



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Βλάβη Διάβρωσης δομικού χάλυβα με επιλεκτική επικάλυψη
με σύστημα wire flame**

ΚΟΥΣΤΣΑΚ ΓΙΑΡΟΣΛΑΒ

ΑΜ:1025950

Χάρης Αποστολόπουλος, Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ, [Οκτώβριος, 2021]

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών
Κούτσας Γιαροσλάβ

© 2021 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Βλάβη Διάβρωσης δομικού χάλυβα με επιλεκτική επικάλυψη με σύστημα wire flame

Κούτσας Γιαροσλάβ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Είναι γνωστό ότι η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού αναγνωρίζεται ως κύρια αιτία υποβάθμισης της ανθεκτικότητας και της επιτελεστικότητας των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Υπό το πρίσμα αυτό, διάφορες άμεσες ή έμμεσες μέθοδοι αντιδιαβρωτικής προστασίας του χάλυβα υιοθετούνται παγκοσμίως με στόχο την καθυστέρηση εμφάνισης διαβρωτικών φαινομένων στο χάλυβα. Βάσει αυτών, στην παρούσα σπουδαστική εργασία μελετάται η επιρροή της επικάλυψης του δομικού χάλυβα B500c με κράμα αλουμινίου 15% και ψευδαργύρου 85% (Al15Zn85) στη βλάβη διάβρωσής του, εκφρασμένη με τον όρο της ποσοστιαίας απώλειας μάζας του χάλυβα.

Για τις ανάγκες της εργαστηριακής μελέτης χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 34 ράβδοι χάλυβα, διαμέτρου 10 mm και έκαστη συνολικού μήκους 200 mm, οι οποίες χωρίστηκαν σε τρεις υποκατηγορίες: α) 16 γυμνές ράβδοι αναφοράς (δίχως επικάλυψη), β) 9 ράβδοι με μερική επικάλυψη Al15Zn85 στις περιοχές μεταξύ των νευρώσεων του χάλυβα και γ) 9 ράβδοι με πλήρη επικάλυψη Al15Zn85. Η διαδικασία επικάλυψης, με πάχος 100 μm, πραγματοποιήθηκε με το σύστημα θερμικού ψεκασμού σύρματος με φλόγα (wire flame spray), ενώ προηγήθηκε ψηγματοβολή των δοκιμίων με σωματίδια κορουνδίου (Al₂O₃). Για την προσομοίωση συνθηκών διαβρωτικού περιβάλλοντος XS1, κατά ΚΤΣ 2016, πραγματοποιήθηκαν πειράματα επιταχυνόμενης διάβρωσης διατηρώντας τα δοκίμια σε θάλαμο αλατονέφωσης για χρόνους έκθεσης 60 και 90 ημερών, ενώ για την περίπτωση των γυμνών δοκιμίων υπήρξε ένας επιπλέον χρόνος, αυτός των 120 ημερών. Με την ολοκλήρωση της εργαστηριακής διάβρωσης και τον καθαρισμό των δοκιμίων (με χρήση μηχανικής βούρτσας και εμβάπτισης σε διάλυμα

υδροχλωρικού οξέος), πραγματοποιήθηκαν τελικές μετρήσεις ζύγισης των δοκιμίων για την εκτίμηση της απώλειας μάζας. Από τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης φαίνεται ότι η διαδικασία της επικάλυψης στην περίπτωση των πλήρως επικαλυμμένων ράβδων με Al15Zn85 προστατεύει επαρκώς το χάλυβα έναντι της διάβρωσης, ενώ στην περίπτωση των μερικώς επικαλυμμένων δοκιμίων καταγράφηκε μεγαλύτερη απώλεια μάζας σε σχέση με τα γυμνά αναφοράς.

Λέξεις κλειδιά

Χάλυβας οπλισμού, Αντιδιαβρωτική προστασία, Ψηματοβολή, Επικάλυψη,

**Corrosion Damage of Steel reinforcement with selective coating
through wire flame
Kushchak Yaroslav**

ABSTRACT

It is known that the corrosion of steel reinforcement is recognized as the main degradation factor of the durability and performance of reinforced concrete structures. In this light, several direct or indirect anti-corrosive methods are adopted worldwide in order to delay the onset of corrosive phenomena. Based on these, in the present student work, the influence of the coating of structural steel B500c with 15% aluminum and 85% zinc alloy on corrosion damage is studied, expressed via the term of percentage mass loss of steel.

For the needs of the laboratory study, a total number of 34 steel rebars, with 10 mm nominal diameter and each with a total length of 200 mm, were used, which were divided into three subgroups: a) 16 bare reference rebars (without coating), b) 9 rebars partially coated with Al15Zn85 in the areas between their ribs and c) 9 rebars fully coated with Al15Zn85. The coating process with a thickness of 10 μm , which was used was the Wire Flame Spray process, while preceded the shot-blasting with corundum (Al_2O_3) particles. To simulate the corrosive environmental conditions of XS1, by KTΣ 2016, accelerated corrosion experiments were performed with the salt spray method for exposure times of 60 and 90 days, while in the case of bare specimens there was an additional time of 120 days. Upon completion of laboratory corrosion and cleaning of specimens (using a mechanical brush and their immersion in hydrochloric acid solution), final weighing measurements of the specimens were performed so as to estimate the mass loss of rebars. From the results of the experimental study it appears that for the case of fully coated rebars with Al15Zn85, coating effectively protects the steel against

corrosion, whereas for the case of the partially coated specimens a greater mass loss was recorded compared to the bare reference rebars.

Keywords

Steel reinforcement, Anti-corrosive protection, Shot-blasting, Coating, Fatigue

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3-1: Σύγκριση των κύριων τεχνικών ψεκασμού.....σελ.	20
Πίνακας 4-1: Μάζες και μήκη δοκιμίων χωρίς επικάλυψη.....σελ.	50
Πίνακας 4-2: Μάζες και μήκη δοκιμίων με πλήρη επικάλυψη.....σελ.	50
Πίνακας 4-3: Μάζες και μήκη δοκιμίων με μερική επικάλυψη.....σελ.	51
Πίνακας 4-4: Οπτικά πρότυπα ψηφματοβολής κατά ISO 8501-1 και SSPC-SP.....σελ.	52
Πίνακας 4-5: Ιδιότητες και χαρακτηριστικά του κορούνδιου.....σελ.	53
Πίνακας 4-6: Χρόνοι παραμονής των δοκιμίων στον θάλαμο αλατονέφωσης.....σελ.	56
Πίνακας 5-1: Απώλειες μάζας δοκιμίων χωρίς επικάλυψη.....σελ.	60
Πίνακας 5-2: Απώλειες μάζας δοκιμίων με πλήρη επικάλυψη.....σελ.	61
Πίνακας 5-3: Απώλειες μάζας δοκιμίων με μερική επικάλυψη.....σελ.	61

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1: Ρηγματώσεις και αποκολλήσεις σκυροδέματος, λόγω εσωτερικών τάσεων που προκαλούνται από τα προϊόντα οξείδωσης (σκουριά) [4].....σελ. 8	σελ. 8
Σχήμα 3-1: Σχηματική απεικόνιση του θερμικού ψεκασμού.....σελ. 15	σελ. 15
Σχήμα 3-2: Τυπική διεργασία θερμικού ψεκασμού [26].....σελ. 17	σελ. 17
Σχήμα 3-3: Κυριότερες κατηγορίες τεχνικών θερμικού ψεκασμού.....σελ. 19	σελ. 19
Σχήμα 3-4: Θερμοκρασίες σωματιδίων και θερμοκρασίες φλόγας των κυριότερων τεχνικών θερμικού ψεκασμού.....σελ. 21	σελ. 21
Σχήμα 3-5: Ψεκασμός πούδρας με φλόγα [14].....σελ. 23	σελ. 23
Σχήμα 3-6: Ψεκασμός σύρματος με φλόγα [14].....σελ. 24	σελ. 24
Σχήμα 3-7: Ψεκασμός με φλόγα υψηλής ταχύτητας (HVOF) [24].....σελ. 27	σελ. 27
Σχήμα 3-8: Ψεκασμός εκτόνωσης [21].....σελ. 29	σελ. 29
Σχήμα 3-9: Διαδικασία ψεκασμού με ηλεκτρικό τόξο [14].....σελ. 30	σελ. 30
Σχήμα 3-10: Διαδικασία ψεκασμού πλάσματος [14].....σελ. 31	σελ. 31
Σχήμα 3-11: Η διαδικασία του ψυχρού ψεκασμού [23].....σελ. 33	σελ. 33
Σχήμα 3-12: Χαρακτηριστικά της διεργασίας του θερμικού ψεκασμού [27].....σελ. 36	σελ. 36
Σχήμα 3-13: Μικροδομή επικάλυψης θερμικού ψεκασμού [27].....σελ. 37	σελ. 37
Σχήμα 3-14: Δημιουργία πορώδους στις επικαλύψεις [27].....σελ. 40	σελ. 40
Σχήμα 3-15: Δημιουργία πορώδους λόγω του φαινομένου σκίασης [27].....σελ. 41	σελ. 41

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1: Παραδείγματα διάβρωσης οπλισμού και ενανθράκωσης σκυροδέματος.....σελ.	9
Εικόνα 3-1: Ιστορική αναδρομή της εξέλιξης της τεχνολογίας Θερμικού Ψεκασμού [8]...σελ.	14
Εικόνα 3-2: Ημιαυτόματη διαδικασία ψεκασμού σύρματος με φλόγα [25].....σελ.	25
Εικόνα 3-3 : Χειροκίνητη διαδικασία ψεκασμού με φλόγα.....σελ.	25
Εικόνα 3-4: Σχηματισμός shock diamonds στον πίδακα φλόγας.....σελ.	26
Εικόνα 4-1: α) Διαδικασία κοπής και β) πονταρίσματος των δοκιμίων.....σελ.	49
Εικόνα 4-2: Τα καλούπια που χρησιμοποιήθηκαν στην μερική επικάλυψη δοκιμίων.....σελ.	53
Εικόνα 4-3: Η διάταξη επιταχυνόμενης διάβρωσης αλατονέφωσης του εργαστηρίου.....σελ.	54
Εικόνα 4-4: Το εσωτερικό του θαλάμου αλατονέφωσης με τα δοκίμια.....σελ.	55
Εικόνα 4-5: α) Η ζυγαριά και β) η βούρτσα που χρησιμοποιήθηκαν για το ζύγισμα και τον καθαρισμό των δοκιμίων.....σελ.	57
Εικόνα 4-6: Πλήρως και μερικώς επικαλυμμένες, διαβρωμένες ράβδοι πριν καθαριστούν με τη βούρτσα.....σελ.	59
Εικόνα 4-7: Οι ράβδοι μετά τον καθαρισμό με τη βούρτσα.....σελ.	59
Εικόνα 5-1: Ποσοστιαία απώλεια μάζας σε σχέση με τον χρόνο διάβρωσης χωρίς επικάλυψη.....σελ.	62
Εικόνα 5-2: Ποσοστιαία απώλεια μάζας σε σχέση με τον χρόνο διάβρωσης με πλήρη επικάλυψη.....σελ.	63
Εικόνα 5-3: Ποσοστιαία απώλεια μάζας σε σχέση με τον χρόνο διάβρωσης με μερική επικάλυψη.....σελ.	64
Εικόνα 5-4: Μέσοι όροι ποσοστιαίας απώλειας μάζας σε σχέση με τον χρόνο διάβρωσης με μερική επικάλυψη.....σελ.	65

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	V
ABSTRACT.....	VII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	X
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	XI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	XII
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	XIII
ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
1.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ.....	3
1.2 ΣΚΟΠΟΣ – ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	4
1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	5
2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	5
2.2 ΑΙΤΙΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	5
2.2.1 Ενανθράκωση του σκυροδέματος	5
2.2.2 Επίδραση χλωριόντων.....	6
2.2.3 Ρωγμές	6
2.2.4 Μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα.....	7

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής,

2.3	ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	8
2.4	ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ – ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ.....	10
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ.....	13
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
3.2	ΟΡΙΣΜΟΣ	15
3.3	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	17
3.4	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ	19
3.4.1	Ψεκασμός με φλόγα (Flame spray)	21
3.4.2	Ψεκασμός με ηλεκτρικό τόξο (Wire Arc Spray – WAS)	29
3.4.3	Ψεκασμός με τόξο πλάσματος (Plasma Spray)	31
3.4.4	Ψυχρός ψεκασμός (Cold Gas Spray – CGS)	32
3.5	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ.....	34
3.6	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ	35
3.7	ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ	37
3.7.1	Πεπλατυσμένα (τηγμένα) σωματίδια (Splats).....	38
3.7.2	Οξειδία.....	38
3.7.3	Οξειδία.....	39
3.7.4	Πορώδες (πόροι)	40
3.8	ΥΛΙΚΑ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ	42
3.8.1	Εισαγωγή.....	42
3.8.2	Έρευνα και επιλογή του κατάλληλου υλικού.....	44

3.8.3	Επικαλύψεις Αλουμινίου (Aluminum Coatings)	44
3.8.4	Επικαλύψεις Ψευδάργυρου (Zinc Coatings)	45
3.8.5	Επικαλύψεις Ψευδαργύρου-Αλουμινίου (Zn-Al Coatings).....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ		48
4.1	ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	48
4.2	ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	49
4.3	ΣΤΑΔΙΟ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ	51
4.4	ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΕ ΘΑΛΑΜΟ ΑΛΑΤΟΝΕΦΩΣΗΣ	54
4.5	ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ		60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ		66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		67
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α		ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
A.1	ΕΝΟΤΗΤΑ 1	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
A.2	ΕΝΟΤΗΤΑ 2	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου Καθηγητή κ. Χάρη Αποστολόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε, στοιχεία που ήταν απαραίτητα για την ολοκλήρωση της εργασίας μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα Κωνσταντίνο Κουλούρη και την Υποψήφια Διδάκτωρ Μαρία Μπασδέκη για την πολύτιμη συμβολή και στήριξη που μου προσέφεραν στην διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Αντοχής Υλικών.

Τελευταίες και πολύ σημαντικές ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην οικογένεια μου , που με στηρίζει με κάθε δυνατό τρόπο και είναι αδιάλειπτα δίπλα μου σε κάθε δύσκολη προσπάθεια που επιχειρώ.

Κούστσακ Γιαροσλάβ,

Πάτρα, 2021

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Η χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος ως κύριο υλικό κατασκευής σε πολλά δομικά και τεχνικά έργα όπως π.χ. κτίρια, γέφυρες, λιμενικά έργα κλπ., είναι γνωστή από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Συγκεκριμένα την αρχική ιδέα χρήσης χαλύβδινου οπλισμού στο σκυρόδεμα, είχε ο Γάλλος κατασκευαστής Ζοζέφ Μονιέ καταθέτοντας την ευρεσιτεχνία του το 1867. Η προσθήκη αυτή ενίσχυσε σημαντικά την αντοχή του σκυροδέματος στα στατικά και δυναμικά φορτία, που καταπονούν τις κατασκευές κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους και υποβαθμίζουν την φέρουσα δομική ικανότητά τους, δηλαδή την ικανότητα τους να παραλαμβάνουν με ασφάλεια τα μηχανικά φορτία.

Ωστόσο δημιουργήθηκε ένας καινούριος, εξίσου σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν στην υποβάθμιση αυτή και δεν είναι άλλος από την διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού λόγω της επίδρασης του περιβάλλοντος. Είναι μία από τις κυριότερες αιτίες που προκαλούν την επιδείνωση των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και έχει μεγάλο αντίκτυπο στην ασφάλεια της κατασκευής. Έτσι τα τελευταία χρόνια παρατηρείται το φαινόμενο, έργα από οπλισμένο σκυρόδεμα κατασκευασμένα πριν από αρκετές δεκαετίες να φτάνουν στο τέλος της χρήσιμης ζωής τους, όχι επειδή κρίνονται ως λειτουργικά ανεπαρκή, ούτε γιατί κάποια εξωτερική μηχανική δράση όπως ένας σεισμός ή τα φορτία χρήσης, προκάλεσαν την αστοχία, αλλά εξαιτίας της φυσικής γήρανσης τους, η οποία επιδεινώνεται σημαντικά από τους μηχανισμούς διάβρωσης. Με τους παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των μετάλλων να είναι πολλοί, κάνουν το φαινόμενό της πολύπλοκο και συχνά μη προβλέψιμο. Γνωρίζουμε όμως ότι υπάρχουν περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται επιθετικά, διότι ευνοούν το φαινόμενο της διάβρωσης. Πιο συγκεκριμένα, σε παραθαλάσσια περιβάλλοντα, όπου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες, σε συνδυασμό με τις υψηλές συγκεντρώσεις χλωριδίων παρατηρούμε πολύ έντονο το φαινόμενο αυτό. Σχετικές έρευνες αποδεικνύουν πως η διάβρωση επιδρά σημαντικά

στην απώλεια μάζας και ελάττωση διατομής των χαλύβδινων ράβδων, οδηγεί στη μείωση της ολκιμότητάς τους και της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας, μειώνοντας άμεσα τον αριθμό των κύκλων φόρτισης σε κόπωση ως την αστοχία [1]. Δεδομένου πως ζούμε σε μία παραθαλάσσια χώρα με πολλές πόλεις δίπλα σε ακτές, αποδεικνύεται πόσο σημαντικό να γίνονται μελέτες πάνω στο φαινόμενο της διάβρωσης και την επίδρασή της στις δομικές κατασκευές.

1.2 ΣΚΟΠΟΣ – ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη για την βελτίωση της αντιδιαβρωτικής προστασίας του δομικού χάλυβα κατηγορίας B500c μέσω επικάλυψης με σύστημα wire flame. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκε η συμπεριφορά του σε έκθεση σε επιθετικό διαβρωτικό περιβάλλον (θάλαμος αλατονέφωσης) και η βλάβη διάβρωσης, εκφρασμένη ως η ποσοστιαία απώλεια μάζας.

1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται η εισαγωγή στο τεχνολογικό πρόβλημα της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού και στο αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.

Στα Κεφάλαια 2 και 3 υπάρχει η απαραίτητη θεωρία και βιβλιογραφία για την διάβρωση του χάλυβα οπλισμού και την τεχνολογία θερμικού ψεκασμού αντίστοιχα.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται αναλυτικά όλη η πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα.

Ενώ στα Κεφάλαια 5 και 6 παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της εργασίας αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

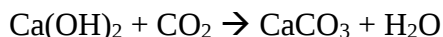
Ως διάβρωση ορίζουμε την υποβάθμιση ενός υλικού λόγω ηλεκτροχημικών ή χημικών αντιδράσεων με το περιβάλλον του. Η υποβάθμιση αυτή εκδηλώνεται ως βλάβη του υλικού που χαρακτηρίζεται με τη βοήθεια μεταλλογραφικών μεγεθών , ως απώλεια ή, σπανιότερα, ως αύξηση βάρους, ή ως υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού . Ορίζεται για τα μέταλλα, επειδή είναι ασταθή από θερμοδυναμικής άποψης και τείνουν να επανέλθουν στην κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας στην οποία απαντώνται στη φύση, δηλαδή ως χημικές ενώσεις, κυρίως με το οξυγόνο, ως οξείδια, αλλά και με άλλα στοιχεία. Εξαίρεση αποτελούν τα ευγενή μέταλλα [2].

2.2 ΑΙΤΙΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

2.2.1 Ενανθράκωση του σκυροδέματος

Κατά την πήξη του τσιμέντου παράγεται υδροξείδιο του ασβεστίου Ca(OH)_2 , το οποίο πλεονάζει στο σκυρόδεμα. Ως αποτέλεσμα αυτού είναι το υψηλό αλκαλικό pH του μπετόν (περίπου 12,5) και όσο αυτό διατηρείται ο οπλισμός είναι προστατευμένος από οξείδωση. Όσο όμως το σκυρόδεμα αντιδρά με διεισδύουσες όξινες ουσίες, μειώνεται και το pH. Μέγιστη επίδραση εδώ έχει το CO_2 , που καθώς αφομοιώνεται τριχοειδώς από την επιφάνεια του μπετόν, διαλυμένο στο νερό της βροχής ή της υψηλής υγρασίας, με αποτέλεσμα την εξουδετέρωση της

αλκαλικότητας:



Το ανθρακικό ασβέστιο που δημιουργείται δίνει και το όνομα στο φαινόμενο αυτό της ενανθράκωσης. Αυτή η διαδικασία στη φύση διαρκεί αρκετά χρόνια (τουλάχιστον 10-15), αλλά όταν το pH πάρει τιμές μικρότερες του 9, έχουμε την αρχή της διάβρωσης του οπλισμού. Κάποιοι από τους παράγοντες που την επιταχύνουν είναι οι πόροι, φωλιές, κακοτεχνίες, υγρασία, ανομοιογενής κακή δόνηση (σεισμός) κ.λ.π.

2.2.2 Επίδραση χλωριόντων

Ένας ακόμη λόγος για την διάβρωση του οπλισμού είναι η παρουσία των χλωριόντων, καθώς μπορούν να διαπεράσουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίων, μέσα από τους πόρους του στρώματος με μεγαλύτερη ευκολία από άλλα ιόντα, με αποτέλεσμα την τοπική ή γενική καταστροφή του προστατευτικού επιφανειακού οξειδίου και την έναρξη της οξειδωσής του. Έχει παρατηρηθεί ότι η ενανθράκωση και η διείσδυση χλωριόντων δεν είναι ανεξάρτητες διαδικασίες, καθώς η πρώτη επιταχύνει σημαντικά τη δεύτερη. Για να αρχίσει η διαβρωτική δράση των χλωριόντων αυτά πρέπει να υπερβούν μια ορισμένη τιμή, η οποία συνήθως εκφράζεται σε γραμμάρια χλωριόντων ανά 100 γραμμάρια τσιμέντου [3].

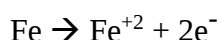
2.2.3 Ρωγμές

Η ύπαρξη ρωγμών στο σκυρόδεμα αποτελεί μέσο μεταφοράς, τόσο των χλωριόντων όσο και του διοξειδίου του άνθρακα στον οπλισμό και συνεπώς την επιτάχυνση της διαδικασίας της διάβρωσης. Οι ρωγμές αυτές μπορεί να προέρχονται από συστολή ξήρανσης, από υψηλές εντάσεις ή από διάφορες συγκρούσεις.

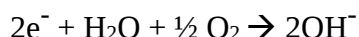
2.2.4 Μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα

Όπως προαναφέρθηκε η διάβρωση είναι ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο, που λαμβάνει χώρα κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, όπως η ύπαρξη ανόδου, καθόδου και ενός ηλεκτρολύτη μέσω του οποίου διακινούνται τα ιόντα. Ακολουθούν οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της διάβρωσης.

