



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διδακτορική διατριβή

---

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΣΕΩΝ  
ΣΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ  
ΜΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

ANNA B. ΓΚΡΙΝΙΑΡΗ

*Διπλ. Χημικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.*

Επιβλέπων

Δημήτριος Ι. Παντελής, Καθηγητής ΕΜΠ

*Αθήνα, 2015*





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

*ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ*

*ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΣΕΩΝ  
ΣΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ  
ΜΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ*

*ANNA B. ΓΚΡΙΝΙΑΡΗ  
Διπλ. Χημικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.*

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Δ. Ι. Παντελής, Καθ. Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, *Επιβλέπων*  
Δ. Μανωλάκος, Καθ. Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ  
Ν. Τσούβαλης, Καθ. Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

**ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Δ. Ι. Παντελής, Καθ. Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ  
Δ. Μανωλάκος, Καθ. Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ  
Ν. Τσούβαλης, Καθ. Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ  
Κ. Χαριτίδης, Καθ. Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ  
Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Καθ. Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ  
Κ. Κόλλια, Καθ. Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ  
Ε. Παυλάτου, Αναπλ. Καθ. Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ

*Με την ολοκλήρωση της διατριβής,  
Θα ήθελα να ευχαριστήσω,  
όλους τους συναδέλφους, με τους οποίους  
κατά καιρούς συνεργάστηκα,  
και ξεχωριστά και ιδιαίτερω, την Χαρά.  
Τους Καθηγητές, κκ Ν. Τσούβαλη και Δ.Μανωλάκο,  
οι οποίοι στην τελευταία φάση,  
της συγγραφής της διατριβής,  
συνέβαλαν με τις παρατηρήσεις  
και συμβουλές τους.  
Τέλος,  
ευχαριστώ τον Καθηγητή μου, κ.Δημ Παντελή, για  
τη γνώση, την επιστημοσύνη, το ήθος,  
και για την πίεση, την επιμονή  
& την υπομονή.*

*Εκτός ΕΜΠ,  
ευχαριστώ για την υποστήριξη  
τη μαμά, τον μπαμπά και τον σύζυγο Γιάννη.*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

*Στην παρούσα διατριβή μελετάται η δυνατότητα επιτυχούς χρήσης της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας (ΣΗΕ) στην επιφανειακή κατεργασία σιδηρούχων κραμάτων, κυρίως χαλύβων. Σε μία πρώτη προσέγγιση φαίνεται ότι τα ηλιακά συστήματα συγκέντρωσης προσφέρουν μερικές μοναδικές ευκαιρίες για μετασχηματισμό υψηλής θερμοκρασίας, αλλά και για σύνθεση υλικών τόσο από άποψη τεχνική όσο και οικονομική.*

*Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, μελετήθηκε η τήξη προαποτιθέμενων κόνεων σε υποστρώματα χάλυβα με στόχο τη δημιουργία κραμάτωσης με ποιοτικά μορφολογικά χαρακτηριστικά της μικροδομής, καλή συνάφεια με το υπόστρωμα, αλλά και αξιόλογη τριβολογική συμπεριφορά και αντίσταση στη φθορά.*

*Επίσης, η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιήθηκε και στη μετα-κατεργασία ανάτηξης υφιστάμενων επιστρώσεων, οι οποίες είχαν δημιουργηθεί με άλλες τεχνικές, προκειμένου οι επιστρώσεις αυτές να βελτιωθούν ως προς τα κύρια χαρακτηριστικά τους : πρόσφυση, μορφολογία, μικροσκληρότητα, χημική σύσταση, καθώς και τριβή/αντοχή στη φθορά.*

*Όσον αφορά στα υλικά που επιλέχθηκαν ως υποστρώματα, αλλά και τα διαφορετικά είδη των κόνεων που επιλέχθηκαν για τη δημιουργία των επιστρώσεων, πρόκειται για υλικά και συνδυασμούς αυτών με ευρύτατες εφαρμογές σε πολλούς διαφορετικούς τομείς της σύγχρονης βιομηχανίας. Ως εκ τούτου, πρόκειται για υλικά συχνά εμφανιζόμενα σε μεγάλο αριθμό αντίστοιχων βιβλιογραφικών αναφορών, στα πλαίσια της σύγχρονης έρευνας στο πεδίο της δημιουργίας των επιφανειακών επιστρώσεων.*

*Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η τήξη κάθε μίας από τις σκόνες*

*A. Κεραμική SiC*

*B. Μεταλλική Mo*

*Γ. Κεραμομεταλλική WC-17%Co*

*σε κάθε ένα από τα χαλύβδινα υποστρώματα*

*Ανοξειδωτου χάλυβα SS304L*

*Κατασκευαστικού St52.3*

*Κατασκευαστικού Ck60*

*Η ενδελεχής εξέταση των διαμορφούμενων ζωνών κραμάτωσης έδειξε ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η ηλιακή κατεργασία κατέληξε σε :*

*- μεγάλου βάθους ζώνες κραμάτωσης σε εξαιρετική συνάφεια με το υπόστρωμα*

*- διαλυτοποίηση των προαποτιθέμενων κόνεων ή των υφιστάμενων επιστρώσεων και διαμόρφωση ομοιόμορφων δομών, χωρίς ρωγμές, ή αξιόλογο πορώδες ή / και άλλες ασυνέχειες.*

*- η μικροσκληρότητα σε όλες τις περιπτώσεις αυξήθηκε κατ' ελάχιστο 100%, ενώ για την περίπτωση της κεραμομεταλλικής επιστρώσεως, αυτό επετεύχθη με σύγχρονη αύξηση της δυσθραυστότητας δεδομένης της ύπαρξης σημαντικών συγκεντρώσεων κοβαλτίου (Co) στη μήτρα.*

*- η αντοχή στην τριβή και τη φθορά είναι σε όλες τις περιπτώσεις αναβαθμισμένη και ενισχυμένη*

*- η διάσταση της διατομής της δέσμης ενέργειας που παράγουν τα ηλιακά συστήματα συγκέντρωσης είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις διαστάσεις των υπό κατεργασία δοκιμίων, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα*

να θεωρηθεί, με μεγάλη ακρίβεια ότι το θερμικό φορτίο με το οποίο πραγματοποιείται η κατεργασία, είναι σταθερό και εφαρμόζεται προς μία μόνο διάσταση. Αυτό καθιστά την ηλιακή κατεργασία ελέγξιμη, για στοιχειωδώς σταθερές καιρικές συνθήκες, επαναλήψιμη και τελικά βελτιστοποιήσιμη.

- Επιπλέον, τα αποτελέσματα της αριθμητικής μοντελοποίησης με το λογισμικό COMSOL Multiphysics 5.0 πιστοποίησαν τα προαναφερθέντα αποτελέσματα. Το μοντέλο αυτό αποτελεί μία σημαντική βάση για το σχεδιασμό προσομοιωμένων βέλτιστων ηλιακών κατεργασιών για οποιοδήποτε συνδυασμό υλικών και γεωμετρίας.

Όσον αφορά στην καινοτομία που εισάγεται με την ολοκλήρωση της διατριβής, αυτή είναι αυταπόδεικτη δεδομένου ότι η εφαρμογή της Σ.Η.Ε. ως πηγή υψηλής πυκνότητας ενέργειας για την εκπόνηση των πειραμάτων της παρούσας Θέσης, είναι μοναδική και πρωτοπόρα στο πεδίο της δημιουργίας κραματώσεων σε χάλυβες, ειδικότερα για τους συγκεκριμένους συνδυασμούς υλικών. Επιπλέον, όλα τα διαφορετικά επίπεδα και είδη εξέτασης και δοκιμών των λαμβανομένων κραματώσεων, σε συνδυασμό με την τεκμηρίωση και πιστοποίησή τους μέσω της προσομοίωσης της ηλιακής κατεργασίας με την ανάπτυξη αριθμητικού εξειδικευμένου θερμικού μοντέλου, δεν έχει αναφερθεί στο παρελθόν.

## THE ABSTRACT

*Within the present thesis, the investigation is to examine and analyze the possibility of successful use of Concentrated Solar Energy (CSE) in the surface modification of materials and more specifically, in the formation of alloying on the surface of different steels. The sun concentrating systems, i.e. solar furnaces, seem to offer unique opportunities for high temperature transformations, as well as, materials synthesis, as far as technical and economical perspectives are concerned.*

*In more specific, within present work, the concentrated solar energy was applied to the melting of pre-deposited powders and existent coatings on different steel substrates, aiming at the formation of alloying with qualitative microstructural characteristics, well adhered to the substrate, which will perform good friction behavior and wear resistance. The post treatment of already formed (by other techniques) coatings, which was also conducted, by melting them with concentrated solar energy aimed at the improvement of these coatings basic characteristics : adhesion to the substrate, elimination of morphological distortions, increased micro-hardness, homogeneous chemical composition, and finally, improved resistance to friction and wear.*

*All the materials examined within this work, as substrates and powders in pre-deposition, and all their combinations, were chosen based on the fact that they are widely applied in many different fields in the industry; therefore, they are very often referred to the most recent literature of the formation of surface alloying.*

*In more specific each one of the following three different types of powders: the ceramic SiC, the cermet WC-17Co and the metallic Molybdenum based, "Amperit" is pre-deposited on each one of the*



*following steels: common steels St52.3, Ck60 and stainless steel 304L and treated with Concentrated Solar Energy.*

*Thorough examination of the treated zones obtained, showed that in almost all of the cases, the solar treatment resulted in:*

- deep alloyed zones well adhered to the substrate*
- increased grade of dilution of the powders or existent coatings, with no presence of cracks or worth mentioned pores or other discontinuities*
- the hardness is in every case at the very least 100% increased, compared to the substrate, whereas toughness of the alloyed zones is also achieved, in specific cases*
- friction and wear behavior are in all cases advanced and enhanced*
- the type of installations employed, along with the study of the influences of the experimental parameters' deviation on the quality of the final product, make the solar treatment controllable and therefore repeatable, and followingly able to be optimized*
- To end with, an arithmetic model is built by means of COMSOL Multiphysics software 5.0, in order to simulate the solar process and to reproduce the temperature field developed. The results are in good agreement to the experimentals. This model can be consider as the first step for the design of simulation of optimum solar treatments of any different combination of material and geometry.*

*As for the innovation that is being introduced with the fulfillment of this thesis, it is self-evident that the energy source, the CSE, employed for conducting all the experimental work, is unique and pioneering to the field of surface treatments and in specific, the testing of all the*

*substrates, pre-deposited powders and other coatings, used here. Moreover, the different aspects and the depth of the subsequent examination of the solar treated samples, along with the following modeling of the melting of the powder or/and the existent coating have not been referenced before, according to my research results.*

|  |                  |
|--|------------------|
| <i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΟΥ.....</i>   | <i>1</i>         |
| <i>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΑ .....</i>   | <i>7</i>         |
| <i>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ.....</i>   | <i>13</i>        |
| <b><i>A. ΜΕΡΟΣ : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</i></b>   |                  |
| <b><i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ I ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....</i></b>                                  | <b><i>15</i></b> |
| <i>I.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΙΟ</i>   |                  |
| <i>I.2 ΗΛΙΑΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ</i>   |                  |
| <i>I.2.1 Ιστορική Αναδρομή</i>   |                  |
| <i>I.2.2 Συγκέντρωση Ηλιακής Ακτινοβολίας</i>  |                  |
| <i>I.2.3 Εγκαταστάσεις Συγκέντρωσης Ηλιακής Ακτινοβολίας</i>                                 |                  |
| <i>I.2.3.1 Σχεδιασμός εγκαταστάσεων για τη συγκέντρωση ηλιακής ενέργειας</i>                 |                  |
| <i>I.2.3.1.1 Σφαιρικό κάτοπτρο</i>   |                  |
| <i>I.2.3.1.2 Ημισφαιρικό κοίλο κάτοπτρο</i>  |                  |
| <i>I.2.3.1.3 Δύο σταδίων ηλιοστάτης - συγκεντρωτής</i>                                       |                  |
| <i>I.2.3.1.4 Συγκεντρωτές/ηλιοστάτες και πύργος</i>  |                  |
| <i>I.2.3.1.5 Πύργος ακτίνας προ τα κάτω</i>  |                  |
| <i>I.2.3.1.6 Σύστημα Παραβολικών κοίλων</i>  |                  |
| <i>I.3 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ Σ.Η.Ε.</i>  |                  |
| <i>I.3.1 Οικονομικά Στοιχεία Συστημάτων ΣΗΕ</i>  |                  |
| <i>I.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</i>  |                  |
| <b><i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ II : ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ.....</i></b>                                     | <b><i>41</i></b> |
| <i>II.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ</i>   |                  |
| <i>II.1.1 Τριβολογικές Ιδιότητες</i>   |                  |
| <i>II.1.2 Ο ρόλος της επιφάνειας στη διαδικασία της τριβής</i>                               |                  |
| <i>II.1.3 Θερμικές Επιδράσεις της Τριβής</i>   |                  |
| <i>II.1.4 Τριβολογική Φθορά</i>  |                  |
| <i>II.2 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ : ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗΣ ΦΘΟΡΑΣ</i> |                  |

*II.3 Η ΛΥΣΗ : ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ & ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ*

*II.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ*

*II.4.1 Κρίσιμοι Παράγοντες*

*II.4.2 Σημαντικές παράμετροι σχεδιασμού επιστρώσεων*

*II.4.3 Σημαντικότερες Τεχνικές Δημιουργίας Τεχνολογικών Επιστρώσεων*

*II.4.4 Σύγχρονες Προοπτικές στη Δημιουργία Τεχνολογικών Επιστρώσεων*

*II.4.4.1 Επιστρώματα του μέλλοντος*

*II.4.4.2 Υβριδικές Μέθοδοι Δημιουργίας Επιστρώσεων*

*II.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ*

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ III : ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (Σ.Η.Ε.)..... 77**

*III.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ*

*III.2 Σκλήρυνση μέσω μαρτενιστικού μετασχηματισμού (ΣΜΜΜ)*

*III.3. Μετα-κατεργασία (Ανάτηξη) προαποτιθέμενης επίστρωσης*

*III.3. 1 Λεπτά στρώματα που παράγονται με μεθόδους PVD*

*III.3.2 Λεπτά στρώματα που παράγονται με μεθόδους CVD*

*III.4 Τήξη Προαποτιθέμενης σκόνης*

*III.5 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ*

*III.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ*

**Β.ΜΕΡΟΣ : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV : ΥΛΙΚΑ & ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ .. .....97**

*IV.1 ΥΛΙΚΑ*

*IV.1.1 Υποστρώματα*

*IV.1.1.1 Ανοξειδωτος χάλυβας SS304L*

*IV.1.1.2 Χάλυβας ST52-3 (Mat.No. 1.0570, DIN St52-3N)*

*IV.1.1.3. Χάλυβας Ck60*

*IV.1.2 Σκόνες*

*IV.1.2.1 Κεραμική Σκόνη Καρβιδίου του Πυριτίου (SiC)*

*IV.1.2.2 Κεραμομεταλλική σκόνη καρβιδίου του βολφραμίου (WC) με 17% Κοβάλτιο (Co)*

*IV.1.2.3 Μεταλλική σκόνη βάσης Μολυβδιανίου (75 Mo/25NiCrBSiFe, AMPERIT 119.075)*

*IV.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ Σ.Η.Ε*

*IV.2.1 SOLAR FURNACE / Plataforma Solar d' Almeria*

*IV.2.1.1 Εξοπλισμός και τρόπος λειτουργίας*

*IV.2.1.2 Η πειραματική διαδικασία*

*IV.2.2 FOUR SOLAIRE ODEILLO / 2kW SOLAR FURNACE*

*IV.2.2.2 Η πειραματική διαδικασία*

*IV.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ*

*IV.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ*

***ΚΕΦΑΛΑΙΟ V : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ ΜΕ Σ.Η.Ε .....123***

*V.1 ΤΗΞΗ ΣΚΟΝΗΣ ΣΕ ΠΡΟΑΠΟΘΕΣΗ*

*V.1.1. Κεραμική Σκόνη Καρβιδίου του Πυριτίου (SiC)*

*V.1.1.1 Υπόστρωμα Χάλυβα St52.3*

*V.1.1.2 Υπόστρωμα Χάλυβα Ck60*

*V.1.1.3 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ*

*V.1.2 Μεταλλική σκόνη βάσης μολυβδαινίου ( AMPERIT 119.075/ 75 Mo - 25NiCrBSiFe )*

*V.1.2.1. Υπόστρωμα St52.3*

*V.1.2.2. Υπόστρωμα Ανοξείδωτου χάλυβα SS304L*

*V.1.2.3 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΣΚΟΝΗΣ ΒΑΣΗΣ Mo*

*V.1.3. Κεραμομεταλλική σκόνη καρβιδίου του βολφραμίου (WC) με 17% Κοβάλτιο (Co)*

*V.1.3.1 Υπόστρωμα χάλυβα St52.3*

V.1.3.2 Υπόστρωμα Χαλύβα Ck60

V.1.3.3 Υπόστρωμα ανοξείδωτου χάλυβα SS304L

V.1.3.4 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ  
ΚΕΡΑΜΟΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΣΚΟΝΗΣ

V.1.4 ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΟΝΕΩΝ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ

V.2 ΑΝΑΘΕΣΗ ΜΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (Σ.Η.Ε.)  
ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ APS ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ

V.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI : ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ & ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ  
ΑΛΛΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ .....201**

VI.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

VI.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΠΡΟΑΠΟΘΕΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ

VI.3 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΣΤΙΣ  
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

VI. 4 ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ

VI.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΗΛΙΑΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ,  
LASER & APS

VI.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ VII : ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....225**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ VIII : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....247**

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ

Στην παρούσα διατριβή μελετάται η δυνατότητα επιτυχούς χρήσης της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας (ΣΗΕ) στην επιφανειακή κατεργασία σιδηρούχων κραμάτων, κυρίως χαλύβων. Είναι γνωστό, τα τελευταία πενήντα και πλέον χρόνια, ότι η χρήση Δεσμών Υψηλής Πυκνότητας Ενέργειας (ΔΥΠΕ) επέδρασαν καταλυτικά στην εξέλιξη της μηχανικής των επιφανειών. Όταν υψηλής πυκνότητας ενέργεια ή υψηλή θερμοκρασία και καθαρότητα απαιτείται, τα συμβατικά συστήματα καύσης δεν είναι ικανά να ανταποκριθούν σε τέτοιες πολύπλοκες προδιαγραφές, και έτσι, περισσότερο εξειδικευμένες πηγές ενέργειας αναζητούνται. Οι δυνατότητες χρήσης αυτών των πηγών είναι άφθονες, μια και η εφαρμογή τους, μειώνει τους κινδύνους εμφάνισης παραμορφώσεων και επιτρέπει υψηλή παραγωγικότητα και μεγάλη ευελιξία. Η συντομία (βραχύτητα) των θερμικών κύκλων, που οφείλεται στην εξαιρετικά υψηλή ισχύ, επιτρέπει τη λήψη πρωτότυπων και νέων δομών, που είναι δύσκολο να ληφθούν με άλλα μέσα. Έτσι, η απευθείας κατεργασία της επιφάνειας των υλικών με δέσμες ενέργειας όπως δέσμες ιόντων, ηλεκτρονίων, plasma, laser και δυνητικά η Σ.Η.Ε. είναι πολλά υποσχόμενες για το μέλλον των επιφανειακών κατεργασιών. Αυτές οι τεχνικές, ενώ παρουσιάζουν σημαντικές και πολλαπλές δυνατότητες έχουν ένα σημαντικό μειονέκτημα : χαμηλή συνολική απόδοση. Αν και η πυκνότητα ενέργειας του laser είναι ως και τέσσερις (4) τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας οι Flamant et al. (1999) μετά από συγκριτική αξιολόγηση στα κεφαλαιακά κόστη και ενεργειακές αποδόσεις και των τριών τεχνικών απέδειξε ότι τα ηλιακά συστήματα παρέχουν μοναδικές δυνατότητες για υψηλής θερμοκρασίας μετασχηματισμούς και σύνθεση υλικών τόσο από τεχνική, όσο και από οικονομική άποψη. Θα πρέπει να τονιστεί, ότι η χρήση της Σ.Η.Ε. μπορεί να μειώσει το κόστος των πειραμάτων υψηλής θερμοκρασίας και αυτό σε συνδυασμό με το μεγάλο φάσμα επιφανειακών μετασχηματισμών που μπορούν να υλοποιηθούν σε εγκαταστάσεις συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας, δίνει σημαντικά πλεονεκτήματα στη χρήση αυτής της τεχνικής. Ένα επίσης αδιαμφισβήτητο πλεονέκτημα στη χρήση της ΣΗΕ είναι η αυξανόμενη απαίτηση για χρήση ανανεώσιμων καθαρών μορφών ενέργειας. Οι ηλιακοί φούρνοι ειδικότερα, αποτελούν εξαιρετικά ερευνητικά εργαλεία για προσφορά στην εξέλιξη της έρευνας σχετικά με τους μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα στις διεργασίες που πραγματοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες σε συνθήκες μη ισορροπίας. Εάν η συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας γίνεται με χρήση φακού Fresnel –τάση η οποία κυριαρχεί όλο και περισσότερο- τότε τα πλεονεκτήματα

πληθαίνουν: περαιτέρω μείωση του κόστους εγκατάστασης, τροποποιήσεις και προσαρμογές μπορούν να γίνουν ευκολότερα.

Ειδικότερα, τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η δέσμη ΣΗΕ είναι :

- Η ακτινοβολία παρέχεται σε μεγάλο εύρος φάσμα, όπου τα περισσότερα υλικά απορροφούν ικανοποιητικά χωρίς ειδικά επιστρώματα. Οι υψηλές θερμοκρασιακές βαθμίδες είναι εφικτές.
- Επειδή η ακτίνα φτάνει στο στόχο χωρίς προγενέστερες διαδικασίες μετατροπής, υπάρχουν λίγα απόβλητα, η αποδοτικότητα είναι υψηλή, και δεν υπάρχει συνήθως καμία απαίτηση για βοηθητική ψύξη.
- Είναι επίσης εύκολο να διαμορφωθεί το σχήμα της ακτίνας και να ελεγχθεί ο παλμός στο μέγιστο σημείο συγκέντρωσης
- Υπάρχει ελάχιστη περιβαλλοντική επίδραση στη χρησιμοποίηση αυτής της τεχνολογίας.

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας για τις βιομηχανικές εφαρμογές υφίσταται ένα σημαντικό μειονέκτημα: τη διαλείπουσα φύση της. Πρέπει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τον Gineste (Gineste et al. 1999) στο Odeillo η μέγιστη τιμή της άμεσης κανονικής ακτινοβολίας είναι  $1100 \text{ W.m}^{-2}$  και υπερβαίνει τα  $700 \text{ W.m}^{-2}$  κατά τη διάρκεια 1600 ωρών ετησίως, ενώ τα  $1000 \text{ W.m}^{-2}$  κατά τη διάρκεια μόνο 200 ωρών ετησίως. Στην Ciudad Real, Spain, στο γεωγραφικό πλάτος  $38^\circ$ , η διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας που αναφέρεται από το Ισπανικό “Instituto Nacional de Meteorologia” (Font Tullot, 1984), είναι 11% υψηλότερη από το Odeillo. Άμεση ηλιακή ακτινοβολία που μετρήθηκε με ένα πυριοηλιόμετρο μεταξύ 19 Ιουνίου και 31 Αυγούστου, 2009, στο ETSII-UCLM (Ciudad Real, Spain) καταχώρησε τιμές υψηλότερες από  $950 \text{ W.m}^{-2}$  για 20% των ημερών και υψηλότερες από  $800 \text{ W.m}^{-2}$  για το 97% όλων των ημερών. Η μέγιστη τιμή που επετεύχθη σε αυτήν την περίοδο ήταν  $976 \text{ W.cm}^{-2}$ . Συνεπώς, χρειάζεται πολύ καλός προγραμματισμός για χρήση της τεχνικής κατά τη διάρκεια των κατάλληλων περιόδων, ή/και χρησιμοποίηση της στα πλαίσια μιας υβριδικής λειτουργίας.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η χρήση αυτής της ενέργειας μπορεί να μειώσει τα κόστη των πειραμάτων υψηλής θερμοκρασίας. Συνδυασμένο δε αυτό με το ευρύ φάσμα των επιφανειακών μετασχηματισμών που μπορούν να λάβουν χώρα στις ηλιακές εγκαταστάσεις, υπάρχουν πολυάριθμα άλλα προτερήματα για να



χρησιμοποιήσει κανείς αυτή τη μορφή ενέργειας. Η ολοένα αυξανόμενη τάση για χρήση ανανεώσιμων και καθαρών μορφών ενέργειας, ο οποίες δεν συμβάλλουν στην περιβαλλοντική επιβάρυνση, είναι ένα βασικό επιχείρημα. Οι ηλιακοί φούρνοι είναι επίσης άριστα ερευνητικά εργαλεία για την επιστημονική γνώση για τους μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα στις διαδικασίες που παράγονται στις υψηλές θερμοκρασίες σε συνθήκες μη ισορροπίας. Εάν, επιπλέον, η ηλιακή συγκέντρωση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας έναν φακό Fresnel, αρκετοί άλλοι θετικοί παράγοντες εμπλέκονται: οι δαπάνες εγκατάστασης χαμηλώνουν, οι ρυθμίσεις και οι τροποποιήσεις είναι εύκολο να πραγματοποιηθούν, οι γενικές δαπάνες διατηρούνται χαμηλές και η υποδομή είναι εύκολο να υλοποιηθεί, η οποία καθιστά τη χρήση αυτού του είδους φακού ιδιαίτερα ελκυστική, λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές βιομηχανικές απαιτήσεις.

Διάφοροι ερευνητές τα τελευταία 20 χρόνια, προτείνουν διάφορα πεδία έρευνας και ανάπτυξης που αφορούν στη χρήση Σ.Η.Ε. και περιλαμβάνουν ταχεία θερμική κατεργασία κεραμικών υλικών, ανακρυστάλλωση στη ζώνη τήξης κτλ. Μία σύντομη ανασκόπηση δείχνει ότι ένα σημαντικό πειραματικό έργο έχει υλοποιηθεί στο οποίο θα πρέπει να βασιστεί η περαιτέρω χρήση της Σ.Η.Ε. στην κατεργασία υλικών (ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ).

Δεδομένων όλων αυτών, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, μελετήθηκε η τήξη προαποτιθέμενων κόκκων σε υποστρώματα χάλυβα με στόχο τη δημιουργία κραμάτωσης με ποιοτικά μορφολογικά χαρακτηριστικά της μικροδομής, καλή συνάφεια με το υπόστρωμα, αλλά και αξιόλογη τριβολογική συμπεριφορά και αντίσταση στη φθορά. Επίσης, η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιήθηκε και στη μετα-κατεργασία ανάτηξης υφιστάμενων επιστρώσεων, οι οποίες είχαν δημιουργηθεί με άλλες τεχνικές, προκειμένου οι επιστρώσεις αυτές να βελτιωθούν ως προς τα κύρια χαρακτηριστικά τους : πρόσφυσης, μορφολογίας, μικροσκληρότητας, χημικής σύστασης και τριβής/αντοχής στη φθορά (ΚΕΦΑΛΑΙΟ V).

Όσον αφορά στα υλικά που επιλέχθηκαν ως υποστρώματα, αλλά και τα διαφορετικά είδη των κόκκων που επιλέχθηκαν για τη δημιουργία των επιστρώσεων, πρόκειται για υλικά και συνδυασμούς αυτών με ευρύτατες εφαρμογές σε πολλούς διαφορετικούς τομείς της σύγχρονης βιομηχανίας. Ως εκ τούτου, πρόκειται για υλικά συχνά εμφανιζόμενα σε μεγάλο αριθμό αντίστοιχων βιβλιογραφικών αναφορών,

στα πλαίσια της σύγχρονης έρευνας στο πεδίο της δημιουργίας των επιφανειακών επιστρώσεων (ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV).

Όσον αφορά στην πειραματική διαδικασία της κατεργασίας με Σ.Η.Ε., από όλες τις διατάξεις συγκέντρωσης της ηλιακής ενέργειας, η διάταξη που ενδείκνυται για τις επιφανειακές κατεργασίες δοκιμών μικρών διαστάσεων, λόγω της δυνατότητας επίτευξης δέσμης ενέργειας μικρής διαμέτρου και υψηλής πυκνότητας, καθώς και εύκολου ελέγχου τόσο του ρυθμού παροχής ενέργειας, όσο και του χρόνου κατεργασίας, είναι ο ηλιακός φούρνος. Ειδικότερα, σε όλες τις πειραματικές δοκιμές της παρούσας διατριβής, χρησιμοποιήθηκαν οι εγκαταστάσεις δύο ηλιακών φούρνων : αυτού της *Plataforma Solar d' Almeria* στην Αλμερία στην Ν.Ισπανία, ισχύος 54kW, με πυκνότητα ενέργειας 3000kW/m<sup>2</sup> και εκείνου στις εγκαταστάσεις του Four Solaire στο Odeillo στην Ν.Γαλλία, ισχύος 2kW, με πυκνότητα ενέργειας 14000 Kw/m<sup>2</sup> (ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV).

Οι πειραματικές συνθήκες της κατεργασίας με Σ.Η.Ε. καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από την ισχύουσα -τη στιγμή του πειράματος- τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας (*insolation, W/m<sup>2</sup>*) η οποία κυμαίνεται ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες. Βάσει λοιπόν της εκάστοτε τιμής της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, σε συνδυασμό με το πάχος των δοκιμών και των τιμών των θερμικών παραμέτρων της προαποτιθέμενης σκόνης και του υποστρώματος, κυμαίνεται και ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας μέχρι τη μέγιστη τιμή. Στη συνέχεια ο χρόνος παραμονής στη θερμοκρασία αυτή, και άρα, και ο συνολικός χρόνος κατεργασίας, καθορίζεται από τις μεταβολές που παρατηρούνται οπτικά -μέσω ειδικής κάμερας- κατά τη διάρκεια του πειράματος στη σκόνη και στο υπόστρωμα.

Μετά το πέρας των πειραμάτων προκειμένου να εξετασθούν τα χαρακτηριστικά της επίστρωσης, το κάθε δοκίμιο κόπηκε σε εγκάρσια τομή, εγκιβωτίστηκε και λειάνθηκε. Έπειτα εξετάστηκε μεταλλογραφικά η ζώνη κραμάτωσης, με μέσα οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, προσδιορίστηκε η χημική σύσταση κατά βάθος της ζώνης και μετρήθηκε η μικροσκληρότητά του. Στη συνέχεια έγινε μέτρηση του συντελεστή τριβής της επιφάνειας της επίστρωσης αλλά και του μη κατεργασμένου υποστρώματος, και περιοδικά κατά τη διάρκεια της τριβομέτρησης, μετρήθηκε, η απώλεια μάζας του υποστρώματος και της επίστρωσης, προκειμένου να προσδιορισθεί η φθορά (ΚΕΦΑΛΑΙΟ V).

Στη συνέχεια διερευνήθηκε ενδελεχώς αριθμός περιπτώσεων ίδιων συνδυασμών υλικών, κατά τη κατεργασία των οποίων, μία απο τις σημαντικές παραμέτρους είχε σημαντικά διαφορετική τιμή. Παρουσιάζεται μία περίπτωση για κάθε διαφορετική παράμετρο, όπου τα αποτελέσματα είναι τα πλέον ενδεικτικά, με στόχο σε πρώτη φάση την επαναληψιμότητα -η οποία και επετεύχθη για συγκεκριμένο συνδυασμό υλικών- και απώτερο στόχο, τη βελτιστοποίηση της διεργασίας (ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI).

Στη συνέχεια, τα λαμβανόμενα αποτελέσματα, για την περίπτωση της τήξης των προαποτιθέμενων κόνεων, αλλά και για την ανάτηξη υφιστάμενων επιστρώσεων, συγκρίθηκαν -για τους ίδιους συνδυασμούς υλικών- με τα αντίστοιχα που ελήφθησαν, με άλλες μεθόδους επιφανειακών κατεργασιών με δέσμες ενέργειας υψηλής πυκνότητας, όπως laser και plasma (ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI).

Τέλος, μοντελοποιήθηκε, με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος COMSOL 5.0 Multiphysics η ακτινοβολή με Σ.Η.Ε. ενός δοκίμιου για τήξη της σκόνης που έφερε σε προαπόθεση στην επιφάνεια του. Ειδικότερα η μοντελοποίηση αποσκοπούσε στην αναπαραγωγή αριθμητικά του θερμοκρασιακού πεδίου στις κραματωμένες επιφάνειες αλλά και στο υπόλοιπο σώμα των δοκίμιων, και ακολούθως στον προσδιορισμό σύγκλισης με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα ( $t$ ,  $T$ ) που καταγράφονταν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων (ΚΕΦΑΛΑΙΟ VII).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ I

Σχήμα I-1 : Ο ήλιος

Σχήμα I- 2 : Τα στρώματα του Ηλίου

Σχήμα I - 3 :Το Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Σχήμα I-4 : Ενεργειακή κατανομή στην ηλιακή ακτινοβολία

Σχήμα I- 5 : Μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

Σχήμα I-6: Οι μηχανισμοί απορρόφησης σκέδασης και ανάκλασης

Σχήμα I-7 : Παγκόσμιος χάρτης ηλιακής ακτινοβολίας (Data source: NASA Goddard Space Flight Center.Data Processing: H. Mächel,Meteorological Institute, University)

Σχήμα I- 8 :Σχηματική απεικόνιση της συγκέντρωσης ακτινοβολίας

Σχήμα I-9 : Παραβολοειδές κάτοπτρο

Σχήμα I-10 : Ημισφαιρικό κοίλο κάτοπτρο

Σχήμα I-11 : Αζιμουθιακός ιχνηλάτης

Σχήμα I- 12 : Ιχνηλάτης δύο αξόνων

Σχήματα I-13 : Διάταξη δύο σταδίων ηλιοστάτη – συγκεντρωτή

Σχήμα I-14 : Απεικόνιση αρχής λειτουργίας ηλιακού φούρνου

Σχήμα I-15 : Σύστημα πεδίου ηλιοστατών / πύργου

Σχήμα I-16: Σχηματική απεικόνιση συστήματος πύργου – ακτίνας προς τα κάτω

Σχήμα I-17 : Σχηματική απεικόνιση παραβολικού κοίλου (trough)

Σχήμα I-18 : Παγκόσμια δυναμικότητα ΣΗΕ - Υφιστάμενη και πρόβλεψη ως το 2015

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ II

Σχήμα II-1 : Κατηγοριοποίηση Τύπων Τριβολογικής Φθοράς

Σχήμα II - 2 : Τρεις (3) αντιπροσωπευτικοί τύποι φθοράς ολίσθησης

Σχήμα II-3 : Ηλεκτρονικές Οπτικές Μικρογραφίες Τριών Διαφορετικών Τύπων φθοράς λόγω εκτριβής [3]

Σχήμα II - 4 : Σχηματική απεικόνιση των επιστημονικών πεδίων όπου άπτεται η επιφανειακή μηχανική

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ III

Σχήμα III - 1: Προφίλ σκληρότητας από το κέντρο των κατεργασμένων ζωνών για διαφορετικούς χρόνους κατεργασίας

Σχήμα III - 2: Σχηματική απεικόνιση επίδρασης δέσμης ενέργειας σε προαποτιθέμενη επίστρωση

Σχήμα III - 3: Μεγένθυση κόκκων (μπιαντιτική μικροδομή) του υποστρώματος μετά την ηλιακή κατεργασία

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV

Σχήμα IV- 1 : Ο Ηλιακός Φούρνος της Plataforma Solar d'Almeria

Σχήμα IV- 2 : Σχηματική Απεικόνιση της Αρχής Λειτουργίας του ηλιακού φούρνου της PSA

Σχήμα IV - 3 Ηλιακός Φούρνος της Plataforma Solar d'Almeria (α) Συλλέκτης / Τραπέζι δοκιμών (β) Σύστημα περισίδων

Σχήμα IV- 4 : Πυκνότητα Ενέργειας στην περιοχή Εστίασης και Κατανομή μέγιστης ροής ενέργειας

Σχήμα IV - 5 : Ηλιακός Φούρνος PSA (α) Συλλέκτης (αριστερά) και Διάταξη δοκιμών (β) προετοιμασία δοκιμίου πριν την ηλιακή κατεργασία

Σχήμα IV - 6 : Δευτερεύον κάλυπτρο

Σχήμα IV- 7 Ηλιακός Φούρνος στο Odeillo (α) Φωτογραφία συστήματος Ηλιοστάτη / Παραβόλου (β) Σχηματική Απεικόνιση Αρχής Λειτουργίας

Σχήμα IV - 8 : Ηλιακός Φούρνος 2kW, Μέγιστη Πυκνότητα Ενέργειας στο επίπεδο μέγιστης εστίασης

Σχήμα IV - 9 : Υποδοχέας Δοκιμίου

Σχήμα IV - 10 : Το στερεοσκόπιο MZ 6 του ENT

Σχήμα IV - 11 : α) Τραχύμετρο TR100 και β) Τραχύμετρο TR200 του ENT

Σχήμα IV - 12 Το λειαντικό μηχάνημα τύπου LaboPol - 5 του ENT

Σχήμα IV - 13 Το οπτικό μικροσκόπιο DMILM του ENT

Σχήμα IV - 14 : Το μικροσκληρόμετρο SHIMADZU μοντέλο HMV-του ENT

Σχήμα IV - 15 : Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης JSM 6390LV του ΙΓΜΕ

Σχήμα IV - 16 Το τριβόμετρο τύπου pin/ball -on-disk

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

Σχήμα V - 1 : Οπτική μακρογραφία επιφάνειας διαφόρων δοκιμών χάλυβα με προαπόθεση σκόνης, μετά την κατεργασία με ΣΗΕ

Σχήμα V-2 : Επίστρωση SiC σε χάλυβα St52.3 : Μακρογραφία κατεργασμένης επιφάνειας

Σχήμα V -3 - : Επίστρωσης SiC σε χάλυβα St52.3 :Οπτικές μακρογραφίες (α) ζώνης κραμάτωσης (β) ΘΕΖ

- Σχήμα V- 4 : Μικροσκληρότητα ως προς το βάθος της ζώνης κατεργασίας
- Σχήμα V- 5 : Φθορά (σε μάζα) ως προς χρόνο τριβομέτρησης (h) σε τριβόμετρο ball on disc (α) δοκιμίου (β) ανταγωνιστικού υλικού
- Σχήμα V -6 : Επίστρωση SiC σε χάλυβα St52.3 (α), (β) οπτικές μικρογραφίες πίστας τριβής
- Σχήμα V- 7 : Επίστρωση κεραμικής σκόνης SiC σε Ck60 (α) Μακρογραφία κατεργασμένης επιφάνειας
- Σχήμα V-8 : Επίστρωση κεραμικής σκόνης SiC σε Ck60 : Οπτική μικρογραφία τομής ζώνης κατεργασίας
- Σχήμα V- 9 : Επίστρωση SiC σε Ck60 : (α) SEM περιοχής αδιάλυτων καρβιδίων (β) Στοιχειακό mapping σε τυχαίο καρβίδιο στη υποζώνη Γ
- Σχήμα V - 10 : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος
- Σχήμα V-11 : Επίστρωση σκόνης βάσης Μολυβδαινίου σε χάλυβα St52.3 : Μακρογραφία κατεργασμένης επιφάνειας
- Σχήμα V-12 : Οπτική μικρογραφία ζώνης κραμάτωσης βάσης Mo
- Σχήμα V - 13 : SEM μικρογραφία σε σημείο της ζώνης κραμάτωσης βάσης Mo
- Σχήμα V - 14 : Επίστρωση σκόνη βάσης Mo σε St52.3 : (α) % κ.β. χημική σύσταση ζώνης κατεργασίας (β) μικροσκληρότητα ως προς βάθος
- Σχήμα V-15 Συντελεστής τριβής
- Σχήμα V- 16 Επίστρωση σκόνης βάσης Mo σε χάλυβα St52.3 : Απώλεια μάζας (α) δοκιμίου (β) σφαίρας αλούμινας
- Σχήμα V - 17 : (α), (β) Οπτικές μακρογραφίες των τροχιών που δημιουργούνται κατά την τριβή (γ) , (δ) σφαίρα αλούμινας (γ) πριν (δ) μετά
- Σχήμα V - 18 : Επίστρωση σκόνης βάσης Mo σε ανοξείδωτο χάλυβα 304L Μακρογραφία της κατεργασμένης επιφάνειας
- Σχήμα V-19 (α), (β), (γ) : Οπτικές μικρογραφίες ζώνης κατεργασίας σκόνης βάσης Mo
- Σχήμα V - 20 : Επίστρωση σκόνης βάσης Mo σε ανοξείδωτο χάλυβα 304L (α) % κ.β. χημική σύσταση ζώνης κατεργασίας (β) τιμές μικροσκληρότητας ως προς βάθος
- Σχήμα V-21 : Συντελεστής τριβής
- Σχήμα V - 22 : Επίστρωση σκόνη βάσης Mo σε ανοξείδωτο χάλυβα SS304L Σύγκριση με δύο διαφορετικά ανταγωνιστικά υλικά (α) απώλεια μάζας δοκιμίου (β) απώλεια μάζας ανταγωνιστικών υλικών
- Σχήμα V -23: Επίστρωση σκόνη βάσης Mo σε ανοξείδωτο χάλυβα SS304L (α), (β) οπτικές μικρογραφίες πίστας τριβής ως προς σφαίρα αλούμινας (γ), (δ) οπτικές μικρογραφίες πίστας τριβής ως προς τον στυλίσκο

Σχήμα V -24 : Επίστρωση cermet σε χάλυβα St52.3 : Μακρογραφίες της κατεργασμένης επιφάνειας (α) χρόνος κατεργασίας 20 min (β) χρόνος κατεργασίας 29 min

Σχήμα V - 25: Επίστρωση WC+17%Co σε St52.3 : Οπτικές μικρογραφίες ζώνων κατεργασίας (α) χρόνος κατεργασίας 21min (β) χρόνος κατεργασίας 29min (γ) υποζώνη E για t=21min (δ) υποζώνη E' για t=29min

Σχήμα V-26 : Επίστρωση WC-17Co σε St52.3 SEM Αδιάλυτου καρβιδίου στην υποζώνη Β' (t=29min)

Σχήμα V-27 : Επίστρωση WC-17Co σε St52.3 SEM μικρογραφία σε περιοχή εκτενούς διαλυτοποίησης (υποζώνη Γ)

Σχήμα V - 28 : Επίστρωση WC-17Co σε St52.3 Λεπτομέρεια σε περιοχή εκτενούς διαλυτοποίησης (υποζώνες Γ και Γ')

Σχήμα V - 29 (α) και (β) : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος επίστρωσης WC-17Co σε St52.3

Σχήμα V - 30 Επίστρωση WC-17%Co σε χάλυβα St52.3: α. Απώλεια μάζας δοκιμίου ως προς χρόνο β. Απώλεια μάζας ανταγωνιστικού υλικού ως προς χρόνο

Σχήμα V - 31 Επίστρωση WC-17%Co σε χάλυβα St52.3 Οπτική μικρογραφία πίστας τριβής

Σχήμα V - 32: Επίστρωση WC-17%Co σε χάλυβα St52.3 : Σφαίρα αλούμινας : πριν και μετά

Σχήμα V - 33 : Μακρογραφίες επίστρωσης WC-17%Co σε χάλυβα Ck60 : για χρόνο κατεργασίας (α) 13min (β) 27min

Σχήμα V - 34 : Οπτικές Μικρογραφίες επίστρωσης WC-17%Co σε χάλυβα Ck60 για χρόνο κατεργασίας (α) 13min και (β) 27min

Σχήμα V - 35 : Διεπιφάνεια επίστρωσης WC-17Co και χάλυβα St52.3 β για χρόνο κατεργασίας t=13min

Σχήματα V-36- α και β : (α) SEM μικρογραφία σημείο υποζώνης Γ' (β) SEM μικτού καρβιδίου

Σχήμα V- 37 : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος

Σχήμα V- 38 : Επίστρωση cermet σε SS304L : SEM μικρογραφίες (α) της τομής της κατεργασμένης επιφάνειας (β) μικτά καρβίδια μερικώς διαλυμένα και αδιάλυτα

Σχήμα V - 39 : Επίστρωση cermet σε SS304L : Ηλεκτρονικές μικρογραφίες σάρωσης (α) τύποι A, B και C (β) Μέρος αδιάλυτου καρβιδίου τύπου A

Σχήμα V-40 : Συγκριτικό Ιστόγραμμα συντελεστών τριβής κραματωμένης επιφάνειας (cermet) και ακατέργαστου υποστρώματος (SS304L)

Σχήμα V - 41 : Επίστρωση WC-17%Co σε ανοξείδωτο χάλυβα SS304L (α), (β), (γ) : Οπτικές μικρογραφίες πίστας τριβής

Σχήμα V - 42 : Οπτική μικρογραφία επίστρωσης APS WC-17Co



Σχήμα V-43 : Γραφική αναπαράσταση δυνάμεων και φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε κατεργασία με Δέσημη Υψηλής Πυκνότητας Ενέργεια

Σχήμα V - 44 : Ανατηγμένη με ηλιακή ενέργεια APS WC-17%Co επίστρωση

Σχήμα V-45 : Ανατηγμένη με ηλιακή ενέργεια APS WC-17%Co επίστρωση (α), (β) SEM ηλεκτρονικές μικρογραφίες

Σχήμα V - 46 Ηλεκτρονική μικρογραφία τομής ανατηγμένου APS coating με συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (PSA930W/m<sup>2</sup>, 120sec)(α) αδιάλυτα και μερικώς διαλυμένα καρβίδια (β) SEM-mapping ενός αδιάλυτου καρβιδίου

Σχήμα V - 47 : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος

Σχήμα V- 48 (α) Σύγκριση Συντελεστών Τριβής (β) Σύγκριση Ρυθμών Αντοχής στη φθορά

Σχήμα V-49 : Ανατηγμένη APS επίστρωση cermet σε χάλυβα SS30L (α) Συντελεστής τριβής, (γ) ρυθμός απώλειας μάζας (γ), (δ) οπτικές μικρογραφίες πίεσης τριβής

Σχήμα V -50 : Επίστρωση cermet WC-17%Co σε χάλυβα St52.3 με τρεις διαφορετικές τεχνικές : ήλιο, laser, APS (α) συντελεστής τριβής (β) απώλεια μάζας δοκιμίου (γ) απώλεια μάζας μπάλας αλούμινας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI

Σχήμα VI-1 : Μακρογραφία ανατηγμένης επίστρωσης WC-17%Co σε χάλυβα SS304L με 14000kW/m<sup>2</sup>

Σχήμα VI -2 : Οπτικές μικρογραφίες της τομής της Ανατηγμένη APS επίστρωση cermet (α) με 1650 kW/m<sup>2</sup> (β) 14000kW/m<sup>2</sup>

Σχήμα VI - 3 : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος CNRS : Κατεργασία με 14000kW/m<sup>2</sup>, PSA :Κατεργασία με 1650kW/m<sup>2</sup>

Σχήμα VI - 4 : Οπτικές μικρογραφίες ζώνης κραμάτωσης σκόνης βάσης Mo σε St52.3 (α) 1mm πάχος προαπόθεσης (β) 2mm πάχος προαπόθεσης

Σχήμα VI - 5 : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος

Σχήμα VI - 6 (α) Θερμικοί κύκλοι χωρίς παραμονή στην μέγιστη θερμοκρασία 1300oC και ρυθμούς θέρμανσης 7.2 και 3.6 oC /sec (β) Θερμικοί κύκλοι με παραμονή στη μέγιστη θερμοκρασία (1200o C) για διάρκεια παραμονής 3 και 6min και ρυθμό θέρμανσης 7.2 oC /sec

Σχήμα VI - 7 (α), (β) Ηλεκτρονικές μικρογραφίες ζώνης κατεργασίας σκόνης βάσης Mo με ρυθμό θέρμανσης 7.2 oC/sec

Σχήμα VI - 8: Οπτικές μικρογραφίες ζώνης κραμάτωσης με ρυθμό θέρμανσης 3.6 oC/sec (α) ανώτερη υποζώνη (β) κατώτερη υποζώνη (γ) στοιχειακή ανάλυση EDS ως προς βάθος ζώνης κατεργασίας

Σχήμα VI - 9: SEM mapping βασικών στοιχείων κραμάτωσης

Σχήμα VI - 10 : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος για τους δύο διαφορετικούς ρυθμούς θέρμανσης

Σχήμα VI - 11 (α), (β) Οπτικές μικρογραφίες της ζώνης κατεργασίας με παραμονή 3min

Σχήμα VI - 12 (α) και (β) : Οπτικές μικρογραφίες ζώνης κατεργασίας με παραμονή στη μέγιστη θερμοκρασία 1300o C για 6min

Σχήμα VI - 13 : Τήξη σκόνης βάσης Mo με παραμονή σε Tmax για 6 min (α) % κ.β. στοιχειακή συγκέντρωση ως προς βάθος ζώνης κατεργασίας (β) χημική σύσταση ως προς βάθος ζώνης κατεργασίας

Σχήμα VI-14 : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος ζώνης κατεργασίας

Σχήμα VI-15 :Ηλιακή Κατεργασία σκόνης Mo σε χάλυβα St52.3 σε προαπόθεση 2mm (α) Οπτική μικρογραφία της ζώνης κραμάτωσης (β) Προφίλ μικροσκληρότητας (ως προς βάθος) (γ) χημική σύσταση ως προς βάθος

Σχήμα VI-16 : Επίστρωση WC-17Co σε χάλυβα St52.3 (α) οπτική μικρογραφία τομής κατεργασίας με laser (β) SEM τομής ζώνης κατεργασίας με APS

Σχήμα VI - 17 : Επίστρωση WC-17%Co σε χάλυβα St52.3 με τρεις διαφορετικές τεχνικές : ήλιο, laser, APS (α) συντελεστής τριβής (β) απώλεια μάζας δοκιμίου (γ) απώλεια μάζας μπάλας αλούμινας

## ΚΕΦΑΛΙΑΟ VII

Σχήμα VII-1 : Σχήμα VII- 1 (α) Σκαρίφημα «φετών» διαφορετικού πάχους του δοκιμίου (β) της ροής ενέργειας μεταξύ δύο διαδοχικών φετών

Σχήμα VII-2 : (α) τετραεδρικό στοιχείο (β) Πλέγμα μοντελοποίησης

Σχήμα VII- 3 : Καμπύλες απόψυξης για διάφορες τιμές του συντελεστή συναγωγής και ακτινοβολίας

Σχήμα VII-4: Καμπύλη πειραματικών δεδομένων θερμοκρασίας, T - χρόνου, t για τήξη σκόνης SiC σε χάλυβα Ck60

Σχήματα VII-5 α και β: Καμπύλη αποτελεσμάτων μοντελοποίησης για προσομοίωση τήξης σκόνης SiC σε χάλυβα Ck60 μέσης θερμοκρασίας, T επιφανειών ως προς χρόνο t (α) στην αρχή και (β) στο τέλος της προσομοίωσης)

Σχήμα VII-6: Κατανομή Θερμοκρασίας στο προσομοιωμένο δοκίμιο κατά τη θέρμανση σε (α) t=240s ,(β) t= 500s

Σχήμα VII-7: Ισόθερμες Καμπύλες κατά τη θέρμανση σε (α) t=442,5s (β) t= 619,5s

Σχήμα VII-8: Ισόθερμες καμπύλες κατά τη ψύξη σε (α) έναρξη ψύξης t=1020s (β) t= 1520 s

Σχήμα VII-9: Ισόθερμες Καμπύλες στο υπόστρωμα σε χρονική στιγμή κατά την ψύξη

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ I

Πίνακας I-1 : Βασικά χαρακτηριστικά συστημάτων πύργου ισχύος

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ II

Πίνακας II - 1 : Κατηγοριοποίηση & Πλεονεκτήματα/ Μειονεκτήματα των σημαντικότερων τεχνικών επιστρώσεων

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ III

Πίνακας III-1 Σύγκριση laser, plasma και ήλιου για την κατεργασία υλικών

Πίνακας III - 2 : Απαιτούμενος χρόνος για να φτάσει το υλικό στο Σ.Τ. απορροφώντας συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια, πυκνότητας 2000W/cm<sup>2</sup>

Πίνακας III-3 : Κόστη Κεφαλαίου για τις τρεις τεχνολογίες

Πίνακα III-4 : Συνοπτική παρουσίαση περιπτώσεων επιφανειακής σκληρυνσης με ΣΗΕ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV

Πίνακας IV - 1: % κ.β. σύσταση χάλυβα SS304L

Πίνακας IV - 2: % κ.β. σύσταση χάλυβα ST52.3

Πίνακας IV - 3: % κ.β. σύσταση χάλυβα Ck60

Πίνακας IV-4 : Τιμές Χαρακτηριστικών Ιδιοτήτων Υποστρωμάτων

Πίνακας IV - 5 : Χαρακτηριστικά χρησιμοποιούμενων κόνεων

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

Πίνακας V-1 : Σύνοπτική παρουσίαση του συνόλου των δοκιμών με ΣΗΕ

Πίνακας V- 2 : Συνδυασμοί Υλικών και Τιμές Πειραματικών Συνθηκών που παρουσιάζονται

Πίνακας V-3 : Τιμές πειραματικών παραμέτρων βέλτιστων δοκιμών με προαπόθεση (1mm) σκόνης SiC

Πίνακας V-4 : % κ.β. χημική σύσταση σε διαφορετικά σημεία στη ζώνη κραμάτωσης

Πίνακας V-5 : Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων ηλιακής κατεργασίας χαλύβων με σκόνη SiC

Πίνακας V-6 : Τιμές πειραματικών παραμέτρων βέλτιστων δοκιμών για τήξη σκόνης βάσης - Mo (1mm)

Πίνακας V - 6 : Κύρια χαρακτηριστικά ζωνών κατεργασίας

Πίνακας V- 7 : Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων ηλιακής κατεργασίας χαλύβων με σκόνη βάσης - Mo

Πίνακας V-8 : Τιμές πειραματικών παραμέτρων δοκιμών κατεργασίας χαλύβων με σκόνη WC-17%Co (1mm)

Πίνακας V - 9 Τιμές πειραματικών παραμέτρων δοκιμών κατεργασίας Ck60 με σκόνη WC-17%Co

Πίνακας V-10 : Χημική σύσταση σε σημεία της ζώνης κατεργασίας (% κ.β.)

Πίνακας V - 11 : Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων ηλιακής κατεργασίας χαλύβων με σκόνη WC-17%Co

Πίνακας V-12 : Βέλτιστες τιμές παραμέτρων Ατμοσφαιρικού Ψεκασμού Πλάσματος (APS)

Πίνακας V - 13 : Τιμές Πειραματικών παραμέτρων της κατεργασίας ανάτηξης με ηλιακή ενέργεια

Πίνακας V - 14 : Χημική Σύσταση (% κ.β.) σε σημεία της ζώνης κατεργασίας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI

Πίνακα VI-1 : Τιμές πειραματικών παραμέτρων της κατεργασίας ανάτηξης με ηλιακή ενέργεια

Πίνακας VI - 2 : Χαρακτηριστικά APS επίστρωσης και ζώνης μετακατεργασίας της

Πίνακας VI-3 : Συνοπτικά αποτελέσματα της ανάτηξης με διαφορετικές Ποκνότητες Ενέργειας

Πίνακας VI - 4 : Πειραματικές Συνθήκες Διερεύνησης επίδρασης πάχους προσιπόθεσης σκόνης

Πίνακας VI - 5 : Χαρακτηριστικά ζώνης κραμάτωσης Mo σκόνης πάχους προσιπόθεσης 1 mm

Πίνακας VI-6 : Πειραματικές Τιμές Συνθηκών Ελέγχου Επαναληψιμότητας

Πίνακας VI-7 : Τιμές Βασικών Πειραματικών Παραμέτρων Κατεργασίας των Τεχνικών

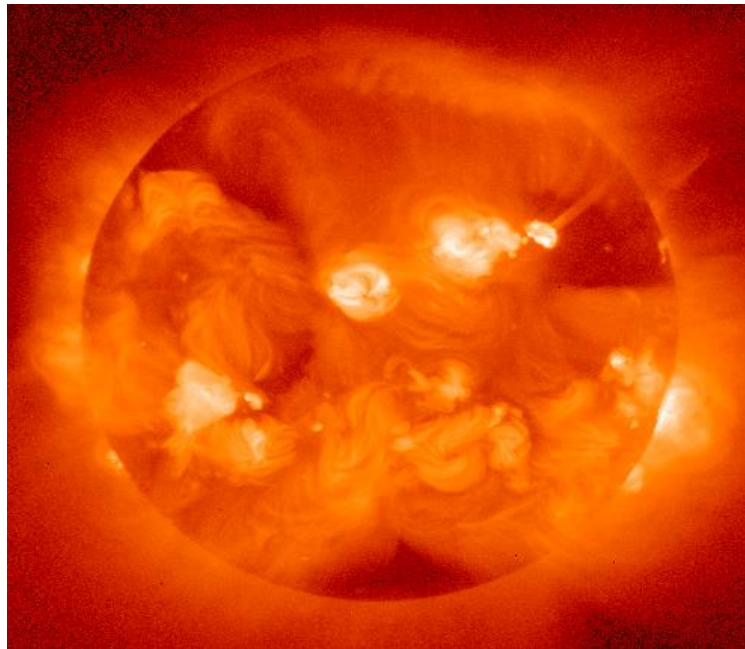
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ VII

Πίνακας VII -1 : Ιδιότητες Υποστρώματος

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι : ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### I.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΙΟ [1]

Ο ήλιος (Σχήμα I-1) είναι μία σφαιρική μάζα από πολύ θερμά αέρια διαμέτρου  $1.39 \times 10^9 \text{m}$ , ο οποίος απέχει από την γη  $1.5 \times 10^{11} \text{m}$ . Σε σχέση με τη γη, ο ήλιος περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του κάθε 4 εβδομάδες, αλλά όχι ως στερεό σώμα: ο ισημερινός του, για παράδειγμα, χρειάζεται 27 ημέρες ενώ οι πόλοι του, περίπου 30 ημέρες για κάθε περιστροφή.

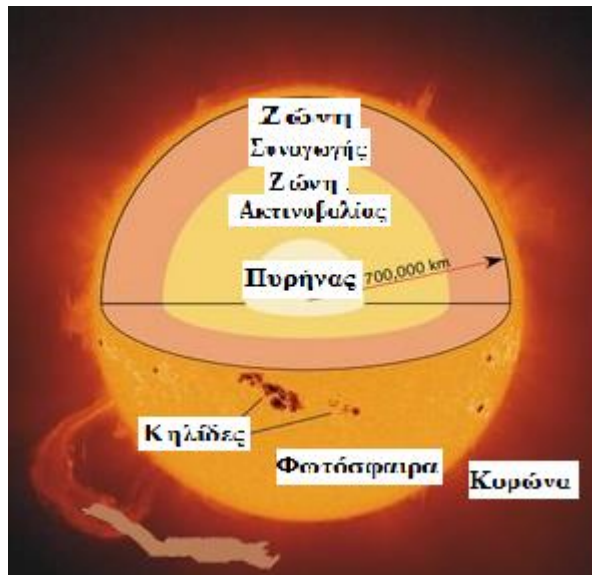


Σχήμα I-1 : Ο ήλιος [1]

Αυτή η πηγή τεράστιων ποσών ηλιακής ενέργειας, θερμότητας και φωτός, ο Ήλιος, αποτελείται από μία μάζα θερμής αέριας ύλης. Η μάζα του Ήλιου είναι πολλές χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από αυτή της Γης και δεν είναι στάσιμη. Η επιφάνεια του ήλιου αποτελείται από ακανόνιστα κελιά συναγωγής, διαστάσεων από 1000 έως 3000km και μέσο χρόνο ζωής της τάξης των μερικών λεπτών. Άλλες διακριτές διαμορφώσεις στην ηλιακή επιφάνεια είναι μικρές σκοτεινές περιοχές που ονομάζονται **πόροι**, οι οποίοι είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τα κελιά συναγωγής, καθώς και **σκοτεινές περιοχές** -μεγαλύτερων διαστάσεων- που καλούνται σημάδια του ήλιου (*sunspots*), τα οποία ποικίλλουν σε μέγεθος. Το εξωτερικό στρώμα της ζώνης

συναγωγής ονομάζεται **φωτόσφαιρα**. Το όριο της φωτόσφαιρας είναι σαφώς προσδιορισμένο, αν και η πυκνότητα της είναι πολύ χαμηλή (τάξη μεγέθους ίση με το  $10^{-4}$  αυτής του αέρα στην επιφάνεια της θάλασσας). Η φωτόσφαιρα είναι συμπαγής, καθώς τα αέρια από τα οποία αποτελείται είναι ισχυρά ιονισμένα, και ικανά να απορροφήσουν και εκπέμψουν ένα συνεχές φάσμα ακτινοβολίας. Η φωτόσφαιρα είναι η πηγή του μεγαλύτερου μέρους της ακτινοβολίας του ήλιου.

Έξω από τη **φωτόσφαιρα** βρίσκεται η **ηλιακή ατμόσφαιρα** η οποία είναι λιγότερο ή περισσότερο διαφανής και γίνεται ορατή κατά την ολική ηλιακή έκλειψη ή από όργανα που αποκρύπτουν τον ηλιακό δίσκο. Επάνω από τη φωτόσφαιρα βρίσκεται ένα στρώμα κρύων αερίων, αρκετών χιλιομέτρων πάχους το οποίο ονομάζεται **αντιστρεπτό στρώμα**, ενώ έξω από αυτό και σε βάθος 10000 km, βρίσκεται η **χρωμόσφαιρα**. Πρόκειται για ένα αέριο στρώμα με θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές της φωτόσφαιρας και χαμηλότερη πυκνότητα. Τέλος, συναντάται η **κορόνα**, μία περιοχή πολύ χαμηλής πυκνότητας και υψηλής θερμοκρασίας.



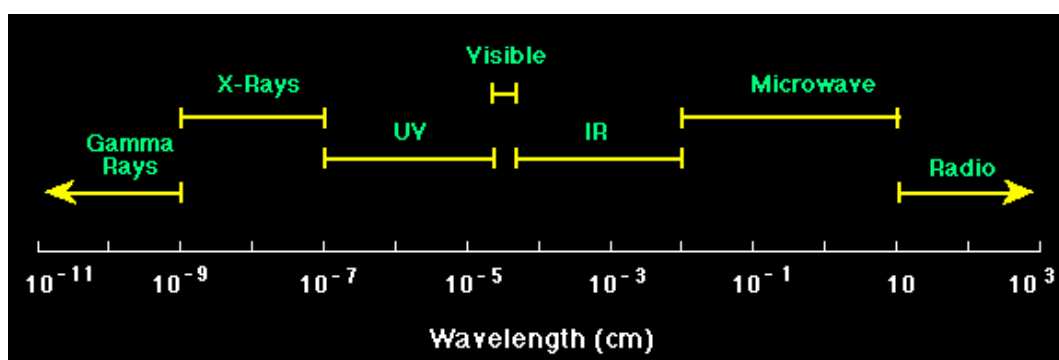
Σχήμα I- 2 : Τα στρώματα του Ηλίου [3]

Στο Σχήμα I-2, φαίνεται μία σχηματική απεικόνιση της δομής του ήλιου. Υπολογίζεται ότι το 90% της ενέργειας παράγεται στην περιοχή από 0 έως  $0.23R$  (όπου  $R$  είναι η ακτίνα του ήλιου), η

οποία περιέχει το 40% της μάζας του ήλιου. Σε απόσταση 0.7R από το κέντρο, η θερμοκρασία πέφτει στους 130000K και η πυκνότητα έχει πέσει στα 70kg/m<sup>3</sup>, ενώ διεργασίες συναγωγής αρχίζουν να γίνονται σημαντικές. Η ζώνη από 0.7 σε 1.0R είναι γνωστή ως ζώνη συναγωγής. Σε αυτήν τη ζώνη η θερμοκρασία πέφτει στους 5000K και η πυκνότητα είναι στα 10<sup>-5</sup>Kg/m<sup>3</sup>.

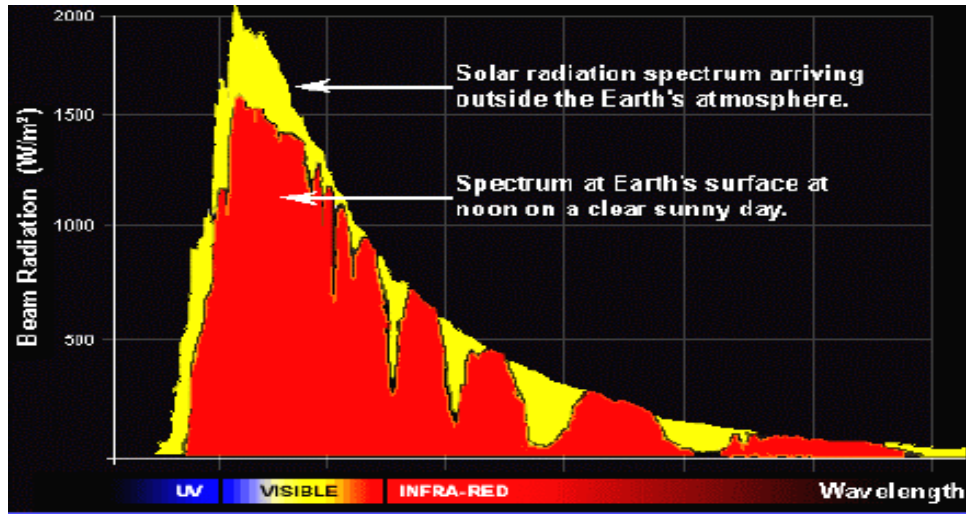
Η μέση θερμοκρασία της φωτόσφαιρας του ήλιου -αντιστοιχεί στην επιφάνεια του- ανέρχεται στους 5777K και προκαλεί ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία «ρέει» από τον ήλιο με μία πυκνότητα της τάξης του  $M_{\text{sun}} = 63,2 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$ . Η πραγματική θερμοκρασία μαύρου σώματος 5777 K αντιστοιχεί στη θερμοκρασία που έχει το μαύρο σώμα, όταν θα ακτινοβολούσε τόση ενέργεια, όσο ο ήλιος.

Η φυσική δομή του ήλιου, η θερμοκρασία του και οι βαθμίδες συγκέντρωσης της πυκνότητας υποδεικνύουν ότι ο ήλιος στην πραγματικότητα δεν λειτουργεί ως μαύρη πηγή ακτινοβολίας. Η εκπέμπόμενη ηλιακή ακτινοβολία είναι το σύνθετο αποτέλεσμα των διαφορετικών στρωμάτων που εκπέμπουν και απορροφούν ακτινοβολία διαφορετικών μηκών κύματος. Η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στην επιφάνεια της γης με διαλείποντα τρόπο, ως άμεση ακτινοβολία και ως διαχεόμενη. Η τελική εξωγήινη ακτινοβολία και η κατανομή του φάσματος έχουν πλέον μετρηθεί με διάφορες μεθόδους. Ειδικότερα : η περιοχή του φάσματος που καλύπτει ξεκινά από την περιοχή κοντά στο υπεριώδες (305nm) και διαμέσου του ορατού -στο οποίο παρουσιάζει μέγιστο (700nm)- εκτείνεται έως την περιοχή του υπέρυθρου (2600nm) (Σχήμα I-3).



Σχήμα I - 3 :Το Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [2]

Συνολικά αποτελείται 9% από υπεριώδη, 45% από ορατή και 46% από υπέρυθρη ακτινοβολία (Σχήμα I - 4) [2].



Σχήμα I-4 : Ενεργειακή κατανομή στην ηλιακή ακτινοβολία [2]

Η ακριβής διαδικασία που συμβαίνει στο εσωτερικό του Ήλιου είναι μια αλυσιδωτή αντίδραση σύντηξης πρωτονίων, που οδηγεί στην παραγωγή ατόμων Ηλίου (He) και, ταυτόχρονα, στην έκλυση τεράστιων ποσών ενέργειας με τη μορφή ακτίνων Χ, ακτίνων γ και νετρίνων. Οι ακτίνες αυτές, μεταφέρονται από τον πυρήνα στην επιφάνεια του Ηλίου, είτε με τη μορφή ακτινοβολίας, είτε μέσω θερμού υλικού με συναγωγή. Κατά την μεταφορά ως ακτινοβολία, κάθε φωτόνιο που δημιουργείται «ταξιδεύει» περίπου ένα μικρόμετρο πριν απορροφηθεί από κάποιο παρακείμενο μόριο φυσικού αερίου, προκαλώντας τη θέρμανση των γειτονικών ατόμων. Έτσι, εκ νέου εκπέμπεται ένα άλλο φωτόνιο που ταξιδεύει και πάλι μία μικρή απόσταση πριν απορροφηθεί από κάποιο άλλο άτομο. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνέχεια, πριν το φωτόνιο να μπορέσει τελικά να εκπεμφθεί στην επιφάνεια του ήλιου. Υπολογίζεται ότι, ένα φωτόνιο χρειάζεται περίπου 100.000 χρόνια ή περίπου  $10^{25}$  απορροφήσεις και εκπομπές για να ολοκληρώσει το ταξίδι από τον πυρήνα του ήλιου στην επιφάνειά του, ενώ η διάρκεια του ταξιδιού του, από την επιφάνεια του ήλιου στη Γη, διαρκεί σχεδόν 8 λεπτά. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, το οποίο αρχικά είναι πολύ μικρό, αυξάνεται, μειώνοντας έτσι την ενέργεια που μεταφέρεται μέσω αυτής.

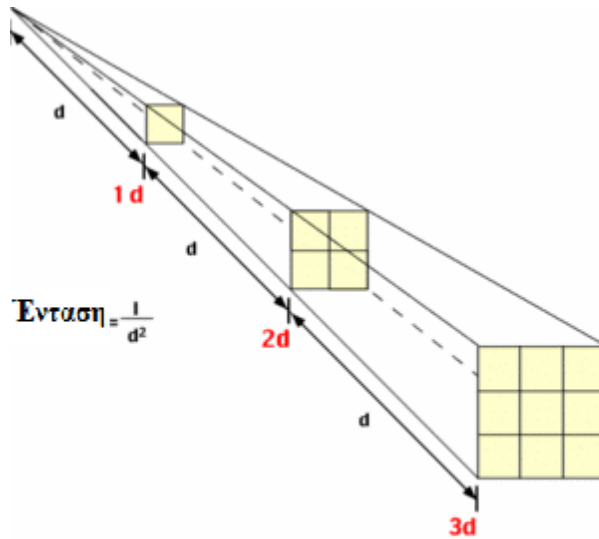


Στη δεύτερη περίπτωση, της μεταφοράς ενέργειας μέσω θερμού υλικού με συναγωγή, λαμβάνει χώρα ο γνωστός ως “κύκλος συναγωγής”, ο οποίος περιλαμβάνει τη μεταφορά θερμού υλικού στην επιφάνεια του Ήλιου μέσω θερμών διαύλων. Ειδικότερα, το θερμό υλικό ψύχεται μεταφέροντας τη θερμότητα στην επιφάνεια και στη συνέχεια επιστρέφει πίσω στον πυρήνα, ώστε να επαναθερμανθεί.

Μέσα από όλη αυτή τη διαδικασία που περιγράφηκε, ο Ήλιος παράγει τα τεράστια ποσά ενέργειας, μέρος των οποίων φτάνουν στη Γη. Η ακτινοβολία [3-7] η οποία, προσπίπτει στην ατμόσφαιρα καθημερινά, είναι σταθερή. Οι όποιες μικρές διακυμάνσεις της, οφείλονται στην ελλειπτική τροχιά της Γης, δεδομένου ότι η απόσταση Ήλιου-Γης κατά τη διάρκεια του έτους, μεταβάλλεται, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή της στο *αφήλιο* (θερινό ηλιοστάσιο) και την ελάχιστη τιμή της στο *περιήλιο* (χειμερινό ηλιοστάσιο). Οι μεταβολές αυτές της ακτινοβολίας υπολογίζονται βάσει του μεγέθους της πυκνότητας της ισχύος στη μέση της απόστασης ήλιου - γης, που ονομάζεται **πυκνότητα ισχύος της ηλιακής σταθεράς**  $G_{solar\_constan}$  και έχει τιμή ίση με **1367 W/m<sup>2</sup>**, αντιστοιχεί δε στην ενέργεια από τον ήλιο ανά μονάδα χρόνου, η οποία λαμβάνεται, κατακόρυφα στην κατεύθυνση της διάδοσης της ακτινοβολίας, σε 1 m<sup>2</sup> επιφάνεια της γης. Η τιμή αυτή κυμαίνεται περί των **1000 W/m<sup>2</sup>**, ανάλογα με την περιοχή, την εποχή, την ώρα της ημέρας και τις κλιματολογικές συνθήκες. Έτσι, η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην ατμόσφαιρα της Γης, καθημερινά, και ονομάζεται  $G_{extra\_terrestrial}$ , δίνεται από τον ακόλουθο τύπο :

$$G_{extra\_terrestrial} = G_{solar\_constant}[1+0,033.\cos((360^\circ.DoY)/365)] \quad (\text{ΕΞ. I-1})$$

**DoY : Day of Year**



Σχήμα I- 5 : Μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

Κατά τη διάρκεια της πορείας της προς τη γη, το μήκος κόματός της αυξάνεται, μειώνοντας την πυκνότητα ισχύος της (Σχήμα I- 5). Αυτό εκφράζεται με τον γνωστό ως 'νόμο του αντίστροφου τετραγώνου' (*Inverse Square Law*), σύμφωνα με τον οποίο, η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον ήλιο, μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή. Όταν τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, η παρουσία σωματιδίων διαφόρων ενώσεων : οξυγόνου ( $O_2$ ), διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ), όζοντος ( $O_3$ ), νερού ( $H_2O$ ), μονοξειδίου του άνθρακα ( $CO$ ), εξαθφοριούχου θείου ( $SF_6$ ) και σκόνης, ανομοιογενώς κατανεμημένα, μειώνουν περαιτέρω της ενέργειά τους. Υπολογίζεται ότι στο επίπεδο της θάλασσας, η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει σε πέντε (5) ώρες με πυκνότητα  $1kW/m^2$ , μία τιμή που είναι γνωστή και ως *ισχύς ενός ήλιου* και αποτελεί την **πρότυπη ηλιακή ακτινοβολία**.

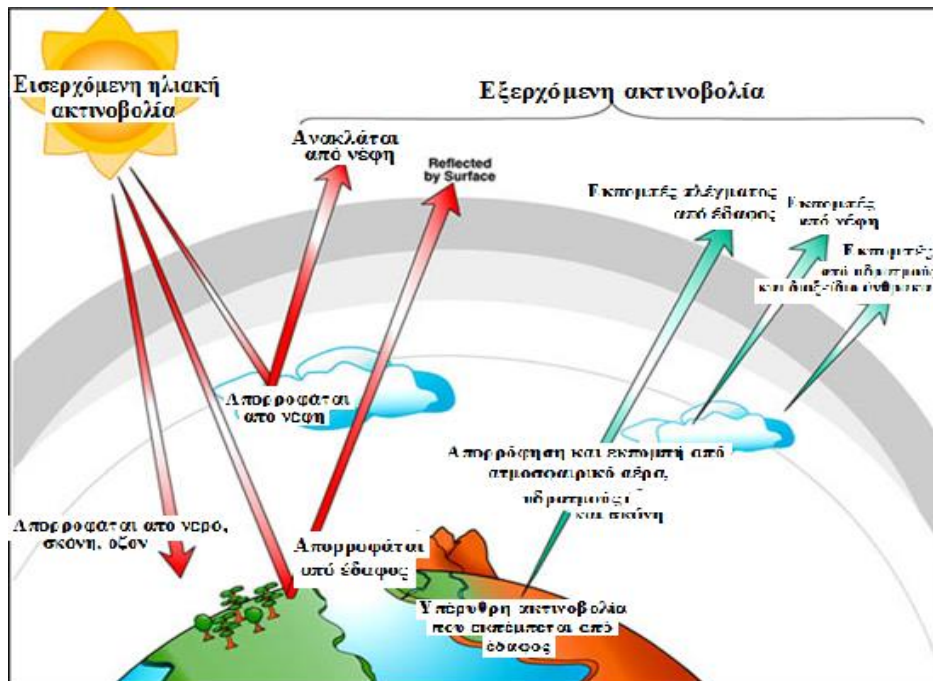
Θεωρητικά και σε ετήσια βάση, η ισχύς φτάνει την τιμή των  $102.000TW$ , ποσότητα τεράστια, η οποία, προφανώς, επαρκεί να καλύψει το μεγαλύτερο μέρος των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη. Στην πράξη όμως, είναι μικρότερη, λόγω διάφορων μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα. Αναλυτικότερα :

### Μηχανισμός Απορρόφησης

Η ακτινοβολία απορροφάται από χημικές ενώσεις οι οποίες βρίσκονται στην ατμόσφαιρα, μετατρέπεται σε θερμότητα, ενώ ένα μικρό μέρος της επαναεκπέμπεται στην ατμόσφαιρα ως ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Ειδικότερα, από τις ενώσεις αυτές, το όζον, για παράδειγμα, απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ το διοξείδιο του άνθρακα, οι υδρατμοί και το εξαφθοριούχο θείο, την υπέρυθη.

### Μηχανισμός Σκέδασης

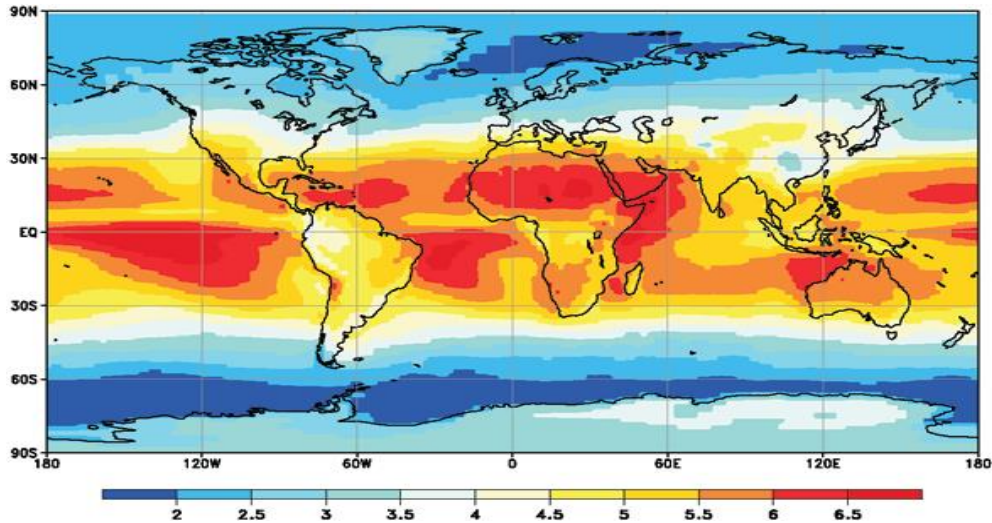
Παράλληλα με την απορρόφηση λαμβάνει χώρα και ο μηχανισμός της **σκέδασης**. Αφορά σε αλλαγή κατεύθυνσης της διάδοσης της ακτινοβολίας λόγω της ύπαρξης υδρατμών, σκόνης και άλλων σωματιδίων της ατμόσφαιρας.



Σχήμα Ι-6: Οι μηχανισμοί απορρόφησης σκέδασης και ανάκλασης [4]

## ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Στο Σχήμα I-6 παριστάνεται σχηματικά η πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι την είσοδο της στη γήινη ατμόσφαιρα.



**Σχήμα I-7 : Παγκόσμιος χάρτης ηλιακής ακτινοβολίας**

*(Data source: NASA Goddard Space Flight Center.Data Processing*

*H. Mächel,Meteorological Institute, University)*

Κατά μέσο όρο, προσπίπτουν 1700 kWh σε κάθε τετραγωνικό μέτρο κάθε χρόνο. Κάθε χρόνο κάθε τετραγωνικό χιλιόμετρο ερήμου «λαμβάνει» ηλιακή ενέργεια ισοδύναμη με 1.5 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου (Σχήμα I-7).

## I.2 ΗΛΙΑΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

### I.2.1 Ιστορική Αναδρομή

Ο άνθρωπος ήδη από τον 7<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. αντιλήφθηκε το μεγάλο ενεργειακό ισοδύναμο που φέρει η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια και έτσι, άρχισε να αναπτύσσεται υποτυποδώς η ηλιακή τεχνολογία. Ήδη τότε, κάτοπτρα χρησιμοποιούνταν για ανάφλεξη υλικών. Η αρχή λειτουργίας των παραβολικών κατόπτρων ήταν γνωστή από την κλασική αρχαιότητα, όταν ο μαθηματικός Διοκλής τους περιέγραψε σε ένα βιβλίο ως οι *καίοντες* καθρέπτες και απέδειξε ότι συγκεντρώνουν μία παράλληλη ακτίνα σε ένα σημείο. Ο Αρχιμήδης τον 3<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. μελέτησε τα παραβολοειδή ως μέρος της μελέτης του για τα υδροστατικά ισοδύναμα, και υπάρχει η μαρτυρία ότι χρησιμοποίησε ανακλαστές προκειμένου να προκαλέσει φλόγα, κατά την κατάκτηση των Συρακουσών. Τον 1<sup>ο</sup> αιώνα τα ρωμαϊκά μπάνια διέθεταν τεράστια παράθυρα με νότιο προσανατολισμό προκειμένου να παραμένουν ζεστά.

Παραβολικά κάτοπτρα επίσης μελετήθηκαν από τον φυσικό Ibn Sahl τον 10<sup>ο</sup> αιώνα, ενώ ο James Gregory, στο βιβλίο του *Optica Promota* (1663), ανέφερε ότι το τηλεσκόπιο ανάκλασης, με την βοήθεια ενός παραβολικού κατόπτρου θα μπορούσε να διόρθωνε τις αποκλίσεις λόγω σφαιρικότητας, που παρατηρούνται στα τηλεσκόπια ανάκλασης. Η διάταξη την οποία οριστικοποίησε βάσει των προαναφερθέντων ονομάστηκε προς τιμήν του "Gregorian telescope". Ο Ισαάκ Νεύτων, ενώ γνώριζε τις ιδιότητες των παραβολικών κατόπτρων, τελικά επέλεξε ένα σφαιρικό σχήμα προκειμένου να απλουστεύσει τη διάταξη. Στους φάρους, επίσης χρησιμοποιούσαν παραβολικά κάτοπτρα προκειμένου να ευθυγραμμίσουν το φως από μία φορητή λάμπα σε μία ακτίνα, πριν αντικατασταθεί αυτή η διάταξη από τους φακούς Fresnel τον 19<sup>ο</sup> αιώνα. Το 1767, ο Ελβετός επιστήμονας Horace de Saussure κατασκευάζει τον πρώτο ηλιακό συλλέκτη, ο οποίος στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε από τον Sir John Herschel για μαγειρικούς σκοπούς κατά τη διάρκεια παραμονής του στην νότια Αφρική το 1830, ενώ το 1883 σχεδιάστηκε το πρώτο φωτοβολταϊκό κελλί.

Η τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια δημιούργησε τις πρώτες μεγάλης ισχύος μονάδες στις αρχές της δεκαετίας του 80 (Hisperia, California 1982) και σήμερα είναι ήδη στην αγορά. Ήδη τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συγκεντρωμένη ηλιακή, έχουν σημαντική συμβολή στην παραγωγή ενέργειας αποδοτικής, οικονομικής και φιλικής με το περιβάλλον [3].

### I.2.2 Συγκέντρωση Ηλιακής Ακτινοβολίας [8]

Υπάρχουν διάφορα οπτικά συστήματα για τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας για παραγωγή ενέργειας ή θερμότητας :

- Πιάτο (*Dish*)

Τρισδιάστατη συγκέντρωση, απευθείας συγκέντρωση ηλιακής ενέργειας στο παραβολοειδές κάτοπτρο, θερμοκρασίες πάνω από 1200°C

- Πύργος (*Tower*)

Τρισδιάστατη συγκέντρωση, σύστημα ηλιοστατών διαξονικό, θερμοκρασίες μέχρι 1200°C

- Κοίλο (*trough*)

Μονό κοίλο, παραβολικό κάτοπτρο, συγκέντρωση σε έναν άξονα μέγιστη θερμοκρασία στους 450°C.

Αυτές οι οπτικές διατάξεις κατατάσσονται βάσει των θερμοκρασιών που επιτυγχάνονται. Στις διατάξεις *πιάτου* και στον *πύργο* οι θερμοκρασίες της θερμαινόμενης επιφάνειας, περιορίζονται από τα διαθέσιμα υλικά και την τεχνολογία του εναλλάκτη θερμότητας. Βασικά ο συγκεντρωτής και ο εναλλάκτης μπορούν να συνδυαστούν στη συνδυασμένη τεχνολογία ατμού / γεννήτριας με μεγάλη ακρίβεια/ αποτελεσματικότητα.

Οι τεχνολογίες συγκέντρωσης έγκεινται στη διαθεσιμότητα της απ' ευθείας ακτινοβολίας, η οποία περιορίζει την εφαρμογή τους σε περιοχές με εν δυνάμει υψηλή ακτινοβολία στη ζώνη του ήλιου. Η ασυνέχεια στη διάθεση ενέργειας στις ηλιακές εγκαταστάσεις καταλήγει στην ανάγκη χρήσης - αποθήκευσης ενέργειας. Το σχήμα μετατροπής ηλιακής / θερμικής ισχύος (the solar/thermal power conversion scheme) μπορεί πολύ καλά να υιοθετηθεί σε εγκατάσταση αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα σε σχέση με τις τεχνολογίες που παράγουν ηλεκτρισμό (τουρμπίνες αέρα, φωτοβολταϊκά κελιά), γιατί η αποθήκευση θερμότητας σε μεγάλες ποσότητες μπορεί να γίνει με μικρότερα κόστη σε σχέση με την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ μπαταρίες). Για αποτελεσματική αποθήκευση ενέργειας θα πρέπει να

χρησιμοποιηθούν υψηλές θερμοκρασίες. Αυτή η προϋπόθεση υποδεικνύει τη χρήση τεχνολογιών υψηλής συγκέντρωσης δίσκων ή πύργων. Από την άλλη μεριά το ηλιακό θερμικό μονοπάτι παρέχει τη δυνατότητα της υβριδικής χρήσης π.χ. αλλαγή με καύση ορυκτού καυσίμου σε περιόδους χωρίς ηλιακή ακτινοβολία.

Πολλές ηλιακές εγκαταστάσεις θερμικής ισχύος έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα. Η τεχνολογία του δίσκου έχει φτάσει σε απόδοση 150 kW ηλεκτρικής ισχύος ανά δίσκο, συστήματα πύργου / κατοπτρών μπορούν να φτάσουν τα 10 MW. Ενώ, η τεχνολογία του κοίλου λειτουργεί σε διαφορετικές εγκαταστάσεις και μπορεί να φτάσει τα 80 MW (ανά μπλοκ).

Η ηλιακή ροή πυκνότητας που φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη συγκρινόμενη με πυκνότητες ενέργειας από καύση ορυκτών καυσίμων. Για αυτόν τον λόγο θα πρέπει να συγκεντρωθεί πριν τροφοδοτήσει θερμικούς και ενεργειακούς κύκλους μετατροπών. Σε αντίθεση με τις οπτικές αρχές που πρέπει να ισχύουν στο σχεδιασμό υψηλής ακρίβειας κατοπτρικού αντικειμένου, στην περίπτωση της συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας θα πρέπει τα χρησιμοποιούμενα οπτικά στοιχεία, να είναι πολύ μεγαλύτερων διαστάσεων. Ο παράγοντας του κόστους είναι πολύ πιο σημαντικός από τον αντίστοιχο της οπτικής ακρίβειας.

Για το σχεδιασμό ηλιακού συγκεντρωτή, εφαρμόζονται οι βασικοί νόμοι της οπτικής δημιουργίας γεωμετρικού αντικειμένου, καθώς και χρησιμοποιούνται εργαλεία παρακολούθησης της ακτίνας για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συγκεντρωτή.

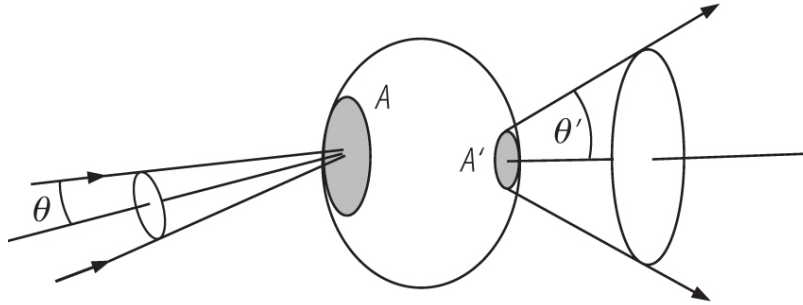
Η ακτινοβολούμενη ροή της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας,  $\Phi$ , έχει μία πυκνότητα ροής  $E$ , στην επιφάνεια της γης,  $A$  (Σχήμα I-8). Σε μία ενεργειακά μονωμένη μετάδοση η ακτινοβολούμενη ροή είναι διατηρούμενη και δεν αυξάνεται άρα :

$$\Phi = \Phi'$$

$$AE = A'E'$$

Συγκέντρωση της πυκνότητας ροής επί έναν παράγοντα  $C$  σημαίνει ότι

$$C = \frac{E}{E'} = \frac{A'}{A}$$



Σχήμα I- 8 :Σχηματική απεικόνιση της συγκέντρωσης ακτινοβολίας

$$A \sin^2 (\theta) = A' \sin^2 (\theta') \text{ (συγκεντρωτές σημείου)}$$

$$A \sin (\theta) = A' \sin (\theta') \text{ (συγκεντρωτές γραμμής)}$$

Για γωνίες διάθλασης  $n$  και  $n'$  για διάδοση σε διάφορα μέσα, ο παράγοντας συγκέντρωσης μπορεί να λάβει τη μέγιστη τιμή του για διάδοση στον αέρα

$$C_{\max} = 46200 \text{ (συγκεντρωτές σημείου)}$$

$$C_{\max} = 215 \text{ (συγκεντρωτές γραμμής)}$$

για γωνία  $\theta = 4,65 \text{ mrad}$  και  $\theta' = \pi/2$



### **I.2.3 Εγκαταστάσεις Συγκέντρωσης Ηλιακής Ακτινοβολίας**

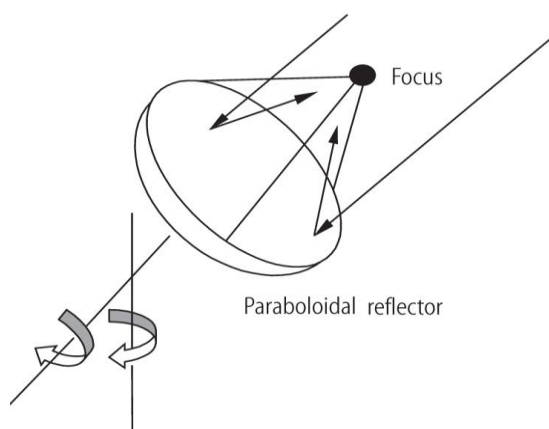
(Στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ, σελ. Π1** καταγράφονται οι βασικές οπτικές μέθοδοι συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας)

#### **I.2.3.1 Σχεδιασμός εγκαταστάσεων για τη συγκέντρωση ηλιακής ενέργειας [4-6]**

Αυτή η ενότητα, περιλαμβάνει μερικές από τις σημαντικότερες διατάξεις, οι οποίες έχουν βρει εφαρμογή στη συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας. Όλες βασίζονται στις αρχές που αναλύονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ. Κάθε μία από αυτές τις διατάξεις θα χρειαστεί λεπτομερή οπτική ανάλυση για την απόδοση λειτουργίας και τις κατανομές της πυκνότητας ροής ενέργειας στα επίπεδα ή και όγκους εστίασης.

##### **I.2.3.1.1 Παραβολοειδές κάτοπτρο**

Πρόκειται για την πλέον απλή οπτική διάταξη για την συγκέντρωση της ακτινοβολίας. Αυτή η μορφή ανακλαστή ονομάζεται δίσκος και έχει καμπύλη επιφάνεια σε σχήμα μίας περιστρεφόμενης συμμετρικής παραβολής. Οι ανακλαστές θα πρέπει να παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια, γιατί αστιγματικές αποκλίσεις (το σφάλμα ενός φακού ή ενός κατόπτρου κατά το οποίο οι ακτίνες που προέρχονται από ένα σημείο δεν συγκλίνουν επί μίας εστίας (στιγμα) κατά το σχηματισμό ειδώλου, αλλά επί δύο εστιακών γραμμών προκαλώντας παραμόρφωση) είναι απαγορευτικές για μεγαλύτερη ευθυγράμμιση. Φαίνεται από το *Σχήμα I-9*, ότι στα όργανα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου το σημείο εστίασης δεν είναι σταθερό στον χώρο και τον χρόνο και προσδιορίζεται επάνω από το έδαφος σε απόσταση της τάξης της διαμέτρου του συγκεντρωτή.



