ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

«Επιφανειακές κατεργασίες με αξιοποίηση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας: Σύγχρονες εξελίξεις και πειραματικά αποτελέσματα»

Σούκερας Πέτρος – Χρήστος

Εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων: Άννα Δ. Ζερβάκη, Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ

Μέλη: Νικόλαος Τσούβαλης Καθηγητής ΕΜΠ

Κωνσταντίνος Μπελιμπασάκης, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, 2024

Περίληψη

Η εργασία επικεντρώνεται στη χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας για επιφανειακές κατεργασίες υλικών, μία μέθοδο που προσφέρει σημαντικά οφέλη σε βιομηχανικές εφαρμογές. Αναλύονται οι σύγχρονες τεχνολογίες και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τις επιφανειακές κατεργασίες με συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια, όπως οι ηλιακοί φούρνοι και οι ειδικές ηλιακές εγκαταστάσεις. Η μελέτη εξετάζει διαφορετικούς συνδυασμούς υλικών και τις βελτιώσεις που επιτυγχάνονται στις ιδιότητες των επιφανειακών επιστρωμάτων, όπως η αυξημένη σκληρότητα, η βελτιωμένη ανθεκτικότητα στη φθορά και η αυξημένη θερμική σταθερότητα.

Επιπλέον, παρουσιάζονται συγκεκριμένες εφαρμογές στις οποίες η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται για την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων υλικών, όπως στην αεροναυπηγική, την αυτοκινητοβιομηχανία και την παραγωγή εργαλείων υψηλής απόδοσης. Μέσω πειραματικών αποτελεσμάτων και συγκριτικών μελετών, η εργασία καταδεικνύει τη δυναμική αυτών των τεχνολογιών, ενώ παράλληλα υπογραμμίζει τις περιβαλλοντικές και οικονομικές προοπτικές τους. Τέλος, προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα με στόχο την περαιτέρω ανάπτυξη και βελτιστοποίηση των τεχνικών, καθώς και την ενσωμάτωσή τους σε νέες βιομηχανικές εφαρμογές.

Λέξεις- κλειδιά: *Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια - Επιφανειακές Κατεργασίες - Καινοτόμες Τεχνικές - Βιομηχανικές Εφαρμογές - Πειραματικά Αποτελέσματα.*

Abstract

The work focuses on the use of concentrated solar energy for surface treatments of materials, a method that offers significant benefits in industrial applications. Modern technologies and techniques used to treat surfaces with concentrated solar energy, such as solar ovens and special solar installations, are analyzed. The study examines different combinations of materials and the improvements achieved in surface coating properties such as increased hardness, improved wear resistance and increased thermal stability.

In addition, specific applications are presented in which solar energy is harnessed to enhance the mechanical properties of materials, such as in aeronautics, the automotive industry, and the production of high-performance tools. Through experimental results and comparative studies, the paper demonstrates the potential of these technologies, while highlighting their environmental and economic perspectives. Finally, directions for future research are proposed with the aim of further developing and optimizing the techniques, as well as their integration into new industrial applications.

Keywords: *Concentrated Solar Energy - Surface Treatments - Innovative Techniques - Industrial Applications - Experimental Results.*

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτεί επίσημα το τελευταίο στάδιο για την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με βαθιά συγκίνηση και ικανοποίηση, ολοκληρώνω αυτό το κομμάτι της ζωής μου, αναλογιζόμενος όλα όσα έμαθα και όσους συνάντησα στην πορεία.

Θα ήθελα να εκφράσω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κ. Άννα Δ. Ζερβάκη, επίκουρη καθηγήτρια του Ε.Μ.Π., για τον χρόνο που διέθεσε, τη σημαντική συνεργασία και την αδιάκοπη υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά όλους όσοι συνέβαλαν στο πρακτικό μέρος της έρευνας. Ειδικότερα, τον κ. Αθανάσιο Μαρκουλή, μέλος του Ειδικού και Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού (ΕΕΔΙΠ), την κ. Χαρά Σαράφογλου, μέλος του Ειδικού και Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού (ΕΕΔΙΠ), την κα Θεοδώρα Τσιούρβα, μέλος του Ειδικού Τεχνικού Εργαστηριακού Προσωπικού (ΕΤΕΠ), και τον κ. Χαράλαμπο Ξάνθη, μέλος του Ειδικού Τεχνικού Εργαστηριακού Προσωπικού (ΕΤΕΠ), για τη βοήθειά τους κατά την πειραματική διαδικασία.

Για την παραχώρηση δοκιμίων για τη μελέτη περίπτωσης ζεύγος χάλυβα – καρβιδίου του βολφραμίου (WC) θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια του ΠΑΔΑ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, κ. Πανδώρα Ψυλλάκη.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένεια μου για την υπομονή και την στήριξή τους, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των απαιτητικών περιόδων όπου εργαζόμουν παράλληλα με τις σπουδές μου. Η παρουσία και η ενθάρρυνσή τους μου έδιναν τη δύναμη να συνεχίζω, ακόμα κι όταν οι δυσκολίες έμοιαζαν ανυπέρβλητες.

Εκφράζω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη προς τους συμφοιτητές μου, που με στήριξαν σε κάθε βήμα αυτής της διαδρομής. Η παρουσία τους και η διάθεσή τους για αμοιβαία βοήθεια, χωρίς ίχνος ανταγωνισμού, υπήρξαν ανεκτίμητα στοιχεία της φοιτητικής μου εμπειρίας.

Ευχαριστώ από καρδιάς τους φίλους μου, που στάθηκαν δίπλα μου σε όλη αυτή την πορεία, προσφέροντάς μου αμέριστη στήριξη, ακόμη και όταν ο χρόνος μας μαζί ήταν περιορισμένος. Υπήρξαν αληθινά στηρίγματα σε κάθε μου βήμα.

Ένα μεγάλο «ευχαριστώ» αξίζει και στους συνεργάτες και εργοδότες μου για τη δική τους κατανόηση και υποστήριξη κατά τις κρίσιμες περιόδους των εξετάσεων, των παραδόσεων και των εργαστηρίων.

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στο φροντιστήριο «στόχος» στο οποίο φοίτησα ως μαθητής της Γ' Λυκείου, για όλη την καθοδήγηση και συμβουλευτική των καθηγητών μου και προσωπικού, καθώς και τα διδάγματα που αποκόμισα στην μετέπειτα πορεία μου εργαζόμενος εκεί.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο καφέ «Μαραμπού» για τη ζεστή φιλοξενία του, όπου πέρασα αμέτρητες ώρες με το λάπτοπ και τις σημειώσεις μου, ιδιαίτερα κατά την απαιτητική τελευταία περίοδο των σπουδών μου.

Ιδιαίτερη μνεία αξίζει στην εμπειρία μου ως μέλος της εθελοντικής Οργάνωσης Humanity Greece, η οποία υπήρξε καθοριστική και διδακτική για την προσωπική μου ανάπτυξη, ενισχύοντας το αίσθημα της προσφοράς και της υπευθυνότητας που με συνοδεύει σε κάθε βήμα της επαγγελματικής μου πορείας.

Περιεχόμενα

Περίληψη 2
Abstract 3
1 Εισαγωγή 8
2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση 9
2.1.1 Εισαγωγή στις αντιτριβικές ιδιότητες των υλικών 9
2.1.2 Ιστορική εξέλιξη και θεμελιώδεις αρχές 13
2.2 Ηλιακή Ενέργεια στις Επιφανειακές Κατεργασίες 14
2.2.1 Εισαγωγή στην Αξιοποίηση της Ηλιακής Ενέργειας 14
2.2.2 Τεχνολογίες και Τεχνικές Εφαρμογής της Ηλιακής Ενέργειας 15
2.2.3 Υλικά και Εφαρμογές 22
2.3 Άλλες Εφαρμογές της Ηλιακής Ενέργειας 25
2.3.1 Εφαρμογές σε Άλλες Βιομηχανίες και Τεχνολογίες 25
2.3.2 Ανάπτυξη Καινοτόμων Τεχνικών και Υλικών 26
2.4 Δυναμική και εξελίξεις στον τομέα 27
2.4.1 Βασικοί ερευνητικοί τομείς και καινοτομίες 27
2.4.2 Επιπτώσεις στη βιομηχανία και μελλοντικές κατευθύνσεις 29
2.4.3 Προσομοιώσεις και Αναλυτικά Μοντέλα 30
2.5 Ενσωμάτωση με την ψηφιακή και έξυπνη κατασκευή 41
2.6 Υβριδικά και πολλαπλών πηγών ενεργειακά συστήματα 45
2.7 Αντιμετώπιση των προκλήσεων και ενίσχυση της επεκτασιμότητας 48
3 Χρήση Ηλιακής Ενέργειας στα Υλικά 53
3.1 Επιφανειακές Κατεργασίες 53
3.1.1 Περιγραφή των μεθόδων και τεχνολογιών 53
3.1.2 Βελτιώσεις που προσφέρουν οι επιφανειακές κατεργασίες με ηλιακή ενέργεια 55
3.2 Επικαλύψεις και Υλικά Υποστρωμάτων 57
3.2.1 Τύποι επιστρώσεων και υποστρωμάτων που έχουν αναπτυχθεί 57
3.2.2 Μεθοδολογίες και αποτελέσματα 61
3.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Μελέτης Ζεύγους Χάλυβα - WC 64
3.3.1 Συνθήκες και παράμετροι 64
4 Πειραματικά Αποτελέσματα: Ζεύγος Χάλυβα - WC 69
4.1 Παρουσίαση του Case Study 69
4.2 Πειραματική Διαδικασία 70
..... 70

4.2.1 Προετοιμασία των δοκιμίων 70
4.2.2 Κοπή 71
4.2.3 Εγκιβωτισμός 73
4.2.4 Λείανση και Στίλβωση 74
4.2.5 Χημική Προσβολή 76
4.2.6 Συνθήκες ακτινοβόλησης και Μορφή Δοκιμίων 79
5 Αποτελέσματα Μικροσκοπικής Ανάλυσης 88
..... 111
5.1 Μικροδομικά Χαρακτηριστικά 112
5.1.1 Ανάλυση μικροδομικών χαρακτηριστικών σε σχέση με τις συνθήκες ακτινοβόλησης 112
5.1.2 Επιπτώσεις στην απόδοση και στα χαρακτηριστικά των υλικών 115
5.1.3 Αποτελέσματα και σύγκριση με βιβλιογραφία 117
6 Δυνατότητες και μελλοντικές προοπτικές 120
6.1 Επέκταση των εφαρμογών σε αναδυόμενες βιομηχανίες 120
7 Συμπεράσματα 126
8 Παράρτημα 127
8.1 Παράρτημα 1α 127
8.2 Παράρτημα 1β 128
8.3 Παράρτημα 1γ 129
Βιβλιογραφικές αναφορές 131

1 Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία επιδιώκει να παρουσιάσει τις πρόσφατες εξελίξεις και παράλληλα να παρουσιάσει πειραματικά αποτελέσματα από την αξιολόγηση στο εργαστήριο δοκιμίων με επιφανειακή κατεργασία με τη βοήθεια συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας. Ο κύριος στόχος της εργασίας είναι να αναλύσει πώς η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιφανειακή κατεργασία υλικών, να εξετάσει τις καινοτόμες τεχνικές και υλικά που έχουν αναπτυχθεί, και να αναδείξει τις σύγχρονες εξελίξεις στην περιοχή αυτή.

Στο 1ο Κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο σκοπός της εργασίας καθώς και μια σύντομη επισκόπηση των κυρίων θεμάτων που αναλύονται. Συγκεκριμένα, η εργασία θα εστιάσει στις εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας στις επιφανειακές κατεργασίες, καθώς και στις σύγχρονες τεχνολογίες και υλικά που προκύπτουν από την αξιοποίησή της. Στην εισαγωγή, θα περιγραφεί η σημασία της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας και η συμβολή της στις σύγχρονες βιομηχανικές διαδικασίες.

Στο 2ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται βιβλιογραφική ανασκόπηση, που περιέχει θεμελιώδεις αρχές των επιφανειακών κατεργασιών και την ιστορική εξέλιξη της τεχνολογίας που συνδυάζει ηλιακή ενέργεια με τη διαδικασία της επιφανειακής κατεργασίας. Στη συνέχεια, αναλύονται οι διαφορετικές εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας σε βιομηχανίες, καθώς και η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνικών και υλικών που έχουν προκύψει από την εφαρμογή της.

Το 3ο Κεφάλαιο εστιάζει στις εξελίξεις της τελευταίας δεκαετίας, αναλύοντας τη δυναμική και τις προόδους στον τομέα, καθώς και τις μελλοντικές προοπτικές. Ακολουθεί η αναφορά στη χρήση ηλιακής ενέργειας στα υλικά, περιγράφοντας τις επιφανειακές κατεργασίες και τις επικάλυψεις, καθώς και τις τεχνικές συγκόλλησης με χρήση ηλιακής ενέργειας.

Στη συνέχεια, στα κεφάλαια 4 και 5, παρουσιάζεται μελέτη περίπτωσης που αφορά τη χρήση ηλιακής ενέργειας για την επιφανειακή κατεργασία χάλυβα με WC. Το case study περιλαμβάνει παραμετρική ανάλυση, μικροδομικά χαρακτηριστικά και συγκρίσεις με υπάρχουσες μελέτες.

Τέλος, η εργασία στο 6ο Κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια συνοπτική παρουσίαση των κυριότερων ευρημάτων και προτάσεων για μελλοντική έρευνα στον τομέα των επιφανειακών κατεργασιών με ηλιακή ενέργεια.

2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1.1 Εισαγωγή στις αντιτριβικές ιδιότητες των υλικών

Οι αυξανόμενες απαιτήσεις για την αντοχή των μετάλλων και των κραμάτων τους σε συνθήκες όπως η φόρτιση, η έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία και η διάβρωση, έχουν οδηγήσει σε σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία των επιφανειακών κατεργασιών. Αυτή η πρόοδος παραμένει έντονη, καθώς οι επιφανειακές κατεργασίες αποτελούν έναν τομέα που ανταποκρίνεται στις σύγχρονες ανάγκες, περιλαμβάνοντας τη βελτιστοποίηση της ενέργειας και των υλικών, καθώς και τη φιλική προς το περιβάλλον προσέγγιση στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης.

Σύμφωνα με τους Burakowski και Wierzchon (1998), μέσω των επιφανειακών κατεργασιών επιτυγχάνονται τα εξής:

- Η δυνατότητα κατασκευής εργαλείων, εξαρτημάτων και συσκευών από υλικά χαμηλότερων ιδιοτήτων, συνήθως πιο οικονομικά, με την προσθήκη βελτιωμένων χαρακτηριστικών στην επιφάνειά τους. Αυτό συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης υλικών και ενέργειας, διατηρώντας τα ίδια επίπεδα αντοχής σε συνδυασμό με καλύτερες τριβολογικές και αντιδιαβρωτικές ιδιότητες.

- Η βελτίωση της αξιοπιστίας χρήσης των εργαλείων και των εξαρτημάτων, μειώνοντας τις βλάβες. Ο κακός σχεδιασμός και οι ακατάλληλες συνθήκες λειτουργίας ευθύνονται για το 15% του χρόνου συντήρησης, ενώ η λανθασμένη επιλογή ή κακή κατασκευή των επιφανειακών στρωμάτων ευθύνεται για το 85% των βλαβών.

- Η μείωση των ενεργειακών απωλειών λόγω τριβών, που επιτυγχάνεται μέσω της μείωσης της μάζας των κινούμενων εξαρτημάτων και της ενίσχυσης των τριβολογικών ιδιοτήτων τους. Συνήθως, το 15 έως 25% της παρεχόμενης ενέργειας καταναλώνεται για την υπέρβαση της αντίστασης τριβής, ενώ σε

ορισμένους κλάδους της βιομηχανίας αυτό το ποσοστό μπορεί να φτάσει το 85%.

- Η μείωση της συχνότητας αντικατάστασης και συντήρησης των εργαλείων και των εξαρτημάτων.

- Η μείωση των απωλειών λόγω διάβρωσης κατά 15 έως 35%, η οποία έχει σημαντικό οικονομικό αντίκτυπο, καθώς μπορεί να κοστίσει έως και 5% του ΑΕΠ.

- Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στη βιομηχανία, καθώς οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στις επιφανειακές κατεργασίες είναι συνήθως ενεργειακά αποδοτικές. Οι τεχνικές υψηλής ενέργειας εφαρμόζονται μόνο σε συγκεκριμένα σημεία των εξαρτημάτων, χωρίς να απαιτείται θέρμανση ολόκληρης της μάζας τους, και συνήθως έχουν πολύ μικρό χρόνο εφαρμογής.

- Η ελαχιστοποίηση της ρύπανσης του περιβάλλοντος λόγω της μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας και της παραγωγής χαμηλών ποσοτήτων αποβλήτων. Οι μέθοδοι αυτές δημιουργούν λιγότερους ρύπους. Οι εκπομπές περιλαμβάνουν μικρές ποσότητες ουσιών που επιδεινώνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου ή προκαλούν όξινη βροχή, ενώ είναι επίσης βλαβερές για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

Οι επιφανειακές κατεργασίες στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας ή της συμπεριφοράς του επιφανειακού στρώματος εξαρτημάτων και εργαλείων, με το στρώμα αυτό να αποτελεί ένα μικρό ποσοστό του συνολικού μεγέθους του αντικειμένου. Ανεξάρτητα από την τελική χρήση του επιφανειακά κατεργασμένου προϊόντος, ο ρόλος του βασικού μετάλλου είναι καθοριστικός, καθώς υποστηρίζει τις καταπονήσεις που υφίσταται η κατασκευή. Το κράμα πρέπει να διαθέτει τις κατάλληλες ιδιότητες, όπως αντοχή ή ολκιμότητα, ανάλογα με την εφαρμογή. Η τροποποίηση της επιφάνειας αυτού του κράματος στοχεύει είτε στην προστασία της κατασκευής από επιβλαβείς συνθήκες λειτουργίας είτε στην προσθήκη συγκεκριμένων χαρακτηριστικών (Burakowski & Wierzchon, 1998).

Στις μηχανολογικές εφαρμογές, οι επιφανειακές κατεργασίες ή τροποποιήσεις των μεταλλικών υλικών έχουν ως στόχο την προστασία της κατασκευής από:

- **Φθορά λόγω τριβής**: Προκαλείται από την επαφή και τη σχετική κίνηση της επιφάνειας με άλλες στερεές επιφάνειες.
- **Διάβρωση**: Προκύπτει όταν το υλικό εκτίθεται σε υγρά περιβάλλοντα με δραστικά ιόντα.
- **Οξείδωση**: Συμβαίνει όταν η επιφάνεια έρχεται σε επαφή με οξειδωτικά αέρια σε υψηλές θερμοκρασίες.
- **Μηχανική ή θερμική κόπωση**: Εμφανίζεται όταν το μηχανολογικό στοιχείο υπόκειται σε εναλλασσόμενες μηχανικές φορτίσεις ή μεταβολές θερμοκρασίας, προκαλώντας την εμφάνιση ρωγμών στην επιφάνεια.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων χρησιμοποιούνται τεχνικές που περιλαμβάνουν την εφαρμογή υλικών με διαφορετική χημική σύσταση και ιδιότητες από το βασικό μέταλλο, σχηματίζοντας ένα πρόσθετο στρώμα, το οποίο ονομάζεται επίστρωμα ή επικάλυψη. Οι τεχνικές επιφανειακών κατεργασιών κατατάσσονται σε έξι κύριες κατηγορίες:

1. **Μηχανικές**
2. **Θερμο-μηχανικές**
3. **Θερμικές**
4. **Θερμο-χημικές**
5. **Ηλεκτρο-χημικές και χημικές**
6. **Φυσικές**

Οι επιφανειακές κατεργασίες των μεταλλικών υλικών, εκτός από τις συμβατικές μεθόδους, πραγματοποιούνται συχνά με τη χρήση δέσμης υψηλής πυκνότητας ενέργειας, όπως το laser, που έχει κερδίσει δημοτικότητα λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών του. Κάθε τεχνική επιφανειακής κατεργασίας δημιουργεί συγκεκριμένο τύπο επιφανειακού στρώματος, κατάλληλο για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Ωστόσο, αυτές οι σύγχρονες μέθοδοι έχουν και κάποια μειονεκτήματα. Η υψηλής πυκνότητας ενέργεια εφαρμόζεται σε μικρές επιφάνειες, συνήθως κάτω από 5 mm, απαιτώντας πολλαπλά περάσματα για την κατεργασία μεγαλύτερων περιοχών. Αυτό μπορεί να επηρεάσει τη σκληρότητα και τις τριβολογικές ιδιότητες των επικαλυπτόμενων επιφανειών. Επιπλέον, οι διατάξεις αυτές έχουν υψηλό κόστος απόκτησης, εγκατάστασης και συντήρησης, ενώ η αποδοτικότητά τους κυμαίνεται συνήθως γύρω στο 10%, υποδεικνύοντας σημαντική κατανάλωση ενέργειας (Burakowski & Wierzchon, 1998).

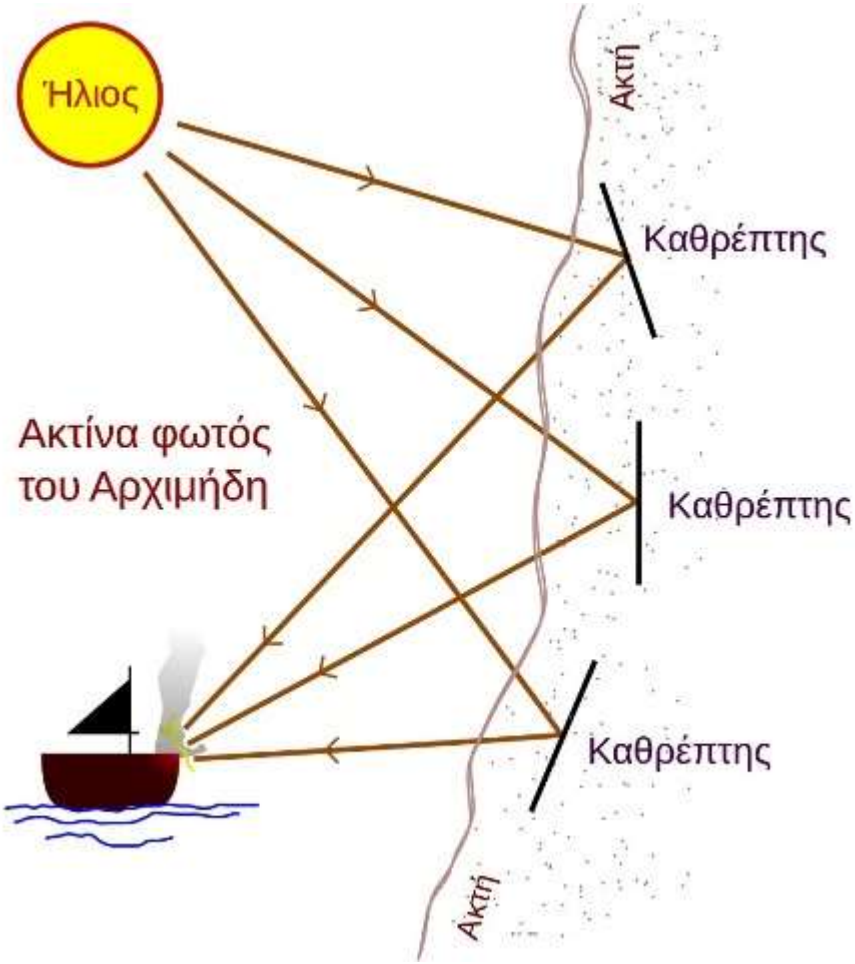
Οι σύγχρονες κοινωνικές και πολιτικές τάσεις απαιτούν τη συνεχή μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, καθώς αυτό είναι σύμφωνο με την «πράσινη οικονομία», μια προσέγγιση που ενσωματώνεται στις νέες βιομηχανικές πολιτικές. Στόχος αυτών των πολιτικών είναι να αναβαθμίσουν την ποιότητα στις βιομηχανίες των ανεπτυγμένων χωρών, ενώ παράλληλα προστατεύουν το περιβάλλον, διασφαλίζουν την υγεία και βελτιώνουν την ποιότητα ζωής των κατοίκων. Για αυτούς τους λόγους, η αναζήτηση νέων πηγών ενέργειας και η βελτιστοποίηση της χρήσης της αποτελούν κεντρικά σημεία των ερευνητικών πολιτικών, κυρίως στις πιο ανεπτυγμένες χώρες .

Μία φυσική και τεχνολογικά απλούστερη πηγή ενέργειας που μπορεί να προσφέρει δέσμη υψηλής πυκνότητας για επιφανειακές κατεργασίες υλικών είναι η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια (CSE: Concentrated Solar Energy). Αυτή η μέθοδος παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς βασίζεται σε φυσική πηγή ενέργειας, δεν παράγει ρύπους, ενώ οι εγκαταστάσεις της είναι οικονομικά προσιτές . Επιπλέον, η CSE επιτρέπει την κατεργασία μεγάλων επιφανειών με αρκετά υψηλή πυκνότητα ενέργειας. Λόγω του ευρέος φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, η απορρόφηση της ενέργειας είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες, όπως οι μονοχρωματικές ακτίνες laser .

Επιπρόσθετα, όπως σημειώνουν οι Flamant et al. (1999), το κόστος και η απόδοση της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας θα μπορούσαν να είναι ανταγωνιστικά σε σχέση με τις τεχνολογίες λέιζερ και πλάσματος. Παρ' όλα αυτά, η τεχνολογία της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας σε συνδυασμό με την κατεργασία υλικών εξακολουθεί να βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης .

2.1.2 *Ιστορική εξέλιξη και θεμελιώδεις αρχές*

Μια σύντομη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας δείχνει ότι η πρώτη καταγεγραμμένη χρήση της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας ανάγεται στη Ρωμαϊκή εποχή. Σύμφωνα με τον θρύλο, κατά την Πολιορκία των Συρακουσών (Β' Καρχηδονιακός Πόλεμος, 215 π.Χ.), ο Αρχιμήδης χρησιμοποίησε καθρέφτες (όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.1) για να καταστρέψει τον ρωμαϊκό στόλο από ξύλινα πλοία. Παρ' όλα αυτά, η πρώτη τεκμηριωμένη και σημαντική εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας στην επεξεργασία υλικών ήταν η χρήση της για την ξήρανση πλίνθων, μια ηλιακή μέθοδος χαμηλής θερμοκρασίας που έχει εφαρμοστεί για πολλά χρόνια (Rossi, 2010).



Σχήμα 2.1.1: Μηχανισμός καθρεπτών του Αρχιμήδη (Wikimedia, 2013)

Οι πρώτες επιστημονικές έρευνες για τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια ξεκίνησαν τον 17ο αιώνα. Ο μαθηματικός Ehrenfried Walter Von Tschirnhaus σχεδίασε και κατασκεύασε φακούς και καθρέφτες για τη συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας, τους

οποίους χρησιμοποίησε για να λιώσει χάλυβα και να παράγει κεραμικά (πορσελάνη) με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας (Rossi, 2010).

Κατά τη Σύγχρονη Περίοδο, διάφοροι ερευνητές αξιοποίησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια. Ο Cassini, τον 17ο αιώνα, κατασκεύασε έναν φακό με διάμετρο 1 μέτρο, ο οποίος μπορούσε να επιτύχει θερμοκρασίες περίπου 1000°C, χρησιμοποιώντας τον για να λιώσει χάλυβα και ασήμι ταυτόχρονα. Τον 18ο αιώνα, ο Lavoisier έλιωσε χάλυβα και πλησίασε το σημείο τήξης της πλατίνας, ενώ απέδειξε ότι είναι δυνατή η επεξεργασία μετάλλων σε ειδική ατμόσφαιρα, όπως το άζωτο. Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, ο Felix Trombe χρησιμοποίησε ηλιακή ενέργεια για να λιώσει πυρίμαχα κεραμικά με υψηλό σημείο τήξης, όπως η αλουμίνα, το οξείδιο του χρωμίου και το ζιρκόνιο (Gálvez et al., 2010).

Οι πρώτες βιομηχανικές εφαρμογές της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας στον τομέα των υλικών επικεντρώθηκαν στη μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών υπό συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Για παράδειγμα, το σύστημα θερμικής προστασίας του διαστημικού αεροσκάφους Hermes δοκιμάστηκε στις εγκαταστάσεις της Plataforma Solar de Almeria (PSA) στις αρχές της δεκαετίας του 1990 (Van den Abeelen, 2017).

2.2 Ηλιακή Ενέργεια στις Επιφανειακές Κατεργασίες

2.2.1 *Εισαγωγή στην Αξιοποίηση της Ηλιακής Ενέργειας*

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για επιφανειακές κατεργασίες έχει εξελιχθεί σε μια καινοτόμο τεχνολογία με σημαντικές εφαρμογές στις βιομηχανικές διαδικασίες, προσφέροντας μια βιώσιμη εναλλακτική στις παραδοσιακές μεθόδους που βασίζονται σε μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτή η τεχνολογική πρόοδος όχι μόνο μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και τους ρύπους, αλλά συμβάλλει ουσιαστικά στην ανάπτυξη πράσινων τεχνολογιών, υποστηρίζοντας τη μετάβαση προς μια βιώσιμη ανάπτυξη. (Kalogirou, 2009 & Islam et al., 2018).

Στην επιφανειακή κατεργασία, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών, απαραίτητων για την τροποποίηση της επιφάνειας

των υλικών. Ειδικότερα, η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (CSP - Concentrated Solar Power) χρησιμοποιείται για την τήξη, την σκλήρυνση και την ανάπτυξη επιστρωμάτων. Αυτή η τεχνολογία εκμεταλλεύεται την υψηλή θερμική ενέργεια που παράγεται από τον ήλιο μέσω ειδικών συστημάτων συγκέντρωσης, όπως ηλιακοί φούρνοι και ηλιακά πυρίμαχα συστήματα (Kalogirou, 2009).

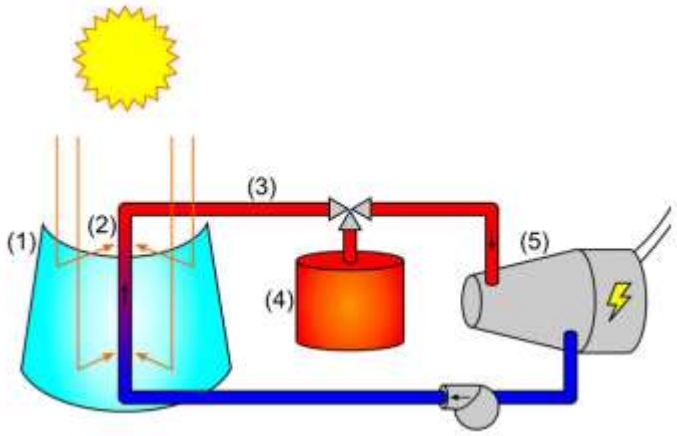
Η επιφανειακή κατεργασία με ηλιακή ενέργεια έχει διάφορα πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και η ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Επιπλέον, η ηλιακή ενέργεια προσφέρει τη δυνατότητα ακριβούς ελέγχου της θερμοκρασίας και της κατεργασίας, κάτι που είναι κρίσιμο για την επίτευξη υψηλής ποιότητας τελικών προϊόντων (Islam et al., 2018).

2.2.2 *Τεχνολογίες και Τεχνικές Εφαρμογής της Ηλιακής Ενέργειας*

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας στις επιφανειακές κατεργασίες υλικών χρησιμοποιεί μια ποικιλία τεχνολογιών και τεχνικών, που επιτρέπουν τη συγκέντρωση και εφαρμογή της ηλιακής θερμότητας με υψηλή αποδοτικότητα. Οι κυριότερες τεχνολογίες και τεχνικές περιλαμβάνουν (Weinstein et al., 2015):

Ηλιακοί Φούρνοι

Οι ηλιακοί φούρνοι χρησιμοποιούν τη ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή υψηλών θερμοκρασιών, που είναι απαραίτητες για διάφορες διαδικασίες επεξεργασίας υλικών. Η τεχνολογία τους έχει εξελιχθεί σημαντικά και περιλαμβάνει διάφορες κατασκευές και εφαρμογές που προσαρμόζονται στις ανάγκες της σύγχρονης βιομηχανίας και της επιστήμης των υλικών. Ακολουθεί μια αναλυτική παρουσίαση των βασικών τύπων ηλιακών φούρνων και των εφαρμογών τους (Weinstein et al., 2015).



Εικόνα 2.2.2.1: Τυπική διάταξη ενός συστήματος CSP (Weinstein, 2015)

Τύποι Ηλιακών Φούρνων

1. Παραβολικοί Συλλέκτες

Οι παραβολικοί συλλέκτες είναι σχεδιασμένοι για να συγκεντρώνουν ηλιακή ακτινοβολία με τη βοήθεια παραβολικών καθρεφτών,W οι οποίοι κατευθύνουν την ηλιακή ενέργεια προς έναν αποδέκτη τοποθετημένο στον εστιακό σημείο. Η ενέργεια συγκεντρώνεται σε αυτόν τον αποδέκτη και μπορεί να φτάσει σε θερμοκρασίες άνω των 1000°C. Αυτοί οι φούρνοι είναι χρήσιμοι για (Khan & Arsalan, 2016):

- **Δημιουργία Υψηλών Θερμοκρασιών:** Επιτρέπουν την επεξεργασία υλικών που απαιτούν ακραίες θερμοκρασίες, όπως η σύντηξη ή η καύση.
- **Παραγωγή Ατμού:** Η θερμότητα που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ατμού, ο οποίος μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού ή για βιομηχανικές διαδικασίες.

2. Ηλιακοί Πύργοι

Οι ηλιακοί πύργοι χρησιμοποιούν μια συγκέντρωση από ηλιακούς συλλέκτες τοποθετημένους γύρω από έναν κεντρικό πύργο, στον οποίο η ηλιακή ενέργεια εστιάζεται μέσω ενός συστήματος καθρεφτών. Η θερμότητα που παράγεται στον πύργο μπορεί να φτάσει σε υψηλές θερμοκρασίες, επιτρέποντας (Sengupta et al., 2021):

- **Κατεργασίες Υλικών:** Χρησιμοποιούνται για να θερμάνουν υλικά σε επίπεδα που δεν είναι εφικτά με άλλες μεθόδους, υποστηρίζοντας διαδικασίες όπως η κατεργασία μετάλλων.

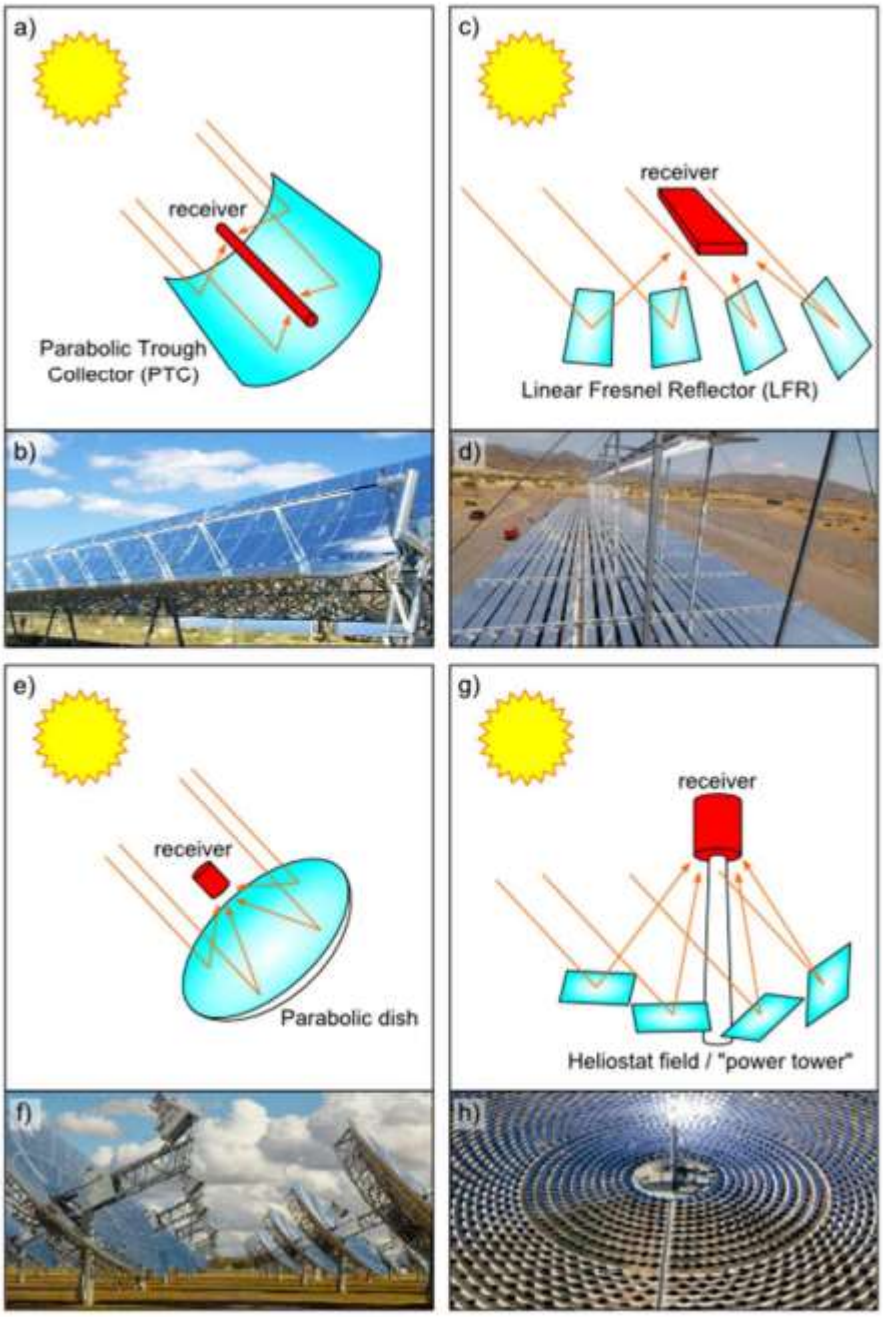
- **Παραγωγή Ενέργειας:** Οι ηλιακοί πύργοι μπορούν να συνδεθούν με συστήματα παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν τη θερμότητα για τη δημιουργία ηλεκτρισμού ή άλλων μορφών ενέργειας.

3. Φακοί Fresnel

Οι φακοί Fresnel είναι μια πιο οικονομική και συμπαγής τεχνολογία που χρησιμοποιεί σειρά από επίπεδους φακούς για να συγκεντρώσει ηλιακή ενέργεια σε ένα μικρό αποδέκτη. Αυτή η μέθοδος προσφέρει (Kabir et al., 2018):

- **Μικρές Εφαρμογές:** Κατάλληλη για εργαστηριακές έρευνες ή εφαρμογές που δεν απαιτούν μεγάλα μεγέθη ή υψηλές θερμοκρασίες.

- **Διαδικασίες Επεξεργασίας:** Επιτρέπει την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών σε μικρές κλίμακες, που είναι χρήσιμες για ερευνητικές και βιομηχανικές εφαρμογές.



Εικόνα 2.2.2.2: Διατάξεις Ηλιακών Φούρνων (Weinstein, 2015)

Ιστορική Εξέλιξη και Εφαρμογές

Η ανάπτυξη των ηλιακών φούρνων έχει στενή σχέση με την ενεργειακή κρίση των δεκαετιών του 1970 και 1980, όταν η ανάγκη για εναλλακτικές πηγές ενέργειας έγινε πιο επιτακτική. Κατά την περίοδο αυτή, οι ηλιακοί φούρνοι εξελίχθηκαν σημαντικά και έχουν καταστεί κρίσιμης σημασίας για την επεξεργασία υλικών και την παραγωγή ενέργειας (Feng et al., 2022).

Στη Γαλλία, ο Felix Trombe, σε συνεργασία με τους Marc Foex και Charlotte Henry La Blanchetais, έθεσε τα θεμέλια της τεχνολογίας των ηλιακών φούρνων δημιουργώντας τον παραβολικό συλλέκτη ισχύος 2kW το 1946. Στη συνέχεια, το 1949, κατασκευάστηκε ο ηλιακός φούρνος 50kW στο Mont Sant Louis. Αυτές οι πρώτες καινοτομίες έθεσαν τα θεμέλια για την εξέλιξη των ηλιακών φούρνων και τη χρήση τους σε επιστημονικές και βιομηχανικές εφαρμογές (Feng et al., 2022).

Στη Γερμανία, το German Aerospace Center (DLR) ανέπτυξε το 1994 έναν ηλιακό φούρνο υψηλής ροής με ισχύ έως 22kW. Αυτή η εξέλιξη επιβεβαίωσε τη δυνατότητα των ηλιακών φούρνων να παράγουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες είναι απαραίτητες για προηγμένες πειραματικές διαδικασίες και βιομηχανικές εφαρμογές (He et al., 2020).

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, το National Solar Thermal Test Facility (NSTTF), που διαχειρίζεται η Sandia National Laboratories, λειτούργησε με έναν ηλιακό φούρνο 16kW το 1979. Αυτό το κέντρο έπαιξε σημαντικό ρόλο στην έρευνα και ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλιακών φούρνων, ενισχύοντας την τεχνογνωσία στις ΗΠΑ και συμβάλλοντας στη βελτίωση των τεχνικών συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας (He et al., 2020).

Στην Ισπανία, το Plataforma Solar de Almería (PSA) ξεκίνησε τη λειτουργία του τη δεκαετία του 1980 και αναδείχθηκε σε σημαντικό κέντρο έρευνας με τον ηλιακό φούρνο ισχύος 60kW και τον ηλιακό πύργο ισχύος 3360-7000kW. Το PSA συνέβαλε στη βελτίωση των τεχνολογιών συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας και στην εφαρμογή τους σε διάφορες βιομηχανικές διαδικασίες (Feng et al., 2022).

Στην Ελβετία, το Ινστιτούτο Paul Scherrer (PSI) ίδρυσε το 1988 τον ηλιακό φούρνο High-Flux, ο οποίος άρχισε τη λειτουργία του το 1997 με ισχύ 40kW. Επιπλέον, εγκαταστάθηκε το ηλιακό πιλοτικό εργοστάσιο 300kW, το οποίο ανέλαβε έργα όπως η ανθρακοθερμική μείωση του οξειδίου του ψευδαργύρου και η θερμική διάσπαση του οξειδίου του ψευδαργύρου για την παραγωγή ψευδαργύρου και αερίου σύνθεσης. Οι εξελίξεις αυτές αποδεικνύουν την προοδευτική εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλιακών φούρνων και την ευρεία εφαρμογή τους σε σημαντικές βιομηχανικές και ερευνητικές διαδικασίες (Feng et al., 2022).

Σημαντικά Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας στους ηλιακούς φούρνους προσφέρει μια σειρά από σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς και ορισμένες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Η ηλιακή ενέργεια, ως καθαρή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα, προάγοντας τη βιωσιμότητα και μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την εξόρυξη και καύση ορυκτών καυσίμων (Fuqiang et al., 2017).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των ηλιακών φούρνων είναι η ικανότητά τους να επιτυγχάνουν εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες. Αυτή η χαρακτηριστική απόδοση καθιστά τους ηλιακούς φούρνους ιδιαίτερα χρήσιμους για ειδικές εφαρμογές επεξεργασίας υλικών, όπως η μεταλλουργία και η χημική βιομηχανία, όπου απαιτούνται πολύ υψηλές θερμοκρασίες για την υλοποίηση συγκεκριμένων διαδικασιών (Fuqiang et al., 2017).

Ωστόσο, παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, υπάρχουν προκλήσεις που σχετίζονται με τη χρήση ηλιακών φούρνων. Η αποτελεσματική αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις κλιματικές συνθήκες και την τοποθεσία, καθώς οι ηλιακοί φούρνοι απαιτούν συνεχή και άμεση ηλιακή ακτινοβολία για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά. Επίσης, το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης των ηλιακών φούρνων μπορεί να είναι υψηλό, γεγονός που καθιστά την τεχνολογία αυτή λιγότερο προσιτή σε κάποιες περιοχές ή βιομηχανίες (Zhang et al., 2018).

Συνολικά, οι ηλιακοί φούρνοι προσφέρουν μια πολλά υποσχόμενη λύση για την επεξεργασία υλικών και την παραγωγή ενέργειας με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα και η οικονομική βιωσιμότητα της τεχνολογίας εξαρτώνται από την υπέρβαση των προκλήσεων που σχετίζονται με τη λειτουργία και την εγκατάστασή τους (Zhang et al., 2018).

Εφαρμογές

Η εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας σε διάφορες διαδικασίες επεξεργασίας υλικών εκμεταλλεύεται την ικανότητα των ηλιακών φούρνων να συγκεντρώνουν υψηλές

θερμοκρασίες με μεγάλη ακρίβεια. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την εφαρμογή τεχνικών που βελτιώνουν τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των υλικών, ανοίγοντας νέες δυνατότητες για τη βιομηχανία (Ho, 2017).

