



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΟΠΗΣ ΣΤΙΣ  
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ**

Φοιτήτρια: ΜΑΝΤΑΛΙΑ ΓΕΩΡΓΙΑ

Επιβλέπων Καθηγητής: Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2009

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όσους συνέβαλαν στη εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα προς:

Τον Καθηγητή, κ. Μανωλάκο Δημήτριο, Διευθυντή του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, για τη δυνατότητα ανάληψης της διπλωματικής εργασίας, την συμβολή του, την συμβουλή του και την αστείρευτη παροχή γνώσεων κατά την διάρκεια όλων των ετών παραμονής μου στο Ε.Μ.Π.

Τον Κύριο Νικόλαο Γαλάνη, υποψήφιο Διδάκτορα στον τομέα κατεργασιών των υλικών του Ε.Μ.Π για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθεια που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τους γονείς μου και την αδερφή μου για τη συνολική τους συμπαράσταση.

Αθήνα, Μάρτιος 2009

Μανταλιά Γεωργία

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>6</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ...7</b>	
<b>1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2 Η ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ.....</b>	<b>8</b>
<b>1.2.1 Συμβατικές κατεργασίες κοπής.....</b>	<b>10</b>
<b>1.2.2 Μη - Συμβατικές κατεργασίες κοπής.....</b>	<b>10</b>
<b>1.3 ΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ( ΚΟΠΕΣ ) .....</b>	<b>11</b>
<b>1.3.1 Λοξή κοπή.....</b>	<b>12</b>
<b>1.3.2 Ορθογωνική κοπή.....</b>	<b>12</b>
<b>1.3.3 Βασικές παράμετροι της κοπής των μετάλλων .....</b>	<b>13</b>
<b>1.4 ΤΑ ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΣΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΟΠΗΣ .....</b>	<b>16</b>
<b>1.5 Η ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ.....</b>	<b>19</b>
<b>1.5.1 Είδη τórνευσης.....</b>	<b>20</b>
<b>1.5.2 Συνθήκες κοπής στην κατεργασία της τórνευσης .....</b>	<b>24</b>
<b>1.5.3 Δυνάμεις στην κοπή .....</b>	<b>25</b>
<b>Υπολογισμός της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής.....</b>	<b>26</b>

1.5.4 Ρυθμός αφαίρεσης υλικού .....	31
1.5.5 Τα κοπτικά εργαλεία στην κατεργασία της τórνευσης. ....	32
1.5.6 Τα υγρά κοπής στην κατεργασία της κοπής. ....	34
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ .....</b>	<b>37</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ .....	37
2.2 ΟΙΚΟΝΟΜΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΚΥΤ .....	37
2.3 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	39
2.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΟΤΑΝ ΥΠΟΚΕΙΝΤΑΙ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΤΑΣΕΙΣ .....	42
2.4.1 Αρχική ελαστικότητα στην έναρξη των απλοποιημένων πρωτοβάθμιων ζωνών διάτμησης.....	44
2.4.2 Αντίδραση του υλικού που διασχίζει την πρωτοβάθμια ζώνη.....	45
2.4.3 Αντίδραση του υλικού που βρίσκεται στην δευτεροβάθμια ζώνη διάτμησης..	47
<b>2 . ΞΕΠΡΟΗ ΤΗΣ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ (ΓΡΕΖΙΟΥ).....</b>	<b>48</b>
2.6 ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ .....	53
2.6.1 Περίληψη .....	53
2.6.2 Μικροφωτογραφίες από τον σχηματισμό αποβλήτου.....	53
2.6.3 Συνθήκες στην δευτεροβάθμια ζώνη όταν κατεργάζεται ανοξείδωτος χάλυβας. ....	58
2.6.4 Προτεινόμενοι μηχανισμοί για οδοντωτά γρέζια ανοξείδωτου χάλυβα .....	59

2.6.5 Ανακεφαλαίωση των παραπάνω επιδράσεων.....	60
2.7 AISI 4340 .....	62
2.7.1 Περίληψη .....	62
2.7.2 Συνθήκες στην πρωτοβάθμια ζώνη όταν κατεργάζεται χάλυβας AISI 4340 ....	63
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΟΠΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ .....</b>	<b>66</b>
3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΟΠΗ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ.....	66
3.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟ KISTLER 9257BA .....	69
3.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΟΠΗΣ.....	80
3.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ( ANOVA ) .....	92
3.5.1 Θεωρητική εισαγωγή της ανάλυσης της διακύμανσης. ....	92
3.5.2 Αποτελέσματα ανάλυσης της διακύμανσης .....	93
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>95</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>96</b>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Γενικά είναι γνωστό ότι εφαρμόζοντας υψηλότερες ταχύτητες κοπής από τις παραδοσιακές, η παραγωγικότητα των κατεργασιών έχει διαρκώς τάσεις ανάπτυξης αλλά και η ποιότητα των προϊόντων παρουσιάζει δυνατότητες βελτίωσης. Τα διαρκώς αναπτυσσόμενα κοπτικά εργαλεία, τα υλικά κατεργασίας και οι εργαλειομηχανές έχουν οδηγήσει και έχουν καταστήσει δυνατή τη διάδοση της τεχνολογίας “ High Speed Machining ”.

Τόσο το μέγεθος, όσο και η μορφή των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της κοπής σε υψηλές ταχύτητες αφορά σε πολλούς τομείς στα πλαίσια των μηχανουργικών κατεργασιών. Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να διατυπώσουν αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις για την περιγραφή της δύναμης κοπής, αλλά καμία όμως από τις σχέσεις αυτές δεν περιλαμβάνει όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν τη δύναμη κοπής. Αυτό συμβαίνει λόγω του μεγάλου αριθμού των παραγόντων αυτών καθώς πολλοί από αυτούς δεν ακολουθούν κάποιο σταθερό νόμο, ο οποίος θα μπορούσε να περιγραφεί με ικανοποιητική ακρίβεια.

Στη πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται αναφορά στις συνθήκες κοπής υψηλών ταχυτήτων (High Speed Turning), στην εφαρμογή αυτών των μεθόδων κατεργασίας για την κατασκευή σφαιρών και στη μελέτη αυτών των δυνάμεων κοπής.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τρία κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική εισαγωγή στις κατεργασίες αποβολής υλικού. Γίνεται, επίσης, εκτενής αναφορά στην κατεργασία της τόννευσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στην τεχνολογία κοπής υψηλών ταχυτήτων (High Speed Machining).

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κοπές και οι μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο. Περιγράφεται η διαδικασία κατεργασίας κοπής δοκιμίων στο τόρνο CNC, τα πειραματικά αποτελέσματα και εν κατακλείδι η επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κατεργασία, στην ευρύτερη της έννοια, είναι η διαδικασία με την οποία τα ακατέργαστα υλικά μετατρέπονται τελικά σε προϊόντα. Η έννοια της κατεργασίας καλύπτει τόσο την καθεαυτού κατασκευή όσο και τα σχέδια των προς κατασκευή προϊόντων χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους κατεργασιών και τεχνικών παραγωγής. Η ιδέα της κατεργασίας πρωτοεμφανίστηκε περίπου το 5000 με 4000 π.Χ. με την παραγωγή προϊόντων από διάφορα είδη ξύλου, κεραμικών, πέτρας, και μετάλλου. Σύμφωνα με την σύγχρονη δε μορφή της είναι η διαδικασία παραγωγής προϊόντων από ακατέργαστα υλικά, με βάση διάφορες διαδικασίες και μηχανήματα οι οποίες ακολουθούν ένα οργανωμένο σχέδιο και κάθε βήμα που απαιτείται.

Τα κατεργασμένα προϊόντα χρησιμοποιούνται επίσης για την παραγωγή άλλων προϊόντων. Επειδή ένα κατασκευασμένο αντικείμενο έχει υποβληθεί σε διάφορες αλλαγές μετά τις οποίες το ακατέργαστο υλικό έχει γίνει πλέον ένα χρήσιμο προϊόν, λαμβάνεται υπόψη η προστιθέμενη αξία, ως νομισματική αξία όσον αφορά την τιμή του προϊόντος. Με την βοήθεια της κατεργασίας μπορούμε να παράγουμε και ιδιαίτερα προϊόντα, δηλαδή είτε μεμονωμένα μέρη των κομματιών, είτε συνεχή προϊόντα. Η κατεργασία είναι γενικά μια σύνθετη δραστηριότητα στην οποία συμμετέχουν άνθρωποι που έχουν μια ευρεία σειρά πειθαρχιών και ικανοτήτων αλλά ταυτόχρονα χρησιμοποιείται και μια ευρεία ποικιλία μηχανημάτων, εξοπλισμού, και εργαλείων διαφόρων επιπέδων αυτοματισμού, συμπεριλαμβανομένων των υπολογιστών, των ρομποτικών μηχανισμών και του υλικού εξοπλισμού χειρισμού. Οι μέθοδοι κατεργασίας θα πρέπει να ανταποκρίνονται σε διάφορες ζητήσεις και τάσεις:

☞ Το προϊόν πρέπει να ικανοποιεί πλήρως τις απαιτήσεις του σχεδίου αλλά και τις απαραίτητες προδιαγραφές.

☞ Το προϊόν πρέπει να κατασκευαστεί με βάση τις πιο οικονομικές μεθόδους προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής.

- ☞ Η ποιότητα θα πρέπει να εξετάζεται σε κάθε στάδιο παραγωγής του προϊόντος, από το σχέδιο έως και το τελικό προϊόν, και όχι απλά να ελέγχεται αφότου κατασκευαστεί αυτό.
- ☞ Σε ένα ιδιαίτερα ανταγωνιστικό περιβάλλον, οι μέθοδοι παραγωγής πρέπει να είναι αρκετά εύκαμπτες για να αποκριθούν στις μεταβαλλόμενες ζητήσεις της αγοράς, στους τύπους των προϊόντων, τα ποσοστά παραγωγής, τις ποσότητες παραγωγής, και στην εντός χρόνου παράδοση στον πελάτη.
- ☞ Οι νέες εξελίξεις της τεχνολογίας στα υλικά, τις μεθόδους παραγωγής, τους υπολογιστές, τόσο στις τεχνολογικές όσο και στις διευθυντικές δραστηριότητες σε ένα κατασκευαστικό οργανισμό πρέπει να αξιολογηθούν άμεσα για να επιτευχθεί η έγκαιρη και οικονομική εφαρμογή τους.
- ☞ Ο κατασκευαστής πρέπει να εργαστεί με τον πελάτη για να πάρει την έγκαιρη ανατροφοδότηση που απαιτείται για τη συνεχή βελτίωση των παραγόμενων προϊόντων.
- ☞ Ο κατασκευαστικός οργανισμός πρέπει συνεχώς να προσπαθεί για την υψηλότερη παραγωγικότητα, που καθορίζεται ως η βέλτιστη χρήση όλων των πόρων της: υλικά, μηχανές, ενέργεια, κεφάλαιο, εργασία, και τεχνολογία. Η απόδοση ανά υπάλληλο και ανά ώρα σε όλες τις φάσεις πρέπει να μεγιστοποιηθεί.

## 1.2 Η ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Οι κατεργασίες διακρίνονται κατά DIN σε:

- ☞ **Αρχέγονες κατεργασίες:** το υλικό αρχικά δεν έχει συγκεκριμένο σχήμα, αλλά αποκτά καθορισμένη γεωμετρία μετά τη μορφοποίηση (χύτευση, κονιομεταλλουργία κλπ).
- ☞ **Διαμορφώσεις:** Χαρακτηριστικό τους είναι η πλαστική παραμόρφωση και η διατήρηση της μάζας του υλικού. Διακρίνονται σε κατεργασίες διαμόρφωσης του συμπαγούς υλικού (σφυρηλάτηση, έλαση, διέλαση, ολκή κλπ.) Και σε



κατεργασίες διαμόρφωσης του επιπέδου ελάσματος (κάμψη, απότμηση, βαθεία κοίλανση κλπ).

☞ **Κοπές ή κατεργασίες αποβολής υλικού:** Η μορφοποίηση επιτυγχάνεται με συνδυασμό πλαστικής παραμόρφωσης σε διάτμηση και αποβολή υλικού (τόρνευση, διάτρηση, φρεζάρισμα, λείανση κλπ.). Στις κατεργασίες αποβολής υλικού, μόνο μία στρώση υλικού της κατεργασμένης επιφάνειας σε μικρό ή σε μεγαλύτερο βάθος, ανάλογα με την περίπτωση κατεργασίες, υφίσταται πλαστική παραμόρφωση και αλλαγές ή και μετασχηματισμούς στην κρυσταλλική του δομή, άρα και σε ορισμένες ιδιότητες του σε πλήρη αντίθεση με τις κατεργασίες διαμορφώσεως, όπου τέτοιες μεταβολές πραγματοποιούνται στην όλη μάζα του κομματιού ή σε σημαντικό μέρος του.

☞ **Επιφανειακές κατεργασίες:** Δεν επιφέρουν αλλαγή σχήματος στο τεμάχιο αλλά μεταβολή στις ιδιότητες της κατεργασμένης επιφάνειας (ενίσχυση και προστασία). Διακρίνονται σε θερμικές, θερμοχημικές και επικαλύψεις.

☞ **Κατεργασίες σύνδεσης:** Διακρίνονται σε μεταλλουργικές συνδέσεις (συγκολλήσεις) και μηχανικές συνδέσεις (ηλώσεις, κοχλιώσεις κλπ).

Με κριτήριο την χρησιμοποιούμενη ενέργεια και εξοπλισμό, οι κατεργασίες διακρίνονται σε:

☞ **Συμβατικές:** χρησιμοποιείται μηχανική ενέργεια και συμβατικός εξοπλισμός (μηχανουργικές κατεργασίες).

☞ **Μη συμβατικές:** ως βασική ενέργεια κατεργασίας χρησιμοποιείται κάποια άλλη μορφή ενεργείας πέραν της μηχανικής, ενώ ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός είναι μη συμβατικός, προσαρμοζόμενος στις ιδιαιτερότητες της κατεργασίας (μαγνητική διαμόρφωση, εκρηκτική συμπίεση, ηλεκτροδιάβρωση, κοπή με laser, εκρηκτική συγκόλληση)

### 1.2.1 Συμβατικές κατεργασίες κοπής

Με τις κατεργασίες κοπής, ως μεθόδου παραγωγής μεταλλικών προϊόντων, αφαιρείται προοδευτικά προκαθορισμένος κατά στρώσεις όγκος μετάλλου με τη βοήθεια εργαλείου σε σχήμα σφήνας, με πλαστική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου υπό μορφή αποβλήτων (γρεζιών) σε μέγεθος και σχήμα που ποικίλλουν κατά περίπτωση κατεργασίας. Έτσι, με τις κατεργασίες κοπής προσδίδεται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο την επιθυμητή (προδιαγεγραμμένη) μορφή και διαστάσεις μέσα σε επιτρεπόμενα όρια ανοχών και ακόμη την απαραίτητη ποιότητα των τεχνολογικών επιφανειών του τεμαχίου, ώστε αυτό να μπορέσει να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις λειτουργικές απαιτήσεις κατά τη χρήση του, για την οποία και προορίζεται.

Η κοπή επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του κατάλληλου εκάστοτε κοπτικού εργαλείου (απλούστερα εργαλείου ή κοπτικού), οπωσδήποτε αρκετά σκληρότερου από το υλικό που κατεργαζόμαστε και της συναφούς εργαλείο μηχανής, που προσδίδει την απαιτούμενη για την κοπή ισχύ και εκτελεί τις αναγκαίες για την μορφοποίηση του κομματιού κινήσεις τόσο του κομματιού, όσο και του εργαλείου.

### 1.2.2 Μη - Συμβατικές κατεργασίες κοπής

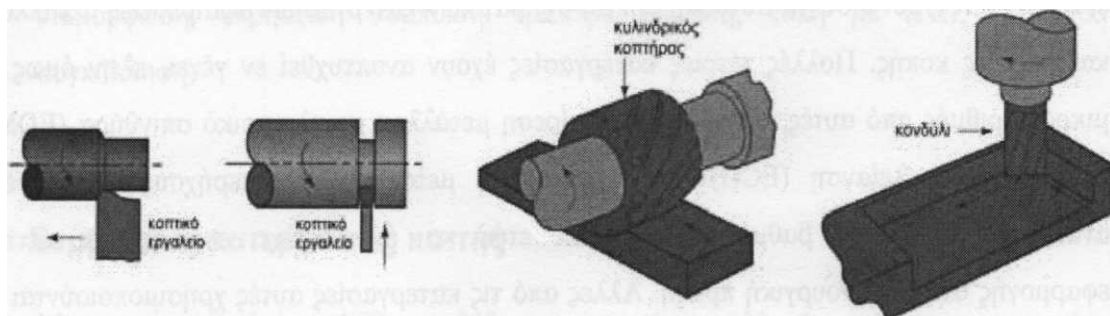
Οι μη συμβατικές (μη καθιερωμένες) κατεργασίες αφαιρέσεως μετάλλου έχουν ως κοινό γνώρισμα με τις κατεργασίες κοπής το ότι και με τις πρώτες, για να μορφοποιηθεί το τεμάχιο, αφαιρείται από αυτό το μέταλλο που πλεονάζει. Όμως, το αποβαλλόμενο μέταλλο δεν έχει τη μορφή αποβλήτου ούτε και σχηματίζεται με τον ίδιο μηχανισμό (υψηλού βαθμού πλαστική παραμόρφωση), αλλά παρουσιάζεται υπό μορφή ποικίλων τελικά σχημάτων, όπως σφαιριδίων, ακανόνιστων τεμαχιδίων κ.ά. Ακόμη, η προσδιδόμενη, για να λάβει χώρα μία μη συμβατική κατεργασία αφαιρέσεως μετάλλου ενέργεια, δεν είναι εν γένει μηχανική, όπως συμβαίνει στις κατεργασίες κοπής, αλλά θερμική, χημική, ηλεκτροχημική ή κάποιας άλλης μορφής. Υπάρχει επιπλέον και η δυνατότητα συνδυασμού μη συμβατικών κατεργασιών αφαιρέσεως μετάλλου με κατεργασίες κοπής. Πολλές τέτοιες κατεργασίες έχουν αναπτυχθεί εν γένει, πλην όμως ένας μικρός αριθμός από αυτές, όπως λ.χ. Η αφαίρεση μετάλλου με ηλεκτρικό σπινθήρα (EDM), η ηλεκτροχημική λείανση (ECG) και η αφαίρεση μετάλλου με υπερήχους (USM) έχουν αναπτυχθεί σε υψηλό βαθμό από αρκετών ετών και έχουν τύχει ευρείας και

επιτυχούς εφαρμογής στη μηχανουργική πράξη. Άλλες από τις κατεργασίες αυτές χρησιμοποιούνται ήδη, αλλά σε περιορισμένη έκταση και για πολύ ειδικές κατεργασίες, ενώ οι υπόλοιπες ευρίσκονται ακόμη σε στάδια θεωρητικής και πειραματικής μελέτης και εξελίξεως.

### 1.3 ΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ( ΚΟΠΕΣ )

Οι κατεργασίες αυτές ταξινομούνται στις συμβατικές κατεργασίες κοπής και προκαλούν αφαίρεση υλικού από την επιφάνεια υπό την μορφή αποβλήτου. Επιθυμητός στόχος μπορεί να είναι ακόμη και η βελτίωση των ανοχών και της ποιότητας της επιφάνειας ενός προηγουμένως ήδη κατεργασμένου τεμαχίου, γεγονός που επιτυγχάνεται με την αφαίρεση του υπερβολικού υλικού υπό μορφή αποβλήτου μέσω ενός μεταλλικού κοπτικού εργαλείου εργαλειομηχανής. Η κατεργασία της κοπής είναι ικανή να επιτύχει γεωμετρικές διαμορφώσεις, ανοχές και ποιότητα επιφάνειας που είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν από οποιαδήποτε άλλη τεχνική. Εντούτοις, η κοπή αφαιρεί υλικό, για το οποίο έχουν ήδη ξοδευτεί χρήματα, υπό μορφή αποβλήτου που είναι δύσκολο να ανακυκλωθεί. Ως εκ τούτου οι εξελίξεις στοχεύουν συχνά στη μείωση του κόστους της παραγωγής αλλά και των περιβαλλοντολογικών επιπτώσεων κατά την χρησιμοποίηση της τεχνικής της κοπής.

Μερικές από τις πιο συχνές κατεργασίες κοπής φαίνονται στο παρακάτω *σχήμα 1.1*.



(α) Διαμήκης τόνρευση (β) Τόνρευση αποκοπής

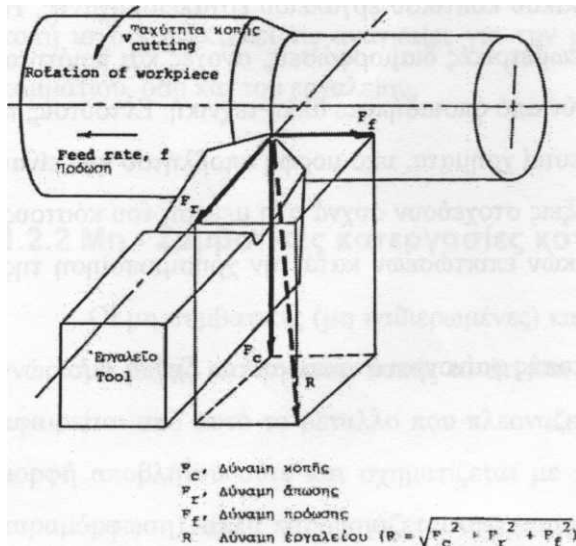
(γ) Περιφερειακό φρεζάρισμα

(δ) Μετωπικό φρεζάρισμα

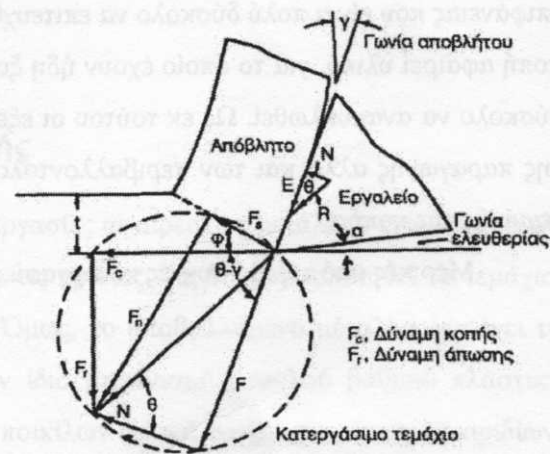
**Σχήμα 1.1** Παραδείγματα εφαρμογών κοπής (kalpakjian)

### 1.3.1 Λοξή κοπή

Πρόκειται για την γενική μορφή της κοπής. Όπως και στην περίπτωση της ορθογωνικής κοπής, που αναφέρεται αμέσως μετά, χρησιμοποιείται ένα κοπτικό εργαλείο με σχήμα σφήνας για την αφαίρεση του μετάλλου. Στο παρακάτω σχήμα 1.2 φαίνεται το κοπτικό εργαλείο καθώς και η δύναμη του εργαλείου μαζί με τις δυνάμεις κοπής, άπωσης και πρόωσης για την περίπτωση της λοξής κοπής.



Σχήμα 1.2 ΛΟΞΗ ΚΟΠΗ



Σχήμα 1.3 ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ

### 1.3.2 Ορθογωνική κοπή

Στην ορθογωνική κοπή η τέμνουσα άκρη του εργαλείου είναι ευθεία και κάθετη στην κατεύθυνση κίνησης. Εδώ το επίπεδο της κοπής είναι παράλληλο προς την επιφάνεια του προς κατεργασία τεμαχίου, δηλαδή θεωρείται ότι η ροή του υλικού είναι δισδιάστατη και η κατεργασία είναι επίπεδη παραμορφωσιακή με την προϋπόθεση ότι το πλάτος του κοπτικού εργαλείου είναι μεγάλο σε σχέση με το πλάτος του αποβλήτου. Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις στην περίπτωση της ορθογωνικής κοπής.

Στο προηγούμενο σχήμα 1.3 η  $f$  είναι η δύναμη τριβής ενώ η  $v$  είναι η κάθετη δύναμη στην επιφάνεια επαφής αποβλήτου και εργαλείου. Οι  $F_t$  και  $F_s$  είναι η κάθετη και η εφαπτομενική συνιστώσα αντίστοιχα στο επίπεδο διάτμησης  $SS$ .

### 1.3.3 Βασικές παράμετροι της κοπής των μετάλλων

Οι βασικές ανεξάρτητες μεταβλητές (αυτές δηλαδή που μπορούν να αλλάξουν άμεσα) στην διαδικασία κοπής είναι οι παρακάτω:

- ☞ Το υλικό του κοπτικού εργαλείου.
- ☞ Το σχήμα του κοπτικού εργαλείου, η ποιότητα της επιφάνειας του, καθώς και η οξύτητα του.
- ☞ Το υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου καθώς και η θερμοκρασία.
- ☞ Οι συνθήκες κοπής, όπως η ταχύτητα, το βάθος κοπής και η πρόωση.
- ☞ Η χρήση υγρών κοπής.
- ☞ Τα χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής, όπως η στιβαρότητα κλπ.
- ☞ Οι μηχανισμοί συγκράτησης του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου.

Οι εξαρτημένες μεταβλητές είναι αυτές που επηρεάζονται από πιθανές αλλαγές των ανεξάρτητων μεταβλητών. Τέτοιες είναι:

- ☞ Ο τύπος του αποβλήτου που παράγεται.
- ☞ Οι δυνάμεις και η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την διαδικασία της κοπής.
- ☞ Η αύξηση της θερμοκρασίας στο ως προς κατεργασία τεμάχιο, στο απόβλητο, και το κοπτικό εργαλείο.
- ☞ Η φθορά και η καταστροφή του κοπτικού εργαλείου.
- ☞ Η ποιότητα της επιφάνειας που προκύπτει μετά την κατεργασία.

Από τις βασικές ανεξάρτητες μεταβλητές που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι σημαντικότερες στην κατεργασία της κοπής είναι:

Η ταχύτητα κοπής: είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του προς κατεργασία τεμαχίου αναφερόμενη στην κύρια κίνηση κοπής.

Το βάθος κοπής: είναι το βάθος διείσδυσης του κοπτικού εργαλείου στο προς κατεργασία τεμάχιο.

Η πρόωση: είναι η σχετική κίνηση μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου που προσφέρει με σταθερό ρυθμό στο εργαλείο νέο υλικό προς κοπή. Η κίνηση της πρόωσης στον τόρνο

γίνεται από το κοπτικό εργαλείο, αλλά σε άλλες περιπτώσεις είναι δυνατό να γίνει και από το προς κατεργασία τεμάχιο. Στον τόρνο, ειδικότερα, μπορούμε να πούμε πως η πρόωση είναι η κατά την έννοια του άξονα περιστροφής μετακίνηση του κοπτικού εργαλείου ανά στροφή του αντικείμενου.

Δύο βασικοί παράγοντες της κατεργασίας κοπής είναι η εργαλειομηχανή που χρησιμοποιείται αλλά και το κοπτικό εργαλείο. Όσον αφορά την εργαλειομηχανή αυτή που χρησιμοποιείται συνήθως, ειδικά στην περίπτωση της κοπής με απλή σημειακή επαφή, είναι ο τόρνος στον οποίο και θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά στην επόμενη παράγραφο. Ιδιαίτερη σημασία αποτελεί επίσης και η επιλογή του κατάλληλου κοπτικού εργαλείου.

Όσον αφορά το κοπτικό εργαλείο, οι κυριότερες γωνίες του είναι (σχήμα 1.4):

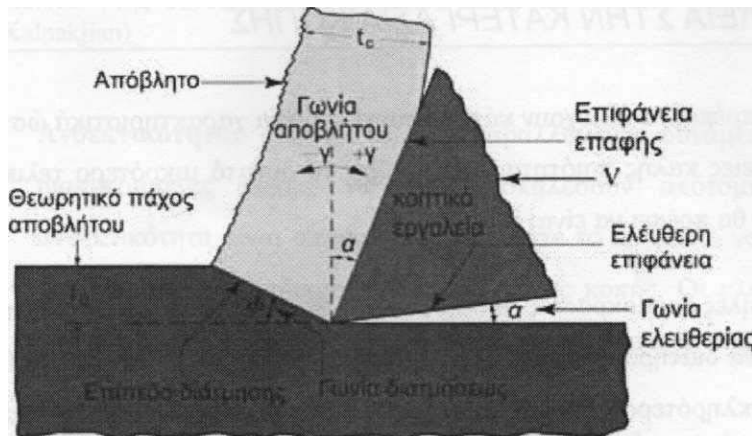
Η γωνία ελευθερίας  $\alpha$  : επιτρέπει την μείωση της τριβής μεταξύ του προς κατεργασία τεμαχίου και του εργαλείου στις περιοχές του εργαλείου που πρόσκεινται στις δύο κόψεις του επηρεάζοντας την φθορά του κοπτικού εργαλείου.

Η γωνία αποβλήτου  $\gamma$  : είναι η γωνία μεταξύ του μετώπου του κοπτικού εργαλείου και της καθέτου που διέρχεται από το σημείο κοπής. Παίρνει μέρος στον σχηματισμό του αποβλήτου και ελέγχει αποτελεσματικά την κοπή, ενώ πιθανή αύξηση της γωνίας αποβλήτου οδηγεί στην μείωση των δυνάμεων κοπής. Σε μεγάλες όμως γωνίες αποβλήτου το κοπτικό εργαλείο γίνεται πιο αιχμηρό και είναι πιθανή η υπερθέρμανση του καθώς και ελάττωση της αντοχής του. Γενικά μπορεί να είναι θετική, αρνητική ή μηδέν. Τέλος σε μεγάλες ταχύτητες κοπής και μικρή διατομή αποβλήτου η γωνία αποβλήτου λαμβάνει αρνητικές τιμές.

Η γωνία διατμήσεως  $\varphi$  : το υλικό παραμορφώνεται συνεχώς με πλαστική διάτμηση κατά μήκος του λεγόμενου επιπέδου διατμήσεως με αποτέλεσμα το σχηματισμό του αποβλήτου (με πάχος  $t_c$ ). Το επίπεδο διατμήσεως κλίνει προς την διεύθυνση κοπής κατά μια γωνία  $\varphi$ .

Το θεωρητικό ( $t_0$ ) και πραγματικό ( $t_c$ ) πάχος αποβλήτου: το  $t_0$  είναι το πάχος του στρώματος του μετάλλου που αφαιρείται με τη βοήθεια του εργαλείου ενώ το πάχος  $t_c$  είναι αυτό που αποκτά το απόβλητο μετά την κοπή και ονομάζεται πραγματικό πάχος

αποβλήτου.



Σχήμα 1.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατά την ορθογωνική κοπή (kalpakjian)

Μεταβλητές (εξαρτημένες και ανεξάρτητες)	Επιρροή και συσχετισμός
Ταχύτητα κοπής, βάθος κοπής, πρόωση, υγρά κοπής	Δυνάμεις, ισχύς, αύξηση θερμοκρασίας, ζώή κοπτικού εργαλείου, είδος αποβλήτου, ποιότητα κατεργασμένης επιφάνειας
Γωνία κοπτικού εργαλείου	Όπως παραπάνω, επιρροή στην κατεύθυνση ροής του αποβλήτου, αντίσταση στην φθορά του κοπτικού εργαλείου (φθορά λόγω μηχανικών τριβών που οδηγεί σε απόξεση ή απόσπαση υλικού (tool chipping) )
Συνεχές απόβλητο	Καλή ποιότητα κατεργασμένης επιφάνειας, σταθερές δυνάμεις κοπής. (Ανεπιθύμητο στις αυτοματοποιημένες κατεργασίες.)
Σχηματισμός αποβλήτου με ψευδοκοπή	Μικρής ποιότητας κατεργασμένη επιφάνειας. Λεπτή σταθερή κόψη που προστατεύει τις επιφάνειες του κοπτικού εργαλείου.
Ασυνεχές απόβλητο	Επιθυμητό για την εύκολη απομάκρυνση του μικρού μεγέθους αποβλήτων. Η αυξομείωση των δυνάμεων κοπής μπορεί να επιδράσει στην ποιότητα επιφανείας και να προκαλέσει δονήσεις και αυτοδιεγερόμενες

	ταλαντώσεις (chatter).
Αύξηση θερμοκρασίας	Επηρεάζει την διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου, συμβάλει στην ανάπτυξη φθοράς κρατήρα, την διαστατική ακρίβεια του τεμαχίου, προκαλεί θερμικές βλάβες στην επιφάνεια του τεμαχίου.
Φθορά κοπτικού εργαλείου	Επιδρά στην ποιότητα επιφανείας, στην διαστατική ακρίβεια της κατεργασίας, στην άνοδος θερμοκρασίας, στις δυνάμεις και την ισχύ.
Κατεργασιμότητα	Σχετίζεται με την ζωή κοπτικού εργαλείου, την ποιότητα κατεργασμένης επιφάνειας, τις δυνάμεις και την ισχύ.

**Πίνακας 1.1 Παράγοντες που επιδρούν στην διαδικασία κοπής (kalpakjian)**

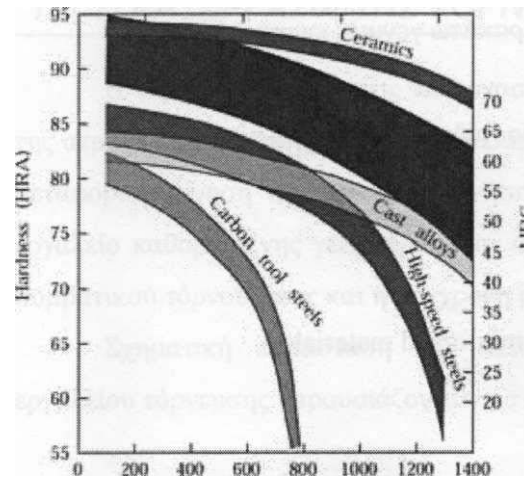
#### 1.4 ΤΑ ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΣΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΟΠΗΣ

Τα κοπτικά εργαλεία θα πρέπει να κατέχουν κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ώστε να παράγουν τεμάχια με επιφάνειες καλής ποιότητας και με όσο το δυνατό μικρότερο τελικό κόστος. Τα χαρακτηριστικά αυτά θα πρέπει να είναι :

☞ **Σκληρότητα:** ειδικά στις υψηλές θερμοκρασίες (σκλήρυνση εν θερμώ), ώστε η σκληρότητα και η αντοχή του εργαλείου να διατηρούνται στις υψηλές θερμοκρασίες κατά την κοπή. Το εργαλείο πρέπει να είναι σκληρότερο από το σκληρότερο συστατικό του υλικού που κατεργάζεται, όχι μόνο σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά και στις πραγματικές συνθήκες κοπής. Η υψηλή σκλήρυνση εν θερμώ (σχήμα 1.5) αποτρέπει την πλαστική παραμόρφωση, εξασφαλίζει την διατήρηση της γεωμετρίας



του εργαλείου κοπής κάτω από τις ακραίες συνθήκες κατά τον σχηματισμού αποβλήτου, και βοηθά επίσης στην αντίσταση σε φθορά.



Σχήμα 1.5 η σκληρότητα διαφόρων υλικών κατασκευής κοπτικών εργαλείων σε συνάρτηση της θερμοκρασίας (σκλήρυνση εν θερμώ). Το μεγάλο εύρος κάθε ομάδας των υλικών προκύπτει από την ποικιλία της σύνθεσης του εργαλείου όπως και από τις διάφορες κατεργασίες που έχει υποστεί. (kalpakjian)

☞ **Ανθεκτικότητα:** έτσι ώστε οι μεταβαλλόμενες δυνάμεις που δέχεται το εργαλείο σε διακεκομμένες κοπές, να μην προκαλέσουν απότομη θραύση του εργαλείου. Η ανθεκτικότητα είναι απαραίτητη έτσι ώστε το εργαλείο να αντεπεξέρχεται των μηχανικών κλονισμών στις διαδικασίες διακοπτόμενης κοπής. Οι κλονισμοί εμφανίζονται ακόμα και στις διαδικασίες σχηματισμού συνεχούς αποβλήτου, όταν το εργαλείο αντιμετωπίσει κάποιο σκληρό σημείο.

☞ **Αντοχή σε φθορά:** ώστε η διάρκεια ζωής του να διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα προτού το εργαλείο θα πρέπει να αλλαχθεί.

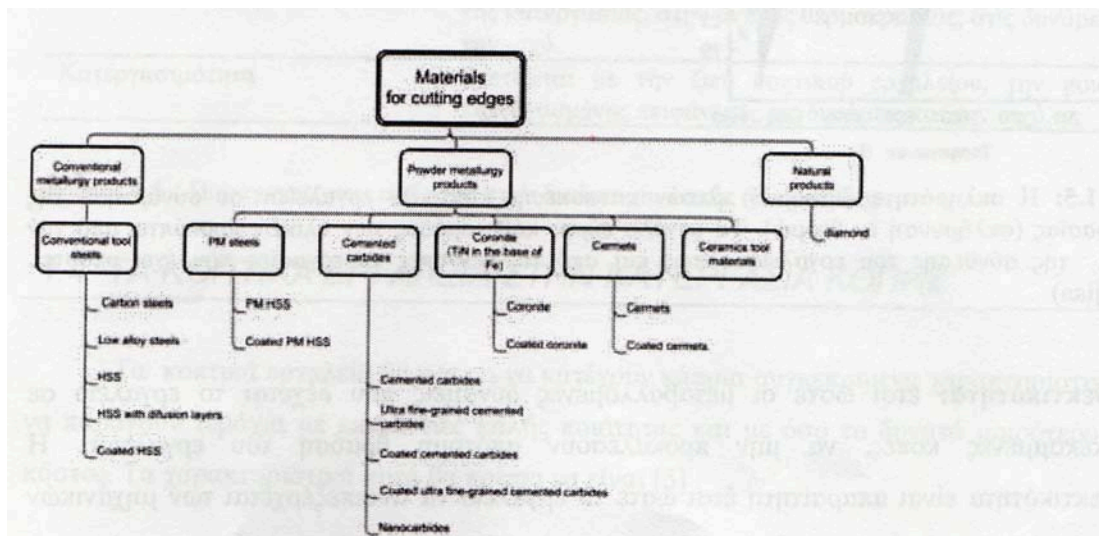
☞ **Χημική σταθερότητα:** ή χημική αδράνεια, ώστε να αποφεύγονται οι αντιδράσεις μεταξύ των υλικών του εργαλείου και του τεμαχίου οι οποίες συνηγορούν στην φθορά του πρώτου.

☞ **Παραδεκτό κόστος:** κτήσεως και διαθεσιμότητα χωρίς να επιβαρύνει σε μεγάλο ποσοστό το συνολικό τελικό κόστος άλλα και να καθιστά την κατεργασία αποδοτική.

