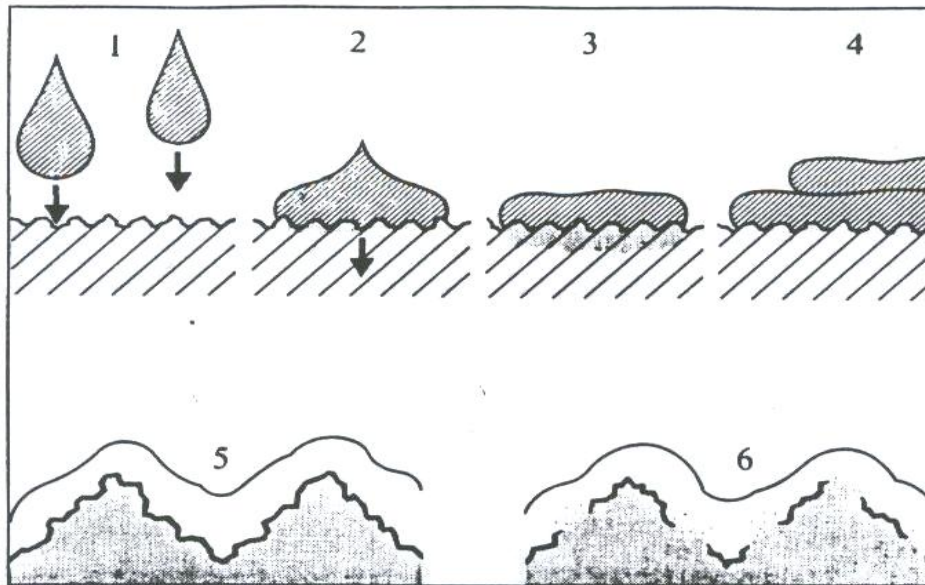
Σχήμα 1.1: Η διεργασία του θερμικού ψεκασμού.

Το υλικό που ψεκάζεται βρίσκεται σε μορφή σύρματος ή σκόνης και η εκτόξευσή του, μετά τη θέρμανσή του ως το σημείο τήξης του, γίνεται με τη βοήθεια ρεύματος συμπιεσμένου αέρα. Τα σταγονίδια του τηγμένου υλικού χτυπούν την επιφάνεια του υποστρώματος, αρχίζουν να γίνονται επίπεδα και σχηματίζουν λεπτές πλάκες που προσκολλώνται στις ανωμαλίες και προεξοχές της κατάλληλα διαμορφωμένης επιφάνειας, καθώς και μεταξύ τους. Η μορφή της επιφάνειας του επιστρώματος που δημιουργείται είναι τραχιά και έντονα πορώδης. Αυτό είναι χαρακτηριστικό του τύπου αυτών των επιστρωμάτων. Η προσκόλληση του επιστρώματος με το υπόστρωμα στηρίζεται κατά κύριο λόγο σε μηχανικούς δεσμούς, αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις και σε μεταλλικούς δεσμούς (εξαρτάται από τη μέθοδο επίστρωσης). Η απαιτούμενη θερμότητα που παράγεται στο δαυλό (πιστόλι) ψεκασμού προέρχεται από αέριο με τη μορφή φλόγας ή πλάσματος. Τα πιστόλια ψεκασμού και οι μονάδες ψεκασμού γενικότερα, είναι δυνατό να μεταφέρονται επί τόπου και να ψεκάζουν το επίστρωμα πάνω στην προς προστασία κατασκευή, ενώ επίσης έχουν τη δυνατότητα να δίνουν διαφορετικού πάχους επιστρώματα πάνω στην ίδια κατασκευή.



Σχήμα 1.2: Τομή υποστρώματος-επιστρώματος θερμικού ψεκασμού.

- A. Τομή σωματιδίου, το κέντρο σε υγρή κατάσταση.
- B. Οξειδωμένη επιφάνεια σωματιδίου.
- C. Πρόσκρουση τηγμένου σωματιδίου.
- D. Σχηματισμός οξειδωμένης επιφάνειας.
- E. Εσωτερική συγκόλληση δύο στρωμάτων, σχηματιζόμενη από μεταλλικά άτομα.
- F. Ανάμειξη δύο σωματιδίων.
- G. Πόροι ή κενά από παγιδευμένο αέρα.
- H. Μη τηγμένα σωματίδια.
- I. Ατομικά στρώματα.
- J. Απελευθερωμένη επιφάνεια.
- K. Υπόστρωμα.



Σχήμα 1.3: Διαδικασία απόθεσης επιστρωμάτων με θερμικό ψεκασμό.

1. Υγρή σταγόνα σωματιδίου εν πτήση προς το υπόστρωμα 2. Πρόσκρουση στο υπόστρωμα 3. Μεταφορά θερμότητας προς το υπόστρωμα 4. Στερεοποίηση των σωματιδίων 5. Μηχανική πρόσφυση 6. Τυχόν τοπικές τήξεις.

Σήμερα είναι δυνατό να ψεκασθεί οποιοδήποτε υλικό, εφόσον αυτό μπορεί να τακεί χωρίς σημαντικό εκφυλισμό κατά τη διάρκεια της μικρής χρονικής παραμονής του στην πηγή θερμότητας. Έτσι μπορούν να ψεκαστούν τα περισσότερα μέταλλα, κράματα, πολλά κεραμικά και τέλος ακόμη και πλαστικά. Η μορφή του υλικού, όπως έχει ήδη αναφερθεί, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ομοιόμορφη στο μέγεθος και πραγματοποιηθεί η ομοιόμορφη τήξη του για την καλύτερη δυνατή πρόσφυσή του.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι θερμικού ψεκασμού, οι οποίες έχουν εξελιχθεί μέχρι σήμερα, και συνεχώς αναπτύσσονται καινούριες. Παρακάτω είναι κάποιες από τις πιο σημαντικές μεθόδους θερμικού ψεκασμού (ως προς την πηγή ενέργειας) :

1. Ψεκασμός με χρήση φλόγας καύσης (Combustion Flame Spray)
2. Ψεκασμός με χρήση ηλεκτρικού τόξου (Electric / Wire Arc Spray)

3. Ψεκασμός οξυακετυλινικής φλόγας με υπερηχητικές ταχύτητες (HVOF)
4. Ψεκασμός πλάσματος (PLASMA SPRAY)

## 1.4 ΨΕΚΑΖΟΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ

Γενικά οποιοδήποτε υλικό έχει σημείο τήξης μερικές εκατοντάδες βαθμούς χαμηλότερο από το σημείο βρασμού μπορεί να αποτεθεί με ψεκασμό με χρήση πλάσματος. Παρακάτω δίδεται μια σύντομη παρουσίαση των σπουδαιότερων κεραμικών επιστρωμάτων πλάσματος.

### 1) Οξειδία

Τα οξειδία χαρακτηρίζονται από καλές μηχανικές ιδιότητες (σκληρότητα, αντοχή σε τριβή), καλές θερμικές ιδιότητες και έχουν μικρό κόστος. Τα πλέον διαδεδομένα οξειδία είναι τα ακόλουθα :

- Το  $Al_2O_3$  που χρησιμοποιείται για θερμική μόνωση και αντιτριβική προστασία. Παρουσιάζει ικανοποιητική πρόσφυση σε μεταλλικά υποστρώματα και είναι ευαίσθητο σε θερμικούς αιφνιδιασμούς. Κύριο μειονέκτημα αυτών των επιστρωμάτων είναι το σχετικά υψηλό πορώδες τους. Στην αλουμίνα προστίθεται  $TiO_2$  σε ποσοστό 2-50% για μείωση του πορώδους της, ενώ προσθήκη  $ZrO_2$  βελτιώνει την αντοχή της σε διάβρωση.
- Το  $ZrO_2$  χρησιμοποιείται για θερμική μόνωση και για προστασία των υποστρωμάτων από οξείδωση και διάβρωση. Στην ζιρκονία προστίθενται  $CaO$  ή  $Y_2O_3$  για την σταθεροποίησή της, ώστε να αποφεύγονται οι μεταβολές του όγκου κατά τον σχηματισμό στην μονοκλινή φάση.
- Τα επιστρώματα πλάσματος  $Cr_2O_3$  έχουν μεγάλη σκληρότητα ( -1900 HV) και κατά συνέπεια εξαιρετική αντίσταση σε φθορά λόγω εκτριβής.

- Τα επιστρώματα  $TiO_2$  διακρίνονται από πολύ καλή αντοχή πρόσφυσης, χαμηλό πορώδες και χαρακτηρίζονται από την καλύτερη κατάσταση της επιφάνειας σε σύγκριση με οποιαδήποτε άλλα κεραμικά επιστρώματα.

## **2) Καρβίδια**

Η μεγάλη σκληρότητα των καρβιδίων βολφραμίου, τιτανίου και χρωμίου τα καθιστά άριστα επιστρώματα για αντιτριβικές εφαρμογές. Ψεκάζονται συνήθως με κάποιο μέταλλο ως συνδετικό (όπως Co, Ti, Cr). Όσο αυξάνει το ποσοστό του συνδετικού μετάλλου τόσο ελλατώνεται η αντιτριβική ικανότητα των επιστρωμάτων, αλλά βελτιώνονται οι μηχανικές ιδιότητές τους. Οι μικροδομές αυτών των επιστρωμάτων είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες και οι ιδιότητες τους συνδέονται με τις παραμέτρους ψεκασμού.

## **3) Βορίδια και Πυριτίδια**

Τα βορίδια σχηματίζουν πολύ σκληρά επιστρώματα για αντιτριβικές εφαρμογές και χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένες πυρηνικές εφαρμογές. Επιπλέον σκληρά αντιτριβικά επιστρώματα παράγονται από τον ψεκασμό πυριτιδίων που είναι κατάλληλα για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες γιατί σχηματίζουν ένα προστατευτικό επιφανειακό υμένιο  $SiO_2$ .

## **4) Σύνθετα Υλικά**

Σύνθετα επιστρώματα χρησιμοποιούνται συνήθως και ως ενδιάμεσα για κεραμικά επιστρώματα. Είναι όμως δυνατή και η κατασκευή ινωδών σύνθετων υλικών με ψεκασμό με χρήση πλάσματος, τα οποία έχουν πολύ καλές ιδιότητες.

Ακολουθεί ο πίνακας 1.1 που δείχνει τα διάφορα υλικά που μπορούν να αποτεθούν με χρήση θερμικού ψεκασμού.

<b><u>ΣΤΟΙΧΕΙΑ</u></b>	<b><u>ΒΗΡΥΛΙΔΙΑ</u></b>	<b><u>ΠΥΡΙΤΙΔΙΑ</u></b>
Ag Fe Sb	MoBe <sub>12</sub>	CrSi <sub>2</sub>
Al Ge Si	NbBe <sub>12</sub>	MoSi <sub>2</sub>
Au Ir Sn	Nb <sub>2</sub> Be <sub>17</sub>	TaSi <sub>2</sub>
B Mg Ta	TaBe <sub>12</sub>	Ta <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>
Be Mn Ti	Ta <sub>2</sub> Be <sub>17</sub>	U <sub>3</sub> Si <sub>3</sub>
Bi Mo U	TiBe <sub>12</sub>	WSi <sub>2</sub>
Cd Nb V	Ti <sub>2</sub> Be <sub>17</sub>	ZrSi <sub>2</sub>
<b><u>ΚΑΡΒΙΔΙΑ</u></b>	<b><u>ΒΟΡΙΔΙΑ</u></b>	<b><u>ΘΕΙΟΥΧΑ</u></b>
B <sub>4</sub> C	CrB <sub>2</sub>	BeS
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	HfB <sub>2</sub>	CeS
HfC	MoB <sub>2</sub>	MoS <sub>2</sub>
MoC	NbB <sub>2</sub>	ThS
Mo <sub>2</sub> C	TaB <sub>2</sub>	US
NbC	TiB <sub>2</sub>	US <sub>2</sub>
<b><u>ΚΡΑΜΑΤΑ</u></b>	<b><u>ΟΞΕΙΔΙΑ</u></b>	<b><u>ΜΙΓΜΑΤΑ</u></b>
Ag	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Cr
Al-Si	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Mo
Babbitt	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Ni
Bronze	BaO·TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Co-Cr-W	BaO·ZrO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Nb
Co-Cr-W-B	BeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub>
Hastelloy B	CaO·ZrO <sub>2</sub>	Au-SeTe
Hastelloy C	CeO <sub>2</sub>	BeO
Hastelloy D	CoO	BeO-TiBe <sub>12</sub>
Haynes	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -Co
Haynes satellite	FeO·TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Al
Rene 41	HfO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Cr
Rene 80	MgO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cu-Fe
4340 steel	MgO·ZrO <sub>2</sub>	HfO <sub>2</sub> Cr
Ni-Cr steel	MoO·ZrO <sub>2</sub>	HfO <sub>2</sub>
Low-C steel	NiO	HfO <sub>2</sub> -Ir
Medium-C steel	SrO·TiO <sub>2</sub>	HfO <sub>2</sub> -Mo
High-C steel	SrO·ZrO <sub>2</sub>	HfO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub>
Ti-Ag-V	ThO <sub>2</sub>	ThO <sub>2</sub>
U	TiO <sub>2</sub>	
W-Re	UO <sub>2</sub>	
304 Stainless	WO <sub>2</sub>	
316 Stainless	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
410 Stainless	ZrO <sub>3</sub>	
Ir-Re	ZrO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub>	

Πίνακας 1.1: Υλικά που μπορούν να αποτεθούν ως επιστρώματα με τη χρήση θερμικού ψεκασμού.

## 1.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΨΕΚΑΣΜΩΝ

### 1.5.1 Ψεκασμός με χρήση φλόγας καύσης (Combustion Flame Spray)



Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί για την τήξη του υλικού που θα σχηματίσει την επικάλυψη, θερμότητα που παράγεται από την καύση ενός αερίου (ή υγρού) καυσίμου. Το καύσιμο αυτό μπορεί να είναι προπάνιο, υδρογόνο ή φυσικό αέριο. Συνήθως όμως επιλέγεται το ακετυλένιο λόγω της υψηλής θερμοκρασίας καύσης και του χαμηλού κόστους το οποίο καίγεται παρουσία οξυγόνου ή πεπιεσμένου αέρα. Τα προς ψεκασμό υλικά μπορούν να είναι σε μορφή σκόνης ή ράβδου.

Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο συμβατικό ψεκασμό φλόγας φθάνουν έως τους 2750 °C. Η αντίστοιχη θερμότητα πάντως, δε θεωρείται αρκετή για να δώσει μια καλή κεραμική επικάλυψη. Στην διαδικασία αυτή το υλικό βρίσκεται σε μορφή σκόνης, η οποία οδηγείται μέσα στο ρεύμα αέρος με έναν τροφοδότη βαρύτητας. Εξαρτώμενα από τη μορφολογία τους και τις θερμικές ιδιότητές τους τα σωματίδια τήκονται μερικώς ή πλήρως. Η φλόγα καύσης τήκει το υλικό, ενώ ταυτόχρονα επιταχύνει και στροβιλίζει τα τηγμένα σωματίδια. Καθώς οι ταχύτητες των σωματιδίων (90 – 180m/s) είναι χαμηλές, οι επικαλύψεις παρουσιάζουν υψηλό πορώδες (10 – 15%), χαμηλή συνοχή και πρόσφυση στο υπόστρωμα. Γι' αυτόν το λόγο, η τεχνική χρησιμοποιείται για ψεκασμό κυρίως μεταλλικών υλικών. Για βελτιωμένη εμφάνιση του επιστρώματος τα σωματίδια του υλικού πρέπει να έχουν κατά το δυνατόν



ομοιόμορφο μέγεθος. Τέλος, ο ψεκασμός με χρήση φλόγας είναι σχετικά φτηνή μέθοδος.

### **1.5.2 Ψεκασμός με χρήση ηλεκτρικού τόξου** **(Electric / Wire Arc Spray)**

Είναι μια μέθοδος με πολλές χρήσεις, η οποία ανήκει στο θερμικό ψεκασμό. Η παρακάτω εικόνα μας δείχνει τη διεργασία του ψεκασμού με χρήση ηλεκτρικού τόξου.



Η απαιτούμενη ενέργεια για την τήξη του προς απόθεση υλικού προέρχεται από το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται, λόγω υψηλής έντασης ρεύματος, μεταξύ δύο αγώγιμων μεταλλικών συρμάτων, που λειτουργούν ως συνεχώς καταναλισκόμενα ηλεκτρόδια καθώς τήκονται από το ηλεκτρικό τόξο. Αέριο μεγάλης ροής (>1500 slpm), που μπορεί να είναι κυρίως πεπιεσμένος αέρας, ή άζωτο ή αργό, ατομοποιεί τα κομμάτια του τηγμένου σύρματος και τα ωθεί προς το υπόστρωμα με μεγάλες ταχύτητες, της τάξης περίπου των 240 m/s. Με αυτή την τεχνική μπορούν να ψεκασθούν όλκιμα και ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά, τα οποία μπορούν να μετατραπούν σε σύρμα. Ωστόσο, η χρήση πεπιεσμένου αέρα ( $T \sim 4000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) προκαλεί οξειδωση στα μεταλλικά σωματίδια με αποτέλεσμα οι επικαλύψεις να περιέχουν μεγάλο αριθμό οξειδίων (10 – 20%) και να είναι σκληρές και μη κατεργάσιμες, με αυξημένο πορώδες 10 – 20%. Τέλος η τεχνική ψεκασμού με χρήση ηλεκτρικού τόξου

χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος και μεγάλους ρυθμούς απόθεσης (μεγάλη κλίμακας παραγωγή).

### **1.5.3 Ψεκασμός οξυακετυλινικής φλόγας με υπερηχητικές ταχύτητες (HVOF)**



Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την θερμική ενέργεια που απελευθερώνεται από μια σειρά εκρήξεων μίγματος οξυγόνου –ασετιλίνης για να επιταχύνει τα σωματίδια του προς απόθεση υλικού, ώστε να προσκρούσουν στην επιφάνεια του υποστρώματος και να δημιουργήσουν το επίστρωμα. Οι ταχύτητες των σωματιδίων είναι εξαιρετικά μεγάλες (υπερηχητικές, ~700 m/s) με αποτέλεσμα τα αποτιθέμενα επιστρώματα να είναι πάρα πολύ πυκνά. Η τεχνική παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λόγω του χαμηλού κόστους και των πολύ καλών ιδιοτήτων των επικαλύψεων (χαρακτηριστικό πορώδες 1 – 2% και οξειδία 1 – 5%). Υπάρχουν τέσσερις βασικές μέθοδοι ψεκασμού με χρήση υπερηχητικής φλόγας καύσης, οι οποίες είναι γνωστές ως :

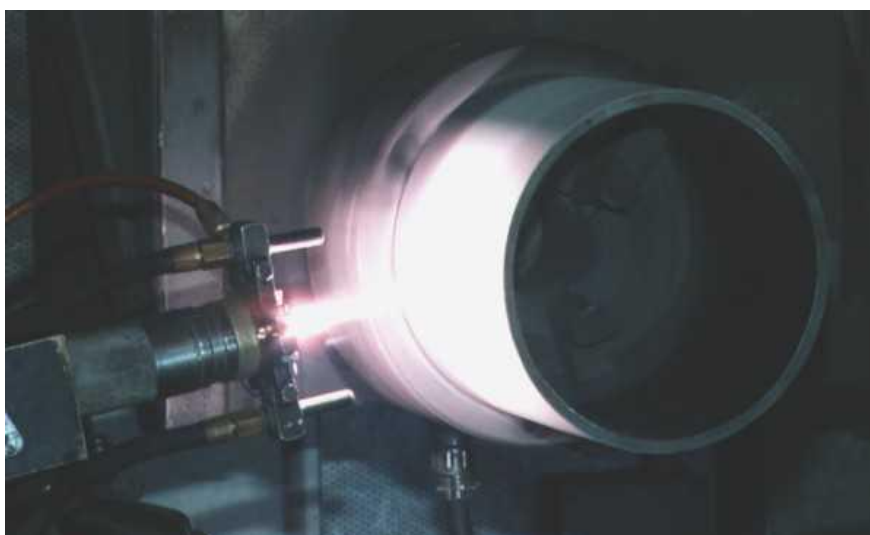
- Μέθοδος D – GUN
- Μέθοδος JET – KATE
- Μέθοδος TOP – GUN
- Μέθοδος DIAMOND – JET

Τα ονόματα των μεθόδων αυτών δόθηκαν από τις ονομασίες των εταιρειών που τις ανέπτυξαν.

#### **1.5.4 Ψεκασμός πλάσματος (PLASMA SPRAY)**

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. Στην ακόλουθη φωτογραφία φαίνεται μια διαδικασία ψεκασμού με χρήση πλάσματος.



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 10.000 – 15.000°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 – 600 m/s. Οι συνήθειες θερμικές επικαλύψεις που παράγονται με τη μέθοδο αυτή για προστασία από τη φθορά είναι  $Al_2O_3$  και  $Cr_2O_3$ . Άλλα κεραμικά, όπως η σταθεροποιημένη με ύτρια, ή με ασβέστιο ζirkονία και το ζirkονικό μαγνήσιο, χρησιμοποιούνται ως φράγματα σε εξαρτήματα μηχανών. Το καρβίδιο του βολφραμίου (WC) με συνδετικό κοβάλτιο (Co) είναι το συνηθέστερο ψεκαζόμενο μεταλλοκεραμικό για εφαρμογές κατά της φθοράς.

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.

Τα επιστρώματα πλάσματος χαρακτηρίζονται από μεγάλες πυκνότητες δεδομένου ότι η ταχύτητα των σωματιδίων είναι πολύ μεγάλη (240 – 600 m/s). Ανάλογα με το περιβάλλον, στο οποίο γίνεται ο ψεκασμός, η μέθοδος διακρίνεται στις ακόλουθες κατηγορίες :

1. Ψεκασμός σε ατμοσφαιρικές συνθήκες (atmospheric plasma spraying)
2. Ψεκασμός υπό κενό (vacuum plasma spraying)
3. Ψεκασμός σε χαμηλή πίεση (low pressure plasma spraying)
4. Ψεκασμός σε περιβάλλον αργού (argon shrouded plasma spraying)

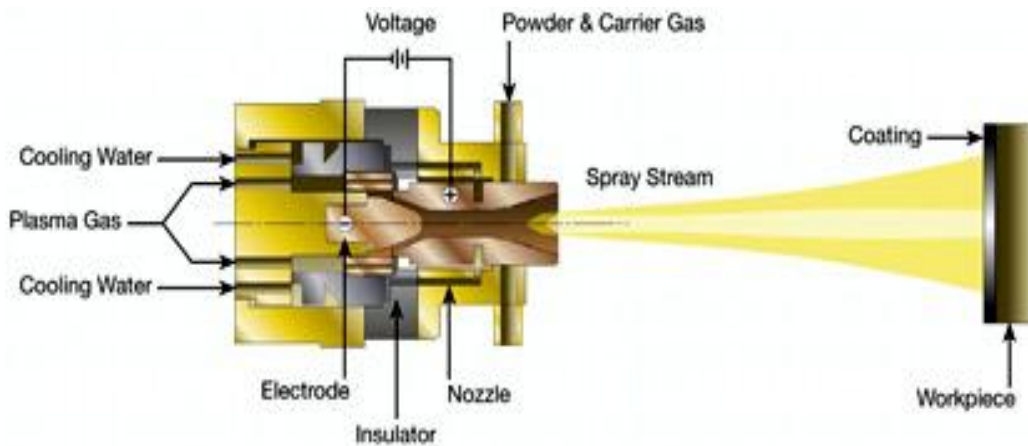
Κατά τον ψεκασμό σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, τα τηγμένα σωματίδια κινούνται με μεγάλες ταχύτητες (200 – 400m/sec) δημιουργώντας πυκνά επιστρώματα. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η εισχώρηση (ανάμιξη) αέρα στη φλόγα πλάσματος, που προκαλεί ελαφρά ψύξη και επιβράδυνση της φλόγας με συνέπεια τη μερική οξειδωση μεταλλικών κόνεων. Η μέθοδος

ενδείκνυται για την απόθεση κεραμικών επιστρωμάτων καθώς και μεταλλικών επιστρωμάτων εφόσον το ποσοστό οξειδίων τους διατηρείται σε ανεκτά επίπεδα.

Στην τεχνική ψεκασμού σε περιβάλλον αργού, διοχετεύεται ένα ρεύμα αργού γύρω από την φλόγα πλάσματος και το υπόστρωμα παρέχοντας προστασία έναντι της αρνητικής επίδρασης που έχει η τυχόν ανάμιξη του αέρα στο πλάσμα.

Τέλος, ο ψεκασμός σε χαμηλή πίεση ή σε κενό ελαχιστοποιεί τα προβλήματα, που σχετίζονται με την είσοδο αέρα στη φλόγα πλάσματος. Οι ταχύτητες των σωματιδίων είναι μεγαλύτερες (της τάξης των 400 – 600m/sec) και η φλόγα πλάσματος μακρύτερη με αποτέλεσμα τα παραγόμενα επιστρώματα να χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα, μεγάλη καθαρότητα και πολύ καλή πρόσφυση. Η χρήση θαλάμου κενού επιτρέπει την θέρμανση του υποστρώματος σε υψηλές θερμοκρασίες βελτιώνοντας περαιτέρω την πρόσφυση επιστρώματος – υποστρώματος με αλληλοδιάχυση στοιχείων μεταξύ τους. Επίσης, η απουσία οξυγόνου δίνει πυκνές επικαλύψεις με πολύ μικρό ποσοστό περιεχομένων οξειδίων.

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



**Σχήμα 1.4: Τεχνολογία ψεκασμού πλάσματος υπό ελεγχόμενη ατμόσφαιρα.**

Οι δυνατότητες της τεχνολογίας CAPS δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί πλήρως καθώς υπάρχει ελάχιστη βιβλιογραφία διεθνώς. Η καινοτομία της τεχνολογίας αυτής είναι ο ψεκασμός υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής φτάνοντας τις τέσσερις ατμόσφαιρες. Σε αυτή την τεχνική, οι θερμικές ανταλλαγές διευκολύνονται με αποτέλεσμα να θερμαίνονται καλύτερα τα σωματίδια των διαφόρων σκονών και να τήκονται ή να πλαστικοποιούνται ευκολότερα. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν χονδρομερείς σκόνες (>100 μm) που είναι πολύ φθηνότερες από τις λεπτομερείς. Με την τεχνολογία CAPS (τεχνολογία ψεκασμού πλάσματος υπό ελεγχόμενη ατμόσφαιρα) επίσης περιορίζεται σημαντικά η αποσύνθεση των καρβιδίων που παρατηρείται σε ατμοσφαιρικό ψεκασμό με πλάσμα, με αποτέλεσμα να γίνεται δυνατός ο ψεκασμός καρβιδίων και να ανταγωνίζεται στον τομέα αυτό η τεχνολογία CAPS την τεχνολογία HVOF (ψεκασμός φλόγας υψηλής ταχύτητας) που είναι ακριβότερη. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της τεχνολογίας CAPS είναι ότι ανακυκλώνει το αδρανές αέριο, γεγονός που βοηθά στην ψύξη του δοκιμίου και έχει ως αποτέλεσμα την οικονομία αερίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### **ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ**

#### **2.1 ΓΕΝΙΚΑ**

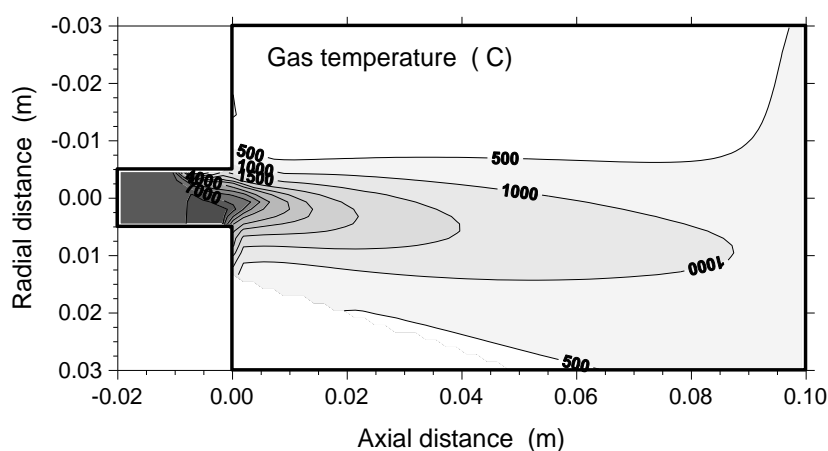
Το πλάσμα είναι ένα αγώγιμο αέριο που περιέχει ιόντα, ηλεκτρόνια και ουδέτερα μόρια. Δημιουργείται με ηλεκτρικό τόξο, όπου κάποια ηλεκτρόνια επιταχύνονται από την κάθοδο στην άνοδο μέσα σε περιβάλλον αερίου. Αν η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων είναι αρκετά υψηλή, κρούσεις τους με τα ουδέτερα άτομα μπορούν να οδηγήσουν σε ιονισμό, δίνοντας θετικά φορτισμένα ιόντα που επιταχύνονται προς την κάθοδο. Σε αυτή την κατάσταση κινήσεων και κρούσεων υψηλής ενέργειας, γίνεται ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ ανόδου και καθόδου, οπότε δημιουργείται το πλάσμα.

