

Μελέτη τραχύτητας και  
χαρακτηριστικών κοπής  
για κράματα τιτανίου

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των  
απαιτήσεων απόκτησης Μεταπτυχιακού Διπλώματος  
Ειδίκευσης

υπό

ΝΕΚΤΑΡΙΟΥ Μ. ΧΑΙΡΕΤΗ

Έτος: 2007

---

© Copyright υπό Νεκτάριου Μ. Χαιρέτη  
Έτος : 2007

Η διατριβή του Νεκτάριου Χαιρέτη εγκρίνεται:

Νικόλαος Τσουρβελούδης (Επιβλέπων) \_\_\_\_\_

Βασίλειος Κουϊκόγλου \_\_\_\_\_

Ιωάννης Νικολός \_\_\_\_\_

## Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή .....	12
<b>1.1 Κίνητρα (Motivation).....</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Ορισμός του προβλήματος.....</b>	<b>13</b>
<b>1.3 Μέθοδος Εργασίας.....</b>	<b>13</b>
<b>1.4 Συνεισφορά .....</b>	<b>14</b>
<b>1.5 Δομή της διατριβής .....</b>	<b>14</b>
2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση .....	15
3. Θεωρία τιτανίου, κραμάτων του, τραχύτητα Επιφανείας Τεχνολογία Κατασκευής Τεχνητών Μελών και Τεχνολογία Κοπτικών Εργαλείων .....	18
<b>3.1 Γενικά.....</b>	<b>18</b>
3.1.1 Εισαγωγή.....	18
3.1.2 Τιτάνιο .....	19
3.1.3 Κράματα τιτανίου .....	20
3.1.4 Τι6Al4V – Κράμα τιτανίου.....	23
3.1.5 τραχύτητα επιφανείας βιο-αποδεκτού Τι6Al4V κράματος τιτανίου.....	26
3.1.6 Τεχνολογία κατασκευής τεχνητών μελών .....	28
3.1.7 Τεχνολογία Κοπτικών Εργαλείων .....	29
4. Διαδικασία εξέλιξης της έρευνας, εργαλειομηχανές, Κοπτικά Εργαλεία και Μηχανουργικές Κατεργασίες .....	35
<b>4.1 Εξέλιξη της Έρευνας.....</b>	<b>35</b>
<b>4.2 Υλικό .....</b>	<b>35</b>
<b>4.3 Εργαλειομηχανές .....</b>	<b>37</b>
4.3.1 Τόρνος .....	37
4.3.2 Φρέζα.....	37
<b>4.4 Κοπτικά Εργαλεία .....</b>	<b>37</b>
4.4.1 Κοπτικά Εργαλεία Τόρνου.....	37
4.4.2 Φρέζα.....	39
<b>4.5 Όργανο Μέτρησης τραχύτητας .....</b>	<b>47</b>
<b>4.6 Μηχανουργικές Κατεργασίες .....</b>	<b>47</b>
4.6.1 Τόρνος .....	48
4.6.2 Φρέζα.....	49
5. Συλλογή αποτελεσμάτων τραχύτητας και παράθεση τους με κοινή βάση, όπως και σύγκρισης τους με αντίστοιχα άλλων ερευνητών .....	53
<b>5.1 Εξέλιξη της Κατεργασίας .....</b>	<b>53</b>
<b>5.2 Κατεργασίες .....</b>	<b>55</b>
5.2.1 Κατεργασίες Τόρνου .....	55
5.2.2 Κατεργασίες Φρέζας.....	55
<b>5.3 Αποτελέσματα.....</b>	<b>55</b>
5.3.1 Κατεργασίες Τόρνου .....	55
5.3.2 Κατεργασίες Φρέζας.....	58
<b>5.4 Συγκρίσεις .....</b>	<b>64</b>
6. Συλλογή συμπερασμάτων και ανάπτυξη αυτών για περαιτέρω επεξεργασία .....	65
<b>6.1 Συμπεράσματα.....</b>	<b>65</b>
Διαγράμματα.....	67
Φωτογραφίες.....	77
Βιβλιογραφία.....	95

## Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 3-1 : Συνοπτική απεικόνιση όλων των βασικών χαρακτηριστικών τιτανίου. ....	20
Σχήμα 3-2 : Απεικόνιση μικροδομής φάσεων κράματος τιτανίου. Με αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνονται οι περιοχές Β φάσης σε βάρος της Α φάσης. ....	21
Σχήμα 3-3 : Απεικόνιση διαγράμματος αντοχής – θερμοκρασίας κράματων τιτανίου.....	22
Σχήμα 3-4 : Απεικόνιση μικροδομής ανοσπτημένου κράματος Ti6Al4V τιτανίου.....	24
Σχήμα 3-5 : Απεικόνιση διαγράμματος αντοχής & επιμήκυνσης – θερμοκρασίας Ti6Al4V.....	25
Σχήμα 3-6 : Ανάπτυξη μυϊκών ιστών και κατεύθυνση τους. [62]......	26
Σχήμα 3-7 : Μορφές επιφανειών κράματος τιτανίου πριν και μετά την ανάπτυξη μυϊκών ιστών. [64]......	27
Σχήμα 3-8 : Επικαθίσεις τηγμένου μετάλλου επάνω στο κοπτικό εργαλείο, πλαστική παραμόρφωση του, όπως και έντονες ρηγματώσεις της κοπτικής ακμής του. [49]. ....	30
Σχήμα 3-9 : Επικαθίσεις τηγμένου μετάλλου επάνω στο κοπτικό εργαλείο και αποφλοίωση της κοπτικής ακμής του. [38]. ....	30
Σχήμα 3-10 : Θρυμματισμένα υπολείμματα κοπής από έντονη ταλάντωση κοπτικού εργαλείου σκληρομετάλλου σε ταχύτητες κοπής 80 m/min & 140 m/min . [38].....	31
Σχήμα 3-11 : Επηρεασμός της ταχύτητα και του μήκους κοπής σε σχέση με τη φθορά του σκληρομετάλλου ως κοπτικού εργαλείου. [38]. ....	31
Σχήμα 3-12 : Επηρεασμός της πρόωσης στη φθορά του σκληρομετάλλου ως κοπτικού εργαλείου. [38]. ....	32
Σχήμα 3-13 : Επηρεασμός της τραχύτητας ανάλογα με τη πρόωση για σκληρομέταλλο ως κοπτικό εργαλείο. [38]......	32
Σχήμα 3-14 : Θρυμματισμένα υπολείμματα κοπής από ταλάντωση του επικαλυμμένου κοπτικού εργαλείου, Στο δεύτερο σχήμα η κυρτότητα του απόβλητου οφείλεται σε επικαθίσεις τηγμένου μετάλλου στη κοπτική ακμή όπου και τη μετατρέπουν από μύτη σε καμπύλη. [38]......	33
Σχήμα 3-15 : Επηρεασμός της επικάλυψης και του μήκους κοπής σε σχέση με τη φθορά του επικαλυμμένου κοπτικού εργαλείου. [38]. ....	33
Σχήμα 3-16 : Σύγκριση της δύναμης κοπής σε σχέση με το χρόνο για ομοιόμορφα και ανομοιόμορφα τοποθετημένες κοπτικές ακμές κοπτικού εργαλείου Φρέζας, κατά τη κατεργασία κράματος Τιτανίου. [36]. ....	34
Σχήμα 4-1 :Πιστοποιητικό διαπίστευσης κράματος τιτανίου. ....	36
Σχήμα 4-2 : Μορφή κοπτικού εργαλείου Τόρνου TNMG220408 – MSRT9010. [42]......	39
Σχήμα 5-1 : Μικροδομή κατεργασμένου δοκιμίου με συμβατική εργαλειομηχανή. [53]......	54
Σχήμα 5-2 : Μικροδομή κατεργασμένου δοκιμίου με ηλεκτρονικά ελεγχόμενη εργαλειομηχανή. [53]. ....	54
Σχήμα 5-3 : Προσκόλληση τηγμένου μετάλλου στη κοπτική ακμή κοπτικού εργαλείου τόρνου και μερική τήξη του. [42]. ....	58

## Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 : Σύγκριση θεωρητικά υπολογιζόμενης μέσης τραχύτητας από μετρούμενη τραχύτητα στις κατεργασίες τόννου με όλα τα κοπτικά εργαλεία.....	67
Διάγραμμα 2 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή στη πρόωση σε συμμετρική και ασύμμετρη κοπή με κοπτικό εργαλείο τόννου κλίσης 91°. ....	67
Διάγραμμα 3 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή στη πρόωση και στη ταχύτητα περιστροφής σε κοπτικό εργαλείο τόννου κλίσης 91°. ....	68
Διάγραμμα 4 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή στη πρόωση και στο βάθος κοπής σε κοπτικό εργαλείο τόννου κλίσης 91°. ....	68
Διάγραμμα 5 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή στη ταχύτητα περιστροφής του δοκιμίου και στο βάθος κοπής με κοπτικό εργαλείο τόννου κλίσης 91°. ....	69
Διάγραμμα 6 : Σύγκριση τραχύτητας σε υγρή και στεγνή κοπή με κοπτικό εργαλείο τόννου κλίσης 60°, 91° και 117°. ....	69
Διάγραμμα 7 : Σύγκριση τραχύτητας θεωρητικά υπολογιζόμενης σε μετωπική και διαμήκης κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας τριών κοπτικών. ....	70
Διάγραμμα 8 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή στη ταχύτητα περιστροφής του δοκιμίου και αλλαγής του βάθους κοπής με κοπτικό εργαλείο φρέζας τριών κοπτικών. ....	70
Διάγραμμα 9 : Σύγκριση τραχύτητας σε υγρή και στεγνή κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας τριών κοπτικών. ..	71
Διάγραμμα 10 : Σύγκριση τραχύτητας σε υγρή και στεγνή κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας έξι κοπτικών (Γωνία Ελευθερίας 25°, Ουδέτερης κοπής). ....	71
Διάγραμμα 11 : Σύγκριση τραχύτητας σε υγρή και στεγνή κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας έξι κοπτικών (Γωνία Ελευθερίας 25°, Δεξιάς κοπής). ....	72
Διάγραμμα 12 : Σύγκριση τραχύτητας σε υγρή και στεγνή κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας έξι κοπτικών (Γωνία Ελευθερίας 11°, Δεξιάς κοπής). ....	72
Διάγραμμα 13 : Σύγκριση τραχύτητας θεωρητικά υπολογιζόμενης με μετρούμενη κοπτικού εργαλείου φρέζας τριών κοπτικών και έξι κοπτικών αντίστοιχα. ....	73
Διάγραμμα 14 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής δοκιμίου και του βάθους κοπής με κοπτικό εργαλείο φρέζας έξι κοπτικών.....	73
Διάγραμμα 15: Σύγκριση τραχύτητας σε μετωπική και διαμήκης κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας έξι κοπτικών ακμών (Γωνία Ελευθερίας 35°).....	74
Διάγραμμα 16 : Σύγκριση τραχύτητας με μετωπική και διαμήκης κοπή σε υγρή και στεγνή κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας έξι κοπτικών ακμών (Γωνία Ελευθερίας 35°).....	74
Διάγραμμα 17 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή στη ταχύτητα περιστροφής σε διαμήκης κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας τριών κοπτικών Ακμών (Γωνία Ελευθερίας 50°). ....	75
Διάγραμμα 18 : Σύγκριση τραχύτητας σε μετωπική και διαμήκης κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας τριών κοπτικών Ακμών (Γωνία Ελευθερίας 50°). ....	75
Διάγραμμα 19 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή στο βάθος κοπής σε υγρή και στεγνή κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας τριών κοπτικών Ακμών (Γωνία Ελευθερίας 50°). ....	76
Διάγραμμα 20 : Σύγκριση τραχύτητας με κοπτικό εργαλείο φρέζας έξι και τριών κοπτικών Ακμών (Γωνία Ελευθερίας 35° & 50°). ....	76

## Πίνακας Φωτογραφιών

Φωτογραφία 1 : Πριν τη κατεργασία.....	77
Φωτογραφία 2 : Πριν τη κατεργασία.....	77
Φωτογραφία 3 : Μετά τη κατεργασία τόννου. ....	78
Φωτογραφία 4 : Μετά τη κατεργασία τόννου. ....	78
Φωτογραφία 5 : Μετά τη κατεργασία φρέζας. ....	79
Φωτογραφία 6 : Μετά τη κατεργασία φρέζας. ....	79
Φωτογραφία 7 : Τόρνος.....	80
Φωτογραφία 8 : Φρέζα.....	80
Φωτογραφία 9 : Κοπτικό εργαλείο τόννου με γωνία κοπής 91°. ....	81
Φωτογραφία 10 : Κοπτικό εργαλείο τόννου με γωνία κοπής 60°. ....	81
Φωτογραφία 11 : Κοπτικό εργαλείο τόννου με γωνία κοπής 117°. ....	82
Φωτογραφία 12 : Κοπτικό εργαλείο φρέζας, μαχαιροφόρα κεφαλή με τρία βίδια.....	82
Φωτογραφία 13 : Κοπτικό εργαλείο φρέζας, μαχαιροφόρα κεφαλή με έξι βίδια. ....	83
Φωτογραφία 14 : Κοπτικό εργαλείο φρέζας, μαχαιροφόρα κεφαλή με έξι βίδια. ....	83
Φωτογραφία 15 : Κοπτικό εργαλείο φρέζας, κονδύλι έξι κοπτικών ακμών (E6MHD1000). ....	84
Φωτογραφία 16 : Κοπτικό εργαλείο φρέζας, κονδύλι τριών κοπτικών ακμών (VALHD1000). ....	84
Φωτογραφία 17 : Προετοιμασία κοπής με κοπτικό εργαλείο τόννου κλίσης 91°. ....	85
Φωτογραφία 18 : Προετοιμασία κοπής με κοπτικό εργαλείο τόννου κλίσης 60°. ....	85
Φωτογραφία 19 : Προετοιμασία κοπής με κοπτικό εργαλείο τόννου κλίσης 117°. ....	86
Φωτογραφία 20 : Διάτρηση μετώπου για καλύτερη στήριξη του δοκιμίου.....	86
Φωτογραφία 21 : Μετωπική κοπή με χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού. ....	87
Φωτογραφία 22 : Κοπή με χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού. ....	87
Φωτογραφία 23 : Κοπή χωρίς τη χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού.....	88
Φωτογραφία 24 : Λεπτομέρεια κοπής.....	88
Φωτογραφία 25 : Λεπτομέρεια κοπής.....	89
Φωτογραφία 26 : Μέτρηση τραχύτητας.....	89
Φωτογραφία 27 : Προετοιμασία κοπής με μαχαιροφόρα κεφαλή.....	90
Φωτογραφία 28 : Προετοιμασία κοπής με κονδύλι.....	90
Φωτογραφία 29 : Κοπή μετώπου με μαχαιροφόρα κεφαλή χωρίς τη χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού....	91
Φωτογραφία 30 : Κοπή μετώπου με κονδύλι χωρίς τη χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού.....	91
Φωτογραφία 31 : Κοπή μετώπου με μαχαιροφόρα κεφαλή με τη χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού.....	92
Φωτογραφία 32 : Κοπή μετώπου με κονδύλι με τη χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού. ....	92
Φωτογραφία 33 : Διαμήκης κοπή με μαχαιροφόρα κεφαλή. ....	93
Φωτογραφία 34 : Διαμήκης κοπή με κονδύλι. ....	93
Φωτογραφία 35 : Λεπτομέρεια κοπής. ....	94
Φωτογραφία 36 : Μέτρηση τραχύτητας.....	94

Αφιέρωση

*Στη Γυναίκα μου &*

*τον Επιβλέποντα μου.*



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ<sup>ο</sup> Νικόλαο Τσουρβελούδη για την επίβλεψη του, στην ολοκλήρωση αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, καθώς και για την αμέριστη βοήθεια και εποικοδομητική συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους αναγνώστες της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας, τον Καθηγητή κ<sup>ο</sup> Βασίλη Κουϊκόγλου και τον Λέκτορα Καθηγητή κ<sup>ο</sup> Ιωάννη Νικολό για το χρόνο που διέθεσαν για την ανάγνωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας και τις παρατηρήσεις τους πάνω σε αυτήν.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου μεταπτυχιακούς φοιτητές της ερευνητικής ομάδας του κ<sup>ου</sup> Νικολάου Τσουρβελούδη για την καλή συνεργασία και επικοινωνία καθ' όλη τη διάρκεια των κοινών μεταπτυχιακών μας σπουδών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του φιλικού και οικογενειακού μου περιβάλλοντος για την πολύπλευρη στήριξη και συμπαράσταση που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τη γυναίκα μου Θεοδώρα, η οποία επιπλέον μου παρείχε σημαντική βοήθειά σχετικά με τη μεταπτυχιακή μου εργασία.

Νεκτάριος Μ. Χαιρέτης

Πολυτεχνείο Κρήτης

Μάιος 2007

## Σύντομο Βιογραφικό

Ο Νεκτάριος Χαιρέτης γεννήθηκε στα Χανιά της Κρήτης στις 09 Φεβρουαρίου 1967. Το 1984 έλαβε το απολυτήριο από το 2<sup>ο</sup> Γενικό Λύκειο Χανίων και εισήχθη μέσω πανελληνίων εξετάσεων στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Το 1991 ολοκλήρωσε τις προπτυχιακές σπουδές του σε 4,5 έτη, στο τμήμα αυτό και έλαβε το δίπλωμά του με βαθμό 7,51 (Άριστα). Από το 1994 μέχρι και το τέλος του 2002 εργάστηκε ως μελετητής, επιβλέπων και κατασκευαστής σε μηχανολογικά έργα. Από τον Ιανουάριο του 2003 είναι Ειδικό Τεχνικό Ερευνητικό Προσωπικό (Ε.Τ.Ε.Π.), στο Διατμηματικό Εργαστήριο Εργαλειομηχανών (ΔΙ.Ε.ΕΡΓΑ.), του Πολυτεχνείου Κρήτης. Το 2005 έγινε δεκτός στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Ειδίκευσης του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών του σπουδών και για δύο συνεχόμενα έτη, ήταν υπότροφος του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών (Ι.Κ.Υ.).

## Περίληψη Διατριβής

Στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετάται η επίδραση παραμέτρων κοπής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, στην τραχύτητα επιφανείας κράματος τιτανίου.

Το τιτάνιο, λόγω φυσικών και χημικών ιδιοτήτων παρουσιάζει σημαντική δυσκολία στην κατεργασία του. Στην παρούσα διατριβή θα μελετηθούν σε πραγματικές συνθήκες η επίδραση παραγόντων, όπως,

- α) το υλικό και η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου,
  - β) η ταχύτητα κοπής,
  - γ) η πρόωση,
  - δ) η ψύξη και η λίπανση,
  - ε) οι κραδασμοί συμβατικών εργαλειομηχανών,
- στην τραχύτητα της επιφάνειας κράματος τιτανίου.

Το κράμα που χρησιμοποιείται είναι το Ti6Al4V (εμπορικά διαθέσιμο) σε μορφή ανόπτησης (θερμικά επεξεργασμένο). Το Ti6Al4V παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω ιδιοτήτων στην αεροδιαστημική και στην τεχνολογία τεχνητών μελών, αφού είναι πλήρως βιο-συμβατό.

Ως τελικό αποτέλεσμα λαμβάνεται η δημιουργία γραφημάτων για την τραχύτητα σε σχέση με τις παραμέτρους κοπής, που βασίζονται σε εκτεταμένα και πειραματικά αποτελέσματα. Η συστηματική μελέτη, αποτύπωση και έλεγχος της τραχύτητας επιφάνειας του συγκεκριμένου υλικού, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την περαιτέρω επεξεργασία του με επικαλύψεις κεραμικών και άλλων υλικών, κυρίως όταν προορίζεται για χρήση στο ανθρώπινο σώμα.

# 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

## Εισαγωγή

### 1.1 Κίνητρα (Motivation)

Η επιστημονική περιοχή των βιο-συμβατών υλικών αποτελεί αντικείμενο μελέτης και εκπόνησης ερευνητικών εργασιών με πολλές εφαρμογές. Σ' αυτό συνεισφέρει η υψηλά απαιτούμενη αξιοπιστία των βιο-συμβατών υλικών. [1], [2].

Το περισσότερο διαδεδομένο και με τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα βιο-συμβατό υλικό σε ιατρικές εφαρμογές είναι κράμα τιτανίου με την ονομασία Ti 6Al 4V. [3].

Η υψηλή αντοχή, το μειωμένο βάρος και η μη οξειδωση του, έχουν οδηγήσει το τιτάνιο σε ένα ευρύ πεδίο επιτυχημένων εφαρμογών, όπου απαιτούνται υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας κύρια σε ιατρικές εφαρμογές. [4], [5].

Περισσότεροι από 1000 τόνοι, κράματος τιτανίου διαφόρων μορφών, τοποθετούνται σε ασθενείς με το νούμερο αυτό να αυξάνει εκθετικά κάθε χρόνο σε παγκόσμια κλίμακα. Οι απαιτήσεις σε αντικαταστάσεις ανθρώπινων μελών μεγαλώνουν, όσο ο άνθρωπος ζει περισσότερο ή τραυματίζεται συχνότερα. Ελαφρύ, ισχυρό, ανοξειδωτο και πλήρως βιο-συμβατό, το τιτάνιο είναι ένα από ελάχιστα υλικά που καλύπτουν τις απαιτήσεις εμφυτευμάτων στο ανθρώπινο σώμα. [6], [7].

Γενικότερα το τιτάνιο είναι το τέταρτο πιο πλούσιο δομικό στοιχείο στη επιφάνεια της Γης και το ένατο πιο διαδεδομένο μέταλλο στη βιομηχανία. Είναι το μοναδικό μέταλλο που έχει αλματώδη άνοδο με ουσιαστική υπεροχή σε κρίσιμες και απαιτητικές εφαρμογές.

Πλεονεκτήματα του τιτανίου, όπως και των κράματων αυτού είναι :

- ο Διαθέσιμο σε όλες τις μορφές (κύλινδρος, κύβος, φύλλο),
- ο Έτοιμο προς επεξεργασία, (μηχανουργική ή χύτευση),
- ο Ανταγωνιστικό κόστος συγκρινόμενο με άλλα υλικά υψηλής αντοχής,
- ο Ελαφρύ υλικό, (σε σχέση με τον χάλυβα ανάλογης αντοχής έχει το μισό βάρος),
- ο Αντέχει σε φωτιά και κραδασμούς, (πυράντοχο και αντικραδασμικό),
- ο Εξαιρετικές κρυογονικές ιδιότητες,
- ο Βίο-συμβατό και μη τοξικό.

Στη πλειονότητα των μηχανολογικών εφαρμογών το τιτάνιο, όπως και τα κράματά του, έχουν αντικαταστήσει βαρύτερα, λιγότερα επεξεργάσιμα και με υψηλότερο κόστος υλικά. Δημιουργώντας με τιτάνιο λαμβάνοντας υπόψη όλους του παράγοντες, όπως σχεδιασμός και κατασκευή εξαρτημάτων, παράγεται αποτέλεσμα πιο αξιόπιστο, και τελικά πιο οικονομικά συμφέρον στο σύνολο του, υπερβαίνοντας τις προδιαγραφές με εφ, όρου ζωής κατασκευή.

## 1.2 Ορισμός του κράματος $Ti6Al4V$

Μελετάται η τραχύτητας επιφανείας του  $Ti6Al4V$ , μετά από κατεργασία σε τόρνο και φρέζα για ποικιλία κοπτικών εργαλείων και παραμέτρων κοπής.

Το  $Ti6Al4V$  είναι το πιο διαδεδομένο κράμα τιτανίου για την κατασκευή τεχνητών μελών. Η τραχύτητα επιφανείας ρυθμίζει την ανάπτυξη του μυϊκού ιστού, επάνω στο τεχνητό μέλος. [8], [9].

## 1.3 Μέθοδος Εργασίας

Αρχικά γίνεται τόννευση του  $Ti6Al4V$ , σε πραγματικές συνθήκες, με διαφορετικά κοπτικά εργαλεία, όπου και καταγράφονται οι τιμές της τραχύτητας από την επιφάνεια. Στη συνέχεια γίνεται επέμβαση στις συνθήκες κοπής τροποποιώντας τη μορφή και τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, τη ταχύτητα κοπής, τη πρόωση, τη ψύξη και τη λίπανση, για να ληφθούν και να συγκριθούν τα ανάλογα αποτελέσματα .

Αντίστοιχα πραγματοποιούνται κατεργασίες κοπής και σε Φρέζα με ακριβώς την ίδια ακολουθία εργασιών, όπως και στη τόννευση.

Τα αποτελέσματα των διαδικασιών αυτών αποκαλύπτουν σημαντικά στοιχεία για την τραχύτητα επιφανείας κάτω από διαφορετικές συνθήκες κοπής και της δυνατότητας προσέγγισης επιθυμητής βέλτιστης τραχύτητας ανάπτυξης μυϊκών ιστών.

## 1.4 Συνεισφορά

Η κύρια συνεισφορά της εργασίας αυτής είναι ότι προτείνει ένα συστηματικό πλαίσιο μέτρησης της τραχύτητας για το Ti6Al4V, σε συμβατικές εργαλειομηχανές κοπής.

Στη συνεισφορά της εργασίας πρέπει να συνυπολογιστεί η μελέτη της τραχύτητας για μεταβαλλόμενους παράγοντες κοπής.

Μηχανουργική κατεργασία κραμάτων τιτανίου δεν εφαρμόζεται, λόγω του ότι κύρια το τιτάνιο κατεργάζεται με διεργασίες χύτευσης, κάτι όμως που είναι δύσκολο εφαρμόσιμο στην Ελλάδα, λόγω των ιδιαιτέρων απαιτήσεων σε υψηλές θερμοκρασίες τήξης.

## 1.5 Δομή της διατριβής

Η διατριβή είναι οργανωμένη με τον ακόλουθο τρόπο. Αρχικά στο κεφάλαιο 2 γίνεται βιβλιογραφική επισκόπηση του θέματος. Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται οι θεωρητικές έννοιες τιτανίου και κραμάτων του με ιδιαίτερη έμφαση στο Ti6Al4V, τραχύτητας επιφάνειας, όπως και τεχνολογίας κατασκευής τεχνητών μελών και κοπτικών εργαλείων. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η διαδικασία εξέλιξης της έρευνας, αναφέροντας τις εργαλειομηχανές τα κοπτικά εργαλεία και τη μορφή των μηχανουργικών κατεργασιών, για κράμα τιτανίου (Ti 6Al 4V), κατεργαζόμενο σε Τόρνο και Φρέζα. Το κεφάλαιο 5 αναφέρεται στη συλλογή των αποτελεσμάτων τραχύτητας και παράθεση τους με κοινή βάση, όπως και σύγκρισης τους με αντίστοιχα άλλων ερευνητών και τέλος το κεφάλαιο 6 αναφέρεται στη συλλογή συμπερασμάτων και ανάπτυξη αυτών για περαιτέρω επεξεργασία.

## 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Στη βιβλιογραφία συναντάται μεγάλο πλήθος εργασιών στις οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί κράματα τιτανίου και ειδικότερα Ti6Al4V. Το σύνολο όλων των εφαρμογών είναι πρακτικά αδύνατο να αναφερθεί, ενώ ξεφεύγει και από τους σκοπούς της εργασίας.

Αντίθετα εφαρμογή τιτανίου ή κράματος αυτού στην Ιατρική με βάση μελέτη, την τραχύτητα του δεν έχει ιδιαίτερα αναπτυχθεί. Ακόμα πιο περιορισμένη είναι η ύπαρξη εργασιών αναφερόμενων στη μελέτη τραχύτητας τιτανίου και κραμάτων του επεξεργαζόμενα με εργαλειομηχανές.

Αρχικά αναφέρονται συγγράμματα σχετικά με τα βίο-αποδεκτά υλικά [3], [10] και ειδικότερα με το τιτάνιο και τα κράματα του. Τα [11], [12] και [13], αναφέρονται στα χαρακτηριστικά των κραμάτων τιτανίου ταξινομώντας τα σε κράματα τύπου A, τύπου AB και τύπου B, όπως και ειδικότερα στο υπό μελέτη κράμα Ti6Al4V. Υπάρχει και μελέτη εξάρτησης των διαφόρων παραπάνω τύπων σε σχέση με τη θερμοκρασία και πώς αυτή έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει τα κράματα τιτανίου από τον έναν τύπο στον άλλο [14]. Αντίστοιχα στα [15] και [16] δίδονται οι κωδικοποιήσεις κατά ASTM (American Society for Testing and Materials), που χαρακτηρίζουν τις προδιαγραφές τιτανίου, των κραμάτων τιτανίου όπως θερμικά επεξεργασμένων (ανόπτηση) δοκιμών των παραπάνω υλικών. Αντίστοιχα στο [17] δίδονται γενικά στοιχεία για το τιτάνιο και τα κράματα του, ενώ στο [18] στοιχεία σχεδίασης αντικειμένων από τιτάνιο και κράματα αυτού που έχουν σχέση με τα χαρακτηριστικά κατεργασίας τους, και τέλος στο [19] στοιχεία για μερικώς κατεργασμένα δοκίμια τιτανίου κατάλληλα για εμπορική χρήση.

Ειδικότερα το [20] αναφέρεται σε κράματα τιτανίου υψηλής αντοχής με εξειδίκευση στο υπό μελέτη κράμα ενώ το [21] δίδει στοιχεία σύνθεσης, φυσικά, μηχανικά και κατεργασίας, για τα βιο-αποδεκτά κράματα τιτανίου. Αντίστοιχα περισσότερα μηχανικά και θερμικά στοιχεία στο Ti6Al4V, δίδονται στο [22]. Τέλος εφαρμογές και ειδικευμένες κατεργασίες του Ti6Al4V δίδονται στο [6] και [23], ενώ θερμομηχανική επεξεργασία για τον επηρεασμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υπό μελέτη κράματος στο [24].

Τρόποι κατεργασίας τιτανίου και κραμάτων του δίδονται κύρια από εγχειρίδια Βιομηχανιών επεξεργασίας τιτανίου, όπως [25], [26], [27], [28], αλλά και από Ινστιτούτα Έρευνας [29], όπως και από ανεξάρτητους Ερευνητές [30], [31]. Τέλος επεξεργασία επιφάνειας τιτανίου και κραμάτων του δίδονται από Ινστιτούτο που εξειδικεύεται στο τιτάνιο [32], όπου και συμπεριλαμβάνονται μέθοδοι ασφαλούς κατεργασίας του [33].

Εξειδικευμένες έρευνες στις δυνατότητες κατεργασίας τιτανίου έχουν αναπτυχθεί από μερικούς μόνο ερευνητές λόγω ότι η συνήθης επεξεργασία τιτανίου κύρια για ιατρικούς σκοπούς έγκειται στη χύτευση αυτού. Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται ιδιαίτερα η μηχανουργική επεξεργασία του (τιτάνιο και κράματα αυτού), λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κύρια στη λεπτομέρεια κατασκευής, όπως και στη ποιότητα κατεργασία του.

Δυνατότητες και μέθοδοι κατεργασίας έχουν αναπτυχθεί στα [34] και [35] μελετώντας την μηχανουργική κατεργασιμότητα των κραμάτων τιτανίου, όπως και τη ποιότητα της δομής των κραμάτων τιτανίου επηρεάζοντας τις παραμέτρους κατεργασίας.

Ιδιαίτερη αναφορά έχει γίνει στην κατεργασία με Φρέζα κύρια σε μεθόδους αύξησης της σταθερότητας κοπής [36], [37], όπως και γενικότερα των συνθηκών κοπής [38], με ειδικές μετρήσεις και αναλύσεις στην ανάπτυξη θερμοκρασιών [39]. Αναλυτικότερες μετρήσεις αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών στο σύνολο των μηχανουργικών κατεργασιών έχουν αναπτυχθεί στο [40] και με ειδίκευση στη διάτρηση [41] με την ελάχιστη απαίτηση σε ψυκτικό υγρό.

Κοπτικά Εργαλεία για την κατεργασία τιτανίου και κραμάτων του, δίδονται από κατάλληλα εμπορικά εγχειρίδια με βασικότερο της μεγαλύτερης εταιρείας Κοπτικών Εργαλείων [42] που ειδικεύεται σε μοντέρνα υλικά κοπής δύσκολων σε κατεργασία δοκιμίων. Αλλά συναφή εγχειρίδια όπου συλλέγονται επιπλέον πληροφορίες είναι το [43] και [44].

Πιο εξειδικευμένη ανάλυση σχετικά και τα κοπτικά εργαλεία το χρόνο ζωής τους όπως και την τραχύτητα επιφάνειας που αφήνουν, δίδονται στο [45] με έμφαση στο χρόνο ζωής, και στο [46], ενώ η φθορά τους και ο ρόλος των επικαλύψεων σε διάφορες κατεργασίες δίδονται στα [47], [48] και [49]. Τέλος ο ρόλος της ψύξης στο κοπτικό εργαλείο κατά την κατεργασία κράματος τιτανίου δίδεται στο [50].

Γενικά χαρακτηριστικά επιφανείας σε επεξεργασμένα κράματα τιτανίου αναπτύσσονται στο [51] μελετώντας την τραχύτητα της επιφάνειας του κατεργασμένου υλικού με την ανάπτυξη των ιστών, ενώ στο [52] μελετάται η μεταβολή των φάσεων (Α-Β Φάση), του κατεργασμένου υλικού στην επιφάνεια του από την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών κατά τη κατεργασία.



Στο [53] μελετάται πως επηρεάζει την τραχύτητα η ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων κοπής, ενώ η επίδραση της τραχύτητας επιφάνειας στην κόπωση των κραμάτων τιτανίου αναλύεται στο [54]. Τέλος η δυνατότητα καθαρισμού επιφανείας τιτανίου και κραμάτων του από υπολείμματα Οξυγόνου και Άνθρακα που επηρεάζουν την βίο-αποδοχή του με θέρμανση αναπτύσσεται στο [55].

Συμπεριφορά τραχύτητας σε κράμα τιτανίου A-B φάσης για την βίο-αποδοχή του δίδεται στο [56]. Απαιτούμενη τραχύτητα επιφανείας για βίο-αποδεκτά κράματα τιτανίου αναπτύσσεται στο [8], όπου και αποτελεί το βασικό εγχειρίδιο έρευνας και μελέτης της τραχύτητας στην ανάπτυξη των μυϊκών ιστών, ενώ βελτίωση της για υψηλότερη βίο-αποδοχή με τεχνητές μεθόδους όπως προετοιμασίας ισοτροπικών επιφανειών στα [57] και [58].

Ο ρόλος της τραχύτητας στην ανάπτυξη των ιστών του ανθρώπινου σώματος δίδονται σε μελέτες [59], [60], με ιδιαίτερη αναφορά στην εξέλιξη του χρόνου ως προς τον πολλαπλασιασμό και την πρόσφυση των μυϊκών ιστών στα τεχνητά μέλη. Επίσης μελετάται η ηχημική σύσταση της επιφάνειας μετά την κατεργασία και η επίδραση της στο πολλαπλασιασμό και την προσκόλληση των ιστών στα [9], [61] και [1]. Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην τοπογραφία και μορφολογία της επιφάνειας τιτανίου και κράματος Ti6Al4V για την ανάπτυξη ιστών [62], όπως και προσπάθειες βελτίωσης των παραπάνω ιδιοτήτων για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στη ανάπτυξη των ιστών [63], όπως και διαχωρισμός της γρήγορης αρχικής ανάπτυξης ιστών, με την παραμονή τους και περαιτέρω ανάπτυξη τους (εμφανίζεται το φαινόμενο γρήγορης ανάπτυξης ιστών αλλά και μη παραμονής τους και σε βάθος χρόνου αποκόλλησης των) [64] και [65].

Τέλος αναπτύσσονται μελέτες για τη βελτίωση της βίο-αποδοχής με έλεγχο της εμφανιζόμενης τραχύτητας στις απαιτούμενες τιμές, καλύπτοντας την κατεργασμένη επιφάνεια με διασπορά των δοκιμίων τιτανίου και κραμάτων του με MoS<sub>2</sub> [65], και αντίστοιχα έκχυση Ιόντων [14], [66] και [67].

Επίσης νέες μορφές τιτανίου και κραμάτων του αναπτύσσονται για τη βέλτιστη ανάπτυξη ιστών όπως με έκχυση κατάλληλου αφρού κράματος τιτανίου [2] ή κατασκευής δικτυώματος από τιτάνιο [68].

## 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### Το τιτάνιο και τα κράματα του στη τεχνολογία τεχνητών μελών και κοπτικών εργαλείων.

#### 3.1 Γενικά

##### 3.1.1 Εισαγωγή

Το χημικό στοιχείο τιτάνιο είναι μέταλλο με ατομικό αριθμό 22 και ατομικό βάρος 47,90. Έχει θερμοκρασία τήξης τους 1660 C° και θερμοκρασία βρασμού τους 3287 C°. Το σύμβολο του είναι το Ti. Ανακαλύφθηκε το 1791 για πρώτη φορά , από έναν ιερέα που ονομαζόταν W. Gregor στην κοιλάδα του Manaccan στην Αγγλία. Το 1795 στην Ουγγαρία καθώς κάνανε ανάλυση σε κάποια κοιτάσματα μετάλλων, ο Martin Heinrich Klaproth βρήκε ρινίσματα τιτανίου. Ονομάστηκε τιτάνιο από τους τιτάνες τους γιους του Ουρανού. Για τα επόμενα χρόνια πολλοί χημικοί προσπαθούσαν να κατασκευάσουν καθαρό τιτάνιο. Το 1825 ο Brezelius κατασκεύασε ακάθαρμο τιτάνιο από διοξείδιο και με διοξείδωση του Νατρίου. Ήταν λίγο πριν αρχίσει ο Α΄ Παγκόσμιος Πόλεμος ο Hunter κατασκεύασε 99,9% καθαρό τιτάνιο καθώς προσπαθούσε να φτιάξει μια βόμβα.