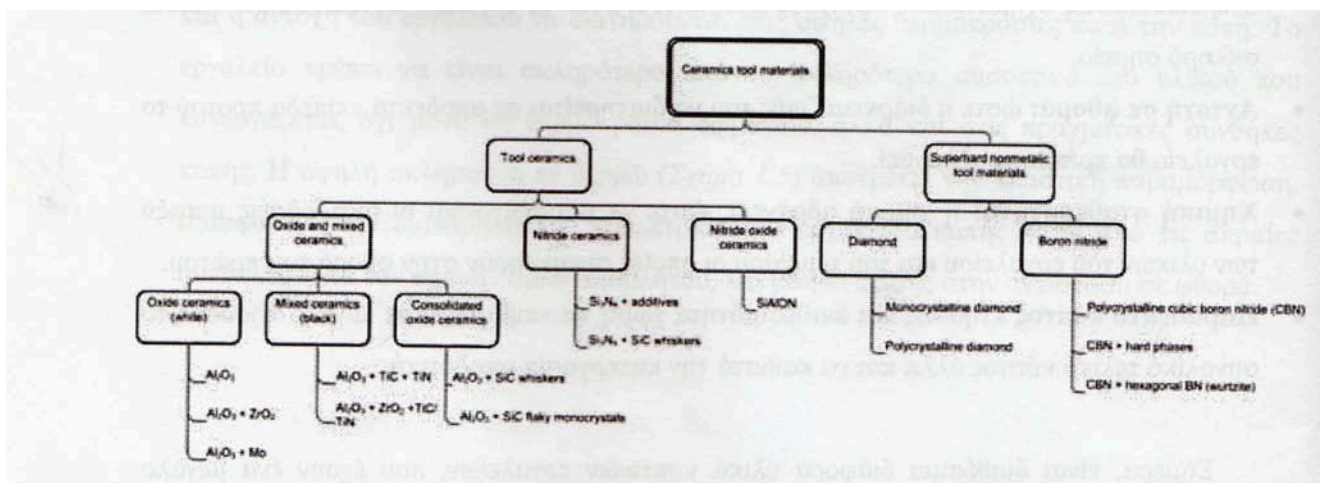
Σήμερα, είναι διαθέσιμα διάφορα υλικά κοπτικών εργαλείων, που έχουν ένα

μεγάλο εύρος ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών. Στα παρακάτω σχήματα 1.6 και 1.7, φαίνονται όλες οι κατηγορίες υλικών κατασκευής κοπτικών εργαλείων σε πλήρη ταξινόμηση. Τα κυριότερα υλικά κατασκευής εργαλείων διακρίνονται συνήθως στις παρακάτω γενικές κατηγορίες:

- Ανθρακούχοι χάλυβες - χάλυβες με μικρές προσμίξεις (cr, μη κ.λ.π.)
- Χυτοκράματα (στελλίτες)
- Ταχυχάλυβες
- Σκληρομέταλλα (συνήθη και επενδεδυμένα)
- Κεραμικά υλικά
- Υπέρσκληρα υλικά (cbn, διαμάντι, whisker reinforced materials)



Σχήμα 1.5 Ταξινόμηση υλικών κατασκευής κοπτικών εργαλείων

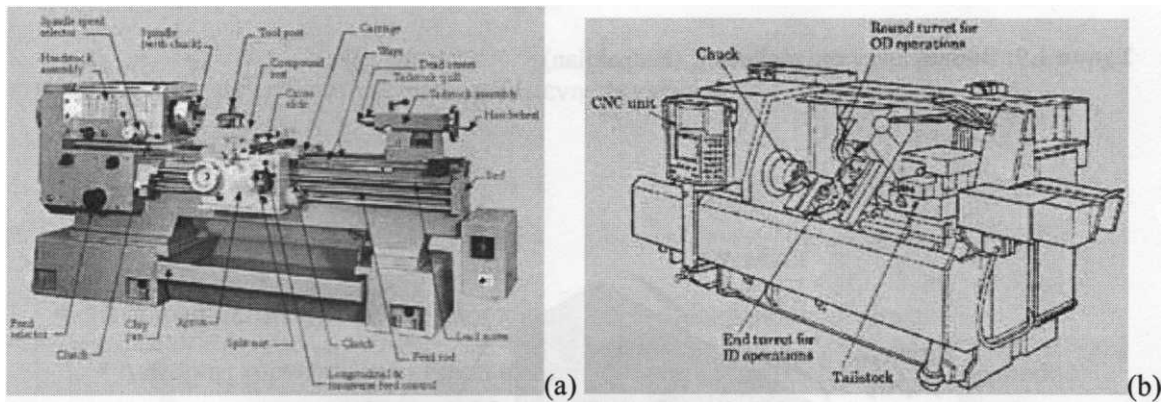


Σχήμα 1.7 Ταξινόμηση κεραμικών υλικών κατασκευής κοπτικών εργαλείων

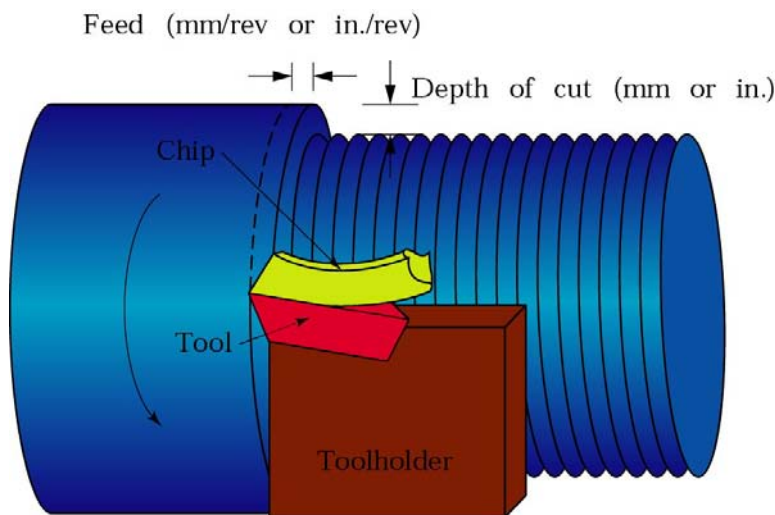
### 1.5 Η ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ

Η τórνευση ανήκει στις κατεργασίες κοπής με κύρια κίνηση την περιστροφική κίνηση της ατράκτου, όπου προσδένεται κατάλληλα το προς κατεργασία τεμάχιο, και δευτερεύουσα τη μεταφορική κίνηση της πρόωσης (κίνηση του κοπτικού εργαλείου), εκτελείται δε με κοπτικό εργαλείο καθορισμένης γεωμετρίας και απλής σημειακής επαφής. Χαρακτηριστικός τύπος συμβατικού τórνου όπως και η σύγχρονη μετεξέλιξη του φαίνονται στο σχήμα 1.8.

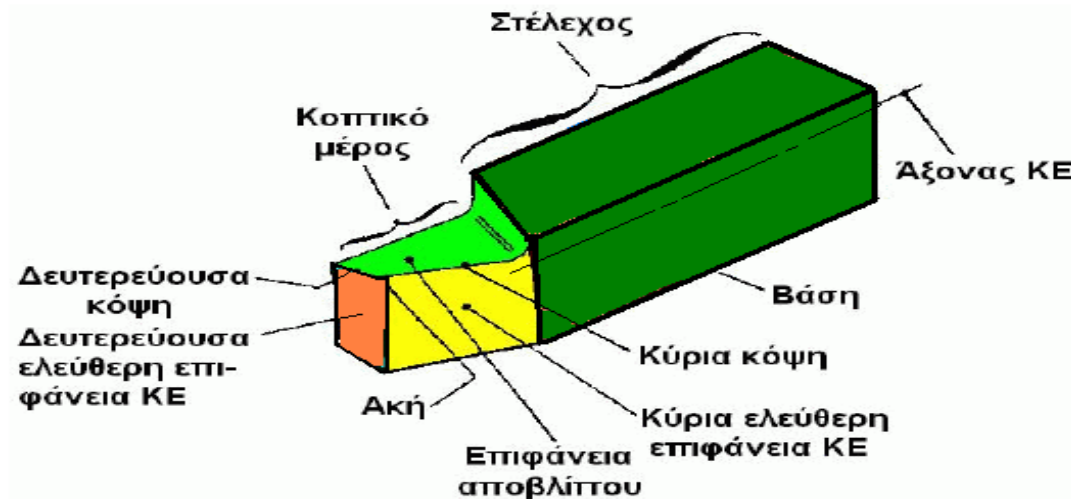
Σχηματική παράσταση της κατεργασίας και τυποποιημένη μορφή του κοπτικού εργαλείου τórνευσης παρουσιάζονται στα σχήματα 1.9 και 1.10 αντίστοιχα.



Σχήμα 1.8 (α) Συμβατικός τórνος και (β) Μηχανή τórνευσης CNC (Kalpakjian)



Σχήμα 1.9 Βασική αρχή τórνευσης.



Σχήμα 1.10 Τυποποιημένη μορφή του κοπτικού εργαλείου τórνευσης.

### 1.5.1 Είδη τórνευσης

Βάσει του άξονα περιστροφής του τεμαχίου ή άξονα τórνευσεως διακρίνουμε την τórνευση ως οριζόντια ή ως κατακόρυφη. Γενικά, μπορούν να τórνευτούν επιφάνειες εκ περιστροφής εξωτερικές όσο και εσωτερικές. Έτσι τα είδη τórνευσης ταξινομούνται (σχήμα 1.11 και 1.12) όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

☞ Ανάλογα με τη διάταξη του άξονα τórνευσης:

- Οριζόντια (οριζόντιος άξονας)
- Κατακόρυφη (κατακόρυφος άξονας).

☞ Ανάλογα με τη θέση της κατεργαζόμενης επιφάνειας:

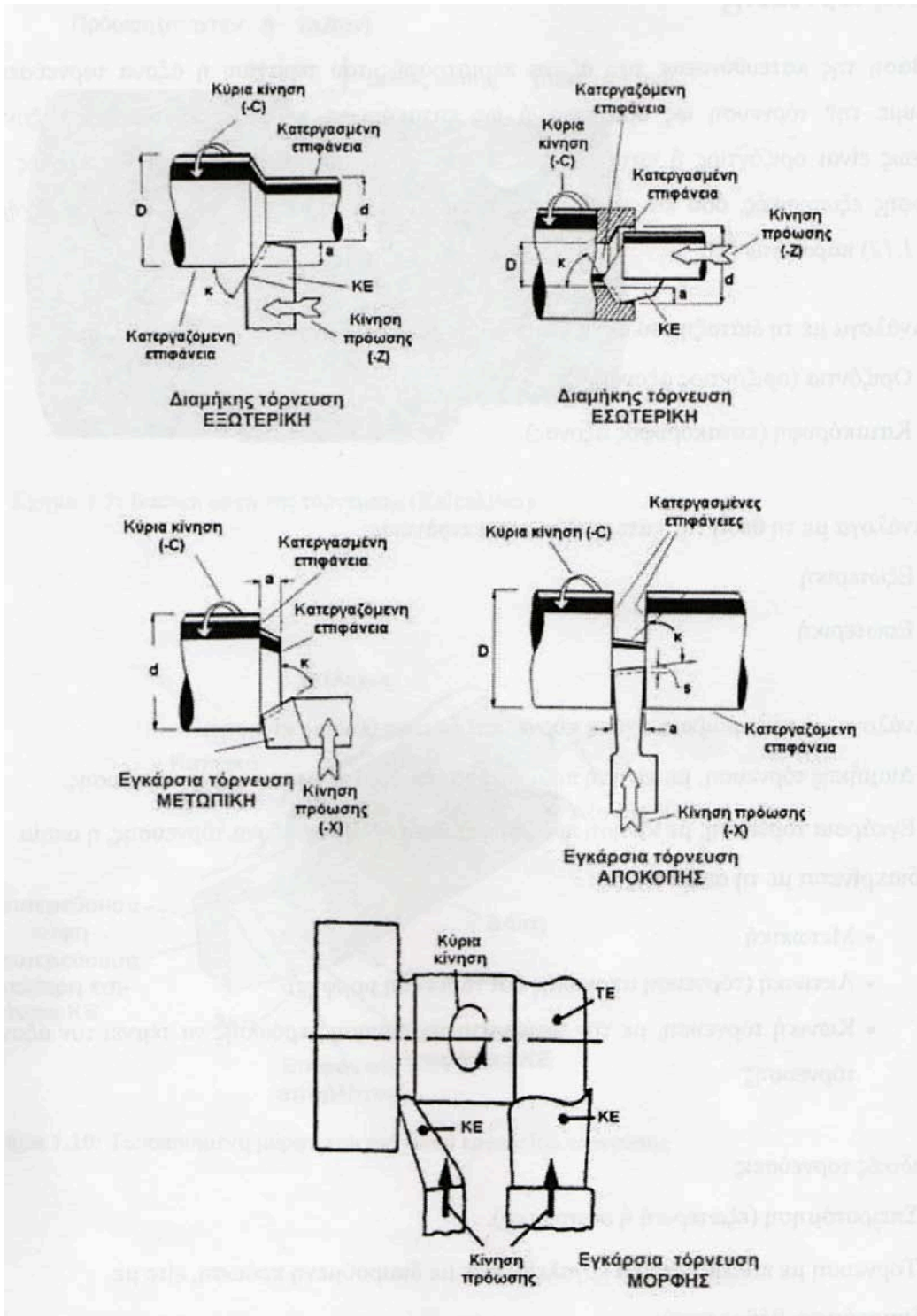
- Εξωτερική
- Εσωτερική.

☞ Ανάλογα με την αμοιβαία σχέση κύριας και δευτερεύουσας κίνησης:

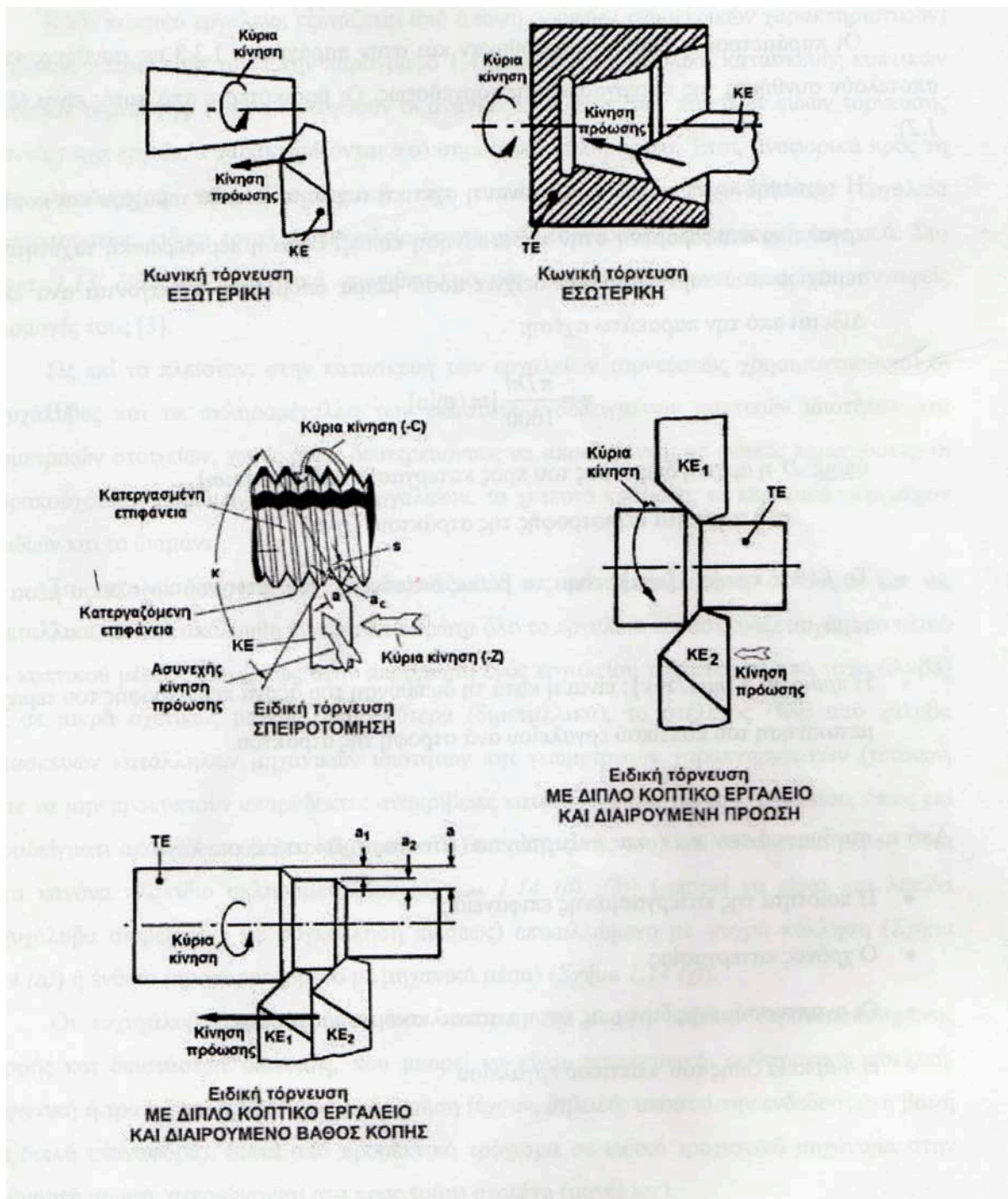
- Διαμήκης τórνευση, με κίνηση πρόωσης παράλληλη προς τον άξονα τórνευσης.
- Εγκάρσια τórνευση, με κίνηση πρόωσης κάθετη προς τον άξονα τórνευσης, η οποία διακρίνεται με τη σειρά της σε:
  - Μετωπική
  - Ακτινική (τόρνευση αποκοπής και τórνευση μορφής.
  - Κωνική τórνευση, με την διεύθυνση της κίνησης πρόωσης να τέμνει τον άξονα τórνευσης.

☞ Ειδικές τoρνεύσεις:

- Σπειροτόμηση (εξωτερική ή εσωτερική),
- Τórνευση με πολλά ΚΕ, είτε με διαιρούμενη πρόωση, είτε με διαιρούμενο βάθος κοπής.



Σχήμα 1.11 Διάφορα είδη τόνρευσης – Διαμήκης και εγκάρσια τόνρευση.



Σχήμα 1.12 Διάφορα είδη τόνρευσης – Κωνική και ειδικές τόνρευσεις.

### 1.5.2 Συνθήκες κοπής στην κατεργασία της τόννευσης

Οι παράμετροι οι οποίοι αναφέρθηκαν και στην παράγραφο 1.3.3 ως συνθήκες κοπής αποτελούν τις συνθήκες της κατεργασίας της τόννευσης. Οι βασικότερες από αυτές είναι (Σχήμα 1.2):

- ☞ Η ταχύτητα κοπής  $v$  [m/min]: είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου αναφερόμενη στην κύρια κίνηση κοπής. Είναι η περιφερειακή ταχύτητα του τεμαχίου που τорνεύεται και δείχνει πόσα μέτρα αποβλήτου παράγονται ανά λεπτό. Δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$v = \frac{\pi D n}{1000} [m / \text{min}]$$

όπου:  $D$  η αρχική διάμετρος του προς κατεργασία τεμαχίου [mm]

$n$  η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου [rpm]

- ☞ Το βάθος κοπής  $a$  [mm]: είναι το βάθος διείσδυσης του κοπτικού εργαλείου μέσα στο τεμάχιο.
- ☞ Η πρόωση  $f$  [mm/rev]: Είναι η μετακίνηση του κοπτικού εργαλείου ανά στροφή της ατράκτου κατά τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής του τεμαχίου.

Από το συνδυασμό των  $v, f$  και  $a$  εξαρτώνται (Πίνακας 1.1) κατά κύριο λόγο :

- ☞ Η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας.
- ☞ Ο χρόνος κατεργασίας.
- ☞ Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις και η καταναλισκόμενη ισχύς κοπής.
- ☞ Η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου



### 1.5.3 Δυνάμεις στην κοπή

Η συνολική δύναμη κοπής  $F$  αναλύεται στις ακόλουθες συνιστώσες ανά δύο κάθετες μεταξύ τους:

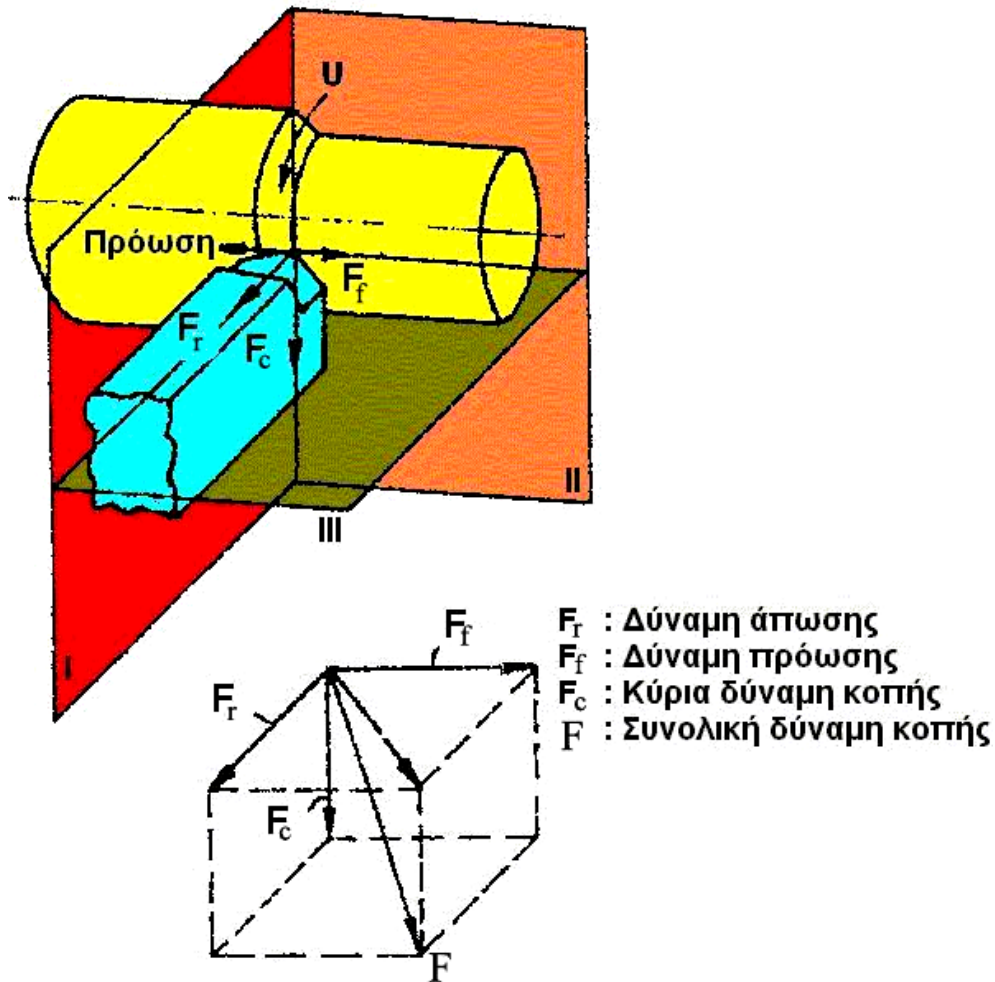
☞  $F_f$ : Δύναμη πρόωσης ( διεύθυνση  $X$  )

☞  $F_r$ : Δύναμη άπωσης του κοπτικού εργαλείου ( διεύθυνση  $Y$  )

☞  $F_c$ : Κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( διεύθυνση  $Z$  )

Η δύναμη κοπής  $F_c$  επενεργεί στην άκρη του κοπτικού εργαλείου τείνοντας να το εκτρέψει προς τα κάτω. Αυτή η δύναμη παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια κοπής. Η δύναμη πρόωσης  $F_f$  επενεργεί στην διαμήκη κατεύθυνση. Η δύναμη άπωσης  $F_r$  ασκείται στην ακτινική κατεύθυνση και τείνει να απομακρύνει το εργαλείο από το τεμάχιο.

Προφανώς ισχύει:  $F = \sqrt{F_c^2 + F_r^2 + F_f^2}$



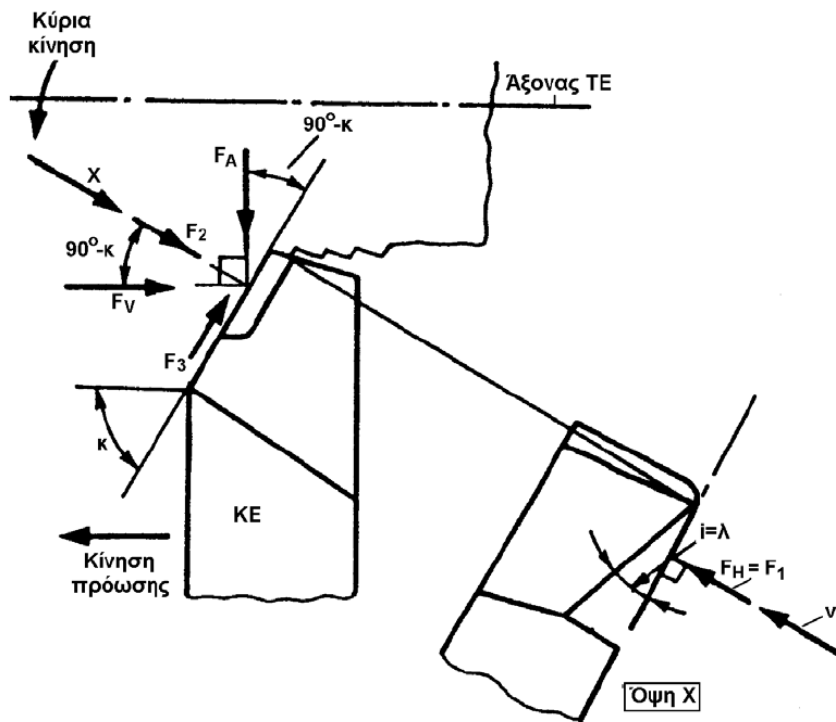
Σχήμα 1.13 Αναπτυσσόμενες δυνάμεις κατά την τórνευση.

### Υπολογισμός της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής

#### 1. Βάσει του προτύπου της λοξής κοπής

Κατά την ανάλυση της λοξής κοπής η συνολική δύναμη κοπής  $F$  αναλύθηκε στις συνιστώσες  $F_1$ ,  $F_2$  και  $F_3$ , οι οποίες συνδέονται με τις  $F_f$ ,  $F_r$  και  $F_c$  μέσω των σχέσεων:

- a.  $F_c = F_1$
- b.  $F_f = F_2 \cdot \sin \kappa + F_3 \cdot \cos \kappa$
- c.  $F_r = F_2 \cdot \cos \kappa - F_3 \cdot \sin \kappa$



Σχήμα 1.14 Υπολογισμός της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής βάσει του προτύπου της λοξής κοπής.

## 2. Η ημιεμπειρική μέθοδος Kienzle

Εισάγεται η έννοια της ειδικής αντίστασης κοπής,  $k_s$ , που ορίζεται από τη σχέση:

$$k_s = \frac{F_c}{A} = \frac{F_c}{h \cdot b}$$

Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι, για σταθερή διατομή αποβλίττου, η ειδική αντίσταση κοπής εξαρτάται από το πάχος αποβλίττου σύμφωνα με τη σχέση:

$$k_s = k_1 \cdot h^{-\zeta}$$

όπου:  $k_1$  η ειδική αντίσταση κοπής του υλικού τεμαχίου για διατομή αποβλίττου  $A=1\text{mm}^2$  ( $b=h=1\text{mm}$ ) και  $\zeta$  σταθερά.

Άρα, η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_c = k_s \cdot A = k_s \cdot b \cdot h = b \cdot k_1 \cdot h^{(1-\zeta)} \quad (\text{σε daN})$$

Τιμές των  $k_1$  και  $\zeta$  δίνονται στον Πίν. 1.

Η πειραματική εργασία του Kienzle έλαβε χώρα υπό τις εξής συνθήκες κοπής:

$$v = 90-125 \text{ m/min}$$

$$h = 0.06-2.5 \text{ mm}$$

$$\gamma = 6^\circ \text{ για χάλυβα και } \gamma = \pm 2^\circ \text{ για χυτοσίδηρο}$$

$$\alpha = 5^\circ$$

Υλικό κοπτικού εργαλείου: Σκληρομέταλλο.

Για διαφορετικές συνθήκες κοπής πρέπει να γίνει διόρθωση της τιμής  $F_c$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$F_{c\delta} = K_\gamma \cdot K_v \cdot K_\varepsilon \cdot K_\phi \cdot F_H$$

όπου:

$K_\gamma$ : συντελεστής διόρθωσης λόγω διαφορετικής γωνίας αποβλίπτου του κοπτικού εργαλείου, η οποία κυμαίνεται μεταξύ των τιμών  $-20^\circ$  και  $+30^\circ$ , σύμφωνα με τη σχέση

$$K_\gamma = 1 - \frac{\gamma - \gamma_o}{66.7}$$

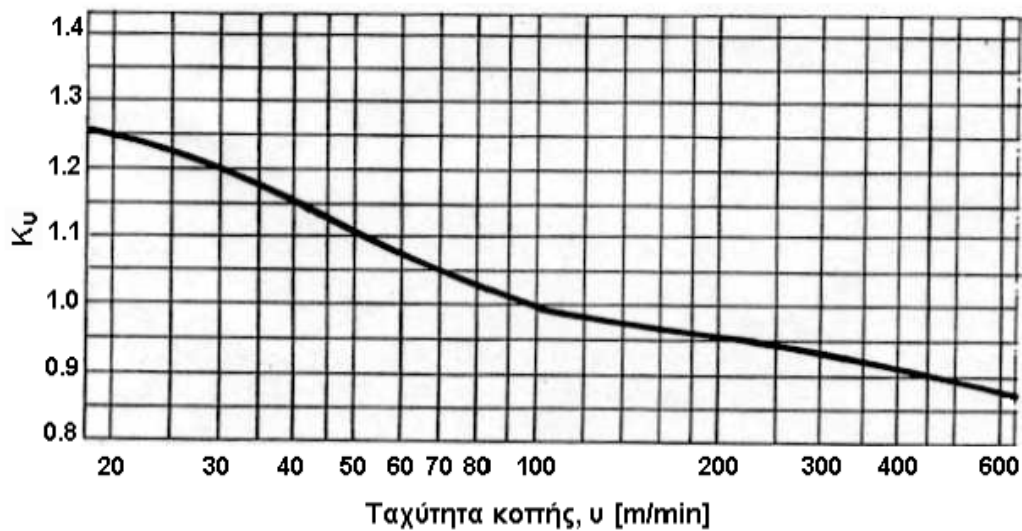
όπου:

$\gamma$ : η τρέχουσα τιμή της γωνίας του χρησιμοποιούμενου κοπτικού εργαλείου.

$\gamma_o = +6^\circ$  για διαμήκη τόννευση χάλυβα και

$\gamma_o = +2^\circ$  για διαμήκη τόννευση χυτοσιδήρου.

$K_v$ : συντελεστής διόρθωσης λόγω ταχύτητας κοπής στην περιοχή τιμών 20-600m/min, τιμές του συντελεστή λαμβάνονται από το Σχ. 9 συναρτήσει της πραγματικής ταχύτητας κοπής  $v$ .



Σχήμα 1.15 Υπολογισμός του συντελεστή διόρθωσης K<sub>v</sub>

K<sub>ε</sub>: συντελεστής διόρθωσης λόγω υλικού κοπτικού εργαλείου, με τιμές 0.90-0.95 για κοπτικό εργαλείο από κεραμεικό υλικό και 1 για κοπτικό εργαλείο από ταχυχάλυβα και σκληρομέταλλο.

K<sub>φ</sub>: συντελεστής διόρθωσης λόγω φθοράς του κοπτικού εργαλείου, με τιμές 1.30-1.50, ανάλογα με την έκταση του πεδίου φθοράς.

#### Εμπειρικός υπολογισμός των υπολοίπων συνιστωσών δυνάμεων

- Για τórνευση χαλύβων:

$$F_c : F_f : F_r = 10 : (4 \div 6) : (2 \div 3)$$

- Για τórνευση χυτοσιδήρων:

$$F_c : F_f : F_r = 10 : (3 \div 6) : (1.5 \div 3)$$

### 3. Μοντέλο υπολογισμού δυνάμεων για κοπές υψηλών ταχυτήτων

Πρόσφατα έχει δημοσιευθεί και μια τρίτη μέθοδος υπολογισμού της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής. Σύμφωνα με αυτή την δημοσίευση η δύναμη κοπής  $F_c$  ισούται με την ειδική αντίσταση κοπής  $k_s$  πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή  $S$ :

$$F_c = k_s \cdot S$$

$$\text{όπου } S = a \cdot f$$

$$\text{Συνεπώς, } F_c = k_s \cdot a \cdot f$$

Η ειδική αντίσταση κοπής  $k_s$  εξαρτάται από το υλικό του κοπτικού εργαλείου, την πρόωση και την ταχύτητα κοπής. Μπορεί να υπολογιστεί, λοιπόν, μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$k_s = k_1 \cdot f^{k_2} \cdot V_c^{k_3}$$

Κατά συνέπεια, η τελική σχέση μέσω της οποίας υπολογίζεται η δύναμη κοπής είναι η παρακάτω:

$$F_c = k_1 \cdot f^{k_2+1} \cdot V_c^{k_3} \cdot a$$

#### 1.5.4 Ρυθμός αφαίρεσης υλικού

Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού (MRR - Material Removal Rate) είναι ο όγκος του αφαιρούμενου υλικού στην μονάδα του χρόνου ( $\text{mm}^3/\text{min}$ ). Παρατηρείται ότι για κάθε περιστροφή του τεμαχίου, αφαιρείται μια στρώση υλικού σχήματος δακτυλίου του οποίου το εμβαδό της επιφάνειας τομής αποτελείται από το γινόμενο της απόστασης που μετακινήθηκε το εργαλείο σε μια περιστροφή (πρόωση  $f$ ) και του βάθους κοπής  $a$ . Ο όγκος του δακτυλίου προκύπτει από το εμβαδόν της επιφάνειας τομής δηλαδή  $f a$  της μέσης περιφέρειας του δακτυλίου δηλαδή

$$\pi D_{avg}, \text{ όπου } D_{avg} = (D_a + D_f)/2.$$

Για μικρά βάθη κοπής σε μεγάλες διαμέτρους τεμαχίων η μέση διάμετρος μπορεί να αντικατασταθεί από  $D_q$ . Η ταχύτητα περιστροφής του τεμαχίου είναι  $N$ . Συνεπώς, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού σε κάθε περιστροφή θα είναι:

$$\text{MRR} = (\pi)(D_{avg})(d)(f)(N)[\text{mm}^3/\text{min}]$$

Ο χρόνος κοπής  $t$  για ένα τεμάχιο μήκους  $l$  μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη ότι το εργαλείο κινείται με ταχύτητα ίση με τον ρυθμό πρόωσης,  $fN$ . Εφόσον η απόσταση που διανύεται είναι  $l$  mm, ο χρόνος κοπής είναι:

$$t = \frac{l}{fN}$$

Ο χρόνος αυτός δεν περιλαμβάνει τον χρόνο που απαιτείται για την προσέγγιση και την απομάκρυνση του εργαλείου από και προς το τεμάχιο. Λόγω του ότι ο νεκρός χρόνος είναι μη παραγωγικός και επιδρά έντονα στα συνολικά κόστος της κατεργασίας θεωρείται πολύ σημαντικός. Οι σημερινές εργαλειομηχανές είναι σχεδιασμένες ώστε να ελαχιστοποιούνται οι νεκροί χρόνοι.

### 1.5.5 Τα κοπτικά εργαλεία στην κατεργασία της τórνευσης.

Κάθε κοπτικό εργαλείο, εξετάζεται από άποψη μορφής (γεωμετρικών χαρακτηριστικών) και υλικού κατασκευής του. Στην παράγραφο 1.4 αναφέρονται τα υλικά κατασκευής κοπτικών εργαλείων τórνευσης. Για να καλυφθούν οι ανάγκες εκτέλεσης των ποικίλων ειδών τórνευσης τα αντίστοιχα εργαλεία χαρακτηρίζονται από σημαντική πολυμορφία. Έτσι, αναφορικά προς τη φύση λειτουργίας τους διακρίνονται σε: τυπικά, εργαλεία εκχονδρίσεως, εργαλεία αποπερατώσεως, ειδικά εργαλεία, εργαλεία εσωτερικής τórνευσεως, σπειροτομήσεως, κ.ά. Στο σχήμα 1.16 δίδονται σχηματικά συνήθεις μορφές εργαλείων τórνευσεως και συναφείς εφαρμογές τους.

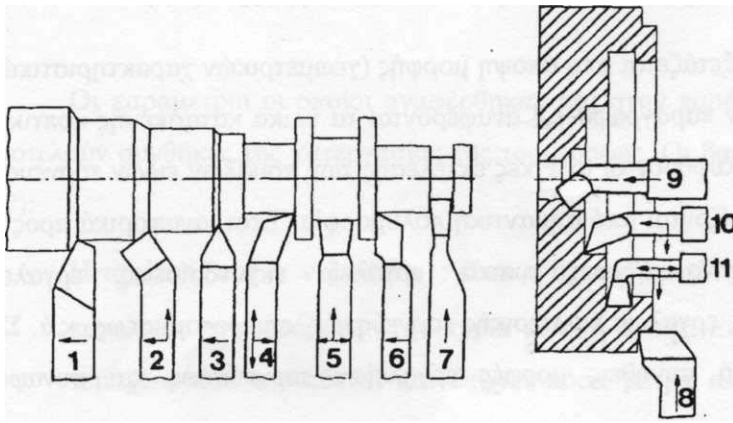
Ως επί το πλείστον, στην κατασκευή των εργαλείων τórνευσεως χρησιμοποιούνται οι ταχυχάλυβες και τα σκληρομέταλλα των εκάστοτε ενδεδειγμένων κοπτικών ιδιοτήτων και γεωμετρικών στοιχείων, χωρίς όμως δευτερευόντως να αποκλείονται σε ειδικές περιπτώσεις: οι ανθρακούχοι και κεκραμένοι χάλυβες εργαλείων, τα χυτευτά κράματα, τα κεραμικά πυριμάχων οξειδίων και το διαμάντι.

Τα εργαλεία τórνευσεως κατασκευάζονται ως μονομεταλλικά ή ολόσωμα και ως διμεταλλικά, με την ακόλουθη έννοια: στα πρώτα όλο το εργαλείο κατασκευάζεται από το υλικό του κοπτικού μέρους του (όπως στην περίπτωση ενός εργαλείου τórνευσεως από ταχυχάλυβα) και σε μικρά σχετικώς μεγέθη. Στα δεύτερα (διμεταλλικά), το στέλεχος είναι από χάλυβα κατασκευών κατάλληλων μηχανικών ιδιοτήτων και γεωμετρικών χαρακτηριστικών (τέτοιων, ώστε να μην προκύπτουν απαράδεκτες ανακρίβειες κατά τη λειτουργία του εργαλείου, όπως επί παραδείγματι απαράδεκτο βέλος κάμψεως στη θέση της ακής του) και το κοπτικό μέρος είναι κατά κανόνα πλακίδιο σκληρομετάλλου (σχήμα 1.17 (β), (δ)) (μπορεί να είναι και λεπίδα ταχυχάλυβα στερεωμένη με συγκόλληση πίεσεως) επικολλώμενο με ψυχρή κόλληση (σχήμα 1.17 (α)) ή ένθετο (προσαρμοζόμενο με μηχανικά μέσα) (σχήμα 1.17 (γ)).

