



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΤΙΛΒΩΣΗ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ
ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Θ. ΔΕΣΠΟΤΕΛΗ

Διπλωματούχου Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών

Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Δ.Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Δεκέμβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΤΙΛΒΩΣΗ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ
ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Θ. ΔΕΣΠΟΤΕΛΗ

Διπλωματούχου Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών

Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Δ.Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. ΧΑΡΙΤΙΔΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Δεκέμβριος 2015

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα τον Καθηγητή ΕΜΠ κύριο Μανωλάκο Δημήτριο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για τη δυνατότητα που μου παρείχε να διεκπεραιώσω την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία στα εργαστήρια του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Η καθοδήγηση και η υποστήριξη του υπήρξε συνεχής και ουσιαστική.

Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη οφείλω επίσης στον Λέκτορα ΕΜΠ κύριο Μαρκόπουλο Άγγελο, του οποίου η συνεισφορά κατά την οργάνωση, εκτέλεση αλλά ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας υπήρξε αδιάλειπτη.

Σημαντική υπήρξε η συνεισφορά των υποψήφιων διδασκόντων του τομέα Κάρκαλου Νικόλαου και Παπαντωνίου Ιωάννη, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της πειραματικής διαδικασίας, όπως επίσης και του τεχνικού προσωπικού το οποίο ευχαριστώ επίσης.

Τέλος, η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία δε θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς τη συνεχή στήριξη της οικογένειάς μου.

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη της ποιότητας επιφάνειας δοκιμίων χάλυβα με χρήση της Μικροσκοπίας Ατομικής Δύναμης (AFM) ως αναλυτικό όργανο. Σε δοκίμια χάλυβα St37 εκτελέστηκε η κατεργασία της στίλβωσης με λειαντική συσκευή και με χρήση διαφόρων τύπου λειαντικών χαρτιών καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Κάθε λειαντικό χαρτί αποτελούνταν από λειαντικούς κόκκους διαφορετικού μέσου μεγέθους. Εν συνεχεία, μελετήθηκε η ποιότητα της επιφάνειας των δοκιμίων, αλλά και επιπλέον προσδιορίστηκε ο πολύ σημαντικός παράγοντας της μέσης επιφανειακής τραχύτητας Ra. Μετά και το τελικό στάδιο κατεργασίας η τιμή αυτή ανήλθε σε 10,8 nm. Επιπρόσθετα, αναλύθηκαν συγκριμένα χαρακτηριστικά που παρατηρήθηκαν στην επιφάνεια των κατεργασμένων δοκιμίων και η εμφάνιση τους συσχετίστηκε με τις παραμέτρους της κατεργασίας.

Abstract

The present Master thesis is focused on the study of surface integrity of steel specimens by using Atomic Force Microscopy (AFM). Initially, steel specimens were produced from steel type St37 and were lapped in a lapping machine with different types of silicon carbide (SiC) abrasive papers. Each paper exhibited a specific mean size of abrasive grains. Thereinafter, the specimens were analyzed with the Atomic Force Microscope were key factor remained the estimation of surface roughness Ra. After the final stage of the lapping processes, the mean surface roughness calculated at 10.8 nm. Specific structures that were produced in the surface of specimens after each stage of the process were analyzed. A correlation between the dimensions of these structures and the parameters of the process became clear.

Πρόλογος

Σκοπός της παρούσης Μεταπτυχιακής Εργασίας, η οποία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών», υπήρξε η διερεύνηση των δυνατοτήτων της κατεργασίας της στίλβωσης μετάλλων στην επίτευξη τραχύτητας επιφάνειας της τάξης του nm. Επιπλέον αντικείμενο μελέτης, αποτέλεσε η διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων της κατεργασίας στην τελική ποιότητα της επιφάνειας μεταλλικών αντικειμένων. Τέλος, η χρήση του Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης (AFM) στη μελέτη και αξιολόγηση των κατεργασμένων επιφανειών υπήρξε ουσιαστικής σημασίας.

Πίνακας περιεχομένων

| | |
|---|------------------|
| <i>Περίληψη</i> | <i>1</i> |
| <i>Abstract</i> | <i>2</i> |
| <i>Πρόλογος</i> | <i>3</i> |
| <i>Πίνακας περιεχομένων</i> | <i>4</i> |
| <i>Κεφάλαιο 1 Στίλβωση (Lapping)</i> | <i>5</i> |
| Εισαγωγή..... | 5 |
| 1.1 Κατεργασία..... | 7 |
| 1.2 Εργαλειομηχανές στίλβωσης (Lapping Types)..... | 9 |
| 1.3 Τύποι λειαντικών μέσων | 14 |
| 1.4 Τραχύτητα | 19 |
| <i>Κεφάλαιο 2 Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης (AFM)</i> | <i>25</i> |
| Εισαγωγή..... | 25 |
| 2.1 Αρχές λειτουργίας AFM..... | 26 |
| 2.2 Μελέτη τραχύτητας και τοπογραφίας επιφάνειας με AFM | 34 |
| <i>Κεφάλαιο 3 Πειραματική διαδικασία</i> | <i>37</i> |
| Εισαγωγή..... | 37 |
| 3.1 Δοκίμια χάλυβα St37..... | 38 |
| 3.2 Συσκευή λείανσης-στίλβωσης..... | 40 |
| 3.3 Λειαντικό μέσο..... | 43 |
| 3.4 Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης (AFM) | 48 |
| <i>Κεφάλαιο 4 Ανάλυση πειραματικών δεδομένων</i> | <i>50</i> |
| Εισαγωγή..... | 50 |
| 4.1 Παράμετροι κατεργασίας στίλβωσης | 51 |
| 4.2 Παρουσίαση-Ανάλυση πειραματικών δεδομένων | 52 |
| 4.3 Ανάλυση επιφανειακών δομών | 70 |
| <i>Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα</i> | <i>76</i> |
| <i>Βιβλιογραφία</i> | <i>80</i> |

Κεφάλαιο 1 Στίλβωση (Lapping)

Εισαγωγή

Οι κατεργασίες αποβολής υλικού είναι ενσωματωμένες στην παραγωγική διαδικασία για περισσότερο από 100 χρόνια, αν και υπάρχουν στοιχεία που υποδεικνύουν την αρχική χρήση τους από τη Νεολιθική εποχή ακόμα. Η απουσία τεχνογνωσίας για τη δημιουργία μηχανών κατεργασίας είχε ως συνέπεια την ανάπτυξη χειρονακτικών τεχνικών, οι οποίες αποτέλεσαν και τις πρώιμες μορφές κατεργασίας υλικών. Η πρώτη συσκευή που κατοχυρώθηκε ως πατέντα από τον Altschner το 1860, αφορούσε ένα τροχό λείανσης κατασκευασμένο από *ψαμμίτη* (κλαστικό ιζηματογενές πέτρωμα που αποτελείται από κόκκους άμμου που συγκρατούνται μαζί με ορυκτές συγκολλητικές ουσίες και κόκκους πετρωμάτων). Κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα όμως υπήρξε πρόσφορο έδαφος για την ανάπτυξη των κατεργασιών αποβολής υλικού, ως σύγχρονες πλέον διαδικασίες (grinding, lapping, polishing). Σημαινόμενες δημοσιεύσεις των Alden και Guest οδήγησαν σε μετεξέλιξη, της μέχρι πρότινος θεωρούμενης ως τέχνης της λείανσης και στίλβωσης σε επιστημονική διαδικασία [1, 2].

Οι κατεργασίες στίλβωσης *Lapping* και *Polishing* είναι σε μεγάλο βαθμό όμοιες. Μέσω αυτών επιτυγχάνεται υψηλής ποιότητας επιφανειακή δομή, υψηλή ακρίβεια διαστάσεων, επίπεδες επιφάνειες με χαμηλή τραχύτητα και ταυτόχρονη ελάχιστη φθορά των κατώτερων επιφανειακών στρωμάτων. Οι κατεργασίες αυτές χρησιμοποιούνται εδώ και αρκετά χρόνια, ακόμα και σε πρωτόγονη μορφή από την αρχή ύπαρξης του ανθρώπου. Η ενσωμάτωση των κατεργασιών αυτών στη βιομηχανία οδήγησε σε δημιουργία επιφανειών που χαρακτηρίζονται από υψηλή ακρίβεια επιθυμητών χαρακτηριστικών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι βιομηχανίες ημιαγωγικών διατάξεων, κεφαλών γραφής/ανάγνωσης δεδομένων και δίσκων αποθήκευσης δεδομένων όπου αυτές οι συγκεκριμένες κατεργασίες αποτελούν σημαντικό μέρος της διαδικασίας παραγωγής. Η κατεργασία στίλβωσης *Lapping* αποτελεί επίσης πολύ σημαντική τεχνική τροποποίησης επιφανειακής δομής στη βιομηχανία κατασκευής κεραμικών υλικών μόνωσης. Οι προαναφερθείσες μικροκατεργασίες χρησιμοποιούνται με ένα κοινό σκοπό: την αποβολή υλικού και την επίτευξη επιθυμητής μορφοποίησης και επιφανειακής δομής σε ψαθυρά και όλκιμα υλικά, μέσω τυχαία προσανατολισμένων λειαντικών και υπερλειαντικών σωματιδίων. Οι κατεργασίες στίλβωσης *Lapping* και *Polishing* αποτελούν ελεύθερας

μορφής λειαντικές διαδικασίες οι οποίες διαφοροποιούνται από άλλες μικροκατεργασίες γνωστές ως honing, fine grinding, superfinishing [3, 4].

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι κατεργασίες στίλβωσης (Lapping, Polishing) χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία επίπεδων επιφανειών και επιπρόσθετα υπακούουν όλες σε συγκεκριμένους φυσικούς νόμους. Τα υπό κατεργασία τεμάχια τοποθετούνται σε επαφή με περιστρεφόμενους δίσκους, ενώ ταυτόχρονα περιστρέφονται και τα ίδια με μηχανικό τρόπο ή εξαιτίας των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται κατά την επαφή, εκτελώντας καθ' αυτόν τον τρόπο πλήθος κινήσεων. Τα λειαντικά μέσα τα οποία χρησιμοποιούνται δύναται να είναι ενσωματωμένα στον περιστρεφόμενο δίσκο (π.χ. λειαντικό χαρτί), είτε να περιέχονται σε κατάλληλη πάστα ή υγρό και να τοποθετούνται από πριν στον περιστρεφόμενο δίσκο ή να παρέχονται σε συγκεκριμένα διαστήματα κατά την εκτέλεση της κατεργασίας. Η αποβολή υλικού από την επιφάνεια του τεμαχίου επιτυγχάνεται μέσω λειαντικών στοιχείων που περιστρέφονται, ολισθαίνουν ή διατηρούνται ενσωματωμένα προκαλώντας μικροκοπή στο τεμάχιο. Λειαντικά τα οποία ολισθαίνουν ή περιστρέφονται εμφανίζουν παρόμοια μηχανική συμπεριφορά με μόνη εξαίρεση την πιο επίπεδη μορφή των ολισθαινόντων λειαντικών τα οποία μπορούν να παρομοιαστούν με μικρές επίπεδες επιφάνειες (ξύστρες). Αντιθέτως, τα λειαντικά τα οποία είναι ενσωματωμένα στον δίσκο στίλβωσης (lapping plate) δρουν ως μικρά κοπτικά εργαλεία προκαλώντας μικροκοπή του τεμαχίου.[11] Η κατεργασία στίλβωσης Lapping, στην οποία θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στην συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, μπορεί να περιέχει και τους τρεις διαφορετικούς μηχανισμούς λείανσης όπως αναφέρθηκαν προηγουμένως.

1.1 Κατεργασία

Σε συνέχεια των όσων αναφέρθηκαν στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου, στην παρούσα παράγραφο αναλύεται η διαδικασία της κατεργασίας στίλβωσης καθώς και οι παράμετροι που την καθορίζουν. Γενικότερα, κατεργασίες οι οποίες έχουν ως σκοπό την τροποποίηση των επιφανειακών χαρακτηριστικών των υλικών χαρακτηρίζονται ως κατεργασίες υπέρ-υψηλής ακρίβειας. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμεύουν στο να μεταβάλλουν επιφανειακά χαρακτηριστικά όπως η τραχύτητα, η υφή (waviness), η επιπεδότητα, η καμπυλότητα κ.α., χωρίς όμως σημαντική αποβολή υλικού από το υπό κατεργασία τεμάχιο.

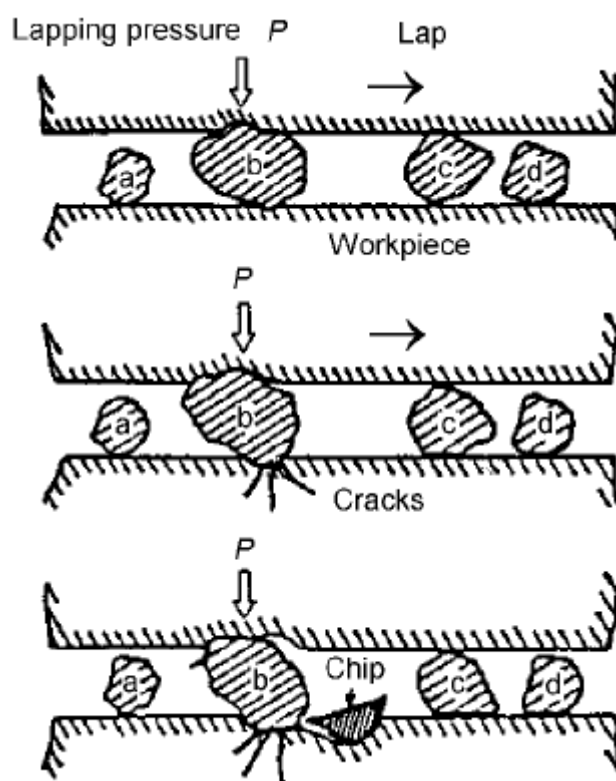
Η στίλβωση (Lapping) αποτελεί μια ελεύθερη κατεργασία λείανσης κατά την οποία κόκκοι λειαντικού υλικού έρχονται σε επαφή με τεμάχιο, με ταυτόχρονη λίπανση μέσω υδατικού διαλύματος. Το διάλυμα μπορεί να περιέχει νερό, λιπαντικό έλαιο ή και συνδυασμό των δύο. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι λειαντικοί κόκκοι μπορούν να είναι ενσωματωμένοι σε μορφή χαρτιού επάνω στην επιφάνεια του λειαντικού τροχού, είτε να περιέχονται σε ελεύθερη μορφή μέσα στο διάλυμα. Σε κάθε περίπτωση ο στόχος είναι κοινός: η δημιουργία ενός λειαντικού φιλμ ανάμεσα στον λειαντικό τροχό και στο τεμάχιο. Ο κάθε λειαντικός κόκκος που χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί η στίλβωση χαρακτηρίζεται από οξύ ακανόνιστο σχήμα. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τη σχετική κίνηση που εισάγεται μέσω του λειαντικού δίσκου και την πίεση που ασκείται στο τεμάχιο μέσω κατάλληλα προσαρμοσμένου βραχίονα συντελεί στην εξαναγκασμένη εισχώρηση των λειαντικών κόκκων εντός της επιφάνειας του τεμαχίου. Ως εκ τούτου, ο κάθε λειαντικός κόκκος δρα ως ένα μικροσκοπικό εργαλείο κοπής, που δύναται είτε να προκαλεί εγχάραξη της επιφάνειας του τεμαχίου, είτε να συντελεί στην αποβολή σωματιδίων του τεμαχίου πολύ μικρών διαστάσεων. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι λειαντικοί κόκκοι χαρακτηρίζονται από ακανόνιστο σχήμα και μέγεθος, γεγονός που θα αναμενόταν να οδηγήσει σε ανομοιόμορφη κατεργασία της επιφάνειας του τεμαχίου. Η χρήση όμως μεγάλων ποσοτήτων κόκκων οδηγεί στην εξάλειψη αυτής της συμπεριφοράς και στην επίτευξη ομοιόμορφης και συνεχόμενης αποβολής υλικού από ολόκληρη την επιφάνεια του τεμαχίου όπως αναπαριστάται σχηματικά στην **Εικόνα 1.1** [5, 6].

Το βάθος κοπής και εγχάραξης της επιφάνειας του τεμαχίου θα καθορίσει και την τελική μέση τραχύτητα της επιφάνειας του, μέγεθος το οποίο προσδιορίζεται με κάποιο αναλυτικό όργανο επιφάνειας, π.χ. Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης (όπως αναλύεται στο Κεφ. 2), και καθορίζεται από τις παραμέτρους Ra, Rz , και Rt οι οποίες θα αναλυθούν εκτενέστερα στην συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου. Μεγαλύτεροι σε μέγεθος και σε

σκληρότητα κόκκοι οδηγούν στη δημιουργία επιφανειακής τραχύτητας με υψηλότερες τιμές. Αντιθέτως, μικρότεροι σε μέγεθος λειαντικοί κόκκοι συντελούν σε χαμηλότερες τιμές επιφανειακής τραχύτητας. Υπάρχει πάραυτα ένα κατώτατο όριο λείανσης το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με την κατεργασία της στίλβωσης (Lapping) ακόμα και σε περιπτώσεις όπου γίνεται χρήση υπέρλεπτων κόκκων [5].

Οι βασικότερες παράμετροι που επηρεάζουν την κατεργασία της στίλβωσης είναι:

- Ο τύπος του λειαντικού μηχανήματος
- Ο τύπος και το μέγεθος/σχήμα των λειαντικών κόκκων
- Ο τύπος του λιπαντικού διαλύματος που χρησιμοποιείται
- Η πίεση που ασκείται στο τεμάχιο μέσω του βραχίονα
- Η ταχύτητα περιστροφής του λειαντικού δίσκου

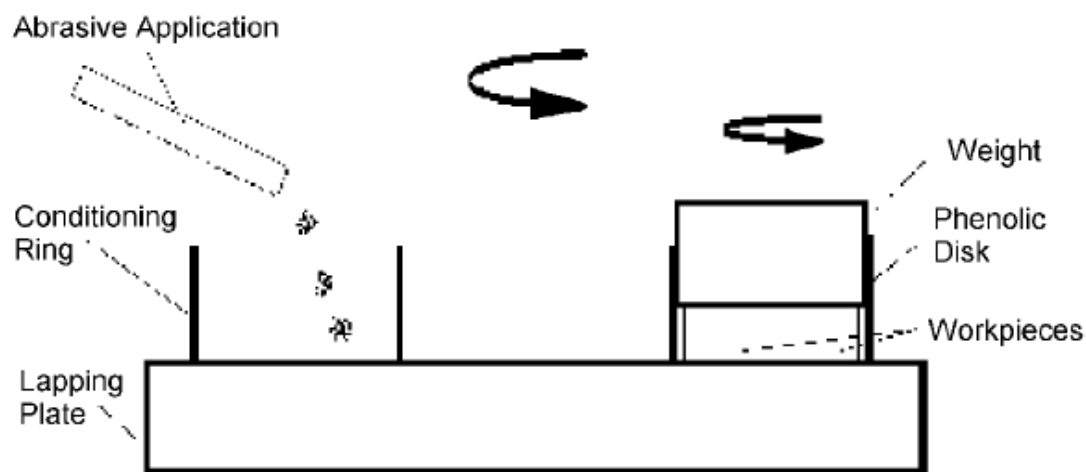


Εικόνα 1.1 Μοντελοποίηση της κατεργασίας στίλβωσης για την περίπτωση ενός σκληρού και ψαθυρού υλικού.

1.2 Εργαλειομηχανές στίλβωσης (Lapping Types)

➤ Στίλβωση με εργαλειομηχανή μονόπλευρης επαφής (Single-Side Lapping)

Αυτή η μέθοδος αποτελεί την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο για παραγωγή επίπεδων επιφανειών. Οι εργαλειομηχανές στίλβωσης με μονόπλευρη επαφή, διαθέτουν έναν περιστρεφόμενο, δακτυλιοειδούς σχήματος τροχό (λειαντικός δίσκος – lapping plate), στην επιφάνεια του οποίου εφαρμόζονται τα υπό κατεργασία τεμάχια. Μικρότερες μηχανές στίλβωσης διαθέτουν τρεις δακτυλίους συγκράτησης των τεμαχίων, ενώ μεγαλύτερες συνήθως τέσσερις. Τα τεμάχια που πρόκειται να κατεργαστούν, τοποθετούνται εντός των δακτυλίων και μέσω του βραχίονα τους ασκείται ένα φορτίο ώστε να διατηρούν επαφή με τον λειαντικό δίσκο, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 1.2** [5, 6].



Εικόνα 1.2 Εργαλειομηχανή στίλβωσης μονόπλευρης επαφής.

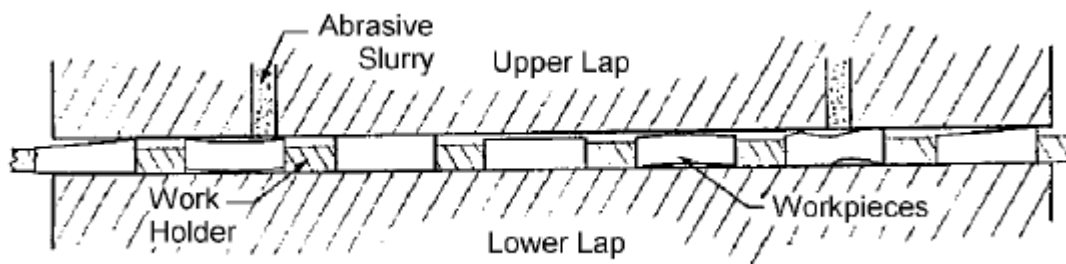
Μέσω της προαναφερθείσας διαδικασίας, τα τεμάχια πιέζονται ενάντια σε ένα ενσωματωμένο χαρτί αποτελούμενο από λειαντικούς κόκκους, είτε ενάντια σε ένα φιλμ το οποίο δημιουργείται με συνεχή παροχή λειαντικών κόκκων στην επιφάνεια του λειαντικού δίσκου. Τρία βασικά θέματα χρήζουν προσοχής κατά την εκτέλεση της διαδικασίας:

- Διατήρηση της επιπεδότητας του λειαντικού δίσκου
- Εφαρμογή ομοιόμορφης και υπολογίσιμης τιμής φορτίου μέσω του βραχίονα
- Διατήρηση συνεχούς και σταθερής ροής λειαντικού μέσου (στην περίπτωση μη χρήσης λειαντικού χαρτιού)

➤ ***Στίλβωση με εργαλειομηχανή διπλής επαφής (Double-Side Lapping)***

Η μέθοδος με τη μεγαλύτερη ακρίβεια αναφορικά με την διατήρηση της επιπεδότητας και της ομοιομορφίας μεγεθών είναι η χρήση εργαλειομηχανής στίλβωσης διπλής επαφής, ονομασία που υποδηλώνει ταυτόχρονη κατεργασία του τεμαχίου και από τις δυο πλευρές του. Με την κατεργασία διπλής επαφής υπάρχει μικρότερη πιθανότητα εισχώρησης ξένων σωματιδίων ανάμεσα στο τεμάχιο και στο ασκούμενο φορτίο. Οι εργαλειομηχανές διπλής επαφής διαθέτουν δυο αντιδιαμετρικούς λειαντικούς δίσκους ίσης διαμέτρου, όπου ο κατώτερος είναι σταθερά προσαρμοσμένος ενώ ο ανώτερος δίσκος δύναται να απομακρύνεται ή να πλησιάζει μέσω υδραυλικού συστήματος κίνηση όπως εμφανίζεται στην **Εικόνα 1.3** [5, 6].

Αμφότεροι οι λειαντικοί δίσκοι περιστρέφονται με αντίθετες συνήθως φορές περιστροφής. Η περιστροφική φορά του κατώτερου δίσκου μπορεί να αντιστρέφεται εφόσον αυτό απαιτείται για συγκεκριμένο σκοπό. Επίσης είναι εφικτός ο καθορισμός διαφορετικής ταχύτητας περιστροφής για κάθε δίσκο ξεχωριστά. Η κατεργασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με λειαντικούς δίσκους χυτοσίδηρου όπου προσφέρεται συνεχής παροχή λειαντικού μέσου μέσω υγρού. Εναλλακτικά, όταν η χρήση υγρού δεν είναι επιθυμητή ή επίσης όταν εξυπηρετεί συγκεκριμένους λόγους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί λειαντικό δίσκος με ενσωματωμένο λειαντικό μέσο στην επιφάνεια του. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης διαδικασίας αποτελεί η ικανότητα εναλλαγής της ασκούμενης πίεσης στο τεμάχιο, καθιστώντας δυνατή τη σταδιακή αύξηση της δύναμης με την οποία οι λειαντικοί δίσκοι φορτίζουν εκατέρωθεν το τεμάχιο. Η διακύμανση της πίεσεως μπορεί ουσιαστικά να μειώσει τον απαιτούμενο χρόνο της κατεργασίας και να οδηγήσει με εύκολο τρόπο στη δημιουργία τεμαχίου της επιθυμητής επιφανειακής τραχύτητας.



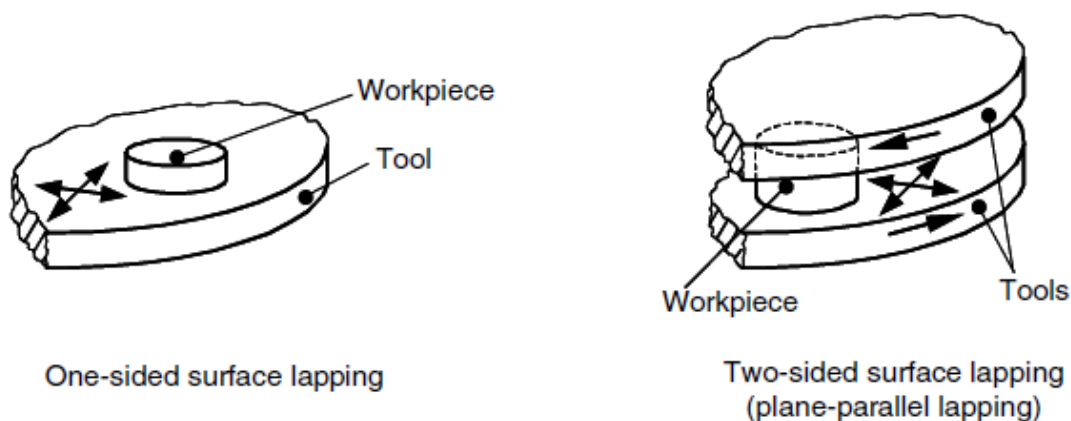
Εικόνα 1.3 Εργαλειομηχανή στίλβωσης διπλής επαφής.

Κάτω από ιδανικές συνθήκες, το αποτέλεσμα στίλβωσης με εργαλειομηχανές διπλής επαφής, είναι η δημιουργία τεμαχίων με οπτικά επίπεδες επιφάνειες, με τραχύτητα τάξεως μικρομέτρων. Η στίλβωση διπλής επαφής αυξάνει την αποτελεσματικότητα της κατεργασίας, καθώς στον ίδιο χρόνο κατεργάζονται δύο επιφάνειες, σε αντίθεση με τη στίλβωση μονής επαφής. Ένας τυπικός κύκλος κατεργασίας στίλβωσης διπλής επαφής αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια:

- Εισαγωγή των τεμαχίων στην εργαλειομηχανή και συγκεκριμένα στην επιφάνεια του κατώτερου λειαντικού δίσκου
- Επαφή του ανώτερου λειαντικού δίσκου με τα τεμάχια
- Έναρξη αργής περιστροφικής κίνησης των δίσκων
- Συνεχής εισροή λειαντικού μέσου καθ' όλο τον κύκλο, από ειδικές παροχές στον ανώτερο δίσκο. Στην περίπτωση χρήσης λειαντικού χαρτιού αυτό έχει τοποθετηθεί πρωτίστως στην επιφάνεια του κάθε λειαντικού δίσκου.
- Σταδιακή αύξηση του ασκούμενου φορτίου στο τεμάχιο μέσω του ανώτερου λειαντικού δίσκου, έως μια επιθυμητή τιμή ώστε να επιτευχθεί το ζητούμενο αποτέλεσμα για κάθε περίπτωση.
- Ο κύκλος της κατεργασίας συνεχίζεται έως ότου το τεμάχιο αποκτήσει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, οπότε και μπορεί να αφαιρεθεί πλέον από την εργαλειομηχανή, κατόπιν απομάκρυνσης του ανώτερου λειαντικού δίσκου.