Πριν τα μέσα του αιώνα μας η βιομηχανική χρήση του τιτανίου ήταν αδύνατη. Το 1938 ένας κατασκευαστής ανέπτυξε ιδιαίτερα την χρήση τιτανίου και έγινε απαραίτητο για την κατασκευή τουρμπινών και αεροσκαφών λόγω του βάρους του και της αντοχής του.

Μαζική παραγωγή για εμπορική χρήση αναπτύχθηκε από τον Kroll το 1946.

Σήμερα η παραγωγή τιτανίου και κραμάτων αυτού, υπολογίζεται παγκόσμια στους 100,000 τόνους. Και χρησιμοποιείται στην κατασκευή πλοίων, αεροσκαφών και σε πολλούς τομείς στην σύγχρονη βιομηχανία. Τέλος στην Ιατρική η χρήση πλέον του τιτανίου είναι αναπόφευκτη.

Για πάνω από 20 χρόνια, κράματα τιτανίου χρησιμοποιούνται για εμφυτεύματα και τεχνητές αρθρώσεις, με σημαντικότερο πλεονέκτημα την υψηλή βίο-συμβατικότητα του.

Το καθαρό τιτάνιο είναι γνωστό για την εξαιρετική αντοχή του στη διάβρωση και για τα μηχανικά του χαρακτηριστικά. Είναι ελαφρύ, έχει εκπληκτικά χαρακτηριστικά σε χαμηλή θερμοκρασία και δεν καταστρέφεται από την ηλιακή ενέργεια. Ακόμα και σε επιθετικά περιβάλλοντα, όπου άλλα μέταλλα παρουσιάζουν διάβρωση η οποία μικραίνει τον κύκλο ζωής τους, το τιτάνιο παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή. Πρόσθετα η μείξη του τιτανίου με άλλα ανόμοια μέταλλα δεν επιταχύνει την διάβρωση του.

Παράλληλα με την εξαιρετική μηχανική αντοχή του, το τιτάνιο έχει χαμηλό συντελεστή διαστολής. Ο γραμμικός συντελεστής διαστολής είναι περίπου το 1/3 εκείνου του Αλουμινίου και το 1/2 εκείνου του ατσάλιου. Συνεπώς η θερμική πίεση είναι πολύ μικρή. Χάρη στην σχετική του αδράνεια, το τιτάνιο θεωρείται το ασφαλέστερο μέταλλο για το περιβάλλον.

Το τιτάνιο έχει όλα τα πλεονεκτήματα που μπορεί να έχουν τα υψηλά πολύτιμα μέταλλα, και δεν προκαλεί αλλεργίες. Είναι το ελαφρύτερο από όλα τα υπόλοιπα μέταλλα (τέσσερις φορές πιο ελαφρύ από το Χρυσό) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο τομέα της βίο-ιατρικής και δεν βλάπτει την βιολογική ισορροπία στο ανθρώπινο σώμα.

Δεν έχει καθόλου γεύση και δεν είναι καλός αγωγός της θερμότητας. Αυτό σημαίνει ότι η φυσική αίσθηση του ζεστού και του κρύου δεν ενοχλείται καθόλου. Έχει ελαφριά ανακλαστικότητα.

Το τιτάνιο είναι ένα κλινικά αποδεδειγμένο αντιαλλεργικό μέταλλο. Ασθενείς που έχουν αντιδράσει αλλεργικά σε διάφορα άλλα μέταλλα στο παρελθόν, δεν έχουν κανένα απολύτως πρόβλημα με την χρήση τιτανίου. [2], [5].

### 3.1.2 Τιτάνιο

Ο συνδυασμός της υψηλής αντοχής με το χαμηλό βάρος, οι ιδιαίτερα καλές μηχανικές ιδιότητες και η άριστη αντιοξειδωτική του προστασία, έχουν φέρει το τιτάνιο ως το καλύτερο μέταλλο για κρίσιμες εφαρμογές, όπου παρά την πρόσφατη εμπορική του ανάπτυξη, μετά το 1950, έχει γίνει ο βασικός κορμός όλων των ιδιαίτερα απαιτητικών εφαρμογών. [17].

Atomic Number	<b>22</b>	47.90	ATOMIC WEIGHT
Boiling Point 'K	3562	4.3	OXIDATION STATES
Melting Point 'K	1943		
DENSITY at 300' K (g/cm <sup>3</sup> )	4.54	<b>TI</b>	SYMBOL
	TITANIUM	(Ar) 3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>	ELECTRON CONFIGURATION
	NAME		

*Σχήμα 3-1 : Συνοπτική απεικόνιση όλων των βασικών χαρακτηριστικών τιτανίου.*

Έχει χαμηλή πυκνότητα (4,54 g/cm<sup>3</sup>) και μέτρια αντοχή (480 MPa) και μπορεί να καθαριστεί μέχρι 99,9 %.

Το τιτάνιο επεξεργάζεται κύρια με χύτευση ακριβείας λόγω του ότι ως καθαρό υλικό έχει υψηλή ρευστότητα στη τήξη του. Χαρακτηρίζεται ως στοιχείο A (Α φάση), λόγω της εξαγωνικής δομής του κρυστάλλου του, όπου και παραμένει σταθερή μέχρι και τους 883°C. Δεν μπορεί με θερμική επεξεργασία να βελτιώσει τις μηχανικές του ιδιότητες.

Άλλες μορφές επεξεργασίας τιτανίου είναι με κονιομεταλλουργία, όπου χρησιμοποιείται μόνο στην Αεροδιαστημική και πλαστική παραμόρφωση.

Χρησιμοποιείται τέλος για την άριστη αντοχή του σε οξείδωση.

### 3.1.3 Κράματα τιτανίου

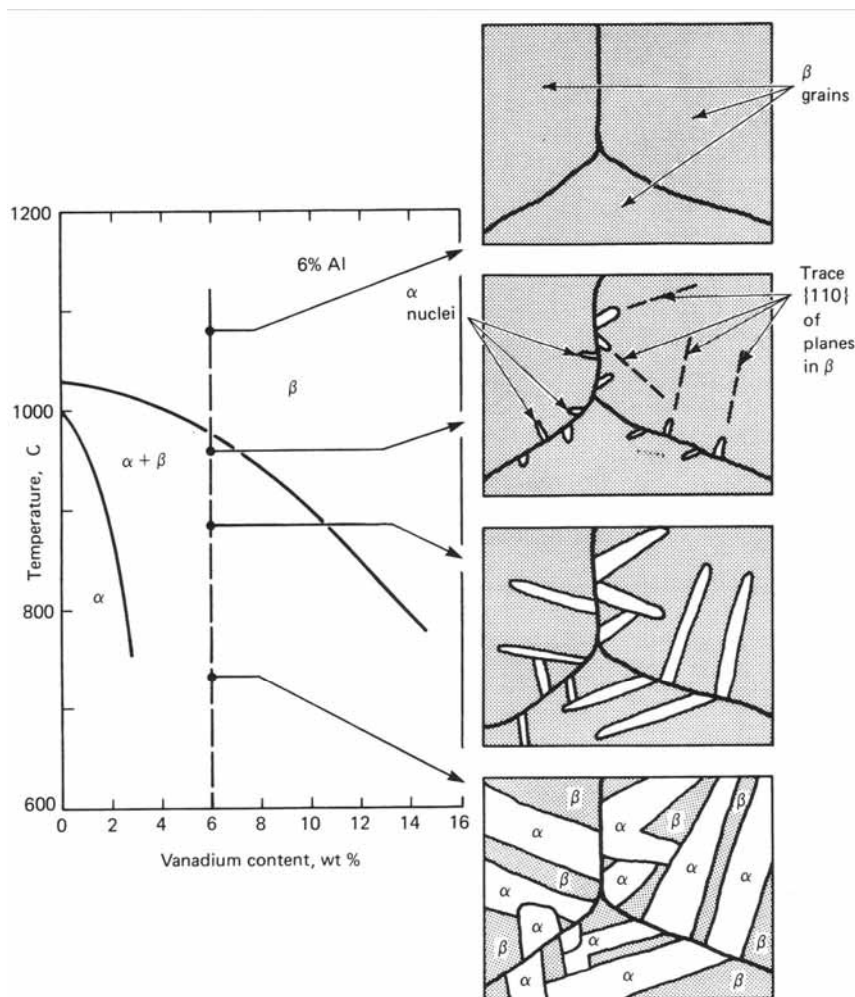
Χαρακτηρίζονται ανάλογα με τη κρυσταλλική τους μορφή σε στοιχεία A (Α Φάση), με εξαγωνική δομή και τα οποία κύρια αποτελούνται από τιτάνιο και Αλουμίνιο ώστε να σταθεροποιείται η φάση A και σε υψηλότερες θερμοκρασίες με τα ανάλογα πλεονεκτήματα (υψηλή αντοχή σε οξείδωση). Το Ζirkόνιο όπως και το Κασσίτερος ενισχύουν την αντοχή σε χρήση των κραμάτων τιτανίου Α φάσης, χωρίς τροποποιήσεις στα χαρακτηριστικά της φάσης. Δεν μπορούν με θερμική επεξεργασία να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητες τους. Έχουν όλα τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του καθαρού τιτανίου, με τις παραπάνω αναφερόμενες τροποποιήσεις.

Αντίστοιχα σε υψηλές θερμοκρασίες τα κράματα τιτανίου αλλάζουν τη κρυσταλλική τους μορφή σε κυβική δομή και ονομάζονται στοιχεία B (Β Φάση), όπου και παραμένουν σταθερά από τους 883 °C έως και τους 1656 °C. Τα κράματα Β Φάσης περιέχουν κυρίως Βανάδιο, Ταντάλιο, Μολυβδαίνιο, Μαγνήσιο, Χαλκό, Σίδηρο και Χρώμιο και σταθεροποιούν τη παραπάνω Φάση και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Μπορεί να ισχυροποιηθεί η Β Φάση με

θερμική κατεργασία. Πλεονεκτήματα παρουσιάζουν κύρια ως προς την αντοχή σε χρήση με μείωση όμως της ικανότητας αντοχής στην οξείδωση. [6].

Τέλος προσθέτοντας στο καθαρό τιτάνιο μικρές ελεγχόμενες ποσότητες στοιχείων που σταθεροποιούν τη Β Φάση (Βανάδιο, Ταντάλιο, Μολυβδαίνιο, Μαγνήσιο, Χαλκός, Σίδηρος, Χρώμιο) παράγονται κράματα δύο φάσεων (Εξαγωνικής και Κυβικής), ονομαζόμενα ως ΑΒ Φάσης. Είναι κράματα ιδιαίτερα υψηλής αντοχής όπου μπορούν να ισχυροποιηθούν περαιτέρω με θερμική επεξεργασία. Σχήμα 3-2.

Έχουν υψηλή αντοχή που μπορεί να φτάσουν και τα 1725 MPa και συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της Α φάσης και της Β φάσης (υψηλή οξειδωτική προστασία, υψηλή αντοχή στη χρήση).



Σχήμα 3-2 : Απεικόνιση μικροδομής φάσεων κράματος τιτανίου. Με αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνονται οι περιοχές Β φάσης σε βάρος της Α φάσης.

Μορφοποιούνται σε θερμό περιβάλλον με θερμοκρασίες χαμηλότερες του Σιδήρου, λόγω της επικινδυνότητας εισχώρησης οξυγόνου στην επιφάνεια του κράματος σε υψηλές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα τη μείωση της αντιοξειδωτικής του προστασίας και την επιφανειακή σκλήρυνση τους.

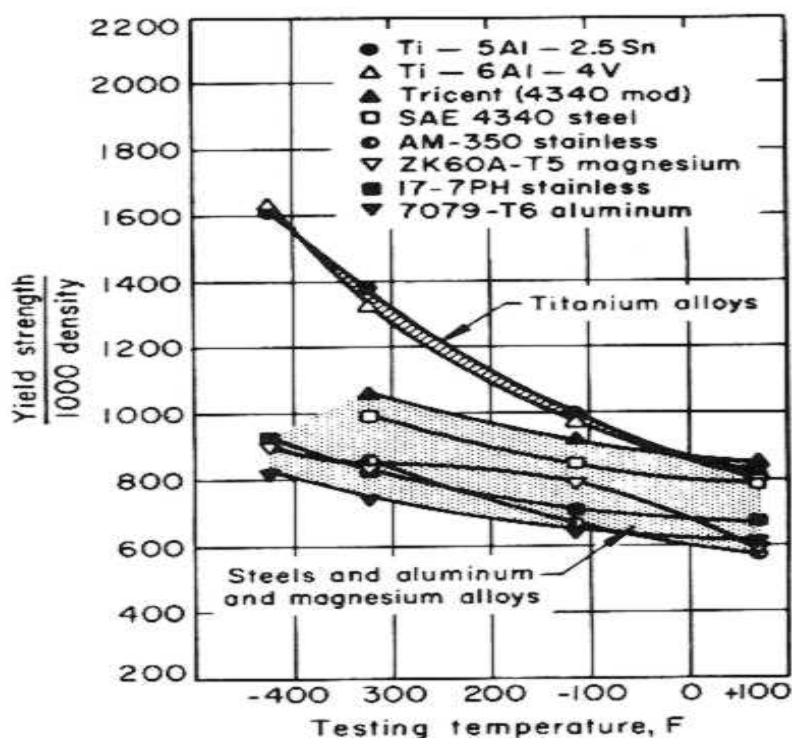
Μορφοποιούνται εν ψυχρώ με δυνάμεις μικρότερες μέχρι και το ένα τρίτο ( $1/3$ ) των δυνάμεων που χρησιμοποιούνται στο Σίδηρο λόγω του φαινομένου της απότομης σκλήρυνσης του κράματος σε απότομα εφαρμοζόμενες και έντονες δυνάμεις.

Στη μηχανική τους επεξεργασία τα κράματα τιτανίου, απαιτούν εργαλεία με πολύ καλής ποιότητας κοπτικές ακμές, διότι εμφανίζουν το φαινόμενο του αλουμινίου, δηλαδή της συσσώρευσης σε μη αιχμηρή ακμή τηγμένων τεμαχίων κράματος που αλλάζουν τα χαρακτηριστικά κοπής (ψευδοκοπή).

Συγκολλούνται με τεχνολογία Πλάσματος ή Αδρανών Αερίων με μη καταναλισκόμενο Ηλεκτρόδιο. Με τη συγκόλληση αυξάνουν την αντοχή τους και τη σκληρότητα τους αλλά μειώνουν την ολκιμότητα τους.

Η επεξεργασία της επιφάνειας τους είναι απαραίτητη κύρια διότι σε θερμό περιβάλλον ενώνονται με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας και δημιουργούν ένα επιφανειακό στρώμα με έντονη σκληρότητα που τροποποιεί τις μηχανικές τους ιδιότητες. Επίσης παρουσιάζουν το φαινόμενο έντονης επιφανειακής φθοράς με τριβή, που αντιμετωπίζεται με ανοδίωση. Τέλος η επιφάνεια των κραμάτων μπορεί να δεχθεί μεταλλική επικάλυψη με ηλεκτρόλυση, εναποθέτοντας Νικέλιο, Χρώμιο, Ζιρκόνιο και Κάδμιο, για την βελτίωση των μηχανολογικών χαρακτηριστικών της. [23].

Τα κράματα του τιτανίου αυξάνουν τη σκληρότητα τους κατά τη διάρκεια μορφοποίησής τους. Εμφανίζουν έντονη πλαστική παραμόρφωση γύρω από τους  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , με πιο έντονα στοιχεία παραμόρφωσης το  $\text{Ti6Al4V}$ . [19].



Σχήμα 3-3 : Απεικόνιση διαγράμματος αντοχής – θερμοκρασίας κραμάτων τιτανίου.

### 3.1.4 Ti6Al4V – Κράμα τιτανίου

Ανήκει στα κράματα AB Φάσης.

Περιέχει κατά αναλογία 89,55 % έως 90 % τιτάνιο (Ti), 5,5 – 6,75 % Αλουμίνιο (Al), 3,5 – 4,5 % Βανάδιο (V), 0,25 % μέγιστο Σίδηρο (Fe) και 0,2 % μέγιστο Οξυγόνο (O). [20]

Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι :

- Πυκνότητα 4,43 g/cc,
- Σκληρότητα κατά Brinell 334,
- Αντοχή σε Εφελκυσμό 950 MPa,
- Αντοχή σε Κόπωση 240 MPa στους 10.000.000 κύκλους.
- Μέτρο Ελαστικότητας 113,80 GPa,
- Επμήκυνση κατά τη θραύση 14 %,
- Μείωση διατομής κατά τη θραύση 36 %,
- Θερμοκρασιακή Διαστολή  $8,6 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία μετατροπής από Στερεό σε Υγρό 1604 – 1660  $^\circ\text{C}$ ,
- Θερμοκρασία μετατροπής από AB σε B Φάση 980  $^\circ\text{C}$ .

[23], [70].

Είναι ιδιαίτερα ανεκτό σε πολύπλοκες διαδικασίες επεξεργασίας και έχει ανώτατο όριο σκληρότητας. Χρησιμοποιείται κύρια στην ανοπτημένη του μορφή, για την μείωση των εναπομενουσών τάσεων κατά την διαδικασία μορφοποίησης του, την αύξηση της αντοχής του, όπως επίσης για την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ ολκιμότητας, κατεργασιμότητας και δομικής σταθερότητας καθώς και αύξησης αντοχής σε κόπωση και γήρανση.

Παρουσιάζει χαμηλό δείκτη διαστολής σε αύξηση θερμοκρασίας, όπως και είναι μη μαγνητικό.

Οι μορφές των δοκιμών κράματος τιτανίου Ti6Al4V, έχουν κωδικοποιηθεί από τον διεθνή αναγνωρισμένο Οργανισμό American Society for Testing and Materials (ASTM), σύμφωνα με την παρακάτω σήμανση :

- B 265, Grade 5 - Έλασμα, φύλλο
- B 348, Grade 5 - Ράβδος
- B 363, Grade WPT 23 - Συγκολλημένο Εξάρτημα
- B 363, Grade WPT 24 - Συγκολλημένο Εξάρτημα
- B 367, Grade C-5 - Χυτό Εξάρτημα
- B 381, Grade 5 - Εξάρτημα διαμορφωμένο στη Πρέσα
- B 861, Grade 5 - Σωλήνα χωρίς Ραφή

- ο B 862, Grade 5 - Σωλήνας με Ραφή
- ο B 863, Grade 5 - Σύρμα
- ο F 136, Grade 5 - Ιατρικής Εφαρμογής
- ο F 467, Grade 5 - Περικόχλιο
- ο F 468, Grade 5 - Κοχλίας

[16].

Άλλες κωδικοποιήσεις είναι :

- Κατά DIN 17850

DIN 3.7165 Grade 5.

- Κατά AMS

AMS 4907, 4911, 4928, 4930, 4931, 4935, 4956, 4965, 4967, 4985, 4991.

- Κατά BSTA

BSTA 10, 11, 12, 28, 56, 59.

- Κατά MIL

MIL –T-9046, -T-9047.

- Κατά ISO

ISO 5832-3.

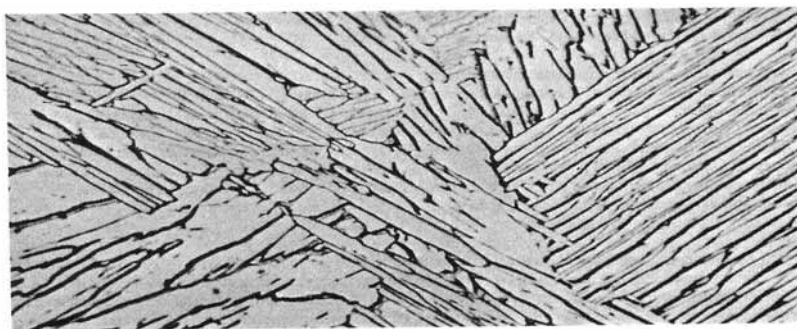
- Κατά UNS

UNS R56400 Grade5, R56403 Grade 25, R56404 Grade 29, R56405 Grade 24.

[10], [21].

Η διαφορά μεταξύ των κράματος Grade 5 και Grade WPT 23, οφείλεται στη μείωση της περιεκτικότητας Οξυγόνου στο δεύτερο σε 0,13 % μέγιστο, που προκαλεί αυξημένη ολκιμότητα, και αυξάνει την σκληρότητα με μικρή μείωση στην αντοχή.

Αντίστοιχα η διαφορά μεταξύ των κράματος Grade WPT 23 και Grade WPT 24, οφείλεται στη πρόσθεση Παλλαδίου στο δεύτερο σε 0,05 % μέγιστο, που προκαλεί αυξημένη αντοχή στην οξείδωση. [12].



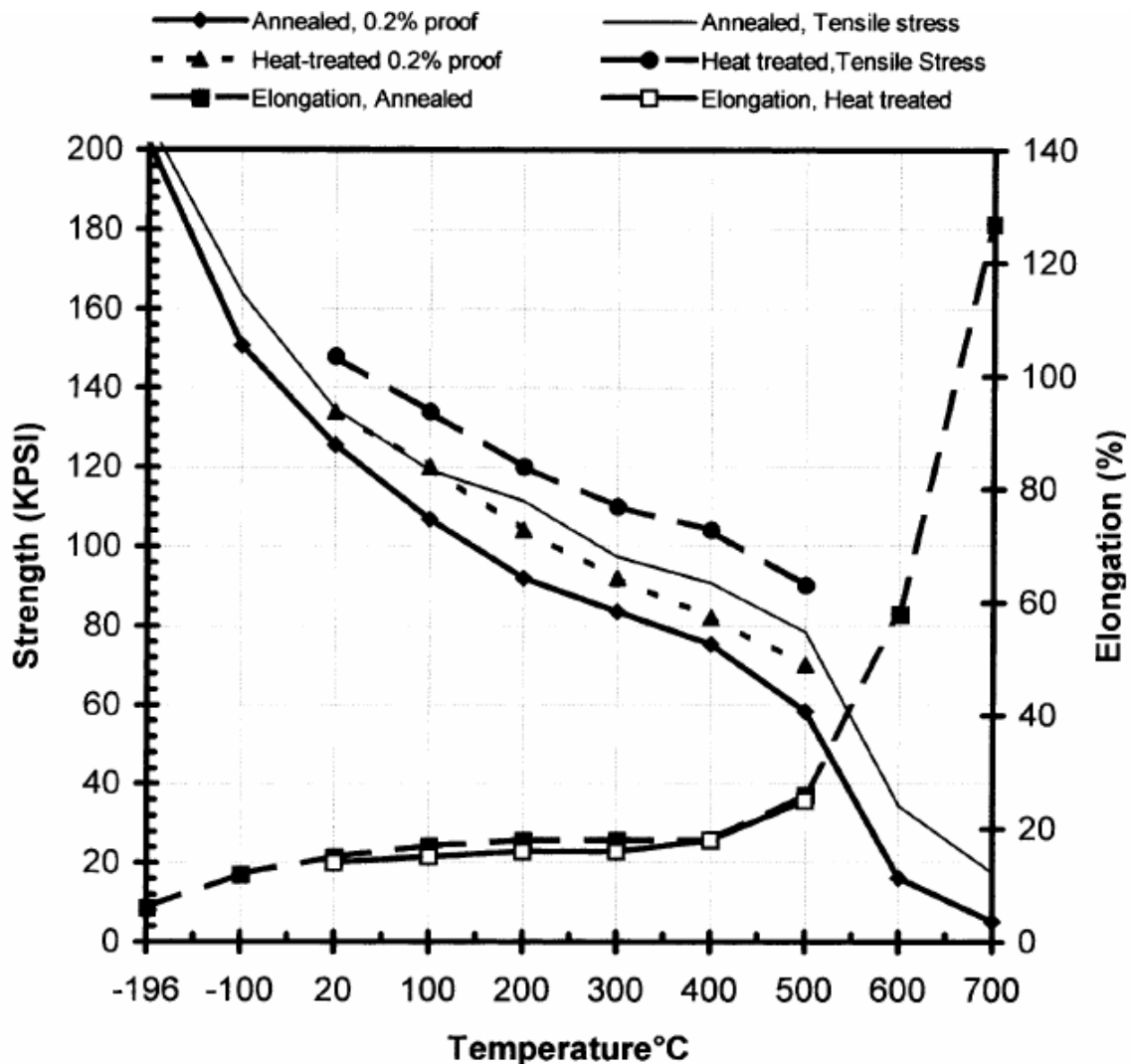
Σχήμα 3-4 : Απεικόνιση μικροδομής ανοπτημένου κράματος Ti6Al4V τιτανίου.



Κατεργάζεται εν' θερμώ σε πιο υψηλές θερμοκρασίες από τα περισσότερα άλλα κράματα τιτανίου. Βρίσκεται σε οποιαδήποτε μορφή (Ράβδος, Φύλλο), λόγω της εν' ψυχρώ εύκολης μορφοποίησης του.

Στη μηχανική τους επεξεργασία όπως και όλα τα κράματα τιτανίου, απαιτεί εργαλεία με πολύ καλής ποιότητας κοπτικές ακμές και συγκολλάτε με τεχνολογία πλάσματος ή αδρανών αερίων με μη καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο.

Έχει ιδιαίτερα άριστη απόδοση ως βίο-αποδεκτό υλικό και η ιδιαίτερα υψηλή αντοχή του σε κόπωση το κατατάσσουν στη κορυφή των υλικών προς εμφύτευση στο ανθρώπινο σώμα. [20].



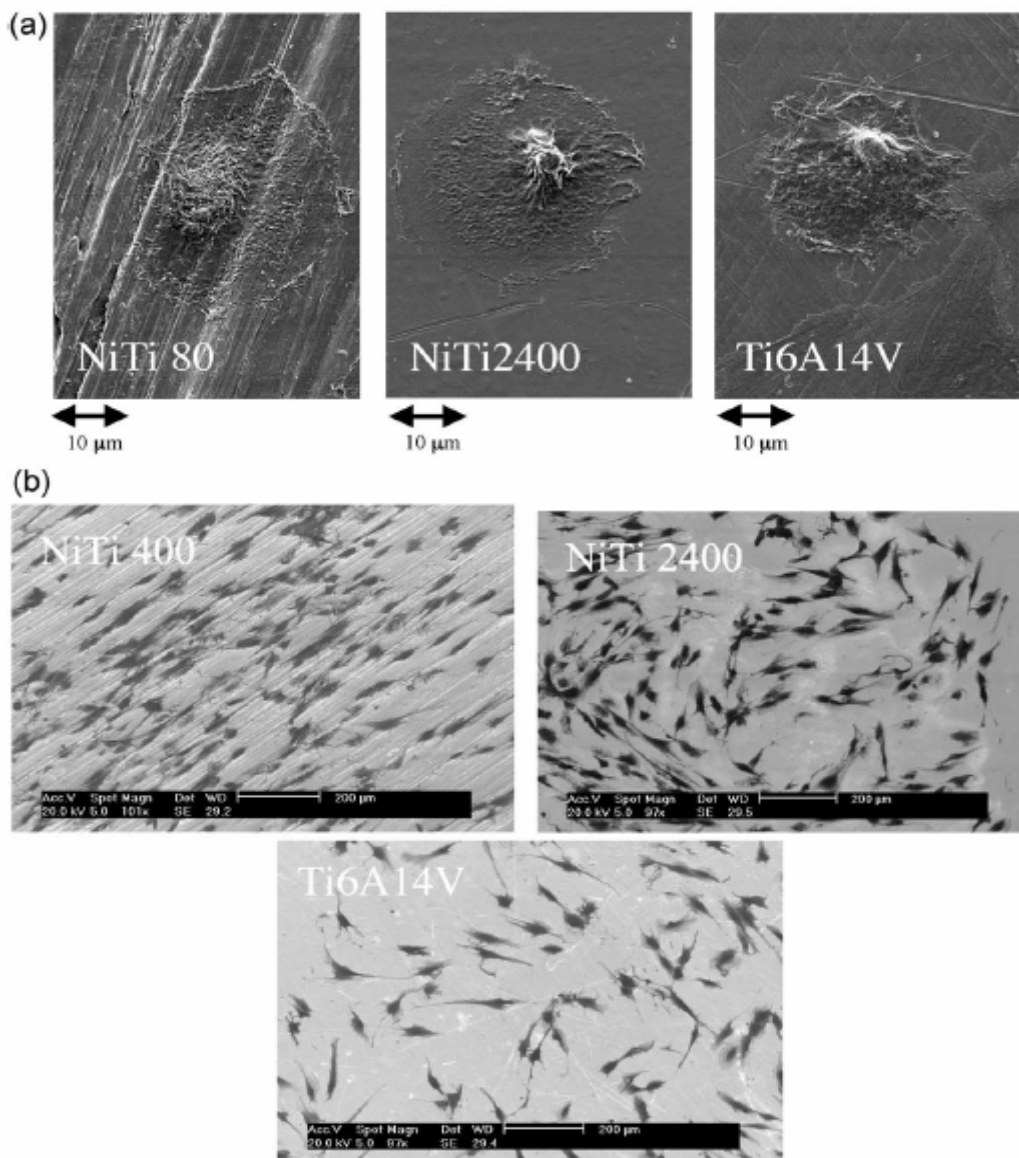
Σχήμα 3-5 : Απεικόνιση διαγράμματος αντοχής & επιμήκυνσης – θερμοκρασίας Ti6Al4V.

### 3.1.5 Τραχύτητα επιφανείας βιο-αποδεκτού Ti6Al4V κράματος τιτανίου

Η τραχύτητα επιφανείας του υπό μελέτη κράματος τιτανίου έχει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην βιο-αποδοχή και την ανάπτυξη των μυϊκών ιστών επάνω στο τεχνητό μέλος.

Δύο είναι οι σημαντικοί παράγοντες που κρίνουν τη αποδοχή του. Αρχικά η δυνατότητα και ταχύτητα πολλαπλασιασμού των ιστών και στη συνέχεια η ικανοποιητική προσκόλληση αυτών επάνω στο τεχνητό μέλος. Και οι δύο παράγοντες επηρεάζονται άμεσα από την τραχύτητα επιφανείας του κράματος τιτανίου.

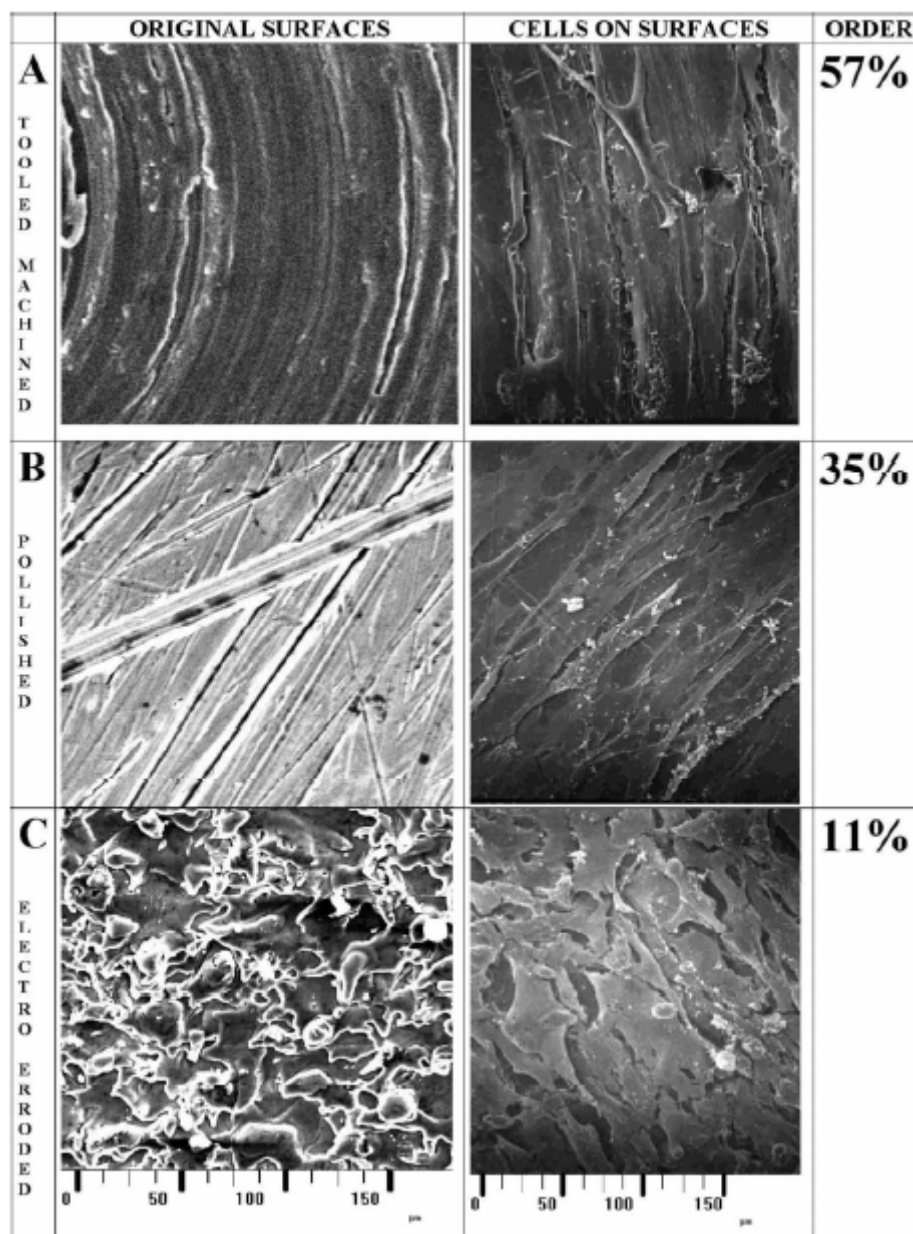
Κατόπιν ιατρικών μελετών έχει αποδειχθεί ότι οι μυϊκοί ιστοί απλώνονται και πολλαπλασιάζονται περισσότερο σε λείες επιφάνειες από ότι σε πιο τραχύς. Όσο πιο τραχιά είναι η επιφάνεια τόσο μειώνεται ο πολλαπλασιασμός των ιστών και οι οποίοι επηρεάζονται από τις ραβδώσεις που συνήθως δημιουργούνται σε τραχύς επιφάνειες, όπου και παίρνουν ανάλογη κατεύθυνση. Σχήμα 3-6.



Σχήμα 3-6 : Ανάπτυξη μυϊκών ιστών και κατεύθυνση τους. [62].

Αντίθετα σε μερικώς έως αρκετά τραχύς επιφάνειες η προσκόλληση των μυϊκών ιστών είναι ιδιαίτερα καλή αντίθετα όμως με τον πολλαπλασιασμό τους ο οποίος είναι αρκετά αργός. Όμως σε χαστικές επιφάνειες δηλαδή με έντονη τραχύτητα και χωρίς συγκεκριμένη κατεύθυνση αυτής το αποτέλεσμα ανάπτυξης των ιστών (πολλαπλασιασμός και προσκόλληση) είναι φτωχό. *Σχήμα 3-7.*

Γενικότερα από πειραματικές έρευνες αποδεικνύεται ότι είναι καλύτερα μία επιφάνεια να είναι τραχιά διότι παρόλο που έχουμε αργή ανάπτυξη ιστών αυτοί έχουν μεγαλύτερη δυναμικότητα. [58], [63], [64].



*Σχήμα 3-7 : Μορφές επιφανειών κράματος τιτανίου πριν και μετά την ανάπτυξη μυϊκών ιστών. [64].*

Σε ορισμένες ειδικά περιπτώσεις για να επιτύχουν την επιθυμητή τραχύτητα επιφανείας, καλύπτουν ψεκάζοντας με τη μορφή λεπτών σταγονιδίων την επιφάνεια του κράματος τιτανίου

με τηγμένο τιτάνιο δημιουργώντας μια τεχνητά ελεγχόμενη τραχύτητα στην επιφάνεια του μετάλλου για την καλύτερη πρόσφυση και γενικότερα ανάπτυξη των μυϊκών ιστών. [8]

Μελέτες τραχύτητας για την ανάπτυξη ιστών σε δοκίμια κραμάτων τιτανίου μορφωμένα από διαφορετικές μηχανουργικές κατεργασίες δεν έχουν γίνει. Έχει μόνο συγκριθεί η τραχύτητα και στη συνέχεια η ανάπτυξη των μυϊκών ιστών σε λείες και τραχιές επιφάνειες, όπως και επιφάνειες με διαφορετική χημική σύσταση. [1], [9], [51], [53], [56], [57], [59], [60], [61], [62], [65], [70].

### 3.1.6 Τεχνολογία κατασκευής τεχνητών μελών

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες γίνεται μία συστηματική προσπάθεια να αξιοποιηθούν οι άριστες βιολογικές ιδιότητες του τιτανίου, που σε συνάρτηση με τις καλές μηχανικές του ιδιότητες, αποτελούν το υλικό επιλογής για πάμπολλες χρήσεις στην Ιατρική.

Στη Ελλάδα η μεγάλη προσπάθεια επικεντρώνεται στην οδοντική προσθετική σαν χυτεύσιμο υλικό για την κατασκευή των σκελετών των στεφανών, γεφυρών και των μερικών οδοντοστοιχιών. Δυστυχώς, τα συγκριτικά πλεονεκτήματα και η ευκολία κατασκευής μηχανικά κατεργασμένων προϊόντων από τιτάνιο, όπως π.χ. τα οδοντικά εμφυτεύματα, έχουν δυσκολέψει στην περίπτωση του χυτεύσιμου υλικού. Αυτό οφείλεται στο υψηλό σημείο τήξης και στη μεγάλη τάση του υλικού να σχηματίζει ενώσεις, κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες, με ένα σύνολο στοιχείων, όπως το οξυγόνο, το πυρίτιο και άλλα. Τέλος, η δυσκολία να επιτευχθεί συμπαγές χυτό (χωρίς εσωτερικό πορώδες) σε σταθερή επαναλαμβανόμενη βάση, επιβάλλει σε όλα τα εργαστήρια που έχουν εντάξει το τιτάνιο μέσα στο παραγωγικό τους οπλοστάσιο, να διαθέτουν συσκευές ακτίνων X για τον έλεγχο του πορώδους των χυτών τους. [5].