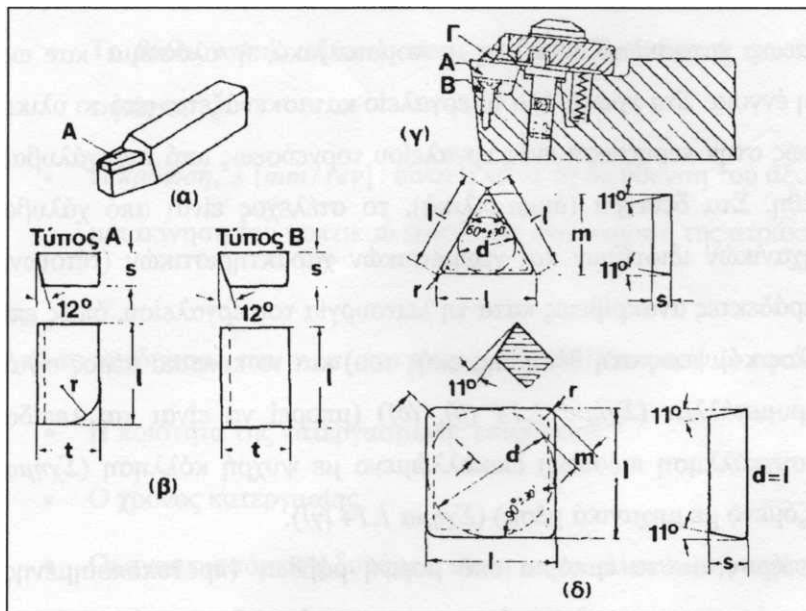
Οι ταχυχάλυβες προσφέρονται στο εμπόριο υπό μορφή ράβδων (προτυποποιημένης μορφής και διαστάσεων διατομής, που μπορεί να είναι τετραγωνική, ορθογωνική, κυκλική, τριγωνική ή τραπεζοειδής) έτοιμων προς χρήση (έχουν, δηλαδή, υποστεί την ενδεδειγμένη βαφή και διπλή επαναφορά). Μετά από προσεκτικό τρόχισμα σε ειδικό τροχιστικά μηχάνημα στην επιθυμητή μορφή, στερεώνονται στα προς τούτο στελέχη (μανέλλες).

Τα σκληρομέταλλα προσφέρονται στο εμπόριο με τη μορφή πλακιδίων σε προτυποποιημένα σχήματα και μεγέθη (σχήμα 1.18).

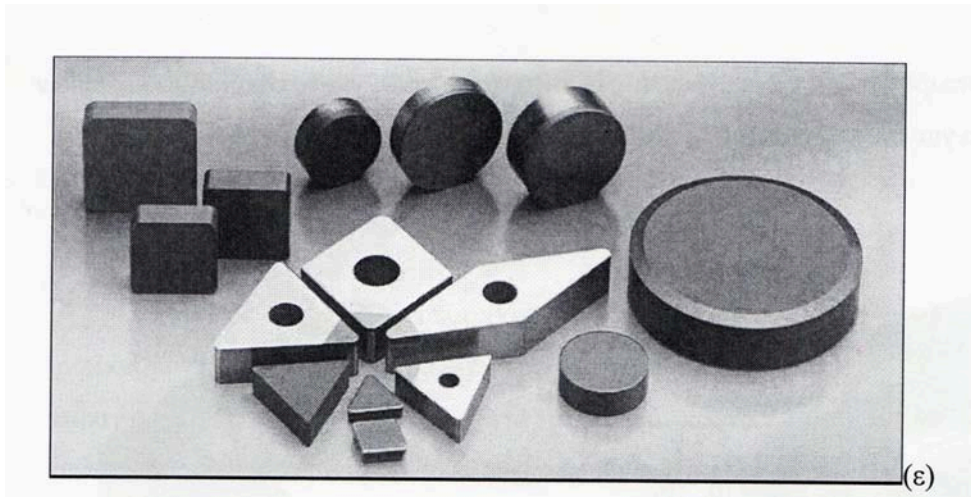




Σχήμα 1.16 σχηματική παράσταση τυποποιημένων μορφών εργαλείων τρνενύσεως και παράδειγμα εφαρμογής τους: 1. ευθύ εργαλείο εκχονδρίσεως, 2. κεκαμμένο εκχονδρίσεως, 3. οξύ αποπερατώσεως 4. κεκαμμένο ειδικής μορφής, 5. πλατύ (ορθογωνικό) αποπερατώσεως, 6. ξεθυμάσματος (γωνιάσματος), 7. αποκοπής, 8. μετωπικής τρνενύσεως (προσώπου), 9. εσωτερικής τρνενύσεως (διαμπερή κοίλα), 10. τρνενύσεως τυφλών κοίλων, 11. ορθογωνικό εσωτερικής αυλακώσεως.



Σχήμα 1.17 Μορφές προτυποποιημένων πλακιδίων από σκληρομέταλλο και τρόποι συγκρατήσεως του στο στέλεχος του κοπτικού εργαλείου. α) Εργαλείο με επικολλώμενο πλακίδιο Α. β) Μορφές επικολλώμενων πλακιδίων, γ) Συγκράτηση ένθετου πλακιδίου: Α. πλακίδιο, Β. Προσθήκη, Γ. γρεζοθραύστης, δ) μορφές ένθετων πλακιδίων.



Σχήμα 1.18 ε) διάφορες μορφές πλακιδίων σκληρομετάλλων (στην συγκεκριμένη περίπτωση πλακίδια από cbn) (seco-carboloy)

Ύστερα από πολλές οικονομοτεχνικές μελέτες που έχουν διεξαχθεί μέχρι σήμερα, αλλά και από τη συσσωρευμένη εμπειρία, έχει πλέον καθιερωθεί το γεγονός ότι τα εργαλεία με ένθετα πλακίδια πλεονεκτούν σημαντικά έναντι των εργαλείων με επικολλώμενα πλακίδια. Και τούτο, γιατί η χαλάρωση του πλακιδίου και απλή περιστροφή του αρκούν για την αλλαγή της κόψης του που τυχόν έχει φθαρεί (έτσι μπορούν διαδοχικά να χρησιμοποιηθούν και οι έξι ή και οι οκτώ κόψεις του πλακιδίου, αν το πλακίδιο είναι αντίστοιχα τριγωνικό ή τετραγωνικό και έχει μηδενική γωνία ελευθερίας, αλλιώς οι τρεις ή οι τέσσερις κόψεις του), χωρίς να απαιτείται αφαίρεση του εργαλείου από την εργαλειομηχανή και αποκόλληση, τρόχιση και επικόλληση του πλακιδίου, όπως συμβαίνει στα εργαλεία με επικολλώμενα πλακίδια. Επιπλέον, τα ένθετα πλακίδια δεν διατρέχουν τον κίνδυνο καταστροφής, ο οποίος επαπειλεί τα επικολλώμενα κατά την κόλληση τους στο στέλεχος.

### 1.5.6 Τα υγρά κοπής στην κατεργασία της κοπής.

Τα υγρά κοπής χρησιμοποιούνται συχνά στις διάφορες κατεργασίες, κατάλληλα προσαγόμενα στην περιοχή κοπής την οποία διαβρέχουν, σε αντίθεση με τη λεγόμενη ξηρή κοπή που εκτελείται χωρίς υγρό κοπής. Η δράση του υγρού κοπής οφείλεται, όπως αναφέρεται παρακάτω, σε ορισμένες χαρακτηριστικές του ιδιότητες και εκδηλώνεται διαφορετικά και ανάλογα με το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, το υλικό και τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και με τις συνθήκες κοπής. Έτσι, ένα υγρό κοπής μπορεί να επενεργήσει είτε ως λιπαντικό είτε ως ψυκτικό και συχνά ως λιπαντικό και ως ψυκτικό μαζί. Η γνώση των δράσεων αυτών του υγρού κοπής μας είναι πολύ χρήσιμη,

γιατί μας διευκολύνει στην επιτυχή εκλογή του στις διάφορες εφαρμογές. Πιο αναλυτικά, με τη χρησιμοποίηση των υγρών κοπής μπορούμε να επιτύχουμε:

- A. Μείωση στο μέσο φαινόμενο συντελεστή τριβής στη διεπιφάνεια αποβλίττου-εργαλείου, αλλά και στο μέσο συντελεστή τριβής στην επιφάνεια επαφής εργαλείου και τεμαχίου (σε περιπτώσεις, που εμφανίζεται σημαντική σχετικά ζώνη φθοράς) ως απόρροια της λιπαντικής δράσεως του υγρού κοπής.
- B. Ελάττωση της θερμοκρασίας του εργαλείου, του τεμαχίου και του αποβλίττου μέσω απαγωγής μέρους της θερμότητας (που παράγεται κατά την κοπή) ως αποτέλεσμα της ψυκτικής δράσεως του υγρού κοπής.
- C. Μείωση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου (και αύξηση της ζωής του) έμμεσα, ως αποτέλεσμα της ελαττώσεως του συντελεστή τριβής και της ψύξεως, ως (α) και (β) παραπάνω.
- D. Βελτίωση της τραχύτητας της κατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου.
- E. Μείωση στις δυνάμεις και στην ισχύ κοπής.
- F. Περιορισμό στις στρεβλώσεις του τεμαχίου, οι οποίες προκαλούνται λόγω υψηλών τοπικών διαφορών της θερμοκρασίας, που αναπτύσσεται.
- G. Ευκολία στο χειρισμό των έτοιμων τεμαχίων. Με τη χρησιμοποίηση κατάλληλου ψυκτικού κοπής είναι δυνατή η διατήρηση ομοιόμορφης, σε κάποιο βαθμό, θερμοκρασίας του τεμαχίου σε χαμηλότερη στάθμη.
- H. Προστασία του τεμαχίου και των μερών της εργαλειομηχανής, που έρχονται σε επαφή υγρό κοπής, από οξείδωση ή διάβρωση.
- I. Απομάκρυνση μικρών τεμαχίων αποβλήτου και άλλων σωμάτων (μικροτμηματιδίων, που προκύπτουν από τη φθορά του εργαλείου, όπως για παράδειγμα από φθορά λόγω αποξέσεως). Αυτό προφυλάσσει από τραυματισμούς την κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου και συνεπώς συμβάλλει στη διατήρηση της επιθυμητής τραχύτητας της.

Το υγρό κοπής πρέπει να έχει ικανοποιητικές ιδιότητες διαβρεκτικότητας επιφανειών, με τις οποίες αυτό έρχεται σε επαφή. Επιπλέον οφείλει να είναι (και να παραμένει), φυσικώς και χημικώς ευσταθές και να διατηρεί την αποτελεσματικότητα του κατά όλη την ωφέλιμη ζωή του, που μπορεί να φθάσει και τους 12 μήνες. Τέλος, πρέπει να είναι οικονομικό. Δηλαδή, το κόστος κτήσεως του υγρού κοπής, μαζί με εκείνο της εγκαταστάσεως και λειτουργίας του συστήματος παροχής του, οφείλει να αντισταθμίζει τουλάχιστον στις ωφέλειες, που προκύπτουν από τη χρήση του στις διάφορες κατεργασίες.

Όπως έχει προαναφερθεί, οι βασικές δράσεις του υγρού κοπής είναι οι (Α) και (Β), όμως, άλλες από τις επενέργειες του μπορούν να θεωρηθούν ως επακόλουθο των πρώτων.

Τα υγρά κοπής χρησιμοποιούμενα στο μηχανουργείο εμφανίζουν εν γένει και ορισμένες ανεπιθύμητες παρενέργειες, που είναι δυνατό ή να καταστήσουν αδύνατη τη χρησιμοποίησή τους ή να περιορίσουν το πεδίο εφαρμογών τους. Ως τέτοιες βασικές παρενέργειες παραθέτονται οι ακόλουθες:

- A. Παρενέργειες στην υγεία του τεχνίτη (για παράδειγμα αναπνευστικά προβλήματα, δερματίτιδες, καρκίνοι) οφειλόμενες σε τοξικούς ατμούς, δυσάρεστες οσμές, αναθυμιάσεις και άμεση επαφή των υγρών κοπής με τον εργάτη.
- B. Επιδράσεις στο υλικό του τεμαχίου ή σε υλικά της εργαλειομηχανής, που εκδηλώνονται συνήθως με οξειδωση ή διάβρωση. Υγρά κοπής για παράδειγμα με πρόσθετα υψηλής πίεσεως, τα οποία περιέχουν θείο, προσβάλλουν τα κράματα του χαλκού, που τυχόν κατεργάζονται, όπως και τα έδρανα της εργαλειομηχανής, τα οποία έχουν ως βάση το χαλκό και είναι προσιτά στο υγρό κοπής.

Οι ανεπιθύμητες παρενέργειες του υγρού κοπής μπορούν να περιοριστούν ή και να εξαφανιστούν πλήρως με την εκλογή κάθε φορά υγρού κοπής με τις ενδεδειγμένες ιδιότητες (όσον το δυνατόν φιλικότερο προς το περιβάλλον και τον χρήστη) ή με την υιοθέτηση σύγχρονων τεχνολογιών και κατάλληλων συνθηκών κατεργασιών κοπής (υπέρσκληρα υλικά κοπτικών εργαλείων, εργαλειομηχανές) όπου εφαρμόζεται η ξηρή κοπή.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ**

Πρόσφατα έχει επανέλθει το ενδιαφέρον για κατεργασίες σε υψηλές ταχύτητες. Η πρώτη παράγραφος περιγράφει μερικούς από τους λόγους που επανήλθε το ενδιαφέρον για κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων (ΚΥΤ). Πριν από δέκα ή είκοσι χρόνια δεν φαινόταν λογικό να κατεργαστεί μεγάλα τεμάχια σε με υψηλές ταχύτητες κοπής. Ωστόσο βελτιώνοντας τον σχεδιασμό όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 απαλείφεται το οικονομικό κόστος και αποφεύγονται συγκολλήσεις στο εργοστάσιο-μηχανουργείο.

Έπειτα αναφέρεται η συμπεριφορά των υλικών κοπής σε υψηλά επίπεδα καταπονήσεων. Αυτό είναι καθοριστικό για την αντίληψη της λειτουργίας των ΚΥΤ .

Οι παράγραφοι 2.6-2.8 περιγράφουν ορισμένα εξειδικευμένα πειράματα με ανοξείδωτο χάλυβα, AISI 4340, κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική, καθώς και με κράματα τιτανίου. Αυτά τα υλικά έχουν διαφορετική απόκριση στις ΚΥΤ βασιζόμενα στις διαφορετικές τους ιδιότητες.

### **2.2 ΟΙΚΟΝΟΜΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΚΥΤ**

Η έρευνα νέων προγραμμάτων κατεργασιών στις εταιρείες κατασκευής των boeing προσφέρουν ένα περαιτέρω κίνητρο για τις ΚΥΤ. Το επόμενο παράδειγμα δείχνει πως ο σχεδιασμός και η κατασκευή συνεχίζουν να αλλάζουν για να ταιριάξουν μια κατάλληλη αλληλοσύνδεση μεταξύ α) της ικανότητας των σύγχρονων τεχνικών κατεργασίας και β) των οικονομικών συνθηκών.

Στο εσωτερικό του άνω κελύφους ενός αεροπλάνου τοποθετούνται κατά το εγκάρσιο σε διάκενα μεταξύ τους, κατασκευές που μοιάζουν με τεράστιους κρεμαστούς θώρακες, για να δημιουργήσουν μια διστρεψία. Σήμερα τα πιο πολλά κατασκευάζονται από συνδεδεμένα τεμάχια .Αυτή η στοιχειοθέτηση φαίνεται στο άνω μέρος του Σχήμα 2.1. Σε αντιπαράθεση νεότερες κατασκευές φαίνονται στο κάτω μέρος του σχήματος αποφεύγοντας έτσι το περαιτέρω κόστος και τις απροσδόκητες συγκολλήσεις στο εργοστάσιο κατασκευής.

Όμως με αυτή την τάση για ανανέωση επιστρέφουμε στην φάση του αρχικού σχεδιασμού, έτσι πρέπει να επιτευχθεί ένας νέος τρόπος αλληλοσύνδεσης μεταξύ σχεδιασμού και κατασκευής. Χρησιμοποιώντας τον ακριβή ορισμό του CIM (computer integrated manufacturing) ή (κατασκευή με ενσωματωμένο υπολογιστή) ο οποίος είναι: συμβολή των τροφοδοτούμενων στοιχείων όπως οι νέες τεχνολογίες και οι απαιτήσεις των καταναλωτών (ποιότητα ποικιλία και πολυμορφικότητα), μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι καινοτομίες περιλαμβάνουν τα εξής:

- ☞ Βελτιωμένη τεχνολογία εργαλείων κοπής και κατανόηση του τρόπου ελέγχου τις ακρίβειας σε ΚΥΤ.
- ☞ Η αποτελεσματικότητα των άκαμπτων εργαλείων και των πολύ υψηλών ταχυτήτων των ατράκτων.
- ☞ Περισσότερο ομοιογενείς μικροκατασκευές που δίνουν ομοιομορφία σε ισχυρά σφυριλατήματα.
- ☞ Η ικανότητα να εκτελούνται περιληπτικές δοκιμές και να αποδεικνύεται αν μη τι άλλο ότι αυτές οι μονομπλόκ κατασκευές είναι πιο αξιόπιστες από αυτές των πολλών τεμαχίων.

Εν τω μεταξύ τα νέα απαιτούμενα στοιχεία περιέχουν:

- ☞ Μεταβλητό κόστος συγκόλλησης ή ήλωσης οι οποίες διαδικασίες μπορούν να είναι το πολύ ημιαυτόματες .Ορισμένες από αυτές τις διαδικασίες συνήθως απαιτούν εφαρμογή με το χέρι.
- ☞ Προδιάθεση να αποφεύγονται τα πολλά βήματα στην κατασκευή διότι χρειάζεται επαναπρογραμματισμός επανατοποθέτηση ιδιοσυσκευών και εξασφάλιση περεταίρω ποιότητας.

Πιέσεις στον χώρο της αεροπορικής βιομηχανίας προς την κατεύθυνση της μείωσης του κόστους και της παράλληλης βελτίωσης της ασφάλειας και της ακεραιότητας του αεροσκάφους.

Αυτές οι επιδιώξεις εισάγουν μια πολυπλοκότητα κατά την φάση του σχεδιασμού και της κατασκευής παράλληλα. Το συμπέρασμα από όλα αυτά είναι ότι καμία διαδικασία κατασκευής ή απλό στοιχείο κατασκευής δεν πρέπει να αναλυθεί και να βελτιστοποιηθεί χωριστά. Πάντα θα υπάρχει κάτι που θα επιδέχεται βελτιστοποίησης, απλοποίησης ή

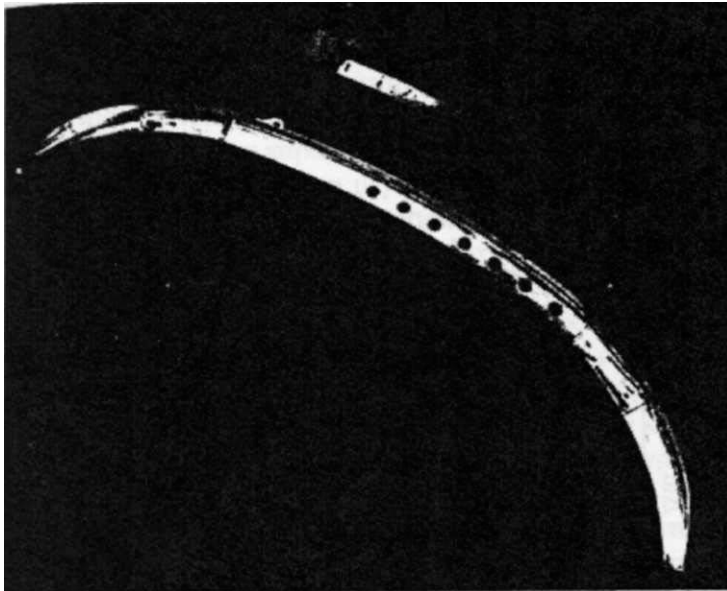
εύρεσης πιο οικονομικής λύσης αν ο σχεδιασμός και η κατασκευή παρακολουθούνται ταυτόχρονα από ένα πιο ευρύ σύστημα προοπτικής.

Πως αντιδρούν τα κατεργαζόμενα υλικά όταν οι ταχύτητες κοπής φτάνουν τις 3500m/min για πτερύγια από κράμα αλουμινίου ?

Ποιες δυνάμεις ασκούνται στο εργαλείο?

Ποιες είναι οι επιδράσεις στον χρόνο ζωής του εργαλείου?

Αυτές είναι ορισμένες από τις ερωτήσεις που απαντώνται σε αυτό το κεφάλαιο.



**Σχήμα 2.1** Ο συνδυασμός σχεδιασμού και μορφοποίησης κατά την διάρκεια της κατεργασίας επιτρέπουν σε αυτό το προϊόν αεροναυπηγικής να έχει διαμορφωθεί εξ ολοκλήρου από ένα στερεό σώμα υλικού.

### 2.3 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Το 1930 ο Trent και άλλοι προώθησαν καθαρά μεταλλογραφικά στοιχεία για τις αδιαβατικές ζώνες διάτμησης κατά την διάρκεια υψηλών τάσεων διαμόρφωσης.

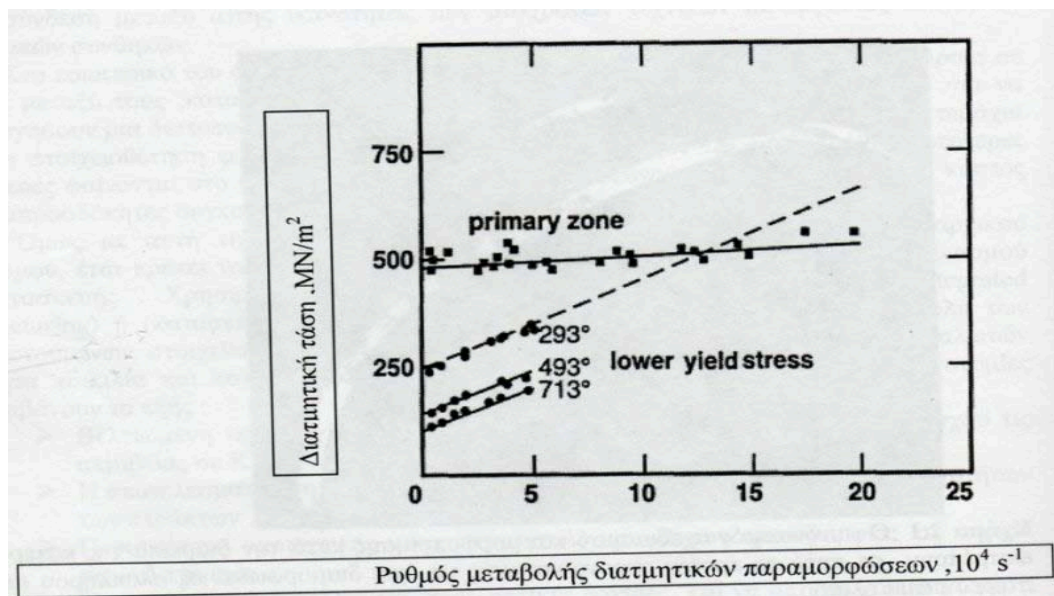
Το 1957 ο Cottrell ανακοίνωσε στην "διάσκεψη για τα υλικά που υφίστανται υψηλή τάση " εν συντομία τα παρακάτω : Εάν ο ρυθμός μεταβολής της πλαστικής διαρροής είναι αρκετά υψηλός δεν υπάρχει αρκετό διάστημα ώστε να αποχετεύουμε την θερμότητα που παράγεται κατά την κατεργασία, και η θερμοκρασία μπορεί να ανέβει αισθητά ούτως ώστε να επηρεάσει την διαμόρφωση του υλικού, η ταχεία τήξη θα

επιτυγχάνεται στις εξωτερικές ζώνες με αποτέλεσμα να γίνονται αρκετά αδύναμες.

Το 1964 ο Recht εφηύρε ένα μοντέλο για την καταστροφική διατμητική αστάθεια που δημιουργείται στα μέταλλα όταν υπόκεινται σε δυναμικά φορτία.

Παρατήρησε ότι υπό ορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας-τάσης η κλίση (παράγωγος) της καμπύλης της τάσης μπορεί να γίνει μηδενική ή ακόμη και αρνητική. Αυτό θα μπορούσε να είναι ιδανικό στην περίπτωση που το μαλάκωμα του υλικού λόγω θέρμανσης του υπερτερούσε έναντι της σκλήρυνσης του λόγω τάσεων.

Αυτή η γενική επισκόπηση από επιστήμονες των υλικών αποτέλεσε την έμπνευση για πειράματα στις κατεργασίες που είχαν σκοπό να επενδύσουν σε τέτοια φαινόμενα. Εκτός των άλλων και οι Kececioglu και Siekmann δημοσίευσαν τα αποτελέσματά τους σε KYT. Η εργασία του Kececioglu είναι αξιοσημείωτη λόγω της ακρίβειας της στο επίπεδο μεγέθους και διασποράς της διάτμησης κατά την διεργασία της κοπής στα μέταλλα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο αρχικός μέσος όρος διάτμησης των ζωνών διάτμησης παραμένει σταθερός για αρκετά υψηλές ταχύτητες. Αυτό το φαινόμενο περιγράφεται γραφικά μέσω του σχήματος 2.2.



Σχήμα 2.2 Σύγκριση μεταξύ πειραμάτων κοπής του Kececioglu και των Campbell και Furguson τις υψηλές τάσεις.

Κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 60' και 70', πειράματα με βλήματα και KYT συνδέθηκαν με αρκετές επιστημονικές ομάδες συμπεριλαμβανομένου και αυτής του Reel. Κάποιος αναγνώστης με βαθύ ενδιαφέρον σε KYT μπορεί να αναφερθεί στην εργασία



που βασίστηκε η διατριβή του Arndt στο πανεπιστήμιο του Μονάχου με τον R.H.Brown. Η εκτενής μνεία του Arndt στην εργασία του περιλαμβάνει όλες τις εργασίες Αμερικανών Γιαπωνέζων και Ευρωπαίων που αναφέρονταν σε KYT έως εκείνη τη στιγμή. Κατά την διάρκεια του πειράματος στο Μονακό χρησιμοποιήθηκε ένα στρατιωτικό όπλο του Bofer για εκπυρσοκροτήσει ένα τεμάχιο το οποίο με την σειρά του πέρασε μέσω ενός οργάνου μέτρησης της τάσης. Οι διατμητικές τάσεις μετρήθηκαν υπό διάφορες ταχύτητες. Αυτά τα πείραμα ενισχύθηκαν κατά την διάρκεια του 1980 σε ένα πρόγραμμα της πολεμικής αεροπορίας της Αμερικής υπό την εποπτεία της General Electric. Τα αποτελέσματα σχετίζονται με τις ιδιότητες του υλικού και τον σχηματισμό αποβλήτου σύμφωνα με τους Von Turkovich, Komanduri, Flom και συνεργάτες.

Από αυτό το σημείο και μετά τα πειράματα KYT προμήνυαν συναρπαστικές υποσχέσεις. Το βασικό ερώτημα ήταν το εξής :

- i) μπορούν οι πολύ υψηλές ταχύτητες να οδηγήσουν σε δυναμική ανακρυστάλωση (dynamic recovery) ή σε τοπική τήξη στις αρχικές ζώνες ούτως ώστε
- ii) οι στρέψεις και τάσεις που υπόκειται το εργαλείο να είναι τόσο χαμηλές ούτως ώστε η φθορά του εργαλείου να ελαττωθεί.

Αυτές οι ερωτήσεις δεν φαίνεται να είχαν απαντηθεί επαρκώς όταν ετέθησαν. Σύμφωνα με τις έως τότε γνώσεις κανένα υλικό δεν παρουσίαζε τόσο μεγάλη βύθιση στην καμπύλη δύναμη κοπής-ταχύτητα σε οποιαδήποτε ταχύτητα κοπής. Είναι προφανώς η περίπτωση που οι δυνάμεις κοπής σταδιακά μειώνονται έως ότου φτάσουν σε μια ομαλή κατάσταση καθόσον η ταχύτητα αυξάνεται. Ωστόσο δεν υπάρχει καμία αξιοσημείωτη βύθιση ούτως ώστε να συσχετιστεί με ξαφνική αλλαγή στην συμπεριφορά του υλικού, όπως δυναμική ανακρυστάλωση ή τοπική τήξη στην προκαταρκτική διάτμηση.

Ίσως πιο σχετικό από πρακτικής άποψης είναι το γεγονός ότι σε κανένα από τα αναφερόμενα πειράματα δεν παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη μείωση στην φθορά του εργαλείου σε πολύ μεγάλες ταχύτητες. Πράγματι μεγάλοι ερευνητές όπως ο Arndt και ο Recht μας δείχνουν ότι μειώνεται δραματικά ο χρόνος ζωής στα πειράματα βαλλιστικής. Τα εργαλεία αποσυνθέτονταν μετά μόνο από 1-2" κοπής κατά μήκος της σφαίρας.

Μερικά ευρήματα στην βιβλιογραφία δείχνουν ότι ελαττώθηκε το ενδιαφέρον στις KYT μετά τα μέσα της δεκαετίας του 80' και είναι μόνο πρόσφατο το ενδιαφέρον που αναγεννήθηκε. Ακόμα και τώρα το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στα υψηλότερα επίπεδα παραγωγής για αλουμίνιο και χυτοσίδηρο όχι αναγκαστικά στην μείωση της φθοράς του εργαλείου. Όντως όλα τα στοιχεία αποδεικνύουν ότι τα περισσότερα υλικά ,ακόμα και τα

μαλακά κράματα αλουμινίου αρχίζουν να κατεργάζονται με ένα πριονωτό ή οδοντωτό γρέζι σε κάποιο ιδιαίτερο κατώφλι τιμών ταχυτήτων κοπής.

Ο Albrecht ήταν ο πρώτος που επεδείξε ότι τέτοιας μορφής απόβλητα (γρέζια) επιταχύνουν την φθορά, ειδικά σε εργαλεία με άνθρακα. Αυτό συμβαίνει επειδή το πριονωτό γρέζι είναι αλληλοσυνδεδεμένο με το φορτίο υπό μορφή κόπωσης στα ευαίσθητα άκρα του εργαλείου.

Ένας πολλαπλός στόχος είναι να αυξήσουμε την ταχύτητα, να μειώσουμε ακόμα τον βαθμό του πριονίσματος του γρεξιού και την κόπωση του εργαλείου. Η παράγραφος 2.9 αναφέρεται σε αυτή την μέθοδο μέσω κάποιων πρακτικών συμβουλών.

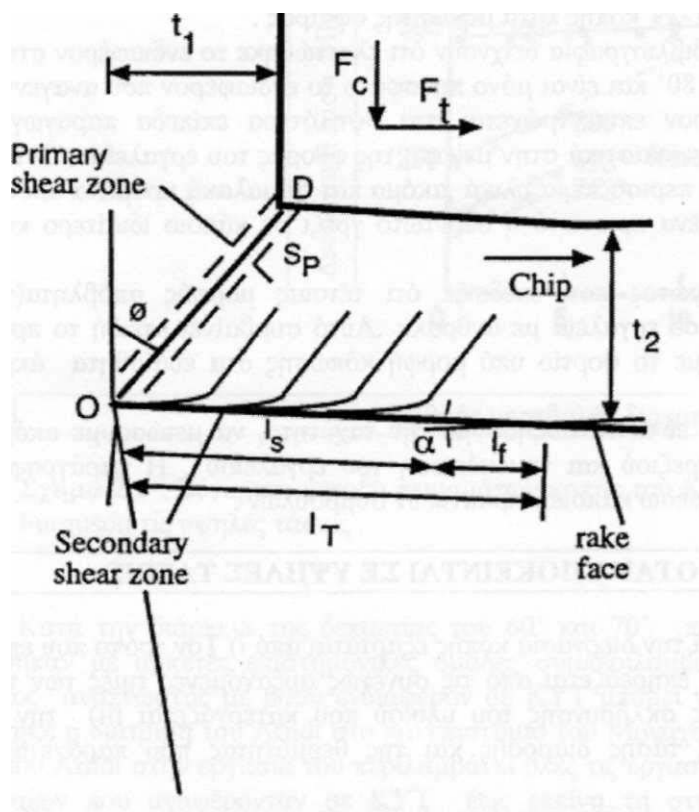
## 2.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΟΤΑΝ ΥΠΟΚΕΙΝΤΑΙ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

Η συμπεριφορά των υλικών κατά την διεργασία κοπής εξαρτάται από i) τον τρόπο που επιδρά η αρχική διαρροή του υλικού και επηρεάζεται από τις συνεχώς αυξανόμενες τιμές των τάσεων ii) τα χαρακτηριστικά της τάσης σκλήρυνσης του υλικού που κατεργάζεται iii) την χρόνο εξαρτώμενη σχέση μεταξύ της τάσης διαρροής και της θερμότητας που παράγεται στην πλαστική περιοχή.

Περί το 1960 και 1970 η ομάδα του Campbell's στο πανεπιστήμιο της Οξφόρδης δημιούργησε ένα μεγάλης έκτασης εργαστήριο που ειδικευόταν σε διαμορφώσεις υψηλών τάσεων, ειδικότερα ειδικευόταν στην τεχνική του Hopkinson. Για να παρουσιάσεις τέτοια δεδομένα εξελίχθηκε σε συνηθισμένη η διαδικασία να ακολουθείς την παρατήρηση της τεχνικής Rosen & Hahn η οποία αποσκοπεί στην περιγραφή των τεσσάρων περιοχών που καλύπτουν ένα πλατύ εύρος τάσεων και θερμοκρασιών. Παρά το γεγονός ότι αυτές οι εκθέσεις είναι αρκετά παλιές ο αναγνώστης προτίθεται να τις συμπεριλάβει στις πιο αξιόπιστες διότι δεν έχουν γίνει παρόμοιες το τελευταίο διάστημα. Αυτό προέκυψε ως αποτέλεσμα του δυσβάσταχτου κόστους τους και του γεγονότος ότι μέχρι το 1980 οι ερευνητές σε Ευρώπη-Ιαπωνία και ΗΠΑ ενδιαφερόντουσαν περισσότερο στους αυτοματισμούς και στο CAD/CAM.

Τα επίπεδα του ρυθμού καταπόνησης που είναι κατάλληλα για κατεργασία ξεκινούν στις συνοριακές τιμές μεταξύ περιοχών II και IV (ένας ρυθμός της τάξης των  $\sim 10^4$  ανά λεπτό ) και φτάνουν και καλύπτουν την περιοχή IV. Στην τελευταία ο βαθμός εξαναγκασμένης μετατόπισης επηρεάζεται από τον μηχανισμό μεταπήδησης ηλεκτρονίων. Έως αυτό το βαθμό η αντοχή διάτμηση παρατηρείται να αυξάνεται

αναλογικά με τον ρυθμό μεταβολής της τάσης όπως περιγράφεται στην εξίσωση 2.1. Μια γενική αναλυτική προσέγγιση που λαμβάνεται σε όλες τις συναφείς έρευνες είναι η σύγκριση των ιδιοτήτων του υλικού του εργαλείου με αυτές του επεξεργαζόμενου υλικού σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες. Ωστόσο το κατεργαζόμενο υλικό επίσης επηρεάζεται από τις υψηλές τάσεις και τους υψηλούς ρυθμούς μεταβολής τους. Επίσης ο χρόνος θέρμανσης του αποβλήτου είναι μικρός εφόσον το τεμάχιο περιστρέφεται, εν συγκρίσει με του εργαλείου που είναι σταθερό (στην περίπτωση της τόννευσης). Όλοι αυτοί οι παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν υπολογίζεται η τάση στο εργαλείο και αναλύεται το πριονωτό γρέζι.



Σχήμα 2.3 Απλοποιημένη πρωτογενής και δευτερογενής ζώνη. Τα στοιχεία εισέρχονται στην πρωτογενή ζώνη και συμπεριφέροντε σύμφωνα με την εξίσωση 2.2 και 2.3. Στη δευτεροβάθμια ζώνη εισέρχεται το υλικό ήδη επεξεργασμένο από την πρωτοβάθμια ζώνη. Υπό αυτές τις συνθήκες κατάληψης επιτυγχάνονται πιο έντονες διαμορφώσεις στην επιφάνεια του εργαλείου. Υλικά όπως ανοξείδωτος χάλυβας AISI 4340 και τιτάνιο έχουν πολύ μεγάλη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να σχηματίζονται πολύ μεγάλες τάσεις στην επιφάνεια του εργαλείου.

### 2.4.1 Αρχική ελαστικότητα στην έναρξη των απλοποιημένων πρωτοβάθμιων ζωνών διάτμησης.

Σαν πρώτη προσέγγιση μπορούμε να υποθέσουμε ότι όλη η πλαστική παραμόρφωση λόγω της πρωτοβάθμιας διάτμησης επιτυγχάνεται σε μία χωριστή παράλληλη περιοχή όπως φαίνεται και στο σχ 2.3. Σ' αυτή την περίπτωση ένα στοιχείο που εισήχθη σε αυτή τη ζώνη άμεσα επιτυγχάνει ο ρυθμός μεταβολής της τάσης του να μορφοποιήσει την τάση διαρροής και να αυξηθεί η τιμή της έως την τιμή  $\gamma_p$ . Πληροφορίες οι οποίες σχετίζονται μόνο με την αρχική ελαστικότητα του υλικού μπορούν να καταγραφούν βάσει των πειραμάτων δυναμικής διάτμησης και βεβαιωμένου τρυπήματος. Επιδράσεις όπως σκλήρυνση ή μαλάκωμα του υλικού μέσω της τάσης που επιδρά επάνω του και οι οποίες εμφανίζονται μετά την ελαστικότητα του δεν αναφέρονται τώρα αλλά θα συζητηθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Με σκοπό να καταγράψουμε την τάση διαρροής και το ρυθμό μεταβολής της διάτμησης ο Dowling et al εισήγαγε τις μεθόδους της βίαιης διάτμησης ώστε να σχηματισθούν λεπτές ζώνες διάτμησης σε λεπτά ελάσματα αλουμινίου, χαλκού, μπρούτζου και μαλακού χάλυβα. Αφ' ετέρου οι Campbell και Ferguson υιοθέτησαν τα πειράματα του Hopkinson σε μαλακό χάλυβα. Τα αποτελέσματα τους για τον μαλακό χάλυβα και για θερμοκρασίες από 293-713 K παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2. Η σχέση μεταξύ ρυθμού μεταβολής διατμητικής τάσης και βαθμού διάτμησης που οφείλεται στην μετατόπιση των σωματιδίων γίνεται ανάλογη στην περιοχή IV.

Αυτό είναι πιο εμφανές από τα δεδομένα των Campbell και Ferguson για μαλακό χάλυβα. Οι τυπικές τιμές ρυθμού μεταβολής διατμητικών τάσεων στις πρωτοβάθμιες ζώνες είναι από  $2-20 \cdot 10^4 \text{ sec}^{-1}$  για τυπικές τιμές κοπής του χάλυβα. Συγκρινόμενοι ρυθμοί μεταβολής τάσεων παρατηρήθηκαν από τους Campbell και Ferguson στα πειράματα υψηλών ρυθμών μεταβολής της διάτμησης.

Αυτή η συμπεριφορά των υλικών επιτρέπει τον καθορισμό του δείκτη ιξώδους. Η τιμή του  $\mu$  μπορεί να παρθεί από τις ευθείες του διαγράμματος 1.2 εφόσον ισχύει

$$k\dot{\gamma} = k_0(T) + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

Όπου  $k\dot{\gamma}$  είναι η τάση διαρροής σε διάτμηση και  $k_0(T)$  είναι παραμένουσα τάση κατά την έναρξη του πειράματος η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία.