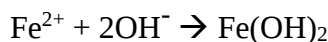
Η ανοδική αντίδραση (οξείδωση) είναι ουσιαστικά η ανοδική διάλυση του σιδήρου με απόδοση ηλεκτρονίων κατά την αντίδραση:



Λόγω της απελευθέρωσης των δύο ηλεκτρονίων από την ανοδική αντίδραση για να διασφαλιστεί η ηλεκτρική ουδετερότητα στην επιφάνεια του χάλυβα, πρέπει να υπάρξει μια καθοδική αντίδραση, η οποία καταναλώνει νερό και οξυγόνο και είναι η εξής:

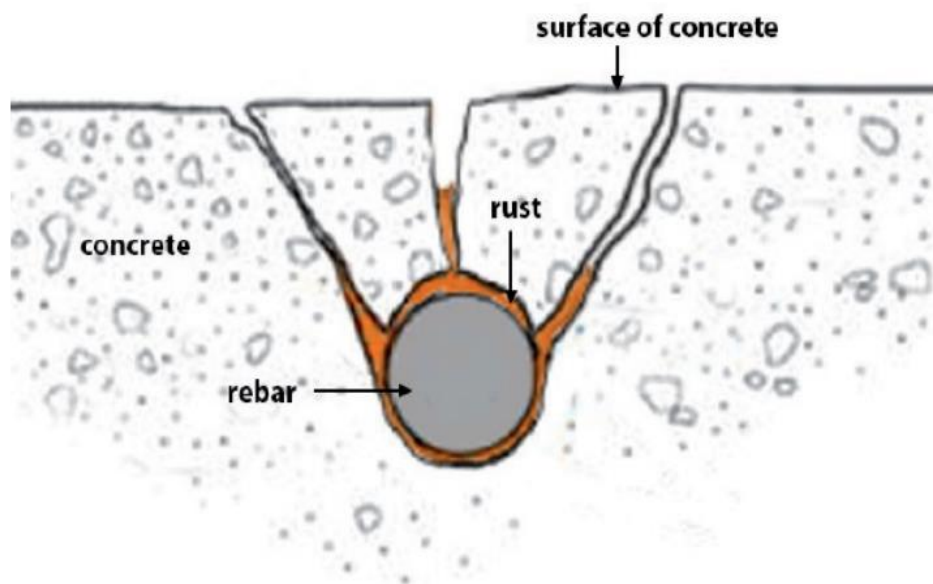


Τα ιόντα του μετάλλου από την ανοδική αντίδραση και τα ιόντα υδροξυλίου από την καθοδική μετακινούνται μέσα στον ηλεκτρολύτη και τελικά αντιδρούν προς σχηματισμό στερεών προϊόντων οξείδωσης:



Το σχηματιζόμενο οξείδιο του δισθενούς σιδήρου με την παρουσία οξυγόνου μετατρέπεται σε υδροξείδιο του τρισθενούς σιδήρου ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), το οποίο με την σειρά του αντιδράει και σχηματίζεται η σκουριά ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$). Αυτή εναποτίθεται στη ράβδο στις περιοχές των καθόδων (ενώ στις περιοχές των ανόδων έχουμε απώλεια υλικού) και επειδή είναι διαπερατή τόσο από το νερό όσο και από τα αέρια, η διαδικασία οξείδωσης συνεχίζεται. Νέα προϊόντα σκουριάς δημιουργούνται με τον όγκο αυτών να αυξάνεται, οδηγώντας στην αύξηση των εσωτερικών τάσεων, που προκαλούν ρηγματώσεις, αποτινάξεις και αποκολλήσεις ολόκληρων κομματιών από μπετόν. Ως εκ τούτου, η διάβρωση επιδρά σημαντικά στον οπλισμό,

μειώνοντας τις αρχικές διαμέτρους των χαλύβδινων ράβδων, υποβαθμίζοντας τις μηχανικές ιδιότητες και τον δεσμό μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος [4,5].



Σχήμα 2-1: Ρηγματώσεις και αποκολλήσεις σκυροδέματος, λόγω εσωτερικών τάσεων που προκαλούνται από τα προϊόντα οξείδωσης (σκουριά) [4].

2.3 ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Οι συνέπειες της διάβρωσης είναι τεράστιες τόσο στην ασφάλεια όσο και στη λειτουργία των δομικών και τεχνικών έργων. Όπως αναφέρθηκε η συσσώρευση σκουριάς πάνω στη χαλύβδινη ράβδο δημιουργεί εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα που περιβάλλει τον οπλισμό προκαλώντας ρηγματώσεις μέχρι και αποκολλήσεις κομματιών μπετόν, που επιτρέπουν τη βαθύτερη διείσδυση υγρασίας στην κατασκευή και περαιτέρω οξείδωση του οπλισμού και διόγκωση των ρωγμών. Αυτό οδηγεί στην εξασθένηση του δεσμού και της συνάφειας οπλισμού-σκυροδέματος θέτοντας σε κίνδυνο την ασφαλή λειτουργία [4]. Όσο το φαινόμενο της διάβρωσης αναπτύσσεται παρατηρείται σταδιακή απώλεια μάζας και ελάττωση της αρχικής διατομής των ράβδων, που σε συνδυασμό με την απότομη και ανομοιόμορφη ψαθυροποίηση του

χάλυβα υποβαθμίζει την ικανότητα επαρκούς απορρόφησης ενέργειας των στατικών και δυναμικών φορτίων που καταπονούν την κατασκευή. Έτσι μικραίνει κατά πολύ ο αριθμός των κύκλων φόρτισης ως την αστοχία, μειώνεται η αντοχή σε κόπωση, άρα και η διάρκεια ζωής της [1]. Ειδικότερα και σε πιο επιθετικά-διαβρωτικά περιβάλλοντα όπως είναι η Ελλάδα, με πολλές παραθαλάσσιες πόλεις, έρευνες έδειξαν πως η αποδόμηση του σιδηροπλισμού και η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων της χαλύβδινης ενίσχυσης λόγω διάβρωσης, είναι τόσο ισχυρή που σε πολλές περιπτώσεις οι τιμές που βρίσκονται δεν πληρούν τα ελάχιστα όρια των πρότυπων διεθνών κανονισμών καθιστώντας τα έργα αυτά πολύ επικίνδυνα για την καθημερινότητα μας [6].



Εικόνα 2-1: Παραδείγματα διάβρωσης οπλισμού και ενανθράκωσης σκυροδέματος.

Από τα παραπάνω αντιλαμβανόμαστε και τις οικονομικές συνέπειες της διάβρωσης, καθώς το κόστος για αντιδιαβρωτική προστασία, για αντικατάσταση υλικών ή εξαρτημάτων και συντήρηση των κατασκευών, ανέρχεται περίπου στο 4-5% του Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος ενός ανεπτυγμένου σύγχρονου κράτους. Επίσης θα πρέπει να συνυπολογισθεί και το έμμεσο οικονομικό κόστος που οφείλεται στη διακοπή λειτουργίας των κατασκευών κατά τη διάρκεια συντήρησης και αποκατάστασής τους.

Κλείνοντας μην παραμελήσουμε και τις συνέπειες για το περιβάλλον (π.χ. μόλυνση λόγω αστοχιών σε χημικές βιομηχανίες ή διυλιστήρια), όπως και για τις απώλειες ωφέλιμης ενέργειας (μείωση απόδοσης εναλλακτών θερμότητας ή κινητήρων) και τη διάβρωση παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς [2].

2.4 ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ – ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ

Όλες οι συνέπειες που αναφέρθηκαν, θέτουν αδιαμφισβήτητα την διάβρωση ως ένα μείζον πρόβλημα στον τομέα των κατασκευών και όχι μόνο. Έτσι οι μηχανικοί με την απαραίτητη βοήθεια της επιστήμης και της τεχνολογίας, καλούνται να βρουν αποτελεσματικούς αλλά και συνάμα οικονομικούς τρόπους αντιμετώπισης του φαινομένου αυτού. Στόχος είναι η πρόβλεψη, πρόληψη ή και αποκατάσταση των βλαβών, ώστε να παρατείνεται η διάρκεια ζωής των κατασκευών, καθώς και να διατηρούνται τα λειτουργικά και αισθητικά χαρακτηριστικά τους.

Λόγω παλαιότητας, πλέον, πολλών κτιρίων και έργων έχουν αναπτυχθεί πολλοί τρόποι που μας επιτρέπουν να επεμβαίνουμε και να επιδιορθώνουμε ή να περιορίζουμε την περαιτέρω διάβρωση και τις συνέπειες της. Οι μέθοδοι αυτοί συντήρησης διακρίνονται σε ήπιες και ενεργές. Με την πρώτη κατηγορία να αναφέρεται σε μεθόδους, οι οποίες μεν αναστέλλουν την εξελισσόμενη φθορά αλλά δεν επιδιορθώνουν την ήδη υπάρχουσα, και εφαρμόζονται και στο σκυρόδεμα και στον οπλισμό [7].

Τέτοιες στην περίπτωση του σκυροδέματος είναι:

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής,
Τεχνολογίας Υλικών και Εμβιομηχανικής 10

- Επαναλκαλοποίηση
- Αφαίρεση Χλωριόντων
- Αφαίρεση Υγρασίας
- Σφράγισμα Ρωγμών

Ενώ στην περίπτωση ήπιας επέμβασης στον οπλισμό έχουμε:

- Καθοδική Προστασία
- Σύστημα με εφαρμοζόμενο ρεύμα
- Σύστημα Θυσιαζόμενης Ανόδου
- Εναλλακτική Μέθοδος Καθοδικής Προστασίας
- Επισκευή με Ινοπλισμένα Τσιμεντοειδή Κονιάματα με Υψηλή Συγκέντρωση σε Αναστολείς Διαβρώσεως

Αντιθέτως η δεύτερη κατηγορία, των ενεργών επεμβάσεων, έχει στόχο την επιδιόρθωση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής και όχι την απευθείας αναίρεση των περιβαλλοντικών αιτιών που προκάλεσαν τη διάβρωση. Έτσι χαρακτηρίζεται ως μια τρωτή μέθοδος και συνιστάται να προηγείται μία συντηρητική (ήπια) επέμβαση [5]. Οι συνήθεις ενεργές επεμβάσεις είναι:

- Καμπτική Ενίσχυση (δοκών, υποστηλωμάτων, πλακών)
- Διατμητική Ενίσχυση
- Μέθοδος Επισκευής με Ινοπλισμένα Πολυμερή

Πέραν του ότι οι διαδικασίες αυτές είναι πολύ δαπανηρές, και πολλές φορές αναστέλλουν την λειτουργία της κατασκευής κατά τη διάρκεια της συντήρησης, η έρευνα μας θα επικεντρωθεί στους τρόπους προστασίας από την αρχή του σχεδιασμού, καθώς ο καλύτερος τρόπος να αντιμετωπιστεί ένα πρόβλημα είναι η πρόληψη του. Έτσι σε μια νέα κατασκευή ο μηχανικός οφείλει να διασφαλίσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, αλλά και την αποδοτική λειτουργία της. Να γίνει σωστή εκτίμηση του περιβάλλοντος και το πόσο επιβλαβές είναι στην επίδραση του στην κατασκευή. Επίσης να επιλεγθούν τα κατάλληλα υλικά και να τηρηθούν οι ανάλογοι κώδικες και κανονισμοί, πράγματα που εκτός της αντιμετώπισης του κύριου προβλήματος οδηγούν και στην καλή συμπεριφορά ολόκληρης της κατασκευής.

Όσον αφορά την παρεμπόδιση και καθυστέρηση εμφάνισης του φαινομένου της διάβρωσης, η βασική ιδέα είναι να επέμβουμε από την αρχή είτε στη διαπερατότητα του σκυροδέματος (παρεμπόδιση διείσδυσης επιβλαβών ουσιών) είτε στην άμεση προστασία του οπλισμού (παρεμπόδιση προσβολής του μετάλλου), ή ακόμη και στα δύο ταυτόχρονα. Η τεράστια ανάπτυξη της επιστήμης και τεχνολογίας υλικών μας δίνει τη δυνατότητα να το κάνουμε αυτό με αρκετούς τρόπους. Ένας είναι η χρήση ανασταλτικών διάβρωσης που προστίθενται στο σκυρόδεμα κατά την παρασκευή του, αλλά παρά το ότι είναι μια οικονομική λύση, μπορεί να επηρεάσει αρνητικά κάποιες φυσικές ιδιότητές του (π.χ. μείωση θλιπτικής αντοχής). Επίσης, ενδεδειγμένος τρόπος πρόληψης, όταν πρόκειται για την αποφυγή της εισόδου της υγρασίας στο σκυρόδεμα είναι οι βαφές και η χρήση στεγανοποιητικών υλικών (ασφαλτικές ενώσεις, πλαστικές και ελαστομερείς ενώσεις, πολυμερή), καθώς η κύρια ιδιότητά τους είναι να μην αφήνουν το νερό να διαπερνά τη μάζα τους. Τα κύρια μειονεκτήματά τους όμως είναι ότι δεν αντέχουν και ρευστοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες και έχουν αρκετά υψηλό κόστος εφαρμογής. Σε κάποια κτίρια ιδιαίτερης σημασίας γίνεται χρήση ανοξειδωτών χαλύβων, αλλά το κόστος τους (σχεδόν δεκαπλάσιο του κοινού χάλυβα) το κάνει απαγορευτικό για μια κοινή λύση.

Τις τελευταίες δεκαετίες όμως, έχει αναπτυχθεί ένας απευθείας τρόπος προστασίας του οπλισμού, που συνδυάζει εξαιρετικά το κόστος με την εφαρμογή και την αποτελεσματικότητα και χαρακτηρίζεται ως μία από τις πιο συμφέρουσες επιλογές στην αντιμετώπιση του φαινομένου της διάβρωσης. Δεν είναι άλλος από την τοποθέτηση επικαλύψεων-επιχρισμάτων πάνω στις χαλύβδινες ράβδους των κατασκευών και σε αυτόν θα εμβαθύνουμε στην έρευνά μας. Η διαδικασία γίνεται με την βοήθεια των τεχνολογιών θερμικού ψεκασμού. Είναι ένας αρκετά οικονομικός σε σχέση με την σημαντική αποτελεσματικότητα τρόπος, με τεράστιες δυνατότητες ανάπτυξης. Σπουδαίο, επίσης, πλεονέκτημά του είναι η δυνατότητα επιλογής από μεγάλη ποικιλία υλικών και τεχνικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, προσαρμοζόμενα στη χρήση και λειτουργία της κατασκευής. Προστατεύει τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα χωρίς να τις επηρεάζει αρνητικά και είναι εύκολος στην εφαρμογή καθώς μπορεί να πραγματοποιηθεί και στον χώρο ανέγερσης της κατασκευής. Αποτελεί πλέον σημαντικό εργαλείο στα χέρια του μηχανικού και έναν κλάδο που συνεχώς εξελίσσεται και μεγαλώνει. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται εκτενέστερη ανάλυση αυτού του τρόπου αντιμετώπισης της διάβρωσης.

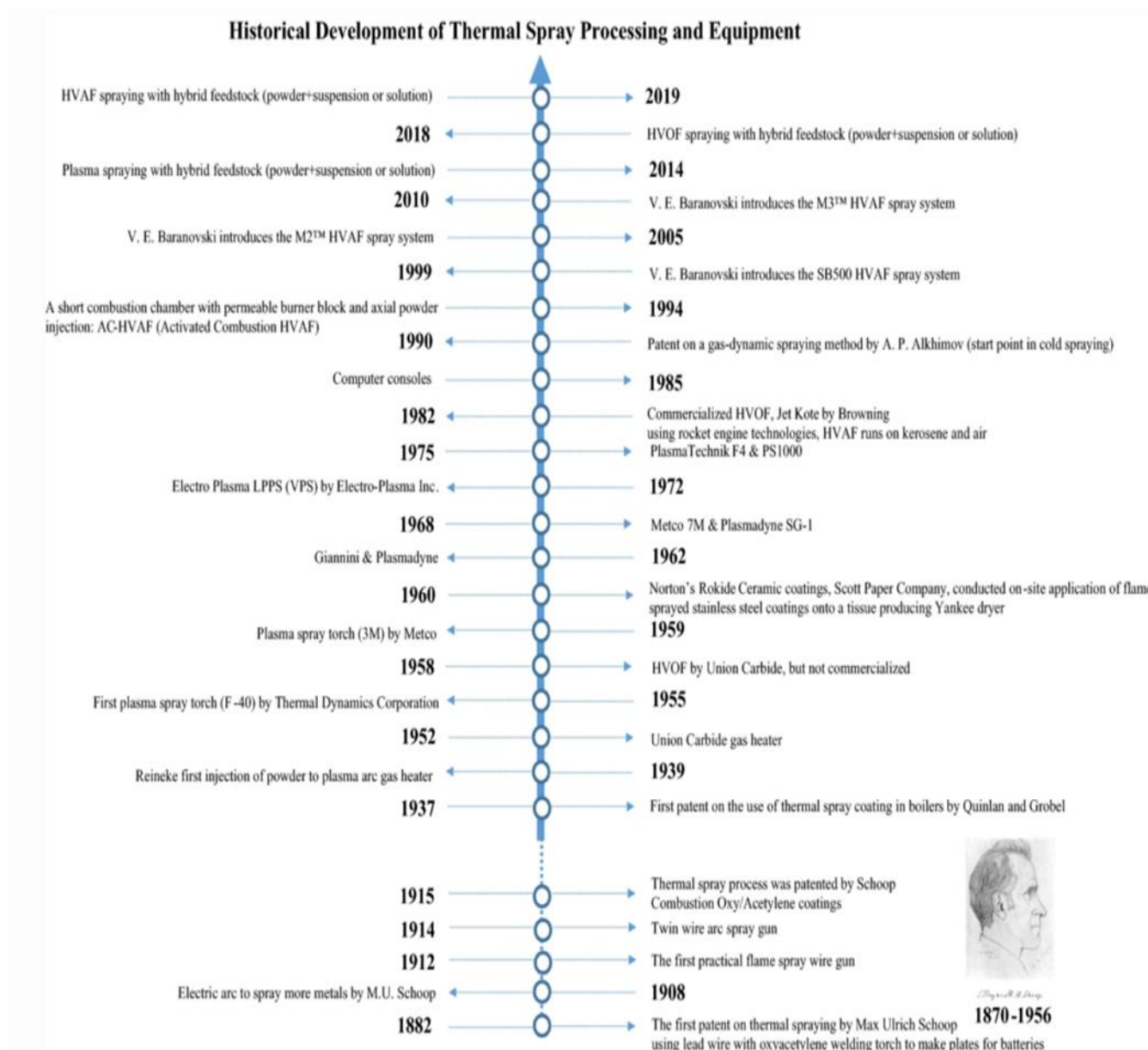
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής,

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ταχύτατη ανάπτυξη των τεχνολογιών και επιστημών τις τελευταίες δεκαετίες έχει κάνει σκληρό και δύσκολο τον αγώνα επιβίωσης στον κατασκευαστικό τομέα. Οι επιφάνειες μιας κατασκευής είναι αυτές που έρχονται πρώτες σε επαφή με το επιβλαβές και επιθετικό περιβάλλον λειτουργίας. Έτσι για να παραμείνουν ανταγωνιστικοί στην αγορά, οι κατασκευαστές είναι αναγκασμένοι να παράγουν υλικά με επιφάνειες που να αντέχουν περισσότερο στη φθορά, στη διάβρωση, στην οξείδωση, στην κόπωση αλλά και να διατηρούν τις ιδιότητές τους (π.χ. αισθητικές, ηλεκτρικές, θερμικές, λειτουργικές, μηχανικές κ.λ.π.) για μεγάλο χρονικό διάστημα. Όλα αυτά, βέβαια, σε συνδυασμό με το χαμηλότερο δυνατό κόστος και με μεγάλη βαρύτητα στους περιβαλλοντικούς περιορισμούς, σε έναν ήδη πολύ επιβαρυνόμενο από τον άνθρωπο πλανήτη.

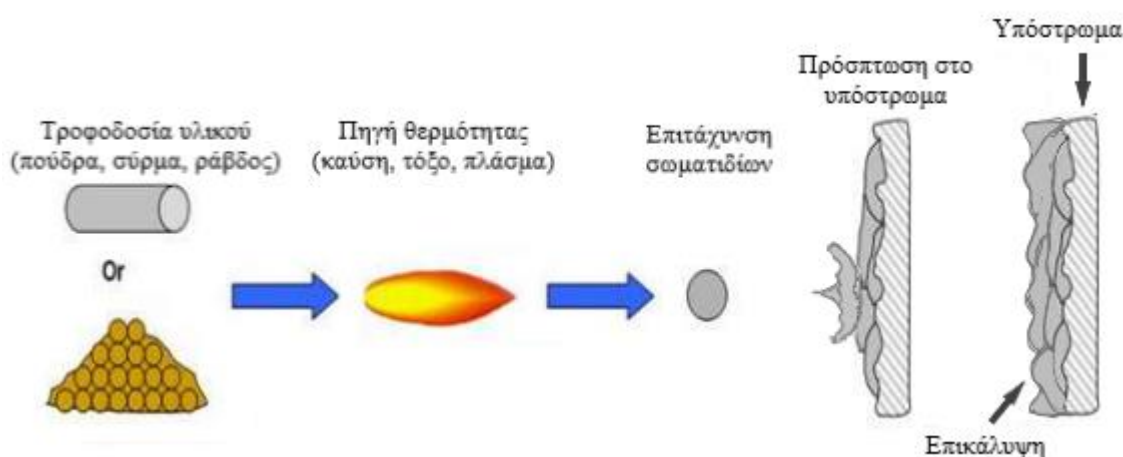
Έτσι παρατηρούμε υλικά που ενώ είναι οικονομικά και φιλικά προς το περιβάλλον μπορεί να υστερούν σε άλλες σημαντικές ιδιότητες, όπως π.χ. ο χάλυβας που έχει πολύ προσιτή τιμή για ευρεία χρήση αλλά είναι εξαιρετικά ευάλωτος στο φαινόμενο της διάβρωσης. Η επιστήμη της κατεργασίας και επικαλύψεων των επιφανειών μας δίνει τη δυνατότητα να βελτιώσουμε σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες αυτές, μεταλλουργικά (π.χ. φλογοβαφή), μηχανικά (π.χ. σφαιροβολή), χημικά (π.χ. εμφύτευση ιόντων) και φυσικά με προσθήκη επικαλύψεων, που γίνεται με ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση, με φυσική ή χημική εναπόθεση ατμών ή με θερμικό ψεκασμό [9]. Παρόλο που οι κατεργασίες αυτές επιτρέπουν στις επιφάνειες να εκτελούν λειτουργίες διαφορετικές του κύριου σώματος του υλικού, πρέπει να λάβουμε υπόψιν και τον παράγοντα να μην αλλοιώνουν ή να επηρεάζουν αρνητικά τις επιθυμητές του ιδιότητες. Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω ο θερμικός ψεκασμός είναι μια αξιόπιστη επιλογή καθώς προσφέρει μεγάλη ποικιλία υλικών και ψεκασμού, σε συνδυασμό με μικρό κόστος και ελάχιστη περιβαλλοντική επιβάρυνση [10].



Εικόνα 3-1: Ιστορική αναδρομή της εξέλιξης της τεχνολογίας Θερμικού Ψεκασμού [8].

3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ

Θερμικός ψεκασμός ορίζεται ως ένας γενικός όρος ενός συνόλου διεργασιών όπου μεταλλικά ή μη υλικά (οργανικά, ανόργανα, υβρίδια οργανικών-ανόργανων, πολυμερή) σε μορφή πούδρας, σύρματος ή ράβδου, εισάγονται σε έναν «φακό» ή «πιστόλι» φλόγας, στο οποίο θερμαίνονται έως ότου τήκονται πλήρως ή μερικώς. Στη συνέχεια επιταχύνονται και προσπίπτουν στην ειδικά προετοιμασμένη επιφάνεια για επικάλυψη (υπόστρωμα). Αμέσως μετά την πρόσπτωση, τα τηγμένα σωματίδια στερεοποιούνται ακαριαία και σχηματίζουν ένα στρώμα ελασματοειδών σωματιδίων, παρόμοιας χημικής σύστασης με το υλικό τροφοδοσίας. Το υπόστρωμα παραμένει άτηκτο και το τελικό πάχος της επικάλυψης καθορίζεται από τον αριθμό «περασμάτων» της συσκευής ψεκασμού πάνω από την επιφάνεια, και κυμαίνεται από 50 μm (μικρά) έως μερικά mm (χιλιοστά). Η διαδικασία μπορεί να γίνει είτε σε ανοιχτό περιβάλλον είτε σε ελεγχόμενο (θάλαμοι κενού). Οι τεχνικές θερμικού ψεκασμού διαχωρίζονται βάσει του είδους λειτουργίας (χειροκίνητη, μηχανική, αυτοματοποιημένη), της μορφής του υλικού τροφοδοσίας (πούδρα, σύρμα, ράβδος) και του είδους της χρησιμοποιούμενης ενέργειας (φλόγα, πλάσμα, τόξο) [9,11].