Τα τελευταία χρόνια έχει επίσης αναπτυχθεί στη Ελλάδα η χειρουργική επέμβαση με ενδομυελικές ράβδους (rodding) που αφορά την εσωτερική «ενίσχυση» των μακρών οστών με τη βοήθεια της εισαγωγής μιας μεταλλικής ράβδου. Η επέμβαση rodding συχνότερα χρησιμοποιείται για να βοηθήσει παιδιά μέτριας ή σοβαρής μορφής ατελούς οστεογένεσης (osteogenesis imperfecta, OI). Οι έφηβοι και οι ενήλικοι υποβάλλονται σε αυτήν ή οποιαδήποτε άλλη χειρουργική επέμβαση σε περιπτώσεις συνήθως δύσκολων καταγμάτων που δεν είναι θεραπεύονται ικανοποιητικά ή παρουσιάζουν προβλήματα παραμόρφωσης. Οι παραπάνω μεταλλικές ράβδοι κράματος τιτανίου μορφοποιούνται μηχανικά. [7].

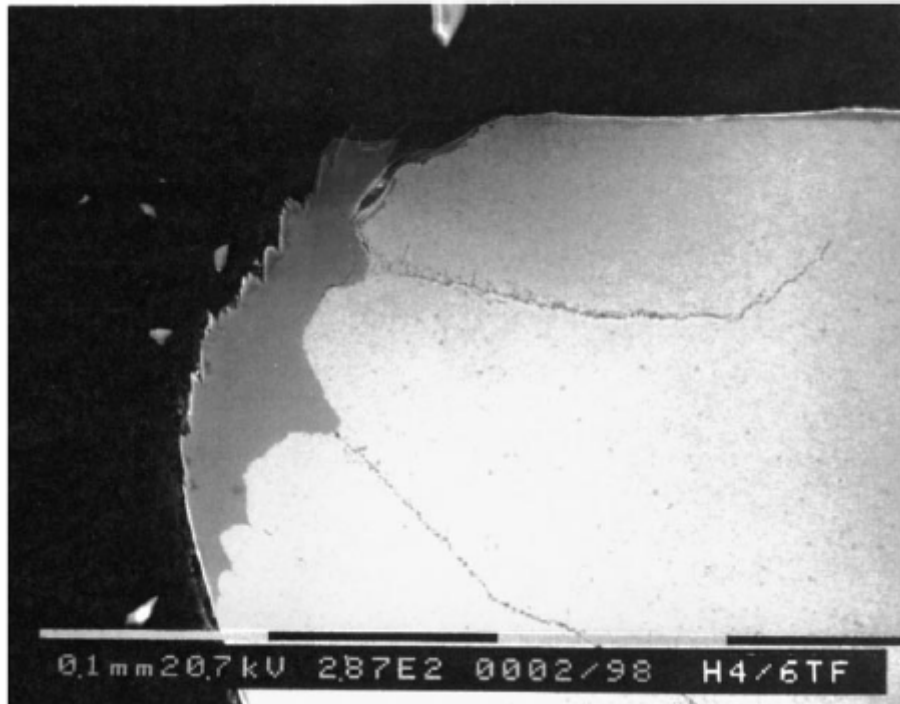
Τέλος εισάγονται εμφυτεύματα γόνατος, όπως και κνημιαία τμήματα από κράμα τιτανίου Ti6Al4V, προεκτάσεις στυελού και βίδες, τα οποία και αυτά κατασκευάζονται κύρια με μηχανουργική κατεργασία. [4].

### 3.1.7 Τεχνολογία Κοπτικών Εργαλείων

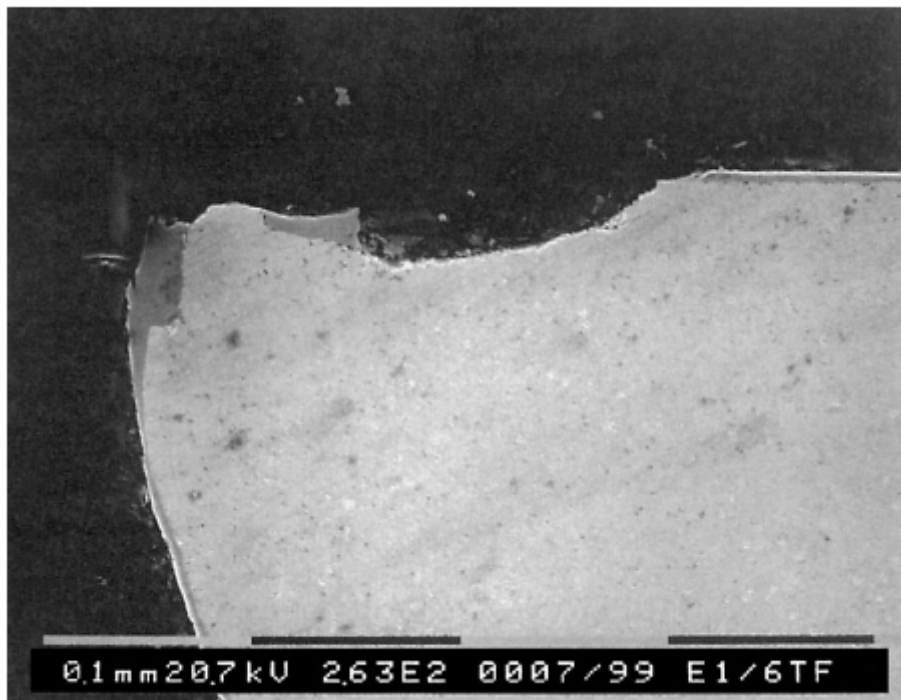
Το τιτάνιο, όπως και τα κράματα του έχουν χαρακτηριστεί ως υλικά δύσκολα για κατεργασία. Οι πρώτες προσπάθειες μηχανουργικής κατεργασίας του τιτανίου ξεκίνησαν το 1950 στην Αμερική στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης και στη συνέχεια στη Γαλλία. [38].

Τα κύρια προβλήματα που υφίστανται κατά την κατεργασία είναι η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών και η ταχεία φθορά του κοπτικού εργαλείου. Τα περισσότερα κοπτικά εργαλεία φθείρονται ιδιαίτερα γρήγορα ακόμα και σε ταχύτητες κοπής μικρότερες του 1 m/s. Ειδικότερα τα χαρακτηριστικά κατεργασίας του τιτανίου και των κραμάτων του επικεντρώνονται στα παρακάτω :

- Παρουσιάζουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Αποτέλεσμα της χαμηλής απαγωγής της θερμοκρασίας είναι η φθορά της κοπτικής ακμής και της επιφάνειας του κατεργαζόμενου δοκιμίου.
- Παρουσιάζουν υψηλή χημική αντίδραση με τα συνήθη υλικά των κοπτικών εργαλείων που εντείνονται με την υψηλή θερμοκρασία. Αυτό οδηγεί σε εκδορές και τήξη της κοπτικής ακμής με αποτέλεσμα την γρήγορη φθορά έως και την αποτυχία κοπής.
- Παρουσιάζουν το φαινόμενο της πλαστικής παραμόρφωσης της επιφάνειας κοπής με αποτέλεσμα την ανομοιόμορφη κοπή και την ανώμαλη τελική επιφάνεια κατεργασίας. Επίσης η ανομοιόμορφη κοπή προκαλεί και ανάλογες ανομοιόμορφα κατανομημένες δυνάμεις με επακόλουθο την ταλάντωση του κοπτικού εργαλείου και την ανώμαλη όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τελική επιφάνεια κατεργασίας.
- Η επιφάνεια επαφής του κοπτικού εργαλείου και του δοκιμίου προς επεξεργασία είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα την τοπική συγκέντρωση της θερμοκρασίας και την δύναμης κοπής με επακόλουθο τη γρήγορη θραύση της.
- Τέλος τεμάχια υπό κατεργασία μετάλλου τήκονται και επικάθονται στη κοπτική ακμή και αλλοιώνουν έως καταστρέφουν τα χαρακτηριστικά κοπής. Επίσης προκαλούν έντονες φορτίσεις στην κοπτική ακμή με επακόλουθο τη θραύση της. Σχήμα 3-7, Σχήμα 3-8.



*Σχήμα 3-8 : Επικαθίσεις τηγμένου μετάλλου επάνω στο κοπτικό εργαλείο, πλαστική παραμόρφωση του, όπως και έντονες ρηγματώσεις της κοπτικής ακμής του. [49].*

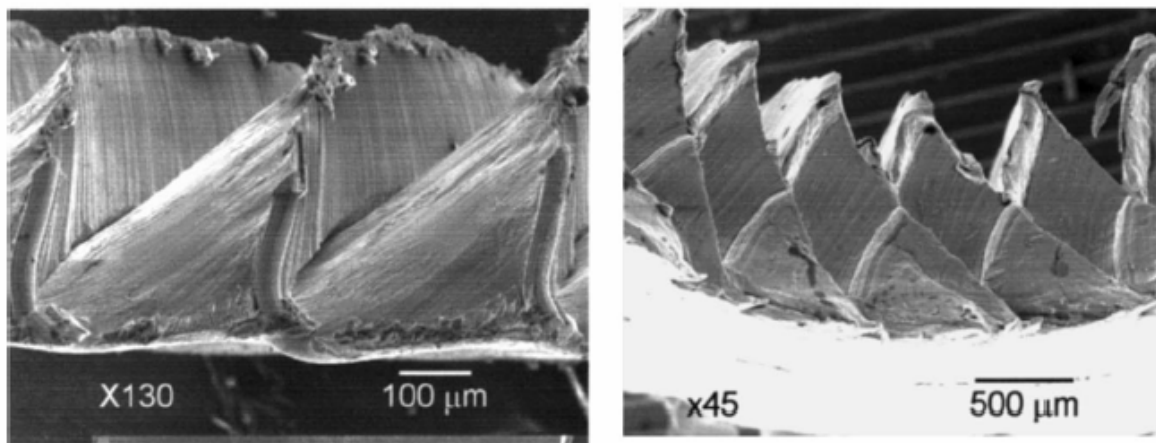


*Σχήμα 3-9 : Επικαθίσεις τηγμένου μετάλλου επάνω στο κοπτικό εργαλείο και αποφλοίωση της κοπτικής ακμής του. [38].*

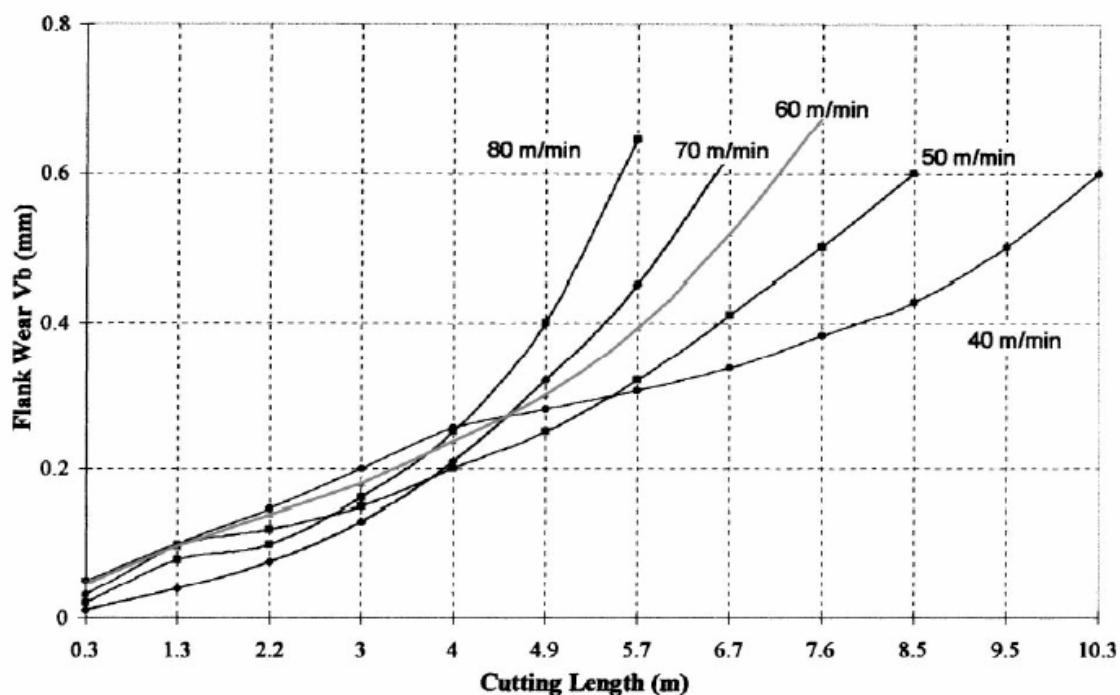
Με βελτιώσεις στα υλικά των κοπτικών εργαλείων δύναται η κατεργασία στα κράματα τιτανίου σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ή σε ταχύτερο ρυθμό αφαίρεσης υλικού. [40], [50].

Δυστυχώς όμως καμία βελτίωση δεν εξαλείφει τα παραπάνω προβλήματα κύρια λόγω της χημικής αντίδρασης των κατεργαζόμενων υλικών με το τιτάνιο συνεπικουρούμενη και με την υψηλή θερμοκρασία. [14], [41].

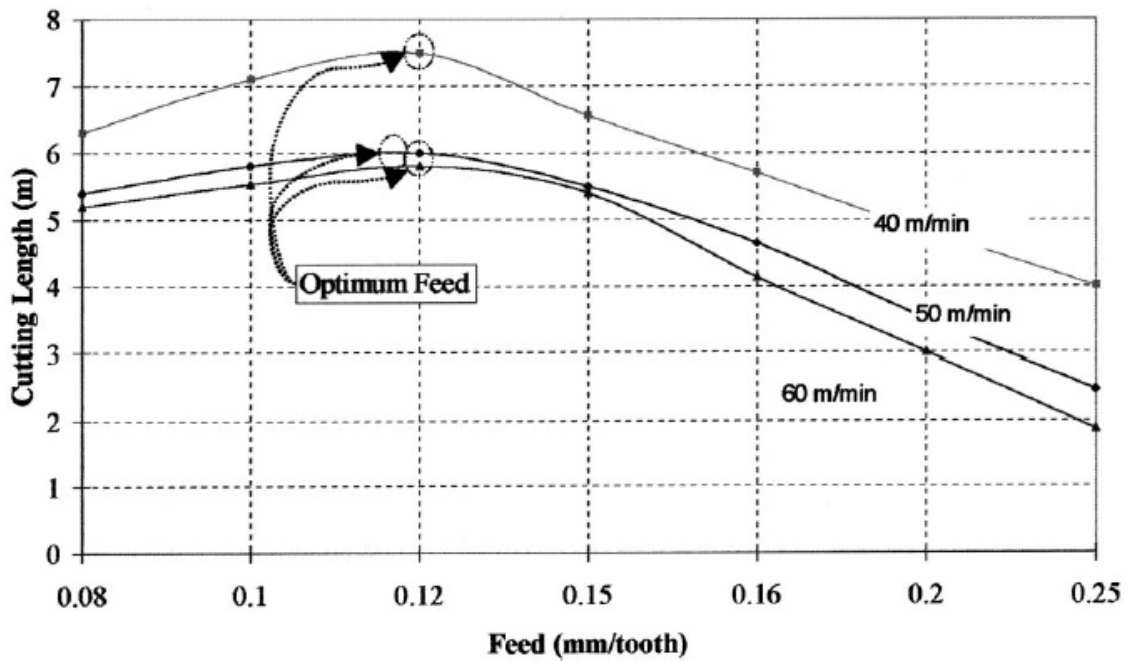
Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν σκληρομέταλλα (ποιότητα K10) χαμηλού κόστους αγοράς, με έντονο το φαινόμενο της προσκόλλησης τηγμένου μετάλλου στη κοπτική ακμή και θρυμματιζόμενο απόβλητο με υψηλή δόνηση. [39].



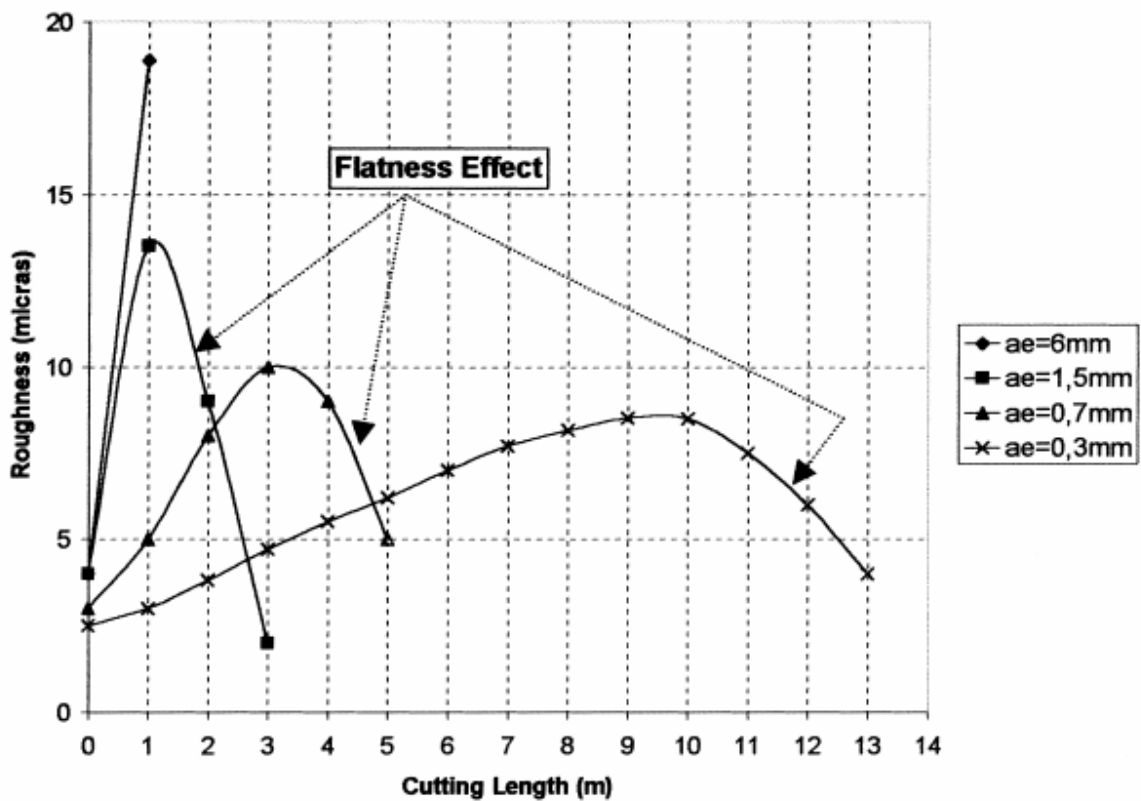
Σχήμα 3-10 : Θρυμματισμένα υπολείμματα κοπής από έντονη ταλάντωση κοπτικού εργαλείου σκληρομέταλλου σε ταχύτητες κοπής 80 m/min & 140 m/min . [38].



Σχήμα 3-11 : Επηρεασμός της ταχύτητα και του μήκους κοπής σε σχέση με τη φθορά του σκληρομέταλλου ως κοπτικού εργαλείου. [38].



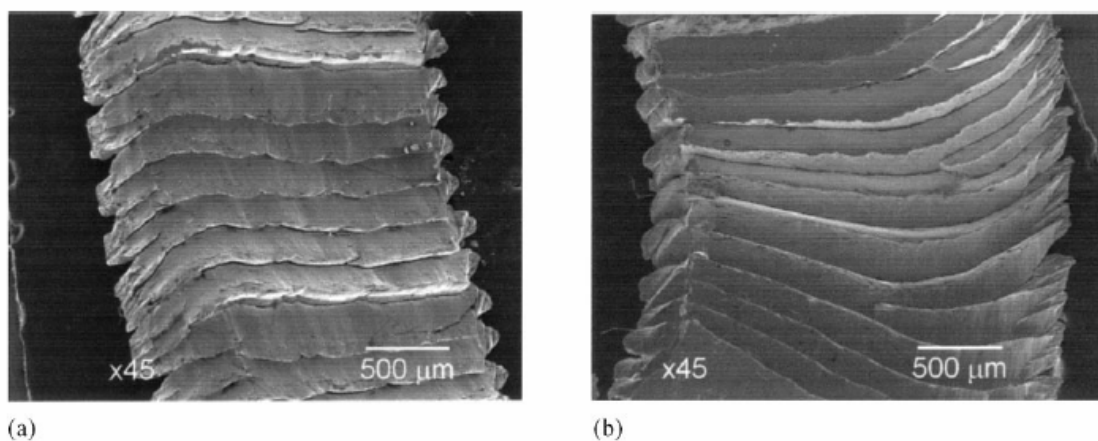
Σχήμα 3-12 : Επηρεασμός της πρόωσης στη φθορά του σκληρομετάλλου ως κοπτικού εργαλείου. [38].



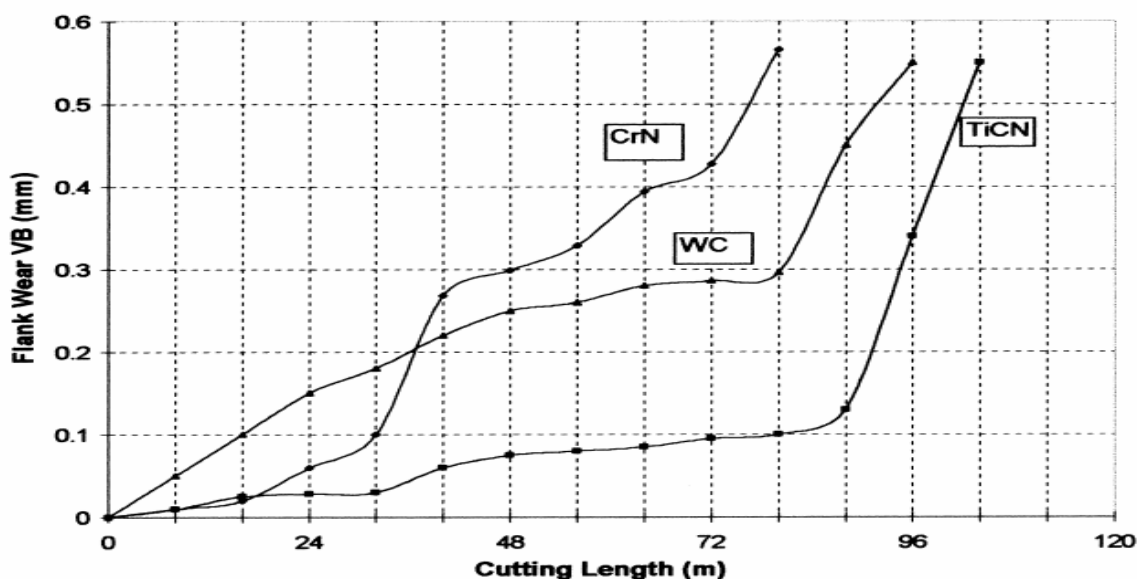
Σχήμα 3-13 : Επηρεασμός της τραχύτητας ανάλογα με τη πρόωση για σκληρομέταλλο ως κοπτικό εργαλείο. [38].



Για μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογών και υψηλότερη αντοχή επιστρώθηκαν τα κοπτικά εργαλεία με καρβίδια συνήθως τιτανίου ή νιτρίδια τιτανίου – αλουμινίου που ουσιαστικά δρουν ως προστασία στη χημική αντίδραση που συνήθως αναπτύσσεται. Ταυτόχρονα ανεβάζουν το κόστος απόκτησης των κοπτικών εργαλείων, χωρίς όμως να εξαλείφονται τα παραπάνω προβλήματα. Χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες που εξαρτώνται από το είδος της επικάλυψης και ονομάζονται PVD και CVD. Μειώνουν το συντελεστή τριβής της κοπτικής ακμής με το κατεργαζόμενο μέταλλο με επακόλουθο τη μειωμένη προσκόλληση τηγμένου μετάλλου στην κοπτική ακμή. Τέλος βοηθούν τη κοπτική ακμή να κρατά τα χαρακτηριστικά της σε υψηλές θερμοκρασίες και να μην υπάρχει ελαστική παραμόρφωση αυτής. [49].



Σχήμα 3-14 : Θρυμματισμένα υπολείμματα κοπής από ταλάντωση του επικαλυμμένου κοπτικού εργαλείου, Στο δεύτερο σχήμα η κυρτότητα του απόβλητου οφείλεται σε επικαθίσεις τηγμένου μετάλλου στη κοπτική ακμή όπου και τη μετατρέπουν από μύτη σε καμπύλη. [38].



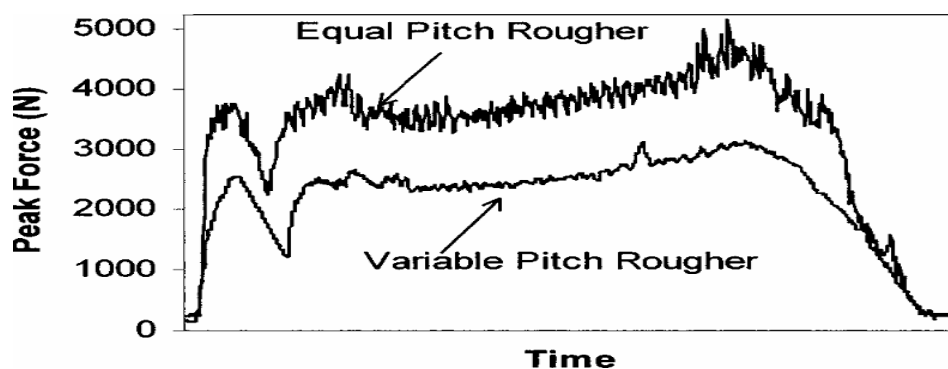
Σχήμα 3-15 : Επηρεασμός της επικάλυψης και του μήκους κοπής σε σχέση με τη φθορά του επικαλυμμένου κοπτικού εργαλείου. [38].

Με την εξέλιξη των εργαλείων αναπτύχθηκαν κοπτικά εργαλεία με επέμβαση στη δομή τους, προσθέτοντας κύρια τιτάνιο και καρβίδια τιτανίου, όπου και ονομάζονται Cement και Cement Carbides. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η υψηλή σκληρότητα χωρίς να έχουν βρει ιδιαίτερα ευρεία εφαρμογή. Ειδικότερα έχουν μελετηθεί τα επονομαζόμενα CBN κοπτικά εργαλεία (Κυβικά Νιτρίδια Βορίου), όπου μπορούν να κατεργαστούν κράματα τιτανίου σε υψηλές ταχύτητες, με καλή τελική επιφάνεια έτοιμου δοκιμίου. [45], [48].

Τέλος μία από τις σημαντικότερες και σύγχρονες κατεργασίες της επιφάνειας των υλικών είναι η επίστρωσή τους με κεραμική επικάλυψη. Η υψηλή σκληρότητα, η χημική αδράνεια και η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των κεραμικών υλικών, καθιστούν τις κεραμικές επικαλύψεις ικανές να προστατεύσουν τα υλικά που αποτελούν το υπόστρωμα, από διάβρωση και φθορά ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως θερμικά φράγματα. Επικαλύψεις όπως, TiC, TiN, TiAlN, WC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> και άνθρακας τύπου διαμαντιού (DLC), επιδεικνύουν κατά περίπτωση εξαιρετική σταθερότητα απέναντι σε μηχανική καταπόνηση και χημική ή θερμική προσβολή. Ως εκ τούτου, εξαρτήματα επικαλυμμένα με τα ως άνω υλικά παρουσιάζουν αυξημένο "χρόνο ζωής" και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περισσότερες δύσκολες συνθήκες εργασίας. [42], [43], [44].

Μικρή βελτίωση στη διεργασία κοπής χωρίς επεμβάσεις στη δομή ή στην επικάλυψη των κοπτικών εργαλείων έχει γίνει με κατάλληλη ψύξη των κοπτικών ακμών. Χρησιμοποιείται υγρό Άζωτο (N<sub>2</sub>) , το οποίο ψεκάζεται με πίεση 11 bar, ώστε όχι μόνο να ψύχει την επιφάνεια κοπής αλλά και με την πίεση να μειώνει το φαινόμενο της προσκόλλησης τηγμένων σωματιδίων κατεργασμένου μετάλλου στην κοπτική ακμή. [50]

Από τα παραπάνω προβλήματα που παρουσιάζονται πρόσφατα μπόρεσαν οι ερευνητές να μειώσουν το φαινόμενο της ταλάντωσης του κοπτικού εργαλείου, χωρίς να επέμβουν στη δομή του. Τοποθέτησαν τις κοπτικές ακμές των εργαλείων κοπής ανομοιόμορφα ώστε να μην υφίσταται το φαινόμενο του συντονισμού με επακόλουθο τη κόπωση και θραύση της κοπτικής ακμής του και την τραχιά τελική επιφάνεια. Έτσι αυξήθηκε η παραγωγικότητα με ταυτόχρονη βελτίωση της επιφάνειας κατεργασίας. [36].



Σχήμα 3-16 : Σύγκριση της δύναμης κοπής σε σχέση με το χρόνο για ομοιόμορφα και ανομοιόμορφα τοποθετημένες κοπτικές ακμές κοπτικού εργαλείου Φρέζας, κατά τη κατεργασία κράματος Τιτανίου. [36].

## 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### Εργαλειομηχανές, κοπτικά εργαλεία και μηχανουργικές κατεργασίες.

#### 4.1 Εξέλιξη της Έρευνας

Το σύνολο της ερευνητικής δραστηριότητας αναπτύσσεται στο χώρο του Διατμηματικού Εργαστηρίου Εργαλειομηχανών (ΔΙ.Ε.ΕΡΓΑ.) στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Ο παραπάνω χώρος πέραν του υπόλοιπου εξοπλισμού περιλαμβάνει τόνους ποικίλων δυναμικοτήτων, όπως και φρέζες οριζόντιας και κάθετης διαμόρφωσης.

#### 4.2 Υλικό

Έγινε αγορά ράβδων σε κυλινδρική μορφή, όπου και χορηγήθηκαν από την προμηθεύτρια εταιρεία τα κατάλληλα πιστοποιητικά για τη διαπίστευση του υλικού.

# MATERIAL CERTIFICATE

ACCORDING TO EN 10204 3.1B

NO: 6464

DATE: 24/11/2004

Customer:		Purchase order:	74014
Product:	ROUND BARS 82 MM	Weight in kg:	48
Specification:	ASTM B348 TITANIUM GR5	Condition:	Annealed
Finish:	Annealed and machined	Random lengths:	R/L

CHEMICAL ANALYSIS %										
Requirement ASTM B348 Ti GR 5:	Al	V	C max	Fe max	H max	N max	O max	Ti	Res Each Max<0.1	Res Total Max<0.4
Heat/ Batch: AB15682	5.5-6.75	3.5-4.5	0.08	0.4	0.015	0.05	0.20			
	6.45	4.18	0.017	0.21	0.003	0.001	0.2	Bal	<0.1	<0.4

MECHANICAL PROPERTIES (ASTM E8)					
Requirement ASTM B348 Ti GR 5:	Tensile Strength (ksi)	Yield Strength (ksi) 0.2%	Elongation % Min 10	Red. of area % Min 25	Hardness (Average)
Heat/ Batch: AB15682	min 130	min 120			
	145.9	133.3	14	35.4	

VISUAL INSPECTION			NON-DESTRUCTIVE TESTS		
Heat/ Batch:	Surface	Dimensional	Straightness	Ultrasonic UTS	Dye penetrant
AB15682	Passed	Passed	Passed	N/A	N/A

Certified that, unless otherwise stated, the whole of the above mentioned materials have been manufactured, tested, and inspected within the terms of the contract/ order applicable thereto and fully conform to the standard/specifications quoted hereon, and requirements of the GMT Norway as. The documents are available at GMT's quality control department upon request.

Note:

Date 24/11-04

GMT  
Sign: *A. Austen*  
Q.C. Manager

GMT Q.A Manager

Σχήμα 4-1 :Πιστοποιητικό διαπίστευσης κράματος τιτανίου.

Το υπό επεξεργασία κράμα περιέχει 6,45 % Al (Αλουμίνιο) με ελάχιστη και μέγιστη τιμή 5,5 % και 6,75 % αντίστοιχα, όπως επίσης και 4,18 % V(Βανάδιο) με ελάχιστη και μέγιστη τιμή 3,5 % και 4,5 % αντίστοιχα. Επίσης περιέχει 0,017 % C (Ανθρακα), 0,21 % Fe (Σίδηρο), 0,001 % N (Αζωτο), 0,003 % H (Υδρογόνο) και 0,2 % Οξυγόνο.

Είναι ανοπτημένο (θερμική επεξεργασία), έχει υποστεί μια πρώτη μηχανουργική επεξεργασία για τη μορφοποίηση του σε κυλίνδρους τυποποιημένης διατομής σε εργαλειομηχανή και έχει αντοχή σε εφελκυσμό 145,9 ksi (1066 MPa), αντοχή σε κόπωση 133,3 ksi (976 MPa) στους 10.000.000 κύκλους, επιμήκυνση στη θραύση 14 % και σμίκρυνση της διατομής του κατά τη θραύση 35,4 %.

Τέλος καλύπτει τις απαιτήσεις βίο-αποδοχής ASTM B348 Grade 5.

## 4.3 Εργαλειομηχανές

### 4.3.1 Τόρνος

Η μηχανουργική κατεργασία των δοκιμών για τη μελέτη της τραχύτητας στην επιφάνεια τους γίνεται σε Τόρνο TOS (TOS Trencin), μοντέλο SN 32, όπου και αποτελεί την καλύτερη δυνατή επιλογή συνδυασμού εργαστηριακής και βιομηχανικής εφαρμογής. Έχει ολικό μήκος 2530 mm, και ενεργή επιφάνεια κατεργασίας μήκους 1000 mm. Μπορεί να δεχθεί δοκίμια διαμέτρου μέχρι 100 mm, και συνολικού βάρους 132 kg στο σύνολο του ενεργού μήκους κατεργασίας του. Η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα του ανέρχεται στα 4 kW / 5,4 HP, με μέγιστη φόρτιση κατά μήκος της επιφάνειας κατεργασίας 8000 N, ενώ κάθετα σε αυτή 4800 N. Παρέχει τη δυνατότητα εναλλαγής έως και 16 σχέσεων ταχύτητας περιστροφής του δοκιμίου προς κατεργασία ξεκινώντας από τις 14 rpm (στροφές ανά λεπτό) και καταλήγοντας στις 2500 rpm. Τέλος η παρεχόμενη ακρίβεια κατεργασίας από το παραπάνω Μηχάνημα ανέρχεται σύμφωνα και τα πιστοποιητικά του υπεύθυνου δοκιμών για τον συγκεκριμένο Τόρνο σε 0,01 mm. [72].

### 4.3.2 Φρέζα

Η μηχανουργική κατεργασία των δοκιμών για τη μελέτη της τραχύτητας στην επιφάνεια τους γίνεται σε κάθετη Φρέζα SUNLIKE, μοντέλο 3 H, με ευρεία εφαρμογή σε βιομηχανικό περιβάλλον. Έχει ολικό ύψος 2220 mm, και ενεργή επιφάνεια κατεργασίας μήκους 700 mm και πλάτους 440 mm. Μπορεί να δεχθεί κοπτικά εργαλεία διαμέτρου μέχρι 40 mm στο σύνολο του ενεργού μήκους κατεργασίας του. Η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα του ανέρχεται στα 1,5 kW / 2 HP. Παρέχει τη δυνατότητα εναλλαγής έως και 16 σχέσεων ταχύτητας περιστροφής του κοπτικού εργαλείου ξεκινώντας από τις 80 rpm (στροφές ανά λεπτό) και καταλήγοντας στις 5440 rpm. Τέλος η παρεχόμενη ακρίβεια κατεργασίας από το παραπάνω μηχανήμα ανέρχεται σύμφωνα και τα πιστοποιητικά του υπεύθυνου δοκιμών για τη συγκεκριμένη Φρέζα σε 0,02 mm. [73].

## 4.4 Κοπτικά Εργαλεία

Τα κοπτικά εργαλεία αποτελούν το βασικότερο κομμάτι της εργαστηριακής έρευνας για τη μελέτη τραχύτητας του κράματος τιτανίου.

### 4.4.1 Κοπτικά Εργαλεία Τόρνου

Λόγω των ιδιοτεροτήτων που παρουσιάζει το υπό μελέτη βίο-αποδεκτό κράμα τιτανίου δεν υπάρχει ευρεία επιλογή στα κοπτικά εργαλεία που μπορούν να επιλεγούν για την κατεργασία στο Τόρνο. Επίσης δεν έχει η έρευνα δώσει μεγάλη ποικιλία σε κοπτικά εργαλεία Τόρνου διότι

η αγορά απαιτεί κύρια κατεργασία με φρέζα λόγω των υψηλότερων δυνατοτήτων στη διαμόρφωση υλικού που μπορεί να επιτευχθεί με τη παραπάνω εργαλειομηχανή.

Επιλέγεται ένα μοντέλο κοπτικών εργαλείων Τόρνου, το οποίο και δίδεται από το σύνολο των κατασκευαστών κοπτικών εργαλείων, ως το καλύτερο για επεξεργασία βίο-αποδεκτού κράματος τιτανίου.

