

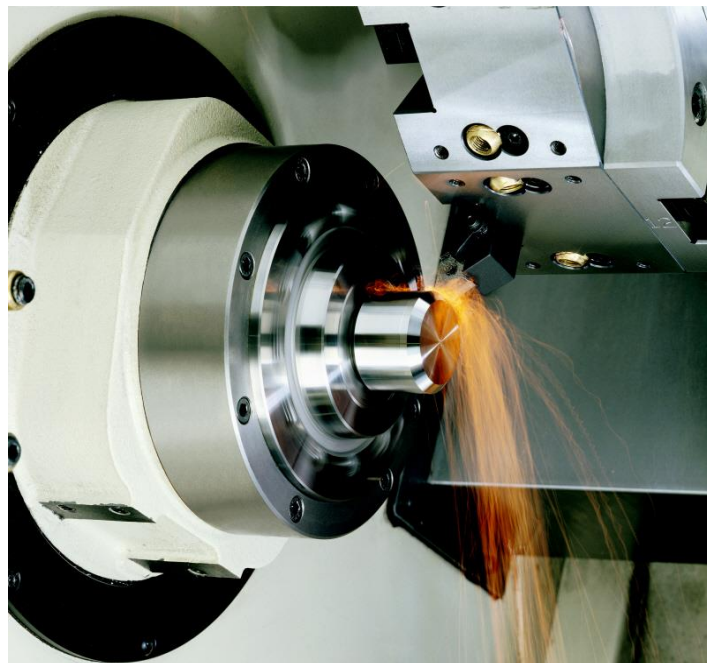
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΚΟΠΗΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΡΝΟΥ



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΠΥΡΟΠΟΥΛΟΣ Α.Μ. : 6243

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΚΑΛΑΡΑΚΗΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΠΑΤΡΑ 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην επίδραση που έχουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη κοπής στην τραχύτητα μεταλλικών δοκιμίων. Η τραχύτητα των τελικών προϊόντων είναι μια σημαντική παράμετρος μελέτης στις κατεργασίες κοπής, για πολλούς και διάφορους λόγους.

Αρχικά γίνεται μια ιστορική αναδρομή και περιγραφή των μηχανουργικών κατεργασιών. Έπειτα, αναλύονται τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της πτυχιακής και οι βασικές αρχές λειτουργίας τους. Στην συνέχεια, περιγράφονται θεωρητικά τα μεγέθη που μελετώνται για την σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που έγιναν, τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου Δρ. Αλέξανδρο Καλαράκη, Καθηγητή Εφαρμογών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. , τον Δρ. Σωτήριο Τσίρκα, Καθηγητή Εφαρμογών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. και την Δρ. Τσώλου Γεωργία, Ακαδημαϊκή Υπότροφο του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφεραν για την πραγματοποίηση της Εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Βασίλη Δρακόπουλο, Ειδικό Λειτουργικό Επιστήμονα Α του Ι.Τ.Ε. / Ι.Ε.Χ.Μ.Η. για τις γνώσεις και την υποστήριξη που μου παρείχε, καθώς και το Μηχανουργείο Υποστήριξης Ερευνητικών Δραστηριοτήτων(Μ.Υ.Ε.Δ.) και ειδικότερα τον κ. Γεράσιμο (Μάκη) Διαμαντή για τον χρόνο και τις διευκολύνσεις που μου παρείχαν στο κατασκευαστικό μέρος της Πτυχιακής Εργασίας μου.

Κωνσταντίνος Σπυρόπουλος

Φεβρουάριος 2017

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής
(Ονοματεπώνυμο)

.....
(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στην τραχύτητα των επιφανειών που έχουν υποστεί κατεργασία από τον άνθρωπο με τη χρήση εργαλειομηχανών. Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή των τιμών που θα έχουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη κοπής έχει και τα αντίστοιχα αποτελέσματα στην τελική ποιότητα και στα χαρακτηριστικά που θα έχει το κατεργασμένο τεμάχιο. Για να μελετηθεί το συγκεκριμένο θέμα, επιλέχθηκαν και υπέστησαν κατεργασία δοκίμια από τρία διαφορετικά υλικά που χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε πολλών ειδών εφαρμογές, μηχανολογικές και μη. Η κατεργασία τους έγινε σε σύγχρονο ψηφιακά καθοδηγούμενο τόρνο με σκοπό να διατηρηθεί όσο το δυνατόν σε μεγάλο βαθμό η πιστότητα και η ακρίβεια των μετρήσεων.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφονται οι μηχανουργικές κατεργασίες και δίνεται βάση στην τórνευση, σαν την πρώτη κατεργασία που ανακαλύφθηκε. Στην συνέχεια ακολουθούν οι εργαλειομηχανές και πιο συγκεκριμένα ο τόρνος. Η περιγραφή περιλαμβάνει μια ιστορική αναδρομή από την ανακάλυψη μέχρι την εξέλιξη του τόρνου ως τις μέρες μας, καθώς και στα είδη τόρνου που υπάρχουν ανάλογα με τις ανάγκες και στην χρησιμότητα του. Γίνεται αναφορά στο πώς ο τόρνος έχει συμβάλει στην εξέλιξη πολλών τεχνολογιών, όπως των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένος, κ.λπ. Ακολουθεί ανάλυση των βασικών μεταβλητών μεγεθών που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα της τórνευσης και στη συνέχεια αναλύεται πιο διεξοδικά η αυτοματοποίηση που εισάχθηκε στις εργαλειομηχανές μετά τα μέσα του 20^{ου} αιώνα. Η αυτοματοποίηση έφερε πολλές βελτιώσεις στην λειτουργία των εργαλειομηχανών και στην ασφάλεια των εργαζόμενων ατόμων σε αυτές, ενώ με την σειρά της εξέλιξε τα ήδη υπάρχοντα μέσα παραγωγής για να μπορέσουν να καλύψουν τις αυξημένες ανάγκες. Τα πλεονεκτήματα των ψηφιακά καθοδηγούμενων εργαλειομηχανών αναπτύσσονται στην επόμενη ενότητα, ενώ στην συνέχεια αναλύεται ο μηχανισμός της δημιουργίας των αποβλήτων από τις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, όπως η τórνευση. Τα μεγέθη που επηρεάζουν την μορφή και τις ιδιότητες των αποβλήτων είναι σημαντικά για την παρούσα εργασία, καθώς παίζουν καθοριστικό ρόλο και στην τελική τραχύτητα της επιφάνειας του κατεργασμένου τεμαχίου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η επιφανειακή τραχύτητα, σαν ένα μέγεθος βαρύνουσας σημασίας για την ικανοποίηση των αναγκών από την βιομηχανία των κατεργασιών στις μέρες μας. Περιγράφονται οι αιτίες για τη δημιουργία της τραχύτητας στις επιφάνειες, η ανάγκη για διαφορετικό βαθμό τραχύτητας ανάλογα με

την εκάστοτε εφαρμογή, και οι επιπτώσεις που υπάρχουν στις διάφορες περιπτώσεις. Για την περιγραφή της επιφανειακής τραχύτητας με μεγέθη χρησιμοποιούνται παράμετροι που συμβολίζουν με ακρίβεια τις μεταβολές που υφίσταται μια κατεργασμένη επιφάνεια κατά μια συγκεκριμένη διεύθυνση ή σε ένα συγκεκριμένο πεδίο μελέτης της. Οι παράμετροι αυτοί αναλύονται σημασιολογικά και πρακτικά, μαζί με εικόνες και αναφέρονται οι τομείς που χρησιμοποιούνται. Για τη μέτρηση της τραχύτητας, χρησιμοποιούνται ειδικά μετρητικά όργανα, τα προφιλόμετρα. Η αρχή λειτουργίας των προφιλόμετρων, ανάλογα με το εάν ανήκουν στα οπτικά προφιλόμετρα ή στα προφιλόμετρα επαφής περιγράφεται στη συνέχεια, μαζί με την αναφορά στις άλλες υποκατηγορίες που υπάρχουν και τις εφαρμογές τους. Η τελευταία ενότητα του δεύτερου κεφαλαίου είναι αφιερωμένη στα μικροσκόπια ηλεκτρονίων, και πιο συγκεκριμένα στο Μικροσκόπιο Σάρωσης Ηλεκτρονίων. Γίνεται και εδώ αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών του, όπως έγινε και για τα προφιλόμετρα.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται τα χαρακτηριστικά των υλικών που κατεργάστηκαν, τα χαρακτηριστικά του τόνου, του κοπτικού εργαλείου, του υγρού κοπής και τα μεγέθη που επιλέχθηκαν σαν μεταβλητές για την κατεργασία, μαζί με τις τιμές τους. Ακολουθούν οι μετρήσεις που έγιναν στο οπτικό προφιλόμετρο και στο Μικροσκόπιο Σάρωσης Ηλεκτρονίων, σε διαγράμματα και σε αντιπροσωπευτικές εικόνες. Τα συγκεκριμένα μηχανήματα δίνουν πολύ μεγάλο εύρος μελέτης με τις λεπτομέρειες που μπορούν να αναδείξουν, γι' αυτό και στα συμπεράσματα αναφέρεται ότι όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη κοπής που επιλέχθηκαν παίζουν ρόλο στην τραχύτητα της κατεργασίας. Συγκεκριμένα, η τραχύτητα μειώνεται κατά την αύξηση της ταχύτητας κατεργασίας και της μείωσης της πρόωσης του κοπτικού εργαλείου, όπως και αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία. Τα τελικά συμπεράσματα δίνουν νέες ιδέες σχετικά με την περαιτέρω μελέτη που μπορεί να γίνει για την επίδραση των ίδιων αλλά και άλλων μεγεθών στην επιστήμη της μηχανουργικής κατεργασίας, πράγμα που πάντα είναι θεμιτό λόγω της αέναης εξέλιξης που συντελείται παντού γύρω μας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πίνακας περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	vii
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ	xi
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	xii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ-ΤΟΡΝΟΣ-ΤΟΡΝΕΥΣΗ.....	5
1.1 ΤΟΡΝΕΥΣΗ	5
1.2 ΤΟΡΝΟΣ.....	8
1.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΟΡΝΩΝ	8
1.3.1 Ταξινόμηση με βάση την αυτοματοποίηση.....	8
1.3.2 Ταξινόμηση με βάση το μέγεθος.....	10
1.4 ΑΞΟΝΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ	12
1.5 ΕΙΔΗ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ.....	13
1.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ	14
1.7 C.N.C.....	16
1.7.1 Διάταξη και διαφορές μεταξύ συμβατικών και C.N.C. εργαλειομηχανών.	16
1.7.2 Διαδικασία κατεργασίας ενός τεμαχίου σε μια C.N.C. εργαλειομηχανή.	22
1.7.3 Πλεονεκτήματα από την χρήση C.N.C. εργαλειομηχανών.....	23
1.8 ΑΠΟΒΛΗΤΟ.....	25
1.8.1 Δημιουργία αποβλήτου κατά την τόννευση.....	25
1.8.2 Μορφή και θραύση του αποβλήτου	25
1.8.3 Απομάκρυνση αποβλήτων από την περιοχή κατεργασίας	27
1.8.4 Πλεονεκτήματα συνεχούς κοπής	27
1.8.5 Ασυνεχές απόβλητο	27
1.9 ΨΕΥΔΟΚΟΨΗ	29
1.9.1 Περιπτώσεις δημιουργίας της ψευδόκοψης	29

1.9.2 Αποτελέσματα της ψευδόκοψης στην κατεργασία.....	29
2. ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ.....	31
2.1 ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	31
2.2 ΑΙΤΙΕΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	31
2.3 ΤΟΜΕΙΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΕΙ Η ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ.....	31
2.4 ΑΝΤΙΚΤΥΠΟΣ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	32
2.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	32
2.6 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΔΙΕΘΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	35
2.7 ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΑΙΤΙΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΤΗΝ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ.....	37
3. ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	39
3.1 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (S.E.M.).....	39
3.1.1 Εισαγωγικά για το S.E.M.	39
3.1.2 Αρχή λειτουργίας του S.E.M.	39
3.1.3 Βασικά μέρη του S.E.M. και περιορισμοί με βάση την αρχή λειτουργίας του.....	40
3.1.4 Λειτουργία ενός S.E.M.....	41
3.1.5 Παρατηρήσεις για τη λειτουργία του S.E.M.	42
3.1.6 Εφαρμογές του S.E.M.	45
3.2 ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΟ.....	46
3.2.1 Ορισμός και κατηγορίες προφίλομέτρων.....	46
3.2.2 Προφίλόμετρο επαφής.....	47
3.2.3 Οπτικό Προφίλόμετρο.....	48
4. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	51
4.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	51
4.1.1 Ανοξείδωτος χάλυβας AISI-SAE 304.....	51
4.1.2. Κατασκευαστικός χάλυβας S235JR.....	52
4.1.3. Αρχιτεκτονικός ορείχαλκος UNS C38000.....	53
4.1.4 Αιτίες επιλογής των ανωτέρω υλικών.....	54
4.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ.....	54
4.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	57
4.4 ΕΠΙΛΟΓΗ Κ.Ε. ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ.....	57
4.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΙΜΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΟΠΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΙ ΤΟΝ ΟΡΕΙΧΑΛΚΟ.....	59
4.6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΦΑΣΕΟΛΟΓΙΟ.....	59

4.7 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ	61
4.7.1 Εύρος τιμών χαρακτηριστικών μεγεθών τórνευσης	61
4.8 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ΣΕ G-CODE	61
4.9 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΓΡΟΥ ΚΟΠΗΣ	61
4.10 ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	62
4.11 ΣΤΟΧΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΠΡΟΣ ΑΠΟΔΕΙΞΗ	62
5. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	64
5.1 ΟΠΤΙΚΟ ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΟ VEECO® WYKO NT1100.....	64
5.1.1 Μέθοδοι λειτουργίας	64
5.1.2 Διαδικασία συλλογής μετρήσεων τραχύτητας	66
5.1.3 Παράμετροι μετρήσεων	67
5.1.4 Επεξεργασία επιλογών απεικόνισης και φιλτραρίσματος	67
5.1.5 Διαγράμματα με παραμέτρους τραχύτητας	74
5.1.6. Παρατηρήσεις για τα διαγράμματα.....	78
5.1.7 Επεξεργασία των τιμών των διαγραμμάτων και νέες παρατηρήσεις	78
5.2 S.E.M. FEI™ Inspect F50.....	83
5.2.1 Χαρακτηριστικά	83
5.2.2. Χαρακτηρισμός των υλικών με χρήση του S.E.M. και σχολιασμός τους.....	86
6. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	94
6.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	94
6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	102
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	108
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Πίνακες Τιμών χαρακτηριστικών μεγεθών τórνευσης	108
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Πίνακες Τιμών παραμέτρων τραχύτητας.....	110

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

α = γωνία σύγκλισης

γ = γωνία αποβλήτου του κοπτικού εργαλείου

ε = βαθμός παραμόρφωσης

λ = λόγος του αριθμού στροφών περιστροφής της ατράκτου προς την ταχύτητα πρόωσης

τ = διατμητική δύναμη

a = βάθος κοπής

d = διάμετρος

f = πρόωση κοπτικού εργαλείου

n = αριθμός στροφών περιστροφής της ατράκτου του τόρνου

Q = ρυθμός αποβολής υλικού

r = γωνία κοπής κοπτικού εργαλείου

R_a = συντελεστής μέσης τραχύτητας της επιφάνειας

R_z = μέσος όρος των υψηλότερων κορφών της επιφάνειας

R_p = μήκος υψηλότερης κορφής της επιφάνειας

R_v = μήκος βαθύτερης κοιλάδας της επιφάνειας

R_q = μέση τετραγωνική ρίζα των διακυμάνσεων της επιφάνειας από μια γραμμή αναφοράς

R_t = απόσταση μεταξύ υψηλότερης κορφής και βαθύτερης κοιλάδας της επιφάνειας

S = ταχύτητα πρόωσης

V_c ή V_k = ταχύτητα κοπής

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

I.E.X.M.H = Ινστιτούτο Επιστημών Χημικής Μηχανικής
I.T.E. = Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Έρευνας
Κ.Ε. = Κοπτικό Εργαλείο
BS.E. = Backscattered Electron
B.U.E. = Built Up Edge
C.A.D. = Computer Aided Design
C.A.M. = Computer Aided Manufacturing
C.C.D. = Charge-Coupled Device
C.N.C. = Computer Numerical Control
D.I.C. = Differential Interference Contrast (microscopy)
D.N.C. = Direct Numerical Control
E.D.S. = Energy Dispersive Spectrometer
E.T.D. = Everhart – Thornley Detector
F.E.M. = Finite Element Method
G.E.D. = Gaseous Electron Detector
H.U.A.T. = Hot Ultrasonically Assisted Turning
L.E.D. = Light Emitting Diode
L.F.D. = Large Field Detector
M.I.T. = Massachusetts Institute of Technology
M.Q.L. = Minimum Quantity Lubrication
N.C. = Numerical Control
P.S.I. = Phase Shifting Interferometry
P.V.D. = Physical Vapor Deposition
RMS = Root Mean Square
S.E.M. = Scanning Electron Microscope
S.S.E.D. = Solid State Electron Detector
T.E.M. = Transmission Electron Microscope
TiAlN = Titanium Aluminium Nitride
U.A.T. = Ultrasonically Assisted Turning
UPS = Uninterruptible Power Supply
V.S.I. = Vertical Scanning Interferometry

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εφεύρεση του τόννου, η δημιουργία των υπόλοιπων μηχανουργικών κατεργασιών και η συνεισφορά τους στην εξέλιξη της τεχνολογίας συνολικά είναι από τα πιο σημαντικά επιτεύγματα που έχει καταφέρει η ανθρώπινη ύπαρξη. Η ικανότητα δημιουργίας ενός καινούργιου προϊόντος από μια απλή πρώτη ύλη ήταν και θα είναι πάντα κάτι που θα προχωρά ένα βήμα μπροστά την ανθρώπινη συνείδηση και την κατανόηση του σύμπαντος.

Ο τόννος είναι μια από τις πρώτες διατάξεις που έφτιαξε ο άνθρωπος για να μπορέσει να κατασκευάσει καινούργια αντικείμενα. Με τη χρήση αυτών που δημιουργούσε, βελτίωνε άλλους τομείς της καθημερινότητάς του και άρχισε να επιβάλλεται στη φύση. Η χειρωνακτική ενασχόληση του έδωσε νέες ιδέες, για νέα πράγματα που θα μπορούσε να επιτύχει, εξελίσσοντας τις ήδη υπάρχουσες τεχνικές. Όσο συνεχιζόταν η πρόοδος στην τεχνολογία των μηχανουργικών κατεργασιών, τόσο αναπτύσσονταν οι υπόλοιποι τομείς της μηχανικής. Οι απαιτήσεις για ανωτέρου επιπέδου εξαρτημάτων και μηχανών ανέβασαν τον πήχη και για τον τόννο.

Ο τόννος ξεκίνησε ως μια διάταξη που χρειαζόταν σχεδόν όλα τα άκρα του ανθρώπινου σώματος για να λειτουργήσει πλήρως και όσο περνούσε ο καιρός, τόσο πιο εύκολο ήταν για κάποιον να τη χειριστεί με λιγότερο κόπο. Από εκείνη την εποχή, φτάσαμε στον καιρό της κυριαρχίας των πλήρως αυτοματοποιημένων μηχανημάτων, των γραμμών παραγωγής που λειτουργούν χωρίς να συμμετέχει ο άνθρωπος, παρά μόνο στην επίβλεψη τους. Οι τόννοι και οι υπόλοιπες εργαλειομηχανές μας δίνουν πια τη δυνατότητα να επιτύχουμε πράγματα που δεν θα μπορούσαμε καν να φανταστούμε μέχρι πριν κάποια χρόνια. Η μελέτη λοιπόν της λειτουργίας και των χαρακτηριστικών στοιχείων που περιγράφουν τις κατεργασίες είναι βασική γνώση για έναν μηχανικό που θέλει να εξελίξει την ήδη υπάρχουσα τεχνολογία.

Η έρευνα επάνω στις μηχανουργικές κατεργασίες δίνει πολύτιμες πληροφορίες για πολλούς κλάδους της παραγωγής. Κάτι που φαντάζει απλό με την πρώτη ματιά, κρύβει πίσω του έναν ατελείωτο δρόμο προόδου.

Η μελέτη των χαρακτηριστικών μεγεθών κοπής είναι ένα από τα θέματα που πάντα έτυχε ενδιαφέροντος για τον κλάδο των μηχανουργικών κατεργασιών. Εξάλλου, η επιλογή των σωστών παραμέτρων για την κάθε ξεχωριστή εφαρμογή επηρεάζει άμεσα το κατασκευαστικό κόστος, το χρόνο διεκπεραίωσης της κατεργασίας, την άνεση και ασφάλεια των χειριστών των εργαλειομηχανών και την επίτευξη των ζητούμενων χαρακτηριστικών από το τελικό προϊόν.

Στην παρούσα Πτυχιακή Εργασία γίνεται μελέτη στην επιφάνεια μεταλλικών δοκιμίων που κατεργάστηκαν σε πλήρως αυτοματοποιημένο τόρνο με τη χρήση προφιλόμετρου που μετρά την τραχύτητα της επιφάνειας και μικροσκοπίου που χρησιμοποιεί ηλεκτρόνια για να δώσει στον χειριστή μια εικόνα της επιφάνειας σε μεγέθυνση νανομέτρου. Γίνεται προσπάθεια να κατανοηθεί και να αναλυθεί ο μηχανισμός δημιουργίας της τραχύτητας κατά την κατεργασία ενός τεμαχίου και να αναδειχθεί το πόσο σημαντική είναι η επιφανειακή τραχύτητα για τη μηχανική-και όχι μόνο-συμπεριφορά ενός τεμαχίου.

Ξεκινάμε αναγνωρίζοντας ότι ο μηχανισμός δημιουργίας της επιφανειακής τραχύτητας είναι μια πολύ σύνθετη έννοια και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της κατεργασίας που λαμβάνει χώρα, καθώς και από τις συνθήκες στις οποίες πραγματοποιείται [1]. Τα πιο σημαντικά μεγέθη που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα είναι η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου του τόρνου, η ταχύτητα μετακίνησης του κοπτικού εργαλείου, το σχήμα και το υλικό του κοπτικού εργαλείου, το βάθος μέσα στο οποίο θα εισχωρήσει κατά την αφαίρεση του υλικού που δεν θέλουμε, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού από το τεμάχιο, το είδος του υλικού και το σχήμα που θέλουμε να κατεργαστούμε.

Εκτός από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, υπάρχουν πολλές ακόμα που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα, γι' αυτό και η ολιστική μελέτη της τόννευσης αποτελεί πρωταρχικό μέλημα για τον κλάδο των κατασκευών. Έχει διαπιστωθεί πως δεν υπάρχει μόνο ένα συγκεκριμένο μοντέλο που μπορεί να περιγράψει με ακρίβεια μια μεγάλη γκάμα από περιπτώσεις τόννευσης, γι' αυτό και οι μελέτες γίνονται για συγκεκριμένες συνθήκες.

Οι ήδη υπάρχουσες μελέτες χρησιμοποιούν εργαλειομηχανές και μετρητικά όργανα σαν αυτά που αναλύονται και στην παρούσα Εργασία. Το οπτικό προφιλόμετρο και το S.E.M. λειτουργούν στηριζόμενα σε περίπλοκες αρχές λειτουργίας, οι οποίες αναλύονται πριν την αναφορά των μετρήσεων που έγιναν. Η χρήση τους απαιτεί προσοχή και εμπειρία από τον χρήστη, αλλά οι δυνατότητες που δίνουν για μια εις βάθος μελέτη βοηθούν στην πλήρη κατανόηση πολλών συμπεριφορών που δεν γίνονται εύκολα αντιληπτές χωρίς πρόσβαση σε μια μέθοδο οπτικής απεικόνισης. Ο αντίκτυπος των εφελκυστικών, θλιπτικών, καμπτικών και διατμητικών τάσεων και δυνάμεων δίνει στα δοκίμια την μορφή που επιθυμούμε.

Για την παρούσα Πτυχιακή Εργασία επιλέχθηκε η κατεργασία δοκιμίων από τρία διαφορετικά υλικά τα οποία συναντώνται σε πολλές εφαρμογές της καθημερινότητας. Τα υλικά αυτά είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας AISI-SAE 304, ο κατασκευαστικός χάλυβας S235JR και ο αρχιτεκτονικός ορείχαλκος UNS C38000. Παρότι η χρήση τους είναι ευρεία, ειδικά για τον ορείχαλκο δεν υπάρχει μεγάλο πλήθος ερευνών [2]. Γι' αυτό και επιλέχθηκε να μελετηθεί η διακύμανση της τραχύτητας που παρουσιάζουν τα δοκίμια και των τριών υλικών καθώς αλλάζουν κάθε φορά η ταχύτητα κοπής V_c και η πρόωση f . Σύμφωνα με τις μέχρι τώρα μελέτες, η καλύτερη τελική επιφάνεια επιτυγχάνεται σε γενικές γραμμές με τη μέγιστη ταχύτητα κοπής και την ελάχιστη πρόωση. Εξαιτίας αυτού, επιλέχθηκε να συγκριθούν οι τέσσερις πιο σημαντικοί παράμετροι που χαρακτηρίζουν την τραχύτητα με τον λόγο λ . Ο λόγος λ

αποτελεί το πηλίκo της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου του τóρνου προς την ταχύτητα μετακίνησης του κοπτικού εργαλείου. Μια τέτοια προσέγγιση δεν έχει γίνει σύμφωνα με τη βιβλιογραφική έρευνα που διεξήχθη πριν την έναρξη της Πτυχιακής Εργασίας.

Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν παρουσιάζονται με μια ποικιλία φωτογραφιών, σχημάτων, διαγραμμάτων και πινάκων, με σκοπό να είναι πιο εύκολη η κατανόηση από τον αναγνώστη και να δημιουργηθεί ενδιαφέρον για το μηχανισμό λειτουργίας των κατεργασιών. Η διάθεση εξάλλου για αναζήτηση και έρευνα είναι αυτή που οδηγεί στην πρόοδο και στο δρόμο της τεχνολογικής εξέλιξης, είτε στις πιο δύσκολες στιγμές του ανθρώπου (Εικόνα 0.1), είτε στις πιο λαμπρές σελίδες της ιστορίας του.



Εικόνα 0.1: Τόρνευση επάνω σε ειδικά διαμορφωμένο Willys MB σε πεδίο μάχης του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου (πηγή: 4th Australian Armored Brigade)

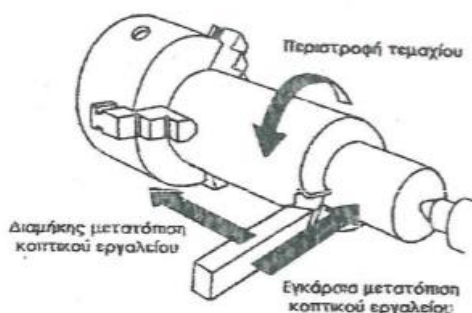
*Στην Ελένη, την οικογένεια μου,
τους φίλους μου και όσους με στήριξαν.*

Και σε όσους κάνουν δουλειά μυρμηγκιού...

1. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ-ΤΟΡΝΟΣ-ΤΟΡΝΕΥΣΗ

1.1 ΤΟΡΝΕΥΣΗ

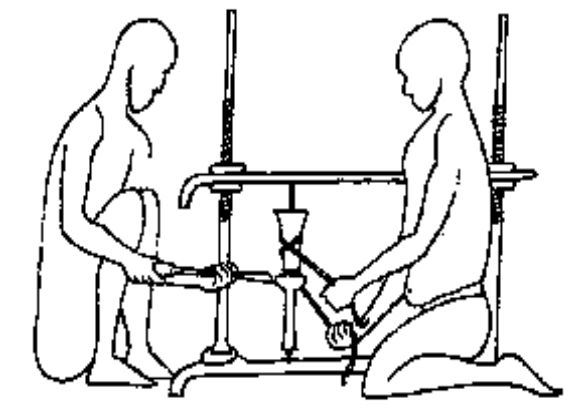
Τόρνευση ονομάζουμε την κατεργασία κοπής κατά την οποία ένα τεμάχιο με -συνήθως- κυκλική διατομή περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του και παράλληλα του αφαιρείται υλικό με τη χρήση ενός κοπτικού εργαλείου που είναι προσδεμένο σε μια εργαλειομηχανή [3],[4]. (Εικόνα 1.1)



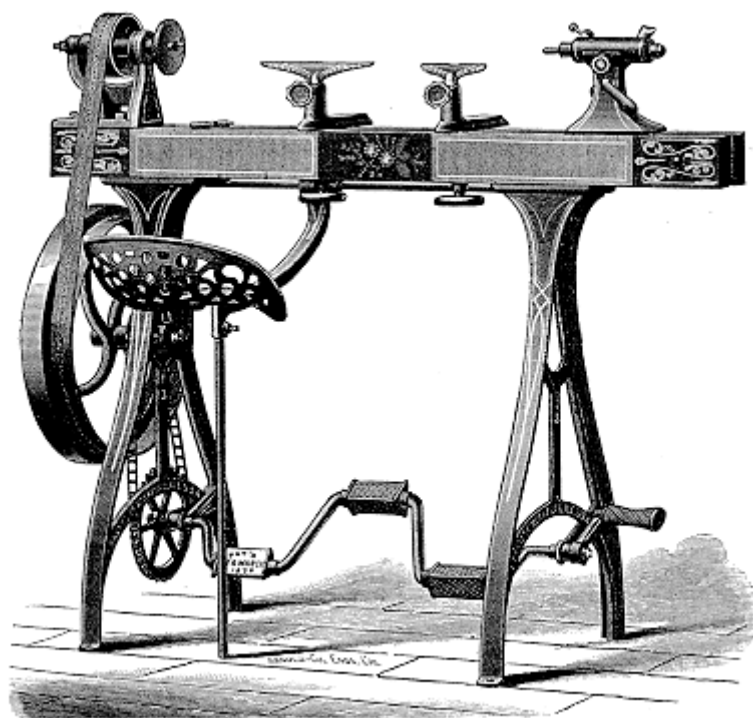
Εικόνα 1.1: Κινηματική αναπαράσταση της τόρνευσης(πηγή: Σημειώσεις στο μάθημα Μηχανολογικό Εργαστήριο II, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας)

Η τόρνευση είναι από τις πιο παλιές κατεργασίες κοπής που ανακαλύφθηκαν από τον άνθρωπο και συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό στην αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας, ειδικά κατά την περίοδο της Βιομηχανικής Επανάστασης [5],[6]. Ο τόρνος εξάλλου είναι ευρέως γνωστός σαν η πρώτη εργαλειομηχανή που κατασκευάστηκε, η ύπαρξη και η εξέλιξη της οποίας έφερε πρωτόγνωρες αλλαγές σε σχέση με το πώς λειτουργούσε η βιομηχανική παραγωγή παλαιότερα και στο πώς έχει εξελιχθεί η τελευταία μέχρι τώρα [7-10].

Ξεκίνησε αρχικά σε πολύ πρωτόγονες μορφές στους αρχαίους πολιτισμούς της Μεσογείου (Εικόνα 1.2) και εξελίχθηκε σιγά σιγά κατά τον Μεσαίωνα με την προσθήκη ποδοκίνητης και άλλων εξαρτημάτων [11]. (Εικόνα 1.3)



Εικόνα 1.2: Σχέδιο αρχαίας τοιχογραφίας που απεικονίζει τórνευση στην αρχαία Αίγυπτο το 300 π.Χ.



Εικόνα 1.3: Ποδοκίνητος τórνος της εποχής του Μεσαίωνα.

Στην περίοδο της Βιομηχανικής Επανάστασης ο τórνος συνδέθηκε μέσω αξόνων και ιμάντων με ατμοκινητήρες και νερόμυλους, αποκτώντας έτσι μεγαλύτερη ισχύ και κάνοντας πιο εύκολη και γρήγορη την κατεργασία εξαρτημάτων σε αυτόν. Με αυτές τις αλλαγές, ο τórνος απέκτησε τη μορφή που έχει μέχρι σήμερα. Οι ανάγκες για πιο στιβαρές εργαλειομηχανές και η εξέλιξη των υλικών και της κατεργασίας τους οδήγησε στην δημιουργία μεγαλύτερων και στιβαρότερων τórνων, κατασκευασμένων από ταχυχάλυβα [8].



Εικόνα 1.4: Τόρνος TOS SN 50 C (πηγή: Μανιουδάκης machines)

Το επόμενο βήμα ήταν η τοποθέτηση ηλεκτροκινητήρων για την περιστροφή των αξόνων που ορίζουν την κίνηση των κοπτικών εργαλείων, κάτι που έγινε μαζικά στις αρχές του 20^{ου} αιώνα [7],[12]. Οι ηλεκτροκινητήρες κράτησαν τον ρόλο τους για πολλά χρόνια, ακόμη και μέχρι την δεκαετία του 80'. (Εικόνα 1.4) Μετά το τέλος του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου και με συνεχή την ανάγκη για γρηγορότερη παραγωγή εξαρτημάτων με ακόμα πιο ακριβείς διαστάσεις, άρχισε η αντικατάσταση του ελέγχου των αξόνων του τόρνου από σερβομηχανισμούς μέσω του αριθμητικού ελέγχου (Numerical Control – N.C.). Η σύνδεση των σερβομηχανισμών με τους υπολογιστές δημιούργησε τον αριθμητικό έλεγχο μέσω του υπολογιστή (Computer Numerical Control – C.N.C.), πράγμα που εκτίναξε στα ύψη την χρηστικότητα και την πολυπλοκότητα των εξαρτημάτων που μπορούν να παραχθούν.

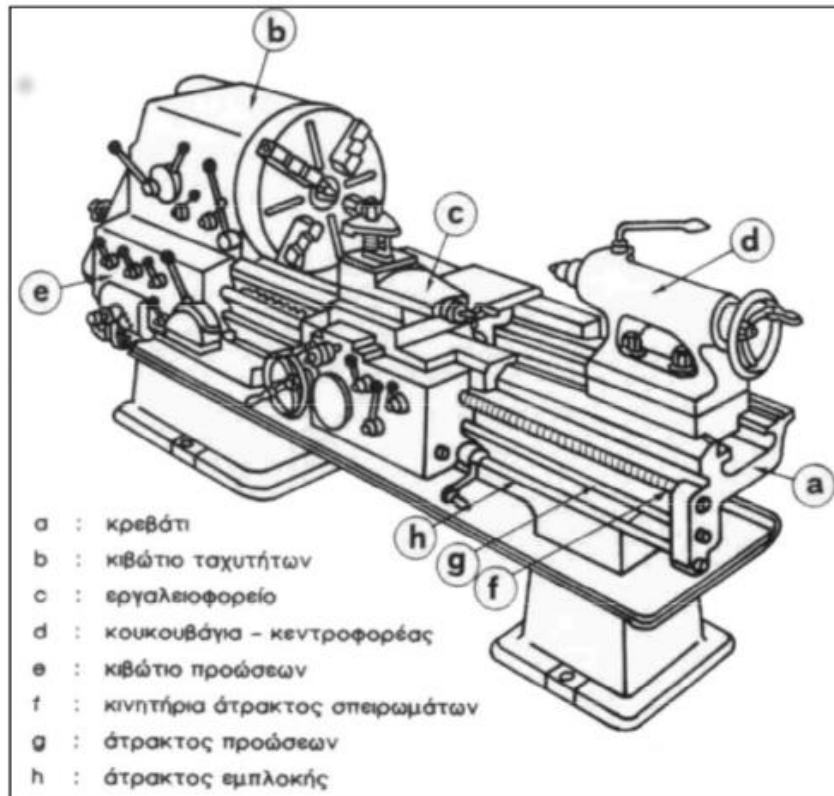
Η τórνευση πλεονεκτεί έναντι πολλών άλλων κατεργασιών, καθώς είναι πιο εύκολο να δημιουργηθούν τεμάχια:

- με πολύπλοκη γεωμετρία
- σε μεγάλους αριθμούς παραγωγής
- που υπερέχουν σε ακρίβεια τελικών διαστάσεων-σε σύγκριση π.χ. με τεμάχια που έχουν παραχθεί από καλούπια
- που πληρούν τις απαιτήσεις που υπάρχουν λόγω υψηλών ποιοτικών κριτηρίων.

Για αυτούς και για πολλούς άλλους λόγους, η τórνευση είναι η κατεργασία που προτιμάται για περίπου το 40% των κατεργασιών κοπής μετάλλων.

1.2 ΤΟΡΝΟΣ

Ο τórνος ανήκει στην κατηγορία των εργαλειομηχανών που κατεργάζεται τεμάχια αφαιρώντας υλικό από αυτά. Τα πιο βασικά εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται ο τórνος παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 1.5):



Εικόνα 1.5: Σχέδιο συμβατικού τórνου και των επιμέρους εξαρτημάτων του (πηγή: Σημειώσεις Εργαστηρίου Μικροκοπής & Κατασκευαστικής Προσομοίωσης, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης)

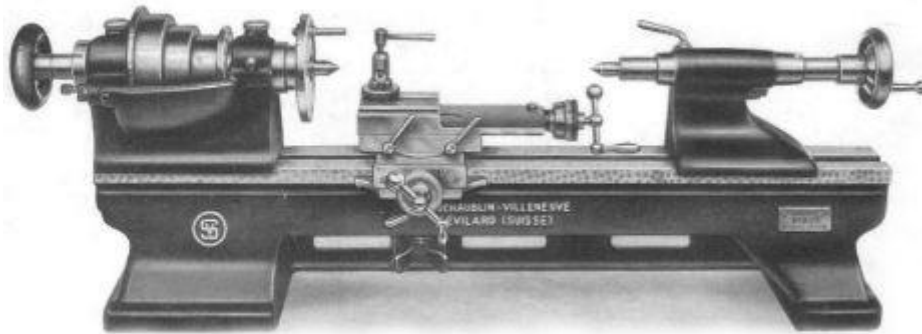
1.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΟΡΝΩΝ

1.3.1 Ταξινόμηση με βάση την αυτοματοποίηση.

Οι τórνοι, όπως και πολλές άλλες εργαλειομηχανές, είναι από τα πρώτα μηχανήματα στα οποία εισάχθηκε η αυτοματοποίηση. Η εξέλιξη σε αυτόν τον τομέα έκανε τους συμβατικούς τórνους-και γενικά όλες τις συμβατικές εργαλειομηχανές-να αποκτούν αυτόματες κινήσεις στους άξονες τους αρχικά και πλήρως αυτοματοποιημένο έλεγχο στην συνέχεια [3]. Με βάση αυτά, οι τórνοι χωρίζονται σε

κατηγορίες, ανάλογα με τον βαθμό στον οποίο έχουν αυτοματοποιημένη λειτουργία και δεν χρειάζεται η συμμετοχή του χειριστή. Αυτές είναι:

- Απλοί συμβατικοί τόρνοι, όπου ο χειριστής δίνει με το χέρι τις βοηθητικές κινήσεις-όπως αυτές στον άξονα κατεύθυνσης του Κ.Ε. -και κάνει όλες τις απαραίτητες ρυθμίσεις. (Εικόνα 1.6)



Εικόνα 1.6: Απλός τόρνος Schaublin SV70 (πηγή: Schaublin Machines SA catalogue 1943)

- Ημιαυτόματοι συμβατικοί τόρνοι, όπου συνήθως η αυτοματοποίηση έγκειται στην ύπαρξη εξαρτήματος γρήγορης εναλλαγής μεταξύ διάφορων Κ.Ε. και ονομάζεται ρεβόλβερ-από την αγγλική λέξη revolve (revolver) που σημαίνει περιστροφή (περίστροφο).
- Τόρνοι με αυτόματο μηχανικό προγραμματισμό, όπου οι καθορισμένες κινήσεις γίνονται με την λειτουργία έκκεντρων αξόνων.
- Πλήρως αυτοματοποιημένοι τόρνοι μέσω συστήματος ψηφιακού ελέγχου (C.N.C. , Computer Numerical Control). Εδώ ο χειριστής αναλαμβάνει συνήθως μόνο τον προγραμματισμό της εργαλειομηχανής και την πρόσδεση/αφαίρεση του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή. Υπάρχει σε πολλές περιπτώσεις γρήγορη εναλλαγή μεταξύ Κ.Ε. μέσω ενός αυτόματου μύλου, σαν αυτόν που έχουν οι ρεβόλβερ.

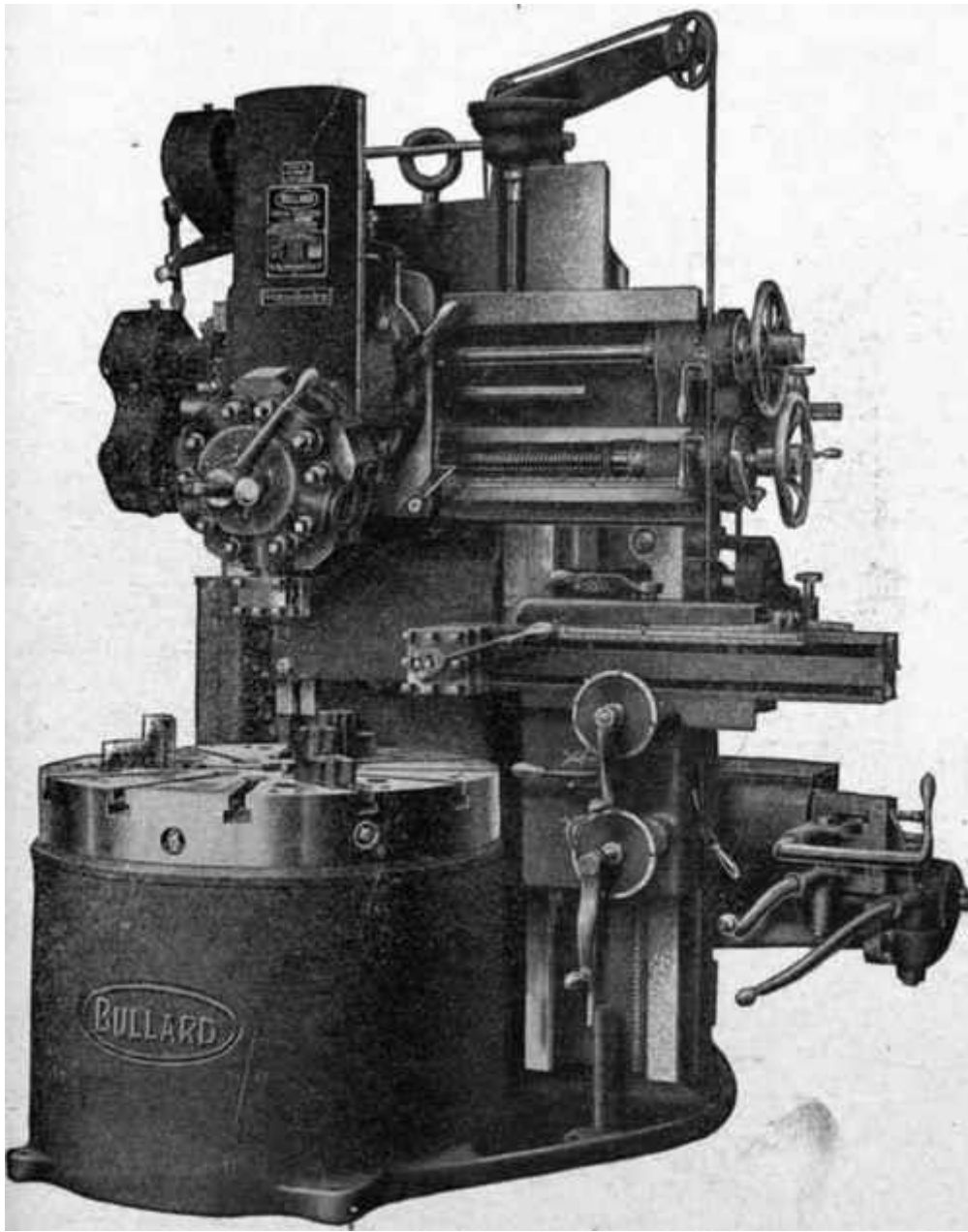


Εικόνα 1.7: C.N.C. Κέντρο Κατεργασίας 5 αξόνων Okuma MU500VA (πηγή: Okuma Corporation)

1.3.2 Ταξινόμηση με βάση το μέγεθος.