### 2.4.2 Αντίδραση του υλικού που διασχίζει την πρωτοβάθμια ζώνη

Η πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια ζώνη λαμβάνονται ως δύο ξεχωριστές ζώνες και για την κάθε μία αντίστοιχα ακολουθείται η παρακάτω εξίσωση

$$K(T, \gamma, \dot{\gamma}) = Ky(T_0, \gamma_y, \dot{\gamma}_y) + \left( \frac{\partial k}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial k}{\partial \gamma} \Delta \gamma + \frac{\partial k}{\partial \dot{\gamma}} \Delta \dot{\gamma} \right) \quad (2.2)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, (k) είναι η τάση διαρροής σε κάθε θερμοκρασία T, γ η διατμητική παραμόρφωση και  $\dot{\gamma}$  ο ρυθμός μεταβολής της στην συγκεκριμένη ζώνη.

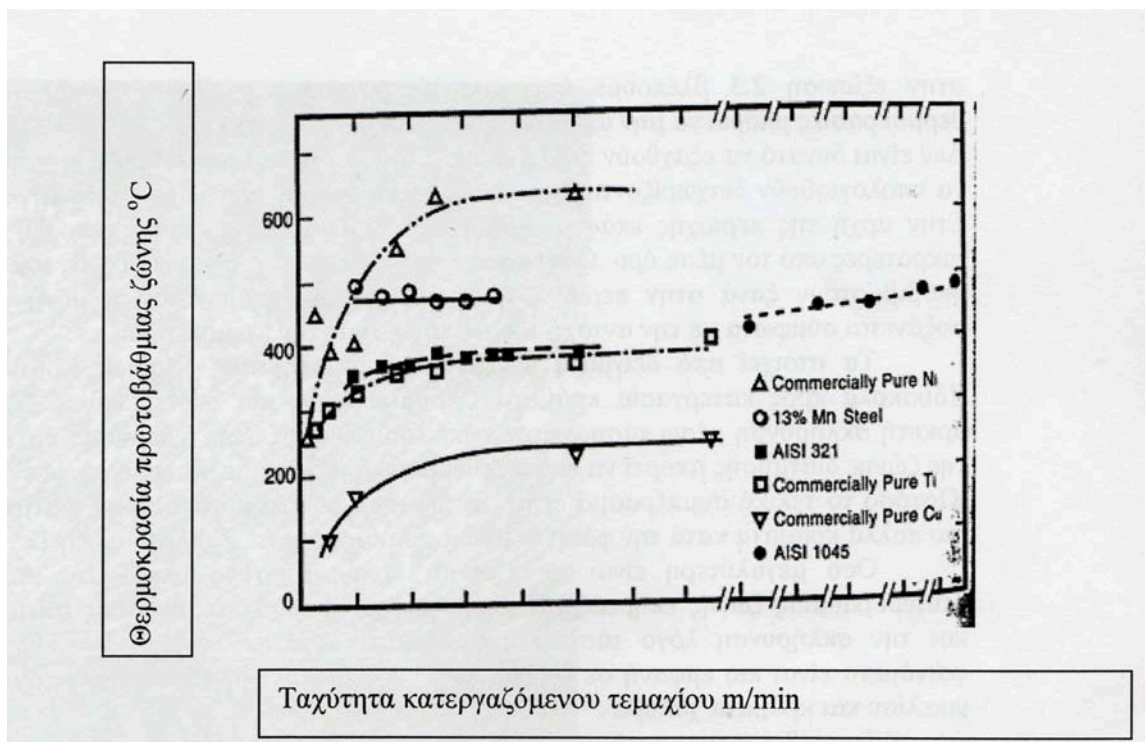
Καθώς τα μόρια ρέουν προς την ζώνη διάτμησης, το υλικό αρχικά "χτυπάει" το αρχικό σύνορο της διακριτής πρωτοβάθμιας παράλληλης ζώνης και διαρρέει. Διαρρέει σε ky διατμητική τάση διαρροής, σε τάση διαρροής  $\gamma_y$ , σε ρυθμό μεταβολής τάσης  $\dot{\gamma}_y$  και αρχική θερμοκρασία  $T_0$ . Σε αυτή την φάση "εισόδου", το υλικό βρίσκεται στην υπό την τάση διαρροής  $\gamma_y$  και όχι αισθητά θερμασμένο, παραμένει στην θερμοκρασία  $T_0$ . Αυτή η κατάσταση αντιπροσωπεύεται από την εξίσωση 2.2.

Η εξίσωση χωρίζεται μ' αυτό τον τρόπο ώστε να διαχωρίσουμε τις επιδράσεις της αρχικής ελαστικότητας και της ακολουθούμενης διαρροής. Η ακολουθούμενη διαρροή αντιπροσωπεύεται από τους όρους στην παρένθεση της εξίσωσης 2.2. Στην πρωτοβάθμια ζώνη το υλικό διαμορφώνεται περαιτέρω μετά την ελαστική περιοχή. Επιτυγχάνονται μεγάλες τιμές ( $\gamma=2-5$ ) γωνιακής παραμόρφωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την σκλήρυνση που αναμένεται μαζί με τον μηχανισμό της μετατόπισης που συζητήθηκε σε προηγούμενο εδάφιο. Κατά την ίδια χρονική στιγμή η πλαστική κατεργασία που έχει επιτευχθεί στο υλικό προκαλεί μεγάλη εισροή θερμότητας. Αυτοί οι παράγοντες αντισταθμίζονται ο ένας με τον άλλο έως κάποιο σημείο αλλά όπως επισήμανε και ο Bancroft το μαλάκωμα είναι χρόνο-εξαρτώμενο. Έτσι η εξίσωση 2.2 θα έπρεπε να περιλαμβάνει ακόμα έναν όρο ο οποίος θα υπολόγιζε τον λόγο :

$$\frac{\partial k}{\partial t} = -ke^{(-Q/RT)} \quad (2.3)$$

Όπου Q είναι η ενέργεια ενεργοποίησης των μορίων. Η ταχύτητα του υλικού στην ζώνη διάτμησης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μία απλή φωτογράφιση κατά την

διάρκεια της κατεργασίας και τα πλάτη των ζωνών διάτμησης που παρουσιάζονται στις διατριβές των Robinson & Kececioglu. Ένα μόριο τυπικά σπαταλάει 200μs στην αρχική ζώνη διάτμησης. Παρόλο που οι εξισώσεις των Bailey & Bhanvadia έχουν επιτυχή εφαρμογή στην συμπεριφορά κατά την διάρκεια θερμών κατεργασιών αλουμινίου, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία χάλυβα είναι πολύ μετριοπαθείς. Το σχ 2.4 μας δείχνει ότι ακόμη και στα πειράματα KYT του Seikman οι υπολογισθείσες μέσες θερμοκρασίες στις πρωτοβάθμιες ζώνες είναι αρκετά πιο κάτω από αυτές που εξήχθησαν υπό κανονικές συνθήκες με αποτέλεσμα να μην είναι αντιπροσωπευτικές για κατεργασίες χάλυβα εν θερμώ. Έτσι σύμφωνα με τις ενδείξεις το υλικό δεν ξοδεύει αρκετό χρόνο στην ζώνη διαμόρφωσης ώστε να γίνει αισθητά πιο μαλακό. Σ' αυτό το γεγονός οφείλεται οι υψηλές και σταθερές τιμές των δυναμικών διατμητικών τάσεων του Kececioglu καθ' όλο το φάσμα των ταχυτήτων κοπής συμπεριλαμβανομένων και των υψηλών.



Σχήμα 2.4 Υπολογισθείσες θερμοκρασίες στην πρωτοβάθμια ζώνη

### 2.4.3 Αντίδραση του υλικού που βρίσκεται στην δευτεροβάθμια ζώνη διάτμησης.

Στο σχ 2.3 φαίνεται ότι τα σύνορα της δευτεροβάθμιας ζώνης εκτείνονται από το σημείο (ο) του άκρου του εργαλείου έως το τελείωμα του μήκους που έρχεται σε επαφή το εργαλείο. Σε ένα μόριο υλικού που διαπερνά αυτή τη ζώνη επενεργούν ποικίλοι παράγοντες επειδή η ζώνη έχει μήκος 1-2mm εξαρτώμενη πάντα από το κατεργαζόμενο υλικό (η πρωτοβάθμια ζώνη είναι μόλις 0.1-0.2 mm πλατιά). Έτσι στην δευτεροβάθμια ζώνη το μόριο επανακατεργάζεται καθ' όλο το μήκος της επιφάνειας. Στο σημείο που έρχεται σε επαφή το εργαλείο με το τεμάχιο (σημείο κοπής) το μόριο έχει μόλις διέλθει μέσω της πρωτοβάθμιας ζώνης και έπειτα γυρίζει ούτως ώστε να εισέλθει στην αρχή της δευτεροβάθμιας στο σημείο Ο όπως αναπαρίσταται στο σχ 2.3. Όταν στους κατεργαζόμενους χάλυβες με προώσεις 200m/min οι τυπικές τιμές των θερμοκρασιών φτάνουν τους 600°C τότε ανεβαίνουν ως τους 1000°C κατά μήκος της διεπιφάνειας.

Όταν κατεργάζονται ανοξείδωτοι χάλυβες, κράματα χάλυβα και κράματα αεροναυπηγικής οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι υψηλότερες. Ωστόσο ανατρέχοντας στην εξίσωση 2.3 βλέπουμε ότι επηρεάζει και ο παράγοντας χρόνος οπότε οι υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να μην αποβαίνουν σε μαλάκωμα του υλικού.

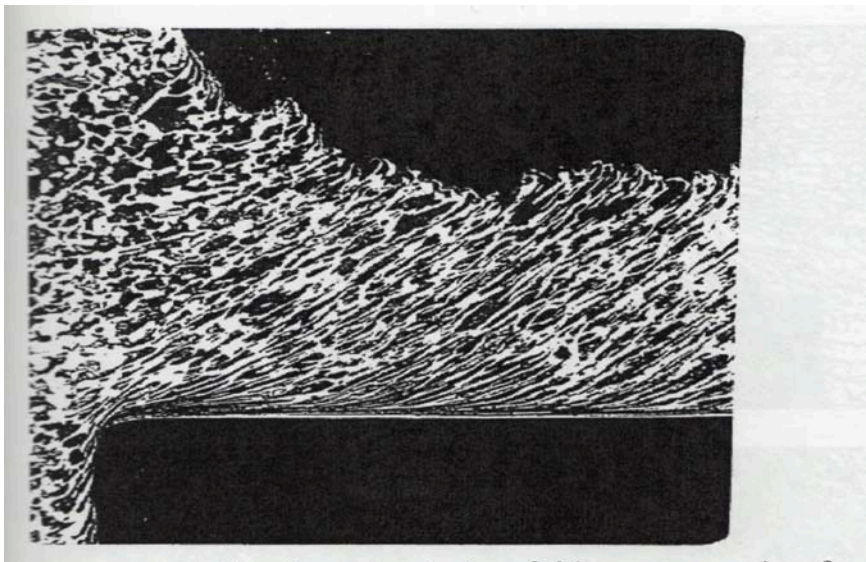
Δεν είναι δυνατό να εξαχθούν πολλά συμπεράσματα για τον μέσο όρο των τάσεων που μπορούν να υπολογισθούν διαχωρίζοντας την μετρούμενη διατμητική δύναμη από την περιοχή επαφής. Στην αρχή της περιοχής επαφής, κοντά στο σημείο (Ο) οι τάσεις μπορεί να είναι σχετικά μικρότερες από τον μέσο όρο. Ωστόσο αναπτύσσονται με γοργό ρυθμό έως τον μέσο όρο προτού υποβιβαστούν ξανά στην περιοχή τριβής. Όπως θα αναμενόταν η μέση διατμητική τάση αυξάνεται σύμφωνα με την αντοχή του υλικού και με την κραμμάτωση.

Τα στοιχεία από δείγματα "ξαφνικού σταματήματος" (quick stop) δείχνουν ότι τα "δύσκολα προς κατεργασία κράματα" δημιουργούν μία δευτερεύουσα ζώνη που περιέχει αρκετή σκλήρυνση μέσω τάσης στο αρχικό σημείο της ζώνης διάτμησης. Στο τελευταίο μέρος της ζώνης διάτμησης μπορεί να εμφανισθεί μερικό μαλάκωμα του υλικού σε εν θερμώ συνθήκες. Ωστόσο το τελικό συμπέρασμα είναι ότι δημιουργούνται μεγάλα ποσά διατμητικής τάσης στα πιο πολλά κράματα κατά την φάση της κατεργασίας τους σε υψηλές ταχύτητες.

Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα κοπής τόσο το υλικό στο αρχικό στάδιο της δευτεροβάθμιας ζώνης επηρεάζεται από την παρεμπόδιση μετατόπισης (dislocation damping) και την σκλήρυνση λόγω τάσεων που υφίστανται στην περιοχή IV. Περαιτέρω

αυτά τα φαινόμενα είναι πιο εμφανή σε υλικά όπως ανοξείδωτος χάλυβας, κράματα τιτανίου, κράματα νικελίου και κράματα χάλυβα.

Το σχ 2.5 αναπαριστά μια κατεργασία "ξαφνικής διακοπής" όπου δίδεται έμφαση στην έντονη τάση και στην επερχόμενη κατάληψη ακριβώς πίσω από τα άκρα κοπής όταν κατεργάζονται "δύσκολα προς κατεργασία κράματα" σε συγκριτικά υψηλές ταχύτητες. Περιληπτικά αυτή η επερχόμενη κατάληψη στο υπό κλίση πρόσωπο είναι συνώνυμη με μία μεγάλη τάση τριβής η οποία μεγαλώνει όσο μεγαλώνει η ταχύτητα. Σε συγκεκριμένα υλικά όπως θα δείξουμε παρακάτω αυτός είναι ο βασικός λόγος του σχηματισμού πριονωτού γρεζιού.

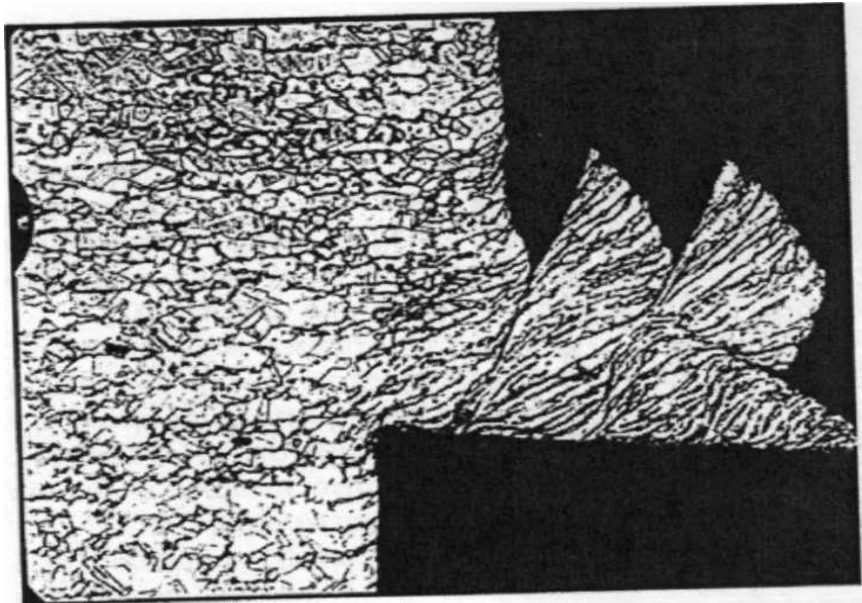


Σχήμα 2.5 Μεγάλες τάσεις και ρυθμοί μεταβολής τους στην αρχή της δευτεροβάθμιας ζώνης

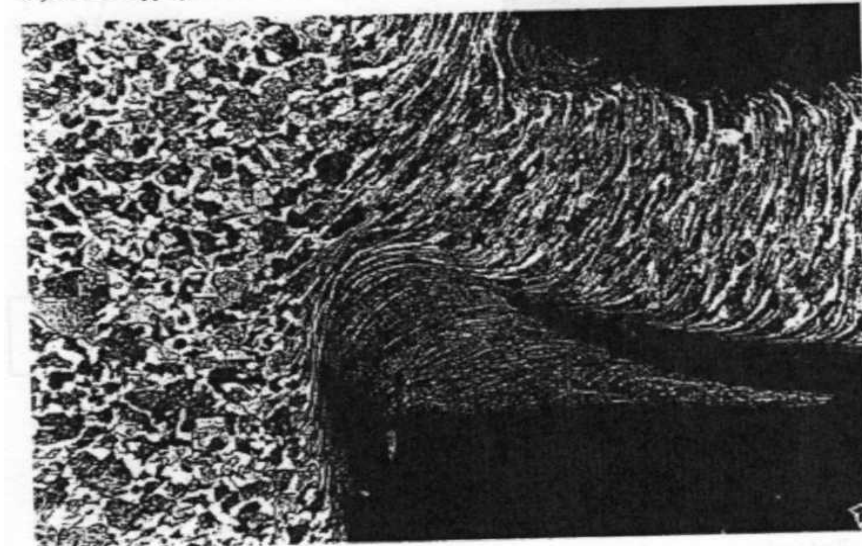
## 2.5 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ (ΓΡΕΖΙΟΥ)

Μία σύντομη ανασκόπηση απαιτείται σε αυτή φάση. Το 1993 ο Ernst διαχώρισε τους τύπους αποβλήτου στους α) ασυνεχείς β) ψευδοκοπή γ) συνεχές. Για πολλά χρόνια αυτές λήφθηκαν υπόψη ως εναλλακτικές δυνατότητες. Ωστόσο τα τωρινά στοιχεία δείχνουν πως υπάρχει άλλη μία δυνατότητα στις ΚΥΤ ονομαζόμενη ως οδοντωτό ή πριονωτό γρέζι. Οι όροι οδοντωτό, πριονωτό και διατρητικά τοποθετημένο δείχνουν να είναι συνώνυμοι στην βιβλιογραφία. Είναι για διαφορετικά υλικά κατεργασίας αλλά επιλέχθηκαν από μερικές κατεργασίες "ξαφνικής διακοπής" που περιγράφουν κατά τον καλύτερο τρόπο το πρότυπο της ροής.

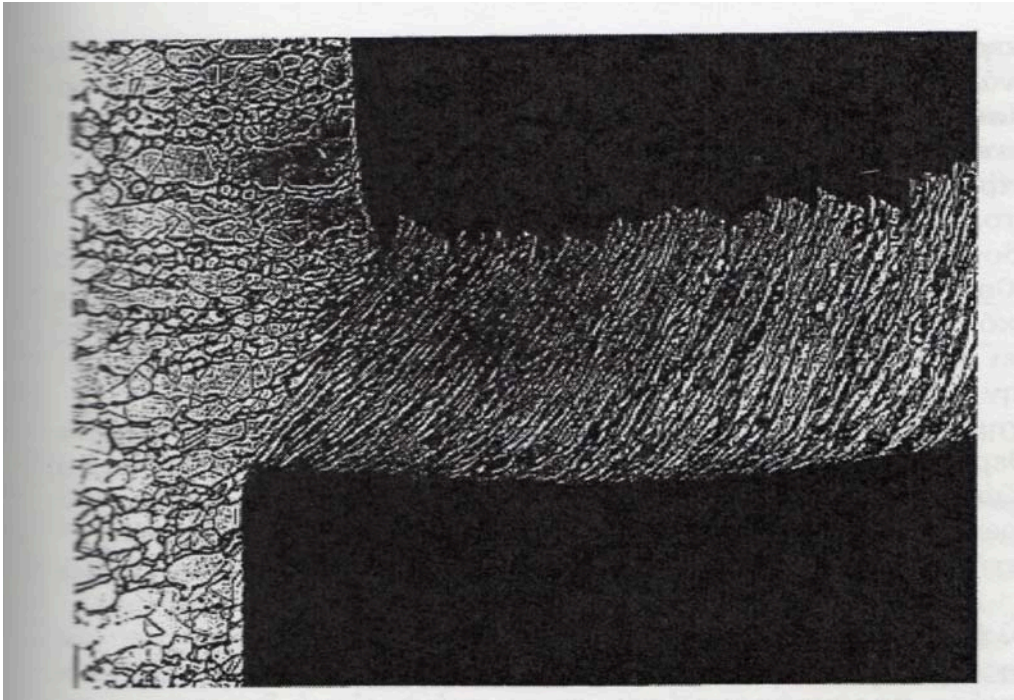




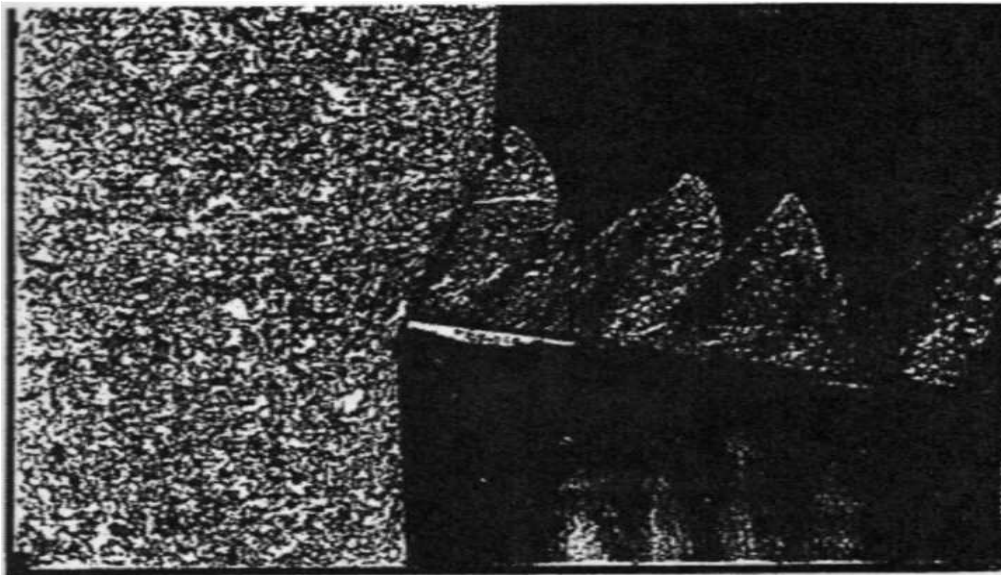
α) ασυνεχές



β) ψευδοκοπή



γ) συνεχές



δ) πριονωτό

Σχήμα 2.6 Τέσσερις τύποι αποβλήτου: ασυνεχές, πάνω από ψευδοκοπή, συνεχές, πριονωτό

Οι τρεις κλασικές περιγραφές του Ernst περιγράφουν καταρχήν :

Ω Ασυνεχές απόβλητο σε πολύ χαμηλές ταχύτητες. Οι χαμηλές θερμοκρασίες προκαλούν σκλήρυνση στο πρώτο υλικό με αποτέλεσμα να κολλάει στην υπό κλίση επιφάνεια του εργαλείου. Το εισερχόμενο υλικό παρεμποδίζεται από το "κολλημένο" και η ομογενής τάση επιφέρει συγκέντρωση όγκου υλικού μπροστά από το εργαλείο. Συχνά εμφανίζεται μία συσσώρευση υλικού στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου. Ξαφνικά λόγω εκτεταμένης φόρτισης μια ρωγμή δημιουργείται σε ένα διατμητικό επίπεδο. Τότε εμφανίζεται ένα ασυνεχές οδοντωτό γρέζι και "γλιστρά" στο εργαλείο. Έπειτα επαναλαμβάνεται ο κύκλος συνεχούς ασυνεχούς γρεζιού.

Ω Οι επιδράσεις της ψευδοκοπής αρχίζουν να υφίστανται σε ενδιάμεσες ταχύτητες (προώσεις) πάνω από 30m/min για χάλυβα μέσης περιεκτικότητας σε άνθρακα. Οι θερμοκρασίες είναι ακόμη χαμηλές και μια αυστηρά σκληρή λόγω τάσης "επικάλυψη" παραμένει στο άκρο κοπής του εργαλείου. Ένα συνεχές απόβλητο "ρέει" πάνω σε αυτή την επικάλυψη.

Ω Τα συνεχή απόβλητα σχηματίζονται σε υψηλότερες προώσεις και από τις από τώρα και πέρα υψηλότερες θερμοκρασίες. Οι θερμοκρασίες απαλείφουν την επίδραση της ψευδοκοπής και η ζώνη ροής την αντικαθιστά στην επιφάνεια του προσώπου του εργαλείου. Στην πρωτοβάθμια ζώνη μια "αδιαβατική λαμελική διάτμηση" δημιουργεί μία ξεχωριστή ζώνη διάτμησης και η ροή του αποβλήτου είναι πολύ στρωτή.

Ω Ο τέταρτος τύπος αποβλήτου μπορεί να ορισθεί ως πριονωτό οδοντωτό ή προϊόν διάτμησης. Η έρευνα της Komanduri και των συνεργατών της δημοσίευσε πολλά δεδομένα στις δύο παρακάτω παραγράφους όπου σε ορισμένα υλικά δημιουργείται αυτή η μετάβαση.

Υπάρχει μία μετάβαση από συνεχές σε πριονωτό γρέζι με την αύξηση της ταχύτητας κοπής για τα πιο πολλά υλικά. Αυτός ο τύπος γρεζιού συνεχίζει να δημιουργείται με την συνεχώς αυξανόμενη πρόωση. Δεν έχει παρατηρηθεί καμία επιπρόσθετη μετάβαση ή επαναδημιουργία συνεχούς γρεζιού τουλάχιστον σε προώσεις άνω των 30,488 m/min. Η μορφοποίηση του αποβλήτου είναι ανομοιογενής σε ένα μικτό επίπεδο. Στη στενή περιοχή μεταξύ των οδόντων των γρεζιών υφίσταται μεγάλη παραμόρφωση τους. Αντιθέτως στα δόντια η παραμόρφωση είναι πολύ χαμηλή. Ο Recht

επίσης παρατήρησε ότι εξαιρετικά λεπτές ζώνες διάτμησης (~0,002 mm) διαχωρίζονται από αρκετά μεγαλύτερες περιοχές μικρής τάσης. Φυσικά τέτοια πριονωτά γρέζια ομοιάζουν με ασυνεχή.

Η ταχύτητα μετάβασης στην οποία λαμβάνει χώρα η αλλαγή στο σχήμα του αποβλήτου από συνεχές σε οδοντωτό δείχνει να ποικίλει ανάλογα με το κατεργαζόμενο υλικό. Για παράδειγμα είναι μόνο λίγα m/min στην περίπτωση κραμάτων τιτανίου, περίπου 61 m/min σε περιπτώσεις υπερκραμάτων νικελίου, και πάνω από 61 m/min έως και 244 m/min στην περίπτωση των ανοξειδωτων (4340 325BHN). Η πρόωση στην οποία εμφανίζεται καταστροφική διάτμηση και η ταχύτητα κοπής στην οποία εμφανίζονται διακριτοί οδόντες στο γρέζι μειώνεται όσο αυξάνεται η σκληρότητα ενός χάλυβα AISI 4340. Συναφή αποτελέσματα εμφανίζονται και για κράματα νικελίου και τιτανίου.

Οι Sullivan Wright & Smith έδειξαν ότι η ταχύτητα μετάβασης από συνεχές σε πριονωτό γρέζι για οστενιτικούς χάλυβες είναι 35 m/min. Παρατήρησαν τέτοιους τύπους αποβλήτου σε προώσεις άνω των 300m/min, όπου η διάρκεια ζωής του εργαλείου (καρβιδίου) γινόταν εμφανώς μικρότερη.

Σαν τελευταία παρατήρηση αυτού του εποπτικού κεφαλαίου θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο σχηματισμός πριονωτού αποβλήτου δεν ενεργοποιείται λόγω ταλάντωσης του εργαλείου αλλά συνδέεται με έμφυτα μεταλλουργικά χαρακτηριστικά του υλικού που κατεργάζεται στις συγκεκριμένες συνθήκες κατεργασίας. Φυσικά άπαξ και αυτές οι μεταλλουργικές αστάθειες ενεργοποιηθούν οδηγούν σε επαναλαμβανόμενα χτυπήματα στο υλικό καθώς και στις ιδιοσυσκευές συγκράτησης.

Έτσι οτιδήποτε μπορεί να γίνει με σκοπό να μειώσει την παραγωγή πριονωτού αποβλήτου αποβαίνει θετικό για όλη την απόδοση της κατεργασίας. Αν υλικά "δύσκολα προς κατεργασία" μπορούν να κατεργαστούν με τα πιο στιβαρά-άκαμπτα εργαλεία σε ένα ειδικά σχεδιασμένο εργοστάσιο, τότε τουλάχιστον μία κατάσταση πρόκλησης θα έχει τεθεί υπό έλεγχο.

## 2.6 ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ

### 2.6.1 Περίληψη

Ο αναλυτικός χαρακτήρας του πριονωτού γρεζιού αρχικά συζητιέται με αναφορά στα αποτελέσματα που προέκυψαν για κατεργασία ωστενιτικού χάλυβα. Τα αποτελέσματα ενός κύκλου σχηματισμού πριονωτού γρεζιού καταγράφηκαν από μία σειρά μικροφωτογραφιών από δείγματα "quick stop". Επίσης καταγράφονται οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις κοπής.

Όταν κατεργαζόμαστε ανοξείδωτο χάλυβα, το πιο ουσιώδες χαρακτηριστικό του σχηματισμού του αποβλήτου είναι μία μεταβαλλόμενη αντοχή του κατεργαζόμενου υλικού στην διεπιφάνεια εργαλείου-τεμαχίου: ένα φαινόμενο που είναι συναφές με το φαινόμενο "κολλημένο υλικό" που εξηγήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο (ασυνεχής σχηματισμός αποβλήτου του Ernst). Σε ένα τυπικό κύκλο οι τάσης θλίψης δημιουργούνται μπροστά από το εργαλείο καθόσον το υλικό "κολλάει" στο αδύνατο πρόσωπο του εργαλείου, τότε εφαρμόζεται διατρητική τάση σε ένα πρωτοβάθμιο διατρητικό επίπεδο όπου μειώνεται το μήκος των τεμαχίων του αποβλήτου όσο αυτό γλιστράει επάνω στο εργαλείο με μεγαλύτερη ταχύτητα.

### 2.6.2 Μικροφωτογραφίες από τον σχηματισμό αποβλήτου

Τα σχήματα 2.7-2.10 είναι αντιπροσωπευτικά των ποικίλων επιπέδων του κύκλου του σχηματισμού πριονωτού αποβλήτου. Αυτές οι μικροφωτογραφίες καλύπτουν προώσεις 50-150 m min, αλλά ο μηχανισμός σχηματισμού οδοντωτού γρεζιού ήταν ο ίδιος για όλες τις συνθήκες χάνω από 300 m/min.

Τα σχήματα 2.11 α-f δείχνουν εν συντομία τα όσα περιγράφονται παρακάτω, και πάνω από κάθε σχήμα είναι το συνεχές απόβλητο .

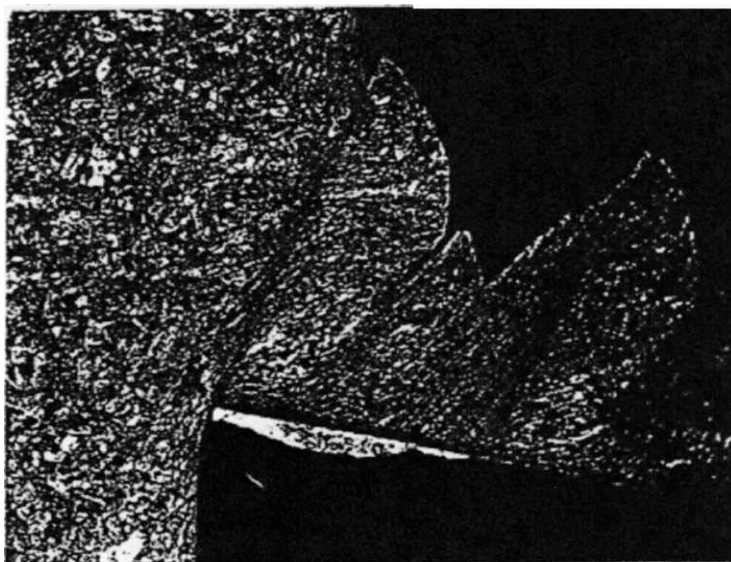
Τα σχήματα 2.7 & 2.11 α δείχνουν το σημείο του κύκλου (της διαδικασίας) στο οποίο αρχίζει μία διατμητική αστάθεια κατά μήκος του επιπέδου διάτμησης AB. Τα στοιχεία της ζώνης της απλής ολίσθησης στο σημείο B ομοιάζουν στον σχηματισμό του εξωτερικού άκρου του αποβλήτου στο Σχήμα 2.6, αλλά είναι προφανές ότι περεταίρω διάτμηση δεν εισάγεται μεγαλύτερη ζώνη ολίσθησης ίδιου μήκους διότι αυτό το φαινόμενο ανήκει στην

περίπτωση του συνεχούς αποβλήτου. Αντιθέτως το μήκος του διατμητικού επιπέδου μειώνεται για να δώσει το μήκος CD να φαίνεται μεγαλύτερο κατά μήκος του αποβλήτου στο προηγούμενο κύκλο.

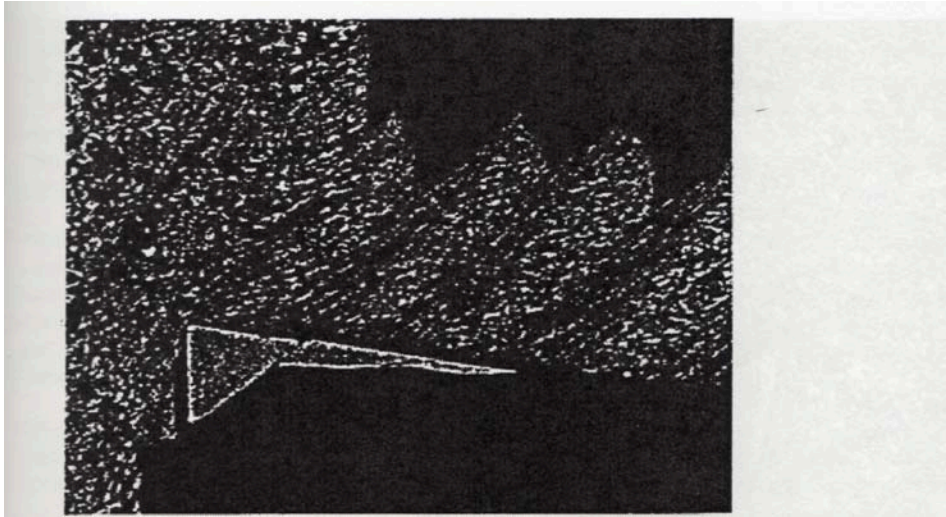
Στο Σχήμα 2.9 δίνονται επαρκή στοιχεία όπου το ταχύ σταμάτημα (quick stop) παρατηρήθηκε κοντά στο άκρο. Η διάτμηση σε αυτή τη φάση απαντάται κατά μήκος του επιπέδου CD και επίσης φαίνεται το μήκος AB το οποίο είναι ισοδύναμο με αυτό του Σχήμα 2.7. Το ελεύθερο άκρο του αποβλήτου κατά μήκος των περιοχών όπως η BD δείχνει ότι η συσπείρωση του επιπέδου διάτμησης είναι μία βαθμιαία διαδικασία η οποία περιγράφεται συνοπτικά στο Σχήμα 2.11 α-ε.

Σχεδιάζοντας μία γραμμή από την ακμή κοπής στην ελεύθερη επιφάνεια είναι προφανές ότι η σταθερή γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του επιπέδου AB και της κατεύθυνσης κοπής είναι  $\Phi_{AB}=18^\circ$ . Παράλληλα η σταθερή γωνία του διατμητικού επιπέδου CD είναι  $\Phi_{CD}=30^\circ$ .

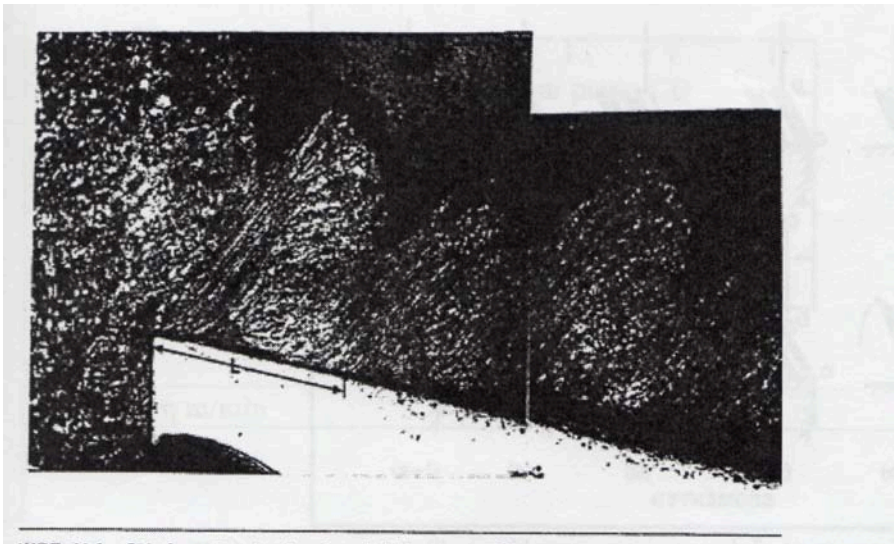
Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η γωνία διάτμησης αλλάζει κατά την διάρκεια της φάση της διάτμησης στο κύκλο όπως θα αναμενόταν από την συνήθη μέθοδο υπολογισμού του  $\phi$ . Δυναμικές αλλαγές στο πραγματικό πάχος αποβλήτου  $t_0$  οδηγεί σε γεωμετρικές αλλαγές της γωνίας  $\phi$ .



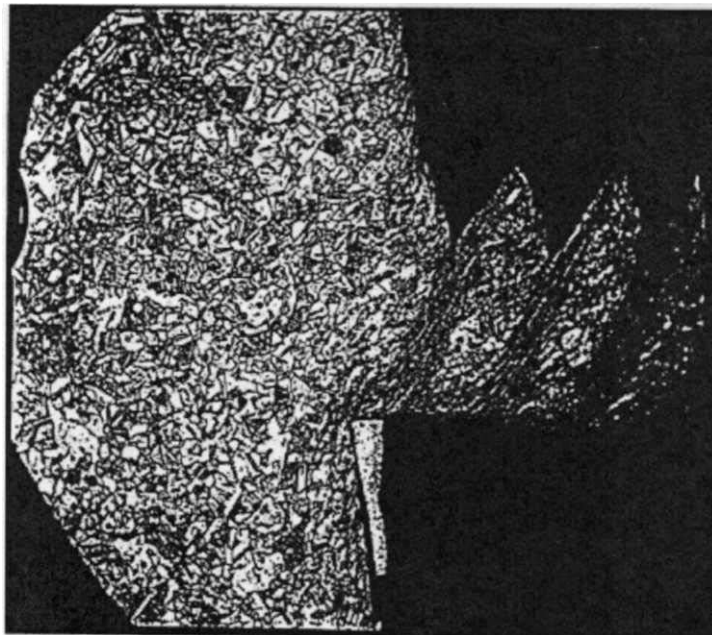
Σχήμα 2.7 Σχηματισμός αποβλήτου που δείχνει την αρχική διάτμηση στις  $18^\circ$  σε ένα μακρύ διατμητικό επίπεδο AB



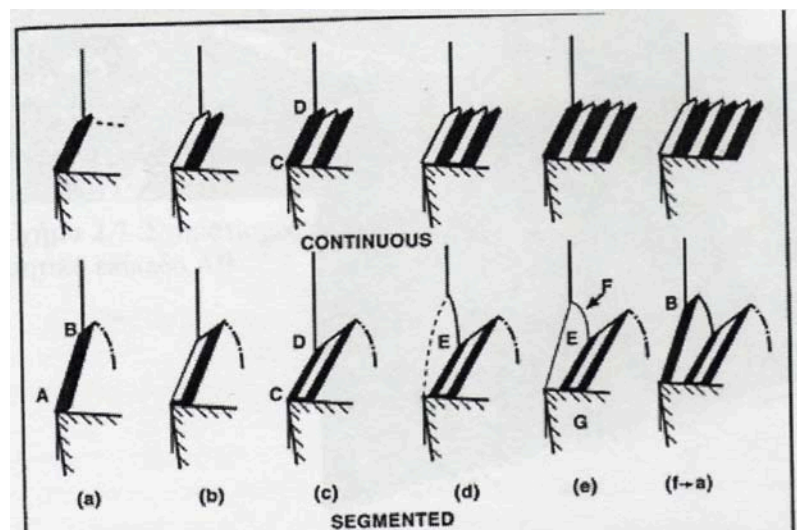
Σχήμα 2.8 Σχηματισμός αποβλήτου που δείχνει την συνέχεια από το μακρύ επίπεδο διάτμησης AB



Σχήμα 2.9 Σχηματισμός αποβλήτου που δείχνει την αποπεράτωσης στις πάνω από  $30^\circ$  επι του μικρού επιπέδου διάτμησης CD



Σχήμα 2.10 Σχηματισμός αποβλήτου που δείχνει την προσωρινή ανάπαυση και την συσσώρευση υλικού που δημιουργεί συμπίεση.