Είναι της εταιρείας MITSUBISHI, μοντέλο TNMG220408 – MSRT9010.

Το κοπτικό που επιλέγεται ανήκει στη κατηγορία των κοπτικών εργαλείων με κεραμική επικάλυψη. Χαρακτηρίζεται από υψηλή σκληρότητα που φτάνει τα 92,0 HRA (Rockwell Hardness Test), χημική αδράνεια και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα που προσεγγίζει τα 79 W/m x K ή 0,019 cal/cm x sec x °C. Περιέχει επικάλυψη WC-Co (Καρβίδιο του Βαναδίου και Κοβάλτιο), και ανήκει στα κοπτικά εργαλεία μεσαίας κοπής (MS) με υψηλής ποιότητας τελική επιφάνεια κατεργασίας.

Από τους πίνακες του εγχειριδίου του παραπάνω κοπτικού εργαλείου προτείνεται για ταχύτητα περιστροφής δοκιμίου 40 min<sup>-1</sup> και πρόωση κοπτικού εργαλείου 0,2 mm/rev, με βάθος κοπής 2 mm.

Η ταχύτητα κοπής ορίζεται από τον τύπο :

$$v_c = (\pi \times D \times n) / 1000$$

όπου :  $v_c$  (m/min) ταχύτητα κοπής,  
D (mm) Διάμετρος δοκιμίου,  
n (min<sup>-1</sup>) ταχύτητα περιστροφής Πλατφόρμας κοπής.

$$v_c = (3,14 \times 80 \times 40) / 1000$$

$$v_c = 10 \text{ m/min}$$

Η ισχύς κοπής που αναπτύσσεται στη μύτη του παραπάνω κοπτικού εργαλείου δίδεται από το τύπο :

$$N_e = (a_p \times f \times v_c \times K_s) / (60 \times 10^3 \times \eta)$$

όπου :  $N_e$  (kW) ισχύς κοπής,  
 $a_p$  (mm) βάθος κοπής,  
f (mm/rev) πρόωση,  
 $v_c$  (m/min) ταχύτητα κοπής,  
 $K_s$  (N/mm<sup>2</sup>) Προκαθορισμένη Δύναμη κοπής,  
η Συντελεστής απόδοσης της εργαλειομηχανής όπου καθορίζεται στο 0,8 (80 %).

Σύμφωνα με τα παραπάνω και αντικαθιστώντας στο τύπο τη προκαθορισμένη ισχύς κοπής ίση με 2900 N/mm<sup>2</sup>, όπου καθορίζεται με τη σκληρότητα του προς επεξεργασία δοκιμίου από κατάλληλους πίνακες έχουμε :

$$N_e = (2 \times 0,2 \times 10 \times 2900) / (60 \times 10^3 \times 0,8)$$

$$N_e = 0,24 \text{ kW}$$

Η παραπάνω τιμή είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική ως φόρτιση της κοπτικής ακμής του επιλεγόμενου εργαλείου κοπής, όπου μπορεί να αντέξει τουλάχιστον τέσσερις φορές τη παραπάνω τιμή φόρτισης.

Η θεωρητική τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας από το παραπάνω κοπτικό εργαλείο με την επιλεγόμενη χρήση δίδεται από το τύπο :

$$h = [f^2 / (8 \times Re)] \times 1000$$

όπου :  $h$  ( $\mu\text{m}$ ) τραχύτητα Επιφάνειας,

$f$  (mm/rev) πρόωση,

$Re$  (rad) Γωνία Καμπυλότητας της κοπτικής ακμής του εργαλείου κοπής.

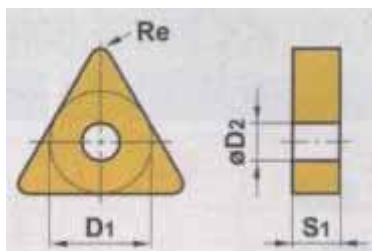
Αντικαθιστώντας στο τύπο τη γωνία σε ακτίνια της κοπτικής ακμής του εργαλείου κοπής από τα χαρακτηριστικά του ίση με 0,8 mm, έχουμε :

$$h = [0,2^2 / (8 \times 0,8)] \times 1000$$

$$h = 6,25 \mu\text{m}$$

Η θεωρητική τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας από το παραπάνω κοπτικό εργαλείο με την επιλεγόμενη χρήση είναι 6,25  $\mu\text{m}$ .

Το κοπτικό εργαλείο είναι τριγωνικής μορφής (ισόπλευρο τρίγωνο), σχηματίζει γωνία ελευθερίας  $0^\circ$ , έχει τρεις κοπτικές ακμές, μέγιστο μήκος 20,8 mm και ολικό ύψος 4,76 mm, γωνία καμπυλότητας σε ακτίνια της κοπτικής ακμής που σχηματίζει το ισόπλευρο τρίγωνο ίση με 0,8 mm και οπή στήριξης διαμέτρου 5,16 mm.



Σχήμα 4-2 : Μορφή κοπτικού εργαλείου Τόρνου TNMG220408 – MSRT9010. [42].

Τοποθετείται σε κατάλληλη βάση (Μανέλα) που του δίδει κλίση ως προς τον άξονα περιστροφής του Τόρνου σε  $91^\circ$  (PTGNR2525M22),  $60^\circ$  (MTEEN2525M22N) και  $117^\circ$  (MTJNL2525M22N).

#### 4.4.2 Φρέζα

Αντίθετα στη Φρέζα η έρευνα δώσει μεγάλη ποικιλία σε κοπτικά εργαλεία, με βασικό κριτήριο την υψηλή παραγωγικότητα ή την βέλτιστη τραχύτητα, μεγέθη αντίθετα στην επεξεργασία κράματος τιτανίου.

Αρχικά επιλέγονται δύο είδη κοπτικών εργαλείων.

Τα κοπτικά εργαλεία που τοποθετούνται ως πλακίδια – βίδια (WIDIA) σε κατάλληλη περιστρεφόμενη πλατφόρμα (μαχαιροφόρα κεφαλή), και κοπτικά εργαλεία που αποτελούν στο σύνολο τους το περιστρεφόμενο εργαλείο αφαίρεσης υλικού (κονδύλια).

Και στις δύο περιπτώσεις επιλέγονται κοπτικά εργαλεία, τα οποία δίδονται ως τα καλύτερα για επεξεργασία βίο-αποδεκτού κράματος τιτανίου, και είναι της εταιρείας MITSUBISHI

Στη πρώτη περίπτωση, επιλέγονται μοντέλα τριγωνικής και τετράγωνης διατομής.

Τριγωνικής μορφής είναι το μοντέλο TEEN2204PEER1.

Ανήκει στη κατηγορία των κοπτικών εργαλείων με κεραμική επικάλυψη. Χαρακτηρίζεται από υψηλή σκληρότητα που φτάνει τα 92,0 HRA (Rockwell Hardness Test), χημική αδράνεια και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα που προσεγγίζει τα 79 W/m x K ή 0,019 cal/cm x sec x °C.

Περιέχει επικάλυψη WC-Co (Καρβίδιο του Βαναδίου και Κοβάλτιο), και ανήκει στα κοπτικά εργαλεία μεσαίας κοπής (MS) με υψηλής ποιότητας τελική επιφάνεια κατεργασίας.

Τοποθετείται σε κατάλληλη κεφαλή (Φρέζα) όπου δέχεται τρία (3) βίδια και δημιουργεί τελική επιφάνεια κοπής με πλάτος 40 mm (ASX400R403S32). Προτείνεται για ταχύτητα περιστροφής Φρέζας 30 min<sup>-1</sup> και ταχύτητα πρόωσης δοκιμίου 0,2 mm/rev, με βάθος κοπής 2 mm.

Η ταχύτητα κοπής ορίζεται από τον τύπο :

$$v_c = (\pi \times D \times n) / 1000$$

όπου :  $v_c$  (m/min) ταχύτητα κοπής,

$D$  (mm) Πλάτος Επιφάνειας κοπής,

$n$  (min<sup>-1</sup>) ταχύτητα περιστροφής Φρέζας.

$$v_c = (3,14 \times 40 \times 30) / 1000$$

$$v_c = 3,77 \text{ m/min}$$

Η ισχύς κοπής που αναπτύσσεται στη μύτη του παραπάνω κοπτικού εργαλείου δίδεται από το τύπο :

$$N_e = (a_p \times f \times v_c \times K_Fs) / (60 \times 10^3 \times \eta)$$

όπου :  $N_e$  (kW) ισχύς κοπής,

$a_p$  (mm) βάθος κοπής,

$f$  (mm/rev) πρόωση,

$v_c$  (m/min) ταχύτητα κοπής,

$K_Fs$  (N/mm<sup>2</sup>) Προκαθορισμένη Δύναμη κοπής,

$\eta$  Συντελεστής απόδοσης της εργαλειομηχανής όπου καθορίζεται στο 0,8 (80 %).

Αντικαθιστώντας στο τύπο τη προκαθορισμένη ισχύς κοπής ίση με 2900 N/mm<sup>2</sup>, όπου καθορίζεται με τη σκληρότητα του προς επεξεργασία δοκιμίου από κατάλληλους πίνακες έχουμε :

$$N_e = (2 \times 0,2 \times 3,8 \times 1900) / (60 \times 10^3 \times 0,8)$$

$$N_e = 0,06 \text{ kW}$$



Η παραπάνω τιμή είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική ως φόρτιση της κοπτικής ακμής του επιλεγόμενου εργαλείου κοπής, όπου μπορεί να αντέξει τουλάχιστον οκτώ φορές τη παραπάνω φόρτιση, από την αναφορά του εγχειριδίου του παραπάνω κοπτικού που δίδει αντοχή 0,50 kW.

Η θεωρητική τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας από το παραπάνω κοπτικό εργαλείο με την επιλεγόμενη χρήση δίδεται από το τύπο :

$$h = [f^2 / (8 \times Re)] \times 1000$$

όπου : h (μm) τραχύτητα Επιφανείας,

f (mm/rev) πρόωση,

Re (rad) Γωνία Καμπυλότητας της κοπτικής ακμής του εργαλείου κοπής.

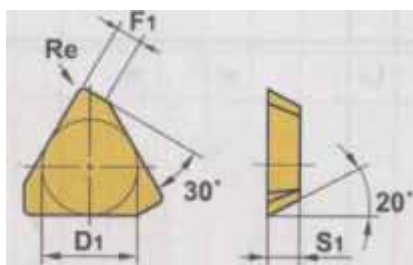
Αντικαθιστώντας στο τύπο τη γωνία σε ακτίνια της κοπτικής ακμής του εργαλείου κοπής από τα χαρακτηριστικά του ίση με 1,0 mm, έχουμε :

$$h = [0,2^2 / (8 \times 1)] \times 1000$$

$$h = 5 \mu\text{m}$$

Η θεωρητική τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας από το παραπάνω κοπτικό εργαλείο με την επιλεγόμενη χρήση είναι 5 μm.

Το κοπτικό εργαλείο είναι τριγωνικής μορφής (ισοσκελές τρίγωνο), σχηματίζει γωνία ελευθερίας 20°, έχει τρεις κοπτικές ακμές, κόβει από δεξιά με μέγιστο μήκος 19,2 mm και ολικό ύψος 4,76 mm και γωνία καμπυλότητας σε ακτίνια της κοπτικής ακμής που σχηματίζει το ισόπλευρο τρίγωνο ίση με 1,0 mm.



Σχήμα 4-3 : Μορφή κοπτικού εργαλείου Φρέζας TEEN2204PEER1. [42].

Τετράγωνης μορφής είναι τα μοντέλα σύμφωνα με τη κωδικοποίηση τους, SEEN1203AFFN1, SEEN1203EFFR1 και SPEN1203EEER1.

Ανήκουν στη κατηγορία των κοπτικών εργαλείων με κεραμική επικάλυψη. Χαρακτηρίζεται από υψηλή σκληρότητα που φτάνει τα 92,0 HRA (Rockwell Hardness Test), χημική αδράνεια και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα που προσεγγίζει τα 79 W/m x K ή 0,019 cal/cm x sec x °C.

Περιέχει επικάλυψη WC-Co (Καρβίδιο του Βαναδίου και Κοβάλτιο), και ανήκει στα κοπτικά εργαλεία μεσαίας κοπής (MS) με υψηλής ποιότητας τελική επιφάνεια κατεργασίας.

Τοποθετείται σε κατάλληλη κεφαλή (Φρέζα) όπου δέχεται έξι (6) βίδες και δημιουργεί τελική επιφάνεια κοπής με πλάτος 80 mm (SE445-080A06R). Προτείνεται για ταχύτητα περιστροφής πλατφόρμας κοπής 30 min<sup>-1</sup> και ταχύτητα πρόωσης δοκιμίου 0,2 mm/rev, με βάθος κοπής 2 mm.

Η ταχύτητα κοπής ορίζεται από τον τύπο :

$$v_c = (\pi \times D \times n) / 1000$$

όπου :  $v_c$  (m/min) ταχύτητα κοπής,  
 $D$  (mm) Πλάτος Επιφάνειας κοπής,  
 $n$  (min<sup>-1</sup>) ταχύτητα περιστροφής Πλατφόρμας κοπής,  
 $KFs$  (N/mm<sup>2</sup>) Προκαθορισμένη Δύναμη κοπής.

$$v_c = (3,14 \times 80 \times 30) / 1000$$

$$v_c = 7,54 \text{ m/min}$$

Η ισχύς κοπής που αναπτύσσεται στη μύτη του παραπάνω κοπτικού εργαλείου δίδεται από το τύπο :

$$Ne = (a_p \times f \times v_c \times KFs) / (60 \times 10^3 \times \eta)$$

όπου :  $Ne$  (kW) ισχύς κοπής,  
 $a_p$  (mm) βάθος κοπής,  
 $f$  (mm/rev) πρόωση,  
 $v_c$  (m/min) ταχύτητα κοπής,  
 $KFs$  (N/mm<sup>2</sup>) Προκαθορισμένη Δύναμη κοπής,  
 $\eta$  Συντελεστής απόδοσης της εργαλειομηχανής όπου καθορίζεται στο 0,8 (80 %).

Αντικαθιστώντας στο τύπο τη προκαθορισμένη ισχύς κοπής ίση με 2900 N/mm<sup>2</sup>, όπου καθορίζεται με τη σκληρότητα του προς επεξεργασία δοκιμίου από κατάλληλους πίνακες έχουμε :

$$Ne = (2 \times 0,2 \times 7,5 \times 1900) / (60 \times 10^3 \times 0,8)$$

$$Ne = 0,12 \text{ kW}$$

Η παραπάνω τιμή είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική ως φόρτιση της κοπτικής ακμής του επιλεγόμενου εργαλείου κοπής, όπου μπορεί να αντέξει τουλάχιστον τέσσερις φορές τη παραπάνω φόρτιση, σύμφωνα με το εγχειρίδιο του κατασκευαστή.

Η θεωρητική τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας από το παραπάνω κοπτικό εργαλείο με την επιλεγόμενη χρήση δίδεται από το τύπο :

$$h = [f^2 / (8 \times Re)] \times 1000$$

όπου :  $h$  (μm) τραχύτητα Επιφάνειας,  
 $f$  (mm/rev) πρόωση,  
 $Re$  (rad) Γωνία Καμπυλότητας της κοπτικής ακμής του εργαλείου κοπής.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και αντικαθιστώντας στο τύπο τη γωνία σε ακτίνια της κοπτικής ακμής του εργαλείου κοπής από τα χαρακτηριστικά του ίση με 1,0 mm, έχουμε :

$$h = [0,2^2 / (8 \times 1)] \times 1000$$

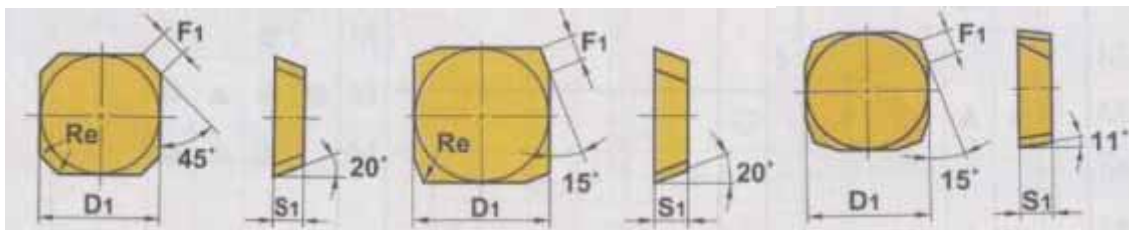
$$h = 5 \text{ μm}$$

Η θεωρητική τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας από το παραπάνω κοπτικό εργαλείο με την επιλεγόμενη χρήση είναι 5  $\mu\text{m}$ .

Τα βίδια SEEN1203AFFN1 είναι τετραγωνικής μορφής. Σχηματίζει γωνία ελευθερίας 25°, όπως και γωνία από την κοπτική ακμή και την ελεύθερη επιφάνεια 45°. Έχει τέσσερις κοπτικές ακμές, κόβει ουδέτερα με μέγιστο μήκος 12,7 mm και ολικό ύψος 3,18 mm και γωνία καμπυλότητας σε ακτίνια της κοπτικής ακμής ίση με 1,0 mm.

Τα βίδια SEEN1203EFFR1 είναι τετραγωνικής μορφής, Σχηματίζει γωνία ελευθερίας 25°, όπως και γωνία από την κοπτική ακμή και την ελεύθερη επιφάνεια 75°. Έχει τέσσερις κοπτικές ακμές, κόβει δεξιά με μέγιστο μήκος 12,7 mm και ολικό ύψος 3,18 mm και γωνία καμπυλότητας σε ακτίνια της κοπτικής ακμής ίση με 1,0 mm.

Τέλος τα βίδια SPEN1203EEER1 είναι τετραγωνικής μορφής, Σχηματίζει γωνία ελευθερίας 11°, όπως και γωνία από την κοπτική ακμή και την ελεύθερη επιφάνεια 75°. Έχει τέσσερις κοπτικές ακμές, κόβει δεξιά με μέγιστο μήκος 12,7 mm και ολικό ύψος 3,18 mm και γωνία καμπυλότητας σε ακτίνια της κοπτικής ακμής ίση με 1,0 mm.



Σχήμα 4-4 : Μορφή Κοπτικών Εργαλείων Φρέζας SEEN1203AFFN1, SEEN1203EFFR1 & SPEN1203EEER1 αντίστοιχα. [42].

Στη δεύτερη περίπτωση επιλέγονται κοπτικά εργαλεία που αποτελούν στο σύνολο τους το περιστρεφόμενο εργαλείο αφαίρεσης υλικού (κονδύλια), σε δύο τύπους.

Αρχικά ο τύπος E6MHD1000.

Ανήκει στη κατηγορία των κοπτικών εργαλείων που αποτελείται από μικροκόκκους καρβιδίων με επικάλυψη από νιτρίδια αλουμινίου και τιτανίου [(Al,Ti)N]. Χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλή σκληρότητα που προσεγγίζει τα 3200 HV (Vickers Hardness Test) ή 275 HRA (Rockwell Hardness Test).

Τοποθετείται αυτόνομα στη Φρέζα έχει έξι (6) Κοπτικές Ακμές και δημιουργεί τελική επιφάνεια κοπής με πλάτος 10 mm. Προτείνεται για ταχύτητα περιστροφής Φρέζας 7600  $\text{min}^{-1}$  και ταχύτητα πρόωσης δοκιμίου 3060  $\text{mm/min}$ , με βάθος κοπής 0,1 mm.

Η ταχύτητα κοπής ορίζεται από τον τύπο :

$$v_c = (\pi \times D \times n) / 1000$$

όπου :  $v_c$  (m/min) ταχύτητα κοπής,

$D$  (mm) Πλάτος Επιφάνειας κοπής,

$n$  ( $\text{min}^{-1}$ ) ταχύτητα περιστροφής Φρέζας.

$$v_c = (3,14 \times 10 \times 7600) / 1000$$

$$v_c = 238,6 \text{ m/min}$$

Η πρόωση του κοπτικού εργαλείου  $f$  (mm/rev) υπολογίζεται από τον τύπο :

$$f = v_f / n$$

όπου :  $f$  (mm/rev) πρόωση,  
 $v_f$  (mm/min) ταχύτητα πρόωσης του δοκιμίου,  
 $n$  (min<sup>-1</sup>) ταχύτητα περιστροφής Φρέζας,

$$f = 3060 / 7600$$

$$f = 0,4 \text{ mm/rev}$$

Η ισχύς κοπής που αναπτύσσεται στη μύτη του παραπάνω κοπτικού εργαλείου δίδεται από το τύπο :

$$N_e = (a_p \times f \times v_c \times K_Fs) / (60 \times 10^3 \times \eta)$$

όπου :  $N_e$  (kW) ισχύς κοπής,  
 $a_p$  (mm) βάθος κοπής,  
 $f$  (mm/rev) πρόωση,  
 $v_c$  (m/min) ταχύτητα κοπής,  
 $K_Fs$  (N/mm<sup>2</sup>) Προκαθορισμένη Δύναμη κοπής,  
 $\eta$  Συντελεστής απόδοσης της εργαλειομηχανής όπου καθορίζεται στο 0,8 (80 %).

Σύμφωνα με τα παραπάνω και αντικαθιστώντας στο τύπο τη προκαθορισμένη ισχύς κοπής ίση με 2900 N/mm<sup>2</sup>, όπου καθορίζεται με τη σκληρότητα του προς επεξεργασία δοκιμίου από κατάλληλους πίνακες έχουμε :

$$N_e = (0,1 \times 0,4 \times 3,06 \times 1900) / (60 \times 10^3 \times 0,8)$$

$$N_e = 0,005 \text{ kW}$$

Η παραπάνω τιμή είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική ως φόρτιση της κοπτικής ακμής του επιλεγόμενου εργαλείου κοπής.

Η θεωρητική τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας από το παραπάνω κοπτικό εργαλείο με την επιλεγόμενη χρήση δίδεται από το τύπο :

$$h = [f^2 / (8 \times Re)] \times 1000$$

όπου :  $h$  (μm) τραχύτητα Επιφανείας,  
 $f$  (mm/rev) πρόωση,  
 $Re$  (rad) Γωνία Καμπυλότητας της κοπτικής ακμής του εργαλείου κοπής.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και αντικαθιστώντας στο τύπο τη γωνία σε ακτίνια της κοπτικής ακμής του εργαλείου κοπής από τα χαρακτηριστικά του ίση με 2,4 mm, έχουμε :

$$h = [0,4^2 / (8 \times 2,4)] \times 1000$$

$$h = 8,3 \text{ μm}$$

Η θεωρητική τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας από το παραπάνω κοπτικό εργαλείο με την επιλεγόμενη χρήση είναι 8,3 μm.

Το κοπτικό εργαλείο είναι κυλινδρικό, σχηματίζει γωνία κοπής  $45^\circ$ , έχει έξι κοπτικές ακμές, κόβει περιστροφικά με μέγιστο πλάτος 10 mm και ολικό βάθος κοπής 22 mm και γωνία καμπυλότητας σε ακτίνια της κοπτικής ακμής ίση με 2,4 mm.



Σχήμα 4-5 : Μορφή κοπτικού εργαλείου Φρέζας E6MHD1000.  
[42].

Στη συνέχεια επιλέγεται ο τύπος VALHD1000.

Ανήκει στη κατηγορία των κοπτικών εργαλείων που αποτελείται από υψηλής σκληρότητας ανοξείδωτο χάλυβα με επικάλυψη τύπου V (V). Χαρακτηρίζεται από υψηλή σκληρότητα που προσεγγίζει τα 2800 HV (Vickers Hardness Test) ή 240 HRA (Rockwell Hardness Test).

Τοποθετείται αυτόνομα στη Φρέζα έχει τρεις (3) Κοπτικές Ακμές και δημιουργεί τελική επιφάνεια κοπής με πλάτος 10 mm. Προτείνεται για ταχύτητα περιστροφής Φρέζας  $640 \text{ min}^{-1}$  και ταχύτητα πρόωσης δοκιμίου  $75 \text{ mm/min}$ , με βάθος κοπής 2 mm.

Η ταχύτητα κοπής ορίζεται από τον τύπο :

$$v_c = (\pi \times D \times n) / 1000$$

όπου :  $v_c$  (m/min) ταχύτητα κοπής,

$D$  (mm) Πλάτος Επιφάνειας κοπής,

$n$  ( $\text{min}^{-1}$ ) ταχύτητα περιστροφής Φρέζας.

$$v_c = (3,14 \times 10 \times 640) / 1000$$

$$v_c = 20 \text{ m/min}$$

Η πρόωση του κοπτικού εργαλείου  $f$  (mm/rev) υπολογίζεται από τον τύπο :

$$f = v_f / n$$

όπου :  $f$  (mm/rev) πρόωση,

$v_f$  (mm/min) ταχύτητα πρόωσης του δοκιμίου,

$n$  ( $\text{min}^{-1}$ ) ταχύτητα περιστροφής Φρέζας.

$$f = 75 / 640$$

$$f = 0,1 \text{ mm/rev}$$

Η ισχύς κοπής που αναπτύσσεται στη μύτη του παραπάνω κοπτικού εργαλείου δίδεται από το τύπο :

$$Ne = (ap \times f \times vc \times KFs) / (60 \times 10^3 \times \eta)$$

όπου : Ne (kW) ισχύς κοπής,  
ap (mm) βάθος κοπής,  
f (mm/rev) πρόωση,  
vc (m/min) ταχύτητα κοπής,  
KFs (N/mm<sup>2</sup>) Προκαθορισμένη Δύναμη κοπής,  
η Συντελεστής απόδοσης της εργαλειομηχανής όπου καθορίζεται στο 0,8 (80 %).

Σύμφωνα με τα παραπάνω και αντικαθιστώντας στο τύπο τη προκαθορισμένη ισχύς κοπής ίση με 2900 N/mm<sup>2</sup>, όπου καθορίζεται με τη σκληρότητα του προς επεξεργασία δοκιμίου από κατάλληλους πίνακες έχουμε :

$$Ne = (2 \times 0,1 \times 0,075 \times 1900) / (60 \times 10^3 \times 0,8)$$
$$Ne = 0,0005 \text{ kW}$$

Η παραπάνω τιμή είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική ως φόρτιση της κοπτικής ακμής του επιλεγόμενου εργαλείου κοπής.

Η θεωρητική τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας από το παραπάνω κοπτικό εργαλείο με την επιλεγόμενη χρήση δίδεται από το τύπο :

$$h = [f^2 / (8 \times Re)] \times 1000$$

όπου : h (μm) τραχύτητα Επιφάνειας,  
f (mm/rev) πρόωση,  
Re (rad) Γωνία Καμπυλότητας της κοπτικής ακμής του εργαλείου κοπής.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και αντικαθιστώντας στο τύπο τη γωνία σε ακτίνια της κοπτικής ακμής του εργαλείου κοπής από τα χαρακτηριστικά του ίση με 2,4 mm, έχουμε :

$$h = [0,1^2 / (8 \times 2,4)] \times 1000$$
$$h = 0,52 \text{ μm}$$

Η θεωρητική τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας από το παραπάνω κοπτικό εργαλείο με την επιλεγόμενη χρήση είναι 0,52 μm.

Το κοπτικό εργαλείο είναι κυλινδρικό, σχηματίζει γωνία κοπής 45°, έχει έξι κοπτικές ακμές, κόβει περιστροφικά με μέγιστο πλάτος 10 mm και ολικό βάθος κοπής 45 mm και γωνία καμπυλότητας σε ακτίνια της κοπτικής ακμής ίση με 2,4 mm.



Σχήμα 4-6 : Μορφή κοπτικού εργαλείου Φρέζας VALHD1000.  
[42]

#### 4.5 Όργανο Μέτρησης τραχύτητας

Η τραχύτητα που αναπτύσσεται στα κατεργασμένα βιο-αποδεκτά δοκίμια που χρησιμοποιούνται ως τεχνητά μέλη είναι το μέτρο ανάπτυξης των μυϊκών ιστών, όπως έχει αναλυτικά περιγραφεί παραπάνω.

Το μετρητικό όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της τραχύτητας πρέπει να είναι ακριβές και να έχει ευρύ πεδίο εφαρμογών.

Χρησιμοποιείται όργανο μέτρησης τραχύτητας της εταιρείας TIME Group Inc., μοντέλο TR 100, και με σειριακό αριθμό 27305030. Μπορεί να μετρήσει μέγιστη τραχύτητα ( $R_z$ ), όπως και μέση τραχύτητα ( $R_a$ ) σε προεπιλεγμένο μήκος επιφάνειας που κυμαίνεται από 0,25 mm, έως και 2,5 mm. Εύρος μέτρησης της μέγιστης τραχύτητας είναι :

$$R_z (\mu\text{m}) : 0,1 - 50$$

Εύρος μέτρησης της μέσης τραχύτητας είναι :

$$R_a (\mu\text{m}) : 0,05 - 10$$

Η μέγιστη απόκλιση ακρίβειας της μέτρησης κυμαίνεται στο 7%, όπου όμως το όργανο έχει τη δυνατότητα ρύθμισης του με πρότυπο πλακίδιο σε απόλυτη ακρίβεια μέτρησης (καλιμπράρισμα).

#### 4.6 Μηχανουργικές Κατεργασίες

Το παραπάνω αναφερόμενο δοκίμιο κατεργάζεται στον Τόρνο και τη Φρέζα, αλλάζοντας κοπτικό εργαλείο, όπου και παίρνονται συγκρινόμενα τα πρώτα αποτελέσματα τραχύτητας από την επιφάνεια. Στη συνέχεια γίνεται επέμβαση στις συνθήκες κοπής τροποποιώντας τη

μορφή και τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, τη ταχύτητα κοπής, τη πρόωση, όπως τη ψύξη και τη λίπανση, για να ληφθούν και να συγκριθούν τα ανάλογα αποτελέσματα .

#### 4.6.1 Τόρνος

Επιλέγεται όπως αναφέρεται και παραπάνω ένα κοπτικό εργαλείο που προβλέπεται ότι θα έχει τη καλύτερη επιδιωκόμενη συμπεριφορά. Περιέχει επικάλυψη WC-Co (Καρβίδιο του Βαναδίου και Κοβάλτιο), και ανήκει στα κοπτικά εργαλεία μεσαίας κοπής (MS) με υψηλής ποιότητας τελική επιφάνεια κατεργασίας. (TNMG220408 – MSRT9010).

Τοποθετείται αρχικά σε κατάλληλη βάση (Μανέλα) που του δίδει κλίση ως προς τον άξονα περιστροφής του Τόρνου σε  $91^\circ$  (PTGNR2525M22). Επιλέγεται σε πρώτη φάση η προτεινόμενη θεωρητικά ταχύτητα περιστροφής δοκιμίου  $40 \text{ min}^{-1}$  όπως και πρόωση κοπτικού εργαλείου  $0,2 \text{ mm/rev}$ , με βάθος κοπής  $2 \text{ mm}$ .

Ο Τόρνος έχει τη δυνατότητα να δώσει ακριβώς τη παραπάνω ταχύτητα περιστροφής  $40 \text{ min}^{-1}$ , όπως και πρόωση κοπτικού εργαλείου  $0,2 \text{ mm/rev}$ . Η ταχύτητα κοπής υπολογίζεται σε  $10 \text{ m/min}$  και η ισχύς κοπής σε  $0,02 \text{ kW}$ . Η ταχύτητα περιστροφής έχει υπολογιστεί για διάμετρο δοκιμίου  $80 \text{ mm}$ . Μειώνοντας τη διάμετρο δεν υπάρχει δυνατότητα ανάλογης μείωσης και της ταχύτητας περιστροφής διότι το επόμενο σκαλοπάτι είναι στα  $56 \text{ min}^{-1}$ , όπου και θεωρητικά εκτιμάται ως βέλτιστο σε διάμετρο κατεργασίας  $57 \text{ mm}$ .

Η θεωρητική τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας από το παραπάνω κοπτικό εργαλείο με την επιλεγόμενη χρήση πρέπει να κυμαίνεται γύρω από τη τιμή των  $6,25 \mu\text{m}$ .

Η πρώτη τροποποίηση από το βέλτιστο γίνεται αυξάνοντας τη ταχύτητα πρόωσης σε  $56 \text{ min}^{-1}$ , (ένα βήμα μεγαλύτερη) και αντίστοιχα μειώνοντας σε  $28 \text{ min}^{-1}$  (ένα βήμα μικρότερη). Στη συνέχεια τροποποιείται η πρόωση του κοπτικού εργαλείου αντίστοιχα κατά ένα βήμα μικρότερη όπως και κατά ένα βήμα μεγαλύτερη από την ενδεικνυόμενη σύμφωνα και με τις δυνατότητες κλιμάκωσης του Τόρνου ( $0,18 \text{ mm/rev}$ ,  $0,22 \text{ mm/rev}$ ). Τέλος γίνεται επέμβαση και στο βάθος κοπής μειώνοντας σταδιακά από τα  $2 \text{ mm}$  σε  $1 \text{ mm}$  με έμφαση στη απόκτηση της βέλτιστης τραχύτητας τελικής επιφάνειας με κατεργασία Τόρνου. Επιπλέον προστίθεται στο μηχανισμό κοπής, δυνατότητα λίπανσης και ψύξης της επιφάνειας κοπής για ακόμη μεγαλύτερη απόδοση του κοπτικού εργαλείου. Χρησιμοποιείται ειδικό υγρό ως λιπαντικό και ψυκτικό στοιχείο από τη ανάμιξη ειδικού ελαίου (MOBIL Solvae 1535) και νερό σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή ( $20\%$  Λάδι –  $80\%$  Νερό), ώστε να παρέχεται στη κοπτική ακμή η καλύτερη απόδοση της.



Η τιμή της τραχύτητας που θεωρητικά προσεγγίζεται ανήκει στα ανώτερα όρια αποδοχής κύρια ως προς τον πολλαπλασιασμό των ιστών ενώ κυμαίνεται σε ιδιαίτερα αποδεκτά όρια ως τη δυνατότητα προσκόλλησης των επάνω στο κράμα τιτανίου.

Η βέλτιστη τιμή που ισορροπεί τους παραπάνω δύο παράγοντες βρίσκεται στη μισή τιμή της μέσης θεωρητικά υπολογιζόμενης τραχύτητας δηλαδή σε 3,00  $\mu\text{m}$ . [9], [57], [61], [62], [63], [64]

Στη συνέχεια αλλάζει η Μανέλα και ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία κοπής με κλίση ως προς τον άξονα περιστροφής του Τόρνου σε 60° (MTEEN2525M22N) . Ολοκληρώνεται η κατεργασία στο Τόρνο με τοποθέτηση κατάλληλης βάσης (Μανέλα) που του δίδει κλίση ως προς τον άξονα περιστροφής του Τόρνου σε 117° (MTJNL2525M22N).

#### 4.6.2 Φρέζα

Αρχικά επιλέγεται όπως αναφέρεται κοπτικό εργαλείο που τοποθετείται ως πλακίδιο – βίδι (WIDIA) σε κατάλληλη περιστρεφόμενη πλατφόρμα (μαχαιροφόρα κεφαλή) και προβλέπεται ότι θα έχει τη καλύτερη επιδιωκόμενη συμπεριφορά. Ανήκει στη κατηγορία των κοπτικών εργαλείων με κεραμική επικάλυψη. Χαρακτηρίζεται από υψηλή σκληρότητα που φτάνει τα 92,0 HRA (Rockwell Hardness Test), χημική αδράνεια και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα που προσεγγίζει τα 79 W/m x K ή 0,019 cal/cm x sec x °C. Είναι τριγωνικής μορφής (TEEN2204PEER1). Περιέχει επικάλυψη WC-Co (Καρβίδιο του Βαναδίου και Κοβάλτιο), και ανήκει στα κοπτικά εργαλεία μεσαίας κοπής (MS) με υψηλής ποιότητας τελική επιφάνεια κατεργασίας.

Τοποθετείται σε κατάλληλη κεφαλή (Φρέζα) όπου δέχεται τρία (3) βίδια και δημιουργεί τελική επιφάνεια κοπής με πλάτος 40 mm (ASX400R403S32). Προτείνεται για ταχύτητα περιστροφής Φρέζας 30  $\text{min}^{-1}$  και ταχύτητα πρόωσης δοκιμίου 0,2 mm/rev, με βάθος κοπής 2 mm.

Η επιλεγόμενη Φρέζα δεν έχει τη δυνατότητα να δώσει τη παραπάνω ταχύτητα περιστροφής. Ρυθμίζεται στη χαμηλότερη ταχύτητα που μπορεί να δώσει των 80  $\text{min}^{-1}$ , με πρόωση που μπορεί εύκολα να μετρηθεί σε 0,2 mm/rev. Η ταχύτητα κοπής υπολογίζεται σε 10 m/min και η ισχύς κοπής σε 0,15 kW.

Η θεωρητική τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας από το παραπάνω κοπτικό εργαλείο με την επιλεγόμενη χρήση πρέπει να είναι περίπου στα 5,00  $\mu\text{m}$ .

Επιλέγεται αρχικά η ταχύτητα περιστροφής κοπτικού στη τιμή των 80  $\text{min}^{-1}$  όπως και πρόωση δοκιμίου 0,2 mm/rev, με βάθος κοπής 2 mm.

Η πρώτη τροποποίηση υφίσταται στη ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού όπου αυξάνεται από την ελάχιστη ρυθμιζόμενη των 80  $\text{min}^{-1}$  στη τιμή των 160  $\text{min}^{-1}$  . Τέλος

γίνεται επέμβαση και στο βάθος ΚΟΠΗΣ μειώνοντας σταδιακά από τα 2 mm σε 1 mm με έμφαση στη απόκτηση της βέλτιστης τραχύτητας τελικής επιφάνειας με κατεργασία Φρέζας. Επιπλέον προστίθεται στο μηχανισμό κοπής, δυνατότητα λίπανσης και ψύξης της επιφάνειας κοπής για ακόμη μεγαλύτερη απόδοση του κοπτικού εργαλείου. Χρησιμοποιείται ειδικό υγρό ως λιπαντικό και ψυκτικό στοιχείο από τη ανάμιξη ειδικού ελαίου (MOBIL Solvae 1535) και νερό σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή (20% Λάδι – 80% Νερό), ώστε να παρέχεται στη κοπτική ακμή η καλύτερη απόδοση της.

