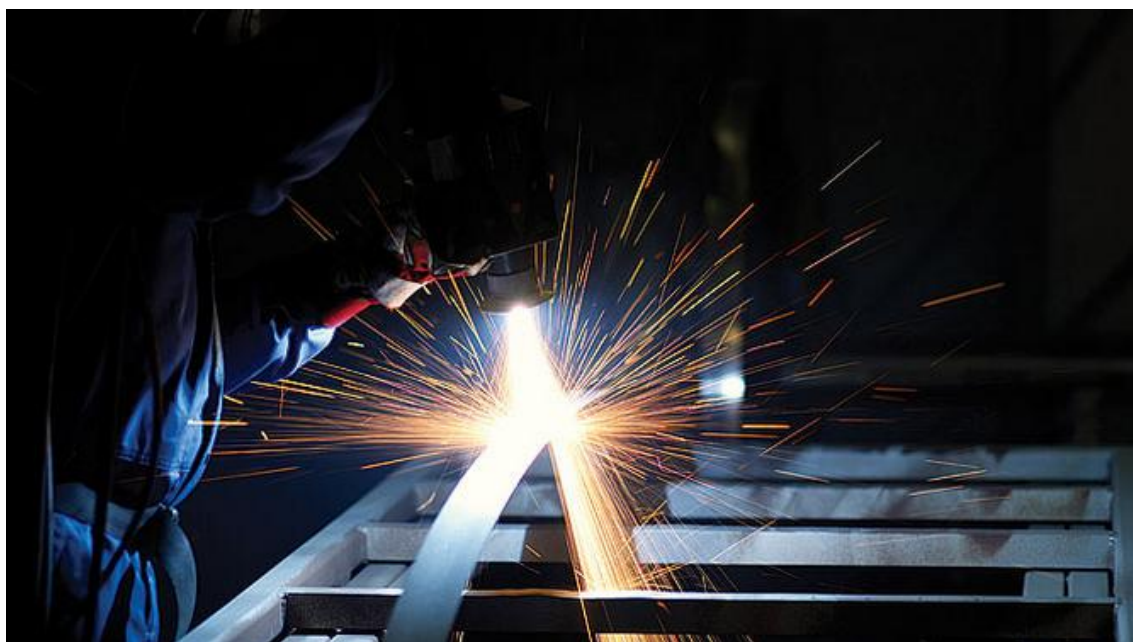


**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: ΕΠΙΥΑΛΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΜΕ
ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΠΡΕΥ.ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ
ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ**



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δ. ΚΟΥΝΤΟΥΡΑΣ

ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ

2017

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: ΕΠΙΥΑΛΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΜΕ
ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΠΡΕΥ.ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ
ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΑΜ:5033

ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ

ΑΜ:5150

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ:

Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας

Ο καθηγητής

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με θέμα την επιτύλωση μεταλλικών επιφανειών με θερμικά σπρέι συντάχθηκε με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας και υλικών, συχνά σπάνιων και ακριβών, με αποτέλεσμα να καθιστούν τις επικαλύψεις ικανές να παίξουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο σε κάθε βιομηχανικό-βιοτεχνικό τομέα σε ξηρά και θάλασσα που έχει σχέση με παραγωγή, συντήρηση και επισκευή. Αρχικά γίνεται μια προσέγγιση στον ορισμό του θερμικού ψεκασμού και έπειτα δίνονται πληροφορίες για την ποιότητα των επιστρωμάτων θερμικού ψεκασμού που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, που έχουν να κάνουν με τις συνθήκες ψεκασμού, με τις ιδιότητες των πρώτων υλών αλλά και με το είδος της τεχνικής που χρησιμοποιείται κάθε φορά.

Abstract

The present final work on the over-glass metal surfaces by thermal spray is produced in order to save energy and materials, often rare and expensive, thereby making coatings able to play a very important role in any industrial-handicraft sector on land and sea related to production, maintenance and repair. Initially made an approach to the definition of the thermal spraying and then provides information about the quality of the coatings thermal spraying depends on many factors, which have to do with the spraying conditions, the properties of raw materials and the type of the technique used every time.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
ΕΙΔΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	11
1.1 ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΜΕ ΨΕΚΑΣΜΟ (Sprayed Coatings)	11
1.2 Θερμικός ψεκασμός σύρματος με φλόγα	13
1.3 Θερμικός ψεκασμός με αέρια (FLSP) με χρήση κονιάματος	16
1.4 Θερμικός ψεκασμός υψηλής ταχύτητας με χρήση φλόγας καύσης (HVOF).....	19
1.5 Ψεκασμός εκτόνωσης (Detonation Gun – D-Gun).....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	22
Ψεκασμός με ηλεκτρικό τόξο (Electric arc processes, Wire arc ή Twin-wire arc).....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	24
ΓΕΝΙΚΑ	24
3.1.1 Ψεκασμός σε ατμοσφαιρικές συνθήκες (atmospheric plasma spraying)	25
3.1.2 Ψεκασμός πλάσματος σε κενό ή σε χαμηλή πίεση (vacuum plasma spray, VPS ή Low pressure plasma spray, LPPS).....	27
3.1.3 Ψεκασμός πλάσματος σε περιβάλλον αργού-αζώτου	27
3.2.1 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ	28
ΓΕΝΙΚΑ	28
3.2.2 ΑΕΡΙΑ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	29
3.2.3 ΑΠΟΘΕΣΗ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	29
3.2.4 ΓΩΝΙΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ	31
3.2.5 ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ.....	32
3.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ	33
3.3.1 ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ	33
3.3.2 ΠΟΡΩΔΕΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ	35
3.3.3 ΠΡΟΣΦΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	36
3.3.4 ΟΞΕΙΔΙΑ.....	38
3.3.5 ΑΤΗΚΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	40
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	40
Εισαγωγή.....	40
4.1 Γεωμετρικές– Επιφανειακές	40
4.2 Δύναμη πρόσφυσης.....	40

4.3 Σκληρότητα	41
4.4 Αντοχή σε τριβή – φθορά	42
4.5 Φθορά Εκτριβής.....	44
4.6 Φθορά λόγω Πρόσφυσης	45
4.7 Φθορά λόγω Επιφανειακής Κόπωσης	46
4.8 Φθορά λόγω Χημικής Διάβρωσης	46
4.9 Φθορά λόγω Μηχανικής Διάβρωσης	47
4.10 Αντοχή σε διάβρωση.....	48
4.11 Παραμένουσες Τάσεις	48
4.12 Άλλες ιδιότητες	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	50
Υλικά –Εφαρμογές	50
5.1 ΥΛΙΚΑ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ	50
5.2 Είδη επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού.....	51
5.3 Τομείς Εφαρμογών των Επιστρώσεων Θερμικού Ψεκασμού	53
Ναυπηγική και Θαλάσσιες Κατασκευές	53
Βιομηχανία Παραγωγής Ενέργειας.....	55
Αυτοκινητοβιομηχανία	56
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	58
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	59
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	60

Πρόλογος

Στο πλαίσιο των σπουδών στην Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Μακεδονίας και στην Σχολή Μηχανικών εκπονήθηκε η πτυχιακή εργασία με θέμα την επιβάλλωση μεταλλικών επιφανειών με θερμικά σπρέι και έλεγχος συμπεριφοράς σε διαβρωτικό περιβάλλον θαλασσινού νερού. Η επιβάλλωση μπορεί να βοηθήσει στην εξοικονόμηση χρημάτων σε σχέση με διάφορα χρώματα που χρησιμοποιούνται για την επικάλυψη της οξειδωσης από το νερό αλλά και σαν διεργασία είναι φιλική προς το περιβάλλον για τον λόγο ότι εάν συντηρηθεί σωστά αποτρέπει την ρύπανση της θάλασσας και των θαλάσσιων οργανισμών. Ο «θερμικός ψεκασμός» είναι ο γενικός όρος που χρησιμοποιείται για ένα σύνολο τεχνικών δημιουργίας μεταλλικών και μη μεταλλικών επικαλύψεων. Είναι η διαδικασία κατά την οποία, υλικά σε μορφή πούδρας, σύρματος ή ράβδου εισάγονται σε μία δέσμη ψεκασμού (jet) φλόγας, εξαιρετικά υψηλής θερμοκρασίας και μεγάλης ταχύτητας, όπου τήκονται. Οι συνήθειες τεχνικές κατηγοριοποιούνται σε τρεις κύριες ομάδες: ψεκασμός με φλόγα (flame spray), ψεκασμός με ηλεκτρικό τόξο (electric arc spray) και ψεκασμός πλάσματος (plasma arc spray). Οι παραπάνω πηγές ενέργειας χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση του υλικού της επικάλυψης (σε μορφή σκόνης, σύρματος ή ράβδου), ώστε να είναι σε κατάσταση πλήρους ή μερικής τήξης ή να γίνει πιο μαλακό. Οι πρώτες καταγεγραμμένες αναφορές του θερμικού ψεκασμού χρονολογούνται από το 1882 έως το 1889 και αφορούν τις ευρεσιτεχνίες του M. U. Schoop (Ζυρίχη, Ελβετία). Το 1908 κατοχυρώθηκε επίσης από τον Schoop ο ψεκασμός σύρματος με ηλεκτρικό τόξο. Ο ψεκασμός πλάσματος αναφέρθηκε για πρώτη φορά το 1939 από τον Reinecke. Μετά το 1945 αναπτύχθηκε όχι μόνο ο ψεκασμός πλάσματος, αλλά και ο ψεκασμός σκόνης. Η τεχνολογία του εξοπλισμού προόδευσε σημαντικά στα τέλη του 1950, με τις τεχνικές ψεκασμού με φλόγα, με ηλεκτρικό τόξο και με πλάσμα να αναπτύσσονται παράλληλα. Η αύξηση των τιμών των παραμέτρων λειτουργίας των στοιχείων μηχανών και συσκευών (μεγάλες φορτίσεις, ταχύτητες και θερμοκρασίες) προξενεί την επιταχυνόμενη φθορά τους. Ο οικονομικότερος τρόπος αποκατάστασης των ιδιοτήτων χρήσης είναι η αναγέννηση με την εναπόθεση επιστρώσεων. Η εναπόθεση επιστρώσεων πετυχαίνεται με θερμικό ψεκασμό ή αναγόμευση.

Ανεξάρτητα από την εφαρμογή της αναγόμευσης στα φθαρμένα αντικείμενα, αυτή η τεχνική εφαρμόζεται όλο και περισσότερο για την παραγωγή νέων εξαρτημάτων μηχανών και συσκευών. Έτσι είναι δυνατόν να παραχθούν βαλβίδες κινητήρων εσωτερικής καύσης, εξατμιστήρες κινητήρων αεριοθούμενων, έλαστρα με κεραμική επικάλυψη κ.α.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΕΙΔΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ

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, οξείδωσης, 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.

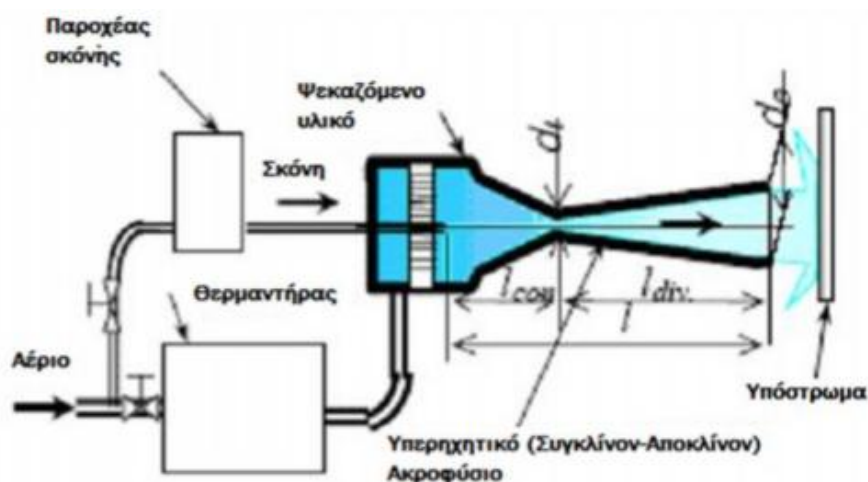
Η επιλογή της μεθόδου σε σχέση με το είδος των ιδιοτήτων που θέλουμε να έχει το επικαλυπτόμενο σύστημα είναι πολύ σημαντική διότι ενδέχεται πολλές φορές ένα υλικό να δύναται να επικαλυφθεί με διαφορετικές μεθόδους, η κάθε μια από τις οποίες να του προσδίδει διαφορετικά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, οι επικαλύψεις αλουμινίου μπορούν να παρασκευαστούν τόσο με τη μέθοδο της εν θερμό εμπάπτισης (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)

Άλλες τεχνικές θερμικού ψεκασμού είναι ο Ψυχρός Ψεκασμός (Cold Gas Dynamic Spray – CGDS). Η μέθοδος Ψυχρού Ψεκασμού ανακαλύφθηκε στα μέσα της δεκαετίας του '80 στο Ινστιτούτο Θεωρητικής και Εφαρμοσμένης Μηχανικής της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών στο Novosibirsk (Institute of theoretical and applied mechanics of the Russian Academy of Science, Novosibirsk) από τον Anatolii Parygin και τους συνεργάτες του, οι οποίοι επιχείρησαν να επιταχύνουν σωματίδια διαμέτρου από 1-50 μm σε ταχύτητες από 450-1000m/s. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων σε υπερηχητικό τούνελ αέρα, διαπιστώθηκε ότι για ένα συγκεκριμένο συνδυασμό συνθηκών (πίεση και θερμοκρασία του φέροντος αερίου) ήταν εφικτή η δημιουργία επιστρώματος. Με τον τρόπο αυτό, ο Anatolii Parygin και οι συνεργάτες του επικάλυψαν επιτυχώς χρησιμοποιώντας ένα πλήθος καθαρών μετάλλων, κραμάτων και σύνθετων υλικών, διάφορα υποστρώματα και απέδειξαν την καταλληλότητα της μεθόδου για ποικίλες εφαρμογές [Parygin, 2001], [Steenkiste, 2003]. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η πρώτη έρευνα στον τομέα της μεθόδου του ψυχρού ψεκασμού έγινε το 1994-1995 πάλι από τον Anatolii Parygin και μια κοινοπραξία μεγάλων αμερικανικών βιομηχανιών όπως οι Ford Motor Company, General Motors Corp., General Electric-Aircraft Engines, Pratt & Whitney Division of United Technologies Corp., Tubal Cain Company και FlameSprayIndustries[Steenkiste, 2003].



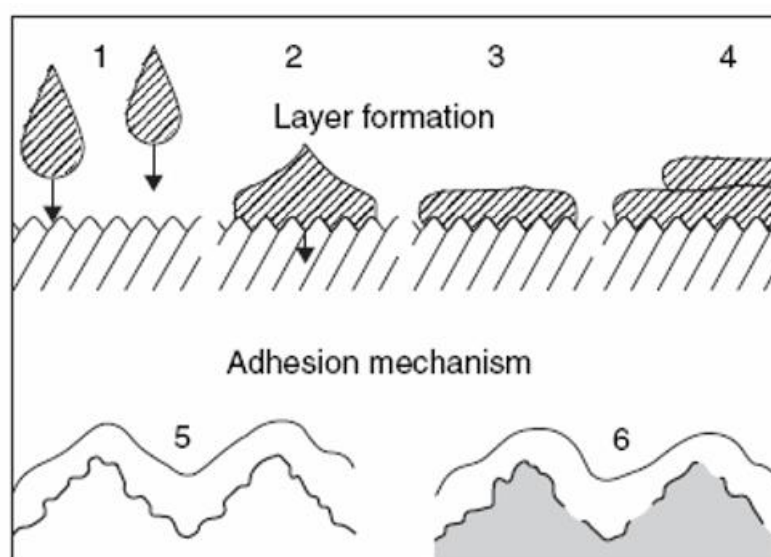
Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης Ψυχρού Ψεκασμού

Η τεχνική του ψυχρού ψεκασμού είναι μια διαδικασία παρασκευής επιστρωμάτων που πραγματοποιείται με την έκθεση ενός υποστρώματος σε υψηλής ταχύτητας δέσμη σωματιδίων. Παρά το όνομα με το οποίο καθιερώθηκε, ανήκει στην κατηγορία των τεχνολογιών θερμικού ψεκασμού, είναι μάλιστα η τεχνική με την χαμηλότερη θερμοκρασία σωματιδίων σε σύγκριση με τις άλλες τεχνικές. Κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι τα σωματίδια της σκόνης επίστρωσης επιταχύνονται σε θερμοκρασία που είναι πάντα χαμηλότερη του σημείου τήξης του υλικού της σκόνης, με άμεση συνέπεια τη δημιουργία επιστρωμάτων από σωματίδια που βρίσκονται συνεχώς σε στερεά φάση [Richter, 2002]. Ένα συμπιεσμένο και θερμό αδρανές αέριο (άζωτο, ήλιο ή μίγμα τους), επιταχύνεται μέσα σε ακροφύσιο τύπου de Laval (συγκλίνον/αποκλίνον ακροφύσιο – **Εικόνα 7**). Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για την επίστρωση εισέρχεται στο εσωτερικό του ακροφυσίου στη ροή του αερίου με μορφή σκόνης και προωθείται στη συνέχεια, συνήθως, κάθετα στο υπόστρωμα. Κατά την πρόσκρουση των σωματιδίων στο υπόστρωμα, όταν η ταχύτητα ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή, τα σωματίδια παραμορφώνονται πλαστικά και προσφύονται ισχυρά στο υπόστρωμα, σχηματίζοντας την επιδιωκόμενη επικάλυψη. Σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους θερμικού ψεκασμού, τα πλεονεκτήματα του Ψυχρού Ψεκασμού επικεντρώνονται στη μη ύπαρξη των αρνητικών επιδράσεων της υψηλής θερμοκρασίας, τόσο στις επικαλύψεις, όσο και στα υποστρώματα, καθώς και στη μη τήξη των ψεκαζόμενων σωματιδίων. Όμως, λίγες εφαρμογές έχουν περάσει σε καθαρά βιομηχανική εφαρμογή καθώς κατά την ανάπτυξη επικαλύψεων με τεχνική ψυχρού ψεκασμού υπάρχουν ακόμα σημεία που χρήζουν επιστημονικής διερεύνησης. Από τα σημαντικότερα προς επίλυση προβλήματα αποτελεί η αλληλεπίδραση ψεκαζόμενου υλικού υποστρώματος και ο ακριβής μηχανισμός πρόσφυσης και ανάπτυξης της επικάλυψης, που δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως μέχρι και σήμερα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΜΕ ΨΕΚΑΣΜΟ (Sprayed Coatings)

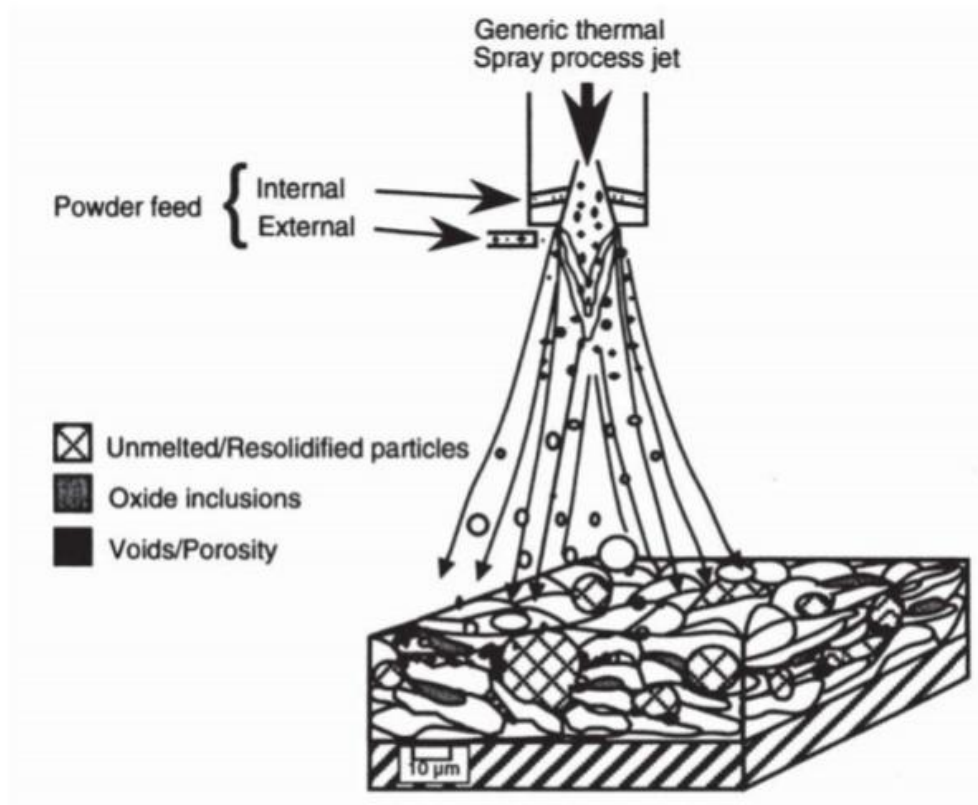
Η τεχνική επικάλυψης με ψεκασμό περιλαμβάνει την θέρμανση ενός μετάλλου (ή κεραμικού), μέχρι να τακεί καθώς αυτό περνάει μέσα από μια πηγή θερμότητας, και την απόθεσή του πάνω σε ένα υπόστρωμα. Τα υγρά σωματίδια του μετάλλου (ή του κεραμικού) παραμορφώνονται κατά την πρόσκρουσή τους στο υπόστρωμα εξασφαλίζοντας την καλή πρόσφυσή τους. (Εικόνα 1)



Coating build-up diagram during thermal spray process: 1, in-flight particles; 2, impact on surface; 3, heat transfer; 4, solidification and contraction of the coating material; 5, mechanical bonding; 6, local fusions.