Τα συνηθισμένα αέρια αποτελούνται από χωριστά μόρια, ενώ το πλάσμα αποτελείται από τα ίδια αέρια, που διαλύθηκαν και χωρίστηκαν έτσι ώστε μερικά ηλεκτρονικά φορτισμένα σωματίδια να διασπαστούν σε θετικά και αρνητικά ιόντα. Τα φορτισμένα σωματίδια διαθέτουν υψηλές ποσότητες κινητικής ενέργειας και έχουν υψηλή θερμοκρασία. Αυτή η κινητική ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί σε άλλα σωματίδια με την μορφή θερμότητας.

Το αέριο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή πλάσματος είναι μοριακό, οπότε οι θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται κατά τη διάσπαση και αντίστοιχα οι ενέργειες που μεταφέρονται μέσω αυτού, είναι αρκετά υψηλότερες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την διέγερση του αερίου δεν παίζει ρόλο μόνο ο ιονισμός του αλλά προηγείται η διάσπαση των μορίων του σε άτομα. Κατά συνέπεια επιτυγχάνεται μεταφορά ενέργειας μέσω συγκρούσεων σε άλλα σωματίδια.

Οι ταχύτητες στα συμβατικά όπλα πλάσματος είναι υποηχητικές, αλλά μπορούν να δημιουργηθούν και υπερηχητικές με χρήση κατάλληλων

ακροφυσίων. Οι θερμοκρασίες στον πυρήνα του πλάσματος μπορεί να ξεπερνούν τους 30.000 °C.



Σχήμα 2.1: Χαρακτηριστική κατανομή θερμοκρασιών στο πλάσμα.

## 2.2 ΔΑΥΛΟΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

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

Η λειτουργία του δαυλού, η ισχύς του οποίου κυμαίνεται μεταξύ 30 και 80 KW και σε ορισμένες περιπτώσεις στα 120 KW, ξεκινά με τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού τόξου μεταξύ ανόδου και καθόδου. Κατόπιν διοχετεύεται το αέριο, το οποίο ιονίζεται και αναφλέγεται από το τόξο. Η είσοδος του αερίου μπορεί να γίνει είτε αξονικά, είτε με τη βοήθεια στροβίλων. Η δεύτερη περίπτωση ευνοεί τη σταθερότητα του τόξου και περιστρέφει την ανοδική ρίζα του περιορίζοντας τη διάβρωση της ανόδου. Εξαιτίας της αδράνειάς του το αέριο εξέρχεται του στομίου του δαυλού με τη μορφή φλόγας, η θερμοκρασία της οποίας ανέρχεται στους 20.000 °K. Τα χαρακτηριστικά της φλόγας εξαρτώνται



από το χρησιμοποιούμενο αέριο, αλλά και από τη διάταξη του ακροφυσίου (μικρότερο ακροφύσιο συνεπάγεται υψηλότερες θερμοκρασίες).

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

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

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

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

## 2.3 ΑΕΡΙΑ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

Για τον μεταλλοψεκασμό με τη μέθοδο του πλάσματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστατικά του πλάσματος μονατομικά και διατομικά αέρια. Το αργό και το ήλιο είναι τα μονατομικά αέρια που χρησιμοποιούνται συχνότερα. Με τα μονατομικά αέρια είναι δυνατή η παροχή ικανής θερμικής ενέργειας για τις περισσότερες εφαρμογές. Φλόγες που προέρχονται από πολυατομικά αέρια έχουν μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο. Δεν απελευθερώνουν μόνο ενέργεια ιονισμού, αλλά επιπλέον ενέργεια μοριακής διάσπασης. Ο συνδυασμός των αερίων που αποτελούν το πλάσμα επηρεάζει την ποιότητα του πλάσματος. Η ποιότητα των ίδιων των αερίων είναι όμοια με αυτή του πλάσματος συγκολλήσεων με χαμηλό ποσοστό υγρασίας και οξυγόνου. Τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα αέρια και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους είναι τα εξής :

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

οποία τείνουν να το απορροφούν όταν βρίσκονται σε τηγμένη μορφή.

- Το **ήλιο** χρησιμοποιείται συνήθως ως δευτερεύον αέριο σε συνδυασμό με αργό, ειδικά όταν το υπόστρωμα είναι τιτάνιο. Επίσης, τείνει να αυξάνει την τάση του τόξου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### **ΑΠΟΘΕΣΗ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ**

Η απόθεση επιστρωμάτων από ρεύμα σωματιδίων τηγμένου μετάλλου ή κεραμικού αναπτύχθηκε αρχικά με τη χρήση φλογών καύσης, εντός των οποίων το προς ψεκασμό υλικό τροφοδοτείται υπό μορφή σκόνης, σύρματος ή ράβδου. Κατά την δεκαετία του 1960 εμφανίστηκαν οι πρώτες συσκευές ψεκασμού επιστρωμάτων με χρήση πλάσματος. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου ψεκασμού με χρήση πλάσματος έναντι της μεθόδου ψεκασμού με χρήση φλόγας είναι η μεγαλύτερη ταχύτητα των σωματιδίων (μέχρι 500 m/sec) και οι υψηλότερες θερμοκρασίες, οι οποίες επιτρέπουν την τήξη ακόμα και των πλέον δύστηκτων υλικών.



**Ψεκασμός με χρήση πλάσματος.**

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

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

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

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

### **3.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΨΕΚΑΣΜΟΥ**

Η τελική δομή και η ποιότητα μιας επικάλυψης είναι συνάρτηση πολλαπλών παραμέτρων που αφορούν την διαδικασία ψεκασμού.

#### **3.1.1 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΣΑΡΩΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ**

Η ταχύτητα με την οποία κινείται ο δαυλός ως προς το υπόστρωμα επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες της επικάλυψης. Σε συνάρτηση και με την παροχή της σκόνης, η ταχύτητα σάρωσης καθορίζει το πάχος της επικάλυψης και την

ομοιομορφία αυτού σε όλη την ψεκαζόμενη έκταση. Για την επίτευξη ομοιομορφίας πρέπει η ταχύτητα του δαυλού να διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια του ψεκασμού, ώστε να αποτίθεται η ίδια ποσότητα υλικού στην επιφάνεια, αλλά και η μεταφορά θερμότητας προς το υλικό της βάσης να μην παρουσιάζει διακυμάνσεις. Σημασία έχει και το εύρος του ίχνους της φλόγας, τόσο ως προς την επιφάνεια που καλύπτει, αλλά και ως προς την διασπορά των σταγονιδίων μέσα σε αυτό και κατ' επέκταση πάνω στο υπόστρωμα.

Έχει αποδειχθεί ότι μεγαλύτερες ταχύτητες σάρωσης οδηγούν σε μικρότερες παραμένουσες τάσεις, σε πυκνότερες δομές και σε ισχυρότερη σύνδεση των κόκκων που σχηματίζονται με το υπόστρωμα και μεταξύ τους. Προτιμάται επομένως η πραγματοποίηση του ψεκασμού με πολλά διαδοχικά περάσματα του δαυλού, ώστε να έχουμε την απόθεση λεπτών στρώσεων και το σταδιακό «χτίσιμο» του επιθυμητού πάχους. Η τεχνική αυτή μετριάζει και τα προβλήματα που προκύπτουν από τους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής της κάθε στρώσης. Επιπλέον, ευνοείται ο ψεκασμός με σκόνες, η σύσταση των οποίων μεταβάλλεται κατά την εξέλιξη της εργασίας, επιτυγχάνοντας ισομερή κατανομή των υλικών στο επίστρωμα.

### **3.1.2 ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΔΑΥΛΟΥ-ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ**

Η σημασία της απόστασης αυτής έγκειται στον έλεγχο της θερμότητας που μεταφέρεται στο ψεκαζόμενο εξάρτημα και στην ικανοποιητική τήξη των σωματιδίων της σκόνης. Μεγάλη απόσταση επιτρέπει την αύξηση του μήκους της φλόγας, γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερο χρόνο παραμονής των σωματιδίων σε αυτή και καλύτερη ρευστοποίησή τους. Παράλληλα αυξάνεται και η διασπορά τους με αποτέλεσμα μικρότερο ποσοστό του ψεκαζόμενου υλικού να φθάνει στην επιφάνεια. Μείωση παρατηρείται και ως προς την ταχύτητα με την οποία τα σταγονίδια προσκρούουν πάνω στο στόχο. Τα φαινόμενα αυτά είναι εντονότερα στην περίπτωση που η απόθεση δεν πραγματοποιείται υπό χαμηλή πίεση. Εκτός από την επιβράδυνση λόγω του ιξώδους του αέρα αυξάνεται και το χρονικό διάστημα που τα σταγονίδια παραμένουν εκτεθειμένα στην οξειδωτική δράση των συστατικών του.

Αντίθετα όταν η απόσταση είναι μικρή τα σταγονίδια προσκρούουν με μεγαλύτερη ταχύτητα στον στόχο, πεπλατώνονται σε μεγαλύτερο βαθμό με αποτέλεσμα την δημιουργία πυκνότερων λεπτών στρώσεων με αυξημένη πρόσφυση. Ο μικρότερος χρόνος όμως παραμονής τους στη φλόγα αυξάνει το ποσοστό των άτηκτων σωματιδίων, τα οποία υποβαθμίζουν την ποιότητα της επικάλυψης. Παράλληλα η θερμότητα που αναπτύσσεται στο υπόστρωμα επιβάλλει την χρήση συστημάτων ψύξης αυτού προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα υπερθέρμανσής του.

Για τις περισσότερες εφαρμογές κρίνεται κατάλληλη μια απόσταση της τάξης των 10 – 15cm. Παρατηρούνται όμως και σημαντικές αποκλίσεις ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής.

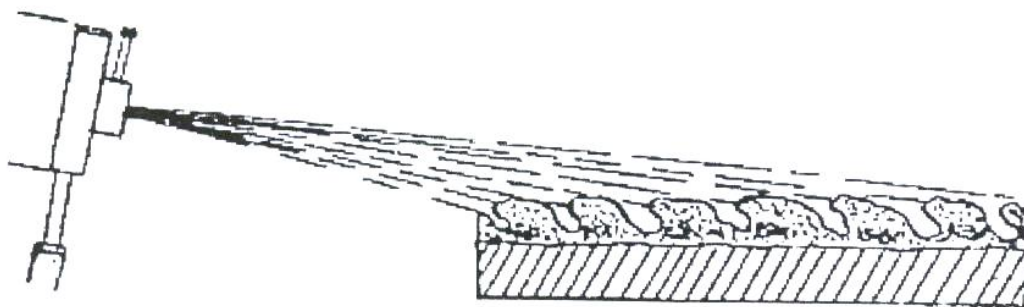
### **3.1.3 ΓΩΝΙΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ**

Σημαντική παράμετρος για την ποιότητα που εμφανίζει ένα επίστρωμα είναι και η γωνία, υπό την οποία τα σταγονίδια της σκόνης βλέπουν την προς απόθεση επιφάνεια. Αυτή είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του υποστρώματος και της ταχύτητας των σωματιδίων.

Όταν η γωνία αυτή είναι γύρω στις  $90^{\circ}$ , τα σωματίδια καθώς προσκρούουν στο υλικό της βάσης στερεοποιούνται σχεδόν τοπικά χωρίς να εξαπλώνονται, με αποτέλεσμα η συνοχή που αποκτούν να μην είναι η καλύτερη δυνατή. Ωστόσο η δομή της επικάλυψης είναι η πυκνότερη που επιτυγχάνεται από κάθε άλλη γωνία.

Για γωνίες μεταξύ  $45^{\circ}$  και  $90^{\circ}$ , τα αποτελέσματα είναι περισσότερο ικανοποιητικά καθώς τα σωματίδια εξαπλώνονται και διεισδύουν καλύτερα στο υπόστρωμα, χωρίς παράλληλα να έχουμε σημαντική αύξηση του πορώδους. Οποιαδήποτε μεταβολή της γωνίας μεταξύ των παραπάνω ορίων δεν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην δομή και την ποιότητα των επικαλύψεων.

Όταν όμως ο ψεκασμός της σκόνης γίνεται υπό γωνία μικρότερη των  $45^\circ$ , η συνοχή του ίδιου του επιστρώματος και η πρόσφυσή του με το υπόστρωμα είναι ασθενής. Αυτό οφείλεται στο λεγόμενο «φαινόμενο σκίασης» (shadow effect), που παρατηρείται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 3.1:** Φαινόμενα σκίασης παρατηρούνται κατά τον ψεκασμό υπό μικρές γωνίες.

Τα πρώτα σταγονίδια που επικάθονται και στερεοποιούνται στο υλικό της βάσης δημιουργούν ένα είδος κυματισμού. Σαν συνέπεια αυτά που ακολουθούν αγκιστρώνονται στα πρώτα αφήνοντας κενή μια περιοχή που βρίσκεται στην σκιά των πρώτων στρώσεων. Δημιουργείται επομένως ένα πορώδες επίστρωμα το οποίο έχει τη τάση να συλλέγει στα κενά του λεπτόκοκκο υλικό από το ρεύμα του ψεκασμού και αέρια από το περιβάλλον που συνεπάγονται υψηλή περιεκτικότητα σε οξειδία. Επιπλέον σημαντικό μέρος από το ψεκαζόμενο υλικό χάνεται καθώς παρατηρείται ανάκλαση των σωματιδίων στο περιβάλλον, όπως αυτά προσπίπτουν με μεγάλη εφαπτομενική ταχύτητα πάνω στην επιφάνεια.

#### **3.1.4 ΔΟΜΗ ΚΟΚΚΩΝ ΣΚΟΝΗΣ**

Προκειμένου όμως για επικαλύψεις υψηλών προδιαγραφών, η ίδια η σκόνη που χρησιμοποιείται έχει ιδιαίτερη σημασία. Αυτή αποτελείται από ένα πλήθος σωματιδίων, τα οποία συμπεριφέρονται τόσο εξατομικευμένα όσο και ομαδικά κατά την διάρκεια του ψεκασμού. Σαν ξεχωριστά σωματίδια, τα χαρακτηριστικά εκείνα που επηρεάζουν την επικάλυψη είναι τα εξής :

- Το μέγεθος.
- Το σχήμα που μπορεί να είναι σφαιρικό, επίμηκες, δένδριτικό, ακανόνιστο.



- Η πυκνότητα, η οποία δεν συμπίπτει πάντα με αυτήν του υλικού από το οποίο προήλθε καθώς οι κόκκοι μπορεί να είναι πορώδεις ανάλογα με την μέθοδο παρασκευής τους.
- Η επιφάνεια πάνω στην οποία πραγματοποιούνται όλες οι αντιδράσεις. Συγκρινόμενη δε με τον όγκο καθορίζει παραμέτρους όπως η παροχή θερμότητας, καθώς λεία σφαιρικά σωματίδια απαιτούν περισσότερη θερμότητα για τήξη από αντίστοιχα πορώδη δενδριτικής μορφής.
- Η μικροδομή αφορά έννοιες όπως μέγεθος, προσανατολισμό και σχήμα των κρυστάλλων των κόκκων, οι οποίοι συνήθως είναι μονοκρυσταλλικοί.
- Τα επιφανειακά οξείδια, η ύπαρξη των οποίων εξαρτάται από την μέθοδο παρασκευής της σκόνης, επηρεάζει την ρευστοποίηση και την ροή των σωματιδίων καθώς και την ποιότητα της επικάλυψης.

Στο σύνολό της η σκόνη χαρακτηρίζεται από τα εξής :

- Το μέσο μέγεθος των κόκκων.
- Τη κατανομή του μεγέθους.
- Την ειδική επιφάνεια, που ορίζεται ως η επιφανειακή έκταση των κόκκων που περιέχονται σε ένα γραμμάριο σκόνης .
- Τη φαινομενική πυκνότητα που σχετίζεται με το σχήμα των κόκκων.
- Τη ροή της σκόνης δια μέσου κάποιου αγωγού.

Οπωσδήποτε όμως σε εκείνο που πρέπει να δοθεί σημασία είναι η χρησιμοποιούμενη σκόνη να είναι ομοιόμορφη και το μέγεθός της να είναι συμβατό με την ισχύ του δαυλού, ώστε να έχουμε ανάλογη κατανομή των σωματιδίων στη φλόγα και να επιτυγχάνεται επαρκής τήξη όλης της μάζας αποφεύγοντας την παρουσία άτηκτων σωματιδίων. Προκειμένου δε για πυκνές επικαλύψεις, χωρίς ελάττωμα στο εσωτερικό τους, προτιμάται η χρήση λεπτόκοκκης πούδρας που ευνοεί την δημιουργία επιστρωμάτων λεπτής υφής.

### **3.1.5 ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

Η κινητική ενέργεια προσδιορίζει την ταχύτητα με την οποία τα τηγμένα σωματίδια προσκρούουν πάνω στο υπόστρωμα. Η υψηλή κινητική ενέργεια εξασφαλίζει :

- Καλή πρόσφυση. Τα σωματίδια εισχωρούν στις εσοχές που έχουν δημιουργηθεί στην προς απόθεση επιφάνεια και αγκιστρώνονται από αυτές.
- Περιορισμένο ποσοστό πορώδους. Το υλικό των σταγονιδίων διεισδύει στα κενά που δημιουργούνται κατά την στερεοποίηση των προηγούμενων στρώσεων.
- Περιορισμένο ποσοστό οξειδίων. Μικρότερος χρόνος παραμονής στην φλόγα περιορίζει και το χρόνο έκθεσης στην οξειδωτική δράση του περιβάλλοντος ψεκασμού.

Αυξημένη ταχύτητα πρόσκρουσης, όμως συνεπάγεται τον κίνδυνο της διάνοιξης των σταγόνων, κατά την επαφή τους με το υπόστρωμα, και της έκχυσης του υλικού. Το φαινόμενο αυτό επιδρά αρνητικά στη συνοχή καθώς τα επιμέρους σταγονίδια αποτελούν πρόσφορο έδαφος για την ανάπτυξη οξειδίων.

### **3.1.6 ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ**

Η σημαντικότερη παράμετρος στην διαδικασία του ψεκασμού είναι ο ίδιος ο τεχνικός που θα την πραγματοποιήσει. Ο ρόλος του ουσιαστικά ξεκινά από την προετοιμασία του υποστρώματος και καταλήγει στον ποιοτικό έλεγχο της επικάλυψης. Το επίπεδο της κατάρτισής του και η κεκτημένη εμπειρία είναι στοιχεία που καθορίζουν τον βαθμό στον οποίο το αποτέλεσμα της επίστρωσης ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές και στις απαιτήσεις που θέτουν οι διάφορες εφαρμογές.

Τα στοιχεία αυτά όμως ποικίλλουν από άτομο σε άτομο, αλλά και ο ίδιος ο τεχνικός δεν δύναται να επιτύχει την ίδια ποιότητα σε επίπεδο μαζικής παραγωγής. Καθώς μάλιστα οι τομείς της σύγχρονης ζωής, όπου απαιτείται η χρήση επικαλύψεων, συνεχώς αυξάνουν κρίνεται απαραίτητη η αυτοματοποίηση της όλης διαδικασίας, με σκοπό την τήρηση των προδιαγραφών σε επίπεδο βιομηχανικής παραγωγής. Η σύγχρονη τεχνολογία μάλιστα επιτρέπει την πλήρη αυτοματοποίηση καθώς το μόνο σημείο όπου απαιτείται η ανθρώπινη παρέμβαση, είναι ο έλεγχος των παραμέτρων μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η δυνατότητα αυτή συμβάλλει στην πανομοιότυπη εκτέλεση της εργασίας ακόμη και σε περιπτώσεις, όπου ιδιαιτερότητες όπως η μορφή των εξαρτημάτων δυσχεραίνουν την πραγματοποίηση του ψεκασμού.

### **3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ**

Τα χαρακτηριστικά της φλόγας πλάσματος (κατανομή θερμοκρασίας και ταχυτήτων) εξαρτώνται από τα χρησιμοποιούμενα αέρια (είδος, παροχή και πίεση), τις διαστάσεις και το σχήμα των ηλεκτροδίων του δαυλού πλάσματος καθώς και από την εφαρμοζόμενη ηλεκτρική ισχύ.

Πειραματικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των χαρακτηριστικών της φλόγας πλάσματος είναι οι ακόλουθες :

- 1) Για μέτρηση θερμοκρασίας  $T > 6000^{\circ}\text{K}$  χρησιμοποιούνται φασματοσκοπικές μέθοδοι, ενώ για θερμοκρασίες μικρότερες των  $4000^{\circ}\text{K}$  χρησιμοποιούνται κατάλληλα θερμοστοιχεία. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο προσδιορισμός των θερμοκρασιών σε διάφορες θέσεις στη φλόγα πλάσματος.
- 2) Η ταχύτητα των σωματιδίων στη φλόγα πλάσματος μετριέται με ανεμομετρία Doppler Laser (LDA) δύο σημείων.

- 3) Η θερμοκρασία της επιφάνειας των σωματιδίων στη φλόγα πλάσματος μετριέται με πυρομέτρηση εν πτήση κατά την οποία ένα είδωλο της φλόγας πλάσματος εστιάζεται στην είσοδο (σχισμή) ψυχόμενου φωτοπολλαπλασιαστού. Κάθε φορά που ένα σωματίδιο περνά μέσα από τη φλόγα παράγονται ηλεκτρικοί παλμοί, η ένταση των οποίων είναι συνάρτηση του σχήματος και του μεγέθους καθώς και της θερμοκρασίας τους ( με κατάλληλη ανάλυση των παλμών είναι δυνατή η μέτρηση της θερμοκρασίας των σωματιδίων).
  
- 4) Η ροή σωματιδίων στη φλόγα πλάσματος μετριέται από τον αριθμό των παλμών, για δεδομένο χρόνο, οι οποίοι παράγονται από τη σκέδαση του φωτός της κίνησης των σωματιδίων μέσα από μία εστιασμένη δέσμη laser.

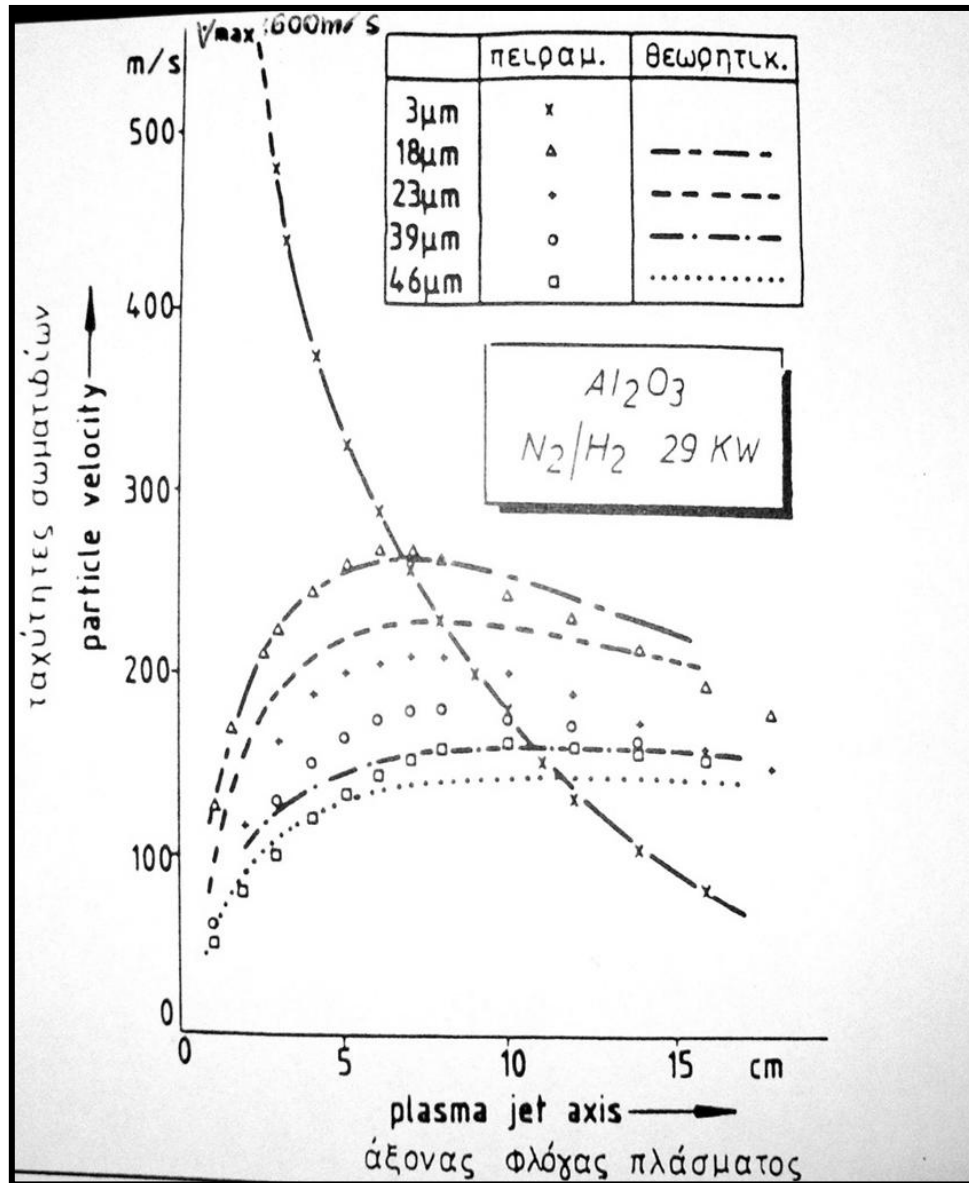
Παρακάτω περιγράφεται η συμπεριφορά των σωματιδίων μέσα στη φλόγα πλάσματος.

### **3.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΗ ΦΛΟΓΑ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ**

Η σκόνη, που πρόκειται να ψεκασθεί, διοχετεύεται μέσα στη φλόγα πλάσματος μέσω μικρού σωληνωτού αγωγού του οποίου η εσωτερική διάμετρος είναι περίπου 2mm. Έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι για την εισαγωγή της σκόνης, οι οποίοι περιλαμβάνουν διαφορετικές θέσεις εισόδου, διαφορετικές γωνίες εισαγωγής και ταυτόχρονη τροφοδοσία μέσω πολλών σωληνώσεων.

Η σκόνη μεταφέρεται με φέρον αδρανές αέριο, η παροχή του οποίου καθορίζεται ανάλογα με τη μάζα των σωματιδίων της σκόνης ώστε να εξασφαλίζεται η είσοδος των σωματιδίων στον θερμό πυρήνα της φλόγας πλάσματος. Τα σωματίδια της σκόνης, που εισέρχονται στο πλάσμα, επιταχύνονται και θερμαίνονται και σε συγκεκριμένη απόσταση από το ακροφύσιο αποκτούν την ταχύτητα του πλάσματος, ενώ σε λίγο μεγαλύτερη

απόσταση η ταχύτητά τους γίνεται μεγαλύτερη εξαιτίας της αδράνειάς τους. Η απόσταση στην οποία η ταχύτητα των σωματιδίων εξισώνεται με την ταχύτητα των αερίων του πλάσματος είναι συνάρτηση της μάζας και του μεγέθους των σωματιδίων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Μεταβολή της ταχύτητας των σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθος.

Όσο αυξάνει η μάζα των σωματιδίων τόσο ελατώνεται η επιτάχυνσή τους και η τελική τους ταχύτητα ( με την οποία προσπίπτουν στο υπόστρωμα).

Θεωρητικά τα σωματίδια της σκόνης πρέπει να προσπίπτουν στο υπόστρωμα με μεγάλες ταχύτητες τελείως τηγμένα ώστε να δημιουργήσουν ένα πυκνό επίστρωμα με μικρό πορώδες. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η

απαίτηση, ιδιαίτερα σημαντικοί παράγοντες είναι η ταχύτητα των σωματιδίων και η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ πλάσματος και σωματιδίων.

