



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΕΩΝ
ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΜΟΥΡΛΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2021



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΕΩΝ
ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΜΟΥΡΛΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2021

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα Ν. 5343/32, άρθρο 202, παράγραφος 2.

Ημερομηνία αίτησης του κ. Αθανάσιου Μουρλά: 12/11/2013

Ημερομηνία ορισμού Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής: 14/11/2013

Μέλη Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής:

Επιβλέπων

Μιχαήλ Καρακασίδης, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Μέλη

Πανδώρα Ψυλλάκη, Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Γεώργιος Βουρλιάς, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Ημερομηνία ορισμού θέματος: 14/11/2013

«Συγκριτική αξιολόγηση εναποθέσεων και ιδιοτήτων κεραμικών και σύνθετων υλικών»

Ημερομηνία τροποποίησης θέματος: 21/10/2021

«Συγκριτική αξιολόγηση εναποθέσεων και ιδιοτήτων επιστρωμάτων κεραμικών και σύνθετων υλικών»

ΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΤΑΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ: 21/10/2021

1. Μιχαήλ Καρακασίδης, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

2. Πανδώρα Ψυλλάκη, Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

3. Γεώργιος Βουρλιάς, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

4. Αγγελική Λεκάτου, Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

5. Ελένη Παυλίδου, Καθηγήτρια του Τμήματος Φυσικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

6. Παντελής Νικολακόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών

7. Άννα Ζερβάκη, Επίκουρη Καθηγήτρια της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Έγκριση Διδακτορικής Διατριβής με βαθμό **«ΑΡΙΣΤΑ»** στις 26/12/2021

Ο Πρόεδρος του Τμήματος

Η Γραμματέας του Τμήματος

Απόστολος Αυγερόπουλος
Καθηγητής

Μαρία Κόντου

[κενή σελίδα]

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής, θέλω να ευχαριστήσω θερμά:

Τον επιβλέποντα της διδακτορικής διατριβής κ. *Μιχαήλ Καρακασίδη*, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, για την ανάθεση της διδακτορικής διατριβής, τη βοήθεια και τις πολύτιμες συμβουλές του.

Την κα *Πανδώρα Ψυλλάκη*, Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, εμπνεύστρια του θέματος, στην οποία οφείλω την εκπόνηση της διατριβής.

Τον κ. *Γεώργιο Βουρλιά*, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, η συμβολή του οποίου ήταν καταλυτική για την ολοκλήρωση της διατριβής.

Την κα *Ελένη Παυλίδου*, Καθηγήτρια του Τμήματος Φυσικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, για την άοκνη συνεισφορά της στην υλοποίηση των παρατηρήσεων σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης και την ερμηνεία τους.

Τον αείμνηστο *Δημήτριο Παντελή*, Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την παραχώρηση μέρους των κόνεων καρβιδίων.

Την κα *Inmaculada Cañadas* και τον κ. *Jose Rodríguez*, υπεύθυνοι των εγκαταστάσεων των ηλιακών φούρνων, και το λοιπό τεχνικό προσωπικό της Plataforma Solar de Almería (PSA) στην Ισπανία, για τη διενέργεια των «ηλιακών» πειραμάτων.

Τον Δρ. *Γεώργιο Πανταζόπουλο*, Technology and Quality Manager του Ελληνικού Κέντρου Ερεύνης Μετάλλων (ΕΛ.Κ.Ε.ΜΕ. Α.Ε.) για την άμεση ανταπόκρισή του στο αίτημα υποβοήθησης του έργου στο στάδιο της μεταλλογραφικής προετοιμασίας δοκιμίων προς περαιτέρω χαρακτηρισμό.

Τον Δρ. *Γεώργιο Σερέτη* για την υλοποίηση των μετρήσεων σκληρότητας στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και τον Δρ. *Κωνσταντίνο Λέντζαρη* για την πραγματοποίηση μέρους των παρατηρήσεων σε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο στο Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Επιθυμώ, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά τη σύζυγό μου, Δρ. *Μαρία Λούντζη*, «αφανή ηρωίδα», για τη συμπαράσταση και την ακούραστη υπομονή που έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια πραγματοποίησης της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αείμνηστο *Σόλωνα Αντωνίου*, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του τέως Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. και τον κ. *Νικόλαο Βαξεβανίδη*, Καθηγητή του Τμήματος Εκπαιδευτικών Μηχανολόγων Μηχανικών της Ανώτατης Σχολής Παιδαγωγικής και Τεχνολογικής Εκπαίδευσης, για την ώθηση που μου έδωσαν ώστε να ασχοληθώ με ερευνητικά θέματα κατά την πολυετή συνεργασία μας στο Εργαστήριο Τριβολογίας του τέως Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ.

Ιωάννινα, Νοέμβριος 2021

Αθανάσιος Μουρλάς

Περίληψη

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, διερευνήθηκε η δυνατότητα εφαρμογής καινοτόμων τεχνικών με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, για τη δημιουργία σύνθετων και ανθεκτικών στη φθορά επιφανειακών στρωμάτων και τα λαμβανόμενα σύνθετα επιφανειακά στρώματα συγκρίνονται με αντίστοιχα επιστρώματα συμβατικής τεχνικής.

Για την επίτευξη του κύριου στόχου της διατριβής, εφαρμόστηκε η τεχνολογία Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας (Concentrated Solar Energy–CSE) για να αποδειχθεί η σκοπιμότητα και η επαναληψιμότητα της τεχνικής, στη δημιουργία σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων, με διασπορά κεραμικών σωματιδίων σε χαλύβδινη μήτρα. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο αλλά και ως μέταλλο βάσης, κοινός ανθρακούχος χάλυβας κλάσης DIN 17100 και πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές δοκιμών, χρησιμοποιώντας προ-εναποτιθέμενες σκόνες καρβιδίων: (α) του τιτανίου (TiC), (β) του βολφραμίου (WC) και (γ) του χρωμίου (Cr_3C_2). Διερευνήθηκαν τα φυσικά φαινόμενα, που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, μελετήθηκαν και ταυτοποιήθηκαν οι επιδράσεις των κρίσιμων παραμέτρων λειτουργίας, στη δομική ακεραιότητα και στη τριβολογική απόδοση των λαμβανόμενων σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων. Μετά την «ηλιακή» ακτινοβολήση των δειγμάτων, οι μικροδομές που επιτεύχθηκαν, υπό διάφορες παραμέτρους επεξεργασίας, χαρακτηρίστηκαν μέσω οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, διάθλασης ακτίνων X καθώς και με μετρήσεις σκληρότητας και μικροσκληρότητας. Στη συνέχεια, η τριβολογική απόδοση των σύνθετων «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων αξιολογήθηκε με δοκιμές ξηράς ολίσθησης τύπου σφαίρας – δίσκου, προσδιορίζοντας με αυτό τον τρόπο την εξέλιξη των συντελεστών τριβής και φθοράς και αποκαλύπτοντας τους μηχανισμούς φθοράς, που λαμβάνουν χώρα κατά την ολίσθηση. Εν κατακλείδι, τα επιστημονικά ευρήματα, συγκρίθηκαν με αυτά ανάλογων δομών συμβατικής τεχνικής επιγόμωσης με χρήση βολταϊκού τόξου και σύρματος με πυρήνα κόνεως (Flux Cored Arc Welding – FCAW).

Τα κύρια συμπεράσματα της διδακτορικής διατριβής αφορούν στην παρουσίαση (α) της σκοπιμότητας χρήσης της «ηλιακής» τεχνικής για την επεξεργασία επιφανειακών στρωμάτων, (β) τον ακριβή έλεγχο της μικροδομής, που λαμβάνεται για κάθε συγκεκριμένο τύπο κόνις καρβιδίου που προ-εναποτίθεται, μέσω λεπτομερής ρύθμισης των παραμέτρων λειτουργίας και (γ) την ανώτερη τριβολογική απόδοση των σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων ύστερα από «ηλιακή» επεξεργασία.

Τα πειράματα με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας υλοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις της CIEMAT στην Plataforma Solar de Almeria (PSA), στην Ισπανία, με τρεις αποστολές, καθεμιά διάρκειας δύο εβδομάδων, στο πλαίσιο έργου συνεργασίας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (πρώην Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ.) και του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, με κοινό τίτλο “Anti-wear carbide – based coatings using concentrated solar energy / CarbiSol”: PI 404300058 (2014), P1503060136 (2015) και P1602050194 (2016), χρηματοδοτούμενο από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα “Solar Facilities for the European Research Area, Second Phase – SFERA II”.

Οι επιγομώσεις με τη συμβατική τεχνική βολταϊκού τόξου και σύρματος με πυρήνα κόνεως (FCAW), καθώς και η τριβολογική απόδοση όλων των δημιουργηθέντων σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων, υλοποιήθηκαν στα Εργαστήρια Συγκολλήσεων και Μηχανικής Επιφανειών αντίστοιχα, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Ο χαρακτηρισμός της μικροδομής με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και με περίθλαση ακτίνων Χ πραγματοποιήθηκε στο Τμήμα Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Τέλος, οι παρατηρήσεις σε οπτικό μικροσκόπιο πραγματοποιήθηκαν στο Τμήμα Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, ενώ οι μετρήσεις σκληρότητας πραγματοποιήθηκαν στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Abstract

Within the framework of the present Ph.D. study, the feasibility of applying innovative techniques using renewable energy sources for the elaboration of composite wear resistant surface layers onto metallic substrates was investigated and compared to conventional welding techniques, commonly used for the production of hardfacing clads.

To accomplish the main target of this research, Concentrated Solar Energy (CSE) technology was applied to prove the feasibility and reproducibility of the technique for elaborating composite surface layers with a dispersion of ceramic particles. For this purpose, a DIN 17100 common steel grade has been used as the model material, serving as the base metal for the whole process. Three series of experiments were carried out using pre-deposited carbide powders, namely: (a) titanium carbide (TiC), (b) tungsten carbide (WC) and (c) chromium carbide (Cr_3C_2). The physical phenomena taking place during processing were investigated and the effects of the crucial operating parameters on the structural integrity and the tribological performance of the obtained surface layers were studied and identified. After solar irradiation of the specimens, the surface microstructures achieved under various processing parameters were characterized by optical and scanning electron microscopy and X-ray diffraction, as well as by microhardness measurements. Subsequently, the tribological performance of the composite “solar” surface layers was evaluated by ball-on-disk experiments that allowed determining the friction and wear coefficient evolution and revealing the wear micro-mechanisms taking place. Finally, these scientific findings were compared to relevant results concerning “traditional” hardfacing clads obtained via the conventional Flux Covered Arc Welding (FCAW) technique.

The main conclusions of this doctoral research concern the demonstration of (a) the feasibility of the “solar” technique for elaborating surface layers, (b) the precise control of the microstructure obtained per each specific type of the carbide powder pre-deposited

via the fine-tuning of the operating parameters and (c) the superior tribological performance of the solar-treated surface layers.

The experiments applying using Concentrated Solar Energy were performed at the facilities of solar furnace at Plataforma Solar de Almería (PSA), Spain, during three campaigns each lasting two weeks, in the framework of three joint projects of the University of West Attica (former Piraeus University of Applied Sciences – PUAS) and Aristotle University of Thessaloniki, under the generic title: “Anti-wear carbide – based coatings using concentrated solar energy / CarbiSol”: PI 404300058 (2014), P1503060136 (2015) and P1602050194 (2016), funded and performed within the European “Solar Facilities for the European Research Area, Second Phase – SFERA II” call.

The surface deposits with the FCAW conventional technique and the tribological characterization of achieved surface layers were carried out at the Welding and Surface Engineering Laboratory of the Mechanical Engineering Department of the University of West Attica.

The microstructure observations using electron scanning microscopy and X-ray diffraction were carried out at the Physics Department of the Aristotle University of Thessaloniki.

The optical microscopy observations were performed at the Department of Materials Science & Engineering of the University of Ioannina and, finally, the hardness measurements were carried out at the School of Mechanical Engineering, of the National Technical University of Athens.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	vii
Περίληψη	ix
Περιεχόμενοι πίνακες	xvii
Περιεχόμενα σχήματα	xix
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Επιφανειακές κατεργασίες και δέσμες υψηλής ενέργειας.....	1
1.2 Το πρόβλημα και η προτεινόμενη λύση του.....	5
1.3 Στόχοι, μεθοδολογία και καινοτομία έρευνας.....	10
1.4 Περιεχόμενο της διατριβής.....	13
1.5 Βιβλιογραφία.....	15
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση: Κατεργασίες με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Οι ηλιακοί φούρνοι.....	18
2.3 Επιφανειακή σκλήρυνση με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια.....	21
2.4 Δημιουργία επικαλύψεων με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια.....	22
2.5 Πυροσυσωμάτωση με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια.....	23
2.6 Εναζώτωση με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια.....	25
2.7 Συνθέσεις με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια.....	26
2.8 Συγκόλληση με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια.....	27
2.9 Συμπεράσματα.....	29
2.10 Βιβλιογραφία.....	29

Κεφάλαιο 3	Εξοπλισμός, υλικά και τεχνικές χαρακτηρισμού.....	37
	3.1 Εισαγωγή.....	37
	3.2 Ηλιακές εγκαταστάσεις της Plataforma Solar de Almeria....	37
	3.3 Διάταξη επιγώμωσης με τη χρήση βολταϊκού τόξου.....	43
	3.4 Υλικά.....	46
	3.4.1 Μέταλλο βάσης.....	46
	3.4.2 Υλικά δημιουργίας σύνθετων επιφ. στρωμάτων.....	47
	3.5 Διαδικασία υλοποίησης επιγομώσεων τεχνικής FCAW.....	56
	3.6 Διαδικασία υλοποίησης της «ηλιακής» επιφ. κατεργασίας...	56
	3.7 Τεχνικές χαρακτηρισμού των επιφανειακών στρωμάτων.....	58
	3.8 Βιβλιογραφία.....	62
Κεφάλαιο 4	Αξιολόγηση της δυνατότητας δημιουργίας αντιτριβικών «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων.....	63
	4.1 Εισαγωγή.....	63
	4.2 Επίδραση των συνθηκών της κατεργασίας στη δομή.....	63
	4.3 Προκαταρκτικός χαρακτηρισμός των «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων.....	69
	4.3.1 Μικροδομή και γεωμετρία των επιφ. στρωμάτων...	69
	4.3.2 Αξιολόγηση της απόδοσης των «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων σε τριβή.....	75
	4.4 Φυσικό μοντέλο των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα.....	81
	4.5 Βιβλιογραφία.....	88
Κεφάλαιο 5	«Ηλιακά» επιφανειακά στρώματα μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση καρβιδίων του τιτανίου.....	89
	5.1 Εισαγωγή.....	89
	5.2 Μικροδομή των επιφανειακών επιστρωμάτων.....	89
	5.3 Σκληρότητα και κατανομή μικροσκληρότητας.....	95
	5.4 Απόδοση επιφανειακών στρωμάτων σε τριβή ολίσθησης...	97
	5.4.1 Εξέλιξη των συντελεστών τριβής και φθοράς.....	99
	5.4.2 Μηχανισμοί φθοράς.....	100
	5.5 Συμβατικές επιγομώσεις με την τεχνική FCAW.....	106

5.5.1	Μικροδομή επιγομώσεων.....	106
5.5.2	Εξέλιξη των συντελεστών τριβής και φθοράς.....	106
5.5.3	Εξέλιξη των μικρομηχανισμών φθοράς.....	109
5.6	Συμπεράσματα.....	112
5.7	Βιβλιογραφία.....	113
Κεφάλαιο 6	«Ηλιακά» επιφανειακά στρώματα μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση καρβιδίων του βολφραμίου.....	115
6.1	Εισαγωγή.....	115
6.2	Μικροδομή των επιφανειακών επιστρωμάτων.....	116
6.2.1	Απλή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία σε αδρανή ατμόσφαιρα.....	116
6.2.2	Απλή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία σε χημικά δραστική ατμόσφαιρα.....	125
6.2.3	Διπλή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία σε αδρανή ατμόσφαιρα.....	129
6.3	Σκληρότητα και κατανομή μικροσκληρότητας.....	138
6.4	Απόδοση επιφανειακών στρωμάτων σε τριβή ολίσθησης...	140
6.4.1	Εξέλιξη των συντελεστών τριβής και φθοράς.....	140
6.4.2	Μηχανισμοί φθοράς.....	143
6.5	Συμπεράσματα.....	146
6.7	Βιβλιογραφία.....	147
Κεφάλαιο 7	«Ηλιακά» επιφανειακά στρώματα μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση καρβιδίων του χρωμίου.....	151
7.1	Εισαγωγή.....	151
7.2	Μικροδομή των επιφανειακών επιστρωμάτων.....	152
7.2.1	Απλή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία σε αδρανή ατμόσφαιρα.....	152
7.2.2	Διπλή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία σε αδρανή ατμόσφαιρα.....	163
7.3	Σκληρότητα και κατανομή μικροσκληρότητας.....	167
7.4	Απόδοση επιφανειακών στρωμάτων σε τριβή ολίσθησης...	169
7.4.1	Εξέλιξη των συντελεστών τριβής και φθοράς.....	169
7.4.2	Μηχανισμοί φθοράς.....	169

7.5	Συμπεράσματα.....	173
7.6	Βιβλιογραφία.....	174
Κεφάλαιο 8	Συγκριτική αξιολόγηση – Γενικά συμπεράσματα.....	177
8.1	Ανακεφαλαίωση των πειραματικών στόχων.....	177
8.2	Γενικά αποτελέσματα.....	178
8.3	Συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης των «ηλιακών στρωμάτων.....	180
8.4	Σημεία και προτάσεις περαιτέρω έρευνας.....	182
8.5	Δημοσιεύσεις.....	183
	Βιβλιογραφία.....	185

Περιεχόμενοι πίνακες

- Πίνακας 1.1** Σύγκριση παραμέτρων των τεχνικών κατεργασίας υλικών.
- Πίνακας 1.2** Σύγκριση πυκνοτήτων ενέργειας, που χρησιμοποιούνται στον τομέα των επιφανειακών κατεργασιών.
- Πίνακας 3.1** Χημική σύσταση (% κ.β.) του μετάλλου βάσης.
- Πίνακας 3.2** Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες διάφορων καρβιδίων.
- Πίνακας 3.3** Ποιοτικά χαρακτηριστικά διάφορων καρβιδίων.
- Πίνακας 3.4** Χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων κόνεων.
- Πίνακας 3.5** Προτεινόμενες, από τον προμηθευτή των χρησιμοποιούμενων στρωμάτων, παράμετροι λειτουργίας συσκευής συγκόλλησης.
- Πίνακας 4.1** Επίδραση των διαστάσεων του υποστρώματος στην επιτυχία της «ηλιακής» κατεργασίας.
- Πίνακας 4.2** Κρίσιμες θερμικές ιδιότητες στους 25°C των δύο υλικών-φορέων των δοκιμών προς «ηλιακή» κατεργασία.
- Πίνακας 4.3** Διάρκεια παραμονής σε θερμοκρασία υψηλότερη της μέσης θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου βάσης και αντίστοιχες τιμές του μέγιστου βάθους «ηλιακής» κατεργασίας που επιτεύχθηκε στο κέντρο της επιφάνειας.
- Πίνακας 5.1** Κατανομή των πενήντα (50) τιμών μέτρησης της μικροσκληρότητας κατά Vickers, κατά τυχαίο τρόπο, των σύνθετων «ηλιακών» στρωμάτων με ενίσχυση σωματιδίων TiC.
- Πίνακας 5.2** Σύγκριση τριβολογικής απόδοσης «ηλιακών» και συμβατικών τεχνικής FCAW επιφανειακών στρωμάτων.
- Πίνακας 6.1** Κλάσεις μικροσκληρότητας σε «ηλιακά» επιφανειακά στρώματα με διασπορά σωματιδίων WC.

Πίνακας 8.1 Συγκριτική παρουσίαση της απόδοσης κατά τη λειτουργία για τους τρεις τύπους ενισχυτικών σωματιδίων, του μετάλλου βάσης και εμπορικού χάλυβα. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν υπό τις ίδιες συνθήκες έναντι σφαίρας Al_2O_3 .

Πίνακας 8.2 Συγκριτική παρουσίαση της κατεργασιμότητας των σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων με ενίσχυση σωματιδίων TiC και WC, που πραγματοποιήθηκαν με δοκιμές ξηράς ολίσθησης έναντι ένθετου πλακιδίου τórνευσης επικαλυμμένο με c-BN.

Περιεχόμενα σχήματα

- Σχήμα 1.1** Ταξινόμηση των τεχνικών επιφανειακών τροποποιήσεων με βάση τη μέθοδο δημιουργίας τους.
- Σχήμα 1.2** Η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, ως εναλλακτική πηγή ενέργειας/θερμότητας στον τομέα των επιφανειακών κατεργασιών.
- Σχήμα 1.3** Πυρπόληση ξύλινων ρωμαϊκών πλοίων στις Συρακούσες (214 - 212 π.Χ.).
- Σχήμα 3.1** Εγκατάσταση ηλιακού φούρνου της Plataforma Solar de Almeria στην Ισπανία: (α) Εικόνα της συνολικής εγκατάστασης του οριζόντιου ηλιακού φούρνου SF40, (β) αρχή λειτουργίας της διάταξης.
- Σχήμα 3.2** Θάλαμος διενέργειας «ηλιακών» δοκιμών: (α) Εστίαση δέσμης στην περιοχή εστίασης, (β) κυκλική περιοχή διαμέτρου ~120mm, όπου εστιάζεται η δέσμη ηλιακής ενέργειας με μέγιστη ισχύ 40kW και με πυκνότητα ενέργειας 7000kW/m² κανονικής κατανομής.
- Σχήμα 3.3** Οπτικά πυρόμετρα και IR κάμερα καταγραφής θερμοκρασίας.
- Σχήμα 3.4** Στιγμιότυπο καταγραφής της θερμοκρασίας IR κάμερας.
- Σχήμα 3.5** Στιγμιότυπο τήξης σύρματος και δημιουργία σύνθετου επιφανειακού στρώματος.
- Σχήμα 3.6** Διασπορά εξωτερικά τροφοδοτούμενων σωματιδίων καρβιδίου, με συμβατική τεχνική FCAW.
- Σχήμα 3.7** Διάταξη επιγύμωσης με συμβατική τεχνική συγκόλλησης FCAW, του Εργαστηρίου Συγκολλήσεων, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.
- Σχήμα 3.8** Διαδικασία τοποθέτησης των κόνεων επί των προς κατεργασία μεταλλικών δοκιμίων.
- Σχήμα 3.9** Φάσμα περίθλασης ακτίνων X για την κόνι καρβιδίου του τιτανίου.
- Σχήμα 3.10** Φάσμα περίθλασης ακτίνων X για την κόνι καρβιδίου του βολφραμίου.
- Σχήμα 3.11** Φάσμα περίθλασης ακτίνων X για την κόνι καρβιδίου του χρωμίου.

- Σχήμα 3.12** Φάσμα περίθλασης ακτίνων X της κόνεως του πυρήνα, σύρματος επιγόμεωσης με την συμβατική τεχνική FCAW.
- Σχήμα 3.13** Φάσμα περίθλασης ακτίνων X του μεταλλικού κελύφους, σύρματος επιγόμεωσης με την συμβατική τεχνική FCAW.
- Σχήμα 3.14** Μορφολογία (α) του σύρματος και (β) της κόνεως επιγόμεωσης με την τεχνική FCAW.
- Σχήμα 3.15** Τοποθέτηση του δοκιμίου στο θάλαμο δοκιμών: (α) έλεγχος της θέσης στην περιοχή εστίασης και (β) τοποθέτηση του διαφανούς θόλου και σφράγιση του θαλάμου για τον έλεγχο της ατμόσφαιρας της κατεργασίας. Έκθεση της προς κατεργασία επιφάνειας σε ηλιακή ακτινοβολία: (γ) βιντεοσκόπηση των πειραμάτων και (δ) έλεγχος των παραμέτρων εργασίας (π.χ. άνοιγμα περσίδων) και συνεχής καταγραφή της θερμοκρασίας της κάτω επιφάνειας του δοκιμίου κατά την κατεργασία.
- Σχήμα 3.16** Διάταξη τύπου (α) σφαίρας-δίσκου, με σφαίρα Al_2O_3 , (β) στυλίσκου-δίσκου, με κοπτικό άκρο τόνρευσης με επικάλυψη c-BN.
- Σχήμα 3.17** Προσδιορισμός της γεωμετρίας της αύλακας φθοράς, με τη χρήση μηχανικού τραχύμετρου (Taylor–Hobson)
- Σχήμα 4.1** Σύστημα ψύξης (ως φορέας δοκιμίων) εντός του θαλάμου δοκιμών.
- Σχήμα 4.2** Ανεπιτυχές αποτέλεσμα λόγω της ταχείας απαγωγής της θερμότητας από την περιοχή πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (πλάκα χαλκού ως φορέας δοκιμίων).
- Σχήμα 4.3** Τυπικά διαγράμματα καταγραφών της χρονικής εξέλιξης των παραμέτρων της «ηλιακής» κατεργασίας. Αφορά την ακτινοβόληση δοκιμίων με εναπόθεση κόνεως TiC.
- Σχήμα 4.4** (α) Εξέλιξη της θερμοκρασίας της κατεργαζόμενης επιφάνειας. (β) Επιφάνεια με διάσπαρτους πόρους και ρωγμές. (γ) Αποφλοίωση της επιφάνειας (μακρογραφίες). Αφορά την ακτινοβόληση δοκιμίων με εναπόθεση κόνεως TiC.

- Σχήμα 4.5** Διαδοχικές μεγεθύνσεις επιτυχούς «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος συνθέτου με διασπορά καρβιδίων του TiC μετά από έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και παραμονή σε θερμοκρασία υψηλότερη των 1440°C για ~1053s (μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου).
- Σχήμα 4.6** Μικρογραφίες ενδεικτικές της: (α) καλής διεπιφάνειας με το μέταλλο βάσης, (β) καλής συνάφειας καρβιδίου-χαλύβδινης μήτρας και (γ) σημείων μικρο-θραύσης των σωματιδίων ενίσχυσης (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης) «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος συνθέτου με διασπορά καρβιδίων του TiC.
- Σχήμα 4.7** Προκαταρκτικές δοκιμές με προ-εναπόθεση κόνεως WC: «ηλιακό» επιφανειακό στρώμα μετά από κατεργασία που περιγράφεται από την κόκκινη (α) και την πράσινη (β) καμπύλη του διαγράμματος (γ). (γ) Εξέλιξη της θερμοκρασίας της επιφάνειας κατά την έκθεσή της σε ηλιακή ακτινοβολία.
- Σχήμα 4.8** Εξέλιξη του συντελεστή τριβής συναρτήσει των κύκλων ολίσθησης για «ηλιακά» σύνθετα επιφανειακά στρώματα με ενίσχυση σωματιδίων WC και TiC. Δοκιμές με κάθετο φορτίο 5 και 10N και χρήση ως ανταγωνιστικού (α) σφαίρας Al₂O₃ και (β) εργαλείου τόννευσης με επικάλυψη c-BN.
- Σχήμα 4.9** Εξέλιξη του συντελεστή φθοράς συναρτήσει των κύκλων ολίσθησης για «ηλιακά» σύνθετα επιφανειακά στρώματα με ενίσχυση σωματιδίων WC και TiC. Διακοπτόμενες δοκιμές με κάθετο φορτίο 5 και 10 N και χρήση ως ανταγωνιστικού (α) σφαίρας Al₂O₃ και (β) εργαλείου τόννευσης με επικάλυψη c-BN.
- Σχήμα 4.10** Εξέλιξη του συντελεστή φθοράς συναρτήσει των κύκλων ολίσθησης, επιφανειακού στρώματος ενισχυμένου με σωματίδια TiC, με (α) CSE και (β) συμβατική τεχνική FCAW, με ανταγωνιστικό υλικό σφαίρα Al₂O₃.
- Σχήμα 4.11** Επιφάνειες φθοράς συζυγών σωμάτων τριβοσυστήματος: «ηλιακό» σύνθετο με ενίσχυση σωματιδίων TiC/σφαίρα Al₂O₃: (α) Μακρογραφία δοκιμίου, μετά από δοκιμές (4) φορτίων, (β) Μικρογραφία κάτοψης τροχιάς φθοράς, (γ) Στερεογραφία της ανταγωνιστικής επιφάνειας.

- Σχήμα 4.12** Εικόνες στερεοσκοπίου των επιφανειακών στρωμάτων που ελήφθησαν με τις «ηλιακές» κατεργασίες που περιγράφονται από την γκρι (α) και τη ροζ (β) καμπύλη του Σχήματος 4.4.
- Σχήμα 4.13** Εικόνες οπτικού μικροσκοπίου των επιφανειακών στρωμάτων που ελήφθησαν με τις «ηλιακές» κατεργασίες που περιγράφονται από την πράσινη (α) και τη κίτρινη (β) καμπύλη του Σχήματος 4.4.
- Σχήμα 4.14** Καμπύλες μεταβολής της θερμοκρασίας της επιφάνειας κατεργασίας συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία.
- Σχήμα 4.15** Γραμμική αύξηση του πάχους του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος συναρτήσει της διάρκειας παραμονής της επιφάνειας σε τιμές θερμοκρασίας υψηλότερες της μέσης θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου βάσης.
- Σχήμα 4.16** Στάδια δημιουργίας «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος: (α) θέρμανση, (β) τήξη υποστρώματος, (γ) εγκλωβισμός σωματιδίων ενίσχυσης και ανάδευση της «λίμνης» τήξης και (δ) επαναστερεοποίηση της επιφάνειας του χαλύβδινου υποστρώματος, καθώς αυτή ενισχύεται από τη διασπορά εξωτερικά τροφοδοτούμενων σωματιδίων καρβιδίου.
- Σχήμα 5.1** «Ηλιακή» κατεργασία αντιπροσωπευτικού δοκιμίου με προαπόθεση κόνεως TiC: (α) Εξέλιξη της θερμοκρασίας της επιφάνειας του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, (β) Μεγέθυνση του επισημαινόμενου στο (α) τμήματος της καμπύλης (μετρήσεις οπτικού πυρόμετρου).
- Σχήμα 5.2** Μικροδομή του σύνθετου επιφανειακού στρώματος με διασπορά σωματιδίων TiC (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).
- Σχήμα 5.3** Μεμονωμένο σωματίδιο καρβιδίου του τιτανίου, όπου διακρίνεται η αποκοπή τμημάτων της περιμέτρου του (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).
- Σχήμα 5.4** Διμερές διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων Fe-Ti.
- Σχήμα 5.5** (α) Εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης ενός μεμονωμένου σωματιδίου καρβιδίου του τιτανίου και (β) αντίστοιχη στοιχειακή μικροανάλυση κατά μήκος της μεγαλύτερης διάστασής του.

- Σχήμα 5.6** Φάσμα περίθλασης ακτίνων X που αναδεικνύει την ύπαρξη των φάσεων TiC και φερρίτη στο «ηλιακό» επιφανειακό στρώμα που προέκυψε από την κατεργασία.
- Σχήμα 5.7** Οπτική μικρογραφία τριών αποτυπωμάτων σκληρομετρήσεων κατά Vickers (HV5).
- Σχήμα 5.8** Χαρακτηριστικά αποτυπώματα μικροσκληρομετρήσεων HV0.3: (α) υψηλών τιμών [5^η κλάση], (β) χαμηλών τιμών [1^η κλάση], (γ) ενδιάμεσων τιμών [2^η-4^η κλάση] και (δ) μη ορθή μέτρηση, απορριπτέα τιμή.
- Σχήμα 5.9** Εξέλιξη των συντελεστών (α) τριβής μ και (β) φθοράς k συναρτήσει των κύκλων ολίσθησης, σε διάταξη τύπου σφαίρας αλουμίνιας - δίσκου.
- Σχήμα 5.10** Εξέλιξη των συντελεστών (α) τριβής μ και (β) φθοράς k συναρτήσει των κύκλων ολίσθησης, σε τριβυσύστημα κοπτικού άκρου cBN- δίσκου.
- Σχήμα 5.11** Επιφάνεια φθοράς «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος με ενίσχυση σωματιδίων TiC: (α) συνολική αύλακα φθοράς, (β) κερματισμός των σωματιδίων ενίσχυσης και πλαστική παραμόρφωση της μεταλλικής μήτρας, (γ) μεμονωμένο κερματισμένο σωματίδιο και (δ) ενδείξεις πλαστικής παραμόρφωσης της μήτρας και εκρίζωσης κερματισμένων τμημάτων των σωματιδίων.
- Σχήμα 5.12** Χαρακτηριστικά της μικροδομής των συμβατικών επιγομώσεων FCAW: (α) μικρογραφία κάθετης τομής, όπου διακρίνεται η ομοιόμορφη διασπορά σωματιδίων TiC, πολύ μικρού μεγέθους (<10 μm) και (β) αντίστοιχο φάσμα περίθλασης ακτίνων X.
- Σχήμα 5.13** Εξέλιξη των συντελεστών (α) τριβής μ και (β) φθοράς k συναρτήσει των κύκλων ολίσθησης, έναντι σφαίρας Al₂O₃, των επιγομώσεων FCAW με διασπορά TiC.
- Σχήμα 5.14** Επιφάνεια φθοράς επιγόμωσης τεχνικής FCAW: (α), (β) συνολική αύλακα φθοράς και γραμμές λείανσης του επιφανειακού στρώματος και (γ) περιοχές τοπικής οξειδωσης του μετάλλου.
- Σχήμα 5.15** Αστοχία της κοπτικής ακμής ένθετου πλακιδίου c-BN.

- Σχήμα 6.1** Καμπύλες εξέλιξης της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της κατεργασίας μονού θερμικού κύκλου υπό αδρανή ατμόσφαιρα του συστήματος με προ-εναπόθεση κόνεως WC.
- Σχήμα 6.2** Μικρογραφία κάθετης τομής του επιφανειακού στρώματος με προ-εναπόθεση WC, μετά από «σύντομη» ηλιακή κατεργασία (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).
- Σχήμα 6.3** Μικροδομή των διακριτών περιοχών του επιφανειακού στρώματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2: (α) εξωτερική ζώνη, (β) εσωτερική ζώνη και (γ) διεπιφάνεια με το μέταλλο βάσης (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).
- Σχήμα 6.4** Μικρογραφία κάθετης τομής του επιφανειακού στρώματος με προ-εναπόθεση WC, μετά από «μακρά» ηλιακή κατεργασία (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).
- Σχήμα 6.5** (α) Μικρογραφία μεμονωμένων σωματιδίων της ανώτερης ζώνης του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος. (β) Μεγέθυνση της (α) στην περιοχή της διεπιφάνειας με τη μεταλλική μήτρα (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).
- Σχήμα 6.6** (α) Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης μεμονωμένου σωματιδίου της ανώτερης ζώνης του «ηλιακού επιφανειακού στρώματος και αντίστοιχοι χάρτες των κύριων μεταλλικών στοιχείων και (β) μικρογραφία στα όρια του σωματιδίου και αντίστοιχη στοιχειακή μικροανάλυση κατά μήκος της γραμμής που σημειώνεται.
- Σχήμα 6.7** Φάσμα περίθλασης ακτίνων X του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος με προ-εναπόθεση κόνεως WC, μετά από κατεργασία «σύντομης» διάρκειας.
- Σχήμα 6.8** Ηλιακή κατεργασία μακράς διάρκειας σε χημικά δραστική ατμόσφαιρα: (α) Εξέλιξη της θερμοκρασίας της επιφάνειας κατά την κατεργασία. (β) Μικροδομή κάθετης τομής του συνολικού «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).
- Σχήμα 6.9** (α) Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης μεμονωμένων σωματιδίων. (β) Στοιχειακή μικροανάλυση των δύο κύριων μεταλλικών στοιχείων (Fe, W) κατά μήκος της γραμμής που σημειώνεται στην (α).

- Σχήμα 6.10** Φάσμα περίθλασης ακτίνων X του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος που δημιουργήθηκε με κατεργασία «μακράς» διάρκειας σε χημικά δραστική ατμόσφαιρα αζώτου.
- Σχήμα 6.11** Θερμικός κύκλος δύο σταδίων υπό αδρανή ατμόσφαιρα.
- Σχήμα 6.12** Μικρογραφία κάθετης τομής του επιφανειακού στρώματος μετά από ηλιακή κατεργασία δύο σταδίων, όπου παρατηρείται συγκέντρωση διακριτών σωματιδίων στην κεντρική περιοχή της «λίμνης» του επαναστερεοποιημένου τήγματος (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).
- Σχήμα 6.13** Μεγέθυνση στην ενδιάμεση περιοχή του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος, όπου διακρίνεται ο σχεδόν πλήρης μετασχηματισμός των αρχικών σωματιδίων του καρβιδίου του βολφραμίου σε μικτό η-καρβίδιο (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και αντίστοιχη γραμμική στοιχειακή μικροανάλυση: Fe-κόκκινη και W-γαλάζια καμπύλη).
- Σχήμα 6.14** Μεγέθυνση στην ανώτερη ζώνη (εξωτερική περιοχή) του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος, όπου διακρίνεται η ύπαρξη σχηματισμών διαφορετικής μορφολογίας εντός της μεταλλικής μήτρας (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).
- Σχήμα 6.15** Μεγέθυνση στην κατώτερη ζώνη (εσωτερική περιοχή) του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος, όπου διακρίνεται η ύπαρξη ενός δικτύου κατακρημνισμάτων εντός της μεταλλικής μήτρας (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).
- Σχήμα 6.16** Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς Fe-W και θερμοκρασίες μετασχηματισμών, όπως υπολογίστηκαν από το National Physical Laboratory, UK.
- Σχήμα 6.17** Τριβολογική συμπεριφορά του σύνθετου επιστρώματος μετά από «σύντομη» περίοδο κατεργασία υπό αδρανή ατμόσφαιρα, υπό συνθήκες ξηράς ολίσθησης έναντι σφαίρας Al_2O_3 : (α) εξέλιξη του συντελεστή τριβής και (β) εξέλιξη του συντελεστή φθοράς, συναρτήσει του αριθμού περιστροφών (κατ' αναλογία του χρόνου δοκιμής και του μήκους ολίσθησης που διανύθηκε).

- Σχήμα 6.18** Τριβολογική συμπεριφορά του σύνθετου επιστρώματος μετά από «σύντομη» περίοδο κατεργασία υπό αδρανή ατμόσφαιρα, υπό συνθήκες ξηράς ολίσθησης έναντι ένθετου πλακιδίου επικαλυμμένο με c-BN: (α) εξέλιξη του συντελεστή τριβής και (β) εξέλιξη του συντελεστή φθοράς, συναρτήσει του αριθμού περιστροφών (κατ' αναλογία του χρόνου δοκιμής και του μήκους ολίσθησης που διανύθηκε).
- Σχήμα 6.19** Επιφάνειες φθοράς του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος με προ-εναπόθεση κόνεως WC, μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών ξηράς ολίσθησης με την επιβολή φορτίου (α) 5N και (β) 10N (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).
- Σχήμα 6.20** Επιφάνεια φθοράς του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος μετά από δοκιμή ολίσθησης με επιβαλλόμενο φορτίο 5N (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης): (α) συνολική εικόνα της αύλακας και (β) μεγέθυνση στην κεντρική περιοχή και ταυτοποίηση της μορφολογίας των διακριτών μικρο-δομικών χαρακτηριστικών του επιφανειακού στρώματος (Spectrum 1: δακτύλιος μετασχηματισμού, Spectrum 2: υπολειπόμενο καρβίδιο και Spectrum 3: μεταλλική μήτρα).
- Σχήμα 7.1** Εξέλιξη της θερμοκρασίας της κατεργαζόμενης επιφάνειας με προ-εναπόθεση κόνεως καρβιδίου του χρωμίου κατά τη διάρκεια ηλιακής κατεργασίας απλής έκθεσης σε ηλιακή ακτινοβολία σε αδρανή ατμόσφαιρα.
- Σχήμα 7.2** (α) Κάθετη τομή «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος με προ-εναπόθεση κόνεως καρβιδίου του χρωμίου και σύντομη έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και (β)-(δ) μεγεθύνσεις χαρακτηριστικών περιοχών (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).
- Σχήμα 7.3** (α) Κάθετη τομή «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος με προ-εναπόθεση κόνεως καρβιδίου του χρωμίου και ενδιάμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία. (β) Στοιχειακή μικροανάλυση κατά μήκος της ευθείας του (α) (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).

- Σχήμα 7.4** Ανάλυση με περίθλαση ακτίνων X του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος που ελήφθη μετά έκθεση στην ακτινοβολία, ενδιάμεσης διάρκειας.
- Σχήμα 7.5** Κάθετη τομή επιφανειακού στρώματος που ελήφθη με ηλιακή κατεργασία μακράς διάρκειας και μεγεθύνσεις σε επιλεγμένες περιοχές (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).
- Σχήμα 7.6** Κάθετη τομή επιφανειακού στρώματος που ελήφθη με ηλιακή κατεργασία μακράς διάρκειας. (α) και (β) Εικόνες οπτικού μικροσκοπίου όπου διακρίνεται η δενδριτική ανάπτυξη των κόκκων του στερεού διαλύματος Fe-Cr κατά τη στερεοποίηση. (γ) και (δ) Εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, όπου παρατηρείται η δημιουργία κατακρημνισμάτων στα όρια των κλάδων των δενδριτών.
- Σχήμα 7.7** Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος Fe-Cr.
- Σχήμα 7.8** Ηλιακή κατεργασία διπλού θερμικού κύκλου (διπλής έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία) σε αδρανή ατμόσφαιρα, με προεναπόθεση κόνεως καρβιδίου του χρωμίου.
- Σχήμα 7.9** (α) Κάθετη τομή του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος με προεναπόθεση κόνεως καρβιδίου του χρωμίου, μετά από κατεργασία διπλού θερμικού κύκλου σε αδρανή ατμόσφαιρα, (β) μεγέθυνση της περιοχής που σημειώνεται στο (α).
- Σχήμα 7.10** Μικροδομή της επιφανειακής ζώνης ανάπτυξης μετά από ηλιακή κατεργασία σε αδρανή ατμόσφαιρα: (α) εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου και (β) εικόνα οπτικού μικροσκοπίου.
- Σχήμα 7.11** Μεταβολή των τιμών της σκληρότητας (α) και της μικροσκληρότητας κατά Vickers (β) μικροσκληρότητας του σύνθετου «ηλιακού επιφανειακού στρώματος μετά από κατεργασία διπλού θερμικού κύκλου, συναρτήσει του βάθους από την επιφάνεια έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία.
- Σχήμα 7.12** Τριβολογική συμπεριφορά σύνθετου «ηλιακού» στρώματος μετά από διπλή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία υπό αδρανή ατμόσφαιρα, κατά τη ξηρά ολίσθηση έναντι σφαίρας Al_2O_3 : εξέλιξη των συντελεστών (α) τριβής μ και (β) φθοράς k .

Σχήμα 7.13 Μικρογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης της επιφάνειας φθοράς: (α) συνολική εικόνα της αύλακας φθοράς που αναπτύσσεται κατά τη διεύθυνση ολίσθησης με την επιβολή φορτίου 10 N, (β) μεγέθυνση στα όρια της αύλακας φθοράς, (γ) και (δ) διαδοχικές μεγεθύνσεις της επιφάνειας φθοράς στο μέσον της αύλακας, όπου αναδεικνύεται η συνέργεια των διακριτών μικρο-μηχανισμών φθοράς των πρωτογενών καρβιδίων (σημεία 1) και της μεταλλικής μήτρας (σημεία 2).

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Επιφανειακές κατεργασίες και δέσμες υψηλής ενέργειας

Οι αυξανόμενες απαιτήσεις για αντοχή των μετάλλων και των κραμάτων τους, σε συνθήκες με χαρακτηριστικά, όπως την υψηλή φόρτιση, την υψηλή θερμοκρασία και τη διάβρωση, έχουν επιφέρει μεγάλη ανάπτυξη στη τεχνολογία των Επιφανειακών Κατεργασιών (Surface Engineering). Η ανάπτυξη αυτή, ήταν και παραμένει δυναμική, διότι οι επιφανειακές κατεργασίες συνιστούν μια επιστήμη, που ανταποκρίνεται στις προσδοκίες των σύγχρονων τεχνικών επιστημονικών δεδομένων, εμπερικλείοντας την αποδοτικότητα της ενέργειας και των υλικών, καθώς και τη «φιλοπεριβαλλοντική» κουλτούρα, στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης.

Σύμφωνα με τους το [Burakowski and Wierzchon, \(1999\)](#), μέσω των επιφανειακών κατεργασιών, επιτυγχάνεται:

- Η δυνατότητα κατασκευής εργαλείων, εξαρτημάτων μηχανών και ολόκληρων συσκευών από υλικά «υποβαθμισμένων» ιδιοτήτων, συνήθως φθηνότερα, αλλά προσδίδοντας στην επιφάνειά τους βελτιωμένα χαρακτηριστικά λειτουργίας. Αυτό συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης υλικών και ενέργειας, που είναι απαραίτητη για την κατασκευή τους, διατηρώντας τα ίδια χαρακτηριστικά αντοχής και συνήθως καλύτερες τριβολογικές, αντιδιαβρωτικές και άλλες ιδιότητες.
- Η βελτίωση της αξιοπιστίας χρήσης εργαλείων, εξαρτημάτων μηχανών και συσκευών και τη μείωση των βλαβών αυτών. Ο κακός σχεδιασμός και οι ακατάλληλες συνθήκες λειτουργίας είναι η αιτία του 15% του χρόνου εργασιών συντήρησης, ενώ η ακατάλληλη επιλογή αλλά και η κακή κατασκευή των επιφανειακών στρωμάτων, ευθύνονται για το 85% των βλαβών.

- Η μείωση των ενεργειακών απωλειών λόγω τριβών, που επιφέρει η μείωση μάζας των κινούμενων μηχανικών εξαρτημάτων συσκευών και μηχανών, αλλά και η ενίσχυση των τριβολογικών ιδιοτήτων των κινούμενων μερών. Συνήθως, 15 έως 25% της παρεχόμενης ισχύος/ενέργειας δαπανάται για την υπέρβαση της αντίστασης τριβής, ενώ σε ορισμένους κλάδους της βιομηχανίας έως και 85% της παρεχόμενης ενέργειας, «χάνεται» με αυτόν τον τρόπο.
- Η μείωση της συχνότητας αντικατάστασης χρησιμοποιούμενων εργαλείων και εξαρτημάτων μηχανών, καθώς και η μείωση της συχνότητας επισκευών συντήρησης.
- Η μείωση κατά 15 έως 35% των απωλειών λόγω διάβρωσης, η οποία έχει μεγάλη σημασία, εφόσον γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ο αντίκτυπος της διάβρωσης στην οικονομία μπορεί να προσεγγίσει ακόμη και το 5% του Α.Ε.Π.
- Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από τη βιομηχανία, επειδή οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στις επιφανειακές κατεργασίες είναι συνήθως ενεργειακά αποδοτικές και οι τεχνικές υψηλής ενέργειας χρησιμοποιούνται μόνο για την επεξεργασία συγκεκριμένων σημείων και περιοχών μηχανικών εξαρτημάτων και εργαλείων, χωρίς την ανάγκη θέρμανσης ολόκληρης της μάζας του εξαρτήματος. Παράλληλα, ο χρόνος εφαρμογής τέτοιων μεθόδων στο προς κατεργασία εξάρτημα/εργαλείο είναι εξαιρετικά μικρός, συνήθως κάποια δευτερόλεπτα.
- Η ελαχιστοποίηση της ρύπανσης του περιβάλλοντος, κυρίως λόγω (α) της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας, από διάφορους κλάδους της βιομηχανίας και (β) τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας με συγκεκριμένες μεθόδους, που χρησιμοποιούνται στις επιφανειακές κατεργασίες, με συνέπεια τη δημιουργία χαμηλών ποσοτήτων αποβλήτων, λυμάτων, καπνού, σκόνης και βιομηχανικών αερίων. Ακόμα και η σκόνη, μπορεί να διαχωριστεί από τα αέρια και να ανακυκλωθεί. Αυτά τα αέρια συνήθως περιέχουν σχετικά μικρές ποσότητες συστατικών, που είναι έμμεσα επιβλαβή λόγω της επιδείνωσης του φαινομένου του θερμοκηπίου (CO₂, NH₃, φρέον, N₂O, O₃) ή το γεγονός ότι αποτελούν πηγή όξινης βροχής (SO₂, NO_x, πτητικοί υδρογονάνθρακες), υπερφορτώνουν το στρώμα του όζοντος της ατμόσφαιρας (χλωροανθρακικά, NH₄, NO_x) ή, τέλος, είναι άμεσα βλαβερά για τον ανθρώπινο οργανισμό, τα ζωικά και φυτικά είδη (SO₂, NO_x, οξειδία μολύβδου, ατμοί βαρέων μετάλλων).

Όπως προαναφέρθηκε, οι επιφανειακές κατεργασίες αποσκοπούν στην τροποποίηση της ποιότητας ή και της συμπεριφοράς του επιφανειακού στρώματος εξαρτημάτων και εργαλείων, το δε στρώμα, είναι πολύ μικρότερων διαστάσεων σε σχέση με το συνολικό μέγεθος του εξαρτήματος. Οποιαδήποτε κι αν είναι η τελική χρήση ενός επιφανειακά κατεργασμένου προϊόντος, δε θα πρέπει να αγνοείται ο ρόλος του βασικού μετάλλου, το οποίο αποτελεί τον κύριο «φορέα» των καταπονήσεων, που υφίσταται η κατασκευή και που θα πρέπει να είναι, ανάλογα με την εφαρμογή, στιβαρό ή ελαστικό ή δύσθραυστο ή μονωτικό. Σε ένα τέτοιο υπόστρωμα, η τροποποίηση της ποιότητας της επιφάνειάς του, έχει σαν στόχο είτε την προστασία της υπόλοιπης κατασκευής από ένα «εχθρικό» περιβάλλον λειτουργίας, είτε την πρόσδοση ιδιαίτερων χαρακτηριστικών.

Ειδικά σε μηχανολογικές εφαρμογές, οι επιφανειακές κατεργασίες ή οι επιφανειακές τροποποιήσεις (surface modifications) των μεταλλικών υλικών, αποσκοπούν στην προστασία της συνολικής κατασκευής έναντι:

- Φθοράς λόγω τριβής (friction wear), που προκαλείται από την επαφή και τη σχετική κίνηση της επιφάνειας του δομικού στοιχείου με τις συζυγείς επιφάνειες άλλων στερεών.
- Διάβρωσης (corrosion), όταν το δομικό στοιχείο θα πρέπει να λειτουργήσει σε υγρό περιβάλλον που ενδέχεται να περιέχει δραστικά ιόντα.
- Οξειδωσης (oxidation), όταν η επιφάνεια του δομικού στοιχείου πρόκειται να δεχθεί τη χημική δράση οξειδωτικών αερίων, η οποία ενεργοποιείται συνήθως σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες.
- Μηχανικής διάβρωσης (erosion), όταν η επιφάνεια του δομικού στοιχείου υφίσταται τη δράση ρευστών ή ρευστών που περιέχουν φυσαλίδες αερίων ή στερεά σωματίδια.
- Μηχανικής ή θερμικής κόπωσης (fatigue ή thermal fatigue), η οποία εκδηλώνεται με την έναρξη επιφανειακά της ρωγμάτωσης του δομικού στοιχείου, λόγω επιβολής εναλλασσόμενης μηχανικής φόρτισης ή μετατοπίσεων, ή λόγω της εναλλαγής θερμοκρασίας λειτουργίας της κατασκευής.

Οι τεχνικές αντιμετώπισης της φθοράς περιλαμβάνουν κατεργασίες κατά τις οποίες υλικό διαφορετικής χημικής σύστασης και διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων από το μέταλλο βάσης, με ιδιότητες τις επιθυμητές ιδιότητες επιφάνειας του τελικού αντικειμένου, εναποτίθεται σχηματίζοντας επιπρόσθετο στρώμα, το οποίο καλείται επίστρωμα (overlayer), ή επικάλυψη (coating), ή ακόμα και επιγύμωση (hard facing).

Ανάλογα τον τρόπο δράσης στη δημιουργία επιφανειακών στρωμάτων, όλες οι τεχνικές επιφανειακών τροποποιήσεων διακρίνονται σε έξι (6) κατηγορίες. Αυτές είναι:

- Μηχανικές.
- Θερμο-μηχανικές.
- Θερμικές.
- Θερμο-χημικές.
- Ηλεκτρο-χημικές και χημικές και
- Φυσικές.

Οι επιφανειακές κατεργασίες των μεταλλικών υλικών, εκτός από τις συμβατικές μεθόδους, πραγματοποιούνται κυρίως με δέσμες υψηλής πυκνότητας ενέργειας. Για παράδειγμα, η χρήση δέσμης laser για την πραγματοποίηση των επιφανειακών κατεργασιών, έχει γίνει πλέον δημοφιλής, εξαιτίας των ξεχωριστών ιδιοτήτων της δέσμης αυτής. Κάθε κατηγορία τεχνικής επιφανειακής τροποποίησης επιτρέπει τη λήψη συγκεκριμένου τύπου επιφανειακού στρώματος, συγκεκριμένου πάχους και εφαρμογής, ενώ μπορεί να υποδιαιρεθεί σε περισσότερους τύπους (Σχήμα 1.1).

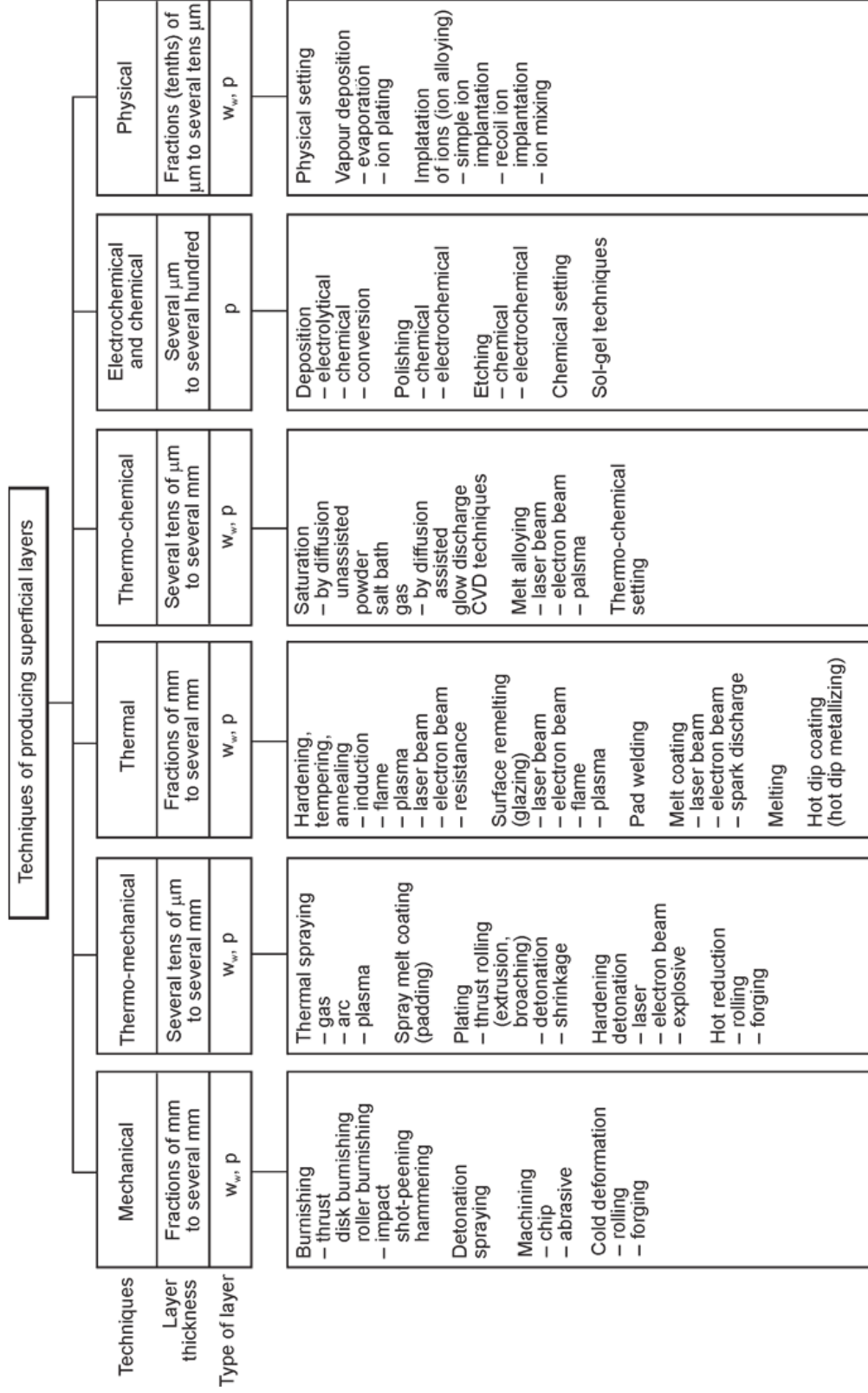
Ωστόσο, οι νέες αυτές μέθοδοι έχουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Η υψηλής πυκνότητας ενέργεια εφαρμόζεται σε μικρή επιφάνεια, συνήθως μικρότερη από 5mm, οπότε πρέπει να πραγματοποιηθούν διαδοχικά περάσματα για να κατεργαστούν μεγάλες επιφάνειες. Αυτό όμως μπορεί να μειώσει τη σκληρότητα των επικαλυπτόμενων επιφανειών, καθώς επίσης και τις τριβολογικές τους ιδιότητες. Επιπρόσθετα, τέτοιες διατάξεις χαρακτηρίζονται από το υψηλό κόστος τους, τόσο απόκτησης και εγκατάστασης, όσο και συντήρησης, ενώ η αποδοτικότητά τους κυμαίνεται συνήθως στο 10%, γεγονός που καταδεικνύει την κατανάλωση μεγάλων ποσών ενέργειας.

1.2 Το πρόβλημα και η προτεινόμενη λύση του

Σύγχρονες κοινωνικές και πολιτικές τάσεις, επιβάλλουν την περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, αφού συνιστούν μέρος της φιλοσοφίας για «πράσινη οικονομία», που βασίζεται στις νέες βιομηχανικές πολιτικές, με στόχο την απόδοση ποιότητας στις βιομηχανίες των ανεπτυγμένων κρατών, αλλά και με σκοπό την προστασία της φύσης, τη διαφύλαξη της υγείας και της ποιότητας ζωής των ανθρώπων, που ζουν σε αυτά τα κράτη. Γι' αυτό το λόγο, η αναζήτηση νέων πηγών ενέργειας και η αποτελεσματική χρήση της, εντοπίζονται στις ερευνητικές πολιτικές διαφόρων χωρών, ειδικότερα των πιο ανεπτυγμένων [Fernandez *et al.*, 2018].

Μια φυσική και τεχνολογικά πιο απλή, πηγή ενέργειας η οποία μπορεί να δώσει δέσμη σχετικά υψηλής πυκνότητας ενέργειας για την επιφανειακή κατεργασία των υλικών, είναι η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια (Concentrated Solar Energy – CSE). Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα καθώς χρησιμοποιεί φυσική πηγή ενέργειας, δεν παράγει απόβλητα στο περιβάλλον, κυρίως CO₂, οι εγκαταστάσεις δεν έχουν υψηλό κόστος [Flamant *et al.*, 1999] και είναι δυνατόν να κατεργαστούν μεγάλες επιφάνειες με αρκετά υψηλή πυκνότητα ενέργειας (Πίνακες 1.1 και 1.2). Εξ' αιτίας του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, η απορρόφηση της ενέργειας είναι μεγάλη σε σύγκριση με άλλες διατάξεις, όπως για παράδειγμα διατάξεις, που χρησιμοποιούν μονοχρωματικό φάσμα (lasers).

Επιπροσθέτως, σύμφωνα με τους Flamant *et al.*, (1999) και τους Ciobanu and Monescu (2021), το κόστος και η απόδοση του κεφαλαίου θα μπορούσαν να είναι ανταγωνιστικά για τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια σε σύγκριση με τις τεχνολογίες laser και πλάσματος. Ωστόσο, το δίδυμο Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια – υλικά εξακολουθεί να είναι μια μη «ώριμη» τεχνολογία.



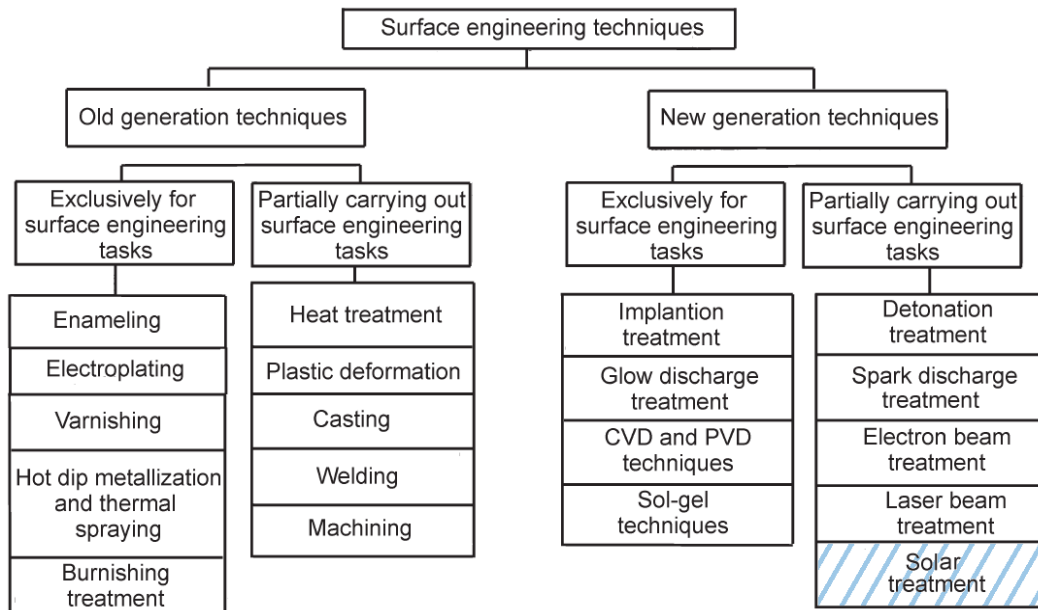
Σχήμα 1.1 Ταξινόμηση των τεχνικών επιφανειακών τροποποιήσεων με βάση τη μέθοδο δημιουργίας τους [Burakowski and Wierzbom, 1999].

Πίνακας 1.1 Σύγκριση παραμέτρων των τεχνικών κατεργασίας υλικών [Flamant *et al.*, 1999].

Technology	Typical power (kW)	Flux density (W/cm ²)	Surface area (cm ²)	Temperature (°K)	Overall efficiency (%)	Capital cost (kECU/kW)
Laser					≈ 2	50-100 (1-5kW)
<i>CO₂</i>	2-5	10 ³ -10 ⁶	< 1	> 5000		
<i>Nd-YAG</i>	≈ 0.5	10 ⁵ -10 ⁹ (pulsed)	< 1	> 5000		
Plasma	10-2000	10 ⁴	≈ 100	> 5000	25	0,8-1,5 (50-1000kW)
Solar furnace	≤1000	10 ³	≈ 1000	≤ 3500	60	1,2-1,8 (50-1000kW)

Πίνακας 1.2 Σύγκριση πυκνοτήτων ενέργειας, που χρησιμοποιούνται στον τομέα των επιφανειακών κατεργασιών [Burakowski and Wierzchom, 1999].

Type of technology	Method of heating	Power density (W/cm ²)	
		Possible to achieve	Most frequently used in practice
No beam technologies	Glow	10 10 ⁻²	0.2 0.7
	Indirect resistance- controlled atmosphere- fluidized bed	0.5 10 2 • (10 10 ⁻²)	0.5 1.5 3 • 10 ¹
	Direct resistance	10 ² 10 ⁻⁵	2 6
	Radiant	1.0 3 • 10 ⁻²	5 10
	Electrode	up to 10 ⁻²	5 5 • 10
	Welding torch	5 • 10 ² 10 ⁻⁴	10 ² 10 ⁻³
	Induction	up to 2 • 10 ⁻⁴	10 ³
	Arc	10 ² 10 ⁻⁴	10 ⁵
Beam technologies	Plasmatron	5 • 10 ⁻⁵	1.0 6 • 10 ⁻²
	Ion	6 • 10 ⁻²	
	Electron: - low energy	up to 10 ⁻⁴	10 10 ⁻²
	- high energy	up to 10 ⁻¹²	10 ³ 10 ⁻⁹
	Laser: - continuous	10 ⁸	10 ³ 10 ⁻⁶
- millisecond impulse	10 ⁹	10 ³ 10 ⁻⁸	
- nanosecond impulse	4 • 10 ⁻¹⁵ 10 ⁻²⁰	10 ³ 10 ⁻¹⁰	
For comparison	- solar constant	0.1367	
	- solar (no condensation)	0.1	
	- solar (condensed by lens)	5 • 10 ⁻³ and higher	10 ²



Σχήμα 1.2 Η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, ως εναλλακτική πηγή ενέργειας/θερμότητας στον τομέα των επιφανειακών κατεργασιών [παρέμβαση του συγγραφέα από Burakowski and Wierzchom, 1999].

Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση

Ιστορικά, η πρώτη χρήση της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας, βρίσκεται στην Ρωμαϊκή εποχή. Κατά τη διάρκεια της Πολιορκίας των Συρακουσών (Β΄ Καρχηδονιακός Πόλεμος, 215 π.Χ.) ο θρύλος αναφέρει ότι ο Αρχιμήδης χρησιμοποίησε καθρέφτες (Σχήμα 1.3) για να καταστρέψει τον ρωμαϊκό ναυτικό στόλο, που αποτελείτο από ξύλινα πλοία [Rossi, 2010]. Ωστόσο, η πρώτη πραγματική και πιο σημαντική εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας στην επεξεργασία υλικών είναι η ξήρανση πλίνθων στον ήλιο, ηλιακή μέθοδο χαμηλής θερμοκρασίας, που εφαρμόζεται για πάρα πολλά χρόνια [Revuelta-Acosta, 2010 and Rodríguez *et al.*, 2006].

Εν συνεχεία, οι πρώτες έρευνες σχετικά με τις πιθανές εφαρμογές της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας, χρονολογούνται τον 17^ο αιώνα. Ο μαθηματικός Ehrenfried Walter Von Tschirnhaus σχεδίασε, κατασκεύασε και εργάστηκε με φακούς και καθρέφτες με στόχο τη συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας, έτηξε χάλυβα και κατασκεύασε κεραμικά (πορσελάνη) με χρήση ηλιακής ενέργειας [Gosh, 1991, Newcomb, 2009, Mc Donald *et al.*, 1982].



Σχήμα 1.3 Πυρπόληση ξύλινων ρωμαϊκών πλοίων στις Συρακούσες (214 - 212 π.Χ.).

Άλλοι ερευνητές εργάστηκαν με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια κατά τη Σύγχρονη Περίοδο: Ο Cassini (17^{ος} αιώνας) σχεδίασε έναν φακό με διάμετρο 1m για να φτάσει σε θερμοκρασίες ~1000°C και έτηξε χάλυβα και ασήμι μαζί. Ο Lavoisier (18^{ος} αιώνας) έτηξε χάλυβα και πλησίασε το σημείο τήξης της πλατίνας [Flamant *et al.*, 2010]. Ο Lavoisier απέδειξε ότι ήταν δυνατή η επεξεργασία μετάλλων σε ειδική ατμόσφαιρα, όπως το άζωτο [Flamant *et al.*, 2010]. Ο Felix Trombe χρησιμοποίησε ηλιακή ενέργεια με σκοπό την τήξη πυρίμαχων κεραμικών υψηλού σημείου τήξης (αλουμίνα, οξείδιο του χρωμίου, ζirkόνιο, κ.α.) μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο [Flamant *et al.*, 2010]. Την ίδια περίοδο, οι Tetsuo *et al.* (1957 and 1959) μελέτησαν την τήξη πολλών μεταλλικών οξειδίων.

Οι πρώτες βιομηχανικές εφαρμογές Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργεια στον τομέα των υλικών, επικεντρώθηκαν στη μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών σε υψηλών θερμοκρασιών συνθήκες. Για παράδειγμα, το σύστημα θερμικής προστασίας του διαστημικού αεροσκάφους Hermes, είχε δοκιμαστεί στις εγκαταστάσεις της Plataforma Solar de Almeria (PSA), στις αρχές της δεκαετίας του '90 [Martínez *et al.*, 1998, Van den Abeelen, 2017].

Άλλοι ερευνητές, που μελέτησαν τη συμπεριφορά ορισμένων υλικών υπό υψηλών θερμοκρασιών συνθήκες, είναι: (α) οι [D'Elia et al. \(2014\)](#), οι οποίοι χαρακτήρισαν λεπτούς κόκκους σκυροδέματος με βάση το καρβίδιο του πυριτίου (SiC), που χρησιμοποιείται σε ακροφύσια, σε ηλιακό φούρνο ισχύος 2kW, υπό συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών οξείδωσης, (β) οι [Charpentier et al. \(2011\)](#), οι οποίοι μελέτησαν τις φυσικές, χημικές και εγγενείς ιδιότητες των πυρίμαχων υλικών, αφού υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια και (γ) οι [Kovacik et al. \(2014\)](#), οι οποίοι μελέτησαν τη συμπεριφορά σε «θερμικό σοκ» χάλυβα 37MnSi5 επικαλυμμένο με κεραμικό TiB₂, χρησιμοποιώντας τον κάθετο ηλιακό φούρνο ισχύος 5kW των εγκαταστάσεων Plataforma Solar de Almeria (PSA) στην Ισπανία.

Εκτός από τη μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών σε υψηλών θερμοκρασιών συνθήκες, η έρευνα για νέες χρήσεις της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας σε διεργασίες επεξεργασίας υλικών, έχει προκαλέσει μεγάλη απήχηση, ιδιαίτερα στην Ευρώπη, με συνεργασίες (Sollab, Alliance of European Laboratories for Research and Technology on Solar Concentrating Systems, 2004) και πανευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα, όπως το “Solar Facilities for the European Research Area”, SFERA I (2009-13), II (2014-17) and III (2019-22). Το ενδιαφέρον για τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια εντοπίζεται και σε άλλες χώρες, όπως στην Αυστραλία, περιοχή μεγάλης διαθεσιμότητας ηλιακής ακτινοβολίας, που σαν παράδειγμα, οι [Eglinton et al. \(2013\)](#) ενασχολήθηκαν με τις πιθανές εφαρμογές της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας στις βιομηχανίες εξόρυξης ορυκτών και μεταλλουργίας της Αυστραλίας.

1.3 Στόχοι, μεθοδολογία και καινοτομία έρευνας

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ηλιακή ενέργεια είναι μία από τις πιο ελπιδοφόρες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς οι θερμοκρασίες, που είναι δυνατόν να επιτευχθούν, όταν η ηλιακή ενέργεια συγκεντρωθεί σωστά, επιτρέπουν την τήξη ακόμη και των κεραμικών υλικών, και με αυτόν τον τρόπο δύναται να θεωρηθεί ως «άπειρος» ο αριθμός εφαρμογών χρήσης της ηλιακής ενέργειας, στην επιστήμη των υλικών και στη μεταλλουργία.

Αν και στις μέρες μας, το ενδιαφέρον για την ηλιακή ενέργεια επικεντρώνεται κυρίως στον τομέα της ενέργειας, τόσο της θερμικής όσο και της ηλεκτρικής, έχουν υλοποιηθεί αρκετές έρευνες (Κεφάλαιο 2), κυρίως τα τελευταία είκοσι (20) χρόνια, όπου διερευνώνται οι πιθανές εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας στην επιστήμη των υλικών. Το πρόβλημα που παρατηρείται στις περισσότερες από αυτές τις έρευνες, είναι η έλλειψη συνέχειας, που σημαίνει ότι ένα συγκεκριμένο πεδίο διερευνάται και στη συνέχεια εγκαταλείπεται, χωρίς προσπάθεια κλιμάκωσης σε πιλοτική μονάδα παραγωγής ή σε βιομηχανική/εμπορική κλίμακα.

Ο λόγος για την μη περαιτέρω επιστημονική διερεύνηση του θέματος ίσως είναι η έλλειψη ενδιαφέροντος από τις βιομηχανίες ή η έλλειψη ελπιδοφόρων αποτελεσμάτων, αν και δεν έχει παρατηρηθεί γενικά αυτό το ζήτημα. Στην πραγματικότητα, μόνο λίγα ερευνητικά έργα προέκυψαν από εργαστηριακή σε πιλοτική κλίμακα και κανένα από αυτά δεν χρησιμοποιείται εμπορικά σε βιομηχανική κλίμακα. Παράλληλα, άλλοι παράγοντες, που θα μπορούσαν να περιορίσουν τις πιθανές εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας στην επιστήμη των υλικών και στη μεταλλουργία, είναι η αβεβαιότητα διαθεσιμότητας της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς υπάρχουν πολλά μέρη που προσφέρουν μέσο ετήσιο αριθμό ωρών ηλιοφάνειας με υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά δεν μπορούν να διασφαλίσουν τις συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες καθημερινά.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα παραπάνω επιστημονικά δεδομένα, οι επιδιωκόμενοι στόχοι της παρούσας διδακτορικής διατριβής, συνιστούν τα κάτωθι:

- Η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας, για τη δημιουργία επιφανειακών στρωμάτων με ενίσχυση σωματιδίων.
- Η δημιουργία επιφανειακών στρωμάτων με ενίσχυση σωματιδίων καρβιδίων του τιτανίου (TiC), του βολφραμίου (WC) και του χρωμίου (Cr₂C₃).
- Η διερεύνηση των παραμέτρων εκείνων, που επηρεάζουν τη δημιουργία νέων υλικών, με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας
- Η βελτιστοποίηση των παραπάνω παραμέτρων, με στόχο τη δημιουργία κραμάτωσης με ποιοτικά μορφολογικά χαρακτηριστικά μικροδομής και καλή

συνάφεια με το υπόστρωμα.

- Η μελέτη διαφόρων χαρακτηριστικών (μικροδομή, σκληρότητα, τριβολογική συμπεριφορά και αντίσταση στη φθορά), των νέων «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων και τέλος,
- Η σύγκριση των παραπάνω χαρακτηριστικών με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά επιφανειακών στρωμάτων, δημιουργημένων με τη συμβατική τεχνική επιγόμεσης FCAW.

Συνεπώς, στο πλαίσιο της παρούσης διδακτορικής διατριβής, πειράματα με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας υλοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις της Plataforma Solar de Almería (PSA), στην Ισπανία, με τρεις αποστολές, καθεμιά διάρκειας δύο εβδομάδων, στο πλαίσιο έργου συνεργασίας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (*πρώην Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ.*) και του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, με κοινό τίτλο “Anti - wear carbide - based coatings using concentrated solar energy/ CarbiSol”: PI 404300058 (2014), P1503060136 (2015) και P1602050194 (2016), χρηματοδοτούμενο από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα “Solar Facilities for the European Research Area, Second Phase - SFERA II”.

Οι επιγομώσεις, για σύγκριση με τα «ηλιακά» επιφανειακά στρώματα, με τη συμβατική τεχνική FCAW, καθώς και η τριβολογική απόδοση όλων των δημιουργημένων, «ηλιακών» και μη, σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων, υλοποιήθηκαν στα Εργαστήρια Συγκολλήσεων και Μηχανικής Επιφανειών αντίστοιχα, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Ο χαρακτηρισμός της μικροδομής, με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και με περίθλαση ακτίνων Χ, πραγματοποιήθηκε στο Τμήμα Φυσικής, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, οι παρατηρήσεις σε οπτικό μικροσκόπιο πραγματοποιήθηκαν στο Τμήμα Τεχνολογίας Υλικών, του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, ενώ οι μετρήσεις σκληρότητας, πραγματοποιήθηκαν στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σχετικά με την τεχνολογική καινοτομία της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής, πρέπει να επισημανθεί ότι κατά το παρελθόν δεν έχει αναφερθεί η δημιουργία υπέρ-σκληρων, μεγάλου πάχους, επιφανειακών στρωμάτων χαλύβδινης μήτρας με ενίσχυση σωματιδίων καρβιδίων με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας, ως εναλλακτική μορφή ενέργειας/ θερμότητας.

1.4 Περιεχόμενο της διατριβής

Η παρούσα διδακτορική διατριβή, συνίσταται από οκτώ (8) κεφάλαια, κατά την οποία (α) διερευνάται η δυνατότητα χρήσης της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας για τη δημιουργία επιφανειακών στρωμάτων χαλύβδινης μήτρας με ενίσχυση σωματιδίων, (β) δημιουργούνται τα προαναφερθέντα επιφανειακά στρώματα με ενίσχυση σωματιδίων καρβιδίων του τιτανίου (TiC), του βολφραμίου (WC) και του χρωμίου (Cr_2C_3) και (γ) συγκρίνονται οι ιδιότητες (μικροδομή, σκληρότητα, αντοχή σε τριβή και φθορά) των λαμβανόμενων «ηλιακών» σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων με αντίστοιχα επιφανειακά στρώματα (ή επιγομώσεις), δημιουργημένα με τη συμβατική τεχνική χρήσης βολταϊκού τόξου και σύρματος με πυρήνα κόψεως (Flux Cored Arc Welding-FCAW).

Στο παρόν (πρώτο) κεφάλαιο, αναδεικνύεται και περιγράφεται το πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει η παρούσα διδακτορική διατριβή και παρουσιάζονται οι στόχοι και η δομή της διατριβής, προκειμένου να παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τα ακόλουθα κεφάλαια και το περιεχόμενό τους.

Στο κεφάλαιο 2, βιβλιογραφική ανασκόπηση αποδεικνύει ότι έχει υλοποιηθεί σημαντικό πειραματικό έργο, στο οποίο θα πρέπει να βασιστεί η περαιτέρω χρήση της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας στη τεχνολογία (ή και κατεργασία) των υλικών, ειδικότερα στις επιφανειακές τροποποιήσεις.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται ο χρησιμοποιούμενος πειραματικός εξοπλισμός, τα υλικά που επιλέχθηκαν ως υποστρώματα, αλλά και τα διαφορετικά είδη των κόνεων που

επιλέχθηκαν για τη δημιουργία των σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων. Πρόκειται για υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές, και συχνά εντοπίζονται σε μεγάλο αριθμό αντίστοιχων βιβλιογραφικών αναφορών, στο πεδίο της δημιουργίας σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται όλες οι προκαταρτικές δοκιμές δημιουργίας των σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων με ενίσχυση σωματιδίων και χρήση της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας, πάντα ως εναλλακτική πηγή ενέργειας/θερμότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι προκαταρτικές αυτές δοκιμές, αποτέλεσαν σημαντικό στάδιο για την περαιτέρω ερευνητική διερεύνηση του θέματος, καθώς επιτεύχθηκε η ποσοτικοποίηση και η βελτιστοποίηση των παραμέτρων, που ελέγχουν την καινοτόμο «ηλιακή» κατεργασία.