Σχήμα 3-1: Σχηματική απεικόνιση του θερμικού ψεκασμού.

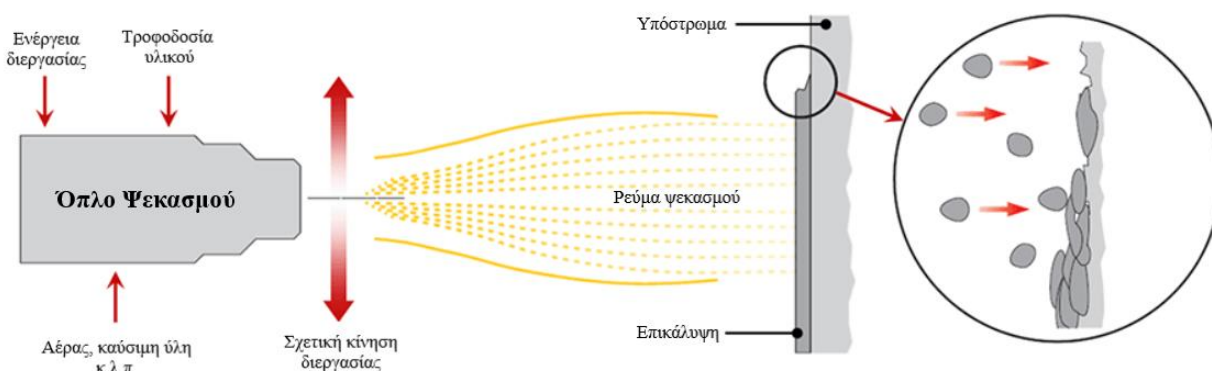
Τεράστιο πλεονέκτημα των τεχνικών θερμικού ψεκασμού είναι η εξαιρετικά μεγάλη ποικιλία των υλικών που μας δίνονται ως επιλογή για επικαλύψεις. Ουσιαστικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάθε υλικό που δύναται να τηχθεί χωρίς να αποσυντεθεί. Άλλο ένα σημαντικό πλεονέκτημα τους είναι η δυνατότητα των επικαλύψεων να εναποτεθούν πάνω στο υπόστρωμα χωρίς να το θερμάνουν σε μεγάλο βαθμό. Κατά συνέπεια, ακόμη και τα υλικά με πολύ υψηλό σημείο τήξης εφαρμόζονται επιτυχώς στο υπόστρωμα χωρίς να του επιφέρουν θερμικές στρεβλώσεις ή αρνητικές συνέπειες στις μηχανικές του ιδιότητες. Επίσης να προστεθεί η δυνατότητα, στις περισσότερες περιπτώσεις, να αφαιρεθεί η προηγούμενη φθαρμένη ή κατεστραμμένη επικάλυψη και να επικαλυφθεί το υπόστρωμα ξανά διατηρώντας τις διαστάσεις και τις ιδιότητες του.

Από την κοστολογική πλευρά ο βασικός εξοπλισμός θερμικού ψεκασμού είναι σχετικά οικονομικός (για όπλα ψεκασμού φλόγας ή ηλεκτρικού τόξου της τάξης 5.000 – 8.000 €) με μερικές εξαιρέσεις, όπως τα όπλα ατμοσφαιρικού ψεκασμού πλάσματος (60.000 €) σε θαλάμους κενού, όπου οι διαδικασίες γίνονται αυτοματοποιημένα με ρομποτικά και η λειτουργία τους ρυθμίζεται μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών [11]. Σε συνδυασμό με τον βασικό εξοπλισμό, οι ταχύτατοι ρυθμοί εναπόθεσης και ψεκασμού επιτυγχάνουν ένα χαμηλό κόστος διεργασίας. Επίσης, εκτός των εξαιρέσεων που αναφέρθηκαν, είναι φορητός και μικρού μεγέθους και μπορεί να γίνει επί τόπου.

Αντιθέτως, ένα μειονέκτημα της μεθόδου του θερμικού ψεκασμού είναι ότι επικαλύπτει αποκλειστικά την περιοχή που βρίσκεται στο «οπτικό πεδίο» του όπλου. Συνεπώς προκύπτουν περιορισμοί ως προς το μέγεθος των εξαρτημάτων προς επικάλυψη, καθώς δεν είναι δυνατόν να επικαλυφθούν μικρές και μεγάλου βάθους κοιλότητες, τις οποίες δεν μπορεί να φτάσει το όπλο ψεκασμού.

3.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η ιστορία του θερμικού ψεκασμού ξεκινάει στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, αρχικά ως μια προσπάθεια διαμερισμού υγρών σε μικρά σωματίδια μέσω ενός ρεύματος αερίου υψηλής πίεσης [13]. Ουσιαστικά αποσκοπούσαν στην παραγωγή πούδρας παρά επικαλύψεων. Τη δυνατότητα για δημιουργία επικαλύψεων από ένα ρεύμα επιταχυνόμενων τηγμένων σωματιδίων, που προσκρούουν το ένα πάνω στο άλλο πάνω σε μια επιφάνεια παρατήρησε πρώτος ο Δρ. Max Ulrich Schoop στη Ζυρίχη περί το 1900. Έτσι ξεκίνησε ερευνητικά πειράματα, αρχικά με μόλυβδο και ψευδάργυρο, τήκοντας τα και ψεκάζοντας σε επιφάνειες ως προστατευτικό υλικό. Το 1909 κατέθεσε με επιτυχία την ευρεσιτεχνία της πρώτης συσκευής για τήξη και προώθηση (ψεκασμό) στερεού μετάλλου σε μορφή σύρματος, με διαδικασία καύσης αερίου καυσίμου με οξυγόνο. Δύο χρόνια αργότερα κατέθεσε νέα πατέντα, αυτή τη φορά χρησιμοποιώντας ως πηγή θερμότητας ένα ηλεκτρικό τόξο, σαν μια εναλλακτική επιλογή. Η διεργασία αυτή αρχικά ονομάστηκε επιμετάλλωση, δηλαδή η εισαγωγή ενός μεταλλικού καλωδίου σε έντονη συγκεντρωμένη φλόγα προκαλεί την τήξη του, και αν περιβληθεί από ρεύμα πεπιεσμένου αερίου, το τηγμένο μέταλλο ατμοποιείται και προωθείται εύκολα πάνω σε μια επιφάνεια σχηματίζοντας την επικάλυψη. Η διαδικασία αυτή σηματοδοτεί τη γέννηση του θερμικού



Σχήμα 3-2: Τυπική διεργασία θερμικού ψεκασμού [26].

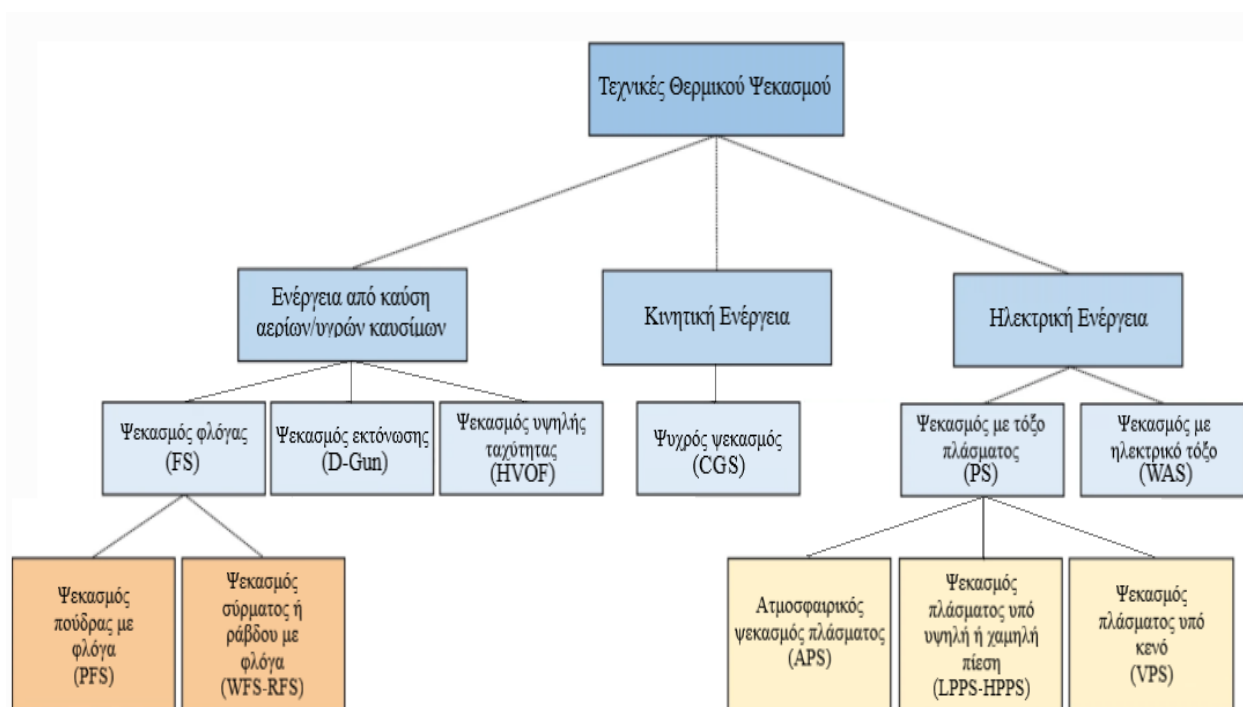
ψεκασμού.

Από τα πρώτα κι όλας χρόνια η μέθοδος αξιοποιήθηκε αμέσως από τις βιομηχανίες, κυρίως ως μέθοδος προστασίας για αντοχή στη διάβρωση με επικαλύψεις ψευδαργύρου. Ωστόσο, αξιοσημείωτη ανάπτυξη οι διαδικασίες αυτές γνώρισαν ύστερα από τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο. Πιο συγκεκριμένα το 1950, λόγω της ανάγκης χρήσης δύστηκτων υλικών για επικαλύψεις κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία, εφευρέθηκε ο ψεκασμός με όπλο εκτόνωσης (Detonation Gun, D-Gun) από τους R.M. Poorman, H.B. Sargent και H. Lamprey. Το 1962 εφευρέθηκε από τους R.M. Gage, O.H. Nestor και D.M. Yenni, ο ψεκασμός πλάσματος (Plasma Spray), ενώ τη δεκαετία του 1980 οι Browning και Witfield ανέπτυξαν την τεχνική ψεκασμού φλόγας υψηλής ταχύτητας (High Velocity OxyFuel – HVOF) [11]. Παρά τις προαναφερθείσες σπουδαίες εξελίξεις, οι βασικές αρχές λειτουργίας του θερμικού ψεκασμού παραμένουν αναλλοίωτες.

Στις μέρες πλέον οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι αυτοί του ψεκασμού με φλόγα και του ψεκασμού με φλόγα υψηλής ταχύτητας, και εκτός από πούδρα (μεταλλική ή μη) χρησιμοποιούνται σύρμα, ράβδοι και τηγμένα μέταλλα. Ενώ οι διαδικασίες που χρησιμοποιούν ως παραγωγή θερμότητας το ηλεκτρικό ρεύμα και είναι εμπορικά πιο αξιοποιημένες είναι οι τεχνικές ψεκασμού με πλάσμα. Επίσης με την εξέλιξη της τεχνολογίας οι θερμικοί ψεκασμοί διεξάγονται συνήθως σε κλειστούς θαλάμους (προϋπόθεση να το επιτρέπουν οι διαστάσεις της προς επικάλυψη επιφάνειας) από αυτοματοποιημένα συστήματα, που ελέγχονται με ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

3.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

Ο κύριος διαχωρισμός των τεχνικών θερμικού ψεκασμού γίνεται με βάση την ενέργεια που χρησιμοποιείται για την εναπόθεση του υλικού επικάλυψης.



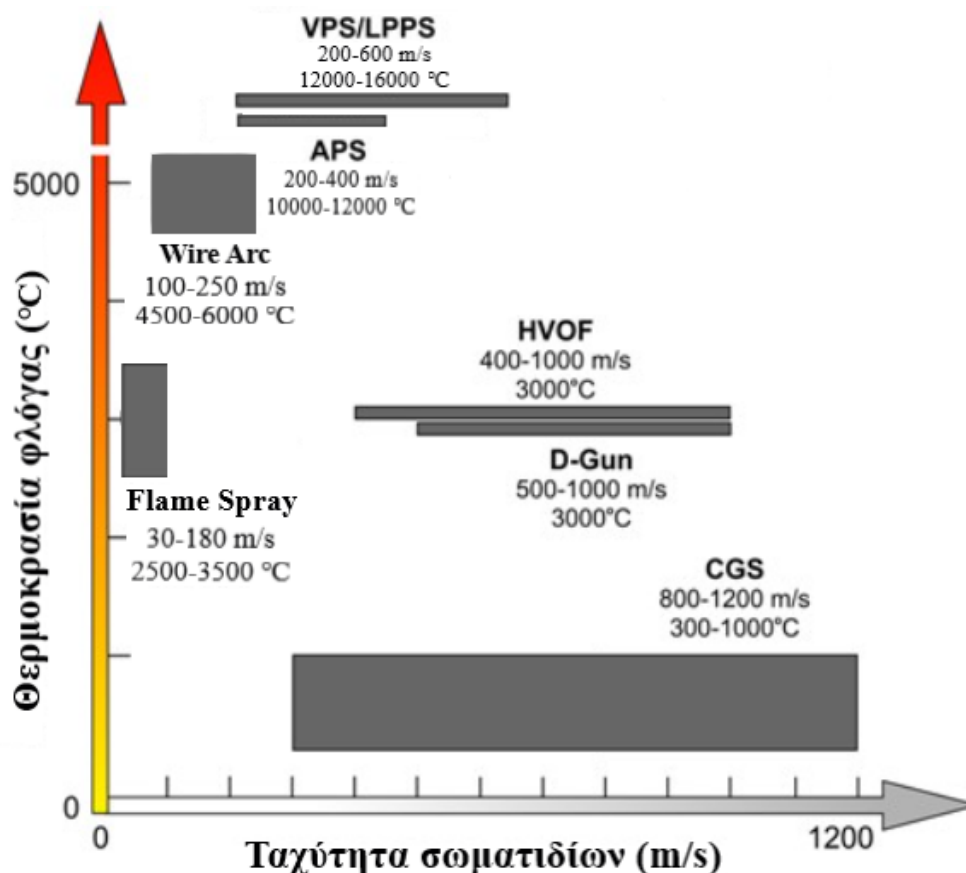
Σχήμα 3-3: Κυριότερες κατηγορίες τεχνικών θερμικού ψεκασμού.

Ο παραπάνω διαχωρισμός έχει φυσικά αρκετές υποκατηγορίες, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-3. Η πρώτη και η τρίτη κατηγορία βασίζονται περισσότερο στις υψηλές θερμοκρασίες και την θερμική ενέργεια, ενώ η πιο πρόσφατα αναπτυγμένη κατηγορία του ψυχρού ψεκασμού βασίζεται κυρίως στην υψηλή κινητική ενέργεια των σωματιδίων κατά τον ψεκασμό. Η τελική επιλογή της πιο κατάλληλης, σε κάθε περίπτωση, μεθόδου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, μερικοί εκ των οποίων είναι οι λειτουργικές απαιτήσεις της επικάλυψης, το μέγεθος του προς επικάλυψη εξαρτήματος, η φορητότητά του, το υλικό ψεκασμού και το κόστος.

Πίνακας 3-1: Σύγκριση των κύριων τεχνικών ψεκασμού.

	Flame spray	Electric arc	APS	HVOF	Cold spray
Πίδακας φλόγας-αερίου-πλάσματος					
Θερμοκρασία πίδακα (°C)	3000	4000	15000	2800	200-1000
Ταχύτητα πίδακα (m/s)	50-100	50-100	300-1000	500-900	400-1200
Ροή αερίου (slpm)	100-200	500-3000	100-200	400-1300	1000-2000
Είδος αερίου	O ₂ , C ₂ H ₂	Air, N ₂ , Ar	Ar, He, H ₂ , N ₂	CH ₄ , C ₃ H ₆ , H ₂ + O ₂	He, N ₂
Απαιτούμενη Ισχύς (kW)	20	2-5	40-150	150-300	40-100
Τροφοδοσία υλικού					
Θερμοκρασία σωματιδίων (°C)	2500	>3800	>3800	3000	<600
Ταχύτητα σωματιδίων (m/s)	50-100	50-200	200-600	600-1000	800-1000
Ροή τροφοδοσίας (g/min)	30-50	150-2000	50-150	20-100	20-200
Επικάλυψη					
Εύρος πυκνότητας (%)	85-90	80-95	90-95	95	95
Αντοχή δεσμού (MPa)	7-18	10-40	40-70	70-100	80-100
Επίπεδο οξείδωσης	Μέτριο προς υψηλό	Μέτριο προς υψηλό	Μέτριο	Μέτριο προς χαμηλό	Κανένα
Σκληρότητα (HRC)	45-55	...	50-65	55-72	55-65

Στο σχήμα 2-4 μπορούμε να δούμε και τον συσχετισμό των θερμοκρασιών και ταχυτήτων που αναπτύσσονται κατά τις διαδικασίες των τεχνικών ψεκασμού, που θα αναλυθούν περαιτέρω στις ενότητες που ακολουθούν.



Σχήμα 3-4: Θερμοκρασίες σωματιδίων και θερμοκρασίες φλόγας των κυριότερων τεχνικών θερμικού ψεκασμού.

3.4.1 Ψεκασμός με φλόγα (Flame spray)

Ο ψεκασμός με φλόγα είναι ο παλαιότερος από τους θερμικούς ψεκασμούς, χαρακτηρίζεται από το χαμηλό κεφάλαιο επένδυσης, υψηλά ποσοστά απόθεσης, και σχετική ευκολία στο χειρισμό και χαμηλό κόστος συντήρησης εξοπλισμού. Για την τήξη του υλικού

επικάλυψης ως πηγή θερμότητας χρησιμοποιούνται καύσιμα-εύφλεκτα αέρια. Τεράστια ποικιλία υλικών σε μορφή πούδρας, σύρματος ή ράβδου μπορεί να εναποτεθεί με τη χρήση «όπλων» ψεκασμού φλόγας, και οι διαδικασίες επί το πλείστον γίνονται χειροκίνητα [14].

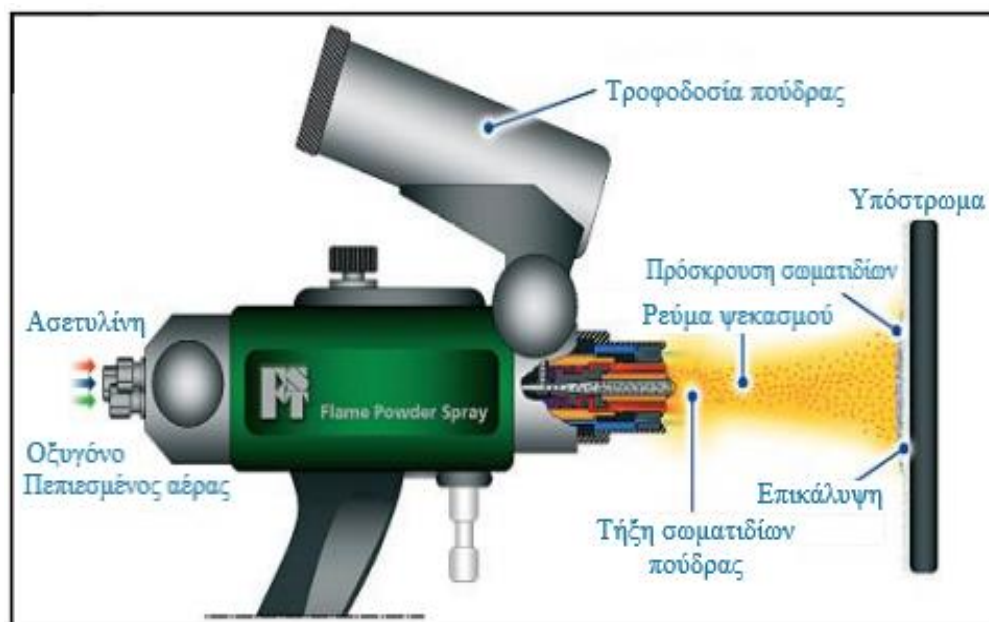
Τα περισσότερα όπλα ψεκασμού έχουν τη δυνατότητα προσαρμογής σε χρήση αρκετών συνδυασμών αερίων, ώστε να εξισορροπείται το κόστος διεργασίας με τις ιδιότητες των επικαλύψεων. Τα πιο κοινά αέρια που χρησιμοποιούμε σε αυτές τις διεργασίες είναι ακετυλένιο, προπάνιο, μεθυλ-ακετυλενιο-προπαδιένιο αέριο και υδρογόνο, μαζί με οξυγόνο. Τα χαρακτηριστικά και η θερμοκρασία της φλόγας εξαρτώνται από την αναλογία οξυγόνου και καυσίμου αερίου και την πίεση. Ο ψεκασμός με φλόγα περιλαμβάνει διαδικασίες ψεκασμού χαμηλών και υψηλών ταχυτήτων με σύρμα ή πούδρα, αλλά και με όπλα εκτόνωσης.

3.4.1.1 Ψεκασμός πούδρας με φλόγα (Powder Flame Spray - PFS)

Είναι η τεχνική όπου το υλικό επικάλυψης έχει αρχικά τη μορφή πούδρας. Πρόκειται για την απλούστερη και παλαιότερη διαδικασία ψεκασμού. Το υλικό τροφοδοσίας διοχετεύεται με τη βοήθεια φέροντος αερίου (αέρας ή κάποιο αδρανές αέριο, κυρίως άζωτο) ή βαρυτικά, στη φλόγα οξυγόνου-καυσίμου (oxy-fuel), τήκεται και προωθείται στην επιφάνεια προς επικάλυψη. Η θερμοκρασία της φλόγας και η ενθαλπία καθορίζονται από τη σύσταση του αερίου καυσίμου (C_xH_y) και τον ρυθμό ροής του. Η διαδικασία εκτελείται σε ατμοσφαιρική πίεση [15].