Σχετικά με την ταχύτητα των σωματιδίων ισχύουν τα εξής:

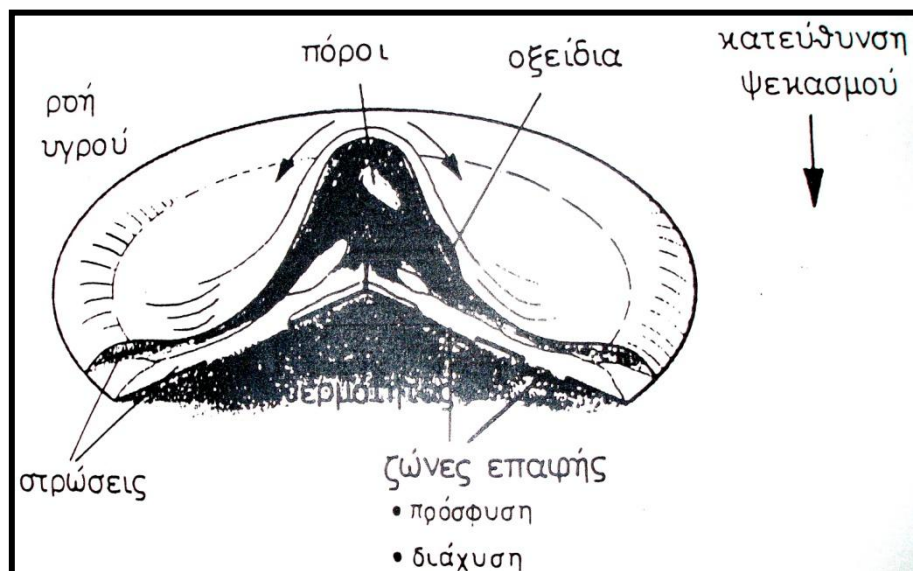
- Η μέση μέγιστη ταχύτητα των σωματιδίων αυξάνει όσο ελατώνεται το μέγεθός τους, αλλά σε μεγάλη απόσταση από το ακροφύσιο η επιβράδυνση των μικρότερων σωματιδίων είναι μεγαλύτερη.
- Για το ίδιο μέγεθος σωματιδίων, υλικά με μικρή πυκνότητα αποκτούν μεγαλύτερες ταχύτητες, αλλά χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη επιβράδυνση.
- Όσο αυξάνει η ηλεκτρική ισχύς του δαυλού πλάσματος τόσο μεγαλύτερη γίνεται η ταχύτητα των αερίων του πλάσματος και επομένως των σωματιδίων.
- Η αύξηση της ταχύτητας εισαγωγής των σωματιδίων στη φλόγα (μέχρι κάποια τιμή) επιτρέπει την δεισδυσή τους στον πυρήνα του πλάσματος με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας τους.

Τα σωματίδια του υλικού, σε τηγμένη ή ημιτηγμένη κατάσταση, προσκρούουν στο υπόστρωμα και δημιουργούν σταδιακά το επίστρωμα. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι στερεοποίησης της προσπίπτουσας σταγόνας κατά την πρόσκρουσή της στο υπόστρωμα, οι οποίοι μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω τρεις περιπτώσεις:

- Όταν το ψεκαζόμενο σωματίδιο δεν είναι πλήρως τηγμένο, τότε το λεπτό και μερικώς τηγμένο εξωτερικό τμήμα του ρέει εκατέρωθεν, ενώ ο άτηκτος πυρήνας του σωματιδίου παραμορφώνεται αποκτώντας ψευδοημισφαιρικό σχήμα.
- Όταν το ψεκαζόμενο σωματίδιο είναι πλήρως τηγμένο τότε, κατά την πρόσκρουσή του στο υπόστρωμα, ρέει εκατέρωθεν σχηματίζοντας ένα δίσκο, η περιφέρεια του οποίου όμως δεν είναι κυκλική.

- Όταν ο αποτιθέμενος λεπτός δίσκος δεν έχει ικανοποιητική πρόσφυση με το υπόστρωμα (ή γενικότερα με την υποκείμενη επιφάνειά του), τότε το εξωτερικό τμήμα του δίσκου θραύεται ή αναδιπλώνεται από τις άκρες του προς το κέντρο.

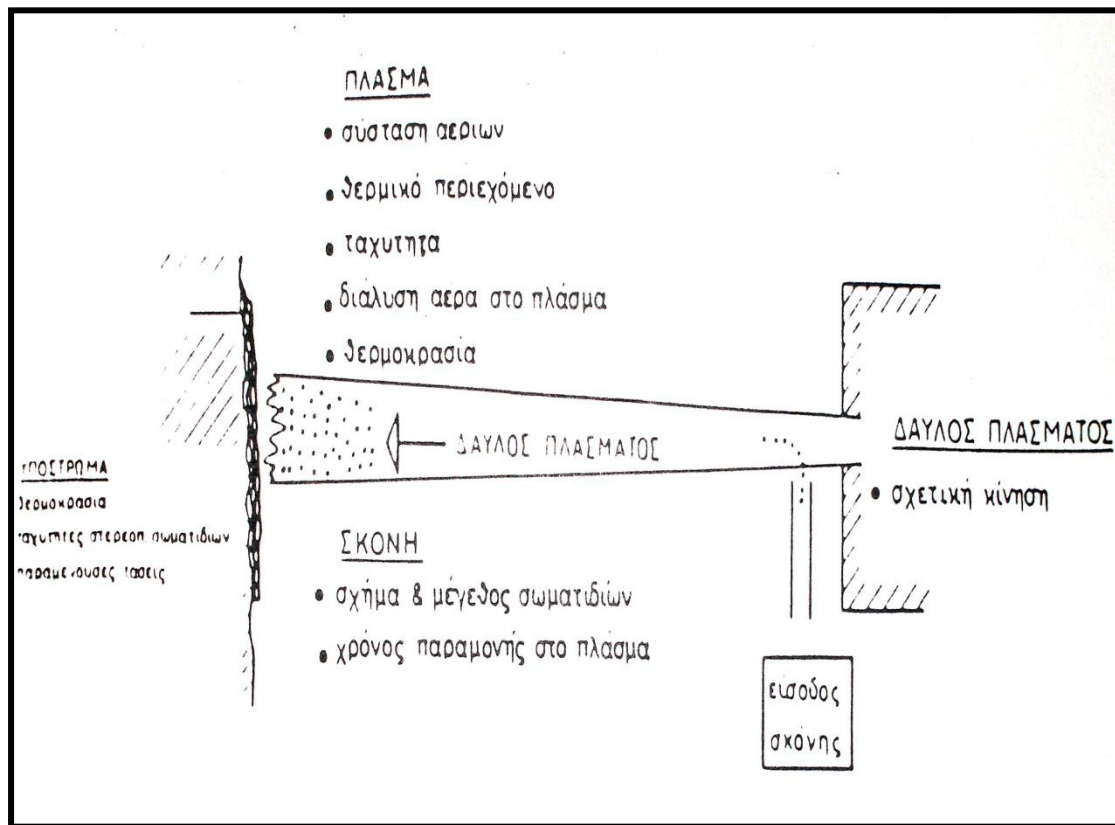
Σε όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις, στο προσπίπτον (τηγμένο ή μερικώς τηγμένο) σωματίδιο λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα δύο φαινόμενα: στερεοποίηση και ακτινική ροή υγρού. Στο παρακάτω σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η μορφή μιας σταγόνας κατά την πρόσκρουσή της στο υπόστρωμα.



**Σχήμα 3.3: Σχηματική απεικόνιση μιας σταγόνας σωματιδίου κατά την πρόσκρουσή της στο υπόστρωμα.**

Τέλος καθώς η φλόγα πλάσματος εξέρχεται από το δαυλό πλάσματος αλληλεπιδρά με τον περιβάλλοντα χώρο. Ο εγκλεισμός αερίων στη φλόγα πλάσματος μειώνει την θερμοκρασία της και επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του επιστρώματος, εφόσον δεν είναι αδρανή. Για παράδειγμα, ο ψεκασμός με χρήση πλάσματος σε ατμοσφαιρικές συνθήκες προκαλεί τον σχηματισμό οξειδίων και νιτριδίων στο επίστρωμα. Επιπλέον, είναι δυνατόν η επιφάνεια του υποστρώματος να οξειδωθεί εάν η θερμοκρασία του αυξηθεί πριν την απόθεση του επιστρώματος. Τα δύο αυτά φαινόμενα μειώνουν την πυκνότητα, την αντοχή και την πρόσφυση του επιστρώματος και μπορούν να

ελαχιστοποιηθούν εάν ο ψεκασμός γίνει σε αδρανή ατμόσφαιρα. Στο παρακάτω σχήμα 3.4 φαίνονται οι αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε ψεκασμό υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες.



**Σχήμα 3.4: Αλληλεπιδράσεις μεταξύ σωματιδίων και πλάσματος κατά τον ψεκασμό επιστρωμάτων σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.**

Στον ψεκασμό σε αδρανή ατμόσφαιρα η φλόγα πλάσματος γίνεται μακρύτερη με αποτέλεσμα τα σωματίδια να παραμένουν περισσότερο χρόνο στη φλόγα, οπότε η θέρμανσή τους είναι πιο ομοιόμορφη. Επειδή η φλόγα γίνεται μακρύτερη αυξάνει και η απόσταση δαυλού – υποστρώματος για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του υποστρώματος.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

#### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

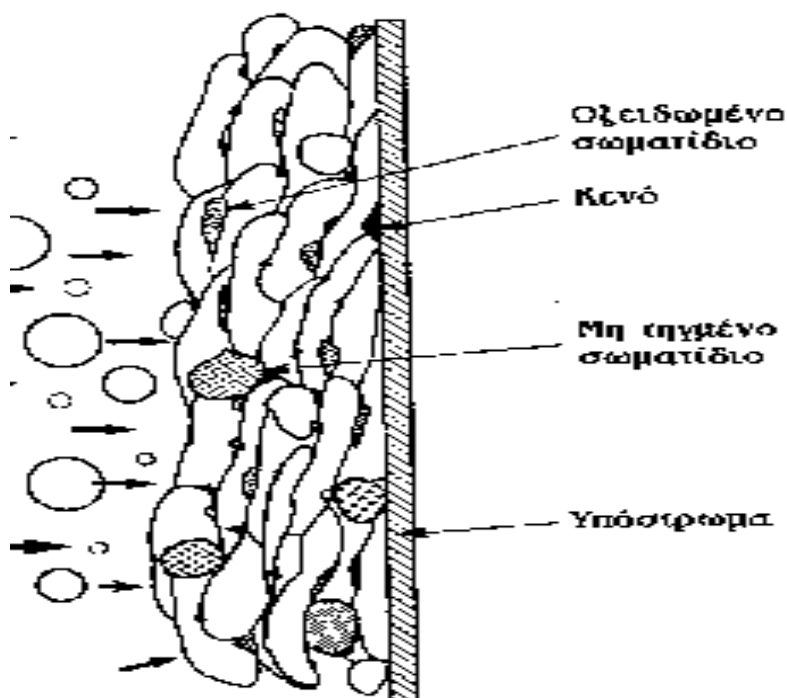
Οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στη φλόγα πλάσματος επιτρέπουν την τήξη οποιουδήποτε υλικού αρκεί αυτό να μην αποσυντίθεται ή να εξατμίζεται σημαντικά για μικρό χρονικό διάστημα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο ψεκασμός επιστρωμάτων με χρήση πλάσματος χαρακτηρίζεται από την τροφοδοσία σκόνης σε ηλεκτρικά σχηματισμένο πλάσμα, τήξη της σκόνης και εμφύσησή της με μεγάλη ταχύτητα σε μεταλλικό ή κεραμικό υπόστρωμα. Η ευκολία και ευελιξία της μεθόδου είχε σαν αποτέλεσμα την γρήγορη εξάπλωσή της. Παρόλα αυτά η ανάπτυξη της μεθόδου στηρίχτηκε κυρίως σε εμπειρικά δεδομένα και λιγότερο σε επιστημονική κατανόηση των φαινομένων που την χαρακτηρίζουν.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες από τις ιδιότητες των επιστρωμάτων ψεκασμού με χρήση πλάσματος.

#### 4.2 ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

Δεδομένου ότι τα επιστρώματα δομούνται από την πρόσκρουση σωματιδίων σε υπόστρωμα, συνάγεται ότι οι κυριότεροι παράγοντες που καθορίζουν την δομή αυτών των επιστρωμάτων είναι η θερμοκρασία, η ταχύτητα και η κατανομή μεγέθους των προσπιπτόντων σωματιδίων. Η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων προσδιορίζεται αποκλειστικά από την φύση του τροφοδοτούμενου υλικού, αλλά η ταχύτητα και η θερμοκρασία τους εξαρτώνται από την κατασκευή και τις λειτουργικές παραμέτρους του δαυλού πλάσματος, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Θεωρητικά, όλα τα σωματίδια που προσπίπτουν στο υπόστρωμα πρέπει να είναι τηγμένα. Άτηκτα σωματίδια ανακλώνται στο υπόστρωμα μειώνοντας την απόδοση της απόθεσης, ενώ τα

μερικώς τηγμένα σωματίδια εντοπίζονται στη δομή του επιστρώματος επηρεάζοντας τις ιδιότητές του. Όταν μια σφαιρική σταγόνα προσκρούει σε μια επίπεδη επιφάνεια με μεγάλη ταχύτητα τείνει να αποκτήσει τη μορφή δίσκου. Το λεπτό στρώμα των υγρών που ρέει ακτινικά στην σταγόνα που πέφτει γίνεται ασταθές και διασπάται σε μικρότερα σταγονίδια. Η θερμοκρασία του υποστρώματος είναι χαμηλότερη από το σημείο τήξης της σταγόνας και η μεταφορά θερμότητας προς το υπόστρωμα είναι τόσο ταχεία ώστε η εξάπλωση και ο κατακερματισμός της σταγόνας να διακόπτεται από την στερεοποίηση. Η κλασική προσέγγιση της μεταφοράς θερμότητας κατά την ψύξη ενός λεπτού επιστρώματος προβλέπει ότι στην διεπιφάνεια με το υπόστρωμα υπάρχει ένας αριθμός σημείων επαφής (contact points), τα οποία είναι κατανομημένα μέσα σε ένα λεπτό μη αγώγιμο υμένιο, ο σχηματισμός του οποίου οφείλεται σε εγκλωβισμένο αέρα. Κατά συνέπεια η μικροδομή των επιστρωμάτων πλάσματος επηρεάζεται από δύο σημαντικούς παράγοντες: την φύση των διεπιφανειών ανάμεσα σε διαδοχικά στρώματα του επιστρώματος και την εσωτερική δομή κάθε ενός από τα διάφορα στρώματα του επιστρώματος, όπως σχηματίζεται εξαιτίας της ταχείας στερεοποίησης. Παρακάτω στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η δομή ενός επιστρώματος πλάσματος, από όπου φαίνεται η στρωματοειδής φύση του.



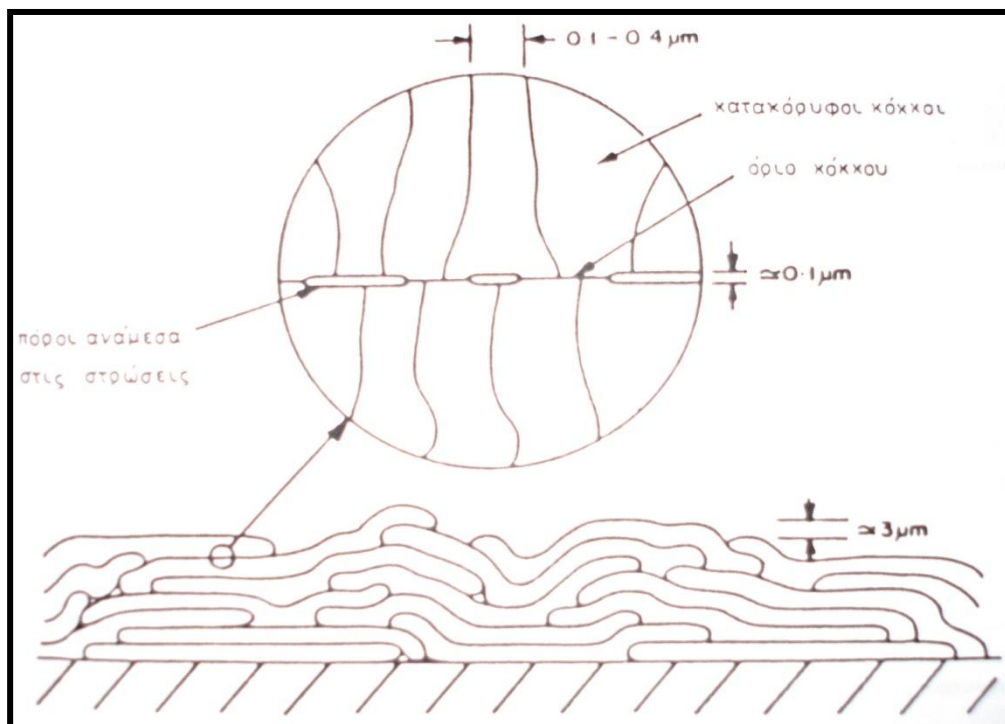
Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση της δομής ενός υποστρώματος πλάσματος.

Κάθε μία από τις στρώσεις του επιστρώματος στερεοποιείται ανεξάρτητα από τις γειτονικές της, έτσι ώστε η εσωτερική δομή της να μπορεί να εξετασθεί ξεχωριστά. Η κρυστάλλωση ενός υγρού λαμβάνει χώρα, ως γνωστόν, με πυρήνωση και ανάπτυξη, αλλά εάν ο ρυθμός πυρήνωσης κατά το χρονικό διάστημα ανάμεσα στο σημείο τήξης και την θερμοκρασία υάλινης μετάπτωσης είναι τόσο μικρός ώστε να μην σχηματίζονται πυρήνες, τότε το υγρό σχηματίζει άμορφη δομή ή γυαλί. Κατά συνέπεια, το μέγεθος των κόκκων και η μορφολογία κάθε στρώσης εξαρτώνται από τους ρυθμούς πυρήνωσης και ανάπτυξης κρυστάλλων από το τήγμα. Γενικά, υψηλοί ρυθμοί απόψυξης προκαλούν μεγάλους ρυθμούς πυρήνωσης, οπότε οι στρώσεις του επιστρώματος είναι πολυκρυσταλλικές με μεγέθη κόκκων σχετικά μικρά. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ταχεία πυρήνωση λαμβάνει χώρα στις ψυχρότερες επιφάνειες της πεπλατυσμένης σταγόνας, ενώ οι κόκκοι αναπτύσσονται σε κατεύθυνση αντίθετη προς τη μεταφορά θερμότητας, σχηματίζοντας βασαλική δομή. Εάν ο ρυθμός ανάπτυξης των κόκκων είναι σχετικά μικρός τότε, καθώς η υγρή σταγόνα υποψύχεται, συμβαίνει περαιτέρω πυρήνωση με αποτέλεσμα το σχηματισμό λεπτής ισοαξονικής δομής.

Ένα μοντέλο για την ανάπτυξη κόκκων σε επιστρώματα πλάσματος βασίζεται στις παρατηρήσεις των Safai και Herman. Οι ερευνητές αυτοί παρατήρησαν ακτινική ανάπτυξη της βασαλικής ζώνης στις λεπτές εξωτερικές στρώσεις επιστρώματος αλουμινίου παρά την ανάπτυξη κρυστάλλων κάθετα προς το υπόστρωμα. Απέδωσαν δε αυτή την ακτινική ανάπτυξη στο γεγονός ότι κάθε προσπίπτουσα πεπλατυσμένη σταγόνα δεν βρισκόταν σε πλήρη επαφή με το υπόστρωμα με αποτέλεσμα η ροή θερμότητας να γίνεται ακτινικά προς το κέντρο κάθε σταγόνας.

### 4.3 ΠΟΡΩΔΕΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

Η δημιουργία των επιστρωμάτων με τον ψεκασμό διακεκριμένων σωματιδίων συνεπάγεται την ύπαρξη κενών στο εσωτερικό τους, που μπορεί να είναι είτε μεμονωμένοι πόροι είτε ρωγμές. Το πολύ μικρό χρονικό διάστημα που απαιτείται για την στερεοποίηση της κάθε σταγόνας έχει σαν αποτέλεσμα το υλικό αυτής να μην προλαβαίνει να διαχυθεί στο περιβάλλον και να καλύψει τα κενά που υπάρχουν γύρω του. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ταχύτητα με την οποία προσκρούει η κάθε σταγόνα στην επιφάνεια αλλά κυρίως η θερμοκρασία αυτής. Το τελευταίο στοιχείο προσδιορίζει ιδιότητες όπως το ιξώδες και την η επιφανειακή της τάση. Η ρευστότητα αλλά και η τάση με την οποία συγκρατείται στο εσωτερικό της καθορίζουν τον βαθμό στον οποίο θα προλάβει να «διαβάσει» την μορφολογία της επιφάνειας στην οποία προσκρούει πληρώνοντας τις ανωμαλίες της. Έχει υπολογιστεί ότι η πραγματική επιφάνεια επαφής μεταξύ των στρωμάτων της επικάλυψης και του υποστρώματος ανέρχεται στο 30% της διαθέσιμης επιφάνειας στα όρια των κόκκων, ενώ το μέγεθος των πόρων κυμαίνεται μεταξύ 10 ως 100nm.



Σχήμα 4.2: Αναπαράσταση της δομής επιστρώματος πλάσματος όπου φαίνονται οι μικροπόροι.

Η συνήθης μορφή των πόρων είναι δισκοειδής με διάταξη παράλληλη προς την επιφάνεια του υποστρώματος που οφείλονται στην ανεπαρκή κάλυψη των κενών θέσεων που σχηματίζονται κατά την στερεοποίηση των σωματιδίων της προηγούμενης στρώσης ή γύρω από σωματίδια που δεν έχουν τηχθεί πλήρως. Διατάσσονται όμως και κάθετα στο επίπεδο των στρώσεων με την μορφή ρωγμών, ιδιαίτερα στη περίπτωση κεραμικών επικαλύψεων, λόγω θερμικών τάσεων. Διακρίνονται δύο μορφές πόρων. Αυτών με μέγεθος 3-10 $\mu\text{m}$  που σχετίζονται με ελαττώματα στην δομή ανεπαρκούς κάλυψης των κενών μεταξύ των στερεοποιημένων σταγονιδίων και αυτών με μέγεθος της τάξεως του 0.1 $\mu\text{m}$  που αποτελούν ένα «έμφυτο» χαρακτηριστικό των επικαλύψεων με ψεκασμό. Σε αρκετές περιπτώσεις έχουμε την συνένωση των πόρων σε δίκτυο, γεγονός που προσδίδει μια κυψελοειδή μορφή, κυρίως στα κεραμικά, και που υποβαθμίζει σχετικά τις ιδιότητες των επικαλύψεων.

Η ύπαρξη πόρων σε μια επικάλυψη μειώνει οπωσδήποτε την πρόσφυση αυτής αλλά και την συνοχή μεταξύ των επιπέδων της. Τα σχηματιζόμενα κενά μπορούν να αποτελέσουν σημεία γέννησης ρωγμών σε συνθήκες κόπωσης. Το μέτρο ελαστικότητας μιας επικάλυψης είναι αρκετά μικρότερο από αυτό του ίδιου του υλικού σε συμπαγή μορφή. Επιπλέον, ευνοούν τον εγκλεισμό αερίων, ανάλογα με το περιβάλλον απόθεσης. Ιδιαίτερα στην περίπτωση συνένωσης των πόρων ευνοείται η διείσδυση των διαβρωτικών στοιχείων (όπως είναι το οξυγόνο) του περιβάλλοντος λειτουργίας του εξαρτήματος, που σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φτάσουν ως το υπόστρωμα. Δημιουργούνται επομένως ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη οξειδίων στο εσωτερικό της επικάλυψης που μπορούν να οδηγήσουν στην σταδιακή αποφλοίωσή τους. Επομένως, υψηλό ποσοστό πορώδους συνεπάγεται μείωση της πρόσφυσης του επιστρώματος και της παρεχόμενης προστασίας έναντι τριβής-φθοράς και διαβρωτικού περιβάλλοντος.

Ωστόσο η ύπαρξη πορώδους σε χαμηλά επίπεδα καθίσταται αναγκαία, και σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή σε φθορά εκτιμάται ότι ένα ποσοστό της τάξεως του 5% επιδρά θετικά στην συμπεριφορά του συστήματος. Αυτό ερμηνεύεται από την ιδιότητα των πόρων να κατακρατούν, υπό συνθήκες λιπάνσεως, ένα μέρος του λιπαντικού μειώνοντας τις τριβές, όπως συμβαίνει με

τα οξειδία του αλουμινίου και του τιτανίου που χρησιμοποιούνται σε εκτριβόμενες επιφάνειες κινητήρων αυτοκινήτων, ενώ η προσρόφηση οξυγόνου μπορεί να αντιμετωπιστεί με επάλειψη με εποξικές ρητίνες. Αυτό είναι σημαντικό για τις επικαλύψεις που πραγματοποιούνται από ψαθυρά υλικά, όπως τα οξειδία, που επιδέχονται μικρές ελαστικές παραμορφώσεις και έχουμε εκτόνωση των τάσεων με την δημιουργία ρωγμών. Τα δημιουργούμενα κενά συντελούν επίσης και στην εκτόνωση των εσωτερικών παραμενουσών τάσεων που οφείλονται στους διαφορετικούς θερμικούς συντελεστές και στην μηχανική προετοιμασία των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Η επίτευξη του επιθυμητού ποσοστού πορώδους είναι δυνατή μέσα από τον έλεγχο των συνθηκών του ψεκασμού, όπως το περιβάλλον, η γωνία ψεκασμού αλλά και των υλικών που χρησιμοποιούνται καθώς και στοιχείων όπως το μέγεθος, το σχήμα, η θερμοκρασία τους και η ταχύτητα με την οποία προσκρούουν στο υπόστρωμα.

#### **4.4 ΠΡΟΣΦΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ**

Μια από τις σπουδαιότερες ιδιότητες των επιστρωμάτων πλάσματος είναι η πρόσφυσή τους με το υπόστρωμα, ωστόσο δεν έχουν πλήρως ερευνηθεί οι παράμετροι που καθορίζουν τους μηχανισμούς πρόσφυσης. Η πρόσφυση του επιστρώματος με το υπόστρωμα είναι κυρίως μηχανική, δηλαδή το επίστρωμα αγκυρώνεται στην τραχεία επιφάνεια του υποστρώματος. Η μηχανική πρόσφυση ενισχύεται περαιτέρω σε ορισμένες περιπτώσεις και με χημική αλληλεπίδραση μεταξύ επιστρώματος και υποστρώματος. Η πρόσφυση ενός ψεκαζόμενου σωματιδίου με το υπόστρωμα ή με κάποιο άλλο σωματίδιο δεν λαμβάνει χώρα σε όλη την επιφάνειά του σωματιδίου αλλά μόνο σε ορισμένες "ενεργές" ζώνες. Οι ενεργές αυτές ζώνες χωρίζονται μεταξύ τους από πόρους ή οξειδία. Στις ζώνες αυτές λαμβάνουν χώρα διάχυση και χημικές αντιδράσεις μεταξύ του υποστρώματος και του επιστρώματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία επαφής τόσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των ζωνών επαφής και τόσο μεγαλύτερο είναι το βάθος διάχυσης. Το μέγεθος και ο αριθμός

αυτών των ενεργών ζωνών επαφής εξαρτώνται κυρίως από τη θερμοκρασία επαφής ανάμεσα στα ψεκασμένα σωματίδια και το υπόστρωμα. Όσο υψηλότερο είναι το σημείο τήξης του ψεκαζόμενου υλικού τόσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία επαφής. Ο αριθμός και το μέγεθος των ζωνών επαφής καθώς και το βάθος διάχυσης εξαρτώνται από το χρόνο της θερμικής επίδρασης του υποστρώματος από τα ψεκαζόμενα σωματίδια. Παχιά σωματίδια έχουν μεγαλύτερους χρόνους στερεοποίησης και μεγαλύτερα μεγέθη ζωνών επαφής. Η θερμοκρασία επαφής είναι ανεξάρτητη του πάχους των ψεκαζόμενων σωματιδίων και εξαρτάται μόνο από τη φύση του υποστρώματος και του ψεκαζόμενου υλικού.

Έτσι, για κεραμικά επιστρώματα οι χημικές μεταλλουργικές αλληλεπιδράσεις με το υπόστρωμα οδηγούν στο σχηματισμό ζωνών οξειδίων, τα οποία μπορεί να είναι μικτά οξειδία (οξειδία υποστρώματος-επιστρώματος) ή νέα οξειδία. Όσο αυξάνει η θερμοκρασία επαφής τόσο αυξάνει ο αριθμός και το μέγεθος των ζωνών επαφής και βελτιώνεται η πρόσφυση των κεραμικών επιστρωμάτων. Κατά συνέπεια, η πρόσφυση των κεραμικών επιστρωμάτων βελτιώνεται ουσιαστικά με αύξηση της θερμοκρασίας του υποστρώματος.

## **4.5 ΟΞΕΙΔΙΑ**

Πρόκειται για τα οξειδία που σχηματίζονται στην επιφάνεια των ψεκαζόμενων σωματιδίων, ανάλογα με το περιβάλλον απόθεσης λόγω αλληλεπίδρασης με αυτό, ή στην επιφάνεια του υποστρώματος στο χρονικό διάστημα μεταξύ της επιφανειακής κατεργασίας και του ψεκασμού. Κατά την διάρκεια λειτουργίας ενός εξαρτήματος αναπτύσσονται οξειδία στην επιφάνειά του ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας, όπως υψηλή θερμοκρασία και οξειδωτικό περιβάλλον.