Α) Επιφανειακή Σκλήρυνση

Μία από τις βασικές εφαρμογές είναι η επιφανειακή σκλήρυνση, η οποία χρησιμοποιεί ηλιακή ενέργεια για να αυξήσει τη σκληρότητα της επιφάνειας των μεταλλικών υλικών. Στη διαδικασία αυτή, η ηλιακή θερμότητα εφαρμόζεται σε συγκεκριμένες περιοχές του υλικού, προκαλώντας την αύξηση της σκληρότητας μέσω της θέρμανσης και της ακόλουθης απότομης ψύξης. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ενίσχυση των χαρακτηριστικών των μετάλλων που υφίστανται φθορά λόγω μηχανικής καταπόνησης (Ho, 2017).

Β) Εναζώτωση

Επιπλέον, η εναζώτωση χρησιμοποιεί ηλιακή θερμότητα για την ενίσχυση των ιδιοτήτων των υλικών, όπως η σκληρότητα και η αντοχή στη φθορά. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την εφαρμογή της ηλιακής θερμότητας στην επιφάνεια του υλικού για να δημιουργηθεί μια πιο ανθεκτική και σκληρή επιφανειακή στρώση, η οποία βελτιώνει τη συνολική αντοχή και τη διάρκεια ζωής του υλικού (Alvarez et al., 2018).

Γ)Επικαλύψεις

Μια άλλη σημαντική εφαρμογή είναι η δημιουργία επικαλύψεων. Εδώ, η ηλιακή θερμότητα χρησιμοποιείται για την επικάλυψη των υλικών με ειδικές επιφανειακές επιστρώσεις. Αυτές οι επικαλύψεις έχουν σκοπό να βελτιώσουν τη λειτουργική απόδοση και την αντοχή των υλικών, προσφέροντας προστασία ενάντια στη διάβρωση, τη φθορά και άλλες περιβαλλοντικές επιδράσεις. Η ηλιακή ενέργεια επιτρέπει την ομοιόμορφη εφαρμογή της στρώσης, εξασφαλίζοντας τη βελτίωση της ποιότητας των επιφανειών (Ho, 2017).

Δ) Πυροσυσωμάτωση

Η πυροσυσωμάτωση είναι μια άλλη εφαρμογή που επωφελείται από την ηλιακή ενέργεια. Σε αυτή τη διαδικασία, η ηλιακή θερμότητα χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση και την ενίσχυση των υλικών μέσω της εφαρμογής υψηλών

θερμοκρασιών. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την ένωση διαφορετικών υλικών με υψηλή ακρίβεια, δημιουργώντας στενές συνδέσεις που αντέχουν σε έντονες συνθήκες (Alvarez et al., 2018).

Συνολικά, η ηλιακή ενέργεια προσφέρει μια καινοτόμο προσέγγιση για την επεξεργασία υλικών, επιτρέποντας την εφαρμογή προηγμένων τεχνικών που συνδυάζουν τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα. Η χρήση της ηλιακής ενέργειας ανοίγει νέες προοπτικές για τη βιομηχανία, προωθώντας την ανάπτυξη πιο ανθεκτικών και αποτελεσματικών υλικών (Alvarez et al., 2018).

2.2.3 *Υλικά και Εφαρμογές*

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας σε επιφανειακές κατεργασίες επεκτείνεται σε διάφορους συνδυασμούς υλικών και εφαρμογές, προσφέροντας πολλές δυνατότητες για βελτίωση και καινοτομία στην τεχνολογία υλικών (Fernández-González et al., 2018).

Οι συνδυασμοί υλικών που επωφελούνται από τη διαδικασία της ηλιακής επεξεργασίας περιλαμβάνουν **μέταλλα, κεραμικά, και σύνθετα υλικά**. Ο ηλιακός φούρνος επιτρέπει τη θέρμανση αυτών των υλικών σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που διευκολύνει την πραγματοποίηση διαφόρων τεχνικών κατεργασίας (Fernández-González et al., 2018).

Συνδυασμός μετάλλων και κεραμικών:

Στον τομέα των επιφανειακών κατεργασιών, η συνδυασμένη χρήση μετάλλων και κεραμικών με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας ανοίγει νέες δυνατότητες για την ενίσχυση και βελτίωση των υλικών(Mehos et al., 2017).

Αυτές οι επικαλύψεις μπορούν να αποτελούνται από διάφορα υλικά, αλλά η χρήση κεραμικών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη. Κεραμικά υλικά, όπως καρβίδια και νιτρίδια, προσφέρουν εξαιρετική αντοχή στη θερμότητα και τη διάβρωση. Όταν χρησιμοποιούνται ως επικαλύψεις πάνω σε μέταλλα, βελτιώνουν την αντοχή του μετάλλου σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και επιθετικού χημικού περιβάλλοντος (Mehos et al., 2017).

Επιπλέον, η ηλιακή επεξεργασία επιτρέπει την ενσωμάτωση κεραμικών υλικών στις επιφάνειες των μετάλλων με υψηλή ακρίβεια, δημιουργώντας λεπτές, ομοιογενείς στρώσεις που βελτιώνουν την αντοχή και τις επιδόσεις των υλικών. Η χρήση κεραμικών επικαλύψεων συνδυάζεται με την ηλιακή επεξεργασία για την κατασκευή υλικών που ανταγωνίζονται ή και υπερβαίνουν τα παραδοσιακά υλικά όσον αφορά τη σκληρότητα, την αντοχή και την αξιοπιστία σε δύσκολες συνθήκες (Xu et al., 2015).

Συνολικά, η συνδυασμένη χρήση μετάλλων και κεραμικών με ηλιακή ενέργεια αντιπροσωπεύει μια καινοτόμο προσέγγιση στη βελτίωση των επιφανειακών ιδιοτήτων των υλικών. Η τεχνολογία αυτή δεν μόνο επιτρέπει την ενίσχυση των φυσικών χαρακτηριστικών των υλικών αλλά και ανοίγει το δρόμο για νέες εφαρμογές σε τομείς που απαιτούν υψηλή αντοχή και μακροχρόνια ανθεκτικότητα (Xu et al., 2015).

Σύνθετα υλικά:

Στα σύνθετα υλικά, η ηλιακή ενέργεια έχει αναδειχθεί ως μια καινοτόμος μέθοδος για την ενίσχυση των μηχανικών και χημικών ιδιοτήτων τους, μέσω εξειδικευμένων διαδικασιών όπως η πυροσυσωμάτωση και η ενανθράκωση (Hayat et al., 2019).

Πυροσυσωμάτωση (Pyrolysis)

Η πυροσυσωμάτωση είναι μια διαδικασία όπου τα υλικά θερμαίνονται σε κλειστό σύστημα απουσία οξυγόνου για να διασπαστούν σε πιο βασικά συστατικά ή να συντεθούν σε νέα προϊόντα. Χρησιμοποιώντας ηλιακή ενέργεια για αυτή τη διαδικασία, επιτυγχάνονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες, που είναι απαραίτητες για τη μετατροπή οργανικών ή πολυμερών υλικών σε κεραμικά ή σύνθετα υλικά με εξαιρετικές ιδιότητες. Η χρήση ηλιακής θερμότητας στη πυροσυσωμάτωση έχει το πλεονέκτημα της μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης σε σύγκριση με συμβατικές μεθόδους που απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια ή ορυκτά καύσιμα. Επιπλέον, η ακριβής θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί με ηλιακή ενέργεια επιτρέπει την παραγωγή υλικών με καθαρές και επιθυμητές ιδιότητες, όπως αυξημένη αντοχή και βελτιωμένη χημική αντίσταση (Hayat et al., 2019).

Ενανθράκωση (Carburizing)

Η ενανθράκωση, από την άλλη πλευρά, είναι μια διαδικασία επιφανειακής κατεργασίας που προσθέτει άνθρακα σε μέταλλα για να βελτιώσει τη σκληρότητα και την αντοχή σε φθορά. Εφαρμόζοντας ηλιακή ενέργεια σε αυτή τη διαδικασία, μπορεί να επιτευχθεί ακριβής και ελεγχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας που είναι απαραίτητη για την εναζώτωση. Η ηλιακή θερμότητα επιτρέπει την επιλεκτική επεξεργασία των επιφανειών των μετάλλων με εξαιρετική ακρίβεια, ενισχύοντας την ικανότητά τους να αντέχουν στη φθορά και την καταπόνηση (Hayat et al., 2019).

Ειδικές Επικαλύψεις

Η δημιουργία ειδικών επικαλύψεων μέσω ηλιακής ενέργειας είναι μια σημαντική εφαρμογή στον τομέα των σύνθετων υλικών. Οι επικαλύψεις αυτές δημιουργούνται με τη χρήση ηλιακής θερμότητας για την κατάθεση λεπτών στρώσεων υλικών πάνω σε επιφάνειες, βελτιώνοντας τις αντοχές τους και προσφέροντας καλύτερη προστασία από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται μπορεί να περιλαμβάνουν κεραμικά, μεταλλικά οξείδια ή σύνθετα υλικά που παρέχουν αντοχή στη διάβρωση, την οξείδωση και άλλες επιθετικές συνθήκες. Η ηλιακή θερμότητα προσφέρει τη δυνατότητα για την επίτευξη ομοιογενών και υψηλής ποιότητας επικαλύψεων, οι οποίες ενισχύουν τις μηχανικές και χημικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών (Kalogirou, 2009).

Δημιουργία Επικαλύψεων από Καρβίδιο του Τιτανίου και του Βολφραμίου

Η χρήση ηλιακής ενέργειας για τη δημιουργία επικαλύψεων από καρβίδιο του τιτανίου (TiC) και του βολφραμίου (WC) έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική για την ενίσχυση των επιφανειακών ιδιοτήτων μεταλλικών υλικών. Αυτές οι επικαλύψεις προσφέρουν εξαιρετική αντοχή στη φθορά και τη θερμότητα, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για εφαρμογές σε βιομηχανικά περιβάλλοντα όπου τα υλικά υφίστανται έντονη καταπόνηση (Zhang et al., 2018).

Τα καρβίδια του τιτανίου (TiC) και του βολφραμίου (WC), όταν εφαρμόζονται ως επικαλύψεις, ενισχύουν την αντοχή των μετάλλων σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και υψηλής τριβής. Η διαδικασία της ηλιακής επεξεργασίας επιτρέπει τη δημιουργία λεπτών και ομοιογενών στρωμάτων καρβιδίων που προσφέρουν καλύτερη προστασία από τη διάβρωση και τη φθορά (50 – 150 μm), καθώς και βελτιωμένη σταθερότητα

υπό ακραίες συνθήκες λειτουργίας. Αυτές οι επικαλύψεις χρησιμοποιούνται ευρέως σε εξαρτήματα εργαλείων, βιομηχανικές μηχανές, και εξοπλισμούς που απαιτούν υψηλή αντοχή και μακροχρόνια διάρκεια ζωής (Zhang et al., 2018).

Ανάπτυξη Νέων Τύπων Επικαλύψεων και Σύνθετων Υλικών

Η ηλιακή επεξεργασία ανοίγει επίσης νέες δυνατότητες για την ανάπτυξη σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων που συνδυάζουν χαρακτηριστικά από διαφορετικά υλικά. Για παράδειγμα, είναι δυνατή η δημιουργία σύνθετων επικαλύψεων που συνδυάζουν την αντοχή των κεραμικών με τις ευκαμψίες των μεταλλικών υλικών, δημιουργώντας έτσι υλικά που προσφέρουν συνδυασμένα πλεονεκτήματα. Αυτά τα νέα τύποι υλικών μπορεί να έχουν βελτιωμένες μηχανικές και χημικές ιδιότητες, όπως αυξημένη αντοχή στην οξείδωση, βελτιωμένη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, και καλύτερη αντίσταση στη φθορά (Müller et al., 2017).

Πλεονεκτήματα της Ηλιακής Επεξεργασίας

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της ηλιακής επεξεργασίας είναι η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος σε σύγκριση με συμβατικές μεθόδους. Η ηλιακή θερμότητα αποτελεί μια καθαρή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, μειώνοντας την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και ελαχιστοποιώντας τις εκπομπές CO2. Επιπλέον, η ακριβής θερμική επεξεργασία που προσφέρει η ηλιακή ενέργεια συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας και της αποδοτικότητας των υλικών, καθιστώντας τις διαδικασίες πιο αποτελεσματικές και οικονομικά βιώσιμες (Hussin et al., 2018).

2.3 Άλλες Εφαρμογές της Ηλιακής Ενέργειας

2.3.1 *Εφαρμογές σε Άλλες Βιομηχανίες και Τεχνολογίες*

Στη βιομηχανία των κατασκευών, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται εκτενώς μέσω ηλιακών θερμικών συστημάτων και ηλιακών πάνελ, που συνεισφέρουν στη θέρμανση νερού και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες, για παράδειγμα, χρησιμοποιούν τη θερμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας για τη θέρμανση

του νερού, μειώνοντας την ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια ή φυσικό αέριο για την παραγωγή ζεστού νερού. Παράλληλα, τα ηλιακά πάνελ μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια, επιτρέποντας την παραγωγή καθαρής ενέργειας για διάφορες χρήσεις. Αυτές οι τεχνολογίες έχουν επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα των κτιρίων, μειώνοντας τη χρήση συμβατικών καυσίμων και περιορίζοντας τις εκπομπές CO2 (Kalogirou, 2009).

Στην παραγωγή χημικών προϊόντων, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την υποστήριξη χημικών αντιδράσεων και τη σύνθεση νέων υλικών. Η ηλιακή θερμότητα μπορεί να ενισχύσει τις χημικές διεργασίες, επιταχύνοντας τις αντιδράσεις και μειώνοντας την ανάγκη για συμβατικές πηγές θερμότητας, όπως οι φούρνοι πετρελαίου ή αερίου. Η χρήση ηλιακών αντιδραστήρων και ηλιακών φούρνων μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα των χημικών διαδικασιών, κάνοντάς τες πιο βιώσιμες και λιγότερο ενεργοβόρες (Müller et al., 2017).

Στη γεωργία, η ηλιακή ενέργεια ενσωματώνεται στις διαδικασίες θερμοκηπίου, παρέχοντας τη θερμότητα που απαιτείται για την καλλιέργεια φυτών και τη βελτίωση της ανάπτυξής τους. Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες και οι ηλιακοί φούρνοι χρησιμοποιούνται επίσης για την ξήρανση αγροτικών προϊόντων, μειώνοντας την εξάρτηση από ηλεκτρική ενέργεια και συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση πόρων. Η ηλιακή ξήρανση δεν μόνο μειώνει το ενεργειακό κόστος αλλά επίσης διασφαλίζει καλύτερη ποιότητα των τελικών προϊόντων, καθώς η διαδικασία ξήρανσης διαρκεί λιγότερο και είναι πιο ομοιόμορφη (Müller et al., 2017).

2.3.2 *Ανάπτυξη Καινοτόμων Τεχνικών και Υλικών*

Η συνεχής ανάπτυξη καινοτόμων τεχνικών και υλικών είναι κρίσιμη για την πρόοδο της αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Οι σύγχρονες τεχνολογίες περιλαμβάνουν προηγμένους ηλιακούς συλλέκτες, όπως οι ηλιακοί φακοί Fresnel και οι ηλιακοί πύργοι, οι οποίοι συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία με υψηλή αποδοτικότητα. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών, απαραίτητων για βιομηχανικές εφαρμογές, και την αποτελεσματική χρήση της ηλιακής ενέργειας (Hayat et al., 2019).

Η συνεχής έρευνα και καινοτομία στις τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας διασφαλίζουν την εξέλιξη της τεχνολογίας, οδηγώντας σε νέες εφαρμογές και λύσεις για τις βιομηχανίες. Αυτή η πρόοδος όχι μόνο ενισχύει την αποδοτικότητα αλλά και προσφέρει βιώσιμες λύσεις για το μέλλον, υπογραμμίζοντας τη σημασία της ηλιακής ενέργειας στην τεχνολογική και βιομηχανική ανάπτυξη (Hayat et al., 2019).

2.4 Δυναμική και εξελίξεις στον τομέα

Κατά την τελευταία δεκαετία, ο τομέας των επιφανειακών κατεργασιών που χρησιμοποιούν συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο. Την περίοδο αυτή παρατηρήθηκε μια έξαρση της έρευνας και της τεχνολογικής καινοτομίας, με επίκεντρο την αξιοποίηση της δύναμης του ήλιου για την εκτέλεση κατεργασιών υψηλής θερμοκρασίας που παραδοσιακά στηρίζονταν σε ορυκτά καύσιμα ή ηλεκτρική ενέργεια. Η δυναμική αυτού του τομέα διαμορφώθηκε από έναν συνδυασμό τεχνολογικών ανακαλύψεων, εξελίξεων στην επιστήμη των υλικών και μιας αυξανόμενης έμφασης στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα (Palacios et al., 2020).

2.4.1 *Βασικοί ερευνητικοί τομείς και καινοτομίες*

Ένας από τους πιο κρίσιμους τομείς ανάπτυξης ήταν η βελτίωση της τεχνολογίας των ηλιακών κλιβάνων. Οι ηλιακοί κλίβανοι χρησιμοποιούν συγκεντρωμένο ηλιακό φως για την επίτευξη θερμοκρασιών που μπορούν να υπερβούν τους 3.000°C, καθιστώντας τους ιδανικούς για διεργασίες όπως η πυροσυσσωμάτωση, η τήξη και οι επιφανειακές κατεργασίες. Η πρόσφατη έρευνα έχει επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της ακρίβειας αυτών των κλιβάνων, επιτρέποντας πιο συνεπείς και ελεγχόμενες συνθήκες κατεργασίας. Οι καινοτομίες στον σχεδιασμό των κατόπτρων, τα συστήματα παρακολούθησης και οι αναλογίες συγκέντρωσης έχουν συμβάλει στο να καταστούν οι ηλιακοί κλίβανοι πιο αξιόπιστοι και προσαρμόσιμοι σε ποικίλες βιομηχανικές ανάγκες (Palacios et al., 2020).

Εκτός από τους ηλιακούς κλιβάνους, την τελευταία δεκαετία σημειώθηκε σημαντική πρόοδος στην εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας στις διεργασίες χημικής εναπόθεσης

ατμών (CVD) και φυσικής εναπόθεσης ατμών (PVD). Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία λεπτών υμενίων και επιστρώσεων με συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως σκληρότητα, αντοχή στη διάβρωση και θερμική σταθερότητα. Οι ερευνητές έχουν αναπτύξει μεθόδους για τη χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας για τις εν λόγω διαδικασίες, μειώνοντας την ανάγκη για ηλεκτρικά θερμαντικά στοιχεία και μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος παραγωγής. Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία επικαλύψεων υψηλής απόδοσης που μπορούν να εφαρμοστούν σε εργαλεία, εξαρτήματα, ακόμη και σε μεγάλες επιφάνειες, με βελτιωμένες ιδιότητες υλικών και μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Palacios et al., 2020).

Η συνδυασμός της ηλιακής ενέργειας με την προηγμένη επιστήμη των υλικών οδήγησε επίσης στην ανάπτυξη νέων σύνθετων υλικών που υφίστανται μοναδικούς μετασχηματισμούς υπό την ηλιακή ακτινοβολία. Για παράδειγμα, η έρευνα έχει δείξει ότι ορισμένα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας μπορούν να ενισχυθούν ή να τροποποιηθεί η μικροδομή τους όταν εκτίθενται σε συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια, οδηγώντας σε βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Αυτές οι εξελίξεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές για βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική, όπου τα υλικά πρέπει να αντέχουν σε ακραίες συνθήκες διατηρώντας παράλληλα τη δομική τους ακεραιότητα (Palacios et al., 2020).

Ένας άλλος τομέας δυναμικής ανάπτυξης είναι η ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας στις διαδικασίες προσθετικής κατασκευής (τρισδιάστατη εκτύπωση). Οι ερευνητές έχουν διερευνήσει τη χρήση της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας ως πηγή θερμότητας για την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με laser (SLS) και άλλες τεχνικές προσθετικής κατασκευής. Η προσέγγιση αυτή όχι μόνο μειώνει το ενεργειακό αποτύπωμα της διαδικασίας κατασκευής, αλλά ανοίγει επίσης νέες δυνατότητες για τη δημιουργία πολύπλοκων γεωμετριών και δομών με βελτιωμένες ιδιότητες υλικών. Η δυνατότητα συνδυασμού της ακρίβειας της προσθετικής κατασκευής με τη βιωσιμότητα της ηλιακής ενέργειας αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη εξέλιξη για τις βιομηχανίες που επιθυμούν να καινοτομούν μειώνοντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις (Palacios et al., 2020).

2.4.2 *Επιπτώσεις στη βιομηχανία και μελλοντικές κατευθύνσεις*

Αυτές οι ερευνητικές εξελίξεις έχουν αρχίσει να έχουν αισθητό αντίκτυπο σε διάφορες βιομηχανίες, οδηγώντας σε στροφή προς πιο βιώσιμες πρακτικές κατασκευής. Εταιρείες σε τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική και η μηχανική υλικών υιοθετούν ολοένα και περισσότερο επιφανειακές κατεργασίες με βάση την ηλιακή ενέργεια για να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα των δραστηριοτήτων τους. Για παράδειγμα, η ηλιακή πυροσυσσωμάτωση έχει εφαρμοστεί στην παραγωγή εξαρτημάτων αυτοκινήτων, οδηγώντας σε μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους (Alvarez et al., 2018).

Επιπλέον, τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση της ηλιακής ενέργειας για επιφανειακές κατεργασίες γίνονται όλο και πιο εμφανή. Καθώς η τεχνολογία ωριμάζει, το κόστος εφαρμογής των διαδικασιών που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια μειώνεται, καθιστώντας την πιο προσιτή σε ένα ευρύτερο φάσμα βιομηχανιών. Η τάση αυτή αναμένεται να συνεχιστεί καθώς η έρευνα διευρύνει τα όρια του εφικτού με την ηλιακή ενέργεια, οδηγώντας σε περαιτέρω μείωση του ενεργειακού κόστους και σε μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα για τις βιομηχανικές διεργασίες (Alvarez et al., 2018).

Κοιτάζοντας μπροστά, ο τομέας είναι έτοιμος για συνεχή ανάπτυξη και καινοτομία. Η μελλοντική έρευνα είναι πιθανό να επικεντρωθεί στην ενίσχυση της επεκτασιμότητας και της ευελιξίας των τεχνολογιών επιφανειακών κατεργασιών με ηλιακή ενέργεια. Αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει την ανάπτυξη νέων υβριδικών συστημάτων που συνδυάζουν την ηλιακή ενέργεια με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ώστε να εξασφαλίζεται συνεχής και αξιόπιστη παροχή ενέργειας. Επιπλέον, η ανάπτυξη έξυπνων υλικών που μπορούν να ανταποκρίνονται δυναμικά στην ηλιακή ακτινοβολία προσφέρει συναρπαστικές δυνατότητες για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της προσαρμοστικότητας των διεργασιών που βασίζονται στην ηλιακή ακτινοβολία (Alvarez et al., 2018).

Εν κατακλείδι, η τελευταία δεκαετία υπήρξε μια περίοδος δυναμικής ανάπτυξης και καινοτομίας στον τομέα των επιφανειακών κατεργασιών με τη χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας. Η πρόοδος που σημειώθηκε στον τομέα αυτό όχι μόνο

μεταμορφώνει τις βιομηχανικές πρακτικές αλλά και ανοίγει το δρόμο για ένα πιο βιώσιμο μέλλον. Καθώς η έρευνα συνεχίζει να εξελίσσεται, οι δυνατότητες της ηλιακής ενέργειας να φέρει επανάσταση στις τεχνολογίες επιφανειακών κατεργασιών είναι τεράστιες, προσφέροντας νέες ευκαιρίες στις βιομηχανίες να καινοτομήσουν μειώνοντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις (Alvarez et al., 2018).

2.4.3 *Προσομοιώσεις και Αναλυτικά Μοντέλα*

Οι προσομοιώσεις και τα αναλυτικά μοντέλα αποτελούν κρίσιμα εργαλεία στην κατανόηση και την ανάπτυξη επιφανειακών κατεργασιών που αξιοποιούν τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια. Οι σύγχρονες τεχνικές προσομοίωσης επιτρέπουν τη λεπτομερή μελέτη της αλληλεπίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας με τα υλικά, συσχετίζοντας τις θερμικές και μηχανικές επιπτώσεις σε επίπεδο μικροδομής και βοηθώντας στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς των υλικών σε πραγματικές συνθήκες (Islam et al., 2018).

Προσομοιώσεις με Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) είναι ένα από τα πιο ισχυρά εργαλεία προσομοίωσης στη μελέτη της επιφανειακής κατεργασίας με τη χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας. Η FEM επιτρέπει την ανάλυση πολύπλοκων φυσικών φαινομένων, όπως η θερμική διάχυση, οι μηχανικές τάσεις και οι παραμορφώσεις που εμφανίζονται σε υλικά που εκτίθενται σε έντονη ηλιακή ακτινοβολία. Οι προσομοιώσεις FEM βοηθούν τους ερευνητές και τους μηχανικούς στη βελτιστοποίηση των μεθόδων κατεργασίας, στην πρόβλεψη της απόδοσης των υλικών και στη μείωση του κόστους των πειραματικών δοκιμών (Islam et al., 2018).

Η ανάλυση των θερμικών επιδράσεων με τη χρήση FEM επικεντρώνεται στη μοντελοποίηση της κατανομής της θερμοκρασίας εντός των υλικών που υπόκεινται σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβόληση. Οι προσομοιώσεις αυτές λαμβάνουν υπόψη την ένταση της ακτινοβολίας, τη διάρκεια έκθεσης, τις θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού και τη γεωμετρία της κατεργασμένης επιφάνειας. Η FEM επιτρέπει τη λεπτομερή καταγραφή της θερμικής επίδρασης και της ανάπτυξης βαθμίδας, η οποία μπορεί να επηρεάσει τη μικροδομή του υλικού. Σε διεργασίες όπως η συγκόλληση ή η

επιφανειακή σκλήρυνση, η πρόβλεψη της θερμικής κατανομής βοηθά στην αποφυγή ρωγμών και ανεπιθύμητων μετασχηματισμών. (Islam et al., 2018).

Η FEM διευκολύνει επίσης την ανάλυση των μηχανικών τάσεων και παραμορφώσεων που προκαλούνται κατά τις επιφανειακές κατεργασίες. Η ανάλυση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε εφαρμογές όπως η συγκόλληση, η θερμική σκλήρυνση και οι επιφανειακές κατεργασίες. Οι προσομοιώσεις μπορούν να προβλέψουν την ανάπτυξη παραμορφώσεων και τις περιοχές υψηλών τάσεων που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία. Αναλύοντας αυτές τις τάσεις, οι μηχανικοί μπορούν να προσαρμόσουν τις παραμέτρους επεξεργασίας, όπως η γωνία πρόσπτωσης ακτινοβολίας ή ο χρόνος έκθεσης, για να μειώσουν την καταπόνηση και να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα των επεξεργασμένων επιφανειών (Islam et al., 2018).

Οι προσομοιώσεις FEM χρησιμοποιούνται περαιτέρω για πολυφασικά συστήματα όπου συνυπάρχουν διαφορετικές φάσεις και μικροδομές και επιτρέπουν την εξέταση του τρόπου με τον οποίο οι θερμικές και μηχανικές διεργασίες επηρεάζουν την ανάπτυξη ή τη διάλυση φάσεων, όπως τα σωματίδια ισχυροποίησης ή δευτερογενείς φάσεις. Στη θερμική κατεργασία χάλυβα με συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια, οι προσομοιώσεις μπορούν να προβλέψουν την ανάπτυξη φάσεων όπως ο μαρτενσίτης, με βάση τη θερμοκρασία και την ταχύτητα ψύξης. (Islam et al., 2018).

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπει τη δοκιμή πολλαπλών σεναρίων και παραμέτρων επεξεργασίας χωρίς δαπανηρά και χρονοβόρα πειράματα. Οι προσομοιώσεις προβλέπουν την επίδραση κάθε παραμέτρου, καθοδηγώντας τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών. Συνολικά, οι προσομοιώσεις FEM διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην πρόοδο του τομέα, καθιστώντας τις τεχνικές επεξεργασίας πιο αποτελεσματικές, ασφαλείς και προσαρμόσιμες στις εξελισσόμενες απαιτήσεις της σύγχρονης βιομηχανίας (Islam et al., 2018).

Ανάλυση Θερμικών Επιπτώσεων και Διάχυση Θερμότητας

Η ανάλυση των θερμικών επιπτώσεων και της διάχυσης θερμότητας είναι σημαντική για την κατανόηση των επιφανειακών κατεργασιών με συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια. Η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια δημιουργεί υψηλές θερμοκρασίες σε

μικρές επιφάνειες, προκαλώντας έντονες θερμοκρασιακές κλίσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε ανάπτυξη της μικροδομής, τάσεις και παραμορφώσεις. (Ponseca Jr et al., 2017).

Στις επιφανειακές κατεργασίες με συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια, η θερμική ανάλυση περιλαμβάνει τη μελέτη της διάχυσης θερμότητας και των θερμοκρασιακών κλίσεων που αναπτύσσονται στα υλικά. Εξαρτάται από τις θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού, όπως η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμότητα, καθώς και από εξωτερικούς παράγοντες, όπως η ένταση της ακτινοβολίας και η ταχύτητα ψύξης. Χρησιμοποιώντας λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (FEM), οι θερμικές κλίσεις μπορούν να μοντελοποιηθούν με ακρίβεια, επιτρέποντας την πρόβλεψη των θερμικών καταπονήσεων και την προσαρμογή των συνθηκών επεξεργασίας για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας (Ponseca Jr et al., 2017).

Για παράδειγμα, σε μεταλλικά κράματα, οι γρήγορες μεταβολές θερμοκρασίας λόγω θέρμανσης και ψύξης μπορούν να οδηγήσουν σε ρωγμές ή άλλες μορφές αστοχίας. Ο προσδιορισμός των κρίσιμων θερμοκρασιών, όπως το σημείο τήξης ή οι θερμοκρασίες μετασχηματισμού φάσεων, είναι καθοριστική για την προσαρμογή των παραμέτρων κατεργασίας, καθώς οι θερμικές προσομοιώσεις παρέχουν πληροφορίες για τις συνθήκες υπό τις οποίες αυτές οι θερμοκρασίες μπορούν να επηρεάσουν τη δομή του υλικού (Ponseca Jr et al., 2017).

Οι θερμικές κλίσεις κατά τη διάρκεια της κατεργασίας μπορεί να οδηγήσουν σε παραμορφώσεις και παραμένουσες τάσεις, οι οποίες επηρεάζουν τη μακροχρόνια απόδοση του υλικού. (Ponseca Jr et al., 2017).

Μέσω των προσομοιώσεων, μπορούν να αναπτυχθούν τεχνικές που μειώνουν τις θερμικές καταπονήσεις και βελτιώνουν τη δομική ακεραιότητα. Αυτές οι βελτιώσεις έχουν πρακτικές εφαρμογές στη βιομηχανία, όπως στην αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία, όπου η ποιότητα και η ανθεκτικότητα των υλικών είναι ζωτικής σημασίας. (Ponseca Jr et al., 2017).

Προσομοιώσεις Μετασχηματισμών Φάσεων

Η προσομοίωση των αλλαγών μικροδομής αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της μελέτης των επιφανειακών κατεργασιών με συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια. Οι προσομοιώσεις αυτές βοηθούν στην πρόβλεψη του μετασχηματισμού των μικροδομών κατά τη διάρκεια διεργασιών όπως η σκλήρυνση, η επικάλυψη ή η κραματοποίηση, όπου τα υλικά εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες και ταχείς ρυθμούς ψύξης. (Fernández-González et al., 2018).

Οι προσομοιώσεις των μικροδομικών αλλαγών συχνά περιλαμβάνουν τη μοντελοποίηση του σχηματισμού και της κατανομής διαφορετικών φάσεων εντός του υλικού, όπως καρβίδια, μαρτενσίτης ή άλλων φάσεων ισχυροποίησης. Η ακρίβεια αυτών των μοντέλων βασίζεται σε λεπτομερή δεδομένα εισόδου, όπως διαγράμματα φάσεων, συντελεστές διάχυσης και θερμοδυναμικές ιδιότητες. Με την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι κλίσεις θερμοκρασίας επηρεάζουν τους μετασχηματισμούς φάσεων, οι προσομοιώσεις μπορούν να προβλέψουν τον σχηματισμό επιθυμητών μικροδομών που βελτιώνουν την απόδοση του υλικού. (Fernández-González et al., 2018).

Επιπλέον, οι προσομοιώσεις διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην κατανόηση και τον περιορισμό ατελειών όπως το πορώδες, οι ρωγμές ή ο διαχωρισμός φάσεων, που μπορεί να προκύψουν κατά την ηλιακή κατεργασία. Με τη μοντελοποίηση των θερμικών κύκλων και των ρυθμών ψύξης, οι προσομοιώσεις βοηθούν στον εντοπισμό συνθηκών που μπορεί να οδηγήσουν σε τέτοιου είδους ελαττώματα, επιτρέποντας προσαρμογές στη στρατηγική επεξεργασίας. (Fernández-González et al., 2018).

Η προσομοίωση των μικροδομικών αλλαγών επεκτείνεται επίσης στην πρόβλεψη της ανάπτυξης παραμενουσών τάσεων, η οποία μπορεί να επηρεάσει μακροπρόθεσμα την αντοχή του υλικού. Οι εν λόγω τάσεις προκύπτουν λόγω της ταχείας θερμικής διαστολής και συστολής κατά την έκθεση στον ήλιο. Οι προσομοιώσεις μπορούν να χαρτογραφήσουν την κατανομή των τάσεων εντός του επεξεργασμένου στρώματος. Προσαρμόζοντας τις παραμέτρους επεξεργασίας με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, οι μηχανικοί μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις παραμένουσες τάσεις, ενισχύοντας τη δομική ακεραιότητα του υλικού (Fernández-González et al., 2018).

Συνολικά, η χρήση εργαλείων προσομοίωσης για την πρόβλεψη των αλλαγών στη μικροδομή είναι σημαντική. Η προσέγγιση αυτή όχι μόνο βελτιώνει την αποδοτικότητα και την απόδοση των επιφανειακών κατεργασιών, αλλά και οδηγεί στη συνεχή εξέλιξη των τεχνολογιών κατεργασίας της ηλιακής ενέργειας, διευρύνοντας τα όρια του τι μπορεί να επιτευχθεί με τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (Fernández-González et al., 2018).

Βελτιστοποίηση Παραμέτρων Κατεργασίας

Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων στις επιφανειακές κατεργασίες με συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων του υλικού και την ενίσχυση της συνολικής αποτελεσματικότητας της διαδικασίας. Αυτό περιλαμβάνει τη λεπτομερή ρύθμιση παραγόντων όπως η ένταση της ενέργειας, ο χρόνος έκθεσης, οι ρυθμοί ψύξης και οι περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίοι επηρεάζουν σημαντικά την τελική μικροδομή και τις επιδόσεις των κατεργασμένων επιφανειών. Ο στόχος της βελτιστοποίησης είναι η καθιέρωση ενός συνόλου συνθηκών που παράγουν σταθερά αποτελέσματα υψηλής ποιότητας, μεγιστοποιώντας την απόδοση του υλικού και ελαχιστοποιώντας παράλληλα το κόστος και το χρόνο επεξεργασίας (Dosta, Betancor & Barreneche, 2024).

Μία από τις πρωταρχικές πτυχές της βελτιστοποίησης των παραμέτρων επεξεργασίας είναι ο έλεγχος της εισαγωγής ενέργειας στο υλικό. Η ένταση και η κατανομή της ηλιακής ενέργειας καθορίζουν τον ρυθμό θέρμανσης, τις κλίσεις θερμοκρασίας και το βάθος της επεξεργασίας. Η ρύθμιση αυτών των παραμέτρων επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο των μετασχηματισμών φάσεων, της ανάπτυξης κόκκων και της επιφανειακής σκλήρυνσης. Για παράδειγμα, η αύξηση της έντασης της ενέργειας μπορεί να ενισχύσει την επιφανειακή σκληρότητα, αλλά θα μπορούσε επίσης να ενέχει τον κίνδυνο υπερθέρμανσης, οδηγώντας σε ανεπιθύμητες μεταβολές φάσεων ή δομικά ελαττώματα. Επομένως, η εύρεση της βέλτιστης ισορροπίας είναι απαραίτητη για να αποφευχθεί η υποβάθμιση του υλικού (Dosta, Betancor & Barreneche, 2024).

Η διάρκεια της έκθεσης στον ήλιο είναι μια άλλη κρίσιμη παράμετρος που επηρεάζει τον θερμικό κύκλο του υλικού. Η παρατεταμένη έκθεση μπορεί να αυξήσει τη διάχυση των κραματικών στοιχείων, οδηγώντας σε πιο ομοιόμορφη μικροδομή, αλλά αυξάνει

επίσης τον κίνδυνο υπερβολικής ανάπτυξης κόκκων ή οξείδωσης. Από την άλλη πλευρά, οι μικρότεροι χρόνοι έκθεσης μπορεί να οδηγήσουν σε ατελείς μετασχηματισμούς ή σε ανεπαρκή συγκόλληση των επιστρώσεων. Μέσω συστηματικού πειραματισμού και προσομοίωσης, μπορεί να προσδιοριστεί ο βέλτιστος χρόνος έκθεσης για την επίτευξη του σωστού συνδυασμού μικροδομικών χαρακτηριστικών και μηχανικών ιδιοτήτων (Dosta, Betancor & Barreneche, 2024).

Ο ρυθμός ψύξης είναι εξίσου σημαντικός στη διαδικασία βελτιστοποίησης, ιδίως όταν πρόκειται για διαδικασίες ταχείας στερεοποίησης. Η ελεγχόμενη ψύξη επιτρέπει το σχηματισμό συγκεκριμένων φάσεων, όπως ο μαρτενσίτης στους χάλυβες, οι οποίες συμβάλλουν στην αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής στη φθορά. Ωστόσο, ο πολύ γρήγορος ρυθμός ψύξης μπορεί να εισάγει παραμένουσες τάσεις ή ρωγμές, ενώ η αργή ψύξη μπορεί να οδηγήσει σε πιο μαλακές, λιγότερο ανθεκτικές μικροδομές. Βελτιστοποιώντας τις συνθήκες ψύξης, η διαδικασία μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να παράγει την πιο ωφέλιμη σύνθεση φάσεων για την προοριζόμενη εφαρμογή (Dosta, Betancor & Barreneche, 2024).

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η ατμόσφαιρα γύρω από τη ζώνη επεξεργασίας, παίζουν επίσης καθοριστικό ρόλο. Η παρουσία οξυγόνου μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη οξείδωση, ενώ το ελεγχόμενο περιβάλλον, όπως με αδρανή αέρια (Ar, N2), μπορούν να αποτρέψουν την επιφανειακή μόλυνση και να βελτιώσουν την ποιότητα του επεξεργασμένου στρώματος. (Dosta, Betancor & Barreneche, 2024).

Η βελτιστοποίηση επηρεάζεται επίσης από το συγκεκριμένο υλικό που υποβάλλεται σε επεξεργασία. Τα διάφορα μέταλλα και κράματα ανταποκρίνονται με διαφορετικό τρόπο στη θερμική έκθεση, γεγονός που καθιστά αναγκαία την προσαρμογή των παραμέτρων επεξεργασίας για κάθε τύπο υλικού. Για παράδειγμα, οι ανοξείδωτοι χάλυβες, τα κράματα τιτανίου και τα υπερκράματα μπορεί να απαιτούν διαφορετικούς συνδυασμούς εισαγωγής ενέργειας, διάρκειας έκθεσης και ψύξης για την επίτευξη βέλτιστων επιφανειακών ιδιοτήτων. (Zervaki et al., 2024).

Τα προηγμένα εργαλεία μοντελοποίησης και προσομοίωσης αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της διαδικασίας βελτιστοποίησης, παρέχοντας μια εικονική πλατφόρμα για τη δοκιμή διαφόρων παραμέτρων χωρίς την ανάγκη εκτεταμένων πειραματικών δοκιμών. (Zervaki et al., 2024).

Προσομοιώσεις για Ανάλυση Τάσεων και Παραμορφώσεων

Η προσομοίωση της ανάλυσης τάσεων και παραμορφώσεων διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη και βελτιστοποίηση των επιφανειακών κατεργασιών με τη χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας. Με την ακριβή μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της ηλιακής ενέργειας και του υλικού, οι προσομοιώσεις βοηθούν στην πρόβλεψη του τρόπου με τον οποίο οι διάφορες παράμετροι επεξεργασίας θα επηρεάσουν τη δομική ακεραιότητα και τις επιδόσεις του υλικού. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει προηγμένες υπολογιστικές μεθόδους, συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA), για να εξεταστεί πώς οι θερμικοί κύκλοι που προκαλούνται από την ηλιακή ενέργεια επηρεάζουν την κατανομή των τάσεων, τις παραμορφώσεις και τους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας (Kumar et al., 2019).

Η ανάλυση των τάσεων και των παραμορφώσεων κατά την ηλιακή επεξεργασία ρίχνει επίσης φως στον τρόπο με τον οποίο οι διαφορετικοί ρυθμοί ψύξης επηρεάζουν την ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων. (Kumar et al., 2019).

Η παραμόρφωση του υλικού κατά την ηλιακή επεξεργασία είναι ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας που οι προσομοιώσεις βοηθούν στη διερεύνηση. Καθώς τα υλικά εκτίθενται σε υψηλής έντασης ηλιακή ενέργεια, υφίστανται θερμική διαστολή, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε προσωρινή ή μόνιμη παραμόρφωση. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο εξελίσσονται αυτές οι παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια και μετά την επεξεργασία είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη της σταθερότητας των διαστάσεων και της επιπεδότητας των επιφανειών. Μέσω προσομοιώσεων, οι ερευνητές μπορούν να προσαρμόσουν τις παραμέτρους επεξεργασίας ώστε να ελαχιστοποιήσουν τις ανεπιθύμητες παραμορφώσεις, διατηρώντας έτσι τη γεωμετρική ακρίβεια που απαιτείται για εφαρμογές υψηλών επιδόσεων (Kumar et al., 2019).

Οι προσομοιώσεις είναι ιδιαίτερα πολύτιμες όταν πρόκειται για πολύπλοκες γεωμετρίες ή πολυστρωματικά υλικά, όπου η άμεση πειραματική παρατήρηση των παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων θα ήταν δύσκολη. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα υπολογιστικά μοντέλα παρέχουν ένα μη επεμβατικό μέσο εξέτασης του τρόπου με τον οποίο τα διάφορα στρώματα αλληλεπιδρούν θερμικά και μηχανικά υπό την

επίδραση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για σύνθετα υλικά ή επιστρώσεις, όπου η συμβατότητα μεταξύ των στρωμάτων καθορίζει τη συνολική επιτυχία της επεξεργασίας (Ding et al., 2021).

Επιπλέον, οι προσομοιώσεις διευκολύνουν τη διερεύνηση νέων υλικών και επεξεργασιών που δεν έχουν ακόμη δοκιμαστεί πειραματικά. Με τη μοντελοποίηση της αναμενόμενης συμπεριφοράς νέων κραμάτων ή σύνθετων συστημάτων υπό την επίδραση της ηλιακής ενέργειας, οι ερευνητές μπορούν να προβλέψουν πιθανές βελτιώσεις των επιδόσεων ή να εντοπίσουν αδυναμίες πριν δεσμευτούν σε δαπανηρές πειραματικές διατάξεις. Αυτή η ικανότητα πρόβλεψης επιταχύνει την ανάπτυξη καινοτόμων επιφανειακών κατεργασιών, μειώνοντας το χρόνο από την ιδέα έως την εφαρμογή (Ding et al., 2021).

Εφαρμογές και Μελλοντικές Προοπτικές των Προσομοιώσεων

Η εφαρμογή των προσομοιώσεων στην ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων υπό συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια επεκτείνεται με ταχείς ρυθμούς, προσφέροντας σημαντικά οφέλη για τις επιφανειακές κατεργασίες σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς. Οι προσομοιώσεις επιτρέπουν τη λεπτομερή διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο τα υλικά συμπεριφέρονται υπό συγκεκριμένες συνθήκες, παρέχοντας γνώσεις που καθοδηγούν την ανάπτυξη νέων διεργασιών και βελτιστοποιούν τις υπάρχουσες. Καθώς οι βιομηχανίες επιδιώκουν να βελτιώσουν την απόδοση και τη μακροζωία των υλικών τους, οι προσομοιώσεις καθίστανται απαραίτητα εργαλεία για την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων, τη μείωση των πειραμάτων δοκιμής και λάθους και την επιτάχυνση της υιοθέτησης προηγμένων επεξεργασιών επιφάνειας (Logie, Pye & Coventry, 2018).