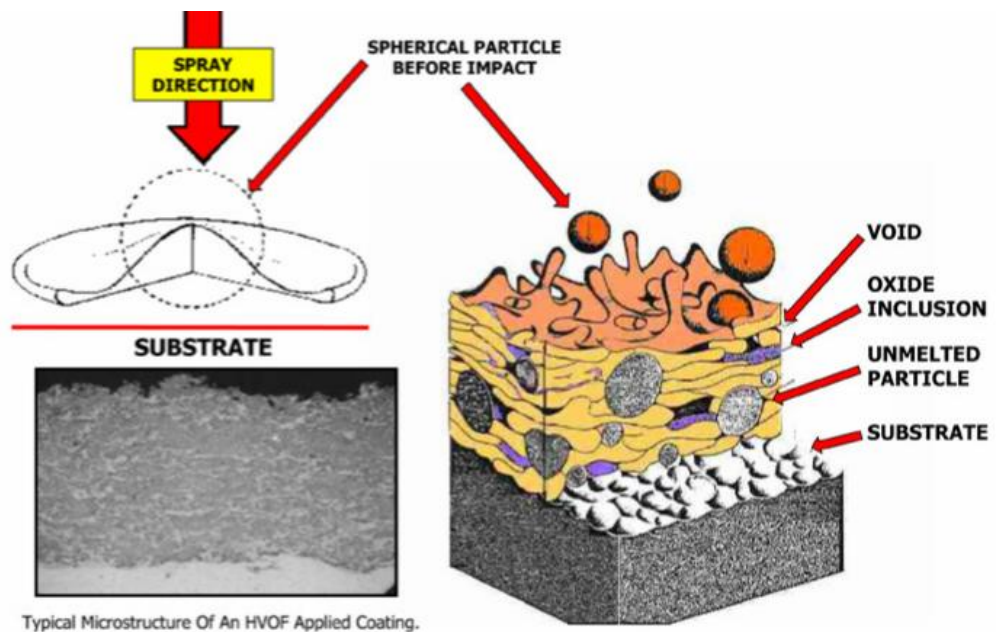
Εικόνα 1 (Διάγραμμα επιτύλωσης κατά την διαδικασία θερμικού ψεκασμού)

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. (Εικόνα 2)



Εικόνα 2: Σχηματισμός μιας τυπικής διαδικασίας θερμικού ψεκασμού με πούδρα

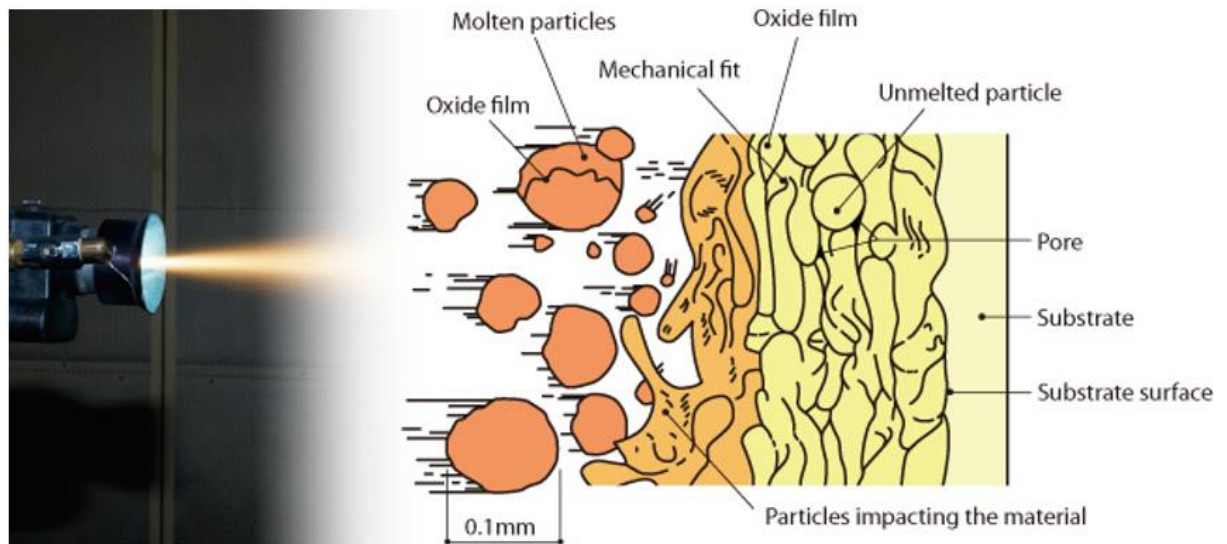
Η δομή των επιστρωμάτων με ψεκασμό είναι στρωματοειδής και χημικά ανομοιογενής.
(Εικόνα 3)



Εικόνα 3: Αναπαράσταση ανομοιογένειας της δομής των υλικών

Η πρόσφυση μεταξύ επιστρώματος και υποστρώματος οφείλεται σε μηχανικά και μεταλλουργικά αίτια. Τα επιστρώματα αυτά είναι πορώδη και έχουν μικρή ολκιμότητα.

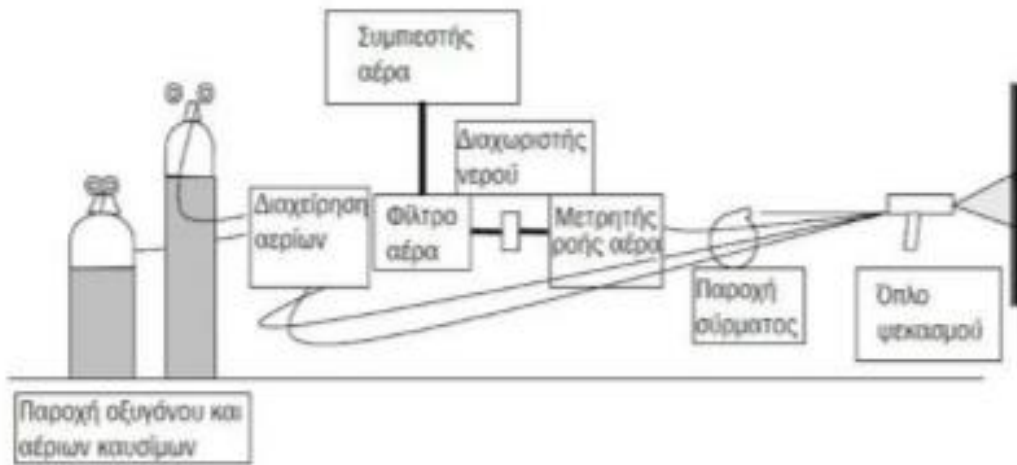
(Εικόνα 4)



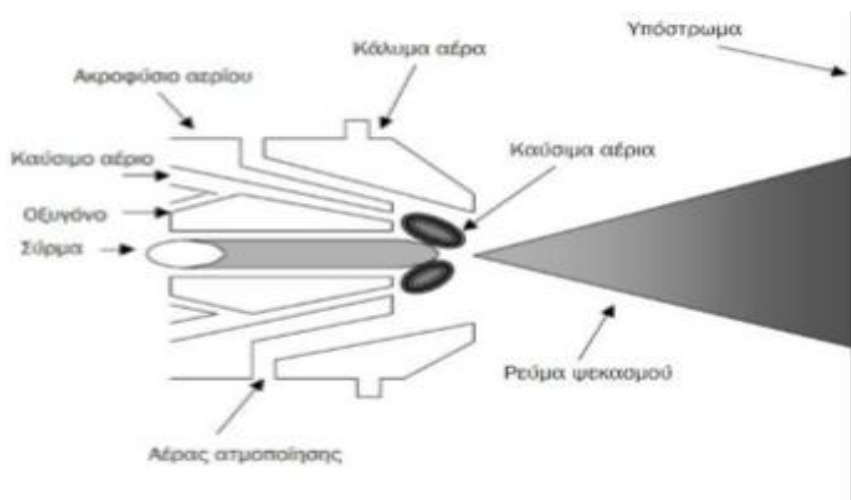
Εικόνα 4: Αναπαράσταση επίστρωσης

1.2 Θερμικός ψεκασμός σύρματος με φλόγα

Η βασική λειτουργία της φλόγας, στην περίπτωση της τεχνικής ψεκασμού σύρματος με φλόγα, είναι η τήξη της πρώτης ύλης. Στη συνέχεια ένα ρεύμα αέρα ατμοποιεί την τηγμένη ύλη και την προωθεί στην υπό επικάλυψη επιφάνεια. Η θερμοκρασία του υποστρώματος κυμαίνεται μεταξύ 95 – 205 οC λόγω της περίσσειας ενέργειας που απαιτείται για την τήξη της πρώτης ύλης [Davis, 2004]. Σε σχέση με την τεχνική ψεκασμού με τόξο, η τεχνική ψεκασμού με φλόγα είναι χρονοβόρα και ακριβή διαδικασία, λόγω του υψηλού κόστους των αερίων μειγμάτων. Ωστόσο η τεχνική ψεκασμού με φλόγα είναι εύχρηστη σε βιομηχανικό επίπεδο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ποιοτικών μεταλλικών επιστρωμάτων για αντιδιαβρωτική προστασία [U.S.ArmyCorps]. (Εικόνα 5-6)



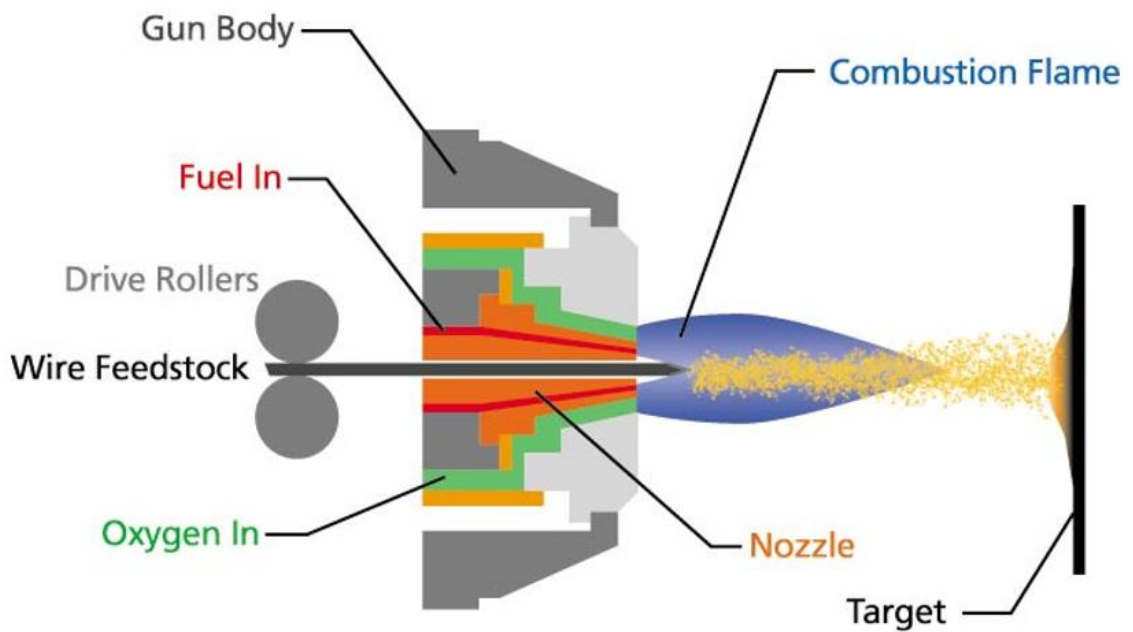
Εικόνα 5: Τυπικό σύστημα ψεκασμού σύρματος με φλόγα [U.S.ArmyCorps]



Εικόνα 6: Σκαρίφημα τυπικού όπλου ψεκασμού σύρματος με φλόγα [U.S.ArmyCorps]

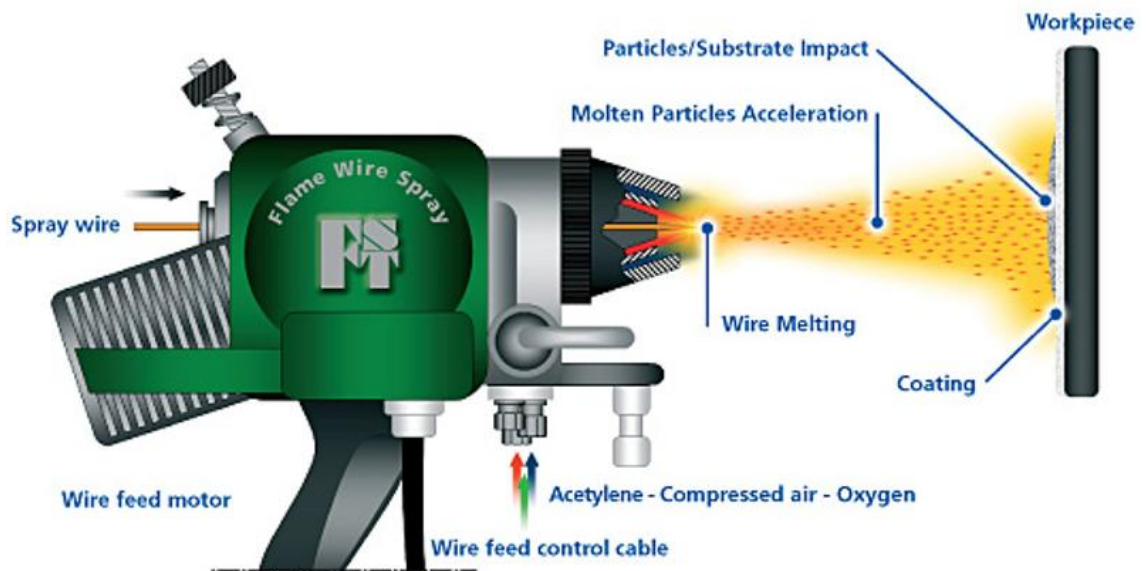
Τα πιστόλια είναι προσαρμοσμένα για κάθε καύσιμο αέριο. Μια τυπική κατασκευή πιστολιού αποτελείται από:

- Το σύστημα τροφοδοσίας του σύρματος (ηλεκτρικό ή πνευματικό),
- Την κεφαλή του αερίου, που ελέγχει τη ροή του καυσίμου αερίου, του οξυγόνου και του πεπιεσμένου αέρα.



Πλήρης ψηφιακή απεικόνιση τελικού ακροφυσίου , πιστολιού βαφής

Η λειτουργία των πιστολιών ψεκασμού με αέρια επιτυγχάνεται χειρωνακτικά ή κινούμενα και αυτά έχουν βάρος συνήθως 1,5 έως 3kg. Τα χρησιμοποιούμενα σύρματα έχουν διάμετρο μέχρι 4,8mm. Για μεγαλύτερη απόδοση ψεκασμού, για αντικείμενα μεγάλων διαστάσεων, εφαρμόζεται ψεκασμός ημιαυτόματος με σύρματα διαμέτρου 4,8mm.



Πλήρης ψηφιακή απεικόνιση πιστολιού θερμικού ψεκασμού

Ο θερμικός ψεκασμός με αέρια, με χρήση σύρματος, συνίσταται στην τήξη και κονιοποίηση στη φλόγα, σύρματος, τροφοδοτούμενο κατά συνεχή τρόπο. Το κονιορτοποιημένο μέταλλο εκτοξεύεται με ροή αέρος στο υπόστρωμα.

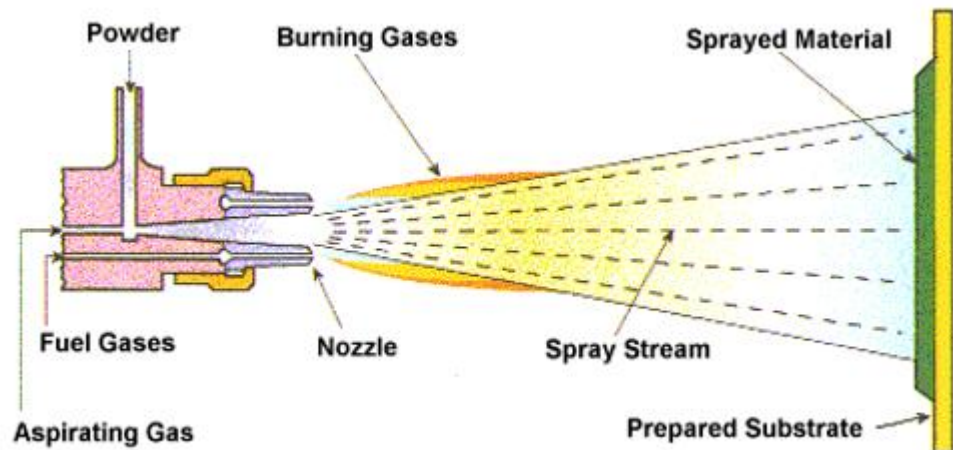


Πιστόλι θερμικού ψεκασμού φλόγας-σύρματος

Η διαδικασία ψεκασμού δεν ασκεί αρνητική επίδραση στις ιδιότητες του υποστρώματος, στο οποίο η θερμοκρασία κατά τον ψεκασμό δεν υπερβαίνει τους 160 έως 200 °C. Προβλέπεται όμως αρχική προθέρμανση μέχρι 100 °C, με σκοπό την αποφυγή της υγρασίας, η οποία μπορεί να συσσωρευθεί στην επιφάνεια του αντικειμένου και να ελαττώσει τις διαφορές της θερμικής διαστολής του εναποτιθέμενου επιστρώματος επί τής επιφάνειας του αντικειμένου.