Λόγω των πολλών και διαφορετικών αναγκών που υπάρχουν, οι τόρνοι που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας, ανάλογα με το μέγεθός τους και το βάρος τους, χωρίζονται στις κάτωθι κατηγορίες [12]:

- Τόρνοι ωρολογοποιών/κοσμηματοποιών, οι οποίοι είναι πολύ μικροί σε μέγεθος και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή εξαιρετικά μικρών εξαρτημάτων για ρολόγια και άλλα παρόμοια αντικείμενα.
- Τόρνοι γενικής χρήσης, όπου μπορούν να γίνουν όλες σχεδόν οι κατηγορίες τórνευσης.
- Τόρνοι βαρέος τύπου, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για μεγάλα τεμάχια όπως π.χ. στροφαλοφόρους άξονες κινητήρων πλοίων.
- Μετωπικοί τόρνοι, για τεμάχια με μικρό πάχος και μεγάλη διάμετρο.

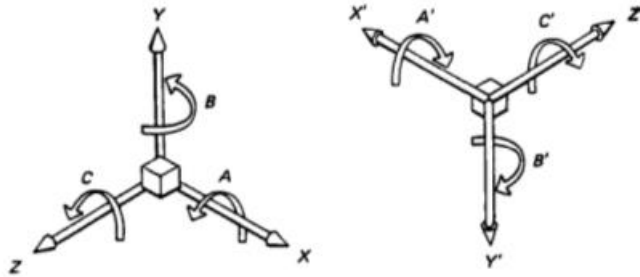


Εικόνα 1.8: Κατακόρυφος τόρνος Bullard (πηγή: Bullard Machine Tool Company, Bridgeport, Connecticut)

- Κατακόρυφοι τόρνοι, για κατεργασίες όπου το μέγεθος των τεμαχίων που θα κατεργαστούν δεν επιτρέπει άλλου είδους τοποθέτηση και υπάρχει ανάγκη για γρήγορη εναλλαγή πολλών κοπτικών εργαλείων [8]. (Εικόνα 1.8)

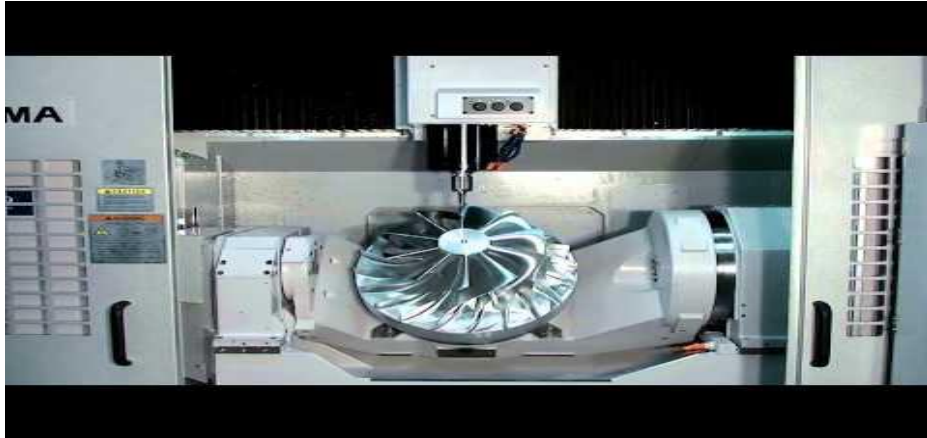
Είναι δηλαδή εμφανές ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η μέγιστη διάμετρος του τεμαχίου που μπορεί να συγκρατήσει ο τόρνος στους σφιγκτήρες του, καθώς και το μήκος του κρεβατιού του τόρνου παίζουν μεγάλο ρόλο. Άλλοι παράγοντες είναι η μέγιστη ισχύς που έχει ο κινητήρας του κύριου άξονα, το εύρος των στροφών περιστροφής και η στιβαρότητα.

1.4 ΑΞΟΝΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ



Εικόνα 1.9: Άξονες κίνησης και περιστροφής για εργαλειομηχανές

Ο απλός συμβατικός τόννος ξεκίνησε με τη δυνατότητα κίνησης του Κ.Ε. σε δυο μόνο άξονες –στον διαμήκη και στον ακτινικό, Z και X αντίστοιχα και την περιστροφική κίνηση της ατράκτου κατά τον άξονα C -περιστροφή δηλαδή γύρω από τον άξονα Z της ατράκτου [13]. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας ελέγχου της κίνησης σε κάθε άξονα και τις αυξημένες ανάγκες, δημιουργήθηκαν αρχικά τόννοι με πλήρη δυνατότητα κίνησης αρχικά σε τρεις και στην συνέχεια σε περισσότερους άξονες. (Εικόνα 1.9) Κλασικά παραδείγματα είναι οι σύγχρονοι C.N.C. τόννοι που αναλύονται στη συνέχεια. Η άτρακτος πολλές φορές σε τέτοιες κατασκευές βρίσκεται σε διαφορετική θέση από ότι σε άλλες και είναι στο δεξί χέρι του χειριστή ή αλλού, με κατεύθυνση πολλές φορές που σχηματίζει οξεία και όχι ορθή γωνία με το έδαφος. Η κλίση αυτή κάνει πιο εύκολο να απομακρυνθούν τα γρέζια από την περιοχή της κατεργασίας, χρησιμοποιώντας απλά την βαρύτητα. (Εικόνα 1.10) Πολλές φορές υπάρχει πάντρεμα μεταξύ του τόννου και άλλων εργαλειομηχανών, όπως η φρέζα, κ.α. Αυτό δημιούργησε τα λεγόμενα Κέντρα Κατεργασίας (Machining Center), όπου συνδυάζονται τα πλεονεκτήματα της κάθε εργαλειομηχανής και η δυνατότητα κίνησης σε πολλούς άξονες, φτάνοντας σε πολλές περιπτώσεις τους έξι άξονες κατεργασίας για εργαλειομηχανές εμπορίου που πωλούνται μαζικά και σε πολύ περισσότερους για βιομηχανικές εργαλειομηχανές ειδικών κατασκευών. (Εικόνα 1.7)

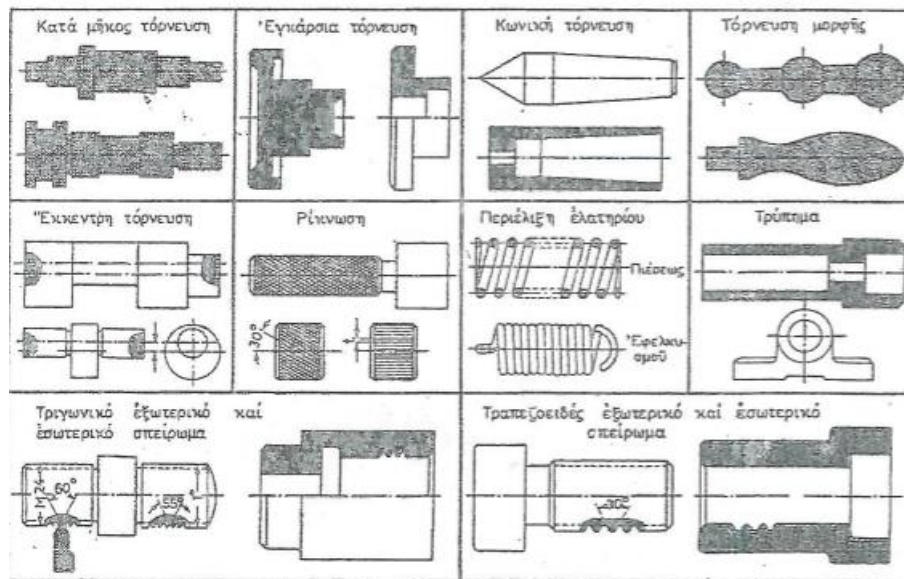


Εικόνα 1.10: Κάθετο Κέντρο Κατεργασίας Okuma MU-500VA 5 αξόνων. Η κλίση της τράπεζας βοηθά στην απομάκρυνση των αποβλήτων. (πηγή: Okuma Corporation)

1.5 ΕΙΔΗ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ

Οι κατεργασίες που μπορούν να γίνουν σε έναν τόρνο [3-5] είναι οι ακόλουθες (Εικόνα 1.11) :

1. Τόρνευση εσωτερικών και εξωτερικών κυλινδρικών επιφανειών.
2. Κωνική τόρνευση.
3. Κατεργασία μορφής επιφάνειας/προφίλ.
4. Τόρνευση κατά τον έκκεντρο άξονα (π.χ. στροφαλοφόροι άξονες).
5. Τόρνευση επίπεδων επιφανειών (πολλές φορές κατά τον εγκάρσιο άξονα).
6. Λείανση εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας.
7. Κατεργασία κοπής εξωτερικών (αρσενικών) και εσωτερικών (θηλυκών) σπειρωμάτων.
8. Περιέλιξη ελατηρίων.
9. Διάνοιξη αυλακώσεων και αποκοπή κομματιού.
10. Ρικνώματα (κανελάζ).
11. Κατεργασία διάνοιξης οπής (διαμπερής ή «τυφλή»).
12. Τόρνευση σφαιρικών επιφανειών (με χρήση ιδιοσυσκευής).



Εικόνα 1.11: Είδη τόνευσης (πηγή: Σημειώσεις στο μάθημα Μηχανολογικό Εργαστήριο II, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας)

Ανάλογα λοιπόν με την κατεργασία, επιλέγουμε και το κατάλληλο εργαλείο. Τα πιο συνηθισμένα εργαλεία είναι αυτά της κοπής, τα οποία διαφέρουν ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το τεμάχιο μας και τις ιδιότητες του, την κατεργασία που θέλουμε να εκτελέσουμε, τον χρόνο μέσα στον οποίο θέλουμε να έχει περατωθεί η κατεργασία, το κόστος, κ.λπ.

1.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ

Τα πιο χαρακτηριστικά στοιχεία κοπής κατά την κατεργασία της τόνευσης είναι [3-6]:

- Η ταχύτητα κοπής V_c ή V_k
- Ο αριθμός περιστροφών της ατράκτου ανά λεπτό n
- Η πρόωση f ή s
- Η ταχύτητα πρόωσης S
- Το βάθος κοπής a
- Ο ρυθμός αποβολής υλικού Q
- Ο συντελεστής μέσης τραχύτητας της επιφάνειας Ra
- Η γωνία αποβλήτου γ

Πιο αναλυτικά:

- Η ταχύτητα κοπής V_c [14] εκφράζει την ταχύτητα που έχει η ακμή του Κ.Ε. κάθε στιγμή σε σχέση με το τεμάχιο. Μετράται σε m/min και υπολογίζεται από τον τύπο

$$V_c = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad (1.1)$$

όπου: d = η διάμετρος του κατεργαζόμενου τεμαχίου σε mm

n = ο αριθμός των στροφών περιστροφής της ατράκτου του τόνου

- Η πρόωση του κοπτικού εργαλείου συμβολίζεται με f ή s , μετράται σε mm/rev και [15] εκφράζει τη μετακίνηση του Κ.Ε. σε σχέση με το τεμάχιο για κάθε περιστροφή της ατράκτου του τόνου.
- Ο αριθμός των στροφών περιστροφής του τεμαχίου που είναι προσδεμένο στους σφιγκτήρες του τόνου συμβολίζεται με n και υποδηλώνει τις στροφές με τις οποίες περιστρέφεται το τεμάχιο σε διάρκεια ενός λεπτού. Μονάδα μέτρησης του n είναι rev/min.
- Η ταχύτητα πρόωσης S είναι αποτέλεσμα του γινομένου $s * n$ και εκφράζει την ταχύτητα με την οποία κινείται το Κ.Ε σε σχέση με το τεμάχιο κατά την συνεχή πρόωση του Κ.Ε. Είναι απόρροια της κίνησης του άξονα πρόωσης του τόνου και μετριέται συνήθως σε mm/min.
- Το βάθος κοπής a εκφράζει το πόσο εισχωρεί το Κ.Ε. μέσα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και μετράται σε mm.
- Ο ρυθμός αποβολής υλικού Q είναι πολύ χρήσιμος για να υπολογίσουμε την ποσότητα των αποβλήτων -γνωστά και ως γρέζια- θα παράγει η κατεργασία μας. Η ποσότητα μας δίνεται σε μονάδες όγκου ως προς τον χρόνο από τον τύπο: $Q = V_c * a * f$
- Ένας πολύ σημαντικός δείκτης για την ποιότητα της κατεργασίας είναι ο δείκτης R_a . Είναι γνωστός σαν αριθμητικός μέσος όρος των απόλυτων τιμών της τραχύτητας μιας επιφάνειας και είναι ίσως το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μέγεθος για τον προσδιορισμό της τραχύτητας. (Μπορεί να δοθεί προσεγγιστικά από τον εμπειρικό τύπο: $R_a = f^2 * 50/r$, ή $R_a = f^2 * 32 * r$, όπου r η ακτίνα της γωνίας κοπής της ακμής του Κ.Ε.
- Η γωνία αποβλήτου γ είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κάθετο που διέρχεται από το σημείο κοπής του Κ.Ε. και της πρόσοψης του. Είναι μια καθοριστική παράμετρος για το απόβλητο που θα σχηματιστεί και τον έλεγχο της κοπής. Όσο σκληρότερο είναι το υλικό του υπό κατεργασία κομματιού, τόσο μικρότερη πρέπει να είναι η γωνία απόβλητου. Σε μεγάλες ταχύτητες κοπής, η γωνία απόβλητου είναι αρνητική. Ο λόγος για τα παραπάνω είναι ότι οι δυνάμεις κοπής μειώνονται με την αύξηση της γωνίας αποβλήτου.

1.7 C.N.C.

Οι εξελίξεις στη ψηφιακή τεχνολογία που συντελέστηκαν με την εφεύρεση των πρώτων υπολογιστών, η πρόοδος στην τεχνολογία των υλικών και οι απαιτήσεις που έπρεπε να καλυφθούν- π.χ. εξαρτήματα πολεμικών αεροσκαφών μετά τον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο-οδήγησαν στην αναζήτηση μεθόδων που θα έκαναν δυνατή την παραγωγή πολλών εξαρτημάτων ανώτερης ποιότητας, σε λιγότερο χρόνο, με μικρότερο κόστος και κόπο [16]. Είναι πολύ γνωστή η εξέλιξη που διαδραματίστηκε στις Η.Π.Α. στις αρχές της δεκαετίας του 50' λόγω της ανάγκης που είχε η Πολεμική της Αεροπορία για την κατασκευή πολυπλοκότερων εξαρτημάτων για τα νέα αεροσκάφη που διέθεταν αεριωθούμενο κινητήρα(jet). Μιας και τα περισσότερα εξαρτήματα από αυτά κατασκευάζονταν σε φρέζες, η Πολεμική Αεροπορία των Η.Π.Α. επιδότησε το Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (Massachusetts Institute of Technology – M.I.T.) για να διεξάγει έρευνα επάνω στο αντικείμενο. Στηριγμένο επάνω σε κάποιες ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες που είχαν εφευρεθεί από τον John T. Parsons, το M.I.T. τροποποίησε μια φρέζα με δυνατότητα κίνησης και στους τρεις άξονες. Η κίνηση στον κάθε άξονα έγινε δυνατή με την προσθήκη σερβομηχανισμών. Ο προγραμματισμός για την μετατόπιση του κάθε άξονα της εργαλειομηχανής γινόταν μέσω διάτρητης ταινίας, ένα αναλογικό μέσο εισαγωγής εντολών που χρησιμοποιούταν κατά κόρον εκείνη την εποχή σε τέτοιες διατάξεις με σερβομηχανισμούς. Αυτό που εισήχθη δηλαδή είναι ο έλεγχος των μετατοπίσεων του κάθε άξονα με την χρήση του αριθμητικού ελέγχου (Numerical Control – N.C.), δηλαδή με σύμβολα, αριθμούς και γράμματα. Η διάτρητη ταινία αντικαταστάθηκε σταδιακά από, αρχικά, αναλογικούς και στην συνέχεια ψηφιακούς υπολογιστές (Computerized Numerical Control – C.N.C.), δημιουργώντας έτσι τις σύγχρονες εργαλειομηχανές ψηφιακού ελέγχου όπως τις γνωρίζουμε σήμερα. Όλη η προαναφερθείσα εξέλιξη επαναστατικοποίησε την τεχνολογία των κατεργασιών και εφαρμόστηκε σε όλων των ειδών τις εργαλειομηχανές - τόννος, φρέζα, στράντζα, ψαλίδι, ηλεκτροδιάβρωση, τρυπάνι, κουρμπαδόρος, κοπή με λέιζερ, κοπή με plasma, συγκολλήσεις, πρέσα, τριβεία, λειαντικές μηχανές και άλλα πολλά.

1.7.1 Διάταξη και διαφορές μεταξύ συμβατικών και C.N.C. εργαλειομηχανών.

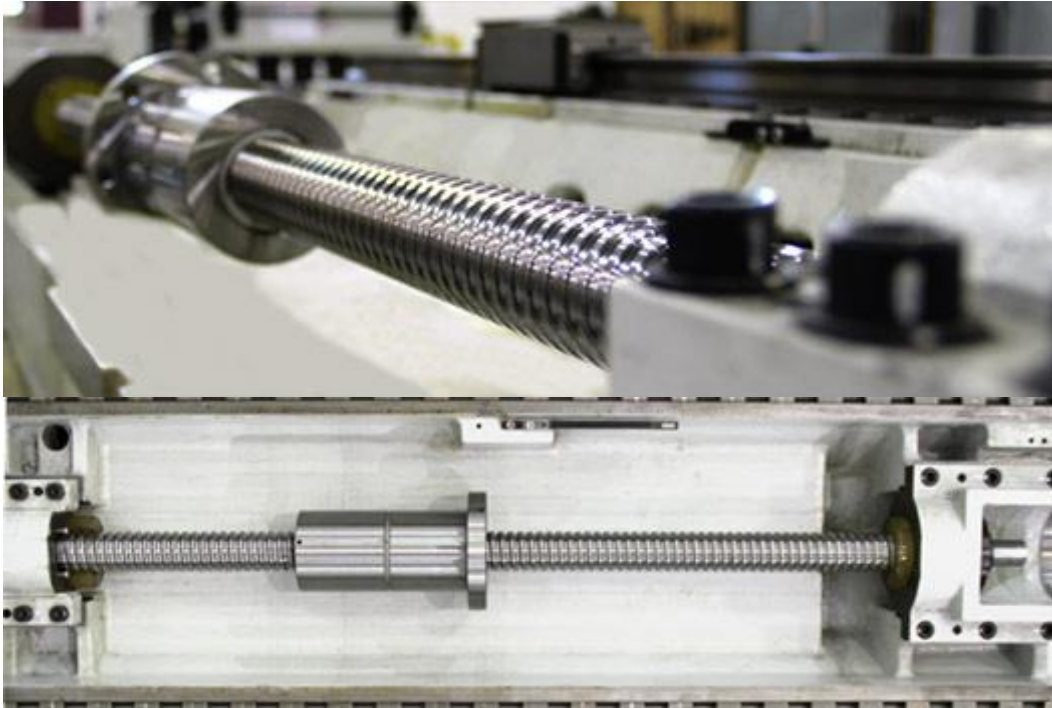
Μια C.N.C. μηχανή περιλαμβάνει τα ίδια βασικά μέρη όπως μια συμβατική και έχει επιπρόσθετα προσαρμοσμένο έναν μικροϋπολογιστή που έχει τον ελεγκτικό ρόλο για την μηχανή. Ο έλεγχος γίνεται από τον χειριστή μέσω μιας κονσόλας παρόμοιας με ένα συνηθισμένο πληκτρολόγιο.



Εικόνα 1.12: Βασικά μέρη C.N.C. τόνου κεκλιμένης διαμόρφωσης, χωρίς το κουβούκλιο ασφαλείας. Διακρίνονται τα γραμμικά ρουλεμάν για την κίνηση κατά μήκος των αξόνων. (πηγή: HPC Services LTD)

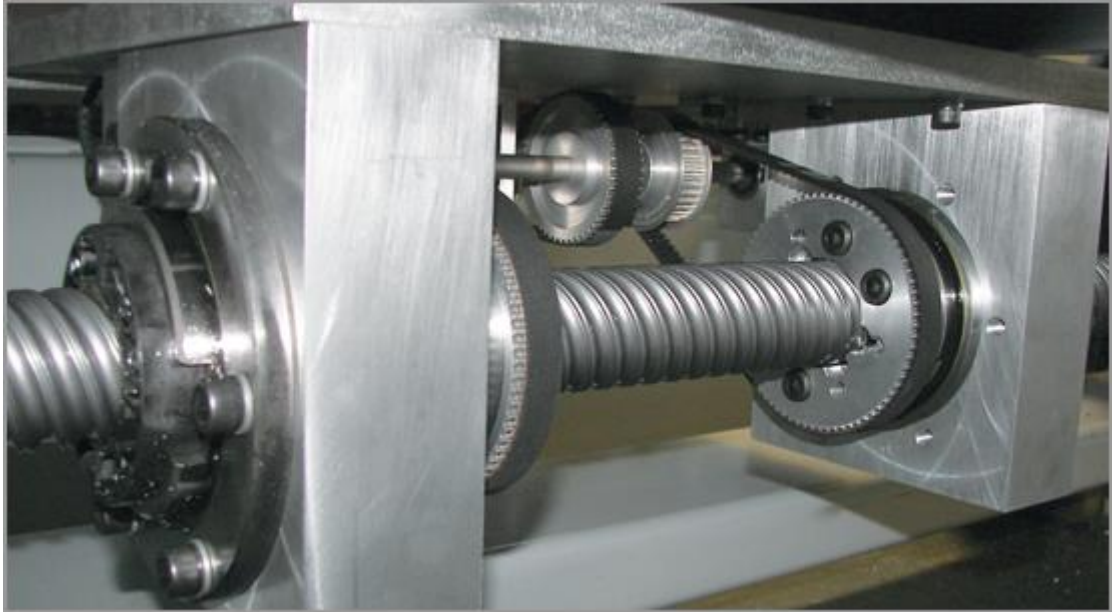
Λόγω των αυξημένων απαιτήσεων για τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος και των πολύ ισχυρότερων δυνάμεων και φορτίων που ασκούνται στα επιμέρους μέρη μιας C.N.C. εργαλειομηχανής σε σχέση με μια συμβατική, υπάρχουν αλλαγές στην δομή της κατασκευής και στα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται:

- Οι C.N.C. έχουν πολύ πιο στιβαρή κατασκευή σε σχέση με τις συμβατικές εργαλειομηχανές, για να υποστηρίξουν τα πολύ υψηλότερα στροφικά φορτία που δημιουργούνται από τις βαρέος τύπου κοπές. Όλα τους τα εξαρτήματα έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί με γνώμονα το προαναφερθέν, κάτι που γίνεται εμφανές εάν παρατηρήσουμε τους οδηγούς και τις ατράκτους που χρησιμοποιούνται [17].



Εικόνα 1.13: Ball screw εργαλειομηχανής C.N.C. (πηγή: Hurco Companies Inc.)

- Στις συμβατικές εργαλειομηχανές, γίνεται χρήση τραπεζοειδών κοχλιών κινήσεως (lead screw) για να μετατρέπουν την περιστροφική κίνηση των κινητήρων που περιστρέφουν τους άξονες σε ευθύγραμμη [18]. Για να βελτιωθεί η διαστασιολογική ακρίβεια των τεμαχίων που κατεργάζονται, οι κοχλίες αυτοί έχουν αντικατασταθεί από γραμμικά έδρανα (ball lead screw). (Εικόνα 1.12) Σε αυτά, ρουλεμάν κυλιόνται επάνω στο σπείρωμα ενός άξονα και η διάταξη λειτουργεί σαν κοχλίας ακριβείας. (Εικόνα 1.13)
 - Η τριβή ολίσθησης που υπάρχει στους τραπεζοειδείς έχει μετατραπεί σε τριβή κύλισης, αυξάνοντας έτσι την διάρκεια ζωής του εξαρτήματος και μειώνοντας τον χρόνο και το κόστος για συντήρηση, καθώς και τις ανάγκες για λίπανση.
 - Τα γραμμικά ρουλεμάν έχουν 90% μηχανική απόδοση σε σχέση με ένα 20-25% που μπορεί να έχει ένας τραπεζοειδής κοχλίας τύπου Acme, για το ίδιο μέγεθος και διάταξη.
 - Απόρροια των παραπάνω είναι η δραστικά μικρότερη ανάγκη για ισχύ από τον κινητήρα περιστροφής του άξονα. (Εικόνα 1.14)



Εικόνα 1.14: Διάταξη ball-nut (πηγή: Stock Drive Products/Stirling Instrument)

- Στους τραπεζοειδείς κοχλίες παρατηρείται πολλές φορές το φαινόμενο της αναπήδησης(backlash) λόγω των ανοχών μεταξύ των εξαρτημάτων του μηχανισμού τους. Το φαινόμενο αυτό εξαλείφθηκε στα γραμμικά έδρανα, καθώς το σπείρωμα μέσα στο οποίο κυλιόνται οι σφαίρες είναι πολύ πιο ακριβές διαστασιολογικά και η σχεδίαση της διάταξης έχει φροντίσει να υπάρχει προφόρτιση (preload) αρκετή έτσι ώστε να μην υπάρχει αναπήδηση.
- Η άτρακτος και οι οδηγόδρομοι (slide ways) οδηγούνται από βηματικούς κινητήρες (stepper motor) σε περιπτώσεις όπου δεν χρειάζονται μεγάλα ποσά ισχύος-μικρού μεγέθους εργαλειομηχανές- ή από σερβοκινητήρες στις υπόλοιπες περιπτώσεις [19]. (Εικόνα 1.15) Με βάση την αρχή λειτουργίας τους, και οι δύο ελέγχουν συνεχώς τις κινήσεις που εκτελούνται με μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα, με τους σερβοκινητήρες να πλεονεκτούν λόγω της χρήσης τους σε συστήματα κλειστού βρόγχου(closed loop system).



Εικόνα 1.15: C.N.C. φρέζα για κατεργασίες ξύλου. Διακρίνεται ο σερβοκινητήρας.

- Ο χώρος μέσα στον οποίο κινείται η άτρακτος και τα Κ.Ε. περιβάλλεται από ενισχυμένα τοιχώματα και όλη η κατασκευή είναι κλειστού τύπου. Η είσοδος για το δέσιμο και τις λοιπές διεργασίες που χρειάζεται να κάνει ο χειριστής κατά την ρύθμιση της μηχανής γίνεται από αυτόματες πόρτες ασφαλείας, (Εικόνα 1.16) οι οποίες είναι ενισχυμένες για να αντέχουν κάποια πιθανή σύγκρουση με ένα τεμάχιο που δεν είχε συγκρατηθεί σωστά ή με κάποιο άλλο εξάρτημα που εκσφενδονίστηκε λόγω λάθος προγραμματισμού και σύγκρουσης. Οι πόρτες επίσης αποτρέπουν την έναρξη της διαδικασίας εάν δεν έχουν κλείσει πλήρως, ενώ υπάρχει και εδώ-όπως και στις υπόλοιπες εργαλειομηχανές- γενικός διακόπτης ασφαλείας που νεκρώνει όλες τις κινήσεις σε περίπτωση ανάγκης.



Εικόνα 1.16: Ο C.N.C. τόνος Haas SL 20 του Μ.Υ.Ε.Δ.

- Υπάρχει προσαρτημένη στην εργαλειομηχανή μια οθόνη ελέγχου, στην οποία εμφανίζεται το πρόγραμμα σε μορφή G-code (G κώδικας) -η μόνη γλώσσα που μπορεί να καταλάβει η μηχανή συνήθως. Μέσω των πλήκτρων της μπορεί να εμφανιστεί σε γράφημα η διαδρομή που θα ακολουθήσουν τα Κ.Ε. για να κατεργαστούν το τεμάχιο, να γίνουν μετατροπές στο πρόγραμμα ή να γραφτεί ένα καινούργιο [20]. Το τελευταίο συνήθως δεν συμβαίνει, διότι το επιθυμητό τεμάχιο έχει πρώτα σχεδιαστεί και μετατραπεί σε γλώσσα G-code με την χρήση λογισμικών C.A.D. (Computer Aided Design) και C.A.M. (Computer Aided Manufacturing) αντίστοιχα και στην συνέχεια φορτώνεται έτοιμο στην μνήμη του επεξεργαστή της εργαλειομηχανής. Εκμεταλλευόμαστε έτσι τον περισσότερο ενεργό χρόνο κατά τον οποίο μπορεί η εργαλειομηχανή να βρίσκεται σε λειτουργία και βελτιώνουμε έτσι την παραγωγικότητα.
- Οθόνη μπορεί να προσαρτηθεί και σε μια συμβατική εργαλειομηχανή, αυτή όμως συνήθως έχει απλά την δυνατότητα να εμφανίζει την ακριβή θέση του Κ.Ε. και να υποβοηθά τον χρήστη με μετρήσεις. Δεν δίνει δηλαδή δυνατότητες αυτοματοποίησης. Για να γίνει κάτι τέτοιο, χρειάζεται να γίνουν μεγάλες μετατροπές πολλές φορές, οι οποίες θέλουν έρευνα, γνώση και εμπειρία για να μην υπάρχει ανεπιθύμητη κατάληξη- ζημιά, περιπτή επένδυση που δεν αποδίδει, κ.α. Σίγουρο είναι πάντως ότι, ακόμα και έτσι, οι συμβατικές εργαλειομηχανές δεν γίνεται να πλησιάσουν αρκετά το υψηλό επίπεδο των σύγχρονων C.N.C. εργαλειομηχανών.
- Οι κινήσεις σε μια C.N.C. εργαλειομηχανή γίνονται με την χρήση κατάλληλων υδροπνευματικών διατάξεων, ενώ σε μερικές περιπτώσεις, μπορούμε να

συναντήσουμε και πιεζοηλεκτρικούς μηχανισμούς -για πολύ μικρών διαστάσεων εργαλειομηχανές και τεμάχια. Η άτρακτος επίσης περιστρέφεται επάνω σε κεραμικά έδρανα μέσω υδροπνευματικού συστήματος, ενώ τα τελευταία χρόνια συναντώνται και υδροπνευματικά έδρανα για τις άτρακτους.

- Η επιλογή των συγκεκριμένων εδράνων είναι μονόδρομος λόγω των πολύ υψηλών ρυθμών περιστροφής που αναπτύσσουν ($n > 12.000 \text{rpm}$). Τα απόβλητα/γρέζια απομακρύνονται από την περιοχή κοπής συνήθως με την χρήση υγρού κοπής υπό πίεση (Εικόνα 1.17) και στην συνέχεια μεταφέρονται έξω από την εργαλειομηχανή μέσω κυλιόμενης ταινίας ή άξονα με σπείρωμα μεγάλου μεγέθους και διακένου [20].



Εικόνα 1.17: Κατεργασία φρεζαρίσματος από φρέζα C.N.C. με χρήση ψυκτικού υγρού υπό πίεση. (πηγή:Elge Precision Machining, Inc)

1.7.2 Διαδικασία κατεργασίας ενός τεμαχίου σε μια C.N.C. εργαλειομηχανή.

Για να κατασκευαστεί το τεμάχιο, είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός Η/Υ με το κατάλληλο σχεδιαστικό πρόγραμμα. Ο χειριστής σχεδιάζει το σχέδιο του τεμαχίου που θέλουμε να κατασκευάσουμε με τη χρήση ενός λογισμικού C.A.D. και δημιουργεί ένα πρόγραμμα με το όνομα του τεμαχίου. Το πρόγραμμα στην συνέχεια μεταφράζεται σε γλώσσα G-code, αποστέλλεται στη εργαλειομηχανή και φορτώνεται στη μνήμη της C.N.C. μηχανής. Το/τα Κ.Ε. της μηχανής και η άτρακτος κινούνται με βάση τις εντολές που είναι γραμμένες στο πρόγραμμα με κώδικα G.

Το πρόγραμμα αποθηκεύεται στη μνήμη του υπολογιστή της μηχανής και μπορεί να τροποποιηθεί ανάλογα με τις περιστάσεις και τις απαιτήσεις. Υπάρχει

επίσης η επιλογή να γραφτεί νέο πρόγραμμα εξ ολοκλήρου από την αρχή μέσω της κονσόλας. Η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί το ίδιο σχεδόν πρόγραμμα για πολλά διαφορετικά τεμάχια κάνει πολύ πιο γρήγορη την εκτέλεση της εκάστοτε κατεργασίας.

Ένα νέο πρόγραμμα εκτελείται αρχικά από το χειριστή τμηματικά και χωρίς το/τα Κ.Ε. να έρχονται σε άμεση επαφή με το τεμάχιο, για να διαπιστωθούν τυχόν λάθη και να διασφαλιστεί η ασφάλεια του χειριστή αλλά και να αποφευχθούν ζημιές στην εργαλειομηχανή και στο τεμάχιο που θα κατεργαστεί. Αυτή η διαδικασία τείνει να αντικατασταθεί από τα λογισμικά C.A.M, στα οποία ο χειριστής δίνει όλα τα στοιχεία κατεργασίας. Σε συνδυασμό με τη βάση δεδομένων που διαθέτουν αυτά τα προγράμματα για κάθε ελεγκτικό μηχανισμό C.N.C. μηχανών και των χαρακτηριστικών τους, γίνεται ανάλυση και προσομοίωση όλης της διαδικασίας σχηματικά και με μεγάλη ακρίβεια.

1.7.3 Πλεονεκτήματα από την χρήση C.N.C. εργαλειομηχανών.

Η εισαγωγή του C.N.C έλυσε πολλά προβλήματα που αντιμετώπιζε η βιομηχανία, καθώς μέσω του υπολογιστή της μηχανής μπορεί να υπάρχει ακριβής έλεγχος της πρόωσης, της ταχύτητας κοπής, της επιτάχυνσης σε κάθε άξονα, καθώς και της θέσης όλων των εξαρτημάτων και των Κ.Ε [21],[22]. Προστέθηκε ελευθερία κίνησης σε παραπάνω άξονες με την δυνατότητα να καλυφθούν πολύ εξειδικευμένες ανάγκες. Έγινε δυνατό δηλαδή:

- Να παραχθούν πολύπλοκα τρισδιάστατα εξαρτήματα που μέχρι τότε δε γινόταν,
- σε πολύ μεγαλύτερους αριθμούς.
- Η διαστασιολογική ακρίβεια σε μια σύγχρονη C.N.C. εργαλειομηχανή φτάνει εύκολα τα 0.0025mm (2,5 μm)
- Μειώθηκε πολύ το κόστος κατασκευής και το χαμένο υλικό που έμενε αναξιοποίητο.
- Εξασφαλίστηκε αυξημένη ασφάλεια για τους χειριστές των μηχανημάτων.
- Ο χειρισμός έγινε ευκολότερος, διότι δεν είναι πια τόσο αναγκαίο να λυθεί και να συγκρατηθεί με διαφορετικό τρόπο ένα πολύπλοκο τεμάχιο για να κατεργαστεί ξανά και να αποκτήσει την απαιτούμενη μορφή.
- Δεν είναι αναγκαία η χρήση εξειδικευμένων ιδιοσκευαίων για ένα πλήθος κατασκευών.
- Ο ορισμός και ο έλεγχος των παραμέτρων για την κάθε ξεχωριστή κατεργασία γίνεται σε πολύ μικρότερο χρόνο.
- Ο χειρισμός και ο προγραμματισμός μπορεί να διεξαχθεί από χειριστές με μικρότερη εμπειρία σε σχέση με αυτούς των συμβατικών εργαλειομηχανών, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν είναι αναγκαία η

γνώση χρήσης και εξέλιξης των βασικών διαδικασιών ενός μηχανουργείου. Το ζήτημα είναι όμως ότι σε μια συμβατική εργαλειομηχανή χρειάζεται να υπάρχει χειριστής με πολύ καλές ικανότητες για να μπορέσει να παράγει κομμάτια που δεν θα έχουν ορατές διαφορές το ένα με το άλλο, με αυτό να είναι σε πολλές καταστάσεις αδύνατο λόγω της πολυπλοκότητας των σύγχρονων εξαρτημάτων.

- Η παραγωγικότητα αυξάνεται σε ασύλληπτο βαθμό συγκρινόμενη με το βαθμό στον οποίο βρισκόταν κατά την χρήση παλαιότερων τεχνολογιών. Με τον χειρισμό C.N.C. και την προσεγμένη κατασκευή τους, οι ψηφιακά προγραμματιζόμενες εργαλειομηχανές μπορούν να βρίσκονται σε λειτουργία για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα και να διακόπτεται η χρήση τους μόνο για λόγους συντήρησης- ή πτώσης του ηλεκτρικού ρεύματος, αν δεν έχουν ληφθεί προστατευτικά μέτρα. Ακόμα, ένας χειριστής μπορεί να λειτουργεί παραπάνω από μια μηχανή, καθώς πολλές φορές δε χρειάζεται να βρίσκεται κάποιος μπροστά σε κάθε μια.
- Το σχετικά υψηλό κόστος κτήσης αντισταθμίζεται από τους λόγους που αναφέραμε πριν, την καλύτερη εκμετάλλευση περισσότερου υλικού, το μικρότερο αριθμό παραγόμενων τεμαχίων που δεν τηρούν τις δοσμένες προδιαγραφές, τη δυνατότητα αναβάθμισης των επιμέρους χαρακτηριστικών-ειδικά σε επίπεδο λογισμικού- κ.α.

Οι συμβατικές εργαλειομηχανές χρησιμοποιούνται ακόμα σε κάποιο βαθμό για βασικές εργασίες και για εκμάθηση λόγω της υψηλής αξιοπιστίας που παρουσιάζει η απλή σχετικά διάταξή τους. Και αυτές όμως σταδιακά αντικαθίστανται, ανάλογα με την τεχνολογική και την οικονομική πρόοδο που έχει συντελεστεί στην κάθε χώρα.

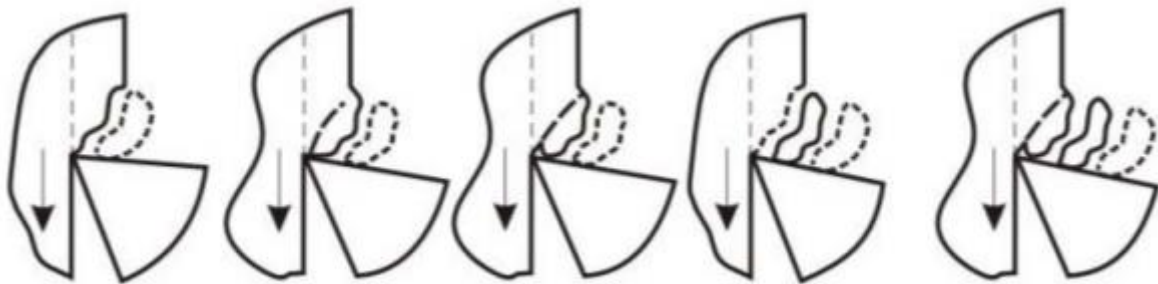
Αναλύοντας όλα τα παραπάνω, δεν μοιάζει περίεργο που οι C.N.C. εργαλειομηχανές και ειδικά ο C.N.C. τόνος έχει αντικαταστήσει τις περισσότερες από τις παλαιότερες τεχνολογίες κατεργασίας του παρελθόντος σε περιπτώσεις που ζητούμενο είναι η υψηλή ποιότητα και ποσότητα των τελικών προϊόντων. Παραδείγματα τομέων χρήσης C.N.C. μηχανημάτων είναι:

Αυτοκινητοβιομηχανίες, επιπλοβιομηχανίες, ναυπηγεία, αεροδιαστημικές κατασκευές, χυτήρια, κατασκευαστήρια πρώτων υλών, κατασκευές μικροϋπολογιστών και κυκλωμάτων και πολλά άλλα που δε θα αναφερθούν τώρα εδώ χάριν συντομίας.

1.8 ΑΠΟΒΛΗΤΟ

1.8.1 Δημιουργία αποβλήτου κατά την τórνευση.

Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενη παράγραφο, κατά την τórνευση, το Κ.Ε. κινείται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση κατά την διεύθυνση κοπής και με μια συγκεκριμένη ταχύτητα [22],[23]. Κατά την επαφή του με το τεμαχίο, ανάλογα με το βάθος κοπής και τις ταχύτητες του Κ.Ε. και του τεμαχίου, δημιουργούνται ανάλογες διατμητικές δυνάμεις και δυνάμεις τριβής που προκαλούν ισχυρή πλαστική παραμόρφωση με αποτέλεσμα την παραγωγή του αποβλήτου -γνωστό και ως γρέζι. (Εικόνα 1.18) Ανάλογα με την κατεργασία που επιλέγουμε κάθε φορά, τις τιμές που λαμβάνουν οι χαρακτηριστικές συνθήκες κατεργασίας, το ψυκτικό υγρό κοπής, το υλικό και τη γεωμετρία του Κ.Ε. και το υλικό του τεμαχίου, το απόβλητο παρουσιάζει και διαφορετική μορφή. Το μόνο σίγουρο πάντως είναι ότι το απόβλητο δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί πάντα μετά την κοπή, καθώς η δομή του υλικού από το οποίο αποτελείται έχει υποστεί δραματικές αλλαγές λόγω των τεράστιων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στην επιφάνεια κοπής κατά την τórνευση, καθώς και λόγω των δυνάμεων παραμόρφωσης που υφίσταται. Ένας ακόμα λόγος είναι οι χημικές αντιδράσεις με τα υγρά κοπής που χρησιμοποιούνται για την ψύξη του τεμαχίου και η μόλυνσή του από ουσίες που υπάρχουν μέσα στα υγρά. Το τελευταίο κάνει δύσκολη και την ανακύκλωση των γρεζιών, καθώς σε πολλές περιπτώσεις είναι οικονομικά πιο συμφέρον να κατασκευαστεί νέο υλικό παρά να γίνει καθαρισμός και ανακύκλωση χρησιμοποιημένων, με βαρύ αντίκτυπο βέβαια στη μόλυνση του περιβάλλοντος.