Τα οξειδία που σχηματίζονται στην επιφάνεια των σταγονιδίων εγκλωβίζονται στην επικάλυψη, ενώ θρυμματίζονται από τις προεξοχές της επιφάνειας του υποστρώματος. Παράλληλα, οι θύλακες αέρα που δημιουργούνται στα κενά και το δίκτυο του πορώδους ευνοούν την περαιτέρω οξειδωση των στοιχείων τόσο της επικάλυψης όσο και του υποστρώματος. Άτομα οξυγόνου διεισδύουν μέσα

στην επικάλυψη και διαχέονται στα μεταλλικά στρώματα αυτής. Τις περισσότερες φορές έχουμε τον σχηματισμό ενός στρώματος οξειδίου στην επιφάνεια της επικάλυψης, η σύσταση του οποίου εξαρτάται από την σύνθεση του κράματος πάνω στο οποίο αναπτύσσεται. Η συνεχής διάχυση όμως, που συνεπάγεται αντικατάσταση των ατόμων του μετάλλου στο πλέγμα του από άτομα οξυγόνου, οδηγεί στην αποδυνάμωση της σύνδεσης επικάλυψης-υποστρώματος. Εντονότερο είναι όμως το πρόβλημα στην περίπτωση χρήσης συνδετικών στρωμάτων.

Η δημιουργία πιο ψαθυρών φάσεων έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών κάτω από την επίδραση μηχανικής καταπόνησης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στην αποκόλληση τμημάτων της επικάλυψης. Οι σχηματιζόμενες σκληρές φάσεις έχουν διαφορετικούς θερμικούς συντελεστές από το υπόλοιπο υλικό με αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων σε περιπτώσεις θερμικών φορτίσεων. Επιπλέον έχουμε διόγκωση λόγω αντίδρασης ατόμων οξυγόνου με άτομα του μετάλλου, ανάπτυξη τάσεων αλλά κυρίως σπάσιμο των στρωμάτων του οξειδίου που οδηγεί σε αύξηση του πορώδους. Στην περίπτωση μάλιστα που το φιλμ του σχηματιζόμενου οξειδίου είναι επιφανειακό, αυτό υφίσταται επιπλέον μηχανική διάβρωση, ενώ με την θραύση του επιδεινώνεται το φαινόμενο της διάχυσης οξυγόνου και έχουμε παραγωγή αποβλήτων που συνεισφέρουν στον μηχανισμό της εκτριβής.

Η παρουσία όμως των οξειδίων μπορεί να έχει και θετικά αποτελέσματα. Όσον αφορά την δομή, η διασπορά των θραυσμάτων των οξειδίων που σχηματίζονται στην επιφάνεια των σταγονιδίων κατά το ψεκασμό, συνεισφέρει στην αύξηση της σκληρότητας της επικάλυψης, καθώς αυτά χαρακτηρίζονται από καλές θερμικές και μηχανικές ιδιότητες. Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις δρουν και ως αυτολιπαινόμενες φάσεις.



## **4.6 ΑΤΗΚΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ**

Πρόκειται για εκείνους τους κόκκους της σκόνης που δεν έχουν τηχθεί πλήρως κατά την διάρκεια του ψεκασμού και βρίσκονται αυτούσια μέσα στα στρώματα της επικάλυψης. Η αιτία του φαινομένου μπορεί να είναι το ίδιο το μέγεθος ορισμένων κόκκων, που επειδή είναι μεγαλύτεροι από το σύνολο της σκόνης, δεν πρόλαβαν να τηχθούν κατά την παραμονή τους μέσα στη φλόγα ψεκασμού υπερηχητικής φλόγας.

Τα σωματίδια αυτά βρίσκονται ακέραια μέσα στην δομή της επικάλυψης προξενώντας ανομοιομορφία ως προς την δομή και το μέγεθος. Συνέπεια αυτού είναι η δημιουργία ασυνεχειών, καθώς ευνοείται η δημιουργία κενών μεταξύ αυτών και των σταγονιδίων που στερεοποιούνται πλησίον τους, από τις οποίες ενδέχεται να έχουμε γένεση ρωγμών κατά την καταπόνηση των εξαρτημάτων. Επίσης, καθώς το σύστημα ψύχεται μέχρι την θερμοκρασία του περιβάλλοντος έχουμε την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων και την υποβάθμιση των ιδιοτήτων της επικάλυψης. Μειωμένη είναι επίσης και η πρόσφυση που παρουσιάζουν τα σωματίδια αυτά με το υλικό που τα περιβάλλει.

Το ποσοστό των άτηκτων σωματιδίων που παρατηρούνται σε μια επιφάνεια μπορεί να ελεγχθεί και να περιοριστεί χρησιμοποιώντας ομοιόμορφη σκόνη και δαυλό κατάλληλης ισχύος που να παρέχει την απαιτούμενη για τη τήξη των κόκκων θερμότητα. Σημαντική είναι η σωστή ρύθμιση της πίεσης και της παροχής του αερίου-φορέα όπως και ο προσανατολισμός των αγωγών διοχέτευσης της σκόνης στη φλόγα.

## **4.7 ΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΑ ΨΕΚΑΖΟΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ**

Είναι δυνατόν να συμβούν χημικές μεταβολές στα σωματίδια μέσα στη φλόγα πλάσματος εξαιτίας αντιδράσεων με τα αέρια του πλάσματος. Οι χημικές μεταβολές συνίστανται σε διάχυση του αερίου του πλάσματος στα

σωματίδια και με αντίστροφη διάχυση των αερίων προϊόντων. Η διάχυση συμβαίνει σε αργούς ρυθμούς ( $10^{-3}$  -  $10^{-1}$  sec) σε σύγκριση με το χρόνο τήξης ( $10^{-4}$  -  $10^{-3}$  sec), ειδικά όταν χρησιμοποιούνται υδρογόνο ή άζωτο ως αέρια του πλάσματος. Η οξείδωση αποτελεί κυρίως πρόβλημα για μέταλλα, όπως το W, Mo και Ti, όπου παρατηρούνται οξειδία στη δομή των επιστρωμάτων.

## 4.8 ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Οι εξαιρετικά ταχείς ρυθμοί απόψυξης από την υγρή κατάσταση είναι χαρακτηριστικοί για τα επιστρώματα πλάσματος και οδηγούν πολλές φορές στον σχηματισμό μετασταθών φάσεων. Τυπικό παράδειγμα είναι η  $Al_2O_3$  όπου κατά τον ψεκασμό της λαμβάνει χώρα μετασχηματισμός της  $\alpha-Al_2O_3$  σε  $\gamma-Al_2O_3$ .

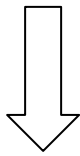
Σε ορισμένα επιστρώματα παρατηρείται συγκεκριμένος προσανατολισμός των κρυστάλλων σχετικά προς την επιφάνεια του υποστρώματος. Αυτό παρατηρείται σε επιστρώματα  $Cr_2O_3$ . Δεδομένου ότι ο συντελεστής τριβής είναι μικρότερος στα πυκνά επίπεδα του κρυστάλλου, συμπεραίνεται ότι τα επιστρώματα  $Cr_2O_3$  δομούνται έτσι ώστε να δίνουν χαμηλό συντελεστή τριβής. Κατά συνέπεια η χρωμία ( $Cr_2O_3$ ) είναι κατάλληλη για τριβές. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν και άλλα υλικά, όπως το  $W_2C$ , το  $CoMo$  και το  $Co_3W$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

#### 1) ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ

##### ΜΕΘΟΔΟΙ



- ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ
- ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΦΥΣΗΣ
- ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ
- ΔΟΚΙΜΗ ΧΑΡΑΞΗΣ
- ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ
- ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ
- ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ
- ΔΟΚΙΜΗ ΕΚΤΡΙΒΗΣ
- ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΟΞΕΙΔΩΣΗ
- ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΕΝΤΟΝΟ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

#### 2) ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ

##### ΜΕΘΟΔΟΙ



- ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ
- ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ LASER
- ΥΠΕΡΗΧΟΙ
- ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ

Προτού οποιοδήποτε εξάρτημα τεθεί σε λειτουργία πρέπει να διαπιστωθεί και να πιστοποιηθεί το κατά πόσο ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις και πληρεί τις προδιαγραφές στο χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο πρόκειται να

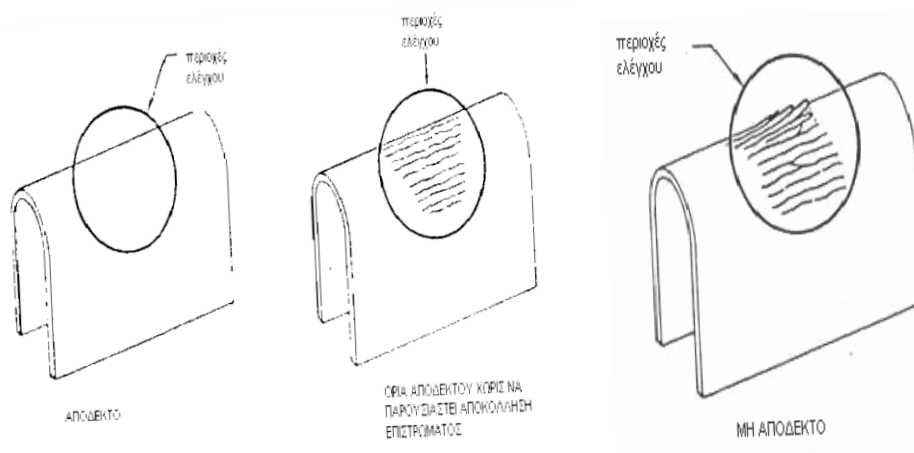
χρησιμοποιηθεί. Πρωταρχικός σκοπός είναι η εξασφάλιση της ασφάλειας του προσωπικού που σχετίζεται με αυτό και ο αποκλεισμός ενδεχόμενης αστοχίας, πάντα βέβαια με το μικρότερο δυνατό κόστος. Για τον σκοπό αυτόν, πέρα από τον οπτικό έλεγχο που παρέχει μια πρώτη εκτίμηση για την ομοιομορφία της επικάλυψης, την ύπαρξη επιφανειακών ρωγματώσεων και την ποιότητα της πρόσφυσης, έχει αναπτυχθεί μια σειρά μεθόδων για τον ποιοτικό έλεγχο των επικαλύψεων.

## 5.1 ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

Οι μέθοδοι αυτοί έγκειται στην μελέτη δοκιμών και όχι των ίδιων των εξαρτημάτων. Επομένως η επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν και των διαστάσεών τους, καθώς και η διεξαγωγή των πειραμάτων πρέπει να παρομοιάζει τα πραγματικά εξαρτήματα και τις συνθήκες λειτουργίας τους.

### 5.1.1 ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ(BEND TEST)

Τα χρησιμοποιούμενα δοκίμια είναι σχήματος ορθογωνίου παραλληλογράμμου, οι διαστάσεις των οποίων εξαρτώνται από τον κάθε κατασκευαστή. Για την πραγματοποίηση της δοκιμής απαιτούνται δύο δοκίμια. Το υλικό, όπως και οι παράμετροι του ψεκασμού είναι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιούνται κατά την επικάλυψη του εξαρτήματος.



**Σχήμα 5.1: Κριτήριο έγκρισης ή απόρριψης ενός επιστρώματος μετά από δοκιμή κάμψης.**

Αυτής της δοκιμής προηγείται οπτικός έλεγχος (υπό μεγέθυνση) για να διαπιστωθούν τυχόν επιφανειακές ατέλειες, ρωγματώσεις και πόροι. Κατόπιν το δοκίμιο κάμπτεται κατά 180°, ώστε ο βραχίονας της συσκευής να εφάπτεται της μη επικαλυμμένης πλευράς του δοκιμίου. Κατά την δοκιμή το επίστρωμα πρέπει να ακολουθεί την παραμόρφωση του μετάλλου. Μετά το πέρας της δοκιμής ελέγχεται κατά πόσο η επικάλυψη ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του κατασκευαστή. Κατά γενικό κανόνα στην περιοχή της κάμψεως είναι αποδεκτές οι ρωγματώσεις όχι όμως και η αποφλοίωση ή απολέπιση του επιστρώματος.

### **5.1.2 ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΦΥΣΗΣ(BOND TEST)**

Στη δοκιμή αυτή χρησιμοποιούνται κυλινδρικά δοκίμια. Το ένα μέρος του δοκιμίου επικαλύπτεται με το πλάσμα, ενώ το άλλο τραχύνεται με αμμοβολή. Ανάλογα με τον κατασκευαστή μπορεί να έχουμε δύο δοκίμια. Το ένα επικαλύπτεται, το άλλο τραχύνεται και κατόπιν ενώνονται και ευθυγραμμίζονται μεταξύ τους. Το δοκίμιο κολλάει με εποξειδική κόλλα και η κόλλα αποκτά τη μέγιστη αντοχή της μετά από θέρμανση σε κλίβανο (curing) και στη συνέχεια τοποθετείται σε μια μηχανή εφελκυσμού. Τα δοκίμια εφελκύνονται και μετριέται η δύναμη στην οποία επήλθε αστοχία, υπολογίζοντας την αντοχή σε πρόσφυση ως το πηλίκο της δύναμης αυτής προς την επιφάνεια του κυλίνδρου.

### **5.1.3 ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ**

Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται είναι από το ίδιο υλικό με εκείνο του εξαρτήματος και έχουν σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου. Χρησιμοποιούνται τρία δοκίμια, εκ των οποίων επικαλύπτονται τα δύο σε ένα μέρος της μιας πλευράς τους. Το τρίτο δοκίμιο τραχύνεται και συνδέεται με τα άλλα με χρήση εποξικής κόλλας εφαρμόζοντας θέρμανση και πίεση. Στη συνέχεια το σύστημα εφελκύεται με τρόπο ώστε να εξασφαλισθεί η ευθυγράμμισή του και υπολογίζεται η αντοχή του σε διάτμηση ως ο λόγος της

δύναμης, όπου παρατηρείται αστοχία, προς την επιφάνεια που είναι κολλημένη.

#### **5.1.4 ΔΟΚΙΜΗ ΧΑΡΑΞΗΣ (SCRATCH TESTING)**

Το προς εξέταση δοκίμιο πρέπει να είναι επίπεδο ενώ οι διαστάσεις του καθορίζονται από τον κάθε κατασκευαστή. Στην επιφάνειά του αποτίθενται ομοιόμορφα λευκή σκόνη ώστε να εξασφαλίζεται αντίθεση μεταξύ αυτής και του αποτυπώματος του χαρακτηριστικού εργαλείου.

Για την χάραξη χρησιμοποιείται ειδική συσκευή όπου οι διαστάσεις και οι παράμετροι της χάραξης εξαρτώνται από τον κατασκευαστή. Πραγματοποιούνται τρεις χαράξεις παράλληλες μεταξύ τους, εκ των οποίων μετρίεται το πλάτος. Από τις μετρήσεις υπολογίζεται ο μέσος όρος και η τιμή αυτή ορίζεται ως αριθμός Scratch Hardness Hoffman.

#### **5.1.5 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ**

Αφού έχει πραγματοποιηθεί η απόθεση του επιστρώματος, όπως και στις προηγούμενες μεθόδους, τα προς εξέταση δοκίμια κόβονται εγκάρσια. Ακολουθεί λείανση της τομής, με λειαντικό χαρτί του οποίου η τραχύτητα συνεχώς ελαττώνεται, και η μηχανική ή ηλεκτρολυτική στίλβωση της επιφάνειας της αποκαλύπτεται. Με την προσβολή αυτής με κατάλληλα αντιδραστήρια, που έχουν σαν σκοπό να αποκαλύψουν τις ιδιαιτερότητες της δομής, ολοκληρώνεται η προετοιμασία των δοκιμών με την παρατήρησή τους από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Ο έλεγχος αυτός αποβλέπει στον υπολογισμό του ποσοστού κενών, οξειδίων και άτηκτων σωματιδίων στο επίστρωμα και στην διεπιφάνειά του με το υπόστρωμα. Το κατά πόσο μία επικάλυψη είναι αποδεκτή ή όχι προκύπτει από σύγκριση των φωτογραφιών του μικροσκοπίου με φωτογραφίες που θεωρούνται ως πρότυπα και παρέχονται από τους κατασκευαστές.

Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει με δύο βασικές μεθόδους :

1. Μηχανική στίλβωση, κατά την οποία το μέταλλο απομακρύνεται με τριβή.
2. Ηλεκτροχημική στίλβωση κατά την οποία το μέταλλο απομακρύνεται υπό την επίδραση χημικών ουσιών.

### **5.1.6 ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ**

Με την δοκιμή αυτή μετριέται η αντίσταση του επιστρώματος στην κάθετη διείσδυση σε αυτό μιας ειδικής κεφαλής , υπό την επίδραση κάποιου φορτίου. Η συσκευή που πραγματοποιεί την δοκιμή ονομάζεται σκληρόμετρο. Συνήθως χρησιμοποιείται η κλίμακα σκληρότητας κατά Rockwell. Η χρησιμότητά της έγκειται στην μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων του ψεκασμού στην τελική δομή του επιστρώματος.

### **5.1.7 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ**

Με την δοκιμή αυτή μετριέται η σκληρότητα μεμονωμένων σωματιδίων και φάσεων στο υπόστρωμα. Πραγματοποιείται με μικροσκληρόμετρο που είναι προσαρτημένο στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο. Η χρησιμότητά της έγκειται στην πρόβλεψη αντοχής σε φθορά και την μελέτη της δομής του επιστρώματος.

### **5.1.8 ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΟΞΕΙΔΩΣΗ**

Το επίστρωμα εκτίθεται σε υψηλή θερμοκρασία σε ατμοσφαιρικό αέρα και μετριέται η αύξηση του βάρους του συναρτήσει του χρόνου. Η δοκιμή αυτή παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ύπαρξη συνεννοουμένων πόρων στο εσωτερικό του επιστρώματος και την ικανότητά του να προστατεύσει το υπόστρωμα από οξείδωση.

### **5.1.9 ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΕΝΤΟΝΟ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

Με την δοκιμή αυτή μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργία των επιστρωμάτων ως θερμικοί μονωτές. Μεγέθη που υπολογίζονται είναι η βάθμωση της θερμοκρασίας κατά το πάχος της επικάλυψης, η θερμική διάρκεια όπου αναπτύσσεται θερμότητα στο σύστημα μέχρι την αστοχία του και η αντοχή σε επιβολή κυκλικών θερμικών τάσεων με εναλλασσόμενη θέρμανση και ψύξη του συστήματος.

## **5.2 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ**

Τα πλεονεκτήματα αυτής της κατηγορίας μεθόδων στηρίζεται στο γεγονός ότι είναι δυνατός ο έλεγχος του ίδιου εξαρτήματος τόσο κατά την παραγωγή του όσο και κατά την διάρκεια της λειτουργίας του. Οι επιμέρους τεχνικές που εφαρμόζονται δεν έχουν καμία επίδραση στις ιδιότητες των υλικών και στην συμπεριφορά τους στο διάστημα λειτουργίας τους.

### **5.2.1 ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ**

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται για την ανίχνευση ρωγματώσεων και πόρων στο εσωτερικό των επιστρωμάτων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της είναι η θέρμανση του δοκιμίου ή του εξαρτήματος σε μία μέτρια θερμοκρασία. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται είτε όταν έχουμε την μέγιστη θερμοκρασία (στατική μέθοδος εξέτασης) είτε κατά την διάρκεια της θέρμανσης και της απόψυξης (δυναμική μέθοδος).

Οι ανομοιογένειες στην δομή της επικάλυψης παρεμποδίζουν την διάδοση της θερμότητας, με αποτέλεσμα διαφοροποιήσεις στην κατανομή των θερμοκρασιών. Επειδή οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις είναι της τάξης των 0,2°C επιβάλλεται ομοιόμορφη θέρμανση σε όλη την έκταση του προς εξέταση εξαρτήματος. Το πεδίο των θερμοκρασιών καταγράφεται από μία θερμοκάμερα και προβάλλεται σε οθόνη. Τυχόν διαταραχές του πεδίου αποτελούν σημεία ύπαρξης ατελειών.



### 5.2.2 ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ LASER

Στην μέθοδο αυτή το προς εξέταση αντικείμενο φωτίζεται από ακτινοβολία Laser και παράγεται το ολόγραμμά του. Η ύπαρξη επιφανειακών κυρίως ατελειών έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία διαταραχών στο ολόγραμμα. Υπάρχουν τρεις επιμέρους τεχνικές για τον έλεγχο των επιφανειών :

- **Ολογραφία παραμορφώσεως:** Χρησιμοποιείται για την παρατήρηση επιφανειακών παραμορφώσεων και κυρίως για ανίχνευση αποκολλήσεων της επικάλυψης.
- **Ολογραφία περιγραμμάτων:** Επιτρέπει την μέτρηση επιφανειακών προφίλ και τον προσδιορισμό της ομοιομορφίας του πάχους των επικαλύψεων.
- **Ολογραφία δονήσεων:** Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με υπέρηχους για την ανίχνευση ατελειών στη δομή.

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι ακόμα και επιφάνειες πολύπλοκης γεωμετρίας μπορούν να επιθεωρηθούν, χωρίς οι μετρήσεις να επηρεάζονται από την επιφανειακή τραχύτητα.

### 5.2.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ

Η αρχή της μεθόδου στηρίζεται στην διάθλαση και ανάκλαση των υπερήχων που εκπέμπονται προς ένα αντικείμενο, όταν στο εσωτερικό του υπάρχουν ασυνέχειες ως προς τη δομή. Οι υπέρηχοι έχουν την ιδιότητα να μην διαδίδονται στο κενό, γεγονός που καθιστά δυνατή την ανίχνευση πόρων και ρωγματώσεων στο εσωτερικό των επικαλύψεων. Επιπλέον η ύπαρξη σωματιδίων διαφορετικής φύσης ή φάσεως από το υλικό της επικάλυψης, όπως οξειδία ή άτηκτα σωματίδια, συνεπάγεται την διάθλαση και την μεταβολή της ταχύτητας των υπερήχων.

Η απλούστερη τεχνική ελέγχου με αυτή τη μέθοδο είναι η εκπομπή υπερήχων από την μία πλευρά ενός σώματος και η καταγραφή του ήχου τους

από την αντίθετη πλευρά. Η ανίχνευση των ατελειών εξαρτάται από την ευαισθησία των οργάνων που χρησιμοποιούνται, που είναι συνάρτηση της συχνότητας των υπερήχων, και από την σωστή ρύθμισή τους με βάση κάποια πρότυπα δοκίμια.

#### **5.2.4 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ**

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην εκπομπή ακουστικών κυμάτων στο επίστρωμα. Τα κύματα αυτά διεισδύουν στο εσωτερικό της επικάλυψης και διαθλώνται από τις υπάρχουσες ατέλειες, γεγονός που επιτρέπει τον προσδιορισμό της θέσης τους. Η ταχύτητά τους και ο βαθμός ανάκλασής τους εξαρτάται από την αντίσταση που παρουσιάζει κάθε υλικό και από τον συντελεστή ανάκλασης που παρουσιάζουν οι διαφορετικές διεπιφάνειες.

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η οπτική απόδοση των ατελειών καθώς οι ατέλειες αποδίδονται με άσπρο χρωματισμό, ενώ η μάζα του υλικού με αποχρώσεις του γκρι. Υπάρχουν μάλιστα τέσσερις διαφορετικοί συνδυασμοί απεικόνισης με παράλληλες και τεμνόμενες ευθείες αναλόγως με το μέγεθος και την θέση των ατελειών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### **ΣΥΝΔΕΣΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ**

Είναι γνωστό ότι οι επικαλύψεις έχουν ως αποτέλεσμα την βελτιστοποίηση της λειτουργίας εξαρτημάτων, ενώ οι απαιτήσεις για υψηλές επιδόσεις με το μικρότερο δυνατό κόστος έχουν οδηγήσει στη χρήση και εφαρμογή υλικών και τεχνικών με τις καλύτερες προδιαγραφές. Συστήματα βαρέως τύπου βιομηχανικών εξαρτημάτων, αποτελούνται από επικαλυμμένα υλικά για προστασία τους από μηχανισμούς τριβής, διάβρωσης και από την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών.

Έτσι λοιπόν ο Μηχανολόγος Μηχανικός εκμεταλλεύομενος αυτές τις ιδιότητες των επικαλυμμένων υλικών μπορεί να τα χρησιμοποιήσει για την σχεδίαση και κατασκευή ιδιαίτερα απολιτικών αντικειμένων.

# **ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ**

# **ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

### 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας, και συγκεκριμένα στις εργαστηριακές μετρήσεις, υπήρξε άμεση συνεργασία με την Αλουμίνιον Της Ελλάδος (ΑΤΕ), όπου είχαν πραγματοποιηθεί ψεκασμοί με πλάσμα και μελέτη δοκιμίων από μεταλλογραφικής πλευράς για την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά τις ιδιότητες και τη φύση των δοκιμίων. Απ'όπου και μας δόθηκαν πολλά στοιχεία και φωτογραφίες για την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας.

Στο εργαστήριο των εγκαταστάσεων της ΑΤΕ έγιναν επικαλύψεις αλούμινας ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) και χρωμίας ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) με θερμικό ψεκασμό πλάσματος σε υπόστρωμα κράματος Inconell 718. Μεταξύ της επικάλυψης αλούμινας και χρωμίας προηγήθηκε ψεκασμός με πλάσμα μιας συνδετικής επικάλυψης (Bond Coat). Αυτή η επικάλυψη, που δημιουργήθηκε με ψεκασμό σκόνης NiCrAlY πάνω στο Inconell 718, ψεκάστηκε για να συνδεθεί καλύτερα η επικάλυψη με το υπόστρωμα. Χωρίς αυτή θα υπήρχαν προβλήματα, όσον αφορά στην συνδεσιμότητα της επικάλυψης.

Οι επικαλύψεις που έγιναν σε τέσσερα δοκίμια με διαστάσεις 26x100mm ήταν οι εξής :

- $\text{Al}_2\text{O}_3$
- $\text{Cr}_2\text{O}_3$
- $\text{Al}_2\text{O}_3 + 20\% \text{ κ.β. } \text{Cr}_2\text{O}_3$
- $\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ κ.β. } \text{Cr}_2\text{O}_3$

Οι διάφορες συνθέσεις ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  και  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) επικαλύψεων έγιναν προκειμένου να παρατηρηθεί πως συμπεριφέρονται και τι αποτελέσματα έχουν σε ορισμένες δοκιμασίες, σε σχέση με τις κύριες επικαλύψεις,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Αυτά τα τέσσερα επικαλυμμένα δοκίμια κόπηκαν καταλλήλως και χρησιμοποιήθηκαν στις παρακάτω διαδικασίες :

- Μεταλλογραφικός έλεγχος (κοπή, εγκιβωτισμός, λείανση, στίλβωση)
- Μέτρηση τραχύτητας
- Μικροσκληρομέτρηση
- Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)
- Μικροσκόπιο
- Μέτρηση πορώδους
- Δοκιμή αντοχής σε έντονο θερμοκρασιακό περιβάλλον (Thermal Shock).

Η απόσταση του δαυλού ψεκασμού με τις επιφάνειες όπου έγιναν οι επικαλύψεις ήταν της τάξης των 10 – 15cm, ενώ η γωνία ψεκασμού ήταν μεταξύ  $45^\circ$  και  $90^\circ$ .

Όταν η γωνία αυτή είναι γύρω στις  $90^\circ$ , τα σωματίδια καθώς προσκρούουν στο υλικό της βάσης στερεοποιούνται σχεδόν τοπικά χωρίς να εξαπλώνονται, με αποτέλεσμα η συνοχή που αποκτούν να μην είναι η καλύτερη δυνατή. Ωστόσο η δομή της επικάλυψης είναι η πυκνότερη που επιτυγχάνεται από κάθε άλλη γωνία.

Για γωνίες μεταξύ  $45^\circ$  και  $90^\circ$ , τα αποτελέσματα είναι περισσότερο ικανοποιητικά καθώς τα σωματίδια εξαπλώνονται και διεισδύουν καλύτερα στο υπόστρωμα, χωρίς παράλληλα να έχουμε σημαντική αύξηση του πορώδους. Οποιαδήποτε μεταβολή της γωνίας μεταξύ των παραπάνω ορίων δεν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην δομή και την ποιότητα των επικαλύψεων.

Όταν τέλος ο ψεκασμός της σκόνης γίνεται υπό γωνία μικρότερη των 45°, η συνοχή του ίδιου του επιστρώματος και η πρόσφυσή του με το υπόστρωμα είναι ασθενής. Αυτό οφείλεται στο λεγόμενο «φαινόμενο σκίασης».