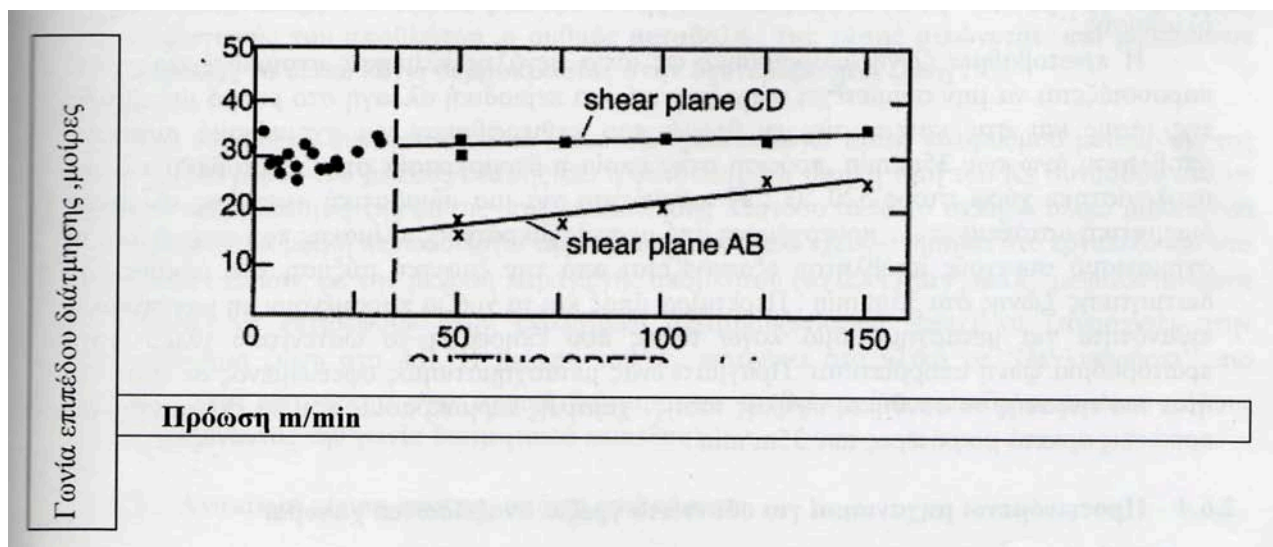
Σχήμα 2.11 Σχηματικό διάγραμμα συνεχούς αποβλήτου που εμφανίζεται σε προώσεις κάτω από 35 m/min και σχηματισμός οδοντωτού γρεξιού που επέρχεται σε προώσεις >35m/min. Τα μήκη CD στα δύο γρέζια είναι περίπου ίσια. Επίσης η οι γωνίες είναι περίπου  $\Phi_{CD}=30^\circ$  ,  $\Phi_{AB}=18^\circ$ .



Η παρέκκλιση στην γωνία διαμητικού επιπέδου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το μέσο μέγιστο και το μέσο ελάχιστο πάχος αποβλήτου μετρημένο από τις διαστάσεις των οδοντώσεων στις μικροφωτογραφίες. Αυτές οι τιμές φαίνονται στο Σχήμα 2.12 και είναι συνυφασμένες με τα αποτελέσματα από την μέτρηση σε γωνία του μεγέθους του συνεχούς αποβλήτου σε προώσεις άνω των 35m/min. Το τελευταίο παρατηρήθηκε χρησιμοποιώντας την τυποποιημένη τεχνική μέτρησης βάρους και μεγέθους που καθορίζει πάχος αποβλήτου και γωνία επιπέδου διάτμησης. Τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος γιατί είναι η "μεγάλη γωνία διάτμησης - λεπτό απόβλητο - χαμηλή ενέργεια " κατάσταση που δεν αλλάζει αξιοσημείωτα με την αύξηση της πρόωσης. Μιλώντας λαϊκιστή είναι σαν " ο τρόπος που προτιμά να σχηματίζεται το απόβλητο".

Σε αντίθεση είναι η κατάσταση που δεν ευνοείται αρχικά στις χαμηλές προώσεις αλλά «ου πυροδοτείτε στα 35 m/min. Η παρατήρηση ότι το επίπεδο διάτμησης είναι περιοδικά μεγαλύτερο (και από τώρα μικρότερη η φ) σε προώσεις μεγαλύτερες από 35 m/min είναι αξιοσημείωτη. Το σχήμα 2.12 είναι συσχετισμένο με τον μηχανισμό σχηματισμού πριονωτού αποβλήτου. Θα έπρεπε επίσης να επισημανθεί ότι το Σχήμα 2.11 σχεδιάστηκε ώστε να συμφωνεί με αυτά τα αποτελέσματα, με το μήκος CD του πριονωτού γρεζιού να είναι ίσο με το μήκος του επιπέδου διάτμησης κατά την φάση του συνεχούς αποβλήτου.

Την στιγμή που το ξεχωριστό μέρος διάτμησης του κύκλου φτάσει το μικρότερο επίπεδο μήκους CD τότε έχουμε προσωρινή διακοπή της διάτμησης. Τα στοιχεία αποδεικνύουν ότι οι τάσεις θλίψης δημιουργούνται έμπροσθεν της περιοχής διάτμησης (ABCD, Σχήμα 2.10) με σκοπό να δημιουργηθεί μία περιοχή ομογενούς χαμηλής τάσης στο σημείο E στο Σχήμα 2.11. Υπάρχει επίσης μία προεργασία του άκοπου υλικού στο F και η συνέχιση της δευτεροβάθμιας διάτμησης διαχέεται έως το σημείο G. Το προσωρινό σταμάτημα της διάτμησης και οι τάσεις θλίψης αντικαθίστανται από την διάτμηση στο μακρύ επίπεδο AB ξανά, έτσι ώστε τα σχήματα 2.11 e&F αναπαρίσταται η έναρξη ενός νέου κύκλου.



Σχήμα 2.12 Οι μετρήσεις της γωνίας διάτμησης δείχνουν ότι η κατάσταση "μεγάλη γωνία διάτμησης - λεπτό απόβλητο- χαμηλή ενέργεια" προτού την μεγάλη πρόωση και η "μικρή γωνία διάτμησης - παχύ απόβλητο-υψηλότερη ενέργεια" συνεισφέρουν στην δημιουργία πριονωτού γραξιού μετά τα 35m/min.

### 2.6.3 Συνθήκες στην δευτεροβάθμια ζώνη όταν κατεργάζεται ανοξειδωτος χάλυβας.

Σε μία ανάλυση πριονωτού γραξιού που δημιουργήθηκε από κατεργασία ωστενιτικού ανοξειδωτου χάλυβα παρατηρήθηκαν τα εξής :

I. Ήταν πρακτικά δυνατή η περιοδική επιμήκυνση της πρωτοβάθμιας ζώνης διάτμησης σε προώσεις άνω των 35m/min έως και τις μέγιστες. Η μέγιστη ήταν 300m/min και ήταν μικρής διάρκειας με εργαλείο καρβιδίου.

II. Το γεγονός ότι η διάτμηση δεν συνεχιζόταν πλέον σε αυτό το επίπεδο ,έτσι το AB μειώνεται στο CD (Σχ.2.7).

Αυτή η διαδικασία προηγείται της θερμοκρασιακής "ανάπαυσης " της διάτμησης και του σχηματισμού τάσης θλίψης στο πρόσωπο του εργαλείου. Οι παραπάνω παρατηρήσεις δείχνουν ότι για να γίνει το διατμητικό επίπεδο περιοδικά χαμηλότερο σε υψηλότερες προώσεις ένα φαινόμενο επικολλήσεως περιοδικής φύσεως πρέπει να επανεισαχθεί στην δευτεροβάθμια ζώνη. Έτσι προτείνεται ένας μηχανισμός (stick-slip) όπως αυτός αναπτύχθηκε σε προηγούμενη παράγραφο να δημιουργηθεί στο αδύνατο πρόσωπο του εργαλείου σε υψηλές προώσεις. Αυτό σημαίνει ότι κατά την διάρκεια της φάσης του κύκλου "διατμητικής ανάπαυσης/θλιπτικής τάσης" η ταχύτητα παραγωγής αποβλήτου

είναι σημαντικά πιο μικρή από την πρόωση κατά την διάρκεια της φάσης της "επιλεγμένης ολίσθησης".

Η πρωτοβάθμια ζώνη απορρίφθηκε ως αιτία μεγάλης κλίμακας ανομοιογένειας γιατί παρουσιάζεται να μην συμμετέχει στην ξαφνική και περιοδική αλλαγή στο ρυθμό μεταβολής της τάσης και στις κατεργασίες εν θερμώ που καθιερώθηκαν για σχηματισμό συνεχούς αποβλήτου άνω των 35m/min, πρόωση στην οποία η θερμοκρασία στην πρωτοβάθμια ζώνη υπολογίστηκε γύρω στους 520 °C. Η πιθανότητα για μια αδιαβατική - μεγάλης κλίμακας διατμητική αστάθεια προερχόμενη από μερικές μικρότερης κλίμακας που επηρεάζει τον σχηματισμό συνεχούς απόβλητου εξαφανίζεται από την ξαφνική αύξηση του μήκους της διατμητικής ζώνης στα 35m/min. Περεταίρω άπαξ και τα γρέζια παραμένουν μη μαγνητικά η πιθανότητα για μετασχηματισμό λόγω τάσης που επηρεάζει το ωστενιτικό υλικό στην πρωτοβάθμια ζώνη απορρίπτεται. Πράγματι ένας μετασχηματισμός οφειλόμενος σε τάση θα ήταν πιο εμφανής σε συνθήκες υψηλής τάσης - χαμηλής θερμοκρασίας που θα επέρχονταν σε προώσεις αρκετά μικρότερες των 35m/min.

#### 2.6.4 Προτεινόμενοι μηχανισμοί για οδοντωτά γρέζια ανοξειδώτου χάλυβα

Στην δευτεροβάθμια περιοχή διάτμησης οι ιδιότητες του υλικού αλλάζουν δραματικά κατά μήκος της επιφάνειας επαφής. Το υλικό είναι σκληρό λόγω τάσης (strain hardened) στο αρχικό μέρος επαφής αλλά, λόγω της αναγεννώμενης θέρμανσης, οι θερμοκρασίες στα άκρα της ζώνης μπορεί να φτάσουν τους 1000°C .

Όπως έχει ήδη συζητηθεί πάνω από ένα ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης  $\dot{\gamma} \approx 10^4 s^{-1}$  η διατμητική τάση αυξάνεται σημαντικά με τον ρυθμό μεταβολής της εξαιτίας του μηχανισμού μετατόπισης (dislocation damping) ο οποίος εμφανίζεται ,αυτό ονομάζεται ως συμπεριφορά της περιοχής IV. Οι κατά προσέγγιση ρυθμοί μεταβολής τάσης στην δευτεροβάθμια ζώνη διάτμησης υπολογίσθηκαν από την ταχύτητα αποβλήτου και το πάχος της ζώνης ώστε ισχύει:

$$\dot{\gamma}_s \approx 1,5 \times 10^4 s^{-1} \text{ στα } 30m.\text{min}^{-1} \text{ και } 3,4 \times 10^4 s^{-1} \text{ στα } 50m.\text{min}^{-1}$$

Αυτές οι τιμές ανταποκρίνονται στην έναρξη και αρκετά στην περιοχή IV για μαλακό χάλυβα. Δεν έχουν γίνει πειράματα μηχανικά για ωστενιτικό χάλυβα σε τόσο μεγάλους

ρυθμούς μεταβολής, αλλά φαίνεται λογικό να θεωρήσουμε ότι η "μετατόπιση" επέρχεται και σε ένα υλικό πιο στιβαρό από τον μαλακό χάλυβα και ότι οι πιο πάνω τιμές είναι οι ίδιες και στην περιοχή IV για ανοξειδωτο χάλυβα.

#### **2.6.4.1 Αρχική επικόλληση (Stick) στην χαμηλότερη πρόωση που οφείλεται στην "μετατόπιση" της περιοχής IV.**

Όπως αυξάνεται η ταχύτητα κοπής, σε ένα κρίσιμο κατώφλι, η τιμή του  $K_s$  ουσιαστικά αυξάνεται, καθόσον η επιρροή του ρυθμού μεταβολής της τάσης "χτυπά". Όπως φαίνεται στο σχ.2.11 ο ρυθμός μεταβολής της τάσης στη δευτεροβάθμια ζώνη είναι υψηλότερος όσο αυξάνεται η ταχύτητα αποβλήτου. Ως συνέπεια η υψηλή τιμή του  $k_s$  ενεργοποιεί την φάση της επικόλλησης (sticking) (σχ.2.11d).

#### **2.6.4.2 Επαναλαμβάνοντας το φαινόμενο της επικόλλησης μετά την πτώση της ταχύτητας παραγωγής του αποβλήτου, ο ρυθμός μεταβολής της τάσης μειώνεται και μαλακώνει μερικώς το υλικό λόγω θερμοκρασίας στην δευτεροβάθμια ζώνη.**

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι το υλικό σκληραίνει λόγω τάσης και ρυθμού μεταβολής της στο αρχικό μέρος του μήκους επαφής και η συνδυασμένη υψηλή τιμή του  $K_s$  συνάδουν στο να έχουμε ενεργοποίηση της φάσης της επικόλλησης. Ωστόσο αυτό το σκληρό υλικό μαλακώνει ύστερα από μία μικρή περίοδο λόγω της θερμοκρασίας που έχει διατηρηθεί στο εργαλείο και στο απόβλητο. Επίσης με την μείωση παραγωγής αποβλήτου (σχ.2.11) τα και μειώνονται ξανά με σκοπό να επιτρέψουν στην επιλεγμένη διάτμηση (selected shear) να ξαναρχίσει στην πρωτοβάθμια ζώνη στο AB. Η μείωση του  $k_s$  επιτρέπει στο υλικό να "ξεγλιστρήσει" πιο εύκολα, έτσι επιτρέπεται στην αρχική διάτμηση να προβεί σε ένα επίπεδο μειωμένου μήκους. (π.χ. αυξάνοντας την γωνία διατμητικού επιπέδου).

#### **2.6.5 Ανακεφαλαίωση των παραπάνω επιδράσεων**

Το σχ.2.13 είναι μία σχηματική παράσταση των δεδομένων των Campbell και AI και των Rosenfield και Hagn για ιδιότητες σε υψηλούς ρυθμούς μεταβολής της τάσης. Στην περιοχή II η αλλαγή στη διατμητική αντοχή λόγω του ρυθμού μεταβολής της τάσης είναι ανεπαίσθητη. Ωστόσο στην περιοχή IV η ελάττωση της μετατόπισης (dislocation

dumping) επιφέρει μία ξαφνική αύξηση στην διατμητική τάση με την αύξηση του ρυθμού μεταβολής της τάσης. Το σχ. 2.2 δίδει έμφαση στο γεγονός ότι η πρωτοβάθμια ζώνη διάτμησης της διαδικασίας της κοπής του μετάλλου περιλαμβάνεται κυρίως στην περιοχή IV. Τα ουσιώδη βήματα είναι:

Βήμα 1: Σε κάποιο "κατώφλι ταχύτητας" το υλικό στο μπροστινό μέρος της δευτεροβάθμιας ζώνης επίσης εισέρχεται στην συμπεριφορά της περιοχής IV. Αυτό ενεργοποιεί την περισσότερο "κολλώδη τριβή" στο άγριο πρόσωπο καθώς ξαφνικά η Ks πηδά στην θέση ST όπως περιγράφεται στο σχ.2.13.

Βήμα 2: Η ολίσθηση του αποβλήτου σταματά προσωρινά και έχουμε μία "συσσώρευση" υλικού που προκαλεί προεξοχές στο εργαλείο.

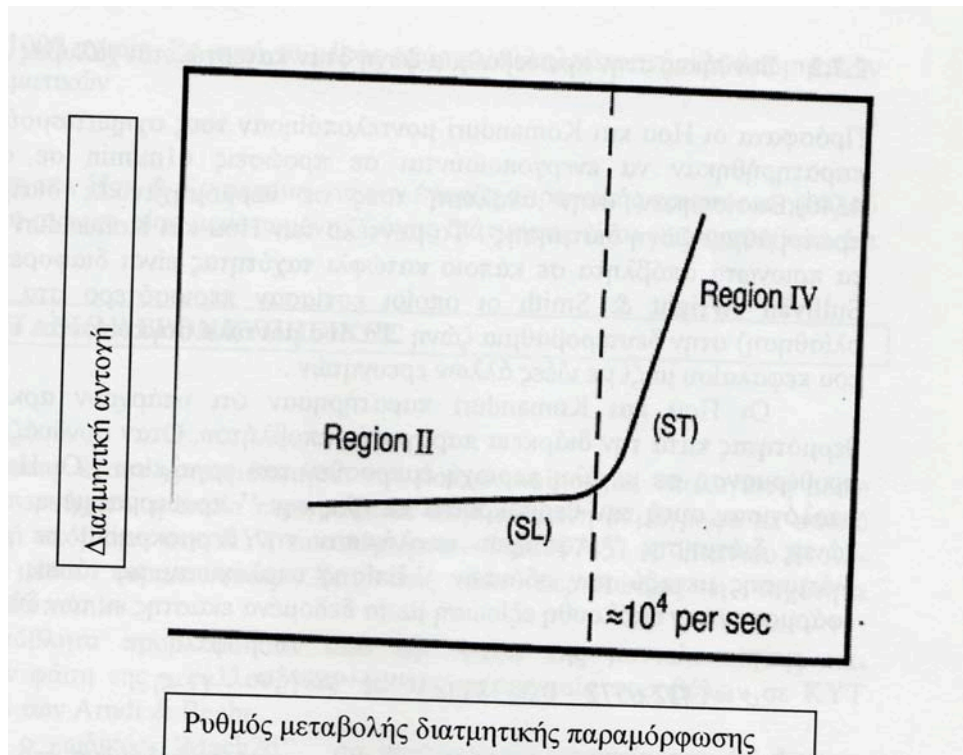
Βήμα 3: Ωστόσο σχεδόν μόνιμα εξαιτίας της τοπικής θέρμανσης και αφετέρου εξαιτίας της "μείωσης" του αποβλήτου οι συνθήκες τείνουν να μετατραπούν σε συνθήκες τριβής ολίσθησης (SL) όπως παρουσιάζεται στο σχ.2.13

Βήμα 4: Όταν κάτι προσφέρει στο σύστημα η συσσωρευμένη ενέργεια κατά την διάρκεια του (pile up) σημαίνει ότι "το επίπεδο διάτμησης έχει τώρα πιεστεί προς τα κάτω" στις μόλις 18° για ανοξείδωτο χάλυβα.

Βήμα 5: Το επίπεδο διάτμησης μπορεί τώρα να επανέλθει εκεί που τείνει να βρίσκεται, γρήγορη αλλαγή στην τιμή και επανάληψη στις 30° με πολύ λιγότερη ενέργεια.

Βήμα 6: Ωστόσο αυτή η κατάσταση είναι μόνο προσωρινή: η αυξανόμενη ταχύτητα αποβλήτου επαναφέρει το υλικό της δευτεροβάθμιας ζώνης πίσω στο ST (σχ.2.13) και επαναλαμβάνεται ο κύκλος σε αυτή την βάση.

Αυτός ο εξαρτώμενος από το ρυθμό μεταβολής μηχανισμός εξηγεί γιατί παρατηρείται συνεχές απόβλητο όταν κατεργάζεται χάλυβας μέσης περιεκτικότητας σε άνθρακα σε συνήθεις ταχύτητες, και επίσης γιατί γίνεται οδοντωτό σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Στην πραγματικότητα όλο το υλικό αναμένεται να εισαχθεί στην περιοχή IV σε κάποια μετασηματισμένη ταχύτητα, πράγμα που σημαίνει ότι όλο το υλικό τελικά θα κατεργαστεί με οδοντωτό γρέζι εάν η πρόωση ανέλθει επαρκώς υψηλά.



Σχήμα 2.13 Παρουσίαση των δεδομένων του ρυθμού μεταβολής στην περιοχή II και στην περιοχή IV. Στο κατώφλι ταχύτητας κοπής το υλικό της δευτεροβάθμιας ζώνης εισέρχεται στην περιοχή IV στο σημείο (ST). Το υψηλότερης αντοχής σε διάτμηση υλικό προκαλεί "επικόλληση" στο τραχύ πρόσωπο. Έτσι παρεμποδίζεται η ολίσθηση του αποβλήτου και προκαλείται τομή της γωνίας του επιπέδου διάτμησης στις  $18^\circ$ . Μία στιγμή αργότερα η δευτεροβάθμια ζώνη διάτμησης αδυνατίζει λόγω θερμικών φαινομένων και της μείωσης του ρυθμού μεταβολής της τάσης. Επανέρχεται στο SL και το γρέζι επιταχύνεται στο τραχύ πρόσωπο του εργαλείου επιτρέποντας την διάτμηση σε ένα μικρότερο επίπεδο στις  $30^\circ$ .

## 2.7 AISI 4340

### 2.7.1 Περίληψη

Από το 1980 σε προγράμματα της πολεμικής αεροπορίας των ΗΠΑ, Η Komanduri & οι συνεργάτες παρατήρησαν ότι τα πριονωτά γρέζια σχηματίζονται πιο πολύ κατά την κατεργασία υλικών με περιορισμένο σύστημα ολίσθησης (π.χ. κρυσταλλικές δομές Hcp) φτωχές θερμικές ιδιότητες και υψηλή σκληρότητα, όπως κραματωμένοι χάλυβες, κράματα τιτανίου και υπερκράματα με βάση το νικέλιο. Σε αντίθεση με το συνεχές απόβλητο που τείνει να εμφανίζεται κατά την κατεργασία υλικών με εκτεταμένο σύστημα ολίσθησης (π.χ. fee & bcc κρυσταλλική δομή) καλές θερμικές ιδιότητες, χαμηλή σκληρότητα, όπως

τα συνηθισμένα κράματα αλουμινίου (A1 6061-T6) και χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (AISI 1018).

### 2.7.2 Συνθήκες στην πρωτοβάθμια ζώνη όταν κατεργάζεται χάλυβας AISI 4340

Πρόσφατα οι Hou και Komanduri μοντελοποίησαν τους σχηματισμούς πριονωτού γρεξιού που παρατηρήθηκαν να ενεργοποιούνται σε προώσεις 61m/min σε σκληρούς χάλυβες AISI 4340). Βασίστηκαν στην ανάλυση τους σε θερμομηχανικές διατμητικές αστάθειες στην πρωτοβάθμια ζώνη διάτμησης. Το μοντέλο των Hou και Komanduri του πως ενεργοποιούνται τα πριονωτά απόβλητα σε κάποιο κατώφλι ταχύτητας είναι διαφορετικό από το μοντέλο των Sullivan, Wright & Smith οι οποίοι εστίασαν περισσότερο στα φαινόμενα (επικόλληση - ολίσθηση) στην δευτεροβάθμια ζώνη. Τα δύο μοντέλα συγκρίνονται στην παράγραφο 2.9 αυτού του κεφαλαίου μαζί με ιδέες άλλων ερευνητών.

Οι Hou και Komanduri παρατήρησαν ότι υπάρχουν αρκετές εντοπισμένες πηγές θερμότητας κατά την διάρκεια παραγωγής αποβλήτου. Όταν συνδυάζονται προσφέρουν αρκετή προθέρμανση σε μεγάλη περιοχή εμπροσθεν του εργαλείου. Οι Hou και Komanduri πρώτοι υπολόγισαν αυτή την θερμοκρασία σε όλη την "προθερμασμένη περιοχή της πρωτοβάθμιας ζώνης διάτμησης". Αφετέρου υπολόγισαν την θερμοκρασία σε μία "συγκεκριμένη ζώνη διάτμησης μεταξύ των οδόντων". Επίσης υπολόγισαν τις τάσεις σε κάθε περιοχή. Έπειτα εφάρμοσαν την ακόλουθη εξίσωση με τα δεδομένα εκάστης εκ των δύο περιοχών .

$$\sigma = (432.6572 - 0.3533T) \varepsilon^{(0.1213+6.4435 \times 10^{-5} T)} \quad (2.4)$$

Αυτή η εξίσωση αρμόζει περισσότερο από τα δεδομένα στο εγχειρίδιο μετάλλων του 1954 ASM. Παρατηρήστε ότι δεν περιέχεται δυστυχώς στην εξίσωση όρος που να περιλαμβάνει την τάση. Μολαταύτα επιτρέπει μία καλή εφαρμόσιμη στρατηγική. Αρχικά μία τιμή  $\sigma$  υπολογίζεται για το συσσωρευμένο προθερμασμένο υλικό καθ' όλη την περιοχή της πρωτοβάθμιας ζώνης διάτμησης. Κατά δεύτερον μία τιμή  $\sigma'$  υπολογίζεται για την αντοχή σε μία χωριστά τοποθετημένη ζώνη διάτμησης.

Το σχ.2.14 δείχνει τα αποτελέσματα των Hou και Komanduri για την εναλλαγή της

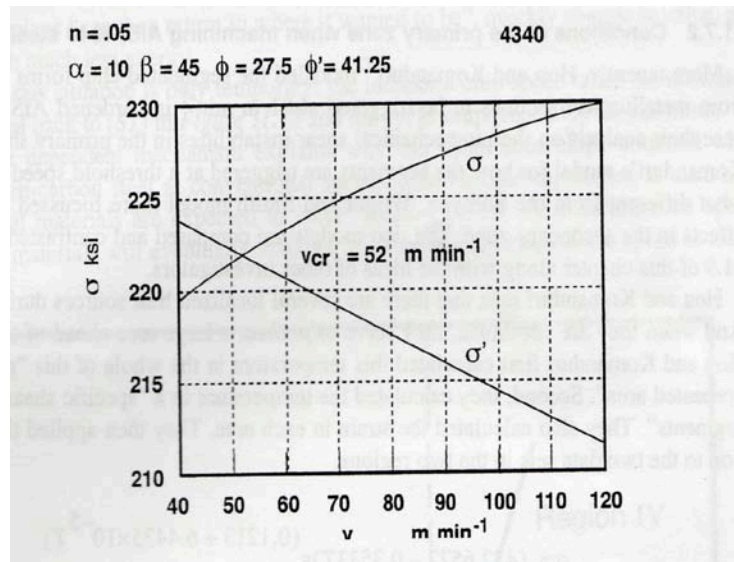
τάσης διάτμησης στην ζώνη διάτμησης,  $\sigma'$ , στην θερμοκρασία της ζώνης διάτμησης και την αντοχή σε διάτμηση του συσσωρευμένου υλικού,  $\sigma$ , στην θερμοκρασία προθέρμανσης, αυξανομένης της ταχύτητας κοπής. Οι προτάσεις από την θεωρητική ανάλυση είναι οι εξής :

☞ Όταν το  $\sigma'$  είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το  $\sigma$ , δεν εντοπίζεται διάτμηση προτού υπερσχύσει σκλήρυνση λόγω διάτμησης στην ζώνη διάτμησης. Αυτή είναι η περίπτωση προβλεπόμενες προώσεις της τάξης των 52m/min.

☞ Πάνω από αυτή την πρόωση το μαλάκωμα λόγω θέρμανσης υπερτερεί έναντι σκλήρυνσης δηλαδή  $\sigma' < \sigma$ . Από τώρα και πέρα η διάτμηση είναι επικείμενη και σύντομα σχηματίζεται πριονωτό γρέζι. Αυτή είναι η περίπτωση για προβλεπόμενες προώσεις της τάξης άνω των 52m/min.

☞ Η τομή αυτών των δύο καμπύλων δίνει την πρόωση της έναρξης της εντοπισμένης διάτμησης. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων του Komanduri et al έδειξαν ύπαρξη διατμητικής αστάθειας στο AISI 4340 που ξεκινά στα 60m/min και ολοκληρώνεται στα 122 m/min - αυτό είναι λογικά συγκρίσιμο με το θεωρητικό αποτέλεσμα ότι το πριονωτό γρέζι πρέπει να ενεργοποιηθεί στα 52 m/min. Επίσης στοσχ.2.14 οι καμπύλες συνεχίζονται μονοτονικά πάνω από τις υψηλές ταχύτητες. Στην ανάλυση των Hou & Komanduri αυτό σημαίνει ότι άπαξ και έλαβε χώρα ο μετασχηματισμός από συνεχές σε απόβλητο εντοπισμένης διάτμησης (shear localized), δεν επέρχεται άλλη αλλαγή σε τύπο γρεζιού για οποιαδήποτε αύξηση της πρόωσης πάνω από 1000 m/min. Σε αυτό το μέρος υπάρχει αλληλοϋποστήριξη θεωρητικών δεδομένων και πειραματικών.





Σχήμα 2.14 Ανάλυση των Hou & Komanduri για την έναρξη παραγωγής πριονωτού γραξιού στα 52 m/min όπου η αντοχή μίας μεμονωμένης ζώνης διάτμησης είναι μικρότερη από ότι όλες μαζί.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΟΠΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

Έγιναν πειράματα κοπής των σφαιρών στο εργαστήριο. Τα πειράματα έγιναν σε συνθήκες κοπής υψηλών ταχυτήτων και μετρήθηκαν οι δυνάμεις κοπής.

#### 3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΟΠΗ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

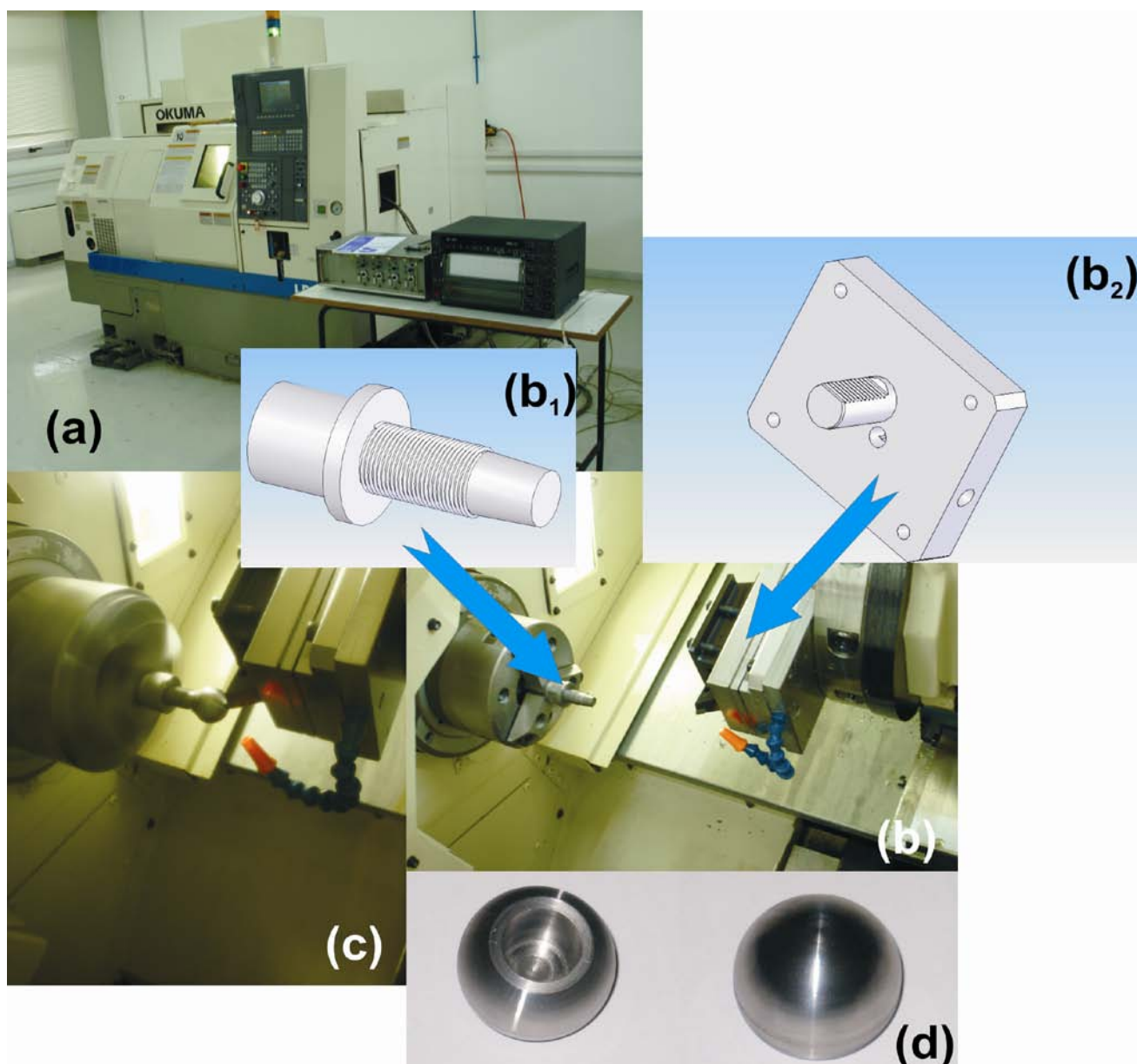
Το κέντρο τόνρευσης που πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π. Πρόκειται για μικρή σχετικά μηχανή του οίκου OKUMA τύπου LB10II (εικόνα 3.1 και 3.α). Η άτρακτος έχει μέγιστη ταχύτητα 10.000 rpm, υβριδικά ρουλεμάν και ειδικό ψυγείο. Οι μέγιστες διαστάσεις κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι διάμετρος 170mm και μήκος 300mm. Η ταχύτητα ταχείας πρόωσης είναι 15 και 20m/min για τον X και το Z άξονα αντίστοιχα. Η ισχύς του κινητήρα της άτρακτος είναι 22 kW και των κινητήρων πρόωσης 3 kW στον άξονα Z και 1,5 kW στον άξονα X. Ο μύλος εργαλείων έχει χωρητικότητα 12 θέσεων. Το υγρό κοπής παρέχεται με υπέρ - υψηλή πίεση αντί του στάνταρ και διατίθενται ειδικό υδραυλικό τσωκ και κύλινδρος μορσέττα καθώς και ειδική πόντα κεντροφορέα. Η μηχανή, παρά το σχετικά μικρό της μέγεθος, ζυγίζει 3.5 τόνους. Το σύστημα ελέγχου CNC είναι της ίδιας της OKUMA, με ανάλυση 0,1 μm, ABSO κλίμακες μέτρησης και δυνατότητες επικοινωνίας DNC-B.



Εικόνα 3.1 Κέντρο κατεργασίας του οίκου OKUMA τύπου LB10II.

Οι πειραματική κοπή στο εργαστήριο έγινε για δεκαοκτώ σφαίρες διαμέτρου 28 mm

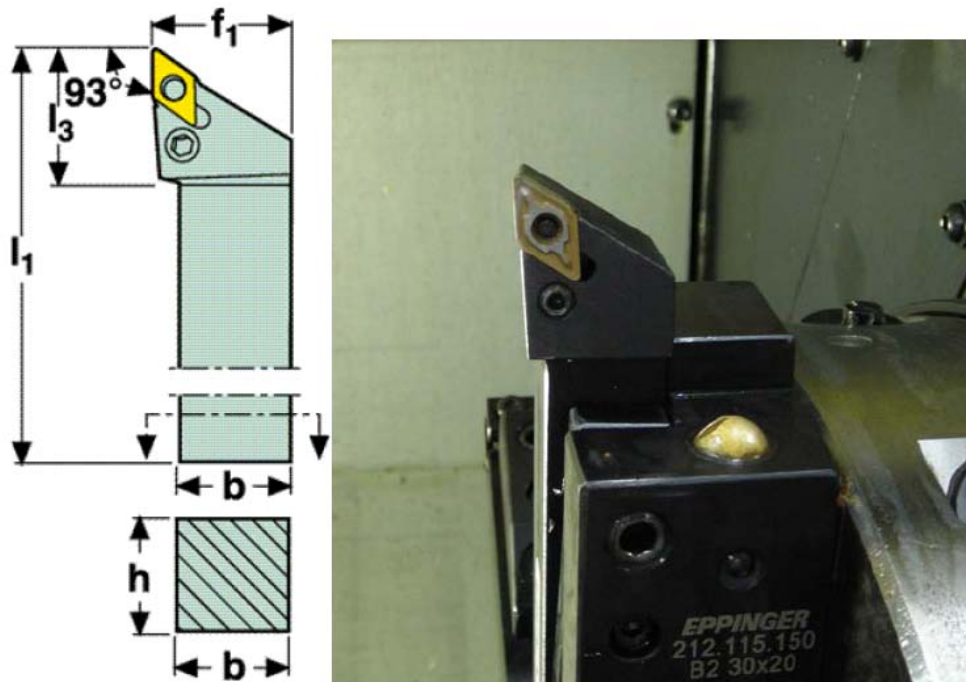
(εικόνα 3.2). Όλες οι κοπές έγιναν με τις ίδιες συνθήκες κατεργασίας, με τα ίδια εργαλεία και στο ίδιο κέντρο κατεργασίας για διάφορες τιμές ταχυτήτων κοπής, βάθους κοπής και προώσεως. Οι σφαίρες κατασκευάστηκαν από χάλυβα 316L. Οι αναλυτικότερες τιμές των ταχυτήτων κοπής, βάθους κοπής και προώσεως παρουσιάζονται σε επόμενη ενότητα στον Πίνακα 3.1.



Εικόνα 3.2

Η τόνρευση έγινε με μανέλα SECO PDJNR 2020 K11 (εικόνα 3.3) και κοπτικό πλακίδιο

SECO DNMG 110402 M3 TP2000.



Εικόνα 3.3 Μανέλα τόνρευσης SECO PDJNR 2020 K11.

Κατά την κατεργασία των τεμαχίων όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.2b μαζί με την μανέλλα είναι τοποθετημένο ένα δυναμόμετρο KISTLER 9257B το οποίο κατά την διάρκεια τόνρευσεως κάθε τεμαχίου μετρά τις πειραματικές δυνάμεις κοπής. Οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Στην εικόνα 3.2b<sub>1</sub> και εικόνα 3.2 b<sub>2</sub> παρουσιάζεται αντιστοίχως το εξάρτημα συγκράτησης των σφαιρών και το εξάρτημα συγκράτησης του δυναμομέτρου.