Η στίλβωση διπλής επαφής προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα:

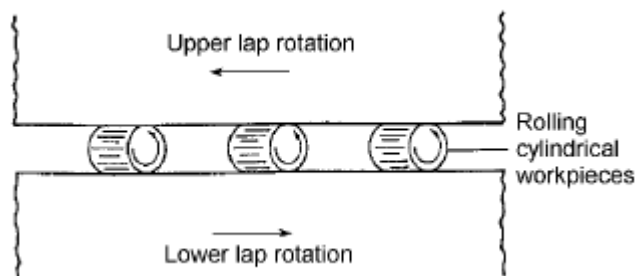
- Είναι δυνατή η ταυτόχρονη κατεργασία και των δυο επιφανειών του τεμαχίου
- Πολλά τεμάχια μπορούν να κατεργαστούν ταυτόχρονα
- Αποτελεί την καλύτερη διαθέσιμη μέθοδο για την επίτευξη τεμαχίων με ομοιόμορφη επιφάνεια σε τραχύτητα, επιπεδότητα, και μέγεθος και στις δυο πλευρές τους
- Η αποβολή υλικού και από τις δυο πλευρές του τεμαχίου ταυτόχρονα συντελεί στην εξάλειψη εσωτερικών τάσεων και κατά συνέπεια καθίσταται ευκολότερη η επίτευξη επίπεδης επιφάνειας.
- Ο ρυθμός αποβολής υλικού είναι ομοιόμορφος εμφανίζοντας επαναληψιμότητα. Αυτό ισχύει βέβαια μόνο στην περίπτωση που το λειαντικό μέσο παρέχεται συνεχώς μέσω υδατικού διαλύματος, καθώς στην περίπτωση χρήσης λειαντικού χαρτιού παρατηρείται η επίδραση της φθοράς στους λειαντικούς κόκκους, που έχει ως συνέπεια την αποβολή υλικού με μικρότερο ρυθμό.



Εικόνα 1.4 Στίλβωση μονόπλευρης και αμφίπλευρης επαφής.

➤ **Κυλινδρική στίλβωση (Cylindrical Lapping)**

Κυλινδρικά τεμάχια ή κυλινδρικά τμήματα συγκεκριμένων εξαρτημάτων μπορούν να αποκτήσουν ένα επιφανειακό φινίρισμα υψηλής γεωμετρικής ακρίβειας, εμφανίζοντας χαμηλή τραχύτητα, μέσω χρήσης εργαλειομηχανών στίλβωσης εξοπλισμένων με κατάλληλα μέσα. Η βάση στήριξης των κυλινδρικών τεμαχίων, διαθέτει άνοιγμα που αντιστοιχεί στις διαστάσεις των τεμαχίων. Οι κυλινδρικές εργαλειομηχανές χρησιμοποιούν δυο λειαντικούς δίσκους προσαρμοσμένους σε κάθετη ράβδο κίνησης. Ο ένας ή και οι δύο δίσκοι περιστρέφονται, με τα τεμάχια να συγκρατούνται ανάμεσα τους μέσω της βάσης στήριξης. Ο υποδοχέας καθοδηγείται στο κέντρο της εργαλειομηχανής, μέσω μιας περιστρεφόμενης ακίδας, η οποία προσαρμόζεται ώστε να μετακινείται έκκεντρα προς το κέντρο του κατώτατου δίσκου. Τα κυλινδρικά τεμάχια προσαρμόζονται σε κατάλληλες υποδοχές, η κεντρική γραμμή των οποίων εφάπτεται σε κυκλική διατομή στο κέντρο της βάσης στήριξης. Η περιστροφική κίνηση των τεμαχίων ωθεί σε περιστροφή και τη βάση στήριξης. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ελεγχόμενης στίλβωσης καθώς τα μέρη ολισθαίνουν κατά την περιστροφή τους, εξαιτίας τη έκκεντρης κίνησης της βάσεως στήριξης (βλ. **Εικόνα 1.5**) [5, 6].



Εικόνα 1.5 Κυλινδρική εργαλειομηχανή στίλβωσης

1.3 Τύποι λειαντικών μέσων

Υπάρχει μια πληθώρα υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται ως λειαντικά μέσα στην κατεργασία της στίλβωσης. Αυτά διαφοροποιούνται σε δυο κατηγορίες, ανάλογα με το αν είναι φυσικά (διαμάντι, κορούνδιο, σμυρίδα, γρανάτης, χαλαζίας) ή κρυσταλλικές δομές τεχνητά κατασκευασμένες (διαμάντι, καρβίδιο του πυριτίου, οξειδίο του αργιλίου ή αλουμίνα, κυβικό νιτρίδιο του βορίου, καρβίδιο του βορίου κ.α.). Η κατηγορία των τεχνητών λειαντικών μέσων διαχωρίζεται σε δυο ομάδες:

A. Συντηγμένα λειαντικά, αποτέλεσμα πολύ υψηλών θερμοκρασιών που επιτυγχάνονται μέσα σε ηλεκτρικούς φούρνους, οδηγούν στο σχηματισμό σκληρών κρυστάλλων.

B. Μη συντηγμένα λειαντικά, αποτέλεσμα χαμηλών θερμοκρασιών και χρήσης χημικών προσθέτων, με μικρότερη σκληρότητα σε σχέση με τα συντηγμένα.

Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα λειαντικά μέσα στη βιομηχανία περιλαμβάνουν:

- **Διαμάντι**

Το σκληρότερο και πιο αιχμηρό λειαντικό μέσο που είναι γνωστό. Υφίσταται τόσο σε φυσική μορφή όσο και σε τεχνητά κατασκευασμένη και στην κλίμακα σκληρότητας Mohs (*Πίνακας 1.1*) καταλαμβάνει την πρώτη θέση με τιμή 10. Ενδείκνυται για χρήση σε κατεργασία σκληρών υλικών όπως το καρβίδιο του βολφραμίου. Στίλβωση με αυτό το υλικό οδηγεί σε ταχύτατη αποβολή υλικού από το τεμάχιο και δημιουργία επιφάνειας εξαιρετικής υφής.

- **Κυβικό νιτρίδιο του βορίου (Cubic boron nitride - CBN)**

Συνθετικό λειαντικό μέσο, σχεδόν εξίσου σκληρό με το διαμάντι (9.9 στην κλίμακα Mohs). Ενδείκνυται για χρήση σε φερριτικά μέταλλα και ειδικότερα σε κουζινέτα χάλυβα 52100, χυτοσίδηρο, χαλύβδινα εργαλεία, κράματα κοβαλτίου, υπερκράματα και σε ορισμένες περιπτώσεις κεραμικά υλικά.

- ***Καρβίδιο του πυριτίου (Silicon carbide – SiC)***

Συντηγμένο, σκληρό, κρυσταλλικό λειαντικό μέσο με τιμή 9.5 στην κλίμακα Mohs. Επιτυγχάνει ταχεία αποβολή υλικού με ταυτόχρονη καλή αποδόμηση των κρυστάλλων του, διατηρώντας έτσι την αιχμηρότητα των λειαντικών του κόκκων ανεξαρτήτως αν εφαρμόζεται σε υλικά χαμηλού ή υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Ενδείκνυται για αδρές επιφάνειες, γρανάζια που έχουν υποστεί σκλήρυνση, βαλβίδες, εργαλεία και γενικότερη συντήρηση όπου η υπέρλεπτη στίλβωση (polishing) δεν είναι το ουσιαστικό ζητούμενο.

- ***Οξείδιο του αργιλίου ή αλουμίνα (Aluminum oxide - Al₂O₃)***

Συντηγμένο λειαντικό με πολύ σκληρή κρυσταλλική δομή, η οποία υπόκειται δύσκολα σε θραύση. Χρησιμοποιείται για στίλβωση υλικών υψηλού μέτρου ελαστικότητας, σε αδρές επιφάνειες, σκληρυμένα γρανάζια, υποδοχές σφαιρικών κουζινέτων και γενικότερα σε στίλβωση όπου ασκείται μεγάλη τιμή πίεσης ώστε να επιτευχθεί θραύση των κρυστάλλων του τεμαχίου.

- ***Κορούνδιο (Corundum)***

Πρόκειται για φυσικό λειαντικό μέσο τον οποίο συναντάται στη Γή και εμφανίζει λιγότερη σκληρή δομή σε σχέση με το καρβίδιο του πυριτίου ή το οξείδιο του αργιλίου. Χρησιμοποιείται σε στίλβωση μεγάλης ποικιλίας μετάλλων μέσης ή μεγάλης σκληρότητας (Rockwell C 35-45).

- ***Μη συντηγμένη αλουμίνα (προσθήκη H₂O, Ca)***

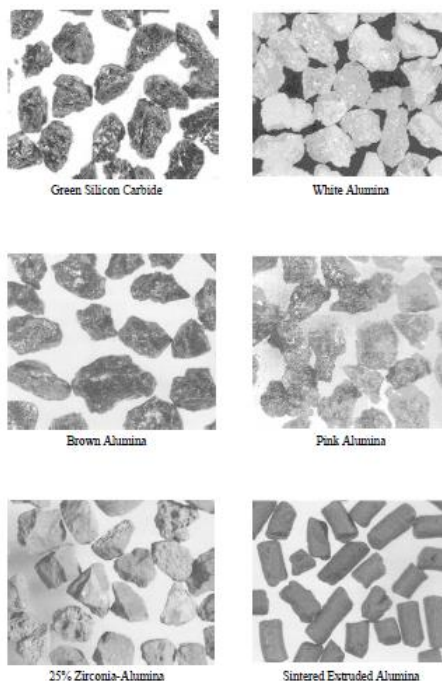
Σχετικά μαλακό λειαντικό μέσο το οποίο χρησιμοποιείται για υπέρλεπτη στίλβωση (polishing). Παράγεται με θερμική κατεργασία με τις τελικές ιδιότητες να είναι αποτέλεσμα του ποσοστού ασβεστίου που έχει χρησιμοποιηθεί. Ήπιος, μέσος ή υψηλός βαθμός ασβεστοποίησης οδηγεί σε μαλακό, μέσο και σκληρό λειαντικό αντίστοιχα. Ενδείκνυται για στίλβωση (lapping) και υπέρλεπτη στίλβωση (polishing) σκληρών μετάλλων (Rockwell C 45-63).

| ABRASIVES | MOHS SCALE |
|--------------------------------------|------------|
| Diamond | 10.0 |
| Cubic Boron Nitride (Borazon CBN) | 9.9 |
| Silicon Carbide | 9.5 |
| Aluminum Oxide | 9.0 |
| 38 White Aluminum Oxide | 9.0 |
| Corundum | 9.0 |
| Chromium Oxide | 8.5 |
| Garnet | 8 to 9 |
| Quartz | 7 |
| Aluminas (hydrates) | 5 to 7 |

Πίνακας 1.1 Κλίμακα σκληρότητας Mohs. [5, 6]

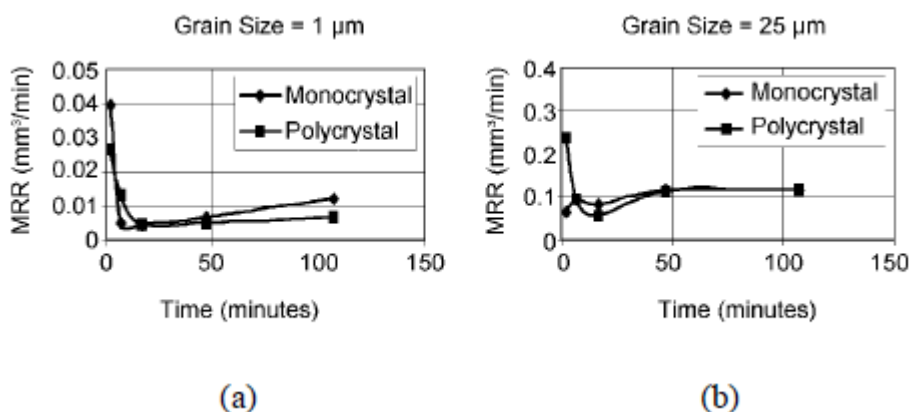
Παρατηρήσεις:

- Λειαντικά μέσα ίδιας ή παρόμοιας σκληρότητας στην κλίμακα του Mohs, δεν εμφανίζουν ισάξια ικανότητα κοπής, στίλβωσης ή φθορά, ούτε παράγουν επιφάνειες με ίδιο αποτέλεσμα.
- Η κρυσταλλική δομή, οι χαρακτηριστικές επιφανειακές δομές, η ευθραυστότητα, η χημική σύνθεση κ.α., αποτελούν τις παραμέτρους που διαμορφώνουν το τελικό αποτέλεσμα της κατεργασίας.
- Οι αλουμίνες χαρακτηρίζονται από ηπιότερη δράση κατά τη στίλβωση και ως εκ τούτου εφαρμόζονται στην υπέρλεπτη στίλβωση (polishing).



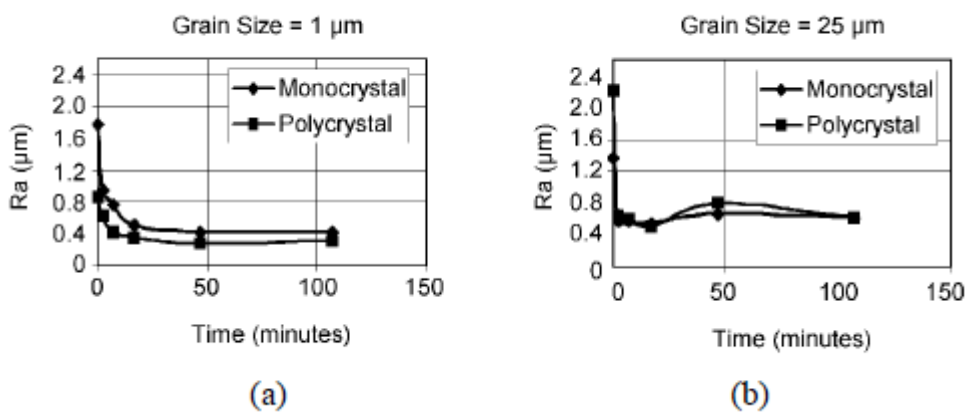
Εικόνα 1.6 Δομή λειαντικών κόκκων καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και διαφόρων τύπων αλουμίνας (Al_2O_3)

Το μέγεθος και η κατανομή του λειαντικού μέσου αποτελούν σημαντικούς παράγοντες που διαμορφώνουν το αποτέλεσμα της επιφάνειας του υπό κατεργασία τεμαχίου. *Συγκεκριμένα, το μέγεθος των κόκκων του λειαντικού μέσου είναι γραμμικά ανάλογο με το ρυθμό αποβολής υλικού από το τεμάχιο και την επιφανειακή του τραχύτητα. Λειαντικοί κόκκοι μεγαλύτερου μεγέθους συντελούν σε υψηλότερο ρυθμό αποβολής υλικού σε σχέση με μικρότερου μεγέθους κόκκους. Αντιθέτως όμως, κόκκοι μικρότερου μεγέθους παράγουν επιφάνειες με χαμηλότερη τραχύτητα.* Τα παραπάνω παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν (Εικόνες 1.7 και 1.8) [5, 6].



Εικόνα 1.7 Ρυθμός αποβολής υλικού συναρτήσει του χρόνου για (a) διαμάντι μεγέθους κόκκων 1 μm και (b) διαμάντι μεγέθους κόκκων 25 μm .

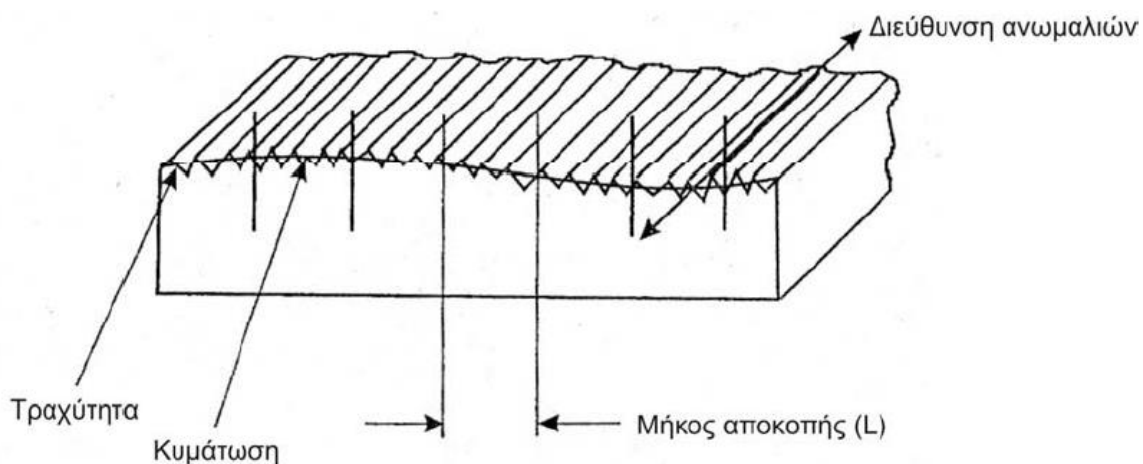
Ένας άλλος επίσης σημαντικός παράγοντας είναι η συγκέντρωση των κόκκων του λειαντικού ανά μονάδα επιφάνειας όταν πρόκειται για χαρτί ή ανά μονάδα όγκου φορέα όταν πρόκειται για διάχυση των κόκκων μέσα σε υγρό διάλυμα. Ειδικότερα, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των κόκκων που βρίσκονται σε επαφή με το τεμάχιο. *Στην περίπτωση που η συγκέντρωση διαφοροποιείται, προκαλείται διαφοροποίηση και στο φορτίο που ασκείται στην επιφάνεια του τεμαχίου. Αύξηση στον αριθμό των λειαντικών κόκκων συνεπάγεται μείωση στο εφαρμοζόμενο φορτίο ανά λειαντικό κόκκο λόγω της δημιουργίας πολλαπλών σημείων επαφής με το τεμάχιο. Μεγέθη λειαντικών κόκκων τάξης μικρότερης των μικρομέτρων, συνεπάγεται ανάλογη αύξηση του αριθμού των κόκκων.*



Εικόνα 1.8 Επιφανειακή τραχύτητα υλικού συναρτήσει του χρόνου για (a) διαμάντι μεγέθους κόκκων 1μm και (b) διαμάντι μεγέθους κόκκων 25μm.

1.4 Τραχύτητα

Η επιφάνεια ενός τεμαχίου χαρακτηρίζεται από τρία σημαντικά χαρακτηριστικά: την τραχύτητα, την κυμάτωση και τη διαγράμμιση. Αυτά τα χαρακτηριστικά προσδίδουν μια συγκεκριμένη τοπογραφία στην επιφάνεια και ακολούθως κρίνεται η επιφανειακή ποιότητα. Το υλικό του τεμαχίου, η εργαλειομηχανή, το σύστημα εργαλείου/τεμαχίου, οι παράμετροι της κατεργασίας και όλα τα περιφερειακά της επηρεάζουν άμεσα το αποτέλεσμα της κατεργασίας στην επιφάνεια του τεμαχίου. Η τραχύτητα της επιφάνειας χρησιμοποιείται παγκοσμίως για να καθορίσει συγκεκριμένες απαιτήσεις αποπεράτωσης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.9** [7].



Εικόνα 1.9 Χαρακτηριστικά επιφάνειας δοκιμίου.

Η τραχύτητα είναι μια μηχανική ιδιότητα, η οποία προσδιορίζει κυρίως μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας και αποτελεί βασικό κριτήριο της ποιότητας των επιφανειών. Το μέγεθος αυτό επηρεάζεται από τις χημικές ή μηχανικές κατεργασίες τις οποίες υφίσταται η επιφάνεια των υλικών. Η επιφανειακή τραχύτητα επιδρά σε σημαντικές ιδιότητες των μετάλλων όπως είναι η ανακλαστικότητα, η διάβρωση, η αντοχή στην κόπωση, η ηλεκτρική αντίσταση, η θερμική εναλλαγή, η φθορά και ο θόρυβος των κινητών μερών διαφόρων μηχανών, όπως επίσης και στη δυνατότητα χρήσης τους ως μέσα επικάλυψης ή μέσα ηλεκτρικών επαφών [8].

Η προσδιοριζόμενη τραχύτητα είναι ένα μέγεθος το οποίο να μην επηρεάζεται από τη δομή των κρυσταλλιτών του στερεού αλλά εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως οι διαφόρου τύπου ατέλειες της επιφάνειας που μπορεί να οφείλονται σε μηχανικές ή και χημικές δράσεις.

Η μετρολογία της μικρογεωμετρίας των επιφανειών συνίσταται στη μέτρηση σφαλμάτων το μέγεθος των οποίων κυμαίνεται από 1mm ως 1nm σε ακραίες περιπτώσεις. Η ανάλυση της τραχύτητας γίνεται συνήθως σε *δισδιάστατες* τομές και προσδιορίζεται μέσω των τιμών Rz, Rt και Ra. Αν It είναι το μήκος που διανύει η ακίδα του ανιχνευτή τραχύτητας πάνω στην εξεταζόμενη μεταλλική επιφάνεια τότε αυτό μπορεί να χωριστεί σε πεπερασμένο πλήθος ίσων τμημάτων. Τα τμήματα αυτά ονομάζονται βήματα Ic και είναι συνήθως πέντε. Κατά συνέπεια ισχύει:

$$It = 5 \cdot Ic \quad (1.1)$$

Οι τιμές Rz, Rt και Ra που προσδιορίζουν την τραχύτητα ορίζονται ως εξής :

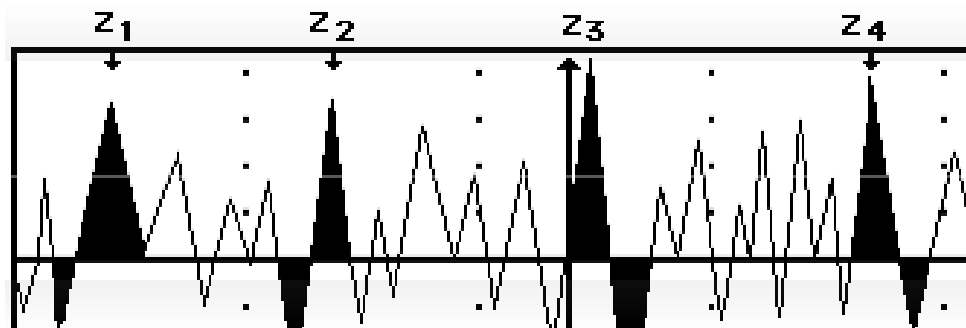
- **Μέση τραχύτητα (Rz):** είναι ο αριθμητικός μέσος των μέγιστων αποκλίσεων (z), οι οποίες αφορούν σε καθένα από τα πέντε βήματα (Ic) (*Εικόνα 1.10*).

Δηλαδή:

$$R_z = \frac{1}{5} \cdot (z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5) \quad (1.2)$$

- **Μέγιστη τραχύτητα (Rt):** είναι η μέγιστη απόκλιση (**Zmax**), η οποία αφορά στο συνολικό διανυόμενο μήκος (It) της ακίδας (*Εικόνα 1.10*). Δηλαδή:

$$R_t = Z_{\max} = Z_3 \quad (1.3)$$



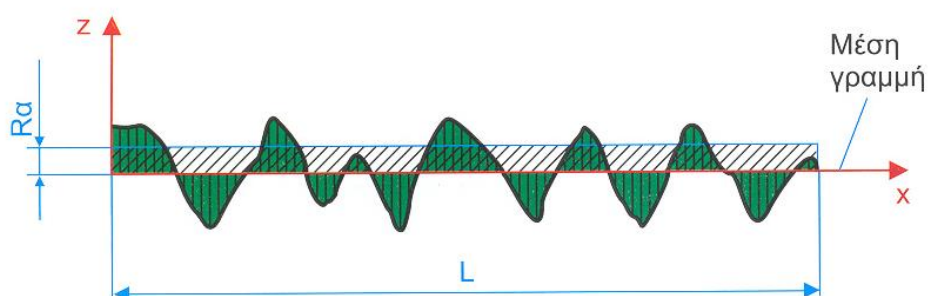
Εικόνα 1.10 Προσδιορισμός των τιμών Rz και Rt. [8]

- **Ολική μέση τραχύτητα (Ra):** είναι ο ολικός μέσος όρος της επιφάνειας που περιγράφεται από τις αποκλίσεις της ακίδας ως προς μια γραμμή αναφοράς, κατά τη μέτρηση του (l). Συνήθιστα χρησιμοποιείται η αριθμητική μέση απόκλιση Ra από τη «μέση γραμμή» της επιφάνειας μέσα σε ένα μήκος αναφοράς l [9].

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (1.4)$$

όπου $y(x)$ ορίζεται το προφίλ της επιφάνειας και υπολογίζεται προσεγγιστικά με χρήση διακριτών τιμών αντί της ολοκλήρωσης.

Η μέση γραμμή ορίζεται έτσι ώστε: *εμβαδό κοιλάδων* = *εμβαδό κορυφών*



Εικόνα 1.11 Μέση γραμμή επιφάνειας

- **Μέτρηση τραχύτητας επιφάνειας – R_{RMS}**

Η τραχύτητα επιφάνειας επίσης μετράται και ως τιμή RMS, δηλαδή:

$$R_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}} \quad (1.5)$$

Αποτελεί άλλον τρόπον υπολογισμού μέσης τιμής της τραχύτητας, κατάλληλα για στατιστική επεξεργασία. Έχει ιδιαίτερη θεωρητική σημασία καθώς πρόκειται ουσιαστικά για την τυπική απόκλιση των αποστάσεων των σημείων του περιγράμματος από τη μέση γραμμή. Είναι παράμετρος περισσότερο ευαίσθητη από την Ra σε περιπτώσεις μεγάλων αποκλίσεων από τη μέση γραμμή. Έχει εκτιμηθεί ότι προκύπτει κατά 10% μεγαλύτερη της τιμής Ra [9].

Μείωση τραχύτητας μέσω στίλβωσης-εφαρμογές





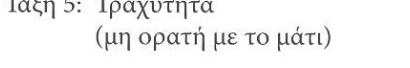
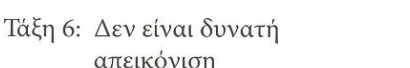
- Εφαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα υλικών, όπως μέταλλα, πολυμερή, ημιαγωγούς.
- Για τα μέταλλα, βρίσκει εφαρμογή σε:
 1. φακούς, κάτοπτρα και άλλα οπτικά μέρη.
 2. στοιχεία μηχανών, όπως γρανάζια, κουζινέτα κ.α. όπου απαιτείται υψηλής ποιότητας επιφανειακή δομή με σκοπό την καλύτερη συνδυαστική λειτουργία τους.
 3. ιατρικά εργαλεία, νυστέρια, βελόνες κ.α. που απαιτούν εξαιρετικό φινίρισμα της επιφάνειας τους.
 4. μεταλλικές συσκευασίες τροφίμων όπου απαιτούνται προδιαγραφές χαμηλής επιφανειακής τραχύτητας (για την αποφυγή της οξείδωσης και της ανάπτυξης μικροβίων).

Σύστημα ταξινόμησης αποκλίσεων μορφής

- Οι αποκλίσεις πρώτης τάξης καλούνται σφάλματα μορφής (shape deviation). Είναι τα σφάλματα κυκλικότητας, ευθύτητας, επιπεδότητας κ.τ.λ.

Οι αποκλίσεις δεύτερης τάξης, που διαπιστώνονται με τη βοήθεια οργάνου παρατηρώντας μέρος της υπό εξέταση επιφάνειας, αποτελούν την κυμάτωση (waviness). Η κυμάτωση τεχνολογικών επιφανειών προκαλείται από διάφορους παράγοντες, όπως μηχανικές αποκλίσεις, εσφαλμένη τοποθέτηση τεμαχίου ή εργαλείου, ταλαντώσεις, θερμικές παραμορφώσεις. Εμφανίζει περιοδικότητα με χαρακτηριστικά το εύρος κυμάτωσης και το ύψος κυμάτωσης, ο λόγος των οποίων παίρνει τιμή μεταξύ 1000:1 και 100:1.

- Τα σφάλματα μορφής και η κυμάτωση αποτελούν τα μακρογεωμετρικά σφάλματα της επιφάνειας.
- Οι αποκλίσεις τρίτης και ανώτερης τάξης αναφέρονται στη μικρομορφή της επιφάνειας και συνιστούν ό,τι ονομάζουμε τραχύτητα επιφάνειας (roughness). Η τραχύτητα επιφάνειας οφείλεται σε χαρακτηριστικά του εργαλείου, στην κινηματική της κατεργασίας καθώς και σε χημικές επιδράσεις και μεταβολές στον κρυσταλλικό ιστό του μετάλλου. Αποτελεί κρίσιμο μέγεθος συσχετιζόμενο με την κατεργασιμότητα του μετάλλου, τις απαιτήσεις ανοχών του κατεργαζόμενου τεμαχίου, τριβολογικά μεγέθη (τριβή, φθορά, λίπανση κ.ά.) σε περιπτώσεις συναρμολοζόμενων επιφανειών και γενικότερα με τη λειτουργική συμπεριφορά των τεχνολογικών επιφανειών [9].

| Τάξη απόκλισης μορφής (μεγέθυνση τομής) | Παραδείγματα αποκλίσεων | Αιτίες αποκλίσεων |
|--|--|--|
| Τάξη 1: Σφάλματα μορφής  | Αποκλίσεις από ευθυγραμμότητα, επιπεδότητα, κυκλικότητα κλπ. | Σφάλματα σε ολισθητήρες εργαλειομηχανής. Παραμορφώσεις εργαλειομηχανής, κατεργαζομένου τεμαχίου. Εσφαλμένη στήριξη τεμαχίου. |
| Τάξη 2: Κυμάτωση  | Κυματοειδής μορφή (DIN 4761) | Έκκεντρος τοποθέτηση τεμαχίου ή εργαλείου. Ταλαντώσεις τεμαχίου ή και εργαλείου. Σημαντική ανομοιογένεια του υλικού του τεμαχίου. |
| Τάξη 3: Τραχύτητα  | Αυλακώσεις (DIN 4761) | Μορφή της κόψης του εργαλείου. Κινηματική της κατεργασίας. |
| Τάξη 4: Τραχύτητα  | Ρωγμές, ανωμαλίες υπό μορφή λεπιών κλπ. (DIN 4761) | Ατέλειες τρόχισης της κόψης του εργαλείου. Δημιουργία ψευδοακμής. Φθορά εργαλείου. Τρόπος σχηματισμού του αποβλίτου. Επίδραση γαλβανικών επεξεργασιών. |
| Τάξη 5: Τραχύτητα (μη ορατή με το μάτι)  | Φύση μετάλλου | Τρόπος κρυστάλλωσης μετάλλου. Ανωμαλίες επιφάνειας λόγω χημικών επιδράσεων. Φαινόμενα διάβρωσης. |
| Τάξη 6: Δεν είναι δυνατή απεικόνιση  | Κρυσταλλικός σχηματισμός μετάλλου | Φυσικές-χημικές μεταβολές κατά τη λεπτή δομή του υλικού. Παραμορφώσεις του κρυσταλλικού ιστού (παραμένουσες τάσεις, ολισθήσεις κρυστάλλων). |

Συνήθως οι αποκλίσεις 1ης έως και 4ης τάξης συνυπάρχουν σε μία πραγματική επιφάνεια.