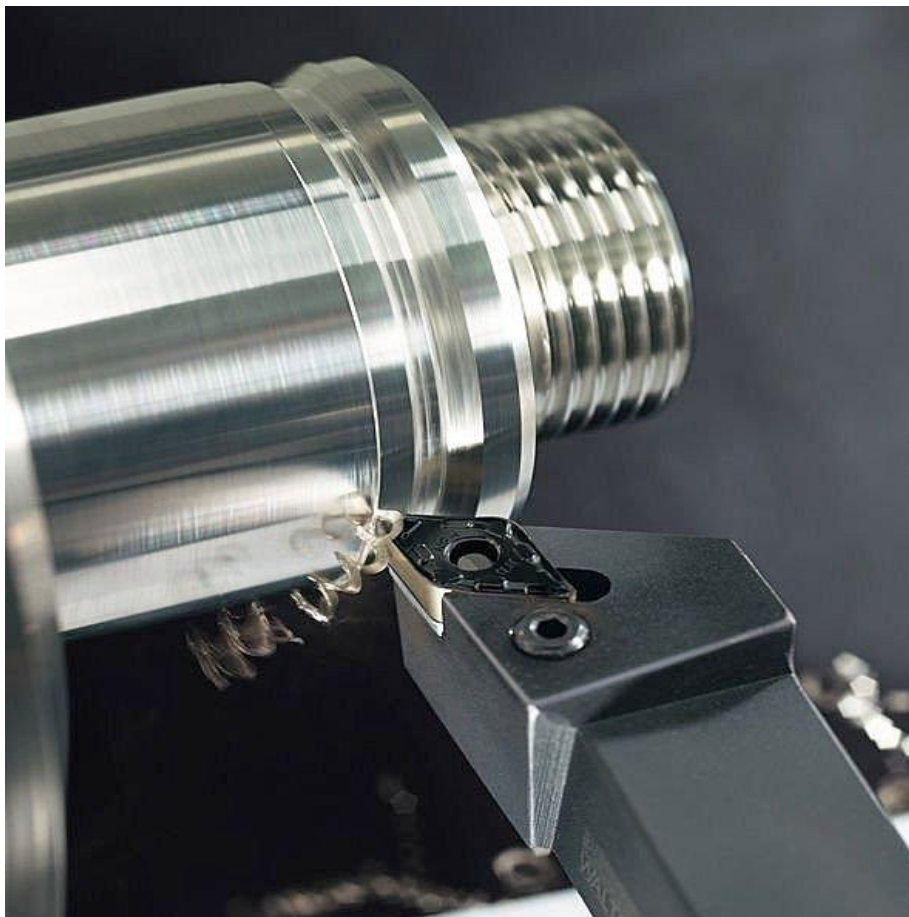


Εικόνα 1.18: Στάδια δημιουργίας αποβλήτου

1.8.2 Μορφή και θραύση του αποβλήτου

Ένα χαρακτηριστικό που είναι πολύ χρήσιμο και άξιο μελέτης είναι η μορφή του αποβλήτου. Κατά την διάρκεια μιας κατεργασίας κοπής, όπως η τórνευση, ο

χειριστής της εργαλειομηχανής πρέπει να προτιμά τη συνεχή κοπή, για λόγους που θα αναφερθούν στην συνέχεια. Σε μια τέτοια περίπτωση, το απόβλητο μπορεί να έχει γίνει μεγάλου μήκους ώσπου να σπάσει, ανάλογα φυσικά και το υλικό του τεμαχίου που κατεργαζόμαστε-κάθε υλικό έχει διαφορετική αντοχή σε διάτμηση τ και διαφορετικό βαθμό παραμόρφωσης ϵ . Εάν συμβεί αυτό, πρέπει να λάβουν χώρα οι απαραίτητες ενέργειες για να σπάσει, καθώς έτσι μπορεί να απομακρυνθεί πιο εύκολα από την περιοχή στην οποία γίνεται η κατεργασία. Επίσης, με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι πιθανότητες να τραυματιστεί ο χειριστής μιας εργαλειομηχανής ανοιχτού τύπου από τα γρέζια που μπορεί να παρασυρθούν από την κίνηση της ατράκτου, αλλά και να φθαρεί το τεμάχιο από το απόβλητο που εγκλωβίζεται σε λάθος σημεία κατά την κατεργασία. Για να γίνει λοιπόν έγκαιρη θραύση, συνήθως χρησιμοποιούνται Κ.Ε. τα οποία έχουν την κατάλληλη γωνία αποβλήτου γ και μπορούν να το απομακρύνουν αποτελεσματικότερα [22],[23]. Ένας ακόμα τρόπος που εφαρμόζεται εδώ και πολλά χρόνια είναι να υπάρχει επάνω στα Κ.Ε. μια ειδική διαμόρφωση που λειτουργεί ως γρεζοθραύστης (γνωστό και ως γρεζοσπάστης). (Εικόνα 1.19)



Εικόνα 1.19: Εξωτερική τόννευση ανοξείδωτου χάλυβα με Κ.Ε. σχήματος ρόμβου, χωρίς την χρήση ψυκτικού υγρού. Διακρίνεται η εσοχή και τα εξογκώματα του γρεζοσπάστη στο πάνω μέρος της μαύρης επιφάνειας του Κ.Ε.

1.8.3 Απομάκρυνση αποβλήτων από την περιοχή κατεργασίας

Τα τελευταία 15-20 χρόνια, με την άνοδο της εφαρμογής της ξηρής κοπής και την τεράστια αύξηση των στροφών περιστροφής της ατράκτου, συναντάται πολύ συχνά διάταξη που απομακρύνει αυτόματα τα γρέζια από την περιοχή της κατεργασίας με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα [24]. Εάν η κοπή δεν είναι ξηρή, ο αέρας συμπληρώνεται/αντικαθίσταται από το υγρό κοπής που διοχετεύεται με πίεση σε κατάλληλα σημεία. Με βάση λοιπόν το υλικό και την κατεργασία, επιλέγεται η σωστότερη γεωμετρία και διάταξη.

1.8.4 Πλεονεκτήματα συνεχούς κοπής

Αναφέρθηκε προηγουμένως η επιδίωξη να έχουμε συνεχή κοπή. Αυτό συμβαίνει για τους κάτωθι λόγους:

- Αύξηση της ταχύτητας περάτωσης της κατεργασίας και ανάλογη μείωση του απαιτούμενου χρόνου.
- Μειώνονται δραστικά οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής, κάτι που συντελεί σε μεγάλο βαθμό στις χαμηλότερες θερμοκρασίες που παρατηρούνται. Γενικά, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου είναι μεγαλύτερες [25],[26]. Αυτή η αύξηση όμως αντισταθμίζεται σε μεγάλο βαθμό από την απομάκρυνση θερμότητας από την περιοχή κατεργασίας, η οποία πραγματοποιείται από τα απόβλητα όταν απομακρύνονται από εκεί.
- Μειώνεται η ανάγκη για ισχυρότερο κινητήρα που θα οδηγεί τον άξονα περιστροφής, καθώς η κατεργασία απαιτεί λιγότερη ισχύ.
- Το κοπτικό εργαλείο φθείρεται λιγότερο, πράγμα που έχει ευεργετικά αποτελέσματα στο κόστος κατασκευής.
- *Βελτιώνεται η τραχύτητα της επιφάνειας του τεμαχίου*, πράγμα που θα μελετηθεί πιο διεξοδικά παρακάτω.

Η αιτία που προκαλούνται όλα τα παραπάνω είναι η συνεχής πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή της ζώνης διάτμησης. Αποτέλεσμα αυτής είναι η διαρροή του υλικού και η γρήγορη απομάκρυνση του συνεχές αποβλήτου.

Συνοπτικά, επιλέγουμε να έχουμε υψηλή ταχύτητα κοπής, χαμηλή πρόωση, μεγάλη γωνία αποβλήτου και κατάλληλη ψύξη [7],[8].

1.8.5 Ασυνεχές απόβλητο

Αντίθετα, όταν το απόβλητο θραύεται καθώς περνά από τη ζώνη διάτμησης, έχουμε τη δημιουργία του ασυνεχούς αποβλήτου. Συνήθως ένα τέτοιο φαινόμενο παρατηρείται:

- κατά την κατεργασία ψαθυρών υλικών (τα όλκιμα υλικά, λόγω λεπτόκοκκης δομής και υψηλής ολκιμότητας παρουσιάζουν την αντίθετη συμπεριφορά),
- λόγω της επιλογής πολύ χαμηλών ταχυτήτων κοπής,
- λόγω της επιλογής υψηλής τιμής πρόωσης,
- όταν το Κ.Ε. έχει μικρή ή αρνητική γωνία αποβλήτου.

Το ασυνεχές απόβλητο έχει αρνητικές επιδράσεις στην κατεργασία, εξαιτίας του ότι πολλές φορές εγκλωβίζεται ανάμεσα στο Κ.Ε. και την επιφάνεια κατεργασίας και αυξάνει τις δυνάμεις απόξεσης που εμφανίζονται στην περιοχή κατεργασίας [12]. Επιγραμματικά, αναφέρεται η κατώτερη ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου, λόγω της ύπαρξης μικρών ρωγμών και γενικά διάφορων άλλων επιφανειακών ανωμαλιών. Τα τελευταία έχουν πολλές φορές ως αποτέλεσμα το τεμάχιο να έχει μικρότερη αντοχή σε κόπωση και τελικά να αστοχήσει συντομότερα όταν βρεθεί υπό φόρτιση. Όλα αυτά μπορούν να μελετηθούν στο φαινόμενο της ψευδόκοψης.



Εικόνα 1.20: Σύλληψη στιγμιότυπου από δημιουργία ψευδόκοψης στην άκρη του Κ.Ε.

1.9 ΨΕΥΔΟΚΟΨΗ

Η ψευδόκοψη ή ψευδοακμή -γνωστή στα Αγγλικά σαν built up edge (BUE)- είναι αποτέλεσμα αποκομμένου από το υπόλοιπο τεμάχιο υλικού που έχει συσσωρευτεί μπροστά από την επιφάνεια κοπής του Κ.Ε. και παρεμβάλλεται μεταξύ του Κ.Ε. και του αποβλήτου [6]. Το σχήμα της μοιάζει με ασύμμετρη σφήνα. Δημιουργείται λόγω των μηχανισμών συγκόλλησης και πίεσης-ισχυρά θλιπτικά φορτία μαζί με υψηλή τριβή και επακόλουθες υψηλές θερμοκρασίες-που αναπτύσσονται στην επιφάνεια κατεργασίας. Αυτές επιδρούν στο πρώτο στρώμα του αποβλήτου που παράγεται και του προσδίδουν αυξημένη σκληρότητα λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης στην οποία υπόκειται. Το κομμάτι σε αρκετές περιπτώσεις παραμένει στην περιοχή κατεργασίας ύστερα από την αποκόλλησή του από το τεμάχιο. Μένοντας μπροστά από το Κ.Ε. και, καθώς η διαδικασία επαναλαμβάνεται, σύντομα έχει δημιουργηθεί ένα στρώμα υλικού [8],[9] πάχους λίγων μm μπροστά από την κοπτική πλευρά του Κ.Ε. (Εικόνα 1.20)

1.9.1 Περιπτώσεις δημιουργίας της ψευδόκοψης

Η ψευδόκοψη δημιουργείται πιο συχνά:

- Όταν έχουμε μικρή ταχύτητα κοπής και μεγάλη πρόωση. Ο λόγος που αυτό δεν παρατηρείται σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής είναι ότι το απόβλητο που αποκόβεται από το τεμάχιο έχει μεγαλύτερη ταχύτητα και απομακρύνεται πιο γρήγορα-λόγω ακτινικών δυνάμεων-παίρνοντας μαζί του μεγαλύτερο ποσό θερμότητας [6],[9].
- Κατεργαζόμαστε υλικό το οποίο είναι θερμοσκληρυνόμενο, όπως πολλών ειδών κράματα. Τα καθαρά μέταλλα δεν έχουν αυτήν την ιδιότητα στον ίδιο βαθμό και σε αυτά δεν παρατηρείται τόσο συχνά ψευδόκοψη.
- Όταν δεν χρησιμοποιείται υγρό κοπής για μείωση των τριβών και ψύξη της επιφάνειας κατεργασίας [5].

1.9.2 Αποτελέσματα της ψευδόκοψης στην κατεργασία

Η ψευδόκοψη παίζει σημαντικό ρόλο κατά τη διάρκεια των κατεργασιών κοπής και ειδικά κατά την διάρκεια της τórνευσης, καθώς αλλάζει πολλά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, στα θετικά συγκαταλέγονται:

- η αλλαγή στη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου λόγω της διαφορετικής κλίσης στην κόψη στις περιπτώσεις όπου η προκύπτουσα γεωμετρία βοηθά στην κοπή, [7],[9]
- η μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για τη διεξαγωγή της κατεργασίας,
- μικρή επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του Κ.Ε. λόγω του ότι η ψευδόκοψη πραγματοποιεί ένα μέρος της κατεργασίας αντί για το ίδιο το Κ.Ε [10].

Υπάρχουν όμως και μειονεκτήματα από την εμφάνιση της ψευδόκοψης, τα οποία πολλές φορές είναι πιο σημαντικά και αξιολογητέα, όπως:

- Η επιφάνεια του τεμαχίου γίνεται πιο σκληρή -σε ανεπιθύμητο βαθμό [8],[9].
- Η αλλαγή στην γεωμετρία της μύτης του Κ.Ε. προκαλεί αύξηση των δυνάμεων κοπής και έτσι αύξηση στην κατανάλωση ισχύος.
- Η μεταβαλλόμενη γεωμετρία του Κ.Ε. δυσχεραίνει τον έλεγχο των διαστάσεων του τεμαχίου κατά την κατεργασία του, καθώς προκαλούνται ταλαντώσεις που μεταφέρονται σε όλο το σύστημα Κ.Ε. - εργαλειοφορείο - εργαλειοδέτης [9].
- Λόγω των παραπάνω, υπάρχει πιθανότητα το Κ.Ε. να φθαρεί πιο γρήγορα και να μην παραταθεί η διάρκεια ζωής του [12].
- Σαν τελευταίο-και πιο σημαντικό για την παρούσα εργασία-θα αναφέρουμε την *χειρότερης ποιότητας επιφάνεια που προκύπτει*. [6-12]. Ο μηχανισμός που προκαλεί αυτό το φαινόμενο περιλαμβάνει τα απομεινάρια της ψευδόκοψης-αμέσως μετά από την θραύση της. Γίνεται δημιουργία συσσωματώματος μεταξύ αυτών και του τεμαχίου -λόγω πλαστικής παραμόρφωσης. Μιας και τα απομεινάρια έχουν σκληρύνει πολύ -όπως περιγράψαμε και προηγουμένως-εμφανίζεται το φαινόμενο της απόξεσης. Όλα τα προαναφερθέντα έχουν καταστροφικές επιπτώσεις στην προσπάθεια επίτευξης μικρότερης ή καθορισμένης τιμής τραχύτητας, καθώς υπάρχουν αστάθμητοι παράγοντες στην δημιουργία του τελικού αποτελέσματος.

Συμπερασματικά, εάν θέλουμε να αποφύγουμε τη δημιουργία της ψευδόκοψης, πρέπει να προβούμε στις παρακάτω ενέργειες:

- Αύξηση της ταχύτητας κοπής
- Μείωση πρόωσης
- Επιλογή Κ.Ε. με κατάλληλη γωνία αποβλήτου
- Επιλογή του σωστού υγρού κοπής για την κατεργασία που πραγματοποιούμε -ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της γνωρίσματα.

2. ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ

2.1 ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

Η τραχύτητα είναι το μέγεθος εκείνο που εμφανίζει την απόκλιση της πραγματικής επιφάνειας από την ιδεατή [27],[28]. Σε όλες τις λείες επιφάνειες υπάρχει ένας βαθμός τραχύτητας, έστω και σε ατομικό επίπεδο. Η επιφανειακή τραχύτητα [28] αποτελείται από σχετικά κοντινές και μικρές επιφανειακές ανωμαλίες. Στα κατεργασμένα τεμάχια μπορούν να παρατηρηθούν κυρίως ως γραμμοειδή σημάδια που άφησε το Κ.Ε. στην επιφάνεια του τεμαχίου καθώς μετακινούνταν επάνω της. Εκτός από τα αποτελέσματα στην τραχύτητα λόγω των μηχανουργικών κατεργασιών, υπάρχουν και άλλα που οφείλονται σε άλλους παράγοντες, όπως π.χ. οι χημικές κατεργασίες, η ραδιενεργή ακτινοβολία, κ.α.

Ο έλεγχος της τραχύτητας των παραγόμενων τεμαχίων αποτελεί μεγάλη προτεραιότητα για τη διασφάλιση υψηλού επιπέδου ποιότητας, καθώς [29] είναι από τα μεγέθη που επηρεάζουν το χρόνο ζωής του τεμαχίου, τη συμπεριφορά του κάτω από φόρτιση και την αποδοτική λειτουργία του. Για αυτό το λόγο, εξαρτήματα π.χ. με κυλινδρικό σχήμα που χρησιμοποιούνται σε κρίσιμα σημεία μηχανημάτων ελέγχονται πολλές φορές διεξοδικά κατά τη συντήρηση και έτσι αποφεύγονται αστοχίες που έχουν υψηλό κόστος επιδιόρθωσης.

2.2 ΑΙΤΙΕΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

Η επιφανειακή τραχύτητα μετά από την κατεργασία μπορεί να οφείλεται σε πολλές και διαφορετικές παραμέτρους, όπως η χαμηλή στιβαρότητα του συνόλου «εργαλειομηχανή – εργαλειοφορείο - Κ.Ε. - τεμάχιο» [30], η επιλογή χαρακτηριστικών μεγεθών κατεργασίας που συγκλίνουν στην ιδιοσυχνότητα του μηχανισμού, το είδος και η ποιότητα του Κ.Ε. , το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το τεμάχιο, η χρήση υγρού κοπής, κ.α.

2.3 ΤΟΜΕΙΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΕΙ Η ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ

Η τραχύτητα μιας επιφάνειας έχει καθοριστικό παράγοντα στη συμπεριφορά ενός τεμαχίου, ειδικά όταν μιλάμε για μηχανολογικά εξαρτήματα. Από αυτήν, ανάλογα

και με την περίπτωση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό [31] η τριβή που θα ασκηθεί μεταξύ των επιφανειών, ο θόρυβος κατά την λειτουργία, η αντοχή σε κόπωση, η κατανάλωση ενέργειας, η παραγόμενη θερμότητα, η ανοχή μεταξύ των επιφανειών και η συναρμογή τους, η ευκολία στην επένδυση με άλλα υλικά και στην λίπανση, [32] η έδραση άλλων επιφανειών, η αντοχή σε διάβρωση και σε οξείδωση, η ελαχιστοποίηση της φθοράς, οι ευκολίες για περαιτέρω κατεργασία της επιφάνειας, κ.α.

Παραδείγματα εφαρμογών των προαναφερθέντων είναι τα ακόλουθα:

- Αντοχή σε κόπωση, φθορά: Ένας στροφαλοφόρος άξονας σε έναν κινητήρα θα φθείρει πολύ πιο γρήγορα τα έδρανά του και θα έχει πολύ μικρότερη διάρκεια ζωής εάν έχει υψηλή επιφανειακή τραχύτητα.
- Ιδιότητες έδρασης: Οι επιφάνειες μέσα στις οποίες κυλίνουν τα σφαιρίδια ενός ρουλεμάν κύλισης δεν μπορούν να είναι απόλυτα λείες εάν το ρουλεμάν απαιτεί λίπανση, αλλιώς το ρουλεμάν θα αστοχήσει σύντομα.
- Αντοχή σε διάβρωση: Για εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται σε αντιδραστήρια, προτιμάται συνήθως να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερη τραχύτητα. Αυτό αποσκοπεί στο να υπάρχει όσο το δυνατόν μικρότερη επιφάνεια για προσβολή από επιβλαβείς για την επιφάνεια παράγοντες.

2.4 ΑΝΤΙΚΤΥΠΟΣ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

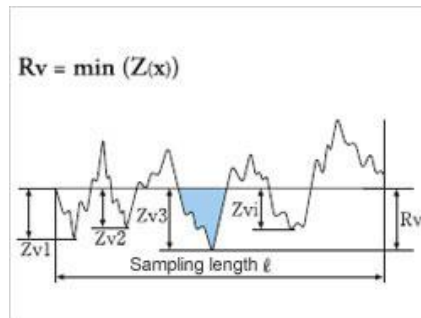
Ένας ακόμα τομέας που επηρεάζεται από την τραχύτητα είναι η εμφάνιση ενός τεμαχίου. Σε πολλές περιπτώσεις δηλαδή δεν υπάρχει επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά του από την τραχύτητα, επιδιώκεται όμως η τελευταία να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη για να αυξηθεί η ανταλλακτική αξία ενός προϊόντος ή ο θαυμασμός προς αυτό. Τα αντικείμενα με περισσότερη λάμψη έχουν συνήθως χαμηλότερη τραχύτητα από τα υπόλοιπα.

2.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

Στην προσπάθεια για τον ορισμό και την σύγκριση της τραχύτητας, δημιουργήθηκαν οι παρακάτω παράμετροι τραχύτητας (EN ISO 4287) [33-35] :

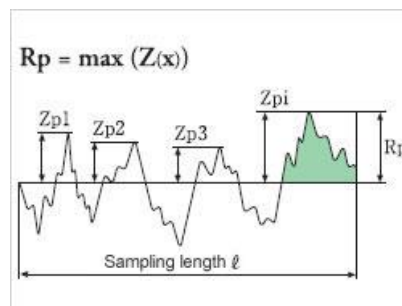
- (1) R_v : Η απόσταση μεταξύ του χαμηλότερου σημείου της επιφάνειας με το μέσο ύψος της επιφάνειας. Ουσιαστικά εκφράζει το μέγιστο βάθος της κοιλάδας

κατά τη δειγματοληψία ενός δείγματος. (Εικόνα 2.1) Χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αντίστασης μιας επιφάνειας σε διάβρωση και της αντοχής της.



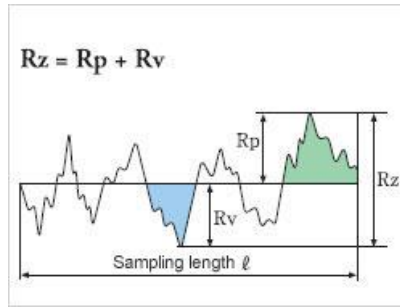
Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση του R_v (πηγή: Olympus Inspection & Measurement Systems)

(2) R_p : Η απόσταση μεταξύ του υψηλότερου σημείου της επιφάνειας με το μέσο ύψος της επιφάνειας. Ουσιαστικά εκφράζει τη μέγιστη κορυφή της κυματομορφής κατά τη δειγματοληψία ενός δείγματος. (Εικόνα 2.2) Χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αντίστασης της επιφάνειας στην ηλεκτρική επαφή και της τριβής.



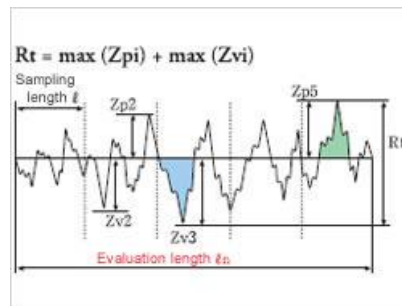
Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση του R_p (πηγή: Olympus Inspection & Measurement Systems)

(3) R_z : Το άθροισμα της υψηλότερης κορυφής και της βαθύτερης κοιλάδας κατά το μήκος της δειγματοληψίας ενός δείγματος. (Εικόνα 2.3) Χρησιμοποιείται συχνά, κυρίως για την αξιολόγηση της αντοχής, της κατεργασιμότητας, της στιλπνότητας, της αντίστασης στην ηλεκτρική επαφή και της λάμψης.



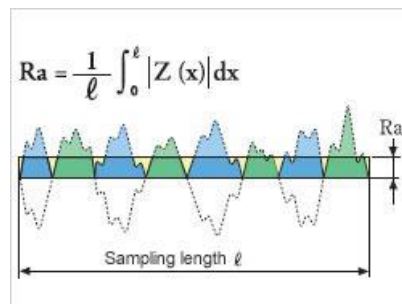
Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση του R_z (πηγή: Olympus Inspection & Measurement Systems)

(4) R_t : Το άθροισμα της υψηλότερης κορυφής και της βαθύτερης κοιλάδας κατά το μήκος της δειγματοληψίας ενός δείγματος, αυτή την φορά όμως για όλο το πεδίο που αξιολογείται και όχι μόνο για ένα μήκος δειγματοληψίας. (Εικόνα 2.4) Ανάμεσα στο R_t και το R_z ισχύει η σχέση $R_t \geq R_z$. Μιας και αφορά όλο μήκος αξιολόγησης έχει πιο αυστηρά κριτήρια από το R_z . Είναι μια από τις παραμέτρους που γίνεται εύκολα αντιληπτή με το μάτι ή με το άγγιγμα, εξού και η συχνή χρήση του.



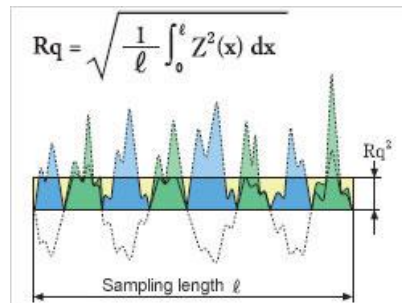
Εικόνα 2.4: Σχηματική απεικόνιση του R_t (πηγή: Olympus Inspection & Measurement Systems)

(5) R_a : Είναι η παράμετρος της τραχύτητας που συναντάται συχνότερα. Ορίζεται ως η αριθμητική μέση τιμή όλων των αποκλίσεων των σημείων από την μέση γραμμή. (Εικόνα 2.5) Όλες οι αποκλίσεις λαμβάνονται με θετικό πρόσημο. Λόγω του ότι λαμβάνονται υπόψη όλα τα σημεία, μια μεγάλη απόκλιση ή σφάλμα σε ένα μόνο σημείο δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη μέτρηση.



Εικόνα 2.5: Σχηματική απεικόνιση του R_a (πηγή: Olympus Inspection & Measurement Systems)

(6) R_q : Συμβολίζει την τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων των αποκλίσεων που συναντώνται σε όλα τα σημεία σε σχέση με τη μέση γραμμή. (Εικόνα 2.6) Συναντάται και ως RMS (RootMeanSquare). Σε σχέση με το R_a , είναι συνήθως μεγαλύτερη παράμετρος κατά περίπου 10%. Χρησιμοποιείται κυρίως στις Η.Π.Α. αλλά τα τελευταία χρόνια αντικαθιστάται από το R_a .



Εικόνα 2.6: Σχηματική απεικόνιση του R_q (πηγή: Olympus Inspection & Measurement Systems)

2.6 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΔΙΕΘΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Όπως αναφέρθηκε και πριν, η τραχύτητα είναι ένα ζήτημα που έχει απασχολήσει από το παρελθόν τις έρευνες για βελτιστοποίηση των κατεργασιών κοπής [36]. Έχει παρατηρηθεί ότι η τραχύτητα της επιφάνειας παίζει σημαντικό ρόλο κατά το φρεζάρισμα, καθώς μια καλά φρεζαρισμένη μεταλλική επιφάνεια με μικρή τραχύτητα βελτιώνει την αντίσταση ενάντια στην διάβρωση, στον ερπυσμό και την αντοχή σε κόπωση.

Έχει διαπιστωθεί από πολλές έρευνες ότι τα χαρακτηριστικά μεγέθη που επηρεάζουν περισσότερο την επιφανειακή τραχύτητα είναι η ταχύτητα κοπής V_c , η πρόωση f , το βάθος κοπής a , η γωνία κοπής γ του Κ.Ε. και στη συνέχεια ακολουθούν άλλοι παράγοντες, όπως η επιλογή υγρού κοπής, κ.λπ. Χρειάζεται να γίνουν βέβαια πολλές έρευνες ακόμα, μιας και δεν υπάρχει ολοκληρωμένο μοντέλο πρόβλεψης για πολλά υλικά με βάση τον τελικό στόχο που θέλουμε να πετύχουμε-τραχύτητα, φθορά Κ.Ε. , ρυθμός αποβολής υλικού, κ.α.

Ο γενικός κανόνας που ισχύει στις περισσότερες περιπτώσεις για την επίτευξη χαμηλότερης τιμής τραχύτητας είναι να αυξηθούν οι στροφές περιστροφής της ατράκτου και να μειωθεί η πρόωση [36],[37]. Το ζητούμενο είναι η αποφυγή της δημιουργίας ψευδόκοπης, η οποία εμφανίζεται κυρίως κατά την κατεργασία με χαμηλές ταχύτητες κοπής. Η ψευδόκοπη δυσχεραίνει την κατεργασία επειδή σε αρκετές περιπτώσεις αυξάνει τοπικά τις δυνάμεις κοπής, πράγμα που ευνοεί τον σχηματισμό ανωμαλιών στην επιφάνεια λόγω αστάθειας.

Από την άλλη βέβαια [37], πρέπει να ληφθεί υπόψιν η μεγαλύτερη φθορά που παρατηρείται στο Κ.Ε. κατά την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Η φθορά αυτή πρέπει να παρακολουθείται, ειδικά σε σκληρότερα υλικά, διότι είναι πολύ πιθανό να

επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα ενός τεμαχίου και να οδηγήσει σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Από ένα σημείο και μετά, η εκλυόμενη θερμότητα στην περιοχή μειώνεται και στο Κ.Ε. ασκείται μικρότερη θερμική καταπόνηση, πράγμα που χρησιμοποιείται στην φιλοσοφία του Η.Σ.Μ. (High Speed Machining, Κοπή με Υψηλές Ταχύτητες) για βελτίωση των κατεργασιών.

Το ποσό της θερμότητας που εκλύεται κατά την κατεργασία μιας επιφάνειας έχει κρίσιμη σημασία για την επιφανειακή τραχύτητα του τελικού προϊόντος, γι' αυτό και έχει γίνει αντικείμενο μελέτης για την κάθε ξεχωριστή εφαρμογή. Παράδειγμα αποτελεί η ξηρή τόννευση που πραγματοποιείται σε σκληρυσμένα μεταλλικά τεμάχια, με σκοπό να αντικαταστήσει την κατεργασία της λείανσης. Ο στόχος της συγκεκριμένης αντικατάστασης είναι η γρηγορότερη και οικονομικότερη κατεργασία, μιας και όλη η διαδικασία γίνεται από λιγότερα άτομα, με μια μόνο τόννευση.

Έχει επισημανθεί η επίδραση της θερμότητας στο υπόστρωμα του υλικού, κυρίως στην κατανομή των παραμενόντων τάσεων [38]. Η θερμότητα δεν είναι απόρροια μόνο των χαρακτηριστικών στοιχείων κατεργασίας, αλλά και της σκληρότητας του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το τεμάχιο. Η θερμότητα προκαλεί επίσης φθορά της πλευράς του Κ.Ε. που είναι παράλληλη με την επιφάνεια κατεργασίας, φθορά η οποία είναι κύρια αιτία για την θερμική καταπόνηση στο υπόστρωμα του τεμαχίου.

Η επίδραση του υγρού κοπής στην ψύξη έχει αποδειχτεί ότι δεν επιφέρει πάντα τα ίδια αποτελέσματα -βλέπε Η.Σ.Μ.- στην κατεργασία [39]. Εκτός από επιδείνωση της υγείας των εργαζομένων στα μηχανουργεία και τις βιομηχανίες, σε αρκετές περιπτώσεις είναι επιβλαβές για το περιβάλλον και αυξάνει το κόστος κατεργασίας. Με σκοπό την αποφυγή των αρνητικών συνεπειών και την βελτίωση της λίπανσης και της ψύξης σε κατεργασίες, νέες τεχνικές δοκιμάζονται. Η χρήση μιας από αυτές, της MQL (Minimum Quantity Lubrication, Ελάχιστη Ποσότητα Λίπανσης) την τελευταία δεκαετία εμφανίζει ενθαρρυντικά αποτελέσματα, καθώς μειώνει την θερμότητα που εκλύεται στην επιφάνεια, ευνοεί την σωστή διεπαφή μεταξύ τεμαχίου-Κ.Ε. αποβλήτου-Κ.Ε. αποβλήτου, ενώ μειώνει και την φθορά του Κ.Ε. Οι ευεργετικές αυτές συνέπειες έχουν θετικά αποτελέσματα στην προσπάθεια μείωσης της επιφανειακής τραχύτητας.

Η ανάλυση που γίνεται [40],[41] στις ερευνητικές διαδικασίες στηρίζεται κυρίως στην μέθοδο Taguchi και δεν λαμβάνει πολλές φορές υπόψιν της τις δονήσεις της εργαλειομηχανής και άλλους σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την τραχύτητα των επιφανειών ενός τεμαχίου που κατεργάζεται. Ο σκοπός βέβαια είναι πάντα να επιτυγχάνεται υψηλή ποιότητα τελικού προϊόντος με το ελάχιστο οικονομικό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα [42]. Η ποιότητα μπορεί να εκφραστεί με πολλούς τρόπους, όπως π.χ. με την επιφανειακή τραχύτητα, η οποία παίζει μεγάλο ρόλο στην αξιολόγηση της ακρίβειας κατεργασίας [43]. Έτσι, επιστρατεύονται μέθοδοι που μπορούν να οδηγήσουν σε αυτό το αποτέλεσμα, όπως η μέθοδος Taguchi που προαναφέρθηκε. Με την χρήση αυτής γίνεται να μελετηθεί η επίδραση των παραμέτρων κοπής στην κατεργασμένη επιφάνεια. [44],[45] και να επιλεγθούν οι κατάλληλες τιμές [46],[47] που θα οδηγήσουν σε μια σταθερή ακρίβεια των

διαστάσεων και της τραχύτητας [48],[49]. Όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή, η περαιτέρω κατανόηση των μηχανισμών δημιουργίας της τραχύτητας μπορεί να βοηθήσει στην σωστή επιλογή παραμέτρων κατεργασίας και να προκύψει τεμάχιο με καλύτερη λειτουργικότητα [50],[51]. Για αυτόν τον σκοπό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν Κ.Ε. με κυκλικό σχήμα, ειδικά στην περίπτωση του φρεζαρίσματος [52],[53].

2.7 ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΑΙΤΙΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΤΗΝ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ

Εάν θέλουμε να εντοπίσουμε τους ακριβείς παράγοντες στους οποίους οφείλεται η δημιουργία τραχύτητας στις επιφάνειες των κατεργασμένων τεμαχίων, θα πρέπει να ερευνήσουμε τι επηρεάζει τα υποσυστήματα μιας εργαλειομηχανής. Οι κυριότεροι παράγοντες λοιπόν, είναι οι εξής [54]:

1. Επίδραση της θερμότητας
2. Γεωμετρικοί παράγοντες
3. Στατική ακαμψία
4. Δυναμική ακαμψία

Αναλυτικά:

1. Η επίδραση της θερμότητας μπορεί να παρατηρηθεί σε πολλές φάσεις της κατεργασίας. Γεωμετρικές διαστάσεις των Κ.Ε. που μεταβάλλονται λόγω αλλαγής θερμοκρασίας στον χώρο της κατεργασίας, κινητήρες και κιβώτια ταχυτήτων που θερμαίνουν τις εδράσεις των αξόνων, αλλαγές στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος και άλλοι πολλοί παράγοντες που σχετίζονται με την θερμότητα παίζουν ρόλο στην κοπή και στο τι επίπεδου τραχύτητα θα έχει το τεμάχιο. Μιας και όλοι αυτοί οι παράγοντες είναι σε πολλές περιπτώσεις αστάθμητοι, δεν είναι εύκολο να δημιουργηθεί ένα αναλυτικό μοντέλο που θα περιγράφει και θα προβλέπει την επίπτωσή τους στο τελικό αποτέλεσμα [54].
2. Οι αποκλίσεις της απόστασης μεταξύ του συνόλου εργαλειοφορείο – εργαλειοδέτης – Κ.Ε. μπορεί να οφείλονται σε γεωμετρικούς και κινηματικούς παράγοντες. Στους γεωμετρικούς συγκαταλέγονται ανακριβείς θέσεις -π.χ. λόγω λανθασμένης μέτρησης από κάποιο αισθητήρα θέσης- και αποκλίσεις των διαστάσεων που έχουν τα εξαρτήματα μιας εργαλειομηχανής από το ιδανικό. Οι παράγοντες που σχετίζονται με την κινηματική αφορούν τον συνδυασμό μετατοπίσεων σε έναν άξονα με την ταυτόχρονη περιστροφή γύρω από έναν άλλο [54].
3. Στην περίπτωση των εργαλειομηχανών, η στατική ακαμψία ουσιαστικά δείχνει το πόσο μεγάλο φορτίο μπορεί να ασκηθεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο μιας επιφάνειας, χωρίς να αλλαχθεί η ακρίβεια της. Η στατική ακαμψία κρίσιμων για

την κατεργασία εξαρτημάτων -όπως τα Κ.Ε., οι άξονες μετάδοσης φορτίων, κ.α.- επηρεάζεται από την βαρύτητα, την επιτάχυνση με την οποία κινούνται και τις δυνάμεις κοπής που ασκούνται επάνω τους. Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου εξαρτήματος λοιπόν, έχει πολλές παραμέτρους που πρέπει να συμπεριλάβει για την διατήρηση σταθερής συμπεριφοράς σε όλο το φάσμα ζωής του εξαρτήματος [54].

4. Ίσως η πιο εύκολη στην κατανόηση κατηγορία των παραγόντων που επηρεάζουν το αποτέλεσμα μιας κατεργασίας είναι η δυναμική ακαμψία. Μια εργαλειομηχανή αποτελείται από πάρα πολλά επιμέρους υποσυστήματα, όπως αντλίες, κινητήρες, περιστρεφόμενους άξονες, ηλεκτρομηχανικές διατάξεις, κ.α. Όλα αυτά παράγουν δονήσεις κατά την λειτουργία της εργαλειομηχανής και μπορούν να επηρεάσουν την φθορά της εργαλειομηχανής και τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Ο κανόνας του «όσο πιο σκληρό, τόσο πιο καλό» δεν είναι πανάκεια, καθώς αυτό που μετράει σαν αποτέλεσμα είναι ο αρμονικός συνδυασμός των δονήσεων που προκαλούνται, έτσι ώστε να μην μεταδίδονται ταλαντώσεις στο Κ.Ε. και στο τεμάχιο. Άρα, για να μπορέσει να σχεδιαστεί και να λειτουργεί σωστά ένα τέτοιο σύστημα, θα πρέπει να υπολογιστεί η κατάλληλη απόσβεση [54]. Στον σχεδιασμό πρέπει να συμπεριληφθούν όλοι οι παράγοντες που προαναφέρθηκαν, καθώς και η αλλαγή στην δυναμική συμπεριφορά των εξαρτημάτων λόγω φθοράς. Ο σχεδιασμός οφείλει επίσης να προβλέπει την επίδραση δονήσεων από το γύρω περιβάλλον της εργαλειομηχανής, καθώς συχνά υπάρχουν και άλλα μηχανήματα γύρω της [54]. Η ταυτόχρονη λειτουργία δηλαδή μιας εργαλειομηχανής με άλλες γύρω της μπορεί να επιδράσει αρνητικά στην ποιότητα του παραγόμενου τεμαχίου

3.ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

3.1 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (S.E.M.)

3.1.1 Εισαγωγικά για το S.E.M.

Στις αρχές του 1930 εκτυλίχθηκαν σημαντικές εξελίξεις στις επιστήμες που μελετούν τα φαινόμενα σε μικροσκοπικό επίπεδο, με χαρακτηριστικές αυτές στην επιστήμη της Βιολογίας, όπου και ανακαλύφθηκαν τα οργανίδια των κυττάρων. Η ανάγκη για περαιτέρω μελέτη τους όμως έβρισκε εμπόδιο στις δυνατότητες που υπήρχαν μέχρι τότε στον κλάδο της μικροσκοπίας [55],[56]. Ο καλύτερος εκφραστής της μικροσκοπίας τότε ήταν το οπτικό μικροσκόπιο, το οποίο χρησιμοποιεί ακτίνες φωτός και δίνει τη δυνατότητα για μεγέθυνση 1000x με 2000x, με διακριτική ικανότητα 0.2 μm. Οι ανάγκες όμως που είχαν δημιουργηθεί ήταν της τάξης του 10.000x. Η έρευνα που έγινε έδωσε λύση με την εφεύρεση και την υιοθέτηση των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων. Το πρώτο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο ήταν το διέλευσης -ή διαπερατότητας- (T.E.M., Transmission Electron Microscope) και ακολουθήθηκε από το μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων (S.E.M., Scanning Electron Microscopy). Τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια υπερκάλυψαν τις αρχικές ανάγκες που υπήρχαν -καθώς φτάνουν πια σε μεγεθύνσεις της τάξεως του > 500.000x με διακριτική ικανότητα 1nm- και άνοιξαν τους ορίζοντες για μια νέα προσέγγιση του μικρόκοσμου από τους επιστήμονες [56],[57].

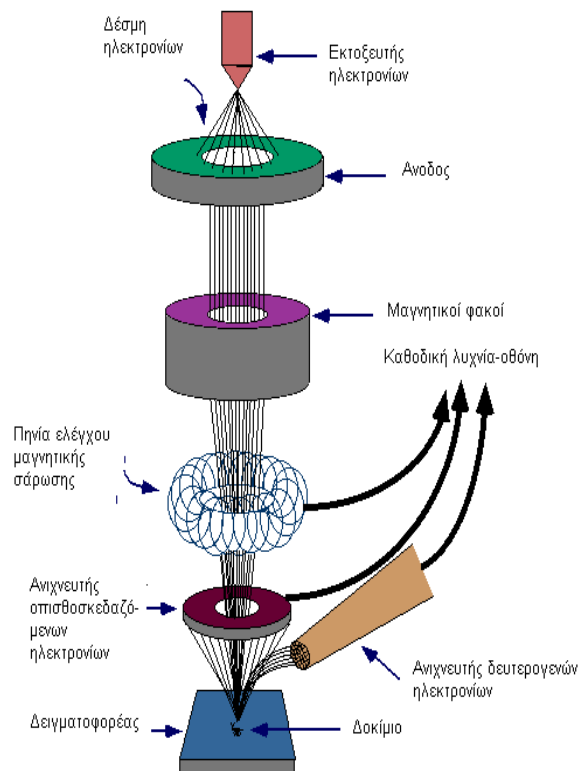
3.1.2 Αρχή λειτουργίας του S.E.M.

Σε αντίθεση με τα οπτικά μικροσκόπια που χρησιμοποιούν φωτεινές ακτίνες και συνηθισμένους φακούς, το S.E.M. δημιουργεί είδωλο της μετρούμενης επιφάνειας με τη χρήση δέσμης ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας και ηλεκτρομαγνητικών φακών (Εικόνα 3.1). Το είδωλο αυτό προβάλλεται σε μια οθόνη-συνήθως ηλεκτρονικού υπολογιστή. Για να γίνει η μέτρηση, δημιουργούνται συνθήκες «κενού», εκπέμπεται μια δέσμη ηλεκτρονίων που κατευθύνεται στο δείγμα και ουσιαστικά γίνεται ανάλυση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ηλεκτρονίων της δέσμης και των ηλεκτρονίων του

δείγματος [55-59]. Τα ηλεκτρόνια του δείγματος εκπέμπονται από τα άτομά του και συνήθως είναι δευτερογενή (secondary) και οπισθοσκεδαζόμενα (backscattered). Εκτός από ηλεκτρόνια, υπάρχουν και ακτίνες Χ που δημιουργούνται από την πρόσπτωση των ηλεκτρονίων στην επιφάνεια που μελετούμε. Με τη μέτρηση της έντασης των ηλεκτρονίων και της διασποράς των ακτινών Χ, μπορούμε να πάρουμε τις απαραίτητες πληροφορίες για την εξεταζόμενη επιφάνεια, όπως τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται, την μορφή της και την κρυσταλλογραφική διάταξη των ατόμων. Γίνεται αντιληπτό δηλαδή ότι με το S.E.M είναι πολύ πιο εύκολο να μελετηθεί η μικροδομή ενός υλικού, καθώς η εστίαση γίνεται σε μια επιφάνεια με πολύ μικρότερο εμβαδό σε σχέση με αυτήν που μελετά ένα οπτικό μικροσκόπιο και σε μεγάλο βάθος διεύθυνσης [55-59].