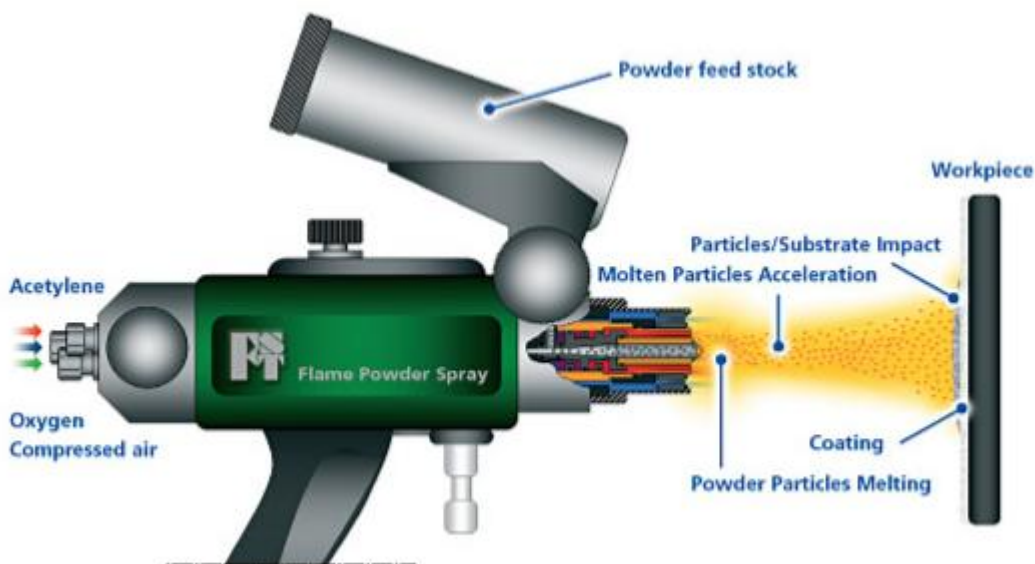
1.3 Θερμικός ψεκασμός με αέρια (FLSP) με χρήση κονιάματος

Ο θερμικός ψεκασμός με αέρια με χρήση κονιάματος(σκόνης) συνίσταται στην τροφοδοσία μεταλλικού κονιάματος στη φλόγα αερίου, στην οποία τήκεται και με την πίεση των αερίων της φλόγας εκτοξεύεται στο αντικείμενο. Επιτυγχάνεται ψεκασμός χειρωνακτικώς ή αυτόματος με απόδοση 3kg/h και με όλα τα αέρια καύσης.



Προσομοίωση κατεργασίας με χρήση κονιάματος

Για τον ψεκασμό χρησιμοποιείται κονίαμα με κοκκομετρία 0,1 έως 0,15 mm, παρόλο που σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται και χοντρότερος κόκκος από 0,1 έως 0,4 mm ή πολύ λεπτός από 0,01 έως 0,04 mm.



Πιστόλι θερμικού ψεκασμού κονιάματος

Συνηθέστερα χρησιμοποιούνται κονιάματα από χάλυβα ανθεκτικό στη διάβρωση και πυρίμαχα κράματα με βάση το νικέλιο, το χρώμιο, το κοβάλτιο, το πυρίτιο, το βόριο, το καρβίδιο του βολφραμίου κ.α.



Πιστόλι ψεκασμού κονιάματος γενικού τύπου

Ανάλογα με τις απαιτήσεις που επιβάλλονται για το υπόστρωμα, εφαρμόζεται ψεκασμός με αέρια με χρήση κονιάματος εν ψυχρό ή εν θερμό.

Ο θερμικός ψεκασμός με αέρια με χρήση κονιάματος εν ψυχρό είναι τεχνική επικάλυψης αντικειμένων που παθαίνουν φθορά πρόσφυσης. Οι επιστρώσεις είναι πορώδεις και επειδή η θερμοκρασία ψεκασμού δεν υπερβαίνει τους 350 οC δεν εμφανίζονται παραμορφώσεις ούτε μεταλλουργικές μεταβολές.

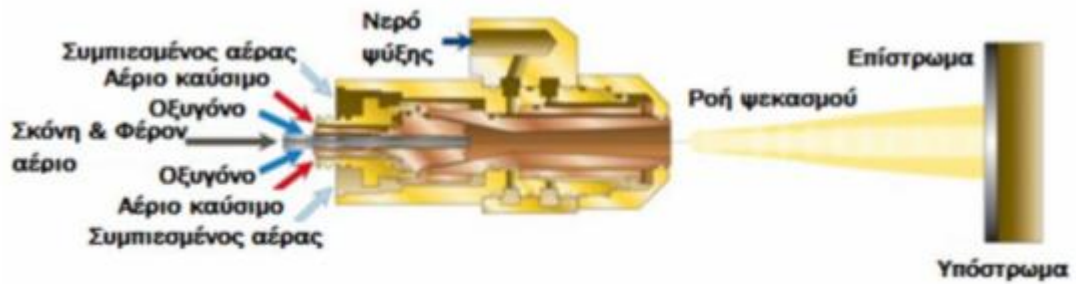
Ο θερμικός ψεκασμός με αέρια με χρήση κονιάματος εν θερμό χρησιμοποιείται για αντικείμενα που απαιτούν υψηλή ανθεκτικότητα στη φθορά, στη διάβρωση, στην πύρωση και την δυσθραυτότητα. Ανάλογα με το είδος του υποστρώματος, εφαρμόζεται προθέρμανση μέχρι 150 έως 500 °C. Μετά την προθέρμανση εναποτίθεται λεπτό στρώμα πάχους 0,2 έως 0,5mm, με σκοπό την προστασία του υποστρώματος από την οξείδωση και θερμαίνεται εκ νέου (600 έως 700°C). Στη συνέχεια εναποτίθενται τα επόμενα στρώματα μέχρι την επίτευξη της επίστρωσης με το απαιτούμενο πάχος, ενώ το πάχος καθενός στρώματος δεν πρέπει να ξεπερνά τα 2mm. Στο εναποτιθέμενο πάχος πρέπει να προβλεφθεί η ανοχή για την κατεργασία και κατά προσέγγιση ή συστολή 25%.

1.4 Θερμικός ψεκασμός υψηλής ταχύτητας με χρήση φλόγας καύσης (HVOF)



Προσομοίωση ψεκασμού υψηλής ταχύτητας με φλόγα καύσης

Η τεχνική ψεκασμού υψηλής ταχύτητας με καύση οξυγόνου έχει παρόμοια αρχή λειτουργίας με την τεχνική ψεκασμού με εκτόνωση. Βασίζεται δηλαδή σε μια υψηλής πίεσης καύση αλλά αντίθετα με την τεχνική ψεκασμού με εκτόνωση, λειτουργεί σε μια συνεχή σταθερή κατάσταση. Επιπλέον τόσο η τεχνική ψεκασμού με εκτόνωση όσο και η τεχνική ψεκασμού υψηλής ταχύτητας με καύση οξυγόνου μπορούν να ψεκάσουν υλικά μόνο υπό μορφή σκόνης. Η ταχύτητα των σωματιδίων της σκόνης εξαρτάται άμεσα από την πίεση του θαλάμου καύσης. Έτσι χρησιμοποιώντας υψηλότερη πίεση καυσίμων αερίων και αέρια με μεγάλη οξειδωτική ικανότητα είναι δυνατόν να επιτευχθούν υπερηχητικές ταχύτητες για τα αέρια ενώ η ταχύτητα πρόσκρουσης των σωματιδίων μπορεί να φτάσει σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές, παρόμοιες με τις ταχύτητες που επιτυγχάνονται στην τεχνική ψεκασμού με εκτόνωση [Fauchais, 2001], [Engine Yearbook, 2001]. Εκτός από τα αέρια καύσιμα που χρησιμοποιούνται συνήθως, όπως είναι το υδρογόνο, το προπυλένιο, το προπάνιο, το ακετυλένιο, χρησιμοποιούνται επίσης και υγρά καύσιμα όπως είναι η κηροζίνη. Υπάρχουν δύο διαφορετικές κατηγορίες συστημάτων ψεκασμού υψηλής ταχύτητας που βασίζονται στις συνθήκες πίεσης που επικρατούν εντός του θαλάμου καύσης. Στην πρώτη κατηγορία, που χαρακτηρίζεται από τον όρο «υψηλή ταχύτητα», επιτυγχάνονται πιέσεις της τάξεως των 241 kPa και ροή θερμότητας περίπου 527 MJ. Στη δεύτερη κατηγορία, που χαρακτηρίζεται με τον όρο «υπερταχύτητα», η πίεση στο θάλαμο καύσης προσεγγίζει τα 620 – 827 kPa και η ροή θερμότητας είναι της τάξεως του 1 GJ [Davis, 2004]. Κατά τον ψεκασμό υψηλής ταχύτητας με καύση οξυγόνου, το μείγμα οξυγόνου και αερίων καυσίμων υποβάλλεται σε καύση υπό πίεση, μέσα στο θάλαμο καύσης, ο οποίος ψύχεται μέσω ροής νερού ή αέρα. Το ρεύμα των αερίων επιταχύνεται μέσα σε κατάλληλα περιορισμένο αγωγό ή δαυλό. Η ψεκαζόμενη σκόνη τροφοδοτείται μέσω φέροντος αερίου στην υψηλής πίεσης φλόγα μέσω του δαυλού και οδηγείται στην επιφάνεια ψεκασμού. Στην **Εικόνα 7** παρουσιάζεται σχηματική παράσταση του όπλου ψεκασμού υψηλής ταχύτητας με καύση οξυγόνου.



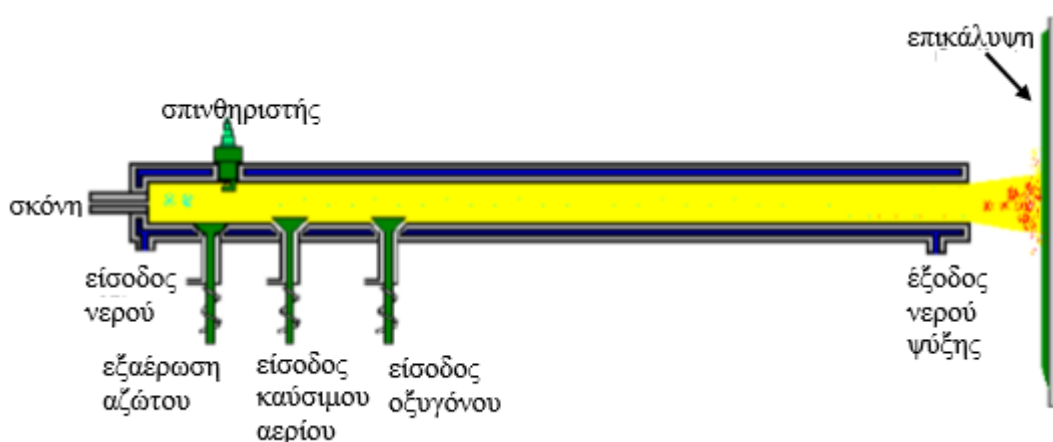
Εικόνα 7: Σχηματική παράσταση της διάταξης ψεκασμού υψηλής ταχύτητας με καύση οξυγόνου

Με αυτόν το σχεδιασμό του όπλου, αυξάνει ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων μέσα στο δαυλό, επιτυγχάνοντας έτσι μεγαλύτερη μεταφορά θερμότητας και αύξηση της αποδοτικότητας της μεθόδου. Έχει αποδειχθεί ότι η υψηλή ταχύτητα των αερίων, κατά τον ψεκασμό υψηλής ταχύτητας με καύση οξυγόνου, αυξάνει την ταχύτητα των σωματιδίων με αποτέλεσμα τη δημιουργία βελτιωμένων επικαλύψεων ως προς την πυκνότητα και την πρόσφυσή τους. Η χαμηλή θερμοκρασία των σωματιδίων, μειώνει το βαθμό τήξης και οξείδωσής τους. Παρ' όλα αυτά η υψηλή ταχύτητα πρόσκρουσης των σωματιδίων κατά τον ψεκασμό προκαλεί περαιτέρω παραμόρφωση των άτηκτων σωματιδίων, τα οποία αποτιθέμενα δημιουργούν πυκνές δομές επιστρωμάτων. Επιπλέον μερική θέρμανση των σωματιδίων μπορεί να προκληθεί κατά την πρόσκρουση, όταν η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική, συμβάλλοντας έτσι επιπρόσθετα στο σχηματισμό πυκνών δομών.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί [Fauchais, 2001] διάφορες λύσεις που αφορούν στη μείωση της θερμοκρασίας των σωματιδίων και την επακόλουθη αύξηση της ταχύτητας, οι οποίες εστιάζονται κυρίως στον επανασχεδιασμό της διάταξης, με έμφαση στο όπλο ψεκασμού.

1.5 Ψεκασμός εκτόνωσης (Detonation Gun – D-Gun)

Ο σχεδιασμός των συμβατικών μεθόδων ψεκασμού με φλόγα περιορίζει την ικανότητά τους στη δημιουργία συμπαγών επιστρωμάτων (με μικρότερο του 2% ποσοστό πορώδους) με καλή πρόσφυση. Αντίθετα η τεχνολογία ψεκασμού με εκτόνωση παρέχει ροή αερίου με υψηλότερη θερμική και κινητική ενέργεια περιορίζοντας την καύση μέσα σε κυλινδρικό αγωγό μέσα στο οποίο εισέρχεται η σκόνη ψεκασμού. Ο σχεδιασμός αυτός επιτρέπει υψηλότερη μεταφορά θερμότητας και ορμής στα σωματίδια της σκόνης. Σχηματική παράσταση της διάταξης ψεκασμού με εκτόνωση παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8: Σχηματική παράσταση της διάταξης ψεκασμού με εκτόνωση [Stokes, 2003]

Κατά τον ψεκασμό με εκτόνωση, ένα εκρηκτικό μείγμα καυσίμων, οξυγόνου και σκόνης εισάγεται σε έναν κυλινδρικό αγωγό και αναφλέγεται μέσω σπινθήρα. Το προκύπτον ρεύμα θερμαίνει (μέχρι τους 4500 οC) και επιταχύνει τα σωματίδια της σκόνης, τα οποία κατευθύνονται με υποηχητική ταχύτητα ~ 800 m/s, μέσω του ψυχόμενου αγωγού, στο υπόστρωμα. Το άζωτο χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό του αγωγού μεταξύ των εκτονώσεων. Ο κύκλος του καθαρισμού, της ανάφλεξης και της εκτόνωσης επαναλαμβάνεται με μια συχνότητα από 3 μέχρι 6Hz. Η διαδικασία του ψεκασμού με εκτόνωση έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει τη διαπλάτυνση των σωματιδίων και αυξάνει την πρόσφυση μεταξύ των τηγμένων σωματιδίων και του ήδη αποτιθέμενου επιστρώματος [Davis, 2004]. Η ομοιόμορφη, απαλλαγμένη από πορώδες και οξείδια στρωματοειδής μικροδομή των επιστρωμάτων προσφέρει υψηλότερη σκληρότητα, πυκνότητα και αντοχή πρόσφυσης σε σχέση με τα επιστρώματα των συμβατικών μεθόδων ψεκασμού φλόγας [Stokes, 2003].

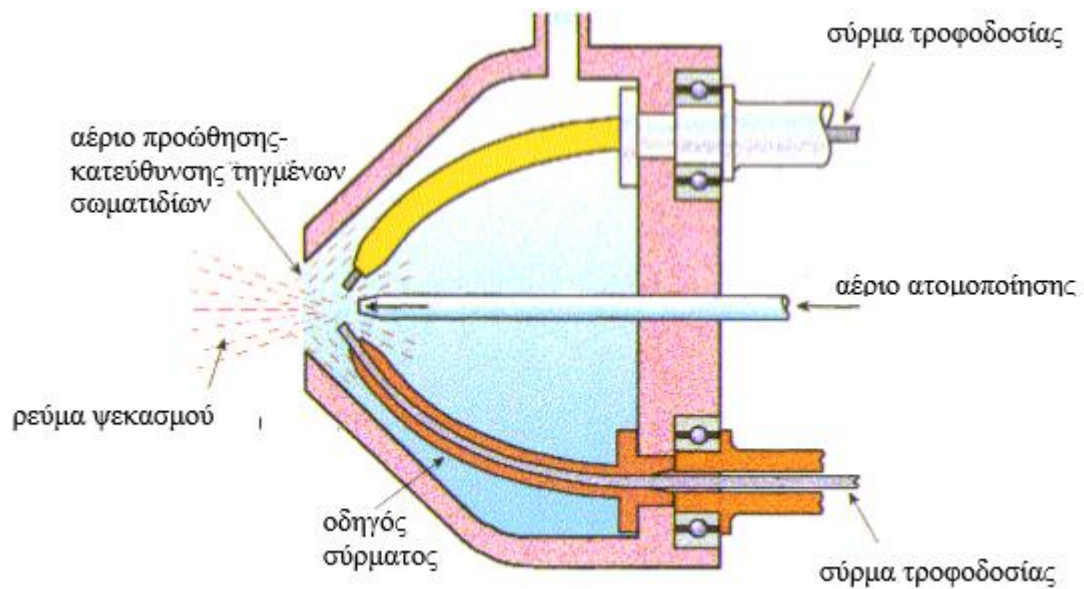
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ψεκασμός με ηλεκτρικό τόξο (Electric arc processes, Wire arc ή Twin-wire arc)

Στην τεχνική ψεκασμού με ηλεκτρικό τόξο (γνωστή και ως ψεκασμός σύρματος με τόξο), δύο καταναλισκόμενα ηλεκτρόδια σε μορφή σύρματος είναι συνδεδεμένα με μία πηγή συνεχούς ρεύματος. Τα σύρματα τροφοδοτούνται στο όπλο ψεκασμού και ανάμεσά τους δημιουργείται ένα τόξο, που λιώνει τις άκρες των συρμάτων. Το τηγμένο μέταλλο ατομοποιείται και προωθείται προς το υπόστρωμα μέσω ενός ρεύματος συμπιεσμένου αέρα (Σχήμα 1.6). Η θερμοκρασία της φλόγας μπορεί να ξεπεράσει τους 5000°C και η ταχύτητα των σωματιδίων πλησιάζει τις τιμές 50 έως 150 m/s (υποηχητικές ταχύτητες, <300m/s). Πρόκειται για ιδιαίτερα αποτελεσματική και ταχεία μέθοδο. Ο ρυθμός ψεκασμού καθορίζεται κυρίως από το ρεύμα λειτουργίας και ποικίλλει σε συνάρτηση με το σημείο τήξης και την αγωγιμότητα. Γενικά, υλικά όπως τα κράματα χαλκού και τα κράματα σιδήρου ψεκάζονται σε 4,5 kg/100A/h. Η θερμοκρασία του υποστρώματος μπορεί να είναι πολύ χαμηλή, γιατί δεν κατευθύνεται προς το υπόστρωμα κάποιο ρεύμα θερμού αερίου. Ο ψεκασμός με ηλεκτρικό τόξο μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας αδρανή αέρια ή σε θάλαμο ελεγχόμενης ατμόσφαιρας. Με τη μέθοδο αυτή παράγονται επικαλύψεις για προστασία κατά της φθοράς και της διάβρωσης. Επιπλέον, χρησιμοποιείται για την αναγόμωση φθαρμένων περιοχών. Οι εφαρμογές της τεχνικής περιλαμβάνουν επικαλύψεις με

- σκόνη
- είσοδος καύσιμου αερίου
- έξοδος νερού ψύξης
- επικάλυψη
- είσοδος οξυγόνου
- είσοδος νερού
- σπινθηριστής
- εξαέρωση αζώτου
- μεταλλικών (αγωγή στερεά σύρματα)

και σύνθετων υλικών (γεμιστά σύρματα), καθώς και ορισμένων κεραμικών υλικών που είναι διαθέσιμα σε μορφή σύρματος. Τα γεμιστά σύρματα έχουν μεταλλικό περίβλημα, στο εσωτερικό του οποίου υπάρχει σκόνη



ΕΙΚΟΝΑ 9: Σύστημα ψεκασμού με ηλεκτρικό τόξο [Airproducts].