**Σχήμα Ι-9 : Παραβολοειδές κάτοπτρο**

### **Ι.2.3.1.2 Σφαιρικό κάτοπτρο**

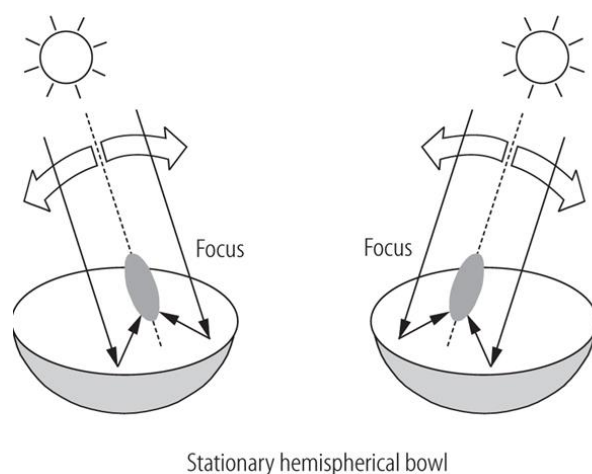
Η διάταξη αυτή είναι παρόμοια με τον παραβολοειδή ανακλαστή και πολύ διαδεδομένη στην οπτική των ειδώλων. Η επιφάνεια έχει τη μορφή σφαιρικού τμήματος. Ένα τμήμα επιφάνειας με διάμετρο πολύ μικρότερη από την ακτίνα της σφαίρας αποτελεί προσέγγιση της παραβολής. Κατασκευαστικά απλοποιείται εξαιτίας της σφαιρικής συμμετρίας. Σε περιπτώσεις επιθυμίας υψηλής πυκνότητας συγκέντρωσης ενέργειας, ένας υψηλός παράγοντας συγκέντρωσης - προϋποθέτει μικρούς  $f/D$  παράγοντες - είναι πολύ πιο σημαντικός από υψηλής ποιότητας είδωλο. Για μικρούς παράγοντες  $f/D$  οι σφαιρικές αποκλίσεις είναι ελάχιστες.

Σε αυτές τις περιπτώσεις η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης δεν ξεπερνά κάποιες εκατοντάδες. Όπως φαίνεται στον παραβολοειδή ανακλαστή η επιφάνεια πρέπει να μετακινείται για να ακολουθεί την τροχιά του ήλιου.

### **Ι.2.3.1.3 Ημισφαιρικό κοίλο κάτοπτρο**

Σε αυτήν την διάταξη χρησιμοποιείται ένας σταθερός ημισφαιρικός συλλέκτης (Σχήμα I-10). Το φως συγκεντρώνεται σε μία περιοχή που προσδιορίζεται από την εστιακή επιφάνεια (στην οποία εφάπτονται οι εξ ανακλάσεως ακτίνες που σχηματίζεται αντί της στιγματικής εστίας, κατά την ανάκλαση ευρείας παράλληλης δέσμης επί σφαιρικού κατόπτρου μεγάλου ανοίγματος λόγω του σφάλματος της σφαιρικής εκτροπής.

Πρόκειται για καμπύλη επιφάνεια εκ περιστροφής με το μέγιστο της έντασης περί την κυρία εστία των ανακλώμενων ακτινών. Ο απορροφητής θα πρέπει να κινείται επάνω σε έναν άξονα (ρίνοτ) στο κέντρο της σφαίρας και να δείχνει αντίθετα από το διάνυσμα του ήλιου.



**Σχήμα I-10 : Ημισφαιρικό κοίλο κάτοπτρο**

Αυτή η διάταξη έχει μέγιστο παράγοντα συγκέντρωσης της τάξης του 800. Τα κύρια στοιχεία των συστημάτων LUZ (αποτελούνται από μεγάλους παραβολικούς κοίλους συγκεντρωτές που παρέχουν σε Rankine εγκαταστάσεις ενέργειας) είναι οι συγκεντρωτές, οι αντλίες μεταφοράς υγρού, τα συστήματα παραγωγής ενέργειας.

#### **I.2.3.1.4 Δύο σταδίων ηλιοστάτης - συγκεντρωτής**

Πριν την αναλυτική περιγραφή του συστήματος Ηλιοστάτη -Συγκεντρωτή παραθέτονται μερικές βασικές πληροφορίες για τους *ηλιοστάτες* και την τεχνολογία τους.

Οι *ηλιοστάτες* είναι συλλέκτες ακτινοβολίας από τους οποίους προσλαμβάνεται η ηλιακή ενέργεια. Πρόκειται για συστήματα κατόπτρων τα οποία τοποθετούνται είτε με σταθερή κλίση, οπότε η πρόσληψη της ενέργειας είναι μικρή, είτε με μεταβαλλόμενη κλίση μέσω ρύθμισης της γωνίας τοποθέτησης τους ανά εποχή, επιτυγχάνοντας έτσι, σαφώς μεγαλύτερη απόδοση πρόσληψης ενέργειας.

Οι πλέον σύγχρονοι ηλιοστάτες είναι οι επονομαζόμενοι *ιχνηλάτες* (trackers), οι οποίοι διαθέτουν σύστημα συνεχούς παρακολούθησης της πορείας του ήλιου, ώστε οι ακτίνες του να προσπίπτουν πάντα κάθετα στην επιφάνεια τους. Έτσι, επιτυγχάνεται αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος από 30% έως 50% συγκριτικά με αυτήν των συλλεκτών σταθερής κλίσης.

Οι Συλλέκτες/ Ιχνηλάτες, βάσει του συστήματος κίνησης διακρίνονται σε :

##### *A. Σύστημα με στροφή γύρω από έναν άξονα*

Σε αυτήν την περίπτωση ο συλλέκτης περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα και παρακολουθεί την πορεία του ήλιου μέχρι την δύση του.

Αυτοί οι ιχνηλάτες διακρίνονται δε σε δύο υποκατηγορίες :

- *αζιμουθιακός ιχνηλάτης*
- *πολικός ιχνηλάτης*

##### *A.1 Ο αζιμουθιακός ιχνηλάτης*

Το σύστημα κατόπτρων περιστρέφεται ως προς έναν κατακόρυφο άξονα, έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να πέφτουν κάθετα στο συλλέκτη. Η γωνία κλίση του, γίνεται βάσει του γεωγραφικού πλάτους.



**Σχήμα I-11 : Αζιμουθιακός ιχνηλάτης**

#### A.2 Πολικός ιχνηλάτης (*polar tracker*)

Σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα των κατόπτρων περιστρέφεται ως προς έναν άξονα με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής και παράλληλα στον πολικό άξονα της. Έτσι, ο ήλιος βρίσκεται πάντα στο επίπεδο που είναι κάθετο στο συλλέκτη. Η δε γωνία μεταξύ των ακτινών του ηλίου και της κάθετης στο συλλέκτη, κυμαίνεται, όλον τον χρόνο μεταξύ διάστημα  $-23,45^\circ$  έως  $+23,45^\circ$ .

Η κύρια εφαρμογή των ιχνηλατών αυτών είναι οι μονάδες παραγωγής ενέργειας, καθώς και οι θερμικοί σταθμοί

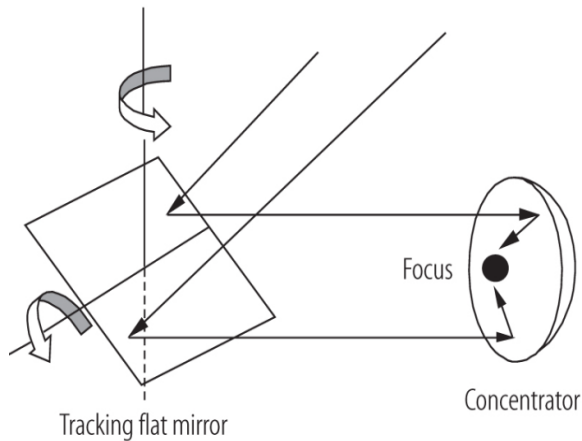
*B.Σύστημα με στροφή γύρω από δύο άξονες*

Οι ιχνηλάτες αυτοί έχουν τη δυνατότητα παρακολούθησης και των δύο κινήσεων του ηλίου : αζιμούθιο  $Z$  και ύψος ηλίου  $\beta$ , και έχουν δύο συστήματα κίνησης. Η επιτυγχανόμενη απόδοση είναι η μέγιστη γιατί η πρόπτωση των ακτίνων διατηρείται κάθετη σε όλη τη διάρκεια της ημέρας και του χρόνου.



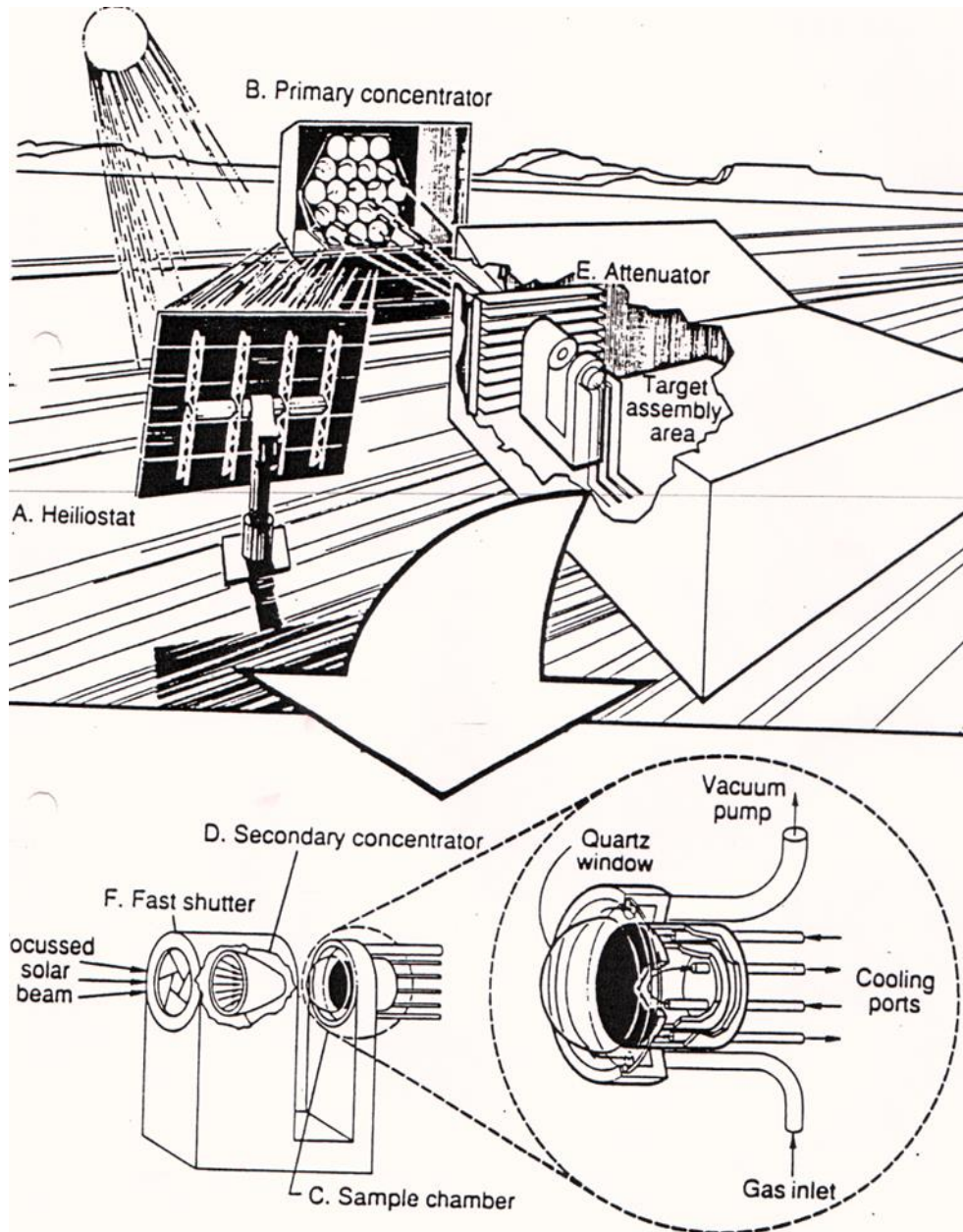
**Σχήμα I- 12 : Ιχνηλάτης δύο αξόνων**

Ο τύπος του ηλιακού συστήματος συγκέντρωσης Ηλιοστάτη - Συγκεντρωτή ονομάζεται *ηλιακός φούρνος*



**Σχήματα I-13 : Διάταξη δύο σταδίων ηλιοστάτη - συγκεντρωτή**

Όλοι οι ηλιακοί φούρνοι έχουν μια μέθοδο συγκέντρωσης της ενέργειας προκειμένου να διατηρούν το επίπεδο της μέγιστης συγκέντρωσης σε μία συγκεκριμένη θέση. Πιο συγκεκριμένα η διάταξη ενός ηλιακού φούρνου μπορεί να ελέγχει τη ροή, το χρόνο έκθεσης και το σχήμα της διατομής της ακτίνας.



Σχήμα I-14 : Απεικόνιση αρχής λειτουργίας ηλιακού φούρνου

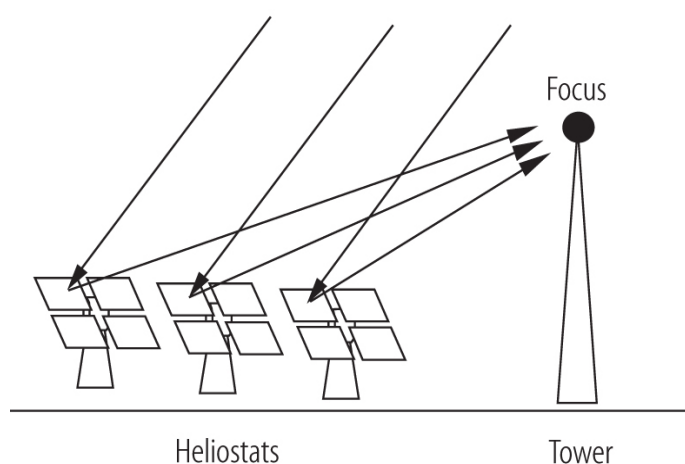


Ειδικότερα, η αρχή λειτουργίας ενός ηλιακού φούρνου, με βάση το πρότυπο της εγκατάστασης του *Solar Energy Research Institute (SERI)* στην Καλιφόρνια, ενός ηλιακού φούρνου Τύπου II, όμοιου με αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν στην εκπόνηση των πειραμάτων της παρούσας διατριβής, παρουσιάζονται στο Σχήμα 16.

Το σύνηθες σύστημα συγκέντρωσης αποτελείται από ένα ή περισσότερα κάτοπτρα, με δυνατότητα κίνησης, τα οποία ονομάζονται ηλιοστάτες, οι οποίοι κατευθύνουν την ηλιακή ενέργεια σε ένα σύστημα κατόπτρων συγκέντρωσης (A, Heliostat και B, Concentrator Σχήμα 16). Στο σημείο εστίασης η εστιαζόμενη δέσμη μπορεί να είναι ένα spot 1mm διαμέτρου ή σε μεγαλύτερες διατάξεις μέχρι και 1m. Το σχήμα του κατόπτρου του ηλιακού φούρνου μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να παράγει μία δέσμη ακτινών με συγκεκριμένο επιθυμητό σχήμα διατομής. Μπροστά από το επίπεδο που τοποθετείται το δοκίμιο που πρόκειται να κατεργαστεί, ένα δεύτερο κάτοπτρο (D, Secondary concentrator) συγκέντρωσης μπορεί να τοποθετηθεί αυξάνοντας τη συγκέντρωση κατά ένα παράγοντα της τάξης του 10 ή περισσότερο. Ένα σετ περσίδων (E, Attenuator) τοποθετείται ανάμεσα στους ηλιοστάτες και το κάτοπτρο προκειμένου να ελέγχει την πυκνότητα ενέργειας που φθάνει στο δείγμα. Η διάταξη αυτή λοιπόν, μπορεί να ελέγχει την ποσότητα της πυκνότητας ενέργειας, τη διάρκεια έκθεσης, καθώς και το σχήμα της ακτίνας που φθάνει το δοκίμιο.

#### **I.2.3.1.5 Συγκεντρωτές/ ηλιοστάτες και πύργος**

Η διάταξη που χρησιμοποιεί έναν αριθμό ηλιοστατών φαίνεται στο Σχήμα I-15 και οδηγεί σε σταθερό σημείο εστίασης. Οι ηλιοστάτες είναι εξοπλισμένοι με καθρέπτες συγκέντρωσης και ανακλούν τον ήλιο στην κορυφή του πύργου. Η διάταξη αντιστοιχεί σε ένα τροποποιημένο οπτικό σύστημα Fresnel. Θα ήταν επίσης δυνατό να χρησιμοποιήσεις μικρούς επίπεδους ηλιοστάτες με καθρέπτες εάν το μέγεθος της επιφάνειας του καθρέπτη ήταν ίσο ή μικρότερο από το προβαλλόμενο ηλιακό είδωλο στο επίπεδο εστίασης.

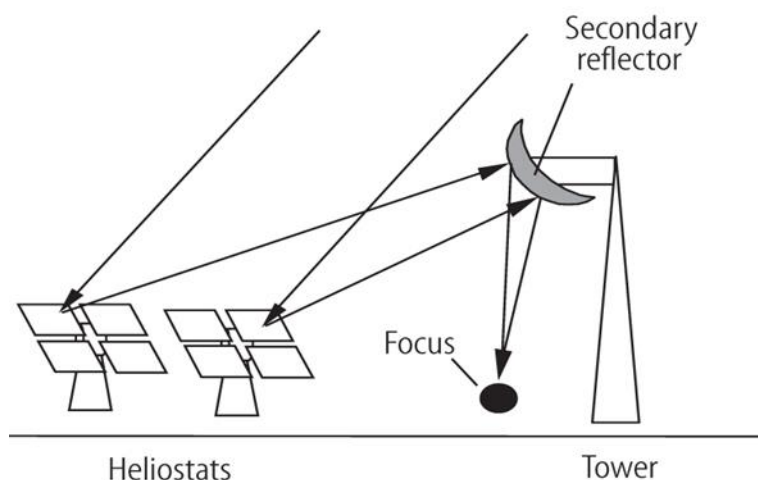


**Σχήμα I-15 : Σύστημα πεδίου ηλιοστατών / πύργου**

Ο ηλιοστάτης και ο πύργος έχουν τις προδιαγραφές για μεγάλης κλίμακας συστήματα. Η κατασκευή και εγκατάσταση μεγάλου αριθμού ηλιοστατών έχει δυνατότητες μείωσης του κόστους. Ένα μικρό μειονέκτημα του όλου θέματος είναι ότι μέρος του συστήματος παραγωγής ισχύος πρέπει να εγκατασταθεί επάνω στην κορυφή του πύργου.

#### **I.2.3.1.6 Πύργος ακτίνας προς τα κάτω**

Η κύρια σχηματική διάταξη της προσέγγισης πύργου ακτίνας προς τα κάτω βασίζεται σε ηλιοστάτες και σε έναν πύργο όπως προαναφέρθηκε. Όπως φαίνεται στο Σχήμα I-16, ένας ενδιάμεσο κάτοπτρο τοποθετείται στην κορυφή του πύργου. Αυτό το κάτοπτρο αντανακλά τη δέσμη προς το έδαφος. Ο δέκτης και όλα τα ενεργειακά παραγωγής συστήματα μπορούν να βρίσκονται στο έδαφος, και με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται και οι απώλειες στις σωληνώσεις. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτής της διάταξης είναι τα ακόλουθα :



Σχήμα I-16: Σχηματική απεικόνιση συστήματος πύργου - ακτίνας προς τα κάτω

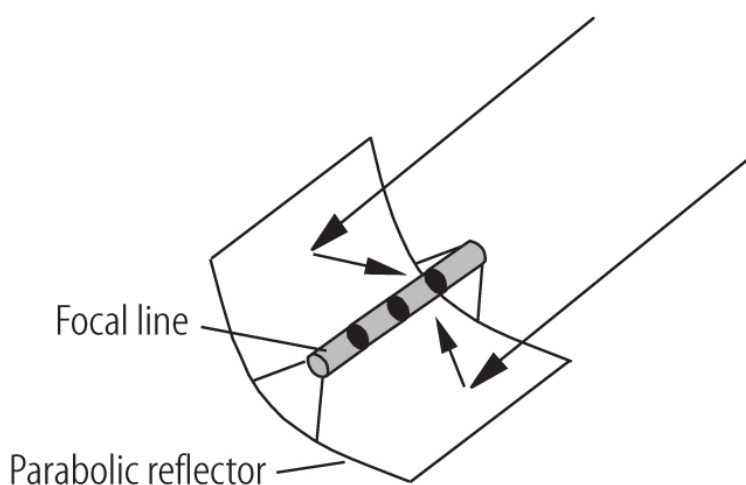
Πίνακας I-1 : Βασικά χαρακτηριστικά συστημάτων πύργου ισχύος

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| Τυπικό μέγεθος                        | 10-200MW <sup>a</sup>   |
| Θερμοκρασία λειτουργίας               |   |
| Rankine                               | 565 °C  |
| Brayton                               | 800 °C  |
| Ετήσιος συντελεστής δυναμικού         | 20-77 % <sup>a</sup>  |
| Απόδοση αιχμής                        | 16-23 % <sup>a</sup>  |
| Ετήσια καθαρή απόδοση                 | 12-20 % <sup>a</sup>  |
| Εμπορική κατάσταση                    | Επίδειξη κλιμακωτής αύξησης (10-30 MW)  |
| Ρίσκο ανάπτυξης της τεχνολογίας       | Μεσαίο  |
| Διαθέσιμο μέσο αποθήκευσης            | Νιτρικό άλας για δέκτες τηγμένου άλατος<br>κεραμική επίπεδη επιφάνεια για δέκτες ατμοσφαιρικού αέρα |
| Υβριδικά σχέδια                       | Ναι   |
| Κόστος επένδυσης<br>\$W <sup>-1</sup> | 4.4-2.5 <sup>a</sup>  |

Οι τιμές με δείκτη "a" υποδηλώνουν την αναμενόμενη πρόοδο από το παρόν μέχρι το 2030.

### I.2.3.1.7 Σύστημα Παραβολικών κοίλων

Το σύστημα παραβολικών κοίλων /ανακλαστή είναι μία διάταξη όπως απεικονίζεται στο Σχήμα I-17, το οποίο συγκεντρώνει την ηλιακή ενέργεια σε μία γραμμή εστίασης. Πρόκειται για την γραμμική προέκταση της παραβολικής γεωμετρίας.



**Σχήμα I-17 : Σχηματική απεικόνιση παραβολικού κοίλου (trough)**

Ο μέγιστος παράγοντας συγκέντρωσης είναι το 215 (πρβλ. παρ. 1.3) και αυτή η διάταξη χρησιμοποιείται σε διεργασίες μέσης θερμοκρασίας. Μπορεί να διαθέτει ένα δι-διάστατο σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου, αλλά το κύριο πλεονέκτημα του γραμμικού συστήματος είναι ότι εάν χρησιμοποιηθούν μεγάλου μήκους τέτοιες διατάξεις μίας διάστασης παρακολούθησης της τροχιάς μπορεί να αντικαταστήσει ισοδύναμα το δι-διάστατο σύστημα, με μικρότερο βαθμό πολυπλοκότητας και άρα μικρότερο κόστος. Αυτή τη στιγμή όλα τα εμπορικά σχέδια παραβολικών κοίλων χρησιμοποιούν ένα μονό άξονα στο σύστημα παρακολούθησης. Μολονότι στο παρελθόν έχουν σχεδιαστεί, κατασκευαστεί και εξεταστεί σχέδια

παρακολούθησης με διπλό άξονα, τα αποτελέσματα αξιολόγησης δείχνουν ότι δεν είναι οικονομικά συμφέροντα. Ειδικότερα, η παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου σε δύο άξονες επιτρέπει η γωνία πρόσπτωσης να είναι πάντα ίση με  $0^\circ$ , γεγονός που ελαχιστοποιεί τις οπτικές απώλειες και αυξάνει παράλληλα την πυκνότητα ροής της ηλιακής ενέργειας. Όμως οι σχετικές θερμικές απώλειες και οι δαπάνες συντήρησης είναι σημαντικά υψηλότερες [8].

#### I.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Duffie, J.A. and Beckman, W.A., April 2013, *SOLAR ENGINEERING OF THERMAL PROCESSES*, 4<sup>th</sup> edition, WILEY
- [2] <http://energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>
- [3] [www.cres.gr](http://www.cres.gr)
- [4] Erbs, D., Klein, S. and Duffie, J.A. (1982) 'Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation' *Solar Energy*, 28 (4), p. 293-302
- [5] Holland, P.G and Mayer, I. (1988) 'On calculating the position of the Sun' *International Journal of Ambient Energy* 9(1), p. 47-52
- [6] Jemaa, B.A., Raza, S., Essounbouli, N., Hamzaoui, A., Hnaien, F., Yalaoui, F. (2013) 'Estimation of Global Solar Irradiation using Three simple Methods' *Energy Procedia* 42 p. 406-415
- [7] Muller-Steinhagen, H. and Trieb, F. (2004) 'Concentrating Solar Energy' *Ingenia*, p.43-50.
- [8] Neumann, A. (2006) 4.1 Solar thermal power plants in *Energies Technology: Renewable Energy* Heinloth, Landolt-Börnstein, New Series **VIII/3C. pages 38**
- [9] Herranz, G. and Rodríguez, G.P. 2010. Uses of Concentrated Solar Energy in Materials Science, *Solar Energy*, Radu D Rugescu (Ed.), ISBN: 978-953-307-052-0, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/solar-energy/uses-of-concentrated-solar-energy-in-materials-science>



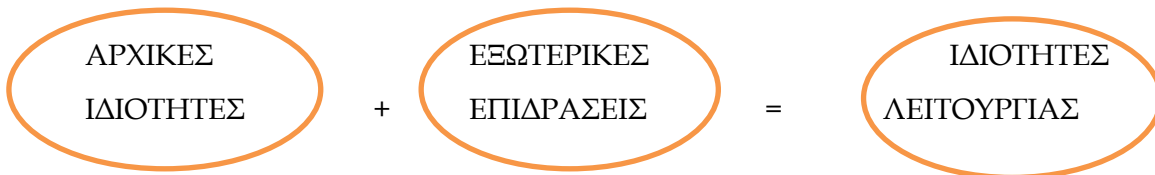
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙ : ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

### ΙΙ.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ [1]

Η επιφάνεια ενός σώματος δημιουργείται για ένα συγκεκριμένο σκοπό, και σχεδιάζεται προκειμένου να εκτεθεί σε εξωτερικές επιδράσεις τόσο φυσικές όσο και χημικές. Πρακτικά χρήσιμες ιδιότητες της επιφάνειας, με θετική συμβολή στη λειτουργία του συγκεκριμένου μέρους υπό συνθήκες μίας μορφής εξωτερικής επίδρασης, μπορεί να αποδειχθούν λιγότερο θετικές σε συνθήκες άλλων εξωτερικών επιδράσεων : για παράδειγμα, μη διαβρώσιμες επιφάνειες είθισται να επιδεικνύουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση.

*Άρα, οι πρακτικά χρήσιμες ιδιότητες της επιφάνειας είναι : το αποτέλεσμα της αντιστοίχισης των αρχικών ιδιοτήτων με τις εξωτερικές επιδράσεις.*

Οι ιδιότητες λειτουργίας, αλλάζουν κατά την εξέλιξη της λειτουργίας με το χρόνο χρήσης του μέρους, εξαρτήματος κλπ. Σε εξαιρετικά λίγες περιπτώσεις ιδιοτήτων μπορεί οι αρχικές, να είναι ισοδύναμες των πρακτικών.



Κατάλληλοι συνδυασμοί των αρχικών τιμών των ιδιοτήτων μπορεί να είναι βέλτιστοι για κατάλληλο συνδυασμό εξωτερικών φορτίσεων /καταπονήσεων. Αυτές μπορεί να είναι μηχανικές τάσεις, τριβή, χημικές αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον, φυσικές αλληλεπιδράσεις προκαλούμενες από ηλεκτρικό ρεύμα ή μαγνητικό πεδίο ή συνδυασμό πεδίων.

Οι πιο σημαντικές ιδιότητες λειτουργίας της επιφάνειας είναι οι : αντοχή, τριβολογικές, και αντιδιαβρωτικές. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής θα εξετασθούν οι τριβολογικές ιδιότητες.

**II.1.1 Τριβολογικές Ιδιότητες [1,2]**

Η τριβή είναι βασική προϋπόθεση για την κίνηση των όντων και των οχημάτων και αποτελεί τη βάση της αρχής λειτουργίας για πολλές τεχνικές συσκευές. Την ίδια στιγμή σε πολλές περιπτώσεις η τριβή αποτελεί μία ανεπιθύμητη επίδραση που προκαλεί σημαντικές απώλειες ενέργειας προκειμένου να ξεπεραστεί η αντίσταση λόγω τριβής. Επιπλέον η τριβή προκαλεί φθορά των εξαρτημάτων των μηχανών, προκαλώντας ζημιές σε αυτά. Το 80-90% των εξαρτημάτων μηχανών λειτουργούν υπό συνθήκες τριβής.

Η τριβή είναι ένα φυσικό φαινόμενο και μπορεί να οριστεί ως εξής :

- **Εξωτερική**, όταν αφορά σε σχετική μετατόπιση των επιφανειών δύο στερεών σε επαφή μεταξύ τους. Αυτός ο τύπος τριβής χαρακτηρίζεται από αμοιβαία διάδραση των σωμάτων στις επιφάνειες επαφής και προκύπτει από την αντίσταση στη σχετική μετακίνηση και έχει κατεύθυνση κάθετη της επιφάνειας επαφής
- **Εσωτερική**, όταν αφορά στην σχετική μετακίνηση τμημάτων/σωματιδίων του ίδιου σώματος π.χ. στην περίπτωση υγρού που διαχωρίζεται από την επιφάνεια του στερεού (π.χ. τριβή υγρών) ή μεταξύ σωματιδίων στερεού (κατά την αποσύνθεση)

Οι τριβολογικές ιδιότητες συνιστούν εκείνες τις ιδιότητες οι οποίες αποτελούν τις συνθήκες της αμοιβαίας διάδρασης της επιφάνειας και του περιβάλλοντος των σωμάτων σε τριβολογική επαφή.

Η τριβή εκφράζεται μέσω του συντελεστή τριβής ( $\mu$ ) ο οποίος ορίζεται από τον λόγο της εφαπτομενικής δύναμης  $F_T$ , η οποία προκαλεί την έναρξη της κίνησης προς την δύναμη  $F_N$ , η οποία ασκείται κάθετα στην επιφάνεια επαφής, οπότε ισχύει η σχέση :

$$F_T = \mu F_N \quad (\text{ΕΞ. II. 1})$$

Εάν η δύναμη  $F_S$  προκαλεί την έναρξη της ολίσθησης ενός σώματος και η δύναμη  $F_K$  είναι η αναγκαία δύναμη για την συντήρηση της κίνησης αυτής τότε διακρίνουμε τον συντελεστή στατικής τριβής ( $F_S/F_N$ ) και τον συντελεστή δυναμικής τριβής ( $F_K/F_N$ ).



Και επειδή, η βασική επίδραση της διάδρασης των σωμάτων που τρίβονται το ένα με το άλλο είναι η φθορά, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι οι τριβολογικές ιδιότητες περιγράφουν το συντελεστή τριβής και την ένταση της φθοράς καθώς, και σε κάποιο βαθμό, την αντίσταση στην πρόσφυση με συγκράτηση. Τα προαναφερθέντα εξαρτώνται από τις συνθήκες στις οποίες η διαδικασία της τριβής, εμφανίζεται, καθώς επίσης και στις αρχικές ιδιότητες των τριβόμενων επιφανειών, π.χ. ο τύπος της τριβής, οι μέθοδοι της λίπανσης και η φύση της φθοράς.

Από την άποψη της *έντασης της φθοράς* η τριβή μπορεί να διαχωριστεί σε :

- **Τριβή με Φθορά**, που εμφανίζεται στην πλειονότητα των πρακτικών εφαρμογών, η οποία συνδέεται σε ένα μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό στην βαθμιαία καταστροφή των τριβόμενων επιφανειών, και συνοδεύεται από υψηλής έντασης φθορά
- **Τριβή χωρίς φθορά**, η οποία εμφανίζεται σε ειδικές συνθήκες και συνδέεται με την αυθόρμητη σύνθεση –κατά τη λειτουργία- νέων τριβόμενων επιφανειών, εξ' αιτίας της επονομαζόμενης επιλεκτικής μετατοπίσης του υλικού. Σε αυτήν την περίπτωση η ένταση της φθοράς είναι πολλές τάξεις μικρότερη από τον προαναφερθέντα τύπο τριβής που προκαλεί φθορά

### II.1.2 Ο ρόλος της επιφάνειας στη διαδικασία της τριβής [1]

Η τριβή είναι μία ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία, η οποία είναι δύσκολο να παρουσιασθεί σε μία απλή θεωρία. Η δύναμη της τριβής εξαρτάται από το φορτίο που πιέζει τις τριβόμενες επιφάνειες, τον τύπο της τριβής και τον συντελεστή τριβής, τα οποία όλα εξαρτώνται αντιστρόφως από τον τύπο των επιφανειακών στρωμάτων των τριβόμενων επιφανειών (αρχικές ιδιότητες τους) και τον τύπο και τις ιδιότητες της ουσίας που βρίσκεται ανάμεσα στις επιφάνειες. Επιπλέον εξαρτάται από την ταχύτητα, θερμοκρασία και την διάρκεια της διαδικασίας της τριβής.

Μεταλλικές επιφάνειες οι οποίες είναι εκτεθειμένες στον αέρα πάντα καλύπτονται από λεπτά φιλμ οξειδίων ή αερίων που έχουν προσροφηθεί, γεγονός που σε μεγάλο βαθμό επηρεάζει την συνάφεια και την τριβή ανάμεσα στις επιφάνειες. Εφόσον υπάρχουν αυτά τα φιλμ επάνω στην μεταλλική επιφάνεια ο συντελεστής τριβής είναι χαμηλός και σπάνια φτάνει το διάστημα τιμών από 1 έως 1,5, χαρακτηριστικές τιμές της τριβής καθαρών μεταλλικών υλικών, που λαμβάνονται σε υψηλά κενά μετά την θέρμανση των μετάλλων. Στην περίπτωση των καθαρών μεταλλικών επιφανειών η συνάφεια είναι τόσο δυνατή ώστε οι αμοιβαίοι δεσμοί των δύο επιφανειών εμφανίζονται σε περιοχές επαφής των προεξοχών από δυνάμεις μεταλλικών δεσμών, οι οποίες στην συνέχεια προκαλούν την δημιουργία συνάφειας μικροδιάχυσης. Η γρήγορη ανάπτυξη των δεσμών συνάφειας των επιφανειών του τριβόμενου ζεύγους προκαλούν αύξηση της τριβής και αντίστοιχα, αύξηση της έντασης της φθοράς οδηγώντας σε βαθιά διάτμηση της επιφάνειας και συχνά σε παύση της σχετικής κίνησης των σωμάτων, και αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως πρόσφυση με συγκράτηση.

Παρόμοιες επιδράσεις έχουν παρατηρηθεί και σε άλλα υλικά. Για παράδειγμα το διαμάντι έχει έναν πολύ μικρό συντελεστή στατικής τριβής, ο γραφίτης έχει επίσης μικρό συντελεστή τριβής όχι μόνο λόγω της γραμμικής δομής του αλλά και λόγω των προσροφημένων επιφανειακών στρωμάτων από νερό και αέρια. Αναλόγως με την υγρασία του αέρα ο συντελεστής τριβής του γραφίτη στον γραφίτη κυμαίνεται από 0.6 έως και 1.

### II.1.3 Θερμικές Επιδράσεις της Τριβής [1]

Κατά τη σχετική κίνηση των ολισθαινουσών επιφανειών ένα σημαντικό ποσό θερμότητας απάγεται, προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας ακόμα και όταν τα φορτία και οι ταχύτητες ολίσθησης είναι πολύ μικρά.

Η θερμότητα που παράγεται κατανέμεται ομοιόμορφα στη ζώνη των τριβόμενων επιφανειών, αλλά περιορίζεται στις κορυφές των προεξοχών. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι το σημείο τήξης του υλικού, με αποτέλεσμα να προκαλούνται τοπικοί μετασχηματισμοί δομής και μεταβολές των παραμενουσών τάσεων του υλικού ή τη δημιουργία τοπικών μικροσυγκολλήσεων. Η θερμοκρασία της επιφάνειας εξαρτάται από τη φόρτιση και την ταχύτητα ολίσθησης, αλλά επίσης και από τη θερμική αγωγιμότητα και το συντελεστή τριβής. Η απαγωγή της θερμότητας είναι μία αυτοεπιταχυνόμενη διαδικασία δεδομένου ότι η αύξηση της τριβής και της συνάφειας σε τοπικά θερμά σημεία των μικροσυγκολλήσεων προκαλεί αύξηση στο ρυθμό απαγωγής της θερμότητας. Αυτό αντιστρόφως προκαλεί αύξηση στον αριθμό τέτοιων μικροσυγκολλήσεων και οδηγεί σε πρόσφυση με συγκράτηση ή ακόμα και δεσμό ανάμεσα στα δύο υλικά.

Το φαινόμενο της απαγωγής θερμότητας κατά την τριβή μπορεί να διαδραματίσει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην απόκτηση πολύ λείων επιφανειών σε διαδικασίες όπως λείανση, με μέσο εκτριβής. Αυτή η διαδικασία αφορά την εξομάλυνση της μη ευθυγραμμισμένης επιφάνειας με την φθορά των κορυφών των προεξοχών και την μετατροπή τους σε εγκοπές. Ως αποτέλεσμα της τριβής ανάμεσα σε μικρά σωματίδια της σκόνης εκτριβής και της λειασμένης επιφάνειας, σημεία υψηλής θερμοκρασίας εμφανίζονται ανάμεσα στη ζώνη επαφής, στα οποία η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει στο σημείο τήξης. Λιωμένο ή μαλακό μέταλλο εξαπλώνεται στην επιφάνεια και μετά από ταχεία στερεοποίηση δημιουργεί ένα χαρακτηριστικό άμορφο επίστρωμα γνωστό ως επίστρωμα Beilby. Αυτό το επίστρωμα δημιουργείται από εξαιρετικά μικρούς κρυστάλλους, λόγω ακριβώς της πολύ ξαφνικής επανακρυσταλλοποίησης του μετάλλου.

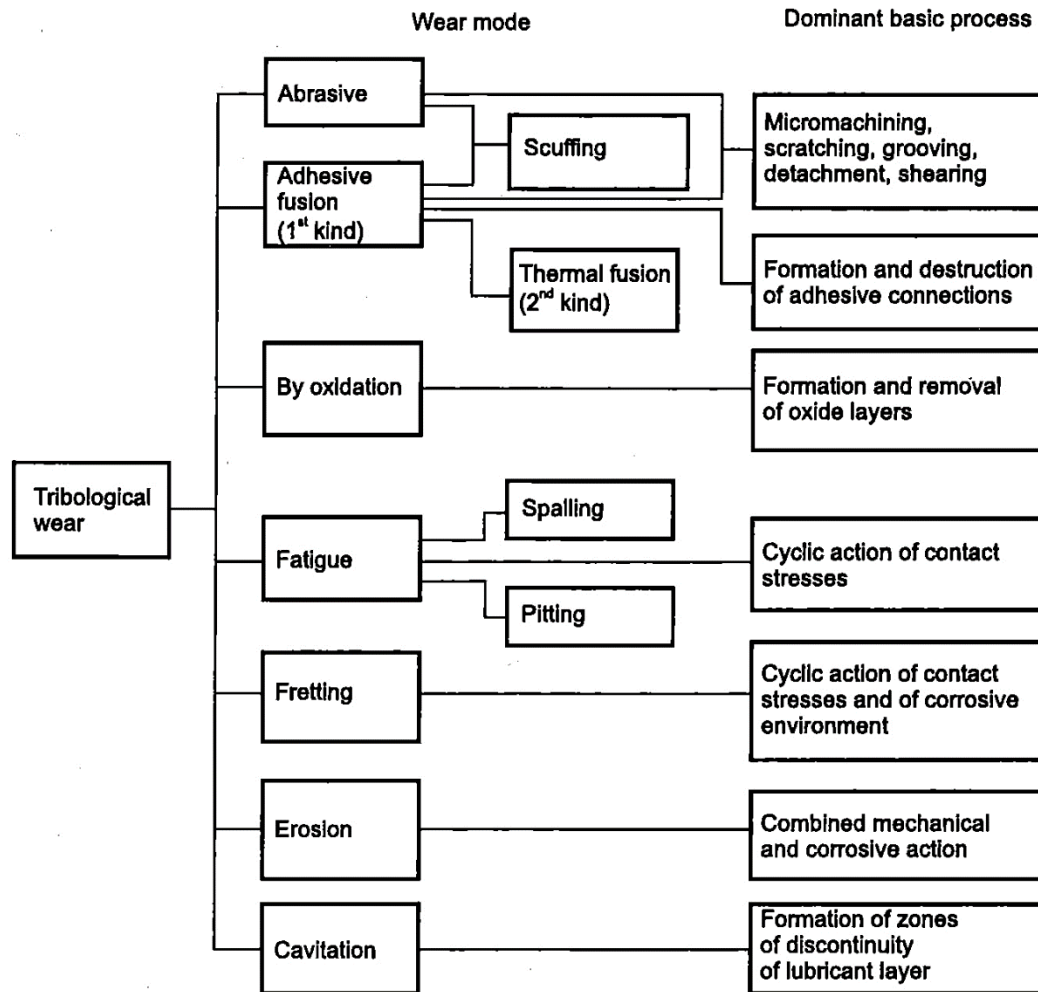
#### II.1.4 Τριβολογική Φθορά [ 1,2,3 ]

Το αποτέλεσμα της διάδρασης των τριβόμενων επιφανειών είναι η *τριβολογική φθορά* που θεωρείται ως η διαδικασία αποκοπής και απομάκρυνσης υλικού από την επιφάνεια των στερεών, εξαιτίας της τριβής, και αποδεικνύεται από την συνεχή αλλαγή των διαστάσεων και των σχημάτων των τριβόμενων εξαρτημάτων. Η φθορά ενός υλικού μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους και δεν αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό ενός υλικού, αλλά εξαρτάται από όλα τα στοιχεία του τριβοσυστήματος :

α. Εξεταζόμενο υλικό, β. Υλικό αναφοράς (ανταγωνιστικό υλικό) γ. Τα παραμένοντα στο σύστημα προϊόντα της φθοράς δ. Το περιβάλλον, υγρασία, θερμοκρασία, λίπανση κλπ

Οι αιτίες της φθοράς είναι στις περισσότερες περιπτώσεις μηχανικής προέλευσης, λιγότερο συχνά θερμικής, συνδυασμένα με χημική αντίδραση του περιβάλλοντος μέσου. Οι βασικές αιτίες φθοράς είναι :

- Ελαστική και πλαστική παραμόρφωση των κορυφών των προεξοχών
- Τον σχηματισμό επι των τριβόμενων επιφανειών επιστρωμάτων οξειδίων, τα οποία παρεμποδίζουν σε κάποιο βαθμό την φθορά και την βαθιά αποκόλληση υλικού, αλλά προσδίδουν ψαθυρότητα στην επιφάνεια
- Ενσωματώνουν μέρη της επιφάνειας του ενός σώματος στη επιφάνεια του άλλου. Κατά τη διάρκεια της φθοράς αυτό μπορεί να προκαλέσει εξόψεις και με παρατεταμένο χρόνο λειτουργίας, αποκόλληση υλικού
- Δεσμούς συνάφειας ανάμεσα στις επιφάνειες σε επαφή που προάγουν την μεταφορά υλικού από το ένα στο άλλο, επιταχύνοντας την φθορά
- Σταδιακή αύξηση της μάζας του υδρογόνου στην επιφάνεια χάλυβα και χυτοσίδηρου γεγονός που εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας και μπορεί να επιταχύνει την φθορά με ένα παράγοντα του 10



Σχήμα ΙΙ-1 : Κατηγοριοποίηση Τύπων Τριβολογικής Φθοράς [1]

Οι ακόλουθοι τέσσερις (4) τύποι φθοράς αναγνωρίζονται γενικά [2,3] ως κύριοι και σημαντικότεροι :

1. Φθορά λόγω εκτριβής (abrasive wear)
2. Φθορά λόγω πρόσφυσης (adhesive wear)
3. Φθορά λόγω τριβοχημικών αντιδράσεων (corrosion wear)
4. Φθορά λόγω επιφανειακής κόπωσης (fatigue wear)

Η φθορά *πρόσφυσης* και *εκτριβής* είναι οι τύποι φθοράς που εμφανίζονται σε συνθήκες πλαστικής επαφής. Στην περίπτωση πλαστικής επαφής ανάμεσα σε παρόμοιας σκληρότητας υλικά, η διεπιφάνεια επαφής έχει αντοχή δεσμών πρόσφυσης. Όταν προκύπτει θραύση λόγω της ισχυρής πρόσφυσης στη διεπιφάνεια επαφής η

προκληθείσα φθορά ονομάζεται φθορά λόγω *πρόσφυσης*, χωρίς να εξειδικεύεται στη μορφή της θραύσης. Στην περίπτωση της πλαστικής επαφής ανάμεσα στα σκληρά και αιχμηρά υλικά και σε υλικά σχετικά μαλακά, το σκληρότερο υλικό εισχωρεί στο μαλακότερο. Όταν η θραύση θεωρείται ότι προέκυψε ως αποτέλεσμα μικροκοπής από το εισχωρούμενο υλικό, η προκύπτουσα φθορά ονομάζεται φθορά εκτριβής. Στην περίπτωση της επαφής κατά το αρχικό στάδιο (*running-in*), η θραύση λόγω κόπωσης δημιουργείται λόγω των επαναλαμβανομένων κύκλων τριβής. Όταν η επιφανειακή αστοχία προκαλείται από κόπωση, η προκαλούμενη φθορά ονομάζεται φθορά κόπωσης. Σε περίπτωση επαφής μέσα σε διαβρωτικό περιβάλλον η τριβοχημική αντίδραση στην διεπιφάνεια επαφής, επιταχύνεται. Και όταν αυτή η τριβοχημική αντίδραση μέσα στα διαβρωτικά μέσα προκαλεί απομάκρυνση υλικού τότε η φθορά ονομάζεται φθορά λόγω διάβρωσης. Στον αέρα το κυρίαρχο διαβρωτικό μέσο είναι το οξυγόνο, οπότε η τριβοχημική φθορά στον αέρα ονομάζεται φθορά λόγω οξειδωσης. Η φθορά λόγω κόπωσης και οξειδωσης μπορούν να παραχθούν τόσο σε ελαστικές όσο και πλαστικές επαφές. Η απομάκρυνση του υλικού σε περίπτωση πρόσφυσης, εκτριβής και κόπωσης ελέγχεται από παραμόρφωση και θραύση στην περιοχή της επαφής. Τέτοιες παραμορφώσεις και θραύση προκαλούνται από επαγόμενες τάσεις.

Η απομάκρυνση του υλικού στη φθορά λόγω διάβρωσης, ελέγχεται και καθορίζεται από την ανάπτυξη του λεπτού στρώματος που δημιουργείται με τη χημική αντίδραση ή τη σταδιακή καταστροφή του στην επιφάνεια φθοράς όπου οι χημικές αντιδράσεις ενεργοποιούνται και επιταχύνονται από τη θέρμανση λόγω τριβής, την παραμόρφωση λόγω τριβής, τη μικροθραύση και την επακόλουθη απομάκρυνση των προϊόντων της αντίδρασης. Αυτός ο τύπος φθοράς γενικά περιγράφεται ως χημική φθορά ή τριβοχημική. Σε κάποιες περιπτώσεις η απομάκρυνση του υλικού ελέγχεται από θέρμανση λόγω τριβής και επιφανειακή ρωγμάτωση που προκαλείται από θερμικές τάσεις. Αυτοί οι τύποι φθοράς περιγράφονται ως *θερμική φθορά*. Η μορφή του κυρίαρχου μηχανισμού μπορεί να διαφοροποιηθεί για λόγους που συμπεριλαμβάνουν τις επιφανειακές ιδιότητες του υλικού και τις αντιδράσεις που προκαλούνται από θέρμανση λόγω τριβής, σχηματισμό λεπτής χημικής επίστρωσης (φίλμ) και φθορά.

Οι μηχανισμοί φθοράς περιγράφονται από τις καταγραφείσες σύνθετες μεταβολές κατά την τριβή. Γενικά η φθορά δε λαμβάνει χώρα με ένα μόνο μηχανισμό, οπότε η διεξοδική μελέτη κάθε ενός από τους μηχανισμούς φθοράς είναι σημαντική.

Στην πράξη μονομερής δράση ενός μηχανισμού φθοράς δεν καταγράφεται ποτέ αλλά συνδυασμένοι μηχανισμοί φθοράς δρουν, με έναν από αυτούς, να είναι ο κυρίαρχος ο οποίος και καθορίζει την ποσότητα της μάζας που χάνεται.

Στο ακόλουθο Σχήμα II-2 α, τρεις αντιπροσωπευτικοί τύποι φθοράς ολίσθησης αναπαρίστανται γραφικά:

Ο **Τύπος I** αντιστοιχεί σε σταθερό ρυθμό φθοράς καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας

Ο **Τύπος II** αντιστοιχεί στη μετάβαση από έναν υψηλό -στην αρχή της διαδικασίας- ρυθμό σε έναν σταθερό -χαμηλότερης τάξης μεγέθους- στη συνέχεια. Αυτός, ο τύπος φθοράς παρατηρείται κυρίως σε μέταλλα.

Ο **Τύπος III** αντιστοιχεί σε καταστροφική μετάβαση από χαμηλού ρυθμού φθοράς σε υψηλό, όπως είναι η φθορά λόγω κόπωσης.

Στο Σχήμα II - 2β, τρεις αντιπροσωπευτικοί τύποι καμπυλών τραχύτητας στις τριβόμενες επιφάνειες παριστάνονται:

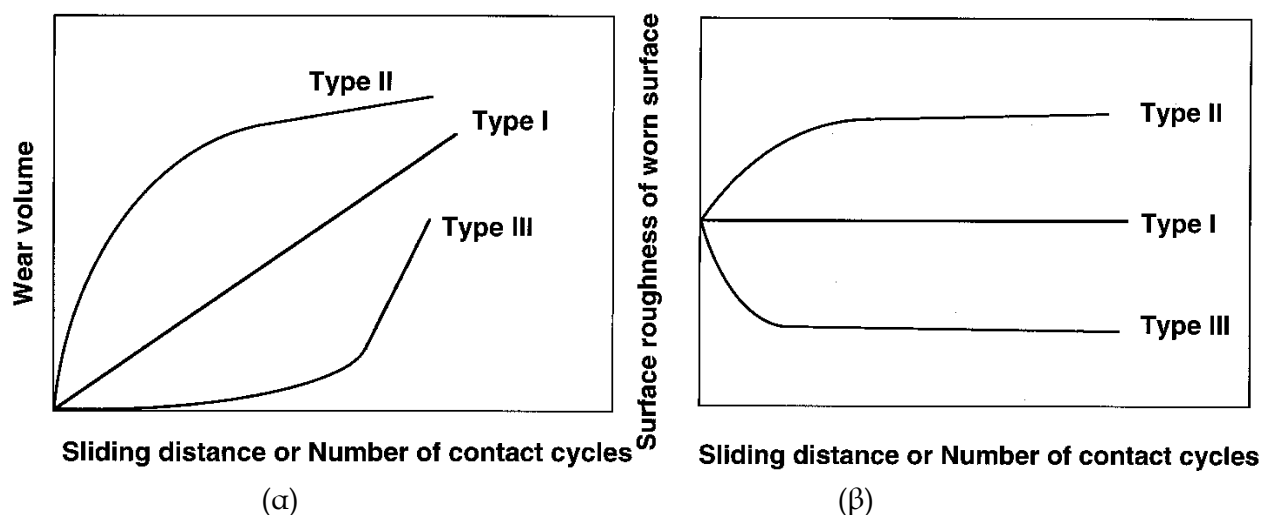
Ο **Τύπος I** δείχνει την περίπτωση της σταθερής φθοράς όταν η τραχύτητα της επιφάνειας δεν αλλάζει κατά την λειτουργία, από την αρχική τιμή.

Ο **Τύπος II** παριστά τη περίπτωση της σταθερής φθοράς όταν η επιφανειακή τραχύτητα αυξάνει μέχρι κάποια τιμή και παραμένει σε αυτή.

Ο **Τύπος III** δείχνει ένα αρχικό στάδιο φθοράς (running-in) και ένα στάδιο σταθερής φθοράς, όπου η επιφανειακή τραχύτητα μειώνεται δραστικά κατά το στάδιο του running-in.

Εάν η διεπιφάνεια επαφής ανάμεσα στις δύο επιφάνειες έχει σύνδεση ανάμεσα σε κεκλιμένες ή κυρτές επαφές, τότε *άρωση* λαμβάνει χώρα κατά την ολίσθηση. Ως αποτέλεσμα της άρωσης ένας συγκεκριμένος όγκος του επιφανειακού υλικού απομακρύνεται και λόγω εκτριβής δημιουργείται μία κοιλότητα στη μαλακότερη επιφάνεια. Αυτός ο τύπος φθοράς ονομάζεται *φθορά λόγω εκτριβής*. Εδώ θεωρείται το μοντέλο σημειακής επαφής όπου ένα σκληρό και αιχμηρό εκτριβιστικό εισχωρεί στην επιφάνεια και δημιουργεί κοιλότητα λόγω άρωσης. Όταν το τριβόμενο υλικό είναι

δύοθραυστο ένα μακρύ κομμάτι παράγεται με το μηχανισμό της μικροκοπής. Στην περίπτωση των ψαθυρών υλικών, όμως, το κομμάτι που παράγεται προέρχεται από τη διάδοση ρωγμής [ 3].



Σχήμα II - 2 : Τρεις (3) αντιπροσωπευτικοί τύποι φθοράς ολίσθησης [3]

(α) ρυθμός φθοράς σε κυκλικές επαφές

(β) μεταβολή επιφανειακής τραχύτητας

#### A. Φθορά λόγω εκτριβής (abrasion)

Ο πιο συχνά εμφανιζόμενος μηχανισμός φθοράς είναι αυτός της **εκτριβής** ο οποίος ευθύνεται για το 80-90% του συνόλου της τριβολογικής φθοράς. Πρόκειται για μια διαδικασία που συνδέεται με τις ιδιότητες του υλικού ως σώμα, και για αυτόν το λόγο είναι ένας αυστηρά μηχανικός μηχανισμός φθοράς. Αφορά στην απομάκρυνση μικρών σωματιδίων του υλικού της επιφάνειας σε συνθήκες τριβής, που προκαλείται από την παρουσία στις τριβόμενες ζώνες των συστατικών που μπορούν να έχουν το ρόλο εκτριβιστικού υλικού, υψηλότερης σκληρότητας από την τριβόμενη επιφάνεια. Η διαδικασία της φθοράς λόγω εκτριβής είναι παρούσα σε συνθήκες τριβής χωρίς λιπαντικό και εξαρτάται από τον τύπο, τη δομή και τις ιδιότητες των υλικών σε επαφή. Συνήθιζεται να θεωρείται ότι αύξηση της σκληρότητας αντιστοιχεί σε αύξηση της αντίστασης σε φθορά που προκαλείται από εκτριβή, αλλά σε αυτόν τον κανόνα υπάρχουν εξαιρέσεις :

- Σε κάποιες περιπτώσεις το μαλακότερο υλικό φθείρεται λιγότερο από το σκληρότερο π.χ. όταν σκληρά μέρη ενσωματώνονται στο μαλακό υλικό και λειτουργούν ως εκτριβιστικό στη σκληρή επιφάνεια

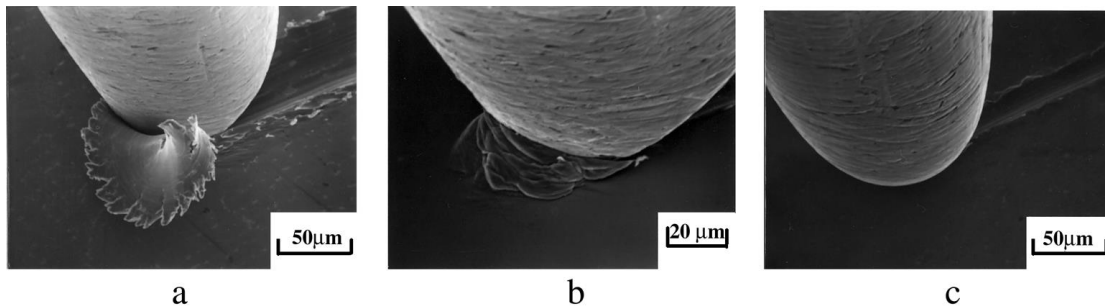


- Όταν η επιφάνεια είναι εξαιρετικά σκληρή μπορεί να είναι και ψαθυρή. Συνεπώς, το υλικό μπορεί να παρουσιάσει ρωγμές στην περιοχή των σημείων επαφής με τα εκτριβιστικά σωματίδια και κατά περιοχές σχετικά μεγάλα τμήματα της επιφάνειας μπορούν να αποκολληθούν από την επιφάνεια οπότε η απώλεια μάζας να είναι σημαντική.

*Φθορά Εκτριβής δύσθραυστων υλικών [3]*

Ακόμα και στην περίπτωση της επαφής ολίσθησης ανάμεσα στις λείες επιφάνειες του ίδιου δύσθραυστου υλικού, παράλληλες κοιλότητες γενικά παρατηρούνται στη φθειρόμενη επιφάνεια.

Αυτό σημαίνει ότι οι σκληρές προεξοχές εκτριβής σχηματίζονται στην επιφάνεια εξαιτίας σκληρότητας, μετατροπές φάσεων, και δημιουργία τρίτου σώματος στη διεπιφάνεια επαφής από επαναλαμβανόμενη επαφή ολίσθησης. Για αυτόν το λόγο η φθορά εκτριβής αναγνωρίζεται ως ο πιο αντιπροσωπευτικός μηχανισμός φθοράς στα δύσθραυστα υλικά, σε επαναλαμβανόμενη ολίσθηση.



**Σχήμα Π-3 : Ηλεκτρονικές Οπτικές Μικρογραφίες Τριών Διαφορετικών Τύπων φθοράς λόγω εκτριβής [3]**

- (a) τύπος κοπής, χάλυβδινος στυλίσκος σε ορείχαλκο;
- (b) τύπος δημιουργίας wedge , χάλυβδινος στυλίσκος σε ανοξείδωτο χάλυβα;
- (c) τύπος άρωσης, χάλυβδινος στυλίσκος σε ορείχαλκο

**B. Φθορά λόγω πρόσφυσης (adhesive wear)**

Εάν η επαφή στη διεπιφάνεια υπό πλαστική επαφή έχει αρκετά δυνατό δεσμό πρόσφυσης ώστε να αντισταθεί στη σχετική κίνηση, μεγάλης έκτασης και έντασης πλαστική παραμόρφωση που προκαλείται λόγω μετατόπισης, εμφανίζεται στην περιοχή επαφής υπό συμπίεση και διάτμηση.

Κατά την ολίσθηση εάν οι σχετικές ταχύτητες είναι μικρές, αλλά τα φορτία μεγάλα, η **φθορά** λόγω **πρόσφυσης** είναι συνήθως, εξαιτίας της δημιουργίας συνδέσεων συνάφειας (οι επονομαζόμενες κρύες συγκολλήσεις) και η επακόλουθη διάσπαση τους κατά την εξακολούθηση της κίνησης. Εφόσον αυτή η σύντηξη είναι έντονη το υλικό συνήθως εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή στις περιοχές της ένωσης, οπότε σωματίδια από το υλικό μικρότερης αντοχής απομακρύνονται δημιουργώντας κρατήρες. Δύο συνθήκες πρέπει να πληρούνται προκειμένου να δημιουργηθεί η ένωση : αφενός πρέπει η απόσταση των δύο επιφανειών σε τριβή να είναι της τάξης των ακτινών δράσης των διαμοριακών αποστάσεων, αφετέρου πρέπει να απουσιάζουν εντελώς οξειδία ή άλλα προσφυμένα στρώματα υλικών μη μεταλλικού χαρακτήρα.

Έτσι η φθορά λόγω πρόσφυσης θεωρείται το αποτέλεσμα του διαχωρισμού των συγκολλημένων ενώσεων από το ένα από τα υλικά και η μεταφορά των σωματιδίων αυτών με τη μορφή εναποθέσεων πάνω στην τριβόμενη επιφάνεια του άλλου υλικού. Η σκληρότητα αυτών των εναποθέσεων είναι συνήθως μεγαλύτερη από τα αρχικά υλικά, ενώ και το σχήμα τους είναι κοφτερό και ακανόνιστο. Οπότε γίνεται αντιληπτό ότι η επιφάνεια υπόκειται σε βαθιές πλαστικές παραμορφώσεις, διακριτή παραμόρφωση των σωματιδίων και ακόμα χαλάρωση της συνοχής, οπότε μειώνεται η σκληρότητά του.

**Συνδυασμός μηχανισμών φθοράς εκτριβής και πρόσφυσης (scuffing) :** εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της συνδυασμένης δράσης της φθοράς λόγω εκτριβής και της φθοράς λόγω πρόσφυσης. Πρόκειται για μία μορφή εξαιρετικά γρήγορης φθοράς που προκαλείται από τη διάτμηση του φιλμ λίπανσης λόγω υψηλών φορτίων. Εξαιτίας της αμοιβαίας διάδρασης των προεξοχών και των δύο τριβόμενων επιφανειών δημιουργείται πρώτα η σύντηξη και στη συνέχεια η αποκόλληση των προεξοχών αυτών στις μικροζώνες της επαφής τους.

**Γ. Φθορά λόγω τριβοχημικών δράσεων***Φθορά λόγω διάβρωσης*

Όταν η ολίσθηση λαμβάνει χώρα σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, προϊόντα αντιδράσεων παράγονται στην επιφάνεια επαφής κυρίως από χημικές ή ηλεκτροχημικές δράσεις. Εάν αυτά τα προϊόντα προσφυθούν στο κυρίως σώμα και συμπεριφερθούν σαν αυτό τότε ο μηχανισμός φθοράς παραμένει ο ίδιος. Σε πολλές περιπτώσεις αυτές οι ενώσεις, που προήλθαν από την δράση των στερεών σωμάτων με το διαβρωτικό περιβάλλον, συμπεριφέρονται διαφορετικά και για την ακρίβεια ελέγχουν τη φθορά. Αυτό το είδος της φθοράς η οποία επιταχύνεται από διαβρωτικά μέσα ονομάζεται φθορά λόγω διάβρωσης (*corrosive wear*). Κατά τη φθορά λόγω διάβρωσης η τριβοχημική αντίδραση παράγει ένα λεπτό επίστρωμα στην επιφάνεια το οποίο ταυτόχρονα απομακρύνεται λόγω τριβής. Οπότε ο ρυθμός της φθοράς καθορίζεται από το σχετικό ρυθμό ανάπτυξης και απομάκρυνσης.

*Φθορά από οξείδωση*

Η φθορά από οξείδωση προκαλείται από την απορρόφηση οξυγόνου στις ζώνες της τριβής, την επακόλουθη διάχυση του μέσα σε πλαστικά και ελαστικά παραμορφωμένα επιστρώματα του μετάλλου και την μηχανική απομάκρυνσή τους λόγω εκτριβής και απομάκρυνση λεπτών κομματιών της μεταλλικής επιφάνειας.

Κατά την οξείδωση, διαφορετικά στρώματα οξειδίων, διαφορετικού πάχους σχηματίζονται σε προκαθορισμένη σειρά : για μη κραματωμένους χάλυβες αυτά είναι:  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ ,  $FeO$ , επάνω στο κυρίως σώμα του μετάλλου, οι οποίες ζώνες οξειδίων εμφανίζουν μεγαλύτερη σκληρότητα από το κυρίως σώμα και για αυτόν τον λόγο η φθορά λόγω οξείδωσης είναι σχετικά μικρή. Η φθορά λόγω οξείδωσης εμφανίζεται όταν ο ρυθμός δημιουργίας των οξειδίων είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό φθοράς τους και απομάκρυνσης τους από την επιφάνεια. Στην περίπτωση της τριβής κύλισης η φθορά από οξείδωση πάντα συνοδεύει την φθορά λόγω κόπωσης. Στην τριβή ολίσθησης η τριβοχημική φθορά είναι συνήθως ο κυρίαρχος μηχανισμός φθοράς υπό συνθήκες τριβής επιφάνειας (Boundary friction τριβή που εμφανίζεται στην επιφάνεια επαφής δύο σωμάτων όταν υπάρχει λίπανση που δεν καλύπτει όλη την επιφάνεια) ή χωρίς καθόλου λίπανση.

*Οξειδωτική φθορά μετάλλων*

Η φθορά λόγω οξείδωσης είναι η πιο αντιπροσωπευτική μορφή φθοράς διάβρωσης των μετάλλων. Βασιζόμενη στην αντίδραση της οξείδωσης ανάμεσα στον χάλυβα και στον κοινό ατμοσφαιρικό αέρα και θεωρώντας το μοντέλο της απομάκρυνσης ενός φιλμ δεδομένου ότι το φιλμ οξειδίου του χάλυβα, θα αποκολληθεί από την επιφάνεια σε ένα δεδομένο κρίσιμο πάχος, ενώ ο συντελεστής της φθοράς λόγω διάβρωσης ( $K_C$ ) ορίστηκε κατά τον Quinn (1987) ως

$$K_C = \frac{dA}{\xi^2 r^2 v} \exp\left(\frac{-Q}{R_G T}\right) \quad (\text{ΕΕ. II} - 2)$$

Όπου  $A$  είναι η σταθερά Arrhenius,  $Q$  η ενέργεια ενεργοποίησης,  $R_G$  η σταθερά του αερίου,  $\xi$  το ιξώδες,  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία,  $d$  η πυκνότητα του οξειδίου,  $v$  η ταχύτητα ολίσθησης και  $L$  η απόσταση που διανύεται κατά την ολίσθηση. Γενικά θεωρούμε ότι η ενέργεια ενεργοποίησης δεν μεταβάλλεται με την ταχύτητα δηλαδή παραμένει σταθερή. Με αυτήν την παραδοχή τα πειραματικά αποτελέσματα φθοράς για την οξείδωση των χαλύβων δίνουν τιμή της σταθερά Arrhenius 7.25 η οποία είναι  $10^3 - 10^{10}$  φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στατική.

**Δ. Φθορά λόγω επιφανειακής κόπωσης**

Η **φθορά λόγω κόπωσης** λαμβάνει χώρα όταν η συνάφεια της επιφάνειας των αμοιβαίων επαφών των τριβόμενων υλικών δεν έχει ένα σημαντικό ρόλο στην διαδικασία της τριβής και συγχρόνως μία μεγάλης διάρκειας κυκλική (περιοδική) δράση των (ελαστικών-πλαστικών) τάσεων επαφής εμφανίζονται στην επιφάνεια.

Ο μηχανισμός εκκίνησης της φθοράς λόγω κόπωσης είναι ο ακόλουθος : σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων -παραμένουσες τάσεις και εξωτερικές τάσεις που προκαλούνται από εξωτερικά φορτία- η μέγιστη τάση διάτμησης εμφανίζεται σε βάθος 0.39 του μήκους της πραγματικής επαφής (σημείο BELAYEV). Από εκείνο το σημείο και μετά, αυτό μεταδίδεται προς την κατεύθυνση της επιφάνειας με την αύξηση της δύναμης τριβής η οποία επηρεάζει τη ζώνη επαφής. Αυτή πιθανόν είναι η αιτία της έναρξης των μικρορωγμών οι οποίες θα εξελιχθούν σε μακρορωγμές. Το τελευταίο φαινόμενο είναι η αποκόλληση τμημάτων της επιφάνειας. Διακρίνονται δύο είδη φθοράς κόπωσης :

- *Αποφλοιώση (delamination)*, απομάκρυνση λεπτών φλύδων υλικού, η οποία εμφανίζεται στις περιπτώσεις μη λίπανσης ή μη κατάλληλης λίπανσης.

Πιστοποιείται με την απώλεια τοπικά μάζας με τη μορφή νιφάδων. Η ένταση φθοράς λόγω αποφλοιώσης είναι μεγάλη και εξαρτάται από το βάθος της πλαστικής παραμόρφωσης της επιφάνειας, την τιμή της μονάδας φορτίου στην επιφάνεια επαφής, τον αριθμό και τη συχνότητα των κυκλικών επαναλήψεων, καθώς και τις ιδιότητες και διαστάσεις των στοιχείων σε τριβή.

- *Βελονισμός (Pitting)*, ο μηχανισμός αυτός εμφανίζεται σε περιπτώσεις ύπαρξης λιπαντικού. Μετά την εμφάνιση των μικρορωγμών λόγω κόπωσης το λιπαντικό διαπερνά τις ασυνέχειες, λόγω της επαφής των δύο επιφανειών και μεγαλώνει τις ρωγμές.

## II.2 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ : ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗΣ ΦΘΟΡΑΣ [4]

Κάθε μηχανή αποτελείται από μια σειρά (assembly) τμημάτων τα οποία, είτε είναι σταθερά συνδεδεμένα είτε μπορεί να συνδέονται με τέτοιο τρόπο που να επιτρέπουν σχετική κίνηση. Ο σχεδιασμός των μεμονωμένων τμημάτων απαιτεί κατανόηση σε βάθος του απαιτούμενου σχήματος, των δεδομένων των ιδιοτήτων από τα οποία αποτελούνται και των μεθόδων ανάλυσης των φορτίων, τάσεων και καταπονήσεων.

Τα κινούμενα τμήματα των βιομηχανικών κατασκευών βρίσκονται σε σημειακή ή σε επιφανειακή επαφή. Η σχετική κίνηση των εφαιπτόμενων επιφανειών οδηγεί στη φθορά τους μέσω τριβολογικών μηχανισμών, που μπορεί να είναι μηχανικής ή χημικής φύσης ή συνδυασμός τους, όπως προαναφέρθηκε.

Στις βιομηχανικές κοινωνίες υπάρχει μία ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για μείωση της φθοράς και έλεγχο της τριβής, προκειμένου να επιτευχθεί παράταση ζωής των μηχανημάτων και των βιο-συστημάτων, να γίνουν οι μηχανές και τα εξαρτήματα πιο αποδοτικά, να εξοικονομούνται υλικά, ενέργεια, καθώς επίσης και να βελτιώνεται η ασφάλεια. Η φθορά, και ειδικότερα η εκτριβή (*abrasive wear*) η οποία αποτελεί τον πιο συχνά εμφανιζόμενο μηχανισμό φθοράς, με το 50% του συνόλου των απωλειών να οφείλεται σε αυτόν, είναι τα πιο κοινά, σχετιζόμενα με τη λειτουργία των βιομηχανικών εξαρτημάτων φαινόμενα, με τεράστιο οικονομικό αντίκτυπο. Στη Βρετανία για παράδειγμα είχε υπολογιστεί μόλις το 1988 ότι το κόστος από τη φθορά έφτανε τα 2 δισεκατομμύρια λίρες! Δυστυχώς η λίπανση η οποία θεωρήθηκε ως μία από τις περισσότερο αποτελεσματικές μεθόδους για τη μείωση της φθοράς δεν μπορεί ποτέ να είναι ιδανική, ενώ υπάρχουν περιπτώσεις που είναι απαγορευτική (βιομηχανίες τροφίμων). Όσον αφορά στατιστικά αστοχιών έχουν καταγραφεί τα εξής :

1. σε **μηχανές diesel** το 70% των αστοχιών οφείλονται σε μολύνσεις, από τις οποίες το 50% είναι συσχετισμένες με προβλήματα φθοράς
2. σχεδόν το 40% των **περιστρεφόμενων μερών εξαρτημάτων** αποτυγχάνουν εξαιτίας ακατάλληλης λίπανσης, ενώ μόλις το 10% αστοχεί στο αναμενόμενο όριο διάρκειας ζωής από κόπωση

3. Σχεδόν 75% αστοχιών προκύπτουν από προβλήματα λειτουργίας όπως :

- λανθασμένη λίπανση
- ξένα υλικά
- φθορά
- αστοχία φρένων
- ακατάλληλη συντήρηση
- συνεχής ή στιγμιαία φόρτιση
- το 51% αυτών οφείλεται σε φθορά και το 49% σε υπερφόρτιση

Η φθορά μέσω της καταστροφής των υλικών έχει μία σειρά οικονομικών επιβαρύνσεων:

1. Απώλειες εξαιτίας της φθοράς:

- *Άμεσες απώλειες* που προέρχονται από έλλειψη ή μη κατάλληλη προστασία ενάντια στη φθορά. Αυτές αφορούν στο κόστος από την καταστροφή εξαρτημάτων και αντικειμένων, κόστος από την επισκευή των, και κόστος από τη μείωση της ζωής των εξαρτημάτων.
- *Έμμεσες απώλειες* που προκύπτουν κυρίως από την ανάγκη της άρσης των επιδράσεων της φθοράς, όπως επιβράδυνση παραγωγικότητας εγκαταστάσεων, κόστη από τη μόλυνση των προϊόντων και του περιβάλλοντος, πρόστιμα κλπ.

2. Κόστη επενδύσεων για προστασία κατά της φθοράς

Ακριβής υπολογισμός των οικονομικών επιδράσεων της φθοράς είναι εξαιρετικά δύσκολος εξαιτίας του υψηλού κόστους για εκπόνηση σχετικής έρευνας, την παγκόσμια φύση της φθοράς σε πολλές και ποικίλες επιδράσεις της, τον μη μοντελοποιήσιμο υπολογισμό της φθοράς, υποκειμενικότητα στις εκτιμήσεις και - πρακτικά μη πιθανή ακριβή εκτίμηση.

Έρευνα που διεξήχθη με πρωτοβουλία του περιοδικού WORKS MANAGEMENT δημοσίευσε τα ακόλουθα δεδομένα : έξοδα για συντήρηση στις χώρες της Ευρώπης υπολογίστηκαν σε 5% του συνολικού ΑΕΠ, ανάμεσα σε 85 με 110 δισεκατομμύρια λίρες. Ποσό που αντιστοιχεί σε όλο το κέρδος από τη βιομηχανική δραστηριότητα της Ολλανδίας. Ενώ 2 εκατομμύρια άνθρωποι σε 350.000 εταιρείες της Ευρώπης απασχολούνται στον τομέα αυτόν.

Τα αντίστοιχα στοιχεία για την Αγγλία ειδικά, είναι:

- 14 εκατομμύρια λίρες ετήσια δαπάνη
- 5% του συνόλου των πωλήσεων
- διπλάσιο ποσό του αντίστοιχου από το κέρδος από εμπορικές δραστηριότητες

Η αναλογία κόστους εξαιτίας της φθοράς προς κόστος για ανάπτυξη συστημάτων κατά της φθοράς κυμαίνεται από χώρα σε χώρα, αλλά κατά μέσο όρο, στους παραγωγικούς κλάδους, είναι 7/3.

Εκτός από τις οικονομικές επιπτώσεις, σημαντικές είναι και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον. Από επιστημονικής άποψης υπάρχουν πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις που μπορούν να υιοθετηθούν προκειμένου να ελεγχθούν ή και να μειωθούν οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Ανεξάρτητα από τις πράξεις πολιτικής που πρόκειται να εφαρμοστούν είναι σίγουρο ότι η χρήση καλής τριβολογικής πρακτικής έχει ένα σημαντικό ρόλο στη στρατηγική για την προστασία του περιβάλλοντος.

Στην αυτοκινητοβιομηχανία [5] για παράδειγμα, έχει αποδειχθεί ότι προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές υδρατμών και CO<sub>2</sub>, ο μόνος πιθανός τρόπος είναι η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Προς αυτήν την κατεύθυνση μία σημαντική ευκαιρία δύναται με την εισαγωγή ελαφρών μετάλλων στην κατασκευή του σώματος του αυτοκινήτου και της μηχανής, προκειμένου να μειωθεί το συνολικό βάρος. Δεδομένου ότι το ποσοστό βάρους της μηχανής προς το συνολικό βάρος του αυτοκινήτου κυμαίνεται από 9-16%, μία σημαντική βελτίωση στο βάρος θα επέτρεπε η μείωση του βάρους του ίδιου του κινητήρα και των συστημάτων μετάδοσης, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί από ένα κατάλληλο σχεδιασμό της μηχανής και των εξαρτημάτων μετάδοσης, και επίσης με την αντικατάσταση με ελαφριά κράματα για την αντικατάσταση του χυτοσιδήρου και του χάλυβα στις συνδέσεις και τα εξαρτήματα βαλβίδων- κινητήρα κλπ. Επιπλέον μία σημαντική βελτίωση στο βάρος του αυτοκινήτου θα ήταν να μειωνόταν το βάρος των κυλιόμενων και παλινδρομικών μερών της μηχανής. Ελαφριά κράματα όπως τιτανίου, αλουμινίου και μαγνησίου είναι τα επικρατέστερα για την κατασκευή τέτοιων εξαρτημάτων. Όμως, είναι γνωστό ότι αυτά τα υλικά εμφανίζουν φτωχές τριβολογικές ιδιότητες,



γεγονός που όταν συνδυάζεται με το υψηλό κόστος τους εμποδίζει την εφαρμογή τους σε μεγάλης κλίμακας παραγωγή. Για αυτόν το λόγο σημαντικό ρόλο, μπορούν να παίξουν οι μέθοδοι δημιουργίας επιστρώσεων για να ελαττώσουν τη φθορά και την επιφανειακή καταπόνηση. Περισσότερο από 60% της ενέργειας που παρέχεται σε μία μηχανή ΕΚ, χάνεται ως θερμότητα από τις θερμές επιφάνειες της μηχανής, ενώ περί το 15% υπολογίζονται οι απώλειες ενέργειας από την τριβή μεταξύ των μερών της μηχανής, σε σχετική κίνηση.

Για τις περισσότερες μηχανές που λειτουργούν με υγρά, όπως οι αντλίες οι τουρμπίνες και οι συμπιεστές, η τριβολογία προσφέρει σημαντικές ευκαιρίες, για καινοτομίες στο σχεδιασμό. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αυτές τις μηχανές, μπορεί να υπάρχουν προβλήματα με στεγανά (ασπίδες) προκειμένου να εμποδίζουν τη διαρροή υγρών είτε μέσα στο λιπαντικό στα ρουλεμάν είτε στο περιβάλλον. Με μία αναβαθμισμένη προσέγγιση του σχεδιασμού των ρουλεμάν, η μηχανή πρέπει να σχεδιαστεί ώστε αυτά να λιπαίνονται με το ίδιο το υγρό λειτουργίας. Αυτό μειώνει το πρόβλημα της μόλυνσης από το λιπαντικό, αφού κανένα λάδι δεν υπάρχει, ενώ αν κάποιο άλλο συνδεόμενο εξάρτημα επίσης λιπαίνεται με το ίδιο υγρό, τότε θα ήταν δυνατό όλη η διάταξη να στεγασθεί σε μία εγκατάσταση. Αυτή η τεχνολογία έχει ήδη εφαρμοστεί στο σχεδιασμό αντλιών κυκλοφορίας για υψηλής πίεσης καυστήρες, όπου μία φυγοκεντρική αντλία και το μοτέρ της περιλαμβάνονται μέσα στο boiler το οποίο στην ουσία είναι ένα δοχείο πίεσης με τις μόνες εξωτερικές συνδέσεις να είναι οι ηλεκτρικές παροχές.

Όλα τα σημαντικά επιτεύγματα στον τομέα των οχημάτων εξαρτώνται σε κρίσιμο βαθμό από την σωστή και αξιόπιστη λειτουργία πολλών κινούμενων μεταξύ τους μηχανικών σειριακών μερών και τριβολογικών εξαρτημάτων. Ο συντελεστής τριβής και ο χρόνος ζωής οποιουδήποτε λιπαντικού έχει πολλά διαφορετικά χαρακτηριστικά υπό διαφορετικές συνθήκες. Είναι λοιπόν βασικό να επιλέξει κανείς τη σωστή τεχνική λίπανσης και το σωστό λιπαντικό για κάθε μηχανολογική και τριβολογική εφαρμογή. Ο συντελεστής τριβής και ο χρόνος ζωής οποιουδήποτε λιπαντικού ποικίλλει ανάλογα με το περιβάλλον, τα λιπαντικά δε, έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά υπό διαφορετικές συνθήκες.

**II.3 Η ΛΥΣΗ : ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ & ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ [4]**

Ο όρος **τριβολογία** καθιερώθηκε σε μια αναφορά του Department of Education and Science το 1966, η οποία είναι γνωστή ως η αναφορά JOST: η επιστήμη και τεχνολογία των επιφανειών σε επαφή ή/και σχετική κίνηση και των πρακτικών που σχετίζονται με αυτό. Η τριβολογία είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για την αξιοπιστία των μηχανών, γιατί κινούμενες επιφάνειες υποβαλλόμενες σε υψηλά φορτία έχουν μία δυναμική για παραγωγή υψηλής θερμότητας και κατά συνέπεια θερμικής απαγωγής στην περίπτωση εσφαλμένης λειτουργίας.

Η αναφορά αυτή επισημαίνει τα σημαντικά οικονομικά οφέλη που μπορούν να επιτευχθούν σε έναν μεγάλο αριθμό βιομηχανικών τομέων στη -βρετανική εν προκειμένω- βιομηχανία, μέσω της εφαρμογής καλών τριβολογικών πρακτικών. Το μεγαλύτερο μέρος αυτών των οικονομιών προέρχονται από μείωση του κόστους συντήρησης, του κόστους αντικατάστασης εξοπλισμού, και παράλληλα την εξοικονόμηση χρημάτων λόγω της μικρότερης συχνότητας τεχνικών προβλημάτων, και επίσης λόγω της αυξημένης διάρκειας ζωής των μηχανημάτων.

Ενώ είναι σαφές ότι η γνώση τριβολογίας εφαρμόζεται αποτελεσματικά, σε κάποιες περιοχές υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός βιομηχανιών οι οποίες ακόμα παραβλέπουν τις βέλτιστες τριβολογικές πρακτικές, οδηγώντας σε σημαντικές οικονομικές απώλειες. Ο Jost πιστεύει ότι οι οικονομικές απώλειες, οι οποίες οφείλονται σε τριβή και φθορά, αντιστοιχούν στο 4% του ΑΕΠ των αναπτυγμένων χωρών, οπότε η εξοικονόμηση του 1% αποτελεί ακόμα εφικτό στόχο.

Μία καμπάνια σχετικά με την τριβολογία, από το Ινστιτούτο Μηχανολόγων Μηχανικών και το Τμήμα Εμπορίου και Βιομηχανίας της Βρετανίας, μπορούσε να εξοικονομήσει 1.5 δις αγγλικές λίρες μέσω της ενίσχυσης της εφαρμογής αρχών τριβολογίας στη συντήρηση, σχεδιασμό και παραγωγή διαδικασιών διαφόρων μεθόδων.

Από τα μέσα του 1960 μέχρι και σήμερα η εφαρμογή καλών τριβολογικών πρακτικών επικεντρώνεται κύρια στα λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός τριβοσυστήματος και γενικά περιλαμβάνει μεγιστοποίηση της αντίστασης κατά της φθοράς, ελαχιστοποίηση των απωλειών ή επίτευξη συμβιβασμού αυτών των δύο με στόχο την οικονομική διάσταση. Η *ολική τριβολογία* περιλαμβάνει την παραδοσιακή προσέγγιση της βελτιστοποίησης των λειτουργικών χαρακτηριστικών του τριβοσυστήματος. Σε αυτήν τη διεργασία, επιλογές όπως π.χ. αυτή των φρένων

γίνονται στο στάδιο του σχεδιασμού ενός προϊόντος με στόχο τη βελτιστοποίηση της λειτουργικότητας ή/και ελαχιστοποιώντας κάποια θέματα λειτουργικών κοστών.

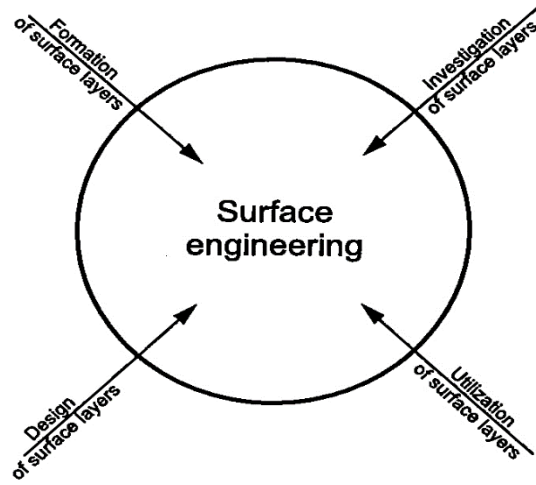
Μέχρι τις αρχές του '80 μελέτες από επιστήμονες άλλων χωρών, ανέδειξαν ότι σημαντικά ποσοστά οικονομικών οφελών από εφαρμογές τριβολογικών πρακτικών προέρχονται από τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και υλικών.

Η αποτελεσματική παραγωγή χρήσιμης ενέργειας και η χρήση μηχανών με μειωμένες μηχανολογικές απώλειες θα διατηρήσουν τα αποθέματα ενέργειας και τις μειωμένες εκπομπές CO<sub>2</sub>. Επιπλέον βελτιώσεις στη διάρκεια του χρόνου ζωής των εξαρτημάτων των μηχανών, θα μειώσουν την ποσότητα ενέργειας και των πρώτων υλών που απαιτούνται για την κατασκευή υποκατάστατων, καθώς και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξαιτίας της μετακίνησης και διανομής τους. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι ακόμα και μικρές βελτιώσεις στην απόδοση και το χρόνο ζωής των μηχανών που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο αριθμό, όπως μηχανές εσωτερικής καύσης για επιβατικά αυτοκίνητα, μπορούν να έχουν μία σημαντική επίδραση δεδομένου ότι η βελτίωση επαναλαμβάνεται σε εκατομμύρια μονάδες, μεγιστοποιώντας το κέρδος καθ' όλη τη διάρκεια της χρήσης τους.

Είναι ενθαρρυντικό το γεγονός ότι ο λόγος εξόδων έρευνας προς ποσά εξοικονόμησης είναι 1:50, γεγονός που ενισχύει το επιχειρήμα της περαιτέρω επένδυσης στην ανάπτυξη της έρευνας και των μηχανισμών μεταφοράς τεχνογνωσίας.

Τα τελευταία χρόνια μία μεθοδολογία που καλείται *life cycle assessment* (LCA) [6] έχει αναπτυχθεί για την εκτίμηση της επίδρασης των επιλογών του σχεδιασμού στο σύνολο του κόστους του κύκλου ζωής. Το πεδίο που αφορά στο LCA είναι ένα εύρος διαφορετικών μορφών κοστών που θα προκύψουν από την κατασκευή, χρήση και έκθεση και τα οποία θα μπορούν να μετρηθούν σε ένα οικονομικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό σύνολο.

Η μηχανική των επιφανειών βρίσκεται στον πυρήνα της ολικής τριβολογίας (Σχήμα Π-4). Η λειτουργικότητα, διάρκεια και απόδοση κύκλου ζωής όλων των τύπων των συστημάτων μηχανικής, τώρα ενισχύονται, και σε πολλές περιπτώσεις διευκολύνονται από χρήση επιφανειακών επιστρώσεων ή κατεργασιών. Για παράδειγμα η μοντέρνα μηχανή αεροπλάνων δεν μπορεί να λειτουργεί χωρίς τη χρήση τοποθετημένων επιστρώσεων σε κρίσιμα σημεία, ούτε αναβαθμισμένα ιατρικά επιθέματα μπορούν να πετύχουν ικανοποιητική απόδοση.



Σχήμα ΙΙ - 4 : Σχηματική απεικόνιση των επιστημονικών πεδίων  
όπου άπτεται η μηχανική των επιφανειών

**II.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ**

Εδώ και αρκετό καιρό, μηχανικοί και σχεδιαστές προσεγγίζουν το θέμα του ελέγχου της τριβής και της φθοράς με δημιουργία επιφανειακών επιστρώσεων. Οι επιστρώσεις σχεδιάζονται προκειμένου να βελτιώσουν λειτουργίες, όπως τριβολογικές, ηλεκτρικές, οπτικές, ηλεκτρονικές, χημικές και μαγνητικές. Με την εναπόθεση λεπτών επιστρώσεων, την παραγωγή πολυστρωματικών επιστρωμάτων, και την τροποποίηση των επιφανειών οι σχεδιαστές μπορούν να ενισχύσουν τη λειτουργία των επιφανειών, να μειώσουν την επιφανειακή ενέργεια, συνάφεια και τριβή και να αυξήσουν την αντίσταση σε εκτριβή, φθορά, διάβρωση, κλπ.

Προκειμένου να κατανοήσουν τις επιφανειακές ιδιότητες και τελικά να παρέχουν καλύτερες επιφάνειες, οι ερευνητές θα πρέπει να μελετήσουν τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά μιας επιφάνειας ενός υλικού που λαμβάνεται από μία δεδομένη διεργασία. Ένας αριθμός εργαλείων είναι τώρα διαθέσιμος για την ανάλυση της επιφάνειας οποιουδήποτε στερεού, δεδομένου ότι η επιφάνεια παίζει σημαντικό ρόλο σε πολλές διεργασίες. Οπότε είναι φυσικό να διαλέγει κανείς το κυρίως αντικείμενο να διαθέτει αντοχή, ακαμψία, διαμορφωσιμότητα, χαμηλό κόστος κλπ και στη συνέχεια να μετατρέπει την επιφάνεια του ή να προσθέτει ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα, δεδομένου ότι με την περιοχή της επιφάνειας συνδέονται όλες οι άλλες ιδιότητες λειτουργίας. Όμως η επιλογή της σωστής δοκιμής προσομοίωσης για δεδομένη εφαρμογή δεν είναι απαραίτητα πάντα εύκολη, και εκεί έγκεται το «κλειδί» της υπόθεσης, δηλαδή στην ικανοποιητική συσχέτιση με την εφαρμογή.

Η τεχνολογία της στερεής λίπανσης και των επιστρώσεων έχει αναπτυχθεί ραγδαία τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες, πρωταρχικά σε ανταπόκριση των αναγκών της αεροναυπηγικής και αυτοκινητοβιομηχανίας. Η στερεή λίπανση χρησιμοποιείται όταν η σύσταση των υγρών λιπαντικών αποτελεί πρόβλημα, και όταν τα υγρά λιπαντικά δεν ανταποκρίνονται στις αναβαθμισμένες απαιτήσεις. Υπο υψηλό κενό (όπως για παράδειγμα επικρατεί στο διάστημα), υψηλές θερμοκρασίες, κρυογενικές θερμοκρασίες, ακτινοβολία, σκόνη, καθαρά περιβάλλοντα ή διαβρωτικά ή και συνδυασμό των παραπάνω, η στερεή λίπανση και οι επιστρώσεις μπορεί να είναι το μόνο εφικτό σύστημα.

Τα υλικά που σχεδιάζονται για επιστρώσεις δεν θα πρέπει μόνο να επιδεικνύουν επιθυμητούς συντελεστές τριβής (από 0.001 σε 0.3) αλλά θα πρέπει επίσης να αντέχουν στο χρόνο σε διαφορετικά περιβάλλοντα, όπως το υψηλό κενό, νερό, η ατμόσφαιρα κλπ. Για αυτόν το λόγο, η επιτυχής χρήση των υλικών και των

επιστρώσεων, απαιτεί κατανόηση των υλικών και των τριβολογικών τους ιδιοτήτων, καθώς και γνώση του ποιας μορφής επίστρωση είναι περισσότερο κατάλληλη σε κάθε εφαρμογή. Θέματα όπως, προκατεργασία της επιφάνειας, συμβατότητα υλικών και επιστρώσεων, την πιθανή δημιουργία στερεών υπολειμμάτων (debris), θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός εξαρτήματος με λίπανση ή ενός κινούμενου μηχανολογικού μέρους.

Οι περισσότερες ιδιότητες των επιστρώσεων είναι στην πραγματικότητα ιδιότητες επιφάνειας. Για παράδειγμα τριβή, συνάφεια, φθορά, διάβρωση, οξειδωση, χημική διάβρωση κόπωση, και ρωγμάτωση επηρεάζονται όλα από τις επιφανειακές ιδιότητες.