Στην εικόνα 3.2c παρουσιάζεται κάποιο στιγμιότυπο κατά την κατεργασία ενός τεμαχίου.

Η τελική μορφή των σφαιρών παρουσιάζεται στην εικόνα 3.2d.

### 3.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟ KISTLER 9257BA

Το δυναμόμετρο KISTLER (εικόνα 3.4) είναι ένα δυναμόμετρο χαλαζία για τη μέτρηση των τριών συνιστωσών μιας δύναμης. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- ∞ Αξιόπιστο σύστημα μέτρησης δύναμης.
- ∞ Είναι κατάλληλο για τη μέτρηση των δυνάμεων κοπής κατά την διάρκεια φρεζαρίσματος, λείανσης και τόννευσης.
- ∞ Ενσωματωμένοι ενισχυτές – απλή λειτουργία.
- ∞ Τέσσερα μετατρέψιμα επίπεδα μετρήσεων.



Εικόνα 3.4 Δυναμόμετρο KISTLER

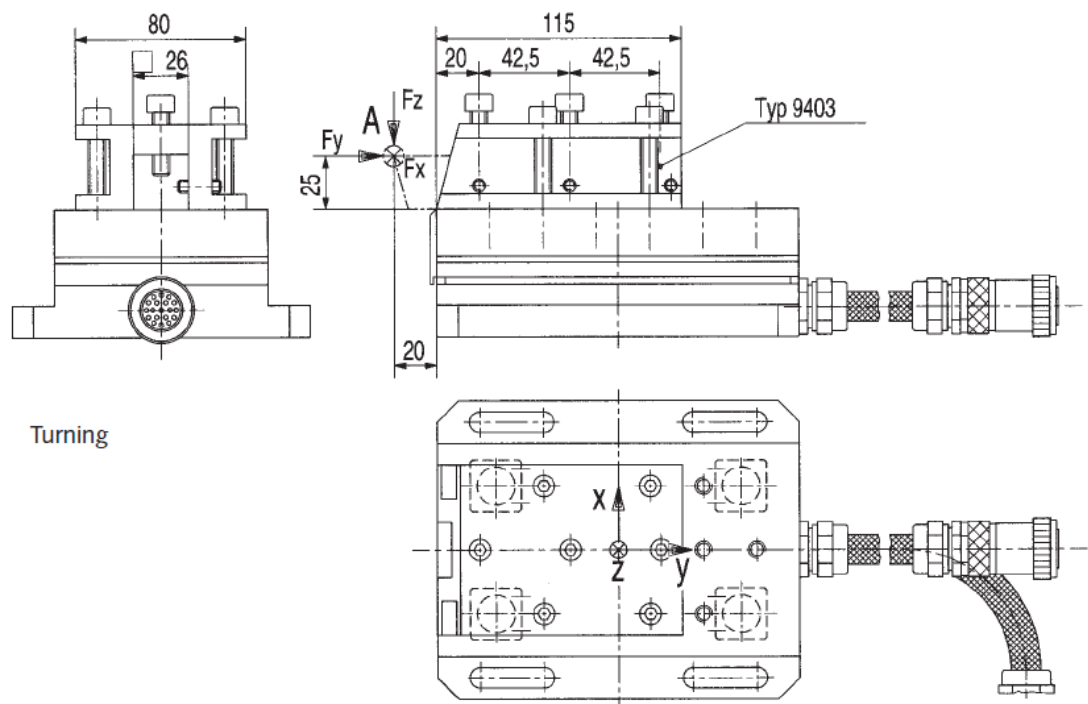
#### Περιγραφή

Το δυναμόμετρο αποτελείται από τέσσερις των τριών συνιστωσών της δύναμης αισθητήρες εγκατεστημένους κάτω από υψηλό preload μεταξύ μιας βάσης-πιάτου και ενός πιάτου κάλυψης. Οι συνιστώσες της δύναμης μετριοούνται ουσιαστικά χωρίς μετατόπιση. Οι τέσσερις αισθητήρες τοποθετούνται έτσι ώστε να είναι απομονωμένοι. Αυτό αποκλείει κατά ένα μεγάλο μέρος τα προβλήματα επίγειων βρόχων. Το δυναμόμετρο

προστατεύεται αντιδιαβρωτικό και από τη διείσδυση από το υγρού ψεκασμού και τα υγρά κοπής.

Το πιάτο κάλυψης εγκαθίσταται με ένα ειδικό στρώμα θερμικής μόνωσης που καθιστά το δυναμόμετρο κατά ένα μεγάλο μέρος αναισθητο στις επιρροές της θερμοκρασίας.

Ένας ενισχυτής 3-καναλιών είναι ενσωματωμένος στο δυναμόμετρο. Επομένως, το σήμα εξόδου στο δυναμόμετρο είναι χαμηλής σύνθετης αντίστασης.

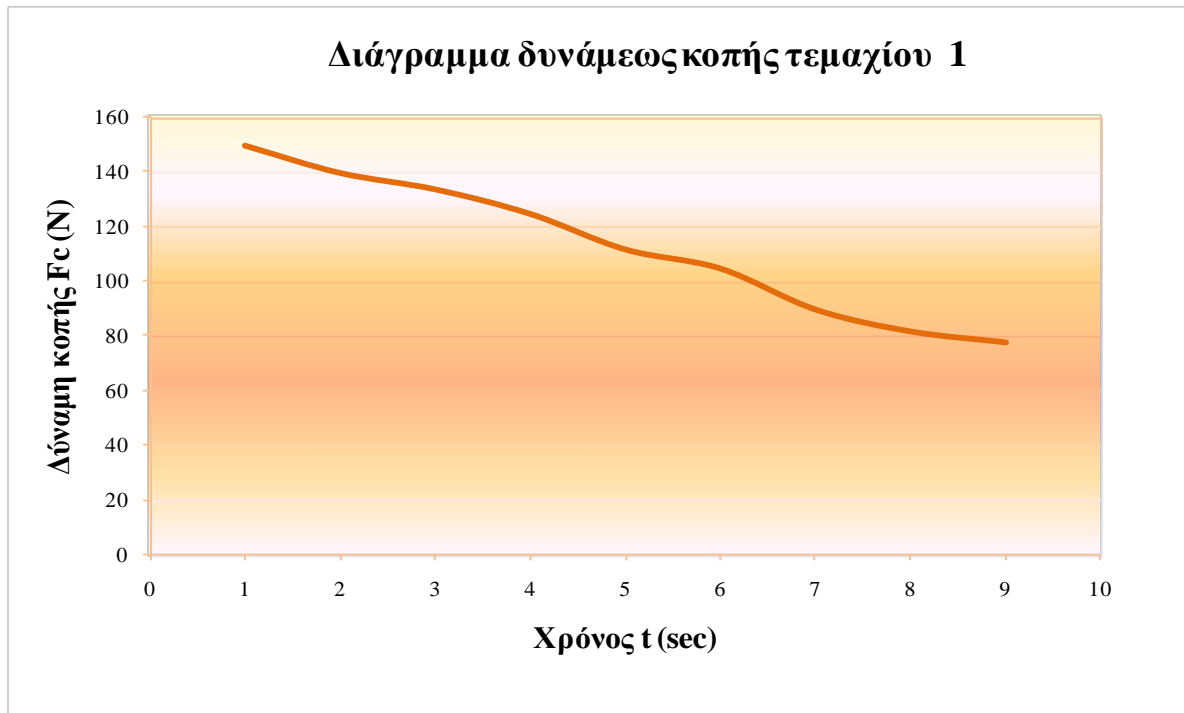


Εικόνα 3.5 Διαστάσεις δυναμόμετρου KISTLER 9257BA

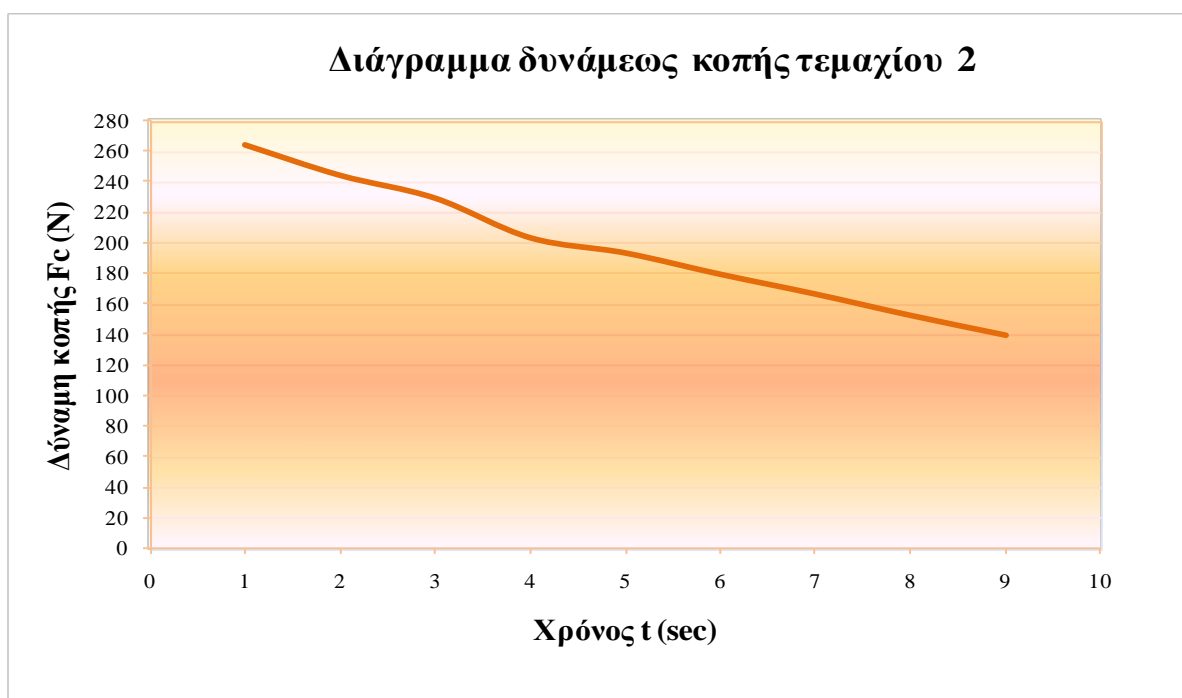
### 3.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ.

Κατά διάρκεια της τόνρευσης κάθε τεμαχίου καταγράφονται οι δυνάμεις μέσω του δυναμόμετρου σε μορφή διαγράμματος.