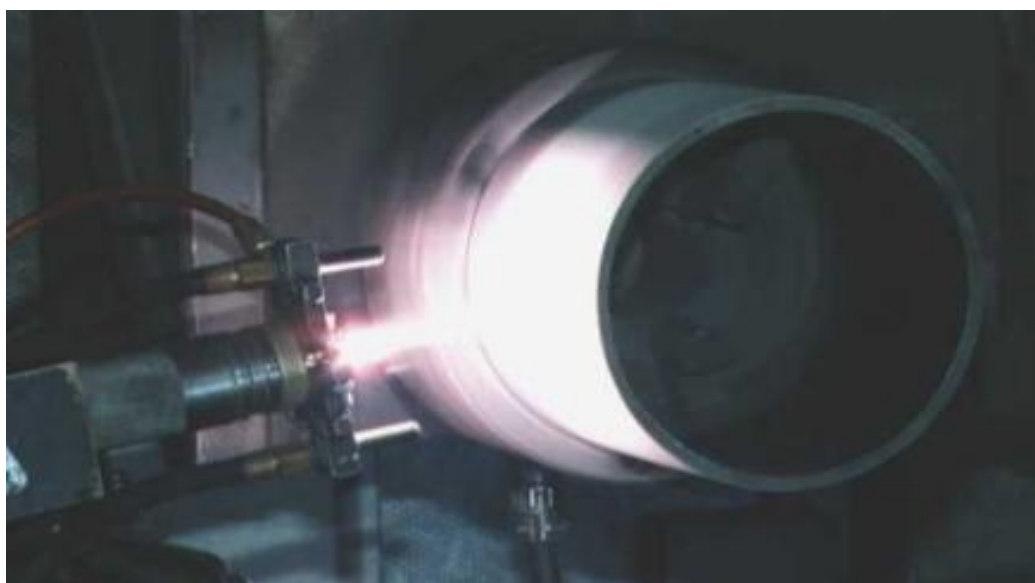
Στα πλεονεκτήματα της τεχνικής συγκαταλέγονται η ευκολία χρήσης και εκμάθησής της. Επίσης, με τον ψεκασμό με τόξο σχηματίζονται επικαλύψεις μεγαλύτερου πάχους και με χαμηλότερο κόστος λειτουργίας σε σχέση με την τεχνική ψεκασμού πλάσματος. Το χαμηλό κόστος του υλικού τροφοδοσίας σε μορφή σύρματος και ο υψηλός ρυθμός απόθεσης του υλικού καθιστούν την τεχνική μία οικονομική και αποδοτική διεργασία ψεκασμού. Η υψηλή θερμοκρασία του τόξου και η υψηλή ταχύτητα σωματιδίου έχουν ως αποτέλεσμα την ισχυρότερη σύνδεση και πυκνότητα σε σχέση με τις επικαλύψεις ψεκασμού φλόγας. Το μειονέκτημα της τεχνικής είναι ότι τυπικά οι επικαλύψεις έχουν υψηλότερο ποσοστό πορώδους, οξειδίων και άτηκτων σωματιδίων. Οι επικαλύψεις έχουν γενικά υψηλότερη τραχύτητα από αυτές των άλλων τεχνικών, αλλά αποτελεί παράμετρο που μπορεί να ρυθμιστεί. Μία από τις περιοχές εφαρμογής της τεχνικής είναι η αεροδιαστημική για την αποκατάσταση των διαστάσεων και την επισκευή εξαρτημάτων. Ο υψηλός ρυθμός απόθεσης καθιστά την τεχνική κατάλληλη για τον ψεκασμό μεγάλων επιφανειών και για εφαρμογές μεγάλου όγκου παραγωγής. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν τον ψεκασμό με ψευδάργυρο και αλουμίνιο σε γέφυρες και θαλάσσιες κατασκευές για την προστασία από διάβρωση, καθώς και τον ψεκασμό ηλεκτρονικών εξαρτημάτων με αγωγικά υλικά (χαλκός, αλουμίνιο). Η τεχνική είναι σημαντική στη βιομηχανία χαρτιού και πολτού, όπου οι σωλήνες του λέβητα προστατεύονται από τη θερμή διάβρωση, καθώς και στην αυτοκινητοβιομηχανία [Dorfman 2002, Struers, Wilden et al. 2005].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ψεκασμός πλάσματος (PLASMA SPRAY)

ΓΕΝΙΚΑ

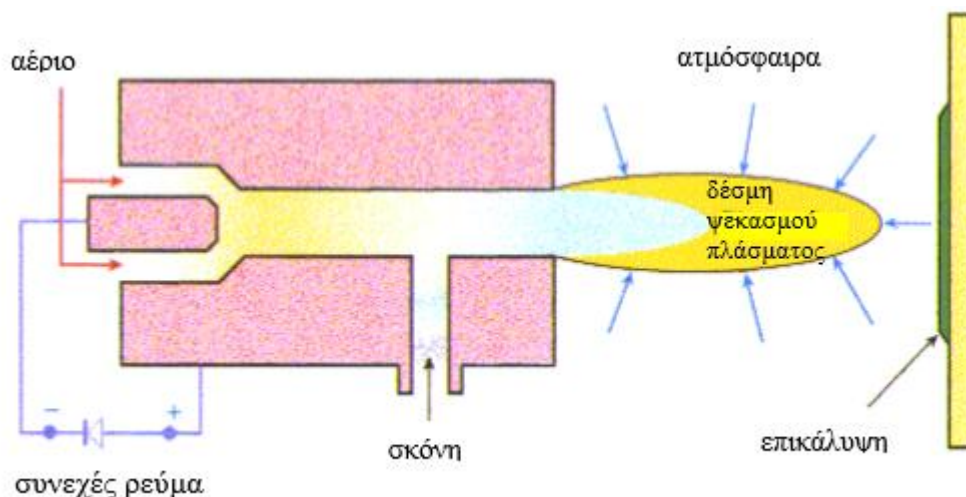
Οι ψεκασμοί με πλάσμα ξεκίνησαν το 1939 και στα μέσα της δεκαετίας του '60 αντικατέστησαν σχεδόν ολοκληρωτικά τους ψεκασμούς με φλόγα και με τόξο, κυρίως σε εφαρμογές για προστασία από φθορά, διάβρωση και οξείδωση.



Προσομοίωση ψεκασμού με χρήση πλάσματος

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 συνήθεις θερμικές επικαλύψεις που παράγονται με τη μέθοδο αυτή για προστασία από τη φθορά είναι Al₂O₃ και Cr₂O₃. Άλλα κεραμικά, όπως η σταθεροποιημένη με ύτρια, ή με ασβέστιο ζirkονία και το ζirkονικό μαγνήσιο, χρησιμοποιούνται ως φράγματα σε εξαρτήματα μηχανών.



Σύστημα ψεκασμού πλάσματος

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 :

- Ψεκασμός σε ατμοσφαιρικές συνθήκες (atmospheric plasma spraying)
- Ψεκασμός υπό κενό (vacuum plasma spraying)
- Ψεκασμός σε χαμηλή πίεση (low pressure plasma spraying)
- Ψεκασμός σε περιβάλλον αργού (argon shrouded plasma spraying)

3.1.1 Ψεκασμός σε ατμοσφαιρικές συνθήκες (atmospheric plasma spraying)

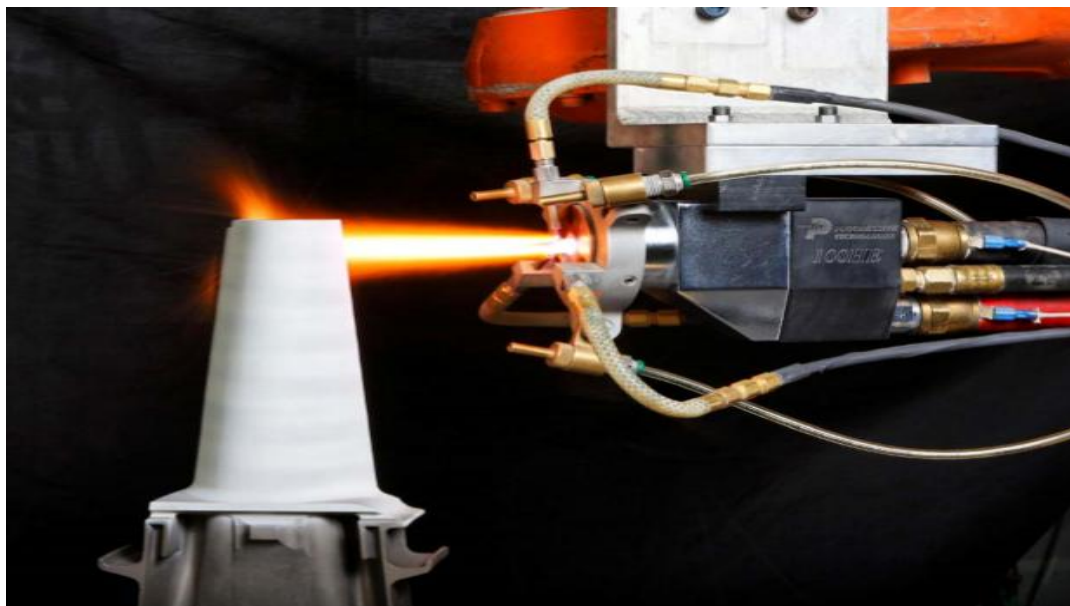
Για τη δημιουργία του πλάσματος, ένα αδρανές αέριο υπερθερμαίνεται και ιονίζεται με τη βοήθεια τόξου συνεχούς ρεύματος μεταξύ δύο μη καταναλισκόμενων ηλεκτροδίων. Το αέριο μπορεί να είναι αργό, υδρογόνο ή μίγμα αργού και υδρογόνου, αλλά και ήλιο, άζωτο και άλλα αέρια κατά περίπτωση. Το υλικό υπό μορφή σκόνης εισάγεται με τη βοήθεια ενός αδρανούς φέροντος αερίου και τήκεται λόγω της ενέργειας του πλάσματος (θερμό ιονισμένο αέριο). Μέσω της δέσμης ψεκασμού πλάσματος το υλικό επιταχύνεται προς το τεμάχιο που πρόκειται να επικαλυφθεί. Η θερμοκρασία του πλάσματος στην περιοχή θέρμανσης της σκόνης κυμαίνεται από 6000 έως 15000°C. Αυτό σημαίνει ότι, η θερμοκρασία στο πλάσμα μπορεί να ξεπεράσει τους 10000°C, ενώ στην έξοδο του πλάσματος τους 5500°C.

Η θερμοκρασία είναι, δηλαδή, πολύ υψηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης οποιουδήποτε δύστηκτου υλικού.

Τα τηγμένα σταγονίδια της σκόνης προσκρούουν στην επιφάνεια του υποστρώματος, γίνονται επίπεδα και ψύχονται ταχύτατα, δημιουργώντας τα “splats”, δηλαδή τηγμένα σωματίδια. Η ταχύτητα ψεκασμού είναι της τάξης των 250-600 m/s. Ωστόσο, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο υπόστρωμα κατά τον ψεκασμό είναι χαμηλές (<200°C), συνεπώς αυτό δεν υπόκειται σε έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές. Πιθανόν να απαιτείται η ρύθμιση της ψύξης και του ρυθμού ψεκασμού, ώστε να διατηρηθεί η θερμοκρασία του υποστρώματος στο εύρος των 95 έως 205°C. Τα εμπορικά όπλα ψεκασμού πλάσματος λειτουργούν σε 20 έως 200 kW.

Ο ρυθμός ψεκασμού εξαρτάται από το σχεδιασμό του όπλου, τα αέρια του πλάσματος, τις ιδιότητες του υλικού, και συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των σωματιδίων, όπως το μέγεθος, η κατανομή, το σημείο τήξης, η μορφολογία και η πυκνότητα.

Το πλεονέκτημα της τεχνικής του ψεκασμού πλάσματος είναι η δυνατότητα χρήσης διαφόρων τιμών θερμοκρασίας φλόγας και ταχύτητας σωματιδίων. Η ποικιλία αυτή επιτρέπει την ευρύτερη επιλογή υλικών και μεγέθους σωματιδίων. Επιπλέον, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών της τεχνικής μπορούν να ψεκαστούν και να αποτεθούν κεραμικά υλικά με υψηλό σημείο τήξης, όπως η υττρία-σταθεροποιημένη ζirkονία για εφαρμογές θερμικής μόνωσης. Θεωρείται κατάλληλη και οικονομική τεχνική επιφανειακής κατεργασίας για διάφορες χρήσεις: προστασία από φθορά και διάβρωση και επικαλύψεις που δρουν ως υποκατάστατο των βιολογικών ιστών (π.χ. υδροξυαπατίτης). Ωστόσο, οι επιστρώσεις που αποτίθενται με τον ψεκασμό πλάσματος μπορεί να παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως μικρορωγμές, ασθενή σύνδεση μεταξύ επικάλυψης και υποστρώματος, αλλαγές φάσεων λόγω της έκθεσης σε υψηλή θερμοκρασία, ανομοιομορφία στην πυκνότητα της επικάλυψης και μη πλήρη έλεγχο της μικροδομής, που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία του εμφυτεύματος.



Ψεκασμός πλάσματος σε ατμοσφαιρικές συνθήκες

3.1.2 Ψεκασμός πλάσματος σε κενό ή σε χαμηλή πίεση (vacuum plasma spray, VPS ή Low pressure plasma spray, LPPS)

Ο ψεκασμός πλάσματος σε κενό ή σε χαμηλή πίεση (Low Pressure Plasma Spray, εμπορικό σήμα της Sulzer Metco) χρησιμοποιεί τροποποιημένα όπλα-ακροφύσια ψεκασμού πλάσματος σε θάλαμο με πίεση στο εύρος των 10 έως 50 kPa (0,1 έως 0,5 atm). Σε χαμηλές πιέσεις, το πλάσμα γίνεται μεγαλύτερο σε διάμετρο και μήκος και μέσω της χρήσης συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου, επιτυγχάνεται υψηλότερη ταχύτητα αερίου.

Επειδή ο ψεκασμός LPPS/VPS πραγματοποιείται σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα ή σε κενό, εξαλείφεται η αλληλεπίδραση των τηγμένων σωματιδίων και του αέρα. Το κόστος είναι υψηλότερο, αλλά η απουσία οξυγόνου και η δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλότερες θερμοκρασίες υποστρώματος οδηγεί στην παραγωγή πιο συμπαγών επικαλύψεων, με μεγαλύτερη ομοιογένεια, καλύτερη πρόσφυση και πολύ μικρότερες περιεκτικότητες οξειδίων.

Τυπικές εφαρμογές είναι ο ψεκασμός των συνδετικών επικαλύψεων MCrAlY σε θερμικούς μονωτές και επικαλύψεων MCrAlY για την προστασία από την οξείδωση και τη θερμή διάβρωση. Επίσης, μπορεί να γίνει επισκευή εξαρτημάτων από υπερκράματα και να ψεκαστούν βιοσυμβατές επικαλύψεις (π.χ. υδροξυαπατίτης) σε ιατρικά εμφυτεύματα.

Μία άλλη προσέγγιση για τη μείωση των οξειδίων είναι η τεχνική πλάσματος προστατευόμενης ατμόσφαιρας (shrouded plasma). Στην τεχνική αυτή, μία φλόγα αργού ή αζώτου απομακρύνει το οξυγόνο από την περιοχή της φλόγας και του τεμαχίου εργασίας. Θεωρείται εναλλακτική τεχνική χαμηλού κόστους σε σχέση με την LPPS, αλλά οι επικαλύψεις δεν είναι τόσο καλές ποιοτικά.

3.1.3 Ψεκασμός πλάσματος σε περιβάλλον αργού-αζώτου

Ψεκασμός πλάσματος σε αδρανή ατμόσφαιρα: Ένα απλό σύστημα αδρανούς ατμόσφαιρας λειτουργεί συνήθως σε πίεση 100kPa, τροφοδοτούμενο συνεχώς με υψηλής καθαρότητας ξηρό άζωτο. Έτσι τα επίπεδα του οξυγόνου διατηρούνται σε πολύ χαμηλά επίπεδα δίνοντας επικαλύψεις με ιδιότητες που δεν επηρεάζονται από την παραμονή εντός του δαυλού. Επιπλέον, είναι δυνατή η προθέρμανση του υποστρώματος, χωρίς τον κίνδυνο να υποστεί οξείδωση, επιτρέποντας έτσι τον καλύτερο έλεγχο των παραμενουσών τάσεων αλλά και της δύναμης πρόσφυσης.

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.

3.2.1 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

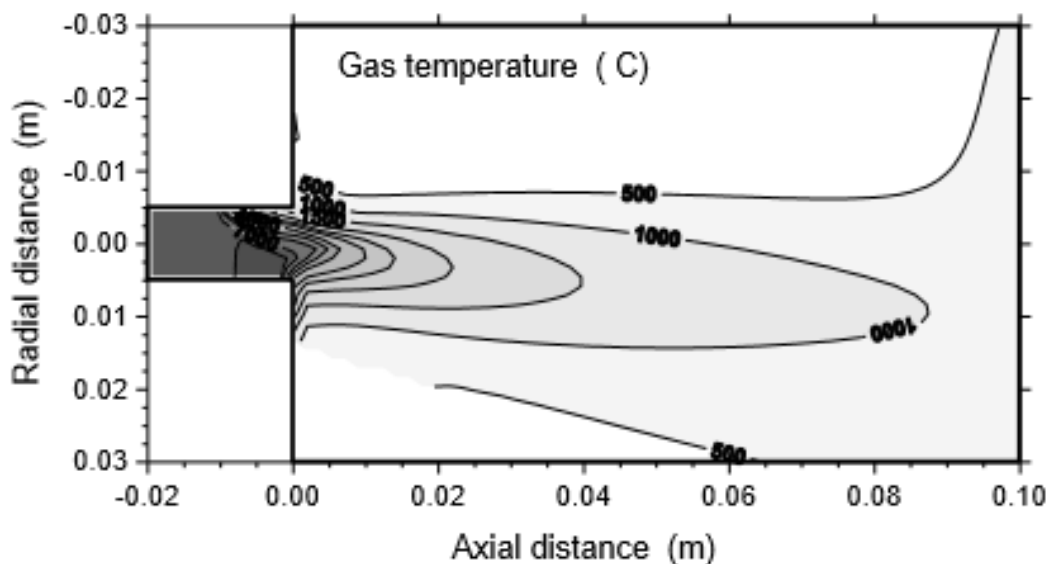
ΓΕΝΙΚΑ

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



Χαρακτηριστική κατανομή θερμοκρασιών στο πλάσμα.