Θεωρητικά η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να αναπτυχθεί υπό ατμοσφαιρική πίεση είναι περίπου 3.400 K, με στοιχειομετρική καύση ασετιλίνης. Οι ταχύτητες που αναπτύσσουν τα σωματίδια μες στη φλόγα είναι σχετικά χαμηλές (δεν ξεπερνούν τα 100 m/s) και η αντοχή πρόσφυσης (<30 MPa) των επιστρωμάτων είναι γενικά χαμηλότερη σε σχέση με αυτή των υψηλών ταχυτήτων. Επίσης το πορώδες μπορεί να είναι υψηλό (>10%) αλλά η διαδικασία είναι απλή, εύκολη, με χαμηλό κόστος και μεγάλη ποικιλία υλικών. Η ενίσχυση της συνοχής και του μεταλλουργικού δεσμού της επικάλυψης μπορεί να επιτευχθεί επαναθερμαίνοντας την ως το σημείο τήξης της. Σημαντικό και εμφανές σε τέτοια περίπτωση η θερμοκρασία τήξης της επικάλυψης δεν πρέπει να ξεπερνάει εκείνη του υποστρώματος. Για τις περισσότερες πούδρες οι

τυπικοί ρυθμοί ψεκασμού είναι μεταξύ 0,5-9 kg/h, ενώ τα υλικά με χαμηλό σημείο τήξης ψεκάζονται με ταχύτερους ρυθμούς. Τέλος εξαιτίας της πρόσκρουσης της φλόγας η θερμοκρασία του υποστρώματος μπορεί να αυξηθεί αρκετά.



Σχήμα 3-5: Ψεκασμός πούδρας με φλόγα [14].

3.4.1.2 Ψεκασμός σύρματος με φλόγα (Wire Flame Spray – WFS)

Είναι η διαδικασία όπου το υλικό προς ψεκασμό βρίσκεται σε μορφή σύρματος. Την πρώτη συσκευή για ψεκασμό μεταλλικών συρμάτων ανέπτυξε ο Δρ. Max Ulrich Schoop το 1912. Η συσκευή αποτελείται από ένα ακροφύσιο, στο οποίο αναμιγνύεται ασετυλίνη με οξυγόνο και καίγεται στην έξοδο του ακροφυσίου. Το σύρμα τροφοδοτείται αξονικά και με σταθερή ταχύτητα, τέτοια ώστε η άκρη του να τήκεται μες στη φλόγα, η οποία είναι ομόκεντρη με το σύρμα ώστε να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη θέρμανση. Ένα ρεύμα πεπιεσμένου αέρα περικλείει τη φλόγα και ατομοποιεί τα υλικά σωματίδια προωθώντας τα προς το υπόστρωμα με συνεχόμενη ροή. Μεγάλο πλεονέκτημα της διεργασίας αυτής είναι πως μόνο τηγμένα σωματίδια

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής,

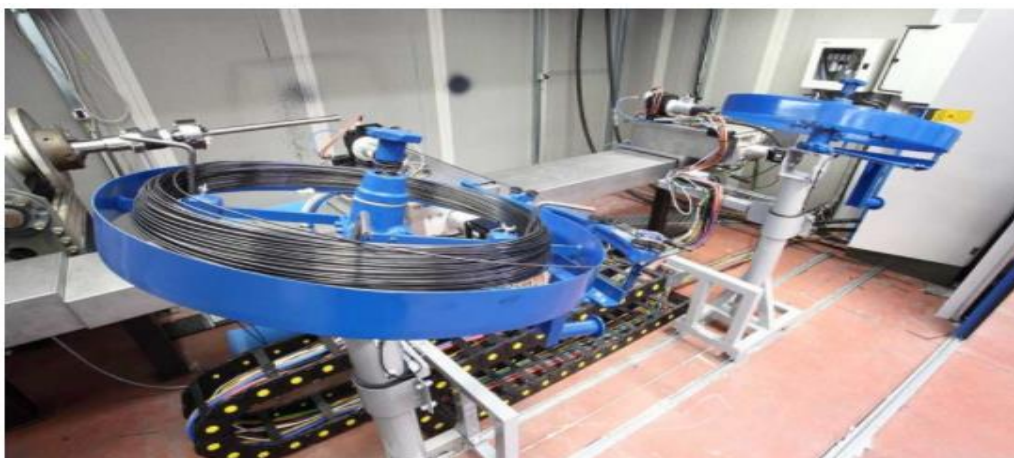
προωθούνται προς το υπόστρωμα, καθώς αν η ταχύτητα τροφοδοσίας είναι υψηλότερη το σύρμα αποβάλλεται από την έξοδο του ακροφυσίου. Το πρόβλημα της σταθερής συνεχόμενης τροφοδοσίας αντιμετωπίστηκε με τη χρήση μιας τουρμπίνας που ενεργοποιούσε γρανάζια και κυλίνδρους κίνησης που τραβούν το σύρμα μέσα στο ακροφύσιο. Με τις δεκαετίες η τουρμπίνα αντικαταστάθηκε με ηλεκτρικό κινητήρα, αλλά πέρα από μικρές αλλαγές στον σχεδιασμό εξαρτημάτων του όπλου, η βασική αρχή της διαδικασίας αυτής παραμένει ίδια: προώθηση ή έλξη του σύρματος μέσα σε μια φλόγα, τήξη και ατομοποίησή του και εναπόθεση των τηγμένων σωματιδίων για να σχηματιστεί μια ενιαία επικάλυψη.



Σχήμα 3-6: Ψεκασμός σύρματος με φλόγα [14].

Όπως και στον ψεκασμό με φλόγα έτσι και εδώ υπάρχει τεράστια ποικιλία στην επιλογή υλικών που μπορούν να εναποτεθούν. Επίσης η διεργασία δεν ασκεί αρνητική επίδραση στις ιδιότητες του υποστρώματος, του οποίου η θερμοκρασία κατά τον ψεκασμό δεν υπερβαίνει τους 200 °C, παρόλο που η θερμοκρασία της φλόγας στην έξοδο του ακροφυσίου, μπορεί να φτάσει τους 3000 °C. Η ταχύτητα των τηγμένων σωματιδίων δεν ξεπερνά τα 180 m/s. Η αντοχή πρόσφυσης κυμαίνεται στα 30 MPa για μεταλλικές επικαλύψεις και στα 15 MPa για κεραμικές, ενώ το πορώδες είναι μεταξύ 5-15 %. Επίσης το πάχος της επικάλυψης ξεκινά από τα 100

φτάνοντας έως τα 2500 μm [16]. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η ευκολία στον χειρισμό του όπλου είτε χειροκίνητα είτε αυτοματοποιημένα με χρήση ρομπότ. Το σχετικά μικρό μέγεθος του προσδίδει ευελιξία και πρόσβαση ακόμη και σε δυσπρόσιτα σημεία των υποστρωμάτων. Η καλή θλιπτική αντοχή των επικαλύψεων που δημιουργούνται με τη μέθοδο αυτή, και το χαμηλό κόστος της, σε συνδυασμό με τα παραπάνω την καθιστούν ως μια αξιόπιστη και συμφέρουσα επιλογή στην προστασία του χάλυβα στις ενισχυμένες δομικές κατασκευές με τη χρήση επικαλύψεων αλουμινίου, ψευδάργυρου και των κραμάτων τους.



Εικόνα 3-2: Ημιαυτόματη διαδικασία ψεκασμού σύρματος με φλόγα [25].



Εικόνα 3-3 : Χειροκίνητη διαδικασία ψεκασμού με φλόγα.

Η τεχνική WFS αποτέλεσε και τη μέθοδο ψεκασμού για τις πειραματικές ανάγκες της παρούσας εργασίας.

3.4.1.3 Ψεκασμός ράβδου με φλόγα (Rod Flame Spray – RFS)

Είναι ο ψεκασμός όπου το υλικό προς ψεκασμό βρίσκεται σε μορφή κεραμικής ράβδου. Χρονολογείται στις αρχές της δεκαετίας του 1950 και ο κύριος λόγος ανάπτυξής του ήταν η ανάγκη για δημιουργία πυρίμαχων επικαλύψεων. Οι επικαλύψεις ψεκασμού πούδρας με φλόγα, λόγω του υψηλού πορώδους δεν ικανοποιούσαν τα κριτήρια συνοχής και προστασίας, έτσι η λύση βρέθηκε στη δημιουργία ενός όπλου ψεκασμού που να μπορεί να ψεκάζει ράβδους. Η αρχή λειτουργίας είναι πανομοιότυπη με τον ψεκασμό σύρματος με φλόγα: η ράβδος προωθείται στην ομόκεντρη φλόγα, η οποία την θερμαίνει ομοιόμορφα ως την τήξη. Στη συνέχεια ομοαξονική παροχή πεπιεσμένου αερίου ατομοποιεί και προωθεί τα τηγμένα σωματίδια προς το υπόστρωμα.

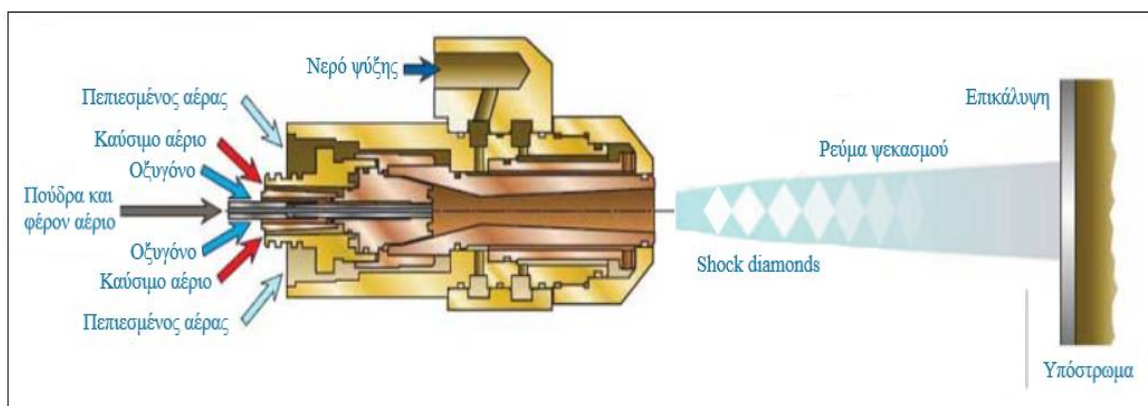
3.4.1.4 Ψεκασμός φλόγας υψηλής ταχύτητας (High Velocity Oxy-Fuel – HVOF)

Ο ψεκασμός φλόγας υψηλής ταχύτητας αποτελεί μια σχετικά πρόσφατη προσθήκη στις τεχνικές θερμικού ψεκασμού. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, οι Browning και Witfield, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες μηχανών πυραύλων, παρουσίασαν τη νέα αυτή μέθοδο ψεκασμού μεταλλικής πούδρας. Η διαδικασία χρησιμοποιεί τον συνδυασμό οξυγόνου με διάφορα καύσιμα αέρια όπως υδρογόνο, προπάνιο, προπυλένιο ή ακόμη και κηροζίνη, που εισάγονται στον (υδρόψυκτο ή αερόψυκτο) θάλαμο καύσης του όπλου μαζί με την πούδρα. Η καύση των αερίων παράγει υψηλή θερμότητα και πίεση μέσα στο θαλαμίσκο, προκαλώντας την εξώθηση του



Εικόνα 3-4: Σχηματισμός shock diamonds στον πίδακα φλόγας.

μίγματος με πολύ υψηλές ταχύτητες προς το ειδικά σχεδιασμένο συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο (τύπου De Laval). Στο συγκλίνον τμήμα τα αέρια συμπιέζονται και η αποσυμπίεσή τους στο αποκλίνον τμήμα προκαλεί τις υπερηχητικές ταχύτητες (έως και 1600 m/s) που αναπτύσσονται. Λόγω της υπερηχητικής ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου παρατηρείται οπτικά στον πίσω φλόγας ένα χαρακτηριστικό φαινόμενο της διαδικασίας, ο σχηματισμός διαμαντιών (shock diamonds), όπως φαίνεται στην εικόνα 2-1. Τα σωματίδια της πούδρας τήκονται πλήρως ή μερικώς μέσα στον θάλαμο καύσης και κατά την προώθησή τους στο ακροφύσιο. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κυμαίνονται μεταξύ 2500 °C και 3200 °C και εξαρτώνται από το καύσιμο, την αναλογία του με το οξυγόνο αλλά και από την πίεση του αερίου [14].



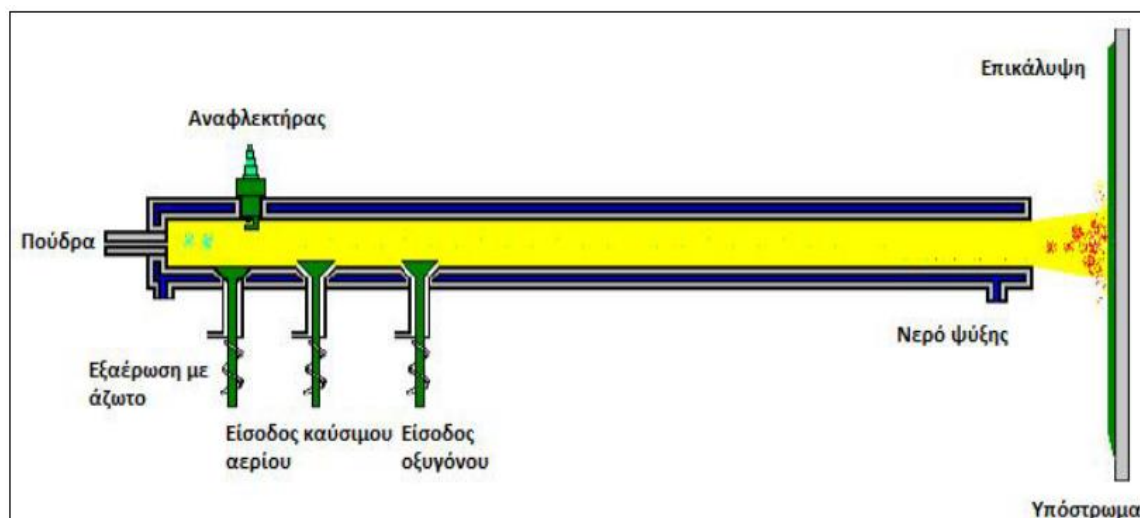
Σχήμα 3-7: Ψεκασμός με φλόγα υψηλής ταχύτητας (HVOF) [24].

Εξαιτίας των υψηλών ταχυτήτων τα σωματίδια παραμένουν για πολύ μικρό διάστημα στον θάλαμο και το ακροφύσιο, με αποτέλεσμα να προσκρούουν στην επιφάνεια προς επικάλυψη σε κατάσταση μερικής τήξης. Έτσι ο συνδυασμός των υπερηχητικών ταχυτήτων και των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών επιτρέπουν τον ψεκασμό των σωματιδίων σε περισσότερο πλαστική κατάσταση παρά τηγμένη, ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται επικαλύψεις υψηλής πυκνότητας και αντοχής πρόσφυσης ($>70\text{MPa}$), αλλά και πολύ χαμηλού πορώδους (1-2%).

Το κύριο χαρακτηριστικό της διαδικασίας HVOF, λοιπόν, είναι η ικανότητά της να παράγει πυκνές επικαλύψεις με χαμηλό ποσοστό υποβάθμισης και αλλαγής φάσεων των μεταλλικών υλικών. Αυτό οφείλεται στον ελάχιστο χρόνο παραμονής των σωματιδίων στην σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας φλόγα. Χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή μεταλλικών επικαλύψεων, αλλά έχει αποδειχθεί πως μπορεί να παρέχει και πολύ αξιόλογες πυκνές κεραμικές επικαλύψεις. Τα μειονεκτήματα της είναι ο χαμηλός ρυθμός εναπόθεσης και το ότι η επικάλυψη δεν είναι 100% κρυσταλλική [14].

3.4.1.5 Ψεκασμός εκτόνωσης (Detonation Gun – D-Gun)

Είναι η τεχνική κατά την οποία πραγματοποιείται ελεγχόμενη έκρηξη ενός μίγματος αερίου καυσίμου, οξυγόνου και υλικού επικάλυψης σε μορφή πούδρας, η οποία επιτυγχάνει την τήξη και προώθηση του προς το υπόστρωμα [11,17,18]. Αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1950 από τους Gfeller και Baiker καθώς ήταν οι πρώτοι που σκέφτηκαν να εισάγουν το υλικό σε μορφή πούδρας μέσα σε κύματα εκτόνωσης ή ωστικά κύματα. Αυτά παράγονται με την ανάφλεξη, με σπινθήρα, ενός μείγματος ασετιλίνης και οξυγόνου μέσα στον θάλαμο εκτόνωσης κοντά στην κλειστή του πλευρά, ενώ από την άλλη καταλήγει σε ένα σωλήνα 1 m και διαμέτρου 2,5 cm [19]. Το ωστικό κύμα που παράγεται ωθεί τα σωματίδια του υλικού προς την επιφάνεια προς επικάλυψη. Οι πιέσεις που δημιουργούνται (της τάξεως 2 MPa) κλείνουν τις βαλβίδες ελέγχου έως ότου η πίεση του θαλάμου να εξισωθεί. Όταν συμβεί αυτό, ο θάλαμος εξαερώνεται με άζωτο και εγχέονται ξανά τα καύσιμα αέρια και ο κύκλος επαναλαμβάνεται (περίπου 4 με 8 φορές το δευτερόλεπτο στα περισσότερα όπλα εκτόνωσης). Με κάθε εκτόνωση ένα πυκνό και συμπαγές στρώμα επικάλυψης εναποτίθεται. Όσο ο κύκλος επαναλαμβάνεται τόσο αυξάνει και το πάχος της επικάλυψης.



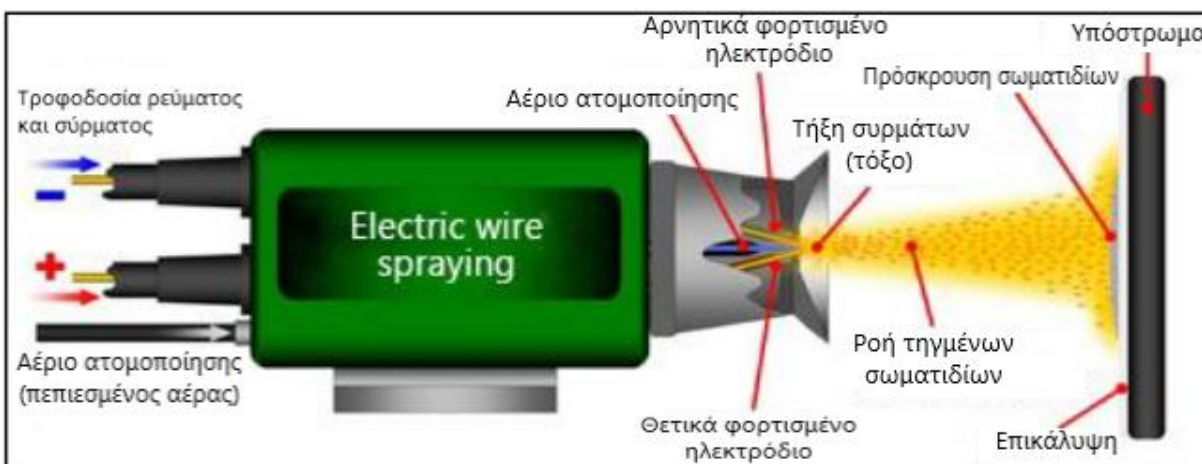
Σχήμα 3-8: Ψεκασμός εκτόνωσης [21].

Ο ψεκασμός εκτόνωσης παράγει εξαιρετικής ποιότητας επικαλύψεις, τόσο μεταλλικές όσο και κεραμικές, χαρακτηριστικά των οποίων είναι η υψηλή πυκνότητα, βελτιωμένη αντίσταση στη διάβρωση, υψηλότερη σκληρότητα, καλύτερη αντοχή στη φθορά, υψηλή αντοχή πρόσφυσης και μικρή οξείδωση. Χρησιμοποιείται ευρέως στις βιομηχανίες χάλυβα, στις κλωστοϋφαντουργίες, στις αεροναυπηγικές αλλά και στις αυτοκινητοβιομηχανίες [20].

3.4.2 Ψεκασμός με ηλεκτρικό τόξο (Wire Arc Spray – WAS)

Στην τεχνική θερμικού ψεκασμού με τόξο, δύο αναλώσιμα ηλεκτρόδια σε μορφή σύρματος συνδεδεμένα σε μια πηγή συνεχούς ρεύματος προωθούνται στο όπλο ψεκασμού με οδηγούς σε ορισμένο σημείο ώστε να δημιουργείται μεταξύ τους ένα τόξο, το οποίο τήκει τις άκρες τους. Τα ηλεκτρόδια είναι αντίθετα φορτισμένα μεταξύ τους ώστε το ένα να αποτελεί την άνοδο και το άλλο την κάθοδο στη διαδικασία. Τα τηγμένα μεταλλικά σωματίδια ατομοποιούνται και προωθούνται προς το υπόστρωμα με την παρουσία ενός αζονικού ρεύματος (πίδακα) συμπιεσμένου αέρα ή άλλου αδρανούς αερίου. Η διεργασία ενεργειακά είναι

εξαιρετικά αποδοτική, καθώς σε αντίθεση με τις τεχνικές ψεκασμού φλόγας δεν απαιτείται εξωτερική πηγή θερμότητας. Η θέρμανση και η τήξη επιτυγχάνονται αποκλειστικά από την δημιουργία του ηλεκτρικού τόξου από τα φορτισμένα ηλεκτρόδια [14].

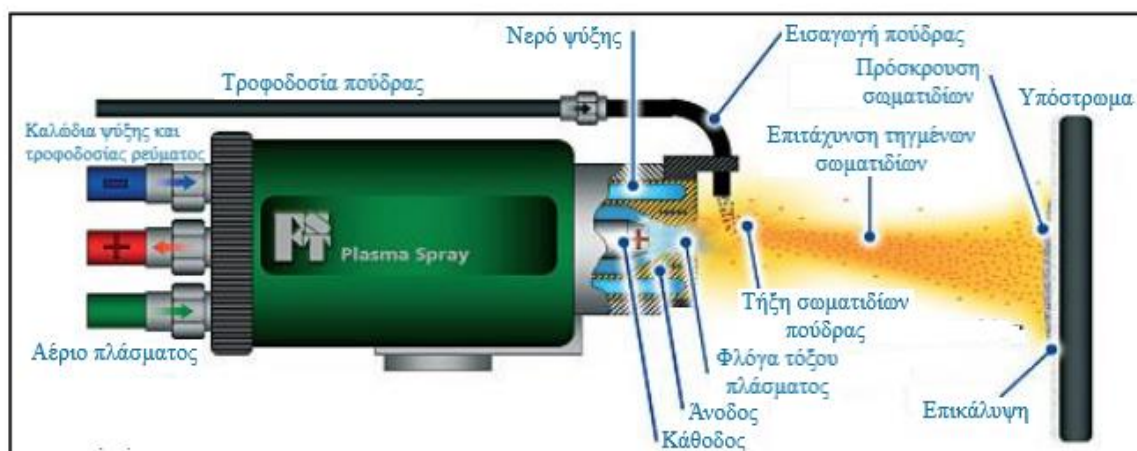


Σχήμα 3-9: Διαδικασία ψεκασμού με ηλεκτρικό τόξο [14].

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι λόγω απουσίας πίδακα φλόγας, το υπόστρωμα δεν θερμαίνεται σχεδόν καθόλου, καθιστώντας την διεργασία εξαιρετική για ψεκασμό επιφανειών με χαμηλά σημεία τήξης, όπως είναι τα πολυμερή [9]. Επίσης δεν απαιτεί τη χρήση οξυγόνου ή καύσιμου αερίου και ο ρυθμός εναπόθεσης είναι αρκετά υψηλός. Ακόμη, με την ταυτόχρονη τροφοδότηση δύο διαφορετικών υλικών είναι εύκολο να σχηματιστούν επικαλύψεις ψευδοκραμάτων ή μειγμάτων. Τέλος η χρήση γεμιστών συρμάτων επιτρέπει την εναπόθεση σύνθετων κραμάτων, αλλά και μεταλλικών κραμάτων που περιέχουν καρβίδια και μπορούσαν να επιτευχθούν μόνο με τη χρήση υλικού σε μορφή πούδρας [10].