Η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική βιομηχανία αξιοποιούν επίσης τις προσομοιώσεις για τη βελτίωση των επιφανειακών κατεργασιών, με στόχο τη δημιουργία ελαφρύτερων, ισχυρότερων και ανθεκτικότερων εξαρτημάτων. Σε αυτούς τους τομείς, η απόδοση των υλικών σε ακραίες συνθήκες είναι κρίσιμη και οι προσομοιώσεις βοηθούν στην πρόβλεψη του τρόπου με τον οποίο οι επεξεργασμένες με ηλιακή ακτινοβολία επιφάνειες θα συμπεριφέρονται υπό την επίδραση μηχανικών φορτίων, θερμικών κύκλων και περιβαλλοντικής έκθεσης.

Για παράδειγμα, στη μελέτη του Logie και των συνεργατών του (2018) για τους ηλιακούς δέκτες, αναλύθηκε η θερμοελαστική καταπόνηση σε σωλήνες που περιέχουν υγρό νάτριο και λιωμένο άλας. Η προσομοίωση έδειξε ότι, λόγω της υψηλότερης θερμικής αγωγιμότητας του υγρού νατρίου, η θερμική καταπόνηση ήταν 35% χαμηλότερη σε σύγκριση με αυτήν στους σωλήνες που περιείχαν λιωμένο άλας, καθώς το νάτριο μειώνει τη θερμική διαφορά μεταξύ της θερμαινόμενης και της ψυχρότερης πλευράς του σωλήνα.

Με την κατανόηση αυτών των αλληλεπιδράσεων σε μικροσκοπικό επίπεδο, οι μηχανικοί μπορούν να σχεδιάσουν υλικά που αντέχουν σε υψηλότερες καταπονήσεις χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια ή η απόδοση. Οι προσομοιώσεις παρέχουν την ευελιξία να διερευνήσουν ένα ευρύ φάσμα σεναρίων, από ταχείς κύκλους θέρμανσης και ψύξης έως μακροχρόνια έκθεση σε απαιτητικές συνθήκες, επιτρέποντας μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των υλικών (Logie, Pye & Coventry, 2018).

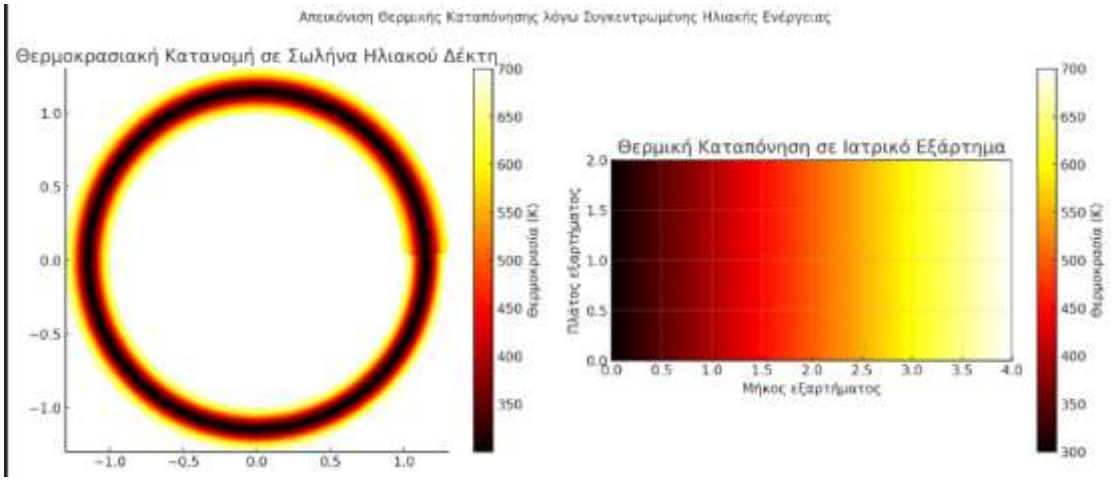
Στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι προσομοιώσεις συμβάλλουν στην ανάπτυξη επικαλύψεων και επιφανειακών κατεργασιών που βελτιώνουν την απόδοση των ηλιακών συλλεκτών και άλλων συσκευών συλλογής ενέργειας. Με τη μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ηλιακού φωτός και των επιφανειών που υποβάλλονται σε κατεργασία, οι ερευνητές μπορούν να σχεδιάσουν επιστρώσεις που ελαχιστοποιούν την ανακλαστικότητα, αυξάνουν την απορρόφηση και βελτιώνουν τη θερμική απόδοση. Οι προσομοιώσεις επιτρέπουν τη λεπτομερή ρύθμιση των επιφανειακών ιδιοτήτων για την επίτευξη βέλτιστων επιδόσεων, υποστηρίζοντας την ανάπτυξη των τεχνολογιών καθαρής ενέργειας (Logie, Pye & Coventry, 2018).

Η κατασκευή ιατρικών συσκευών είναι ένας άλλος τομέας όπου οι προσομοιώσεις αποδεικνύονται πολύτιμες. Οι επιφανειακές κατεργασίες με τη χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροποποίηση της βιοσυμβατότητας, της αντοχής στη φθορά και των αντιβακτηριακών ιδιοτήτων των εμφυτευμάτων και των χειρουργικών εργαλείων. Για παράδειγμα, η θερμική καταπόνηση από συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να εφαρμοστεί σε μεταλλικά εμφυτεύματα, ώστε να αυξηθεί η ανθεκτικότητά τους στη φθορά και να βελτιωθούν οι αντιβακτηριακές τους ιδιότητες, χωρίς να διακυβεύεται η δομική τους ακεραιότητα. Με την προσομοίωση τέτοιων επιδράσεων, οι μηχανικοί μπορούν να

ελέγξουν με ακρίβεια την απόδοση των επιφανειών αυτών στις συνθήκες του ανθρώπινου σώματος, όπου οι απαιτήσεις βιοσυμβατότητας και αντοχής είναι εξαιρετικά υψηλές.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Logie, Pye και Coventry (2018), η θερμοκρασιακή καταπόνηση που προκαλείται από συγκεντρωμένη θερμική ακτινοβολία μπορεί να ελεγχθεί και να προσαρμοστεί ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού, διασφαλίζοντας ότι επιτυγχάνονται οι επιθυμητές τροποποιήσεις. Η χρήση τέτοιων προσομοιώσεων σε διάφορα μέταλλα και πολυμερή επιτρέπει στους κατασκευαστές να δημιουργήσουν ιατρικές συσκευές με βελτιωμένες επιδόσεις και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, συμβάλλοντας έτσι σε καλύτερα αποτελέσματα για τους ασθενείς.

Η θερμοκρασιακή κατανομή και η θερμική καταπόνηση απεικονίζονται στο **Σχήμα 2.4.3.1**, όπου φαίνεται η διαφορά θερμοκρασίας σε έναν ηλιακό δέκτη και σε μια ιατρική συσκευή υπό προσομοίωση. Η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην εκτεθειμένη και σκιασμένη πλευρά στο Σχήμα **2.4.3.1α** καταδεικνύει τις θερμικές καταπονήσεις που επιβαρύνουν το υλικό. Στο Σχήμα **2.4.3.1β**, η κατανομή θερμότητας σε ένα απλό μοντέλο ιατρικής συσκευής υπογραμμίζει τις διαφορές θερμικών φορτίων, βοηθώντας στην εκτίμηση της διάρκειας ζωής και αντοχής των συσκευών.

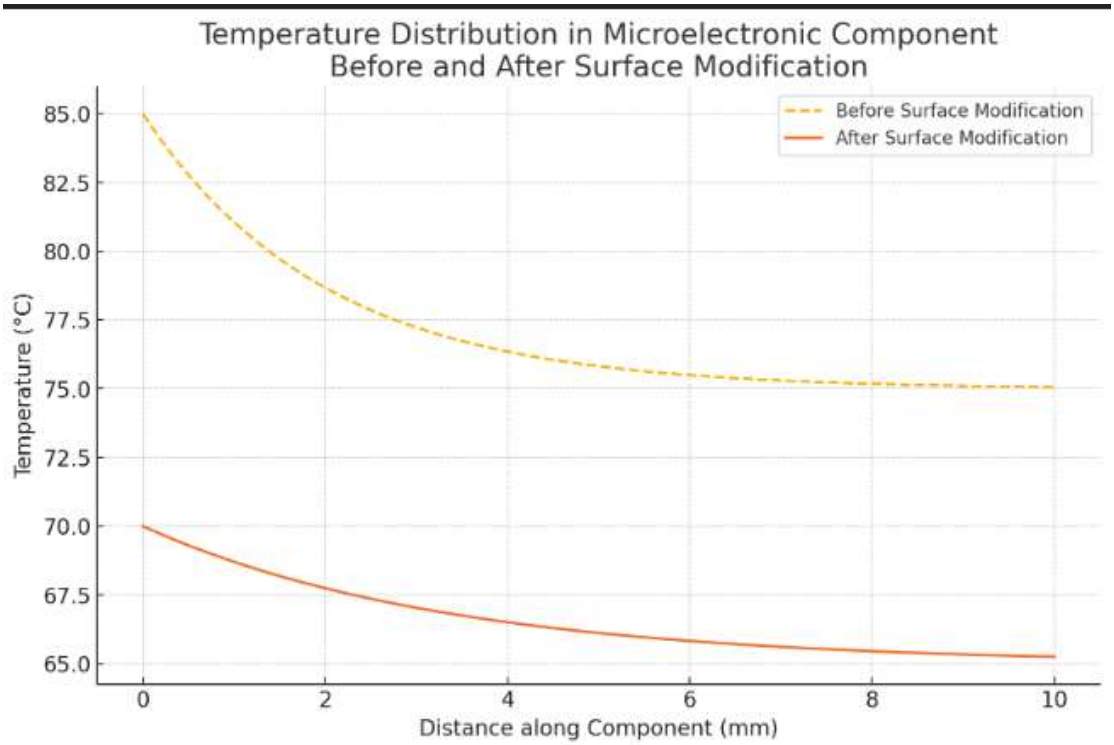


Σχήμα 2.4.3.1: Απεικόνιση Θερμικής Καταπόνησης λόγω Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας (Χρήση Κώδικα Python – **Παράρτημα 1α**)

Η ηλεκτρονική βιομηχανία επωφελείται από τις προσομοιώσεις επεξεργασιών που σχετίζονται με την ηλιακή ενέργεια, ειδικά στην ανάπτυξη μικροηλεκτρονικών εξαρτημάτων και αισθητήρων υψηλής απόδοσης. Για παράδειγμα, στην κατασκευή αισθητήρων θερμοκρασίας για βιομηχανική χρήση, οι επιφανειακές τροποποιήσεις,

όπως η επικάλυψη με στρώματα υλικών ανθεκτικών στη θερμότητα, συμβάλλουν στη μείωση της θερμικής παραμόρφωσης και στη διατήρηση της ακρίβειας μέτρησης σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο βελτιώνει τη θερμική αγωγιμότητα αλλά επίσης προστατεύει τα εξαρτήματα από φθορά και διάβρωση.

Οι προσομοιώσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα **2.4.3.2**, δείχνουν την κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος του εξαρτήματος πριν και μετά την επιφανειακή τροποποίηση, υποδεικνύοντας πώς η βελτιωμένη θερμική διάχυση μειώνει τη θερμοκρασιακή συγκέντρωση. Αυτή η δυνατότητα πρόβλεψης είναι κρίσιμη, καθώς οι συσκευές γίνονται ολοένα και μικρότερες και ταυτόχρονα πιο περίπλοκες. (Du et al., 2016).



Σχήμα 2.4.3.2: Θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος μικροηλεκτρονικού εξαρτήματος πριν και μετά την επιφανειακή τροποποίηση. **(Παράρτημα 1β)**

Κοιτάζοντας μπροστά, η ενσωμάτωση των προσομοιώσεων με την τεχνητή νοημοσύνη και τη μηχανική μάθηση είναι έτοιμη να φέρει επανάσταση στις τεχνολογίες επιφανειακών κατεργασιών. Συνδυάζοντας δεδομένα από προσομοιώσεις με πειραματικά αποτελέσματα, αυτοί οι προηγμένοι αλγόριθμοι μπορούν να εντοπίσουν πρότυπα και να βελτιστοποιήσουν διαδικασίες ταχύτερα από ποτέ. Αυτή η προσέγγιση θα επιτρέψει τη συνεχή βελτίωση των επιφανειακών κατεργασιών, επιτρέποντας ταχείες προσαρμογές και λεπτομερή ρύθμιση για την κάλυψη των εξελισσόμενων βιομηχανικών αναγκών. Οι προσομοιώσεις, ενισχυμένες με τεχνητή νοημοσύνη, θα παρέχουν μια δυναμική πλατφόρμα για τη διερεύνηση νέων υλικών και μεθόδων

επεξεργασίας, διευρύνοντας τα όρια του εφικτού στην επιστήμη των υλικών (Du et al., 2016).

Συνοψίζοντας, η χρήση προσομοιώσεων στις τεχνολογίες επιφανειακών κατεργασιών οδηγεί σε σημαντικές προόδους σε πολλούς κλάδους. Παρέχοντας λεπτομερή κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών υπό συνθήκες συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας, οι προσομοιώσεις επιτρέπουν την ανάπτυξη προσαρμοσμένων επεξεργασιών, όπως η ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα που λειτουργούν σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, οι προσομοιώσεις που στοχεύουν στη βελτίωση της θερμικής και μηχανικής αντοχής επιφανειών, όπως αυτές σε αισθητήρες και κυκλώματα ψύξης, επιτρέπουν την πρόβλεψη της αντοχής σε θερμική καταπόνηση και την αποτροπή της διάβρωσης. Αυτές οι επιφανειακές τροποποιήσεις διασφαλίζουν ότι τα εξαρτήματα μπορούν να αντέξουν παρατεταμένη έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία χωρίς απώλεια απόδοσης. Καθώς οι δυνατότητες προσομοίωσης εξελίσσονται, αναμένεται ότι η προγνωστική ακρίβεια θα βελτιωθεί, καθιστώντας δυνατή την κατασκευή εξαρτημάτων υψηλής αντοχής με μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και αυξημένη διάρκεια ζωής Αυτή η συνέργεια μεταξύ προσομοίωσης, πειραματισμού και βιομηχανικών αναγκών τοποθετεί τις προσομοιώσεις στην πρώτη γραμμή της μελλοντικής τεχνολογικής ανάπτυξης, διασφαλίζοντας ότι οι επιφανειακές κατεργασίες συμβαδίζουν με τις συνεχώς εξελισσόμενες απαιτήσεις των σύγχρονων εφαρμογών (Du et al., 2016).

2.5 Ενσωμάτωση με την ψηφιακή και έξυπνη κατασκευή

Η ενσωμάτωση της επιφανειακής κατεργασίας με συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια με την ψηφιακή και έξυπνη κατασκευή αποτελεί ένα σημαντικό άλμα προς τα εμπρός στην εξέλιξη της σύγχρονης βιομηχανίας. Καθώς οι διαδικασίες κατασκευής γίνονται όλο και περισσότερο αυτοματοποιημένες και διασυνδεδεμένες, η χρήση της ηλιακής ενέργειας σε αυτές τις διαδικασίες εισάγει ένα νέο επίπεδο αποτελεσματικότητας, ακρίβειας και βιωσιμότητας. Για παράδειγμα, στη βιομηχανία μετάλλων, η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θερμική επεξεργασία και σκλήρυνση επιφανειών. Όταν αυτή η διαδικασία ενσωματωθεί σε ένα σύστημα αυτοματοποιημένης κατασκευής, αυξάνει την ανθεκτικότητα των μεταλλικών

εξαρτημάτων και μειώνει το ενεργειακό κόστος, ενώ συνδέεται ψηφιακά με άλλες μηχανές για ακριβή και βιώσιμη παραγωγή. Αυτός ο συνδυασμός οδηγεί σε καινοτόμες βιομηχανικές εφαρμογές που ενισχύουν τη βιωσιμότητα και την απόδοση. (Edgar & Pistikopoulos, 2018).

Ψηφιακή δίδυμη τεχνολογία και ηλιακές επιφανειακές κατεργασίες

Η τεχνολογία ψηφιακών διδύμων, η οποία περιλαμβάνει τη δημιουργία εικονικού αντιγράφου ενός φυσικού συστήματος για παρακολούθηση και προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο, έχει καταστεί ακρογωνιαίος λίθος της έξυπνης παραγωγής. Όταν συνδυάζεται με ηλιακές επιφανειακές κατεργασίες, η τεχνολογία αυτή μπορεί να βελτιστοποιήσει τη διαδικασία κατασκευής από την αρχή έως το τέλος. Για παράδειγμα, τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να προσομοιώσουν τον τρόπο με τον οποίο τα υλικά ανταποκρίνονται στις ηλιακές επεξεργασίες, προβλέποντας τα αποτελέσματα και επιτρέποντας ακριβείς προσαρμογές πριν από την έναρξη της πραγματικής διαδικασίας (Edgar & Pistikopoulos, 2018).

Έξυπνα εργοστάσια και αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας

Τα έξυπνα εργοστάσια, που χαρακτηρίζονται από τη χρήση διασυνδεδεμένων συστημάτων, την αυτοματοποίηση και τη λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων, προσφέρουν πρόσφορο έδαφος για την εφαρμογή ηλιακών επιφανειακών κατεργασιών Σε αυτά τα περιβάλλοντα, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί όχι μόνο για επιφανειακές κατεργασίες αλλά και ως κύρια πηγή ενέργειας για άλλες διαδικασίες παραγωγής. Η ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα του έξυπνου εργοστασίου μειώνει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και μειώνει το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα της παραγωγικής διαδικασίας (Edgar & Pistikopoulos, 2018).

Επιπλέον, οι ηλιακές επιφανειακές κατεργασίες μπορούν να ενσωματωθούν πλήρως στις αυτοματοποιημένες ροές εργασίας των έξυπνων εργοστασίων. Ρομποτικά συστήματα εξοπλισμένα με αισθητήρες και τεχνητή νοημοσύνη μπορούν να εφαρμόζουν με ακρίβεια ηλιακές κατεργασίες σε διάφορα εξαρτήματα,

εξασφαλίζοντας ομοιομορφία και ποιότητα. Αυτά τα αυτοματοποιημένα συστήματα μπορούν επίσης να προσαρμόζονται στις αλλαγές στο περιβάλλον κατασκευής, όπως οι διακυμάνσεις στην ένταση του ηλιακού φωτός, προσαρμόζοντας ανάλογα τις παραμέτρους της διαδικασίας (Edgar & Pistikopoulos, 2018).

Διαδίκτυο (IoT) και βελτιστοποίηση διαδικασιών

Το Διαδίκτυο (IoT) διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη βελτιστοποίηση των ηλιακών επιφανειακών κατεργασιών στο πλαίσιο της έξυπνης κατασκευής. Οι συσκευές IoT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λεπτομερή ρύθμιση της διαδικασίας επιφανειακής κατεργασίας. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες IoT μπορούν να ανιχνεύσουν μικρές αποκλίσεις στη διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας και να προσαρμόσουν τη διάρκεια ή την ένταση της επεξεργασίας για να διατηρήσουν σταθερή ποιότητα (Bouaddi et al., 2018).

Το IoT διευκολύνει επίσης την ενσωμάτωση των ηλιακών επιφανειακών κατεργασιών με άλλες διαδικασίες παραγωγής. Για παράδειγμα, τα δεδομένα από τις συσκευές IoT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον συγχρονισμό των ηλιακών κατεργασιών με επόμενες διεργασίες, όπως η ψύξη ή η επίστρωση, διασφαλίζοντας ότι κάθε βήμα βελτιστοποιείται για μέγιστη απόδοση. Αυτή η διασυνδεδεμένη προσέγγιση όχι μόνο βελτιώνει την ποιότητα των τελικών προϊόντων αλλά και μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και τη σπατάλη υλικών (Bouaddi et al., 2018).

Τεχνητή νοημοσύνη (AI) και μηχανική μάθηση στις ηλιακές κατεργασίες

Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και η μηχανική μάθηση χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας των επιφανειακών κατεργασιών ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να αναλύσουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων από προηγούμενες επεξεργασίες, εντοπίζοντας μοτίβα και συσχετίσεις που μπορεί να διαφεύγουν από τους ανθρώπινους

χειριστές. Αξιοποιώντας αυτά τα δεδομένα, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να βελτιστοποιήσει τις παραμέτρους της επεξεργασίας ηλιακών κατεργασιών, όπως ο χρόνος έκθεσης και η ένταση, ώστε να επιτευχθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα (Bouaddi et al., 2018).

Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν επίσης να προβλέψουν πιθανά προβλήματα πριν από την εμφάνισή τους, επιτρέποντας στους κατασκευαστές να αναλάβουν προληπτική δράση. Για παράδειγμα, εάν ο αλγόριθμος ανιχνεύσει ένα μοτίβο που συνήθως οδηγεί σε επιφανειακά ελαττώματα, μπορεί να προσαρμόσει αυτόματα τις παραμέτρους της διαδικασίας ώστε να αποφευχθούν αυτά τα ζητήματα. Αυτή η ικανότητα πρόβλεψης όχι μόνο βελτιώνει την ποιότητα των προϊόντων, αλλά και παρατείνει τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού παραγωγής μειώνοντας τη φθορά (Bouaddi et al., 2018).

Βιωσιμότητα και ενεργειακή απόδοση

Ένα από τα σημαντικότερα οφέλη από την ενσωμάτωση των ηλιακών επιφανειακών κατεργασιών με την ψηφιακή και έξυπνη κατασκευή είναι η ενίσχυση της βιωσιμότητας και της ενεργειακής απόδοσης. Η ηλιακή ενέργεια, καθώς είναι ανανεώσιμη και άφθονη, μειώνει την εξάρτηση από τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας, μειώνοντας σημαντικά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με τις διαδικασίες κατασκευής. Όταν ενσωματώνονται με την έξυπνη κατασκευή, οι ηλιακές επιφανειακές κατεργασίες μπορούν να ελέγχονται με ακρίβεια για την ελαχιστοποίηση της χρήσης ενέργειας, ενισχύοντας περαιτέρω τη βιωσιμότητα της διαδικασίας (Bouaddi et al., 2018).

Η χρήση ψηφιακών τεχνολογιών συμβάλλει επίσης στην ενεργειακή αποδοτικότητα με τη βελτιστοποίηση ολόκληρης της ροής εργασιών παραγωγής. Για παράδειγμα, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να εντοπίσει ευκαιρίες για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια των ηλιακών κατεργασιών, όπως η προσαρμογή της διαδικασίας με βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες σε πραγματικό χρόνο ή ο προγραμματισμός των επεξεργασιών κατά τις ώρες αιχμής του ηλιακού φωτός. Αυτό το επίπεδο βελτιστοποίησης διασφαλίζει ότι η ενέργεια που χρησιμοποιείται στη

διαδικασία μεγιστοποιείται, μειώνοντας τη σπατάλη και μειώνοντας το λειτουργικό κόστος (Bouaddi et al., 2018).

2.6 Υβριδικά και πολλαπλών πηγών ενεργειακά συστήματα

Η ενσωμάτωση της συμπυκνωμένης ηλιακής ενέργειας με υβριδικά συστήματα ενέργειας και συστήματα πολλαπλών πηγών ενέργειας αποτελεί μια προσέγγιση αιχμής για τη βελτίωση των επιφανειακών κατεργασιών σε βιομηχανικές εφαρμογές. Συνδυάζοντας την ηλιακή ενέργεια με άλλες πηγές ενέργειας, όπως η ηλεκτρική ενέργεια, το φυσικό αέριο ή ακόμη και ανανεώσιμες πηγές όπως η αιολική και η γεωθερμική ενέργεια, αυτά τα υβριδικά συστήματα προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία, αποδοτικότητα και αξιοπιστία στις διαδικασίες παραγωγής (Canale et al., 2021).

Ενίσχυση της αποδοτικότητας και της ευελιξίας

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των υβριδικών ενεργειακών συστημάτων είναι η ικανότητά τους να ενισχύουν τη συνολική αποδοτικότητα των επιφανειακών κατεργασιών. Η ηλιακή ενέργεια, αν και άφθονη και ανανεώσιμη, υπόκειται σε διακυμάνσεις λόγω παραγόντων όπως οι καιρικές συνθήκες και η ώρα της ημέρας. Με την ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας με άλλες πηγές ενέργειας, τα υβριδικά συστήματα μπορούν να διατηρήσουν σταθερή παραγωγή ενέργειας, διασφαλίζοντας ότι οι επιφανειακές κατεργασίες μπορούν να συνεχίζονται αδιάλειπτα ανεξάρτητα από τη διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας (Canale et al., 2021).

Για παράδειγμα, σε περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας, ένα υβριδικό σύστημα μπορεί να στραφεί στη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας ή φυσικού αερίου για να διατηρήσει τις απαιτούμενες θερμοκρασίες και τα επίπεδα ενέργειας για τις επιφανειακές κατεργασίες. Αυτή η απρόσκοπτη μετάβαση μεταξύ των πηγών ενέργειας όχι μόνο διασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία των διαδικασιών παραγωγής, αλλά και βελτιστοποιεί τη χρήση ενέργειας, μειώνοντας το κόστος και βελτιώνοντας τη βιωσιμότητα της λειτουργίας (Canale et al., 2021).

Ενεργειακά συστήματα πολλαπλών πηγών και οι εφαρμογές τους

Τα ενεργειακά συστήματα πολλαπλών πηγών προχωρούν περαιτέρω την έννοια των υβριδικών συστημάτων ενσωματώνοντας πολλαπλές πηγές ενέργειας σε ένα ενιαίο, συνεκτικό σύστημα. Στο πλαίσιο των ηλιακών επιφανειακών κατεργασιών, αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει την ταυτόχρονη χρήση ηλιακής, αιολικής και γεωθερμικής ενέργειας για την τροφοδοσία διαφορετικών πτυχών της διαδικασίας (Canale et al., 2021).

Για παράδειγμα, η ηλιακή ενέργεια θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την πρωτογενή θέρμανση των υλικών, ενώ η αιολική ενέργεια θα μπορούσε να τροφοδοτεί τα μηχανικά συστήματα που χειρίζονται τα υλικά ή ελέγχουν την κίνηση των ηλιακών συγκεντρωτών. Η γεωθερμική ενέργεια θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παροχή σταθερής βασικής θερμοκρασίας για διαδικασίες προθέρμανσης ή ψύξης μετά την επεξεργασία. Με την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων κάθε πηγής ενέργειας, τα συστήματα πολλαπλών πηγών ενέργειας μπορούν να επιτύχουν υψηλότερη συνολική απόδοση και να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των βιομηχανικών διεργασιών (Canale et al., 2021).

Εξελίξεις στην αποθήκευση και διαχείριση ενέργειας

Ένα κρίσιμο στοιχείο των υβριδικών και των ενεργειακών συστημάτων πολλαπλών πηγών είναι η ικανότητα αποτελεσματικής αποθήκευσης και διαχείρισης της ενέργειας. Οι εξελίξεις στις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες μεγάλης χωρητικότητας και τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της διαθεσιμότητας ενέργειας όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλή ή όταν άλλες πηγές δεν είναι άμεσα διαθέσιμες (Cavazzuti & Bottarelli, 2023).

Στο πλαίσιο της ηλιακής επιφανειακής κατεργασίας, τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης μπορούν να δεσμεύουν και να αποθηκεύουν την περίσσεια ηλιακής ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής της ηλιακής ακτινοβολίας, απελευθερώνοντάς την ανάλογα με τις ανάγκες για τη διατήρηση σταθερών συνθηκών επεξεργασίας. Παρομοίως, οι μπαταρίες μπορούν να αποθηκεύσουν ηλεκτρική ενέργεια που

παράγεται από ηλιακή ή αιολική ενέργεια, παρέχοντας εφεδρική παροχή ενέργειας που εξασφαλίζει τη συνέχεια της διαδικασίας (Cavazzuti & Bottarelli, 2023).

Τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας που είναι εξοπλισμένα με προηγμένους αλγορίθμους μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη χρήση της αποθηκευμένης ενέργειας, αποφασίζοντας σε πραγματικό χρόνο από ποια πηγή ενέργειας θα αντληθεί με βάση τις τρέχουσες συνθήκες, τους παράγοντες κόστους και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτή η έξυπνη διαχείριση όχι μόνο βελτιώνει την αξιοπιστία της διαδικασίας, αλλά και ενισχύει τη συνολική αποδοτικότητα και βιωσιμότητά της (Cavazzuti & Bottarelli, 2023).

Επιπτώσεις στις βιομηχανικές εφαρμογές

Η υιοθέτηση υβριδικών και πολλαπλών πηγών ενέργειας στις ηλιακές επιφανειακές κατεργασίες έχει σημαντικό αντίκτυπο σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Σε τομείς όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η προηγμένη μεταποίηση, όπου οι ακριβείς επιφανειακές κατεργασίες είναι κρίσιμες, η ικανότητα διατήρησης σταθερής παροχής ενέργειας μέσω υβριδικών συστημάτων είναι ζωτικής σημασίας (Cavazzuti & Bottarelli, 2023).

Για παράδειγμα, στην αεροδιαστημική βιομηχανία, όπου τα υλικά συχνά απαιτούν εξαιρετικά ακριβείς και ομοιόμορφες επιφανειακές κατεργασίες για να πληρούν αυστηρά πρότυπα ασφάλειας και επιδόσεων, η αξιοπιστία που παρέχουν τα υβριδικά συστήματα εξασφαλίζει ότι οι κατεργασίες αυτές μπορούν να πραγματοποιηθούν με ελάχιστη μεταβλητότητα. Αυτό οδηγεί σε προϊόντα υψηλότερης ποιότητας, μειωμένο κόστος παραγωγής και βελτιωμένη συνολική αποδοτικότητα (Cavazzuti & Bottarelli, 2023).

Στην αυτοκινητοβιομηχανία, όπου οι επιφανειακές κατεργασίες είναι απαραίτητες τόσο για τις επιδόσεις όσο και για την αισθητική, η χρήση υβριδικών ενεργειακών συστημάτων επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στις διαδικασίες παραγωγής. Οι κατασκευαστές μπορούν να εναλλάσσουν μεταξύ των πηγών ενέργειας ανάλογα με τη διαθεσιμότητα και το κόστος, διασφαλίζοντας ότι οι κατεργασίες ολοκληρώνονται αποτελεσματικά και βιώσιμα (Cavazzuti & Bottarelli, 2023).

2.7 Αντιμετώπιση των προκλήσεων και ενίσχυση της επεκτασιμότητας

Όσο ελπιδοφόρα και αν είναι τα υβριδικά συστήματα και τα συστήματα ενέργειας πολλαπλών πηγών για τις ηλιακές επιφανειακές κατεργασίες, συνοδεύονται από τις δικές τους προκλήσεις. Οι προκλήσεις αυτές κυμαίνονται από τεχνικά και λειτουργικά ζητήματα έως οικονομικά και κανονιστικά εμπόδια. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων είναι ζωτικής σημασίας για την ενίσχυση της επεκτασιμότητας και την ευρεία υιοθέτηση αυτών των συστημάτων σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές (Fernández-González et al., 2018).

Τεχνικές και λειτουργικές προκλήσεις

Μία από τις πρωταρχικές τεχνικές προκλήσεις κατά την ανάπτυξη υβριδικών και ενεργειακών συστημάτων πολλαπλών πηγών είναι η πολυπλοκότητα της ενσωμάτωσης διαφόρων πηγών ενέργειας σε μια απρόσκοπτη λειτουργία. Κάθε πηγή ενέργειας, είτε πρόκειται για ηλιακή, αιολική, γεωθερμική ή παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα, έχει μοναδικά χαρακτηριστικά όσον αφορά τη διαθεσιμότητα, τη μεταβλητότητα της παραγωγής και τις απαιτήσεις ελέγχου. Η επιτυχής ενσωμάτωση αυτών των διαφορετικών πηγών σε ένα ενοποιημένο σύστημα που μπορεί να εναλλάσσεται δυναμικά μεταξύ τους χωρίς να διακόπτει τη διαδικασία της επιφανειακής κατεργασίας απαιτεί προηγμένα συστήματα ελέγχου και εξελιγμένους αλγορίθμους (Fernández-González et al., 2018).

Η ανάγκη για ακριβή συντονισμό μεταξύ αυτών των πηγών ενέργειας απαιτεί συχνά την ανάπτυξη προσαρμοσμένων λύσεων λογισμικού και την ανάπτυξη πολύπλοκου υλικού, γεγονός που μπορεί να αυξήσει την αρχική επένδυση και την λειτουργική πολυπλοκότητα. Επιπλέον, η διασφάλιση της συμβατότητας μεταξύ διαφορετικών ενεργειακών τεχνολογιών, όπως τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης και οι μπαταρίες υψηλής χωρητικότητας, προσθέτει ένα ακόμη επίπεδο τεχνικής δυσκολίας (Fernández-González et al., 2018).

Ενώ οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες και τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης, είναι κρίσιμες για τη λειτουργία των υβριδικών συστημάτων, παρουσιάζουν επίσης προκλήσεις. Οι τρέχουσες τεχνολογίες μπαταριών, αν και βελτιώνονται, εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν περιορισμούς όσον αφορά την ενεργειακή πυκνότητα, το κόστος και τη διάρκεια ζωής. Τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης, από την άλλη πλευρά, απαιτούν σημαντικό χώρο και εξελιγμένη μόνωση για να διατηρήσουν την ενεργειακή απόδοση με την πάροδο του χρόνου. Η αποδοτικότητα αυτών των συστημάτων αποθήκευσης επηρεάζει άμεσα τη σκοπιμότητα των υβριδικών ενεργειακών συστημάτων στις ηλιακές επιφανειακές κατεργασίες, ιδίως σε περιβάλλοντα όπου η ηλιακή ενέργεια είναι ασταθής ή όπου άλλες ανανεώσιμες πηγές δεν είναι άμεσα διαθέσιμες (Fernández-González et al., 2018).

Η πολυπλοκότητα των υβριδικών και πολλαπλών πηγών ενέργειας δημιουργεί επίσης ανησυχίες σχετικά με τη συντήρηση και την αξιοπιστία. Η ενσωμάτωση πολλαπλών πηγών ενέργειας και λύσεων αποθήκευσης αυξάνει τον αριθμό των εξαρτημάτων και συστημάτων που απαιτούν παρακολούθηση, συντήρηση και πιθανή επισκευή. Η διασφάλιση της αξιοπιστίας αυτών των συστημάτων, ιδίως σε κρίσιμες βιομηχανικές εφαρμογές όπου ο χρόνος διακοπής λειτουργίας μπορεί να είναι δαπανηρός, απαιτεί ισχυρές στρατηγικές συντήρησης και προηγμένα συστήματα παρακολούθησης. Η ανάγκη για εξειδικευμένους τεχνικούς που είναι εξοικειωμένοι με τις περιπλοκές αυτών των συστημάτων αυξάνει περαιτέρω τις λειτουργικές προκλήσεις (Fernández-González et al., 2018).

Οικονομικές και κανονιστικές προκλήσεις

Η υψηλή αρχική επένδυση που απαιτείται για την ανάπτυξη υβριδικών ενεργειακών συστημάτων αποτελεί σημαντικό οικονομικό εμπόδιο. Το κόστος που συνδέεται με την ενσωμάτωση πολλαπλών πηγών ενέργειας, την ανάπτυξη προσαρμοσμένων συστημάτων ελέγχου και την εγκατάσταση λύσεων αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να είναι απαγορευτικό για πολλές βιομηχανίες. Αν και η μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση του ενεργειακού κόστους και τα οφέλη της αυξημένης αξιοπιστίας και αποδοτικότητας

μπορούν να αντισταθμίσουν αυτές τις αρχικές δαπάνες, η αρχική οικονομική δέσμευση παραμένει πρόκληση για την ευρεία υιοθέτηση (Zhang et al., 2018).

Τα ρυθμιστικά πλαίσια και οι πολιτικές μπορούν επίσης να αποτελέσουν προκλήσεις για την υιοθέτηση υβριδικών και πολλαπλών πηγών ενέργειας. Σε πολλές περιοχές, οι κανονισμοί για την ενέργεια δεν έχουν ακόμη προσαρμοστεί πλήρως ώστε να εξυπηρετούν την ενσωμάτωση πολλαπλών πηγών ενέργειας ή τη χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ρυθμιστικά εμπόδια που περιπλέκουν την ανάπτυξη και τη λειτουργία των υβριδικών συστημάτων. Επιπλέον, οι πολιτικές που ευνοούν τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας έναντι των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορούν να εμποδίσουν περαιτέρω την υιοθέτηση αυτών των καινοτόμων λύσεων (Zhang et al., 2018).

Για να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια, είναι σημαντικό για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής να αναπτύξουν υποστηρικτικά ρυθμιστικά πλαίσια που ενθαρρύνουν την υιοθέτηση υβριδικών ενεργειακών συστημάτων και διευκολύνουν την ενσωμάτωσή τους στις υφιστάμενες βιομηχανικές διαδικασίες. Κίνητρα, επιδοτήσεις και άλλοι χρηματοδοτικοί μηχανισμοί θα μπορούσαν να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στη μείωση της οικονομικής επιβάρυνσης των βιομηχανιών που επιθυμούν να υιοθετήσουν αυτά τα συστήματα (Zhang et al., 2018).

Στρατηγικές για την ενίσχυση της επεκτασιμότητας

Μια από τις πιο αποτελεσματικές στρατηγικές για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που συνδέονται με τα υβριδικά ενεργειακά συστήματα είναι η ανάπτυξη τυποποιημένων και αρθρωτών στοιχείων. Η τυποποίηση μπορεί να απλοποιήσει την ενσωμάτωση διαφορετικών πηγών ενέργειας και λύσεων αποθήκευσης, μειώνοντας την πολυπλοκότητα και το κόστος ανάπτυξης. Τα δομοστοιχειωτά συστήματα, τα οποία μπορούν εύκολα να αναβαθμιστούν ή να μειωθούν με βάση τις ειδικές ανάγκες μιας βιομηχανικής διαδικασίας, προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και διευκολύνουν τις βιομηχανίες να υιοθετήσουν τα υβριδικά ενεργειακά συστήματα σταδιακά (Zhang et al., 2018).

Η ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων ελέγχου και αλγορίθμων διαχείρισης ενέργειας είναι ένας άλλος κρίσιμος τομέας για την ενίσχυση της επεκτασιμότητας των υβριδικών ενεργειακών συστημάτων. Τα συστήματα αυτά πρέπει να είναι ικανά να διαχειρίζονται δυναμικά τις ροές ενέργειας από πολλαπλές πηγές, να βελτιστοποιούν τη χρήση της αποθηκευμένης ενέργειας και να εξασφαλίζουν τη συνεχή λειτουργία των επιφανειακών κατεργασιών. Οι εξελίξεις στην τεχνητή νοημοσύνη και τη μηχανική μάθηση προσφέρουν πολλά υποσχόμενες δυνατότητες για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας αυτών των συστημάτων ελέγχου, καθιστώντας τα πιο προσαρμόσιμα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες των βιομηχανικών διεργασιών (Zhang et al., 2018).

Η συνεργασία μεταξύ βιομηχανιών, ακαδημαϊκών ιδρυμάτων και παρόχων τεχνολογίας είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση των τεχνικών και οικονομικών προκλήσεων των υβριδικών ενεργειακών συστημάτων. Οι κοινές προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία καινοτόμων λύσεων που ανταποκρίνονται στις ειδικές ανάγκες διαφορετικών βιομηχανιών. Επιπλέον, η κοινή γνώση και εμπειρογνωμοσύνη μπορεί να επιταχύνει την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και να μειώσει το χρόνο που απαιτείται για να καταστούν τα συστήματα αυτά εμπορικά βιώσιμα (Zhang et al., 2018).

Η κυβερνητική στήριξη, με τη μορφή ερευνητικών επιχορηγήσεων, επιδοτήσεων και ευνοϊκών πολιτικών, είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση της υιοθέτησης υβριδικών και ενεργειακών συστημάτων πολλαπλών πηγών. Οι βιομηχανικές συμπράξεις και οι συνεργασίες δημόσιου και ιδιωτικού τομέα μπορούν επίσης να παράσχουν τους απαραίτητους πόρους και την τεχνογνωσία για την προώθηση αυτών των τεχνολογιών. Συνεργαζόμενοι, οι ενδιαφερόμενοι φορείς μπορούν να δημιουργήσουν ένα περιβάλλον που προάγει την καινοτομία και ενθαρρύνει την ευρεία υιοθέτηση βιώσιμων ενεργειακών λύσεων σε βιομηχανικές εφαρμογές (Zhang et al., 2018).

Μελλοντικές προοπτικές

Το μέλλον των υβριδικών και πολλαπλών πηγών ενέργειας στην ηλιακή επιφανειακή κατεργασία είναι πολλά υποσχόμενο, με σημαντικές δυνατότητες τεχνολογικής προόδου και ευρύτερης βιομηχανικής υιοθέτησης. Καθώς οι τεχνολογίες αποθήκευσης

ενέργειας βελτιώνονται, το κόστος μειώνεται και τα ρυθμιστικά πλαίσια εξελίσσονται, τα συστήματα αυτά είναι πιθανό να γίνουν πιο προσιτά και διαδεδομένα (Fernández-González et al., 2018).

Τα επόμενα χρόνια, μπορούμε να αναμένουμε τη συνεχή ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις βιομηχανικές διεργασίες, με γνώμονα την ανάγκη για μεγαλύτερη βιωσιμότητα και αποδοτικότητα. Τα υβριδικά συστήματα ενέργειας και τα συστήματα πολλαπλών πηγών ενέργειας θα διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο σε αυτή τη μετάβαση, προσφέροντας στις βιομηχανίες την ευελιξία και την αξιοπιστία που απαιτούνται για τη διατήρηση υψηλών προδιαγραφών παραγωγής με ταυτόχρονη μείωση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων. Η συνεχιζόμενη ανάπτυξη αυτών των συστημάτων όχι μόνο θα μεταμορφώσει τον τρόπο με τον οποίο διεξάγονται οι επιφανειακές κατεργασίες, αλλά και θα συμβάλει στον ευρύτερο στόχο της δημιουργίας ενός πιο βιώσιμου και ανθεκτικού ενεργειακού μέλλοντος (Fernández-González et al., 2018).

Εν κατακλείδι, οι μελλοντικές προοπτικές για τις επιφανειακές κατεργασίες με τη χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας είναι καλές και γεμάτες δυνατότητες. Καθώς η έρευνα και η ανάπτυξη συνεχίζουν να διευρύνουν τα όρια του εφικτού, οι επιφανειακές κατεργασίες με βάση την ηλιακή ενέργεια είναι πιθανό να γίνουν πιο διαδεδομένες σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών. Οι δυνατότητες καινοτομίας είναι τεράστιες, με ευκαιρίες για την ανάπτυξη νέων υλικών, διαδικασιών και υβριδικών συστημάτων που θα μπορούσαν να φέρουν επανάσταση στην κατασκευή και να συμβάλουν σε ένα πιο βιώσιμο μέλλον. Καθώς οι τεχνολογίες αυτές εξελίσσονται, όχι μόνο θα βελτιώσουν την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα των βιομηχανικών διεργασιών, αλλά και θα δημιουργήσουν νέους δρόμους για την οικονομική ανάπτυξη και την περιβαλλοντική διαχείριση (Gonzalo, Marugán & Márquez, 2019).

3 Χρήση Ηλιακής Ενέργειας στα Υλικά

3.1 Επιφανειακές Κατεργασίες

3.1.1 *Περιγραφή των μεθόδων και τεχνολογιών*

Οι επιφανειακές κατεργασίες με χρήση ηλιακής ενέργειας περιλαμβάνουν μια σειρά μεθόδων και τεχνολογιών που αποσκοπούν στη βελτίωση των ιδιοτήτων των επιφανειών των υλικών, όπως η σκληρότητα, η αντοχή στη φθορά, η αντοχή στη διάβρωση και η θερμική σταθερότητα. Οι κατεργασίες αυτές αξιοποιούν τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια ως βιώσιμη και αποτελεσματική πηγή θερμότητας, προσφέροντας ακριβή έλεγχο του θερμικού φορτίου και μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους. Οι βασικές τεχνολογίες σε αυτόν τον τομέα περιλαμβάνουν την επιφανειακή σκλήρυνση με ηλιακή υποβοήθηση, την ηλιακή συγκόλληση, την ηλιακή τήξη και επανασύνδεση και τις ηλιακές επιστρώσεις, καθεμία από τις οποίες έχει συγκεκριμένες εφαρμογές και πλεονεκτήματα (Zhang et al., 2018).

Η επιφανειακή σκλήρυνση με ηλιακή υποβοήθηση είναι μία από τις κύριες μεθόδους που χρησιμοποιούνται στις επιφανειακές κατεργασίες, χρησιμοποιώντας συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια για την αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής της επιφάνειας των υλικών. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την έκθεση της επιφάνειας του υλικού σε ηλιακή ακτινοβολία, την ταχεία θέρμανσή της σε υψηλή θερμοκρασία και στη συνέχεια την ταχεία ψύξη της. Η ταχεία θέρμανση επιτρέπει στο υλικό να φτάσει γρήγορα στη θερμοκρασία όπου συμβαίνουν αλλαγές στη μικροδομή του, όπως η επαναδιάταξη των ατόμων του υλικού σε πιο ανθεκτικές διαμορφώσεις. Η επακόλουθη ταχεία ψύξη «παγώνει» αυτές τις αλλαγές, αποτρέποντας την επιστροφή του υλικού στην αρχική του κατάσταση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής του υλικού στη φθορά, ιδιότητες που είναι κρίσιμες για εφαρμογές υψηλής απόδοσης.