3.1.3 Βασικά μέρη του S.E.M. και περιορισμοί με βάση την αρχή λειτουργίας του

Τα βασικά μέρη του S.E.M. είναι το αυτό της παραγωγής και εκτόξευσης της δέσμης ηλεκτρονίων, οι ηλεκτρομαγνητικοί φακοί που κατευθύνουν και εστιάζουν τη δέσμη, οι ανιχνευτές πληροφοριών και το σύστημα για τη δημιουργία και τη διατήρηση του «κενού». Οι μετρήσεις που γίνονται από το S.E.M. στηρίζονται στο πώς αλληλοεπιδρούν τα ηλεκτρόνια της δέσμης που προσπίπτει στο δείγμα με τα ηλεκτρόνια του δείγματος. Το S.E.M. μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη δοκιμίων φτιαγμένων από υλικό που είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού και να υπάρχει η απαραίτητη γείωση [55-59]. Εάν δεν τηρηθούν αυτές οι προϋποθέσεις, η επιφάνεια του δοκιμίου φορτίζεται αρνητικά σε μικρό χρόνο από τα ηλεκτρόνια του αρνητικού φορτίου της δέσμης, με αποτέλεσμα αυτά να απωθούνται και να μην προσκρούουν επάνω στο δοκίμιο. Με λίγα λόγια, γίνεται αδύνατη η πραγματοποίηση της μέτρησης.



Εικόνα 3.1: Βασικά εξαρτήματα και λειτουργία του S.E.M. (πηγή: Dr. Ludwig Reimer, *Scanning Electron Microscopy-Physics of Image Formation and Microanalysis*, Springer Series in Optical Sciences, Vol.45, 1998)

3.1.4 Λειτουργία ενός S.E.M.

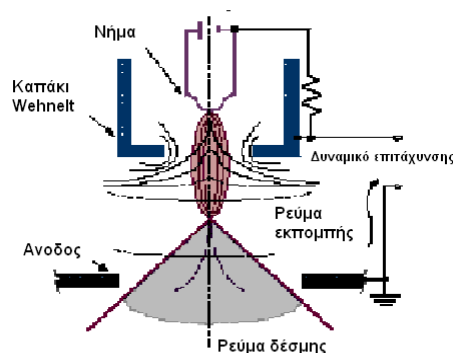
Για τη μελέτη μιας επιφάνειας ενός δοκιμίου, πρώτα γίνεται σχολαστικός καθαρισμός του και τοποθετείται επάνω σε μια ειδική βάση στο εσωτερικό του S.E.M. Στη συνέχεια, ο χώρος του S.E.M. κλείνει και με τη χρήση κατάλληλων αντλιών ο αέρας που έχει εγκλωβιστεί μέσα στο S.E.M. απομακρύνεται από το εσωτερικό του. Δημιουργούνται δηλαδή συνθήκες «κενού», καθώς η πίεση είναι της τάξεως του $2e^{-3}$ Pa. Η ανάγκη για την απομάκρυνση του αέρα γεννιέται από το ότι η δέσμη των ηλεκτρονίων μπορεί να δημιουργείται και να ταξιδεύει σταθερά σε μεγάλη απόσταση μόνο σε τέτοιες συνθήκες [55-59]. Σε διαφορετική περίπτωση, τα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα μόρια του αέρα, και είτε απορροφώνται από αυτά είτε σκεδάζονται. Το αποτέλεσμα είναι να μην πραγματοποιείται η μέτρηση.

Εάν έχουν επιτευχθεί οι παραπάνω συνθήκες, εκτελούνται διαδοχικά τα εξής βήματα (Εικόνα 3.2):

1. Γίνεται διέλευση ρεύματος από ένα νήμα βολφραμίου ή άλλου υλικού που είναι εξίσου αγωγίμο και ανθεκτικό στις υψηλές θερμοκρασίες. Το νήμα λειτουργεί ως κάθοδος. Απέναντι από την κάθοδο, υπάρχει ένα δυναμικό που λειτουργεί ως άνοδος και αναγκάζει τη δέσμη

ηλεκτρονίων που δημιουργείται να επιταχυνθεί λόγω του θετικού ηλεκτρικού δυναμικού και να κατευθυνθεί προς το δείγμα [55-59].

2. Κατά το μήκος που διατρέχει η δέσμη υπάρχουν ηλεκτρομαγνητικοί φακοί, πηνία για τον έλεγχο της μαγνητικής σάρωσης και κατάλληλου μεγέθους και σχήματος μεταλλικά τοιχώματα. Όλα αυτά λεπταίνουν τη δέσμη, μεγαλώνοντας παράλληλα την πυκνότητα των ηλεκτρονίων. Η επιφάνεια του δείγματος σαρώνεται με τη δέσμη και δημιουργούνται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ηλεκτρονίων της δέσμης και των ηλεκτρονίων του δοκιμίου [55],[56].
3. Με χρήση κατάλληλων ανιχνευτών, οι αλληλεπιδράσεις μετρούνται και στέλνονται σε μια εξωτερική οθόνη, όπου και εμφανίζεται ένα είδωλο αντίστοιχο με τις εκπομπές του δοκιμίου.



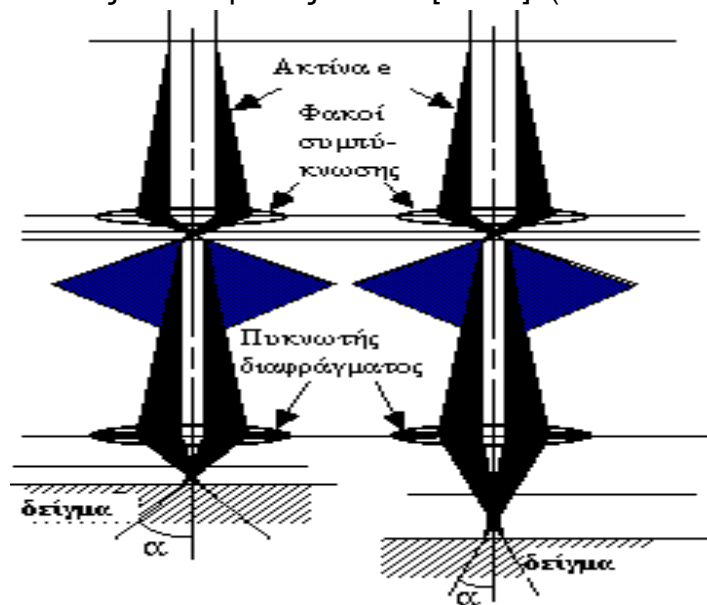
Εικόνα 3.2: Διάγραμμα εκπομπής δέσμης (πηγή: Dr. Ludwig Reimer, *Scanning Electron Microscopy- Physics of Image Formation and Microanalysis*, Springer Series in Optical Sciences, Vol.45, 1998)

3.1.5 Παρατηρήσεις για τη λειτουργία του S.E.M.

1. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται από το νήμα φτάνει σε ένα μέγιστο με την αύξηση του ρεύματος που διέρχεται από το νήμα, δηλαδή το νήμα έρχεται σε κορεσμό (filament saturation). Μια περαιτέρω αύξηση του ρεύματος οδηγεί σε υπερθέρμανση και καύση του νήματος. Το νήμα εξαχνώνεται και κατά τη λειτουργία στο σημείο κορεσμού, γι' αυτό και χάνει το αρχικό πάχος του με την πάροδο του χρόνου [55],[57].
2. Τα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν την δέσμη των ηλεκτρονίων είναι:
 - i. Το ρεύμα εκπομπής (emission current), το οποίο εκφράζει τον αριθμό των ηλεκτρονίων. Το ρεύμα αυτό εξαρτάται από την απόσταση που υπάρχει ανάμεσα στην άκρη του νήματος και στο καπάκι Wehnelt (Εικόνα 3.2). Όσο αυτή η απόσταση μειώνεται, το ρεύμα αυξάνεται λόγω της αύξησης των ηλεκτρονίων που έλκονται. Το καπάκι επίσης μετακινείται από τον χειριστή και έτσι ρυθμίζεται η γωνία σύγκλισης α (convergence angle), η

γωνία δηλαδή που ορίζει το βάθος του πεδίου. Εάν η γωνία είναι μικρή, το βάθος αυξάνει και το αντίστροφο [58].

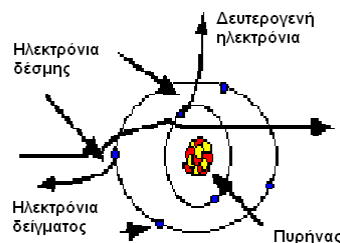
- ii. Τα ηλεκτρόνια γίνονται δέσμη ύστερα από την διέλευση τους μέσα από έναν ηλεκτρομαγνητικό φακό συμπύκνωσης (condenser lens). Όσο πιο ισχυρός είναι αυτός ο φακός, τόσο πιο λεπτή θα είναι η δέσμη (spot size) και η γωνία σύγκλισης α [59].
- iii. Εκτός από τον ηλεκτρονικό φακό συμπύκνωσης, η δέσμη επηρεάζεται και από άλλους ηλεκτρομαγνητικούς φακούς. Όλοι αυτοί, ανάλογα με το ρεύμα που ρέει μέσα τους, δίνουν την δυνατότητα για αλλαγή της εστίασης της δέσμης [55],[56].
- iv. Η απόσταση ανάμεσα στο σημείο που προσπίπτει η δέσμη των ηλεκτρονίων δείγμα και τους χαμηλότερους φακούς ονομάζεται απόσταση εργασίας (Working Distance) και επηρεάζει την ανάλυση του δείγματος. Εάν οι φακοί απομακρυνθούν από το δοκίμιο, το σημείο που προσπίπτει η ακτίνα μειώνεται και μαζί του μειώνεται και η ανάλυση. Το βάθος όμως που διεισδύει η δέσμη αυξάνεται λόγω της μείωσης την γωνίας σύγκλισης, μεγαλώνοντας έτσι το βάθος πεδίου [55-59]. (Εικόνα 3.3)



Εικόνα 3.3: Επίπτωση της απόστασης εργασίας στην γωνία σύγκλισης α (πηγή: Dr. Ludwig Reimer, *Scanning Electron Microscopy-Physics of Image Formation and Microanalysis*, Springer Series in Optical Sciences, Vol.45, 1998)

3. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι ανιχνευτές είναι οι ακόλουθοι [55],[58],[59]:
 - ανιχνευτής δευτερογενών ηλεκτρονίων -π.χ. Everhart – Thornley Detector (ETD)
 - ανιχνευτής ευρέως πεδίου (Large Field Detector, LFD)
 - ανιχνευτής αερίων (Gaseous Electron Detector, GED) για την συλλογή δευτερογενών ηλεκτρονίων, ειδικά σε περιβαλλοντικό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης

- ανιχνευτής διόδου στερεάς φάσης (Solid State Electron Detector, SSEED) για τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (BSE)
 - ανιχνευτής διόδου λιθίου – πυριτίου (Si-Li), με τον οποίο ανιχνεύουμε την ενεργειακή διασπορά ακτινών X (Energy Dispersive Spectrometer, EDS).
4. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του S.E.M. σε σχέση με ένα απλό μικροσκόπιο φωτός είναι το βάθος του δείγματος που μπορεί να μελετηθεί. Το βάθος στο οποίο μπορεί να διεισδύσει η δέσμη των ηλεκτρονίων και κατ' επέκταση να εμφανιστεί στην οθόνη εξαρτάται από τις ακόλουθες μεταβλητές:
- Πλήθος ηλεκτρονίων δέσμης (emission current)
 - Διάμετρος της δέσμης (spot size)
 - Ταχύτητα / Ενέργεια των ηλεκτρονίων (accelerating voltage)
 - Είδος του δείγματος. Πιο συγκεκριμένα, πόσο μεγάλος είναι ο μέσος ατομικός αριθμός του δείγματος.
5. Καθώς η δέσμη ηλεκτρονίων προσκρούει στο δοκίμιο, σε μια περιοχή που ονομάζεται όγκος αλληλεπίδρασης, παράγονται σε μορφή εκπομπών οι μορφές δευτερεύουσας ακτινοβολίας. Ακόμα, το δείγμα θερμαίνεται και παράγονται ακτίνες X και καθοδοφωτοβολία. Ο τρόπος σκέδασης των ηλεκτρονίων δημιουργείται και διαφορετικό αποτέλεσμα:
- Όταν τα ηλεκτρόνια σκεδάζονται ελαστικά, εκτρέπονται σε μεγαλύτερη γωνία και υφίστανται μικρότερη απώλεια ενέργειας. Τα ηλεκτρόνια αυτά χωρίζονται σε αυτά που σκεδάζονται μόνο στο εσωτερικό του υλικού και στα οπισθοσκεδαζόμενα [55],[59]. Τα τελευταία είναι αυτά που έχουν ενδιαφέρον για την μέτρηση, μιας και έχουν μεγαλύτερη ενέργεια και εκπέμπονται από μεγαλύτερο βάθος από το δείγμα. Ανάλογα με την ενέργεια που έχουν, δίνουν πληροφορίες για τη σύσταση του υλικού. Ξέρουμε πως όταν το υλικό από το οποίο αποτελείται το δοκίμιο έχει μεγάλο ατομικό αριθμό και πυκνότητα τότε η εμβέλεια της δέσμης είναι μικρή, και το αντίστροφο [55],[56]. Επίσης, τα υλικά με μεγαλύτερο ατομικό αριθμό δημιουργούν περισσότερα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια, κάνοντας έτσι λαμπρότερη την εικόνα που εμφανίζεται.



Εικόνα 3.4: Δημιουργία δευτερογενών ηλεκτρονίων (πηγή: Dr. Ludwig Reimer, *Scanning Electron Microscopy-Physics of Image Formation and Microanalysis*, Springer Series in Optical Sciences, Vol.45, 1998)

- Όταν πάλι τα ηλεκτρόνια σκεδάζονται ανελαστικά, τότε εκτρέπονται κατά μικρότερη γωνία και υφίστανται μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας. Και εδώ, όπως και πριν, το S.E.M. μετρά μόνο μια κατηγορία για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, την κατηγορία των δευτερογενών ηλεκτρονίων (Secondary electrons). Τα συγκεκριμένα ελευθερώνονται από τα άτομα του υλικού με το μηχανισμό του ιονισμού κατά την πρόσπτωση των ηλεκτρονίων της δέσμης στο δοκίμιο [55],[56] (Εικόνα 3.4). Δημιουργούνται καθώς η δέσμη εισέρχεται στην επιφάνεια, αλλά και όταν τα οπισθοσκεδαζόμενα εξέρχονται από την επιφάνεια του δοκιμίου. Συνήθως συμβαίνει το δεύτερο, γι' αυτό και οι δυο αυτές κατηγορίες εντοπίζονται στις ίδιες περιοχές του δοκιμίου και δίνουν παρόμοιες εικόνες. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια έχουν χαμηλή ενέργεια, ίση περίπου με 50 eV, και εκπέμπονται κοντά στην επιφάνεια του δείγματος αφού είναι πιο εύκολο να ξεφύγουν προς τα έξω. Αυτά που εκπέμπονται από μεγαλύτερο βάθος, απορροφώνται [57]. Όπως και με τα οπισθοσκεδαζόμενα, ο αριθμός των δευτερογενών είναι άμεσα εξαρτώμενος από το υλικό του δοκιμίου, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται μαζί με τα οπισθοσκεδαζόμενα για να καθοριστεί η μορφή της επιφάνειας.

3.1.6 Εφαρμογές του S.E.M.

Από την πρώτη εμφάνισή τους, τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια έχουν βρει μεγάλη απήχηση στην επιστημονική κοινότητα και χρησιμοποιούνται κατά κόρον για ερευνητικούς σκοπούς, παρά το υψηλό κόστος κτήσης τους και της πολυπλοκότητας του συνόλου του. Η γκάμα των εφαρμογών εντοπίζεται κυρίως σε περιπτώσεις που ενδιαφερόμαστε για την μορφή και τα στοιχεία που συνθέτουν μια μικροδομή. Σαν παραδείγματα μπορούν να αναφερθούν η μέτρηση της τραχύτητας μιας επιφάνειας, του μεγέθους ενός μορφοκλάσματος (fractal), της έκτασης της οξειδωσης σε ένα υλικό, της επικάλυψης μιας επιφάνειας, των διαστάσεων σε νανοεπίπεδο, της κατηγοριοποίησης ανάλογα την σύσταση, κ.α. [55-59]. Όλα αυτά τα πεδία μπορούν να μελετηθούν σε μεγαλύτερη έκταση λόγω της μεγαλύτερης και ευκολότερης εστίασης σε ένα σημείο και των τρισδιάστατων εικόνων που λαμβάνουμε, χωρίς να αφιερώνουμε πολύτιμο χρόνο για να προετοιμάσουμε ένα δείγμα για ανάλυση.

3.2 ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΟ

3.2.1 Ορισμός και κατηγορίες προφίλομέτρων

Το προφιλόμετρο είναι ένα μετρητικό όργανο που χρησιμοποιείται για να μετρηθεί το προφίλ μιας επιφάνειας, με απώτερο σκοπό να ποσοτικοποιηθεί η τραχύτητα της.

Τα προφιλόμετρα, ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους, χωρίζονται σε δυο κύριες κατηγορίες [60],[61] :

1. Οπτικά προφιλόμετρα
2. Προφιλόμετρα επαφής

Πιο αναλυτικά, στα οπτικά προφιλόμετρα βρίσκουμε τις εξής κατηγορίες, ανάλογα με τη μέθοδο στην οποία βασίζονται:

- Ψηφιακό ολογραφικό μικροσκόπιο
 - Συμβολόμετρο Μετατόπισης Φάσης
 - Συμβολόμετρο Κάθετης Σάρωσης / Συμβολόμετρο λευκού φωτός
 - Μικροσκόπιο D.I.C. (γνωστό και ως μικροσκόπιο Nomarski)
- Μέθοδοι ανίχνευσης εστίασης
- Ανίχνευση έντασης
 - Διαφορικής ανίχνευσης
 - Κρίσιμης γωνίας
 - Ομοεστιακό μικροσκόπιο
 - Μεταβολή εστίασης
 - Αστιγματική
 - Μέθοδος Foucault
- Μέθοδοι προβολής μοτίβου
- Προβολή κροσσών
 - Προφιλόμετρο Fourier
 - Μοτίβο moiré/κροσσοί moiré
 - Αντανάκλαση μοτίβου

Όσο για τα προφιλόμετρα επαφής, αυτά διαχωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες [60],[61]:

- Προφιλόμετρο γραφίδας (γνωστό και ως μηχανικό προφιλόμετρο) [62]
- Μικροσκόπιο δύναμης ατόμου [63]
- Μικροσκόπιο σάρωσης σήραγγας

3.2.2 Προφιλόμετρο επαφής

3.2.2.1 Αρχή λειτουργίας προφιλόμετρων επαφής

Η μέτρηση γίνεται μέσω της επαφής του μετρούμενου δείγματος με την ειδική διάταξη που διαθέτει το μετρητικό όργανο [60–62]. Πιο συγκεκριμένα, μια γραφίδα από διαμάντι με κάθετο προσανατολισμό έρχεται σε επαφή με το δείγμα που μετράται. Αυτή κινείται πλάγια επάνω στο δείγμα, ασκώντας πάνω του μια συγκεκριμένη δύναμη επαφής, για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Λόγω της τραχύτητας του δοκιμίου, ο κατακόρυφος προσανατολισμός της γραφίδας αλλάζει ανάλογα με την θέση στην οποία βρίσκεται. Η κάθετη μετατόπιση παράγει ένα αναλογικό σήμα, το οποίο μετατρέπεται σε ψηφιακό, αναλύεται και απεικονίζεται. Για να υπολογίσει την τραχύτητα του δείγματος, το προφιλόμετρο επεξεργάζεται τις δυο μεταβλητές-κάθετη και οριζόντια μετατόπιση. Στο οπτικό προφιλόμετρο, οι κάθετες μετατοπίσεις της γραφίδας που μπορούν να μετρηθούν κυμαίνονται στο διάστημα μεταξύ 10 nm και 1mm [61]. Η γραφίδα έχει συνήθως διάμετρο 20 με 50 nm και η δύναμη που ασκεί επάνω στο δοκίμιο κατά την επεξεργασία του κυμαίνεται μεταξύ 1 με 50 mg [62].

3.2.2.2 Πλεονεκτήματα προφιλόμετρων επαφής

- Λόγω του ότι ήταν το πρώτο είδος προφιλόμετρου που εφευρέθηκε, τα περισσότερα πρότυπα στηρίζονται σε αυτά και η χρήση τους αποτελεί πολλές φορές μονόδρομο για πιστοποιημένα αποτελέσματα. Δεν είναι λοιπόν περίεργο που συναντούν ευρεία αποδοχή από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα.
- Μιας και η γραφίδα είναι σε επαφή με το δοκίμιο, δεν επηρεάζεται τόσο από διάφορα άλλα στοιχεία που μπορεί να βρίσκονται στην επιφάνειά του -π.χ. ακαθαρσίες-όσο ένα οπτικού τύπου, ενώ επιπρόσθετα, οι μετρήσεις μας δεν επηρεάζονται από το χρώμα ή τις αντανακλάσεις της επιφάνειας που μετράται.
- Στηρίζεται στην άμεση επαφή με το δοκίμιο και άρα δε χρειάζεται να γίνει μοντελοποίηση των δεδομένων-όπως στο οπτικό.

3.2.2.3 Μειονεκτήματα προφιλόμετρων επαφής

- Λόγω του ότι οι μετρούμενες επιφάνειες είναι πολλές φορές πολύ λεπτές -π.χ. φιλμ- ή ευαίσθητες λόγω μικρής σκληρότητας, καθίσταται αδύνατη η μέτρηση της τραχύτητάς τους με προφιλόμετρο επαφής [59].

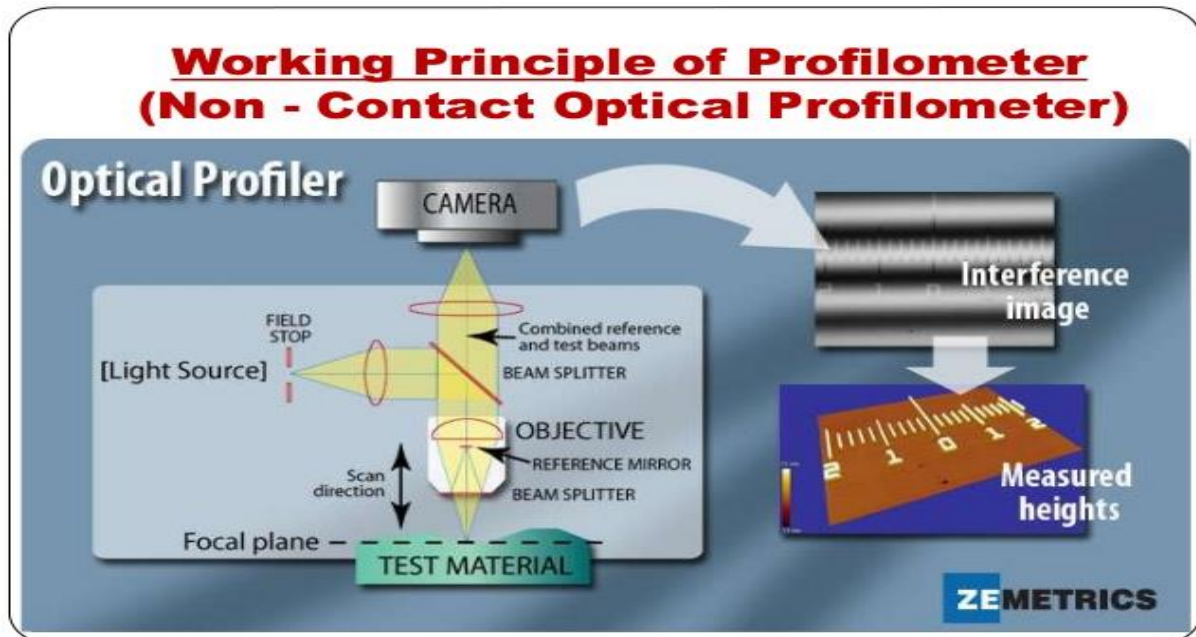
- Από την άλλη πλευρά, υπάρχει επίσης το ενδεχόμενο να προκληθεί βλάβη στην γραφίδα λόγω πολύ σκληρών ή ανομοιογενών επιφανειών.
- Μέχρι πρότινος, τα αποτελέσματα ήταν διαθέσιμα μόνο σε 2D μορφή, πράγμα που έκανε δυσνόητη την κατανόησή τους σε αρκετές περιπτώσεις. Οι νέες τεχνικές έχουν κάνει δυνατή την 3D εμφάνιση αποτελεσμάτων, με αντίκτυπο όμως τον αυξημένο χρόνο που είναι αναγκαίος για να γίνει η μοντελοποίηση.

3.2.3 Οπτικό Προφιλόμετρο

3.2.3.1 Αρχή λειτουργίας οπτικών προφιλόμετρων

Τα οπτικά προφιλόμετρα μετρούν την τραχύτητα μιας επιφάνειας ακολουθώντας τις τεχνικές της συμβολομετρίας και τις συνδυάζουν με την χρήση μικροσκοπίου. Η διάταξη και η λειτουργία τους περιγράφονται ως εξής (Εικόνα 3.5):

Μια δέσμη φωτός διαχωρίζεται σε δυο ίσες μέσω ενός Διαχωριστή Δέσμης (beam splitter) [59]. Ο Διαχωριστής Δέσμης είναι ένα κομμάτι γυαλιού που έχει μια λεπτότατη επίστρωση από ασήμι. Όταν η δέσμη του φωτός θα προσκρούσει πάνω του, η μισή θα συνεχίσει να κινείται στην ίδια κατεύθυνση και σε ευθεία γραμμή και η άλλη μισή θα ανακλαστεί προς τα πίσω. Η δέσμη που συνέχισε στην αρχική κατεύθυνση, ανακλάται σε έναν καθρέπτη και καταλήγει σε κάποια μετρητική διάταξη. Η δέσμη που έχει υποστεί ανάκλαση από τον Διαχωριστή Δέσμης κατευθύνεται στην επιφάνεια που θέλουμε να μετρήσουμε, ανακλάται επάνω της και επιστρέφει πίσω στον Διαχωριστή και μετά στην ίδια μετρητική διάταξη που κατέληξε και η άλλη [61],[62].



Εικόνα 3.5: Αρχή λειτουργίας οπτικών προφιλόμετρων. (πηγή: Zometrics, Inc.)

Μιας και η μια έχει διατρέξει περισσότερη απόσταση από την άλλη, βρίσκεται σε διαφορετική φάση. Οι δύο δέσμες φωτός συγκρούονται και επικαλύπτονται μεταξύ τους λόγω της διαφορετικής μεταξύ τους φάσης, παράγοντας αυτό που εμείς βλέπουμε σαν μοτίβο ασπρόμαυρων γραμμών. Αυτές δεν είναι τίποτα άλλο από τους κροσσούς συμβολής. Εκεί που οι δυο δέσμες έχουν αφαιρεθεί η μια από την άλλη- έχει μειωθεί η ενέργεια τους δηλαδή- τότε η περιοχή γίνεται σκούρα. Όταν έχει γίνει το αντίθετο-οι δέσμες δηλαδή έχουν ενωθεί και έχουν παράγει ένα μεγαλύτερο κύμα φωτός-η περιοχή γίνεται άσπρη. Αυτό που ακολουθεί μετά είναι η μέτρηση και η επεξεργασία του μοτίβου για να διαπιστώσουμε τις διαφορές στην τραχύτητα μεταξύ του κάθε σημείου της επιφάνειας του δοκιμίου που μετράται.

3.2.3.2 Πλεονεκτήματα οπτικών προφιλόμετρων

- Στα οπτικά προφιλόμετρα -σε αντίθεση με τα προφιλόμετρα επαφής-δεν υπάρχει άμεση επαφή με την μετρούμενη επιφάνεια και άρα δεν συναντώνται συχνά οι συνηθισμένες ζημιές που συμβαίνουν στα επαφής-όπως λόγω απροσεξίας του χρήστη ή η αναπόφευκτη φθορά λόγω της επαφής της γραφίδας με την επιφάνεια μέτρησης. Επιτυγχάνεται επίσης εξοικονόμηση χρόνου και χρήματος, καθώς λόγω της ανυπαρξίας φθειρόμενων μερών, δεν χρειάζεται να γίνεται η-όχι και τόσο απλή, χρονοβόρα και ακριβή πολλές φορές-αλλαγή γραφίδας. Τα νέα μηχανήματα επίσης χρησιμοποιούν σε αρκετές περιπτώσεις λάμπα L.E.D. και πρακτικά δεν χρειάζεται αντικατάσταση [59].

- Ένας ακόμα λόγος για τον οποίον προτιμώνται κάποιες φορές είναι η κατασκευή τους με την μέθοδο της Στερεάς Κατάστασης, πράγμα το οποίο τα κάνει να χρειάζονται πολύ λιγότερη συντήρηση σε σχέση με τα άλλα.
- Η ικανότητά τους να μοντελοποιούν σε τρεις διαστάσεις 3D τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι ξεκάθαρα γρηγορότερη από την αντίστοιχη των προφίλομέτρων επαφής.
- Πολύ σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι μπορεί να παρατηρηθεί μια αρκετά μεγάλη περιοχή με μια μόνο μέτρηση, πράγμα το οποίο την κάνει πιο χρήσιμη από μια μέτρηση λεπτής γραμμής ενός προφίλομέτρου επαφής. Η περιοχή που μας ενδιαφέρει μπορεί επίσης να προσδιοριστεί ευκολότερα με καρτεσιανές συντεταγμένες και να μελετηθεί σε αντιδιαστολή με άλλες.
- Οι νέες τεχνικές που εφαρμόζονται στα οπτικά προφίλομετρα μας επιτρέπουν να μετρήσουμε επιφάνειες που δεν έχουν επίπεδο σχήμα -π.χ. καμπύλη.

3.2.3.3 Μειονεκτήματα οπτικών προφίλομέτρων

- Σε πολύ υψηλές πλαγιές των κορυφών, είναι αναγκαίο να υπάρχει αρκετή επιφάνειά τους που θα αντανakλά το φως και δεν θα το αντικατοπτρίζει μακριά από το όργανο μας.
- Χρειάζεται ακόμα προσοχή και υπολογισμός κατά τη μέτρηση επιφανειών που αποτελούνται από διαφορετικά υλικά, μιας και το καθένα έχει διαφορετικό δείκτη διάθλασης του φωτός και χρειάζεται προσεκτική βαθμονόμηση από το χρήστη.
- Για να μπορέσουν να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της μέτρησης, χρειάζεται να υπάρχει ένα -συνήθως ακριβό- λογισμικό επεξεργασίας και μετατροπής τους.

4. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

4.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στην παρούσα πτυχιακή, επιλέχθηκε να κατεργαστούν τα κάτωθι υλικά:

1. Ανοξειδωτος χάλυβας AISI-SAE 304
2. Κατασκευαστικός χάλυβας S235JR / St 37-2
3. Αρχιτεκτονικός ορείχαλκος UNS C38000

4.1.1 Ανοξειδωτος χάλυβας AISI-SAE 304

Ο ανοξειδωτος χάλυβας με τυποποίηση AISI – SAE 304 ή ISO A2 ή UNS S30400 ή EN 1.4301 έχει σαν κύρια φάση τον ωστενίτη (γ -Fe). Η χημική του σύσταση και οι μηχανικές του ιδιότητες παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες:

Πίνακας 4.1: Χημική σύσταση AISI-SAE 304 (πηγή:ASM Aerospace Specification Metals, Inc.)

Χημικό στοιχείο	Fe	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N
Μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση %	66.5	0.08	1.9	0.75	0.045	0.03	20	10.5	0.1

Πίνακας 4.2: Μηχανικές ιδιότητες AISI-SAE 304(πηγή: Specialty Steel Industry of North America (SSINA))

Μηχανικές ιδιότητες	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa) min	Όριο διαρροής (MPa) min	Πυκνότητα (kg/m ³)	Σκληρότητα		Λόγος Poisson
				Rockwell B (HR B)	Brinell (HB)	
Τιμή	590	240	7800	92	201	0.28

Το νικέλιο Ni και το μαγγάνιο Mn κρατούν σταθερή τη φάση του ωστενίτη σε όλο το φάσμα των θερμοκρασιών. Το ποσοστό του νικελίου ορίζει επίσης και την αντοχή

του σε διάβρωση. Λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα C έχουν καλή αντίσταση στη διακρυσταλλική διάβρωση [64].

Στις ιδιότητες τώρα, αυτή η κατηγορία των χαλύβων δεν είναι μαγνητικοί, αλλά κάτω από ψυχρή έλαση αποκτούν κάποιες μαγνητικές ιδιότητες [65]. Αν και είναι πολύ όλκιμοι, δεν ανήκουν στα υλικά που είναι εύκολα στην κατεργασία τους. Τα αίτια είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητά τους και η υψηλή μηχανική ευαισθησία τους σε επίπεδο μικροδομής όταν ασκούνται τέτοιες τάσεις και πιέσεις [66],[67]. Ακόμα, οι ωστενιτικοί χάλυβες δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία.

4.1.1.1 Εφαρμογές ανοξείδωτου χάλυβα AISI-SAE 304: Η οικογένεια 300 έχει το μεγαλύτερο ποσοστό στις εφαρμογές που χρησιμοποιείται ανοξείδωτος χάλυβας, ξεπερνώντας το 70%. Παραδείγματα χρήσης τους είναι:

Συνδετήρες, κοχλίες, βίδες, βαρέλια μπύρας, αρχιτεκτονικά πλαίσια και πίνακες, φυσούνες, χημικός εξοπλισμός (χαρτοβιομηχανία, κ.λπ.), εξοπλισμός μαγειρικής (κατσαρόλες, τηγάνια, κ.λπ.), κρυογονικά δοχεία, αμαξοστοιχίες, γαλακτοκομικός εξοπλισμός, βραστήρες, μαχαιροπίρουνα, εξοπλισμός επεξεργασίας τροφίμων, νοσοκομειακός χειρουργικός εξοπλισμός (υποδόριες βελόνες, κ.λπ.), ωρολογοποιία, ναυτιλία (πυρηνικά σκάφη, τύμπανα πλοίων, κ.λπ.), φίλτρα (πετρελαιοπηγών, νερού, κ.λπ.), ψυκτικός εξοπλισμός (εναλλάκτες θερμότητας, κ.λπ.), δοχεία πίεσης, είδη υγιεινής (νεροχύτες, κ.λπ.), βαλβίδες, τύμπανα πλοίων, ελατήρια, κλώση, εξοπλισμός βαφής υφασμάτων, σωληνώσεις (εύκαμπτοι μεταλλικοί σωλήνες, σωληνώσεις ύδατος τροφοδοσίας, κ.λπ.).

Προσοχή χρειάζεται στο να μη χρησιμοποιηθεί το συγκεκριμένο είδος χάλυβα σε εφαρμογές όπου υπάρχει οποιαδήποτε συγκέντρωση θειικού οξέος ή υδροχλωρικού οξέος, καθώς είναι πολύ οξειδωτικά κατά την επαφή τους με το συγκεκριμένο τύπο.

4.1.2. Κατασκευαστικός χάλυβας S235JR

Ο χάλυβας με τη γερμανική τυποποίηση RSt 37-2 πήρε το όνομα S235JR με την οδηγία EN10025 και είναι γνωστός και με την αμερικανική τυποποίηση USA A283C [71]. Όπως και οι υπόλοιποι κατασκευαστικοί χάλυβες, επιλέγεται για πολλές και ποικίλες εφαρμογές.

Η χημική του σύσταση και οι κύριες μηχανικές ιδιότητες του παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 4.3: Χημική σύσταση EN10025 S235JR (πηγή: AZoM Materials)

Χημικό στοιχείο	C	Mn	Si	P	S	N	Cu
Μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση %	0.24	0.9	0.4	0.035	0.045	0.01	0.5

Πίνακας 4.4: Μηχανικές ιδιότητες EN10025 S235JR (πηγή: AZoM Materials)

Μηχανικές ιδιότητες	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Όριο διαρροής (MPa)	Πυκνότητα(kg/m ³)	Λόγος Poisson
Τιμή	370	230	7900	0.29

4.1.2.1 Εφαρμογές κατασκευαστικού χάλυβα S235JR. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των κατασκευαστικών χάλυβων είναι ότι συνδυάζουν καλή συγκολλησιμότητα με καλή αντοχή. Ο συγκεκριμένος επιλέγεται για κατασκευές όλων των ειδών και των μεγεθών, ειδικά σε περιπτώσεις όπου θέλουμε να αυξήσουμε την αντοχή της δομής της κατασκευής, μειώνοντας παράλληλα το βάρος της.

4.1.3. Αρχιτεκτονικός ορείχαλκος UNS C38000

Ο αρχιτεκτονικός ορείχαλκος UNS C38000 ή ASTM B455 ή EN CW624N είναι ένα κράμα χαμηλής περιεκτικότητας σε μόλυβδο με χημική ονομασία EN CuZn43Pb2Al [69],[70]. Έχει μια μικρή προσθήκη αλουμινίου -εξού και το λαμπρό χρυσό χρώμα, καλή μηχανική αντοχή και είναι εύκολα κατεργάσιμος. Η αιτία για το τελευταίο είναι η ύπαρξη μόλυβδου (Pb) στη σύστασή του [69],[72]. Ο μόλυβδος συγκεντρώνεται στα όρια μεταξύ των κρυστάλλων σε μικρά κατακρημνίσματα. Μιας και ο μόλυβδος δεν είναι διαλυτός μέσα στις κύριες φάσεις του ορείχαλκου, ο συγκεκριμένος τύπος ορείχαλκου παράγει μικρότερου μεγέθους απόβλητα κατά την κατεργασία του λόγω των ασυνεχειών που παρουσιάζονται από τα κατακρημνίσματα του μόλυβδου. Μια ακόμα επίπτωση της ύπαρξης του μόλυβδου είναι η λίπανση που παρέχει, κάτι που παρατηρείται στην επιλογή του σαν συμπληρωματικό του χαλκού σε εφαρμογές που χρησιμοποιούνται έδρανα (ρουλεμάν) [73].

Η χημική του σύσταση και οι μηχανικές του ιδιότητες συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 4.5: Χημική σύσταση UNS C38000 (πηγή: MakeltFrom.com)

Χημικό στοιχείο	Cu	Zn	Al	Pb	Fe	Sn	Υπολείμματα
Μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση %	57	43	0.5	2	0.35	0.3	0.5

Πίνακας 4.6: Μηχανικές ιδιότητες UNS C38000 (πηγή: MakeltFrom.com)

Μηχανικές ιδιότητες	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Όριο διαρροής (MPa)	Πυκνότητα(kg/m ³)	Λόγος Poisson
Τιμή	380	130	8200	0.31

4.1.3.1 Εφαρμογές αρχιτεκτονικού ορείχαλκου UNS C38000. Εκτός από εφαρμογές που απαιτούν καλές λιπαντικές ιδιότητες και εύκολη μηχανική επεξεργασία, επιλέγεται σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές εξαιτίας των καλών ιδιοτήτων του και του λαμπρού χρώματός του.

4.1.4 Αιτίες επιλογής των ανωτέρω υλικών

Μετά από μελέτη στην διεθνή βιβλιογραφία, δεν βρέθηκαν σχεδόν καθόλου αναφορές για την ακριβή συμπεριφορά του ορείχαλκου C38000 κατά την τόννευση, πράγμα που κάνει πολύ ενδιαφέρουσα τη μελέτη της συμπεριφοράς του συγκεκριμένου υλικού, λόγω και της χρήσης του σε ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Και τα τρία παραπάνω υλικά επιλέχθηκαν λόγω των εξής παραγόντων:

1. Μικρής έκτασης υπάρχουσα βιβλιογραφική έρευνα -ειδικά για τον ορείχαλκο C38000 και τον χάλυβα S235JR.
2. Διαθεσιμότητα.
3. Ευρύ φάσμα χρήσης σε καθημερινές περιπτώσεις.
4. Εύκολα στην κατεργασία -κυρίως για τον ορείχαλκο και τον χάλυβα.
5. Εμπειρία στην κατεργασία τους.
6. Χρήση τους από το Μ.Υ.Ε.Δ. σε πολλές περιπτώσεις και εξέτασης της συμπεριφοράς τους για βελτιστοποίηση των κατεργασιών που πραγματοποιούνται.

4.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Η διεξαγωγή των κατεργασιών έγινε στον C.N.C. τόρνο Haas SL-20 του Μηχανουργείου Υποστήριξης Ερευνητικών Διαδικασιών (Μ.Υ.Ε.Δ.) του

Πανεπιστημίου Πατρών. (Εικόνα 1.16) Έχει δυνατότητα κίνησης στους άξονες Z και X, καθώς και στον άξονα C. Ο άξονας C είναι ουσιαστικά η περιστροφική κίνηση της ατράκτου γύρω από τον άξονα Z [74]. (Εικόνα 1.9) Ο συγκεκριμένος τórνος κατασκευάστηκε στις Η.Π.Α. και χρησιμοποιείται ευρέως για διάφορων ειδών κατεργασίες στο Μ.Υ.Ε.Δ. από το 2008.

Τα χαρακτηριστικά του τόνου παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.7: Χαρακτηριστικά C.N.C. τόνου Haas SL-20 (πηγή: Haas Automation®, Inc.)

α/α	Χαρακτηριστικό	Περιγραφή
1	Έτος κατασκευής	2008
2	Αρπάγες (τσοκ)	Μεγέθους 203 mm με υδραυλικό σύστημα συγκράτησης και δυνατότητα για τοποθέτηση άξονα που θα περνά μέσα από την άτρακτο
3	Μέγιστη διάμετρος τεμαχίου (mm)	240
4	Μέγιστο μήκος τεμαχίου (mm)	500
5	Μέγιστη ισχύς κινητήρα (HP)	20
6	Εύρος στροφών περιστροφής ατράκτου (rpm)	40 - 4000
7	Διάμετρος ατράκτου (mm)	76.2
8	Θέσεις για Κ.Ε. στο ρεβόλβερ/καρουζέλ	10
9	Διαδρομή κίνησης στον άξονα X (mm)	24
10	Διαδρομή κίνησης στον άξονα Z (mm)	508
11	Κεντροφορέας	MT4, πλήρως προγραμματιζόμενος, με συνολική διαδρομή κίνησης 508 mm
12	Μέγιστη ταχύτητα πρόωσης στον άξονα X (mm/min)	14.986
13	Μέγιστη ταχύτητα πρόωσης στον άξονα Z (mm/min)	17.983
14	Σύστημα πιασίματος έτοιμων τεμαχίων	Αυτόματο
15	Διαστάσεις εργαλειομηχανής (Μήκος x Πλάτος x Ύψος(περ.) (m)	(3,2*1,9*1,88)
16	Βάρος εργαλειομηχανής(περ.) (kg)	4.550
17	C.N.C. control	Haas 32 Bit
18	Σύνδεση με υπολογιστή	Μέσω θύρας RS-232C

4.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για να κατεργαστούν τα δοκίμια, χρησιμοποιήθηκε αρχικά η οριζόντια κορδέλα για την κοπή αξόνων Φ16. Για τον ανοξειδωτο χάλυβα και τον ορείχαλκο κόπηκε άξονας μήκους 300mm και για τον κατασκευαστικό χάλυβα άξονας 350mm. Το μήκος του κάθε άξονα υπολογίστηκε με βάση τις συνθήκες κατεργασίας, όπου έχουμε:

- Για τη σωστή και ασφαλή συγκράτηση του άξονα στις αρπάγες του C.N.C. τόννου και με βάση τις δυνάμεις κοπής, υπολογίστηκαν τουλάχιστον 70mm από τις οδηγίες του κατασκευαστή και την εμπειρία που διαθέτει το μηχανουργείο.
- Κατεργάστηκαν 10 δοκίμια μήκους 20mm το καθένα για τον ανοξειδωτο χάλυβα και άλλα τόσα για τον ορείχαλκο. Υπολογίστηκε 1mm για την αποκοπή του δοκιμίου με το Κ.Ε. της κόφτρας και τουλάχιστον 1mm για την κατεργασία καθαρισμού προσώπου, σύνολο $10*20+(10*1)+(10*1)=220\text{mm}$. Τα περίπου 80mm που απόμειναν είναι αρκετά για τη σωστή συγκράτηση.
- Για τον δομικό χάλυβα, κόπηκαν 12 δοκίμια ίδιου μήκους με τα προηγούμενα. Με τα υπόλοιπα στοιχεία να παραμένουν ίδια, έχουμε $12*20+(12*1)+(12*1)=264\text{mm}$. Τα περίπου 86mm χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκράτηση του άξονα.