Προκειμένου να αναδειχθεί η επίδραση της φύσης των καρβιδίων της ενίσχυσης στην αποτελεσματικότητα της νέας μεθόδου και τον προσδιορισμό των κρίσιμων σημείων που χρήζουν προσοχής ανά ποιότητα καρβιδίου, στα επόμενα κεφάλαια, μελετώνται και συγκρίνονται οι ιδιότητες (μικροδομή, σκληρότητα, αντοχή σε τριβή και φθορά) σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων, τα οποία παρήχθησαν σε χαλύβδινα υποστρώματα με προαπόθεση κόνεων καρβιδίων του τιτανίου (κεφάλαιο 5), του βολφραμίου (κεφάλαιο 6) και του χρωμίου (κεφάλαιο 7) με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας και συγκρίνονται με αντίστοιχα επιφανειακά στρώματα (ή επιγομώσεις), που έχουν δημιουργηθεί με τη συμβατική τεχνική χρήσης βολταϊκού τόξου και σύρματος με πυρήνα κόνεως FCAW. Αναλυτικότερα, εξετάζεται μεταλλογραφικά η ζώνη κατεργασίας, με μέσα οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, προσδιορίζεται η χημική σύσταση κατά βάθος της ζώνης αυτής, μετράται η σκληρότητά τους και προσδιορίζεται η αντοχή τους σε τριβή και φθορά, υπό συνθήκες ξηράς ολίσθησης.

Τέλος, το κεφάλαιο 8, περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις ολοκληρωμένες εργασίες στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής και προτείνονται θέματα που θα μπορούσαν να απασχολήσουν επόμενους ερευνητές, ως συνέχεια των ελπιδοφόρων αποτελεσμάτων της παρούσης έρευνας.

1.5 Βιβλιογραφία

- Charpentier, L., Dawi, K., Eck, J., Pierrat, B., Sans, J., Balat-Pichelin, M., 2011. Concentrated solar energy to study high temperature materials for space and energy. *J. Solar Energy Eng.*, 133 (3), 031005–031013.
- Ciobanu, I., Monescu, V., Advantages and limitations regarding the processing of materials in concentrated energy solar furnaces. 2021. *J. Recent* (63), 022–033.
- D’Elia, R., Bernhart, G., Cutard, T., Perandan, G., Balat-Pichelin, M., 2014. Preliminary test of silicon carbide based concretes for hybrid rocket nozzles in a solar furnace. *Acta Astronautica*, 99, 242–251.
- Eglinton, T., Hinkley, J., Beath, A., Dell’Amico, M., 2013. Potencial applications of concentrated solar thermal technologies in the Australian minerals processing and extractive metallurgical industry. *JOM* 65 (12), 1710–1720.
- Fernandez-Gonzalez, D., Ruiz-Bustinza, I., Gonzalez-Gasca, C., Pinuela Noval, J., Mochon-Castanos, 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, D., 1999. Solar processing of materials: Opportunities and new frontiers. *Solar Energy*, 66 (2), 117–132.
- Flamant, G. and Balat-Pichelin, M., 2010. Elaboration and testing of materials using concentrated solar energy, in *Solar Energy Conversion and Photoenergy Systems. Thermal Systems and Desalination Plants. Volume I*. In: Blanco Gálvez, J., Rodríguez, S.M., Delyannis, E., Belessiotis, V.G., Bhattacharya, S.C., Kumar, S. (Eds.), *Encyclopedia of Life Support Systems*. United Kingdom: Eolss Publishers Co., Ltd./ UNESCO, 363–389.
- Gosh, G.K., 1991. *Solar Energy, The Infinite Source*. APH Publishing Corporation, New Delhi.
- Kovacik, J., Emmer, S., Rodríguez, J., Cañadas, I., 2014. Solar Furnace: Thermal Shock Behaviour of TiB₂ Coating on Steel, *METAL* 2014, May 21st-23rd. Czech Republic, Brno.

- Martínez, D., Rodríguez, J., 1998. Tratamiento superficial de materiales mediante luz solar concentrada: una opción mediante energías renovables. *Revista de Metalurgia de Madrid*, 34 (2), 104–108.
- McDonald, D., Hunt, L.B., 1982. *A History of Platinum and its Allied Metals*, Hatton Garden, London: Ed. Johnson Matthey.
- Newcomb, S., 2009. *The World in a Crucible: Laboratory Practice and Geological Theory at the Beginning of Geology*. The Geological Society of America Inc, Boulder, Colorado.
- Rossi, C., 2010. Archimedes' cannons against the roman fleet?, *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 (editors Stephanos A. Paipetis, Marco Ceccarelli), London: Springer, 113–132.
- Revuelta-Acosta, J.D., García-Díaz, A., Soto-Zarazua, G.M., Rico-García, E., 2010. Adobe as sustainable material: A thermal performance. *J. Appl. Sci.* 10 (19), 2211–2216.
- Rodríguez, M.A., Soroza, B., 2006. Determination of the optimum composition of adobe brick for a school in Cuba. *Materiales de Construcción*, 56 (282), 53–62.
- Tadeusz Burakowski, Tadeusz Wierzchom, *Surface engineering of metals*, CRC Press, 1999.
- Tetsuo, N., Masao, M., and Choji, N., 1957. High temperature research in a solar furnace. I. On the fusion of metal oxides, *Bulletin of Reports of the Government Research Institute of Nagoya*, 6 (11), 663-672.
- Tetsuo, N., Masao, M., and Choji, N., 1959. High temperature research in a solar furnace. II. On the fusion of metal oxides, *Bulletin of Reports of the Government Research Institute of Nagoya*, 8 (1), 61–67.
- Van den Abeelen, L., 2017. *Spaceplane HERMES: Europe's Dream of Independent Manned Spaceflight*, 1st edition. Springer Praxis Books, Hilversum, The Netherlands.
- Venn, F., 2002. *The Oil Crisis*, New York, NY: Ed. Taylor and Francis.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική ανασκόπηση: Κατεργασίες με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας

2.1 Εισαγωγή

Η ορθολογική αξιοποίηση της ενέργειας συνιστά μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της ανθρωπότητας στον 21^ο αιώνα. Η ηλιακή ενέργεια είναι ο αστείρευτος ενεργειακός πόρος, που διατίθεται στην ανθρώπινη κοινωνία, ο οποίος είναι δέκα χιλιάδες φορές η συνολική ανάγκη του κόσμου για ενέργεια με 4×10^6 EJ/έτος [Sonawane and Raja, 2020]. Ωστόσο, η ηλιακή ενέργεια είναι η λιγότερο χρησιμοποιούμενη πηγή ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [Chen, 2011]. Εφαρμογές θερμοσυλλεκτών, που μελετήθηκαν από τον Kalogirou (2004), αποδεικνύουν ότι οι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται όποτε είναι αυτό εφικτό. Οι Lewis *et al.* (2005) παρατήρησαν ότι η ηλιακή ενέργεια δεν χρησιμοποιείται πλήρως. Ο Kalogirou (2009) παρατήρησε ότι η ηλιακή ενέργεια είναι οικονομικά αποδοτικότερη σε σύγκριση με το υψηλού κόστους πετρέλαιο.

Για επιφανειακές κατεργασίες υψηλών θερμοκρασιών, οι Herranz and Rodriguez (2010) διαπίστωσαν ότι η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια αποτελεί μία ισχυρή εναλλακτική λύση έναντι των συμβατικών δεσμών ενέργειας, με ήπιες προς το περιβάλλον τεχνολογίες και χαμηλότερο συγκριτικά κόστος. Οι Charpentier *et al.* (2011) μελέτησαν τη χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας για τη μελέτη των πυρίμαχων υλικών σχετικά με τις χημικές και φυσικές συμπεριφορές τους και τις εγγενείς ιδιότητές τους, με ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Οι Llorente, Ballestrin and Vazquez (2011) ανέπτυξαν μια μικρής κλίμακας και χαμηλού κόστους συσκευή Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας για επεξεργασία υλικών. Οι Rojas-Morin *et al.* (2013) εφάρμοσαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια από τον παραβολικό συλλέκτη, για τη θερμική επεξεργασία δοκιμίου.

Οι Baharoon *et al.* (2015) παρατήρησαν ότι η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια μπορεί να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα, όπως σε ένα συμβατικό εργοστάσιο και να διατηρήσει τη συνεχή λειτουργία του. Οι Flamant and Balat-Pichelin (2016) μελέτησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για τη επιφανειακή επεξεργασία υλικών, δοκιμές υλικών, καθαρισμό και τήξη όγκου υλικών και βρήκαν πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Ο Francis and Bupesh Raja (2015) υποστήριξαν τη χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας για υψηλών θερμοκρασιών εφαρμογές. Οι Sonawane and Bupesh Raja (2017) πραγματοποίησαν επισκόπηση της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας και των εφαρμογών της και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, αφενός, δύναται να χρησιμοποιηθεί για διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας υλικών, αφετέρου, θα μπορούσε να προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη.

Η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, για την επεξεργασία υλικών, χρησιμοποιείται για διεργασίες όπως:

- Επιφανειακής σκλήρυνσης.
- Δημιουργίας επιφανειακών στρωμάτων/επικαλύψεων.
- Πυροσυσσωμάτωσης.
- Εναζώτωσης.
- Συνθέσεων και
- Συγκολλήσεων.

2.2 Οι ηλιακοί φούρνοι

Στις περισσότερες εφαρμογές επεξεργασίας υλικών, για τη συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας, χρησιμοποιούνται ηλιακοί φούρνοι (solar furnaces). Πιο οικονομικές και μικρού μεγέθους εγκαταστάσεις φακών Fresnel, για τη συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας, χρησιμοποιούνται επίσης για την επεξεργασία υλικών [Fernandez *et al.*, 2018].

Αρχικά, θα προσπαθήσουμε να διερευνήσουμε από που προήλθε η εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας στον τομέα της επιστήμης των υλικών. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι περισσότεροι σύγχρονοι ηλιακοί φούρνοι και οι ηλιακές εγκαταστάσεις κατασκευάστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του '70 και στις αρχές της δεκαετίας του '80, στο πλαίσιο ενεργειακής κρίσης (πετρελαϊκή κρίση 1973 και 1979). Πρέπει παράλληλα να συνυπολογιστεί ότι οι ηλιακοί φούρνοι και οι ηλιακές εγκαταστάσεις κατασκευάστηκαν αρχικά με σκοπό την αναζήτηση νέων πηγών ενέργειας, σε ένα πλαίσιο υψηλών τιμών πετρελαίου.

Πριν την πετρελαϊκή κρίση (1973 και 1979), υπήρχαν αρκετές ηλιακές εγκαταστάσεις, οι πιο σημαντικές από τις οποίες ήταν αυτές που πρότεινε ο Felix Trombe και κατασκευάστηκαν μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο στη Γαλλία. Οι Felix Trombe, Marc Foex και Charlotte Henry La Blanchetais ξεκίνησαν ξανά τις έρευνες του Lavoisier το χρονικό διάστημα από 1946 έως 1949 στο Meudon (Γαλλία) με την κατασκευή ενός παραβολικού συλλέκτη ισχύος 2kW, που χρησιμοποιήθηκε στη χημεία και τη μεταλλουργία υψηλών θερμοκρασιών. Μετά από αυτόν, κατασκευάστηκε ο ηλιακός φούρνος ισχύος 50kW του Mont Sant Louis το 1949 [Fernandez *et al.*, 2018].

Ωστόσο, σύμφωνα με τους Herranz *et al.* (2010) και τους Konstandopoulos *et al.* (2012) οι περισσότερες από τις ηλιακές εγκαταστάσεις κατασκευάστηκαν μετά την πρώτη ενεργειακή κρίση και συνοψίζονται παρακάτω:

- PROMES (Procédés, Matériaux et Énergie Solaire, CNRS)
Τέλη δεκαετίας '60 κατασκευάστηκαν ηλιακοί φούρνοι ισχύος 0,9kW, 1,5kW, 6kW και 1MW. Θεωρείται το κύριο ερευνητικό κέντρο στο οποίο μελετάται το δίδυμο Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια & υλικά (Odeillo - Γαλλία).
- PSA (Plataforma Solar de Almería)
Αρχές δεκαετίας '80, λειτούργησε ηλιακός φούρνος ισχύος 60kW και ηλιακός πύργος ισχύος 3360-7000kW (Αλμερία - Ισπανία).
- CENIM-CSIC και UCLM. Λειτούργησε από τη δεκαετία του '90, με βασικό ερευνητικό/πειραματικό προσανατολισμό τον εξοπλισμό φακών Fresnel ισχύος 0,6kW.

- Ο ηλιακός φούρνος του Ουζμπεκιστάν (κατασκευάστηκε το 1981, 1MW).
- Ηλιακός φούρνος υψηλής ροής στο DLR (German Aerospace Center) στην Κολωνία-Πόρτ (1994, ισχύς έως 22kW, [Herranz and Rodríguez, 2010](#)), με σημαντική εμπειρία στις δοκιμές υλικών.
- Εργαστήριο Ηλιακής Τεχνολογίας στο Ινστιτούτο Paul Scherrer (PSI), που ιδρύθηκε το 1988 στο Villigen (Ελβετία), περιλαμβάνει τον ηλιακό φούρνο High-Flux (1997, 40kW) και το ηλιακό πιλοτικό εργοστάσιο 300kW (η ανάθεση έγινε το 2005, έργο της ΕΕ SOLZINC) με σκοπό την πραγματοποίηση της ανθρακοθερμικής μείωσης του οξειδίου του ψευδαργύρου. Παράλληλα, λειτουργεί ηλιακό πιλοτικό εργοστάσιο ισχύος 100kW (η ανάθεση έγινε το 2011, έργο BFE Solar2Zinc) για τη θερμική διάσπαση του οξειδίου του ψευδαργύρου για την παραγωγή ψευδαργύρου και αερίου σύνθεσης.
- Το Ινστιτούτο Επιστημών Weizmann του Ισραήλ (ηλιακός πύργος 3MW, από τα τέλη της δεκαετίας του '80 και ηλιακός φούρνος 50kW από τις αρχές της δεκαετίας του '80).
- National Solar Thermal Test Facility (NSTTF), που διαχειρίζεται η Sandia National Laboratories για το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (1979, ηλιακός φούρνος 16 kW, [\[Herranz and Rodríguez, 2010\]](#)).
- Το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL) (1977), διαθέτει ηλιακό φούρνο 10kW υψηλής πυκνότητας σε λειτουργία από το 1990 στο Golden (Κολοράδο).
- Το Ινστιτούτο Ενεργειακής Έρευνας της Κορέας (KIER), (21ος αιώνας, ηλιακός φούρνος 40kW - ηλιακός συλλέκτης τύπου δίσκου 10 kW), εξειδικεύεται κυρίως στις ηλιακές εφαρμογές στον τομέα της ενέργειας.
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), (21ος αιώνας, ηλιακός πύργος 500kW) επικεντρώνεται κυρίως στις ηλιακές εφαρμογές στον ενεργειακό τομέα [\[Konstandopoulos et al., 2012\]](#).

2.3 Επιφανειακή σκλήρυνση με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια

Δοκιμές σκλήρυνσης χάλυβα με φακό Fresnel στο Instituto de Energias Renovables (IER, Madrid, Spain) και στον ηλιακό πύργο στις εγκαταστάσεις της Plataforma Solar de Almeria (PSA, Ισπανία) πραγματοποιήθηκαν από τους Rodriguez, Vazquez and de Damborenea (1993). Επιτεύχθηκαν ικανοποιητικά αποτελέσματα για τη διάχυση άνθρακα. Από τις δύο διαθέσιμες επιλογές για τη χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας για σκλήρυνση του χάλυβα, ο φακός Fresnel ήταν η φθηνότερη εγκατάσταση ενώ το μέγεθος του φακού περιορίζει τη μέγιστη ισχύ του. Η σκλήρυνση επιφανειών σε χάλυβα AISI 4140 με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας μελετήθηκε από τους G. Rodriguez *et al.* (1995) που διαπίστωσαν ότι η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια δίνει το ίδιο αποτέλεσμα με τις συμβατικές τεχνικές για τη σκλήρυνση επιφανειών. Η επιφανειακή σκλήρυνση του χάλυβα 40CrMo4 με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια αναλύθηκε από τους Rodriguez, de Damborenea and Vazquez (1997), οι οποίοι έλαβαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα σχετικά με τις ιδιότητες μικροδομής του υλικού. Ο χρόνος επεξεργασίας ήταν λιγότερο από 30s και η ζώνη σκλήρυνσης με βάθος από 1 έως 10mm. Η σκλήρυνση χαλύβδινων επιφανειών με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια βρέθηκε ότι είναι οικονομικά αποδοτική από τους Flamant *et al.* (1999).

Οι Pantelis, Psyllaki and Sarafoglou (2002) χρησιμοποίησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για την επιφανειακή σκλήρυνση χάλυβα και βρήκαν ότι η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια μπορεί να ανταγωνιστεί τις συμβατικές μεθόδους επιφανειακής σκλήρυνσης. Οι Sierra and Vazquez (2005) πραγματοποίησαν επιφανειακές τροποποιήσεις υλικών με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, οι οποίες λήφθηκαν από μια φτηνή εγκατάσταση φακού Fresnel. Καθώς επιτεύχθηκε θερμοκρασία 1500 - 2000°C σε λίγα δευτερόλεπτα, οι επεξεργασίες των υλικών ολοκληρώθηκαν σε λίγα λεπτά.

Οι Llorente and Vazquez (2009) παρουσίασαν μια εγκατάσταση μικρής κλίμακας και χαμηλού κόστους, το σύστημα συγκέντρωσης διπλών φακών Fresnel, με συντελεστή συγκέντρωσης 1000x για επιφανειακές ή ολικές σκληρύνσεις χάλυβα.

Οι [Herranz and Rodriguez \(2010\)](#) επεξεργάστηκαν εκκεντροφόρο άξονα με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας και έλαβαν μια μικρότερη ζώνη προσβεβλημένη από τη θερμότητα με πολύ μεγαλύτερη σκληρότητα. Βρήκαν ότι η επιφάνεια ύστερα από την ηλιακή επεξεργασία ήταν καλύτερη σε σύγκριση με την επιφάνεια που λήφθηκε ύστερα από επεξεργασία με τεχνική συγκόλλησης GTAW. Οι [Ruiz-Bustanza et al. \(2013\)](#) υποστήριξαν τη χρήση ηλιακών φούρνων για υψηλών θερμοκρασιών χημικές και μεταλλουργικές ανάγκες.

2.4 Δημιουργία επικαλύψεων με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια

Οι [Vazquez, Rodriguez and de Damborenea \(1991\)](#) μελέτησαν την επιφανειακή επεξεργασία ανθρακούχου χάλυβα με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας. Ανάλογα με το πάχος και την πυκνότητα ενέργειας, χρειάστηκαν λίγα δευτερόλεπτα ή λεπτά για να επιτευχθεί η μέγιστη θερμοκρασία των 1200°C. Όσον αφορά τον χρόνο, ήταν ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα της Συγκεντρωμένης Ηλιακή Ενέργεια για τη δημιουργία ή το σχηματισμό επιφανειακών κραμάτων.

Οι [Franck et al. \(1993\)](#) χρησιμοποίησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για τη δημιουργία σκληρών επικαλύψεων με φυσική εναπόθεση ατμών TiN.

Οι [Kennedy and Price \(2005\)](#) συζήτησαν για το Πρόγραμμα Τεχνολογιών Ηλιακής Ενέργειας, με στόχο τη μείωση του κόστους της παραβολικής τεχνολογίας μέσω της ηλιακής ενέργειας. Υλοποιήθηκαν μετρήσεις ανάκλασης και εκπομπής υψηλής θερμοκρασίας για την πραγματοποίηση διαδικασιών δοκιμής επιλεκτικής επικάλυψης για τις οπτικές τους ιδιότητες.

Οι [Pantelis and Griniari \(2005\)](#) μελέτησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για τήξη προ-αποτιθέμενης κεραμο-μεταλλικής κόνις WC-17% Co, καθώς και για την επανάτξη επικάλυψης ατμοσφαιρικού ψεκασμού πλάσματος σκόνης WC-17% Co σε ανοξείδωτο χάλυβα 304L. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν πολύ ενθαρρυντικά για τη χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας.

Οι [Pantelis, Psyllaki, and Sarafoglou \(2005\)](#) επιχείρησαν τη χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας για τη κραμάτωση της επιφάνειας ανοξείδωτου χάλυβα 304L με κόνι μολυβδαινίου. Διαπίστωσαν ότι το βάθος κραμάτωσης αυξάνεται αναλογικά με τον χρόνο έκθεσης στην ακτινοβολία και παρατηρήθηκε ότι η τελική σκληρότητα ήταν υψηλότερη από εκείνη του υποστρώματος.

Οι [Sanchez Bautista et al. \(2006\)](#) μελέτησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για τη δημιουργία διμεταλλικών επικαλύψεων. Οι συγκεκριμένες επικαλύψεις συνδυάζουν υψηλής θερμοκρασίας αυτό-πολλαπλασιαζόμενη σύνθεση και Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, επιτρέποντας τη σύνθεση με λιγότερη απαιτούμενη ενέργεια. Έλαβαν ομοιογενείς επιστρώσεις NiAl με χαμηλό πορώδες.

Οι [Ferriere et al. \(2006\)](#) χρησιμοποίησαν Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για τη δημιουργία επιστρώσεων μέσω τήξης προ-εναποθετημένης AISI316 κόνις σε χαλύβδινο υπόστρωμα. Διαπίστωσαν ότι η σύνθεση των επιστρώσεων δεν αντιστοιχούσε ποτέ με την αρχική σύνθεση του προϊόντος.

Οι [Sanchez Bautista, Rodriguez and Ferriere \(2008\)](#) πραγματοποίησαν ανάλυση FEM της διαδικασίας «ηλιακής» επίστρωσης/επένδυσης. Μελετήθηκε η «ηλιακή» επένδυση AISI 316 ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα σε χαμηλού άνθρακα χάλυβα AISI 1026. Το αποτέλεσμα ήταν μια βελτιστοποιημένη διαδικασία μέσω του μοντέλου FEM.

Οι [Herranz and Rodriguez \(2010\)](#) μελέτησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για να λάβουν και αυτοί «ηλιακές» επιστρώσεις. Καθώς επιτεύχθηκαν υψηλές θερμοκρασίες, πραγματοποιήθηκε επίστρωση NiAl σε ανοξείδωτο χάλυβα μέσω ταχείας τήξης και στερεοποίησης της κόνις. Ελήφθησαν ομοιογενείς, καλής πρόσφυσης και χαμηλού πορώδους επιστρώσεις, με αυξημένη αντοχή στη ηλεκτροχημική διάβρωση και με δενδριτικές μικροδομές.

2.5 Πυροσυσωμάτωση με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια

Οι *Zhilinska et al. (2003)* χρησιμοποίησαν Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για τη πυροσυσωμάτωση υλικών με βάση το νιτρίδιο του πυριτίου. Βρέθηκε ασήμαντη διαφορά στις ιδιότητες μεταξύ της πυροσυσωμάτωσης με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας και μιας συμβατικής πυροσυσωμάτωσης. Οι *Oliveira et al. (2005)* απέδειξαν τη χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας για την πυροσυσωμάτωση κεραμικών οξειδίων. Οι *Roman et al. (2008)* ανέλυσαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για την παραγωγή πυκνών κεραμικών σωμάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ακόμη και σε λιγότερο χρόνο, ελήφθησαν υψηλότεροι ρυθμοί θέρμανσης εν συγκρίσει με τη συμβατική πυροσυσωμάτωση. Τροποποιώντας τις παραμέτρους πυροσυσωμάτωσης, παρατηρήθηκαν αλλαγές στο μέγεθος των κόκκων της μήτρας και στο πορώδες.

Οι *Herranz and Rodriguez (2010)* χρησιμοποίησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για τη πυροσυσωμάτωση «πράσινων» μερών, που είχαν προηγουμένως ληφθεί με συμπίεση. Η συνολική διάρκεια της επεξεργασίας βρέθηκε να μειώνεται σημαντικά, ενώ ελήφθησαν δομές με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Οι *Herranz et al. (2013)* διερεύνησαν τις παραμέτρους επεξεργασίας Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας για τη πυροσυσωμάτωση κόνις χάλυβα υπό ατμόσφαιρα N_2 και H_2 . Και στις δύο ηλιακές εγκαταστάσεις, η καλύτερη πυκνότητα επιτεύχθηκε στους $1150^\circ C$ σε 1,5h για τον ηλιακό φούρνο και σε 0,5h στην περίπτωση της εγκατάστασης φακού Fresnel. Για την ίδια περίπτωση, στον συμβατικό φούρνο, η συνολική διάρκεια ήταν 10h. Τέλος η μικροσκληρότητα ήταν μεταξύ 800 και 900HV. Οι *Herranz et al. (2014)* ανέλυσαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για τη πυροσυσωμάτωση χάλυβα εργαλείων AISI M2, επικαλυμμένο με καρβίδιο του βαναδίου. Καθώς επιτεύχθηκαν υψηλοί ρυθμοί θέρμανσης, η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια επέτρεψε σημαντική μείωση των χρόνων επεξεργασίας. Οι βέλτιστες θερμοκρασίες πυροσυσωμάτωσης βρέθηκαν μειωμένες πάνω από $200^\circ C$.

Οι *Plaza et al. (2015)* μελέτησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για την κατασκευή κεραμικών. Πραγματοποιήθηκε βιομηχανική διαδικασία για πιο καθαρή παραγωγή

κεραμικών. Οι *I. Garcia et al. (2016)* ανέλυσαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για τη πυροσυσωμάτωση καρβιδίου του βαναδίου (3, 6 ή 10% κ.β.) και χάλυβα εργαλείων AISI M2. Παρατηρήθηκαν υψηλοί ρυθμοί θέρμανσης και σημαντική μείωση των χρόνων επεξεργασίας. Οι *C. Garcia et al. (2016)* μελέτησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για πυροσυσωμάτωση και σχηματισμό «αφρού» τιτανίου. Σε σύγκριση με τη συμβατική πυροσυσωμάτωση, ο «αφρός» τιτανίου βρέθηκε να είναι πλήρως πυροσυσωματωμένος σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Οι *Kovacik et al. (2017)* πραγματοποίησαν πυροσυσωμάτωση τιτανίου χρησιμοποιώντας Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια και παρατήρησαν μικρότερους χρόνους πυροσυσωμάτωσης, με το τελικό πορώδες κάτω του 5%.

Οι *Apostol et al. (2018)* διαπίστωσαν ότι το μέγεθος των κόκκων αυξανόταν με την αύξηση του χρόνου παραμονής. Σε μια δεδομένη θερμοκρασία, η ανάπτυξη των κόκκων αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο και εκθετικά με τη θερμοκρασία. Η διηλεκτρική σταθερά βρέθηκε να αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου παραμονής.

2.6 Εναζώτωση με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια

Φακός Fresnel χρησιμοποιήθηκε για τη συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας από τους *Garcia, Sanchez Olias and Vazquez (1999)* για τη λήψη μεμβρανών νιτριδίου του τιτανίου, με θέρμανση της επιφάνειας των δειγμάτων τιτανίου σε ατμόσφαιρα αζώτου. Αυτή η επίστρωση νιτριδίου σχηματίστηκε μετά από μόνο 2min επεξεργασίας, που αναπτύχθηκε με άζωτο και η στερεά διάχυση που βρέθηκε ήταν πολύ ομοιόμορφη. Οι *Herranz and Rodriguez (2010)*, χρησιμοποιώντας Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, έλαβαν διαφορετικά είδη νιτριδίων, που αυξάνουν τη σκληρότητα των δειγμάτων. Καθορίστηκαν οι σημαντικές δυνατότητες εναζώτωσης με τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια. Η εναζώτωση κράματος Ti6Al4V με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια μελετήθηκε από τους *Rodriguez, Herranz and Romero (2013)*. Η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, ελήφθη από την εγκατάσταση φακού Fresnel με ισχύ 250W/cm² στο σημείο εστίασης.

Η χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας για τη σύνθεση νιτριδίων και καρβιδίων, έχει ερευνηθεί από τους [Oliveira et al. \(2015\)](#), οι οποίοι βρήκαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Οι [Oliveira et al. \(2016\)](#) πραγματοποίησαν μελέτη χρήσης Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας για εναζώτωση μεταβατικών μετάλλων ομάδας IVa σε μικρότερη θερμοκρασία, και λιγότερο χρόνο. Δεν επιτεύχθηκε σωστή εναζώτωση λόγω χαμηλής θερμοκρασίας.

2.7 Συνθέσεις με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια

Οι [Garcia et al. \(1998\)](#) διερεύνησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για σύνθεση υλικών με αντίδραση αερίου-στερεού. Με περίθλαση ακτίνων X, ελήφθη επίστρωση TiN καλής ποιότητας για όλες τις συνθήκες δοκιμής. Οι [Sanchez Olias, Garcia and Vazquez \(1999\)](#) μελέτησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια μέσω φακών Fresnel για τη δημιουργία μεμβρανών νιτριδίου του τιτανίου. Οι [Flamant et al. \(1999\)](#) κατάφεραν να ελέγξουν με ακρίβεια τις παραμέτρους της διαδικασίας για τη σύνθεση φουλερενίων και νανοσωλήνων. Οι [Rodriguez, Garcia and Vazquez \(1999\)](#) διερεύνησαν την αυτοπαραγωγή σύνθεσης υψηλής θερμοκρασίας (SHS) χρησιμοποιώντας την εγκατάσταση του φακού Fresnel. Παρατηρήθηκε ότι, με τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, δεν απαιτούνται μεγάλες ποσότητες ενέργειας και μεγάλοι χρόνοι επεξεργασίας, όπως απαιτούνται από συμβατικούς κλιβάνους.

Οι [Herranz and Rodriguez \(2010\)](#) απέδειξαν τη χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας σε διαδικασία επίστρωσης χρησιμοποιώντας αντίδραση SHS από την εγκατάσταση φακού Fresnel. Η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια χρησιμοποιήθηκε για να προκαλέσει μια εξώθερμη αντίδραση μεταξύ του Ni και του Al στη θερμοκρασία ανάφλεξης. Σχεδιάστηκε σύστημα προθέρμανσης για να μειώσει το πορώδες και να αυξήσει την πρόσφυση. Οι [López-Delgado et al. \(2014\)](#) μελέτησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια χρησιμοποιώντας φακό Fresnel για μια διαδικασία αφυδάτωσης γύψου. Με 1min ηλιακής έκθεσης, επιτεύχθηκε θερμοκρασία 700°C. Οι [Padilla et al. \(2014\)](#) μελέτησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, λαμβάνοντας αλουμίνα από βεμίτη. Οι

Ceballos-Mendivil *et al.* (2015) ετοίμασαν με επιτυχία καρβίδιο του πυριτίου (SiC) χρησιμοποιώντας Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια.

2.8 Συγκόλληση με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια

Η χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας μελετήθηκε από τον Siores (1997) για την επεξεργασία θερμοπλαστικών, όπως πολυβινυλοχλωρίδιο, πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο και πολυστυρένιο. Η έρευνα απέδειξε το μεγάλο εύρος της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας στις βιομηχανίες επεξεργασίας πλαστικών. Οι Stoynov and Yarlagadda (2003) διερεύνησαν τη δυνατότητα να εφαρμοστεί η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια στη μηχανική θερμοπλαστικών. Χρησιμοποιώντας Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, οι Kim, Prasad and Stoynov (2004) παρουσίασαν τη βέλτιστη τάση εφελκυσμού στη συγκόλληση, επιλέγοντας τις παραμέτρους της διαδικασίας από ένα «έξυπνο» σύστημα. Οι αλγόριθμοι ελήφθησαν με την τεχνική πολλαπλής παλινδρόμησης.

Συγκόλληση κράματος αλουμινίου της σειράς 7075 επιχειρήθηκε με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας από τους Karalis, Pantelis, and Papazoglou (2005). Παρατηρήθηκε μείωση της μικροσκληρότητας κατά 25% της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης (ΘΕΖ), η οποία βρέθηκε να είναι 20% για τη ζώνη μερικής τήξης και 10% για τη ζώνη τήξης. Η συγκόλληση βρέθηκε να έχει ικανοποιητική διείδυση στον διαμήκη άξονα και σε σύγκριση με την αρχική μικροδομή του υλικού, η μικροδομή άλλαξε.

Οι Cambronerio *et al.* (2010) απέδειξαν τη χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας σαν ένα κατάλληλο μέσο δημιουργίας «αφρού» AlSi12. Η διαρροή του αλουμινίου, η αποστράγγιση και η κυτταρική σκλήρυνση, αποδείχτηκε να είναι παρόμοιες με τους συμβατικούς προ-θερμασμένους ηλεκτρικούς φούρνους. Οι Cambronerio *et al.* (2011) έλαβαν πρόδρομες ουσίες αφρού και με τη χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας, οι ανθρακικές πρόδρομες ουσίες βρέθηκαν να αφρίζονται εύκολα. Επίσης, διαπίστωσαν μικρότερο κίνδυνο κατάρρευσης των κυττάρων από ό,τι με προδρομικές ουσίες υδριδίου.

Οι [Romero et al. \(2013\)](#) χρησιμοποίησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για να επιτύχουν συγκόλληση μετάλλων με υψηλό σημείο τήξης, όπως χάλυβα εργαλείων H13 και ανοξείδωτο χάλυβα AISI 316L. Αυτή η εργασία πραγματοποιήθηκε σε παραβολικό συλλέκτη κάθετου άξονα. Στη ζώνη τήξης, παρατηρήθηκαν διάφορες μικροδομές. Βελτιστοποιώντας την ταχύτητα παρακολούθησης της ηλιακής ακτινοβολίας, τη γεωμετρική διαμόρφωση και την ηλιακή ακτινοβολία, ελήφθησαν λωρίδες συγκόλλησης χωρίς ελαττώματα και για τα δύο υλικά.

Οι [Cambronerio et al. \(2014\)](#) εφάρμοσαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για τη συγκόλληση πλακών «αφρού», σε μη προστατευτική ατμόσφαιρα. Με τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, το υλικό πλήρωσης θερμάνθηκε και επιτεύχθηκε συνεχής συγκόλληση με σχετικά μικρή ΘΕΖ. Παρατηρήθηκε θραύση της συγκόλλησης των πλακών, λόγω εμφάνισης διατμητικών τάσεων κατά τη διαστολή πλήρωσης και του ιξώδους του τηγμένου υλικού πλήρωσης. Οι [Romero et al. \(2015\)](#) συγκόλλησαν με επιτυχία με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας, φύλλα από κράμα τιτανίου Ti6Al4V με διαμόρφωση γωνιακών αρμών. Μεταβλήθηκαν αρκετές παράμετροι της πειραματικής διαδικασίας για να ληφθούν αρμοί συγκόλλησης χωρίς ελαττώματα. Η βέλτιστη συγκόλληση επιτεύχθηκε με ηλιακή ακτινοβολία περίπου 1000W/m^2 και με σταθερή ταχύτητα παρακολούθησης $0,15\text{mm/s}$.

Οι [Alami and Aokal \(2017\)](#) χρησιμοποίησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για τη συγκόλληση πολυμερών. Η συγκόλληση με την ελάχιστη θερμική ζημιά του υποστρώματος, επιτεύχθηκε με βελτιστοποιημένη εγκάρσια ταχύτητα και σημείο εστίασης.

Οι [Karalis et al. \(2017\)](#) προσπάθησαν να συγκολλήσουν παχιές πλάκες αλουμίνιο σειράς 5083-H111, χρησιμοποιώντας μεταβαλλόμενη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια. Μεταβάλλοντας το άνοιγμα κλείστρου του ηλιακού φούρνου κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, σε πραγματικό χρόνο, εφαρμόστηκε μεταβλητή Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια. Τέλος, χρησιμοποιώντας τυπικές μεταλλογραφικές τεχνικές, χαρακτηρίστηκε το επεξεργασμένο δείγμα.

Οι Pantelis, Kazasidis, and Karakizis (2017) χρησιμοποίησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για τη συγκόλληση λεπτών φύλλων (1,3mm) κράματος τιτανίου. Παρατηρήθηκαν επαρκής μηχανικές ιδιότητες και αυξημένη κατανομή σκληρότητας εντός της ζώνης τήξης. Οι Pantelis *et al.* (2017) χρησιμοποίησαν τη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια για τη συγκόλληση λεπτών πλακών κράματος αλουμινίου σειράς 6082 (σε κατάσταση T6). Για τη δημιουργία αδρανούς ατμόσφαιρας και διάχυσης θερμότητας, χρησιμοποιήθηκε ένας ειδικά σχεδιασμένος θάλαμος κενού και ένα σύστημα ψύξης. Η μικροσκληρότητα βρέθηκε μειωμένη κατά 23% και η αντοχή εφελκυσμού κατά 32%.

2.9 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα δεδομένα της ερευνητικής βιβλιογραφίας, καταλήγουμε στα κάτωθι:

- Η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια είναι μια ισχυρά εναλλακτική λύση για την επεξεργασία υλικών.
- Για ανάγκες υψηλότερης θερμοκρασίας για μεταλλουργικές διεργασίες, η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια είναι μια μη ρυπογόνος και φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία.
- Σε μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρήθηκε ότι η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια έχει αυξήσει την αποτελεσματικότητα επεξεργασίας σε μικρότερους χρόνους επεξεργασίας, με πολύ καλή ποιότητα της τροποποιημένης επιφάνειας.
- Για επιφανειακές σκληρύνσεις, επιστρώσεις πυροσυσσωματώσεις, εναζωτώσεις, συνθέσεις και συγκολλήσεις, η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια είναι πολύ αποδοτική, από ενεργειακής και οικονομικής άποψης.
- Το κύριο τεχνικό πλεονέκτημα της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας είναι η παροχή μεγάλης ενέργειας/θερμότητας σε σχετικά μεγάλη επιφάνεια.
- Τέλος, για επεξεργασία υλικών, η Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, που χρησιμοποιεί την εγκατάσταση φακού/φακών Fresnel, είναι μια πολύ καλή επιλογή αντί των συμβατικών μεθόδων.

2.10 Βιβλιογραφία

- Alami, Abdul Hai, and Kamilia Aokal, 2017. Experiments on Polymer Welding via Concentrated Solar Energy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 3715–3724.
- Apostol, Irina, Jose Rodríguez, Inmaculada Cañadas, Jose Galindo, Senen Lanceros Mendez, Pedro Libanio de Abreu Martins, Luis Cunha, and Kandasamy Venkata Saravanan, 2018. Concentrated Solar Energy Used for Sintering Magnesium Titanates for Electronic Applications. *Applied Surface Science*, 438, 1–7.
- Baharoon, Dhyia Aidroos, Hasimah Abdul Rahman, Wan Zaidi Wan Omar, and Saeed Obaid Fadhil, 2015. Historical Development of Concentrating Solar Power Technologies to Generate Clean Electricity Efficiently-A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 996–1027.
- Cambronero, L. E. G., Inmaculada Canadas, J. J. Diaz, J. M. Ruiz-Roman, and D. Martinez, 2011. Properties of Aluminum Nodules Foamed with Concentrated Solar Energy. *Euro PM 2011-Cellular Materials*, 339–344.
- Cambronero, L. E. G., Inmaculada Canadas, D. Martinez, and J. M. Ruiz-Roman, 2010. Foaming of Aluminum-Silicon Alloy Using Concentrated Solar Energy. *Solar Energy*, 84, 879–887.
- Cambronero, L. E. G., Inmaculada Canadas, J. M. Ruiz-Roman, M. Cisneros, and F. A. Corpas Iglesias, 2014. Weld Structure of Joined Aluminum Foams with Concentrated Solar Energy. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 2637–2643.
- Ceballos-Mendivil, L. G., R. E. Cubanelles-Lopez, J. C. Tanori-Cordova, R. Murrieta Yescas, C. A. Perez-Rabago, H. I. Villafan-Vidales, Camilo A. Arancibia-Bulnes, and C. A. Estrada, 2015. Synthesis of Silicon Carbide Using Concentrated Solar Energy. *Solar Energy* 116, 238–246.
- Charpentier, Ludovic, Kamel Dawi, Julien Eck, Baptiste Pierrat, Jean Louis Sans, and Marianne Balat-Pichelin, 2011. Concentrated Solar Energy to Study High Temperature Materials for Space and Energy. *Journal of Solar Energy Engineering* 133, 1-8.
- Chen, C. Julian, 2011. *Physics of Solar Energy*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

- Ferriere, A., C. Sanchez Bautista, G. P. Rodriguez, and Alfonso J. Vazquez. 2006. Corrosion Resistance of Stainless Steel Coatings Elaborated by Solar Cladding Process. *Solar Energy* 80, 1338–1343.
- Flamant, G., and Marianne Balat-Pichelin, 2016. Elaboration and Testing Materials Using Concentrated Solar Energy. *Solar Energy Conversion and Photoenergy Systems I. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*.
- Flamant, G., A. Ferriere, D. Laplaze, and C. Monty, 1999. Solar Processing of Materials: Opportunities and New Frontiers. *Solar Energy* 66 (2), 117–132.
- Francis, Abel J., and V. K. Bupesh Raja, 2015. An Overview of Concentrated Solar Power (CSP) and Its Applications. *International Journal of Applied Engineering and Research* 10 (5), 1755–1761.
- Franck, M., B. Blanpain, B. C. Oberl, J. P. Celis, and J. R. Roos, 1993. Surface Modification of TiN Hard Coatings with Concentrated Solar Energy. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 31, 401–414.
- Garcia, I., E. Gracia-Escosa, M. Bayod, A. Conde, M. A. Arenas, J. J. de Damborenea, A. Romero, and G. P. Rodriguez, 2016. Sustainable Production of Titanium Foams for Biomedical Applications by Concentrated Solar Energy Sintering. *Materials Letters* 185, 420–423.
- Garcia, C., A. Romero, Gemma Herranz, Y. Blanco, and F. Martin, 2016. Effect of Vanadium Carbide on Dry Sliding Wear Behavior of Powder Metallurgy AISI M2 High Speed Steel Processed by Concentrated Solar Energy. *Materials Characterization* 121, 175–186.
- Garcia, I., J. Sanchez Olias, and Alfonso J. Vazquez, 1999. A New Method for Materials Synthesis: Solar Energy Concentrated by Fresnel Lens. *Proceedings of the 9th SolarPACES International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies*, Font-Romeu, France, 435–440.
- Herranz, Gemma, and G. P. Rodriguez, 2010. Uses of Concentrated Solar Energy in Materials Science. *Solar Energy*, 1–27.
- Herranz, Gemma, A. Romero, V. de Castro, and G. P. Rodriguez, 2013. Development of High Speed Steel Sintered Using Concentrated Solar Energy. *Journal of Materials Processing Technology* 213, 2065–2073.

- Herranz, Gemma, A. Romero, V. de Castro, and G. P. Rodriguez. 2014. Processing of AISI M2 High Speed Steel Reinforced with Vanadium Carbide by Solar Sintering. *Materials & Design* 54, 934–946.
- Kalogirou, Soteris A., 2004. Solar Thermal Collectors and Applications. *Progress in Energy and Combustion Science* 30, 231–295.
- Kalogirou, Soteris A., 2009. *Solar Energy Engineering-Processes and Systems*. Burlington, MA: Academic Press, Elsevier Inc.
- Karalis, D. G., D. I. Pantelis, N. M. Daniolos, V. D. Bougiouri, Jose Rodríguez, P. N. Karakizis, and M. E. Kazasidis, 2017. An Attempt of 5083-H111 Aluminum Alloy Welding Using Variable Concentrated Solar Energy. 6th ICMEN International Conference at Thessaloniki, 1–10.
- Karalis, D. G., D. I. Pantelis, and V. J. Papazoglou, 2005. On the Investigation of 7075 Aluminum Alloy Welding Using Concentrated Solar Energy. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 86, 145–163.
- Kennedy, C., and H. Price, 2005. Development and Testing of High- Temperature Solar Selective Coatings, NREL/CP-520-36581, 1–5.
- Kim, I. S., Yarlagadda K.D.V. Prasad, and L. A. Stoykov, 2004. A Study on an Intelligent System to Predict the Tensile Stress in Welding Using Solar Energy Concentration. *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154, 649–653.
- Kovacik, J., S. Emmer, Jose Rodríguez, and Inmaculada Canadas, 2017. Sintering of HDH Ti Powder in a Solar Furnace at Plataforma Solar de Almeria. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 52–59.
- Lewis, Nathan S., George Crabtree, Arthur J Nozik, Michael R Wasielewski, and Paul Alivisatos, 2005. *Basic Research Needs for Solar Energy Utilization*. Renée M. Nault, Argonne National Laboratory.
- Llorente, J., Jesus Ballestrin, and Alfonso J. Vazquez, 2011. A New Solar Concentrating System: Description, Characterization and Applications. *Solar Energy* 85, 1000–1006.
- Llorente, J., and Alfonso J. Vazquez, 2009. Solar Hardening of Steels with a New Small Scale Solar Concentrator. *Materials Chemistry and Physics*, 118, 86–92.

- López-Delgado, Aurora, Sol López-Andrés, Isabel Padilla, Marta Alvarez, Roberto Galindo, and Alfonso José Vázquez, 2014. Dehydration of Gypsum Rock by Solar Energy: Preliminary Study. *Geomaterials*, 4, 82–91.
- Oliveira, Fernando Almeida Costa, Luis Guerra Rosa, Jorge Cruz Fernandes, Jose Rodriguez, Inmaculada Canadas, Teresa Magalhaes, and Nobumitsu Shohoji, 2015. Nitriding VI-Group Metals (Cr, Mo and W) in Stream of NH₃ Gas Under Concentrated Solar Irradiation in a Solar Furnace at PSA (Plataforma Solar de Almería). *Solar Energy*, 114, 51–60.
- Oliveira, Fernando Almeida Costa, Nobumitsu Shohoji, Jorge Cruz Fernandes, and Luis Guerra Rosa, 2005. Solar Sintering of Cordierite-based Ceramics at Low Temperatures. *Solar Energy*, 78, 351–361.
- Oliveira, Fernando Almeida Costa, Isabel Figueira Vasques, Jorge Cruz Fernandes, Inmaculada Cañadas, José Rodríguez, Luís Guerra Rosa, and Nobumitsu Shohoji, 2016. Reactions of IVa-group Metals, Ti and Zr, with Uncracked NH₃ Gas at a Temperature in the Range Between 600 and 800°C Under Heating with Concentrated Solar Beam at PSA. *Solar Energy*, 138, 119–127.
- Padilla, Isabel, A. Lopez-Delgado, S. Lopez-Andres, Marta Alvarez, Roberto Galindo, and Alfonso J. Vazquez, 2014. The Application of Thermal Solar Energy to High Temperature Processes: Case Study of the Synthesis of Alumina from Boehmite. *The Scientific World Journal*, 1–8. 2014: Article id 825745.
- Pantelis, D. I., and A. V. Griniari. 2005. Solar Treatment of Pre-Deposited and Atmospheric Plasma Sprayed WC-17% Co Powder on Stainless Steel 304L. *Surface Modification Technologies*, XVIII, 1–10.
- Pantelis, D. I., P. N. Karakizis, M. E. Kazasidis, D. G. Karalis, and Jose Rodriguez, 2017. Experimental and Numerical Investigation of AA6082-T6 Thin Plates Welding Using Concentrated Solar Energy (CSE). *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 171, 187-196.
- Pantelis, D. I., M. Kazasidis and P. N. Karakizis, 2017. Titanium Alloys Thin Sheet Welding with the Use of Concentrated Solar Energy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26 (12), 5760–5768.

- Pantelis, D. I., Pandora Psyllaki and Ch. Sarafoglou, 2002. Surface Alloying on Cast Iron Using Concentrated Solar Energy. *Fonderie-Fondeur d’Aujourd’hui*, 211, 23-33.
- Pantelis, D. I., A. Griniari and Ch. Sarafoglou, 2005. Surface Alloying of Pre Deposited Molybdenum-Based Powder on 304L Stainless Steel Using Concentrated Solar Energy. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89, 1–11.
- Plaza, Diego Martinez, Inmaculada Cãnadas Martinez, Gustavo Mallol Gasch, Félix Téllez Sufrategui, and José Rodríguez García, 2015. A Case Study of the Feasibility of Using Solar Concentrating Technologies for Manufacturing Ceramics. *Journal of Cleaner Production*, 87, 977–991.
- Rodriguez, G. P., J. J. de Damborenea and Alfonso J. Vazquez, 1997. Surface Hardening of Steel in a Solar Furnace. *Surface & Coatings Technology*, 92, 165–170.
- Rodriguez, G. P., I. Garcia, and Alfonso J. Vazquez, 1999. Coating Processing by Self-propagating High-temperature Synthesis (SHS) Using a Fresnel Lens. *Journal of Physics*, 9, 411–416.
- Rodriguez, G. P., Gemma Herranz and A. Romero, 2013. Solar Gas Nitriding of Ti6Al4V Alloy. *Applied Surface Science*, 283, 445–452.
- Rodriguez, G. P., V. Lopez, J. J. de Damborenea and Alfonso J. Vazquez, 1995. Surface Transformation Hardening on Steels Treated with Solar Energy in Central Tower and Heliostats Field. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 37, 1–12.
- Rodriguez, G. P., A. J. Vazquez and J. J. de Damborenea, 1993. Steel Hardening with High-Energy Density Beams in Solar Facilities. *Materials and Design*, 14(3), 169-174.
- Rojas-Morin, A., Y. Flores-Salgado, A. Barba-Pingarron, R. Valdez-Navarro, F. Mendez, O. Alvarez-Brito and M. Salgado-Baltazar, 2013. Thermal Analysis for the Solar Concentrating Energy and Induction Heating for Metals. *COMSOL Conference*, 1–16.
- Roman, R., Inmaculada Canadas, Jose Rodriguez, M. T. Hernandez and M. Gonzalez, 2008. Solar Sintering of Alumina Ceramics: Microstructural Development. *Solar Energy*, 82, 893–902.

- Romero, A., I. Garcia, M. A. Arenas, V. Lopez, and Alfonso J. Vazquez. 2013. High Melting Point Metals Welding by Concentrated Solar Energy. *Solar Energy*, 95, 131–143.
- Romero, A., I. Garcia, M. A. Arenas, V. Lopez, and Alfonso J. Vazquez. 2015. Ti6Al4V Titanium Alloy Welded Using Concentrated Solar Energy. *Journal of Materials Processing Technology*, 223, 284–291.
- Ruiz-Bustinza, I., Inmaculada Canadas, Jose Rodriguez, Luis Felipe Verdeja, Fernando Garcia-Carcedo and Alfonso J. Vazquez, 2013. Magnetite Production from Steel Wastes with Concentrated Solar Energy. *Steel Research International*, 84, 207–217.
- Sanchez Bautista, C., A. Ferriere, G. P. Rodriguez, M. López-Almodovar, A. Barba, Cristina Sierra and Alfonso J. Vazquez, 2006. NiAl Intermetallic Coatings Elaborated by a Solar Assisted SHS Process. *Intermetallics*, 14, 1270–1275.
- Sanchez Bautista, C., G. P. Rodriguez and A. Ferriere, 2008. Numerical Modelling of the Solar Cladding Process. *Surface and Coatings Technology*, 202, 1594–1605.
- Sanchez Olias, J., I. Garcia and Alfonso J. Vazquez, 1999. Synthesis of TiN with Solar Energy Concentrated by a Fresnel Lens. *Materials Letters*, 38, 379–385.
- Sierra, Cristina and Alfonso J. Vazquez, 2005. High Solar Energy Concentration with a Fresnel Lens. *Journal of Materials Science*, 40, 1339–1343.
- Siores, E., 1997. Thermoplastic Joining Using Solar Energy Concentrator. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37 (9), 1273–1279.
- Sonawane, Pushkaraj D. and V. K. Bupesh Raja, 2017. An Overview of Concentrated Solar Energy and Its Applications. *International Journal of Ambient Energy*, 4, 1–6.
- Sonawane, Pushkaraj D. and V. K. Bupesh Raja, 2020. Concentrated Solar Energy in materials processing. *International Journal of Ambient Energy*, 41:10, 1201–207.
- Stoynov, L. A., and Prasad K D V Yarlagadda, 2003. Joining of Engineering Thermoplastics by Concentrated Beam Insolation-A Feasibility Study. *Journal of Materials Processing Technology*, 138, 67–74.
- Vazquez, A. J., G. P. Rodriguez and J. J. de Damborenea, 1991. Surface Treatment of Steels by Solar Energy. *Solar Energy Materials*, 24, 751–759.
- Zhilinska, N., I. Zalite, Jose Rodriguez and Inmaculada Canadas, 2003. Sintering of Nanodisperse Powders in a Solar Furnace. *Euro PM*, 423–428.

[κενή σελίδα]

Κεφάλαιο 3

Εξοπλισμός, υλικά και τεχνικές χαρακτηρισμού

3.1 Εισαγωγή

Παρακάτω αναλύεται ο πειραματικός εξοπλισμός, οι τεχνικές χαρακτηρισμού, καθώς επίσης και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, με σκοπό τη δημιουργία σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων χαλύβδινης μήτρας με ενίσχυση σωματιδίων, τα οποία παρήχθησαν με δύο διαφορετικούς τρόπους: (α) με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας και (β) την συμβατική τεχνική επιγόμεσης βολταϊκού τόξου και σύρματος με πυρήνα κόνεως (Flux Cored Arc Welding- FCAW).

3.2 Ηλιακές εγκαταστάσεις της Plataforma Solar de Almeria

Το σύνολο των δοκιμών με τη χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας, όπως αναφέρθηκε εισαγωγικά, υλοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις της CIEMAT στην Plataforma Solar de Almeria (PSA), στην Ισπανία. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε ο οριζόντιος ηλιακός φούρνος (solar furnace) SF40 (Σχήμα 3.1α), η αρχή λειτουργίας του οποίου απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1β.

Στην περίπτωση του συγκεκριμένου ηλιακού φούρνου, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ανακλάται από τον ηλιοστάτη και προσπίπτει στον συλλέκτη, δηλαδή σε ένα παραβολικό κάτοπτρο με το οποίο επιτυγχάνεται η συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας/ακτινοβολίας σε κυκλική περιοχή εστίασης, όπου βρίσκεται τοποθετημένος ο θάλαμος (κώδωνας) δοκιμών.

Τα κύρια τμήματα της εγκατάστασης είναι [Rodriguez *et al.*, 2016]:

- Ο **ηλιοστάτης** (heliostat), ο οποίος αποτελείται από εκατό (100) επίπεδους καθρέπτες τύπου sandwich με συνολική επιφάνεια αντανάκλασης 100m^2 , ώστε ο δείκτης ανακλαστικότητας να εγγίζει το 90%.
- Το **σύστημα περσίδων** (shutters), το οποίο αποτελείται από τριάντα (30) χαλύβδινες παράλληλες περσίδες (πάνελς). Αυτές είναι τοποθετημένες σε δύο κατακόρυφους στύλους σε οριζόντια διάταξη των 15, ώστε να είναι εφικτή η ρύθμιση του ποσού της διερχόμενης ακτινοβολίας και ο έλεγχος του κλάσματός της, που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για τη διενέργεια των πειραμάτων. Η συνολική επιφάνεια του συστήματος των περσίδων είναι $11,2 \times 11,5\text{m}$ και αυτές μπορούν να ρυθμισθούν σε 15.896 σχετικές θέσεις, μεταξύ 0° (πλήρως ανοικτή θέση) και 55° (πλήρως κλειστή θέση). Με τον τρόπο αυτό ρυθμίζεται το διάκενο (άνοιγμα) μεταξύ των περσίδων, ώστε να ελέγχεται η διερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από τον ηλιοστάτη. Έτσι, η εξασθένιση της ακτινοβολίας αντιστοιχεί στο ποσοστό της συνολικής επιφάνειας του συστήματος των περσίδων που είναι ανοικτό. Οι περσίδες λαμβάνουν τη σχετική τους θέση με τη χρήση ενός κινητήρα, ο οποίος περιστρέφει τον άξονα στον οποίο συνδέονται οι περσίδες από 0° έως 55° , με ελάχιστο χρόνο για την πλήρη κίνηση 12s.
- Ο **συλλέκτης** (concentrator-parabolic dish). Σε αντίθεση με τα δύο προηγούμενα τμήματα, που είναι εγκατεστημένα στην ύπαιθρο, ο συλλέκτης είναι τοποθετημένος στο εσωτερικό του κτηρίου της εγκατάστασης. Έχει τη μορφή παραβολικού δίσκου και αποτελείται από 89 κοίλους καθρέπτες με πέντε διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε πλαίσιο με τρόπο ώστε να σχηματίζουν ένα παραβολοειδές. Κάθε καθρέπτης είναι έτσι προσανατολισμένος ώστε να ανακλά την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε μία μικρή περιοχή εστίασης διαμέτρου σχεδόν 120mm, στο κέντρο του κτηρίου και σε απόσταση 7,45m μπροστά από το κέντρο του δίσκου, όπου ακριβώς είναι τοποθετημένος ο θάλαμος δοκιμών. Οι συνολικές διαστάσεις του συλλέκτη είναι $11,01 \times 10,41\text{m}$, που αντιστοιχούν σε μία επιφάνεια ανάκλασης της τάξης των $98,5\text{m}^2$, με δείκτη ανακλαστικότητας 94%. Με τον τρόπο αυτό, η μέγιστη ισχύς είναι 40kW, η

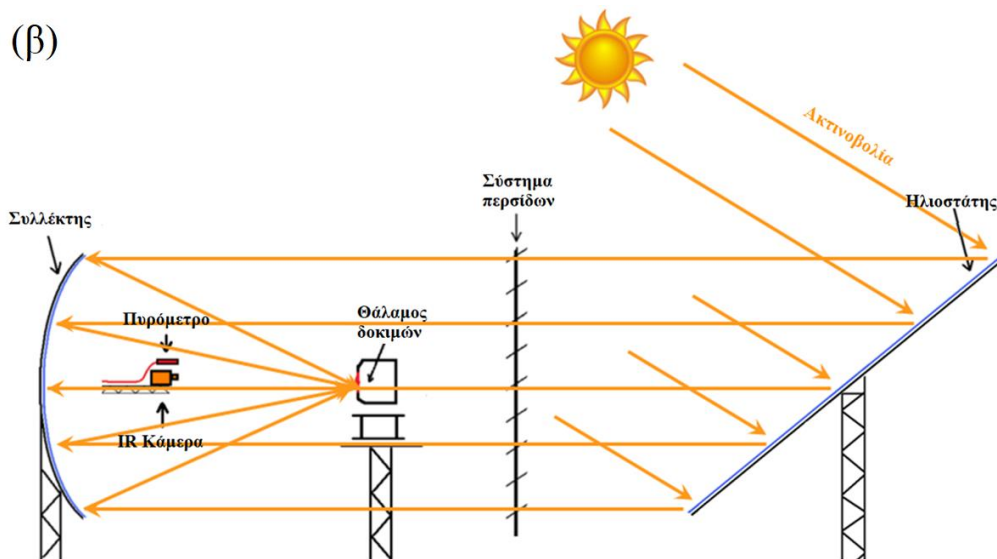
πυκνότητα ενέργειας στην κυκλική περιοχή εστίασης διαμέτρου 120mm είναι 7000kW/m^2 και έχει κανονική (Gaussian) κατανομή.

- **Ο θάλαμος δοκιμών** (κώδωνας χαλαζία, quartz bell). Όλες οι δοκιμές γίνονται εντός θαλάμου δοκιμών υπό τη μορφή διάφανου κώδωνα χαλαζία (Σχήματα 3.2α και 3.3β) που επιτρέπει τον έλεγχο της ατμόσφαιρας στην οποία γίνεται η κατεργασία (αδρανής ή δραστική ατμόσφαιρα). Για παράδειγμα, αδρανής ατμόσφαιρα εντός του θαλάμου επιτυγχάνεται με τη ροή αργού (Ar) υπό πίεση 2bar. Το δοκίμιο τοποθετείται σε τράπεζα (0,6×0,7m), με δυνατότητα κίνησης σε τρεις άξονες. Η κίνηση της τράπεζας, που γίνεται με τρεις κινητήρες, αφορά μετακίνηση 850mm κατά τον άξονα X (κατεύθυνση Ανατολής-Δύσης), 600mm κατά τον άξονα Y (προς τον συλλέκτη) και 450mm κατά τον άξονα Z (κατακόρυφη μετακίνηση). Το δοκίμιο τοποθετείται σε μία φορέα πορώδους αλουμίνας, που βρίσκεται μεταξύ δύο πυρίμαχων πλίνθων, ώστε να διασφαλίζεται η πλευρική θερμική μόνωση του κατεργαζόμενου δοκιμίου.

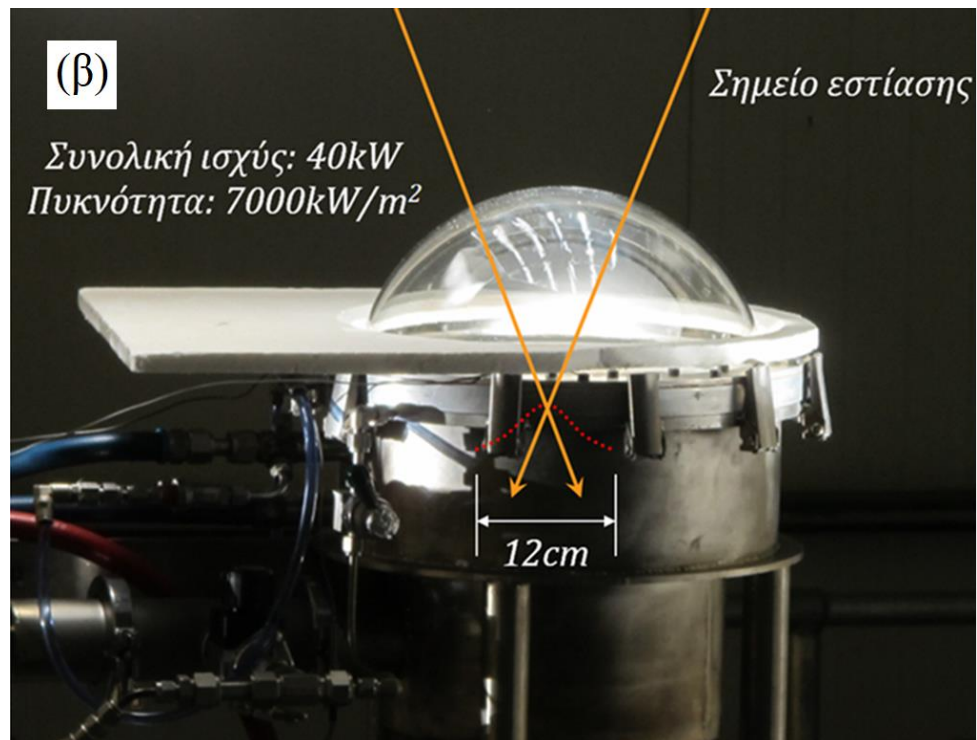
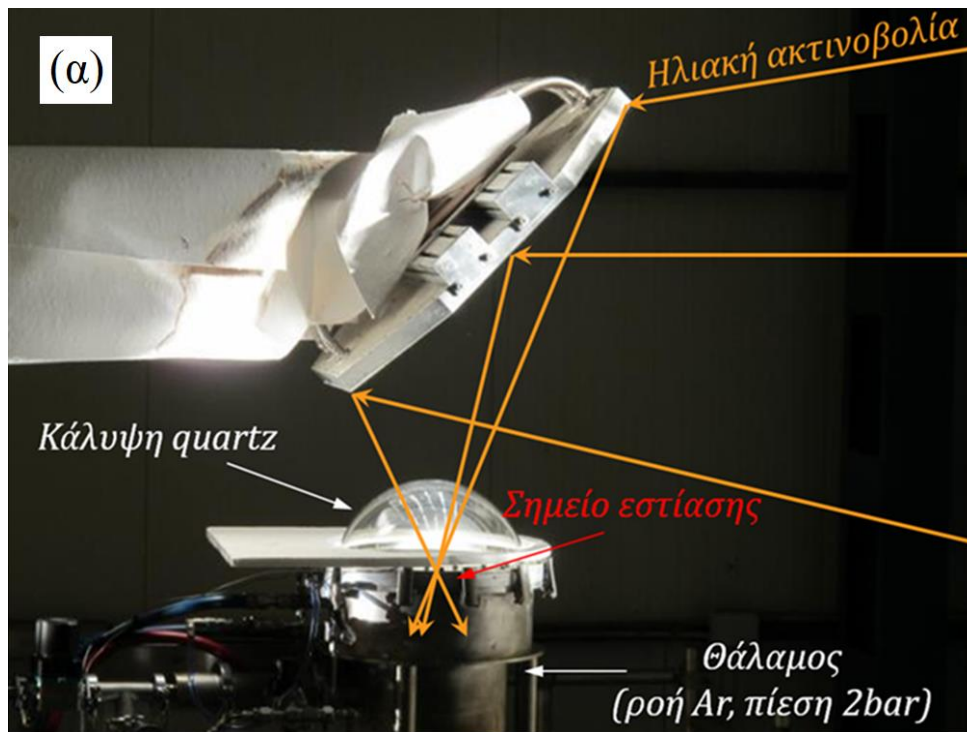
Τόσο η σχετική θέση των περσίδων όσο και η σχετική θέση ή η κίνηση της τράπεζας/φορέα των δοκιμών, ρυθμίζονται μέσω ηλεκτρονικό υπολογιστή, από το θάλαμο ελέγχου της διάταξης.

Όπως προαναφέρθηκε, το σύστημα των περσίδων, με το σταδιακό άνοιγμα ή κλείσιμο, καθορίζει την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, που τελικά προσπίπτει στην επιφάνεια του προς κατεργασία δοκιμίου, που τοποθετείται εντός του θαλάμου δοκιμών (Σχήμα 3.2), επιτρέποντας έτσι τον έλεγχο του ρυθμού ανόδου της θερμοκρασίας της επιφάνειας του δοκιμίου έως μία μέγιστη τιμή και του χρόνου παραμονής (dwell time) στη θερμοκρασία αυτή. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών η εξέλιξη της θερμοκρασίας της επιφάνειας του δοκιμίου καταγράφεται συνεχώς με τη χρήση οπτικού πυρομέτρου (IMPAC Electronic GmbH / Paul Scherrer Institute), που είναι τοποθετημένο σε απόσταση μπροστά από το θόλο του θαλάμου δοκιμών (Σχήμα 3.3), ενώ η θερμοκρασία της οριζόντιας πλευράς του δοκιμίου, που δεν είναι εκτεθειμένη στη ακτινοβολία (κάτω μέρος του δοκιμίου) καταγράφεται συνεχώς με τη χρήση θερμοστοιχείων επαφής. Επιπλέον των μετρήσεων της θερμοκρασίας, όλα τα πειράματα στο θάλαμο δοκιμών

βιντεοσκοποούνται, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των διαγραμμάτων εξέλιξης της θερμοκρασίας της επιφάνειας με φαινόμενα που μπορούν να παρατηρηθούν μακροσκοπικά στην επιφάνεια των δοκιμών κατά τη διάρκεια της έκθεσής τους στην ηλιακή ακτινοβολία.

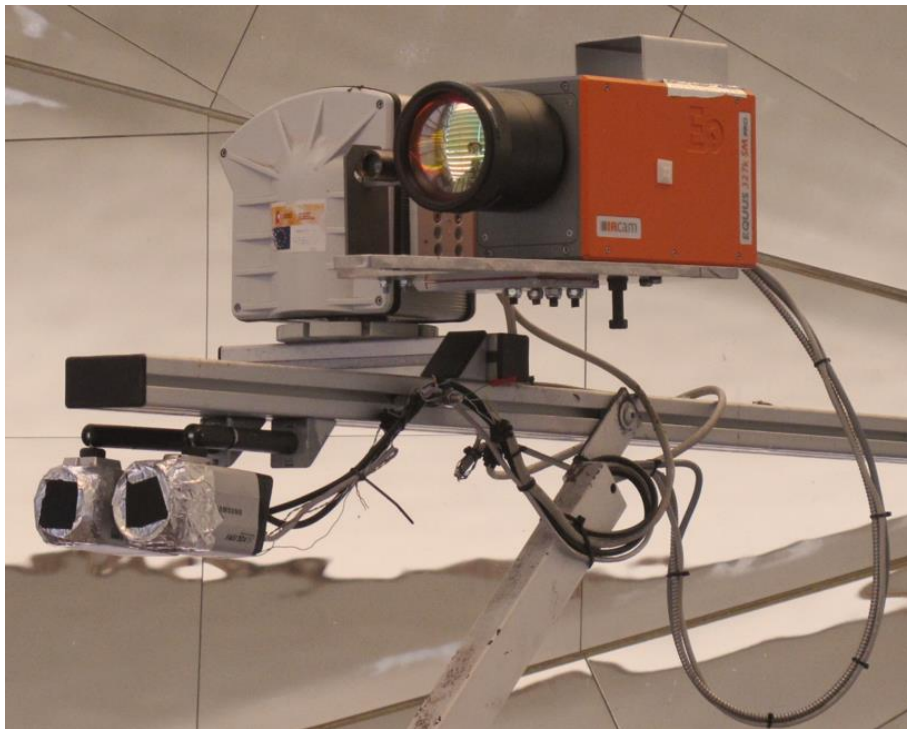


Σχήμα 3.1 Εγκατάσταση ηλιακού φούρνου της Plataforma Solar de Almeria στην Ισπανία: (α) Εικόνα της συνολικής εγκατάστασης του οριζώντιου ηλιακού φούρνου SF40, (β) αρχή λειτουργίας της διάταξης.

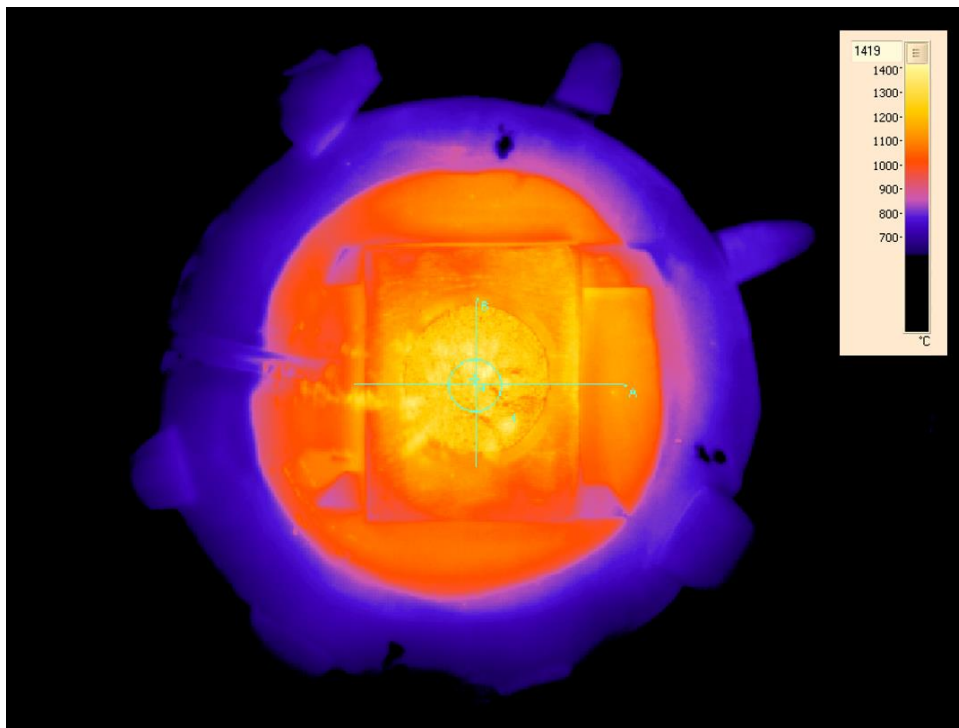


Σχήμα 3.2 Θάλαμος διενέργειας «ηλιακών» δοκιμών: (α) Εστίαση δέσμης στην περιοχή εστίασης, (β) κυκλική περιοχή διαμέτρου ~120mm, όπου εστιάζεται η δέσμη ηλιακής ενέργειας με μέγιστη ισχύ 40kW και με πυκνότητα ενέργειας 7000kW/m² κανονικής κατανομής.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η χρήση τέτοιων οπτικών πυρομέτρων για τον προσδιορισμό της πραγματικής θερμοκρασίας των επιφανειών με ηλιακή ακτινοβολία σε επιτόπιες συνθήκες, υπήρξε ζήτημα σκεπτικισμού, καθώς οι οπτικές ιδιότητες, όπως και οι εκπομπές αερίων είναι άγνωστες [Hernandez *et al.*, 2008] και η ηλιακή ακτινοβολία, που ανακλάται από τις επιφάνειες που υφίστανται κατεργασία, εισάγουν διακυμάνσεις των καταγραφόμενων τιμών. Για τη συγκεκριμένη διάταξη, που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής έρευνας, το σχετικό σφάλμα μετρήσεων του πυρομέτρου εκτιμάται έως 5% για θερμοκρασίες άνω των 950°C [Ballestrín *et al.*, 2010]. Αν και αυτή η απόκλιση αντιστοιχεί σε μια αβεβαιότητα της τάξης των ~100°C για το εύρος των θερμοκρασιών που αναφέρονται στη συνέχεια, η μέγιστη θερμοκρασία που πραγματικά επιτεύχθηκε στην παρούσα μελέτη πιθανόν να υπερβαίνει τις αναφερόμενες τιμές. Για το λόγο αυτό και προκειμένου να εξαχθούν έγκυρα συμπεράσματα, οι μετρήσεις της θερμοκρασίας συν-αξιολογήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις οπτικές καταγραφές (βιντεοσκοπήσεις) όλων των πειραμάτων, καθώς και τα αποτελέσματα του εργαστηριακού χαρακτηρισμού της μικροδομής των επιφανειακών στρωμάτων που ελήφθησαν.



Σχήμα 3.3 Οπτικά πυρόμετρα και IR κάμερα καταγραφής θερμοκρασίας.

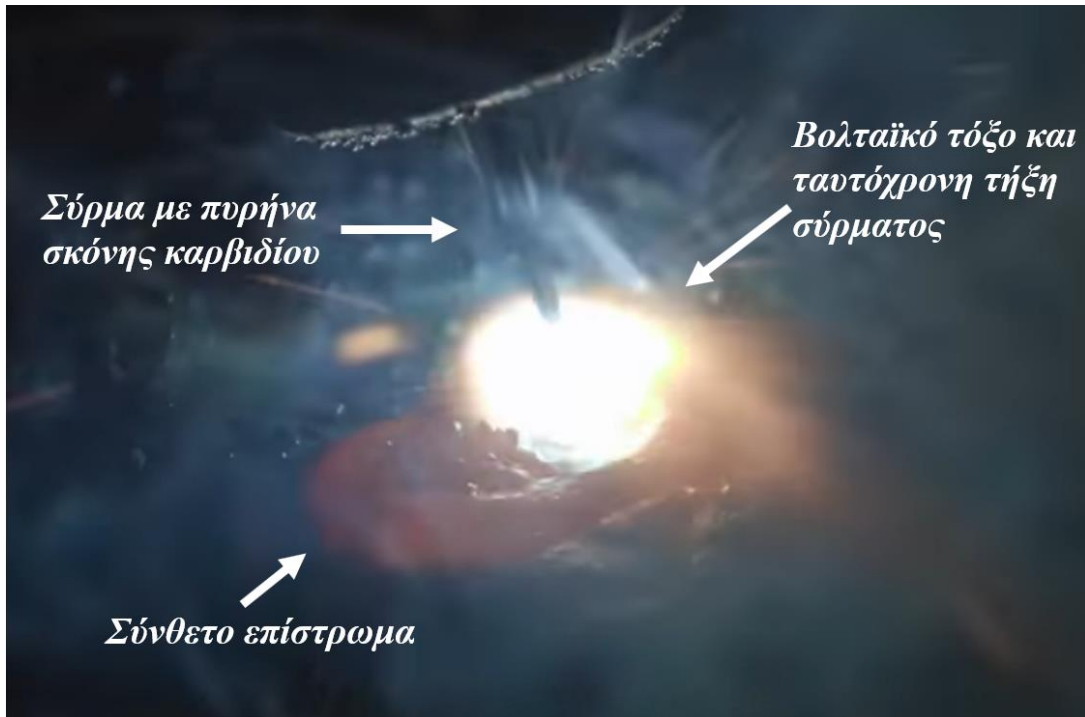


Σχήμα 3.4 Στιγμιότυπο καταγραφής της θερμοκρασίας IR κάμερας.

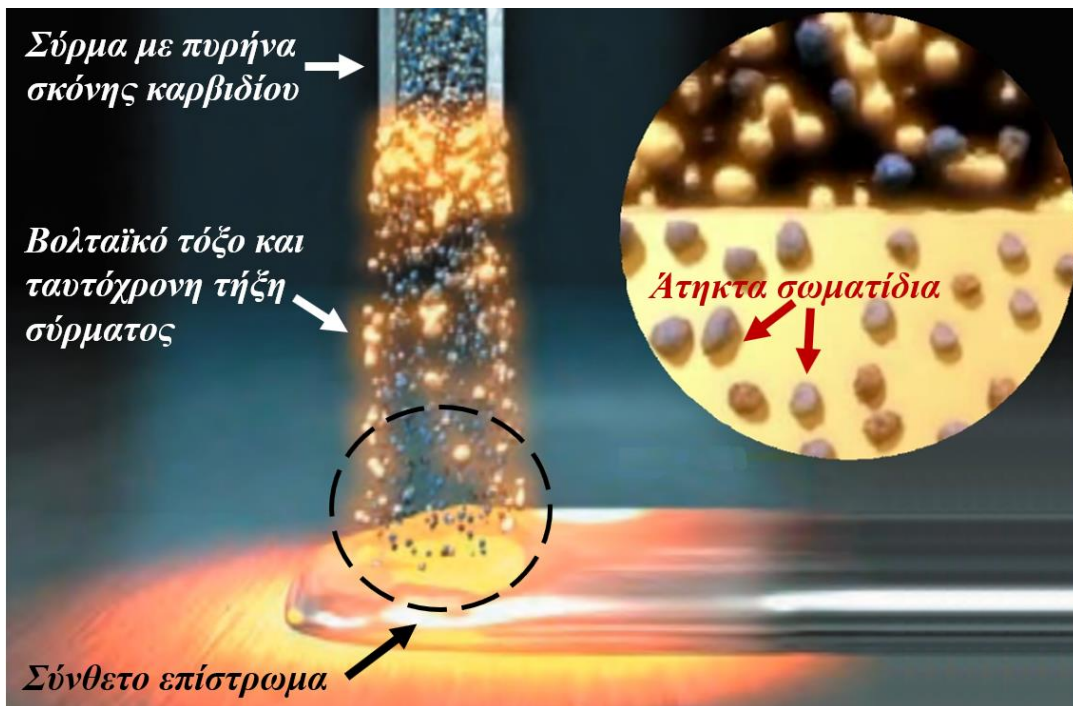
3.3 Διάταξη επιγόμεωσης με τη χρήση βολταϊκού τόξου

Προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση σε τριβικές φορτίσεις των «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων, εφαρμόστηκε η συμβατική τεχνική δημιουργίας επιγομώσεων με την τεχνική βολταϊκού τόξου και τη χρήση συρμάτων με πυρήνα κόνεως καρβιδίου (Flux Cored Arc Welding-FCAW). *Για τα συστήματα υλικών που δεν υπήρχαν εμπορικά διαθέσιμα τα αντίστοιχα σύρματα, η σύγκριση έγινε με τα αναφερόμενα στη διεθνή βιβλιογραφία.*

Η επιλογή της τεχνικής αυτής έγινε διότι παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με την «ηλιακή» τεχνική ως προς τα θεμελιώδη φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την παραγωγή των επιφανειακών στρωμάτων, δηλαδή τήξη και επαναστερεοποίηση της επιφάνειας του μεταλλικού υποστρώματος (μετάλλου βάσης), μετά από διασπορά εξωτερικά τροφοδοτούμενων σωματιδίων καρβιδίου (Σχήματα 3.5 και 3.6).