Η ταχεία θέρμανση και ψύξη μεταβάλλουν τη μικροδομή του υλικού, ενισχύοντας τη σκληρότητα και την αντοχή του στη φθορά. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανίες όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική και η μεταποίηση,

όπου οι βελτιωμένες επιφανειακές ιδιότητες των εξαρτημάτων είναι απαραίτητες για την απόδοση και την αντοχή (Zhang et al., 2018).

Η ηλιακή συγκόλληση είναι μια άλλη καινοτόμος μέθοδος που χρησιμοποιεί τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια για τη σύνδεση υλικών, συνήθως μετάλλων, με την τήξη των άκρων τους και την ένωση τους. Η τεχνική αυτή προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως μειωμένες παραμορφώσεις, μικρό μέγεθος ζώνη τήξης και θερμοεπηρεαζόμενης ζώνης και αυξημένη αντοχής της συγκόλλησης. Η ηλιακή συγκόλληση είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και ελάχιστη θερμική καταπόνηση, καθιστώντας την υποψήφια για εφαρμογές σε αεροδιαστημικά εξαρτήματα, δομές με λεπτά τοιχώματα και κράματα υψηλής απόδοσης, όπως κράματα τιτανίου (π.χ., Ti-6Al-4V), υπερκράματα νικελίου (π.χ., Inconel 718) και αλουμινίου-λιθίου (π.χ., Al-Li). Η διαδικασία μειώνει επίσης την ανάγκη για χρήση συγκολλητικού υλικού, καθιστώντας την μια οικονομικά αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους συγκόλλησης (Zhang et al., 2018).

Η ηλιακή τήξη αφορά τη χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής θερμότητας για την τήξη επιφανειακού στρώματος ενός υλικού, επιτρέποντας την ανακατανομή ή την εισαγωγή νέων κραματικών στοιχείων. Η μέθοδος αυτή μπορεί να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας, όπως η σκληρότητα, η αντοχή στη φθορά και η προστασία από τη διάβρωση, λόγω της τροποποίησης της σύνθεσης και της δομής του εξωτερικού στρώματος. Η ηλιακή τήξη είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την επιδιόρθωση επιφανειακών ατελειών, την τροποποίηση μικροδομών και τη βελτίωση των επιφανειακών ιδιοτήτων σε εφαρμογές όπως κοπτικά εργαλεία και εξαρτήματα μηχανών. Ο ακριβής έλεγχος της εισροής θερμότητας που παρέχει η ηλιακή ενέργεια ελαχιστοποιεί τις ανεπιθύμητες θερμικές επιδράσεις και εξασφαλίζει υψηλής ποιότητας αποτελέσματα (Müller et al., 2017).

Οι ηλιακές επιστρώσεις αποτελούν μια άλλη σημαντική τεχνολογία στις επιφανειακές κατεργασίες, όπου η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια βοηθά στην εναπόθεση προστατευτικών ή επικαλύψεων σε επιφάνειες υλικών. Τεχνικές όπως η υποβοηθούμενη από την ηλιακή ακτινοβολία φυσική εναπόθεση ατμών (PVD: Physical Vapor Deposition) και η χημική εναπόθεση ατμών (CVD: Chemical Vapor Deposition) χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη λεπτών υμενίων που βελτιώνουν τις

επιφανειακές ιδιότητες, όπως η σκληρότητα, η μείωση της τριβής και η συμπεριφορά στη διάβρωση. Αυτές οι επιστρώσεις είναι κρίσιμες σε βιομηχανίες όπως η ηλεκτρονική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η ενέργεια, όπου η βελτιωμένη επιφανειακή απόδοση μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη διάρκεια ζωής και την αποδοτικότητα των προϊόντων. Η χρήση της ηλιακής ενέργειας στις διαδικασίες επίστρωσης προσφέρει αυξημένη ενεργειακή απόδοση και μείωση των επιβλαβών παραπροϊόντων, ευθυγραμμιζόμενη με την αυξανόμενη ζήτηση για βιώσιμες πρακτικές παραγωγής (Müller et al., 2017).

Συνολικά, η χρήση της ηλιακής ενέργειας στις επιφανειακές κατεργασίες επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις στην ακρίβεια, την απόδοση και τη βιωσιμότητα. Με την αντικατάσταση των συμβατικών πηγών θερμότητας με συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια, οι μέθοδοι αυτές μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, καθιστώντας τις πιο φιλικές προς το περιβάλλον. Η ενσωμάτωση των ηλιακών τεχνολογιών στις διεργασίες επιφανειακής κατεργασίας όχι μόνο βελτιώνει τις ιδιότητες των υλικών, αλλά και ευθυγραμμίζεται με τις τάσεις της βιομηχανίας προς οικολογικότερες κατασκευαστικές λύσεις, τοποθετώντας τις επιφανειακές κατεργασίες με βάση την ηλιακή ενέργεια ως βασικό στοιχείο στο μέλλον της μηχανικής υλικών (Müller et al., 2017).

3.1.2 *Βελτιώσεις που προσφέρουν οι επιφανειακές κατεργασίες με ηλιακή ενέργεια*

Οι επιφανειακές κατεργασίες με ηλιακή ενέργεια αποτελούν μια εναλλακτική προσέγγιση στη μηχανική των υλικών, προσφέροντας πολλές βελτιώσεις σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Οι εξελίξεις οφείλονται κυρίως στην ικανότητα παροχής ακριβούς, υψηλής έντασης θέρμανσης με ελεγχόμενο τρόπο, η οποία βελτιώνει την αποδοτικότητα, την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα των επιφανειακών κατεργασιών(Nemani et al., 2018).

Η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια επιτρέπει την ταχεία θέρμανση και ψύξη των επιφανειών των υλικών, η οποία μπορεί να τροποποιήσει τη μικροδομή τους και να βελτιώσει την απόδοση τους. Για παράδειγμα, οι διεργασίες σκλήρυνσης με τη βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργούν σκληρότερες, πιο ανθεκτικές στη φθορά επιφάνειες, μεταβάλλοντας την κρυσταλλική δομή των μετάλλων, καθιστώντας τα κατάλληλα για απαιτητικές εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, την

αεροδιαστημική και τα βιομηχανικά εξαρτήματα. Οι τεχνικές τήξης με ηλιακή ενέργεια επιτρέπουν επίσης την ακριβή ανακατανομή των στοιχείων κράματος, βελτιώνοντας τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας χωρίς να υποβαθμίζονται οι ιδιότητες του υλικού (Nemani et al., 2018).

Η ενεργειακή απόδοση είναι ένα άλλο κρίσιμο πλεονέκτημα των επιφανειακών κατεργασιών με ηλιακή ενέργεια. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους που βασίζονται στην ηλεκτρική ενέργεια ή τα ορυκτά καύσιμα, οι ηλιακές τεχνολογίες χρησιμοποιούν μια ανανεώσιμη και άφθονη πηγή ενέργειας - τον ήλιο. Αυτό μειώνει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και το λειτουργικό κόστος, καθιστώντας τις επιφανειακές κατεργασίες πιο οικονομικές, ειδικά για διαδικασίες υψηλής ενέργειας όπως η συγκόλληση, οι επιφανειακές κατεργασίες και η τήξη. Η άμεση χρήση της ηλιακής ενέργειας ελαχιστοποιεί τις απώλειες ενέργειας που συνήθως συνδέονται με τις διαδικασίες μετατροπής ενέργειας, με αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη παροχή θερμότητας στην επιφάνεια του υλικού. Αυτή η αποδοτικότητα είναι ιδιαίτερα πολύτιμη σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας, όπου το ενεργειακό κόστος αποτελεί σημαντικό μέρος του λειτουργικού προϋπολογισμού (Nemani et al., 2018).

Η χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας εξαλείφει την ανάγκη για ορυκτά καύσιμα, μειώνοντας σημαντικά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων που σχετίζονται με τις συμβατικές θερμικές διεργασίες. Αυτό ευθυγραμμίζεται με τις παγκόσμιες προσπάθειες για την προώθηση της βιώσιμης παραγωγής και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των βιομηχανικών δραστηριοτήτων. Επιπλέον, οι κατεργασίες με ηλιακή ενέργεια παράγουν λιγότερα επικίνδυνα παραπροϊόντα και απόβλητα, συμβάλλοντας σε καθαρότερα περιβάλλοντα παραγωγής και ασφαλέστερες συνθήκες εργασίας (Nemani et al., 2018).

Μια άλλη βασική βελτίωση που παρέχουν οι επιφανειακές κατεργασίες με ηλιακή ενέργεια είναι η ακρίβεια και ο έλεγχος που προσφέρουν στη θερμική κατεργασία. Η δυνατότητα εστίασης της ηλιακής ενέργειας σε συγκεκριμένες περιοχές ενός υλικού επιτρέπει την εξαιρετικά εντοπισμένη θέρμανση, ελαχιστοποιώντας τη θερμική παραμόρφωση και τις ανεπιθύμητες αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού. Αυτό το επίπεδο ελέγχου είναι ιδιαίτερα επωφελές σε εφαρμογές όπως η ηλιακή συγκόλληση, όπου η ακριβής εφαρμογή θερμότητας είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της

ακεραιότητας και της αντοχής της σύνδεσης. Η εστιασμένη φύση της ηλιακής ενέργειας επιτρέπει επίσης γρήγορους χρόνους κατεργασίας, βελτιώνοντας την απόδοση και την παραγωγικότητα στις διαδικασίες παραγωγής (Tilley, 2019).

Οι επιφανειακές κατεργασίες με ηλιακή ενέργεια ανοίγουν επίσης την πόρτα σε καινοτόμες εφαρμογές που ήταν προηγουμένως δύσκολο ή αδύνατο να επιτευχθούν με συμβατικές μεθόδους. Για παράδειγμα, οι υψηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται με τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια επιτρέπουν την επεξεργασία προηγμένων υλικών, όπως τα υπερκράματα και τα κεραμικά, τα οποία απαιτούν ακριβή έλεγχο στη θερμοκρασία έκθεσης. Αυτά τα υλικά είναι ζωτικής σημασίας σε βιομηχανίες, όπως η αεροδιαστημική, η βιομηχανία ενέργειας και οι ιατρικές συσκευές, όπου τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας επηρεάζουν άμεσα την απόδοση και την αντοχή. Οι μοναδικές δυνατότητες των κατεργασιών με ηλιακή ενέργεια υποστηρίζουν επίσης την ανάπτυξη νέων επιφανειακών επικαλύψεων και λειτουργικών στρωμάτων, ενισχύοντας ιδιότητες όπως η ανακλαστικότητα, η αγωγιμότητα και η χημική αντοχή (Tilley, 2019).

Συνοπτικά, οι επιφανειακές κατεργασίες με ηλιακή ενέργεια παρέχουν πολυάριθμες βελτιώσεις σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους, συμπεριλαμβανομένων των βελτιωμένων ιδιοτήτων των υλικών, της ενεργειακής απόδοσης, των μειωμένων περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της δυνατότητας χειρισμού προηγμένων υλικών με ακρίβεια. Τα πλεονεκτήματα καθιστούν τις τεχνολογίες με ηλιακή ενέργεια ως μια προοδευτική προσέγγιση στην Επιστήμη των Υλικών, η οποία οδηγεί στην ανάπτυξη πιο βιώσιμων και υψηλής απόδοσης βιομηχανικών διαδικασιών (Tilley, 2019).

3.2 Επικαλύψεις και Υλικά Υποστρωμάτων

3.2.1 *Τύποι επιστρώσεων και υποστρωμάτων που έχουν αναπτυχθεί*

Τύποι επικαλύψεων που αναπτύσσονται με χρήση ηλιακής ενέργειας

Οι προστατευτικές επιστρώσεις που έχουν αναπτυχθεί με τη χρήση ηλιακής ενέργειας, όπως οι αυτοκαθαριζόμενες και ανθεκτικές στην οξείδωση επικαλύψεις, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας και της διάρκειας ζωής των υλικών. Για παράδειγμα, οι υπερυδροφοβικές επικαλύψεις που

μιμούνται το «φαινόμενο λωτού» παρέχουν ανθεκτικότητα στη φθορά και τη διάβρωση μέσω της χρήσης νανοσωματιδίων οξειδίου του τιτανίου (TiO_2) και πυριτίου (SiO_2). Αυτές οι επικαλύψεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές σε περιβάλλοντα με ειδικές απαιτήσεις, όπως η ναυτιλία, η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική βιομηχανία, όπου τα υλικά εκτίθενται σε ακραίες θερμοκρασίες και απαιτούνται χαρακτηριστικά υψηλής απόδοσης και αντοχής.

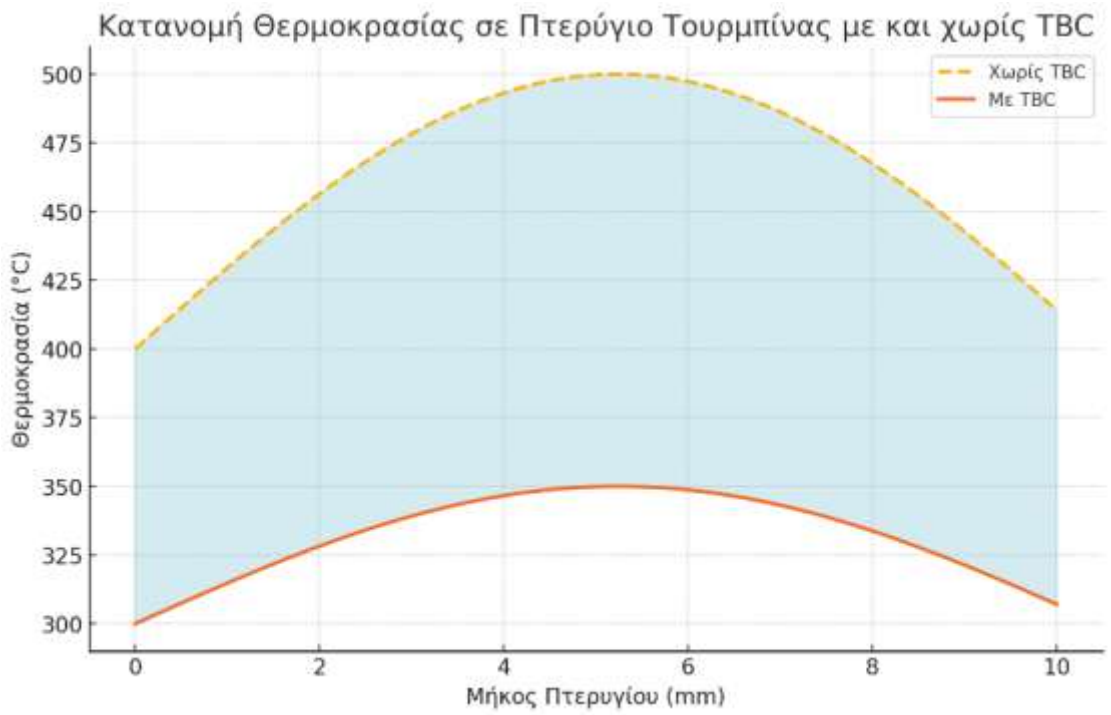
Οι τεχνικές θερμικού ψεκασμού με ηλιακή υποστήριξη χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή κεραμικών ή μεταλλικών επικαλύψεων, οι οποίες προσφέρουν βελτιωμένη αντοχή σε μηχανική φθορά και χημική έκθεση, μειώνοντας παράλληλα τις ανάγκες συντήρησης και εξοικονομώντας πόρους σε περιβάλλοντα με ακραίες απαιτήσεις (Mozumder et al., 2019).

Οι σκληρές επιστρώσεις, όπως το νιτρίδιο του τιτανίου (TiN) και το καρβίδιο του βολφραμίου (WC), χρησιμοποιούνται ευρέως για την αύξηση της σκληρότητας και τη μείωση της τριβής σε εργαλεία και εξαρτήματα. Οι τεχνικές ηλιακής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής εναζώτωσης και της ηλιακής τήξης, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αυτών των επικαλύψεων, ενισχύοντας τη σκληρότητα της επιφάνειας και παρατείνοντας τη λειτουργική διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων, των καλουπιών και των εξαρτημάτων μηχανών. Η συγκεντρωμένη θερμότητα που παράγεται από την ηλιακή ενέργεια επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο του πάχους και της μικροδομής της επικάλυψης, με αποτέλεσμα την βελτιωμενη αντοχή στη φθορά (Mozumder et al., 2019).

Οι επιστρώσεις σχεδιάζονται για να προσδίδουν συγκεκριμένες ιδιότητες στο υπόστρωμα, όπως αντοχή στο νερό (υδροφοβικότητα), ηλεκτρική αγωγιμότητα ή τη δυνατότητα να επιταχύνουν χημικές αντιδράσεις (καταλυτική δράση). Μέθοδοι ηλιακής ενέργειας, όπως η ηλιακή χημική εναπόθεση ατμών (CVD) και η οξείδωση που προκαλείται από την ηλιακή ενέργεια, χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη επικαλύψεων με προηγμένες ιδιότητες. Οι αντιανακλαστικές επιστρώσεις σε ηλιακούς συλλέκτες, για παράδειγμα, μπορούν να αναπτυχθούν με τη χρήση ηλιακής ενέργειας, ενισχύοντας την απορρόφηση του φωτός και βελτιώνοντας τη συνολική ενεργειακή απόδοση. Καταλυτικές επιστρώσεις που χρησιμοποιούνται σε περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπως ο καθαρισμός του νερού και το φιλτράρισμα του αέρα, μπορούν

επίσης να συντεθούν με υψηλή ενεργειακή απόδοση και μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Mozumder et al., 2019).

Οι επικαλύψεις θερμικού φράγματος (TBC: Thermal Barrier Coating) είναι απαραίτητες σε εφαρμογές που απαιτούν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως τα πτερύγια τουρμπινών και οι κινητήρες αυτοκινήτων. Αυτές οι επικαλύψεις, συνήθως κατασκευασμένες από κεραμικά όπως η ζιρκονία, εφαρμόζονται με τεχνικές ηλιακής ενέργειας, παρέχοντας εξαιρετική μόνωση και προστατεύοντας τα υποστρώματα από τη θερμική κόπωση. Η ακρίβεια που προσφέρουν οι ηλιακές διεργασίες εξασφαλίζει ομοιόμορφη εφαρμογή της επικάλυψης, ελαχιστοποιώντας τα ελαττώματα που θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο την απόδοση της (Mozumder et al., 2019).



Σχήμα 3.2.1.1: Κατανομή Θερμοκρασίας σε Πτερύγιο Τουρμπίνας με και χωρίς TBC **(Παράρτημα 1γ)**

Οι αντιδιαβρωτικές επικαλύψεις αποτελούν μια άλλη σημαντική εξέλιξη, προστατεύοντας τα μέταλλα από τη διάβρωση και την υποβάθμιση κατά τη λειτουργία τους. Οι τεχνικές επίστρωσης με ηλιακή ενέργεια, όπως ο ηλιακός ψεκασμός και η ηλιακή ηλεκτρολυτική επίστρωση, επιτρέπουν την εφαρμογή επιστρώσεων όπως

ψευδαργύρου, αλουμινίου και άλλων κραμάτων, οι οποίες δρουν ως θυσιαζόμενες άνοδοι για την πρόληψη της διάβρωσης. Αυτές οι επιστρώσεις είναι ιδιαίτερα πολύτιμες σε υποδομές, θαλάσσιες και βιομηχανικές εφαρμογές, όπου η αύξηση του χρόνου ζωής των υλικών είναι σημαντική (Mozumder et al., 2019).

Τύποι υποστρωμάτων που αναπτύσσονται με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας

Τα μεταλλικά υποστρώματα, όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο και το τιτάνιο, υποβάλλονται συχνά σε κατεργασία με ηλιακή ενέργεια για τη βελτίωση των επιφανειακών ιδιοτήτων τους. Οι επιφανειακές διεργασίες που υποστηρίζονται από την ηλιακή ενέργεια, όπως η τήξη και η κραματοποίηση, βελτιώνουν τη σκληρότητα, την αντοχή στην κόπωση και την αντοχή στη διάβρωση. Για παράδειγμα, η επιφανειακή τήξη με ηλιακή ενέργεια μπορεί να βελτιώσει τη μικροδομή των χαλύβδινων υποστρωμάτων, μειώνοντας το πορώδες και αυξάνοντας τη συνολική αντοχή, καθιστώντας αυτά τα υποστρώματα ιδανικά για την αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία και τις κατασκευές (Müller et al., 2017).

Τα κεραμικά υποστρώματα, όπως η αλουμίνα, η ζιρκονία και το καρβίδιο του πυριτίου, υφίστανται κατεργασία με ηλιακή ενέργεια για να βελτιώσουν την αντοχή στη φθορά, τη θερμική τους σταθερότητα και τη χημική αντοχή. Οι διεργασίες ηλιακής πυροσυσσωμάτωσης και τήξης παράγουν πυκνά κεραμικά υποστρώματα χωρίς ελαττώματα, κατάλληλα για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας, όπως εξαρτήματα κινητήρων, εργαλεία κοπής και ηλεκτρονικές συσκευές. Οι υψηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται με τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια επιτρέπουν την ακριβή προσαρμογή των κεραμικών μικροδομών, ενισχύοντας την απόδοσή τους σε απαιτητικά περιβάλλοντα (Müller et al., 2017).

Τα σύνθετα υποστρώματα, τα οποία συνδυάζουν μέταλλα, κεραμικά ή πολυμερή, από τις κατεργασίες με τη βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας που βελτιώνουν τα επιφανειακά χαρακτηριστικά χωρίς να μεταβάλλουν τη συνολική δομή του σύνθετου υλικού. (Müller et al., 2017).

Τα υποστρώματα από πολυμερή υλικά ωφελούνται επίσης από τις επιφανειακές τροποποιήσεις που επιτυγχάνονται μέσω ηλιακής ενέργειας, οι οποίες βελτιώνουν την

πρόσφυση, την αντοχή στις γρατζουνιές και τη χημική σταθερότητα. Τεχνικές όπως ο **ηλιακά επαγόμενος εμβολιασμός** (solar-induced grafting) και οι επεξεργασίες πλάσματος με ηλιακή υποστήριξη χρησιμοποιούνται για τη λειτουργικοποίηση πολυμερικών επιφανειών, καθιστώντας τα κατάλληλα για ισχυρότερη πρόσφυση με επιστρώσεις ή άλλα υλικά. Αυτές οι τεχνικές ενισχύουν τις επιδόσεις των πολυμερών σε εφαρμογές όπως το εσωτερικό αυτοκινήτων, τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και τις ιατρικές συσκευές (Müller et al., 2017).

Τα νανοδομημένα υποστρώματα, συμπεριλαμβανομένων εκείνων με επιφανειακές τροποποιήσεις σε νανοκλίμακα, αναπτύσσονται με τη χρήση ηλιακής ενέργειας για τη βελτίωση ιδιοτήτων όπως η αγωγιμότητα, η καταλυτική δραστηριότητα. Οι ηλιακές τεχνικές επιτρέπουν τον ακριβή σχηματισμό χαρακτηριστικών νανοκλίμακας σε υποστρώματα, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας σε εφαρμογές όπως αισθητήρες, συσκευές αποθήκευσης ενέργειας και προηγμένοι καταλύτες. Η χρήση της ηλιακής ενέργειας εξασφαλίζει ότι τα υποστρώματα αυτά αναπτύσσονται με ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και υψηλή επαναληψιμότητα (Müller et al., 2017).

Συνολικά, η χρήση της ηλιακής ενέργειας στην ανάπτυξη επικαλύψεων και υποστρωμάτων έχει φέρει επανάσταση στις επιδόσεις των υλικών, παρέχοντας βελτιωμένες επιφανειακές ιδιότητες, βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση και μεγαλύτερη βιωσιμότητα. Το ευρύ φάσμα επικαλύψεων και υποστρωμάτων που αναπτύσσονται με τεχνικές που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια ανταποκρίνεται στις εξελισσόμενες ανάγκες των σύγχρονων βιομηχανιών, προσφέροντας λύσεις που είναι τεχνολογικά προηγμένες και φιλικές προς το περιβάλλον. Καθώς ο τομέας αυτός συνεχίζει να εξελίσσεται, η ηλιακή ενέργεια θα διαδραματίζει ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος της επιστήμης και της μηχανικής των υλικών (Müller et al., 2017).

3.2.2 *Μεθοδολογίες και αποτελέσματα*

Η εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας στην ανάπτυξη επικαλύψεων και υποστρωμάτων περιλαμβάνει μια σειρά προηγμένων μεθοδολογιών που αξιοποιούν τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια. Στην παρούσα ενότητα διερευνώνται οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται σε επικαλύψεις και επεξεργασίες υποστρωμάτων με βάση την

ηλιακή ενέργεια και τα οφέλη και τα αποτελέσματά τους που προκύπτουν (Alva et al., 2017). Συγκεκριμένα:

Α) Μία από τις κύριες μεθοδολογίες στη χρήση της ηλιακής ενέργειας για επιστρώσεις είναι η **χημική εναπόθεση ατμών** με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας (CVD). Σε αυτή τη διαδικασία, η ηλιακή ενέργεια συγκεντρώνεται για να παρέχει τις υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για τη διάσπαση των αερίων που περιέχουν τη χρήσιμη ένωση, με αποτέλεσμα το σχηματισμό λεπτών υμενίων σε υποστρώματα. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για τη δημιουργία υψηλής ποιότητας, ομοιόμορφων επικαλύψεων με εξαιρετική πρόσφυση. Η ηλιακή μέθοδος CVD έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή επικαλύψεων όπως το νιτρίδιο του τιτανίου (TiN) και το καρβίδιο του πυριτίου (SiC), τα οποία είναι γνωστά για τη σκληρότητα, την αντοχή στη φθορά και τη θερμική τους σταθερότητα. Τα αποτελέσματα της χρήσης της ηλιακής CVD περιλαμβάνουν επιστρώσεις με εκλεπτυσμένες μικροδομές και μειωμένα ποσοστά ατελειών, συμβάλλοντας σε υλικά μεγαλύτερης διάρκειας ζωής και πιο αξιόπιστα για χρήση σε βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική, η ηλεκτρονική και η αυτοκινητοβιομηχανία (Kalogirou, 2023).

Β) Ο **θερμικός ψεκασμός** είναι μια άλλη βασική μεθοδολογία όπου η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για να τήξουν πλήρως ή μερικώς υλικά επικάλυψης, τα οποία στη συνέχεια ψεκάζονται σε ένα υπόστρωμα για να σχηματίσουν ένα προστατευτικό στρώμα. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την εφαρμογή ευρέος φάσματος επιστρώσεων, συμπεριλαμβανομένων κεραμικών, μετάλλων και σύνθετων υλικών, βελτιώνοντας τις επιφανειακές ιδιότητες εξαρτημάτων που εκτίθενται σε ακραίες συνθήκες. Ο θερμικός ψεκασμός οδηγεί σε πυκνές, καλά προσκολλημένες επιστρώσεις που παρουσιάζουν ανώτερη αντοχή στη φθορά, τη διάβρωση και τις υψηλές θερμοκρασίες. Οι εφαρμογές αυτής της μεθόδου περιλαμβάνουν πτερύγια στροβίλων, εξαρτήματα κινητήρων και βιομηχανικά εργαλεία, όπου οι βελτιωμένες επιστρώσεις συμβάλλουν στην αύξηση της απόδοσης και στη μείωση του κόστους συντήρησης (Alva et al., 2017).

Γ) Η **επικάλυψη με λέιζερ με ηλιακή ενέργεια** περιλαμβάνει τη χρήση συγκεντρωμένου ηλιακού φωτός για την τήξη ενός επιφανειακού στρώματος του υποστρώματος, ενώ ταυτόχρονα τροφοδοτείται ένα υλικό επικάλυψης, όπως μια μεταλλική σκόνη ή ένα σύρμα, στη λιωμένη λίμνη. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας μεταλλουργικά συνδεδεμένης επικάλυψης που

βελτιώνει τη σκληρότητα της επιφάνειας, την αντοχή στη διάβρωση και την απόδοση στη φθορά. Η επικάλυψη με ηλιακό λέιζερ είναι εξαιρετικά ευέλικτη, επιτρέποντας τον ακριβή έλεγχο του πάχους και της σύνθεσης της επικάλυψης, και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την επισκευή φθαρμένων εξαρτημάτων ή την προσθήκη λειτουργικών στρωμάτων σε νέα εξαρτήματα. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν αυξημένη ανθεκτικότητα και απόδοση των επιφανειακών κατεργασιών, με σημαντικές επιπτώσεις στον κύκλο ζωής των εξαρτημάτων σε βαριά μηχανήματα και περιβάλλοντα υψηλής καταπόνησης (Kalogirou, 2023).

Δ) Η **ηλιακή πυροσυσσωμάτωση** χρησιμοποιείται στην παραγωγή κεραμικών επιστρώσεων και υποστρωμάτων, χρησιμοποιώντας συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια για την επίτευξη των υψηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται για τη συμπύκνωση των κεραμικών σκονών. Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί για τη δημιουργία εξαιρετικά πυκνών, χωρίς ελαττώματα επικαλύψεων που παρέχουν εξαιρετική θερμομόνωση και αντοχή στην περιβαλλοντική υποβάθμιση. Η ηλιακή πυροσυσσωμάτωση έχει εφαρμοστεί με επιτυχία για τη δημιουργία επικαλύψεων θερμικού φράγματος (TBC) για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών, όπως αεριοστρόβιλοι και κινητήρες. Τα αποτελέσματα δείχνουν επικαλύψεις με ανώτερη αντοχή σε θερμικό σοκ και παρατεταμένη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με εκείνες που παράγονται με συμβατικές μεθόδους, καθιστώντας τες ιδανικές για εφαρμογές όπου η απόδοση των υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες είναι κρίσιμη (Alva et al., 2017).

Ε) Η **ηλιακή ηλεκτρολυτική επίστρωση** χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια για την ηλεκτροχημική εναπόθεση μετάλλων σε υποστρώματα. Χρησιμοποιώντας την ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή του απαραίτητου ηλεκτρικού ρεύματος, η μέθοδος αυτή παρέχει μια φιλική προς το περιβάλλον προσέγγιση στις διαδικασίες ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης, μειώνοντας την ανάγκη για παραδοσιακές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλιακή ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση χρησιμοποιείται για την εφαρμογή επιστρώσεων όπως ψευδάργυρος, χρώμιο και νικέλιο, οι οποίες προστατεύουν τα υποστρώματα από τη διάβρωση και τη φθορά. Τα αποτελέσματα της ηλιακής ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης περιλαμβάνουν επιστρώσεις με βελτιωμένη ομοιομορφία και αντοχή συγκόλλησης, καθώς και μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Alva et al., 2017).

ΣΤ) Η **ανοδίωση με ηλιακή υποβοήθηση** είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη βελτίωση των επιφανειακών ιδιοτήτων των κραμάτων Αλουμινίου με τη δημιουργία ενός προστατευτικού στρώματος οξειδίου μέσω ηλεκτροχημικής διαδικασίας που τροφοδοτείται από την ηλιακή ενέργεια. Η τεχνική αυτή βελτιώνει τη σκληρότητα, την αντοχή στη διάβρωση και την αισθητική εμφάνιση των επεξεργασμένων υποστρωμάτων. Η χρήση της ηλιακής ενέργειας στην ανοδίωση μειώνει το αποτύπωμα άνθρακα της διαδικασίας και προσφέρει ακριβή έλεγχο του πάχους και του χρώματος του στρώματος οξειδίου. Τα αποτελέσματα της ανοδίωσης με ηλιακή υποβοήθηση περιλαμβάνουν εξαιρετικά ανθεκτικές επιστρώσεις με ενισχυμένες προστατευτικές ιδιότητες, καθιστώντας τες κατάλληλες για εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, τις κατασκευές και την αεροδιαστημική βιομηχανία (Kalogirou, 2023).

Τα αποτελέσματα αυτών των μεθοδολογιών που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια σε επικαλύψεις και επεξεργασίες υποστρωμάτων χαρακτηρίζονται από σημαντικές βελτιώσεις στις ιδιότητες των υλικών, όπως αυξημένη σκληρότητα, αυξημένη αντοχή στη φθορά και τη διάβρωση και καλύτερη θερμική απόδοση. Αυτές οι εξελίξεις όχι μόνο παρατείνουν τη λειτουργική διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων, αλλά και μειώνουν το συνολικό κόστος συντήρησης και αντικατάστασης, παρέχοντας οικονομικά οφέλη παράλληλα με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Επιπλέον, η ακρίβεια και ο έλεγχος που προσφέρουν οι ηλιακές τεχνικές επιτρέπουν την προσαρμογή των χαρακτηριστικών της επιφάνειας ώστε να ικανοποιούνται συγκεκριμένες βιομηχανικές ανάγκες, προωθώντας την καινοτομία και διευρύνοντας τις πιθανές εφαρμογές των επεξεργασμένων υλικών (Kalogirou, 2023).

3.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Μελέτης Ζεύγους Χάλυβα - WC

3.3.1 Συνθήκες και παράμετροι

Κατά τη διάρκεια της έρευνας, διάφορες παράμετροι διεργασίες, όπως η ένταση της ηλιακής ροής, ο χρόνος έκθεσης και οι μέθοδοι προετοιμασίες υλικού, μεταβλήθηκαν συστηματικά για να κατανοηθεί η επίδραση τους στη μικροδομή και την ποιότητα σύνδεσης (Han et al. 2018)

Ένα από τα βασικά ευρήματα ήταν η σημαντική επίδραση της έντασης και της ηλιακής ροής στην ποιότητα της σύνδεσης μεταξύ του χάλυβα και των σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου. Οι υψηλότερες εντάσεις ροής είχαν ως αποτέλεσμα πιο

αποτελεσματική τήξη και σύντηξη της διεπιφάνειας, οδηγώντας σε ισχυρότερο μεταλλουργικό δεσμό. Αυτός ο ισχυρός δεσμός είναι ζωτικής σημασίας για την ενίσχυση της αντοχής στη φθορά και της μηχανικής ακεραιότητας του σύνθετου υλικού σε εφαρμογές υψηλής καταπόνησης. Ωστόσο, η υπερβολική έντασης ροής εισήγαγε επίσης τον κίνδυνο θερμικών τάσεων και ταχείας ψύξης, που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μικρορωγμές και μείωση της συνολικής σκληρότητας του υλικού. Έτσι, η βελτιστοποίηση της ηλιακής ροής αναγνωρίστηκε ως ένας κρίσιμος παράγοντας για την επίτευξη της επιθυμητής ισορροπίας μεταξύ της αντοχής σύνδεσης και της ακεραιότητας του υλικού (Han et al., 2018).

Η μελέτη διαπίστωσε επίσης ότι ο χρόνος έκθεσης σε συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια έχει καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό της μικροδομικής εξέλιξης του σύνθετου υλικού. Η παρατεταμένη έκθεση επέτρεψε μια πιο ομοιογενή κατανομή των σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου μέσα στη μήτρα του χάλυβα, μειώνοντας το πορώδες και ελαχιστοποιώντας το σχηματισμό ανεπιθύμητων φάσεων. Αυτή η ομοιογενής μικροδομή συμβάλλει στη βελτιωμένη σκληρότητα και αντοχή στη φθορά, βασικές ιδιότητες για εφαρμογές σε βιομηχανίες εργαλείων, εξόρυξης και μεταποίησης. Ωστόσο, η παρατεταμένη έκθεση αύξησε επίσης την πιθανότητα μεγέθυνσης των κόκκων, η οποία θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά τη σκληρότητα και την αντοχή του σύνθετου υλικού στην κόπωση. Ως εκ τούτου, η παραμετρική ανάλυση τόνισε τη σημασία του προσεκτικού ελέγχου του χρόνου έκθεσης για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων (Han et al., 2018).

Η προετοιμασία του υλικού πριν από την ηλιακή κατεργασία ήταν ένας άλλος τομέας έρευνας. Η μελέτη διαπίστωσε ότι οι διαδικασίες προεπεξεργασίας, όπως ο καθαρισμός της επιφάνειας, η προτοποθέτηση σκόνης και η αρχική συμπύκνωση, επηρέασαν σημαντικά την ποιότητα του τελικού σύνθετου υλικού. Η κατάλληλη προετοιμασία εξασφάλισε καλύτερη διαβρεξιμότητα μεταξύ του χάλυβα και του καρβιδίου του βολφραμίου, ενισχύοντας τη διαδικασία συγκόλλησης κατά την έκθεση στον ήλιο. Η κακή προετοιμασία, από την άλλη πλευρά, οδήγησε σε ανεπαρκή σύνδεση, υψηλότερο πορώδες και ανομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων καρβιδίου, με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση του σύνθετου υλικού (Li et al., 2020).

Επιπλέον, η έρευνα αποκάλυψε ότι ο τύπος και το μέγεθος των σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου που χρησιμοποιήθηκαν επηρέασαν επίσης το αποτέλεσμα της ηλιακής

επεξεργασίας. Τα μικρότερα μεγέθη σωματιδίων επέτρεψαν μια πιο ομοιόμορφη κατανομή εντός της χαλύβδινης μήτρας, οδηγώντας σε λεπτότερη και πιο ομοιόμορφη μικροδομή. Αυτή η ομοιομορφία ενίσχυσε την αντοχή στη φθορά του σύνθετου υλικού και μείωσε τη συχνότητα εμφάνισης θέσεων έναρξης ρωγμών, που είναι κοινές σε πιο χονδρόκοκκες μικροδομές. Ωστόσο, η χρήση μικρότερων σωματιδίων απαιτούσε ακριβή έλεγχο κατά το στάδιο της προτοποθέτησης για να αποφευχθεί η συσσωμάτωση, η οποία θα μπορούσε να δημιουργήσει ελαττώματα στην επεξεργασμένη επιφάνεια (Li et al., 2020).

Ένα άλλο σημαντικό εύρημα σχετίζεται με τον ρυθμό ψύξης μετά την επεξεργασία. Η ελεγχόμενη ψύξη ήταν απαραίτητη για την πρόληψη της ανάπτυξης θερμικών τάσεων και για τη διατήρηση της μικροδομικής ακεραιότητας του σύνθετου υλικού. Αντίθετα, οι πιο αργοί ρυθμοί ψύξης βοήθησαν στην ανακούφιση των εσωτερικών τάσεων, αλλά θα μπορούσαν να προκαλέσουν ανάπτυξη κόκκων, επηρεάζοντας αρνητικά την απόδοση φθοράς. Έτσι, η διαδικασία ψύξης αναγνωρίστηκε ως κρίσιμη παράμετρος στη συνολική ακολουθία επεξεργασίας (Li et al., 2020).

Οι παράγοντες που εξετάστηκαν για την συσχέτιση τους με το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας της επιφανειακής κατεργασίας είναι:

Ένταση ηλιακής ροής

Μία από τις κύριες παραμέτρους που διερευνήθηκαν ήταν η ένταση της συγκεντρωμένης ηλιακής ροής. Η μελέτη διερεύνησε μια σειρά από εντάσεις ροής για να αξιολογήσει τον αντίκτυπό τους στην τήξη και τη σύνδεση των σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου στη μήτρα του χάλυβα. Οι υψηλότερες εντάσεις ροής βρέθηκαν να διευκολύνουν την καλύτερη τήξη και σύντηξη στη διεπιφάνεια, βελτιώνοντας την αντοχή συγκόλλησης μεταξύ των υλικών. Ωστόσο, οι υπερβολικά υψηλές εντάσεις ροής εισήγαγαν επίσης κινδύνους όπως θερμική καταπόνηση και ταχεία ψύξη, που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στο σχηματισμό μικρορωγμών. Η ανάλυση είχε ως στόχο να βρει μια ισορροπία που μεγιστοποιούσε την ποιότητα συγκόλλησης ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τις δυσμενείς επιπτώσεις (Jaworski, Kluz & Trzepieciński, 2017).

Χρόνος έκθεσης

Η διάρκεια κατά την οποία το ζεύγος καρβιδίου χάλυβα-βολφραμίου εκτέθηκε στην ηλιακή ενέργεια ήταν μια άλλη κρίσιμη παράμετρος. Δοκιμάστηκαν διάφοροι χρόνοι έκθεσης για να αξιολογηθεί η επιρροή τους στη μικροδομική ανάπτυξη και την ομοιομορφία του σύνθετου υλικού. Οι μεγαλύτεροι χρόνοι έκθεσης γενικά είχαν ως αποτέλεσμα μια πιο ομοιογενή κατανομή των σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου μέσα στη μήτρα του χάλυβα, μειώνοντας το πορώδες και ενισχύοντας την αντοχή στη φθορά. Αντίθετα, η παρατεταμένη έκθεση θα μπορούσε να οδηγήσει σε μεγέθυνση των κόκκων και μειωμένη σκληρότητα, επομένως η μελέτη προσπάθησε να εντοπίσει τη βέλτιστη διάρκεια έκθεσης που εξισορρόπησε αποτελεσματικά αυτούς τους παράγοντες (Jaworski, Kluz & Trzepieciński, 2017).

Προετοιμασία Υλικού

Η προετοιμασία των υλικών πριν από την έκθεση στην ηλιακή ενέργεια αναλύθηκε προσεκτικά. Αυτό περιελάμβανε παράγοντες όπως ο καθαρισμός της επιφάνειας του χάλυβα, η προτοποθέτηση σκόνης καρβιδίου του βολφραμίου και η αρχική συμπύκνωση των υλικών. Η κατάλληλη προετοιμασία ήταν απαραίτητη για την εξασφάλιση καλής διαβρεξιμότητας και πρόσφυσης μεταξύ του χάλυβα και του καρβιδίου του βολφραμίου. Η ανάλυση επικεντρώθηκε στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι διαφορετικές μέθοδοι παρασκευής επηρέασαν την ποιότητα του τελικού σύνθετου υλικού, με στόχο την καθιέρωση βέλτιστων πρακτικών για τις διαδικασίες προεπεξεργασίας (Choudhary & Jain, 2021).

Μέγεθος και κατανομή σωματιδίων

Εξετάστηκε επίσης το μέγεθος και η κατανομή των σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου που χρησιμοποιούνται στην κατεργασία. Τα μικρότερα σωματίδια γενικά επέτρεπαν μια πιο ομοιόμορφη κατανομή εντός της χαλύβδινης μήτρας, συμβάλλοντας σε μια λεπτότερη μικροδομή και βελτιωμένη αντοχή στη φθορά. Ωστόσο, εξετάστηκαν επίσης η συσσωμάτωση σωματιδίων κατά την προτοποθέτηση. Η μελέτη διερεύνησε πώς τα διαφορετικά μεγέθη και οι κατανομές σωματιδίων επηρέασαν την απόδοση του σύνθετου υλικού και στόχευε στον προσδιορισμό των ιδανικών συνθηκών για την επίτευξη των καλύτερων αποτελεσμάτων (Choudhary & Jain, 2021).

Ρυθμός ψύξης

Οι ρυθμοί ψύξης μετά την επεξεργασία ήταν μια άλλη κρίσιμη παράμετρος στην ανάλυση. Η μελέτη διερεύνησε τόσο τους γρήγορους όσο και τους αργούς ρυθμούς ψύξης για να κατανοήσει τις επιπτώσεις τους στις ιδιότητες του υλικού του επεξεργασμένου σύνθετου υλικού. Η ταχεία ψύξη συχνά είχε ως αποτέλεσμα αυξημένη σκληρότητα αλλά επίσης εισήγαγε μειωμένη δυσθραυστότητα, ενώ οι πιο αργοί ρυθμοί ψύξης βοήθησαν στην ανακούφιση των θερμικών καταπονήσεων αλλά θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ανάπτυξη κόκκων. Η ανάλυση προσπάθησε να βρει έναν βέλτιστο ρυθμό ψύξης που εξισορροπούσε τη σκληρότητα, τη σκληρότητα και τη συνολική ακεραιότητα του υλικού (Choudhary & Jain, 2021).

Παράμετροι ελέγχου διαδικασίας

Τέλος, η μελέτη εξέτασε επίσης διάφορες παραμέτρους ελέγχου διεργασιών, όπως οι συνθήκες περιβάλλοντος, η ευθυγράμμιση του ηλιακού συγκεντρωτή και η συνέπεια στην εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας. Αυτοί οι παράγοντες ήταν κρίσιμοι για τη διασφάλιση της επαναληψιμότητας και της αξιοπιστίας στη διαδικασία επιφανειακής επεξεργασίας. Ο στόχος ήταν να δημιουργηθεί μια αξιόπιστη και επαναλαμβανόμενη διαδικασία που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για βιομηχανικές εφαρμογές (Jaworski, Kluz & Trzepieciński, 2017).