Η τιμή της τραχύτητας που θεωρητικά προσεγγίζεται ανήκει στα ανώτερα όρια αποδοχής κύρια ως προς τον πολλαπλασιασμό των ιστών ενώ κυμαίνεται σε ιδιαίτερα αποδεκτά όρια ως τη δυνατότητα προσκόλλησης των επάνω στο κράμα τιτανίου.

Στην ίδια κατηγορία κοπτικών εργαλείων επιλέγεται και τοποθετείται ως πλακίδια – βίδια (WIDIA) σε κατάλληλη περιστρεφόμενη πλατφόρμα (μαχαιροφόρα κεφαλή) κοπτικό εργαλείο τετράγωνης μορφής.

Είναι τα μοντέλα SEEN1203AFFN1, SEEN1203EFFR1, και SPEN1203EEER1.

Ανήκουν στη κατηγορία των κοπτικών εργαλείων με κεραμική επικάλυψη. Χαρακτηρίζονται από υψηλή σκληρότητα που φτάνει τα 92,0 HRA (Rockwell Hardness Test), χημική αδράνεια και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα που προσεγγίζει τα 79 W/m x K ή 0,019 cal/cm x sec x °C.

Τοποθετούνται σε κατάλληλη κεφαλή (Φρέζα) όπου δέχεται έξι (6) βίδια και δημιουργεί τελική επιφάνεια κοπής με πλάτος 80 mm (SE445-080A06R). Προτείνεται για ταχύτητα περιστροφής πλατφόρμας κοπής 30 min<sup>-1</sup> και ταχύτητα πρόωσης δοκιμίου 0,2 mm/rev, με βάθος κοπής 2 mm. Υπολογίζεται ταχύτητα κοπής 7,54 m/min, με ισχύς κοπής 0,12 kW.

Η επιλεγόμενη Φρέζα δεν έχει τη δυνατότητα να δώσει τη παραπάνω ταχύτητα περιστροφής. Ρυθμίζεται στη χαμηλότερη ταχύτητα που μπορεί να δώσει των 80 min<sup>-1</sup>, με πρόωση που μπορεί εύκολα να μετρηθεί σε 0,20 mm/rev. Η ταχύτητα κοπής υπολογίζεται σε 20 m/min και η ισχύς κοπής σε 0,32 kW.

Η θεωρητική τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας από το παραπάνω κοπτικό εργαλείο με την επιλεγόμενη χρήση πρέπει να είναι 5,00 μm.

Οι τροποποιήσεις γύρω από τη διαδικασία κοπής ακολουθούν ακριβώς την ίδια μεθοδολογία με τη προηγούμενη κατεργασία.

Στη δεύτερη περίπτωση, επιλέγονται τα κονδύλια σε δύο τύπους.

Αρχικά ο τύπος E6MHD1000.

Ανήκει στη κατηγορία των κοπτικών εργαλείων που αποτελείται από μικροκόκκους καρβιδίων με επικάλυψη από νιτρίδια αλουμινίου και τιτανίου [(Al,Ti)N]. Χαρακτηρίζεται

από ιδιαίτερα υψηλή σκληρότητα που προσεγγίζει τα 3200 HV (Vickers Hardness Test) ή 275 HRA (Rockwell Hardness Test).

Τοποθετείται αυτόνομα στη Φρέζα έχει έξι (6) Κοπτικές Ακμές και δημιουργεί τελική επιφάνεια κοπής με πλάτος 10 mm. Προτείνεται για ταχύτητα περιστροφής Φρέζας  $7600 \text{ min}^{-1}$  και ταχύτητα πρόωσης δοκιμίου  $3060 \text{ mm/min}$ , με βάθος κοπής 0,1 mm.

Η επιλεγόμενη Φρέζα δεν έχει τη δυνατότητα να δώσει τη παραπάνω ταχύτητα περιστροφής. Ρυθμίζεται στη υψηλότερη ταχύτητα που μπορεί να δώσει των  $5440 \text{ min}^{-1}$ , με πρόωση που μπορεί να μετρηθεί σε  $3060 \text{ mm/min}$ . Η ταχύτητα κοπής υπολογίζεται σε  $170,8 \text{ m/min}$ , η πρόωση του δοκιμίου  $0,56 \text{ mm/rev}$  και η ισχύς κοπής σε  $0,007 \text{ kW}$ .

Η θεωρητική τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας από το παραπάνω κοπτικό εργαλείο με την επιλεγόμενη χρήση πρέπει να κυμαίνεται στη τιμή των  $8,3 \mu\text{m}$ . Έτσι επιλέγεται αρχικά η ταχύτητα περιστροφής δοκιμίου των  $5440 \text{ min}^{-1}$  όπως και πρόωση δοκιμίου  $0,56 \text{ mm/rev}$ , με βάθος κοπής 0,1 mm.

Η μόνη τροποποίηση υφίσταται στη πρόωση του κοπτικού εργαλείου αυξανόμενη και μειούμενη σταδιακά γύρω από τη τιμή των  $0,56 \text{ mm/rev}$ .

Δεν μπορεί να γίνει επέμβαση στο βάθος κοπής διότι είναι ήδη αρκετά μικρό.

Επιπλέον προστίθεται στο μηχανισμό κοπής, δυνατότητα λίπανσης και ψύξης της επιφάνειας κοπής για ακόμη μεγαλύτερη απόδοση του κοπτικού εργαλείου. Χρησιμοποιείται ειδικό υγρό ως λιπαντικό και ψυκτικό στοιχείο από τη ανάμιξη ειδικού ελαίου (MOBIL Solvae 1535) και νερό σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή (20% Λάδι – 80% Νερό), ώστε να παρέχεται στη κοπτική ακμή η καλύτερη απόδοση της.

Και εδώ η τιμή της τραχύτητας που θεωρητικά προσεγγίζεται ξεπερνά τα ανώτερα όρια αποδοχής κύρια ως προς τον πολλαπλασιασμό των ιστών ενώ κυμαίνεται σε αποδεκτά όρια ως τη δυνατότητα προσκόλλησης των επάνω στο κράμα τιτανίου.

Στη συνέχεια επιλέγεται ο τύπος VALHD1000.

Ανήκει στη κατηγορία των κοπτικών εργαλείων που αποτελείται από υψηλής σκληρότητας ανοξείδωτο χάλυβα με επικάλυψη τύπου V (Violet). Χαρακτηρίζεται από υψηλή σκληρότητα που προσεγγίζει τα 2800 HV (Vickers Hardness Test) ή 240 HRA (Rockwell Hardness Test).

Τοποθετείται αυτόνομα στη Φρέζα έχει τρεις (3) Κοπτικές Ακμές και δημιουργεί τελική επιφάνεια κοπής με πλάτος 10 mm. Προτείνεται για ταχύτητα περιστροφής Φρέζας  $640 \text{ min}^{-1}$  και ταχύτητα πρόωσης δοκιμίου  $75 \text{ mm/min}$ , με βάθος κοπής 2 mm.

Η επιλεγόμενη Φρέζα δεν έχει τη δυνατότητα να δώσει ακριβώς τη παραπάνω ταχύτητα περιστροφής. Ρυθμίζεται στη ταχύτητα των  $650 \text{ min}^{-1}$ , με πρόωση που μπορεί εύκολα να

μετρηθεί σε 75 mm/rev. Δημιουργεί τελική επιφάνεια κοπής με πλάτος 10 mm. Προτείνεται για ταχύτητα περιστροφής Φρέζας  $640 \text{ min}^{-1}$  και ταχύτητα πρόωσης δοκιμίου 75 mm/min, με βάθος κοπής 2 mm. Η ταχύτητα κοπής υπολογίζεται σε 20 m/min, η πρόωση του κοπτικού εργαλείου 0,1 mm/rev και η ισχύς κοπής σε 0,0005 kW.

Η θεωρητική τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας από το παραπάνω κοπτικό εργαλείο με την επιλεγόμενη χρήση πρέπει να είναι 0,52  $\mu\text{m}$ .

Αρχικά υφίσταται τροποποίηση εφόσον υπάρχει δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής σε τιμή μεγαλύτερη ή μικρότερη από την προτεινόμενη των  $650 \text{ min}^{-1}$ , σύμφωνα και με τις δυνατότητες της Φρέζας. Η επόμενη κλίμακα ταχύτητας προς τα επάνω είναι η  $660 \text{ min}^{-1}$ , αλλά δεν χρησιμοποιείται λόγω του ότι προσεγγίζει με τη βέλτιστη τιμή, οπότε και επιλέγεται η αμέσως μεγαλύτερη με διαφορά, όπου είναι η  $1150 \text{ min}^{-1}$ . Τέλος επιλέγεται ως μικρότερη τιμή ταχύτητας περιστροφής η τιμή των  $420 \text{ min}^{-1}$ , προς τα κάτω όπου και δοκιμάζεται η κατεργασία και η τελική τραχύτητα της επιφάνειας.

Δεν υφίσταται τροποποίηση στη πρόωση του δοκιμίου διότι η τιμή της είναι πολύ μικρή. (0,1 mm/rev).

Τέλος γίνεται επέμβαση και στο βάθος κοπής μειώνοντας σταδιακά από τα 2 mm σε 1 mm με έμφαση στη απόκτηση της βέλτιστης τραχύτητας τελικής επιφανείας με κατεργασία Φρέζας.

Επιπλέον όπως και προηγούμενα προστίθεται στο μηχανισμό κοπής, δυνατότητα λίπανσης και ψύξης της επιφάνειας κοπής για ακόμη μεγαλύτερη απόδοση του κοπτικού εργαλείου. Χρησιμοποιείται ειδικό υγρό ως λιπαντικό και ψυκτικό στοιχείο από τη ανάμιξη ειδικού ελαίου (MOBIL Solvae 1535) και νερό σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή (20% Λάδι – 80% Νερό), ώστε να παρέχεται στη κοπτική ακμή η καλύτερη απόδοση της.

Παρατηρείται ότι η μέση θεωρητική τραχύτητα αντίθετα με τα προηγούμενα ανήκει στα ιδιαίτερα αποδεκτά όρια κύρια ως προς τον πολλαπλασιασμό των ιστών ενώ κυμαίνεται στα κατώτερα αποδεκτά ως προς τη δυνατότητα προσκόλλησης των επάνω στο κράμα τιτανίου

## 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### Αποτελέσματα τραχύτητας και σύγκριση τους με κοινή βάση.

#### 5.1 Εξέλιξη της Κατεργασίας

Το σύνολο της δραστηριότητας αναπτύσσεται στο χώρο του Διατμηματικού Εργαστηρίου Εργαλειομηχανών. (ΔΙ.Ε.ΕΡΓΑ.)

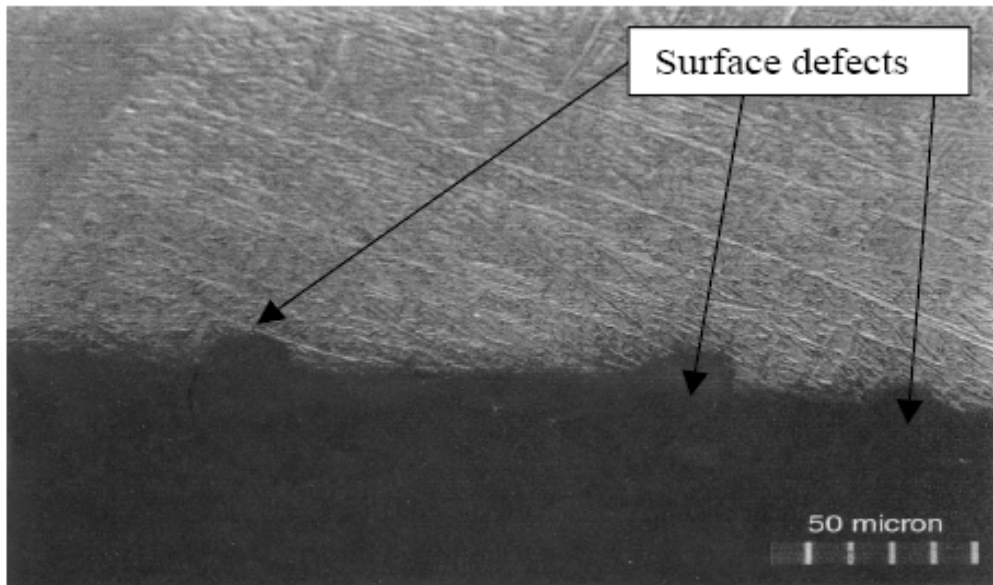
Αρχικά γίνονται οι κατεργασίες στο Τόρνο και στη συνέχεια στη Φρέζα.

Οι παραπάνω κατεργασίες γίνονται σε συμβατικό Τόρνο και συμβατική Φρέζα χρησιμοποιώντας τις παραπάνω ενδεδειγμένες ταχύτητες και όχι σε υψηλών ταχυτήτων υπολογιστικά ελεγχόμενες εργαλειομηχανές (HSM - CNC, High Speed Machining – Computed Numerical Control). Από πειράματα έχει αποδειχθεί ότι οι συμβατικές εργαλειομηχανές για τις παραπάνω κατεργασίες αποδίδουν καλύτερη ποιότητα επιφανείας και καλύτερα ελεγχόμενη και ομοιόμορφα αποδιδόμενη τραχύτητα. [30]

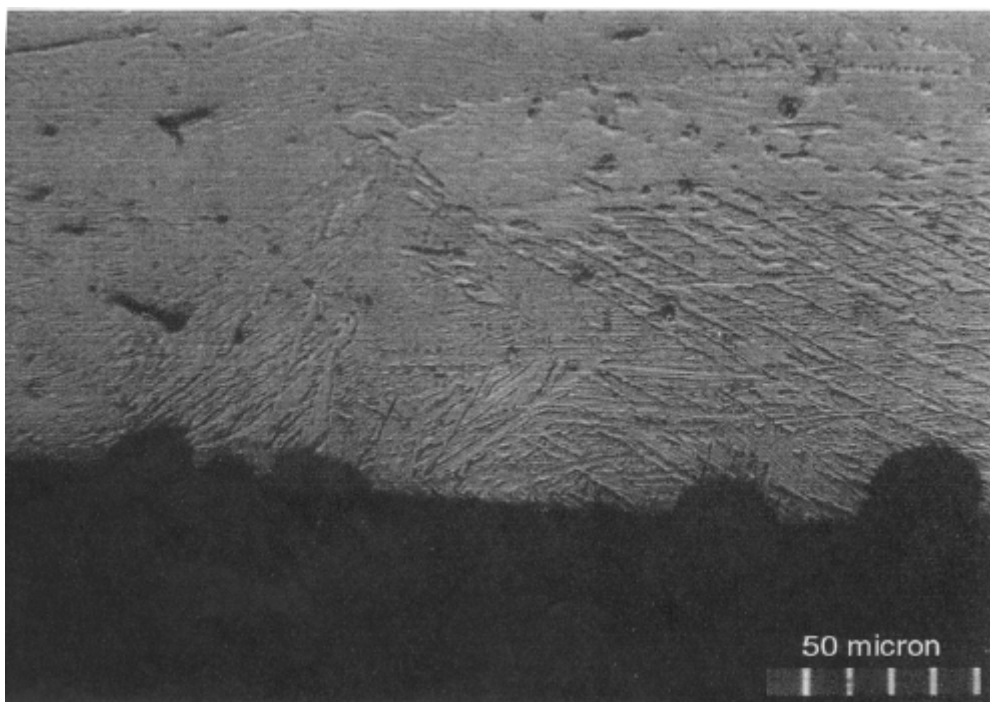
Συγκεκριμένα οι υπολογιστικά ελεγχόμενες εργαλειομηχανές επηρεάζουν αρνητικά την τραχύτητα επιφανείας, προκαλώντας περισσότερες προεξοχές και εγχοπές. Εμφανίζουν στην επιφάνεια του μετάλλου μεγαλύτερη πλαστική παραμόρφωση και αλλάζουν σημαντικά τη σκληρότητα της. Τέλος αφήνουν υψηλότερες εναπομένουσες τάσεις και δημιουργούν κατά τη

κατεργασία μικρορωγμές στη επιφάνεια του κατεργαζόμενου δοκιμίου όπου και επηρεάζουν έντονα τη κόπωση ως φαινόμενο του τεχνητού μέλους. [53]

Το μόνο που μπορεί να προσφέρουν οι παραπάνω HSM - CNC εργαλειομηχανές είναι υψηλό ρυθμό αφαίρεσης μετάλλου και ιδιαίτερα μικρό χρόνο παραγωγής κάτι όμως που δεν έχει μεγάλη βαρύτητα σε σχέση με τη ποιότητα επιφάνειας και την αντοχή της στο χρόνο.



Σχήμα 5-1 : Μικροδομή κατεργασμένου δοκιμίου με συμβατική εργαλειομηχανή. [53].



Σχήμα 5-2 : Μικροδομή κατεργασμένου δοκιμίου με ηλεκτρονικά ελεγχόμενη εργαλειομηχανή. [53].

## 5.2 Κατεργασίες

### 5.2.1 Κατεργασίες Τόρνου

Αρχικά εκτελούνται οι κατεργασίες Τόρνου όπου για καλύτερη στήριξη των δοκιμίων γίνεται μία αρχική επεξεργασία στις μετωπικές επιφάνειες τους (*Φωτογραφία 21*) και στη συνέχεια μερική διάτρηση μετώπου για τη τοποθέτηση επιπλέον στήριξης (Κεντροφορέας) (*Φωτογραφία 20*).

Κατόπιν κατεργάζονται με όλες τις παραπάνω παρατιθέμενες μεταβλητές πρώτα με χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού όπως και στη συνέχεια χωρίς αυτό.

Μετά το πέρας κάθε μίας κατεργασίας λαμβάνονται όλες οι δυνατές μετρήσεις τραχύτητας ως προς τη μέση και αντίστοιχα τη μέγιστη τιμή της.

Συνολικά κατεγράφησαν 560 μετρήσεις τραχύτητας από τις οποίες οι μισές αφορούσαν μέση τραχύτητα και οι υπόλοιπες μέγιστη τιμή.

### 5.2.2 Κατεργασίες Φρέζας

Στη συνέχεια εκτελούνται οι κατεργασίες Φρέζας όπου και αρχικά κατεργάζονται τα μέτωπα των δοκιμίων στις ενδεικνυόμενες κατεργασίες και στη συνέχεια το κυλινδρικό τμήμα τους σε διαμήκης κατεργασία. Και εδώ αρχικά γίνεται χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού στη συνέχεια δε χωρίς αυτό.

Μετά το πέρας κάθε μίας κατεργασίας λαμβάνονται όλες οι δυνατές μετρήσεις τραχύτητας ως προς τη μέση και αντίστοιχα τη μέγιστη τιμή της.

Συνολικά κατεγράφησαν στη κατεργασία Φρέζας 584 μετρήσεις τραχύτητας από τις οποίες οι μισές αφορούσαν μέση τραχύτητα και οι υπόλοιπες μέγιστη τιμή.

Συνολικά πάρθηκαν και συγκρίθηκαν 1144 μετρήσεις τραχύτητας.

## 5.3 Αποτελέσματα

### 5.3.1 Κατεργασίες Τόρνου

Όπως αναφέρεται και παραπάνω επιλέγεται ένα κοπτικό εργαλείο που περιέχει επικάλυψη WC-Co (Καρβίδιο του Βαναδίου και Κοβάλτιο), και ανήκει στα κοπτικά εργαλεία μεσαίας κοπής (MS) με υψηλής ποιότητας τελική επιφάνεια κατεργασίας. Η τροποποίηση που υφίσταται ως προς αυτό, αναφέρεται στη γωνία κοπής που σχηματίζει ως προς τον διαμήκη άξονα του Τόρνου και επιλέγεται μεταξύ των τιμών των 91°, 60° και 117°.

Η θεωρητική μέση τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας για το παραπάνω υλικό του κοπτικού εργαλείου με την επιλεγόμενη χρήση πρέπει να κυμαίνεται γύρω από τη τιμή των 6,25  $\mu\text{m}$ , σύμφωνα και με τους υπολογισμούς που έχουν γίνει και αναφέρονται παραπάνω. Για τη βέλτιστη σύμφωνα με τα παραπάνω κατεργασία (προτεινόμενη ταχύτητα περιστροφής δοκιμίου  $40 \text{ min}^{-1}$ , πρόωση κοπτικού εργαλείου 0,2 mm/rev, βάθος κοπής 2 mm), υπολογίζεται ως μέσος όρος της συνολικής μετρούμενης μέσης τραχύτητας 2,02  $\mu\text{m}$ .

Αναλυτικότερα σε γωνία κοπής  $91^\circ$ , η συνολική μέση τραχύτητα υπολογίζεται στη τιμή των 1,67  $\mu\text{m}$ , με μέγιστη τιμή των 12,6  $\mu\text{m}$ . Αντίστοιχα για γωνία κοπής  $60^\circ$ , η μέση τραχύτητα μειώνεται κύρια λόγω καλύτερης εφαρμογής των δυνάμεων κοπής σε σχέση με τη πρόωση, όπου είναι σχεδόν αντίρροπες, αντίθετα με τη πρώτη γωνία όπου είναι κάθετα εφαρμοζόμενες μεταξύ τους. Τέλος για γωνία κοπής  $117^\circ$ , παρατηρείται μεγάλη απόκλιση από την βέλτιστη μετρούμενη τραχύτητα με μέση τιμή 2,95  $\mu\text{m}$ , όπου και πάλι κύριο λόγο αυτής αποτελεί η σημαντική διαφορά την γωνία που ορίζεται από τη κατεύθυνση πρόωσης σε σχέση με τη γωνία κοπής. Η σημαντική διαφορά που εντοπίζεται τη τραχύτητα μεταξύ της θεωρητικά υπολογιζόμενης και των αντίστοιχα μετρούμενων οφείλεται στην εξέλιξη των κοπτικών εργαλείων κύρια ως προς το υλικό κατασκευής τους, όπου και όπως αναφέρεται παραπάνω οι κατάλληλες προσμίξεις υλικών σε συνδυασμό με τις σωστές επικαλύψεις προσθέτουν αντοχή και αυξημένη απόδοση στη χρήση σε εξειδικευμένα προς κατεργασία υλικά. (Διάγραμμα 6 : ).

Οι μετρούμενες τιμές της τραχύτητας ως προς την ανάπτυξη των μυϊκών ιστών του ανθρωπίνου σώματος ανήκουν στα πλαίσια της γρήγορης εξάπλωσης τους, αλλά με όχι ιδιαίτερα καλή προσκόλληση, σύμφωνα με τα αναφερόμενα παραπάνω από διάφορους μελετητές. Βέλτιστη τιμή ανάπτυξης (πολλαπλασιασμού) και ταυτόχρονα ικανοποιητικής προσκόλλησης ορίζεται η τιμή μέσης τραχύτητας ίση με 3  $\mu\text{m}$ . [60], [61].

Οι παραπάνω τιμές αναφέρονται σε κοπή με χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού, ενώ κατά τη μη χρήση του, προσαυξάνονται ανάλογα περίπου και κατά 440%, σε ορισμένες περιπτώσεις προσεγγίζοντας τη τιμή των 8,9  $\mu\text{m}$ . Αντίστοιχα οι τιμές της τραχύτητας ως προς την ανάπτυξη των μυϊκών ιστών του ανθρωπίνου σώματος ανήκουν στα πλαίσια της ιδιαίτερα καλής προσκόλλησης αλλά με όχι γρήγορη ανάπτυξη και πολλαπλασιασμό, σύμφωνα με τα αναφερόμενα παραπάνω από διάφορους μελετητές. Πρέπει να αναφερθεί μετά το πέρας κάθε κατεργασίας έγιναν σε κάθε επιφάνεια οκτώ συνολικά μετρήσεις, τέσσερις για τη μέση και τέσσερις για την ανώτερη τιμή της τραχύτητας. (Διάγραμμα 6)

Μέσος όρος με και χωρίς χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού τραχύτητας κυμαίνεται στα 5,46  $\mu\text{m}$ , τιμή προσεγγίσιμη στη θεωρητικά υπολογισμένη.

Επιπρόσθετες παρατηρήσεις που μπορούν να αναπτυχθούν αναφέρονται στις επιμέρους τροποποιήσεις που έγιναν κατά τις κατεργασίες Τόρνου. Όλες οι μεταβολές τραχύτητας

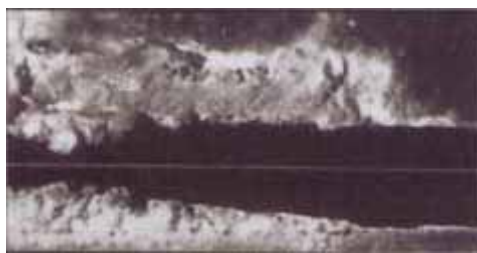


που αναφέρονται σε μία γωνία κοπής αναλογικά μεταφέρονται και στις υπόλοιπες δύο γωνίες με τις παραπάνω σχετικές παρατηρήσεις.

Αρχικά δοκιμάζεται το φαινόμενο της ασύμμετρης κοπής. Δηλαδή το κοπτικό εργαλείο δεν κόβει συνεχώς αλλά σε ακαθόριστα χρονικά διαστήματα. Επιτυγχάνεται με ασύμμετρα τοποθετημένο δοκίμιο στο Τόρνο. Έτσι αποφεύγεται το φαινόμενο του συντονισμού με επακόλουθο τη θραύση της κοπτικής ακμής και την τραχιά επιφάνεια. Τελική μέση τραχύτητα μετράται στη τιμή των  $1,57 \mu\text{m}$ , περίπου στη μισή τιμή για πλήρης αφαίρεση υλικού, με ακριβώς ίδιες συνθήκες κοπής ( $2,84 \mu\text{m}$ ). Παρατηρείται ότι για πρόωση  $0,20 \text{ mm/rev}$ , η ασύμμετρη με τη πλήρη κοπή προσεγγίζουν σε μέση τιμή τραχύτητας διότι βρίσκονται στη βέλτιστη τιμή πρόωσης. (Διάγραμμα 2).

Στη συνέχεια υφίσταται μεταβολή η πρόωση του κοπτικού εργαλείου σε τιμές γύρω από τη βέλτιστα υπολογιζόμενη ( $0,20 \text{ min}^{-1}$ ). Παρατηρείται ότι αυξάνοντας τη πρόωση ( $0,22 \text{ min}^{-1}$ ) η τραχύτητα αυξάνει περίπου κατά  $14 \%$  ( $2,06 \mu\text{m}$ ) κάτι που θεωρείται φυσιολογικό. Αντίστοιχα όταν η πρόωση μειωθεί ( $0,18 \text{ min}^{-1}$ ) παρατηρείται μία μείωση στη τραχύτητα περίπου κατά  $8 \%$ . Ταυτόχρονα αλλάζοντας τη ταχύτητα περιστροφής του δοκίμιου από τη βέλτιστα υπολογιζόμενη των  $40 \text{ mm/rev}$  σε  $28 \text{ mm/rev}$  και  $56 \text{ mm/rev}$ , παρατηρείται ιδιαίτερα μικρή αύξηση στη πρώτη περίπτωση σε ποσοστό  $10 \%$ , ενώ στη δεύτερη η αύξηση παραμένει μικρή και κυμαίνεται στη τιμή του  $11 \%$ . Επίσης παρατηρείται σε μικρή πρόωση μεγάλη μετρούμενη τραχύτητα λόγω του που προσεγγίζει τα  $5,00 \mu\text{m}$ , τιμή που δεν βοηθάει ως προς τη ποιότητα της επιφάνειας αλλά βοηθάει στη δυναμικότητα προσκόλλησης και ανάπτυξης των μυϊκών ιστών. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο χαρακτηριστικό του υπό μελέτη κράματος τιτανίου να συμπεριφέρεται όπως το Αλουμίνιο στη κοπή του σε χαμηλές προώσεις και βάθη κοπής. Δηλαδή κατά τη κοπή του προσκολλάται τηκόμενο μέταλλο στις κοπτικές ακμές του, που αποκολλά από τα υπό κατεργασία επιφανειακά στρώματα του μετάλλου τμήματα αυτού και επιδεινώνει κατακόρυφα τη τραχύτητα του. (Διάγραμμα 3).

Τέλος επέμβαση γίνεται στο βάθος κοπής εκτιμώντας το βέλτιστο ως μέγιστο βάθος κοπής για τη φόρτιση του κοπτικού εργαλείου. Σε μείωση αυτού σταδιακά από τα  $2,0 \text{ mm}$ , σε  $1,0 \text{ mm}$  και τέλος σε  $0,5 \text{ mm}$ , παρατηρείται αντίστοιχη μείωση μέσης τραχύτητας μόνο στη περίπτωση της αφαίρεσης υλικού σε βάθος  $0,5 \text{ mm}$ , που και πάλι προσεγγίζει το ποσοστό σε μείωση αυτή τη φορά κατά  $11 \%$  με μέση τιμή τραχύτητας  $1,46 \mu\text{m}$ . Όμως όταν η πρόωση μειωθεί ( $0,18 \text{ min}^{-1}$ ) παρατηρείται και εδώ η αντίστοιχη κατακόρυφη αύξηση στη τραχύτητα όπου αναπτύσσεται στη προηγούμενη παράγραφο. Συγκρίνοντας τη τραχύτητα σε σχέση με την ταχύτητα και το βάθος κοπής φαίνεται και πάλι ότι σε ιδανικά υπολογιζόμενες συνθήκες υφίσταται η ελάχιστη τραχύτητα. (Διάγραμμα 4), (Διάγραμμα 5).



*Σχήμα 5-3 : Προσκόλληση τηγμένου μετάλλου στη κοπτική ακμή κοπτικού εργαλείου τórνου και μερική τήξη του. [42].*

Συμπεραίνεται ότι για την επίτευξη υψηλής δυναμικότητας προσκόλλησης των μυϊκών ιστών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί χαμηλή πρόωση και μικρό βάθος κοπής, μέθοδος όμως ιδιαίτερα αντιπαραγωγική με προβλήματα όπως αναφέρθηκαν παραπάνω στις κοπτικές ακμές. Έτσι παραμένει η κατεργασία στις υπολογίσιμες συνθήκες κοπής με μεγάλη ταχύτητα πολλαπλασιασμού των μυϊκών ιστών αλλά με μέτρια δυναμικότητα προσκόλλησης επάνω στο βίο-αποδεκτό κράμα τιτανίου.

### 5.3.2 Κατεργασίες Φρέζας

Αντίστοιχα με την κατεργασία στο Τόρνο επιλέγονται και εδώ κοπτικά εργαλεία που περιέχουν επικάλυψη WC-Co (Καρβίδιο του Βαναδίου και Κοβάλτιο), και ανήκουν στα κοπτικά εργαλεία μεσαίας κοπής (MS) με υψηλής ποιότητας τελική επιφάνεια κατεργασίας.

Διαχωρίζονται σε κοπτικά εργαλεία που τοποθετούνται σε κατάλληλες μαχαιροφόρες κεφαλές ως βίδια (WIDIA), και είναι τριών ή έξι τεμαχίων, όπως και σε κοπτικά εργαλεία που τοποθετούνται αυτόνομα και ονομάζονται κονδύλια.

Αρχικά εξετάζεται η χρήση μαχαιροφόρας κεφαλής με τρία βίδια.

Η θεωρητική μέση τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας για το παραπάνω υλικό του κοπτικού εργαλείου με την επιλεγόμενη χρήση πρέπει να κυμαίνεται γύρω από τη τιμή των 5,00  $\mu\text{m}$ , σύμφωνα και με τους υπολογισμούς που έχουν γίνει και αναφέρονται παραπάνω.

Για τη βέλτιστη σύμφωνα με τα παραπάνω κατεργασία (ταχύτητα περιστροφής κοπτικού εργαλείου 80  $\text{min}^{-1}$ , ταχύτητα πρόωσης δοκιμίου 0,2  $\text{mm/rev}$ , βάθος κοπής 2  $\text{mm}$ ), υπολογίζεται ως μέσος όρος της συνολικής μετρούμενης μέσης τραχύτητας 13,28  $\mu\text{m}$ , με αντιστοιχία 4,45  $\mu\text{m}$  σε κοπή με χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού και 22,11  $\mu\text{m}$  σε κοπή χωρίς τη χρήση του. (Αύξηση υγρής και στεγνής κοπής κατά 396 %) Πρέπει να αναφερθεί μετά το πέρας κάθε κατεργασίας έγιναν σε κάθε επιφάνεια οκτώ συνολικά μετρήσεις, τέσσερις για τη μέση και τέσσερις για την ανώτερη τιμή της τραχύτητας. (Διάγραμμα 9).

Αναλυτικότερα σε μετωπική κοπή εμφανίζεται μία μικρή βελτίωση της τραχύτητας σε σύγκριση με τη κοπή στον διαμήκη άξονα της Φρέζας, που προσεγγίζει το ποσοστό των

11 %, με συνολική μέση τραχύτητα που μετράται στη τιμή των 3,96  $\mu\text{m}$ . Η παραπάνω μεταβολή οφείλεται στη καλύτερη στήριξη του δοκιμίου για κατεργασία μετώπου στη Φρέζα. (Φωτογραφία 27 & Φωτογραφία 28). (Διάγραμμα 8 : 7).

Οι παραπάνω τιμές μέσης τραχύτητας ειδικά σε κοπή με χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού θεωρούνται ιδανικές και προσεγγίζουν τη βέλτιστη τιμή, ως προς την ορθή ανάπτυξη των μυϊκών ιστών του ανθρωπίνου σώματος. Ανήκουν στα πλαίσια της μέσης ταχύτητας εξάπλωσης τους, και με καλή προσκόλληση, σύμφωνα με τα αναφερόμενα παραπάνω από διάφορους μελετητές. Βέλτιστη τιμή ανάπτυξης (πολλαπλασιασμού) και ταυτόχρονα ικανοποιητικής προσκόλλησης ορίζεται η τιμή μέσης τραχύτητας ίση με 3  $\mu\text{m}$ .

Επιπρόσθετες παρατηρήσεις που μπορούν να αναπτυχθούν αναφέρονται στις επιμέρους τροποποιήσεις που έγιναν κατά τις κατεργασίες με Φρέζα, με τη χρήση της μαχαιροφόρας κεφαλής τριών κοπτικών.

Στη παρούσα μελέτη δεν μπορεί να δημιουργηθεί το φαινόμενο της ασύμμετρης κοπής. Δηλαδή το κοπτικό εργαλείο να μην κόβει συνεχώς αλλά σε ακαθόριστα χρονικά διαστήματα. Η ασύμμετρη κοπή επιτυγχάνεται με αφαίρεση τυχαίων κοπτικών δοντιών από τη μαχαιροφόρα κεφαλή ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο του συντονισμού και της ταλάντωσης, με επακόλουθο τη θραύση της κοπτικής ακμής και την τραχιά επιφάνεια. Υφίστανται τρία μόνο κοπτικά δόντια και δεν επιτυγχάνεται το παραπάνω φαινόμενο σωστά, αφαιρώντας ένα ή περισσότερα από αυτά.

Δεν υφίσταται μεταβολή στη πρόωση του δοκιμίου, διότι η τιμή είναι ήδη πολύ μικρή.

Αλλάζοντας τη ταχύτητα περιστροφής της μαχαιροφόρας κεφαλής, από τη βέλτιστα υπολογιζόμενη των 80  $\text{mm}^{-1}$  που είναι και η ελάχιστη δυνατή που μπορεί να ρυθμιστεί στη Φρέζα σε 160  $\text{mm}^{-1}$  (αμέσως επόμενη), παρατηρείται μείωση της τραχύτητας από τη μέση τιμή των 4,45  $\mu\text{m}$  στη τιμή των 3,31  $\mu\text{m}$ . (μείωση 26 %) Προσεγγίζεται ακόμη περισσότερο η βέλτιστη ταχύτητας εξάπλωσης των μυϊκών ιστών, και με ιδιαίτερα καλή προσκόλληση, σύμφωνα με τα αναφερόμενα παραπάνω. Οφείλεται στο αντίθετο φαινόμενο που έχει αναλυθεί στη κατεργασία Τόρνου. Δηλαδή κατά τη κοπή του δεν προσκολλάται τηκόμενο μέταλλο στις κοπτικές ακμές του και δεν αποκολλάται από τα υπό κατεργασία επιφανειακά στρώματα του μετάλλου τμήματα αυτού που να επιδεινώνουν κατακόρυφα τη τραχύτητα του. Έτσι σε αντίστοιχη περίπτωση με μικρό βάθος κοπής όπου εμφανίζεται το παραπάνω φαινόμενο, η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής επιφέρει και αύξηση κατά τουλάχιστον 16,79 % της μέσης τιμής της τραχύτητας. Τέλος επέμβαση γίνεται στο βάθος κοπής εκτιμώντας το βέλτιστο ως μέγιστο βάθος κοπής για τη φόρτιση του κοπτικού εργαλείου. Σε μείωση αυτού σταδιακά από τα 2,0 mm, σε 1,0 mm και τέλος σε 0,5 mm, παρατηρείται αντίστοιχη κατακόρυφη μείωση μέσης τραχύτητας εφάμιλλη και στις δύο περιπτώσεις, που και πάλι προσεγγίζει το ποσοστό σε μείωση αυτή

τη φορά κατά 509 % σε βάθος κοπής 1,0 mm και αντίστοιχα 564 % με μέση τιμή τραχύτητας 0,67  $\mu\text{m}$ . (Διάγραμμα 8).