4.4 ΕΠΙΛΟΓΗ Κ.Ε. ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Για την κατεργασία εξωτερικής τόννευσης των δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκε το ένθετο Κ.Ε. AH630 της Tungaloy με κωδικό TNMG160408-SM, με ακτίνα γωνίας κοπής $r = 0.8$ [75],[76]. Πρόκειται για ένα ένθετο (insert) για εξωτερική τόννευση, κατασκευασμένο από καρβίδιο του βολφραμίου (tungsten carbide) με επίστρωση από νιτρίδιο αλουμινίου τιτανίου (TiAlN) . Η επίστρωση γίνεται με την χρήση της τεχνολογίας Physical Vapor Deposition (PVD) - (Φυσική Εναπόθεση Ατμών) . Είναι μια ιδανική επιλογή για κατεργασία υλικών όπως ο ανοξειδωτος χάλυβας ,κ.λπ. , ενώ επίσης συνδυάζει καλή απόδοση σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο εύρος ταχυτήτων κοπής και κοπή που κυμαίνεται μεταξύ συνεχόμενης και διακοπτόμενης. Έχει καλή αντοχή σε θραύση και φθορά και παρουσιάζει σταθερή συμπεριφορά. Ο γρεζοθραύστης που διαθέτει έχει όνομα SM, είναι μεγάλου μεγέθους και είναι σχεδιασμένος στο να αποβάλει εύκολα τα απόβλητα, κάνοντάς τα κυκλικά στο σχήμα.

Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά του, η σύγκρισή του με τα υπόλοιπα ένθετα της σειράς του και τα προτεινόμενα εύρη των

χαρακτηριστικών μεγεθών κοπής, τα οποία και χρησιμοποιήθηκαν για την τόννευση του ανοξειδωτου χάλυβα:

Operation	Machining mode	Chip-breaker	Grades	Depth of cut ap (mm)	Feed f (mm/rev)
Finishing	Continuous	SF	T6120	0.5 ~ 2.5	0.08 ~ 0.45
	Continuous to Light interrupted		T6130		
	Heavy interrupted		AH630		
Medium cutting	Continuous	SM	T6120	1.0 ~ 4.0	0.2 ~ 0.5
	Continuous to Light interrupted		T6130		
	Light interrupted		AH630		
	Heavy interrupted		AH645		
Medium to heavy cutting	Continuous	SH	T6130	2.0 ~ 6.0	0.3 ~ 0.6
	Continuous to Light interrupted		AH630		
	Heavy interrupted		AH645		

Εικόνα 4.1: Εύρος του βάθους κοπής και της πρόωσης του Κ.Ε. (Πηγή: Tungaloy Corporation®)

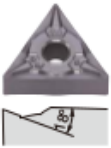
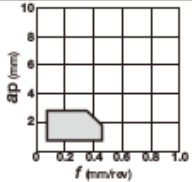

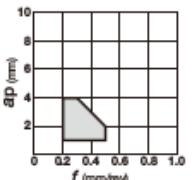
Work materials	Grades	Cutting speed: Vc (m/min)
Austenitic <u>SUS304, SUS316 etc.</u> (X5CrNi18-9, X5CrNiMo17-12-2 etc.) *AH630: First choice	T6120	140 - 240
	T6130	100 - 200
	AH630	90 - 190
	AH645	70 - 150
Ferrite / Martensite SUS430 / SUS410 etc. (X6Cr17, X12Cr13 etc.)	T6120	160 - 280
	T6130	120 - 240
	AH630	110 - 210
	AH645	90 - 170
Precipitation hardened SUS631 etc. (X7CrNiAl17-7 etc.)	T6120	80 - 150
	T6130	70 - 110
	AH630	60 - 90

Εικόνα 4.2: Εύρος ταχύτητας κοπής του Κ.Ε. ανάλογα με το υλικό κατεργασίας. (Πηγή: Tungaloy Corporation®)

Grade	Substrate			Coating layer	
	ISO application code	Specific gravity	Hardness (HRA)	T.R.S. (GPa)	Main composition
AH630	14.4	91.5	3.0	(Ti,Al)N	5
M15 - M30					
PREMIUMTEC					

Εικόνα 4.3: Λοιπά χαρακτηριστικά του Κ.Ε. (Πηγή: Tungaloy Corporation®)

Triangular, 60°

Appli- cation	Chipbreaker Appearance (Cross section)	f - ap	Cat. No.	Stocked grades		Dimensions (mm)			
				Coated		I.C.dia ød	Thick- ness s	Hole dia ødt	Corner radius r _E
				AH630	AH645				
Finishing cutting	SF 		TNMG160404-SF	●		9.525	4.76	3.81	0.4
			*TNMG160408-SF	●					0.8
			TNMG160412-SF	●					1.2
			Medium cutting	SM 		TNMG160404-SM	●	●	9.525
*TNMG160408-SM	●	●				0.8			
TNMG160412-SM	●	●				1.2			
TNMG220408-SM	●	●				12.7	5.16	0.8	
TNMG220412-SM	●	●						1.2	

Εικόνα 4.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του Κ.Ε. (Πηγή: Tungaloy Corporation©)

4.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΙΜΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΟΠΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΙ ΤΟΝ ΟΡΕΙΧΑΛΚΟ

Για την κατεργασία των άλλων δυο υλικών, τα χαρακτηριστικά μεγέθη κοπής επιλέχθηκαν από τον κατάλογο της εταιρείας Uddelholm [77]:

Πίνακας 4.8: Πίνακας εύρους χαρακτηριστικών μεγεθών τórνευσης με Κ.Ε. από καρβίδιο. (πηγή: Uddelholm Corrax®)

Χαρακτηριστικό μέγεθος κοπής	Προτεινόμενο εύρος τιμών	
	Ξεχόνδρισμα	Φινίρισμα
Ταχύτητα κοπής V _c (m/min)	110 – 160	160 – 210
Πρόωση f (mm/rev)	0.2 – 0.4	0.05 – 0.2
Βάθος κοπής a (mm)	2 – 4	0.5 – 2

4.6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΦΑΣΕΟΛΟΓΙΟ

Για την εξωτερική τórνευση και των τριών υλικών χρησιμοποιήθηκε το ίδιο Κ.Ε. Λόγω του τριγωνικού σχήματος του και της δυνατότητας για τοποθέτηση και στις δυο πλευρές του, δίνεται η δυνατότητα για χρησιμοποίηση και των έξι κοπτικών ακμών του. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε μια καινούργια πλευρά για κάθε υλικό, με όλες τις κατεργασίες να γίνονται διαδοχικά η μια μετά την άλλη. Για την αποκοπή των

δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε Κ.Ε. αποκοπής- γνωστό σαν «κόφτρα» -με χαρακτηριστικά στοιχεία κοπής $n = 500 \text{ rpm}$ και $f = 0.03 \text{ mm/rev}$.

Η τórνευση όλων των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σε δυο στάδια. Πρώτα έγινε το στάδιο του ξεχονδρίσματος σε βάθος κοπής $a = 0.9 \text{ mm}$ και σε δεύτερη φάση το στάδιο του τελειώματος σε βάθος κοπής $a = 0.1 \text{ mm}$ για το τελικό φινίρισμα. Τα δοκίμια έφτασαν τελικά σε διάμετρο τα 15 mm . Αυτή είναι και η μικρότερη δυνατή διάμετρος που μπορεί να επιτευχθεί με απόλυτη ασφάλεια από το συγκεκριμένο τórνο, με το συγκεκριμένο τσοκ, σε αυτές τις συνθήκες κοπής- οι οποίες είναι πολύ κοντά στο μέγιστο που μπορεί να υποστηρίξει, ειδικά στον αριθμό στροφών περιστροφής της ατράκτου. Η όσο το δυνατόν μικρότερη διάμετρος ήταν αυτή που υποδείκνυε το προαναφερθέν, λόγω της χωροταξίας του S.E.M. και της ανάγκης για διεξαγωγή μετρήσεων χωρίς περιορισμούς.

Για την ορθολογική χρήση των αξόνων και για να μην χρησιμοποιείται άσκοπα υλικό, χρησιμοποιήθηκε βαθύμετρο για να εξασφαλιστεί πως το μήκος του άξονα που εξέχει από τις αρπάγες του τórνου είναι όσο πραγματικά χρειάζεται και όχι περισσότερο.

Όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή, σε αυτήν την πτυχιακή εφαρμόστηκε η ταυτόχρονη διακύμανση της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής, με αντιστρόφως ανάλογο τρόπο. Η ταχύτητα κοπής V_c ξεκινά από την μικρότερη τιμή της στο δοκίμιο no.1 και φτάνει στην μέγιστη τιμή της στο δοκίμιο no.10 του κάθε υλικού, ενώ για την πρόωση γίνεται το ακριβώς αντίστροφο.

Η μικρότερη και η μεγαλύτερη τιμή της ταχύτητας κοπής V_c και της πρόωσης f είναι γνωστές από τους πιο πάνω πίνακες. Οι οριακές αυτές τιμές χρησιμοποιήθηκαν για τα δοκίμια no.1 και no.10 αντίστοιχα. Για τα ενδιάμεσα δοκίμια, η αριθμητική απόσταση έπρεπε να καλυφθεί σε 8 βήματα, με ακέραιο αριθμό για χάριν ευκολίας. Για να συμβεί αυτό, η ταχύτητα κοπής V_c αυξανόταν κατά 4 μονάδες για κάθε δοκίμιο και στις δυο φάσεις. Η πρόωση f μειωνόταν στη φάση του ξεχονδρίσματος κατά 0.3 μονάδες και κατά 0.1 μονάδα στην φάση του φινιρίσματος.

Έγινε επίσης τórνευση δυο επιπλέον δοκιμίων από χάλυβα κατασκευών, με διαφορετικές τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών κοπής από αυτές που επιλέχθηκαν για τα υπόλοιπα δοκίμια. Οι συγκεκριμένες τιμές είναι αυτές που επιλέγονται συνήθως από το Μ.Υ.Ε.Δ. για την κατεργασία τεμαχίων, με γνώμονα τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του Κ.Ε. την ικανοποίηση των αναγκών της κάθε εφαρμογής, έχουν δε παρατηρηθεί εμπειρικά:

1. Για το πρώτο δοκίμιο, το extra 1, επιλέχθηκε να μείνει ίδια η ταχύτητα κοπής V_c και να μειωθεί η πρόωση f από 0.08 mm/rev που ήταν για το δοκίμιο no.10, σε 0.07 mm/rev στη φάση του φινιρίσματος.
2. Για το δεύτερο δοκίμιο, το extra 2, η πρόωση f επιλέχθηκε να μείνει ίδια με αυτή του extra 1 και να μειωθεί ο αριθμός των περιστροφών της ατράκτου, φτάνοντας σε $n=1200 \text{ rpm}$. Αυτό έκανε την ταχύτητα κοπής V_c και την ταχύτητα πρόωσης S να γίνουν αντίστοιχα 2,5 και 3,25 φορές μικρότερες από αυτές του δοκιμίου extra 1.

Τα αναλυτικά αριθμητικά στοιχεία παρατίθενται στους πίνακες του Παραρτήματος Α. (Πίνακες Α1-Α4)

4.7 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ

4.7.1 Εύρος τιμών χαρακτηριστικών μεγεθών τόνρευσης

Πίνακας 4.9: Επιλογή εύρους χαρακτηριστικών μεγεθών κοπής για τον ανοξείδωτο χάλυβα AISI-SAE 304

Χαρακτηριστικό μέγεθος	Ταχύτητα κοπής V_c (m/min)	Βάθος κοπής a (mm)	Πρόωση f (mm/rev)
Τιμή	90 - 186	0.1 – 0.9	0.08 – 0.5

Πίνακας 4.10: Επιλογή εύρους χαρακτηριστικών μεγεθών κοπής για τον κατασκευαστικό χάλυβα S235JR / St 37-2 και τον αρχιτεκτονικό ορείχαλκο UNS C38000

Χαρακτηριστικό μέγεθος	Ταχύτητα κοπής V_c (m/min)	Βάθος κοπής a (mm)	Πρόωση f (mm/rev)
Τιμή	115 - 196	0.1 – 0.9	0.07 – 0.5

4.8 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ΣΕ G-CODE

Το πρόγραμμα γράφτηκε σε G-code στην κονσόλα της εργαλειομηχανής χωρίς τη χρήση και σύνδεση του τόννου με Η/Υ. Ο λόγος είναι η έλλειψη θύρας USB στην κονσόλα του τόννου και η μικρού μεγέθους μνήμη του C.N.C. controller του τόννου. Η μεταφορά του προγράμματος μπορεί να γίνει μέσω θύρας RS-232C και εκτέλεσης του προγράμματος βήμα-βήμα (Direct numerical control, D.N.C.) λόγω της μικρού μεγέθους μνήμης του C.N.C. controller, αλλά λόγω της απλότητας της κατεργασίας δεν κρίθηκε αναγκαίο να γίνει κάτι τέτοιο.

4.9 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΓΡΟΥ ΚΟΠΗΣ

Για την ψύξη της κατεργαζόμενης περιοχής κατά την τόνρευση, χρησιμοποιήθηκε σε μορφή διαλύματος το υγρό κοπής Hocut® 795/1 της Houghton International. Το διάλυμα αποτελείται από το υγρό κοπής μαζί με νερό σε αναλογία υγρού κοπής:νερού ίση με 1:10.

4.10 ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Μιας και είναι εφοδιασμένος με πόρτα ασφαλείας και δεν τίθεται σε λειτουργία χωρίς να είναι ερμητικά κλειστή καθ' όλη την διάρκεια της τόννευσης, ο συγκεκριμένος τόννος διαθέτει διάταξη αυτόματης ράμπας για την εξαγωγή του έτοιμου τεμαχίου, πράγμα βολικό και σημαντικό για να αποφευχθούν τυχόν φθορές από την πτώση του δοκιμίου στο κάτω μέρος του τόννου.

4.11 ΣΤΟΧΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΠΡΟΣ ΑΠΟΔΕΙΞΗ

Η επιλογή των παραπάνω συνθηκών έγινε με σκοπό να μελετηθεί η μεταβολή του λόγου $\lambda = n / S$ σε σχέση με την τραχύτητα των δοκιμίων. Με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί, έγινε έρευνα στηριζόμενη στην απόδειξη των παρακάτω υποθέσεων:

1. Όσο ο λόγος λ αυξάνεται, η τιμή των παραμέτρων R της τραχύτητας μειώνεται.
2. Η μικρότερη τραχύτητα δηλαδή επιτυγχάνεται με την μικρότερη ταχύτητα πρόωσης και το μεγαλύτερο αριθμό περιστροφών της ατράκτου.
3. Για τον ίδιο λόγο λ , τα σκληρότερα υλικά θα πρέπει να έχουν μεγαλύτερη τραχύτητα. Αυτό δικαιολογείται λόγω των ισχυρότερων τάσεων απόσχισης, των αυξημένων ποσών θερμότητας και των μεγαλύτερων πλαστικών παραμορφώσεων που υφίστανται τα μόρια των σκληρότερων υλικών κατά την τόννευση. Δηλαδή θα πρέπει να παρατηρηθεί μεγαλύτερη επιφανειακή τραχύτητα στον ανοξειδωτο χάλυβα και μικρότερη στον ορείχαλκο, για την ίδια τιμή του λόγου λ .



Εικόνα 0.1: Τα δοκίμια νο.10 και των τριών υλικών.

5.ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

5.1 ΟΠΤΙΚΟ ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΟ VEECO® WYKO NT1100

Για της ανάγκες της πτυχιακής εργασίας, παραχωρήθηκε προς χρήση το 3D οπτικό μικροσκόπιο Wyko NT1100 του Ι.Ε.Χ.ΜΗ. (Εικόνα 5.1) Το Ι.Ε.Χ.ΜΗ. ιδρύθηκε και ξεκίνησε τη λειτουργία του στο Ρίο της Πάτρας το 1984 ως ανεξάρτητο ακαδημαϊκό ινστιτούτο και το 1987 ενσωματώθηκε στη δομή του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (Ι.Τ.Ε.). Το συγκεκριμένο προφιλόμετρο λειτουργεί με βάση τη συμβολομετρία, όπως αναφέραμε και πριν. Για την επεξεργασία και την προβολή των μετρήσεων, χρησιμοποιείται το λογισμικό Vision32® της Wyko.

Το Wyko NT1100 είναι μια οικονομικά προσιτή λύση για τη μέτρηση προφίλ επιφανειών. Διαθέτει λαμπτήρα αλογόνου βολφραμίου [59] και μπορεί να μετρήσει επιφάνειες με ακρίβεια από 160 nm έως 1 mm, ανάλογα τη μέθοδο λήψης των μετρήσεων [78],[79]. Το προφιλόμετρο που χρησιμοποιήθηκε διαθέτει επίσης πνευματική διάταξη απορρόφησης κραδασμών, μετρώντας έτσι πιο αξιόπιστα και χωρίς να επηρεάζεται από τυχόν δονήσεις του εδάφους.

Το λογισμικό Vision32® δίνει στον χρήστη πάνω από 200 δυνατότητες επεξεργασίας και απεικόνισης των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν από τις μετρήσεις. Μαζί με τη μηχανοκίνητη πλατφόρμα για την τοποθέτηση των δοκιμίων προς εξέταση, μπορεί να μετρήσει γρήγορα και αυτόματα μεγάλες περιοχές της επιφάνειάς τους.

5.1.1 Μέθοδοι λειτουργίας

Ο χρήστης του συγκεκριμένου προφιλόμετρου μπορεί να επιλέξει μεταξύ δυο διαφορετικών μεθόδων που λειτουργούν σύμφωνα με τις αρχές της συμβολομετρίας, της VSI (Vertical Scanning Interferometry) και της PSI (Phase Shifting Interferometry) [80],[81]. Στην πρώτη, λευκό φως περνά μέσα από ένα φίλτρο ουδέτερης πυκνότητας και διαχωρίζεται σε δυο ξεχωριστές δέσμες φωτός. Η μια κατευθύνεται προς μια πολύ λεία επιφάνεια που λειτουργεί ως επιφάνεια αναφοράς και η άλλη προς το

αντικείμενο που θέλουμε να μετρήσουμε. Αφού προσκρούσουν στις δυο επιφάνειες, οι δέσμες επιστρέφουν πίσω και ενώνονται πάλι, δημιουργώντας ένα μοτίβο άσπρων και σκοτεινών γραμμών [82]. Στην συνέχεια, μια κάμερα CCD (Charge-Coupled Device) χρησιμοποιείται για να φωτογραφίσει το μοτίβο, το οποίο στέλνεται και αναλύεται από τον υπολογιστή που είναι εφοδιασμένος με το πρόγραμμα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων και έχει συνδεθεί



Εικόνα 5.1: Το οπτικό μικροσκόπιο Wyko NT1100 του Ι.Τ.Ε./Ι.Ε.Χ.ΜΗ. Πάτρας και η αλουμινένια ιδιοσυσκευή στήριξης των δοκιμίων προς μέτρηση.

με το προφιλόμετρο. Στην λειτουργία VSI, το πρόγραμμα επεξεργάζεται και εδώ με την χρήση CCD την ένταση του σήματος που λαμβάνεται από τις φωτεινές δέσμες, για να υπολογίσει την διαμόρφωση που έχουν οι κροσσοί και να παρουσιάσει τελικά σαν αποτέλεσμα την τραχύτητα της επιφάνειας. Όταν τελειώσει η μέτρηση του συγκεκριμένου σημείου, η εστίαση του προφιλόμετρου αλλάζει, αλλάζοντας έτσι και το σημείο της επιφάνειας που μετράμε [80]. Αυτό γίνεται κατά τον κάθετο άξονα, εξού και το όνομα της συγκεκριμένης λειτουργίας (Συμβολόμετρο Κάθετης Σάρωσης) [82]. Στη λειτουργία PSI, το προφιλόμετρο λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο, μόνο που τώρα

το φίλτρο μέσα από το οποίο περνά αρχικά το φως του προσδίδει μικρότερο εύρος ζώνης. Ακόμα, η αλλαγή φάσης που μετράται από τη δέσμη στο τέλος αφορά μονάχα ένα συγκεκριμένο σημείο, μιας και δε γίνεται ξανά κάθετη εστίαση αλλού. Δεν προσμετρούνται δηλαδή άλλα σημεία της επιφάνειας για να υπολογιστεί η τραχύτητα, όπως στην λειτουργία VSI. Για να υπολογιστεί η τραχύτητα, το πρόγραμμα επεξεργάζεται και εδώ την ένταση του σήματος, μόνο που τώρα δίνεται βάση στα δεδομένα από τις ξεχωριστές φάσεις των φωτεινών δεσμών, οι οποίες έχουν διαφορετική ένταση και όχι στους κροσσούς. Λόγω όλων των παραπάνω λοιπόν, η συγκεκριμένη λειτουργία ονομάζεται PSI (Σάρωση Αλλαγής Φάσης) [81],[82].

Λόγω του τρόπου λήψης των μετρήσεων, η μέθοδος PSI είναι γρηγορότερη και, κυρίως, πιο ακριβής, με κάθετη ανάλυση που φτάνει σε επίπεδα 1 ångström – μονάδα μέτρησης που συμβολίζεται με Å. $1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm}$. Για αυτό και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου οι επιφάνειες έχουν πολύ καλή ποιότητα και μικρή τραχύτητα, με σκοπό να μελετηθούν οι ανωμαλίες [78].

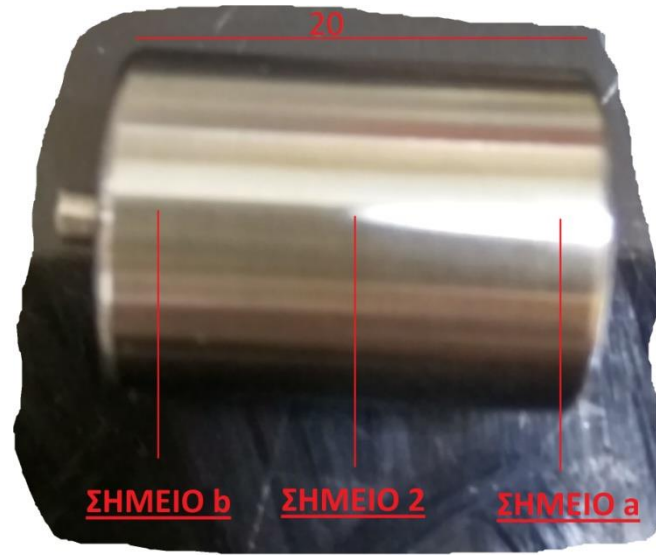
Η μέθοδος VSI από την άλλη χρησιμοποιείται για να μελετηθούν πιο τραχιές επιφάνειες, με ύψη και κοιλάδες που φτάνουν σε απόσταση αρκετά χιλιοστά. Ο λίγο μεγαλύτερος χρόνος λήψης των μετρήσεων σε σχέση με την PSI και η ακρίβεια που φτάνει το 1 nm είναι ικανοποιητικά χαρακτηριστικά για τις ανάγκες αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, για αυτό και επιλέχθηκε να είναι η μέθοδος για την λήψη των μετρήσεων.

5.1.2 Διαδικασία συλλογής μετρήσεων τραχύτητας

Για να μετρηθεί η τραχύτητα των δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκε μια ειδική βάση στήριξης από αλουμίνιο, η οποία κατασκευάστηκε σε φρέζα και επιτρέπει τη σταθεροποίησή τους. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν έτσι ώστε ο χρήστης να βλέπει μπροστά του τον διαμήκη άξονα του δοκιμίου, με την προεξοχή του δοκιμίου στραμμένη προς αυτόν.

Μιας και τα 32 δοκίμια μετρήθηκαν σε τέσσερα σημεία το καθένα, έγιναν 128 μετρήσεις. Η καθεμία από αυτές τις μετρήσεις έγινε και σε διαφορετική περιοχή του δοκιμίου. Συγκεκριμένα, το σημείο 2 που εξετάστηκε βρίσκεται σε απόσταση 10 mm από την άκρη του δοκιμίου κατά το διαμήκη άξονα, περίπου στη μέση του δηλαδή. Το σημείο 2_180 βρίσκεται εάν το δοκίμιο περιστραφεί κατά 180° , πάλι στο μέσο του διαμήκη άξονα. Τα σημεία a και b επιλέχθηκαν σε απόσταση περίπου 6mm από την άκρη και το τέλος του διαμήκη άξονα αντίστοιχα. Τα σημεία επιλέχθηκαν με γνώμονα τη μελέτη των ξεχωριστών τιμών τραχύτητας που ίσως παρατηρηθούν, λόγω της ταλάντωσης του δοκιμίου κατά την κατεργασία. Το σημείο δηλαδή που βρίσκεται πιο μακριά από την περιοχή αποκοπής και τους σφιγκτήρες της ατράκτου ίσως έχει μεγαλύτερη επιφανειακή τραχύτητα, λόγω του ότι σε αυτό ασκούνται πιο ισχυρές καμπικές ροπές εξαιτίας της μεγαλύτερης απόστασης. Η μικρή προεξοχή στην άκρη του δοκιμίου δεν επηρεάζει την μέτρηση, αντίθετα βοήθησε στη διεξαγωγή των

μετρήσεων επειδή λειτουργεί σαν σημείο αναφοράς. Ο μηχανισμός δημιουργίας της δεν είναι επιτηδευμένος. Παραμένει εκεί λόγω της αποκοπής, μιας και το Κ.Ε. της αποκοπής δεν προλαβαίνει να την τονάρει πριν το δοκίμιο αποκοπεί οριστικά λόγω της βαρύτητας. (Εικόνα 5.2)



Εικόνα 5.2: Σημεία μέτρησης τραχύτητας. Το τέταρτο σημείο είναι στο ύψος του 2, σε περιμετρική απόσταση 180°.

5.1.3 Παράμετροι μετρήσεων

Οι μετρήσεις έγιναν με την εφαρμογή της τεχνικής VSI και οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για τα όσο το δυνατόν καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

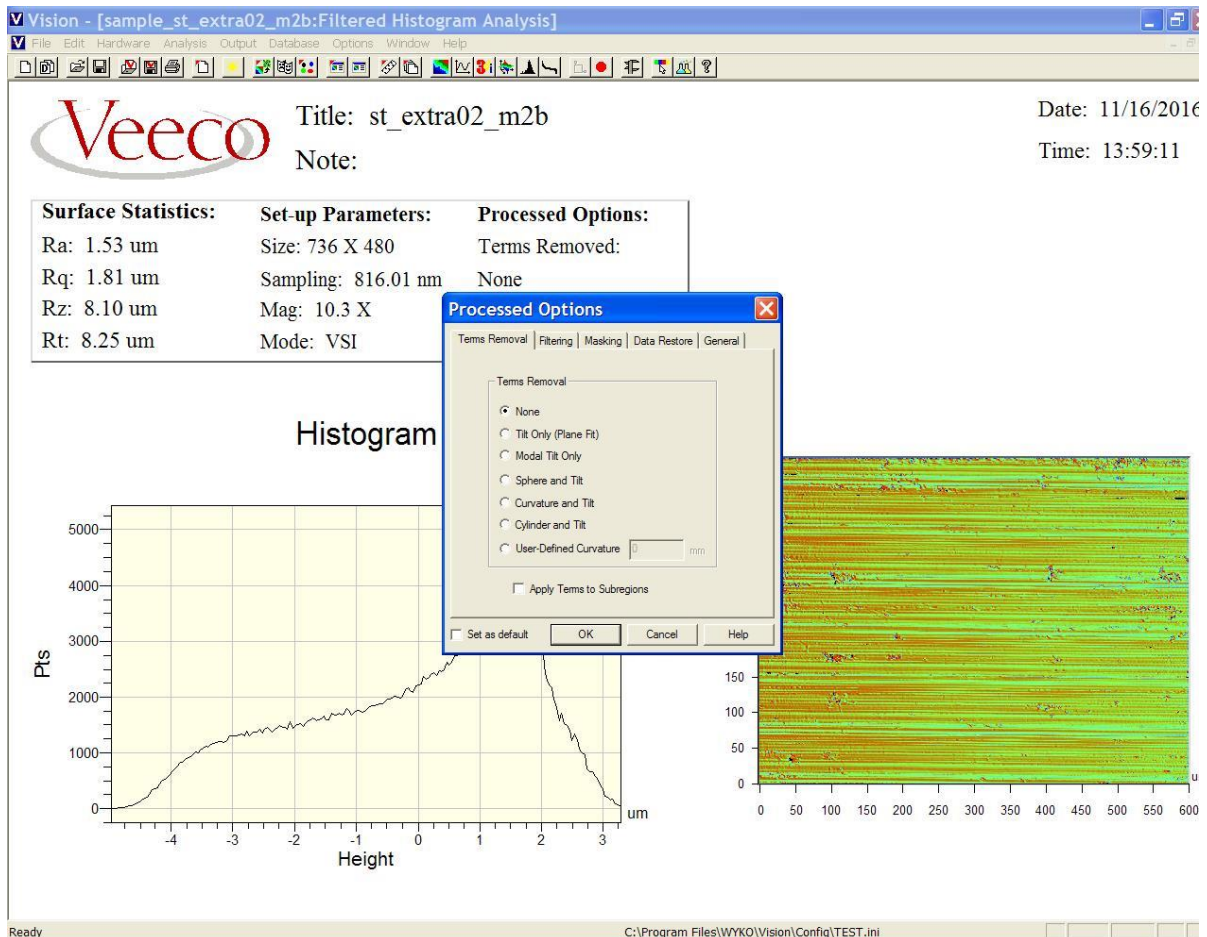
Πίνακας 5.1: Παράμετροι οπτικού προφιλόμετρου για μέτρηση της τραχύτητας

Όνομα παραμέτρου	Μεγέθυνση	Ακτίνα δειγματοληψίας (nm)	Ανάλυση δείγματος
Τιμή	X10.29	816.01	736 x 480

5.1.4 Επεξεργασία επιλογών απεικόνισης και φιλτραρίσματος

Με σκοπό να γίνει πιο κατανοητή η διακύμανση της τραχύτητας σε σχέση με τα χαρακτηριστικά μεγέθη κοπής, οι μετρήσεις όλων των σημείων έγιναν από δυο φορές, φτιάχνοντας έτσι δυο κατηγορίες. Στην μια δεν έγινε κάποια επεξεργασία για την εξαγωγή τους, ενώ οι υπόλοιπες πέρασαν από φιλτράρισμα. Το λογισμικό

Vision32® δίνει τη δυνατότητα για επεξεργασία και αφαίρεση όρων από τη μέτρηση της τραχύτητας, η οποία και χρησιμοποιήθηκε. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε από τη λίστα αφαίρεσης όρων η επιλογή *None* για τις μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν αυτούσιες και η επιλογή *Cylinder and Tilt* για αυτές που πέρασαν από φιλτράρισμα. (Εικόνα 5.3)



Εικόνα 5.3: Πλαίσιο διαλόγου του προγράμματος *Vision32®* για φιλτράρισμα όρων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεν έχει γίνει επιλογή αφαίρεσης κάποιου όρου.

Η επιλογή *Cylinder and Tilt* ουσιαστικά επεξεργάζεται τα σημεία της επιφάνειας που μετράται και μετατρέπει την καμπύλη επιφάνεια του δοκιμίου σε επίπεδη και παράλληλη με το έδαφος. Οι τιμές των παραμέτρων της τραχύτητας που προκύπτουν από αυτήν την επιλογή είναι μικρότερες, πράγμα λογικό μιας και οι κορυφές δεν απέχουν στον ίδιο βαθμό από τις κοιλάδες όσο στην πραγματικότητα.

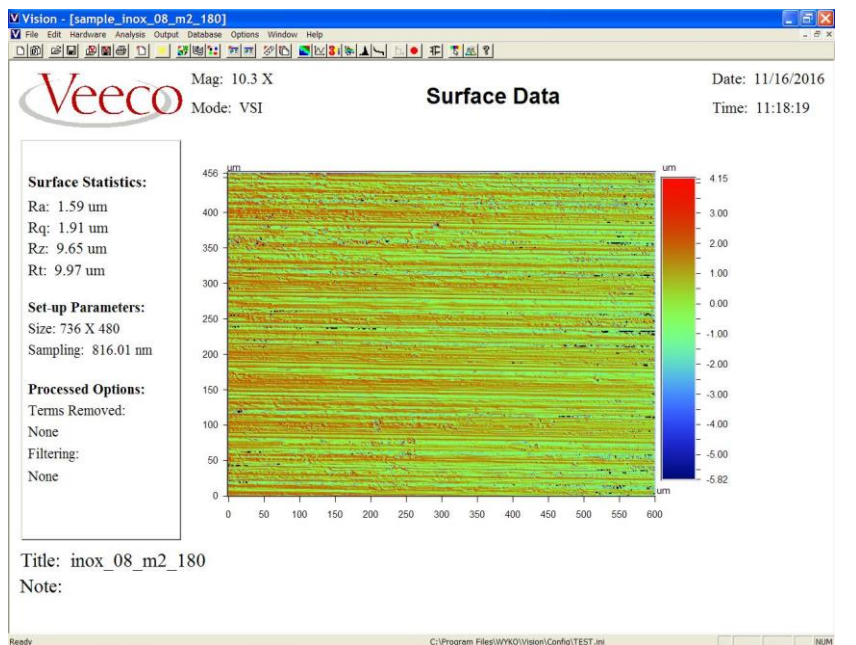
Η απεικόνιση των μετρήσεων επιλέχθηκε να γίνει σε πέντε διαφορετικές μορφές έτσι ώστε να επιτευχθεί καλύτερη κατανόηση και μελέτη:

1. Contour plot
2. 2D analysis
3. 3D interactive plot
4. 3D plot

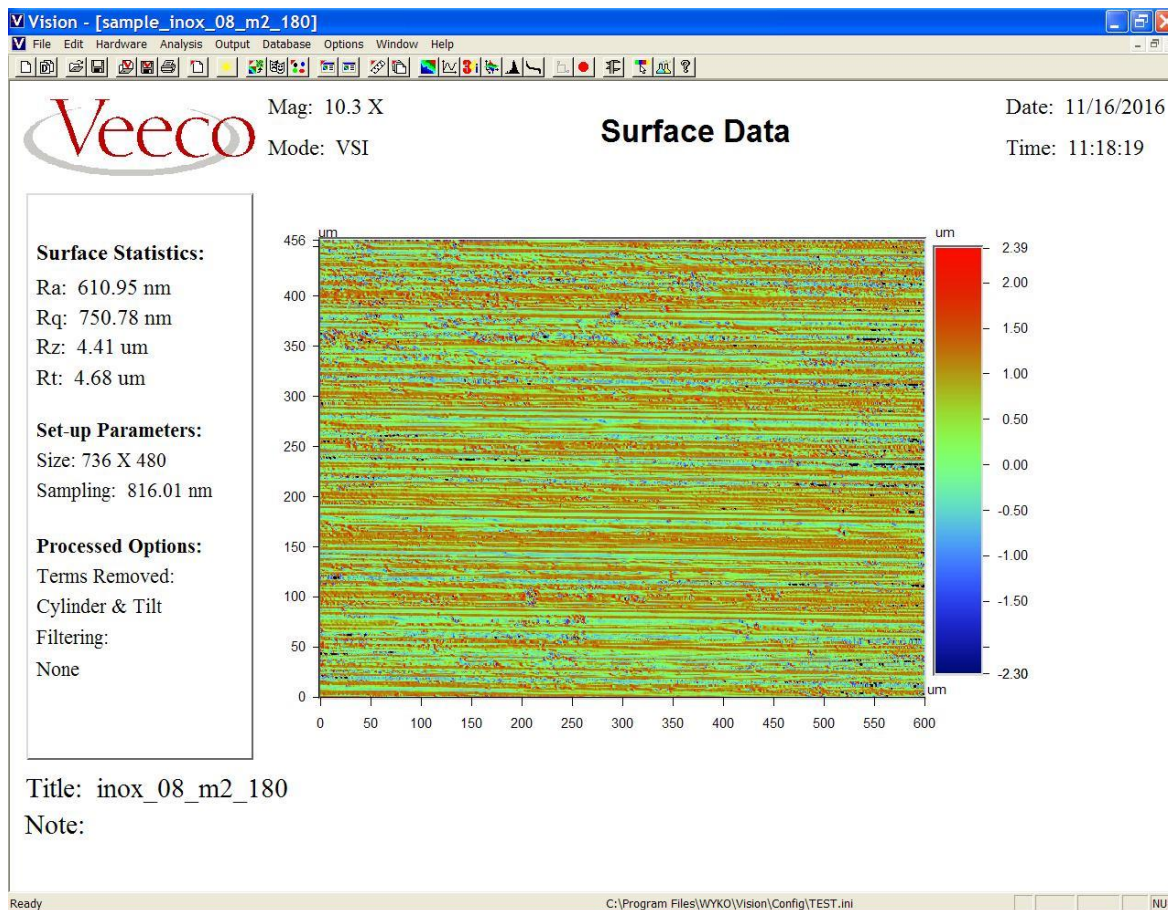
5. Filtered histogram analysis

Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά στιγμιότυπα από τα αποτελέσματα των μετρήσεων και αναλύονται οι μορφές απεικόνισης:

1. *Contour plot*: Απεικονίζεται η διακύμανση της τραχύτητας μέσα σε ένα κλειστό ορθογωνικό πλαίσιο, το οποίο είναι ουσιαστικά μια 2D φωτογραφία της επιφάνειας. Τα σημεία απεικονίζονται με παράλληλες γραμμές διαφορετικού χρώματος μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρωματικό φάσμα. Οι κορυφές της επιφάνειας συμβολίζονται με πιο θερμά χρώματα, ενώ οι κοιλάδες με πιο ψυχρά. Οι μαύρες περιοχές συμβολίζουν τα σημεία της επιφάνειας των οποίων η τραχύτητα δεν έγινε δυνατόν να μετρηθεί λόγω διάφορων παραγόντων- σκέδαση φωτός, κ.λπ. Για τα σημεία αυτά, το λογισμικό δίνει μια τυχαία τιμή σε συνάρτηση με τις γειτονικές και έτσι υπολογίζει τις παραμέτρους της τραχύτητας. Σε γενικές γραμμές, ο χειριστής του προφίλομέτρου πρέπει να επιδιώκει την ελάχιστη συγκέντρωση τέτοιων σημείων έτσι ώστε οι μετρήσεις να είναι πιο ορθές. Εάν έχει γίνει καλή εστίαση κατά την εμφάνιση των κροσσών, τότε τα σημεία που δε γίνεται να μετρηθούν είναι σημαντικά λιγότερα. Στην μελέτη που πραγματοποιήθηκε, δε γίνεται να μην υπάρχουν μαύρα σημεία στην περιοχή, καθώς τα δοκίμια έχουν κυλινδρικό σχήμα και η κεκλιμένη επιφάνεια κάνει πιο δύσκολη την αποφυγή της σκέδασης του φωτός. (Εικόνα 5.4, Εικόνα 5.5)

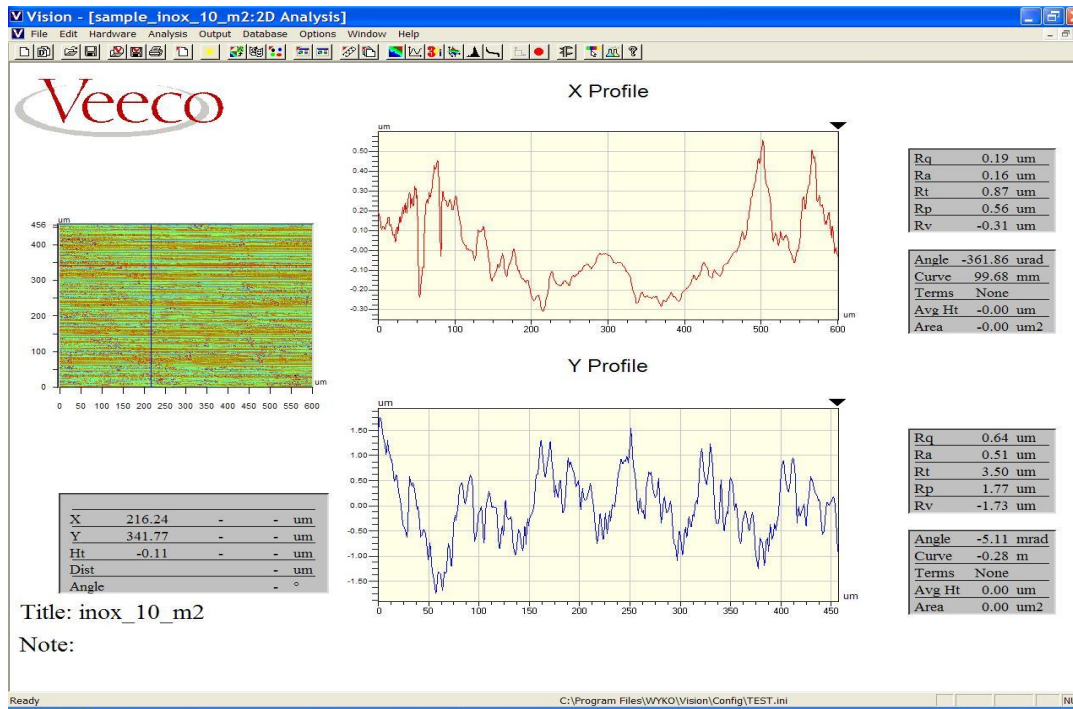


Εικόνα 5.4: Vision32® 3D Contour plot της τραχύτητας του δοκιμίου no.8 από ανοξείδωτο χάλυβα στην περιοχή του αντιδιαμετρικού σημείου με το 2, χωρίς φιλτράρισμα.