#### II.4.1 Κρίσιμοι Παράγοντες [4]

Η επιτυχία του ελέγχου με απώτερο στόχο την ελαχιστοποίηση της φθοράς στην περίπτωση της δημιουργίας επιστρώσεων, εξαρτάται σημαντικά από την επιλογή των υλικών. Το υλικό για το υπόστρωμα επιλέγεται με κριτήριο την αντοχή και δυσθραυστότητα, ενώ η επίστρωση σχεδιάζεται για αντίσταση κυρίως σε φθορά, θερμικές τάσεις και διάβρωση. Όταν οι συνθήκες λειτουργίας σε τριβολογικές εφαρμογές γίνονται πολύ δύσκολες, οι επιστρώσεις μπορεί να είναι η μόνη λύση για τον έλεγχο τριβής και φθοράς. Σύμφωνα με τους Holmberg et al. [6], μία γενικότερη αξιολόγηση του σχεδιασμού των τριβολογικών προδιαγραφών σε μία επιφάνεια επικαλυμμένη με επίστρωση, μπορεί να προσεγγισθεί ως ακολούθως :

- ✓ Ο αρχικός συντελεστής τριβής, ο συντελεστής τριβής σταθερής κατάστασης και η διακόμευση τους, δεν θα πρέπει να ξεπερνούν συγκεκριμένες τιμές.
- ✓ Η φθορά των επιφανειών σε επαφή με τις επιστρωμένες δεν θα πρέπει να ξεπερνούν συγκεκριμένες τιμές σχεδιαμού.
- ✓ Ο χρόνος ζωής του συστήματος θα πρέπει, με μία προσδιορισμένη πιθανότητα, να είναι μεγαλύτερος από τον προδιαγραφόμενο. Το όριο του χρόνου ζωής του συστήματος μπορεί να οριστεί ως ο χρόνος στον οποίο μία από τις προαναφερθείσες προδιαγραφές παύει να ισχύει

Για τα τριβολογικά και στερεά λιπαντικά επιστρώματα, οι βασικές απαιτούμενες ιδιότητες είναι :

- ☞ Εξαιρετικά καλή αντίσταση στην τριβή και τη φθορά
- ☞ Πολύ σκληρή επιφάνεια
- ☞ Χαμηλή επιφανειακή ενέργεια
- ☞ Χαμηλός συντελεστής τριβής
- ☞ Προστασία από διάβρωση
- ☞ Μη τοξικότητα
- ☞ Ιδιότητες μη διαβροχής
- ☞ Εξαιρετική αντίσταση στη διάβρωση

Για τριβολογικά και επιστρώματα στερεών λιπαντικών η δυνατή συνάφεια με το υπόστρωμα είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για μεγάλης διάρκειας χρόνο λειτουργίας. Μοντέρνες μέθοδοι εναπόθεσης με δυνατότητα υβριδικού συνδυασμού επεξεργασιών, είναι ιδιαίτερα ικανές να επιφέρουν πολύ δυνατή συνάφεια με το υπόστρωμά τους.

Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει κανείς να αξιολογήσει τη φύση του προβλήματος φθοράς και στη συνέχεια για να εκτιμήσει την ανάγκη επιφανειακής κατεργασίας, θα πρέπει να λάβει υπόψη του και τους ακόλουθους παράγοντες :

#### **Κατάσταση λειτουργίας**

- Υλικά που ήδη χρησιμοποιούνται
- Οι πραγματικές ή/ και αναμενόμενες συνθήκες φθοράς
- Πραγματική ή αναμενόμενη διάρκεια λειτουργίας
- Ελάχιστη απαιτούμενη οικονομική ζωή
- Κόστη εξαιτίας της φθοράς
  1. κόστος αντικατάστασης
  2. εργατικά κόστη για αντικατάσταση
  3. κόστη από τη διακοπή παραγωγής
  4. κόστος από διαδοχική ζημιά σε συσχετιζόμενο εξοπλισμό

### **Διαθέσιμες επιλογές**

- Αλλαγή συνθηκών λειτουργίας για μείωση φθοράς
- Αλλαγή υλικών προκειμένου να επιτευχθεί βελτίωση στη λειτουργία και μείωση του κόστους. Οι εναλλακτικές είναι:
  - (α) χρήση υλικών για κατασκευή εξαρτημάτων με καλύτερη αντίσταση στη φθορά με μεγαλύτερο αρχικό κόστος
  - (β) χρήση επιφανειακών επιστρώσεων σε φθειρόμενες επιφάνειες σε συνδυασμό ίσως με αλλαγή των υλικών κατασκευής των εξαρτημάτων
- Βελτίωση του σχεδιασμού των φθειρόμενων επιφανειών
  - Απλοποίηση σχεδιασμού για διευκόλυνση συντήρησης

### **Ανάλυση Κόστους/οφέλους**

Ειδικότερα, ο στόχος είναι η δημιουργία σύνθετων υλικών που εμφανίζουν αντοχή στη φθορά, αλλά ταυτόχρονα ελαχιστοποιούν το λόγο : κόστος/όφελος, δηλαδή το υπόστρωμα και η επιστρώση θα έχουν καλύτερη απόδοση από εκείνη που θα είχε το κάθε μέρος μεμονωμένα. Η τελική απόδοση, καθορίζεται από το συνδυασμό των τιμών πολλών και διαφορετικών ιδιοτήτων (φυσικών, χημικών, μηχανικών, μεταλλουργικών και θερμικών), τόσο του υποστρώματος όσο και της επίστρωσης.

**Αποτελέσματα δοκιμών** Οι διαδράσεις τριβής και φθοράς των στερεών λιπαντικών και επιστρώσεων είναι ιδιότητες του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι η απόδοση και η συμπεριφορά εξαρτώνται από το λιπαντικό και τα υλικά, τις συνθήκες λειτουργίας, και το σύστημα. Οι δοκιμές πεδίου ( υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας) είναι όμως ακριβές και μη πρακτικές, οπότε απαιτείται η τριβολογική προσομοίωση των δοκιμών των επιφανειών και των υλικών, καθώς και ο χαρακτηρισμός των καινοτόμων στερεών λιπαντικών και επιστρώσεων. Οι δοκιμές και οι χαρακτηρισμοί είναι βασικές προϋποθέσεις στην έρευνα και ανάπτυξη των επιστρώσεων. Οι επιφανειακές κατεργασίες ή πιο τυπικά η «μηχανική των επιφανειών» προσέδωσε στις επιφάνειες των μεταλλικών υλικών και μηχανικών εξαρτημάτων τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- έλεγχο της τριβής και της φθοράς
- βελτίωση της αντίστασης στη διάβρωση
- μεταβολή των τιμών των φυσικών ιδιοτήτων
- μεταβολή των διαστάσεων



- διαφοροποίηση της επιφάνειας (χρώμα και σκληρότητα)
- μείωση του κόστους
- αύξηση χρόνου ζωής των υλικών και της λειτουργίας των εξαρτημάτων

#### II.4.2 Σημαντικές παράμετροι σχεδιασμού επιστρώσεων [7]

Η πρωταρχική προϋπόθεση στον σχεδιασμό των επιστρωμένων εξαρτημάτων είναι η επίτευξη αντοχής σε φορτία και δευτερευόντως, όταν αυτό επιτευχθεί η προσπάθεια επικεντρώνεται στην αύξηση της αντοχής σε φθορά κατά τη λειτουργία.

Οι βασικές παράμετροι στο σχεδιασμό επιστρωμένων εξαρτημάτων συμπεριλαμβάνουν πάχος επίστρωσης, επιλογή υλικού για τη επίστρωση, την μικροδομική μορφολογία, την κατανομή των παραμενουσών τάσεων και την τρασχύτητα. Όλες αυτές οι παράμετροι καθορίζονται από την επιλογή της μεθόδου απόθεσης της επίστρωσης και τις παραμέτρους της μεθόδου, αλλά προφανώς επηρεάζονται από το υλικό και την τοπογραφία του υποστρώματος. Η επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού προδιαγράφει τις ιδιότητες της επίστρωσης, συμπεριλαμβανομένης της αντίστασης στη δράση διαφορετικών μηχανισμών φθοράς, της σκληρότητας, των διαφόρων μηχανικών μερών, της δυσθραυστότητας, των ιδιοτήτων υψηλής θερμοκρασίας και της τριβολογικής συμπεριφοράς.

*Οι τάσεις στην Τριβολογία των Επιστρώσεων*

Τουλάχιστον δύο τύποι μορφών τάσεων επαφής θα πρέπει να θεωρηθούν στον σχεδιασμό των επιστρώσεων :

1. Τάσεις επαφής τύπου Hertz, που συσχετίζονται με τη μακροσκοπική γεωμετρία της
2. Τάσεις που σχετίζονται με τις μικροσκοπικές επαφές των προεξοχών

Στη στατική επαφή, ή στην επαφή κύλισης, ή ολίσθησης με πολύ μικρό συντελεστή τριβής η μέγιστη τάση διάτμησης, εμφανίζεται σε βάθος ίσο με το μισό της ακτίνας της Hertzian επαφής.

Η ομάδα των εξαρτημάτων/ μερών μηχανών, που μπορεί να αστοχήσει λόγω της κόπωσης της υπο-επιφάνειας λόγω των υπερβολικά υψηλών κυκλικών Hertzian τάσεων, σε ένα βάθος κάτω από τη επιφάνεια είναι αυτών των σφαιρικών ρουλεμάν, γραναζιών, και άλλων εξαρτημάτων μηχανών με μη συμμορφώμενες επιφάνειες

επαφής. Η μέγιστη τιμή της τάσης διάτμησης τυπικά εμφανίζεται πολύ κάτω από το πάχος των λεπτών επιστρώσεων (PVD ή CVD). Συνεπώς, η εφαρμογή ενός λεπτού επιστρώματος πολύ σπάνια μπορεί να θεωρηθεί επαρκής ώστε να μειώσει αυτά τα θέματα.

Σε επαφή ολίσθησης, σε συμβατής επαφής επιφάνειες το φορτίο κατανέμεται σε μία μεγάλης έκτασης ονομαστική επιφάνεια. Οι επιβλαβείς (που προκαλούν θραύση) τάσεις επαφής περιορίζονται στις περιοχές των επαφών των προεξοχών. Σε αυτές τις ζώνες μικροσκοπικής επαφής οι υψηλότερες τάσεις συνήθως εμφανίζονται σε μερικά μm πάχους, της διεπιφάνειας επαφής. Οπότε, σε αυτήν την περίπτωση η πρόγνωση για τη βελτίωση των ιδιοτήτων της τριβής και της φθοράς με την εφαρμογή ενός λεπτού επιστρώματος, είναι σαφώς πιθανότερη.

Κάποιες προτεινόμενες αρχές και διαμορφώσεις για επίτευξη κατάλληλων επιστρωμάτων είναι οι ακόλουθες :

- Διαμόρφωση σύστασης και μικροδομής ή νανοδομής ενός ενδιάμεσου στρώματος (bond coat) ανάμεσα σε μία επίστρωση και ένα υπόστρωμα, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την απόκλιση μεταξύ των συντελεστών θερμικής διαστολής, την απόκλιση μεταξύ των παραμέτρων του πλέγματος, και τη διαφορά των μηχανικών ιδιοτήτων, ενώ, ταυτόχρονα θα αυξηθεί η χημική συγγένεια και ο δεσμός (π.χ. ενδιάμεσο στρώμα σε ένα υπόστρωμα μετάλλων, ένα ενδιάμεσο στρώμα πυριτίου σε ένα κεραμικό υπόστρωμα, ή ένα ενδιάμεσο στρώμα ψευδάργυρου σε ένα πολυμερές υπόστρωμα)
- Για επιφάνειες όπου υψηλή διάχυση θερμότητας είναι επιθυμητή προτείνονται υψηλής θερμικής αγωγιμότητας επιστρώσεις νανοσωλήνων άνθρακα (carbon nanotubes), νανοκρυσταλλικές επιστρώσεις διαμαντιού, επιστρώματα διαμαντιού με ενίσχυση μετάλλου, επιστρώματα άνθρακα τεχνητού διαμαντιού με ενίσχυση μετάλλου, και μαλακά μεταλλικά λεπτά στρώματα films (χρυσού, ασημιού, χαλκού, μολύβδου, και κραμάτων αυτών).
- Για επιφάνειες όπου η διατήρηση καθαρού αέρα είναι επιθυμητή προτείνεται η δημιουργία περιβαλλοντικά φιλικών στερεών λιπαντικών και επιστρωμάτων :  $TiO_2$  ανεπτυγμένο επάνω σε επιφάνεια 55Ni-45Ti και κράματα βάσης Τιτανίου,  $TiO_2$  επιστρώματα, και TiC επιστρώματα.

- Για επιφάνειες που απειλούνται από εκτριβή και διάβρωση εξαιτίας πολύ ρυπαρού περιβάλλοντος, προτείνεται η δημιουργία υπέρ-σκληρων επιφανειών ή σκληρών στερέων λιπαντικών και επιστρώσεων : κεραμικές επιστρώσεις (BN, B<sub>4</sub>C, VC, AlN, CN<sub>x</sub>, TiO<sub>2</sub>, SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, και SiO<sub>2</sub>), νανοκρυσταλλικά και μικροκρυσταλλικά επιστρώματα διαμαντιού, και επιστρώματα τεχνητού διαμαντιού)
- Για εφαρμογές όπου ένας μικρός συντελεστής τριβής είναι έντονα επιθυμητός προτείνονται οι ακόλουθες επιστρώσεις : νανοσωλήνες άνθρακα, φθοριωμένοι σωλήνες άνθρακα, επιστρώματα μαλακών μετάλλων, PTFE, Πολυ-νανοστρωματικές επιστρώσεις, σύνθετες επιστρώσεις (MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>/C και MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>) και λειτουργικά αναβαθμισμένες, πλουστρωματικές ανόργανες επιστρώσεις (TiC<sub>x</sub>/C)
- Για εφαρμογές όπου απαιτείται έλεγχος της φθοράς προτείνονται τα πολύ σκληρά στερεά λιπαντικά και επιστρώσεις : πολυστρωματικές σύνθετες επιστρώσεις (WC/C, MoS<sub>2</sub>/C, WS<sub>2</sub>/C, και TiC/C), πολυ-νανο επιστρώσεις, σύνθετες επιστρώσεις (MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>/C και MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>), λειτουργικά αναβαθμισμένα, πολυστρωματικά ανόργανα επιστρώματα (TiC<sub>x</sub>/C), κεραμικές επιστρώσεις (BN, B<sub>4</sub>C, VC, AlN, CN<sub>x</sub>, TiO<sub>2</sub>, SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, and SiO<sub>2</sub>), νανοκρυσταλλικά και μικροκρυσταλλικά επιστρώματα άνθρακα και διαμαντιού

### II.4.3 Σημαντικότερες Τεχνικές Δημιουργίας Τεχνολογικών Επιστρώσεων [8]

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι για εφαρμογή σκληρών επιστρώματων ανθεκτικών στη φθορά επάνω σε μεταλλικά επιστρώματα. Νέες τεχνικές συνεχώς εμφανίζονται, καθώς κάθε διαθέσιμη τεχνολογία υιοθετείται προκειμένου η εναπόθεση της επιστρώσεως να είναι πιο αποτελεσματική. Η αντίσταση στην φθορά μιας επιφάνειας μπορεί επίσης να βελτιωθεί με χρήση θερμικής κατεργασίας σε τοπικό επίπεδο π.χ. θερμική σκλήρυνση, ή με εισαγωγή στοιχείων κραμάτωσης π.χ. αζώτου ή άνθρακα. Κάποιες από αυτές τις μεθόδους χρησιμοποιούνται χρόνια, αλλά δυστυχώς υπολείπονται στο γεγονός ότι το υπόστρωμα θερμαίνεται αναγκαστικά πολύ.

**Πίνακας II - 1 : Κατηγοριοποίηση & Πλεονεκτήματα/ Μειονεκτήματα των σημαντικότερων τεχνικών επιστρώσεων**

| <i>Τεχνικές Δημιουργίας Επιστρώσεων που εξαρτώνται από κενό ή αέριο σε πολύ χαμηλές πιέσεις</i> |   |
|---|---|
| PVD & CVD   | <i>Λεπτά διακριτά επιστρώματα/ κανένας περιορισμός στα υλικά</i>  |
| Εμφύτευση Ιόντων  | <i>Λεπτό διαχεόμενο επίστρωμα / μίξη με το υπόστρωμα αναλόφει</i>   |
| <i>Τεχνικές Δημιουργίας Επιστρώσεων που απαιτούν τοπική συγκέντρωση έντονης θερμότητας</i>      |   |
| Επιφανειακή Συγκόλληση  | <i>Κατάλληλη για τα πολύ παχιά επιστρώματα μόνο; Περιορισμένη στα υλικά που παραμένουν σταθερά σε υψηλές θερμοκρασίες; οι επικαλυμμένες επιφάνειες μπορεί να χρειαστούν περαιτέρω επεξεργασία</i> |
| Θερμικός ψεκασμός   | <i>Ικανή για πολύ παχιά επιστρώματα αλλά ο έλεγχος της καθαρότητας του επιστρώματος είναι δύσκολος</i>  |
| Αμορφοποίηση & Κραμάτωση με laser   | <i>Παχιά επιστρώματα, με την προϋπόθεση το υλικό του επιστρώματος να είναι σε θέση να λειώσει</i>   |
| Διαμόρφωση επιφάνειας με τριβή  | <i>Απλή τεχνολογία αλλά περιορίζεται στις επίπεδες επιφάνειες, παράγει παχιά μεταλλικά επιστρώματα</i>  |
| Εκρηκτική Επίστρωση   | <i>Γρήγορη επίστρωση μεγάλων επιφανειών και η συνάφεια με το υπόστρωμα είναι καλή. Μπορούν να δώσουν πιο παχύ και πιο σκληρό επίστρωμα από πολλές άλλες μεθόδους</i>                              |
| Ηλεκτροαπόθεση  | <i>Ευρύ φάσμα παχών επιστρώματος, αλλά η προσκόλληση στο υπόστρωμα είναι φτωχή, και μόνο ορισμένα υλικά μπορούν να επιστρωθούν με αυτήν την τεχνική</i>   |

(Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ, σελ Π-7 οι βασικότερες από τις παραπάνω τεχνικές περιγράφονται αναλυτικότερα)

Κάθε ομάδα τεχνικών επιτρέπει τη δημιουργία επιστρώσεων συγκεκριμένων χαρακτηριστικών και μπορεί να χωριστεί σε διάφορες υποκατηγορίες. Οι ίδιοι τύποι επιστρώσεων μπορούν να επιτευχθούν με διαφορετικές ομάδες τεχνικών. Επιπλέον, επιστρώσεις μπορούν να δημιουργηθούν με μία ή και με συνδυασμό τεχνικών, τάση η οποία είναι και η πλέον σύγχρονη και ανερχόμενη. Για την επιλογή μίας τεχνικής για συγκεκριμένη εφαρμογή δεν πρέπει μόνο να θεωρηθούν οι τελικές ιδιότητες της επιφάνειας, αλλά και το πάχος του μετασχηματισμένου στρώματος σε σχέση με το βάθος διείσδυσης του επιφανειακού πεδίου δυνάμεων, καθώς και σε σχέση με το ρυθμό φθοράς, τη διάρκεια ζωής για την οποία έχει σχεδιαστεί και την ανοχή σε αλλαγές διαστάσεων που θα παρουσιάζει. Ανάλογα με το είδος της ενέργειας που απαιτείται για μία τεχνική επίστρωσης, η κατηγοριοποίηση των τεχνικών δημιουργίας επιστρώσεων παρατίθεται στον Πίνακα Π- 1, συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των περισσότερο εφαρμοζόμενων, αλλά και πολλά υποσχόμενων, τεχνικών δημιουργίας επιστρώσεων.

Στην κατηγορία των Τεχνικών Δημιουργίας Επιστρώσεων που απαιτούν τοπική συγκέντρωση έντονης θερμότητας εντάσσεται και η τεχνική δημιουργίας επιστρώσεων μεγάλου πάχους με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια (ΣΗΕ) που εξετάζεται στη παρούσα διατριβή.

#### **Π.4.4 Σύγχρονες Προοπτικές στη Δημιουργία Τεχνολογικών Επιστρώσεων**

##### **Π.4.4.1 Επιστρώματα του μέλλοντος [3]**

Η δημιουργία επιστρώσεων μέχρι σήμερα είχε ειδοθεί από την οπτική της *παράτασης της ζωής* των μηχανικών εξαρτημάτων και δεν λαμβάνονταν υπόψη κατά τον αρχικό σχεδιασμό των εξαρτημάτων. Οι νέες απαιτήσεις που προκύπτουν, κυρίως από την αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροναυπηγική, επιβάλλουν οι επιστρώσεις να είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να είναι “πρωτίστης αξιοπιστίας” (prime reliant) και να συμπεριλαμβάνονται στο σχεδιασμό του συστήματος. Αυτό προφανώς προϋποθέτει κατοχύρωση τόσο της αξιοπιστίας όσο και της επαναληψιμότητας στην παραγωγή τους, καθώς και της γνώσης που βασίζεται στις ιδιαίτερες - εσωτερικές ιδιότητες των

υλικών και της συμπεριφοράς τους, γεγονός, που ώθησε για συστηματικότερη και ενδελεχή έρευνα στο πεδίο αυτό.

Φαίνεται να υπάρχει σχεδόν μία οικουμενική σχέση ανάμεσα στην σκληρότητα και την δυσθραυστότητα όλων των υλικών, με τρόπο ώστε η αύξηση της σκληρότητας κάποιου υλικού σχεδόν πάντα, πραγματοποιείται εις βάρος της δυσθραυστότητας. Με τη μείωση του μεγέθους των κόκκων ή με την εισαγωγή μίας δομής ινών φαίνεται να επιτυγχάνεται αύξηση και της σκληρότητας και της δυσθραυστότητας. Η τιμή της δυσθραυστότητας των κεραμικών είναι τυπικά μέχρι 8 MPam. Τα PVD ή CVD επιστρώματα των ίδιων υλικών συνήθως εμφανίζουν μικρότερη τιμή στο διάστημα από 0.1 έως 1.0 MPam. Συνεπώς, η όλη προσπάθεια στο πεδίο της δημιουργίας επιστρώσεων επικεντρώνεται στην αύξηση της δυσθραυστότητας.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές σημαντικές βελτιώσεις στα πεδία των τριβολογικών και στερεών λιπαντικών επιστρώσεων (λεπτά φιλμς). Αυτά τα καινοτόμα επιστρώματα έχουν πολλά να προσφέρουν σε συνεχώς αυξανόμενες δύσκολες συνθήκες εφαρμογών για μελλοντικά τριβοσυστήματα. Κάθε μία από αυτές τις επιστρώσεις είναι μάλλον μοναδική, και σχεδιάζεται ή διαμορφώνεται έτσι ώστε να αποδίδει υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Ανεξάρτητα του τύπου, δεν υπάρχει επιστροφή που να είναι κατάλληλη να λειτουργεί υπό οποιοδήποτε συνθήκες. Αναλόγως το περιβάλλον δοκιμών, τη θερμοκρασία και τις συνθήκες κύλισης, η απόδοση και η διάρκεια των επιστρώσεων κυμαίνονται σημαντικά. Για να ξεπεραστούν αυτές οι διακυμάνσεις, οι ερευνητές διερευνούν καινοτόμες αρχιτεκτονικές επιστρώσεων όπως των πολυεπιστρώσεων, νανο δομές, επιφανειακή μικροτοπογραφία, καθώς και σύνθετα υλικά. Τέτοιες εξεζητημένες επιστρώσεις φαίνεται να λειτουργούν καλύτερα από τα παραδοσιακά ανταγωνιστικά τριβολογικά μέρη, τόσο σε μηχανικές όσο και σε συνθήκες επαφής σε κύλιση, εφαρμογές. Μερικές από τις νανοδομικές επιστρώσεις είναι υπέρσκληρες και εξαρτώνται από τη σύστασή τους, ενώ μερικές από αυτές είναι ικανές να παρέχουν καλύτερη απόδοση και διάρκεια σε ευρύτερο φάσμα εφαρμογών. Διαφορετικές φάσεις και επιστρώματα μπορούν να συνδυαστούν σε sandwich επιστρώσεις, πολύ-στρωματικές, υπερ - πλεγματικές, νανοκρυσταλλικές και πολυσυστατικές :

#### ***Πολύ-στρωματικές επιστρώσεις***

Οι πολυστρωματικές επιστρώσεις διακρίνονται από τα επιστρώματα τύπου sandwich από την περιοδική επανάληψη της γραμμικής δομής των δύο ή περισσότερων υλικών που την απαρτίζουν. Οι επιστρώσεις που δημιουργούνται από τις

πολυστρωματικές δομές έχουν αποδειχθεί σημαντικά σκληρότερες και πιο δύσθραυστες από τις μονοστρωματικές επιστρώσεις.

#### *Υπερ πλεγματικές επιστρώσεις*

Πολυστρωματικές επιστρώσεις των υλικών με παρόμοιες κρυσταλλικές δομές οι οποίες τείνουν να δημιουργήσουν δομή κολονοειδών κρυστάλλων που εκτείνονται διαμέσου όλης της επίστρωσης, δεδομένου ότι το πάχος των μεμονωμένων διαστρωματώσεων παραμένει ικανά λεπτό, μεταξύ 5 και 25nm. Τέτοιες επιστρώσεις αναφέρονται ως υπερπλεγματικές επιστρώσεις. Μερικά από τα πρώτα παραδείγματα των υπερπλεγματικών επιστρώσεων ελήφθησαν από τον συνδυασμό TiN/VN και TiN/NbN. Με την επιλογή των κατάλληλων συνδυασμών υλικών μπορεί να επιτευχθεί υψηλή αντοχή κατά της φθοράς, διάβρωσης, οξειδωσης, υψηλής τριβής κλπ. Για παράδειγμα επιστρώσεις με συνδυασμό TiN και TaN μπορεί να δώσουν πολύ καλά αποτελέσματα στην κοπή του ανοξειδωτού χάλυβα. Αυτό προφανώς οφείλεται ως αποτέλεσμα της βελτιωμένης δυσθραυστότητας σε συνδυασμό με την χαμηλή συγγένεια του TaN στο υλικό του εργαλείου .

#### *Νανοκρυσταλλικές Επιστρώσεις*

Το όριο διαρροής, η σκληρότητα και η δυσθραυστότητα των πολυκρυσταλλικών υλικών γενικά βελτιώνονται με την μείωση του μεγέθους των κόκκων. Παραπλήσιο φαινόμενο εμφανίζεται να ισχύει και σε λεπτά επιστρώματα, κόκκων διαστάσεων νανομετρίας. Επιπλέον των βελτιωμένων μηχανικών ιδιοτήτων τα νανοκρυσταλλικά υλικά μπορούν να επιδεικνύουν υψηλότερη θερμική διαστολή, μικρότερη θερμική αγωγιμότητα, μοναδικές οπτικές, μαγνητικές και ηλεκτρονικές ιδιότητες. Πρόσφατα νανοκρυσταλλικές δομές (τόσο των κυρίως σωμάτων όσο και των νανοκρυσταλλικών δομών) διερευνούνται για τριβολογικές εφαρμογές.

#### *Πολυσυστατικές επιστρώσεις*

Είναι επιστρώσεις που συντίθεται από δύο ή περισσότερα συστατικά σε επίπεδο κόκκων, σωματιδίων ή ινών. Αν και πολλές από τις σημερινές μονοστρωματικές επιστρώσεις έχουν μία πολυσυστατική δομή, πρόκειται γο ένα πεδίο ανεξερευνητο προς το παρόν για την δημιουργία επιστρώσεων αντοχής

#### II.4.4.2 Υβριδικές Μέθοδοι Δημιουργίας Επιστρώσεων

Τέλος, μία από τις πλέον σύγχρονες και πολλά υποσχόμενες τάσεις στην δημιουργία των επιστρώσεων είναι και ο συνδυασμός τεχνικών, όπως αυτή του υβριδικού συνδυασμού laser και plasma. Συγκεκριμένα, οι Chang et al [9], από την Κίνα εισήγαγαν την ακτίνα Laser που παρήχθη από μία Q-switch Nd: YAG laser μηχανή, μέσα σε μία ακτίνα πλάσματος τόξου ως επιπλέον πηγή θέρμανσης. Τα αποτελέσματα της χρήσης της υβριδικής αυτής μεθόδου συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- (1) Η διάμετρος της ακτίνας πλάσματος τόξου διπλασιάζεται, το βάθος της τηκόμενης περιοχής αυξάνει και το πλάτος της μειώνεται
- (2) Η ανάφλεξη του τόξου γίνεται ευκολότερα
- (3) Η κατανομή (χημική και μορφολογική) των συστατικών της επίστρωσης είναι ομοιογενής
- (4) Οι μηχανικές ιδιότητες της επίστρωσης μεγάλου πάχους που δημιουργείται είναι πολύ βελτιωμένες σε σχέση με αυτές της επίστρωσης που παράγεται εξ' ολοκλήρου από plasma

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η έρευνα για πιο σύγχρονες και βελτιωμένες τριβολογικές και στερεού λιπαντικού επιστρώσεις θα εξακολουθήσει τα επόμενα χρόνια, -εφόσον οι συνθήκες εφαρμογών των μελλοντικών μηχανικών συστημάτων θα γίνονται όλο και πιο απαιτητικές. Μία από τις πιο συναρπαστικές τάσεις σήμερα είναι η ανάπτυξη επιστρώσεων για ξηρές, και σχεδόν ξηρές, μηχανολογικές εφαρμογές. Με βάση τα υφιστάμενα δεδομένα και τις διαθέσιμες πηγές, δεν υπάρχει αμφιβολία ότι αυτές οι επιστρώσεις θα είναι διαθέσιμες στο εγγύς μέλλον. Η συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για υψηλότερες αποδόσεις, μείωση του βάρους και προκλητικά δύσκολες συνθήκες εφαρμογών θα είναι οι βασικοί οδηγοί για την υποκατάσταση των εξαρτημάτων του χάλυβα και του χυτοσίδηρου από ελαφρά μέταλλα. Όμως τα κράματα αλουμινίου και τιτανίου χαρακτηρίζονται από φτωχή τριβολογική συμπεριφορά, η οποία αποτελεί σοβαρό περιορισμό στις τριβολογικές εφαρμογές. Αυτό μπορεί να ξεπεραστεί μέσω εφαρμογών εξειδικευμένης επιφανειακής μηχανικής.



## II.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1 ] Wierzchon, Burakowski, Surface Enginneering of Metals, CRC Press
- [2] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής «Επιστήμη και Τεχνολογία των μεταλλικών υλικών», Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2002
- [3] Modern Tribology Handbook, Bharat Bhushan, Two Volume Set.
- [4] I. Sherigton, W.B. Rowe and R.J.K Wood TOTAL TRIBOLOGY, *Tribology in Practice Series*
- [5] A.M. Merlo, vol. 174-175, 2003, p.21-26
- [6] Holmberg et al., THIN SOLD FILMS, vol. 253, iss 1-2, p.173-178
- [7] Kazuhisa Miyoshi, NASA/TM–2007-214668,
- [8] Enginnering Tribology, 4th edition, 2013, Butterworth Heineman, Gwidon Stachowiak, Andrew Batchelor
- [9] Zhong Kui Yu and Jin Tang Lu, Surface Engineering, 1987, Vol. 3, pp. 41-45



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ : ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ Σ.Η.Ε.

### ΙΙΙ.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ [1]

Όταν υψηλής πυκνότητας ενέργεια ή υψηλή θερμοκρασία και καθαρότητα απαιτείται στην κατεργασία της επιφάνειας των υλικών, τα συμβατικά συστήματα καύσης δεν είναι κατάλληλα, και έτσι, περισσότερο εξειδικευμένες πηγές ενέργειας αναζητούνται, όπως το laser και το plasma. Στα πλαίσια αναζήτησης «καθαρών» πηγών ενέργειας, τα τελευταία τριάντα χρόνια, πολλοί ερευνητές, σε όλον τον κόσμο διερευνούν συστηματικά την χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας, στις επιφανειακές και τις άλλες κατεργασίες υλικών. Σε μία πρώτη προσέγγιση φαίνεται ότι τα ηλιακά συστήματα συγκέντρωσης ενέργειας, προσφέρουν μερικές μοναδικές ευκαιρίες για μετασχηματισμούς υψηλής θερμοκρασίας, αλλά και για σύνθεση υλικών, τόσο από άποψη τεχνική όσο και οικονομική.

Ειδικότερα, εάν αναζητήσουμε δεδομένα απόδοσης στις επιφανειακές κατεργασίες, σε σχέση με τις λοιπές τεχνικές προδιαγραφές, των κύριων συστημάτων υψηλής συγκέντρωσης ενέργειας και τα συγκρίνουμε (Πίνακα ΙΙΙ-1) αναδεικνύεται η πολύ ενδιαφέρουσα προοπτική που έχει η Σ.Η.Ε.

**Πίνακας ΙΙΙ-1 Σύγκριση Τεχνικών Χαρακτηριστικών Απόδοσης laser, plasma και ήλιου στην κατεργασία υλικών [1]**

| ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ                 | ΤΥΠΙΚΗ ΙΣΧΥΣ<br>(kW) | ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ<br>ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ<br>(kW/m <sup>2</sup> )  | ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ<br>ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ<br>(cm <sup>2</sup> ) | ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ<br>(K) | ΣΥΝΟΛΙΚΗ<br>ΑΠΟΔΟΣΗ<br>(%) |
|----------------------------|----------------------|---|--|--------------------|----------------------------|
| <i>LASER</i>               |                      |   |  |                    |                            |
| CO <sub>2</sub>            | 2-25                 | 10 <sup>3</sup> - 10 <sup>6</sup>               | <1   | >5000              | ~2                         |
| Nd-YAG                     | 1-5                  | 10 <sup>5</sup> - 10 <sup>9</sup><br>(ΠΑΛΑΜΙΚΟ) | <1   | >5000              | ~10                        |
| <i>PLASMA</i>              | 10-2000              | 10 <sup>4</sup>                                 | ~100   | >5000              | 25                         |
| <i>ΗΛΙΑΚΟΣ<br/>ΦΟΥΡΝΟΣ</i> | <1000                | 10 <sup>3</sup>                                 | ~1000  | <3500              | 60                         |

Ειδικότερα, από τον Πίνακα III-1, συγκρίνοντας πηγές ενέργειας φωτονίων, όπως το Laser και ο ήλιος, προκύπτει, ότι στην περίπτωση του Laser λαμβάνονται πυκνότητες ενέργειας πολύ μεγαλύτερες - δύο έως και τρεις τάξεις μεγέθους- από τις αντίστοιχες των ηλιακών συστημάτων για κατεργασίες στις οποίες απαιτούνται θερμοκρασίες μικρότερες από 3000K. Όμως, τα ηλιακά συστήματα προσφέρουν τη μοναδική συνδυαστική δυνατότητα υψηλής πυκνότητας ενέργειας και μεγάλης επιφάνειας κατεργασίας. Συγκρίνοντας τώρα το θερμικό ψεκασμό πλάσματος (plasma spraying) με τα ηλιακά συστήματα, πάλι στην περίπτωση του πλάσματος, επιτυγχάνονται, λογικά, υψηλές πυκνότητες ενέργειας και υπάρχει δυνατότητα κατεργασίας μεγαλύτερων επιφανειών (συγκριτικά με το laser), αλλά, το φέρρον αέριο που χρησιμοποιείται στο πλάσμα, επιδρά σημαντικά στη απόδοση της τεχνικής, δεδομένου ότι κυριαρχεί η συναγωγή κατά τη μεταφορά θερμότητας μειώνοντας σημαντικά την απόδοση. Αυτό προκύπτει και από τις τιμές της συνολικής απόδοσης μετατροπής της ενέργειας για κάθε μία από τις τρεις τεχνικές, που παρατίθενται στον Πίνακα III-1, όπου φαίνεται ότι η ενεργητική απόδοση των laser και plasma είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με την αντίστοιχη ηλιακή. Ειδικότερα, η απορρόφηση της δέσμης laser CO<sub>2</sub> (10.6μm) από ένα σιδηρούχο κράμα, για παράδειγμα, κυμαίνεται από 4% σε θερμοκρασία δωματίου έως 30% στη θερμοκρασία τήξης. Αυτό συνεπάγεται μία πολύ μικρή ενεργειακή απόδοση της διαδικασίας. Πολλά μέταλλα με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα (χαλκός, αλουμίνιο) εμφανίζουν υψηλή ανακλασιμότητα στο μήκος κύματος του laser CO<sub>2</sub> (10.6μm), κάνοντας έτσι, προτιμότερη την χρήση μικρότερου μήκους κύματος laser. Η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (Σ.Η.Ε.) υπερτερεί σε αυτό. Ως γνωστόν ο ρυθμός απορρόφησης εξαρτάται από το μήκος κύματος της εισρέουσας ακτινοβολίας, και επειδή το μήκος κύματος της ορατής ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνεται από 400 έως και 800nm, αυτή επιτρέπει υψηλότερη απορρόφηση για τις περισσότερες μεταλλικές επιφάνειες, κάνοντας αυτές τις διαδικασίες περισσότερο αποδοτικές ενεργειακά. Στον Πίνακα III - 2, καταγράφεται ενδεικτικά ο χρόνος που απαιτείται για διαφορετικά μέταλλα να φτάσουν στο σημείο τήξης τους, υπό την ακτινοβολία με δέσμη συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας, πυκνότητας 2000W/cm<sup>2</sup>.

**Πίνακας III - 2 : Απαιτούμενος χρόνος για να φτάσει το υλικό στο Σ.Τ. απορροφώντας συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια, πυκνότητας 2000W/cm<sup>2</sup> [2]**

| ΥΛΙΚΟ           |                          | Σ.Τ.<br>(°C) | Χρόνος<br>(sec) |
|-----------------|--------------------------|--------------|-----------------|
|                 | <b>Αλουμίνιο</b>         | 660          | 0.42            |
|                 | <b>Χάλυβας</b>           | 1535         | 0.79            |
| <b>ΜΕΤΑΛΛΑ</b>  | <b>Cr</b>                | 1857         | 1.46            |
|                 | <b>Mo</b>                | 2617         | 4.7             |
|                 | <b>W</b>                 | 3407         | 9.8             |
|                 | <b>ΚΕΡΑΜΙΚΑ</b>          |              |                 |
| <b>ΟΞΕΙΔΙΑ</b>  | <b>SiO</b>               | 1720         | 0.014           |
|                 | <b>CaO</b>               | 2580         | 1.66            |
|                 | <b>ZrO</b>               | 2900         | 0.08            |
|                 | <b>ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΚΑΡΒΙΔΙΑ</b> |              |                 |
|                 | <b>SiC</b>               | 3830         | 0.56            |
|                 | <b>TiC</b>               | 3200         | 9.14            |
| <b>ΝΙΤΡΙΔΙΑ</b> | <b>SiN</b>               | 1900         | 0.059           |
|                 | <b>BN</b>                | 3000         | 0.545           |

Επιπλέον, όσον αφορά στη σύγκριση των οικονομικών στοιχείων και συγκεκριμένα, του κόστους κεφαλαίων, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα III-3, είναι κοινός τόπος ότι τα ηλιακά συστήματα είναι ακριβά, κυρίως εξαιτίας των υψηλών απαιτούμενων ποσών επένδυσης, ως προς τα συμβατικά συστήματα καύσης. Αλλά συγκρινόμενα με άλλες πηγές ενέργειας, όπως το laser και το plasma, διαπιστώνεται ότι, το laser είναι το πιο ακριβό από τις τρεις τεχνικές, με έναν παράγοντα x10, ενώ τα κόστη για το plasma και τον ήλιο είναι σχεδόν ισόποσα, τουλάχιστον σε επίπεδο επένδυσης.

**Πίνακας ΙΙΙ-3 : Κόστη Κεφαλαίου για τις τρεις τεχνολογίες**

| ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ                | ΚΟΣΤΟΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ (Κεcu/KW) |
|---------------------------|----------------------------|
| <i>Laser (1-5kW)</i>      | <u>50-100</u>              |
| <i>Plasma (50-1000kW)</i> | <u>0.8-1.5</u>             |
| <i>Solar (50-1000kW)</i>  | <u>1.2-1.8</u>             |

Διαπιστώνεται λοιπόν, από τα προαναφερθέντα ότι η υψηλής πυκνότητας συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια, είναι μία επιλογή με σημαντικές προοπτικές στις μεθόδους επιφανειακών κατεργασιών υλικών, δεδομένου ότι συνδυάζει ενδιαφέρουσες δυνατότητες. Ως εκ τούτου, τα τελευταία 30 και πλέον χρόνια διερευνάται συστηματικά από τους επιστήμονες στο πεδίο των υλικών η χρήση της Σ.Η.Ε. ως πηγή θέρμανσης στην κατεργασία της επιφάνειας των υλικών. Ακολουθεί αναλυτική αναφορά στις σημαντικότερες από τις εργασίες, που αφορούν σε μετασχηματισμούς επιφάνειας μέσω κατεργασίας με Σ.Η.Ε.

### ΙΙΙ.2 Σκλήρυνση μέσω μαρτενιστικού μετασχηματισμού (ΣΜΜΜ)

Όπως είναι γνωστό η επιφάνεια [3] των ελαφρά κραματωμένων χαλύβων μπορεί να σκληρυνθεί, εφόσον εκτεθούν σε μία ικανή - ενεργειακά - θερμοκρασιακή βαθμίδα. Η τάξη μεγέθους της πυκνότητας ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί με χρήση ενός ηλιακού φούρνου, επιτρέπει τη σκλήρυνση της επιφάνειας των χαλύβων. Έτσι, υπό συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων της ηλιακής κατεργασίας μία θερμοκρασιακή βαθμίδα μπορεί να αναπτυχθεί, η οποία θα θερμάνει την επιφάνεια πάνω από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, ενώ συγχρόνως θα διατηρήσει τη χαμηλή θερμοκρασία του υποστρώματος μέχρι να ολοκληρωθεί η έκθεση και να ψυχθεί η επιφάνεια -μέσω αγωγής- και να σκληρυνθεί. Αυτή η δυνατότητα έχει διερευνηθεί διεξοδικά μέσω της χρήσης δέσμης υψηλής πυκνότητας ενέργειας laser προκειμένου να παραχθούν μαρτενιστικά στρώματα σε χαλύβδινα εξαρτήματα. Η ακτίνα ενός καλά εστιασμένου, υψηλής πυκνότητας ενέργειας laser είναι τόσο δυνατή ώστε να παράγει μία εξαιρετικά έντονη θερμική βαθμίδα, η οποία εάν θερμάνει αρκετά την

επιφάνεια μέχρι τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, τότε θα ψυχθεί τόσο γρήγορα μέσω αγωγής, ώστε η μετατροπή σε μαρτενσίτη είναι αναπόφευκτη.

Η σκλήρυνση της επιφάνειας των χαλύβων μέσω μαρτενσιτικού μετασχηματισμού με επιβολή συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας αναμένεται να σκληρώνει ένα παχύ επιφανειακό στρώμα, αποφεύγοντας τη δημιουργία μεγάλων εφελκυστικών τάσεων στο υπόστρωμα. Η θερμότητα εισέρχεται βαθιά μέσα στο προς κατεργασία υλικό, με μικρή θερμοκρασιακή βαθμίδα, έτσι η υπερθέρμανση της επιφάνειας αποφεύγεται και κατ' επέκταση η επίδραση της θερμικής εκτόνωσης, μειώνεται.

Η συνολική ισχύς που επιτυγχάνεται με τη συγκέντρωση με ηλιακό φούρνο είναι σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με τα περισσότερα εμπορικά lasers, όπως αναφέρθηκε. Αυτό σημαίνει ότι με έναν ηλιακό φούρνο μία πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια μπορεί να ακτινοβοληθεί, από ότι με ένα laser, αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη για επανάληψη της διεργασίας με διαδοχικές σαρώσεις, που οδηγεί σε ανομοιόμορφο προφίλ σκλήρυνσης. Αντιστρόφως, μικρή πυκνότητα ενέργειας σημαίνει μεγαλύτερη διάρκεια έκθεσης που απαιτείται για την επίτευξη θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης. Αυτό όμως οδηγεί σε θέρμανση του υποστρώματος και σε μικρότερο ρυθμό ψύξης ( $d\theta/dt$ ), ο οποίος μπορεί να είναι αρκετά χαμηλός προκειμένου να δώσει σκλήρυνση μέσω μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, εκτός εάν η διεργασία είναι προσεκτικά ελεγχόμενη. Υπολογισμοί μεταφοράς της θερμότητας απέδειξαν ότι :

$$d\theta/dt \propto 1/F^2$$

(ΕΞ. III-1)

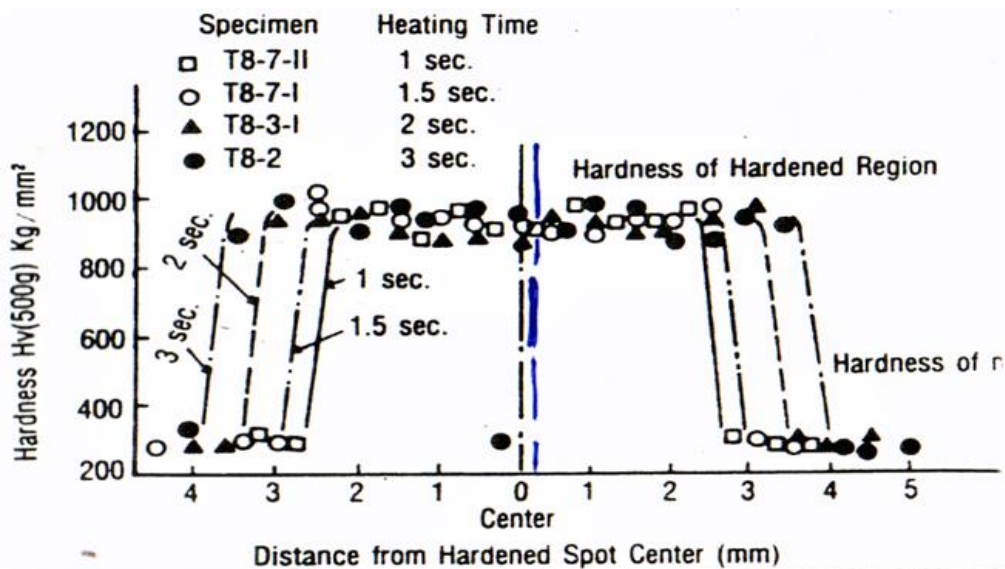
όπου  $F$  : η πυκνότητα ενέργειας

Οπότε, η αύξηση της πυκνότητας ενέργειας έχει μία ισχυρή επίδραση στο ρυθμό ψύξης των επιφανειακών στρωμάτων. Είναι σημαντικό το  $F$  να είναι αρκετά υψηλό ώστε να επιτρέψει στον κρίσιμο ρυθμό ψύξης, να είναι στο σωστό επίπεδο. Μερικές παραδοχές προσδιορίζουν τις σωστές συνθήκες έκθεσης προκειμένου να σκληρυνθεί ένας χάλυβας :

1. Υπολογισμός των θερμικών κύκλων υπό δεδομένη πυκνότητα ενέργειας

2. Υπολογισμός του ποσού του ωστενίτη που σχηματίζεται στην επιφάνεια του χάλυβα υπό τον θερμικό κύκλο που εφαρμόζεται (Βήμα 1), μέσω υπολογισμού της κινητικής του
3. Υπολογισμός του ψυκτικού κύκλου με λύση των εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας με αγωγή
4. Σύγκριση του ψυκτικού κύκλου του Βήματος 3 με το κρίσιμο ρυθμό ψύξης για σχηματισμό μαρτενσίτη

Η πρώτη ερευνητική προσπάθεια σκλήρυνσης χαλύβων μέσω μαρτενσιτικού μετασχηματισμού έγινε από τους Yu et al. [4] του Ινστιτούτου Τεχνολογίας στη Guangzhou στη Νότιο Κίνα, το 1982. Για τη συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιήθηκε ένας παραβολικός δίσκος διαμέτρου 1.5m, ο οποίος υπολογίστηκε ότι συγκέντρωνε την ηλιακή ενέργεια σε πυκνότητα  $3000\text{W}/\text{cm}^2$ , με διάμετρο δέσμης 5mm. Παρά τους πολύ μικρούς χρόνους έκθεσης (1-7s) επετεύχθη επιφανειακή σκλήρυνση κυλινδρικών δοκιμίων χάλυβα και χυτοσίδηρου διαφορετικών συστάσεων όπως T8A, T10A, 40Cr, 20Cr και QT60-2 (διάμετρου 30-40mm και πάχους 1.3-5mm). Προκειμένου να κατεργαστεί όλη η επιφάνεια των κυλινδρικών δοκιμίων έγιναν αλεπάλληλες σαρώσεις, με αποτέλεσμα να μειώνεται η σκληρότητα στις περιοχές της επιφάνειας όπου υπήρχε επικάλυψη (overlapping) των σαρώσεων.



Σχήμα III - 1: Προφίλ σκληρότητας από το κέντρο των κατεργασμένων ζωνών για διαφορετικούς χρόνους κατεργασίας [13]



Αποδείχθηκε, ότι μεγαλύτερη διάρκεια έκθεσης μεγεθύνει και βαθαίνει τη ζώνη σκλήρυνσης. Υψηλές τιμές σκληρότητας ελήφθησαν (μέχρι και 1000HV) σε βάθος 2mm (Σχήμα III-1). Η δομή της κατεργασμένης ζώνης ήταν, κυρίως, μαρτενιτική με το μέγεθος των κόκκων να αυξάνεται με τον χρόνο της επίδρασης. Η αντίσταση στην τριβή και τη φθορά του κατεργασμένου με ηλιακή ενέργεια δοκιμίου συγκρίθηκε με την αντίστοιχη ενός κατεργασμένου δοκιμίου με άλλη μέθοδο και βρέθηκε σημαντικά βελτιωμένη. Η ίδια ομάδα εξακολούθησε την έρευνα μέχρι το 1986 [5,6]

Οι **Maiboroda et al.** [7], στο Κίεβο (Ουκρανία), στην Εθνική Ακαδημία Επιστημών, χρησιμοποίησαν παρόμοιο –με τους Κινέζους- εξοπλισμό, αλλά με χαμηλότερη πυκνότητα ενέργειας (200-400 W/cm<sup>2</sup>). Στα πλαίσια της εργασίας τους αυτής, απέδειξαν ότι δοκίμια που εκτίθενται σε πυκνότητες ενέργειας που κυμαίνονται από 200-400W/cm<sup>2</sup> μπορούν να θερμανθούν μέχρι τους 1000°C, ενώ παρουσιάζουν αυξημένο όριο ελαστικότητας σε σύγκριση με δοκίμια που κατεργάστηκαν με συμβατικό τρόπο.

Οι **Pitts et al.**, πραγματοποίησαν θερμικές κατεργασίες σε δοκίμια χάλυβα χρησιμοποιώντας Σ.Η.Ε. στον Ηλιακό Φούρνο του NREL s στο Κολοράντο (ΗΠΑ) [8, 9], με πυκνότητα ενέργειας 300 W/cm<sup>2</sup> και διάμετρο δέσμης 15mm. Απέδειξαν ότι με ακόμα χαμηλότερες πυκνότητες ηλιακής ενέργειας επιτυγχάνεται μεγαλύτερο βάθος στην κατεργασία και άλλα ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα σκλήρυναν την κεντρική περιοχή δοκιμών χάλυβα διαμέτρου 50mm και πάχους 1.6mm σε όλο της το βάθος. Στη δεύτερη εργασία [9] κατεργάστηκαν παρελληλεπίπεδα δοκίμια (610x150x13mm<sup>3</sup>) χαλύβων A2 και AISI 4340. Η πλήρως σκληρωμένη περιοχή έφτανε σε βάθος 1-2mm, ενώ η ζώνη μετάβασης στη μη κατεργασμένη περιοχή ήταν μάλλον παχιά **4-5mm**.

Στην Ισπανία, οι πρώτες προσπάθειες πραγματοποιήθηκαν από τους **Vazquez και Rodriguez et al.** [10-14], στις εγκαταστάσεις της Plataforma Solar d' Almeria, τόσο χρησιμοποιώντας τον κεντρικό πύργο συγκέντρωσης (με πυκνότητα ενέργειας 80-120 W/cm<sup>2</sup>), όσο και τον ηλιακό φούρνο (με πυκνότητα ενέργειας 200-250W/cm<sup>2</sup>). Τα δοκίμια που κατεργάστηκαν ήταν τριών διαφορετικών χαλύβων : 40CrMo4, 55Cr5 και x30Cr13 και είχαν κυλινδρικό σχήμα, διαμέτρου 35mm και τα πάχη τους ήταν 15, 25 και 35mm. Στην περίπτωση κατεργασίας στον κεντρικό πύργο, πολύ παχιές (6-

11mm) ζώνες κατεργασίας ελήφθησαν, αλλά οι μη ομοιόμορφες συνθήκες ψύξης κατέληξαν σε μη ομοιόμορφη κατανομή της επιτυγχανόμενης σκληρότητας. Ενώ οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στον ηλιακό φούρνο, οδήγησαν σε μικρότερο βάθος κατεργασίας (0.5-5mm), αλλά ομοιόμορφο προφίλ και μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας (700).

Στα πλαίσια της έρευνας των **Yang και Torrance [15]**, οι οποίοι εργάστηκαν στον ηλιακό φούρνο της Plataforma Solar, στην Almeria, έγινε κατεργασία κυλινδρικών δοκιμίων (25mm διάμετρος και 12.5mm πάχος) τριών διαφορετικών χαλύβων EN8, EN16 και EN24. Οι ερευνητές επικεντρώθηκαν στη βελτίωση της απορρόφησης της ενέργειας. Στα πλαίσια των δοκιμαστικών προσπαθειών φάνηκε ότι η επάνω επιφάνεια του δοκιμίου μπορεί να φτάσει σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία για σχηματισμό ωστενίτη, αλλά απαιτείται έκθεση μεγαλύτερης διάρκειας, ακόμα και όταν ο φούρνος εργάζεται υπό ιδανικές συνθήκες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην επιτευχθεί σκλήρυνση, αφού η θερμοκρασία στο κάτω μέρος του δοκιμίου αυξάνεται. Προκειμένου να παραχθεί επιφανειακή σκλήρυνση υπό αυτές τις συνθήκες, θα πρέπει να εφαρμοστεί εξωτερική ψύξη.

Παράλληλα, συγκρίθηκαν οι πυκνότητες ενέργειας που θεωρητικά απορροφούνταν, με τις πειραματικές και αυτές κυμαίνονταν στο διάστημα από 1.3-2.0 MW/m<sup>2</sup>, και διαπιστώθηκε ότι ακόμα και υπό ιδανικές συνθήκες λειτουργίας του φούρνου, η ενέργεια που απορροφάται από το δοκίμιο είναι πολύ πιο χαμηλή από τη θεωρητική απόδοση του φούρνου. Στην περίπτωση του ελέγχου της ακτινοβολίας μέσω του χρόνου έκθεσης, αυτός διατηρήθηκε το δυνατό πιο μικρός, προκειμένου να μη θερμανθεί πολύ το κυρίως σώμα του δοκιμίου, ώστε η ψύξη να είναι το δυνατό πιο ταχεία. Δυστυχώς, αυτό κατέληξε σε θερμοκρασιακές βαθμίδες που έχουν ανεπαρκή κινητική, ώστε να προκαλέσουν ωστενιτοποίηση. Η περίπτωση του ελέγχου της ακτινοβολίας, μέσω της καταγραφής της θερμοκρασίας, δίνει μικρότερη ακρίβεια από τον έλεγχο του χρόνου έκθεσης, αλλά μπορεί τουλάχιστον να διασφαλίσει ότι η κινητική της αντίδρασης είναι επαρκής ώστε να ωστενιτοποιηθεί η επιφάνεια.

Ο ηλιακός φούρνος ισχύος 2kW στις εγκαταστάσεις του CNRS στο Odeillo της ΝΔ Γαλλίας, χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να επιτευχθεί επιφανειακή σκλήρυνση μέσω μετασχηματισμού του χάλυβα XC55, με εφαρμογή πυκνότητας ενέργειας 1400W/cm<sup>2</sup> **[16,17]**. Η μορφολογία των κατεργασμένων επιφανειών είναι ομοιόμορφη χωρίς

ρωγμές, ενώ το πάχος των ζωνών, βρέθηκε ανάλογο του χρόνου κατεργασίας. Οι δομές που ελήφθησαν ήταν πλήρως μαρτενσιτικές, σκληρότητας μέχρι και 1000HV. Η δε περιοχή της κατεργασίας δεν εμφανίζει μέγιστο εφελκυστικών τάσεων στη διεπιφάνεια. Η διεπιφάνεια αποτελείται από τον μη ωστενιτοποιημένο φερρίτη με περιοχές μαρτενσίτη. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας και για τα ίδια υλικά πραγματοποιήθηκε σύγκριση της κατεργασίας με laser. Το laser προκάλούσε εμφάνιση μέγιστου εφελκυστικών τάσεων στην περιοχή της διεπιφάνειας, ενώ και η ποιότητα των μικροδομικών χαρακτηριστικών ήταν υποβαθμισμένη σε σχέση με την ηλιακή κατεργασία.

Στον ακόλουθο **Πίνακα III-4** συνοψίζονται οι προσπάθειες επιφανειακής σκλήρυνσης χαλύβων με Σ.Η.Ε.:

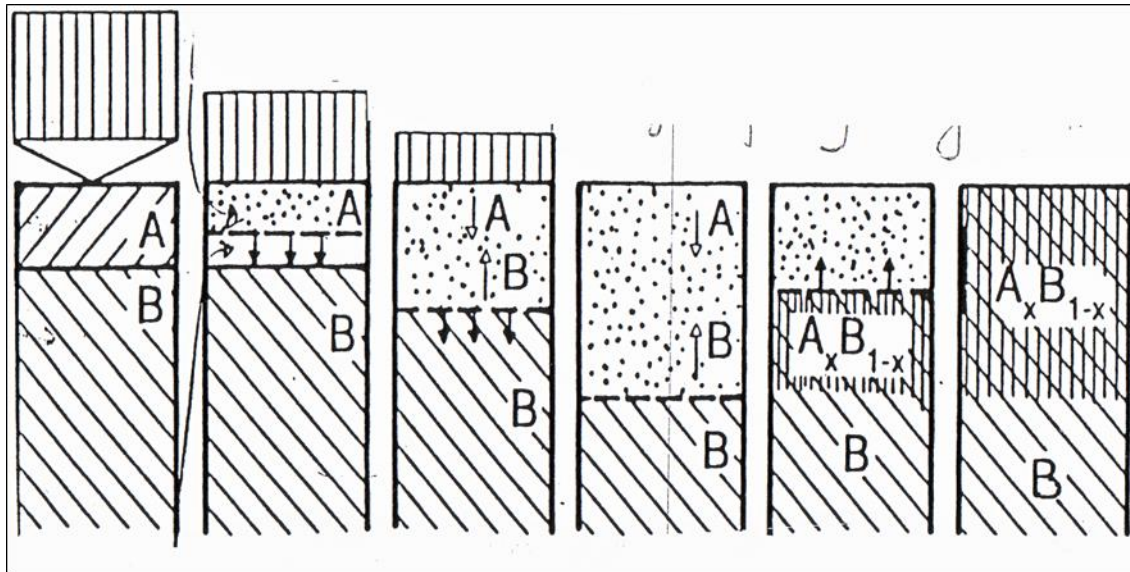
**Πίνακα III-4 : Συνοπτική παρουσίαση ερευνητικών εργασιών επιφανειακής σκλήρυνσης με κατεργασία με Σ.Η.Ε.**

| Συγγραφέας              | Ηλιακή Εγκατάσταση | Περιοχή             | Είδος χάλυβα                                      | Διαστάσεις                                      | Διάρκεια | Ποικνόντ. ενέργειας       | Βάθος ζώνης          | Αναφορές |
|-------------------------|--------------------|---------------------|---|---|----------|---------------------------|----------------------|----------|
| Yu & co workers         | Παραβολικό Πιάτο   | Guangzho u (Κίνα)   | T8A, T10A, 40Cr                                   | 30-40mm<br>Ø 13-5mm                             | 1-7s     | 3000 W/cm <sup>2</sup>    | Ø 5mm depth<br>0.5mm | [4-6]    |
| Maiboroda et al         | Παραβολικό Πιάτο   | Kiev (Ουκρανία)     | 34KhN3MFA   |   |          | 200-400 W/cm <sup>2</sup> |                      | [7]      |
| Pitts and co workers    | Ηλιακός Φούρνος    | Colorado            | AISI 4230, A2 tool steel                          | Cylinder (50mm, 16mm) rectangles 610, 150,13mm) | 6s       | 200 W/cm <sup>2</sup>     | 1-2mm depth, Ø 20mm  | [8,9]    |
| Vazquez et co workers   | Κεντρικός Πύργος   | Almeria             | AISI 4140, 42Cr4, 55Cr5, X30Cr13                  | Ø 35mm, length 15,25,35 mm                      | 130-220s | 80-120 W/cm <sup>2</sup>  | Ø 35mm, 1-8mm depth  | [10]     |
| Vazquez et co workers   | Ηλιακός Φούρνος    | Almeria             | AISI 4140, 42Cr4, 55Cr5, X30Cr13                  | Ø 35mm, length 15,25,35 mm                      | 20-45s   | 180-250 W/cm <sup>2</sup> | Ø 35mm, 1-10mm depth | [11]     |
| Vazquez et co workers   | Fresnel Lens       | Madrid              | Μαρτενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας                  | Ø 35mm, thickness 5mm                           | 2-4min   |                           | Ø 8 mm               | [12-14]  |
| Various ETSII-UCLM      | Fresnel Lens       | Ciudad real (Spain) | Μαρτενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας, εργαλειοχάλυβας | Διάφορα   |          | 260W/cm <sup>2</sup>      |                      | [27-32]  |
| Torrance and co workers | Ηλιακός Φούρνος    | Almeria             | EN24, EN8, EN16                                   | Ø 25mm, 12.5mm thickness                        | 40s      | 150-200W/cm <sup>2</sup>  | Ø 25mm, 4mm βάθος    | [ 15]    |
| Feriere et al.          | Ηλιακός Φούρνος    | Odeillo             |   | 20mm thickness, 20mm Πλάτος, 60mm μήκος         | 2-4s     | 1300W/cm <sup>2</sup>     | 0.4-1.15mm βάθος     | [16,17]  |

### III.3. Μετα-κατεργασία (Ανάτηξη) προαποτιθέμενης επίστρωσης

Μετά την εναπόθεση επιθυμητού υλικού σε υπόστρωμα, μπορεί η επίστρωση να υποστεί κατεργασία στον ηλιακό φούρνο, στα πλαίσια μίας μετά κατεργασίας προκειμένου να βελτιωθεί η μικροδομή της .

Αν και η κατεργασία με ακτίνες laser και με ηλιακές ακτίνες είναι διαφορετικές, και οι δύο θερμαίνουν εξαιρετικά γρήγορα. Για αυτόν τον λόγο τα φαινόμενα που σχετίζονται με την επιβολή ακτίνας laser σε μία επιφάνεια μπορούν να προσομοιάσουν την αντίστοιχη κατεργασία με ηλιακή ακτίνα. Ο παλμός laser μεταφέρει ενέργεια στο δείγμα προκαλώντας τήξη της επιφάνειας και η διεπιφάνεια υγρού-στερεού μετακινείται μέσα στο δείγμα (Σχήμα III - 2). Τελικά, όταν ο παλμός του laser παύει, στερεοποίηση λαμβάνει χώρα παράλληλα με την κρυσταλλοποίηση. Αυτή η ανάπτυξη κόκκων προς το υπόστρωμα επηρεάζει τον προσανατολισμό και το μέγεθος των κόκκων. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες των επιστρωμένων υλικών είναι η πυκνότητα και το μέγεθος του κόκκου, τα όρια και ο προσανατολισμός τους. Η τεχνική δημιουργίας επιστρώσεων με ψεκασμό πλάσματος είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στη βιομηχανία, με σημαντικές προοπτικές. Ένα από τα προβλήματα της είναι η συχνή όσο και εκτενής παρουσία πορώδους στην παραγομένη επίστρωση. Αυτό το πορώδες προφανώς μειώνει την αντίσταση σε διάβρωση σε πολλά μεταλλικά μέρη, ενώ ρωγμές παράγονται και διαδίδονται κατά μήκος αυτών των ασυνχειών, καταλήγοντας σε αποκόλληση και αστοχία. Η κατεργασία αυτών των επιστρώσεων με ακτίνες laser έχει αποδειχθεί μέχρι στιγμής επιτυχής. Μία λοιπόν ενδιαφέρουσα προοπτική για τη χρήση της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας είναι και η κατεργασία τέτοιων επιστρώσεων προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητά τους.



**Σχήμα III - 2: Σχηματική απεικόνιση επίδρασης δέσμης ενέργειας  
σε προαποτιθέμενη επίστρωση**

Η ανάτηξη επίστρωσης (με ψεκασμό πλάσματος) Ζιρκονίας μερικώς σταθεροποιημένης με Υτρία ( $7.6\%Y_2O_3$ ), με υψηλής πυκνότητας συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια στον ηλιακό φούρνο των 2kW στο Odeillo με πυκνότητα ενέργειας  $1400W/cm^2$  [18], οδήγησε σε μετασχηματισμούς οι οποίοι οδήγησαν σε ομογενοποίηση της μικροδομής σε κυψελλοειδή μορφολογία, με εμφάνιση όμως κάποιων ρωγμών. Το πορώδες μειώνεται δραστικά, ενώ η χημική σύσταση και η κρυσταλλική δομή της σκόνης παραμένουν αμετάβλητες.

### III.3. 1 Λεπτά στρώματα που παράγονται με μεθόδους PVD

Διάφορες μέθοδοι φυσικής εναπόθεσης ατμών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να παραχθούν λεπτά στρώματα επάνω σε υποστρώματα. Αυτά τα στρώματα μπορούν να τηχθούν, προκειμένου να δημιουργηθούν επιστρώσεις με την επιθυμητή σύσταση. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται προκειμένου να παραχθούν συστατικά ημιαγωγών με επί τόπου σύνθεση από στρώματα με τα επιθυμητά συστατικά που εναποτίθενται σε υποστρώματα μονωτών. Η τήξη επιτεύχθηκε με ακτινοβολία με laser με την οποία έλιωνε μικρό τμήμα του δοκιμίου κατά διαστήματα. Η στοιχειομετρία μπορεί να προκαθορισθεί με επιλογή του τύπου, του πάχους και του αριθμού των επιστρώσεων που εναποτίθενται στο αρχικό δείγμα. Η αντικατάσταση του laser με ηλιακή ακτινοβολία θα έχει σημαντικά πλεονεκτήματα,

γιατί η επιφάνεια η οποία θα αντιδρούσε θα ήταν σημαντικά μεγαλύτερη και η κρυσταλλοποίηση θα ήταν καλής ποιότητας. Συγκεκριμένα επιστρώσεις αλουμινίου και νικελίου αντέδρασαν, υπόκατεργασία σε ηλιακό φούρνο, και έδωσαν επιστρώσεις αλουμινιούχου νικελίου επάνω σε υποστρώματα χάλυβα.

Αυτή τη μέθοδο έχουν δοκιμάσει Ισπανοί [19], όπως προαναφέρθηκε, με στόχο τη δημιουργία οξειδίων του τιτανίου σε PVD/TiN επιστρώσεις, με επιβολή πυκνότητας ενέργειας  $17.5\text{W}/\text{cm}^2$ . Τα υπό κατεργασία δοκίμια θερμάνθηκαν μέχρι τους  $800^\circ\text{C}$  και έδωσαν τη σταθερή μορφή του  $\text{TiO}_2$ . Παρατεταμένη θέρμανση της επιφάνειας βελτίωσε σημαντικά την πορώδη δομή των αρχικά σχηματιζόμενων οξειδίων.

### III.3.2 Λεπτά στρώματα που παράγονται με μεθόδους CVD

Η χημική εναπόθεση ατμών (Chemical Vapor Deposition) δημιουργίας λεπτών στρωμάτων είναι μία ιδιαίτερα σημαντική μέθοδος επιφανειακής κατεργασίας. Εφαρμογές της είναι η κατασκευή ηλεκτρονικών μερών, επιστρώσεις στη βιομηχανία εργαλείων, σύνθετα υλικά με ενσωμάτωση ινών, καθώς και επιστρώσεις με αντοχή στη διάβρωση. Ένας γενικός ορισμός της μεθόδου είναι ο σχηματισμός στερεών προϊόντων από αντίδραση αέριων αντιδρώντων. Η αντίδραση αυτή ξεκινά με θερμότητα ή/και φως. Η φύση των προϊόντων εξαρτάται σημαντικά από τις συνθήκες της αντίδρασης και ειδικότερα από τη ροή, τη θερμοκρασία, την πίεση και το μίγμα των αντιδρώντων αερίων, οι οποίες θεωρούνται ως οι πιο σημαντικές παράμετροι. Οι τύποι των αντιδραστήρων είναι δύο : θερμού τοιχώματος και ψυχρού. Ο αντιδραστήρας θερμού τοιχώματος είναι τροποποίηση ενός συμβατικού φούρνου μέσω του οποίου περνούν αέρια. Αυτού του τύπου οι αντιδραστήρες δεν έχουν πολύ καλή απόδοση, γιατί εκτός από την επιφάνεια του δείγματος που πρόκειται να επιστρωθεί, πραγματοποιούνται και άλλες αντιδράσεις στις υπόλοιπες θερμές επιφάνειες. Οι αντιδραστήρες ψυχρού τοιχώματος συγκεντρώνουν την ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης επάνω στην επιφάνεια που πρόκειται να επιστρωθεί, με ένα ειδικά σχεδιασμένο εξάρτημα θέρμανσης το οποίο μπορεί και να είναι φως από laser ή τόξο. Ο ηλιακός φούρνος ο οποίος προσαρμόζεται στο χώρο της αντίδρασης συνιστά ένα πολύ καλό ψυχρού τοιχώματος σύστημα αντίδρασης. Η ακτινοβολούμενη ενέργεια μπορεί πολύ εύκολα να ρυθμίζεται ώστε να φτάνουν συγκεκριμένα ποσά ενέργειας, κατά συγκεκριμένα περιοδικά διαστήματα. Το

σύστημα είναι πολύ καθαρό και με ενεργειακή απόδοση. Πρόσθετα στη θερμική ενεργοποίηση υπάρχουν συστήματα τα οποία έχουν και φωτολυτική ενεργοποίηση, εάν διαθέτουν φάσμα απορρόφησης στο υψηλής ενέργειας τμήμα του ηλιακού φάσματος.

#### III.4 Τήξη Προαποτιθέμενης σκόνης

Σοβιετικοί επιστήμονες [20] επέδειξαν ότι λεπτές επιστρώσεις υλικών, μπορούν να λιώσουν επάνω στο υποστρώμα με χρήση ενός ηλιακού φούρνου. Οι επιστρώσεις αυτές έλιωσαν επάνω σε υποστρώματα χάλυβα και κραμάτων τιτανίου, προκειμένου να παράγουν επιστρώσεις πάχους 50-150 $\mu\text{m}$ . Η βασική σύσταση των επιστρώσεων αποτελείται κυρίως από TiC-Ni-B και WC-Ni-B και παρουσίαζαν αντίσταση στη διάβρωση και στη φθορά. Ένας ηλιακός φούρνος χρησιμοποιήθηκε για την



**Σχήμα III - 3: Μεγένθυση κόκκων (μπαινιτική μικροδομή)  
του υποστρώματος μετά την ηλιακή κατεργασία**



κατεργασία, με πυκνότητα ενέργειας της τάξης των 600-1200W/cm<sup>2</sup>. Οι επιστρώσεις αλληλεπίδρασαν με το υπόστρωμα μέσω διάχυσης, με τον μεγαλύτερο όγκο του υποστρώματος να παραμένει ανέπαφο. Τα επιστρώματα έχουν ικανοποιητική ποιότητα επιφάνειας, καλή πυκνότητα, σκελετική δομή και καλή συνάφεια με το υπόστρωμα.

**Ισπανοί ερευνητές [21]** δοκίμασαν με πυκνότητα ενέργειας περί των 250W/cm<sup>2</sup> να τήξουν υπερκράμα Ni (METCO 15E) σε χάλυβα AISI 4140 δημιουργώντας επίστρωση πάχους 500μm που δε διαχέεται στο υπόστρωμα (cladding). Η μικροδομή της επίστρωσης αντιστοιχεί σε μία τηγμένη ζώνη, με μεγάλο αριθμό αδιάλυτων καρβιδίων πολύ υψηλής σκληρότητας (800HV). Είδαν όμως, ότι μία πυκνότητα της τάξης των 250W/cm<sup>2</sup> δεν είναι ικανή να δημιουργήσει επίστρωση, χωρίς να προκαλέσει αύξηση του μεγέθους των κόκκων του υποστρώματος. Εάν όμως η διατήρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υποστρώματος είναι και πρέπει να είναι το ζητούμενο, είναι προφανές ότι θα πρέπει να εφαρμόσουμε μία μεγαλύτερης πυκνότητας ενέργειας δέσμη. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα και με βάση άλλες έρευνες που έχουν σχετικά πραγματοποιηθεί, υπολογίστηκε ότι η ελάχιστη πυκνότητα ενέργειας που απαιτείται προκειμένου να επιτευχθεί, τόσο η θέρμανση όσο και η τήξη, λεπτών στρωμάτων προαποτιθέμενων κόνεων, σε σχετικά μικρό χρόνο αλλά και με αποφυγή του φαινομένου της μεγέθυνσης των κόκκων, είναι 600-800W/cm<sup>2</sup>.

**Κινέζοι ερευνητές [22]** προσπάθησαν με δέσμη ηλιακής ενέργειας πυκνότητας 4000W/cm<sup>2</sup> να δημιουργήσουν κραμάτωση καρβιδίου του βολφραμίου (WC), μέσω τήξης προαποτιθέμενης σκόνης. Η διαμορφούμενη ζώνη κραμάτωσης, μέσου πάχους 800μm, αποτελείται από λεπτόκοκκο ευτηκτικό λεδεμβουρίτη, γεγονός που αποδεικνύει ότι ο χυτοσίδηρος και το καρβίδιο αναμίχθηκαν τηκόμενα πλήρως, ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι δεν δημιουργήθηκε πορώδες. Η σκληρότητα άγγιξε τα 1000HV<sub>0.2</sub>

**Ουκρανοί ερευνητές [23]** διερεύνησαν την πιθανότητα σκλήρυνσης κραμάτων VK8 και T15K6 με επιστρώσεις νιτριδίου του τιτανίου. Έτσι, με πυκνότητα ενέργειας 100-250W/cm<sup>2</sup> επετεύχθη διάχυση του άνθρακα από το υπόστρωμα στην επίστρωση -η οποία ήταν πιο έντονη στην περίπτωση του T15K6 λόγω της ομοιογενούς κατανομής των καρβιδίων- και άρα αύξηση κατά 1.7-4.5 φορές της αντοχής στη φθορά.

### III.5 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Τα προαναφερθέντα μπορούν να θεωρηθούν ως αποδείξεις των νέων δυνατοτήτων που ανοίγονται. Μία από αυτές τις δυνατότητες αφορά σε επιστρώσεις οι οποίες εκλύουν θερμότητα σε συστήματα πολύ υψηλών θερμοκρασιών. Για παράδειγμα μέσα που χρησιμοποιούνται σε θερμικά προστατευτικά συστήματα (thermal protective systems, TBC) είναι τα ακόλουθα SiC, SiB<sub>4</sub> και MoSi<sub>2</sub>. Αυτά τα υλικά ακτινοβολούν σημαντικά ποσά από την προσπίπτουσα ενέργεια με αποτέλεσμα να μειώνουν τη ροή της θερμότητας μέσα στο υπόστρωμα. Επιστρώσεις από αυτά τα υλικά έχουν εφαρμοστεί σε μέταλλα και σε βιομηχανίες πυρίμαχων υλικών, καθώς και στην αεροναυπηγική βιομηχανία, με αποτέλεσμα η εξοικονόμηση ενέργειας να αυξηθεί από 24 σε 38%.

Μία άλλη προοπτική αφορά σε μίγμα σκονών τα οποία θα αντιδράσουν με την απελευθέρωση ενέργειας. Από τη στιγμή που ξεκινά η εξώθερμη αντίδραση γίνεται αυτοσυντηρούμενη και θα εξακολουθήσει να διαδίδεται μέσω της αντίδρασης του μίγματος. Αυτό καλείται αυτοδιαδιδόμενη υψηλής θερμοκρασίας σύνθεση (Α-Δ.Υ.Θ.Σ.). Αποδείχθηκε ότι η Α-Δ.Υ.Θ.Σ. μπορεί να πραγματοποιηθεί σε έναν ηλιακό φούρνο. Κατά την αντίδραση οι σκόνες αυτές προσθέτουν τη θερμότητα της αντίδρασης στην ηλιακή ακτίνα, επιτρέποντας τη θερμοκρασία να φτάσει σε επίπεδα της τάξης του σημείου τήξης κεραμικών υλικών. Σύγχρονα, υψηλής αποδοτικότητας κεραμικά προσφέρουν μοναδικούς συνδυασμούς ιδιοτήτων, κάνοντας τα ιδιαίτερα ελκυστικά. Οι τεχνικές των διεργασιών είναι ιδιαίτερης σημασίας όταν αυτές αφορούν σε υψηλές θερμοκρασίες και τάσεις. Εφαρμογές των κεραμικών επιστρώσεων που απαιτούν διατήρηση των μηχανικών ιδιοτήτων σε υψηλές θερμοκρασίες, τριβολογικές ιδιότητες και αντίσταση στη διάβρωση από υψηλής θερμοκρασίας υγρά, ανασκοπήθηκαν από τον **Fisher [24]**.

Πιο πρόσφατα **Γάλλοι ερευνητές [25]** εξέτασαν την αντίσταση σε διάβρωση επιστρώσεων ανοξειδωτού χάλυβα σε υπόστρωμα χάλυβα με ηλιακή κατεργασία. Ειδικότερα, σκόνη ανοξειδωτού χάλυβα έλιωσε με Σ.Η.Ε. στον μικρό ηλιακό φούρνο των 2kW στο CNRS στο Odeillo, France. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο κενό, υπό μια μέση πυκνότητα ενέργειας της τάξης των 13400 kW/m<sup>2</sup>. Η συνάφεια στη διεπαφή μεταξύ του επιστρώματος και του υποστρώματος είναι καλή. Η συμπεριφορά στη διάβρωση αναλύεται χρησιμοποιώντας την ανοδική δοκιμή

πόλωσης σε διάλυμα 0.6 M NaCl. Ένα παθητικό στρώμα διαμορφώνεται, προσφέροντας κατά συνέπεια μια πολύ καλή αντίσταση στη διάβρωση.

**Rodriguez Danoso et al.**, εξακολούθησαν την έρευνα σε αυτόν τον τομέα χρησιμοποιώντας μία εγκατάσταση μικρής κλίμακας, ένα φακό Fresnel ο οποίος βρίσκεται στο ερευνητικό κέντρο CENIM στη Μαδρίτη. Ενώ, σήμερα η ομάδα της Rodriguez εξακολουθεί την έρευνα με παρόμοιο εξοπλισμό φακού Fresnel στο ESTI-UCLM στην Ciudad Real στην Ισπανία [26].

Η έρευνα που εκπονείται σήμερα περιλαμβάνει διεργασίες τήξης μεταλλικών κραμάτων, επιφανειακές κατεργασίες χάλυβα και χυτοσιδήρων δημιουργία επίστρωσης ανοξειδωτού χάλυβα και ενδομεταλλικών συστατικών, και υψηλής θερμοκρασίας νίτρωση των κραμάτων τιτανίου και NiAl ενδομεταλλικής επίστρωσης το οποίο κατεργάζεται από μία αυτοτροφοδοτούμενη Υψηλής Θερμοκρασίας Αντίσραση. Η έρευνα διεξάγεται στα πλαίσια Ευρωπαϊκών και Εθνικών Προγραμμάτων Πρόσβασης σε Μεγάλης Κλίμακας Εγκαταστάσεις, σε συνεργασία με τις ερευνητικές ομάδες των A. J. Vázquez (CENIMCSIC, Spain), A. Ferriere (PROMES-CNRS, France) και I. Cañadas (PSA-CIEMAT, Spain) και με χρήση των ηλιακών φούρνων της PSA και του εργαστηρίου.PROMES.

### III.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Flamant, G., Ferriere, A., Laplaze, D. & Monty, C. 1999. Solar processing materials: opportunities and new frontiers. *Solar energy*, vol. 66, issue 2: p.117-132
- [2] Heckman, R.A. 1993 High Flux Solar Furnace Processing of Solid Materials *Pollution Prevention Review* p. 475-479
- [3] Χρυσουλάκης, Ι. & Παντελής, Δ. Ι. 2002 *Επιστήμη και Τεχνολογία των μεταλλικών υλικών*, Αθήνα : Παπασωτηρίου
- [4] Yu, Z.K.; Zong, Q.Y.& Tam, Z.T. 1982. A preliminary investigation of surface hardening of steel and iron by solar energy, *Journal of Heat Treating*, vol. 2, is. 4: p. 344-350
- [5] Yu, Z.K.; Zong, Q.Y.& Tam, Z.T. 1983. A further investigation of surface hardening of iron and steel by solar energy, *Journal of Heat Treating*, vol.3, is.2: p.120-125
- [6] Zong, Q.Y.; Tam, Z.T.; Cao, M.D.& Yu, Z.K. 1986. Localized hardening of a machine gun bolt by means of high-intensity solar beam, *Heat Treat. Met.*, vol. 6: p.15-18
- [7] Maiboroda, V.P., Pasichniy, V.V.; Palaguta, N.G.; Stegnii, A.I.& Krivenko, V.G. 1986. Special features of local heat treatment of steel 34KhN3MFA in the focal spot of a solar furnace, *Metalloved. i Term. Obrab. Met.*, vol. 1: p. 59-60
- [8] Stanley, J.T.; Fields, C.I.& Pitts, J.R. 1990. Surface treating with sunbeams, *Adv. Mat. Proc.*, vol. 12 : p.16-21
- [9] Pitts, J.R.; Stanley, J.T.& Fields, C.L. 1990. Solar Induced Surface Transformation of Materials, *In: Solar Thermal Technology-Research-Development and Applications*, B.P. Gupta & W.H. Trangott, (Eds.): p. 459-470, Hemisphere Publishing Corporation
- [10] Vaquez, A.J., Rodriguez, G.P. & De Damborenea, J.J. 1991. Surface treatment of steels by solar energy *Solar Energy Materials*, vol. 24 : p. 751-759
- [11] Rodríguez, G.P., Vázquez, A.J. & Damborenea, J.J. 1994. Steel heat treatment with Fresnel lenses, *Materials Science Forum*, vol. 163: p. 133-138
- [12] Rodríguez, G.P., López, V., Damborenea, J.J. & Vázquez, A.J. 1995. Surface transformation hardening on steels treated with solar energy in central tower and heliostat field, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 37: p.1-12
- [13] Rodríguez, G.P. ; Damborenea, J.J. & Vázquez, A.J. 1997. Surface Hardening of Steel in a Solar Furnace, *Surface and Coatings Technology* vol. 92: p. 165-170

- [14] Rodríguez, G.P.; García, I. & Vázquez, A.J. 1999. Materials and coating processing by self propagating high-temperature synthesis (SHS) using a Fresnel lens, *Journal de Physique IV*, vol. 9: p. 411-416
- [15] Yang, Y., Torrance, A.A. & Rodriguez, J. 1996 The solar hardening of steels: Experiments and prediction. *Solar Energy Materials and Solar Cells* vol. 40, : p. 103-121
- [16] A. Ferriere, G. Faillat, S. Galasso, L. Barralier, J.E. Masse, *Journal of Solar Energy Engineering : Transactions of the ASME*, 121 (1), 1999, pp.36-39
- [17] A. Ferriere *Journal de Physique IV*, vol 9 (pt13), 1999, pp.441-446
- [18] A. Ferriere, L. Lestrade et al., *Journal of Thermal Spray Technology*, 1994, Volume 3 (4), pp.362-370
- [19] Rodriguez, G.R. 1994. Aplicaciones de la Energia Solar Concentrada a la Modificación Superficial de Aceros. Thesis doctoral, CENIM-CSIC, Madrid
- [20] A.A. Korol, E.A. Kasich-Pilipenko et al., *Poroshkoyava Metallurgiya (Kiev)* (4) (1983) p.39
- [21] A. J. Vazquez and J.J. Damborenea, *Application of engineering solar treatment of metal materials, Solar Thermal Technology Research*
- [22] Zhong Kui Yu and Jin Tang Lu, *Surface Engineering*, 1987, Vol. 3, pp. 41-45
- [23] Ivanchenk, L.A., Rusakov, G.V. et al., *Soviet powder Metallurgy and Metal Ceramics (english translation of Poroshkoyava Metallurgiya)*, 1989, Vol. 28 (1), pp.64-68
- [24] G. Fischer, *Am. Ceramic Society Bulletin*, 1986, Vol. 65 (2), p.283
- [25] Ferriere, A. ; Sanchez Bautista, C.; Rodriguez, G.P. & Vazquez, A.J. 2006. Corrosion resistance of stainless steel coatings elaborated by solar cladding process, *Solar Energy* vol 80, issue 10: p.1338-1343
- [26] Gemma Herranz and Gloria P. Rodríguez (2010). *Uses of Concentrated Solar Energy in Materials Science*, Solar Energy, Radu D Rugescu (Ed.), ISBN: 978-953-307-052-0, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/solar-energy/uses-of-concentrated-solar-energy-in-materials-science>



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙV : ΥΛΙΚΑ & ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

### IV.1 ΥΛΙΚΑ

Η επιλογή τόσο των υλικών - υποστρωμάτων και κόνεων- όσο και των συνδυασμών τους, που μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής έγινε με τα ακόλουθα τρία (3) κριτήρια :

A. Ευρεία Χρήση των συγκεκριμένων υλικών -και των συνδυασμών τους- σε Σύγχρονες Βιομηχανικές Εφαρμογές

B. Δυνατότητα συγκριτικής διερεύνησης της επίδρασης των διαφορετικών τιμών στις ίδιες ιδιότητες, των συγκεκριμένων υλικών

Γ. Διαθεσιμότητα Υλικών

Δ. Προηγούμενη Μελέτη των συγκεκριμένων συνδυασμών, με άλλες μεθόδους επιφανειακών κατεργασιών, από το επιστημονικό προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ΕΝΤ), ώστε να επιτραπεί η επακόλουθη συγκριτική αξιολόγηση

**IV.1.1 Υποστρώματα [1]****IV.1.1.1 Ανοξειδωτος χάλυβας SS304L**

Ο ανοξειδωτος χάλυβας 304 είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος από την κατηγορία του. Είναι ένας ωστενιτικός, υψηλής αντοχής στη διάβρωση χάλυβας με εξαιρετική αντοχή, δυσθραυστότητα και διαβροχότητα. Ο ανοξειδωτος χάλυβας **SS 304L** είναι μία έκδοση του SS 304 ο οποίος προσφέρει ένα βέλτιστο συνδυασμό αντοχής στη διάβρωση και ολκιμότητας, λόγω της μικρότερης περιεκτικότητας του σε άνθρακα ( C ). Η χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα μειώνει επίσης, την κατακρήμνηση των καρβιδίων κατά τη διάρκεια συγκόλλησης. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά τον κάνουν ιδιαίτερα ελκυστικό για κατασκευή : πολλών μηχανικών εξαρτημάτων, οικιακού εξοπλισμού και σκευών, σωληνώσεων, μπουλονιών και βιδών, ζυθοποιείων, γαλακτοκομείων, εξοπλισμού παραγωγής τροφίμων και φαρμάκων, ελατηρίων κ.α.

Η σύσταση του χάλυβα αυτού απεικονίζεται στον ακόλουθο Πίνακα IV -1 :

**Πίνακας IV - 1: % κ.β. σύσταση χάλυβα SS304L**

| C     | Cr   | Ni  | Si  | Mn  | Fe      |
|-------|------|-----|-----|-----|---------|
| 0.015 | 18.3 | 8.5 | 0.5 | 1.6 | Balance |

Οι τιμές των πιο σημαντικών θερμοφυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα παρουσιάζονται στον Πίνακα IV - 4.

**IV.1.1.2 Χάλυβας ST52-3 (Mat.No. 1.0570, DIN St52-3N)**

Ο χάλυβας St52-3 είναι ένας μη κραματωμένος κατασκευαστικός χάλυβας.

**Πίνακας IV - 2 : % κ.β. σύσταση χάλυβα St52.3**

| C      | Si     | Mn     |
|--------|--------|--------|
| ≤ 0.22 | ≤ 0.55 | ≤ 1.60 |

Ένας κοινός κατασκευαστικός χάλυβας για γραμμές παραγωγής συγκόλλησης. Εγγυημένη δυσθραυστότητα στους 0° C, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε στατικά όσο και σε δυναμικά φορτισμένες κατασκευές. Ο χάλυβας St52-3 έχει πολύ καλή συμπεριφορά σε κατεργασίες ψυχρής διαμόρφωσης. Γενικά χρησιμοποιείται στην



κατασκευή μερών μηχανών, κινητό εξοπλισμό, κτιρίων, γεφυρών και άλλων μηχανολογικών κατασκευών. Πολύ καλή διαμορφωσιμότητα, κυμαίνεται στο 90% του χάλυβα AISI 1116 που είναι 100% κατασκευαστικός χάλυβας αναφοράς.

Οι τιμές των πιο σημαντικών θερμοφυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων και αυτού του χάλυβα παρουσιάζονται στον Πίνακα IV - 4.

#### IV.1.1.3. Χάλυβας Ck60

Πρόκειται για ανθρακούχο χάλυβα με μεγάλη σχετικά περιεκτικότητα σε άνθρακα :

**Πίνακας IV - 3: Σύσταση χάλυβα Ck60**

| C       | Si        | Mn      | P       | S       |
|---------|-----------|---------|---------|---------|
| 0.6-0.8 | 0.17-0.57 | 0.5-0.8 | ≤ 0.035 | ≤ 0.035 |

Οι εφαρμογές αφορούν σε άξονες, δακτυλίους, συνδέσεις ράβδων, γεωργικά εργαλεία χειρός, μεγάλα σφυρήλατα κομμάτια, ελατήρια, ελασματοποιημένες εν ψυχρώ ταινίες κλπ. Η δυνατότητα για εν ψυχρώ διαμόρφωση του χάλυβα CK60, όπως και όλων των υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα χαλύβων, είναι σχετικά μικρή.

Δεν εμφανίζει καλή αντίσταση στη διάβρωση. Όσον αφορά τη συγκολλησιμότητα του είναι μεγάλη με όλες τις πιθανές μεθόδους συγκόλλησης, αλλά λόγω του μεγάλου κλάσματος C, θα πρέπει και να προθερμανθεί (150 έως 260°C) αλλά και να μετάθερμανθεί (590 έως 650°C).

Στον ακόλουθο Πίνακα IV - 4 παρουσιάζονται οι τιμές των πιο σημαντικών θερμοφυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα Ck60.

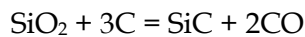
**Πίνακας IV-4 : Τιμές Χαρακτηριστικών Ιδιοτήτων Υποστρωμάτων**

| ΧΑΛΥΒΑΣ | Πυκνότητα<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | Ειδική<br>Θερμότητα<br>Cp(J/Kg·°K) | Θερμική<br>Αγωγιμότητα<br>λ (W/K m) | Μέτρο<br>Ελαστικότητας<br>(GPa ) | Όριο<br>Διαρροής<br>(MPa) | Όριο<br>εφελκυσμού<br>( MPa) | Επιμή-<br>κωση<br>(%) |
|---------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------|
| SS304L  | 8                                  | 480                                | 21,5 (T=500°C)                      | 193                              | 205                       | 515                          | 35                    |
| Ck60    | 7,85                               | 502                                | 49,7                                | 210                              | 380                       | 210                          | 10                    |
| St52-3  | 7,8                                | 502                                | 35-45                               | 210                              | 350                       | 190                          | 22                    |

## IV.1.2 Σκόνες

### IV.1.2.1 Κεραμική Σκόνη Καρβιδίου του Πυριτίου (SiC) [1,2, 3]

Το καρβίδιο του πυριτίου είναι εξαιρετικά σκληρό και ανθεκτικό, με εξαιρετικές χημικές ιδιότητες. Ως συνέπεια έχει πολλές εφαρμογές ως μέσο εκτριβής. Το καρβίδιο του πυριτίου εμπορικά παράγεται με διάχυση άμμου και κωκ σε ηλεκτρικό φούρνο και σε θερμοκρασίες πάνω από 2200°C. Πρόκειται για τη διαδικασία Acheson, η οποία περιγράφεται από την ακόλουθη χημική εξίσωση :



Περισσότερο από το 95% της παγκόσμιας παραγωγής παράγεται κατά αυτόν τον τρόπο. Η αντίδραση Acheson είναι σημαντικής ενεργειακής έντασης.

Το καρβίδιο του πυριτίου, έχει εξαιρετική αντίσταση στη θερμότητα, και αποσυντίθεται όταν θερμαίνεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 2700°C; χρησιμοποιείται επίσης σε πυρίμαχα υλικά και σε ειδικά τμήματα των πυρηνικών αντιδραστήρων.

Πολύ καθαρό καρβίδιο του πυριτίου είναι λευκό ή άχρωμο, ενώ κρύσταλλοι αυτού χρησιμοποιούνται σε ημιαγωγούς για εφαρμογές πολύ υψηλής θερμοκρασίας. Ίνες καρβιδίου του πυριτίου που προστίθενται ως ενισχύσεις σε πλαστικά ή ελαφρά μέταλλα προσδίδουν αυξημένη αντοχή και δυσκαμψία.