Παράδειγμα:



Εικόνα 1.12 Συνοπτική παρουσίαση αποκλίσεων μορφής [9].

Η τραχύτητα των μεταλλικών επιφανειών εκφράζεται συνήθως από την τιμή Ra, η οποία θεωρείται η πλέον αξιόπιστη.

Κεφάλαιο 2 Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης (AFM)

Εισαγωγή

Στο πρώτο μέρος του παρόντος κεφαλαίου αναπτύσσονται λεπτομερώς οι βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία του Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης (AFM). Εν συνεχεία, παρουσιάζονται οι τρόποι λειτουργίας του, ενώ παρατίθενται επίσης τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα καθώς και οι χρήσεις του καθενός. Το δεύτερο μέρος επικεντρώνεται στη χρήση του Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης και πιο συγκεκριμένα στον υπολογισμό της τραχύτητας και στην αναπαράσταση της τοπογραφίας επιφανειών, με ταυτόχρονη παράθεση παραδειγμάτων που είναι διαθέσιμα από τη βιβλιογραφία.

2.1 Αρχές λειτουργίας AFM

Η Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης (Atomic Force Microscopy) αναπτύχθηκε το 1986 από τους Binnig, Quate και Gerber στα πλαίσια συνεργασίας της εταιρείας IBM και του πανεπιστημίου Stanford. Η αρχή λειτουργίας της Μικροσκοπίας Ατομικής Δύναμης βασίζεται στην ικανότητα που εμφανίζει η συγκεκριμένη μέθοδος στην ανίχνευση ασθενών δυνάμεων. Συγκεκριμένα, ένας πρόβολος ο οποίος διαθέτει μια αιχμηρή άκρη (ακίδα) στο τελειώμά του, αποτελεί το μέσον με το οποίο γίνονται αισθητές οι δυνάμεις που ασκούνται στην αιχμηρή αυτή άκρη από τα άτομα του δείγματος. Προκειμένου να γίνουν αντιληπτές ασθενείς δια-ατομικές δυνάμεις, ο πρόβολος πρέπει να μην επηρεάζεται από εξωγενείς παράγοντες προερχόμενους από τον περιβάλλοντα χώρο που περικλείει την πειραματική διάταξη. Τέτοιου είδους εξωτερικές επιδράσεις προκαλούνται από δονήσεις των οποίων η φασματική πυκνότητα συχνοτήτων εντοπίζεται σημαντικά στην περιοχή 0–2 kHz. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν δονήσεις που προκαλούνται από τις κτιριακές εγκαταστάσεις ή το υπέδαφος. Προκειμένου λοιπόν να αποφευχθούν αυτές οι εξωτερικές επιδράσεις στη μέτρηση, η συχνότητα συντονισμού του προβόλου οφείλει να είναι μεγαλύτερη από 2 kHz. Συγχρόνως όμως, ο πρόβολος πρέπει να παραμένει επαρκώς ευαίσθητος ώστε να είναι σε θέση να ανιχνεύσει τις δια-ατομικές δυνάμεις. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ της αιχμηρής άκρης του προβόλου και του δείγματος κυμαίνονται σε ένα εύρος $10^{-7} - 10^{-12}$ Newton. Για τη δημιουργία μιας εκτροπής του προβόλου μεγαλύτερης από 1 Å για μια δεδομένη δύναμη 10^{-12} N, η σταθερά ελατηρίου k προβόλου πρέπει να είναι μικρότερη από 0,01 N/m. Για δεδομένη δυσκαμψία προβόλου τάξεως 0,01 N/m και συχνότητα συντονισμού ίση με 2 kHz, απαιτείται η μάζα του προβόλου να είναι μικρότερη από 10^{-10} kg. Αυτές οι προδιαγραφές συναντώνται από προβόλους με μέγεθος μερικών μm, που συνήθως κατασκευάζονται από νιτρίδια ή οξειδία του πυριτίου (SiN, SiO), με χρήση μεθόδων μικρο-κατασκευής. Τυπικές διαστάσεις μήκους, πλάτους και πάχους μικρο-προβόλων που χρησιμοποιούνται στη Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης είναι 100, 10, και 2 μm αντιστοίχως. Το μέτρο δυσκαμψίας τους επίσης μπορεί να κυμαίνεται από 0,06 μέχρι 100N/m [10]. Μια τυπική διάταξη Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης παρουσιάζεται γραφικά στην **Εικόνα 2.1**. Η κυρίαρχη μέθοδος για την καταγραφή της εκτροπής του προβόλου κάνει χρήση μιας δέσμης λέιζερ. Συγκεκριμένα, η δέσμη αυτή εστιάζεται πάνω στην επιφάνεια του προβόλου και ανακλάται σε μια διαχωρισμένη φωτοδίοδο. Η εκτροπή του προβόλου συντελείται εξαιτίας της ανάπτυξης δια-ατομικών

δυνάμεων ανάμεσα στον πρόβολο και τα άτομα επιφανείας του δείγματος. Ακολούθως αυτή η εκτροπή μεταβάλλει τη γωνία την οποία η προσπίπτουσα δέσμη λέιζερ σχηματίζει με την επιφάνεια του προβόλου, το οποίο κατά τη συνέπεια, μεταβάλλει και το σημείο πρόσπτωσης της δέσμης στη φωτοδιόδο. Το τελευταίο συμβάν καταγράφεται ως αλλαγή στην τάση λειτουργίας της φωτοδιόδου. Το μήκος διαδρομής της ανακλώμενης δέσμης λέιζερ ενισχύει το σήμα που αντιστοιχεί στην εκτροπή θέσης του προβόλου [10].

Το πέρασ του προβόλου στηρίζεται σταθερά στη *βάση*, η οποία με τη σειρά της είναι προσαρμοσμένη σε έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο του οποίου η στήριξη γίνεται σε σύστημα που μπορεί να ταλαντώνεται (*Εικόνα. 2.1*). Αυτό ακριβώς το χαρακτηριστικό παρέχει τη δυνατότητα στη *βάση του προβόλου* να ταλαντώνεται επίσης. Τέλος, ένας σαρωτής (scanner), ο οποίος ενεργοποιείται από πιεζοηλεκτρικό υλικό, δύναται να αλλάζει τη θέση του δείγματος οριζόντια και κάθετα κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαδικασίας απεικόνισης [10].

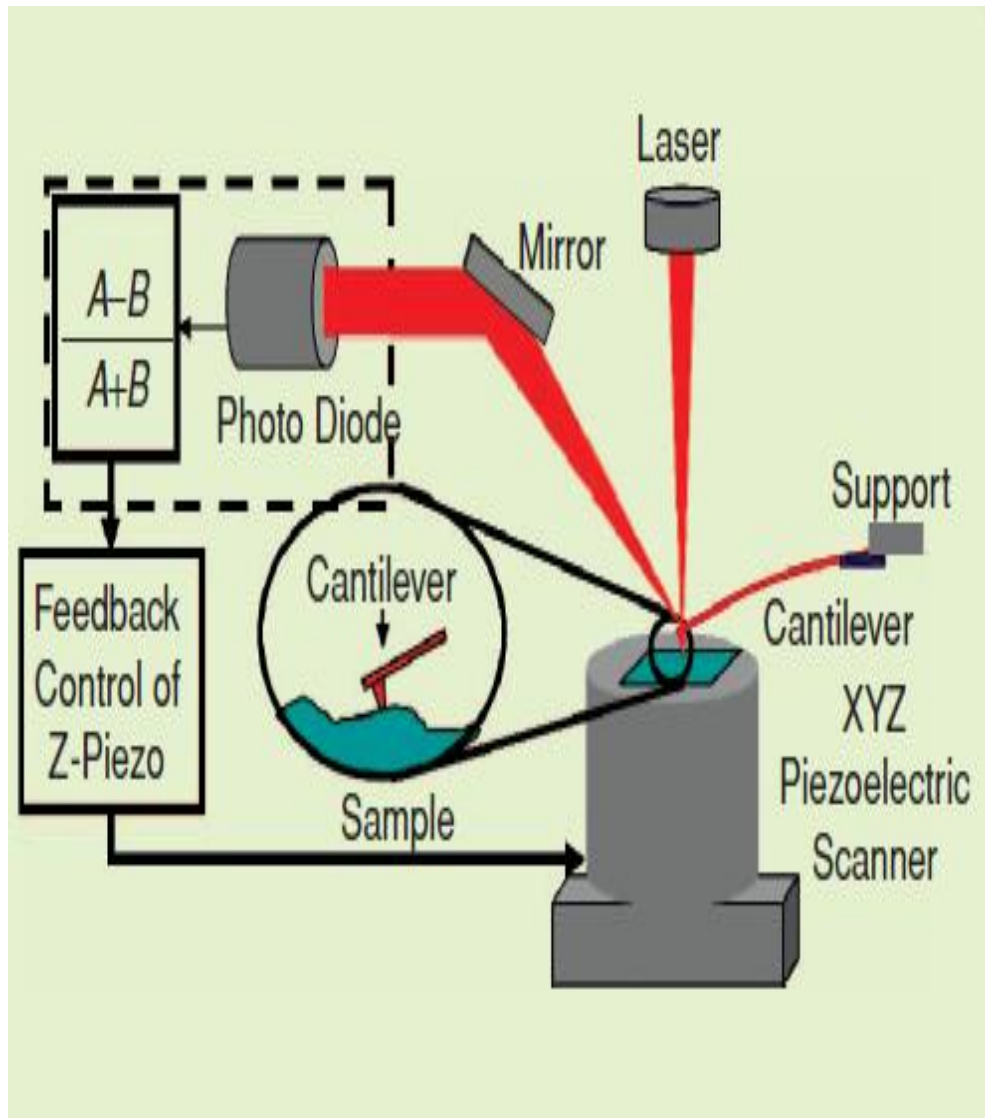
Ο πρόβολος αποτελεί ένα εύκαμπτο ταλαντούμενο μέλος και περιγράφεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση ελατηρίου-μάζας-δύναμης επαναφοράς:

$$\ddot{p} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{p} + \omega_0^2 \cdot p = f(t) \quad (2.1)$$

$$y = p + v$$

Όπου οι παράμετροι p , f , y , και v ορίζουν την εκτροπή της αιχμής από τη θέση ισορροπίας, τη δύναμη που ασκείται στον πρόβολο, τη μετρούμενη συνολική εκτροπή και το μετρούμενο σήμα θορύβου αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, οι παράμετροι ω_0 και Q αποτελούν την *πρώτη συχνότητα συντονισμού* και το *συντελεστή ποιότητας* του προβόλου αντίστοιχα. Ο συντελεστής ποιότητας του προβόλου καθορίζει συγκεκριμένα την ενεργειακή απώλεια από τον πρόβολο προς το περιβάλλον. Η πρώτη συχνότητα συντονισμού για τυπικά είδη προβόλων που χρησιμοποιούνται στη Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης κυμαίνεται στο εύρος 10–400 kHz ενώ ο συντελεστής ποιότητας Q μπορεί να κυμαίνεται από μια τιμή 2 σε υδάτινο περιβάλλον μέχρι 10.000 ή περισσότερο όταν η μέτρηση γίνεται υπό κενό. Η μέτρηση του θορύβου v καθορίζεται από μια τιμή $1/f$ σε χαμηλές συχνότητες και είναι σχεδόν μηδενική (white noise) από μερικά kHz και άνω. Η εξίσωση 2.1 που περιγράφει ένα μοντέλο του προβόλου, μπορεί να υπολογιστεί με

ακρίβεια. Η αντιμετώπιση του προβόλου ως ένα *φίλτρο* στην εξίσωση 2.1 αποδεικνύεται κρίσιμη στην προσαρμογή συστημάτων αλλά και μεθόδων χειρισμού στο Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης [10].



Εικόνα 2.1 Διάταξη Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης με τα κυριότερα μέρη που το αποτελούν. Το Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης καθιστά εφικτή την απεικόνιση δειγμάτων με ανάλυση σε επίπεδο ατομικής κλίμακας, τόσο για υλικά αγωγούς όσο και για μονωτές. Το κυριότερο μέρος του αποτελεί ένας μικρο-πρόβολος ο οποίος δύναται να εκτρέπεται από τη θέση του, εξαιτίας των αλληλεπιδράσεων που αναπτύσσονται ανάμεσα στα άτομα του δείγματος και στα άτομα της αιχμηρής άκρης του ίδιου του προβόλου. Η εκτροπή του προβόλου εν συνεχεία καταγράφεται με τη βοήθεια δέσμης laser η οποία προσπίπτει επάνω στον πρόβολο και ανακλάται εν συνεχεία σε μια διαχωρισμένη φωτοδιόδο που καταγράφει το σήμα εισόδου. Η βάση του προβόλου εξαναγκάζεται σε ταλάντωση χάριν σε έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο. Το σήμα ελέγχου, το οποίο καθορίζει ένα σημείο αναφοράς μετακινώντας το δείγμα κάθετα σε σχέση με τον πρόβολο, παρέχει ένα μέτρο της τοπογραφίας του δείγματος. Ο πιεζοηλεκτρικός σαρωτής με τη σειρά του μετακινεί το δείγμα σε σχέση με το δείγμα κατά την

Η δύναμη αλληλεπίδρασης ανάμεσα στην αιχμηρή άκρη του προβόλου και στο δείγμα εκφράζεται από την εξίσωση Lennard-Jones :

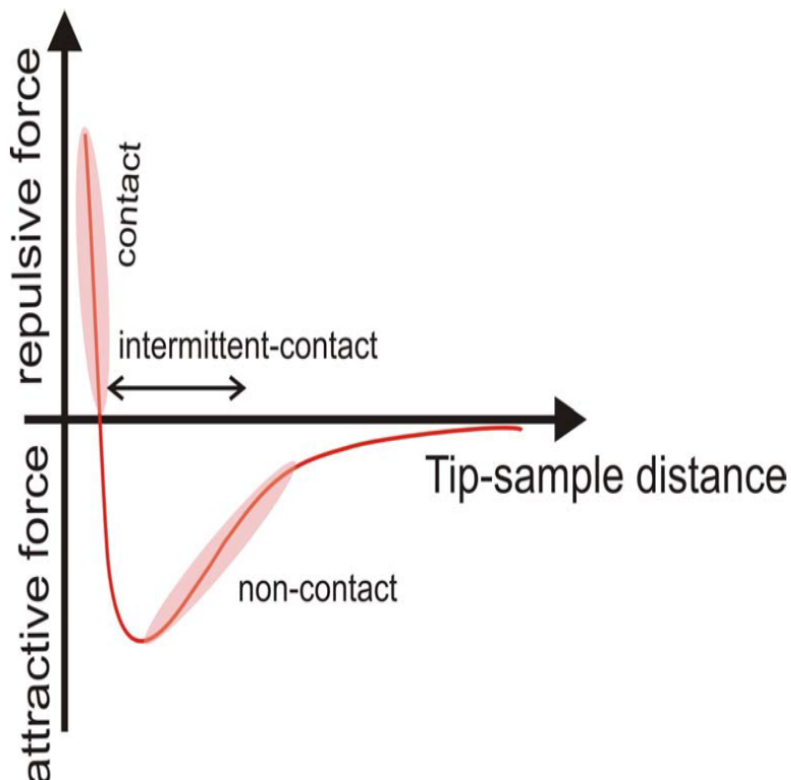
$$F(r) = \frac{-6A}{r^7} + \frac{12B}{r^{13}} \quad (2.2)$$

όπου ως r ορίζεται η απόσταση ανάμεσα στην αιχμηρή άκρη και στο δείγμα. Ο όρος $-A/r^7$ μοντελοποιεί τις αλληλεπιδράσεις Van der Waals που προκαλούν την ελκτική δύναμη (εξ' ου και το αρνητικό πρόσημο) ανάμεσα στα άτομα του δείγματος και στα άτομα της αιχμηρής άκρης του προβόλου. Το αποτέλεσμα των ασθενών αυτών δυνάμεων γίνεται αντιληπτό όταν δυο άτομα διαχωρίζονται από αποστάσεις μικρότερες των 10 nm. Αντιθέτως, σε αποστάσεις μεταξύ ατόμων μικρότερες από 1 Å, παρατηρείται η εμφάνιση ισχυρών απωστικών δυνάμεων λόγω επικάλυψης των ηλεκτρονιακών νεφών των ατόμων αλλά και ιοντικών αλληλεπιδράσεων. Η επίδραση των ισχυρών αυτών απωστικών δυνάμεων περιγράφεται στην εξίσωση 2.2 από τον όρο B/r^{13} . Το μοντέλο Lennard-Jones προσφέρει έναν αρκετά καλό ποιοτικό χαρακτηρισμό της αλληλεπίδρασης δείγματος-ακίδας, παρόλο που δεν περιέχει τους πολύπλοκους και πολυάριθμους παράγοντες που προκαλούν τα πραγματικά πειράματα Μικροσκοπίας Ατομικής Δύναμης να διαφέρουν από το συγκεκριμένο μοντέλο Lennard-Jones [10].

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας (modes) στη Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης, οι οποίοι καθορίζονται από τον τρόπο αλληλεπίδρασης δείγματος-ακίδας και είναι οι ακόλουθοι:

- Λειτουργία με επαφή δείγματος-ακίδας (contact mode)
- Διακεκομμένη λειτουργία (intermittent-contact or tapping mode)
- Λειτουργία απουσία επαφής δείγματος ακίδας (non-contact mode)

Στην **Εικόνα 2.2** παρουσιάζονται οι τρεις αυτοί τρόποι λειτουργίας, σε συσχέτιση με τη δύναμη αλληλεπίδρασης ως συνάρτηση της απόστασης δείγματος-ακίδας.



Εικόνα 2.2 Γραφική περιγραφή του μοντέλου Lennard-Jones όπου παρουσιάζεται η δύναμη αλληλεπίδρασης ως συνάρτηση της απόστασης δείγματος-ακίδας [10].

Ακολούθως παρατίθενται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε τρόπου λειτουργίας στη Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης [11].

Λειτουργία με επαφή - Contact mode

Πλεονεκτήματα:

- Υψηλές ταχύτητες σάρωσης δείγματος (ρυθμός μέτρησης).
- Αποτελεί τη μόνη λειτουργία μέτρησης στη Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης, κατά την οποία μπορούν να επιτευχθούν εικόνες με ανάλυση σε ατομική κλίμακα.
- Δείγματα που εμφανίζουν μεγάλη επιφανειακή τραχύτητα και ακραίες διαφοροποιήσεις στην τοπογραφία της επιφάνειάς τους κατά την κάθετη διεύθυνση και μπορούν να σαρωθούν ευκολότερα με αυτό τον τρόπο λειτουργίας.

Μειονεκτήματα:

- Η εμφάνιση διατμητικών δυνάμεων λόγω της επαφής δείγματος-ακίδας μπορεί να διαταράξει τα χαρακτηριστικά της υπό δημιουργία εικόνας.
- Οι ορθές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη διεύθυνση αλληλεπίδρασης δείγματος-ακίδας δύναται να λάβουν μεγάλες τιμές σε μέτρηση που λαμβάνει χώρα χωρίς τη δημιουργία κενού. Αυτό οφείλεται στην εμφάνιση τριχοειδών δυνάμεων, εξαιτίας του στρώματος υγρασίας που δημιουργείται στην επιφάνεια του δείγματος.
- Ο συνδυασμός εμφάνισης ορθών και διατμητικών δυνάμεων μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη διακριτική ικανότητα του μικροσκοπίου και συγχρόνως να προκαλέσει φθορά σε ευπαθή δείγματα (π.χ. βιολογικά δείγματα, πολυμερή, δοκίμια πυριτίου) εξαιτίας εγχάραξης του δείγματος από την ακίδα.

Ενδιάμεση λειτουργία - Tapping mode**Πλεονεκτήματα:**

- Υψηλότερη διακριτική ικανότητα διατμητικά για τα περισσότερα είδη δειγμάτων (1 nm έως 5 nm).
- Ανάπτυξη ασθενών δυνάμεων που συνεπάγεται μικρότερη φθορά σε ευπαθή δείγματα για μετρήσεις που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα.
- Ουσιαστική απουσία διατμητικών δυνάμεων με ταυτόχρονη ολοκληρωτική προστασία της επιφάνειας του δείγματος από εγχάραξη λόγω της ακίδας.

Μειονεκτήματα:

- Σχετικά μικρότερη ταχύτητα σάρωσης του δείγματος σε σχέση με τη λειτουργία επαφής (contact mode).

Λειτουργία μη-επαφής - Non-contact Mode

Πλεονεκτήματα:

- Απουσία ασκούμενης δύναμης στην επιφάνεια του δείγματος.

Μειονεκτήματα:

- Χαμηλότερη διακριτική ικανότητα διατμητικά λόγω της απόστασης διαχωρισμού δείγματος-ακίδας.
- Χαμηλότερη ταχύτητα σάρωσης δείγματος σε σχέση με την ενδιάμεση λειτουργία.
- Έχει εφαρμογή μόνο σε εξαιρετικά υδρόφοβα δείγματα όπου το επαγόμενο επιφανειακό στρώμα υγρασίας περιορίζεται στο ελάχιστο. Σε αντίθετη περίπτωση όπου έχει παγιδευτεί ένα παχύ στρώμα υγρασίας στην επιφάνεια η ακίδα παγιδεύεται από αυτό παρέχοντας λανθασμένη απόκριση στα μετρούμενα μεγέθη και προκαλώντας ταυτόχρονα φθορά στο δείγμα.

Εξαιτίας της φύσης των μειονεκτημάτων που επιδεικνύει η λειτουργία μη-επαφής με το δείγμα, οι εφαρμογές της συγκεκριμένης μεθόδου παραμένουν περιορισμένες. Αντιθέτως, η λειτουργία σε επαφή με το δείγμα μπορεί να προκαλέσει φθορά σε οργανικά δείγματα τα οποία είναι εξαιρετικά ευαίσθητα. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η ενδιάμεση λειτουργία παραμένει η προτιμητέα για τη μελέτη της επιφανειακής δομής ενός δείγματος. Η μέτρηση πραγματοποιείται καθώς η ακίδα, η οποία βρίσκεται στο πέρας του προβόλου ο οποίος ταλαντώνεται, σαρώνει κατά μήκος την επιφάνεια του δείγματος. Συγκεκριμένα, ο πρόβολος ταλαντώνεται με μια συχνότητα σχετικά μικρότερη από τη συχνότητα συντονισμού του, με ένα πλάτος που κυμαίνεται από 20 nm μέχρι 100 nm. Ως συνέπεια, η ακίδα «αναπηδά» στην επιφάνεια του δείγματος κατά τη σάρωση, ερχόμενη σε επαφή με αυτήν στο κατώτατο σημείο της ταλάντωσης της. Ο βρόγχος ανάδρασης (feedback loop) διατηρεί σταθερό το πλάτος ταλάντωσης του προβόλου. Αυτό επιτυγχάνεται διατηρώντας σταθερή την τετραγωνική ρίζα των μέσων τιμών των τετραγώνων (RMS-Root Mean Square) του σήματος της ταλάντωσης, όπως αυτό λαμβάνεται στον ανιχνευτή της διαχωρισμένης φωτοδιόδου. Προκειμένου να σχηματιστεί η τοπογραφία της επιφάνειας του δείγματος, ο υπολογιστής αποθηκεύει τη θέση του σαρωτή

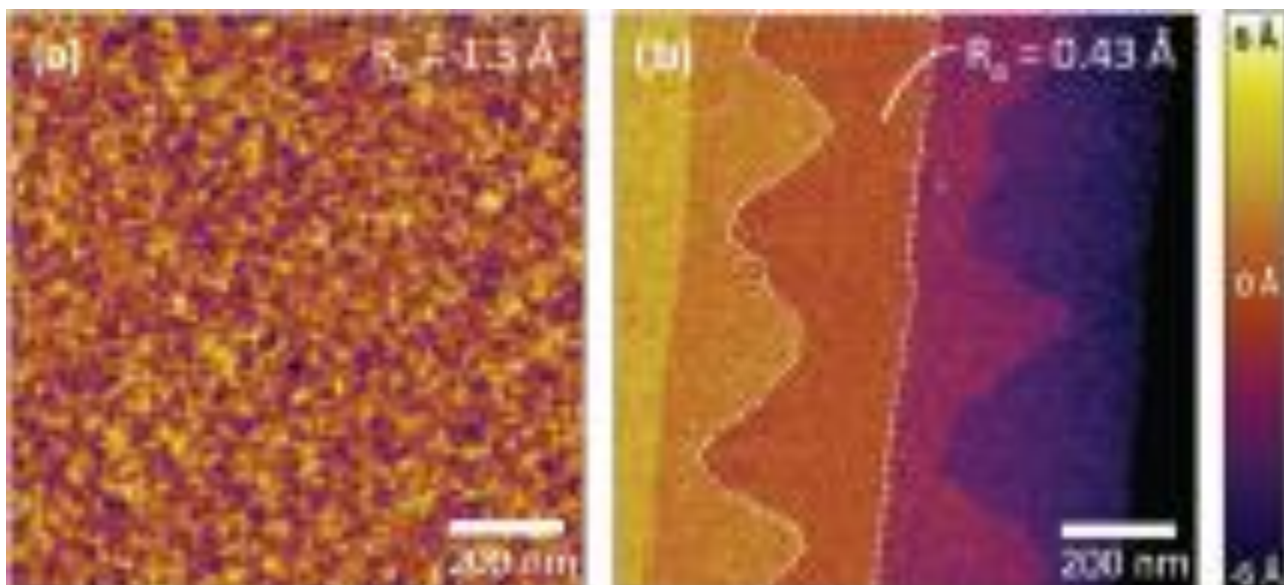
κατά την κάθετη διεύθυνση και για κάθε σημείο (x,y) των δεδομένων που λαμβάνονται, διατηρώντας καθ' αυτόν τον τρόπο ένα σταθερό πλάτος ως σημείο αναφοράς. Ως αποτέλεσμα, η διατήρηση σταθερού πλάτους ταλάντωσης οδηγεί σε μια επίσης σταθερή αλληλεπίδραση ακίδας-δείγματος κατά τη σάρωση. Η μέτρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο σε ατμοσφαιρικό όσο και σε υδάτινο περιβάλλον. Στο υδάτινο περιβάλλον ωστόσο, η συχνότητα ταλάντωσης του προβόλου οφείλει να είναι διαφορετική από τη συχνότητα συντονισμού του. Σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον το πλάτος ταλάντωσης επιτρέπει στην ακίδα να έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του δείγματος, διαμέσου του στρώματος υγρασίας που έχει αναπτυχθεί σε αυτήν, χωρίς έτσι να υπάρχει ο κίνδυνος παγίδευσης της ακίδας στην επιφάνεια [11].

2.2 Μελέτη τραχύτητας και τοπογραφίας επιφάνειας με AFM

Η Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης αποτελεί ένα ουσιαστικό και πολύ σημαντικό εργαλείο στη μελέτη της επιφανειακής τραχύτητας σε επίπεδο νανοκλίμακας, επιδεικνύοντας διακριτική ικανότητα και ακρίβεια πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με άλλες μεθόδους που βασίζονται σε χρήση ακίδας ή οπτικών μέσων. Η μετρούμενη τιμή της τραχύτητας οποιασδήποτε επιφάνειας, βασίζεται στη διακριτική ικανότητα του οργάνου κατά την κάθετη διεύθυνση αλλά και στο επίπεδο ταυτόχρονα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, πως οι πραγματικές επιφάνειες χαρακτηρίζονται από μια τραχύτητα που παρουσιάζει διακυμάνσεις αναφορικά με το μήκος των διαφόρων επιφανειακών δομών. Αυτές μπορεί να διαφέρουν σε τέτοιο βαθμό ώστε να εκλαμβάνονται ως ένα νέο επίπεδο πάνω στην ίδια την επιφάνεια. Αξίζει να σημειωθεί, πως ακόμα και μια επιφάνεια επίπεδη σε ατομική κλίμακα παρουσιάζει ποσοτικά μετρήσιμη τραχύτητα, η οποία γίνεται αντιληπτή με τη χρήση οργάνου υπερ-υψηλής ακρίβειας και ικανότητας ανάλυσης σε υποατομική κλίμακα, όπως είναι το Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης Cypher (Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης με τη μεγαλύτερη δυνατή ανάλυση).