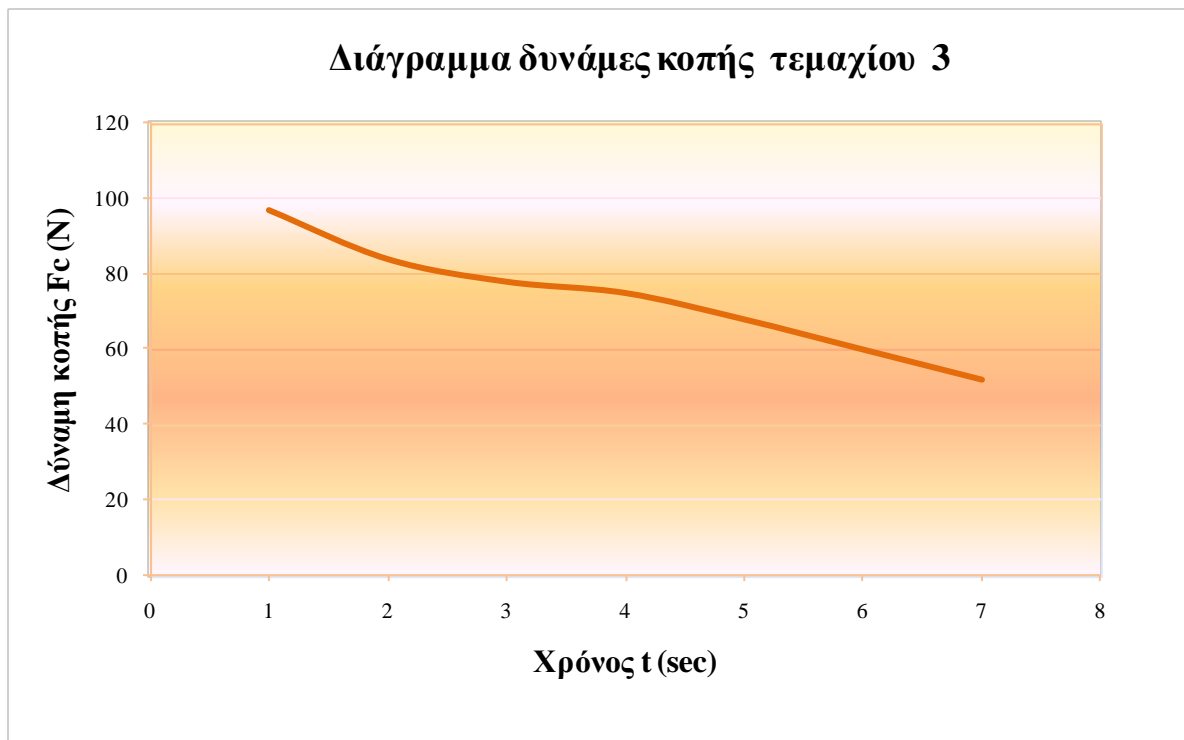
Τεμάχιο 1<sup>ο</sup>



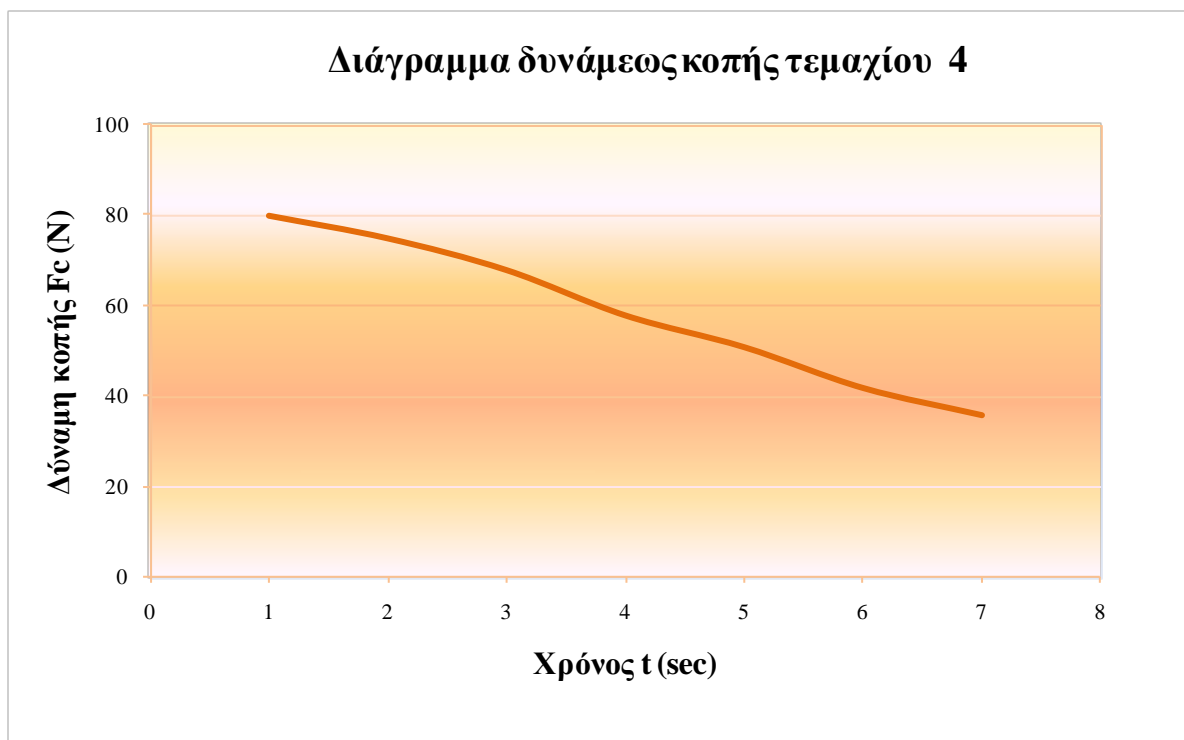
Τεμάχιο 2<sup>ο</sup>



Τεμάχιο 3°

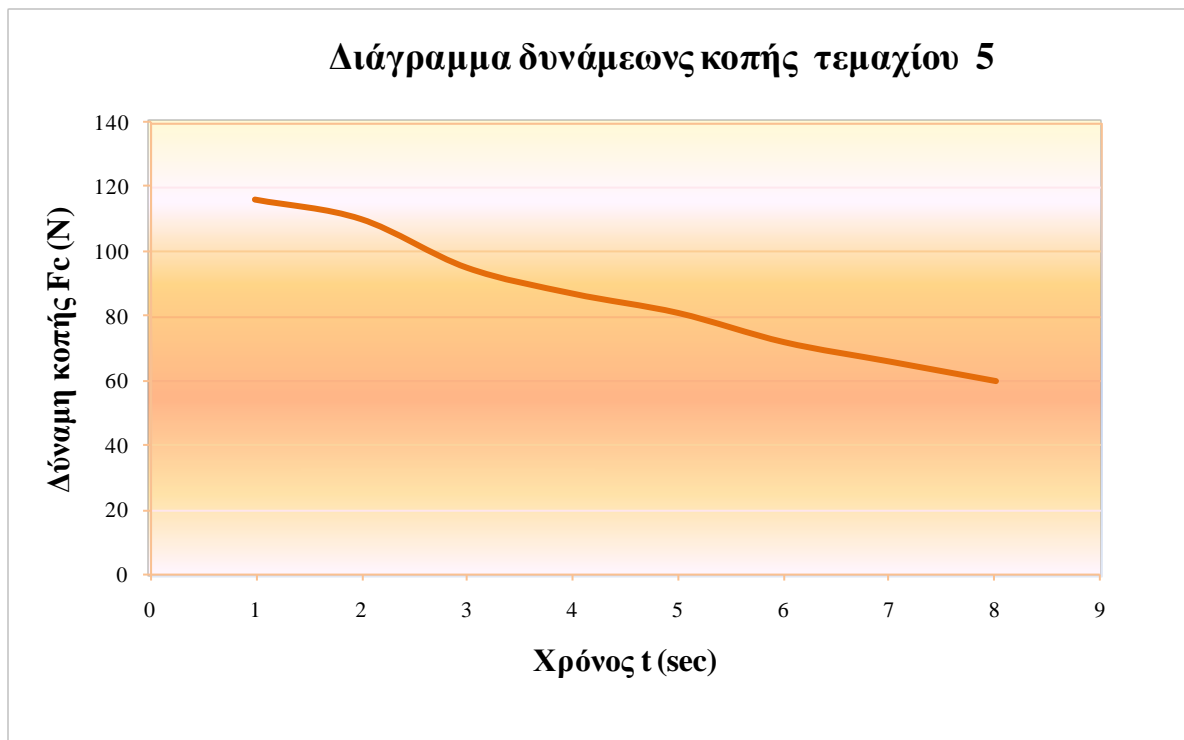


Τεμάχιο 4°

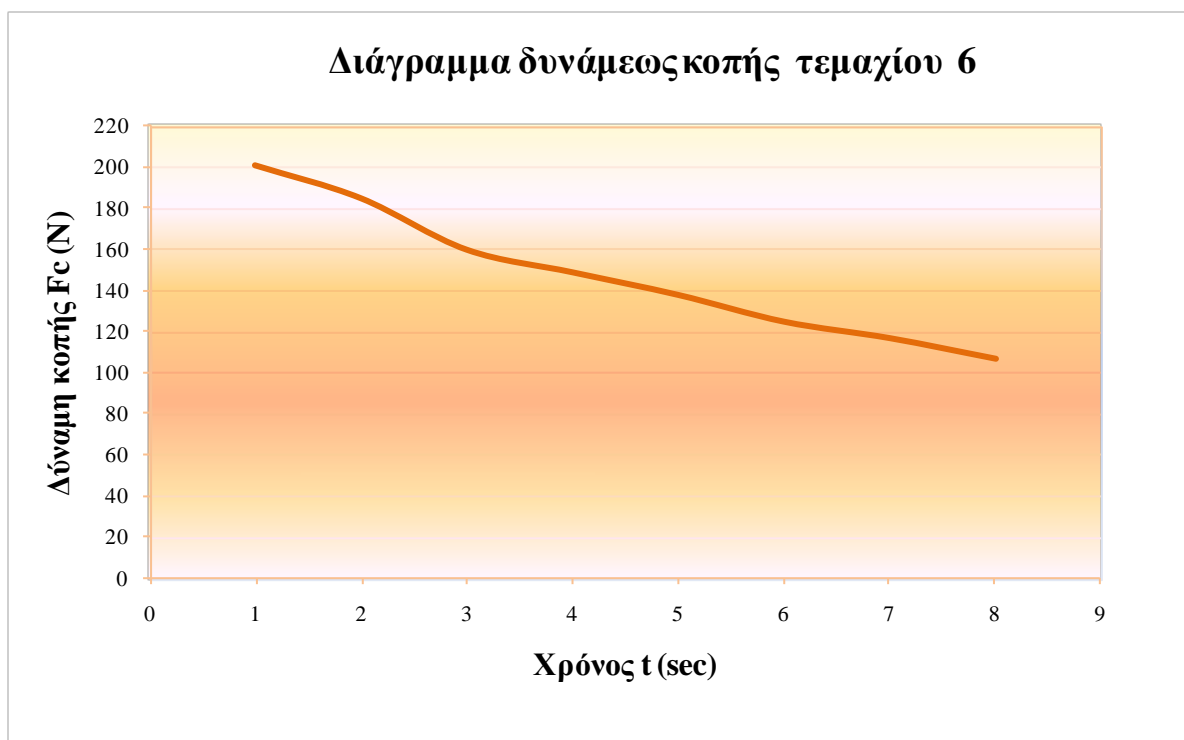




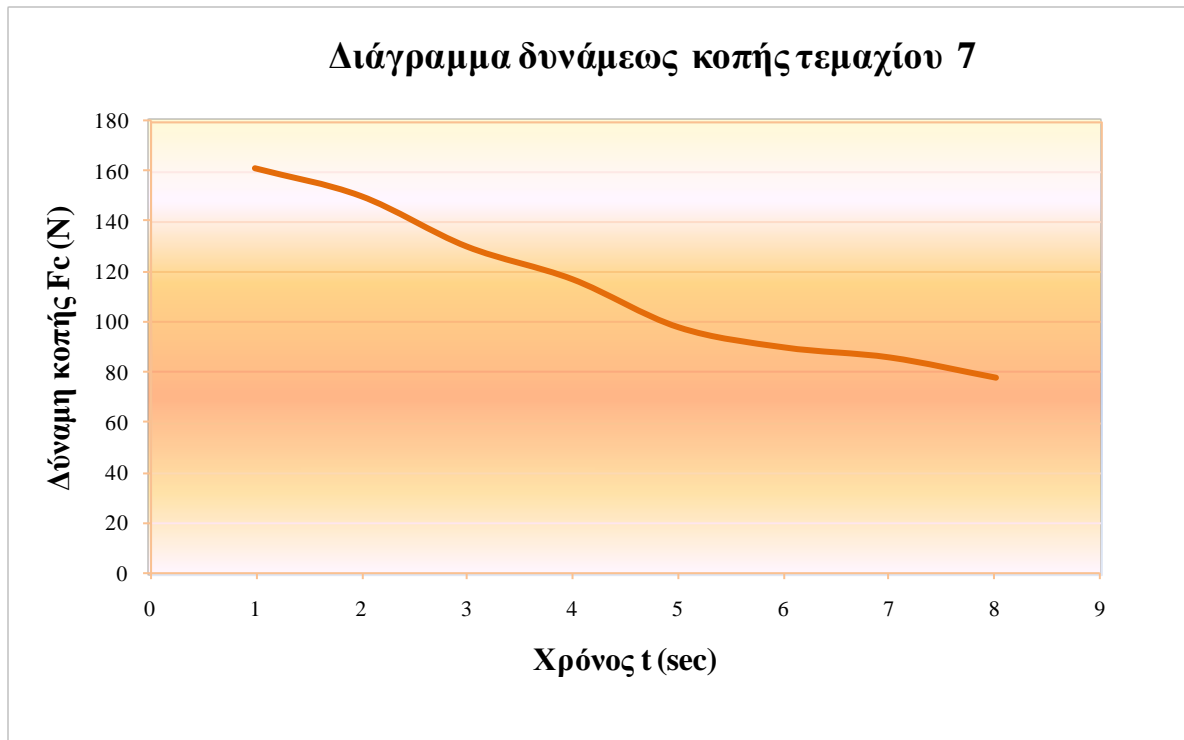
Τεμάχιο 5°



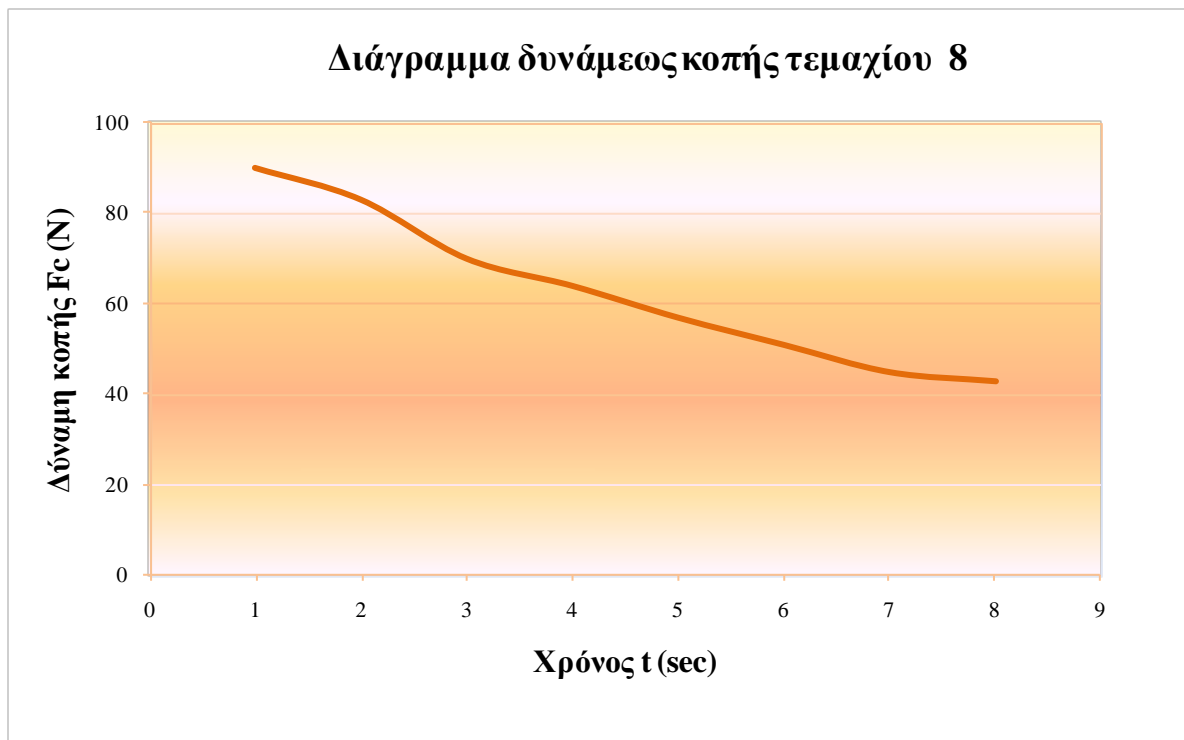
Τεμάχιο 6°



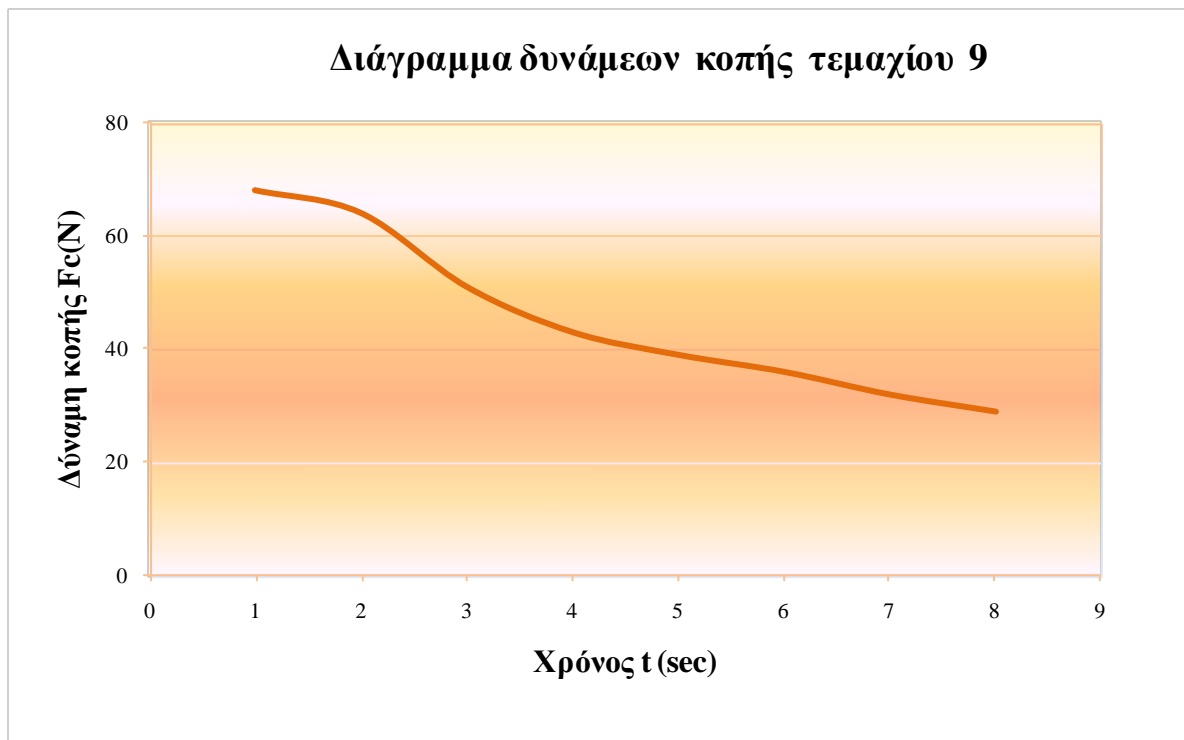
Τεμάχιο 7°



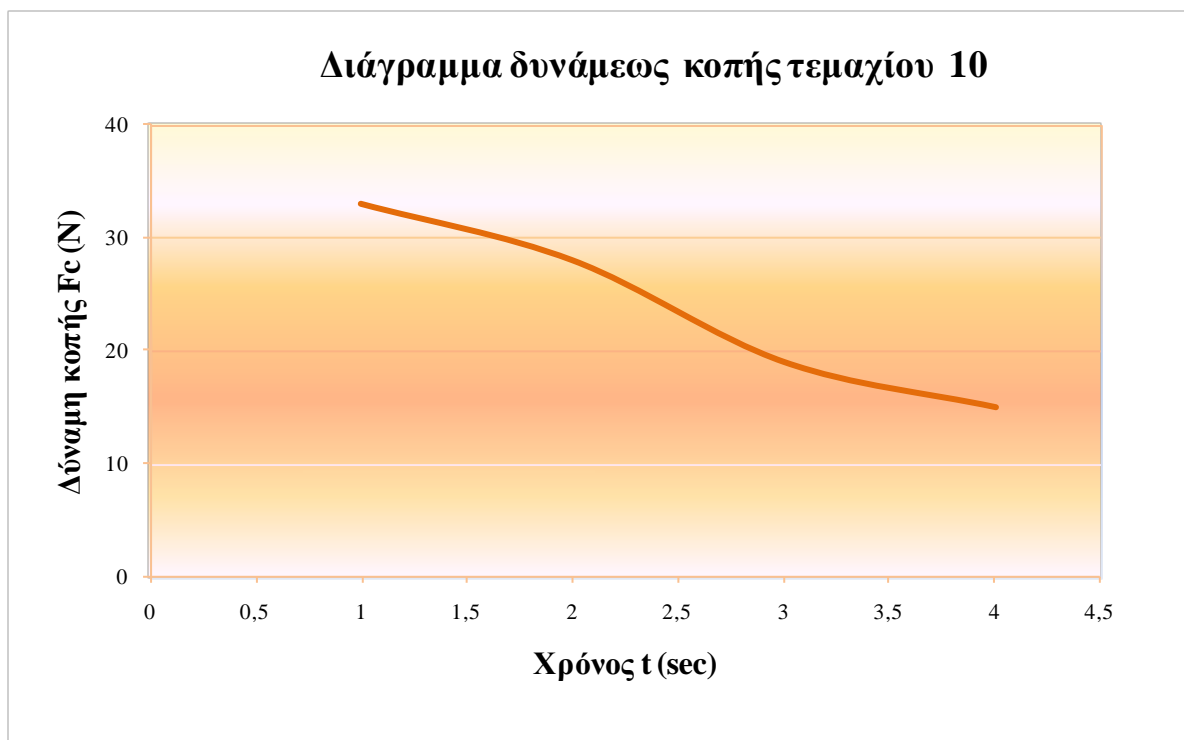
Τεμάχιο 8°



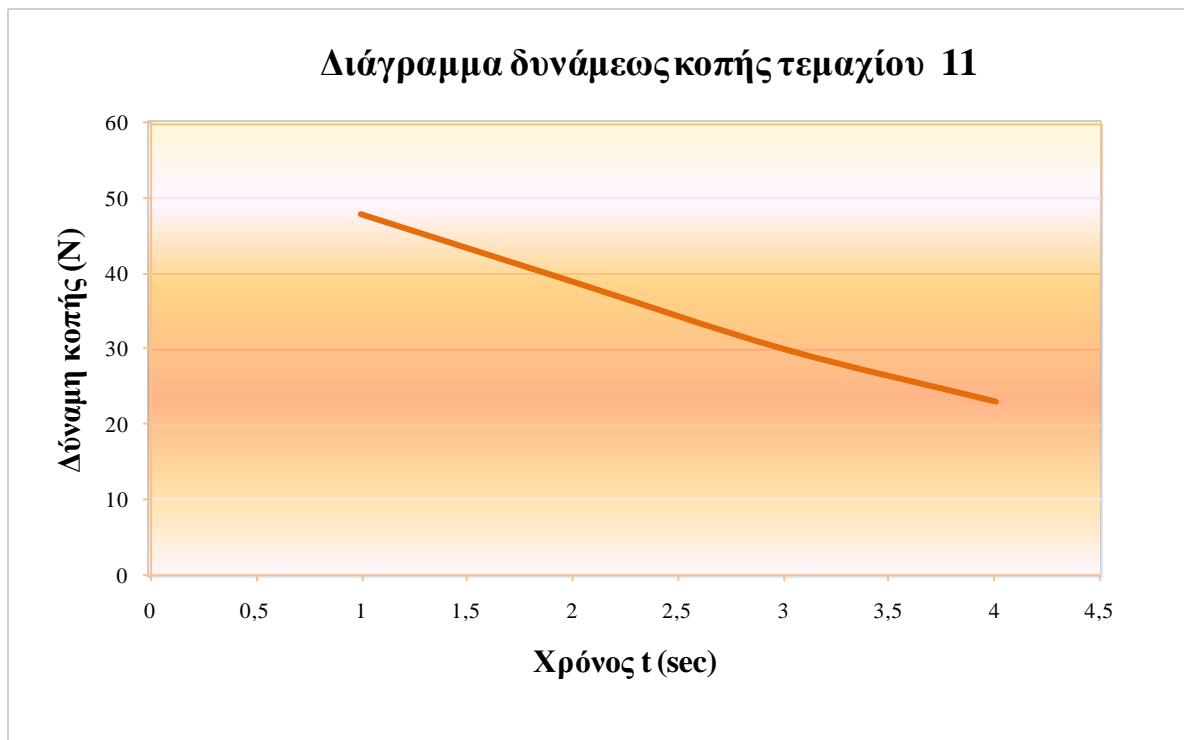
Τεμάχιο 9°



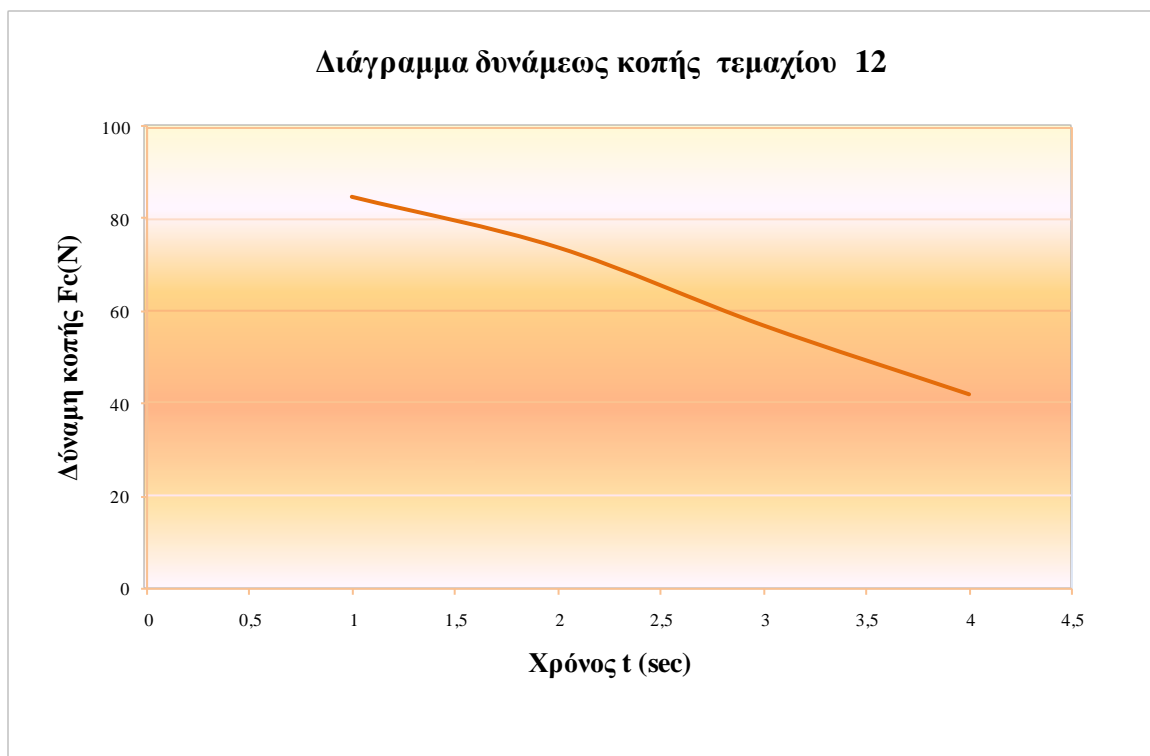
Τεμάχιο 10°



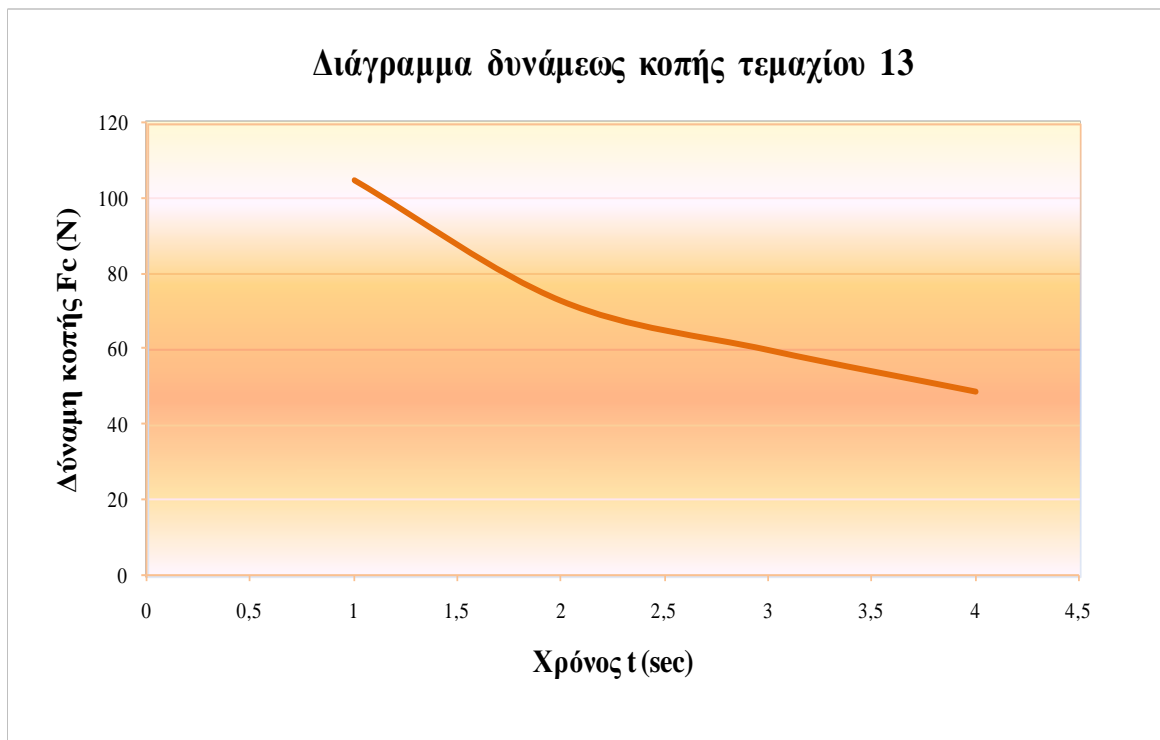
Τεμάχιο 11°



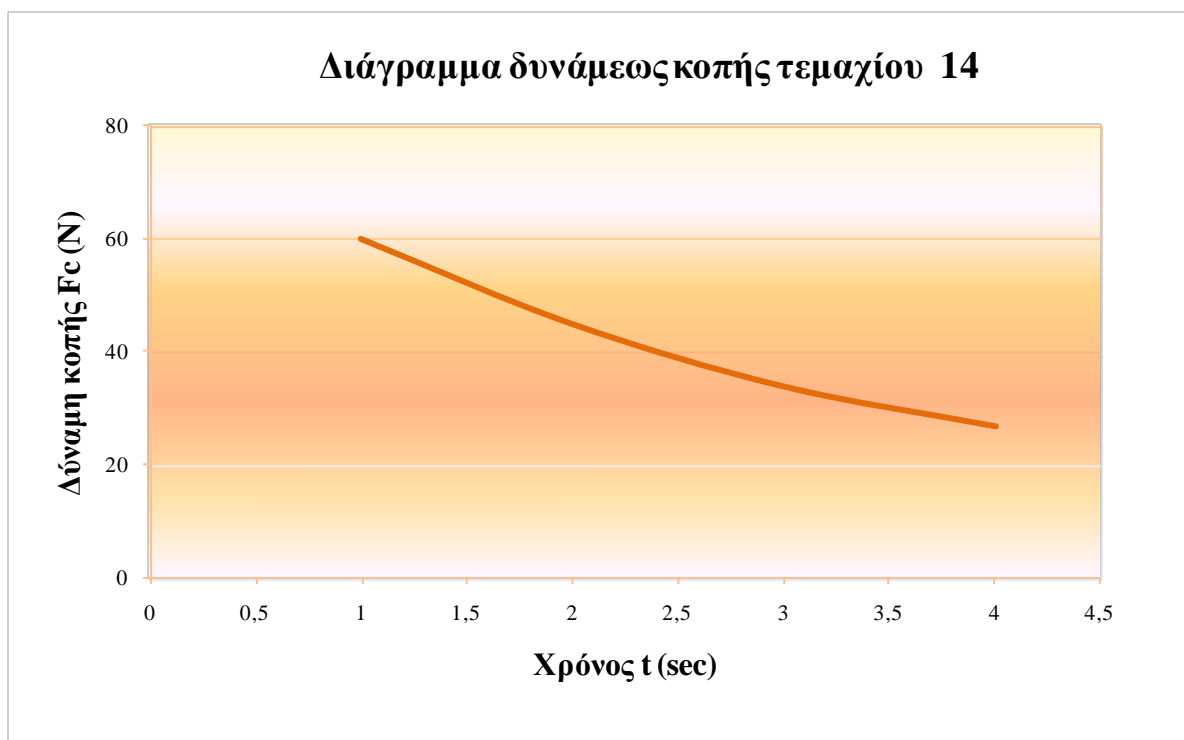
Τεμάχιο 12°



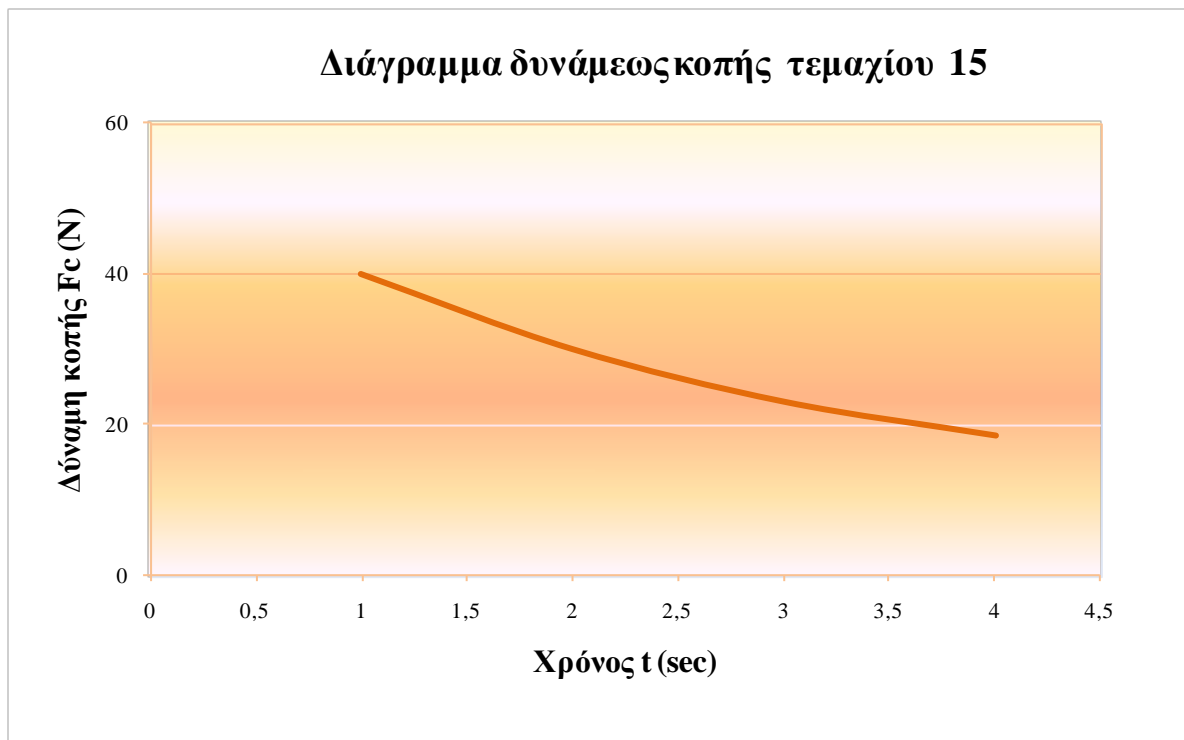
Τεμάχιο 13°



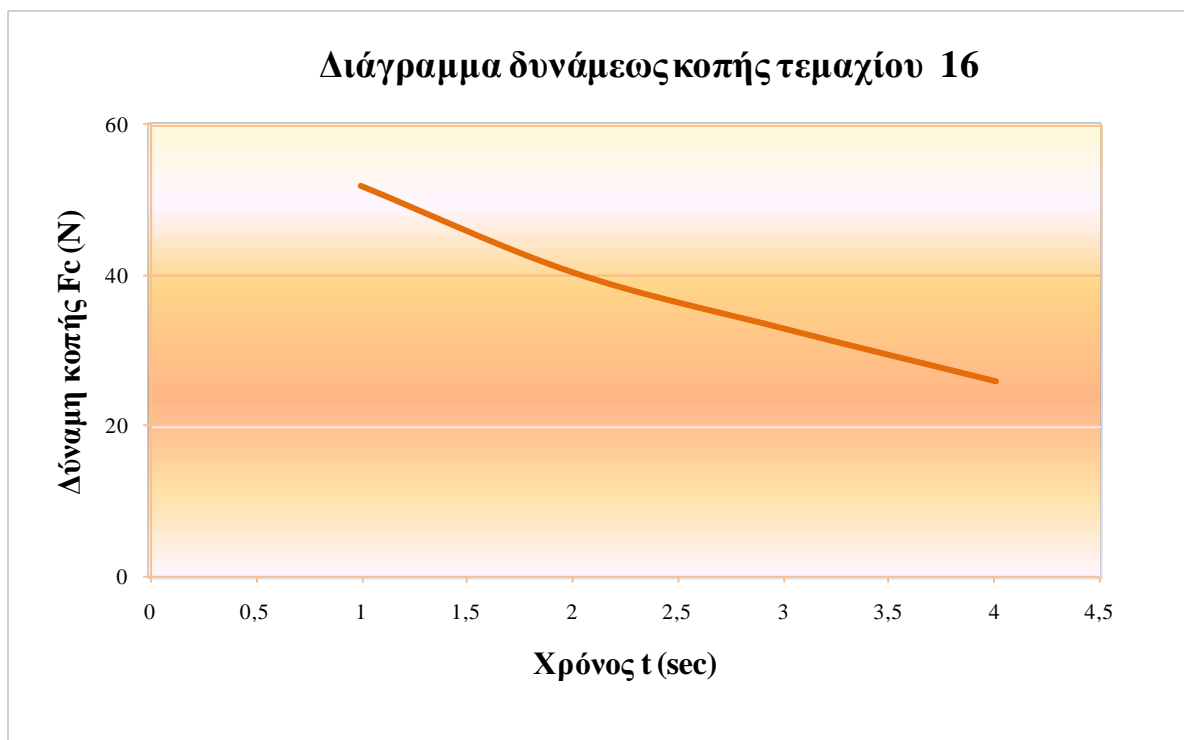
Τεμάχιο 14°



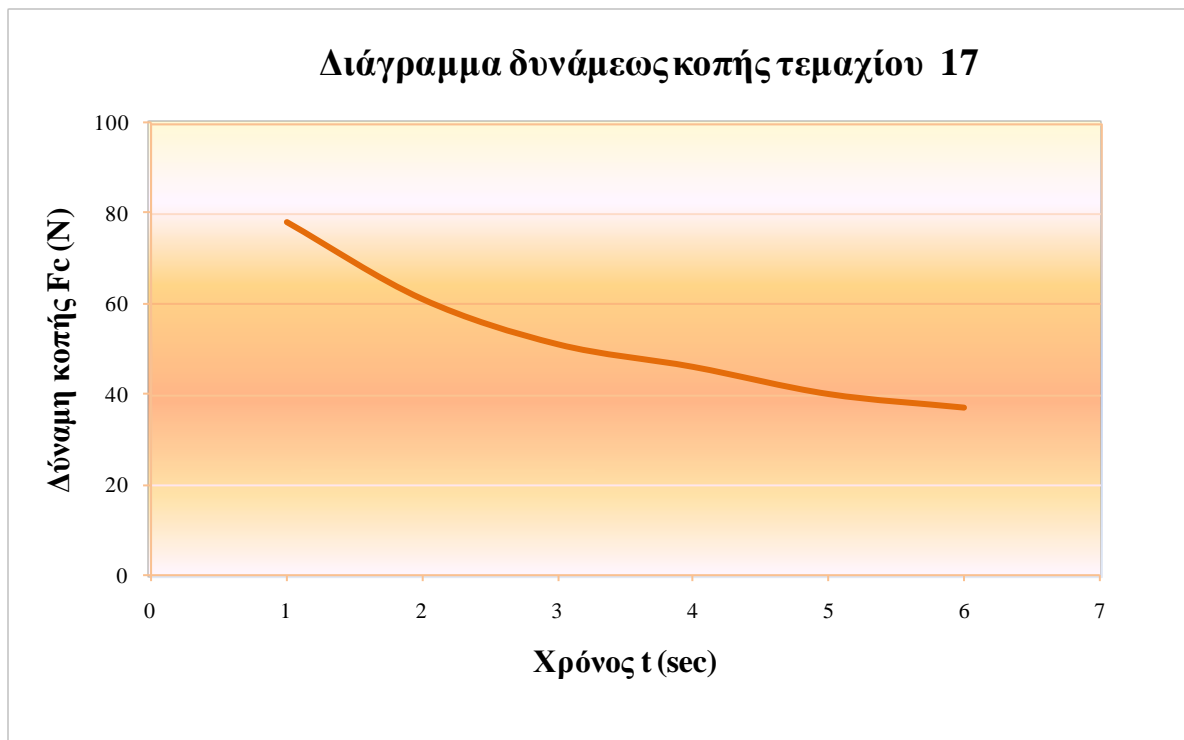
Τεμάχιο 15°



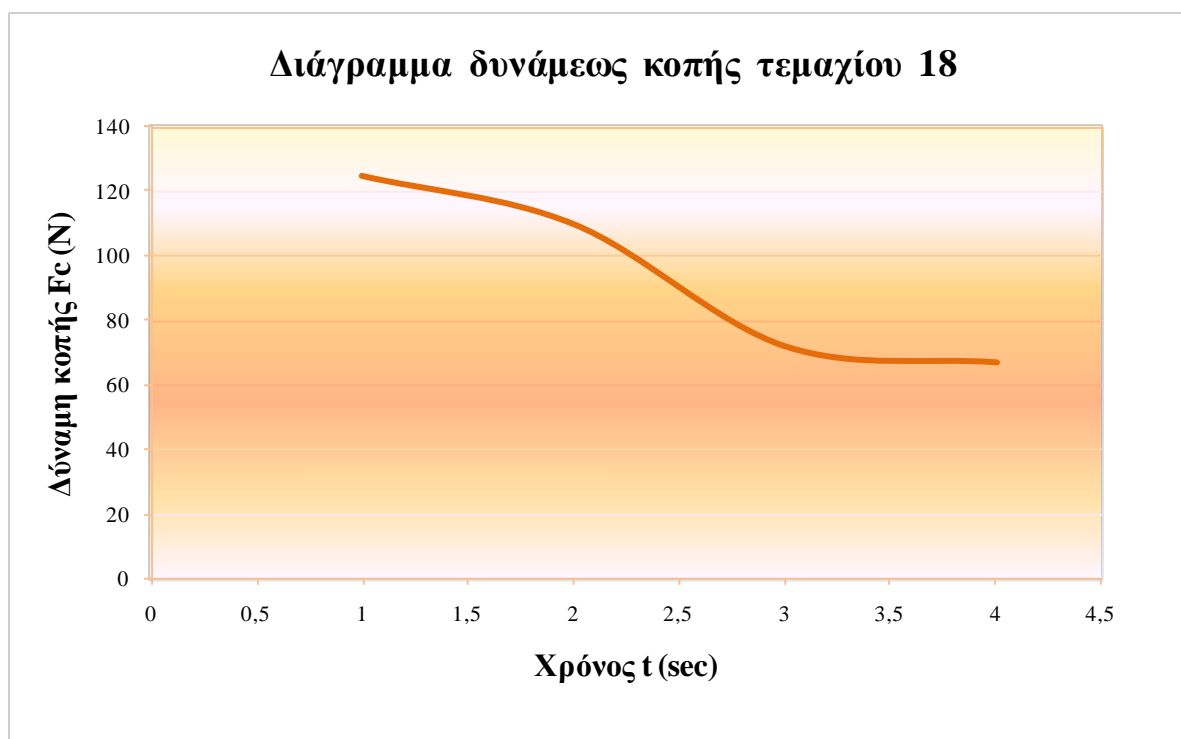
Τεμάχιο 16°



Τεμάχιο 17°



Τεμάχιο 18°



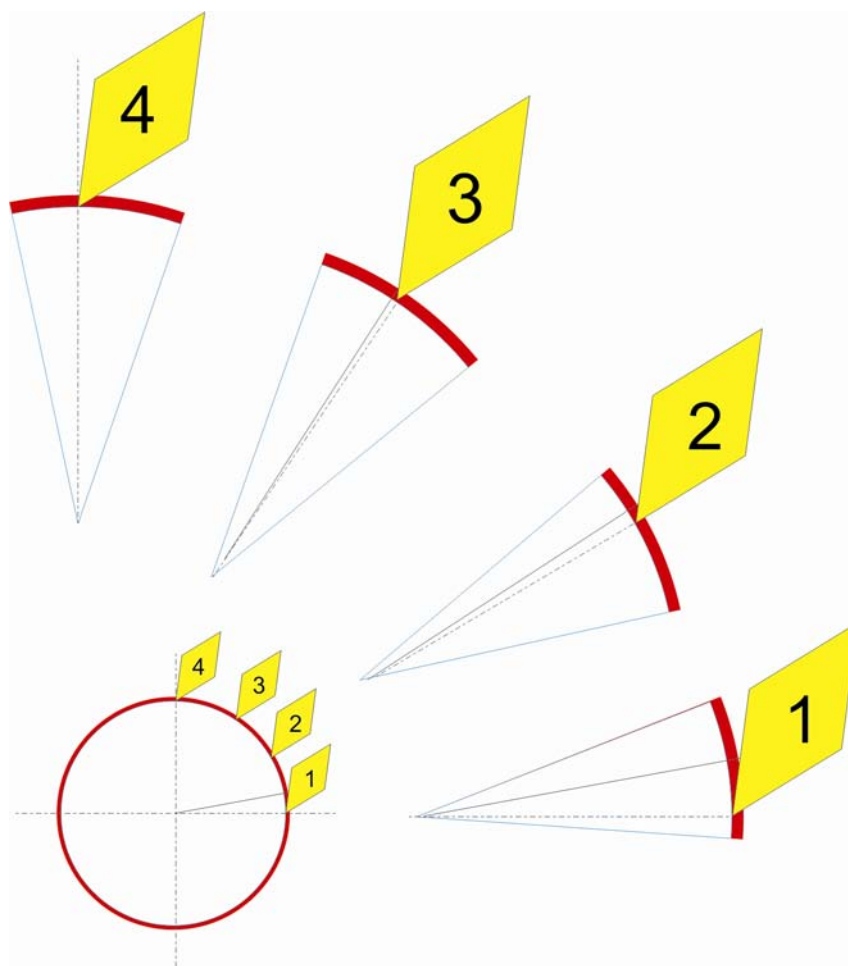
### 3.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΟΠΗΣ

Τόσο το μέγεθος, όσο και η μορφή των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της κοπής ενδιαφέρει πολλούς τομείς στα πλαίσια των μηχανουργικών κατεργασιών. Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να διατυπώσουν αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις για την περιγραφή της δύναμης κοπής. Καμία όμως από τις σχέσεις αυτές δεν περιλαμβάνει όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν τη δύναμη κοπής. Ο λόγος γι' αυτό είναι ο μεγάλος αριθμός των παραγόντων αυτών καθώς και το γεγονός ότι πολλοί από αυτούς δεν ακολουθούν κάποιο σταθερό νόμο ο οποίος θα μπορούσε να περιγραφεί με ικανοποιητική ακρίβεια.

Σ' αυτό το σημείο καλούμαστε να μελετήσουμε την καταλληλότερη μαθηματική σχέση η οποία θα περιλαμβάνει πλήρως τις συνθήκες κοπής των τεμαχίων μας.

Εξαιτίας της γεωμετρίας των τεμαχίων μας, δηλαδή σφαίρες, δημιουργείται ένα βασικό πρόβλημα στην εύρεση της μαθηματικής σχέσης υπολογισμού των δυνάμεων. Κατά την διάρκεια της κατεργασίας μεταβάλλεται διαρκώς το βάθος κοπής, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.6.

Εικόνα 3.6





Η μαθηματική σχέση η όποια συμπεριλαμβάνει όλες τις παραμέτρους κοπής των τεμαχίων μας είναι:

$$F_c = k_1 \cdot f^{k_2} \cdot V_c^{k_3} \cdot \alpha \quad (3.1)$$

Σκοπός μας είναι να υπολογίσουμε τις τιμές των συντελεστών  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  και του βάθους κοπής βάσει της γεωμετρίας της κατεργαζόμενης σφαίρας έτσι ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερη απόκλιση από τις τιμές των πειραματικών δυνάμεων.

Αρχικά, θα λογαριθμήσουμε την σχέση (3.1)

$$\ln F_c = \ln(k_1 f^{k_2} \cdot V_c^{k_3} \cdot \alpha) \quad (3.2)$$

Κάνοντας χρήση των ιδιοτήτων των λογαρίθμων η σχέση (3.2) μετατρέπεται:

$$\begin{aligned} \ln F_c &= \ln k_1 + k_2 \ln f + k_3 \ln V_c + \ln \alpha \\ \underbrace{\ln F_c - \ln \alpha}_y &= \underbrace{\ln k_1}_{x_1} + \underbrace{k_2}_{x_2} \cdot \underbrace{\ln f}_\beta + \underbrace{k_3}_{x_3} \cdot \underbrace{\ln V_c}_\gamma \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$y = x_1 + \beta \cdot x_2 + \gamma \cdot x_3$$

Έχοντας τρεις αγνώστους για να επιλύσουμε την εξίσωση την μετατρέπουμε σε μορφή πίνακα.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \beta_{12} & \gamma_{13} \\ 1 & \beta_{22} & \gamma_{23} \\ 1 & \beta_{32} & \gamma_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Έχοντας ως δεδομένο τις συνθήκες κοπής, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1, οι τιμές των συντελεστών  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  υπολογίστηκαν:

$$k_1 = 2452143$$

$$k_2 = 1,392302$$

$$k_3 = -0,94242$$

Συνεπώς, η σχέση (3.1) είναι της μορφής

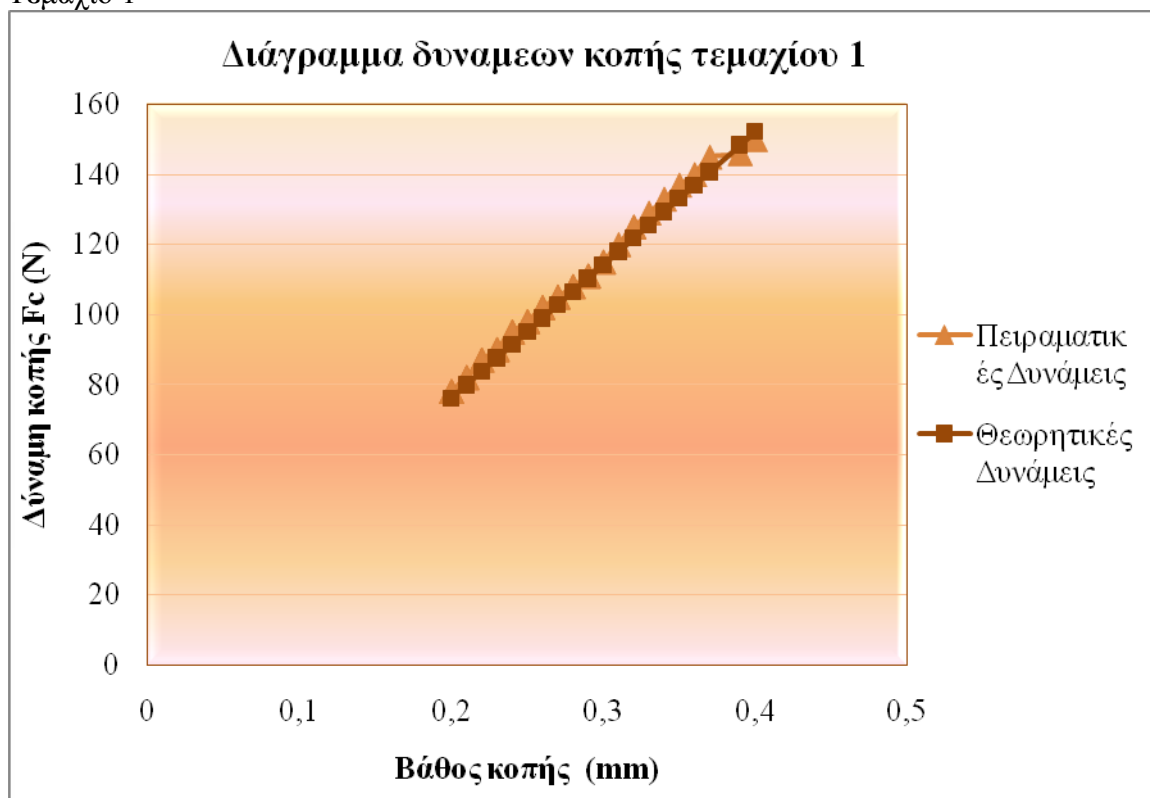
$$F_c = 2452143 \cdot f^{1,392302} \cdot V_c^{-0,94242} \cdot \alpha \quad (3.5)$$

Σ' αυτό το σημείο παρουσιάζεται ο Πίνακας 3.1 στον οποίο παρουσιάζονται οι συνθήκες κοπής για κάθε τεμάχιο, καθώς και οι πειραματικές και οι θεωρητικές τιμές της δύναμης κοπής.

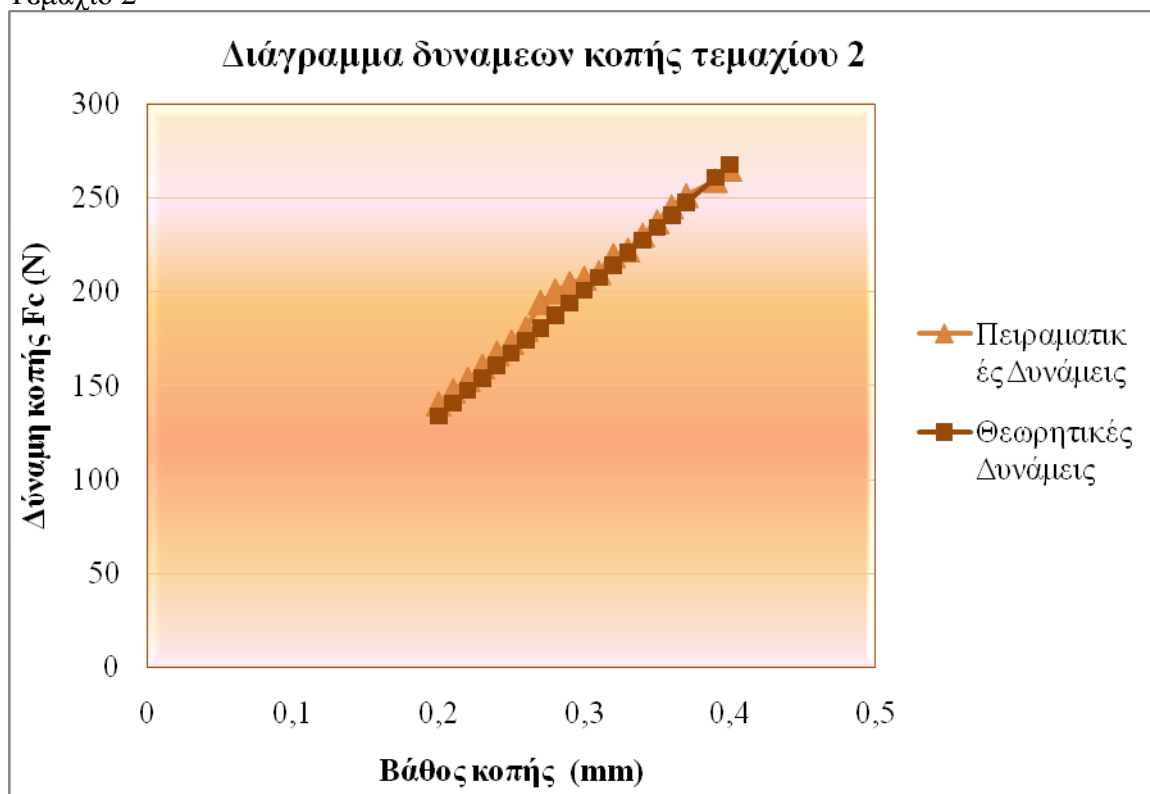
Πίνακας 3.1						
Τεμάχιο	Ταχύτητα	Πρώωση	Βάθος κοπής	Πειραματική δύναμη	Θεωρητική δύναμη	Ποσοστό απόκλισης
1	264	0,08	0,02	78,0	76,06	3%
2	264	0,12	0,02	140,0	133,77	5%
3	264	0,06	0,02	52,0	50,96	2%
4	352	0,06	0,02	36,0	38,86	7%
5	352	0,08	0,02	60,0	58,00	3%
6	352	0,12	0,02	107,0	102,00	5%
7	440	0,12	0,02	78,0	82,65	6%
8	440	0,08	0,02	43,0	47,00	9%
9	440	0,06	0,02	29,0	31,49	8%
10	440	0,06	0,01	15,0	15,74	5%
11	440	0,08	0,01	23,0	23,50	2%
12	440	0,12	0,01	42,0	41,33	2%
13	352	0,12	0,01	49,0	51,00	4%
14	352	0,08	0,01	27,0	29,00	7%
15	352	0,06	0,01	18,5	19,43	5%
16	264	0,06	0,01	26,0	25,48	2%
17	264	0,08	0,01	37,0	38,03	3%
18	264	0,12	0,01	67,0	66,88	0,17%

Παρακάτω παρουσιάζονται και διαγραμματικά οι πειραματικές και θεωρητικές τιμές των δυνάμεων κάθε τεμαχίου.