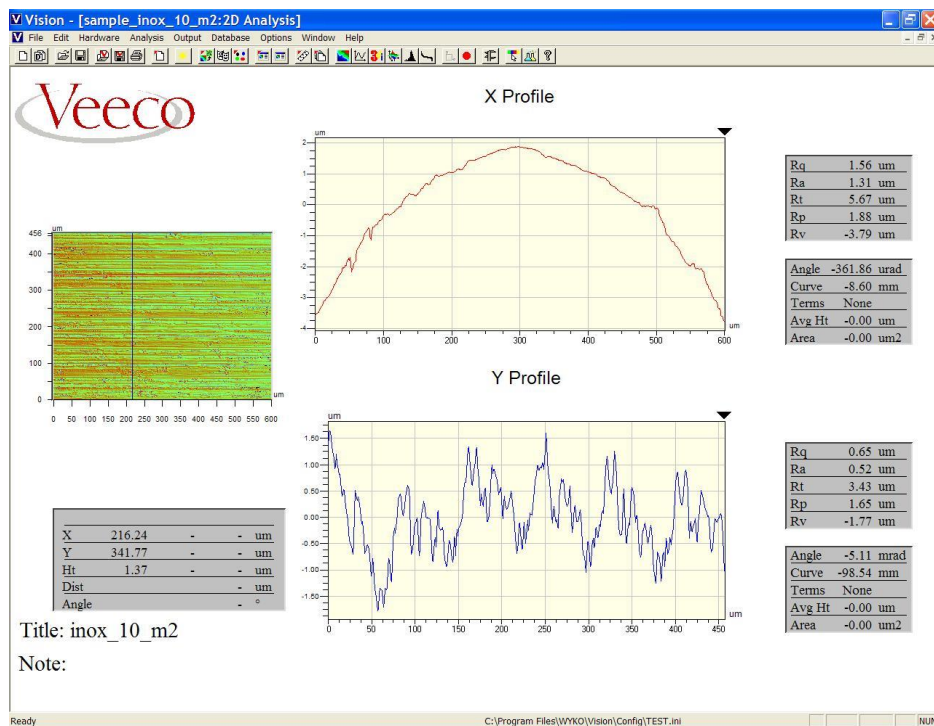


Εικόνα 5.5: Vision32® 3D Contour plot της τραχύτητας του δοκιμίου νο.8 από ανοξείδωτο χάλυβα στην περιοχή του αντιδιαμετρικού σημείου με το 2, με φιλτράρισμα.

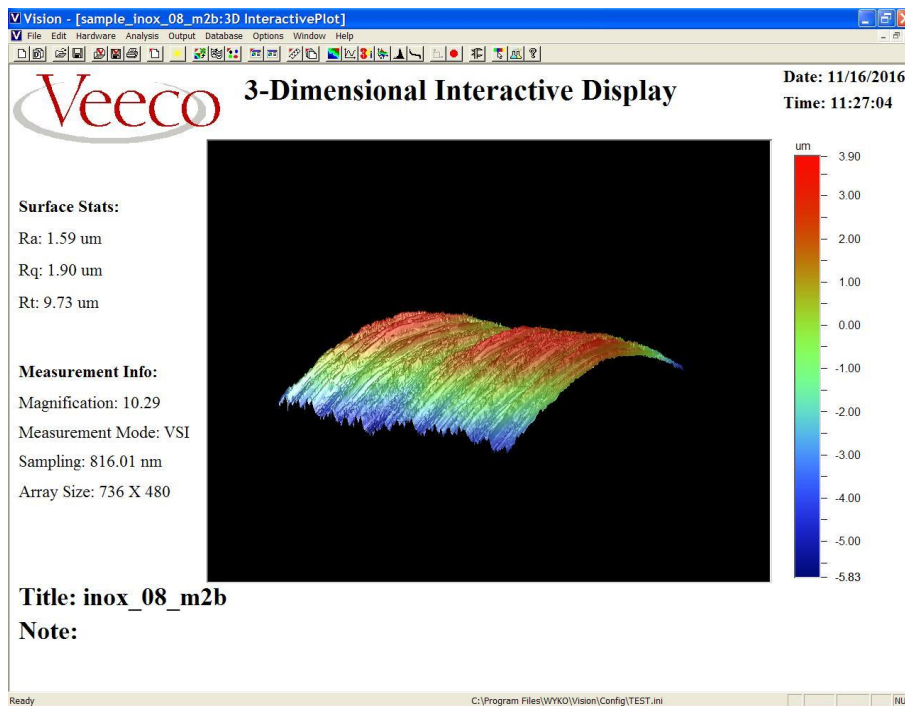
2. *2D analysis:* Εδώ εμφανίζονται οι τιμές των παραμέτρων τραχύτητας για ένα συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειας, το οποίο ορίζεται από το χρήστη μέσα στην περιοχή που εμφανίζεται και το Contour plot. Υπάρχουν δυο διαγράμματα, ένα για το προφίλ στον άξονα X και ένα για το προφίλ στον άξονα Y. Ουσιαστικά, για το κάθε σημείο που επιλέγεται, λαμβάνεται ένας μέσος όρος των τιμών των παραμέτρων για όλα τα σημεία των κάθετων στους άξονες ευθειών που περνάνε από το σημείο που επιλέξαμε. (Εικόνα 5.6) Για την επαναληψιμότητα των μετρήσεων, έγινε καταγραφή των μετρήσεων για δυο διαφορετικά σημεία της περιοχής που σαρωνόταν. Τα σημεία απείχαν αρκετή απόσταση μεταξύ τους, έτσι ώστε να αποκλειστεί όσο γίνεται η πιθανότητα μη ορθής μέτρησης.



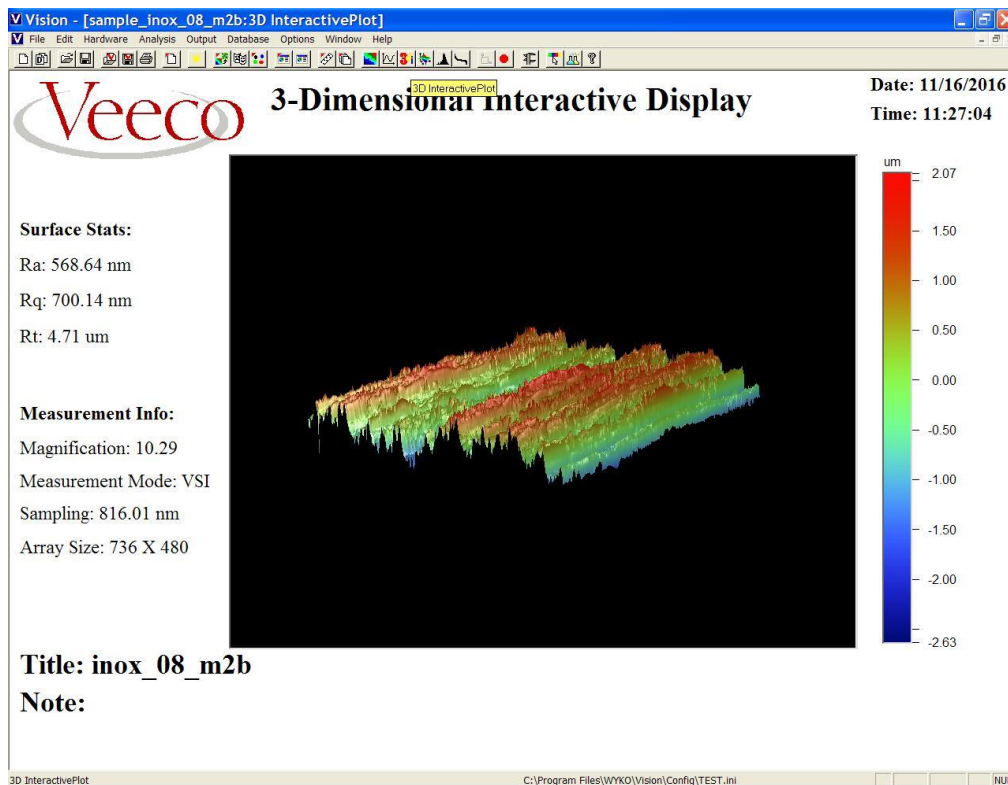
Εικόνα 5.6: Vision32® 2D analysis της τραχύτητας του δοκιμίου vo.10 από ανοξείδωτο χάλυβα στην περιοχή του σημείου 2, με φιλτράρισμα.



Εικόνα 5.7: Vision32® 2D analysis της τραχύτητας του δοκιμίου vo.10 από ανοξείδωτο χάλυβα στην περιοχή του σημείου 2 και για τις ίδιες συντεταγμένες, χωρίς φιλτράρισμα.

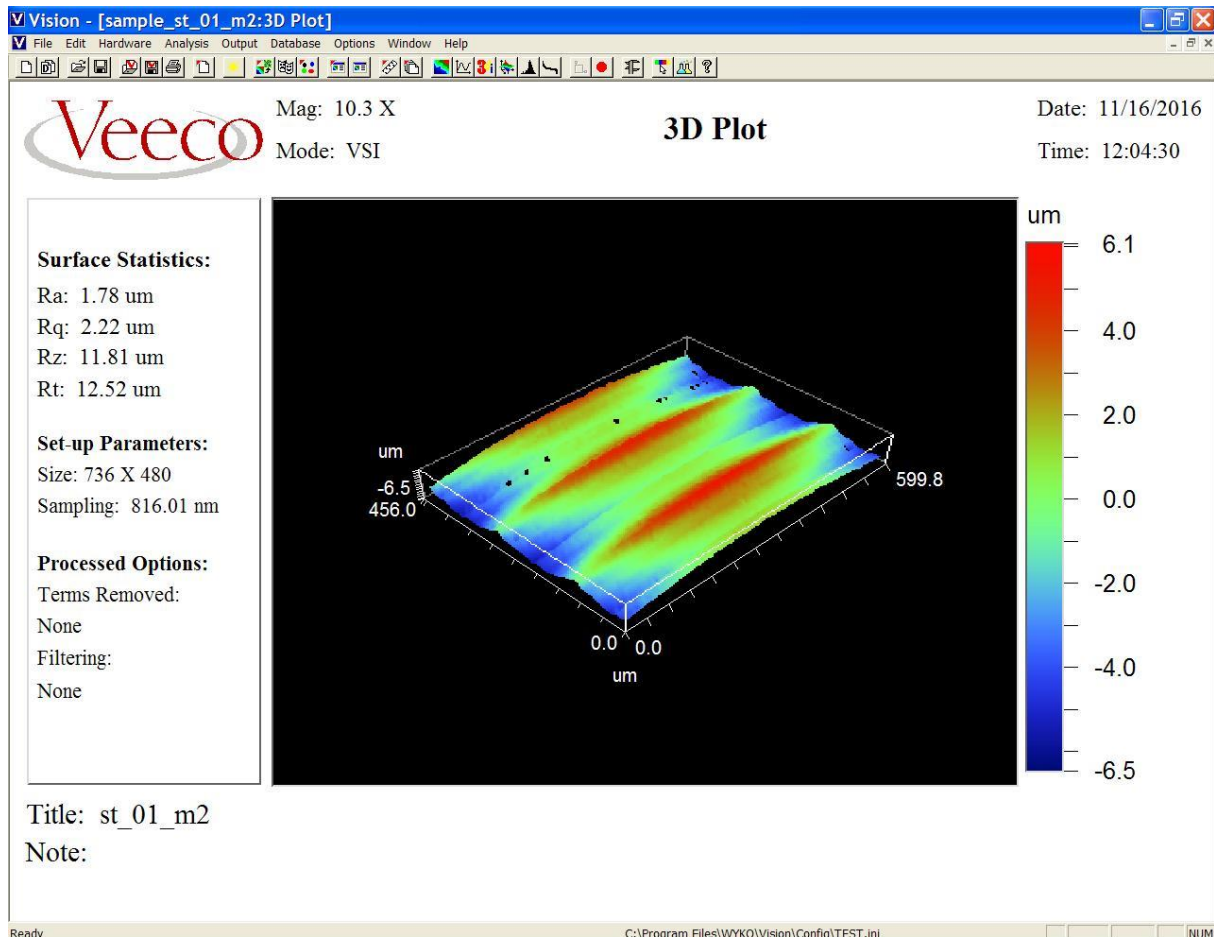


Εικόνα 5.8: Vision32® 3D interactive plot της τραχύτητας του δοκιμίου νο.8 από ανοξείδωτο χάλυβα στην περιοχή του σημείου b, χωρίς φιλτράρισμα.



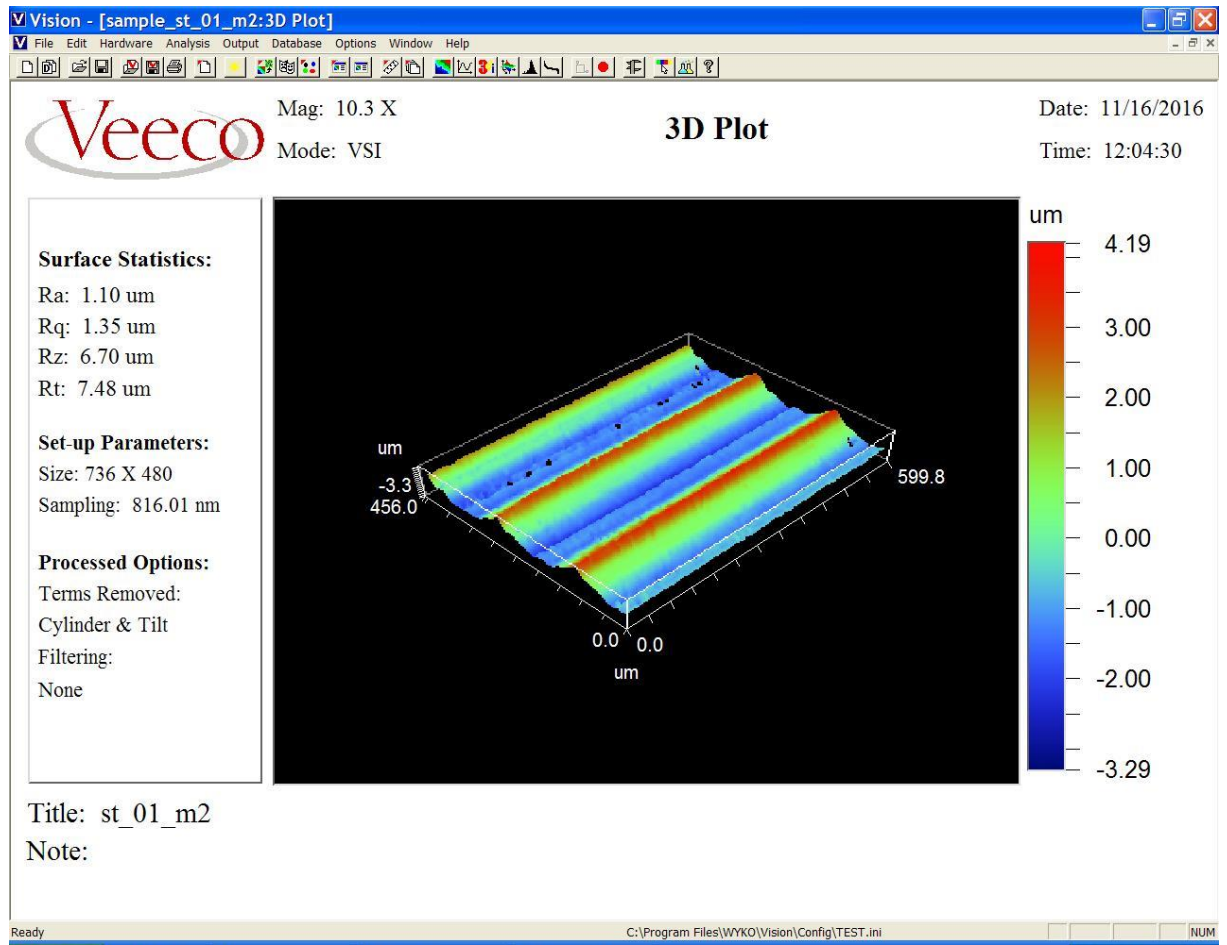
Εικόνα 5.9: Vision32® 3D interactive plot της τραχύτητας του δοκιμίου νο.8 από ανοξείδωτο χάλυβα στην περιοχή του σημείου b, με φιλτράρισμα.

3. *3D interactive plot*: Σε αυτό το εργαλείο γίνεται τρισδιάστατη απεικόνιση των ανωμαλιών της επιφάνειας. Με την επιλογή None, είναι ότι πιο κοντινό στο πώς αντιλαμβάνεται το μάτι την τραχύτητα όταν το δοκίμιο παρατηρείται υπό κλίση. (Εικόνα 5.8, Εικόνα 5.9)



Εικόνα 5.10: Vision32® 3D plot της τραχύτητας του χαλύβδινου δοκιμίου νο.1 στην περιοχή του σημείου 2, χωρίς φιλτράρισμα. Διακρίνονται με αριθμούς οι μικρότερες τιμές των κοιλάδων στις δυο γωνίες.

4. *3D plot*: Οι ίδιες διακυμάνσεις που εμφανίζονται στο 3D interactive plot περικλείονται από πλαίσιο με πλευρές χωρισμένες σε ίσα διαστήματα, δίνοντας έτσι μια χωρική προοπτική της επιφάνειας(Εικόνα 5.10, Εικόνα 5.11). Το 3D interactive plot και το 3D plot είναι τα πιο ενδιαφέροντα για την παρατήρηση της διαφοράς μεταξύ φιλτραρισμένης και μη μέτρησης.



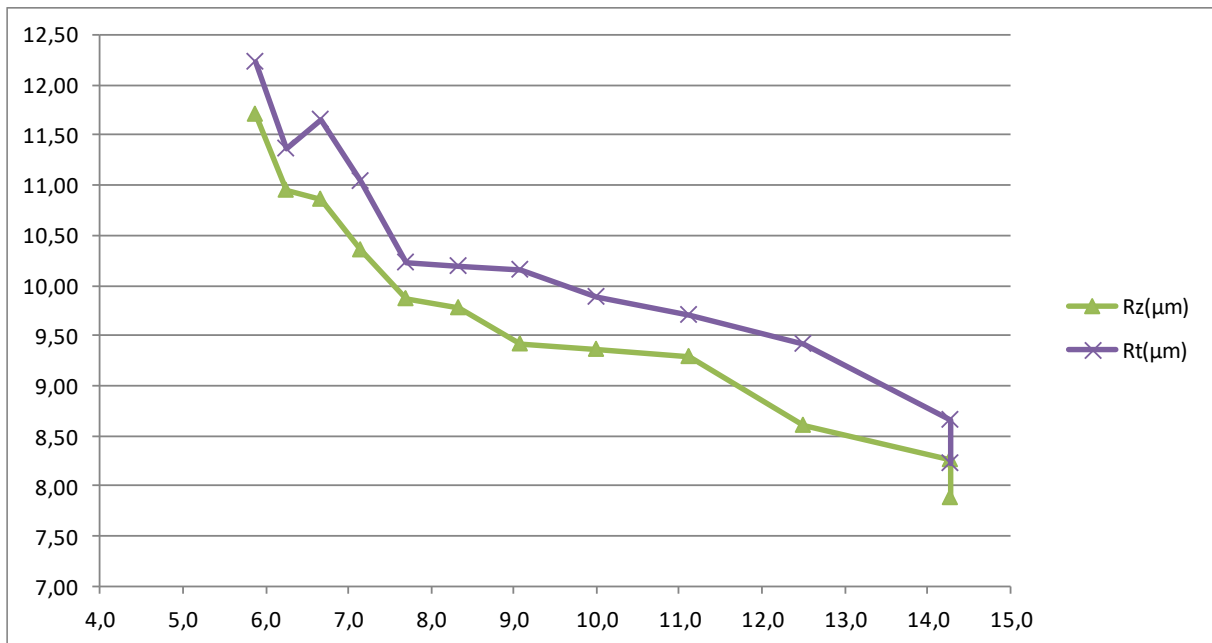
Εικόνα 5.11: Vision32® 3D plot της τραχύτητας του χαλύβδινου δοκιμίου νο.1 στην περιοχή του σημείου 2, με φιλτράρισμα για εξάλειψη της κλίσης. Διακρίνονται με αριθμούς οι μικρότερες τιμές των κοιλάδων στις δυο γωνίες.

5. *Filtered histogram analysis:* Το ιστόγραμμα απεικονίζει σε μορφή γραφήματος τον αριθμό των σημείων της επιφάνειας που μετρούνται με κοινή τραχύτητα, δηλαδή όλα τα σημεία που έχουν ίδια τιμή ύψους επιφάνειας. Ο κάθετος άξονας συμβολίζει τον αριθμό των σημείων που έχουν την ίδια τιμή κατά μήκος της μετρούμενης επιφάνειας και είναι χωρισμένος σε ίσα διαστήματα. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει το ύψος της τραχύτητας. (Εικόνα 5.3)

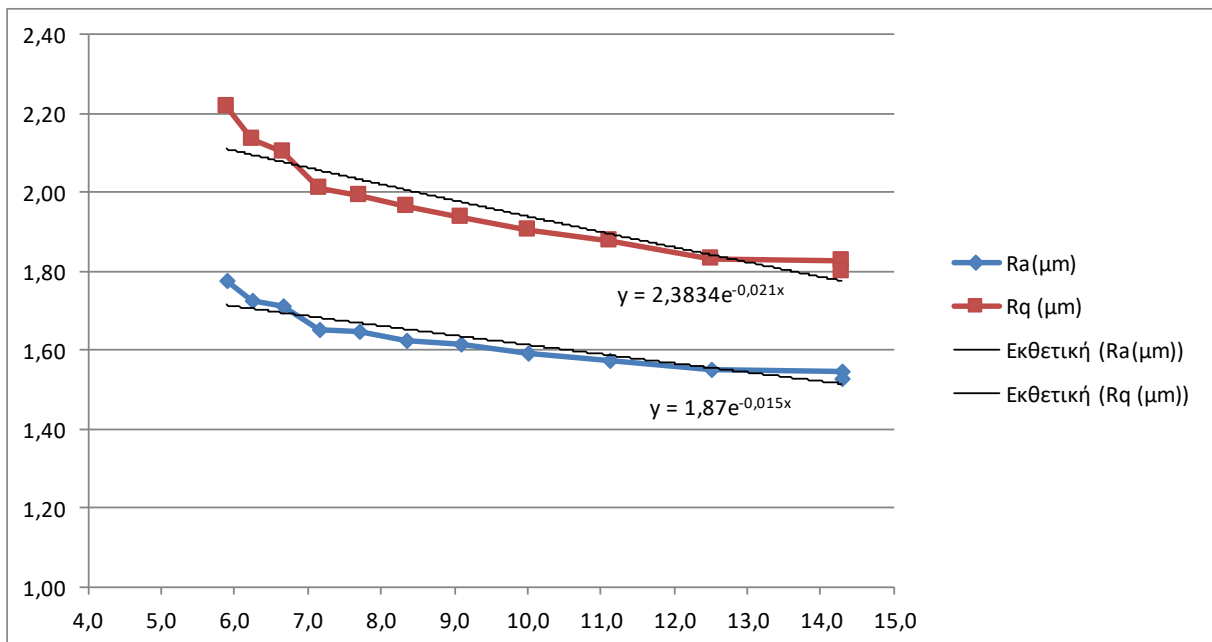
5.1.5 Διαγράμματα με παραμέτρους τραχύτητας

Όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων έχουν μονάδα μέτρησης το nm και το um (στο πρόγραμμα συμβολίζεται ως um λόγω του ότι το γράμμα μ απουσιάζει πολλές φορές από το αλφάβητο χρωών του εξωτερικού. Όλες οι τιμές τους μετατράπηκαν από nm σε um όπου χρειάστηκε και τοποθετήθηκαν σε υπολογιστικά φύλλα του

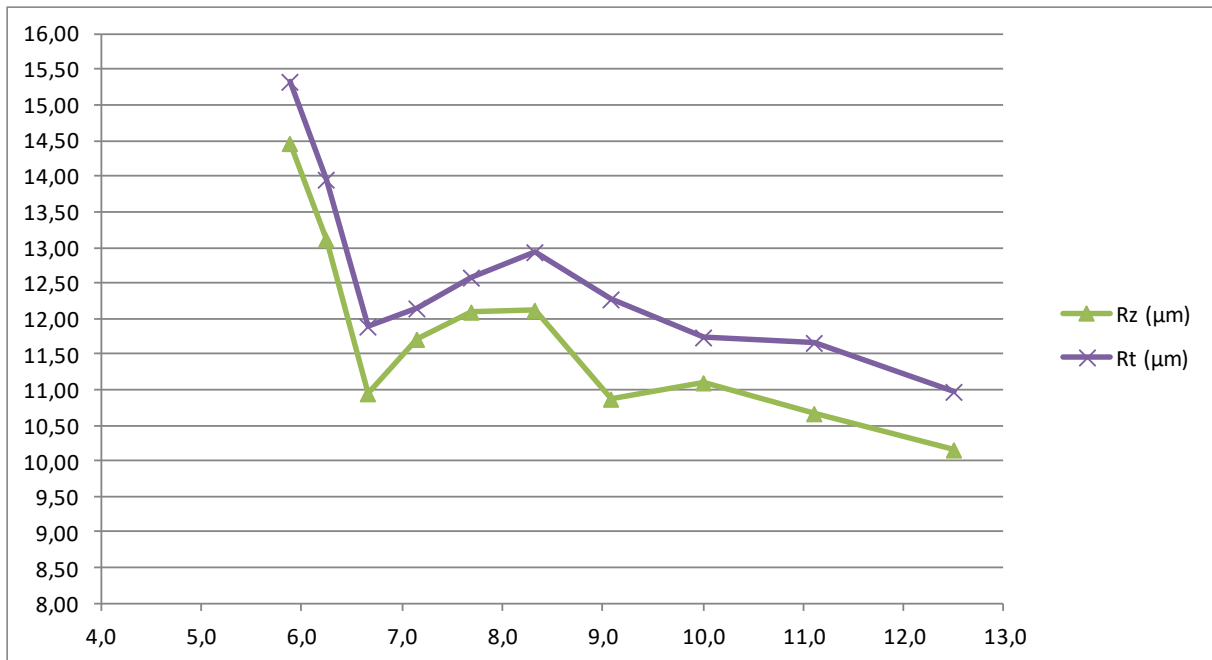
Microsoft Excel. Με βάση αυτά σχεδιάστηκαν διαγράμματα για τη μεταβολή των παραμέτρων σε συνάρτηση με τον λόγο $\lambda = n / S$ για το κάθε υλικό.



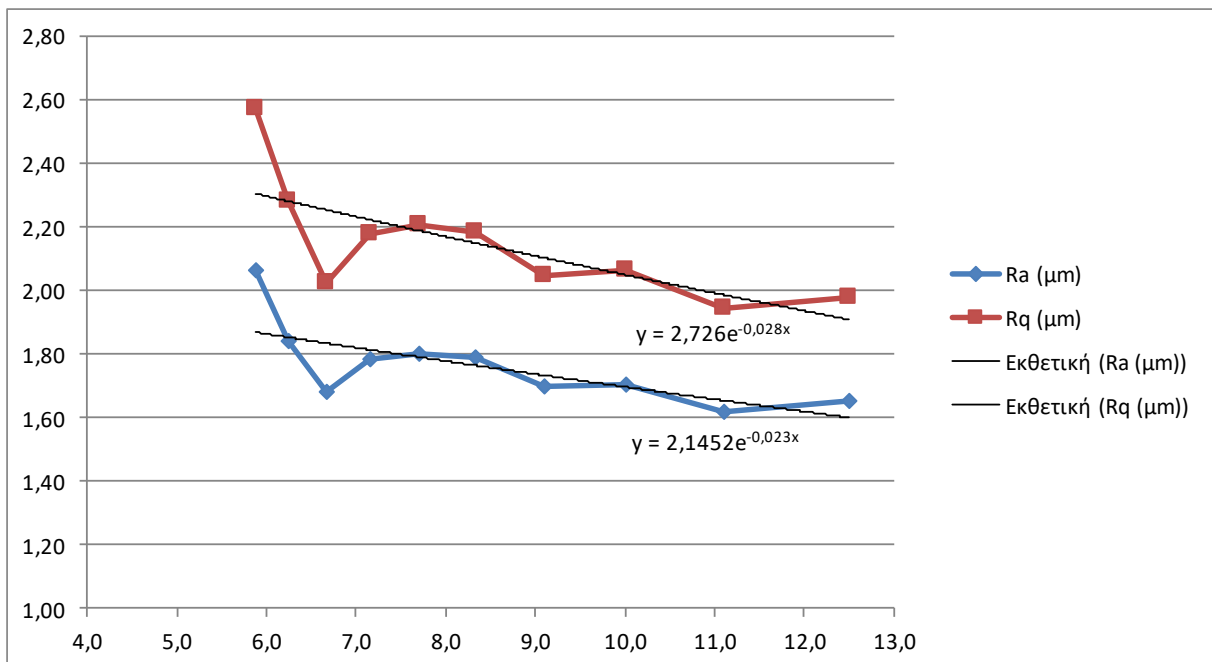
Εικόνα 5.12: Διάγραμμα σχέσης μεταξύ του λόγου λ και των R_z , R_t για τον κατασκευαστικό χάλυβα.



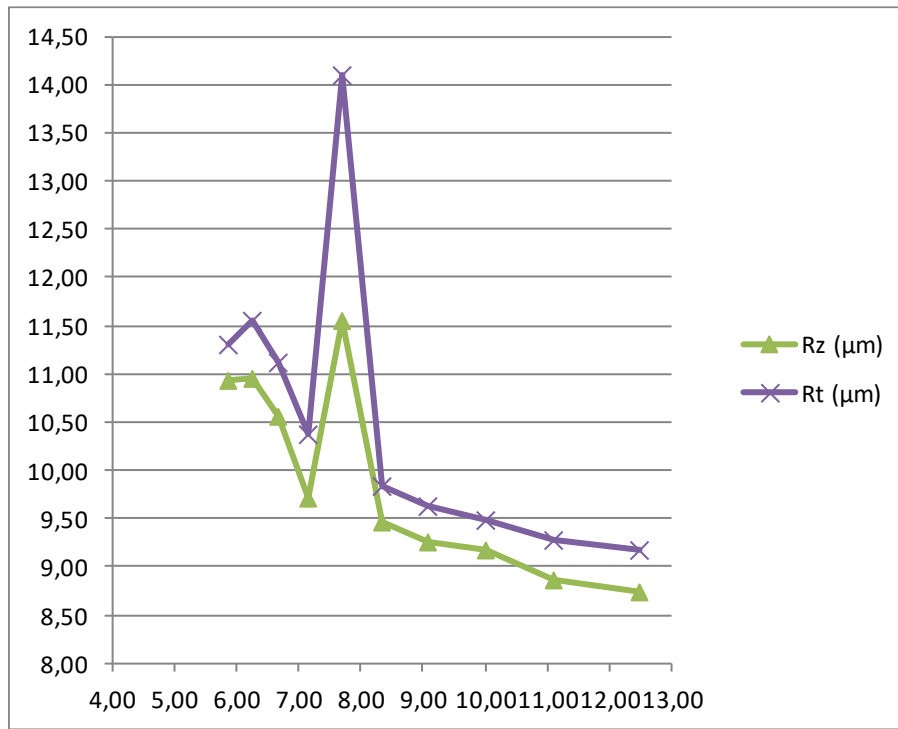
Εικόνα 5.13: Διάγραμμα του λόγου λ συναρτήσει των R_a , R_q για τον κατασκευαστικό χάλυβα, μαζί με γραμμές τάσης εκθετικού τύπου.



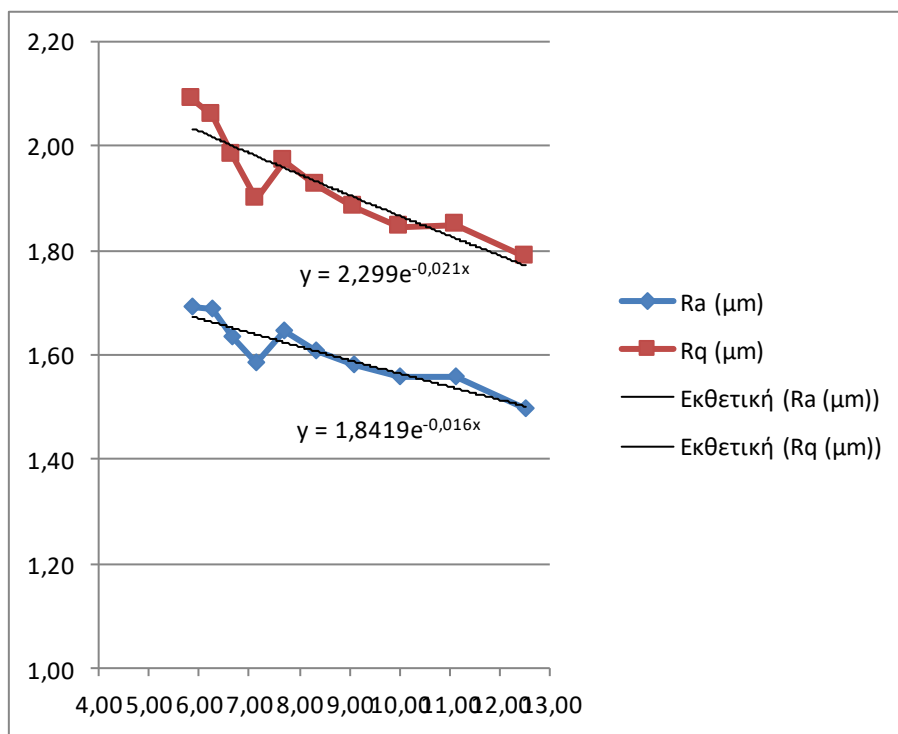
Εικόνα 5.14: Διάγραμμα του λόγου λ συναρτήσει των R_z , R_t για τον αρχιτεκτονικό ορείχαλκο.



Εικόνα 5.15: Διάγραμμα του λόγου λ συναρτήσει των R_a , R_q για τον αρχιτεκτονικό ορείχαλκο.



Εικόνα 5.16: Διάγραμμα του λόγου λ συναρτήσει των R_z , R_t για τον ανοξειδωτο χάλυβα.



Εικόνα 5.17: Διάγραμμα του λόγου λ συναρτήσει των R_a , R_q για τον ανοξειδωτο χάλυβα, μαζί με γραμμές τάσης εκθετικού τύπου.

5.1.6. Παρατηρήσεις για τα διαγράμματα

Στα διαγράμματα απεικονίζονται εμφανέστατα τα αποτελέσματα της μεταβολής των παραμέτρων τραχύτητας μαζί τις παραμέτρους κοπής. *Υπάρχει δηλαδή μείωση των παραγόντων R της τραχύτητας καθώς αυξάνεται η ταχύτητα κοπής V_c και ελαττώνεται η πρόωση f .*

Όπως μπορεί εύκολα να παρατηρήσει κάποιος, οι τιμές των παραμέτρων R συναρτήσει του λόγου λ συμβαδίζουν με αυτό που είχαμε υποθέσει από την αρχή. Για μεγαλύτερο λόγο λ -για υψηλότερη ταχύτητα κοπής και χαμηλότερη πρόωση- η τραχύτητα μειώνεται. Υπάρχει δηλαδή μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ τους. Η αντιστοιχία αυτή παρατηρείται στην πλειονότητα των δοκιμών, υπάρχουν όμως και εξαιρέσεις που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα. Πιο συγκεκριμένα:

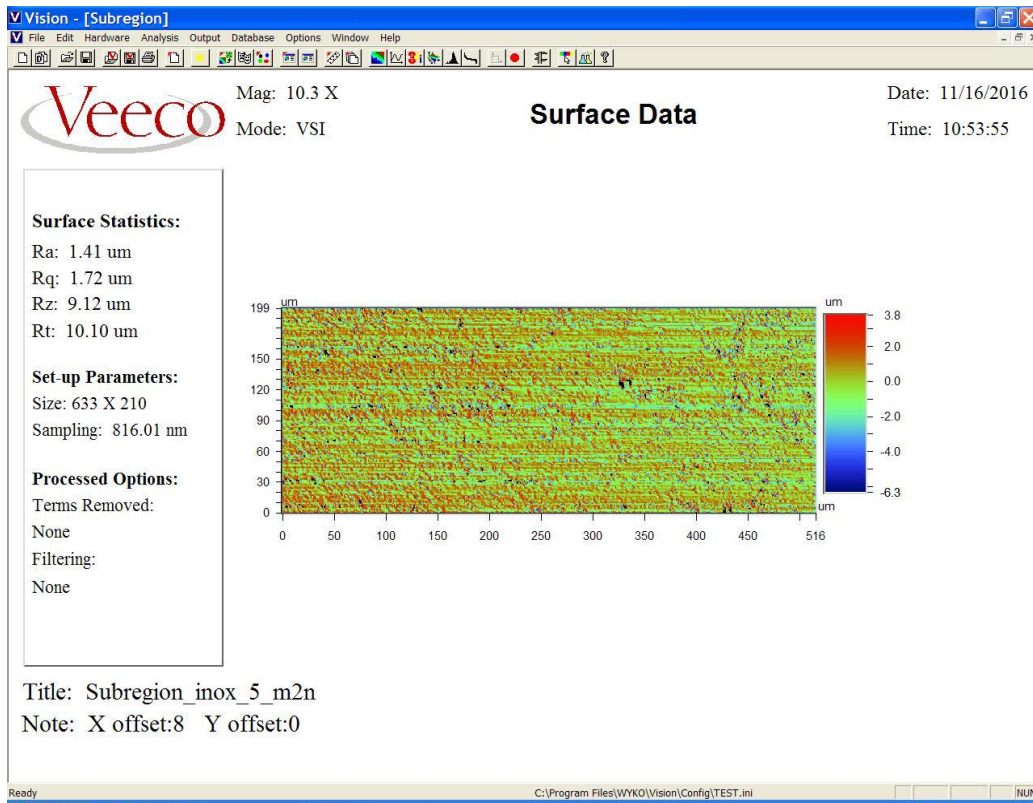
- Για τον κατασκευαστικό χάλυβα S235 παρατηρείται μια μικρή άνοδος της τραχύτητας στο δοκίμιο νο.3. Η πτώση στο τέλος του διαγράμματος (Εικόνα 5.12) είναι απόρροια του ότι ο λόγος λ αυξάνεται αρκετά, εξαιτίας της μειωμένης πρόωσης.
- Στον αρχιτεκτονικό ορείχαλκο C38000, το δοκίμιο νο.1 παρουσιάζει ασυνήθιστα υψηλή τραχύτητα σε σχέση με τα υπόλοιπα, ενώ το δοκίμιο νο.3 έχει αρκετά μειωμένες τιμές R συγκρινόμενο με τα υπόλοιπα. Υπάρχει μια μικρή ανοδική πορεία των τιμών των παραγόντων της τραχύτητας μέχρι και το δοκίμιο νο.6, για να εξασθενήσει και αυτή στην συνέχεια.(Εικόνα 5.14, Εικόνα 5.15)
- Ο ανοξείδωτος χάλυβας AISI-SAE 304 παρουσιάζει την πιο μεγάλη απόκλιση στο δοκίμιο νο.5, φτάνοντας σε ένα πολύ μεγαλύτερο νούμερο τραχύτητας από το αναμενόμενο.(Εικόνα 5.16, Εικόνα 5.17)

5.1.7 Επεξεργασία των τιμών των διαγραμμάτων και νέες παρατηρήσεις

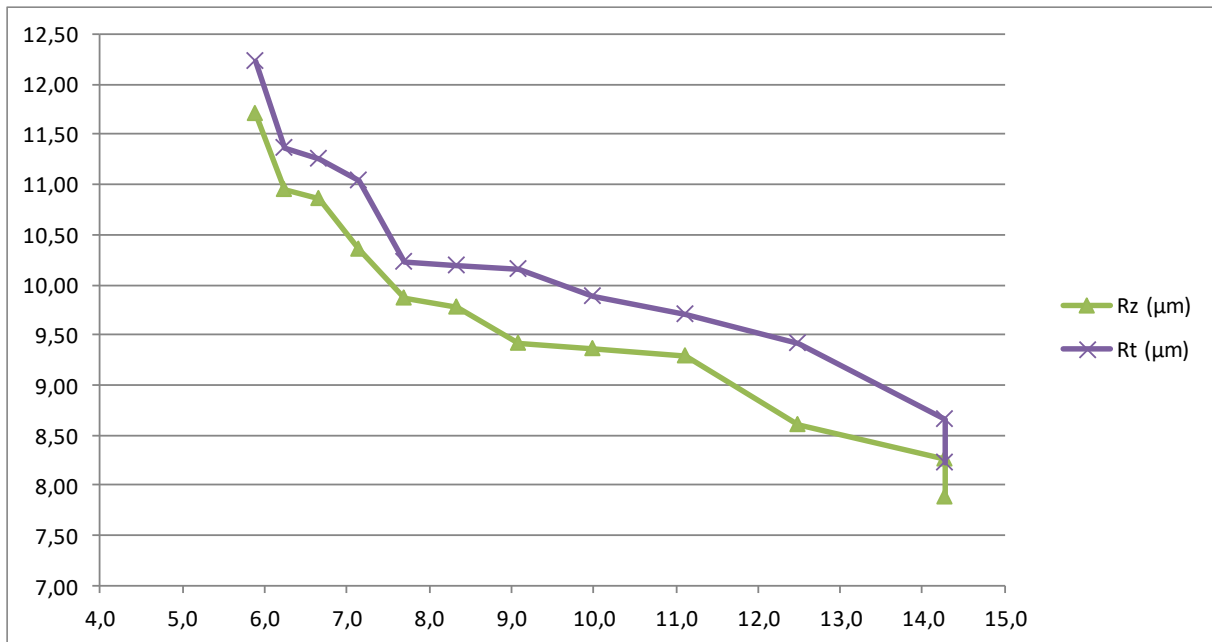
Για να μελετηθεί το τι συνέβη με τα συγκεκριμένα δοκίμια, έγινε αρχικά μια προσεκτική παρατήρηση των μετρήσεων που είχαν γίνει με το οπτικό προφιλόμετρο. Διαπιστώθηκε ότι υπήρχαν ανωμαλίες στην επιφάνεια των δοκιμών που είχαν εμφανίσει μεγάλες αποκλίσεις στην τραχύτητα, ανωμαλίες που δεν είχαν απομονωθεί κατά τη μέτρηση και επηρέαζαν αρνητικά την πιστότητα και την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Η διαπίστωση έγινε με την παρατήρηση αρκετών μαύρων σημείων μέσα στην περιοχή που μετρήθηκε.

Το αμέσως επόμενο βήμα ήταν να γίνει χρήση της δυνατότητας που έχει το λογισμικό Vision32© για μελέτη μιας υποπεριοχής από την αρχική που είχε μετρηθεί. Με αυτόν τον τρόπο, απομονώθηκε το κομμάτι της περιοχής που είχε τις πολύ μεγάλες διακυμάνσεις και πάρθηκαν τιμές τραχύτητας πιο κοντά στις αναμενόμενες (παράδειγμα για το δοκίμιο νο.5 από ανοξείδωτο χάλυβα στην Εικόνα 5.18). Με βάση

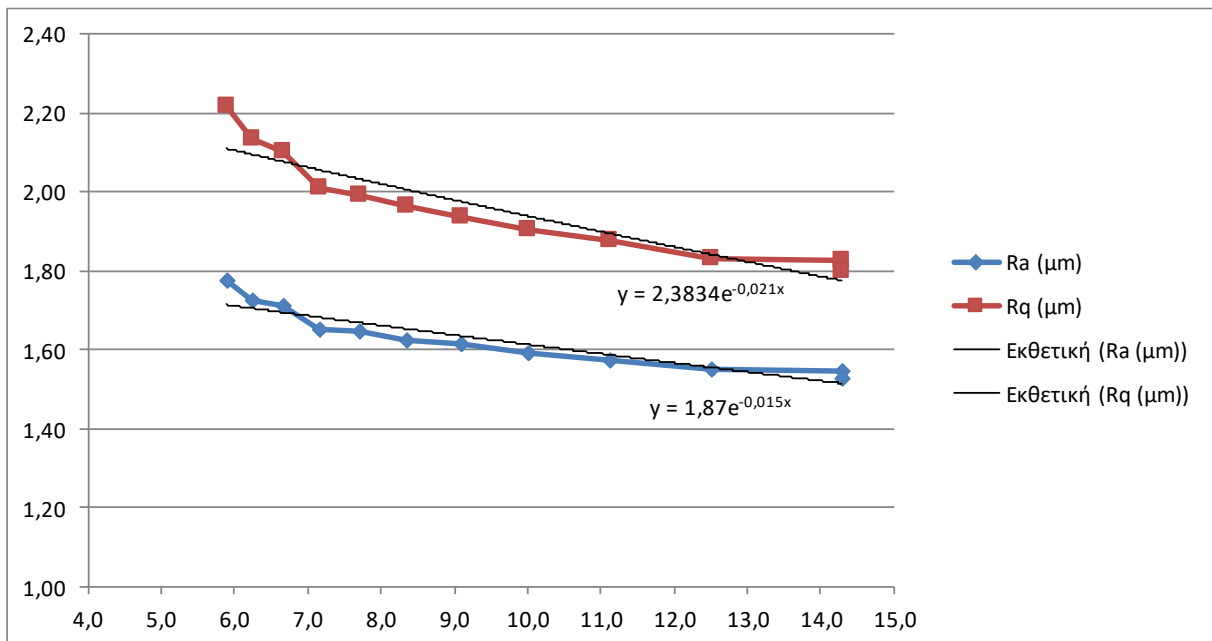
τις νέες τιμές και σε συνδυασμό με τις προηγούμενες που είχαν ληφθεί, φτιάχτηκαν νέα υπολογιστικά φύλλα στο Microsoft Excel και σχεδιάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα. Τα νέα διαγράμματα προσομοιάζουν ακόμα περισσότερο την συμπεριφορά που έχει παρατηρηθεί από την ερευνητική κοινότητα και επαληθεύουν τη συναρτησιακή σχέση που υπάρχει.