Συνολικά, η παραμετρική ανάλυση στη μελέτη περίπτωσης καρβιδίου χάλυβα-βολφραμίου παρείχε πολύτιμες γνώσεις σχετικά με την πολύπλοκη αλληλεπίδραση διαφόρων συνθηκών και παραμέτρων στις επιφανειακές κατεργασίες που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια. Με τη συστηματική αξιολόγηση αυτών των παραγόντων, η μελέτη στόχευε στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας επεξεργασίας για βελτιωμένη απόδοση υλικού και στη θέσπιση κατευθυντήριων γραμμών για μελλοντικές εφαρμογές σε περιβάλλοντα υψηλής φθοράς και υψηλής θερμοκρασίας (Jaworski, Kluz & Trzepieciński, 2017).

4 Πειραματικά Αποτελέσματα: Ζεύγος Χάλυβα - WC

4.1 Παρουσίαση του Case Study

Στα πλαίσια της Διπλωματικής αξιολογήθηκε στο εργαστήριο μελέτη περίπτωσης ζεύγους χάλυβα-καρβιδίου βολφραμίου. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός υλικών χρησιμοποιείται ευρέως σε εργαλεία, εξαρτήματα μηχανημάτων και άλλες εφαρμογές που απαιτούν υψηλή σκληρότητα και αντοχή στη φθορά.

Ο χάλυβας και το καρβίδιο του βολφραμίου χρησιμοποιούνται συχνά μαζί σε σύνθετη μορφή, με το καρβίδιο του βολφραμίου να είναι η σκληρή, ανθεκτική στη φθορά φάση ενσωματωμένη σε χαλύβδινη επιφάνεια. Αυτός ο συνδυασμός δημιουργεί ένα στιβαρό υλικό που συνδυάζει την ανθεκτικότητα του χάλυβα με την εξαιρετική σκληρότητα του καρβιδίου του βολφραμίου, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές όπως κοπτικά εργαλεία, εξοπλισμό εξόρυξης και άλλα εξαρτήματα βαρέως τύπου. Ωστόσο, το κύριο πρόβλημα με αυτό το ζεύγος υλικών είναι οι διαφορές των συντελεστών θερμικής διαστολής και των μηχανικών ιδιοτήτων τους, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αστοχίες όπως ρωγμές, αποκολλήσεις ή η φθορά υπό υψηλή καταπόνηση και διακυμάνσεις θερμοκρασίας.

Η πρωταρχική πρόκληση έγκειται στη διασφάλιση της αποτελεσματικής σύνδεση του καρβιδίου του βολφραμίου με το χαλύβδινο υπόστρωμα. Οι συμβατικές μέθοδοι για την ενίσχυση της αντοχής της σύνδεσης μεταξύ χάλυβα και καρβιδίου βολφραμίου συχνά περιλαμβάνουν διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας που μπορούν να εισάγουν παραμένουσες τάσεις ή ανεπιθύμητες μικροδομικές αλλαγές, επηρεάζοντας τη συνολική απόδοση του εξαρτήματος.

Επιπλέον, η αντοχή στη φθορά των σύνθετων υλικών χάλυβα-καρβιδίου βολφραμίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα της διεπιφάνειας μεταξύ των δύο υλικών. Η κακή σύνδεση μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρες αστοχίες. Οι παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής, όπως η πυροσυσσωμάτωση, η συγκόλληση ή η μηχανική στερέωση, μπορεί να είναι χρονοβόρες, ενεργοβόρες και επιρρεπείς σε ελαττώματα.

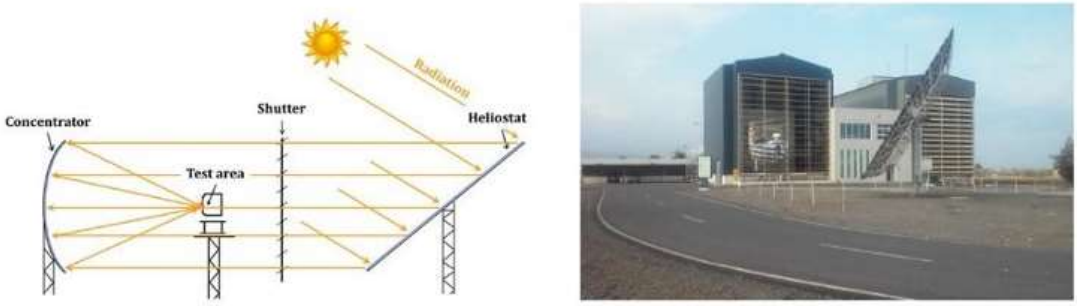
Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, η παρούσα μελέτη περίπτωσης διερευνά τη χρήση της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας ως μεθόδου επιφανειακής κατεργασίας για τη βελτίωση της σύνδεσης.

Ο βασικός στόχος είναι να αναλυθούν οι μικροδομικές αλλαγές που προκαλούνται από την ηλιακή επεξεργασία και πώς αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν τη συνολική αντοχή στη φθορά και τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού.

4.2 Πειραματική Διαδικασία

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των εργαστηριακών πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν με στόχο την ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς και των μικροδομικών αλλαγών σε δείγματα σκόνης βολφραμίου εναποτεθειμένα σε χάλυβα S355, υπό διαφορετικές συνθήκες ακτινοβόλησης.

Πειραματική Διάταξη



Σχήμα 4.4.1: Γραφική διάταξη συλλογής ηλιακός φωτός οριζόντιου ηλιακού φούρνου και φωτογραφία του ηλιοστάτη- ακίνητου παραβολικού συγκεντρωτή **στις εγκαταστάσεις (PSA) της Ισπανίας, όπου έγινε το πείραμα. (A. Mourlas, E. Pavlidou, 2019)**

Ο συγκεκριμένος φούρνος έχει τη δυνατότητα να αποδώσει μέγιστη ισχύ 40 [kW] εντός κυκλικής περιοχής με διάμετρο 120 [mm]. Η ηλιακή δέσμη ακολουθεί κανονική κατανομή, με τη μέγιστη πυκνότητα ισχύος να φτάνει τα 7 [MW/m²]. Για τις δοκιμές, χρησιμοποιήθηκε δέσμη με διάμετρο 35 [mm].

4.2.1 Προετοιμασία των δοκιμίων

Πριν την παρατήρηση ενός δοκιμίου με το οπτικό μικροσκόπιο, είναι απαραίτητο να ακολουθηθεί μια διαδικασία προετοιμασίας της επιφάνειάς του. Αρχικά, η διαδικασία αυτή αφαιρεί τις επιφανειακές ατέλειες και στη συνέχεια αποκαλύπτει τα δομικά χαρακτηριστικά του υλικού. Σε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα έχει πραγματοποιηθεί κοπή και λείανση χωρίς μηχανικές αλλοιώσεις, αποφεύγονται γρατσουνιές και υπολείμματα υγρών, διατηρούνται τα εγκλείσματα και διασφαλίζεται επίπεδη

επιφάνεια για την κατάλληλη παρατήρηση σε μεγέθυνση. Τα βασικά στάδια προετοιμασίας περιλαμβάνουν την κοπή, τον εγκιβωτισμό, τη μηχανική λείανση, τη στίλβωση και την χημική προσβολή. Ανάλογα με το δείγμα, ενδέχεται να χρειαστεί καθαρισμός ή επιμετάλλωση.

4.2.2 Κοπή

Η παρατήρηση με το οπτικό μικροσκόπιο γίνεται συνήθως σε εγκάρσιες ή διαμήκεις τομές των υλικών. Η καλύτερη μέθοδος κοπής για το χάλυβα είναι ο τροχός κοπής, καθώς προσφέρει λείες επιφάνειες με ελάχιστες αλλοιώσεις και αποτρέπει τις δομικές μεταβολές λόγω υπερθέρμανσης.

Έπρεπε να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη δύναμη κοπής, στη χρήση άφθονου ψυκτικού υγρού και στη σταθερή συγκράτηση του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, καθώς αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την τελική δομή του υλικού.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το σπάσιμο του δίσκου, όπου κομμάτι έμεινε στην κοπή του δοκιμίου, λόγω του ότι δεν ήταν στις σωστές στροφές για τη σκληρότητα ο δίσκος.

Σχήμα 4.4.2.1: Στιγμιότυπο από τη χρήση του μηχανήματος – τροχού κοπής για τα δοκίμια που έγινε η μελέτη περίπτωσης. Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Σχήμα 4.4.2.2: Στιγμιότυπο από τη χρήση του μηχανήματος – τροχού κοπής για τα δοκίμια που έγινε η μελέτη περίπτωσης. Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

4.2.3 Εγκιβωτισμός

Εάν το δοκίμιο είναι πολύ μικρό για να συγκρατηθεί, τότε ακολουθείται η διαδικασία εγκιβωτισμού. Για τον εγκιβωτισμό επιλέγεται ένα υλικό που μπορεί να χυτευθεί χωρίς να επηρεάζει την επιφάνεια του δοκιμίου από θερμότητα ή πίεση. Συχνά χρησιμοποιούνται εποξικά υλικά για αυτή τη διαδικασία.

Στην περίπτωση και των τεσσάρων (4) δοκιμίων που μελετήθηκαν, δεν ήταν αναγκαίος ο εγκιβωτισμός λόγω των διαστάσεων.

4.2.4 Λείανση και Στίλβωση

Ανεξαρτήτως της μεθόδου κοπής, η επιφανειακή δομή του υλικού μπορεί να έχει υποστεί αλλοιώσεις. Το κατεστραμμένο στρώμα αφαιρείται με τη χρήση λειαντικών χαρτιών (γυαλόχαρτων) με σταδιακά λεπτότερους κόκκους. Για σιδηρούχα υλικά χρησιμοποιούνται γυαλόχαρτα καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Τα γυαλόχαρτα τοποθετούνται σε περιστρεφόμενη επιφάνεια, ενώ κατά τη διάρκεια της λείανσης τροφοδοτείται νερό για την ψύξη του δοκιμίου και την απομάκρυνση των υπολειμμάτων. Η διαδικασία λείανσης ξεκινά με γυαλόχαρτα χοντρού κόκκου (π.χ. 180 grit) και συνεχίζεται με λεπτότερους κόκκους (240, 320, 400 και 600 grit). Σε κάθε στάδιο, η λείανση πραγματοποιείται σε κατεύθυνση κάθετη προς την προηγούμενη. Η πίεση που ασκείται στο δοκίμιο πρέπει να είναι ομοιόμορφη και ανάλογη με τη σκληρότητά του.

Η στίλβωση έχει ως στόχο την αφαίρεση των γραμμών που αφήνει η μηχανική λείανση. Χρησιμοποιούνται υφάσματα (όπως βελούδο) τοποθετημένα σε περιστρεφόμενη βάση, τα οποία περιέχουν διαμαντένιους κόκκους εξαιρετικά λεπτής κοκκομετρίας (10 – 0.1 μm). Κατά τη διάρκεια της στίλβωσης, το ύφασμα διαβρέχεται με κάποιο υγρό για τη λίπανση και ψύξη του δοκιμίου. Η στίλβωση των σιδηρούχων υλικών απαιτεί μικρό χρόνο, υψηλή δύναμη και χαμηλή ταχύτητα περιστροφής.

Σχήμα 4.4.4.1: Παράδειγμα των γραμμών που αναπτύχθηκαν μετά τον τροχό κοπής στην επιφάνεια του δοκιμίου

Σχήμα 4.4.4.2: Στιγμιότυπο από τη χρήση του περιστρεφόμενου δίσκου, για τη λείανση των δοκιμίων

4.2.5 Χημική Προσβολή

Κάποιες πληροφορίες μπορούν να αντληθούν από το γυαλισμένο δοκίμιο χωρίς χημική προσβολή, όπως διαφορές στη σκληρότητα που προκαλούν ανάγλυφη επιφάνεια, ή η ύπαρξη ρωγμών, πόρων, οπών και μη μεταλλικών εγκλεισμάτων. Ωστόσο, η χημική προσβολή είναι απαραίτητη στη μεταλλογραφία για την αποκάλυψη της μικροδομής του μετάλλου ή κράματος και την παρατήρησή του με το οπτικό μικροσκόπιο. Ανάλογα με το υλικό, χρησιμοποιούνται κατάλληλα χημικά αντιδραστήρια που αντιδρούν με τη μεταλλική επιφάνεια. Η διάρκεια της προσβολής κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα έως λεπτά. Μετά την ολοκλήρωση της χημικής προσβολής, το δοκίμιο ξεπλένεται σε καθαρό νερό για να απομακρυνθούν τα χημικά

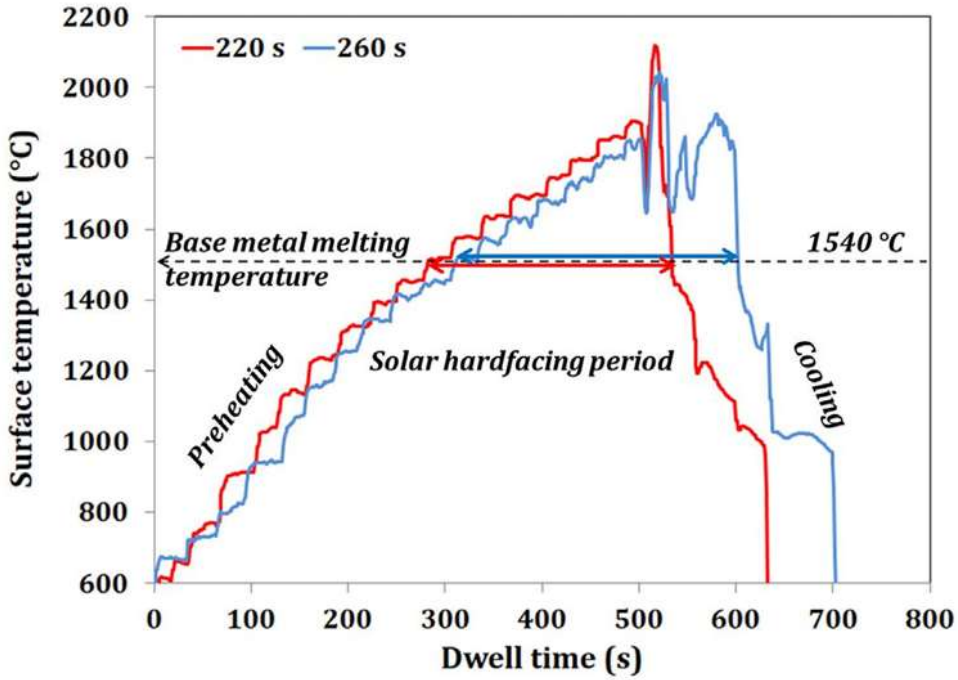
και να σταματήσει η αντίδραση, ενώ ακολουθεί στέγνωμα για την παρατήρηση στο μικροσκόπιο.

Σε μονοφασικά κράματα και καθαρά μέταλλα, ένα διάλυμα μπορεί να προσβάλει τα όρια των κόκκων, τα οποία εμφανίζονται ως σκοτεινές γραμμές που περιβάλλουν τους κόκκους, ή να διαλύσει επιλεκτικά διαφορετικά προσανατολισμένους κόκκους. Το φως που πέφτει κάθετα στα επίπεδα των κόκκων αντανακλάται σε διαφορετικές γωνίες, δημιουργώντας αντίθεση στις γκρίζες αποχρώσεις των κόκκων. Οι κόκκοι που είναι κάθετοι στο φως εμφανίζονται φωτεινοί, ενώ αυτοί που σχηματίζουν γωνία φαίνονται σκοτεινοί. Τέλος, οι ακαθαρσίες που βρίσκονται στα όρια των κόκκων μπορούν να βελτιώσουν αισθητά το αποτέλεσμα της προσβολής. Στα κράματα, οι διαφορετικές φάσεις αντιδρούν διαφορετικά με το αντιδραστήριο, επιτρέποντας την διάκρισή τους κατά την παρατήρηση με το μικροσκόπιο.

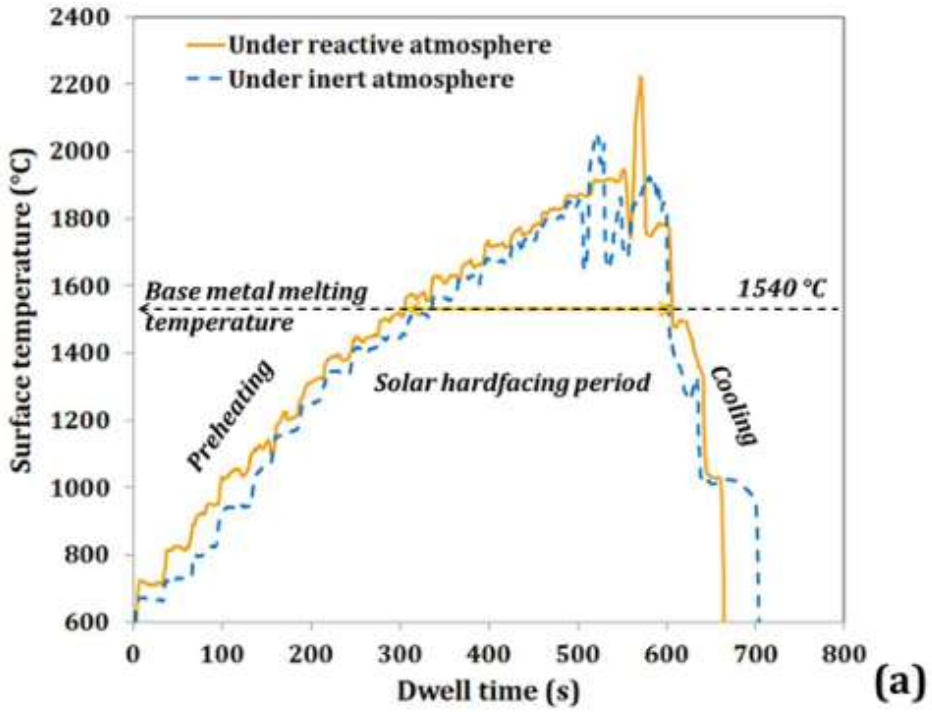
Για την συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, χρησιμοποιήθηκε Nital 2% για 15 sec.

Σχήμα 4.4.5.1: Απεικόνιση του πάγκου εργασίας στο Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας

4.2.6 Συνθήκες ακτινοβόλησης και Μορφή Δοκιμίων



Σχήμα 4.2.6.1: Συνθήκες Ακτινοβόλησης Δοκιμίου No10 (Ar) –κόκκινη γραμμή και No 9 (Ar) – μπλε γραμμή **(A. Mourlas, E. Pavlidou, 2019)**

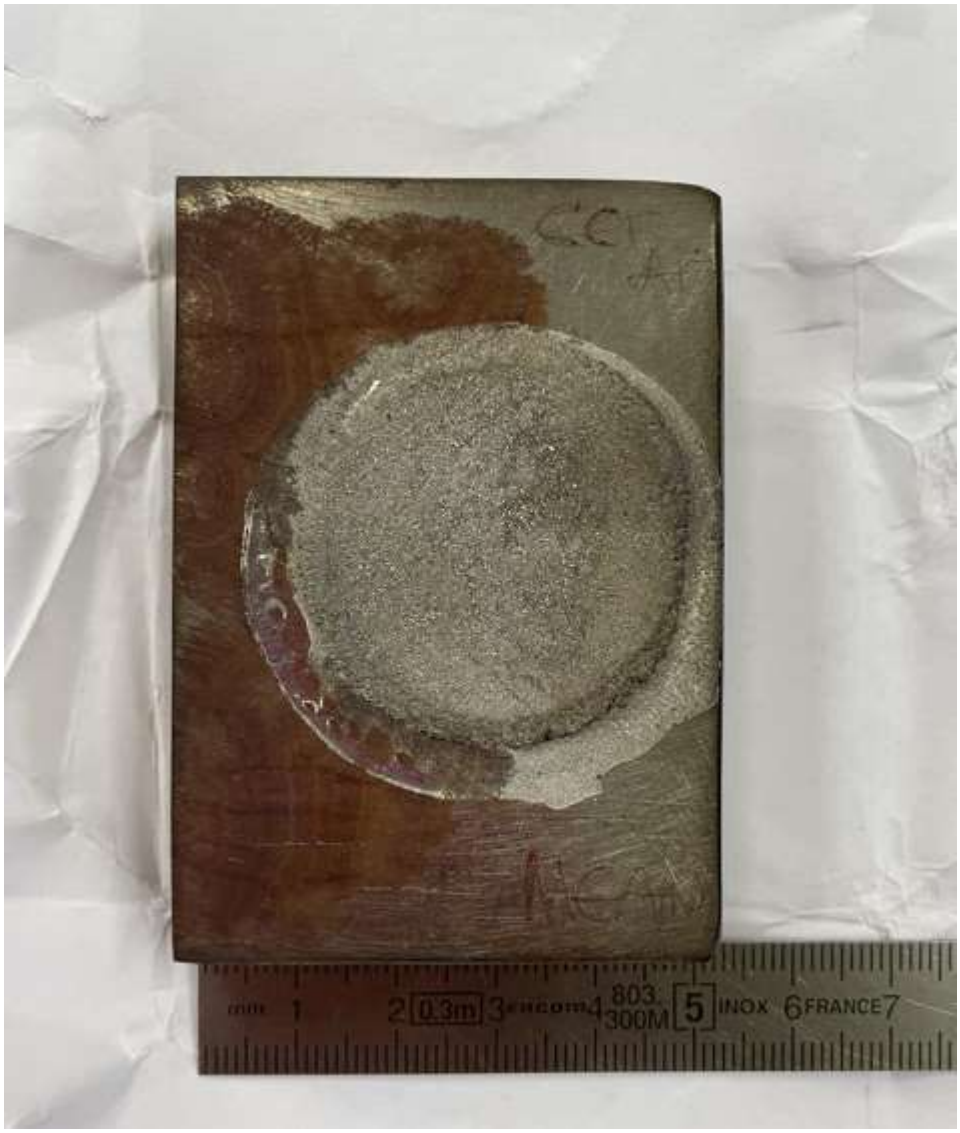


Σχήμα 4.2.6.2: Συνθήκες Ακτινοβόλησης Δοκιμίου No11 (N2) – κίτρινη γραμμή και Δοκιμίου No 6 (Ar) – μπλε γραμμή **(A. Mourlas, E. Pavlidou, 2019)**

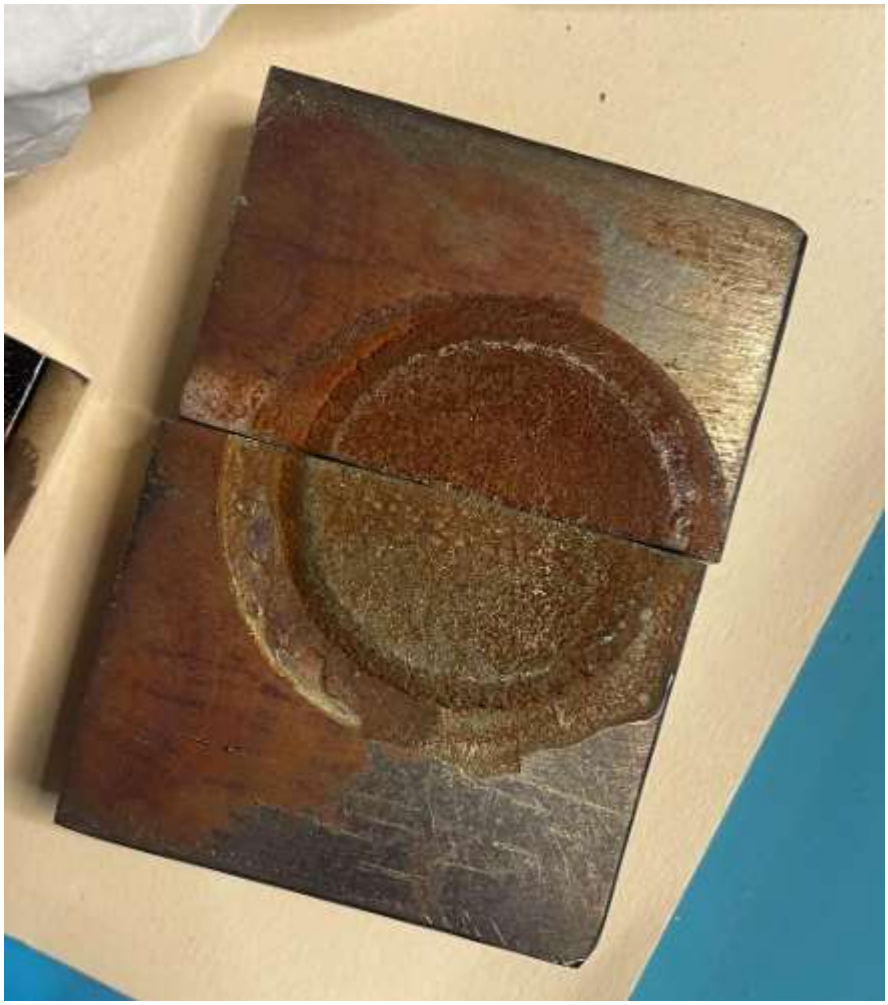
α/α Δοκιμίου	**Αέριο**	**Διάρκεια ακτινοβόλησης**	**Μέγιστη θερμοκρασία ακτινοβόλησης**
6	Αργό (Ar)	700 sec	2050 ° C
9	Αργό (Ar)	705 sec	2010 ° C
10	Αργό (Ar)	625 sec	2150 ° C
11	Άζωτο (N_2)	670 sec	2250 ° C

Πίνακας 4.2.6.1: Δοκίμια υπό μελέτη και συνθήκες ακτινοβόλησης

Παρακάτω, παρατίθενται οι απεικονίσεις των δοκιμίων, πριν την κοπή τους στο Εργαστήριο, στα Σχήματα **4.2α-4.5β,** όπως χαρακτηρίζονται αναλυτικά με τις αντίστοιχες λεζάντες:



Σχήμα 4.2α: Απεικόνιση του Δοκιμίου 6 – Αρχική Κατάσταση



Σχήμα 4.2β: Απεικόνιση του Δοκιμίου 6 – Κατάσταση δοκιμίου μετά την Κοπή

Σχήμα 4.3α: Απεικόνιση του Δοκιμίου 9 – Αρχική Κατάσταση

Σχήμα 4.3β: Απεικόνιση του Δοκιμίου 9 – Κατάσταση δοκιμίου μετά την Κοπή

Σχήμα 4.4α: Απεικόνιση του Δοκιμίου 10 – Αρχική Κατάσταση

Σχήμα 4.4β: Απεικόνιση του Δοκιμίου 10 – Κατάσταση δοκιμίου μετά την κοπή

Σχήμα 4.5α: Απεικόνιση του Δοκιμίου 11 – Αρχική Κατάσταση

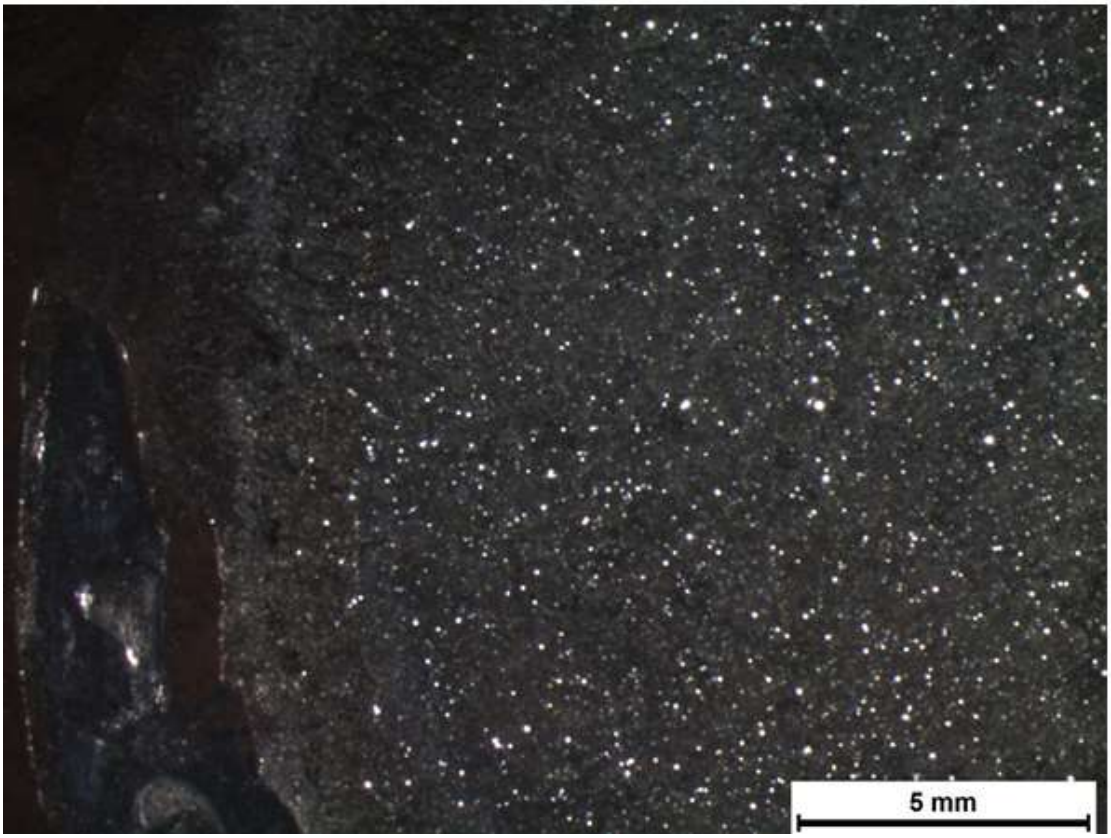
Σχήμα 4.5β: Απεικόνιση του Δοκιμίου 11 - Κατάσταση δοκιμίου μετά την κοπή

5 Αποτελέσματα Μικροσκοπικής Ανάλυσης

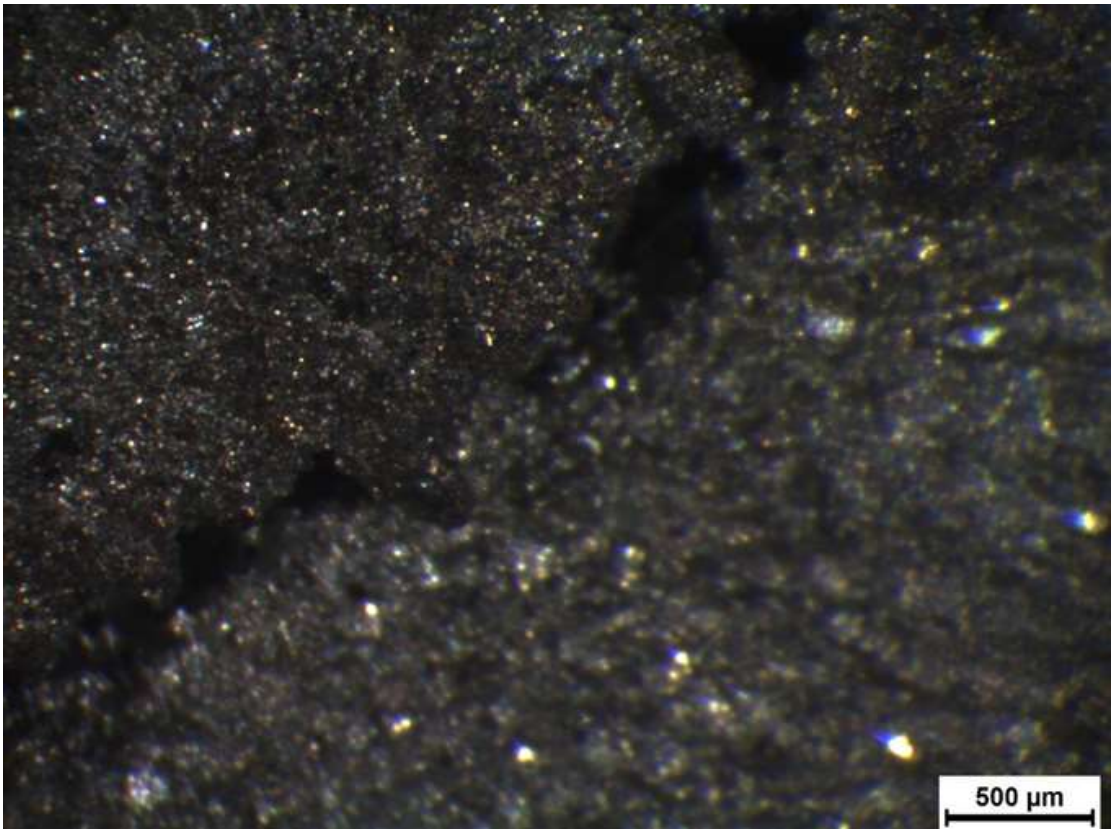
Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων, πραγματοποιήθηκε λεπτομερής μικροσκοπική ανάλυση για την εξέταση των επιπτώσεων της ακτινοβόλησης στη δομή της επιφάνειας των δειγμάτων. Παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δειγμάτων που ακτινοβολήθηκαν με Αργό (Ar) και αυτού που ακτινοβολήθηκε με Άζωτο (N_2). Παρακάτω περιγράφονται οι παρατηρήσεις:

1. **Δοκίμιο No 6**

   Στο πρώτο δοκίμο παρατηρήθηκε έντονη δημιουργία πόρων στην επιφάνεια, κυρίως σε περιοχές που υποβλήθηκαν σε παρατεταμένη ακτινοβόληση με Ar.



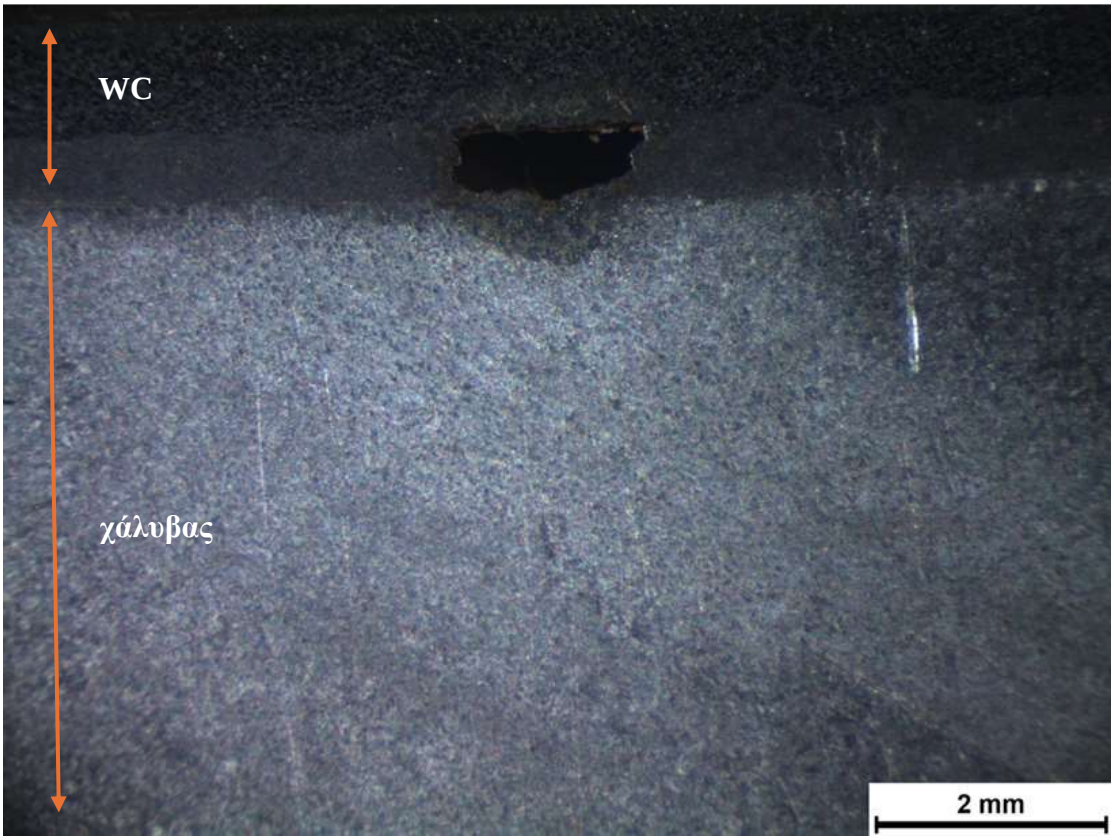
Σχήμα 5.1.1: Απεικόνιση της επιφάνειας της σκόνης βολφραμίου στο χάλυβα



Σχήμα 5.1.2: Απεικόνιση της επιφάνειας της σκόνης βολφραμίου στο χάλυβα

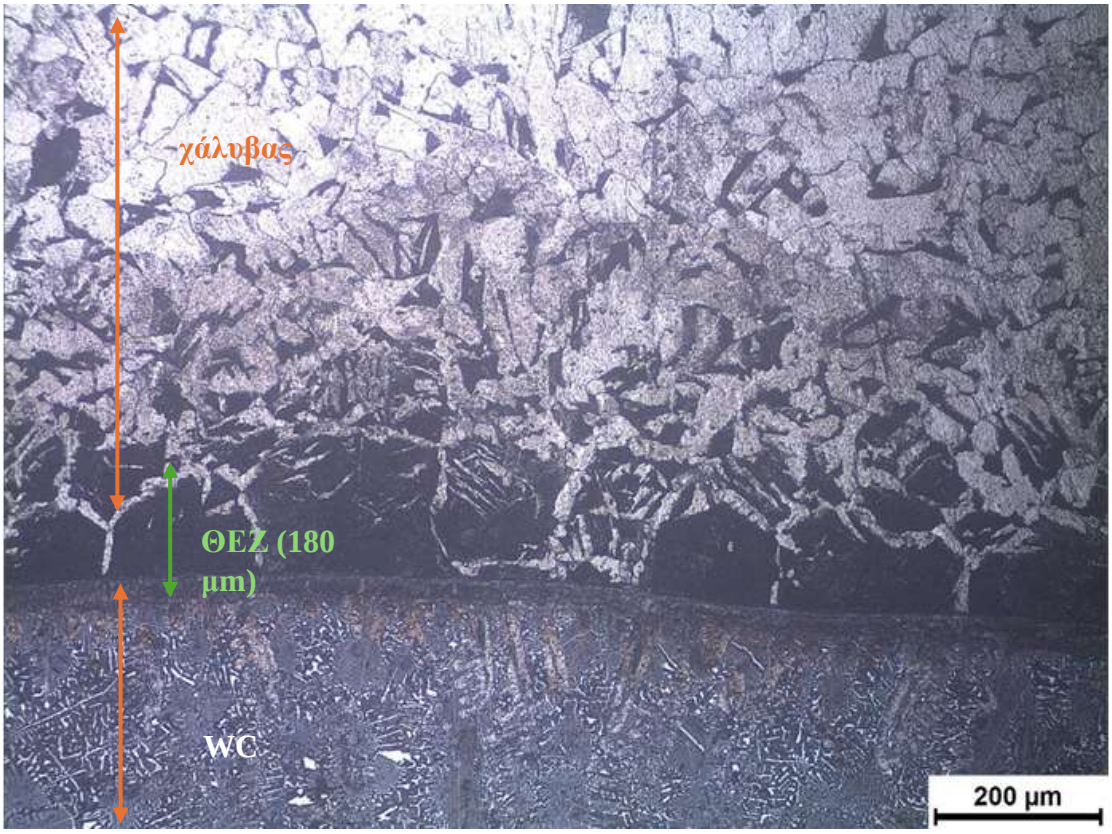
Στις παραπάνω εικόνες, παρατηρείται πως η επιφάνεια της σκόνης βολφραμίου είναι λαμπερή και κοκκώδης.

Σχήμα 5.1.3: Απεικόνιση του Δοκιμίου 6 - Τομή δοκιμίου -5,1 cm μήκος τομής 1,4 cm πάχος τομής (1,1 cm απόσταση από αριστερά ξεκινάει μήκος συγκόλλησης 3,55 cm με πάχος 0,2 cm)



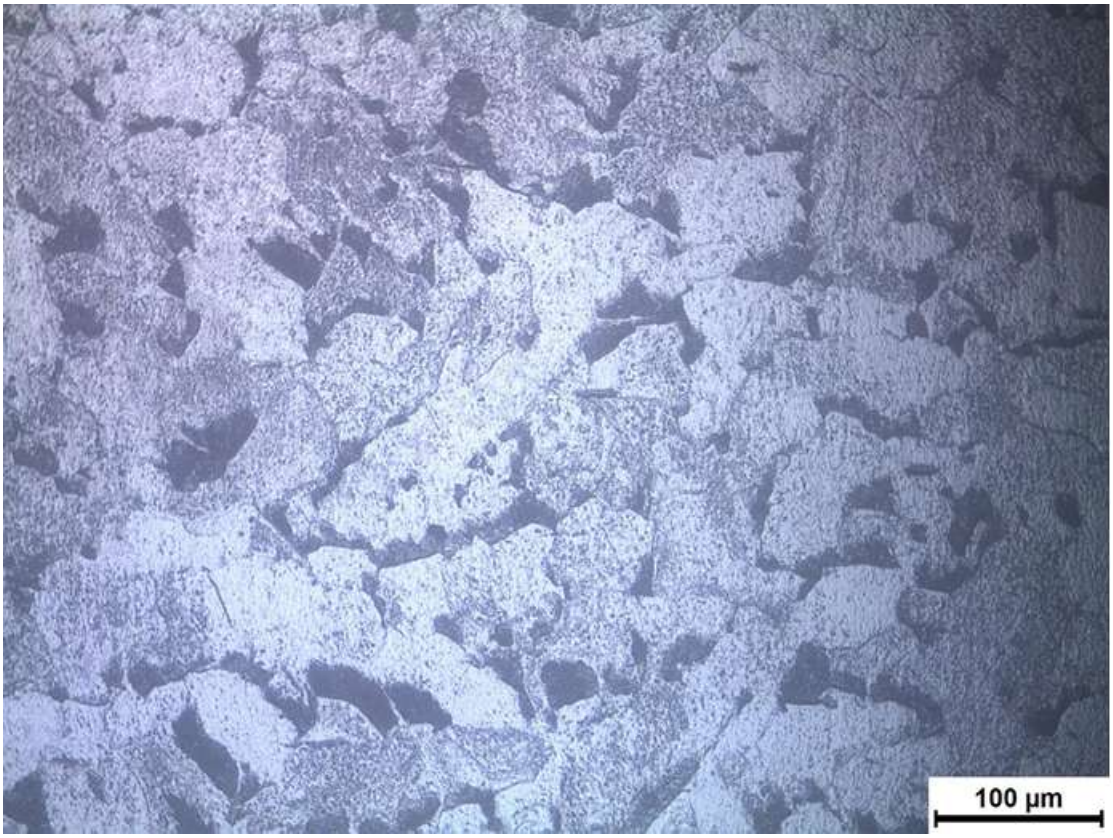
Σχήμα 5.1.4: Διεπιφάνεια χάλυβα / WC

Στο Σχήμα 5.1.4 παρατηρείται ένα μεγάλο κενό – πορώδες, διαστάσεων 1,8 mm που υποδηλώνει ατελή τήξη. Δεν έχει φτάσει η ένταση της ενέργειας να λιώσει αυτή την περιοχή.



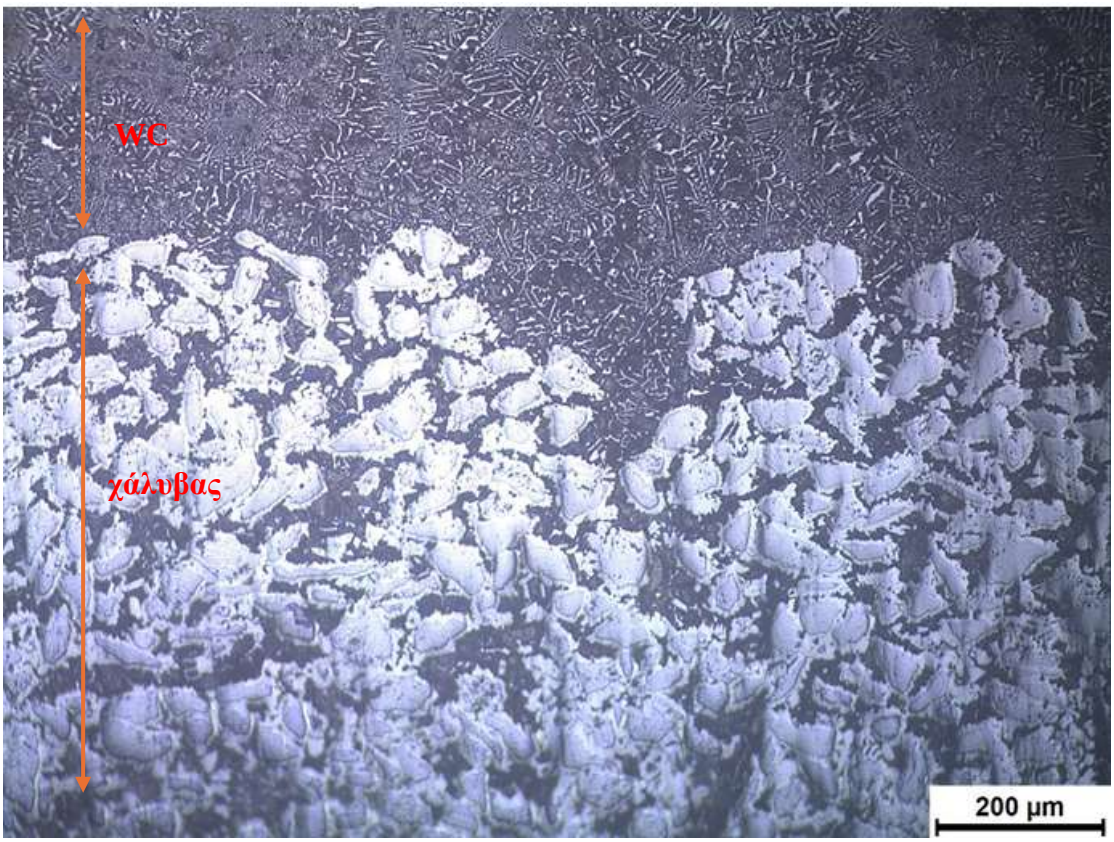
Σχήμα 5.1.5: Διεπιφάνεια επιστρώματος με χάλυβα.