3.4.3 Ψεκασμός με τόξο πλάσματος (Plasma Spray)

Ο ψεκασμός με τόξο πλάσματος είναι ίσως η πιο πολύπλευρη και πολύπλοκη τεχνική θερμικού ψεκασμού. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι η δημιουργία ενός ηλεκτρικού τόξου, με παροχή συνεχούς ρεύματος, που παράγει ένα ρεύμα ιονισμένων αερίων (πλάσμα) το οποίο τήκει και προωθεί το υλικό (σε μορφή πούδρας) προς το υπόστρωμα. Ως πλάσμα ορίζουμε ένα νέφος ιονισμένων αερίων που αποτελείται από ιόντα, ελεύθερα ηλεκτρόνια, ουδέτερα άτομα και μόρια και δημιουργείται όταν ένα αέριο θερμανθεί σε πολύ υψηλό βαθμό, τέτοιο ώστε να διασπώνται οι χημικοί δεσμοί του και τα άτομά του υφίστανται βίαιες τυχαίες κινήσεις και συγκρούσεις. Το πλάσμα είναι ηλεκτρικά ουδέτερο και τα αέρια που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι τα: αργό, άζωτο, υδρογόνο, ήλιο και συνδυασμοί τους [18,21]. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το όπλο και η διαδικασία του ψεκασμού με τόξο πλάσματος.



Σχήμα 3-10: Διαδικασία ψεκασμού πλάσματος [14].

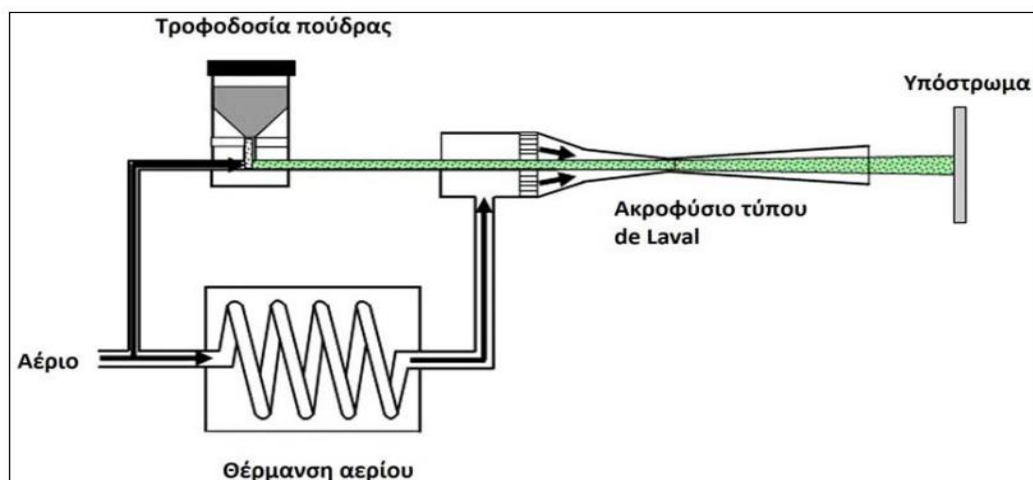
Το όπλο ψεκασμού αποτελείται από δύο μη αναλώσιμα ηλεκτρόδια. Μία αξονική κάθοδο από βολφράμιο και μία άνοδο από βολφράμιο που σχηματίζει ένα συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο (De Laval), και οι δύο υδρόψυκτες. Στο μικρό θάλαμο που σχηματίζεται μεταξύ τους δημιουργείται ένα ηλεκτρικό τόξο, το οποίο αναφλέγεται με μια σπίθα υψηλής συχνότητας υπερθερμαίνοντας το αέριο πλάσματος και δημιουργείται στην έξοδο του ακροφυσίου μια φλόγα πλάσματος μερικών εκατοστών, όπου και εισάγεται κάθετα σε αυτήν το υλικό επικάλυψης σε μορφή πούδρας (μεταλλικής ή μη). Η θερμοκρασία μέσα στον πίδακα πλάσματος μπορεί να φτάσει μέχρι και 16000 °C. Έτσι το υλικό τήκεται και προωθείται στο υπόστρωμα με υψηλές ταχύτητες που κυμαίνονται μεταξύ 200 έως 600 m/s. Τα συνήθη εμπορικά όπλα λειτουργούν σε εύρος 20 – 200 kW. Ο ρυθμός ψεκασμού εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως, από τον σχεδιασμό του όπλου, το αέριο πλάσματος και από τον τρόπο εισαγωγής και τις ιδιότητες των σωματιδίων της πούδρας [11,14,16].

Το κύριο μειονέκτημα της τεχνικής είναι η πολυπλοκότητα και το υψηλό οικονομικό κόστος της. Οι μηχανικές και χαρακτηριστικές ιδιότητες των επικαλύψεων διαφέρουν ανάλογα με το περιβάλλον, στο οποίο πραγματοποιείται η διεργασία. Ο ψεκασμός μπορεί να γίνει σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον (Atmospheric Plasma Spray – APS) μειώνοντας αρκετά το κόστος αλλά υποβαθμίζοντας την αντοχή πρόσφυσης και αυξάνοντας το πορώδες και την οξείδωση. Άλλος τρόπος είναι να εκτελείται υπό κενό (Vacuum Plasma Spray – VPS), υπό χαμηλή πίεση (Low Pressure Plasma Spray – LPPS) ή σε αδρανή ατμόσφαιρα (Inert Plasma Spray – IPS) σε ειδικά διαμορφωμένους θαλάμους, παρέχοντας εξαιρετικής ποιότητας επικάλυψη (πολύ χαμηλό πορώδες, μηδαμινή οξείδωση, υψηλή πυκνότητα και αντοχή) αλλά εκτοξεύοντας το κόστος σε πολύ υψηλά επίπεδα.

3.4.4 Ψυχρός ψεκασμός (Cold Gas Spray – CGS)

Είναι μια διεργασία ψεκασμού, η οποία βασίζεται στη χρήση πίδακα πεπιεσμένου αερίου υπερηχητικής ταχύτητας για την επιτάχυνση σωματιδίων πούδρας σε εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες σε θερμοκρασία δωματίου. Τα μη τηγμένα σωματίδια ταξιδεύουν με ταχύτητες από

500 έως 1500 m/s και κατά την πρόσκρουση παραμορφώνονται πλαστικά και ενοποιούνται με το υπόστρωμα, σχηματίζοντας την επικάλυψη [22]. Αναπτύχθηκε στην πρώην Σοβιετική Ένωση στα μέσα της δεκαετίας του 1980 από τον Parygin και αξιοποιείται εμπορικά πλέον και στην Ευρώπη και την Αμερική [16]. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ολόκληρη η διαδικασία.



Σχήμα 3-11: Η διαδικασία του ψυχρού ψεκασμού [23].

Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην επιτάχυνση των σωματιδίων της πούδρας σε υπερηχητικές ταχύτητες, άρα και στην υψηλή κινητική ενέργεια, έτσι ώστε κατά την πρόσκρουση να επέρχεται πλαστική παραμόρφωση και τήξη τους, χωρίς να έχουν θερμανθεί ιδιαίτερα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ειδικού συγκλίνον-αποκλίνον ακροφυσίου τύπου De Laval, εφαρμογή υψηλών πιέσεων (έως 3,5 MPa) και ρυθμών ροής αερίων (ηλίου ή αζώτου) τάξης των 90 m³/h. Τα αέρια προθερμαίνονται στους 700-800 °C για αποφυγή υγροποίησης τους και για αύξηση της ταχύτητας τους. Λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών χρησιμοποιούνται μόνο όλκιμα μεταλλικά υλικά και κράματά τους ή σε συνδυασμό με κάποια ψαθυρά κεραμικά (η περιεκτικότητα του μίγματος πρέπει να είναι αυστηρά τουλάχιστον 50% σε όλκιμο μέταλλο) [16].

Βασικά πλεονεκτήματα του ψυχρού ψεκασμού είναι το πολύ χαμηλό ποσοστό οξείδωσης της επικάλυψης, η καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, βελτιωμένη αντοχή πρόσφυσης, σταθερότητα φάσεων και σύστασης και αποφυγή θέρμανσης του υποστρώματος. Κύριο μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος, λόγω της υψηλής ροής, των αερίων που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία καθώς και η σύντομη εσωτερική φθορά του ακροφυσίου, επειδή τα υλικά που εκτοξεύονται σε υψηλές ταχύτητες λειτουργούν αποξεστικά.

Εφαρμογές του ψυχρού ψεκασμού βλέπουμε στις βιομηχανίες αεροσκαφών και αυτοκινήτων για προστασία από την διάβρωση, στους ηλεκτρικούς αγωγούς και στα υλικά συγκόλλησης αλλά και στην επίστρωση μεταλλικών επικαλύψεων σε κεραμικά και γυάλινα υποστρώματα.

3.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

Οι παράμετροι που επηρεάζουν τις διεργασίες θερμικού ψεκασμού είναι αμέτρητες. Μπορούμε να επικεντρωθούμε όμως σε εκείνες που επηρεάζουν άμεσα τα χαρακτηριστικά των επικαλύψεων και πρέπει να παραμείνουν αμετάβλητες για τη δημιουργία μιας ομοιόμορφης και ποιοτικής επικάλυψης, όπως ο χρόνος, ο χειρισμός, η θερμοκρασία και η μάζα.

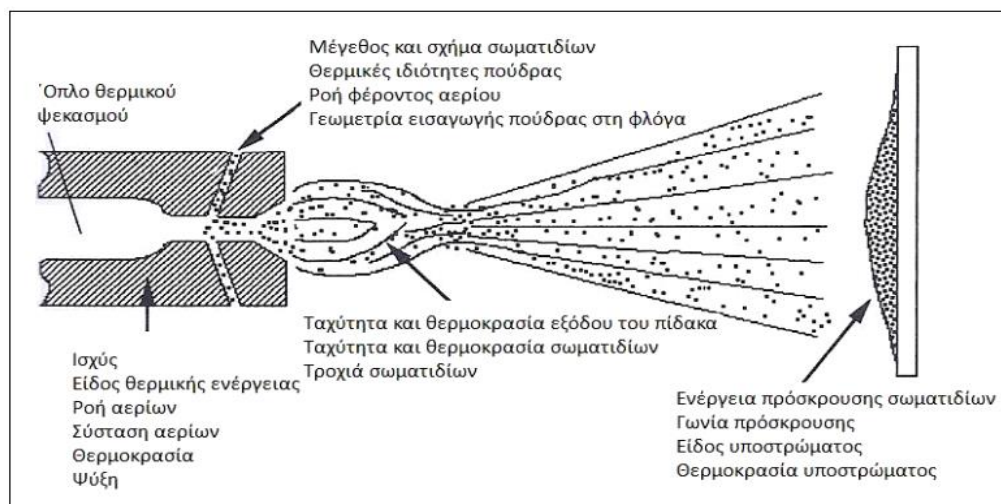
Η παράμετρος του χρόνου εξαρτάται από τον σχεδιασμό του όπλου (διάμετρος και γεωμετρία ακροφυσίου), τον ρυθμό ροής των αερίων και της καύσιμης ύλης, καθώς και από τη διαθέσιμη ενέργεια που επιδρά στα αέρια της φλόγας. Όσον αφορά τον χειρισμό σημαντικό ρόλο έχουν η ταχύτητα σάρωσης της επιφάνειας, η απόσταση του όπλου από το υπόστρωμα και η γωνία πρόσπτωσης. Ενώ η θερμοκρασία ρυθμίζεται κι εκείνη από την ροή των αερίων και τη διαθέσιμη ενέργεια που επιδρά στο σύστημα. Τέλος η μάζα είναι μια μεταβλητή, στην οποία μπορούμε να επέμβουμε μόνο στον ρυθμό τροφοδοσίας του υλικού προς επικάλυψη, αφού τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του είναι τυποποιημένα σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Τέτοια χαρακτηριστικά για πούδρες είναι η μορφολογία, το μέγεθος των

σωματιδίων και η φαινόμενη πυκνότητα, ενώ για σύρματα η διάμετρός τους, η μέθοδος παρασκευής τους αλλά και αν είναι απλά ή σύνθετα (γεμιστά).

Σύμφωνα με τα παραπάνω αντιλαμβανόμαστε ότι για την ανάπτυξη και βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων μιας επικάλυψης, λόγω του μεγάλου πλήθους των παραμέτρων, οι πειραματικές έρευνες θα ήταν πολύ χρονοβόρες και ακριβές. Για τη μείωση και του χρόνου και του κόστους της διαδικασίας χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι στατιστικού σχεδιασμού που δίνουν αρκετά ξεκάθαρη εικόνα για την αλληλεπίδραση και για το πλήθος των μεταβλητών που πρέπει να ληφθούν υπόψη στις πειραματικές διαδικασίες [27].

3.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

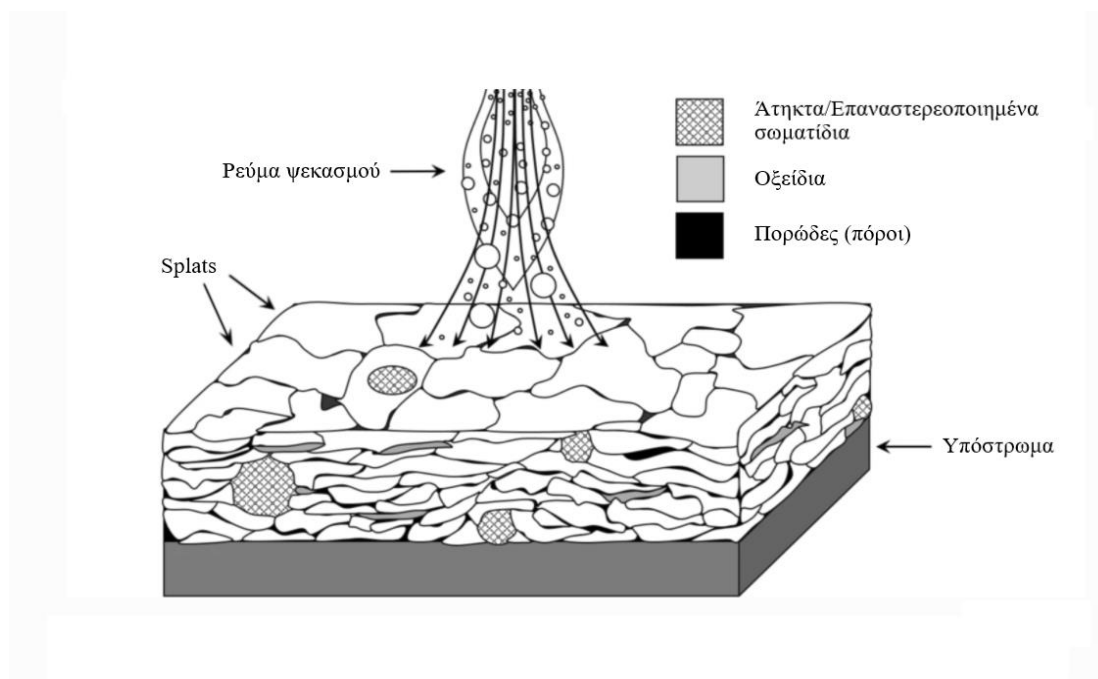
Όπως αντιλαμβανόμαστε ο θερμικός ψεκασμός είναι μια περίπλοκη διεργασία με αρκετά χαρακτηριστικά να επηρεάζουν την ποιότητα και αξιοπιστία των επικαλύψεων. Συνοπτικά είναι μια θερμική κατεργασία υψηλής ταχύτητας, η οποία έχει στόχο μέσα στον μικρό χρόνο παραμονής (dwell time) του υλικού (π.χ. πούδρας) μέσα στον θάλαμο και τον πίδακα του όπλου ψεκασμού, να αναπτύξει θερμοκρασίες και ταχύτητες τέτοιες ώστε να εναποτεθεί επιτυχώς στο υπόστρωμα. Αυτό εξαρτάται τόσο από την ίδια διεργασία, δηλαδή τις ταχύτητες και θερμοκρασίες αερίων-πίδακα, όσο κι από τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων της πούδρας (μορφολογία, μέγεθος, μάζα). Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά της διαδικασίας του θερμικού ψεκασμού.



Σχήμα 3-12: Χαρακτηριστικά της διεργασίας του θερμικού ψεκασμού [27].

Η ταχύτητα του αερίου-πίδακα, που επηρεάζει άμεσα εκείνη των σωματιδίων, επιτυγχάνεται συναρτήσει της ροής, των χαρακτηριστικών του αλλά και της απαιτούμενης ενέργειας για τη διαδικασία. Είναι γενικώς αποδεκτό ότι όσο υψηλότερη η ταχύτητα του πίδακα, τόσο ταχύτερα κινούνται τα σωματίδια προς το υπόστρωμα, προσδίδοντας στην επικάλυψη ισχυρότερη πρόσφυση και υψηλότερη πυκνότητα. Ο μικρός χρόνος παραμονής των σωματιδίων στον πίδακα μερικές φορές μπορεί να μην είναι αρκετός για την επιτυχή τήξη τους, αλλά το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την αύξηση της ενθαλπίας, και συνεπώς θερμοκρασίας του πίδακα, που με τη σειρά του αυξάνει κ τη μέση θερμοκρασία των σωματιδίων.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί προηγμένα συστήματα παρακολούθησης, με κάμερες υψηλών ταχυτήτων και αισθητήρες, τα οποία μας επιτρέπουν την καταγραφή ποικίλων χαρακτηριστικών, όπως η ταχύτητα, η διεύθυνση και η θερμοκρασία των σωματιδίων κατά τον θερμικό ψεκασμό, βοηθώντας σημαντικά στη θεωρητική μελέτη αλλά και στη μαθηματική μοντελοποίηση και βελτίωση των διεργασιών [28,29,30].



Σχήμα 3-13: Μικροδομή επικάλυψης θερμικού ψεκασμού [27].

3.7 ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

Οι επικαλύψεις θερμικού ψεκασμού έχουν τη δική τους χαρακτηριστική μικροδομή, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 2-13 και σχηματίζονται, όπως έχει προαναφερθεί, με την πρόσκρουση τηγμένων (πλήρως ή μερικώς) σωματιδίων στο υπόστρωμα και με τη συσσώρευσή τους το ένα πάνω στο άλλο. Το πάχος των επικαλύψεων εξαρτάται από τα περάσματα του όπλου ψεκασμού πάνω από την επιφάνεια και τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους είναι: τα πεπλατυσμένα σωματίδια (splats), τα παγιδευμένα μη τηγμένα σωματίδια, οι μικρορωγμές, οι κόκκοι, η διεπιφανειακή πρόσφυση, τα εγκλείσματα οξειδίων και το πορώδες. Ειδικότερα τα δύο τελευταία καθορίζουν σε πολύ σημαντικό βαθμό την αποτελεσματικότητα της επικάλυψης κατά του φαινομένου της διάβρωσης [11,27,31].

3.7.1 Πεπλατυσμένα (τηγμένα) σωματίδια (Splats)

Με τον όρο «Splats» εννοούμε το αποτέλεσμα της πρόσκρουσης των σωματιδίων, στην επιφάνεια του ειδικά επεξεργασμένου υποστρώματος, κατά την οποία μετατρέπονται σε λεπτές, πεπλατυσμένες, δισκοειδείς δομές, που καλύπτουν τα υποκείμενα διάκενα, στερεοποιούνται και προσκολλώνται το ένα στο άλλο και σχηματίζουν τελικά το συνεχόμενο στρώμα επικάλυψης. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί κι από το σχήμα 2-13, αποτελούν το βασικότερο δομικό συστατικό της επίστρωσης [11,27]. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως για τον σωστό σχηματισμό των splats σημαντικό ρόλο έχει η σωστή θερμοκρασία του πίδακα αερίου/φλόγας για δεδομένη ταχύτητα των σωματιδίων, καθώς όταν έχουμε χαμηλότερες θερμοκρασίες δεν τήκονται πλήρως και δημιουργούνται κενά μετά την πρόσκρουση, ενώ στην περίπτωση υπερθέρμανσης κατά την πρόσπτωση διασπώνται σε μικρότερα σταγονίδια και σχηματίζουν λεπτόκκοκα «συντρίμμια» που διαταράσσουν την ομοιομορφία και ομαλότητα της επικάλυψης.

3.7.2 Οξείδια

Τα οξείδια δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση σωματιδίων/ατμόσφαιρας ή και από την θέρμανση της επιφάνειας της επικάλυψης κατά την διάρκεια της διεργασίας με αποτέλεσμα να σχηματίζονται λεπτά φιλμ οξειδίων ή και νιτριδίων στις επιφάνειες των σωματιδίων. Όσο πιο μεγάλος είναι ο χρόνος παραμονής στη φλόγα και όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία των σωματιδίων, τόσο αυξάνεται το πάχος του φιλμ και συνεπώς και η περιεκτικότητα της επικάλυψης σε οξείδια.

Παρόλο που τα εγκλείσματα οξειδίου αυξάνουν την σκληρότητα της επίστρωσης, γενικά δεν είναι επιθυμητά σε μεγάλο ποσοστό, καθώς οδηγούν σε μεγαλύτερη ευθραυστότητα και υποβάθμιση της συνοχής των splats, συνεπώς και της συνοχής της επικάλυψης. Το πρόβλημα του υψηλού ποσοστού σε οξείδια ελαχιστοποιείται με τρόπους όπως, η απομόνωση της

διαδικασίας από το αντιδραστικό περιβάλλον με χρήση ειδικών θαλάμων αδρανούς ατμόσφαιρας, τη μείωση του χρόνου παραμονής των σωματιδίων αυξάνοντας την ταχύτητα ή μειώνοντας την απόσταση ψεκασμού, μείωση της θερμοκρασίας τους αλλά και της επιφάνειας που επικαλύπτεται και άλλα. Βέβαια, κατ'εξάιρεση, υπάρχουν και περιπτώσεις όπου είναι επιθυμητή η παρουσία οξειδίων, διότι μπορούν να αυξήσουν την αντίσταση κατά της φθοράς ή να μειώσουν την θερμική αγωγιμότητα [10].

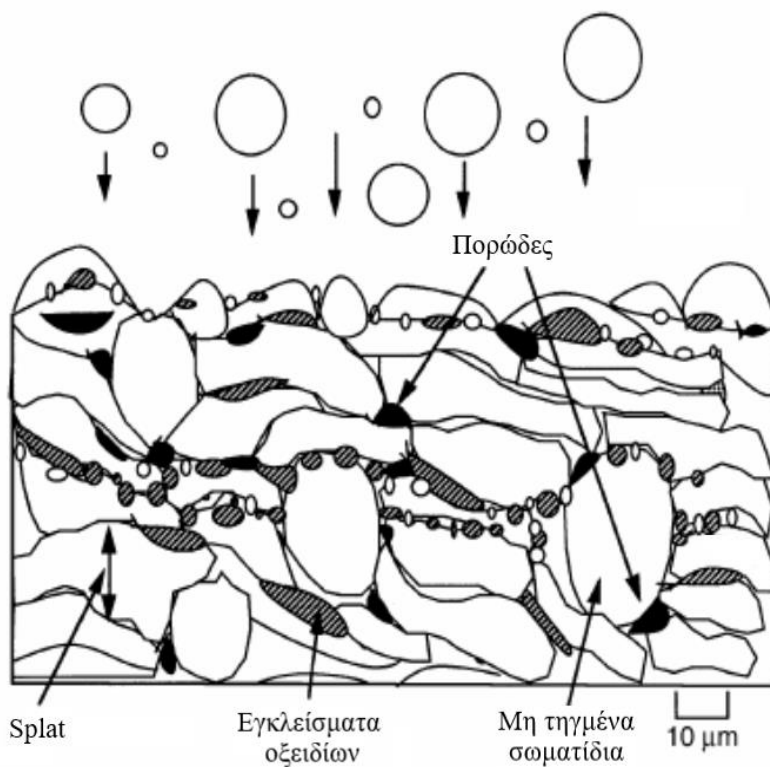
3.7.3 Οξείδια

Τα οξείδια δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση σωματιδίων/ατμόσφαιρας ή και από την θέρμανση της επιφάνειας της επικάλυψης κατά την διάρκεια της διεργασίας με αποτέλεσμα να σχηματίζονται λεπτά φιλμ οξειδίων ή και νιτριδίων στις επιφάνειες των σωματιδίων. Όσο πιο μεγάλος είναι ο χρόνος παραμονής στη φλόγα και όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία των σωματιδίων, τόσο αυξάνεται το πάχος του φιλμ και συνεπώς και η περιεκτικότητα της επικάλυψης σε οξείδια.