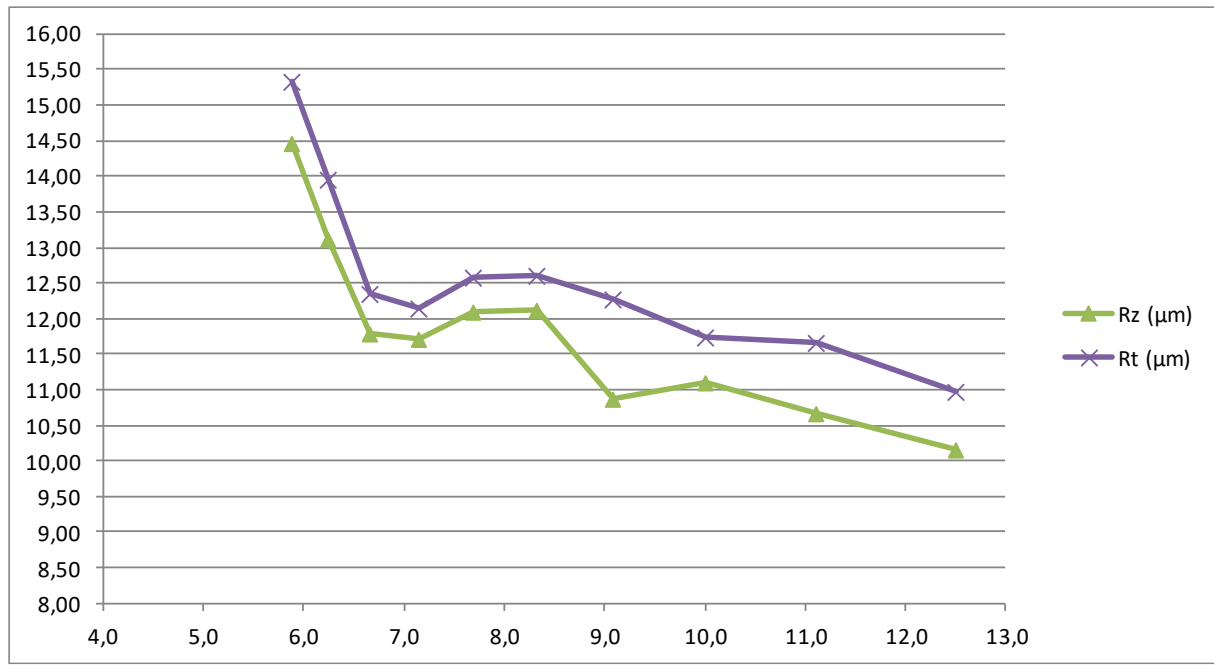
Εικόνα 5.18: Μέτρηση υποπεριοχής διαστάσεων 633 X 210 στο σημείο 2 για το δοκίμιο no.5 από ανοξείδωτο χάλυβα AISI-SAE 304.



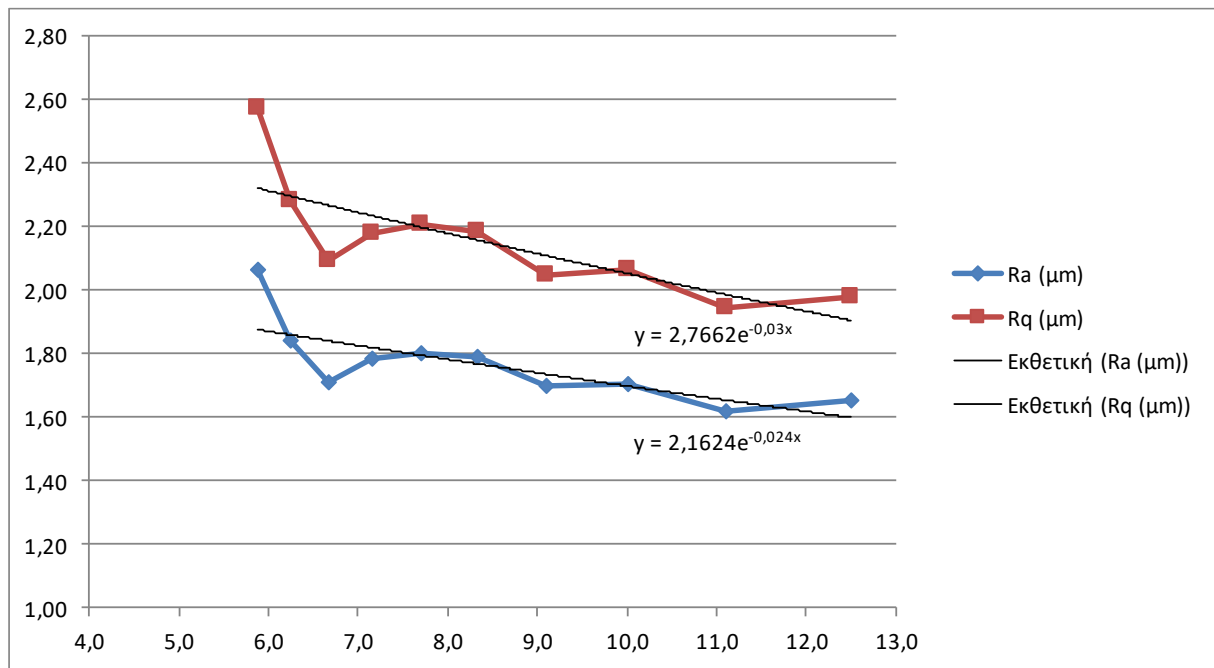
Εικόνα 5.19: Διάγραμμα του λόγου λ συναρτήσει των R_z , R_t για τον κατασκευαστικό χάλυβα, μετά από τη διόρθωση.



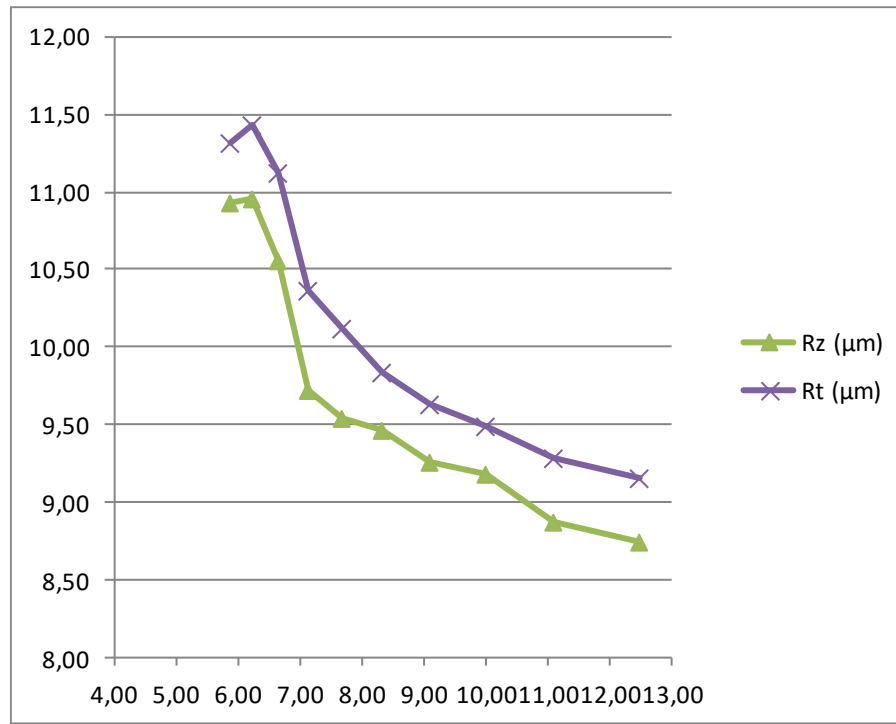
Εικόνα 5.20: Διάγραμμα του λόγου λ συναρτήσει των R_a , R_q για τον κατασκευαστικό χάλυβα, μαζί με γραμμές τάσης εκθετικού τύπου, μετά από τη διόρθωση.



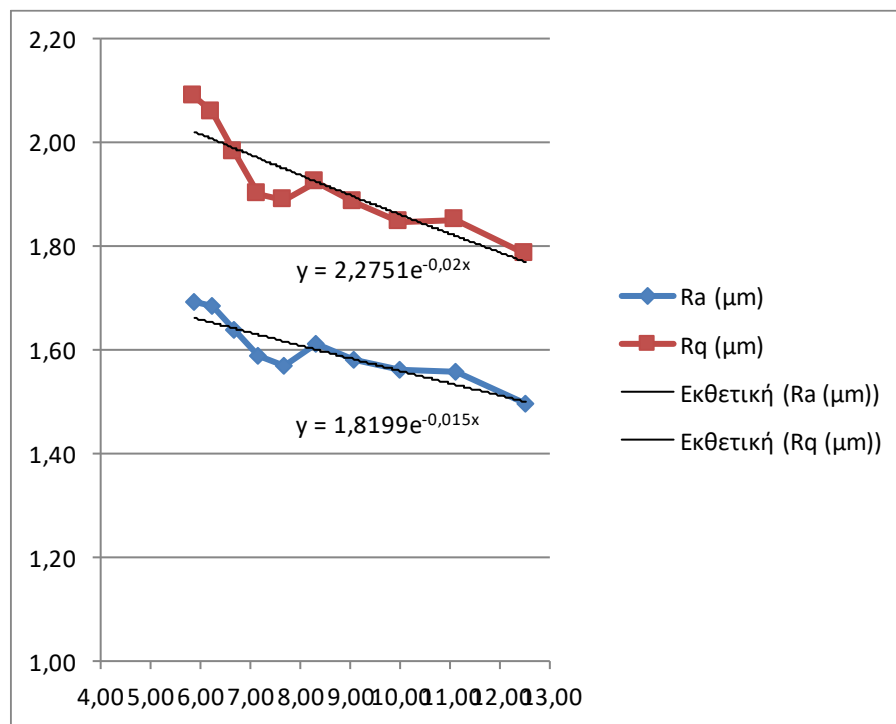
Εικόνα 5.21: Διάγραμμα του λόγου λ συναρτήσεσι των R_z , R_t για τον αρχιτεκτονικό ορείχαλκο, μετά από τη διόρθωση.



Εικόνα 5.22: Διάγραμμα του λόγου λ συναρτήσεσι των R_a , R_q για τον αρχιτεκτονικό ορείχαλκο, μαζί με γραμμές τάσης εκθετικού τύπου, μετά από τη διόρθωση.



Εικόνα 5.23: Διάγραμμα του λόγου λ συναρτήσει των R_z , R_t για τον ανοξειδωτο χάλυβα, μετά από τη διόρθωση.



Εικόνα 5.24: Διάγραμμα του λόγου λ συναρτήσει των R_a , R_q για τον ανοξειδωτο χάλυβα, μαζί με γραμμές τάσης εκθετικού τύπου, μετά από τη διόρθωση.

5.2 S.E.M. FEI™ Inspect F50

Για την διερεύνηση των λόγων που οδήγησαν στην εξαγωγή αυξημένων τιμών τραχύτητας, χρησιμοποιήθηκε το S.E.M. FEI™ Inspect F50 του Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας. (Εικόνα 5.25) Το S.E.M. χρησιμοποιήθηκε για να μελετηθούν τα δοκίμια που παρουσίασαν μεγάλες διακυμάνσεις στην τραχύτητα τους σε σχέση με τα υπόλοιπα.



Εικόνα 5.25: Το S.E.M. FEI™ Inspect F50 του Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας.

5.2.1 Χαρακτηριστικά

Το συγκεκριμένο S.E.M. είναι μια προσιτή οικονομικά λύση που μπορεί να καλύψει ένα μεγάλο εύρος αναγκών, ανεξάρτητα από το επίπεδο εμπειρίας του χειριστή. (Εικόνα 5.25) Διαθέτει λειτουργία εκπομπής δέσμης ηλεκτρονίων μέσω χαμηλής τάσης, δίνοντας έτσι την δυνατότητα για εικόνα με υψηλού επιπέδου φωτεινότητα, ενώ παράλληλα η δέσμη των ηλεκτρονίων εστιάζεται σε μια μικρή επιφάνεια. [85].



Εικόνα 5.26: Το S.E.M. μαζί με τους υπολογιστές, τις οθόνες προβολής και απεικόνισης και τα χειριστήρια ελέγχου της λειτουργίας του.

Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 5.26, είναι συνδεδεμένο με δυο υπολογιστές για την εύκολη παρατήρηση και επίβλεψη των λειτουργιών του, καθώς στην μια οθόνη προβάλλονται οι εικόνες από το δείγμα και στην άλλη προβάλλονται οι απαραίτητες για την εποπτεία και έλεγχο λειτουργίες του μικροσκοπίου από τον δεύτερο υπολογιστή. Το συγκεκριμένο S.E.M. είναι εφοδιασμένο με όλων των ειδών τους ανιχνευτές που προαναφέρθηκαν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρατήρηση παντός είδους δειγμάτων. (Εικόνα 5.27)



Εικόνα 5.27: Ο θάλαμος τοποθέτησης των δειγμάτων προς μέτρηση, η στήλη εκπομπής ηλεκτρονίων και οι διάφοροι αισθητήρες για την μέτρηση των αποτελεσμάτων.

Σύμφωνα με τα στοιχεία που δίνει η FEI™ :

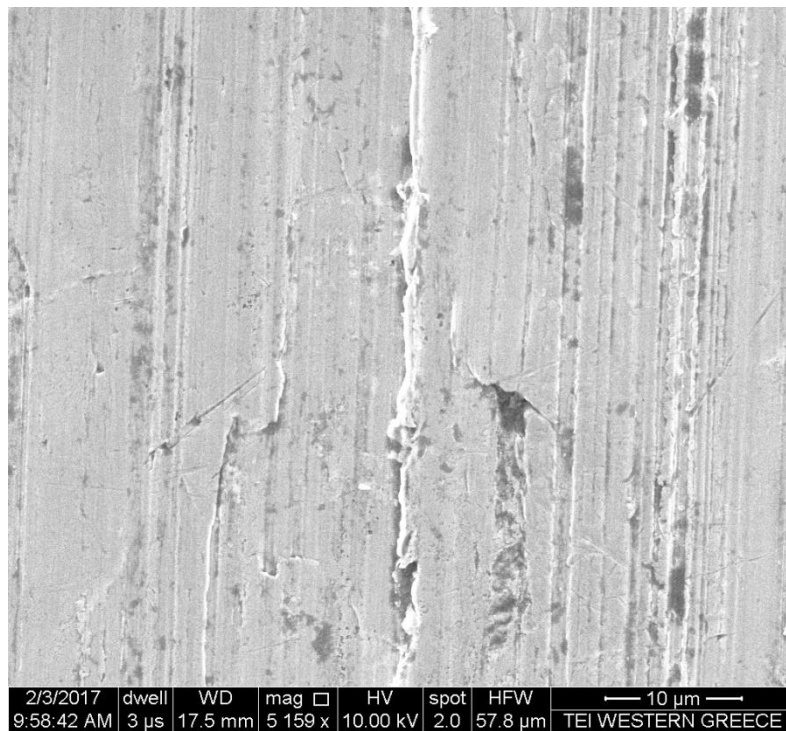
Οι συνθήκες «κενού» στον θάλαμο τοποθέτησης των δειγμάτων μπορεί να φτάσουν ως τα $9 \cdot 10^{-4}$ Pa, σε χρόνο ≤ 150 sec. Ο θάλαμος έχει μέγεθος 284 mm κατά το πλάτος και επιτρέπει την μελέτη των δειγμάτων σε αναλυτική απόσταση ως και 10 mm. Μέσα στον θάλαμο υπάρχει βάση που μπορεί να μετατοπιστεί κατά 50 mm και στους τρεις άξονες (X,Y,Z), να περιστραφεί κατά 360° γύρω από τον άξονα Y, ενώ έχει και εύρος κλίσης T σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο(άξονας X) ίσο με $-15^\circ \leq T \leq +75^\circ$. Η επαναληψιμότητα φτάνει τα 2 μm στους άξονες X και Y.

Το επιταχυνόμενο δυναμικό κυμαίνεται μεταξύ 200 V και 30kV. Το ρεύμα εκπομπής είναι ≤ 200 nA και μπορεί να ρυθμίζεται συνεχώς.

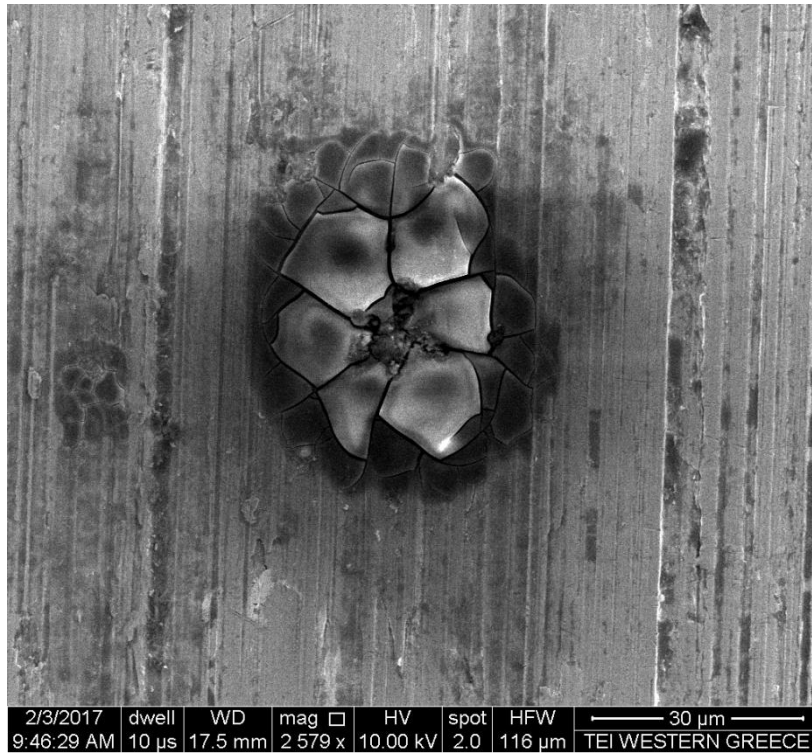
Η μεγέθυνση που μπορεί να προσφέρει είναι της τάξεως του 14-1000000x, ενώ η ανάλυση της δέσμης ηλεκτρονίων κυμαίνεται μεταξύ των 0.8 nm με 3 nm, με την χαμηλότερη τιμή να επιτυγχάνεται μέσω του υψηλότερου δυναμικού.

Το συνολικό του βάρος είναι 669 kg, αλλά συνοδεύεται και από επιπρόσθετα μηχανήματα. Για την σωστή λειτουργία του, υπάρχει σύστημα κλιματισμού για διατήρηση της θερμοκρασίας μεταξύ 17-23 °C και της σχετικής υγρασίας κάτω από 80% RH. Έχει συνδεθεί επίσης UPS(Uninterruptible Power Supply), το οποίο παρέχει αδιάλειπτα ηλεκτρική ενέργεια, ακόμα και όταν υπάρχει διακοπή της ηλεκτρικής παροχής από το δίκτυο.

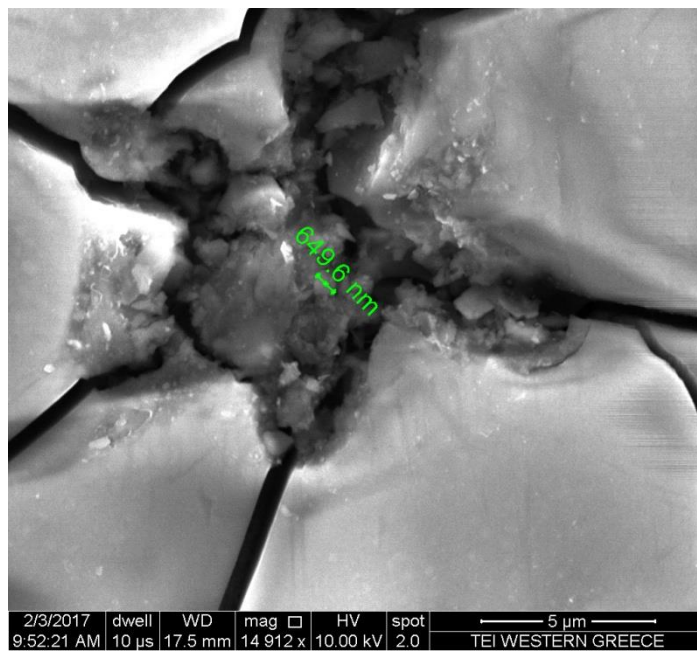
5.2.2. Χαρακτηρισμός των υλικών με χρήση του S.E.M. και σχολιασμός τους



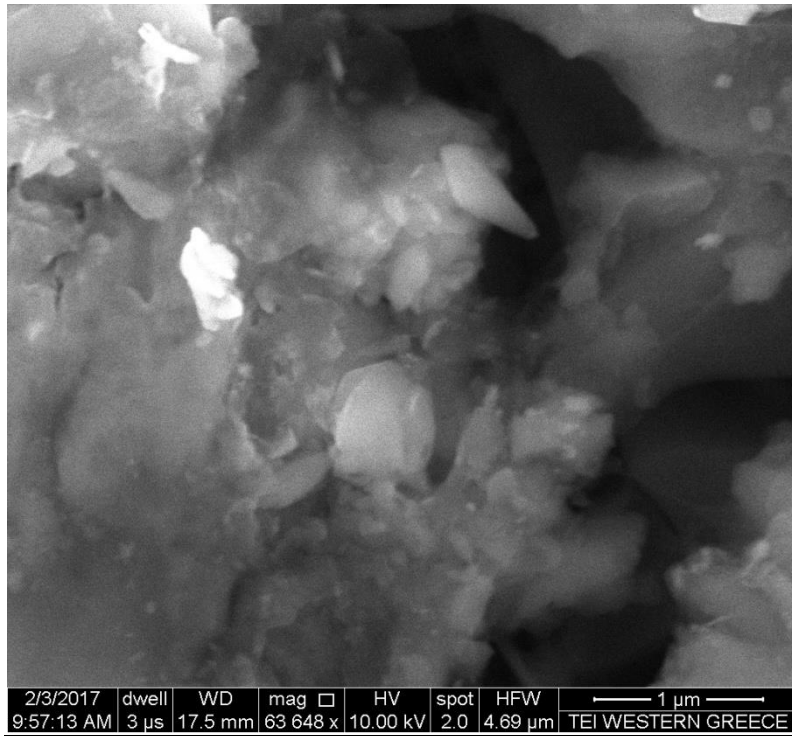
Εικόνα 5.28: Επιφάνεια του τρίτου δοκιμίου από ορείχαλκο. Παρατηρούνται αναμενόμενες-για το υλικό-ανομοιομορφίες μετά την τόννευση, λόγω και της ύπαρξης μόλυβδου.



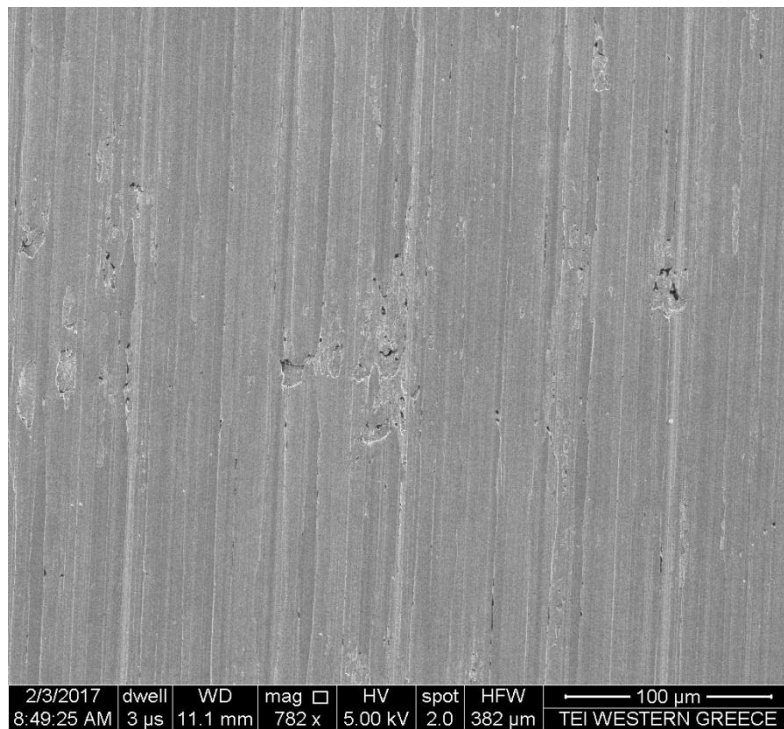
Εικόνα 5.29: Αστοχία στην επιφάνεια του τρίτου ορειχάλκινου δοκιμίου. Κρίνοντας από τη φωτεινότητα και τη διάδοση ρωγμών (crack propagation), καταλαβαίνουμε ότι πρόκειται για αστοχία λόγω θερμοκρασίας (thermal crack).



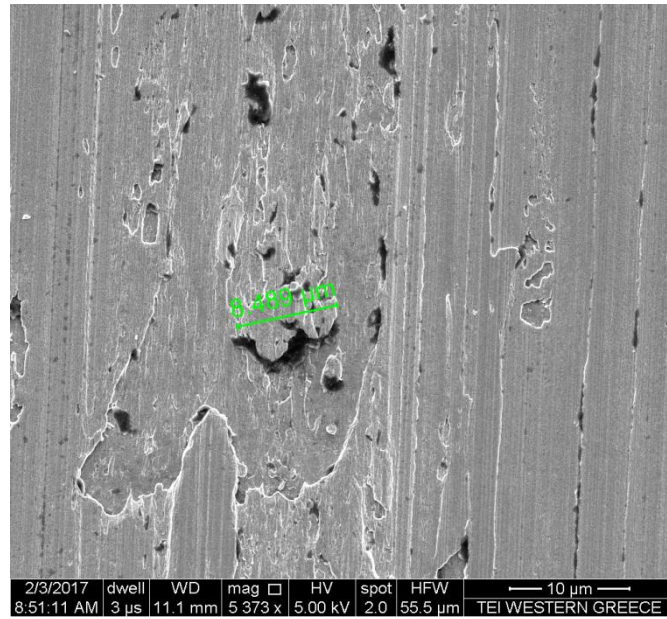
Εικόνα 5.30: Μεγέθυνση της προηγούμενης αστοχίας στην περιοχή της αρχής των ρωγμών, στην κρίσιμότερη δηλαδή περιοχή για την αστοχία του τεμαχίου.



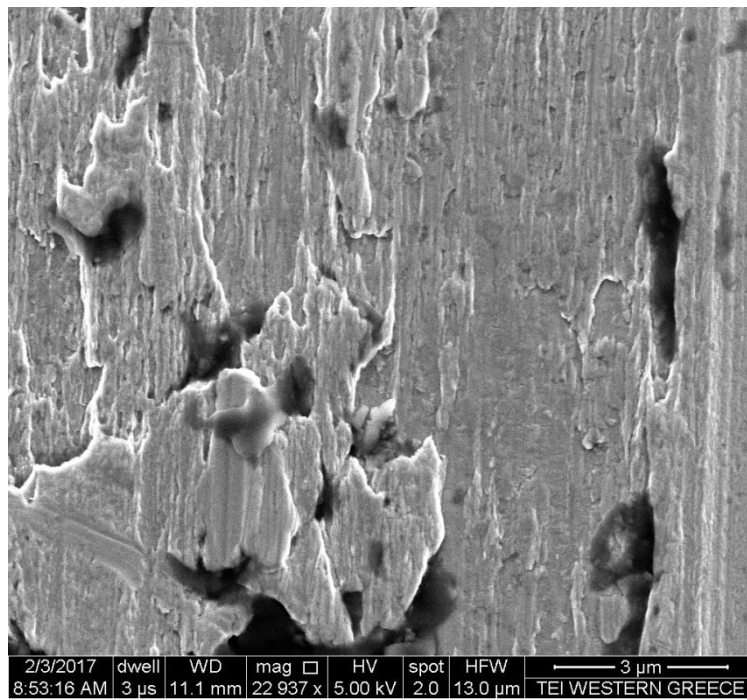
Εικόνα 5.31: Περαιτέρω μεγέθυνση της αστοχίας του ορειχάλκινου δοκίμιου. Είναι πιο εμφανής η ανομοιομορφία, μιας και ο ορειχάλκος είναι ψαθυρό υλικό.



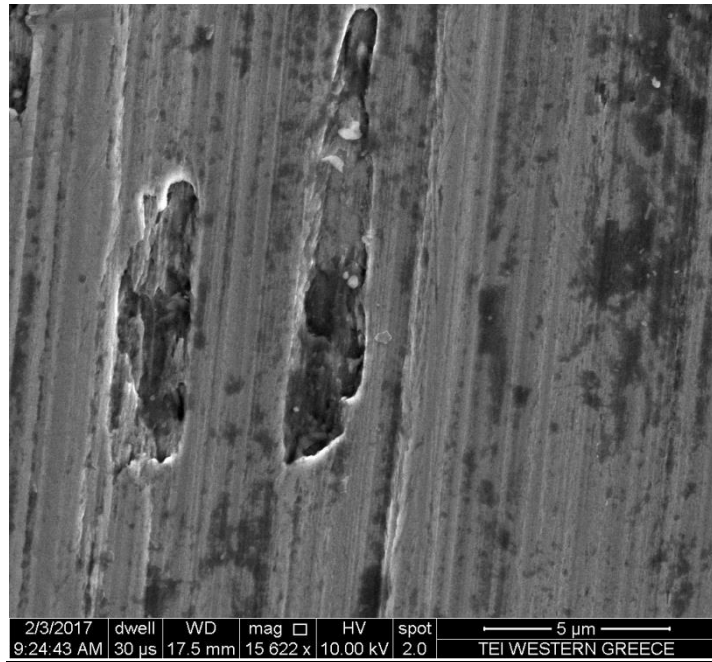
Εικόνα 5.32: Περιοχή εμφάνισης επιφανειακών ανωμαλιών στο πέμπτο δοκίμιο από ανοξείδωτο χάλυβα. Το μοτίβο τους υποδηλώνει ότι προκαλούνται από αστοχία του υλικού.



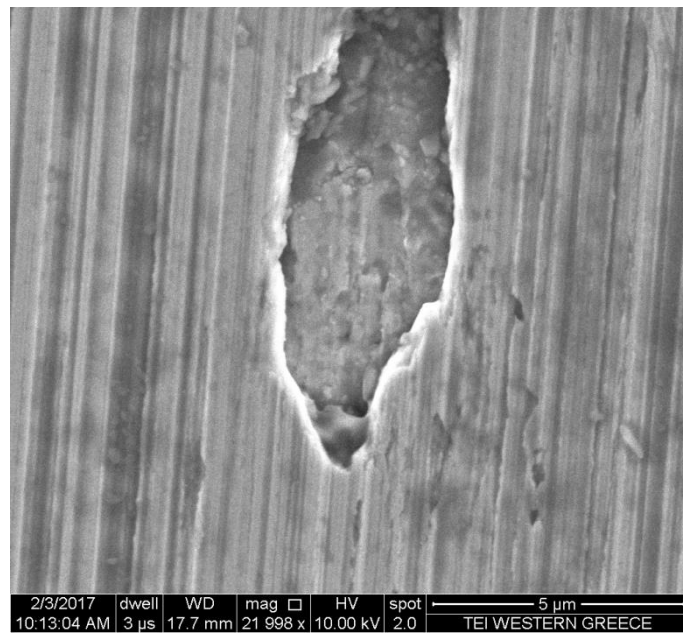
Εικόνα 5.33: Μεγέθυνση σε επιφανειακή ανομοιομορφία του ανοξειδωτου χάλυβα από αστοχία υλικού. Είναι ορατή λόγω διαφοράς στο βάθος η αστοχία στην υποεπιφάνεια του δοκιμίου. Παρατηρείται επίσης οξείδωση-τα πιο σκοτεινά σημεία στην πάνω περιοχή.



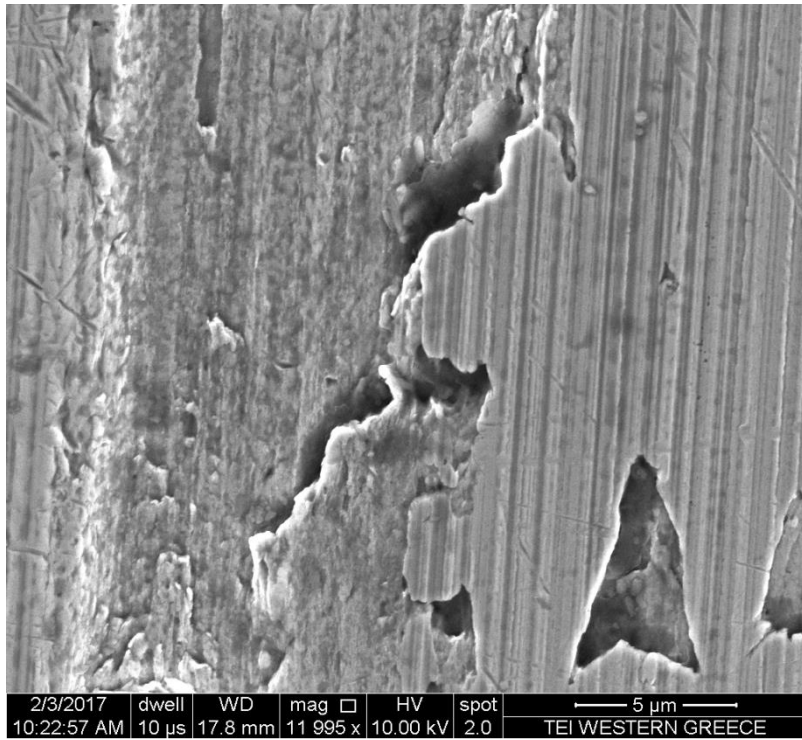
Εικόνα 5.34: Μεγέθυνση της προηγούμενης αστοχίας για περαιτέρω ανάλυση και μέτρηση της διαφοράς στην τραχύτητα. Η διαφορά μεταξύ των περιοχών με αστοχία και των υπολοίπων είναι της τάξεως των 2.9μm. Ορατή πλαστική παραμόρφωση στο κέντρο της εικόνας.



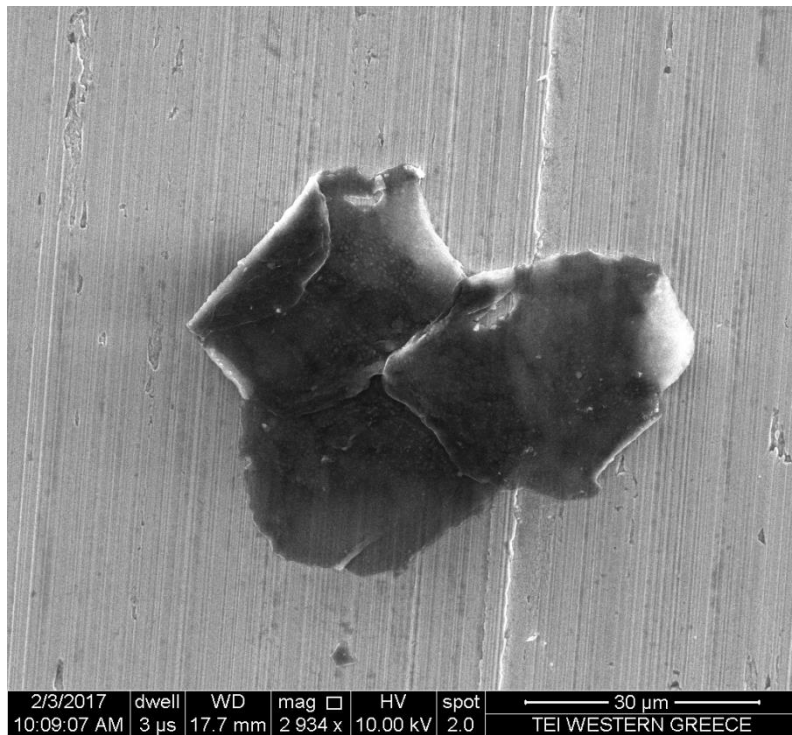
Εικόνα 5.35: Αποκόλληση στο τρίτο δοκίμιο του ανοξειδωτου χάλυβα λόγω αστοχίας υλικού. Παρατηρείται η αρχή δημιουργίας οξειδωσης μέσα στην αστοχία-οι πιο σκοτεινές περιοχές- λόγω των ασυνεχειών.



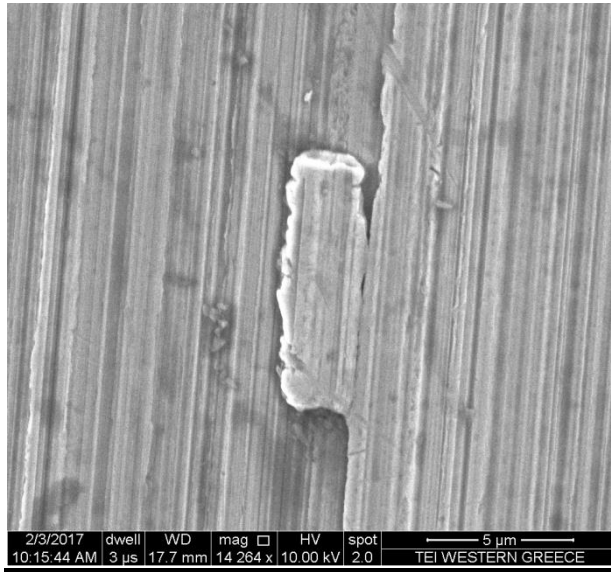
Εικόνα 5.36: Αστοχία λόγω ασυνέχειας υλικού στο τρίτο δοκίμιο του χάλυβα. Παρατηρείται η αρχή οξειδωσης -περιοχή με πορώδη χαρακτηριστικά- λόγω της αποκόλλησης.



Εικόνα 5.37: Ανωμαλίες στο τρίτο δοκίμιο του χάλυβα λόγω ύπαρξης ψευδόκοψης-αριστερά-και αστοχίας του υλικού λόγω ασυνεχειών-δεξιά. Η διαφορά της τραχύτητας μεταξύ των περιοχών φτάνει τα 4μm. Εμφανές το μεταβατικό στάδιο και το τέλος της ψευδόκοψης.



Εικόνα 5.38: Απόβλητο από την τόννευση του χάλυβα που έχει υποστεί πλαστική παραμόρφωση ύστερα από την κοπή και έχει προσκολληθεί στην επιφάνεια του τρίτου δοκιμίου, πιθανόν λόγω ψευδόκοψης (B.U.E.) που το παρέσυρε προς την κατεύθυνση πρόωσης του Κ.Ε.



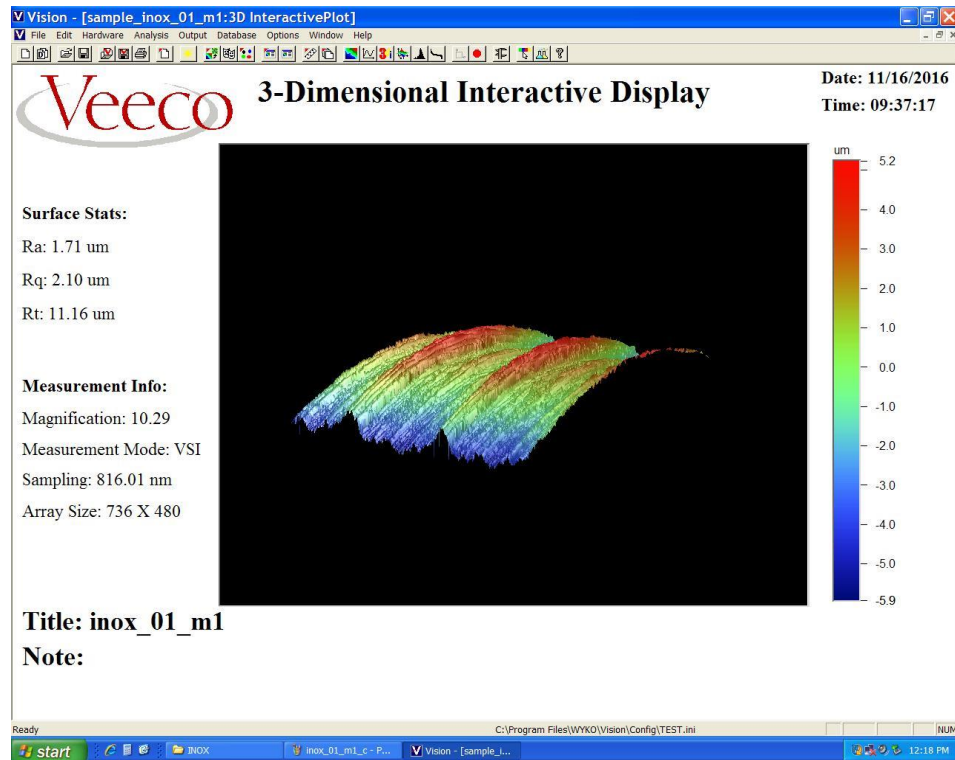
Εικόνα 5.39: Απόβλητο του χάλυβα που δεν έχει αποκοπεί εντελώς από την επιφάνεια του τρίτου δοκιμίου κατά τη διαδρομή κοπής του Κ.Ε., λόγω και της χαμηλής πρόωσης. Είναι ορατές οι γραμμές κοπής του Κ.Ε. κατά την περιστροφή του τεμαχίου.

6. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη της επίδρασης των χαρακτηριστικών μεγεθών κοπής ταχύτητα κοπής V_c και πρόωση f στην τραχύτητα της επιφάνειας μεταλλικών δοκιμών κατεργασμένων σε C.N.C. τόρνο. Η μελέτη αυτή έγινε με τη χρήση οπτικού προφίλομέτρου για μέτρηση της επιφανειακής τραχύτητας και μικροσκοπίου σάρωσης ηλεκτρονίων για περαιτέρω μελέτη της μικροσκοπικής συμπεριφοράς των υλικών. Επιλέχθηκαν τρία υλικά που χρησιμοποιούνται συχνά σε καθημερινές εφαρμογές και σε μηχανολογικές κατασκευές, ο ανοξείδωτος χάλυβας AISI-SAE 304, ο αρχιτεκτονικός ορείχαλκος C38000 και ο χάλυβας κατασκευών S235JR. Για τα συγκεκριμένα υλικά δεν έχει γίνει τόσο ενδελεχής μελέτη όσο θα περίμενε κάποιος με βάση το πλήθος εφαρμογών τους. Επίσης, δεν έχει χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη μεθοδολογία για τη μελέτη της επίδρασης των συγκεκριμένων συνθηκών κοπής, ούτε τόσοι πολλοί παράγοντες τραχύτητας για την καταγραφή των μετρήσεων.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη των δειγμάτων είναι τα εξής:



Εικόνα 6.1: 3D απεικόνιση του δοκιμίου no.1 από ανοξείδωτο χάλυβα στην περιοχή του σημείου 2, χωρίς φιλτράρισμα.