Συμπεραίνεται ότι για την επίτευξη υψηλής δυναμικότητας προσκόλλησης των μυϊκών ιστών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέγιστο βάθος κοπής (2,0 mm), όπως και υψηλή ταχύτητα περιστροφής (160 min/rev), μέθοδος ιδιαίτερα παραγωγική χωρίς προβλήματα στις κοπτικές ακμές. Έτσι παραμένει η κατεργασία στις υπολογίσιμες συνθήκες κοπής με ιδιαίτερα ικανοποιητική ταχύτητα πολλαπλασιασμού των μυϊκών ιστών αλλά με βέλτιστη δυναμικότητα προσκόλλησης των, επάνω στο κράμα τιτανίου.

Στη συνέχεια εξετάζεται η χρήση μαχαιροφόρας κεφαλής με έξι βίδια, όπου και συγκρίνεται με τη προηγούμενη με τρία βίδια.

Η θεωρητική μέση τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας για το παραπάνω υλικό του κοπτικού εργαλείου με την επιλεγόμενη χρήση πρέπει να κυμαίνεται γύρω από τη τιμή των 5,00  $\mu\text{m}$ , σύμφωνα και με τους υπολογισμούς που έχουν γίνει και αναφέρονται παραπάνω, όπως και προηγούμενα.

Για τη βέλτιστη σύμφωνα κατεργασία (ταχύτητα περιστροφής κοπτικού εργαλείου 80 min<sup>-1</sup>, ταχύτητα πρόωσης δοκιμίου 0,2 mm/rev, βάθος κοπής 2 mm), υπολογίζεται ως μέσος όρος της συνολικής μετρούμενης μέσης τραχύτητας 14,86  $\mu\text{m}$ , με αντιστοιχία 4,05  $\mu\text{m}$  σε κοπή με χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού και 25,68  $\mu\text{m}$  σε κοπή χωρίς τη χρήση του. (Αύξηση υγρής και στεγνής κοπής κατά 534 %)

Λαμβάνονται πάντα για τον αποκλεισμό λαθών στις μετρήσεις, τέσσερις τιμές μέσης τραχύτητας. (Διάγραμμα 10, Διάγραμμα 11, Διάγραμμα 12).

Σύγκριση κοπής με τρία κοπτικά βίδια και έξι αντίστοιχα, εμφανίζει μία ελάχιστη βελτίωση στη δεύτερη περίπτωση (9,0 %), που οφείλεται στο μικρότερο μέγεθος του κοπτικού εργαλείου (Βίδι), άρα και στη καλύτερη του πρόσδεση, στη μαχαιροφόρα κεφαλή με πολύ μικρή δυνατότητα ανάπτυξης ροπής στρέψης, αντίθετα της πρώτης περίπτωσης, όπου λόγω της μεγαλύτερης προεξοχής του εμφανίζεται μεγαλύτερη ροπή στρέψης και αντίστοιχα ταλάντωσης. (Διάγραμμα 13).

Οι παραπάνω τιμές μέσης τραχύτητας ειδικά σε κοπή με χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού θεωρούνται ιδανικές και προσεγγίζουν τη βέλτιστη τιμή, ως προς την ορθή ανάπτυξη των μυϊκών ιστών του ανθρωπίνου σώματος. Ανήκουν στα πλαίσια της μέσης ταχύτητας εξάπλωσης τους, και με καλή προσκόλληση, σύμφωνα με τα αναφερόμενα παραπάνω από διάφορους μελετητές. Βέλτιστη τιμή ανάπτυξης (πολλαπλασιασμού) και ταυτόχρονα ικανοποιητικής προσκόλλησης, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ορίζεται η τιμή μέσης τραχύτητας ίση με 3,0  $\mu\text{m}$ .

Επιπρόσθετες παρατηρήσεις που μπορούν να αναπτυχθούν αναφέρονται στις επιμέρους τροποποιήσεις που έγιναν κατά τις κατεργασίες Φρέζας με τη χρήση της μαχαιροφόρας κεφαλής έξι Κοπτικών.

Και στη παρούσα κατεργασία μπορεί να δημιουργηθεί το φαινόμενο της ασύμμετρης κοπής. Δηλαδή το κοπτικό εργαλείο να μην κόβει συνεχώς αλλά σε ακαθόριστα χρονικά διαστήματα. Επιτυγχάνεται με αφαίρεση τυχαίων κοπτικών δοντιών από τη μαχαιροφόρα κεφαλή ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο του συντονισμού και της ταλάντωσης, με επακόλουθο τη θραύση της κοπτικής ακμής και την τραχιά επιφάνεια. Αφαιρούνται τα κοπτικά κατά σειρά αρίθμησης 2 και 5, από το σύνολο των έξι. Βελτιώνεται η μέση τραχύτητα όχι όμως τόσο πολύ όσο στον Τόρνο αλλά περίπου κατά το ένα τέταρτο της, από 1,78  $\mu\text{m}$  σε 1,34  $\mu\text{m}$ , μετρούμενη σε μέσες τιμές.

Και εδώ δεν υφίσταται μεταβολή η πρόωση του δοκιμίου διότι η τιμή της είναι ήδη πολύ μικρή.

Αλλάζοντας τη ταχύτητα περιστροφής της μαχαιροφόρας κεφαλής, από τη βέλτιστα υπολογιζόμενη των 80 mm/rev που είναι και η ελάχιστη δυνατή που μπορεί να ρυθμιστεί η Φρέζα σε 160 mm/rev (αμέσως επόμενη), παρατηρείται μείωση της τραχύτητας από τη μέση τιμή των 4,05  $\mu\text{m}$  στη τιμή των 2,01  $\mu\text{m}$ . (μείωση 49 %) Εκτιμάται ότι για όποια ταχύτητα περιστροφής επιλεγεί επιτυγχάνεται η βέλτιστη ταχύτητα εξάπλωσης των μυϊκών ιστών, και με ιδιαίτερα καλή προσκόλληση. Οφείλεται στο αντίθετο φαινόμενο που έχει αναλυθεί στη κατεργασία Τόρνου, και είναι ανάλογο της προηγούμενης κατεργασίας με τρία κοπτικά. Έτσι σε αντίστοιχη περίπτωση με μικρό βάθος κοπής (0,5 mm) η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής επιφέρει και αύξηση κατά τουλάχιστον 77 % της μέσης τιμής της τραχύτητας. Τέλος επέμβαση γίνεται στο βάθος κοπής εκτιμώντας το βέλτιστο ως μέγιστο βάθος κοπής για τη φόρτιση του κοπτικού εργαλείου. Σε μείωση αυτού σταδιακά από τα 2,0 mm, σε 1,0 mm και τέλος σε 0,5 mm, παρατηρείται αντίστοιχη κατακόρυφη μείωση μέσης τραχύτητας εφάμιλλη και στις δύο περιπτώσεις, που και πάλι προσεγγίζει το ποσοστό σε μείωση αυτή τη φορά κατά 439 % σε βάθος κοπής 1,0 mm και αντίστοιχα 744 % με μέση τιμή τραχύτητας 0,48  $\mu\text{m}$ . (Διάγραμμα 14).

Συμπεραίνεται ότι για την επίτευξη υψηλής δυναμικότητας προσκόλλησης των μυϊκών ιστών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέγιστο βάθος κοπής (2,0 mm), όπως και υψηλή ταχύτητα περιστροφής (160 min/rev), μέθοδος ιδιαίτερα παραγωγική χωρίς προβλήματα στις κοπτικές ακμές. Έτσι παραμένει η κατεργασία στις υπολογίσιμες συνθήκες κοπής με ιδιαίτερα ικανοποιητική ταχύτητα πολλαπλασιασμού των μυϊκών ιστών αλλά με βέλτιστη δυναμικότητα προσκόλλησης των επάνω στο κράμα τιτανίου.

Πρέπει να τονιστεί ότι κατά τη σύγκριση μεταξύ των διαφόρων Κοπτικών για τη μαχαιροφόρα κεφαλή με τα έξι βίδια, το κοπτικό εργαλείο με γωνία ελευθερίας μικρότερη από τα άλλα δύο (11° έναντι 25°) εμφάνισε σημαντικά λιγότερο τραχιά επιφάνεια σε ποσοστό 45 % (2,79  $\mu\text{m}$ ), ενώ τα Κοπτικά δεξιάς και ουδέτερης κοπής εμφάνισαν παρόμοια αποτελέσματα με μία μικρή βελτίωση αυτά της δεξιάς κοπής.

Τέλος εξετάζεται η χρήση κονδυλίων, όπου και συγκρίνονται με τη χρήση της μαχαιροφόρας κεφαλής.

Λόγω του ότι το κάθε κονδύλι κατά τη κατεργασία συμπεριφέρεται διαφορετικά διαχωρίζονται σε κονδύλι με υψηλές ταχύτητες περιστροφής (E6MHD1000 - 5440 min<sup>-1</sup>) και με χαμηλές ταχύτητες περιστροφής (VALHD 1000 - 650 έως 1115 min<sup>-1</sup>) .

Η θεωρητική μέση τραχύτητα της τελικής επεξεργασμένης επιφάνειας για το πρώτο κονδύλι υπολογίζεται στα 8,3 μm, ενώ για το δεύτερο 0,52 μm, σύμφωνα και με τους υπολογισμούς που έχουν γίνει και αναφέρονται παραπάνω, όπως και προηγούμενα. Ως πρώτη προσέγγιση εκτιμάται ότι το κονδύλι υψηλών ταχυτήτων φέρει καλύτερα αποτελέσματα για χρήση του σε κατεργασία βίο-αποδεκτού κράματος τιτανίου.

Αρχικά στο κονδύλι υψηλών ταχυτήτων περιστροφής, για τη βέλτιστη σύμφωνα με τα παραπάνω κατεργασία (ταχύτητα περιστροφής κοπτικού εργαλείου 5440 min<sup>-1</sup>, ταχύτητα πρόωσης δοκιμίου 0,56 mm/rev, βάθος κοπής 0,1 mm), υπολογίζεται ως μέσος όρος της συνολικής μετρούμενης μέσης τραχύτητας 0,60 μm, με αντιστοιχία 0,39 μm σε κοπή με χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού και 0,81 μm σε κοπή χωρίς τη χρήση του. Αύξηση υγρής και στεγνής κοπής κατά 107 %. Υπάρχει μεγάλη απόκλιση από τη θεωρητικά υπολογισμένη η οποία όμως καλύπτεται όταν γίνεται κατεργασία μετώπου. Αντίθετα με τη μαχαιροφόρα κεφαλή οι δυνάμεις κοπής που δημιουργούνται σε σχέση με τη στήριξη του δοκιμίου προκαλούν αύξηση της μέσης τραχύτητας κύρια σε κοπή χωρίς χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού. Έτσι με αντίστοιχες συνθήκες κοπής σε κατεργασία μετώπου η μέση τραχύτητα εκκινεί από 1,70 μm, με κατάληξη στα 4,70 μm. (Διάγραμμα 15, Διάγραμμα 16).

Αντίστοιχα στο κονδύλι χαμηλών ταχυτήτων περιστροφής, για τη βέλτιστη σύμφωνα με τα παραπάνω κατεργασία (ταχύτητα περιστροφής κοπτικού εργαλείου 650 min<sup>-1</sup>, ταχύτητα πρόωσης δοκιμίου 75 mm/rev, βάθος κοπής 2 mm), υπολογίζεται ως μέσος όρος της συνολικής μετρούμενης μέσης τραχύτητας 1,34 μm, με αντιστοιχία 0,75 μm σε κοπή με χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού και 1,93 μm σε κοπή χωρίς τη χρήση του. Αύξηση υγρής και στεγνής κοπής κατά 157 %. Πρέπει να αναφερθεί ότι το βάθος κοπής είναι 2,0 mm, αντίθετα με τη προηγούμενη περίπτωση όπου είναι 0,1 mm. Σε ανάλογο βάθος κοπής (0,5 mm) οι παραπάνω τιμές τραχύτητας βελτιώνονται με συνολική μετρούμενη μέση τραχύτητα 0,69 μm, και αντιστοιχία 0,44 μm σε κοπή με χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού και 0,94 μm σε κοπή χωρίς τη χρήση του. Αύξηση υγρής και στεγνής κοπής κατά 113%. Εδώ δεν παρουσιάζεται το φαινόμενο έντονης μεταβολής στη τραχύτητα από την κατεργασία κατά τον διαμήκη άξονα ή κατά μέτωπο. Έτσι με αντίστοιχες συνθήκες κοπής σε κατεργασία μετώπου η μέση τραχύτητα εκκινεί από 0,67 μm, με κατάληξη στα 1,34 μm. Διαφορά διαμήκης και μετωπικής κοπής 52 %. (Διάγραμμα 18).

Σύγκριση κοπής με κονδύλι υψηλών ταχυτήτων και αντίστοιχα χαμηλών ταχυτήτων εμφανίζει την ιδιαιτερότητα ότι το πρώτο έχει γενικότερα μία μικρή βελτίωση στη τραχύτητα με ανάλογες συνθήκες κοπής, σε σχέση με το δεύτερο αντίθετα με τις θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές μέσης τραχύτητας που αναφέρονται παραπάνω.

Η απόκλιση αυτή μεγαλώνει ιδιαίτερα όταν τα κονδύλια λειτουργούν στις ενδεδειγμένες κατά περίπτωση συνθήκες λειτουργίας όπου αυτό τον χαμηλών ταχυτήτων εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη μέση τραχύτητα στην κατεργασμένη επιφάνεια από αυτό των χαμηλών αντίστοιχα. Οφείλεται σύμφωνα με παρατηρήσεις, στη προσκόλληση τηγμένου κράματος τιτανίου στις κοπτικές ακμές, και λόγω χαμηλής ταχύτητας κοπής να δημιουργείται το φαινόμενο της ψευδοκοπής όπου και αυξάνει τη τραχύτητα στη τελική επιφάνεια κατεργασίας.

Οι παραπάνω τιμές μέσης τραχύτητας θεωρούνται όχι καλές ως προς την ορθή ανάπτυξη των μυϊκών ιστών του ανθρώπινου σώματος. Ανήκουν στα πλαίσια της μεγάλης ταχύτητας εξάπλωσης τους, και με μειωμένη προσκόλληση, σύμφωνα με τα αναφερόμενα παραπάνω. Βέλτιστη τιμή ανάπτυξης (πολλαπλασιασμού) και ταυτόχρονα ικανοποιητικής προσκόλλησης ορίζεται η τιμή μέσης τραχύτητας ίση με  $3,0 \mu\text{m}$ .

Επιπρόσθετες παρατηρήσεις που μπορούν να αναπτυχθούν αναφέρονται στις επιμέρους τροποποιήσεις που έγιναν κατά τις κατεργασίες με φρέζας και με τη χρήση των κονδυλίων υψηλών και χαμηλών ταχυτήτων.

Στη παρούσα κατεργασία δεν μπορεί να δημιουργηθεί το φαινόμενο της ασύμμετρης κοπής. Δηλαδή το κοπτικό εργαλείο να μην κόβει συνεχώς αλλά σε ακαθόριστα χρονικά διαστήματα, λόγω του ότι δεν δύναται να αφαιρεθούν κοπτικές ακμές του.

Δεν υφίσταται μεταβολή στη πρόωση του κοπτικού εργαλείου σε καμία από τις δύο περιπτώσεις κοπής με κονδύλι.

Η ταχύτητα περιστροφής στο κονδύλι υψηλών ταχυτήτων είναι ήδη πολύ υψηλή και δεν γίνεται καμία αλλαγή της. Αντίθετα αλλάζοντας τη ταχύτητα περιστροφής του κονδυλίου χαμηλών ταχυτήτων, από τη βέλτιστα υπολογιζόμενη των  $650 \text{ mm/rev}$  σε μεγαλύτερη διαβάθμιση που αναφέρεται και παραπάνω των  $1115 \text{ mm/rev}$ , παρατηρείται αύξηση της μέσης τραχύτητας κατά  $75 \%$ . Εκτιμάται ότι για όποια ταχύτητα περιστροφής επιλεγεί επιτυγχάνεται η υψηλή ταχύτητας εξάπλωσης των μυϊκών ιστών, και με όχι όμως ιδιαίτερα καλή προσκόλληση. (Διάγραμμα 17).

Τέλος επέμβαση γίνεται στο βάθος κοπής μόνο για τη χρήση κονδυλίου χαμηλών ταχυτήτων, όπου από τους υπολογισμούς δίδεται το δικαίωμα να εισχωρήσει με βάθος κοπής που προσεγγίζουν τα  $2 \text{ mm}$ . Εκτιμώντας το βέλτιστο των  $2 \text{ mm}$ , ως μέγιστο βάθος κοπής για τη φόρτιση του κοπτικού εργαλείου. σταδιακά μειώνεται σε  $1,0 \text{ mm}$  και τέλος σε  $0,5 \text{ mm}$ , όπου και παρατηρείται μηδενική αλλαγή στη τιμή της μέσης τραχύτητας με μία παράδοξη μικρή αύξηση της κατά  $117 \%$  σε βάθος κοπής  $1,0 \text{ mm}$  ενώ σε βάθος  $0,5 \text{ mm}$  και  $2,0 \text{ mm}$  δεν αλλάζει ιδιαίτερα η μετρούμενη τραχύτητα. (Διάγραμμα 19).

Συμπεραίνεται ότι για την επίτευξη υψηλής δυναμικότητας προσκόλλησης των μυϊκών ιστών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέγιστο βάθος κοπής ( $2,0 \text{ mm}$ ), όπως και υψηλή ταχύτητα

περιστροφής (1115 min/rev) , μέθοδος που όπως αναφέρεται και παραπάνω δεν ενδείκνυται για ικανοποιητική ταχύτητα πολλαπλασιασμού των μυϊκών ιστών με ταυτόχρονη υψηλή δυναμικότητα προσκόλλησης των επάνω στο κράμα τιτανίου.

Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι κατά τη σύγκριση μεταξύ των διαφόρων κοπτικών φρέζας (μαχαιροφόρα κεφαλή – κονδύλι) η κατεργασία με τη μαχαιροφόρα εμφάνισε σημαντικά υψηλότερη μέση τραχύτητα στη τελική κατεργασμένη επιφάνεια σε ποσοστό που ξεπερνά το 200 %. Όπως είναι αναμενόμενο η χρήση Κοπτικών σε μαχαιροφόρα κεφαλή εξυπηρετεί τις ανάγκες κατεργασίας βίο-αποδεκτών κραμάτων τιτανίου, ώστε να υφίσταται μετά το πέρας της κατεργασίας ικανή μέση τραχύτητα για την ικανοποιητικότερη υγιής ανάπτυξη των μυϊκών ιστών. (Διάγραμμα 20).

## 5.4 Συγκρίσεις

Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία δεν υπάρχουν συγκρίσιμα αποτελέσματα από άλλους ερευνητές. Υφίσταται όπως αναφέρεται παραπάνω αναπτυγμένη βιβλιογραφία επάνω στη μελέτη τραχύτητας βίο-αποδεκτών κραμάτων τιτανίου και συναφών μετάλλων σε σχέση με την ανάπτυξη των μυϊκών ιστών και περαιτέρω ισχυροποίηση τους επάνω στο τεχνητό μέλος. Επίσης υπάρχουν μελέτες επηρεασμού από εξωτερικούς παράγοντες της τραχύτητας για καλύτερη ανάπτυξη ιστών, που έχουν αναφερθεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών έχουν αποτυπωθεί πολλαπλώς στην εξέλιξη της παρούσας διατριβής.



## 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### Συλλογή συμπερασμάτων και ανάπτυξη αυτών για περαιτέρω επεξεργασία.

#### 6.1 Συμπεράσματα

Στη παρούσα διατριβή μελετήθηκε η τραχύτητα που αναπτύσσεται και τα χαρακτηριστικά κοπής κατά την κατεργασία βιο-αποδεκτών κραμάτων τιτανίου με συμβατικές εργαλειομηχανές.

Χρησιμοποιήθηκε ως υλικό κατεργασίας Ti6Al4V, με τα κατάλληλα εργαλεία κοπής. Τέλος ως συμβατικές εργαλειομηχανές επιλέχθηκαν ο τόρνος και η φρέζα.

Αρχικά στη κατεργασία με τη χρήση τόρνου γενικότερα, παρατηρείται ότι εάν υπάρχει απόκλιση από τις υπολογίσιμες βέλτιστες συνθήκες κοπής, τότε και η τραχύτητα βρίσκεται μέσα στα αποδεκτά όρια για την ανάπτυξη των μυϊκών ιστών. Η βασικότερη απόκλιση υφίσταται στη μη χρήση ψύξης και λίπανσης κατά τη διάρκεια της κοπής. Η παραπάνω απόκλιση δημιουργεί όμως έντονο πρόβλημα στα κοπτικά εργαλεία, παρουσιάζοντας έντονη φθορά, με φαινόμενα ψευδοκοπής και θραύσης της κοπτικής ακμής.

Αντίθετα στη κατεργασία με τη χρήση Φρέζας, παρατηρείται ότι εάν διεξάγεται η κατεργασία αφαίρεσης υλικού στις βέλτιστες συνθήκες κοπής, τότε και η τραχύτητα βρίσκεται μέσα στα

αποδεκτά όρια για την ανάπτυξη των μυϊκών ιστών, εκτός τη χρήση κονδυλίων ως κοπτικά εργαλεία που προσεγγίζονται οι τιμές μέσης τραχύτητας αυτές του τόρνου.

Οι παραπάνω κατεργασίες είναι εύκολα εφικτές σε βιοτεχνικό και βιομηχανικό περιβάλλον με χαμηλό τώρα πια, λόγω της εξέλιξης των κοπτικών εργαλείων, κόστος. Όπως έχει αναφερθεί εύκολα μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή τραχύτητα χωρίς τη χρήση επιπλέον κατεργασιών, όπως κεραμικών επικαλύψεων ή έκχυσης ιόντων, όπου μέχρι τώρα στα συνήθη από χύτευση τεχνικά μέλη εφαρμοζόταν.

Η διαδικασία χύτευσης κράματος τιτανίου με ελεγχόμενη τραχύτητα ήταν μέχρι τώρα η καλύτερη μέθοδος κατασκευής τεχνητών μελών. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας η παραπάνω μέθοδος έχει φτάνει σε τέλμα χωρίς να μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις σε ιδιαίτερες κατασκευές με πολύπλοκη μορφολογία. Επίσης η χύτευση απαιτεί τουλάχιστον για τον ελληνικό χώρο υψηλές οικονομικές απαιτήσεις σε πάγιο εξοπλισμό, με περιορισμένες δυνατότητες.

Αναπόφευκτα η εξέλιξη κινείται στη κατεργασία με εργαλειομηχανές και ιδιαίτερα συμβατικές που μπορούν να προσδώσουν καλύτερα ελεγχόμενη και ομοιόμορφα αποδιδόμενη τραχύτητα.

Περαιτέρω ανάπτυξη της παραπάνω μελέτης μπορεί να γίνει σε περιβάλλον οικονομοτεχνικό με τη σύνταξη μελέτης που να κινείται στους άξονες κόστους, απόδοσης και τραχύτητας.

# Διαγράμματα

A.

κοπτικό τόρνον TNMG220408 - MSRT9010

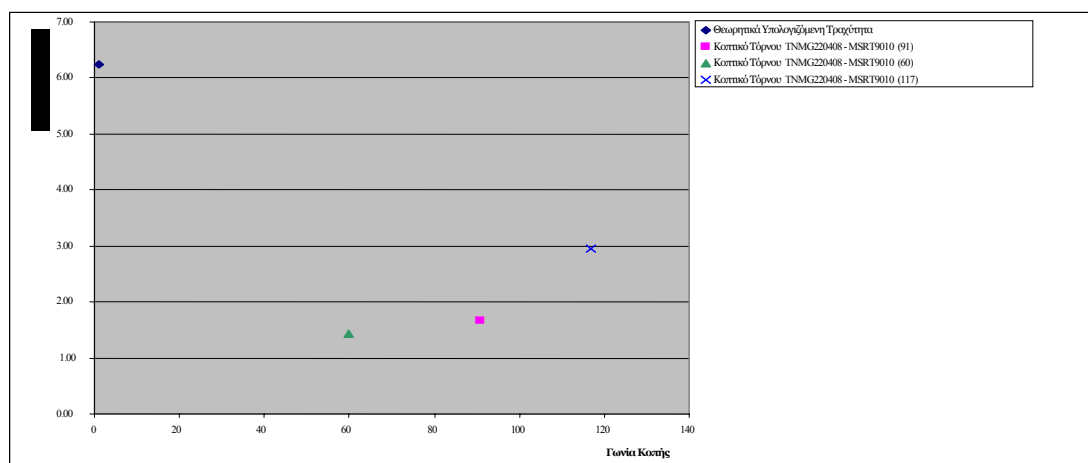
Μανέλα PTGNR2525M22 (91°)

κοπτικό τόρνον TNMG220408 - MSRT9010

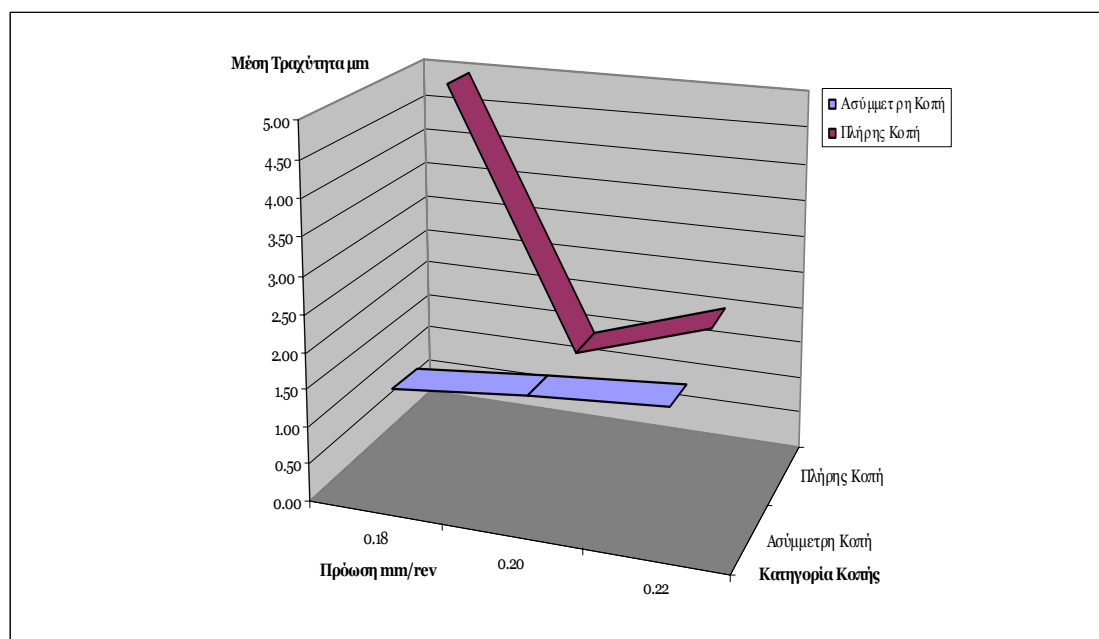
Μανέλα MTEEN2525M22N (60°)

κοπτικό τόρνον TNMG220408 - MSRT9010

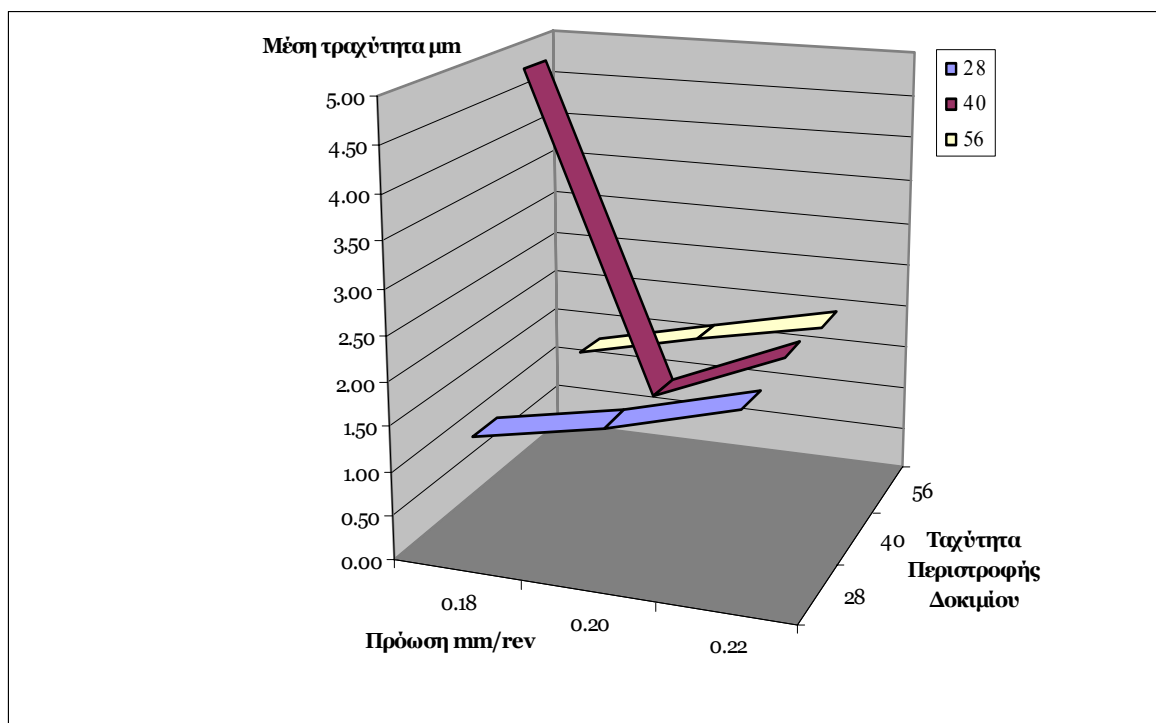
Μανέλα MTJNL2525M22N (117°)



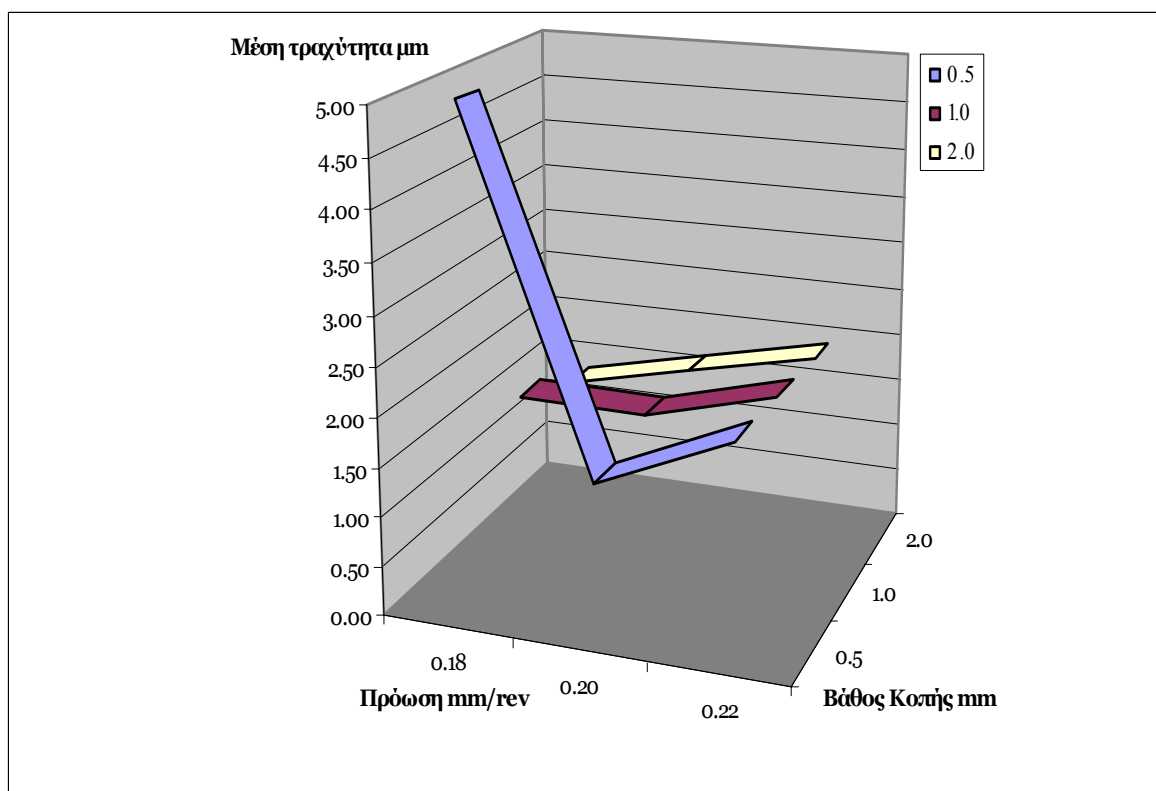
Διάγραμμα 1 : Σύγκριση θεωρητικά υπολογιζόμενης μέσης τραχύτητας από μετρούμενη τραχύτητα στις κατεργασίες τόρνον με όλα τα κοπτικά εργαλεία.



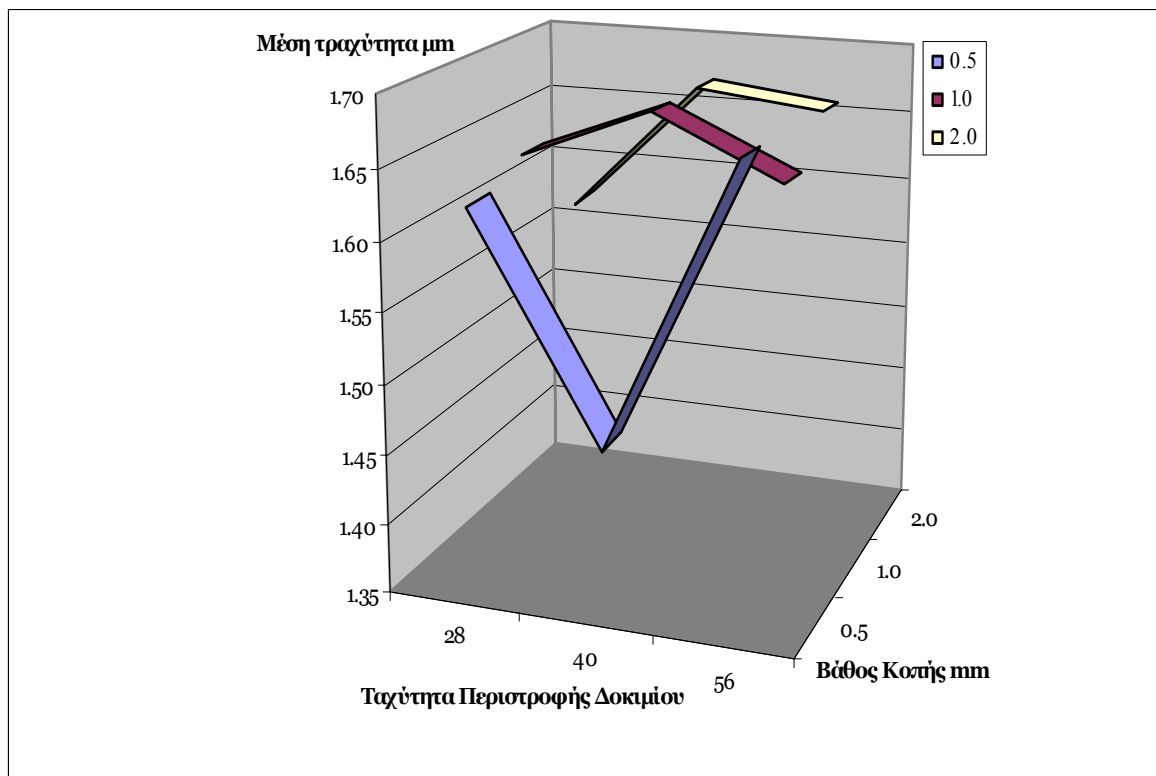
Διάγραμμα 2 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή στη πρόωση σε συμμετρική και ασύμμετρη κοπή με κοπτικό εργαλείο τόρνον κλίσης 91°.



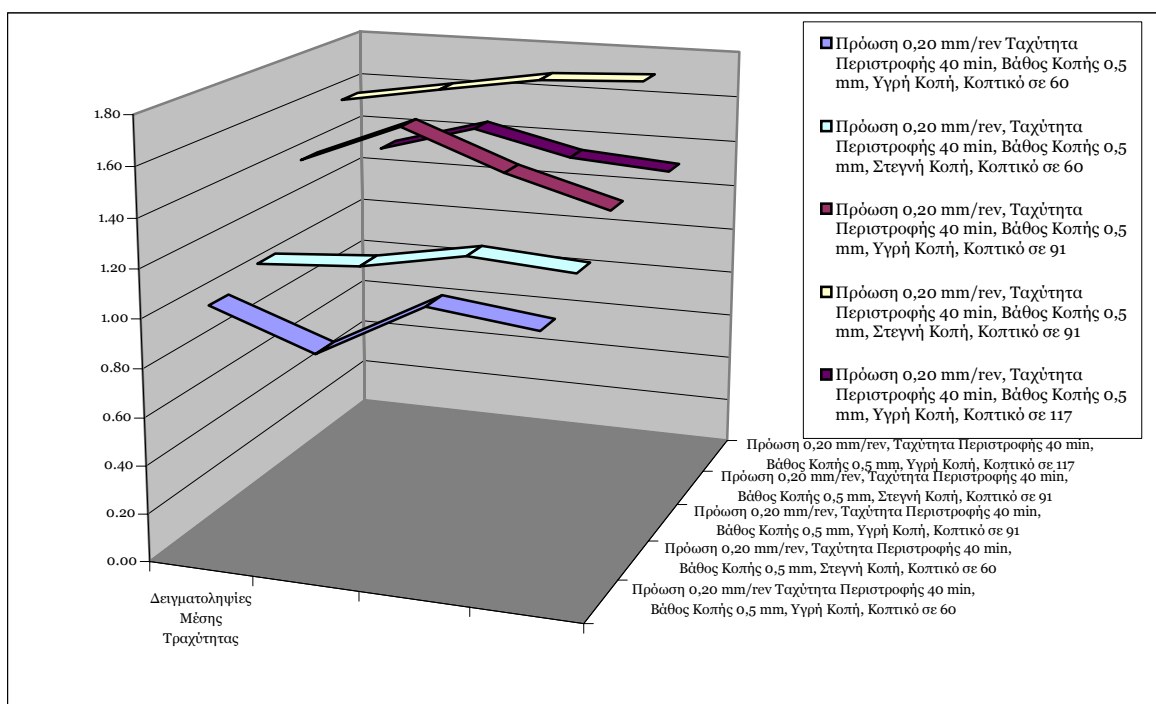
Διάγραμμα 3 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή στη πρόωση και στη ταχύτητα περιστροφής σε κοπτικό εργαλείο τόρνου κλίσης 91°.