Παρόλο που τα εγκλείσματα οξειδίου αυξάνουν την σκληρότητα της επίστρωσης, γενικά δεν είναι επιθυμητά σε μεγάλο ποσοστό, καθώς οδηγούν σε μεγαλύτερη ευθραυστότητα και υποβάθμιση της συνοχής των splats, συνεπώς και της συνοχής της επικάλυψης. Το πρόβλημα του υψηλού ποσοστού σε οξείδια ελαχιστοποιείται με τρόπους όπως, η απομόνωση της διαδικασίας από το αντιδραστικό περιβάλλον με χρήση ειδικών θαλάμων αδρανούς ατμόσφαιρας, τη μείωση του χρόνου παραμονής των σωματιδίων αυξάνοντας την ταχύτητα ή μειώνοντας την απόσταση ψεκασμού, μείωση της θερμοκρασίας τους αλλά και της επιφάνειας που επικαλύπτεται και άλλα. Βέβαια, κατ'εξάιρεση, υπάρχουν και περιπτώσεις όπου είναι επιθυμητή η παρουσία οξειδίων, διότι μπορούν να αυξήσουν την αντίσταση κατά της φθοράς ή να μειώσουν την θερμική αγωγιμότητα [10].

3.7.4 Πορώδες (πόροι)

Ένα πολύ σημαντικό γνώρισμα της επικάλυψης, που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες της είναι το πορώδες. Δημιουργείται από την ύπαρξη μη τηγμένων σωματιδίων στο ρεύμα ψεκασμού, τα οποία προσκρούουν στην επιφάνεια χωρίς να σχηματίζουν splats και συνεπώς δεν καλύπτουν τα υποκείμενα διάκενα του σημείου πρόσκρουσης. Έτσι από κάτω και

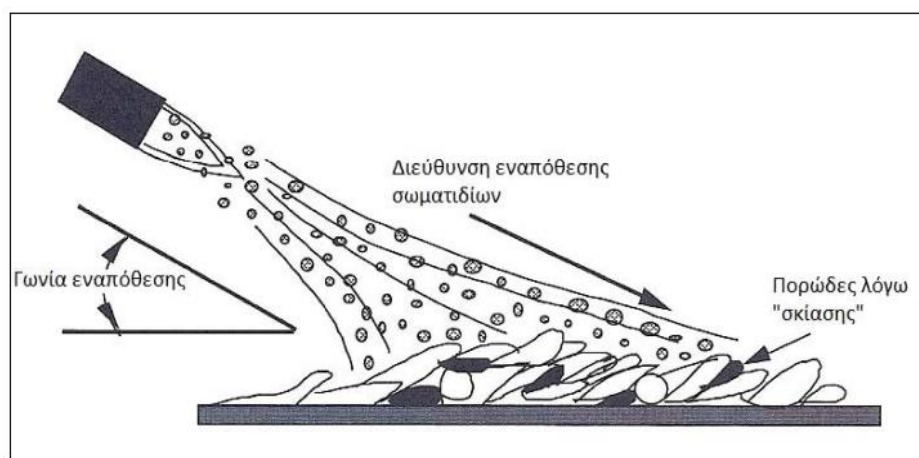


Σχήμα 3-14: Δημιουργία πορώδους στις επικαλύψεις [27].

γύρω τους προκύπτουν κενά (Σχήμα 2-14), τα οποία δεν καλύπτονται από το επόμενο πέρασμα του όπλου, δεδομένου ότι η γωνία ψεκασμού παραμένει σταθερή καθ'όλη τη διαδικασία. Τα κενά αυτά προκαλούν μια ανεπαρκή συνοχή μεταξύ των splats και των μη τηγμένων σωματιδίων και οδηγούν σε μια πρόωρη δημιουργία ρηγμάτων, αποκόλληση ή θρυμματισμό. Επίσης, το πορώδες, μειώνει σημαντικά την σκληρότητα και υποβαθμίζει την αντοχή σε φθορά της

επικάλυψης, ενώ δυσκολεύει και την διεργασία λείανσης, όπου είναι απαραίτητη. Ακόμη, στο θέμα της διάβρωσης, η ύπαρξή του σε μεγάλο ποσοστό είναι επικίνδυνη, διότι πολλοί πόροι ενοποιημένοι μπορούν να λειτουργήσουν σαν μια οδός πρόσβασης των διαβρωτικών ή οξειδωτικών στοιχείων του περιβάλλοντος μέχρι το υλικό του υποστρώματος, ακυρώνοντας έτσι την εγγενή αντίσταση ολόκληρης της επικάλυψης κατά της διάβρωσης. Συνεπώς καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως, παρά κάποιων εξαιρέσεων, δεν είναι καθόλου επιθυμητό χαρακτηριστικό και επικίνδυνο για την συνοχή και φθορά της επίστρωσης.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος πρέπει να εστιάσουμε στους παράγοντες που το επιδεινώνουν και την προέλευση του. Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, ίσως ο πιο σημαντικός παράγοντας σχηματισμού του πορώδους είναι τα μη τηγμένα σωματίδια, τον αριθμό των οποίων πρέπει να ελαχιστοποιούμε είτε ρυθμίζοντας την θερμοκρασία είτε την ταχύτητα του ρεύματος ψεκασμού. Έτσι αντιμετωπίζουμε και τους παράγοντες της ανεπαρκούς συνοχής μεταξύ των splats, καθώς και της ανεπαρκούς διαβροχής των προσκείμενων επιφανειών. Πρέπει επίσης να προσέχουμε στην προμήθεια της πούδρας, ώστε να είναι ποιοτικά πιστοποιημένη και ελεγχμένη



Σχήμα 3-15: Δημιουργία πορώδους λόγω του φαινομένου σκίασης [27].

και να μην υπάρχει ήδη εγγενές πορώδες που να έχει σχηματιστεί κατά τη διάρκεια παραγωγής της. Το ίδιο ισχύει και για τα σύρματα ψεκασμού. Πολύ σημαντικό ρόλο έχει και η γωνία πρόσπτωσης των σωματιδίων και συνεπώς του όπλου ψεκασμού ως προς το υπόστρωμα. Όσο η γωνία ψεκασμού πλησιάζει τις 90° , δηλαδή το ρεύμα ψεκασμού κάθετο προς το υπόστρωμα, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής,

τόσο ελαχιστοποιείται το πορώδες και αυξάνεται η συνοχή και πυκνότητα της επίστρωσης. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται και το φαινόμενο σκίασης (Σχήμα 2-15). Στην αυστηρότητα τήρησης της γωνίας πρόσπτωσης μας βοηθούν σημαντικά τα πιο εξελιγμένα αυτοματοποιημένα συστήματα ψεκασμού με χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών και ρομποτικών.

Ολοκληρώνοντας μπορούμε να αναφέρουμε το πορώδες ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών του ψεκαζόμενου υλικού (μέθοδος παρασκευής, μέγεθος, μορφολογία), της φλόγας και των παραμέτρων ψεκασμού (αέρια καύσης, θερμοκρασία και ταχύτητα πίδακα, χρόνος παραμονής, γωνία ψεκασμού), τα οποία αν ελεγχθούν σωστά, μπορεί να ελεγχθεί και να περιοριστεί το πορώδες της επίστρωσης [10].

3.8 ΥΛΙΚΑ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

3.8.1 Εισαγωγή

Σε προηγούμενο κεφάλαιο αναφέραμε ως ένα από τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας του θερμικού ψεκασμού το πολύ μεγάλο πλήθος υλικών που μπορούν να επιλεγούν για την εκάστοτε προστασία ή ενίσχυση του υποστρώματος. Προϋποθέτει όμως και τις κατάλληλες γνώσεις και εμπειρία για την επιλογή του σωστού σε κάθε περίπτωση υλικού. Με βάση την μορφή του υλικού ψεκασμού (πούδρες, ράβδοι, σύρμα) μπορεί να γίνει μια πρώτη κατηγοριοποίηση.

Στην περίπτωση που επιλέγουμε ψεκασμό με πούδρα, ενδεικτικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι κεραμικά (π.χ. Al_2O_3 , μολίτης, υδροξυαπατίτης), μεσομεταλλικές ενώσεις (π.χ. NiAl), κεραμο-μεταλλικές ενώσεις (π.χ. WC-Co), σύνθετα υλικά ή μίγματα (π.χ. Al-Si -πολυεστέρας), μέταλλα και κράματά τους (π.χ. Al , Cu , Mo , Ni-Al , Ni-Cr) και πολυμερείς ενώσεις (π.χ. nylon, πολυαμίδια, πολυεστέρες) [10].

Στον θερμικό ψεκασμό με σύρμα, που χρησιμοποιήθηκε και στην πειραματική διαδικασία της παρούσας εργασίας, τα κύρια υλικά ψεκασμού πρέπει να είναι όλκιμα, όπως τα μεταλλικά και τα διάφορα κράματά τους (π.χ. Ni, Al, Zn, Al/Zn, Ni/Cr, Zn/Al/Mg κ.λ.π.). Το κύριο πλεονέκτημα τους σε σχέση με τις πούδρες είναι ο ρυθμός εναπόθεσης [9]. Η διαδικασία εναλλακτικά ονομάζεται και επιμετάλλωση.

Σπουδαίο ρόλο στην ποιότητα των επικαλύψεων έχουν η πούδρα ή το σύρμα που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη, και πρέπει να είναι τα βέλτιστα για την εκάστοτε διαδικασία ψεκασμού. Σε αντίθετη περίπτωση, υλικά από διάφορους κατασκευαστές, με την ίδια ονομαστική χημική σύνθεση, ενδέχεται να επιδεικνύουν διαφορετικές ιδιότητες και λειτουργική απόδοση, ακόμη κι αν έχουν εναποτεθεί με τον ίδιο ακριβώς τρόπο [16, 31]. Επίσης πολύ σημαντικός παράγοντας είναι το περιβάλλον, στο οποίο θα λειτουργεί η επικαλυμμένη επιφάνεια. Κάποια χαρακτηρίζονται από πιο «επιθετική» διάβρωση, όπως είναι οι παραθαλάσσιες περιοχές (λόγω αυξημένης περιεκτικότητας σε NaCl στην ατμόσφαιρα) αλλά και οι πυκνοκατοικημένες πόλεις όπου υπάρχει μεγάλη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα από τους ρύπους αλλά και οι όξινες βροχές που προκαλούνται από αυτούς. Ενώ αντιθέτως σε αγροτικές περιοχές και μακριά από θαλάσσιο περιβάλλον η διάβρωση είναι πιο ήπια και αναπτύσσεται με αργό ρυθμό. Γνωρίζουμε επίσης ότι και το ίδιο υλικό αντιδράει διαφορετικά συναρτήσει του περιβάλλοντος που θα χρησιμοποιηθεί. Ακόμη η τελική επιλογή βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις οικονομικές δυνατότητες που παρέχονται και το κόστος για την εφαρμογή και συντήρηση του εκάστοτε υλικού, καθώς και την ασφάλεια της υγείας του προσωπικού δυναμικού [32].

Με την επιλογή του κατάλληλου υλικού ο μηχανικός καλείται να δώσει την πιο σωστή λύση σε τεχνικο-οικονομικό αλλά και περιβαλλοντικό επίπεδο. Επίσης μειώνει σημαντικά τις δαπάνες για διάφορα μονωτικά υλικά (π.χ. βαφές) αλλά και την ανάγκη για συντήρηση ή αντικατάσταση των κατασκευών. Ακόμη μπορούμε να μειώσουμε και το βάρος της κατασκευής χρησιμοποιώντας μικρότερα πάχη επικαλύψεων ή ελαφρύτερα υλικά. Συνεπώς από όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε τη σημαντικότητα της σωστής απόφασης για τα υλικά επικαλύψεων.

3.8.2 Έρευνα και επιλογή του κατάλληλου υλικού

Το φάσμα των διάφορων ειδών των υλικών προς επικάλυψη συνεχώς μεγαλώνει, και μαζί και ο αριθμός των πιθανών κατάλληλων υλικών για την εκάστοτε χρήση. Σε αυτό το σημείο μας διευκολύνει η συνεχής εξέλιξη και έρευνα στον τομέα της τεχνολογίας των υλικών, παρέχοντάς μας μια μεγάλη εμπειρική βάση δεδομένων με υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές.

Από τα πρώτα κι όλας χρόνια ερευνών, όπως αυτή της American Welding Society (AWS) το 1974 [33], εκείνη των Robert M. Kain και Earl A. Baker που ξεκίνησε το 1987 (για 34 χρόνια) [34], αλλά και αργότερα των S. Kuroda, J. Kawakita, M. Takemoto το 2003 [35], δύο υλικά επέδειξαν εξαιρετική αντοχή και προστασία ενάντια στο φαινόμενο της διάβρωσης ακόμη και υπό δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες, το αλουμίνιο (Al) και ο ψευδάργυρος (Zn), όπως και οι μίξεις μεταξύ τους σε διάφορες περιεκτικότητες. Η βασική ιδέα είναι τα παραπάνω μέταλλα είναι πιο ηλεκτροαρνητικά (ανοδικά) από τον χάλυβα και κατά τη διάβρωση λειτουργούν ως θυσιαστικοί άνοδοι, μετατρέποντας σε κάθοδο το χαλύβδινο υπόστρωμα. Επίσης οι επικαλύψεις αυτές λειτουργούν και ως φυσικό εμπόδιο μη αφήνοντας την διάβρωση να φτάσει στο υπόστρωμα. Αλλά έστω και όταν ξεκινήσει η διαδικασία τα προϊόντα που παράγονται από τις αντιδράσεις σχηματίζουν ένα προστατευτικό φιλμ, που μειώνει σημαντικά ή σε πολλές περιπτώσεις σταματά το φαινόμενο [12, 32].

3.8.3 Επικαλύψεις Αλουμινίου (Aluminum Coatings)

Οι επικαλύψεις αλουμινίου γενικά θεωρούνται εξαιρετικές για προστασία από τη διάβρωση λόγω των ιδιοτήτων τους, όπως το χαμηλό βάρος, η ευκολία στη διαμορφωσιμότητα, η υψηλή αντίσταση στη διάβρωση σε πολλές περιβαλλοντικές συνθήκες, η παραγωγή άχρωμων και μη-επιβλαβών προϊόντων κατά την διαδικασία της διάβρωσης καθώς και η υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Αξίζει να αναφερθεί ένα παράδοξο χαρακτηριστικό του αλουμινίου, το οποίο σε περιβάλλοντα όπως θαλασσόνερο, παραθαλάσσιες και βιομηχανικές περιοχές διαβρώνεται πιο αργά και δύσκολα σε σχέση με τον χάλυβα. Όμως όταν αυτά ενωθούν σαν γαλβανικό ζεύγος (δηλαδή αφού αρχίσει η διάβρωση) στα παραπάνω περιβάλλοντα, το αλουμίνιο είναι το υλικό που θα ξεκινήσει να διαβρώνεται πρώτο προστατεύοντας τον χάλυβα.

Η σύζευξη αυτή όμως είναι λίγο πιο περίπλοκη και μπορεί να παρουσιάσει διαφορετική συμπεριφορά σε άλλο περιβάλλον, και ως συνέπεια το αλουμίνιο να λειτουργεί άλλοτε ανοδικά και άλλοτε καθοδικά. Στους πόρους του θερμικά ψεκασμένου αλουμινίου πάνω σε χάλυβα μπορούμε να δούμε τρία διαφορετικά φαινόμενα να συμβαίνουν:

- Η επικάλυψη να λειτουργεί ως κάθοδος λόγω του οξειδίου, αποτρέποντας την αγωγιμότητα των ιόντων, αλλά επιτρέποντας σε ένα βαθμό την αγωγιμότητα των ηλεκτρονίων.
- Λόγω του αυξημένου pH στην κάθοδο, η διαλυτότητα του οξειδίου του αργιλίου αυξάνεται, επομένως το μεταλλικό αλουμίνιο εκτίθεται στο διάλυμα και η επικάλυψη ως λιγότερο ευγενές μέταλλο από τον χάλυβα, αρχίζει να λειτουργεί σαν άνοδος.
- Τα προϊόντα της διάβρωσης του αλουμινίου σταδιακά μπλοκάρουν τους πόρους της επικάλυψης, το γαλβανικό στοιχείο γίνεται αναποτελεσματικό και επέρχεται σταθερότητα και ισορροπία στην επικάλυψη [12, 32].

3.8.4 Επικαλύψεις Ψευδάργυρου (Zinc Coatings)

Οι επικαλύψεις ψευδαργύρου ίσως είναι και οι σημαντικότερες στην προστασία του χάλυβα από το φαινόμενο της διάβρωσης. Σχεδόν η μισή από την παγκόσμια παραγωγή ψευδαργύρου καταναλώνεται για τον σκοπό αυτό. Μερικοί από τους λόγους της τόσο διευρυμένης εφαρμογής είναι το σχετικά χαμηλό κόστος, ο τεράστιος όγκος αποθεμάτων και η άφθονη προσφορά, η μεγάλη ευελιξία κατά την διαδικασία εφαρμογής παρέχοντας διάφορες ποιότητες και ελεγχόμενο πάχος στρώσης. Επίσης η παροχή πολύ καλής ποιότητας καθοδικής

προστασίας και τα πολλά ειδικά κράματα που έχουν αναπτυχθεί προσφέρουν ακόμη πιο βελτιωμένη προστασία από την διάβρωση.

Η διάβρωση της επικάλυψης του ψευδάργυρου μπορεί να θεωρηθεί σαν μια ανάλογη σχέση μεταξύ χρόνου και απώλειας μάζας και γενικά οι επικαλύψεις αυτές έχουν καλή αντοχή στους διάφορους ρύπους της ατμόσφαιρας. Κάποια σημεία που πρέπει να προσεχθούν είναι η επιδείνωση της διάβρωσης, όσο περισσότερος είναι ο χρόνος έκθεσης σε υγρό περιβάλλον, και ότι ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται όταν υπάρχει αύξηση της ποσότητας θεικών ενώσεων στην ατμόσφαιρα. Τα χλωρίδια και τα οξείδια του αζώτου έχουν μικρότερη επίδραση, αλλά σε συνδυασμό με θειικά άλατα μπορούν να γίνουν επιβλαβή.

Η επικάλυψη αντιστέκεται στη διάβρωση σχηματίζοντας προστατευτικό φιλμ αποτελούμενο από βασικά άλατα, κυρίως ανθρακικά. Εδώ πολύ σημαντικός είναι ο χρόνος έκθεσης στο υγρό στοιχείο, καθώς η παραμονή υγρού πάνω στην επικάλυψη μπορεί να επιδεινώσει πολύ την διάβρωση (σχηματισμός «λευκής» σκουριάς) διότι αποτρέπει τον σχηματισμό του προστατευτικού φιλμ.

3.8.5 Επικαλύψεις Ψευδαργύρου-Αλουμινίου (Zn-Al Coatings)

Μελετώντας αναλυτικότερα τις επικαλύψεις ψευδαργύρου και αλουμινίου ξεχωριστά παρατηρούμε τα θετικά και τα αρνητικά τις κάθε μεθόδου για τις διάφορες συνθήκες και περιβάλλοντα λειτουργίας. Όπως για παράδειγμα το αλουμίνιο να υπερτερεί σε βιομηχανικές περιοχές και σε μαλακά νερά (φτωχά σε αμινοξέα) και αποδεικνύεται μακροβιότερη επικάλυψη έως και σε τριπλάσιο βαθμό, ενώ ο ψευδάργυρος αποδίδει καλύτερα σε πιο σκληρά νερά και αλκαλικά διαλύματα. Σε θαλάσσιες περιοχές και αλατόνερα φαίνεται το αλουμίνιο να έχει πλεονέκτημα, όμως με μεγάλο κόστος. Ο ψευδάργυρος έχει πολύ μικρότερο κόστος και περισσότερες εφαρμογές [32].

Συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των δύο υλικών, δεν άργησε να έρθει η ιδέα να χρησιμοποιηθούν μαζί ως μία επικάλυψη ώστε να εκμεταλλευτούμε στο βέλτιστο τις θετικές

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής,

ιδιότητες τους. Έρευνες όπως εκείνη των Z. Panossian, L. Mariaca, M. Morcillo το 2005 (για 3,5 χρόνια σε διάφορα ατμοσφαιρικά περιβάλλοντα) έδειξαν την εξαιρετική συμπεριφορά των मिγμάτων Zn/5Al και Zn/15Al και την δυνατότητα που έχουν να παρέχουν καθοδική προστασία σε χαλύβδινες επιφάνειες σε κάθε είδους ατμόσφαιρα [36]. Συνεχίζοντας το 2007 ο M. Butefuhr μελέτησε τις διάφορες περιεκτικότητες των मिγμάτων σε αλουμίνιο καταλήγοντας πως το ποσοστό 15-22% Al αποφέρει τα βέλτιστα αποτελέσματα στην προστασία από διάβρωση στις περισσότερες εφαρμογές της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού. Η βελτιωμένη αυτή απόδοση οφείλεται στην επιλεκτική διάβρωση της πλούσιας σε ψευδάργυρο φάσης σε συνδυασμό με τον σχηματισμό προστατευτικού φιλμ από υδροξείδια του αργιλίου [37]. Πολύ σημαντικά ευρήματα παρουσίασαν το 2011 οι Ahmet Gulec, Ozgur Cevher, Ahmet Turk, Fatih Ustel, Fevzi Yilmaz στην έρευνά τους πάνω στην συμπεριφορά των Al, Zn και Zn/Al επικαλύψεων σε επιταχυνόμενη διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης και σε ατμόσφαιρες υψηλές σε χλωριούχα στοιχεία. Επιβεβαίωσαν την μεγαλύτερη αντίσταση στην διάβρωση της μίξης Zn/15Al σε σχέση με τα δύο υλικά ξεχωριστά σε γενικό επίπεδο, αλλά και την ανωτερότητά της σε χλωριούχο περιβάλλον σε αντίθεση με τον ψευδάργυρο μόνο του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η επικάλυψη Zn/15Al προσφέρει δύο μηχανισμούς προστασίας ταυτόχρονα, χάρη στον ψευδάργυρο που λειτουργεί ως θυσιαστική άνοδος και το αλουμίνιο που δημιουργεί ένα σταθερό φιλμ οξειδίων τα οποία εμποδίζουν την διάχυση του οξυγόνου στην χαλύβδινη επιφάνεια (barrier effect) [38]. Ακόμη οι Kirsten Bobzin, Mehmet Öte, Martin Andreas Knoch στη μελέτη τους επιβεβαίωσαν την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της Zn/15Al επίστρωσης, σε σχέση με εκείνη του ψευδάργυρου, καθώς και την καλή αντοχή της στη δημιουργία και διάδοση ρωγμών [39].