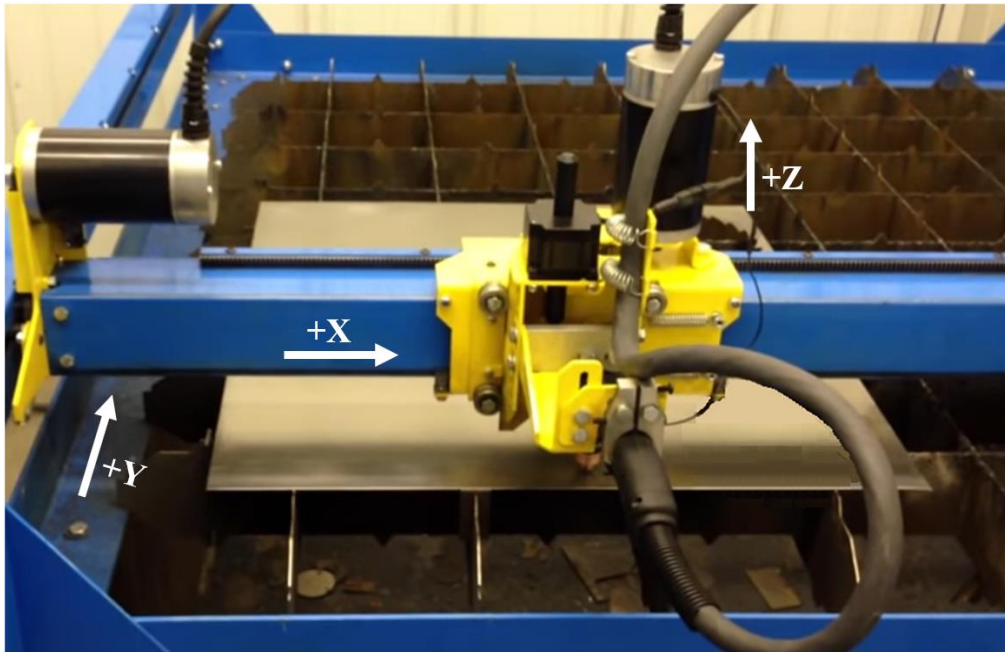


Σχήμα 3.5 Στιγμιότυπο τήξης σύρματος και δημιουργία σύνθετου επιφανειακού στρώματος.



Σχήμα 3.6 Διασπορά εξωτερικά τροφοδοτούμενων σωματιδίων καρβιδίου, με συμβατική τεχνική FCAW.

Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός του Εργαστηρίου Συγκολλήσεων, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η κεντρική μονάδα συγκόλλησης GMAW, με μέγιστη τιμή έντασης ρεύματος 300Α. Προκειμένου να είναι δυνατός ο ακριβής έλεγχος της απόστασης του ακροφυσίου του τόξου από την προς κατεργασία επιφάνεια, καθώς και της σχετικής ταχύτητας μετακίνησης μεταξύ τους, κατασκευάστηκε μια, ελεγχόμενη από ηλεκτρονικό υπολογιστή, τράπεζα, με κινούμενη γέφυρα, πάνω στην οποία είχε προσαρμοστεί κατάλληλα ο πυρσός συγκόλλησης (gantry portal cnc machine). Έτσι, με αυτόν τον τρόπο, ο πυρσός συγκόλλησης μετατοπιζόταν κατά τους άξονες X και Y, πάνω από το προς επιγύμωση μεταλλικό δοκίμιο, με ταχύτητα μετακίνησης από 1 έως 30mm/s και σε συγκεκριμένη απόσταση (άξονας Z) από την επιφάνεια των δοκιμίων και διαμέσου του ετροφοδοτείτο το υλικό της επιγύμωσης κατά τρόπο συνεχή και με σταθερό ρυθμό (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7 Διάταξη επιγύμωσης με συμβατική τεχνική συγκόλλησης FCAW, του Εργαστηρίου Συγκολλήσεων, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

3.4 Υλικά

3.4.1 Μέταλλο βάσης

Ως μέταλλο βάσης (υπόστρωμα) χρησιμοποιήθηκε κοινός ανθρακούχος χάλυβας κλάσης DIN 17100 (St37-2, Wr.N. 1.0037), η χημική σύσταση του οποίου αναφέρεται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Χημική σύσταση (% κ.β.) του μετάλλου βάσης.

C	Si	Mn	P	S	Fe
0,21 - 0,25	0,0	<0,4	<0,065	<0,065	υπόλοιπο

Πρόκειται για έναν υποευτηκτοειδή χάλυβα, φεριττοπερλιτικής μικροδομής και χαμηλής κραματοποίησης, ο οποίος συνήθως χρησιμοποιείται σε δομικές και ναυπηγικές εφαρμογές. Ακριβώς αυτή η «φτωχή» χημική σύσταση ενός χάλυβα ευρείας εφαρμογής, ήταν και ο λόγος που επιλέχθηκε ως υλικό «μοντέλο», ώστε να μελετηθούν οι φυσικοί και μεταλλουργικοί μετασχηματισμοί, που ενεργοποιούνται κατά την έκθεση στη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ακτινοβολία, χωρίς αυτοί να επηρεάζονται από την παρουσία άλλων χημικών στοιχείων.

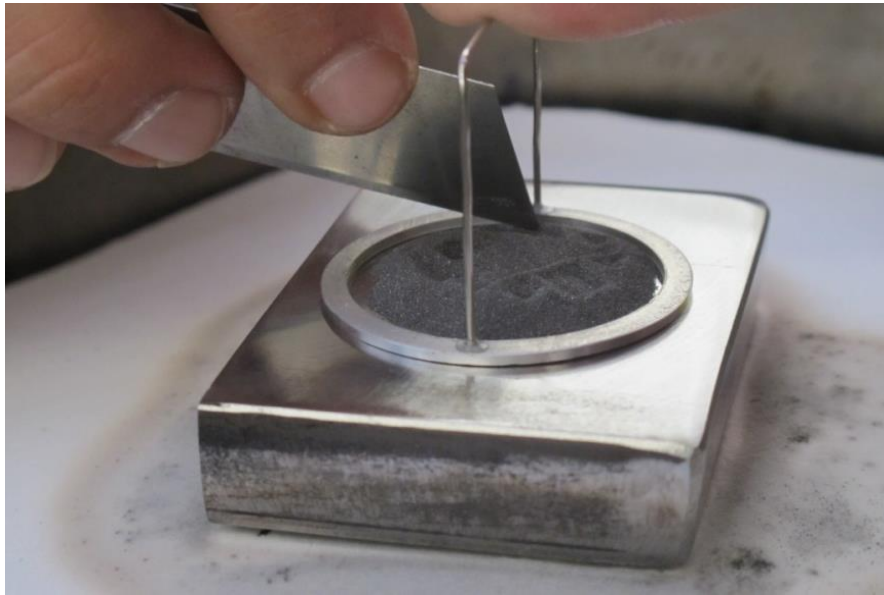
Η θερμοκρασία τήξης του κυμαίνεται από 1420 έως 1460°C και εμπορικά διατίθεται σε ελάσματα τυποποιημένων παχών, με ελαφρά μεταβολή της αντίστοιχης αντοχής σε εφελκυσμό. Η σκληρότητα του υλικού που χρησιμοποιήθηκε, μετρήθηκε στα 150 HV10, ενώ η επιφάνεια των δοκιμών προς κατεργασία λειάνθηκε έως μια μέση αριθμητική τραχύτητα (R_a) 0,2μm.

Προκειμένου να μελετηθούν τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την έκθεση των δοκιμών στην ηλιακή ακτινοβολία, πραγματοποιήθηκαν προκαταρκτικές δοκιμές σε δοκίμια διαστάσεων 35×35×15 και 35×70×15mm³. Οι τελικές δοκιμές για την ανάδειξη των μεταλλουργικών μετασχηματισμών, που λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία, καθώς και των τριβολογικών ιδιοτήτων, που χρησιμοποιήθηκαν για την

αξιολόγηση της απόδοσης των επιφανειακών στρωμάτων, πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια διαστάσεων $50 \times 70 \times 15 \text{mm}^3$. Δοκίμια του ίδιου υλικού και των ίδιων τελικών διαστάσεων χρησιμοποιήθηκαν ως υποστρώματα για την εναπόθεση των επιγομώσεων με την συμβατική τεχνική του βολταϊκού τόξου FCAW.

3.4.2 Υλικά δημιουργίας σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων

Για τις προκαταρκτικές δοκιμές, χρησιμοποιήθηκε κόνις καρβιδίου του τιτανίου (TiC), που συμπιέστηκε απλά στην προς κατεργασία επιφάνεια, υπό μορφή δισκίων διαμέτρου 35mm και πάχους 1,5mm. Στο [Σχήμα 3.8](#), απεικονίζεται ο τρόπος χειρωνακτικής τοποθέτησης των κόνεων επί των μεταλλικών δοκιμίων.



Σχήμα 3.8 Διαδικασία τοποθέτησης των κόνεων επί των προς κατεργασία μεταλλικών δοκιμίων.

Για τη διενέργεια των τελικών «ηλιακών» δοκιμών, εκτός της κόνεως TiC, χρησιμοποιήθηκαν, επίσης, εμπορικές κόνεις καρβιδίου του βολφραμίου (WC) και καρβιδίου του χρωμίου (Cr_3C_2), βάσει των παρακάτω, με σημαντικότητα, κριτηρίων επιλογής:

- Τη σκληρότητά τους,
- Τη θερμοκρασία τήξης τους,

- Την ολκιμότητά τους,
- Την αντίσταση σε σημειακές φορτίσεις και
- Την αντίσταση στη διάβρωση.

Όλες οι κόνεις τοποθετήθηκαν με τον ίδιο τρόπο επί των προς κατεργασία επιφανειών, στις ίδιες διαστάσεις. Τα κύρια χαρακτηριστικά των κόνεων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή, συνοψίζονται στον Πίνακα 3.4, ενώ τα φάσματα περίθλασης ακτίνων Χ για κάθε ποιότητα παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.9 έως 3.12.

Πίνακας 3.2 Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες διάφορων καρβιδίων.

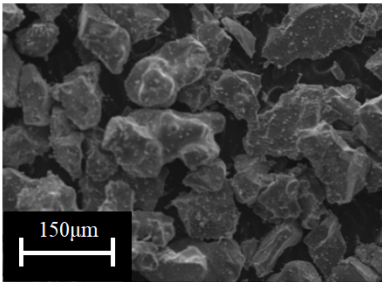
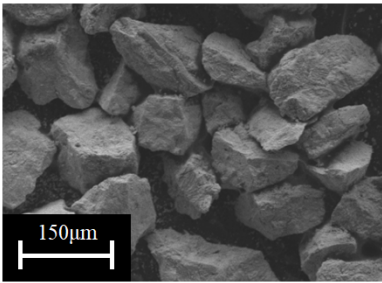
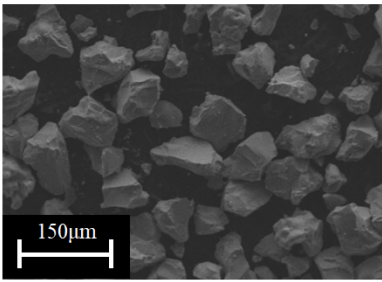
Υλικό/ Σύμβολο	Πυκνότητα (g/cm ³)	Θερμοκρασία τήξης (°C)	Σκληρότητα (HV)
SiC	3,2	2830	2600
TiC	4,9	3160	3200
VC	6,0	2830	2800
NbC	7,8	3500	2400
Cr ₃ C ₂	6,7	1930	1300
Mo ₂ C	9,2	2690	1500
WC/ W ₂ C	15,8/17,3	2870	2400

Πίνακας 3.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά διάφορων καρβιδίων.

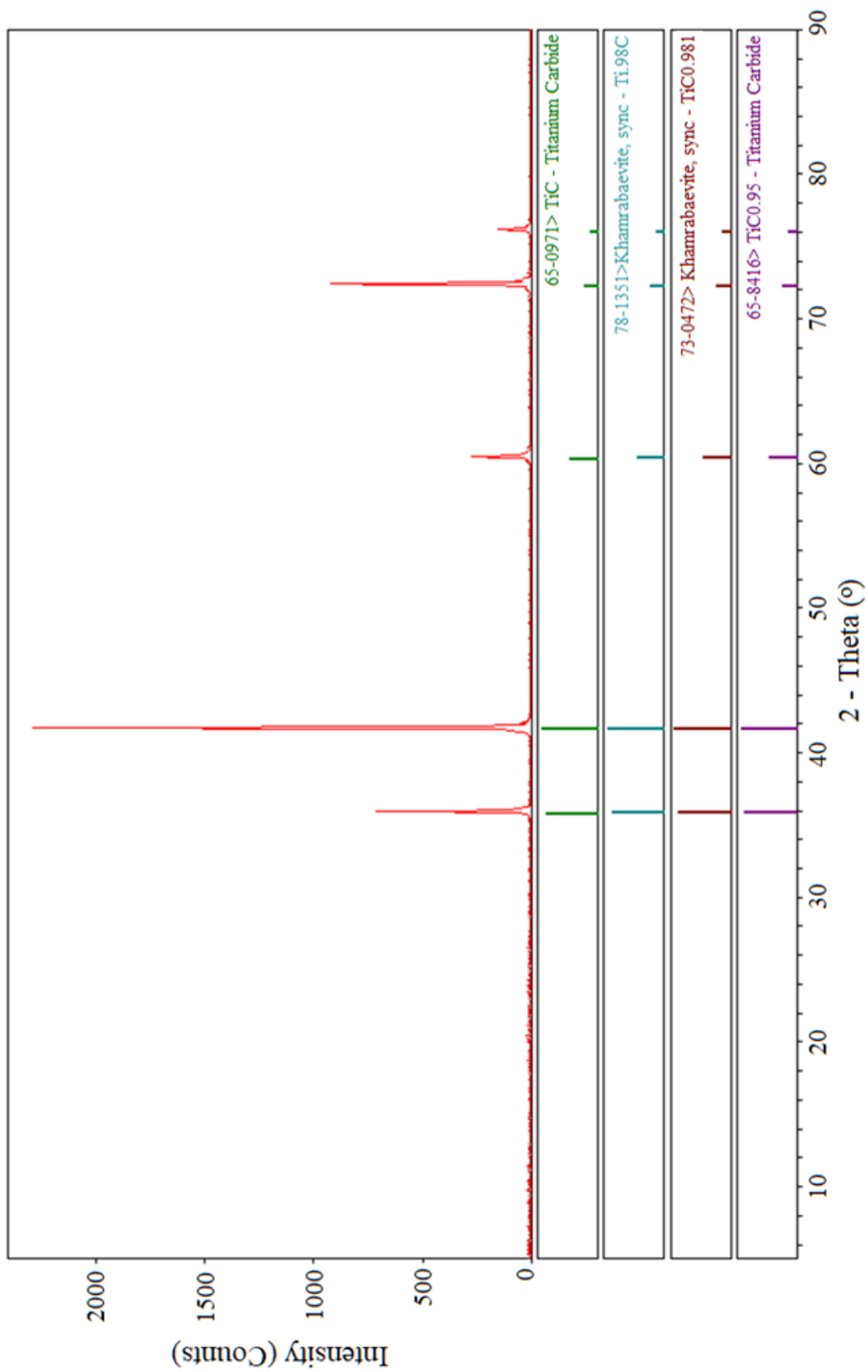
Υλικό/ σύμβολο	Απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες	Αντίσταση σε σημειακές φορτίσεις	Ολκιμότητα	Αντίσταση στη διάβρωση
SiC	▲▲▲▲	▲▲▲	▼	▲▲▲
TiC	—	▲▲▲	▼	▲
VC	▲▲	▼	▼▼▼	—
NbC	▲▲▲	▲	▼▼▼	▲
Cr ₃ C ₂	▲▲	▼▼▼▼	▼▼▼	▲▲▲▲
Mo ₂ C	▲▲▲	▲▲	▼	▲▲
WC/ W ₂ C	▲▲▲▲	▼▼	▼▼▼▼	—

Για την υλοποίηση των συμβατικών επιγομώσεων με την τεχνική FCAW χρησιμοποιήθηκε εμπορικά διαθέσιμο σύρμα μεταλλικού κελύφους με πυρήνα κόνεως καρβιδίου του τιτανίου. Στα Σχήματα 3.13 και 3.14 παρουσιάζονται η μορφολογία της κόνεως του πυρήνα και τα διαγράμματα περίθλασης ακτίνων X, του πυρήνα και του μεταλλικού κελύφους, αντίστοιχα. Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό, η κόνις του πυρήνα αποτελεί ένα μίγμα σωματιδίων TiC, πυριτίου και σιδήρου, καθώς και CaCO₃, CaF₂, ενώσεις που τυπικά προστίθενται σε τέτοια αναλώσιμα για να διευκολύνουν τη συγκόλληση και να σταθεροποιήσουν το βολταϊκό τόξο. Το μεταλλικό κέλυφος είναι κατασκευασμένο από χρωμιούχο ανοξειδωτο χάλυβα.

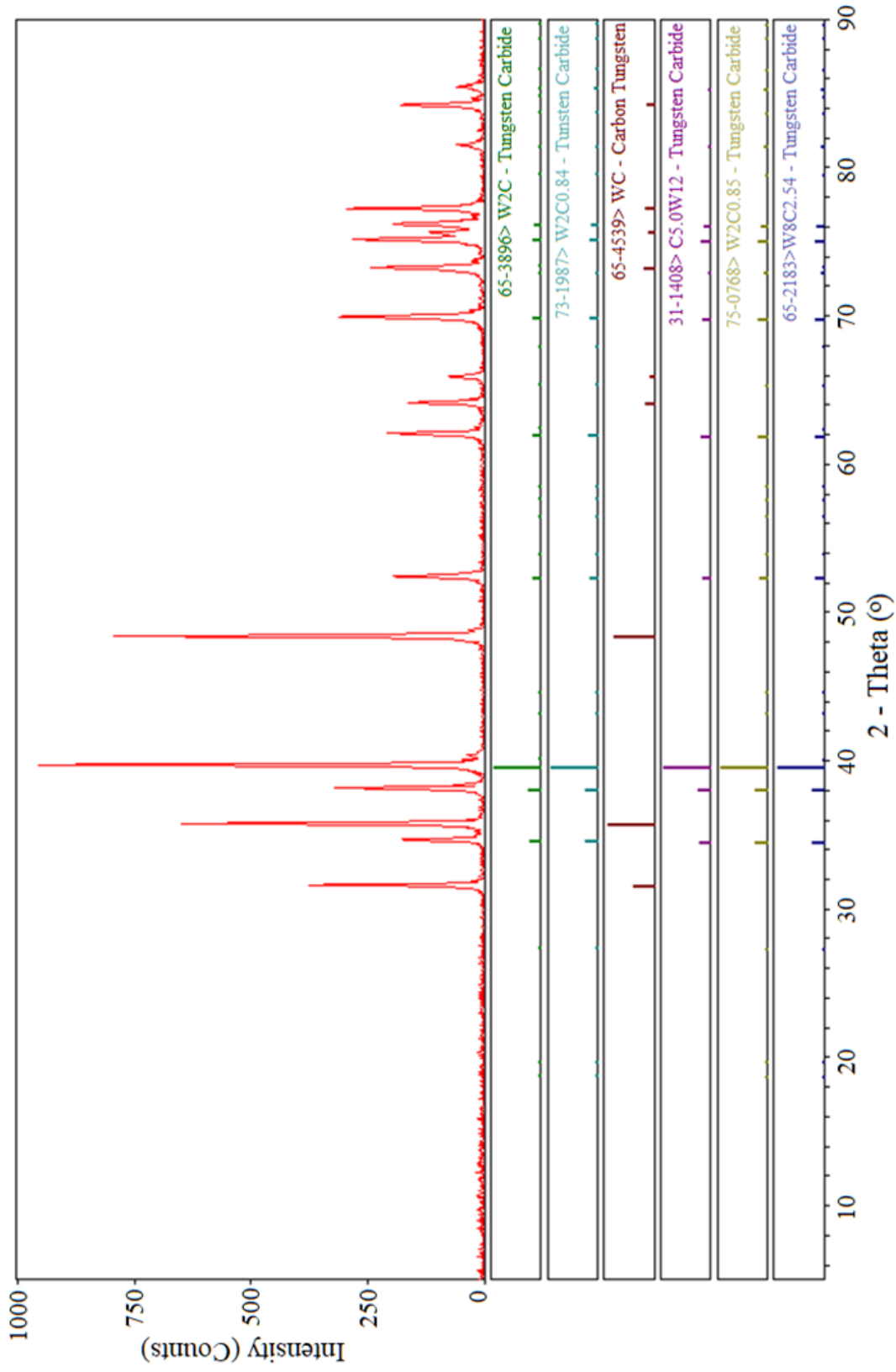
Πίνακας 3.4 Χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων κόνεων.

Κόνις	Χαρακτηριστικά	Μορφολογία
Καρβίδιο του τιτανίου	<p><u>Κοκκομετρία:</u> -149+74 μm <u>Θερμοκρασία τήξης:</u> 3160 °C <u>Κύρια κρυσταλλική φάση:</u> TiC (Σχήμα 4.6)</p>	
Καρβίδιο του βολφραμίου	<p><u>Μέσο μέγεθος κόκκων:</u> 140 μm <u>Θερμοκρασία τήξης:</u> 2870 °C <u>Κύριες κρυσταλλικές φάσεις:</u> WC, W₂C (Σχήμα 4.7)</p>	
Καρβίδιο του χρωμίου	<p><u>Κοκκομετρία:</u> -106 + 45 μm <u>Θερμοκρασία τήξης:</u> 1930 °C <u>Κύρια κρυσταλλική φάση:</u> Cr₃C₂ (Σχήμα 4.8)*</p>	

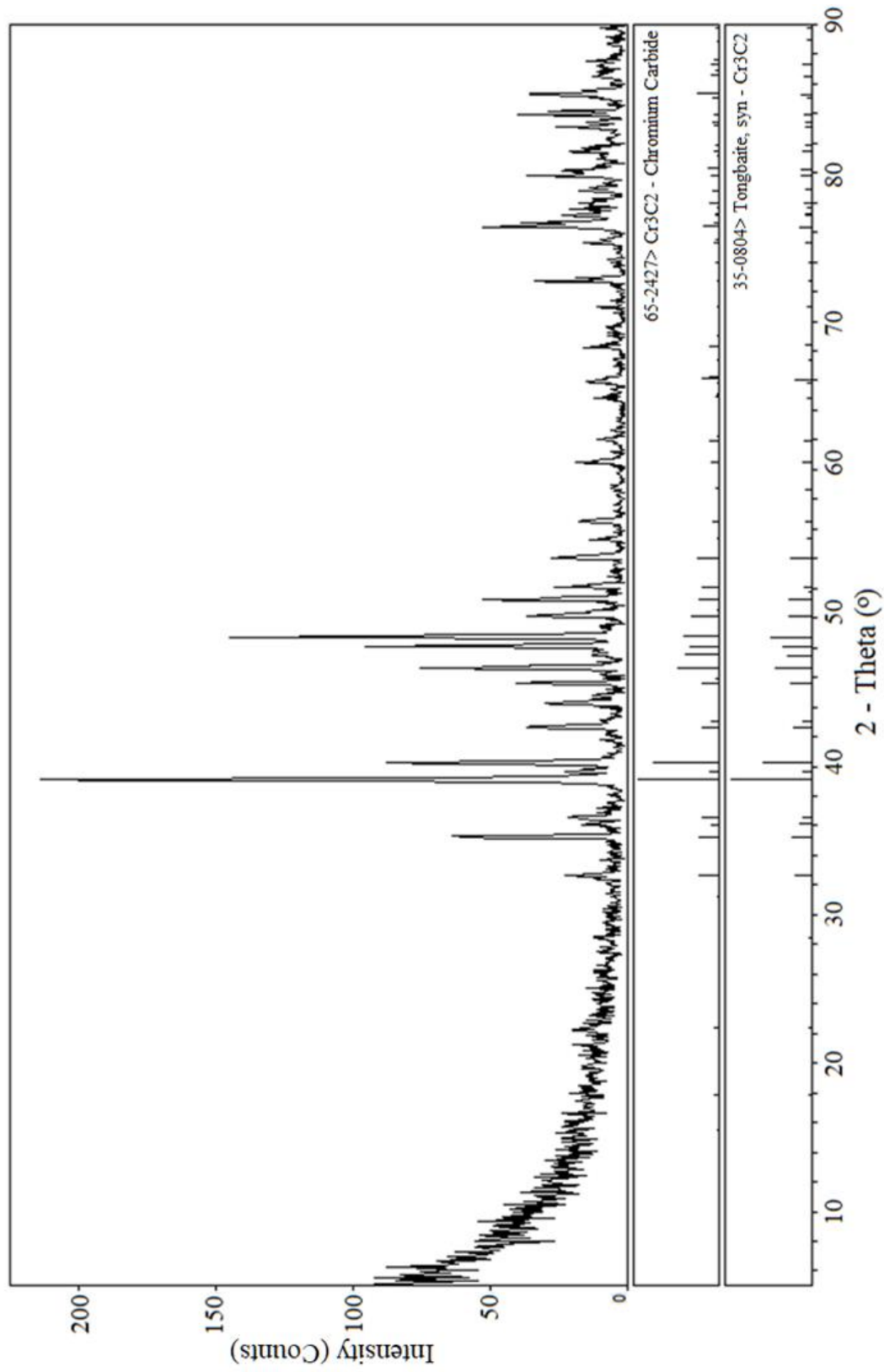
*Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προμηθευτή (<https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/materials/carbides/>) η κόνις που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται κατά 99,0% από ορθορομβική φάση Cr₃C₂, ενώ το υπολειπόμενο ποσοστό που δεν ανιχνεύθηκε στη μέτρηση με περίθλαση ακτίνων X αποτελεί μίγμα των εξαγωνικών φάσεων Cr₇C₃ και Cr₂₃C₆.



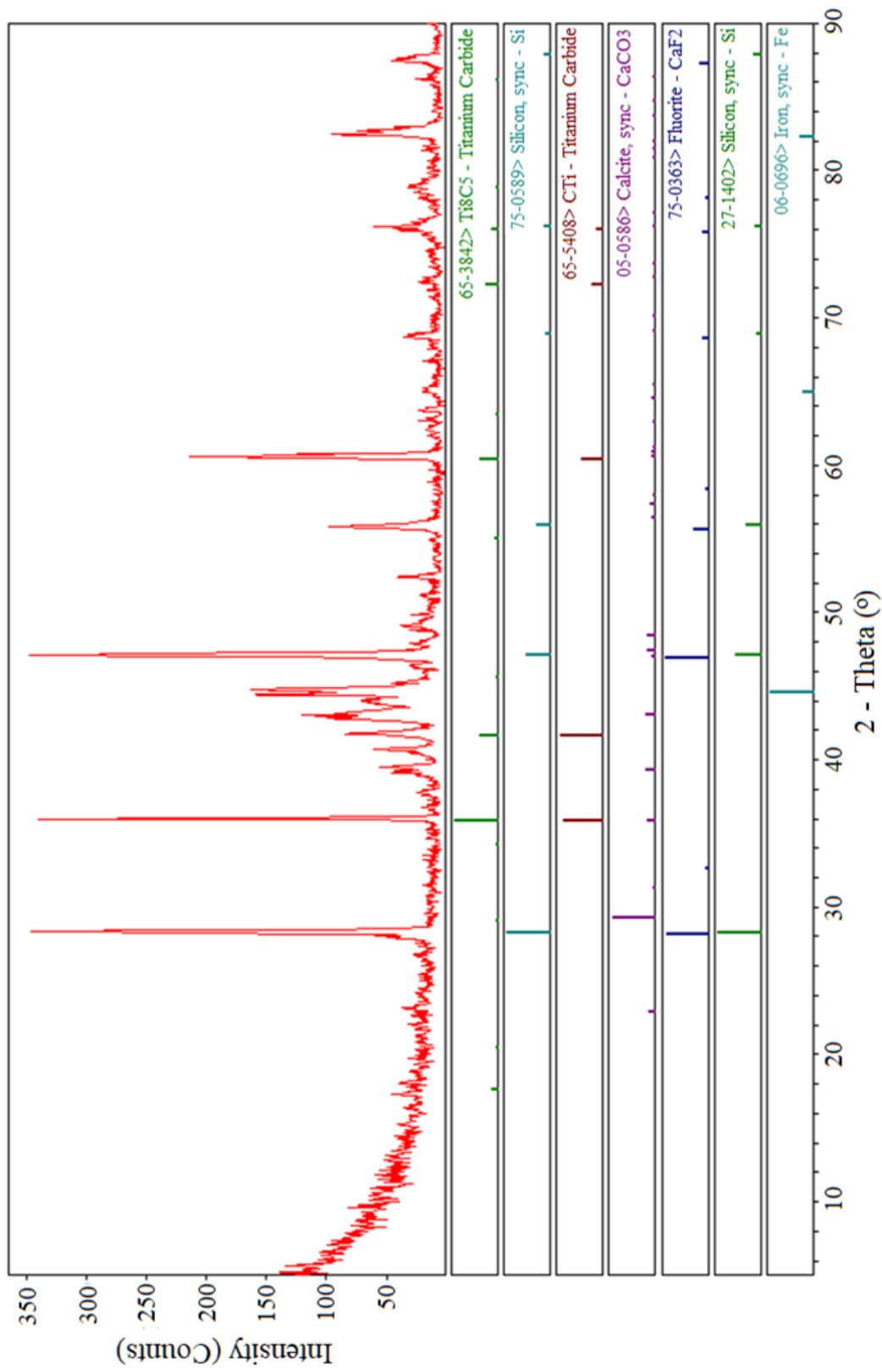
Σχήμα 3.9 Φάσμα περίθλασης ακτίνων X για την κόνι καρβιδίου του τιτανίου.



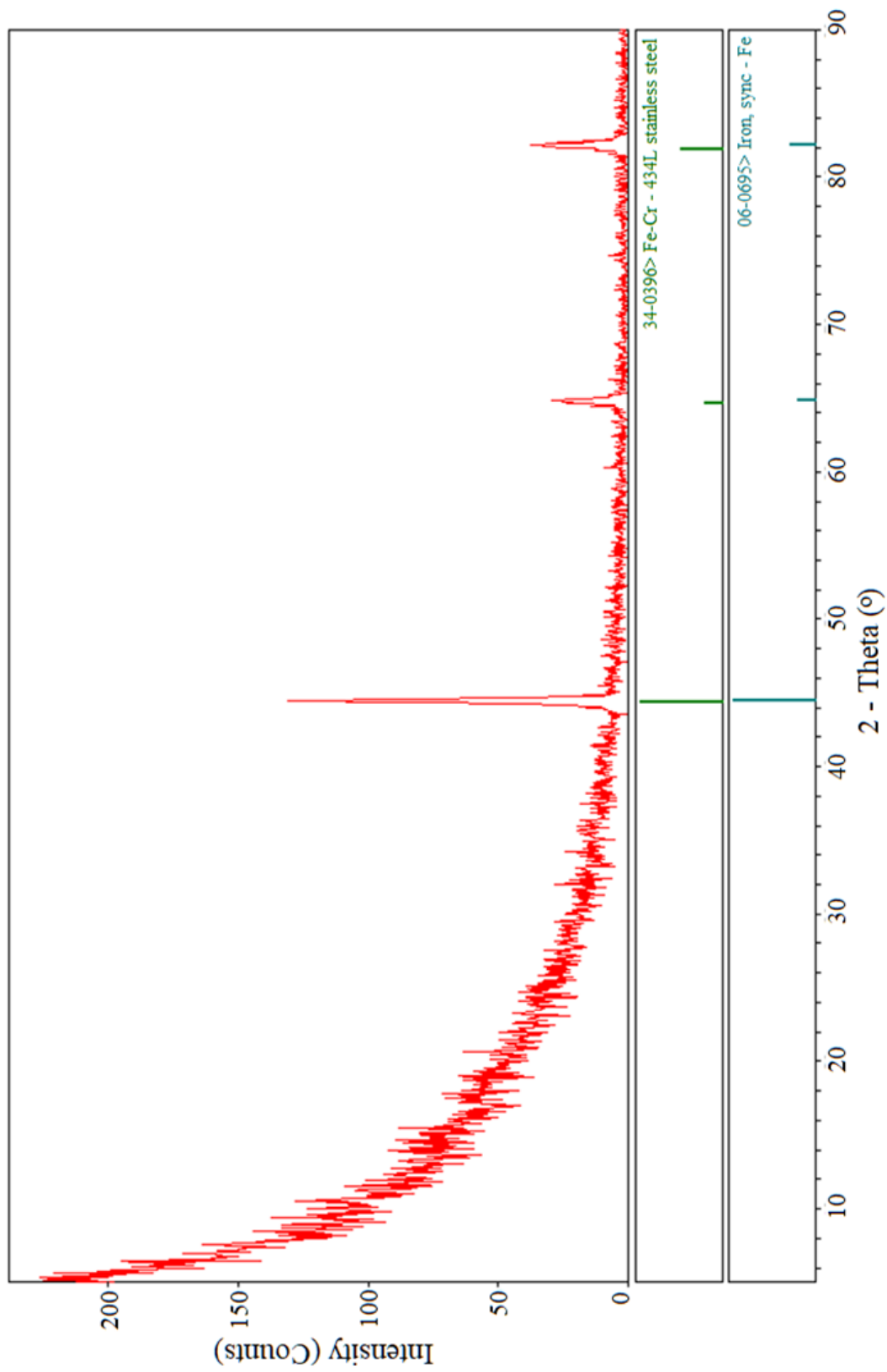
Σχήμα 3.10 Φάσμα περίθλασης ακτίνων X για την κόνι καρβιδίου του βολφραμίου.



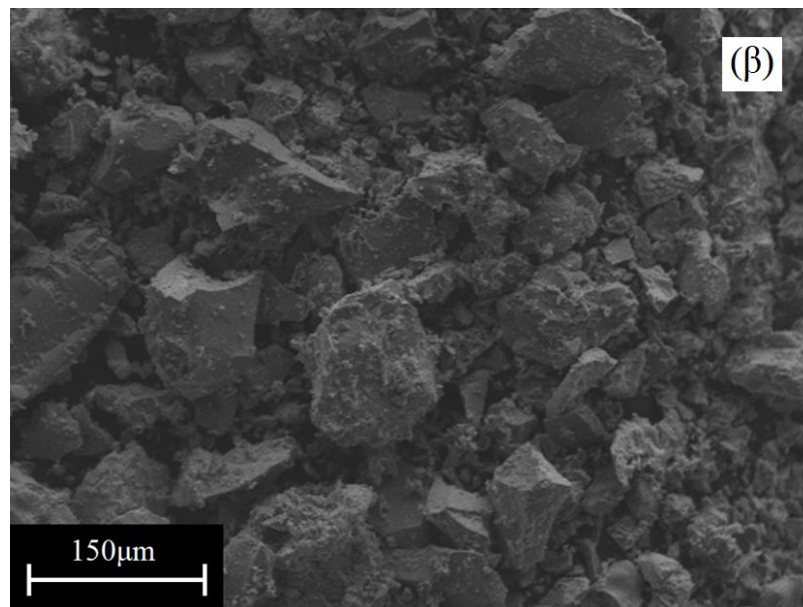
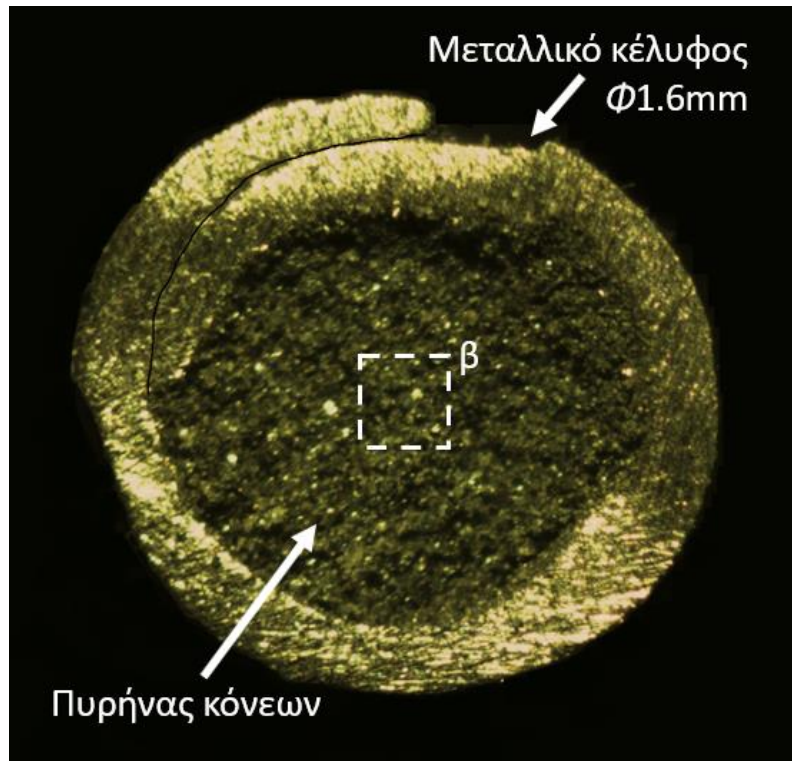
Σχήμα 3.11 Φάσμα περίθλασης ακτίνων X για την κόνι καρβιδίου του χρωμίου.



Σχήμα 3.12 Φάσμα περιθλάσεως ακτίνων X της κόνεως του πυρήνα, σύρματος επιγόμεσης με την συμβατική τεχνική FCAW.



Σχήμα 3.13 Φάσμα περίθλασης ακτίνων X του μεταλλικού κελύφους, σύρματος επιγόμωσης με την συμβατική τεχνική FCAW.



Σχήμα 3.14 Μορφολογία (α) του σύρματος και (β) της κόνεως επιγόμωσης με την τεχνική FCAW.

3.5 Διαδικασία υλοποίησης επιγομώσεων τεχνικής FCAW

Στην περίπτωση της χρήσης διατάξεων συγκόλλησης για τη δημιουργία επιγομώσεων, οι τιμές των παραμέτρων της κατεργασίας επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τη δομική ακεραιότητα και τη μικροδομή των λαμβανόμενων επιφανειακών στρωμάτων. Προκειμένου, λοιπόν, να αποφευχθούν τα ελαττώματα δομής, όπως είναι οι πόροι και οι ρωγμές, των επιστρωμάτων και να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές επιπτώσεις, λόγω του υψηλού θερμικού φορτίου, όπως είναι η εκτεταμένη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ), που υπόκειται της επιγόμεσης και η γεωμετρική στρέβλωση του μετάλλου βάσης, οι τιμές των παραμέτρων λειτουργίας της συσκευής συγκόλλησης διατηρήθηκαν σταθερές και εντός του εύρους των τιμών που προτείνει ο προμηθευτής των χρησιμοποιούμενων συρμάτων της επιγόμεσης (Πίνακας 3.5).

Πίνακας 3.5 Προτεινόμενες, από τον προμηθευτή των χρησιμοποιούμενων συρμάτων, παράμετροι λειτουργίας συσκευής συγκόλλησης.

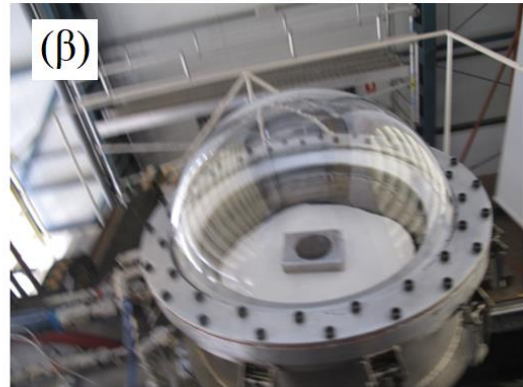
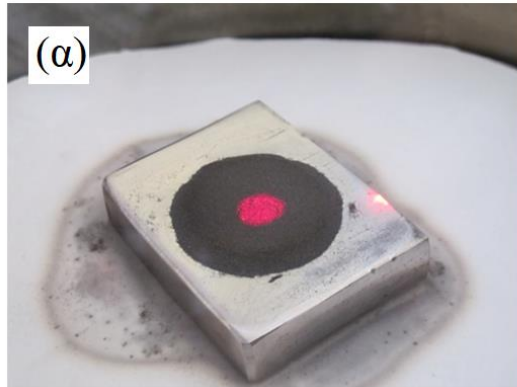
Πάχος σύρματος (mm)	Τάση ρεύματος (V)	Ένταση ρεύματος (A)	Προέκταση σύρματος (mm)	Πολικότητα
1,6	24 - 27	150 - 210	12,7 – 3,2	DCEP

3.6 Διαδικασία υλοποίησης της «ηλιακής» επιφανειακής κατεργασίας

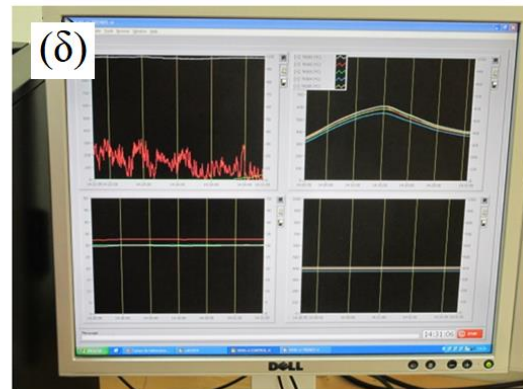
Αφού το δοκίμιο τοποθετηθεί στη βάση αλουμίνιας του θαλάμου δοκιμών, «ανοίγεται» το σύστημα των περσίδων και η ακριβής θέση του στο χώρο ρυθμίζεται ώστε το κέντρο της προς κατεργασία επιφάνειας να βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής εστίασης (Σχήμα 3.15α). Ο διάφανος θόλος χαλαζία τοποθετείται στο θάλαμο, ο οποίος με τον τρόπο αυτό σφραγίζεται (Σχήμα 3.15β). Στο θάλαμο αυτό εισάγεται με συνεχή ροή 2bar το αέριο της κατεργασίας: αργό (Ar) στην περίπτωση διενέργειας πειραμάτων σε αδρανή ατμόσφαιρα ή άζωτο (N₂) στην περίπτωση κατεργασίας σε χημικά δραστική ατμόσφαιρα. Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, η μακροσκοπική κατάσταση της επιφάνειας βιντεοσκοπείται (Σχήμα 3.15γ), κάτι που επιτρέπει τον προσδιορισμό της χρονικής στιγμής έναρξης της

τήξης (κίνηση της επιφάνειας) και λήξης της στερεοποίησης (ακινητοποίηση της κίνησης). Κατά τη διάρκεια του πειράματος, οι παράμετροι της κατεργασίας καταγράφονται συνεχώς (Σχήμα 3.15δ), όπως επίσης συνεχώς καταγράφεται και η μέτρηση της θερμοκρασίας με το θερμοστοιχείο, που είναι σε επαφή με την πίσω πλευρά του δοκιμίου. Μετά την ολοκλήρωση της έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία, οι περσίδες «κλείνονται» και το δοκίμιο αφήνεται να ψυχθεί ομαλά μέσα στο θάλαμο, πάντοτε υπό τη συνεχή ροή αερίου, ώσπου η θερμοκρασία του θερμοστοιχείου να φτάσει τους 400°C. Τότε, αποσφραγίζεται ο θάλαμος, απομακρύνεται ο θόλος και η ψύξη του δοκιμίου συνεχίζεται σε ατμοσφαιρικό αέρα.

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ
“ΗΛΙΑΚΗ” ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ



ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΘΕΣΗ ΣΕ
ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ



Σχήμα 3.15 Η «ηλιακή» κατεργασία, για τη δημιουργία σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων με διασπορά καρβιδίων σε χαλύβδινη μήτρα, περιλαμβάνει δύο εξίσου σημαντικά στάδια: Τοποθέτηση του δοκιμίου στο θάλαμο δοκιμών (α) έλεγχος της θέσης στην περιοχή εστίασης και (β) τοποθέτηση του διαφανούς θόλου και σφράγιση του θαλάμου για τον έλεγχο της ατμόσφαιρας της κατεργασίας. Έκθεση της προς κατεργασία επιφάνειας σε ηλιακή ακτινοβολία: (γ) βιντεοσκόπηση των πειραμάτων και (δ) έλεγχος των παραμέτρων εργασίας (π.χ. άνοιγμα περσίδων) και συνεχής καταγραφή της θερμοκρασίας της κάτω επιφάνειας του δοκιμίου κατά την κατεργασία.

3.7 Τεχνικές χαρακτηρισμού των επιφανειακών στρωμάτων

Η παρατήρηση της μικροδομής των κατεργασμένων δοκιμίων έγινε κατά κύριο λόγο με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) στο Τμήμα Φυσικής του Α.Π.Θ. και χρησιμοποιήθηκε όργανο τύπου 20kV JEOL 840A SEM, το οποίο είναι εφοδιασμένο με αναλυτή OXFORD INCA 300 EDS, που επιτρέπει τη χημική μικροανάλυση των παρατηρούμενων επιφανειών σε επιλεγμένα σημεία ή γραμμές, καθώς και τη στοιχειακή χαρτογράφηση. Η κρυσταλλική δομή των φάσεων που συνυπάρχουν στα αρχικά υλικά και στα λαμβανόμενα επιφανειακά στρώματα, προσδιορίστηκε με την τεχνική της περίθλασης ακτίνων X, με τη χρήση περιθλασίμετρου Siemens D-8000, εγκατεστημένου επίσης στο Τμήμα Φυσικής του Α.Π.Θ. Για όλες τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ακτινοβολία $\text{CuK}\alpha$ και η ταχύτητα σάρωσης ήταν $2^\circ \times \text{min}^{-1}$.

Επικουρικά, χρησιμοποιήθηκαν το στερεοσκόπιο (Leica MS 5) και το οπτικό μικροσκόπιο (Nikon Epihot 300) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., καθώς και το οπτικό μικροσκόπιο του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων (Leica DM 4000). Για την παρατήρηση τομών κάθετων στην προς κατεργασία επιφάνεια ακολουθήθηκε η τυπική διαδικασία της μεταλλογραφικής προετοιμασίας δοκιμίων μεταλλικών υλικών (κοπή, εγκιβωτισμός, λείανση, στίλβωση) και χημική προσβολή με 3% Nital (διάλυμα νιτρικού οξέος σε αιθυλική αλκοόλη). Η μεταλλογραφική προετοιμασία υλοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις της εταιρείας ΕΛ.Κ.Ε.ΜΕ. Α.Ε.

Οι μετρήσεις σκληρότητας κατά Vickers με φορτίο 5,0kg και μικροσκληρότητας κατά Vickers με φορτίο 0,3kg έγιναν με τη χρήση οργάνου τύπου Wolpert Wilson 430 της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Το όργανο είναι συνδεδεμένο με κάμερα και ηλεκτρονικό υπολογιστή, γεγονός που επιτρέπει τη λήψη εικόνων των αποτυπωμάτων. Όλες οι μετρήσεις έγιναν σε κάθετες τομές, εντός του επιφανειακού στρώματος. Για τη σκληρότητα πραγματοποιήθηκαν πέντε (5) μετρήσεις ανά δοκίμιο, ενώ για τη μικροσκληρότητα πραγματοποιήθηκαν πενήντα (50) μετρήσεις

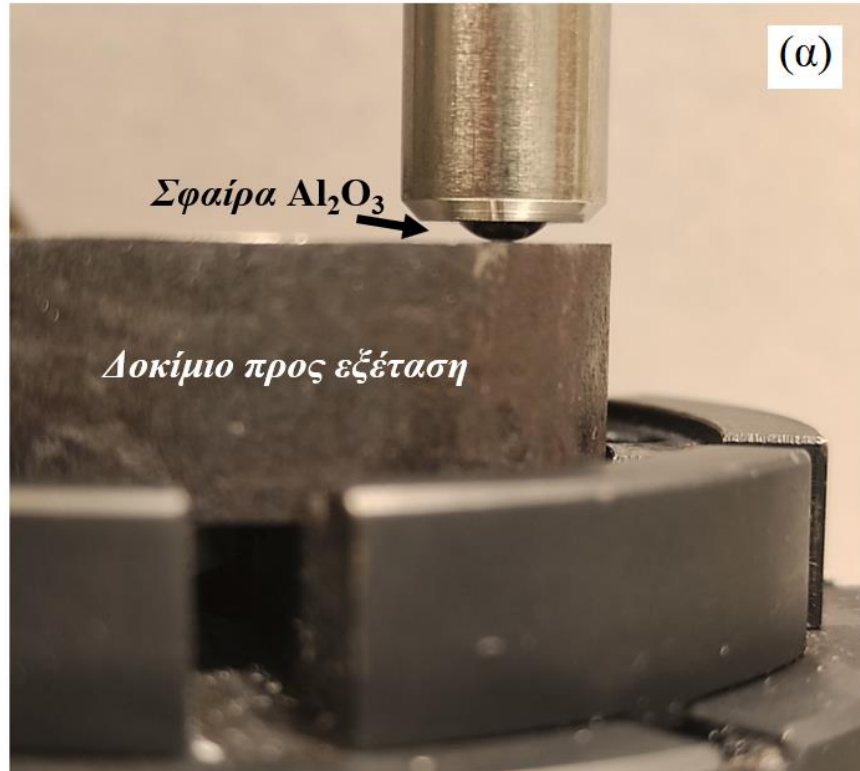
Τέλος, η αξιολόγηση της απόδοσης των παραγόμενων «επιτυχημένων» επιφανειακών στρωμάτων, πραγματοποιήθηκε με δοκιμές τριβής ολίσθησης στο τριβόμετρο σημειακής επαφής, τύπου στυλίσκου-δίσκου (Centre Suisse d' Electronique et de Microtechnique-CSEM), του εργαστηρίου Μηχανικής Επιφανειών του Πα.Δ.Α., υπό συνθήκες ξηράς τριβής (25%RH, 20°C) και σύμφωνα με το πρότυπο [ASTM G99-17](#). Η διάταξη επιτρέπει τη συνεχή καταγραφή του συντελεστή τριβής μ που αναπτύσσεται όταν ένα υλικό αναφοράς (ανταγωνιστικό υλικό), υπό τη μορφή σφαίρας, στυλίσκου ή κοπτικού άκρου ολισθαίνει επί επίπεδης επιφάνειας (επιφάνειας προς χαρακτηρισμό), με την επιβολή κάθετης φόρτισης και υπό σταθερή ταχύτητα. Για την ορθή υλοποίηση των σχετικών δοκιμών οι τροποποιημένες επιφάνειες υποβλήθηκαν σε λείανση.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι ανταγωνιστικών υλικών:

- Σφαίρα αλουμίνας (Al_2O_3) διαμέτρου 6mm (διάταξη σφαίρας – δίσκου, [Σχήμα 3.16α](#)), προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση των επιφανειακών στρωμάτων σε συνθήκες λειτουργίας και
- Κοπτικό άκρο τόννευσης με επικάλυψη c-BN (διάταξη στυλίσκου – δίσκου, [Σχήματα 3.16β](#)), προκειμένου να εκτιμηθεί συγκριτικά η δυνατότητα κατεργασίας των επιφανειακών στρωμάτων σε συμβατικές εργαλειομηχανές.

Ο λόγος επιλογής των ανταγωνιστικών αυτών υλικών σχετίζεται με το κύριο κριτήριο αξιολόγησης των νέων επιφανειακών στρωμάτων, τα οποία θα πρέπει να εμφανίζουν χαμηλές τιμές των συντελεστών τριβής και φθοράς, όταν εφαρμόζονται σε στοιχεία που θα λειτουργήσουν ως μέρη τριβοσυστημάτων, αλλά ταυτοχρόνως χαμηλό συντελεστή τριβής και ικανά υψηλό συντελεστή φθοράς, όταν πρέπει να υποβληθούν σε μηχανουργική κατεργασία και πριν τεθούν σε λειτουργία.

Σε όλα τα δοκίμια, που εξετάστηκαν ως προς την τριβολογική τους απόδοση, έγιναν δοκιμές υπό κάθετο φορτίο 1, 2, 5 και 10N, ενώ για όλα τα πειράματα διατηρήθηκαν σταθερές η γραμμική ταχύτητα και η ακτίνα ολίσθησης, $0,20 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$ και 6mm, αντίστοιχα.



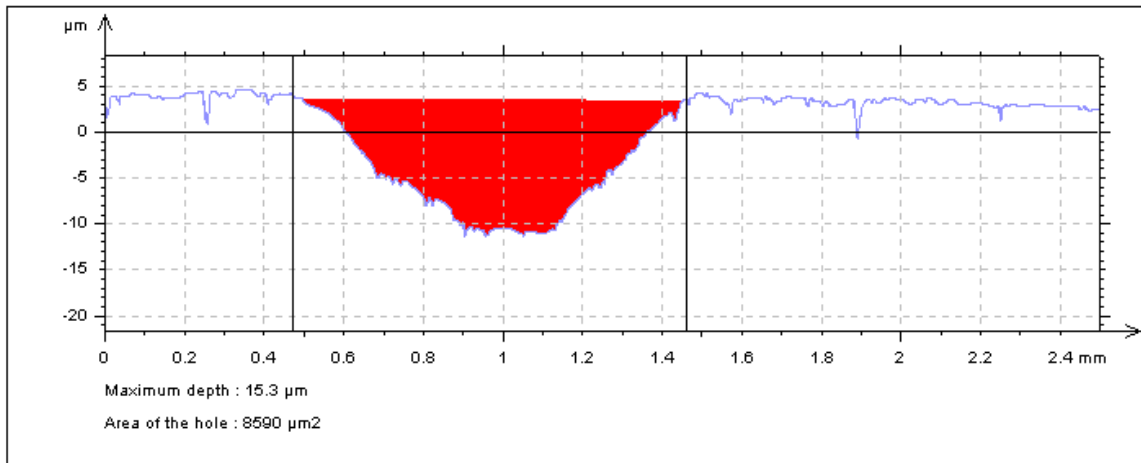
Σχήμα 3.16 Διάταξη τύπου (α) σφαίρας-δίσκου, με σφαίρα Al_2O_3 , (β) στυλίσκου-δίσκου, με κοπτικό άκρο τόνρευσης με επικάλυψη c-BN.

Η συνολική διάρκεια για τη σειρά πειραμάτων με τη χρήση σφαίρας αλουμίνιας, ως ανταγωνιστικού υλικού, ήταν 200.000 κύκλοι ολίσθησης, ενώ για τη σειρά πειραμάτων με τη χρήση κοπτικού άκρου τόνρευσης c-BN ήταν 100.000 κύκλοι.

Ο όγκος φθοράς προσδιορίστηκε με τη χρήση μηχανικού τραχύμετρου (Taylor–Hobson), που επέτρεψε τον προσδιορισμό της γεωμετρία της αύλακας φθοράς. Για κάθε δοκιμή έγιναν οκτώ (8) μετρήσεις σε διαφορετικές ευθείες κάθετες στην αύλακα φθοράς και υπολογίστηκε σε τομή το εμβαδόν του υλικού που απομακρύνθηκε (Σχήμα 3.17). Τελικά, ο όγκος φθοράς υπολογίστηκε με την ολοκλήρωση του μέσου όρου των οκτώ αυτών μετρήσεων σε όλο το μήκος της αύλακας. Υπολογίστηκε, έτσι, ο συντελεστής φθοράς (k) του εξεταζόμενου υλικού από την τυπική σχέση:

$$k = \frac{v}{F \times SL}$$

όπου v , ο μετρούμενος όγκος φθοράς σε mm^3
 F , το επιβαλλόμενο κάθετο φορτίο σε N και
 SL , ο προεπιλεγμένος αριθμός των κύκλων ολίσθησης.



Σχήμα 3.17 Προσδιορισμός της γεωμετρία της αύλακας φθοράς, με τη χρήση μηχανικού τραχύμετρου (Taylor–Hobson)

3.8 Βιβλιογραφία

ASTM G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with Pin-on-Disk Apparatus.

D. Hernandez, J.L. Sans, M. Pfänder, Pyroreflectometry to determine the true temperature and optical properties of surfaces, *J. Sol. Energy.-T ASME* 130. 2008. 031003.

J. Ballestrín, A. Marzo, I. Cañadas, J. Rodríguez, Testing a solar-blind pyrometer, *Metrologia* 47. 2010. 646–651.

Rodriguez, Jose, Inmaculada Canadas, and Eduardo Zarza. 2016. New PSA High Concentration Solar Furnace SF40. *AIP Conference Proceedings*, 1734. 070028.

Κεφάλαιο 4

Αξιολόγηση της δυνατότητας δημιουργίας αντιτριβικών «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων

4.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αφορά τις προκαταρκτικές δοκιμές, που πραγματοποιήθηκαν σε υποστρώματα διαφόρων γεωμετριών προκειμένου κατ' αρχάς να αξιολογηθεί η δυνατότητα εφαρμογής της τεχνολογίας Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας για τη δημιουργία «επιτυχών» σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων.

4.2 Επίδραση των συνθηκών της κατεργασίας στη δομή

Αρχικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε λειασμένα δοκίμια του μετάλλου βάσης, χωρίς την εναπόθεση κόνεως. Η οπτική εξέταση της επιφάνειας, που εκτέθηκε στην ηλιακή ακτινοβολία, δεν έδωσε ενδείξεις μεταβολών.




Όπως προαναφέρθηκε, οι προκαταρκτικές δοκιμές έγιναν σε δοκίμια διαφορετικών διαστάσεων, διατηρώντας πάντοτε τις ίδιες διαστάσεις του στρώματος της κόνεως (δισκία διαμέτρου 35mm και πάχους 1,5mm, επιφάνεια έκθεσης: 961,6 mm²) που προεναποτέθηκε, γεγονός που οδηγεί και σε διαφορετικά ποσοστά κάλυψης της προς κατεργασία επιφάνειας. Στον Πίνακα 4.1 συνοψίζονται τα ποσοστά κάλυψης της εκτιθέμενης επιφάνειας, που επιτυγχάνονται με τη μεταβολή των διαστάσεων του υποστρώματος και η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στο σύστημα.

- Στην περίπτωση κάλυψης της επιφάνειας σε ποσοστό 100%, δηλαδή όταν ολόκληρη η προς κατεργασία επιφάνεια ήταν πλήρως καλυμμένη με κόνι καρβιδίου (TiC ή WC), το αποτέλεσμα της έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία

ήταν ανεπιτυχές, καθώς το επιφανειακό στρώμα που ελήφθη δεν ήταν συνεχές και ένα μέρος του αποσπάστηκε από την κατεργαζόμενη επιφάνεια.

- Στην περίπτωση κάλυψης της επιφάνειας σε ποσοστό 39,3%, δηλαδή όταν κατά τη μία διάσταση το μέταλλο βάσης ήταν πλήρως καλυμμένο με την κόνη, το αποτέλεσμα της έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία ήταν επίσης ανεπιτυχές, καθώς τα θερμικά φαινόμενα που αναπτύχθηκαν προκάλεσαν μερικώς την τήξη του μετάλλου βάσης και την γεωμετρική παραμόρφωσή του.
- Στην περίπτωση κάλυψης της επιφάνειας κατά 27,5%, το λαμβανόμενο επιφανειακό στρώμα εμφάνιζε συνέχεια, χωρίς παραμόρφωση των διαστάσεων του μετάλλου βάσης. Για το λόγο αυτό, τέτοια δοκίμια επελέγησαν τελικά προκειμένου τα επιφανειακά στρώματα να αξιολογηθούν προκαταρκτικά ως προς την απόδοση σε τριβικές φορτίσεις.

Πίνακας 4.1 Επίδραση των διαστάσεων του υποστρώματος στην επιτυχία της «ηλιακής» κατεργασίας.

Διαστάσεις υποστρώματος (mm×mm×mm)	Ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας (%)	Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας
35×35×15	100,0	
35×70×15	39,3	
50×70×15	27,5	

Ως φορέας, επί του οποίου τοποθετήθηκαν τα προς κατεργασία δοκίμια, επιλέχθηκε πλάκα αλουμίνιας, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς η χρήση είτε πλάκας χαλκού, είτε συστήματος ψύξης (Σχήμα 4.1), που επίσης δοκιμάστηκαν εναλλακτικά στις προκαταρκτικές δοκιμές, δεν επέτρεψαν τη δημιουργία επιφανειακών στρωμάτων (Σχήμα 4.2), λόγω της ταχείας απαγωγής της θερμότητας από την περιοχή πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (Luca *et al.*, 2020). Ενδεικτικά, στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι τιμές των θερμικών ιδιοτήτων των δύο αυτών υλικών, όπως βρέθηκαν στη βιβλιογραφία (<http://www.matweb.com/>).

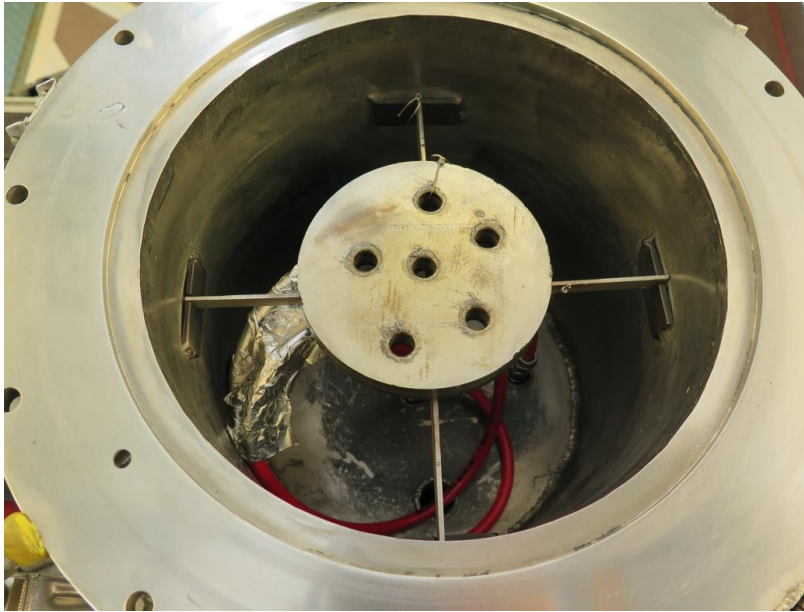
Πίνακας 4.2 Κρίσιμες θερμικές ιδιότητες στους 25°C των δύο υλικών-φορέων των δοκιμών προς «ηλιακή» κατεργασία.

Υλικό	Θερμοχωρητικότητα (J/g.K)	Θερμική αγωγιμότητα (W/m.K)
Αλουμίνια (Al ₂ O ₃)	0,880	~ 30
Χαλκός (Cu)	0,385	~ 400

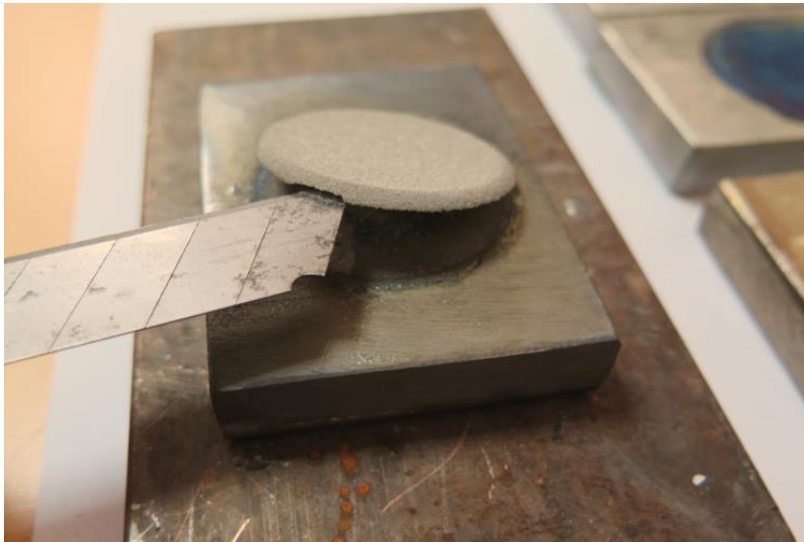
Η συνεχής καταγραφή της θερμοκρασίας, που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του δοκιμίου με τη χρήση πυρομέτρου, της θερμοκρασίας του υποστρώματος με τη χρήση θερμοζεύγους, της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και το ποσοστού «ανοίγματος» των περσίδων, επέτρεψε τον προσδιορισμό της διάρκειας έκθεσης των δοκιμών στην ηλιακή ακτινοβολία για καθεμία δοκιμή. Ένα τυπικό παράδειγμα τέτοιων καταγραφών παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.

Κατά την υλοποίηση των προκαταρκτικών πειραμάτων με τη χρήση κόνεων καρβιδίου του τιτανίου και καρβιδίου του βολφραμίου, τα διαγράμματα αυτά επέτρεψαν τον προσδιορισμό των τιμών της διάρκειας της κατεργασίας και της μέγιστης θερμοκρασίας. Για τον προσδιορισμό των τιμών αυτών, αξιοποιήθηκαν τα διαγράμματα καταγραφής της θερμοκρασίας της επιφάνειας (Σχήμα 4.4α). Παρότι, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, οι τιμές της θερμοκρασίας που λαμβάνονται με τη χρήση οπτικών πυρομέτρων ενδέχεται να παρουσιάζουν αποκλίσεις έως και 100°C, η επεξεργασία των διαγραμμάτων αυτών επέτρεψε τον περιορισμό του εύρους των τιμών της διάρκειας της «ηλιακής»

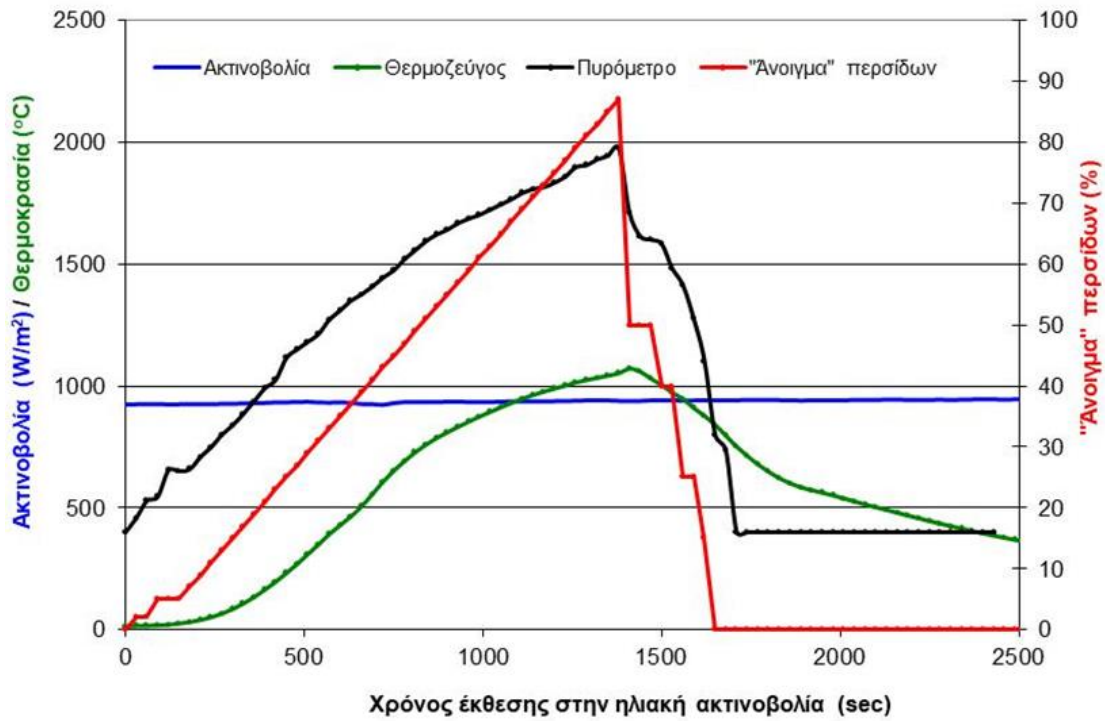
κατεργασίας. Παρατηρήθηκε συστηματικά ότι μικρής διάρκειας έκθεση, ακόμη και σε υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας, οδηγεί σε επιφάνειες με ελαττώματα δομής, όπως είναι οι πόροι ή/και οι ρωγμές (Σχήμα 4.4.β) ή ακόμη και σε αποφλοίωση του δοκιμίου (Σχήμα 4.4γ). Για το λόγο αυτό, η εξέταση που ακολουθεί, περιορίζεται στα πειράματα που σημειώνονται ως κατ' αρχάς επιτυχή στο Σχήμα 4.4α.



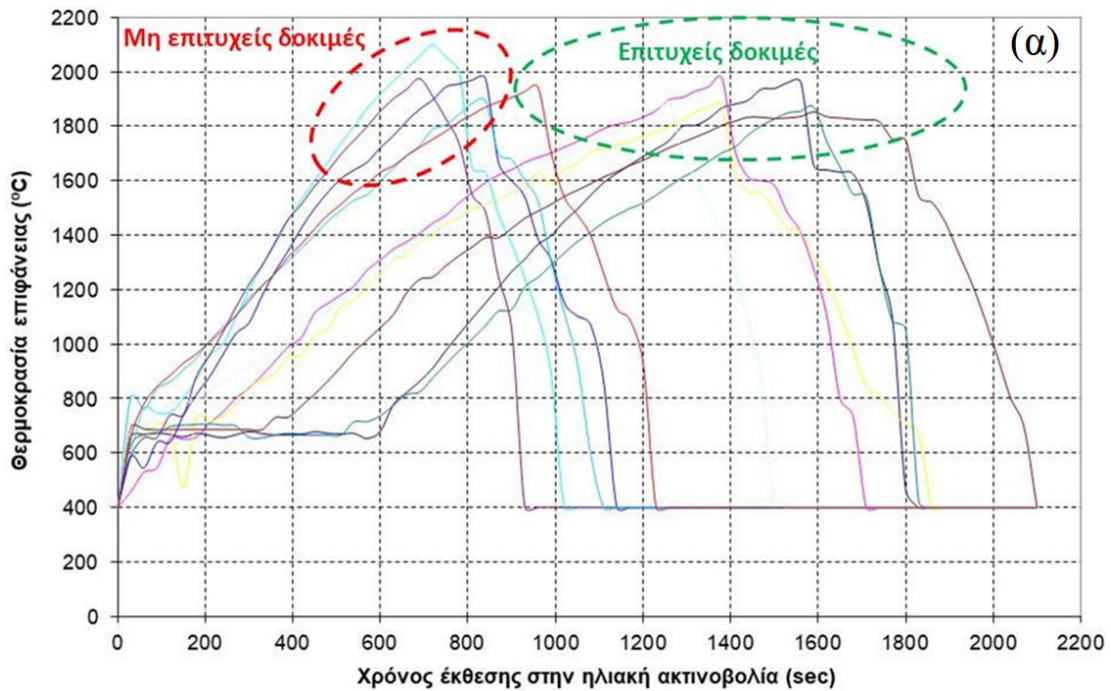
Σχήμα 4.1 Σύστημα ψύξης (ως φορέας δοκιμίων) εντός του θαλάμου δοκιμών.

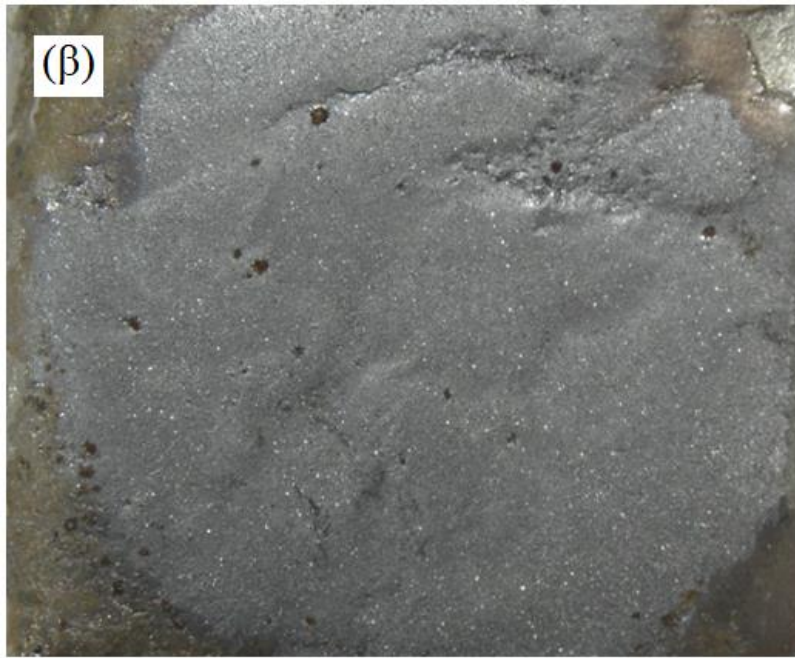


Σχήμα 4.2 Ανεπιτυχές αποτέλεσμα λόγω της ταχείας απαγωγής της θερμότητας από την περιοχή πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (πλάκα χαλκού ως φορέας δοκιμίων).



Σχήμα 4.3 Τυπικά διαγράμματα καταγραφών της χρονικής εξέλιξης των παραμέτρων της «ηλιακής» κατεργασίας. Αφορά την ακτινοβόληση δοκιμίων με εναπόθεση κόνεως TiC.





Σχήμα 4.4 (α) Εξέλιξη της θερμοκρασίας της κατεργαζόμενης επιφάνειας. (β) Επιφάνεια με διάσπαρτους πόρους και ρωγμές. (γ) Αποφλοίωση της επιφάνειας (μακρογραφίες). Αφορά την ακτινοβόληση δοκιμίων με εναπόθεση κόνεως TiC.

4.3 Προκαταρκτικός χαρακτηρισμός των «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων

4.3.1 Μικροδομή και γεωμετρία των επιφανειακών στρωμάτων

Στην περίπτωση των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση σωματιδίων και προκειμένου αυτά να εμφανίζουν ισότροπη μηχανική συμπεριφορά, καθοριστικό παράγοντα για την αξιολόγησή τους αποτελεί η ομοιόμορφη διασπορά των σωματιδίων στον όγκο της μήτρας. Εν προκειμένω, ως κρίσιμο χαρακτηριστικό της δομής των λαμβανομένων «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων, εξετάζεται η δυνατότητα ομοιογενούς διασποράς των καρβιδίων του τιτανίου εντός της χαλύβδινης μήτρας. Για το λόγο αυτό, σε όλα τα δοκίμια, που ελήφθησαν μετά από τις «επιτυχείς» ηλιακές δοκιμές, πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφική παρατήρηση των κάθετων τομών των επιφανειακών στρωμάτων και ελέγχθηκε η ομοιομορφία της διασποράς των καρβιδίων του TiC.

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται μια τυπική εικόνα της μικροδομής που επιτεύχθηκε και αφορά την κατεργασία που περιγράφεται από την καφέ καμπύλη του Σχήματος 4.4α. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, με την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, δημιουργήθηκε ένα επιφανειακό στρώμα σύνθετου υλικού πάχους ~1250 μm (Σχήμα 4.5α), το οποίο παρουσιάζει ομοιογενή διασπορά των σωματιδίων TiC, που είχαν προεναποτεθεί, και συνέχεια με το μέταλλο βάσης, χωρίς να παρατηρούνται ελαττώματα μικροδομής στη μεταξύ τους διεπιφάνεια (Σχήματα 4.5β και 4.6α).

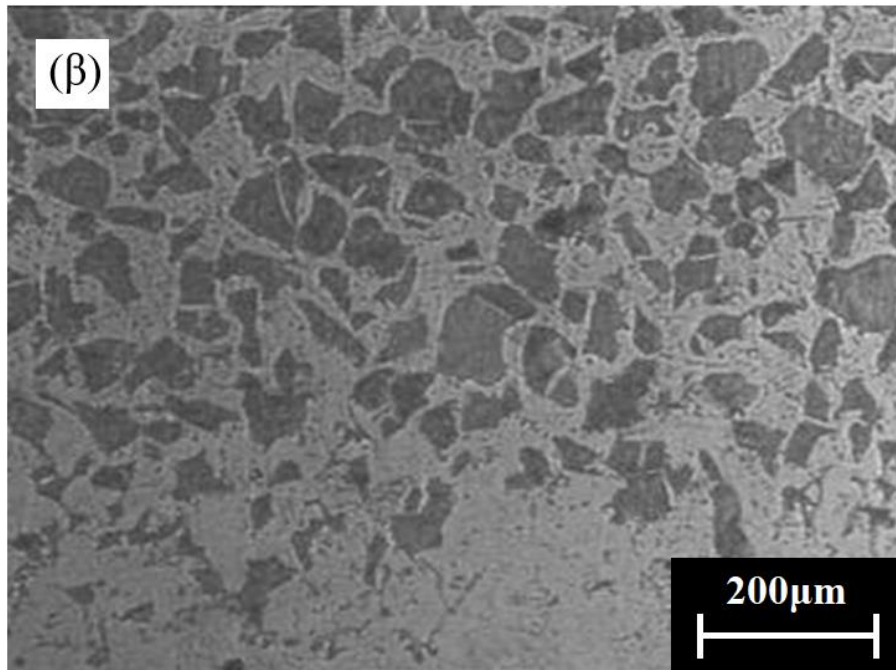
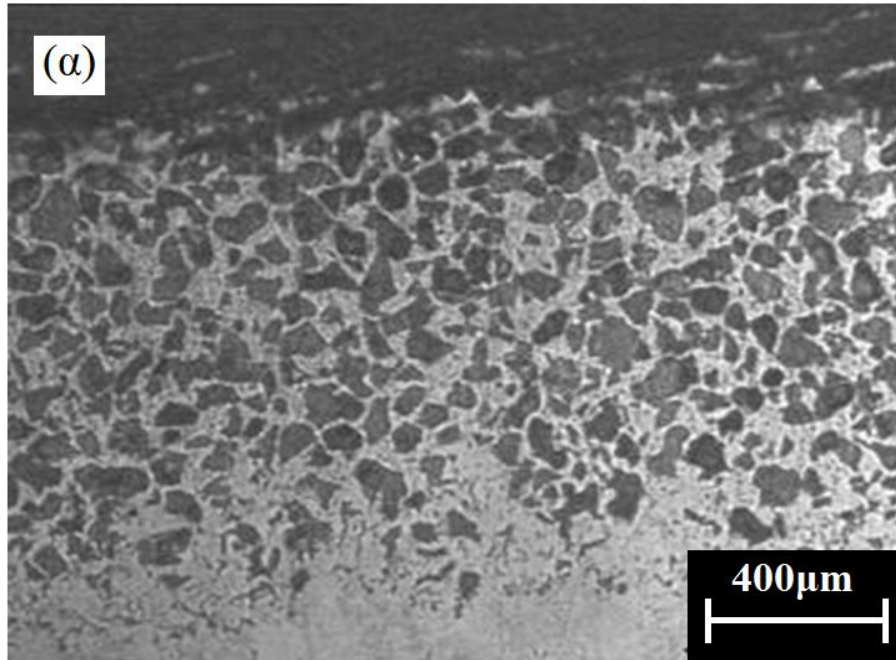
Στο στρώμα του επιφανειακού σύνθετου υλικού δεν παρατηρήθηκε πορώδες ή ρωγμάτωση, που αποτελούν από τα πλέον συνήθη ελαττώματα που αναπτύσσονται κατά τη στερεοποίηση μεταλλικών τηγμάτων (Σχήμα 4.5γ). Επιπλέον, παρατηρείται καλή συνάφεια των σωματιδίων του καρβιδίου με τη μεταλλική μήτρα (Σχήμα 4.6β), γεγονός που υποδηλώνει την καλή διαβροχή τους κατά την κατεργασία. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένα μέρος των σωματιδίων εμφανίζει ενδείξεις μικρο-θραύσης (Σχήμα 4.6γ), χωρίς αυτό ωστόσο να επηρεάζει τη γενικότερη ακεραιότητα του επιφανειακού στρώματος. Οι

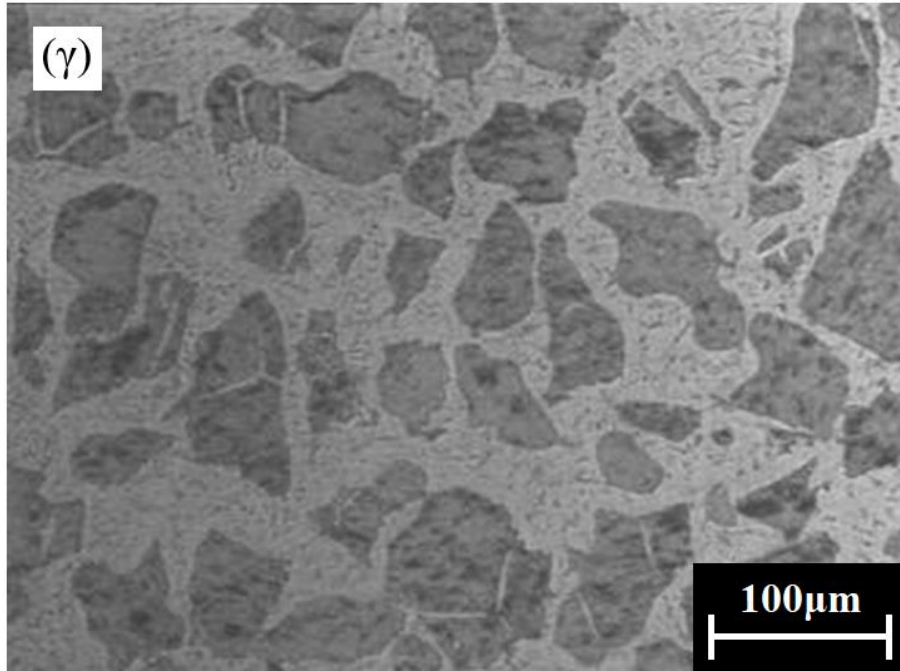
παρατηρήσεις αυτές αφορούν το σύνολο των δοκιμίων, που εξετάστηκαν σε αυτό το προκαταρκτικό στάδιο της μελέτης.