Στο **Σχήμα 5.1.5** διακρίνεται η μεταβατική περιοχή διάχυσης.



Σχήμα 5.1.6: Μικροδομή μετάβασης μεταξύ επιστρώματος με χάλυβα

Στο **Σχήμα 5.1.6** παρατηρείται η μικροδομή στην περιοχή μετάβασης μεταξύ επιστρώματος με χάλυβα, όπου έχουμε εμπλουτισμό της περιοχής με άνθρακα.

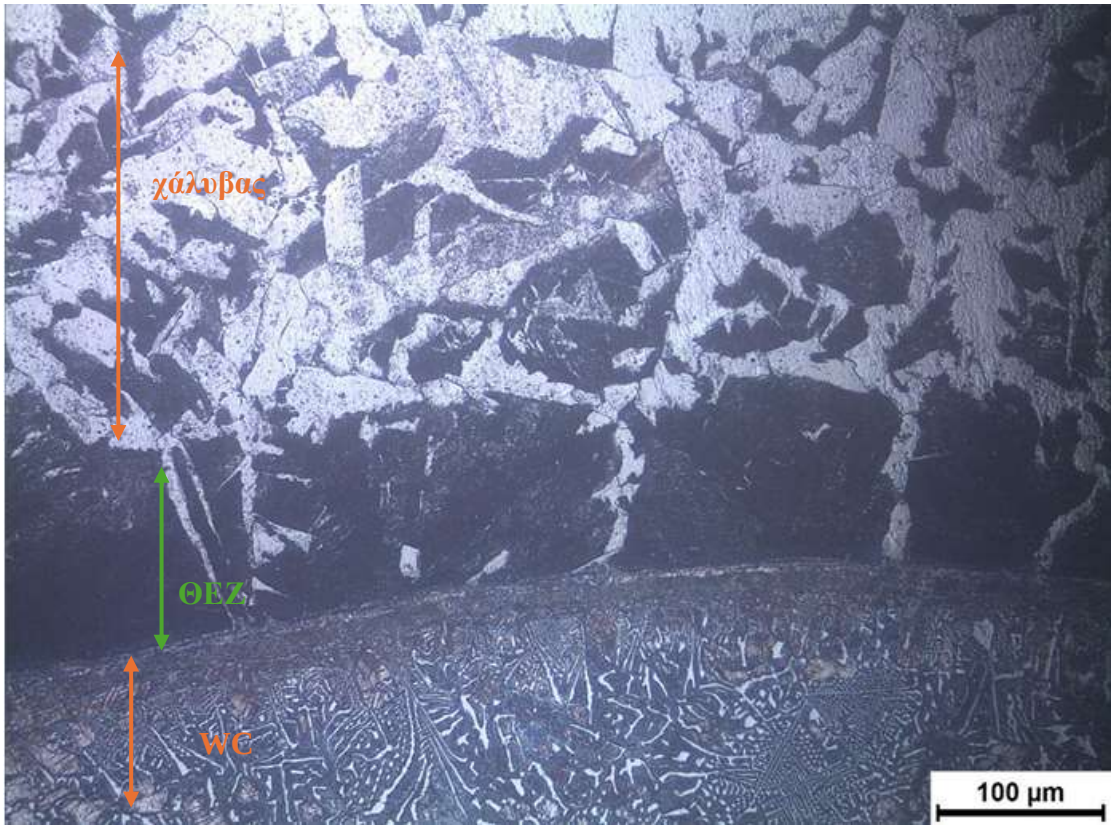


Σχήμα 5.1.7: Περιοχή τήξης.

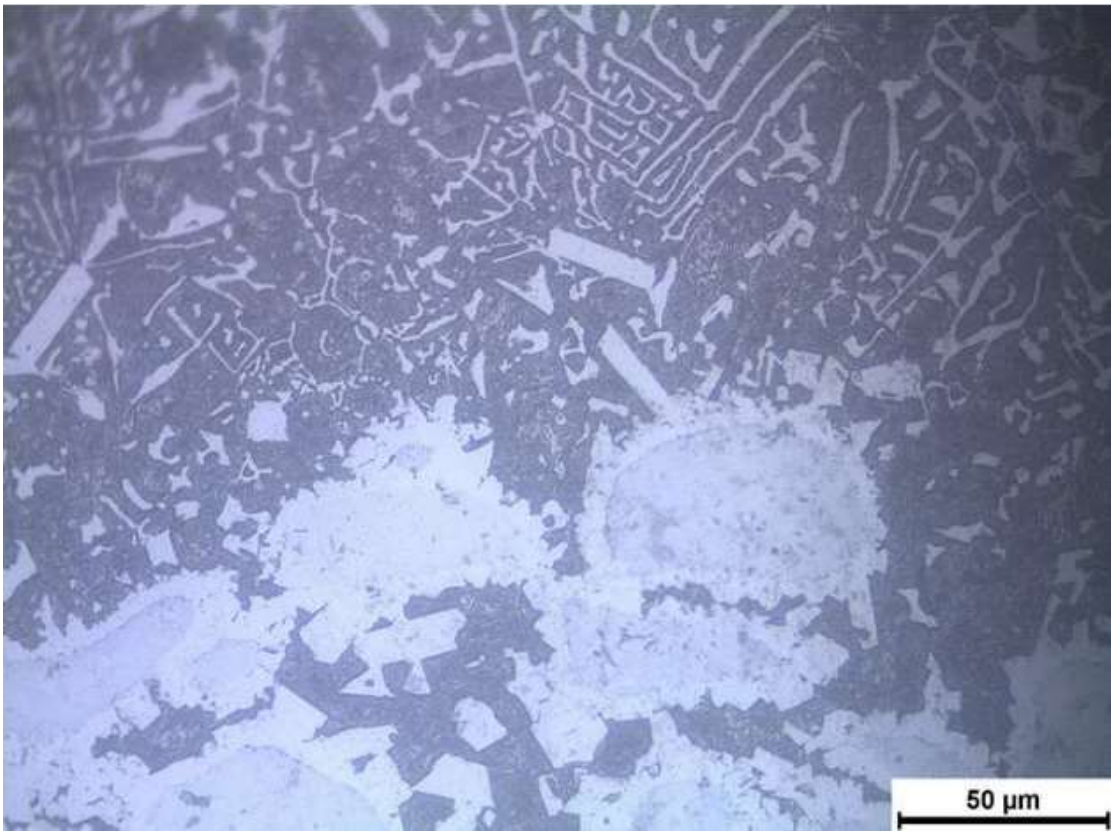
Στο **Σχήμα 5.1.7** παρατηρείται η περιοχή τήξης, που έχει εισχωρήσει μέσα στο χάλυβα.

Σχήμα 5.1.8: Επίστρωμα με πορώδες

Στο **Σχήμα 5.1.8** παρατηρείται το επίστρωμα με πορώδες, λόγω τήξης και επανεστερεοποίησης.



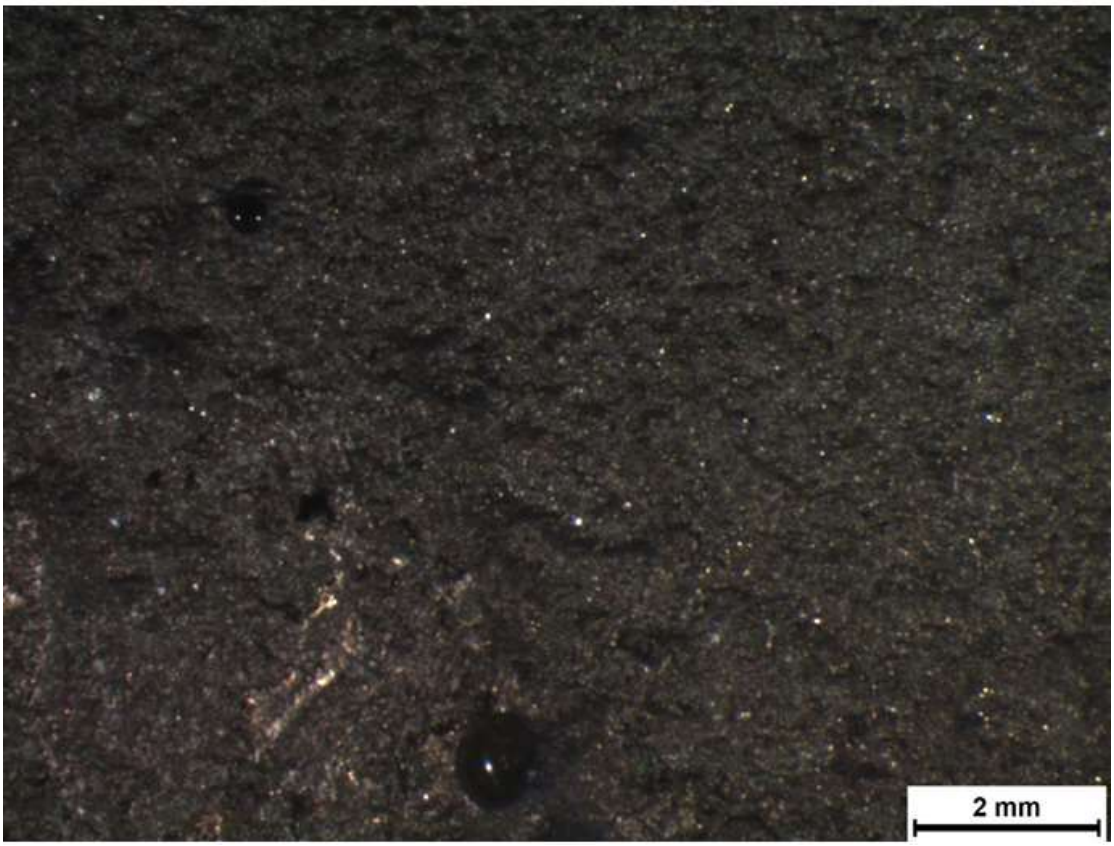
Σχήμα 5.1.9: Περιοχή Τήξης – Διάχυση



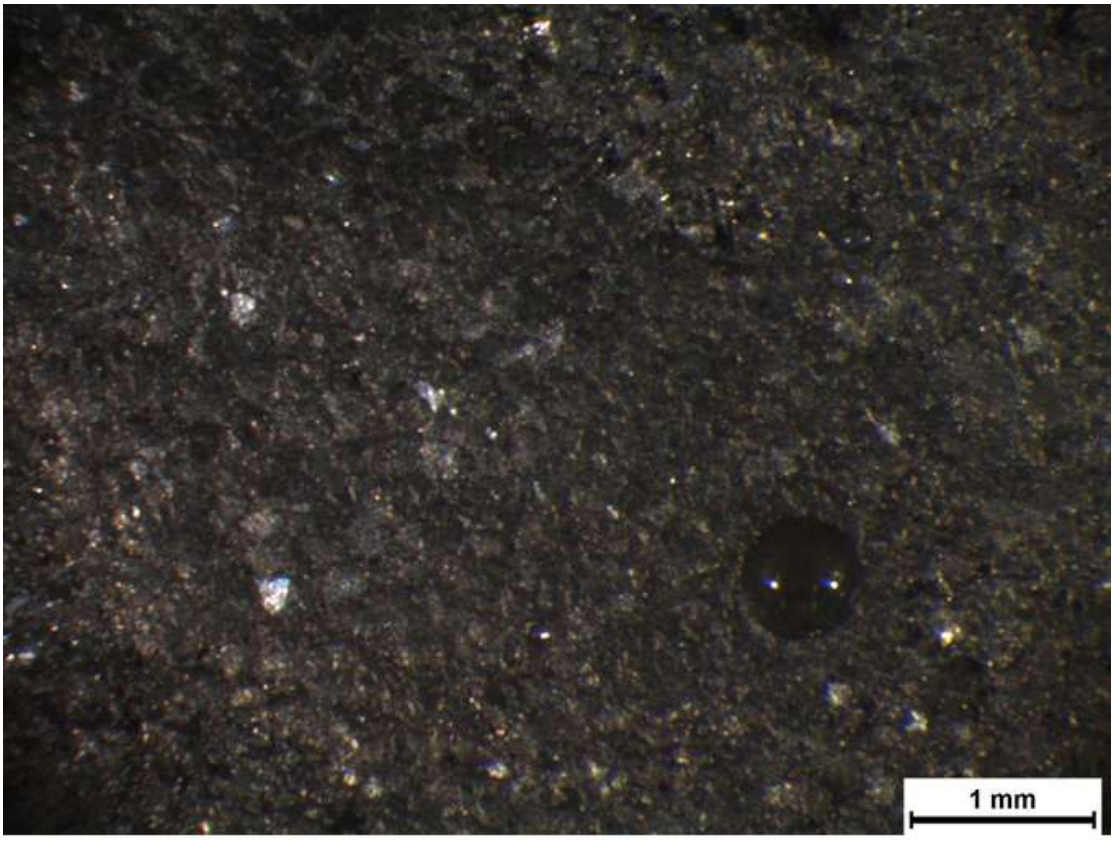
Σχήμα 5.1.10: Απεικόνιση της διεπιφάνειας χάλυβα / WC

2. **Δοκίμιο 9**

   Το **Δοκίμιο 9** παρουσιάζει μικρορωγμές, ενώ η επιφάνεια του είναι λιγότερο λαμπερής και κοκκώδης, όπως ακτινοβολήθηκε σε μικρότερη θερμοκρασία.

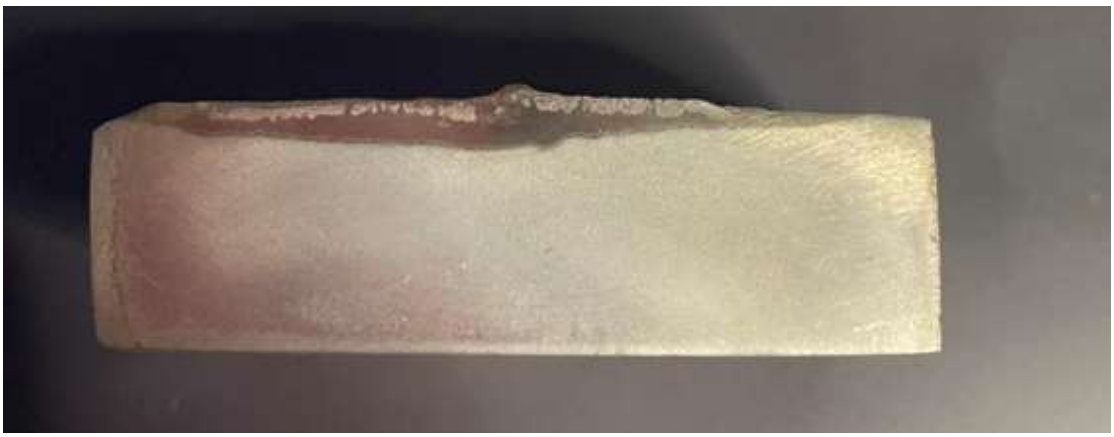


Σχήμα 5.2.1: Απεικόνιση της επιφάνειας της σκόνης βολφραμίου στο χάλυβα

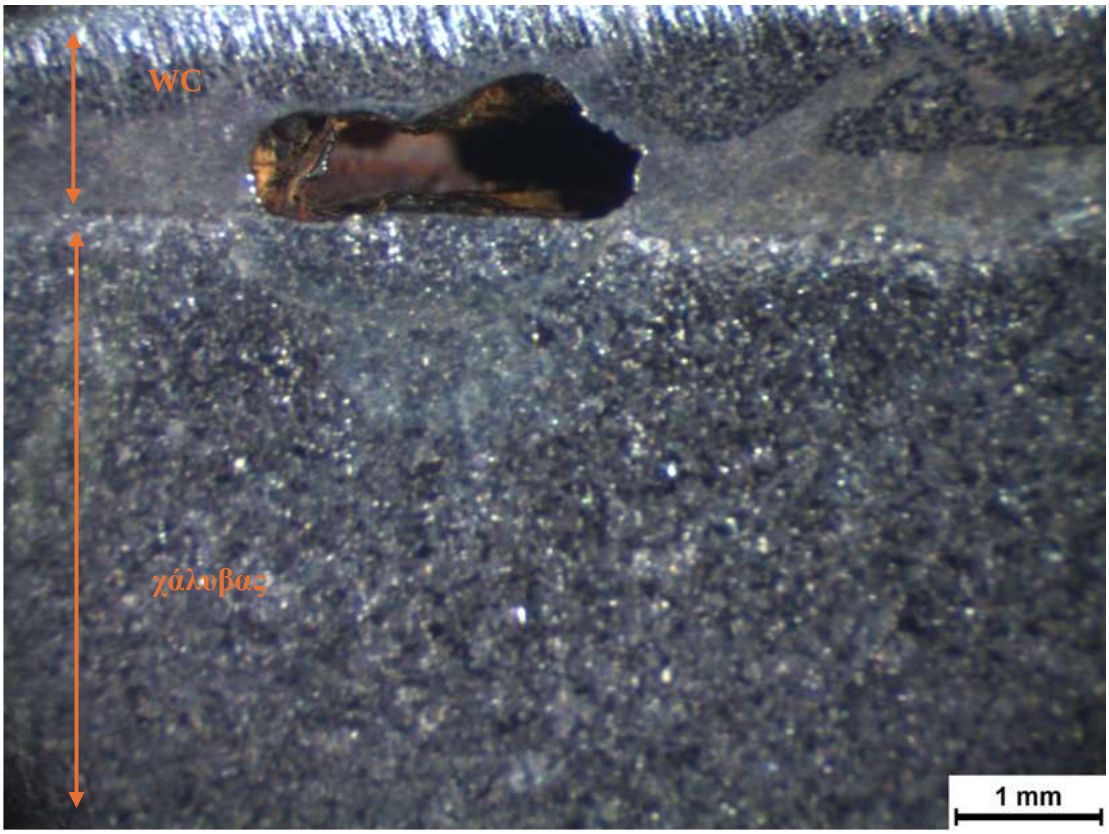


Σχήμα 5.2.2: Απεικόνιση της επιφάνειας της σκόνης βολφραμίου στο χάλυβα

Στις παραπάνω εικόνες, **Σχήμα 5.2.1 & 5.2.2**, παρατηρείται πως η επιφάνεια της σκόνης βολφραμίου είναι λαμπερή και κοκκώδης, λιγότερο ωστόσο από το Δοκίμιο No6. Παρατηρούνται μικρορωγμές λόγω ενδεχομένως hot cracking.

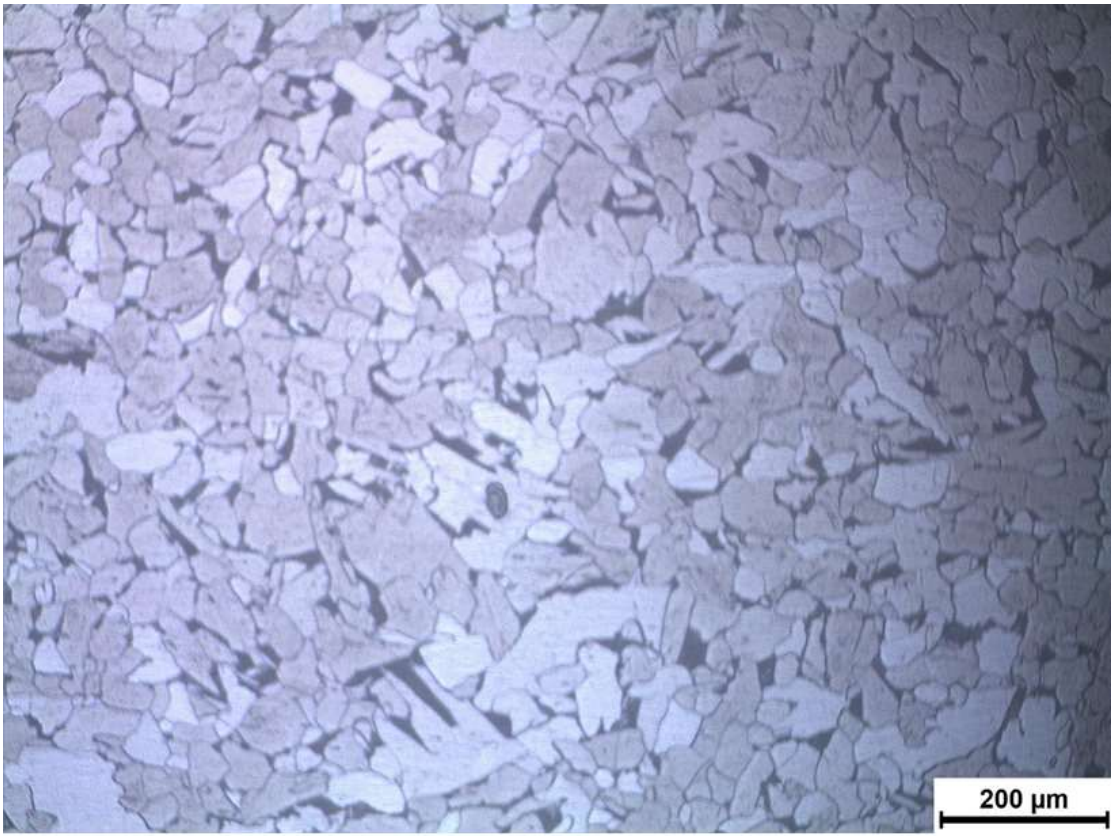


Σχήμα 5.2.3: Απεικόνιση του Δοκιμίου 9 – Τομή δοκιμίου - μήκος τομής 5,05 cm πάχος 1,4 cm και 0,2 cm από αριστερά ξεκινάει μήκος συγκόλλησης 3,5 cm με πάχος 0,1 cm)



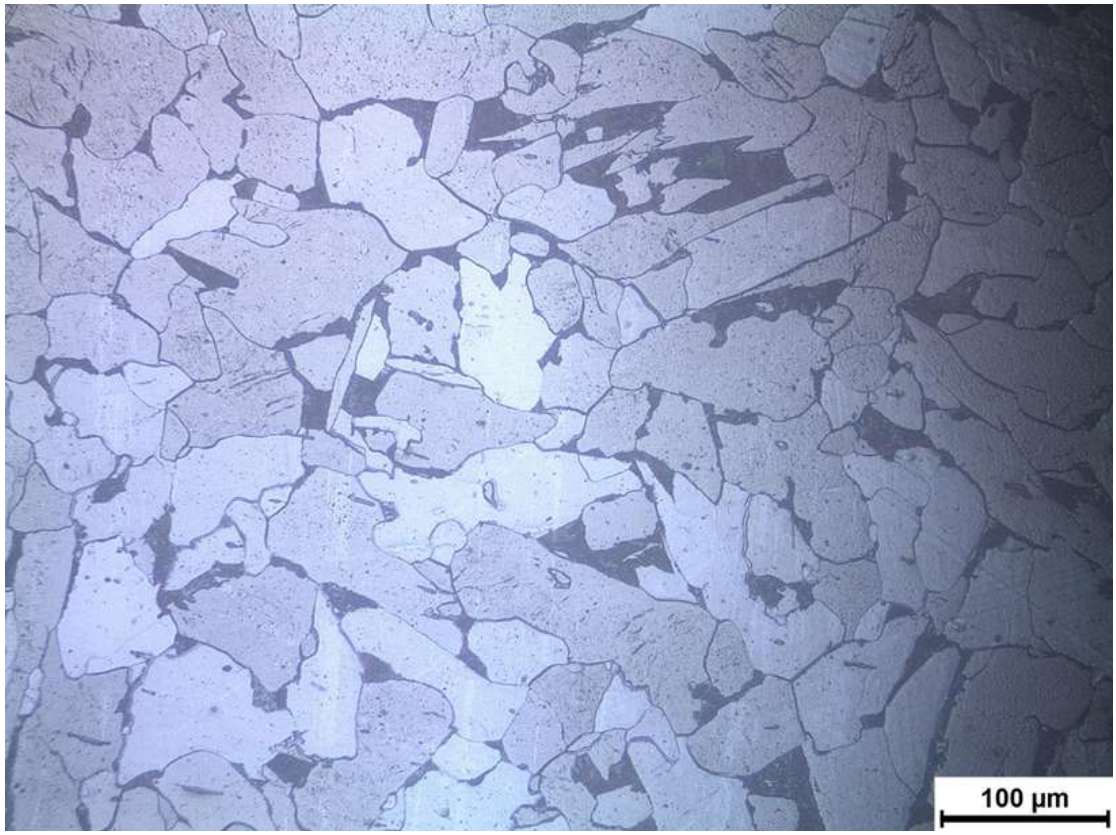
Σχήμα 5.2.4: Απεικόνιση της επιφάνειας τομής σε στερεοσκόπιο

Στο Σχήμα **5.2.4** παρατηρείται μια μεγάλη ασυνέχεια – πορώδες στην διεπιφάνεια, μεγαλύτερη των 2,5 mm.

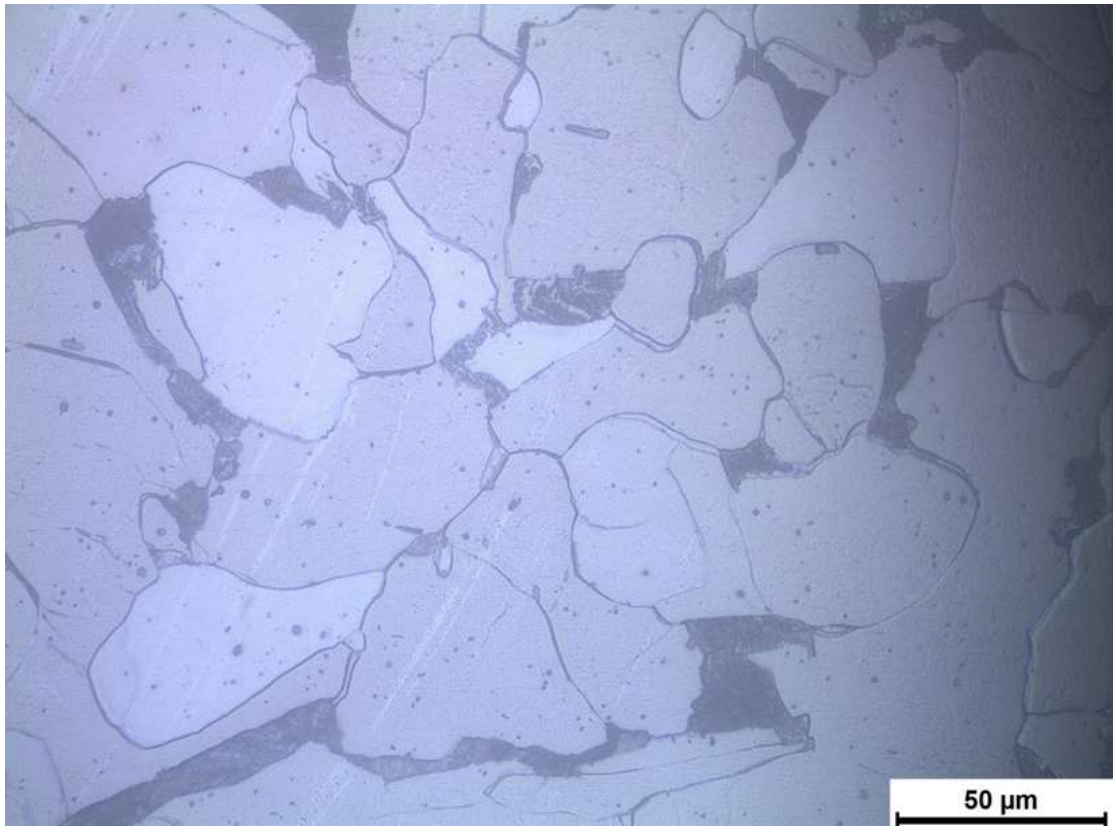


Σχήμα 5.2.5: Απεικόνιση της μικροδομής του χάλυβα

Στο **Σχήμα 5.2.5** παρατηρούμε τη μικροδομή του χάλυβα, όπου φερρίτης φαίνεται με το λευκό χρώμα και ο περλίτης με το μαύρο.

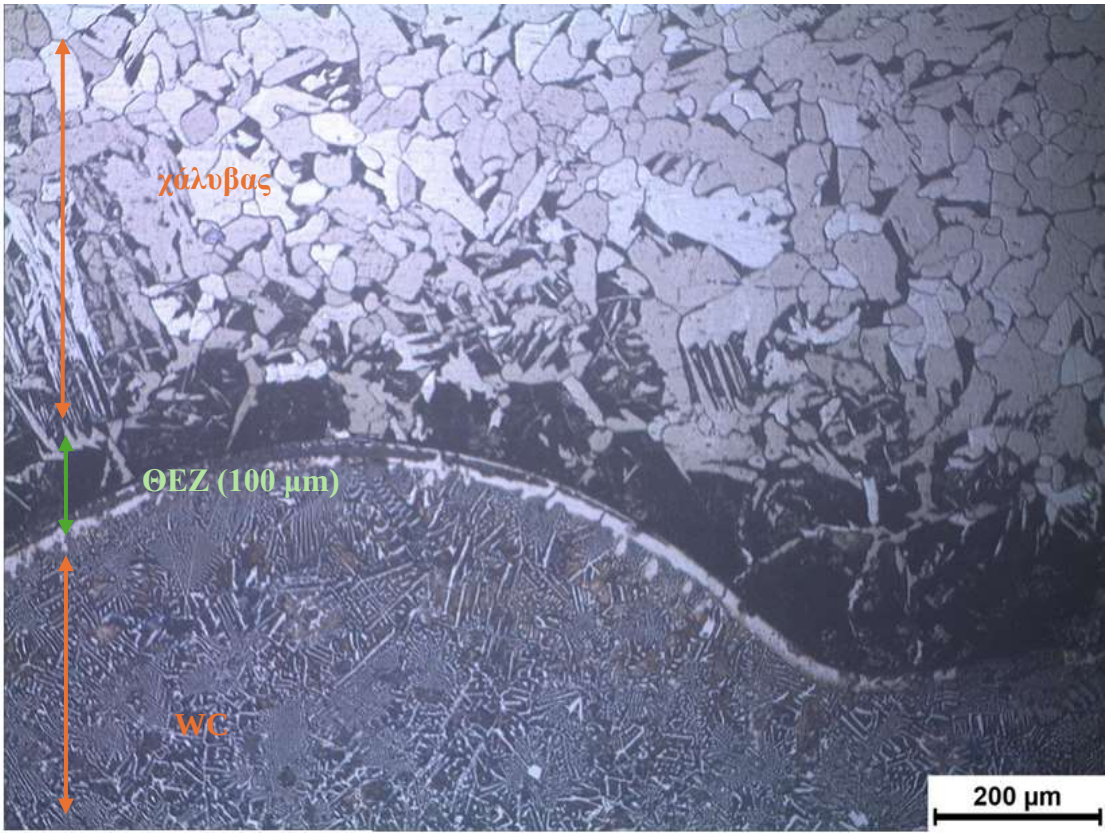


Σχήμα 5.2.6: Απεικόνιση μικροδομής του χάλυβα σε μεγέθυνση x 200.



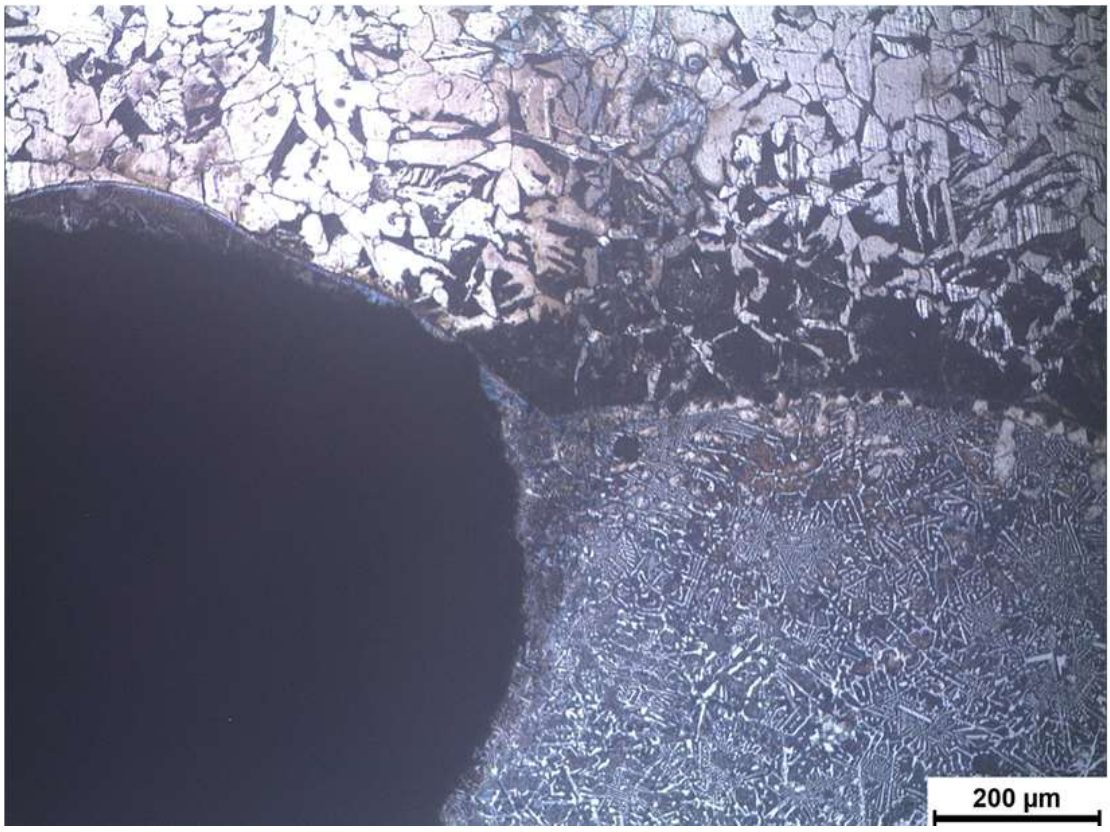
Σχήμα 5.2.7: Απεικόνιση του χάλυβα

Στα **Σχήματα 5.2.6 & 5.2.7** παρατηρούμε τη μικροδομή του χάλυβα, όπου φερρίτης φαίνεται με το λευκό χρώμα και ο περλίτης με το μαύρο.

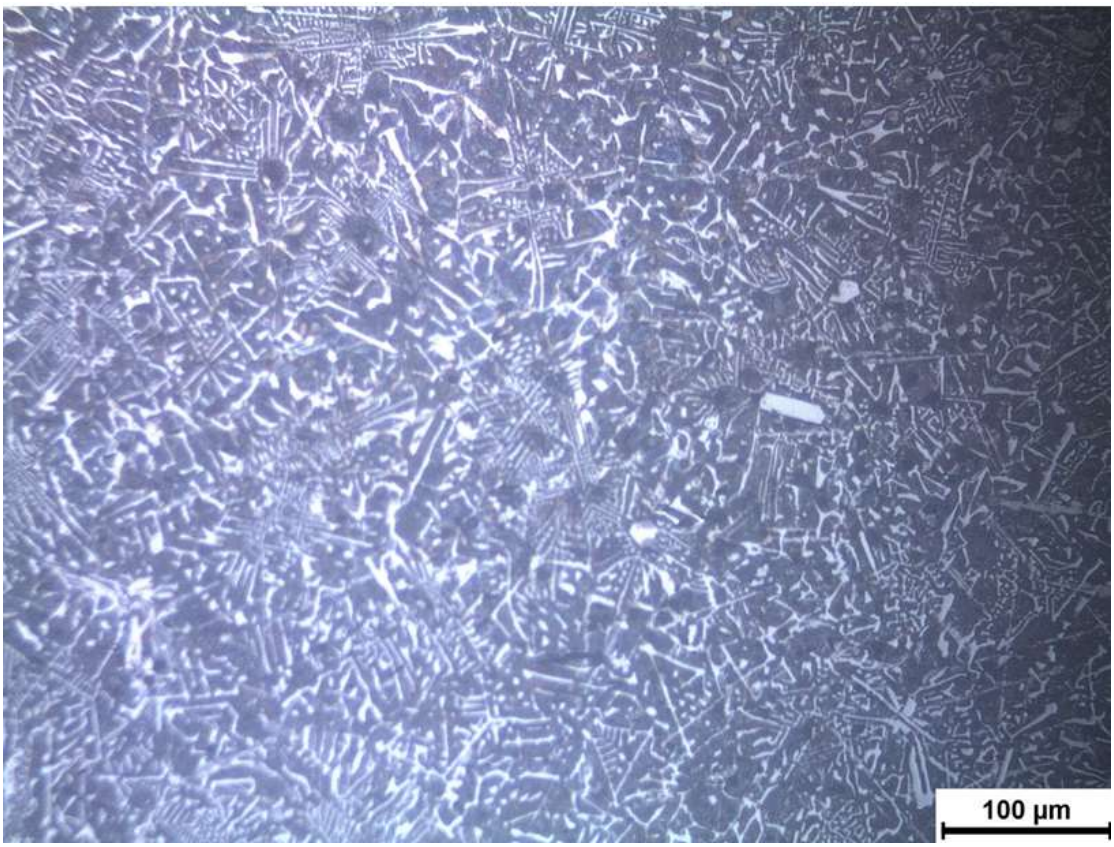


Σχήμα 5.2.8: Απεικόνιση χάλυβα / WC

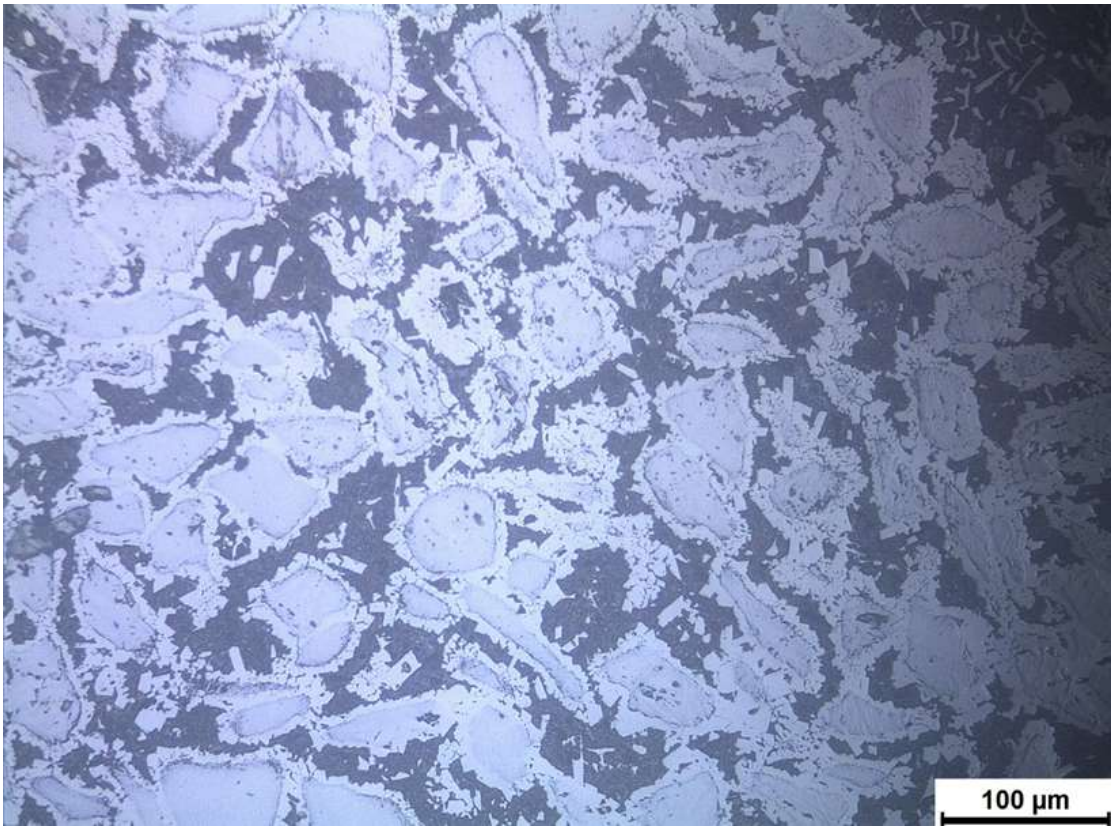
Στο **Σχήμα 5.2.8** παρατηρείται μικρότερη Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη (ΘΕΖ) από πριν, όπως προκύπτει από τη χαμηλότερη θερμοκρασία ακτινοβόλησης.



Σχήμα 5.2.9: Εγκάρσια τομή στην επικάλυψη



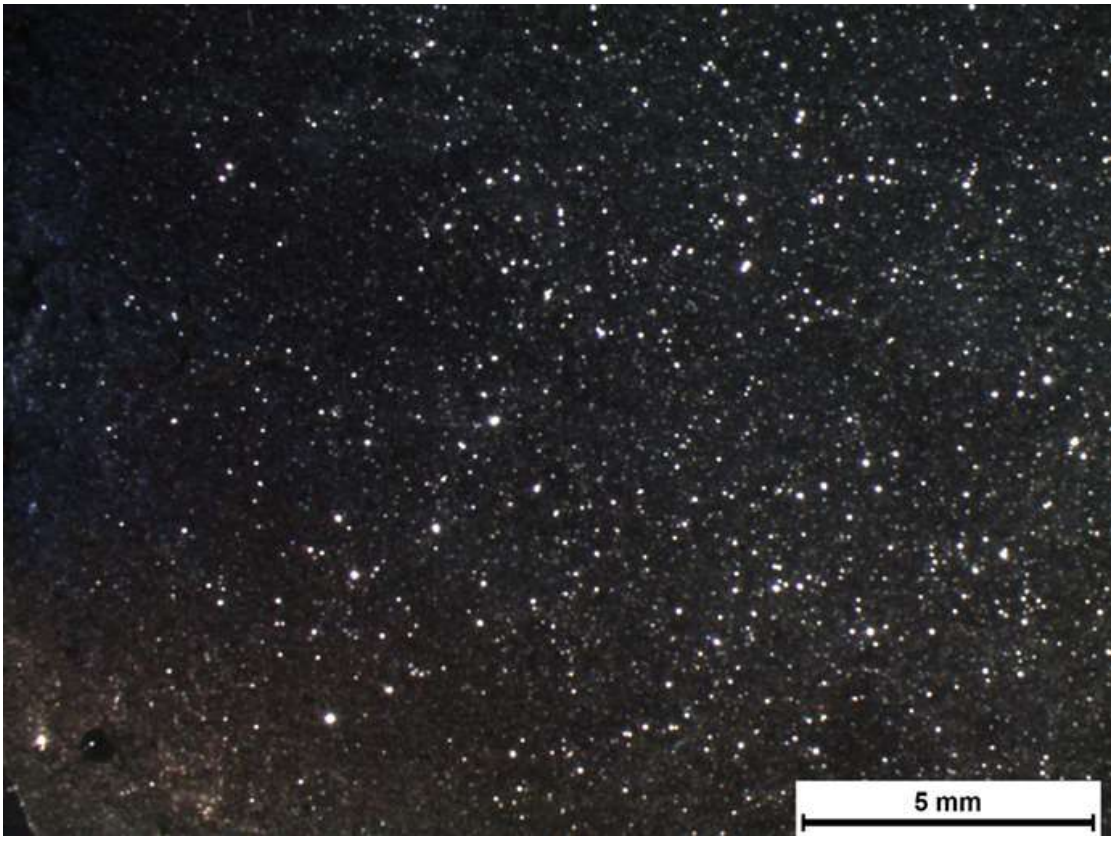
Σχήμα 5.2.10: Απεικόνιση της επιφάνειας τομής του δοκιμίου σε μικροσκόπιο
Παρατηρείται έντονη παρουσία δενδριτών.