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω είναι φανερά τα οφέλη των επικαλύψεων Zn/Al15 και για αυτό επιλέχθηκε στην παρούσα έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

4.1 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας μελετήθηκε η μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος κατηγορίας B500c, διατομής Φ10 και συνολικού μήκους 200 mm, η υποβάθμιση του λόγω του φαινομένου της διάβρωσης και η αποτελεσματικότητα-βελτίωση της αντιδιαβρωτικής προστασίας μέσω εφαρμογής επικάλυψης ψευδαργύρου/αλουμινίου (Zn/Al15) με σύστημα wire flame. Για τον σκοπό αυτόν κατασκευάστηκαν τριών ειδών δοκίμια:

- α). δοκίμια χωρίς επικάλυψη
- β). δοκίμια με πλήρη επικάλυψη
- γ). δοκίμια με μερική επικάλυψη

Τα παραπάνω δοκίμια κερώθηκαν στα άκρα (5 cm σε κάθε άκρο) για την αποφυγή φαινομένων τοπικής διάβρωσης και για να μην αστοχήσουν μέσα στις αρπάγες της μηχανής κόπωσης. Ύστερα τοποθετήθηκαν σε καμπίνα επιταχυνόμενης διάβρωσης (θάλαμος αλατονέφωσης) για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (60, 90 και 120 ημέρες). Στη συνέχεια, αφού καθαρίστηκαν λεπτομερώς, μετρήθηκε η απώλεια μάζας λόγω διάβρωσης και ακολούθησαν οι δοκιμές κόπωσης.

Για την εγκυρότητα των πειραμάτων και την ομαλή λειτουργία των μηχανών ακολουθήθηκαν οι συγκεκριμένες διεθνείς προδιαγραφές. Ολόκληρη η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Αντοχής Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

Ακολουθεί η λεπτομερής καταγραφή του τρόπου εκτέλεσης του κάθε σταδίου της πειραματικής διαδικασίας.

4.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της εργασίας παρασκευάστηκαν από την τμήση χαλύβδινων ράβδων κατηγορίας B500c, διατομής $\Phi 10$ και συνολικού μήκους 200 mm, από τα Ελληνικά Χυτήρια Θεσσαλίας (Ε.Χ.Θ.). Ο συνολικός αριθμός των δοκιμίων ήταν 34. Μετά την διαδικασία κοπής ακολούθησε η αρίθμηση και σήμανση (ποντάρισμα) στην άκρη κάθε ράβδου. Στη συνέχεια οι ράβδοι ζυγίστηκαν σε ζυγαριά ακριβείας 2 δεκαδικών του γραμμαρίου και μετρήθηκε το ακριβές μήκος της καθεμίας.



Εικόνα 4-1: α) Διαδικασία κοπής και β) πονταρίσματος των δοκιμίων.

Πίνακας 4-1: Μάζες και μήκη δοκιμίων χωρίς επικάλυψη.

Δοκίμια χάλυβα χωρίς επικάλυψη		
Αρίθμηση δοκιμίου	Μάζα δοκιμίου (gr)	Μήκος δοκιμίου (cm)
1	123,11	19,80
2	123,05	20,80
3	123,88	19,80
4	122,93	20,20
5	121,86	19,70
6	126,26	20,10
7	123,08	20,00
8	118,92	19,60
9	125,28	19,90
10	120,53	19,90
11	123,80	19,90
12	122,30	20,00
13	124,83	19,80
14	120,90	19,80
15	124,29	19,90
16	125,79	19,90

Πίνακας 4-2: Μάζες και μήκη δοκιμίων με πλήρη επικάλυψη.

Πλήρως επικαλυμμένα δοκίμια χάλυβα		
Αρίθμηση δοκιμίου	Μάζα δοκιμίου (gr)	Μήκος δοκιμίου (cm)
1	123,81	20,50
2	122,40	18,75
3	122,57	19,75
4	121,17	18,00
5	122,70	19,50
6	121,50	19,00
7	126,03	20,75
8	124,12	20,25
9	123,86	18,00

Πίνακας 4-3: Μάζες και μήκη δοκιμίων με μερική επικάλυψη.

Μερικώς επικαλυμμένα δοκίμια χάλυβα		
Αρίθμηση δοκιμίου	Μάζα δοκιμίου (gr)	Μήκος δοκιμίου (cm)
10	124,72	20,00
11	124,63	18,75
12	123,27	22,00
13	122,13	20,00
14	121,52	17,00
15	121,41	17,75
16	124,57	19,00
17	124,03	18,50
18	125,06	18,00

4.3 ΣΤΑΔΙΟ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ

Αφού ολοκληρώθηκε η προετοιμασία των δοκιμίων, εστάλησαν για να γίνει η διαδικασία της επικάλυψης με το σύστημα wire flame στην βιομηχανία ΠΥΡΟΓΕΝΕΣΙΣ Α.Ε.. Τα δοκίμια προτού επικαλυφθούν περνούν από την διαδικασία της αμμοβολής.

Η αμμοβολή είναι μια μέθοδος καθαρισμού και δημιουργίας θλιπτικών τάσεων στην επιφάνεια μεταλλικών επιφανειών, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της βίαιης προώθησης ρεύματος μικρών σωματιδίων από σκληρυμένο υλικό σε υψηλές ταχύτητες επί της επιφάνειας, χωρίς να γίνεται παρέμβαση στη χημική σύσταση . Ως αποτέλεσμα της σύγκρουσης των σωματιδίων στην επιφάνεια δημιουργούνται εσοχές που περιβάλλονται από πλαστικές ζώνες, τις οποίες ακολουθούν οι ελαστικές. Έτσι μετά την αναπήδηση του σωματιδίου, κατά την αποκατάσταση της ελαστικής ζώνης δημιουργούνται μεγάλες παραμένουσες θλιπτικές τάσεις στην επιφάνεια. Η στρώση αυτή των παραμενουσών θλιπτικών τάσεων καθυστερεί κατά πολύ την δημιουργία και διάδοση ρωγμών, που συνήθως ξεκινά από την επιφάνεια των μετάλλων και γίνεται η κύρια αιτία που επιταχύνει την αστοχία του υλικού [43]. Επίσης λόγω του καθαρισμού με αμμοβολή

επιτυγχάνεται καλύτερη και αποτελεσματικότερη προσκόλληση του υλικού επικάλυψης πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα.

Το αποτέλεσμα και η επιτυχία της μεθόδου εξαρτάται από παράγοντες του ρεύματος των σωματιδίων, όπως είναι το μέγεθος και το σχήμα τους, η ταχύτητα εκτόξευσης, η σκληρότητα και το είδος του υλικού, αλλά και από χαρακτηριστικά της προσπίπτουσας επιφάνειας (σκληρότητα, αντοχή), καθώς και άλλους παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η χρονική διάρκεια της διαδικασίας.

Η επιλογή του επιπέδου της επιφανειακής καθαρότητας και του βάθους των θλιπτικών παραμορφώσεων, σε σχέση με την αρχική εξωτερική επιφάνεια, γίνεται σύμφωνα με τα οπτικά πρότυπα αξιολόγησης του βαθμού καθαρότητας του NACE/SSPC (National Association of Corrosion Engineer; Steel Structures Painting Council) καθώς και του ISO 8501-1 (2007) [44] , όπως παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 4-4: Οπτικά πρότυπα ψηγματοβολής κατά ISO 8501-1 και SSPC-SP.

Description	International ISO 8501-1	American SSPC-SP
White metal	Sa 3	SSPC SP5
Nearly white metal	Sa 2.5	SSPC SP10
Commercial blast	Sa 2	SSPC SP6
Brush-off blast	Sa 1	SSPC SP7

Στην παρούσα έρευνα επιλέχτηκε βαθμός καθαρότητας Sa 2 κατά ISO 8501-1 και ως αποξεστικό μέσο χρησιμοποιήθηκε το κορούνδιο (corundum), που είναι ορυκτό οξείδιο του αργιλίου και το δεύτερο σε σκληρότητα υλικό που ανευρίσκεται στη φύση, μετά το διαμάντι. Συνεπώς τα σωματίδια είναι πολύ αιχμηρά και σκληρά και πραγματοποιούν έναν πολύ αποτελεσματικό καθαρισμό. Τα δοκίμια μετά τον καθαρισμό, λόγω του σχήματος των σωματιδίων, αποκτούν μια ματ τραχιά επιφάνεια, ώστε να ακολουθήσει η επικάλυψη με θερμικό ψεκασμό.

Πίνακας 4-5: Ιδιότητες και χαρακτηριστικά του κορούνδιου.

Σχήμα	Γωνιώδες
Χρώμα	Γκρι/Καφέ
Σκληρότητα (Mohs)	9.0
Ειδική Πυκνότητα (kg/dm³)	3.9
Φαινόμενο βάρος (kg/dm³)	1.8
Μέγεθος Σωματιδίων (mm)	0.053-2

Για την μέθοδο αμμοβολής με κορούνδιο η γωνία πρόσκρουσης των σωματιδίων ήταν 90°, ο ρυθμός ροής 1.5-2 sec/μονάδα επιφάνειας και απόσταση από τα δοκίμια 15 εκατοστά.

Στη συνέχεια τα δοκίμια επικαλύφθηκαν με τη μέθοδο θερμικού ψεκασμού σύρματος με φλόγα (Κεφάλαιο 3) με μίγμα Zn/15Al πάχους 100 μm, πλήρως και μερικώς, κατά ομάδες των 9. Για την μερική επικάλυψη χρησιμοποιήθηκαν ειδικά καλούπια, που κατασκευάστηκαν στο μηχανουργείο του εργαστηρίου.

**Εικόνα 4-2:** Τα καλούπια που χρησιμοποιήθηκαν στην μερική επικάλυψη δοκιμίων.

4.4 ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΕ ΘΑΛΑΜΟ ΑΛΑΤΟΝΕΦΩΣΗΣ

Μια από τις πιο διαδεδομένες εργαστηριακές μεθόδους προσομοίωσης των παράκτιων περιβαλλοντικών συνθηκών, εδώ και περισσότερο από 80 χρόνια, είναι η επιταχυνόμενη διάβρωση αλατονέφωσης [42].



Εικόνα 4-3: Η διάταξη επιταχυνόμενης διάβρωσης αλατονέφωσης του εργαστηρίου.

Έτσι μετά την ολοκλήρωση του σταδίου της επικάλυψης τα δοκίμια εισήχθησαν σε ειδικό θάλαμο αλατονέφωσης ώστε να υποβληθούν σε τεχνητή επιταχυνόμενη διάβρωση, μέσω νέφους αλατόνευρου και σύμφωνα με την προδιαγραφή B117 της ASTM [40]. Η διάταξη αποτελείται από δύο θαλάμους και έναν πίνακα ελέγχου. Στον έναν θάλαμο, χωρητικότητας 100 λίτρων, τοποθετείται το διάλυμα χλωριούχου νατρίου (NaCl) περιεκτικότητας 5% κατά μάζα με διαλύτη το απιονισμένο νερό και ψεκάζεται στον δεύτερο θάλαμο, όπου βρίσκονται οι προς διάβρωση ράβδοι υπό γωνία 15° - 30° από τον κατακόρυφο άξονα, με σταθερή θερμοκρασία $35 \pm 1.1 - 1.7^{\circ}\text{C}$. Η δημιουργία του νέφους γίνεται με βαλβίδες σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση (10 – 25 psi). Το pH του παραγόμενου νέφους μετά την υγραποίηση και σε θερμοκρασία δωματίου (25°C) πρέπει να έχει τιμές 6.5-7.2 και ρυθμίζεται με μικρές ποσότητες νιτρικού οξέος. Αναλυτικότερα η τροφοδοσία και εκνέφωση του διαβρωτικού μέσου γίνεται με κατάλληλο

ακροφύσιο τοποθετημένο μέσα στον θάλαμο των δοκιμίων μαζί με υγρό αέρα που προέρχεται από τον υγραποιητή (humidifier). Στον υγραποιητή παρέχεται ρεύμα αέρα υπό πίεση από εξωτερικό αερο-συμπιεστή. Διερχόμενο μέσα από μια στήλη νερού ορισμένης θερμοκρασίας, το ρεύμα αυτό θερμαίνεται και καθίσταται κορεσμένο σε υγρασία. Ο υγρός αέρας μαζί με το διαβρωτικό μέσο αναμιγνύονται στο ακροφύσιο, με αποτέλεσμα να παράγεται το ζητούμενο



Εικόνα 4-4: Το εσωτερικό του θαλάμου αλατονέφωσης με τα δοκίμια.

νέφος στον θάλαμο των δοκιμίων. Η θερμοκρασία του ρυθμίζεται από την θερμοκρασία του

υγρού αέρα που παράγει ο υγραποιητής [41]. Αυτή είναι και η πρώτη λειτουργία του θαλάμου και διαρκεί 1 ώρα και 30 λεπτά. Στη δεύτερη λειτουργία πραγματοποιείται ψεκασμός μόνο με ξηρό αέρα σε θερμοκρασία 49° C και διαρκεί και εκείνη το ίδιο χρονικό διάστημα. Οι δύο λειτουργίες (στεγνή και υγρή) εναλλάσσονται συνεχώς πραγματοποιώντας 8 κύκλους ανά 24ωρο. Αυτό βοηθάει στο να στεγνώνουν οι διαβρωτικοί παράγοντες από την επιφάνεια των ράβδων ώστε το επόμενο μίγμα να έχει ισχυρότερη δράση.

Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέχθηκε για την παρούσα εργασία, διότι ο χρόνος που είναι αναγκαίος για την επίτευξη της επιθυμητής βλάβης είναι αρκετά σύντομος. Επίσης ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η πολύ προσιτή τιμή της πρώτης ύλης του διαβρωτικού μέσου καθώς και η ευκολία στον χειρισμό και την χρήση του θαλάμου. Τέλος μας δίνει τη δυνατότητα για έκθεση στο διαβρωτικό μέσω πολλών δοκιμίων μαζί [6]. Οι χρόνοι παραμονής των δοκιμίων στον

θάλαμο ορίστηκαν σε 60, 90 και 120 ημέρες, ώστε να υπάρχει αρκετά μεγάλη ποικιλία επιπέδων διάβρωσης των δοκιμίων και παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4-6: Χρόνοι παραμονής των δοκιμίων στον θάλαμο αλατονέφωσης.

Χρόνος διάβρωσης σε ημέρες	Χωρίς επικάλυψη δοκίμια	Πλήρως επικαλυμμένα δοκίμια	Μερικώς επικαλυμμένα δοκίμια
0	4	3	3
60	4	3	3
90	4	3	3
120	4	-	-
Σύνολο:	16	9	9

4.5 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Εφόσον ολοκληρώθηκε το στάδιο της επιταχυνόμενης διάβρωσης για την κάθε ομάδα δοκιμίων είναι αναγκαίο να καθαριστούν λεπτομερώς. Αρχικά αφαιρέθηκε, με φλόγιστρο, το κερί από τα άκρα των ράβδων. Στη συνέχεια ακολούθησε καθαρισμός με συρματοβούρτσα και εμβάπτιση σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος ανά μισή ώρα έως ότου να σταθεροποιηθεί η μάζα στο δέκατο του γραμμαρίου στη ζυγαριά ακριβείας. Είναι σημαντικό να γίνει σωστός καθαρισμός, ώστε να έχουμε την καλύτερη δυνατή ακρίβεια στον υπολογισμό της απώλειας μάζας, να είναι ευδιάκριτη η φθορά των δοκιμίων λόγω διάβρωσης και να μην υπάρχει ολίσθηση των ράβδων στις αρπάγες της μηχανής κόπωσης διασφαλίζοντας την εγκυρότητα του πειράματος. Να σημειωθεί ότι η σκληρότητα των μεταλλικών ινών της βούρτσας ήταν μικρότερη από αυτήν του μαρτενσίτη στην επιφάνεια του χάλυβα, αποκλείοντας το ενδεχόμενο αλλοίωσης της επιφάνειας του χάλυβα και επιπλέον αφαίρεσης μάζας από αυτόν.



Εικόνα 4-5: α) Η ζυγαριά και β) η βούρτσα που χρησιμοποιήθηκαν για το ζύγισμα και τον καθαρισμό των δοκιμίων.

Ο καθαρισμός των δοκιμίων έγινε υπό τις οδηγίες του Κανονισμού Τεχνολογίας Χαλύβων (Κ.Τ.Χ.) 2008 παράγραφο 10.1 έως 10.4 για την διάβρωση και τα προϊόντα της, βάσει του οποίου: «Το κάθε δοκίμιο ζυγίζεται αρχικά με ακρίβεια 0,01 gr. Στη συνέχεια εμβαπτίζεται σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος (υδατικό διάλυμα 12 gr υδροχλωρικού οξέος σε 100 ml υδατικού διαλύματος) και εξαμεθυλενοτετραμίνης (διάλυμα 0,35 gr εξαμεθυλενοτετραμίνης σε 100 ml διαλύματος). Το δοκίμιο ζυγίζεται κάθε 30 λεπτά μέχρι την σταθεροποίηση της μάζας του.»

Συνοπτικά τα βήματα με τη σειρά που ακολούθησε το στάδιο καθαρισμού είναι:

- 1). Εξαγωγή των δοκιμίων από τον θάλαμο αλατονέφωσης σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (60, 90 και 120 μέρες).
- 2). Αφαίρεση κεριού από τα άκρα με φλόγιστρο.
- 3). Πρώτος καθαρισμός με συρματόβουρτσα για την αφαίρεση των περισσότερων προϊόντων διάβρωσης.
- 4). Παρασκευή διαλύματος περιεκτικότητας 12% υδροχλωρικού οξέος και 0,35% εξαμεθυλενοτετραμίνης (ουροτροπίνης).

- 5). Εισαγωγή των δοκιμίων στο παραπάνω διάλυμα και ζύγισμά τους κάθε 30 λεπτά, έως ότου η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων να είναι μικρότερη του 0,02 gr.
- 6). Ξέπλυμα των ράβδων και καθαρισμός με συρματόβουρτσα.
- 7). Ζύγισμα των δοκιμίων για την εύρεση της τελικής τους μάζας.
- 8). Υπολογισμός της απώλειας μάζας από τον τύπο:

$$AM\% = \frac{\text{Αρχική μάζα} - \text{Τελική μάζα}}{\text{Αρχική μάζα}} * 100\%$$



Εικόνα 4-6: Πλήρως και μερικώς επικαλυμμένες, διαβρωμένες ράβδοι πριν καθαριστούν με τη βούρτσα.



Εικόνα 4-7: Οι ράβδοι μετά τον καθαρισμό με τη βούρτσα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μια πρώτη εκτίμηση της φθοράς από το διαβρωτικό περιβάλλον είναι η απώλεια μάζας σε κάθε δοκίμιο, η οποία υπολογίζεται με τύπο που αναφέρθηκε προηγουμένως. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 5-1: Απώλειες μάζας δοκιμίων χωρίς επικάλυψη.

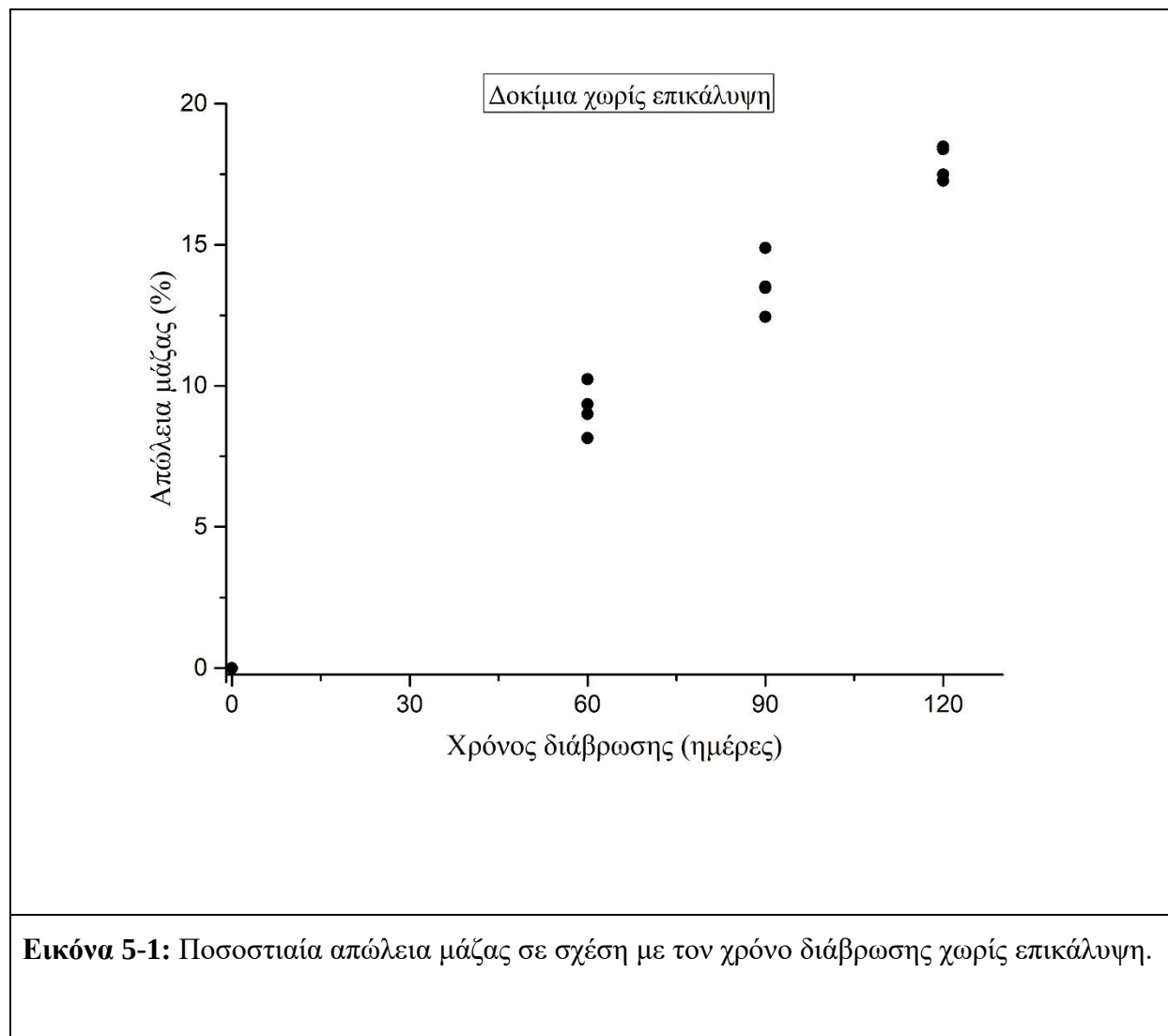
A/A	Χρόνος Διάβρωσης (Ημέρες)	Συνολικό Μήκος (cm)	Αρχική Μάζα (gr)	Τελική Μάζα (gr)	Ποσοστιαία Απώλεια Μάζας (%)	M.O. Απώλεια Μάζας
1	0	19,80	123,11	123,11	0,000	0
2	0	20,10	123,05	123,05	0,000	
3	0	19,80	123,88	123,88	0,000	
4	0	20,20	122,93	122,93	0,000	
5	60	19,70	121,86	116,29	9,005	9,184
6	60	20,10	126,26	121,14	8,151	
7	60	20,00	123,08	116,78	10,237	
8	60	19,60	118,92	113,25	9,345	
9	90	19,90	125,28	115,91	14,884	13,582
10	90	19,90	120,53	112,99	12,449	
11	90	19,90	123,80	115,39	13,518	
12	90	20,00	122,30	114,06	13,475	
13	120	19,80	124,83	113,94	17,273	17,907
14	120	19,80	120,90	109,67	18,392	
15	120	19,90	124,29	113,37	17,484	
16	120	19,90	125,79	114,11	18,478	