Στην περίπτωση που στο μέταλλο βάσης προ-εναποτέθηκε κόνις καρβιδίου του βολφραμίου, η στερεοσκοπική παρατήρηση τομών κάθετων στην επιφάνεια κατεργασίας ανέδειξε, επίσης, τη δυνατότητα διασποράς των σωματιδίων στη μεταλλική μήτρα (Σχήματα 4.7α και 4.7β). Σε αντίθεση με την περίπτωση των σωματιδίων TiC, η διασπορά αυτή δεν είναι ομοιογενής, αλλά στο επιφανειακό στρώμα διακρίνονται δύο στοιβάδες διαφορετικής μικροδομής:

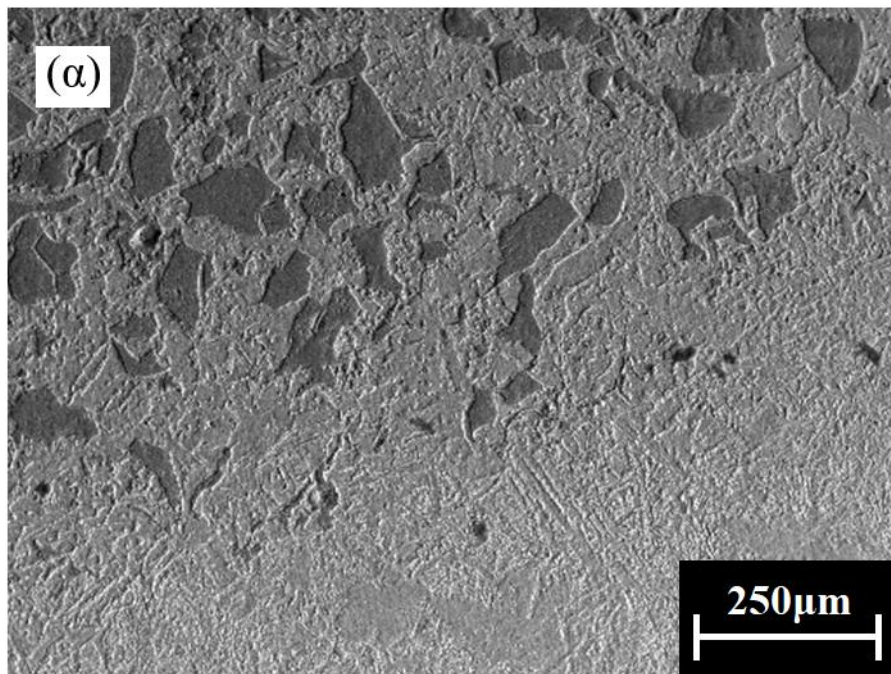
- Η εξωτερική στρώση, όπου όντως έχει λάβει χώρα ομοιογενής διασπορά των σωματιδίων υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, και
- Η εσωτερική στρώση όπου δεν διακρίνεται ευκρινώς διασπορά των καρβιδίων, γίνεται όμως αντιληπτή η επίδραση της κατεργασίας.

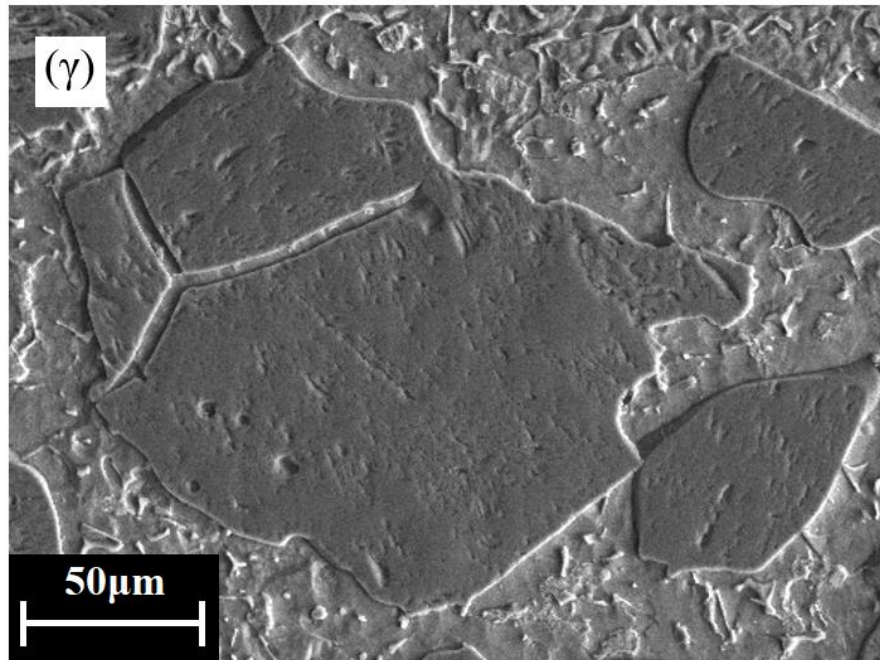
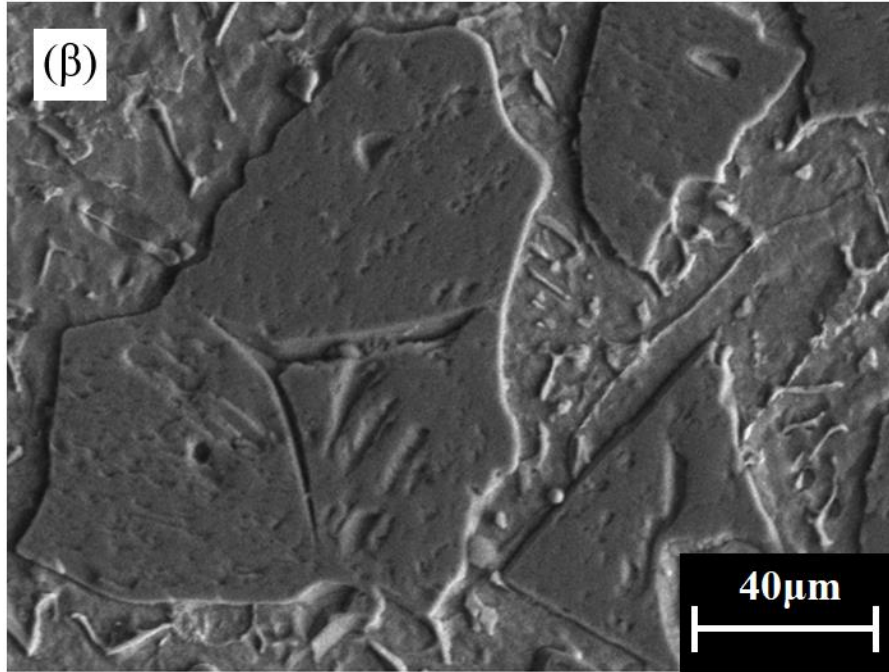
Η σύγκριση των καμπυλών εξέλιξης της επιφανειακής θερμοκρασίας (Σχήμα 4.7γ) έδειξε ότι για υψηλότερους χρόνους ηλιακής έκθεσης το πάχος της υποκείμενης στοιβάδας αυξάνεται εις βάρος της επιφανειακής στρώσης ομοιόμορφης διασποράς. Επιπλέον, είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία [Chaidemenopoulos *et al.*, 2019] ότι το καρβίδιο του βολφραμίου προσβάλλεται από τη δράση τηγμένων σιδηρούχων κραμάτων. Για τον λόγο αυτό, η περίπτωση της ενίσχυσης με διασπορά WC εξετάζεται διεξοδικά στο Κεφάλαιο 6.



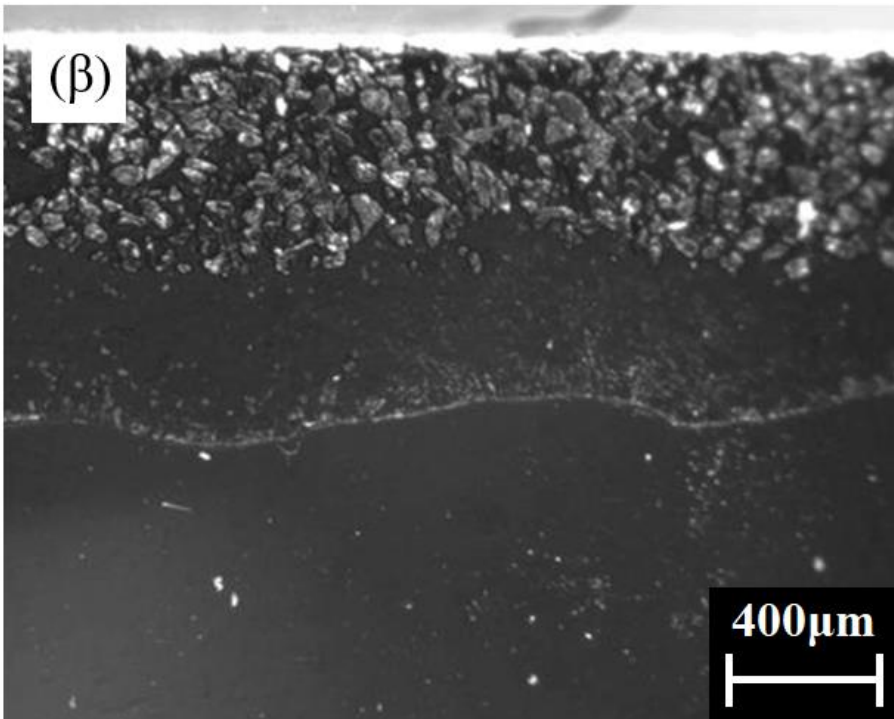
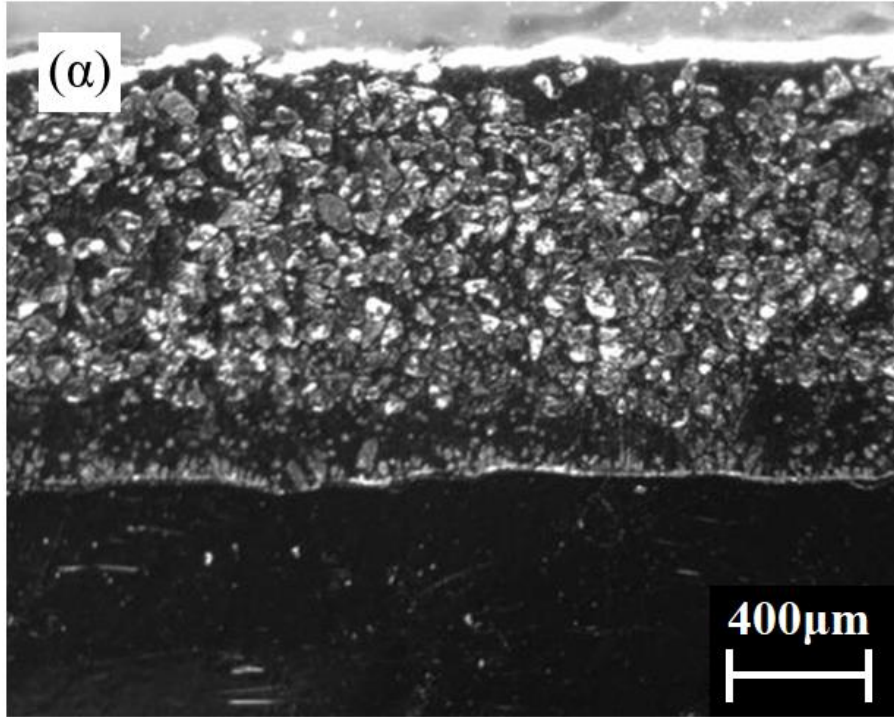


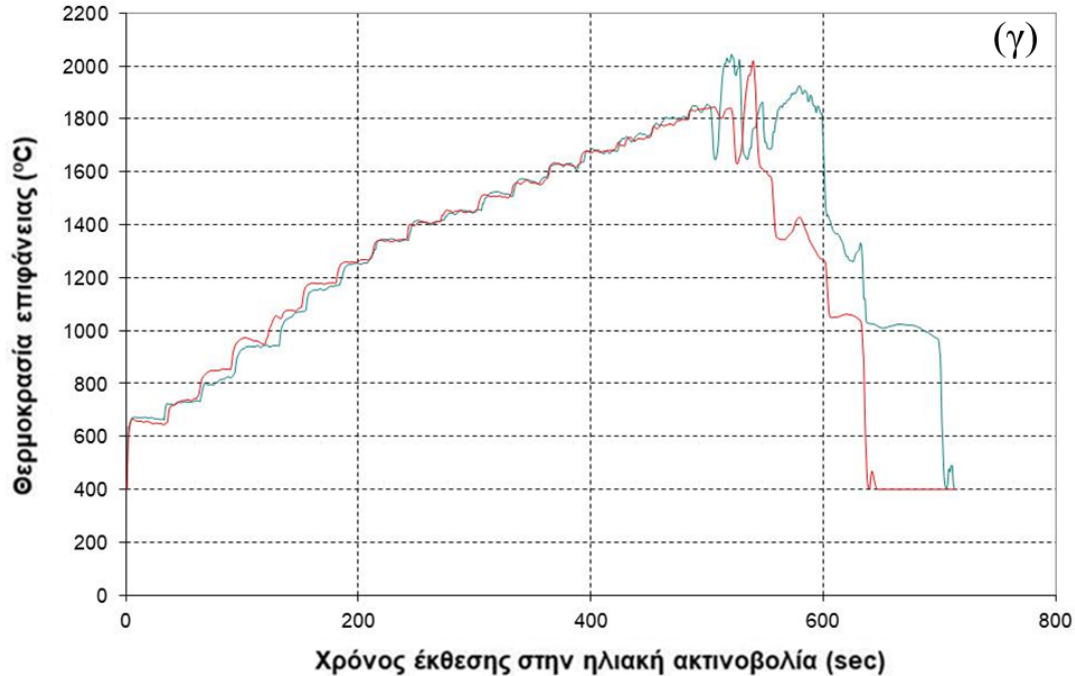
Σχήμα 4.5 Διαδοχικές μεγεθύνσεις επιτυχούς «ηλιακού» σύνθετου επιφανειακού στρώματος με διασπορά καρβιδίων του τιτανίου, μετά από έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και παραμονή σε θερμοκρασία υψηλότερη των 1440°C για ~1053s (μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου).





Σχήμα 4.6 Μικρογραφίες ενδεικτικές της: (α) καλής διεπιφάνειας με το μέταλλο βάσης, (β) καλής συνάφειας καρβιδίου-χαλύβδινης μήτρας και (γ) σημείων μικρο-θραύσης των σωματιδίων ενίσχυσης «ηλιακού» σύνθετου επιφανειακού στρώματος με διασπορά καρβιδίων του τιτανίου (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).





Σχήμα 4.7 Προκαταρκτικές δοκιμές με προ-εναπόθεση κόνεως WC: «ηλιακό» επιφανειακό στρώμα μετά από κατεργασία που περιγράφεται από την κόκκινη (α) και την πράσινη (β) καμπύλη του διαγράμματος (γ). (γ) Εξέλιξη της θερμοκρασίας της επιφάνειας κατά την έκθεσή της σε ηλιακή ακτινοβολία.

4.3.2 Αξιολόγηση της απόδοσης των «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων σε τριβή ολίσθησης

Στη συνέχεια, τα «ηλιακά» επιφανειακά στρώματα, που ελήφθησαν κατά τις προκαταρκτικές δοκιμές, υποβλήθηκαν σε δοκιμές τριβής, προκειμένου να εκτιμηθεί ο αντιτριβικός χαρακτήρας τους υπό συνθήκες τυποποιημένου ελέγχου σε τριβή ολίσθησης και να αξιολογηθεί η εξέλιξη του συντελεστή φθοράς των επιφανειακών στρωμάτων, με τη διενέργεια διακοπόμενων δοκιμών.

Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα της εξέλιξης του συντελεστή τριβής για τα δυο ανταγωνιστικά υλικά:

- Στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε σφαίρα αλουμίνιας, ο συντελεστής τριβής μόνιμης κατάστασης έτεινε στο $0,75 \pm 0,02$ και στο $0,47 \pm 0,02$, για σύνθετα επιστρώματα με ενίσχυση σωματιδίων WC και TiC, αντιστοίχως (Σχήμα 4.8α).

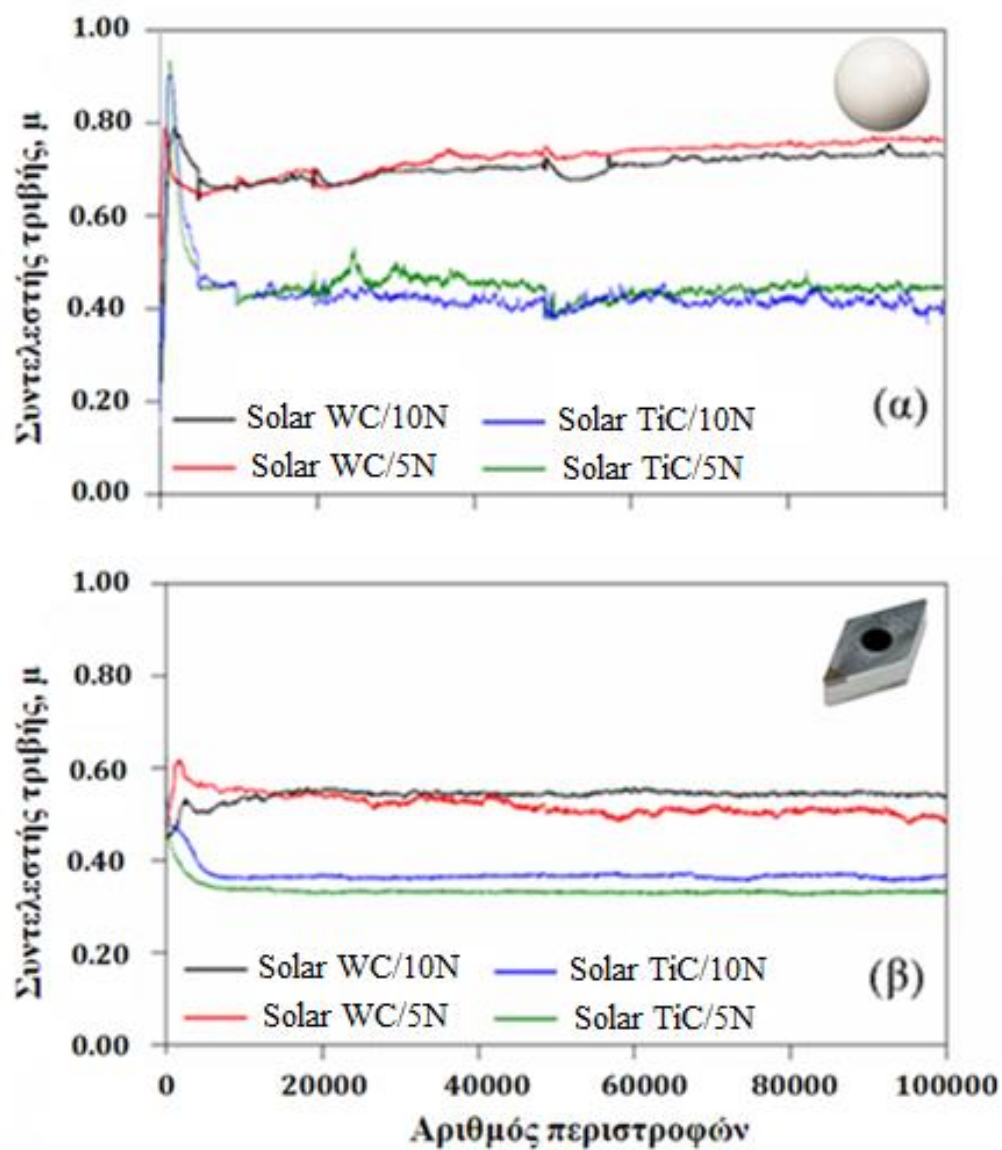
- Στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε ένθετο πλακίδιο τόννευσης c-BN, ο συντελεστής τριβής μόνιμης κατάστασης έτεινε στο $0,55 \pm 0,02$ και στο $0,39 \pm 0,02$, για σύνθετα επιστρώματα με ενίσχυση σωματιδίων WC και TiC, αντιστοίχως, ανεξαρτήτως του εφαρμοζόμενου φορτίου (Σχήμα 4.8β).

Πειράματα που έγιναν για λόγους σύγκρισης υπό τις ίδιες πειραματικές συνθήκες στο μέταλλο βάσης έδωσαν τιμές συντελεστή τριβής της τάξεως του $0,72 \pm 0,02$.

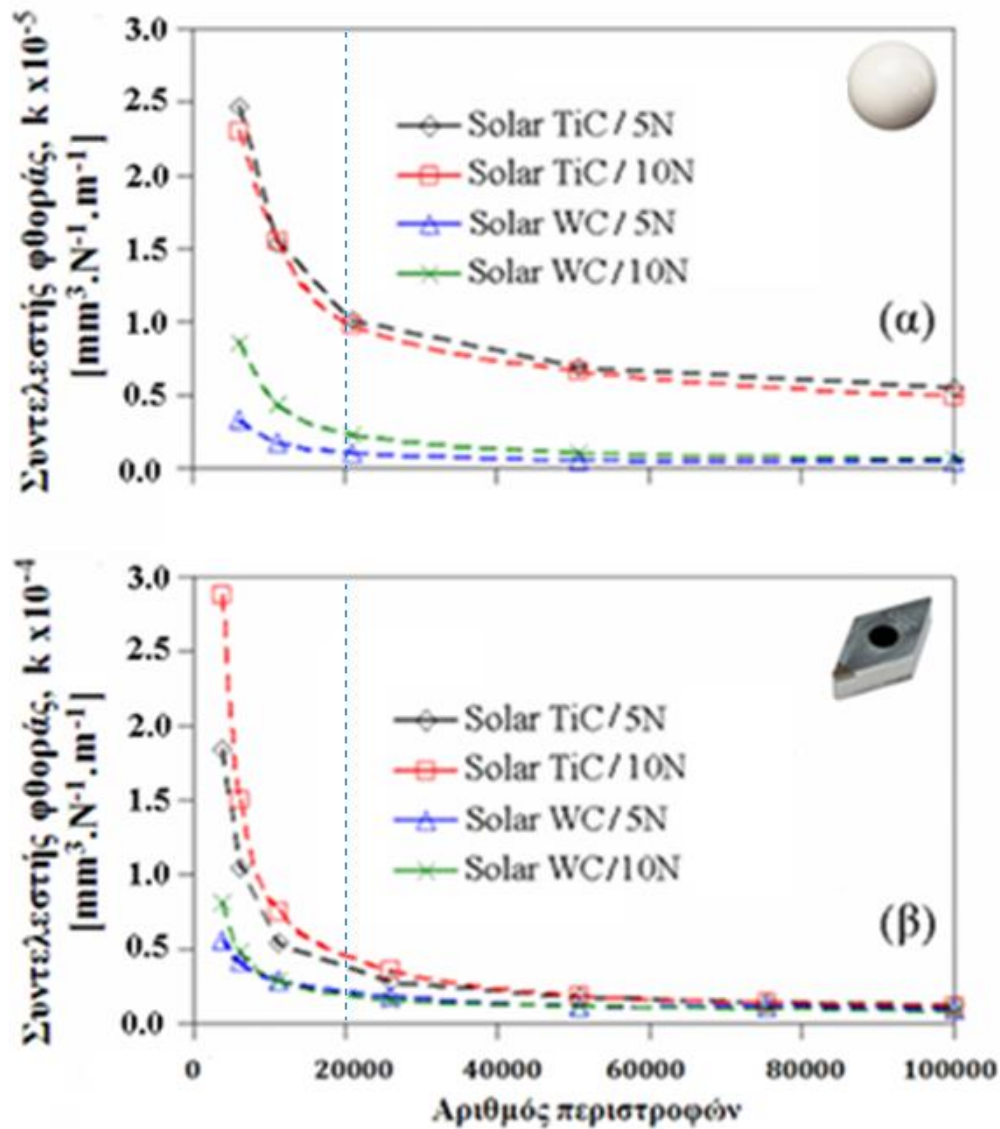
Κατ' αντιστοιχία με τα διαγράμματα του Σχήματος 4.8, η εξέλιξη του συντελεστή φθοράς για τους δυο τύπους των «ηλιακών» συνθέτων επιφανειακών στρωμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9:

- Με την έναρξη της κατεργασίας τους, τα στρώματα με ενίσχυση σωματιδίων TiC εμφανίζουν υψηλότερους ρυθμούς αποβολής υλικού από εκείνα με ενίσχυση σωματιδίων WC (Σχήμα 4.9α). Μετά από 40.000 κύκλους ολίσθησης, οι υπολογιζόμενοι ρυθμοί φθοράς των επιφανειακών στρωμάτων και των δυο τύπων τείνουν προς την ίδια τιμή των $\sim 0,20 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, παρουσιάζοντας καλύτερη κατεργασιμότητα με συμβατικές τεχνικές από επικαλύψεις WC θερμικού ψεκασμού [Mourlas *et al.*, 2014].
- Η απόδοση των «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων σε συνθήκες λειτουργίας διαφοροποιείται με το είδος των περιεχομένων σωματιδίων ενίσχυσης (Σχήμα 4.9β). Σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, τα επιστρώματα με ενίσχυση σωματιδίων WC εμφανίζουν συντελεστή φθοράς της τάξεως των $0,25 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, ενώ εκείνα με ενίσχυση σωματιδίων TiC σχεδόν τριπλάσια.

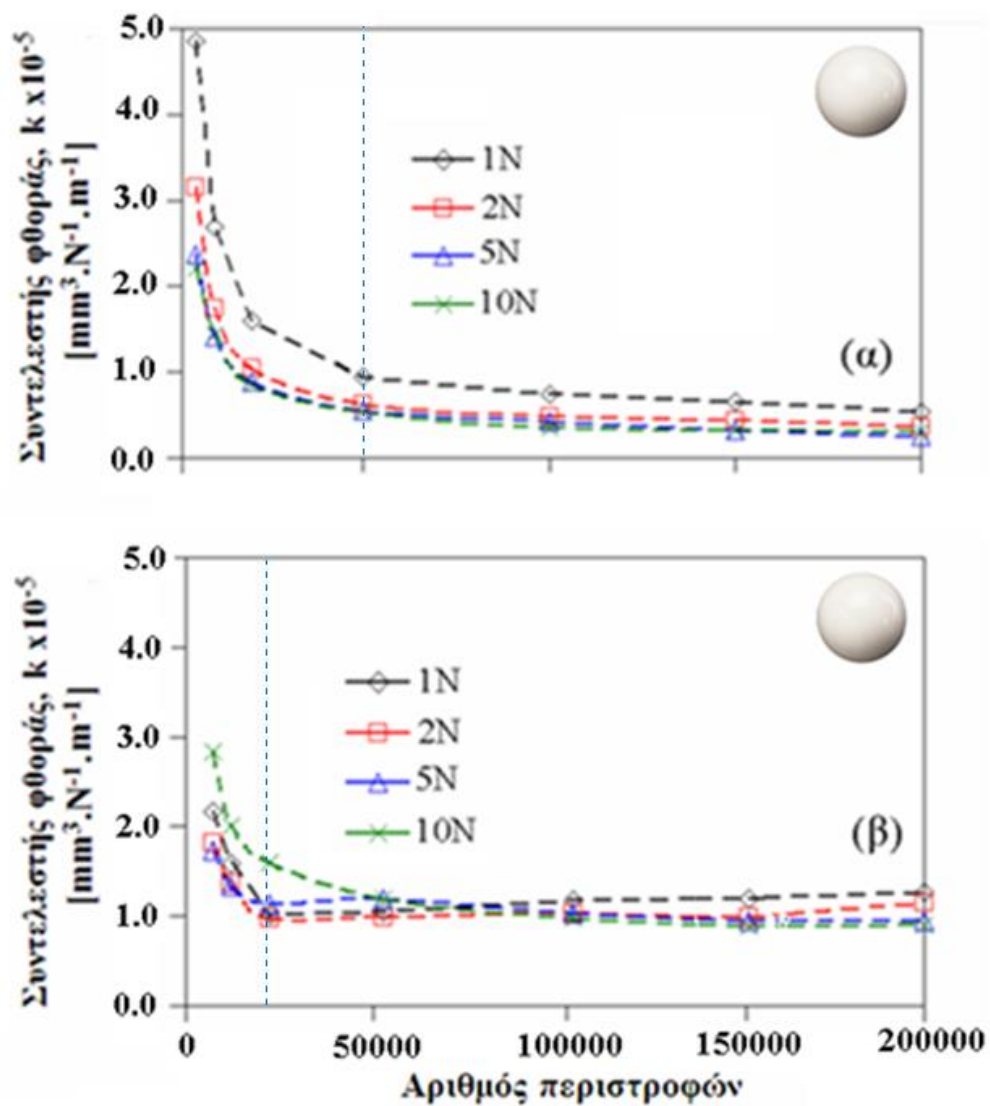
Για λόγους σύγκρισης, αξίζει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής φθοράς k χαλύβων, μετά από ενανθρακαζώτωση – μια συνήθη επιφανειακή κατεργασία σε βιομηχανική κλίμακα – είναι $\sim 0,4 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ [Karamboiki *et al.*, 2013] έναντι σφαίρας Al_2O_3 .



Σχήμα 4.8 Εξέλιξη του συντελεστή τριβής συναρτήσει των κύκλων ολίσθησης για «ηλιακά» σύνθετα επιφανειακά στρώματα με ενίσχυση σωματιδίων WC και TiC. Δοκιμές με κάθετο φορτίο 5 και 10N και χρήση ως ανταγωνιστικού (α) σφαίρας Al_2O_3 και (β) εργαλείου τόννευσης με επικάλυψη c-BN.



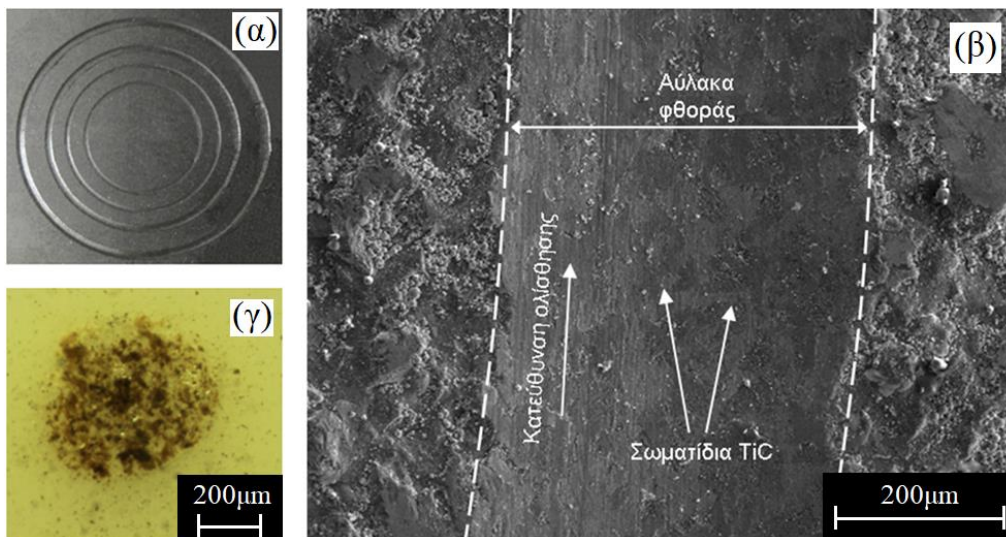
Σχήμα 4.9 Εξέλιξη του συντελεστή φθοράς συναρτήσει των κύκλων ολίσθησης για «ηλιακά» σύνθετα επιφανειακά στρώματα με ενίσχυση σωματιδίων WC και TiC. Διακοπτόμενες δοκιμές με κάθετο φορτίο 5 και 10N και χρήση ως ανταγωνιστικού (α) σφαίρας Al_2O_3 και (β) εργαλείου τόννευσης με επικάλυψη c-BN.



Σχήμα 4.10 Εξέλιξη του συντελεστή φθοράς συναρτήσει των κύκλων ολίσθησης, σύνθετου επιφανειακού στρώματος ενισχυμένου με σωματίδια TiC, με (α) CSE και (β) συμβατική τεχνικής FCAW, με ανταγωνιστικό υλικό σφαίρα Al_2O_3 .

Στο [Σχήμα 4.10](#) παρουσιάζεται η εξέλιξη των συντελεστών φθοράς, και για τις τέσσερις τιμές επιβαλλόμενων φορτίων, των επιφανειακών στρωμάτων με ενίσχυση σωματιδίων TiC, που παρήχθησαν με την προτεινόμενη «ηλιακή» κατεργασία, καθώς και με την συμβατική τεχνική αναγόμωσης FCAW με χρήση σύρματος με «γέμιση» καρβιδίων. Και στις δύο περιπτώσεις, η αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου οδηγεί σε μείωση των συντελεστών φθοράς. Τα «ηλιακά» επιφανειακά στρώματα εμφανίζουν συστηματικά υψηλότερη αντοχή σε φθορά, - με μέσο συντελεστή φθοράς $\sim 0,6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, για τις 4 τιμές κάθετου φορτίου, - συγκρινόμενα με τα στρώματα επιγόμωσης, των οποίων ο συντελεστής φθοράς τείνει στο $1,20 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Οι μηχανισμοί αποβολής υλικού κατά την ολίσθηση αξιολογήθηκαν με τη παρατήρηση των επιφανειών φθοράς με τη χρήση μικροσκοπίων.

Στο [Σχήμα 4.11](#) παρουσιάζονται ενδεικτικές εικόνες των αποτελεσμάτων των δοκιμών σε «ηλιακά» επιφανειακά στρώματα με ενίσχυση σωματιδίων TiC. Το [Σχήμα 4.11α](#) είναι μακρογραφία δοκιμίου, όπου διακρίνονται οι τέσσερις αύλακες φθοράς, - μια για κάθε τιμή επιβαλλόμενου φορτίου - μετά την ολοκλήρωση των τριβολογικών δοκιμών. Το [Σχήμα 4.11β](#) είναι μεγέθυνση της αύλακας φθοράς, στην οποία εμφανίζονται ίχνη πλαστικής παραμόρφωσης της χαλύβδινης μήτρας και κατά τόπους αποκάλυψη των σωματιδίων ενίσχυσης. Τέλος, στο [Σχήμα 4.11γ](#) παρουσιάζεται η μορφολογία της φθειρόμενης επιφάνειας του ανταγωνιστικού υλικού (σφαίρα Al_2O_3), όπου φαίνεται να έχουν προσκολληθεί ψήγματα φθοράς (debris) του τριβοσυστήματος. Μετά το πέρας κάθε διακοπτόμενης δοκιμής, τα ψήγματα φθοράς συλλέχθηκαν προκειμένου να πραγματοποιηθεί περαιτέρω μελέτη μικροδομής και να εκτιμηθεί η επίδρασή τους στους μικρο-μηχανισμούς φθοράς των επιστρωμάτων.



Σχήμα 4.11 Επιφάνειες φθοράς συζυγών σωμάτων τριβοςυστήματος: «ηλιακό» σύνθετο με ενίσχυση σωματιδίων TiC/σφαίρα Al₂O₃: (α) Μακρογραφία δοκιμίου, μετά από δοκιμές (4) φορτίων, (β) Μικρογραφία κάτοψης τροχιάς φθοράς, (γ) Στερεογραφία της ανταγωνιστικής επιφάνειας.

Συνοψίζοντας ως προς τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων, αυτά:

- Εμφανίζουν υψηλή αντοχή σε φθορά, υψηλότερη εκείνης των αντιστοίχων στρωμάτων επιγόμεσης, που λαμβάνονται με την συμβατική τεχνική FCAW και
- Είναι κατεργάσιμα με συμβατικές μηχανουργικές τεχνικές, γεγονός που επιτρέπει την εύκολη κατεργασία των επιφανειακά τροποποιημένων μηχανολογικών στοιχείων.

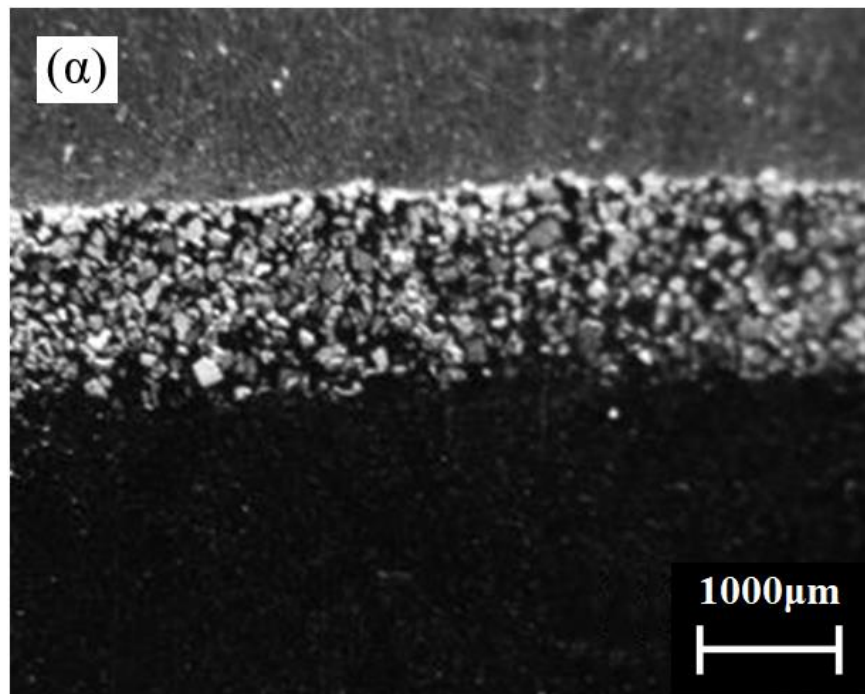
4.4 Φυσικό μοντέλο των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα

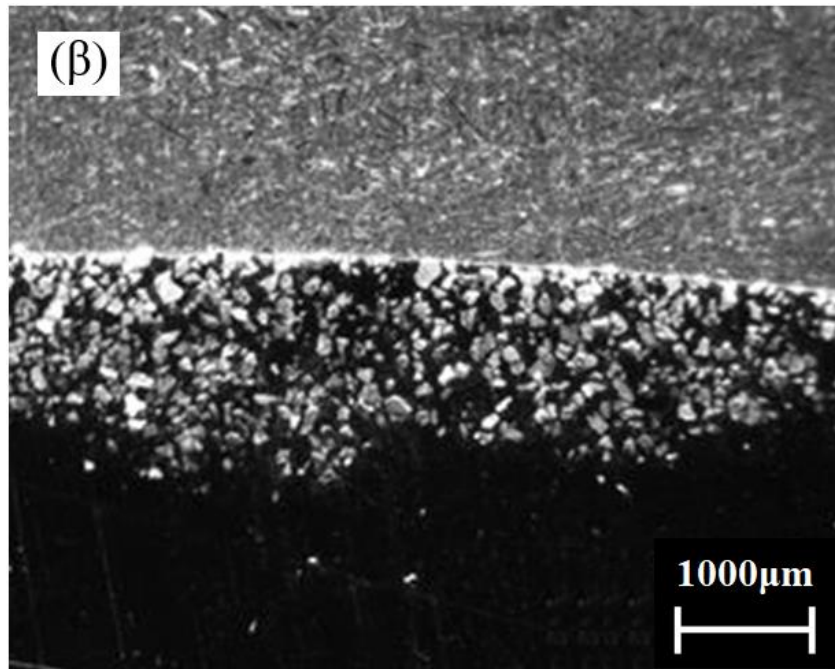
Προκειμένου να διερευνηθούν οι φυσικοί μηχανισμοί, που λαμβάνουν χώρα κατά την έκθεση σε Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια (ή ακτινοβολία) μεταλλικών υποστρωμάτων, στα οποία έχει προ-εναποτεθεί κόνις καρβιδίου, μελετήθηκε το σύστημα-μοντέλο κόνεως TiC επί χαλύβδινου υποστρώματος. Για όλες τις σχετικές προκαταρκτικές δοκιμές, που έχουν περιγραφεί προηγουμένως, προσδιορίστηκε η γεωμετρία του επιφανειακού στρώματος που λήφθηκε, μετρήθηκε το μέγιστο πάχος του στο κέντρο της κατεργαζόμενης επιφάνειας και τα αποτελέσματα αυτά

συναξιολογήθηκαν με τις καμπύλες εξέλιξης της θερμοκρασίας, από τις οποίες προσδιορίστηκε και η διάρκεια της «ηλιακής» κατεργασίας.

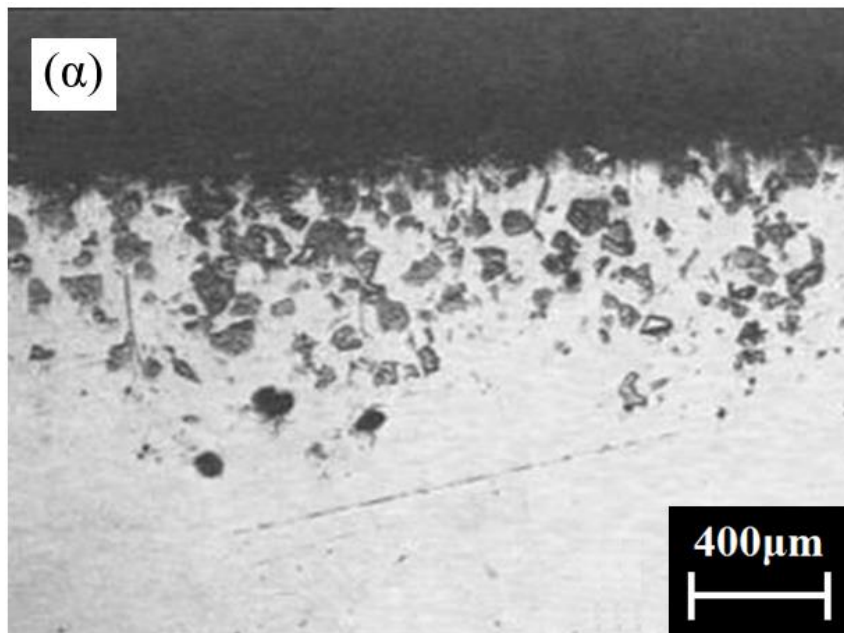
Γενικότερα, το επιφανειακό στρώμα εμφανίζει κωδωνοειδή μορφολογία, με το μέγιστο πάχος να παρατηρείται στο κέντρο της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Η μέτρηση του πάχους έγινε κατ' αρχάς με μετρήσεις σε μικρογραφίες στερεοσκοπίου (Σχήμα 4.12) και οι τιμές επιβεβαιώθηκαν με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου (Σχήμα 4.13).

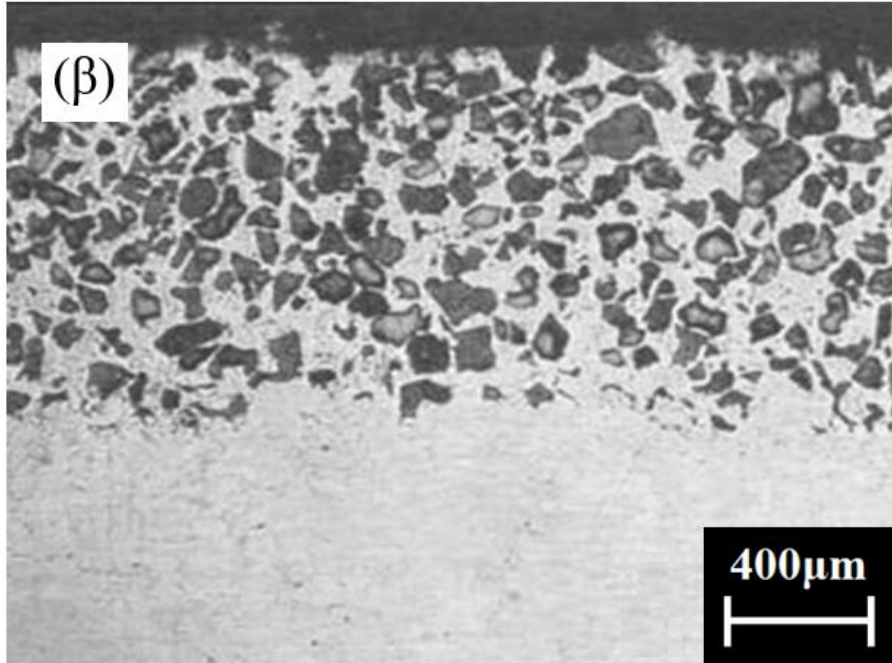
Προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών, από τις καμπύλες των «επιτυχών» ηλιακών δοκιμών, μετρήθηκε η διάρκεια παραμονής της επιφάνειας σε τιμές θερμοκρασίας υψηλότερες της θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου βάσης (Σχήμα 4.14), η οποία όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, κυμαίνεται από 1420 έως 1460°C. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να υπενθυμίζουμε ότι οι τιμές που μετρώνται με τη χρήση οπτικού πυρόμετρου σε αυτό το εύρος, ενδέχεται να αποκλίνουν ακόμη και κατά 100°C. Ωστόσο, η επεξεργασία των καμπυλών αυτών, λαμβάνοντας υπόψη για όλες τις δοκιμές τη μέση θεωρητική θερμοκρασία τήξης του υποστρώματος (1440°C), εκτιμάται ότι μπορεί να δώσει μία εμπειρική εκτίμηση του βάθους κατεργασίας ή αλλιώς του πάχους του επιφανειακού στρώματος.





Σχήμα 4.12 Εικόνες στερεοσκοπίου των επιφανειακών στρωμάτων που ελήφθησαν με τις «ηλιακές» κατεργασίες που περιγράφονται από την (α) γκρι και (β) τη ροζ καμπύλη του Σχήματος 4.4



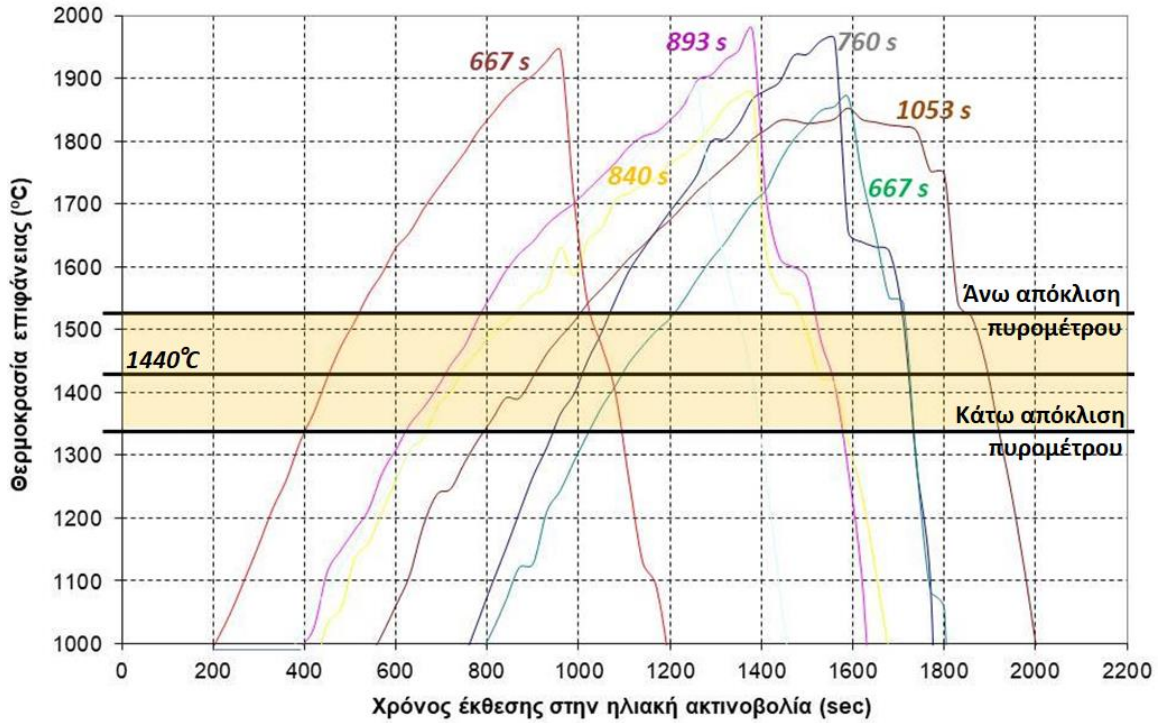


Σχήμα 4.13 Εικόνες οπτικού μικροσκοπίου των επιφανειακών στρωμάτων που ελήφθησαν με τις «ηλιακές» κατεργασίες που περιγράφονται από την (α) πράσινη και (β) την κίτρινη καμπύλη του Σχήματος 4.4.

Πραγματικά, η αντιστοίχιση των παχών του επιφανειακού στρώματος, που μετρήθηκαν με οπτικά μέσα, με τη διάρκεια παραμονής σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου βάσης (Πίνακας 4.3), έδειξε μια γραμμική σχέση μεταξύ των δυο αυτών μεγεθών (Σχήμα 4.15) που μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω ευθεία παλινδρόμησης, με συντελεστή συσχέτισης (R^2) ίσο προς 0,9758:

$$y = 1,6759x - 529,7$$

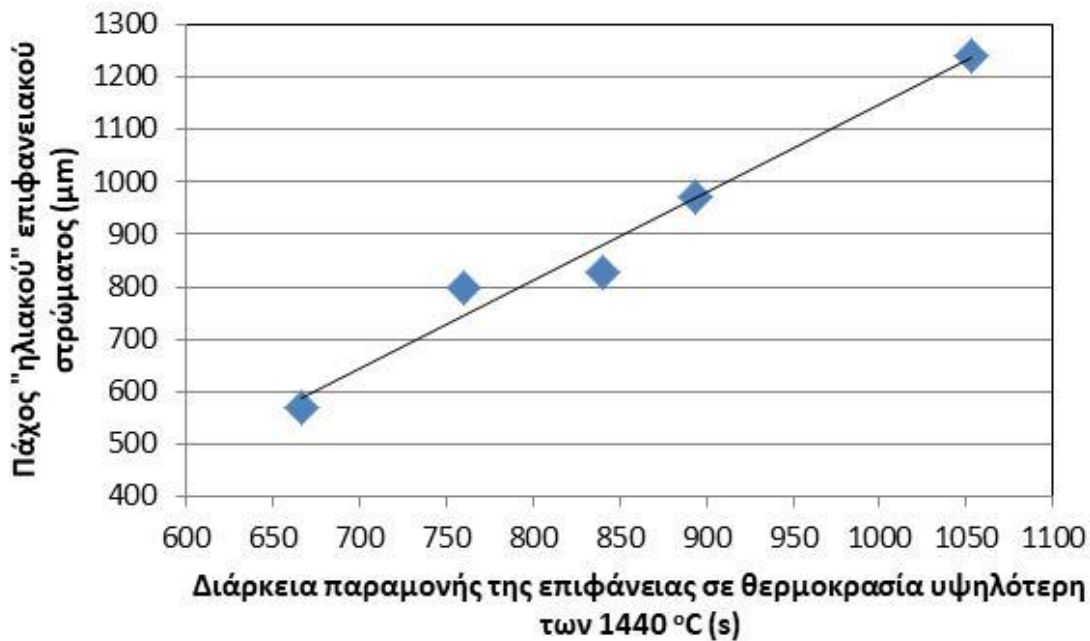
όπου: x , η διάρκεια παραμονής της επιφάνειας σε θερμοκρασία υψηλότερη των 1440°C (σε s),
 y , το μέγιστο βάθος του επιφανειακού στρώματος (σε μm).



Σχήμα 4.14 Καμπύλες μεταβολής της θερμοκρασίας της επιφάνειας κατεργασίας συναρτήσεως του χρόνου έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία.

Πίνακας 4.3 Διάρκεια παραμονής σε θερμοκρασία υψηλότερη της μέσης θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου βάσης και αντίστοιχες τιμές του μέγιστου βάρους «ηλιακής» κατεργασίας που επιτεύχθηκε στο κέντρο της επιφάνειας.

Παραμονή της επιφάνειας σε θερμοκρασία >1440 °C (s)	Μετρούμενο πάχος «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος (μm)
667	571
760	800
840	829
893	970
1053	1243



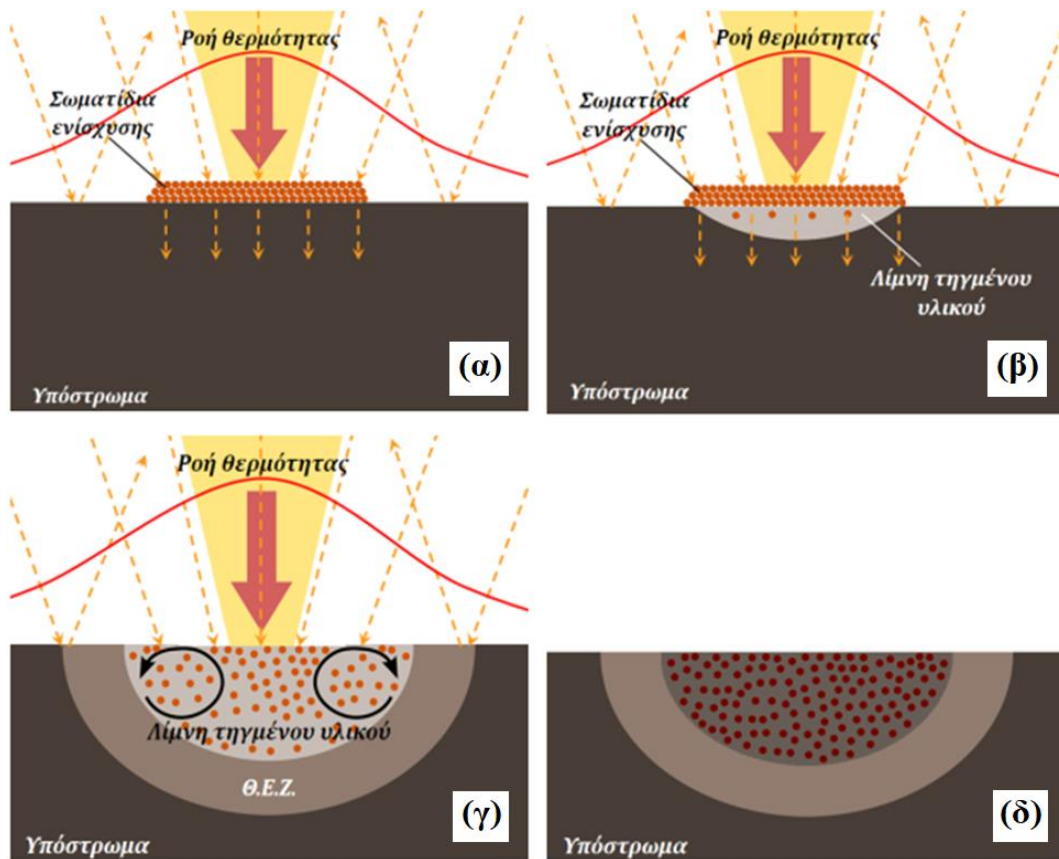
Σχήμα 4.15 Γραμμική αύξηση του πάχους του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος συναρτήσει της διάρκειας παραμονής της επιφάνειας σε τιμές θερμοκρασίας υψηλότερες της μέσης θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου βάσης.

Συνοψίζοντας, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η συμπεριφορά αυτή αφορά τα συγκεκριμένα πειράματα, που περιγράφηκαν σε αυτή την παράγραφο, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα των μετρήσεων που εισάγονται λόγω της χρήσης του οπτικού πυρόμετρου και των μικροσκοπιών. Ωστόσο, αποτελεί μια ισχυρή ένδειξη της δυνατότητας ποσοτικοποίησης των φαινομένων, που ελέγχουν την καινοτόμο «ηλιακή» κατεργασία και θα ήταν ενδιαφέρουσα η περαιτέρω ερευνητική διερεύνηση του θέματος.

Συμπερασματικά δύναται να προταθεί το απλουστευμένο φυσικό μοντέλο που παρουσιάζεται στο [Σχήμα 4.16](#) και περιγράφει ποιοτικά το μηχανισμό δημιουργίας των «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων:

- (α) Η προσπίπτουσα Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, κανονικής κατανομής ισχύος, απορροφάται μόνο από την περιοχή της επιφάνειας που καλύπτεται από κόνι καρβιδίου (μαύρου χρώματος) και ανακλάται από τις ακάλυπτες περιοχές της λειασμένης μεταλλικής επιφάνειας.

- (β) Στην περιοχή απορρόφησης, η ροή θερμότητας προς το μεταλλικό υπόστρωμα προκαλεί την τήξη του υποκείμενου μετάλλου δημιουργώντας μια «λίμνη» τηγμένου υλικού.
- (γ) Η κόνις του καρβιδίου, η οποία κατά κανόνα έχει χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης από το μέταλλο βάσης, βυθίζεται στη λίμνη του τήγματος, όπου αναδεύεται λόγω της κίνησης του τελευταίου, ώστε να επιτευχθεί η ομοιογενής κατανομή της.
- (δ) Μετά τη λήξη της έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία, το επιφανειακό στρώμα του τηγμένου μετάλλου ψύχεται ομαλά και στερεοποιείται, ώστε στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος να ληφθεί το σύνθετο επιφανειακό στρώμα με ενίσχυση διασποράς καρβιδίων.



Σχήμα 4.16 Στάδια δημιουργίας «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος: (α) θέρμανση, (β) τήξη υποστρώματος, (γ) εγκλωβισμός σωματιδίων ενίσχυσης και ανάδευση της «λίμνης» τήξης και (δ) επαναστερεοποίηση της επιφάνειας του χαλύβδινου υποστρώματος, καθώς αυτή ενισχύεται από τη διασπορά εξωτερικά τροφοδοτούμενων σωματιδίων καρβιδίου.

Ο φυσικός μηχανισμός που περιγράφηκε είναι γενικός και δεν αφορά περιπτώσεις κατά τις οποίες τα σωματίδια της ενίσχυσης αλληλοεπιδρούν με το τηγμένο μέταλλο, όπως για παράδειγμα στην προαναφερθείσα περίπτωση των σωματιδίων WC. Προκειμένου λοιπόν να αναδειχθεί η επίδραση της φύσης των καρβιδίων της ενίσχυσης στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου και τον προσδιορισμό των κρίσιμων σημείων, που χρήζουν προσοχής ανά ποιότητα καρβιδίου, εξετάζονται στη συνέχεια αυτές οι παράμετροι σε τρεις περιπτώσεις προ-εναποθετημένων καρβιδίων: TiC (Κεφάλαιο 5), WC (Κεφάλαιο 6) και Cr₃C₂ (Κεφάλαιο 7).

4.5 Βιβλιογραφία

- Chaidemenopoulos, N.G., Psyllaki, P.P., Pavlidou, E., Vourlias, G., 2019. Aspects on carbides transformations of Fe-based hardfacing deposits. Surf. Coat. Techn., 357, 651-661.
- Karamboiki, C.-M, Mourlas A, Psyllaki, P, Sideris, J, 2013. Influence of microstructure on the sliding wear behavior of nitrocarburized tool steels. Wear, 303, 560-568.
- Luca M., Tiorean M., Pisu T., Rodriguez J., Croitoru C., 2020. The influence of concentrated solar energy flux on the structure and properties of stainless steel brazed joints. J. Thermal analysis and calorimetry, 141, 1291-1304.
- Mourlas A, Psyllaki P, Vardavoulias M., 2014. Influence of the CerMet fraction on the wear of HVOF composite coatings. Proc. 8th Inter. Conf. on Tribology (BalkanTrib'14), 506-512.

Κεφάλαιο 5

«Ηλιακά» επιφανειακά στρώματα μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση καρβιδίων του τιτανίου

5.1 Εισαγωγή

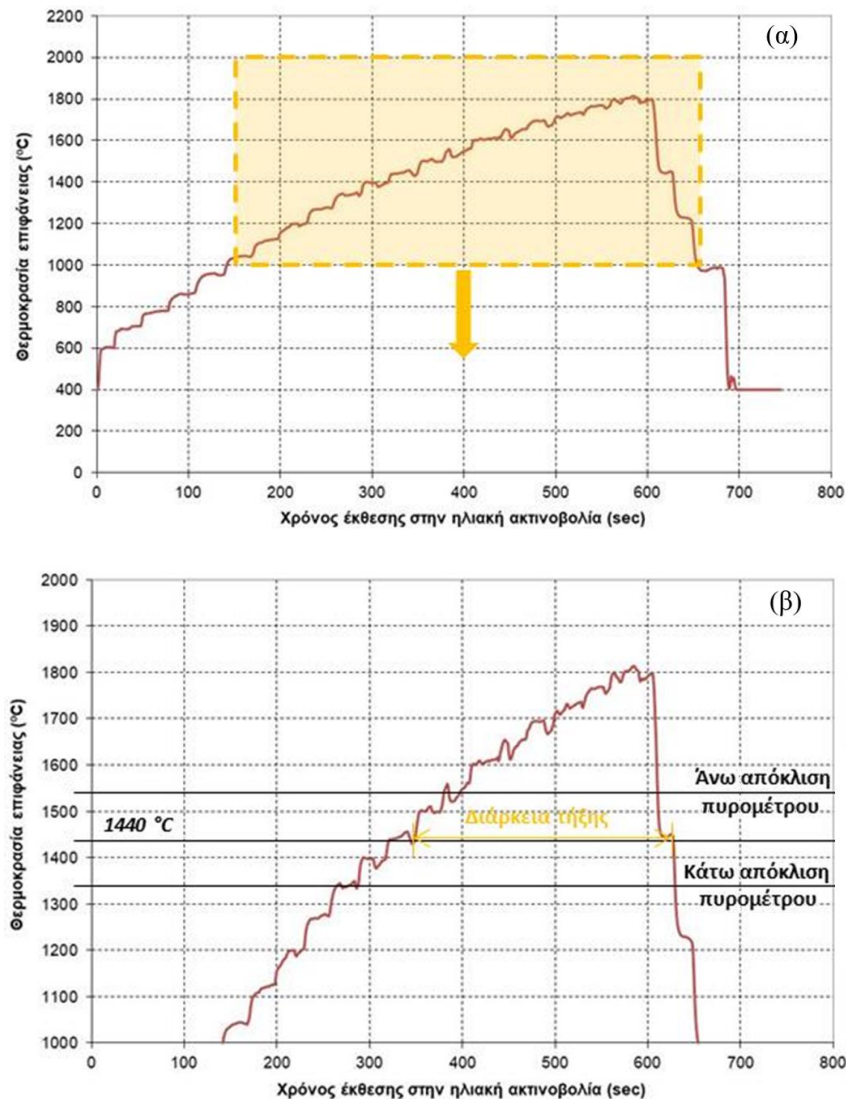
Μετά από την επιβεβαίωση της δυνατότητας «επιτυχούς» υλοποίησης της επιφανειακής τροποποίησης με τη χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας και τον προσδιορισμό των κρίσιμων παραμέτρων, που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της κατεργασίας, υλοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών, με ενισχυτικά σωματίδια TiC σε μέταλλο βάσης DIN St37-2, διαστάσεων $50 \times 70 \times 15 \text{mm}^3$, υπό αδρανή ατμόσφαιρα. Μετά το διεξοδικό μικροδομικό χαρακτηρισμό των δοκιμίων και τον έλεγχο της απόδοσής τους σε τριβή ολίσθησης, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα που αφορούν επιγομώσεις με την συμβατική τεχνική FCAW, δηλαδή με τη χρήση βολταϊκού τόξου και τροφοδοσία με σύρμα μεταλλικού κελύφους με πυρήνα κόνεως TiC, τυποποιημένης ποιότητας και διατομής.

5.2 Μικροδομή των επιφανειακών στρωμάτων

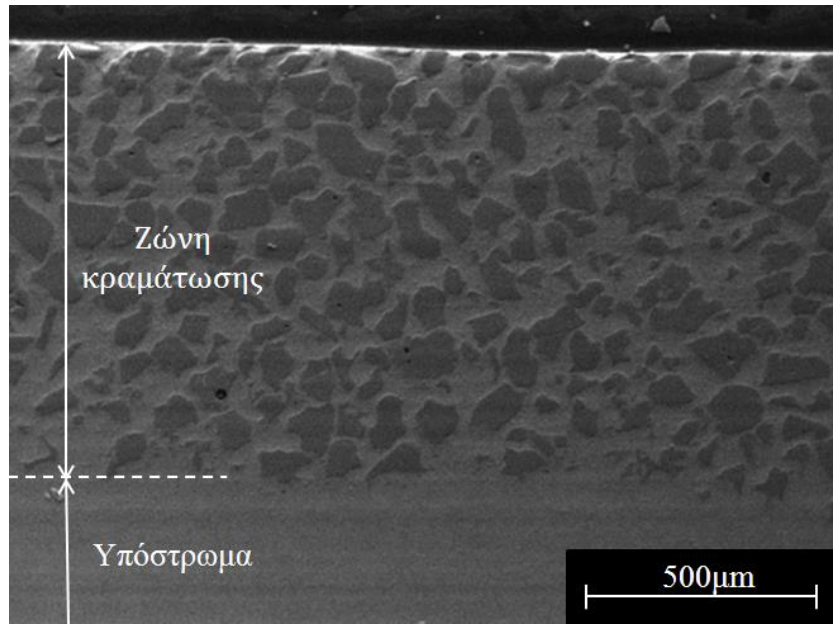
Στη συγκεκριμένη ενότητα, ως αντιπροσωπευτικό όλων των επιφανειακών στρωμάτων της κατηγορίας, αναλύεται η μικροδομή του επιφανειακού στρώματος που δημιουργήθηκε με την «ηλιακή» κατεργασία, που περιγράφει η καμπύλη του [Σχήματος 5.1α](#). Πρόκειται για ένα σύνθετο στρώμα που δημιουργήθηκε μετά από παραμονή του δοκιμίου σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου βάσης για $\sim 280 \text{s}$ ([Σχήμα 5.1β](#)). Σε σύγκριση με τις προκαταρκτικές δοκιμές, που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4, για την ίδια κόνι, θα πρέπει να σημειωθεί ο υψηλότερος ρυθμός θέρμανσης ($2,25^\circ\text{C/s}$ έναντι $1,35^\circ\text{C/s}$) και η χαμηλότερη μέγιστη θερμοκρασία, που επιτεύχθηκε (1800°C έναντι $\sim 1900^\circ\text{C}$). Πρόκειται για δύο παραμέτρους που θα πρέπει να

συναξιολογηθούν με τις διαστάσεις του κατεργαζόμενου μετάλλου βάσης, καθώς ενδέχεται να επηρεάζουν τη γεωμετρία της «λίμνης» τήξης και το πάχος του «ηλιακού» επιστρώματος.

Για τις συγκεκριμένες συνθήκες, η «ηλιακή» κατεργασία οδήγησε σε ένα σύνθετο επιφανειακό στρώμα, με ομοιογενή διασπορά σωματιδίων TiC εντός της χαλύβδινης μήτρας, με μέγιστο πάχος ~900μm στο κέντρο της ακτινοβολημένης επιφάνειας (Σχήμα 5.2).



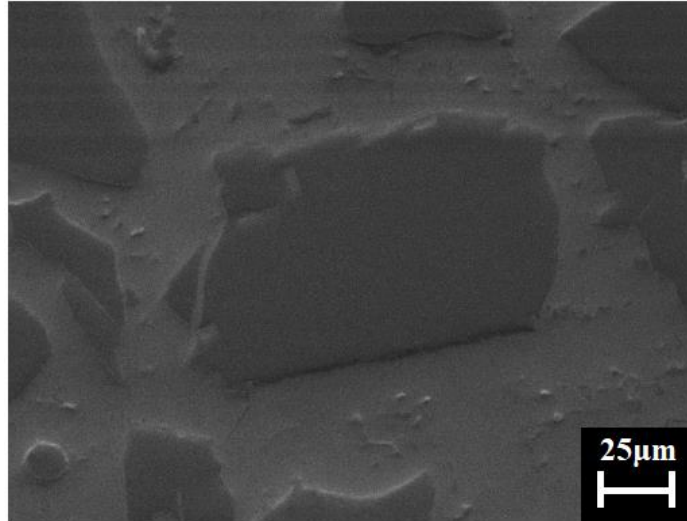
Σχήμα 5.1 «Ηλιακή» κατεργασία αντιπροσωπευτικού δοκιμίου με προαπόθεση κόνεως TiC: (α) Εξέλιξη της θερμοκρασίας της επιφάνειας του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, (β) Μεγέθυνση του επισημαινόμενου στο (α) τμήματος της καμπύλης (μετρήσεις οπτικού πυρομέτρου).



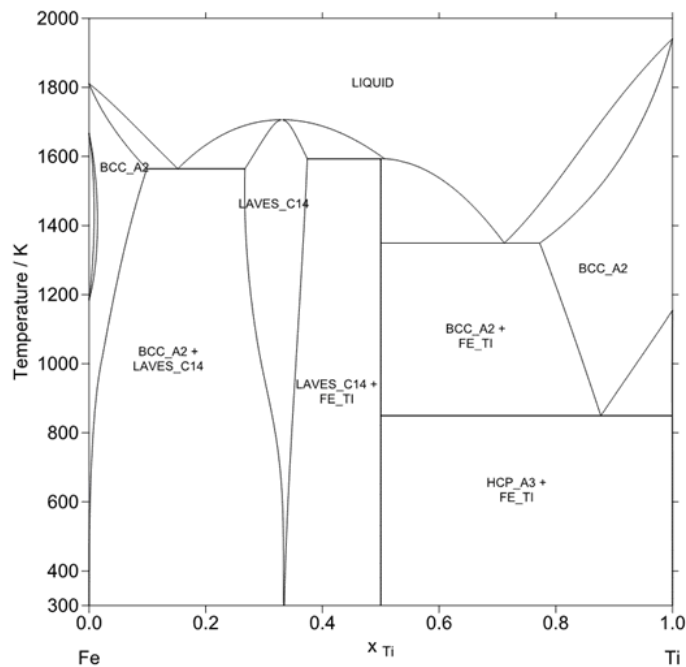
Σχήμα 5.2. Μικροδομή του σύνθετου επιφανειακού στρώματος με διασπορά σωματιδίων TiC (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).

Λεπτομερής παρατήρηση του επιφανειακού στρώματος, που επιτεύχθηκε με υψηλότερες μεγεθύνσεις, αποκάλυψε όντως μία μικροδομή της χαλύβδινης μήτρας, απαλλαγμένη από πόρους ή ρωγμές, τα οποία αποτελούν τα τυπικά ελαττώματα μικροδομής, που εμφανίζονται στην περίπτωση τήξεως και επαναστεροποίησης των μετάλλων. Οι παρατηρούμενες μεμονωμένες, αραιές κοιλότητες (ή πόροι) που παρατηρούνται αποκλειστικά σε λίγα σωματίδια TiC και όχι εντός της χαλύβδινης μήτρας, θα πρέπει να αποδοθούν στην προετοιμασία του δείγματος για μικροσκοπική παρατήρηση, παρά να συσχετιστούν με τη διαδικασία της επιφανειακής κατεργασίας. Ελάχιστα σωματίδια TiC, εμφάνισαν ρωγμές που αναπτύχθηκαν σε περιοχές των αιχμηρότερων άκρων τους, οδηγώντας τελικά στην απόσπασή τους από τον κύριο όγκο του σωματιδίου (Σχήμα 5.3). Στο Σχήμα 5.5α απεικονίζεται ένα μεμονωμένο σωματίδιο ενίσχυσης με ορατά σαφή όρια με το μέταλλο της μήτρας, τα οποία επιβεβαιώνονται από την αντίστοιχη στοιχειακή μικροανάλυση (EDS, Σχήμα 5.5β) κατά μήκος της μεγαλύτερης διάστασης του καρβιδίου, καθώς οι καμπύλες ανάλυσης των κύριων μεταλλικών στοιχείων των δύο φάσεων (μήτρας Fe και ενίσχυσης Ti), δεν παρουσιάζουν αλληλοεπικάλυψη στην μεταξύ τους διεπιφάνεια. Η ανάλυση με περίθλαση ακτίνων X (Σχήμα 5.6) ανέδειξε την ύπαρξη στο επιφανειακό στρώμα αποκλειστικά της ένωσης TiC, που προστέθηκε ως υλικό

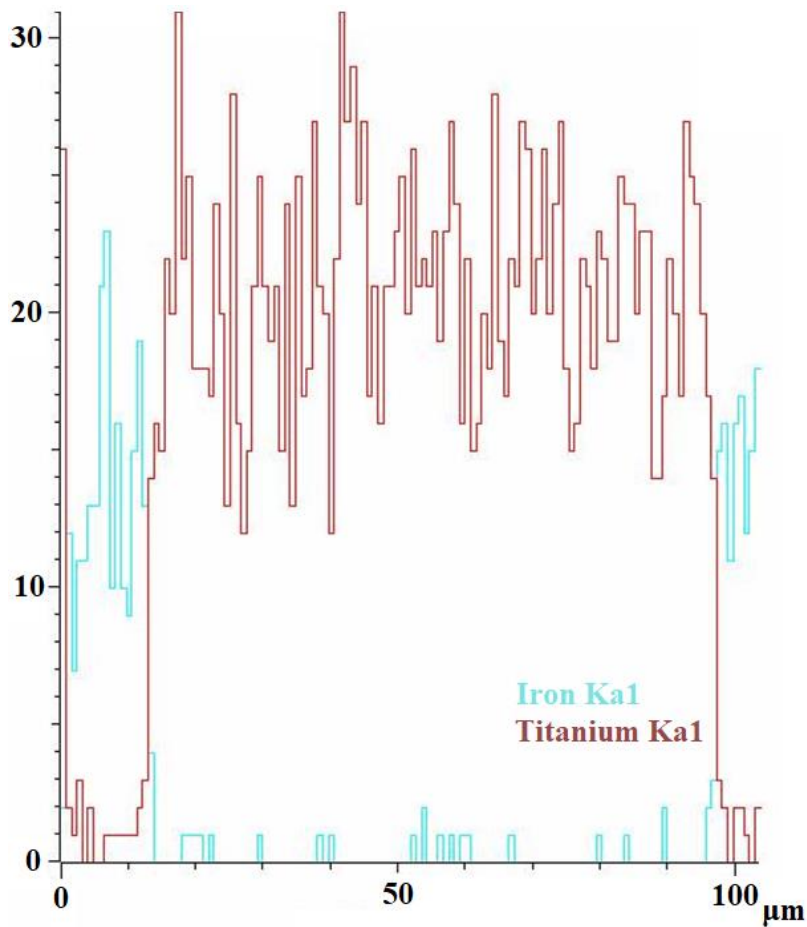
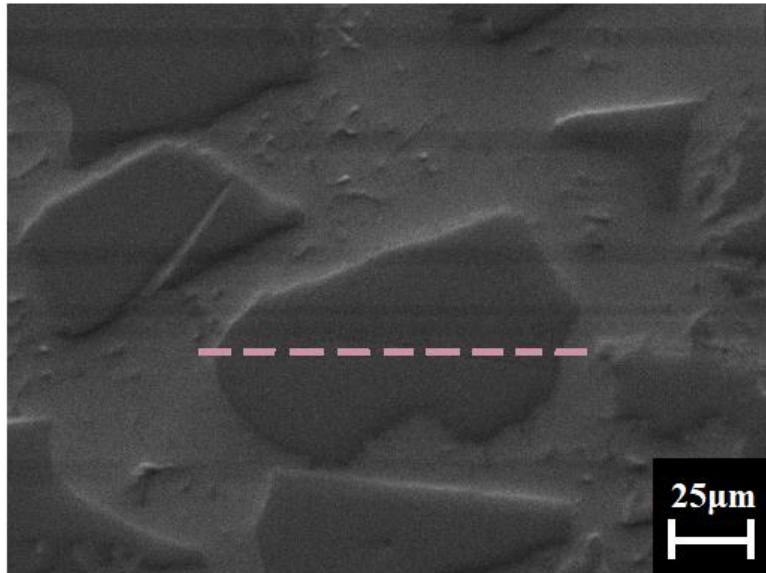
ενίσχυσης και φερρίτη, που αντιστοιχεί στη μήτρα του χάλυβα, ενώ δεν αναγνωρίστηκαν μικτές φάσεις σιδήρου – τιτανίου, που από το διμερές διάγραμμα ισορροπίας (Σχήμα 5.4) θα μπορούσαν να είναι διμεταλλικές φάσεις Laves του τύπου Fe_2Ti και $FeTi$ [Jonsson, 1998].



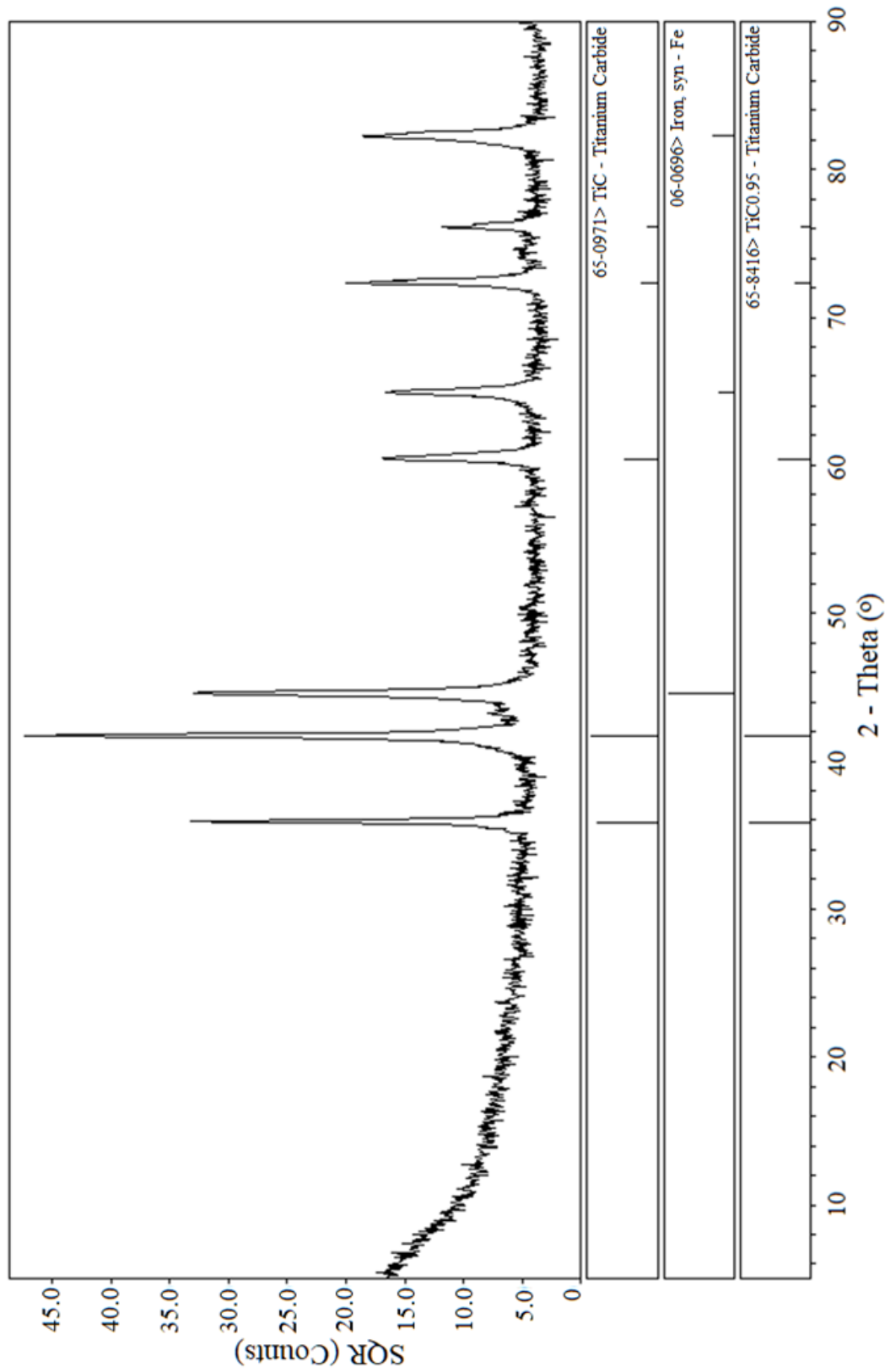
Σχήμα 5.3 Μεμονωμένο σωματίδιο καρβιδίου του τιτανίου, όπου διακρίνεται η αποκοπή τμημάτων της περιμέτρου του (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).