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

3.2.3 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 σε εσωτερική επιφάνεια μετάλλου

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 πλάσματος και κατόπιν προς το υπόστρωμα. Με τον τρόπο αυτό είναι πλέον δυνατός ο συσχετισμός των φυσικών ιδιοτήτων των επιστρωμάτων πλάσματος με την θερμοκρασία στην επιφάνεια του υποστρώματος και την ταχύτητα των σωματιδίων κατά την πρόσκρουσή τους με το υπόστρωμα.

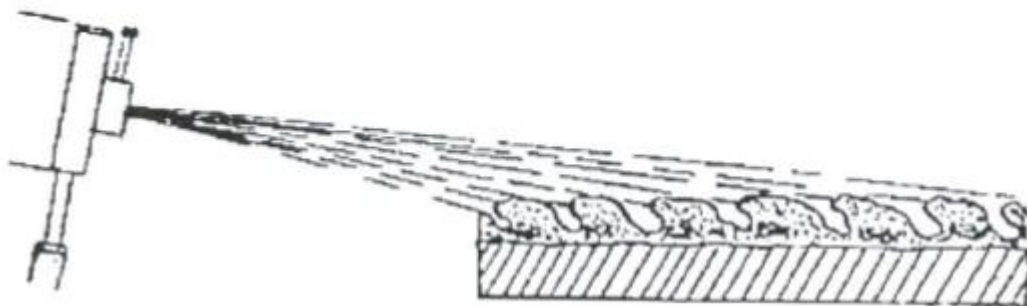
3.2.4 ΓΩΝΙΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

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 90ο, 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 45ο και 90ο, 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 45ο, 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: 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 εφαιπτομενική ταχύτητα πάνω στην επιφάνεια.

3.2.5 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.



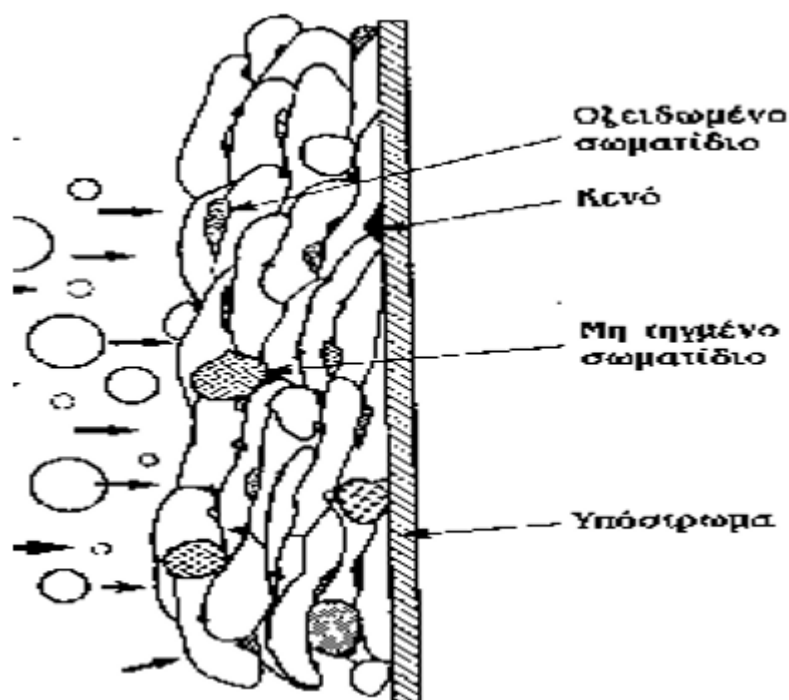
Τεχνικός κατά την διάρκεια ψεκασμού

3.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

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.

3.3.1 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 κατανεμημένα 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 παρουσιάζεται η δομή ενός επιστρώματος πλάσματος, από όπου φαίνεται η στρωματοειδής φύση του.



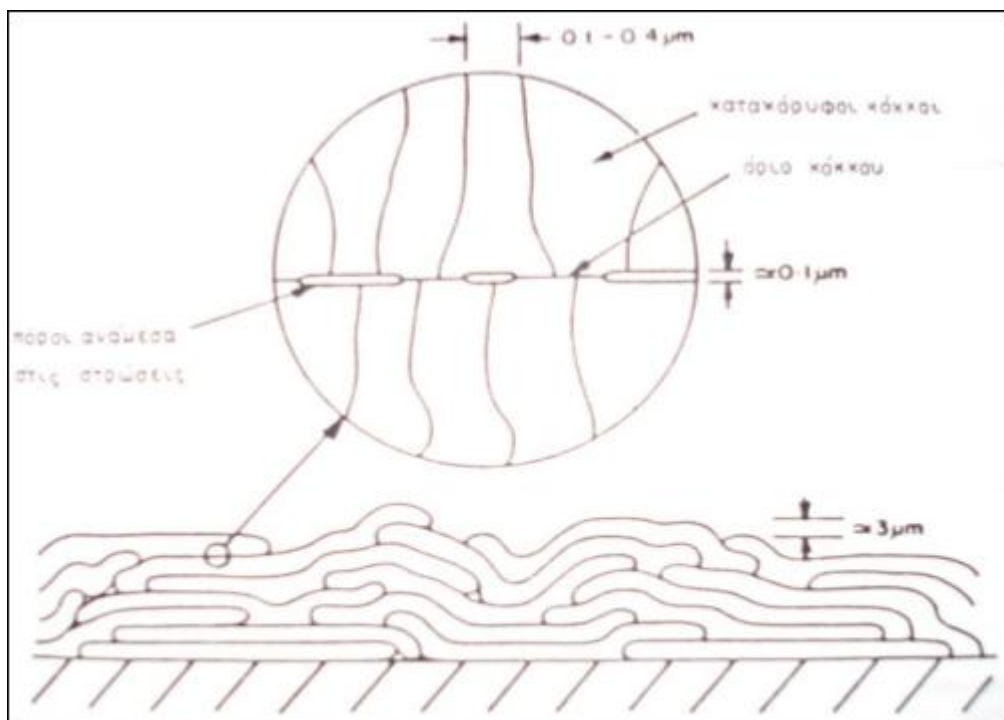
Σχήμα : Σχηματική αναπαράσταση της δομής ενός υποστρώματος πλάσματος

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 βασαλτική 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 βασαλτικής 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.

3.3.2 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 πληρώντας 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.



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 3-10μm που σχετίζονται με ελαττώματα στην δομή ανεπαρκούς

κάλυψης των κενών μεταξύ των στερεοποιημένων σταγονιδίων και αυτών με μέγεθος της τάξεως του 0.1μm που αποτελούν ένα «έμφυτο» χαρακτηριστικό των επικαλύψεων με ψεκάσμό. 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 διείδυση 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 αποφλοιώσή 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 οξείδια του αλουμινίου και του τιτανίου που χρησιμοποιούνται σε εκτριβόμενες επιφάνειες κινητήρων αυτοκινήτων, ενώ η προσρόφιση οξυγόνου μπορεί να αντιμετωπιστεί με επάλειψη με εποξικές ρητίνες. Αυτό είναι σημαντικό για τις επικαλύψεις που πραγματοποιούνται από ψαθυρά υλικά, όπως τα οξείδια, 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.

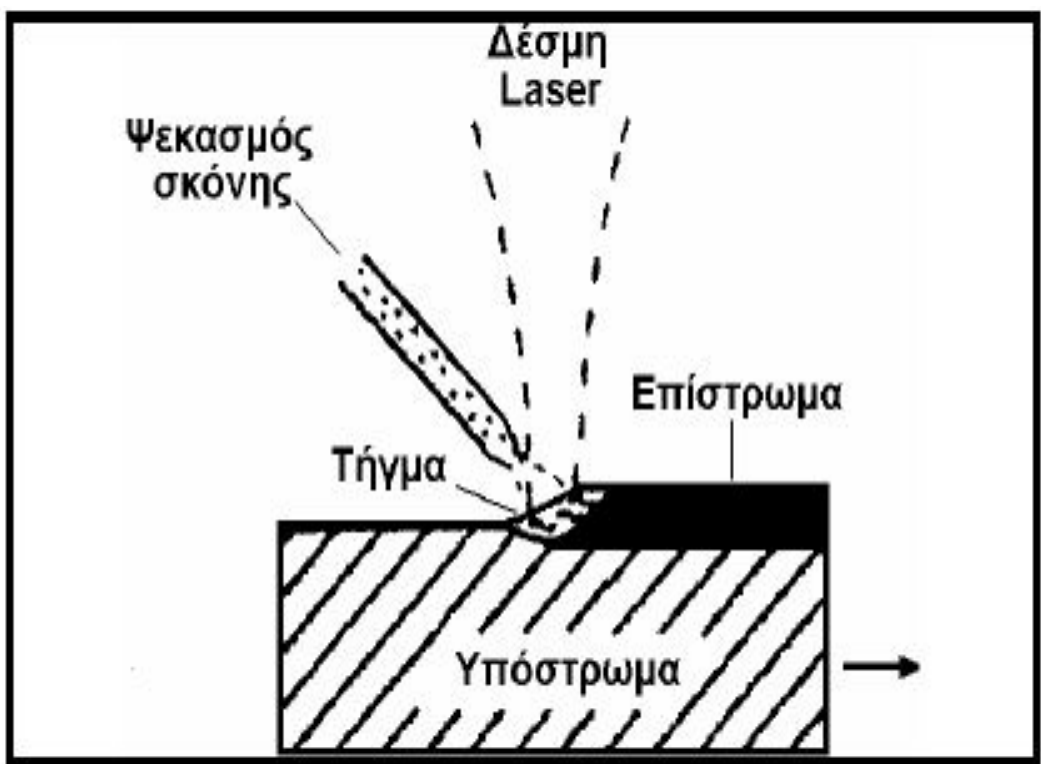
Η επίτευξη του επιθυμητού ποσοστού πορώδους είναι δυνατή μέσα από τον έλεγχο των συνθηκών του ψεκάσμου, όπως το περιβάλλον, η γωνία ψεκάσμου αλλά και των υλικών που χρησιμοποιούνται καθώς και στοιχείων όπως το μέγεθος, το σχήμα, η θερμοκρασία τους και η ταχύτητα με την οποία προσκρούουν στο υπόστρωμα

3.3.3 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 οξείδια. 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 οξείδια (οξείδια υποστρώματος-επιστρώματος) ή νέα οξείδια. 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.



Σχηματική προσομοίωση ψεκασμού σε υπόστρωμα

3.3.4 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 οξείδωση 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.

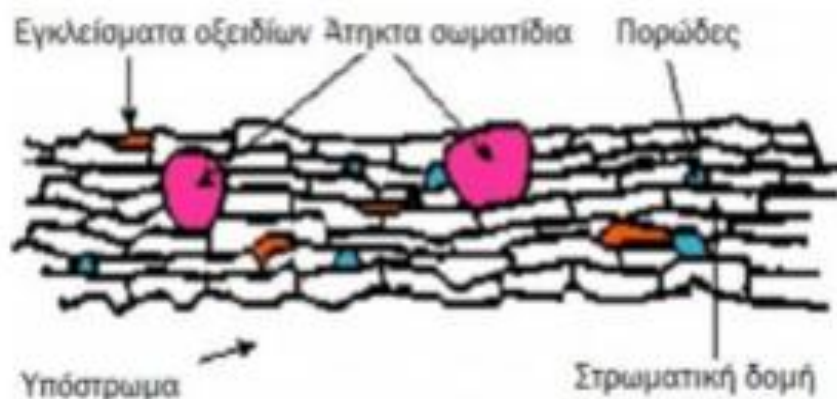
Η δημιουργία πιο ψαθυρών φάσεων έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών κάτω από την επίδραση μηχανικής καταπόνησης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στην αποκόλληση τμημάτων της επικάλυψης. Οι σχηματιζόμενες σκληρές φάσεις έχουν διαφορετικούς θερμικούς συντελεστές από το υπόλοιπο υλικό με αποτέλεσμα 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.



Απεικόνιση επίδρασης οξειδίων σε μέταλλο

3.3.5 ΑΤΗΚΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Πρόκειται για εκείνους επίσης κόκκους επίσης σκόνης που δεν έχουν τηχθεί πλήρως κατά την διάρκεια του ψεκασμού και βρίσκονται αυτούσια μέσα στα στρώματα επίσης επικάλυψης. Η αιτία του φαινομένου μπορεί να είναι το ίδιο το μέγεθος ορισμένων κόκκων, που επειδή είναι μεγαλύτεροι από το σύνολο επίσης σκόνης, δεν πρόλαβαν να τηχθούν κατά την παραμονή επίσης μέσα στη φλόγα ψεκασμού υπερηχητικής φλόγας. Τα σωματίδια αυτά βρίσκονται ακέραια μέσα στην δομή επίσης επικάλυψης προξενώντας ανομοιομορφία ως επίσης την δομή και το μέγεθος. Συνέπεια αυτού είναι η δημιουργία ασυνεχειών, καθώς ευνοείται η δημιουργία κενών μεταξύ αυτών και των σταγονιδίων που στερεοποιούνται πλησίον επίσης, από επίσης 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 επίσης επικάλυψης. Μειωμένη είναι επίσης και η πρόσφυση που παρουσιάζουν τα σωματίδια αυτά με το υλικό που τα περιβάλλει.



Γραφική απεικόνιση άτηκτων σωματιδίων

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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Εισαγωγή

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα του θερμικού ψεκασμού είναι η δυνατότητα παραγωγής επικαλύψεων με ιδιότητες που καλύπτουν οποιαδήποτε εφαρμογή. Η ευελιξία που παρέχει ο θερμικός ψεκασμός, σε ότι αφορά στην επιλογή υλικών, έγκειται στο γεγονός ότι είναι δυνατόν να παράξει επικαλύψεις με διάφορες μορφολογίες, είτε σκληρές είτε μαλακές, με πυκνή δομή ή πορώδη. Οι ιδιότητες των επικαλύψεων που συνήθως εξετάζονται, ανάλογα με την εφαρμογή που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, είναι:

- I. Δύναμη πρόσφυσης
- II. Σκληρότητα
- III. Αντοχή σε διάβρωση και οξείδωση
- IV. Θερμικές ιδιότητες
- V. Ηλεκτρικές ιδιότητες
- VI. Μαγνητικές–οπτικές ιδιότητες

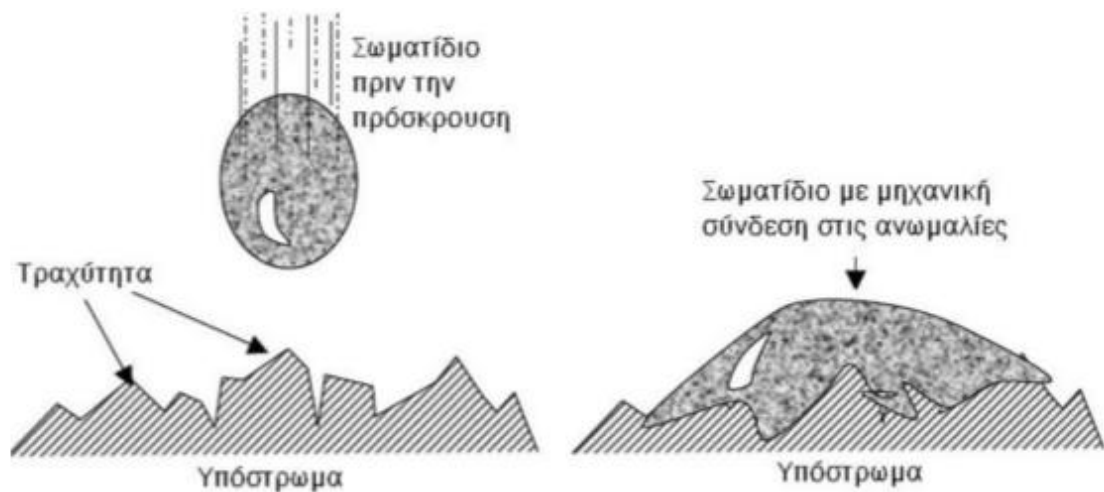
Οι ιδιότητες των επιστρωμάτων επηρεάζονται σημαντικά από τα μικροδομικά χαρακτηριστικά των επιστρωμάτων, όπως το πορώδες, την πρόσφυση μεταξύ των τηγμένων σωματιδίων, αλλά και την περιεκτικότητα σε οξείδια.

4.1 Γεωμετρικές–Επιφανειακές

Οι επικαλύψεις θερμικού ψεκασμού παρουσιάζουν θαμπή και τραχυμένη επιφάνεια. Η τραχύτητα των επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού κυμαίνεται από 2.5 έως 38 μm , ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται. Η κοκκομετρία της σκόνης ψεκασμού παίζει επίσης καθοριστικό ρόλο στη μορφολογία της επιφάνειας της επικάλυψης. Οι χονδρόκοκκες πούδρες δίνουν επικαλύψεις με αυξημένη τραχύτητα, σε σχέση με τις πιο λεπτόκοκκες.

4.2 Δύναμη πρόσφυσης

Μια πολύ σημαντική ιδιότητα για τις επικαλύψεις είναι η δύναμη πρόσφυσης, που καθορίζεται από την πρόσφυση της επικάλυψης με τον υπόστρωμα και τη συνάφεια μεταξύ των μεμονωμένων σωματιδίων που έχουν αποθεθεί. Η δύναμη πρόσφυσης του σωματιδίου που προσκρούει στο υπόστρωμα βασίζεται σε μηχανισμούς μηχανικούς, μεταλλουργικούς – χημικούς και φυσικούς. Ένα σωματίδιο που προσκρούει σε μια κατάλληλα προετοιμασμένη επιφάνεια θα διαπλατυνθεί και θα προσαρμοστεί ανάλογα, στην επιφάνεια. Κατόπιν θα προσφύσει μηχανικά στην επιφάνεια του υποστρώματος (Εικόνα).



Εικόνα: Σχηματική παράσταση πρόσφυσης σωματιδίου σε τραχωμένο υπόστρωμα

Σαν επακόλουθο, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί διάχυση ή κραμάτωση, δημιουργώντας ενδομεταλλικές ενώσεις, που υποδηλώνουν τον μεταλλουργικό – χημικό μηχανισμό πρόσφυσης. Η πρόσφυση βάσει του φυσικού μηχανισμού, υπακούει ουσιαστικά στις αρχές Van der Waals μεταξύ των σωματιδίων και του υποστρώματος. Η αύξηση της πρόσφυσης μιας επικάλυψης εξαρτάται κυρίως από τις παραμέτρους της διαδικασίας ψεκασμού, αλλά και από την προετοιμασία των επιφανειών, σε ότι αφορά τον καθαρισμό της επιφάνειας από οξειδία και άλλα στοιχεία. Επιπλέον, τον πιο καθοριστικό ρόλο παίζει η αρχικά προσδιδόμενη τραχύτητα του υποστρώματος αλλά και η πλαστική παραμόρφωση στην οποία αυτό υπόκειται από την πρόσκρουση των σωματιδίων.