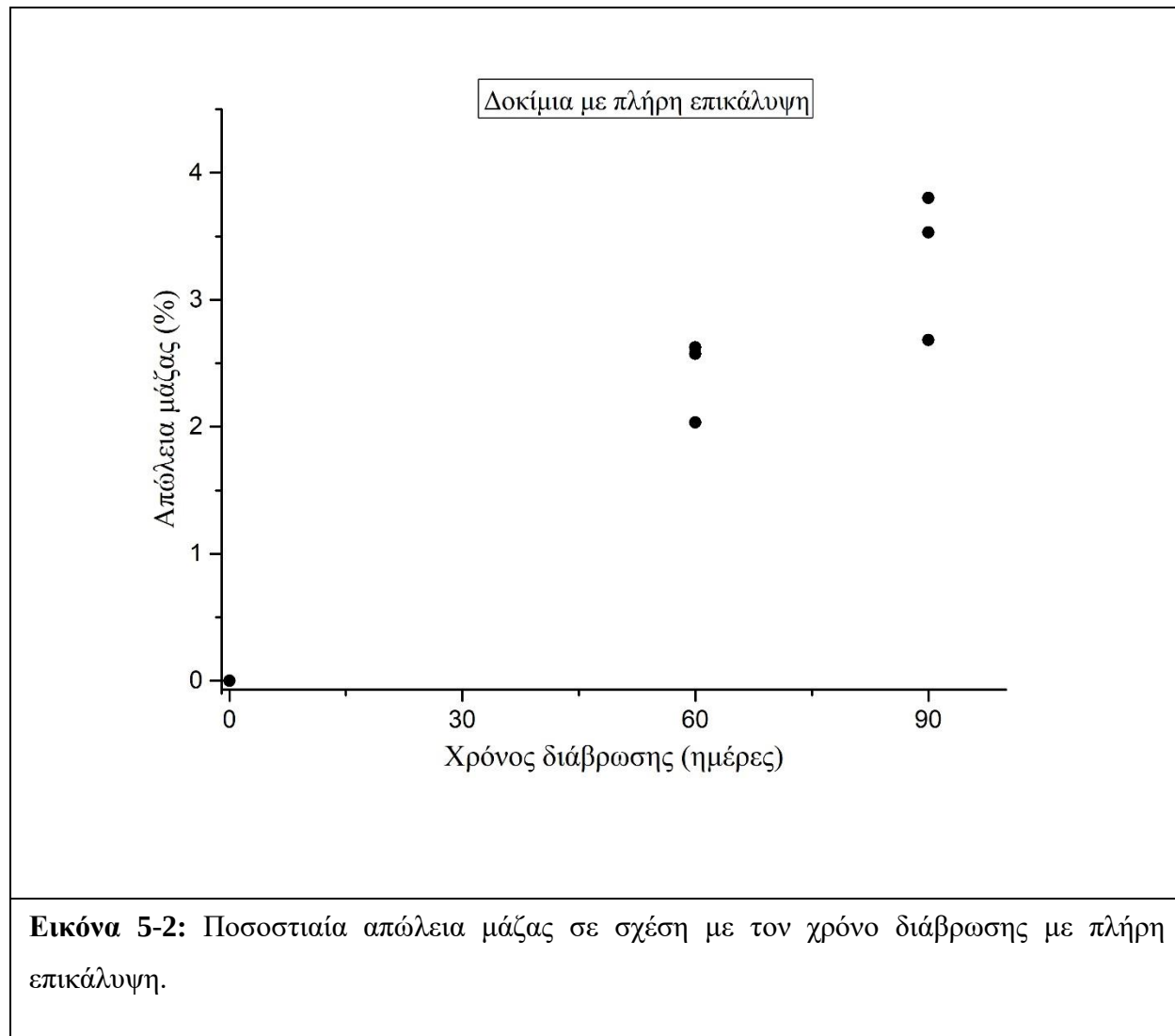
Πίνακας 5-2: Απώλειες μάζας δοκιμίων με πλήρη επικάλυψη.

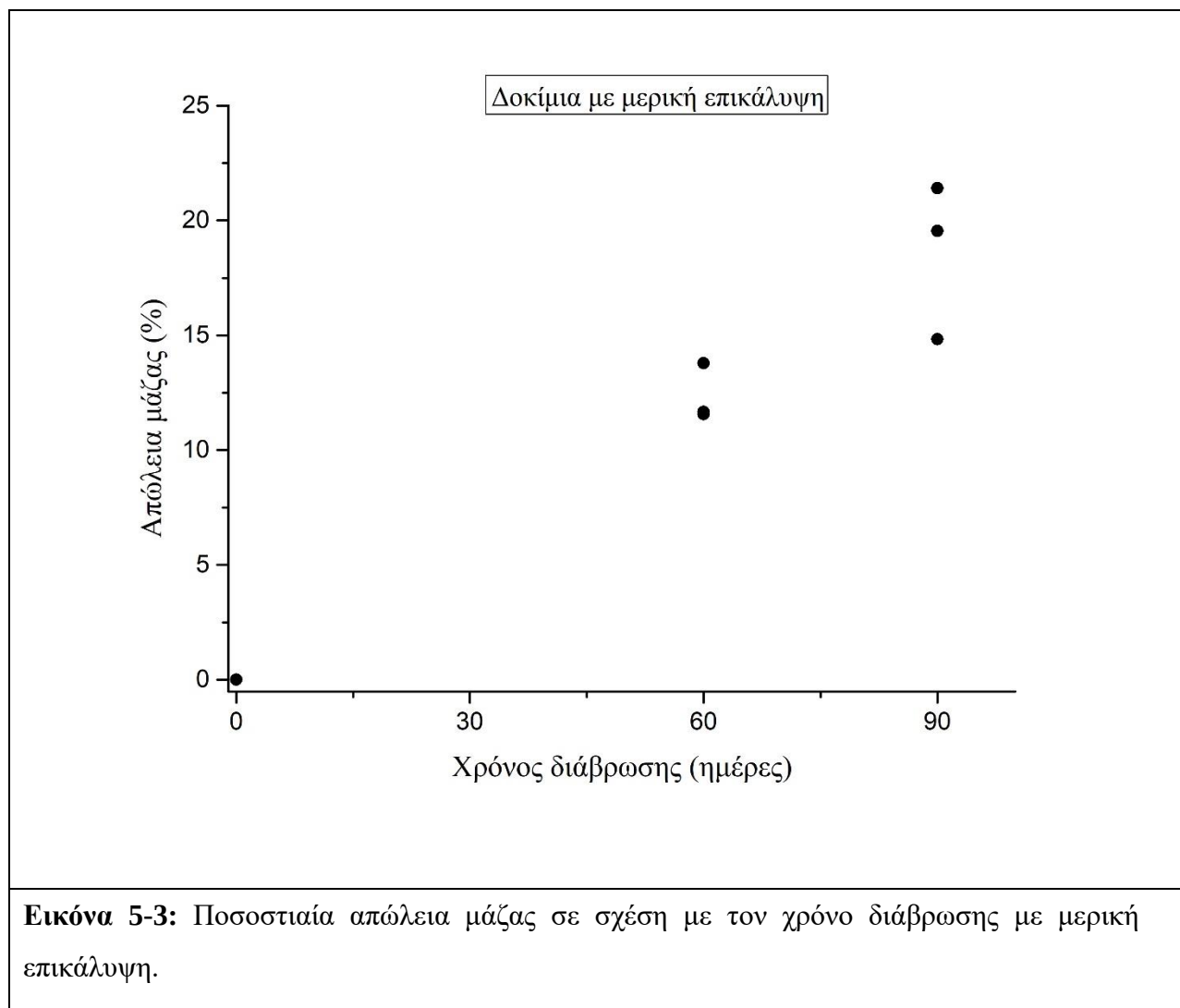
A/A	Χρόνος Διάβρωσης (Ημέρες)	Συνολικό Μήκος (cm)	Αρχική Μάζα (gr) Before Coating	Αρχική Μάζα (gr) After Coating	Τελική Μάζα (gr)	Ποσοστιαία Απώλεια Μάζας (%)	M.O. Απώλεια Μάζας
1	0	20,50	123,81	126,25	126,25	0	0
2	0	18,75	122,40	124,66	124,66	0	
3	0	19,75	122,57	124,00	124,00	0	
4	60	18,00	121,17	123,23	119,80	2,035	2,412
5	60	19,50	122,70	123,54	121,08	2,575	
6	60	19,00	121,50	123,09	119,82	2,627	
7	90	20,75	126,03	128,32	124,40	2,684	3,339
8	90	20,25	124,12	126,28	121,79	3,801	
9	90	18,00	123,86	127,22	121,43	3,531	

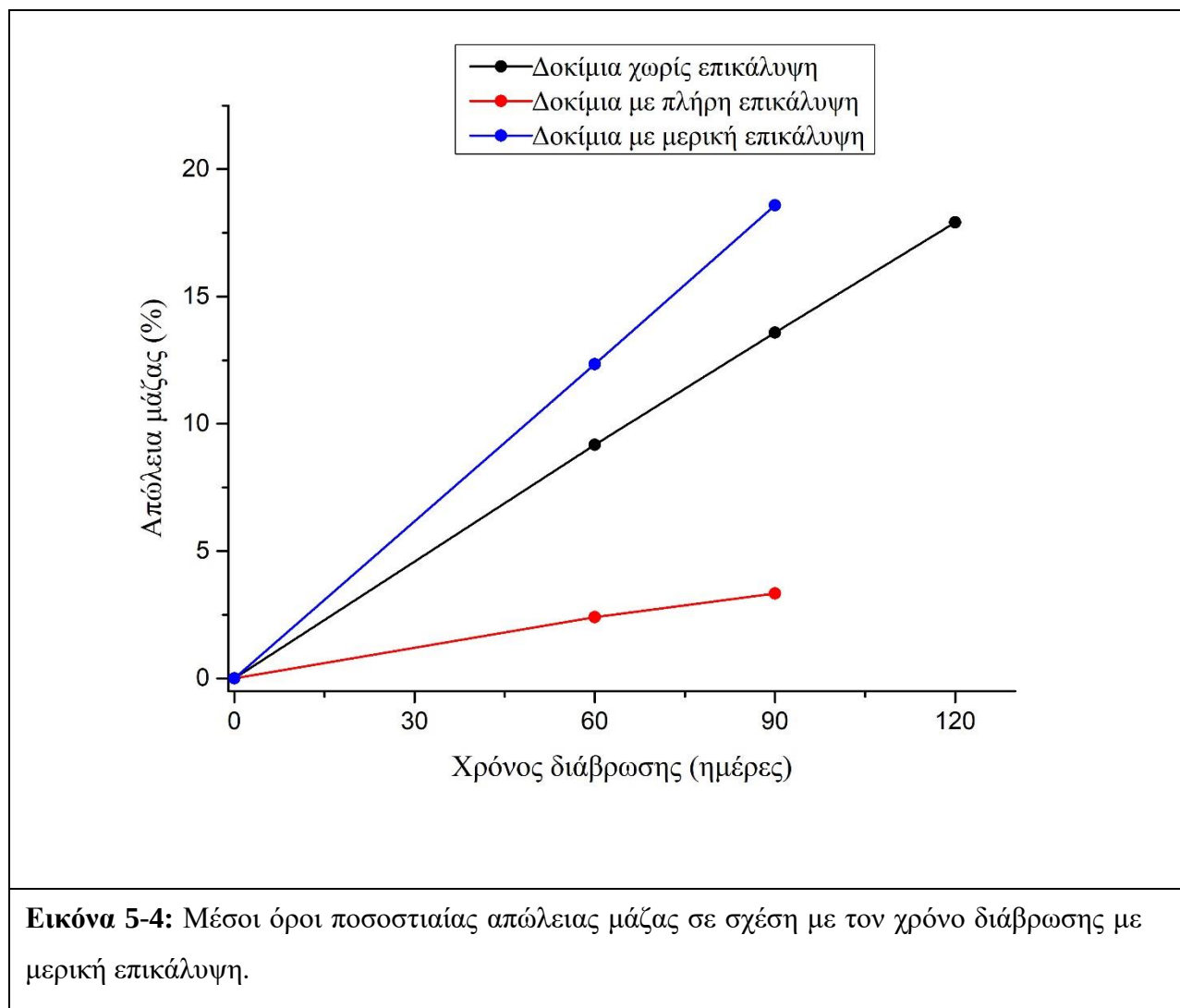
Πίνακας 5-3: Απώλειες μάζας δοκιμίων με μερική επικάλυψη.

A/A	Χρόνος Διάβρωσης (Ημέρες)	Συνολικό Μήκος (cm)	Αρχική Μάζα (gr) Before Coating	Αρχική Μάζα (gr) After Coating	Τελική Μάζα (gr)	Ποσοστιαία Απώλεια Μάζας (%)	M.O. Απώλεια Μάζας
10	0	20,00	124,72	124,43	124,72	0,000	0
11	0	18,75	124,63	124,23	124,63	0,000	
12	0	22,00	123,27	123,02	123,27	0,000	
13	60	20,00	122,13	121,87	113,71	13,789	12,342
14	60	17,00	121,52	121,35	113,25	11,569	
15	60	17,75	121,41	121,22	113,43	11,667	
16	90	19,00	124,57	124,19	110,54	21,399	18,590
17	90	18,50	124,03	123,69	114,09	14,826	
18	90	18,00	125,06	124,72	111,48	19,546	









ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Συνοψίζοντας όλα τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας έρευνας προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η πλήρης επικάλυψη των ράβδων με $Al^{15}Zn^{85}$ προστατεύει επαρκώς το χάλυβα έναντι της διάβρωσης, ενώ στην περίπτωση των μερικώς επικαλυμμένων δοκιμίων καταγράφηκε μεγαλύτερη απώλεια μάζας σε σχέση με τα γυμνά αναφοράς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Damage Parameters of Reebars in Marine Environment and Fatigue Life, **Charis Alk. Apostolopoulos, Konstantinos F. Koulouris and Maria A. Basdeki** , International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS 2019) Durability, Monitoring and Repair of Structures 20-22 March 2019 – Rovinj, Croatia
- [2]. Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών, **Σπύρος Γ. Παντελάκης, Κωνσταντίνος Ι. Τσερπές** .
- [3]. Ανθεκτικότητα Οπλισμένου Σκυροδέματος, **Θ. Π. Τάσιος, Κ. Αλιγιζάκη** , Αθήνα, 1993
- [4]. Corrosion Effect on Bond Loss between Steel and Concrete, **Charis Apostolopoulos and Konstantinos Koulouris**, November 10th 2020, DOI: 10.5772/intechopen.94166 © 2020 The Author(s). Licensee IntechOpen.
- [5]. Η Διάβρωση του Χάλυβα στο Σκυρόδεμα - Πρόληψη - Έλεγχοι και Επεμβάσεις σε υφιστάμενες κατασκευές - Τρωτότητα των Ενιχύσεων, **Τσώνη Νικολέττα**, Φοιτητικό Συνέδριο Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα 2010
- [6]. Corrosion of exposed rebars, associated mechanical degradation and correlation with accelerated corrosion tests, **M.P. Papadopoulos , C.A. Apostolopoulos, A.D. Zervaki, G.N. Haidemenopoulos**, Construction and Building Materials 25 (2011) 3367-3374.
- [7]. Διάβρωση Χάλυβα Οπλισμένου Σκυροδέματος και Τρόποι Αποκατάστασης, **Δημάδη Κωνσταντίνα, Κάτσεινου Γεωργία**.
- [8]. Advances in Corrosion-Resistant Thermal Spray Coatings for Renewable Energy Power Plants. Part I: Effect of Composition and Microstructure, **Esmail Sadeghi, Nicolaie Markocsan, Shrikant Josh**, J Therm Spray Tech (2019) 28:1749–1788.
- [9]. Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part, **Pierre L. Fauchais, Joachim V.R. Heberlein, Maher I. Boulos**, 2014.
- [10]. Ανάπτυξη και Μελέτη Δομής και Ιδιοτήτων Επικαλύψεων Νανοϋλικών με Τεχνολογίες Θερμικού Ψεκασμού, **Νικόλαου Π. Πέτσα**, Διδακτορική Διατριβή Αθήνα, 2012.

- [11]. Surface Engineering: Volume 5 of the ASM Handbook, **Catherine M. Cotell, James A. Sprague, and Fred A. Smidt Jr.**, published in 1994, The Volume was prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee.
- [12]. Fundamentals of Corrosion - Mechanisms, Causes and Preventative Methods, **Philip A. Schweitzer**, © 2010 by Taylor and Francis Group, LLC.
- [13]. Thermal Spraying: What it was and what it has become, **Frank J. Hermanek**, International Thermal Spray Association, 5th Edition, 2011, www.thermalspray.org
- [14]. A Review on Thermal Spray Coating Processes, **Sagar Amin, Hemant Panchal**, International Journal of Current Trends in Engineering & Research (IJCTER) e-ISSN 2455–1392 Volume 2 Issue 4, April 2016 pp. 556 - 563 Scientific Journal Impact Factor : 3.468 <http://www.ijcter.com>
- [15]. Combustion, **Glassmann I.**, Academic, New York, NY (1977).
- [16]. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: Second Edition, **Lech Pawlowski**, Copyright © 2008 John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.
- [17]. Thermal Spray Coatings, in Handbook of Environmental Degradation of Materials (2nd edition), **Mitchell R. Dorfman**, 2012, p.569-596.
- [18]. Thermal Spray Terminology and Company Origins, First Printing, **Frank J. Hermanek**, 2001, ASM International, Materials Park, OH.
- [19]. Gas Dynamical Parameters of Detonation Powder Spraying, **E. Kadyrov and V. Kadyrov**, J. Therm. Spray Technology Vol 4 (No. 3), 1995, p 280–286.
- [20]. Thermal Spray Coating: A Study., **Rakesh Kumar & Santosh Kumar**, International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, March, 2018.
- [21]. Thermal Spray Coatings, www.gordonengland.co.uk
- [22]. The cold spray process and its potential for industrial applications, **Gärtner F, Stoltenhoff T, Schmidt T, Kreye H.**, J Therm Spray Technol 15(2):223–232 (2006).
- [23]. From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying, **Tobias Schmidt, Hamid Assadi, Frank Gärtner, Horst Richter, Thorsten Stoltenhoff, Heinrich**

Kreye & Thomas Klassen, Journal of Thermal Spray Technology volume 18, Article number: 794 (2009).

[24]. Metallizing Equipment CO, PVT.LTD, www.mecpl.com

[25]. Linkotek Equipment, www.lincotekequipment.com

[26]. GRIEKSPoor Thermal Coatings, Techniques, www.griekspoorthermalcoatings.com

[27]. Handbook of thermal spray technology, **Davis JR (ed)**, ASM International, Materials Park, OH (2004).

[28]. Knowledge concerning splat formation: an invited review, **Fauchais P, Fukumoto M, Vardelle A, Vardelle M.**, J Therm Spray Technol 13(3):337–360 (2004)

[29]. Analysis and optimization of the HVOF process by combined experimental and numerical approaches, **E. Dongmo, M. Wenzelburger, R.Gadow**, Surface and Coatings Technology, Volume 202, Issue 18, 15 June 2008, Pages 4470-4478.

[30]. Modeling of Combustion as well as Heat, Mass, and Momentum Transfer During Thermal Spraying by HVOF and HVSFs, **Esther Dongmo, Rainer Gadow, Andreas Killinger & Martin Wenzelburger**, Journal of Thermal Spray Technology volume 18, Article number: 896 (2009).

[31]. From Powders to Thermally Sprayed Coatings, **Pierre Fauchais, Ghislain Montavon, and Ghislaine Bertrand**, December 2010 Journal of Thermal Spray Technology 19(1):56-80.

[32]. Corrosion and Protection - (Engineering materials and processes), **Einar Bardal**, Engineering Materials and Processes ISSN 1619-0181, ISBN 1-85233-758-3 Springer-Verlag London Berlin Heidelberg, a member of BertelsmannSpringer Science+Business Media GmbH, <http://www.springer.co.uk>

[33]. American Welding Society. Corrosion Testing of Flame-Sprayed Coated Steel—19 Year Report C2.14-74, 1974., **AWS**.

[34]. Marine Atmospheric Corrosion Museum Report on the Performance of Thermal Spray Coatings on Steel, **Robert M. Kain**, Corrosion Scientist and **Earl A. Baker**, Senior Research Technologist, 1987.

[35]. Marine Exposure Tests of Thermal Sprayed Coatings in Japan, **S. Kuroda, J. Kawakita, M. Takemoto**, Thermal Spray Committee Japan Association of Corrosion Control, Tokyo, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής,

Japan, Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology, (Ed.) **C. Moreau** and **B. Marple**, Published by ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 2003.

[36]. Steel cathodic protection afforded by zinc, aluminium and zinc/aluminium alloy coatings in the atmosphere, **Z. Panossian**, **L. Mariaca**, **M. Morcillo**, **S. Flores**, **J. Rocha**, **J.J. Peña**, **F. Herrera**, **F. Corvo**, **M. Sanchez**, **O.T. Rincon**, **G. Priddybailo**, **J. Simancas**, Z. Panossian et al. / Surface & Coatings Technology 190 (2005) 244–248, (PATINA project).

[37]. Zinc-Aluminium-Coatings as Corrosion Protection for Steel, **M. Bütetführ**, Materials and Corrosion 2007, 58, No. 9, DOI: 10.1002/maco.200704058, Corrosion Concepts.

[38]. Accelerated Corrosion Behaviors of Zn, Al and Zn/15Al Coatings on a Steel Surface, **Ahmet Gulec**, **Ozgur Cevher**, **Ahmet Turk**, **Fatih Ustel**, **Fevzi Yilmaz**, 2011.

[39]. Corrosion behaviour of thermally sprayed Zn, ZnMgAl and ZnAl15 coatings, **Kirsten Bobzin**, **Mehmet Öte**, **Martin Andreas Knoch**, support from the German Federal Ministry of Economics and Technology.

[40]. B117 **ASTM**, σε Standard practice for operating Salt Spray (fog) testing apparatus.

[41]. Η χρήση του θαλάμου αλατονέφωσης ως μεθόδου μελέτης της διάβρωσης των μετάλλων, **N. Πιστοφίδης**, **Γ. Βουρλιας**, **Γ. Στεργιούδης**, **Δ. Τσίπας**, Τεχνικά Χρονικά, Μάιος – Ιούνιος 2006.

[42]. Salt Spray Testing, **B. N. Tipton**, ASM, τομ. 13, pp. 224 – 226, 2000.

[43]. Abrasive Blast Cleaning, **M. R. Laliaert**, **N. Weightman**, **M. M. Woelfel**, Surface Preparation Handbook, ASM, pp. 83-96.

[44] Μελέτη της επίδρασης της βλάβης διάβρωσης στη μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος, **Δρακακάκη Αργυρώ**, PhD thesi

(Τελευταία σελίδα της εργασίας)