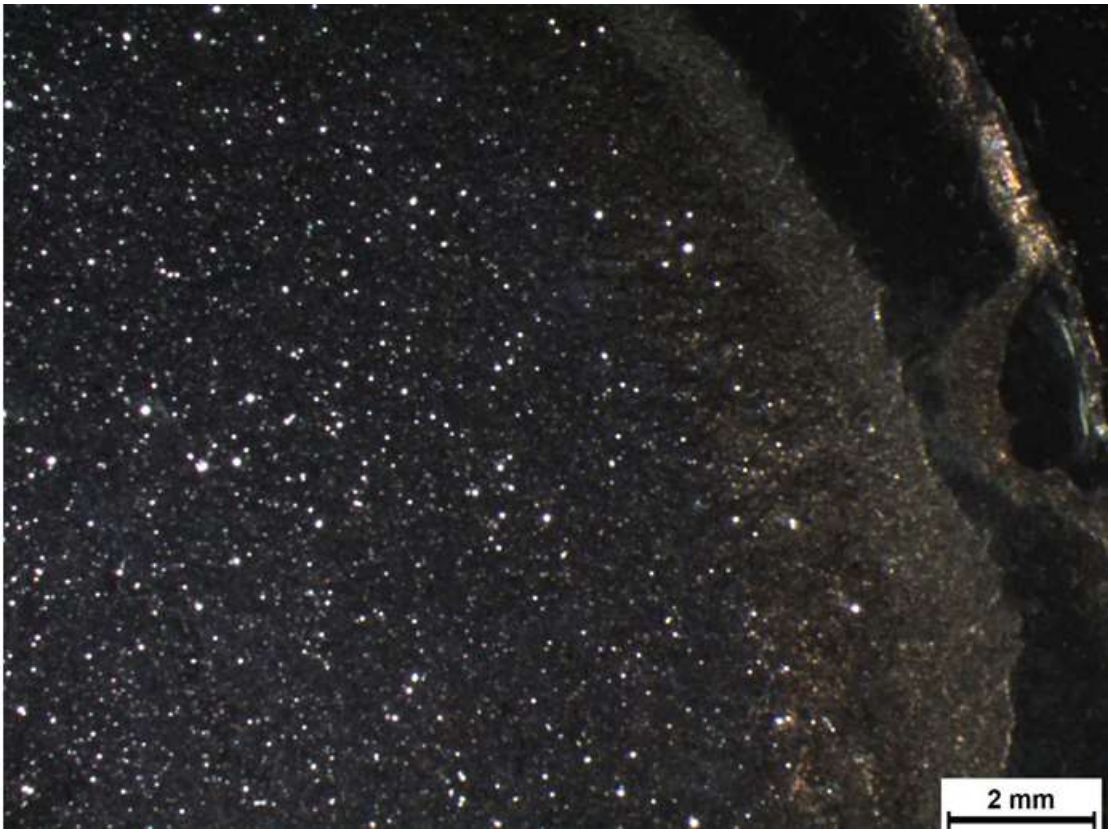
Σχήμα 5.2.11: Απεικόνιση μέσα στην περιοχή τήξης.

Στο **Σχήμα 5.2.11** τα μεγάλα λευκά είναι τα καρβίδια του βολφραμίου.

3. **Δοκίμιο 10**
   Το **Δοκίμιο 10** εκτέθηκε σε υψηλότερες θερμοκρασίες, σε περιβάλλον με Αργό (Ar).

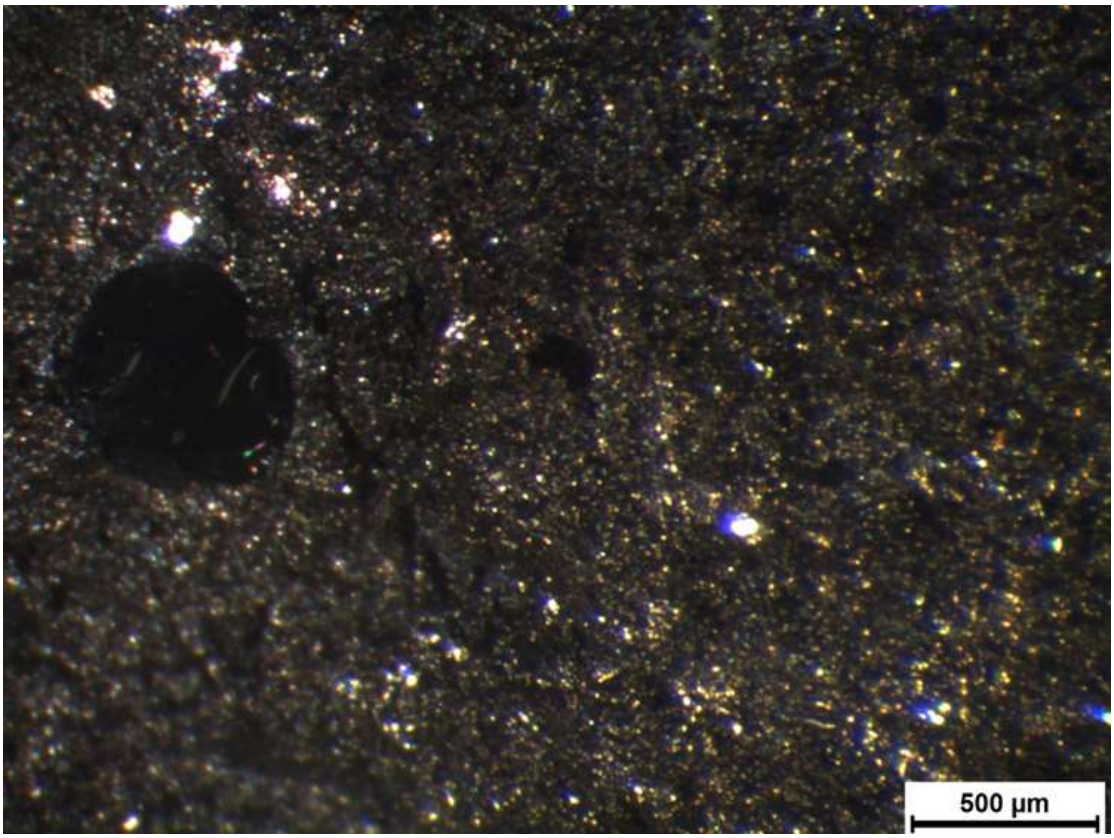


Σχήμα 5.3.1: Απεικόνιση της επιφάνειας της σκόνης βολφραμίου στο χάλυβα



Σχήμα 5.3.2: Απεικόνιση της επιφάνειας της σκόνης βολφραμίου στο χάλυβα

Στα **Σχήματα 5.3.1 & 5.3.2** παρατηρούμε λαμπερή και κοκκώδη επιφάνεια, περισσότερο από το προηγούμενο Δοκίμιο.

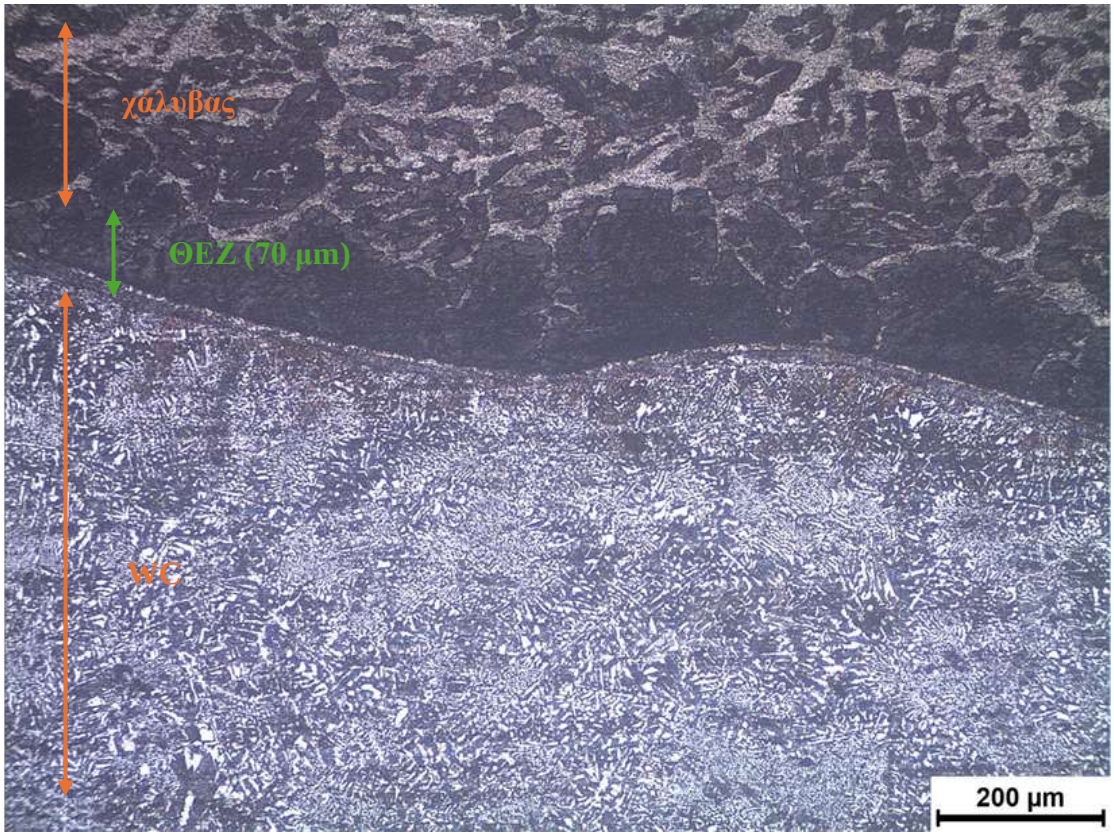


Σχήμα 5.3.3: Απεικόνιση της επιφάνειας της σκόνης βολφραμίου

Στο **Σχήμα 5.3.3** παρατηρούμε πόρο στην επιφάνεια της σκόνης – ασυνέχεια, της τάξης μεγέθους 500 μm.

Σχήμα 5.3.4: Απεικόνιση του Δοκιμίου 10 - Τομή δοκιμίου - μήκος τομής 5 cm -1,4 cm πάχος τομής συν 0,15 cm πάχος συγκόλλησης (0,75 cm άπο αριστερά ξεκινάει 3,6 cm μήκος συγκόλλησης

Σχήμα 5.3.5: Απεικόνιση της επιφάνειας τομής σε στερεοσκόπιο

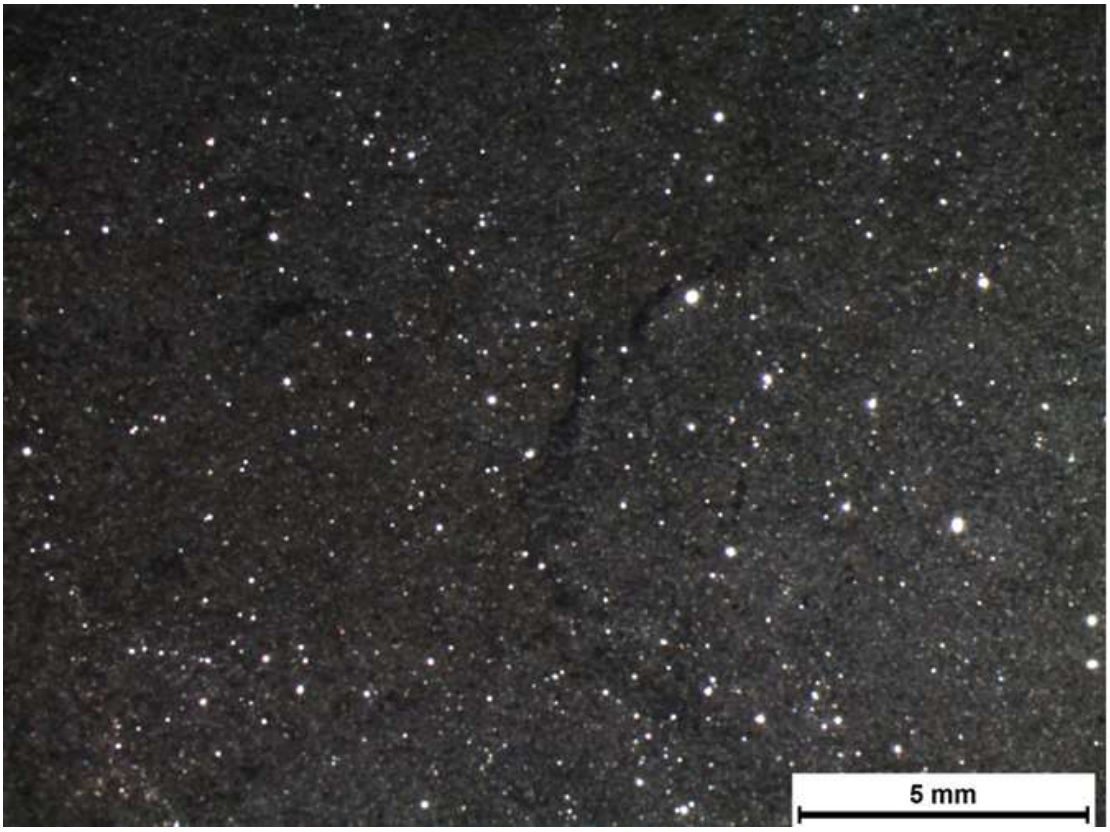


Σχήμα 5.3.6: Απεικόνιση χάλυβα/WC

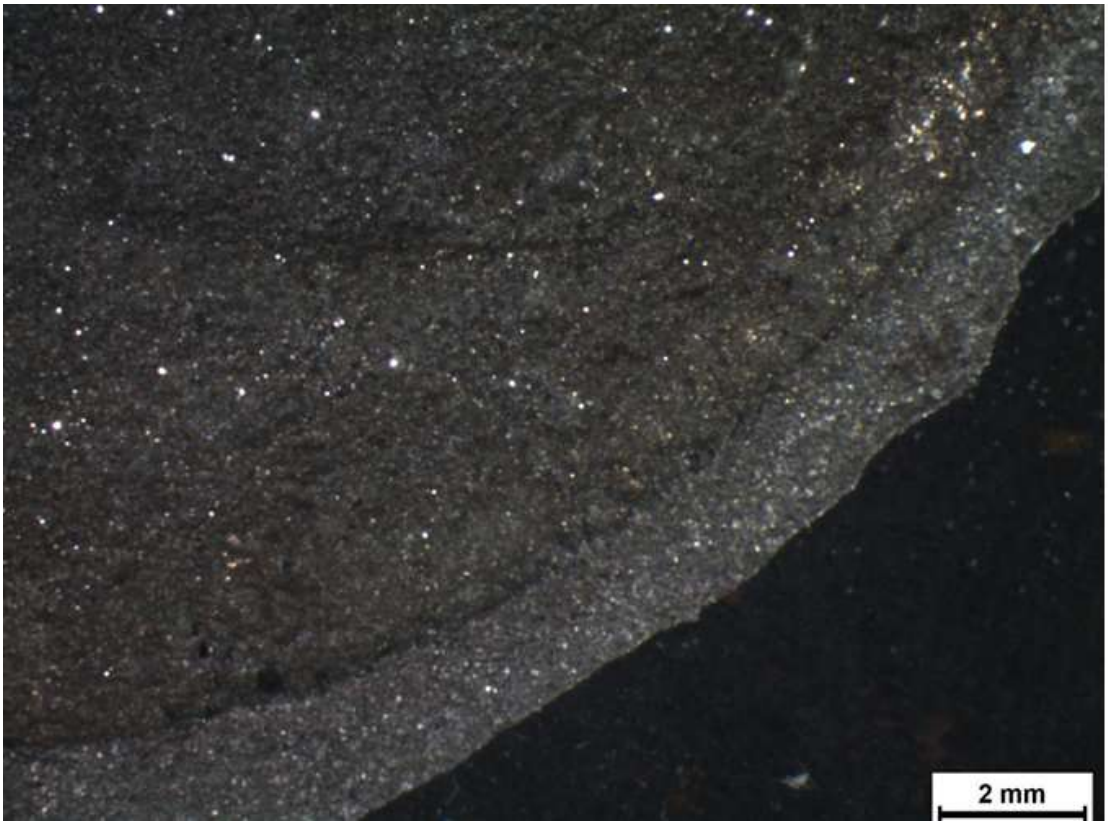
Παρατηρούμε μικρότερη ΘΕΖ σε σημεία.

4. **Δοκίμιο 11**

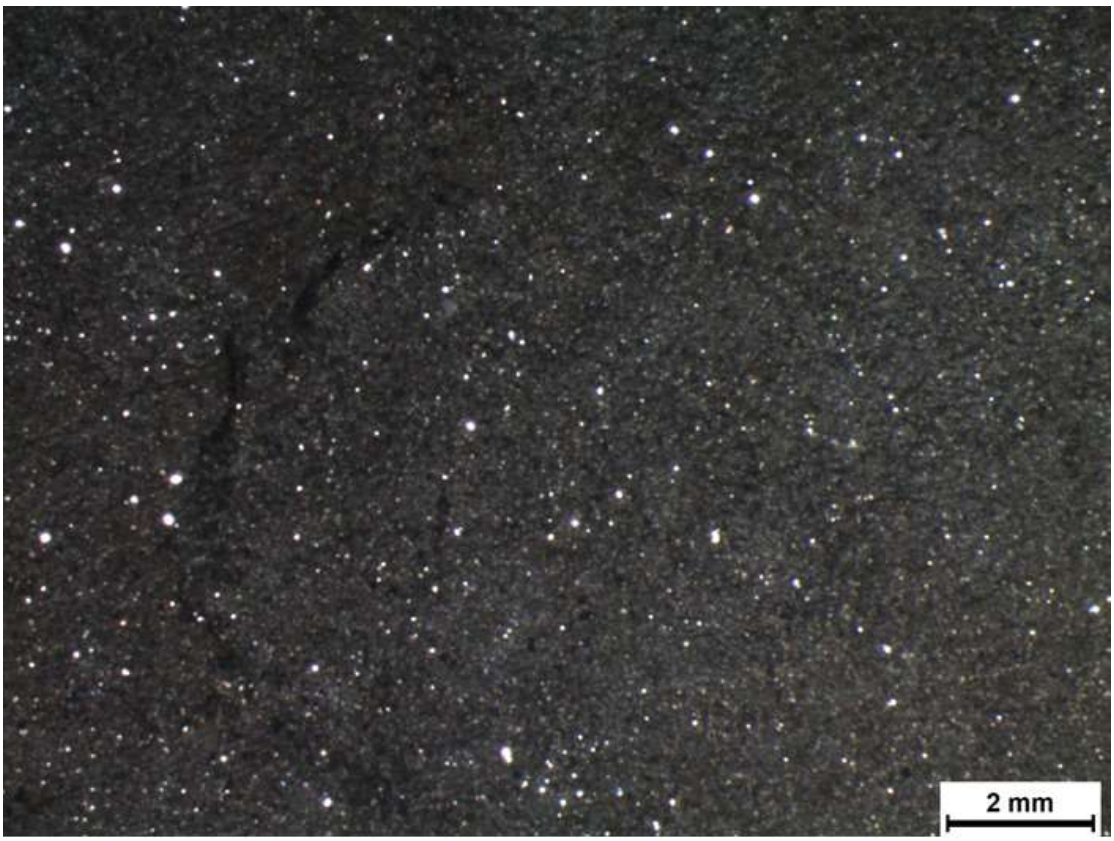
Το δοκίμιο το οποίο εκτέθηκε σε περιβάλλον με άζωτο για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, καθώς και σε μεγαλύτερη μέγιστη θερμοκρασία ακτινοβόλησης.



Σχήμα 5.4.1: Απεικόνιση της επιφάνειας της σκόνης βολφραμίου στο χάλυβα

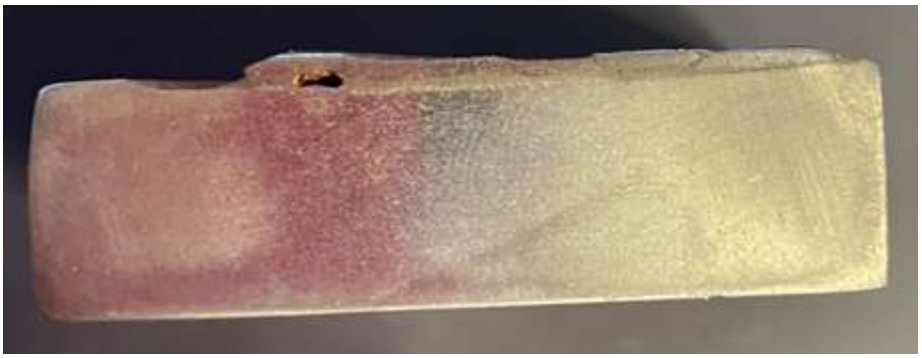


Σχήμα 5.4.2: Απεικόνιση της επιφάνειας της σκόνης βολφραμίου στο χάλυβα

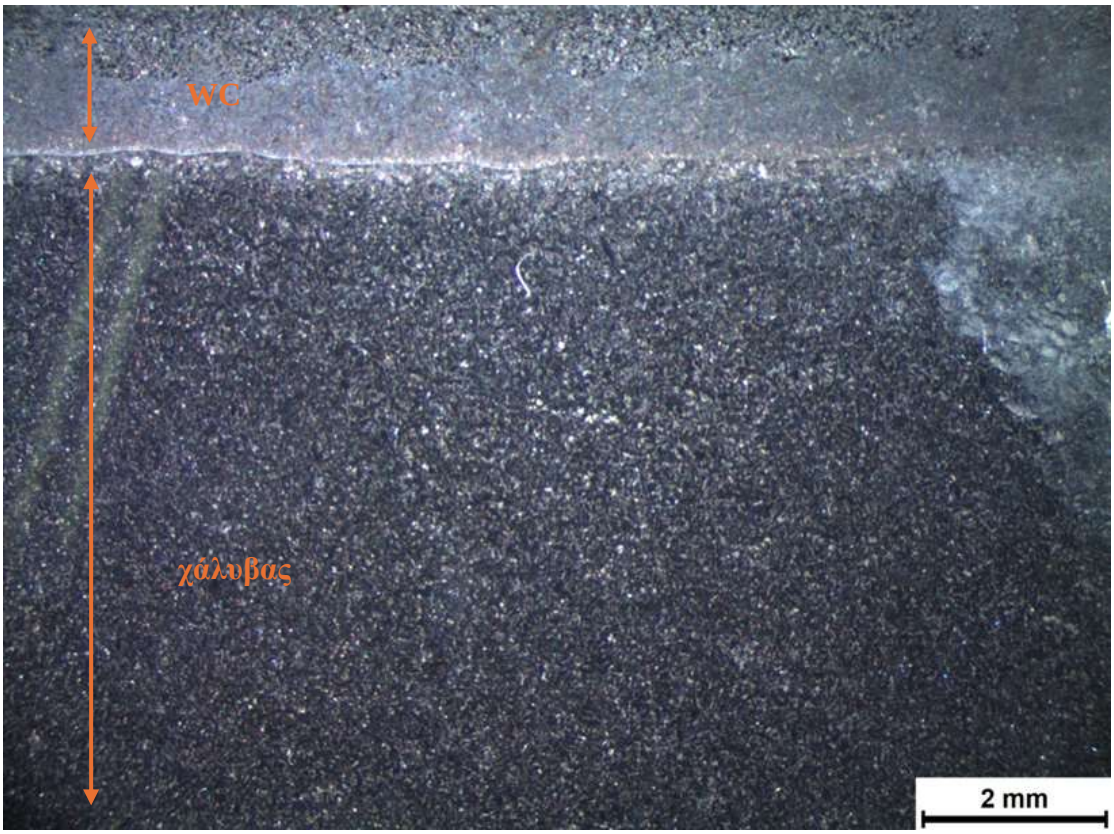


Σχήμα 5.4.3 Απεικόνιση της επιφάνειας της σκόνης βολφραμίου στο χάλυβα

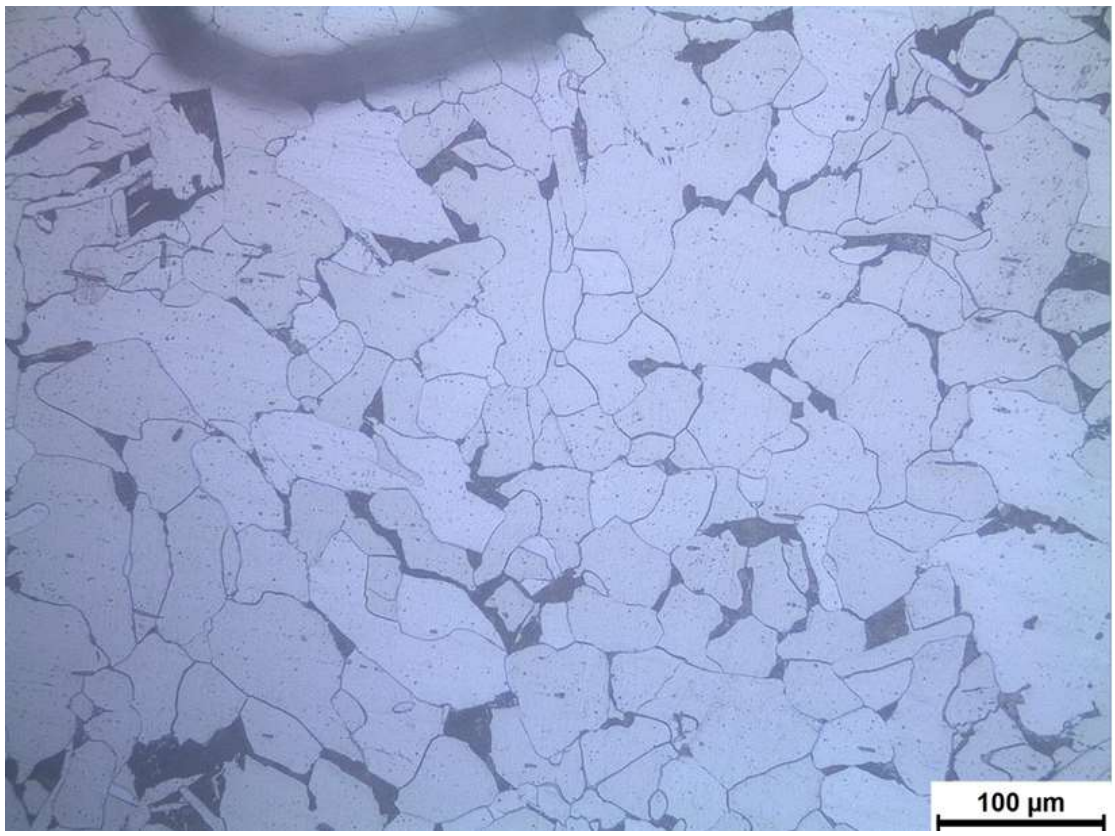
Στα **Σχήματα 5.4.1, 5.4.2 & 5.4.3** παρατηρούμε λαμπερή και κοκκώδη επιφάνεια, παρουσία μικρορωγμών.



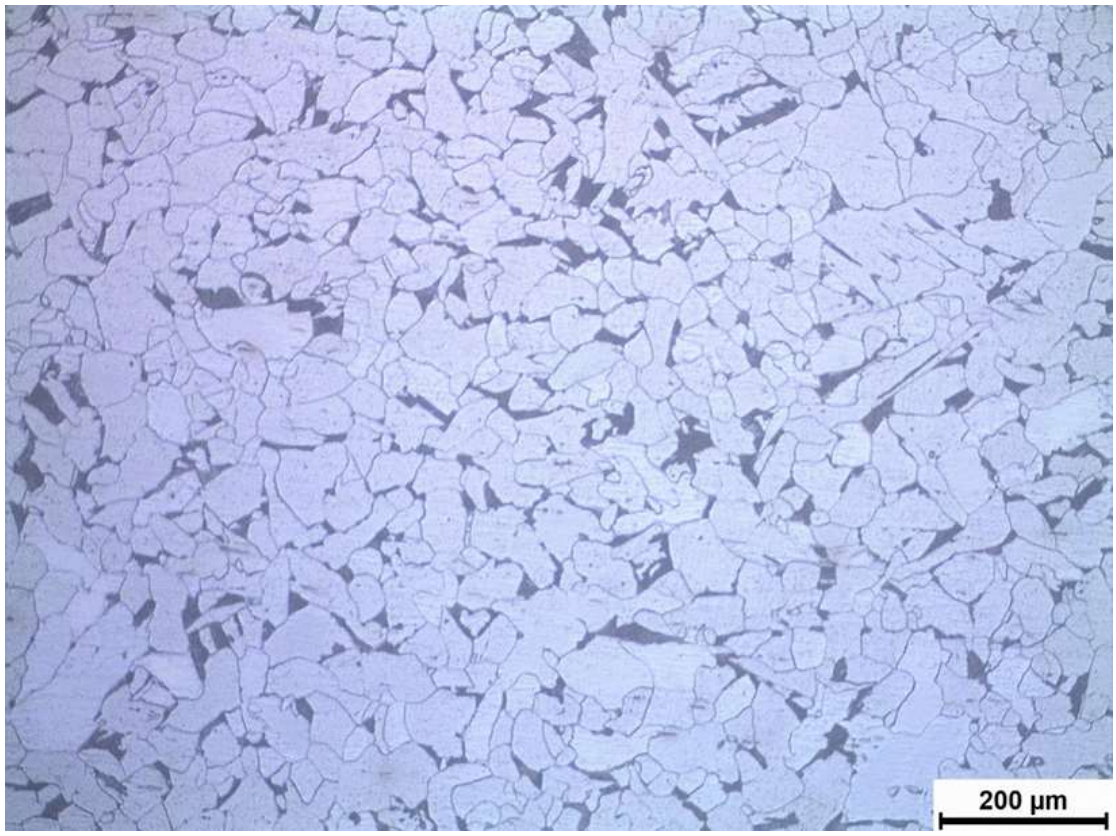
Σχήμα 5.4.4.: Απεικόνιση του Δοκιμίου 11 - Τομή δοκιμίου διαστάσεις 5,1 cm μήκος τομής , 1.3 cm πάχος τομής + 0,2 cm της συγκόλλησης (πάχος) + 3.9 cm μήκος συγκόλλησης (από δεξιά πλάι)



Σχήμα 5.4.5: Απεικόνιση της επιφάνειας τομής σε στερεοσκόπιο

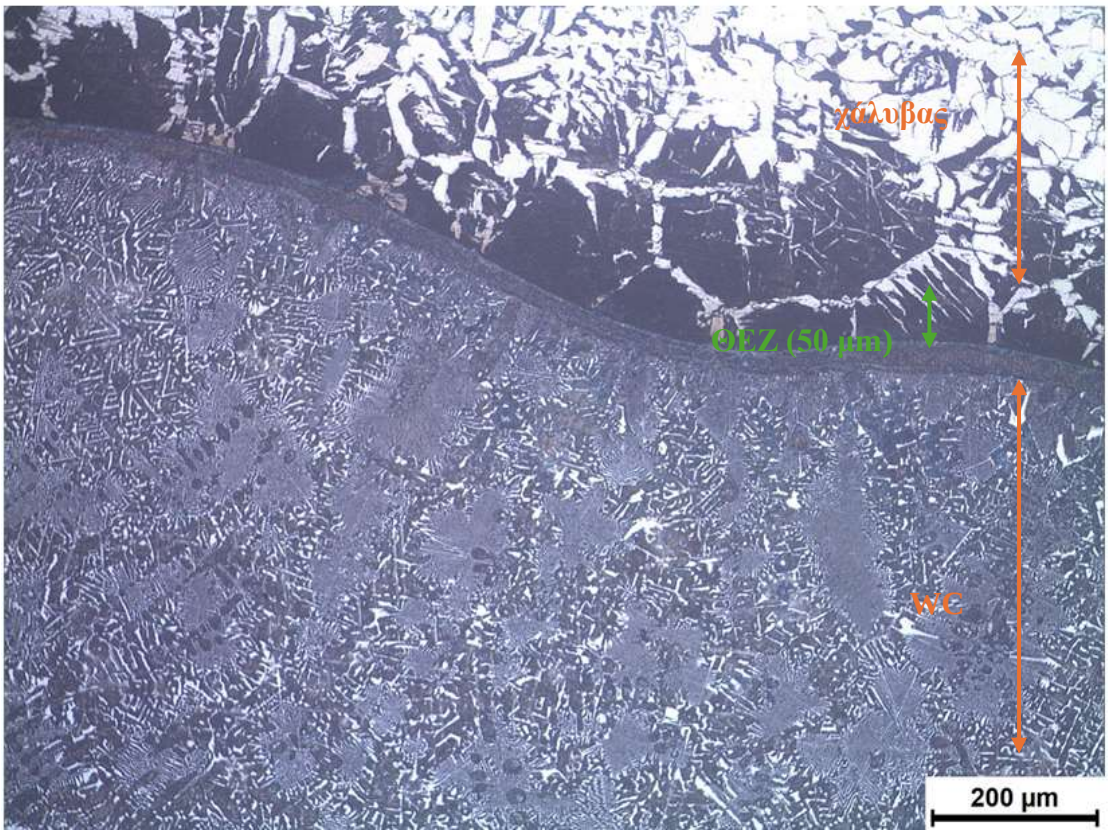


Σχήμα 5.4.6: Απεικόνιση του χάλυβα



Σχήμα 5.4.7: Απεικόνιση του χάλυβα

Στα **Σχήματα 5.4.6 & 5.4.7** παρατηρούμε τη μικροδομή του χάλυβα, όπου υπάρχει φερρίτης και περλίτης.



Σχήμα 5.4.8: Απεικόνιση χάλυβα / WC

Στο **Σχήμα 5.4.8** παρατηρείται πολύ μικρότερη Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη συγκριτικά με τα προηγούμενα 3 Δοκίμια.

5.1 Μικροδομικά Χαρακτηριστικά

5.1.1 Ανάλυση μικροδομικών χαρακτηριστικών σε σχέση με τις συνθήκες ακτινοβόλησης

Στη μελέτη περίπτωσης που εξέταζε την αλληλεπίδραση μεταξύ χάλυβα και καρβιδίου βολφραμίου υπό επιφανειακή κατεργασία με βάση την ηλιακή ενέργεια, η ανάλυση των μικροδομικών χαρακτηριστικών αποκάλυψε σημαντικές πληροφορίες για το πώς οι διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας επηρεάζουν τις ιδιότητες του υλικού. Η μελέτη επικεντρώθηκε στην κατανόηση του πώς διάφοροι παράγοντες όπως η ένταση

ακτινοβολίας, η διάρκεια και οι ρυθμοί ψύξης επηρεάζουν τη μικροδομή και την απόδοση του σύνθετου υλικού χάλυβα-καρβιδίου βολφραμίου.

Κάτω από διαφορετικές συνθήκες ακτινοβόλησης, τα μικροδομικά χαρακτηριστικά του σύνθετου καρβιδίου χάλυβα-βολφραμίου αξιολογήθηκαν συστηματικά. Η ανάλυση παρείχε πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις επιπτώσεις της ηλιακής ενέργειας στην κατανομή των σωματιδίων, την ποιότητα των δεσμών, τους μετασχηματισμούς φάσης και τη συνολική ακεραιότητα του υλικού.

Κατανομή σωματιδίων και σύνδεση

Μία από τις κύριες παρατηρήσεις ήταν η ομοιομορφία των σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου μέσα στη μήτρα του χάλυβα. Οι υψηλότερες εντάσεις ακτινοβολίας διευκόλυναν την καλύτερη τήξη των σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου και την ενσωμάτωσή τους στη μήτρα του χάλυβα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα μια πιο ομοιογενή κατανομή των σωματιδίων, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για την ενίσχυση της αντοχής στη φθορά και της ανθεκτικότητας του σύνθετου υλικού. Η μελέτη διαπίστωσε ότι οι βέλτιστες συνθήκες ακτινοβολίας οδήγησαν σε καλά συνδεδεμένα σωματίδια με ελάχιστο πορώδες, ενώ η υπερβολική ένταση μερικές φορές προκαλούσε ανομοιόμορφη κατανομή σωματιδίων και ελλιπή σύνδεση. Αυτά τα ευρήματα είναι σύμφωνα με την έρευνα των Vijay, Raju, Ramji και Kamaluddin (2021), το οποίο τόνισε τον ρόλο της έντασης της ακτινοβολίας στην επίτευξη ομοιόμορφης διασποράς σωματιδίων και αποτελεσματικής σύνδεσης.

Μετασχηματισμοί φάσης

Η επίδραση των συνθηκών ακτινοβολίας στους μετασχηματισμούς φάσης εντός της χαλύβδινης μήτρας ήταν μια άλλη βασική εστίαση. Διαφορετικοί χρόνοι και εντάσεις ακτινοβολίας οδήγησαν σε διάφορες μικροδομικές φάσεις στο σύνθετο υλικό χάλυβα-καρβιδίου βολφραμίου. Για παράδειγμα, οι παρατεταμένοι χρόνοι ακτινοβολίας επέτρεψαν πιο εκτεταμένους μετασχηματισμούς φάσης, συμπεριλαμβανομένου του σχηματισμού διαμεταλλικών ενώσεων και φάσεων καρβιδίου, οι οποίες μπορούν να

ενισχύσουν τη σκληρότητα και την αντοχή στη φθορά του σύνθετου υλικού. Ωστόσο, η υπερβολική ακτινοβολία θα μπορούσε να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες φάσεις και ανάπτυξη κόκκων, που επηρεάζουν αρνητικά τις ιδιότητες του υλικού. Αυτές οι παρατηρήσεις ευθυγραμμίζονται με τα ευρήματα των Pandiyan και Tjahjowidodo (2019), οι οποίοι ανέφεραν παρόμοιους μετασχηματισμούς φάσης και τις επιπτώσεις τους στην απόδοση του υλικού υπό διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας.

Μέγεθος κόκκων και υφή

Η μελέτη διερεύνησε επίσης αλλαγές στο μέγεθος και την υφή των κόκκων εντός της μήτρας χάλυβα. Οι βέλτιστες συνθήκες ακτινοβολίας οδήγησαν σε εκλεπτυσμένες δομές κόκκων, οι οποίες συμβάλλουν σε βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες όπως η αντοχή και η σκληρότητα. Αντίθετα, οι υψηλές εντάσεις ακτινοβολίας ή οι παρατεταμένοι χρόνοι έκθεσης οδήγησαν σε πιο χονδροειδείς κόκκους και αλλοιωμένη υφή, που θα μπορούσαν να μειώσουν την απόδοση του υλικού. Αυτά τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν παλαιότερη έρευνα των Chen et al. (2018), το οποίο κατέδειξε την επίδραση των συνθηκών ακτινοβολίας στη βελτίωση των κόκκων και στην ανάπτυξη της υφής σε παρόμοια υλικά.

Μικροδομή

Η ακεραιότητα της μικροδομής, συμπεριλαμβανομένης της παρουσίας ρωγμών, κενών και αποκόλλησης στη διεπιφάνεια μεταξύ των σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου και της μήτρας χάλυβα, αξιολογήθηκε κριτικά. Κάτω από συνθήκες ελεγχόμενης ακτινοβολίας, η διεπαφή βρέθηκε να είναι καλά ενσωματωμένη με ελάχιστα ελαττώματα. Ωστόσο, οι αποκλίσεις από τις βέλτιστες συνθήκες, όπως η υπερβολική θέρμανση ή η ταχεία ψύξη, οδήγησαν στο σχηματισμό μικρορωγμών και αποκόλλησης. Αυτά τα ζητήματα επισημάνθηκαν σε προηγούμενες μελέτες, όπως αυτές των Lian et al. (2023), το οποίο υπογράμμισε τη σημασία της διατήρησης ακριβών παραμέτρων ακτινοβολίας για την αποφυγή επιζήμιων μικροδομικών ελαττωμάτων.

Επίδραση ρυθμού ψύξης

Ο ρυθμός ψύξης μετά την ακτινοβολία βρέθηκε να επηρεάζει σημαντικά τη μικροδομή. Η αργή ψύξη επέτρεψε πιο ελεγχόμενη στερεοποίηση και ελαχιστοποίησε τις θερμικές καταπονήσεις, οδηγώντας σε μια πιο σταθερή και χωρίς ελαττώματα μικροδομή. Αντίθετα, η ταχεία ψύξη είχε ως αποτέλεσμα υψηλότερη σκληρότητα αλλά επίσης εισήγαγε ευθραυστότητα και πιθανότητα ρωγμών. Αυτές οι παρατηρήσεις ευθυγραμμίζονται με την έρευνα των Wang et al. (2021), το οποίο συζήτησε τις ανταλλαγές μεταξύ των ρυθμών ψύξης και των ιδιοτήτων του υλικού.

Συνολικά, η μικροδομική ανάλυση του σύνθετου καρβιδίου χάλυβα-βολφραμίου υπό διάφορες συνθήκες ακτινοβολίας παρείχε μια ολοκληρωμένη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι επιφανειακές κατεργασίες που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια επηρεάζουν τις ιδιότητες του υλικού. Η μελέτη επιβεβαίωσε ότι η βελτιστοποίηση των παραμέτρων ακτινοβολίας είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των επιθυμητών μικροδομικών χαρακτηριστικών και τη βελτίωση της απόδοσης του σύνθετου υλικού. Αυτά τα ευρήματα συνεισφέρουν πολύτιμες γνώσεις στον τομέα της επεξεργασίας υλικών με βάση την ηλιακή ενέργεια και προσφέρουν μια βάση για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα.

5.1.2 *Επιπτώσεις στην απόδοση και στα χαρακτηριστικά των υλικών*

Στη μελέτη περίπτωσης που επικεντρώθηκε στην αλληλεπίδραση μεταξύ χάλυβα και καρβιδίου βολφραμίου, μια εις βάθος ανάλυση των μικροδομικών χαρακτηριστικών ήταν απαραίτητη για την κατανόηση του πώς αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την απόδοση και τις ιδιότητες του υλικού. Η έρευνα ανέδειξε αρκετές βασικές πτυχές που επηρεάζονται από τις επιφανειακές κατεργασίες που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια.

Τα μικροδομικά χαρακτηριστικά του σύνθετου καρβιδίου χάλυβα-βολφραμίου έχουν άμεση επίδραση στην αντοχή του στη φθορά. Τα σωματίδια καρβιδίου του βολφραμίου είναι γνωστά για τη σκληρότητά τους και την αντοχή τους στη φθορά και η κατανομή τους μέσα στη μήτρα του χάλυβα είναι κρίσιμη για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του σύνθετου υλικού. Η μελέτη διαπίστωσε ότι οι βελτιστοποιημένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας οδηγούν σε πιο ομοιόμορφη διασπορά των σωματιδίων

καρβιδίου του βολφραμίου. Αυτή η ομοιόμορφη κατανομή συμβάλλει στο σχηματισμό ενός προστατευτικού στρώματος που μειώνει σημαντικά τη λειαντική φθορά, επεκτείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής του υλικού. Αυτό το εύρημα υποστηρίζεται από έρευνα από τους Zhou et al. (2024), ο οποίος τόνισε τη σημασία της κατανομής σωματιδίων στη βελτίωση της αντοχής στη φθορά.

Μια άλλη κρίσιμη παράμετρος που επηρεάζεται από τη μικροδομή είναι η σκληρότητα του σύνθετου υλικού. Η παρουσία σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου μέσα στη μήτρα χάλυβα αυξάνει σημαντικά τη σκληρότητα του σύνθετου υλικού. Η μελέτη αποκάλυψε ότι οι συνθήκες ελεγχόμενης ακτινοβολίας έχουν ως αποτέλεσμα μια λεπτότερη κατανομή αυτών των σωματιδίων και διευκολύνουν το σχηματισμό σκληρών φάσεων στον χάλυβα. Αυτό ενισχύει την αντίσταση του σύνθετου υλικού στην παραμόρφωση υπό φορτίο. Τα αποτελέσματα ευθυγραμμίζονται με την εργασία των Zhang et al. (2019), ο οποίος απέδειξε ότι η ενισχυμένη διασπορά σωματιδίων και οι μετασχηματισμοί φάσης οδηγούν σε αυξημένη σκληρότητα σε παρόμοια υλικά.

Η σκληρότητα επηρεάζεται επίσης σημαντικά από τη μικροδομή του σύνθετου υλικού. Αν και η παρουσία καρβιδίου του βολφραμίου βελτιώνει τη σκληρότητα, μπορεί μερικές φορές να μειώσει τη σκληρότητα εάν δεν διαχειρίζεται σωστά. Η μελέτη έδειξε ότι η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ σκληρότητας και σκληρότητας είναι ζωτικής σημασίας. Η υπερβολική σκληρότητα μπορεί να οδηγήσει σε ευθραυστότητα, καθιστώντας το υλικό πιο επιρρεπές σε ρωγμές υπό πίεση ή κρούση. Η μελέτη περίπτωσης τόνισε την ανάγκη για προσεκτικά ελεγχόμενες συνθήκες ακτινοβολίας για την επίτευξη αυτής της ισορροπίας. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι συνεπείς με τα ευρήματα των Wu et al. (2022), ο οποίος διερεύνησε τις ανταλλαγές μεταξύ σκληρότητας και σκληρότητας σε σύνθετα υλικά.

Η θερμική σταθερότητα του σύνθετου καρβιδίου χάλυβα-βολφραμίου είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας. Η μελέτη διαπίστωσε ότι η σωστή ηλιακή ακτινοβολία ενισχύει τη θερμική σταθερότητα του σύνθετου υλικού, βοηθώντας το να διατηρήσει τη δομική του ακεραιότητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Η αποτελεσματική διαχείριση των συνθηκών ακτινοβολίας αποτρέπει το σχηματισμό επιζήμιων φάσεων και μειώνει τις θερμικές καταπονήσεις, οι οποίες διαφορετικά θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ρωγμές ή αποκόλληση. Αυτά τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τα ευρήματα των

Nemati et al. (2017), ο οποίος τόνισε τη σημασία της θερμικής διαχείρισης για τη διατήρηση των ιδιοτήτων του υλικού σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας.