Η συνάφεια μεταξύ των μεμονωμένων σωματιδίων που έχουν αποθεθεί, εξαρτάται από την τραχύτητα του υποστρώματος, τη θερμοκρασιακή διαφορά και τη δύναμη πρόσφυσης – συνάφειας του στρώματος που έχει ήδη αποθεθεί. Η πρόσφυση ενός επιστρώματος με το υπόστρωμα αλλά και η συνάφεια μεταξύ των αλληπάλληλων τηγμένων σωματιδίων επηρεάζεται κυρίως από:

- Τις παραμένουσες τάσεις εντός του επιστρώματος.
- Την τήξη και τοπικά κραμάτωση των επιφανειών των σωματιδίων αλλά και της διεπιφάνειας μεταξύ του υποστρώματος και των παρακείμενων σωματιδίων.
- Τη διάχυση στοιχείων κατά μήκος των ορίων των τηγμένων σωματιδίων
- Τις ατομικές δυνάμεις VanderWaals.
- Τις μηχανικές αλληλεπιδράσεις.

4.3 Σκληρότητα

Οι επικαλύψεις θερμικού ψεκασμού παρουσιάζουν χαμηλή σχετικά μακροσκληρότητα, σε σχέση με τα αντίστοιχα χυτά ή σφυρήλατα υλικά, λόγω του πορώδους και των οξειδίων που παρουσιάζουν στη μικροδομή τους. Αν και τα οξειδία αυξάνουν τη μικροσκληρότητά τους, ωστόσο μειώνουν την ολκιμότητά τους καθώς τα καθιστούν ψαθυρά. Παρόλα αυτά οι επικαλύψεις θερμικού ψεκασμού υπερέχουν σημαντικά άλλων επικαλύψεων, όπως οι οργανικές, λόγω της σκληρότητάς τους, αντικαθιστώντας τις σε πολλές εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή αντίσταση σε φθορά.

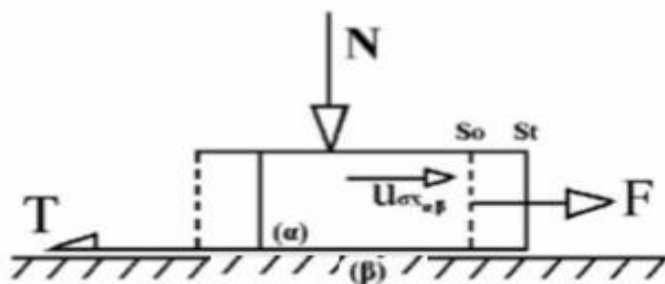
Η σκληρότητα, όπως και η πυκνότητα των επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού είναι χαμηλότερες σε σχέση με το υλικό τροφοδοσίας. Τόσο για την περίπτωση των μεταλλικών επικαλύψεων όσο και για τις κεραμικές επικαλύψεις, οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται από το υλικό που πρόκειται να ψεκαστεί, τον εξοπλισμό του θερμικού ψεκασμού, τις παραμέτρους της διαδικασίας, τη θερμοκρασία των σωματιδίων και τον τύπο του αερίου ατομοποίησης.

Γενικά ισχύει ότι όσο πιο υψηλή είναι η ταχύτητα των σωματιδίων, εντός του δαυλού, τόσο σκληρότερες και πυκνότερες είναι οι επικαλύψεις. Κατά φθίνουσα σειρά, τις σκληρότερες και πυκνότερες επικαλύψεις δίνει ο ψεκασμός με εκτόνωση, ψεκασμός υψηλής ταχύτητας με καύση οξυγόνου, ψεκασμός με τόξο πλάσματος, ψεκασμός ηλεκτρικού τόξου, ψεκασμός φλόγας.

4.4 Αντοχή σε τριβή – φθορά

Οι επικαλύψεις θερμικού ψεκασμού χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές που απαιτούνται αντιτριβικές ιδιότητες, δίνοντας τη δυνατότητα αντιμετώπισης των περισσότερων μηχανισμών φθοράς. Λόγω της ευχέρειας που παρέχει ο θερμικός ψεκασμός στην επιλογή και εφαρμογή μη συμβατικών υλικών, καθίσταται δυνατή η επίλυση προβλημάτων φθοράς και τριβής, καλύπτοντας ταυτόχρονα και άλλες απαιτήσεις, παράγοντας μια μόνο επικάλυψη. Σε σχέση με τα χυτά ή σφυρήλατα υλικά, οι επικαλύψεις υπερέχουν σημαντικά σε ότι αφορά στην αντίσταση σε φθορά, με βασικό λόγο την ιδιαιτερότητα της μικροδομής (πορώδες) που προσφέρει ο θερμικός ψεκασμός. Ειδικά σε περιπτώσεις εφαρμογής λιπαντικού, το πορώδες επιτρέπει τη διείσδυση αυτού ευκολότερα, προσφέροντας χαμηλότερο συντελεστή τριβής. Επιπλέον, η εφαρμογή επικαλύψεων υψηλής αντοχής σε φθορά, σε υλικά με χαμηλή αντίσταση, επιτρέπει τη χρήση τους ακόμα και σε ιδιαίτερα δυσμενή περιβάλλοντα.

Η τριβή και η φθορά συμβαίνει όταν δυο επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή υποβάλλονται σε ολίσθηση ή κύλιση. Η τριβή είναι μια σοβαρή αιτία απώλειας ενέργειας ενώ η φθορά είναι αιτία σπατάλης υλικού. Για την αποφυγή αυτών, συνήθως επιλέγονται κατάλληλα τα υλικά που πρόκειται να έρθουν σε επαφή ή χρησιμοποιούνται λιπαντικά που αποτρέπουν την ταχεία και υψηλή φθορά τους. Τριβή (friction) λέγεται το φυσικό φαινόμενο κατά το οποίο σε δύο επαπτόμενα σώματα, το ένα ανθίσταται στην κίνηση ή την τάση να κινηθεί, του άλλου. Η τριβή των στερεών είναι πολύπλοκο φαινόμενο που εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους που δρουν επί του τριβικού συστήματος και μάλιστα στην πραγματική επιφάνεια επαφής και στα στρώματα του υλικού κάτω από αυτή, σε μικρό σχετικά βάθος. Όταν δύο σώματα (α) και (β) κινούνται με σχετική ταχύτητα u λόγω του φαινομένου της τριβής αναπτύσσεται η επαπτομενική δύναμη τριβής T που ανθίσταται στη σχετική κίνηση των σωμάτων (Εικόνα) και κατά συνέπεια έχει διεύθυνση (περίπου) αντίθετη προς τη διεύθυνση της σχετικής ταχύτητας.

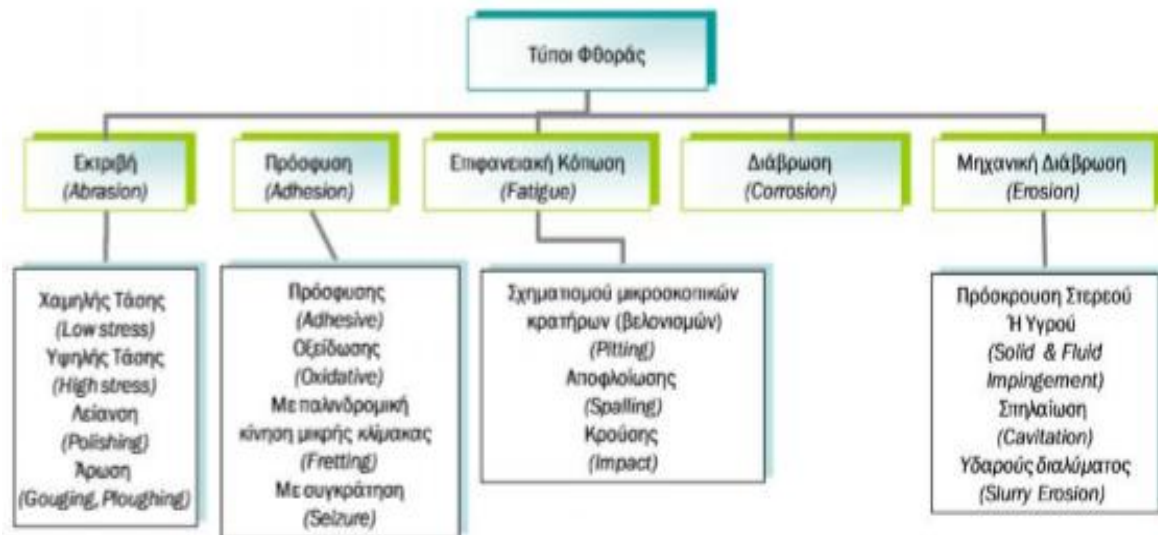


Εικόνα: Το τριβικό σύστημα

Βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την λειτουργία του τριβικού συστήματος είναι:

- τα υλικά των τριβομένων επιφανειών
- η παρουσία επιφανειακού στρώματος (λιπαντικού, ρύπου, οξειδίων)
- η τραχύτητα των επιφανειών
- η σχετική ταχύτητα ολίσθησης
- το εφαρμοζόμενο κάθετο φορτίο
- η διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ των επιφανειών.

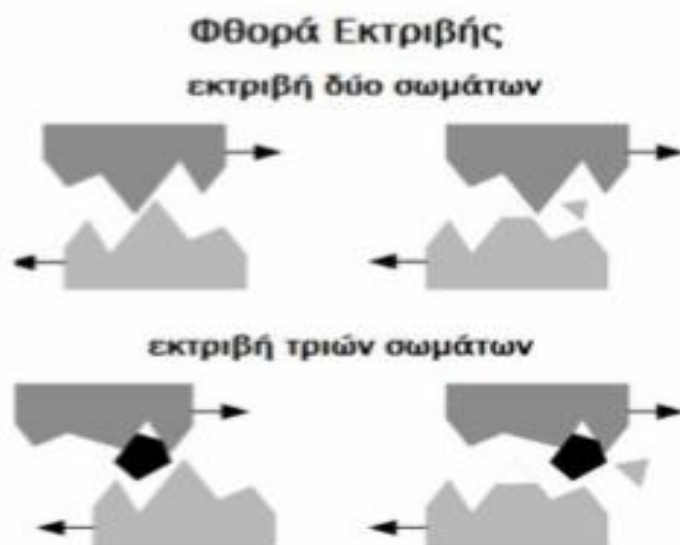
Οι επιφανειακές ανωμαλίες που έρχονται σε επαφή, μπορούν να καταστραφούν με διαφορετικούς τρόπους υπό την επίδραση των δυνάμεων τριβής. Οποιοδήποτε είδος καταστροφής εξαρτάται από τις ιδιότητες των τριβόμενων υλικών και από την επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας, όπως το φορτίο και η ταχύτητα. Το φορτίο αυξάνει το πλήθος των τριβικών δεσμών που καταστρέφονται. Κατά την ολίσθηση τα επιφανειακά στρώματα θερμαίνονται και αυτό προκαλεί μεταβολή των ιδιοτήτων των επιφανειών. Το αποτέλεσμα της φθοράς, που αποτελεί την απομάκρυνση υλικού από στερεές επιφάνειες λόγω μηχανικής δράσης, είναι ανυπολόγιστης οικονομικής σημασίας, καθώς είναι ο παράγοντας, που περισσότερο από κάθε τι άλλο, καθορίζει τη διάρκεια ζωής των περισσότερων μηχανολογικών κατασκευών. Χαρακτηριστικό της διεργασίας της φθοράς είναι ότι συνήθως πραγματοποιείται με πολύ αργό ρυθμό και το ποσό της ύλης που αφαιρείται κάθε φορά είναι συνήθως πολύ μικρό. Στην Εικόνα παρουσιάζονται οι πέντε κύριοι τύποι φθοράς καθώς και οι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα για κάθε κατηγορία.



Εικόνα: Κατηγορίες φθοράς και κύριοι μηχανισμοί φθοράς

4.5 Φθορά Εκτριβής

Η φθορά λόγω εκτριβής, εμφανίζεται όταν δύο επιφάνειες που αλληλεπιδρούν, βρίσκονται σε άμεση επαφή και ένα από τα δυο σώματα είναι σημαντικά σκληρότερο από το άλλο. Υπό την επίδραση κανονικού φορτίου, οι επιφανειακές ανωμαλίες του σκληρότερου υλικού διεισδύουν στην επιφάνεια του πιο μαλακού υλικού προκαλώντας πλαστική παραμόρφωση (εκτριβή δύο σωμάτων–Εικόνα).



Εικόνα: Σχηματική παράσταση της φθοράς εκτριβής

Όταν εμφανιστεί και επαπτομενική κίνηση, τότε έχουμε και απομάκρυνση θραυσμάτων υλικού από τη μαλακότερη επιφάνεια, τα οποία διεισδύουν στη μια ή και στις δύο επιφάνειες και προκαλούν απόξεσή τους (εκτριβή τριών σωμάτων – Εικόνα). Αυτό συνήθως οδηγεί στο μηχανισμό της μικροάρωσης, της μικροκοπής και μικρορωγμάτωσης. Ο ρυθμός φθοράς λόγω εκτριβής μειώνεται με τη μείωση του επιβαλλόμενου φορτίου και την αύξηση της σκληρότητας του φθειρόμενου υλικού, διότι μειώνεται το βάθος προσβολής του υλικού από τα σκληρά σωματίδια. Έρευνες έχουν δείξει ότι η εφαρμογή κατάλληλων επιστρωμάτων θερμικού ψεκασμού βελτιώνει την αντοχή σε φθορά λόγω εκτριβής.

4.6 Φθορά λόγω Πρόσφυσης

Η φθορά λόγω πρόσφυσης (Εικόνα), εκδηλώνεται εξαιτίας της ανάπτυξης δεσμών πρόσφυσης στην διεπιφάνεια δυο ολισθαινουσών επιφανειών. Τα στάδια που εξελίσσεται το όλο φαινόμενο είναι τα εξής:

- Κατά τη διάρκεια επαφής των ανταγωνιστικών επιφανειών, εκδηλώνεται παραμόρφωση επιφανειακής τραχύτητας και σχηματισμός δεσμών πρόσφυσης.
- Με την ανάπτυξη κατάλληλων συνθηκών, επέρχεται σχάση δεσμών και δημιουργία σωματιδίων.
- Μεταφορά των δημιουργούμενων αποβλήτων από το ένα σώμα στο άλλο με τελική απομάκρυνσή τους ως παραπροϊόντα διεργασίας.



Εικόνα: Σχηματική παράσταση της φθοράς λόγω πρόσφυσης

Δυο σημαντικά στοιχεία του μηχανισμού πρόσφυσης είναι τα εξής:

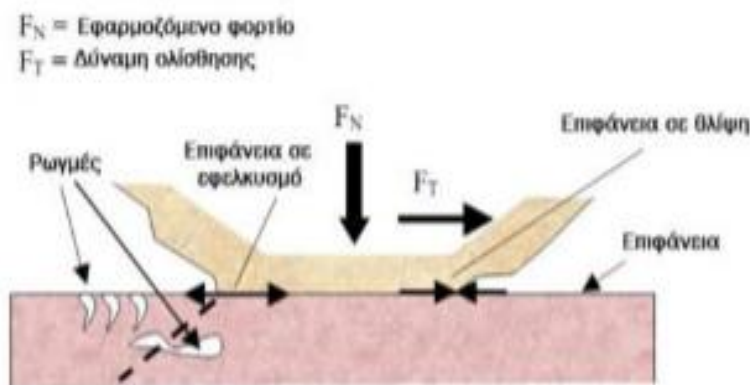
Το πρώτο είναι η δημιουργία δεσμών πρόσφυσης. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη δεσμών πρόσφυσης αποτελεί η άμεση επαφή των δύο σωμάτων. Η ισχύς και η σταθερότητα του δεσμού εξαρτάται από τη μικροδομή, τις φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες των σε επαφή επιφανειών.

Το δεύτερο σημαντικό στοιχείο είναι η σχάση των δεσμών πρόσφυσης, η οποία δεν είναι απόλυτα αποσαφηνισμένη. Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι η καταστροφή των δεσμών εξαρτάται από τη μικροδομή των σωμάτων και συγκεκριμένα από την κρυσταλλική δομή, την ηλεκτρονική δομή και τον προσανατολισμό των κρυστάλλων.

4.7 Φθορά λόγω Επιφανειακής Κόπωσης

Η φθορά λόγω επιφανειακής κόπωσης (Εικόνα), έχει άμεση σχέση με τις κυκλικά επαναλαμβανόμενες φορτίσεις τις οποίες υφίστανται επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή. Καθώς το ένα σώμα παλινδρομεί πάνω στο άλλο, αναπτύσσονται επαναλαμβανόμενα φορτία τα οποία όπως είναι γνωστό προκαλούν συγκέντρωση τάσεων κυρίως σε σημεία επιφανειακών ανωμαλιών. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία ρωγμάτων, η διάδοση ρωγμών και τελική αστοχία του υλικού. Διακρίνονται τα εξής στάδια κατά τη διάρκεια φθοράς λόγω επιφανειακής κόπωσης:

- Καθώς οι επιφάνειες έρχονται σε επαφή εκδηλώνεται μετάδοση τάσεων στα σημεία επαφής.
- Στην επιφάνεια του πιο μαλακού υλικού επέρχεται αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης.
- Η συσσώρευση παραμόρφωσης, ιδιαίτερα κάτω από την επιφάνεια του υλικού, οδηγεί βαθμιαία σε δημιουργία μικρορωγματώσεων και κενών.
- Καθώς συνεχίζεται η επαναλαμβανόμενη φόρτιση, επέρχεται διάδοση των ρωγμών και σε τελικό στάδιο, αποκόλληση υλικού και σχηματισμός σωματιδίων φθοράς.



Εικόνα: Σχηματική παράσταση της φθοράς λόγω Επιφανειακής Κόπωσης

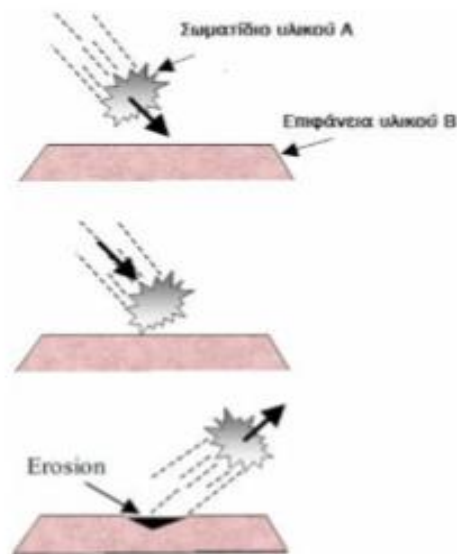
4.8 Φθορά λόγω Χημικής Διάβρωσης

Η φθορά λόγω τριβοχημικών αντιδράσεων, είναι μηχανισμός που εμφανίζεται σε τριβοσυστήματα υλικών με διαφορετική χημική σύσταση και επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες του περιβάλλοντος, όπως τα υλικά που υπόκεινται εύκολα σε οξειδωση. Τα στάδια στα οποία εξελίσσεται το φαινόμενο είναι τα ακόλουθα:

- Καθώς τα σώματα βρίσκονται σε επαφή, οι δύο επιφάνειες αλληλεπιδρούν ή αντιδρούν με το περιβάλλον.
- Τα προϊόντα από τις χημικές αντιδράσεις σχηματίζουν στρώματα διαφορετικής χημικής σύστασης στην διεπιφάνεια των δυο σωμάτων.
- Καθώς τα δύο σώματα τρίβονται, τα στρώματα αυτά απομακρύνονται ως παραπροϊόντα της τριβής και ακολούθως επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία δημιουργίας και απομάκρυνσης στρωμάτων.