## **7.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ**

Πριν την επικάλυψη των δοκιμών πραγματοποιήθηκε προετοιμασία της επιφάνειας του υποστρώματος. Τα θερμικά επιστρώματα χαρακτηρίζονται γενικά από τις μηχανικές συνδέσεις με τα υποστρώματα. Ο καθαρισμός των επιφανειών και η τραχύτητα της επιφάνειας είναι πολύ σημαντικοί παράμετροι. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό η επιφάνεια να μην είναι μολυσμένη από λίπη, και ο ψεκασμός να γίνεται αμέσως μετά τον καθαρισμό και την προετοιμασία για καλύτερα αποτελέσματα. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την προετοιμασία της επιφάνειας, που αναλύονται στη συνέχεια.

### **7.2.1 Καθαρισμός-Απολίπανση**

Το πρώτο στάδιο των εργασιών προπαρασκευής της οποιαδήποτε μεταλλικής επιφάνειας είναι ο πλήρης καθαρισμός της, με τη βοήθεια μιας από τις ακόλουθες τρεις μεθόδους :

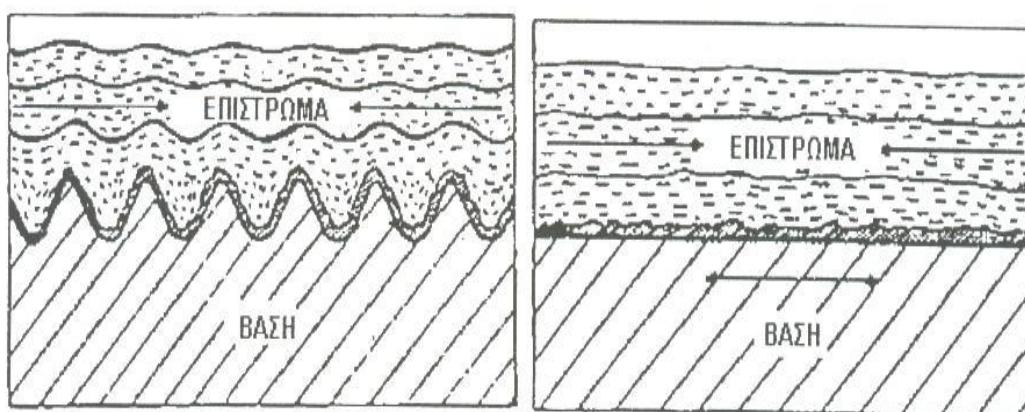
1. καθαρισμός με μηχανικά μέσα
2. καθαρισμός με διαλύτες
3. καθαρισμός με χημικές ουσίες

Η διαδικασία του καθαρισμού έχει σαν σκοπό την απομάκρυνση των λιπαντικών και της σκουριάς από την επιφάνεια του μετάλλου. Συνεπώς, στην αρχή, αφαιρέθηκαν τα λιπαντικά (λάδια, γράσα, κ.τ.λ.), γιατί σχημάτιζαν ένα προστατευτικό στρώμα γύρω από την σκουριά, δυσκολεύοντας την αφαίρεσή της. Τα μέταλλα του εμπορίου έχουν σχεδόν πάντα λιπαντικό, δεδομένου, ότι κατά την μορφοποίησή τους περνούν μέσα από μηχανές, με λιπάνσεις. Τα στοιχεία του μετάλλου ενώνονται με τα αέρια (κυρίως οξυγόνο) του ατμοσφαιρικού αέρος και σχηματίζουν τη σκουριά, που συνδέεται ισχυρά με

το μέταλλο και μερικές φορές είναι σκληρότερη από αυτό. Η σκουριά αυτή πρέπει να απομακρυνθεί γιατί λόγω της σκληρότητάς της μπορεί να προκαλέσει το «στόμωμα» των λειαντικών εργαλείων ή το σπάσιμο των κοπτικών εργαλείων. Ο σχηματισμός της σκουριάς ευνοείται επίσης από τις πολυάριθμες θερμικές επεξεργασίες, στις οποίες υποβάλλονται τα μέταλλα πριν δοθούν στην κατανάλωση.

### 7.2.2 Τράχυνση-Αμμοβολή

Στις περισσότερες βιομηχανίες, η «αμμοβολή» χρησιμοποιείται σαν τυπικό στάδιο για τον καθαρισμό και την κατάλληλη διαμόρφωση των επιφανειών για την αποδοχή των primers ή άλλων προστατευτικών επιστρώσεων. Ο όρος αμμοβολή φαίνεται εξαιρετικά καταχρηστικός όσον αφορά τα χρησιμοποιούμενα αποξεστικά. Αλλά εφόσον η αρχή της μεθόδου (βομβαρδισμός επιφανειών με σωματίδια μέσω ρεύματος πεπιεσμένου αέρα) είναι ίδια, εξακολουθεί να χρησιμοποιείται και σήμερα, ενώ σε αυτή την περίπτωση ένας διεθνώς γενικά αποδεκτός όρος είναι grit-blasting. Βομβαρδισμός επιφανειών γίνεται επίσης και για την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των αεροπορικών κραμάτων. Στην δικιά μας περίπτωση η αμμοβολή των επιστρωμάτων πραγματοποιήθηκε με σφαιρίδια  $Al_2O_3$ .



Σχήμα 7.1: Η δημιουργία πτυχώσεων υποβοηθάει το μηχανισμό πρόσφυσης εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής μεταξύ υποστρώματος-επιστρώματος.

Τα αποξεστικά υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον καθαρισμό και την προετοιμασία των επιφανειών είναι κατά βάση τα βιομηχανικά σφαιρίδια



$Al_2O_3$  σε διάφορα κοκκομετρικά μεγέθη (από 80 ως 500mesh), χάντρες γυαλιού (glass beads) και για ελαφρά απόξεση τριμμένα καρυδότσουφλα. Τα υλικά αυτά είναι διεθνώς τυποποιημένα με χαρακτηρισμούς που αφορούν βασικά την κοκκομετρική κατανομή τους, την υγρασία ή ακόμη και την καμπυλότητά τους. Τα χρησιμοποιούμενα αποξεστικά είναι ανακυκλώσιμα με μέση διάρκεια ζωής που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες ( από το είδος της ακαθαρσίας στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν, το είδος του εξαρτήματος που πρόκειται να καθαριστεί, κλπ.) και εισάγονται σε πολύ υψηλές τιμές. Οι ακαθαρσίες, που συνήθως αντιμετωπίζονται είναι βρωμιές από λάδια, οξειδώσεις επιφανειών ή και εξαιρετικά δύσκολες ακαθαρσίες, όπως αυτές που δημιουργούνται στους θαλάμους καύσης εξαιτίας των πολύ υψηλών θερμοκρασιών.



**Σχήμα 7.2: Διεργασία αμμοβολής.**

Οι μονάδες (grit-blasting) είναι ενταγμένες στην διαδικασία συντήρησης-παραγωγής και αποτελούνται από κλειστές μηχανές αμμοβολής με δυνατότητα ανακύκλωσης του χρησιμοποιούμενου υλικού. Κρίσιμο χαρακτηριστικό των χρησιμοποιούμενων υλικών είναι η διατήρηση της αποξεστικής δράσης με την ταυτόχρονη κατά το δυνατό μικρότερη απώλεια υλικού, δεδομένου ότι υψηλή τραχύτητα σημαίνει μείωση της διάρκειας ζωής

του εξαρτήματος. Τα επιθυμητά όρια τραχύτητας για το δημιουργούμενο προφίλ βρίσκονται στην περιοχή με Ra από 0 ως 3μm. Ακόμη η ομοιογένεια των χαρακτηριστικών του προφίλ και η καθαρότητα της επιφάνειας αποτελούν σημαντικούς παράγοντες αξιολόγησης ενός αποξεστικού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμη και μετά την επιβεβαίωση θετικής συμπεριφοράς κάποιου υλικού, με τα προαναφερόμενα κριτήρια, ακολουθεί μακρά περίοδος δοκιμών, που αφορούν κάθε άλλη πιθανή συνέπεια της χρήσης του υλικού πριν εισαχθεί στην διαδικασία παραγωγής και συντήρησης.

### **7.2.3 Διαμόρφωση τελικής επιφάνειας**

Η διαμόρφωση (φινίρισμα) της τελικής επιφάνειας με μηχανικούς τρόπους ή με λείανση των ψεκασμένων υλικών δεν έχει μεγάλη σημασία στην τεχνική του ψεκασμού. Μετά το πέρας του ψεκασμού η επιφάνεια του επιστρώματος δεν είναι κατάλληλη για χρήση. Για τον λόγο αυτόν υφίστανται θερμικές ή μηχανικές κατεργασίες που στοχεύουν στη διαμόρφωση της τοπογραφίας τους και στη βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Το πάχος τους δεν είναι ομοιόμορφο σε όλη την έκτασή τους, η τραχύτητά τους ενδέχεται να αντενδεικνύεται στις εφαρμογές, αλλά και η ύπαρξη πόρων και η πρόσφυση με το υπόστρωμα δεν ικανοποιούν πάντα τις απαιτήσεις του μηχανικού.

Για την εξομάλυνση της επιφανειακής τραχύτητας και την ρύθμιση του πάχους εφαρμόζεται λείανση και μηχανική απομάκρυνση υλικού. Αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση λειαντικών τροχών από νιτρίδια του βορίου και καρβίδια του πυριτίου. Κατά την λείανση λήφθηκε υπόψη η δομή του επιστρώματος. Επειδή οι επικαλύψεις ήταν σχετικά λεπτές αποφεύχθηκε η υπερθέρμανσή τους, ενώ στις περιπτώσεις με αυξημένο πορώδες η αφαίρεση του υλικού έγινε ομαλά. Οποσδήποτε όμως η μηχανική κατεργασία δεν πρέπει να επιβαρύνει το σύστημα με εσωτερικές τάσεις.

Τα σκληρά υλικά που χρησιμοποιούνται για την σκλήρυνση των επιφανειών, όπως είναι το καρβίδιο, απαιτούν συνεχόμενη λείανση κάτι το οποίο είναι πιο σημαντικό και δύσκολο από όλη την υπόλοιπη διαδικασία.

Τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατεργασία της επιφάνειας με χρήση ακτινών Laser και την μέθοδο της θερμής ισοστατικής συμπίεσης (Hot Isostatic Pressing).

### 7.3 INCONEL 718 (Υπόστρωμα)

Το κράμα Inconel 718, που χρησιμοποιήθηκε σαν υπόστρωμα, είναι ένα κράμα νικελίου-χρωμίου που περιέχει σημαντικές ποσότητες σιδήρου, νιόβιου και μολυβδαινίου καθώς και μικρότερα ποσοστά αλουμινίου και τιτανίου. Συνδυάζει αντίσταση στη διάβρωση και υψηλή αντοχή με πολύ καλή συγκολλησιμότητα, μαζί με την αντίσταση στις, μετά συγκολλήσεις, ρωγμές. Τέλος το κράμα αυτό χρησιμοποιείται σε τουρμπίνες, σε μηχανές πυραύλων, σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, σε σωλήνες, σε εργαλειομηχανές και σε διαστημόπλοια.

#### Χαρακτηριστικά

##### -ΣΥΣΤΑΣΗ :

<b>Ni(+Co)</b>	50 - 55 %	<b>Al</b>	0.2 -0.8 %
<b>Cr</b>	17 – 21 %	<b>C</b>	0.08 %
<b>Fe</b>	10-15 %	<b>Mn</b>	0.35 %
<b>Co</b>	1 %	<b>Si</b>	0.35 %
<b>Mo</b>	2.8 - 3.3 %	<b>B</b>	0.006 %
<b>Nb(+Ta)</b>	4.75 - 5.5 %	<b>Cu</b>	0.3 %
<b>Ti</b>	0.65 - 1.15 %		

-ΣΗΜΕΙΟ ΤΗΞΗΣ : 1260 - 1336°C (2300 - 2437°F)

## Τυπικές φυσικές ιδιότητες του Inconel 718

Πυκνότητα	8.19 g/cm <sup>3</sup>
Ειδική θερμότητα	435 J / kg·K
Θερμική αγωγιμότητα	11.4 W/ m·K
Ηλεκτρική αντίσταση	1250 n ·m
Θερμοκρασία Curie	-112°C (-170°F)
Σκληρότητα	36 HRC
Αντοχή στον εφελκυσμό	1240 MPa

### 7.4 ΣΚΟΝΕΣ ΨΕΚΑΣΜΟΥ (ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ)

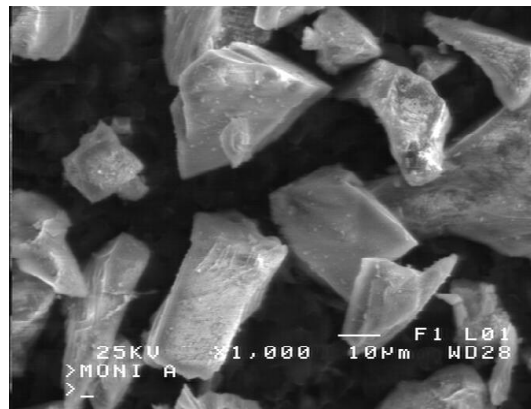
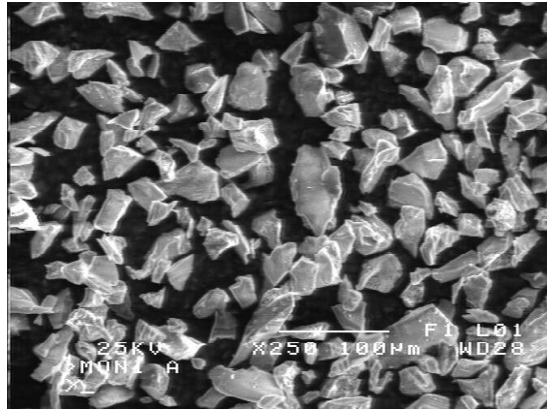
#### 7.4.1 ΣΚΟΝΗ ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

##### Χαρακτηριστικά της σκόνης Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**ΣΥΣΤΑΣΗ** : Οξείδιο του αλουμινίου, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 98,5% κ.β.  
Οξείδιο του πυριτίου, SiO<sub>2</sub> : 1,0% κ.β.  
Λοιπά οξείδια : 0,5% κ.β.

**ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ** : -270 mesh +15 microns (-53 +15μm).

**ΣΗΜΕΙΟ ΤΗΞΗΣ** : 2000°C (3630°F)



Η πρώτη μικρογραφία του SEM δείχνει τους κόκκους της σκόνης Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε μικρή μεγέθυνση(x250), ενώ η δεύτερη σε μεγαλύτερη(x1000). Οι κόκκοι της Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> έχουν πολυγωνικό σχήμα και δεν έχουν πορώδες (ίσως κάποια nm). Στην μικρογραφία με τη μεγάλη μεγέθυνση διακρίνουμε επίσης τα επίπεδα των κόκκων.

Η αλουμίνα είναι μια άσπρη κεραμική σκόνη. Παράγει παχιές επικαλύψεις που αντέχουν στην κόπωση και επίσης αντιστέκονται στη διάβρωση σε υψηλές θερμοκρασίες. Επικαλύψεις με άσπρη αλουμίνα έχουν επίσης καλή αντίσταση στον ηλεκτρισμό σε υψηλές θερμοκρασίες. Μια πρόσφατη χρήση τους είναι (ως λείες επιφάνειες) στους κινητήρες ώσεως αερίων, όπου αναπτύσσονται θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1650°C (3000°F).

Η αλουμίνα μπορεί να ψεκασθεί είτε με τη χρήση θερμικού ψεκασμού είτε με ψεκασμό με τη χρήση πλάσματος. Οι καλύτερες επικαλύψεις παράγονται με ψεκασμό με χρήση πλάσματος.

## Τυπικές Φυσικές Ιδιότητες των επικαλύψεων με $Al_2O_3$

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΨΕΚΑΣΜΟΣ	ΨΕΚΑΣΜΟΣ ΜΕ ΠΛΑΣΜΑ
Σκληρότητα(DPH <sub>300</sub> )	690	690
Πυκνότητα(g/cm <sup>3</sup> )	2.6-2.9	3.3
Βάρος επικάλυψης (kg/m <sup>2</sup> /0.1mm)	0.27-0.29	0.33
Πορώδες(%)	4-8	ΜΙΚΡΟ (4.6%)
Συνδεσιμότητα	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ
Αντοχή στο Θερμικό Αιφνιδιασμό	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ

### Παράμετροι Συστήματος- Ψεκασμός με πλάσμα

Τύπος δαυλού πλάσματος : 3MB/ 7MB (N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>)

Παράμετροι αερίων :

	Πίεση (MPa)	Παροχή (l/min)
Πρωτεύον αέριο (N <sub>2</sub> )	0.35	378
Δευτερεύον αέριο (H <sub>2</sub> )	0.35	71
Φέρον αέριο (ατμ.αέρας)	0.35	175

Παράμετροι δαυλού :

Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος : 500 A

Τάση ηλεκτρικού ρεύματος : 80 V

Ρυθμός ψεκασμού : 3.0 kg/hr

Απόσταση ψεκασμού : 50 – 100mm

Επιφάνεια που επικαλύπτεται: 6.02 m<sup>2</sup>/hr/0.1mm

Βάρος σκόνης : 0.40 kg/m<sup>2</sup>/0.1mm

Αποδοτικότητα απόθεσης : 80 %

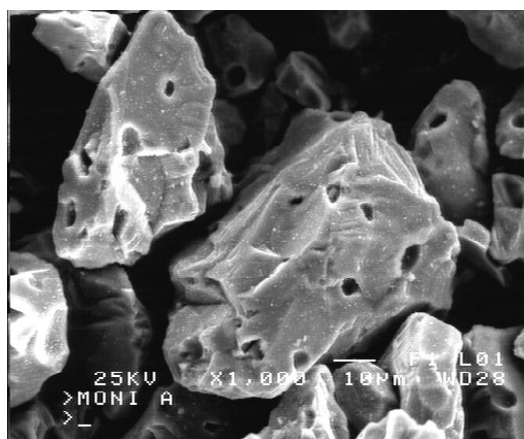
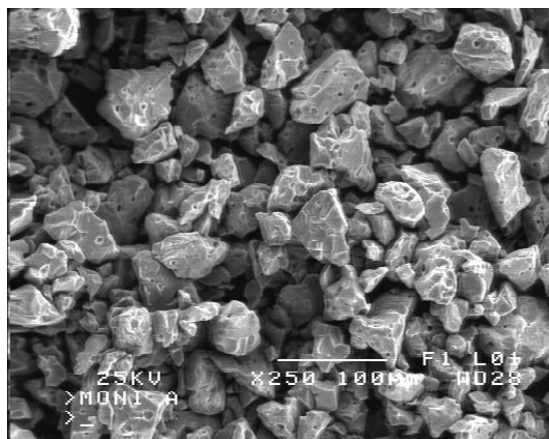
## 7.4.2 ΣΚΟΝΗ ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΧΡΩΜΙΟΥ (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

### Χαρακτηριστικά της σκόνης Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**ΣΥΣΤΑΣΗ :** Οξείδιο του χρωμίου, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 96% κ.β.  
Οξείδιο του τιτανίου, TiO<sub>2</sub> : 2% κ.β.  
Λοιπά οξείδια : 2% κ.β.

**ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ :** -170 mesh +15 microns (-90 +15 μm)

**ΣΗΜΕΙΟ ΤΗΞΗΣ :** 2435°C (4415°F)



Η πρώτη μικρογραφία του SEM δείχνει τους κόκκους της σκόνης Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε μικρή μεγέθυνση (x250) και η δεύτερη σε μεγαλύτερη (x1000). Οι κόκκοι της Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> έχουν πολυγωνικό σχήμα και αρκετό πορώδες. Στην μικρογραφία με τη μεγάλη μεγέθυνση διακρίνουμε επίσης τα επίπεδα των κόκκων.

Η χρωμία (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) είναι μια σκόνη οξειδίου του χρωμίου για ψεκασμό είτε θερμικό είτε με τη χρήση πλάσματος (κυρίως). Σχεδιάστηκε για να παράγει επικαλύψεις πυκνές, σκληρές και που να αντέχουν στην κόπωση. Οι επικαλύψεις αυτές έχουν επίσης ιδιότητες κατά της φθοράς. Επίσης,

προτείνονται για αντοχή στην κόπωση σκληρών επιφανειών, διάβρωση σωματιδίων και δημιουργία κοιλοτήτων, όλα σε θερμοκρασίες κάτω των 540°C (1000°F). Τέλος είναι αδιάλυτες σε οξέα, αλκάλια και οινόπνευμα.

Επικαλύψεις με χρωμία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βιομηχανίες υφασμάτων, σε κάθε σημείο των μηχανών που έρχονται σε επαφή με ίνες και νήματα, όπου απαιτείται μια σκληρή και με αντοχή σε κόπωση και διάβρωση, κεραμική επικάλυψη.

### Τυπικές Φυσικές Ιδιότητες των επικαλύψεων με Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΨΕΚΑΣΜΟΣ ΜΕ ΠΛΑΣΜΑ
Σκληρότητα(DPH <sub>300</sub> )	900-1200
Πυκνότητα(g/cm <sup>3</sup> )	4.8
Βάρος επικάλυψης (kg/m <sup>2</sup> /0.1mm)	0.48
Πορώδες(%)	ΥΨΗΛΟ (9.8%)
Συνδεσιμότητα	ΚΑΛΗ
Αντοχή στο Θερμικό Αιφνιδιασμό	ΟΧΙ ΚΑΛΗ

### Παράμετροι Συστήματος- Ψεκάσμος με πλάσμα

Τύπος δαυλού πλάσματος : 3MB/ 7MB (N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>)



**Παράμετροι αερίων :**

	Πίεση (MPa)	Παροχή (l/min)
Πρωτεύον αέριο (N <sub>2</sub> )	0.35	378
Δευτερεύον αέριο (H <sub>2</sub> )	0.35	71
Φέρον αέριο (ατμ.αέρας)	0.35	175

**Παράμετροι δαυλού :**

Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος : 500 A

Τάση ηλεκτρικού ρεύματος : 80 V

Ρυθμός ψεκασμού : 4.1 kg/hr

Απόσταση ψεκασμού : 65 mm

Επιφάνεια που επικαλύπτεται: 4.9 m<sup>2</sup>/hr/0.1mm

Βάρος σκόνης : 0.83 kg/m<sup>2</sup>/0.1mm

Αποδοτικότητα απόθεσης : 60 %

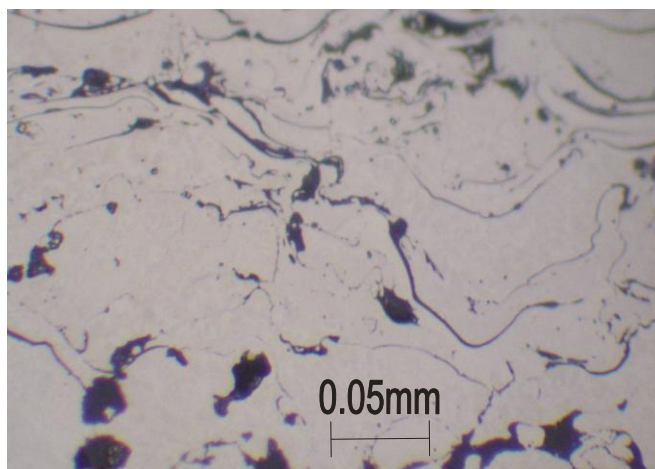
### 7.4.3 ΣΚΟΝΗ NiCrAlY (BOND COAT)

#### Χαρακτηριστικά της σκόνης

**ΣΥΣΤΑΣΗ** : Νικέλιο, Ni : ~64% κ.β.  
Χρώμιο, Cr : ~24% κ.β.  
Αλουμίνιο, Al : ~10.5% κ.β.  
Ύτριο, Y : ~1.5% κ.β.

**ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ** : -140 mesh +270 microns (-106 +53μm).

**ΣΗΜΕΙΟ ΤΗΞΗΣ** : 1320°C (2408°F)



Η παραπάνω μικρογραφία από το μικροσκόπιο δείχνει την τηγμένη σκόνη NiCrAlY που έχει αποτεθεί πάνω στο υπόστρωμα INCONEL 718.

Η σκόνη NiCrAlY είναι μία άριστης ποιότητας σφαιρική σκόνη σχεδιασμένη κυρίως για να δίνει επιστρώματα που να αντέχουν στη θερμή ρωγμάτωση. Χρησιμοποιείται ψεκαζόμενη με τη μέθοδο του πλάσματος σαν επικάλυψη ή σαν συνδετική επικάλυψη που αντιστέκεται στην οξείδωση και στην προσβολή με διαβρωτικό αέριο σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των περίπου 980°C. Η σκόνη αυτή συχνά χρησιμοποιείται σαν συνδετικό υλικό σαν «θερμικό φράγμα». Η αλουμίνα και η χρωμία σαν επικαλύψεις πάνω από το

NiCrAlY παρέχουν προστασία σχηματίζοντας μία προστατευτική αναλογία οξειδίων, αφού η προσθήκη του ύτριου (Y) βελτιώνει την προσκόλληση των επικαλύψεων.

### Τυπικές Φυσικές ιδιότητες των επικαλύψεων

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΨΕΚΑΣΜΟΣ ΜΕ ΠΛΑΣΜΑ
Βάρος επικάλυψης (kg/m <sup>2</sup> /0.1mm)	1.1
Πορώδες(%)	ΜΙΚΡΟ (~2-3%)
Συνδεσιμότητα	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ
Αντοχή στο Θερμικό Αιφνιδιασμό	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ

### Παράμετροι Συστήματος- Ψεκασμός με πλάσμα

Τύπος δαυλού πλάσματος : 3MB/ 7MB/9MB (N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>)

Παράμετροι αερίων :

	Πίεση (MPa)	Παροχή (l/min)
Πρωτεύον αέριο (N <sub>2</sub> )	0.35	378
Δευτερεύον αέριο (H <sub>2</sub> )	0.35	71
Φέρον αέριο (ατμ.αέρας)	0.35	175

### Παράμετροι δαυλού :

Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος : 500-550 A

Τάση ηλεκτρικού ρεύματος : 80 V

Ρυθμός ψεκασμού : 3.0 kg/hr

Απόσταση ψεκασμού : 50-100 mm

Επιφάνεια που επικαλύπτεται: 4.0 m<sup>2</sup>/hr/0.1mm

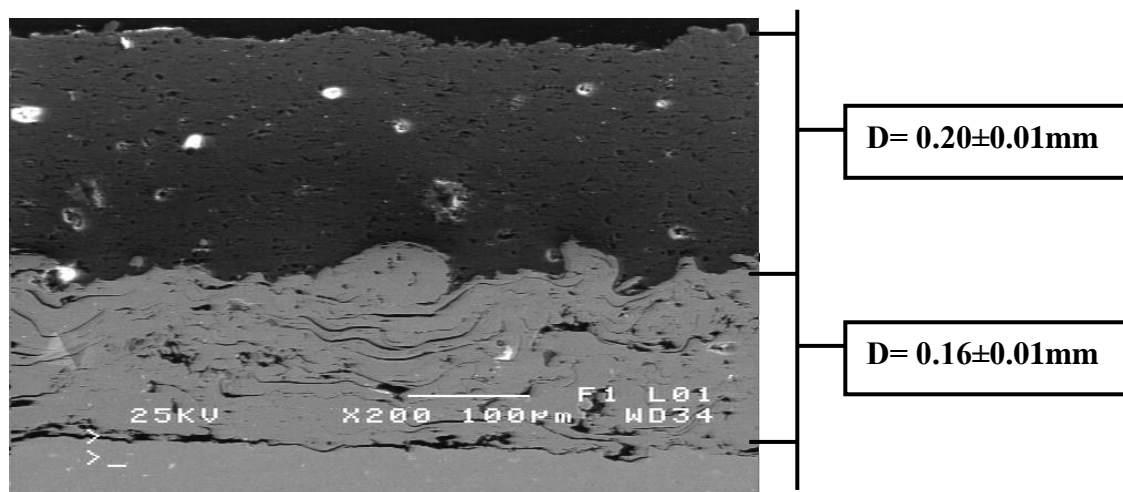
Βάρος σκόνης : 1.1 kg/m<sup>2</sup>/0.1mm

Αποδοτικότητα απόθεσης : 65 %

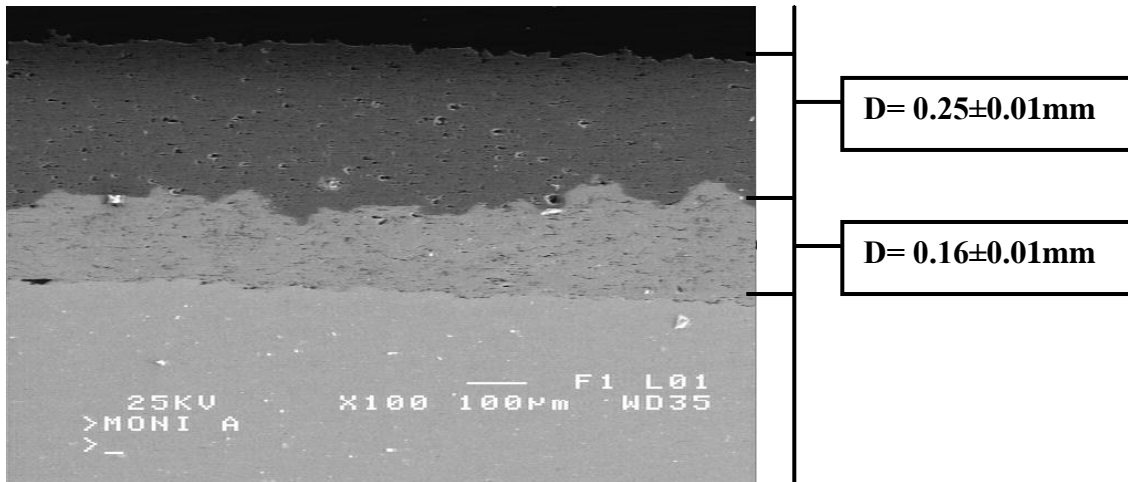
## 7.5 ΠΑΧΟΣ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Το πάχος των επιστρωμάτων μετρήθηκε σε δέκα μικρογραφίες κατά μήκος κάθε δοκιμίου και παρακάτω σημειώνεται ο μέσος όρος αυτών.