Οι βασικές του ιδιότητες περιγράφονται ακολούθως :

- ✓ Χαμηλή πυκνότητα
- ✓ Υψηλή αντοχή
- ✓ Χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής
- ✓ Υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- ✓ Υψηλή σκληρότητα
- ✓ Υψηλό μέτρο ελαστικότητας
- ✓ Εξαιρετική αντίσταση σε θερμικά σοκ

Ενώ οι τυπικές εφαρμογές είναι :

- ✓ Σταθερά και κινούμενα εξαρτήματα τουρμπίνων
- ✓ Καπάκι κουτιών αναρρόφησης
- ✓ Συσκευές στεγανοποίησης, εξαρτήματα στήριξης
- ✓ Σφαιρικές βαλβίδες
- ✓ Εσωτερικά περιβλήματα σε θερμού αερίου ροή
- ✓ Εναλλάκτες θερμότητας
- ✓ Εξοπλισμός ημιαγωγών

Το καρβίδιο του πυριτίου αποτελείται από τετραεδρικό άνθρακα και άτομα πυριτίου με ισχυρούς δεσμούς με το κρυσταλλικό πλέγμα. Αυτό δίνει ένα πολύ σκληρό και ανθεκτικό υλικό. Το καρβίδιο του πυριτίου δεν προσβάλλεται από οξέα ή αλκάλια ή τηγμένα άλατα μέχρι τους 800° C. Στον αέρα το SiC σχηματίζει ένα προστατευτικό στρώμα από οξειδίο του πυριτίου στους 1200° C και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι τους 1600°C. Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα συνδυασμένη με χαμηλή θερμική διαστολή δίνει στο υλικό εξέχουσες ιδιότητες αντίστασης στα θερμικά shock. Τα κεραμικά καρβίδια του πυριτίου με ελάχιστες ή καθόλου ακαθαρσίες στα όρια των κόκκων διατηρούν την αντοχή τους σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες φτάνοντας τους 1600° C χωρίς ιδιαίτερες απώλειες αντοχής. Χημική καθαρότητα, αντίσταση σε χημική αντίδραση σε υψηλή θερμοκρασία και διατήρηση της αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, έχουν κάνει αυτό το υλικό ιδιαίτερα δημοφιλές. Η ηλεκτρική δε αγωγιμότητα του υλικού έχει οδηγήσει στη χρήση του ως αντίσταση στους ηλεκτρικούς φούρνους και ως συστατικό κλειδί σε θερμίστορ (ημιαγώγιμη διάταξη της οποίας η αντίσταση είναι πολύ ευαίσθητη στις αλλαγές της θερμοκρασίας και χαρακτηρίζεται από αρνητικό θερμικό συντελεστή της αντίστασης) αλλά και σε αντιστάσεις.

#### IV.1.2.2 Κεραμομεταλλική σκόνη καρβιδίου του βολφραμίου (WC) με 17% Κοβάλτιο (Co) [ 3-6 ]

Τα καρβίδια του Βολφραμίου (WC) λόγω της υψηλής τιμής της σκληρότητάς τους θεωρούνται κατάλληλα για την προστασία επιφανειών από εκτριβή. Έχουν όμως περιορισμένη δυσθραυστότητα και προκειμένου να τη βελτιώσουν υιοθετείται η κεραμομεταλλική δομή, με την προϋπόθεση ο λόγος του όγκου των σωματιδίων του καρβιδίου προς αυτόν της μήτρας να παραμένει αρκετά μεγάλος. Το μέγεθος και η κατανομή των καρβιδίων, το ποσοστό του πορώδους και το ποσό των ενδιάμεσων φάσεων που προκύπτουν από κρυσταλλογραφικούς μετασχηματισμούς, είναι τα κύρια χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τις ιδιότητες αυτών των επιστρώσεων. Ειδικότερα, το μέγεθος των καρβιδίων καθώς και η μέση ελεύθερη απόσταση της συνδετικής φάσης-μήτρας καθορίζουν την τριβολογική συμπεριφορά, με τρόπο ώστε μείωση του μεγέθους των καρβιδίων συνεπάγεται μείωση της ελεύθερης απόστασης και άρα μεγαλύτερη σκληρότητα και αντίσταση στη φθορά. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε στην εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των νανομικροδομικών WC-Co κόνεων στη δημιουργία επιστρώσεων, κυρίως με τη μέθοδο του θερμικού ψεκασμού. Όμως, υπήρξαν κάποιες δυσκολίες στην προσπάθεια ενίσχυσης της αντοχής στη φθορά με αυτόν τον τρόπο, καθώς η μείωση του μεγέθους των καρβιδίων οδήγησε σε εντατικοποίηση των φαινομένων της απανθράκωσης προκαλώντας το αντίστροφο αποτέλεσμα.

Το κοβάλτιο (Co) προτιμάται ως μεταλλικό συνδετικό εξαιτίας των χαρακτηριστικών της πολύ καλής διαβροχής (wetting) και συνάφειας με το WC. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε κοβάλτιο (9, 12 και 17%) κατά την απόθεση WC-Co με APS και VPS οδηγεί σε μείωση του πορώδους και των ρωγμών. Στη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε κοβάλτιο (9%) εντοπίστηκαν πολύπλοκα καρβίδια συγκεκριμένα  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ , αλλά και WC σε μικρό βαθμό, ενώ στις περιεκτικότητες 12 και 17% σε Co η κυρίαρχη φάση είναι το WC [9].

Οι μηχανικές ιδιότητες και άρα η αντίσταση στη φθορά επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες. Περιεκτικότητα, μέγεθος και κατανομή των σωματιδίων του καρβιδίου καθορίζουν την αντίσταση στη φθορά. Ειδικότερα, η αντίσταση στη φθορά αυξάνει με αύξηση της περιεκτικότητας σε καρβίδια, ενώ το όριο διαρροής μειώνεται. Ανάλογα με το μηχανισμό φθοράς, τόσο η αντίσταση στη φθορά όσο και το όριο διαρροής μπορούν να αυξηθούν, με χρήση σκόνης πολύ μικρού μεγέθους καρβιδίων.

Επίσης, το σχήμα και η κρυσταλλικότητα επηρεάζουν τη συμπεριφορά σε φθορά. Συνήθως τα καρβίδια βολφραμίου χρησιμοποιούνται σε ακανόνιστο σχήμα. Όμως υπάρχει δυνατότητα σφαιροποίησης τους. Εξαιτίας της μικρής σχετικά επιφάνειας των τελευταίων, αυτά τα σωματίδια έχουν μικρότερη τάση για μεταλλουργικές αντιδράσεις με τη μήτρα, σε σχέση με τα ακανόνιστου σχήματος σωματίδια.

Μεταξύ των βασικών βιομηχανικών εφαρμογών των κεραμομεταλλικών επιστρώσεων είναι τα στηρίγματα εξαρτημάτων και τα καλύμματα μεταλλικών μερών μηχανών, κυρίως λόγω της ραβδωτής μορφολογίας τους.

Στη βιομηχανία οι WC-Co επιστρώσεις δημιουργούνται κυρίως με χρήση APS, δεδομένης της υψηλής θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται από τη φλόγα του πλάσματος (περισσότερο από 18000°C). Οι ιδιότητες και η συμπεριφορά των WC-Co επιστρώσεων αποτελούν πολύπλοκες συναρτήσεις των ακόλουθων παραμέτρων: μέγεθος, σχήμα και κατανομή των καρβιδίων, σκληρότητα και δυσθραυστότητα της μήτρας.

#### IV.1.2.3 Μεταλλική σκόνη βάσης Μολυβδαινίου (75 Mo/25NiCrBSiFe, AMPERIT 119.075) [1,7,8]

Το Μολυβδάνιο (Mo) είναι ένα από τα περισσότερο διαδεδομένα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στην ενίσχυση των σιδηρούχων κραμάτων μέσα από διαδικασίες σκλήρυνσης μέσω στερεού διαλύματος. Βελτιώνει σημαντικά τη δυνατότητα σκλήρυνσης και τη δυσθραυστότητα των χαλύβων, ενώ εμποδίζει τη γήρανση και αυξάνει την αντοχή σε επαναφορά, φθορά και διάβρωση. Επιπλέον, εξαιτίας του υψηλού σημείου τήξης (σχεδόν 2600°C) καθυστερεί την εμφάνιση διεπιφανειακής τήξης κατά την ολίσθηση. Έτσι, θεωρείται ένα από τα καλύτερα υλικά για επιστροφή προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή αντίσταση στη συνδυασμένη δράση μηχανισμών φθοράς εκτριβής και πρόσφυσης. Οι επιστρώσεις σκόνης βάσης μολυβδαινίου χρησιμοποιούνται, τόσο σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας, όσο και σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μείωση του συντελεστή τριβής και αυξημένη αντοχή στην φθορά. Έτσι, εφαρμόζονται κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία, αεροναυπηγική, στις βιομηχανές χαρτιού.

Στον ακόλουθο **Πίνακα IV - 5** συνοψίζονται οι βασικές ιδιότητες των σκονών που χρησιμοποιήθηκαν.

**Πίνακας IV - 5 : Χαρακτηριστικά χρησιμοποιούμενων κόψεων**

| Σκόνη   | Κοκκομετρία (μm) | Σ. Τ. (°C) | ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ, λ (W/m K) | ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ, Cp (J/Kg K) | Πυκνότητα, ρ (Kg/m <sup>3</sup> ) | Θερμική Διαχυτότητα, α (m <sup>2</sup> /s)<br>α = λ/(ρ Cp) |
|---------|------------------|------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|
| SiC     | +45-60           | 2700       | 126                            | 670                           | 3100                              | 0.012  |
| WC-17Co | +45-60           | 2870       | 70                             | 250                           | 15800                             | 0.0003   |
| 75Mo/25 | -90+15           | 2600       | 138                            | 250                           | 10220                             | 0.0013   |

## IV.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ Σ.Η.Ε

Το σύνολο των πειραματικών δοκιμών της παρούσας διατριβής υλοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις δύο ηλιακών φούρνων : του SOLAR FURNACE στην Plataforma Solar d' Almeria στην Ισπανία και στον FOUR SOLAIRE στο Odeillo της Ν. Γαλλίας.

### IV.2.1 SOLAR FURNACE / Plataforma Solar d' Almeria [9-12]

#### IV.2.1.1 Εξοπλισμός και τρόπος λειτουργίας

Μία γενική διάταξη του ηλιακού φούρνου στις εγκαταστάσεις της Plataforma Solar φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα IV - 1, α και β.



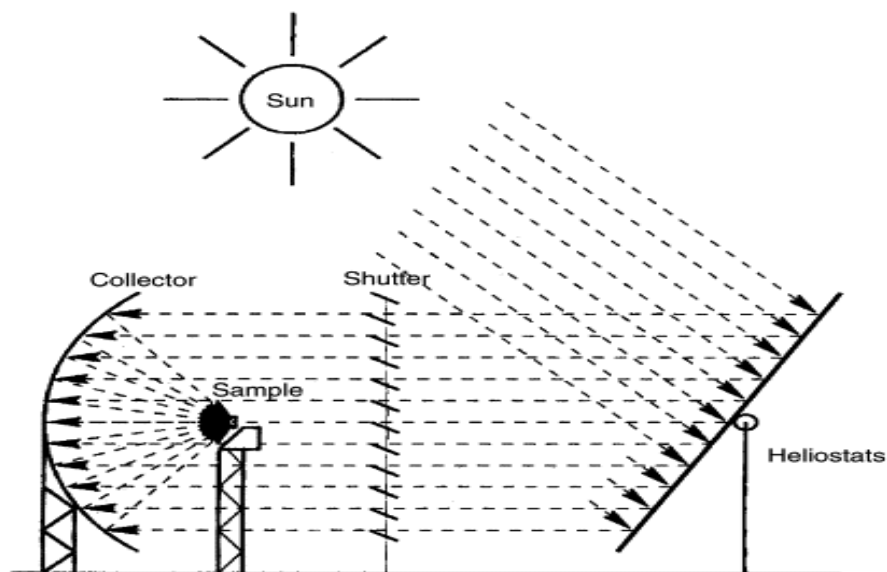
(α)



(β)

#### Σχήμα IV- 1 : Ο Ηλιακός Φούρνος της Plataforma Solar d'Almeria

Τα βασικά τμήματα του είναι : οι ηλιοστάτες (heliostats, Σχήμα IV- 1β), ο συλλέκτης (parabolic dish, Σχήμα IV- 3α), το τραπέζι δοκιμών όπου τοποθετείται το δοκίμιο και το σύστημα περσίδων (shutters, Σχήμα IV- 3β). Η αρχή λειτουργίας του οποίου απεικονίζεται στο Σχήμα IV - 2. Στην περίπτωση αυτού του ηλιακού φούρνου η απευθείας ακτινοβολία αντανακλάται από τους ηλιοστάτες (δείκτης αντανακλασιμότητας 90%) στον 11m πλάτος και 14m ύψος πολυμετωπικό αποδέκτη (δείκτη αντανακλασιμότητας 94%). Το πιάτο συγκεντρώνει τις ακτίνες σε στρογγυλή διατομή η οποία στο σημείο μέγιστης εστίασης έχει διάμετρο 23cm. Η ενεργειακή κατανομή στα πλαίσια της περιοχής της ακτίνας είναι γκαουσιανή (Gaussian) με μέγιστη συγκέντρωση ενέργειας σχεδόν 3000kW/m<sup>2</sup> (Σχήμα IV- 4).



**Σχήμα IV- 2 : Σχηματική Απεικόνιση της Αρχής Λειτουργίας του ηλιακού φούρνου της PSA**

#### ΗΛΙΟΣΤΑΤΗΣ

Κάθε ένας αποτελείται από 16 επίπεδους τύπου sandwich καθρέπτες με επιφάνεια αντανάκλασης 53.61m<sup>2</sup>. Η αντανακλαστικότητα φτάνει το 90%.

#### ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΕΡΣΙΔΩΝ

Οι ηλιοστάτες αντανακλούν τις ακτίνες μέσα από το σύστημα περσίδων στον συλλέκτη, ο οποίος είναι εγκατεστημένος στον εσωτερικό τοίχο του κτιρίου (Σχήμα IV - 3 α). Το σύστημα περσίδων (Σχήμα IV - 3 β) αποτελείται από 30 χαλύβδινα παράλληλα πάνελς, σε διάταξη των 15, σε δύο κολώνες, τα οποία επιτρέπουν την ρύθμιση του ποσού του εισερχόμενου φωτός, διαστάσεων 11.2μΧ11.5μ και με 15896 πιθανές θέσεις μεταξύ των 0° (ανοικτή θέση) και των 55° (κλειστή θέση) και ελέγχει το κλάσμα ηλιακής ακτινοβολίας που θεωρείται κατάλληλο για την πραγματοποίηση δοκιμών στο δοκίμιο. Το άνοιγμα των περσίδων περιορίζει την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία η οποία τα διαπερνά. Η εξασθένηση στην οποία υπόκειται η ακτινοβολία αντιστοιχεί στο ποσοστό της συνολικής επιφάνειας του συστήματος των περσίδων που είναι ανοικτό. Το άνοιγμα των περσίδων πραγματοποιείται με ένα κινητήρα AC (εναλλασσόμενου ρεύματος), ο οποίος περιστρέφει τον άξονα στον οποίο συνδέονται οι περσίδες από 0° έως 55° . Ο ελάχιστος χρόνος κλεισίματος των περσίδων είναι 12sec.





(α)

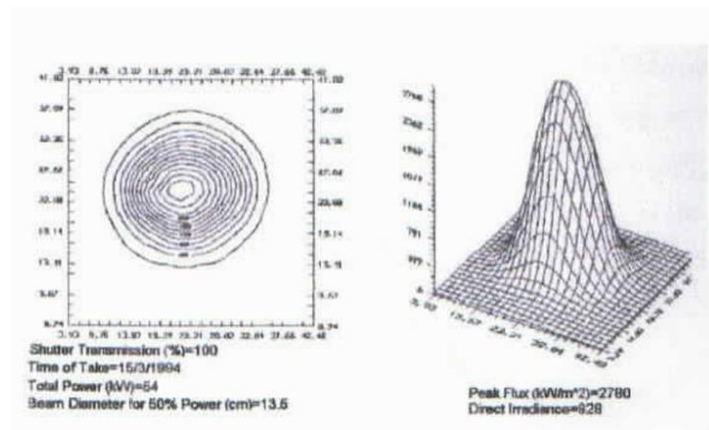


(β)

Σχήμα IV - 3 Ηλιακός Φούρνος της Plataforma Solar d'Almeria

(α) Συλλέκτης/ Τραπέζι δοκιμών

(β) Σύστημα περισιδων



Σχήμα IV- 4 :Πυκνότητα Ισχύος στην περιοχή εστίασης  
 Εστίασης και Κατανομή μέγιστης ροής ενέργειας

## ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ

Ο δίσκος αποτελείται από 89 σφαιρικού τύπου sandwich καθρέπτες, πέντε διαφορετικών ακτίνων κοιλότητας τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο, σε πλαίσιο ώστε να σχηματίζουν ένα παραβολοειδές. Οι συνολικές διαστάσεις του δίσκου είναι 11.01x10.41m δίνοντας μία επιφάνεια αντανάκλασης της τάξης των 98.5m<sup>2</sup> (Σχήμα IV- 5).



(α)



(β)

**Σχήμα IV - 5 : Ηλιακός Φούρνος PSA (α) Συλλέκτης (αριστερά) και Διάταξη δοκιμών (β) προετοιμασία δοκιμίου πριν την ηλιακή κατεργασία**

Κάθε καθρέπτης είναι έτσι προσανατολισμένος ώστε να αντανακλά εισερχόμενες ακτίνες πάνω σε μία μικρή περιοχή εστίασης διαμέτρου σχεδόν 120mm, στο κέντρο του κτιρίου και σε απόσταση 7.45m μπροστά από το κέντρο του δίσκου, ακριβώς επάνω από το τραπέζι δοκιμών.

## ΤΡΑΠΕΖΙ ΔΟΚΙΜΩΝ

Το δοκίμιο τοποθετείται στο τραπέζι δοκιμών (0.6x0.7 m) το οποίο είναι προσαρμοσμένο σε μία βάση που μπορεί να το μετακινεί, με δυνατότητα κίνησης στους τρεις άξονες. Ειδικότερα, τρεις κινητήρες ελέγχουν την κίνηση του τραπεζιού : ένας 850-mm-μήκους-X-άξονα (κατεύθυνση Ανατολής-Δύσης), ένας 600-mm μήκους Y-άξονα (προς τον συλλέκτη) και ένας 450-mm μήκους Z axis (κάθετος). Το δοκίμιο τοποθετείται σε μία υποδοχή από πορώδη αλούμινα, η οποία βρίσκεται ανάμεσα σε

δύο πυρότουβλα, διασφαλίζοντας έτσι την πλευρική μόνωση του δοκιμίου, ώστε μόνο το επάνω μέρος της επιφάνειας να είναι ελεύθερο. Η όλη διάταξη καλύπτεται από μία διαφανή καλύπτρα χαλαζία, ημισφαιρικού σχήματος, στην οποία περιέχεται αέριο αργό (Ar) (σε πίεση 2 bars). Και το σύστημα περιόδων και το τραπέζι δοκιμών ελέγχονται μέσω Υπολογιστή από το δωμάτιο ελέγχου.

Το σετ των περιόδων καθορίζει την εισερχόμενη Πυκνότητα Ισχύος με το σταδιακό άνοιγμα ή κλείσιμο. Έτσι, η μέγιστη θερμοκρασία που εφαρμόζεται στο δείγμα και η διάρκεια της έκθεσης στη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια μπορούν να ελεγχθούν. Ο συνολικός χρόνος έκθεσης ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται ώστε η θερμοκρασία να φτάσει μία μέγιστη τιμή, πλέον του χρόνου που η θερμοκρασία αυτή διατηρείται σταθερή. Η θερμοκρασία και ο χρόνος καταγράφονται συνεχώς on line μέσω ζεύγους θερμοστοιχείων που είναι κολλημένο στο πίσω μέρος του δοκιμίου και είναι συνδεδεμένο σε Η/Υ και με ένα σύστημα λήψης δεδομένων που είναι εγκατεστημένο.

Η θεωρητικά υπολογιζόμενη συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας είναι επί 8000, δίνοντας ένα θεωρητικό μέγιστο στην Πυκνότητα Ισχύος στα 7.2MW/m<sup>2</sup> (συνυπολογίζοντας το ποσοστό αντανakλαστικότητας των ηλιοστατών) για μία ακτινοβολία της τάξης των 1000W/m<sup>2</sup>. Αλλά, η σκιά που παράγεται από τις περιόδους, το τραπέζι των τεστ δοκιμών και τη βάση του, την έλλειψη των καθρεπτών στο κεντρικό τμήμα των ηλιοστατών, καθώς και το παγκόσμιο οπτικό σφάλμα των ηλιοστατών και του δίσκου, μειώνουν σημαντικά την Πυκνότητα Ισχύος στο σημείο εστίασης.

Μέσω μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν από το μετρητικό σύστημα της εγκατάστασης (High Resolution CCD Flux Measuring System) οι πραγματικές τιμές των βασικών χαρακτηριστικών είναι :

Μέγιστη Πυκνότητα Ισχύος 1650kW/m<sup>2</sup>

Ολική ισχύς : 36 kW

Ακτίνα δέσμης για 90% της ισχύος : 23cm

Ακτίνα δέσμης για 50% της ισχύος : 14

Για τις αρχικές δοκιμές -μέχρι τον καθορισμό των βέλτιστων συνθηκών- η ακτινοβολία του δοκιμίου ξεκινούσε με άνοιγμα των περιόδων μπροστά από τον φούρνο, στη συνέχεια μετακίνηση του δοκιμίου στο ακριβές σημείο της εστίασης με

την κάθετη μετακίνηση του τραπεζιού. Όμως, βρέθηκε ότι το αργό άνοιγμα των περιόδων (7sec) έκανε το χρόνο έκθεσης πολύ δύσκολο να ρυθμιστεί ακριβώς, και για αυτόν τον λόγο ένα κάλυπτρο σε ένα δευτερεύον επίπεδο προσαρμόστηκε στο τραπέζι ανάμεσα στον δίσκο και το δοκίμιο (Σχήμα IV - 6). Αυτή η περιόδια έχει χρόνο ανοίγματος και κλεισίματος της τάξης των 0.1sec, οπότε ο χρόνος της έκθεσης ρυθμιζόταν πολύ καλύτερα.



**Σχήμα IV - 6 : Δευτερεύον κάλυπτρο**

#### **IV.2.1.2 Η πειραματική διαδικασία**

Το δοκίμιο τοποθετείται στον ειδικά διαμορφωμένο θάλαμο, σε ατμόσφαιρα Ar. Το επάνω μέρος του θαλάμου είναι από κρύσταλλο χαλαζία, και μέσω αυτού, με τη βοήθεια μιας κάμερας, ήταν δυνατή η συνεχής παρακολούθηση της κατεργασίας. Στην εκτεθειμένη επιφάνεια του δοκιμίου -στην περίπτωση της κατεργασίας της τήξης- γίνεται προαπόθεση της σκόνης και συμπιέζεται με τη βοήθεια χειροκίνητης πρέσσας σε σχήμα κύκλου και σε επιθυμητό πάχος.

Κατόπιν ανοίγεται το σετ των περιόδων, στη συνέχεια μετακινείται το δοκίμιο στο ακριβές σημείο της εστίασης με την κάθετη μετακίνηση του τραπεζιού. Μετά το τέλος του πειράματος, το οποίο καθορίζει ο βαθμός τήξης της σκόνης και η τιμή της θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου, το δοκίμιο αφήνεται να ψυχθεί ομαλά μέσα στο θάλαμο -πάντα σε ατμόσφαιρα Ar- μέχρι η θερμοκρασία του θερμοστοιχείου να

φτάσει τους 400°C, οπότε ανοίγεται ο θάλαμος και συνεχίζεται η ψύξη του στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Η βελτιστοποίηση της μεθοδολογίας επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων κατεργασίας, οι οποίες με τη σειρά τους αντιστοιχούν στα βέλτιστα δυνατά χαρακτηριστικά –για κάθε συνδυασμό των ζωνών κατεργασίας. Η δυνατότητα –βάσει της αρχής λειτουργίας-- που δίνεται στον ερευνητή για παρέμβαση στη διαδικασία αφορά –εκτός από τα χαρακτηριστικά των υλικών – στη ρύθμιση της ακτινοβολήσης με τη δυνατότητα διαβάθμισης στην κίνηση του συστήματος των περιόδων, και μέσω αυτής, τη ρύθμιση της τιμής της μέγιστης θερμοκρασίας και του χρόνου κατεργασίας.

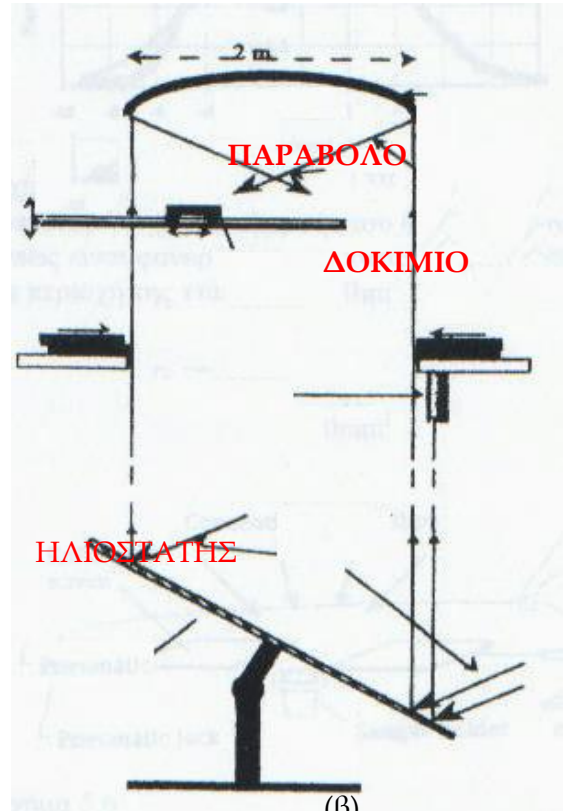
Η συνεχής οπτική παρατήρηση του δοκιμίου ώστε να επιτευχθεί τήξη της σκόνης σε όλη την έκταση της προαπόθεσης χωρίς έντονες φουσαλίδες ή άλλες ασυνέχειες και χωρίς να επηρεαστούν εμφανώς οι διαστάσεις και τα εξωτερικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος, πιστοποιεί σε πρώτο επίπεδο τη σύγκλιση στη βελτιστοποίηση. Σε δεύτερο επίπεδο, τα μακροσκοπικώς βέλτιστα δοκίμια εξετάζονται και στο επίπεδο των χαρακτηριστικών της ζώνης κατεργασίας και επαναλαμβάνονται τα πειράματα με διαφοροποίηση των τιμών των παραμέτρων, μέχρι την επίτευξη των βέλτιστων τιμών.

#### IV.2.2 FOUR SOLAIRE ODEILLO / 2kW SOLAR FURNACE [12,13]

Στο Σχήμα IV- 7, α και β, φαίνεται μία γενική διάταξη της εγκατάστασης του ηλιακού φούρνου FOUR SOLAIRE, που αποτελείται από έναν επίπεδο ηλιοστάτη που αντανακλά την ακτινοβολία του ήλιου σε έναν παραβολικό δίσκο με επίπεδη απόσταση τα 85 εκ .



(α)



(β)

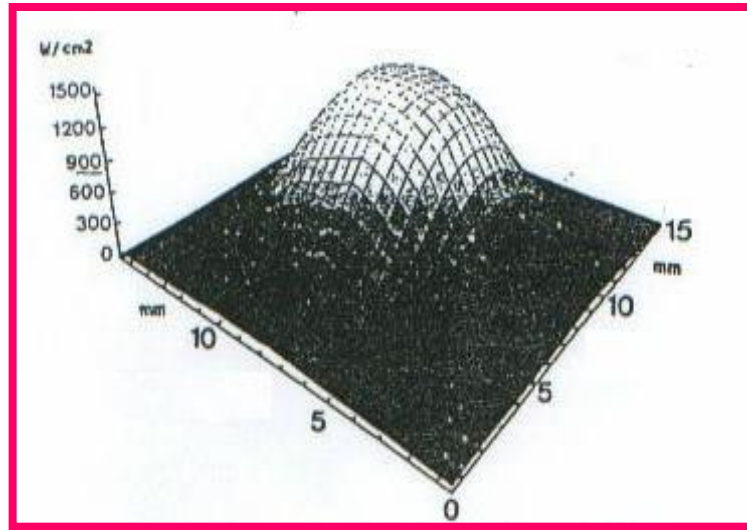
Σχήμα IV- 7 Ηλιακός Φούρνος στο Odeillo

(α) Φωτογραφία συστήματος Ηλιοστάτη/Παραβόλου

(β) Σχηματική Απεικόνιση Αρχής Λειτουργίας

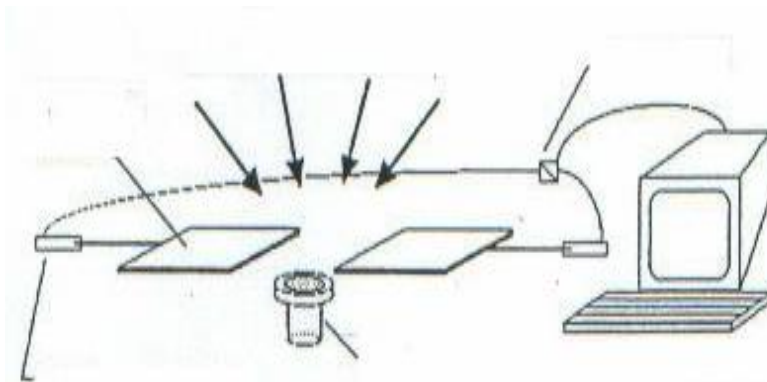
Η αξονοσυμμετρική κατανομή της πυκνότητας ενέργειας στο επίπεδο εστίασης (Σχήμα IV- 8β) αναπαριστάται με μεγάλη ακρίβεια από μία Gaussian κατανομή με μέγιστο τα  $14000 \text{ kW/m}^2$ . Το 90% αυτής της μέγιστης τιμής είναι διαθέσιμο σε διατομή  $20 \text{ mm}^2$  ( $\varnothing \sim 5 \text{ mm}$ ). Προκειμένου να ελέγχεται η εισερχόμενη ενέργεια υπάρχουν δύο ανακλώμενες οθόνες οι οποίες ανοίγουν ή κλείνουν αυτόματα, μέσω Η/Υ, ώστε να διασφαλίζεται η επαναληψιμότητα της κατεργασίας, συρόμενες οριζόντια σε χρόνο 40ms . Στην περίπτωση αυτού του ηλιακού φούρνου υπάρχουν τρεις δυνατότητες διαφορετικών μορφών κατεργασίας : της στατικής ακτινοβολήσης,

της οριζόντιας σάρωσης αλλά και της κάθετης σχετικής κίνησης από το σημείο μέγιστης εστίασης.



**Σχήμα IV - 8 : Ηλιακός Φούρνος 2kW,  
Πυκνότητα Ισχύος στο επίπεδο μέγιστης εστίασης**

Ο υποδοχέας του προς κατεργασία δείγματος (Σχήμα IV-9) έχει τη δυνατότητα κάθετης και οριζόντιας μετακίνησης, αυτόματα ρυθμιζόμενης μέσω Η/Υ, ενώ οι δοκιμές μπορούν να πραγματοποιηθούν σε μη οξειδωτικές συνθήκες με χρήση ειδικού σκέπαστρου από χαλαζία που μπορεί να καλύψει αεροστεγώς τον υποδοχέα



**Σχήμα IV - 9 : Υποδοχέας Δοκιμίου**

#### IV.2.2.2 Η πειραματική διαδικασία

Στο Σχήμα IV-7β φαίνεται μία σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας του φούρνου των 2kW με πυκνότητα Ισχύος 14000kW/m<sup>2</sup>. Αυτή η πυκνότητα ενέργειας, καταλήγει στο δοκίμιο που πρόκειται να κατεργαστεί το οποίο βρίσκεται σε οριζόντιο επίπεδο επάνω σε ένα τραπέζι. Η όλη διάταξη καλύπτεται από γυαλί στο οποίο υπάρχει αέριο Argon σε πίεση 1.7bars. Το δοκίμιο επιπλέον ψύχεται στην κάτω επιφάνεια του με σύστημα ψύξης με νερό. Το προς κατεργασία δοκίμιο τοποθετείται τέλος, στο επίπεδο εστίασης επάνω στο τραπέζι, το οποίο έχει δυνατότητα κίνησης στους τρεις άξονες και η κίνηση του ελέγχεται ηλεκτρονικά. Τέλος, υπάρχει μία γρήγορη περσίδα η οποία σύρεται οριζόντια και ανοίγει προκειμένου να ακτινοβοληθεί το δοκίμιο, αλλά χρησιμοποιείται και για ρύθμιση και έλεγχο της εισερχόμενης ακτινοβολίας.



### IV.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ

Για τον χαρακτηρισμό των λαμβανομένων επιστρώσεων εφαρμόστηκαν διάφορες μέθοδοι. Ειδικότερα, ο *μικροδομικός χαρακτηρισμός* πραγματοποιήθηκε με χρήση :

- οπτικής μικροσκοπία
- ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (SEM-EDS)
- φθορισμού ακτίνων Χ (XRF)

Ο *μηχανικός χαρακτηρισμός* των επιστρώσεων επιτυγχάνεται μέσω μέτρησης των παρακάτω ιδιοτήτων :

- τραχύτητας της επιφάνειας
- μικροσκληρότητας
- αντοχής σε πρόσφυση
- συντελεστή τριβής
- αντοχής στη φθορά

Το σύνολο των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ENT) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ πλὴν της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, για την οποία χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός ηλεκτρονικής μικροσκοπίας SEM –EDS του ΙΓΜΕ και του φθορισμού ακτίνων ΧRF για την οποία χρησιμοποιήθηκε ο αντίστοιχος εξοπλισμός του ΕΛ.Κ.Α.

#### **Στερεοσκοπία**

Το στερεοσκόπιο βρίσκει εφαρμογές εκεί που χρειάζεται να παρατηρηθεί σε μεγέθυνση η εξωτερική μορφολογία ενός αντικειμένου. Με αυτό το όργανο επιτυγχάνεται στερεοσκοπική εικόνα του δείγματος από διαφορετική γωνία. Το στερεοσκόπιο χρησιμοποιήθηκε για την παρατήρηση της επιφάνειας των επιστρωμάτων αλλά και για τη μελέτη των επιφανειών τριβής μετά τα αντίστοιχα πειράματα. Οι επιφάνειες συνήθως δε χρειάζονται καμία προετοιμασία. Τα δοκίμια παρατηρήθηκαν αρχικά μακροσκοπικά, στο στερεοσκόπιο MZ 6 του οίκου LEICA.



Σχήμα IV - 10 : Το στερεοσκόπιο MZ 6 του ENT

### Τραχύτητα επιφάνειας

Στην επιφάνεια των παραχθέντων επιστρώσεων, αλλά και των υποστρωμάτων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τραχύτητας, χρησιμοποιώντας το τραχύμετρο TR100 του οίκου TIME Group Inc. καθώς και το τραχύμετρο TR200 του οίκου TIME Group Inc..



(α)



(β)

Σχήμα IV - 11 : α) Τραχύμετρο TR100 και β) Τραχύμετρο TR200 του ENT

### Μεταλλουργική Προετοιμασία των δοκιμών

Προκειμένου να παρατηρηθεί αρχικά η επιφάνεια των επιστρώματων, δεν χρειάστηκε να γίνει κάποια ιδιαίτερη προετοιμασία για τα δοκίμια πέρα από καθαρισμό.

Για την παρατήρηση της τομής των επιστρώματων, η οποία δίνει σημαντικές πληροφορίες τόσο για τις ιδιότητες της μικροδομής (πάχος, πορώδες, ρωγμές, οξειδία, κλπ) όσο και για τη συνολική ποιότητα του επιστρώματος σε ότι αφορά τη διεπιφάνεια επιστρώματος - υποστρώματος και τη συνάφεια, τα δοκίμια εγκιβωτίστηκαν σε ρητίνη και προετοιμάστηκαν κατάλληλα για την παρατήρησή τους σε οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

### Κοπή, Εγκιβωτισμός και Λείανση

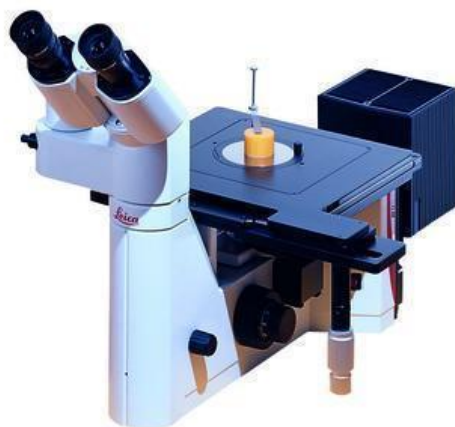
Λόγω της ψαθυρής φύσης των περισσότερων επιστρώματων, της πιθανής παρουσίας πορώδους αλλά και των διαφορετικών τιμών σκληρότητας κατά βάθος του επιστρώματος, υπάρχει πάντα ο κίνδυνος η προετοιμασία για τη μεταλλογραφική παρατήρηση είτε να αποτύχει στο να αποκαλύψει την πραγματική μικροδομή ή να προκαλεί στοιχεία που οδηγούν σε λανθασμένη ερμηνεία των παρατηρήσεων. Για το λόγο αυτό τόσο κατά την κοπή όσο και κατά την προετοιμασία των δειγμάτων ακολουθήθηκαν διαδικασίες προετοιμασίας που προτείνουν οι κατασκευαστές μηχανημάτων για την κοπή και λείανση μεταλλογραφικών δοκιμών (Struers, Buehler). Χρησιμοποιήθηκε το λειαντικό μηχάνημα τύπου LaboPol - 5 του οίκου Struers.



Σχήμα IV - 12 Το λειαντικό μηχάνημα τύπου LaboPol - 5 του ENT

### Οπτική μικροσκοπία

Χρησιμοποιείται οπτικό μικροσκόπιο DMILM του οίκου LEICA για την μελέτη της μικροδομής των επιστρωμάτων αλλά και την παρατήρηση των επιφανειών τριβής. Οι εικόνες που λήφθηκαν από το οπτικό μικροσκόπιο αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό ανάλυσης εικόνας Image ProPlus 4.5. Η ανάλυση εικόνας χρησιμοποιείται για τη μελέτη επικαλύψεων θερμικών ψεκασμών και ακολουθούνται συγκεκριμένοι κανόνες για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών τους, όπως μέγεθος πόρων, πάχος, κλπ.



Σχήμα IV - 13 Το οπτικό μικροσκόπιο DMILM του ENT

### Μικροσκληρότητα

Σε μεταλλογραφικές τομές των επιστρωμάτων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της μικροσκληρότητας με τη μέθοδο Vickers, με φορτίο HV0.3 για χρόνο 10 sec. Έγιναν μετρήσεις σε άξονα κάθετο στη διεπιφάνεια επικάλυψης - υποστρώματος, αλλά και κατά μήκος της επίστρωσης. Οι μικροσκληρομετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε μικροσκληρόμετρο SHIMADZU μοντέλο HMV-2.



**Σχήμα IV - 14 : Το μικροσκληρόμετρο SHIMADZU μοντέλο HMV-του ENT**

### **Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (Scanning Electron Microscopy - SEM)**

Οι τομές των επιστρωμάτων παρατηρήθηκαν σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης JSM 6390LV του οίκου Jeol Technics Ltd., το οποίο ήταν εφοδιασμένο με το σύστημα EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), που επιτρέπει τη στοιχειομετρική ανάλυση.



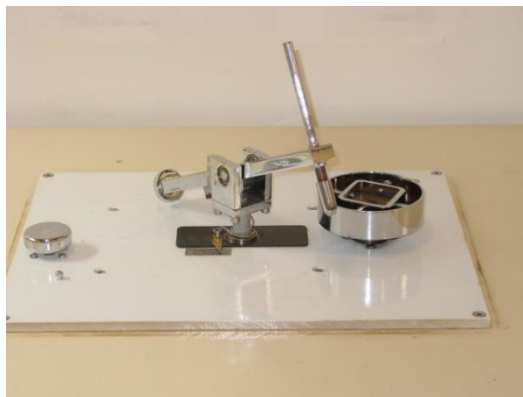
**Σχήμα IV - 15 : Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης JSM 6390LV του ΙΓΜΕ**

### **Τριβολογία**

Ο χαρακτηρισμός των κατεργασμένων δοκιμίων, από άποψη τριβολογικής συμπεριφοράς, πραγματοποιήθηκε σε τριβόμετρο τύπου ball-on-disk το οποίο ήταν δυνατόν να μετατραπεί σε pin-on-disk.

Το τριβόμετρο αυτό είναι της εταιρείας MCS (Motion and Control Systems) εξασφαλίζει συνθήκες σημειακής επαφής. Ο προσδιορισμός του συντελεστή τριβής ολισθησης βασίζεται στη συνεχή μέτρηση της εφαπτομενικής δύναμης  $F_T$  που

αναπτύσσεται στο σημείο επαφής μεταξύ της τριβόμενης επιφάνειας και του ανταγωνιστικού υλικού καθώς επίσης και στη γνώση του επιβαλλόμενου φορτίου.



**Σχήμα IV - 16 Το τριβόμετρο τύπου pin/ball -on-disk**

Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία και υγρασία περιβάλλοντος χωρίς τη χρήση λιπαντικού. Για τον υπολογισμό της φθοράς του τριβοσυστήματος το πείραμα διακοπτόταν κάθε ορισμένο αριθμό στροφών, απομακρύνονταν τα απόβλιττα τριβής από τα δοκίμια και το ανταγωνιστικό υλικό με πλύση με νερό και αιθυλική αλκοόλη και ζυγίζονταν σε ζυγό ακριβείας. Η φθορά του τριβοσυστήματος εκφράστηκε ως ο λόγος της απώλειας μάζας (g) του τριβοσυστήματος προς την επιφάνεια επαφής (mm<sup>2</sup>) του στυλίσκου.

Οι συνθήκες τριβής σε όλους τους συνδυασμούς δοκιμών ήταν :

- Ταχύτητα περιστροφής : 200 rpm
- Χρόνος : 5 ώρες
- Φορτίο : 10 N
- Ανταγωνιστικό υλικό : σφαίρα αλούμινας (1900HV,  $\varnothing = 8\text{mm}$ ) και ανοξείδωτος στυλίσκος SS440 (350 HV,  $\varnothing = 5\text{mm}$ )
- Ατμοσφαιρικές συνθήκες, μη λίπανση

Οι συνθήκες τριβής διατηρήθηκαν οι ίδιες για όλους τους συνδυασμούς υλικών, προκειμένου να είναι δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση της τριβολογικής συμπεριφοράς των διαφορετικών επιστρωμάτων.

**IV.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] [www.matweb.com](http://www.matweb.com)
- [2] «Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά», Δ.Ι. Παντελής, Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2008
- [3] S.M.Hsu, Ming Shen *Wear* 256 (2004) p. 867-878
- [4] Chen ,Hutchings, *Surface & Coating Technology*, vol. 1998, p.
- [5] P.Cosemans et al., *Surface & Coating Technology* 174-175 (2003) p.416-420
- [6] Hyung-Jun Kim et al., *Surface & Coating Technology* 191 (2005) p. 335-340
- [7] Q. Yang et al., *Surface & Coating Technology* 200 (2006) 4208 - 4212
- [8] S.Usmani and S.Sampath, *Wear*, volumes 225-229, 1999, p. 1131-1140
- [9] M. Scherge, *Wear* 255, 2003, p.395-400
- [10] Pantelis D., Griniari A., Ch. Sarafoglou *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Volume 89, Issue 1 (2005) pages 1-11
- [11] J.A. Rodríguez Povedano, J. Rodríguez  
Proc. 6th Int Symp. on Solar Thermal Concentrating Technologies (4th edition), Vol. IICIEMAT (1992), pp. 1421-1430
- [12] G.P. Rodríguez-Donoso, J. Ruiz, B.J. Fernández, *Materials & Design*  
Volume 16, Issue 3, 1995, Pages 163-166
- [13] J Ballestrin, M Rodriguez-Alonso, J Rodriguez et al., *Metrologia* Volume 43 (2006) pages 495-500
- [14] M. Balat, A. Ferriere, D. Hernández, G. Olalde, B. Rivoire, J.F. Robert Proc. 6the Int Symp. on Solar Thermal concentrating Technologies (4th edition), Vol. IICIEMAT (1992), pp. 1409-1420





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ V : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ ΜΕ Σ.Η.Ε

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Όσον αφορά στην προσέγγιση του πειραματικού μέρους της παρούσας διατριβής, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τόσο στη χρήση του ηλιακού φούρνου, όσο και στην κατεργασία σε αυτόν των συγκεκριμένων υλικών και διαστάσεων, υπήρχε πολύ μικρή σχετική εμπειρία, και αντίστοιχα πολύ μικρός αριθμός βιβλιογραφικών αναφορών, τη χρονική στιγμή που ξεκίνησε ο σχεδιασμός και υλοποίηση των πειραμάτων. Έτσι, ο σχεδιασμός των αρχικών πειραματικών δοκιμών κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί στα ακόλουθα τρία στάδια :

#### 1ο ΣΤΑΔΙΟ : ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Στη διάρκεια του πρώτου σταδίου, πραγματοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός δοκιμών κατεργασίας με συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια, χαλύβδινων υποστρωμάτων τα οποία έφεραν επίστρωση, είτε ως:

#### A. Σκόνη σε προαπόθεση

Δοκιμάστηκαν τρία διαφορετικά είδη σκόνης, σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς με τα διαφορετικά υποστρώματα:

- *κεραμική* (καρβίδιο του πυριτίου SiC)
- *μεταλλική* (Amperit, βάσης Μολυβδανίου) και
- *κεραμομεταλλική* (καρβίδιο του βολφραμίου με Κοβάλτιο, WC-17%Co)

#### B. Υφιστάμενη επίστρωση, που παράχθηκε με APS

Αυτή η περίπτωση εξετάστηκε μόνο για τον συνδυασμό υλικών APS κεραμομεταλλικής /WC-17%Co επίστρωσης σε ανοξείδωτο χάλυβα SS304L. Οι δοκιμές ανάτηξης της APS επίστρωσης, του συγκεκριμένου συνδυασμού υλικών πραγματοποιήθηκαν και στους δύο διαφορετικούς ηλιακούς φούρνους, που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία της παρούσας διατριβής (της Plataforma Solar στην Almeria και Four Solaire στο Odeillo, της Ν.Γαλλίας).

Για κάθε έναν από τους προαναφερθέντες συνδυασμούς πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές. Κάποιες από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, κύρια στις πρώτες προσπάθειες, σε αυτό το στάδιο, ήταν ανεπιτυχείς. Ως τέτοιες, θεωρήθηκαν οι

δοκιμές εκείνες κατά τη διάρκεια των οποίων ή μετά το πέρας αυτών, τα υπό κατεργασία δοκίμια «κατέρρεαν» τηκόμενα. Η μη ύπαρξη δε, αναφορών πειραματικών συνθηκών από δοκιμές των ίδιων συνδυασμών υλικών άλλων ερευνητών, επέτεινε το βαθμό αστοχίας των αρχικών τουλάχιστον πειραματικών δοκιμών. Έτσι, χρειάστηκε κάποιος αριθμός δοκιμών, έως ότου εξοικειωθεί ο ερευνητής με τον καλύτερο δυνατό έλεγχο του συστήματος περσίδων για τη ρύθμιση της εισερχόμενης ακτινοβολίας -για τα συγκεκριμένα υλικά και γεωμετρίες- καθώς και για την προσαρμογή των πειραματικών δοκιμών στη μεταβολή της εισερχόμενης ακτινοβολίας.

Αντιστρόφως, ως επιτυχείς θεωρούνταν οι δοκιμές κατά τις οποίες, η σκόνη διαλυτοποιήθηκε και διαχεόταν στο υπόστρωμα δημιουργώντας κραμάτωση, ενώ το υπόστρωμα διατηρούσε τις διαστάσεις και το σχήμα του.

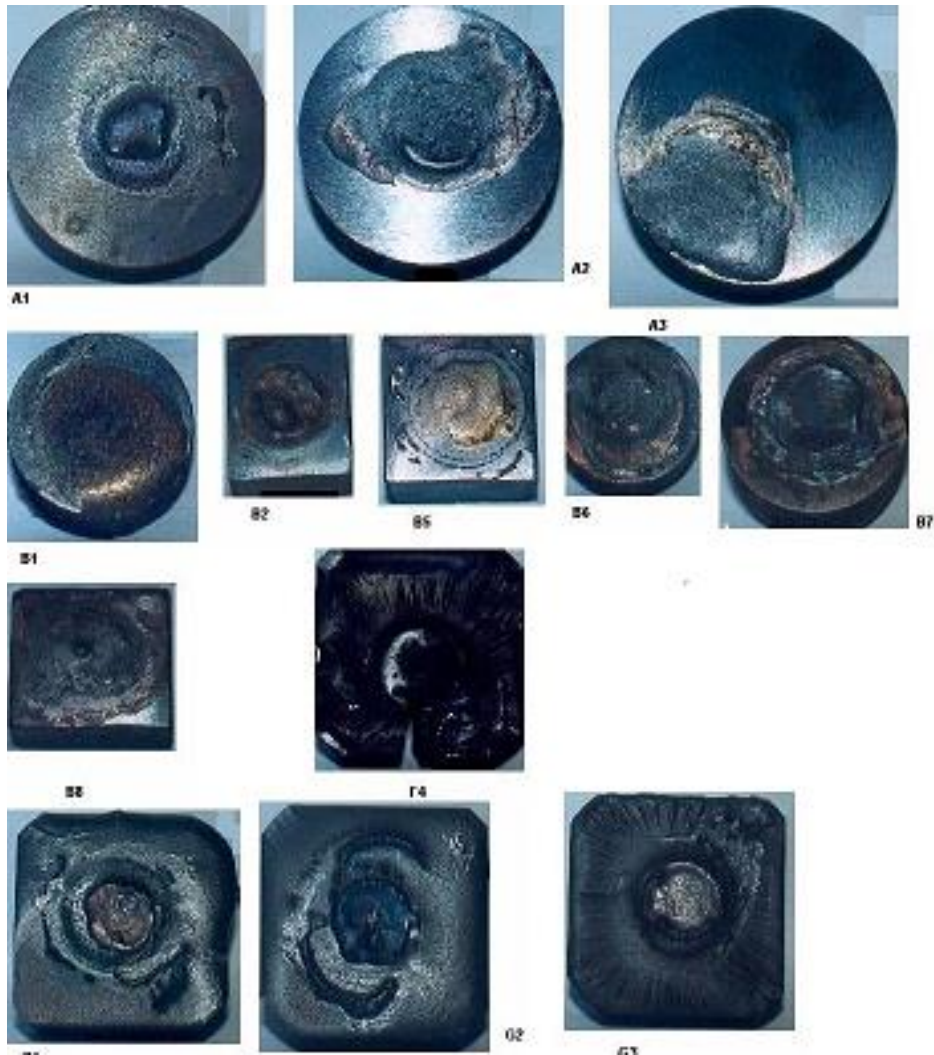
Στον ακόλουθο Πίνακα V-1 παρατίθενται τα διαστήματα μεταβολής των τιμών των πειραματικών παραμέτρων όλων των δοκιμών -επιτυχών και μη- που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του πειραματικού μέρους:

**Πίνακας V-1 : Σύνοπτική παρουσίαση του συνόλου των δοκιμών με ΣΗΕ**

| Υπόστρωμα     | Σκόνη /πάχος         | Αριθμός δοκιμών | Εισερχ/νη Ακτινοβ. (W/m <sup>2</sup> ) | Χρόνος Κατεργασίας (min) | T <sub>max</sub> (°C) | Χρόνος Παραμονής σε T <sub>max</sub> (min) | Βάθος Κατ/σίας (μm) |
|---------------|----------------------|-----------------|--|--------------------------|-----------------------|--|---------------------|
| <i>Ck60</i>   | <i>SiC/ 1mm</i>      | 3               | 896-921                                | 13-17                    | 1240-1275             | 7-5  | 2000-2200           |
| <i>Ck60</i>   | <i>WC-17%Co/ 1mm</i> | 5               | 934-985                                | 13-27                    | 1155-1180             | 3-19                                       | 1200-3000           |
| <i>St52.3</i> | <i>WC-17%Co/ 2mm</i> | 5               | 896-924                                | 16-21                    | 1363-1400             | 5-8  | 1400-4000           |
| <i>St52.3</i> | <i>SiC/ 1mm</i>      | 5               | 869-920                                | 16-21                    | 1270-1330             | 4-13                                       | 1250-1500           |
| <i>St25.3</i> | <i>Mo base/ 1mm</i>  | 5               | 750-960                                | 9                        | 1300                  | 6  | 800-1200            |
| <i>St52.3</i> | <i>Mo base/ 2mm</i>  | 5               | 650-760                                | 9                        | 1300-1400             | 3-6  | 1800-1900           |
| <i>SS304L</i> | <i>Mo base/ 1mm</i>  | 3               | 750                                    | 9                        | 1300                  | 6  | 1100                |
| <i>SS304L</i> | <i>WC-17%Co/ 1mm</i> | 4               | 660-670                                | 10                       | 1400                  | 6  | 2300                |
| <i>SS304L</i> | <i>APS WC-17%Co</i>  | 3               | 842-931                                | 6-11                     | 1200-1860             | 0-2  | 1100                |

**2ο ΣΤΑΔΙΟ : ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΑ ΕΠΙΤΥΧΩΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ**

Στα πλαίσια του 2<sup>ου</sup> σταδίου, στα επιτυχή, από τα δοκίμια του 1<sup>ου</sup> σταδίου, πραγματοποιήθηκε μία σειρά δοκιμών. Ειδικότερα, τα δοκίμια αυτά εξετάστηκαν μακροσκοπικά ως προς την ποιότητα της επιφάνειας της κραμάτωσης, την τραχύτητα και τη συνάφεια με το υπόστρωμα, αλλά και μικροσκοπικά -με μέσα οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας- ως προς τη μικροδομή και τη χημική τους σύσταση, ενώ μετρήθηκε και η μικροσκληρότητα τους. Επιπλέον, εξετάστηκε η τριβολογική συμπεριφορά τους και η αντοχή τους στη φθορά.



**Σχήμα V - 1 : Οπτική μακρογραφία δοκιμίων χαλύβων μετά την επιτυχή κατεργασία της προαποτιθέμενης σκόνης με Σ.Η.Ε.**

Τα αποτελέσματα όλων των προαναφερθεισών δοκιμών συσχετίσθηκαν με τις παραμέτρους της ηλιακής κατεργασίας και αξιολογήθηκαν συγκριτικά. Στη συνέχεια επιλέχθηκε να παρουσιαστεί από κάθε συνδυασμό το βέλτιστο δοκίμιο. Ως τέτοιο, βάσει των προαναφερθέντων ιδιοτήτων της ηλιακής κατεργασίας, ορίζεται στο παρόν, το δοκίμιο στο οποίο επιτεύχθη διαλυτοποίηση της σκόνης στο μέγιστο βαθμό. Παράλληλα, παρουσιάζονται και εκείνα τα δοκίμια, ίδιων συνδυασμών υλικών, που κατεργάστηκαν υπό πολύ διαφορετικές τιμές ίδιων παραμέτρων και έδωσαν αντίστοιχα, ενδεικτικά αποτελέσματα, προκειμένου να συναρτηθεί και μοντελοποιηθεί, η επίδραση των διαφορετικών τιμών των συνθηκών. Στον ακόλουθο **Πίνακα V-2**, παρατίθενται οι συνδυασμοί των υλικών και οι τιμές των παραμέτρων των δοκιμών με Σ.Η.Ε. (*Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια*) στον

ηλιακό φούρνο της PSA (Plataforma Solar d' Almeria), τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται διεξοδικά στις ακόλουθες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου. Για λόγους διευκόλυνσης της σύγκρισης, στην περίπτωση της τήξης σκόνης σε προαπόθεση, επιλέχθηκαν τα δοκίμια στα οποία υπάρχει σκόνη σε προαπόθεση πάχους 1mm σε όλες τις περιπτώσεις

**Πίνακας V-2 : Συνδυασμοί Υλικών και Τιμές Πειραματικών Συνθηκών που παρουσιάζονται**

| Υπό/μα | Σκονη   | Πάχος Δοκιμ. (mm)   | Πυκνότητα Εισερχ/ης Ακτινοβολίας (W/m <sup>2</sup> ) | Ολ. Χρόνος Κατεργασίας (min) | Χρόνος παραμ. σε Tmax (min) | T max (°C) |
|--------|---------|---------------------|--|------------------------------|-----------------------------|------------|
| St52.3 | SiC     | 35                  | 923  | 16                           | 4                           | 1330       |
| Ck60   |         | 35                  | 896  | 17                           | 7                           | 1240       |
| St52.3 | Mo-base | 5                   | 760  | 9                            | 6                           | 1300       |
| SS304L |         | 5                   | 750  | 9                            | 6                           | 1300       |
| St52.3 | WC-17Co | 35                  | 923  | 21                           | 13                          | 1270       |
|        |         |                     | 973  | 29                           | 20                          | 1250       |
| Ck60   |         | 30                  | 985  | 13                           | 3                           | 1155       |
|        |         |                     | 932  | 27                           | 19                          | 1180       |
| SS304L |         | 5                   | 660  | 10                           | 6                           | 1400       |
| SS304L |         | APS/WC-17Co (170μm) | 5  | 930                          | 2                           | -          |

**3<sup>ο</sup> ΣΤΑΔΙΟ : ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΕ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ**

Στα πλαίσια αυτού τα σταδίου και βάσει των αποτελεσμάτων του 2<sup>ου</sup> σταδίου, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των επιδράσεων στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των επιστρώσεων, των ακόλουθων παραμέτρων :

- A. Πυκνότητα Εισερχόμενης Ενέργειας
- B. Θερμικός κύκλος που εφαρμόζεται
- Γ. Πάχος Προαπόθεσης Σκόνης

Η διερεύνηση της επίδρασης των βασικών παραμέτρων της κατεργασίας στις ιδιότητες των λαμβανομένων επιστρώσεων έδωσε τη δυνατότητα επίτευξης και πιστοποίησης της επαναληψιμότητας της μεθόδου σε βέλτιστες δοκιμές. Εδώ, παρουσιάζεται για τον συνδυασμό λεπτού δοκιμίου χάλυβα St52.3 με προαπόθεση σκόνης βάσης Μολυβδαινίου.

Τέλος, παρουσιάζεται αναλυτικά και συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων τριών διαφορετικών κατεργασιών : της Σ.Η.Ε., του laser και APS ίδιου συνδυασμού υλικών χάλυβα St52.3 και κεραμομεταλλικής σκόνης WC-17Co ως επίστρωση.

**V.1 ΤΗΞΗ ΣΚΟΝΗΣ ΣΕ ΠΡΟΑΠΟΘΕΣΗ****V.1.1. Κεραμική Σκόνη Καρβιδίου του Πυρτίου (SiC) [1-4]**

Στον ακόλουθο **Πίνακα V-3** παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων των βέλτιστων δοκιμών με Σ.Η.Ε. (*Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια*) στον ηλιακό φούρνο της PSA (Plataforma Solar d' Almeria), κατά τις οποίες κατεργάστηκαν δοκίμια χαλύβων St52.3 και Ck60, που έφεραν σε προαπόθεση -πάχος 1mm- κεραμική σκόνη καρβιδίου του πυρτίου (SiC).

**Πίνακας V- 3 : Τιμές πειραματικών παραμέτρων βέλτιστων δοκιμών με προαπόθεση (1mm) σκόνης SiC**

| Υπόστρωμα | Πάχος Δοκιμίων (mm) | Πυκνότητα Εισερχόμενης Ακτινοβολίας (W/m <sup>2</sup> ) | Ολικός Χρόνος Κατεργασίας (min) | Χρόνος παραμονής σε Tmax (min) | T max (°C) |
|-----------|---------------------|---|---------------------------------|--------------------------------|------------|
| St52.3    | 35                  | 923   | 16                              | 4                              | 1330       |
| Ck60      | 35                  | 896   | 17                              | 7                              | 1240       |

### V.1.1.1 Υπόστρωμα Χάλυβα St52.3

#### A. Μελέτη μικροδομής

Η μακροσκοπική παρατήρηση της κατεργασμένης επιφάνειας έδειξε ότι η προαποτιθέμενη σκόνη SiC, στην επιφάνεια του χάλυβα, έλιωσε πλήρως και ότι προσφύεται ικανοποιητικά στο υπόστρωμα (Σχήμα V-2). Διακρίνονται κάποιες μεμονωμένες φυσαλίδες-πόροι (*μαύρες περιοχές*) στα όρια της τηγμένης σκόνης, ενώ δεν είναι εμφανείς ρωγμές ή άλλες ασυνέχειες στην επιφάνεια της κατεργασίας.



**Σχήμα V-2 : Επίστρωση SiC σε χάλυβα St52.3**  
**Μακρογραφία κατεργασμένης επιφάνειας**

Η τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας, μετρήθηκε ίση με  $Ra_{κατ} = 1.9$ , και είναι, όπως ήταν αναμενόμενο, αυξημένη σε σχέση με την αρχική τιμή της τραχύτητας του υποστρώματος ( $Ra_{ουτ} = 0.8$ ).

Η εγκάρσια τομή της επίστρωσης έδειξε τη δημιουργία ζώνης κατεργασίας συνολικού πάχους περίπου 1300μm, (Σχήμα V- 3α). Περαιτέρω μελέτη, με μέσα οπτικής μικροσκοπίας, στα όρια της ζώνης, έδειξε ότι αυτή διαστρωματώνεται σε πέντε (5) διακριτές, αλληπάλληλες υποζώνες, διαφορετικής μορφολογίας :

α. Η ανώτερη (υποζώνη Α), πάχους 350μm χαρακτηρίζεται από μορφολογία ομοιόμορφη, μαρτενσιτική τύπου. Η μικροδομή της είναι γενικά ομοιογενής και λεπτόκοκκη σε όλη της την έκταση, με διάσπαρτα, σε λεπτό και ομοιόμορφο διαμερισμό, μερικώς διαλυμένα καρβίδια

β. Στην επόμενη υποζώνη Β, που ακολουθεί, μέσου πάχους 400 μm, υπάρχουν ενδιάμεσως μαρτενσιτικής μήτρας, μεγάλου μεγέθους αδιάλυτα και μερικώς διαλυμένα καρβίδια (Σχήμα V-3α).



γ. Η ακόλουθη υποζώνη Γ, έχει μέσο πάχος 250μm και παρουσιάζει παραπλήσια μορφολογία με αυτήν της Α, δηλαδή χαρακτηρίζεται από λεπτόκοκκη, ομοιόμορφη μαρτενσιτικού τύπου μήτρα, με τη διαφορά ότι στο κατώτερο μέρος διακρίνονται πόροι, σε αραγή διαφορά, μικρής διαμέτρου.

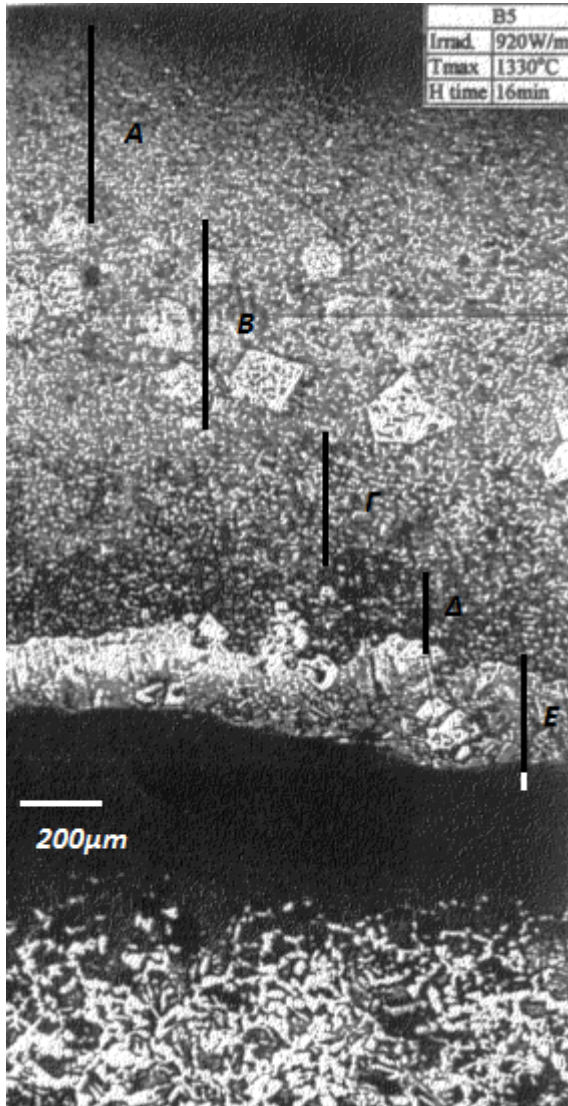
δ. Η υποζώνη Δ, έχει πάχος περί των 200μm και η μορφολογία της συγκλίνει προς εκείνων των Α και Γ υποζωνών, με τη διαφορά ότι τα καρβίδια είναι περαιτέρω διαλυτοποιημένα μέσα σε ιδιαίτερος λεπτόκοκκη μαρτενσιτική μήτρα.

ε. Τέλος, μεταξύ της υποζώνης Δ και του υποστρώματος παρεμβάλεται μία λευκή υποζώνη Ε, μέσου πάχους 100-150μm, παράλληλη με το υπόστρωμα. Η ζώνη αυτή είναι λεπτόκοκκη, αποτελούμενη από μαρτενσίτη και υπολειπόμενο ωστενίτη, και σε σημεία διακρίνονται πολύ μικρά υπολείματα καρβιδίων. Η συνάφεια με το υπόστρωμα είναι πολύ καλή (Σχήμα V-3β).

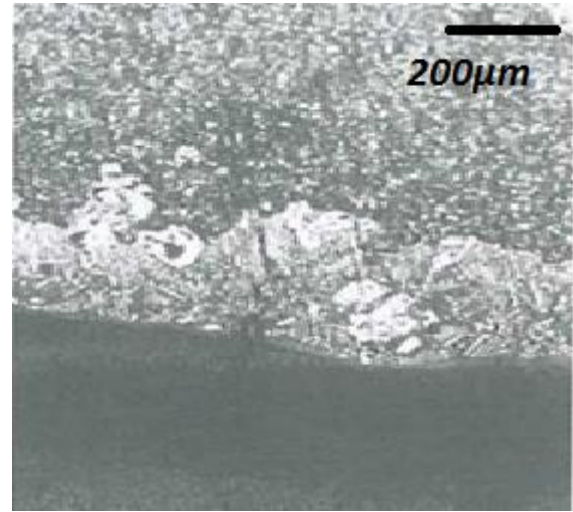
Η στοιχειακή ανάλυση EDS, κατά βάθος της ζώνης κατεργασίας και στις περιοχές της ομοιόμορφης λεπτόκοκκης μικροδομής (υποζώνες Α&Γ) έδειξε ότι : η συγκέντρωση του σιδήρου (Fe) αυξάνεται από 88 σε 99% από την επιφάνεια προς το υπόστρωμα, ενώ η συγκέντρωση του πυριτίου (Si) μειώνεται - αντίστοιχα - από 0.8 σε 0.3% (Πίνακας V-4), αποδεικνύοντας ότι επετεύχθη κραμάτωση. Στις περιοχές συσσωμάτωσης αδιάλυτων και μερικώς διαλυμένων καρβιδίων SiC, αλλά και στο επαναστεροποιημένο κράμα πέριξ των καρβιδίων, η συγκέντρωση του πυριτίου (Si) βρέθηκε, όπως ήταν αναμενόμενο, αυξημένη.

**Πίνακας V-4 : % κ.β. χημική σύσταση σε διαφορετικά σημεία στη ζώνη κραμάτωσης**

|           | <b>Ζώνη Κατεργασίας</b> | <b>Αδιάλυτα Καρβίδια</b> | <b>Μερικώς Διαλυμένα</b> |
|-----------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>Si</b> | <b>0.8-0.3</b>          | <b>44</b>                | <b>38</b>                |
| <b>C</b>  | <b>0.02-0.025</b>       | <b>3</b>                 | <b>2</b>                 |
| <b>Fe</b> | <b>88-99</b>            | <b>-</b>                 |                          |



(α)



(β)

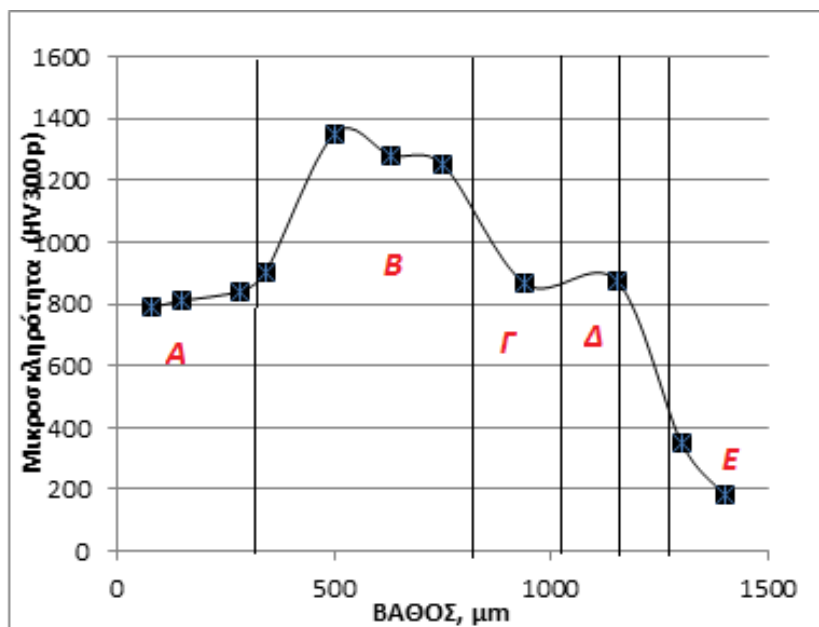
Σχήμα V -3 - : Επίστρωση SiC σε χάλυβα St52.3  
 Οπτικές μικρογραφίες (α) ζώνης κραμάτωσης (β)Υποζώνη E

### B. Μελέτη Μικροσκληρότητας

Η μέτρηση της μικροσκληρότητας σε διαφορετικά σημεία, κατά βάθος της ζώνης κατεργασίας, έδωσε τιμές που αντιστοιχούν στην μικροδομή και στα άλλα χαρακτηριστικά, όπως περιγράφηκαν, της κάθε υποζώνης.

Συγκεκριμένα, οι τιμές κυμαίνονται από 800-900 HV<sub>300p</sub> στις υποζώνες A, Γ και Δ ομοιογενούς μικροδομής και σταθερής χημικής σύστασης, ενώ όταν η σκληρότητα μετράται πολύ κοντά στα εναπομείνοντα αδιάλυτα καρβίδια (υποζώνη B), αυτή είναι πολύ υψηλή, της τάξης των 1400HV<sub>300p</sub>. Όμως, και στις περιοχές, που

χαρακτηρίζονται από υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο (Si), ως προϊόντος της διαλυτοποίησης, οι τιμές της μικροσκληρότητας κυμαίνονται από 1000 - 1200 HV<sub>300p</sub> (Σχήμα V-4).



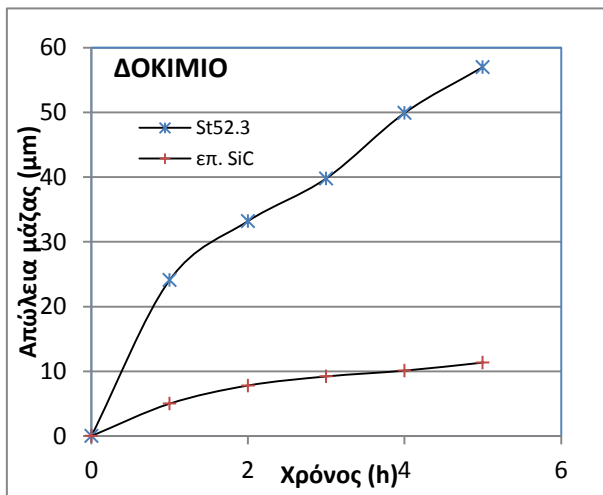
Σχήμα V-4 : Μικροσκληρότητα ως προς το βάθος της ζώνης κατεργασίας

### Γ. Τριβολογική Μελέτη - Φθορά

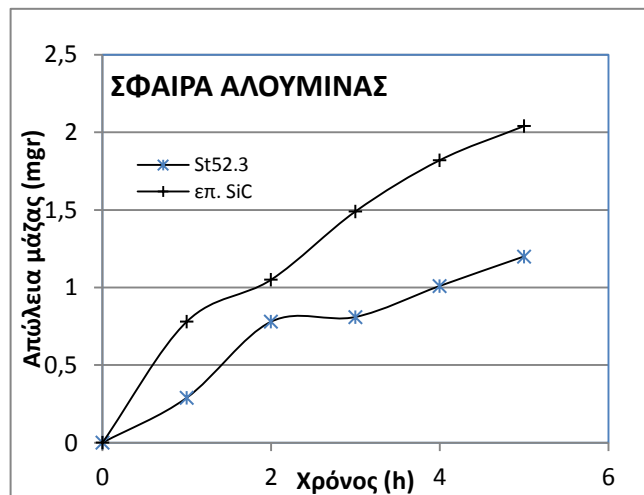
Η κραμάτωση της λαμβανόμενης επίστρωσης SiC, σε συνδυασμό με την αύξηση στην μικροσκληρότητα που επετεύχθησαν με την κατεργασία με Σ.Η.Ε., βελτίωσε σημαντικά την τριβολογική συμπεριφορά της επιφάνειας. Έτσι, ο συντελεστής τριβής της κατεργασμένης με σκόνη SiC επιφάνειας του χάλυβα St52.3, ως προς ανταγωνιστικό υλικό σφαίρα αλούμινας (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), έδωσε μέση τιμή ίση με 0.55. Η τιμή αυτή είναι μειωμένη κατά 21% σε σχέση με τον συντελεστή τριβής της ακατέργαστης επιφάνειας του χάλυβα (0.7), και άρα βελτιωμένη.

Όσον αφορά στη φθορά της κραματωμένης επιφάνειας, ως προς το ανταγωνιστικό υλικό, αυτή -οπολογιζόμενη σε μονάδες μάζας- βρέθηκε πέντε (5) φορές μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη του ακατέργαστου υποστρώματος (Σχήμα V-5α). Αντίστοιχα, η φθορά του ανταγωνιστικού υλικού, κατά την τριβή της στην κραματωμένη επιφάνεια, ήταν 2.5 φορές μεγαλύτερη συγκρινόμενη με αυτή ως προς

το ακατέργαστο υπόστρωμα (Σχήμα V-5β). Είναι, λοιπόν, ιδιαίτερα σημαντική η βελτίωση της αντοχής στη φθορά της επιφάνειας του χάλυβα, όταν αυτή επιστρώνεται με κραμάτωση καρβιδίου του πυριτίου, Si.



(α)



(β)

### Σχήμα V-5 : Επίστρωση SiC σε χάλυβα St52.3

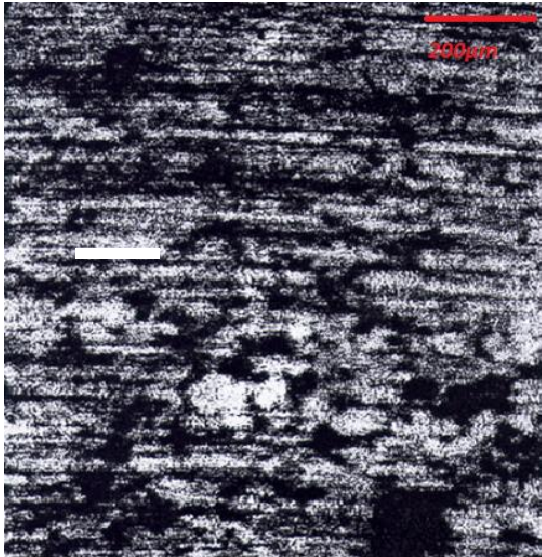
Φθορά (σε mgr) ως προς χρόνο τριβομέτρησης (h) σε τριβόμετρο ball on disc

(α) δοκιμίου (β) ανταγωνιστικού υλικού

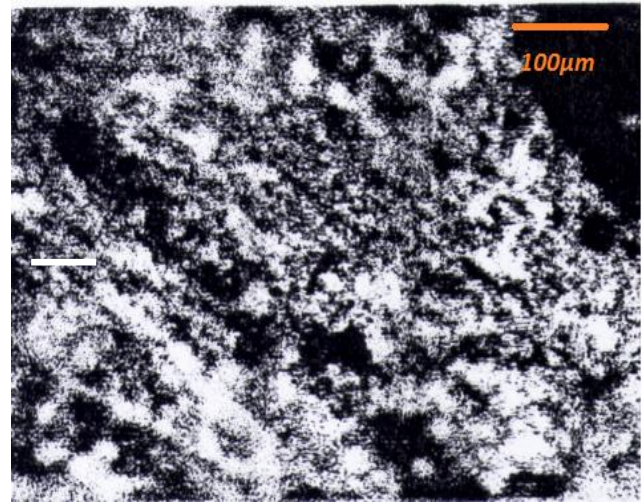
Όσον αφορά στους μηχανισμούς φθοράς οι οποίοι προκάλεσαν αυτή την απώλεια μάζας, από τη μικρογραφική εξέταση της πίστας τριβής, διαπιστώθηκε ότι ο μηχανισμός που, κυρίως, έλαβε χώρα είναι αυτός της *εκτριβής (abrasion)*, ο οποίος και συνετέλεσε στη παραγωγή αποβλήτων της τριβής (*debris*) αφήνοντας αντίστοιχα κενά (μαύρες περιοχές, Σχήμα V-6α). Μέρος των *debris*, και υπό την επίδραση του βάρους (10 N) που εφαρμόζεται κατά την τριβομέτρηση, προσκολλήθηκε πίσω στην πίστα τριβής μέσω του μηχανισμού της *πρόσφυσης (adhesion)*. Οπότε ο κυρίαρχος μηχανισμός είναι ο συνδυασμός των μηχανισμών εκτριβής και πρόσφυσης (*scuffing*).

Επιπλέον, παρατηρούνται παράλληλες γραμμές που διαγράφονται ομόκεντρα στην πίστα τριβής (Σχήμα V-6α), οι οποίες ταυτοποιούν τη δράση του μηχανισμού *μικροάρρωσης (microploughing)*. Η μικροάρρωση είναι το αποτέλεσμα της κυκλικής

κίνησης, υπό την πίεση του βάρους των 10N, μεγάλων και αιχμηρών κομματιών αποβλήτων της τριβής (debris), τα οποία και δημιουργούν τα ομόκεντρα αυτά ίχνη.



(α)



(β)

**Σχήμα V - 6 : Επίστρωση SiC σε χάλυβα St52.3  
(α), (β) οπτικές μικρογραφίες πίστας τριβής**

### V.1.1.2 Υπόστρωμα Χάλυβα Ck60

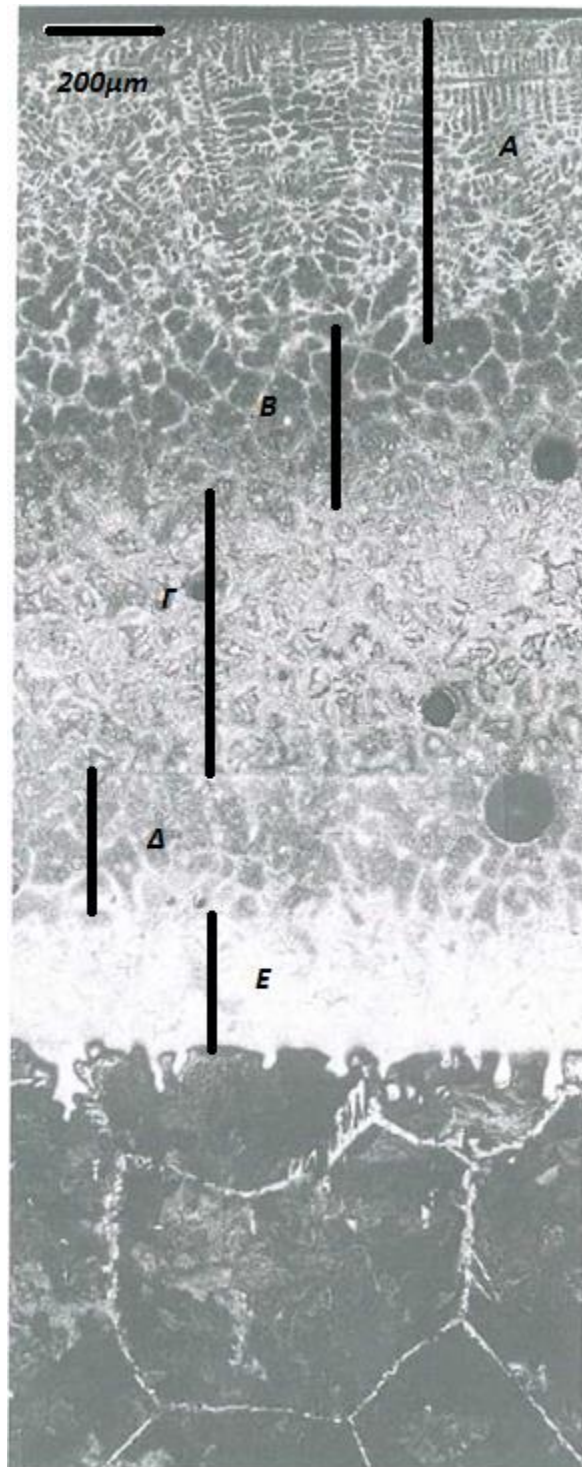
#### A. Μελέτη μικροδομής

Η μακροσκοπική παρατήρηση της κατεργασμένης με Σ.Η.Ε. επιφάνειας του δοκιμίου χάλυβα Ck60 με προαπόθεση σκόνης SiC, έδειξε ότι η σκόνη SiC έλιωσε πλήρως και ότι αυτή προσφύεται εξαιρετικά στην επιφάνεια του υποστρώματος. Διακρίνονται ελάχιστες φυσαλίδες στα όρια του ίχνους της τηγμένης σκόνης, ενώ δεν είναι εμφανείς ρωγμές (Σχήμα V-7). Η επιφανειακή τραχύτητα (Ra) καταγράφεται αυξημένη από 0,8, της ακατέργαστης επιφάνειας του χάλυβα, σε 1,2 μετά την κατεργασία, επάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια.



**Σχήμα V- 7 : Επίστρωση κεραμικής σκόνης SiC σε Ck60  
Μακρογραφία κατεργασμένης επιφάνειας**

Κατά την παρατήρηση με οπτικό μικροσκόπιο της εγκάρσιας τομής της επίστρωσης, φάνηκε ότι μετά την διαλυτοποίηση της προαποτιθέμενης σκόνης SiC με Σ.Η.Ε., διαμορφώθηκε μία ζώνη κατεργασίας μέσου βάθους 2000μm. Η κατεργασμένη περιοχή διαστρωματώνεται (όπως και στον προηγούμενο χάλυβα) σε πέντε διακριτές υποζώνες (Σχήμα V- 8). Ειδικότερα :



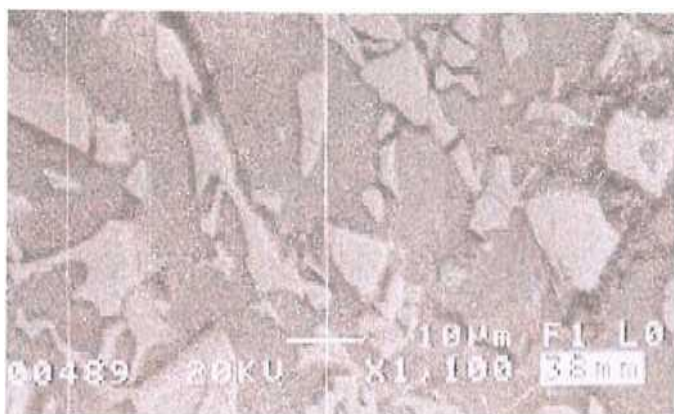
**Σχήμα V-8 : Επίστρωση κεραμικής σκόνης SiC σε Ck60  
Οπτική μικρογραφία τομής ζώνης κατεργασίας**

α. η ανώτερη υποζώνη Α, εκτείνεται σε μεγάλο βάθος, κατά μέσο όρο 600μm, και έχει χαρακτηριστική, ομοιογενή κυψελοειδή δομή με δενδρίτες μεγάλων διαστάσεων, μορφολογία που παραπέμπει σε αργή στερεοποίηση.

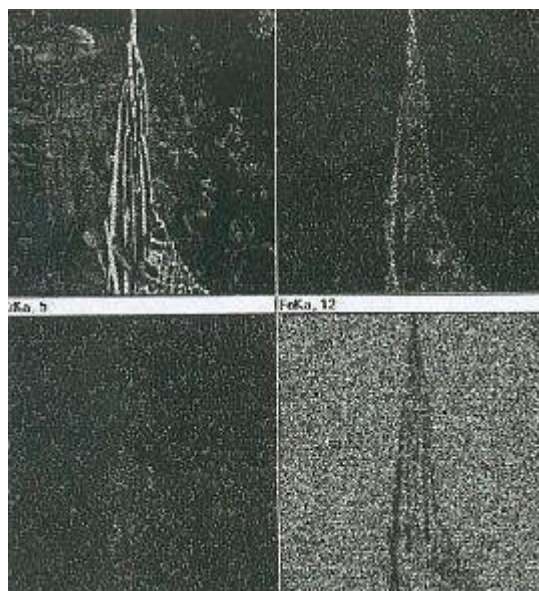
β. Στην επόμενη υποζώνη Β, πάχους περίπου 350μm, η μικροδομή είναι επίσης κυψελοειδούς μορφής, αλλά με κυψέλες μεγαλύτερων ακόμα διαστάσεων, χαρακτηριστική δομή, ακόμα βραδύτερης ψύξης. Στα κατώτερα σημεία της υποζώνης διακρίνονται μεμονωμένοι πόροι.

γ. Στη συνέχεια, ακολουθεί μία ομοιόμορφης μορφολογίας υποζώνη Γ, η οποία εκτείνεται σε βάθος 500μm. Η μορφολογία της ζώνης αποτελείται από μαρτενιτική μήτρα, με μεγάλο αριθμό μερικώς διαλυμένων και αδιάλυτων καρβιδίων σε ομοιογενή διασπορά μέσα σε αυτήν.

Στο Σχήμα V- 9α βλέπουμε ηλεκτρονική μικρογραφία σε εσωτερικό σημείο της υποζώνης Γ, όπου φαίνονται πολύ μικρά μερικώς διαλυμένα καρβίδια, ενώ στο Σχήμα V - 9β παρουσιάζεται στοιχειακό mapping σε τυχαίο καρβίδιο.



(α)



(β)

**Σχήμα V- 9 : Επίστρωση SiC σε Ck60**

**(α) SEM περιοχής αδιάλυτων καρβιδίων**

**(β) Στοιχειακό mapping σε τυχαίο καρβίδιο στη υποζώνη Γ**

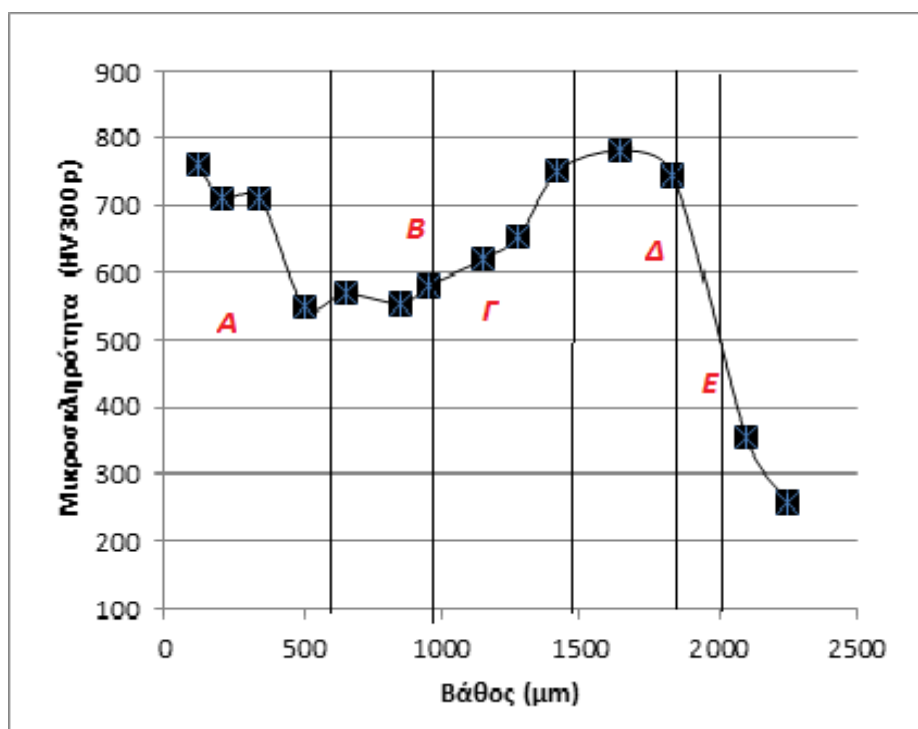
δ. Η υποζώνη Δ είναι πάχους μικρότερου των 350μm, και η μικροδομή της είναι κυψελοειδής, με μικρότερες κυψέλες σε σχέση με την υποζώνη Β. Έχει ενδιαφέρον, το γεγονός, ότι αυτές οι δύο υποζώνες κυψελοειδούς μορφολογίας, πλαισιώνουν την υποζώνη Γ (ένα μοτίβο που επαναλαμβάνεται σε άλλους συνδυασμούς, όπως θα αναλυθεί παρακάτω).



ε. Τέλος, και σε αυτήν την περίπτωση, όπως και στον προηγούμενο χάλυβα, εμφανίζεται η λευκή υποζώνη E, μέσου πάχους 200μm, η οποία σε αυτήν την περίπτωση έχει χαρακτηριστικά ζώνης επαναστερεοποίησης με καλή πρόσφυση στο υπόστρωμα.

### B. Μελέτη μικροσκληρότητας

Η μέτρηση της μικροσκληρότητας κατά βάθος της ζώνης κατεργασίας, έδωσε, ανά υποζώνη, διαφορετικές τιμές μικροσκληρότητας, αναλόγως της μικροδομής της. Έτσι, η ανώτερη υποζώνη (A), δίνει σχετικά υψηλές τιμές μικροσκληρότητας της τάξης των 750HV<sub>300p</sub> (Σχήμα V-10), σταθερές κατά βάθος. Η μικροσκληρότητα μειώνεται στα όρια της ζώνης B, σε τιμές τυπικές αδρομερούς κυψελλοειδούς δομής. Ενώ, στην υποζώνη Γ αυξάνονται και φτάνουν πάλι στις τιμές της υποζώνης A, τόσο λόγω της λεπτόκοκκης μικροδομής όσο και λόγω της παρουσίας πολύ μικρών μερικώς διαλυμένων καρβιδίων σε ομοιογενή κατανομή μέσα στην υποζώνη.



Σχήμα V- 10: Μικροσκληρότητα ως προς βάθος

Η μέτρηση της μικροσκληρότητας στην υποζώνη Δ, δίνει σχετικά υψηλή τιμή (Σχήμα V-10), δεδομένου ότι επαναλαμβάνεται μεν η δομή της κυψελλοειδούς μορφολογίας, αλλά οι κυψέλες είναι μικρότερου μεγέθους, ενώ, τέλος η τιμή της σκληρότητας στην υποζώνη E είναι πολύ χαμηλή.