Σχήμα 5.4 Διμερές διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων Fe-Ti [Jonsson, 1998].



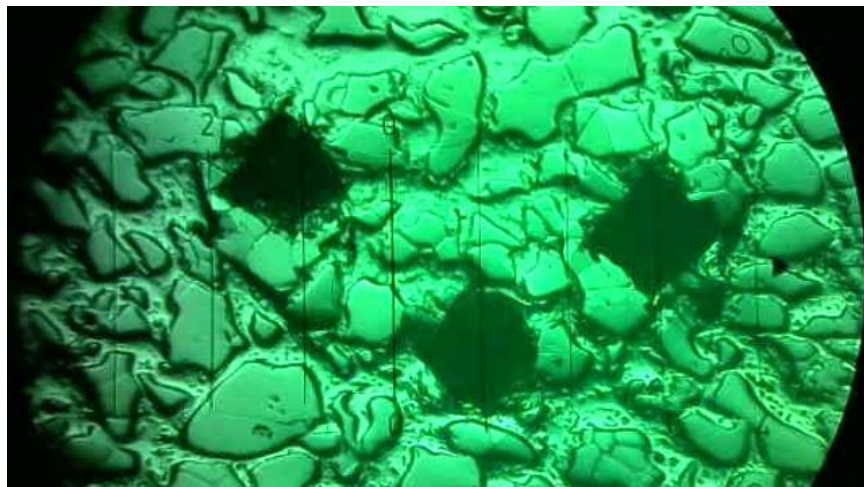
Σχήμα 5.5 (α) Εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης ενός μεμονωμένου σωματιδίου καρβιδίου του τιτανίου και (β) αντίστοιχη στοιχειακή μικροανάλυση κατά μήκος της μεγαλύτερης διάστασής του.



Σχήμα 5.6 Φάσματα περίθλασης ακτίνων X που αναδεικνύει την υπαρξη των φάσεων TiC και φερριτή στο «ηλιακό» επιφανειακό στρώμα που προέκυψε από την κατεργασία.

5.3 Σκληρότητα και κατανομή μικροσκληρότητας

Οι μετρήσεις της σκληρότητας κατά Vickers, σε τομή εγκάρσια στο σύνθετο επιφανειακό στρώμα, με φορτίο 5kg, έδωσαν τιμές από 450 έως 550 HV5, με απόκλιση της τάξης του 1% (± 5 HV5). Οι τιμές αυτές είναι 3 έως 4 φορές υψηλότερες της τιμής σκληρότητας του χαλύβδινου μετάλλου βάσης. Στο [Σχήμα 5.7](#) απεικονίζεται η επιφάνεια όπου έγιναν τρεις από τις πέντε σκληρομετρήσεις, με ορατά τα αποτυπώματά τους. Είναι σαφές ότι υπό την επίδραση του φορτίου, η επηρεασμένη περιοχή περιλαμβάνει τόσο την όλκιμη μήτρα όσο και τα ψαθυρά σωματίδια TiC. Συνεπώς, οι μετρούμενες τιμές σκληρότητας είναι το αποτέλεσμα της συνδυαστικής αλληλεπίδρασης των δύο φάσεων του σύνθετου υλικού.



Σχήμα 5.7 Οπτική μικρογραφία τριών αποτυπωμάτων σκληρομετρήσεων κατά Vickers (HV5).

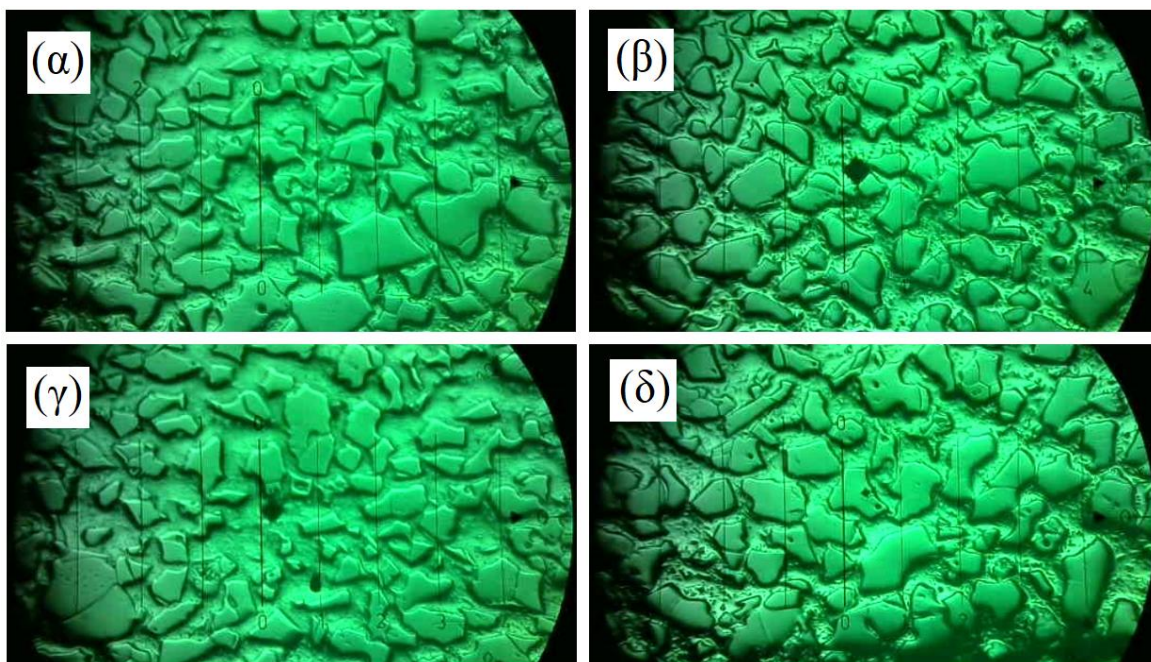
Ωστόσο, οι μετρήσεις της μικροσκληρότητας, με την εφαρμογή φορτίου 0,3kg, έδειξαν υψηλή διακύμανση τιμών σε ένα πολύ μεγάλο εύρος (280-2170 HV0.3). Προκειμένου αυτό να ερμηνευθεί, οι πενήντα (50) συνολικά μετρήσεις ταξινομήθηκαν σε κλάσεις τιμών ([Πίνακας 5.1](#)) και τα αντιπροσωπευτικά μεγέθη των αποτυπωμάτων ([Σχήμα 5.8](#)), άρα και των μετρούμενων τιμών, συνδέθηκαν με την περιοχή της μέτρησης. Από τις εικόνες των αποτυπωμάτων παρατηρήθηκε ότι, συστηματικά, πολύ υψηλές τιμές λαμβανόταν σε περιπτώσεις που η μέτρηση γινόταν σε περιοχές της μεταλλικής μήτρας μεταξύ δύο σωματιδίων ενίσχυσης, τα οποία βρισκόταν πολύ κοντά το ένα στο άλλο ([Σχήμα 5.8α](#)). Αντίθετα, όταν τα σωματίδια ενίσχυσης ήταν ικανά μακριά, τότε και το αποτύπωμα της μέτρησης ήταν μεγαλύτερης επιφάνειας ([Σχήμα](#)

5.7β) και, κατ' αντιστοιχία, η τιμή της μικροσκληρότητας ήταν σχετικά χαμηλή. Στις περιπτώσεις όπου μετά την μέτρηση ταυτοποιήθηκε ότι τα σωματίδια της ενίσχυσης δεν απείχαν πάρα πολύ, αλλά ούτε και ήταν πολύ κοντά το ένα στο άλλο (Σχήμα 5.8γ), οι τιμές της μικροσκληρότητας ανήκαν στις τρεις μεσαίες κλάσεις του Πίνακα 5.1. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι μικρός αριθμός μετρήσεων έδωσε τιμές από 2500 έως 2900 HV0.3 και οι μικροσκοπικές παρατηρήσεις έδειξαν ότι αντιστοιχούν σε αποτυπώματα επί των κεραμικών σωματιδίων TiC (Σχήμα 5.8δ). Οι μετρήσεις αυτές θεωρήθηκαν ως μη ορθές πειραματικά, οι αντίστοιχες τιμές απορρίφθηκαν από το δείγμα ως παρασιτικά σφάλματα και οι ίσος αριθμός μετρήσεων επαναλήφθηκε σε άλλες τυχαίες περιοχές του επιφανειακού στρώματος.

Το 1978, παρόμοιες παρατηρήσεις έκαναν οι Lee and Gurland σε κεραμομεταλλικά υλικά, δηλαδή σε κεραμικά υλικά με πολύ λιγότερο ποσοστό (<20%) μεταλλικής συνδετικής φάσης. Έτσι, αναπτύχθηκε το ομώνυμο μοντέλο, που ερμηνεύει τις τιμές σκληρότητας που μετρώνται, βάσει των διαστάσεων του «ελεύθερου μονοπατιού», που έχει η μεταλλική φάση, ώστε να παραμορφωθεί πλαστικά και της απόστασης και της μορφολογίας που έχουν τα κεραμικά σωματίδια, τα οποία δεν παραμορφώνονται πλαστικά και παρεμποδίζουν την ελεύθερη πλαστική παραμόρφωση του μεταλλικού συνδετικού μέσου.

Πίνακας 5.1 Κατανομή των πενήντα (50) τιμών μέτρησης της μικροσκληρότητας κατά Vickers, κατά τυχαίο τρόπο, των σύνθετων «ηλιακών» στρωμάτων με ενίσχυση σωματιδίων TiC.

Τιμές μικροσκληρότητας [HV0.3]	Μέση τιμή και σφάλμα	Αριθμός εμφάνισης τιμών της κλάσης	Συχνότητα εμφάνισης στο δείγμα [%]
250 – 350	283 ± 3	7	14
350 – 600	490 ± 2	20	40
600 – 900	716 ± 6	10	20
900 – 1500	1310 ± 10	8	16
1500 – 2500	2170 ± 2	5	10



Σχήμα 5.8 Χαρακτηριστικά αποτυπώματα μικροσκληρομετρήσεων HV0.3: (α) υψηλών τιμών [5^η κλάση], (β) χαμηλών τιμών [1^η κλάση], (γ) ενδιάμεσων τιμών [2^η-4^η κλάση] και (δ) μη ορθή μέτρηση, απορριπτέα τιμή

5.4 Απόδοση επιφανειακών στρωμάτων σε τριβή ολίσθησης

Ένα μέρος των δειγμάτων με τις τελικές διαστάσεις, αφού υπέστησαν «ηλιακή» κατεργασία, υποβλήθηκαν σε τυποποιημένες δοκιμές ξηράς τριβής ολίσθησης σημειακής επαφής, ώστε να αξιολογηθεί η απόδοση των καινοτόμων επιφανειακών στρωμάτων υπό συνθήκες λειτουργίας

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, για υλικά που προορίζονται να χρησιμοποιηθούν σε τριβосуστήματα, μια συνήθης πρακτική είναι η μέτρηση των συντελεστών τριβής και φθοράς κατά την ολίσθηση με τη χρήση ανταγωνιστικού υλικού αναφοράς. Ως τέτοιο, τυπικά χρησιμοποιείται σφαίρα αλουμίνας (Al_2O_3) ή σκληρυμένη χαλύβδινη σφαίρα. Ωστόσο, μετά την κατασκευή και πριν τα υλικά τεθούν σε λειτουργία, πολλές φορές απαιτείται η μηχανουργική κατεργασία τους.

Έτσι, όταν σχεδιάζουμε ή προτείνουμε υλικά για τέτοιες εφαρμογές, πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι η βέλτιστη λύση θα πρέπει να συνδυάζει δύο αντίρροπες συμπεριφορές, φαινομενικά ασύμβατες:

- Χαμηλό συντελεστή τριβής και υψηλό συντελεστής φθοράς, όταν κινούνται σχετικά με τα κοπτικά άκρα εργαλειομηχανών, προκειμένου να επιτευχθεί απρόσκοπτη και αποδοτική μηχανουργική κατεργασία (καλή δυνατότητα μηχανουργικής κατεργασίας).
- Χαμηλό συντελεστή τριβής και χαμηλό συντελεστή φθοράς, όταν κινούνται σχετικά με άλλα υλικά με τα οποία είναι συζευγμένα κατά τη χρήση, προκειμένου να επιτευχθεί απρόσκοπτη και μακρά διάρκεια ζωής (καλή απόδοση κατά τη λειτουργία) του τριβοζεύγους.

Έτσι, οι δύο πειραματικές διατάξεις, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη, επιλέχθηκαν για την εκτίμηση του φάσματος τιμών των δύο συντελεστών, ώστε να ικανοποιούνται ταυτόχρονα και οι δύο προαναφερθείσες απαιτήσεις.

Στην περίπτωση μηχανουργικής κατεργασίας αποβολής υλικού με συμβατικά εργαλεία κοπής, ένα από τα στοιχεία που επηρεάζουν την ικανότητα επεξεργασίας (δύναμη και ταχύτητα κοπής) και την ποιότητα επιφάνειας (τραχύτητα) που προκύπτει, είναι ο συντελεστής τριβής του τριβοσυστήματος πλακίδιο κοπής/κατεργαζόμενο αντικείμενο, σύμφωνα με το μοντέλο του Merchant [Merchant, 1945a και 1945b]. Ανάμεσα στα ποικίλα πλακίδια τόννευσης, τα επικαλυμμένα με c-BN αποτελούν τα προτεινόμενα εργαλεία για την κατεργασία «δύσκολων» ετερογενών δομών, όπως είναι ο χυτοσίδηρος. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε ένθετο πλακίδιο επικαλυμμένο με c-BN ως ανταγωνιστικό υλικό, προκειμένου να γίνει η εκτίμηση του συντελεστή τριβής, που θα πρέπει να αναμένουμε σε πραγματικές συνθήκες κατεργασίας.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται και στις δύο σειρές δοκιμών, δηλαδή δοκιμές τύπου σφαίρας-δίσκου και δοκιμές τύπου στυλίσκου-δίσκου, εξασφαλίζει μη σύμμορφη σημειακή επαφή. Σε αυτή την περίπτωση, φορτίο 5 έως 10N, ανάλογα με τις ελαστικές ιδιότητες των στερεών που έρχονται σε επαφή, μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές τοπικές τάσεις. Έτσι, ακόμη και κάτω από μια τέτοια ονομαστικά χαμηλή φόρτιση, η πραγματική τοπική τάση, που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του υλικού, μπορεί να οδηγήσει, κατά περίπτωση, σε μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις (ελαστοπλαστικών υλικών, όπως είναι τα μέταλλα) ή ακόμη και σε θραύση (μη ελαστοπλαστικών υλικών ή μη ελαστικών υλικών, όπως είναι τα κεραμικά).

5.4.1 Εξέλιξη των συντελεστών τριβής και φθοράς

Η τριβολογική απόδοση των σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων, που δοκιμάστηκαν έναντι σφαίρας αλουμίνιας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.9. Ο συντελεστής τριβής μ (Σχήμα 5.9α) συγκλίνει σε συνθήκες σταθερής κατάστασης σε σύντομο χρονικό διάστημα, μετά από το οποίο παραμένει σταθερός και ίσος με $0,43 \pm 0,02$ και $0,46 \pm 0,02$, όταν εφαρμόζεται κάθετο φορτίο 5 και 10N αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές συντελεστών τριβής είναι πρακτικά ίδιες μεταξύ τους, αλλά ταυτοχρόνως και πολύ χαμηλές για συνθήκες ξηρής ολίσθησης, κάτι του υποδεικνύει σταθερή και απρόσκοπτη απόδοση υπό καθεστώς ισοδύναμων συνθηκών λειτουργίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι αιχμηρές κορυφές και βυθίσεις, που διακρίνονται στο σχήμα, οφείλονται στην ηθελημένη διακοπή των πειραμάτων, ώστε να μετρηθεί ο όγκος φθοράς, που αντιστοιχεί τη στιγμή της διακοπής.

Ομοίως, ο συντελεστής φθοράς k τείνει επίσης προς μια τιμή σταθερής κατάστασης, ωστόσο, μετά από ένα μεγαλύτερο αριθμό περιστροφών (Σχήμα 5.9β). Στην περίπτωση επιβαλλόμενου φορτίου 5N, ο συντελεστής φθοράς μειώνεται ραγδαία από $1,54 \times 10^{-6}$ σε $6,33 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \times \text{N}^{-1} \times \text{laps}^{-1}$, τιμές που μετρήθηκαν μετά από δοκιμή για 5.000 και 20.000 κύκλους ολίσθησης, ενώ στη συνέχεια παραμένει σταθερός, ίσος με μια μέση τιμή $(3,26 \pm 0,41) \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \times \text{N}^{-1} \times \text{laps}^{-1}$. Στην περίπτωση φορτίου 10N, η συμπεριφορά είναι ποιοτικά παρόμοια, με τις αντίστοιχες ποσοτικές τιμές, μετά από 5.000 και 20.000 κύκλους ολίσθησης, να είναι $1,88 \times 10^{-6}$ και $7,96 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \times \text{N}^{-1} \times \text{laps}^{-1}$ και η μέση τιμή σταθερής κατάστασης $(4,18 \pm 0,42) \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \times \text{N}^{-1} \times \text{laps}^{-1}$.

Σε όλες τις περιπτώσεις, ακόμη και κατά τη διάρκεια της περιόδου «στρωσίματος» (running in period), οι μετρηθείσες τιμές είναι χαμηλές και χαρακτηριστικές ενός εξαιρετικά ανθεκτικού στη φθορά επιφανειακού στρώματος. Επιπλέον, το παρατεταμένο στάδιο φθοράς σταθερής κατάστασης επιτρέπει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς αυτών των στρωμάτων και, έτσι, τα καθιστά επιθυμητά για τριβολογικές εφαρμογές (όπως είναι οι τριβείς ολίσθησης και τα μηχανικά μέρη, που θα δεχθούν υψηλές επιφανειακές φορτίσεις), καθώς η διάρκεια ζωής τους μπορεί να εκτιμηθεί με μεγάλη ακρίβεια και να σχεδιασθούν τα χρονοδιαγράμματα συντήρησης, αντικατάστασης ή επισκευής.

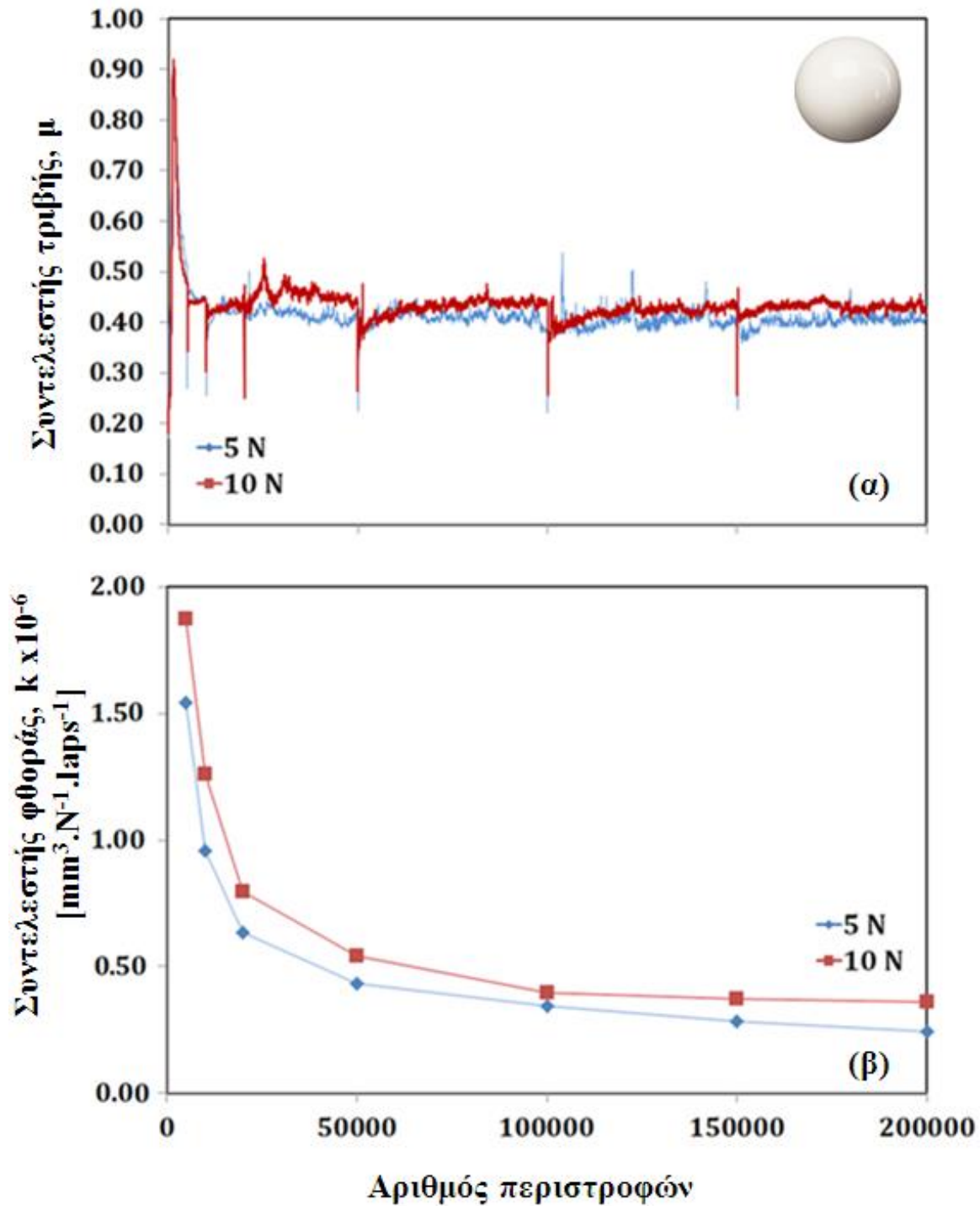
Τα τριβολογικά αποτελέσματα, σχετικά με τη δυνατότητα μηχανουργικής κατεργασίας των σύνθετων «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων, παρουσιάζονται στο [Σχήμα 5.10](#). Μετά από μια σύντομη περίοδο λειτουργίας, περίπου 5.000 κύκλων ολίσθησης, ο συντελεστής τριβής ([Σχήμα 5.10α](#)) παρέμεινε σταθερός και ίσος προς $0,34 \pm 0,01$ και $0,37 \pm 0,01$, για φορτία 5 και 10N, αντίστοιχα. Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της δοκιμής τύπου σφαίρας-δίσκου, το στάδιο φθοράς σταθερής κατάστασης ([Σχήμα 6.10β](#)) αρχίζει ταυτόχρονα με την τριβή σταθερής κατάστασης χωρίς χρονική υστέρηση. Οι συντελεστές φθοράς στο στάδιο της σταθερής κατάστασης τείνουν σε μέσες τιμές $(1,31 \pm 0,03) \times 10^{-6}$ και $(4,25 \pm 0,04) \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \times \text{N}^{-1} \times \text{laps}^{-1}$ στις περιπτώσεις επιβαλλόμενων φορτίων 5 και 10N, αντίστοιχα.

Όπως και με τις δοκιμές τύπου σφαίρας-δίσκου, η ύπαρξη των σταδίων τριβής σταθερής κατάστασης και φθοράς σταθερής κατάστασης είναι ενδεικτική της σταθερής λειτουργίας του τριβοσυστήματος, που αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για την εκτίμηση της μηχανουργικής κατεργασίας με τη χρήση συμβατικών εργαλείων κοπής των παραγόμενων «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων. Περαιτέρω μείωση του συντελεστή τριβής, που θα καθιστούσε ευκολότερη τη μηχανουργική κατεργασία, μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση του κατάλληλου υγρού κοπής/λιπαντικού, που συνιστά θέμα προς μελλοντική έρευνα.

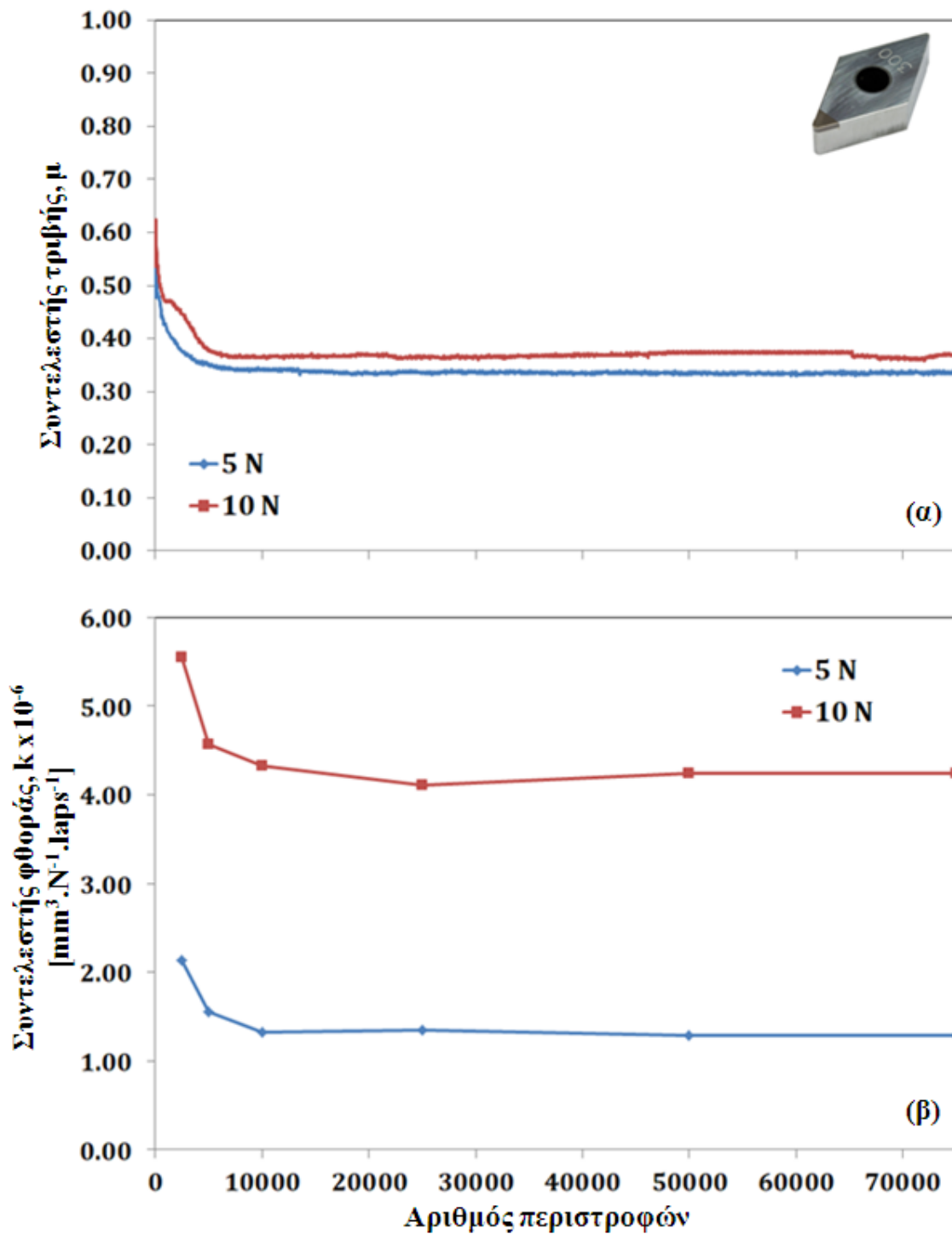
5.4.2 Μηχανισμοί φθοράς

Οι εμπλεκόμενοι μικρομηχανισμοί φθοράς προσδιορίστηκαν με παρατηρήσεις ηλεκτρονικής μικροσκοπίας της κάτοψης των επιφανειών φθοράς, μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών ολίσθησης.

Στο [Σχήμα 5.11](#), ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα των μικρομηχανισμών φθοράς των «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων, παρουσιάζονται διαφορετικές μεγεθύνσεις της επιφάνειας φθοράς του καινοτόμου σύνθετου, μετά από δοκιμή ολίσθησης έναντι σφαίρας αλουμίνιας, η οποία διήρκησε 200.000 κύκλους ολίσθησης με την επιβολή κάθετης φόρτισης 10N.



Σχήμα 5.9 Εξέλιξη των συντελεστών (α) τριβής, μ , και (β) φθοράς, k , συναρτήσει των κύκλων ολίσθησης, σε διάταξη τύπου σφαίρας αλουμίνας - δίσκου.

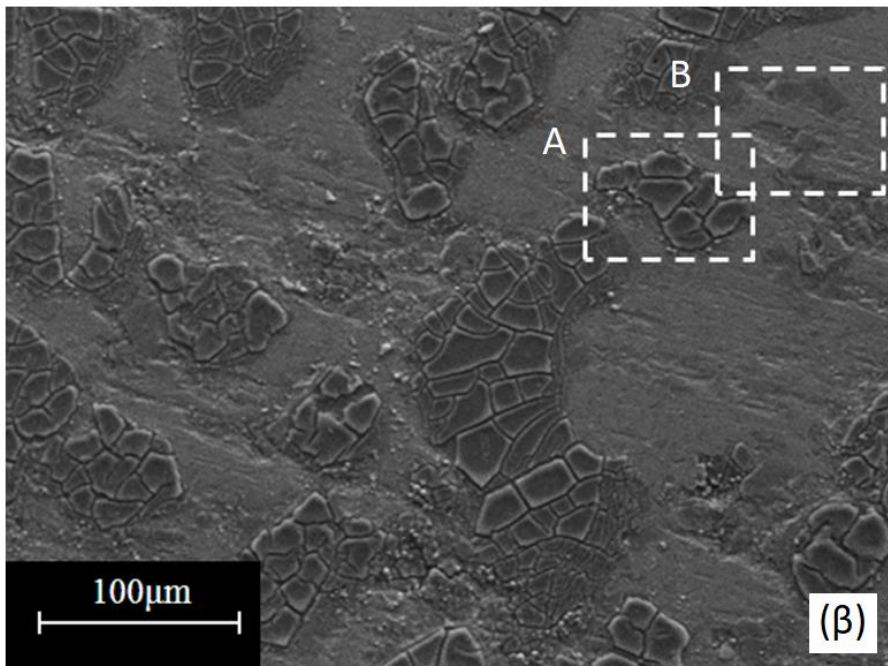
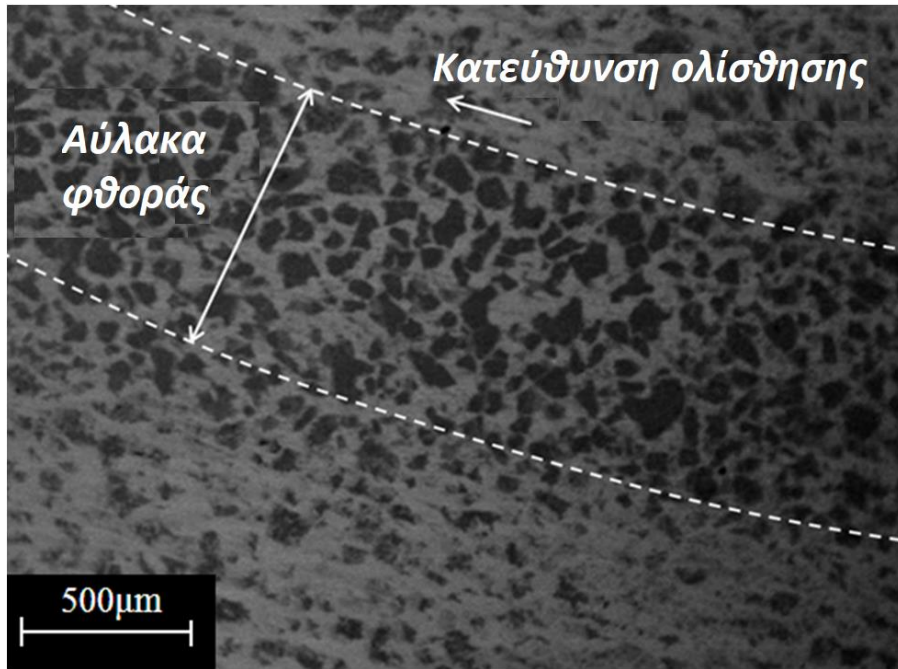


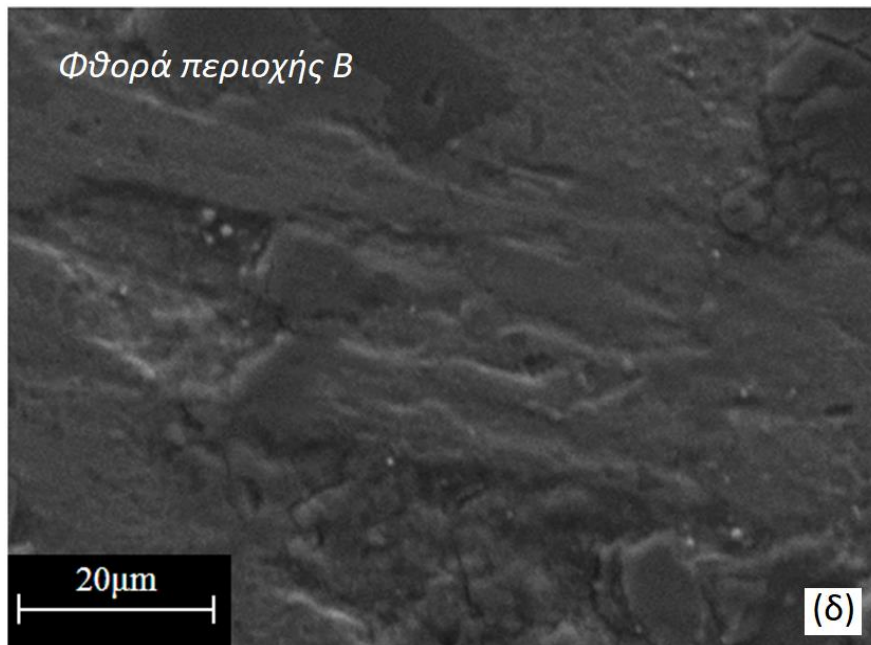
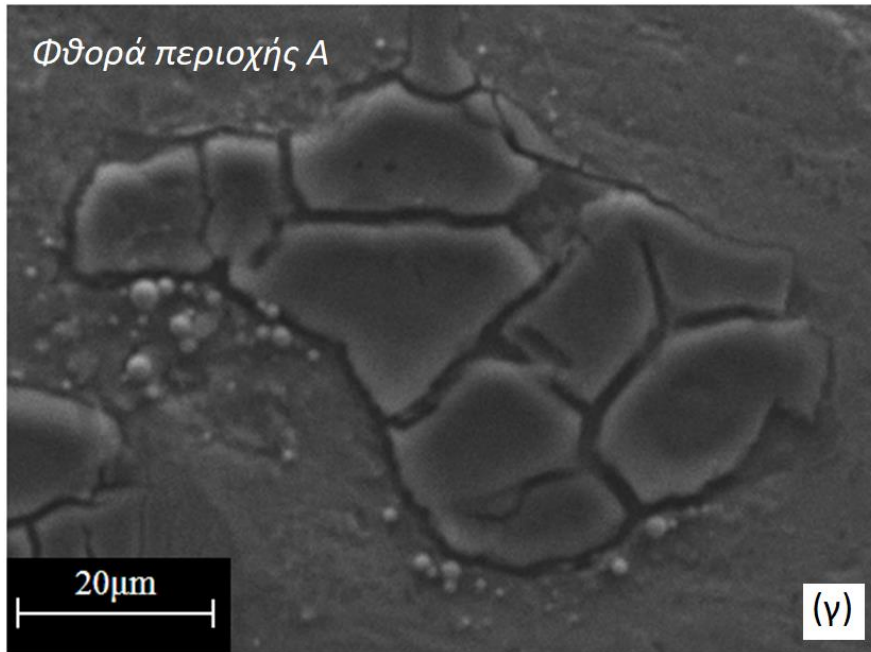
Σχήμα 5.10 Εξέλιξη των συντελεστών (α) τριβής μ και (β) φθοράς k συναρτήσει των κύκλων ολίσθησης, σε τριβόσύστημα κοπτικού άκρου τórνευσης cBN - δίσκου.

Με την ολοκλήρωση της δοκιμής υπό αυτές τις συνθήκες, διακρίνεται η αύλακα φθοράς πλάτους ~870μm (Σχήμα 5.11α), εντός της οποίας μπορούν να αναγνωρισθούν οι περιοχές όπου έχει αποκαλυφθεί η κατανομή των καρβιδίων (σκούρες περιοχές) στη χαλύβδινη μήτρα (φωτεινές περιοχές), ακόμη και υπό σχετικά μικρή μεγέθυνση. Παρατήρηση της επιφάνειας φθοράς σε υψηλότερη μεγέθυνση (Σχήμα 5.12β), κατέδειξε τη ρωγμάτωση και τον κερματισμό των σωματιδίων TiC, τα οποία έχουν ψαθυρή συμπεριφορά, καθώς και την ταυτόχρονη πλαστική παραμόρφωση της όγκιμης μεταλλικής μήτρας. Οι δύο αυτές παρατηρήσεις δηλώνουν ότι ο συνολικός μηχανισμός φθοράς του σύνθετου επιφανειακού στρώματος αποτελεί την υπέρθεση δύο διακριτών μικρο-μηχανισμών, εξ ολοκλήρου διαφορετικών χαρακτηριστικών.

Στο Σχήμα 5.11γ απεικονίζεται ένα μεμονωμένο καρβίδιο του τιτανίου και μπορεί να διακρίνεται με σαφήνεια ο μικρομηχανισμός της φθοράς του: αναπτύσσονται ρωγμές που διασχίζουν τον όγκο του καρβιδίου, καθώς και τη διεπιφάνεια του σωματιδίου με τη μεταλλική μήτρα. Στο Σχήμα 5.12δ διακρίνεται ο μικρο-μηχανισμός της φθοράς της μεταλλικής μήτρας (πλαστική παραμόρφωση), ενώ επίσης παρατηρείται τοπικά η δημιουργία κρατήρων, οι οποίοι μπορούν να συνδεθούν με την ενεργοποίηση ενός μικρο-μηχανισμού εκρίζωσης (exfoliation) των κερματισμένων τμημάτων της κεραμικής φάσης.

Η συνολικά, μετρούμενη φθορά του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος, λοιπόν, αποδίδεται στη συνέργεια των τριών μικρομηχανισμών, που προαναφέρθηκαν, και οι οποίοι διακρίνονται καθαρά στην επιφάνεια φθοράς. Ανάλογες παρατηρήσεις για τη συνδυασμένη δράση διακριτών μικρο-μηχανισμών φθοράς, ο καθένας από τους οποίους μπορεί να συνδεθεί με τη μηχανική συμπεριφορά των διαφορετικών φάσεων του υλικού, έχουν γίνει και στην περίπτωση κεραμομεταλλικού υλικού TiC με συνδετικό μέταλλο Ti, μετά από τον πειραματικό του έλεγχο υπό καθεστώς παλινδρομικής ολίσθησης για ένα ευρύ φάσμα εφαρμοζόμενων φορτίων [Degnan *et al.*, 2001].





Σχήμα 5.11 Επιφάνεια φθοράς «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος με ενίσχυση σωματιδίων TiC: (α) συνολική αύλακα φθοράς, (β) κερματισμός των σωματιδίων ενίσχυσης και πλαστική παραμόρφωση της μεταλλικής μήτρας, (γ) μεμονωμένο κερματισμένο σωματίδιο και (δ) ενδείξεις πλαστικής παραμόρφωσης της μήτρας και εκρίζωσης κερματισμένων τμημάτων των σωματιδίων.

5.5 Συμβατικές επιγομώσεις με την τεχνική FCAW

5.5.1 Μικροδομή επιγομώσεων FCAW

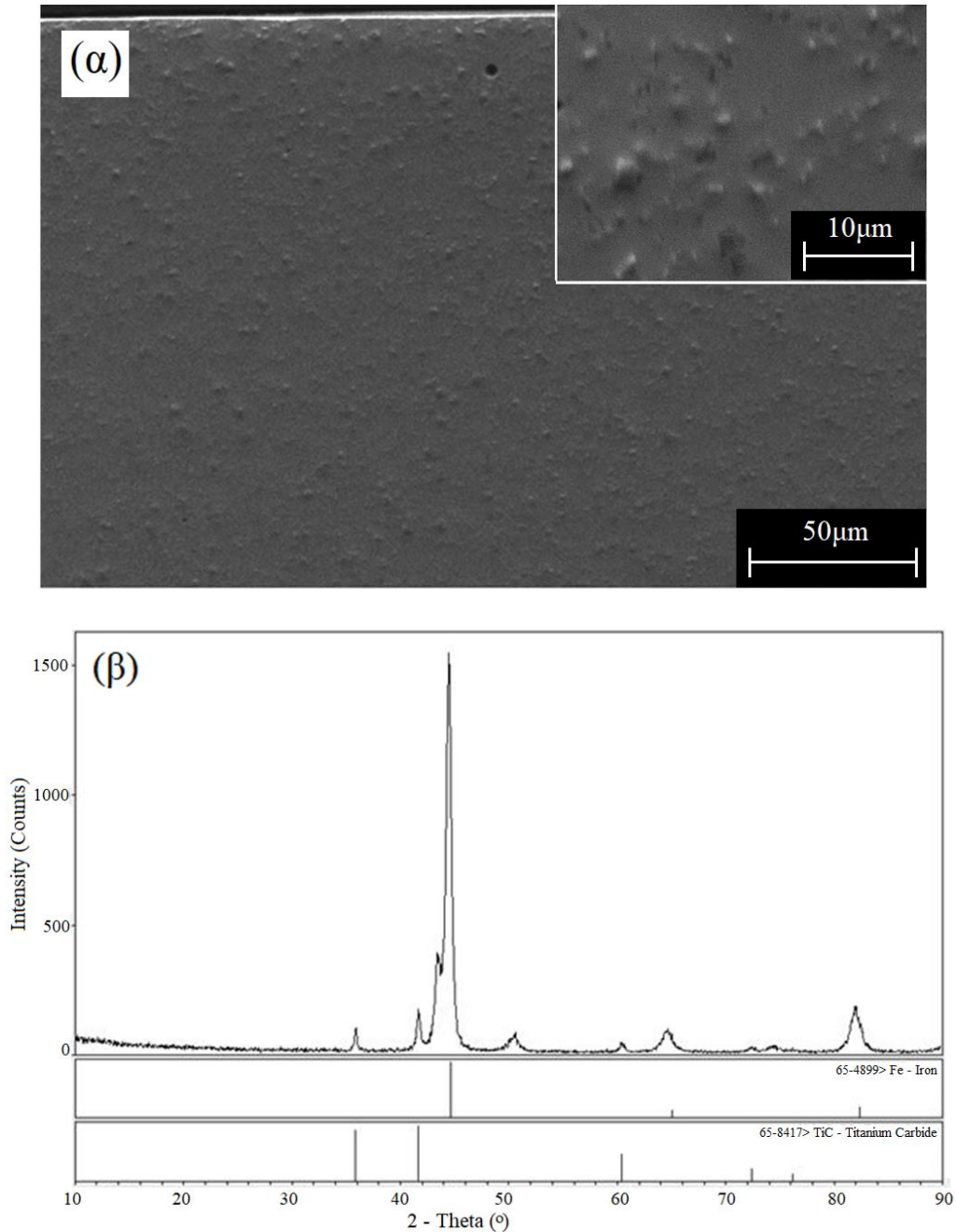
Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζεται η μικροδομή και η ταυτοποίηση των φάσεων, που αφορούν τις συμβατικές επιγομώσεις, του ίδιου μετάλλου βάσης, που έγιναν με τη χρήση τεχνικής βολταϊκού τόξου FCAW και την τροφοδοσία σύρματος με πυρήνα κόνεως TiC.

Η παρατήρηση κάθετων τομών, σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Σχήμα 5.12α), ανέδειξε την ομοιόμορφη διασπορά σωματιδίων καρβιδίου του τιτανίου στην μεταλλική μήτρα. Τα σωματίδια αυτά είναι πολύ μικρού μεγέθους (<10 μm) και συγκρινόμενα με την εικόνα των αρχικών σωματιδίων του πυρήνα του σύρματος (Σχήμα 5.9), το μέγεθός τους ισούται προς ~10% των τελευταίων. Μπορεί, λοιπόν, βάσιμα να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι τα σωματίδια του πυρήνα είναι μάλλον συσσωματώματα των στοιχείων και ενώσεων που ταυτοποιήθηκαν με περίθλαση ακτίνων X (TiC, Fe, Si, CaCO₃, CaF₂) και όχι καθαρά σωματίδια καρβιδίου του τιτανίου, τα οποία είναι όντως πολύ μικρότερου μεγέθους. Η ανάλυση με περίθλαση ακτίνων X ταυτοποίησε την ύπαρξη στην επιγόμωση των φάσεων TiC και φερρίτη, όπως και στην περίπτωση των «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων. Οι ενώσεις CaCO₃ και CaF₂ δεν ανιχνεύονται στην επικάλυψη, καθώς προστίθενται στο υλικό του πυρήνα ως παράγοντες ροής και για τη σταθεροποίηση του βολταϊκού τόξου και δεν μετέχουν στην τελική εναπόθεση. Επίσης, στην τελική εναπόθεση δεν ταυτοποιούνται φάσεις χρωμίου προερχόμενου από το ανοξειδωτο κέλυφος του σύρματος, καθώς με την αραίωση, που επιτυγχάνεται με το μέταλλο βάσης κατά την επιγόμωση, η σχηματιζόμενη στερεή μήτρα παραμένει ανθρακούχος χάλυβας.

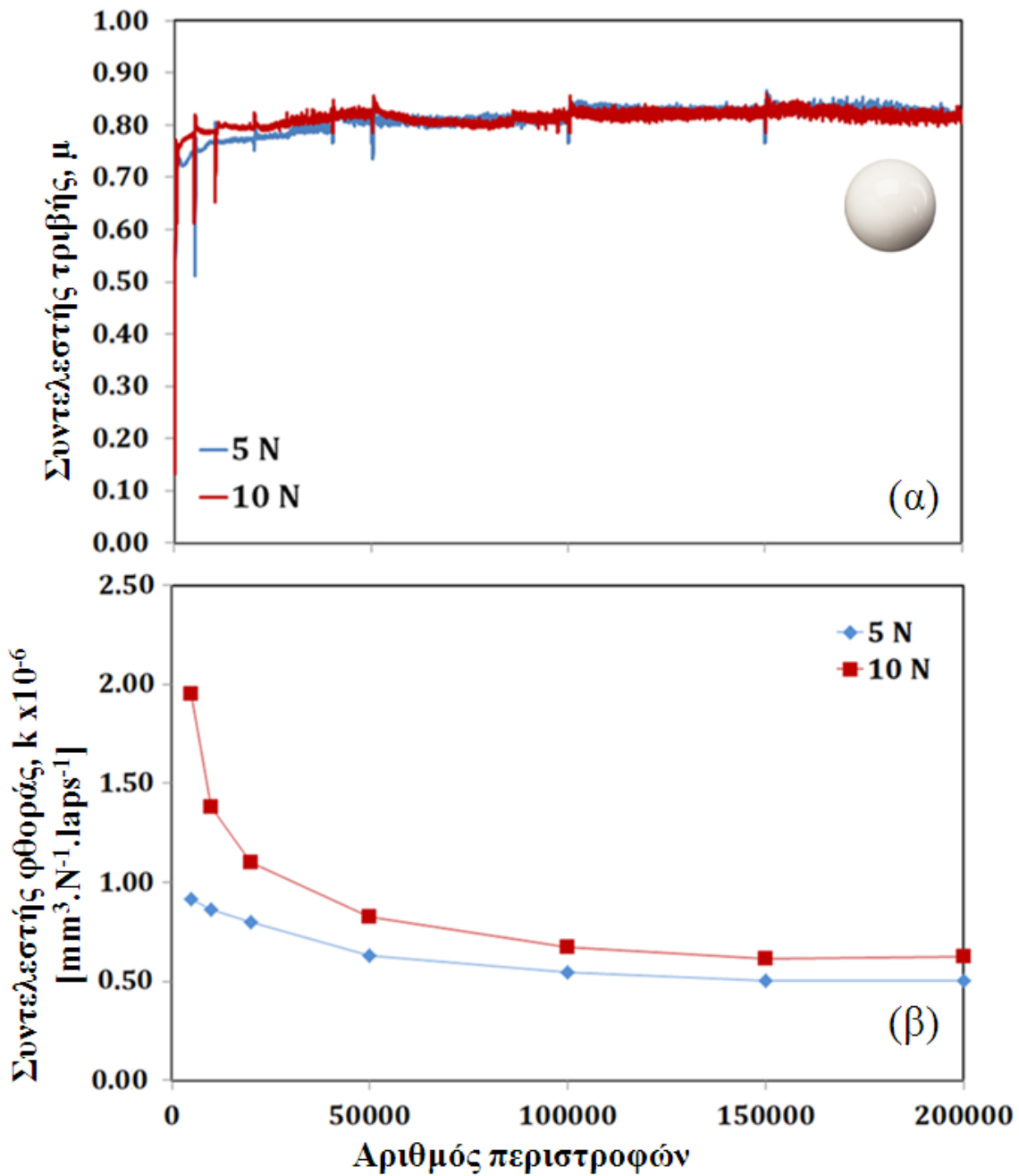
5.5.2 Εξέλιξη των συντελεστών τριβής και φθοράς

Η τριβολογική απόδοση κατά τη λειτουργία των συμβατικών επιγομώσεων FCAW έναντι σφαίρας αλουμίνας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.13. Ο συντελεστής τριβής μ εγγίζει αμέσως στο στάδιο σταθερής κατάστασης (Σχήμα 5.13α), αποκτώντας μια

σταθερή τιμή $0,78 \pm 0,02$, ουσιαστικά η ίδια και για τα δύο φορτία. Ο συντελεστής φθοράς k εγγίζει τις συνθήκες σταθερής κατάστασης μετά από 20.000 κύκλους ολίσθησης (Σχήμα 5.13β), τείνοντας σε $(5,45 \pm 0,31) \times 10^{-7}$ και $(6,84 \pm 0,49) \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \times \text{N}^{-1} \times \text{laps}^{-1}$ για 5 και 10N, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.12 Χαρακτηριστικά της μικροδομής των συμβατικών επιγομώσεων FCAW: (α) μικρογραφία κάθετης τομής, όπου διακρίνεται η ομοιόμορφη διασπορά σωματιδίων TiC, πολύ μικρού μεγέθους (<10 μm) και (β) αντίστοιχο φάσμα περίθλασης ακτίνων X.



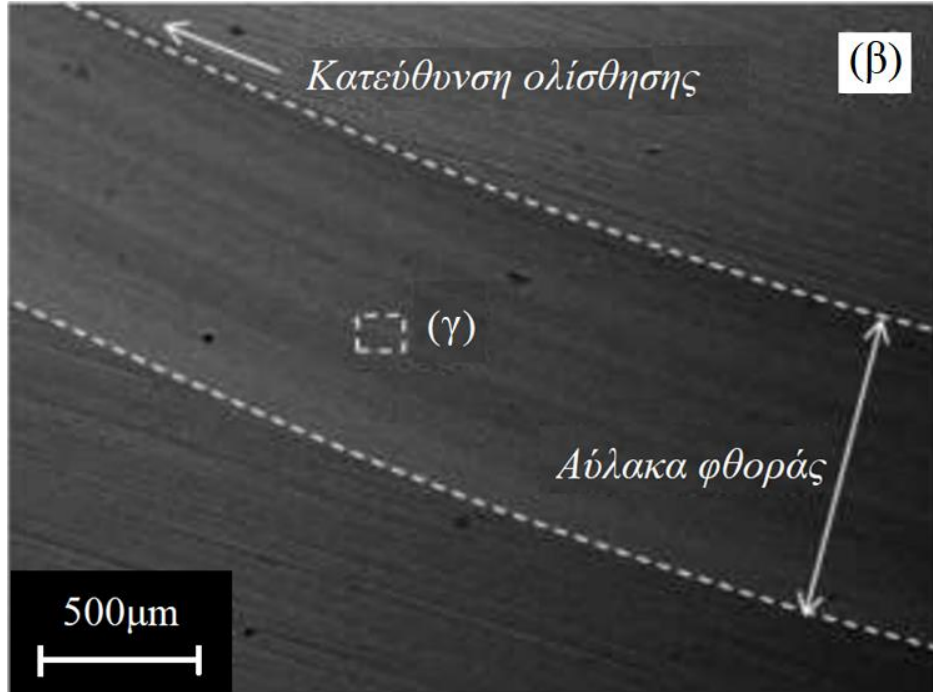
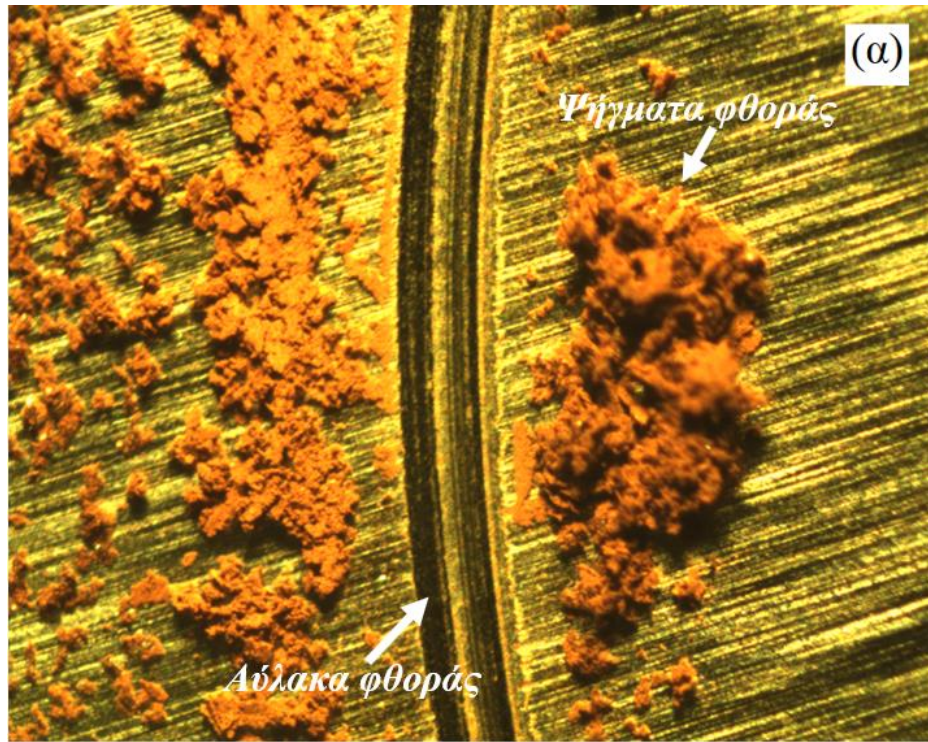
Σχήμα 5.13 Εξέλιξη των συντελεστών (α) τριβής μ και (β) φθοράς k συναρτήσει των κύκλων ολίσθησης, έναντι σφαίρας Al_2O_3 , των επιγομώσεων FCAW με διασπορά TiC.

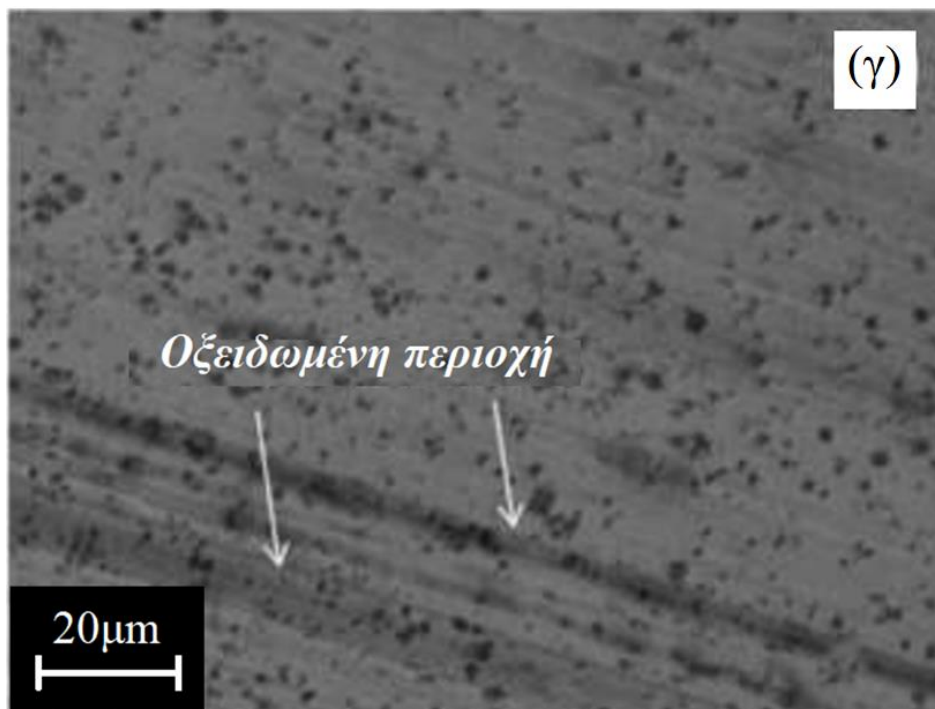
5.5.3 Εξέλιξη των μικρομηχανισμών φθοράς

Στην περίπτωση επιβολής κάθετου φορτίου 10N, οι παρατηρήσεις ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης των επιφανειών φθοράς, ανέδειξαν την ανάπτυξη μια αύλακας φθοράς πλάτους ~840μm, (Σχήμα 5.14β), εντός της οποίας διακρίνονται τροχιές λείανσης και περιοχές οξείδωσης της μεταλλικής μήτρας (Σχήμα 5.14γ), όπως επίσης και η διασπορά καρβιδίων μικρού μεγέθους. Οι δοκιμές ξηράς ολίσθησης των επιγομώσεων FCAW με ένθετο πλακίδιο τόνρευσης επικαλυμμένο με c-BN οδήγησαν σε ρωγμή και τελική αστοχία της κοπτικής ακμής του πλακιδίου (Σχήμα 5.15), καθώς ο χαρακτήρας των επιγομώσεων είναι κατ' εξοχήν μεταλλικός, γεγονός που καθιστά το συγκεκριμένο εργαλείο ακατάλληλο για κοπή. Τα συγκριτικά αποτελέσματα για την τριβολογική απόδοση των «ηλιακών» σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων και των επιγομώσεων τεχνικής FCAW, συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2 Σύγκριση τριβολογικής απόδοσης «ηλιακών» και συμβατικών τεχνικής FCAW επιφανειακών στρωμάτων.

Τύπος δοκιμής /φόρτιση		Συντελεστής τριβής, μ		Συντελεστής φθοράς (mm ⁻³ .N ⁻¹ .laps ⁻¹)	
		«Ηλιακά» σύνθετα επιφ. στρώματα	Συμβατικές επιγομώσεις FCAW	«Ηλιακά» σύνθετα επιφ. στρώματα	Συμβατικές επιγομώσεις FCAW
Σφαίρας-δίσκου	5N	0,43 ± 0,02	0,78 ± 0,02	(3,26 ± 0,41)×10 ⁻⁷	(5,45±0,31)×10 ⁻⁷
	10N	0,46 ± 0,02	0,78 ± 0,02	(4,18 ± 0,42)×10 ⁻⁷	(6,84±0,49)×10 ⁻⁷
Στυλίσκου-δίσκου	5N	0,34 ± 0,02	-	(1,31±0,03)×10 ⁻⁶	-
	10 N	0,37 ± 0,02	-	(4,25±0,04)×10 ⁻⁶	-



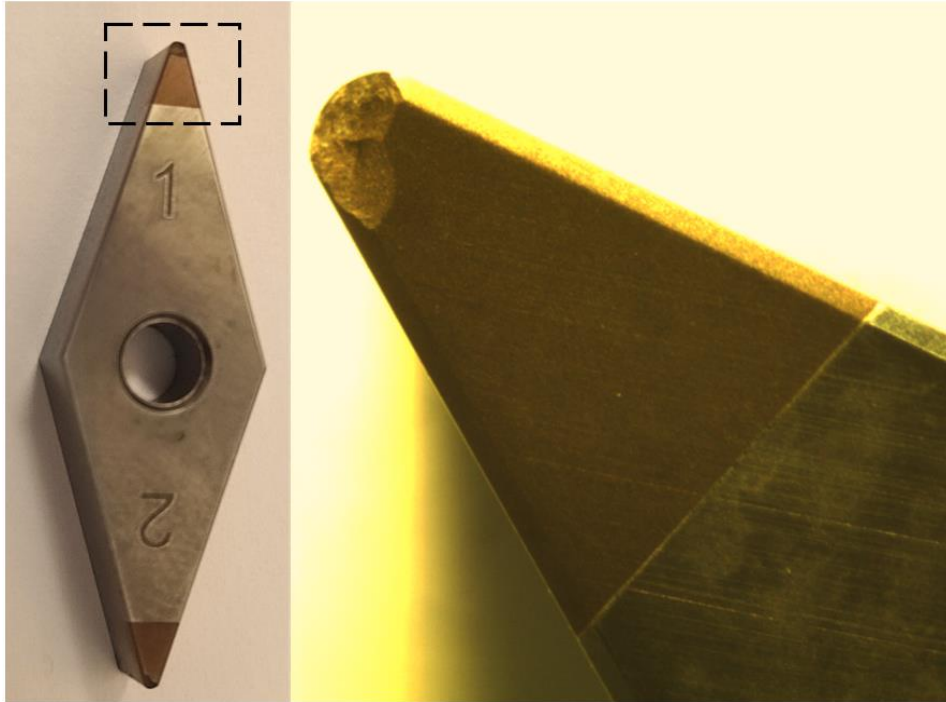


Σχήμα 5.14 Επιφάνεια φθοράς επιγόμωσης τεχνικής FCAW: (α), (β) συνολική αύλακα φθοράς και γραμμές λείανσης του επιφανειακού στρώματος και (γ) περιοχές τοπικής οξείδωσης του μετάλλου.

Οι κύριες διαφορές μεταξύ των δύο σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων, οφείλονται στο μέγεθος των ενισχυτικών σωματιδίων TiC και την διασπορά τους εντός της μεταλλικής μήτρας:

- Τα «ηλιακά» επιφανειακά στρώματα, ενισχυμένα με σωματίδια TiC μεγαλύτερου μεγέθους, εμφανίζουν τα τυπικά χαρακτηριστικά ενός σύνθετου μεταλλικού υλικού ενισχυμένου με κεραμικά σωματίδια, με την κεραμική φάση να διαδραματίζει τον κυρίαρχο ρόλο στις τιμές συντελεστών χαμηλής τριβής. Ο μηχανισμός φθοράς αποτελεί υπέρθεση των διακριτών μικρομηχανισμών φθοράς των συμμετεχόντων φάσεων: πλαστική παραμόρφωση της μεταλλικής μήτρας, κατακερματισμού της κεραμικής ενίσχυσης και εκρίζωση των κερματισμένων σωματιδίων.
- Οι συμβατικές εναποθέσεις τεχνικής FCAW, ενισχυμένες με σωματίδια TiC μικρότερου μεγέθους, εμφανίζουν κατ' εξοχήν μεταλλικό χαρακτήρα, με υψηλές τιμές συντελεστών τριβής, που τείνουν προς αυτές του ενός τυπικού

χάλυβα [Karamboiki *et al.*, 2013], ενώ οι σχετιζόμενοι μικρομηχανισμοί φθοράς είναι αυτοί της λείανσης και της οξείδωσης της μεταλλικής μήτρας.



Σχήμα 5.15 Αστοχία της κοπτικής ακμής ένθετου πλακιδίου c-BN.

5.6 Συμπεράσματα

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί εμβάθυνση στους μετασχηματισμούς δομής που λαμβάνουν χώρα κατά τη δημιουργία επιφανειακών στρωμάτων ενισχυμένων με διασπορά σωματιδίων TiC και στην αξιολόγηση της απόδοσής τους σε τριβικές φορτίσεις, ως συνέχεια της προκαταρκτικής εκτίμησης της δυνατότητας παρασκευής τέτοιων με τη χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας. Ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα, αναπτύχθηκε η περίπτωση «ηλιακής» κατεργασίας με διάρκεια παραμονής του δοκιμίου σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας τήξης του υποστρώματος για 280s, η οποία είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία επιφανειακού σύνθετου στρώματος μέγιστου πάχους ~900μm στο κέντρο της ακτινοβολημένης επιφάνειας.

Τα κύρια πειραματικά ευρήματα συνοψίζονται ως ακολούθως [Mourlas *et al.*, 2019a]:

- Κατά την έκθεση σε Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, σε θερμοκρασία πάνω από το σημείο τήξης του υποστρώματος, τα μη τηγμένα σωματίδια TiC βυθίζονται στο λουτρό τηγμένου χάλυβα, όπου κατανέμονται ομοιογενώς, χωρίς καμία ένδειξη χημικής αντίδρασης με το μέταλλο.
- Μετά την επαναστερεοποίηση, τα καρβίδια TiC, που είναι εγκλωβισμένα στη χαλύβδινη μήτρα, παρέχουν ένα σύνθετο επιφανειακό στρώμα, που παρουσιάζει ένα ευρύ φάσμα τιμών τοπικής μικροσκληρότητας. Μέγιστη μέση σκληρότητα 2170 HV0.3 μετρήθηκε σε περιοχές πυκνότερης κατανομής καρβιδίων, ενώ ελάχιστη 283 HV0.3, σε περιοχές με αραιή κατανομή.
- Ο χαμηλός συντελεστής τριβής και φθοράς κατά τη διάρκεια ξηρής ολίσθησης έναντι σφαίρας αλουμίνιας, υποδηλώνει μια αναμενόμενη υψηλή απόδοση κατά τη λειτουργία των «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων, ενώ η χαμηλή τριβή και ο σχετικά υψηλός συντελεστής φθοράς κατά την ξηρή ολίσθηση έναντι ένθετου πλακιδίου τόννευσης c-BN, υποδηλώνουν την αποδεκτή μηχανική τους ικανότητα, χρησιμοποιώντας συμβατικά εργαλεία κοπής.
- Σε σύγκριση με τις συμβατικές επιγομώσεις τεχνικής FCAW με βάση το TiC, οι «ηλιακές» παρουσίασαν τιμές συντελεστή τριβής μ σχεδόν 50% μικρότερες και επίσης ελαφρώς χαμηλότερους συντελεστές φθοράς κατά τη διάρκεια ξηρής ολίσθησης έναντι σφαίρας αλουμίνιας. Αυτό αποδίδεται στους ανώτερους μικρο-μηχανισμούς φθοράς των συγκεκριμένων «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων που λαμβάνονται, οι οποίοι αποτελούν υπέρθεση των διακριτών μικρο-μηχανισμών φθοράς της κάθε φάσης ενός σύνθετου υλικού μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση σωματιδίων. Αντίθετα, οι συμβατικές επιγομώσεις τεχνικής FCAW εμφανίζουν μεταλλικό χαρακτήρα κατά την τριβή, που αποδόθηκε στη διασπορά σωματιδίων ενίσχυσης πολύ μικρών διαστάσεων.

5.7 Βιβλιογραφία

- Chaidemenopoulos, N.G., Psyllaki, P.P., Pavlidou, E., Vourlias, G., 2019. Aspects on carbides transformations of Fe-based hardfacing deposits. *Surf. Coat. Techn.*, 357, 651-661.
- Degnan, C.C., Shipway, P.H., Wood, J.V., 2001. Elevated temperature sliding wear behaviour of TiC-reinforced steel matrix composites. *Wear*, 251, 1444-1451.
- Jonsson, S., 1998. Assessment of the Fe-Ti system. *Metall. Mater. Trans. B*, 29B, 361-370.
- Merchant, M.E., 1945a. Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. *J Appl Phys.*, 16 267-275.
- Merchant, M.E., 1945b. Mechanics of the metal cutting process. II. Plasticity conditions in metal cutting. *J Appl Phys.*, 16, 318-324.
- Mourlas A, Pavlidou E., Vourlias G., Rodriguez J., Psyllaki P., 2019a. Concentrated solar energy for in-situ elaboration of wear-resistant composite layers. Part I: TiC and chromium carbide surface enrichment of common steels. *J. Surface & Coatings Technology*, 377, 124882

Κεφάλαιο 6

«Ηλιακά» επιφανειακά στρώματα μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση καρβιδίων του βολφραμίου

6.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αφορά στην επίδραση των παραμέτρων της ηλιακής επεξεργασίας, που οδηγούν σε σύνθετα επιφανειακά στρώματα με διασπορά σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου (WC), προκειμένου να ενισχυθεί η αντοχή σε φθορά της μεταλλικής μήτρας, υπό συνθήκες ξηρής ολίσθησης [Ahn, 2013].

Όπως και στην περίπτωση σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων με διασπορά καρβιδίων του τιτανίου (TiC), τα τελικά πειράματα πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις της Plataforma Solar de Almería, PSA (Ισπανία), συγκεκριμένα στον οριζόντιο ηλιακό φούρνο SF40 [Rodríguez *et al.*, 2016], και ακολουθήθηκε η πειραματική διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

Στην περίπτωση αυτή πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές ηλιακών πειραμάτων:

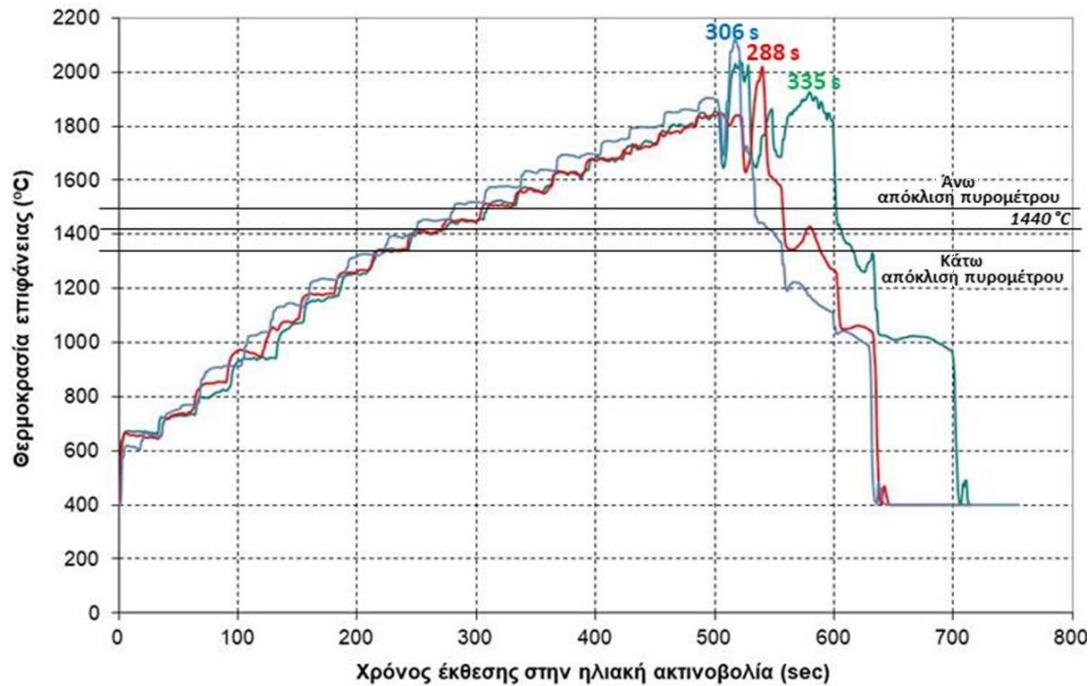
- Η πρώτη αφορά την ηλιακή κατεργασία μονού θερμικού κύκλου, υπό αδρανή ατμόσφαιρα, η οποία επιτεύχθηκε μέσω ροής αερίου αργού (Ar). Η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία για διάφορους χρόνους παραμονής, επέτρεψε να μελετηθεί η επίδραση της διάρκειας της έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία επί της μικροδομής του σύνθετου επιφανειακού στρώματος.
- Η δεύτερη αφορά την ηλιακή κατεργασία μονού θερμικού κύκλου σε χημικά δραστική ατμόσφαιρα που επιτεύχθηκε με τη ροή αζώτου (N₂), ώστε να αξιολογηθεί η δυνατότητα ταυτόχρονης ενίσχυσης με σωματίδια και εναζώτωσης της κατεργαζόμενης επιφάνειας.
- Η τρίτη αφορά την ηλιακή κατεργασία διπλού θερμικού κύκλου υπό αδρανή

ατμόσφαιρα ροής αργού (Ar). Σε πρώτο στάδιο, τα δείγματα μετά την ακτινοβόλησή τους αφέθηκαν να ψυχθούν και να στερεοποιηθούν εντός του θαλάμου δοκιμών, έως ότου η θερμοκρασία της επιφάνειας (μετρούμενη με οπτικό πυρόμετρο) να μειωθεί στους 800°C. Σε δεύτερο στάδιο, το ίδιο δοκίμιο επαναεκτέθηκε στην ηλιακή ακτινοβολία έως και την τήξη του όπου και παρέμεινε για διάφορα χρονικά διαστήματα. Δεδομένης της αβεβαιότητας των τιμών μέτρησης του πυρομέτρου, η ανάττηξη της επιφάνειας επιβεβαιώθηκε και με την παρακολούθηση των αντιστοιχών βιντεοσκοπήσεων.

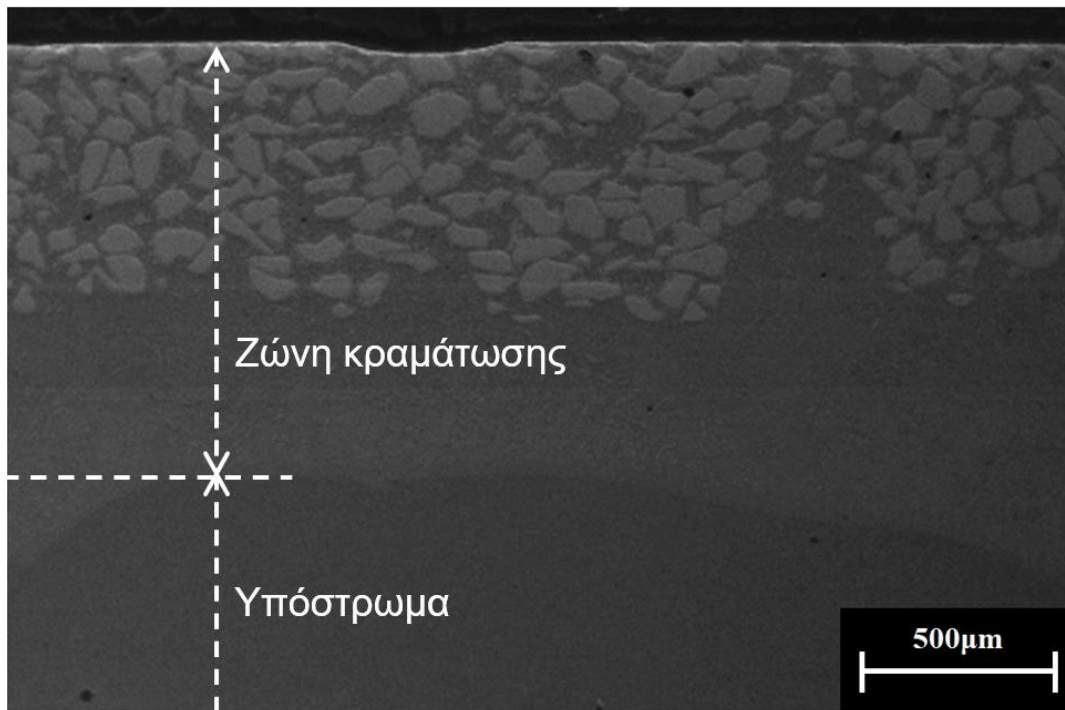
6.2 Μικροδομή των επιφανειακών στρωμάτων

6.2.1 Απλή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία σε αδρανή ατμόσφαιρα

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζονται τρεις χαρακτηριστικές κατεργασίες μονού θερμικού κύκλου υπό αδρανή ατμόσφαιρα (μέσω ροής αερίου Ar), για τρεις διαφορετικές τιμές της διάρκειας έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία. Σε όλα τα πειράματα ο ρυθμός θέρμανσης έως τη θερμοκρασία τήξης του υποστρώματος παρέμεινε ίσος προς $\sim 3,2^\circ\text{C/s}$. Η διάρκεια παραμονής σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας τήξης του υποστρώματος ήταν $\sim 288\text{s}$ (κόκκινη καμπύλη), $\sim 306\text{s}$ (μπλέ καμπύλη) και $\sim 335\text{s}$ (πράσινη καμπύλη). Στη συνέχεια, θα αναλυθεί η πρώτη και η τελευταία περίπτωση που εφεξής θα αναφέρονται ως «σύντομη» και «μακρά» κατεργασία, αντίστοιχα. Μετά από την ακτινοβόλησή τους, τα δοκίμια αφέθηκαν να ψυχθούν υπό κανονικές συνθήκες, όπως έχει ήδη περιγραφεί.



Σχήμα 6.1 Καμπύλες εξέλιξης της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της κατεργασίας μονού θερμικού κύκλου υπό αδρανή ατμόσφαιρα του συστήματος με προ-εναπόθεση κόνεως WC.