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα που καταδεικνύουν τη σημασία μέτρησης της επιφανειακής τραχύτητας σε επίπεδο νανοκλίμακας. Στη βιομηχανία παραγωγής συστημάτων αποθήκευσης δεδομένων για παράδειγμα, όπου 1 bit δεδομένων καταλαμβάνει χωρική πυκνότητα που ξεπερνά το 1 TB/in^2 και οι κεφαλές εγγραφής/ανάγνωσης αιωρούνται μερικά nm μόνο πάνω από την επιφάνεια, υφίσταται η ανάγκη τα μέρη του σκληρού δίσκου να λειαίνονται, καθιστώντας εφικτή μια τραχύτητα Ra ανάλογη του 1 \AA .

Παρομοίως στη βιομηχανία παραγωγής ημιαγωγών, η ελαχιστοποίηση των διαστάσεων των transistors σε ακολουθία με το νόμο του Moore, οδηγεί στη συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για μέτρηση της επιφανειακής τραχύτητας σε επίπεδο μικρότερο από μερικά \AA . Υποστρώματα πυριτίου επίπεδα σε ατομική κλίμακα οδηγούν σε κατασκευή transistors που εμφανίζουν μειωμένη παρουσία θορύβου και αυξημένη αξιοπιστία και απόδοση [12, 13]. Στην **Εικόνα 2.3** που ακολουθεί συγκρίνονται οι ληφθείσες τοπογραφίες και οι τραχύτητες ανάμεσα σε ένα υπόστρωμα πυριτίου που έχει υποστεί χημική και μηχανική λείανση ($Ra=1.3 \text{ \AA}$) και σε ένα απλό επίπεδο υπόστρωμα πυριτίου που εμφανίζει τραχύτητα ατομικής κλίμακας ($Ra=0.43 \text{ \AA}$) [12, 13].

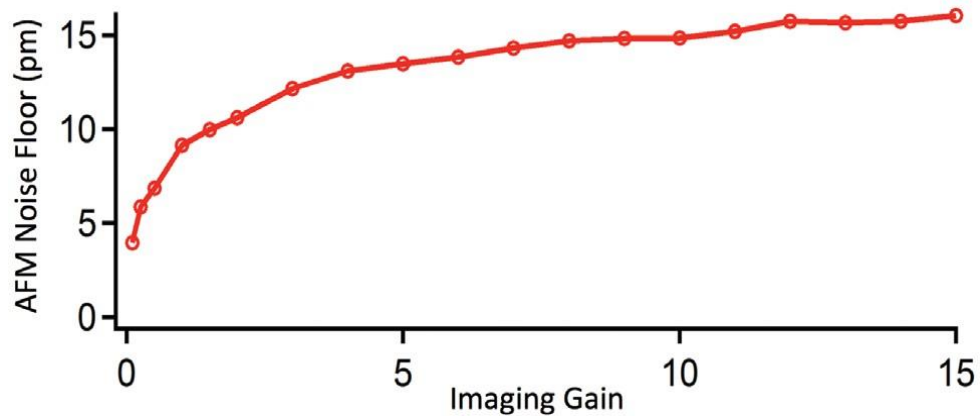


Εικόνα 2.3 Επιφανειακή τραχύτητα (a) υποστρώματος πυριτίου κατόπιν χημικής-μηχανικής λείανσης όπου η μέση τραχύτητα μετρήθηκε $R_a=1.3\text{\AA}$ και (b) απλού επιπέδου υποστρώματος πυριτίου που εμφανίζει τραχύτητα ατομικής κλίμακας ίση με $R_a=0.43\text{\AA}$.

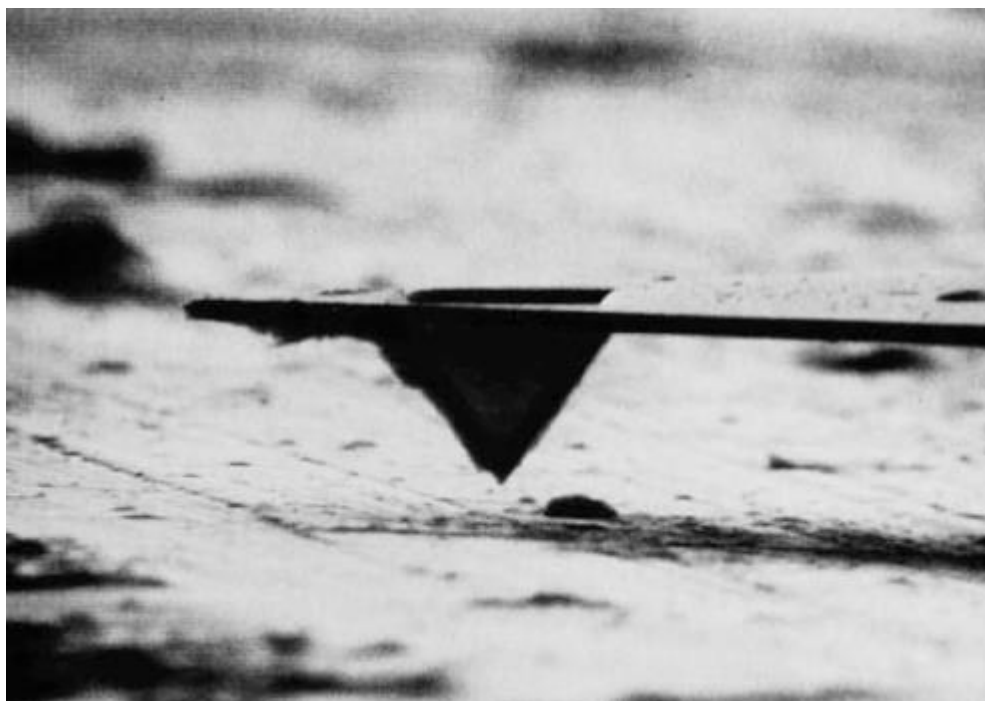
Υπάρχουν δυο σημαντικοί παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν την διακριτική ικανότητα του Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης, κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης επιφανειακής τραχύτητας:

- Ο θόρυβος του οργάνου περιορίζει την ανάλυση κατά την κάθετη διεύθυνση.
- Η ακτίνα της ακίδας περιορίζει την ανάλυση κατά το επίπεδο και η φθορά της επηρεάζει την ακρίβεια της μέτρησης.

Στην **Εικόνα 2.4** που ακολουθεί παρουσιάζεται η συσχέτιση ανάμεσα στο υπόβαθρο θορύβου που παρουσιάζει ένα Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης κατά τη λειτουργία του και στην ενίσχυση της ληφθείσας εικόνας ως τρόπο αντιμετώπισης του θορύβου, ενώ στην **Εικόνα 2.5** γίνονται εμφανή τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός μικροπρόβολου μαζί με την μικροακίδα η οποία είναι τοποθετημένη στο πέρας του [14, 15].



Εικόνα 2.4 Συνάρτηση υποβάθρου θορύβου – ενίσχυσης εικόνας.



Εικόνα 2.5 Μικροπρόβλος και μικροακίδα κατασκευασμένα από SiN για μέτρηση σε λειτουργία επαφής με το δείγμα.

Κεφάλαιο 3 Πειραματική διαδικασία

Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει όλες τις λεπτομέρειες της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Συγκεκριμένα, θα αναλυθούν όλα τα στάδια της διαδικασίας, θα αναφερθούν τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη υλικού και θα παρουσιαστούν τα πειραματικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Τα πειράματα διεξήχθησαν στο μεταλλογραφικό εργαστήριο που διαθέτει ο Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών, της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. και περιελάμβαναν την προετοιμασία των δειγμάτων, τη στίλβωση τους με χρήση λειαντικού τροχού και κατάλληλων λειαντικών χαρτιών και τέλος τη μελέτη των κατεργασμένων δειγμάτων με χρήση του Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για την επίδραση της κατεργασίας στίλβωσης στην ποιότητα της επιφάνειάς τους.

3.1 Δοκίμια χάλυβα St37

Το δοκίμια που κατεργάστηκαν και μελετήθηκαν προέρχονταν από χάλυβα μέσης αντοχής St37. Αρχικά, με τη χρήση τόννου κόπηκαν από κυλινδρικό τεμάχιο, κυλινδρικά δοκίμια κατάλληλου πάχους μερικών χιλιοστών, ώστε να μπορούν να προσαρμοστούν σε βάση στήριξης από πολυμερές η οποία τα συγκρατούσε σταθερά κατά τη διαδικασία της στίλβωσης. Το μικρό πάχος των δοκιμίων ήταν επίσης επιθυμητό για την ευκολότερη τοποθέτηση τους εν συνεχεία υπό του Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης. Στην **Εικόνα 3.1** που ακολουθεί εμφανίζεται το αρχικό ακατέργαστο τεμάχιο από το οποίο προήλθαν τα δοκίμια, η πολυμερική βάση στήριξης και ένα εκ των κατεργασμένων δοκιμίων. Είναι εμφανής με γυμνό οφθαλμό η διαφορά στην επιφάνεια ανάμεσα στο κατεργασμένο και ακατέργαστο τεμάχιο. Στην **Εικόνα 3.2** το δοκίμιο είναι προσαρμοσμένο εντός της βάσης στήριξης, όπου παρατηρείται ότι η επιφάνεια του εξέρχει από την βάση ώστε να καθίσταται εφικτή η κατεργασία της επιφάνειάς του.



Εικόνα 3.1 Ακατέργαστο τεμάχιο, κατεργασμένο δοκίμιο και πολυμερική βάση στήριξης.



Εικόνα 3.2 Δοκίμιο χάλυβα St37 τοποθετημένο εντός της βάσεως στήριξης.

Στον *Πίνακα 3.1* και *3.2* που ακολουθεί παρατίθενται τα χαρακτηριστικά για το συγκεκριμένο τύπο χάλυβα που μελετήθηκε και πιο συγκεκριμένα η χημική του σύσταση και οι μηχανικές του ιδιότητες. Περαιτέρω αξίζει να σημειωθεί πως ο χάλυβας St37 συνιστά ένα μη κραματικό χάλυβα και αποτελεί έναν κοινό δομικό χάλυβα αναφορικά με την περιεκτικότητα του σε άνθρακα (C). Χρησιμοποιείται στην κατασκευή πλοίων, γεφυρών, κτιρίων και γενικότερα σε μέρη όπου συνδέονται μεταξύ τους με αρμούς είτε κατόπιν συγκόλλησης καθώς εμφανίζει καλές ιδιότητες και εγγυημένη αντοχή εμφανίζοντας τάση διάχυσης μεγαλύτερη από 235 MPa και αντοχή σε εφελκυσμό στην περιοχή 360-510 MPa [15].

| <i>Chemical elements</i> | C≤16mm max | C>16mm max | Si max | Mn max | P max. | S max |
|--------------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|-------|
| <i>%by mass</i> | 0.17 | 0.17 | - | 1.40 | 0.045 | 0.045 |

Πίνακας 3.1 Χημική σύσταση χάλυβα St37 [15]

| thickness | Yield Strength ReH [N/mm ²] transv.min. | Tensile Strength Rm [N/mm ²] transv. | Fracture Elongation [%] transv. min. | Notch Impact Energy ¹)Ch Vcomplete sample longitud. min [J] |
|---|--|---|---|--|
| t ≤ 16mm t > 16mm | 235 225 | | | Degree: 0 AV: 27J |
| t < 3mm t ≥ 3mm | | 360-510 340-470 | | |
| Up to 1.5mm 1.51-2.00mm 2.01-2.50mm 2.51-2.99mm ≥ 3mm | | | 16 17 18 19 24 | |

Πίνακας 3.2 Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα St37 [15]

3.2 Συσκευή λείανσης-στύλβωσης

Για την κατεργασία στύλβωσης του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε συσκευή λείανσης-στύλβωσης *STRUERS DAP-V* η οποία απεικονίζεται στην *Εικόνα 3.3* που ακολουθεί. Η συσκευή αποτελείται από δύο κύρια μέρη:

- i. τη βάση στην οποία εδράζεται ο περιστρεφόμενος λειαντικός δίσκος
- ii. τον βραχίονα στήριξης των δειγμάτων *PEDEMIN-2*, ο οποίος μπορεί να εκτελεί επίσης περιστροφή των δειγμάτων με αντίθετη φορά όμως σε σχέση με το λειαντικό δίσκο.

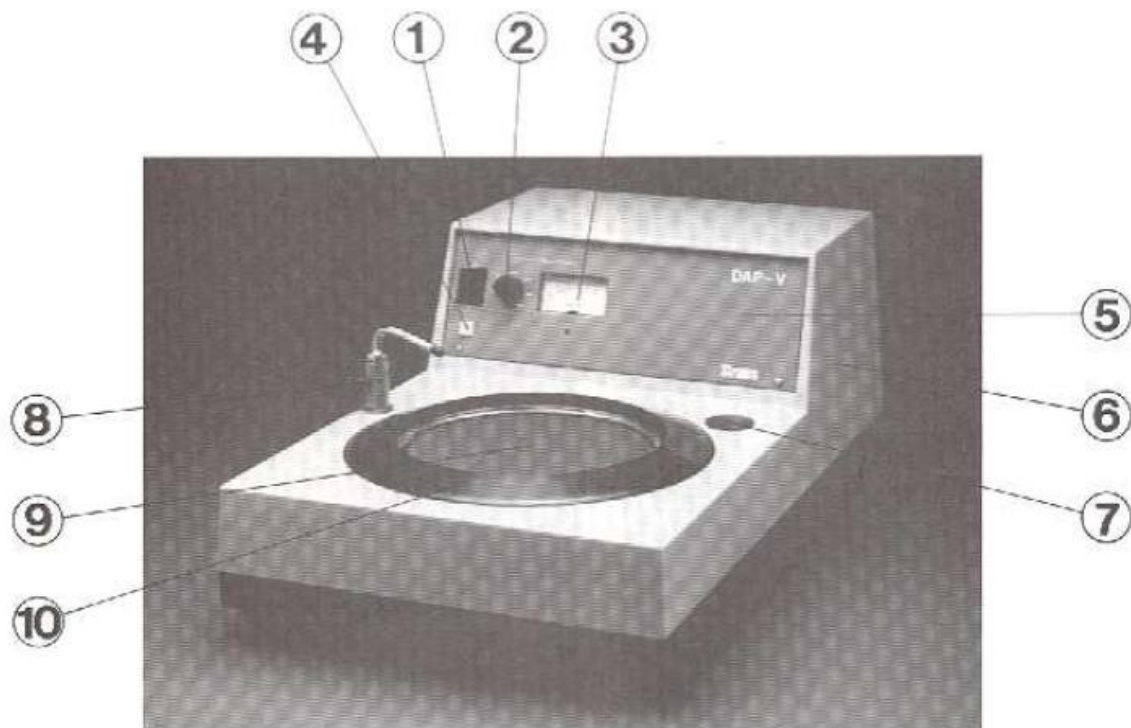
Η αντίθετη φορά περιστροφής των δειγμάτων σε σχέση με το λειαντικό δίσκο, συντελεί σε ανάπτυξη μεγαλύτερων δυνάμεων τριβής ανάμεσα τους και ως εκ τούτου σε ταχύτερη αποβολή υλικού. Ο βραχίονας είναι εξοπλισμένος με μικρό κινητήρα και διαθέτει τρεις υποδοχές για δείγματα τα οποία μπορούν να κατεργάζονται ταυτόχρονα και να συγκρατούνται σε επαφή με το λειαντικό δίσκο μέσω ελατηρίου.



Εικόνα 3.3 Συσκευή λείανσης-στύλβωσης

Στην **Εικόνα 3.4** που ακολουθεί σημειώνονται όλα τα χαρακτηριστικά της συσκευής τα οποία είναι αναλυτικά:

- 1.** Διακόπτης λειτουργίας
- 2.** Διακόπτης καθορισμού ρυθμού περιστροφής λειαντικού δίσκου
- 3.** Ένδειξη πραγματικού ρυθμού περιστροφής λειαντικού δίσκου
- 4.** Λυχνία ένδειξης λειτουργίας
- 5.** Πίνακας διαχείρισης συσκευής
- 6.** Βάση συσκευής
- 7.** Υποδοχή βραχίονα στήριξης δειγμάτων
- 8.** Παροχή υδατικού διαλύματος λίπανσης
- 9.** Λειαντικός δίσκος στον οποίο τοποθετείται το λειαντικό μέσο
- 10.** Δαχτυλίδι συγκράτησης παραπροϊόντων κατεργασίας



Εικόνα 3.4 Αναλυτική περιγραφή συσκευής λείανσης-στίλβωσης [16].

Στον λειαντικό δίσκο οποίος μπορεί να έχει διάμετρο 200-250 mm, παρέχεται ισχύς ίση με 180 W και οι στροφές περιστροφής του ορίζονται χειροκίνητα στο εύρος 40-600 rpm. Ο βραχίονας στήριξης των δειγμάτων κινείται με παρεχόμενη ισχύ 30W και περιστρέφεται με 105 rpm όταν τίθεται σε λειτουργία 50 Hz και 125 rpm σε λειτουργία 60 Hz. Το βάρος του ανέρχεται σε 8,5 kg και το φορτίο που ασκεί σε κάθε δείγμα κυμαίνεται από 3 N έως 50 N. Επίσης είναι εξοπλισμένος με κατάλληλο θερμικό διακόπτη, οποίος διακόπτει τη λειτουργία σε περίπτωση θερμικής υπερφόρτωσης [16].

3.3 Λειαντικό μέσο

Το λειαντικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε για την κατεργασία στίλβωσης των δειγμάτων ήταν το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) σε μορφή λειαντικού χαρτιού (grinding paper). Το λειαντικό χαρτί τοποθετείται στην επιφάνεια του λειαντικού δίσκου όπου συγκρατείται με κατάλληλο μεταλλικό δακτύλιο. Στον **Πίνακα 3.3** που ακολουθεί παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά κάθε τύπου χαρτιού. Είναι αξιοσημείωτο πως κάθε χαρτί χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό ο οποίος σχετίζεται με το μέγεθος των λειαντικών κόκκων. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός αυτός τόσο μικρότερο το μέγεθος των κόκκων και τόσο μεγαλύτερη η επιφανειακή πυκνότητα των κόκκων και αντίστροφα [17].

| Standard ANSI grit | European (P-Grade) | Median Diameter (microns) | Surface Roughness on Steel, Rc 30 (Ra –nm) |
|--------------------|--------------------|---------------------------|--|
| 60 | P80 | 250 | - |
| 80 | P80 | 180 | 1140 |
| 120 | P120 | 106 | 1050 |
| 180 | P180 | 75 | 880 |
| 240 | P220 | 63 | 300 |
| 320 | P360 | 40.5 | 230 |
| 400 | P800 | 25.8 | 120 |
| 600 | P1200 | 15.3 | 110 |
| 800 | P2400 | 6.5 | 25 |
| 1200 | P4000 | 2.5 | 20 |

Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά λειαντικού χαρτιού SiC [17].

Παρατηρήσεις:

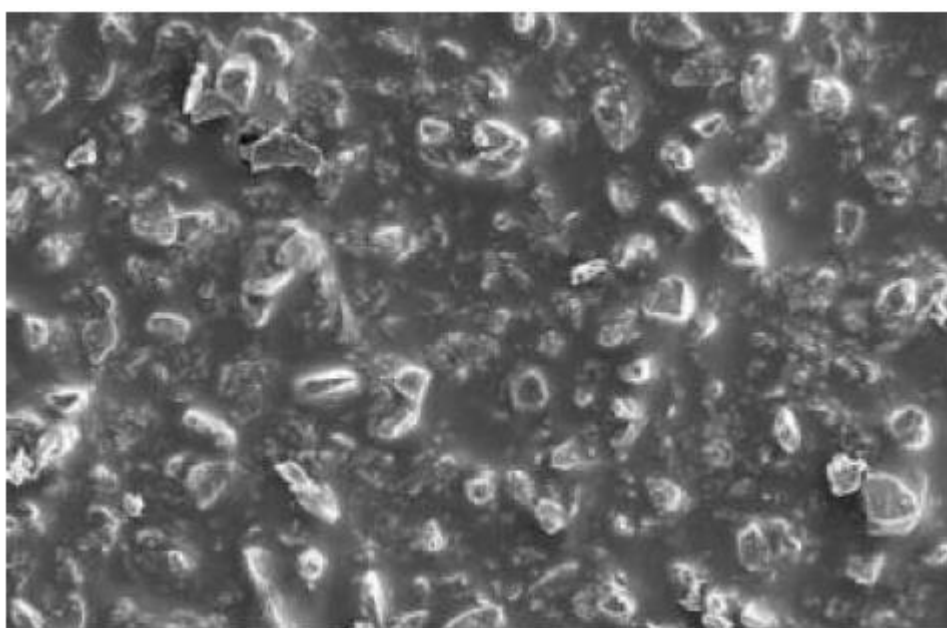
η μέση διάμετρος των λειαντικών κόκκων μπορεί να κυμαίνεται

- ❖ από 250 μm για λειαντικό χαρτί **P60** έως 2,5 μm για λειαντικό χαρτί **P4000**

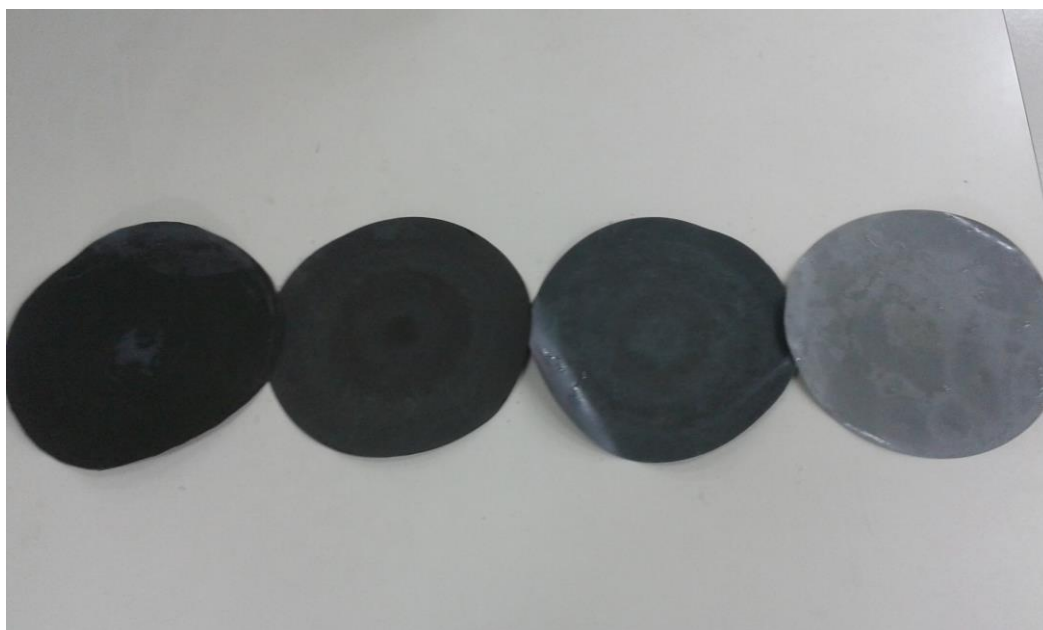
η μέση τραχύτητα R_a σε ένα δοκίμιο χάλυβα Rc-30 διαμορφώνεται σε

- ❖ 1140 nm για λειαντικό χαρτί **P80** έως 20 nm για λειαντικό χαρτί **P4000**.

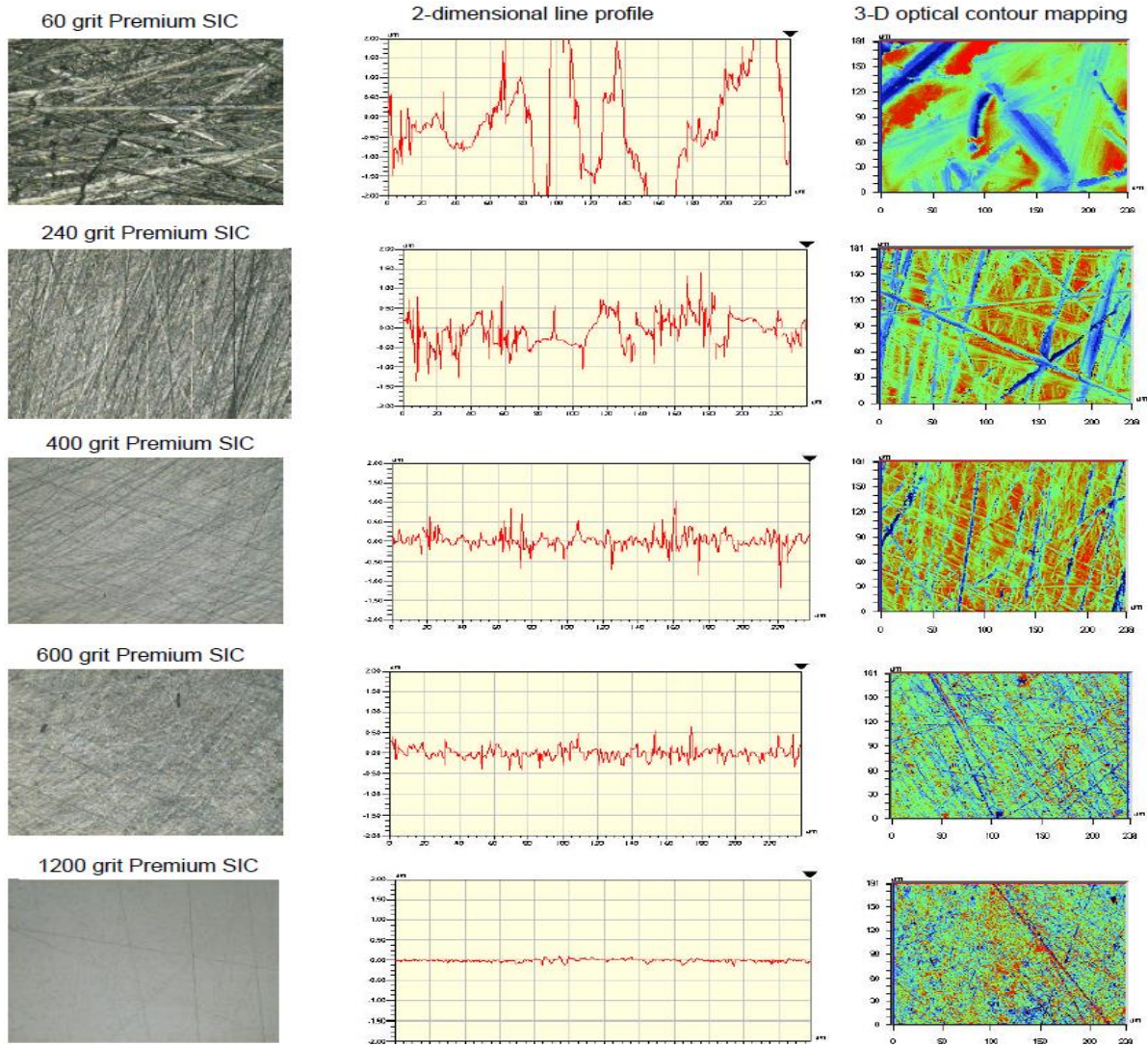
Στην **Εικόνα 3.5** που ακολουθεί παρουσιάζεται η επιφανειακή δομή των λειαντικών κόκκων ενός λειαντικού χαρτιού SiC P600, όπως γίνεται ορατή με χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM). Στην **Εικόνα 3.6** διακρίνονται ορισμένα από τα λειαντικά χαρτιά SiC που χρησιμοποιήθηκαν, κατά μειούμενο μέγεθος κόκκων από τα αριστερά προς τα δεξιά, κάνοντας εμφανή τη διαφορά τους ακόμα και με γυμνό οφθαλμό. Τέλος, στην **Εικόνα 3.7** γίνεται εμφανής η επίδραση που έχει στην ποιότητα της επιφάνειας του δοκιμίου κάθε διαφορετικός τύπος λειαντικού χαρτιού [17].



Εικόνα 3.5 Επιφανειακή δομή λειαντικού χαρτιού SiC P600 (SEM) [17].