**V.1.1.3 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στον ακόλουθο Πίνακα V-5 συνοψίζονται και παρατίθενται συγκριτικά τα αποτελέσματα της τήξης SiC στους δύο διαφορετικούς χάλυβες :

**Πίνακας V- 5: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων ηλιακής κατεργασίας χαλύβων με σκόνη SiC**

| Υπόστρωμα | $\lambda_{ΥΠ}$<br>(W/m K) | $\lambda$<br>ΣΚ<br>(W/m K) | Πυκν.<br>Εισερχ.<br>Ενέργ.<br>(W/m <sup>2</sup> ) | $t_{ΟΛΙΚ}$<br>(min) | $t_{\text{παραμ.}}$<br>(min) | T max<br>(°C) | Βάθος<br>Ζώνης<br>(μm) | Χαρακτηριστικά<br>Ζωνών Κατεργασίας  |
|-----------|---------------------------|----------------------------|---|---------------------|------------------------------|---------------|------------------------|--|
| St52.3    | 35-<br>45                 | 126                        | 923   | 16                  | 4                            | 1330          | 1250                   | - 5 υποζώνες<br>- Κραματωμένη μήτρα<br>- Μεγάλα αδιάλυτα καρβίδια<br>στο μέσο και στο κάτω μέρος<br>HV300p <sub>μήτρας</sub> : 800-1000<br>HV300p <sub>πέριξ καρβιδίων</sub> : 1300-1400   |
| Ck60      | 49.7                      |                            | 896   | 17                  | 7                            | 1240          | 2000                   | - 5 υποζώνες<br>- Κραμάτωμένη μήτρα με δομή<br>βραδείας στερεοποίησης<br>- Πολύ μικρά μερικώς διαλυμένα ή<br>αδιάλυτα καρβίδια<br>HV300p <sub>περιοχή με καρβίδια</sub> : 800-1000<br>HV300p <sub>βραδείας ψύξης</sub> : 550-650 |

Συμπερασματικά, ισχύουν τα ακόλουθα :

#### V.1.1.3. Σ1

Η υψηλή τιμή της θερμικής διαχυτότητας της σκόνης του καρβιδίου του πυριτίου ( $a = \lambda/(\rho \cdot C_p)$ ),  $0.015 \text{ m}^2/\text{s}$ ) διασφαλίζει υψηλό βαθμό διαλυτοποίησης των καρβιδίων.

#### V.1.1.3. Σ2

Ο βαθμός διαλυτοποίησης των καρβιδίων στην περιοχή κοντά στη διεπιφάνεια με το υπόστρωμα, διαπιστώνεται, ότι εξαρτάται από την τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας και από τον χρόνο παραμονής της κατεργασίας σε αυτήν. Αυτό ισχύει γιατί το υπόστρωμα, λόγω και του μεγάλου όγκου του –και στις δύο περιπτώσεις- για πολύ μεγάλους χρόνους κατεργασίας και υψηλές τιμές θερμοκρασίας διατηρείται πολύ θερμό, ακόμα και μετά την παύση της κατεργασίας. Έτσι, τα κατώτερα στρώματα της ζώνης που έρχονται σε επαφή με αυτό, θερμαίνονται εκτενέστερα, και αντίστοιχα, τα καρβίδια διαλυτοποιούνται σε μεγαλύτερο βαθμό. Αυτό είναι πιο έντονο στην περίπτωση του χάλυβα Ck60, ο οποίος για ίδια τιμή ειδικής θερμότητας  $C_p$  με τον St52.3, ο όγκος του είναι μεγαλύτερος, καθώς και η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας του. Έτσι, παρατηρείται στην περίπτωση αυτή μεγαλύτερη διαλυτοποίηση και αντίστοιχα χαμηλότερες τιμές σκληρότητας

#### V.1.1.3. Σ3

Ο χρόνος παραμονής στην  $T_{max}$  καθορίζει το βάθος της ζώνης κατεργασίας. Έτσι, για τον ίδιο χρόνο κατεργασίας, ο σχεδόν διπλάσιος χρόνος παραμονής (7min) του χάλυβα Ck60 στη μέγιστη θερμοκρασία δίνει πολύ μεγαλύτερο βάθος της ζώνης κατεργασίας (2000μm).

#### V.1.1.3. Σ4

Σημαντική είναι και η επίδραση της μεγάλης περιεκτικότητας σε άνθρακα του χάλυβα Ck60 εξαιτίας της οποίας, περνά σε φάση ωστενιτοποίησης σε μικρότερη  $T$  (Διάγραμμα Fe C), και άρα παραμένει περισσότερο σε συνθήκες τέτοιες. Έτσι ο Σίδηρος (Fe) μπορεί να δεσμεύσει μεγαλύτερο ποσοστό άνθρακα από τα καρβίδια, γεγονός που εξηγεί το μεγαλύτερο βαθμό διαλυτοποίησης στην περίπτωση του χάλυβα αυτού.

### V.1.2 Μεταλλική σκόνη βάσης μολυβδαινίου (AMPERIT 119.075/ 75 Mo - 25NiCrBSiFe ) [5,6]

Στον ακόλουθο Πίνακα V- 6 παρατίθενται οι τιμές των πειραματικών παραμέτρων των βέλτιστων δοκιμών τήξης σκόνης βάσης Μολυβδαινίου, (“Amperit” 75% Mo και Ni, Cr, B, Si, Fe in 25% (κ.β.)) σε προαπόθεση πάχους 1mm, στις επιφάνειες δύο διαφορετικών χαλύβων : ο πρώτος είναι ο St52.3 και, ο δεύτερος, ο ανοξειδωτος χάλυβας SS304L

**Πίνακας V- 6 : Τιμές πειραματικών παραμέτρων βέλτιστων δοκιμών για σκόνη βάσης - Mo (1mm)**

| Υπόστρωμα | Πάχος<br>Δοκιμίων<br>(mm) | Ποικν. Εισ.<br>Ακτινοβολίας<br>(W/m <sup>2</sup> ) | Ολικός<br>Χρόνος<br>Κατεργασίας<br>(min) | Χρόνος<br>παραμονής<br>σε Tmax<br>(min) | T max(°C) |
|-----------|---------------------------|--|--|---|-----------|
| St52.3    | 5                         | 760  | 9  | 6                                       | 1300      |
| SS304L    | 5                         | 750  | 9  | 6                                       | 1300      |

Στην περίπτωση της σκόνης βάσης Mo επιλέχθηκαν μικρού πάχους δοκίμια χάλυβα ώστε να υπάρχει καλύτερος έλεγχος της κατεργασίας και ειδικότερα της θερμοκρασίας, δεδομένου ότι η πλήρης διαλυτοποίηση του Μολυβδαινίου στον Σίδηρο (Διάγραμμα φάσεων Mo-Fe) επιτυγχάνεται σε θερμοκρασία πλησίον του σημείου τήξης του χάλυβα.

**V.1.2.1. Υπόστρωμα St52.3****A. Μελέτη μικροδομής**

Η μακροσκοπική παρατήρηση της επιφάνειας του χάλυβα St52.3, μετά την ηλιακή κατεργασία, έδειξε ότι η σκόνη προσφύεται εξαιρετικά στο υπόστρωμα, ενώ η εξωτερική επιφάνεια είναι λεία, με μέση τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας της τάξης του 0,9, ελάχιστα αυξημένη σε σχέση με τον ακατέργαστο χάλυβα. Διακρίνονται κάποιες φυσαλίδες, ενώ δεν είναι εμφανείς ρωγμές (Σχήμα V - 11).



**Σχήμα V- 11 : Επίστρωση σκόνης βάσης Μολυβδαινίου σε χάλυβα St52.3  
Μακρογραφία κατεργασμένης επιφάνειας**

Κατά τη μικρογραφική εξέταση της τομής της κατεργασμένης επιφάνειας που ακολούθησε, φάνηκε ότι : για έκθεση της επιφάνειας του δοκιμίου για χρόνο 6 λεπτών στη μέγιστη θερμοκρασία  $T=1300^{\circ}\text{C}$ , δημιουργείται μία ομοιογενής ζώνη κατεργασίας που εκτείνεται σε μέσο πάχος 1100 $\mu\text{m}$ , πάχος το οποίο μειώνεται προς τις άκρες του δοκιμίου (Σχήμα V-12), καθώς, η γρήγορη και ομοιογενή θέρμανση του δοκιμίου (λόγω μικρού πάχους) επιτρέπει η σκόνη να προσφύεται συμμετρικά σε όλη την επιφάνεια του.

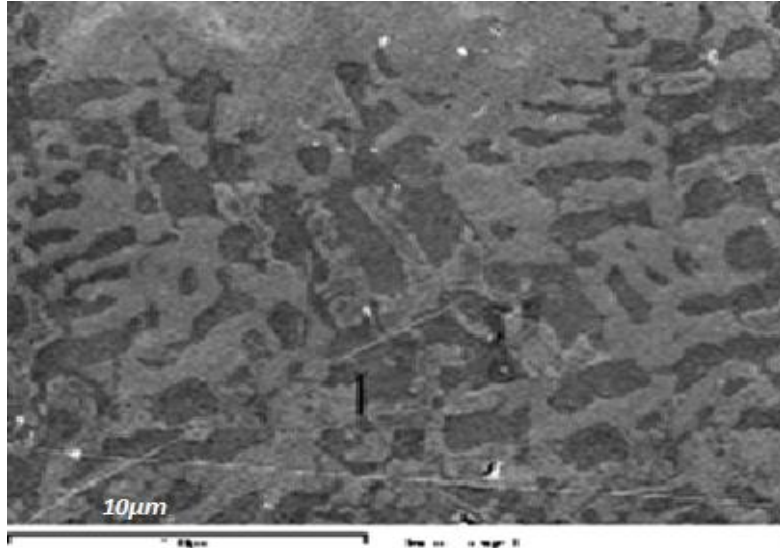
Σε όλη την έκταση της ζώνης κατεργασίας, η μικροδομή είναι ομοιόμορφη, κυψελλοειδής, με διακριτές περιοχές ανάπτυξης δενδριτών, χωρίς πόρους ή ρωγμές. Η αντίστοιχη χημική σύσταση που καταγράφηκε -με ανάλυση SEM-EDS- σε διαφορετικά βάρη της ομοιογενούς μορφολογικά ζώνης κατεργασίας, έδωσε, όπως

ήταν αναμενόμενο, συγκέντρωση Μολυβδαινίου (Mo) αυξανόμενη από το υπόστρωμα προς την επιφάνεια, από 9 σε 20% κ.β. αντίστοιχα, ενώ του σιδήρου καταγράφηκε μειούμενη, αντίστοιχα, από 70 σε 55% (Σχήμα V-14α). Οι τιμές αυτές των συγκεντρώσεων, καθώς και η μεταβολή τους κατά βάθος της ζώνης κατεργασίας, αποδεικνύουν ότι επετεύχθη κραμάτωση.



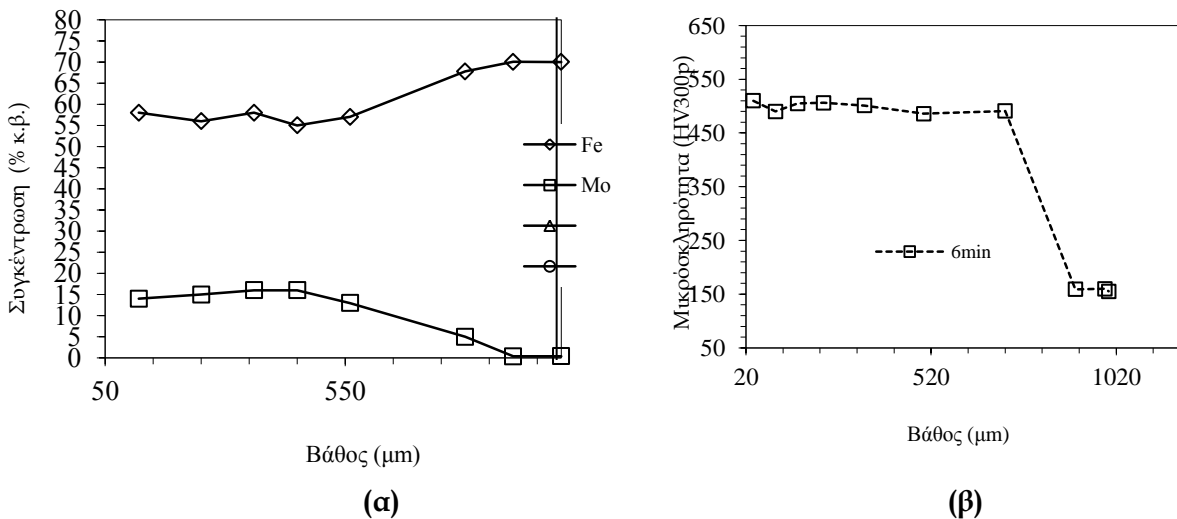
**Σχήμα V - 12 : Οπτική μικρογραφία ζώνης κραμάτωσης βάσης Mo**

Από το αντίστοιχο διάγραμμα ισορροπίας φάσεων των στοιχείων Mo-Fe (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ, σελ Π-18), για τα διαστήματα των συγκεντρώσεων που μετρήθηκαν, δείχνει ότι η μήτρα της κραματωμένης επιφάνειας αποτελείται από δύο φάσεις, οι οποίες αναπτύσσονται σε εναλλαγή (Σχήμα V-13) : η σκούρα γκρι, είναι η κυβική  $\alpha$ -φάση, ενώ η λευκή είναι η  $\epsilon$ -φάση ρομβοειδούς κρυσταλλικής μορφής (τύπου  $W_6Fe_7$ ) [5].



Σχήμα V - 13 : SEM μικρογραφία σε σημείο της ζώνης κραμάτωσης βάσης Mo

Η ποιότητα της ζώνης κραμάτωσης είναι εξαιρετική, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν ρωγμές και πόροι. Στη διεπιφάνεια μεταξύ της ζώνης κραμάτωσης και του υποστρώματος παρεμβάλεται μία λεπτόκοκκης μικροδομής ζώνη (λευκή ζώνη, Σχήμα V-12) πάχους 70μm, με περιεκτικότητα σε μολυβδαίνιο μικρότερη του 8%κ.β. Η δε κυρίαρχη φάση σε αυτήν είναι η ε-φάση ρομβοειδούς κρυσταλλικής μορφής (τύπου  $W_6Fe_7$ ).



Σχήμα V- 14 : Επίστρωση σκόνη βάσης Mo σε St52.3

(α) % κ.β. χημική σύσταση ζώνης κατεργασίας

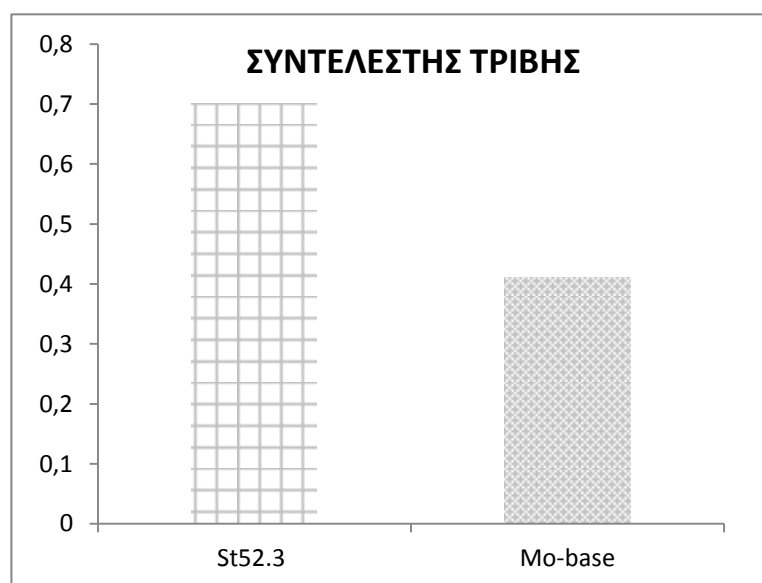
(β) μικροσκληρότητα ως προς βάθος

## Β. Μελέτη μικροσκληρότητας

Η ομοιογενής μορφολογία της ζώνης κατεργασίας σε όλη την έκταση της, δίνει αντίστοιχα, ομοιόμορφο προφίλ μικροσκληρότητας. Συγχρόνως, η εναλλαγή των δύο φάσεων της σκληρής κυβικής  $\alpha$ -φάση (σκούρα γκρι, Σχήμα V-13), και της μαλακότερης  $\epsilon$ -φάσης (λευκή), ρομβοειδούς κρυσταλλικής μορφής (τύπου  $W_6Fe_7$ ), σε λεπτόκοκκη αλληλουχία, διασφαλίζει μία μέση τιμή της σκληρότητας, της τάξης των  $500HV_{300p}$  (Σχήμα V-14β).

## Γ. Τριβολογική Μελέτη - Φθορά

Στην περίπτωση του χάλυβα St52.3 η δημιουργία επιστρώματος στην επιφάνεια μέσω τήξης -με Σ.Η.Ε. - της προαποτιθέμενης σκόνης βάσης μολυβδαινίου, οδηγεί σε βελτίωση της τριβολογικής του συμπεριφοράς με μείωση του συντελεστή τριβής, ως προς το ανταγωνιστικό υλικό, τη σφαίρα αλούμινας κατά 43% : από 0.7 της ακατέργαστης σε 0.41 της κατεργασμένης ζώνης (Σχήμα V-15).

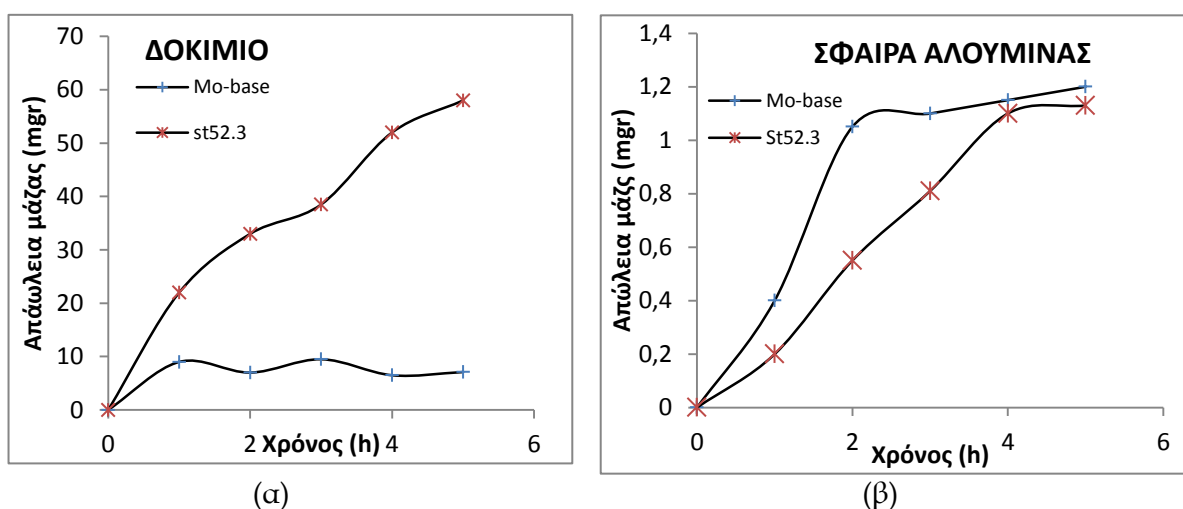


Σχήμα V-15 : Συντελεστής τριβής

Όσον αφορά στη φθορά της κραματωμένης επιφάνειας ως προς το ανταγωνιστικό υλικό, τη σφαίρα αλούμινας, μετρημένη σε απώλεια μάζας, αυτή βρέθηκε έξι (6) φορές -τουλάχιστον- μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη της ακατέργαστης επιφάνειας (Σχήμα V-16 α). Η αντοχή άρα στην φθορά της επιφάνειας λόγω της δημιουργούμενης κραμάτωσης παρουσιάζει σημαντική βελτίωση.



Από την άλλη, η αντίστοιχη φθορά της μπάλας αλούμινας κατά την τριβή της στην κραματωμένη επιφάνεια ήταν μεγάλη -σε σχέση με τη φθορά ως προς το ακατέργαστο υπόστρωμα- στην έναρξη της μέτρησης. Στη συνέχεια όμως, καταγράφεται μείωση της, λόγω της έντονης πρόσφυσης του αποβαλλόμενου υλικού από την κραματωμένη επιφάνεια, στην επιφάνεια της μπάλας (Σχήμα V-16 β), αφού αυτό «υποκαθιστούσε» την απώλεια της μάζας της μπάλας. Τα προϊόντα της τριβής (*debris*) που παράγονταν, καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής, προέρχονταν από την κραματωμένη επιφάνεια, όπως αποδείχθηκε και από την απώλεια στη μάζα του δοκιμίου που καταγράφηκε.

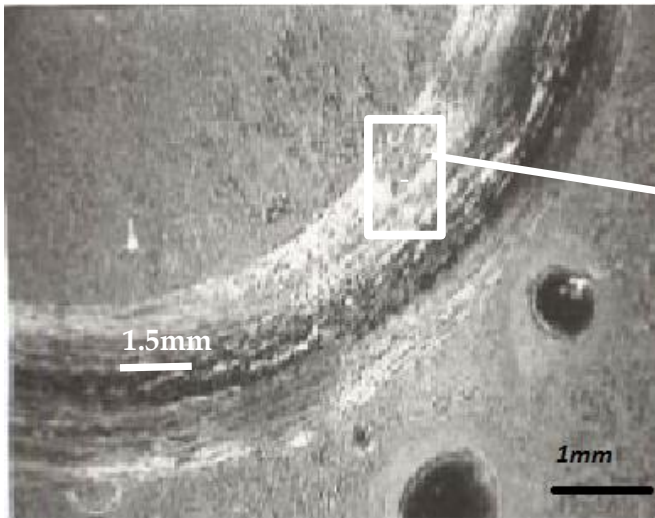


**Σχήμα V - 16 : Επίστρωση σκόνης βάσης Mo σε χάλυβα St52.3  
Απώλεια μάζας (α) δοκιμίου (β) σφαιρας αλούμινας**

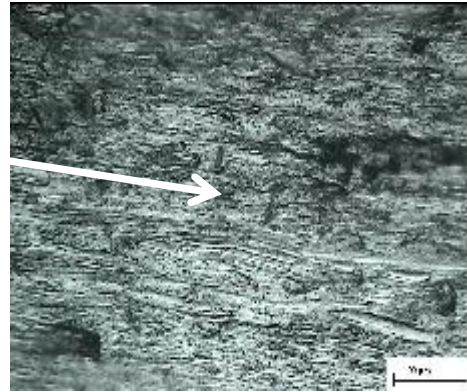
Η αποβολή υλικού (φθορά) της κραματωμένης επιφάνειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής προκαλείται λόγω της δράσης του μηχανισμού εκτριβής. Ακολούθως, μέρος του αποβαλλόμενου υλικού -υπό την επίδραση του βάρους 10N- επαναπροσφύεται στην επιφάνεια της πίστας ολοκληρώνοντας τον μικτό μηχανισμό εκτριβής και πρόσφυσης (*scuffing*), ο οποίος είναι και ο κυρίαρχος. Ο μηχανισμός της πρόσφυσης των αποβαλλόμενων υλικών αφορά και στη φθορά της σφαίρας, όπως φαίνεται στα Σχήματα V - 17 γ και δ, και όπως πιστοποιήθηκε και από τη μέτρηση της απώλειας μάζας της.

Επιπλέον, οι έντονες ομόκεντρες τροχιές που εμφανίζονται στην πίστα τριβής, αντιστοιχούν σε δράση του μηχανισμού της μικροάρρωσης, που προκαλεί η πίεση

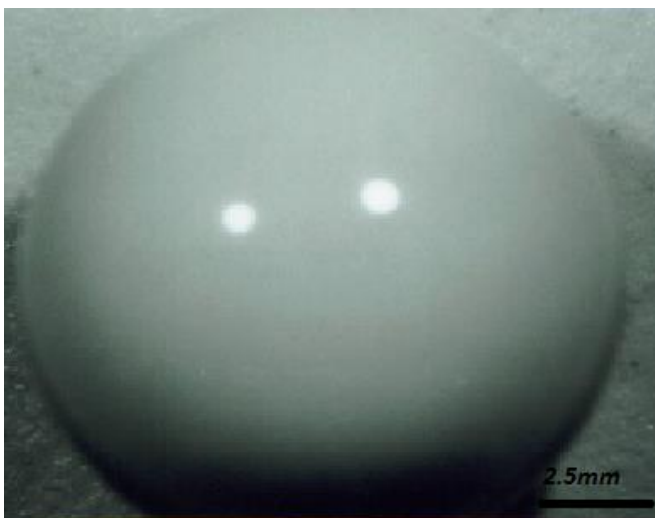
αιχμηρών και μεγάλων κομματιών debris υπό την επίδραση του βάρους και τη σύγχρονη κυκλική κίνηση.



(α)



(β)



(γ)

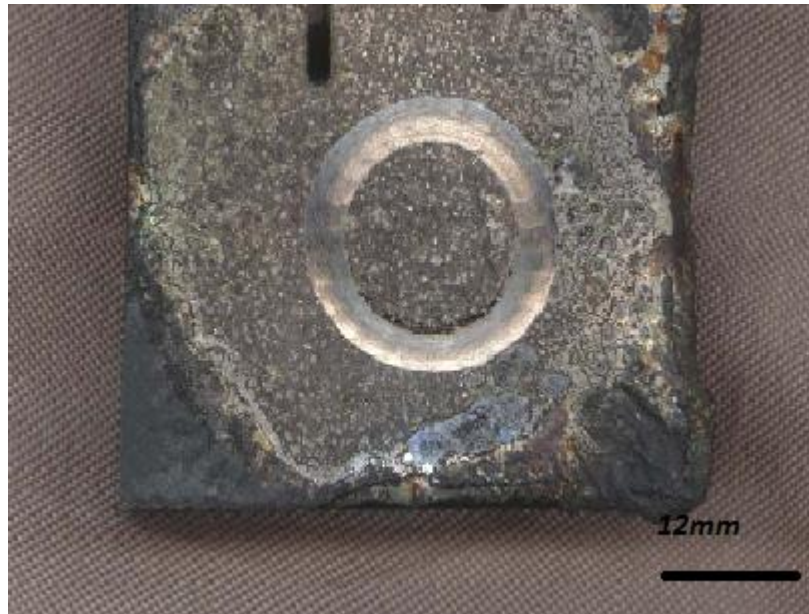


(δ)

**Σχήμα V - 17 : Επίστρωση σκόνης βάσης Mo σε χάλυβα St52.3  
Οπτικές μακρογραφίες (α), (β) των τροχιών που δημιουργούνται κατά την τριβή  
σφαίρας αλούμινας (γ) πριν (δ) μετά**

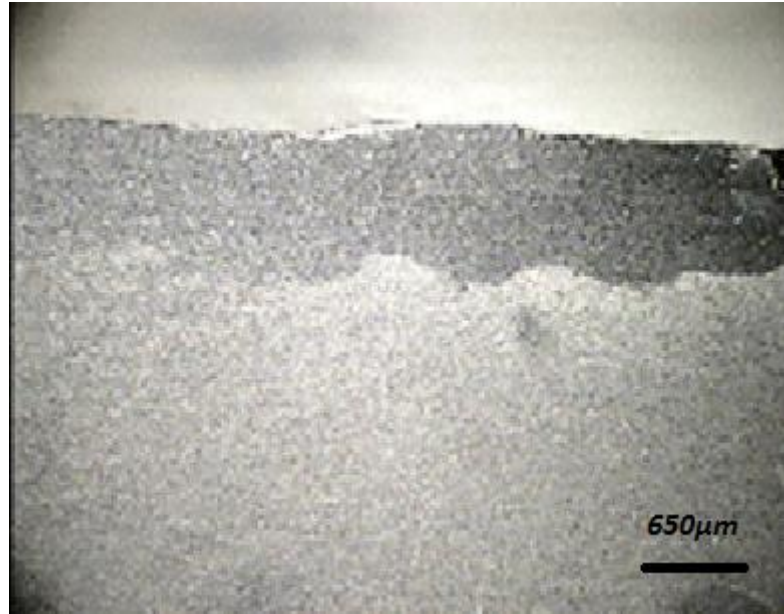
**V.1.2.2. Υπόστρωμα Ανοξειδωτου χάλυβα SS304L [6]****A. Μελέτη Μικροδομής**

Η μακροσκοπική παρατήρηση της κατεργασμένης επιφάνειας του δοκιμίου ανοξειδωτου χάλυβα με προαπόθεση σκόνης μολυβδαινίου 1mm, αμέσως μετά την ηλιακή κατεργασία, δείχνει ότι η σκόνη έχει τηχθεί πλήρως και ότι έχει προσφυθεί στο υπόστρωμα (Σχήμα V- 18). Η τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας έχει αυξηθεί ( $R_a=2\mu\text{m}$ ) σε σχέση με την ακατέργαστη ( $R_a=0.8\mu\text{m}$ ) .



**Σχήμα V - 18 : Επίστρωση σκόνης βάσης Mo σε ανοξειδωτο χάλυβα 304I  
Μακρογραφία της κατεργασμένης επιφάνειας (κυκλικό ίχνος τριβομέτρησης)**

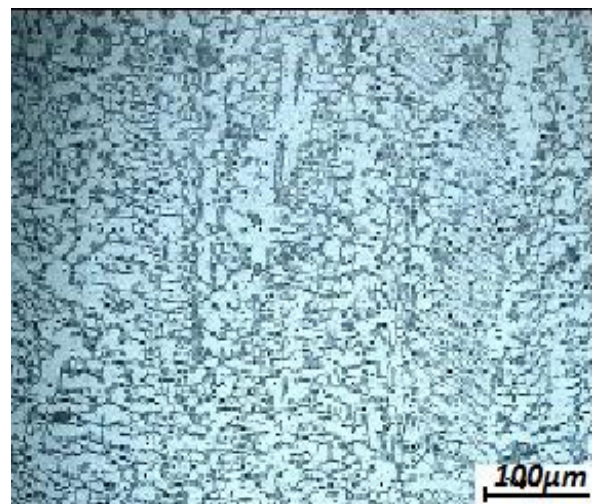
Η επακόλουθη μικρογραφική εξέταση της κατεργασμένης επιφάνειας έδειξε ότι η κατεργασία του ανοξειδωτου χάλυβα με την προαποτιθέμενη σκόνη μολυβδαινίου, υπό τις ίδιες ακριβώς συνθήκες με την περίπτωση του χάλυβα St52.3, δίνει, ελάχιστα, μεγαλύτερο μέσο βάθος κατεργασίας, που φτάνει στα 1200 $\mu\text{m}$ . Η δε μικροδομή που λαμβάνεται είναι επίσης ομοιόμορφη, κυψελλοειδής με έντονη παρουσία δενδριτών (Σχήμα V 19 - α, β), και σε εξαιρετική συνάφεια με το υπόστρωμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή δε διαμορφώνεται ζώνη μετάβασης άλλης μικροδομής ή σύστασης, όπως στην περίπτωση του St52.3 (Σχήμα V-12).



(α)



(β)

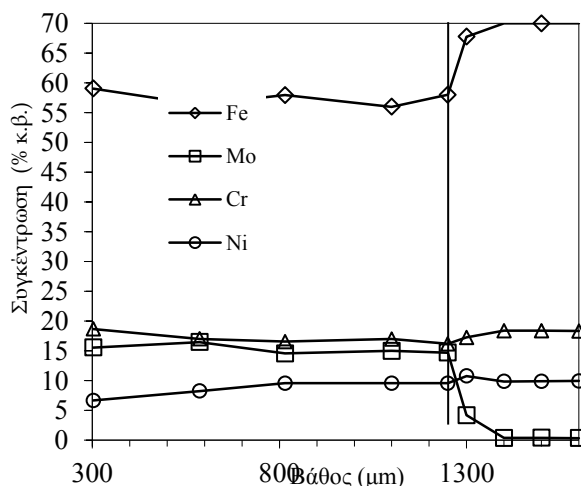


(γ)

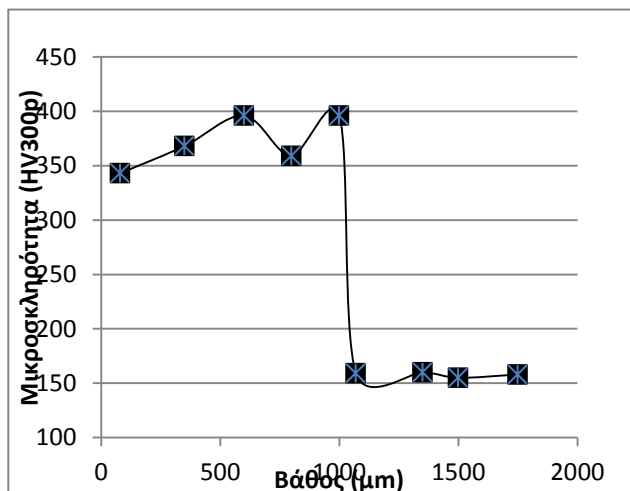
Σχήμα V-19 (α), (β), (γ) :

**Οπτικές μικρογραφίες ζώνης κατεργασίας σκόνης βάσης Mo σε ανοξείδωτο 304L**

Η χημική ανάλυση μέσω EDS της σύστασης της ζώνης κατεργασίας σε διαφορετικά σημεία κατά βάθος, παραμένει σταθερή (Σχήμα V - 20 α), με τη συγκέντρωση του Μολυβδαινίου να έχει μέση τιμή 15% κατά βάθος, και την αντίστοιχη του Σιδήρου στο 60%, αποδεικνύοντας την εξαιρετική χημική ομοιογένεια, που διασφάλισε ο κατάλληλος χρόνος κατεργασίας.



(α)



(β)

Σχήμα V- 20 : Επίστρωση σκόνης βάσης Mo σε ανοξείδωτο χάλυβα 3041

(α) % κ.β. χημική σύσταση ζώνης κατεργασίας

(β) τιμές μικροσκληρότητας ως προς βάθος

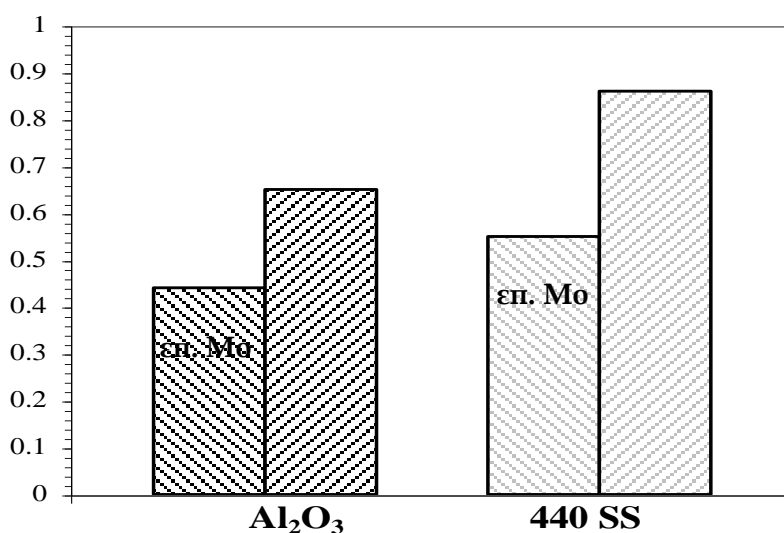
## B. Μελέτη μικροσκληρότητας

Το προφίλ της μικροσκληρότητας είναι ομοιόμορφο με σταθερές τιμές σε όλο το βάθος της ζώνης κατεργασίας, δεδομένης και της ομοιομοφίας στη μικροδομή και τη χημική σύσταση. Οι τιμές σκληρότητας της ζώνης κραμάτωσης που μετρήθηκαν, κυμαίνονται μεταξύ 350-400HV<sub>300p</sub> (Σχήμα V - 20 β), διπλάσιες μεν αυτών του ακατέργαστου υποστρώματος, αλλά σχετικά χαμηλές, σε σύγκριση με την κατεργασμένη επιφάνεια του χάλυβα St52.3. Αυτό οφείλεται στην παρατεταμένη κατεργασία και άρα διαλυτοποίηση της σκόνης, και την -αντίστοιχα- αργή απόψυξη, που συνεπάγεται η πιο βραδεία στερεοποίηση.

### Γ. Τριβολογική Μελέτη -Φθορά

Στην περίπτωση της δημιουργίας κραμάτωσης στην επιφάνεια του ανοξείδωτου χάλυβα SS304L με διαλυτοποίηση σκόνης βάσης Mo, η τριβολογική της συμπεριφορά εξετάστηκε ως προς δύο διαφορετικά ανταγωνιστικά υλικά : μία σφαίρα αλούμινας και ένα στυλίσκο από ανοξείδωτο χάλυβα 440 SS. Το δεύτερο αυτό, ανταγωνιστικό υλικό δοκιμάστηκε λόγω αφενός της πολύ συχνής βιβλιογραφικής εμφάνισης αυτού του τριβοσυστήματος, αφετέρου για λόγους συγκριτικής αξιολόγησης με άλλη εργασία της ερευνητικής ομάδας του ENT, όπου εξετάζεται η τριβολογική συμπεριφορά μίας APS επίστρωσης της ίδιας σκόνης στον ίδιο χάλυβα και ενός στυλίσκου από χάλυβα 440SS [10].

Ο συντελεστής τριβής της κραματωμένης επιφάνειας ως προς τη σφαίρα αλούμινας μειώνεται σε 0.42, από 0.6 της ακατέργαστης επιφάνειας, ενώ ο συντελεστής τριβής ως προς τον στυλίσκο, από την αρχική τιμή 0.86 της επιφάνειας του μη κατεργασμένου δοκιμίου μειώθηκε σε 0.45 -κατά μέσο όρο- όπως φαίνεται στο Σχήμα V-21.



Σχήμα V - 21 : Συντελεστής τριβής

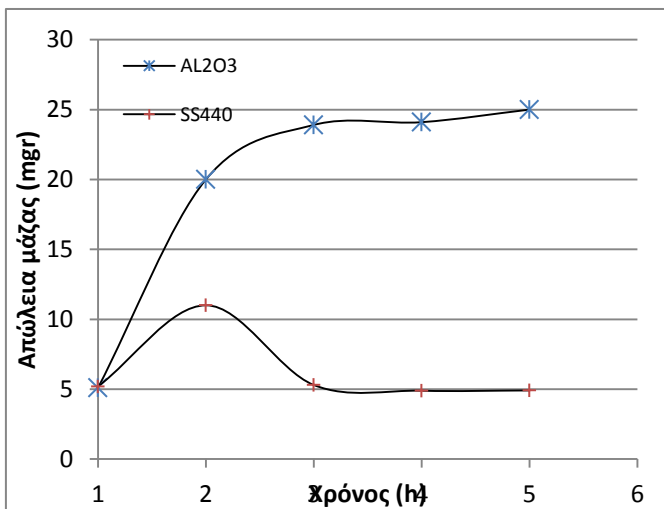
Κατά τη μέτρηση του συντελεστή τριβής της ηλιακά κατεργασμένης επιφάνειας παρατηρήθηκαν έντονες διακυμάνσεις στην τιμή του, οι οποίες, οφείλονται κύρια

στην παρεμβολή των αποβλήτων τριβής (debris), λόγω του μηχανισμού της εκτριβής (abrasion).

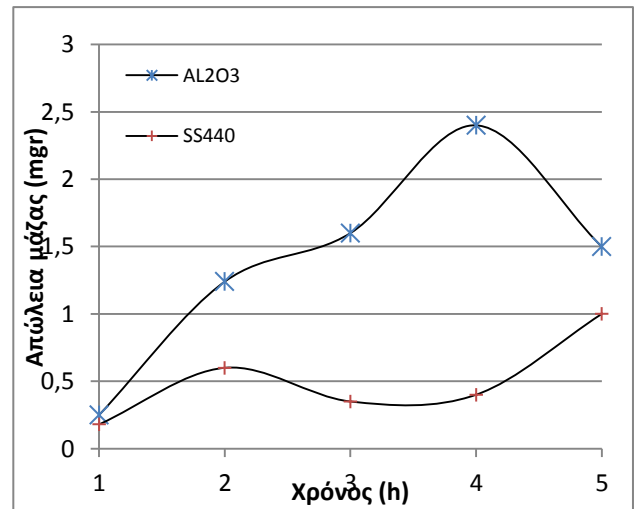
Όσον αφορά στα αποτελέσματα για την αντοχή στη φθορά της δημιουργούμενης κραματωμένης επιφάνειας ως προς τη σφαίρα αλούμινας και τον στυλίσκο από ανοξείδωτο χάλυβα, που έδειξαν οι ενδιάμεσες -σε τακτά διαστήματα της τριβομέτρησης- μετρήσεις του βάρους του δοκιμίου, είναι τα ακόλουθα :

Η αντίσταση στη φθορά της κατεργασμένης επιφάνειας ως προς τη σφαίρα αλούμινας μετρήθηκε βελτιωμένη κατά περίπου τρεις (3) φορές σε σχέση με αυτήν του ακατέργαστου δοκιμίου, ενώ η αντοχή στη φθορά ως προς τον στυλίσκο από ανοξείδωτο χάλυβα, βρέθηκε βελτιωμένη κατά περίπου επτά (7) φορές σε σχέση με αυτήν του ακατέργαστου δοκιμίου (Σχήμα V-22α).

Αντίστοιχα, η απώλεια μάζας του ανταγωνιστικού υλικού είναι πολύ μικρή, στην περίπτωση της μπάλας αλούμινας, και στην περίπτωση του ανοξείδωτου χάλυβα 440 SS, είναι ασήμαντη (Σχήμα V-22β).



(α)



(β)

Σχήμα V - 22 : Επίστρωση σκόνη βάσης Mo σε ανοξείδωτο χάλυβα SS304L

Σύγκριση με δύο διαφορετικά ανταγωνιστικά υλικά

(α) απώλεια μάζας δοκιμίου

(β) απώλεια μάζας ανταγωνιστικών υλικών

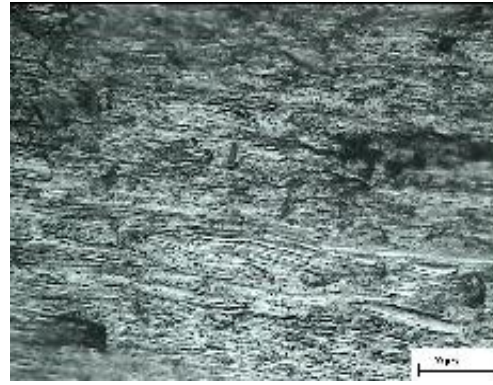
Μεταξύ των μηχανισμών φθοράς που έλαβαν χώρα και προκάλεσαν –συνεργιστικά– την απώλεια μάζας που προαναφέρθηκε, ο μηχανισμός της μικροάρρωσης (*microploughing*) φαίνεται ότι έδρασε έντονα, όπως αποδεικνύουν οι γραμμές που διαγράφουν ομόκεντρα το ίχνος της τριβής, και στις δύο περιπτώσεις (Σχήματα V-23α και γ), διαφορετικών ανταγωνιστικών υλικών. Ο μηχανισμός αυτός, προκαλείται από την κυκλική κίνηση και ταυτόχρονη συμπίεση από τα ανταγωνιστικά υλικά, των σκληρών σωματιδίων του αποβαλλόμενου υλικού.

Περαιτέρω εξέταση με οπτική μικροσκοπία των ιχνών ανέδειξαν κενά που έμειναν λόγω της αποκοπής αυτών των σωματιδίων (Σχήματα V-23 β και δ) που αποδεικνύουν δράση του μηχανισμού της αποκόλλησης (*delamination*), καθώς, και μικρορωγμές, που αποδεικνύουν την δράση μηχανισμού μικροκοπής (*microcutting*). Συνισταμένα δρώντας οι προαναφερθέντες μηχανισμοί δίνουν τον κύριο μηχανισμό της εκτριβής (*abrasion*), ο οποίος σε συνδυασμό με επακόλουθη πρόσφυση (*adhesion*) μέρους του αποβαλλόμενου υλικού - φαινόμενο που αντιστοιχεί σε μείωση του ρυθμού απώλειας μάζας, προιούσης της τριβομέτρησης - ολοκληρώνουν τη δράση του μικτού μηχανισμού εκτριβής - πρόσφυσης (*scuffing*), ο οποίος και σε αυτήν την περίπτωση είναι ο κυρίαρχος. Τέλος, οι πορτοκαλόχρωμες περιοχές που διακρίνονται σε σημεία στις πίστες τριβής, υποδηλώνουν δράση και του μηχανισμού τριβοχημικής φθοράς, ο οποίος και επιτείνει τη φθορά.





(α)



(β)



(γ)



(δ)

**Σχήμα V - 23 : Επίστρωση σκόνη βάσης Mo σε ανοξείδωτο χάλυβα SS304L  
(α), (β) οπτικές μικρογραφίες πίστας τριβής ως προς σφαίρα αλούμινας  
(γ), (δ) οπτικές μικρογραφίες πίστας τριβής ως προς τον στυλίσκο**

### V.1.2.3 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΣΚΟΝΗΣ ΒΑΣΗΣ Μολυβδαινίου

Στην περίπτωση της ηλιακής κατεργασίας δύο εντελώς διαφορετικών χαλύβων με σκόνη βάσης Μολυβδαινίου, προκειμένου να δημιουργηθεί επιφανειακή κραμάτωση, οι βέλτιστες δοκιμές είχαν ταυτόσημες τιμές πειραματικών παραμέτρων, οπότε η όποια διαφοροποίηση στα αποτελέσματα οφείλεται στις διαφορετικές ιδιότητες των υποστρωμάτων. Στον ακόλουθο Πίνακα V - 7 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της κατεργασίας των δύο χαλύβων:

**Πίνακας V - 7 : Συνοπτική παρουσίαση αποτελέσματος ηλιακής κατεργασίας χαλύβων με σκόνη βάσης Mo**

| Υπόστρωμα | $\lambda$ ΥΠ<br>(W/m K) | $\lambda$<br>ΣΚ<br>(W/m K) | Ποικν.<br>Εισερχ.<br>Ακτινοβ<br>ολίας<br>(W/m <sup>2</sup> ) | $t_{\text{ΟΛΙΚΟΣ}}$<br>(min) | $t_{\text{παραμ..}}$<br>(min) | $T_{\text{max}}$<br>(°C) | Βάθος<br>Ζώνης<br>(μm) | Χαρακτηριστικά Ζωνών Κατεργασίας  |
|-----------|-------------------------|----------------------------|--|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|---|
| St52.3    | 35-45                   | 138                        | 760  | 9                            | 6                             | 1300                     | 1100                   | Κυψελλοειδής μορφολογία, με διακριτές περιοχές ανάπτυξης δενδριτών, χωρίς πόρους ή ρωγμές<br>HV300p : 500     |
| SS304L    | 21.5                    |                            | 760  | 9                            | 6                             | 1300                     | 2300                   | Κυψελλοειδής μορφολογία, με διακριτές περιοχές ανάπτυξης δενδριτών, χωρίς πόρους ή ρωγμές<br>HV300p : 350-400 |

Συμπερασματικά λοιπόν, ισχύουν τα ακόλουθα :

#### V.1.2.3Σ1

Το μικρό πάχος των υποστρωμάτων (5mm) επιτρέπει την συντομότερη συνολική διάρκεια της κατεργασίας, η οποία διάρκεια αποδεικνύεται αρκετή ώστε να διασφαλιστεί η ομοιογένεια στη μικροδομή και στα άλλα χαρακτηριστικά της ζώνης κατεργασίας. Επιπλέον, ο μικρότερος όγκος των υποστρωμάτων επιτρέπει συμμετρική διάχυση της τηκόμενης σκόνης και στην επιφάνεια του υποστρώματος, η οποία είναι πιο έντονη στην περίπτωση του χάλυβα με τη μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα (St52.3).

V.1.2.3Σ2

Η σημαντικά μικρότερη τιμή θερμικής αγωγιμότητας του υποστρώματος, στην περίπτωση του ανοξείδωτου χάλυβα SS304L, επιτρέπει:

A. Παράταση του χρόνου στον οποίο η σκόνη παραμένει στην  $T_{max}$ , λόγω της μειωμένης αγωγής

B. Αύξηση του πάχους της ζώνης κατεργασίας

Γ. Πιο αργή απόψυξη και αντίστοιχα, αδρομερείς μικροδομές

Δ. Χαμηλότερες τιμές σκληρότητας

**V.1.3. Κεραμομεταλλική σκόνη (cermet) καρβιδίου του βολφραμίου (WC) με 17% Κοβάλτιο (Co) [2-4, 7,8]**

Στον ακόλουθο Πίνακα V - 8 παρατίθενται όλες οι τιμές των πειραματικών παραμέτρων των βέλτιστων δοκιμών -με Σ.Η.Ε.- διαλυτοποίησης προσαποτιθέμενης κεραμομεταλλικής σκόνης καρβιδίου του βολφραμίου με πρόσμιξη 17% κοβαλτίου, σε τρεις διαφορετικούς χάλυβες.

**Πίνακας V- 8 : Τιμές πειραματικών παραμέτρων δοκιμών κατεργασίας χαλύβων με σκόνη WC-17%Co (1mm)**

| Υπόστρωμα | Πάχος Δοκιμίων (mm) | Ποικν. Εισ. Ενέργειας (W/m <sup>2</sup> ) | Ολικός Χρόνος Κατεργασίας (min) | Χρόνος παραμονής σε T <sub>max</sub> (min) | T <sub>max</sub> (°C) |
|-----------|---------------------|---|---------------------------------|--|-----------------------|
| St52.3    | 35                  | 923                                       | 21                              | 13   | 1270                  |
|           |                     | 973                                       | 29                              | 20   | 1250                  |
| Ck60      | 30                  | 985                                       | 13                              | 3  | 1155                  |
|           |                     | 932                                       | 27                              | 19   | 1180                  |
| SS304L    | 5                   | 660                                       | 10                              | 6  | 1400                  |

Ειδικότερα, στην περίπτωση της κεραμομεταλλικής σκόνης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εξέταση των ακόλουθων δοκιμών:

- A. Δύο δοκίμια Χάλυβα St52.3 με διαφορετικούς χρόνους κατεργασίας
- B. Δύο δοκίμια Χάλυβα Ck60 με διαφορετικούς χρόνους κατεργασίας
- Γ. Ένα δοκίμιο Ανοξειδωτου χάλυβα SS304L

Σε όλα εναποτέθηκε κεραμομεταλλική σκόνη WC-17%Co, σε πάχος 1mm.

### V.1.3.1 Υπόστρωμα χάλυβα St52.3

#### A. Μελέτη Μικροδομής

Η μακροσκοπική παρατήρηση της επιφάνειας των κυλινδρικών δοκιμών St52.3 ( $\varnothing 50\text{mm}$ , ύψους 35mm) μετά την κατεργασία, έδειξε ότι η σκόνη και στις δύο περιπτώσεις, προσφύθηκε εξαιρετικά στο υπόστρωμα (Σχήματα V - 24 α και β), με σχετική υποχώρηση της επιφάνειας αυτού, και αναμενόμενα αυξημένη τιμή της τραχύτητας, της τάξης του  $Ra=2$ .



(α)

(β)

Σχήμα V - 24 : Επίστωση cermet σε χάλυβα St52.3

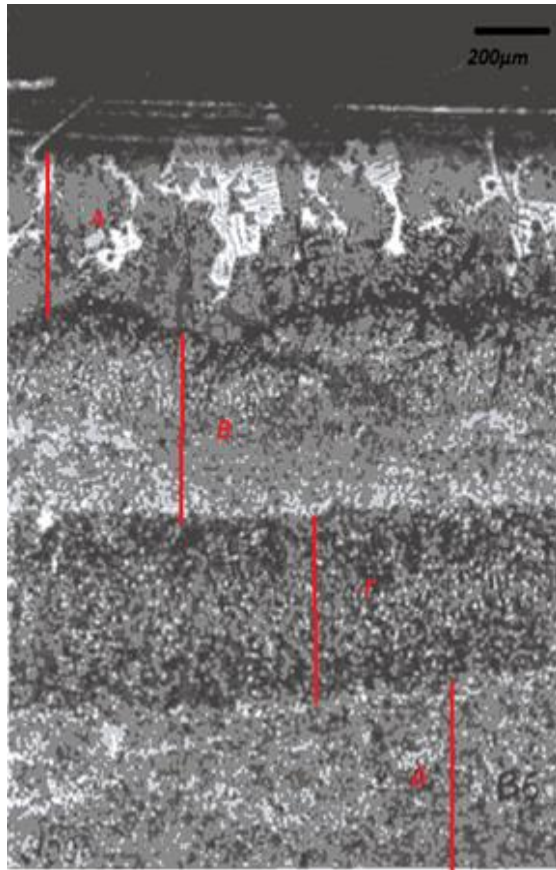
Μακρογραφίες της κατεργασμένης επιφάνειας

α) χρόνος κατεργασίας 20 min β) χρόνος κατεργασίας 29 min

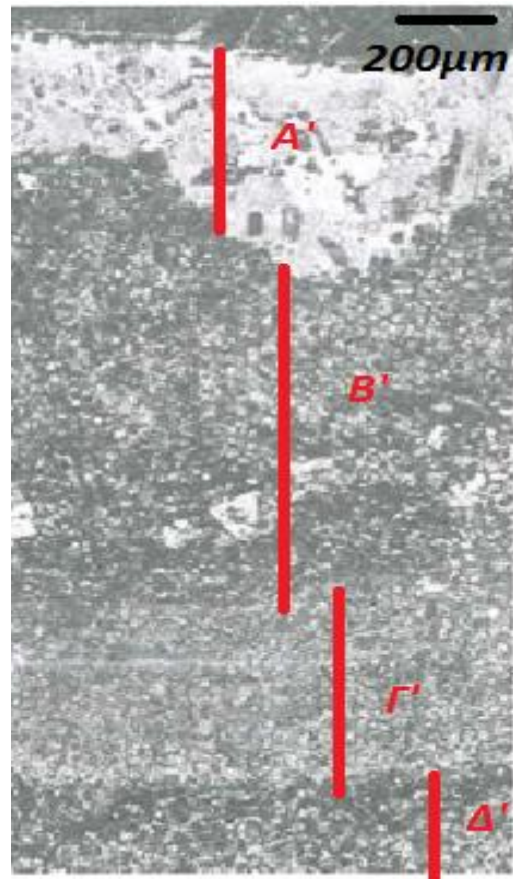
Κατά τη μικρογραφική εξέταση της τομής των κατεργασμένων επιφανειών των δύο δοκιμών χάλυβα St52.3 με την κεραμομεταλλική σκόνη WC+17%Co, διαπιστώθηκαν τα εξής :

Για χρόνο συνολικής κατεργασίας ίσο με  $t=21\text{min}$  και παραμονή στη μέγιστη θερμοκρασία  $T=1270^\circ\text{C}$  για 13min η κραματωμένη ζώνη φτάνει σε μέγιστο βάθος μέχρι  $1600\mu\text{m}$  (Σχήμα V-25 α), ενώ για μεγαλύτερο χρόνο κατεργασίας  $t=29\text{min}$  και αντίστοιχα μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στην ίδια τιμή μέγιστης θερμοκρασίας (20min,  $T=1250^\circ\text{C}$ ), το βάθος της ζώνης κατεργασίας ξεπερνά τα  $2400\mu\text{m}$  (Σχήμα V-25 β). Η ανάλυση με XRF, σε διάφορα σημεία της μαρτενσιτικής μήτρας κατά βάθος

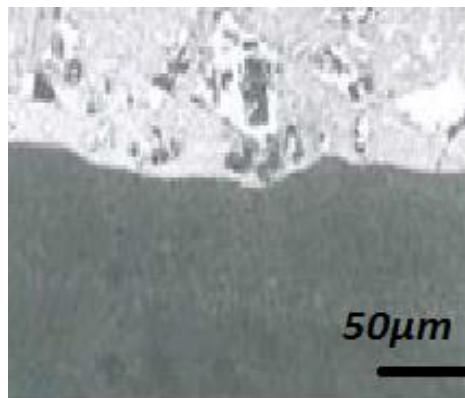
της ζώνης κατεργασίας έδωσε, και στις δύο περιπτώσεις μέση σύσταση (%κ.β) : 72.6 βολφράμιο (W), 16.4 κοβάλτιο (Co) και 11 σίδηρο (Fe), σύσταση που αντιστοιχεί σε κραμάτωση.



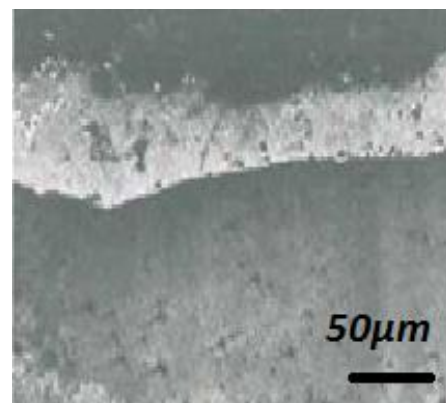
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήματα V-25 : Οπτικές μικρογραφίες επιστρώσης WC-17%Co σε St52.3

ζωνών κατεργασίας : (α)  $t= 21\text{min}$  (β)  $t= 29\text{min}$

υποζωνών : (γ) E και (δ) E'

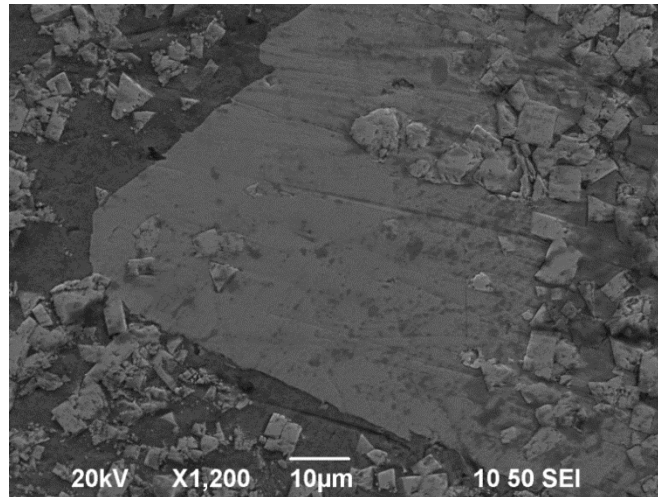
Και στις δύο περιπτώσεις διακρίνονται στα όρια των ζωνών κατεργασίας πέντε υποζώνες διαφορετικές μορφολογίας. Το εξαιρετικά ενδιαφέρον είναι ότι ενώ, τα σχετικά μεγέθη των υποζωνών και οι μικροδομές τους έχουν διαφορές, υπάρχει αντιστοιχία στην αλληλουχία τους, και για αυτόν τον λόγο, στη συνέχεια θα αναλυθούν παράλληλα.

Η ανώτερη υποζώνη Α (Σχήμα V-25α) στην περίπτωση του μικρότερου χρόνου κατεργασίας (21min), εκτείνεται σε βάθος 400μm και αποτελείται κύρια από συσσωματώσεις αδιάλυτων καρβιδίων, ενώ ρωγματώσεις διακρίνονται στα κατώτερα όρια της.

Η αντίστοιχη υποζώνη Α' (Σχήμα V-25β) για μεγαλύτερο χρόνο κατεργασίας 29min, έχει μέσο πάχος 350μm και εμφανίζει περιοχές λεπτόκοκκης μικροδομής που αντιστοιχούν σε κραμάτωση, σε όλη της την έκταση, με διακριτά μεμονωμένα αδιάλυτα καρβίδια, όχι μεγάλου μεγέθους.

Η επόμενη υποζώνη Β (κατεργασία για  $t=21\text{min}$ ) εκτείνεται σε μέσο βάθος 600μm είναι λεπτόκοκκης μαρτενιτικής μικροδομής, με μεγάλο αριθμό μικρών και μεσαίου μεγέθους μερικώς διαλυμένων-μικτών καρβιδίων, τα οποία δεν είναι ομοιογενώς κατανεμημένα στην υποζώνη. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται μεγαλύτερη συγκέντρωση τέτοιων στο κατώτερο τμήμα της.

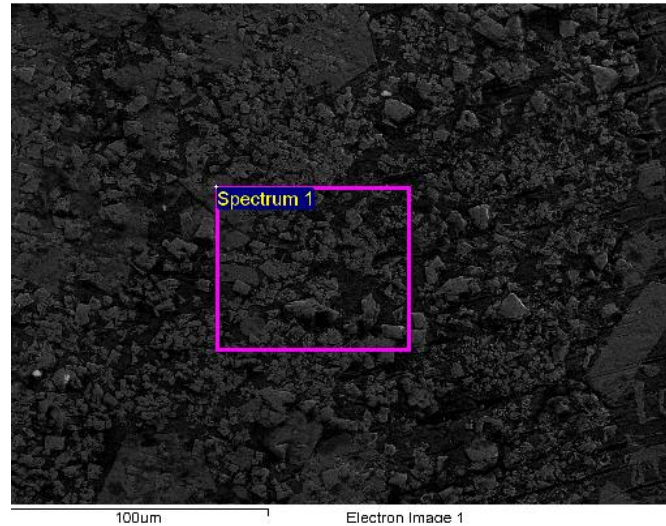
Στη περίπτωση του μεγαλύτερου χρόνου κατεργασίας, η αντίστοιχη υποζώνη Β' εκτείνεται σε μεγαλύτερο ακόμα βάθος (700μm), είναι λεπτόκοκκης μαρτενιτικής μικροδομής με ομοιόμορφη κατανομή πολύ μικρών μερικώς διαλυμένων καρβιδίων σε όλης της την έκταση, και μόνο στο κατώτερο τμήμα της υπάρχουν αδιάλυτα καρβίδια. Στο Σχήμα V-26 απεικονίζεται σημείο της κατώτερης υποζώνης Β', όπου μεγάλου μεγέθους αδιάλυτο καρβίδιο βρίσκεται ενδιάμεσως πολύ μικρών μερικώς διαλυμένων - μικτών καρβιδίων.



**Σχήμα V-26 : Επίστρωση WC-17Co σε St52.3  
SEM Αδιάλυτου καρβιδίου στην υποζώνη Β' (t=29min)**

Στην περίπτωση του μικρότερου χρόνου, η ακόλουθη υποζώνη Γ εκτείνεται σε βάθος 400µm και εμφανίζει ομοιόμορφη σε όλη της την έκταση κατανομή πολύ μικρών (μέσης  $\varnothing < 10\mu\text{m}$ ) μερικώς διαλυμένων καρβιδίων, σε διαμερισμό σε λεπτόκοκκη μήτρα μαρτενσιτικής μικροδομής (Σχήμα V-27). Η μέση χημική σύσταση της μήτρας (περιοχή οριοθετημένη, Σχήμα V-27) που προσδιορίστηκε μέσω EDS, είναι σε % κ.β. : Co 3.62, Fe 27, C 12.39 και W 53,7. Αποδεικνύεται έτσι, η διαλυτοποίηση των καρβιδίων σε ικανοποιητικό βαθμό, και ως εκ τούτου, η επίτευξη κραμάτωσης, προσδίδοντας αντίστοιχα, αύξηση της σκληρότητας.



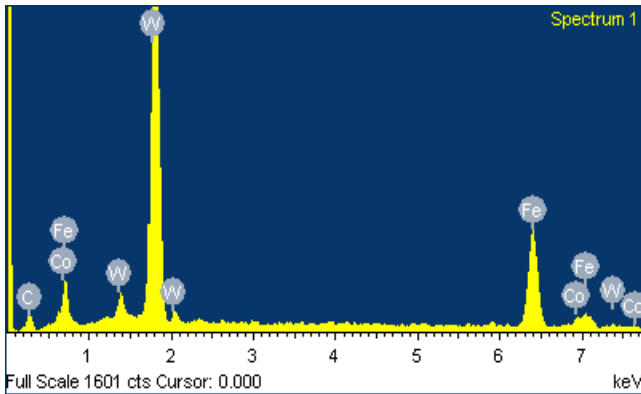
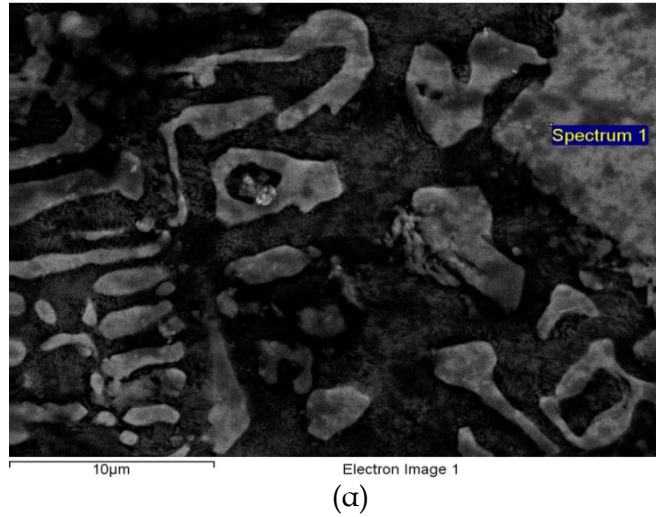


**Σχήμα V-27 : Επίστρωση WC-17Co σε St52.3**

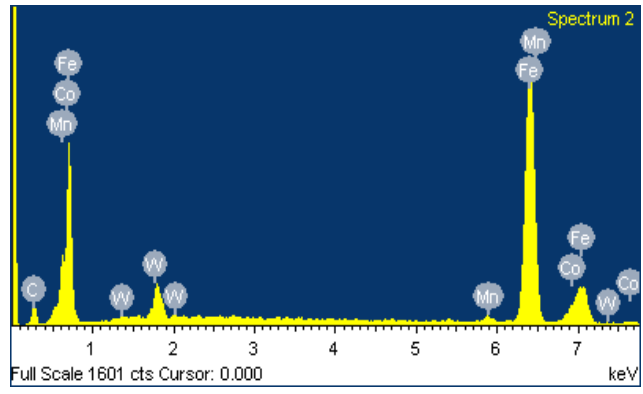
**SEM μικρογραφία σε περιοχή εκτενούς διαλυτοποίησης (υποζώνη Γ)**

Αντίστοιχα, η υποζώνη Γ' εκτείνεται σε ίδιο περίπου βάθος με την Γ, και εμφανίζει την ίδια μορφολογία της πυκνής κατανομής πολύ μικρών μερικώς διαλυμένων - μικτών καρβιδίων. Στο Σχήμα V-28 α απεικονίζεται καρβίδιο σε μεγάλο βαθμού διαλυτοποίηση και στα Σχήματα V-28 β και γ, απεικονίζονται αντίστοιχα τα EDS φάσματα της σύστασης του καρβιδίου και της μήτρας. Όπως προκύπτει από τα φάσματα, η σύσταση για το μικτό καρβίδιο είναι : (σε % κ.β.) C 6.07, W 69.97, Co 1.69 και Fe 22.27, ενώ για την ενδιάμεση περιοχή είναι : (σε % κ.β.) C 9.38, W 8.94, Co 5.18 και Fe 75.13 , σύσταση που πιστοποιεί την ομοιογενή κραμάτωση.

Στη συνέχεια οι υποζώνες Δ και Δ' έχουν το ίδιο βάθος, περί των 200µm και παρουσιάζουν, και οι δύο, την ίδια μικροδομή αντίστοιχα με τις υπόζωνες Β και Β'.



(β)



(γ)

### Σχήμα V-28: Επίστρωση WC-17Co σε St52.3

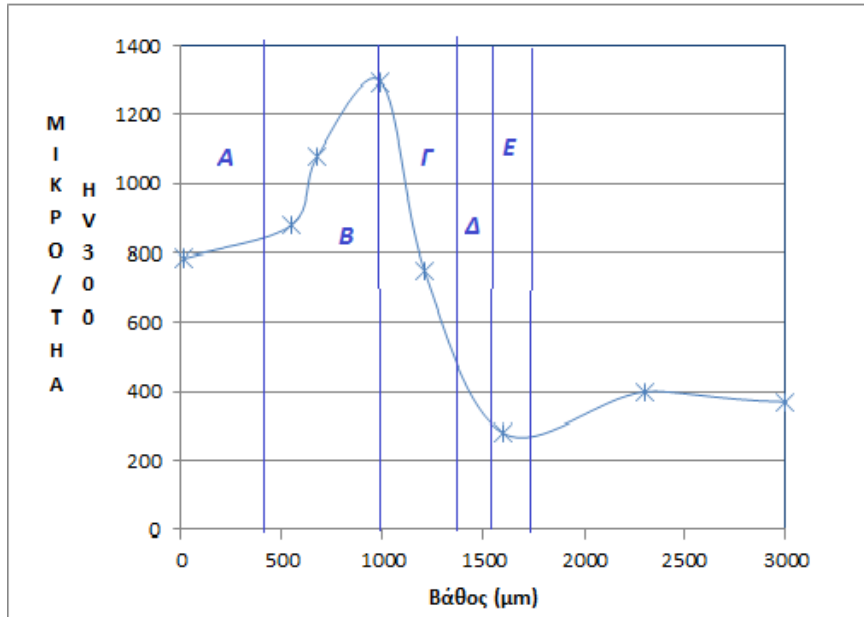
- (α) Μικτό Καρβίδιο σε μεγάλο βαθμό διαλυτοποίηση στην υποζώνη Γ'  
 (β) EDS στοιχειακό Φάσμα του καρβιδίου (γ) EDS στοιχειακό Φάσμα της μήτρας

Τέλος, όπως φαίνεται και από τα Σχήματα V-25 γ και δ, και στις δύο περιπτώσεις μεταξύ του υποστρώματος και της επίστρωσης παρεμβάλεται μία λεπτή υπόζωνη - που δεν ξεπερνά τα 200µm- λεπτόκοκκης μικροδομής, κυρίως μαρτενιτική, με υπολειπόμενο ωστενίτη και σε πολύ καλή συνάφεια με το υπόστρωμα. Η μόνη διαφορά μεταξύ των υποζωνών Ε και Ε', είναι ότι στην περίπτωση του πολύ μεγαλύτερου χρόνου κατεργασίας, και αντίστοιχα παραμονής στη μέγιστη θερμοκρασία, δεν υπάρχουν στην υποζώνη αυτή αδιάλυτα καρβίδια (Σχήμα V-26 δ). Η ηλιακή κατεργασία, όπως περιγράφηκε (Κεφ. IV, παρ. IV.2.1.2) πραγματοποιείται σε περιβάλλον αργού (σε πίεση 2bar) διασφαλίζοντας τη μη δημιουργία οξειδίων στη μήτρα. Επιπλέον, λόγω της μη επαρκώς υψηλής θερμοκρασίας, για επίτευξη σε

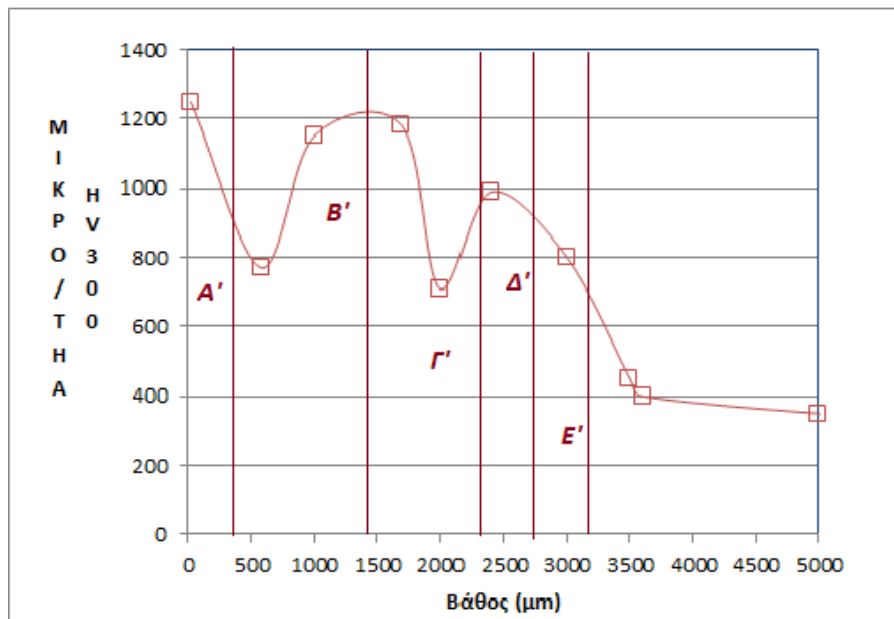
μεγάλο βαθμό απανθράκωσης του WC, δε διαχέεται ποσότητα άνθρακα στην τηγμένη ζώνη με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η δημιουργία της ψαθυρής φάσης  $W_2C$ , ακόμα και μεταλλικού W, όπως επίσης και της η -  $(Co_xW_yC_z)$  / άμορφης φάσης. Είναι γεγονός ότι όλες οι συμβατικές σκόνες περιέχουν τέτοιες ενώσεις, οπότε ο περιορισμός της περαιτέρω δημιουργίας τους-κατά τη θερμική κατεργασία- είναι επιβεβλημένος. Ειδικότερα, όσο μικρότερο είναι το ποσοστό των ενώσεων τύπου η -  $(Co_xW_yC_z)$ , τόσο μεγαλύτερη η δυσθραυστότητα και τόσο καλύτερη η τριβολογική συμπεριφορά των δημιουργούμενων επιστρώσεων. Επίσης, το σχετικά μεγάλο μέγεθος των σωματιδίων WC (όσο μικρότερο το μέγεθος τόσο μεγαλύτερη η αντιδρασιμότητα και άρα ευκολότερη η διαλυτοποίηση) στη σκόνη που χρησιμοποιείται εδώ, περιορίζει περαιτέρω τη δημιουργία η -  $(Co_xW_yC_z)$  / άμορφης φάσης [ 9]

### **B. Μελέτη Μικροσκληρότητας**

Η διαφορά στη μικροδομή των διαστρωματωμένων υποζωνών που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, καταγράφεται όπως ήταν αναμενόμενο και στις αντίστοιχες μετρήσεις μικροσκληρότητας και στις δύο περιπτώσεις. Στις ανώτερη υποζώνη οι μετρήσεις της μικροσκληρότητας σε περιοχή με αδιάλυτα καρβίδια είναι ιδιαίτερα υψηλές, της τάξης των 1300 HV<sub>300p</sub> (Σχήμα V- 29 α ), ενώ στην κραματωμένη μήτρα πέριξ των καρβιδίων, οι τιμές μειώνονται στα 700 HV<sub>300p</sub>. Στην περίπτωση όμως της εκτεταμένης κραματωμένης περιοχής Α' που λαμβάνουμε με τον μεγαλύτερο χρόνο κατεργασίας, οι τιμές διατηρούνται σταθερά υψηλές κατά μέσο όρο στα 1000 HV<sub>300p</sub>.



(α) t=21 min



(β) t=29 min

Σχήματα V - 29 (α) και (β) : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος επιστρώσης WC-17Co σε St52.3

Στην ακόλουθη υποζώνη Β ( $t=21\text{min}$ ), σε σημεία λεπτού διαμερισμού μερικώς διαλυμένων καρβιδίων, η τιμή της σκληρότητας ξεπερνά τα  $800\text{HV}_{300p}$ , ενώ στο κατώτερο τμήμα της που υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση καρβιδίων λαμβάνονται επίσης μεγάλες τιμές, όπως και στην περίπτωση της υποζώνης Α. Στην αντίστοιχη Β' ( $t=29\text{min}$ ), με τα ανομοιόμορφα διάσπαρτα καρβίδια μικρού μεγέθους, οι τιμές της μικροσκληρότητας κυμαίνονται περί των  $1000\text{HV}_{300p}$ .

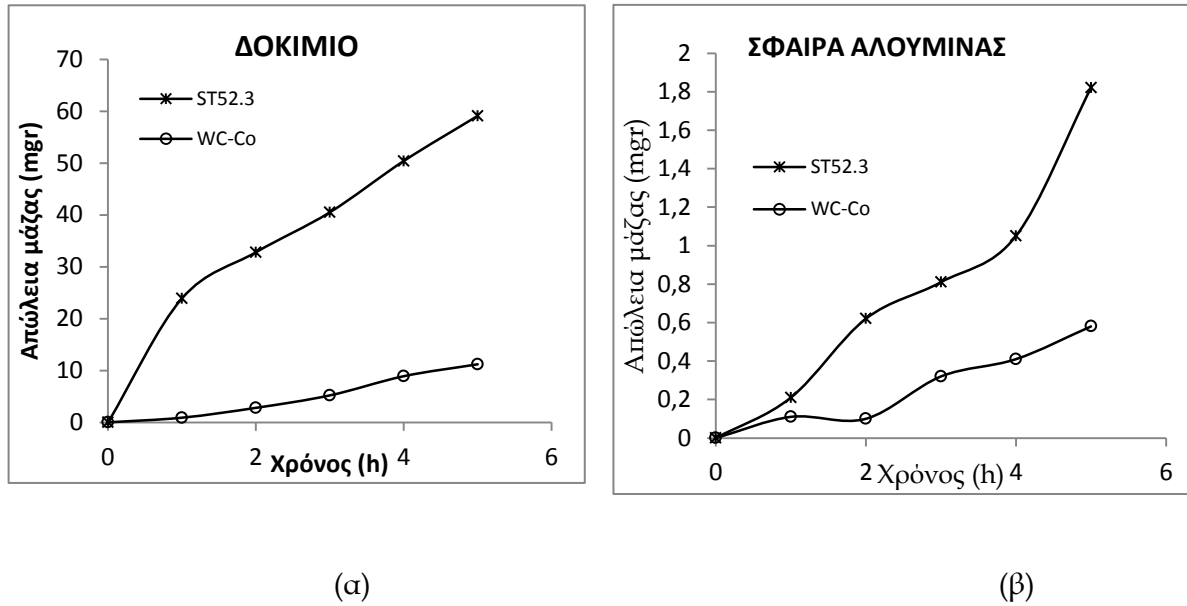
Στην υποζώνη Γ, αλλά και στη Γ', που έχουν την ίδια μορφολογία, η εκτεταμένη διαλυτοποίηση των καρβιδίων δίνει τιμές, και στις δύο περιπτώσεις, της τάξης των  $800\text{HV}_{300p}$ .

Στις υποζώνες Δ και Δ' η τιμή της μικροσκληρότητας φτάνει τα  $900\text{HV}_{300p}$ , ενώ στις λευκές λεπτόκοκκης μορφολογίας υποζώνες Ε και Ε' οι τιμές της μικροσκληρότητας πέφτουν στα  $400\text{HV}_{300p}$  και λιγότερο (Σχήματα V-29 α και β), όταν οι μετρήσεις γίνονται σε περιοχές της μήτρας μακριά από τα αδιάλυτα καρβίδια (Σχήμα V-25γ), δεδομένου ότι πλησιάζοντας στο υπόστρωμα αυξάνει και η περιεκτικότητα σε Fe

### Γ. Τριβολογική συμπεριφορά - Φθορά

Η μέτρηση του συντελεστή τριβής της κατεργασμένης επιφάνειας - του δοκιμίου με τον μεγαλύτερο χρόνο κατεργασίας- ως προς ανταγωνιστικό υλικό τη σφαίρα αλούμινας, δίνει τιμή συντελεστή τριβής 0.47, δηλαδή 45% μειωμένο σε σχέση με την αρχική τιμή, της ακατέργαστης επιφάνειας του χάλυβα (0.7).

Η απώλεια μάζας της κραματωμένης επιφάνειας κατά τη διάρκεια της τριβομέτρησης, ως προς τη σφαίρα αλούμινας, είναι περίπου πέντε (5) φορές μικρότερη από την αντίστοιχη απώλεια μάζας της ακατέργαστης επιφάνειας του υποστρώματος (Σχήμα V-30α). Όσον αφορά στην απώλεια μάζας του ανταγωνιστικού υλικού, το ποσοστό απώλειας του κατά την τριβή του με την κραματωμένη επιφάνεια είναι κατά 50% μειωμένο, συγκρινόμενο με την φθορά του ως προς το ακατέργαστο (Σχήμα V-30β), προφανώς λόγω επακόλουθης πρόσφυσης των αποβλήτων της τριβής (debris) στην επιφάνεια της σφαίρας.

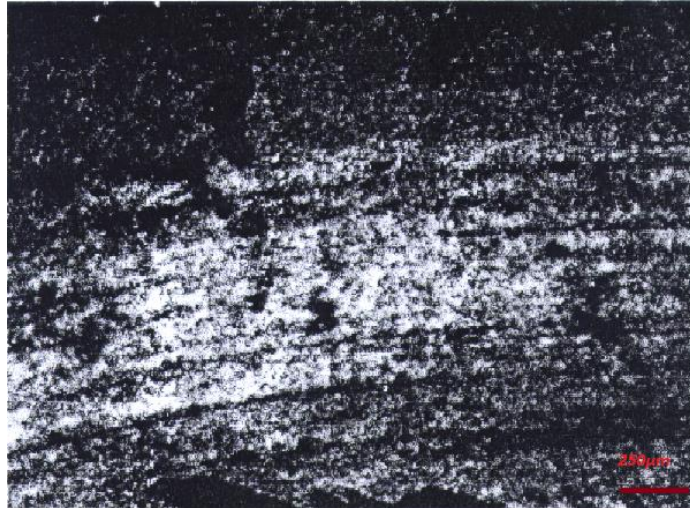


Σχήμα V -30 : Επίστρωση WC-17%Co σε χάλυβα St52.3

α. Απώλεια μάζας δοκιμίου ως προς χρόνο

β. Απώλεια μάζας ανταγωνιστικού υλικού ως προς χρόνο

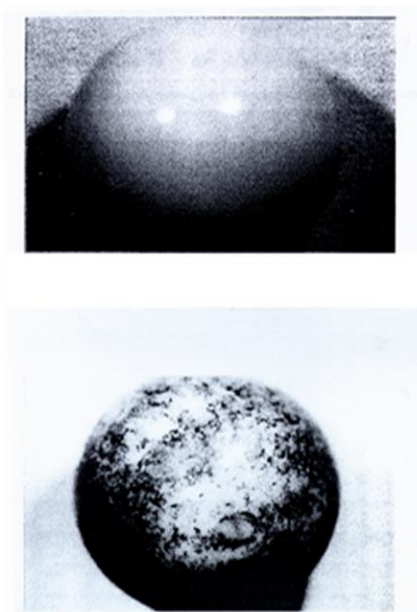
Η παρατήρηση της εξέλιξης της διαδικασίας αποβολής υλικού κατά τη διάρκεια της μέτρησης της απώλειας μάζας, αλλά και η οπτική παρατήρηση της πίεσης τριβής μετά το πέρας της διαδικασίας, ανέδειξε ως κύριο μηχανισμό φθοράς την εκτριβή και τη μικροάρρωση (Σχήμα V - 31). Η παρουσία μικρορωγμών, απόρροια του μηχανισμού φθοράς λόγω κόπωσης, και άλλων κενών λόγω της αποβολής/απομάκρυνσης αδιάλυτων καρβιδίων (*spalling*), προκαλεί, προόδου της διαδικασίας της τριβής, και υπό το βάρος των 10N, θραύση και μικροκοπή.



**Σχήμα V - 31 : Επίστρωση WC-17%Co σε χάλυβα St52.3**

**Οπτική μικρογραφία πίστας τριβής**

Συγχρόνως όμως, υπό την επίδραση του μηχανισμού πρόσφυσης (adhesion) προσφύονται κάποια από τα απόβλητα της τριβής στην πίστα της τριβής, στην κραματωμένη επιφάνεια. Έτσι, και σε αυτήν την περίπτωση ο κυρίαρχος μηχανισμός φθοράς είναι ο συνδυασμός εκτριβής και πρόσφυσης (scuffing). Η πρόσφυση όμως ως μηχανισμός, δρα και στην επιφάνεια της σφαίρας αλούμινας (Σχήμα V-32), ιδιαίτερα έντονα, όπως γίνεται αντιληπτό στο τέλος της δοκιμής.



**Σχήμα V - 32 : Επίστρωση WC-17%Co σε χάλυβα St52.3**

**Σφαίρα αλούμινας : πριν και μετά**

### V.1.3.2 Υπόστρωμα Χάλυβα Ck60

#### A. Μελέτη Μικροδομής

Και σε αυτήν την περίπτωση η μακροσκοπική εξέταση, των δύο κατεργασμένων - υπό τις ακόλουθες διαφορετικές συνθήκες Πίνακας V-9 -δοκιμίων έδειξε πλήρη πρόσφυση της σκόνης στην επιφάνεια του υποστρώματος και σύγχρονη υποχώρηση της επιφάνειας του υποστρώματος, η οποία υποχώρηση είναι σαφώς εντονότερη στο δοκίμιο που κατεργάστηκε για μεγαλύτερο χρόνο (Σχήμα V-33α).

**Πίνακας V- 9 : Τιμές πειραματικών παραμέτρων δοκιμών κατεργασίας Ck60 με σκόνη WC-17%Co**

| Υπόστρωμα | Πάχος<br>Δοκιμίων<br>(mm) | Πυκν. Εισ.<br>Ενέργειας (W/m <sup>2</sup> ) | Ολικός<br>Χρόνος<br>Κατεργασίας<br>(min) | Χρόνος<br>παραμονής σε<br>T <sub>max</sub><br>(min) | T <sub>max</sub> (°C) |
|-----------|---------------------------|---|--|---|-----------------------|
| Ck60      | 30                        | 985   | 13                                       | 3   | 1155                  |
|           |                           | 932   | 27                                       | 19  | 1180                  |

Όπως ήταν αναμενόμενο η κατεργασία και στις δύο περιπτώσεις οδήγησε σε αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας μετά την κατεργασία (Ra=1.9, Σχήμα V - 33 α και β), η οποία τραχύτητα είναι λιαν αυξημένη στα όρια του ίχνους της κατεργασίας.



(α)



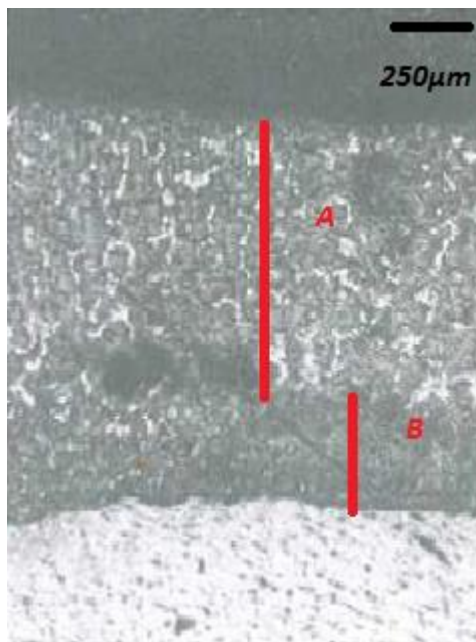
(β)

**Σχήμα V - 33 : Μακρογραφίες επιστρώσης WC-17%Co σε χάλυβα Ck60 για χρόνο κατεργασίας (α) 13min (β) 27min**

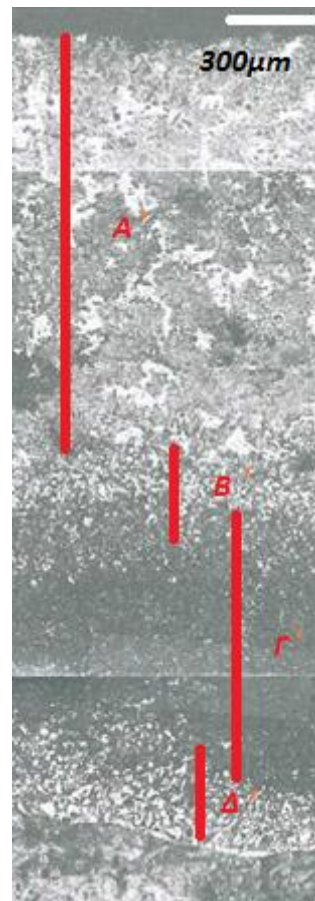


Η επακόλουθη μικρογραφική εξέταση της τομής των κατεργασμένων επιφανειών των δύο δοκιμίων, ανέδειξε και στις δύο περιπτώσεις, ζώνες κραμάτωσης, οι οποίες εκτείνονται σε μεγάλο βάθος και διαστρωματώνονται σε υποζώνες διαφορετικών μορφολογιών και παχών, αλλά αντίστοιχης αλληλουχίας.

Στην περίπτωση της κατεργασίας για 13min και παραμονή στην μέγιστη θερμοκρασία μόλις 3min (Σχήμα V-34 α), η ζώνη κατεργασίας, εκτείνεται σε βάθος 1500μm και σε ένα πρώτο επίπεδο παρατήρησης, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από μόνο δύο διαφορετικές υποζώνες: η πρώτη υποζώνη Α, η οποία καταλαμβάνει τα  $\frac{3}{4}$  και πλέον, του συνόλου της ζώνης, περί τα 1200μm, δείχνει να έχει τηχθεί ελάχιστα και κατ' επέκταση διατηρεί αδιαλυτοποιημένα, μεγάλο αριθμό καρβιδίων, τα οποία συσσωματώνονται σε ομοιόμορφα μοτίβα μέσα στην υποζώνη, προφανώς, όπως ομοιόμορφα βρίσκονταν στην αρχική σκόνη.



(α)



(β)

**Σχήμα V - 34 : Οπτικές Μικρογραφίες επιστρώσης WC-17%Co σε χάλυβα Ck60 για χρόνο κατεργασίας (α) 13min και (β) 27min**

Η δεύτερη υποζώνη Β, (βάθους μέχρι 350 $\mu\text{m}$ , Σχήμα V-34α), που βρίσκεται σε επαφή με το υπόστρωμα είναι εκείνη στην οποία έχει επιτευχθεί διαλυτοποίηση σε πολύ μεγάλο βαθμό, και αποτελείται από πολύ μικρά μερικώς διαλυμένα καρβίδια σε λεπτό διαμερισμό και ομοιόμορφα κατανεμημένα στα όρια της ζώνης. Χαρακτηριστικό στην περίπτωση αυτή είναι ότι η δεύτερη αυτή υποζώνη προσφύεται άμεσα στο υπόστρωμα, με πολύ καλή συνάφεια. Χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα V-35, λεπτομέρεια, στο κατώτερο τμήμα της υποζώνης Β, με αδιάλυτα καρβίδια.

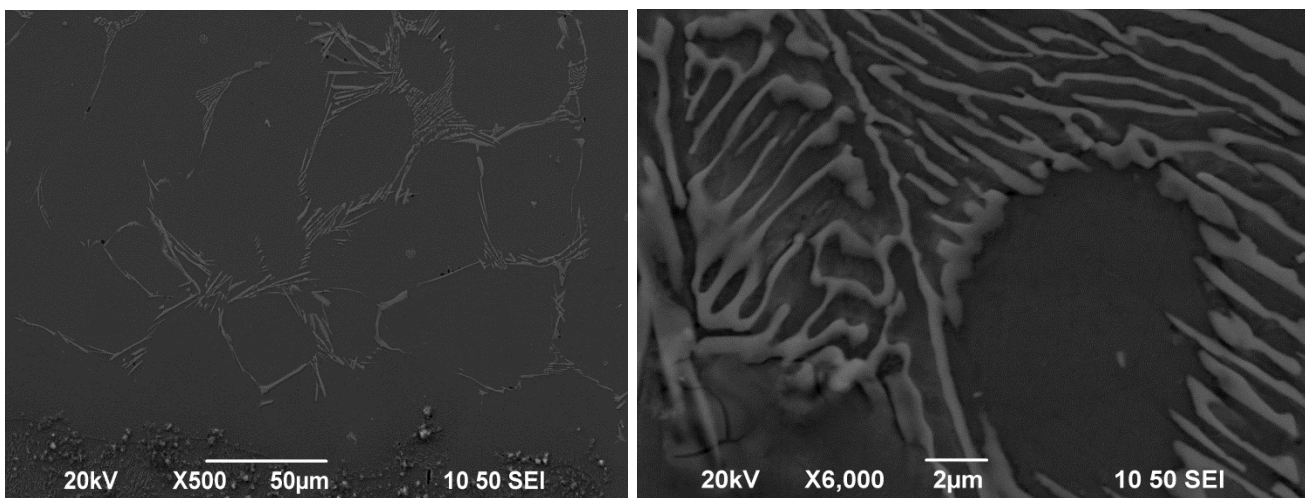


**Σχήμα V-35 : Λεπτομέρεια κοντά στη διεπιφάνεια επιστρώσης WC-17Co και χάλυβα St52.3 για χρόνο κατεργασίας  $t=13\text{min}$**

Η πολύ μικρή τιμή θερμικής διαχυτότητας ( $0.003\text{m}^2/\text{s}$ ), σε συνδυασμό με τη μεγάλη πυκνότητα της σκόνης, και τον πολύ μικρό χρόνο κατεργασίας οδηγεί στην απορρόφηση μικρού ποσού θερμότητας, στην ανώτερη υποζώνη, με αποτέλεσμα να παραμένει αυτός ο μεγάλος αριθμός μεγάλων αδιάλυτων καρβιδίων. Η επαφή όμως των κατώτερων ζωνών με το πολύ θερμό υπόστρωμα, λόγω του μεγάλου του όγκου και θερμικής αγωγιμότητας -τα θερμοστοιχεία στην κάτω επιφάνεια του έδειχναν ένδειξη θερμοκρασίας  $1350^\circ\text{C}$  για  $3\text{min}$ , τουλάχιστον- διασφαλίζει μεγαλύτερη διαλυτοποίηση της σκόνης στην περιοχή αυτή.

Η κατεργασία του ίδιου συνδυασμού υλικών για διπλάσιο χρόνο κατεργασίας και παραμονή στη μέγιστη θερμοκρασία για 19min, οδηγεί προφανώς, σε πολύ μεγαλύτερο βάθος -ξεπερνά τα 3000μm, Σχήμα V-34 β- και δίνει ζώνη κατεργασίας διαστρωματωμένη σε πέντε (5) διακριτές υποζώνες.

Η ανώτερη υποζώνη Α', εκτείνεται σε μέσο βάθος 1200μm και εμφανίζει παρόμοια μορφολογία με την ανώτερη υποζώνη του μικρού χρόνου κατεργασίας, αλλά με σαφώς αραιότερες συσσωματώσεις αδιάλυτων καρβιδίων, που υποδηλώνει την επίτευξη διαλυτοποίησης σε μεγαλύτερο βαθμό.