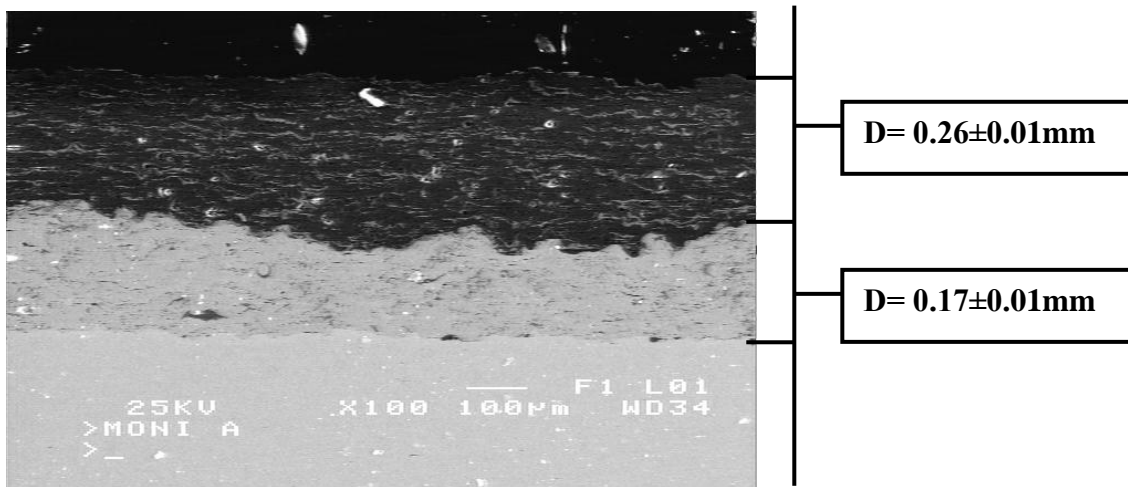
- Επίστρωμα Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



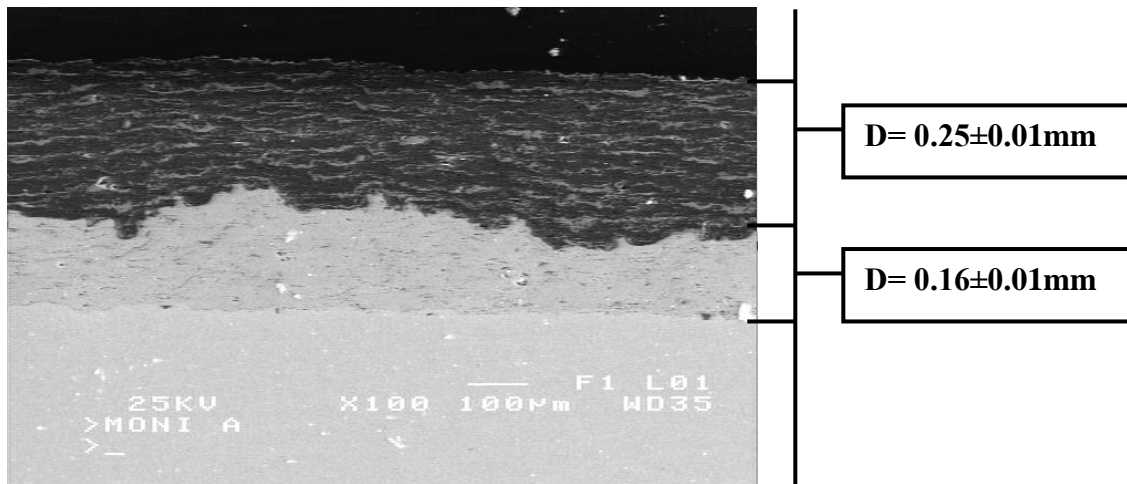
- Επίστρωμα Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



- Επίστρωση  $\text{Al}_2\text{O}_3+20\%\text{Cr}_2\text{O}_3$

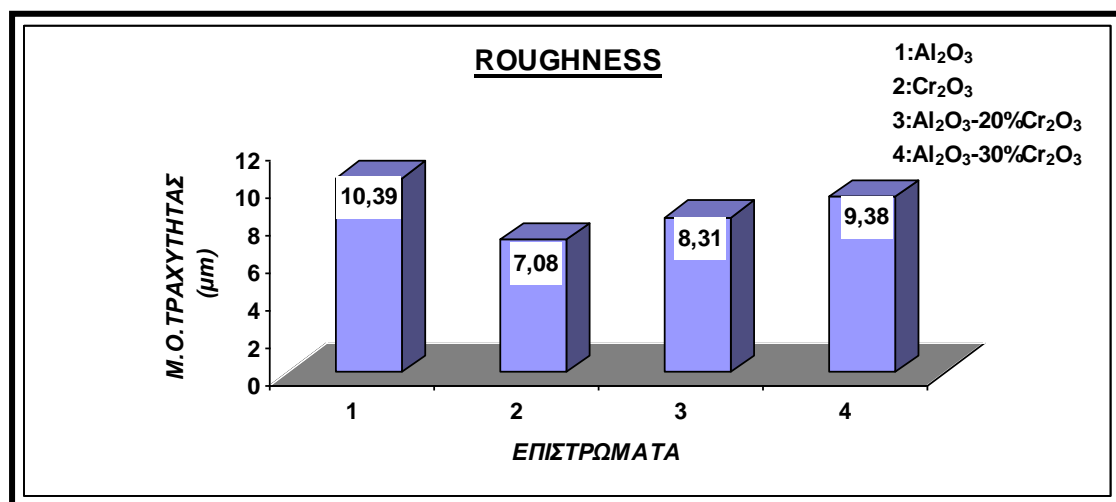


- Επίστρωση  $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{Cr}_2\text{O}_3$



## 7.6 ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ

Ο έλεγχος της τραχύτητας έγινε με το μηχάνημα SURFTEST 212 αφού πρώτα πραγματοποιήθηκε το καλιμπράρισμα του μηχανήματος (μέση τραχύτητα,  $R_a = 2,5\mu\text{m}$ ). Παρακάτω (σχήμα 7.3), φαίνονται οι τιμές κατά μέσο όρο της μέσης τραχύτητας ( $R_a$ ) κάθε δοκιμίου μετά τον ψεκασμό τους με πλάσμα.

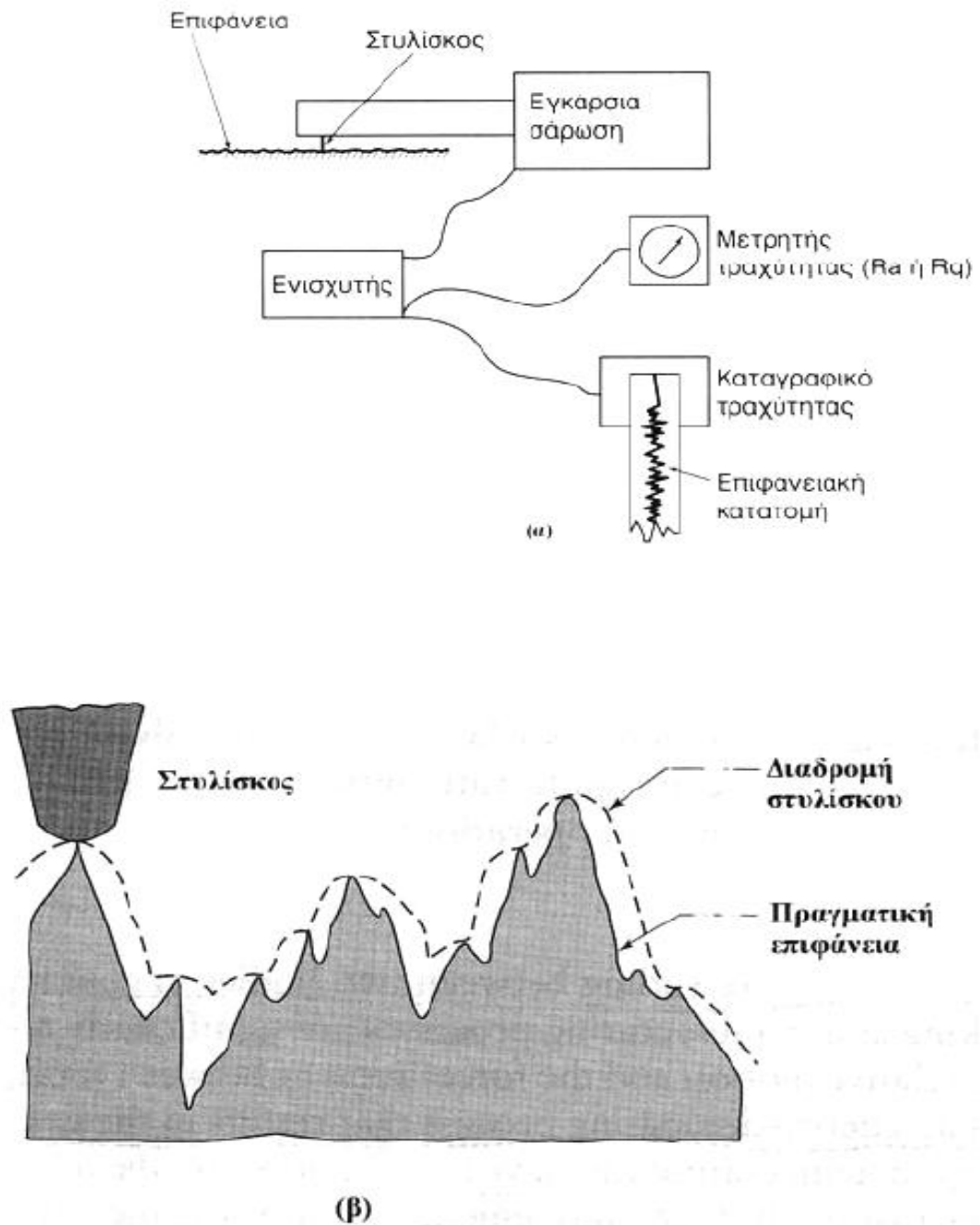


Σχήμα 7.3: Σύγκριση της τραχύτητας των επιστρωμάτων.

<b>ROUGHNESS (<math>\mu\text{m}</math>)</b>					
<b>Υλικό</b>	<b>Μετρήσεις</b>	<b>M.O.</b>	<b>St.Deviation</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	10	10,39	0,631	9,340	11,100
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	10	7,08	0,762	6,480	8,690
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+20%Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	10	8,31	0,767	6,980	9,170
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+30%Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	10	9,38	1,337	7,910	12,150

Παρατηρούμε ότι κατά μέσον όρο η επικάλυψη με αλουμίνα παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μέση τραχύτητα ( $R_a=10,39\mu\text{m}$ ), ενώ αυτή της χρωμίας τη μικρότερη ( $R_a=7,08\mu\text{m}$ ). Οι άλλες δύο ενδιάμεσες επικαλύψεις ( $\text{Al}_2\text{O}_3+20\%\text{Cr}_2\text{O}_3$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) παρουσιάζουν μέση τραχύτητα με τιμή ανάμεσα στην τιμή της τραχύτητας των δύο κύριων επικαλύψεων ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  και  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).

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 σε 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.



Σχήμα 7.4: α) Αρχή λειτουργίας τραχυμέτρων, β) Διαδρομή στυλίσκου.

## 7.7 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

### Πειραματική διαδικασία

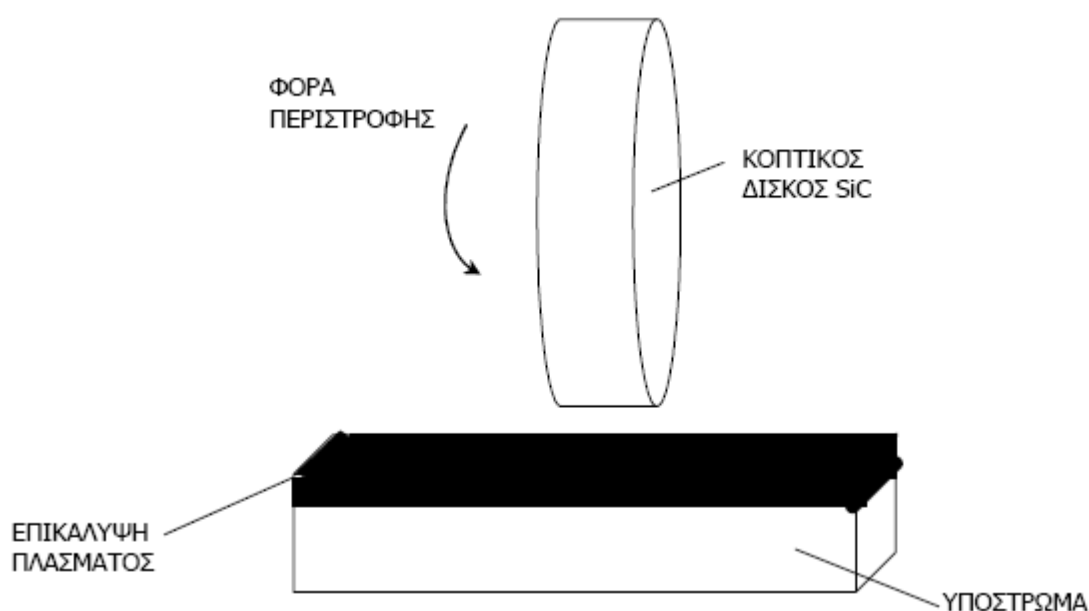
Η μεταλλογραφική εξέταση των δοκιμίων χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του μεγέθους των κόκκων, για την εύρεση τυχόν ακαθαρσιών ή ατελειών του, αλλά και για τον εντοπισμό τυχόν παραμόρφωσης που μπορεί να έχει υποστεί ένα δοκίμιο.



## Κοπή

Τα προς εξέταση δοκίμια για να είναι κατάλληλα για λείανση και στίλβωση κόπηκαν σε τέτοιες διαστάσεις (σχήμα 7.5), ώστε στη συνέχεια να εγκιβωτισθούν σε κατάλληλη θήκη για τον μεταλλογραφικό τους έλεγχο.

Κατά την κοπή, τα δοκίμια ψύχονταν με σαπουνέλαιο για να μην υπερθερμανθούν και αλλάξει η δομή του μετάλλου. Επίσης, για να αποφευχθούν φαινόμενα αποφλοίωσης της επικάλυψης, ο δισκοτόμος κατά την περιστροφή του ερχόταν πρώτα σε επαφή με την επικάλυψη.



Σχήμα 7.5: Διαδικασία κοπής δοκιμίων με επικάλυψη πλάσματος.

Τέλος, μετά την κοπή, τα δοκίμια καθαρίστηκαν στις άκρες από τυχόν προεξοχές, ώστε να μη σκιστούν τα λειαντικά χαρτιά κατά τη διάρκεια της λείανσης.

## Εγκιβωτισμός

Επειδή τα δοκίμια ήταν μικρά και δεν μπορούσαν να λειανθούν ή να στιλβωθούν, εγκιβωτίστηκαν σε πολυεστερική, μη αγώγιμη ρητίνη για να γίνει

πιο εύκολη η επεξεργασία τους. Αρχικά, τα δοκίμια καθαρίστηκαν, ώστε να μην υπάρχουν ακαθαρσίες και λιπαρές ουσίες. Έπειτα παρασκευάστηκε το μίγμα της ρητίνης, όπου για κάθε 10 ml ρητίνης χρειάστηκαν έξι σταγόνες καταλύτη. Στη συνέχεια, το μίγμα αυτό χύθηκε σε κυλινδρικό καλούπι (sample-cup) στον αφαιρούμενο πάτο του οποίου είχαν τοποθετηθεί τα δοκίμια σε κλιπσάκια (sample-clips), για να κρατιούνται τα δοκίμια. Μετά από πενήντα λεπτά, χρόνος που απαιτείται για την σκλήρυνση της ρητίνης, τα εγκιβωτισμένα δοκίμια απομακρύνθηκαν από το καλούπι. Η συγκεκριμένη ρητίνη συστέλλεται με την αύξηση της θερμοκρασίας κι αφαιρείται εύκολα από το καλούπι χωρίς την ύπαρξη βαζελίνης. Ο εγκιβωτισμός έγινε σε κενό αέρος για να αποφευχθούν οι πιθανές φυσαλίδες.

### Λείανση (Gritting)

Κατά την λείανση, μια επίπεδη επιφάνεια φέρει διάφορα λειαντικά χαρτιά και περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα. Τα δοκίμια επεξεργάστηκαν, ώστε η επιφάνειά τους να είναι αποδεκτή για συγκεκριμένη εξέταση. Η λείανση έγινε μηχανικά.

	Grite size	Pressure	Speed	Time	Papers
<b>Κόντρα</b>	180	10psi/mount	400 RPM	1 min	remove 0,60"
<b>Κόντρα</b>	240	10psi/mount	400 RPM	1 min	2(χαρτιά)
<b>Κόντρα</b>	320	10psi/mount	400 RPM	1 min	2
<b>Κόντρα</b>	400	10psi/mount	400 RPM	1 min	2
<b>Κόντρα</b>	600	10psi/mount	400 RPM	1 min	2

Αμέσως μετά τη διαδικασία της λείανσης, ακολούθησε έκπλυση και στέγνωμα των δοκιμίων.

Στην αρχή, τα δοκίμια λειάνθηκαν σε τραχύ λειαντικό χαρτί κι έπειτα η διαδικασία συνεχίστηκε με τη λείανσή τους σε λιγότερο τραχιά λειαντικά χαρτιά. Σε κάθε λειαντικό περιστρεφόμενο χαρτί, τα δοκίμια συγκρατούνταν με σταθερή πίεση, ώστε να μη σχηματισθούν διαφορετικά επίπεδα στην

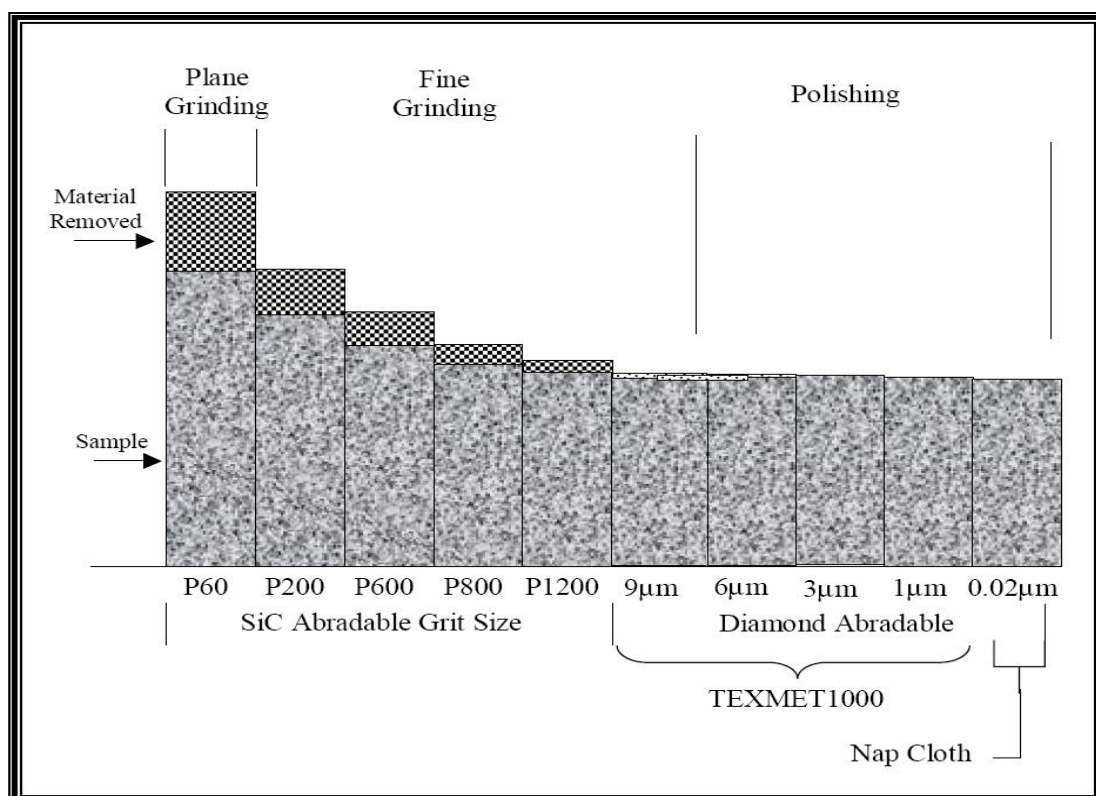
επιφάνεια των δοκιμίων κι αποτύχει η λείανση. Όσο λιγότερο τραχιά ήταν τα λειαντικά χαρτιά, τόσο μικρότερη ήταν η πίεση με την οποία συγκρατούνταν τα δοκίμια στην επιφάνεια του λειαντικού χαρτιού.

### Στίλβωση

Με το πέρας της λείανσης, τα δοκίμια χαρακτηρίζονταν από πολύ λεπτές χαραγές, οι οποίες είχαν την κατεύθυνση της κίνησης του τελευταίου λειαντικού χαρτιού. Ο σκοπός της στίλβωσης ήταν να απομακρυνθούν οι χαραγές που εισήχθησαν στην προηγούμενη διεργασία. Η στίλβωση έγινε μηχανικά. Τα μεταλλικά δοκίμια, αφού πλύθηκαν με νερό μετά τη λείανση, στιλβώθηκαν με τη χρήση ενός μεταλλικού κι επίπεδου τροχού, όπου στην επιφάνειά του τοποθετήθηκε ειδικό ύφασμα. Η ταχύτητα περιστροφής του δίσκου ήταν σταθερή.

	Grit size	Pressure	Speed	Time	Papers
<b>Κόντρα</b>	Αδαμαντόπαστα (6μm diamond polishing compound) +Λάδι (Lapping oil)	5psi/mount	150RPM	1 min	TEXMET
<b>Κόντρα</b>	Αδαμαντόπαστα (1μm diamond polishing compound) +Λάδι (Lapping oil)	5psi/mount	150RPM	1 min	TEXMET
<b>Έκπλυση με σαπούνι και στέγνωμα</b>					
<b>Κόντρα</b>	Πυρίτιο σε υγρή μορφή (Colloidal Silica)	5psi/mount	150RPM	1 min	MICRO (LOTH)
<b>Έκπλυση, στέγνωμα και μετά μικροσκόπιο</b>					

Κατά τη στίλβωση, έγινε χρήση της παραφίνης, η οποία είναι λιπαντικό, ώστε το ύφασμα στίλβωσης να μην είναι ποτέ στεγνό γιατί ειδάλλως, μπορούσε να αποκολληθεί και να κολλήσει πάνω στην επιφάνεια των δοκιμίων. Παράλληλα, η χρήση της παραφίνης απέτρεψε την τυχόν υπερθέρμανση και χάραξη του δοκιμίου.



Σχήμα 7.6: Αφαίρεση του υλικού μετά τη λείανση και τη στίλβωση.

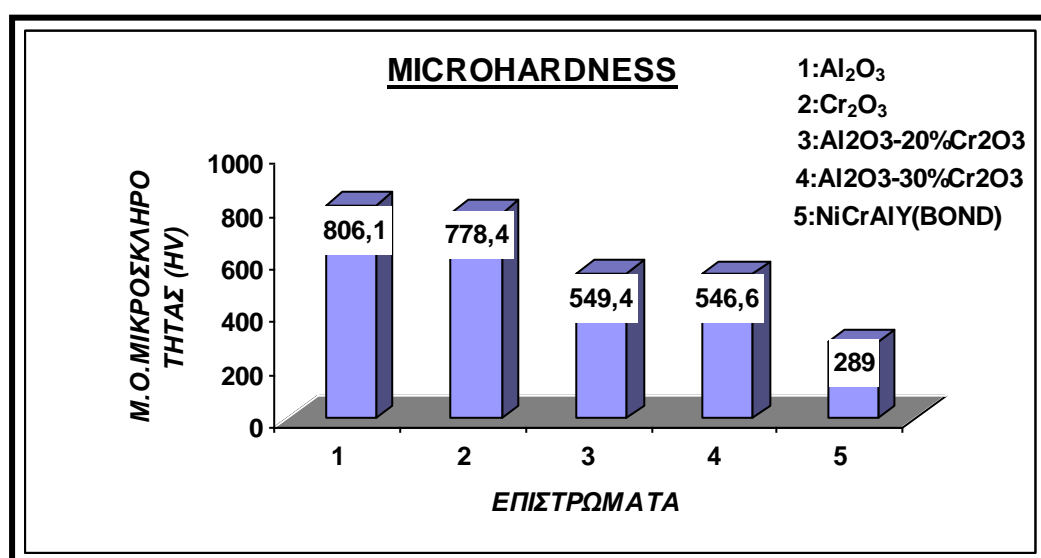
Αρχικά, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στην άκρη του περιστρεφόμενου τροχού για να γίνει η στίλβωση γρηγορότερα και σταδιακά τα δοκίμια έτειναν προς το κέντρο του τροχού, όπου η στίλβωση γινόταν με πιο αργούς ρυθμούς. Κατά τη διάρκεια της διεργασίας, η επιφάνεια των δοκιμίων πλενόταν με νερό, ώστε να απομακρύνονται τα προϊόντα εκτριβής που θα μπορούσαν να χαράξουν τα δοκίμια.

Όταν τελείωσε η στίλβωση, τα δοκίμια πλύθηκαν με οινόπνευμα, ώστε να απομακρυνθεί η παραφίνη. Στη συνέχεια ξηράνθηκαν όπου οι επιφάνειές τους ήταν τελείως λείες. Δεν χρειάστηκε να χρησιμοποιηθεί χημικό αντιδραστήριο στην επιφάνεια τους καθώς η δομή τους ήταν ευκρινής.

Μετά τον μεταλλογραφικό έλεγχο έγινε μικροσκληρομέτρηση της κάθε μιας επικάλυψης για να μετρηθεί η σκληρότητα μεμονωμένων σωματιδίων και φάσεων στο υπόστρωμα.

## 7.8 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ

Η χρησιμότητά της μικροσκληρότητας έγκειται στην πρόβλεψη αντοχής σε φθορά.



Σχήμα 7.7: Σύγκριση της μικροσκληρότητας των επιστρωμάτων.

MICROHARDNESS (MHV/300gr)					
ΥΛΙΚΟ	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	M.O.	St. Deviation	Minimum	Maximum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10	806,1	104,7	618	930
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10	778,4	115,1	580	958
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -20%Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10	549,4	150,3	416	794
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -30%Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10	546,6	89,3	440	666

Κατά τη μικροσκληρομέτρηση, όσο πιο μεγάλο είναι το αποτύπωμα του διαμαντιού τόσο πιο μαλακό είναι το υλικό και άρα τόσο μικρότερη σκληρότητα, άρα πιο μικρές τιμές μικροσκληρότητας. Έτσι συμπεραίνουμε ότι

δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη διαφορά στις μικροσκληρότητες των δύο κύριων κόνεων ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  και  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Η συνδετική επικάλυψη (NiCrAlY) τέλος έχει πολύ χαμηλή μικροσκληρότητα. Επίσης, οι δύο συνθέσεις των κύριων επικαλύψεων έχουν εντελώς διαφορετικές τιμές μικροσκληρότητας από αυτές των  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Αυτό έχει να κάνει με την κοκκομετρία της κάθε σκόνης.