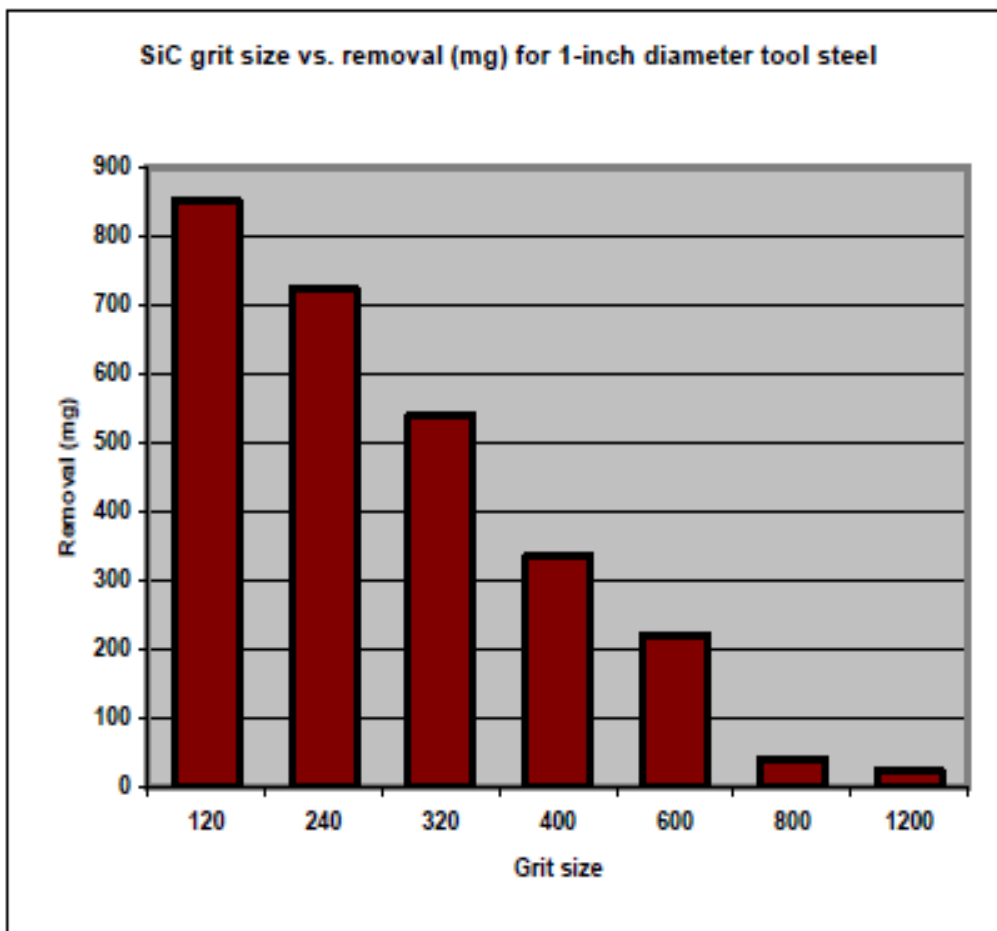


Εικόνα 3.6 Διαφορετικοί τύποι λειαντικού χαρτιού SiC που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατεργασία στίλβωσης.



Εικόνα 3.7 Επίδραση διαφορετικών τύπων λειαντικού χαρτιού SiC στην επιφανειακή δομή δοκιμίου σκληρυμένου χάλυβα Rc-30 [17].

Στην **Εικόνα 3.8** που ακολουθεί παρουσιάζεται η εξάρτηση της αποβολής υλικού σε mg, κατά την κατεργασία λείανσης-στύλβωσης, από τον τύπο του λειαντικού χαρτιού SiC.

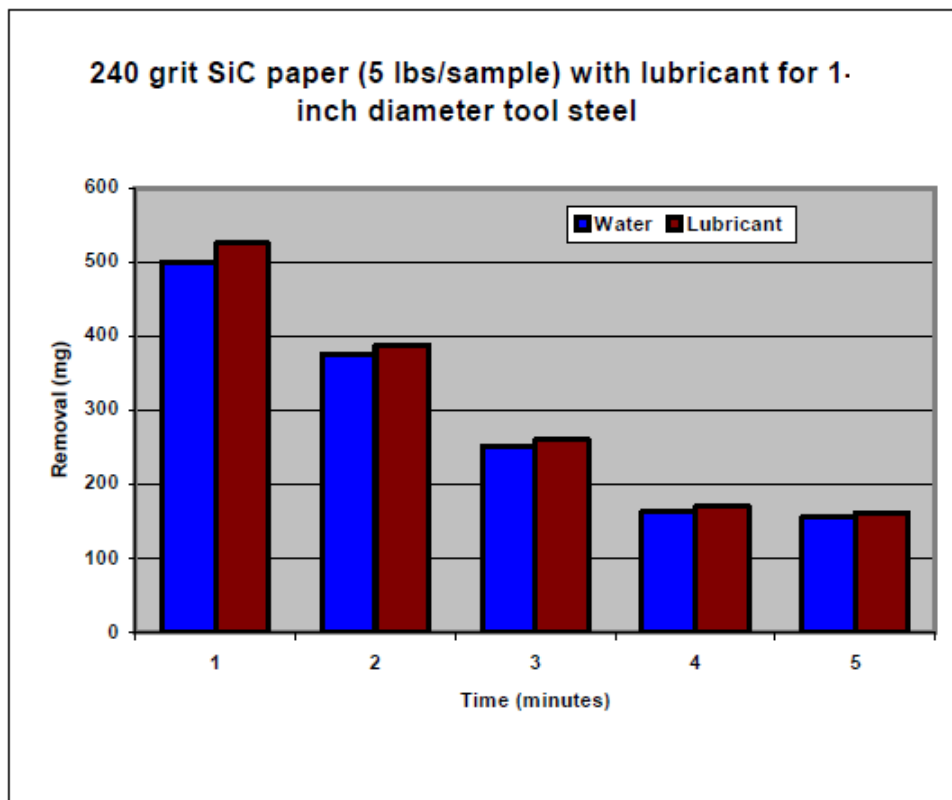


Εικόνα 3.8 Εξάρτηση αποβολής υλικού σε mg από το μέγεθος των λειαντικών κόκκων [18].

Παρατήρηση

- ❖ Γίνεται κατανοητό πως για λειαντικά χαρτιά με μεγαλύτερη διάμετρο κόκκων (P120), η αφαίρεση υλικού από το τεμάχιο που επιτυγχάνεται είναι πολλαπλάσια σε σχέση με λειαντικά χαρτιά που χαρακτηρίζονται από μικρότερο μέγεθος κόκκων (P1200).

Στην **Εικόνα 3.9** παρουσιάζεται η αποβολή υλικού σε mg συναρτήσει του χρόνου κατεργασίας και του λιπαντικού μέσου που χρησιμοποιήθηκε, το οποίο την παρούσα πειραματική διαδικασία αποτέλεσε το νερό.



Ιστόγραμμα 3.9 Εξάρτηση της αποβολής υλικού σε mg από το χρόνο κατεργασίας και το λιπαντικό μέσο για λειαντικό χαρτί SiC 240grit [18].

Παρατηρήσεις

- ❖ Αύξηση του χρόνου κατεργασίας οδηγεί σε ολοένα και λιγότερη αποβληθείσα μάζα υλικού. Αυτό οφείλεται στη σταδιακή μείωση της επιφανειακής τραχύτητας του τεμαχίου κατά την κατεργασία και ως εκ τούτου στην αδυναμία των λειαντικών κόκκων συγκεκριμένου μεγέθους να εισχωρήσουν στο επιφανειακό πλέγμα του μετάλλου και να προκαλέσουν κοπή.
- ❖ Χρήση λιπαντικού ελαίου κατά την κατεργασία, συντελεί σε μια ελάχιστη διαφορά στην αποβολή υλικού σε σχέση με τη χρήση νερού ως μέσο λίπανσης.

3.4 Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης (AFM)

Η ποιότητα της επιφάνειας των κατεργασμένων δοκιμίων χάλυβα St-37, μελετήθηκε με χρήση του Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης, με το οποίο καθίσταται εφικτός και ο προσδιορισμός της μέσης επιφανειακής τραχύτητας καθώς και άλλων σημαντικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας, όπως οι διαστάσεις συγκεκριμένων δομών.

Το Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας είναι το *Igloo with DS 95 SPM Head* και είναι προϊόν της εταιρείας *DME(Danish Micro Engineering)*. Το κυριότερο μέρος της διάταξης παρουσιάζεται στην *Εικόνα 3.10* που ακολουθεί



Εικόνα 3.10 Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης DME Igloo DS 95 with SPM Head [19].

Αναλυτικά τα κύρια μέρη που διακρίνονται είναι:

- Η βάση της διάταξης στην επιφάνεια της οποίας βρίσκεται και η βάση τοποθέτηση του υπό εξέταση δείγματος και η οποία διαθέτει δέσμη φωτός.
- Ο χειροκίνητος μηχανισμός μετακίνησης του δείγματος και προς τις τρεις διαστάσεις X,Y,Z.
- Η κεφαλή σάρωσης DS 95 στην οποία περιλαμβάνεται και ο μικροπρόβολος με την ακίδα η οποία σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος.
- Η βάση στήριξης του σαρωτή η οποία χαρακτηρίζεται από σταθερότητα ώστε να μην επηρεάζεται η μέτρηση από κραδασμούς.
- Η CCD κάμερα υψηλής ανάλυσης για τον οπτικό έλεγχο του δείγματος.

Επιπρόσθετα, στην **Εικόνα 3.11** διακρίνονται όλα τα συνεργαζόμενα εξαρτήματα της διάταξης όπως είναι:

- Ο Η/Υ μέσω του οποίου γίνεται ο χειρισμός και η παραμετροποίηση της σάρωσης.
- Η αντικραδασμική βάση στήριξης του οργάνου.
- Τα ηλεκτρονικά μέρη ενίσχυσης και καθαρισμού του σήματος.
- Η οθόνη η οποία συνδέεται με την CCD κάμερα και μέσω της οποίας γίνεται ο οπτικός έλεγχος της επιφάνειας του δείγματος και η επιλογή του κατάλληλου σημείου για να εκτελεσθεί η σάρωση.



**Εικόνα 3.11 Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης.
Τομέας Τεχνολογίας των Καταργασιών,
Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.**

Κεφάλαιο 4 Ανάλυση πειραματικών δεδομένων

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά θα αναφερθούν οι διάφορες παράμετροι που επιλέχθηκαν κατά την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας. Εν συνεχεία θα παρουσιαστούν τα πειραματικά δεδομένα, όπως αυτά ελήφθησαν με χρήση του Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης (AFM) και χαρακτηρίζουν την ποιότητα της επιφάνειας των υπό μελέτη δοκιμίων. Τέλος θα γίνει μια ανάλυση εις βάθος των ληφθέντων πειραματικών δεδομένων, ώστε να αποκαλυφθεί η συσχέτιση ανάμεσα στην κατεργασία στίλβωσης που ακολουθήθηκε και στην τελική ποιότητα και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των δοκιμίων.

4.1 Παράμετροι κατεργασίας στίλβωσης

Βασικές παράμετροι που ήταν εφικτό να καθοριστούν κατά την κατεργασία στίλβωσης αποτέλεσαν:

- Ο τύπος του λειαντικού χαρτιού SiC που χρησιμοποιήθηκε
- Η ταχύτητα περιστροφής του λειαντικού δίσκου
- Ο χρόνος της κατεργασίας για κάθε τύπο λειαντικού χαρτιού
- Ο αριθμός επαναλήψεων της κατεργασίας που ακολουθήθηκε για κάθε τύπο λειαντικού χαρτιού.

Στον **Πίνακα 4.1** που ακολουθεί παρουσιάζονται αναλυτικά οι προαναφερθείσες παράμετροι. Παρατηρούμε ότι η διαδικασία αρχίζει με λειαντικά χαρτιά που χαρακτηρίζονται από μεγάλο μέγεθος λειαντικών κόκκων και όσο προχωρά η διαδικασία χρησιμοποιούνται λειαντικά χαρτιά με μικρότερο μέγεθος και μεγαλύτερη πυκνότητα κόκκων. Η ταχύτητα περιστροφής διατηρήθηκε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων στις 200 στροφές/λεπτό, όπως επίσης και ο χρόνος κατεργασίας κάθε σταδίου στίλβωσης στα 20 λεπτά. Τέλος, η κατεργασία επαναλήφθηκε για τους τρεις πρώτους τύπους λειαντικών χαρτιών με ενδιάμεση μέτρηση με το Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης (AFM), ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση της διάρκειας κατεργασίας στην επιφανειακή ποιότητα των δοκιμίων.

| <i>Τύπος λειαντικού χαρτιού SiC (grit)</i> | <i>Μέσο μέγεθος λειαντικών κόκκων (μm)</i> | <i>Ταχύτητα περιστροφής λειαντικού δίσκου (rpm)</i> | <i>Χρόνος κατεργασίας (min)</i> |
|--|--|---|---------------------------------|
| <i>P120</i> | <i>106</i> | <i>200</i> | <i>20</i> |
| <i>P320</i> | <i>46,2</i> | <i>200</i> | <i>20</i> |

| | | | |
|--------------|------|-----|----|
| <i>P800</i> | 25,8 | 200 | 20 |
| <i>P1200</i> | 15,3 | 200 | 20 |
| <i>P2400</i> | 6,5 | 200 | 20 |
| <i>P4000</i> | 2,5 | 200 | 20 |

Πίνακας 4.1 Παράμετροι κατεργασίας στίλβωσης δοκιμίων χάλυβα St37

4.2 Παρουσίαση-Ανάλυση πειραματικών δεδομένων

Μετά από κάθε στάδιο της κατεργασίας στίλβωσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην επιφάνεια των δοκιμίων με χρήση του Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης (AFM). Από τα δεδομένα αυτά, όπως παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2** που ακολουθεί, υπολογίστηκε η μέση επιφανειακή τραχύτητα των δοκιμίων και αξιολογήθηκε η δομή της επιφάνειάς τους τόσο μέσω της εξαιρετικής ανάλυσης που προσφέρει το AFM αλλά και οπτικά, μέσω της CCD κάμερας που είναι προσαρμοσμένη σε αυτό. Αξίζει να σημειωθεί πως για κάθε επιφάνεια ελήφθησαν τρεις μετρήσεις μέσης τραχύτητας και εξάχθηκε ο μέσος όρος των τιμών αυτών, έτσι ώστε να περιοριστούν τυχόν στατιστικά σφάλματα. Η σάρωση των δειγμάτων εκτελέστηκε σε λειτουργία επαφής με την επιφάνεια (contact mode), καθώς τα μεταλλικά δοκίμια ενδείκνυνται για τέτοια λειτουργία, δεδομένου ότι η επιφάνεια τους δεν χαρακτηρίζεται ως ευπαθής. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφ. 2, με αυτή τη λειτουργία του οργάνου επιτυγχάνεται και η καλύτερη δυνατή ανάλυση στις ληφθείσες εικόνες και ταυτόχρονα τα πιο ακριβή αριθμητικά αποτελέσματα. Επίσης από τις μετρήσεις κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός του ύψους της μέγιστης παρατηρούμενης δομής της επιφάνειας, δηλαδή του στοιχείου εκείνου της επιφάνειας που χαρακτηρίζεται από μέγιστο ύψος. Αυτό συνιστά σημαντική λεπτομέρεια ώστε να προσδιοριστεί η απόκλιση της μέγιστης δομής από τη μέση επιφανειακή τραχύτητα και σχηματιστεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την ποιότητα της επιφάνειάς του υλικού. Μια επιφάνεια που χαρακτηρίζεται από μικρή μέση επιφανειακή τραχύτητα αλλά στην οποία παρατηρείται μέγιστη δομή τάξεων μεγέθους μεγαλύτερη θα χαρακτηριζόταν ως μη λειτουργική. Παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση όπου τα τεμάχια αποτελούν μέρη μηχανισμών και πρέπει να εφαρμόζονται ιδανικά με άλλα.

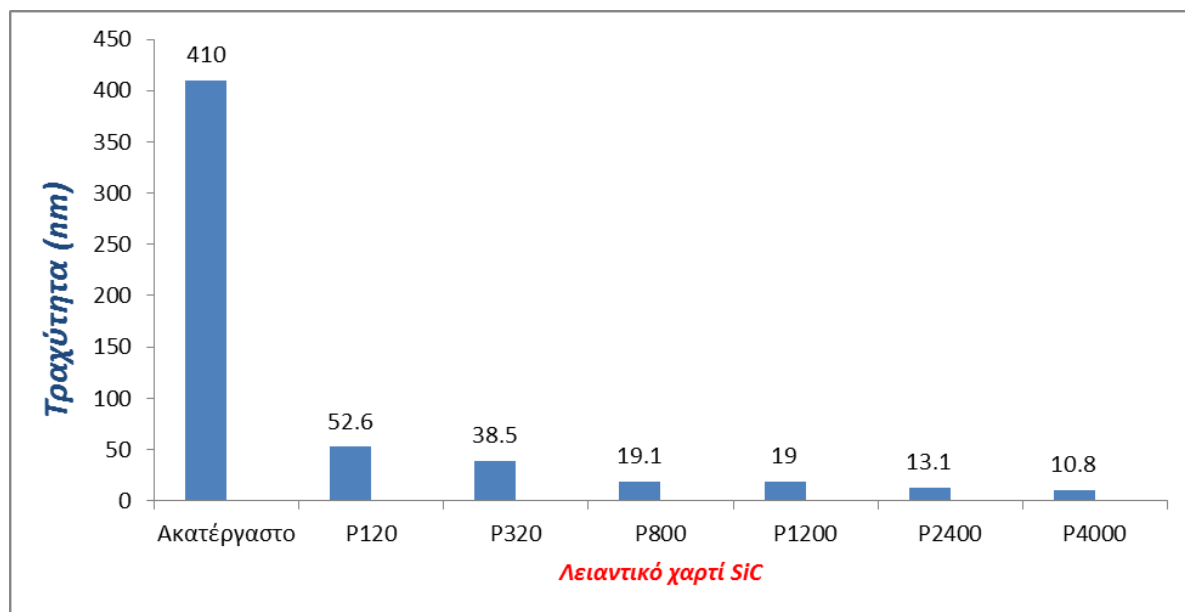
| <i>Τύπος λειαντικού χαρτιού SiC (grit)</i> | <i>Μέση τραχύτητα επιφάνειας (nm)</i> | <i>Μέγιστη δομή επιφάνειας (nm)</i> |
|--|---|---|
| <i>Ακατέργαστο τεμάχιο</i> | <i>Ra=410</i> | <i>Sy=3480</i> |
| <i>P120</i> | <i>Ra₁=50,4 Ra₂=45,9 Ra₃=61,4 Ra_{avg}=52,6</i> | <i>Sy₁=470 Sy₂=479 Sy₃=518 Sy_{avg}=489</i> |
| <i>P320</i> | <i>Ra₁=39,1 Ra₂=42,3 Ra₃=34,0 R_{avg}=38,5</i> | <i>Sy₁=504 Sy₂=423 Sy₃=361 Sy_{avg}=429,3</i> |
| <i>P800</i> | <i>Ra₁=23,1 Ra₂=17,8 Ra₃=16,6 R_{avg}=19,1</i> | <i>Sy₁=546 Sy₂=253 Sy₃=237 Sy_{avg}=345,3</i> |
| <i>P1200</i> | <i>Ra₁=19,6 Ra₂=17,3 Ra₃=20,1 R_{avg}=19</i> | <i>Sy₁=265 Sy₂=216 Sy₃=246 Sy_{avg}=242,3</i> |
| <i>P2400</i> | <i>Ra₁=20,5 Ra₂=11,5 Ra₃=7,23 R_{avg}=13,1</i> | <i>Sy₁=940 Sy₂=351 Sy₃=209 Sy_{avg}=500</i> |

| | | |
|--------------|---|---|
| P4000 | $Ra_1=6,65$ $Ra_2=13,5$ $Ra_3=10,6$ $R_{avg}=10,8$ | $Sy_1=236$ $Sy_2=1380$ $Sy_3=831$ $Sy_{avg}=815,7$ |
|--------------|---|---|

Πίνακας 4.2 Πειραματικά δεδομένα μετρήσεων με χρήση Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης.

Παρατηρήσεις

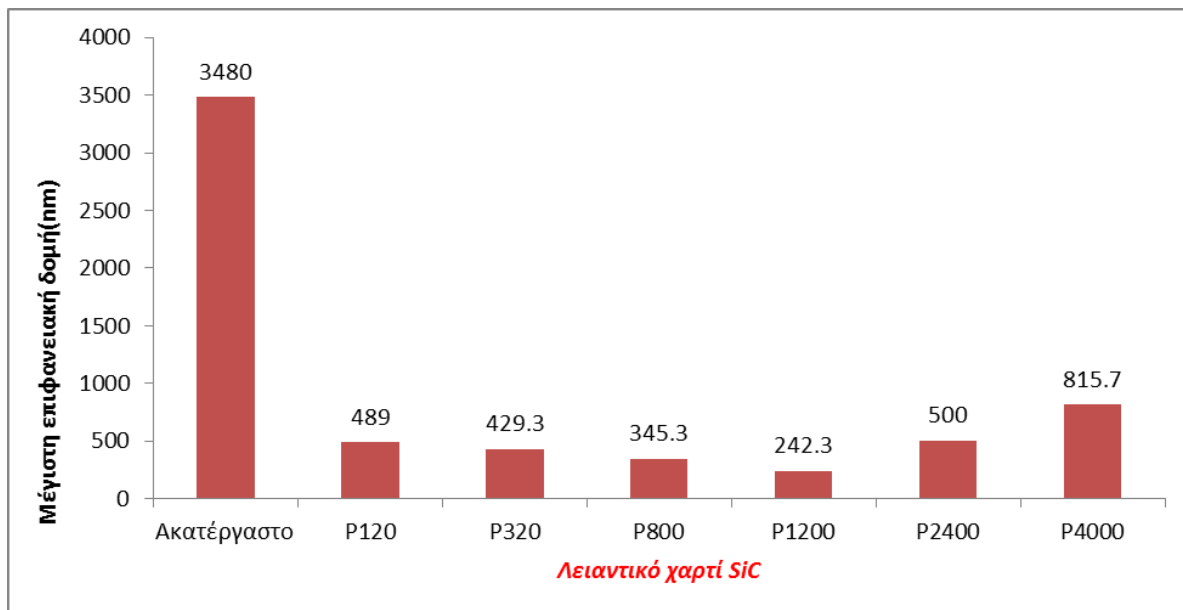
- ❖ Η επιφάνεια μέτρησης σε κάθε περίπτωση ήταν ίση με **50 μm x 50 μm**, το οποίο αποτελεί για το συγκεκριμένο όργανο, το μέγιστο όριο διαστάσεων του δείγματος το οποίο μπορεί να σαρωθεί.
- ❖ Το ελάχιστο όριο διαστάσεων επιφάνειας ορίζεται σε **5 μm x 5 μm** και σε αυτό επιτυγχάνεται η μέγιστη διακριτική ικανότητα του οργάνου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως, ζητούμενο υπήρξε η εκτίμηση της συνολικής ποιότητας της επιφάνειας και ως εκ τούτου, αποτέλεσε πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα μια σάρωση στη μεγαλύτερη δυνατή επιφάνεια του δείγματος.
- ❖ Οι μετρήσεις επιφανειακής τραχύτητας οι οποίες επαναλήφθηκαν τρεις φορές για κάθε στάδιο ώστε να περιοριστεί η πιθανότητα στατιστικού σφάλματος, εκτελέστηκαν σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας του δείγματος κάθε φορά.
- ❖ Είναι αξιοσημείωτη η σταδιακή μείωση της τραχύτητας του δοκιμίου με την ταυτόχρονη μείωση στο μέγεθος των λειαντικών κόκκων.
- ❖ Παράλληλα παρατηρείται σταδιακή μείωση του μεγέθους της μέγιστης επιφανειακής δομής που εντοπίζεται στην επιφάνεια μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο όμως. Στα δύο τελευταία λειαντικά χαρτιά παρατηρείται σημαντική αύξηση, γεγονός που χρήζει περαιτέρω πειραματικής διερεύνησης.
- ❖ Τα παραπάνω παρουσιάζονται γραφικά στις **Εικόνες 4.1 και 4.2** που ακολουθούν ενώ στον **Πίνακα 4.3** δίνεται η ποσοστιαία μείωση της μέσης επιφανειακής τραχύτητας μετά από κάθε στάδιο κατεργασίας.



Εικόνα 4.1 Μέση τραχύτητα επιφάνειας δοκιμίου συναρτήσει του λειαντικού χαρτιού SiC.

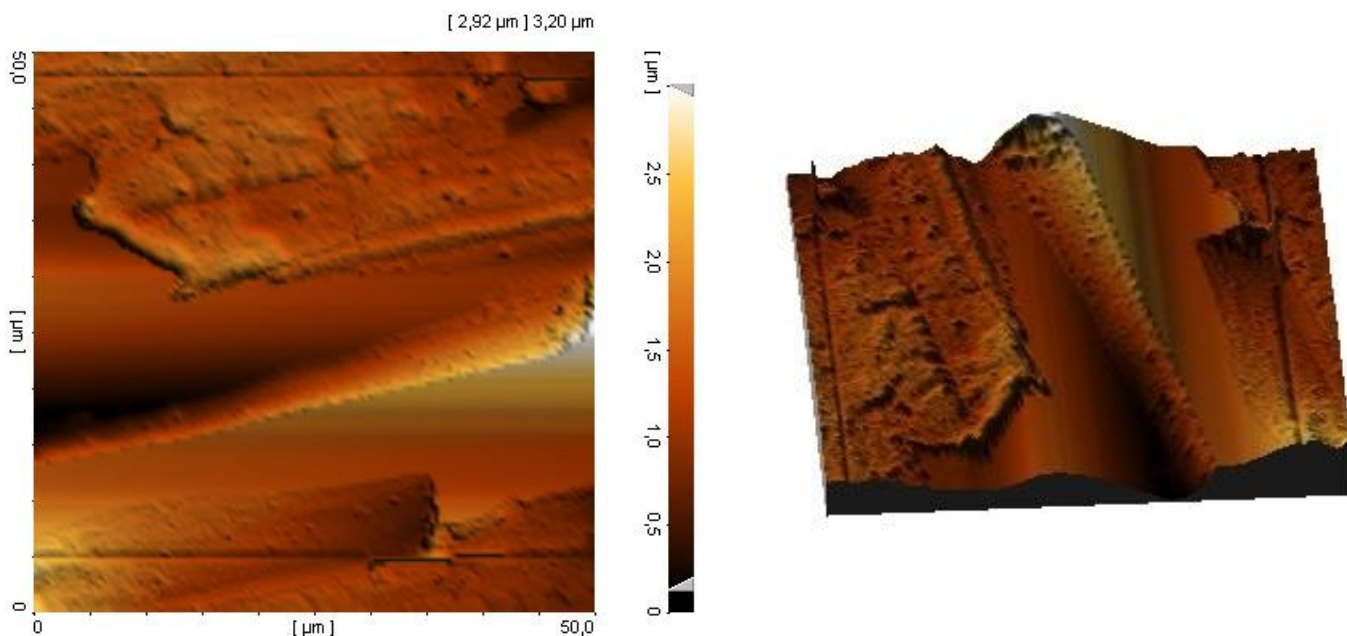
| Στάδιο κατεργασίας | Μεταβολή στο μέσο μέγεθος των λειαντικών κόκκων (μείωση) | Μεταβολή μέσης τραχύτητας επιφάνειάς (μείωση) |
|--------------------|--|---|
| <i>P120</i> | - | 87% |
| <i>P320</i> | 56% | 27% |
| <i>P800</i> | 44 % | 50% |
| <i>P1200</i> | 41% | 0,5% |
| <i>P2400</i> | 58% | 31% |
| <i>P4000</i> | 62% | 17,5% |

Πίνακας 4.3 Ποσοστιαία μεταβολή μέσης επιφανειακής τραχύτητας και μέσου μεγέθους λειαντικών κόκκων.