(α)

(β)

**Σχήματα V-36- α και β :**

**(α) SEM μικρογραφία σημείο υποζώνης Γ' (β) SEM μικτού καρβιδίου**

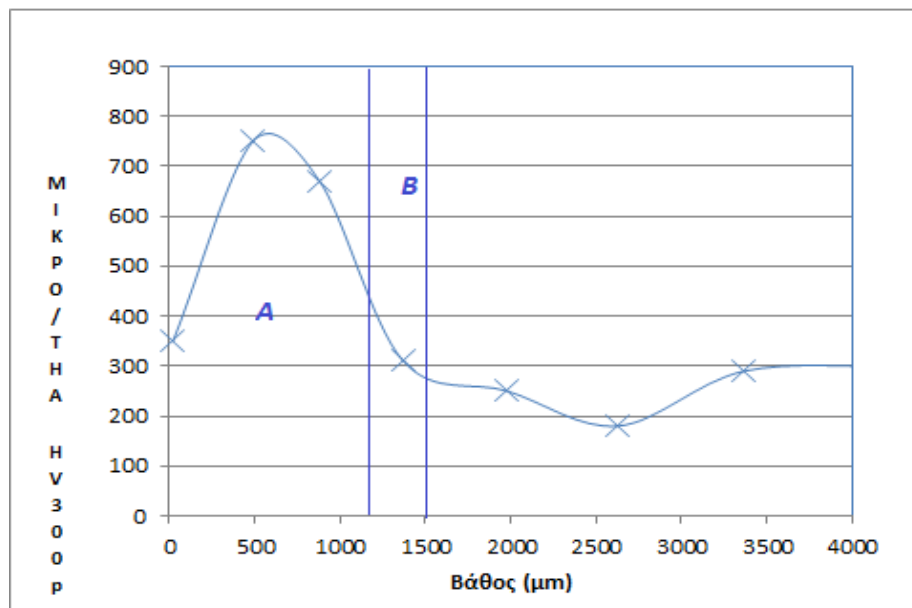
Ακολουθεί η υποζώνη Β', πάχους μόλις 350-400μm η οποία, παρουσιάζει λεπτόκοκκη, μαρτενιτικής δομής μήτρα, ενδιάμεσως της οποίας βρίσκονται σε πολύ πυκνή διασπορά πολύ μικρά μέρη μερικώς διαλυμένων καρβιδίων, ομοιόμορφα κατανεμημένα. Η ζώνη αυτή, μαζί με την υποζώνη Δ', με την οποία παρουσιάζουν την ίδια ακριβώς μικροδομή, πλαισιώνουν την υποζώνη Γ', η οποία τόσο μικροδομικά όσο και ως σύσταση θεωρείται η βέλτιστη. Συγκεκριμένα, η υποζώνη Γ', πάχους που φτάνει τα 800μm είναι λεπτόκοκκης και ομοιογενούς μικροδομής, στην οποία υπάρχει εκτενέστατη διαλυτοποίηση των καρβιδίων (Σχήμα V-36α) και τα εναπομείναντα μικτά καρβίδια είναι πολύ μικρών διαστάσεων (Σχήμα V-36β) και κατανέμονται ομοιόμορφα στα όρια της υποζώνης. EDS ανάλυση που έγινε σε σημείο στην περιοχή περίξ του καρβιδίου έδωσε συγκέντρωση W 5% κ.β., Fe 73%κ.β. και Co 5.1%. Η σύσταση αυτή αποδεικνύει την επίτευξη κραμάτωσης, καθώς και τον

εμπλουτισμό της μήτρας με Κοβάλτιο (Co) το οποίο προσδίδει δυσθραυστότητα. Τέλος, η υποζώνη Ε' είναι μία χαρακτηριστική λευκή ζώνη, εξαιρετικά λεπτή (πάχους <math><50\mu\text{m}</math>) στην περίπτωση αυτή, λειπόκοκκη και σε άριστη συνάφεια με το υπόστρωμα.

### Β. Μελέτη μικροσκληρότητας

Η μικροσκληρότητα που μετρήθηκε σε διαφορετικά σημεία κατά βάθος της ζώνης κραμάτωσης, είναι ανάλογη της μικροδομής και της χημικής σύστασης στις διαφορετικές υποζώνες, όπως αυτές περιγράφηκαν ανωτέρω, και στις δύο περιπτώσεις.

Έτσι, η μέτρηση της μικροσκληρότητας στην περίπτωση της κατεργασίας στην περίπτωση του μικρού χρόνου ( $t=13\text{min}$ ), στην υποζώνη Α, έδωσε τιμές χαμηλότερες των  $800\text{HV}_{300\text{p}}$ , οι οποίες προφανώς αντιστοιχούν σε σημεία κοντά σε αδιάλυτα καρβίδια, ενώ ενδιάμεσως, στο υπόλοιπο μέρος της ζώνης, η τιμή κυμάνθηκε κάτω των  $400\text{HV}_{300\text{p}}$ , τιμή που αντιστοιχεί σε περιορισμένη κραμάτωση (Σχήμα V-37).



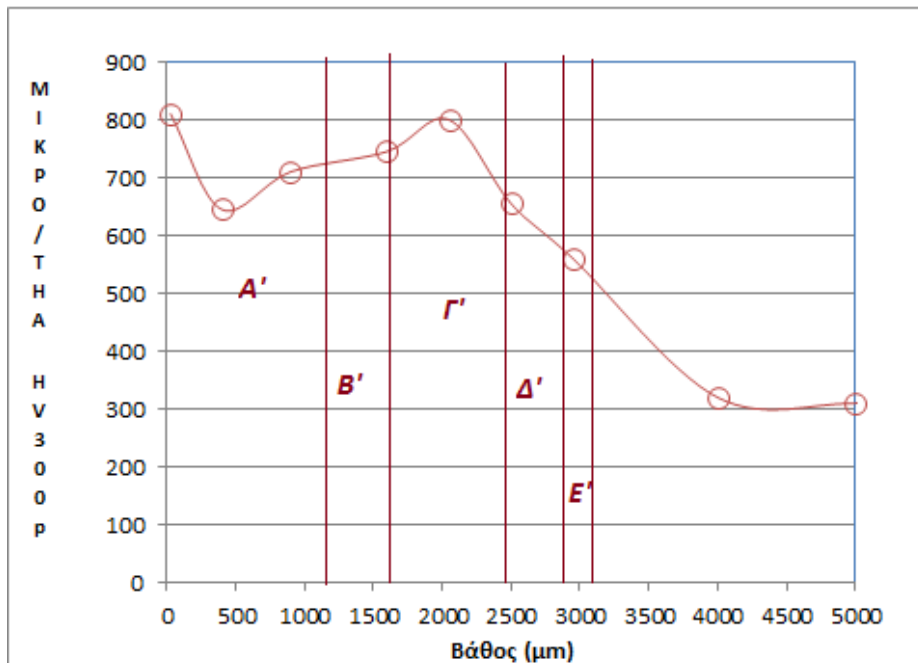
Σχήμα V - 37 : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος για  $t=13\text{min}$

Στην επόμενη υποζώνη Β η μικροσκληρότητα μετρήθηκε εξίσου σε χαμηλές τιμές, μικρότερες των  $400\text{HV}_{300\text{p}}$ , γεγονός που δείχνει την παρατεταμένη διαλυτοποίησης ζώνης αυτής, η οποία πλαισιωμένη από τη μη διαλυτοποιημένη σκόνη και το πολύ

θερμό υπόστρωμα, οπότε αυτή στερεοποιήθηκε αργά και έτσι, έχει αντίστοιχα χαμηλή σκληρότητα.

Όσον αφορά τη μικροσκληρότητα της λαμβανομένης ζώνης κατεργασίας για μεγάλο χρόνο κατεργασίας (Σχήμα V-38), αυτή διαφέρει ανά υποζώνη, και είναι ανάλογη της μικροδομής και της σύστασης της κάθε μίας. Έτσι, στην υποζώνη Α' η σκληρότητα κοντά σε αδιάλυτο καρβίδιο έχει τιμή της τάξης των 800 HV<sub>300p</sub> (όπως και για τον μικρό χρόνο, t=13min), ενώ η μέτρηση στην περιβάουσα μήτρα είναι της τάξης των 650-700 HV<sub>300p</sub>, δεδομένου ότι σε αυτήν την περίπτωση υπήρξε κάποιου βαθμού διαλυτοποίηση και άρα κραμάτωση.

Στην υποζώνη Β' οι τιμές αυξάνονται στα 750 HV<sub>300p</sub>, επίσης αναμενόμενο αφού πρόκειται για περιοχή ομοιογενώς διασκορπισμένων μερικώς διαλυμένων καρβιδίων. Η υποζώνη Γ' με τη βέλτιστη μικροδομή, δίνει υψηλές τιμές σκληρότητας που αντιστοιχούν σε μικροδομή με πυκνή διασπορά πολύ μικρών διαλυτοποιημένων μικτών καρβιδίων (Σχήμα V-36β). Πλησιάζοντας προς το υπόστρωμα και στην υποζώνη Δ', η οποία παρουσιάζει μικροδομή παρόμοια της Β', η μικροσκληρότητα κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα, με τάση μείωσης, δεδομένου ότι αυξάνει η περιεκτικότητα σε Fe στην κραματωμένη περιοχή.

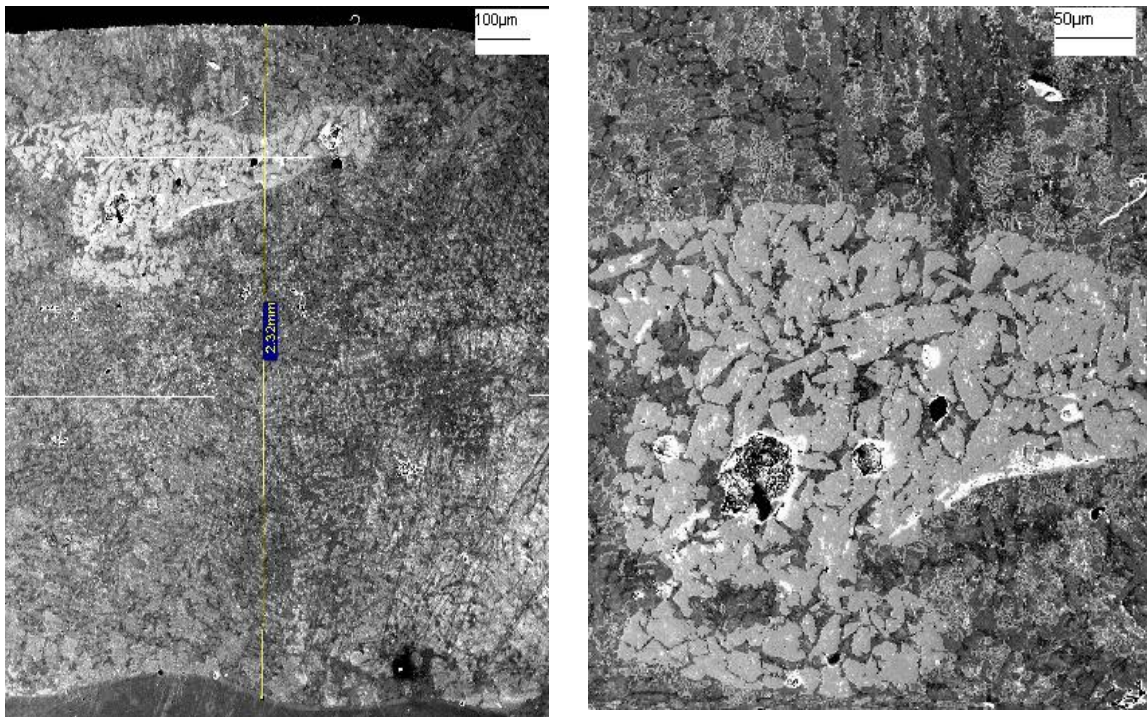


Σχήμα V - 38 : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος για t=27min

### V.1.3.3 Υπόστρωμα ανοξειδωτου χάλυβα SS304L [11]

#### A. Μελέτη μικροδομής

Η κατεργασία του λεπτού δοκιμίου (πάχους 5mm) του ανοξειδωτου χάλυβα 304L με προαπόθεση σκόνης WC-17%Co σε πάχος 1mm, για παραμονή 6 min σε θερμοκρασία 1400°C, οδηγεί στη δημιουργία ζώνης κραμάτωσης η οποία εκτείνεται σε μεγάλο βάθος, της τάξης των 2300μm. Η μικροδομή της ζώνης κατεργασίας μπορεί να θεωρηθεί γενικά ομοιογενής, με μερικώς διαλυμένα και αδιάλυτα καρβίδια, σε πολύ λεπτό διαμερισμό, πυκνότερο ή αραιότερο, σε σημεία. (Σχήμα V - 39 α). Η μόνη μεγάλη διακριτή ασυνέχεια της ομοιογενούς μικροδομής, είναι η συσσώρευση σε σημείο που απέχει 300μm από την επιφάνεια, μεγάλου αριθμού αδιάλυτων, ως επι το πολύ καρβιδίων (Σχήμα V -39 β).



Σχήμα V - 39 : Επίστρωση cermet σε SS304L

SEM μικρογραφίες (α) της τομής της κατεργασμένης επιφάνειας  
(β) μικτά καρβίδια μερικώς διαλυμένα και αδιάλυτα

Η ενδελεχέστερη μελέτη της περιοχής συσσώρευσης, με χημική ανάλυση EDS-SEM επάνω σε καρβίδια, ανέδειξε την ύπαρξη καρβιδίων σε διαφορετικό βαθμό διαλυτοποίησης. Τα καρβίδια αυτά μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις τύπους

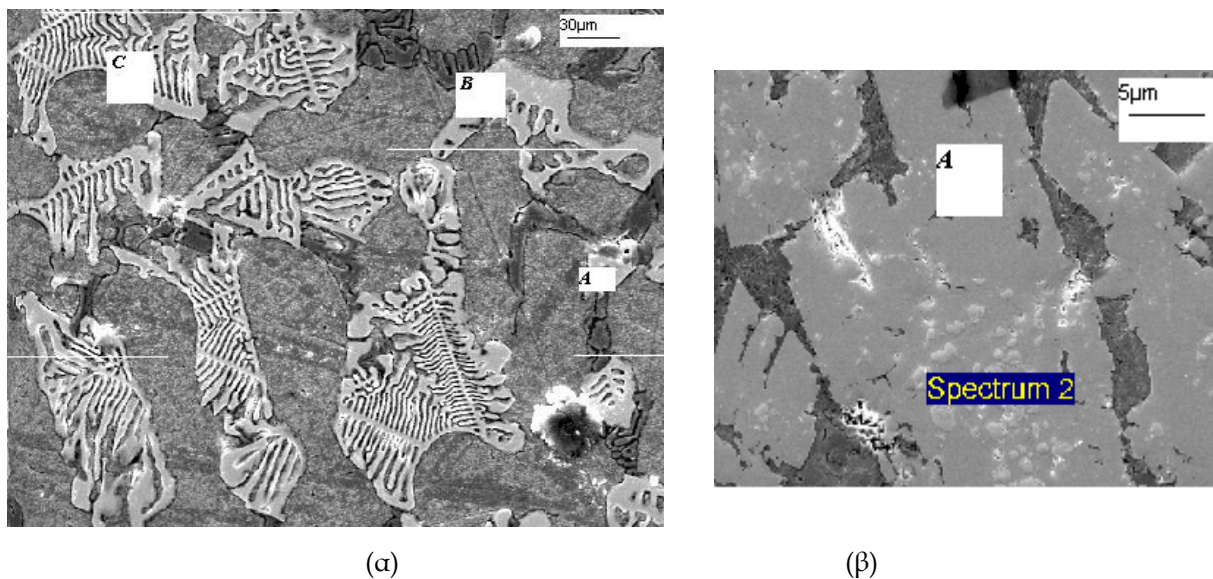
(τύποι Α, Β και C). Ο κάθε τύπος θεωρείται «ενδιάμεσο προϊόν» της αντίστοιχης φάσης της διαλυτοποίησης

Στον Πίνακα V - 10 παρουσιάζεται η χημική σύσταση του κάθε τύπου. Ειδικότερα, η διαλυτοποίηση των καρβιδίων WC αποδεικνύεται να είναι προοδευτική και για κάθε στάδιο όλα τα ενδιάμεσα προϊόντα-φάσεις της διαλυτοποίησης είναι παρόντα στη ζώνη κατεργασίας. Ανάλογα με την βαθμίδα θερμοκρασίας που αναπτύσσεται τοπικά, δημιουργούνται περιοχές με μικρή ή μεγάλη συγκέντρωση καρβιδίων. Έτσι, υπάρχουν αδιάλυτα καρβίδια (τύπος Α, Σχήματα V 40 α και β), μερικώς διαλυμένα (τύπος Β) και μικτά καρβίδια (τύπος C).

**Πίνακας V - 10 : Χημική σύσταση σε σημεία της ζώνης κατεργασίας (% κ.β.)**

|  | Περιοχή | W  | C   | Co  | Fe | Cr  | Ni  |
|--|---------|----|-----|-----|----|-----|-----|
| <b>Μήτρα</b>                                     |         | 13 | 7   | 5.5 | 60 | 8.5 | 7   |
| <b>Αδιάλυτα<br/>καρβίδια WC</b>                  | A       | 82 | 16  | -   | -  | -   | -   |
| <b>Μερικώς<br/>Διαλυμένα-<br/>Μικτά καρβίδια</b> | B       | 70 | 7.5 | 5   | 11 | 5   | 1.5 |
| <b>Μικτά καρβίδια</b>                            | C       | 64 | 5   | 4   | 17 | 7   | 3   |

Όπως φαίνεται και από τις συστάσεις των καρβιδίων, η συγκέντρωση Βολφραμίου (W) μειώνεται κατά τη σταδιακή διαλυτοποίηση, από τον τύπο Α στον τύπο C των καρβιδίων, όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ η συγκέντρωση του σιδήρου Fe, αντίστοιχα αυξάνεται στην περιοχή πέριξ των καρβιδίων. Αφού ολοκληρωθεί η διαλυτοποίηση, αλλά και η επακόλουθη στερεοποίηση, δημιουργείται μία μήτρα που αντιστοιχεί σε σχηματισμό κράματος. Η σύγχρονη δε παρουσία όλων αυτών των στοιχείων στην κραματωμένη μήτρα της προσδίδει τόσο σκληρότητα, όσο και δυσθραυστότητα, λόγω της παρουσίας Κοβαλτίου (Co).



**Σχήμα V - 40 : Επίστρωση cermet σε SS304L**

**Ηλεκτρονικές μικρογραφίες σάρωσης**

**(α) τύποι A, B και C (β) Μέρος αδιάλυτου καρβιδίου τύπου A.**

Πόροι και ρωγμές δεν είναι εμφανή μέσα στη ζώνη κραμάτωσης, ενώ η συνάφεια με το υπόστρωμα είναι πολύ καλή.

### **B. Μελέτη Μικροσκληρότητας**

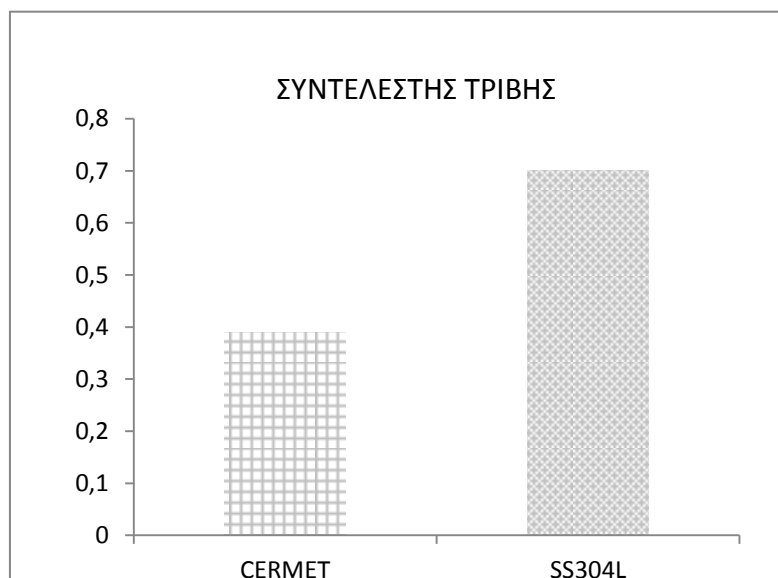
Οι τιμές της σκληρότητας κατά βάθος της ζώνης κραμάτωσης κυμαίνονται από 384-548HV<sub>300p</sub>. Τοπικά και πλησίον των αδιάλυτων καρβιδίων (τύπου A) αυξάνεται η τιμή και φτάνει μέχρι 1280-1380 HV<sub>300p</sub>.

### **Γ. Τριβολογική Μελέτη - Φθορά**

Η μέση τιμή του συντελεστή τριβής της κραματωμένης επιφάνειας έδωσε την πιο χαμηλή μέση τιμή συντελεστή τριβής, από όλους τους μέχρι στιγμής εξετασθέντες συνδυασμούς, ίσης με 0.39 (Σχήμα V-41).

Παρατηρήθηκαν έντονες διακυμάνσεις κατά την τριβομέτρηση, ειδικά στα πρώτα στάδια που προφανώς οφείλονται στην παρουσία αδιάλυτων και σκληρών καρβιδίων στα ανώτερα υποστρώματα της ζώνης κατεργασίας, τα οποία στην συνέχεια αποβάλλονται.



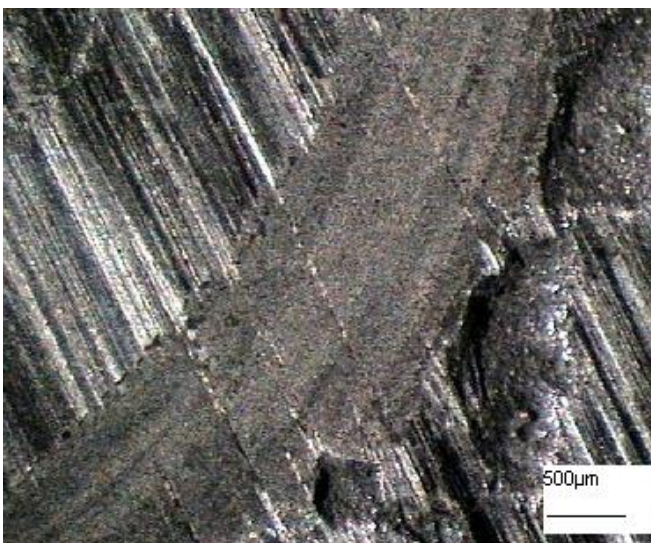


**Σχήμα V-41 : Συγκριτικό Ιστόγραμμα συντελεστών τριβής κραματωμένης επιφάνειας (cermet) και ακατέργαστου υποστρώματος (SS304L)**

Ο ρυθμός φθοράς της ζώνης κραμάτωσης της κεραμομεταλλικής σκόνης κατά τη διάρκεια των τριών ωρών τριβομέτρησης (1700m), ήταν σχεδόν σταθερός στην τιμή των  $22 \times 10^{-6} \text{g/m}$ . Το βάθος του ίχνους δε, της φθοράς έφθασε τα  $200 \mu\text{m}$  μέσα στην επίστρωση. Η χαμηλή τιμή της σκληρότητας της μήτρας της ζώνης κατεργασίας, συγκριτικά με τη σκληρότητα του ανταγωνιστικού υλικού, δικαιολογεί τον αρχικά, υψηλό αυτόν ρυθμό. Η απώλεια μάζας παρατηρήθηκε ότι είναι εντονότερη στην αρχή, στη συνέχεια όμως μοιάζει να «ελέγχεται», λόγω της παρουσίας του κοβαλτίου (Co) -προσδίδει δυσθραυστότητα- ενώ στη συνέχεια μειώνεται. Τα προϊόντα της φθοράς, είτε υφιστάμενα σκλήρυνση λόγω της μηχανικής κατεργασίας που υπόκεινται κατά τη διαδικασία της τριβής, είτε και λόγω της περιεκτικότητας τους σε μικρότερο ή μεγαλύτερο ποσοστό μεικτών καρβιδίων του βολφραμίου (W), λειτουργούν ως τρίτο σώμα, προκαλώντας απώλεια μάζας στη σφαίρα αλούμινας  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , με ρυθμό  $6.2 \times 10^{-6} \text{g/m}$ .



(α)



(β)



(γ)

**Σχήμα V - 42 : Επίστρωση WC-17%Co σε ανοξείδωτο χάλυβα SS304L**

**(α), (β), (γ) : Οπτικές μικρογραφίες πίστας τριβής**

Στην περίπτωση της κραματομένης επιφάνειας κατά τα 500 πρώτα μέτρα της δοκιμής φθοράς, ο κύριος μηχανισμός φθοράς είναι η μικροάρωση (*microploughing*,

Σχήμα V-42α). Προφανώς, η παρουσία καρβιδίων που αποκολλήθηκαν, τα οποία προκαλούσαν και τις έντονες αρχικές διακυμάνσεις στην τιμή του συντελεστή τριβής, σχημάτισαν κατά την περιστροφική κίνηση τους -υπό την επίδραση των 10N- τις χαρακτηριστικές ομόκεντρες γραμμές.

Η παρουσία μικρορωγμών -μηχανισμός φθοράς λόγω κόπωσης- και άλλων κενών (*spalling*) στην πίστα τριβής, λόγω και αυτών της απομάκρυνσης των καρβιδίων προκαλεί θραύση και μικροκοπή, αναδεικνύοντας και σε αυτήν την περίπτωση την εκτριβή (*abrasion*), ως κυρίαρχο μηχανισμό φθοράς.

Συγχρόνως, όμως λόγω δυνάμεων συνάφειας αλλά και υπό την επίδραση του βάρους, μέρος του αποβαλλόμενου υλικού προσφύεται τόσο στην επιφάνεια (*adhesion*), όσο και στο ανταγωνιστικό υλικό. Επιπλέον, διακριτές αμυδρώς πορτοκαλόχρες περιοχές υποδεικνύουν τη δράση και οξειδωτικής (*τριβοχημικής*) φθοράς (Σχήμα V-42 β).

**V.1.3.4 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ**

**ΚΕΡΑΜΟΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ**

**Πίνακας V-11 : Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων ηλιακής κατεργασίας χαλύβων με σκόνη WC-17%Co**

| Υπόστρωμα | $\lambda_{\text{ΥΠ}}$<br>(W/mK) | $\lambda_{\text{ΣΚ}}$<br>(W/mK) | Ποικν. Εισερχ. Ακτινοβολίας (W/m <sup>2</sup> ) | t <sub>ΟΛΙΚΟΣ</sub> (min) | t <sub>παραμ.</sub> (min) | T <sub>max</sub> (°C)   | Βάθος Ζώνης (μm) | Χαρακτηριστικά Ζωνών Κατεργασίας   |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------|---|---------------------------|---------------------------|---|------------------|--|
| St52.3    | 35-45                           | 70                              | 923   | 20                        | 13                        | 1270  | 1600             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 5 υποζώνες</li> <li>- μεγάλα αδιάλυτα καρβίδια στην ανώτερη</li> <li>- ομοιογενώς κατανεμημένα καρβίδια διαφορετικού βαθμού διαλυτοποίησης στις υπόλοιπες</li> </ul> HV:1300 πλησίον καρβιδίων<br>HV:800-1000 μήτρα |
|           |                                 |                                 | 973   | 29                        | 20                        | 1250  | 2400             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 5 υποζώνες</li> <li>- Εντονη λεπτόκοκκη κρυστάλλωση στην ανώτερη</li> <li>- ομοιογενώς κατανεμημένα καρβίδια διαφορετικού βαθμού διαλυτοποίησης στις άλλες</li> </ul> HV:1300 πλησίον καρβιδίων<br>HV:750-1000μήτρα |
| 985       | 13                              |                                 | 3   | 1155                      | 1500                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 βασικές υποζώνες</li> <li>- μη διαλυτοποίηση καρβιδίων στην ανώτερη υποζώνη</li> <li>- μεγάλη διαλυτοποίηση και αργή ψύξη στην κατώτερη</li> </ul> HV:800 πλησίον καρβιδίων<br>HV:400 στη μήτρα<br>HV <400 στην υποζώνη Β      |                  |  |
| 932       | 27                              |                                 | 19  | 1180                      | 3100                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 5 υποζώνες</li> <li>- μη διαλυτοποίηση καρβιδίων στην ανώτερη υποζώνη</li> <li>- ομοιογενώς κατανεμημένα καρβίδια διαφορετικού βαθμού διαλυτοποίησης στις άλλες υποζώνες</li> </ul> HV:800 πλησίον καρβιδίων<br>HV:650-800 μήτρα |                  |  |
| SS304L    | 21.5                            |                                 | 660   | 10                        | 6                         | 1400  | 2300             | -Μία ομοιόρφη ζώνη κατεργασίας με μερικώς διαλυμένα και μικτά καρβίδια <ul style="list-style-type: none"> <li>- μεμονωμένη περιοχή αδιάλυτων καρβιδίων</li> </ul> HV300p μήτρα 384-548<br>HV300p περιοχή καρβιδίων :1280-1380                                |

Στον παραπάνω Πίνακα V - 11 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της ηλιακής επιφανειακής κατεργασίας χαλύβων με προαπόθεση κεραμομεταλλικής σκόνης καρβιδίου του βολφραμίου (WC) με Κοβάλτιο (Co). Τα συμπεράσματα που συνάγονται για την διαλυτοποίησηπροαποτιθέμενης κεραμομεταλλικής σκόνης σε επιφάνειες διαφορετικών χαλύβων είναι :

#### V1.3.4 Σ1

*Η μικρή τιμή της θερμικής διαχυτότητας (0.003 m<sup>2</sup>/s, Πίνακας IV-5, IV1.2) της κεραμομεταλλικής σκόνης περιορίζει την απορρόφηση θερμότητας κατά την ακτινοβολήση με αποτέλεσμα η ανώτερη περιοχή να χαρακτηρίζεται από παρουσία πυκνών περιοχών αδιάλυτων καρβιδίων και στις τρεις περιπτώσεις. Αυτό είναι πιο έντονο στα μεγάλα δοκίμια (St52.3 και Ck60) και από αυτά, στους μικρούς χρόνους κατεργασίας.*

#### V1.3.4 Σ2

*Η μεγαλύτερης διάρκειας κατεργασία θερμαίνει περισσότερο το υπόστρωμα, το οποίο όταν τυχαίνει να έχει μεγάλο όγκο, τα στρώματα της ζώνης κατεργασίας που εφάπτονται σε αυτό χαρακτηρίζονται από μεγάλο βαθμό διαλυτοποίησης της σκόνης. Όταν δε το υπόστρωμα έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα (Ck60) τότε ο βαθμός διαλυτοποίησης αυξάνεται.*

#### V1.3.4 Σ3

*Το σχετικό βάθος των διαμορφούμενων υποζωνών και το ποσοστό διαλυτοποίησης των κόνεων σε αυτές, εξαρτάται από το χρόνο κατεργασίας, τη μέγιστη θερμοκρασία και το χρόνο παραμονής σε αυτή, καθώς και από την απόσταση από το υπόστρωμα.*

#### V1.3.4 Σ4

*Στην περίπτωση του λεπτού δοκιμίου (1/7 του πάχους των άλλων χαλύβων) του ανοξειδώτου χάλυβα, ο χρόνος κατεργασίας είναι μικρότερος, αλλά το βάθος κατεργασίας, η ομοιογένεια και ο βαθμός διαλυτοποίησης είναι μεγαλύτερα. Αυτό οφείλεται στο ότι αυτός ο χάλυβας έχει πολύ μικρή θερμική αγωγιμότητα (21.5 W/mK στους 500° C), οπότε το όποιο ποσό θερμότητας που τελικά απορροφάται από τη σκόνη, παραμένει περισσότερο χρόνο σε κατεργασία υψηλής θερμοκρασίας δίνοντας εκτενέστερη διαλυτοποίηση της προαποτιθέμενης σκόνης και βάθος κατεργασίας.*

**V.1.4 ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΟΝΕΩΝ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ**

Στον ακόλουθο Πίνακα V- 12 συνοψίζονται όλα τα αποτελέσματα της ηλιακής κατεργασίας σκόνης σε προαπόθεση:

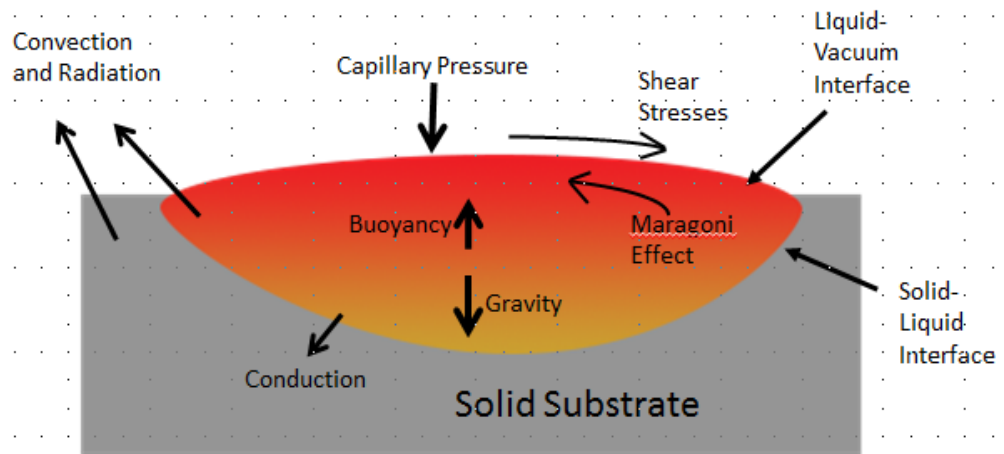
**Πίνακας V-12 Σύνοψη αποτελεσμάτων ηλιακής κατεργασίας τήξης διαφόρων κόνεων σε χάλυβινα υποστρώματα**

| Υπό-στρώμα (Υ) | λ <sub>pγ</sub> (W/m K) | ΣΚΟΝΗ /λΣ (W/mK)   | Εισερχ. Ακτιν. (W/m <sup>2</sup> ) | t <sub>ΟΛ.</sub> (min) | t <sub>ΠΑΡ.</sub> (min) | T <sub>max</sub> (°C) | Βάθος Ζώνης (μm) | Χαρακτηριστικά Ζωνών Κατεργασίας  |
|----------------|-------------------------|--------------------|------------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|---|
| St52.3         | 35-45                   | SiC/<br>125        | 923                                | 16                     | 4                       | 1330                  | 1250             | - 5 υποζώνες<br>- Κραμάτωμένη μήτρα<br>- Μεγάλα αδιάλυτα καρβίδια στο μέσο και στο κάτω μέρος<br>HV300p <sub>μήτρας</sub> : 800-1000<br>HV300p <sub>πéρις καρβιδίων</sub> : 1300-1400                                   |
| Ck60           | 49.7                    |                    | 896                                | 17                     | 7                       | 1240                  | 2000             | 5 υποζώνες<br>- Κραμάτωμένη μήτρα με δομή βραδείας στερεοποίησης<br>- Πολύ μικρά μερικώς διαλυμένα ή αδιάλυτα καρβίδια<br>HV300p <sub>περιοχή με καρβίδια</sub> : 800-1000<br>HV300p <sub>βραδείαςμυξης</sub> : 550-650 |
| St52.3         | 35-45                   | Mo/<br>138         | 760                                | 9                      | 6                       | 1300                  | 1000             | -Κυψελλοειδής μορφολογία, με διακριτές περιοχές ανάπτυξης δενδριτών, χωρίς πόρους ή ρωγμές<br>HV300p : 500  |
| SS304L         | 21.5                    |                    | 760                                | 9                      | 6                       | 1300                  | 2300             | Κυψελλοειδής μορφολογία, με διακριτές περιοχές ανάπτυξης δενδριτών, χωρίς πόρους ή ρωγμές<br>HV300p : 350-400   |
| St52.3         | 42,7                    | WC-<br>17Co/<br>70 | 923                                | 20                     | 13                      | 1270                  | 1600             | - 5 υποζώνες<br>- μεγάλα αδιάλυτα καρβίδια στην ανώτερη<br>- ομοιογενώς κατανεμημένα καρβίδια διαφορετικού βαθμού διαλυτοποίησης στις υπόλοιπες<br>HV:1300 πλησίον καρβιδίων<br>HV:800-1000 μήτρα                       |
|                |                         |                    | 973                                | 29                     | 20                      | 1250                  | 2400             | - 5 υποζώνες<br>- Έντονη λεπτόκοκκη κραμάτωση στην ανώτερη<br>- ομοιογενώς κατανεμημένα καρβίδια διαφορετικού βαθμού διαλυτοποίησης στις άλλες<br>HV:1300 πλησίον καρβιδίων<br>HV:750-1000 μήτρα                        |

| Υπό-στρώμα (Υ) | λ <sub>pY</sub> (W/m K) | ΣΚΟΝΗ /ΛΣ (W/mK) | Εισερχ. Ακτιν. (W/m <sup>2</sup> ) | t <sub>ΟΛ.</sub> (min) | t <sub>ΠΑΡ.</sub> (min) | T <sub>max</sub> (°C) | Βάθος Ζώνης (μm) | Χαρακτηριστικά Ζωνών Κατεργασίας   |
|----------------|-------------------------|------------------|------------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|--|
| Ck60           | 49.7                    |                  | 985                                | 13                     | 3                       | 1155                  | 1500             | - 2 βασικές υποζώνες<br>- μη διαλυτοποίηση καρβιδίων στην ανώτερη υποζώνη<br>- μεγάλη διαλυτοποίηση και αργή ψύξη στην κατώτερη<br>HV:800 πλησίον καρβιδίων<br>HV:400 μήτρα<br>HV <400 υποζώνη Β             |
|                |                         |                  | 932                                | 27                     | 19                      | 1180                  | 3100             | -5 υποζώνες<br>- μη διαλυτοποίηση καρβιδίων στην ανώτερη υποζώνη<br>-ομοιογενώς κατανεμημένα καρβίδια διαφορετικού βαθμού διαλυτοποίησης στις άλλες υποζώνες<br>HV:800 πλησίον καρβιδίων<br>HV:650-800 μήτρα |
| SS304L         | 21.5                    |                  | 660                                | 10                     | 6                       | 1400                  | 2300             | -Μία ομοιόρφη ζώνη κατεργασίας με μερικώς διαλυμένα και μικτά καρβίδια<br>- μεμονωμένη περιοχή αδιάλυτων καρβιδίων<br>HV300p μήτρα 384-548<br>HV300p περιοχή καρβιδίων :1280-1380                            |

Τα ακόλουθα συμπεράσματα προέκυψαν από τη σύνθεση των επιμέρους συμπερασμάτων από την εργαστηριακή μελέτη και τις δοκιμές των κατεργασμένων επιφανειών της τήξης με Σ.Η.Ε. σκόνης σε προαπόθεση σε επιφάνεια χαλύβων, η οποία αποτελεί την κύρια κατεργασία που εξετάστηκε στην παρούσα διατριβή

- Σε όλες τις περιπτώσεις, όπως φαίνεται από τον Πίνακα V-12 στα χαρακτηριστικά των ζωνών κατεργασίας, παρατηρείται διαστρωμάτωση υποζωνών –πολλών ή λιγότερων- παράλληλα με το υπόστρωμα, ή διαφορετικά κατά τη φορά της επιβολής του θερμικού φορτίου. Στην περίπτωση της κατεργασίας με Σ.Η.Ε. μπορεί να θεωρηθεί με ασφάλεια ότι το δοκίμιο βρίσκεται σε όλο το μήκος και πλάτος του εντός του μέγιστου της γκαουσιανής καμπόλης, δηλαδή ότι το δοκίμιο φορτίζεται επιφανειακά με ομοιόμορφη κατανομή θερμότητας προς μία κατεύθυνση, αυτή του βάθους. Από τη θεωρία που αφορά στα ρεύματα συναγωγής σε λουτρό τήγματος λόγω κατεργασίας με ΔΥΠΕ (Δέσμη Υψηλής Πυκνότητας Ενέργεια), όπως φαίνεται και από το Σχήμα V-43, λαμβάνουν χώρα πολλαπλά φαινόμενα.



**Σχήμα V-43 : Γραφική αναπαράσταση δυνάμεων και φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε ζώνη κατεργασίας με Δέση Υψηλής Ποκνότητας Ενέργεια**

Πιο συγκεκριμένα, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα V-43, όταν η Δέση είναι διατομής πολύ μικρότερου μεγέθους από το δοκίμιο (πχ laser) ακτινικές θερμοκρασιακές βαθμίδες αναπτύσσονται μεταξύ των κεντρικών πιο θερμών σημείων και της πιο ψυχρής διεπιφάνειας τήγματος/στερεού. Στα περισσότερα υλικά οι **συντελεστές επιφανειακής τάσης** αυξάνονται με τη μείωση της θερμοκρασίας και έτσι, προκαλούν ροή του υγρού από τις ψυχρότερες προς τις θερμότερες διεπιφάνειες, γνωστή και ως **ροή Marangoni**. Η δε ποκνότητα των υλικών μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και η διαφορά δυναμικού που δημιουργείται δίνει τις δυνάμεις Άνωσης (**Buoyancy**). Επιπλέον, δρα, ως είναι φυσικό και η βαρύτητα (**gravity**).

Στην περίπτωση της ηλιακής κατεργασίας μπορεί να θεωρηθεί, όπως προαναφέρθηκε, ότι το θερμικό φορτίο εφαρμόζεται μονοδιάστατα ως προς το βάθος, με αποτέλεσμα οι θερμοκρασιακές βαθμίδες να εμφανίζονται ανά διαστήματα κατά βάθος και έτσι, όλες οι προαναφερθείσες ροές, εξαιτίας αυτών των βαθμίδων, να δημιουργούν διαστρωμάτωση: μικροδομών, συστάσεων και κατανομής διαφορετικού βαθμού διαλυτοποίησης καρβιδίων, παράλληλα με το υπόστρωμα.

Τα όρια των διαστρωματώσεων καθορίζονται κυρίως, από το χρόνο κατεργασίας, τη μέγιστη θερμοκρασία, τις ιδιότητες και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υλικών. Έτσι σε δοκίμια μεγάλου όγκου και θερμικής αγωγιμότητας, που καθορίζουν σε



μεγάλο βαθμό τη θερμοκρασία της ζώνης κατεργασίας –και κατά τη θερμική κατεργασία, αλλά και κατά την ψύξη- το φαινόμενο είναι πιο έντονο.

Το προαναφερθέν φαινόμενο ερθύνεται και για τον συχνό «εγκλωβισμό» αδιάλυτων καρβιδίων στην τελευταία υποζώνη, πριν το υπόστρωμα.

- Για το ίδιο συνδυασμό υλικών, ο χρόνος που χρειάζεται η θερμοκρασία να λάβει τη μέγιστη τιμή της  $T_{max}$  είναι ανάλογος της εισερχόμενης ακτινοβολίας
- Διαπιστώνεται ότι μία πολύ υψηλή τιμή  $T_{max}$  επιφέρει –για τον ίδιο συνδυασμό υλικών- διαλυτοποίηση σε σημαντικό βαθμό και ομοιογενή κραμάτωση, ακόμα και με μικρότερους χρόνους κατεργασίας ή με μεγαλύτερου πάχους προαπόθεση.
- Ο χρόνος παραμονής στην  $T_{max}$  καθορίζει το βάθος της ζώνης κατεργασίας –για ίδιων διαστάσεων και υλικών σώματα- και σε συνδυασμό με τη θερμική διαχυτότητα της σκόνης και τη θερμική αγωγιμότητα του υποστρώματος, καθορίζει το βαθμό διαλυτοποίησης και άρα κραμάτωσης
- Η μεγάλη συνολική διάρκεια της κατεργασίας, αλλά και ο μεγάλος χρόνος παραμονής στην  $T_{max}$ , σε συνδυασμό με τον μεγάλο όγκο του υποστρώματος και την τιμή της θερμικής αγωγιμότητάς του, το καθιστά, μέχρι στο πέρας της κατεργασίας, μία «πηγή» **μεγάλου θερμικού φορτίου**. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη διαλυτοποίηση στις κατώτερες περιοχές της επίστρωσης.
- Σημαντική είναι και η επίδραση της μεγάλης περιεκτικότητας σε άνθρακα του χάλυβα Ck60 εξαιτίας της οποίας, περνά σε φάση ωστενιτοποίησης σε μικρότερη  $T$  (Διάγραμμα Fe C), και άρα παραμένει περισσότερο σε συνθήκες τέτοιες. Έτσι ο Σίδηρος (Fe) μπορεί να δεσμεύσει μεγαλύτερο ποσοστό άνθρακα από τα καρβίδια, γεγονός που εξηγεί το μεγαλύτερο βαθμό διαλυτοποίησης στην περίπτωση του χάλυβα αυτού.
- **Μικρή τιμή θερμικής αγωγιμότητας** του υποστρώματος (ανοξειδωτος χάλυβας SS30L) οδηγεί σε
  - A. Παράταση του χρόνου στον οποίο η σκόνη παραμένει στην  $T_{max}$
  - B. Αύξηση του πάχους της ζώνης κατεργασίας
  - Γ. Πιο αργή απόψυξη και αντίστοιχες μικροδομές
  - Δ. Χαμηλότερες τιμές σκληρότητας

- Βάσει των προαναφερθέντων, η εκτεταμένη διαλυτοποίηση των υπο κατεργασία κόνεων μπορεί να οφείλεται σε κάθε μία από τις παρακάτω παραμέτρους ή/ και σε συνδυασμό αυτών
  - A. Μεγάλος χρόνος κατεργασίας
  - B. Μεγάλος χρόνος παραμονής στη μέγιστη θερμοκρασία
  - Γ. Μεγάλη τιμή της  $T_{max}$
  - Δ. Μεγάλος όγκος υποστρώματος
  - E. Μικρή θερμική αγωγιμότητα του υποστρώματος
  - ΣΤ. Μεγάλη θερμική διαχυτότητα της σκόνης
  - Z. Μεγάλη Περιεκτικότητα σε C του χάλυβα
  
- Βάσει των προαναφερθέντων, και δεδομένου ότι η μεγάλη διαλυτοποίηση οδηγεί σε μειωμένες τιμές σκληρότητας, ισχύουν τα ακόλουθα συμπεράσματα για τη μικροσκληρότητα :
  - είναι σημαντικά αυξημένη σε όλες τις περιπτώσεις, σε σχέση με τις τιμές των υποστρωμάτων
  - Οι υψηλότερες τιμές σκληρότητας (1280 HV300p) ελήφθησαν στις μετρήσεις στις περιοχές πέριξ των καρβιδίων του πυριτίου (SiC) και βολφραμίου (WC) με υπόστρωμα χάλυβα St52.3
  - Η μεγαλύτερη μέση τιμή σκληρότητας (800 HV300p) της κραματωμένης μήτρας ελήφθηκε στην περίπτωση της κεραμομεταλλικής σκόνης (WC-17%Co) με υπόστρωμα χάλυβα St52.3
  - Γενικά το υπόστρωμα Ck60 δίνει μεγάλη διαλυτοποίηση, υπό ικανό χρόνο κατεργασίας, λόγω μεγάλου όγκου και τιμής θερμικής αγωγιμότητας και ως εκ τούτου, χαμηλές σχετικά τιμές σκληρότητας
  - Οι χαμηλότερες τιμές σκληρότητας (300 HV300p) καταγράφηκαν στην περίπτωση της μεταλλικής σκόνης βάσης μολυβδαινίου, επάνω στον ανοξειδωτο χάλυβα 304L και στην περίπτωση κατεργασίας με Πυκνότητα Ισχύος της τάξης των 14000kW/m<sup>2</sup> (παρ. VI-2)
  
- Ο συντελεστής τριβής σε όλες τις περιπτώσεις μειώθηκε περισσότερο από 40% σε σχέση με το υπόστρωμα, ως προς οποιοδήποτε ανταγωνιστικό υλικό χρησιμοποιήθηκε.
- Η αντοχή στη φθορά της κραματωμένης επιφάνειας σε όλες τις περιπτώσεις αυξήθηκε, δεδομένου ότι η απώλεια μάζας της ήταν πολύ μικρότερη σε σχέση με αυτήν του

ανατέργαστου υποστρώματος. Αυτό ήταν αναμενόμενο δεδομένης της αύξησης της σκληρότητας. Αλλά σε κάποιες περιπτώσεις επιστρώσεων με κεραμομεταλλική σκόνη, στις οποίες δεν υπήρξε σημαντική αύξηση της σκληρότητας (π.χ. SS304L+WC-17Co) η αυξημένη αντοχή στη φθορά οφείλεται σε ενίσχυση της δυσθραυστότητας που επέφερε η παρουσία Κοβαλτίου (Co) στην κραμάτωση.

- Αντίστροφα, μικρότερη σημαντικά είναι η απώλεια μάζας του ανταγωνιστικού υλικού, σε όλες τις περιπτώσεις τριβής του ως προς τις κατεργασμένες επιφάνειες, οπότε ως τριβουσοτήματα, οι κατεργασμένες επιφάνειες και τα ανταγωνιστικά υλικά, επιδεικνύουν σημαντικά αυξημένη αντοχή στη φθορά και άρα είναι ενεργειακά συμφέροντα.
- Όσον αφορά στους μηχανισμούς που έλαβαν χώρα και προκάλεσαν φθορά, σε όλες τις περιπτώσεις ο κυρίαρχος μηχανισμός ήταν αυτός της εκτριβής, με αποβολή υλικού (*debris*). Επίσης, σε όλες τις περιπτώσεις ποσοστό των *debris* προσφύταν στην επιφάνεια ολοκληρώνοντας με αυτόν τον τρόπο τη δράση του μηχανισμού *scuffing*. Η κυκλική φόρτιση σε κάποιες περιπτώσεις έδινε κόπωση και μικροκοπή, ενώ και αποφλοιώση (*delamination*) παρατηρήθηκε στις περιπτώσεις παρουσίας πορώδους. Τέλος, στη μεταλλική επίστρωση βάσης Μολυβδαινίου παρατηρήθηκε και τριβοχημική φθορά οξείδωσης.

**V.2 ΑΝΑΤΗΞΗ ΜΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (Σ.Η.Ε.)****ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ APS ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ [7,10]****V.2.1 Ανάτηξη APS WC-17%Co επίστρωσης σε επιφάνεια ανοξειδωτού χάλυβα SS304L [ 11 ]**

Στα πλαίσια διερεύνησης της δυνατότητας δημιουργίας επιστρώσεων με Σ.Η.Ε., διερευνήθηκε και η δυνατότητα ανάτηξης υφιστάμενων επιστρώσεων με Σ.Η.Ε., μία διαδεδομένη πρακτική μετακατεργασίας προκειμένου να βελτιωθούν τα μικροδομικά και τριβολογικά χαρακτηριστικά τους. Ειδικότερα, μελετήθηκε η ανάτηξη επιστρώσεων κεραμομεταλλικής σκόνης WC-17%Co σε ανοξειδωτο χάλυβα SS304L, που είχαν δημιουργηθεί με Ατμοσφαιρικό Ψεκασμό Πλάσματος (APS).

**A. Μικροδομική μελέτη και μικροσκληρότητα**

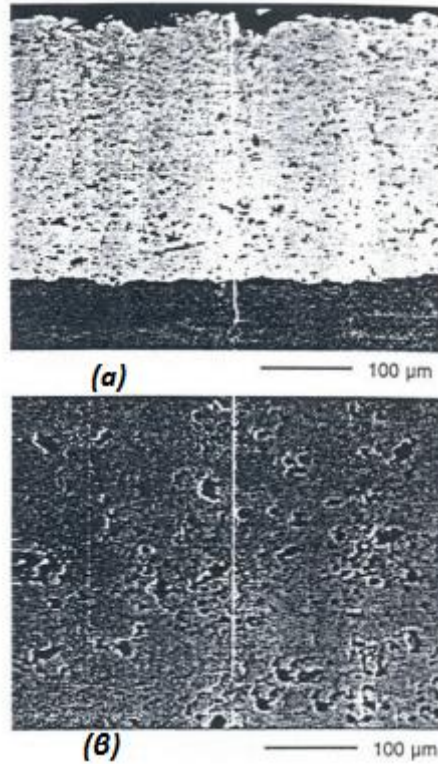
Ο AP ψεκασμός κεραμομεταλλικής σκόνης WC-17%Co, στην επιφάνεια ανοξειδωτού χάλυβα –οι τιμές παραμέτρων της διεργασίας του plasma spraying παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα V-13- οδηγεί στη δημιουργία μίας επίστρωσης πάχους 170μm, με μία τυπική για επιστρώσεις ψεκασμού plasma διαστρωματωμένη μορφολογία (Σχήμα V - 45), με πόρους, ρωγμές και σχετικά υποβαθμισμένη συνάφεια με το υπόστρωμα.

**Πίνακας V - 13 : Βέλτιστες τιμές παραμέτρων Ατμοσφαιρικού Ψεκασμού Πλάσματος (APS)**

| Ένταση Ρεύματος<br>(A) | Απόσταση Ψεκασμού<br>(mm) | Κύριο Αέριο/Αργό<br>(l/min) | Φέρον Αέριο/Αργό<br>(l/min) | Δευτερεύον Αέριο/Ηλιο<br>(l/min) | Ταχύτητα ψεκασμού<br>(m/s) | Τροφοδοσία πούδρας<br>(g/min) |
|------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 700                    | 100                       | 110                         | 12                          | 35                               | 0.534                      | 25                            |

Οι ανοιχτόχρωμες περιοχές στο ίδιο σχήμα αντιστοιχούν σε κοβάλτιο, ενώ οι γκρι περιοχές αντιστοιχούν στο καρβίδιο, όπως έδειξε η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM). Οι κεραμομεταλλικές σκόνες τύπου WC-Co γενικά που περιέχουν μόνο WC και Co (f.c.c.), στην περίπτωση που αυτές κατεργάζονται με plasma spraying είναι σύνηθες να περιέχουν επίσης WC, W<sub>2</sub>C και W σε άμορφη / νανοκρυσταλλική φάση [9], οι οποίες ενώσεις παρατηρήθηκαν και στην παρούσα

εργασία, μέσω ανάλυσης XRD [10]. Αυτή η αναμενόμενη αποσύνθεση του WC σε  $W_2C$  εμφανίζει μικρότερη δυσθραυστότητα εξαιτίας της εύθραυστης φύσης του  $W_2C$  και ένα μη ομαλό προφίλ σκληρότητας με μέση τιμή  $1000HV_{300}$  (Σχήμα V-48). Πορώδες εμφανίζεται σε όλη την επίστρωση, ενώ υπάρχουν και ρωγμές. Στη ζώνη σύνδεσης της επίστρωσης και του υποστρώματος εκτεταμένες ρωγματώσεις και πορώδες υπάρχουν, υποβαθμίζοντας την ποιότητα της συνάφειας.



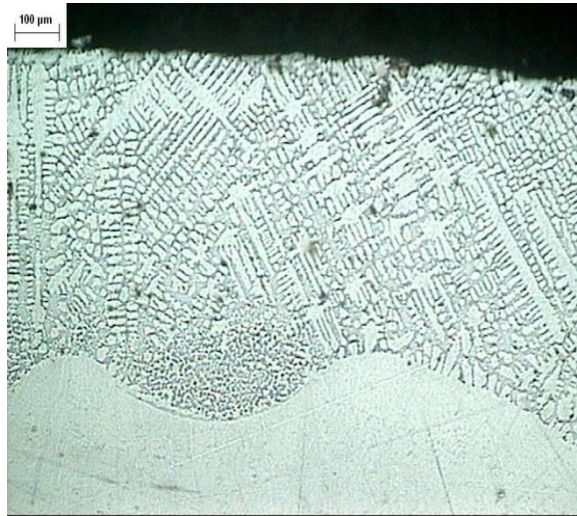
Σχήματα V - 44 : (α), (β) Οπτικές μικρογραφίες τομής επίστρωσης APS WC-17Co

Στον Πίνακα V-14 που ακολουθεί, συνοψίζονται οι πειραματικές τιμές των βέλτιστων δοκιμών της ηλιακής μετακατεργασίας των plasma sprayed κεραμομεταλλικών επιστρώσεων :

**Πίνακας V - 14 : Τιμές Πειραματικών παραμέτρων της κατεργασίας ανάτηξης με ηλιακή ενέργεια**

| ΔΙΑΤΑΞΗ | ΙΣΧΥΣ (kW) | Ø ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ (in mm) | ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kW/m <sup>2</sup> ) | ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (W/m <sup>2</sup> ) | ΧΡΟΝΟΣ (sec) | ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C) |
|---------|------------|----------------------|--|--|--------------|--------------------------|
| PSA     | 36         | 230                  | 1650   | 930                                    | 120          | 1200                     |

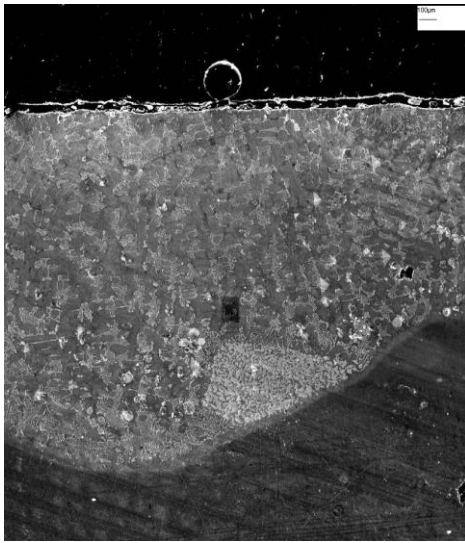
Στην περίπτωση της ανάτηξης APS WC-17%Co επίστρωσης στον *ηλιακό φούρνο της Ισπανίας (PSA)*, με Πυκνότητα Ισχύος  $1650\text{kW/m}^2$ , λαμβάνεται ζώνη κατεργασίας μέσου βάθους  $1100\mu\text{m}$  (Σχήμα V - 45), 6.5 φορές το πάχος της αρχικής APS επίστρωσης. Παρά τον ελάχιστο χρόνο κατεργασίας και την παραμονή της κατεργασίας στη  $T_{\text{max}}=1200^\circ\text{C}$ , η μορφολογία της μικροδομής στα όρια της ζώνης κατεργασίας είναι κυψελοειδής με περιοχές δενδριτικές, δομές ταχείας στερεοποίησης, χωρίς πόρους ή ρωγμές και σε εξαιρετική συνάφεια με το υπόστρωμα.



**Σχήμα V - 45 : Ανατηγμένη με ηλιακή ενέργεια APS WC-17%Co επίστρωση**

Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση (Σχήματα 46 α και β) διαπιστώνεται ότι στα όρια των κυψελών και δενδριτών υπάρχουν μικρά μέρη εναπομειναντων μερικώς διαλυμένων ή μικτών καρβιδίων, ομοιόμορφα κατανεμημένων στην κραματομένη μήτρα.

Σε σχέση με την διαλυτοποίηση της σκόνης σε προαιόθεση (παρ. V. 1.3.3), στη ζώνη κατεργασίας της οποίας βρέθηκαν τριών τύπων καρβίδια A,B,C, ενδιάμεσα προϊόντα διαφορετικών βαθμών διαλυτοποίησης, είναι εμφανές ότι στην περίπτωση της μετακατεργασίας σχεδόν εξαλείφονται τα αδιάλυτα καρβίδια (τύπος A). Μόνη εξαίρεση μία συσσωμάτωση μικρών μερών ( $30-50\mu\text{m}$ ) αδιάλυτων καρβιδίων σε σημείο κοντά στη διεπιφάνεια (Σχήμα V-46β).



(α)



(β)

Σχήμα V-46 : Ανατηγμένη με ηλιακή ενέργεια APS WC-17%Co επιστρωση

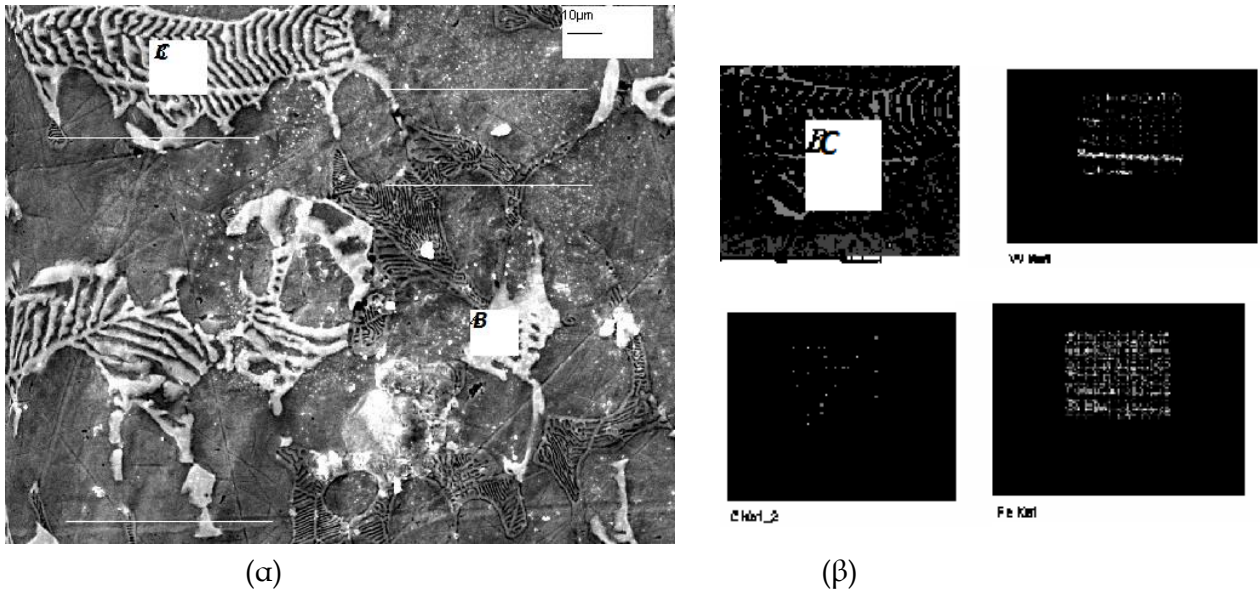
(α), (β) SEM ηλεκτρονικές μικρογραφίες

Έτσι, διαπιστώνεται ότι ανιχνεύονται μόνο οι τύποι των μερικώς διαλυμένων και μικτών καρβιδίων που εντοπίστηκαν και στη κατεργασία της σκόνης (τύποι Β και C, Σχήμα V-47 α).

Πίνακας V - 15 : Χημική Σύνθεση (% κ.β.) σε σημεία της ζώνης κατεργασίας

| Περιοχές                           |   | W    | C   | Co  | Fe | Cr  | Ni  |
|------------------------------------|---|------|-----|-----|----|-----|-----|
| Μήτρα                              |   | 18   | 9   | 5.5 | 55 | 7.5 | 5   |
| Μερικώς διαλυμένα - μικτά καρβίδια | B | 67   | 7   | 2.5 | 16 | 6   | 1.5 |
| Μικτά καρβίδια                     | C | 60.3 | 5.5 | 1.2 | 20 | 10  | 2   |

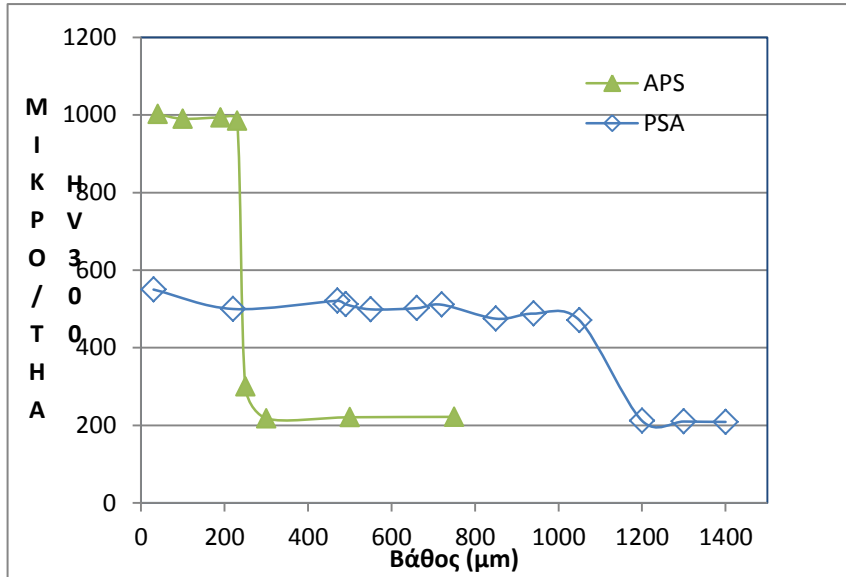
Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα V-14, οι τύποι Β και C, αυτών των καρβιδίων εμφανίζουν σύσταση που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο βαθμό διαλυτοποίησης, σε σχέση με τους αντίστοιχους τύπους της απευθείας τήξης σκόνης, ενώ και η μήτρα εμφανίζεται πλούσιότερη σε Κοβάλτιο (Co), στοιχείο που της προσδίδει δυσθραυστότητα.



**Σχήμα V - 47: Ηλεκτρονική μικρογραφία τομής ανατηγμένου APS coating με συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (PSA930W/m<sup>2</sup>, 120sec)**  
**(α) μερικώς διαλυμένα (B) και μικτά καρβίδια ©**  
**(β) SEM-mapping ενός μικτού καρβιδίου**

Δεδομένης της ομοιογένειας της περιοχής κραμάτωσης, το προφίλ της μικροσκληρότητας είναι επίσης, ομοιόμορφο σε όλο το βάθος της ζώνης. Τοπικά στην περιοχή συγκέντρωσης καρβιδίων κοντά στο υπόστρωμα δίνει τιμές της τάξης των 720HV<sub>300p</sub>, ενώ η μέση τιμή της σκληρότητας της κυρίως μήτρας κυμαίνεται από 413-453HV<sub>300p</sub> (Σχήμα V -48).



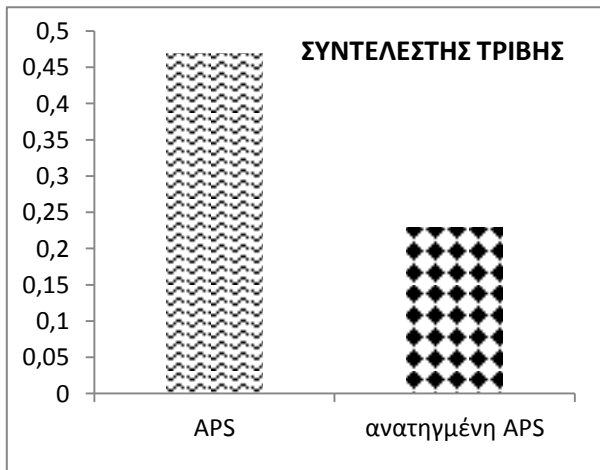


Σχήμα V - 48 : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος

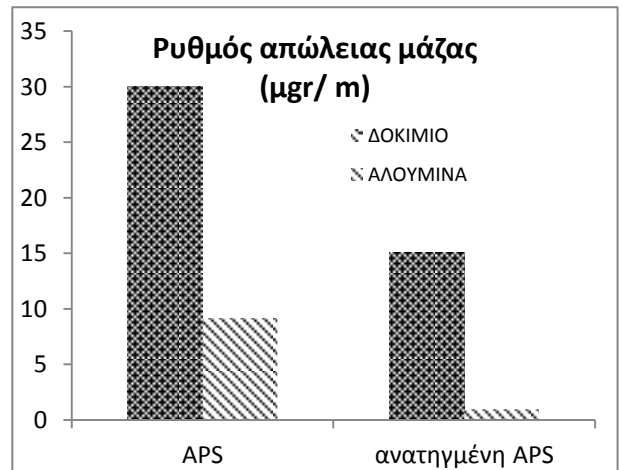
**Β. Τριβολογική Μελέτη -Αντοχή στη Φθορά**

Η τριβολογική μελέτη της APS επίστρωσης, μας έδωσε συντελεστή τριβής 0.47-ως προς ανταγωνιστικό υλικό τη σφαίρα αλουμίνας- μειωμένο κατά 40% (Σχήμα V-49α) ως προς τον αντίστοιχο, της ακατέργαστης επιφάνειας του χάλυβα.

Έτσι, όσον αφορά στον συντελεστή τριβής της ανατηγμένης επιφάνειας αυτός βρέθηκε 50% μικρότερος (0.23) από τον αντίστοιχο της αρχικής APS επίστρωσης (0.47, Σχήμα V -49α).



(α)



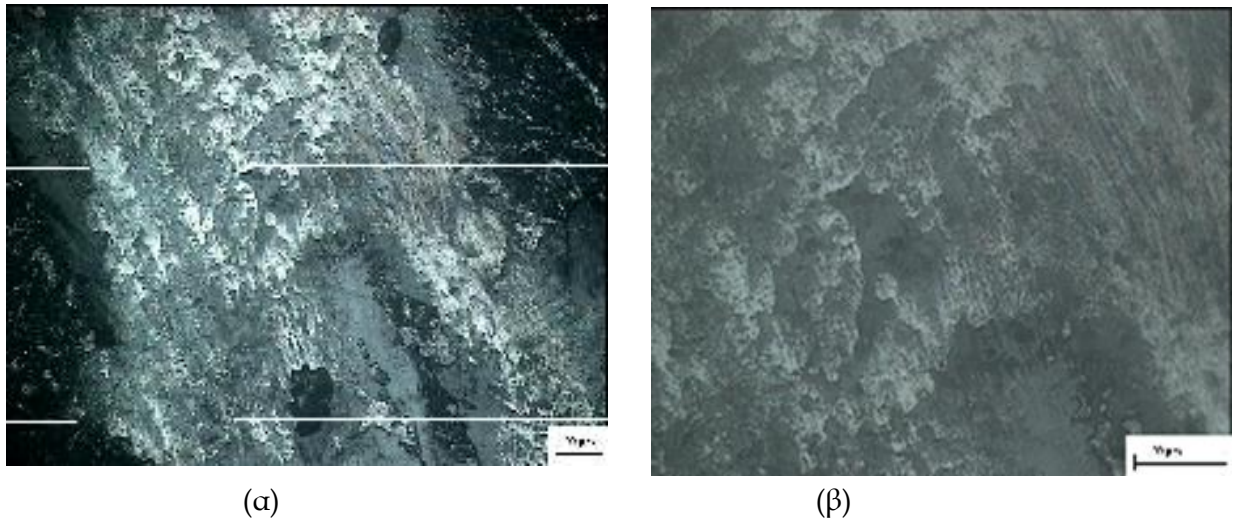
(β)

Σχήμα V- 49 : (α) Σύγκριση Συντελεστών Τριβής

(β) Σύγκριση Ρυθμών Αντοχής στη φθορά

Οι απώλειες μάζας κατά την τριβομέτρηση είναι 30mg/m, ενώ ο ρυθμός φθοράς της ανατηγμένης επίστρωσης είναι 15 mg/m, δηλαδή 50% μικρότερος. Αντίστοιχα οι απώλειες της σφαίρας αλούμινας (Σχήμα V-49β) ως προς την ανατηγμένη επιφάνεια είναι 4-5 φορές μικρότερες, από τις αντίστοιχες απώλειες ως προς την αρχική APS επίστρωση.

Η βελτίωση στην αντοχή στη φθορά οφείλεται κυρίως στη μείωση της τραχύτητας και των ρωγμών στη μετακατεργασμένη επιφάνεια.



**Σχήμα V-50 : Ανατηγμένη APS επίστρωση cermet σε χάλυβα SS30L**

**(α), (β) οπτικές μικρογραφίες πίστας τριβής**

Η κόπωση που προκαλεί μικρορωγμάτωση και η αποκόλληση, που αποτελούν τους κύριους μηχανισμούς φθοράς, στην περίπτωση της επίστρωσης APS, αντικαθίστανται στην περίπτωση της ανατηγμένης επιφάνειας, από επιφανειακή εκτριβή και στη συνέχεια πρόσφυση και ο συνδυασμός τους (scuffing) αποτελούν τον κύριο μηχανισμό φθοράς. Διαπιστώνεται επιπλέον, και η δράση μηχανισμού αποκόλλησης (*delamination*, Σχήμα V- 50β)

#### V.2.1.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μετακατεργασία με Σ.Η.Ε. για πολύ μικρό χρόνο μόλις 2min βελτιώνει την αρχική APS επίστρωση σημαντικά, σχεδόν σε όλα της τα χαρακτηριστικά :

A) στο βάθος της κατεργασίας : ανάτηξη της APS WC-17%Co επίστρωσης σε SS304L δίνει βάθος κατεργασίας 6.5 φορές μεγαλύτερο, από την αρχική APS επίστρωση

B) στη μορφολογία της μικροδομής : η μορφολογία που λαμβάνεται είναι ομοιογενής, κυψελοειδής με δενδριτικές περιοχές, σε εξαιρετική συνάφεια με το υπόστρωμα. Έχουν δε εξαλειφθεί στο σύνολο τους τόσο το πορώδες, όσο και οι άλλες ασυνέχειες της APS επίστρωσης.

Γ) Η διαλυτοποίηση των καρβιδίων πραγματοποιείται στο μέγιστο βαθμό, εξαλείφοντας τα αδιάλυτα καρβίδια και αφήνοντας μετά το πέρας της κατεργασίας, μόνο μερικώς διαλυμένα ή/και μικτά καρβίδια, ενώ συγχρόνως, η μήτρα εμπλουτίζεται σε Κοβάλτιο ενισχύοντας σημαντικά τη δυσθραυστότητα της κραμάτωσης.

- η τριβολογική συμπεριφορά της ανατηγμένης επιφάνειας, σε σύγκριση με την αρχική APS είναι σαφώς καλύτερη με έναν συντελεστή τριβής 50% μικρότερο, και ανάλογη μείωση της απώλειας μάζας της. Η βελτίωση οφείλεται κύρια στην αύξηση της δυσθραυστότητας της επίστρωσης, δεδομένου ότι η σκληρότητα μειώθηκε, καθώς και στη μείωση της τραχύτητας και των εσωτερικών στην επίστρωση ατελειών.
- Ενώ, κόπωση και η αποκόλληση αποτελούν τους δύο κύριους μηχανισμούς φθοράς στην περίπτωση της επίστρωσης APS, στην περίπτωση της ανατηγμένης επιφάνειας αυτοί αντικαθίστανται από εκτριβή και πρόσφυση.

### V.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Pantelis D.I., Griniari A., Houndri A., Sarafoglou Ch., Chionopoulos S  
 «Surface alloying of SiC powder on metallic substrates using solar energy», 6th National Conference on the renewable energies: «Optimization of energetic processes», I.S.T. (Institute of Solar Technology), Volos, 3-5 November 1999, Proceedings, Volume B', pp. 225-232
- [2] D.I. Pantelis, A. Griniari, Proceedings of Surface Modification Technologies 14<sup>th</sup> International Conference, Paris 11-13 September 2000, ed. T.S. Sudarshan and M.Jeandin, Publ. By "The Institute of Materials" (2000) 353-359.
- [3] Pantelis D.I., Griniari A., Chionopoulos S. «Tribological behavior of surface alloys produced using solar energy», 7th National Conference on Renewable Energies, University of Patras, Patra, 6-8 November 2002, Proceedings, Volume B', pp. 303-310.
- [4] Pantelis D.I., Griniari A.«Surface alloying using solar energy», 2nd Panhellenic Conference on Metallic Materials, N.T.U.A., Zografou Campus, 25-26 November 2004, Proceedings, pp. 379-384
- [5] D.I. PANTELIS, A. GRINIARI, CH. SARAFOGLOU Solar Energy Materials and Solar Cells, 89/1, (2005), pp. 1-11.
- [6] D.I. PANTELIS, A. GRINIARI "Tribological behaviour of Molybdenum-base alloyed surfaces of 304L SS produced by Solar and APS treatments", Proc. of the 3rd International Conference: "The Coatings", 27-29 November 2002, Thessaloniki (Greece), pp. 441-449.
- [7] D.I. PANTELIS, A.V. GRINIARI "Solar treatment of pre-deposited and atmospheric plasma sprayed WC-17%Co powder on Stainless Steel 304L", proceedings of the 18th International Conference SMT18 ("Surface Modification Technologies XVIII"), Dijon (France), 15-17 November 2004, edited by T.S. Sudarshan, M. Jeandin and J.J. Stiglich, published by ASM International, UK, 2006, Book-Institute of Materials, Vol. 807, pp. 159-167.
- [8] Pantelis D.I., Griniari A., Houndri A.  
 «Surface alloying of cermets powder in metal substrates using solar energy», 2nd Panhellenic Conference on Ceramics, Athens, 2-3 December 1999, N.T.U.A., ed. by Hellenic Ceramic Society, Proceedings, pp. 291-299.

[9] J.M. Guilemany; J.M. de Paco «Study and Characterisation of the W<sub>2</sub>C-Phase Formation During the HVOF Spraying of WC+12%Co Powders» Thermal Spray 1999: United Thermal Spray Conference P.756-760

[10] Pantelis D.I., Griniari A., Houndri A.  
«Remelting using solar energy of an atmospheric plasma spray cermet powder coating on a 304L stainless steel», 3rd Panhellenic Conference on Ceramics, Athens, 12-13 December 2002, N.T.U.A., Ed. by Hellenic Ceramic Society, Proceedings, pp. 393-401

[11] Pantelis D.I., Griniari A., Chionopoulos S.  
«Tribological behavior of surface alloys produced using solar energy», 7th National Conference on Renewable Energies, University of Patras, Patra, 6-8 November 2002, Proceedings, Volume B', pp. 303-310



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ VΙ : ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ & ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ**

Στο Κεφάλαιο αυτό διερευνάται η επίδραση των σημαντικότερων από τις παραμέτρους της ηλιακής κατεργασίας στα χαρακτηριστικά των διαμορφούμενων ζωνών κραμάτωσης. Ειδικότερα, εξετάστηκαν περιπτώσεις ιδίων συνδυασμών υλικών, κατά τη κατεργασία των οποίων, μία από τις βασικές παραμέτρους έχει σημαντικά διαφορετική τιμή. Εδώ, παρουσιάζεται μία περίπτωση για κάθε διαφορετική παράμετρο, όπου τα αποτελέσματα είναι τα πλέον ενδεικτικά.

Τέλος, γίνεται και σύγκριση της ηλιακής κατεργασίας με δύο άλλες τεχνικές επιφανειακής κατεργασίας με δέσμη ενέργειας υψηλής πυκνότητας, αυτών του Laser και APS, για τον ίδιο συνδυασμό υλικών.

**VI.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ [1]**

Η πυκνότητα της ενέργειας με την οποία τελικά ακτινοβολείται το δοκίμιο, αναμένεται να επιδρά καταλυτικά στην κατεργασία. Το είδος της επίδρασης και ο βαθμός της, δόθηκε η δυνατότητα να διερευνηθούν για την περίπτωση της ανάτηξης APS επιστρώσης WC-17%Co σε χάλυβα SS304L

Ειδικότερα, ακριβώς τα ίδια δοκίμια χάλυβα SS304L στην επιφάνεια των οποίων υπήρχε επιστρωση από ψεκασμό σκόνης WC-17%CO -υπό τις ίδιες ακριβώς συνθήκες- APS, μετα-κατεργάστηκαν με Σ.Η.Ε στις δύο διαφορετικές διατάξεις ηλιακών φούρνων, στις οποίες ήταν δυνατή η πρόσβαση, με τις διαφορετικές - δεδομένες- τιμές πυκνότητας ενέργειας : η πρώτη είναι αυτή του ηλιακού φούρνου της Plataforma Solar (Ισπανία) και η δεύτερη, ο ηλιακός φούρνος, ισχύος μόλις 2kW του Four Solaire (N. Γαλλία). Λεπτομερή αναφορά των τεχνικών χαρακτηριστικών των φούρνων αυτών βρίσκεται στο Κεφάλαιο IV, στις παραγράφους IV.2.1 και IV.2.2., αντίστοιχα.

Στον Πίνακα VI-1 που ακολουθεί, συνοψίζονται οι πειραματικές τιμές των βέλτιστων δοκιμών της ηλιακής μετακατεργασίας ανάτηξης των plasma sprayed WC-17%Co επιστρώσεων, σε κάθε μία από τις δύο διατάξεις :

**Πίνακας VI - 1 : Τιμές πειραματικών παραμέτρων της κατεργασίας ανάτηξης με ηλιακή ενέργεια**

| ΔΙΑΤΑΞΗ                 | ΙΣΧΥΣ<br>(kW) | Ø<br>ΤΗΣ<br>ΔΕΣΜΗΣ<br>(in mm) | ΜΕΓΙΣΤΗ<br>ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ<br>ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ<br>(kW/m <sup>2</sup> ) | ΗΛΙΑΚΗ<br>ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ<br>(W/m <sup>2</sup> ) | ΧΡΟΝΟΣ<br>(sec) | ΜΕΓΙΣΤΗ<br>ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ<br>(°C) |
|-------------------------|---------------|-------------------------------|---|--|-----------------|--------------------------------|
| PSA                     | 36            | 230                           | 1650  | 930  | 120             | 1200                           |
| CNRS/<br>IMP<br>Odeillo | 2             | 5                             | 14000   | 813  | 60              | 1200                           |

Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την κατεργασία στον ηλιακό φούρνο της Plataforma Solar d' Almeria (πρβλ. παρ. V.2.1) συνοψίζονται ακολούθως :



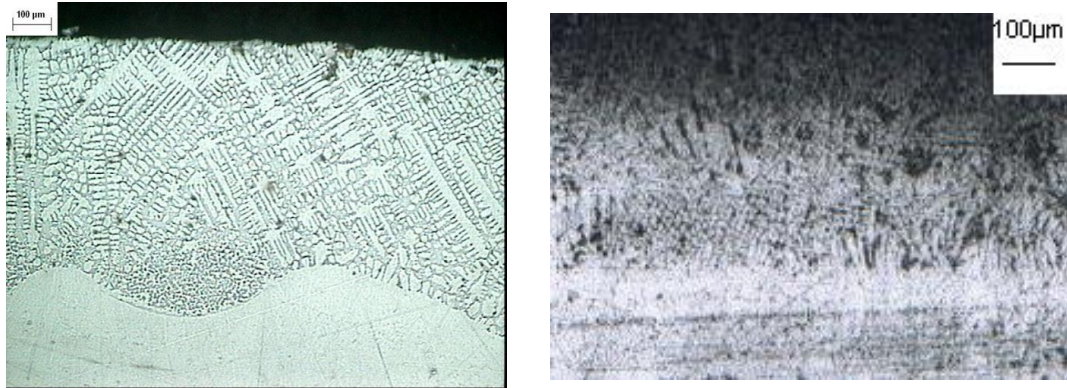
η ζώνη κατεργασίας που σχηματίστηκε είχε μέσο βάθος 1100 $\mu\text{m}$ , 6.5 φορές το πάχος της αρχικής APS επίστρωσης. Παρά τον ελάχιστο χρόνο κατεργασίας και τη μη παραμονή της κατεργασίας σε  $T_{\text{max}}=1200^{\circ}\text{C}$ , η μορφολογία της μικροδομής στα όρια της ζώνης κατεργασίας είναι ομοιόμορφη, κυψελοειδής με περιοχές δενδριτικές, δομές σχετικής ταχείας στερεοποίησης, χωρίς πόρους ή ρωγμές και σε εξαιρετική συνάφεια με το υπόστρωμα

Η κατεργασία της ίδιας APS επίστρωσης, με 7-πλάσια Πυκνότητα Ισχύος της ίδιας έδωσε μακροσκοπικά, ένα τηγμένο κυκλικό ίχνος διαμέτρου 15mm και ιδιαίτερα αυξημένης τραχύτητας ( $R_a=10\mu\text{m}$ , Σχήμα VI-1), συγκρινόμενης τόσο με τη μη κατεργασμένη επιφάνεια του χάλυβα, όσο και με την επίστρωση APS. Στα όρια δε, του ίχνους διακρίνεται έντονο πορώδες.



**Σχήμα VI-1 : Μακρογραφία ανατηγμένης επίστρωσης  
WC-17%Co σε χάλυβα SS304L με 14000kW/m<sup>2</sup>**

Όσον αφορά στη ζώνη κατεργασίας, για διάρκεια ακτινοβολίας μόλις 1min αυτή εκτείνεται σε βάθος 800 $\mu\text{m}$  σχεδόν 5 φορές βαθύτερη από την αρχική APS επίστρωση, (Σχήμα VI -2β), ενώ η μικροδομή της παρουσιάζει κυψελοειδή μορφολογία, με δενδριτικές περιοχές. Τα μικρά μαύρα στίγματα που διακρίνονται στη φωτογραφία είναι πολύ μικρής διαμέτρου κόκκοι, που δημιουργούνται λόγω της παρατεταμένης διαλυτοποίησης λόγω της πολύ μεγάλης πυκνότητας ενέργειας.



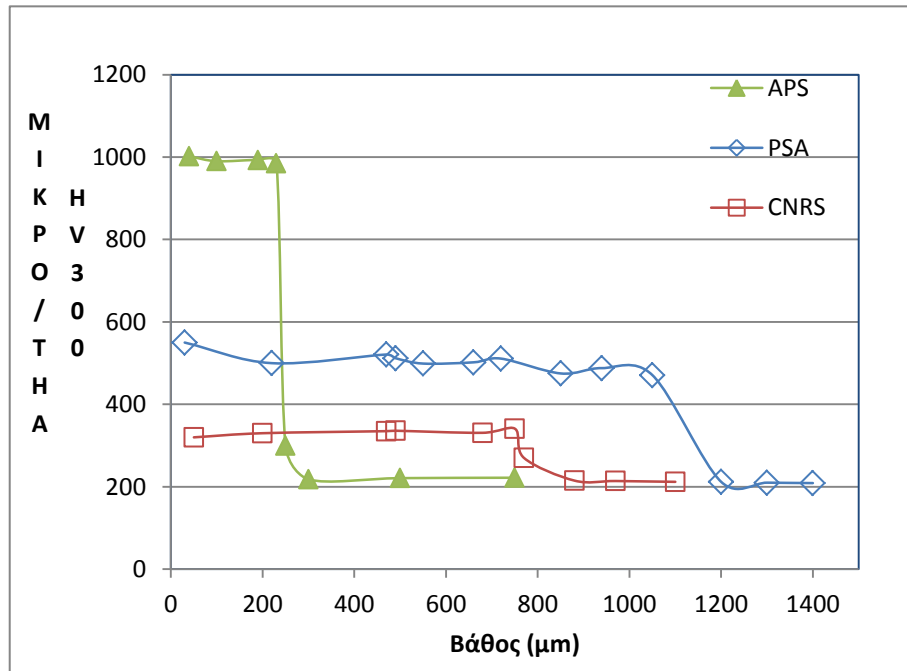
(α)

(β)

**Σχήμα VI -2 : Οπτικές μικρογραφίες της τομής της Ανατηγμένη APS επίστρωση cermet (α) με 1650 kW/m<sup>2</sup> (β) 14000kW/m<sup>2</sup>**

Μία ζώνη πάχους 80μm παρεμβάλλεται μεταξύ της κυρίως ζώνης κατεργασίας και του υποστρώματος, λεπτόκοκκης μικροδομής και σε εξαιρετική συνάφεια με το υπόστρωμα.

Όσον αφορά στη μικροσκληρότητα (Σχήμα VI-3) αυτή έχει σταθερή τιμή κατά βάθος της ζώνης κατεργασίας, αλλά ιδιαίτερα χαμηλή προφανώς εξαιτίας τόσο της παρατεταμένης τήξης που επέβαλε η πολύ υψηλή πυκνότητα ενέργειας, αλλά και εξαιτίας του πορώδους.



**Σχήμα VI - 3 : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος**

Στον ακόλουθο Πίνακα VI-2, καταγράφονται συνοπτικά τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των δύο μετακατεργασιών και της APS αρχικής επίστρωσης :

**Πίνακας VI-2 : Συνοπτικά αποτελέσματα της ανάτηξης με διαφορετικές Πυκνότητες Ισχύος**

|   | Βάθος<br>κατεργασίας<br>(mm) | HV <sub>300p</sub> | Μικροδομή  |
|---|------------------------------|--------------------|--|
| APS   | 170                          | 1000               | Μικρό βάθος κατεργασίας / έντονη παρουσία ρωγμών και πόρων και άλλων ατελειών/κακή συνάφεια με υπόστρωμα |
| PSA<br>1650kw/m <sup>2</sup><br>για 2 min               | 1100                         | 430                | Υπερ-πολλαπλάσιο βάθος/Δομή ομοιόμορφη /κυψελλοειδής με περιοχές δενδριτών                               |
| FOUR<br>SOLAIRE<br>14000 kw/m <sup>2</sup><br>για 1 min | 800                          | 350                | Υπερ-πολλαπλάσιο βάθος/Δομή ομοιόμορφη /κυψελλοειδής με περιοχές δενδριτών /συχνή εμφάνιση μικρών πόρων  |

Συμπερασματικά λοιπόν, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα :

- Και στις δύο περιπτώσεις μετακατεργασίας τα χαρακτηριστικά της APS επίστρωσης είναι εξαιρετικά βελτιωμένα. Η επίστρωση επεκτάθηκε σε βάθος, σε εξαιρετική συνάφεια με το υπόστρωμα, δεν εμφανίζονται ρωγμές, διαστρωματώσεις ή μεγάλοι πόροι. Η μόνη υποβαθμισμένη ιδιότητα, σε σχέση με την αρχική επίστρωση APS, είναι αυτή της σκληρότητας ειδικά στην περίπτωση της μεγάλης πυκνότητας ενέργειας.
- Ειδικά στην πολύ μεγάλη Πυκνότητα Ισχύος διαπιστώνεται παρατεταμένη διαλυτοποίηση της APS επίστρωσης, ακόμα και σε ελάχιστο χρόνο και με ταχεία ψύξη.
- Το βάθος μετακατεργασίας δε διαφέρει σημαντικά, δεδομένου ότι ο χρόνος είναι διπλάσιος στην πρώτη περίπτωση της χαμηλής πυκνότητας ενέργειας.
- Η συνάφεια με το υπόστρωμα είναι εξαιρετική και στις δύο περιπτώσεις, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση της μεγάλης πυκνότητας παρεμβάλλεται μία λεπτόκοκκη λευκή ζώνη, διαφορετικής μορφολογίας από την κυρίως κατεργασία

**VI.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΠΡΟΑΠΟΘΕΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ**

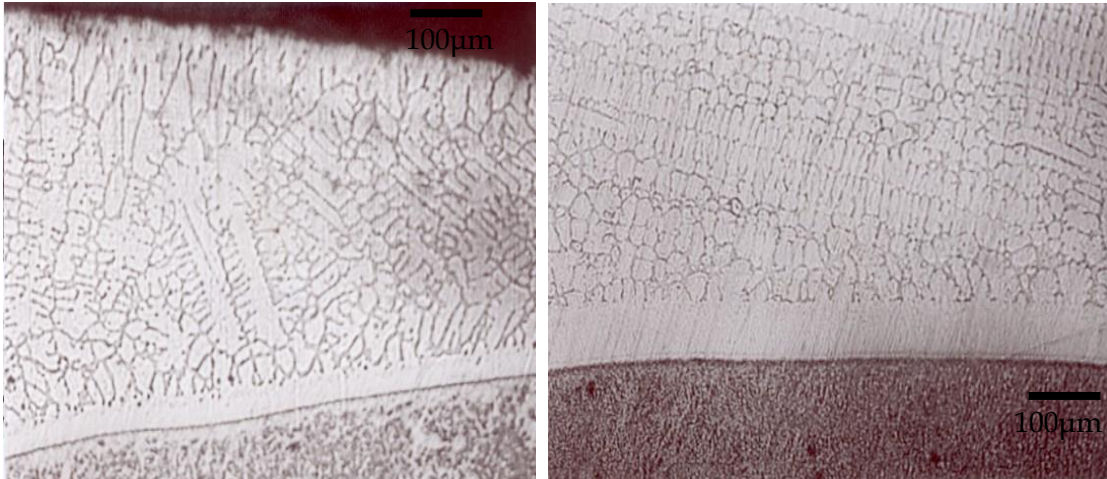
Η διερεύνηση της επίδρασης του διαφορετικού, για την ακρίβεια, του διπλάσιου πάχους προαπόθεσης της σκόνης στη μικροδομή των διαμορφούμενων ζωνών κατεργασίας πραγματοποιήθηκε για το συνδυασμό υλικών : χάλυβα St52.3 με προαπόθεση της σκόνης βάσης Μολυβδαινίου, υπό τις ίδιες ακριβώς συνθήκες κατεργασίας. Όλες οι τιμές των πειραματικών παραμέτρων παρατίθενται και στον Πίνακα VI-3 :

**Πίνακας VI - 3 : Πειραματικές Συνθήκες Διερεύνησης επίδρασης πάχους προαπόθεσης σκόνης**

| Σκόνη              | Πάχος Προαπόθεσης Σκόνης (mm) | Πάχος Δοκιμίων (mm) | Ποικν. Εισ. Ακτινοβολίας (W/m <sup>2</sup> ) | Ολικός Χρόνος Κατεργασίας (min) | Χρόνος παραμονής σε T <sub>max</sub> (min) | T <sub>max</sub> (°C) |
|--------------------|-------------------------------|---------------------|--|---------------------------------|--|-----------------------|
| Βάσης Μολυβδαινίου | 1                             | 5                   | 760  | 9                               | 6  | 1300                  |
|                    | 2                             |                     | 750  | 9                               | 6  | 1300                  |

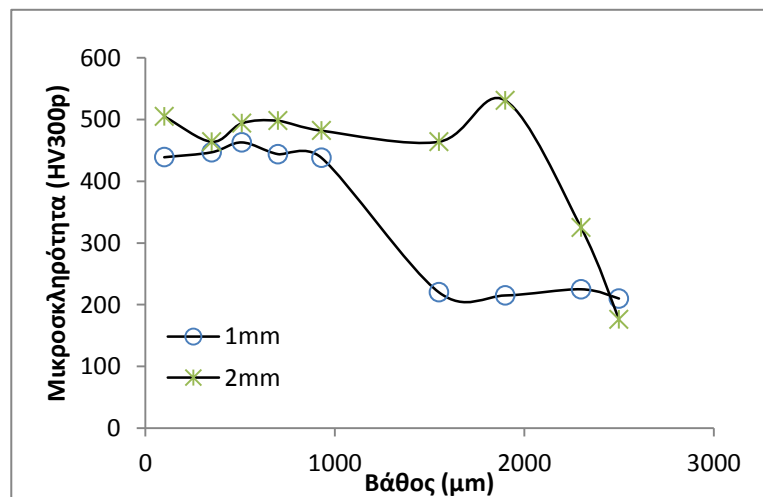
Σε συνέχεια της παρ. V.2.1.1 όπου περιγράφονται διεξοδικά τα αποτελέσματα της τήξης σκόνης βάσης Mo σε προαπόθεση 1mm αναφέρονται συνοπτικά τα ακόλουθα : Σε όλη την έκταση της ζώνης κατεργασίας, πάχους 1100μm, η μικροδομή είναι ομοιόμορφη, κυψελλοειδής, με διακριτές περιοχές ανάπτυξης δενδριτών, χωρίς πόρους ή ρωγμές. Η συγκέντρωση Μολυβδαινίου (Mo) αυξανόμενη από το υπόστρωμα προς την επιφάνεια, από 9 σε 20% κ.β. αντίστοιχα, και του σιδήρου μειούμενη, αντίστοιχα, από 70 σε 55% αποδεικνύουν ότι επετεύχθη κραμάτωση.