1. Η παρατήρηση και η σύγκριση των εικόνων μεταξύ τους (π.χ. Εικόνα 5.8 με Εικόνα 6.1) δείχνει ξεκάθαρα την ομαλότερη επιφάνεια που έχουν τα δοκίμια με μεγαλύτερο λόγο λ, καθώς οι κορυφές και οι κοιλάδες είναι πολλαπλάσιες, ενώ και η κάθετη απόσταση μεταξύ των κοιλάδων και των κορυφών είναι πολύ μικρότερη.
2. Η θέση αυτή αποδεικνύεται επίσης και από το γεγονός ότι, σχεδόν καθολικά, οι μικρότερες αριθμητικές τιμές των παραγόντων της επιφανειακής τραχύτητας συναντώνται στο τελευταίο από τα 10 δοκίμια του κάθε υλικού. (Πίνακες Β1-Β3)
3. Η μεγαλύτερη διακύμανση μεταξύ της τραχύτητας του δοκιμίου νο.1 και του δοκιμίου ν10 παρατηρήθηκε για τα δοκίμια από ορείχαλκο. Ακολούθησαν τα δοκίμια από τον κατασκευαστικό χάλυβα και στην συνέχεια τα δοκίμια από τον ανοξείδωτο χάλυβα. Η μείωση των παραγόντων της τραχύτητας δηλαδή φάνηκε να είναι μεγαλύτερη για το μαλακότερο υλικό και μικρότερη για το σκληρότερο.
4. Τα δοκίμια που εμφάνισαν τη χαμηλότερη τραχύτητα από τα 32 ήταν τα δυο επιπλέον δοκίμια extra 1 και extra 2 από κατασκευαστικό χάλυβα S235JR. Η διαφορά τους με τα υπόλοιπα και ειδικά με το δοκίμιο νο.10 από το ίδιο υλικό δεν είναι τόσο μεγάλη όσο θα περίμενε κάποιος, ειδικά εάν παρατηρήσει την πτωτική πορεία που είχαν όλοι οι παράμετροι πριν το νο.10.
 - Οι ελάχιστα μικρότερες τιμές της τραχύτητας που προκύπτουν για το δοκίμιο extra 1 οφείλονται στην χαμηλότερη πρόωση. Η πρόωση για το συγκεκριμένο δοκίμιο είχε επιλεγεί να είναι ίση με 0,07 mm/rev και η ταχύτητα κοπής ίδια με αυτή που επιλέχθηκε για το δοκίμιο νο.10. Φαίνεται

δηλαδή ότι αυτή η μικρή μεταβολή στην πρόωση δεν έπαιξε τόσο ρόλο στην τραχύτητα που επετεύχθη.

- Το δοκίμιο extra 2 είχε τη μικρότερη τραχύτητα από όλα, παρόλο που ήταν το τελευταίο από τα συνολικά 12 δοκίμια του κατασκευαστικού χάλυβα που торνεύτηκαν. Το τελευταίο είναι άξιο αναφοράς, εξεταζόμενο με βάση την παράμετρο της φθοράς του Κ.Ε., είναι δε μόνο μια από τις παρατηρήσεις για το συγκεκριμένο δοκίμιο. Η ίδια πρόωση με το extra 1 και το νο.10 συνοδεύτηκε εδώ από τρεις φορές μικρότερη ταχύτητα κοπής, με βάση εμπειρικές παρατηρήσεις από το Μ.Υ.Ε.Δ. Οι τιμές της τραχύτητας αναμένονταν να είναι υψηλότερες, με βάση τα όσα αναφέρθηκαν ήδη για την επίτευξη καλύτερης επιφάνειας -με τη μικρότερη πρόωση και τη μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής. Αυτό μπορεί να συμβαίνει λόγω συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, όπως η ιδιοσυχνότητα του συνόλου εργαλειομηχανή-εργαλειοφορείο-εργαλειοδέτης-Κ.Ε., οι δυνάμεις κοπής και η θερμοκρασία που αναπτύσσονται στην περιοχή κατεργασίας, τα λανθασμένα εύρη ταχυτήτων κοπής που ίσως επιλέχθηκαν για το συγκεκριμένο υλικό, κ.α. Είναι λοιπόν σωστό και προτείνεται να γίνει ενδελεχής μελέτη για δοκίμια σαν το extra 2, κατεργασμένα δηλαδή εκτός του εύρους που προτείνεται.

5. Από τα 30 δοκίμια που κατεργάστηκαν με παρόμοια μέθοδο, αυτά του ανοξείδωτου χάλυβα AISI-SAE 304 έχουν συνολικά τη μικρότερη τραχύτητα. Ακολουθούν τα δοκίμια από τον κατασκευαστικό χάλυβα και τη μεγαλύτερη τραχύτητα έχουν αυτά του αρχιτεκτονικού ορείχαλκου C38000. Οι τιμές της τραχύτητας του ορείχαλκου μπορεί να οφείλονται σε διάφορους παράγοντες, όπως:

- Ο συγκεκριμένος ορείχαλκος έχει υψηλή συγκέντρωση σε ψευδάργυρο, πράγμα που τον κάνει πιο ψαθυρό [95]. Τα ψαθυρά υλικά, αν και πιο ευκατέργαστα από τα όλκιμα, παρουσιάζουν πιο εύκολα το φαινόμενο της ψευδόκοψης κατά την κατεργασία τους, πράγμα που οδηγεί συνήθως σε χειρότερη τραχύτητα.
- Οι τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών κοπής που επιλέχθηκαν για τον ορείχαλκο είναι ίδιες με αυτές για τον κατασκευαστικό χάλυβα. Ίσως τα δοκίμια από ορείχαλκο θα είχαν καλύτερα αποτελέσματα εάν επιλέγονταν διαφορετικά εύρη.

6. Από τις υποθέσεις που έγιναν στην αρχή, μόνο η μια φαίνεται να επαληθεύεται. Η άνοδος του λόγου λ όντως συμβαδίζει με τη μείωση της τραχύτητας. Η μικρότερη τραχύτητα όμως δεν επιτεύχθηκε με τις υψηλότερες στροφές περιστροφής, ενώ τα ορειχάλκινα δοκίμια εμφάνισαν μεγαλύτερη τραχύτητα από τα υπόλοιπα. Χρειάζεται να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα για τη συμπεριφορά αυτή έτσι ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

Οι παρατηρήσεις που έγιναν για τα καινούργια διαγράμματα είναι οι εξής:

1. Η τραχύτητα των δοκιμών από κατασκευαστικό χάλυβα S235JR φαίνεται να παρουσιάζει την πιο ομαλή διακύμανση, σχηματίζοντας σχεδόν ευθεία γραμμή για την παράμετρο R_a , οποία είναι και η πιο σημαντική παράμετρος μαζί με την R_q .
2. Ο αρχιτεκτονικός ορείχαλκος C38000 παρουσιάζει πιο ομαλή διακύμανση, χωρίς οι καμπύλες να αποκτούν την ίδια μορφή με αυτές του κατασκευαστικού χάλυβα S235JR.
3. Το διάγραμμα των παραμέτρων της τραχύτητας για τον ανοξείδωτο χάλυβα AISI-SAE 304 έχει και αυτό πιο ομαλή διακύμανση των δεδομένων, με το δοκίμιο no.5 να μην παρουσιάζει πια τόσο μεγάλη απόκλιση.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η παρούσα πτυχιακή είναι μια πρώτη προσέγγιση επάνω στο θέμα της επιρροής των χαρακτηριστικών συνθηκών στην τórνευση, με βάση την τραχύτητα των κατεργασμένων τεμαχίων. Όπως και για όλες τις ερευνητικές διαδικασίες, υπάρχουν πολλοί ακόμα τομείς που μπορούν να ερευνηθούν διεξοδικά με τον ίδιο τρόπο και με την χρήση άλλων μεθόδων έτσι ώστε να αποκτηθεί μεγαλύτερη εμπειρία και να εξαχθούν επιπλέον συμπεράσματα για το συγκεκριμένο θέμα.

Η πιο σημαντική βελτίωση που μπορεί να λάβει χώρα σε μια νέα παρόμοια μεθοδολογία είναι η μελέτη των χαρακτηριστικών μεγεθών με κάποιο/α από αυτά να παραμένει σταθερό σε τιμή και όλα τα υπόλοιπα να μεταβάλλονται ταυτόχρονα ή κατά ομάδες, μέσα σε ένα συγκεκριμένο φάσμα. Π.χ. μπορεί να γίνει μελέτη της μη χρήσης υγρού κοπής στην τórνευση ή επιλογή τιμής για την πρόωση που δεν ανήκει μέσα στο εύρος που αναγράφει η ενδεδειγμένη βιβλιογραφία. Επίσης, για μεγαλύτερη εξακρίβωση, μπορούν να κατεργαστούν περισσότερα δοκίμια, από περισσότερα υλικά και να λάβουν χώρα περισσότερες μετρήσεις. Έτσι, το δείγμα θα είναι πιο αντιπροσωπευτικό. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ειδικό θερμόμετρο υπέρυθρων, το οποίο θα καταγράφει τη διακύμανση της θερμοκρασίας σε ένα συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειας του τεμαχίου που κατεργάζεται ή δυναμόμετρο που μετρά την τιμή των δυνάμεων κοπής που ασκούνται. Αυτά τα μηχανήματα θα χρησιμοποιούνταν στην παρούσα και σε πολλές άλλες περιπτώσεις έρευνας και παραγωγής εάν ήταν δυνατή η χρήση τους, δίνοντας έτσι υψηλότερου επιπέδου γνώσεις.

Πιο αναλυτικά, για την παρούσα και γενικά για επίτευξη ποιοτικότερου αποτελέσματος στις κατεργασίες μπορούν να γίνουν τα εξής:

1. Επιλογή ειδικού Κ.Ε. για την τόννευση φινιρίσματος. Εάν είναι εφικτό και αναγκαίο, χρήση ειδικού Κ.Ε., μελετημένου για την κατεργασία συγκεκριμένων υλικών.
2. Χρήση καινούργιας κοπτικής ακμής του Κ.Ε. για κάθε δοκίμιο, έτσι ώστε οι τιμές των μετρήσεων να μην επηρεάζονται από την φθορά του Κ.Ε.
3. Πειραματισμός με διάφορες τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών κοπής και εύρεση των τιμών εκείνων που ταιριάζουν στην ιδιοσυχνότητα και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του συνόλου.
4. Μια καλύτερη μέθοδος από την 3^η πρόταση είναι η *εφαρμογή της Robust Design* (μέθοδος Στιβαρού Σχεδιασμού). Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και ως μέθοδος Taguchi, από τον Ιάπωνα Dr. Genichi Taguchi που την εφηύρε και την εισήγαγε. Η φιλοσοφία αυτής της τεχνικής είναι οι αλλαγές στον σχεδιασμό του συνόλου εργαλειομηχανή-Κ.Ε.-τεμάχιο, έτσι ώστε αυτός και τα χαρακτηριστικά των κατεργασμένων τεμαχίων να μην επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες -π.χ. ταλαντώσεις. Η μέθοδος Robust Design κάνει δυνατή την εύρεση των κατάλληλων τιμών των μεγεθών που μελετώνται, χωρίς όλες αυτές να χρειάζεται να υπολογιστούν και να ερευνηθούν πειραματικά στην πλήρη έκταση τους-όπως συνέβαινε παλαιότερα. Εκτός από την μέθοδο Taguchi, μπορούν να εισαχθούν και άλλες, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM), η μέθοδος ANOVA, κ.α.
5. *Εφαρμογή της μεθόδου High Speed Machining (H.S.M.):* Μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές που εφαρμόζεται στις κατεργασίες κοπής τις τελευταίες δεκαετίες είναι το H.S.M. Η τεχνική αυτή έχει τις ρίζες της στον Carl J. Salomon, ο οποίος θεωρείται ο «πατέρας» της, μιας και το 1931 υπολόγισε μέσω πειραμάτων την επίδραση της ταχύτητας κοπής στο φρεζάρισμα μη σιδηρούχων μετάλλων [86]. Η αύξηση της ταχύτητας κοπής οδηγεί σε άνοδο της θερμοκρασίας κοπής, σχεδόν μέχρι την θερμοκρασία τήξης του υλικού. Ο Salomon όμως παρατήρησε ότι, από ένα σημείο και μετά, η θερμοκρασία μειώνεται όσο η ταχύτητα κοπής αυξάνεται. Αυτό οδήγησε στην έρευνα για τυχόν πλεονεκτήματα που μπορεί να προσφέρει η κατεργασία σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Στις 27 Απριλίου του 1931, ο τότε γερμανικός βιομηχανικός κολοσσός Friedrich Krupp A.G. πήρε την Γερμανική Ευρεσιτεχνία νούμερο 523.594 σχετικά με την «μέθοδο κατεργασίας μετάλλων ή υλικών που συμπεριφέρονται ανάλογα όταν κατεργάζονται με Κ.Ε.». Η συγκεκριμένη ευρεσιτεχνία ήταν στηριγμένη σε μεγάλο βαθμό στις έρευνες του Salomon και άρχισε να μπαίνει σε εφαρμογή, ειδικά στα τέλη της δεκαετίας του 70' [86]. Όπως και με την τεχνολογία N.C. έτσι και εδώ η Πολεμική Αεροπορία των Η.Π.Α. ερεύνησε περαιτέρω την συγκεκριμένη τεχνική, μαζί με την General Electric.

Η τεχνική H.S.M. δεν αφορά μόνο μεγαλύτερους ρυθμούς περιστροφής της ατράκτου όπως κάποιος μπορεί να αντιληφθεί. Η φιλοσοφία της σχετίζεται με την ολιστική μελέτη του συνόλου «εργαλειομηχανή-Κ.Ε.-τεμάχιο-υλικό τεμαχίου-χειρισμός-προγραμματισμός». Σε πολλές περιπτώσεις, κατεργασίες

που πριν γίνονταν σε πολλά στάδια, με διαφορετικά Κ.Ε. , πραγματοποιούνται τώρα με την χρήση μόνο ενός Κ.Ε. σε ένα στάδιο. Για να συμβεί αυτό, συνήθως εφαρμόζονται υψηλότεροι ρυθμοί περιστροφής της ατράκτου, υψηλότερη πρόωση, μικρότερο βάθος κοπής και διαφορετική διαδρομή του Κ.Ε.-ειδικά στην κατεργασία του φρεζαρίσματος. Οι συγκεκριμένες συνθήκες κοπής εφαρμόζονται σε πολύ στιβαρές, ακριβείς και ζυγοσταθμισμένες εργαλειομηχανές, στις οποίες τα Κ.Ε. και τα τεμάχια συγκρατούνται με μεθόδους που εξασφαλίζουν την σίγουρη και σταθερή συγκράτηση, καθ' όλη την κατεργασία [87]. Αυτές οι εργαλειομηχανές είναι στην συντριπτική πλειοψηφία C.N.C. αλλά σε μερικές περιπτώσεις έχουν εφαρμοστεί μερικώς και σε συμβατικές εργαλειομηχανές, με-αναπάντεχα-θετικά αποτελέσματα.

Η εφαρμογή της τεχνικής H.S.M. προσφέρει πάρα πολλά πλεονεκτήματα:

- i. *Η τραχύτητα και η διαστασιολογική ακρίβεια των κατεργασμένων επιφανειών είναι πολύ υψηλότερου επιπέδου, λόγω των πιο στιβαρών συνόλων κοπής και των ασθενέστερων δυνάμεων που ασκούνται.*
- ii. Ο εξοπλισμός ανωτέρου επιπέδου συντελεί ώστε ένας μεγάλος αριθμός ίδιων τεμαχίων να έχει πολύ λιγότερες αποκλίσεις μεταξύ του.
- iii. Η κατεργασία των τεμαχίων διαρκεί λιγότερο, πράγμα που αυξάνει την παραγωγικότητα και ικανοποιεί τις ανάγκες που υπάρχουν. Επιπρόσθετα, η εφαρμογή της συγκεκριμένης φιλοσοφίας κάνει έναν παραγωγικό χώρο πιο ικανό να υιοθετεί και να εξελίσσει νέες και πιο αποδοτικές μεθόδους παραγωγής.
- iv. Τα Κ.Ε. έχουν σε πολλές περιπτώσεις μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Οι δυνάμεις κοπής που ασκούνται έχουν μικρότερη τιμή εξαιτίας των υψηλών ταχυτήτων. Σε αυτό οφείλεται και η χαμηλότερη τιμή της εκλυόμενης θερμότητας, άρα και της φθοράς στα ειδικά σχεδιασμένα Κ.Ε.
- v. Η θερμότητα που εκλύεται απομακρύνεται κυρίως με την αποχώρηση των αποβλήτων από τον χώρο κατεργασίας, κάτι που γίνεται πιο εύκολα λόγω των υψηλών ακτινικών ταχυτήτων που έχουν. Έτσι, σε πολλές περιπτώσεις δεν χρησιμοποιείται υγρό κοπής, μειώνοντας έτσι τους κινδύνους για τους εργαζόμενους και το περιβάλλον, καθώς και το κόστος κατεργασίας.
- vi. Τα τεμάχια που έχουν κατεργαστεί με αυτήν την φιλοσοφία έχουν το πλεονέκτημα της χαμηλότερης καταπόνησης από δυνάμεις και θερμότητα κατά την κατεργασία, κάτι που παίζει μεγάλο ρόλο στην διάταξη της μικροδομής τους και στην αντοχή τους κατά την χρήση. Είναι δηλαδή δυνατόν να δημιουργηθούν μεγάλα τεμάχια με λεπτά ή περίπλοκα τοιχώματα και μέρη-π.χ. εξαρτήματα αεροσκαφών- από ένα μόνο κομμάτι υλικού, χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος της αστοχίας κατά την κατεργασία, αυξάνοντας έτσι τον βαθμό εκμετάλλευσης του υλικού.
- vii. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η μείωση του αριθμού των εξαρτημάτων και των αναγκαίων μεταξύ τους συνδέσεων, που είναι αναγκαίες για την δημιουργία μιας διάταξης, γεγονός που αυξάνει την στιβαρότητα και την

αντοχή της. Αυτή ήταν ουσιαστικά και η επιδίωξη του τομέα κατασκευών αεροσκαφών, γι' αυτό και εφάρμοσε και εξέλιξε τόσο την συγκεκριμένη τεχνική, εφαρμόζοντάς την για την κατεργασία εξαρτημάτων από αλουμίνιο και τιτάνιο.

6. Εφαρμογή τεχνολογίας UAT (Ultrasonically Assisted Turning - Υπερηχητικά Υποβοηθούμενη Κατεργασία) [88],[89]. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποτελεί ουσιαστικά ένα υβρίδιο κανονικής κατεργασίας κοπής και υπέρθεσης σε υπερηχητικές ταλαντώσεις του Κ.Ε. Οι ταλαντώσεις ουσιαστικά επιτελούν μια κινηματική αλληλοεπικάλυψη της περιστροφής του εργαλείου. Η ταλάντωση του Κ.Ε. έχει συχνότητα υψηλής διέγερσης-ως και 40 KHz- και χαμηλό πλάτος-κάτω από 20 μm-αλλά επηρεάζει την συμπεριφορά του τεμαχίου προς κατεργασία [95]. Η επιρροή αυτή μπορεί να φτάσει σε μείωση των ασκούμενων δυνάμεων κοπής σε ποσοστό 40% σε σχέση με μια συμβατική κατεργασία και έως 80% για την τόννευση αεροδιαστημικών υλικών. Όπως έχει αναφερθεί και πιο πριν, *χαμηλότερες δυνάμεις κοπής οδηγούν σε χαμηλότερη επιφανειακή τραχύτητα*(εδώ: $R_a < 0,1 \mu\text{m}$) [90], μείωση των τάσεων, μειωμένη φθορά του Κ.Ε και πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου. Ακόμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υψηλότερες τιμές πρόωσης [92]. Η UAT εφαρμόζεται κυρίως στην κατεργασία του φρεζαρίσματος και προσφάτως, σε αυτές της λείανσης και της διάνοιξης οπής [93],[94]. Εξαιτίας των προηγουμένων, υιοθετείται με μεγάλη επιτυχία τα τελευταία χρόνια, ειδικά στον τομέα των αεροδιαστημικών κατασκευών και για δυσκατέργαστα υλικά όπως το κορούνδιο, το καρβίδιο του βολφραμίου, τα κεραμικά και τα συνθετικά [89].

Μια παραλλαγή της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι ο συνδυασμός της με τεχνικές θερμής κατεργασίας (HUAT-Hot Ultrasonically Assisted Turning). Οι συγκεκριμένες τεχνικές χρησιμοποιούνται ευρέως από την αρχή του 21^{ου} αιώνα στην κατεργασία σκληρών και ανθεκτικών κραμάτων, όπως αυτά του τιτανίου. Με τον συνδυασμό και των δυο τεχνικών επιτυγχάνεται *βελτίωση της επιφανειακής τραχύτητας* λόγω της μείωσης των δυνάμεων κοπής [91].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] E. Richard Booser, *CRC Handbook of Lubrication and Tribology, Volume III: Monitoring, Materials, Synthetic Lubricants and Applications*, CRC Press 1993
- [2] M. Kaladhar, K. Venkata Subbaiah, Ch. Srinivasa Rao, *Parametric optimization during machining of AISI 304 Austenitic Stainless Steel using CVD coated DURATOMIC™ cutting insert*, International Journal of Industrial Engineering Computations, Volume 3, pp. 577–586, 2012
- [3] *Σημειώσεις στο μάθημα Μηχανολογικό Εργαστήριο II*, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολογίας και Βιομηχανικού Σχεδιασμού, Εισαγωγική Κατεύθυνση Μηχανολογίας
- [4] Σωτήριος Τσίρκας, *Σημειώσεις μαθήματος Μηχανουργική Τεχνολογία (Εργαστήριο)*, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. , Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας
- [5] Π. Γ. Πετρόπουλος, *Μηχανουργική Τεχνολογία - Εργαστήριο I*, Ίδρυμα Ευγενίδου, 1991
- [6] Α. Αντωνιάδης, Γ. Πανταζόπουλος, *Μηχανουργική Τεχνολογία II (Κατεργασίες Διαμόρφωσης)* ΟΕΔΒ – ΤΕΕ – Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα 2012
- [7] Αριστομένης Αντωνιάδης, Νεκτάριος Βιδάκης, *Προγραμματισμός Εργαλειομηχανών CNC*, έκδοσης ΟΕΔΒ 2002
- [8] Αριστομένης Θ. Αντωνιάδης, *Μηχανουργική Τεχνολογία Τόμος Β' : Κατεργασίες Κοπής*, 2^η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010
- [9] *Σημειώσεις Εργαστηρίου Μικροκοπής & Κατασκευαστικής Προσομοίωσης*, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης
- [10] *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, editor: J. Paulo, Springer-Verlag Limited, London, pp. 29 -58, 2008.
- [11] Woodbury, Robert S, *History of the Lathe to 1850: A Study in the Growth of a Technical Element of an Industrial Economy*, Society for the History of Technology, Cleveland, Ohio, 1961, ISBN 978-0-262-73004-4.
- [12] *Εργαστήριο Ειδικότητας Εργαλειομηχανών*, Ανδρέου Γ. - Μποζώνας Α. , Εκδόσεις Ευγενίδου ,1982
- [13] Heinrich M. Arnold, *Technology Shocks: Origins, Managerial Responses, and Firm Performance*, Springer, January 2003
- [14] Joshua Rose, *The Complete Practical Machinist: Embracing Lathe Work, Vise Work, Drills...*, H.C. Baird & Co, 1885, p.64
- [15] Ο.π. p.27

- [16] R.L. Timings, *Manufacturing technology, vol. 1*, 3rd edition, Pearson Education Limited, 1998, p.176, chapter 5, Numerical control part programming, sec. 5.4, Axis nomenclature, ISBN-13: 9780582356931
- [17] Ο.π. , p. 173
- [18] Ο.π. , p. 153
- [19] Ο.π. , p. 177
- [20] *Trade of Toolmaking – Phase 2*, Module 6: Introduction to CNC, Unit 1: CNC Machine Tools, SOLAS Ireland 25/09/2014, p. 7, 8
- [21] R.L. Timings, *Manufacturing technology, vol. 1*, 3rd edition, Pearson Education Limited, 1998, p.173, chapter 5, Numerical control part programming, sec. 5.3, Axis nomenclature, ISBN-13: 9780582356931
- [22] Π. Γ. Πετρόπουλος, *Μηχανουργική Τεχνολογία - Εργαστήριο Ι*, Ίδρυμα Ευγενίδου, 1991
- [23] Γεώργιος Χρυσολούρης – Κωνσταντίνος Σαλωνίτης, *ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ*, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πάτρα, 2003
- [24] *Σημειώσεις Εργαστηρίου Μικροκοπής & Κατασκευαστικής Προσομοίωσης*, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης
- [25] M'Saoubi, R., Outerio, J.C., Changeux, B., Lebrun, J.L., Dias, A.M., *Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 96, 1991, pp. 225 – 233.
- [26] Grzesik, W., Nieslony, P., *A computational approach to evaluate temperature and heat partition in machining with multilayer coated tools*, International Journal of Machine Tools and Manufacture vol.43, 2013, pp. 1311-1317
- [27] Schmitt Industries - Schmitt Measurement Systems
- [28] M.O. Nicolls, *The measurement of surface finish*, De Beers Technical Service Centre, UK, 1980
- [29] *Manufacturing Processes II*, Mechanism of chip formation, National Programme on Technology Enhanced Learning, Indian Institutes of Technology
- [30] Kuldip Singh Sangwan, Sachin Saxena, Girish Kant, *Optimization of Machining Parameters to Minimize Surface Roughness using Integrated ANN-GA Approach*, The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering, 7-9 April 2015, Sydney, Australia
- [31] Mathew A. Kuttolamadom, Sina Hamzehlouia, M. Laine Mears, *Effect of Machining Feed on Surface Roughness in Cutting 6061 Aluminum*, SAE International Journal of Materials and Manufacturing, Vol.119, August 2010
- [32] Sharda R. Nayse, M. G. Rathi, *Optimization of Turning Parameters Using Taguchi Method*, International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), Vol. 4, Iss.11], Nov. 2014, p.49 ISSN: 2249–6645
- [33] Olympus Inspection & Measurement Systems
- [34] WYKO Vision32 parameter definitions
- [35] Precision Devices, Inc

- [36] A.B. Abdullah, L.Y. Chia and Z. Samad, *The Effect of Feed Rate and Cutting Speed to Surface Roughness*. Asian Journal of Scientific Research, vol.1, 2008, p.12-21
- [37] R.L. Timings, *Manufacturing technology, vol. 1*, 3rd edition, Pearson Education Limited, 1998, p.176, chapter 5, Numerical control part programming, sec. 5.4, Axis nomenclature, ISBN-13: 9780582356931
- [38] N. Senthil Kumar T. Tamizharasan, *Impact of Interface Temperature over Flank Wear in Hard Turning Using Carbide Inserts*, Procedia Engineering Volume 38, 2012, pp.613-621
- [39] N.R. Dhar , M. Kamruzzaman, Mahiuddin Ahmed, *Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 172, Issue 2, 28 February 2006, pp 299–304
- [40] S.B. Salvi, R.R. Deshmukh, Dr. S.D. Deshmukh, *Analysis of surface roughness in hard turning by using Taguchi method*, International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST) Vol. 5 No.02 February 2013
- [41] S. Thamizhmanii, S. Saparudin, S. Hasan, *Analyses of surface roughness by turning process using Taguchi method*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Volume 20, Issues 1-2, January-February 2007
- [42] Palanikumar, L. Karunamoorthy, R. Krathikeyan, *Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass –reinforced polymer composites*, Journal of Materials and Design, vol. 27, 2006, pp.862-871.
- [43] Xue Ping, C. Richard Liu, Zhenqiang Yao, *Experimental study and evaluation methodology on hard surface integrity*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, August 2007, Volume 34, Issue 1, pp.141–148
- [44] T. Tamizharasan, T. Selvaraj, A. Noorul Hag, *Analysis of tool wear and surface finish in hard turning*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2005) Volume 20, Issues 1-2, January-February 2007
- [45] W.H. Yang, Y.S. Tang, *Design optimization of cutting parameters for turning operations based on Taguchi method*, Journal of Materials Processing Technology, vol.84, 1998, pp.122-129.
- [46] Ersan Aslan, Necip Camuscu Burak Bingoren, *Design of optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC) with Al₂O₃ + TiCN mixed ceramic tool*, Materials and Design, Volume 28, Issue 5, 2007, Pages 1618–1622
- [47] D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments, 4th edition, New York: Wiley; 1997.
- [48] N. Nalbant, H. Gokkaya, G. Sur, *Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning*, Materials and Design, Volume 28, Issue 4, 2007, Pages 1379–1385
- [49] I.A. Choudhury, M.A. El-Baradie, *Surface roughness prediction in the turning of high strength steel by factorial design of experiments*, Journal of Materials Processing technology, 67, 1997, pp.55-67.

- [50] B. Erginc, Z. Kampudž, B. Sustarsic. *The use of the Taguchi approach to determine the influence of injection –molding parameters on the properties of green parts*, Journal of achievement in Materials and Manufacturing Engineering, 15, 2006.
- [51] X.L. Liu, D.H. Wen, Z.J. Li, Xiao. G. Yan, *Experimental study on hard turning of hardened GCr15 steel with PCBN tool*, Journal of Materials Processing Technology, vol.129, 2002, pp.217-221.
- [52] S. Thamizhmanii, S. Hasan *Analyses of roughness, forces and wear in turning gray cast iron*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Volume 17, Issue 1-2, July-August 2006
- [53] E.O. Ezugwu and S.H. Tang, *Surface abuse when machining cast iron (G17) and nickel base super alloy (Inconel 718) with ceramic tools*, Journal of Materials Processing Technology, Vol.55, Issue 2, 15, November 1995, pages 63-69.
- [54] Annika Larsson, *Capability in Machining Systems*, Department of Production Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm 2002
- [55] Skoog, Holler, Nilman, *Principles of Instrumental Analysis*, Harcourt College Publishers, 1998
- [56] R. Kellner, J.M. Mermet, M. Otto, H.M. Widmer, *Analytical Chemistry*, Wiley-VCH, 1997
- [57] Ludwig Reimer, *Scanning Electron Microscopy, Physics of Image Formation and Microanalysis*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo, 1998
- [58] Goldstein J, Newbury D, Joy D, Lyman C, Echlin P, Lifshin E, Sawyer L and Michael J, *Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis*. Springer, 2003
- [59] http://www.ltu.se/cms_fs/1.86403!/file/Wyko.pdf
- [60] Jean M. Bennett, Lars Mattsson, *Introduction to Surface Roughness and Scattering*, Optical Society of America, Washington, D.C.
- [61] W J Walecki, F Szondy and M M Hilali. *Fast in-line surface topography metrology enabling stress calculation for solar cell manufacturing for throughput in excess of 2000 wafers per hour*, 2008 Meas. Sci. Technol. 19 025302
- [62] Stout, K. J.; Blunt, Liam, *Three-Dimensional Surface Topography* (2nd ed.). Penton Press, 2000, p.22. ISBN 978-1-85718-026-8.
- [63] Binnig, Gerd, Calvin F Quate and Ch Gerber, *Atomic force microscope*, Physical review letters vol.56, number 9, 1986, p.930.
- [64] ASM Aerospace Specification Metals, Inc.
- [65] <http://www.ssina.com/overview/history.html>
- [66] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6381>
- [67] S. Ghosh and V. Kain, *Microstructural changes in AISI 304L stainless steel due to surface machining: effect on its susceptibility to chloride stress corrosion cracking*, J Nuc. Mater., vol. 403, pp. 62-67, 2010.
- [68] S. Ghosh and V. Kain, *Effect of surface machining and cold working on the ambient temperature chloride stress corrosion cracking susceptibility of AISI*

- 304L stainless steel*, Materials Science and Engineering: A, Volume 527, Issue 3, 15 January 2010, Pages 679–683
- [69] Lin. Yan, Wenyu. Yang, Hongping. Jin, Zhiguang Wang, *Microstructure Changes of Machined Surfaces on Austenitic 304 Stainless Steel*, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering Vol:5, No:9, 2011
- [70] <http://www.makeitfrom.com/material-properties/UNS-C38000-CW624N-Leaded-Brass>
- [71] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022>
- [72] <http://www.australwright.com.au/copper-alloy-brasses/>
- [73] J. R. Davis et al. (editors), *Metals Handbook, vol. 2, Properties of Non-ferrous Alloys*, 10th edition, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, pp. 216–402.
- [74] Haas Automation ©
- [75] Tungaloy Report No. 323-E
- [76] Tungaloy Report No. 399-E
- [77] http://www.uddeholm.com/files/PB_Uddeholm_corrax_english.pdf
- [78] P. Hariharan, *Interferometers*, in Handbook of Optics (McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 1996), Chapter 21.
- [79] K. Creath, *Temporal Phase Measurement Methods*, in Interferogram Analysis (Institute of Physics Publishing Ltd., Bristol, 1993), pp. 94-140.
- [80] K. G. Larkin, *Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry*, J. Opt. Soc. Am. A 13, 832-843 (1996).
- [81] A. Harasaki, J. Schmit, and J. C. Wyant, "Improved vertical scanning interferometry," Appl. Opt. 39, 2107- 2115 (2000).
- [82] Interferometry: Technology and Applications by A. G. Olszak, J. Schmit, M. G. Heaton
- [83] École polytechnique fédérale de Lausanne, Center of Micronanotechnology (CMI)
- [84] Veeco Vision 32©
- [85] FEI™ Inspect F50 manual
- [86] King, R.I. and R.L. Vaughn. *A synoptic review of High-speed machining from Salomon to the present. in High speed machining*, presented at the winter annual meeting of the American Society of Mechanical Engineers 1984. New Orleans, Louisiana: ASME (345 E. 47th St., New York 10017): p. 1-13.
- [87] Prof., Dr. Eng. H. Schulz, *Manufacturing Technologies for Machines of the Future 21st Century Technologies*, Part II, pp 197-214 2003 Springer Berlin Heidelberg
- [88] <http://www.mmsonline.com/articles/cutting-tool-considerations-for-high-speed-machining>
- [89] Vadim V. Silberschmidta, Sameh M.A. Mahdyb, Moustafa A. Goudab, Ahmed Naseera, Agostino Maurottoa, Anish Roya, *Surface-roughness Improvement in*

Ultrasonically Assisted Turning, Procedia CIRP Volume 13, 2014, Pages 49–54
2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI)

[90] DMG MORI

[91] R. Muhammada, A. Mistryb, S.W. Khanc, N. Ahmeda, A. Royb and V.V. Silberschmidtb, *Analysis of tool wear in ultrasonically assisted turning of -Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn alloy*, Scientia Iranica B, vol.23, issue 4, 2016, pp.1800-1810

[92] Riaz Muhammad, Agostino Maurotto, Murat Demiral, Anish Roy, Vadim V. Silberschmidt. *Thermally enhanced ultrasonically assisted machining of Ti alloy*, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol.7, Issue 2, December 2014

[93] Varun Sharma & Pulak M. Pandey, *Recent advances in ultrasonic assisted turning: A step towards sustainability*, Journal Cogent Engineering Volume 3, 2016 – Issue 1

[94] A Celaya, L N L De Lacalle, F J Campa, A Lamikiz, *Application of ultrasonics as assistance in machining operations*, Feb 2013

[95] S. Amini, H. Nouri Hosseinabadi, S.A. Sajjady, *Experimental study on effect of micro textured surfaces generated by ultrasonic vibration assisted face turning on friction and wear performance*, Applied Surface Science Volume 390, 30 December 2016, pp.633–648

[96] <https://www.quora.com/Is-brass-a-brittle-material>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Πίνακες Τιμών χαρακτηριστικών μεγεθών τόννευσης

Πίνακας Α1: Τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών τόννευσης για το στάδιο του ξεχονδρίσματος του ανοξείδωτου χάλυβα AISI 304.

INOX 304	Ξεχόνδρισμα									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ταχύτητα κοπής Vc(m/min)	90	94	98	102	106	110	114	118	122	126
Πρόωση s (mm/rev)	0,5	0,47	0,44	0,41	0,38	0,35	0,32	0,29	0,26	0,23
Στροφές $n=(1000*Vc)/(\pi*d)$ (rev/min)	1791	1871	1951	2030	2110	2189	2269	2349	2428	2508
Ταχύτητα πρόωσης $f=s*n$ (mm/min)	896	879	858	832	802	766	726	681	631	577
Λόγος n/f	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4

Πίνακας Α2: Τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών τόννευσης για το στάδιο του φινιρίσματος του ανοξείδωτου χάλυβα AISI 304.

INOX 304	Φινίρισμα									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ταχύτητα κοπής Vc(m/min)	150	154	158	162	166	170	174	178	182	186
Πρόωση s (mm/rev)	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,1	0,09	0,08
Στροφές $n=(1000*Vc)/(\pi*d)$ (rev/min)	2986	3065	3145	3225	3304	3384	3463	3543	3623	3702
Ταχύτητα πρόωσης $f=s*n$ (mm/min)	508	490	472	451	430	406	381	354	326	296
Λόγος n/f	5,9	6,3	6,7	7,1	7,7	8,3	9,1	10,0	11,1	12,5

Πίνακας Α3: Τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών τόννευσης για το στάδιο του ξεχονδρίσματος του χάλυβα St37.2 και του ορείχαλκου C38000.

Χάλυβας St37.2 και Ορείχαλκος C38k	Ξεχόνδρισμα											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Extra 1	Extra 2
Ταχύτητα κοπής Vc(m/min)	115	119	123	127	131	135	139	143	147	151	151	60,288
Πρόωση s (mm/rev)	0,5	0,47	0,44	0,41	0,38	0,35	0,32	0,29	0,26	0,23	0,19	0,19
Στροφές $n=(1000*Vc)/(\pi*d)$ (rev/min)	2289	2369	2448	2528	2607	2687	2767	2846	2926	3006	3006	1200
Ταχύτητα πρόωσης $f=s*n$ (mm/min)	1145	1113	1077	1036	991	940	885	825	761	691	571	228
Λόγος n/f	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	5,26	5,26

Πίνακας A4: Τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών τόννευσης για το στάδιο του φινιρίσματος του χάλυβα St37.2 και του ορείχαλκου C38000.

Χάλυβας St37.2 και Ορείχαλκος C38k	Φινίρισμα											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Extra 1	Extra 2
Ταχύτητα κοπής Vc(m/min)	160	164	168	172	176	180	184	188	192	196	196	60,288
Πρόωση s (mm/rev)	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,1	0,09	0,08	0,07	0,07
Στροφές $n=(1000*Vc)/(\pi*d)$ (rev/min)	3185	3264	3344	3424	3503	3583	3662	3742	3822	3901	3901	1200
Ταχύτητα πρόωσης $f=s*n$ (mm/min)	541	522	502	479	455	430	403	374	344	312	273	84
Λόγος n/f	5,9	6,3	6,7	7,1	7,7	8,3	9,1	10,0	11,1	12,5	14,286	14,286

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Πίνακες τιμών παραμέτρων τραχύτητας

Πίνακας Β1: Τιμές παραμέτρων τραχύτητας για τον ανοξείδωτο χάλυβα AISI-SAE 304, χωρίς τη διόρθωση.

ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ											
		ΣΥΝΘΗΚΕΣ									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NONE	Ra	1,69	1,69	1,64	1,59	1,65	1,61	1,58	1,56	1,56	1,50
	Rq	2,09	2,06	1,98	1,90	1,97	1,92	1,88	1,85	1,85	1,79
	Rz	10,93	10,96	10,55	9,72	11,56	9,46	9,26	9,18	8,87	8,75
	Rt	11,31	11,56	11,13	10,37	14,10	9,84	9,63	9,49	9,28	9,16
CYLINDER	Ra	0,90	0,78	0,69	0,56	0,61	0,53	0,52	0,54	0,45	0,49
	Rq	1,16	1,01	0,87	0,69	0,76	0,66	0,65	0,67	0,56	0,61
	Rz	5,96	5,50	5,17	4,60	7,45	4,20	4,00	4,16	3,62	3,79
	Rt	6,61	5,97	5,63	5,43	10,26	4,60	4,26	4,53	4,29	4,18
Λόγος n/S		5,88	6,25	6,67	7,14	7,69	8,33	9,09	10,00	11,11	12,50

Πίνακας Β2: Τιμές παραμέτρων τραχύτητας για τον κατασκευαστικό χάλυβα S235JR, χωρίς τη διόρθωση.

ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ													
		ΣΥΝΘΗΚΕΣ											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Extra 1	Extra 2
NONE	Ra	1,78	1,73	1,71	1,65	1,65	1,63	1,62	1,59	1,57	1,55	1,55	1,53
	Rq	2,22	2,14	2,10	2,01	1,99	1,96	1,94	1,90	1,88	1,83	1,83	1,80
	Rz	11,70	10,95	10,86	10,36	9,87	9,77	9,42	9,36	9,28	8,60	8,27	7,88
	Rt	12,23	11,36	11,64	11,04	10,22	10,18	10,15	9,88	9,70	9,41	8,66	8,22
CYLINDER	Ra	1,08	0,99	0,93	0,82	0,77	0,69	0,62	0,58	0,47	0,34	0,36	0,35
	Rq	1,33	1,18	1,11	0,97	0,89	0,82	0,76	0,72	0,62	0,43	0,44	0,42
	Rz	6,61	5,82	6,01	5,40	4,62	4,61	4,22	4,12	4,25	3,55	3,36	3,00
	Rt	7,43	6,77	6,94	5,86	5,30	5,44	4,64	4,83	4,85	4,44	4,16	3,50
Λόγος n/S		5,9	6,3	6,7	7,1	7,7	8,3	9,1	10,0	11,1	12,5	14,3	14,3

Πίνακας Β3: Τιμές παραμέτρων τραχύτητας για τον αρχιτεκτονικό ορείχαλκο C38000, χωρίς τη διόρθωση.

ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ											
		ΣΥΝΘΗΚΕΣ									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NONE	Ra	2,06	1,84	1,68	1,78	1,80	1,79	1,70	1,71	1,62	1,65
	Rq	2,57	2,28	2,03	2,18	2,21	2,19	2,05	2,07	1,94	1,98
	Rz	14,46	13,12	10,95	11,71	12,10	12,12	10,88	11,10	10,66	10,16
	Rt	15,33	13,96	11,88	12,14	12,59	12,93	12,26	11,73	11,67	10,96
CYLINDER	Ra	1,48	1,20	1,01	0,97	1,04	0,98	0,79	0,82	0,70	0,65
	Rq	1,78	1,48	1,25	1,16	1,26	1,41	0,98	1,01	0,87	0,81
	Rz	9,63	8,66	7,46	6,50	7,04	7,32	6,22	6,47	6,30	4,88
	Rt	10,22	10,18	8,70	7,37	7,61	8,14	7,83	7,17	7,35	5,63
Λόγος n/S		5,9	6,3	6,7	7,1	7,7	8,3	9,1	10,0	11,1	12,5