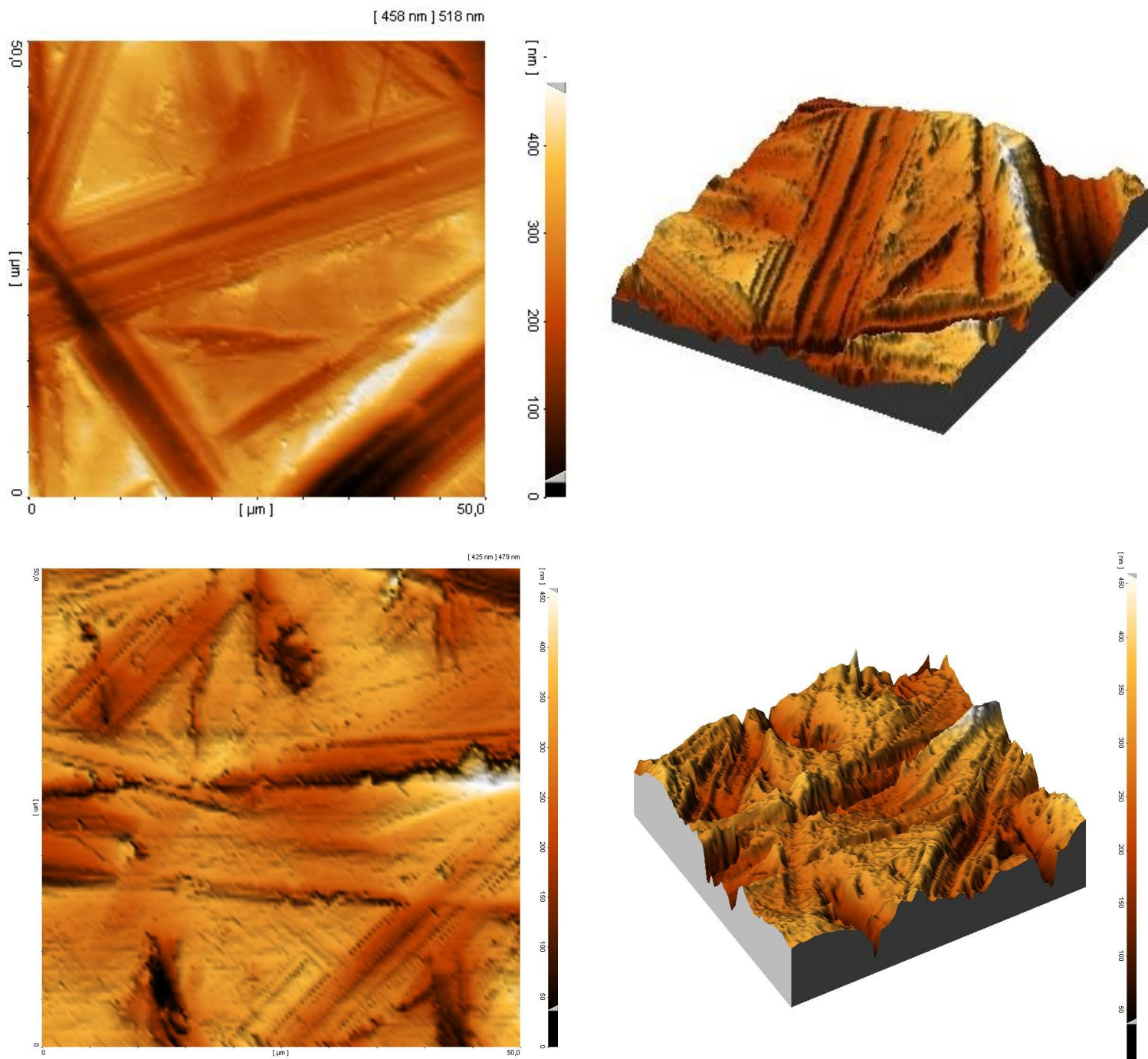


Εικόνα 4.2 Μέγιστη επιφανειακή δομή συναρτήσει του λειαντικού χαρτιού SiC.

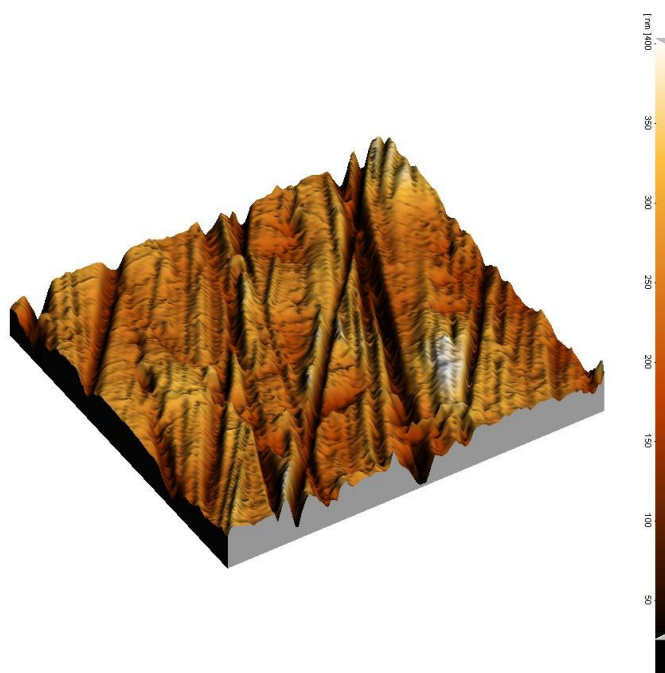
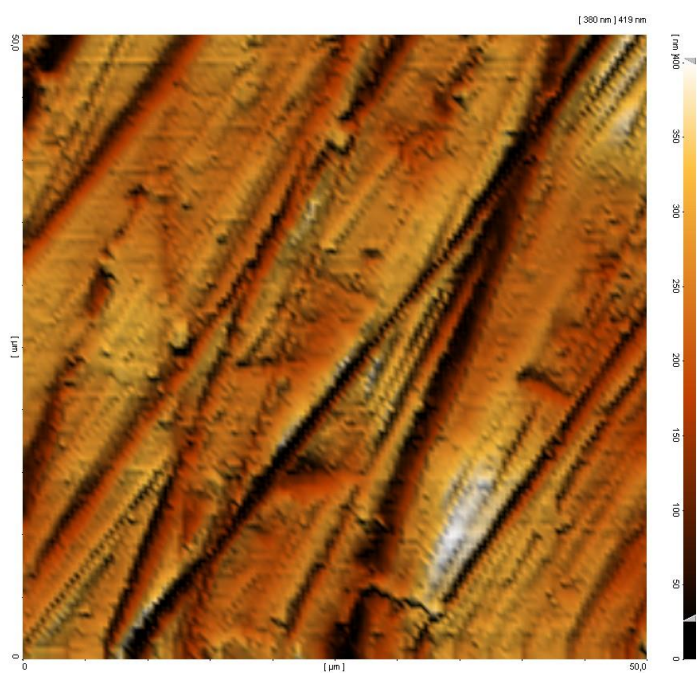
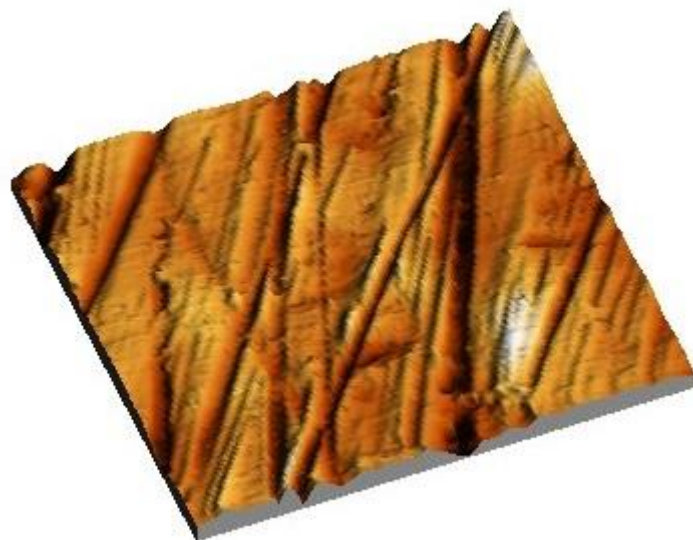
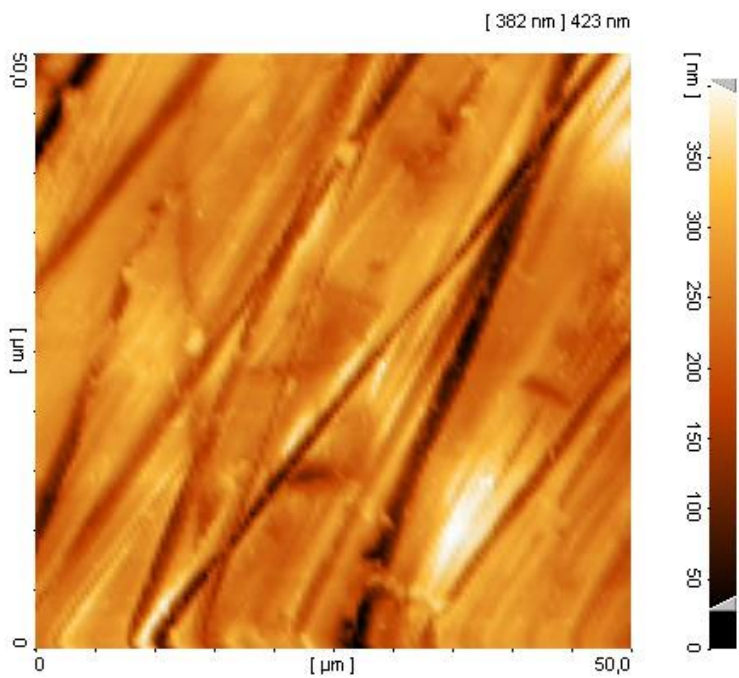
Στις **Εικόνες 4.3-4.9** παρουσιάζεται η δομή της επιφάνειας σε διδιάστατη και τρισδιάστατη μορφή για κάθε στάδιο κατεργασίας, όπως γίνεται διακριτή με το Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης (AFM).



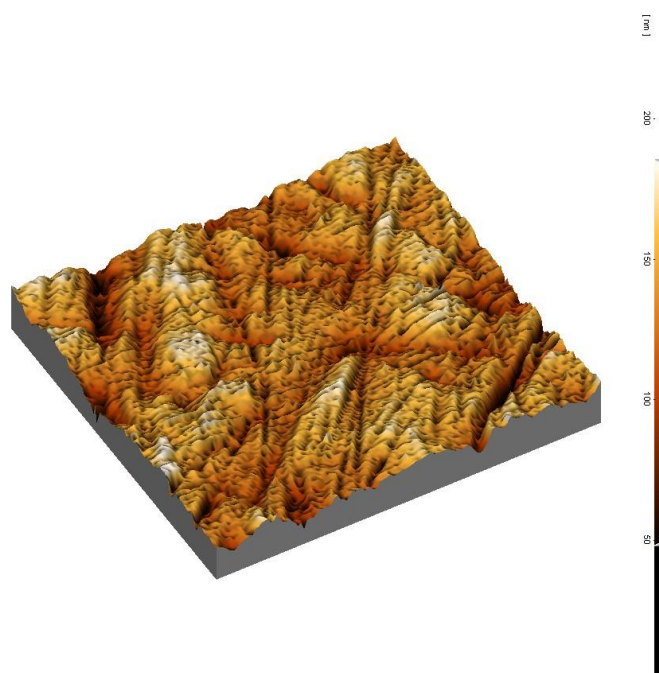
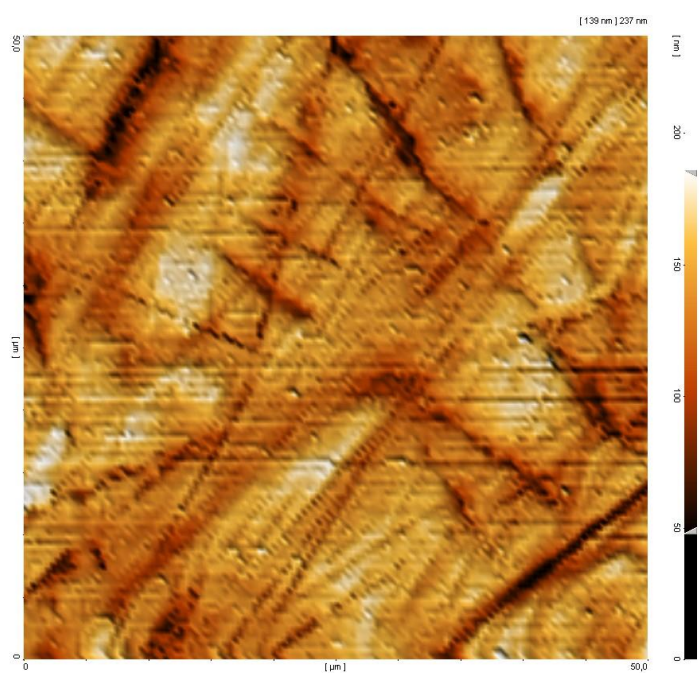
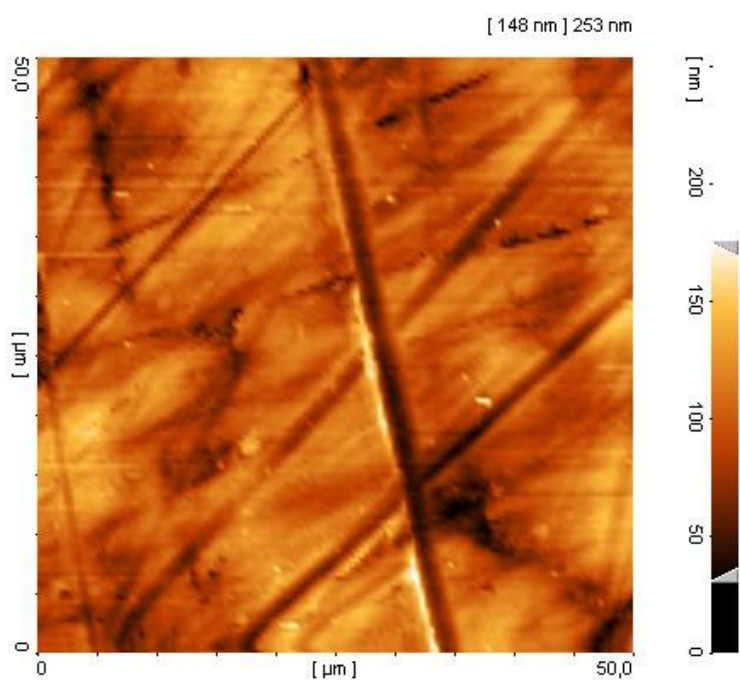
Εικόνα 4.3 Δισδιάστατη και τρισδιάστατη επιφανειακή δομή ακατέργαστου δοκιμίου χάλυβα St37.



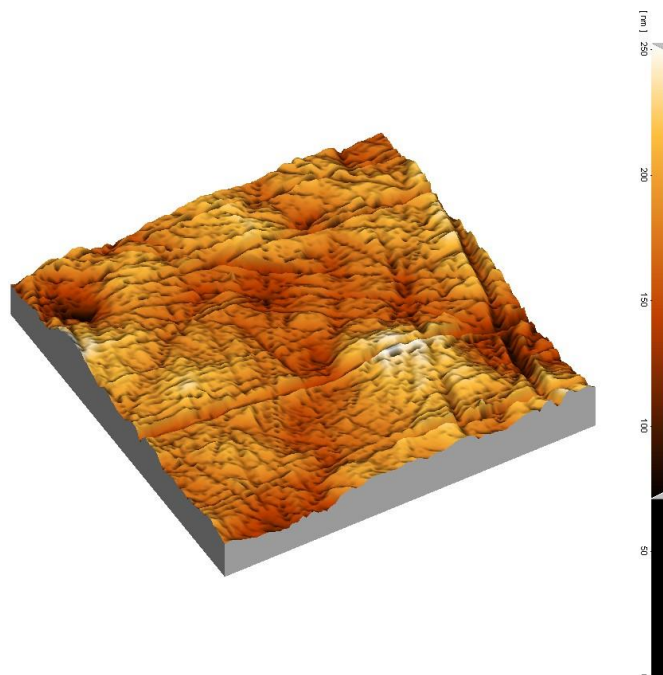
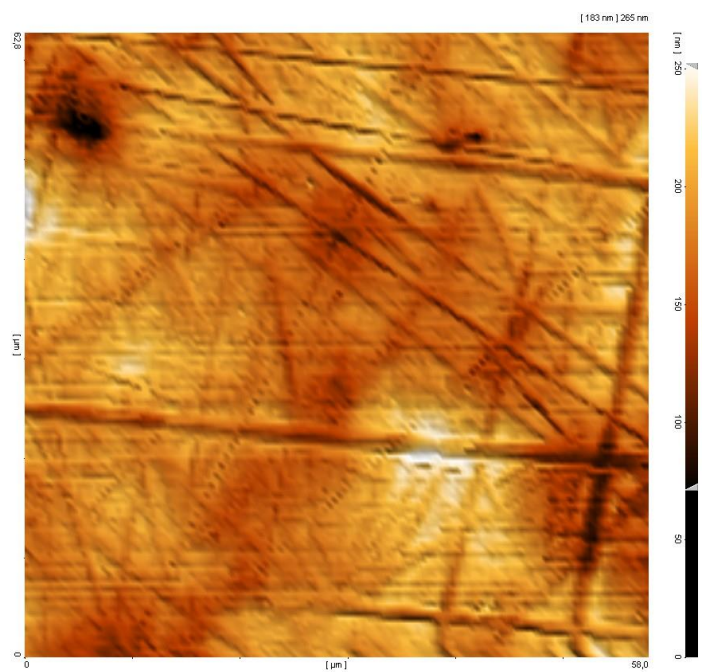
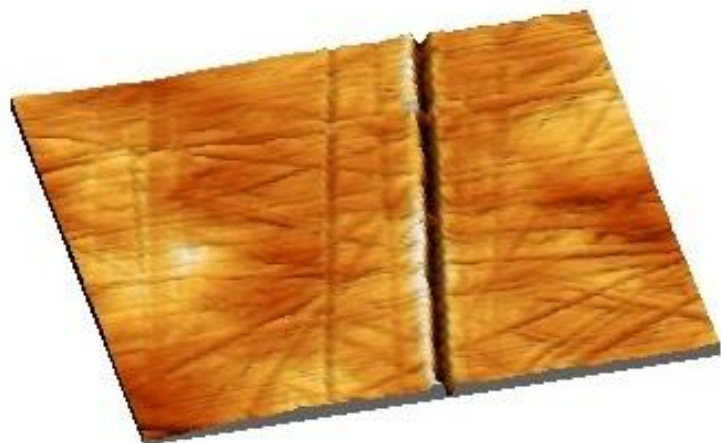
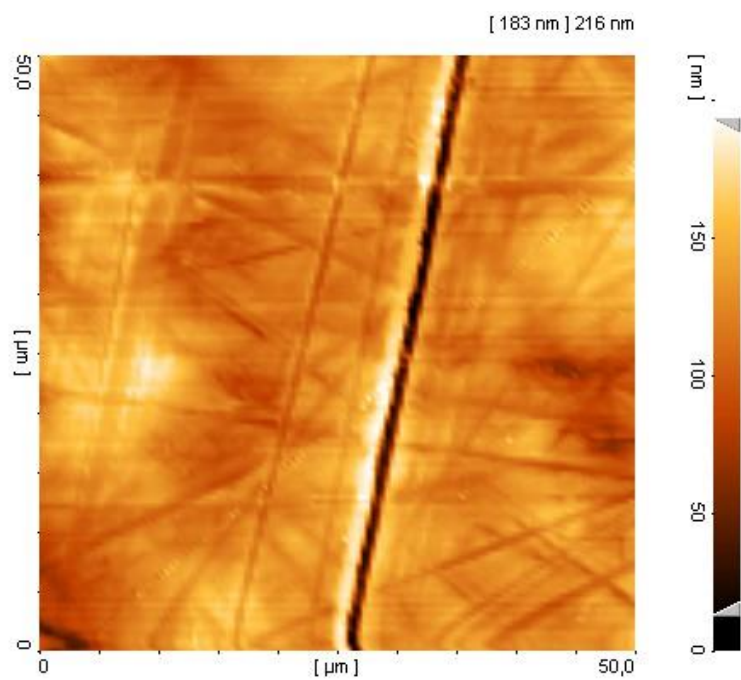
Εικόνα 4.4 Δισδιάστατη και τρισδιάστατη επιφανειακή δομή κατόπιν κατεργασίας με λειαντικό χαρτί SiC P120.



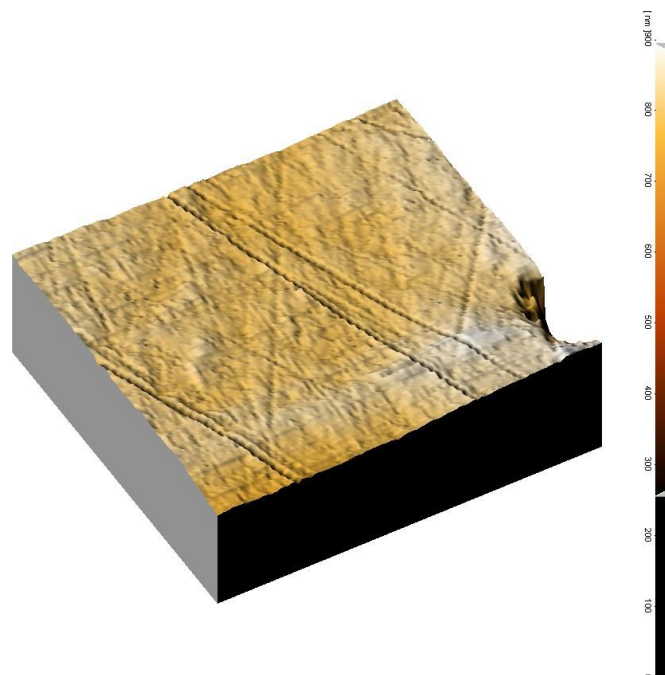
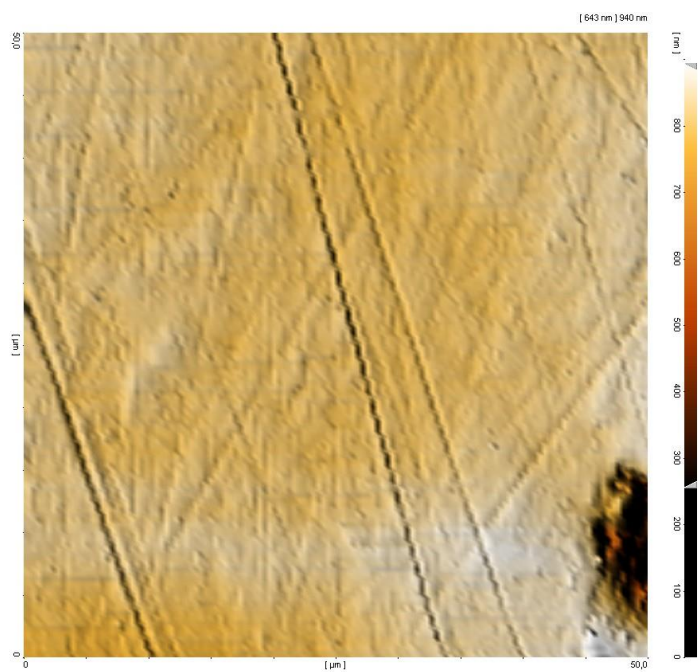
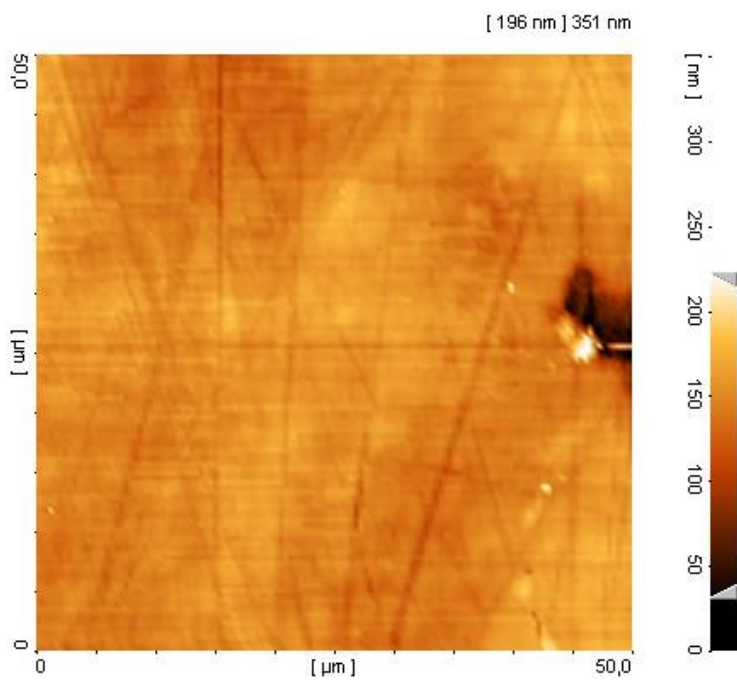
Εικόνα 4.5 Δισδιάστατη και τρισδιάστατη επιφανειακή δομή κατόπιν κατεργασίας με λειαντικό χαρτί SiC P320.



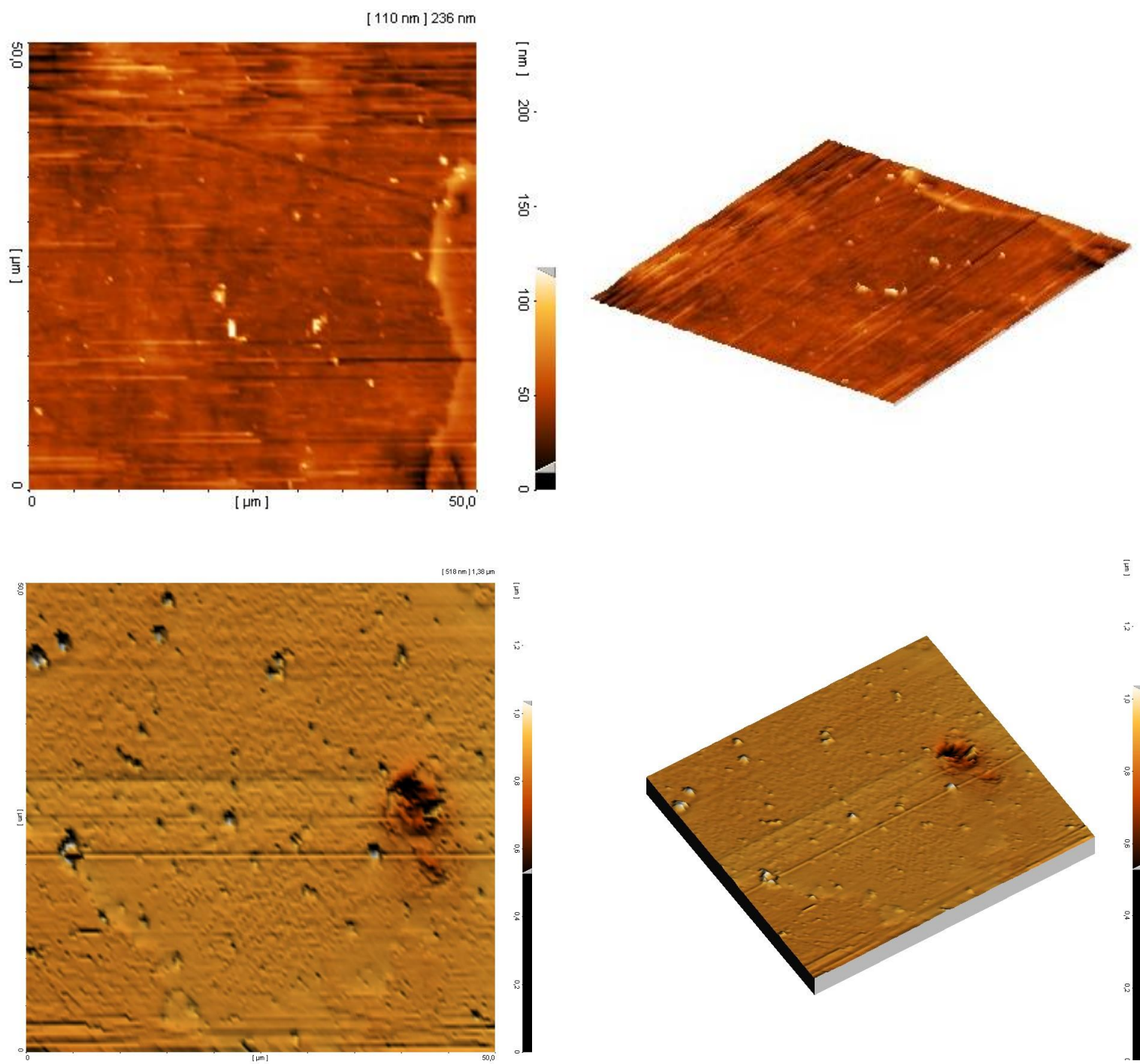
Εικόνα 4.6 Δισδιάστατη και τρισδιάστατη επιφανειακή δομή κατόπιν κατεργασίας με λειαντικό χαρτί SiC P800.



Εικόνα 4.7 Δισδιάστατη και τρισδιάστατη επιφανειακή δομή κατόπιν κατεργασίας με λειαντικό χαρτί SiC P1200.



Εικόνα 4.8 Δισδιάστατη και τρισδιάστατη επιφανειακή δομή κατόπιν κατεργασίας με λειαντικό χαρτί SiC P2400.



Εικόνα 4.9 Δισδιάστατη και τρισδιάστατη επιφανειακή δομή κατόπιν κατεργασίας με λειαντικό χαρτί SiC P4000.