Στην περίπτωση, τώρα της προαπόθεσης της σκόνης σε πάχος 2mm, για παραμονή της ακτινοβολίας των δοκιμίων για 6 λεπτά στους 1300°C λαμβάνεται ζώνη κατεργασίας βάθους 1900μm (Σχήμα VI-3 α), ομοιογενούς κυψελλοειδούς μορφολογίας, με δενδριτικής μικροδομής περιοχές, η οποία αποτελείται επίσης κυρίως από τις φάσεις α και ε.



**Σχήμα VI - 4 : Οπτικές μικρογραφίες ζώνης κραμάτωσης σκόνης βάσης Mo σε St52.3 με πάχος προαπόθεσης (α) 1mm (β) 2mm**

Αντίστοιχα ομοιόμορφο είναι το προφίλ της σκληρότητας κατά βάθος της ζώνης τήξης, με μέση τιμή σκληρότητας τα 500HV<sub>300p</sub> (Σχήμα VI-4 ). Χαρακτηριστικό είναι το σαφώς μεγαλύτερο πάχος της ζώνης που δημιουργείται στα όρια με το υπόστρωμα, στη δεύτερη περίπτωση.



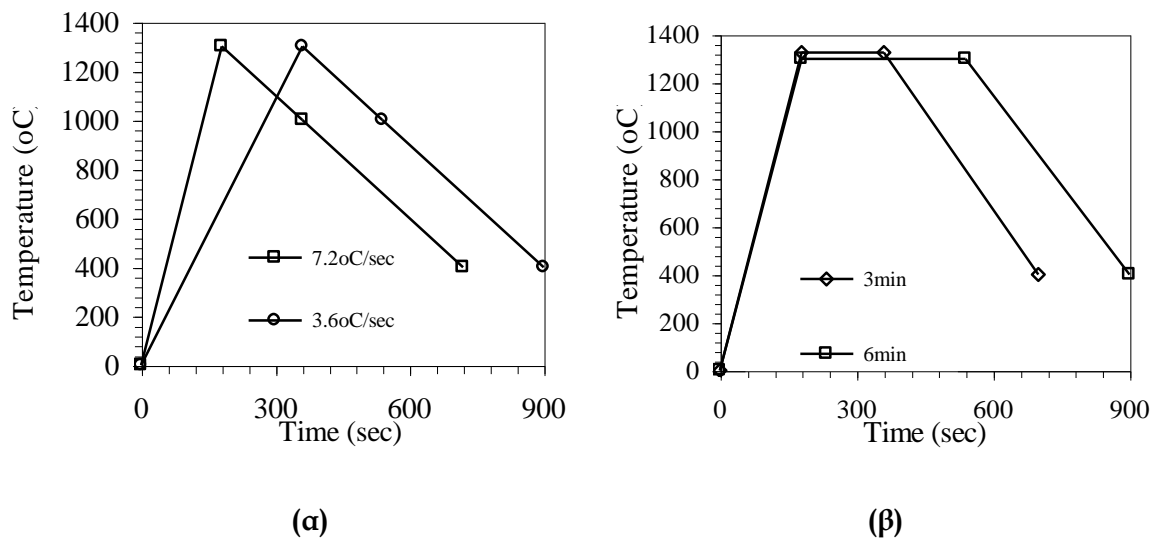
**Σχήμα VI - 5 : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος**

## Συμπερασματικά :

- Στην περίπτωση της προαπόθεσης της σκόνης σε πάχος 2mm, για ίδιες ακριβώς πειραματικές συνθήκες (ίδια εισερχόμενη ακτινοβολία, παραμονή στη μέγιστη θερμοκρασία, 1300°C, για 6 λεπτά ) δίνει ζώνη κατεργασίας σχεδόν διπλάσιου πάχους, 1900μm
- Η μικροδομή είναι κυψελλοειδής-δενδριτική και στις δύο περιπτώσεις, ενώ διακρίνεται μία έντονη συμμετρία σε επαναλαμβανόμενα μοτίβα παράλληλα στο υπόστρωμα, στην περίπτωση της προαπόθεσης της σκόνης σε πάχος 2mm. Αυτό οφείλεται στην ταχύτερη ψύξη, και άρα στερεοποίηση, δεδομένου ότι ο διπλάσιος όγκος ψύχεται στον ίδιο χρόνο. Έτσι, δικαιολογείται και η ελαφρώς μεγαλύτερη μέση τιμή σκληρότητας.
- Ανεξάρτητα από το πάχος προαπόθεσης της σκόνης στον ίδιο χρόνο, παρατηρείται ότι τήκεται το σύνολο της σκόνης και λαμβάνεται η ίδια μικροδομή και σκληρότητα, ακόμα και σε χαμηλή τιμή εισερχόμενης ακτινοβολίας. Από το διάγραμμα Mo-Fe, για τη θερμοκρασία που εφαρμόζεται διαπιστώνεται ότι η διαλυτότητα του Μολυβδαινίου στο Σίδηρο, είναι πολύ μεγάλη, οπότε το σύνολο της σκόνης διαλυτοποιείται.

### VI.3 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ [2]

Η επίδραση διαφορετικών θερμικών κύκλων, με ίδια εισερχόμενη ακτινοβολία, διερευνήθηκε για τον συνδυασμό χάλυβα ανοξειδώτου 304 L ως υπόστρωμα και προαποτιθέμενης σκόνης βάσης μολυβδαινίου (Mo) σε πάχος προαπόθεσης 1mm, στην εγκατάσταση του ηλιακού φούρνου στην PSA, Almeria, Ισπανία



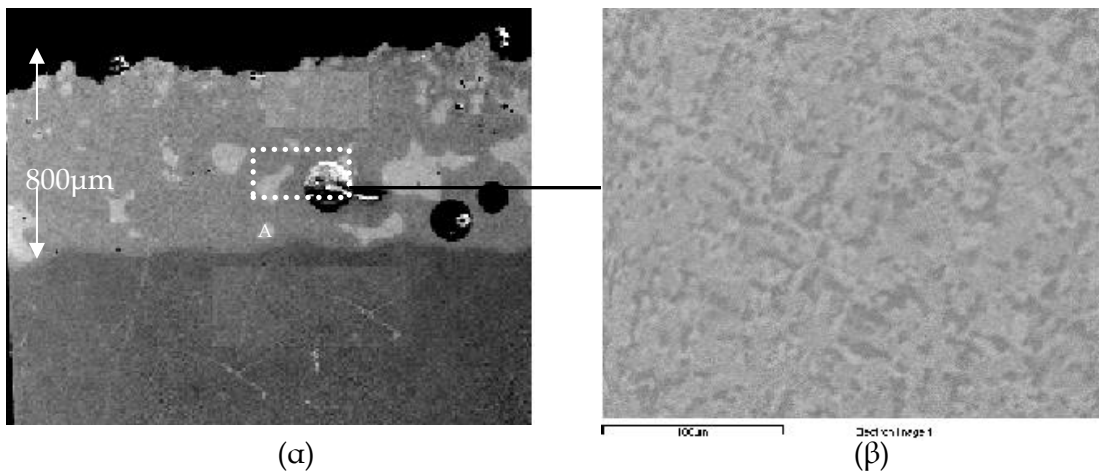
Σχήμα VI- 6 (α) Θερμικοί κύκλοι χωρίς παραμονή στην μέγιστη θερμοκρασία 1300°C και ρυθμούς θέρμανσης 7.2 και 3.6 °C/sec

(β) Θερμικοί κύκλοι με παραμονή στη μέγιστη θερμοκρασία (1300° C) για διάρκεια παραμονής 3 και 6min και ρυθμό θέρμανσης 7.2 °C/sec

Ειδικότερα, για ίδια τιμή ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε ένα από τέσσερα δοκίμια εφαρμόστηκε ένας διαφορετικός -αντίστοιχα- θερμικός κύκλος, οι δύο διαφορετικοί τύποι των οποίων απεικονίζονται στα Σχήματα V I- 6 α και β.

### A. Θέρμανση χωρίς παραμονή στη μέγιστη θερμοκρασία

Στην περίπτωση της θέρμανσης μέχρι τη μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας 1300°C με ρυθμό 7.2°C/sec, η ζώνη της κατεργασίας φτάνει μέχρι τα 800μm και παρουσιάζει μικρό ποσοστό πορώδους, ενώ ρωγμές δεν υπάρχουν. Η παρατήρηση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης της ζώνης κατεργασίας ανέδειξε την ύπαρξη μεγάλων λευκών περιοχών (Σχήμα VI-7α) φάσης ε-πλούσιας σε Μολυβδαίνιο μέσα σε μία μήτρα λευκών και γκρι περιοχών οι οποίες είναι διευθετημένες σε μία κυψελλοειδή δομή (Σχήμα VI-7 β) .



Σχήμα VI - 7 (α), (β) Ηλεκτρονικές μικρογραφίες ζώνης κατεργασίας σκόνης βάσης Mo με ρυθμό θέρμανσης 7.2 °C/sec

Αυτές οι περιοχές αντιστοιχούν σε διαφορετικές φάσεις και έχουν διαφορετική χημική σύσταση : οι λευκές περιοχές αποτελούνται κυρίως από Μολυβδαίνιο (35% κ.β.), ενώ στις γκρι, ο σίδηρος είναι σε μεγαλύτερο ποσοστό, μεγαλύτερο από 50% κ.β., όπως έδειξε η ανάλυση με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Η χημική και μικροδομική ανομοιογένεια αντικατοπτρίζεται και στο προφίλ της σκληρότητας, με τις ληφθείσες τιμές να κυμαίνονται από 400 σε 700HV<sub>300p</sub> (Σχήμα VI-10).



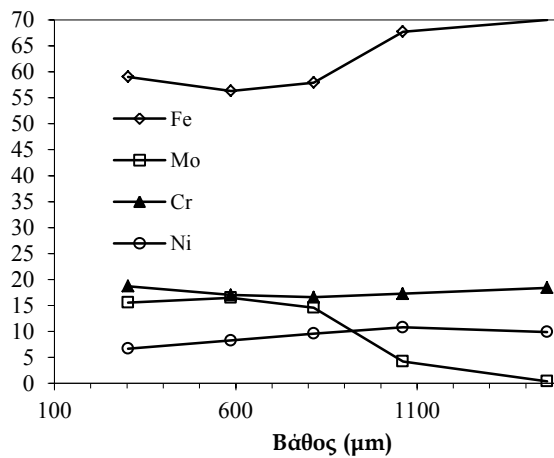
Όταν ο ρυθμός θέρμανσης μειώνεται ( $3.6^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ ) η ζώνη τήξης εκτείνεται σε μεγαλύτερο βάθος ίσο με  $1100\mu\text{m}$  και βρίσκεται σε καλή συνάφεια με το υπόστρωμα. Εξαιτίας της μεγαλύτερης τελικά διάρκειας θέρμανση, η τήξη της ζώνης κατεργασίας πραγματοποιείται σταδιακά επιτρέποντας το σχηματισμό μιας ομοιογενούς μικροδομής ζώνη κατεργασίας, χωρίς αδιάλυτα σωματίδια σκόνης Μολυβδαινίου (Σχήματα VI-8 α και β)



(α)

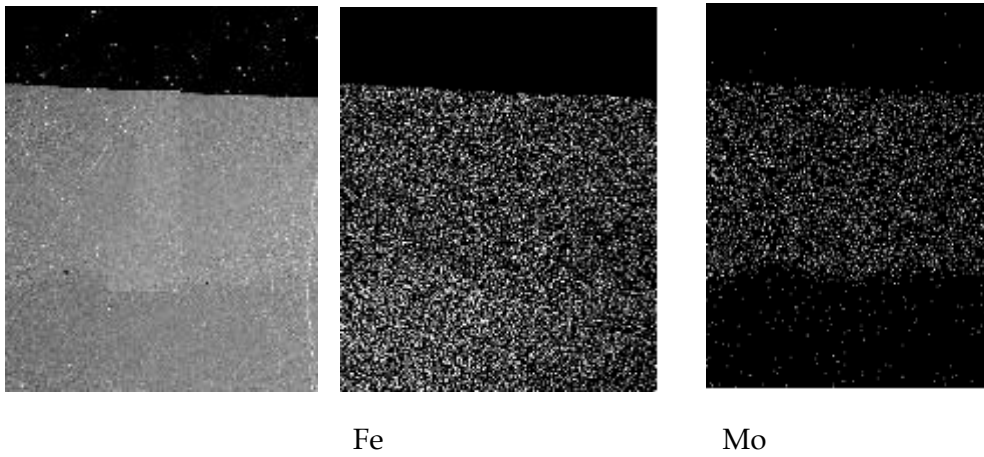


(β)



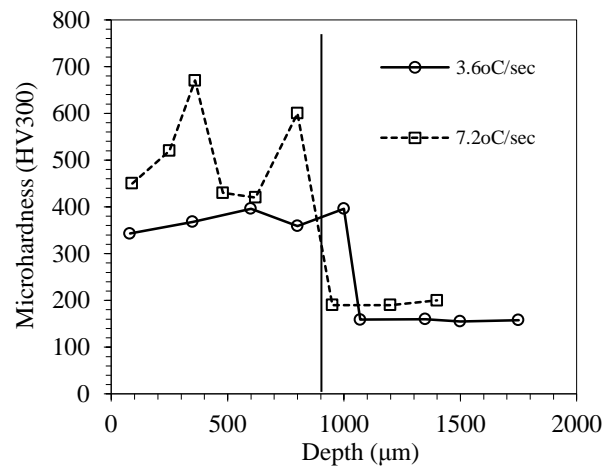
(γ)

Σχήμα VI - 8: Οπτικές μικρογραφίες ζώνης κραμάτωσης με ρυθμό θέρμανσης  $3.6^{\circ}\text{C}/\text{sec}$  (α) ανώτερη υποζώνη (β) κατώτερη υποζώνη (γ) στοιχειακή ανάλυση EDS ως προς βάθος ζώνης κατεργασίας



**Σχήμα VI - 9 : SEM mapping βασικών στοιχείων κραμάτωσης**

SEM mapping (Σχήμα VI - 9) το οποίο πραγματοποιείται σε μέρος της ζώνης κατεργασίας ανέδειξε μια ομοιόμορφη κατανομή της συγκέντρωσης των δύο βασικών μετάλλων, του Σιδήρου και του Μολυβδαινίου κατά βάθος.



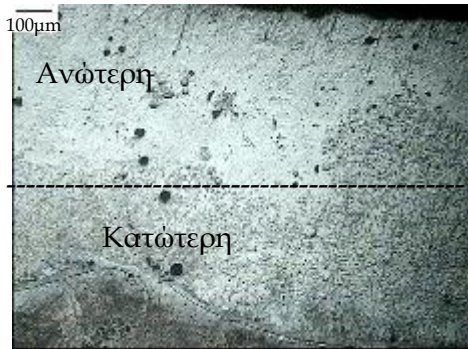
**Σχήμα VI - 10 : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος για τους δύο διαφορετικούς ρυθμούς θέρμανσης**

Έτσι, η δημιουργία ενός ομοιόμορφου κράματος αποδεικνύεται ενώ και το προφίλ της σκληρότητας είναι αντίστοιχα ομοιόμορφο, με μέση τιμή στα 370HV<sub>300</sub> (Σχήμα VI -10). Η διεπιφάνεια ανάμεσα στη ζώνη κατεργασίας και στο υπόστρωμα είναι και στις δύο περιπτώσεις λεπτόκοκκης μικροδομής και ομοιογενούς χημικής σύστασης, σε άριστη συνάφεια με το υπόστρωμα και χωρίς παρουσία πόρων ή ρωγμών, όπως

αποδεικνύεται τόσο από την οπτική όσο και από την ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης.

### **Β. Θέρμανση με παραμονή στη μέγιστη θερμοκρασία**

Όταν το δοκίμιο διατηρείται σε θερμοκρασία 1300°C για μία συγκεκριμένη χρονική διάρκεια τα ληφθέντα αποτελέσματα εξαρτώνται έντονα από αυτήν. Ειδικότερα, για διάρκεια παραμονής της έκθεσης στη μέγιστη θερμοκρασία για **τρία (3)** λεπτά η ζώνη της κατεργασίας φτάνει σε βάθος 1100μm, η οποία φαίνεται να διακρίνεται σε δύο διαφορετικές υπο-ζώνες με κυμαινόμενο βάθος και διαφορετικές μορφολογίες (Σχήματα VI-11α και β).



(α)



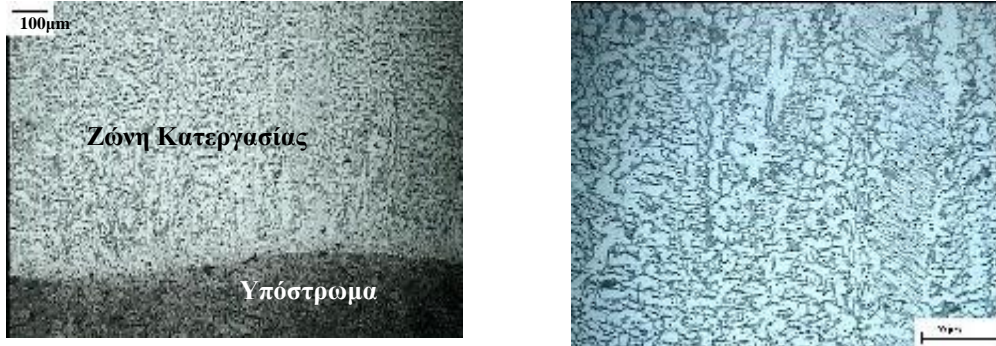
(β)

**Σχήμα VI - 11 (α), (β) Οπτικές μικρογραφίες της ζώνης κατεργασίας με παραμονή 3min**

Η ανώτερη (λευκή) ζώνη εκτείνεται σε μέσο βάθος 500μm και έχει πολύ μικρό μέγεθος κόκκων και ομοιόμορφη μικροδομή. Για αυτόν τον λόγο έχει πολύ υψηλές τιμές σκληρότητας οι οποίες κυμαίνονται από 600 σε 780HV<sub>300p</sub>. Η κατώτερη υποζώνη είναι βαθύτερη (700μm) και έχει μεγάλο μέγεθος κόκκων και κυψελλοειδή μικροδομή.

Η ανάλυση με EDS σε διαφορετικά βάθη στην ανώτερη υποζώνη δίνει περιεκτικότητα για τον σίδηρο από 45-50% (κ.β.) και η αντίστοιχη τιμή για το Μολυβδαίνιο είναι 15%. Αυτές οι τιμές σε συνδυασμό με τη μικροδομή, η οποία είναι λεπτόκοκκη εξηγούν τις υψηλές τιμές σκληρότητας στην υποζώνη αυτή.

Στην κατώτερη υποζώνη η συγκέντρωση του σιδήρου αυξάνει από 50 σε 70%, ενώ η συγκέντρωση του Μολυβδαινίου είναι υψηλότερη φτάνοντας το 32% στα ανώτερα σημεία της και κοντά στο υπόστρωμα 7% κ.β (Σχήμα VI-13α).

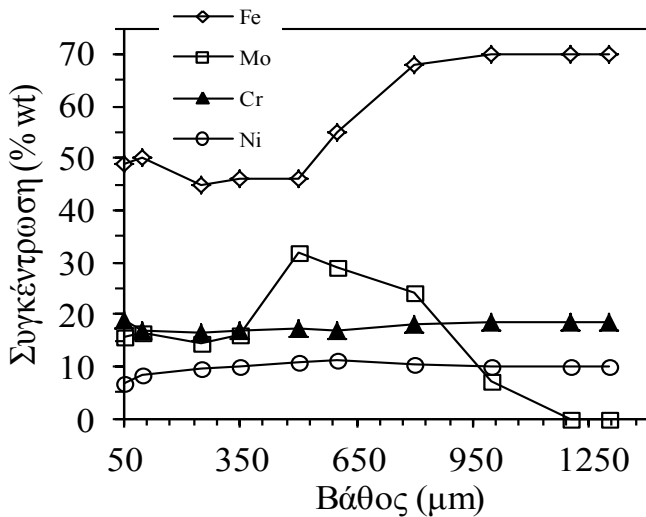


(α)

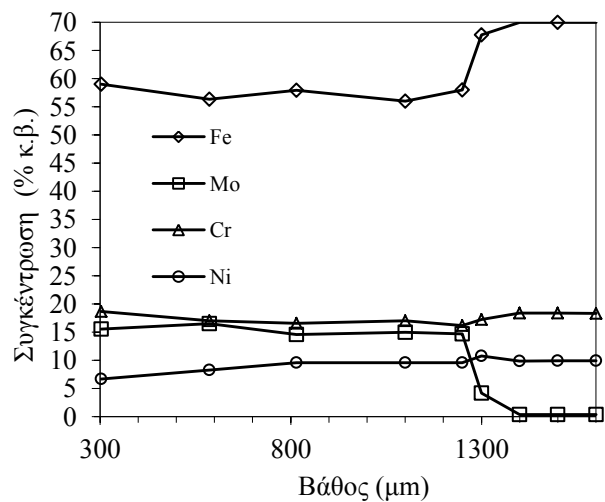
(β)

Σχήμα VI - 12 (α) και (β) : Οπτικές μικρογραφίες ζώνης κατεργασίας με παραμονή στη μέγιστη θερμοκρασία 1300° C για 6min

Για διπλάσιο χρόνο (6min) παραμονής στην ίδια μέγιστη θερμοκρασία (1300°C), το μέσο βάθος της κατεργασίας είναι αντίστοιχα, διπλάσιο (1400µm) και η μικροδομή που λαμβάνεται είναι ομοιογενής, μικτή κυψελλοειδούς και δενδριτικής μορφολογίας (Σχήματα VI -12α και β). Η συγκέντρωση των κυρίων συστατικών παραμένει σταθερή σε διαφορετικά βάθη της ζώνης κατεργασίας όπως ανέδειξε η EDS ανάλυση, με εξαίρεση την κατώτερη περιοχή κοντά στο υπόστρωμα όπου ο σίδηρος Fe αυξάνεται και το Μολυβδάνιο Mo, μειώνεται (Σχήμα VI-13β).



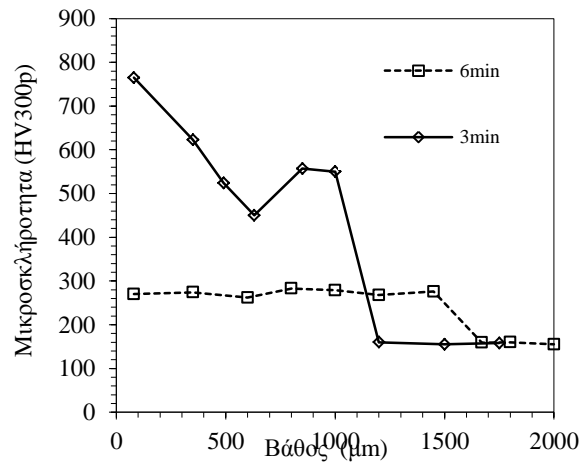
(α)



(β)

Σχήμα VI - 13 : % κ.β. στοιχειακή συγκέντρωση ως προς βάθος ζώνης κατεργασίας με παραμονή σε Tmax (α) για 3 min (γ) για 6 min

Επίσης, ομοιόμορφο είναι το προφίλ της μικροσκληρότητας ως προς το βάθος, αλλά σε πολύ χαμηλές τιμές, της τάξης των 300HV<sub>300p</sub> (Σχήμα VI -14) δεδομένης της μεγάλης περιεκτικότητας σε Σίδηρο (Fe). Η συνάφεια είναι επίσης, πολύ καλή χωρίς να παρατηρούνται ρωγμές και πόροι.



Σχήμα V-14 : Μικροσκληρότητα ως προς βάθος

Συμπερασματικά :

- Για τους διαφορετικούς θερμικούς κύκλους (τύποι 2 και 3) η συνολική διάρκεια της έκθεσης είναι η ίδια (6 λεπτά) και ίδιο είναι και το βάθος της ζώνης κατεργασίας ίσο με 1100μm, στα υπόλοιπα, όμως χαρακτηριστικά διαφέρουν
- Θέρμανση για 6 λεπτά στους 1300°C και ακόλουθη άμεση ψύξη οδηγεί σε σχηματισμό μιας ομοιόμορφης ζώνης κραμάτωσης, τόσο ως προς την μικροδομή όσο και από χημική σύσταση. Το προφίλ της σκληρότητας είναι επίσης ομοιόμορφο, αλλά με τιμές σκληρότητας ιδιαίτερα χαμηλές (300 HV<sub>300</sub>, Σχήμα VI-12β).
- Στην περίπτωση του θερμικού κύκλου 3 θέρμανση μέχρι τους 1300°C και παραμονή για 3 λεπτά, καταλήγει σε ζώνη κατεργασίας αποτελούμενη από δύο υποζώνες. Και οι δύο υποζώνες, έχουν την ίδια κοψελλοειδή μικροδομή, αλλά διαφορετική χημική

σύσταση και διαφορετικές τιμές σκληρότητας. Κατά μέσο όρο η ζώνη κραμάτωσης είναι σκληρότερη σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, με τις τιμές της σκληρότητας να κυμαίνονται από 500-800  $HV_{300p}$ , (Σχήμα VI -14)

- Στην περίπτωση του διπλάσιου χρόνου παραμονής σε  $T_{max}$  η τήξη και διαλυτοποίηση είναι εκτενέστερη όπως τεκμηριώνεται από την χημική ανάλυση, η οποία δίνει υψηλά ποσοστά Σιδήρου (Fe)- αντίστοιχα ομοιόμορφη είναι η μικροδομή, και χαρακτηριστική βραδείας στερεοποίησης, ενώ και η μικροσκληρότητα είναι χαμηλή.
- Η μελέτη των διμερών διαγραμμάτων φάσεων (Fe-Mo, Fe-Ni, Fe-Cr) και του τριμερούς Fe-Mo-Cr [12] αποδεικνύει ότι η κύρια φάση που λαμβάνεται μετά την ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι αυτή της  $\alpha$ -φάσης του σιδήρου, και σε μικρότερα ποσοστά αυτά των ενώσεων τύπου  $FeNi_3$  και  $W_6Fe_7$ . Αυτές οι ενώσεις προκύπτουν από τις αντίστοιχες χημικές συστάσεις των ζωνών κραμάτωσης μετά την στερεοποίηση.

#### VI. 4 ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ

Όσον αφορά στην επαναληψιμότητα της μεθόδου, δείγματα ίδιων διαστάσεων που κατεργάζονται υπό τις ίδιες βέλτιστες συνθήκες σχηματίζουν ζώνες ακριβώς ίδιου βάθους, ομοιογενούς κυψελλοειδούς-δενδριτικής μικροδομής, με ίδια χημική σύσταση και προφίλ σκληρότητας.

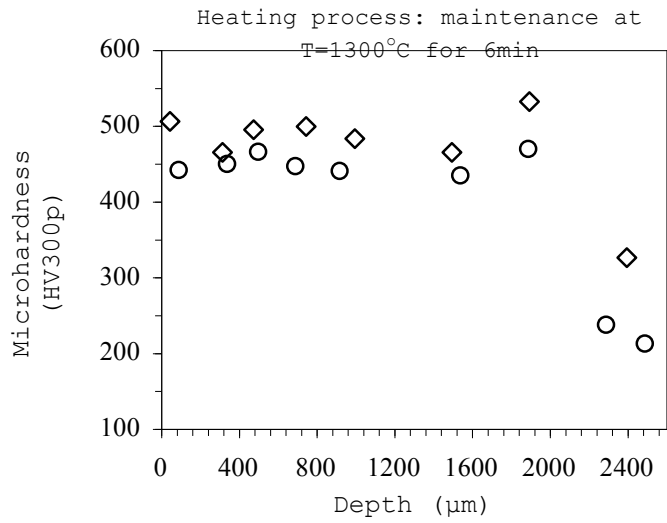
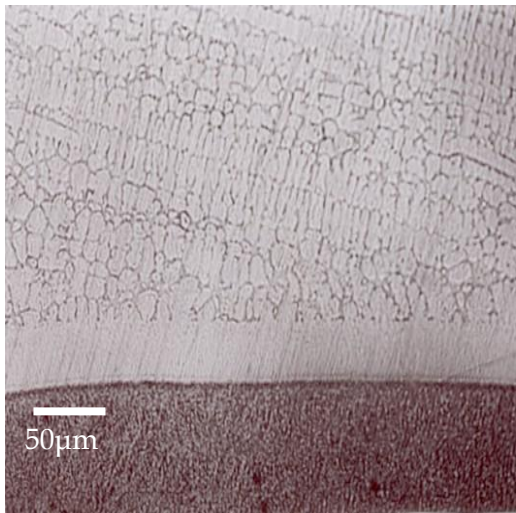
Η επαναληψιμότητα επαληθεύθηκε και πιστοποιήθηκε στην περίπτωση λεπτών δοκιμών χάλυβα, με επίστρωση σκόνης βάσης Μολυβδαινίου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί και σε αυτό το κεφάλαιο, αλλά και στο προηγούμενο, το μικρό μέγεθος των δοκιμών δίνει τη δυνατότητα καλύτερου ελέγχου της κατεργασίας, η οποία κατεργασία σχεδόν αυτοματοποιήθηκε δεδομένου ότι οι συνθήκες κατεργασίας (ολικός χρόνος 9min και παραμονή σε  $T_{max} = 1400^{\circ} C$  για 6min) είναι ακριβώς οι ίδιες σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

Οι τιμές των πειραματικών συνθηκών της ηλιακής κατεργασίας, που εφαρμόστηκαν προκειμένου να πιστοποιηθεί η επαναληψιμότητα της μεθόδου παρατίθενται στον Πίνακα VI-4 :

**Πίνακας VI-4 : Πειραματικές Τιμές Συνθηκών Ελέγχου Επαναληψιμότητας**

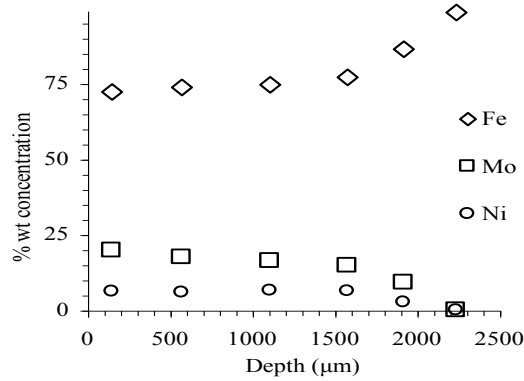
| Υπόστρωμα/<br>Σκόνη | Πάχος<br>Δοκιμίων<br>(mm)/Πάχος<br>προαπόθεσης<br>σκόνης (mm) | Πυκν. Εισ.<br>Ενέργειας ( $W/m^2$ ) | Ολικός<br>Χρόνος<br>Κατεργ<br>ασίας<br>(min) | Χρόνος<br>παραμονής<br>σε $T_{max}$<br>(min) | $T_{max}(^{\circ}C)$ |
|---------------------|---|-------------------------------------|--|--|----------------------|
| St52.3/<br>βάση Μο  | 5 / 2   | 600                                 | 9  | 6  | 1400                 |

Αυτό πιστοποιήθηκε για σκόνη βάσης Μολυβδαινίου σε προαπόθεση 2mm επάνω σε χάλυβα St52.3. Στην περίπτωση της προαπόθεσης της σκόνης σε πάχος 2mm, για παραμονή της ακτινοβολήσης των δοκιμίων για 6 λεπτά στους  $1400^{\circ}C$  δίνει ζώνη κατεργασίας βάθους 1900μm (Σχήμα VI-15 α), ομοιογενούς κυψελλοειδούς-δενδριτικής μικροδομής, η οποία αποτελείται επίσης κυρίως από τις φάσεις α και ε. Αντίστοιχα ομοιόμορφο είναι το προφίλ της σκληρότητας κατά βάθος της ζώνης τήξης, με μέση τιμή σκληρότητας τα  $500HV_{300p}$  (Σχήμα VI-15 β)



(α)

(β)



(γ)

Σχήμα VI-15 : Ηλιακή Κατεργασία σκόνης Mo σε χάλυβα St52.3 σε προαπόθεση 2mm (α) Οπτική μικρογραφία της ζώνης κραμάτωσης (β) Προφίλ μικροσκληρότητας (ως προς βάθος) (γ) χημική σύσταση ως προς βάθος

Η λευκή ζώνη η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ της διεπιφάνειας και του υποστρώματος είναι και αυτή ομοιογενούς μικροδομής και λειπόκοκκη και έχει την ακόλουθη -σταθερή σε όλες τις δοκιμές σύσταση- σύσταση : Fe 86,4%, Mo 9,13%, Ni 2,6% και Mn 1,2% (Σχήμα VI-15γ).



### VI.5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΗΛΙΑΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ, LASER & APS [3]

Σε αυτήν την εργασία μελετήθηκε η δυνατότητα της παραγωγής κεραμομεταλλικής επιστρώσης WC-17Co σε χάλυβα St52.3 με χρήση τριών διαφορετικών τεχνικών δημιουργίας επιστρώσεων :

- α. Με CO<sub>2</sub> laser και εκτόξευση σωματιδίων cermet
- β. με APS (Ατμοσφαιρικό Ψεκάσμο Πλάσματος) και
- γ. Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια (Σ.Η.Ε.)

Στην πρώτη τεχνική (α) της κατεργασίας με Laser χρησιμοποιήθηκε ένα συνεχές CO<sub>2</sub> laser με ονομαστική ισχύ 3kW.

Η επιστροφή με APS πραγματοποιήθηκε με χρήση ενός συστήματος Ατμοσφαιρικού Ψεκάσμου (Miller-Thermal SG100) με πλήρως αυτοματοποιημένο χειρισμό. Η κίνηση του όπλου -σε δύο διαστάσεις- μπροστά στην επιφάνεια, ελεγχόταν με ένα ρομποτικό σύστημα. Οι τιμές των βασικών πειραματικών παραμέτρων κατεργασίας για κάθε διαφορετική τεχνική, συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα VI-5 :

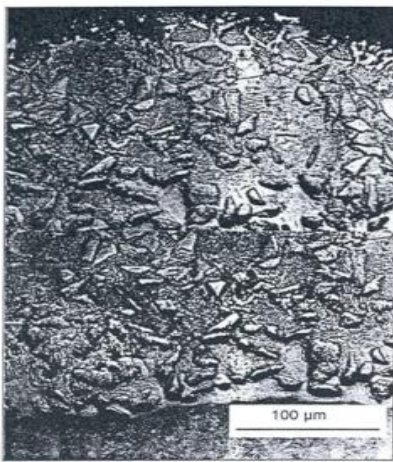
**Πίνακας VI- 5 : Τιμές Βασικών Πειραματικών Παραμέτρων Κατεργασίας των Τεχνικών**

|   |            |   |                                       |                                   |                            |                                    |
|---|------------|---|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| <i>CO<sub>2</sub></i><br><b>Laser</b><br><i>Melt</i><br><i>Particle</i><br><i>Injection</i> | Ισχύς (kW) | Απόσταση Αφεστίασης (mm)                    | Απόσταση Ακροφυσίου/ επιφάνειας (mm)  | Ταχύτητα Δέσμης (m/s)             | Ροή Αερίου (l/min)         | Ρυθμός Τροφοδοσίας Σκόνης (gr/min) |
|   | <b>3</b>   | <b>30</b>                                   | <b>20</b>                             | <b>0,45</b>                       | <b>4</b>                   | <b>16,8</b>                        |
| <b>APS</b>  | Ισχύς (kW) | Αριθμός Περσμάτων                           | Αποσταση Εκτόξευσης (mm)              | Ταχύτητα Ψεκάσμου πλάσματος (m/s) | Ροή Αερίου (l/min)         | Ρυθμός Τροφοδοσίας Σκόνης (gr/min) |
|   | <b>63</b>  | <b>20</b>                                   | <b>115</b>                            | <b>0,53</b>                       | <b>12</b>                  | <b>25</b>                          |
| <b>Σ.Η.Ε</b>  | Ισχύς (kW) | Εισερχόμενη Ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> ) | Ποκνότητα Δέσμης (kW/m <sup>2</sup> ) | Μέγιστη Θερμοκρασία (°C)          | Διάρκεια Κατεργασίας (min) | Διάμετρος τομής Δέσμης (mm)        |
|   | <b>36</b>  | <b>920</b>                                  | <b>1650</b>                           | <b>1270</b>                       | <b>21</b>                  | <b>230</b>                         |

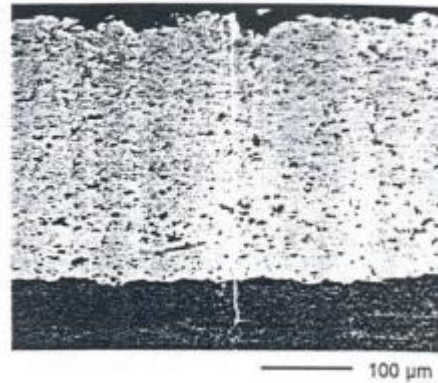
Οι διαφορετικές τεχνικές οδήγησαν σε σχηματισμό επιστρώσεων κατεργασίας διαφορετικών χαρακτηριστικών. Εδικότερα :

Στην περίπτωση του Laser η ζώνη κατεργασίας φτάνει σε βάθος 350 $\mu\text{m}$ , είναι ομοιόμορφη με μικροδομή ταχείας στερεοποίησης, ενδιαμέσως της οποίας υπάρχει μεγάλος αριθμός αδιάλυτων καρβιδίων, ενώ δεν εμφανίζει πόρους. Η μικροσκληρότητα είναι σταθερή και φτάνει στα 1500 HV<sub>300p</sub>.

Στην περίπτωση της χρήσης APS σχηματίζεται κεραμομεταλλική επίστρωση βάθους 350 $\mu\text{m}$ , η οποία με εξαίρεση την παρουσία κάποιων πόρων και μικρών ασυνεχειών παρουσιάζει ομοιογενή μικροδομή, σε καλή συνάφεια με το υπόστρωμα. Η σκληρότητα της κυμαίνεται μεταξύ 600-760 HV<sub>300p</sub>.



(α)

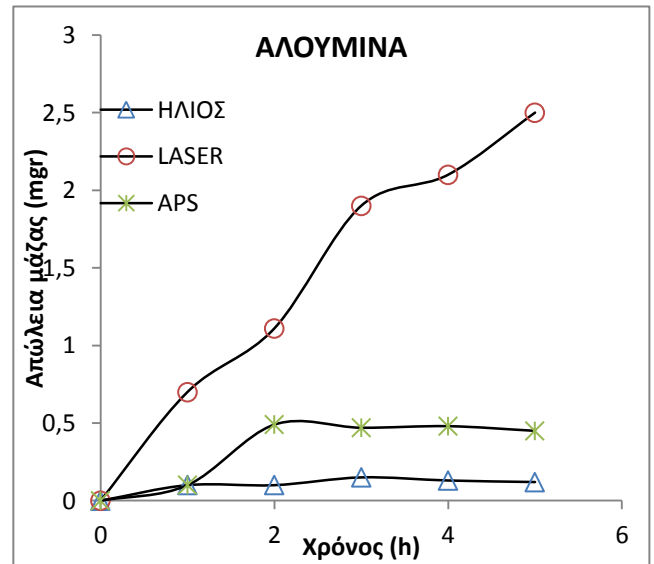
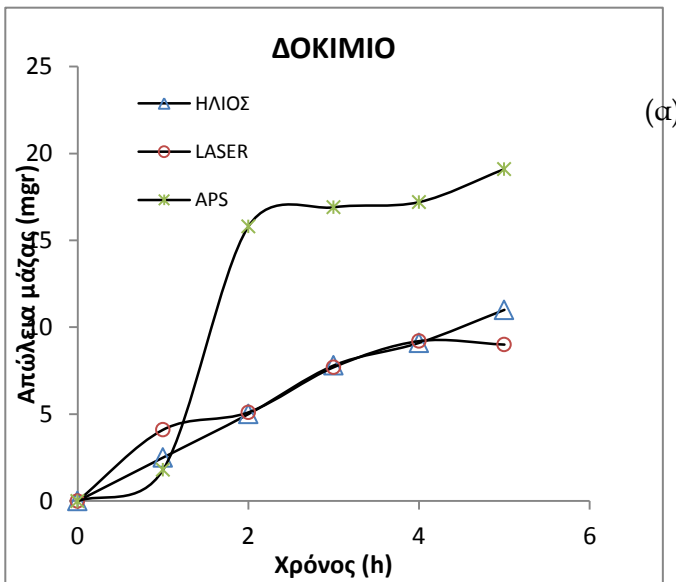
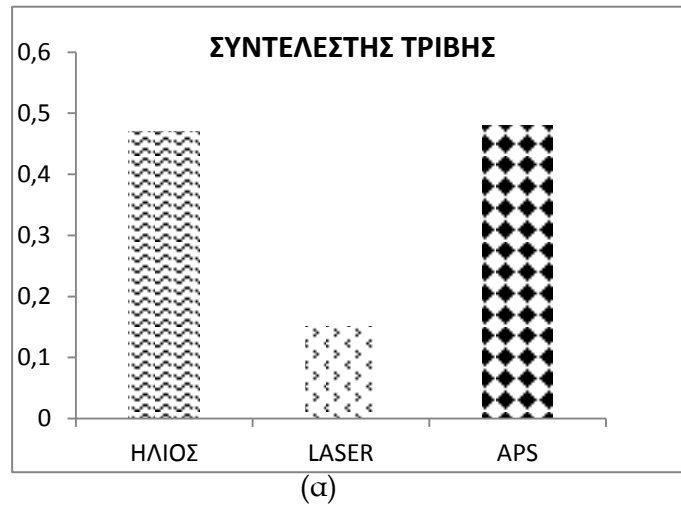


(β)

**Σχήμα VI-16 : Επίστρωση WC-17Co σε χάλυβα St52.3**  
**(α) οπτική μικρογραφία τομής κατεργασίας με Laser**  
**(β) SEM τομής ζώνης κατεργασίας με APS**

Τέλος, στην περίπτωση της Σ.Η.Ε. (πρβλ παρ. V1.3.1.) για χρόνο συνολικής κατεργασίας ίσο με  $t=21\text{min}$  και παραμονή στη μέγιστη θερμοκρασία  $T=1270^\circ\text{C}$  για 13min η κραματωμένη ζώνη φτάνει σε μέγιστο βάθος μέχρι 1600 $\mu\text{m}$  (Σχήμα V-25α). Χαρακτηρίζεται δε από διαστρωμάτωση πέντε (5) υποζωνών, περιεχόμενων καρβιδίων, σε διαφορετικό βαθμό διαλυτοποίησης η κάθε μία. Ενώ η σκληρότητα είναι πολύ υψηλή πλησίον των αδιάλυτων καρβιδίων, στις μήτρες των υποζωνών κυμαίνεται από 750-950 HV<sub>300p</sub>.

Η σύγκριση της τριβολογικής συμπεριφοράς των επιστρώσεων έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα : Τη μικρότερη τιμή στο συντελεστή τριβής παρουσιάζει η επίστρωση που δημιουργήθηκε με Laser, ίση με 0.15, έναντι 0.48 για την επίστρωση που παράχθηκε με ψεκασμό plasma και 0.47 αντίστοιχα, για τον ήλιο (Σχήμα VI-17 α).



Σχήμα VI - 17 : Επίστρωση WC-17%Co σε χάλυβα St52.3 με τρεις διαφορετικές τεχνικές : ήλιο, laser, APS (α) συντελεστής τριβής (β) απώλεια μάζας δοκιμίου (γ) απώλεια μάζας μπάλας αλούμινας

Παρ' όλη την πολύ μικρότερη τιμή του συντελεστή τριβής στην περίπτωση του Laser, η φθορά της επίστρωσης είναι ίδια (Σχήμα VI- 17β) με αυτήν της επίστρωσης με ήλιο,

ενώ αμφότερες είναι τρεις φορές μικρότερες από την περίπτωση της κατεργασίας με plasma.

Όσον αφορά στη σφαίρα αλούμινας, αυτή φθείρεται ελάχιστα κατά την τριβή της στην επιστροφή με ήλιο, και συγκεκριμένα πενήντα (50) φορές λιγότερο από την επιστροφή με laser και έξι (6) φορές λιγότερο από την επιστροφή με plasma (Σχήμα VI-17 γ).

Συμπερασματικά :

- Το μεγαλύτερο βάθος κατεργασίας επιτυγχάνεται στην περίπτωση της ηλιακής κατεργασίας, ενώ στην περίπτωση του laser και APS η ζώνη δε ξεπερνά τα 350μm.
- Ο ήλιος και το laser δίνουν μεγάλη διαλυτοποίηση καρβιδίων και μηδενικές ασυνέχειες (πόρους, ρωγμές) σε αντίθεση με την ανομοιόμορφη APS επιστροφή.
- Όσον αφορά στην τριβολογική συμπεριφορά και αντοχή στη φθορά, η επιστροφή με laser, εξεταζόμενη μεμονωμένα φαίνεται να έχει την καλύτερη και από τις τρεις τεχνικές : μικρότερο συντελεστή τριβής-μικρή φθορά επιστροφής-μεγάλη φθορά ανταγωνιστικού υλικού, αλλά συγκρίνοντας ως προς τη συνολική συμπεριφορά του εξεταζόμενου τριβοσυστήματος (επιστροφή-σφαίρα) η κατεργασία με ήλιο υπερέχει.

## VI.6 ΒΙΒΛΙΟ ΓΡΑΦΙΑ

[1] D.I. PANTELIS, A.V. GRINIARI "Solar treatment of pre-deposited and atmospheric plasma sprayed WC-17%Co powder on Stainless Steel 304L", proceedings of the 18th International Conference SMT18 ("Surface Modification Technologies XVIII"), Dijon (France), 15-17 November 2004, edited by T.S. Sudarshan, M. Jeandin and J.J. Stiglich, published by ASM International, UK, 2006, Book-Institute of Materials, Vol. 807, pp. 159-167.

[2] PantelisD., Griniari. A, Solar Energy and Solar Cells, 2005,Vol 89, is 1, p1-11

[3] D.I. Pantelis, A. Choundri. H.Hontzopoulos G. Palli : «Wear behavior of cermet coatings on steel formed by three different surface treatment techniques»  
Proceedings of Surface Modification Technologies 14th International Conference, Paris 11-13 September 2000, ed. T.S. Sudarshan and M.Jeandin, Publ. By "The Institute of Materials", 2000 pp.353-359 [13]



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ VII : ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ****VII.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στα πλαίσια των περισσότερων επιφανειακών κατεργασιών σιδηρούχων υλικών, κυρίως χαλύβων, που πραγματοποιούνται με χρήση δεσμών υψηλής πυκνότητας ενέργειας, ο στόχος είναι να επιτευχθεί η μέγιστη πυκνότητα ενέργειας. Μαθηματικά μοντέλα που προβλέπουν με μεγάλη ακρίβεια την απόκριση των υλικών στην επιφανειακή κατεργασία με Laser έχουν ήδη αναπτυχθεί για τη δημιουργία επίστρωσης, την περίπτωση της δημιουργίας κραμάτωσης [1], της ανόπτησης [2], της συγκόλλησης [3] και την επιφανειακή σκλήρυνσης [4-7].

Δεδομένης της ομοιότητας της κατεργασίας με laser με την ηλιακή κατεργασία, αυτά τα μοντέλα μπορούν να παρέχουν τη βάση για την αντίστοιχη θερμική ανάλυση της ηλιακής κατεργασίας.

Η εξέλιξη στις υπολογιστικές μεθόδους, τις σχετικές με την ανάπτυξη των υπολογιστών, καθώς και η εμφάνιση και ανάπτυξη προγραμμάτων που βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS, ABAQUS, COMSOL MULTIPHYSICS Κλπ) έχουν επιτρέψει στην επιστημονική κοινότητα να αντικαταστήσουν τα αναλυτικά και πολύ απλοποιημένα μοντέλα, σε άλλα αριθμητικά ικανά να λάβουν υπόψη τους, απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολία, αλλαγές στη γεωμετρία με την προσθήκη ενός νέου υλικού, και άλλες παραμέτρους, οι οποίες επιτρέπουν να προσεγγίσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα αριθμητικά αποτελέσματα με εκείνα που ελήφθησαν πειραματικά.

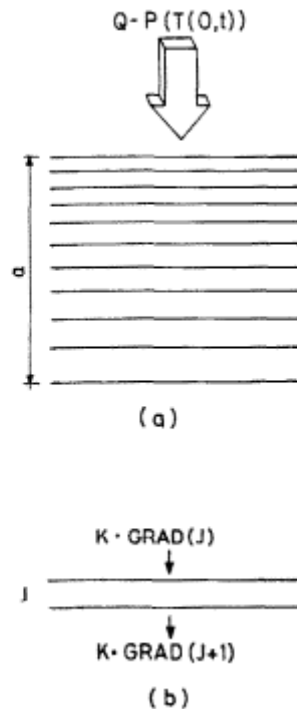
Ο στόχος της μοντελοποίησης είναι να αναπαραχθεί αριθμητικά το θερμοκρασιακό πεδίο που ελήφθηκε από την πραγματική διαδικασία κραμάτωσης των δοκιμών στον ηλιακό φούρνο της PSA, η διάταξη και η αρχή λειτουργίας του οποίου, περιγράφονται στην παράγραφο IV.2.1 της διατριβής.

Η δημιουργία κραμάτωσης με κατεργασία ή/και ανακατεργασία με ΣΗΕ έχει μοντελοποιηθεί από πολύ λίγους ερευνητές. Αναλυτικότερα:

Οι Rodriguez et al., το 1995 [8] δημιούργησαν ένα πρόγραμμα με πεπερασμένα στοιχεία βασισμένο σε ένα μοντέλο μονοδιάστατης μεταφοράς θερμότητας προκειμένου να προβλέψουν τις επιδράσεις της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας στα δοκίμια χάλυβα. Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε υπολογισμός της ακτίνας που

εφαρμόζεται στην ανάλυση της θέρμανσης των δοκιμίων χάλυβα που κατεργάζονται με συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια.

Ένα επίπεδο κομμάτι χάλυβα με πάχος  $a$  cm χωρίστηκε σε έναν ικανό αριθμό φετών με κομψιμένο πάχος, το οποίο αυξανόταν με την απόσταση από την ακτινοβολούμενη επιφάνεια (Σχήμα VII-1). Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, η επάνω ακτινοβολούμενη επιφάνεια κάθε φέτας θεωρείται ότι λαμβάνει μία ομοιόμορφη πυκνότητα ενέργειας. Η φέτα με δείκτη  $J$  φαίνεται ότι λαμβάνει θερμότητα από την προηγούμενη φέτα ( $J-1$ ) και δίνει θερμότητα στην επόμενη ( $J+1$ ), η οποία υπολογίστηκε ως συνάρτηση του συντελεστή αγωγιμότητας  $K$  και των αντίστοιχων θερμοκρασιακών βαθμίδων.



**Σχήμα VII- 1 (α) Σκαρίφημα «φετών» διαφορετικού πάχους του δοκιμίου  
(β) της ροής ενέργειας μεταξύ δύο διαδοχικών φετών**

Η συνολική διάρκεια της κατεργασίας διαιρέθηκε σε μικρότερα διαστήματα, σε κάθε ένα από τα οποία θεωρείται η θερμοκρασία της κάθε φέτας σταθερή. Στο μοντέλο οι θερμοκρασίες καθορίζονταν συνεχώς μέσω των βαθμίδων που υπολογίζονταν από τις θερμοκρασίες των φετών. Το μοντέλο αναπτύχθηκε για πειραματική κατεργασία που πραγματοποιήθηκε σε δύο διαφορετικές εγκαταστάσεις : του κεντρικού πόργου



και του ηλιακού φούρνου. Και στις δύο περιπτώσεις εγκαταστάσεων οι πιο ενεργητικές ζώνες της δέσμης ενέργειας είχαν μεγαλύτερη διάμετρο από ότι το δοκίμιο, με αποτέλεσμα η επιφάνεια να απορροφά μία ομοιογενή πυκνότητα ενέργειας. Τα κυλινδρικά δοκίμια είχαν διαστάσεις διάμετρο 35 x ύψος 35mm, και ακτινοβολούνταν μόνο από μία από τις δύο βάσεις του δοκιμίου, ενώ η πλευρική επιφάνεια ήταν σκεπασμένη με κεραμικό υλικό, προκειμένου η θερμότητα να εισέρχεται μόνο από την ακτινοβολούμενη επιφάνεια. Τα δοκίμια κατεργάστηκαν υπό διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας. Οι θερμικές καμπύλες που ελήφθησαν, χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά για την επαλήθευση του μοντέλου. Μέσα επίπεδα τιμών αγωγιμότητας και διαχυτότητας χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογίσουν τις θερμικές καμπύλες μέσω του προτεινόμενου προγράμματος λαμβάνοντας υπόψη το θερμοκρασιακό εύρος των δοκιμών. Η θερμική αγωγιμότητα θεωρήθηκε ίση με  $0.38 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$  και η διαχυτότητα ίση με  $0.074 \text{ cm}^2/\text{s}$ . Η ισχύς που εφαρμόζεται υπολογίζεται με προσαρμογή της πειραματικής καμπύλης στη θεωρητική που παράγεται από το μοντέλο. Οι πυκνότητες ενέργειας στις δοκιμές του ηλιακού φούρνου υπολογίστηκαν ανάμεσα στα  $140\text{-}250 \text{ W}/\text{cm}^2$ . Με δεδομένη την πυκνότητα ενέργειας το μοντέλο επέτρεψε τον υπολογισμό του βάθους σκλήρυνσης ως συνάρτησης του χρόνου θέρμανσης.

Στην ίδια λογική, άλλοι ερευνητές [9] διερεύνησαν τη θερμική μοντελοποίηση της διαδικασίας δημιουργίας επίστρωσης με ΣΗΕ του ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα AISI 316 επάνω σε ένα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα χάλυβα, με χρήση προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Ειδικότερα, η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε θεωρώντας τη θερμοκρασιακή εξάρτηση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων θερμότητα πλέγματος, απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας. Μία διαδικασία δοκιμής σφάλματος επέτρεψε να συγκλίνουν οι υπολογισμοί με τα πειραματικά, ενώ η επικύρωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων έγινε λαμβάνοντας υπόψη τις πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας και τη μικροδομική αξιολόγηση.

Αν και μερικοί περιορισμοί εμφανίστηκαν, το μοντέλο αποδίδει με καλή ακρίβεια τις πραγματικές θερμοκρασίες κατά τη διαδικασία, παρέχοντας τη βάση για μελλοντική βελτιστοποίηση του.

## VII.2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ [10]

Η Θερμική ανάλυση χρησιμοποιείται προκειμένου να καθοριστεί η κατανομή της θερμοκρασίας, η συσσώρευση θερμότητας ή η απαγωγή της και άλλες συναφείς θερμικές ποσότητες σε ένα αντικείμενο. Οι κομβικοί βαθμοί ελευθερίας (αρχικά άγνωστα στοιχεία) είναι οι θερμοκρασίες. Οι πρωταρχικοί μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας είναι αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Επιπλέον, λιγότερο κυρίαρχα φαινόμενα όπως η αλλαγή της φάσης (τήξη) & η εσωτερική παραγωγή θερμότητας, μπορούν να εμφανιστούν.

### VII.2.1 Αγωγή

Η αγωγή θερμότητας αναφέρεται σε μακροσκοπικώς ακίνητα σώματα (στερεά ή ρευστά σε ακινησία) και συνδέεται με τη συναλλαγή ενέργειας σε μοριακό επίπεδο. Ουσιαστικά πρόκειται για τη μετάδοση ενέργειας από σωματίδια υψηλότερης προς σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας, δια της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης. Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή περιγράφεται (σε μία διάσταση) με το Νόμο του Fourier. Ας θεωρήσουμε επίπεδο σώμα σταθερού πάχους  $L$  με τις άλλες δύο διαστάσεις του να εκτείνονται στο άπειρο. Αν επικρατεί στη μία πλευρά του θερμοκρασία  $T_1$  και στην άλλη πλευρά του θερμοκρασία  $T_2$  μικρότερη της  $T_1$ , τότε ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας κατά την  $x$  διεύθυνση (κάθετα στο επίπεδο του σώματος) ανά μονάδα επιφανείας δίδεται από την εξίσωση Fourier:

$$q_x'' = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (\text{ΕΞ. VII-1})$$

Το μέγεθος  $q_x''$  ονομάζεται πυκνότητα ροής θερμότητας ή πυκνότητα θερμοροής (heat flux), και η μονάδα μέτρησής του είναι  $W/m^2$  (ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας). Εκφράζει τη θερμική ενέργεια που περνά από μοναδιαία επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου, λόγω της θερμοκρασιακής διαβάθμισης σε διεύθυνση κάθετη στην εν λόγω επιφάνεια. Το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω σχέση οφείλεται στο γεγονός ότι η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται από μεγαλύτερες προς μικρότερες θερμοκρασίες. Ο συντελεστής  $\lambda$  στην παραπάνω σχέση ονομάζεται συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (thermal conductivity) με μονάδα μέτρησης  $W/(m \cdot K)$ . Ο

συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται από το υλικό στο οποίο εφαρμόζεται η θερμοκρασιακή διαβάθμιση.

### VII.2.2 Συναγωγή

Η συναγωγή αναφέρεται στη μετάδοση θερμότητας σε κινούμενα ρευστά. Στην περίπτωση αυτή συνυπάρχουν δύο μηχανισμοί μετάδοσης ενέργειας. Ο πρώτος είναι η διάχυση ενέργειας μέσω των σωματιδιακών αλληλεπιδράσεων (όπως στην περίπτωση της αγωγής), ενώ ο δεύτερος μηχανισμός συνδέεται με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού. Κατά τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, τα στοιχειώδη σωματίδια που απαρτίζουν τα στοιχεία του ρευστού, μεταφέρουν μαζί με τη μάζα τους και τη θερμική ενέργεια που σχετίζεται με την τυχαία μεταφορική κίνησή τους, την εσωτερική περιστροφή τους και την ταλάντωσή τους. Έτσι η συνολική μετάδοση θερμικής ενέργειας είναι το άθροισμα της μετάδοσης λόγω συγκρούσεων (διάχυση) και της μετάδοσης λόγω της μεταφοράς της θερμικής ενέργειας των σωματιδίων μέσω της μακροσκοπικής κίνησης του ρευστού.

Η κύρια περιοχή εφαρμογής της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή είναι η μετάδοση από στερεή επιφάνεια προς κινούμενο ρευστό σε επαφή με την επιφάνεια, ή το αντίθετο. Γνωρίζουμε από τη μηχανική των ρευστών ότι στην περιοχή επαφής του ρευστού με στερεή επιφάνεια αναπτύσσεται το λεγόμενο οριακό στρώμα ταχύτητας (ή υδραυλικό οριακό στρώμα), ως αποτέλεσμα της δράσης των δυνάμεων συνεκτικότητας στο εσωτερικό του ρευστού. Στο οριακό στρώμα εμφανίζεται ομαλή μετάβαση από την ταχύτητα της ροής μακριά από το τοίχωμα (ταχύτητα ελεύθερης ροής) στη μηδενική ταχύτητα στην επιφάνεια του ακίνητου τοιχώματος. Στην περίπτωση κινούμενης επιφάνειας, η ταχύτητα της ροής πάνω στην επιφάνεια ισούται, ως γνωστόν, με την ταχύτητα της επιφάνειας (συνθήκη μη ολίσθησης). Στην περίπτωση διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της στερεής επιφάνειας και του ρευστού εμφανίζεται και το λεγόμενο θερμικό οριακό στρώμα (thermal boundary layer), του οποίου το πάχος μπορεί να είναι ίσο, μικρότερο ή μεγαλύτερο από αυτό του υδραυλικού οριακού στρώματος.

Εντός του θερμικού οριακού στρώματος εμφανίζεται ομαλή μεταβολή της θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία της στερεής επιφάνειας  $T_s$  μέχρι τη θερμοκρασία

της κύριας ροής  $T_o$ . Στην περίπτωση που η πρώτη είναι μεγαλύτερη της δεύτερης, η ροή θερμότητας πραγματοποιείται από τη θερμή επιφάνεια στο ψυχρότερο ρευστό. Επειδή στην περιοχή κοντά στο στερεό τοίχωμα οι ταχύτητες της ροής είναι πολύ μικρές, ο μηχανισμός της διάχυσης είναι αυτός που επικρατεί. Αντίθετα, μακριά από το τοίχωμα, όπου έχουν αυξηθεί οι ταχύτητες της ροής, επικρατεί η μετάδοση θερμότητας με μεταφορά. Ειδικά πάνω στο τοίχωμα, που η σχετική ταχύτητα της ροής είναι μηδέν, υπάρχει μόνο μετάδοση θερμότητας με διάχυση.

Η ροή που προκαλεί τη συναγωγή θερμότητας μπορεί να οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες ή στην ίδια τη μετάδοση θερμότητας. Έτσι, στην περίπτωση των σωμάτων κεντρικής θέρμανσης ενός σπιτιού, ο θερμαινόμενος (αρχικά μόνο με αγωγή) ακίνητος αέρας, λόγω μείωσης της πυκνότητάς του ανέρχεται, προκαλώντας φυσική κυκλοφορία στο εσωτερικό του δωματίου. Η φυσική αυτή κυκλοφορία δίνει την αναγκαία μεταφορική κίνηση για την εμφάνιση συναγωγής μεταξύ του θερμαντικού σώματος και του αέρα. Ο μηχανισμός της συναγωγής είναι πολύ πιο έντονος από τον αντίστοιχο της αγωγής. Στην παραπάνω περίπτωση έχουμε συναγωγή με φυσική κυκλοφορία. Στην περίπτωση που η ροή του ρευστού συντηρείται από εξωτερικό αίτιο (μία αντλία ή έναν ανεμιστήρα) τότε έχουμε μετάδοση θερμότητας με συναγωγή με εξαναγκασμένη κυκλοφορία

Συνήθως μαζί με την εξαναγκασμένη κυκλοφορία συνυπάρχει και φυσική κυκλοφορία, λόγω των δυνάμεων άνωσης από τη μεταβολή των πυκνοτήτων, μόνο που το πρώτο φαινόμενο είναι πιο έντονο στις περισσότερες των περιπτώσεων.

Το φαινόμενο της συναγωγής εξαρτάται από τη ροή του ρευστού (και τα χαρακτηριστικά της) και από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και της στερεής επιφάνειας. Μια γενική σχέση που περιγράφει τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι ο νόμος του Newton για τη συναγωγή, ο οποίος δίνει την πυκνότητα ροής θερμότητας:

$$q_x'' = h(T_s - T_o) \quad (\text{ΕΞ. VII-2})$$

Ο συντελεστής  $h$  ονομάζεται συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή και δίδεται σε  $W/(m^2K)$ . Η τιμή του εξαρτάται από το είδος της ροής, τη μορφή της επιφάνειας και τα θερμοδυναμικά και ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά του ρευστού. Ο προσδιορισμός του συνήθως απαιτεί σοβαρές γνώσεις ρευστομηχανικής, ενώ για τυπικές ροές η τιμή του βρίσκεται από πίνακες και διαγράμματα.

### VII.2.3 Ακτινοβολία

Κάθε σώμα (στερεό, υγρό ή αέριο) το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία διαφορετική από  $0\text{ K}$  εκπέμπει θερμική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία (σε μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - φωτονίων) δημιουργείται με αλλαγές στην ενεργειακή κατάσταση των ηλεκτρονίων των ατόμων του σώματος. Σε αντίθεση με τους άλλους δύο μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας (αγωγή και συναγωγή), η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη ύλης, αλλά μπορεί να γίνεται και εν κενώ (στην πραγματικότητα η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία γίνεται πιο αποδοτικά εν κενώ).

Ας θεωρήσουμε τη στερεή εξωτερική επιφάνεια ενός σώματος. Η ακτινοβολία που εξέρχεται από την επιφάνεια παράγεται στο εσωτερικό του σώματος και ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια εξέρχεται από μοναδιαίο εμβαδόν της επιφάνειας καλείται πυκνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας  $E$ . Η μέγιστη τιμή της  $E_b$ , δίδεται από το νόμο Stefan - Boltzman ως:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (\text{ΕΞ. VII-3})$$

όπου  $T_s$  η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας (σε  $K$ ) και  $\sigma$  η σταθερά των Stefan - Boltzmann ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2K^4)$ ). Η επιφάνεια που εκλύει τη μέγιστη αυτή ισχύ ακτινοβολίας ονομάζεται μέλαν σώμα (black body). Σε μία πραγματική επιφάνεια η ακτινοβολούσα ισχύς είναι προφανώς μικρότερη για την ίδια θερμοκρασία και δίδεται από τη σχέση:

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (\text{ΕΞ. VII-4})$$

όπου  $\varepsilon$  η ικανότητα εκπομπής (emissivity) της επιφάνειας, με τιμές μεταξύ 0 και 1. Η τιμή της ικανότητας εκπομπής εξαρτάται από το υλικό και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας και δείχνει πόσο η επιφάνεια αυτή προσεγγίζει το μέλαν σώμα.

Όταν μια επιφάνεια που βρίσκεται σε θερμοκρασία  $T_s$  ακτινοβολεί προς το περιβάλλον, η ροή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από τη σχέση:

$$q'' = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (\text{ΕΞ. VII-5})$$

όπου  $T_\infty$  είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Στην περίπτωση αυτή δεχόμαστε ότι το περιβάλλον συμπεριφέρεται ως μέλαν σώμα και απορροφά όλη την ακτινοβολία που εκλύεται από την επιφάνεια.

### VII.3 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

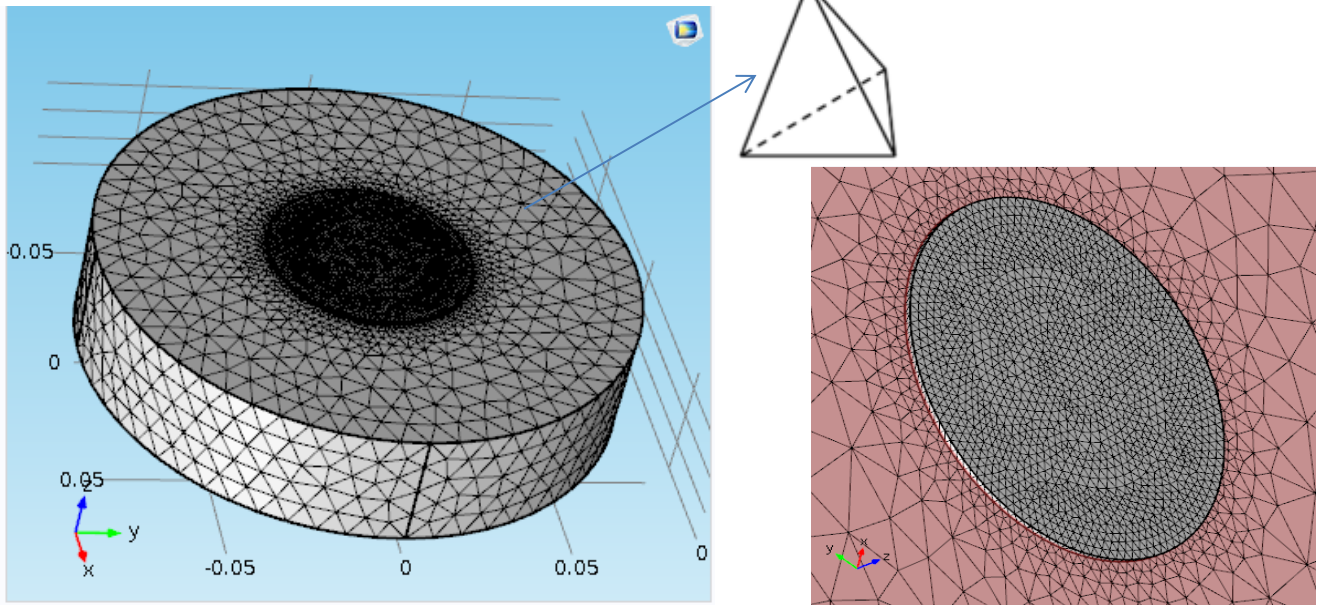
Προκειμένου να αναπαραχθεί το θερμοκρασιακό πεδίο που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια των κατεργασιών υπό διαφορετικές παραμέτρους ηλιακής κατεργασίας, σε διαφορετικά υλικά, ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ανάλυσης μεταφοράς θερμότητας ανεγέρθηκε με χρήση του λογισμικού COMSOL Multiphysics version 5.0.

Από όλες τις περιπτώσεις κατεργασιών που μοντελοποιήθηκαν παρουσιάζεται εδώ η τήξη σκόνης SiC σε προαπόθεση 1mm πάχους στην επιφάνεια κυλινδρικού δοκιμίου χάλυβα Ck60, ύψους 35mm και διαμέτρου 80mm που πραγματοποιήθηκε στον ηλιακό φούρνο της Plataforma Solar d' Almeria. Τα πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης της ζώνης κατεργασίας που σχηματίστηκε στην περίπτωση αυτή, παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφ. V παρ. V.1.1.2

#### VII.3.1 Χαρακτηριστικά Μοντελοποίησης

##### A. Πλέγματοποίηση (Meshing)

Η ανέγερση του μοντέλου περιελάμβανε αρχικά τη γεωμετρική προσομοίωση του υποστρώματος και της φέρουσας επίστρωσης και στη συνέχεια την πλεγματοποίηση του. Η απλή γεωμετρία του δοκιμίου επέτρεψε την αρχική επιλογή του είδους του πλέγματος που βασικά προτείνεται (default) από το COMSOL : πλέγμα ελεγχόμενο από Νόμους της Φυσικής (*Physics-controlled mesh*) με Κανονικό Μέγεθος Στοιχείου (*Normal element size*). Στη συνέχεια όμως, και κατόπιν κάποιων δοκιμών θεωρήθηκε ότι η αναβάθμιση του πλέγματος σε λεπτότερο (*finer*) θα απέδιδε με μεγαλύτερη ακρίβεια τις τιμές θερμοκρασίας στο θερμοκρασιακό πεδίο. Έτσι, το τελικό πλέγμα αποτελείται από τετραεδρικά στοιχεία (tets) μέγιστου μεγέθους 0,0088m και ελάχιστου μεγέθους 6,4E-04m, (Σχήμα VII-2α, ένθετο) τα οποία κατανέμονται ως εξής : 62706 στοιχεία στο κυρίως σώμα, 11018 πλευρικά και 404 γωνιακά στοιχεία.



(α)

(β)

**Σχήματα VII-2 : Πλέγμα μοντελοποίησης (finer) με τετραεδρικά στοιχεία (tets)**

**(α) Γενική Άποψη (β) στην περιοχή της σκόνης**

### B. Θερμικό Φορτίο

Η μοντελοποίηση που πραγματοποιήθηκε αφορούσε μόνο στη μεταφορά θερμότητας σε στερεά (Heat Transfer in Solids). Η βασικά προτεινόμενη (default) επιλογή του COMSOL “heat transfer in solids” για την περίπτωση αυτή, εφαρμόζει τον φυσικό νόμο της μεταφοράς θερμότητας, κοινώς αναφερόμενος ως αρχή διατήρησης της ενέργειας, ο οποίος στην περίπτωση της τρισδιάστατης ανάλυσης περιγράφεται με την επόμενη εξίσωση :

$$\rho C_p \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} = k \left[ \left( \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial z} \right) \right] \quad (\text{ΕΞ-VII-6})$$

όπου,  $k$  είναι η θερμική αγωγιμότητα,  $C_p$  η ειδική θερμότητα και  $\rho$  η πυκνότητα των υλικών.

Στην **επάνω επιφάνεια** κάθε δοκιμίου θεωρείται ότι εφαρμόζεται μια ροή θερμότητας (Heat Flux) που δίνεται από την εξίσωση ΕΞ-VII-7 :



$$-k \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] = Q(x, y, z) - \varepsilon \sigma [T^4 - T_0^4] - h[T - T_0] \quad (\text{ΕΞ-VII-7})$$

Η τριών διαστάσεων Gaussian ενεργειακή κατανομή της δέσμης ακτινοβολίας δίνεται από την εξίσωση ΕΞ-VII-8 :

$$Q(x, y, z) = Q_0 * (1 - Rc) * Ac * Ar * \exp\left(-\frac{(x)^2}{(2 * sigx^2)} - \frac{(y)^2}{(2 * sigy^2)}\right) * \exp(-Ac * abs(z))$$

(ΕΞ-VII-8)

όπου  $Q_0$  είναι η ισχύς του ηλιακού φούρνου ίση με 36kW,  $sigx$  και  $sigy$  είναι οι τυπικές αποκλίσεις στους αντίστοιχους άξονες και  $Ac$  ο συντελεστής απορρόφησης,  $Rc$  η ανακλαστικότητα και  $Ar$  το αντίστροφο του εμβαδού της διατομής της δέσμης. Αν και η κατανομή της θερμότητας του ηλιακού σποτ είναι Γκαουσιανή, ωστόσο, οι διαστάσεις της προαιπόθεσης της σκόνης (Διάμετρος Προαιπόθεσης 2mm), σε σχέση με τις διαστάσεις του ηλιακού σποτ (Διάμετρος 23cm), για το οποίο αναπτύσσεται πλήρως η γκαουσιανή καμπύλη είναι πολύ μικρότερη. Συνεπώς, χωρίς σημαντικό σφάλμα, θεωρείται ότι η περιοχή κατεργασίας βρίσκεται εντός του μέγιστου της γκαουσιανής καμπύλης, δηλαδή ότι το δοκίμιο φορτίζεται επιφανειακά με ομοιόμορφο και σταθερό θερμικό φορτίο. Η δε λανθάνουσα θερμότητα που παράγεται λόγω ενδεχόμενης αλλαγής φάσης θεωρείται αμελητέα σε σχέση με το πολύ μεγάλο θερμικό φορτίο που εφαρμόζεται, για αυτό και δεν συνυπολογίζεται.

Το μοντέλο ζητήθηκε να δίνει τιμές θερμοκρασίας ανά 0,5s, για τη διάρκεια της κατεργασίας των 1020s, αλλά και για την φάση της ψύξης μέχρι τον χρόνο των 1900s. Για αυτό το βήμα και για τύπο πλέγματος finer ο υπολογιστικός χρόνος είναι 44min και 27s. Εικονικά, σημειακά και επιφανειακά θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν σε διαφορετικά σημεία και επιφάνειες του υποστρώματος και της επίστρωσης για να παρακολουθείται τοπικά η εξέλιξη της θερμοκρασίας, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης της κατεργασίας.

### Γ. Εισαγωγή Ιδιοτήτων Υλικών

Στον ακόλουθο Πίνακα VII-1 παρουσιάζονται οι τιμές των θερμικών και άλλων ιδιοτήτων του υποστρώματος χάλυβα Ck60 που χρειάστηκε να εισαχθούν στο μοντέλο, δεδομένου ότι τις ιδιότητες για τη σκόνη SiC, ως συναρτήσεις της θερμοκρασίας, τις δίνει το COMSOL, αφού αυτή η ένωση περιλαμβάνεται στη βάση δεδομένων υλικών που διαθέτει.

**Πίνακας VII-1 : Ιδιότητες Υποστρώματος**

| ΧΑΛΥΒΑΣ | Πυκνότητα<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | Ειδική Θερμότητα*<br>(J/Kg·°K) | Θερμική<br>Αγωγιμότητα*<br>(W/ K m) |
|---------|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| Ck60    | 7,85                               | 502                            | 49.7                                |

### Γ. Οριακές Συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που τέθηκαν καθορίζουν τους προαναφερθέντες μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας (παρ. VII-2), που λαμβάνουν χώρα σε κάθε διαφορετική επιφάνεια του δοκιμίου, τόσο κατά τη θέρμανση όσο και την ψύξη.

Το δοκίμιο θεωρήθηκε ότι με την έναρξη της δοκιμής, βρισκόταν σε ομοιόμορφη θερμοκρασία  $T_0 = 90,7^{\circ}\text{C}$ , τιμή που προέκυψε από τις ενδείξεις του θερμοστοιχείου.

Σε όλες τις υπόλοιπες επιφάνειες -εκτός από τη βάση του δοκιμίου που θεωρήθηκε μονωμένη- τέθηκαν οι οριακές συνθήκες συναγωγής και ακτινοβολίας, οι οποίες δίνονται από την ακόλουθη εξίσωση :

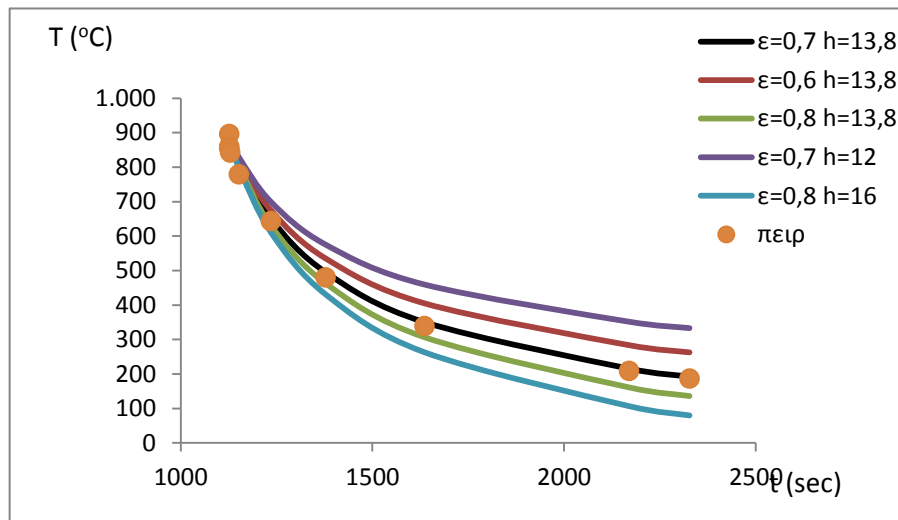
$$-k \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] = h[T - T_0] + \varepsilon\sigma[T^4 - T_0^4] \quad (\text{ΕΞ-VII-9})$$

όπου  $h$  είναι ο συντελεστής συναγωγής και  $\varepsilon$  είναι ο συντελεστής ακτινοβολίας.

Οι τιμές του συντελεστή συναγωγής και του συντελεστή ακτινοβολίας προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος για μία σειρά «τρεξιμάτων» ενός απλού μοντέλου, και επιλέχθηκε εκείνο το ζεύγος τιμών, το οποίο στο στάδιο της απόψυξης έδωσε καμπύλη θερμοκρασίας - χρόνου απόψυξης, με τη μικρότερη απόκλιση από την πειραματική. Τελικά, οι τιμές του έγιναν αποδεκτές και χρησιμοποιήθηκαν είναι :

Συντελεστής συναγωγής  $h= 13,8 \text{ W/m}^2\text{K}$

Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας  $\varepsilon=0,7$



**Σχήμα VII-3 : Καμπύλες απόψυξης για διάφορες τιμές του συντελεστή συναγωγής και ακτινοβολίας**

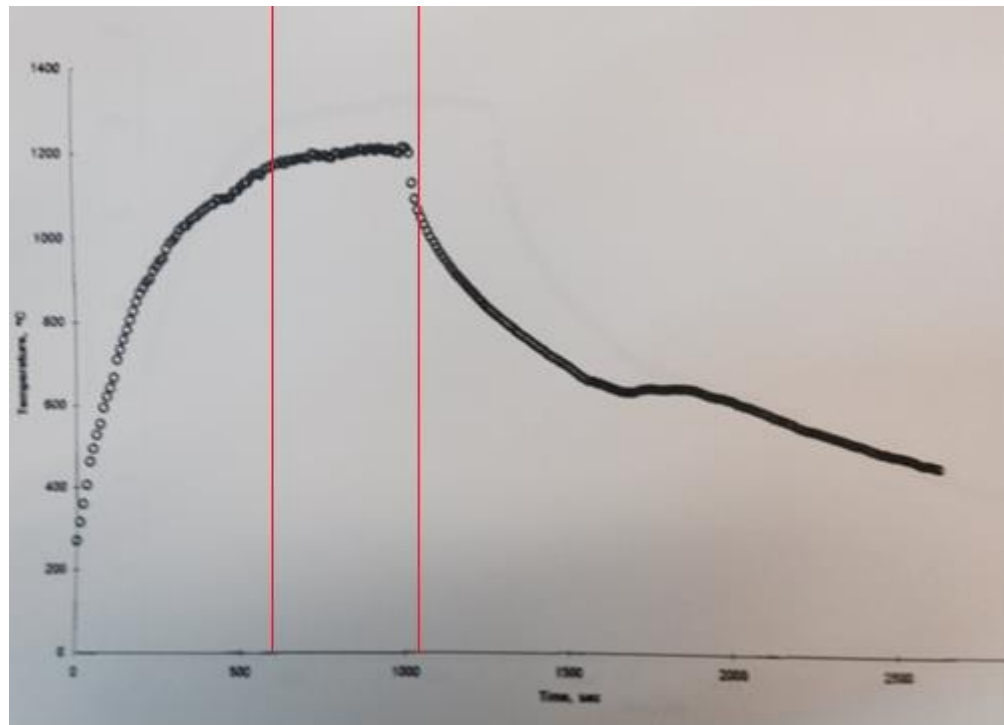
Σε ότι αφορά στις παραπάνω τιμές μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

- Η τιμή που προσδιορίστηκε για το συντελεστή συναγωγής είναι αναμενόμενη για ψύξη στον αέρα με φυσική κυκλοφορία. Βιβλιογραφικά δίνονται τιμές της τάξης των  $8 - 14 \text{ W/m}^2\text{K}$  [[http://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d\\_284.html](http://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d_284.html)].

- Ο συντελεστής ακτινοβολίας συμφωνεί με τις τιμές που δίνονται βιβλιογραφικά για οξειδωμένο χάλυβα ( $\epsilon=0,79$ ) [[http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d\\_447.html](http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html)]

#### VII.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

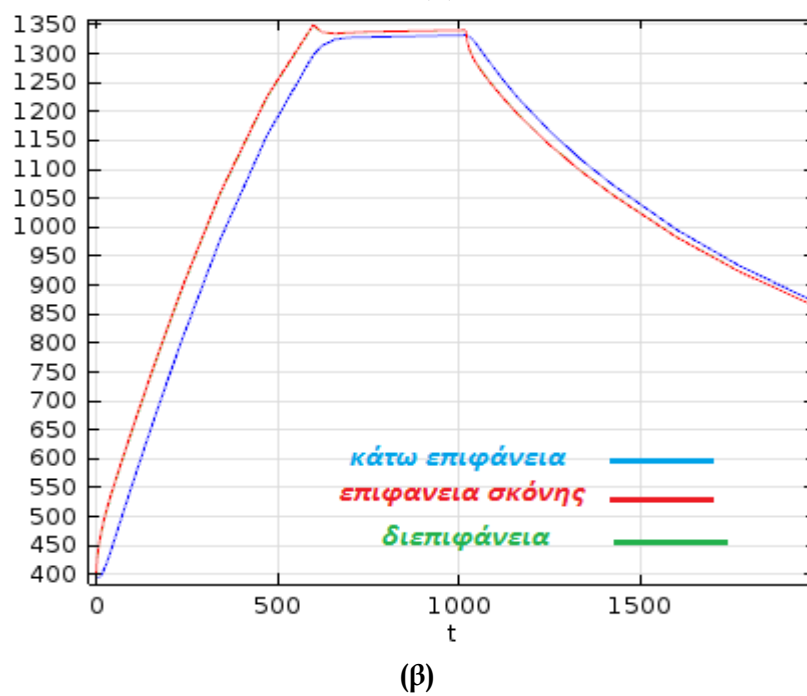
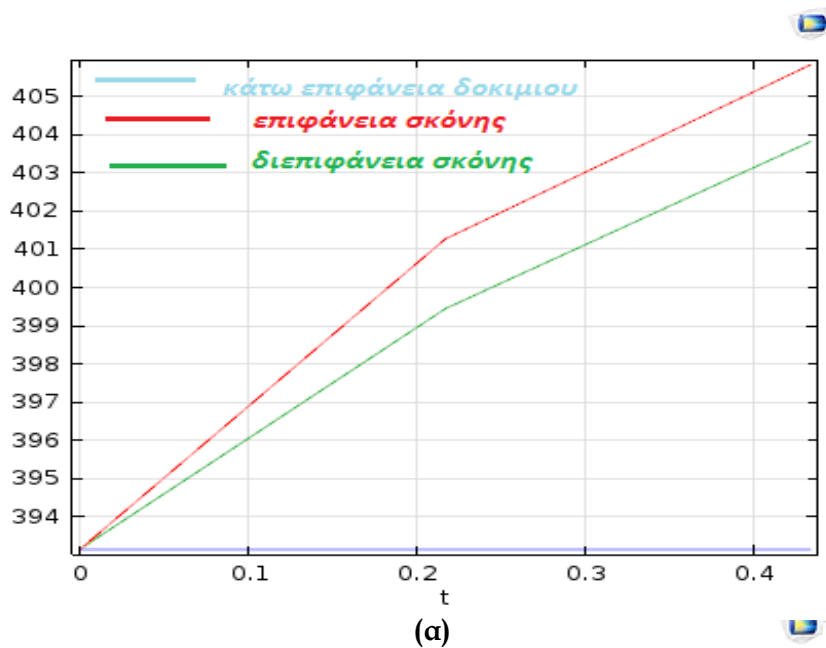
Στο ακόλουθο Σχήμα VII-4 παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα θερμοκρασίας  $T$  και χρόνου  $t$ , όπως καταγράφηκαν από το σύστημα λήψης δεδομένων με το οποίο ήταν συνδεδεμένα τα θερμοστοιχεία, στη βάση του δοκιμίου.



**Σχήμα VII-4 : Καμπύλη πειραματικών δεδομένων θερμοκρασίας,  $T$  - χρόνου,  $t$  για τήξη σκόνης SiC σε χάλυβα Ck60**

Όπως φαίνεται, σε χρόνο 10min η θερμοκρασία φτάνει στη μέγιστη τιμή της,  $T_{max} = 1240^{\circ} C$  με ένα ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας της τάξης των  $2^{\circ}C / sec$ . Στη συνέχεια παραμένει το δοκίμιο για 7min στη μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας, και ακολούθως αφήνεται να ψυχθεί.

Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα που έδωσε το μοντέλο κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και της ψύξης, κατά τη μέτρηση της μέσης θερμοκρασίας στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου ( $z=0$ ), στην κάτω επιφάνεια της επιστρώσης ( $z=0.035$ ) και στην επάνω επιφάνεια της σκόνης ( $z=0.036$ ) φαίνονται στα ακόλουθα Σχήματα VII-5 α και β. Ειδικότερα, στα πρώτο από αυτά τα σχήματα, απεικονίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας, στην πολύ αρχή της προσομοίωσης, όπου φαίνεται και η δυναμική της θέρμανσης στην επιφάνεια της σκόνης με ρυθμό 37,5K/s και της διεπιφάνειας με ρυθμό 30K/s, ενώ το υποστρώμα δεν έχει θερμανθεί ακόμα.

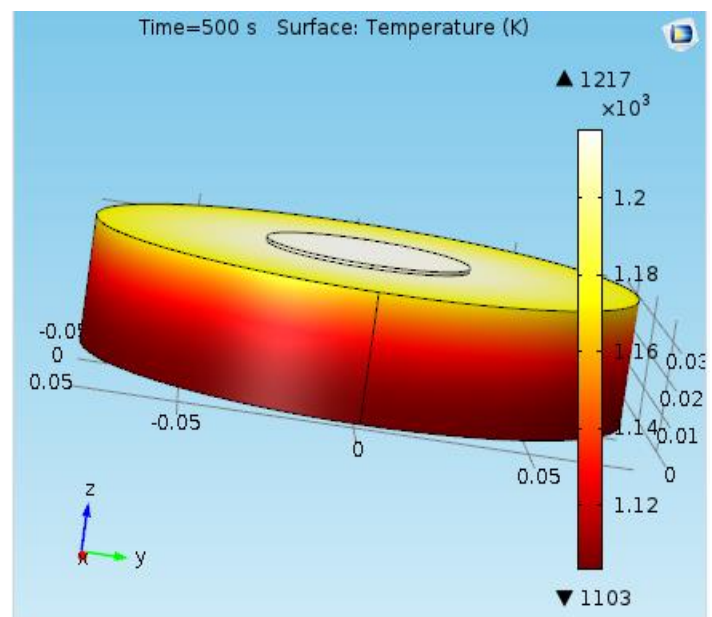
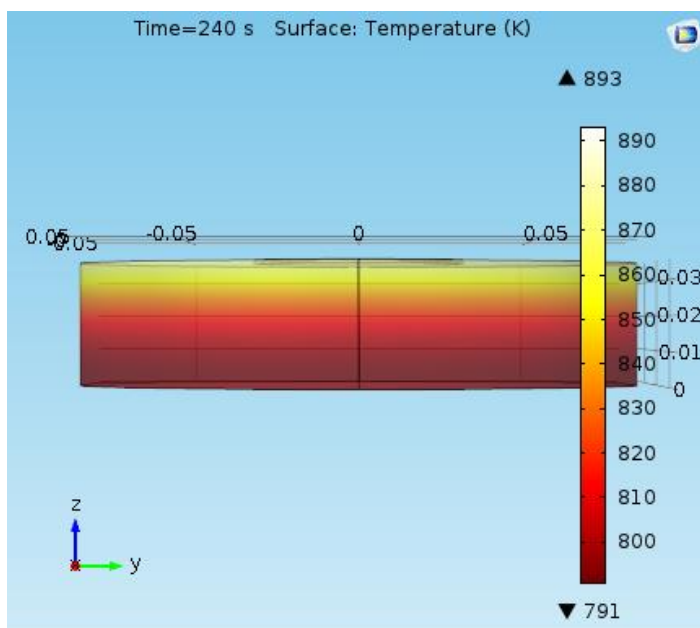


**Σχήματα VII-5 α και β: Καμπύλη αποτελεσμάτων μοντελοποίησης για προσομοίωση τήξης σκόνης SiC σε χάλυβα Ck60 μέσης θερμοκρασίας, T διαφορετικών επιφανειών ως προς χρόνο t**

(α) στην αρχή και (β) στο τέλος της προσομοίωσης

Από την σύγκριση των πειραματικών δεδομένων και αυτών του μοντέλου, διαπιστώνεται ότι, ενώ ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο πειραματικό, η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας που υπολογίζει το μοντέλο, δεν είναι μεγαλύτερη, όπως θα ήταν το αναμενόμενο αλλά φτάνει μέχρι τους  $1320\text{K} = 1047^\circ \text{C}$ . Επίσης, δεν υπάρχει διαφορά στην τιμή της θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας σκόνης και διεπιφάνειας, αν εξαιρεθεί η πολύ αρχική φάση της προσομοίωσης, ενώ και η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας της σκόνης και του υποστρώματος είναι μικρή, σταθερά  $50\text{K}$ , σε όλη τη φάση της θέρμανσης ( $0 < t < 600\text{s}$ ). Κατά τη φάση της παραμονής στην  $T_{\text{max}}$ , οι θερμοκρασίες υποστρώματος επίστρωσης συγκλίνουν μεταξύ τους, λόγω της αυξημένης θερμοχωρητικότητας του υποστρώματος. Τέλος κατά την ψύξη, το υπόστρωμα φαίνεται αρχικά να ψύχεται με μικρότερο ρυθμό.