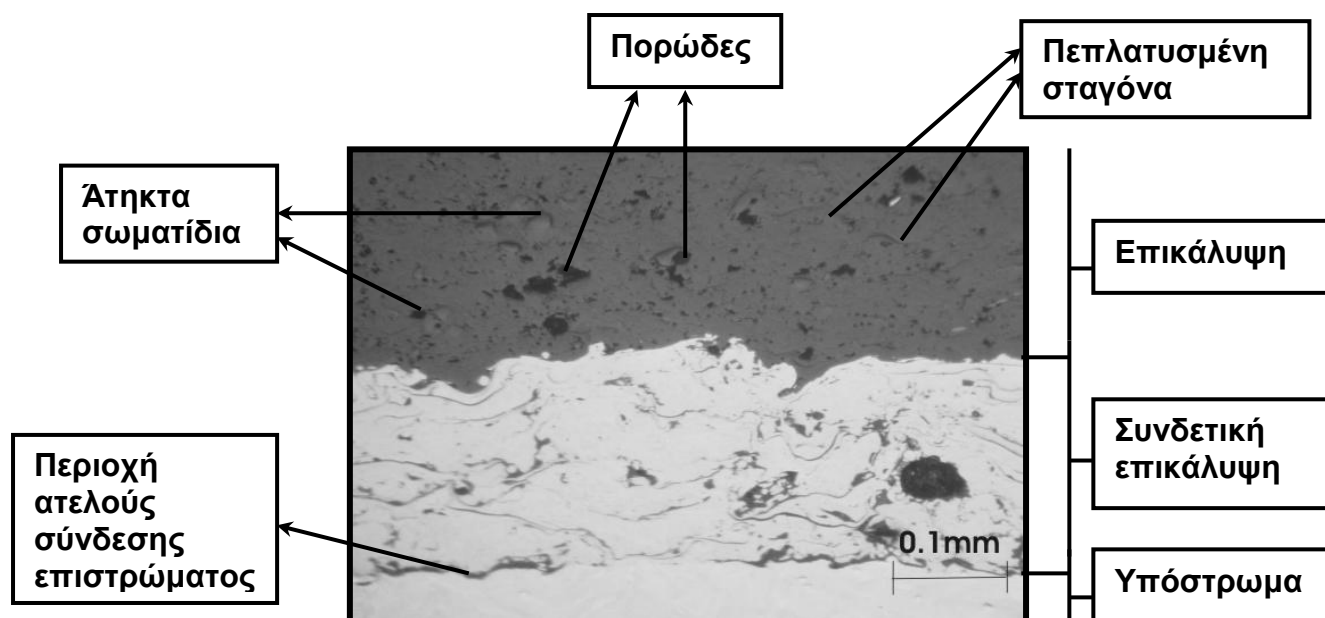
## 7.9 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑΣ

Με την ολοκλήρωση της μεταλλογραφικής προετοιμασίας, τα δοκίμια παρατηρήθηκαν σε οπτικό μικροσκόπιο. Η οπτική μικροσκοπία ανακλώμενου φωτός αποτελεί ακόμα και σήμερα την πιο σημαντική μέθοδο μελέτης της μικροδομής μετάλλων και κραμάτων, τα οποία έχουν υποστεί λείανση και στίλβωση (και αν είναι απαραίτητο, προσβολή). Το κύριο εργαλείο της οπτικής μικροσκοπίας είναι το μικροσκόπιο ανακλώμενου φωτός.

- **Επίστρωμα  $\text{Al}_2\text{O}_3$**

Η επικάλυψη της αλουμίνας παρουσίασε διάφορα χαρακτηριστικά, όπως πορώδεις, πεπλατυσμένα σωματίδια, περιοχές ατελούς σύνδεσης του επιστρώματος, ανομοιομορφία στη διεπιφάνεια υποστρώματος-επιστρώματος καθώς και άτηκτα σωματίδια.

Τα άτηκτα σωματίδια είναι σωματίδια που δεν έχουν προλάβει να τηχθούν στο δαυλό πλάσματος κι εγκλωβίστηκαν στη μικροδομή της επικάλυψης μεταξύ των διαδοχικών στρώσεων. Τα άτηκτα σωματίδια αποτελούν ξένα προς τη δομή σωματίδια και κατά συνέπεια έχουν αρνητική επίπτωση στη μηχανική συμπεριφορά της επικάλυψης ως σημεία έναρξης των αστοχιών.



Στην παραπάνω μικρογραφία διακρίνεται η εγκάρσια τομή της επικάλυψης  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και της συνδετικής επικάλυψης NiCrAlY (BOND COAT) στο χάλυβα. Επίσης, διακρίνονται πόροι διάφορων διαστάσεων. Οι πόροι αυτοί οφείλονται στον εγκλωβισμένο αέρα κατά τη διάρκεια της απόθεσης των σωματιδίων. Παράλληλα, η παρουσία πόρων και κενών που οφείλεται στην επαλληλία των στρώσεων, αλλά και η μεγάλη ταχύτητα σάρωσης του δαυλού κατά την διάρκεια του ψεκασμού είναι αιτίες που συμβάλλουν στην ύπαρξη πορώδους.

Η παρουσία του πορώδους συμβάλλει στην εκτόνωση των τάσεων που προκαλούνται από μηχανικές φορτίσεις και θερμικούς κύκλους. Ωστόσο, μέσω των πόρων, η επικάλυψη και το υπόστρωμα μπορούν να προσβληθούν από το εξωτερικό περιβάλλον (διάβρωση), αλλά και η ύπαρξη τους στη διεπιφάνεια μπορεί να οδηγήσει σε αποφλοιώση.

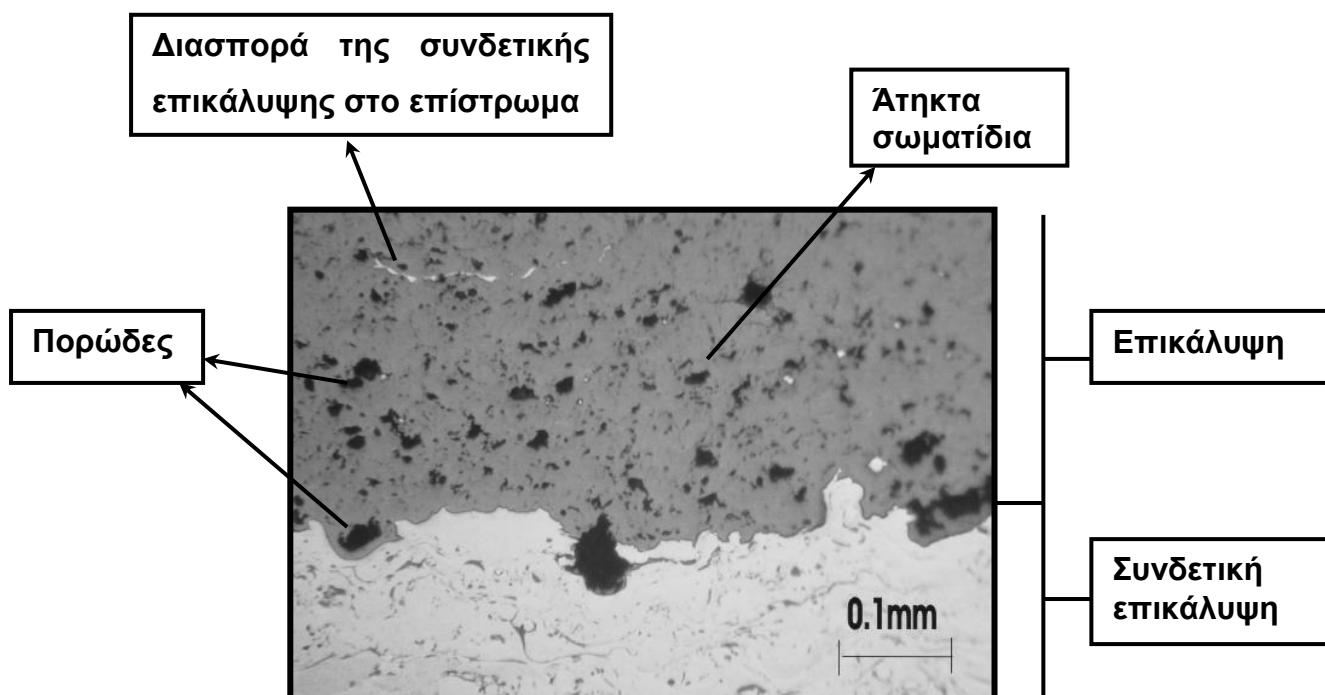
Το ποσοστό του πορώδους της επικάλυψης  $\text{Al}_2\text{O}_3$  μετρήθηκε με τη χρήση ενός ειδικού προγράμματος ανάλυσης εικόνας. Το πορώδες μετρήθηκε σε δέκα μεταλλογραφίες και βρέθηκε να είναι 4,6% (απόκλιση  $\pm 0,4\%$ ). Παρατηρείται ότι οι περισσότεροι πόροι είναι σχετικά ευμεγέθεις, ενώ

υπάρχουν και μικρότεροι πόροι. Οι ευμεγέθεις πόροι αποδίδονται σε πλημμελή κάλυψη των κενών που υπάρχουν ενδιάμεσα σε ήδη αποτεθέντα σωματίδια, ενώ οι μικρότεροι πόροι στην ατελή επαφή μεταξύ διαδοχικών στρώσεων.

Γενικά, η μικροδομή της επικάλυψης είναι ανομοιογενής με πτυχώσεις, οι οποίες ακολουθούν την πτύχωση της διεπιφάνειας, η οποία ακολουθεί κατά γενικό κανόνα το προφίλ της επιφάνειας του χάλυβα που έχει υποστεί αμβολή πριν την απόθεση.

- **Επίστρωμα Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

Η επικάλυψη της χρωμίας παρουσίασε επίσης διάφορα χαρακτηριστικά, όπως αυξημένο πορώδες, ανομοιομορφία στη διεπιφάνεια υποστρώματος-επίστρωματος, καθώς και άτηκτα σωματίδια. Επίσης παρατηρείται και διασπορά της συνδετικής επικάλυψης (NiCrAlY) στην επικάλυψη της χρωμίας (το οποίο επαληθεύτηκε από την χημική ανάλυση αυτής της περιοχής που έγινε στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης). Αυτό οφείλεται στο «splating» της συνδετικής επικάλυψης, όταν πέφτουν πάνω της οι σταγόνες της χρωμίας, με αποτέλεσμα τα δύο υλικά να αναμιγνύονται.

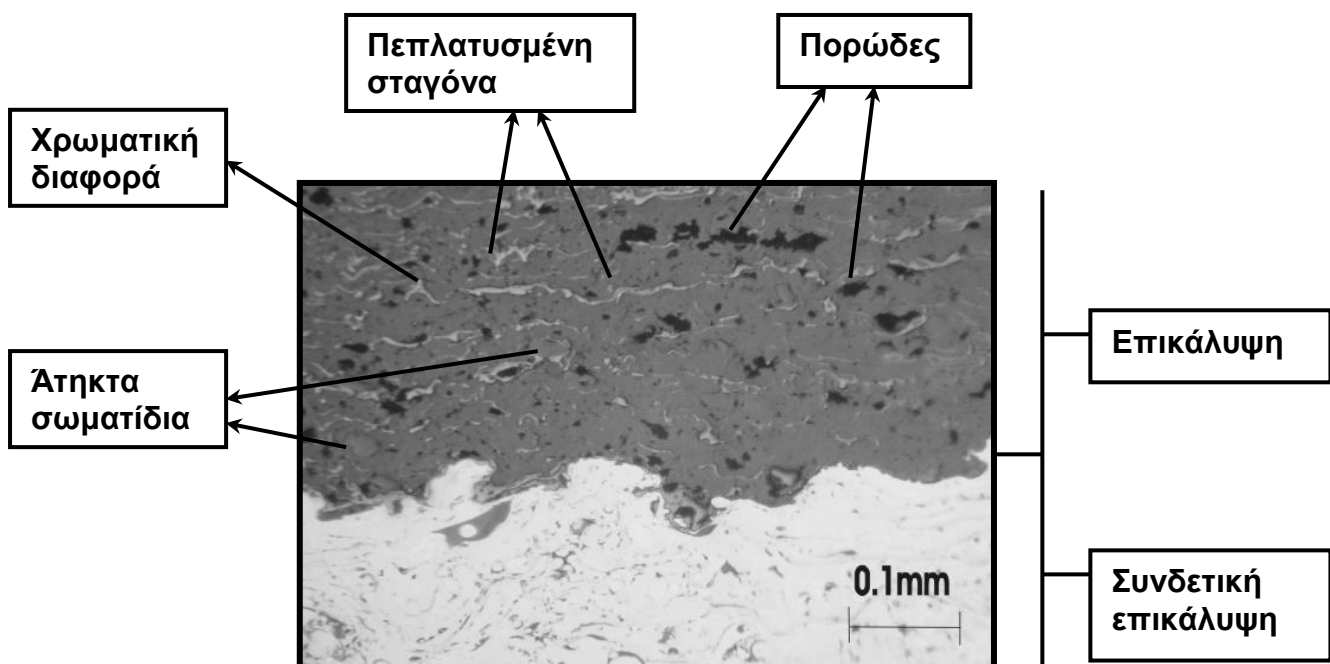




Το ποσοστό του πορώδους της επικάλυψης  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  μετρήθηκε με τη χρήση του προγράμματος ανάλυσης εικόνας. Το πορώδες μετρήθηκε σε δέκα μεταλλογραφίες και βρέθηκε να είναι κατά μέσο όρο 9,64% (απόκλιση  $\pm 0,2\%$ ). Παρατηρείται ότι σε σχέση με την επικάλυψη  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , η επικάλυψη  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  εμφανίζει υπερδιπλάσιο πορώδες. Παρατηρείται επίσης ότι λίγοι πόροι είναι σχετικά ευμεγέθεις, ενώ κυρίως οι πόροι είναι μικροί. Βλέπουμε τέλος ότι μια λεπτόκοκκη πούδρα (πχ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) εμφανίζει μεγαλύτερο πορώδες από μια χονδροκόκκη (πχ  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

- **Επίστρωμα  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 20% κ.β.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$**

Αυτή η επικάλυψη της αλουμίνας με 20% χρωμιά, παρουσίασε διάφορα χαρακτηριστικά, όπως πορώδες, πεπλατυσμένα σωματίδια, ανομοιομορφία στη διεπιφάνεια υποστρώματος-επιστρώματος και άτηκτα σωματίδια.

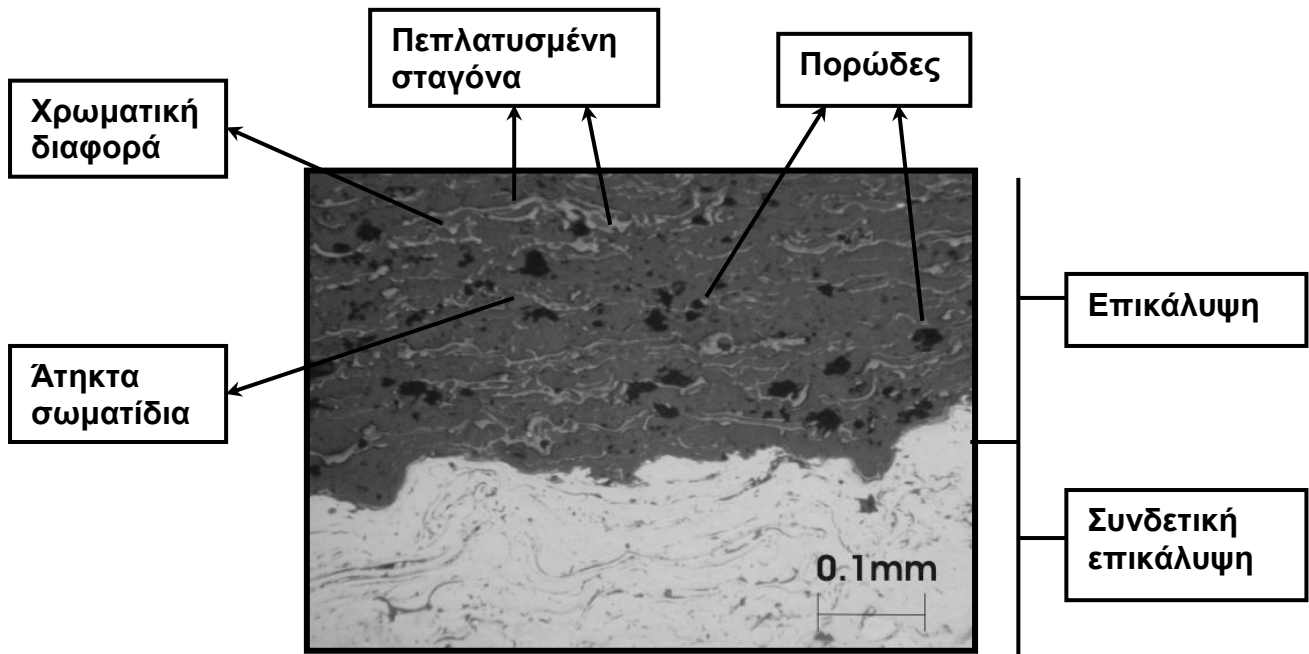


Στην παραπάνω μικρογραφία μπορούμε να διακρίνουμε την ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στην αλουμίνα (80%-γκρι) και τη χρωμία (20%-λευκό). Φαίνονται επίσης τα διάφορα στρώματα που έχουν σχηματισθεί στο επίστρωμα από τις σταγόνες της αλούμινας και της χρωμίας.

Το ποσοστό του πορώδους της επικάλυψης αυτής ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + 20\%$  κ.β.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) μετρήθηκε με τη χρήση του προγράμματος ανάλυσης εικόνας σε δέκα μεταλλογραφίες και βρέθηκε να είναι ίσο με 6,2% (απόκλιση  $\pm 0,3\%$ ). Παρατηρείται ότι έχει λίγο περισσότερο (+1,6%) πορώδες από την  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και λίγο λιγότερο (-3,4%) από την  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

- **Επίστρωμα  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\%$  κ.β.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$**

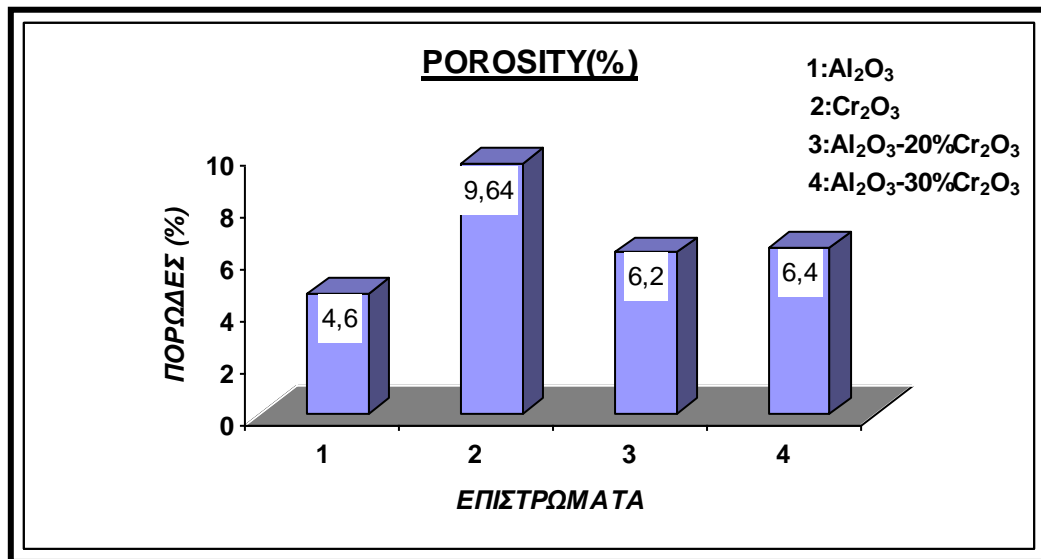
Αυτή η επικάλυψη της αλουμίνας με 30% χρωμία, παρουσίασε χαρακτηριστικά, όπως πορώδες, πεπλατυσμένα σωματίδια, ανομοιομορφίες στη διεπιφάνεια υποστρώματος-επιστρώματος καθώς και άτηκτα σωματίδια.



Στην παραπάνω μικρογραφία μπορούμε να διακρίνουμε την ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στην αλουμίνα (70%-γκρι) και τη χρωμία (30%-λευκό). Βλέπουμε επίσης τα διάφορα στρώματα που έχουν σχηματισθεί στο επίστρωμα από τις σταγόνες της αλούμινας και κυρίως της χρωμίας. Διακρίνετε με το μάτι ότι το ποσοστό της χρωμίας τώρα είναι μεγαλύτερο από την προηγούμενη μικρογραφία.

Το ποσοστό του πορώδους της επικάλυψης αυτής ( $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%$  κ.β.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) μετρήθηκε με το πρόγραμμα ανάλυσης εικόνας σε δέκα μεταλλογραφίες και βρέθηκε να είναι ίσο με 6,4% (απόκλιση  $\pm 0,2\%$ ). Παρατηρείται ότι έχει λίγο περισσότερο (+1,8%) πορώδες από την  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και λίγο λιγότερο (-3,2%) από την  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Τέλος παρατηρούμε ότι έχει πολύ λίγο παραπάνω πορώδες (+0,2%) από την προηγούμενη επικάλυψη που εξετάσθηκε ( $\text{Al}_2\text{O}_3+20\%$  κ.β.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Αυτό το λίγο δικαιολογείται αφού η επικάλυψη  $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%$  κ.β.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  έχει μεγαλύτερο ποσοστό χρωμίας.

Στο παρακάτω σχήμα 7.8 βλέπουμε συγκεντρωτικά το πορώδες του κάθε επιστρώματος.

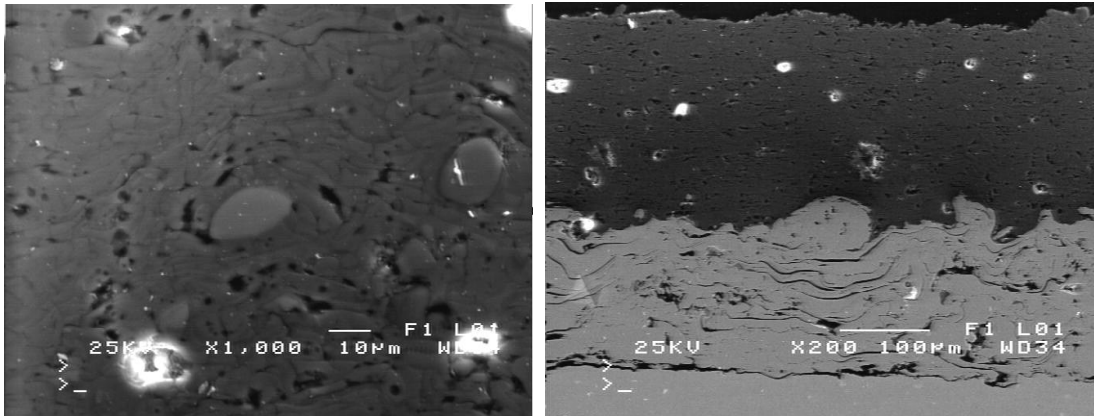


Σχήμα 7.8: Σύγκριση του πορώδους των επιστρωμάτων.

## 7.10 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)

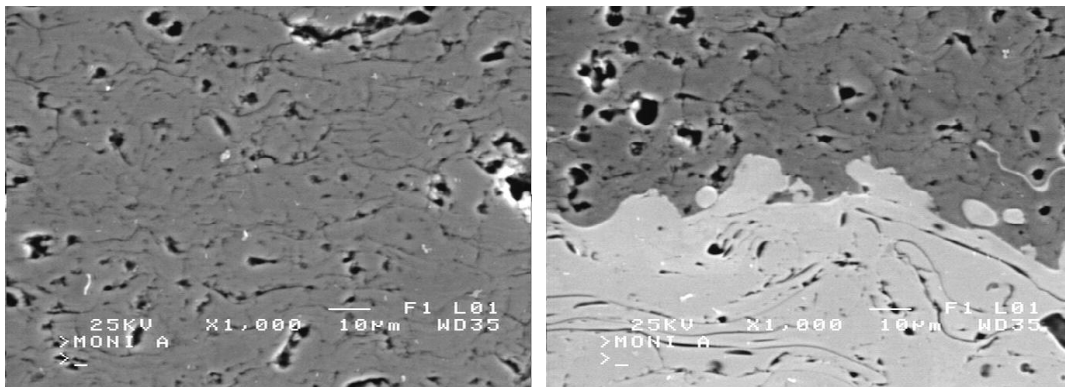
Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope – SEM) χρησιμεύει στην παρατήρηση επιφανειών και σε συνδυασμό με κατάλληλα συστήματα μικροανάλυσης για την στοιχειακή ανάλυση συγκεκριμένων περιοχών της υπό παρατήρηση εικόνας. Παρακάτω παρατίθενται μικρογραφίες καθώς και χημικές αναλύσεις της κάθε επικάλυψης.

## Επικάλυση Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



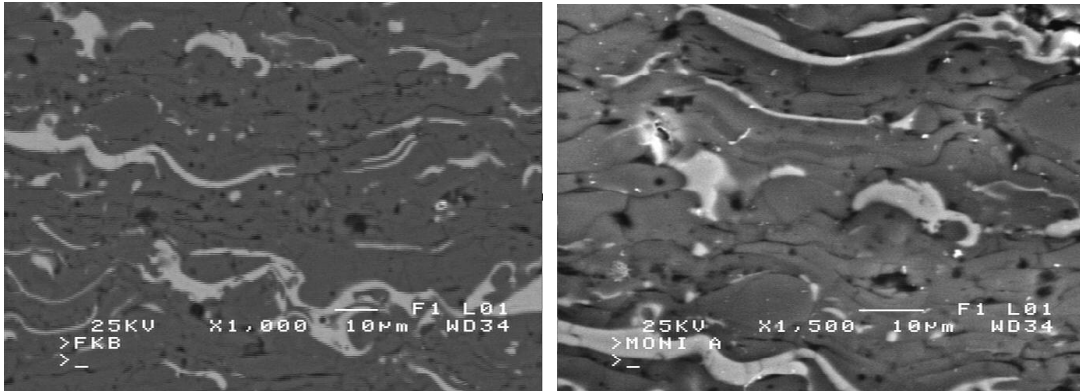
Η επικάλυψη της αλουμίνας παρουσίασε διάφορα χαρακτηριστικά, όπως πορώδεις (4,6%), πεπλατυσμένα σωματίδια, περιοχές ατελούς σύνδεσης του επιστρώματος, ανομοιομορφία στη διεπιφάνεια υποστρώματος-επιστρώματος καθώς και άτηκτα σωματίδια.

## Επικάλυση Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



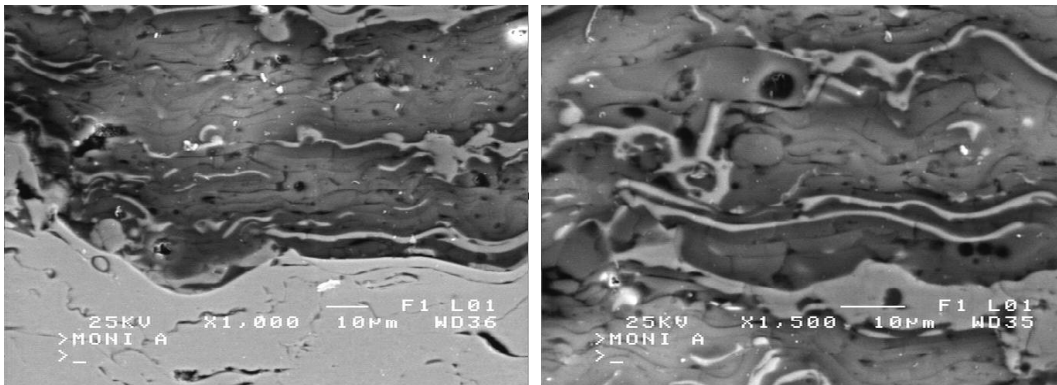
Η επικάλυψη της χρωμίας παρουσίασε χαρακτηριστικά, όπως αυξημένο πορώδες (9,64%), πεπλατυσμένα σωματίδια, ανομοιομορφία στη διεπιφάνεια υποστρώματος-επιστρώματος καθώς και άτηκτα σωματίδια. Επίσης εδώ δεν διαπιστώθηκε ατελής σύνδεση της επικάλυψης, όπως έγινε στην περίπτωση της αλουμίνας. Η χημική ανάλυση στη γκρι φάση έδειξε ότι περιείχε 96,24% χρώμιο και 3,76% τιτάνιο.

### Επικάλυση $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-20\%Cr}_2\text{O}_3$



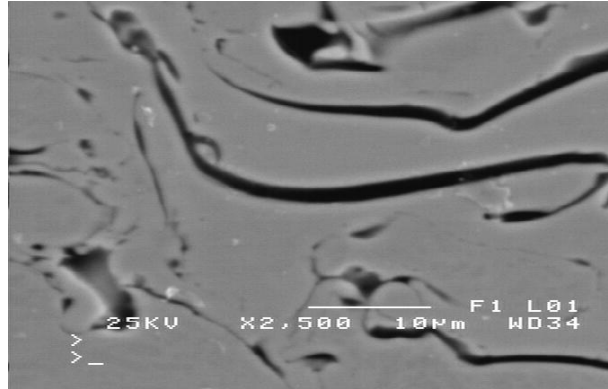
Η επικάλυψη αυτή παρουσίασε πορώδες 6,2%. Επίσης διακρίνουμε καθαρά τις στρώσεις της κάθε σταγόνας που έπεφτε, καθώς και άηχτα σωματίδια. Εδώ υπάρχουν δύο φάσεις: η γκρι (Al: 98,06% , Cr: 1,93%) και η λευκή (Cr: 92,87% , Al: 3,98% , Ti: 2,70% , Si: 0,45%). Μια γενική ανάλυση έδειξε ότι είχαμε 84,66% Al ,15,01% Cr και 0,33% Ti.