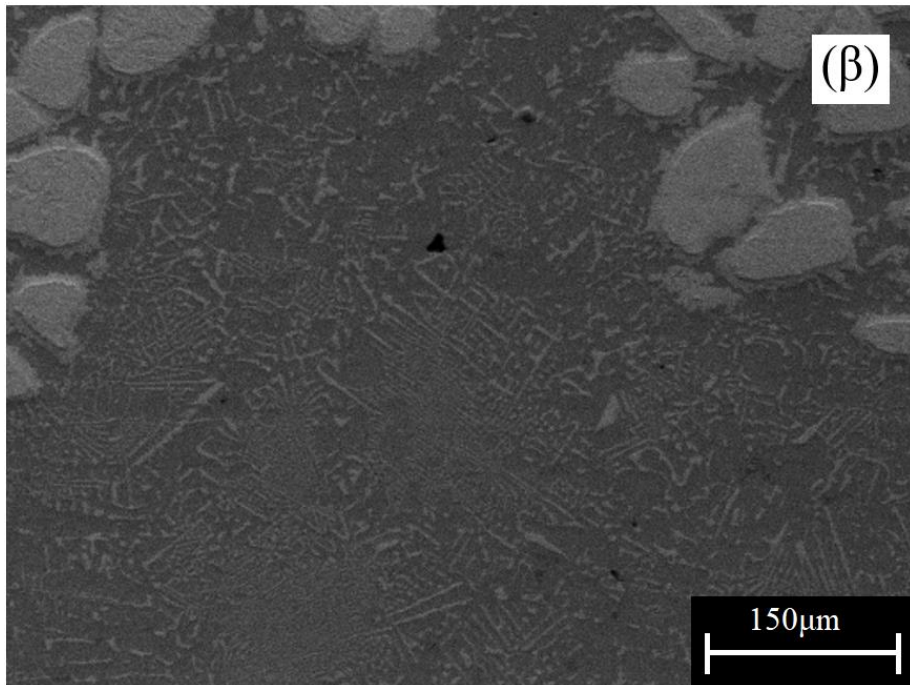
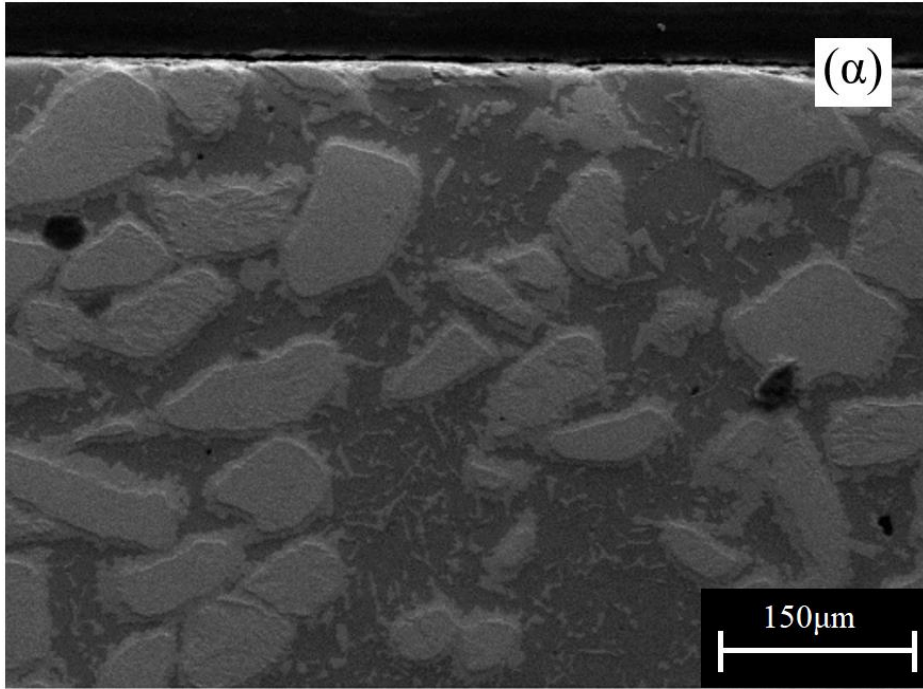
Σχήμα 6.2 Μικρογραφία κάθετης τομής του επιφανειακού στρώματος με προ-εναπόθεση WC, μετά από «σύντομη» ηλιακή κατεργασία (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).

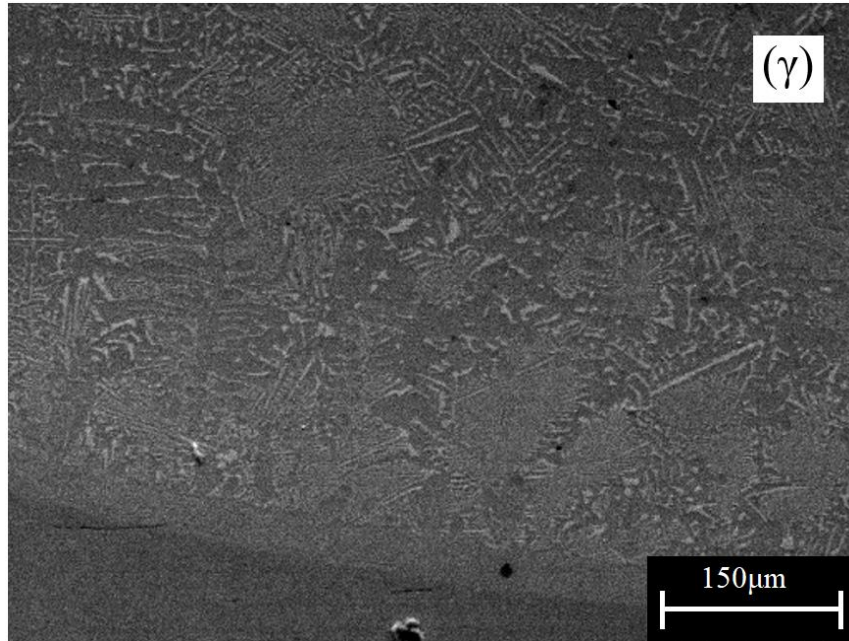
Η μικροδομή του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος, που προέκυψε μετά από τη «σύντομη» κατεργασία, παρουσιάζεται στο [Σχήμα 6.2](#). Η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία είχε ως αποτέλεσμα την τήξη της επιφάνειας μέχρι ένα μέγιστο βάθος, που υπερβαίνει το ορατό των ~1250μm, δεδομένου ότι στο συγκεκριμένο δείγμα, το ανώτερο στρώμα της επιφάνειας έχει ήδη αφαιρεθεί ώστε να πραγματοποιηθούν οι λοιπές εργαστηριακές δοκιμές. Δεδομένου ότι δεν σημειώθηκε υπέρβαση της θερμοκρασίας τήξης του καρβιδίου του βολφραμίου 2870°C ([Σχήμα 6.1](#)), τα προ-εναποτεθημένα σωματίδια του καρβιδίου σε στερεή κατάσταση βυθίστηκαν στο λουτρό του τηγματος χάλυβα, όπου παγιδεύτηκαν κατά την επαναστερεοποίηση. Σε αντίθεση με την περίπτωση των σωματιδίων καρβιδίου του τιτανίου, τα οποία, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5, παρατηρήθηκε να διασπείρονται ομοιόμορφα σε όλη τη «λίμνη» του τηγματος, το δε «ηλιακό» επιφανειακό στρώμα του [Σχήματος 6.2](#) εμφανίζει δύο ζώνες ([Σχήμα 6.3](#)):

- Την εξωτερική ζώνη πάχους ~700μm, η οποία εκτέθηκε άμεσα στην ηλιακή ακτινοβολία, μακροσκοπικά παρατηρείται όντως ομοιόμορφη διασπορά των σωματιδίων.
- Την εσωτερική ζώνη πάχους ~550μm, η οποία βρίσκεται σε επαφή με τη μη τηγμένο μέταλλο βάσης, δεν παρατηρείται μακροσκοπικά η ύπαρξη σωματιδίων και η ζώνη αυτή έχει μάλλον μεταλλική εμφάνιση.

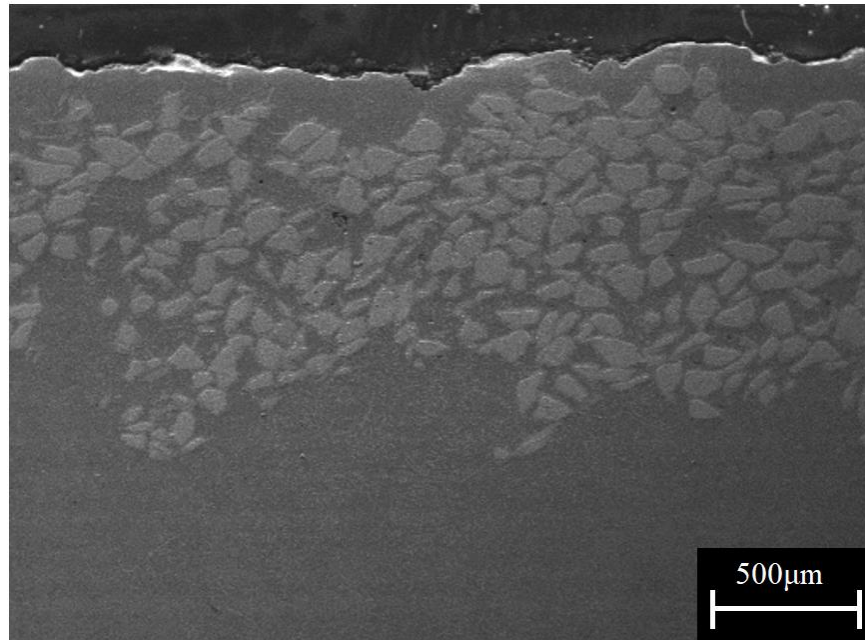
Για «σύντομη» διάρκεια έκθεσης, μόνο το ανώτερο τμήμα του επιφανειακού στρώματος φαίνεται να έχει ενισχυθεί με διασπορά σωματιδίων, που αποτελεί το στόχο της παρούσας έρευνας.

Μετά από «μακρά» ηλιακή κατεργασία ([Σχήμα 6.4](#)), το συνολικό πάχος του επιφανειακού στρώματος εγγίζει τα ~1900μm, με την εξωτερική ζώνη υψηλής συγκέντρωσης σωματιδίων να είναι πάχους ~1200μm. Η αύξηση κατά ~45 έως 50s της διάρκειας έκθεσης σε Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια (ή ακτινοβολία) οδήγησε στην αυτονόητη αύξηση του τηγμένου όγκου του μετάλλου βάσης, αλλά ταυτόχρονα και σε επέκταση της εσωτερικής ζώνης μεταλλικής εμφάνισης, εις βάρος της ανώτερης ζώνης διασποράς των σωματιδίων.





Σχήμα 6.3 Μικροδομή των διακριτών περιοχών του επιφανειακού στρώματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2: (α) εξωτερική ζώνη, (β) εσωτερική ζώνη και (γ) διεπιφάνεια με το μέταλλο βάσης (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).



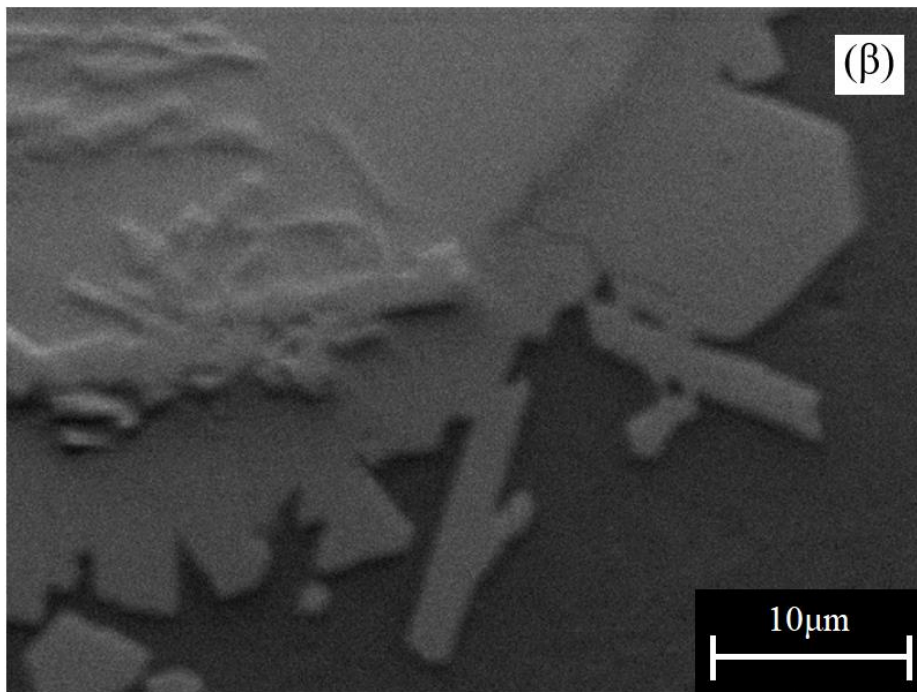
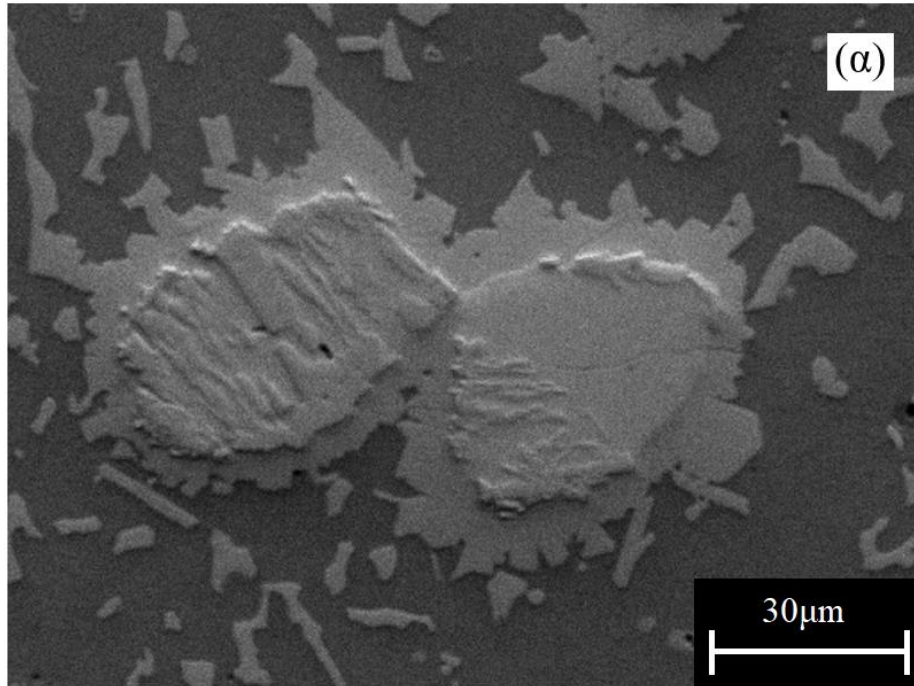
Σχήμα 6.4 Μικρογραφία κάθετης τομής του επιφανειακού στρώματος με προ-εναπόθεση WC, μετά από «μακρά» ηλιακή κατεργασία (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).

Τόσο στην περίπτωση της «σύντομης», όσο και στην περίπτωση της «μακράς» κατεργασίας, η στοιχειακή μικροανάλυση σε μεμονωμένα καρβίδια της ανώτερης ζώνης (Σχήμα 6.5α), καθώς και στα όριά τους με τη μεταλλική μήτρα (Σχήμα 6.5β), έδειξε ότι το νέο χαρακτηριστικό της μικροδομής, που εμφανίζεται ως δακτύλιος γύρω από τα σωματίδια WC, αποτελείται από σίδηρο (Fe) και βολφράμιο (W). Η συνύπαρξη σιδήρου και βολφραμίου σε αυτούς τους δακτυλίους αποτελεί ισχυρή ένδειξη ότι το σωματίδιο του καρβιδίου του βολφραμίου υφίσταται προσβολή από το τήγμα, προς το σχηματισμό μιας νέας φάσης.

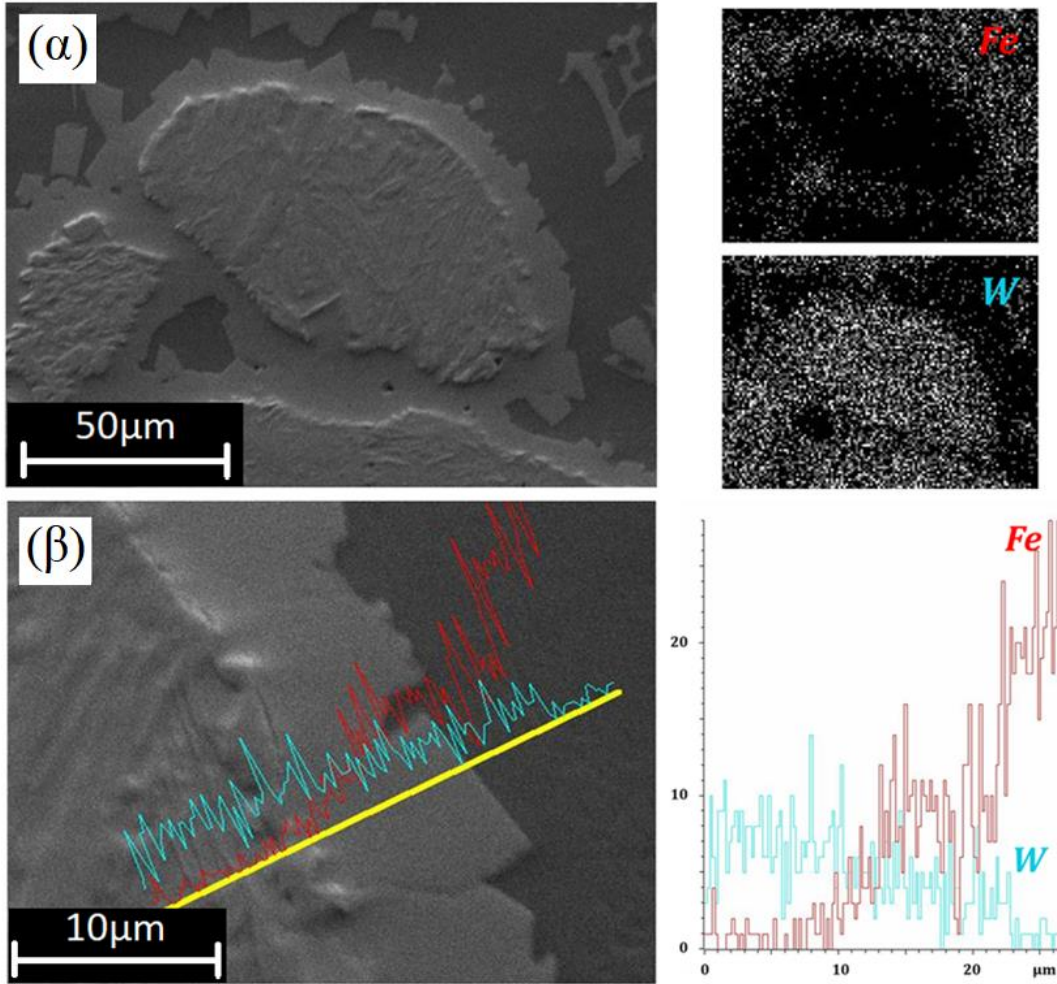
Η στοιχειακή μικροανάλυση στην περιοχή ενός απομονωμένου σωματιδίου, που βρίσκεται στην ανώτερη ζώνη (Σχήμα 6.6), αποκάλυψε την ύπαρξη τριών διακριτών περιοχών διαφορετικής χημικής σύνθεσης:

- Τον πυρήνα του διατηρηθέντος αρχικού νηματοειδούς σωματιδίου με ~99 wt.% W.
- Το δακτύλιο που περιβάλλει το σωματίδιο με ατομική αναλογία Fe:W, ίση σχεδόν με 1:1, και αποτελεί το προϊόν της προσβολής του WC από το τήγμα του χάλυβα. Παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του χρόνου έκθεσης, το πλάτος των δακτυλίων αυτών αυξανόταν επίσης.
- Τη μήτρα του χάλυβα, όπου το κυρίαρχο στοιχείο που ανιχνεύθηκε ήταν ο σίδηρος.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η νηματοειδής εμφάνιση του μη-επηρεασμένου πυρήνα του σωματιδίου αποδίδεται τυπικά στη σύσταση της αρχικής κόνεως, που όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, αποτελεί μίγμα των φάσεων WC και W₂C. Αυτές έχουν εξαγωνική μικροδομή και συχνά αναφέρονται ως δ-WC και β-W₂C φάσεις [Kurlov *et al.*, 2016]. Η δεύτερη, β-W₂C ή ημι-καρβίδιο, αποτελεί ένα ενδιάμεσο προϊόν κατά τη χύτευση του καρβιδίου του βολφραμίου και αποδίδεται στην ευτηκτοειδή αντίδραση μεταξύ του W και του δ-WC στους 1250°C [Fernandes *et al.*, 2011, Kurlov *et al.*, 2016]. Σε αυτή την αντίδραση αποδίδεται ακριβώς και η νηματοειδής μορφολογία των σωματιδίων [Mendez *et al.*, 2014].



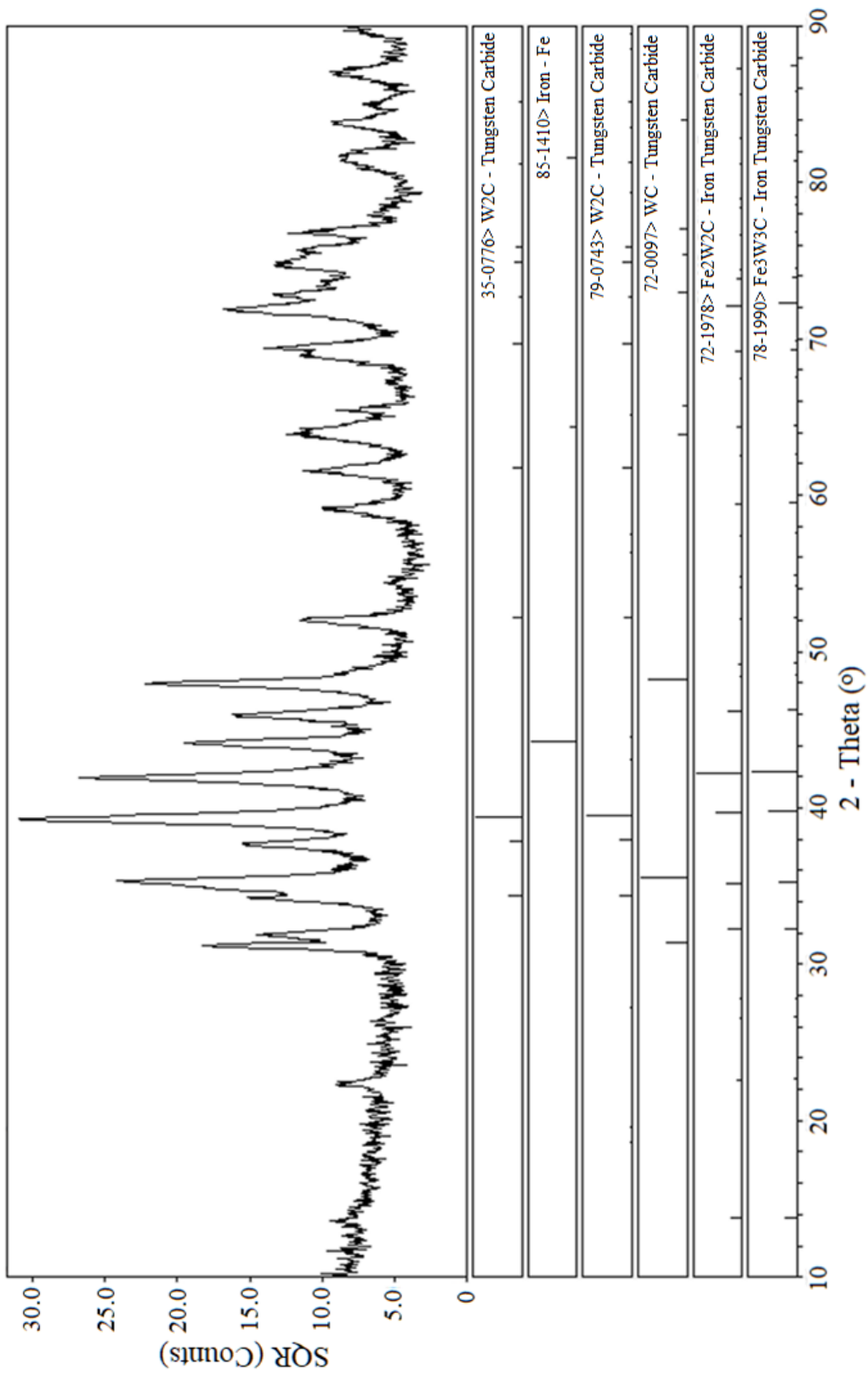
Σχήμα 6.5 (α) Μικρογραφία μεμονωμένων σωματιδίων της ανώτερης ζώνης του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος. (β) Μεγέθυνση της (α) στην περιοχή της διεπιφάνειας με τη μεταλλική μήτρα (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).



Σχήμα 6.6 (α) Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης μεμονωμένου σωματίδιου της ανώτερης ζώνης του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος και αντίστοιχοι χάρτες των κύριων μεταλλικών στοιχείων και (β) μικρογραφία στα όρια του σωματιδίου και αντίστοιχη στοιχειακή μικροανάλυση κατά μήκος της γραμμής που σημειώνεται.

Παρόμοιες παρατηρήσεις σχετικές με τη δράση του τηγμένου χάλυβα έγιναν και στην περίπτωση επιγομώσεων με τη χρήση της τεχνικής FCAW και σύρματος με πυρήνα κόνεως WC [Chaidemenopoulos *et al.*, 2019] και προτάθηκε ο σχετικός μηχανισμός.

Προκειμένου να ταυτοποιηθεί η φύση του προϊόντος, που σχηματίζεται ως δακτύλιος γύρω από τα σωματίδια, πραγματοποιήθηκε ανάλυση με περίθλαση ακτίνων X σε δοκίμια «σύντομης» διάρκειας (Σχήμα 6.7). Επιπλέον των φάσεων που είχαν αναγνω-



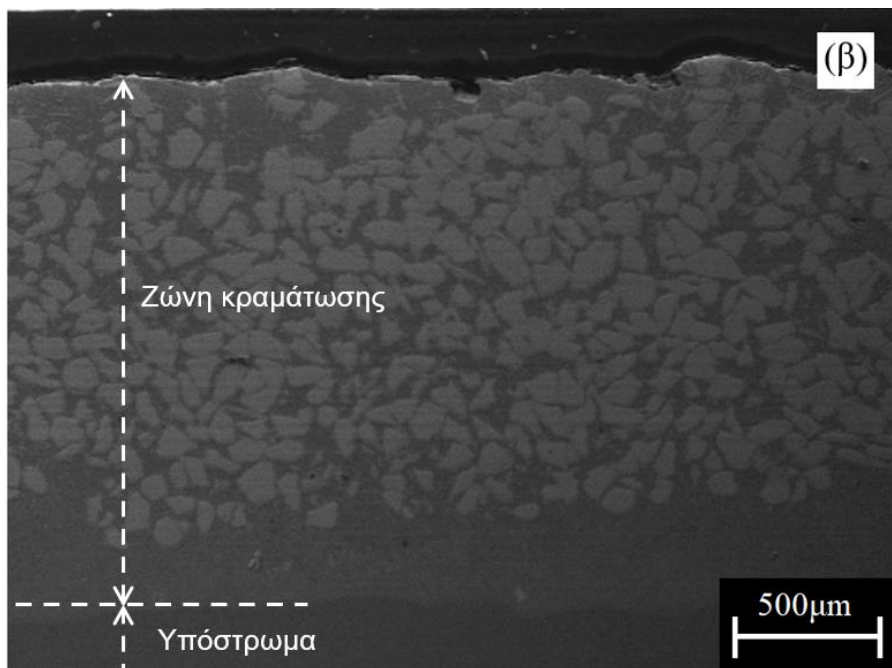
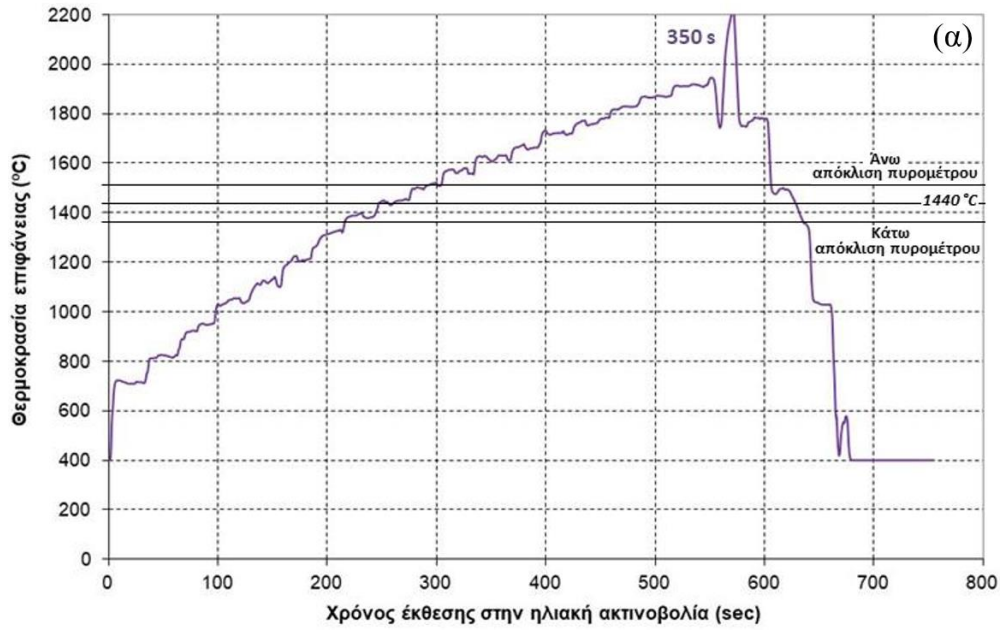
Σχήμα 6.7 Φάσμα περίθλασης ακτίνων Χ του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος με προ-εναπόθεση κόνεως WC, μετά από κατεργασία «σύντομης» διάρκειας.

ρισθεί στην αρχική κόνη (Σχήμα 3.10) που προ-εναποτέθηκε στα επιφανειακά στρώματα μετά την ηλιακή κατεργασία, ταυτοποιήθηκε η ύπαρξη μικτών ενώσεων Fe-W-C, του τύπου Fe_2W_2C ή Fe_3W_3C , γνωστών ως η-καρβιδίων [Pollock *et al.*, 1970], με ατομική αναλογία Fe:W είναι ίση με 1:1. Οι μικτές αυτές φάσεις μπορούν να αποδοθούν μόνο με δημιουργία του προϊόντος γύρω από τα σωματίδια, όπως περιγράφηκε έως τώρα.

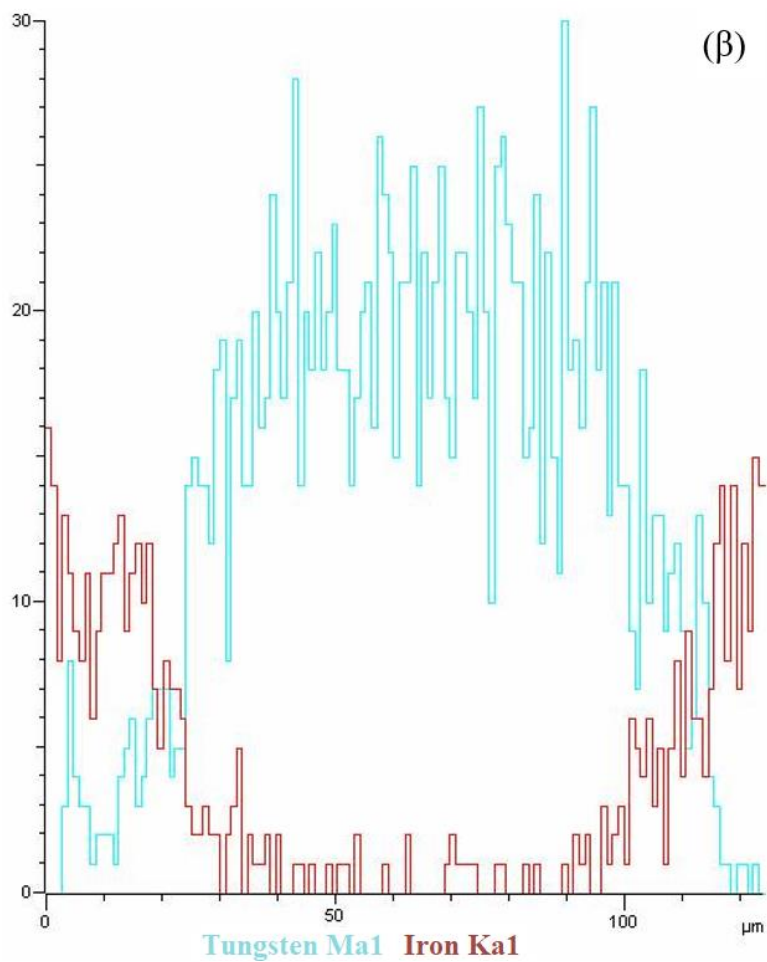
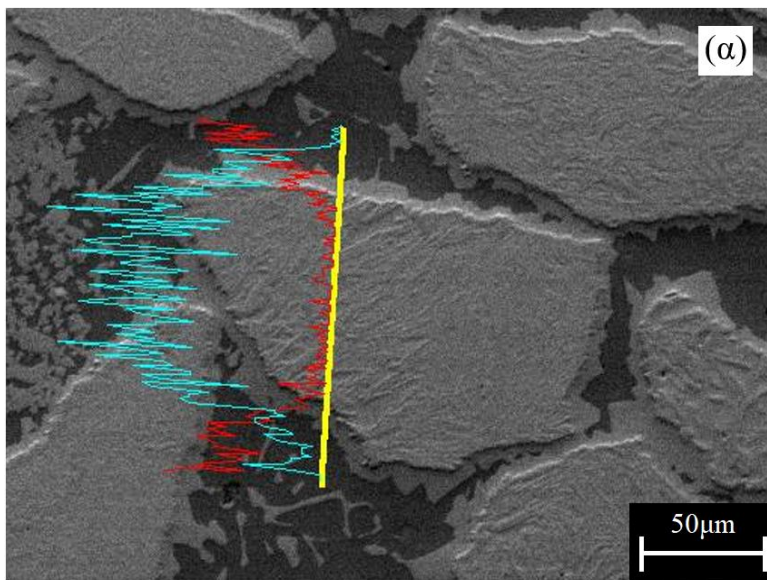
6.2.2 Απλή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία σε χημικά δραστική ατμόσφαιρα

Ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα της κατεργασίας σε χημικά δραστική ατμόσφαιρα αναλύεται η ηλιακή κατεργασία, που περιγράφεται στο Σχήμα 6.8α. Πρόκειται για μια κατεργασία παρόμοιας διάρκειας παραμονής σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου βάσης με αυτήν της κατεργασίας «μακράς» διάρκειας της παραγράφου 6.2.1, η οποία οδήγησε σε περιορισμό της ανώτερης ζώνης διασποράς των καρβιδίων. Στην περίπτωση κατεργασίας σε χημικά δραστική ατμόσφαιρα (ροή N_2 , 2bar), το μέγιστο πάχος στο κέντρο της «λίμνης» τήξης μετρήθηκε στα $\sim 1850\mu m$ (Σχήμα 6.8β), τιμή που προσεγγίζει εκείνη της προηγούμενης περίπτωσης. Ωστόσο σε αντίθεση με την τελευταία, η διασπορά των καρβιδίων που επιτεύχθηκε, φαίνεται να έχει λάβει χώρα σχεδόν σε όλο το πάχος του τηγμένου στρώματος.

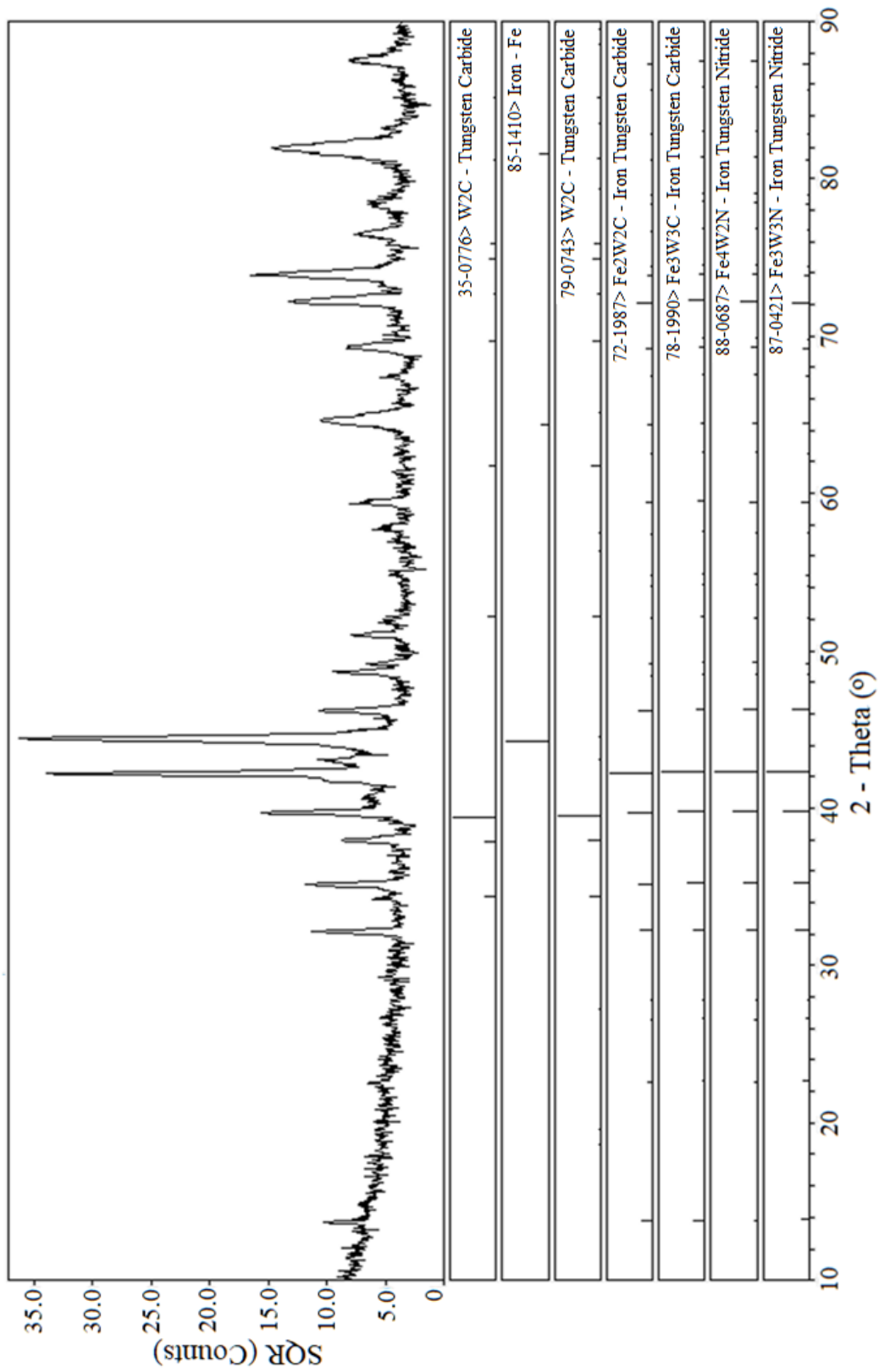
Η παρατήρηση της μικροδομής του επιφανειακού στρώματος σε υψηλή μεγέθυνση, ανέδειξε επίσης το σχηματισμό γύρω από τα διασπαρμένα σωματίδια ενός δακτυλίου προϊόντος αντίδρασης (Σχήμα 6.9), ο οποίος ωστόσο είναι πολύ μικρότερου πλάτους σε σχέση με εκείνον που αναπτύσσεται με παρόμοιες συνθήκες ακτινοβολήσης σε αδρανή ατμόσφαιρα. Εκτός από τις φάσεις, που ταυτοποιήθηκαν στην προηγούμενη περίπτωση, η ανάλυση με περίθλαση ακτίνων X (Σχήμα 6.10) ανέδειξε την παρουσία δύο πιθανών επιπρόσθετων φάσεων, που αντιστοιχούν σε μικτά νιτρίδια Fe-W του τύπου Fe_4W_2N και Fe_3W_3N . Δεδομένου ότι οι κορυφές υψηλής έντασης των μικτών καρβιδίων και νιτριδίων συμπίπτουν, δυσχεραίνοντας τη μεταξύ τους διάκριση, η εμφάνιση της κορυφής στις $72,2^\circ$, η οποία αντιστοιχεί μόνο στη Fe_4W_2N , συνηγορεί προς το σχηματισμό του νιτριδίου αυτού.



Σχήμα 6.8 Ηλιακή κατεργασία μακράς διάρκειας σε χημικά δραστική ατμόσφαιρα:
 (α) Εξέλιξη της θερμοκρασίας της επιφάνειας κατά την κατεργασία.
 (β) Μικροδομή κάθετης τομής του συνολικού «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).



Σχήμα 6.9 (α) Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης μεμονωμένων σωματιδίων. (β) Στοιχειακή μικροανάλυση των δύο κύριων μεταλλικών στοιχείων (Fe, W) κατά μήκος της γραμμής που σημειώνεται στην (α).



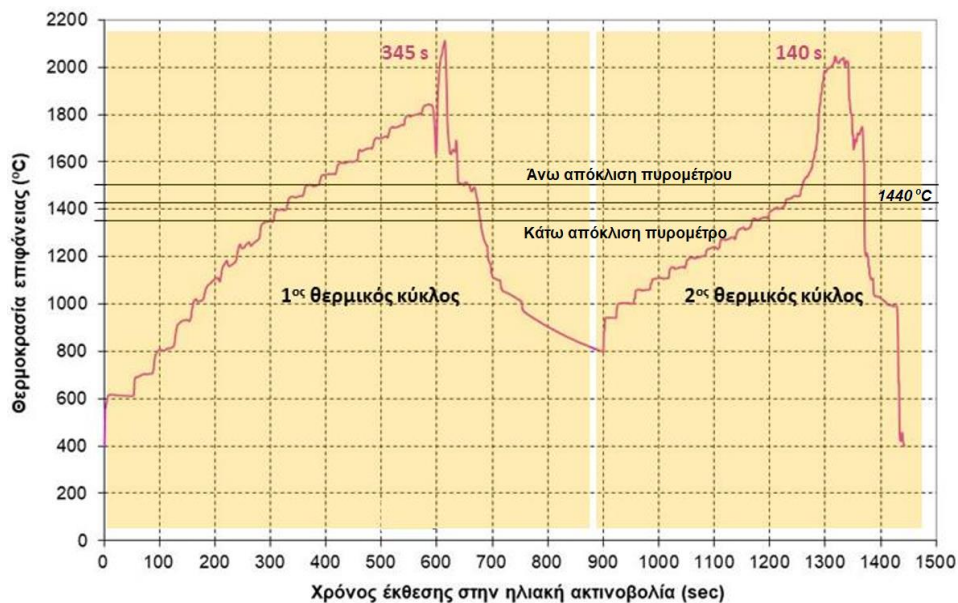
Σχήμα 6.10 Φάσμα περίθλασης ακτίνων X του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος που δημιουργήθηκε με καταργασία «μακράς» διάρκειας σε χημικά δραστική ατμόσφαιρα αζώτου.

6.2.3 Διπλή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία σε αδρανή ατμόσφαιρα

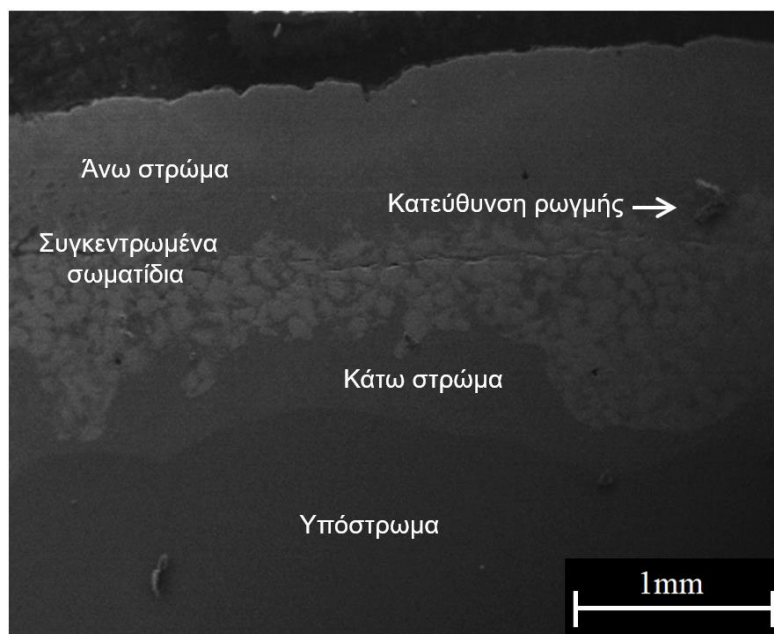
Η εξέλιξη της θερμοκρασίας της επιφάνειας διπλής ηλιακής επεξεργασίας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.11. Μια τέτοια ηλιακή κατεργασία οδήγησε σε ένα μάλλον «ανεπιτυχές» επιφανειακό στρώμα με πάχος 1700-2000μm και μη ομοιόμορφη διασπορά των σωματιδίων καρβιδίου. Η ύπαρξη διακριτών σωματιδίων φαίνεται να συγκεντρώνεται στη μεσαία περιοχή της «λίμνης» τήξης, ενώ οι περιοχές που βρίσκονται επάνω από αυτήν (σε άμεση έκθεση στη Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ακτινοβολία) και στο βάθος της επηρεαζόμενης ζώνης (κοντά στη διεπιφάνεια με το μη τηγμένο μέταλλο βάσης), φαίνεται να εμφανίζουν μεταλλικό χαρακτήρα. Περαιτέρω παρατήρηση σε υψηλότερη μεγέθυνση ανέδειξε ότι το επιφανειακό αυτό στρώμα, μακροσκοπικά «κατοπτρικής συμμετρίας», αποτελείται από:

- (α) Μια ενδιάμεση ζώνη με πάχος ίσο προς 25-30% του συνολικού πάχους της ζώνης, που έχει οδηγηθεί σε τήξη, στην οποία διακρίνεται η ανάπτυξη μιας κεντρικής ρωγμής παράλληλης με την αρχική επιφάνεια του δοκιμίου. Στη ζώνη αυτή, οι δακτύλιοι γύρω από τα διακριτά σωματίδια είναι πολύ μεγαλύτερου πλάτους και σε αρκετές περιπτώσεις εφάπτονται μεταξύ τους (Σχήμα 6.13), με τρόπο ώστε να μπορεί να ειπωθεί ότι πρόκειται μάλλον για μια ζώνη ψαθυρού η-καρβιδίου, παρά για διασπορά σωματιδίων εντός της μεταλλικής μήτρας.
- (β) Μια ανώτερη ζώνη «μεταλλικού χαρακτήρα» (Σχήμα 6.14), όπου μπορούν να διακριθούν δύο τύποι σχηματισμών διαφορετικής μορφολογίας εντός της μεταλλικής μήτρας. Ο πρώτος τύπος αφορά τα αδρομερή σωματίδια, που παρατηρούνται και που θα μπορούσαν να αντιστοιχηθούν με τμήματα του η-καρβιδίου, τα οποία αποκόπηκαν από τους δακτυλίους που δημιουργήθηκαν γύρω από τα αρχικά καρβίδια και αναδεύθηκαν στη χαλύβδινη μήτρα. Ο δεύτερος τύπος αφορά ένα δίκτυο βελονοειδών σχηματισμών, που θα μπορούσαν να παραπέμπουν σε κατακρμνήσματα κατά τη διάρκεια δένδριτικής στερεοποίησης ενός τήγματος διαφορετικής χημικής σύστασης από εκείνη του κοινού ανθρακούχου χάλυβα του μετάλλου βάσης.
- (γ) Μια κατώτερη ζώνη, επίσης «μεταλλικού χαρακτήρα» (Σχήμα 6.15), όπου επικρατεί ο δεύτερος τύπος σχηματισμών. Παρόμοιας μορφολογίας ήταν οι εσωτερικές ζώνες

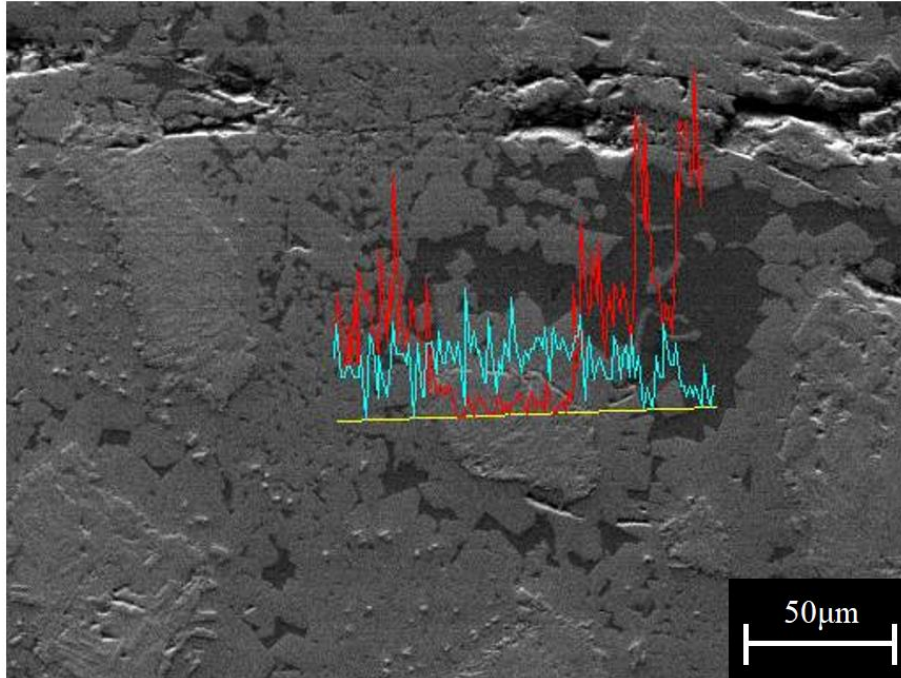
«μεταλλικού χαρακτήρα» και στις δύο προηγούμενες κατεργασίες απλού θερμικού κύκλου υπό αδρανή ατμόσφαιρα και υπό χημικά δραστική ατμόσφαιρα και για το λόγο αυτό, η αξιολόγηση των σχετικών ευρημάτων παρουσιάζεται ενοποιημένα στην παρούσα παράγραφο.



Σχήμα 6.11 Θερμικός κύκλος δύο σταδίων υπό αδρανή ατμόσφαιρα.



Σχήμα 6.12 Μικρογραφία κάθετης τομής του επιφανειακού στρώματος μετά από ηλιακή κατεργασία δύο σταδίων, όπου παρατηρείται συγκέντρωση διακριτών σωματιδίων στην κεντρική περιοχή της «λίμνης» του επαναστερεοποιημένου τήγματος (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).



Σχήμα 6.13 Μεγέθυνση στην ενδιάμεση περιοχή του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος, όπου διακρίνεται ο σχεδόν πλήρης μετασχηματισμός των αρχικών σωματιδίων του καρβιδίου του βολφραμίου σε μικτό η-καρβίδιο (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και αντίστοιχη γραμμική στοιχειακή μικροανάλυση: Fe-κόκκινη και W-γαλάζια καμπύλη).

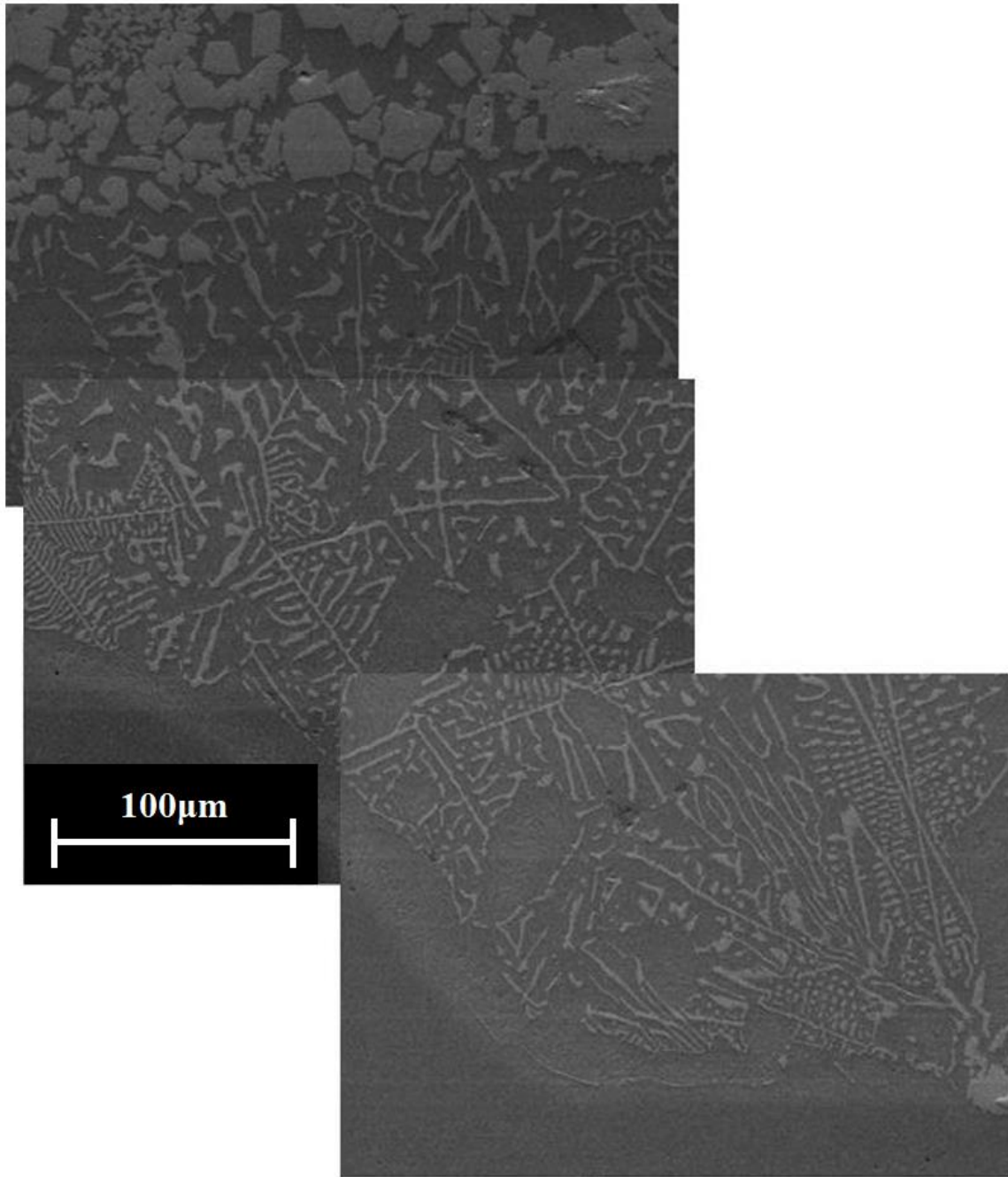
Οι δύο κύριοι μεταλλουργικοί μετασχηματισμοί, που παρατηρούνται κατά την ηλιακή κατεργασία με προ-εναπόθεση κόνεως WC, ελέγχονται από τη θερμοδυναμική του συστήματος και αφορούν:

- Την προσβολή του καρβιδίου από το τήγμα της σιδηρούχας μήτρας, ένας μεταλλουργικός μετασχηματισμός που λαμβάνει χώρα κατά την παραμονή του επιφανειακού στρώματος σε θερμοκρασία ανώτερη της θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου βάσης.
- Το σχηματισμό κατακρμνησμάτων κατά τη στερεοποίηση του εμπλουτισμένου λουτρού τήγματος ή/και κατά τη διάρκεια της ψύξης των επανα-στερεοποιημένων στρωμάτων έως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στην πρώτη περίπτωση, ο υγρός χάλυβας προσβάλλει περιμετρικά το αρχικό στερεό σωματίδιο του καρβιδίου του βολφραμίου, σχηματίζοντας γύρω από αυτό έναν δακτύλιο από το προϊόν της αντίδρασης Fe_xW_xC .



Σχήμα 6.14 Μεγέθυνση στην ανώτερη ζώνη (εξωτερική περιοχή) του «ηλιακού επιφανειακού στρώματος, όπου διακρίνεται η ύπαρξη σχηματισμών διαφορετικής μορφολογίας εντός της μεταλλικής μήτρας (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωση).



Σχήμα 6.15 Μεγέθυνση στην κατώτερη ζώνη (εσωτερική περιοχή) του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος, όπου διακρίνεται η ύπαρξη ενός δικτύου κατακρημνισμάτων εντός της μεταλλικής μήτρας (εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).

Ο μετασχηματισμός αυτός προς η-καρβίδιο γίνεται σχετικά εύκολα, καθώς στο σύστημα Fe-W-C υπάρχει ένα τριμερές εύτηκτο μόλις στους 1143°C τήγμα [Fernandes, 2011]. Με την αύξηση της διάρκειας της ηλιακής κατεργασίας και την παραμονή επιφανειακού στρώματος σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου βάσης, αυξάνεται και το πλάτος του δακτυλίου μετασχηματισμού. Το η-καρβίδιο που δημιουργείται εμφανίζει μια μάλλον ψαθυρή συμπεριφορά, ενώ το μεταλλικό τήγμα γύρω από αυτό βρίσκεται σε συνεχή κίνηση λόγω της διαφοράς της θερμοκρασίας κατά το πάχος ολόκληρου του υλικού συστήματος (λουτρό/μη τηγμένο μέταλλο βάση/μονωτικό υπόστρωμα αλουμίνιας). Υπό αυτές τις συνθήκες ευνοείται η δημιουργία και διάδοση ρωγμών του ψαθυρού αυτού προϊόντος αντίδρασης. Οι ρωγμές αυτές διαδίδονται και προς τον όγκο του σωματιδίου που δεν έχει υποστεί μετασχηματισμό, δημιουργώντας ένα «μονοπάτι» που επιτρέπει στο υγρό μέταλλο να διεισδύσει βαθύτερα στο καρβίδιο, επιταχύνοντας έτσι τη μετατροπή προς μικτό καρβίδιο σιδήρου και βολφραμίου. Το προϊόν της ρωγμάτωσης κατακεραματίζεται περαιτέρω σε λωρίδες (Σχήμα 6.14), οι οποίες μετακινούνται εντός της «λίμνης» του τήγματος.

Παρόμοιες παρατηρήσεις αναφέρονται και στις περιπτώσεις επιγόμεσης με τεχνικές FCAW [Chaidemenopoulos *et al.*, 2019] και PTAW [Mendez, 2014]. Η διάλυση των σωματιδίων καρβιδίου βρέθηκε να περιορίζεται όταν ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται είτε καθαρό στοιχειομετρικό μονο-κρυσταλλικό WC αντί του ευτηκτικού μείγματος W₂C/WC, είτε ευτηκτικός πυρήνας με λεπτό εξωτερικό περίβλημα μονοκρυσταλλικής ένωσης [Mendez *et al.*, 2014]. Αυτές οι παρατηρήσεις αποδόθηκαν στην υψηλή αντίσταση της φάσης WC από τη δράση σιδηρούχων τηγμάτων σε υψηλή θερμοκρασία.

Καθώς ο δακτύλιος μετασχηματισμού αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης του στερεού σωματιδίου με το υγρό μέταλλο, η βελτιστοποίηση της κατεργασίας θα πρέπει να στοχεύει στον προσδιορισμό της ελάχιστης διάρκειας έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία, ώστε να μειωθεί κατά το δυνατόν το πάχος του. Σε παρόμοια περίπτωση ενίσχυσης με σωματίδια WC χαλύβδινης μήτρας [Li *et al.*, 2018], αναφέρθηκε ότι η μεταβολή του σχήματος των σωματιδίων από ακανόνιστο σε πιο σφαιρικό, προκαλεί την επιβράδυνση διάδοσης των ρωγμών στο δακτύλιο

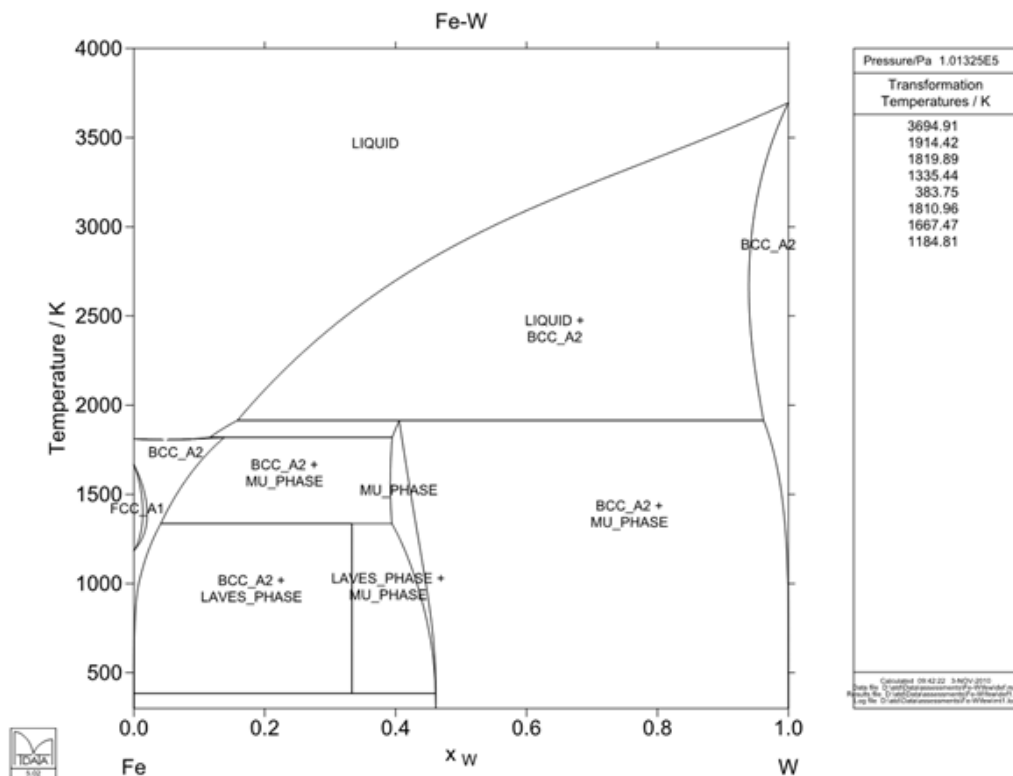
μετασχηματισμού. Στην περίπτωση παραγωγής, με τεχνικές πυροσυσσωμάτωσης κεραμομεταλλικών υλικών WC με τη χρήση χάλυβα ως συνδετικού μετάλλου [Ojo-Kuroluyi *et al.*, 2017], παρατηρήθηκε ότι η μείωση της περιεκτικότητας σε άνθρακα της μεταλλικής φάσης, οδήγησε στη ψαθυρή η-φάσης. Αντίστοιχες ήταν οι παρατηρήσεις που έγιναν στην περίπτωση παραγωγής σύνθετου υλικού με διασπορά WC με τεχνικές μηχανικής κραματοποίησης και συσσωμάτωσης πλάσματος [Tan *et al.*, 2016].

Ο σχηματισμός κατακρημνισμάτων εντός της μεταλλικής μήτρας, αποτελούν ένα δεύτερο σημείο προς περαιτέρω διερεύνηση. Στην περίπτωση της ηλιακής κατεργασίας, οι σχηματισμοί αυτοί παρατηρήθηκαν στην ανώτερη (Σχήμα 6.14) και την κατώτερη (Σχήμα 6.15) ζώνη, «μεταλλικού χαρακτήρα» με τη μορφή μεμονωμένων ράβδων και ιδεογραμμάτων, είτε με τη μορφή δικτύων, που θυμίζουν «τυπωμένο κύκλωμα» και «ψαροκόκαλο». Η μορφολογία αυτή παραπέμπει σε (α) διμεταλλικές φάσεις του τριμερούς συστήματος Fe-W-C, τα κράματα των οποίων χαρακτηρίζονται από κατακρημνίσματα Fe_2W (φάση Laves) και / ή Fe_7W_6 (μ- φάση), και σε (β) καρβίδια του τύπου $M_{23}C_6$ (όπου M: Fe+W), ανάλογα την ακριβή χημική σύνθεση του συγκεκριμένου τριμερούς κράματος. Οι δύο πρώτες διμεταλλικές φάσεις σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης τηγμάτων, ενώ η τρίτη κατά τη διάρκεια της ψύξης του στερεού από υψηλή θερμοκρασία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ως αποτέλεσμα μετασχηματισμών σε στερεά κατάσταση.

Τέτοιου τύπου κατακρημνίσματα ελήφθησαν πειραματικά με θερμική γήρανση χάλυβων και μελετήθηκε η επίδρασή τους στη σκληρότητα, στην αντοχή σε εφελκυσμό και στον ρυθμό ερπυσμού. Στην περίπτωση του χάλυβα 12Cr-2W [Li, 2006], αποδείχθηκε ότι ο σχηματισμός φάσεων Laves επηρεάζουν τη μηχανική αντοχή του υλικού διττά: με τη διασπορά τους στη μεταλλική μήτρα, η αντοχή αυξάνεται, αλλά ταυτόχρονα η δέσμευση των στοιχείων στις διμεταλλικές ενώσεις, οδηγεί σε μείωση της αντοχής του με μηχανισμό ισχυροποίησης μέσω στερεού διαλύματος. Στην περίπτωση του χάλυβα P92 [Sakthivel *et al.*, 2018], οι μεταβολές της σκληρότητας και της αντοχής σε εφελκυσμό, που παρατηρήθηκαν για διάφορους χρόνους γήρανσης, αποδόθηκαν στην ανταγωνιστική δράση φάσεων Laves και κατακρημνισμάτων $M_{23}C_6$. Στην περίπτωση χάλυβα της ίδιας

κλάσης, ο οποίος, αφού υπέστη θερμική σκλήρυνση, υποβλήθηκε σε δοκιμή ερπυσμού [Maddi *et al.*, 2016], διαπιστώθηκε ότι το επιβαλλόμενο φορτίο είχε αμελητέα επίδραση στη συσσωμάτωση των φάσεων Laves, αλλά σημαντική στα κατακρημνίσματα $M_{23}C_6$. Οι Gao *et al.* (2015) απέδειξαν ότι η φάση Laves σχηματίζεται κατά προτίμηση σε θέσεις κοντά στα σωματίδια $M_{23}C_6$, όταν ο πυράντοχος χάλυβας 9Cr-1.7W-0.4Mo-Co υποβληθεί σε ισοθερμική γήρανση. Η ανθεκτικότητα και η αντίσταση ερπυσμού των χαλύβων G115 [Liu *et al.*, 2018] βρέθηκαν να μειώνονται με την περιεκτικότητα σε βολφράμιο, λόγω της κατακρήμνισης της φάσης Laves, μετά από παρατεταμένη έκθεση σε αυξημένη θερμοκρασία. Οι Gulyaev *et al.* (1990) μελέτησαν πειραματικά το κράμα Fe-48%W, το οποίο μετά την ατμοποίησή του αφαιήθηκε να στερεοποιηθεί με ρυθμό ψύξης της τάξης των $5 \times 10^3 - 1 \times 10^5$ °C/s. Τέτοιοι ρυθμοί οδήγησαν σε πλήρη αναστολή σχηματισμού της μ-φάσης (Fe_7W_6) εντός του τήγματος, ενώ πιθανολογείται ότι, με ακόμη υψηλότερους ρυθμούς ψύξης, μπορεί να επιτευχθεί ολική διαλυτοποίηση του βολφραμίου και δημιουργία στερεού διαλύματος. Η επαναθέρμανση του στερεού διαλύματος προκαλεί την κατακρίμνιση της μ-φάσης, η οποία βρίσκεται στο διάλυμα σε διασπορά.

Σε πιο πρόσφατη μελέτη [Jacob *et al.*, 2015], το ίδιο δυαδικό σύστημα μελετήθηκε θερμοδυναμικά, ώστε να περιγραφούν οι δύο διμεταλλικές φάσεις, για τις οποίες είτε απουσιάζουν είτε αμφισβητούνται θερμοδυναμικά δεδομένα. Ως παράδειγμα μιας τέτοιας προσέγγισης παρουσιάζεται το διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος Fe-W, όπως υπολογίζεται από το National Physical Laboratory, UK (Σχήμα 6.16). Με αυτό προβλέπεται ο σχηματισμό φερρίτη (α -Fe), με κρυσταλλική δομή bcc και μ-φάση (Fe_7W_6), στην περιοχή που είναι πλούσια σε βολφράμιο και σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των $\sim 1546^\circ\text{C}$. Τέλος, με βάση τα θερμοδυναμικά δεδομένα των τριών διμερών συστημάτων Fe-C, Fe-W και W-C, ο Uhrenius (1980) μελέτησε τη θερμοδυναμική ισορροπία του τριμερούς συστήματος Fe-W-C, επαληθεύοντας τον σχηματισμό μ-φάσης, για ενδιάμεσες συγκεντρώσεις W, ενώ σχετικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από τον Gustafson (1987) εισήγαγαν νέα θερμοδυναμικά δεδομένα, τα οποία, επέτρεψαν τη διόρθωση του διαγράμματος τριμερούς διαγράμματος ισορροπίας των φάσεων.



Σχήμα 6.16 Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς Fe-W και θερμοκρασίες μετασηματισμών, όπως υπολογίστηκαν από το National Physical Laboratory, UK.

Στην παρούσα μελέτη ενίσχυσης χαλύβδινων υποστρωμάτων με σωματίδια καρβιδίου του βολφραμίου (WC) με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας, η υψηλή συγκέντρωση διμεταλλικών σχηματισμών στις ζώνες «μεταλλικού χαρακτήρα» του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος και η διάταξή τους σε δίκτυα, θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένας τύπος δευτερογενούς θερμικής κατεργασίας. Ο σχηματισμός του η-καρβιδίου, που στη συνέχεια κερματίζεται σε μικρότερα τμήματα οδηγεί στη δημιουργία τήγματος υψηλής συγκέντρωσης σε W, το οποίο κατά τη στερεοποίηση οδηγεί στα δίκτυα της ιδιαίτερης μορφολογίας που περιγράφηκε.

Η καλύτερη διασπορά των σωματιδίων στο «ηλιακό» επιφανειακό στρώμα και η στενότερη κατώτερη ζώνη, που παρατηρείται στην περίπτωση της ηλιακής κατεργασίας υπό χημικά δραστική ατμόσφαιρα, θα μπορούσε να συσχετιστεί με την αύξηση της πυκνότητας της υγρής μεταλλικής μήτρας, λόγω της διαλυτοποίησης του αζώτου σε αυτήν [Gulyaev *et al.*, 1990].




6.3 Σκληρότητα και κατανομή μικροσκληρότητας

Όπως στην περίπτωση των «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων με διασπορά σωματιδίων TiC (Κεφάλαιο 5), έτσι και στην περίπτωση διασποράς σωματιδίων WC παρατηρήθηκε διαφοροποίηση των μετρούμενων τιμών σκληρότητας με φορτίο 5kg, οι οποίες έδωσαν μια μέση τιμή της τάξης των 1210 ± 70 HV5, και των τιμών της μικροσκληρότητας με φορτίο 0,3kg, οι οποίες ανέδειξαν την ύπαρξη τριών διακριτών κλάσεων τιμών (Πίνακας 6.1).

Οι υψηλότερες τιμές μικροσκληρότητας προέκυψαν σε μετρήσεις στον δακτύλιο μετασχηματισμού και τείνουν σε 1970 ± 230 HV0.3, ενώ οι χαμηλότερες (922 ± 45 HV0.3) σε μετρήσεις της μεταλλικής μήτρας, μεταξύ καρβιδίων που απέχουν μεταξύ τους.

Η παρατήρηση αυτή ενισχύει την παρατήρηση ότι η μικρότερη απόσταση μεταξύ των καρβιδίων θέτει περιορισμό στην πλαστική παραμόρφωση του μετάλλου και, κατά συνέπεια, οδηγεί σε υψηλότερες φαινόμενες τιμές μικροσκληρότητας.

Πίνακας 6.1 Κλάσεις μικροσκληρότητας σε «ηλιακά» επιφανειακά στρώματα με διασπορά σωματιδίων WC.

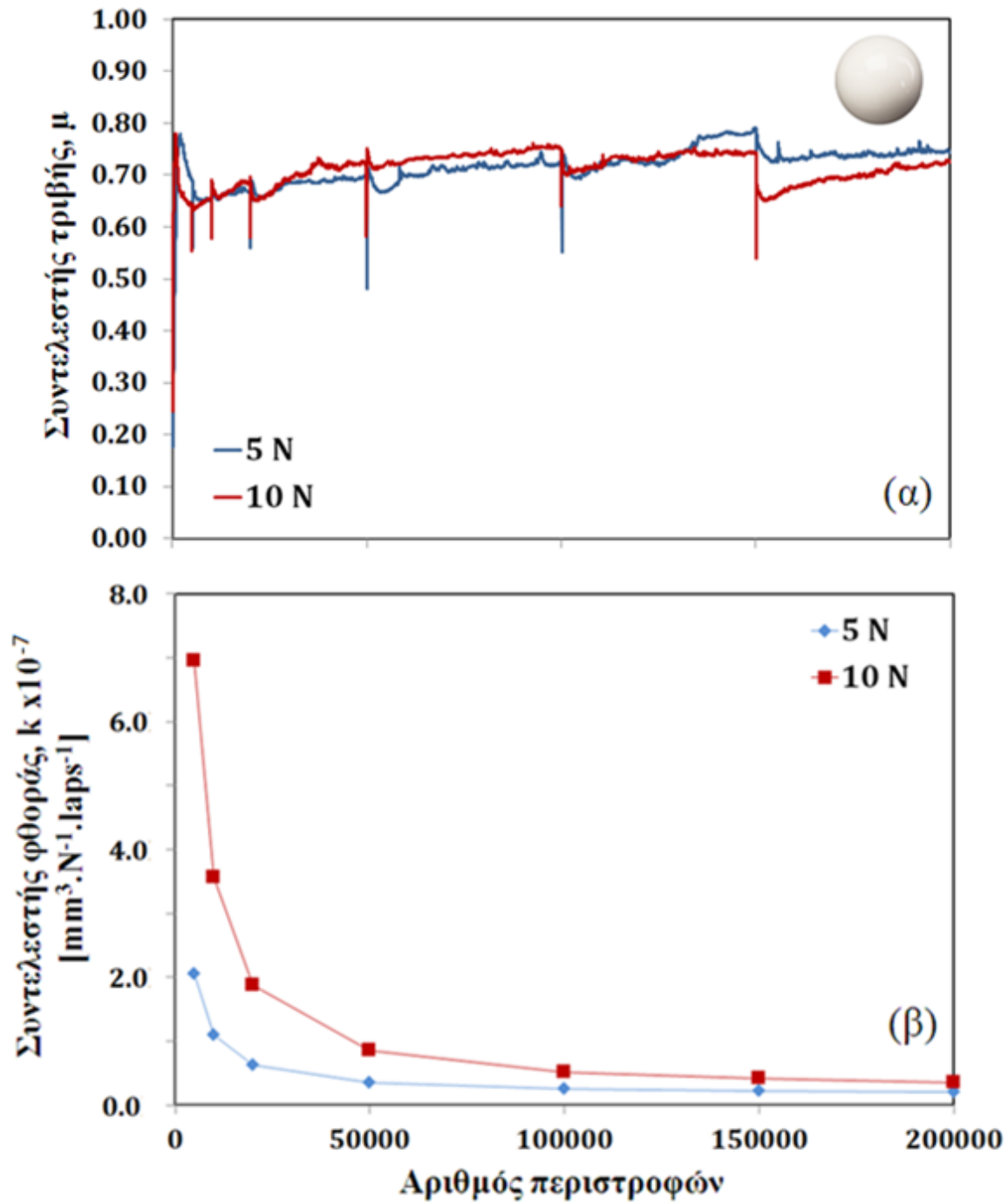
ΜΕΣΗ ΜΙΚΡΟ- ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ HV0.3	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ (%)	ΘΕΣΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ
922 ± 45	42	Μεταλλική μήτρα μεταξύ απομακρυσμένων καρβιδίων	
1300 ± 120	33	Δακτύλιος αντίδρασης, μεταξύ απομακρυσμένων καρβιδίων	
1970 ± 230	25	Δακτύλιος αντίδρασης, μεταξύ γειτονικών καρβιδίων	

6.4 Απόδοση επιφανειακών στρωμάτων σε τριβή ολίσθησης

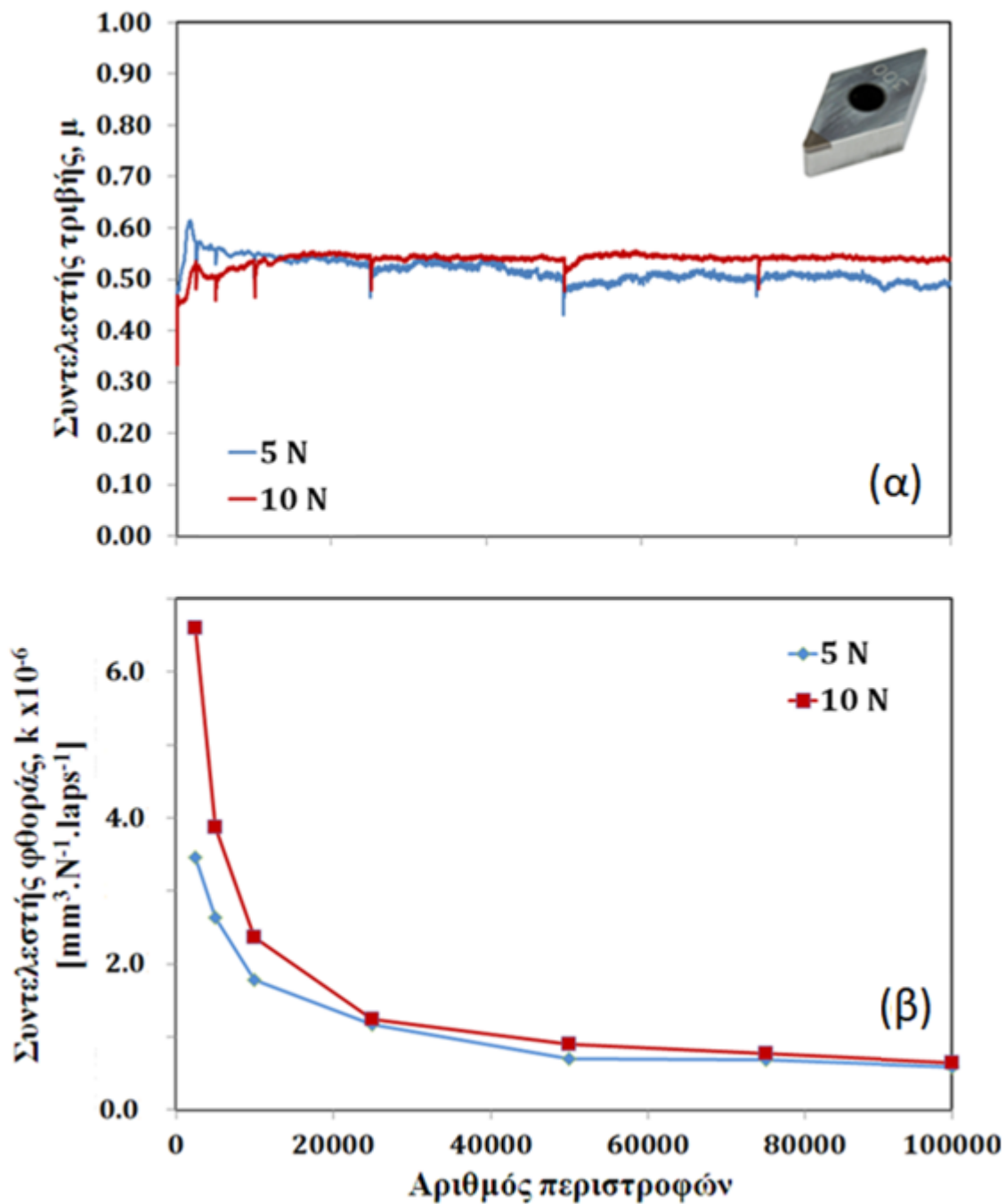
6.4.1 Εξέλιξη των συντελεστών τριβής και φθοράς

Η τριβολογική συμπεριφορά του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος υπό συνθήκες ξηράς ολίσθησης, έναντι σφαίρας αλουμίνας (Al_2O_3) παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.17. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.17α, η περίοδος εκκίνησης (running-in period) έχει σχεδόν εκμηδενιστεί και η δοκιμή περνά σε συνθήκες σταθερής κατάστασης (steady-state condition) με την τιμή του συντελεστή τριβής μ να τείνει σε σταθερή τιμή ίση προς $0,70 \pm 0,05$ και για τα δύο υψηλότερα φορτία που επιβλήθηκαν (5 και 10N). Σε αντίθεση, ο συντελεστής φθοράς k συγκλίνει στις τιμές σταθερής κατάστασης $2,61 \pm 0,3 \times 10^{-8} \text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{laps}^{-1}$ για εφαρμοζόμενο φορτίο 5N και $5,40 \pm 1,13 \times 10^{-8} \text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{laps}^{-1}$ για 10 N, μετά από 200.000 κύκλους ολίσθησης (Σχήμα 6.17β).