Παρατηρήσεις

- ❖ Από τις δισδιάστατες και τρισδιάστατες εικόνες επιφανειακής δομής που ελήφθησαν μέσω του Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης (AFM), γίνεται εμφανής και οπτικά η σταδιακή μείωση της τραχύτητας κατά τα συνεχόμενα στάδια κατεργασίας.
- ❖ Με σημείο αναφοράς την **Εικόνα 4.3** όπου το αρχικά ακατέργαστο δοκίμιο διακρίνεται από μεγάλες και ανομοιόμορφες δομές, συντελείται μια σταδιακή εξομάλυνση της επιφάνειας του, με ταυτόχρονη εμφάνιση εγχάραξης στην επιφάνεια, η οποία προκαλείται από τους λειαντικούς κόκκους. Στην **Παράγραφο 4.3** θα αναλυθεί περαιτέρω η συσχέτιση ανάμεσα στις διαστάσεις των δομών που σχηματίζονται στην επιφάνεια και στο μέσο μέγεθος των λειαντικών κόκκων που χρησιμοποιήθηκαν.
- ❖ Παρατηρείται πως κατά το τελευταίο στάδιο η μέση τραχύτητα της επιφάνειας έχει μειωθεί στην ελάχιστη τιμή των 10,8 nm. Σε αυτό το σημείο γίνεται η εμφάνιση εξωγενών παραγόντων όπως διακρίνονται ως φωτεινά σημεία στην **Εικόνα 4.9**.
- ❖ Μετά και το τελευταίο στάδιο κατεργασίας, η επιφάνεια του δοκιμίου έχει μετατραπεί σε καθρέπτη, όπως γίνεται εμφανές και στην **Εικόνα 4.10** που ακολουθεί.



Εικόνα 4.10 Δοκίμιο χάλυβα St37 μετά το πέρας όλων των σταδίων κατεργασίας.

Διακρίνεται η δημιουργία επιφάνειας-καθρέπτη.

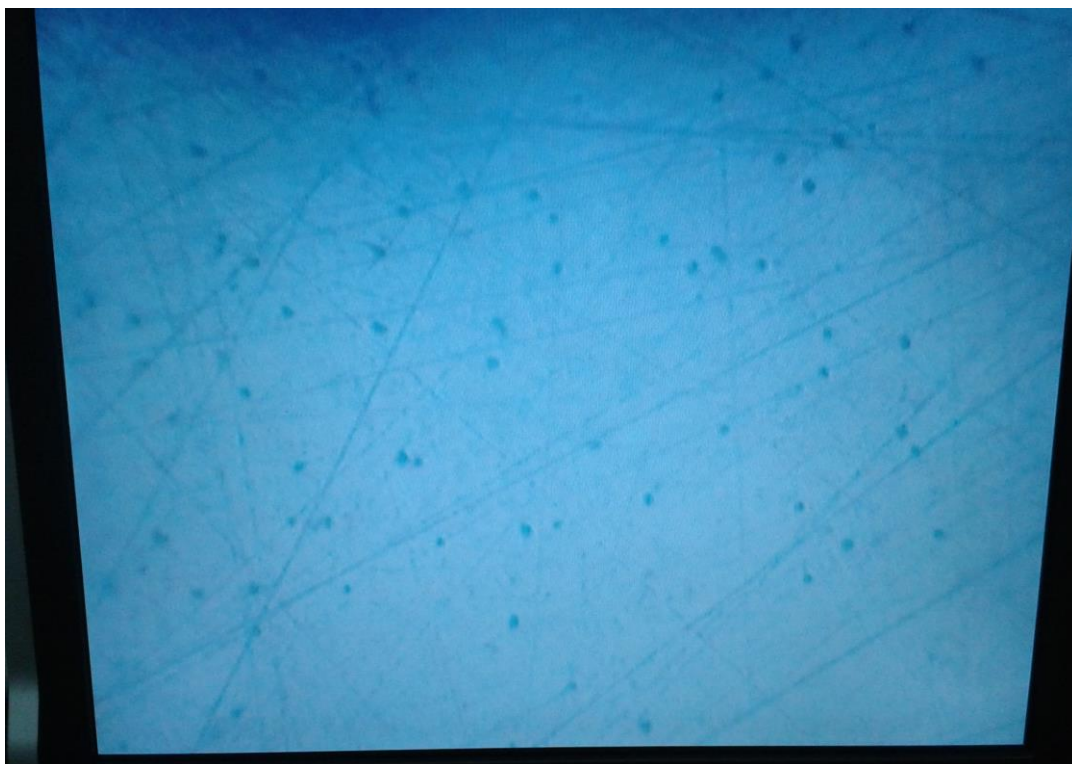
Στις *Εικόνες 4.11 έως 4.14* που ακολουθούν παρουσιάζεται μέσω της κάμερας CCD του Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης (AFM), η επιφάνεια του δοκιμίου κατά την εξέλιξη των διαφόρων σταδίων της κατεργασίας.



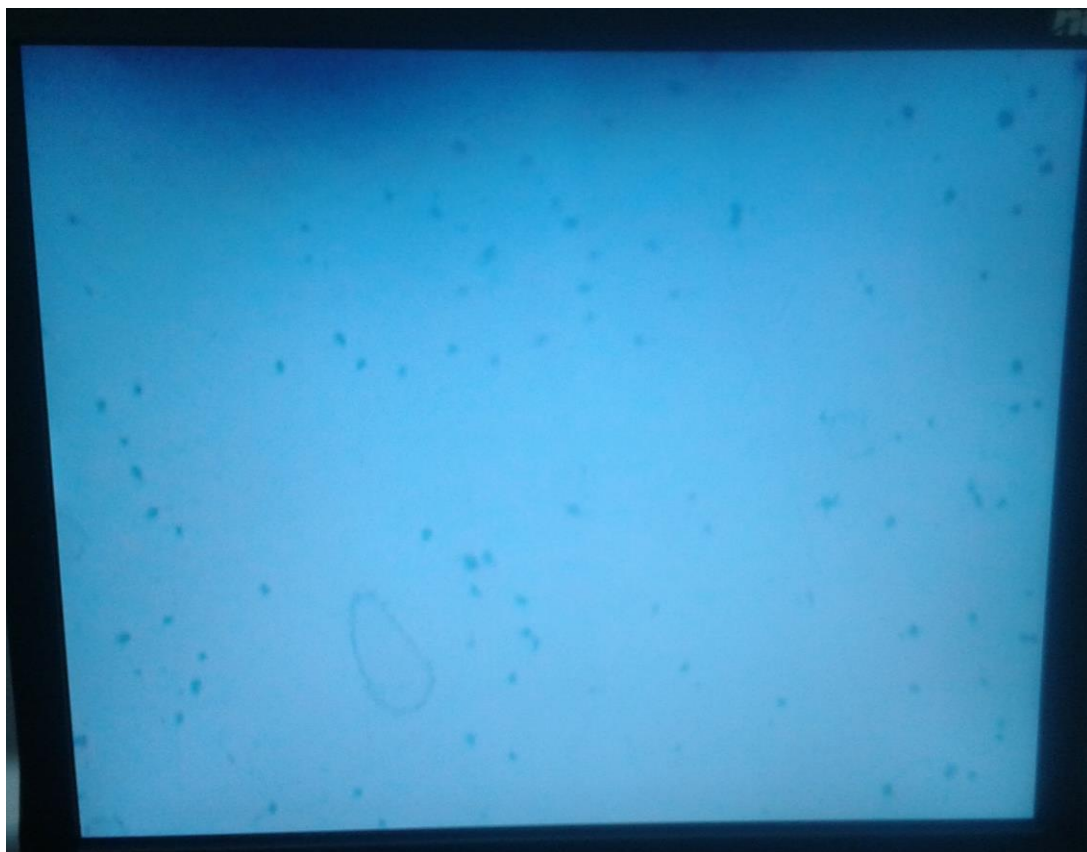
Εικόνα 4.11 Επιφάνεια δοκιμίου κατά τα πρώτα στάδια της κατεργασίας όπως γίνεται εμφανής μέσω της κάμερας CCD.



Εικόνα 4.12 Επιφάνεια δοκιμίου κατά τα ενδιάμεσα στάδια της κατεργασίας όπως γίνεται εμφανής μέσω της κάμερας CCD. Στην εικόνα διακρίνεται και ο μικροπρόβολος που φέρει την ακίδα σάρωσης στο πέρας του.



Εικόνα 4.13 Επιφάνεια δοκιμίου κατά το προτελευταίο στάδιο κατεργασίας. Διακρίνεται η σταδιακή μείωση των διαστάσεων των δομών εγχάραξης του δοκιμίου και η αρχική εμφάνιση εξωγενών παραγόντων στην επιφάνεια.



Εικόνα 4.14 Επιφάνεια δοκιμίου μετά και το τελικό στάδιο κατεργασίας. Διακρίνεται η ολική απουσία των δομών εγχάραξης του δοκιμίου και η διατήρηση εξωγενών παραγόντων στην επιφάνεια.

Αξιοσημείωτα από την οπτική παρατήρηση της επιφάνειας μέσω της κάμερας CCD

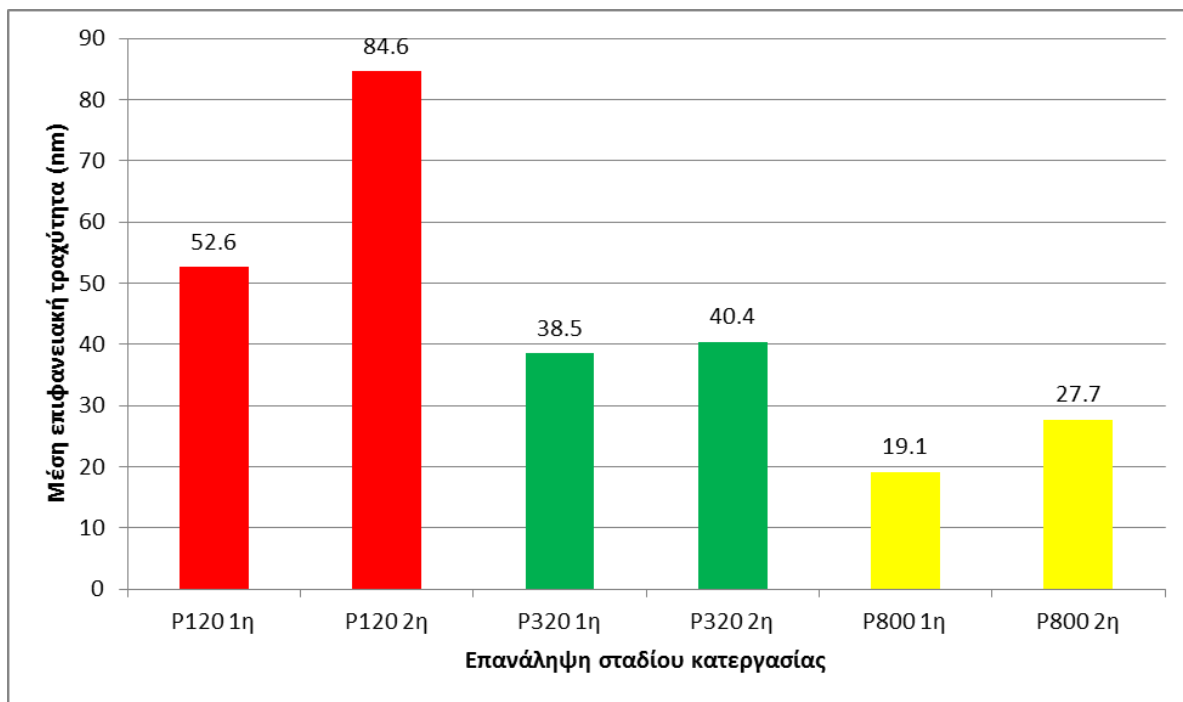
- ❖ Κατά τα πρώτα στάδια της κατεργασίας (λειαντικά χαρτιά P120, P320) εμφανίζονται πλατιές δομές εγχάραξης, γεγονός που συμβαδίζει με το μεγάλο μέγεθος των λειαντικών κόκκων που χρησιμοποιούνται.
- ❖ Κατά τα ενδιάμεσα στάδια της κατεργασίας (λειαντικά χαρτιά P800, P1200) οι δομές εγχάραξης της επιφάνειας μειώνονται σε μέγεθος και αυξάνονται σε πλήθος.
- ❖ Κατά τα τελικά στάδια της κατεργασίας (P2400, P4000) παρατηρείται η σταδιακή μείωση έως και εξάλειψη των δομών εγχάραξης από την επιφάνεια του δοκιμίου, πλην όμως κάνουν την εμφάνιση τους ξένοι παράγοντες με τη μορφή μαύρων στιγμάτων. Σύμφωνα με την κλίμακα μεγεθών, οι παράγοντες αυτοί χαρακτηρίζονται από διαστάσεις μεγαλύτερες των 100 nm σε μια επιφάνεια μέσης τραχύτητας 10,8 nm. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει πως πρόκειται για εξωγενείς παράγοντες, πιθανόν προερχόμενους από τους λειαντικούς κόκκους του χαρτιού SiC, που σε αυτά τα τελικά στάδια κατεργασίας είναι της τάξης μερικών μικρομέτρων.

Διερεύνηση επίδρασης πολλαπλών επαναλήψεων των σταδίων στίλβωσης με λειαντικά χαρτιά ίδιου τύπου

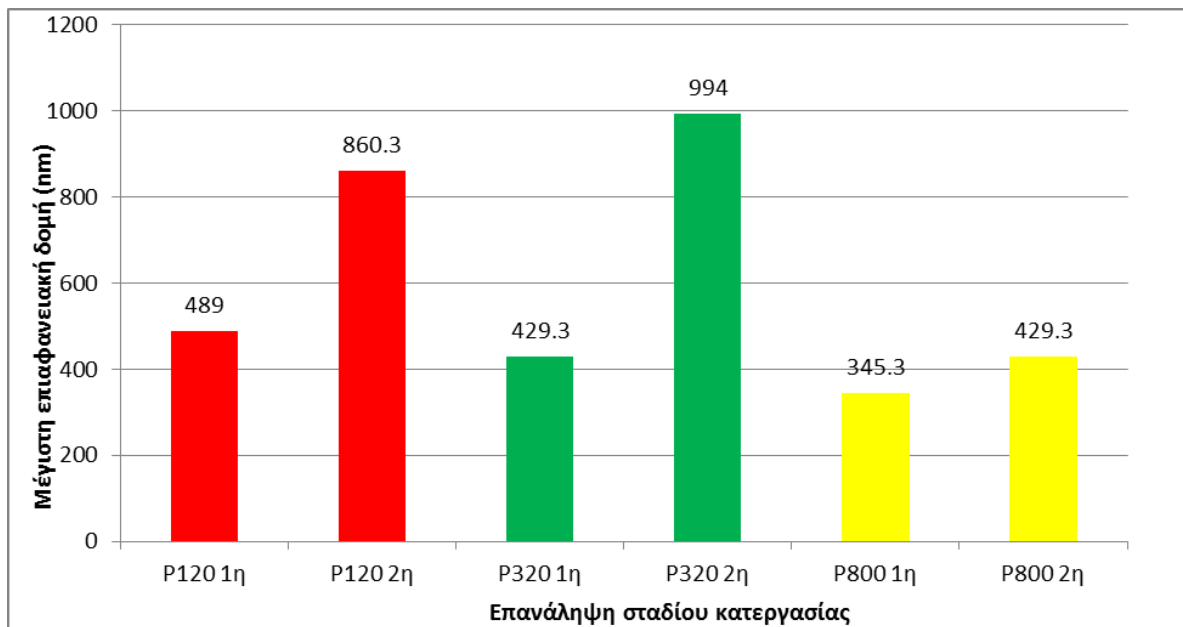
Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα μιας ξεχωριστής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε και σκοπός της υπήρξε να διευκρινιστεί η επίδραση των πολλαπλών επαναλήψεων των σταδίων στίλβωσης του δοκιμίου, με χρήση λειαντικών χαρτιών ίδιου τύπου. Συγκεκριμένα για τα λειαντικά χαρτιά SiC P120, P320 και P800 επαναλήφθηκε η διαδικασία επιπλέον δυο φορές στο ίδιο δοκίμιο. Σε όλες τις περιπτώσεις οι παράμετροι της κατεργασίας διατηρήθηκαν σταθερές. Στον **Πίνακα 4.4** που ακολουθεί παρουσιάζονται αριθμητικά τα αποτελέσματα ενώ στο **Εικόνες 4.15** και **4.16** γίνεται η γραφική τους απεικόνιση.

| Τύπος λειαντικού χαρτιού SiC (grit) | Αριθμός επανάληψης κατεργασίας | Μέση τραχύτητα επιφάνειας (nm) | Μέγιστη δομή επιφάνειας (nm) |
|-------------------------------------|--------------------------------|---|---|
| P120 | 1η | $Ra_1=50,4$ $Ra_2=45,9$ $Ra_3=61,4$ $R_{avg}=52,6$ | $Sy_1=470$ $Sy_2=479$ $Sy_3=518$ $Sy_{avg}=489$ |
| P120 | 2η | $Ra_1=57,1$ $Ra_2=112$ $Ra_3=84,7$ $R_{avg}=84,6$ | $Sy_1=406$ $Sy_2=1320$ $Sy_3=855$ $Sy_{avg}=860,3$ |
| P320 | 1η | $Ra_1=39,1$ $Ra_2=42,3$ $Ra_3=34,0$ $R_{avg}=38,5$ | $Sy_1=504$ $Sy_2=423$ $Sy_3=361$ $Sy_{avg}=429,3$ |
| P320 | 2η | $Ra_1=30,8$ $Ra_2=32,3$ $Ra_3=58,1$ $R_{avg}=40,4$ | $Sy_1=1010$ $Sy_2=812$ $Sy_3=1160$ $Sy_{avg}=994$ |
| P800 | 1η | $Ra_1=23,1$ $Ra_2=17,8$ $Ra_3=16,6$ $R_{avg}=19,1$ | $Sy_1=546$ $Sy_2=253$ $Sy_3=237$ $Sy_{avg}=345,3$ |
| P800 | 2η | $Ra_1=25$ $Ra_2=22$ $Ra_3=36$ $R_{avg}=27,7$ | $Sy_1=365$ $Sy_2=208$ $Sy_3=904$ $Sy_{avg}=492,3$ |

Πίνακας 4.4 Αριθμητικά αποτελέσματα μέσης τραχύτητας και μέγιστης δομής επιφάνειας.



Εικόνα 4.15 Διαμόρφωση της μέσης επιφανειακής τραχύτητας μετά από επανάληψη της κατεργασίας.



Εικόνα 4.16 Διαμόρφωση της μέσης επιφανειακής τραχύτητας μετά από επανάληψη της κατεργασίας.

Παρατηρήσεις

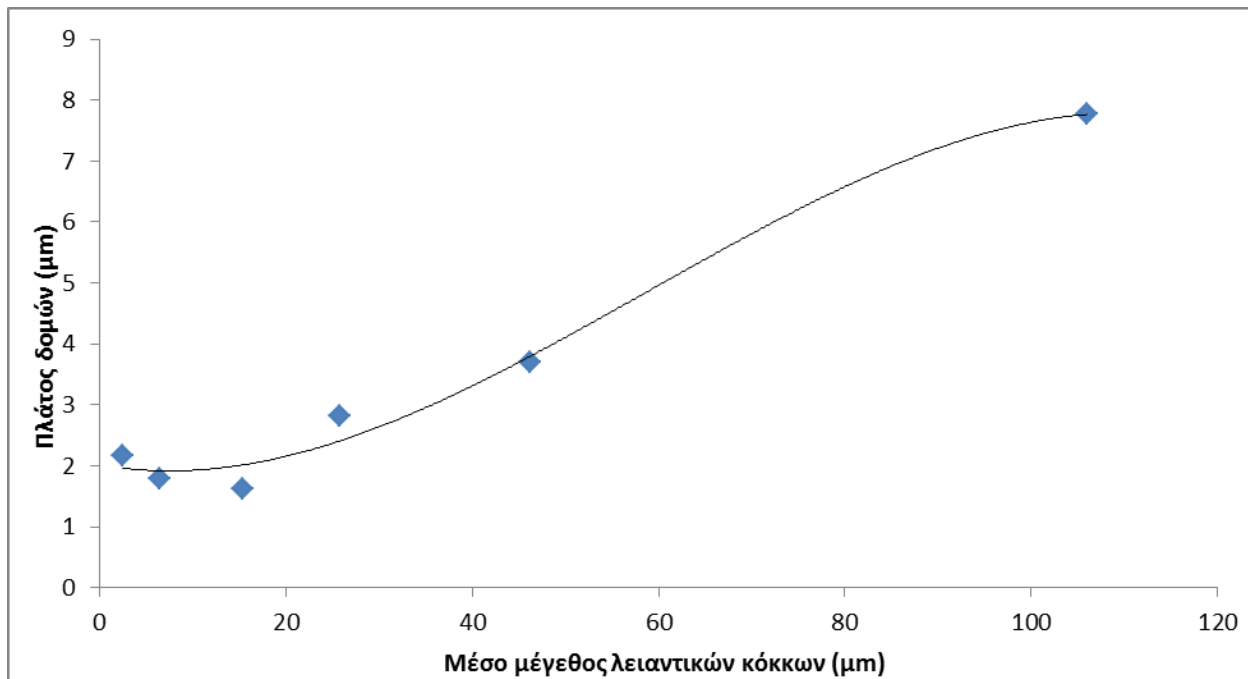
- ❖ Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό πως η επανάληψη της κατεργασίας και για τους τρεις τύπους λειαντικού χαρτιού, οδήγησε σε επιφάνειες με μεγαλύτερη μέση τραχύτητα και μεγαλύτερο μέγεθος μέγιστων δομών.
- ❖ Ταυτόχρονα, η επιλογή του χρόνου κατεργασίας 20 λεπτών με μια μόνο επανάληψη σε κάθε στάδιο, θεωρήθηκε ως η πιο ενδεδειγμένη για τη συνέχεια των πειραμάτων.
- ❖ Η βελτιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ποιότητα επιφάνειάς θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο ξεχωριστής μελέτης.
- ❖ Σε κάθε περίπτωση, παρά την αύξηση που παρατηρείται μετά τη 2^η επανάληψη, παρατηρείται συνολικά μείωση των μεγεθών με χρήση λειαντικών χαρτιών με μικρότερο μέσο μέγεθος λειαντικών κόκκων.
- ❖ Το παραπάνω γεγονός συμβαδίζει και με τα προηγούμενα συμπεράσματα.
- ❖ Κατά τη 2^η επανάληψη που πραγματοποιήθηκε, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο λειαντικό χαρτί που είχε χρησιμοποιηθεί και στην αρχική. Η φθορά των λειαντικών κόκκων αποτελεί έναν πιθανό παράγοντα που μπορεί να συντελεί στη δημιουργία αυτών των αποτελεσμάτων.
- ❖ Τα παρόντα πειραματικά ευρήματα χρήζουν περαιτέρω και πιο εντοπισμένης διερεύνησης ώστε να διευκρινιστούν οι ακριβείς αιτίες που προκαλούν αυτή τη συμπεριφορά μετά από επανάληψη της κατεργασίας.

4.3 Ανάλυση επιφανειακών δομών

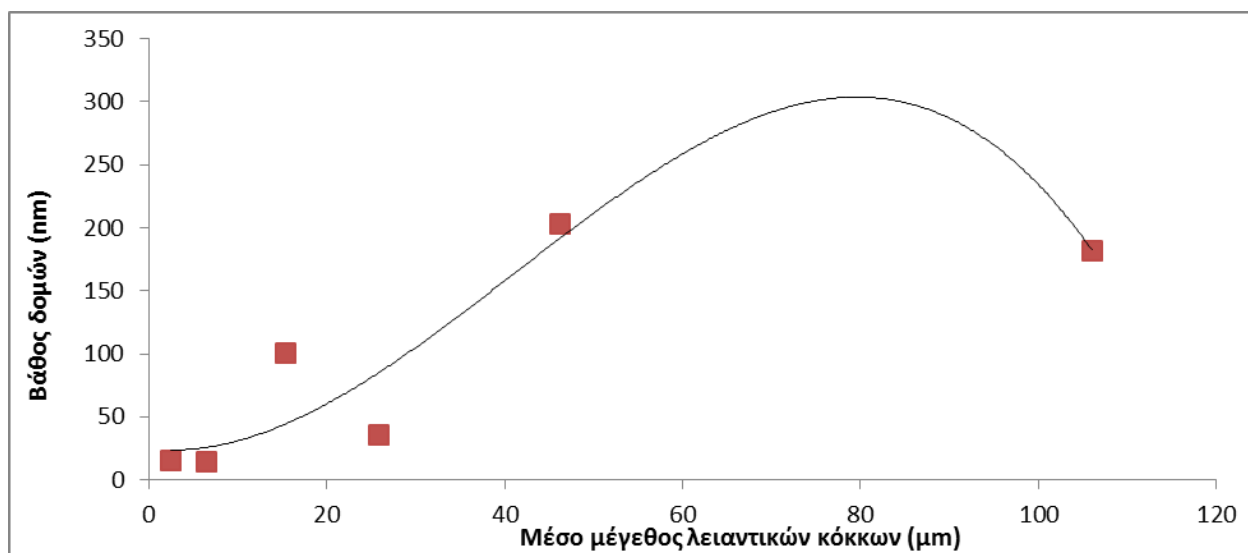
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστεί για κάθε στάδιο της κατεργασίας στίλβωσης ξεχωριστά η ανάλυση των χαρακτηριστικών διαστάσεων των δομών εγχάραξης που σχηματίζονται λόγω της επίδρασης των λειαντικών κόκκων, καθώς και εν συνεχεία η διακύμανση ύψους της επιφάνειας του δοκιμίου. Σκοπός είναι η δημιουργία συσχέτισης ανάμεσα στο μέσο μέγεθος των λειαντικών κόκκων και στις σχηματιζόμενες δομές εγχάραξης της επιφάνειας. Στον **Πίνακα 4.5** που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκεντρωμένες οι διαστάσεις πλάτους και βάθους των δομών αυτών, καθώς και το μέσο μέγεθος των λειαντικών κόκκων του εκάστοτε σταδίου κατεργασίας. Τα **Γραφήματα 4.1-4.2** αναπαριστούν τη συσχέτιση των διαστάσεων αυτών συναρτήσει του μεγέθους των κόκκων.

| <i>Τύπος λειαντικού χαρτιού SiC (grit)</i> | <i>Μέσο μέγεθος λειαντικών κόκκων (μm)</i> | <i>Πλάτος δομής εγχάραξης (μm)</i> | <i>Βάθος δομής εγχάραξης (nm)</i> |
|--|--|--|-----------------------------------|
| <i>P120</i> | <i>106</i> | <i>7.77</i> | <i>182</i> |
| <i>P320</i> | <i>40.5</i> | <i>3.69</i> | <i>203</i> |
| <i>P800</i> | <i>25.8</i> | <i>2.82</i> | <i>36.1</i> |
| <i>P1200</i> | <i>15.3</i> | <i>1.63</i> | 101 |
| P2400 | 6.5 | 1.79 | 14.4 |
| P4000 | 2.5 | 2.16 | 15.8 |

Πίνακας 4.5 Διαστάσεις χαρακτηριστικών δομών εγχάραξης



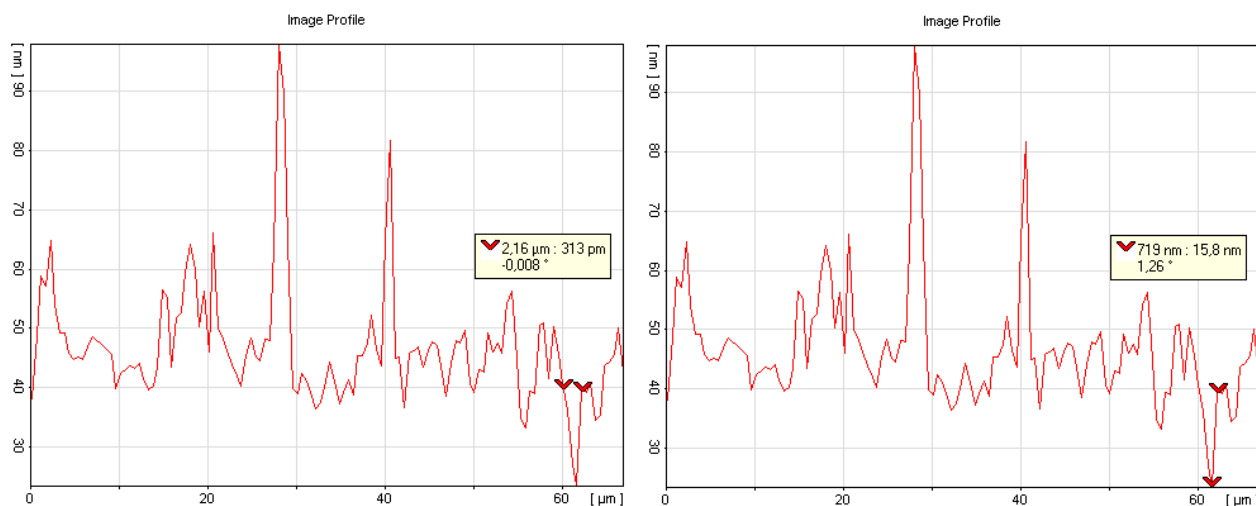
Γράφημα 4.1 Εξάρτηση του πλάτους δομών εγχάραξης από το μέσο μέγεθος των λειαντικών κόκκων.



Γράφημα 4.2 Εξάρτηση του βάθους δομών εγχάραξης από το μέσο μέγεθος των λειαντικών κόκκων.