Διάγραμμα 4 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή στη πρόωση και στο βάθος κοπής σε κοπτικό εργαλείο τόρνου κλίσης 91°.



Διάγραμμα 5 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή στη ταχύτητα περιστροφής του δοκιμίου και στο βάθος κοπής με κοπτικό εργαλείο τόννου κλίσης  $91^\circ$ .



Διάγραμμα 6 : Σύγκριση τραχύτητας σε υγρή και στεγνή κοπή με κοπτικό εργαλείο τόννου κλίσης  $60^\circ$ ,  $91^\circ$  και  $117^\circ$ .

## B.

**κοπτικό φρέζας TEEN2204PEER1**

**κεφαλή τριών (3) κοπτικών ASX400R403S32**

κομπικό φρέζας SEEN1203AFFN1

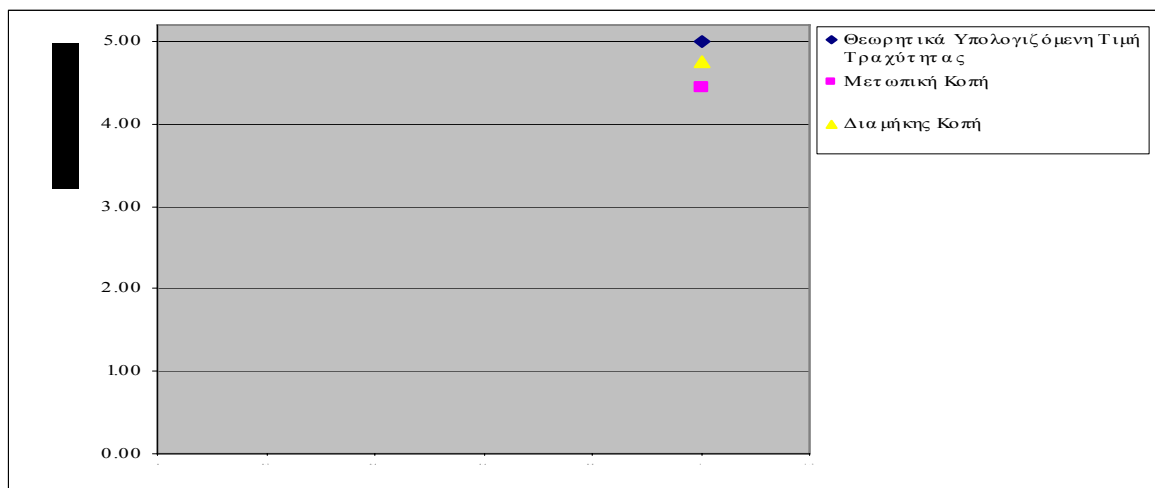
**κεφαλή έξι (6) κοπτικών SE445080A06R**

κοπτικό φρέζας SEEN1203EFFR1

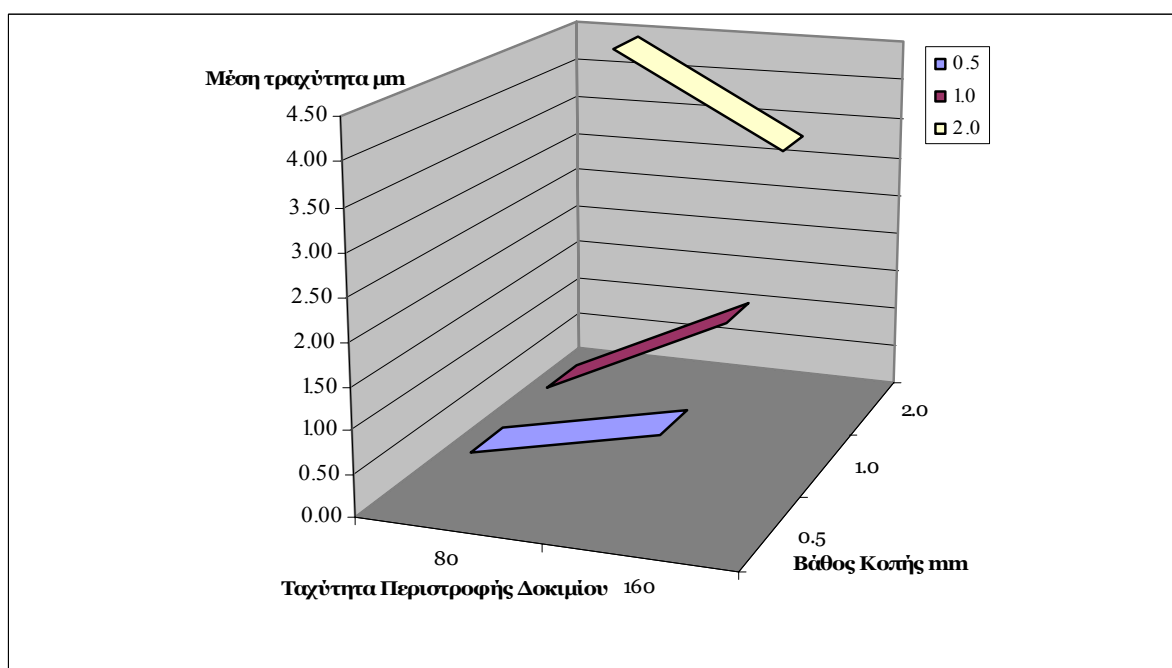
**κεφαλή έξι (6) κοπτικών SE445080A06R**

**κοπτικό φρέζας SEEN1203EEER1**

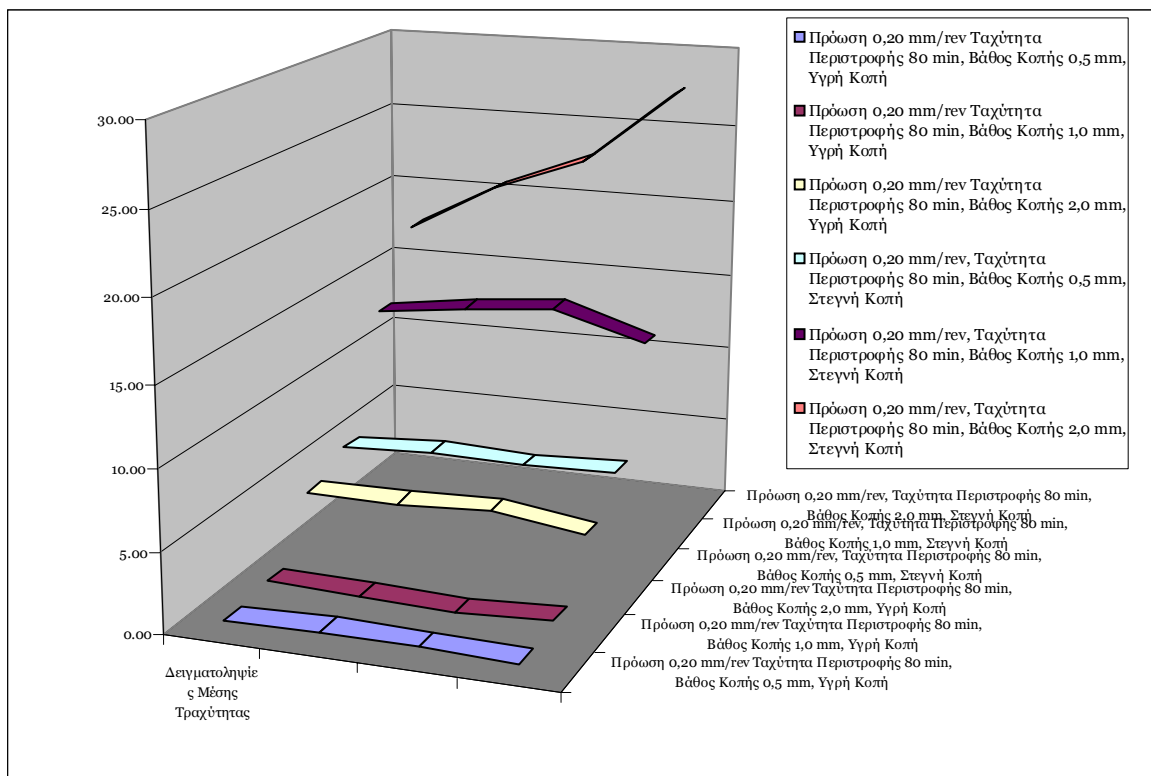
**κεφαλή έξι (6) κοπτικών SE445080A06R**



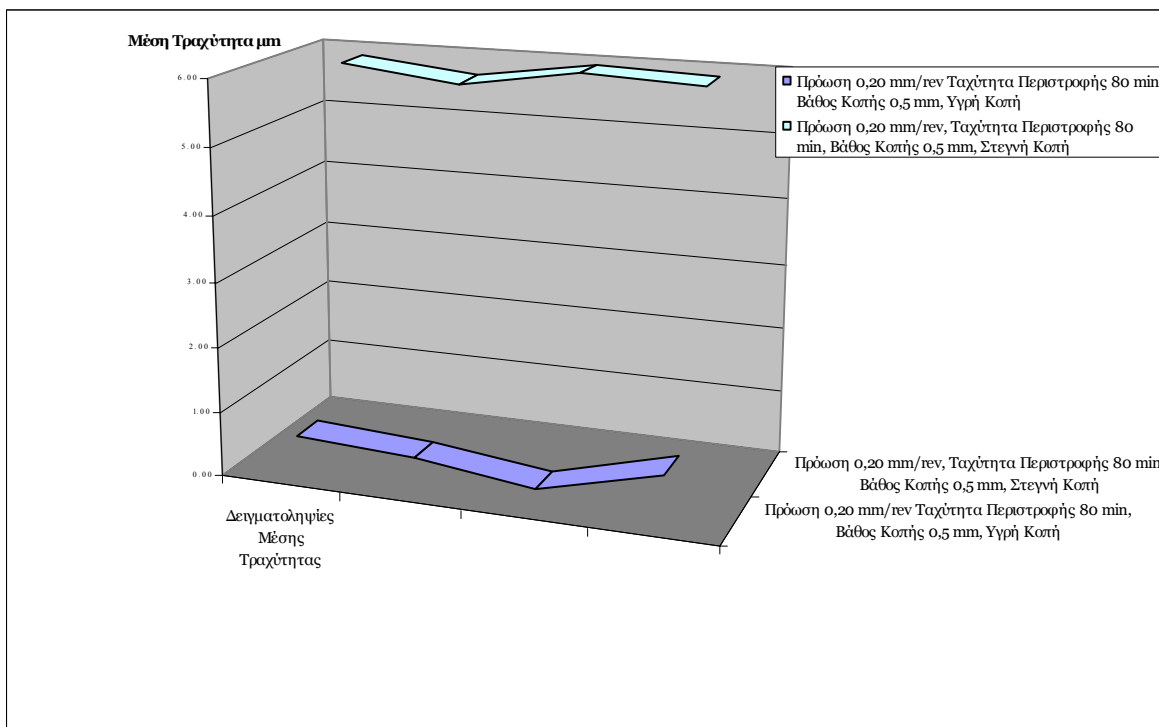
Διάγραμμα 7 : Σύγκριση τραχύτητας θεωρητικά υπολογιζόμενης σε μετωπική και διαμήκης κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας τριών κοπτικών.



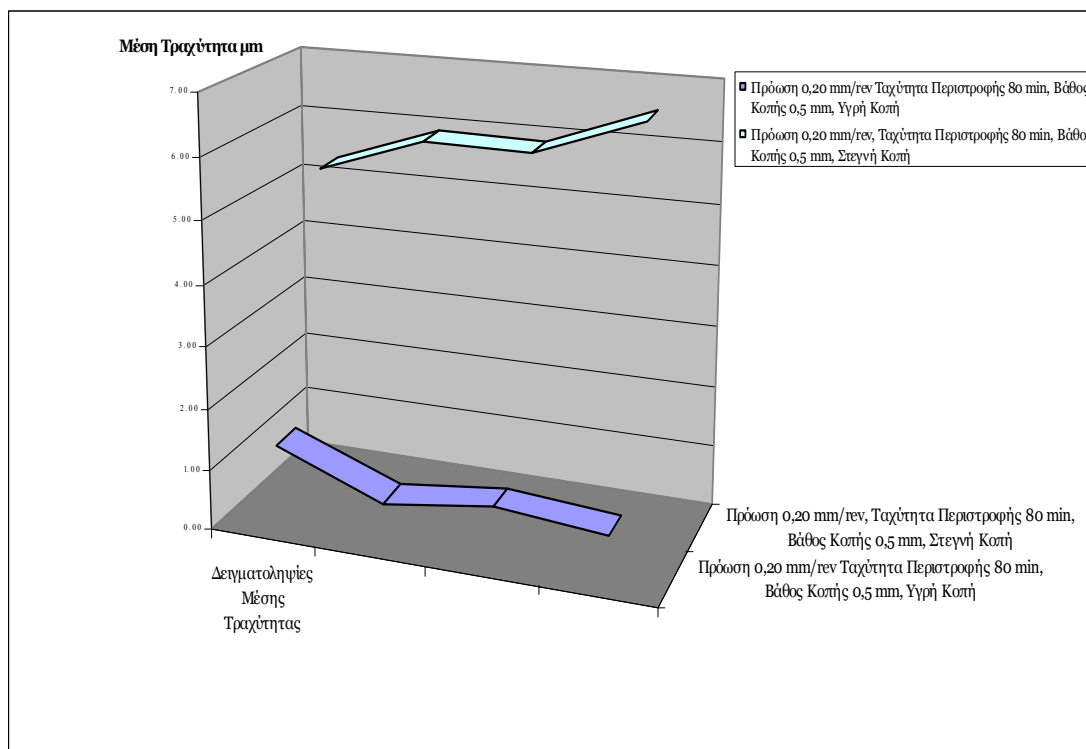
Διάγραμμα 8 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή στη ταχύτητα περιστροφής του δοκιμίου και αλλαγής του βάθους κοπής με κοπτικό εργαλείο φρέζας τριών κοπτικών.



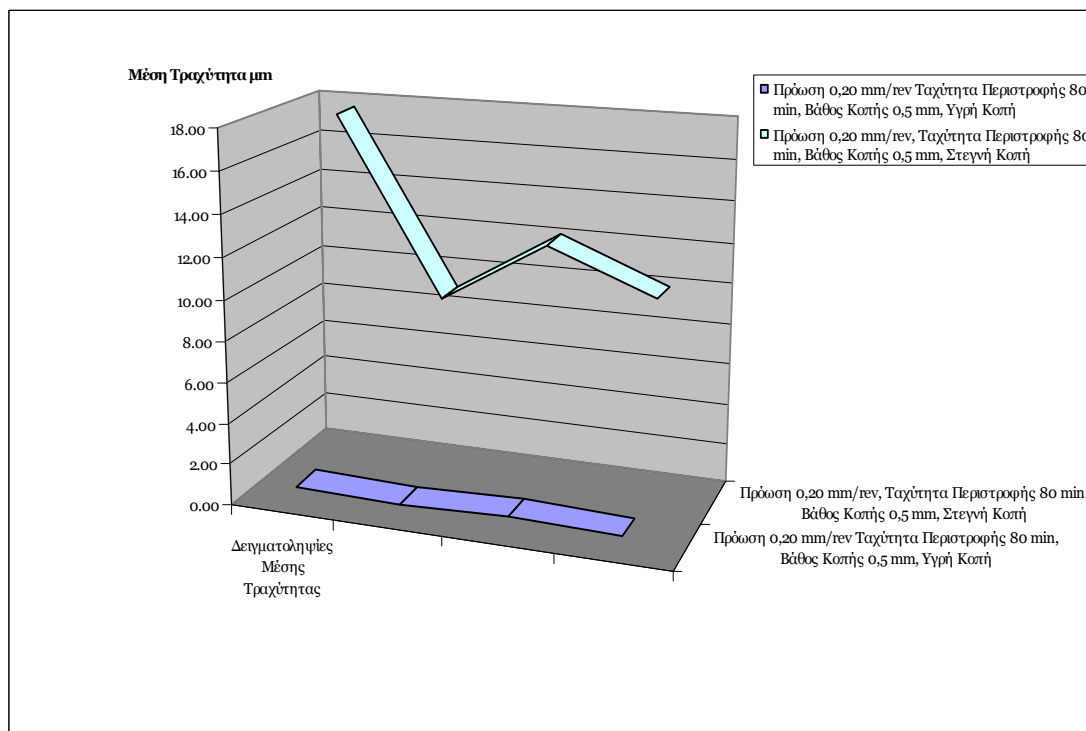
Διάγραμμα 9 : Σύγκριση τραχύτητας σε υγρή και στεγνή κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας τριών κοπτικών.



Διάγραμμα 10 : Σύγκριση τραχύτητας σε υγρή και στεγνή κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας έξι κοπτικών (Γωνία Ελευθερίας 25°, Ουδέτερης κοπής).

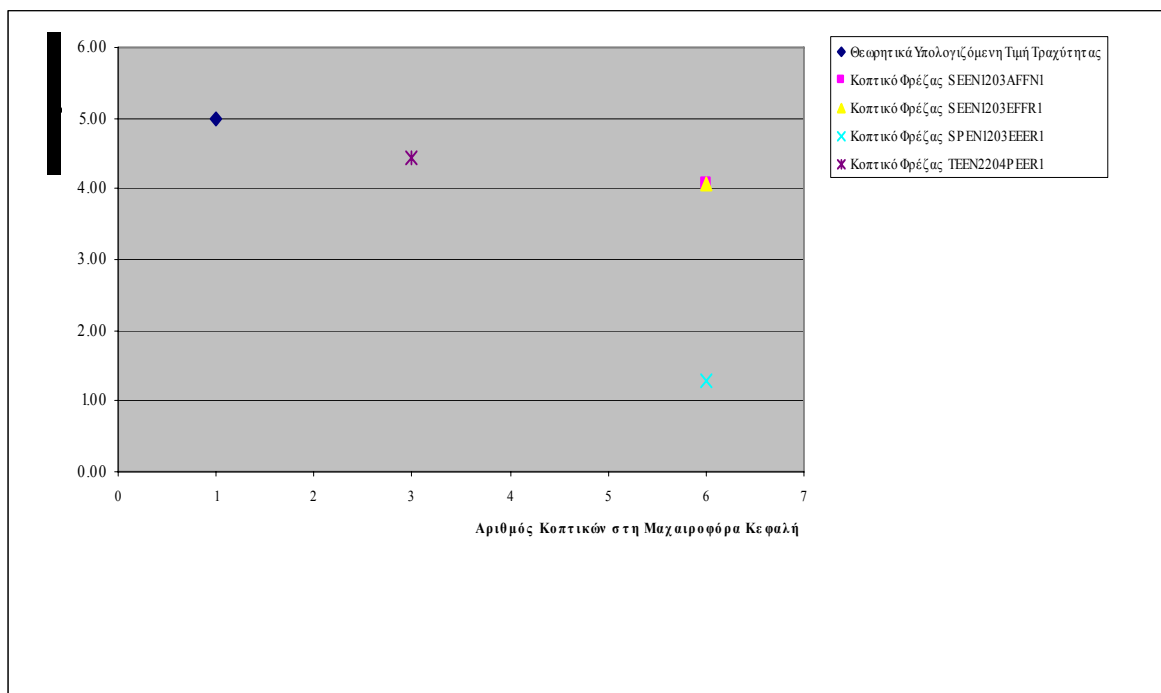


Διάγραμμα 11 : Σύγκριση τραχύτητας σε υγρή και στεγνή κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας έξι κοπτικών (Γωνία Ελευθερίας  $25^\circ$ , Δεξιάς κοπής).

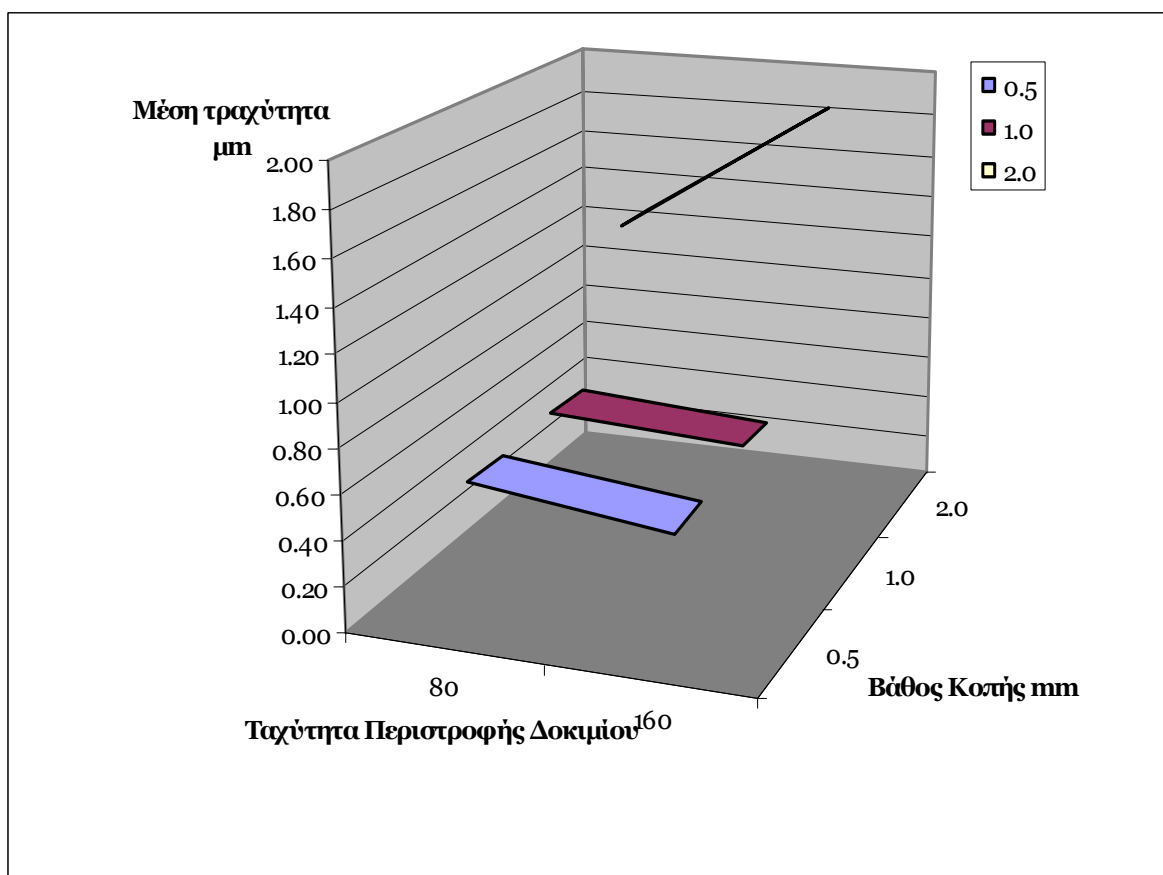


Διάγραμμα 12 : Σύγκριση τραχύτητας σε υγρή και στεγνή κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας έξι κοπτικών (Γωνία Ελευθερίας  $11^\circ$ , Δεξιάς κοπής).



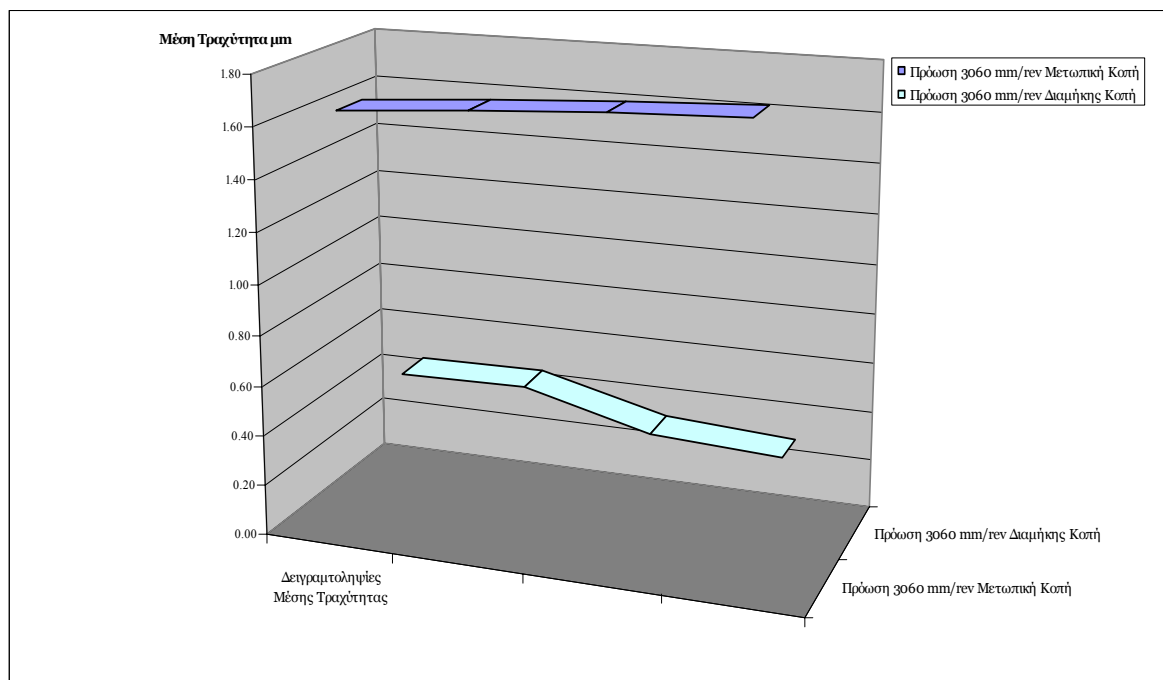


Διάγραμμα 13 : Σύγκριση τραχύτητας θεωρητικά υπολογιζόμενης με μετρούμενη κοπτικού εργαλείου φρέζας τριών κοπτικών και έξι κοπτικών αντίστοιχα.

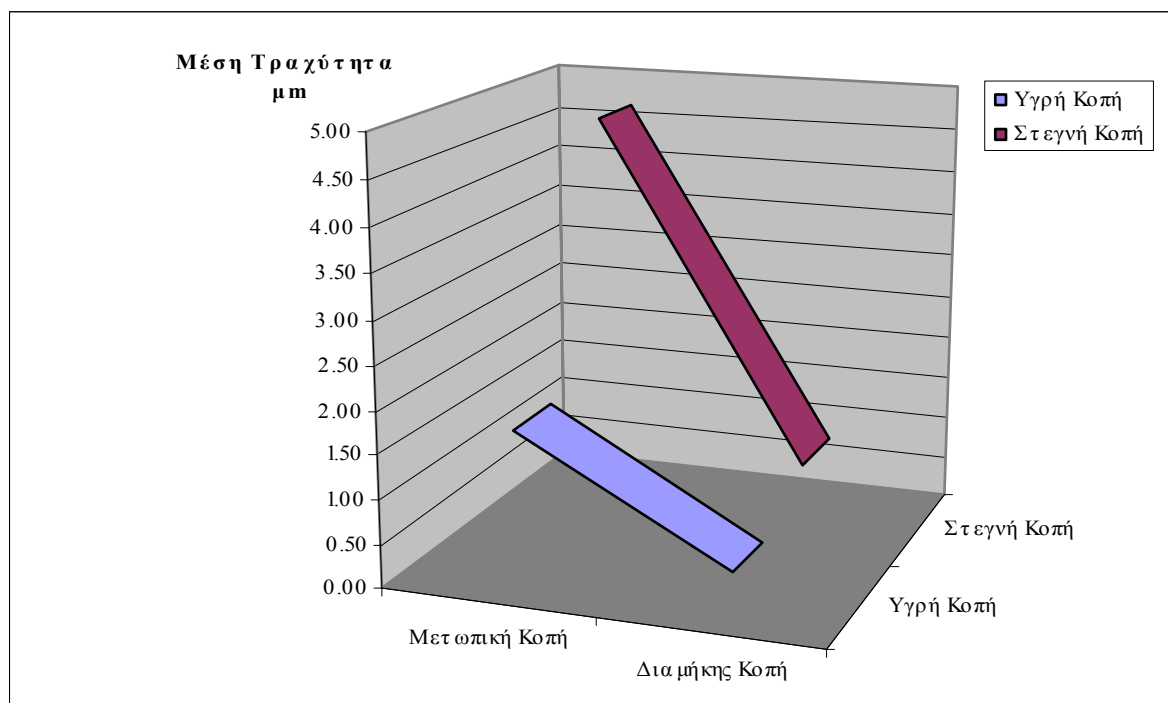


Διάγραμμα 14 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής δοκιμίου και του βάθους κοπής με κοπτικό εργαλείο φρέζας έξι κοπτικών.

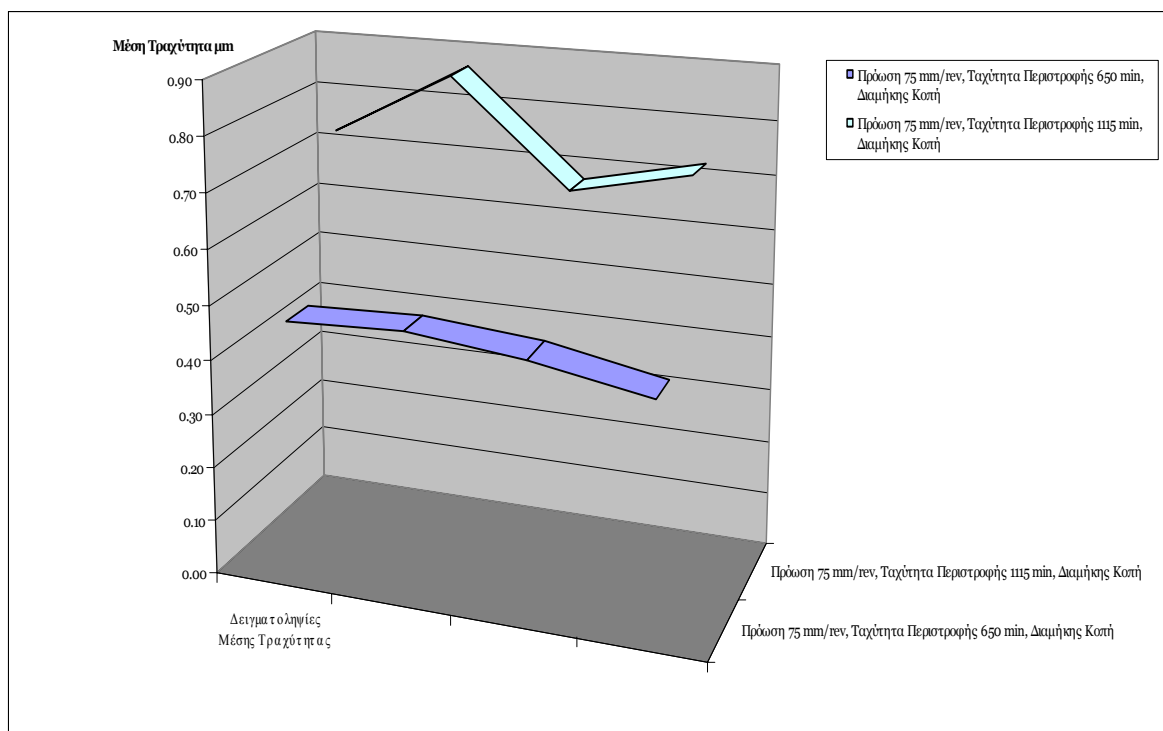
**κοπτικό φρέζας E6MHD1000**  
**κοπτικό φρέζας VALHD1000**



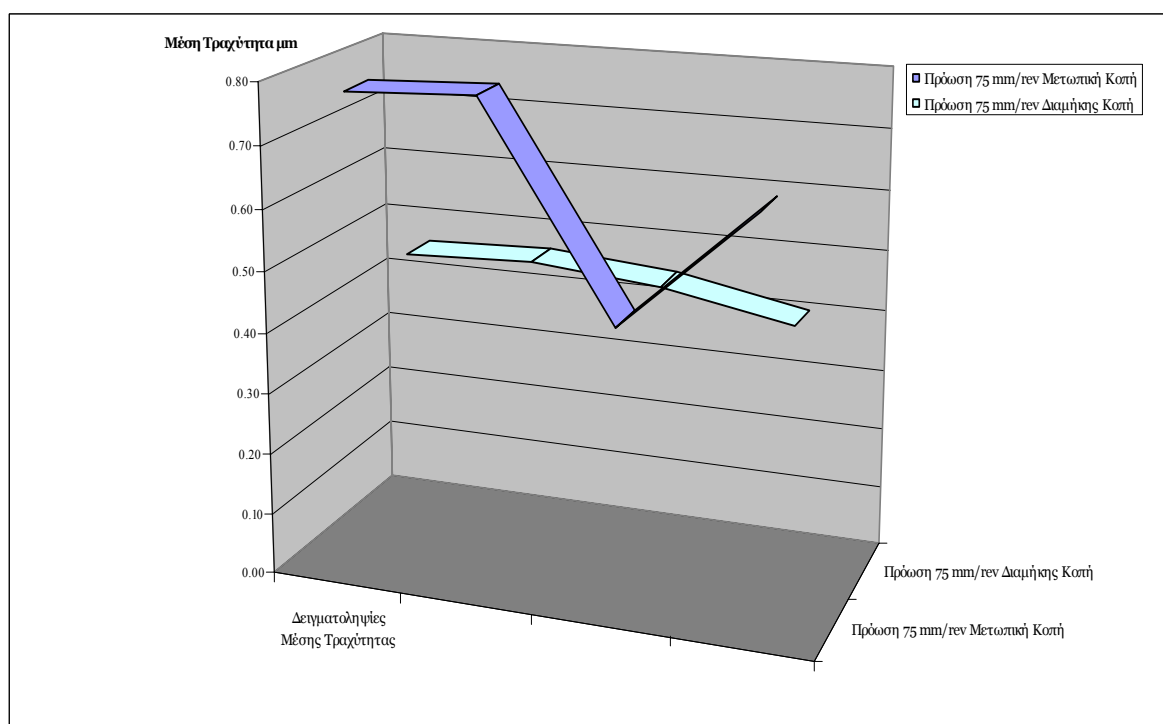
Διάγραμμα 15: Σύγκριση τραχύτητας σε μετωπική και διαμήκης κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας έξι κοπτικών ακμών (Γωνία Ελευθερίας  $35^\circ$ ).



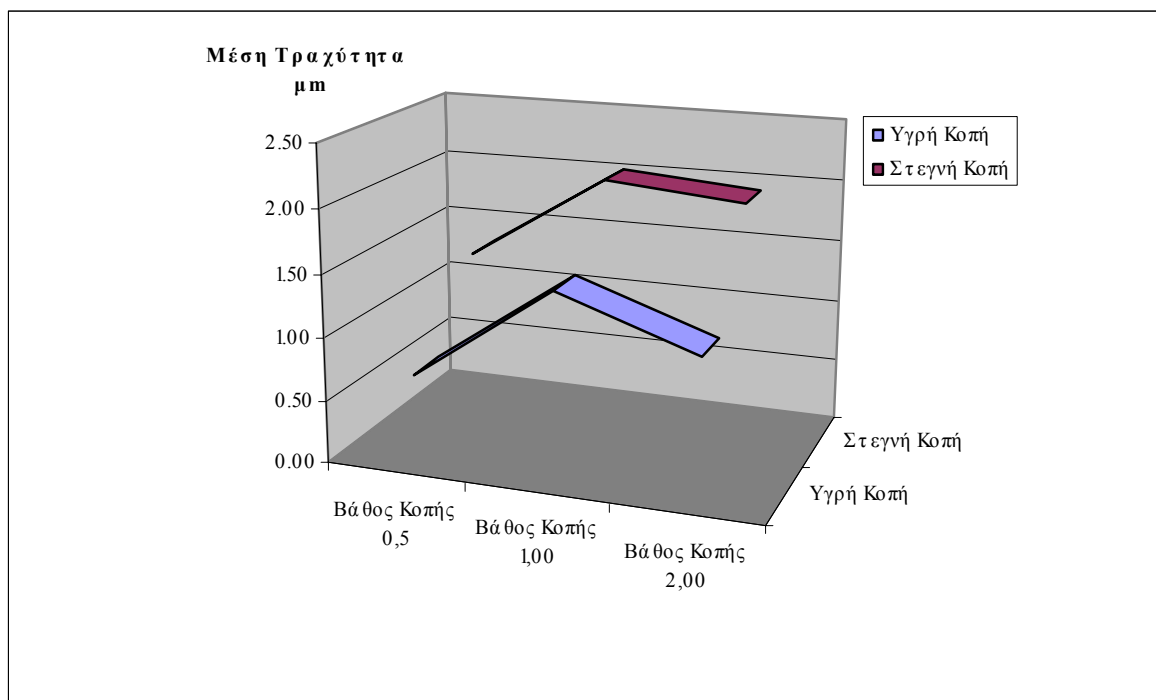
Διάγραμμα 1616 : Σύγκριση τραχύτητας με μετωπική και διαμήκης κοπή σε υγρή και στεγνή κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας έξι κοπτικών ακμών (Γωνία Ελευθερίας  $35^\circ$ ).