4.9 Φθορά λόγω Μηχανικής Διάβρωσης

Η πρόσκρουση στερεών σωματιδίων ή μικρών σταγόνων αερίου ή υγρού προκαλεί τη φθορά λόγω μηχανικής διάβρωσης των υλικών. Όπως φαίνεται στην Εικόνα σωματίδιο του υλικού A προσπίπτει στην επιφάνεια του υλικού B, με αποτέλεσμα την απομάκρυνση από την επιφάνεια σωματιδίων του υλικού B.



Εικόνα: Σχηματική παράσταση της φθοράς λόγω μηχανικής διάβρωσης

Η αντίσταση της επιφάνειας ενός υλικού στη φθορά λόγω μηχανικής διάβρωσης εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος του υλικού, η επιφανειακή του κατεργασία, αλλά και από παράγοντες που έχουν να κάνουν με τα προσπίπτοντα σωματίδια, όπως το μέγεθος και το είδος των σωματιδίων, την ταχύτητα και τη γωνία πρόσπτωσης.

4.10 Αντοχή σε διάβρωση

Η προστασία από διάβρωση παρέχεται συνήθως από ευγενή μέταλλα, χημικά αδρανή κεραμικά ή πλαστικά, τα οποία μπορούν να ψεκαστούν θερμικά δημιουργώντας ένα «φράγμα» μεταξύ του υποστρώματος και του περιβάλλοντος. Το πορώδες, ιδιαίτερα το ανοικτό πορώδες, είναι ο παράγοντας που παίζει καθοριστικό ρόλο σε αυτού του είδους τις επικαλύψεις και χρήζει περιορισμού .

Οι μεταλλικές επικαλύψεις θερμικού ψεκασμού μπορεί να είναι ανοδικές ή καθοδικές για το υπόστρωμα στο οποίο εφαρμόζονται. Επειδή η διάβρωση λαμβάνει χώρα στην άνοδο, ο σχεδιασμός αντιδιαβρωτικών επικαλύψεων γίνεται με γνώμονα η επικάλυψη να είναι ανοδικότερη του υποστρώματος. Οι ανοδικές επικαλύψεις θα διαβρωθούν ή θα «θυσιαστούν» ώστε να προστατέψουν το υπόστρωμα .

Τα πιο συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της διάβρωσης είναι ο ψευδάργυρος, το αλουμίνιο, τα κράματα βάσης νικελίου και τα κράματα βάσης χαλκού –νικελίου.

4.11 Παραμένουσες Τάσεις

Οι παραμένουσες τάσεις παρουσιάζονται στις περισσότερες επικαλύψεις και αποτελούν σημαντικό πρόβλημα μιας και μπορεί να επηρεάσουν διάφορα χαρακτηριστικά της επικάλυψης, όπως για παράδειγμα την αντοχή σε φθορά και την αντοχή σε έναρξη ρωγμάτωσης λόγω κόπωσης, αλλά και την εν γένει καλή λειτουργία τους. Επιπλέον, συχνά υπάρχει ο κίνδυνος οι παραμένουσες τάσεις να προκαλέσουν την έναρξη αποσύνδεσης και αποκόλλησης της επικάλυψης. Κάτι τέτοιο είναι περισσότερο πιθανό να συμβεί σε επικαλύψεις μεγάλου πάχους, εφόσον η ποσότητα της ενέργειας ελαστικής παραμόρφωσης που είναι συσσωρευμένη αυξάνει γραμμικά με το πάχος, όταν υπάρχει χαλάρωση των τάσεων.

Οι παραμένουσες τάσεις είναι αποτέλεσμα τόσο της διαδικασίας παραγωγής των επικαλύψεων, η οποία περιλαμβάνει αλλαγές φάσεων και μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές, όσο και των θερμικών κύκλων κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους σε κάποια εφαρμογή. Η γνώση και κατανόηση των παραμενουσών τάσεων στις επικαλύψεις είναι αναγκαία για την εξασφάλιση της καλής λειτουργίας τους αλλά και για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής τους.

4.12 Άλλες ιδιότητες

Τα επιστρώματα θερμικού ψεκασμού παρουσιάζουν κοκκοειδή μικροδομή με κάποιο ποσοστό πορώδους. Επιπλέον η επιφάνειά τους είναι εν γένει υψηλής τραχύτητας. Τέτοιου είδους μικροδομή δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των οπτικών εφαρμογών και για το λόγο αυτό συνήθως εφαρμόζονται τεχνικές απόθεσης όπως η τεχνική φυσικής εναπόθεσης ατμών (physical vapour deposition, PVD) .

Η δυνατότητα ελέγχου της ακτινοβολίας για παράδειγμα σε παράθυρα κτιρίων για μείωση της ενεργειακής απώλειας συνήθως πραγματοποιείται με την εφαρμογή τέτοιων επιστρωμάτων. Ένα άλλο παράδειγμα είναι οι ηλιακοί συλλέκτες, όπου για τη μείωση των θερμικών απωλειών απαιτείται και υψηλή απορροφητικότητα σε όλο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας ($0.3 < \lambda < 3 \mu\text{m}$) και χαμηλή ακτινοβολία στα μεσαία υπέρυθρα μήκη κύματος ($\lambda > 3 \mu\text{m}$). Σε αυτή την περίπτωση, όπου η αδιαφάνεια δεν είναι πλέον απαιτούμενη προϋπόθεση, είναι δυνατόν να εφαρμοστούν και παχύτερα επιστρώματα της τάξης των 100–500 μm . Επομένως τεχνικές όπως ο ψεκασμός πλάσματος είναι κατάλληλες και εφαρμόζονται με επιτυχία.

Σε ότι αφορά στις ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες των επιστρωμάτων θερμικού ψεκασμού, τα τελευταία χρόνια μελετώνται και εφαρμόζονται ολοένα και συχνότερα. Για παράδειγμα, αγωγοί επιστρωμένοι με χαλκό που έχουν παραχθεί με την τεχνική του ψυχρού ψεκασμού χρησιμοποιούνται ευρέως.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Υλικά –Εφαρμογές

5.1 ΥΛΙΚΑ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

Τα υλικά που είναι κατάλληλα για θερμικό ψεκασμό είναι αυτά τα οποία δεν διαχωρίζονται, αποσυντίθενται ή εξαχνώνονται ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα περισσότερα μέταλλα, μεσομεταλλικές ενώσεις, κράματα, όλες οι μορφές κεραμικών (οξειδία, βορίδια, νιτρίδια, καρβίδια, κλπ), κεραμομεταλλικά υλικά αλλά και κάποια πολυμερή είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για ψεκασμό με κάποια από τις μεθόδους θερμικού ψεκασμού. Μέταλλα και κράματά τους, όπως το μολυβδαίνιο, το βολφράμιο, τα υπερκράματα (βάσης σιδήρου, νικελίου, κοβαλτίου), το αλουμίνιο, διάφοροι χάλυβες (μαρτενσιτικοί, ωστενιτικοί, μαλακοί), το NiCr και κράματα αυτού κλπ., έχουν με επιτυχία χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία επικαλύψεων με τεχνικές θερμικού ψεκασμού. Τα πλεονεκτήματα των μεταλλικών υλικών ως υλικά ψεκασμού είναι η ομοιότητά τους με πολλά από τα βασικά μέταλλα (υποστρώματα) που χρειάζονται την εφαρμογή επικαλύψεων, αλλά επιπλέον και η αντοχή τους, η αντίσταση σε διάβρωση, οξείδωση και τριβή – φθορά.

Οι μεταλλικές επικαλύψεις παρουσιάζουν χαρακτηριστική στρωματική ομοιόμορφη δομή, με τη διεύθυνση των εναποτιθέμενων σταγονιδίων παράλληλη με την επιφάνεια του υποστρώματος. Τις περισσότερες φορές παρουσιάζονται και οξειδία (εκτός από την περίπτωση όπου ο ψεκασμός πραγματοποιήθηκε με ελεγχόμενη ατμόσφαιρα) με διεύθυνση επίσης παράλληλη με την επιφάνεια του υποστρώματος. Τα οξειδία αυτά μπορεί να είναι είτε μεγάλου μεγέθους σε μορφή στρώματος είτε μικρού μεγέθους διασκορπισμένα στις διεπιφάνειες των εναποτιθέμενων σταγονιδίων. Η μορφή τους και η περιεκτικότητα εξαρτάται από την τεχνική ψεκασμού που έχει χρησιμοποιηθεί. Σε ότι αφορά στα κεραμικά, ο θερμικός ψεκασμός είναι ο πλέον κατάλληλος για τη δημιουργία επικαλύψεων.

Όλα τα κεραμικά (οξειδία, καρβίδια, νιτρίδια) έχουν αποτεθεί με επιτυχία με όλες τις τεχνικές θερμικού ψεκασμού. Η πιο κατάλληλη όμως μέθοδος είναι ο ψεκασμός με τόξο πλάσματος, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας της φλόγας. Η μικροδομή των κεραμικών επιστρωμάτων είναι παρόμοια με αυτή των μεταλλικών αλλά με δύο σημαντικές διαφορές, τον προσανατολισμό των κόκκων και την παρουσία μικρορωγμών. Όπως και στην περίπτωση των μεταλλικών επιστρωμάτων, η ταχεία στερεοποίηση των μικρών σωματιδίων οδηγεί σε λεπτόκοκκες δομές. Ωστόσο λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας των κεραμικών, είναι δυνατόν να υπάρξουν πολλαπλοί κόκκοι εντός ενός τηγμένου σωματιδίου, σε αντίθεση με τα μεταλλικά υλικά όπου σε κάθε ένα τηγμένο σωματίδιο της επικάλυψης υπάρχει μόνο ένας κόκκος.

Επιπλέον η παρουσία των μικρορωγμών εντός των μεμονωμένων τηγμένων σωματιδίων είναι έντονη και οφείλεται στη συσσώρευση υψηλών, εντοπισμένων παραμενουσών τάσεων. Εκτός από τα μεταλλικά και τα κεραμικά υλικά, πολλοί ερευνητές μελετούν το θερμικό ψεκασμό και των μεσο-μεταλλικών ενώσεων, όπως TiAl, Ti3Al, Ni3Al, NiAl και MoSi2, τα οποία προσφέρουν βελτιωμένες ιδιότητες όπως η ολκιμότητα και η αντοχή σε εφελκυσμό. Επίσης, τα πολυμερή είναι υλικά που προσφέρονται για θερμικό ψεκασμό, εστιάζοντας σε εφαρμογές όπου απαιτείται προστασία από χημικές προσβολές και από διάβρωση.

Ανεξάρτητα με το είδος του υλικού που πρόκειται να ψεκαστεί, (μεταλλικό, κεραμικό, σύνθετο) την καλή ποιότητα της επικάλυψης επηρεάζει η μορφολογία και το μέγεθος του αρχικού υλικού τροφοδοσίας, ιδιαίτερα για την περίπτωση που το ψεκαζόμενο υλικό είναι υπό μορφή πούδρας. Τρεις τύποι πούδρας χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή επικαλύψεων: λεπτόκοκκη και πυροσυσσωματωμένη, τηγμένη και κονιορτοποιημένη, και σφαιροποιημένη μέσω τεχνικής πλάσματος. Διαφορετικές μορφολογίες της αρχικής πούδρας έχει αποδειχθεί ότι δίνουν επικαλύψεις ψεκασμού πλάσματος με διαφορετική μικροδομή και ιδιότητες

5.2 Είδη επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού

Είδη Επικαλύψεων Θερμικού Ψεκασμού Επιστρώματα αντοχής σε εκτριβή και φθορά. Για εφαρμογές όπου απαιτείται προστασία από φθορά που προκαλείται από ολίσθηση, κύλιση ή πρόσκρουση, χρησιμοποιούνται επικαλύψεις με υψηλή δυσθραυστότητα και μικρές παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις. Χρησιμοποιούνται κυρίως κεραμικά, κεραμομεταλλικά υλικά, και μεταλλικά κράματα, όπως κράματα σιδήρου, νικελίου, χρωμίου και κοβαλτίου.

Επιστρώματα για αντοχή σε πρόσκρουση. Η επιλογή επιστρωμάτων για τέτοιες εφαρμογές εξαρτάται από την οξύτητα των συνθηκών και τον τύπο της διάβρωσης. Για την περίπτωση πρόσκρουσης στερεών σωματιδίων υπό μικρή γωνία, όπου η φθορά είναι παρόμοια με αυτήν της εκτριβής, απαιτούνται επιστρώματα με υψηλή σκληρότητα. Για την περίπτωση πρόσκρουσης στερεών σωματιδίων υπό γωνία κοντά στις 90ο, η δυσθραυστότητα πρέπει να είναι αυξημένη.

Για διάβρωση μέσω μηχανικής σπηλαίωσης λόγω πρόσκρουσης υγρών, απαιτείται επιστρώμα με καλή αντοχή σε κόπωση. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες επιστρώσεις περιλαμβάνουν τις κεραμομεταλλικές (καρβίδιο του βολφραμίου με κοβάλτιο, καρβίδιο του χρωμίου, νικελιούχο χρώμιο), διάφορα κράματα σιδήρου, νικελίου, χρωμίου και κοβαλτίου, επιστρώσεις αλουμινίου – ορείχαλκου, MONEL καθώς και οξειδία.

Επιστρώματα για εργαλεία και καλούπια. Το κόστος των εργαλείων και των καλουπιών επιβαρύνει σημαντικά το συνολικό κόστος των μηχανουργικών κατεργασιών. Παρά τις μεγάλες επενδύσεις σε υλικά, η φθορά των εργαλείων οδηγεί σε γρήγορη αστοχία τους και μείωση της παραγωγής. Με την επικάλυψη των εργαλείων με υλικά υψηλής αντοχής σε φθορά επεκτείνεται ο χρόνος ζωής και μειώνεται το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Μερικά παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι το καρβίδιο του χρωμίου, το καρβίδιο του βολφραμίου.

Επιστρώσεις για ρουλεμάν. Οι επιστρώσεις θερμικού ψεκασμού στις επιφάνειες των ρουλεμάν επιτρέπουν, λόγω του υψηλού τους πορώδους, την εύκολη εισαγωγή μικροποσοτήτων λιπαντικού μέσου. Επιπλέον, είναι χαμηλού κόστους και φθείρονται αυτές κατά προτίμηση και όχι η προστατευμένη επιφάνεια. Οι πιο συνηθισμένες επιστρώσεις που χρησιμοποιούνται για την προστασία των επιφανειών ρουλεμάν περιλαμβάνουν: επιστρώσεις αλουμινίου – ορείχαλκου, φώσφορου – ορείχαλκου, σύνθετες επιστρώσεις αλουμινίου – ορείχαλκου – πολυμερούς.



Επιφάνεια οδοντωτού τροχού μετά επιναλωση

Για σκληρότερες επιφάνειες χρησιμοποιούνται κεραμομεταλλικά επιστρώματα (όπως π.χ. καρβίδιο του βολφραμίου με κοβάλτιο, καρβίδιο του χρωμίου με νικελιούχο χρώμιο), κεραμικά (όπως π.χ. οξείδιο του χρωμίου, αλούμινα), αλλά και μεταλλικά κράματα (όπως π.χ. κράματα σιδήρου, νικελίου, χρωμίου και κοβαλτίου).

5.3 Τομείς Εφαρμογών των Επιστρώσεων Θερμικού Ψεκασμού

Οι επικαλύψεις θερμικού ψεκασμού εφαρμόζονται ήδη επιτυχώς σε μία ευρεία γκάμα εφαρμογών όπως:

- Αυτοκινητοβιομηχανία, νηζελομηχανές (ελατήρια εμβόλων — piston rings, εσωτερική επιφάνεια κυλίνδρων, βαλβίδες, φρένα, στροφαλοφόροι — εκκεντροφόροι άξονες, κλπ.)
- Στροβιλομηχανές
- Ναυπηγεία
- Χημική, πετροχημική βιομηχανία
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Αεροναυπηγική
- Αντλίες —υδραυλικά συστήματα
- Γεωργικά μηχανήματα —εργαλεία
- Εργαλεία μεταλλείων, ορυχείων
- Μεταφορά και επεξεργασία βιομηχανικών ορυκτών και μεταλλευμάτων
- Εξοπλισμός αμμοβολής
- Κλωστοϋφαντουργία
- Χαρτοβιομηχανία
- Μηχανές τυπογραφείων
- Τσιμεντοβιομηχανία
- Μεταλλουργία
- Τούβλα, κεραμίδια
- Ιατρικά εμφυτεύματα
- Ηλεκτρονική

Ναυπηγική και Θαλάσσιες Κατασκευές.

Τα επιστρώματα θερμικών ψεκασμών, εφαρμόζονται και σε στοιχεία μηχανών που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική. Κεραμικά επιστρώματα θερμικής μόνωσης, τα οποία δημιουργούνται με τεχνική ατμοσφαιρικού ψεκασμού πλάσματος, χρησιμοποιούνται σε τμήματα (πιστόνια, βαλβίδες) ναυπηγικών μηχανών ντίζελ βελτιώνοντας σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά και τις επιδόσεις τους.

Τα επιστρώματα αυτά θα πρέπει ωστόσο να δοκιμάζονται ως προς την καλή αντιδιαβρωτική και αντιοξειδωτική τους συμπεριφορά, καθώς οι συνθήκες που επικρατούν σε θαλάσσιο και παράκτιο περιβάλλον είναι ιδιαίτερα δύσκολες. Τέτοια επιστρώματα που να συνδυάζουν καλή θερμική μόνωση και καλή προστασία από το περιβάλλον είναι επικαλύψεις υψηλής περιεκτικότητας σε χρώμιο, όπως το NiCrMo (Hastelloy ή Nistelle), το CoCrSiMo (Triballoy) και τα MCrAlYs, που δημιουργούνται βασικά είτε με τεχνική πλάσματος είτε με HVOF.

Επίσης, η ανάπτυξη κόνεων νανοδομής έχει διευρύνει την εφαρμογή επιστρωμάτων θερμικών ψεκασμών στη ναυπηγική. Συγκεκριμένα, σύνθετα κεραμικά αντιτριβικά επιστρώματα αλούμινας-τιτανίας που δημιουργούνται με τεχνική ατμοσφαιρικού ψεκασμού πλάσματος έχουν υιοθετηθεί από το Ναυτικό των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής για την εφαρμογή τους τόσο σε πλοία όσο και σε υποβρύχια.