### Επικάλυση $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-30\%Cr}_2\text{O}_3$



Η επικάλυψη αυτή παρουσίασε πορώδες 6,4%. Μια γενική ανάλυση έδειξε ότι υπήρχε 76,99% Al , 20,84% Cr , 1,13% Si και 1,05% Ti. Εδώ υπάρχουν δύο φάσεις: η γκρι (Al: 97,3% , Cr: 1,99% , Si: 0,7%) και η λευκή (Cr: 95,88% , Ti: 2,76% , Al: 1,01% , Si: 0,35%). Επίσης έγινε χημική ανάλυση και στη συνδετική επικάλυψη (NiCrAlY). Βρέθηκαν δύο φάσεις : η λευκή φάση (Ni: 72,48% , Cr: 20,68% , Al: 4,09% , Si: 1,25% , Y: 1,96%) και η γκρι φάση, το μητρικό (Ni: 64,27% , Cr: 23,96% , Al: 11,44% , Si: 0,33% , Y: 0%).

## Συνδεδειγμένη Επικάλυψη (NiCrAlY)



Μια γενική ανάλυση της συνδεδειγμένης επικάλυψης (NiCrAlY) έδειξε ότι υπήρχε 64,18% Ni, 23,97 Cr, 10,56% Al και 1,29% Υ.

### **7.11 ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ (Thermal Shock)**

Κατά την δοκιμή αντοχής σε έντονες θερμικές καταπονήσεις (Thermal Shock), τοποθετήθηκαν τα 4 δοκίμια ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -20%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) σε φούρνο προκειμένου να ελεγχθεί η αντοχή τους στο θερμικό αιφνιδιασμό, ακολουθώντας την εξής πρότυπη διαδικασία:

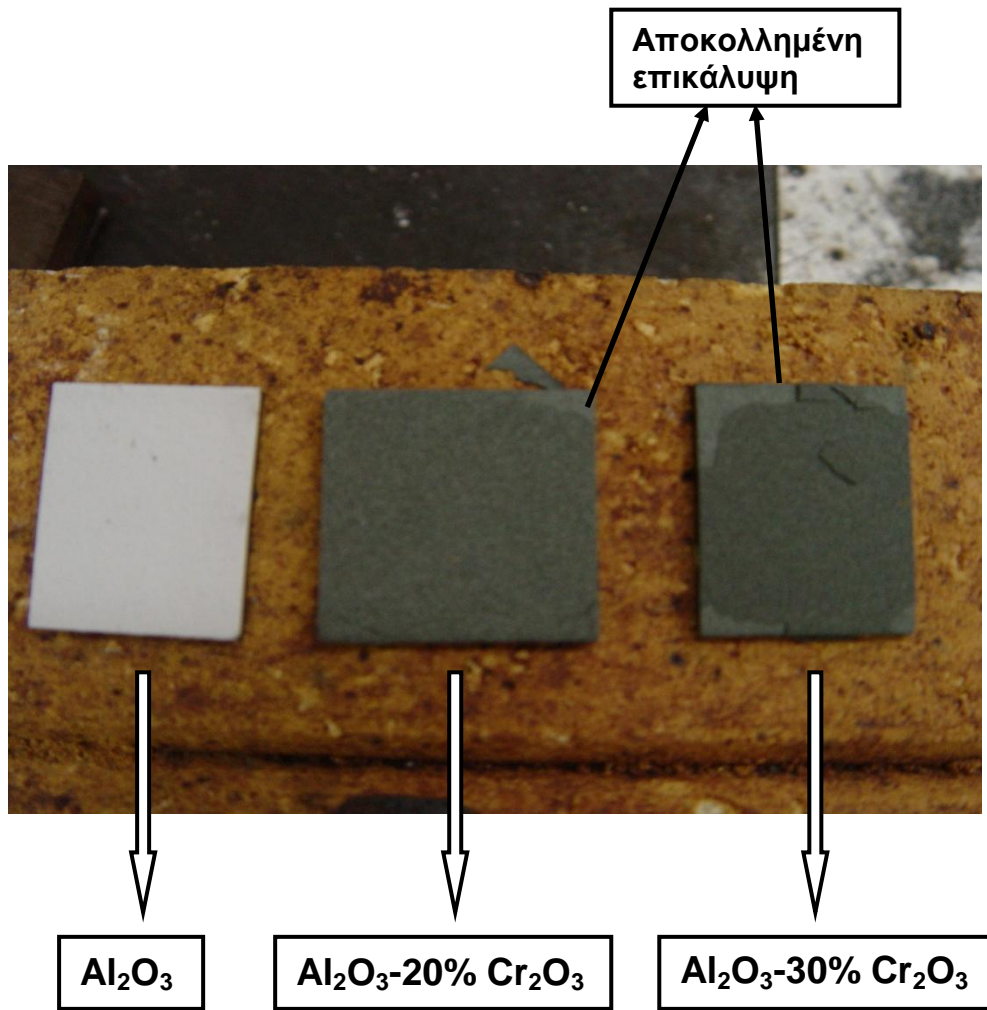
1. Εισαγωγή των δοκιμίων σε εργαστηριακό φούρνο.
2. Αύξηση της θερμοκρασίας του φούρνου με ρυθμό  $15^\circ\text{C}/\text{min}$  μέχρι τους  $900^\circ\text{C}$ .
3. Παραμονή σε θερμοκρασία  $900^\circ\text{C}$  για 10min.
4. Εξαγωγή από το φούρνο και παρατήρηση.
5. Παραμονή για 10min σε θερμοκρασία δωματίου και εισαγωγή στο φούρνο, ο οποίος διατηρείται στους  $900^\circ\text{C}$ .
6. Αύξηση της θερμοκρασίας του φούρνου στους  $1000^\circ\text{C}$ . Παραμονή σε θερμοκρασία  $1000^\circ\text{C}$  για 10min.
7. Εξαγωγή από το φούρνο και παρατήρηση.

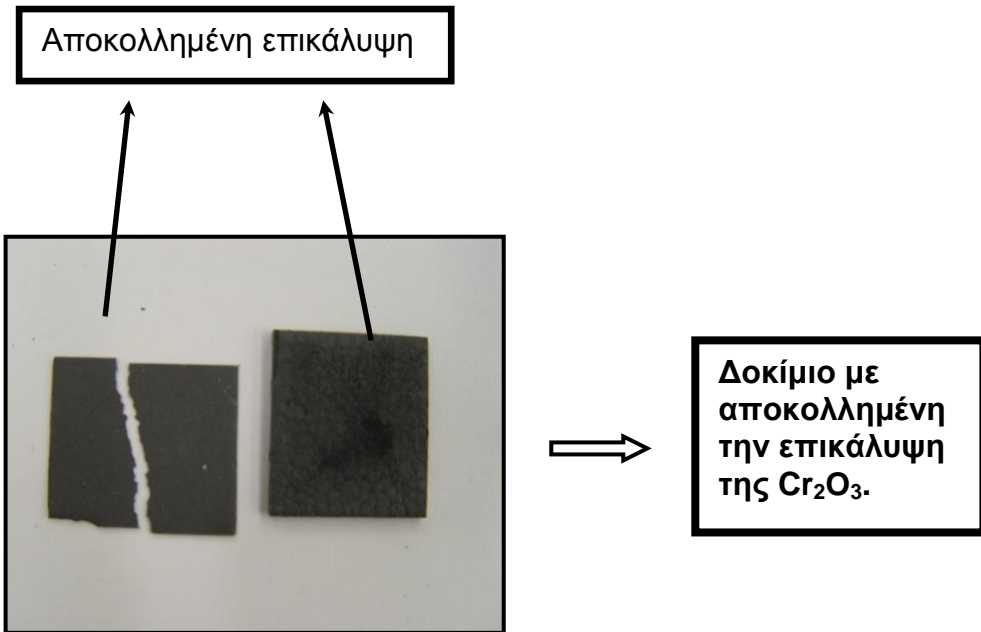
8. Παραμονή για 10min σε θερμοκρασία δωματίου και εισαγωγή στο φούρνο ο οποίος διατηρείται στους 1000°C.
9. Παραμονή σε θερμοκρασία 1000°C για 10min.
10. Εξαγωγή από το φούρνο.
11. Διακοπή του πειράματος μετά την καταστροφή των δοκιμίων.

(ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Η διαδικασία της θερμικής καταπόνησης πραγματοποιήθηκε μόνο μια φορά για κάθε μια επικάλυψη).

Στο πρώτο στάδιο της θερμικής καταπόνησης είχαμε ολική αποκόλληση της επικάλυψης  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (έμεινε μόνο η συνδετική επικάλυψη, NiCrAlY) κατά την απόψυξη από τους 900°C, δηλαδή εκτός φούρνου και μετά από θέρμανση στους 900°C. Έτσι είχαμε διακοπή του πειράματος για την χρωμιά. Κατά το δεύτερο βήμα της θερμικής καταπόνησης και μετά από παραμονή στους 1000°C δεν είχαμε καμία μεταβολή στα υπόλοιπα δοκίμια ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -20%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Κατά το τελευταίο στάδιο της θερμικής καταπόνησης των δοκιμίων υπήρξε μερική αποκόλληση της «άνω» επικάλυψης των δύο ενδιάμεσων υλικών ( **$\text{Al}_2\text{O}_3$ -20%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$**  και  **$\text{Al}_2\text{O}_3$ -30%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$** ). Δεν υπήρξε αποκόλληση της συνδετικής επικάλυψης (NiCrAlY). Το δοκίμιο που είχε επικαλυφθεί με  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  είχε μεγαλύτερη μερική αποκόλληση της «άνω» επικάλυψης σε σχέση με το δοκίμιο  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -20%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  που είχε λιγότερη αποκόλληση. Τέλος στο δοκίμιο που είχε επικαλυφθεί με αλουμίνα ( **$\text{Al}_2\text{O}_3$** ) δεν υπήρξε καμία μεταβολή. Ήταν το μόνο δοκίμιο που άντεξε τη θερμική καταπόνηση. Παρακάτω παρατίθενται δύο φωτογραφίες μετά τη θερμική καταπόνηση.



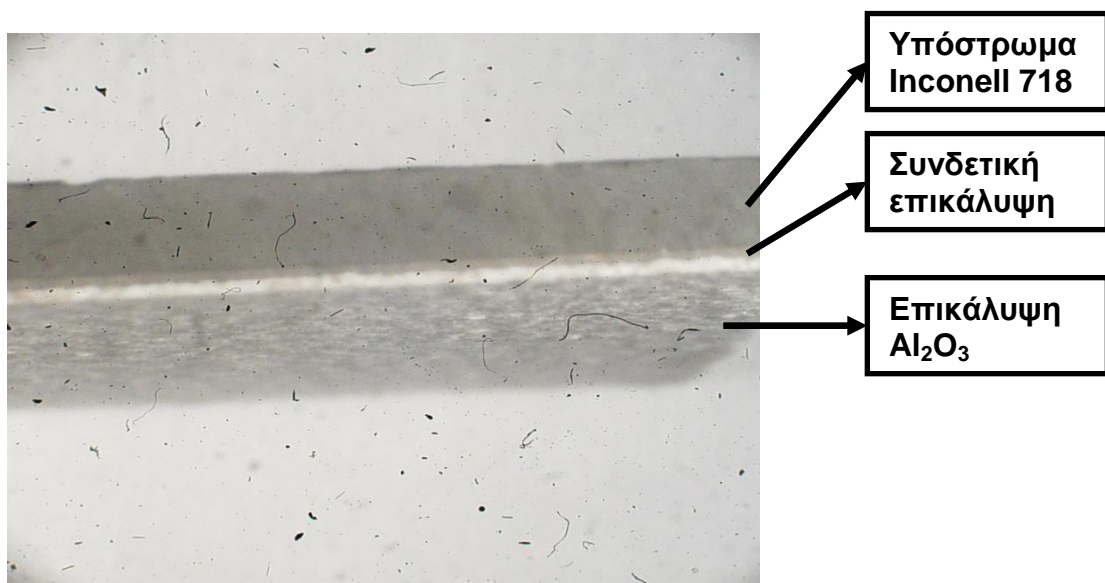




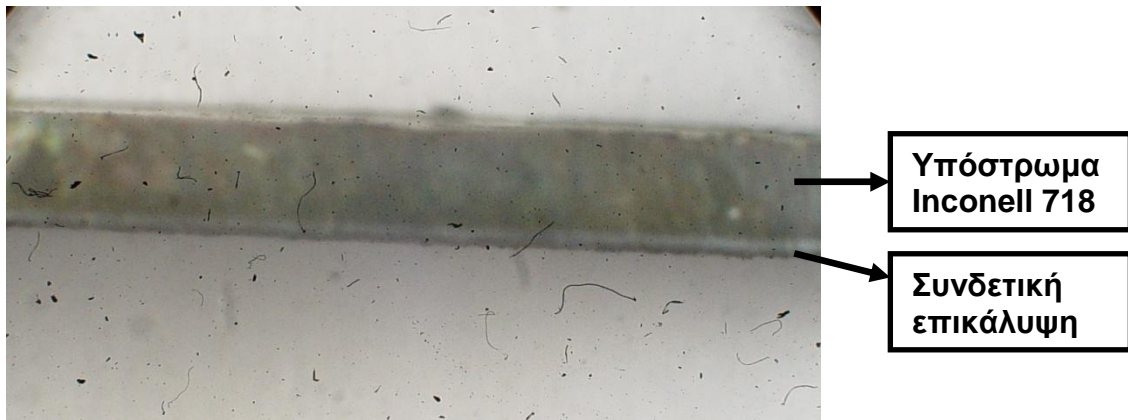
Αριστερά φαίνεται η αποκολλημένη επικάλυψη της  $Cr_2O_3$  (που έχει κοπεί στα δύο) και δεξιά βλέπουμε το δοκίμιο που έχει μείνει (πλέον, μόνο με τη συνδετική επικάλυψη NiCrAlY).

## ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

- $Al_2O_3$

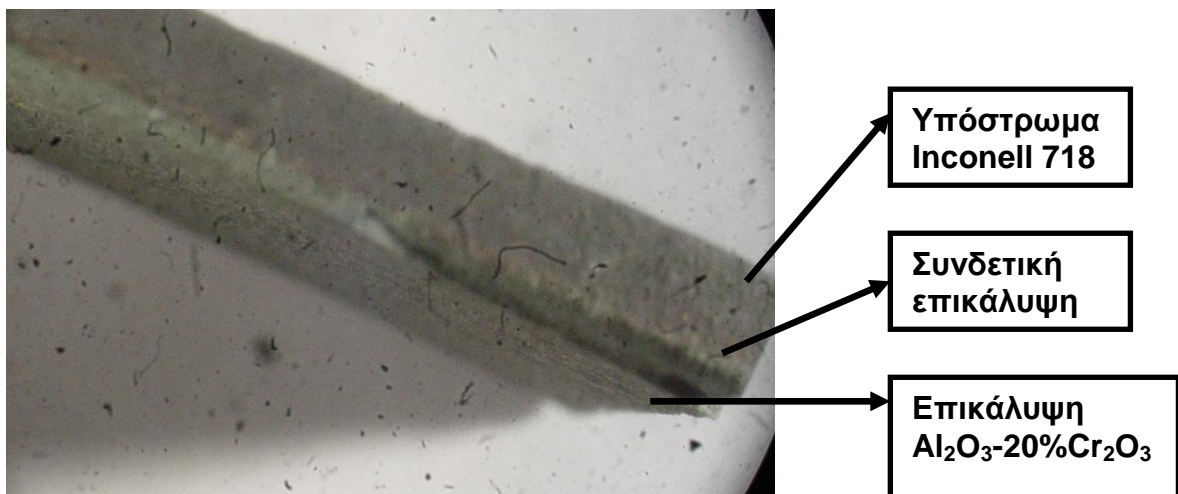


- Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

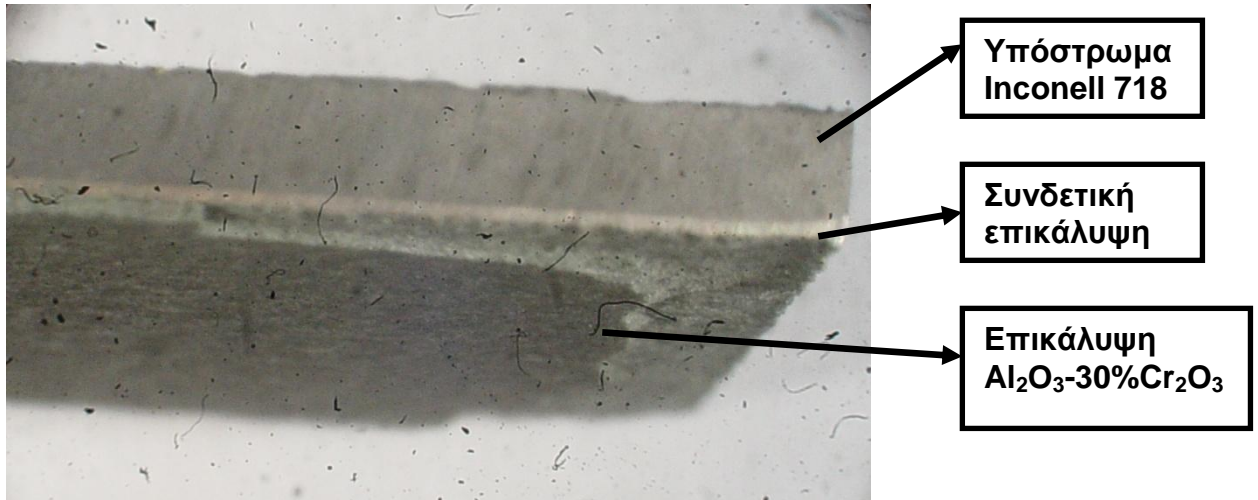


Η επίστρωση χρωμίας (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) αποκολλήθηκε κατά τη θερμική καταπόνηση.

- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+20%Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



- $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{Cr}_2\text{O}_3$



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα βασικά συμπεράσματα της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι τα ακόλουθα:

1. Τα επιστρώματα  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}20\%\text{Cr}_2\text{O}_3$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}30\%\text{Cr}_2\text{O}_3$  χαρακτηρίζονται από πορώδες, το οποίο οφείλεται στην παγίδευση αέρα ανάμεσα στα τηγμένα σωματίδια της  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και της  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  καθώς αυτά προσπίπτουν στο υπόστρωμα. Τα περισσότερα από τα σωματίδια του επιστρώματος είναι πεπλατυσμένα, λόγω του ότι προσπίπτουν στο υπόστρωμα με μεγάλη ταχύτητα. Από την μεταλλογραφική εξέταση διαπιστώθηκε η ύπαρξη πορώδους στο επίστρωμα  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ίσο με  $4,6\pm 0,4\%$ , στην  $\text{Cr}_2\text{O}_3$   $9,64\pm 0,2\%$ , στο επίστρωμα  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}20\%\text{Cr}_2\text{O}_3$   $6,2\pm 0,3\%$  και στο επίστρωμα  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}30\%\text{Cr}_2\text{O}_3$   $6,4\pm 0,2\%$ .
2. Μεταξύ των κεραμικών αυτών επικαλύψεων και του υποστρώματος (Inconell 718) αποτέθηκε λεπτό στρώμα ενδιάμεσης επικάλυψης (NiCrAlY) με στόχο τη βελτίωση της πρόσφυσης. Η αλουμίνα και η χρωμία σαν επικαλύψεις πάνω από το NiCrAlY παρέχουν προστασία σχηματίζοντας μία προστατευτική αναλογία οξειδίων, αφού η προσθήκη του ύτριου (Y) βελτιώνει την προσκόλληση των επικαλύψεων.
3. Τα επιστρώματα της  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , της  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , καθώς και των συνθέσεών τους,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}20\%\text{Cr}_2\text{O}_3$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}30\%\text{Cr}_2\text{O}_3$  παρουσίασαν (μετά από παρατήρηση σε αρκετές μεταλλογραφίες) διάφορα χαρακτηριστικά, όπως πορώδες, πεπλατυσμένα σωματίδια, ανομοιομορφία στη διεπιφάνεια υποστρώματος-επιστρώματος και άτηκτα σωματίδια.

4. Επίσης η μέτρηση της τραχύτητας σε αυτά τα τέσσερα επιστρώματα έδειξε ότι το επίστρωμα μιας χονδροκόκκης σκόνης ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) παρουσίασε μεγαλύτερη μέση τραχύτητα ( $R_a = 10,387\mu\text{m}$ ), σε σχέση με την μέση τραχύτητα του επιστρώματος μιας πιο λεπτής σκόνης ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $R_a = 7,081\mu\text{m}$ ).
5. Μια σύγκριση της μικροσκληρότητας των επιστρωμάτων έδειξε ότι τα δύο κύρια επιστρώματα ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  και  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) παρουσιάζουν αυξημένη και σχεδόν ίδια μικροσκληρότητα, ενώ οι δύο συνθέσεις αυτών έχουν μικρότερες τιμές μικροσκληρότητας. Έτσι παρουσιάζουν μειωμένη αντοχή στη φθορά.
6. Επίσης παρατηρήθηκε ότι κατά την θερμική καταπόνηση των τεσσάρων δοκιμών υπήρξε ολική αποκόλληση του επιστρώματος της  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , από το πρώτο στάδιο, ενώ στο τέλος της διαδικασίας αυτής παρατηρήθηκε μερική αποκόλληση της «άνω» επικάλυψης των επιστρωμάτων  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}20\%\text{Cr}_2\text{O}_3$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}20\%\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Τέλος το επικαλυμμένο με αλουμίνα δοκίμιο ήταν το μοναδικό που άντεξε στη θερμική καταπόνηση.
7. Τέλος κατά τη δοκιμή φθοράς εκτριβής παρατηρήθηκε ότι η ανάμιξη δύο διαφορετικών φάσεων (της  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και της  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) μειώνει τη συνοχή της επικάλυψης. Έτσι φθείρονται πιο εύκολα σε σχέση με το αν η επικάλυψη ήταν ομοιογενής. Η αντίσταση στη φθορά εκτριβής έχει άμεση σχέση με τη σκληρότητα της κάθε επικάλυψης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ι.Χρυσουλάκης, Δ.Παντελής, “Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών”, Παπασωτηρίου 1996.
- α) [www.space-science.com/ExploringSpace/PlasmaStateOfMatter/1.html](http://www.space-science.com/ExploringSpace/PlasmaStateOfMatter/1.html),  
β) “Plasma Science Report”, 1995 (Contents and overview)-  
[www.nap.edu/readingroom/books/plasma/contents.html](http://www.nap.edu/readingroom/books/plasma/contents.html)  
γ) [www.nap.edu/readingroom/books/plasma/contents.html](http://www.nap.edu/readingroom/books/plasma/contents.html),  
δ) [www.gordonengland.co.uk/tsc.html](http://www.gordonengland.co.uk/tsc.html),  
ε) [www.plasmacoalition.org/applications.html](http://www.plasmacoalition.org/applications.html),  
ζ) [www.plasmas.org/basics.html](http://www.plasmas.org/basics.html),
- [www.spray-itsa.com](http://www.spray-itsa.com)
- [www.aacoinc.com](http://www.aacoinc.com)
- [www.plasmacoalition.org](http://www.plasmacoalition.org)
- Δ.Παντελής, “Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά, Δομή-Ιδιότητες-Τεχνολογία-Εφαρμογές”, Παπασωτηρίου 1996
- [www.plasmacoalition.org/more3.html](http://www.plasmacoalition.org/more3.html),
- K. Borbeck, Intern.Therm.Spray.Conf σελ (99-104)
- Flame Spray Handbook Vol III – Plasma flame process H.S Ingham and P.C Wolf,
- Technical Bulletin #10-093 – Metco 105NS White Alumina Powders
- Technical Bulletin – Metco 106 Chromium Oxide Powder,
- Technical Bulletin #10-655 – Amdry 962 Nickel Chromium Aluminium Yttria Powder For Bond Coats,
- Technical Bulletin - Inconel 718
- A.R.Nicoll, Plasma Technik AG Switzerland, “Protective Coatings and Their Processing – Thermal Spray”, High Temperature Materials and Coatings, 24-29, 1984,
- H.Herman, S.Sampath, “Thermal Spray Coatings”, [www.matscieng.sunysb.edu](http://www.matscieng.sunysb.edu),

- ΙΚ ΙV Καγιαμπάκη, ΙΚ ΙV Κατερίνη, “Διπλωματική Εργασία: Τεχνολογία απόθεσης επικαλύψεων με χρήση πλάσματος. Εφαρμογές στην ΠΑ. Μελέτη της κατεργασίας με laser επιστρώματος πλάσματος ζirkονίας”- T.N.Rhys-Jones, “Thermally Sprayed Coating systems for Surface Protection and Clearance Control Applications in Aero Engines”, Surf. & Coat. Technology, 43/44, 1990, 402-415
- S.Takeuchi, Mlt6, K.Takeda, Surf. And Coat Technol,43/44,1990, 426-435,
- Clark, W.P. “The Development of Thermal Spray hard surfacing” Welding Journal 60(7) : 27-29, July 1981.
- Ingham, H.S., Jr. and Fabel, A.J. “Comparison of plasma flame spray gases.” Welding Journal 54(2) : 101-5, February 1975.
- Technical Bulletin (από την ΕΑΒ) για τη Θερμική Καταπόνηση (Thermal Shock).
- Technical Bulletin για τη δοκιμή αντίστασης στη φθορά λόγω εκτριβής (Room Temperature Erosion Testing).
- [www.hai.gr](http://www.hai.gr)
- Γ. Δ. Παπαδημητρίου, Ε.Μ.Π., Μεταλλογνωσία ΙΙ

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>ΣΧΗΜΑ 1.1:</b> Η ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΨΕΚΑΣΜΟΥ .....	10
<b>ΣΧΗΜΑ 1.2:</b> ΤΟΜΗ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ-ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΟΨΕΚΑΣΜΟΥ. ....	11
<b>ΣΧΗΜΑ 1.3:</b> ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΘΕΡΜΙΚΟ ΨΕΚΑΣΜΟ.....	12
<b>ΣΧΗΜΑ 1.4:</b> ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ. .....	22



<b>ΣΧΗΜΑ 2.1:</b> ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΤΟ ΠΛΑΣΜΑ. ....	24
<b>ΣΧΗΜΑ 3.1:</b> ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΚΙΑΣΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΝΤΑΙ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΨΕΚΑΣΜΟ ΥΠΟ ΜΙΚΡΕΣ ΓΩΝΙΕΣ.....	32
<b>ΣΧΗΜΑ 3.2:</b> ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ. ....	37
<b>ΣΧΗΜΑ 3.3:</b> ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΙΑΣ ΣΤΑΓΟΝΑΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗ ΤΗΣ ΣΤΟ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ .....	39
<b>ΣΧΗΜΑ 3.4:</b> ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΨΕΚΑΣΜΟ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ. ....	40
<b>ΣΧΗΜΑ 4.1:</b> ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΕΝΟΣ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	42
<b>ΣΧΗΜΑ 4.2:</b> ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΟΠΟΥ ΦΑΙΝΟΝΤΑΙ ΟΙ ΜΙΚΡΟΠΟΡΟΙ. ....	44
<b>ΣΧΗΜΑ 5.1:</b> ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΕΓΚΡΙΣΗΣ Η ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ ΕΝΟΣ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ .....	52
<b>ΣΧΗΜΑ 7.1:</b> Η ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΤΥΧΩΣΕΩΝ ΥΠΟΒΟΗΘΑΕΙ ΤΟ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΠΡΟΣΦΥΣΗΣ ΕΞΑΣΦΑΛΙΖΟΝΤΑΣ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ- ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ. ....	64
<b>ΣΧΗΜΑ 7.2:</b> ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΑΜΜΟΒΟΛΗΣ. ....	65
<b>ΣΧΗΜΑ 7.3:</b> ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ .....	79
<b>ΣΧΗΜΑ 7.4:</b> Α) ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΡΑΧΥΜΕΤΡΩΝ, Β) ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΣΤΥΛΙΣΚΟΥ. ....	80
<b>ΣΧΗΜΑ 7.5:</b> ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΟΠΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ. ....	82
<b>ΣΧΗΜΑ 7.6:</b> ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕΤΑ ΤΗ ΛΕΙΑΝΣΗ ΚΑΙ ΤΗ ΣΤΙΛΒΩΣΗ. ....	85
<b>ΣΧΗΜΑ 7.7:</b> ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ. ....	86
<b>ΣΧΗΜΑ 7.8:</b> ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ. ....	93