Μικροδομικά ελαττώματα όπως το πορώδες, οι ρωγμές και η αποκόλληση μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την αξιοπιστία και την απόδοση του σύνθετου υλικού. Η μελέτη αποκάλυψε ότι οι καλά ελεγχόμενες συνθήκες ακτινοβολίας οδηγούν σε λιγότερα ελαττώματα και βελτιώνουν τη συνολική αξιοπιστία του υλικού. Η αποτελεσματική σύνδεση μεταξύ των σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου και της μήτρας χάλυβα μειώνει τον κίνδυνο αποκόλλησης και ενισχύει τη δομική ακεραιότητα του σύνθετου υλικού. Αυτά τα ευρήματα συμφωνούν με τους Xu et al. (2021), ο οποίος τόνισε τη σημασία του ελέγχου των παραμέτρων επεξεργασίας για την ελαχιστοποίηση των ελαττωμάτων.

Συνολικά, η ανάλυση των μικροδομικών χαρακτηριστικών στο σύνθετο υλικό καρβιδίου χάλυβα-βολφραμίου, επηρεασμένη από επιφανειακές κατεργασίες με βάση την ηλιακή ενέργεια, παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για το πώς αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την απόδοση και τις ιδιότητες του υλικού. Η μελέτη έδειξε ότι οι βελτιστοποιημένες συνθήκες ακτινοβολίας μπορούν να ενισχύσουν την αντίσταση στη φθορά, τη σκληρότητα και τη θερμική σταθερότητα, εξισορροπώντας ταυτόχρονα την σκληρότητα και ελαχιστοποιώντας τα ελαττώματα. Αυτά τα αποτελέσματα προσφέρουν σημαντική καθοδήγηση για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα της επεξεργασίας προηγμένων υλικών.

5.1.3 Αποτελέσματα και σύγκριση με βιβλιογραφία

Η παραμετρική ανάλυση της μελέτης περίπτωσης που περιελάμβανε το ζεύγος καρβιδίου χάλυβα-βολφραμίου είχε ως στόχο να αξιολογήσει τις επιπτώσεις διαφόρων παραμέτρων επεξεργασίας στις ιδιότητες του υλικού και να συγκρίνει τα αποτελέσματα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Η μελέτη εξέτασε βασικούς παράγοντες όπως η ένταση ακτινοβολίας, η διάρκεια, οι ρυθμοί ψύξης και η επίδραση των επιφανειακών κατεργασιών που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια στα χαρακτηριστικά απόδοσης του σύνθετου υλικού.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βέλτιστη ένταση ακτινοβολίας βελτίωσε σημαντικά τη σκληρότητα και την αντοχή στη φθορά του σύνθετου υλικού χάλυβα-καρβιδίου βολφραμίου. Οι υψηλότερες εντάσεις προώθησαν μια πιο εκλεπτυσμένη μικροδομή με

καλύτερη διασπορά σωματιδίων του καρβιδίου του βολφραμίου μέσα στη μήτρα του χάλυβα, οδηγώντας σε ενισχυμένη συγκόλληση και μειωμένο πορώδες. Αυτό συμφωνεί με ευρήματα από παρόμοιες μελέτες, όπως αυτές των Choudhary και Jain (2021), το οποίο υπογράμμισε τη σημασία του ελέγχου της ακτινοβολίας για την επίτευξη μιας ομοιόμορφης και πυκνής μικροδομής που επηρεάζει άμεσα την αντίσταση στη φθορά.

Επιπλέον, η μελέτη διαπίστωσε ότι η ελεγχόμενη διάρκεια ακτινοβολίας έπαιξε κρίσιμο ρόλο στην αποφυγή της υπερβολικής ανάπτυξης κόκκων, η οποία μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Οι μικρότεροι χρόνοι ακτινοβολίας διατήρησαν μια λεπτόκοκκη δομή, διατηρώντας τη σκληρότητα και βελτιώνοντας την σκληρότητα του υλικού. Αυτά τα αποτελέσματα ευθυγραμμίζονται με προηγούμενες έρευνες, όπως η εργασία των Han et al. (2018), η οποία τόνισε ότι η παρατεταμένη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη τραχύτητα των κόκκων, μειώνοντας τη συνολική απόδοση.

Η επίδραση των ρυθμών ψύξης ήταν επίσης ένα σημαντικό εύρημα στην παραμετρική ανάλυση. Η ταχεία ψύξη μετά την ακτινοβολία οδήγησε στο σχηματισμό μαρτενσιτικών δομών που συνέβαλαν στην αύξηση της σκληρότητας αλλά θα μπορούσαν ενδεχομένως να οδηγήσουν σε ευθραυστότητα. Αντίθετα, η ελεγχόμενη ψύξη επέτρεψε το σχηματισμό μιας ισορροπημένης μικροδομής, βελτιστοποιώντας τη σκληρότητα και τη σκληρότητα. Αυτή η συμπεριφορά ταιριάζει με παρατηρήσεις από τη βιβλιογραφία, συγκεκριμένα τη μελέτη των Li, Choi και Nam (2020), η οποία σημείωσε ότι η γρήγορη απόσβεση μπορεί να ενισχύσει τη σκληρότητα σε βάρος της ολκιμότητας, υποδηλώνοντας την ανάγκη για προσαρμοσμένες στρατηγικές ψύξης.

Σε σύγκριση με τις υπάρχουσες μελέτες, τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης περίπτωσης τόνισαν τη σημασία της εξισορρόπησης των παραμέτρων επεξεργασίας για την επίτευξη των επιθυμητών μηχανικών ιδιοτήτων. Για παράδειγμα, η αυξημένη αντίσταση στη φθορά που παρατηρήθηκε σε αυτή τη μελέτη ήταν συγκρίσιμη με τις βελτιώσεις που αναφέρθηκαν στους Abdoos et al. (2020), οι οποίοι χρησιμοποίησαν παρόμοιες τεχνικές ηλιακής ακτινοβολίας αλλά διέφεραν τα μεγέθη των σωματιδίων και τις στρατηγικές διανομής. Και οι δύο μελέτες επιβεβαίωσαν ότι η διασπορά λεπτότερων σωματιδίων που επιτυγχάνεται μέσω ελεγχόμενων συνθηκών επεξεργασίας συμβάλλει σημαντικά στη βελτιωμένη αντοχή στη φθορά.

Η παραμετρική ανάλυση αποκάλυψε επίσης ότι οι συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας επηρέασαν όχι μόνο τα μικροδομικά χαρακτηριστικά αλλά και τη θερμική σταθερότητα του σύνθετου υλικού. Οι σωστά βελτιστοποιημένες παράμετροι βοήθησαν στη διατήρηση της σταθερότητας φάσης σε υψηλές θερμοκρασίες, βελτιώνοντας την απόδοση του υλικού σε συνθήκες θερμικού κύκλου. Αυτή η παρατήρηση συμφωνεί με τα ευρήματα από τους Jaworski, Kluz και Trzepieciński (2017), η οποία σημείωσε ότι τα ειδικά πρωτόκολλα θερμικής επεξεργασίας που περιλαμβάνουν ηλιακή ενέργεια μπορούν να σταθεροποιήσουν τα καρβίδια εντός της μήτρας, αποτρέποντας τον μετασχηματισμό φάσης και ενισχύοντας τη θερμική αντοχή.

Μια σύγκριση με την ευρύτερη βιβλιογραφία έδειξε ότι ενώ οι παραδοσιακές μέθοδοι όπως οι θεραπείες με πλάσμα ή λέιζερ βελτιώνουν επίσης την αντοχή στη φθορά και τη σκληρότητα, οι θεραπείες που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια προσφέρουν μια πιο βιώσιμη και ενεργειακά αποδοτική προσέγγιση. Τα ευρήματα της μελέτης έδειξαν ανταγωνιστικά αποτελέσματα με συμβατικές τεχνικές, τοποθετώντας την ηλιακή ακτινοβολία ως βιώσιμη εναλλακτική λύση, ιδιαίτερα όταν δίνονται προτεραιότητα σε περιβαλλοντικούς παράγοντες και παράγοντες εξοικονόμησης ενέργειας (Jaworski, Kluz & Trzepieciński, 2017).

Συνολικά, η παραμετρική ανάλυση έδειξε ότι η προσεκτική προσαρμογή της έντασης της ακτινοβολίας, της διάρκειας και των ρυθμών ψύξης παίζει κρίσιμο ρόλο στη βελτιστοποίηση της απόδοσης των σύνθετων υλικών καρβιδίου χάλυβα-βολφραμίου. Τα αποτελέσματα ήταν σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, ενισχύοντας τη σημασία των προσαρμοσμένων συνθηκών επεξεργασίας για την επίτευξη βελτιωμένων ιδιοτήτων του υλικού. Αυτή η σύγκριση με καθιερωμένες μελέτες υπογραμμίζει τις δυνατότητες των επιφανειακών κατεργασιών που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια ως μια αποτελεσματική, βιώσιμη προσέγγιση για την προηγμένη επεξεργασία υλικών (Jaworski, Kluz & Trzepieciński, 2017).

6 Δυνατότητες και μελλοντικές προοπτικές

Το μέλλον των επιφανειακών κατεργασιών με τη χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας έχει τεράστιες δυνατότητες, οι οποίες καθοδηγούνται τόσο από την τεχνολογική πρόοδο όσο και από την αυξανόμενη παγκόσμια έμφαση στη βιωσιμότητα. Καθώς οι βιομηχανίες συνεχίζουν να αναζητούν πιο πράσινες και αποδοτικές διαδικασίες, ο ρόλος της ηλιακής ενέργειας στις επιφανειακές κατεργασίες αναμένεται να επεκταθεί σημαντικά. Η παρούσα ενότητα διερευνά τις δυνατότητες για μελλοντική έρευνα, τεχνολογική ανάπτυξη και τις ευρύτερες επιπτώσεις για τη βιομηχανία (Palacios et al., 2020).

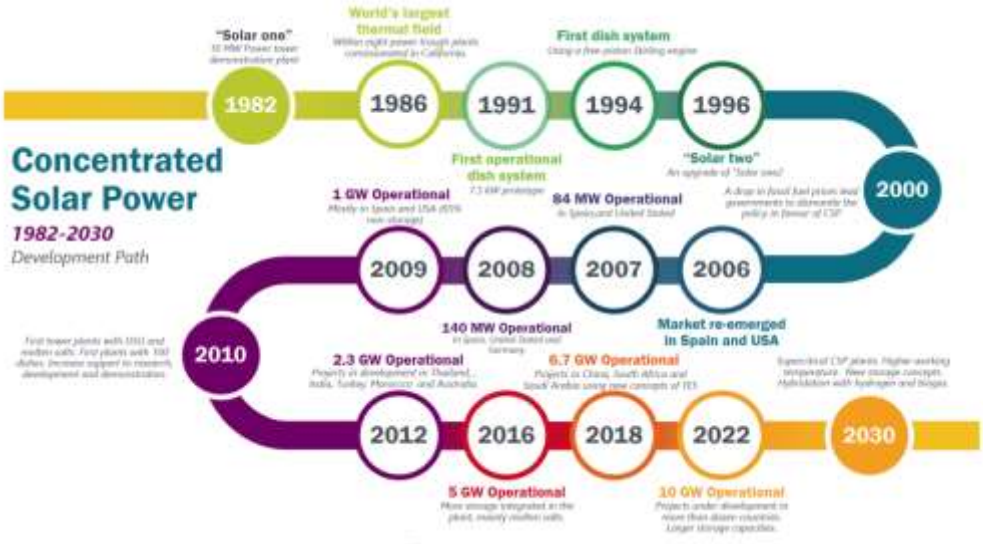
6.1 Επέκταση των εφαρμογών σε αναδυόμενες βιομηχανίες

Η εφαρμογή της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας στις επιφανειακές κατεργασίες έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση σε διάφορες αναδυόμενες βιομηχανίες, παρέχοντας μια ενεργειακά αποδοτική, βιώσιμη και τεχνολογικά προηγμένη εναλλακτική λύση σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Καθώς αυξάνεται η ζήτηση για υλικά και διαδικασίες υψηλής απόδοσης, ιδίως σε βιομηχανίες που εστιάζουν στην καινοτομία και τη βιωσιμότητα, ο ρόλος των τεχνολογιών που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια αναμένεται να επεκταθεί σημαντικά (Palacios et al., 2020).

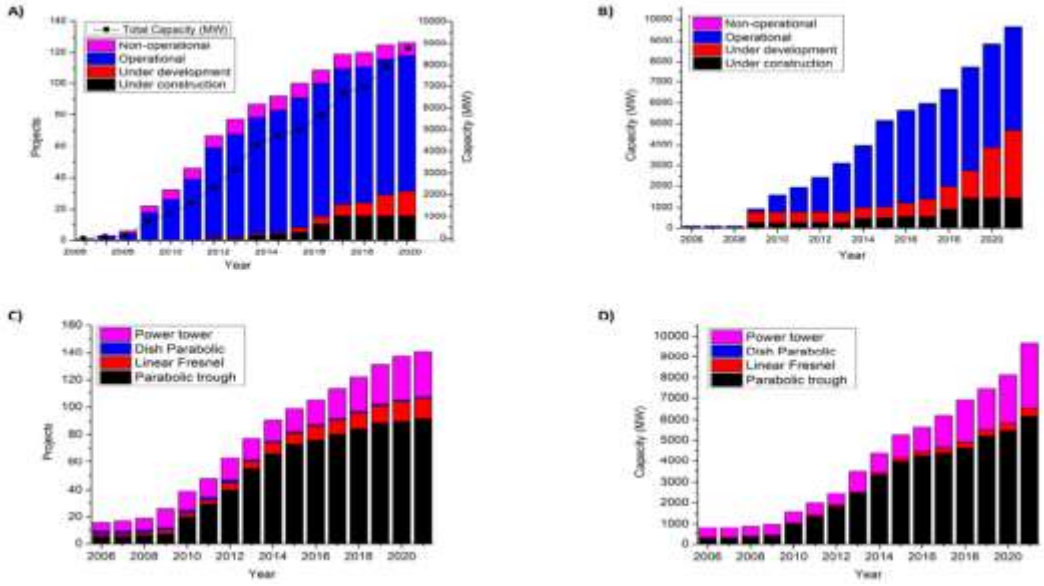
Τομέας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Μία από τις πιο άμεσες εφαρμογές των επιφανειακών κατεργασιών με βάση την ηλιακή ενέργεια είναι στον ίδιο τον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια, που αποτελεί ήδη τη ραχοκοκαλιά των πρωτοβουλιών για τη βιώσιμη ενέργεια, μπορεί να αξιοποιηθεί για τη βελτίωση της απόδοσης και της μακροζωίας των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για παράδειγμα, οι ηλιακές επιφανειακές κατεργασίες μπορούν να εφαρμοστούν σε φωτοβολταϊκά πάνελ για να βελτιώσουν την αποδοτικότητα και την αντοχή τους. Επικαλύψεις που μειώνουν την ανακλαστικότητα, βελτιώνουν την απορρόφηση του φωτός ή παρέχουν αυτοκαθαριζόμενες ιδιότητες μπορούν να αναπτυχθούν με τη χρήση της ηλιακής

ενέργειας, συμβάλλοντας άμεσα στην αποδοτικότητα της παραγωγής ηλιακής ενέργειας (Palacios et al., 2020).



Εικόνα 6.1.1: Εξέλιξη Τεχνολογιών Συγκεντρωμένη Ηλιακής Ενέργειας (Palacios et al, 2020)



Εικόνα 6.1.2: Διατάξεις Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ισχύος (CSP) και Τάσεις Ανάπτυξης Εγκατεστημένης Ισχύος (Palacios et al)

Τα συστήματα αιολικής ενέργειας μπορούν επίσης να επωφεληθούν από τις επιφανειακές κατεργασίες ηλιακής ενέργειας. Εξαρτήματα όπως τα πτερύγια των στροβίλων, τα οποία εκτίθενται σε απαιτητικές περιβαλλοντικές συνθήκες, μπορούν να υποστούν επεξεργασία με διεργασίες που βασίζονται στην ηλιακή ακτινοβολία για να βελτιώσουν την αντοχή τους στη φθορά, τη διάβρωση και την υποβάθμιση από την υπεριώδη ακτινοβολία. Αυτό θα παρατείνει τη λειτουργική διάρκεια ζωής των ανεμογεννητριών, θα μειώσει το κόστος συντήρησης και θα βελτιώσει τη συνολική παραγωγή ενέργειας (Palacios et al., 2020).

Προηγμένη κατασκευή και αεροδιαστημική

Στην προηγμένη μεταποίηση, η χρήση της ηλιακής ενέργειας για επιφανειακές κατεργασίες είναι έτοιμη να αντιμετωπίσει την αυξανόμενη ζήτηση της βιομηχανίας για υλικά υψηλής απόδοσης που μπορούν να αντέξουν σε ακραίες συνθήκες. Η αεροδιαστημική, ειδικότερα, πρόκειται να επωφεληθεί από την ακριβή και ελεγχόμενη φύση των διαδικασιών που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια. Τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη και διαστημόπλοια απαιτούν υλικά που είναι ελαφριά και ταυτόχρονα ισχυρά, ικανά να αντέχουν τις καταπονήσεις των ταξιδιών υψηλής ταχύτητας και την έκθεση σε διαφορετικές θερμοκρασίες και επίπεδα ακτινοβολίας (Hayat et al., 2019).

Η ηλιακή πυροσυσσωμάτωση, για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία σύνθετων σύνθετων υλικών με ανώτερες ιδιότητες. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την κατασκευή εξαρτημάτων με διαβαθμισμένες ιδιότητες, όπου η σύνθεση και η δομή μπορούν να μεταβληθούν σε όλο το υλικό ώστε να ικανοποιούνται συγκεκριμένα κριτήρια απόδοσης. Αυτά τα προηγμένα υλικά θα μπορούσαν να βελτιώσουν σημαντικά την ασφάλεια, την αποδοτικότητα και τις επιδόσεις των αεροδιαστημικών εξαρτημάτων (Hayat et al., 2019).

Επιπλέον, η δυνατότητα επιτόπιας επιφανειακής κατεργασίας με βάση τον ήλιο κατά τη διάρκεια διαστημικών αποστολών αποτελεί τομέα αυξανόμενου ενδιαφέροντος. Η δυνατότητα επιδιόρθωσης ή βελτίωσης των υλικών με τη χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας στο διάστημα θα μπορούσε να μειώσει την ανάγκη για

ανταλλακτικά και να παρατείνει τη διάρκεια ζωής των διαστημοπλοίων, οδηγώντας σε πιο βιώσιμες και οικονομικά αποδοτικές αποστολές (Hayat et al., 2019).

Βιοτεχνολογία και ιατρικές συσκευές

Οι βιομηχανίες βιοτεχνολογίας και ιατρικών συσκευών παρουσιάζουν επίσης σημαντικές ευκαιρίες για την εφαρμογή επιφανειακών κατεργασιών με βάση την ηλιακή ενέργεια. Σε αυτούς τους τομείς, οι επιφανειακές ιδιότητες είναι κρίσιμες για τη λειτουργικότητα και την ασφάλεια των συσκευών και των εμφυτευμάτων. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροποποίηση της επιφανειακής υφής, την εφαρμογή βιοσυμβατών επικαλύψεων ή την αποστείρωση υλικών με ιδιαίτερα ελεγχόμενο και αποτελεσματικό τρόπο (Kabir et al., 2018).

Για παράδειγμα, τα εμφυτεύματα και τα προσθετικά που απαιτούν επιφάνειες ανθεκτικές στα βακτήρια θα μπορούσαν να υποστούν επεξεργασία με τη χρήση ηλιακής ακτινοβολίας, ώστε να επιτευχθεί μια νανοδομημένη επιφάνεια που αποτρέπει τον σχηματισμό βιοφίλμ. Αυτό θα ενίσχυε την ασφάλεια και τη μακροζωία των ιατρικών συσκευών, μειώνοντας τον κίνδυνο μόλυνσης και βελτιώνοντας τα αποτελέσματα των ασθενών (Kabir et al., 2018).

Στη βιοτεχνολογία, οι ηλιακές επιφανειακές κατεργασίες θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στην παραγωγή φαρμακευτικών και βιολογικών προϊόντων. Η δυνατότητα ακριβούς ελέγχου των επιφανειακών ιδιοτήτων, όπως η υδροφοβικότητα ή η υδροφιλία, μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών παραγωγής, να μειώσει τους κινδύνους μόλυνσης και να διασφαλίσει την ακεραιότητα των ευαίσθητων βιολογικών υλικών (Kabir et al., 2018).

Αυτοκινητοβιομηχανία και μεταφορές

Η αυτοκινητοβιομηχανία επικεντρώνεται όλο και περισσότερο στη μείωση του βάρους των οχημάτων, στη βελτίωση της αποδοτικότητας των καυσίμων και στη μείωση των εκπομπών, γεγονός που την καθιστά πρωταρχικό υποψήφιο για την υιοθέτηση επιφανειακών κατεργασιών με βάση την ηλιακή ενέργεια. Ελαφριά υλικά όπως το αλουμίνιο και τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται συνήθως στην κατασκευή

οχημάτων και οι ηλιακές κατεργασίες μπορούν να βελτιώσουν τις ιδιότητές τους (Zhang et al., 2018).

Για παράδειγμα, οι επικαλύψεις με βάση την ηλιακή ακτινοβολία μπορούν να εφαρμοστούν στα αμαξώματα των οχημάτων για να βελτιώσουν την αντίσταση στη διάβρωση, να μειώσουν την τριβή ή να παρέχουν προστατευτικά φράγματα έναντι περιβαλλοντικών παραγόντων όπως η υπεριώδης ακτινοβολία και οι ρύποι. Αυτές οι κατεργασίες μπορούν να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων των αυτοκινήτων και να συμβάλουν στη συνολική βιωσιμότητα των οχημάτων μειώνοντας την ανάγκη για συχνή συντήρηση και αντικατάσταση (Zhang et al., 2018).

Στα ηλεκτρικά οχήματα (EVs), τα οποία βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην τεχνολογία των μπαταριών, οι ηλιακές επιφανειακές κατεργασίες θα μπορούσαν να βελτιώσουν την απόδοση των εξαρτημάτων των μπαταριών ενισχύοντας τη θερμική διαχείριση και την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Καθώς η αυτοκινητοβιομηχανία κινείται προς την κατεύθυνση της μεγαλύτερης ηλεκτροκίνησης, η ζήτηση για τέτοια προηγμένα υλικά και επεξεργασίες αναμένεται να αυξηθεί (Zhang et al., 2018).

Ηλεκτρονικά και καταναλωτικά αγαθά

Η βιομηχανία ηλεκτρονικών ειδών, η οποία διευρύνει συνεχώς τα προς όλο και μικρότερα εξαρτήματα και των επιδόσεων, μπορεί επίσης να επωφεληθεί από τις επιφανειακές κατεργασίες με βάση την ηλιακή ενέργεια. Η δυνατότητα τροποποίησης και βελτίωσης των επιφανειών των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σε μικρο- και νανοκλίμακα με τη χρήση ηλιακής ενέργειας ανοίγει νέες δυνατότητες για τη βελτίωση της απόδοσης και της ανθεκτικότητας των συσκευών (Palacios et al., 2020).

Για παράδειγμα, οι διεργασίες που προκαλούνται από την ηλιακή ακτινοβολία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία αγώγιμων ή μονωτικών στρωμάτων, την ενίσχυση της πρόσφυσης των εξαρτημάτων ή την ανάπτυξη επιφανειών που βελτιώνουν την απαγωγή θερμότητας στις ηλεκτρονικές συσκευές. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει στην παραγωγή πιο αξιόπιστων, αποδοτικών και μεγαλύτερης διάρκειας καταναλωτικών ηλεκτρονικών συσκευών, από smartphones έως φορητή τεχνολογία (Palacios et al., 2020).

Στα καταναλωτικά αγαθά, η χρήση της ηλιακής ενέργειας για επιφανειακές κατεργασί μπορεί να προσφέρει τόσο λειτουργικά όσο και αισθητικά οφέλη. Για παράδειγμα, ηλιακές επιστρώσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε υφάσματα, πλαστικά ή γυαλί για να προσδώσουν ιδιότητες όπως αντοχή στο νερό, προστασία από την υπεριώδη ακτινοβολία ή αντι-ανακλαστικές ιδιότητες, καθιστώντας τα προϊόντα πιο ανθεκτικά και ελκυστικά για τους καταναλωτές (Palacios et al., 2020).

7 Συμπεράσματα

Η χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας στις επιφανειακές κατεργασίες υλικών προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στις ιδιότητες, όπως αυξημένη σκληρότητα, βελτιωμένη αντίσταση στη φθορά και υψηλότερη θερμική σταθερότητα. Κατά τη διάρκεια της μελέτης της περίπτωσης του ζεύγους χάλυβα-WC, οι παραμετρικές αναλύσεις και οι μικροδομικές εξετάσεις κατέδειξαν πώς οι συνθήκες ακτινοβόλησης επηρεάζουν τη μικροδομή και, συνεπώς, τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Τα ευρήματα υποδεικνύουν ότι η σωστή ρύθμιση των παραμέτρων ακτινοβόλησης, όπως η ένταση και η διάρκεια της ακτινοβολίας, μπορεί να επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση των υλικών.

Πιο συγκεκριμένα, η κατεργασία με ηλιακή ενέργεια επιτυγχάνει σημαντική μείωση των επιφανειακών ατελειών και βελτίωση της συνοχής της μικροδομής, μειώνοντας τις πιθανότητες εμφάνισης ρωγμών και άλλων μη επιθυμητών χαρακτηριστικών. Επιπλέον, η ομοιογενής διάχυση των στοιχείων εντός του υλικού, που επιτυγχάνεται μέσω της ηλιακής κατεργασίας, οδηγεί σε καλύτερη συνοχή των φάσεων και βελτιωμένη ανθεκτικότητα στη φθορά, καθιστώντας τα υλικά κατάλληλα για εφαρμογές όπου οι συνθήκες λειτουργίας είναι απαιτητικές (Feng et al., 2022).

Όσον αφορά τις πιθανές εφαρμογές, η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για επιφανειακές κατεργασίες παρουσιάζει ενδιαφέρον για τη βιομηχανία της αεροναυπηγικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και της παραγωγής εργαλείων, όπου η ανθεκτικότητα και η απόδοση των υλικών είναι κρίσιμης σημασίας. Οι μελλοντικές έρευνες μπορούν να εστιάσουν στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών για διαφορετικά είδη υλικών και να διερευνήσουν τη δυνατότητα συνδυασμού της ηλιακής κατεργασίας με άλλες καινοτόμες τεχνολογίες, όπως οι επικαλύψεις πολλαπλών στρώσεων ή οι υβριδικές μέθοδοι επεξεργασίας (Palacios et al., 2020).

Για τη συνέχιση της έρευνας, προτείνεται να εξεταστούν πιο εξελιγμένες τεχνικές προσομοίωσης που θα βοηθήσουν στην κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν την αλληλεπίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας με τα υλικά.. Συνολικά, η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια φαίνεται να έχει καλές προοπτικές, τόσο σε βιομηχανικό όσο και σε ερευνητικό επίπεδο, προσφέροντας μια πράσινη και αποδοτική εναλλακτική για την κατεργασία υλικών υψηλής απόδοσης (Gonzalo, Marugán & Márquez, 2019).

8 Παράρτημα

8.1 Παράρτημα 1α

Κώδικας Python για την Απεικόνιση Θερμικής Καταπόνησης

```
# Adjust code further to fix dimension mismatch and properly visualize the temperature distribution


# Create figure for both subplots

fig, axs = plt.subplots(1, 2, figsize=(14, 6))

fig.suptitle("Απεικόνιση Θερμικής Καταπόνησης λόγω Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας")


# --- Diagram 1: Κατανομή Θερμοκρασίας σε Σωλήνα ---

# Define parameters for the polar plot

radius_inner = 1  # Inner radius of tube

radius_outer = 1.3  # Outer radius of tube

theta = np.linspace(0, 2 * np.pi, 100)

radii = np.linspace(radius_inner, radius_outer, 100)


# Create 2D temperature distribution using outer temperature as base

T = np.outer(np.cos(theta) + 1, radii)

T = temp_inner + (temp_outer_exposed - temp_inner) * T / T.max()  # scale temperature


# Convert to Cartesian coordinates

X = np.outer(radii, np.cos(theta))

Y = np.outer(radii, np.sin(theta))


# Plot temperature distribution

tube_temp_map = axs[0].pcolormesh(X, Y, T, shading='auto', cmap='hot')

axs[0].set_title("Θερμοκρασιακή Κατανομή σε Σωλήνα Ηλιακού Δέκτη")

axs[0].set_aspect('equal', 'box')

fig.colorbar(tube_temp_map, ax=axs[0], label="Θερμοκρασία (K)")
```

```
# --- Diagram 2: Θερμική Καταπόνηση σε Ιατρικό Εξάρτημα ---

# Create a simple 2D heat gradient for a rectangular component to illustrate stress distribution

width, height = 4, 2

x = np.linspace(0, width, 100)

y = np.linspace(0, height, 100)

X, Y = np.meshgrid(x, y)

temp_gradient = temp_inner + (temp_outer_exposed - temp_inner) * (X / width)


# Plot the thermal stress distribution on the medical component

stress_map = axs[1].imshow(temp_gradient, extent=[0, width, 0, height], cmap='hot', origin='lower')

axs[1].add_patch(patches.Rectangle((0, 0), width, height, fill=False, color="black", linewidth=1.5))

axs[1].set_title("Θερμική Καταπόνηση σε Ιατρικό Εξάρτημα")

axs[1].set_xlabel("Μήκος εξαρτήματος")

axs[1].set_ylabel("Πλάτος εξαρτήματος")

fig.colorbar(stress_map, ax=axs[1], label="Θερμοκρασία (K)")


plt.tight_layout(rect=[0, 0.03, 1, 0.95])

plt.show()
```

8.2 Παράρτημα 1β

```
import matplotlib.pyplot as plt

import numpy as np


# Sample data for a microelectronic component's temperature profile before and after surface modification


# X axis (distance along the component's length in mm)

distance = np.linspace(0, 10, 100)
```

```
# Y axis (temperature in °C) before and after modification
temp_before = 75 + 10 * np.exp(-0.5 * distance)  # Higher temp with concentration at center
temp_after = 65 + 5 * np.exp(-0.3 * distance)  # Lower temp after modifications

# Plotting temperature distribution before and after surface modification
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(distance, temp_before, label="Before Surface Modification", linestyle="--")
plt.plot(distance, temp_after, label="After Surface Modification", linestyle="-")

# Adding labels and title
plt.xlabel("Distance along Component (mm)")
plt.ylabel("Temperature (°C)")
plt.title("Temperature Distribution in Microelectronic Component\nBefore and After Surface Modification")
plt.legend()
plt.grid(True)

# Displaying the plot
plt.show()
```

8.3 Παράρτημα 1γ

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# Function to create a heatmap for thermal distribution
def plot_thermal_distribution():
    x = np.linspace(0, 10, 100)
    y_no_tbc = 400 + 100 * np.sin(0.3 * x)  # Higher temperature without TBC
    y_tbc = 300 + 50 * np.sin(0.3 * x)  # Lower temperature with TBC
```

```
    plt.figure(figsize=(10, 6))
    plt.plot(x, y_no_tbc, label="Χωρίς TBC", linestyle="--", linewidth=2)
    plt.plot(x, y_tbc, label="Με TBC", linestyle="-", linewidth=2)
    plt.fill_between(x, y_tbc, y_no_tbc, color='lightblue', alpha=0.5)

    plt.xlabel("Μήκος Πτερυγίου (mm)")
    plt.ylabel("Θερμοκρασία (°C)")
    plt.title("Κατανομή Θερμοκρασίας σε Πτερύγιο Τουρμπίνας με και χωρίς TBC")
    plt.legend()
    plt.grid(True)
    plt.show()

# Plot the thermal distribution visualization
plot_thermal_distribution()
```

Βιβλιογραφικές αναφορές

Abdoos, M., Bose, B., Rawal, S., Arif, A. F. M., & Veldhuis, S. C. (2020). The influence of residual stress on the properties and performance of thick TiAlN multilayer coating during dry turning of compacted graphite iron. *Wear*, *454*, 203342.

Alva, G., Liu, L., Huang, X., & Fang, G. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *68*, 693-706.

Alvarez, O., Barba, A., Rojas, A., González, R., Valdez, R., Covelo, A., & Hernández, M. (2018). Applications and Contributions of Physics to the Surface Treatment Process of Materials. Part II: Other Treatments. *European Journal of Engineering and Technology Research*, *3*(4), 80-86.

Alvarez, O., Barba, A., Rojas, A., Vázquez, A., Rodríguez, G., & Valdez, R. (2018). Experiences and proposals for the application of concentrated solar energy in the processing of materials. *Modern Environmental Science and Engineering*, *4*(6), 546-52.

Bouaddi, S., Fernández-García, A., Sansom, C., Sarasua, J. A., Wolfertstetter, F., Bouzekri, H., ... & Azpitarte, I. (2018). A review of conventional and innovative-sustainable methods for cleaning reflectors in concentrating solar power plants. *Sustainability*, *10*(11), 3937.

Burakowski, T., & Wierzchon, T. (1998). *Surface engineering of metals: principles, equipment, technologies*. CRC press.

Canale, L., Di Fazio, A. R., Russo, M., Frattolillo, A., & Dell'Isola, M. (2021). An overview on functional integration of hybrid renewable energy systems in multi-energy buildings. *Energies*, *14*(4), 1078.

Cavazzuti, M., & Bottarelli, M. (2023). Performance analysis of a multi-source renewable energy system for temperature control in buildings of varied thermal

transmittance and climate zone. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *187*, 113725.

Chen, R., Tan, Y., Fang, H., Luo, L., Ding, H., Su, Y., ... & Fu, H. (2018). Macro/microstructure evolution and mechanical properties of Ti33. 3Al alloys by adding WC particles. *Materials Science and Engineering: A*, *725*, 171-180.

Choudhary, A. K., & Jain, R. (2021). Fundamentals of friction stir welding, its application, and advancements. *Welding Technology*, 41-90.

Commons, Wikimedia (2013), https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Archimedes_Heat_Ray_conceptual_diagram-el.svg

Ding, M., Zhang, Y., Lu, H., & Sun, Y. (2021). Numerical investigation on stress concentration of surface notch on blades. *Engineering Failure Analysis*, *122*, 105241.

Dosta, S., Betancor, L., & Barreneche, C. (2024). Overview of surface engineering technology to improve the energy efficiency in concentrated solar power (CSP) plants. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *277*, 113090.

Du, B. C., He, Y. L., Zheng, Z. J., & Cheng, Z. D. (2016). Analysis of thermal stress and fatigue fracture for the solar tower molten salt receiver. *Applied Thermal Engineering*, *99*, 741-750.

Edgar, T. F., & Pistikopoulos, E. N. (2018). Smart manufacturing and energy systems. *Computers & Chemical Engineering*, *114*, 130-144.

Feng, C., Wu, Z. P., Huang, K. W., Ye, J., & Zhang, H. (2022). Surface modification of 2D photocatalysts for solar energy conversion. *Advanced Materials*, *34*(23), 2200180.

Fernández-González, D., Ruiz-Bustinza, I., González-Gasca, C., Noval, J. P., Mochón-Castaños, J., Sancho-Gorostiaga, J., & Verdeja, L. F. (2018). Concentrated solar energy applications in materials science and metallurgy. *Solar Energy*, *170*, 520-540.

Flamant, G., Ferriere, A., Laplaze, D., & Monty, C. (1999). Solar processing of materials: opportunities and new frontiers. *Solar energy*, *66*(2), 117-132.

Fuqiang, W., Ziming, C., Jianyu, T., Yuan, Y., Yong, S., & Linhua, L. (2017). Progress in concentrated solar power technology with parabolic trough collector system: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *79*, 1314-1328.

Gálvez, J. B., Rodríguez, S. M., Delyannis, E., Belessiotis, V. G., Bhattacharya, S. C., & Kumar, S. (Eds.). (2010). *Solar Energy Conversion and Photoenergy Systems: Thermal Systems and Desalination Plants-Volume I*. EOLSS Publications.

Gonzalo, A. P., Marugán, A. P., & Márquez, F. P. G. (2019). A review of the application performances of concentrated solar power systems. *Applied Energy*, *255*, 113893.

Han, S., Hwang, T., Oh, I., Choi, M., & Moon, Y. H. (2018). Manufacturing of tailor-rolled blanks with thickness variations in both the longitudinal and latitudinal directions. *Journal of Materials Processing Technology*, *256*, 172-182.

Hayat, M. B., Ali, D., Monyake, K. C., Alagha, L., & Ahmed, N. (2019). Solar energy—A look into power generation, challenges, and a solar-powered future. *International Journal of Energy Research*, *43*(3), 1049-1067.

He, Y. L., Qiu, Y., Wang, K., Yuan, F., Wang, W. Q., Li, M. J., & Guo, J. Q. (2020). Perspective of concentrating solar power. *Energy*, *198*, 117373.

Ho, C. K. (2017). Advances in central receivers for concentrating solar applications. *Solar energy*, *152*, 38-56.

Hussin, F., Issabayeva, G., & Aroua, M. K. (2018). Solar photovoltaic applications: opportunities and challenges. *Reviews in Chemical Engineering*, *34*(4), 503-528.

Islam, M. T., Huda, N., Abdullah, A. B., & Saidur, R. (2018). A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *91*, 987-1018.

Jaworski, J., Kluz, R., & Trzepieciński, T. (2017). Influence of heat treatment on content of the carbide phases in the microstructure of high-speed steel. *Archives of Foundry Engineering*, *17*.

Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K. H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 894-900.

Kalogirou, S. A. (2023). *Solar energy engineering: processes and systems*. Elsevier.

Khan, J., & Arsalan, M. H. (2016). Solar power technologies for sustainable electricity generation–A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *55*, 414-425.

Khan, M. I., Asfand, F., & Al-Ghamdi, S. G. (2022). Progress in research and technological advancements of thermal energy storage systems for concentrated solar power. *Journal of Energy Storage*, *55*, 105860.

Kumar, D., Idapalapati, S., Wang, W., & Narasimalu, S. (2019). Effect of surface mechanical treatments on the microstructure-property-performance of engineering alloys. *Materials*, *12*(16), 2503.

Li, C., Deng, X., Huang, L., Jia, Y., & Wang, Z. (2020). Effect of temperature on microstructure, properties and sliding wear behavior of low alloy wear-resistant martensitic steel. *Wear*, *442*, 203125.

Li, S., Choi, M. S., & Nam, T. H. (2020). Effect of thermo-mechanical treatment on microstructural evolution and mechanical properties of a superelastic Ti–Zr-based shape memory alloy. *Materials Science and Engineering: A*, *789*, 139664.

Lian, J. J., Ma, X. G., Jiang, Z. Y., Lee, C. S., & Zhao, J. W. (2023). A review of the effect of tungsten alloying on the microstructure and properties of steels. *Tungsten*, *5*(4), 440-466.

Logie, W. R., Pye, J. D., & Coventry, J. (2018). Thermoelastic stress in concentrating solar receiver tubes: A retrospect on stress analysis methodology, and comparison of salt and sodium. *Solar Energy*, *160*, 368-379.

Mehos, M., Turchi, C., Vidal, J., Wagner, M., Ma, Z., Ho, C., ... & Kruizenga, A. (2017). *Concentrating solar power Gen3 demonstration roadmap* (No. NREL/TP-5500-67464). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Mozumder, M. S., Mourad, A. H. I., Pervez, H., & Surkatti, R. (2019). Recent developments in multifunctional coatings for solar panel applications: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *189*, 75-102.

Mourlas A., E. Pavlidou, G Vourlias, J. Rodríguez, P Psyllaki, «Concentrated solar energy for in-situ elaboration of wear-resistant composite layers. Part II: Tungsten carbide surface enrichment of common steels*», Surface & Coatings Technology*, 375 (2019) 739–751.

Müller, K., Bugnicourt, E., Latorre, M., Jorda, M., Echegoyen Sanz, Y., Lagaron, J. M., ... & Schmid, M. (2017). Review on the processing and properties of polymer nanocomposites and nanocoatings and their applications in the packaging, automotive and solar energy fields. *Nanomaterials*, *7*(4), 74.

Nemani, S. K., Annavarapu, R. K., Mohammadian, B., Raiyan, A., Heil, J., Haque, M. A., ... & Sojoudi, H. (2018). Surface modification of polymers: methods and applications. *Advanced Materials Interfaces*, *5*(24), 1801247.

Nemati, N., Bozorg, M., Penkov, O. V., Shin, D. G., Sadighzadeh, A., & Kim, D. E. (2017). Functional multi-nanolayer coatings of amorphous carbon/tungsten carbide with exceptional mechanical durability and corrosion resistance. *ACS applied materials & interfaces*, *9*(35), 30149-30160.

Palacios, A., Barreneche, C., Navarro, M. E., & Ding, Y. (2020). Thermal energy storage technologies for concentrated solar power–A review from a materials perspective. *Renewable Energy*, *156*, 1244-1265.

Pandiyan, V., & Tjahjowidodo, T. (2019). Use of Acoustic Emissions to detect change in contact mechanisms caused by tool wear in abrasive belt grinding process. *Wear*, *436*, 203047.

Ponseca Jr, C. S., Chábera, P., Uhlig, J., Persson, P., & Sundstrom, V. (2017). Ultrafast electron dynamics in solar energy conversion. *Chemical reviews*, *117*(16), 10940-11024.

Rodriguez, G. P., López, V., Vazquez, A. J., & De Damborenea, J. J. (1995). Surface transformation hardening on steels treated with solar energy in central tower and heliostats field. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, *37*(1), 1-12.

Rossi, C. (2010, April). Archimedes' Cannons Against the Roman Fleet?. In *The Genius of Archimedes--23 Centuries of Influence on Mathematics, Science and Engineering: Proceedings of an International Conference held at Syracuse, Italy, June 8-10, 2010* (pp. 113-131). Dordrecht: Springer Netherlands.

Sengupta, M., Habte, A., Wilbert, S., Gueymard, C., & Remund, J. (2021). *Best practices handbook for the collection and use of solar resource data for solar energy applications* (No. NREL/TP-5D00-77635). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Tilley, S. D. (2019). Recent advances and emerging trends in photo-electrochemical solar energy conversion. *Advanced Energy Materials*, *9*(2), 1802877.

Van den Abeelen, L. (2017). *Spaceplane HERMES: Europe's Dream of Independent Manned Spaceflight*. Springer International Publishing.

Vázquez, A. J., Rodriguez, G. P., & de Damborenea, J. (1991). Surface treatment of steels by solar energy. *Solar energy materials*, *24*(1-4), 751-759.

Vijay, P., Raju, K. B., Ramji, K., & Kamaluddin, S. (2021). Effect of tungsten carbide on Al6061/SiC hybrid metal matrix composites. *Compos. Theory Pract*, *21*, 169-180.

Wang, H., Cao, L., Li, Y., Schneider, M., Detemple, E., & Eggeler, G. (2021). Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of a low-carbon low-alloyed steel. *Journal of Materials Science*, *56*, 11098-11113.

Weinstein, L. A., Loomis, J., Bhatia, B., Bierman, D. M., Wang, E. N., & Chen, G. (2015). Concentrating solar power. *Chemical reviews*, *115*(23), 12797-12838.

Wilberforce, T., Baroutaji, A., El Hassan, Z., Thompson, J., Soudan, B., & Olabi, A. G. (2019). Prospects and challenges of concentrated solar photovoltaics and enhanced geothermal energy technologies. *Science of The Total Environment*, *659*, 851-861.

Wu, N., Xue, F., He, J., Wang, C., Lu, J., Zhou, H., ... & Luo, F. (2022). Effect of tungsten carbide content on the tribological behavior of TiB2–TiC-based cermets. *Wear*, *498*, 204333.

Xu, B., Li, P., & Chan, C. (2015). Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: a review to recent developments. *Applied Energy*, *160*, 286-307.

Xu, L., Song, W., Ma, S., Zhou, Y., Pan, K., & Wei, S. (2021). Effect of slippage rate on frictional wear behaviors of high-speed steel with dual-scale tungsten carbides (M6C) under high-pressure sliding-rolling condition. *Tribology International*, *154*, 106719.

Zervaki, A. D., Lambrakos, S. G., Mourlas, A. G., Papantoniou, I. G., Rodríguez, J., & Psyllaki, P. P. (2023). Inverse Thermal Analysis as a Tool for Optimizing Concentrated Solar Energy Elaboration of Wear Resistant Surface Layers. *Metals*, *13*(5), 942.

Zhang, H., Li, H., Yan, L., Wang, C., Ai, F., Li, Y., ... & Jiang, Z. (2019). Effect of particle size on microstructure and element diffusion at the interface of tungsten carbide/high strength steel composites. *Materials*, *12*(24), 4164.

Zhang, Y., Sivakumar, M., Yang, S., Enever, K., & Ramezanianpour, M. (2018). Application of solar energy in water treatment processes: A review. *Desalination*, *428*, 116-145.

Zhou, Z., Luo, C., Xiong, Y., Xiong, H., & Li, F. (2024). Effect of Tungsten Carbide Additions on the Microstructure, Mechanical, and Tribological Properties of M2 High-Speed Steel Matrix Composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-14.

Μουρλάς, Α. (2021). *Συγκριτική αξιολόγηση εναποθέσεων και ιδιοτήτων επιστρωμάτων κεραμικών και συνθέτων υλικών* [Comparative evaluation of depositions and properties of ceramic and composite coatings] (Doctoral dissertation). University of Ioannina.