Αυτά τα αντιτριβικά επιστρώματα νανοδομής, τα οποία χαρακτηρίζονται ως επιστρώματα εξαιρετικών ιδιοτήτων, εφαρμόζονται στο μειωτήρα, στα υδραυλικά πιστόνια, στους οδηγούς των περισκοπίων, στα έδρανα-κουζινέτα καθώς και σε άλλα τμήματα των πλοίων και των υποβρυχίων.

Βασική απαίτηση της σύγχρονης ναυπηγικής είναι η μείωση του βάρους των πλοίων και των υποβρυχίων χρησιμοποιώντας κράματα αλουμινίου. Όμως τα υλικά αυτά δεν παρουσιάζουν αντοχή ούτε στη φθορά ούτε και στη διάβρωση που προκαλεί το θαλάσσιο περιβάλλον, με άμεση συνέπεια τη μείωση του χρόνου ζωής τους και την αύξηση του κόστους συντήρησης.

Υλικά που δίνουν υποσχέσεις για το μέλλον είναι τα κράματα Al-Si-Cu τα οποία όμως για να εφαρμοστούν σε τμήματα ναυπηγικών κατασκευών θα πρέπει να επικαλυφθούν προκειμένου να έχουν βελτιωμένη αντοχή στη φθορά και τη διάβρωση. Προστατευτικά επιστρώματα που δημιουργούνται σε αυτήν την περίπτωση με τεχνική πλάσματος είναι κράματα WC-12Co, WC-NiCr και WC-4Co10Cr. Επιστρώματα θερμικών ψεκασμών εφαρμόζονται και σε παράκτιες μεταλλικές κατασκευές.

Ομάδα εφαρμογής	Εξάρτημα	Υλικό επίστρωσης	Λειτουργικές απαιτήσεις	Τεχνική επίστρωση
Κινητήρας (diesel, αερίου, βενζίνης)	Κυλίνδρους	Χάλυβας + οξειδία σιδήρου	Υψηλή αντοχή σε φθορά	Ατμοσφαιρικός ψεκασμός πλάσματος
	Ελατήριο εμβόλου (βενζινοκινητήρα)	Mo+NiCrBSi		Ατμοσφαιρικός ψεκασμός πλάσματος
	Ελατήριο εμβόλου (κινητήρα diesel)	Cr ₃ C ₂ +NiCr	Αντοχή σε αγκίστρωση, φθορά και εκτριβή	Ψεκασμός υψηλής ταχύτητας με καύση οξυγόνου
	Κεφαλή Εμβόλου (κινητήρα diesel)	MCrAlY και ZrO ₂ +Y ₂ O ₃	Θερμική μόνωση και αντοχή σε διάβρωση	Ατμοσφαιρικός ψεκασμός πλάσματος
	Ανιχνευτής οξυγόνου (αισθητήρες Λ)	Al ₂ O ₃ , MgO	Αντοχή σε πρόσκρουση στερεού ή υγρού και αντίσταση σε θερμικό σοκ	Ατμοσφαιρικός ψεκασμός πλάσματος
	Ακροφύσιο έγχυσης	Mo	Αντοχή σε διάβρωση και πρόσκρουση στερεού ή υγρού	Ατμοσφαιρικός ψεκασμός πλάσματος

Πίνακας επιλογής κατάλληλων υλικών επίστρωσης

Στην Ιαπωνία σε διάφορα τμήματα μεταλλικών θαλάσσιων και παράκτιων κατασκευών (κυρίως γέφυρες), ήδη από το 1985, εφαρμόζονται επιστρώματα θερμικών ψεκασμών ψευδαργύρου και αλουμινίου για την προστασία από τη φθορά και την έντονη διάβρωση που προκαλεί το θαλάσσιο περιβάλλον και τα αποτελέσματα κρίνονται ιδιαίτερα επιτυχή. Αν και οι βασικές τεχνικές δημιουργίας αυτών των επιστρωμάτων είναι η εμβάπτιση σε θερμό λουτρό και ο ηλεκτρογαλβανισμός, τα τελευταία χρόνια η δημιουργία αυτών των επιστρωμάτων γίνεται και με τεχνικές θερμικών ψεκασμών, δίνοντας επιστρώματα με πολύ μεγαλύτερο χρόνο ζωής και κόστος παραγωγής που είναι πλέον ανταγωνιστικό αυτού των συμβατικών τεχνικών.



Επιυαλωμένα μέταλλα εργοστασιακής κατασκευής

Επίσης, εκτιμάται ότι σημαντική ώθηση στην εφαρμογή τεχνικών θερμικών ψεκασμών στις ναυπηγικές και θαλάσσιες κατασκευές θα δώσει η αντικατάσταση των κλασικών χρησιμοποιούμενων χρωμάτων και βερνικιών, με ανθεκτικότερες επικαλύψεις πολυμερών (πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο κ.α). Αν και οι επικαλύψεις θερμικών ψεκασμών με πολυμερή υλικά έχουν βρει εφαρμογή από τα μέσα της δεκαετία του 1990 στις Η.Π.Α., παρόλα αυτά δεν έχουν περάσει ακόμα σε ευρεία εφαρμογή. Η σύγχρονη έρευνα όμως, επικεντρώνεται σε αυτά τα επιστρώματα και αναμένεται ότι τα επόμενα χρόνια θα αυξηθούν σημαντικά οι εφαρμογές τους

Βιομηχανία Παραγωγής Ενέργειας

Σημαντικό πεδίο εφαρμογής και έρευνας των επιστρωμάτων θερμικών ψεκασμών αποτελούν τα κελιά καύσης τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας. Τα κελιά καύσης χρησιμοποιούνται προκειμένου να μετατρέψουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική, λειτουργούν σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 1300K και αποτελούνται από την κάθοδο στην οποία συγκεντρώνεται το οξυγόνο, την άνοδο στην οποία συγκεντρώνεται το υδρογόνο και έναν στερεό ηλεκτρολύτη, ο οποίος βρίσκεται ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο. Στην κάθοδο των κελιών καύσης χρησιμοποιούνται επιστρώματα ατμοσφαιρικού ψεκασμού πλάσματος από LaMnO_3 με πρόσθετα SrO και CaO , καθώς το υλικό αυτό παρουσιάζει καλή ηλεκτρική

αγωγιμότητα και είναι συμβατό με το στερεό ηλεκτρολύτη που σε αρκετές περιπτώσεις είναι σταθεροποιημένη ζirkονία που έχει δημιουργηθεί είτε με ατμοσφαιρικό ψεκασμό πλάσματος είτε με ψεκασμό πλάσματος σε κενό. Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας (900-1000oC) των κελιών καύσης είναι ένας από τους παράγοντες που αποτελεί εμπόδιο για την ευρεία χρήση τους για την παραγωγή ενέργειας παρά την υψηλή τους απόδοση και την εξαιρετικά χαμηλή εκπομπή ρύπων. Η δημιουργία κελιών καύσης ενδιάμεσης θερμοκρασίας, όπως ονομάζονται οι συγκεκριμένες διατάξεις, έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον της διεθνούς έρευνας.



Σκαπτικό μηχάνημα εξόρυξης λυχνίτη με επιμεταλλωμένη επιφάνεια δράσης

Αυτοκινητοβιομηχανία

Τα επιστρώματα θερμικών ψεκασμών έχουν βρει ήδη εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία τόσο στην Ευρώπη και την Ιαπωνία όσο και στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής με ιδιαίτερα αυξητική την τάση χρήσης αυτών των επικαλύψεων. Η λειτουργική απόδοση των επικαλύψεων θερμικών ψεκασμών στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική και εκτιμάται ότι η χρήση τους θα αυξηθεί, τόσο στα βενζινοκίνητα όσο και στα πετρελαιοκίνητα οχήματα. Επιστρώματα νικελίου, πυριτίου και χρωμίου που δημιουργούνται με ατμοσφαιρικό ψεκασμό πλάσματος έχουν βρει εφαρμογή στο δακτύλιο των πιστονιών.

Τα επιστρώματα αυτά παρουσιάζουν σημαντικό πορώδες προκειμένου να διευκολύνεται η συγκράτηση του λαδιού. Επιστρώματα μολυβδαινίου δημιουργούνται με ατμοσφαιρικό ψεκασμό πλάσματος γενικότερα ως αντιτριβικά επιστρώματα καθώς

και σε τμήματα των κιβωτίων ταχυτήτων πολλών επιβατικών οχημάτων, εξασφαλίζοντας όσο το δυνατόν αθόρυβη λειτουργία.



Εργοστασιακή επιμετάλλωση αυτοκινητοβιομηχανίας

Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια το αλουμίνιο χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στην αυτοκινητοβιομηχανία για την κατασκευή διαφόρων εξαρτημάτων αντικαθιστώντας διάφορα σιδηρούχα κράματα. Τα αλουμινένια αυτά εξαρτήματα θα πρέπει να προστατευθούν από τη φθορά, κάτι που μπορεί να γίνει με την εφαρμογή επιστρωμάτων χυτοσιδήρου με ατμοσφαιρικό ψεκασμό πλάσματος. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές των θερμικών επικαλύψεων στην αυτοκινητοβιομηχανία.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από αυτήν την εργασία διάφορα σημαντικά συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν σχετικά με την εναπόθεση μετάλλων με την χρήση του θερμικού ψεκασμού. Οι δύο τύποι επιστρώματων έχουν τις διαφορετικές μορφολογίες δεδομένου ότι τα θερμικά ψεκασμένα επιστρώματα είναι λιγότερο ομοιογενή με το υψηλό πορώδες σε σχέση με την διαδικασία του ψυχρού ψεκασμού. Τα θερμικά επιστρώματα ψεκασμού αποτελούνται από Νικέλιο Ni, χρώμιο Cr, και διάφορες φάσεις Νικελίου-Χρωμίου, ενώ τα επιστρώματα pack cementation έχουν ένα λεπτό στρώμα του οξειδίου χρωμίου στην επιφάνεια και φάσεις Ni-B, Cr-B και Fe-Ni που διαμορφώνονται κάτω από αυτό το στρώμα. Υπάρχουν αρκετές μεταβλητές κατά το θερμικό ψεκασμό, ο κατάλληλος συνδυασμός των οποίων μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή ενός καλού επιστρώματος. Η ατμόσφαιρα που περιβάλλει το δαυλό του πλάσματος, επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες της φλόγας. Η τεχνική ψεκασμού πλάσματος υψηλής πίεσης HPPS (High Pressure Plasma Spraying), μπορεί να δημιουργήσει επιστρώματα, με σημαντικά βελτιωμένες επιφανειακές ιδιότητες, κατάλληλες για υψηλών απαιτήσεων εφαρμογές. Οι ιδιότητες εξαρτώνται σημαντικά από τις συνθήκες της διαδικασίας, όπως η πίεση και η σύνθεση της ατμόσφαιρας του θαλάμου ψεκασμού, τα αέρια, η θερμοκρασία, η ισχύς, κλπ.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Εκτός από την αλματώδη εξέλιξη στο πεδίο έρευνας ψεκασμού ναοκρυσταλλικών πρώτων υλών, σημαντική έρευνα τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται και στην υιοθέτηση νέων μεθόδων θερμικού ψεκασμού οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα επιλογής νέων υλικών που μπορούν να ψεκαστούν παρέχοντας επιστρώματα με εξαιρετικές ιδιότητες διευρύνοντας έτσι τις εφαρμογές στις οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν. Μια τέτοια μέθοδος είναι ο ψυχρός ψεκασμός. Είναι μια ανερχόμενη τεχνολογία, η οποία αντιμετωπίζει με επιτυχία τα περισσότερα μειονεκτήματα των κλασικών μεθόδων θερμικού ψεκασμού. Κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας αρκετές προσπάθειες βρίσκονται σε εξέλιξη για τη βελτιστοποίηση αυτής της μεθόδου και τη διερεύνηση των καταλληλότερων υλικών ψεκασμού, του απαιτούμενου εξοπλισμού και της επέκτασης των εφαρμογών των παραγόμενων επιστρωμάτων.

Σε σύγκριση με τη δεκαετία του 1980, ο θερμικός ψεκασμός έχει εξελιχθεί σημαντικά από μια «τέχνη» σε μια επιστήμη. Αυτή τη στιγμή, είναι δυνατό να παραχθούν επιστρώσεις προσαρμοσμένες σε ειδικές συνθήκες λειτουργίας καθιστώντας τον θερμικό ψεκασμό μια από τις σημαντικότερες διαδικασίες παραγωγής προϊόντων στη βιομηχανία. Ωστόσο, εκτός από θέματα μάρκετινγκ σε ότι αφορά στην αγορά που απευθύνεται ο θερμικός ψεκασμός, η ανάπτυξη πρέπει να συνδέεται με τη βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας μέσω σωστής επιλογής των παραμέτρων του θερμικού ψεκασμού, δηλαδή της προετοιμασίας της επιφάνειας του υποστρώματος, τις συνθήκες ψεκασμού, και την μετά κατεργασία των επιστρωμάτων. Μια σημαντική προσπάθεια πρέπει να γίνει στους ακόλουθους τομείς.

Επίτευξη καλύτερου ελέγχου της προετοιμασίας της επιφάνειας του υποστρώματος με αμμοβολή ώστε οι ακαθαρσίες να παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα, η τραχύτητα να είναι προσαρμοσμένη στα εκάστοτε ψεκαζόμενα σωματίδια και οι παραμένουσες τάσεις στο επιθυμητό επίπεδο. Αυτό συνδέεται στενά με την επιλογή του υλικού αμμοβολής, την κοκκομετρία του, την πίεση και το χρόνο αμμοβολής. Ήδη νέες τεχνικές χρησιμοποιούνται και φαίνονται πολλά υποσχόμενες καθώς διατηρούν τα επίπεδα των παραπάνω παραμέτρων χαμηλά. Τέτοιες τεχνικές τράχυνσης και καθαρισμού είναι η υψηλής πίεσης υδροβολή, η τεχνική με σωματίδια πάγου και η επιφανειακή κατεργασία με παλμικό laser.

Σημαντικό πεδίο έρευνας πρέπει να αποτελέσει και ο έλεγχος της σκόνης (ειδικά τα λεπτομερή σωματίδια της σκόνης ψεκασμού που προκύπτουν από την εξάχνωση της πρώτης ύλης) τόσο εντός του θαλάμου ψεκασμού όσο και κοντά στο υπό κατεργασία δοκίμιο. Η ανάπτυξη μοντέλων ροής κοντά στο υπόστρωμα θα βοηθήσει στο σχεδιασμό συσκευών αναρρόφησης οι οποίες θα περιορίσουν τα επίπεδα της σκόνης κοντά στο σημείο ψεκασμού. η βελτίωση σε αυτό το πεδίο δεν θα βελτιώσει μόνο την ποιότητα του θερμικού ψεκασμού αλλά θα ενισχύσει και τον περιβαλλοντικό έλεγχο αυτών των διαδικασιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ι.Χρυσουλάκης, Δ.Παντελής, “Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών”, Παπασωτηρίου 1996
- α)www.space-science.org/ExploringSpace/PlasmaStateOfMatter/1.html,
β)“Plasma Science Report”, 1995 (Contents and overview)-
www.nap.edu/readingroom/books/plasma/contents.html
γ)www.nap.edu/readingroom/books/plasma/contents.html,
δ)www.gordonengland.co.uk/tsc.html,
ε)www.plasmacoalition.org/applications.html,
ζ)www.plasmas.org/basics.html
- ΙΚ IV Καγιαμπάκη, ΙΚ IV 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
- Γ. Δ. Παπαδημητρίου, Ε.Μ.Π., Μεταλλογνωσία ΙΙ
- Διπλωματική Εργασία ‘Σαραφόγλου Χαρίκλεια
- Διπλωματική Εργασία ‘Παρέσογλου Μαριάννα’
- Joon B. Park, Roderic S. Lakes (auth.)-Biomaterials-Springer New York (2007)
- Boretos J.W, Eden M (1984), Contemporary Biomaterials, Material and Host Response, Clinical Applications, New Technology and Legal Aspects. Noyes Publications, Park Ridge, NJ, pp. 232–233
- Meyers M.A., Chen P.-Y.-Biological Materials Science_ Biological Materials, Bioinspired Materials, and Biomaterials-CUP (2014)
- Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Τομέας Φυσικής, Σημειώσεις Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας
- Μαρία Οξενκιούν – Πετροπούλου, “Φασματομετρικές Μέθοδοι Β’ Έκδοση”, Εκδόσεις Συμμετρία
- Δέσποινα Μπρασινίκα, Διδακτορική Διατριβή, Βιομηχανική ανάπτυξη σύνθετων βιοκεραμικών νανοϋδροξυαπατίτη – βιοπολυμερών με ελεγχόμενες ιδιότητες για βιολογικές εφαρμογές, Αθήνα 2015
- H. Tagai & H. Aoki , “Preparation of synthetic Hydroxyapatite and sintering of apatite ceramics: Mechanical properties of biomaterials”, Chapter 39, edited by G. W. Hastings and D. F. Williams (John Wiley & Sons Ltd, 1987) p. 213.
- Nicholson J.W (2002), The chemistry of medical and dental materials. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK
- Hydroxyapatite nanoparticles: A review of preparation methodologies, M.P. Ferraz , F.J. Monteiro, C.M. Manuel, Journal of Applied Biomaterials & Biomechanics, 2004 ; 2 :7480
- Filkova L. & Mujumdar A.S., 1995, “Industrial Spray Drying System”, In A.S. Mujumdar (Ed.) Handbook of Industrial Drying (2nd edition), Marcel Dekker, New York

- Κωστούλα Ι. Τριάντου, Διδακτορική Διατριβή, Μελέτη απλών και σύνθετων επικαλύψεων ψυχρού ψεκασμού : μικροδομή, μηχανισμός συναπόθεσης, τριβολογία και αντοχή σε διάβρωση, Αθήνα 2012
- Gordon England, Thermal Spray Coatings, Independent Metallurgist and Consultant to the Thermal Spray Coating Industry, Kingfishers, Folly Lane North, Upper Hale, Farnham, Surrey, GU9 OHU, England
- Stefan Kozerski, Lech Pawlowski, Roman Jaworski, Francine Roudet, Fabrice Petit, Two zones microstructure of suspension plasma sprayed hydroxyapatite coatings, Surface and Coatings Technology, 2010
- Douglas L. Schulz, Robert A. Sailer, and Scott Payne, North Dakota State University, Fargo, North Dakota 58108-6050, James Leach and Ronald J. Molz, Sulzer Metco (US) Inc., Westbury, New York 11590-2724, Thin films by metal-organic precursor plasma spray, 2009
- R. Jaworski, L. Pawlowski, C. Pierlot, Suspension Plasma Sprayed Titanium Oxide and Hydroxyapatite Coatings, Thermal Spray 2009: Proceedings of the International Thermal Spray Conference, B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.-C. Lau, C.-J. Li, R.S. Lima, G. Montavon, editors, p 156-161
- Phosphoric acid rate addition effect in the hydroxyapatite synthesis by neutralization method, Gouveia, D. S., Bressiani, A. H. A., Bressiani, J. C. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares –IPEN – CCTM- Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – 05508-000 - São Paulo-SP, Brasil