Παρατηρήσεις

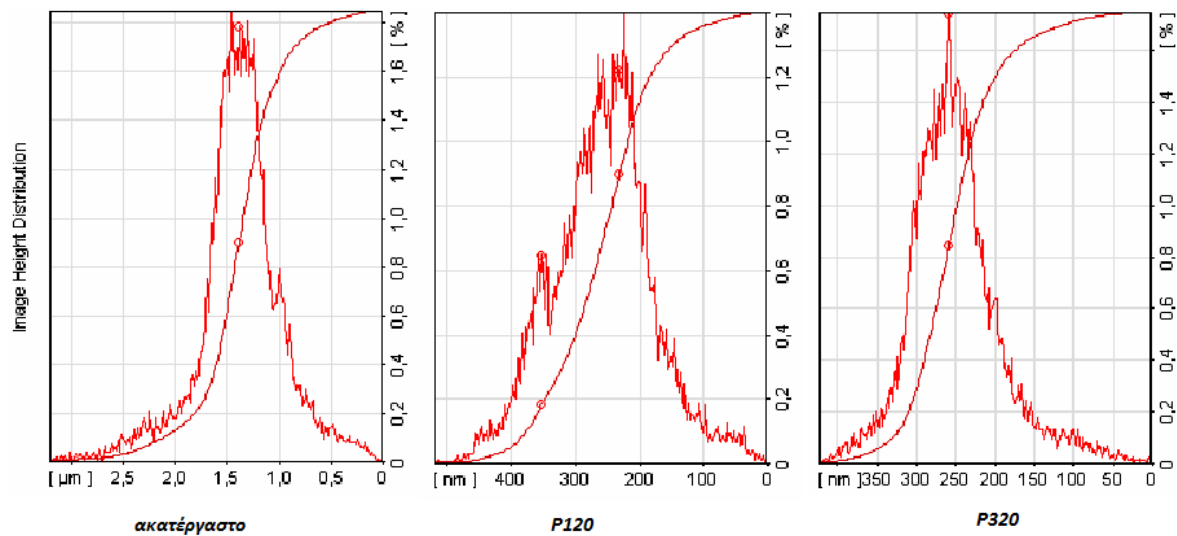
- ❖ Τόσο από τις τιμές του **Πίνακα 4.5** όσο και από την αναπαράσταση τους στα **Γραφήματα 4.1-4.2** γίνεται αντιληπτή η σχεδόν γραμμική εξάρτηση των χαρακτηριστικών διαστάσεων των δομών εγχάραξης που σχηματίζονται στην επιφάνεια των δοκιμίων, από το μέσο μέγεθος των λειαντικών κόκκων.
- ❖ Μεγαλύτεροι λειαντικοί κόκκοι προκαλούν το σχηματισμό δομών με μεγαλύτερο πλάτος και αντίστροφα.
- ❖ Η μικρή αύξηση που παρατηρείται στα χαρακτηριστικά μεγέθη των δομών κατά τα δύο τελευταία στάδια κατεργασίας (λειαντικά χαρτιά P2400 και P4000) δεν αλλοιώνει τη γενική εξάρτηση που πιστοποιείται. Ταυτόχρονα, συμβαδίζει με τα δεδομένα του **Πίνακα 4.2** της **Παραγράφου 4.2** σύμφωνα με τα οποία παρατηρήθηκε αύξηση της μέγιστης δομής που εντοπίστηκε στην επιφάνεια στα συγκεκριμένα στάδια κατεργασίας, γεγονός που χρήζει περαιτέρω και πιο επικεντρωμένης διερεύνησης ώστε να αποκαλυφθούν οι αιτίες.
- ❖ Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών των δομών πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού επεξεργασίας εικόνων που διαθέτει το Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.17** που ακολουθεί. Συγκεκριμένα, μετρήθηκε σε κάθε περίπτωση το πλάτος και το βάθος της αυλάκωσης εκείνης η οποία είχε ως αρχή της το κατώτατο σημείο που εμφανίζει η επιφάνεια.



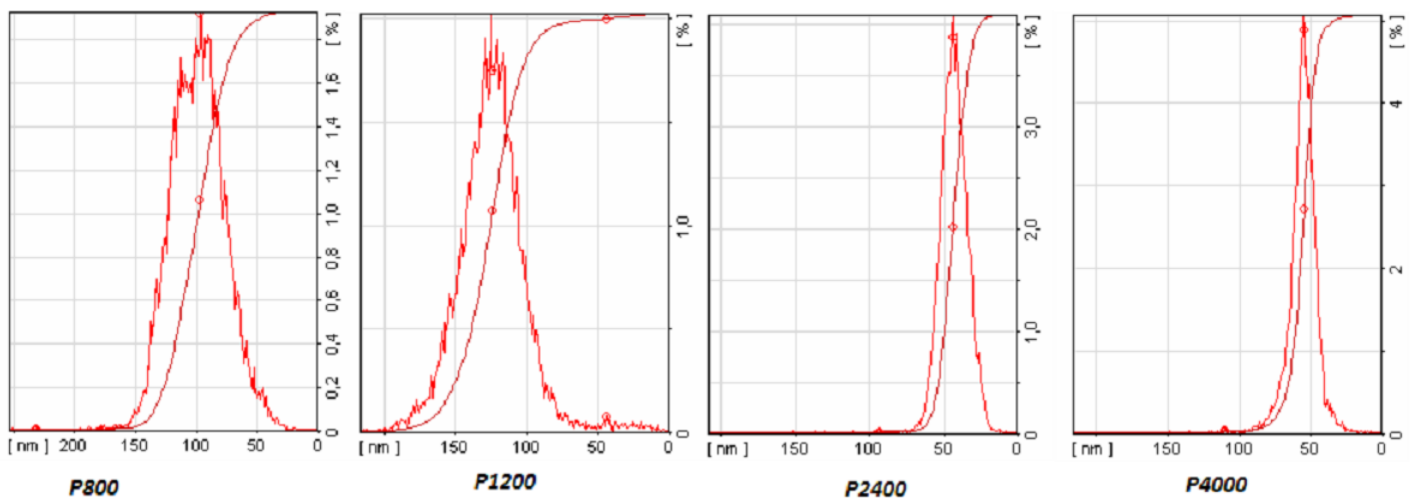
Εικόνα 4.17 Προσδιορισμός διαστάσεων πλάτους και βάθους χαρακτηριστικής δομής εγχάραξης.

Κατανομή και διακύμανση ύψους επιφανειακών δομών δοκιμίων

Στα **Γράφηματα 4.3-4.4** που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή των υψών της επιφάνειάς για κάθε στάδιο της κατεργασίας και γίνεται εμφανής η διακύμανση που παρουσιάζουν. Στον **Πίνακα 4.6** παρουσιάζεται το μέσο ύψος όπως προκύπτει με κατάλληλη καμπύλη προσαρμογής μέσω του λογισμικού ανάλυσης.



Γράφημα 4.3 Διακύμανση υψών για το ακατέργαστο δοκίμιο και τα δύο πρώτα στάδια της κατεργασίας.



Γράφημα 4.4 Διακύμανση υψών για τέσσερα επόμενα στάδια της κατεργασίας.

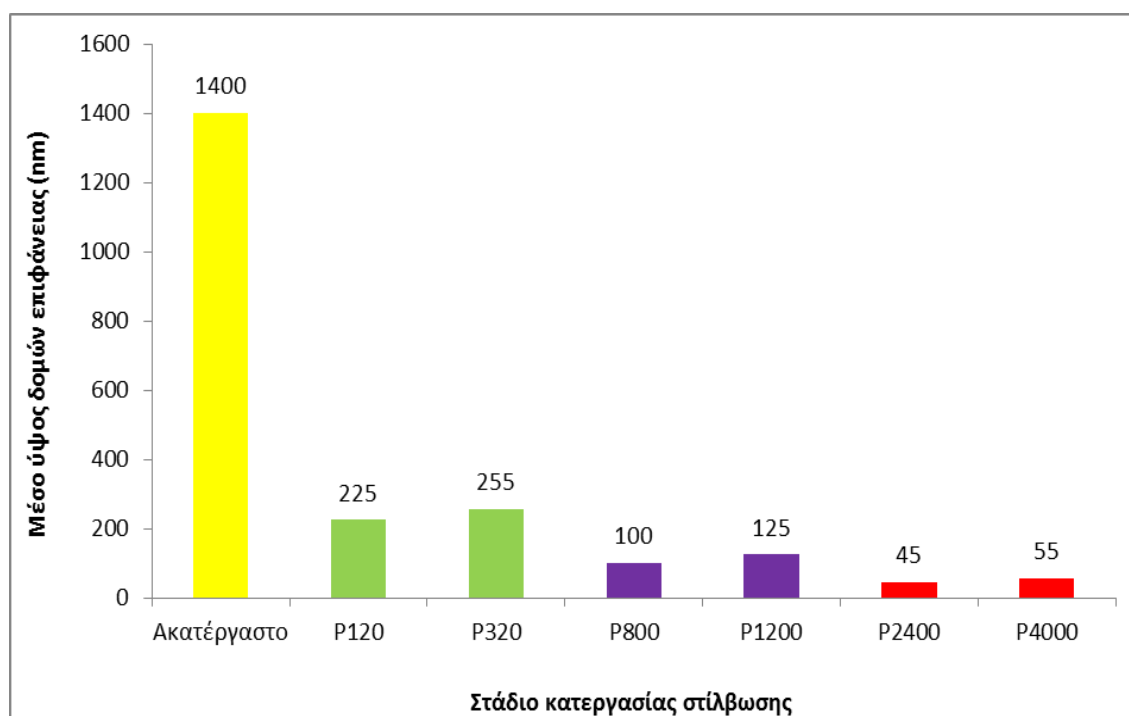
Παρατηρήσεις

- ❖ Αρχικά η διακύμανση του ύψους των δομών της επιφάνειας παρουσιάζεται διευρυμένη σε μια περιοχή μερικών μm.
- ❖ Με την εξέλιξη των σταδίων της κατεργασίας η περιοχή αυτή εμφανίζεται σημαντικά πιο εντοπισμένη σε μια περιοχή εύρους **0-100 nm**.

| <i>Τύπος λειαντικού χαρτιού SiC (grit)</i> | <i>Μέσο ύψος δομών επιφάνειας (nm)</i> |
|--|--|
| Ακατέργαστο | 1400 |
| P120 | 225 |
| P320 | 255 |
| P800 | 100 |
| P1200 | 125 |
| P2400 | 45 |
| P4000 | 55 |

Πίνακας 4.6 Μέσο ύψος δομών σε κάθε στάδιο της κατεργασίας.

Στην *Εικόνα 4.17* που ακολουθεί, παρουσιάζεται το μέσο ύψος των δομών της επιφάνειας σε κάθε στάδιο της κατεργασίας, όπου παρατηρείται συνολικά η σταδιακή μείωση του, γεγονός που συμβαδίζει με τη σταδιακή μείωση της μέσης επιφανειακής τραχύτητας. Αξιοσημείωτο είναι πως για λειαντικά χαρτιά με παρόμοιο μέσο μέγεθος λειαντικών κόκκων, παρατηρούνται ελάχιστες αποκλίσεις στο μέσο ύψος των επιφανειακών δομών, παρατήρηση που έρχεται σε συμφωνία και με τις μετρήσεις επιφανειακής τραχύτητας.



Γράφημα 4.17 Μέσο ύψος δομών επιφάνειας σε κάθε στάδιο της κατεργασίας.

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας υπήρξε η μελέτη της ποιότητας επιφάνειας δοκιμίων χάλυβα St37 με χρήση του Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης (AFM), κατά την κατεργασία στίλβωσης των δοκιμίων αυτών. Συγκεκριμένα, βασικό ζητούμενο καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός της μέσης επιφανειακής τραχύτητας των κατεργασμένων δοκιμίων, καθώς και ο χαρακτηρισμός και ανάλυση των επιφανειακών δομών που δημιουργήθηκαν στα διάφορα στάδια της κατεργασίας. Επιπροσθέτως, μελετήθηκε και η εξάρτηση των αποτελεσμάτων από τις παραμέτρους που επιλέχθηκαν κατά την κατεργασία.

- Βαθμός καινοτομίας της εργασίας

Πλήθος ερευνών έχουν πραγματοποιηθεί διερευνώντας με χρήση του Μικροσκοπίου Ατομικής Δύναμης, την επιφανειακή τραχύτητα και ποιότητα μεταλλικών υλικών με διάφορους τρόπους επιφανειακής κατεργασίας.

Παρατίθενται ορισμένες εκ των οποίων το τελικό αποτέλεσμα της τιμής Ra ανέρχεται επίσης σε τάξη μεγέθους nm:

- Lisbeth R. Hilberta, Dorthe Bagge-Ravnb, John Koldc, Lone Gramb, Influence of surface roughness of stainless steel on microbial adhesion and corrosion resistance, *International Biodeterioration & Biodegradation* 52 (2003) 175 – 185.
- F.Klocke, O.Dambon, G.G.Capudi Filho, Influence of the polishing process on the near-surface zone of hardened and unhardened steel, *Wear* 258 (2005) 1794–1803.
- Gi-Ja Leea,b, Ki-Ho Parkc, Young-Guk Parkc, Hun-Kuk Parka,b, A quantitative AFM analysis of nano-scale surface roughness in various orthodontic brackets, *Micron* 41 (2010) 775–782.
- H.-W. Hoffmeistera, W.-C. Hahmanna, Influence of Machining with Lapping Foils on Surface Integrity of Hardened Steel, *Procedia Engineering* 19 (2011) 144 – 149.

- A.Srithara, K.Palanikumarb, B.Durgaprasadc, Experimental Investigation and Surface roughness Analysis on Hard turning of AISI D2 Steel using Coated Carbide Insert, Procedia Engineering 97 (2014) 72 – 77.

Ωστόσο από την βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε δεν βρέθηκαν διαθέσιμα στοιχεία αναφορικά με:

- ✓ Την επίδραση της επανάληψης των διαφόρων σταδίων κατεργασίας στο τελικό αποτέλεσμα επιφανειακής τραχύτητας και ποιότητας της επιφάνειας.
 - ✓ Την λεπτομερή ανάλυση των παρατηρούμενων επιφανειακών δομών εγχάραξης – αυλακώσεων.
 - ✓ Τη συσχέτιση των χαρακτηριστών αυτών των δομών με τα διάφορα στάδια της κατεργασίας.
- *Δοκίμια χάλυβα St37* κατεργάστηκαν σε λειαντική συσκευή με χρήση λειαντικών χαρτιών *καρβιδίου του πυριτίου SiC*, αποτελούμενα από διαφορετικού μέσου μεγέθους λειαντικούς κόκκους. Για κάθε διαφορετικό τύπο λειαντικού χαρτιού, πραγματοποιήθηκε μελέτη της ποιότητας επιφάνειας των δοκιμίων. Η μελέτη αυτή αποκάλυψε διαφοροποιήσεις στην μέση επιφανειακή τραχύτητα των δοκιμίων και συγκεκριμένα, **σταδιακή μείωση του μέσου μεγέθους των λειαντικών κόκκων, οδήγησε σε σταδιακή μείωση της μέσης επιφανειακής τραχύτητας των δοκιμίων.**
 - Ταυτόχρονα παρατηρήθηκε **μείωση στις διαστάσεις ύψους της μέγιστης παρατηρούμενης δομής της επιφάνειας, με εξαίρεση τα δύο τελευταία στάδια κατεργασίας (P2400, P4000), όπου παρατηρήθηκε πολύ σημαντική αύξηση γεγονός που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.**
 - Η κατεργασία στίλβωσης που πραγματοποιήθηκε, οδήγησε στη δημιουργία εγχάραξης της επιφάνειας του δοκιμίου και ειδικότερα σε επιφανειακές δομές με διαφορετικό βάθος και πλάτος για κάθε στάδιο της κατεργασίας. Λεπτομερής ανάλυση των διαστάσεων των δομών αυτών αποκάλυψε τη συσχέτιση τους με

το μέσο μέγεθος των λειαντικών κόκκων που χρησιμοποιήθηκαν. **Μεγαλύτερο μέγεθος λειαντικών κόκκων οδήγησε σε δομές εγχάραξης με μεγαλύτερο βάθος και πλάτος και αντίστροφα.**

- Κατά τα δυο τελευταία στάδια της κατεργασίας παρατηρήθηκε οπτικά σημαντική μείωση έως και συνολική εξάλειψη των δομών εγχάραξης, με μια ταυτόχρονη ελάχιστη αύξηση στο πλάτος και το βάθος όσων παραμένουν, χωρίς όμως αυτό να διαφοροποιεί το συνολικό αποτέλεσμα.
- Επιπρόσθετα, στα δυο αυτά τελευταία στάδια παρατηρείται η **εμφάνιση εξωγενών παραγόντων στην επιφάνεια**, πιθανόν προερχόμενων από τους λειαντικούς κόκκους οι οποίοι σε αυτά τα στάδια είναι **μεγέθους μερικών μικρομέτρων**. Στο συμπέρασμα αυτό καταλήγουμε καθώς η μέση επιφανειακή τραχύτητα στα στάδια αυτά ανέρχεται σε μερικά **nm**, ενώ οι παράγοντες αυτοί προσδιορίζονται σε διαστάσεις μεγαλύτερες των **100 nm**.
- Μετά το πέρας όλων των σταδίων της κατεργασίας στίλβωσης έχει δημιουργεί **επιφάνεια μέση τραχύτητα 10,8 nm** που χαρακτηρίζεται οπτικά ως καθρέπτης.
- Η διακύμανση του ύψους των δομών της επιφάνειας μειώνεται κατά την εξέλιξη των διαφόρων σταδίων της κατεργασίας. Από ένα **αρχικό εύρος μερικών μικρομέτρων παρατηρείται σταδιακή μείωση στην περιοχή 0-100 nm**.
- Το μέσο ύψος των δομών της επιφάνειας, όπως αυτό προσδιορίζεται με κατάλληλη προσαρμογή στην καμπύλη διακύμανσης ύψους, εμφανίζει σταδιακή μείωση κατά την εξέλιξη των σταδίων της κατεργασίας. Μικρές διαφοροποιήσεις στις τιμές παρατηρούνται για λειαντικά χαρτιά με παρόμοιο μέσο μέγεθος λειαντικών κόκκων.
- Τέλος, διαπιστώθηκε η επίδραση επανάληψης μερικών σταδίων της κατεργασίας στην επιφανειακή ποιότητα των δοκιμίων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε δεύτερη επανάληψη με τα λειαντικά χαρτιά P120, P320 και P800. Η μελέτη της επιφάνειας που ακολούθησε κατόπιν καταδεικνύει την αύξηση της μέσης

επιφανειακής τραχύτητας και το σχηματισμό μέγιστης δομής της επιφάνειας με μεγαλύτερης διαστάσεις. Πιθανή αιτία στα παραπάνω συμπεράσματα είναι η φθορά των λειαντικών κόκκων καθώς χρησιμοποιήθηκε το ίδιο λειαντικό χαρτί με την αρχική επανάληψη. Σε κάθε περίπτωση, περαιτέρω διερεύνηση θα μπορούσε να διευκρινίσει αυτή τη συμπεριφορά.

Οι κατεργασίες αποβολής υλικού, στις οποίες συγκαταλέγεται και η κατεργασία της στίλβωσης η οποία εξετάστηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, αποτελούν πολύ σπουδαία εργαλεία τροποποίησης της ποιότητας επιφάνειας των υλικών. Έχοντας εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα υλικών, από μέταλλα, ημιαγωγούς μέχρι και φακούς, κάτοπτρα και άλλα οπτικά μέρη, μπορούν και προσφέρουν σημαντική βελτίωση των ιδιοτήτων των υλικών αυτών. Τα περισσότερα μέρη που αποτελούν έναν ολοκληρωμένο ηλεκτρονικό υπολογιστή, υπόκεινται σε διάφορα στάδια λείανσης-στίλβωσης με σκοπό να γίνουν κατάλληλα για την επίτευξη συγκεκριμένων διεργασιών. Μηχανικά μέρη, όπως γρανάζια, κουζινέτα κ.α. απαιτούν υψηλής ποιότητας επιφανειακή δομή με σκοπό την καλύτερη συνδυαστική λειτουργία τους. Ιατρικά εργαλεία, νυστέρια, βελόνες και πολλά άλλα απαιτούν εξαιρετικό φινίρισμα της επιφάνειας τους. Είναι αποδεδειγμένο πως η επιφανειακή τραχύτητα του ανοξειδωτου χάλυβα, καθορίζει το βαθμό στον οποίο η επιφάνεια του προσβάλλεται από οξείδωση και ευνοεί την ανάπτυξη μικροβίων [20]. Μεταλλικά σκεύη τροφίμων απαιτούν προδιαγραφές χαμηλής επιφανειακής τραχύτητας, καθιστώντας τις κατεργασίες αυτές σημαντικό μέρος των διαδικασιών βιομηχανικής παραγωγής.

Για όλους τους παραπάνω λόγους η διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων της κατεργασίας στην τελική ποιότητα της επιφάνειας των υλικών κρίνεται υψηλής σημασίας. Στην κατεύθυνση αυτή, το Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης (AFM) αποτελεί ένα εξαιρετικό εργαλείο που καθιστά εφικτή τη μέτρηση επιφανειακής τραχύτητας ελάχιστων νανομέτρων αλλά και την ανάλυση των χαρακτηριστικών στοιχείων της επιφάνειας που καθορίζουν τη λειτουργικότητα της.

Βιβλιογραφία

- [1] Alden, G.I., *Operation of grinding wheels in machine grinding*, *Trans. ASME*, 1914, 36, 451–460.
- [2] Guest, J.J., *Grinding Machinery*, Edward Arnold, London, 1915.
- [3] CIRP, *Dictionary of Production Engineering II—Material Removal Processes*, Springer, Heidelberg, 2005.
- [4] Czichos, H., *Tribology—A Systems Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear*, Elsevier, Amsterdam, 1978.
- [5] Marinescu, I.D., Uhlmann, E. and Doi, T., *Handbook of lapping and polishing*, CRC Press, 2007.
- [6] Marinescu, I.D., Rowe, W.B., Dimitrov, B. and Inasaki, I., *Tribology of Abrasive Machining Processes*, William Andrew Publishing, Norwich, NY, 2004.
- [7] Γαλάνης, Ν.Ι., *Διδακτορική διατριβή, Κατεργασιμότητα λίαν υψηλής ακριβείας βιολογικών εμφυτευμάτων τεχνητού ισχίου*, ΕΜΠ, Αθήνα 2011.
- [8] Παυλάτου, Ε.Α., *Εργαστηριακές Ασκήσεις του μαθήματος «Τεχνική Ανόργανων και Ηλεκτροχημικών Βιομηχανιών»*, ΕΜΠ, Αθήνα 2012.
- [9] Mansour, G, Καραχάλιου, Χ., *Διαστατική Μετρολογία*, Εκδόσεις Ζήτη, 2007.
- [10] Salapaka, S.M. and Salapaka, M., *Scanning Probe Microscopy*, *IEEE Control Systems Magazine*, 65-81, 2008.
- [11] *SPM Training Notebook*, Veeco Instruments Inc., 2003.
- [12] Bhushan, B., *Modern Tribology Handbook, Vol. 1 - Principles of Tribology*, CRC Press, 2001.
- [13] Kuroda, R., Suwa, T., Teramoto, A., Hasebe, R., Sugawa, S. and Ohmi, T., *Atomically Flat Silicon Surface and Silicon/Insulator Interface Formation Technologies for (100) Surface Orientation Large-Diameter Wafers Introducing High Performance and Low-Noise Metal–Insulator–Silicon FETs*, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 56, 291-298, 2009.
- [14] De Oliveira, R.R.L., Albuquerque, D.A.C., Cruz, T.G.S., Yamaji, F.M. and Leite, F.L., *Measurement of the Nanoscale Roughness by Atomic Force Microscopy: Basic Principles and Applications*, Bellitto, V. (ed.) *Atomic Force Microscopy - Imaging, Measuring and Manipulating Surfaces at the Atomic Scale*, InTech, , 2012.
- [15] <http://www.steel-plate-sheet.com/>

[16] *Struers Tech manual*

[17] <http://www.metallographic.com/>

[18] Zipperian, D., *Silicon Carbide Abrasive Grinding, PACE Technologies, Vol.I, Issue 2, 1-3, 2002.*

[19] *DME Igloo With DS 95 SPM Head - AFM manual*

[20] Lisbeth R. Hilberta, Dorthe Bagge-Ravnb, John Koldc, Lone Gramb, *Influence of surface roughness of stainless steel on microbial adhesion and corrosion resistance, International Biodeterioration & Biodegradation 52 (2003) 175 – 185.*

[21] F.Klocke, O.Dambon, G.G.Capudi Filho, *Influence of the polishing process on the near-surface zone of hardened and unhardened steel, Wear 258 (2005) 1794–1803.*

[22] Gi-Ja Leea,b, Ki-Ho Parkc, Young-Guk Parkc, Hun-Kuk Parka,b, *A quantitative AFM analysis of nano-scale surface roughness in various orthodontic brackets, Micron 41 (2010) 775–782.*

[23] H.-W. Hoffmeistera, W.-C. Hahmanna, *Influence of Machining with Lapping Foils on Surface Integrity of Hardened Steel, Procedia Engineering 19 (2011) 144 – 149.*

[24] A.Srithara, K.Palanikumarb, B.Durgaprasadc, *Experimental Investigation and Surface roughness Analysis on Hard turning of AISI D2 Steel using Coated Carbide Insert, Procedia Engineering 97 (2014) 72 – 77.*

Despotelis Konstantinos

2015 Curriculum Vitae

EDUCATION & PRACTICAL EXPERIENCE

- 2014- present *Interdepartmental - Interdisciplinary Postgraduate Program (MSc, 90 ECTS) in
“Materials Science and Technology”
National Technical University of Athens, Greece
School of Chemical Engineering*
- Master Thesis:* *“Surface analysis of Steel specimens after lapping, using Atomic Force Microscopy”
Supervisor: Prof. D. Manolakos (School of Mechanical Engineering NTUA)*
- 2003-2013 *Diploma (5-year degree equivalent to MSc, 300 ECTS) in
“Applied Mathematical and Physical Sciences”
National Technical University of Athens, Greece
Specialization: Applied Physics
Subject area:*
- *Materials Science*
 - *Photovoltaic Technology*
 - *Optoelectronics and Lasers*
- Overall Mark: 6,7/10*
- 08.2011-01.2012 *Technical University of Berlin (TUB) LLP/Erasmus Program
Institute of Solid State Physics / Experimental Nanophysics and Photonics group
STM measurements on PbPc molecules*
- 03.2011-02.2012 *Researcher on Organic Solar Cells at Helmholtz Centre Berlin for Materials and Energy (HZB)
Organic Solar Cells Group
Berlin, Germany*
- 01.2009-01.2010 *Technical Support & Web Services for corporate customers at OTE S.A.
Hellenic Telecommunications Organization
Athens, Greece*
- 11.2007-12.2007 *Research Internship at European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)
High Resolution Diffraction Topography Beamline
Grenoble, France*
- Diploma Thesis:* *“Organic Photovoltaic Technology: Development of organic solar cells based on Thiophene-
Fullerene (a-6T/C60) heterojunctions”.*
- Thesis Mark: 10/10*
- *Helmholtz Centre Berlin for Materials and Energy
Supervisor: Dr. Fostiropoulos K.
(Work-Group: Prof. Dr. Lux-Steiner M.-Ch.)*
 - *Technical University of Berlin (LLP/Erasmus)
Supervisor: Dr. Vogt P.
(Work-Group: Prof. Dr. Kneissl M.)*
 - *National Technical University of Athens
Supervisor: Assist. Professor Dr. Papadimitriou D.*

Experienced in: **Atomic Force Microscopy (AFM) for surface characterization**
Lapping process
Molecular Electronics
Organic Thin Films
Physical Vapor Deposition (PVD)
Scanning Tunneling Microscopy (STM)
UV/Vis Spectroscopy
X-Ray Diffraction (XRD)
Electroreflectance Spectroscopy (ER)
Electrical characterization of solar cells

PUBLICATIONS & PARTICIPATION IN CONFERENCES

- [1] **K. Despotelis, D. Papadimitriou, K. Fostiropoulos, and M.-Ch. Lux-Steiner**, *Structural, optical and electrical investigation of alpha-sexithiophene thin films and alpha sexithiophene:fullerene based organic solar cells in Fuelling the future: advances in science and technologies for energy generation, transmission and storage*, (ed. A. Mendez-Vilas), Brown Walker Press (USA 2012) p. 247-250
The Energy & Materials Research Conference, (EMR) Torremolinos, Spain 2012
- [2] **S. Kassavetis, T. Mete, K. Despotelis, G. Peschel, M. Toepel, D. Papadimitriou, K. Fostiropoulos**, *Thickness and temperature effect on the properties of alpha-sexithiophene (a-6T) and efficiency of a-6T/C60 solar cells*, 9th Int. Conf. on Nanosciences & Nanotechnologies (NN12), Thessaloniki 2012

TECHNICAL & COMPUTER SKILLS

- **General**
 Windows, Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint)
- **Programming and Analysis Specialized Software**
 AFM software, Origin, Matlab, Mathematica, Java, Fortran, HTML

LANGUAGES

- **English (Very good knowledge)**
 IELTS exam 7.5/9 (31.10.2015) "First Certificate in English", University of Cambridge
- **German (good knowledge)**
 " Zertifikat Deutsch", Goethe Institut