Η κατεργασιμότητα του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος με τη χρήση συμβατικού εργαλείου κοπής, προσδιορίστηκε με δοκιμές τύπου στυλίσκου-δίσκου και τη χρήση ένθετου πλακιδίου τόννευσης επικαλυμμένο με c-BN, ως ανταγωνιστικό υλικό. Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.18. Ο συντελεστής τριβής μ συγκλίνει σε μέση τιμή $0,50 \pm 0,05$, και για τα δύο φορτία (5 και 10N), ενώ ο συντελεστής φθοράς k έφθασε σε τιμές σταθερής κατάστασης $(7,58 \pm 1,28) \times 10^{-7} \text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{laps}^{-1}$ για 5N, και $(8,87 \pm 2,62) \times 10^{-7} \text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{laps}^{-1}$ για 10N, μετά από 100.000 κύκλους ολίσθησης. Σε σύγκριση με την κατεργασιμότητα του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος με βάση το καρβίδιο του τιτανίου (TiC), ο συνδυασμός υψηλότερης τριβής και χαμηλότερων συντελεστών φθοράς υποδηλώνει ότι οι συγκεκριμένες εναποθέσεις κατεργάζονται μάλλον δυσκολότερα με τη χρήση συμβατικών εργαλείων κοπής.



Σχήμα 6.17 Τριβολογική συμπεριφορά του σύνθετου επιστρώματος μετά από «σύντομη» περίοδο κατεργασία υπό αδρανή ατμόσφαιρα, υπό συνθήκες ξηράς ολίσθησης έναντι σφαίρας Al_2O_3 : (α) εξέλιξη του συντελεστή τριβής και (β) εξέλιξη του συντελεστή φθοράς, συναρτήσει του αριθμού περιστροφών (κατ' αναλογία του χρόνου δοκιμής και του μήκους ολίσθησης που διανύθηκε).



Σχήμα 6.18 Τριβολογική συμπεριφορά του σύνθετου επιστρώματος μετά από «σύντομη» περίοδο κατεργασία υπό αδρανή ατμόσφαιρα, υπό συνθήκες ξηράς ολίσθησης έναντι ένθετου πλακιδίου επικαλυμένο με c-BN: (α) εξέλιξη του συντελεστή τριβής και (β) εξέλιξη του συντελεστή φθοράς, συναρτήσει του αριθμού περιστροφών (κατ' αναλογία του χρόνου δοκιμής και του μήκους ολίσθησης που διανύθηκε).

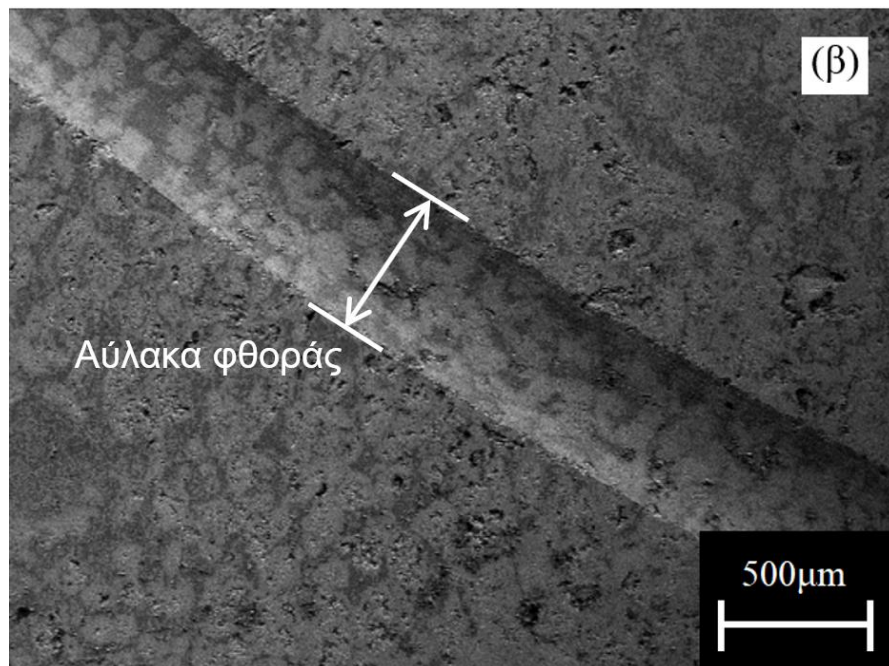
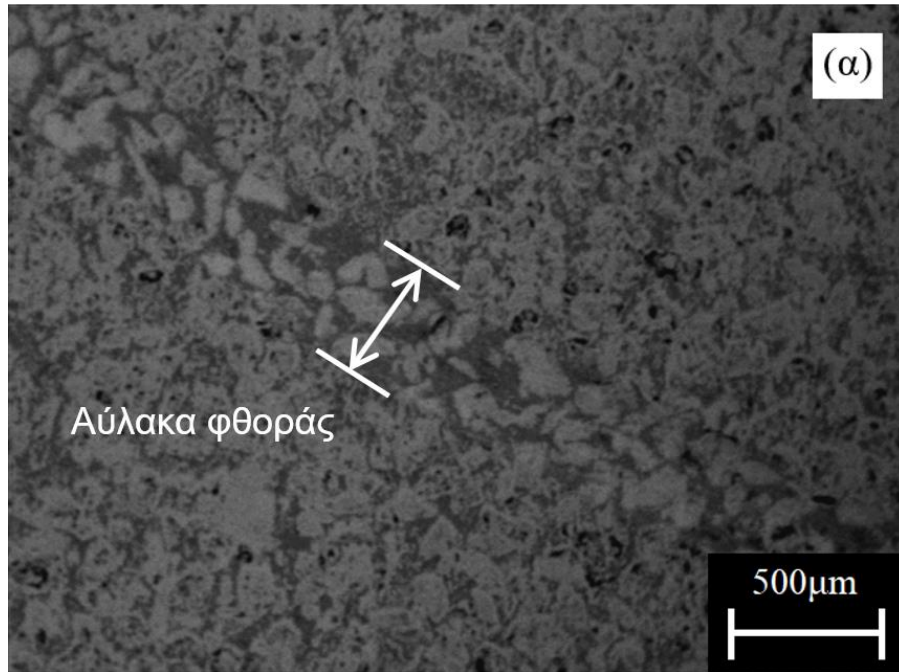
6.4.2 Μηχανισμοί φθοράς

Η παρατήρηση των επιφανειών φθοράς, μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής ξηράς ολίσθησης έναντι σφαίρας αλουμίνιας (Σχήμα 6.19), ανέδειξε επίσης τη συνέργεια μικρο-μηχανισμών φθοράς, ο καθένας από τους οποίους μπορεί να αντιστοιχηθεί με τους μηχανισμούς φθοράς των τριών διακριτών χαρακτηριστικών της μικροδομής (μεταλλική μήτρα, υπολειπόμενο σωματίδιο καρβιδίου, δακτύλιος η-καρβιδίου).

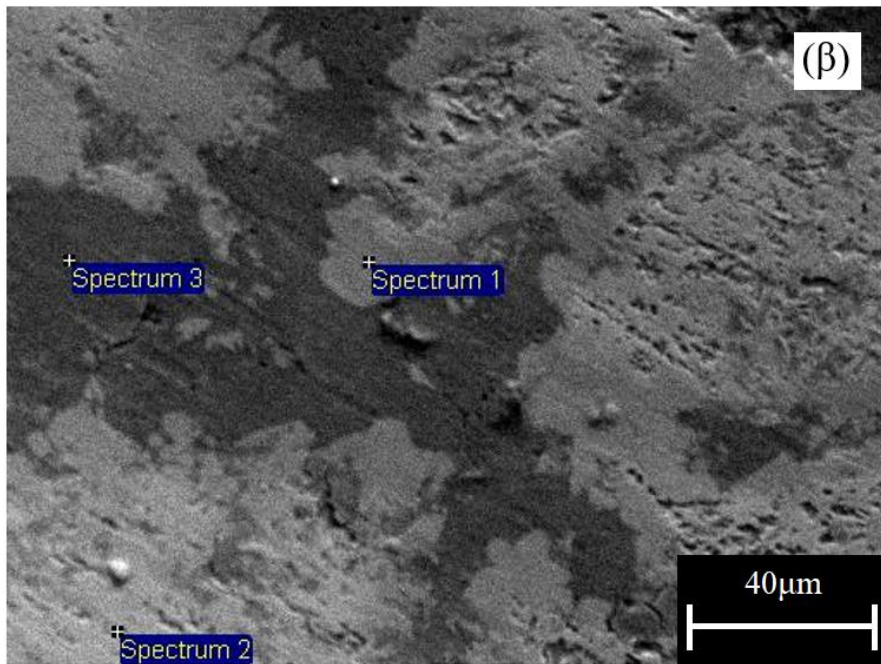
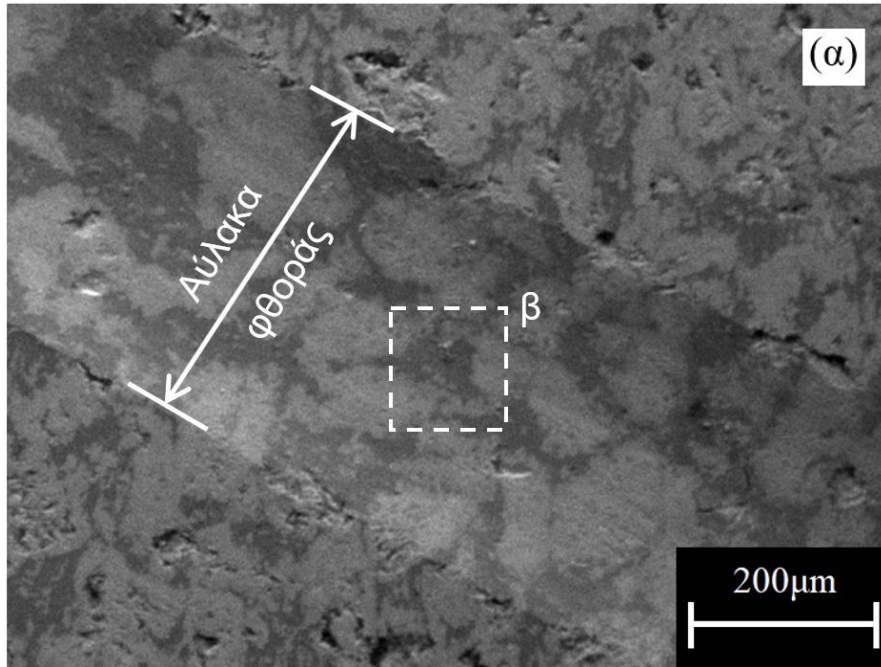
Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα παρουσιάζεται η επιφάνεια φθοράς, που δημιουργήθηκε με την επιβολή φορτίου 5N (Σχήμα 6.19α). Η αύλακα φθοράς που δημιουργήθηκε έχει πλάτος ~400μm (Σχήμα 6.20α) και στα όρια της αναπτύχθηκαν, σε τυχαίες περιοχές της περιμέτρου της, ρωγμές σε παράλληλες με την διεύθυνση ολίσθησης, οι οποίες σε κάθε περίπτωση εντοπίζονται στο δακτύλιο μετασχηματισμού. Μεγέθυνση σε κεντρική περιοχή της επιφάνειας φθοράς ανέδειξε τους διαφορετικούς μικρο-μηχανισμών φθοράς (Σχήμα 6.20β).

Οι τρεις μικρο-μηχανισμοί φθοράς που διακρίνονται αφορούν [Mourlas *et al.*, 2019b]:

- Το υπολειπόμενο σωματίδιο του καρβιδίου του βολφραμίου (Σχήμα 6.20β, Spectrum 2), το οποίο φθείρεται με μηχανισμό λείανσης, όπως συμπεραίνεται από τις αυλακώσεις μεγάλου βάθους. Αυτός ο μηχανισμός οδηγεί τελικά στην εκρίζωσή του από την επιφάνεια, όπως γίνεται αντιληπτό από τους κρατήρες που δημιουργήθηκαν.
- Το δακτύλιο μετασχηματισμού προς η-καρβίδιο (Σχήμα 6.20β, Spectrum 1), ο οποίος φθείρεται επίσης με μηχανισμό λείανσης. Ωστόσο, η φθορά του είναι πιο ήπια σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, καθώς οι μικρο-αυλακώσεις εμφανίζονται ως γραμμές λείανσης μικρότερου βάθους.
- Τη μήτρα χάλυβα (Σχήμα 6.20β, Spectrum 3), η οποία εμφανίζει ενδείξεις πλαστικής παραμόρφωσης με εκτόπιση υλικού (ploughing), όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο.



Σχήμα 6.19 Επιφάνειες φθοράς του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος με προ-εναπόθεση κόνεως WC, μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών ξηράς ολίσθησης με την επιβολή φορτίου (α) 5N και (β) 10N (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).



Σχήμα 6.20 Επιφάνεια φθοράς του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος μετά από δοκιμή ολίσθησης με επιβαλλόμενο φορτίο 5N (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης): (α) συνολική εικόνα της αύλακας και (β) μεγέθυνση στην κεντρική περιοχή και ταυτοποίηση της μορφολογίας των διακριτών μικρο-δομικών χαρακτηριστικών του επιφανειακού στρώματος (Spectrum 1: δακτύλιος μετασχηματισμού, Spectrum 2: υπολειπόμενο καρβίδιο και Spectrum 3: μεταλλική μήτρα).

6.5 Συμπεράσματα

Το παρόν κεφάλαιο αφορά τη χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας για την παραγωγή σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων μεταλλικής μήτρας ενισχυμένης με διασπορά σωματιδίων του καρβιδίου του βολφραμίου (WC). Σε αντίθεση ενίσχυσης με διασπορά σωματιδίων καρβιδίου του τιτανίου (TiC), που μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 5, η μελέτη της μικροδομής των λαμβανόμενων «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων ανέδειξε την ενεργοποίηση μεταλλουργικών μετασχηματισμών (κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και κατά την ψύξη του στερεοποιημένου τήγματος έως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος), ως τον κυρίαρχο παράγοντα, που επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

Κατά τη διάρκεια παραμονής του επιφανειακού στρώματος σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου βάσης, η τηγμένη μήτρα του χάλυβα προσβάλλει τα προ-εναποτεθέντα σωματίδια του καρβιδίου. Το προϊόν της αντίδρασης είναι ένα μικτό καρβίδιο σιδήρου-βολφραμίου (η-καρβίδιο), που περιβάλλει το υπολειπόμενο σωματίδιο με τη μορφή δακτυλίου, έχει ψαθυρή συμπεριφορά και με την αύξηση της διάρκειας έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία, αυξάνεται και η έκταση της ζώνης μετατροπής. Για το λόγο αυτό, περαιτέρω προσπάθειες για τη βελτιστοποίηση της καινοτόμου «ηλιακής» κατεργασίας θα πρέπει να εστιασθούν σε τεχνικές in-situ περιορισμού του ρυθμού μετατροπής, ώστε να ληφθούν επιφανειακά στρώματα μεγάλου πάχους με ικανοποιητική μηχανική συμπεριφορά.

Τα κύρια ευρήματα της πειραματικής ανάλυσης που προηγήθηκε, συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Υπό αδρανή ατμόσφαιρα με ροή αργού (Ar), η αύξηση της περιόδου «ηλιακής» επεξεργασίας επιδεινώνει την ποιότητα του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος, καθώς αυξάνεται το πλάτος του δακτυλίου μετατροπής, που περιβάλλει τα σωματίδια. Η παρατήρηση αυτή υποδεικνύει την ύπαρξη ενός ανώτερου ορίου διάρκειας σε «ηλιακή» έκθεση, ώστε να επιτευχθεί η ομοιόμορφη διασπορά των καρβιδίων μέσα στη χαλύβδινη μήτρα και να περιορισθεί ο σχηματισμός του η-

καρβιδίου.

- Η ηλιακή κατεργασία διπλού θερμικού κύκλου υπό την αδρανή ατμόσφαιρα, ανέδειξε καθαρότερα την αρνητική επίδραση της διάρκειας της κατεργασίας στη μικροδομή των λαμβανομένων «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων.
- Η ηλιακή κατεργασία σε χημικά δραστική ατμόσφαιρα αζώτου (N_2) περιορίζει την αρνητική δράση της χρονικής διάρκειας της κατεργασίας, καθώς παρατηρήθηκε πιο ομοιόμορφη διασπορά των σωματιδίων σε όλο τον όγκο της «λίμνης» τήγματος κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.
- Η εξέλιξη των τιμών των συντελεστών τριβής μ και φθοράς k , έδειξαν ότι τα «ηλιακά» επιφανειακά στρώματα που λαμβάνονται, χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση κατά τη λειτουργία, αλλά σχετικά χαμηλή κατεργασιμότητα με τη χρήση συμβατικών εργαλείων.

Τα ανωτέρω αποτελέσματα συμπληρώνονται με τα αντίστοιχα, που αφορούν την εφαρμογή της τεχνικής για τη δημιουργία επιφανειακών στρωμάτων μετά από εναπόθεση κόνεως καρβιδίου του χρωμίου (Cr_3C_2), στο ίδιο μέταλλο βάσης (Κεφάλαιο 7).

6.7 Βιβλιογραφία

- A. Jacob, C. Schmetterer, L. Singheiser, A. Gray-Weale, B. Hallstedt, A. Watson, 2015. Modeling of Fe-W phase diagram using principles and phonons calculations, CALPHAD 50, 92–104.
- A.P. Gulyaev, O.D. Sidorova, T.P. Moskvina, 1990. Effect of solidification rate of the structure of alloys of the system Fe-W, Met. Sci. Heat Treat., 32, 683–686.
- A.S. Kurlov, A.I. Gusev, 2006. Tungsten carbides and W-C phase diagram, Inorg. Mater. 42, 121–127.
- B. Uhrenius, 1980. Calculation of phase equilibria in the Fe-W-C system, CALPHAD 4, 173- 191.
- C.B. Pollock, H.H. Stadelmaier, 1970. The eta carbides in the Fe-W-C and Co-W-C systems. Metall. Trans. 1, 767–770.

- C.M. Fernandes, A.M.R. Senos, 2011. Cemented carbide phase diagrams: a review, *Int. J. Refract. Met. H.*, 29, 405–418.
- C. Tan, G. Wang, L. Ji, Y. Tong, X.M. Duan, 2016. Investigation on 316L/W functionally grades materials fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering, *J. Nucl. Mater.*, 469, 32–38.
- D.-G. Ahn, 2013. Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: a review. *Int. J. Precis. Eng. Man.*, 14, 1271–1283.
- L. Maddi, G.S. Deshmukh, A.R. Ballal, D.R. Peshwe, R.K. Paretkar, K. Laha, M.D. Mathew, 2016. Effect of Laves phase on the creep rupture properties of P92 steel. *Mat. Sci. Eng. A – Struct.* 668, 215–223.
- Mourlas A., Pavlidou E., Vourlias G., Rodriguez J., Psyllaki P., 2019b. Concentrated solar energy for in-situ elaboration of wear-resistant composite layers. Part II: Tungsten carbide surface enrichment of common steels. *J. Surface & Coatings Technology*, 375, 739-751.
- N.G. Chaidemenopoulos, P.P. Psyllaki, E. Pavlidou, G. Vourlias, 2019. Aspects on carbides transformations of Fe-based hardfacing deposits. *Surf. Coat. Techn.*, 357, 651–661.
- O.J. Ojo-Kupoluyi, S.M. Tahir, B.T.H.T. Baharidin, M.A. Azmah Hanim, M.S. Anuar, 2017. Mechanical properties of WC-based hardmetals bonded with iron alloys- Areview, *Mater. Sci. Tech.-Lond.*, 33, 507–516.
- P.F. Mendez, N. Barnes, K. Bell, S.D. Borle, S.S. Gajapathi, S.D. Guest, H. Izadi, A. Kamyabi Gol, G. Wood, 2014. Welding processes for wear resistant overlayers. *J. Manuf. Process.*, 16, 4-25.
- P. Gustafson, 1987. A thermodynamic evaluation of the C-Fe-W system, *Metall. Trans. A.*, 18, 175–188.
- Q. Gao, Y. Zhang, H. Zhang, H. Li, F. Qu, J. Han, C. Lu, B. Wu, Y. Lu, Y. Ma, 2017. Precipitates and particles coarsening of 9Cr-1.7W-0.4Mo-Co ferritic heat-resistant steel after isothermal aging, *Sci. Rep. – UK* 7, 5859.
- Li, 2006. Precipitation of Fe₂W Laves phase and modelling of its direct influence on the strength of a 12Cr-2W steel, *Metall. Trans. A.*, 37, 89–97.

- T. Sakthivel, S. Panner Selvi, P. Parameswaran, K. Laha, 2018. Influence of thermal ageing on microstructure and tensile properties of P92 steel, *High Temp. Mater. Proc.*, 37, 425–435.
- Z. Li, P. Wang, Q. Shan, Y. Jiang, H. Wei, J. Tan, 2018. The particles shape of WC governing the fracture mechanism of particle reinforced iron matrix composites, *Materials*, 11, 984.
- Z. Liu, Z. Liu, X. Wang, Z. Chen, L. Ma, 2018. Evolution of the microstructure in aged G115 steels with different concentration of tungsten, *Mat. Sci. Eng. A–Struct.*, 729, 161–169.

[κενή σελίδα]

Κεφάλαιο 7

«Ηλιακά» επιφανειακά στρώματα μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση καρβιδίων του χρωμίου

7.1 Εισαγωγή

Το τελευταίο αυτό κεφάλαιο αφορά την επίδραση των παραμέτρων της ηλιακής κατεργασίας, που οδηγεί στη δημιουργία επιφανειακών στρωμάτων συνθέτου υλικού μεταλλικής μήτρας, με διασπορά καρβιδίων του χρωμίου (Cr_3C_2), τα οποία να εμφανίζουν υψηλή αντοχή σε φθορά λόγω ξηράς ολίσθησης [Ahn, 2013]. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους μεταλλουργικούς μετασχηματισμούς, που λαμβάνουν χώρα κατά την επαναστερεοποίηση του τηγμένου επιφανειακού στρώματος. Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα, που αφορούν την ενίσχυση του ίδιου μετάλλου βάσης με διασπορά σωματιδίων TiC (Κεφάλαιο 5) και WC (Κεφάλαιο 6).

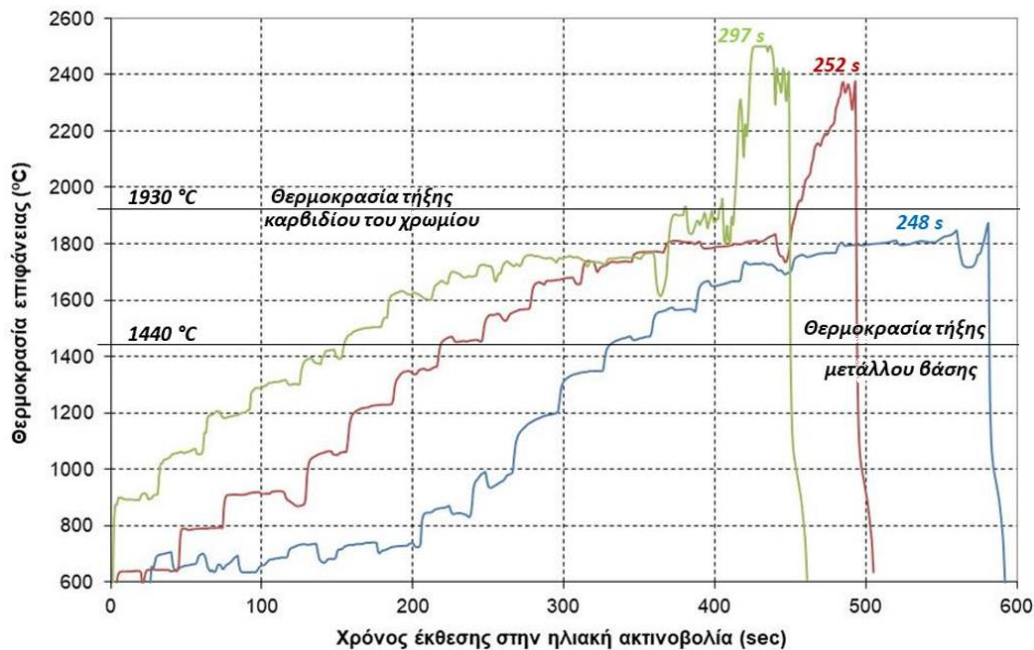
Όπως και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, τα πειράματα ηλιακής επιφανειακής κατεργασίας με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας, πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις της Plataforma Solar de Almería, PSA (Ισπανία) και συγκεκριμένα στον οριζόντιο ηλιακό φούρνο SF40 [Rodríguez *et al.*, 2016]. Ως μέταλλο βάσης χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος ανθρακούχος χάλυβας (DIN St37-2), στις ίδιες διαστάσεις δοκιμίων, προκειμένου να είναι δυνατή η άμεση συγκριτική αξιολόγηση των «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων, που θα ληφθούν με την προτεινόμενη κατεργασία. Το πάχος της προ-εναποτεθείσας κόνεως καρβιδίου του χρωμίου παρέμεινε 1,5mm και εξετάστηκε η επίδραση σε έκθεση σε ηλιακή κατεργασία μονού και διπλού θερμικού κύκλου σε αδρανή ατμόσφαιρα.

7.2 Μικροδομή των επιφανειακών στρωμάτων

7.2.1 Απλή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία σε αδρανή ατμόσφαιρα

Προκειμένου να αναλυθεί η επίδραση του χρόνου της κατεργασίας, στη συνέχεια αναλύεται η μικροδομή, που λαμβάνεται για τρεις διαφορετικές διάρκειες έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.1:

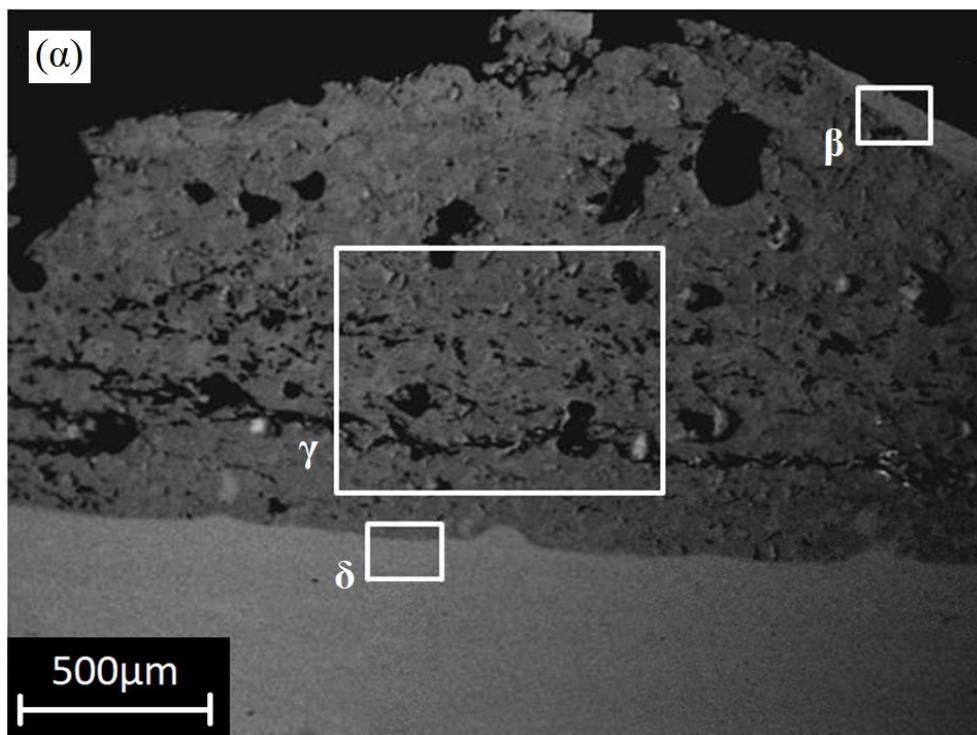
- Έκθεση για 248s σε θερμοκρασία επιφάνειας $1440\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta < 1930\text{ }^{\circ}\text{C}$, δηλαδή σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου βάσης, αλλά χαμηλότερη της θερμοκρασίας τήξης της κόνεως του καρβιδίου.
- Έκθεση για 252s σε θερμοκρασία επιφάνειας υψηλότερης της θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου βάσης, εκ των οποίων τα τελευταία ~38s σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας τήξης της κόνεως του καρβιδίου.
- Έκθεση για 297s σε θερμοκρασία επιφάνειας υψηλότερης της θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου βάσης, εκ των οποίων τα τελευταία ~45s σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας τήξης της κόνεως του καρβιδίου.

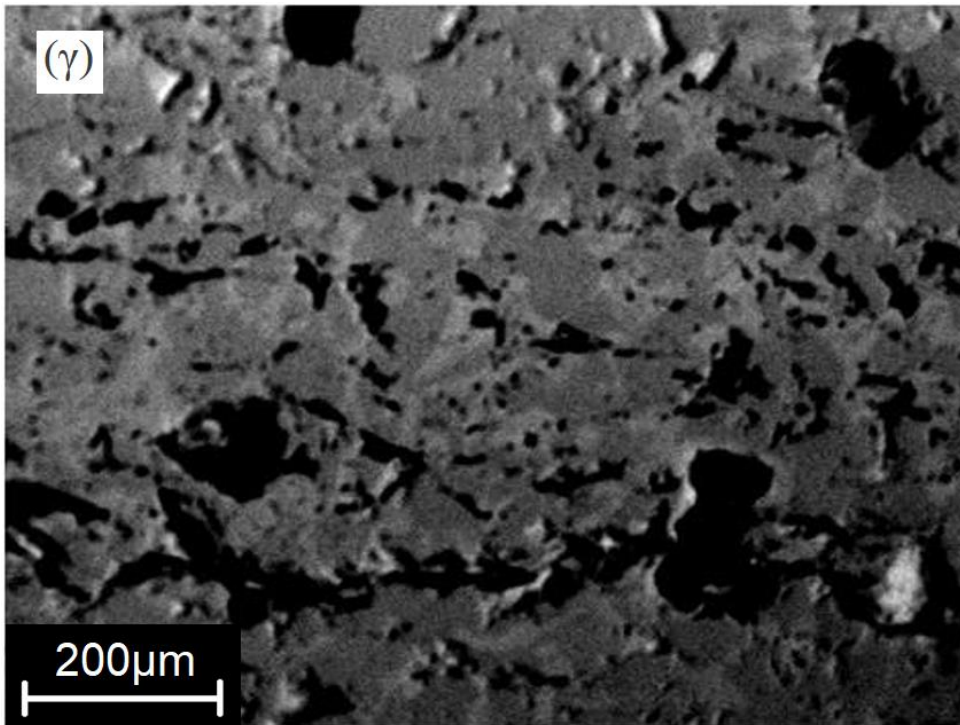
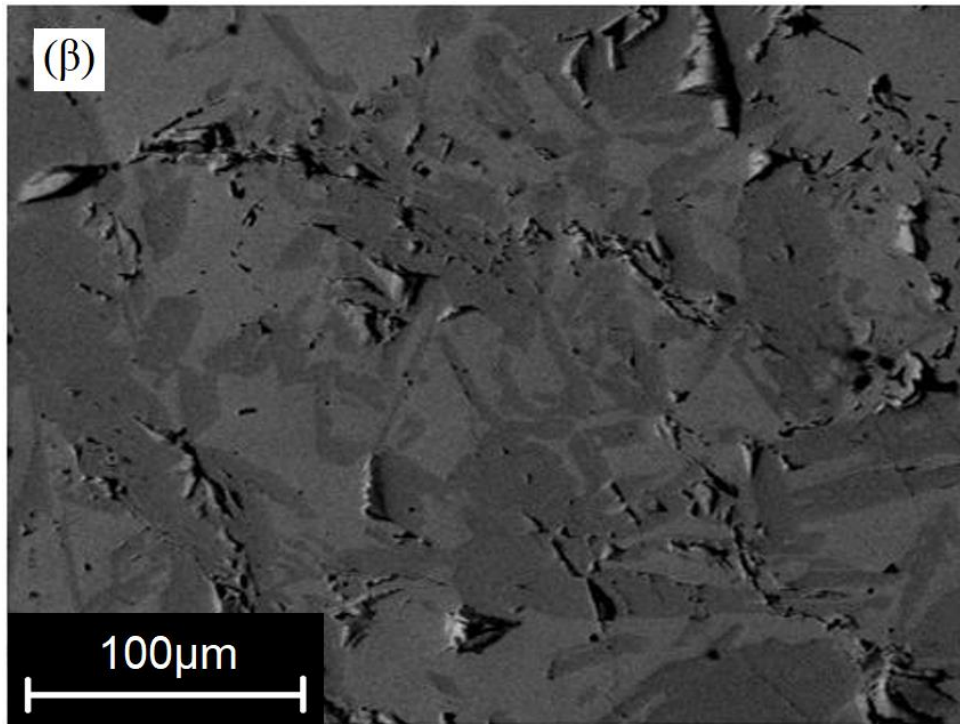


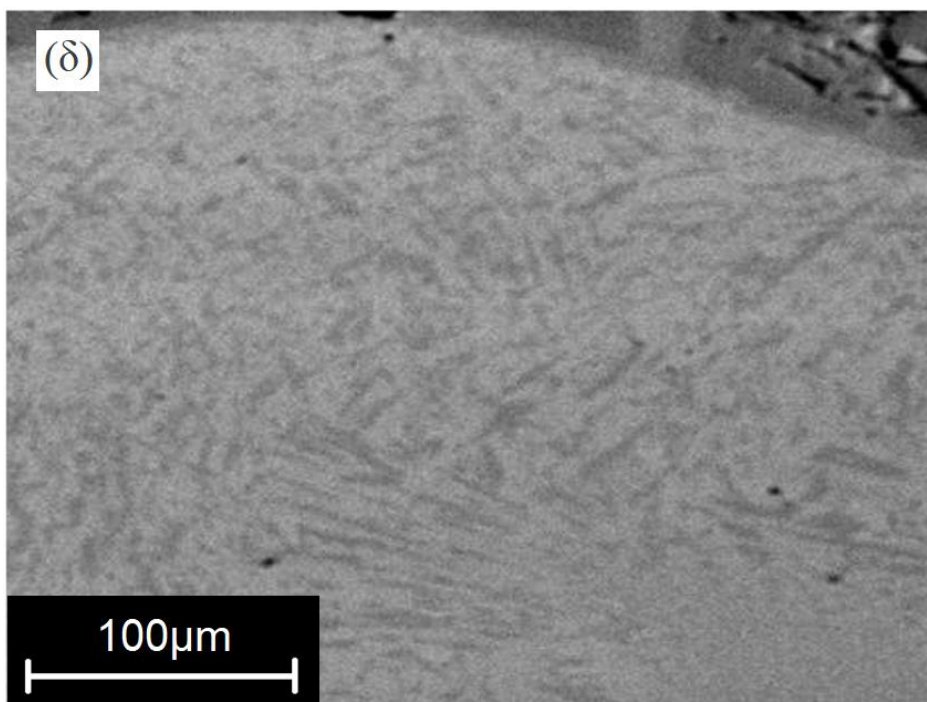
Σχήμα 7.1 Εξέλιξη της θερμοκρασίας της κατεργαζόμενης επιφάνειας με προ-εναπόθεση κόνεως καρβιδίου του χρωμίου κατά τη διάρκεια ηλιακής κατεργασίας απλής έκθεσης σε ηλιακή ακτινοβολία σε αδρανή ατμόσφαιρα.

Στην περίπτωση της ηλιακής κατεργασίας της μικρότερης διάρκειας, με μέγιστη θερμοκρασία που δεν υπερβαίνει τη θερμοκρασία τήξης του καρβιδίου του χρωμίου, τα επιφανειακά στρώματα που ελήφθησαν, δεν παρουσίασαν ενδείξεις διασποράς των σωματιδίων της κόνεως στη μεταλλική μήτρα. Αντιθέτως, τα επιστρώματα που ελήφθησαν (Σχήμα 7.2), παρουσίασαν μια επιφανειακή στοιβάδα «μεταλλικού χαρακτήρα», όπου διακρίνονται σαφώς περιοχές συνύπαρξης χρωμίου, σιδήρου και άνθρακα (ανοικτόχρωμες περιοχές, Σχήμα 7.2δ) και περιοχές όπου ανιχνεύεται μόνο χρώμιο και άνθρακας σε αναλογία ατόμων ~1:1 (ανοικτόχρωμες περιοχές, Σχήμα 7.2δ).

Με την ολοκλήρωση της ψύξης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, παρατηρήθηκε η τοπική ανάπτυξη ρωγμών στη διεπιφάνεια μεταξύ της στοιβάδας αυτής και του υποκείμενου στρώματος, που κάποιες φορές οδηγούν σε μερική αποκόλλησή της από αυτό. Πρόκειται για ισχυρή ένδειξη θερμής ρωγμάτωσης (hot cracking), ένα σύνηθες ελάττωμα που παρατηρείται σε συγκολλήσεις [Παντελής, Παπάζογλου, Χαϊδεμενόπουλος, 2017].







Σχήμα 7.2 (α) Κάθετη τομή «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος με προ-εναπόθεση κόνεως καρβιδίου του χρωμίου και σύντομη έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και (β)-(δ) μεγεθύνσεις χαρακτηριστικών περιοχών (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).

Κάτω από την επιφανειακή στοιβάδα παρατηρείται μία ζώνη μεγάλου πάχους, όπου έχουν συσσωρευθεί διάφορα ελαττώματα δομής, όπως είναι οι πόροι μεγάλου μεγέθους και ρωγμές μεγάλου μήκους, που αναπτύσσονται παράλληλα με την επιφάνεια που εκτέθηκε στην ακτινοβολία (Σχήμα 7.2γ). Στη συνέχεια, παρατηρείται η ανάπτυξη μιας τρίτης συνεχούς ζώνης «μεταλλικού χαρακτήρα» σε επαφή με το μέταλλο βάσης, χωρίς τα ελαττώματα δομής που προαναφέρθηκαν (Σχήμα 7.2δ). Η στοιχειακή μικροανάλυση στην περιοχή αυτή ανέδειξε τη συνύπαρξη χρωμίου και σιδήρου (Σχήμα 7.3).

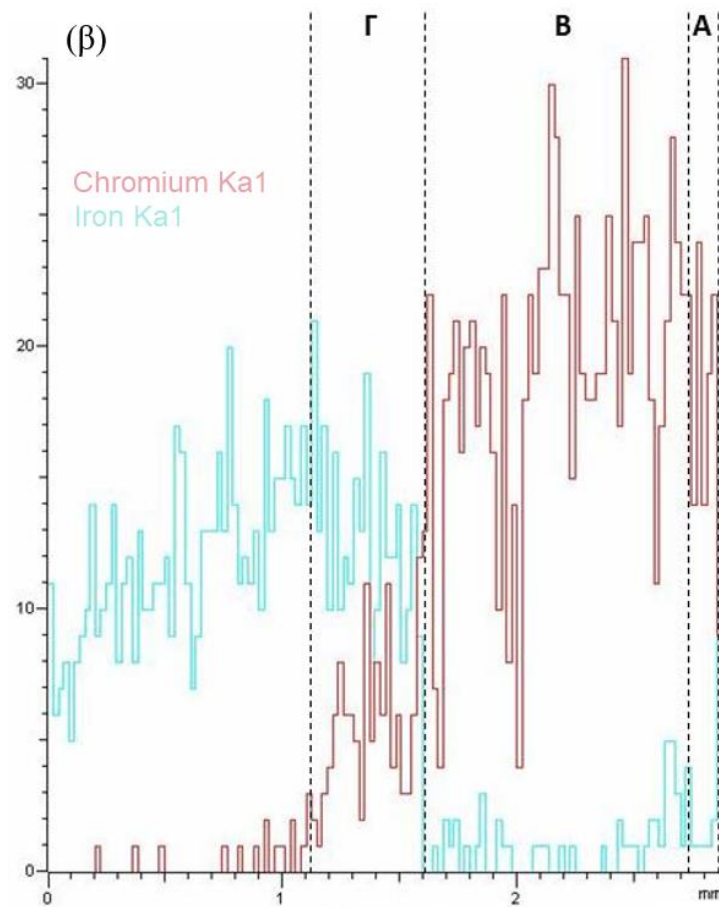
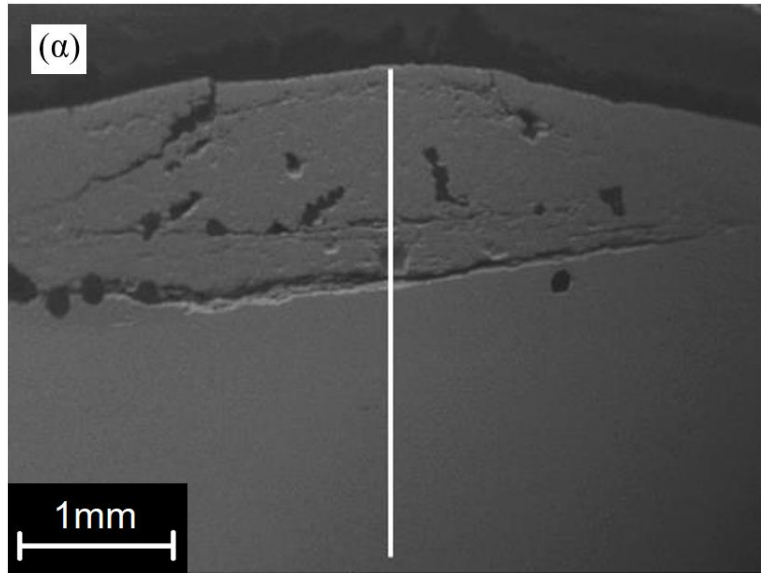
Οι παρατηρήσεις αυτές συνηγορούν υπέρ της ανάπτυξης μιας ζώνης μερικής τήξης στην ενδιάμεση περιοχή του επιφανειακού στρώματος και φαινομένων διαλυτοποίησης του καρβιδίου εντός της μεταλλικής μήτρας στις δύο εξωτερικές ζώνες.

Παρόμοιες παρατηρήσεις έγιναν και για τα επιφανειακά στρώματα, που ελήφθησαν μετά από ηλιακή κατεργασία μεγαλύτερης διάρκειας (Σχήμα 7.5α). Σε αυτή την περίπτωση η

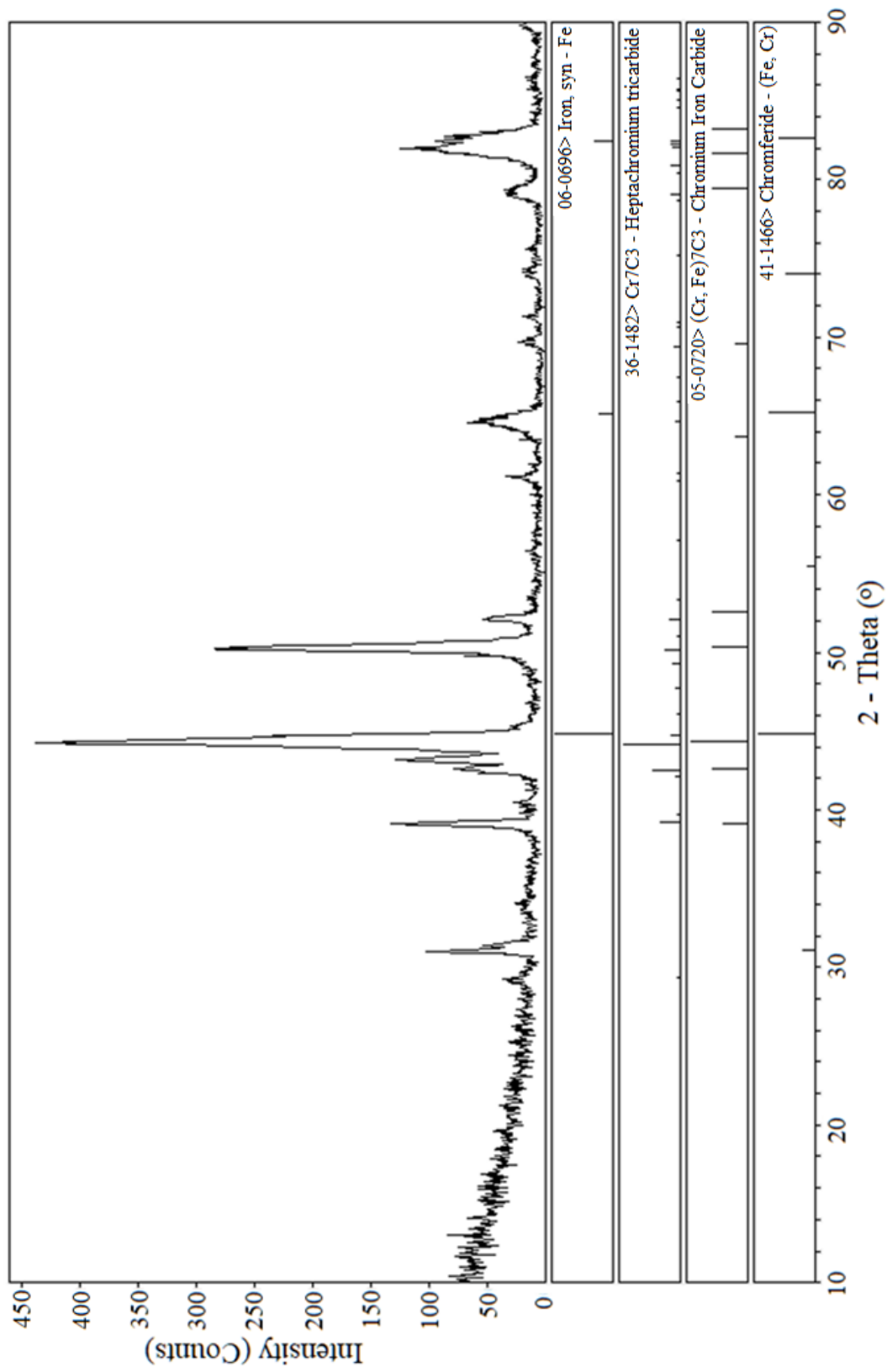
ενδιάμεση ζώνη έχει μικρότερο πλάτος, ενώ αναπτύσσεται η τρίτη (βαθύτερη) ζώνη διαλυτοποίησης των καρβιδίων στη μεταλλική μήτρα (Σχήμα 7.3δ). Η ανάλυση με περίθλαση ακτίνων X (Σχήμα 7.4) επιβεβαίωσε τη δημιουργία στερεού διαλύματος σιδήρου-χρωμίου (Fe, Cr), καθώς και την ανάπτυξη καρβιδίων του χρωμίου και μικτών καρβιδίων χρωμίου-σιδήρου του τύπου Cr_7C_3 και $(Cr,Fe)_7C_3$, αντίστοιχα.

Με την έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία για ακόμη υψηλότερη διάρκεια (ή/και σε υψηλότερη θερμοκρασία) μπορεί να επιτευχθεί πλήρης διαλυτοποίηση της κόνεως του καρβιδίου του χρωμίου εντός του τήγματος του χάλυβα, ώστε κατά τη στερεοποίηση και την ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος να δημιουργηθεί ένα «ηλιακό» επιφανειακό στρώμα στερεού διαλύματος σιδήρου-χρωμίου, μεγάλου πάχους χωρίς ελαττώματα μικροδομής (Σχήμα 7.5α). Το στρώμα αυτό χαρακτηρίζεται από την τυπική ανάπτυξη δενδριτών (Σχήματα 7.6α και 7.6β) στην ίδια διεύθυνση και κατά φορά αντίθετη της φοράς απαγωγής της θερμότητας διαμέσου (α) της εξωτερικής επιφάνειας του κατεργαζόμενου δοκιμίου και (β) του κυρίως όγκου του μετάλλου βάσης, κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης με βραδείς ρυθμούς. Στα όρια των δενδριτικών κλάδων παρατηρείται η δημιουργία κατακρημνισμάτων (Σχήμα 7.6γ και Σχήμα 7.6δ), που έχουν μια μορφολογία που παραπέμπει σε διμεταλλική σ-φάση (FeCr) ή/και κατακρημνίσματα καρβιδίων. Οι φάσεις αυτές, σε χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε χρώμιο, είναι καθοριστικής τεχνολογικής σημασίας, καθώς οδηγούν σε δραστική μείωση της μηχανικής αντοχής του μετάλλου, της ολκιμότητας και της αντοχής του σε διάβρωση [Sieurin and Sandström, 2007].

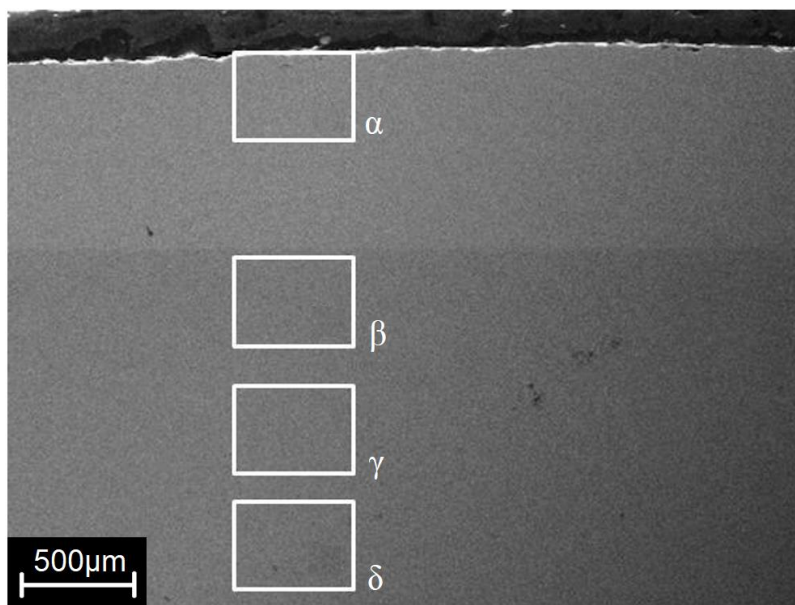
Σε κράματα χαλύβων υψηλής αντοχής, όπως είναι οι ανοξείδωτοι και οι πυράντοχοι χάλυβες, η σ-φάση σχηματίζεται μέσω ευτηκτοειδούς μετασχηματισμού μετά από παρατεταμένη θέρμανση στους 560 - 980°C, εντοπίζεται σε περιοχές υψηλότερης συγκέντρωσης σε χρώμιο (Cr) και εμφανίζεται κυρίως στις διεπαφές φερρίτη-ωστενίτη [Bina, 2012]. Ως παράδειγμα του μετασχηματισμού αυτού, παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.7 [CALPHAD, 2018] το διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος Fe-Cr, απ' όπου συνάγεται η δημιουργία της σ-φάσης για κράματα με περιεκτικότητα σε χρώμιο 21-75%.



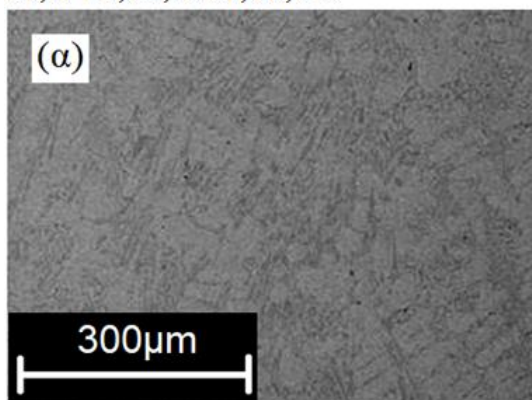
Σχήμα 7.3 (α) Κάθετη τομή «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος με προ-εναπόθεση κόνεως καρβιδίου του χρωμίου και ενδιάμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία. (β) Στοιχειακή μικροανάλυση κατά μήκος της ευθείας του (α) (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).



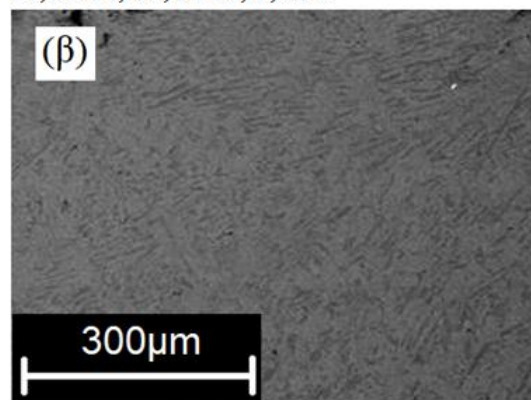
Σχήμα 7.4 Ανάλυση με περίθλαση ακτίνων Χ του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος που ελήφθη μετά έκθεση στην ακτινοβολία, ενδιάμεσης διάρκειας.



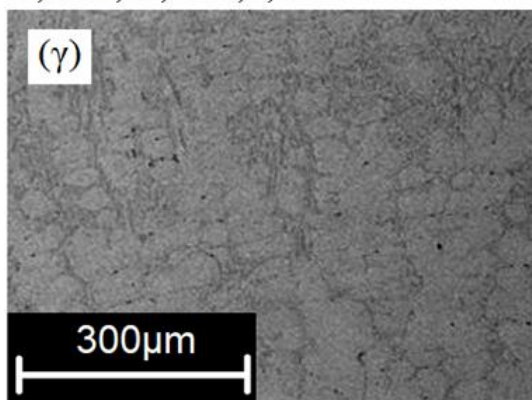
61,77 Fe, 27,53 Cr, 10,7 C



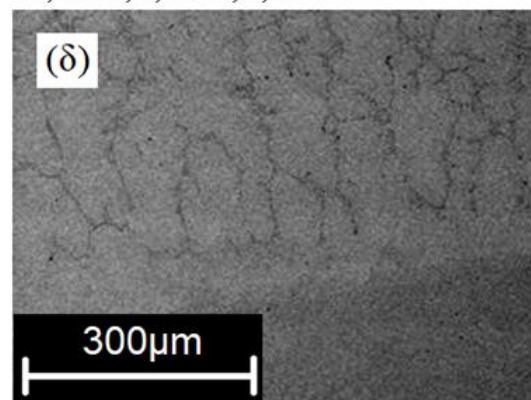
79,67 Fe, 16,62 Cr, 3,70 C



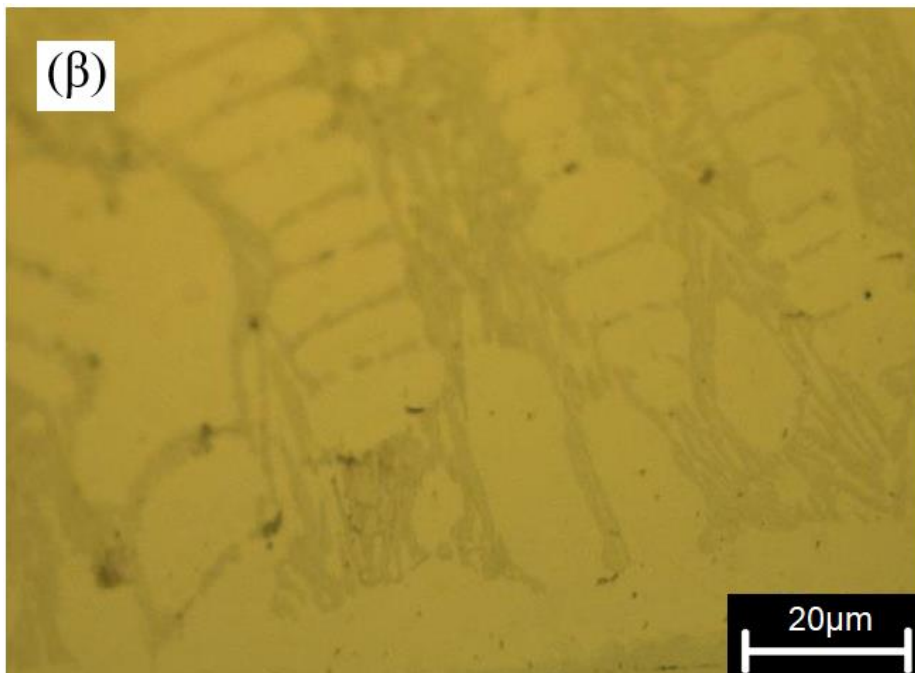
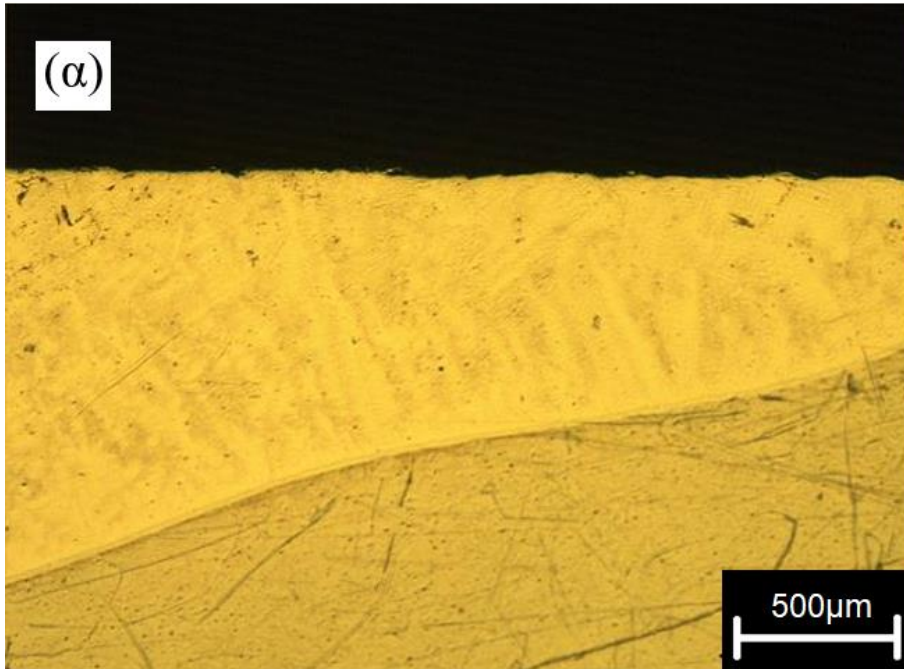
79,38 Fe, 12,37 Cr, 8,25 C

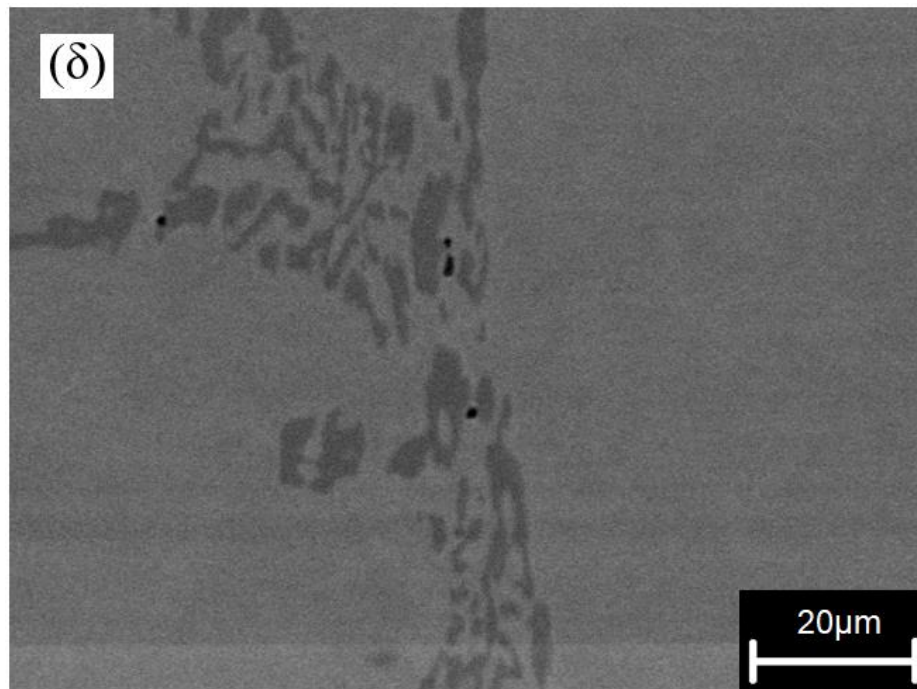
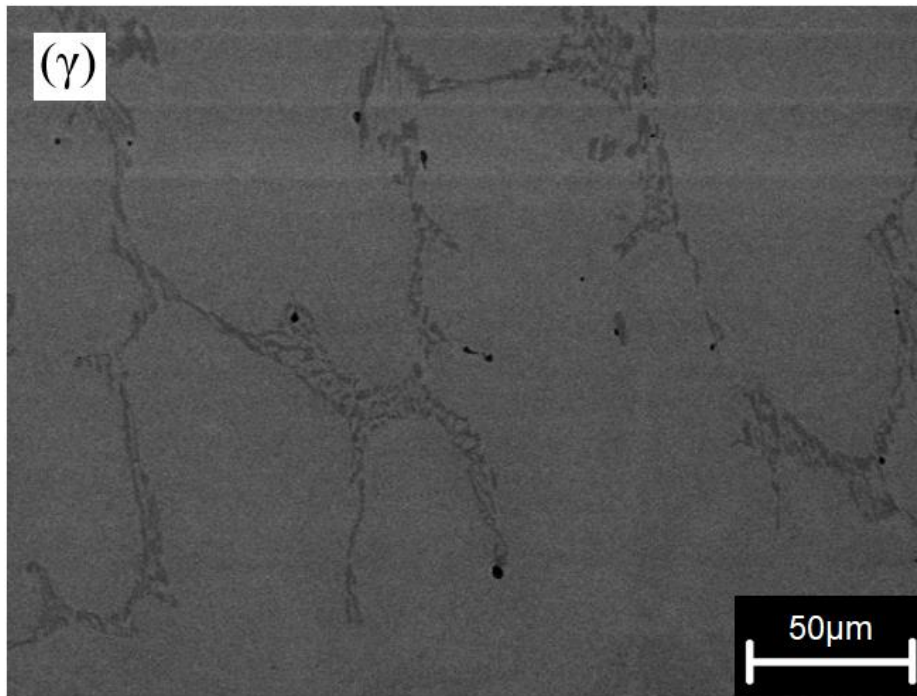


97,66 Fe, 0,03 Cr, 2,31 C

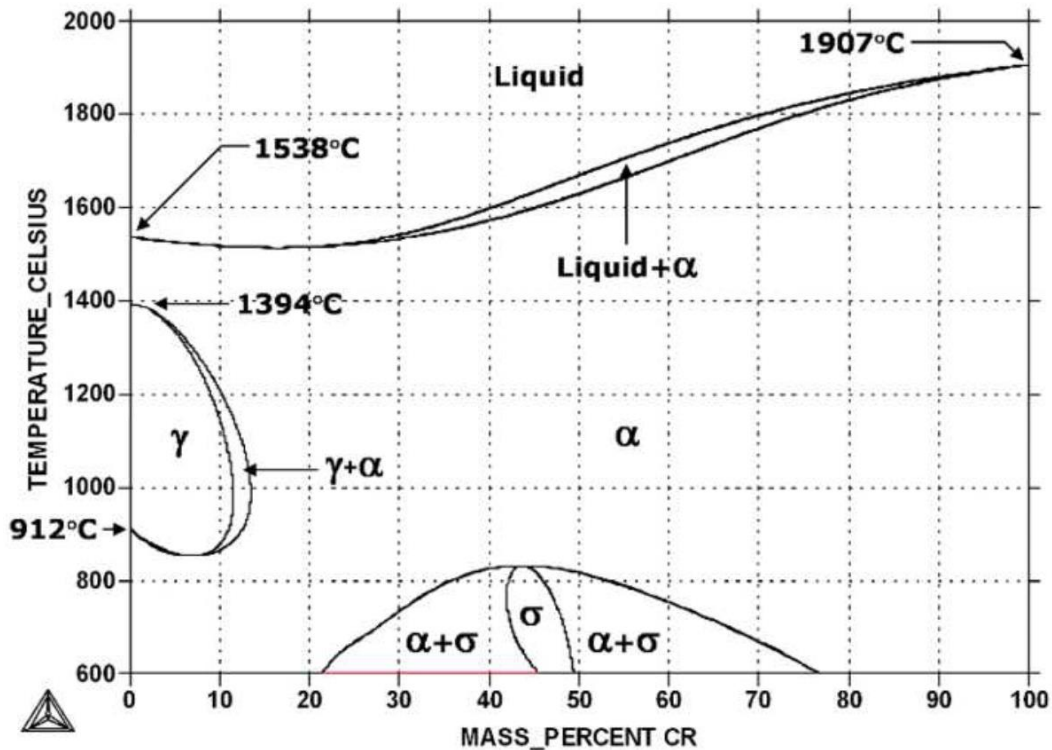


Σχήμα 7.5 Κάθετη τομή επιφανειακού στρώματος που ελήφθη με ηλιακή κατεργασία μακράς διάρκειας και μεγεθύνσεις σε επιλεγμένες περιοχές (εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης).





Σχήμα 7.6 Κάθετη τομή επιφανειακού στρώματος, που ελήφθη με ηλιακή κατεργασία μακράς διάρκειας. (α) και (β) εικόνες οπτικού μικροσκοπίου, όπου διακρίνεται η δενδριτική ανάπτυξη των κόκκων του στερεού διαλύματος Fe-Cr κατά τη στερεοποίηση. (γ) και (δ) εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, όπου παρατηρείται η δημιουργία κατακρημνισμάτων στα όρια των κλάδων των δενδριτών.



Σχήμα 7.7 Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος Fe-Cr [CALPHAD; 2018].

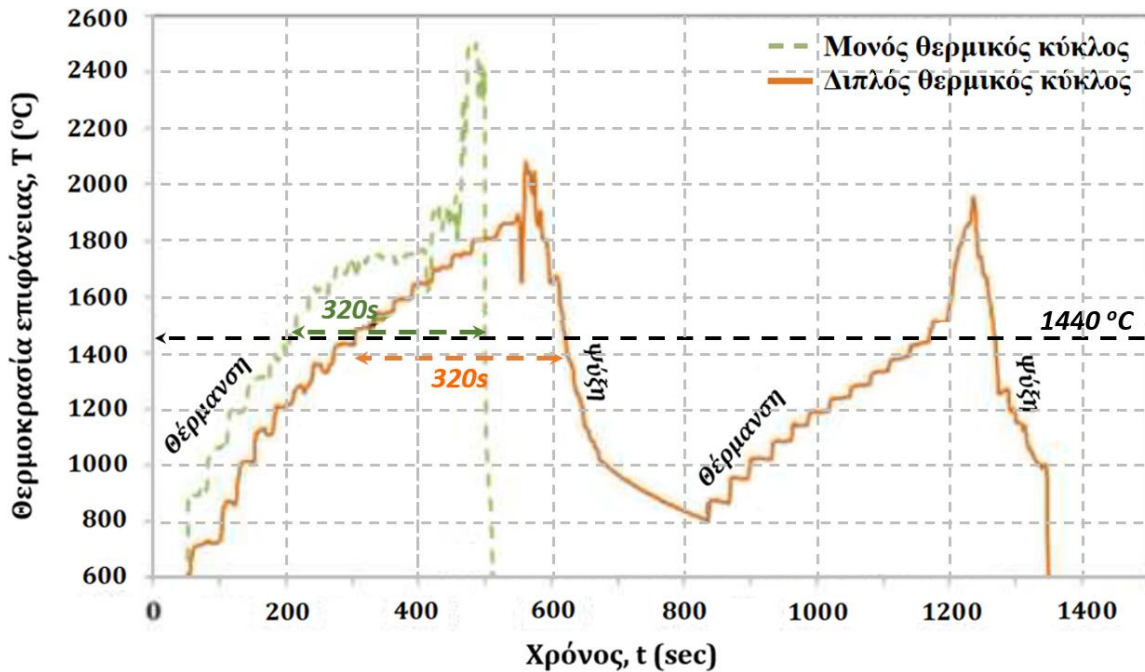
Αν και η κατακρίμνηση των διμεταλλικών φάσεων Fe και Cr είναι γνωστή από τις αρχές της δεκαετίας του 1900, εξακολουθεί να διεξάγεται σχετική επιστημονική έρευνα [Hsieh and Wu, 2012], που επικεντρώνεται είτε σε πειραματική έρευνα πυρηνοποίησης και ανάπτυξης σε διαφορετικής ποιότητας χάλυβες [Villanueva *et al.*, 2006], είτε σε σχετικούς θερμοδυναμικούς υπολογισμούς, με στόχο τον προσδιορισμό των ρυθμών ψύξης που οδηγούν στη δημιουργία τους [Sieurin and Sandström, 2007, Jacob *et al.*, 2018]. Πρόσφατη έρευνα για την επίδραση αυτής της διμεταλλικής ένωσης, στη φθορά ολίσθησης ανοξειδωτού χάλυβα AISI 2205 [del Abra-Arzola, 2018], απέδειξε ότι παρότι η σ-φάση έχει θετική επίδραση στην αντίσταση σε φθορά, οδηγεί σε αστοχία λόγω της δημιουργίας ρωγμών κόπωσης.

7.2.2 Διπλή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία σε αδρανή ατμόσφαιρα

Παρά το γεγονός ότι μακρά ηλιακή έκθεση των προς κατεργασία υλικών έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός συνεχούς επιφανειακού στρώματος μεγάλου πάχους, χωρίς ελαττώματα δομής, η μικροδομή που επιτεύχθηκε είναι τέτοια, που δεν εξασφαλίζει την ενίσχυση της αντίστασης σε φθορά του μετάλλου βάσης. Στην περίπτωση, λοιπόν, του καρβιδίου του χρωμίου η κατεργασία απλού θερμικού κύκλου οδηγεί μάλλον στην επιφανειακή κραματοποίηση, παρά στη διασπορά ενισχυτικών σωματιδίων σε μεταλλική μήτρα. Για το λόγο αυτό διεξήχθη ηλιακή κατεργασία δύο επάλληλων σταδίων (Σχήμα 7.8).

- Σε πρώτο στάδιο, η κατεργαζόμενη επιφάνεια υποβλήθηκε σε μεγάλης διάρκειας έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, ώστε να επιτευχθεί πλήρης κραματοποίηση του επιφανειακού στρώματος, σε όλο το πάχος του. Εν συνεχεία, η κατεργαζόμενη επιφάνεια αφέθηκε να στερεοποιηθεί και να ψυχθεί εντός του θαλάμου δοκιμών.
- Σε δεύτερο στάδιο η κατεργαζόμενη επιφάνεια εκτέθηκε εκ νέου στην ηλιακή ακτινοβολία και παρέμεινε σε θερμοκραία υψηλότερη της θερμοκρασίας τήξης του αρχικού μετάλλου βάσης για 320s. Δεδομένου ότι η ακριβής θερμοκρασία τήξης του νέου «ηλιακού κράματος» δεν ήταν γνωστή, η έναρξη και η λήξη της τήξης της επιφάνειας προσδιορίθηκαν με την οπτική παρατήρηση της κίνησης/ κατάστασης της επιφάνειας μέσω της βιντεοκάμερας, που κατέγραφε την κατεργασία.

Μετά την τελική στερεοποίηση και τη βραδεία ψύξη έως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, η παρατήρηση της μικροδομής σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, έδειξε (Σχήμα 7.9) ότι το ολικό πάχος του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος παρέμεινε το ίδιο (~2400 μm) με αυτό του επιφανειακού στρώματος απλής έκθεσης ίδιας διάρκειας. Ωστόσο, η ανώτερη ζώνη (πάχους ~ 800μm), η οποία υπεβλήθει σε ανάτηξη κατά τη διάρκεια του 2^{ου} θερμικού κύκλου, χαρακτηρίζεται από τη διασπορά αδρομερών καρβιδίων του χρωμίου ακανόνιστης γεωμετρίας (Σχήμα 7.10). Η υποκείμενη ζώνη που δεν έφτασε σε ανάτηξη διατηρεί τη δενδριτική μικροδομή με κατακρημνίσματα στα όρια των βραχιόνων που αναπτύχθηκε προηγουμένως.

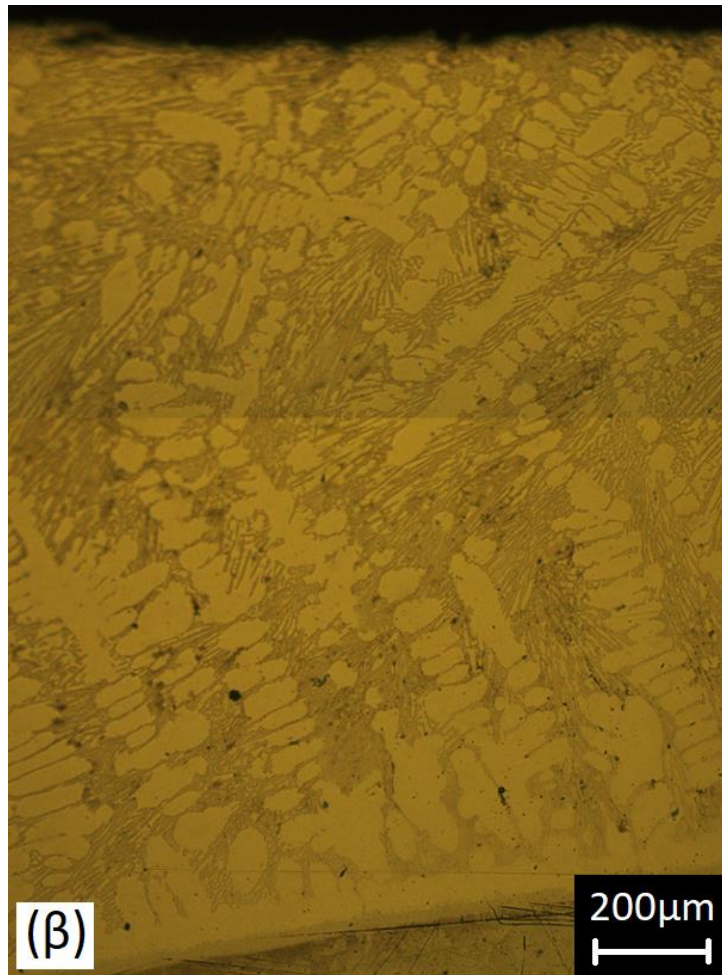
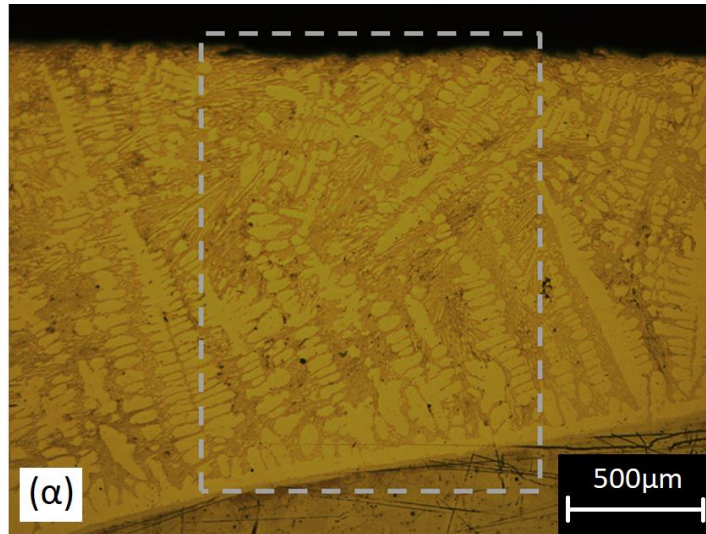


Σχήμα 7.8 Ηλιακή κατεργασία διπλού θερμικού κύκλου (διπλής έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία) σε αδρανή ατμόσφαιρα, με προαπόθεση κόνεως καρβιδίου του χρωμίου.

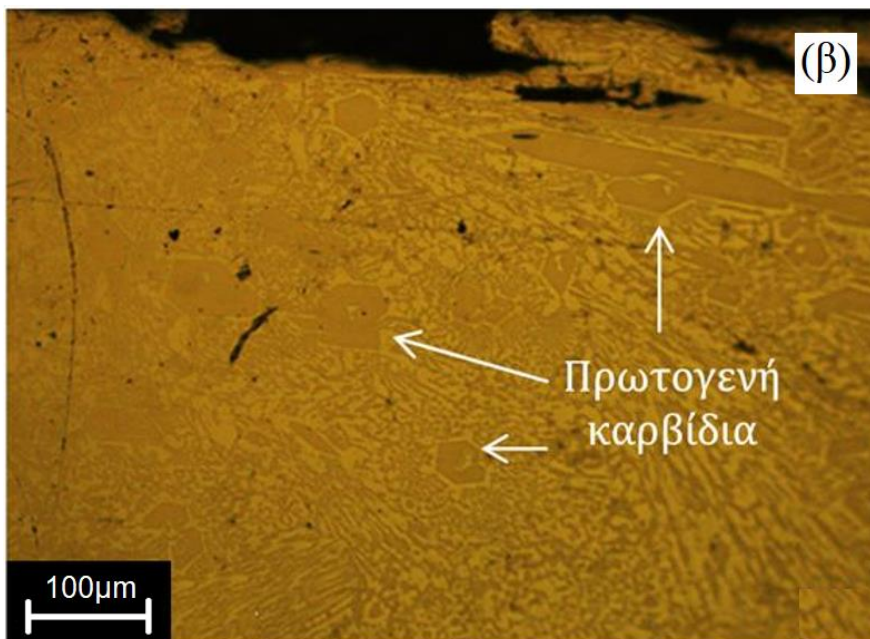
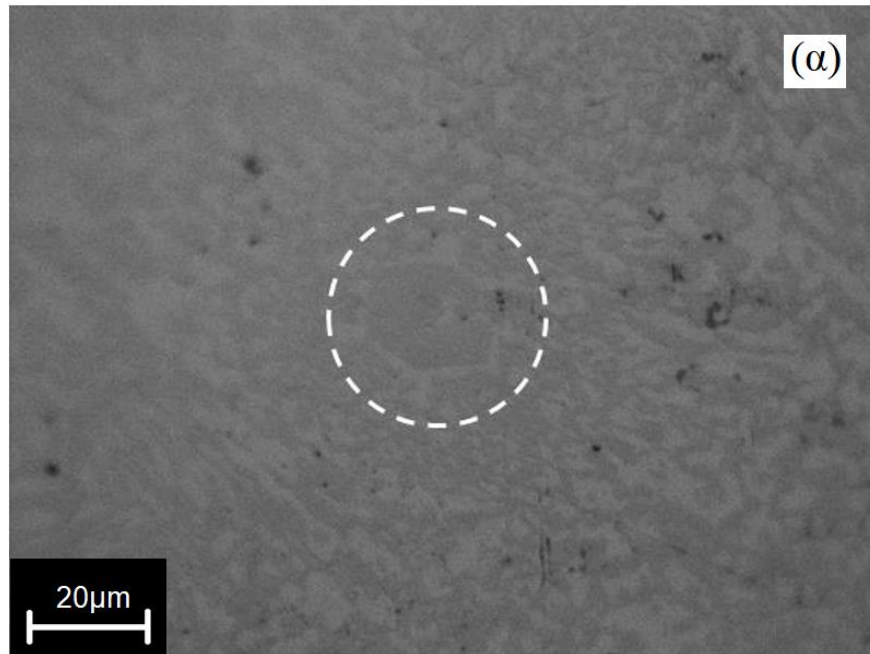
Η μορφολογία των καρβιδίων πολυγωνικού τύπου που παρατηρήθηκαν (Σχήμα 7.10α), έχουν μελετηθεί στην περίπτωση δημιουργίας επιγομώσεων με τεχνικές συγκόλλησης και έχουν ταυτοποιηθεί ως πρωτογενή καρβίδια, δηλαδή καρβίδια που δημιουργούνται εντός του τήγματος κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, του τύπου $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ [Chang *et al.*, 2009a; Chang *et al.*, 2009b; Sadeghi *et al.*, 2017]. Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί σε παρόμοιο σύστημα Fe-Cr-C [Chaidemenopoulos *et al.*, 2019] έδειξαν την πορεία των μεταλλουργικών μετασχηματισμών κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης του τήγματος, που οδήγησαν σε αυτή τη συγκεκριμένη δομή:



Επιπλέον των πρωτογενών αυτών καρβιδίων στη μεταλλική μήτρα, μπορούν να ανιχνευθούν και κατακρημνίσματα καρβιδίων με διαφορετική μορφολογία (Σχήμα 7.10β), τα οποία έχουν ταυτοποιηθεί στις πριναφερθείσες μελέτες ως τύπου M_{23}C_6 δευτερογενή καρβίδια, δηλαδή κατακρημνίσματα σε στερεά κατάσταση.