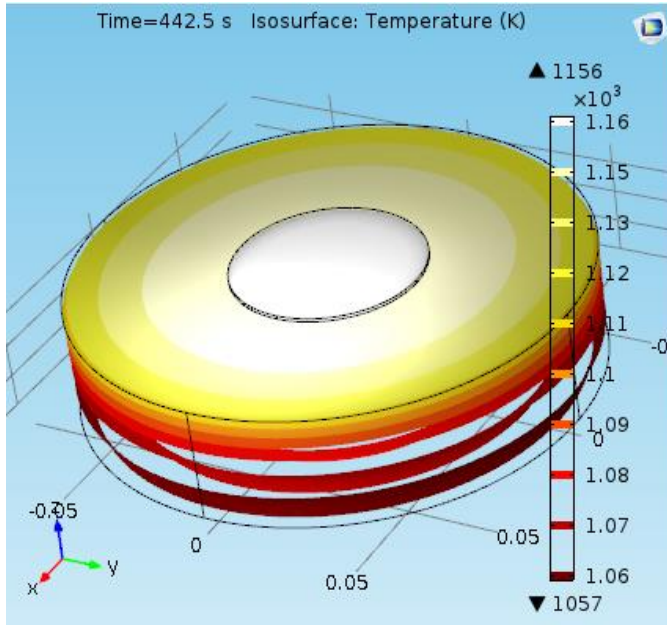
Στα επόμενα Σχήματα VII-6α και β παρουσιάζονται, σε διαφορετικές στιγμές κατά την προσομοίωση της κατεργασίας, η κατανομή της θερμοκρασίας στον όγκο του δοκιμίου, ενώ στα ακόλουθα Σχήματα VII-7α και β, φαίνονται οι ισόθερμες καμπύλες σε δύο χρονικές στιγμές της θέρμανσης.



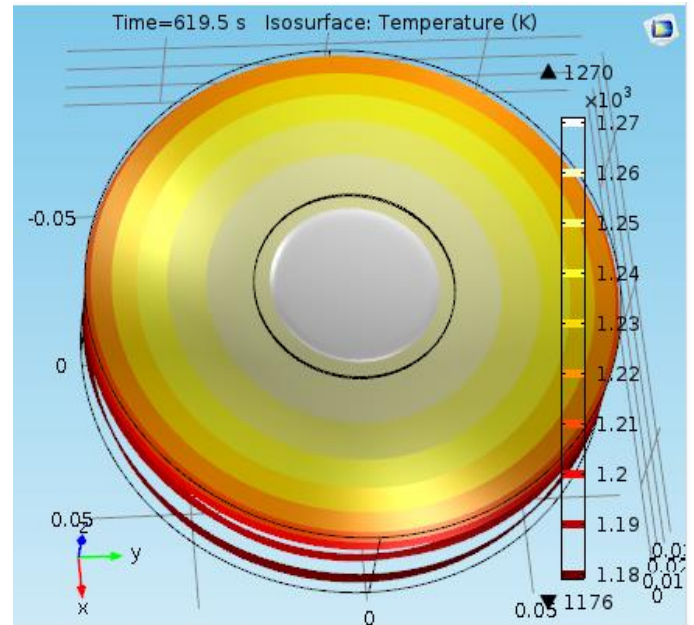
(α)

(β)

**Σχήμα VII-6: Κατανόμη Θερμοκρασίας στο προσομοιωμένο δοκίμιο κατά τη θέρμανση σε (α)  $t=240s$  ,(β)  $t= 500s$**



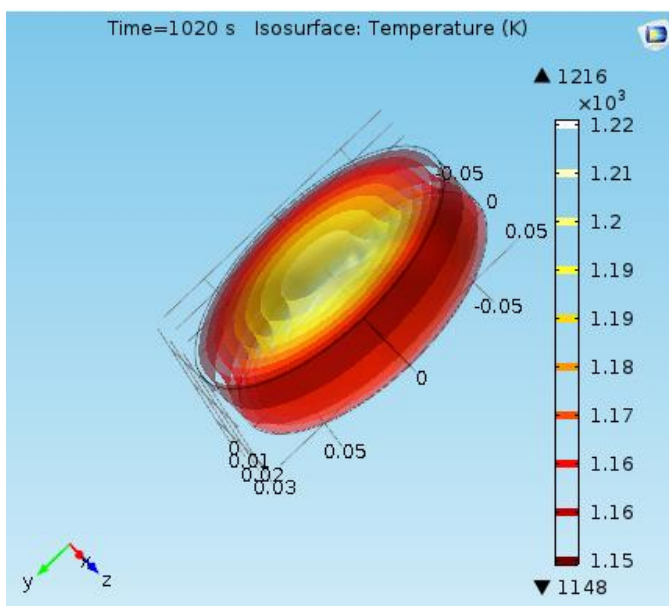
(α)



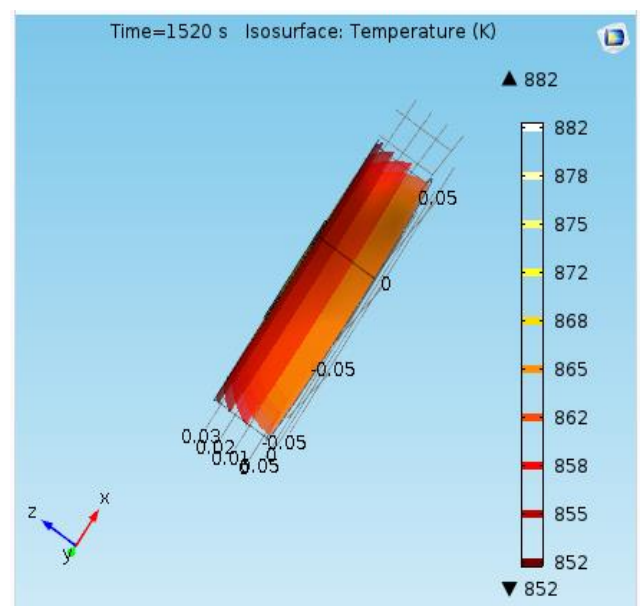
(β)

**Σχήμα VII-7: Ισόθερμες Καμπύλες κατά τη θέρμανση σε**

**(α)  $t=442,5s$  (β)  $t= 619,5s$**



(α)



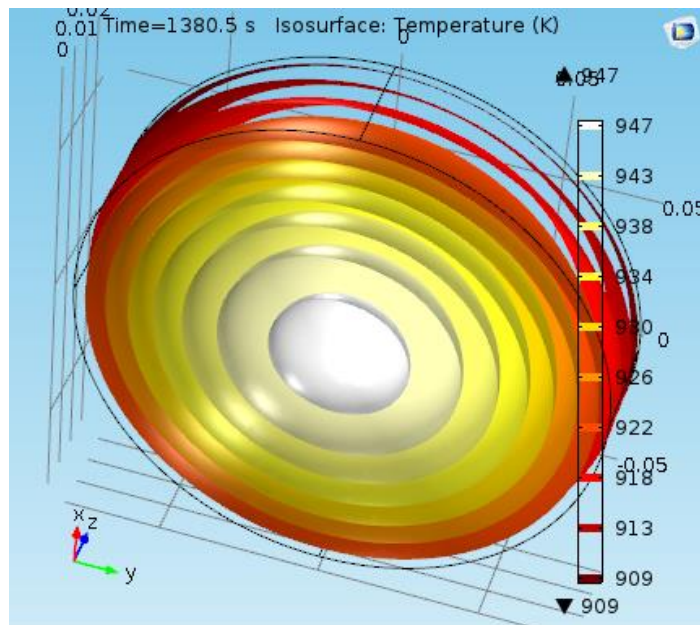
(β)

### Σχήμα VII-8: Ισόθερμες καμπύλες κατά τη ψύξη σε

(α) έναρξη ψύξης  $t=1020\text{s}$  (β)  $t= 1520\text{ s}$

Στα Σχήματα VII-8 α και β απεικονίζονται ισόθερμες καμπύλες σε χρονικές στιγμές κατά την ψύξη του δοκιμίου. Η επίδραση των απωλειών προς το περιβάλλον έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία Γκαουσιανής κατανομής του θερμοκρασιακού πεδίου στο δοκίμιο, για αυτό και το κέντρο του είναι σε κάθε περίπτωση θερμότερο από τις εξωτερικές επιφάνειες.

Το γεγονός της πολύ υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσει το υπόστρωμα, το οποίο τη διατηρεί και παραμένει σε αυτή και αρκετό χρόνο μετά την παύση επιβολής του θερμικού φορτίου φαίνεται και στο Σχήμα VII-9, και είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον γιατί συγκλίνει με τα ευρήματα της μικρογραφικής μελέτης (κεφ. V παρ. 1.1.2) των κατεργασμένων ζωνών.



Σχήμα VII-9: Ισόθερμες Καμπύλες στο υπόστρωμα σε χρονική στιγμή

κατά την ψύξη



### Παρατηρήσεις -Συμπεράσματα

1. Το μοντέλο προβλέπει γρηγορότερο ρυθμό θέρμανσης από το πείραμα. Αυτό οφείλεται στις απώλειες θερμότητας από τη βάση του δοκιμίου, η οποία στο μοντέλο θεωρείται μονωμένη, ενώ στην πράξη, όπως αναφέρεται και στην περιγραφή της πειραματικής διάταξης (Κεφ. IV, παρ.IV.2.1) το δοκίμιο είναι τοποθετημένο σε μία μικρή οπή από κεραμικό υλικό αλούμινας, αλλά η βάση του δεν εφάπτεται τέλεια σε αυτήν.
2. Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας που υπολογίζεται για τον ίδιο χρόνο θέρμανσης, είναι μικρότερη, και αυτό συμβαίνει σε όλες τις περιπτώσεις που μοντελοποιήθηκαν. Αυτό οφείλεται, αν εξαιρεθούν οι όποιες επισφάλειες έχει η *in situ* μέτρηση με θερμοστοιχεία, στο ότι το δοκίμιο μέσα στην οπή από κεραμικό υλικό που βρίσκεται, αφενός δεν μονώνεται, αφετέρου δεν έχει ελεύθερο χώρο παραπλεύρως. Έτσι, η αρχική τιμή  $T_0$  που τέθηκε ίση με  $90,7^{\circ}\text{C}$  και θεωρήθηκε σταθερή στο μοντέλο, στην πράξη αυξάνεται προιόντος του πειράματος, λόγω της έντονης θέρμανσης της όλης περιοχής. Και άρα, τελικά, στην πράξη δε χάνεται τόσο μεγάλο ποσό θερμότητας από τις πλευρικές επιφάνειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας, όσο αυτό που υπολογίζει το πρόγραμμα, με αποτέλεσμα η τελική τιμή της θερμοκρασίας που δίνει το μοντέλο να είναι μικρότερη.
3. Η διαφορά θερμοκρασίας υποστρώματος - επιφάνειας είναι πολύ μικρή σε όλη τη φάση της θέρμανσης, μηδενίζεται δε στη φάση της παραμονής στη μέγιστη θερμοκρασία, ενώ στην αρχική φάση της ψύξης το υπόστρωμα είναι θερμότερο. Αυτό οφείλεται στον μεγάλο όγκο του υποστρώματος, τη μεγάλη τιμή θερμικής αγωγιμότητας του, αλλά και στο γεγονός ότι η κεραμική επίστρωση, ψυχόμενη λειτουργεί μονωτικά και δεν απάγει τη θερμότητα του υποστρώματος. Αυτό, συνάδει με τα πειραματικά αποτελέσματα όπου παρατηρήθηκε ότι οι περιοχές οι οποίες εφάπτονται στο θερμό υπόστρωμα διαλυτοποιούνται εκτενέστερα. Ισχύει δε, σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά είναι πιο έντονο στα υποστρώματα μεγάλου όγκου.

4. Δεδομένου ότι σε καμία από τις περιπτώσεις κατεργασίας δεν επιτεύχθη θερμοκρασία πλησίον του Σημείο Τήξης των κόνων, η διαλυτοποίηση τους και η επακόλουθη κραμάτωση που επήλθε οφείλεται στην παρατεταμένη διάρκεια θέρμανσης των κατεργασμένων ζωνών, οι οποίες έδωσαν την απαραίτητη θερμική ενέργεια και χρόνο, για ενεργοποίηση των μηχανισμών διάχυσης που οδηγούν στη διαλυτοποίηση. Για αυτόν τον λόγο στην περίπτωση της σκόνης με την υψηλότερη τιμή διαχυτότητας (SiC) παρατηρείται και ο μεγαλύτερος βαθμός διαλυτοποίησης.

#### VII.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M Zhong\* and W Liu, JMES1782 “Laser surface Cladding : the state of the art and challenges” Proc. IMechE Vol. 224 Part C: J. Mechanical Engineering Science
- [2] L. Liu, A. Hirose, K.F. Kobayashi Acta Mater., 50 (2002), p. 1331
- [3] A.P. Mackwood, R.C. Crafer Opt. Laser Technol., 37 (2005), p. 99
- [4] E. Kennedy, G. Byrne, D.N. Collins J. Mater. Process. Technol., 155--156 (2004), p. 1855
- [5] X.F. Wang, X.D. Lu, G.N. Chen, Sh.G. Hu, Y.P. Su Opt. Laser Technol., 38 (2006), p. 8
- [6] A. Yáñez, J.C. Álvarez, A.J. López, G. Nicolás, J.A. Pérez, A. Ramil, E. Saavedra Appl. Surf.
- [7] W. Wu, N.G. Liang, C.H. Gan, G. Yu Surf. Coat. Technol., 200 (2006), p. 2686
- [8] G.P. Rodriguez -Donoso et al., Materials & Design, Vol. 16, Number 3, 1995
- [9] C. Sanchez Bautista et al., Surface and Coatings Technology, Vo 202, Issue 9, 2008, p. 1594-1608
- [10] Ν. Κουμούτσος, Β. Λυγερού «Μεταφορά Θερμότητας», Σημειώσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1991

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ VIII : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

*Τα αποτελέσματα της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής αποδεικνύουν ότι η χρήση των ηλιακών συστημάτων συγκέντρωσης ενέργειας στις επιφανειακές κατεργασίες των υλικών, προσφέρουν μοναδικές δυνατότητες για μετασχηματισμούς υψηλής Θερμοκρασίας, αλλά και για σύνθεση υλικών, τόσο από άποψη τεχνική όσο και οικονομική. Ειδικότερα, τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η δέσμη Σ.Η.Ε. είναι :*

- Η ακτινοβολία παρέχεται σε μεγάλου εύρους φάσμα, όπου τα περισσότερα υλικά απορροφούν ικανοποιητικά χωρίς ειδικά επιστρώματα.*
- Οι υψηλές Θερμοκρασιακές βαθμίδες είναι εφικτές.*
- Επειδή η ακτίνα φτάνει στο στόχο χωρίς προγενέστερες διαδικασίες μετατροπής, υπάρχουν λίγα απόβλητα, η αποδοτικότητα είναι υψηλή, και δεν υπάρχει συνήθως καμία απαίτηση για βοηθητική ψύξη.*
- Είναι εύκολο να διαμορφωθεί το μέγεθος και σχήμα της περιοχής εστίασης της ηλιακής ακτινοβολίας και να ελεγχθεί η πυκνότητα ισχύος της*
- Υπάρχει ελάχιστη περιβαλλοντική επιβάρυνση στη χρησιμοποίηση αυτής της τεχνολογίας.*

*Ειδικότερα στη δημιουργία μεταλλικών και κεραμικών επιστρώσεων σε χαλύβδινα υποστρώματα, η χρήση Σ.Η.Ε. αποδείχθηκε ότι δίνει εξαιρετικά ενδιαφέροντα αποτελέσματα :*

- 1. Σε όλες τις περιπτώσεις επιτυγχάνεται μεγάλο βάθος κατεργασίας, το οποίο σε συνδυασμό με την εξαιρετική συνάφεια με το υπόστρωμα, προσδίδει μεγάλη αντοχή στη φθορά των επιστρώσεων*
- 2. Η μικροδομή και η χημική σύσταση των ζωνών κατεργασίας είναι ομοιογενείς είτε σε όλη την έκταση της είτε σε διακριτές διαστρωματώσεις. Όταν η ζώνη διαστρωματώνεται σε διαφορετικές υποζώνες, αυτό συμβαίνει ομοιόμορφα σε όλη της την έκταση και πάντα παράλληλα με το υπόστρωμα.*
- 3. Η μικροσκληρότητα σε όλες τις περιπτώσεις αυξάνεται κατ' ελάχιστον 100% σε σχέση με το υπόστρωμα*
- 4. Οι συντελεστές τριβής των κατεργασμένων επιφανειών, μετρήθηκαν σε όλες τις περιπτώσεις σημαντικά μειωμένοι (ποσοστό >43%), και το ίδιο ισχύει και για την απώλεια μάζας των κατεργασμένων επιφανειών.*
- 5. Ακόμη πιο ενδιαφέροντα και πολλά υποσχόμενα είναι και τα αποτελέσματα της χρήσης Σ.Η.Ε. στην μετακατεργασία υφιστάμενων επιστρώσεων. Συγκεκριμένα ελήφθησαν τα ακόλουθα, αποτελέσματα :*

*υπερπολλαπλασιάστηκαν τα βάθη της κατεργασίας, οι ασυνέχειες των αρχικών επιστρώσεων εξαλήφθηκαν, η συνάφεια με το υπόστρωμα αναβαθμίστηκε, και ενώ η σκληρότητα μειώθηκε, η τριβολογική συμπεριφορά και αντοχή στη φθορά βελτιώθηκε. Η μετακατεργασία με Σ.Η.Ε. για τους λόγους αυτούς, προκρίνεται, δεδομένου ότι και ο μικρός χρόνος που απαιτείται για αυτήν, συνάδει με την αδυναμία χρήσης της Σ.Η.Ε. σε συνεχή παραγωγή, λόγω της εξάρτησής της από τις καιρικές συνθήκες.*

- 6. Όλα τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας Διατριβής, σε συνδυασμό με τη διερεύνηση της επίδρασης της μεταβολής σημαντικών παραμέτρων της κατεργασίας στα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των επιστρώσεων, επιτρέπουν την επίτευξη βελτιστοποίησης της κατεργασίας*
- 7. Επίσης, η επιβολή σταθερού θερμικού φορτίου εστιασμένο σε μεγάλη επιφάνεια σε σχέση με αυτήν των υπό κατεργασία δοκιμίων, δίνει τη δυνατότητα η ηλιακή κατεργασία να είναι ελέγξιμη, για στοιχειωδώς σταθερές καιρικές συνθήκες, επαναλήψιμη, και τελικά, βελτιστοποιήσιμη.*
- 8. Η αριθμητική μοντελοποίηση της κατεργασίας με Σ.Η.Ε., που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή και η οποία συγκλίνει σε σημαντικό βαθμό στην πραγματικότητα, αποτελεί τη βάση και δίνει τη δυνατότητα για αναβάθμιση της προσομοίωσης, με εισαγωγή πιο πολύπλοκων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα, στα όρια της περιοχής κατεργασίας.*

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

*Έτσι, μπορεί να υπάρξει ένα αξιόπιστο εργαλείο προσομοίωσης της κάθε αυτό κατεργασίας, προσαρμόσιμο σε οποιεσδήποτε συνθήκες, υλικά και γεωμετρίες.*



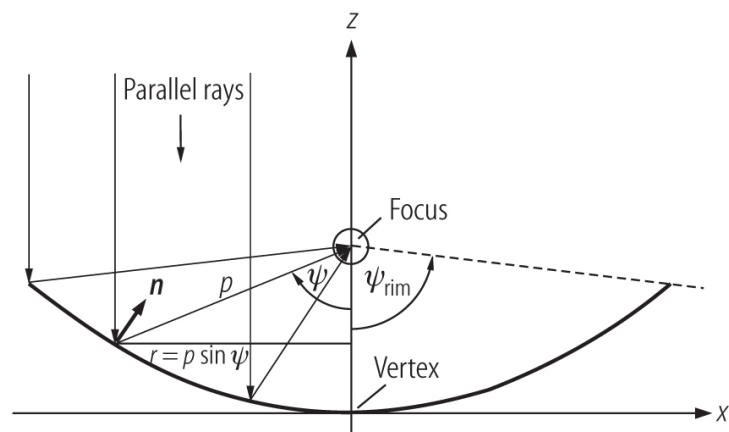
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι

## Παραβολική Γεωμετρία

Το σχήμα της παραβολικής επιφάνειας είναι ιδιαίτερα γνωστό στην οπτική ειδώλων εξαιτίας των ακτίνων παράλληλων αξόνων που αντανακλούνται σε ένα σημείο εστίασης. Η απλή γεωμετρία είναι μία καλή βάση για να αναλυθούν μερικές από τις βασικές σχέσεις.

Ειδικότερα ισχύει η σχέση :



Σχήμα Π-1 : Παραβολική Γεωμετρία

$$z = \left[ \frac{1}{(4f)} \right] x^2 + bf$$

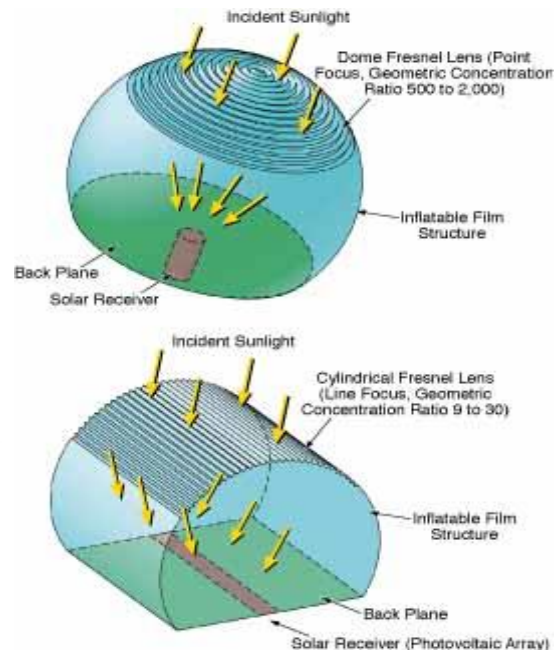
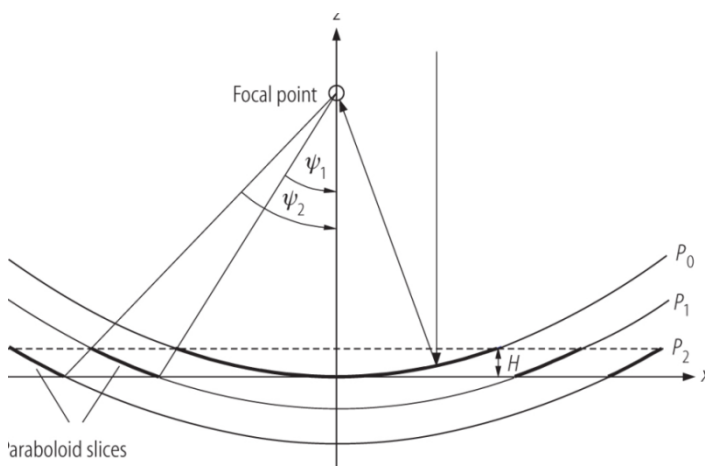
Όπου  $f$  είναι το μήκος εστίασης και  $b$  η τιμή της ζ-συντεταγμένης. Εάν  $b = -1$  το σημείο εστίασης προσδιορίζεται στο αρχικό. Η γωνία  $\psi_{\text{rim}}$  είναι η γωνία του παραβολικού συγκεντρωτή. Κατά την περιστροφή του παραβολοειδούς κατόπτρου περί τον άξονα  $z$ , δημιουργείται ένα παραβολοειδές κάτοπτρο τρισδιάστατης εστίασης. Στο Σχήμα 8,  $\rho$  είναι η τυχαία απόσταση του παραβολοειδούς από το σημείο εστίασης. Η ακτίνα της κυκλικής διατομής ανοίγματος του παραβόλου σε τυχαίο σημείο είναι  $r = \rho \cdot \sin \psi$ , και η αντίστοιχη διάμετρος είναι  $D = 2r$  ενώ η αριθμητική τιμή είναι  $f/D$ . Οπότε ένα παράβολο με γωνία  $90^\circ$  έχει αριθμητική διατομή  $f/D = 0.25$ . Η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου κατόπτρου είναι η εξής : ακτίνες παράλληλες στον  $z$  άξονα όλες διέρχονται από το σημείο εστίασης μετά από την πρόσπτωση. Η περιστροφή του κατόπτρου περί τον άξονα  $z$  παράγει

παραβολοειδές κάτοπτρο. Εστίαση σε γραμμή παράγεται εάν η διάταξη είναι παράλληλη στον άξονα  $y$  εκτός επιπέδου  $x-z$ .

### Γεωμετρία Fresnel

Η κατασκευή ενός μεγάλου μόνο τμήματος παραβολοειδούς, είναι αρκετά ακριβή οπότε άλλα σχέδια θα ήταν προτιμότερα για το σκοπό της συγκέντρωσης ενέργειας. Μία εναλλακτική είναι ο ανακλαστής Fresnel ο οποίος αποτελείται από παραβολικές φέτες πακτωμένες σε μία επιφάνεια, η οποία ως ιδέα έχει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα στη βάση της πρακτικής μηχανικής και της κατασκευής της.

Ο συλλέκτης Fresnel αποτελείται από πολλές παράλληλες σειρές ανακλαστήρων που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα δέκτη τοποθετημένο κατά μήκος των σειρών αυτών και σε αρκετά μέτρα ύψος. Οι ανακλαστήρες αυτοί είναι γνωστοί ως πρωτοβάθμιοι για να μη συγχέονται με ένα δευτεροβάθμιο ανακλαστήρα που είναι τοποθετημένος στο επάνω μέρος του δέκτη και κατευθύνει όλες τις εισερχόμενες ακτίνες στο σωλήνα απορρόφησης, (Σχήμα 9).



Σχήμα Π-2. : Γεωμετρία Frensel

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Η απλούστερη γεωμετρία απεικονίζεται στο Σχήμα 9. Ένα σετ παραβόλων με ένα κοινό σημείο εστίασης τοποθετούνται η μία επάνω στην άλλη (επικείμενες)

Τρία παραβολικά κάτοπτρα P0, P1 και 2 φαίνονται στο αντίστοιχο Σχήμα 9, με τον P0 να είναι η βάση της διάταξης, και με τα εστιακά μήκη (απόσταση κέντρου παραβολής από το σημείο εστίασης) να συσχετίζονται με την ακόλουθη σχέση :

$$f = f_i \frac{1 + \cos(\psi_i)}{2\cos(\psi_i)}$$

Όπου  $f$  είναι το εστιακό μήκος του παραβολικού κατόπτρου βάσης, και  $f_i$  και  $\psi_i$  εστιακό μήκος και γωνία  $i$ - παραβόλου.

Προφανώς τα εξωτερικά παράβολα έχουν πολύ μεγαλύτερο άνοιγμα και μικρότερη κοιλότητα. Οπότε η κοιλότητα είναι πιο σημαντική για τα εσωτερικά μέρη. Επιπλέον τα είδωλα των παραβολικών μερών απομειώνονται συνεχώς για τα εξωτερικά μέρη. Το μέγεθος των παραβολικών μερών ορίζονται από το πάχος της σειράς αντίστοιχα το ύψος  $H$ . Οι γωνίες  $\psi_i$  μπορούν να προσδιοριστούν ως

$$\tan(\psi_i) = (x^u_{i-1}) / (f - H)$$

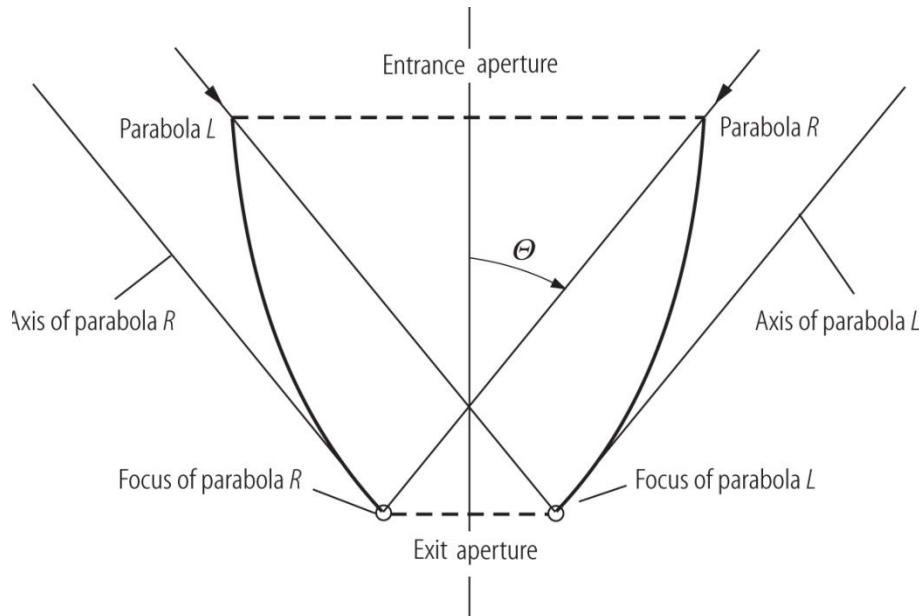
Ο όρος  $x^u$  είναι η  $x$ -value της αντίστοιχης παραβολής για  $z = H$ . Επίσης περιστροφή γύρω από τον  $z$ -axis παράγει μία συσκευή εστίασης σε σημείο, ενώ γραμμική προέκταση δίνει προφανώς μία γραμμική εστίαση. Η διάταξη σε γεωμετρία Fresnel μπορεί επίσης να εφαρμοστεί ως συσκευή διάθλασης, τους ομώνυμους φακούς. Το υλικό διάθλασης μπορεί να είναι ένα πλαστικό φιλμ και οι ενεργές επιφάνειες μπορούν να κατεργαστούν με την πίεση εγκοπές μέσα στο φιλμ. Αυτή η μέθοδος μπορεί να παράξει χαμηλού κόστους οπτικά στοιχεία.

## ΟΠΤΙΚΗ ΜΗ ΕΙΔΩΛΟΥ

Αυτή η κατηγορία οπτικών συστημάτων αφορά στη βέλτιστη μεταφορά της ακτινοβολίας ανάμεσα στην πηγή και το στόχο. Σε αντίθεση με τα συμβατικά οπτικά συστήματα οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται δεν έχουν στόχο να σχηματίσουν κάποιο είδωλο της

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

πηγής, αντίθετα επιχειρείται η επίτευξη ενός βέλτιστου οπτικού συστήματος για οπτική μεταφορά ακτινοβολίας από την πηγή στο στόχο.



Σχήμα Π-3 : Μέρος συγκεντρωτή μη απεικόνισης

Εάν η προσέγγιση της συγκέντρωσης του φωτός με αρχές διαμόρφωσης ειδώλου εγκαταλειφθεί, πολλά διαφορετικά σχήματα μη απεικονιστικής (του ειδώλου της πηγής ενέργειας) οπτικής υπάρχουν. Ένα από αυτά είναι ο παραβολικός συγκεντρωτής. Μία διδιάστατη γραμμική γεωμετρία εστίασης φαίνεται στο Σχήμα 10. Δύο παραβολικά κάτοπτρα  $R$  και  $L$  συνεννώνονται έτσι ώστε το σημείο εστίασης της πρώτης παραβολής να βρίσκεται στο τέλος της δεύτερης παραβολής και αντίστροφα. Οι άξονες των παραβολών σε σχέση με τον κύριο άξονα του συγκεντρωτή σχηματίζουν τη γωνία πρόσπτωσης. Οι ακτίνες που εισέρχονται με γωνίες ανακλώνται στα αντίστοιχα σημεία εστίασης. Όλες οι ακτίνες που εισέρχονται με μικρότερες γωνίες περνούν το άνοιγμα. Θεωρώντας τις ακόλουθες παραδοχές α. ότι η επιφάνεια ανάκλασης είναι τέλεια, β. ομοιόμορφη κατανομημένη ακτινοβολία στο άνοιγμα δίοδου και γ. μία ομοιόμορφη γωνιακή κατανομή των ακτινών, ο διδιάστατος CPC είναι ένας ιδανικός συγκεντρωτής με τον οποίο επιτυγχάνεται η μέγιστη συγκέντρωση. Ο λόγος της συγκέντρωσης ορίζεται ως ο λόγος των δίοδων, ενώ περιστροφή γύρω από τον κεντρικό άξονα οδηγεί σε τρισδιάστατο CPC. Αυτή η διάταξη δεν είναι ένας

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

τέλειος συγκεντρωτής, ακόμα και την τέλεια ανακλαστικότητα γιατί οι λοξές ακτίνες εν μέρει απορρίπτονται.

Ένας μεγάλος αριθμός άλλων τέτοιων οπτικών διατάξεων έχουν αναπτυχθεί, όπως ο συγκεντρωτής «τρομπέτα» (trumpet), ο κωνικός και ο στρογγυλοποιημένος κώνος. Αυτού του τύπου οι συγκεντρωτές, συνήθως χρησιμοποιούνται ως δεύτερο στάδιο συγκέντρωσης ενός ειδικού κατόπτρου

Για δεδομένο συγκεντρωτή τα μη απεικονιστικά οπτικά παρέχουν τις μεγαλύτερες δυνατές γωνίες πρόσπτωσης και άρα είναι τα πλέον κατάλληλα στην συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν συγκρίνονται με την παραδοσιακή οπτική ειδώλου (όπως φακούς Fresnel και παραβολικά κάτοπτρα) τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της κατηγορίας οπτικών είναι :

- Μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης που οδηγούν σε υψηλότερες τιμές ανοχών (ανεκτών αποκλίσεων από τις πραγματικές τιμές) και άρα υψηλότερες απόδόσεις για :
  - Μικρότερης ακρίβειας παρακολούθηση των ακτίνων
  - Χαμηλής ποιότητας κατασκευής οπτικών
  - Χαμηλότερης ποιότητας συναρμολογούμενα μέρη
  - Μετακίνηση του συστήματος εξαιτίας των ανέμων
  - πεπερασμένη δυσκαμψία της υποστηρικτικής υποδομής
  - παραμόρφωση λόγω παλαιώσης
  - δέσμευση και της ακτινοβολίας της άλου
  - άλλες ατέλειες του συστήματος
- Υψηλότερες συγκεντρώσεις ηλιακής ενέργειας
  - Μικρότερα φωτοβολταϊκά
  - Υψηλότερες θερμοκρασίες
  - Χαμηλότερες θερμικές απώλειες
  - Εξάπλωση των εφαρμογών της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας όπως της προσομοίωσης με το laser
- Δυνατότητα ομοιόμορφου φωτισμού
  - Βελτίωση της αξιοπιστίας και της απόδοσης των φωτοβολταϊκών
  - Βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Πολλές δυνατότητες στο σχεδιασμό, δηλ. διαφορετικών ειδών οπτικών με διαφορετικές γεωμετρίες μπορούν να διαμορφώσουν συστήματα για διαφορετικές εφαρμογές.

Επιπλέον, για χαμηλές συγκεντρώσεις ή πολύ μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης μπορεί να αποφευχθεί η παρακολούθηση της τροχιάς του

Η μόνη αδυναμία αυτού του είδους οπτικών συστημάτων, όταν συγκρίνονται με τις γεωμετρίες παραβολής και [τους φακούς Fresnel](#), είναι ότι για υψηλές συγκεντρώσεις, χρειάζεται η λειτουργία τους μία ακόμη οπτική επιφάνεια, γεγονός που στοιχειωδώς μεν, αλλά, μειώνει την απόδοση. Αυτό βέβαια είναι καταγράψιμο όταν το οπτικά στοχεύουν κατ' ευθείαν στον ήλιο, το οποίο δεν είναι ιδιαίτερα σύνηθες λόγω των εγγενών αδυναμιών των συστημάτων, στην πράξη.

- **Φυσική εναπόθεση με ατμούς (Physical Vapor Deposition, PVD)**

Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται για την εφαρμογή επιστρώσεων με συμπύκνωση ατμών σε κενό. Οι εξαιρετικά καθαρές συνθήκες που δημιουργούνται με το κενό και την εκκένωση λάμπης οδηγούν σε σχεδόν τέλεια συνάφεια των ατόμων της επίστρωσης με τα άτομα του υποστρώματος. Το πορώδες επίσης περιορίζεται από την απουσία βρώμικων ενσωματώσεων. Η τεχνολογία PVD είναι εξαιρετικά προσαρμοζόμενη. Ουσιαστικά οποιοδήποτε υλικό από τις κατηγορίες κεραμικών, μεσομεταλλικών ή άλλων ενώσεων μετάλλων, που δεν υποβάλλονται σε διαχωρισμό μπορούν να αποθεθούν εύκολα επάνω στα υποστρώματα ουσιαστικά οποιουδήποτε υλικού, π.χ. μέταλλα, κεραμικά, πλαστικά ή ακόμα και χαρτί. Επομένως οι εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας κυμαίνονται από την διακόσμηση ως τη μικροηλεκτρονική, σε ένα σημαντικό τμήμα της εφαρμοσμένης μηχανικής, χημικής, πυρηνικής και άλλες σχετικές βιομηχανίες. Τα τελευταία χρόνια, ένας αριθμός εξειδικευμένων PVD τεχνικών έχει αναπτυχθεί και έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς. Κάθε μια από αυτές τις τεχνικές έχει τα πλεονεκτήματα και τη σειρά προτιμημένων εφαρμογών της. Οι κυριότερες μέθοδοι φυσικής αποθέσεως ατμών, είναι:

- Εξάχνωση υπό κενό - Vacuum evaporation
- Θρυμματισμός – Sputtering
- DC Sputtering: Χρησιμοποιείται συνεχής τροφοδοσία υψηλής τάσης. Στην άνοδο, τοποθετούνται τα υποστρώματα και στην κάθοδο ο στόχος. Ο στόχος “ξύνεται” με εκκένωση αίγλης μεταξύ ανόδου και καθόδου σε θάλαμο κενού, παρουσία χημικά αδρανούς αερίου, λόγω της μεγάλης ορμής των ατόμων του τελευταίου.
- Reactive DC Sputtering: Πρόκειται για χημική παραλλαγή με χρήση χημικά ενεργού στοιχείου, π.χ. οξυγόνου για την εναπόθεση οξειδίου. Χρησιμοποιείται επίσης ευρύτατα σε ατμόσφαιρα αζώτου ή μεθανίου, για την εναπόθεση νιτριδίων και καρβιδίων.
- RF Sputtering: Χρησιμοποιείται για την εναπόθεση μαγνητικών υλικών. Η υλοποίηση πραγματοποιείται μέσω πεδίου ραδιοσυχνότητας για τον περιορισμό της εκκένωσης στην περιοχή του στόχου.
- Magnetron Sputtering: Χρησιμοποιούνται ισχυρά μαγνητικά πεδία, δημιουργούμενα από μόνιμους μαγνήτες, με σκοπό τον χωρικό περιορισμό του πλάσματος και την αύξηση της ομοιομορφίας του παραγόμενου στρώματος. Το υφιστάμενο μαγνητικό πεδίο εμποδίζει τα ιόντα μεγάλης ταχύτητας να χτυπήσουν το λεπτό στρώμα και να προκαλέσουν πλεγματικές ατέλειες σε αυτό, με αποτέλεσμα και την καλύτερη κρυσταλλική ποιότητα του στρώματος.



- **Χημική Εναπόθεση με ατμούς (Chemical Vapor Deposition, CVD)**

Αντίθετα, η χημική απόθεση ατμών (CVD) είναι μια σύνθετη διαδικασία, κατά την οποία χημικώς αντιδρώντα συστατικά αντιδρούν στην αέρια φάση, κοντά ή πάνω στο υπόστρωμα, το οποίο θερμαίνεται, με αποτέλεσμα το σχηματισμό στερεών επικαλυπτικών στρωμάτων. Ο σχηματισμός αυτός καθορίζεται από συγκεκριμένες βασικές αρχές, που επιβάλλονται από τη χημεία, τη θερμοδυναμική, τη χημική κινητική, και τα φαινόμενα μεταφοράς. Τυπικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε έναν αντιδραστήρα χημικής εναπόθεσης ατμών είναι η πυρόλυση, η αναγωγή, η οξειδωση και η νιτρίδωση και χρησιμοποιούνται σε ευρεία κλίμακα στη βιομηχανία των ημιαγωγών. Το συνηθέστερο σύστημα CVD είναι το θερμικό, στο οποίο η απαιτούμενη ενέργεια για την ενεργοποίηση της αντίδρασης δίδεται μέσω είτε ηλεκτρικής αντίστασης είτε επαγωγικών ρευμάτων. Από εκεί και πέρα ιδιαίτερα διαδεδομένα είναι και τα ακόλουθα συστήματα CVD :

α. Χημική εναπόθεση ατμών με τεχνολογία πλάσματος (Plasma CVD).

β. Χημική εναπόθεση ατμών με τεχνολογία λέιζερ και φωτός.

- **Φυσικο Χημική Εναπόθεση με ατμούς**

Πρόκειται για μία υβριδική μέθοδο που εφαρμόζει εκκένωση λάμπης προκειμένου να ενεργοποιηθεί η διαδικασία CVD. Είναι ευρέως γνωστή ως Χημική Εναπόθεση με ατμούς με ενίσχυση πλάσματος (plasma enhanced chemical vapour deposition' (PECVD)) ή με υποβοήθηση πλάσματος (plasma assisted chemical vapour deposition' (PACVD)). Σε αυτήν την διαδικασία οι τεχνικές δημιουργίας στερεών αποθέσεων με την πρόκληση χημικών αντιδράσεων σε ένα αέριο με ηλεκτρικό φορτίο, χρησιμοποιούνται. Πολλά φαινόμενα τα οποία είναι χαρακτηριστικά της συμβατικής, υψηλής θερμοκρασίας, τεχνικής CVD εφαρμόζονται σε αυτήν την διαδικασία. Αντίστοιχα, οι ίδιες αρχές που διέπουν την τεχνική πλάσματος εκκένωσης λάμπης με θρυμματισμό εφαρμόζονται στο CVD. Σε αυτήν την διαδικασία η επίστρωση μπορεί να εναποτεθεί σε σημαντικότερα χαμηλές θερμοκρασίες υποστρώματος, της τάξης των 100- 600ο C, λόγω της ικανότητας των ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας που παράγονται από την εκκένωση λάμπης, σε πιέσεις που κυμαίνονται από 1 to 500 [Pa], να προκαλέσουν σπάσιμο των χημικών δεσμών και να προωθήσουν τις χημικές αντιδράσεις. Σχεδόν κάθε αέριο ή ατμός, συμπεριλαμβανομένων των πολυμερών μπορούν να γίνουν υλικό εναπόθεσης.

Σήμερα, παρατηρείται μια διεθνής τάση οι δύο αυτές διαφορετικές μέθοδοι εναπόθεσης να ενοποιηθούν. Για παράδειγμα η PVD τεχνική κάνει εκτεταμένη χρήση τεχνολογίας πλάσματος, το οποίο είναι φυσικό φαινόμενο και αντίστροφα, η εξάχνωση και ο θρυμματισμός εμφανίζονται σε χημικό περιβάλλον. Οι διατάξεις των δύο τεχνικών επίσης, με τους αντιδραστήρες και τον υπόλοιπο συνοδευτικό εξοπλισμό τους τείνουν επίσης να συγχωνευτούν σε μία, στις διεργασίες ειδικά που σχετίζονται με τους ημιαγωγούς, οπότε και οι όποιες διαφορές μεταξύ των δύο τεχνικών καθίστανται πλέον δυσδιάκριτες.

- **Εμφύτευση Ιόντων (Ion Implantation)**

Αποτελεί μία από τις πλέον οικονομικές και βιώσιμες διεργασίες για βελτίωση των τριβολογικών ιδιοτήτων της επιφάνειας των μηχανικών εξαρτημάτων. Σε πολλές μηχανικές περιπτώσεις η επιλογή των υλικών συχνά βασίζεται σε έναν συμβιβασμό των μηχανικών ιδιοτήτων του κυρίου σώματος και των τριβολογικών ιδιοτήτων της επιφάνειας, χωρίς καμία από αυτές να απαιτείται να είναι σε βέλτιστες τιμές. Ως αποτέλεσμα υπάρχει σημαντικό ενδιαφέρον στις τεχνικές επίστρωσης, όπως είναι η εμφύτευση ιόντων γιατί καταφέρνει να διατηρήσει τις ιδιότητες του κυρίως σώματος και συγχρόνως να πετύχει επιθυμητές τριβολογικές επιφανειακές ιδιότητες.

Η εμφύτευση ιόντων είναι μία διαδικασία μέσω της οποίας κάθε στοιχείο του περιοδικού χάρτη μπορεί να εκτοξευθεί επάνω στην επιφάνεια οποιουδήποτε στερεού μέσω μιας ακτίνας ιόντων υψηλής ταχύτητας με ενέργειες που κυμαίνονται από 10 keV μέχρι μερικά MeV. Τα ιόντα επιβραδύνονται επάνω στο υλικό κατανέμονται σε βάθη που κυμαίνονται από νανόμετρα σε μικρόμετρα, που καθορίζονται από την ενέργεια του σωματιδίου, την γωνία πρόσπτωσης, και την σύσταση του υποστρώματος. Αναλόγως με τον τύπο του ιόντος, την μάζα, την ενέργεια, την δόση, την θερμοκρασία απόθεσης και την σύσταση του υποστρώματος, οι χημικές, ηλεκτρικές, θερμικές, μικροδομικές και κρυσταλλογραφικές ιδιότητες της επιφάνειας μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά, την συμπεριφορά του εξαρτήματος στην τριβή και την φθορά.

Τεχνικές δημιουργίας επιστρώσεων που βασίζονται σε εναπόθεση σε στερεή κατάσταση

Θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο να επιτευχθεί ένωση του υποστρώματος με το υλικό της επίστρωσης χωρίς τις ενδιάμεσες διαδικασίες όπως την επίστρωση βάση πλάσματος. Υπό ορισμένες συνθήκες αυτό θα ήταν εύκολο, αν και υπάρχουν κάποιοι σημαντικοί περιορισμοί στην εφαρμογή αυτών των μεθόδων.

Δύο βασικές μέθοδοι απευθείας ένωσης είναι η επιφανειακή επεξεργασία μέσω τριβής (friction surfacing) και η εκρηκτική σύνδεση (explosive bonding). Αυτές οι δύο τεχνικές δεν απαιτούν ένα προσεκτικά ελεγχόμενο περιβάλλον ή μια τοπική πηγή θερμότητας αλλά μπορούν να πραγματοποιηθούν σε καθαρό αέρα.

Επιφανειακή επεξεργασία με Τριβή (Friction Surfacing) : πρόκειται για προσαρμογή της συγκόλλησης μέσω τριβής όπου ένα υλικό σε μορφή σκοινιού κολλάει / συνδέεται σε μία επιφάνεια με ένα συνδυασμό περιστροφής και υψηλής δύναμης επαφής. Ανακαλύφθηκε ότι εάν η επιφάνεια μετακινείτο ενώ το σκοινί πιεζόταν επάνω της και συγχρόνως περιστρεφόταν, τότε ένα στρώμα του μεταφερόμενου υλικού θα εναποτίθετο στην επιφάνεια. Αυτό αποτελεί έναν σχετικά απλό τρόπο ταχείας εναπόθεσης παχέος στρώματος μετάλλου. Μια σημαντική απλοποίηση αυτής της τεχνολογίας επιστρώματος έναντι άλλων μεθόδων, είναι ότι δεν υπάρχει καμία ανάγκη για τον αποκλεισμό ατμοσφαιρικού οξυγόνου, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επιστρώματος. Εντούτοις, η παροχή ατμόσφαιρας αδρανούς αερίου βελτιώνει την προσκόλληση ή τη σύνδεση μεταξύ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

του επιστρώματος και του υποστρώματος. Περιορισμοί μορφής του υποστρώματος, π.χ., ότι η τεχνική είναι μόνο εφαρμόσιμη στις επίπεδες επιφάνειες ή εκείνες με την αξονική συμμετρία, π.χ. εξωθήσεις μετάλλων, σε αντιδιαστολή με τις σύνθετες επιφάνειες, π.χ. δόντι ταχύτητας, περιορίζουν την εφαρμογή, αυτής της κατά τα άλλα υποσχόμενης και απλής τεχνολογίας

Εκρηκτική Επίστρωση (Explosive Cladding) επίσης γνωστή ως εκρηκτική σύνδεση ή εκρηκτική συγκόλληση, είναι ουσιαστικά μια στερεάς φάσης διαδικασία συγκόλλησης, κατά τη διάρκεια της οποίας η σύνδεση παράγεται από σύγκρουση υψηλής ταχύτητας μεταξύ του υποστρώματος και του υλικού επιστρώματος. Η υψηλή ταχύτητα επιτυγχάνεται από μια ελεγχόμενη έκρηξη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το υλικό επιστρώματος υπό μορφή φύλλου τοποθετείται με μια μικρή γωνία της πρόπτωσης στο υπόστρωμα. Ένας προστατευτικός απομονωτής, συνήθως υπό μορφή λαστιχένιου φύλλου, τοποθετείται πάνω από το υλικό επιστρώματος. Όταν οι εκρηκτικές ύλες υπό μορφή φύλλου ή πηλού πυροδοτούνται πίσω από τον απομονωτή, η επαφή μεταξύ του φύλλου του υλικού επιστρώματος και του υποστρώματος διαδίδεται έξω από το τέλος του φύλλου που βρίσκεται πιο κοντά το υπόστρωμα. Ένα μέτωπο διαμορφώνεται στην άκρη της επαφής όπου το φύλλο είναι προς στιγμήν διπλωμένο. Ισχυρή σύνδεση του υλικού σύνδεσης διευκολύνεται από την αποβολή των μολυσματικών παραγόντων και στρωμάτων οξειδίων ως ένα νέφος τεμαχισμένων ή λειωμένων υλικών μπροστά από τις προσκρούμενες επιφάνειες μετάλλων. Η αφαίρεση των μολυσματικών παραγόντων και των οξειδίων προκαλείται από την επίδραση της εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας των αντιτιθέμενων επιφανειών κατά τη διάρκεια της εκρηκτικής σύνδεσης. Καμία εξωτερική θερμότητα δεν απαιτείται σε αυτήν την διαδικασία. Ουσιαστικά οποιοσδήποτε συνδυασμός μετάλλων και κραμάτων, ο οποίος ειδάλλως δεν μπορεί να συνδεθεί, π.χ. αλουμίνιο και χάλυβας, μπορεί να συνδεθεί με αυτήν την διαδικασία. Πολύ υψηλές πιέσεις περίπου 3 [GPa], παραγομένες κατά τη διάρκεια της διαδικασίας περιορίζουν το πάχος των επιστρωμάτων σε στρώματα παχύτερα από 0.3 [mm] δεδομένου ότι τα λεπτότερα στρώματα θα μπορούσαν να σπάσουν. Η διαδικασία χρησιμοποιείται στην κατασκευή, π.χ., ανθεκτικών επιστρωμάτων διάβρωσης για τις χημικές, ναυπηγικές και πετροχημικές βιομηχανίες. Η δυσκολία με τις εκρηκτικές ύλες, ο περιορισμός αυτής της μεθόδου στις μεγάλες επίπεδες επιφάνειες και η απαίτηση για το υλικό επιστρώματος να είναι σκληρό, περιορίζου σοβαρά τη χρησιμότητα αυτής της τεχνικής .

Τεχνικές Δημιουργίας Επίστρώσεων που απαιτούν τοπική συγκέντρωση έντονης θερμότητας

- **Επιφανειακή Συγκόλληση**

Στα πλαίσια αυτής της τεχνικής η επίστρωση δημιουργείται με την τήξη του υλικού της επίστρωσης επάνω στο υπόστρωμα με διαδικασία συγκόλλησης με φλόγα αερίου, τόξο πλάσματος ή με ηλεκτρικό τόξο. Μία μεγάλη ποικιλία υλικών μπορούν να εναποθεθούν με αυτήν την τεχνική. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας συγκόλλησης ένα ποσοστό της επιφάνειας λιώνει και αναμιγνύεται με το υλικό της επίστρωσης στα όρια της ζώνης τήξης, καταλήγοντας σε καλό δεσμό της επίστρωσης με το υπόστρωμα. Η συγκόλληση χρησιμοποιείται σε μία ποικιλία βιομηχανικών εφαρμογών, που απαιτούν σχετικά παχιά, επιστρώματα με αντίσταση στην φθορά, που κυμαίνονται από 750 μm σε λίγα millimetres. Οι διαδικασίες συγκόλλησης μπορούν να αυτοματοποιηθούν εύκολα και είναι σε θέση να εναποθέσουν επιστρώματα τόσο σε μικρά εξαρτήματα πολύπλοκου σχήματος όσο και σε μεγάλες επίπεδες επιφάνειες.

- **Θερμικός Ψεκασμός**

Μεταξύ των τεχνικών δημιουργίας επιστρώσεων εκείνες των θερμικών ψεκασμών κατέχουν μία ξεχωριστή θέση. Πρόκειται για ομάδα τεχνικών δημιουργίας επιστρώσεων κατά τις οποίες σωματίδια μεταλλικών ή μη μεταλλικών υλικών σε λεπτή διαχώριση (  $\varnothing$  από 1 έως 50μm) εναποτίθενται σε τηγμένη ή μερικώς τηγμένη κατάσταση προκειμένου να σχηματίσουν μία επίστρωση. Ειδικότερα, τα σωματίδια συγκρούονται σε μία επιφάνεια και χτίζουν ένα υπόστρωμα του οποίου η ποιότητα αξιολογείται από την περιεκτικότητα σε οξείδια, πόρους και δύναμη των δεσμών με το υπόστρωμα. Το υλικό της επίστρωσης μπορεί να είναι σε μορφή σκόνης, κεραμικού, σύρματος ή τηγμένου υλικού. Ο μηχανισμός του δεσμού με την επιφάνεια του υποστρώματος είναι ο ίδιος όπως στην περίπτωση των επικαλύψεων, δηλαδή τόσο στον μηχανικό διαδεσμό όσο και στην ατομική διάδραση με μία διατμητική τάση περί των 7 MPa (10 ksi). Το πάχος της επίστρωσης μπορεί να κυμαίνεται από 25 μm έως και 2.5 mm. Πρακτικά, οι επιστρώσεις με θερμικό ψεκασμό μπορούν κάλλιστα να ανταγωνισθούν τις επικαλύψεις, αλλά και τις βαφές σε αντίσταση σε ατμοσφαιρική διάβρωση στην κατασκευή δεξαμενών, TVtowers, γέφυρες και άλλες μεγάλες χαλύβδινες κατασκευές.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 ο Dr Schoor στην Ζυρίχη αναγνώρισε τη δυνατότητα μίας ροής τηγμένων σωματιδίων, εμφυτευόμενα στο υπόστρωμα και εναποτιθέμενα στη συνέχεια το ένα επάνω στο άλλο να δημιουργήσουν επίστρωση. Η δική του εργασία και επακόλουθη των συνεργατών του κατέληξαν στη καθιέρωση των τεχνικών θερμικού ψεκασμού, οι οποίες προώθησαν την παγκόσμια οικονομία υπηρετώντας περισσότερους από τριάντα (30) τομείς, οδηγώντας σε πωλήσεις περισσότερων των δύο δισεκατομμυρίων δολαρίων το χρόνο.

Ειδικότερα, το 1912 οι προσπάθειες τους οδήγησαν στη δημιουργία του πρώτου οργάνου για τον ψεκασμό του στερεού μετάλλου σε μορφή σύρματος. Αυτή η απλή συσκευή βασιζόταν στην αρχή ότι εάν ένα σύρμα τροφοδοτηθεί σε μία συγκεντρωμένη ενέργειας φλόγα (όπως η καύση αερίου με οξυγόνο) θα λιώσει και εφόσον η φλόγα ενισχυθεί με ρεύμα πεπιεσμένου αερίου το λιωμένο μέταλλο θα διασπασθεί σε άτομα τα οποία θα είναι έτοιμα να εμφυτευθούν στην επιφάνεια δημιουργώντας επίστρωση.

Όταν χρησιμοποιούνται μεταλλικά υλικά στο υλικό επιστρώματος η κατεργασία ονομάζεται ψεκασμός μεταλλοποίησης

Τα θερμικά ψεκαζόμενα επιστρώματα έχουν επιτυχώς χρησιμοποιηθεί σε όλους τους σημαντικούς τομείς επιστρώσεων ναυπηγικών και βιομηχανικών εφαρμογών για τον καλύτερο έλεγχο της διάβρωσης. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται σε άλλους τομείς της βιομηχανικής αγοράς. Στην πραγματικότητα η βασική αγορά για τα θερμικά ψεκασμένα επιστρώματα είναι η βιομηχανία αποκατάστασης ή επιδιόρθωσης των εξαρτημάτων των μηχανών. Αυτή είναι μία μεγάλη και πολυποίκιλη αγορά που χρησιμοποιεί μέταλλα, καρβίδια και κεραμικά προκειμένου να αποκαταστήσει φθαρμένες διαστάσεις σε ποικιλία στατικού και περιστρεφόμενου εξοπλισμού υποκειμένου σε διάβρωση, υψηλές θερμοκρασίες και φθορά. Επίσης, χρησιμοποιούνται ραγδαία στην επικάλυψη επιφανειών νέων εξαρτημάτων πριν χρησιμοποιηθούν προκειμένου να καθυστερήσουν την συντήρηση.

Δημοφιλής από το 1990 ο θερμικός ψεκασμός δημιουργεί μία συνεχή επίστρωση με την τήξη του αναλώσιμου υλικού σε σταγονίδια και με την προσκόλληση αυτών των σταγονιδίων στο υπόστρωμα. Ο μηχανισμός της δημιουργίας δεσμών με το υπόστρωμα στον θερμικό ψεκασμό είναι ο ίδιος όπως στην περίπτωση της εναπόθεσης, δηλ. αμοιβαία μηχανική μόνιμη σύνδεση (κύρια των άκρων των σταγονιδίων) και διάδραση σε ατομικό επίπεδο, με όριο αντοχής στην διάτμηση της τάξης των 7 MPa (10 ksi). Το πάχος της επίστρωσης κυμαίνεται από 25 μm σε 2.5 mm. Στην πράξη οι επιστρώσεις θερμικού ψεκασμού μπορεί να ανταγωνιστούν τις επιστρώσεις εναπόθεσης και βαφής για προστασία από την διάβρωση στις δεξαμενές νερού, πύργους τηλεόρασης, γέφυρες και άλλες μεγάλες κατασκευές από ατσάλι.

Όλες οι κατεργασίες θερμικού ψεκασμού τυπικά ομαδοποιούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες : ψεκασμός φλόγας, ψεκασμός ηλεκτρικού τόξου και τόξου πλάσματος, με έναν μεγάλο αριθμό υποκατηγοριών. Ψυχρός ψεκασμός μόλις πρόσφατα προστέθηκε στην οικογένεια των κατεργασιών θερμικών ψεκασμών. Αυτή η κατεργασία τυπικά χρησιμοποιεί κάποια μέτρια προθέρμανση, αλλά κυρίως αφορά μία διαδικασία κινητικής ενέργειας.

Ο θερμικός ψεκασμός συμπεριλαμβάνει, επίσης, χαμηλής ταχύτητας φλόγα σκόνης, φλόγα μεταλλικής ράβδου, και διαδικασίες φλόγας σύρματος καθώς και υψηλής ταχύτητας κατεργασίες όπως HVOF καθώς και κατεργασία με όπλο εκπυροσκόρτησης (D-Gun) (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α\_ΚΕΦ\_3)

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου θερμικού ψεκασμού καθορίζεται από

- επιθυμητό υλικό επίστρωσης
- Απαιτήσεις λειτουργίας της επίστρωσης

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Οικονομικοί παράμετροι
- μέγεθος εξαρτήματος/μέρους προς επίστρωση και μεταφερισιμότητα

Ο Θερμικός Ψεκασμός Πλάσματος που παράγεται απ' ευθείας από τόξα ρεύματος σε τιμές πίεσης ατμοσφαιρικές ή σχεδόν ατμοσφαιρικές (10-300kPa) χρησιμοποιείται από το 1960 για επιφανειακές κατεργασίες. Ανήκει στην οικογένεια των τεχνικών θερμικού ψεκασμού, η οποία το 2005 έκανε 5δισ Usδολλ, παγκοσμίως με το ψεκασμό πλάσματος να αντιπροσωπεύει το 48%. Σήμερα οι περισσότερες επιστρώσεις παρασκευάζονται με χρήση συμβατικών πυρσών ψεκασμού πλάσματος με χρήση μίας καυτής καθόδου σε μορφή στικ και μία άνοδο. Καλή επαναληψιμότητας επιστρώσεις επιτυγχάνεται με συστηματική καταγραφή της μακροσκοπικών παραμέτρων λειτουργίας του πυρσού : ρεύμα τόξου, σύσταση αερίου παραγωγής πλάσματος και ροή, θερμοκρασία ψύξης νερού, και ρυθμός παροχής σκόνης (η βέλτιστη τιμή της οποίας εξαρτάται από την ροή μάζας του φέρροντος αερίου). Στα πλαίσια της προσπάθειας επίτευξης καλύτερου ελέγχου της διαδικασίας, και άρα επαναληψιμότητα στις επιστρώσεις νέες διατάξεις καταγραφής έχουν αναπτυχθεί οι οποίες μπορούν να λειτουργούν σε πολύ σκληρά περιβάλλοντα των οδών ψεκασμού. Αυτές οι διατάξεις οι οποίες περιλαμβάνουν CCD κάμερες, συστήματα χρόνου ψεκασμού και εξαιρετικά γρήγορα (50 ns) πυρόμετρα επιτρέπουν τον χαρακτηρισμό των θερμών σωματιδίων με :

- 5% ακρίβεια (θέση, ένταση, ακτινική κατανομή σε τομή του όπλου) της ροής φωτός που εκπέμπεται
- Ταχύτητες σωματιδίων με ίδια ακρίβεια
- Διάμετρο σωματιδίου σε πτήση

Τέτοιες μετρήσεις έχουν βελτιώσει σημαντικά την καταγραφή της εκτόξευσης σωματιδίων, μειώνοντας τον αριθμό των αποβαλλόμενων μερών κατά ένα παράγοντα της τάξης του 5. Η επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας του πυρσού στις θερμοκρασίες και τις ταχύτητες του σωματιδίου μπορούν πλέον να μελετηθούν καλύτερα και αυτές οι παράμετροι «πτήσης» του σωματιδίου συνδέονται με τις ιδιότητες της επίστρωσης. Βαθμίδες μετρήσεων που έχουν επιτευχθεί λόγω της μετατόπισης αυτών των διαγνωστικών συσκευών λόγω των διακυμάνσεων της τάσης έχουν επιδείξει δραστικά αρνητικές επιπτώσεις της επίδρασης αυτών των διακυμάνσεων στην ποιότητα της επίστρωσης. Οι διακυμάνσεις στην τάση χατακτηρίζονται από το λόγο : εξαγωγή τάσης προς μέση τάση. Για παράδειγμα στο ίδιο επίπεδο ισχύος, όταν ο λόγος αυτός είναι 50 το πορώδες της επίστρωσης αλούμινας είναι 45% και η απόδοση απόθεσης είναι 73% ενώ όταν ο λόγος είναι ίσος με 51, οι τιμές είναι αντίστοιχα 7% και 48%!

Μία άλλη εμφανής τάση στις εφαρμογές επεξεργασιών ψεκασμού είναι ότι οι πελάτες επιζητούν όλο και πιο πολύ λεπτοδομημένα ή νανοδομημένα επίστρωματα, τα οποία μπορούν να ληφθούν μόνο όταν ψεκάζονται υπο-μικρο ή νανό μεγέθους σωματίδια. Τα συμβατικά φέρροντα αέρια δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τέτοιου μεγέθους σωματίδια και νέες μέθοδοι ψεκασμού είναι υπό ανάπτυξη χρησιμοποιώντας υγρά ως

φέρροντα μέσα. Δύο πιθανότητες υπάρχουν σε αυτήν την περίπτωση : είτε ύπαρξη πρόδρομου διαλύματος του υλικού που θα ψεκασθεί είτε δημιουργία κολλοειδών. Και στις δύο περιπτώσεις το πολύπλοκο πρόβλημα είναι η τμηματοποίηση και η ατμοποίηση του υγρού από το πλάσμα. Έχει αποδειχθεί ότι η επιμεροποίηση εμφανίζεται πριν –με διαφορά της τάξης των μικροδευτερολέπτων – και ακολουθείται από την ατμοποίηση. Οι διακυμάνσεις του ψεκασμού πλάσματος είναι περισσότερο καταστρεπτικές σε σχέση με τον συμβατικό ψεκασμό. Όταν χρησιμοποιείται πρόδρομο διάλυμα αυτό συμπυκνώνεται στην περιφέρεια των σταγονιδίων πυρολύεται και λιώνει, ενώ στην περίπτωση των κολλοειδών όταν ο διαλύτης εξατμίζεται τα υπο-μικρο και νανό σωματίδια λιώνουν. Και στις δύο περιπτώσεις τα λιωμένα σωματίδια επιταχύνονται σε ταχύτητες μέχρι τα 500m/s και δίνουν επιστροφή ίση με τις αντίστοιχες συμβατικές επιστρώσεις. Η διαφορά έγκειται στο μέγεθος του σταγονιδίου : διάμετροι κάτω από 1 mm με πάχος μερικές δεκάδων νανόμετρα. Έτσι, πυκνά ή πορώδη επιστρώματα μπορούν να ληφθούν με ρυθμούς απόθεσης της τάξης του ενός τετάρτου αυτών των συμβατικών ψεκασμών. Επιστρώσεις πάχους 200-300 nm μπορούν να επιτευχθούν με εναπόθεση με ατμό σε πάχος μέχρι 2 mm, και συμβατικά ψεκασμένα επιστρώματα με ένα mm πάχος των 50mm.

Καταλήγοντας, επισημαίνεται ότι ο θερμικός ψεκασμός αυξάνει την αγορά του κατά 5% κάθε χρόνο. Η επαναληψιμότητα και η εφικτότητα και αξιοπιστία των παραγόμενων επιστρώσεων έχει σημαντικά βελτιωθεί με τα νέα συστήματα αισθητήρων, στις οδούς ψεκασμού και στα νέα όπλα πλάσματος. Ο ψεκασμός πλάσματος με διάλυμα ή με κολλοειδές είναι πολλά υποσχόμενες τεχνικές αλλά χρειάζονται αρκετή δουλειά για να ωριμάσουν.

- **Επιφανειακή Σκλήρυνση και κραμάτωση με Laser**

Η ιστορία των laser είναι μεγαλύτερη από 50 χρόνια. Η επιστημονική βάση της τεχνολογίας αυτής βρίσκεται στις βασικές αρχές της ατομικής φυσικής και συγκεκριμένα οι θεμελιώδεις αρχές του τέθηκαν από τον Δανό Φυσικό NielsBohr (1913 :θεωρία της δομής του ατόμου του υδρογόνου) και από τον Γερμανό AlbertEinstein (1916: εισαγωγή στην αρχή της stimulated εκπομπής) Το 1950 ο Kastler από τη Γαλλία πρότεινε την οπτική pumping (δημιουργία διαφορών στην κατανομή πλήρωσης διαφορετικών στοιβάδων ατομικής ενέργειας ως αποτέλεσμα της excitation από φωτεινή ακτινοβολία) με το οποίο κέρδισε το βραβείο Nobel.

Τη δεκαετία 50-60 Αμερικανοί και Ρώσοι επιστήμονες πρωτοστάτησαν στην εφαρμογή της θεωρίας του Kastler, με σταθμούς κατά τη διάρκεια αυτή την

Όλα τα laser ανεξάρτητα του σχεδίου και της λειτουργίας αποτελούνται από τα ακόλουθα συστατικά : - ενεργό μέσο που αποτελείται από ένα σύνολο ατόμων, ιόντων και σωματιδίων τα οποία κατά την εκπομπή είναι ικανά για εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κατά τη μέθοδο αυτή πραγματοποιείται τήξη ενός στρώματος από κάποιο επιφερόμενο υλικό κατάλληλα επιλεγμένο ώστε να πληρεί τις απαιτήσεις χρήσης του προς κατεργασία υποστρώματος. Επιδίωξη της μεθόδου είναι να μην τηχθεί το υπόστρωμα εκτός μιας μικρής ποσότητας, η οποία απαιτείται ώστε να δημιουργηθεί ισχυρή συνάφεια ανάμεσα στο υπόστρωμα και το επιφερόμενο υλικό. Η απόθεση του επιφερόμενου υλικού μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Η έγχυση σωματιδίων από ένα ακροφύσιο φαίνεται να είναι και η πιο κατάλληλη αφού επιτρέπει πολύ καλύτερο έλεγχο των παραμέτρων της κατεργασίας, οι οποίοι με τη σειρά τους παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα του παραγόμενου επιφανειακού στρώματος. Δύο ακόμα σημαντικοί παράγοντες καθορισμού της τελικής ποιότητας του υποστρώματος είναι η ικανότητα διαβροχής του υποστρώματος από το υλικό της επίστρωσης και η διαφορά των σημείων τήξης του επιστρώματος (υψηλή) και του υποστρώματος (χαμηλή).

Το laser παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε ότι αφορά στη δημιουργία επιφανειακών επιστρώσεων.

1. Ελεγχόμενο επίπεδο διάλυσης
2. Τοπική θέρμανση με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμικής παραμόρφωσης του κατεργαζόμενου υλικού
3. Ελεγχόμενο σχήμα
4. Καλής ποιότητας δεσμός με το υπόστρωμα
5. Εκλεπτυσμένη μικροδομή

Η δημιουργία επιφανειακών επιστρώσεων με laser συντελείται μέσω δύο κύριων τεχνικών : Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτής της μεθόδου είναι παρόμοια με αυτά της επιφανειακής επίστρωσης. Η μόνη σημαντική διαφορά βρίσκεται στο ότι σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο επιδιώκεται η δημιουργία ενός μίγματος μεταξύ του επιφερόμενου υλικού και του υποστρώματος. Για αυτόν τον λόγο ο ρόλος που παίζει η συναγωγή είναι πολύ σημαντικός για την τελική ποιότητα του παραγόμενου υποστρώματος. Ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου σε σχέση με την προηγούμενη είναι η ανυπαρξία διφασικής επιφάνειας (ανάμεσα στο επίστρωμα και στο υπόστρωμα), η οποία πολλές φορές είναι δυνητικό σημείο καταστροφής της επιφάνειας, λόγω αποκόλλησης από το υπόστρωμα. Η διαδικασία όμως της κραμάτωσης εισάγει θερμοδυναμικής φύσης περιορισμούς στη δυνατότητα επιλογής των επιφερομένων υλικών.

### Η Συγκριτική Αξιολόγηση LASER & Ψεκασμού Πλάσματος

Ακολουθεί αναφορά σε δύο άρθρα στα οποία συγκρίνονται οι δύο προαναφερθείσες τεχνικές στην κατεργασία του ίδιου συνδυασμού υλικών :

Οι Ισπανοί ερευνητές Cadenasetal et al [7] από το πανεπιστήμιο του Oveido συνέκριναν τη δημιουργία επίστρωσης WC-17%Co στον χάλυβα AISI1043 με δύο διαφορετικές μεθόδους : plasma spraying και με laser κατεργασία και ταυτόχρονη εκτόξευση σκόνης. Η επίστρωση που δημιουργήθηκε με το laser παρουσίαζε καλύτερη συνάφεια με το υπόστρωμα



(60N/mm<sup>2</sup>) και με την αποκόλληση να εμφανίζεται στη ζώνη συνάφειας και όχι στη διεπιφάνεια, ενώ στην plasmasprayed επίστρωση η πίεση στην οποία εμφανίζεται μερική ή πλήρης αποκόλληση είναι μικρότερη των 50N/mm<sup>2</sup>. Το πορώδες στην περίπτωση της κατεργασίας με laser είναι ελάχιστο, ενώ η μικροδομή δεν είναι σε όλη την έκταση της επίστρωσης ομοιόμορφη. Ειδικότερα, σε αυτήν την περίπτωση στα σημεία της υπερκάλυψης τα καρβίδια είναι μικρά και στρογγυλεμένα, ενώ στις περιοχές με μονή κατεργασία είναι με γωνίες και μεγάλα. Επίσης, ρωγμές εμφανίζονται παράλληλα στην φορά της κατεργασίας με laser. Στην περίπτωση της κατεργασίας με plasmaspraying, μικρά και στρογγυλεμένα καρβίδια είναι ομοιογενώς κατανεμημένα μέσα στη μήτρα κοβαλτίου, ενώ η διεπιφάνεια έχει ακανόνιστο σχήμα. Η σκληρότητα στην περίπτωση της κατεργασίας με laser είναι 1300HV300g στα καρβίδια και γύρω στα 800HV300g στην μήτρα, ενώ στην περίπτωση της κατεργασίας με plasma η σκληρότητα είναι περίπου 700HV300g. Όσον αφορά στην τριβολογική συμπεριφορά των επιστρώσεων, ο συντελεστής τριβής της επίστρωσης με laser είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο της επίστρωσης με plasma, ενώ ο ρυθμός φθοράς αντίστοιχα είναι 34% μικρότερος.

Οι δύο αυτές μέθοδοι δεν λειτουργούν πάντα ανταγωνιστικά, αλλά και ως συμπληρωματικές, δεδομένου ότι συνήθως επιβάλλεται η ανακατεργασία των plasmasprayed επιφανειών, και μία από τις μεθόδους που κατά κόρον χρησιμοποιείται για αυτόν τον σκοπό είναι το laser.

Η ανάτηξη plasma sprayed επιστρώσεων με χρήση laser είναι μία πρόσφατη τεχνική προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα της μορφολογίας των επιστρώσεων. Ειδικότερα, έχει ως στόχο την ολική ή μερική διάχυση των κεραμικών συνήθως συστατικών των plasma sprayed επιστρώσεων ώστε η ακόλουθη στερεοποίηση να κάνει το υλικό περισσότερο ομοιογενές και να εξαλειφθεί το πορώδες. Αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί σε αυτό το πεδίο :

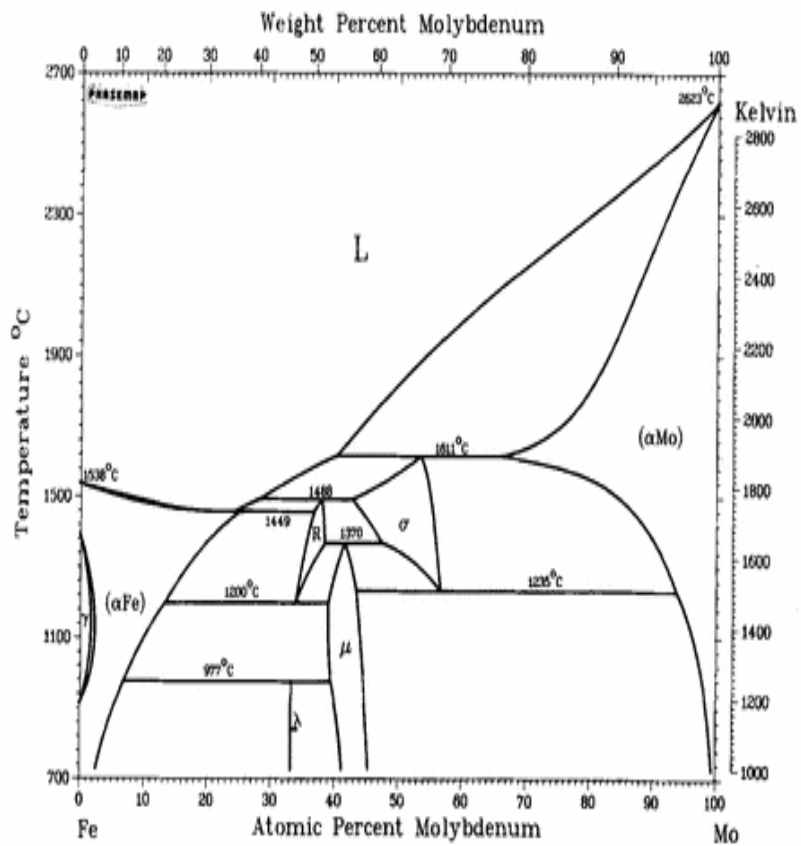
Ενδεικτικά αναφέρεται η δουλειά, το 2000, των Mateosetal, από το πανεπιστήμιο του Oveido [8] οι οποίοι χρησιμοποίησαν το laser στην ανάτηξη plasma sprayed επίστρωσης WC-17%Co προκειμένου να βελτιώσουν την ποιότητα της επίστρωσης. Η κατεργασία με laser εξάλειψε σχεδόν το πορώδες της αρχικής επίστρωσης με plasma, ενώ μετέβαλλε και τη μορφή της μικροδομής από τα στρογγυλεμένα καρβίδια σε πολυγωνικά μετά την ανάτηξη, ενώ επιπλέον παρατηρήθηκαν περιοχές στερεοποιημένες σε δενδριτική μορφή. Η σκληρότητα της plasma sprayed επίστρωσης αυξήθηκε κατά 85% μετά την ανάτηξη με laser, ενώ η μέση τιμή της παρέμεινε σταθερή ως προς το βάθος της επανεκατεργασμένης επίστρωσης δεδομένης της ομοιογένειας που έχει επιτευχθεί. Η συνάφεια με το υπόστρωμα βελτιώθηκε με την αντίστοιχη πίεση που μετρήθηκε στην αρχική επίστρωση 43.4MPa να βρεθεί αυξημένη σε 49.8MPa στην ανατηγμένη επίστρωση. Αυτό οφείλεται στη διάχυση του σιδήρου από τον χάλυβα στην επίστρωση που επιτεύχθηκε με την επίδραση της ακτινοβολίας του laser.

Ως προς την τριβολογική τους συμπεριφορά οι επιστρώσεις δεν εμφάνισαν διαφορά στον συντελεστή τριβής (0.55 πριν και 0.57 μετά), ενώ ως προς την φθορά παρατηρήθηκε ότι αυτή ήταν μεγαλύτερη στην περίπτωση των laser κατεργασμένων επιφανειών, γεγονός που εξηγείται από την καλύτερη απόδοση του λιπαντικού στην περίπτωση των plasma sprayed

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

επιφανειών, εξαιτίας της προσρόφησης του λιπαντικού στο πορώδες. Σημειώνεται η σημαντική απώλεια μάζας του ανταγωνιστικού υλικού (χάλυβας) στην περίπτωση των με laser ανατηγμένων επιφανειών.

Fig. 1 Fe-Mo Phase Diagram



Note: The numerical values shown are the assessed values. The drawn curves are from thermodynamic calculations and are not always identical to the assessed values.  
A. Fernández Guillermet, 1982.

C.V.

**ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ**

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ (ΕΜΠ)**

**Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών**

Εκπόνηση Διδακτορικής Διατριβής (PhD) με Θέμα : *Μελέτη Δημιουργίας Επιστρώσεων σε Σιδηρούχα Κράματα με Χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας*

- Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά και Ανακοινώσεις (oral & posters) σε Διεθνή Συνέδρια του Επιστημονικού Πεδίου
- Ολοκλήρωση της Διδακτορικής Διατριβής κατά την διάρκεια full time εργασίας

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ (ΕΜΠ)**

**Σχολή Χημικών Μηχανικών**

Πτυχίο Χημικού Μηχανικού (MSc), Ιούνιος 1996

- Κατεύθυνση Σχεδιασμού Διεργασιών και Ρύθμισης Συστημάτων
- Διπλωματική Εργασία στο Επιστημονικό Πεδίο της Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής

**ΕΜΠΕΙΡΙΑ**  
**8/1997-3/2012**

**ΕΟΜΕΧΧ Α.Ε.**

**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΑΡΓΥΡΟΧΡΥΣΟΧΟΙΑΣ (ΕΛ.Κ.Α) Α.Ε.**

Θέσεις για την περίοδο: 1997-2012

- Υπεύθυνη Στρατηγικών και Επιχειρησιακών Σχεδίων (09/05- 03/12)
- Υπεύθυνη Διάχυσης Αποτελεσμάτων Εφαρμοσμένης Έρευνας (10/02-02/12)
- Υπεύθυνη Σχεδιασμού, Εκπόνησης & Παρακολούθησης Προγραμμάτων Εφαρμοσμένης Έρευνας & Ανάπτυξης (10/02-02/12)
- Υπεύθυνη του Cluster LEADING GOLD CREATIONS (01/99-01/01)
- Υπεύθυνη Κλαδικών Μελετών & Ερευνών Αγοράς (12/98-10/02)
- Υπεύθυν σχεδιασμού –παρακολούθησης υλοποίησης διαφημιστικών καμπάνιων ΕΛ.Κ.Α.& ΣΗΜΑΤΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΕΛ.Κ.Α.
- Υπεύθυνη μητρώου εξαγωγέων ΕΛ.Κ.Α. – εκπρόσωπος ΕΛ.Κ.Α. σε συνεργασία με Β8 ΥΠ.ΕΞ. & Γ.ΟΕΥ Πρεσβειών (οργάνωση επιχειρηματικών αποστολών και ομαδικών συμμετοχών εκθέσεων στο εξωτερικό, συνεργασία με ΟΠΕ, webinars μεταξύ επιχειρηματιών )
- Υπεύθυνη διοργάνωσης 2<sup>ου</sup> (11/98) και 3<sup>ου</sup> (11/2000) Πανελλήνιων συνεδρίων Αργυροχρυσοχοίας
- Συμμετοχή στον Σχεδιασμό και Υλοποίηση της διοργάνωσης της μεγαλύτερης κλαδικής έκθεσης «ΧΡΥΣΟΣ – ΑΣΗΜΙ» (1998-2012)
- Υπεύθυνη Σήματος Ποιότητας ΕΛ.Κ.Α (12/98-10/02)
- Τεχνική Υπεύθυνη Εργαστηρίου Κραμάτων Πολύτιμων Μετάλλων (08/97-12/98)

**ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ PROJECTS:**

**Εκπόνηση Κλαδικών Μελετών και Ερευνών Αγοράς**

- Επικεφαλής Ομάδας Στελεχών ΕΛ.Κ.Α. και Εξωτερικών Συμβούλων (PLANNING S.A.) για τον Σχεδιασμό και Εκπόνηση Κλαδικής Μελέτης για τον Κλάδο της Ελληνικής Αργυροχρυσοχοίας
- Επικεφαλής Ομάδας Στελεχών ΕΛ.Κ.Α. και Εξωτερικών Συμβούλων (NOISIS S.A.) για Επικαιροποίηση της Κλαδικής Μελέτης

**Εκπόνηση 5ετούς Επιχειρηματικού Σχεδίου Εξαγωγών του Κλάδου**

- Επικεφαλής Ομάδας Στελεχών ΕΛ.Κ.Α. και Εξωτερικών Συμβούλων (MENTORING) για την Ολοκλήρωση του Σχεδίου Εξαγωγών

### **Περιβαλλοντική Διαχείριση Αποβλήτων με Φωτοκαταλυτική Μέθοδο για Ανάκτηση Πολύτιμων Μετάλλων**

- Συντονιστής Ομάδας Εκπόνησης Έργου σε Συνεργασία με ΕΚΕΦΕ/ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ
- Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Έρευνας σε 100 Επιχειρήσεις
- Συντονισμό Συνεργασίας Επιχειρήσεων με ΔΗΜΟΚΡΙΤΟ για Εγκατάσταση Ιδιο-Διάταξης σε κάθε Παραγωγική Επιχείρηση

### **Ανάπτυξη Καινοτόμων Μεθόδων Παραγωγής Κοσμημάτων: Βελτιστοποίηση Διαδικασίας Χύτευσης για την Παραγωγή Κοσμημάτων και Διαδικασία Συγκόλλησης**

- Συντονιστής Ομάδας Εκπόνησης Έργου σε Συνεργασία με ΕΜΠ/ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧ. ΜΗΧ.
- Εγκατάσταση Λογισμικού Βελτιστοποίησης σε 50 Παραγωγικές Μονάδες

### **Εκπόνηση Στρατηγικού Σχεδίου του Κλάδου**

- Επικεφαλής Ομάδας Στελεχών ΕΛ.Κ.Α. και Εξωτερικών Συμβούλων (NOISIS) για την ολοκλήρωση του Στρατηγικού Σχεδίου
- Συντονιστής Στελεχών ΕΛ.Κ.Α./ΕΟΜΜΕΧ και εκπροσώπων Φορέων του Κλάδου της Αργυροχρυσοχοΐας στα Πλαίσια Υλοποίησης του Στρατηγικού Σχεδίου

### **Εκπόνηση 5ετούς Επιχειρηματικού Σχεδίου ΕΛ.Κ.Α. για Ειδική Γραμματεία ΔΕΚΟ βάσει Ν.4329/2005.**

- Επικεφαλής Ομάδας Στελεχών ΕΛ.Κ.Α. και Εξωτερικών Συμβούλων (KPMG) για την Ολοκλήρωση του Επιχειρηματικού Σχεδίου
- Συντονιστής Στελεχών ΕΛ.Κ.Α. στα Πλαίσια Υλοποίησης του Επιχειρηματικού Σχεδίου

### **Ανάπτυξη Ηλεκτρονικών Πλατφορμών e-learning και e-commerce Κεντρικά Διαχειρίσιμων με Στόχο τον Εκσυγχρονισμό και την Αναβάθμιση Σχετικών Διαδικασιών**

- Συντονιστής Ομάδας Εκπόνησης Έργου σε Συνεργασία με Σχολή ΜΗΧ ΜΗΧ./ΕΜΠ

### **Δημιουργία Μοντέλου Αναφοράς του Φάσματος της Παραγωγικής Διαδικασίας**

- Συντονιστής Ομάδας Εκπόνησης Έργου σε Συνεργασία με ΕΜΠ/Σχολή ΜΗΧ. ΜΗΧ.

### **CLUSTERING: Δικτύωση Επιχειρήσεων**

- Σχεδιασμός, Υλοποίηση και Παρακολούθηση 2 έτους Business Plan του Cluster “LEADING GOLD CREATIONS”
- Διοργάνωση Ημερίδων Ενημέρωσης Στελεχών Cluster για Clustering
- Μέλος Δ.Σ. Cluster του “LEADING GOLD CREATIONS”
- Σχεδιασμός Εγχειρημάτων Εξωστρέφειας του Cluster:
  - Συνεργασία με ΟΠΕ
  - Εκπόνηση Ερευνών Αγοράς / Προτάσεις Δικτύωσης Επιχειρήσεων
  - Διοργάνωση web-seminar σε συνεργασία με την Β8/ Υπουργείο Εξωτερικών
  - Επαφές με Γραφεία ΟΕΥ & Τοπικές Επιχειρήσεις
  - Διοργάνωση Συμμετεχών σε Εκθέσεις Εξωτερικού (SIDNEY 08/98, NY 05/99)

### **Βιομηχανική Υπεργολαβία**

- Συμμετοχή στην Ομάδα ΕΟΜΜΕΧ Σχεδιασμού Προγράμματος Βιομηχανικής Υπεργολαβίας 2.7.3
- Αξιολόγηση Προτάσεων Επιχειρήσεων για Ένταξη τους στο Πρόγραμμα 2.7.3 Βιομηχανικής Υπεργολαβίας

### **Σήμα Ποιότητας ΕΛ.Κ.Α**

- Συντονιστής της Ομάδας Σχεδιασμού του ΣΗΜΑΤΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΕΛ.Κ.Α. (ISO 9001) Στελεχών ΕΛ.Κ.Α. και Εξωτερικών Συμβούλων (TQM)
- Υπεύθυνη Εγκατάστασης και Ελέγχου του ΣΗΜΑΤΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΕΛ.Κ.Α. σε 60 Παραγωγικές Επιχειρήσεις Αργυροχρυσοχοΐας
- Εγγραφή στον Παγκόσμιο Κατάλογο Επιθεωρητών Ποιότητας IRCA (11/98)

### **Εργαστήριο Δοκιμών Κραμάτων Πολύτιμων Μετάλλων**

- Τεχνική Υπεύθυνη Εργαστηρίου Δοκιμών Κραμάτων Πολύτιμων Μετάλλων ΕΛ.Κ.Α
- Συντόνιστης της Ομάδας Στελεχών Εργαστηρίου ΕΛ.Κ.Α. και Εξωτερικών Συμβούλων (TQM) για τον Σχεδιασμό, Εγκατάσταση και Πιστοποίηση Συστήματος Ποιότητας EN45001

**10/2014-7/2015**

**Συνεργασία με την ερευνητική ομάδα του καθηγητή Dr Narendra Dahotre, στο Τμήμα Επιστήμης των Υλικών και Μηχανικής, Discovery Park/University of North Texas (UNT), Denton, TX**

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ στα πλαίσια της συνεργασίας :

***“Dynamic crystallization during non-isothermal laser treatment of Fe–Si–B metallic glass”***

*Sameehan S Joshi, Anna V Gkriniari, Shravana Katakam, and Narendra B Dahotre*

Published 16 November 2015 • © 2015 IOP Publishing Ltd • Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 48, Number 49

**2002-2009**

### **ΠΕΚ ΜΟΚΥΜΕ**

- Εισηγήτρια Μαθημάτων Τεχνικής Πωλήσεων
- Εισηγήτρια Μαθημάτων Μεταλλογνωσίας
- Εισηγήτρια Μαθημάτων ISO

### **ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΑ**

- Ξένες Γλώσσες:  
Proficiency of Cambridge in English  
Grundsuffe (GOETHE)  
Γαλλικά (επίπεδο DELF II)
- Γυμναστική: τρέξιμο, Pilates
- Ενδιαφέρον για Εκδηλώσεις Τέχνης (ζωγραφική, ποίηση, λογοτεχνία, φωτογραφία, cinema)
- Συμμετοχή στην Τοπική Οργανωτική Επιτροπή ΕΜΠ/ IAESTE (ανταλλαγή φοιτητών πολυτεχνικών σχολών για εργασία)
- Ημερομηνία γέννησης: 6-8-1972

*ΛΙΣΤΑ*  
*ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ*



## ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

---

[1] Pantelis D.I., Griniari A., Houndri A., Sarafoglou Ch., Chionopoulos S  
«Surface alloying of SiC powder on metallic substrates using solar energy»,  
6th National Conference on the renewable energies: «Optimization of  
energetic processes», I.S.T. (Institute of Solar Technology), Volos, 3-5  
November 1999, Proceedings, Volume B', pp. 225-232

[2] Pantelis D.I., Griniari A., Houndri A.  
«Surface alloying of cermets powder in metal substrates using solar energy»,  
2nd Panhellenic Conference on Ceramics, Athens, 2-3 December 1999,  
N.T.U.A., ed. by Hellenic Ceramic Society, Proceedings, pp. 291-299.

[3] D.I. Pantelis, A. Griniari, Proceedings of Surface Modification  
Technologies 14<sup>th</sup> International Conference, Paris 11-13 September 2000, ed.  
T.S. Sudarshan and M.Jeandin, Publ. By "The Institute of Materials" (2000)  
353-359

[4] Pantelis D.I., Griniari A., Chionopoulos S. «Tribological behavior of  
surface alloys produced using solar energy», 7th National Conference on  
Renewable Energies, University of Patras, Patra, 6-8 November 2002,  
Proceedings, Volume B', pp. 303-310.

[5] D.I. PANTELIS, A. GRINIARI "Tribological behaviour of Molybdenum-base  
alloyed surfaces of 304L SS produced by Solar and APS treatments", Proc. of  
the 3rd International Conference: "The Coatings", 27-29 November 2002,  
Thessaloniki (Greece), pp. 441-449.

[6] Pantelis D.I., Griniari A., Houndri A.  
«Remelting using solar energy of an atmospheric plasma spray cermet powder  
coating on a 304L stainless steel», 3rd Panhellenic Conference on Ceramics,  
Athens, 12-13 December 2002, N.T.U.A., Ed. by Hellenic Ceramic Society,  
Proceedings, pp. 393-401

[7] D.I. PANTELIS, A.V. GRINIARI "Solar treatment of pre-deposited and atmospheric plasma sprayed WC-17%Co powder on Stainless Steel 304L", proceedings of the 18th International Conference SMT18 ("Surface Modification Technologies XVIII"), Dijon (France), 15-17 November 2004, edited by T.S. Sudarshan, M. Jeandin and J.J. Stiglich, published by ASM International, UK, 2006, Book-Institute of Materials, Vol. 807, pp. 159-167.

[8] Pantelis D.I., Griniari A.«Surface alloying using solar energy», 2nd Panhellenic Conference on Metallic Materials, N.T.U.A., Zografou Campus, 25-26 November 2004, Proceedings, pp. 379-384

[9] Pantelis D., Griniari. A, Solar Energy and Solar Cells, 2005, Vol 89, is 1, p1-11

[10] P. Psyllaki, A.V. Griniari and D.Pantelis : "Parametric Study of Laser Nitriding of 1.5919 Steel", Journal of Materials Processing Technology, 195 (1-3) (2008), p.299-304