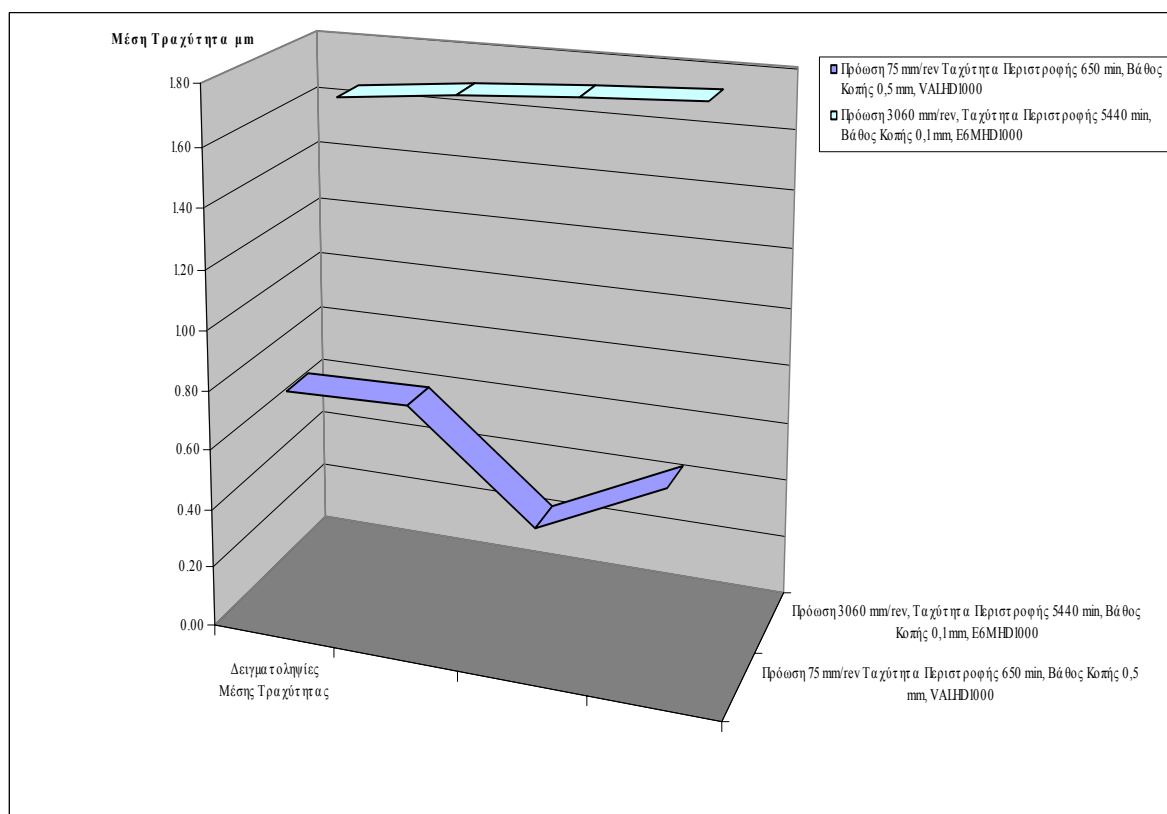
Διάγραμμα 17 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή στη ταχύτητα περιστροφής σε διαμήκης κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας τριών κοπτικών Ακμών (Γωνία Ελευθερίας  $50^\circ$ ).



Διάγραμμα 18 : Σύγκριση τραχύτητας σε μετωπική και διαμήκης κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας τριών κοπτικών Ακμών (Γωνία Ελευθερίας  $50^\circ$ ).



Διάγραμμα 19 : Σύγκριση τραχύτητας με μεταβολή στο βάθος κοπής σε υγρή και στεγνή κοπή με κοπτικό εργαλείο φρέζας τριών κοπτικών Ακμών (Γωνία Ελευθερίας 50°).



Διάγραμμα 2020 : Σύγκριση τραχύτητας με κοπτικό εργαλείο φρέζας έξι και τριών κοπτικών Ακμών (Γωνία Ελευθερίας 35° & 50°).

# Φωτογραφίες

I.

Υλικό



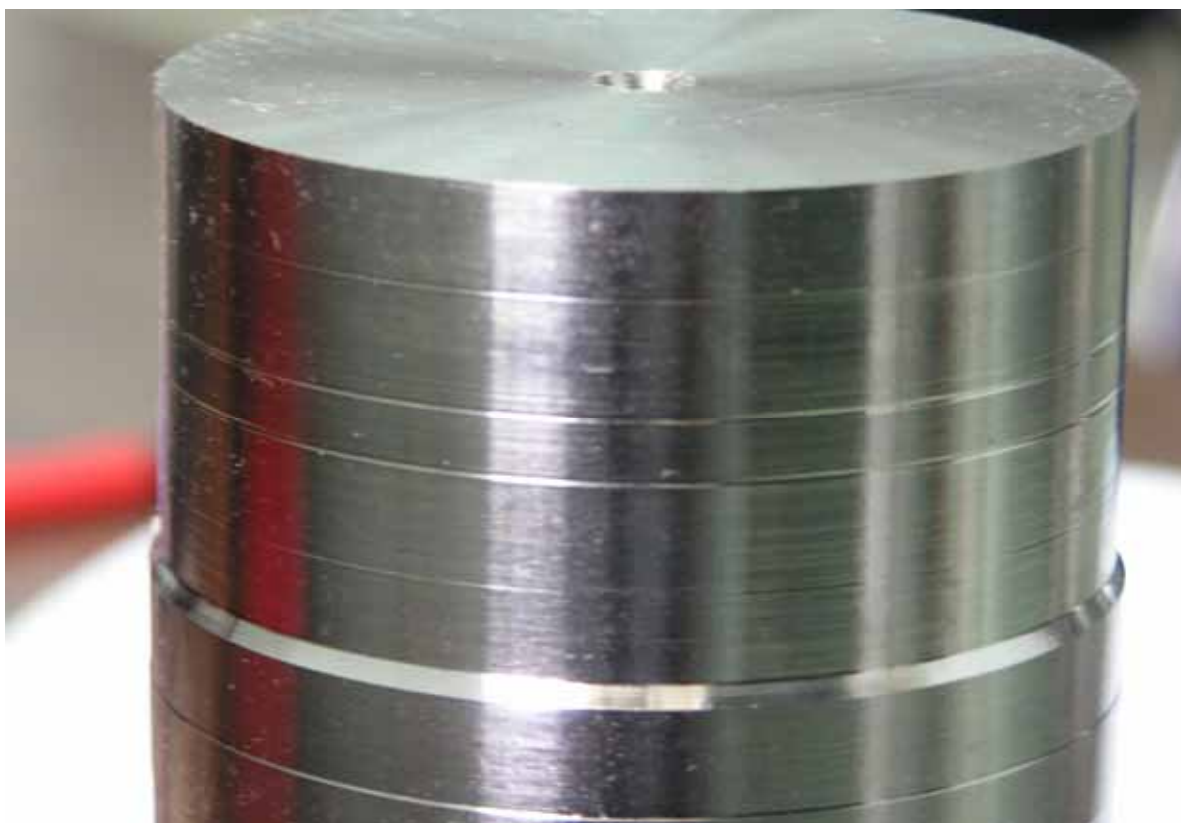
*Φωτογραφία 1 : Πριν τη κατεργασία.*



*Φωτογραφία 2 : Πριν τη κατεργασία.*



*Φωτογραφία 3 : Μετά τη κατεργασία τóρνου.*

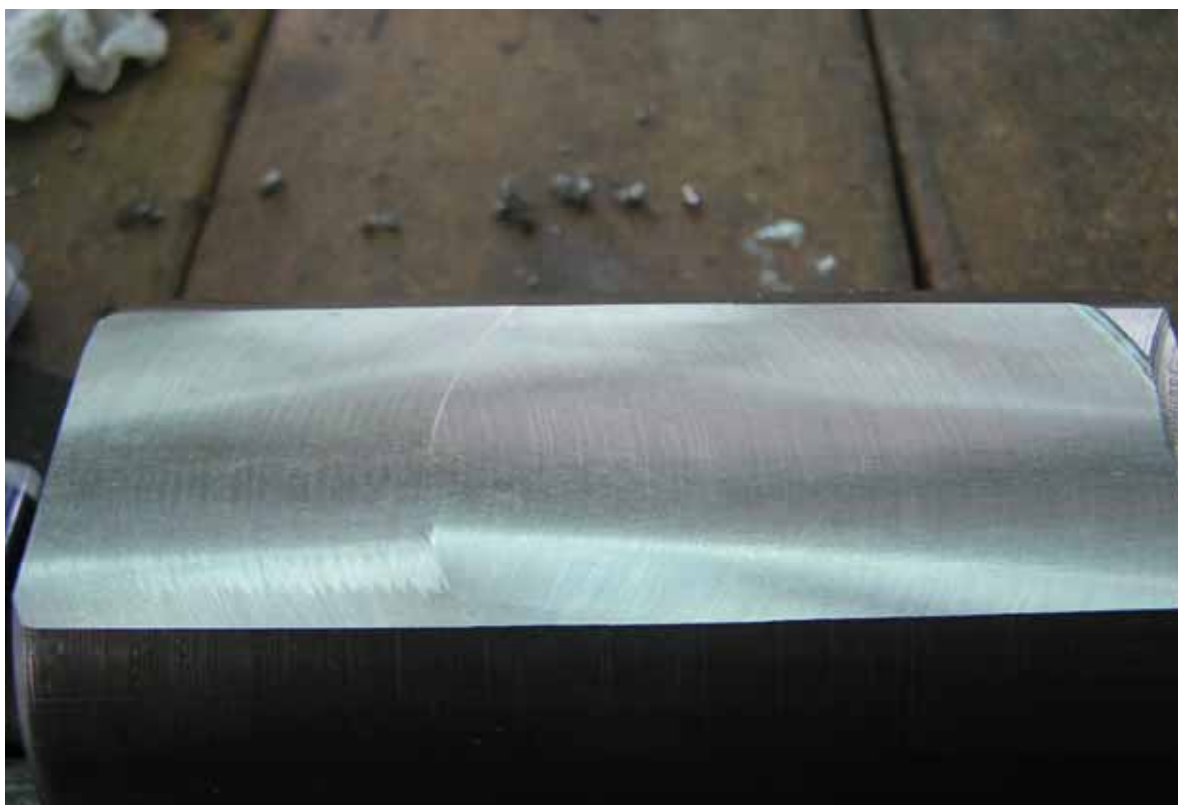


*Φωτογραφία 4 : Μετά τη κατεργασία τóρνου.*





*Φωτογραφία 5 : Μετά τη κατεργασία φρέζας.*



*Φωτογραφία 6 : Μετά τη κατεργασία φρέζας.*

## II.

### Εργαλειομηχανές



Φωτογραφία 7 : Τόρνος.



Φωτογραφία 8 : Φρέζα.



### III.

#### Κοπτικά Εργαλεία



Φωτογραφία 9 : Κοπτικό εργαλείο τόρνου με γωνία κοπής  $91^\circ$ .



Φωτογραφία 10 : Κοπτικό εργαλείο τόρνου με γωνία κοπής  $60^\circ$ .



Φωτογραφία 11 : Κοπτικό εργαλείο τóρνου με γωνία κοπής  $117^\circ$ .



Φωτογραφία 12 : Κοπτικό εργαλείο φρέζας, μαχαιροφόρα κεφαλή με τρία βίδια.



Φωτογραφία 13 : Κοπτικό εργαλείο φρέζας, μαχαιροφόρα κεφαλή με έξι βίδια.



Φωτογραφία 14 : Κοπτικό εργαλείο φρέζας, μαχαιροφόρα κεφαλή με έξι βίδια.



Φωτογραφία 15 : Κοπτικό εργαλείο φρέζας, κονδύλι έξι κοπτικών ακμών (E6MHD1000).



Φωτογραφία 16 : Κοπτικό εργαλείο φρέζας, κονδύλι τριών κοπτικών ακμών (VALHD1000).



#### IV.

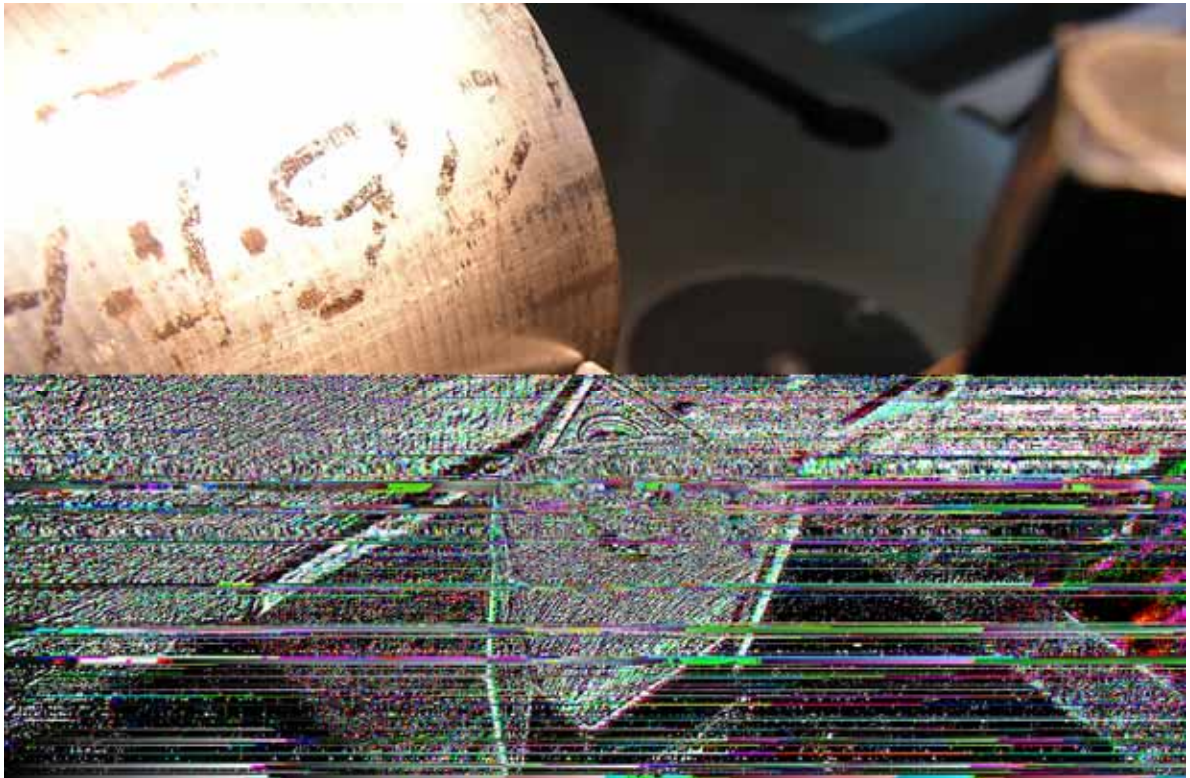
##### Κατεργασία Τόρνου



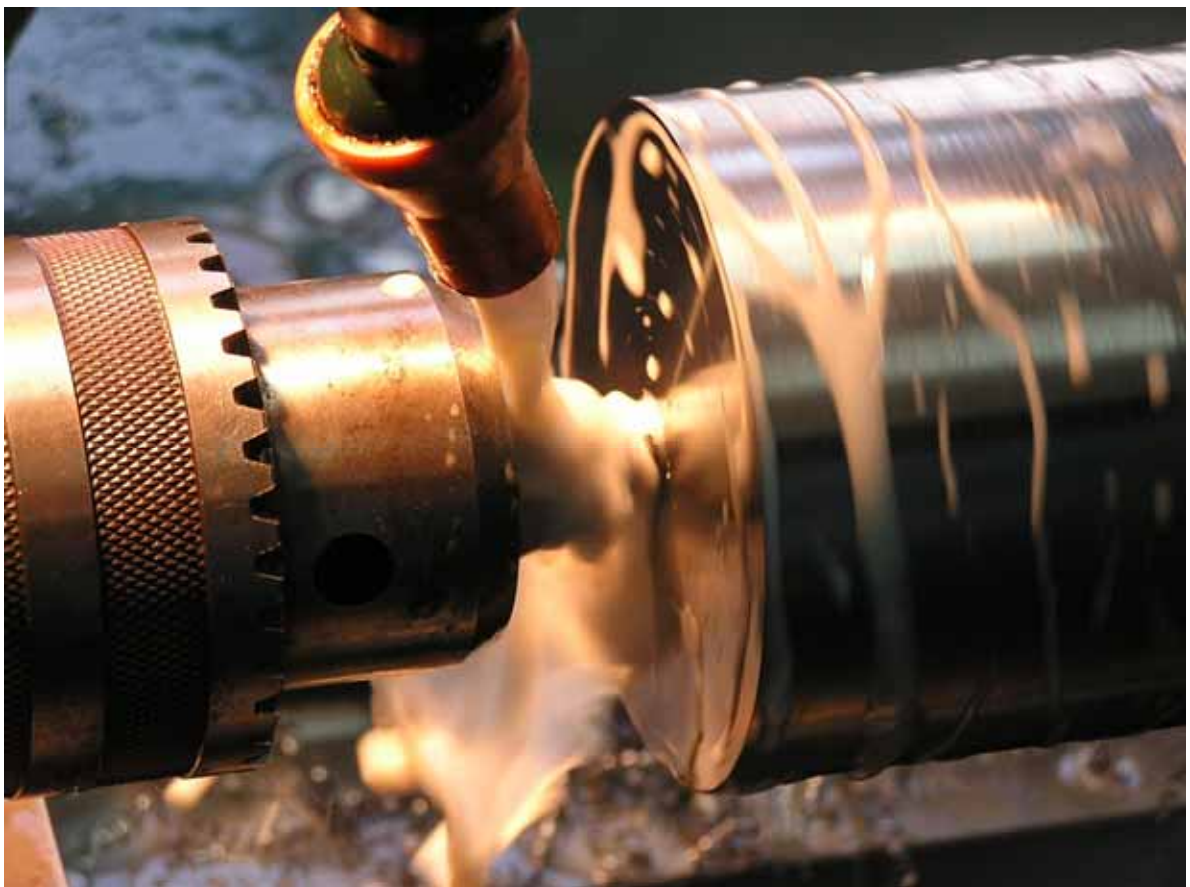
Φωτογραφία 17 : Προετοιμασία κοπής με κοπτικό εργαλείο τόρνου κλίσης  $91^\circ$ .



Φωτογραφία 18 : Προετοιμασία κοπής με κοπτικό εργαλείο τόρνου κλίσης  $60^\circ$ .



Φωτογραφία 19 : Προετοιμασία κοπής με κοπτικό εργαλείο τόρνον κλίσης  $117^\circ$ .



Φωτογραφία 20 : Διάτρηση μετώπου για καλύτερη στήριξη του δοκιμίου.





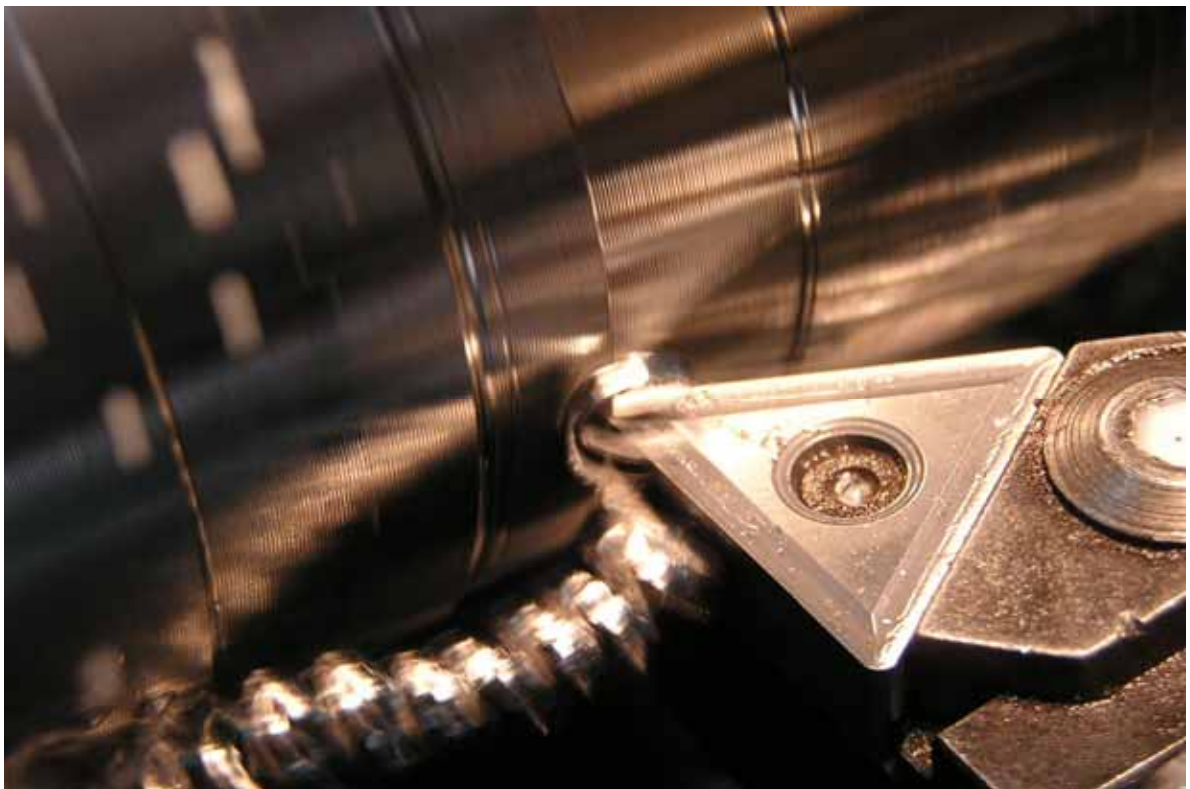
*Φωτογραφία 21 : Μετωπική κοπή με χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού.*



*Φωτογραφία 22 : Κοπή με χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού.*



*Φωτογραφία 23 : Κοπή χωρίς τη χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού.*



*Φωτογραφία 24 : Λεπτομέρεια κοπής.*





Φωτογραφία 25 : Λεπτομέρεια κοπής.



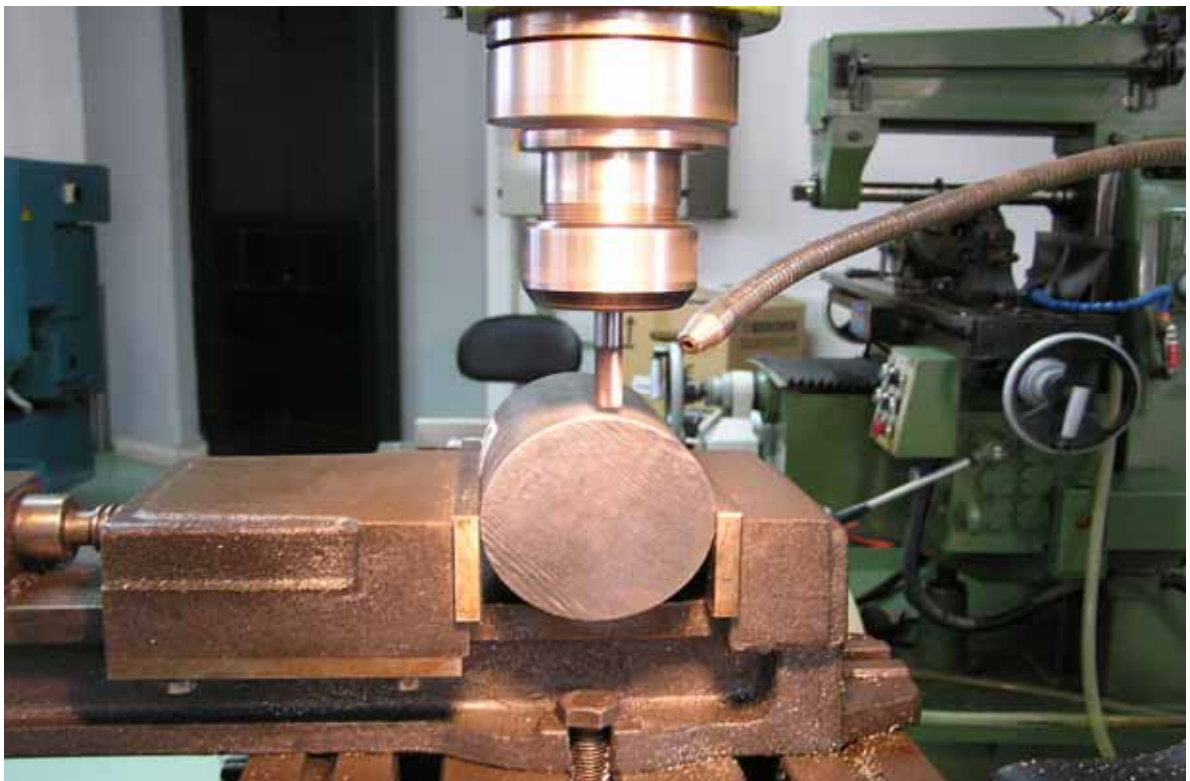
Φωτογραφία 26 : Μέτρηση τραχύτητας.

V.

### Κατεργασία Φρέζας



Φωτογραφία 27 : Προετοιμασία κοπής με μαχαιροφόρα κεφαλή.



Φωτογραφία 28 : Προετοιμασία κοπής με κονδύλι.





*Φωτογραφία 29 : Κοπή μετώπου με μαχαιροφόρα κεφαλή χωρίς τη χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού.*



*Φωτογραφία 30 : Κοπή μετώπου με κονδύλι χωρίς τη χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού.*



*Φωτογραφία 31 : Κοπή μετώπου με μαχαιροφόρα κεφαλή με τη χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού.*



*Φωτογραφία 32 : Κοπή μετώπου με κονδύλι με τη χρήση ψυκτικού και λιπαντικού υγρού.*





Φωτογραφία 33 : Διαμήκης κοπή με μαχαιροφόρα κεφαλή.



Φωτογραφία 34 : Διαμήκης κοπή με κονδύλι.



Φωτογραφία 35 : Λεπτομέρεια κοπής.



Φωτογραφία 36 : Μέτρηση τραχύτητας.

# Βιβλιογραφία

- [1] Anselme K., Osteoblast adhesion on biomaterials, Pages 667 – 681, October 1999.
- [2] Tuchinskiy Lev., Loutfy R., Titanium foams for medical applications, Pages 1 - 3, December 2003.
- [3] Corso Del G., Materials for Medical Devices, Pages 1 – 3, Decemder 2003.
- [4] Encore Medical L.P., Συστήματα Γόνατος Encore (Encore Knie-Systems), Pages 1 – 5, January 2003.
- [5] IATPOTEK, Στοματολογία, Pages 76 - 86, January 2005.
- [6] KENMETAL., High Temp Alloys, Pages 1 - 2, 2005.
- [7] Osteogenesis Imperfecta Foundation, Rodding Surgery, Pages 1 – 5, January 2006.
- [8] Conforto E., Arosson B. O., Salito A., Crestou C., Caillard D., Rough surfaces of titanium alloys for implants and prostheses, Pages 611 – 618, October 2004.
- [9] Ponsonnet L., Reybier K., Jaffrezie N., Comte V., Lagneau C., Lissac M., Martelet C., Relationship between surface properties (roughness, wettability) of titanium and titanium alloys and cell behavior, Pages 551 – 560, March 2003.
- [10] Stainless Steel World, High Strength Alloys : Ti6Al4V, Pages 1 - 2, 2005.
- [11] ASM International, Materials Park, Titanium : A Technical Guide, Pages 75 - 85, August 1998.
- [12] AZOM, Titanium Alloys – Characteristics of Alpha, Alpha Beta and Beta Titanium Alloys, Pages 1 - 3, 2005.
- [13] AZOM, Titanium Alloys – Ti6Al4V, Pages 1 - 41, 2006.
- [14] Browne M., Gregson P. J., Effect of mechanical surface pretreatment on metal ion release, Pages 385 - 392, August 1999.
- [15] ASM Material Data Sheet, Titanium Ti-6Al-4V, Pages 1 - 7, 2006.
- [16] ASTM Specifications, Titanium Ti-6Al-4V Annealed Bar, Pages 1 - 2, 2006.
- [17] KEY to METALS., Titanium and Titanium Alloys, Pages 1 - 3, 2003.
- [18] Basics of Design Engineering, Titanium, Pages 1 - 2, 2005.
- [19] EURO – TITAN, Titanium Semi-Finished Products, Pages 1 – 2, 2005.
- [20] KEY to METALS., Properties and Applications of Titanium – 6 % Aluminum – 4 % Vanadium Alloy, Pages 1 - 5, 2005.
- [21] TITANEX, Titanium Ti6Al4V, Pages 1 - 3, 2006.
- [22] MatWeb The Online Materials Database, Titanium Ti6Al4V, Annealed, 2005.
- [23] KEY to METALS., Fabrication of Titanium and Titanium Alloys, Pages 1 - 4, 2004.
- [24] Grundhoff K. J., Schurmann H., Influence of thermomechanical treatment on the mechanical properties of Ti6Al4V, Pages 284 – 289, August 1989.
- [25] Finn E. Michael, Machining of Advanced Materials, Pages 1 – 309, August 2005.
- [26] SUPRA Alloys, Machining Titanium & Its Alloys, Pages 1 – 12, August 2005.
- [27] Trucks H. E., Machining Titanium Alloys, Pages 1 - 5, June 2005.

- [28] HANITA, Take a Bite Out of Titanium, Pages 1 - 7, 2004.
- [29] Machining Research Centre – Research Project, High Speed Machining of Ti-alloys under various Cutting Media with Conventional and Superabrasive Cutting Tools, Pages 1 – 24, August 2005.
- [30] Ezugwu E. O., High Speed Machining of Aero-Engine Alloys, Pages 1 – 11, January-March 2004.
- [31] Hempel F. W. & Co, High Precision Parts, Pages 1 - 3, July 2005.
- [32] THE TITANIUM INFORMATION GROUP, Surface Treatment of Titanium, March 1998.
- [33] THE TITANIUM INFORMATION GROUP, Material Users Safety Data Sheet, Titanium, June 2001.
- [34] Ezugwu E. O., Bonney J., Yamane Y., An overview of the machinability of aeroengine alloys, Pages 233 – 253, October 2002.
- [35] Thomas M. P., Robertson J. G., Winstone M. R., Effect of fabrication parameters on the micro structural quality of fibre-foil titanium metal matrix composites, Pages 3607 - 3614, May 1998.
- [36] Budak E., An Analytical Design Method for Milling Cutters with Nonconstant Pitch to Increase Stability, Part 2 : Application, Pages 35 – 38, February 2003.
- [37] Balic Jose, Valavanis P. Kimon, Tsourveloudis Nikos, Ioannidis Stratos, Intelligent Manufacturing Systems : Programming And Control, Pages 237 – 257, April 2003.
- [38] Lopez de Lacalle L. N., Perez J., Llorente I. J., Sanchez J. A., Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys, Pages 1 – 11, January 1998.
- [39] Li L., Chang H., Wang M., Zuo D. W., He L., Temperature measurement in high speed milling Ti6Al4V, Pages 804 - 808, May 2004.
- [40] Reissig L., Volkl R., Mills M. J., Glatzel U., Investigation of near surface structure in order to determine process – temperatures during different machining processes, Pages 121 – 126, September 2003.
- [41] Zeilmann Panosso R., Weingaertner Lindolfo W., Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimal quantity of lubricant, Pages 522 - 525, March 2005.
- [42] MITSUBISHI, Turning Tools, Rotating Tools, Tooling Solutions, 2005 - 2006.
- [43] ROBBJACK, Premium Solid Carbide Metric End Mills and Saws, 2005 - 2006.
- [44] SECO, SECOTOOLS Selection 2005, 2005 - 2006.
- [45] Mande A. L., Aspinwall D. K., Tool life and work piece surface roughness when high speed machining a gamma titanium aluminide, Pages 89 – 94, October 1998.
- [46] Siemers C., Mukherji D., Grusewski C., Rosler J., Preparation Method of Ti6Al4V Quick Stop Specimens for Cross-Sectional TEM-Analyses, Pages 1 - 20, September 2004.
- [47] Ezugwu E. O., Wang Z. M., Machado A. R., Wear of Coated Carbide Tools when Machining Nickel-based (Inconel 718) and Titanium (Ti6Al4V) Alloys, Pages 1 – 11, January-March 2004.
- [48] Ezugwu E. O., Da Silva R. B., Bonney J., Machado A. R., Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti6Al4V alloy with high pressure coolant supplies, Pages 1009 – 1014, January 2005.
- [49] Jawaid A., Sharif S., Koksai S., Evaluation of wear mechanisms of coated carbide tools when face milling titanium alloys, Pages 266 - 274, May 1999.
- [50] Hong Y. Shane, Markus Irel, Jeong Woo-cheol, New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti6Al4V, Pages 2245-2260, March 2001.
- [51] Lim Y. J., Oshida Y., Andres C. J., Barco M. T., Surface characterizations of variously treated titanium materials, Pages 1 - 2, May 2000.
- [52] Berberich F., Matz W., Richter E., Schell N., Temperature dependent measurements of phase transformations in N-implanted Ti6Al4V alloys, Pages 1 - 15, August 1999.



- [53] Modgil Aditya, Effects of High Speed Machining on Surface Topography of Titanium Alloy (Ti6Al4V), University of Florida, 2003.
- [54] Bumbalek Leos, Influence of Surface Layer Properties on Fatigue, Pages 1 - 7, March 2002.
- [55] Dhlamini M. S., Swart H. C., Terblans J. J., Terlanche C. J., Surface cleaning of commercially pure Ti, Ti6Al4V and Ti3Al8V6Cr4Zr4Mo alloys by linear heating, Pages 339 – 3421, October 2005.
- [56] Semiatin S. L., Kirby B. C., Salishchev G. A., Coarsening Behavior of an Alpha-Beta Alloy, Pages 1 - 37, November 2004.
- [57] Bigerelle M. Anselme K., Noel B., Ruderman I., Hardouin P., Iost A., Improvement in morphology of Ti-based surfaces : a new process to increase in vitro human osteoblast response, Pages 1563 – 1577, April 2002.
- [58] Linez-Bataillon P., Monchau F., Bigerelle M. Hildebrand H. F., In vitro MC3T3 osteoblast adhesion with respect to surface roughness of Ti6Al4V substrates, Pages 53, May 1998.
- [59] Hallab J. N., Bundy J. K., Connor O. K., Moses L. R., Jacobs J. J., Evaluation of Metallic and Polymeric Biomaterial Surface Energy and Surface Roughness Characteristics for Directed Cell Adhesion, Pages 55 – 71, February 2001.
- [60] Zinger O., Anselme K., Denzer A., Habersetzer P., Wieland M., Jeanfils J., Hardouin P., Landolt D., Time-dependent morphology and adhesion on osteoblastic cells on titanium model surfaces featuring scale-resolved topography, Pages 2695 - 2711, September 2003.
- [61] Ponsonnet L., Comte V., Othmane A., Lagneau C., Charbonnier M., Lissac M., Jaffrezie N., Effect of topography and chemistry on adhesion, orientation and growth of fibroblasts on nickel – titanium substrates, Pages 157 – 165, March 2002.
- [62] Anselme K., Linez P., Bigerelle M., Le Maguer D., Le Maguer A., Hardouin P., Hildebrand H. F., Iost A., Leroy J. M., The relative influence of the topography and chemistry of Ti6Al4V surfaces on osteoblastic cell behaviour, Pages 1567 – 1577, January 2000.
- [63] Bigerelle M. Anselme K., Dufresne E., Hardouin P., Iost A., An upscaled parameter to measure the order of surface : a new surface elaboration to increase cells adhesion, Pages 79 – 83, April 2002.
- [64] Anselme K., Bigerelle M., Topography effects of pure titanium substrates on human osteoblast long-term adhesion, Pages 211 – 222, November 2004.
- [65] Bigerelle M., Anselme K., Bootstrap analysis of the relation between initial adhesive events and long-term cellular functions of human osteoblasts cultured on biocompatible metallic substrates, Pages 499 – 510, June 2005.
- [66] Roberts E. W., Williams B. J., Ogilvy J. A., The effect of substrate surface roughness on the friction and wear of sputtered MoS<sub>2</sub> films, Pages 65 – 70, January 1992.
- [67] Zhu X. M., Lei M. K., Surface engineering of biomedical metallic materials by plasma-based low-energy ion implantation, Pages 1 - 5, March 2006.
- [68] Schmidt H., Miehe G., Soltani-Farshi M., Schminke A., Influence of Annealing on Depth Distributions and Microstructure of Ion-Implanted Ti6Al4V, Pages 2121 - 2127, August 1999.
- [69] Chandarasekaran M., Yong M. S., Prasad Y., Permanent Titanium Tissue Scaffolds, Pages 28 – 33, May 2004.
- [70] EFUNDA, Properties of Titanium Alloy Ti6Al4V, Pages 1 – 11, 2005.
- [71] Ruslan Z. Valiev, Stolyarov V. V., Rack H. J., Lowe C. Terry, SPD-Processed Ultra-Fine Grained Ti Materials for medical applications, Pages 1 - 3, December 2003.
- [72] TOS TRENCIN a.s., Universal Centre Lathe SN 32, January 1997.
- [73] TARNG YANG ENTERPRICE CO., LTD, Turret Milling Machine 3H, February 1996.