Σχήμα 7.9 (α) Κάθετη τομή του «ηλιακού» επιφανειακού στρώματος με προ-εναπόθεση κόνεως καρβιδίου του χρωμίου, μετά από κατεργασία διπλού θερμικού κύκλου σε αδρανή ατμόσφαιρα, (β) μεγέθυνση της περιοχής που σημειώνεται στο (α).



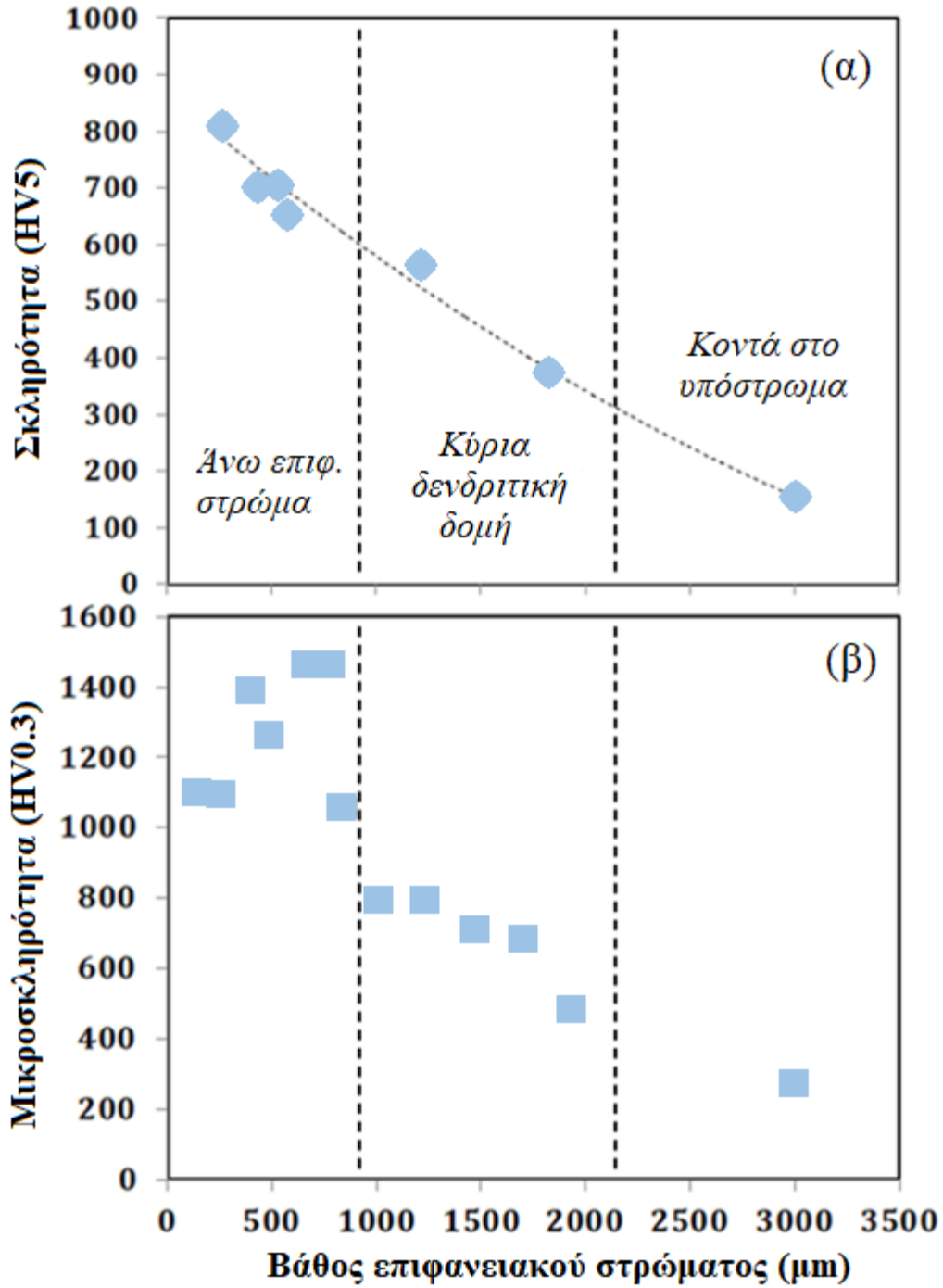
Σχήμα 7.10 Μικροδομή της επιφανειακής ζώνης ανάπτυξης μετά από ηλιακή κατεργασία σε αδρανή ατμόσφαιρα: (α) εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου και (β) εικόνα οπτικού μικροσκοπίου.

7.3 Σκληρότητα και κατανομή μικροσκληρότητας

Οι μετρήσεις σκληρότητας με την επιβολή φορτίο 5kg (Σχήμα 7.11α), σε μία ευθεία κάθετη στην εξωτερική επιφάνεια του «ηλιακού» σύνθετου επιστρώματος, μετά από κατεργασία δύο σταδίων, ανέδειξαν την γραμμική (κατά προσέγγιση) μείωση των τιμών από περίπου 810 ± 5 HV5 κοντά στην εξωτερική ακτινοβολημένη επιφάνεια, σε 155 ± 5 HV5 στην εσωτερική ζώνη της περιοχής, στη διεπιφάνεια με το μέταλλο βάσης. Ωστόσο, οι μετρήσεις μικροσκληρότητας στην ίδια εγκάρσια τομή, εφαρμόζοντας φορτίο 0,3kg (Σχήμα 7.11β) έδειξαν με σαφήνεια τρεις ξεχωριστές ζώνες διαφορετικού εύρους τιμών μικροσκληρότητας:

- Το εξωτερικό ηλιακό στρώμα ανάτηξης, με μέσο πάχος $700 \pm 100\mu\text{m}$, όπου σημειώθηκε η κατακρήμνιση πρωτογενών καρβιδίων κατά το δεύτερο στάδιο της ηλιακής έκθεσης, παρουσίασε διασπορά τιμών από 1050 έως 1400 HV0.3, με μέση τιμή 1260 ± 70 HV0.3.
- Η υποκείμενη ζώνη με πάχος $\sim 1500\mu\text{m}$, που χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη δενδριτικής δομής και κατακρημνίσεις στα όρια των δενδριτών, παρουσίασε διασπορά τιμών από 480 έως 795 HV0.3, με μέση τιμή 695 ± 60 HV0.3.
- Η εσωτερική ζώνη, στην περιοχή της διεπιφάνειας με το μέταλλο βάσης κραματοποίησης όπου η σκληρότητα συγκλίνει σε σχεδόν σταθερή τιμή, ίση προς 270 ± 10 HV0.3.

Σε σύγκριση με προηγούμενη μελέτη [Chaidemenopoulos *et al.*, 2019], σχετικά με το σύστημα Fe-Cr-C, που εναποτέθηκε με τεχνική συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου (Shielded Metal Arc Welding-SMAW), βρέθηκε ότι η μικροσκληρότητα του εξωτερικού στρώματος είχε υψηλότερες τιμές, γεγονός που θα μπορούσε να αποδοθεί σε υψηλότερη συγκέντρωση αδρομερών πρωτογενών καρβιδίων στην περίπτωση διπλής ηλιακής κατεργασίας. Η επίδραση της απόστασης μεταξύ καρβιδίων, στις μετρούμενες τιμές της μικροσκληρότητας, έχει συζητηθεί ήδη στα Κεφάλαια 5 και 6 της παρούσας διατριβής.



Σχήμα 7.11 Μεταβολή των τιμών της σκληρότητας (α) και της μικροσκληρότητας κατά Vickers (β) μικροσκληρότητας του σύνθετου «ηλιακού επιφανειακού στρώματος μετά από κατεργασία διπλού θερμικού κύκλου, συναρτήσεως του βάθους από την επιφάνεια έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία.

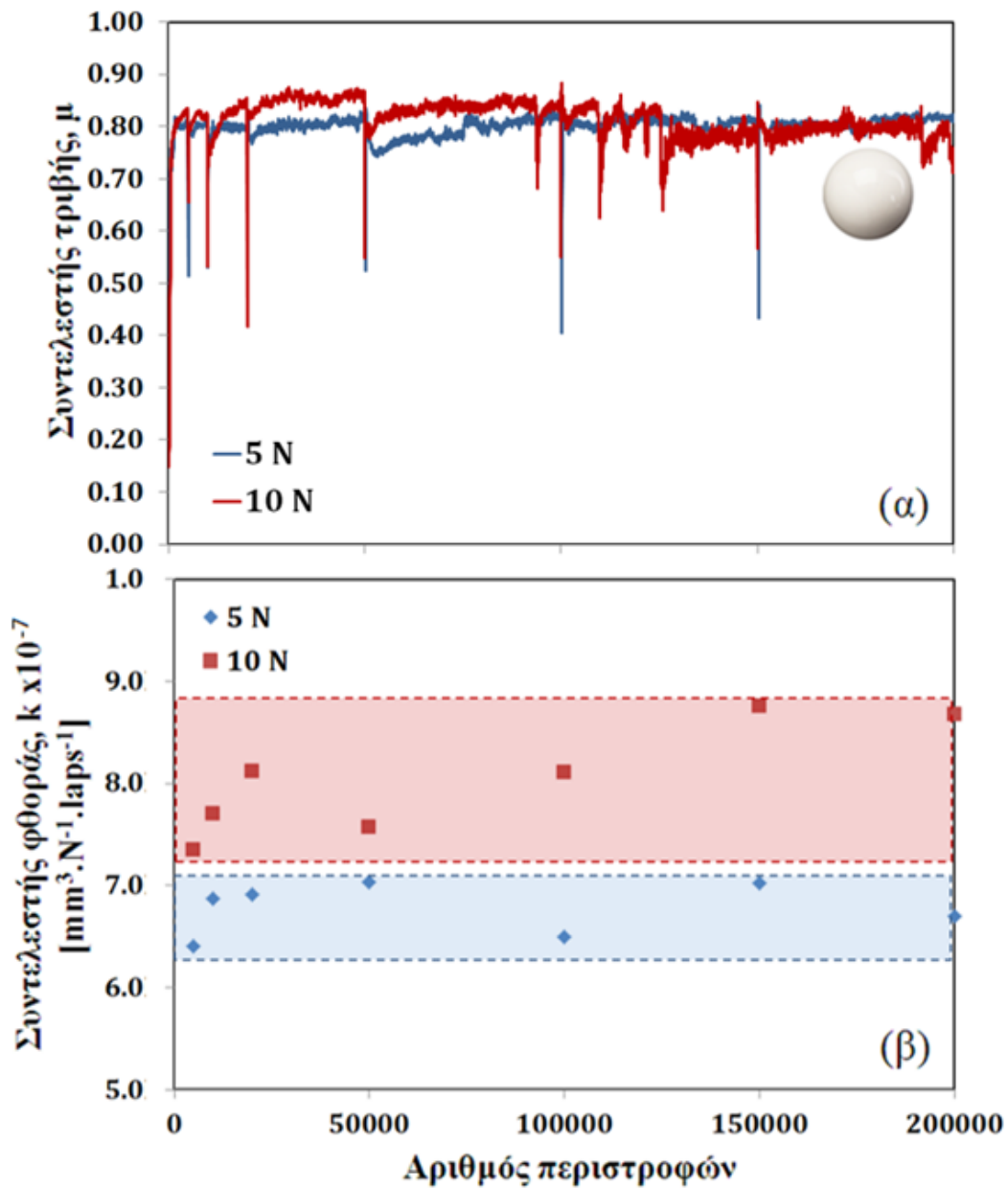
7.4 Απόδοση επιστρωμάτων σε τριβή ολίσθησης

7.4.1 Εξέλιξη των συντελεστών τριβής και φθοράς

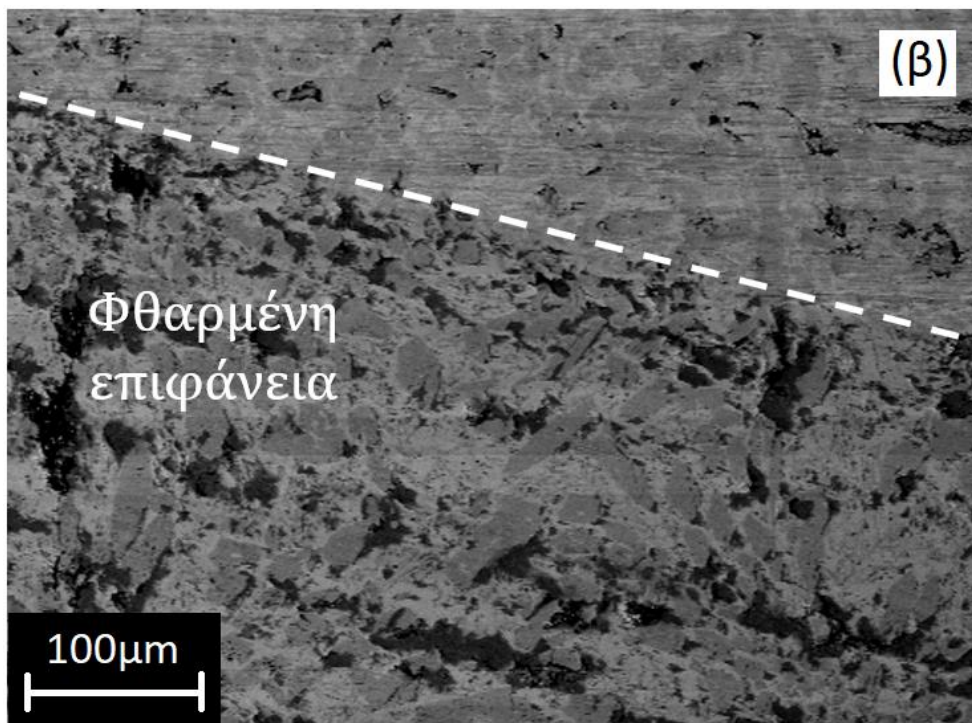
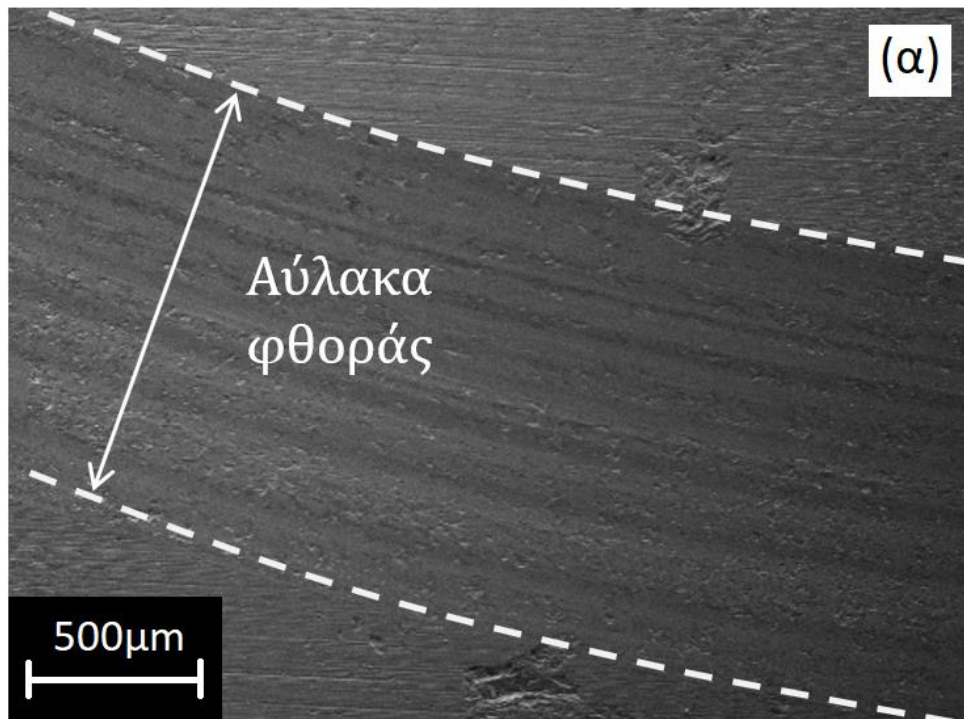
Τα σύνθετα επιφανειακά στρώματα, που προέκυψαν μέσω της ηλιακής επεξεργασίας δύο σταδίων, χαρακτηρίστηκαν σε σχέση με την τριβολογική τους απόδοση κατά τη λειτουργία, έναντι μιας σφαίρας Al_2O_3 ως ανταγωνιστικού υλικού. Για τα δύο φορτία που εφαρμόστηκαν, 5 και 10N, ο συντελεστής τριβής μ (Σχήμα 7.12α) έφθασε σε πολύ σύντομη περίοδο λειτουργίας σε σταθερή τιμή $0,80 \pm 0,02$. Ένας παρόμοιος, σχετικά υψηλός συντελεστής τριβής παρατηρήθηκε επίσης κατά τη διάρκεια αντίστοιχης δοκιμής ενός ανθρακο-εναζωτομένου χάλυβα, με μικροδομή που χαρακτηρίζεται από διασπορά καρβιδίων μέσα σε μια μήτρα σιδήρου [Karamboiki *et al.*, 2013]. Ο συντελεστής φθοράς k κατά τη διάρκεια της δοκιμής (Σχήμα 7.12β) τείνει σε μια σταθερή μέση τιμή $6,78 \pm 0,09 \times 10^{-7}$ και $8,04 \pm 0,20 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{laps}^{-1}$, για φορτία 5 και 10N, αντίστοιχα. Η διασπορά των τιμών, που μπορούν να παρατηρηθούν οπτικά στο διάγραμμα, δεν έχει πρακτική σημασία, στο συγκεκριμένο μετρούμενο εύρος τιμών του συντελεστή φθοράς.

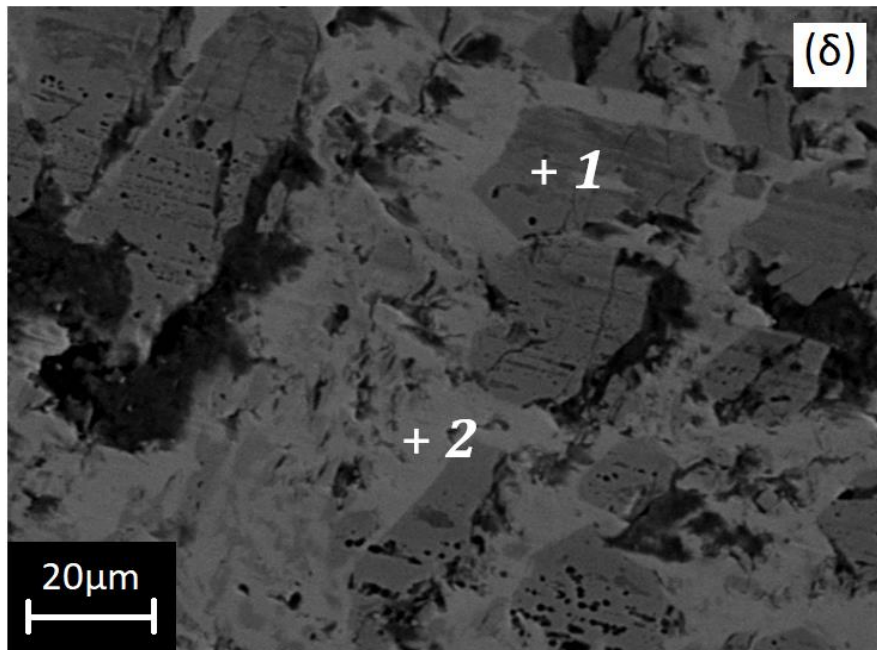
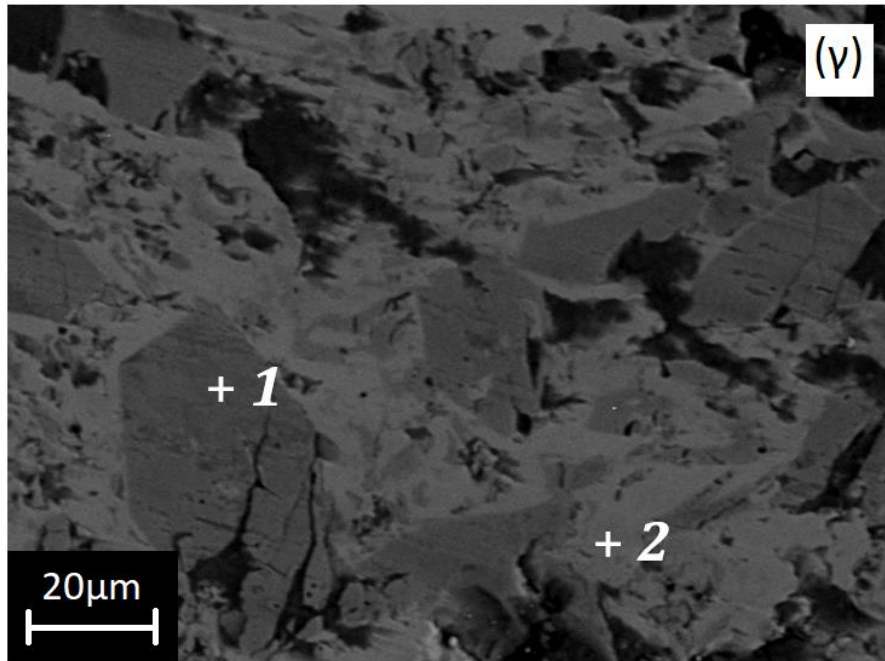
7.4.2 Μηχανισμοί φθοράς

Περαιτέρω παρατηρήσεις ηλεκτρονικής μικροσκοπίας της φθαρμένης επιφάνειας μετά το πέρας των δοκιμών ξηράς ολίσθησης, αποκάλυψαν τους μηχανισμούς φθοράς που έλαβαν χώρα. Η γενική εμφάνιση της αύλακας φθοράς, με μέσο πλάτος $1,4 \pm 0,05 \text{ mm}$, είναι αυτή ενός μεταλλικού υλικού με τροχιές λείανσης παράλληλες στην διεύθυνση ολίσθησης (Σχήμα 7.13α). Ωστόσο, παρατηρώντας προσεκτικότερα τόσο τα όρια με την μη φθαρμένη επιφάνεια (Σχήμα 7.13β), όσο και το μέσο της αύλακας φθοράς (Σχήματα 7.13γ και 7.13δ), διακρίνουμε τη συνέργεια μικρομηχανισμών τοπικής φθοράς. Η μεταλλική μήτρα υπέστη φθορά λείανσης και πλαστική παραμόρφωση, ενώ η κεραμική ενίσχυση φθάρηκε μέσω λείανσης και μέσω μικρορωγματώσεων, που εμφάνισαν τα καρβίδια, η επιφάνεια της οποίας παρουσιάζει τυχαίες κοιλότητες, ένδειξη ότι σε ένα μεταγενέστερο στάδιο θα πραγματοποιηθεί αποκόλληση των ενισχυτικών σωματιδίων.



Σχήμα 7.12 Τριβολογική συμπεριφορά σύνθετου «ηλιακού» στρώματος μετά από διπλή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία υπό αδρανή ατμόσφαιρα, κατά τη ξηρά ολίσθηση έναντι σφαίρας Al_2O_3 : εξέλιξη των συντελεστών (α) τριβής μ και (β) φθοράς k .





Σχήμα 7.13 Μικρογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης της επιφάνειας φθοράς: (α) συνολική εικόνα της αύλακας φθοράς που αναπτύσσεται κατά τη διεύθυνση ολίσθησης με την επιβολή φορτίου 10N, (β) μεγέθυνση στα όρια της αύλακας φθοράς, (γ) και (δ) διαδοχικές μεγεθύνσεις της επιφάνειας φθοράς στο μέσον της αύλακας, όπου αναδεικνύεται η συνέργεια των διακριτών μικρο-μηχανισμών φθοράς των πρωτογενών καρβιδίων (σημεία 1) και της μεταλλικής μήτρας (σημεία 2).

7.5 Συμπεράσματα

Στο τελευταίο μέρος της διατριβής αυτής, διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας για την άμεση ενίσχυση χαλύβδινης μήτρας με σωματίδια καρβιδίων του χρωμίου σε διασπορά. Ειδικότερα, κόνις καρβιδίου του χρωμίου με αρχική στοιχειομετρία Cr_3C_2 προ-εναποτέθηκε σε κοινό χάλυβα DIN St 37-2, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως υλικό-μοντέλο για την παρούσα διερεύνηση και το υλικό σύστημα εκτέθηκε σε Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια, σε αδρανή ατμόσφαιρα αργού, για διάφορα χρονικά διαστήματα. Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων, απλού και διπλού κύκλου έκθεσης, προκειμένου να προσδιορισθούν οι κρίσιμες παράμετροι της κατεργασίας, που επιδέχονται βελτιστοποίησης [Mourlas *et al.*, 2019a]:

- Βραχείας διάρκειας έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σχετικά μεγάλου πάχους επιφανειακών στρωμάτων, τα οποία ωστόσο εμφανίζουν πληθώρα ελαττωμάτων δομής, που τα καθιστά ακατάλληλα για χρήση.
- Για διάρκεια έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία υψηλότερη μιας τιμής-κατωφλίου, επιτυγχάνεται η πλήρης διαλυτοποίηση της κόνεως των καρβιδίων στο τήγμα της χαλύβδινης μήτρας. Με την ολοκλήρωση της στερεοποίησης και της ψύξης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, λαμβάνονται επιφανειακά στρώματα στερεού διαλύματος Fe-Cr δενδριτικής ανάπτυξης, ικανοποιητικού πάχους και χωρίς δομικές ατέλειες. Η ηλιακή κατεργασία ενός θερμικού κύκλου οδηγεί σε κραματοποίηση του επιφανειακού στρώματος και όχι στην επιθυμητή διασπορά των σωματιδίων ενίσχυσης.
- Η ηλιακή κατεργασία δύο σταδίων: ενός 1^{ου} σταδίου, κατά τη διάρκεια του οποίου επιτυγχάνεται η κραματοποίηση, ακολουθούμενο από ένα 2^ο στάδιο ανάπτυξης του στερεού διαλύματος, που προέκυψε από το 1^ο, οδηγεί πράγματι σε επιφανειακά στρώματα συνθέτου υλικού, με τη διασπορά πρωτογενών καρβιδίων M_7C_3 εντός της μεταλλικής μήτρας.
- Η απόδοση των συνθέτων «ηλιακών επιφανειακών στρωμάτων σε ξηρά τριβή ολίσθησης κρίνεται καλύτερη από αυτήν του μετάλλου βάσης, τόσο ως προς τις τιμές του συντελεστή τριβής, όσο και ως προς την αντίστασή τους σε φθορά.
- Ο συνολικός μηχανισμός φθοράς του σύνθετου επιφανειακού στρώματος αποτελεί

την υπέρθεση δύο μικρομηχανισμών. Ο πρώτος αφορά τη φθορά της μεταλλικής μήτρας κυρίως με μηχανισμούς πρόσφυσης και πλαστικής παραμόρφωσης, ενώ ο δεύτερος αφορά το μηχανισμό μικρο-κοπής του καρβιδίου, που επηρεάζει τη συνοχή του με τη μεταλλική μήτρα και ενδέχεται να οδηγήσει τελικά στην εκρίζωσή του από αυτήν.

Αυτά τα αποτελέσματα του κεφαλαίου αυτού, σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα των Κεφαλαίων 5 και 6, μπορούν να συμβάλλουν στον καθορισμό των κατευθυντηρίων γραμμών για την επιτυχή υλοποίηση της προτεινόμενης τεχνολογίας. Μια τέτοια ολοκληρωμένη προσέγγιση, μπορεί να συνεισφέρει στον εντοπισμό περαιτέρω πιθανών εφαρμογών της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας για την άμεση τροποποίηση των επιφανειών λειτουργίας των κραμάτων, που χρησιμοποιούνται στον κλάδο των μηχανολογικών κατασκευών.

7.6 Βιβλιογραφία

- A. Jacob, E. Povoden-Karadeniz, E. Kozeschnik, 2018. Revised thermodynamic description of the Fe-Cr system based on an improved sublattice model of the σ phase. *Calphad*, 60, 16–28.
- CALPHAD, 2018. <http://www.calphad.com/iron-chromium.html>, Accessed date: 29 October 2018.
- C.-C. Hsieh, W. Wu, 2012. Overview of intermetallic sigma (σ) phase precipitation in stainless steels, *ISRN Metallurgy*, <https://doi.org/10.5402/2012/732471> 16.
- D.-G. Ahn, 2013. Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: a review. *Int. J. Precis. Eng. Man.*, 14, 1271–1283.
- C.M. Chang, C.M. Lin, C.C. Hsieh, J.H. Chen, C.M. Fan, W. Wu, 2009. Effect of carbon content on microstructural characteristics of the hypereutectic Fe-Cr-C claddings. *Mater. Chem. Phys.*, 117, 257–261.
- C.M. Chang, C.M. Lin, C.C. Hsieh, J.H. Chen, W. Wu, 2009. Micro-structural characteristics of Fe-40 wt%Cr-xC hardfacing alloys with [1.0-4.0 wt%] carbon content. *J Alloy Compd*, 487, 83–89.

- C.-M. Karamboiki, A. Mourlas, P. Psyllaki, J. Sideris, 2013. Influence of microstructure on the sliding wear behavior of nitrocarburized tool steels. *Wear*, 303, 560–568.
- D.M.E. Villanueva, F.C.P. Junior, R.L. Plaut, A.F. Padilha, 2006. Comparative study on sigma phase precipitation of three types of stainless steels: austenitic, superferritic and duplex. *Mater. Sci. Tech.-Lond.*, 22, 1098–1104.
- F. Sadeghi, H. Najafi, A. Abbasi, 2017. The effect of Ta substitution for Nb on the microstructure and wear resistance of an Fe-Cr-C hardfacing alloy. *Surf Coat Tech.*, 324, 85–91.
- H. Sieurin, R. Sandström, 2007. Sigma phase precipitation in duplex stainless steel 2205. *Mat. Sci. Eng. A-Struct.* 444, 271–276.
- J.L. del Abra-Arzola, M.A. García-Rentería, V.L. Cruz-Hernández, J. García-Guerra, V.H. Martínez-Landeros, L.A. Falcón-Franco, F.F., Curiel-López, 2018. Study of the effect of sigma phase precipitation on the sliding wear and corrosion behaviour of duplex stainless steel AISI 2205. *Wear*, 400-401, 43–51.
- M.H. Bina, 2012. Homogenization heat treatment to reduce the failure of heat resistant steel castings, Chapter 5, in: Y. Pardhi (Ed.), *Metallurgy-Advances in Materials and Processes*, IntechOpen, 95–116.
- Mourlas A, Pavlidou E., Vourlias G., Rodriguez J., Psyllaki P., 2019a. Concentrated solar energy for in-situ elaboration of wear-resistant composite layers. Part I: TiC and chromium carbide surface enrichment of common steels. *J. Surface & Coatings Technology*, 377, 124882
- N.G. Chaidemenopoulos, P.P. Psyllaki, E. Pavlidou, G. Vourlias, 2019. Aspects on carbides transformations of Fe-based hardfacing deposits. *Surf. Coat. Techn.*, 357, 651–661.
- Q. Sun, J. Wang, H.B. Li, Y. Li, Y.D. Hu, J.G. Bai, P.G. Han, Chi, 2016. Phase after shortterm aging and corrosion behavior in 2205 duplex stainless steel, *J. Iron Steel Res. Int.*, 23, 1071–1079.
- Παντελής Δ., Παπαζογλου Β., Χαϊδεμενόπουλος Γ., 2017. *Επιστήμη και τεχνολογία των συγκολλήσεων*. Εκδ. Τζιόλα.
- Rodriguez, Jose, Inmaculada Canadas, and Eduardo Zarza. 2016. New PSA High Concentration Solar Furnace SF40. *AIP Conference Proceedings*, 1734. 070028.

[κενή σελίδα]

Κεφάλαιο 8

Συγκριτική αξιολόγηση – Γενικά συμπεράσματα

8.1 Ανακεφαλαίωση των πειραματικών στόχων

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, εξετάζεται η δυνατότητα χρήσης Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας, ως εναλλακτικής μορφής θερμότητας/ενέργειας, για τη δημιουργία επιφανειακών στρωμάτων με διασπορά ενισχυτικών σωματιδίων εντός της μεταλλικής μήτρας του υποστρώματος. Τέτοιου τύπου επιγομώσεις δημιουργούνται τυπικά με τη χρήση συμβατικών τεχνικών συγκόλλησης τόξου και βρίσκουν εφαρμογή σε μηχανολογικές κατασκευές, που κατά τη λειτουργία τους θα υποβληθούν σε υψηλές τριβικές φορτίσεις και φθορά.

Για την αξιολόγηση της τεχνικής χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές κόνεις καρβιδίων (TiC , WC και Cr_3C_2), οι οποίες προ-εναποτέθηκαν σε υπόστρωμα κοινού χάλυβα (St37-2) διαφόρων διαστάσεων, προκειμένου κατ' αρχάς να διερευνηθεί η δυνατότητα εφαρμογής της προτεινόμενης τεχνικής, χωρίς να παρεμβάλλεται στην εξέταση η πολυστοιχειακή χημική σύσταση του μετάλλου βάσης.

Τα τρία συστήματα υλικών υποβλήθηκαν σε ηλιακή κατεργασία απλού ή/και διπλού θερμικού κύκλου υπό αδρανή ή/και χημικά δραστική ατμόσφαιρα στον ηλιακό φούρνο SF40 των εγκαταστάσεων Plataforma Solar de Almería (PSA) στην Ισπανία.

Τα αποτελέσματα των ηλιακών κατεργασιών αξιολογήθηκαν με τη μελέτη της επιτυγχανόμενης μικροδομής, με μετρήσεις σκληρότητας/μικροσκληρότητας και, τέλος, με την υλοποίηση δοκιμών ξηράς τριβής ολίσθησης.

Κατά περίπτωση, η μικροδομή και η τριβολογική απόδοση των επιτυχών «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων συγκρίθηκε με αντίστοιχα πειραματικά ή/και βιβλιογραφικά δεδομένα, που αφορούν επιγομώσεις που λαμβάνονται με τη συμβατική τεχνική βολταϊκού τόξου FCAW.

8.2 Γενικά αποτελέσματα

Το φυσικό μοντέλο, που περιγράφει την κατεργασία σε κάθε περίπτωση, αφορά την μεγιστοποίηση της απορρόφησης της Συγκεκτρωμένης Ηλιακής Ενέργειας μόνο από την επιφάνεια, η οποία καλύπτεται από τη κόνι καρβιδίου. Στην περιοχή αυτή δημιουργείται μια «λίμνη» τήγματος του μετάλλου βάσης, η οποία έχει γεωμετρία ανάλογη της κανονικής κατανομής της δέσμης της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας. Τα σωματίδια της κόνεως των καρβιδίων βυθίζονται στη λίμνη του τήγματος, η κίνηση του οποίου διευκολύνει τη διασπορά τους σε όλο τον όγκο του. Με τη στερεοποίηση του εμπλουτισμένου τήγματος και την ψύξη του σε θερμοκρασία περιβάλλοντος λαμβάνονται επιφανειακά στρώματα συνθέτου υλικού. Το μέγιστο πάχος του στρώματος αυτού, στο κέντρο της ακτινοβολούμενης επιφάνειας, μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με τη διάρκεια του χρόνου έκθεσης σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου βάσης.

Για τις τρεις ποιότητες κόνεως καρβιδίων και για δεδομένες διαστάσεις του μετάλλου βάσης, μπορεί να προσδιορισθεί το εύρος των χρόνων έκθεσης για το οποίο το λαμβανόμενο επιφανειακό στρώμα δεν εμφανίζει τα συνήθη ελαττώματα δομής των στερεοποιημένων τηγμάτων, δηλαδή πόρους ή και ρωγμές. Η τελική μικροδομή τέτοιων επιτυχών επιφανειακών στρωμάτων, εξαρτάται από τη δραστηριότητα του σιδηρούχου τήγματος επί των σωματιδίων της κόνεως που έχει προ-εναποτεθεί:

- Στην περίπτωση κόνεως καρβιδίου του τιτανίου (TiC), τα ενισχυτικά σωματίδια δεν προσβάλλονται από τον τηγμένο χάλυβα, διασπείρονται ομοιογενώς στη μεταλλική μήτρα και με την αύξηση του χρόνου έκθεσης, αυξάνεται το πάχος του «ηλιακού» επιστρώματος. Με τον κατάλληλο, λοιπόν, συνδυασμό ποσότητας και κοκκομετρίας της προ-εναποτιθέμενης κόνεως, και χρόνου ηλιακής έκθεσης,

είναι δυνατή η παραγωγή επιφανειακών συνθέτων διαφόρων ποιοτήτων (κ.ο. αναλογία ενισχυτικής φάσης).

- Στην περίπτωση κόνεως καρβιδίου του βολφραμίου (WC), τα ενισχυτικά σωματίδια προσβάλλονται περιμετρικά από τον τηγμένο χάλυβα προς σχηματισμό ψαθυρού η-καρβιδίου, το οποίο στη συνέχεια κερματίζεται προς μικρότερα τεμάχια.. Με την αύξηση της διάρκειας της κατεργασίας, ο μετασχηματισμός αυτός ενδέχεται να οδηγήσει σε πλήρη μετατροπή της ενισχυτικής φάσης. Τα κερματισμένα τεμάχια του η-καρβιδίου αντιδρούν περαιτέρω με το τήγμα οδηγώντας στη δημιουργία ενός εκτεταμένου δικτύου διμεταλλικών ενώσεων και φάσεων Laves στη μεταλλική μήτρα, όπως ταυτοποιήθηκαν βιβλιογραφικά. Υπάρχει, λοιπόν, ένας μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος επαφής των σωματιδίων με την τηγμένη μήτρα, προκειμένου να περιορισθεί ο μετασχηματισμός αυτός και να επιτευχθεί η ομοιόμορφη διασπορά των σωματιδίων σε όλο τον όγκο του τήγματος. Παρατηρήθηκε ότι η κατεργασία σε δραστική ατμόσφαιρα αζώτου συμβάλλει σε αυτό.
- Στην περίπτωση κόνεως καρβιδίου του χρωμίου (Cr_3C_2), τα ενισχυτικά σωματίδια διαλυτοποιούνται στο μεταλλικό τήγμα, σχηματίζοντας περιοχές στερεού διαλύματος (Fe,Cr) και μερικής διαλυτοποίησης. Με την αύξηση του χρόνου έκθεσης μπορεί να επιτευχθεί πλήρης διαλυτοποίηση της κόνεως των καρβιδίων και πλήρης επιφανειακή κραματοποίηση του μετάλλου βάσης. Για να δημιουργηθεί η επιθυμητή δομή συνθέτου με διασπορά ενισχυτικών καρβιδίων, απαιτείται η ανάτηξη του κράματος, που ελήφθη στο πρώτο στάδιο. Τα καρβίδια αυτά είναι πρωτογενή καρβίδια του χρωμίου (Cr_7C_3) πολυγωνικής μορφολογίας, τα οποία δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης του επανατηγμένου όγκου. Στην περίπτωση, λοιπόν, των καρβιδίων του χρωμίου, η βελτιστοποίηση της ηλιακής κατεργασίας σχετίζεται με τη σχετική διάρκεια των δύο επάλληλων θερμικών κύκλων και το ρυθμό απαγωγής της θερμότητας κατά την ψύξη, ώστε να ελεγχθεί η μορφολογία της λαμβανόμενης μικροδομής (δενδριτική ή ισοαξονικής ανάπτυξης) και η δημιουργία/κατακρήμνιση φάσεων, που θα οδηγήσουν σε μείωση της μηχανικής αντοχής του του υλικού.

8.3 Συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης των «ηλιακών» στρωμάτων

Στην περίπτωση των τριβολογικών δοκιμών, που προσομοιάζουν την επίδοση κατά τη λειτουργία, δηλαδή την ξηρά ολίσθηση έναντι μιας σφαίρας Al_2O_3 και για τους τρεις τύπους ενισχυτικών καρβιδίων, διαπιστώθηκε ότι ο συντελεστής φθοράς σε σταθερή κατάσταση (Πίνακας 8.1) ήταν χαμηλότερος από εκείνον του κοινού μετάλλου κατά 3 τάξεις μεγέθους, υποδηλώνοντας ότι ο κύριος στόχος της επίτευξης επιφανειακών σύνθετων στρωμάτων με ενίσχυση σωματιδίων με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί. Στην περίπτωση των τριβολογικών δοκιμών που προσομοιάζουν τη συμβατική κατεργασία, δηλαδή ξηράς ολίσθησης έναντι ένθετου πλακιδίου τόννευσης επικαλυμμένο με c-BN (Πίνακας 8.2), αμφότερα τα επιφανειακά στρώματα με βάση το καρβίδιο του τιτανίου (TiC) και του βολφραμίου (WC) παρουσίασαν ένα ορισμένο, μετρήσιμο βαθμό κατεργασιμότητας, που μπορεί να βελτιστοποιηθεί περαιτέρω με την σωστή επιλογή της ποιότητας του ένθετου κοπής.

Πίνακας 8.1 Συγκριτική παρουσίαση της απόδοσης κατά τη λειτουργία για τους τρεις τύπους ενισχυτικών σωματιδίων, του μετάλλου βάσης και εμπορικού χάλυβα. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν υπό τις ίδιες συνθήκες έναντι σφαίρας Al₂O₃.

Ενισχυτικό σωματίδιο σύνθετου επιφανειακού στρώματος	Επίδοση κατά τη λειτουργία			Παρατηρήσεις/ αναφορές
	Φορτίο (N)	Συντελεστής τριβής, μ	Συντελεστής φθοράς, $k^* \times 10^{-7}$ (mm ³ ·N ⁻¹ ·laps ⁻¹)	
Καρβίδιο του τιτανίου	5	0,44 ± 0,02	3,62 ± 0,41	Υψηλή αντίσταση στη φθορά
	10		4,18 ± 0,42	
Καρβίδιο του βολφραμίου	5	0,70 ± 0,05	0,26 ± 0,03	Εξαιρετικά υψηλή αντίσταση στη φθορά
	10		0,54 ± 0,11	
Καρβίδιο του χρωμίου	5	0,80 ± 0,02	6,78 ± 0,09	Καλή αντίσταση στη φθορά
	10		8,04 ± 0,20	
Αντιπροσωπευτικοί χάλυβες				
Μέταλλο βάσης DIN St37-2	5	0,60 ± 0,05	76,4 ± 21	Mourlas and Psyllaki, 2016
	10		328 ± 88	
Hardox400	5	0,58 ± 0,05	10,3 ± 2,5	Mourlas and Psyllaki, 2016
	10		40,0 ± 12,1	

Πίνακας 8.2 Συγκριτική παρουσίαση της κατεργασιμότητας των σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων με ενίσχυση σωματιδίων TiC και WC, που πραγματοποιήθηκαν με δοκιμές ξηράς ολίσθησης έναντι ένθετου πλακιδίου τόννευσης επικαλυμμένο με c-BN.

Ενισχυτικό σωματίδιο σύνθετου επιφανειακού στρώματος	Κατεργασιμότητα			Παρατηρήσεις/ αναφορές
	Φορτίο (N)	Συντελεστής τριβής, μ	Συντελεστής φθοράς, $k^* \times 10^{-7}$ (mm ³ ·N ⁻¹ ·laps ⁻¹)	
Καρβίδιο του τιτανίου	5	0,34 ± 0,01	13,1 ± 0,3	Υψηλή κατεργασιμότητα
	10	0,37 ± 0,01	42,5 ± 0,4	
Καρβίδιο του βολφραμίου	5	0,50 ± 0,05	7,58 ± 1,28	Χαμηλή κατεργασιμότητα
	10	0,50 ± 0,05	8,87 ± 2,62	

*Ο λόγος 1/k ορίζεται ως «αντίσταση στη φθορά».

8.4 Σημεία και προτάσεις περαιτέρω έρευνας

Εφόσον αποδείχθηκε η δυνατότητα εφαρμογής της προτεινόμενης τεχνικής για την παραγωγή «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων και αναδείχθηκαν τα κρίσιμα σημεία ανά τύπο καρβιδίου που ελέγχουν την αποτελεσματικότητά της, τα κύρια σημεία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης, ώστε να προταθεί μια γενικευμένη προσέγγιση επί του θέματος, αφορούν:

- Την διατύπωση ενός αναλυτικού μοντέλου, που να επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της κατεργασίας και την ανάπτυξη ενός αριθμητικού μοντέλου, που να προβλέπει τα αποτελέσματα της κατεργασίας για υποστρώματα διαφόρων διαστάσεων και για διαφορετικούς ρυθμούς ψύξης.
- Τον θερμοδυναμικό υπολογισμό των ιδιαίτερων φάσεων, που αναμένεται να αναπτυχθούν κατά την κατεργασία και την πειραματική του επιβεβαίωση.
- Τον έλεγχο της απόδοσης των «ηλιακών» επιφανειακών στρωμάτων σε συνθήκες επιφανειακής φόρτισης άλλου τύπου, όπως είναι η εκτριβή με την παρουσία τρίτου σώματος (three body abrasion), η ολίσθηση υψηλών θερμοκρασιών (high temperature sliding), η μηχανική διάβρωση (erosion), ή/και η αντίσταση σε ηλεκτροχημική διάβρωση (corrosion resistance).
- Την εφαρμογή της μεθοδολογίας με τη χρήση και άλλων σωματιδίων, όπως είναι τα καρβίδια του πυριτίου (SiC), του βαναδίου (VC), του νιοβίου (NbC) και του μολυβδαινίου (Mo₂C) ή και μίγματα αυτών, καθώς αποτελούν τα κύρια υλικά ενίσχυσης μεταλλικών υλικών, καθώς και την εφαρμογή της σε πολυστοιχειακά υποστρώματα, δηλαδή σε μέταλλα βάσης πιο σύνθετης χημικής σύστασης, όπως είναι οι χάλυβες εργαλείων και οι ανοξείδωτοι χάλυβες.

8.5 Δημοσιεύσεις

Εργασίες σε διεθνή περιοδικά (με κριτές)

1. A. Mourlas, P. Psyllaki, D. Pantelis, «Anti-wear TiC-based surface layers using concentrated solar energy», *Key Engineering Materials*, 674 (2016), 296-301.

Η εργασία αυτή αφορά στα προκαταρκτικά αποτελέσματα, της 1^{ης} αποστολής στην Αλμερία, και παρουσιάστηκε προφορικά στο 24th International Baltic Conference on Engineering Materials and Tribology, BALTMATTRIB and IFHTSE 2015, Tallinn (Estonia), 5-6.11.15.

2. A. Mourlas, P. Psyllaki, «Application of concentrated solar power for elaborating wear resistant hardfacing surface layers», *Bulgarian Chemical Communications*, 48 (Spec E) (2016) 266-271.

Η εργασία αυτή αφορά στη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την 1^η και τη 2^η αποστολή στην Αλμερία και παρουσιάστηκε προφορικά στο XV International Conference “Renewable Energy & Innovative Technologies, Smolyan (Bulgaria), 10-11.06.16.

3. A. Mourlas, E. Pavlidou, G. Vourlias, J. Rodriguez, P. Psyllaki, «Concentrated solar energy for in-situ elaboration of wear-resistant composite layers. Part I: TiC and chromium carbide surface enrichment of common steels», *Surface & Coatings Technology*, 377, (2019), 124882

4. A. Mourlas, E. Pavlidou, G. Vourlias, J. Rodriguez, 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.

Παρουσιάσεις σε διεθνή συνέδρια

5. Α. Μουρλάς, Π. Ψυλλάκη, Γ. Βουρλιάς, Ε. Παυλίδου, Χ. Σαράφογλου, Δ. Παντελής, «Δημιουργία σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων υψηλής αντιτριβικής συμπεριφοράς με χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας», Πρακτικά 6^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Μεταλλικών Υλικών, Ιωάννινα (7-9.12.2016), 326-331 (προφορική παρουσίαση).

6. P.P. Psyllaki, A. Mourlas, G. Vourlias, E. Pavlidou, J. Rodríguez, I. Cañadas, “Elaboration of Wear Resistant Carbide-based Surface Layers via Concentrated Solar Power”, EUROMAT 2017, Thessaloniki (17-22.09.2017), (highlight προφορική παρουσίαση, με κρίση εκτεταμένης περίληψης).

7. P.P. Psyllaki, A. Mourlas, G. Vourlias, E. Pavlidou, J. Rodríguez, I. Cañadas, «Concentrated Solar Power technology for in-situ elaboration of carbide-based surface layers on metallic substrates», SolarPACES 2017, Santiago de Chile (26-29.07.2017), (παρουσίαση poster, με κρίση εκτεταμένης περίληψης).

Βιβλιογραφία

- A. Jacob, C. Schmetterer, L. Singheiser, A. Gray-Weale, B. Hallstedt, A. Watson, 2015. Modeling of Fe-W phase diagram using principles and phonons calculations, CALPHAD 50, 92–104.
- A. Jacob, E. Povoden-Karadeniz, E. Kozeschnik, 2018. Revised thermodynamic description of the Fe-Cr system based on an improved sublattice model of the σ phase. Calphad, 60, 16–28.
- Alami, Abdul Hai, and Kamilia Aokal, 2017. Experiments on Polymer Welding via Concentrated Solar Energy. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92, 3715–3724.
- Apostol, Irina, Jose Rodríguez, Inmaculada Cañadas, Jose Galindo, Senen Lanceros Mendez, Pedro Libanio de Abreu Martins, Luis Cunha, and Kandasamy Venkata Saravanan. 2018. Concentrated Solar Energy Used for Sintering Magnesium Titanates for Electronic Applications. Applied Surface Science, 438, 1–7.
- A.P. Gulyaev, O.D. Sidorova, T.P. Moskvina, 1990. Effect of solidification rate of the structure of alloys of the system Fe-W, Met. Sci. Heat Treat., 32, 683–686.
- A.S. Kurlov, A.I. Gusev, 2006. Tungsten carbides and W-C phase diagram, Inorg. Mater. 42, 121–127.
- Baharoon, Dhyia Aidroos, Hasimah Abdul Rahman, Wan Zaidi Wan Omar, and Saeed Obaid Fadhl. 2015. Historical Development of Concentrating Solar Power Technologies to Generate Clean Electricity Efficiently-A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 996–1027.
- B. Uhrenius, 1980. Calculation of phase equilibria in the Fe-W-C system, CALPHAD 4, 173- 191.
- CALPHAD, 2018. <http://www.calphad.com/iron-chromium.html>, Accessed date: 29 October 2018.

- Cambronero, L. E. G., Inmaculada Canadas, J. J. Diaz, J. M. Ruiz-Roman, and D. Martinez. 2011. Properties of Aluminium Nodules Foamed with Concentrated Solar Energy. *Euro PM 2011-Cellular Materials*, 339–344.
- Cambronero, L. E. G., Inmaculada Canadas, D. Martinez, and J. M. Ruiz-Roman. 2010. Foaming of Aluminium-Silicon Alloy Using Concentrated Solar Energy. *Solar Energy*, 84, 879–887.
- Cambronero, L. E. G., Inmaculada Canadas, J. M. Ruiz-Roman, M. Cisneros, and F. A. Corpas Iglesias. 2014. Weld Structure of Joined Aluminium Foams with Concentrated Solar Energy. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 2637–2643.
- C.B. Pollock, H.H. Stadelmaier, 1970. The eta carbides in the Fe–W–C and Co–W–C systems. *Metall. Trans.* 1, 767–770.
- C.-C. Hsieh, W. Wu, 2012. Overview of intermetallic sigma (σ) phase precipitation in stainless steels, *ISRN Metallurgy*.
- D.-G. Ahn, 2013. Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: a review. *Int. J. Precis. Eng. Man.*, 14, 1271–1283.
- Ceballos-Mendivil, L. G., R. E. Cabanillas-Lopez, J. C. Tanori-Cordova, R. Murrieta Yescas, C. A. Perez-Rabago, H. I. Villafan-Vidales, Camilo A. Arancibia-Bulnes, and C. A. Estrada. 2015. Synthesis of Silicon Carbide Using Concentrated Solar Energy. *Solar Energy* 116, 238–246.
- Chaidemenopoulos, N.G., Psyllaki, P.P., Pavlidou, E., Vourlias, G., 2019. Aspects on carbides transformations of Fe-based hardfacing deposits. *Surf. Coat. Techn.*, 357, 651-661.
- Charpentier, L., Dawi, K., Eck, J., Pierrat, B., Sans, J., Balat-Pichelin, M., 2011. Concentrated solar energy to study high temperature materials for space and energy. *J. Solar Energy Eng.*, 133 (3), 031005–031013.
- Charpentier, Ludovic, Kamel Dawi, Julien Eck, Baptiste Pierrat, Jean Louis Sans, and Marianne Balat-Pichelin. 2011. Concentrated Solar Energy to Study High Temperature Materials for Space and Energy. *Journal of Solar Energy Engineering* 133, 1-8.
- Chen, C. Julian. 2011. *Physics of Solar Energy*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

- Ciobanu, I., Monescu, V., Advantages and limitations regarding the processing of materials in concentrated energy solar furnaces, 2021. *J. Recent* (63), 022–033.
- C.M. Fernandes, A.M.R. Senos, 2011. Cemented carbide phase diagrams: a review, *Int. J. Refract. Met. H.*, 29, 405–418.
- C.M. Chang, C.M. Lin, C.C. Hsieh, J.H. Chen, C.M. Fan, W. Wu, 2009. Effect of carbon content on microstructural characteristics of the hypereutectic Fe-Cr-C claddings. *Mater. Chem. Phys.*, 117, 257–261.
- C.M. Chang, C.M. Lin, C.C. Hsieh, J.H. Chen, W. Wu, 2009. Micro-structural characteristics of Fe-40 wt%Cr-xC hardfacing alloys with [1.0-4.0 wt%] carbon content. *J Alloy Compd*, 487, 83–89.
- C. Tan, G. Wang, L. Ji, Y. Tong, X.M. Duan, 2016. Investigation on 316L/W functionally grades materials fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering, *J. Nucl. Mater.*, 469, 32–38.
- Degnan, C.C., Shipway, P.H., Wood, J.V., 2001. Elevated temperature sliding wear behaviour of TiC-reinforced steel matrix composites. *Wear*, 251, 1444-1451.
- D’Elia, R., Bernhart, G., Cutard, T., Perandan, G., Balat-Pichelin, M., 2014. Preliminary test of silicon carbide based concretes for hybrid rocket nozzles in a solar furnace. *Acta Astronautica*, 99, 242–251.
- D.-G. Ahn, 2013. Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: a review. *Int. J. Precis. Eng. Man.*, 14, 1271–1283.
- D.M.E. Villanueva, F.C.P. Junior, R.L. Plaut, A.F. Padilha, 2006. Comparative study on sigma phase precipitation of three types of stainless steels: austenitic, superferritic and duplex. *Mater. Sci. Tech.-Lond.*, 22, 1098–1104.
- Eglinton, T., Hinkley, J., Beath, A., Dell’Amico, M., 2013. Potential applications of concentrated solar thermal technologies in the Australian minerals processing and extractive metallurgical industry. *JOM* 65 (12), 1710–1720.
- Farber, E.A., 1964. Crystals of high-temperature materials produced in the solar furnace. *Solar Energy*, 8 (1), 38–42.
- Fernandez-Gonzalez, D., Ruiz-Bustinza, I., Gonzalez-Gasca, C., Pinuela Noval, J., Mochon-Castanos, J., Sancho-Gorostiaga, J., Verdeja, L. F., 2018. Concentrated

- solar energy applications in materials science and metallurgy. *Solar Energy*, 170, 520–540.
- Ferriere, A., C. Sanchez Bautista, G. P. Rodriguez, and Alfonso J. Vazquez. 2006. Corrosion Resistance of Stainless Steel Coatings Elaborated by Solar Cladding Process. *Solar Energy* 80, 1338–1343.
- Flamant, G. and Balat-Pichelin, M., 2010. Elaboration and testing of materials using concentrated solar energy, in *Solar Energy Conversion and Photoenergy Systems. Thermal Systems and Desalination Plants. Volume I*. In: Blanco Gálvez, J., Rodríguez, S.M., Delyannis, E., Belessiotis, V.G., Bhattacharya, S.C., Kumar, S. (Eds.), *Encyclopedia of Life Support Systems*. United Kingdom: Eolss Publishers Co., Ltd./ UNESCO, 363–389.
- Flamant, G., and Marianne Balat-Pichelin. 2016. Elaboration and Testing Materials Using Concentrated Solar Energy. *Solar Energy Conversion and Photoenergy Systems I. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*.
- Flamant, G., A. Ferriere, D. Laplaze, and C. Monty. 1999. Solar Processing of Materials: Opportunities and New Frontiers. *Solar Energy* 66 (2), 117–132.
- Francis, Abel J., and V. K. Bupesh Raja. 2015. An Overview of Concentrated Solar Power (CSP) and Its Applications. *International Journal of Applied Engineering and Research* 10 (5), 1755–1761.
- Franck, M., B. Blanpain, B. C. Oberl, J. P. Celis, and J. R. Roos. 1993. Surface Modification of TiN Hard Coatings with Concentrated Solar Energy. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 31, 401–414.
- F. Sadeghi, H. Najafi, A. Abbasi, 2017. The effect of Ta substitution for Nb on the microstructure and wear resistance of an Fe-Cr-C hardfacing alloy. *Surf Coat Tech.*, 324, 85–91.
- Garcia, I., E. Gracia-Escosa, M. Bayod, A. Conde, M. A. Arenas, J. J. de Damborenea, A. Romero, and G. P. Rodriguez. 2016. Sustainable Production of Titanium Foams for Biomedical Applications by Concentrated Solar Energy Sintering. *Materials Letters* 185, 420–423.
- Garcia, C., A. Romero, Gemma Herranz, Y. Blanco, and F. Martin. 2016. Effect of Vanadium Carbide on Dry Sliding Wear Behavior of Powder Metallurgy AISI M2

- High Speed Steel Processed by Concentrated Solar Energy. *Materials Characterization* 121, 175–186.
- Garcia, I., J. Sanchez Olias, and Alfonso J. Vazquez. 1999. A New Method for Materials Synthesis: Solar Energy Concentrated by Fresnel Lens. *Proceedings of the 9th SolarPACES International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies*, Font-Romeu, France, 435–440.
- Gosh, G.K., 1991. *Solar Energy, The Infinite Source*. APH Publishing Corporation, New Delhi.
- Herranz, Gemma, and G. P. Rodriguez. 2010. Uses of Concentrated Solar Energy in Materials Science. *Solar Energy*, 1–27.
- Herranz, G. and Rodríguez, G. P., 2010. Uses of Concentrated Solar Energy in Materials Science, Chapter 8 in *Solar Energy In: Rugescu, R.D. (Ed.), InTech*, 145-170.
- Herranz, Gemma, A. Romero, V. de Castro, and G. P. Rodriguez. 2013. Development of High Speed Steel Sintered Using Concentrated Solar Energy. *Journal of Materials Processing Technology* 213, 2065–2073.
- Herranz, Gemma, A. Romero, V. de Castro, and G. P. Rodriguez. 2014. Processing of AISI M2 High Speed Steel Reinforced with Vanadium Carbide by Solar Sintering. *Materials & Design* 54, 934–946.
- H. Sieurin, R. Sandström, 2007. Sigma phase precipitation in duplex stainless steel 2205. *Mat. Sci. Eng. A-Struct.* 444, 271–276.
- Isabel Roldan, M., Inmaculada Canadas, J. L. Casas, and Eduardo Zarza. 2013. Thermal Analysis and Design of a Solar Prototype for High-Temperature Processes. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 56 (1–2), 309–318.
- J.L. del Abra-Arzola, M.A. García-Rentería, V.L. Cruz-Hernández, J. García-Guerra, V.H. Martínez-Landeros, L.A. Falcón-Franco, F.F., Curiel-López, 2018. Study of the effect of sigma phase precipitation on the sliding wear and corrosion behaviour of duplex stainless steel AISI 2205. *Wear*, 400-401, 43–51.
- Jonsson, S., 1998. Assessment of the Fe-Ti system. *Metall. Mater. Trans. B*, 29B, 361-370.
- Kaddou, Abdul-Fattah K., and Abbas Abdul-Latif. 1969. The Feasibility of Joining Metal Using a Solar Furnace. *Solar Energy* 12, 377–378.

- Kalogirou, Soteris A. 2004. Solar Thermal Collectors and Applications. Progress in Energy and Combustion Science 30, 231–295.
- Kalogirou, Soteris A. 2009. Solar Energy Engineering-Processes and Systems. Burlington, MA: Academic Press, Elsevier Inc.
- Karalis, D. G., D. I. Pantelis, N. M. Daniolos, V. D. Bougiouri, Jose Rodríguez, P. N. Karakizis, and M. E. Kazasidis. 2017. An Attempt of 5083-H111 Aluminum Alloy Welding Using Variable Concentrated Solar Energy. 6th ICMEN International Conference at Thessaloniki, 1–10.
- Karalis, D. G., D. I. Pantelis, and V. J. Papazoglou. 2005. On the Investigation of 7075 Aluminum Alloy Welding Using Concentrated Solar Energy. Solar Energy Materials and Solar Cells, 86, 145–163.
- Karamboiki, C.-M, Mourlas A, Psyllaki, P, Sideris, J. 2013. Influence of microstructure on the sliding wear behavior of nitrocarburized tool steels. Wear, 303, 560-568.
- Kennedy, C., and H. Price. 2005. Development and Testing of High- Temperature Solar Selective Coatings, NREL/CP-520-36581, 1–5.
- Kim, I. S., Yarlalagadda K.D.V. Prasad, and L. A. Stoynev. 2004. A Study on an Intelligent System to Predict the Tensile Stress in Welding Using Solar Energy Concentration. Journal of Materials Processing Technology, 153–154, 649–653.
- Konstandopoulos, A. G., Pagkoura, C., and Lorentzou, S., 2012. Solar fuels and industrial chemistry, in Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications. In: Lovegrove, K., Stein, W. (Eds.), Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 620–654.
- Kovacik, J., Emmer, S., Rodríguez, J., Cañadas, I., 2014. Solar Furnace: Thermal Shock Behaviour of TiB₂ Coating on Steel, METAL 2014, May 21st-23rd. Czech Republic, Brno.
- Kovacik, J., S. Emmer, Jose Rodríguez, and Inmaculada Canadas. 2017. Sintering of HDH Ti Powder in a Solar Furnace at Plataforma Solar de Almeria. Journal of Alloys and Compounds, 695, 52–59.
- Lee, H.C., Gurland, J., 1978. Hardness and deformation of cemented tungsten carbide. Mat. Sci. Eng., 33, 125-133.

- Lewis, Nathan S., George Crabtree, Arthur J Nozik, Michael R Wasielewski, and Paul Alivisatos. 2005. Basic Research Needs for Solar Energy Utilization. Renée M. Nault, Argonne National Laboratory. http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/SEU_rpt.pdf. Date accessed: 09/06/2017.
- Llorente, J., Jesus Ballestrin, and Alfonso J. Vazquez. 2011. A New Solar Concentrating System: Description, Characterization and Applications. *Solar Energy* 85, 1000–1006.
- Llorente, J., and Alfonso J. Vazquez. 2009. Solar Hardening of Steels with a New Small Scale Solar Concentrator. *Materials Chemistry and Physics*, 118, 86–92.
- L. Maddi, G.S. Deshmukh, A.R. Ballal, D.R. Peshwe, R.K. Paretkar, K. Laha, M.D. Mathew, 2016. Effect of Laves phase on the creep rupture properties of P92 steel. *Mat. Sci. Eng. A – Struct.* 668, 215–223.
- López-Delgado, Aurora, Sol López-Andrés, Isabel Padilla, Marta Alvarez, Roberto Galindo, and Alfonso José Vázquez. 2014. Dehydration of Gypsum Rock by Solar Energy: Preliminary Study. *Geomaterials*, 4, 82–91.
- Luca M., Tieren M., Pisu T., Rodriguez J., Croitoru C., 2020. The influence of concentrated solar energy flux on the structure and properties of stainless steel brazed joints. *J. Thermal analysis and calorimetry*, 141, 1291-1304.
- Martínez, D., Rodríguez, J., 1998. Tratamiento superficial de materiales mediante luz solar concentrada: una opción mediante energías renovables. *Revista de Metalurgia de Madrid*, 34 (2), 104–108.
- Martínez, D., Cañadas, I., Mallol, G., Téllez, F., Rodríguez, J., 2015. A case study of the feasibility of using solar concentrating technologies for manufacturing ceramics. *J. Clean. Prod.* 87, 977–991.
- McDonald, D., Hunt, L.B., 1982. *A History of Platinum and its Allied Metals*, Hatton Garden, London: Ed. Johnson Matthey.
- Merchant, M.E., 1945a. Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. *J Appl Phys.*, 16 267-275.
- Merchant, M.E., 1945b. Mechanics of the metal cutting process. II. Plasticity conditions in metal cutting. *J Appl Phys.*, 16, 318-324.

- M.H. Bina, 2012. Homogenization heat treatment to reduce the failure of heat resistant steel castings, Chapter 5, in: Y. Pardhi (Ed.), Metallurgy-Advances in Materials and Processes, IntechOpen, 95–116.
- Mourlas A, Psyllaki P, Vardavoulias M. 2014. Influence of the CerMet fraction on the wear of HVOF composite coatings. Proc. 8th Inter. Conf. on Tribology (BalkanTrib'14), 506-512.
- Mourlas A., Psyllaki P., 2016. Application of concentrated solar power for elaborating wear resistant hardfacing surface layers», Bulgarian Chemical Communications, 48 (Spec E), 266-271.
- Mourlas A, Pavlidou E., Vourlias G., Rodriguez J., Psyllaki P., 2019a. Concentrated solar energy for in-situ elaboration of wear-resistant composite layers. Part I: TiC and chromium carbide surface enrichment of common steels. J. Surface & Coatings Technology, 377, 124882
- Mourlas A, Pavlidou E., Vourlias G., Rodriguez J., Psyllaki P., 2019b. Concentrated solar energy for in-situ elaboration of wear-resistant composite layers. Part II: Tungsten carbide surface enrichment of common steels. J. Surface & Coatings Technology, 375, 739-751.
- Newcomb, S., 2009. The World in a Crucible: Laboratory Practice and Geological Theory at the Beginning of Geology. The Geological Society of America Inc, Boulder, Colorado.
- O.J. Ojo-Kupoluyi, S.M. Tahir, B.T.H.T. Baharidin, M.A. Azmah Hanim, M.S. Anuar, 2017. Mechanical properties of WC-based hardmetals bonded with iron alloys-A review, Mater. Sci. Tech.-Lond., 33, 507–516.
- Oliveira, Fernando Almeida Costa, Luis Guerra Rosa, Jorge Cruz Fernandes, Jose Rodriguez, Inmaculada Canadas, Teresa Magalhaes, and Nobumitsu Shohoji. 2015. Nitriding VI-Group Metals (Cr, Mo and W) in Stream of NH₃ Gas Under Concentrated Solar Irradiation in a Solar Furnace at PSA (Plataforma Solar de Almería). Solar Energy, 114, 51–60.
- Oliveira, Fernando Almeida Costa, Nobumitsu Shohoji, Jorge Cruz Fernandes, and Luis Guerra Rosa. 2005. Solar Sintering of Cordierite-based Ceramics at Low Temperatures. Solar Energy, 78, 351–361.

- Oliveira, Fernando Almeida Costa, Isabel Figueira Vasques, Jorge Cruz Fernandes, Inmaculada Cañadas, José Rodríguez, Luís Guerra Rosa, and Nobumitsu Shohoji. 2016. Reactions of IVa-group Metals, Ti and Zr, with Uncracked NH₃ Gas at a Temperature in the Range Between 600 and 800°C Under Heating with Concentrated Solar Beam at PSA. *Solar Energy*, 138, 119–127.
- Padilla, Isabel, A. Lopez-Delgado, S. Lopez-Andres, Marta Alvarez, Roberto Galindo, and Alfonso J. Vazquez. 2014. The Application of Thermal Solar Energy to High Temperature Processes: Case Study of the Synthesis of Alumina from Boehmite. *The Scientific World Journal*, 1–8. 2014: Article id 825745.
- Pantelis, D. I., and A. V. Griniari. 2005. Solar Treatment of Pre-Deposited and Atmospheric Plasma Sprayed WC-17% Co Powder on Stainless Steel 304L. *Surface Modification Technologies*, XVIII, 1–10.
- Pantelis D.I, Griniari A, Sarafoglou Ch. 2005. Surface alloying of pre-deposited molybdenum-based powder on 304L stainless steel using concentrated solar energy. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 89, 1-11.
- Pantelis, D. I., P. N. Karakizis, M. E. Kazasidis, D. G. Karalis, and Jose Rodriguez. 2017. Experimental and Numerical Investigation of AA6082-T6 Thin Plates Welding Using Concentrated Solar Energy (CSE). *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 171, 187-196.
- Pantelis, D. I., M. Kazasidis, and P. N. Karakizis. 2017. Titanium Alloys Thin Sheet Welding with the Use of Concentrated Solar Energy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26 (12), 5760–5768.
- Pantelis, D. I., Pandora Psyllaki, and Ch. Sarafoglou. 2002. Surface Alloying on Cast Iron Using Concentrated Solar Energy. *Fonderie-Fondeur d’Aujourd’hui*, 211, 23-33.
- Pantelis, D. I., A. Griniari, and Ch. Sarafoglou. 2005. Surface Alloying of Pre Deposited Molybdenum-Based Powder on 304L Stainless Steel Using Concentrated Solar Energy. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89, 1–11.
- Pantelis D.I, Sarafoglou Ch, Griniari A, Assimidis P. 2002. Tribological behavior of plasma sprayed zirconia on stainless steels with and without solar treatment. *Proc. 3rd Inter. Conf. “The Coatings” in Manufacturing Engineering*, 461-470.

- Pantelis D.I, Psyllaki P, Sarafoglou Ch. 2002. Surface alloying on cast iron using concentrated solar energy. *Fonderie–Fondeur d’ Aujourd’hui*, 211, 23-33.
- Παντελής Δ., Παπάζογλου Β., Χαϊδεμενόπουλος Γ., 2017. Επιστήμη και τεχνολογία των συγκολλήσεων. Εκδ. Τζιόλα.
- P.F. Mendez, N. Barnes, K. Bell, S.D. Borle, S.S. Gajapathi, S.D. Guest, H. Izadi, A. Kamyabi Gol, G. Wood, 2014. Welding processes for wear resistant overlayers. *J. Manuf. Process.*, 16, 4-25.
- P. Gustafson, 1987, A thermodynamic evaluation of the C-Fe-W system, *Metall. Trans. A.*, 18, 175–188.
- Plaza, Diego Martinez, Inmaculada Cãnadas Martinez, Gustavo Mallol Gasch, Félix Téllez Sufrategui, and José Rodríguez García. 2015. A Case Study of the Feasibility of Using Solar Concentrating Technologies for Manufacturing Ceramics. *Journal of Cleaner Production*, 87, 977–991.
- Q. Gao, Y. Zhang, H. Zhang, H. Li, F. Qu, J. Han, C. Lu, B. Wu, Y. Lu, Y. Ma, 2017. Precipitates and particles coarsening of 9Cr-1.7W-0.4Mo-Co ferritic heat-resistant steel after isothermal aging, *Sci. Rep. – UK* 7, 5859.
- Q. Li, 2006. Precipitation of Fe₂W Laves phase and modelling of its direct influence on the strength of a 12Cr-2W steel, *Metall. Trans. A.*, 37, 89–97.
- Q. Sun, J. Wang, H.B. Li, Y. Li, Y.D. Hu, J.G. Bai, P.G. Han, Chi 2016. Phase after shortterm aging and corrosion behavior in 2205 duplex stainless steel, *J. Iron Steel Res. Int.*, 23, 1071–1079.
- Revuelta-Acosta, J.D., García-Díaz, A., Soto-Zarazua, G.M., Rico-García, E., 2010. Adobe as sustainable material: A thermal performance. *J. Appl. Sci.* 10 (19), 2211–2216.
- Rodriguez, Jose, Inmaculada Canadas, and Eduardo Zarza. 2013. PSA Vertical Axis Solar Furnace SF5. *Energy Procedia*, 49, 1511–1522.
- Rodriguez, Jose, Inmaculada Canadas, and Eduardo Zarza. 2016. New PSA High Concentration Solar Furnace SF40. *AIP Conference Proceedings*, 1734. 070028.
- Rodriguez, G. P., J. J. de Damborenea, and Alfonso J. Vazquez. 1997. Surface Hardening of Steel in a Solar Furnace. *Surface & Coatings Technology*, 92, 165–170.

- Rodriguez, G. P., I. Garcia, and Alfonso J. Vazquez. 1999. Coating Processing by Self-propagating High-temperature Synthesis (SHS) Using a Fresnel Lens. *Journal of Physics*, 9, 411–416.
- Rodriguez, G. P., Gemma Herranz, and A. Romero. 2013. Solar Gas Nitriding of Ti6Al4V Alloy. *Applied Surface Science*, 283, 445–452.
- Rodriguez, G. P., V. Lopez, J. J. de Damborenea, and Alfonso J. Vazquez. 1995. Surface Transformation Hardening on Steels Treated with Solar Energy in Central Tower and Heliostats Field. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 37, 1–12.
- Rodriguez, G. P., A. J. Vazquez, and J. J. de Damborenea. 1993. Steel Hardening with High-Energy Density Beams in Solar Facilities. *Materials and Design*, 14(3), 169–174.
- Rodríguez, M.A., Soroza, B., 2006. Determination of the optimum composition of adobe brick for a school in Cuba. *Materiales de Construcción*, 56 (282), 53–62.
- Rojas-Morin, A., Y. Flores-Salgado, A. Barba-Pingarron, R. Valdez-Navarro, F. Mendez, O. Alvarez-Brito, and M. Salgado-Baltazar. 2013. Thermal Analysis for the Solar Concentrating Energy and Induction Heating for Metals. *COMSOL Conference*, 1–16.
- Roman, R., Inmaculada Canadas, Jose Rodriguez, M. T. Hernandez, and M. Gonzalez. 2008. Solar Sintering of Alumina Ceramics: Microstructural Development. *Solar Energy*, 82, 893–902.
- Romero, A., I. Garcia, M. A. Arenas, V. Lopez, and Alfonso J. Vazquez. 2013. High Melting Point Metals Welding by Concentrated Solar Energy. *Solar Energy*, 95, 131–143.
- Romero, A., I. Garcia, M. A. Arenas, V. Lopez, and Alfonso J. Vazquez. 2015. Ti6Al4V Titanium Alloy Welded Using Concentrated Solar Energy. *Journal of Materials Processing Technology*, 223, 284–291.
- Rossi, C., 2010. Archimedes' cannons against the roman fleet?, *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 (editors Stephanos A. Paipetis, Marco Ceccarelli), London: Springer, 113–132.

- Ruiz-Bustinza, I., Inmaculada Canadas, Jose Rodriguez, Luis Felipe Verdeja, Fernando Garcia-Carcedo, and Alfonso J. Vazquez. 2013. Magnetite Production from Steel Wastes with Concentrated Solar Energy. *Steel Research International*, 84, 207–217.
- Sanchez Bautista, C., A. Ferriere, G. P. Rodriguez, M. López-Almodovar, A. Barba, Cristina Sierra, and Alfonso J. Vazquez. 2006. NiAl Intermetallic Coatings Elaborated by a Solar Assisted SHS Process. *Intermetallics*, 14, 1270–1275.
- Sanchez Bautista, C., G. P. Rodriguez, and A. Ferriere. 2008. Numerical Modelling of the Solar Cladding Process. *Surface and Coatings Technology*, 202, 1594–1605.
- Sanchez Olias, J., I. Garcia, and Alfonso J. Vazquez. 1999. Synthesis of TiN with Solar Energy Concentrated by a Fresnel Lens. *Materials Letters*, 38, 379–385.
- Sierra, Cristina, and Alfonso J. Vazquez. 2005. High Solar Energy Concentration with a Fresnel Lens. *Journal of Materials Science*, 40, 1339–1343.
- Siores, E. 1997. Thermoplastic Joining Using Solar Energy Concentrator. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37 (9), 1273–1279.
- Sonawane, Pushkaraj D, and V. K. Bupesh Raja. 2017. An Overview of Concentrated Solar Energy and Its Applications. *International Journal of Ambient Energy*, 4, 1–6.
- Sonawane, Pushkaraj D, and V. K. Bupesh Raja. 2020. Concentrated Solar Energy in materials processing. *International Journal of Ambient Energy*, 41:10, 1201–207.
- Stoynov, L. A., and Prasad K D V Yarlagadda. 2003. Joining of Engineering Thermoplastics by Concentrated Beam Insolation-A Feasibility Study. *Journal of Materials Processing Technology*, 138, 67–74.
- Tetsuo, N., Masao, M., and Choji, N., 1957. High temperature research in a solar furnace. I. On the fusion of metal oxides, *Bulletin of Reports of the Government Research Institute of Nagoya*, 6 (11), 663-672.
- Tetsuo, N., Masao, M., and Choji, N., 1959. High temperature research in a solar furnace. II. On the fusion of metal oxides, *Bulletin of Reports of the Government Research Institute of Nagoya*, 8 (1), 61–67.
- T.J.B. Alves, G.C.S. Nunes, L.F.S. Tupan, P.W.C. Sarvezuk, F.F. Ivashita, C.A.S. de Oliveira, A. Paesano Jr., 2018. Aging-induced transformations of maraging-400 alloys. *Metall. Trans. A*. 49, 3441–3449.

- T. Sakthivel, S. Panner Selvi, P. Parameswaran, K. Laha, 2018. Influence of thermal ageing on microstructure and tensile properties of P92 steel, *High Temp. Mater. Proc.*, 37, 425–435.
- Van den Abeelen, L., 2017. *Spaceplane HERMES: Europe's Dream of Independent Manned Spaceflight*, 1st edition. Springer Praxis Books, Hilversum, The Netherlands.
- Venn, F., 2002. *The Oil Crisis*, New York, NY: Ed. Taylor and Francis.
- Vazquez, A. J., G. P. Rodriguez, and J. J. de Damborenea. 1991. Surface Treatment of Steels by Solar Energy. *Solar Energy Materials*, 24, 751–759.
- Zhilinska, N., I. Zalite, Jose Rodriguez, and Inmaculada Canadas. 2003. Sintering of Nanodisperse Powders in a Solar Furnace. *Euro PM*, 423–428.
- Z. Li, P. Wang, Q. Shan, Y. Jiang, H. Wei, J. Tan, 2018. The particles shape of WC governing the fracture mechanism of particle reinforced iron matrix composites, *Materials*, 11, 984.
- Z. Liu, Z. Liu, X. Wang, Z. Chen, L. Ma, 2018. Evolution of the microstructure in aged G115 steels with different concentration of tungsten, *Mat. Sci. Eng. A–Struct.*, 729, 161–169.