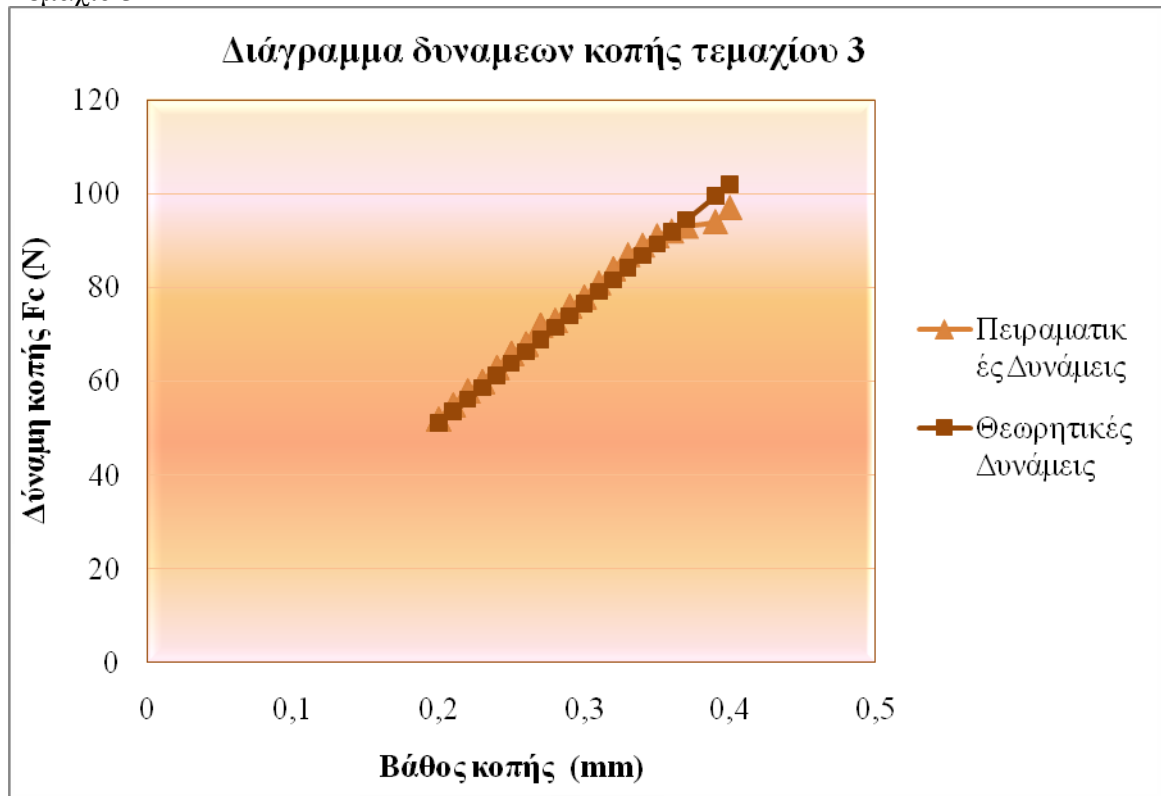
Τεμάχιο 1<sup>ο</sup>



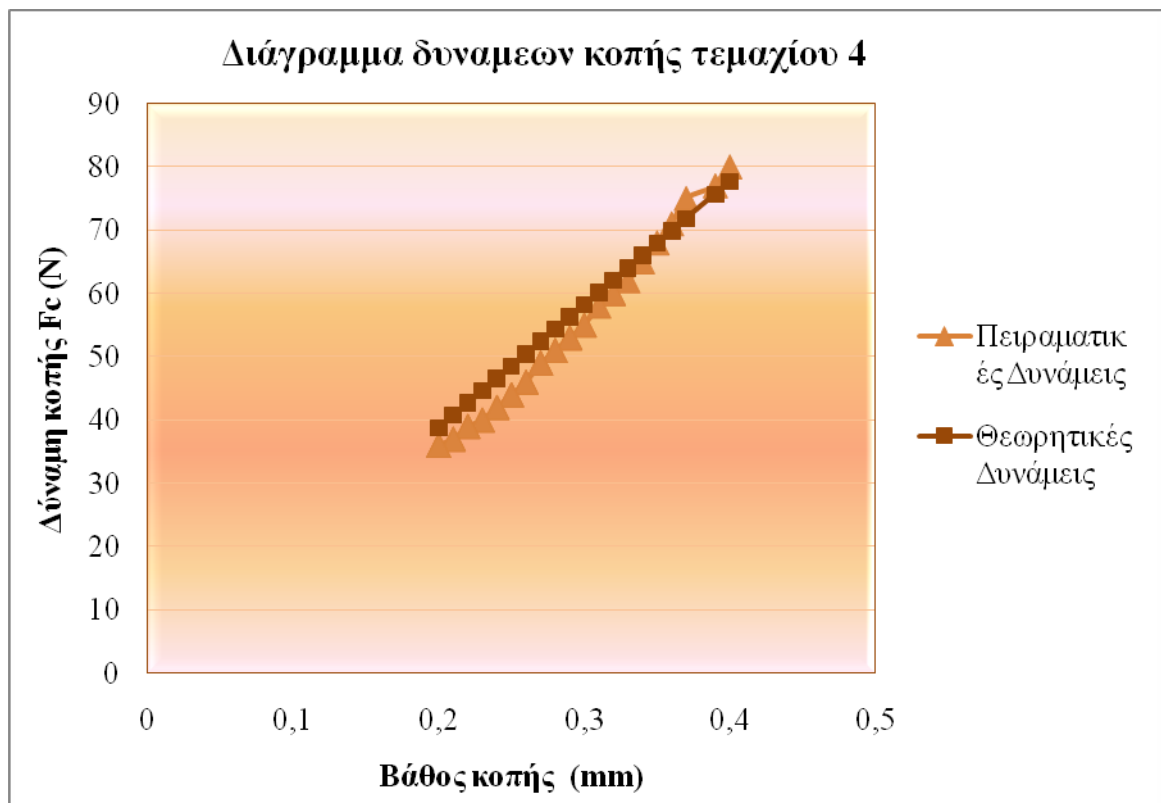
Τεμάχιο 2<sup>ο</sup>



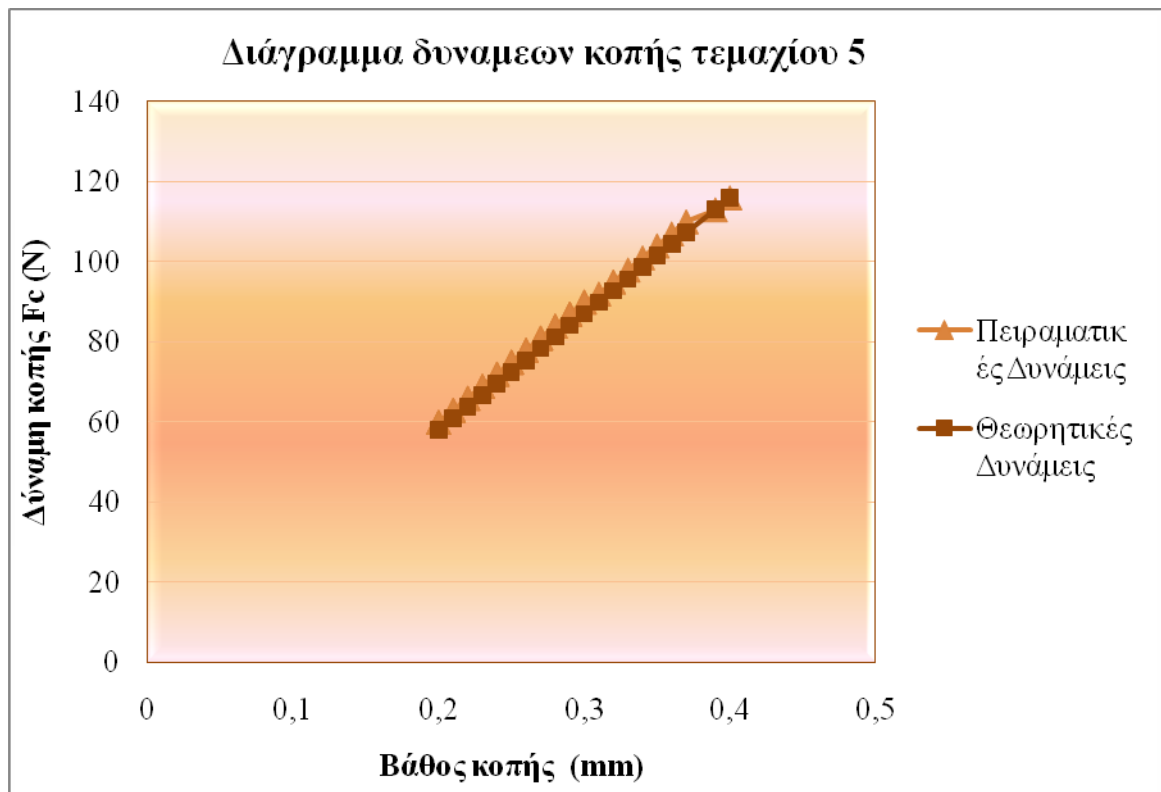
Τεμάχιο 3°



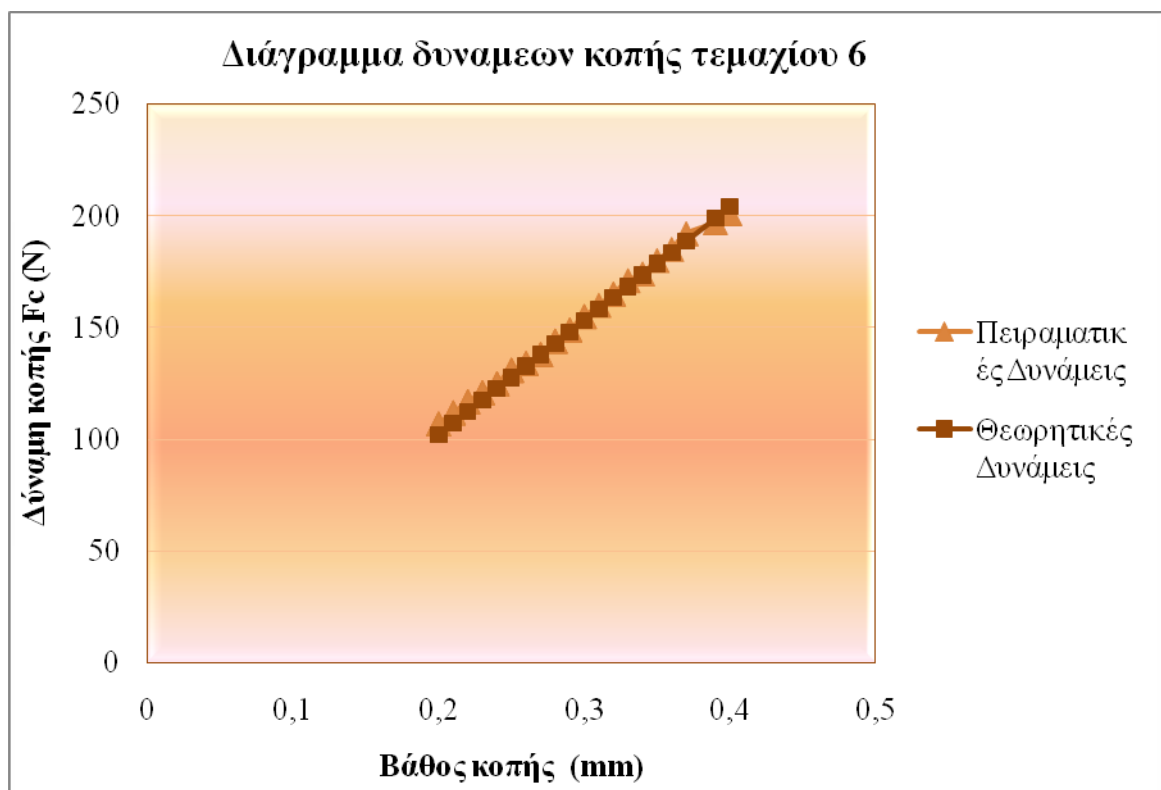
Τεμάχιο 4°



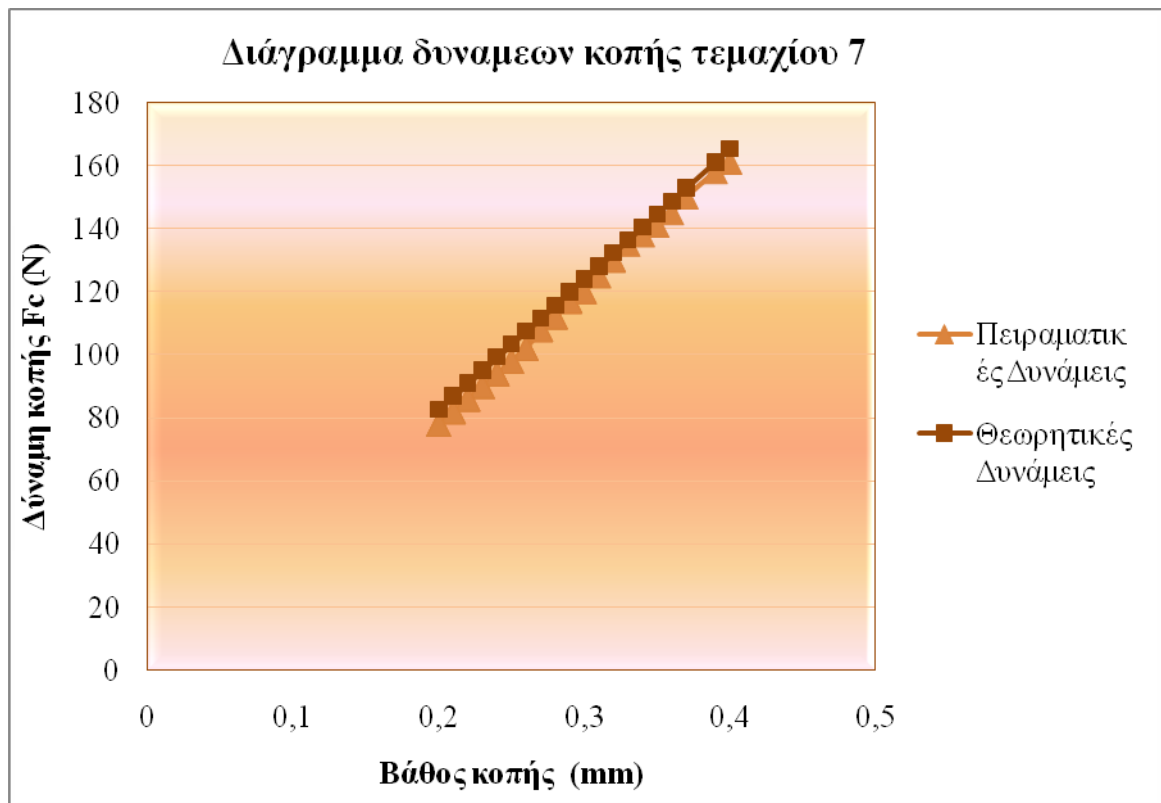
Τεμάχιο 5°



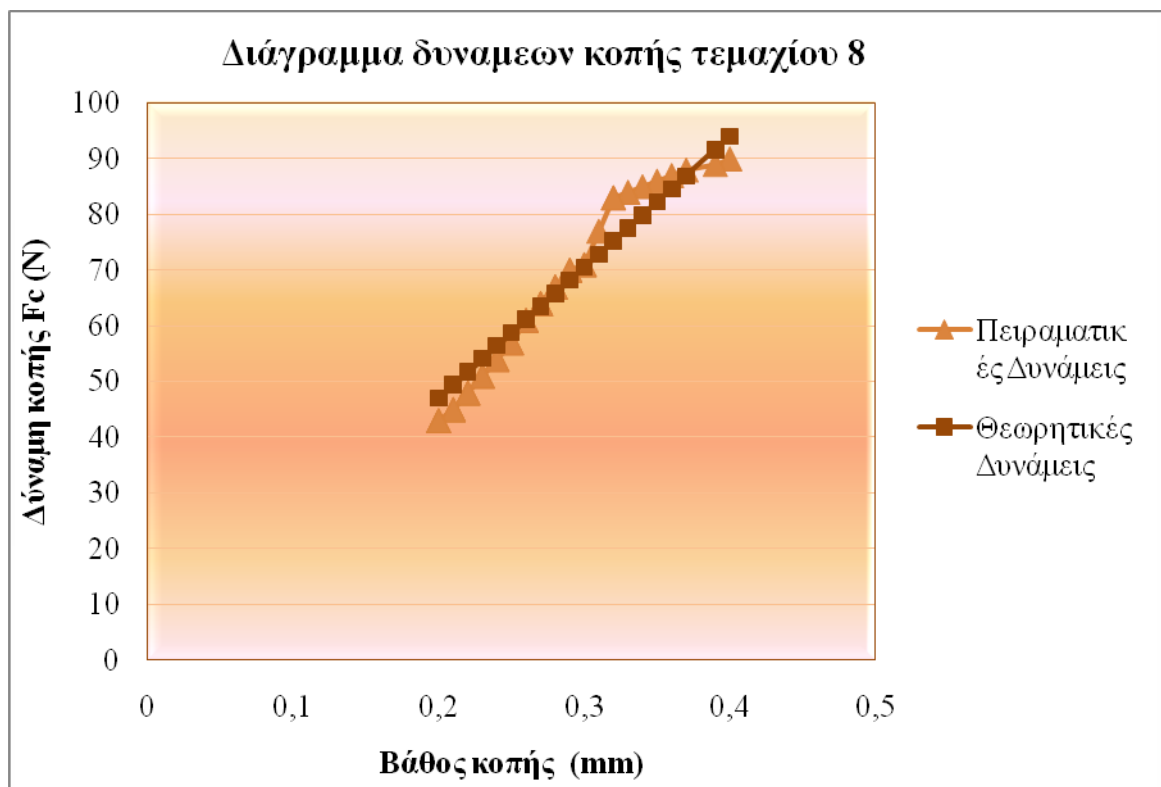
Τεμάχιο 6°



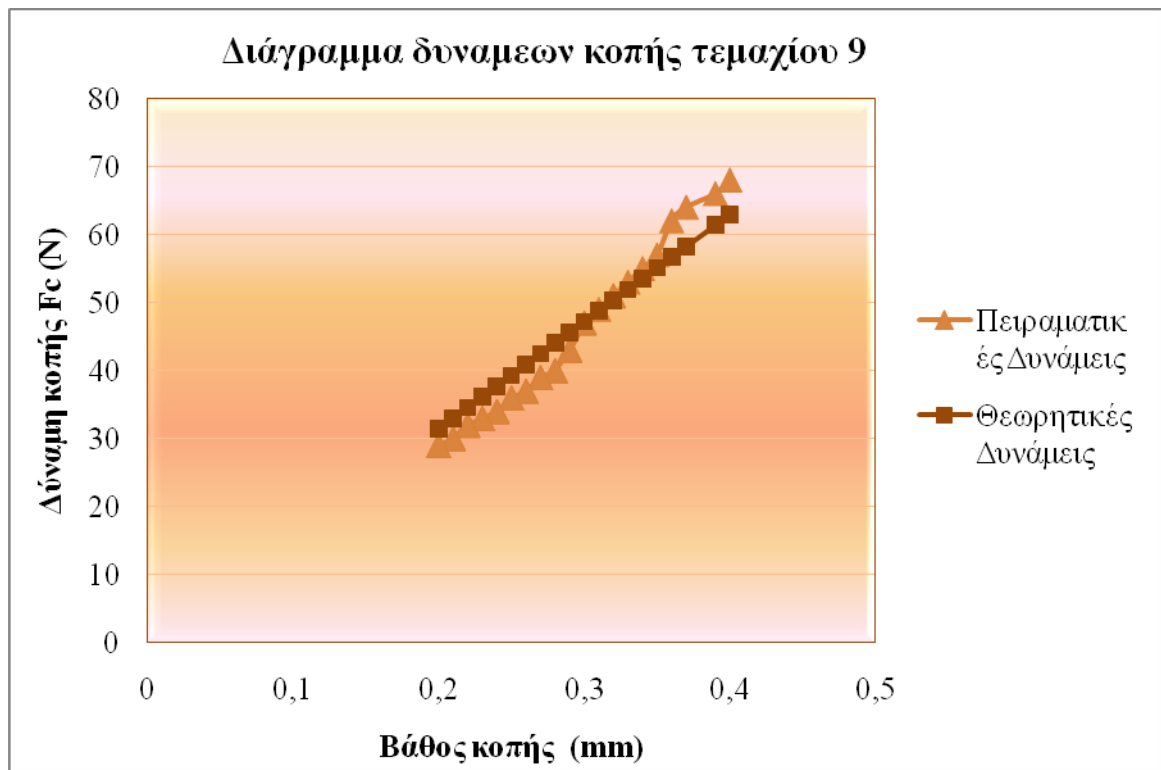
Τεμάχιο 7°



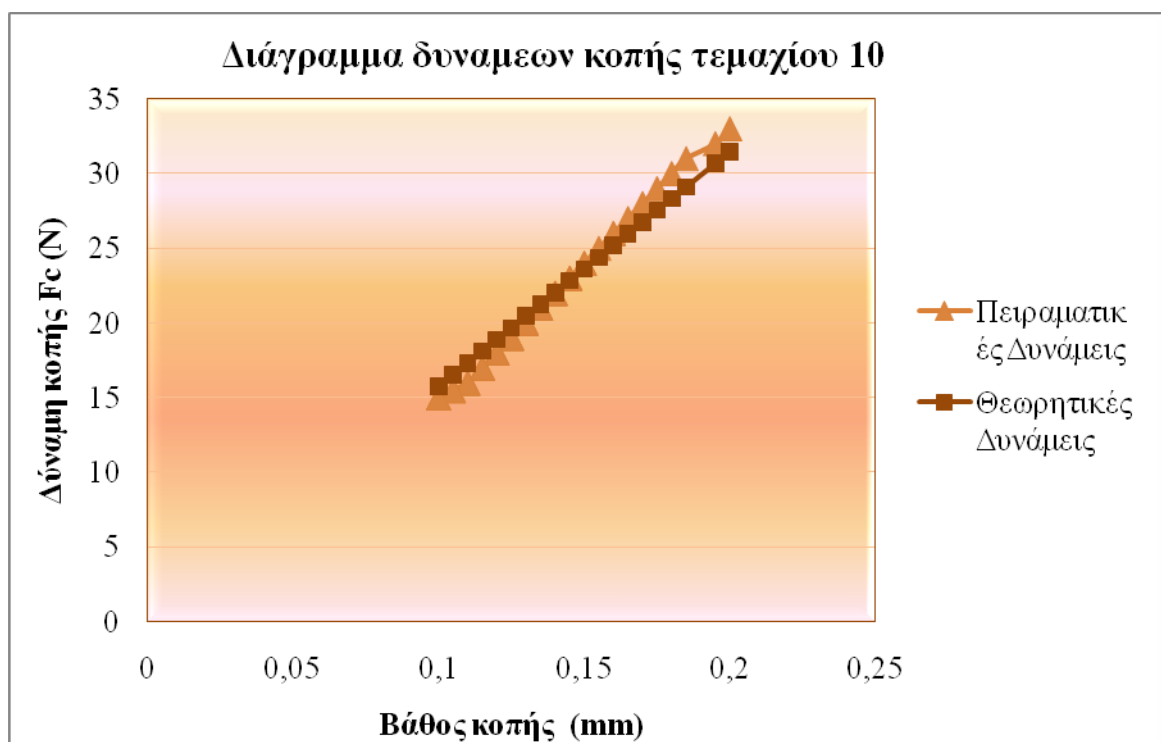
Τεμάχιο 8°



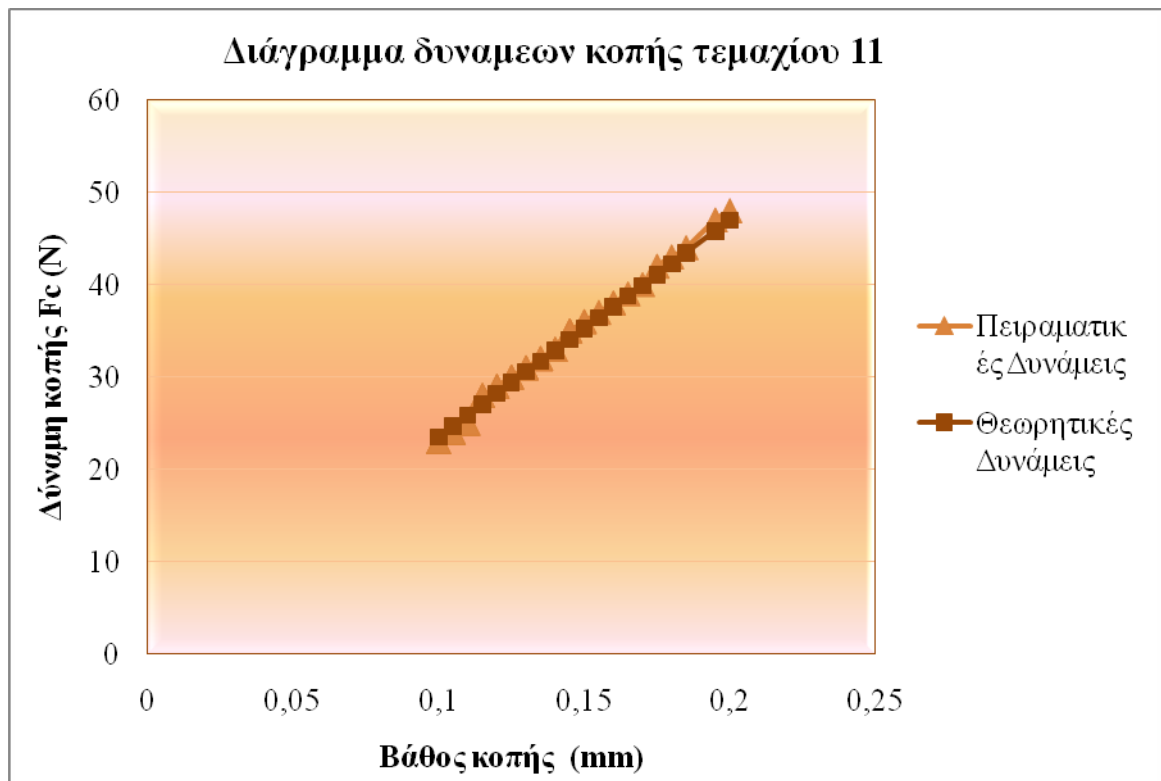
Τεμάχιο 9°



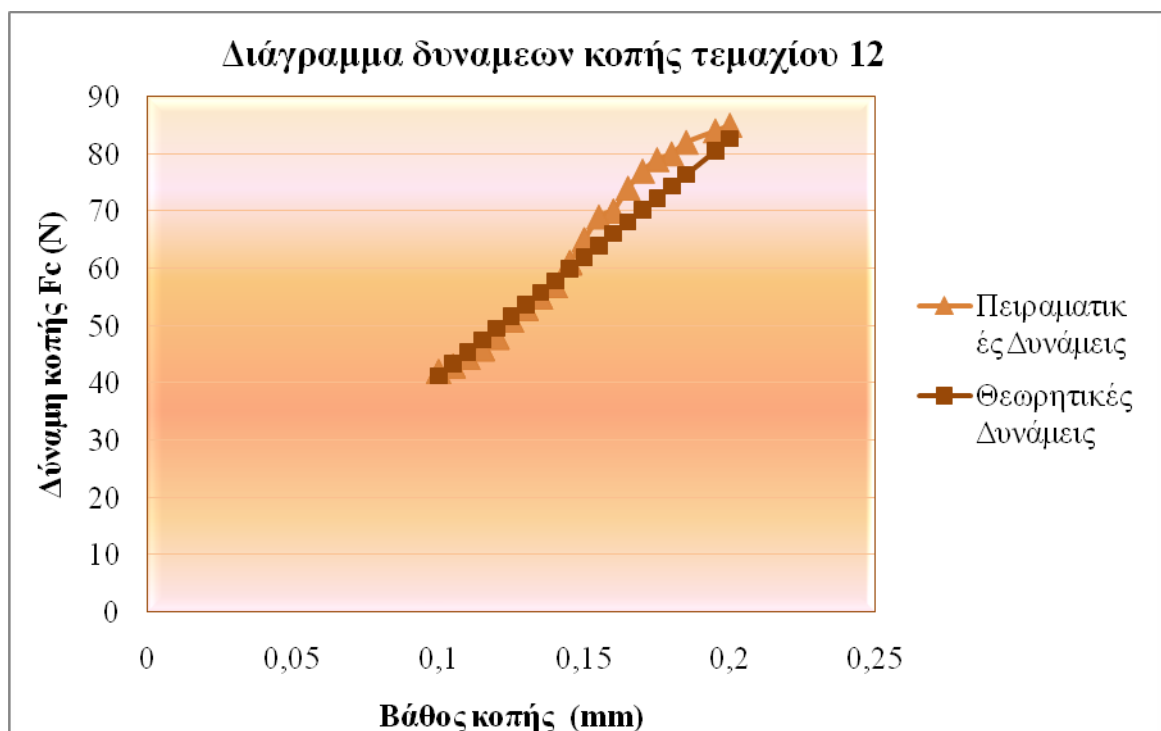
Τεμάχιο 10°



Τεμάχιο 11°

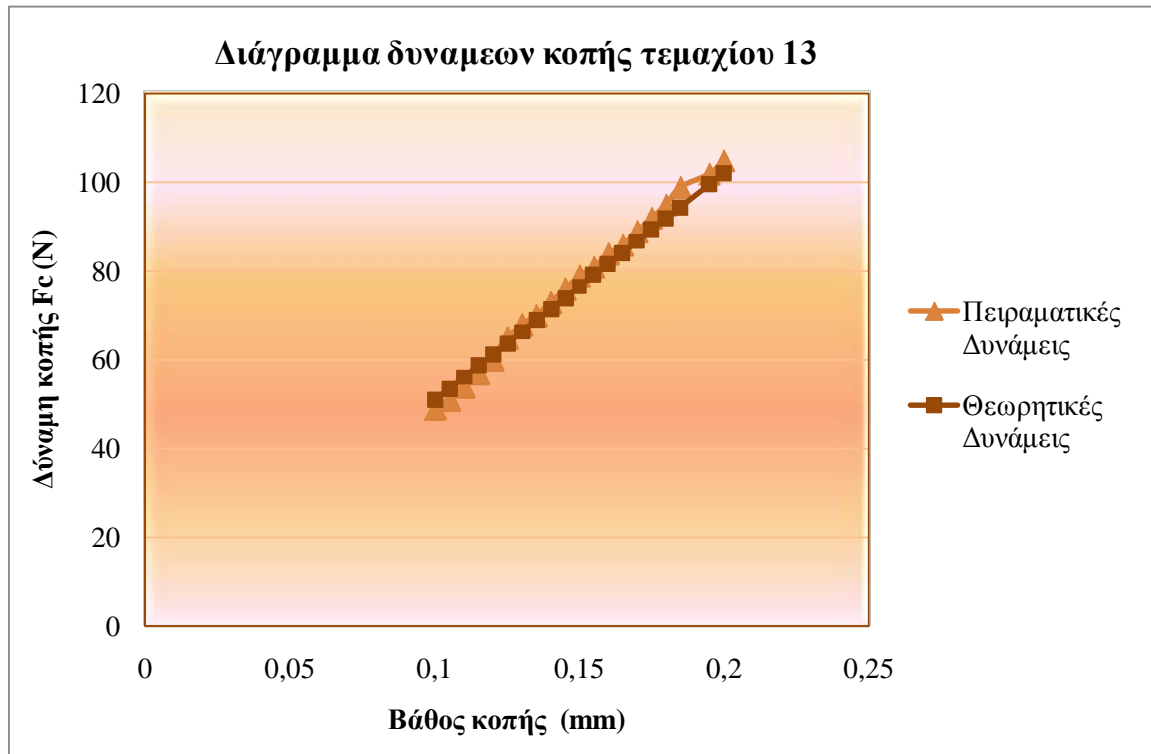


Τεμάχιο 12°

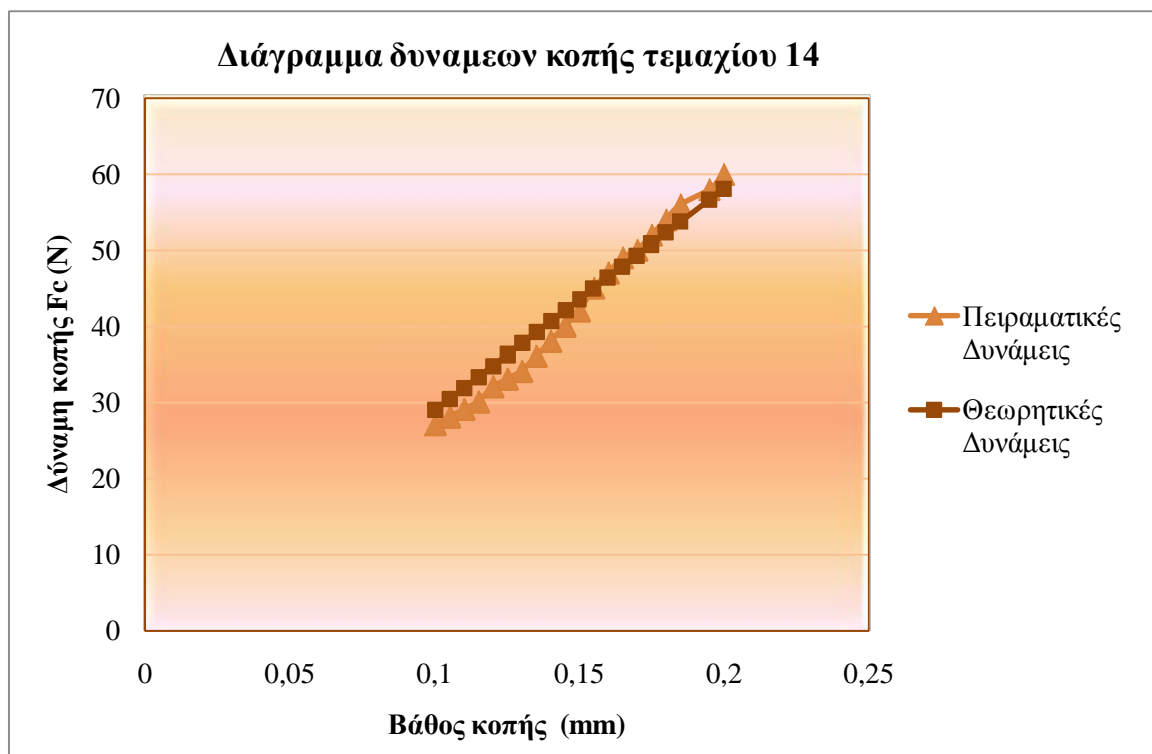




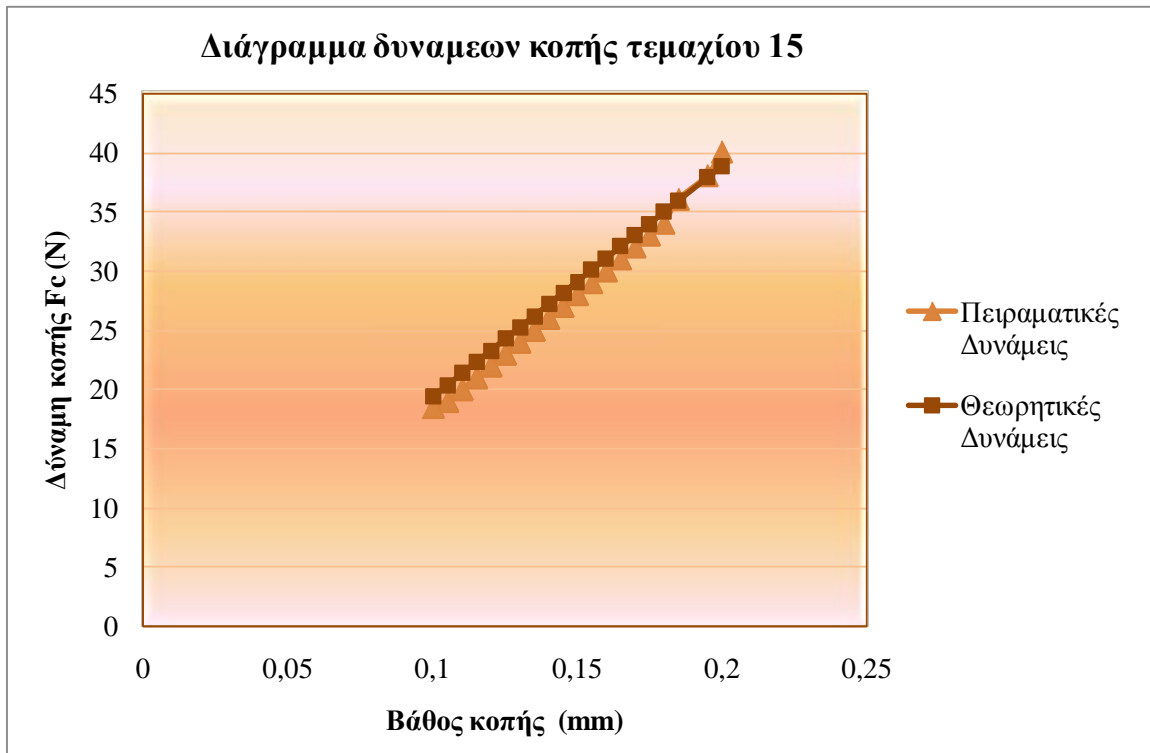
Τεμάχιο 13°



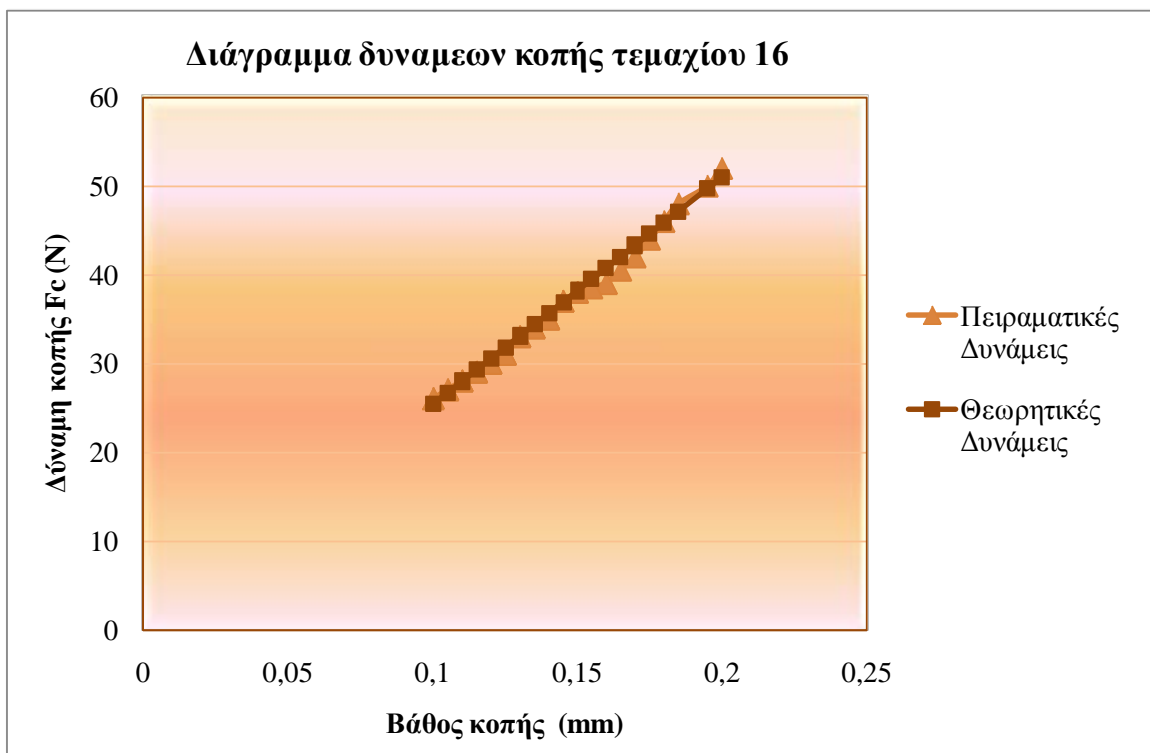
Τεμάχιο 14°



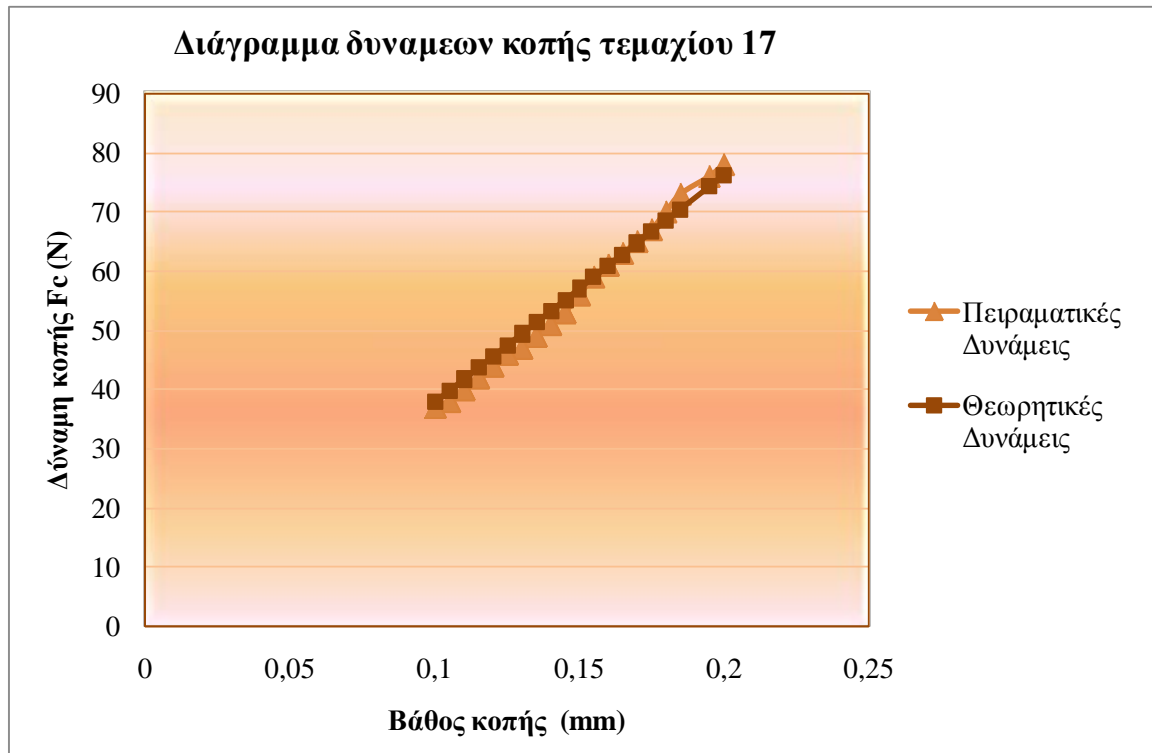
Τεμάχιο 15°



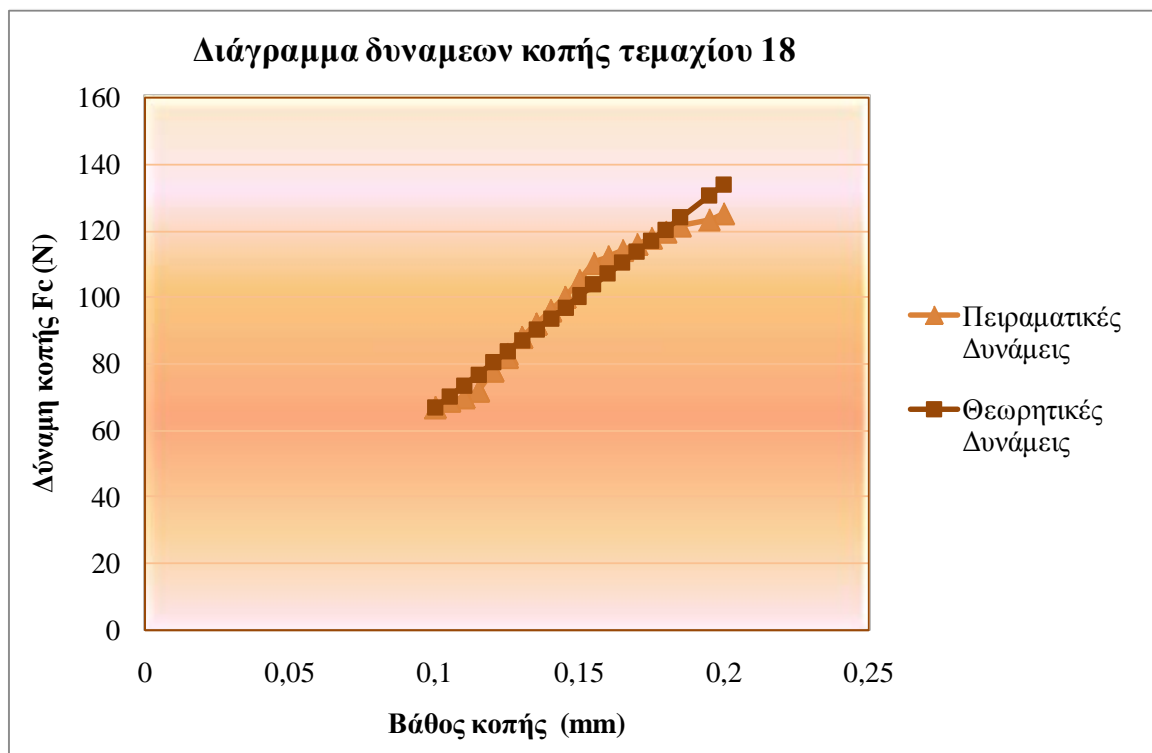
Τεμάχιο 16°



Τεμάχιο 17°



Τεμάχιο 18°



### 3.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ( ANOVA )

Θα πρέπει να γίνει έλεγχος των αποτελεσμάτων που εξάγαμε γιατί ο αριθμός των μετρήσεων μας δεν είναι αρκετά μεγάλος έτσι ώστε να είμαστε σίγουροι για την ακρίβεια της μαθηματικής σχέσης. Επιλέγουμε, λοιπόν, να κάνουμε ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA).

#### 3.5.1 Θεωρητική εισαγωγή της ανάλυσης της διακύμανσης.

Η ανάλυση της διακύμανσης (ANalysis Of Variance – ANOVA) είναι μία στατιστική μέθοδος με την οποία η μεταβλητότητα που υπάρχει σ' ένα σύνολο δεδομένων διασπάται στις επιμέρους συνιστώσες της με στόχο την κατανόηση της σημαντικότητας των διαφορετικών πηγών προέλευσής της. Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας οφείλεται στον θεμελιωτή της σύγχρονης στατιστικής επιστήμης, άγγλο στατιστικό Sir Ronald Aylmer Fisher (1890-1962). Στην πραγματικότητα η ANOVA περιλαμβάνει μία ομάδα στατιστικών μεθόδων καταλλήλων για την ανάλυση δεδομένων που προκύπτουν από πειραματικούς σχεδιασμούς.

Τα δεδομένα ενός δείγματος ανάλογα με την προέλευσή τους διακρίνονται σε παρατηρήσεις (observational sampling) ή σε πειραματικά (designed sampling). Στην πρώτη κατηγορία ο στατιστικός ερευνητής απλά παρατηρεί τις τιμές που εμφανίζονται χωρίς να έχει δυνατότητα επέμβασης στις αντίστοιχες μεταβλητές. Αντίθετα στη δεύτερη κατηγορία ο στατιστικός ερευνητής προσπαθεί να ελέγξει τα επίπεδα μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων (independent) μεταβλητών προκειμένου να προσδιορίσει την επίδραση που έχουν πάνω στην υπό μελέτη μεταβλητή που καλείται εξαρτημένη (dependent) η απόκριση (response).

Στόχος κάθε στατιστικού πειράματος είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών πάνω στην απόκριση. Οι μεταβλητές αυτές αναφέρονται συνήθως σαν παράγοντες (factors) και μπορεί να είναι είτε ποσοτικές είτε ποιοτικές. Οι τιμές του παράγοντα που προσδιορίζονται στο πείραμα λέγονται επίπεδα (levels). Σε ένα πείραμα με ένα παράγοντα οι μεταχειρίσεις (treatments) του πειράματος είναι τα επίπεδα του παράγοντα. Σε ένα πείραμα με δύο ή περισσότερους παράγοντες οι μεταχειρίσεις είναι οι συνδυασμοί παραγόντων-επιπέδων.

### 3.5.2 Αποτελέσματα ανάλυσης της διακύμανσης

Με βάση τις πειραματικές, θεωρητικές τιμές των δυνάμεων κοπής, την ταχύτητα κοπής, του βάθους κοπής, της προώσεως και κάνοντας χρήση του στατιστικού λογισμικού MINITAB λάβαμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

#### ANOVA

##### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ versus ΤΑΧΥΤΗΤΑ; ΠΡΟΩΣΗ; ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ

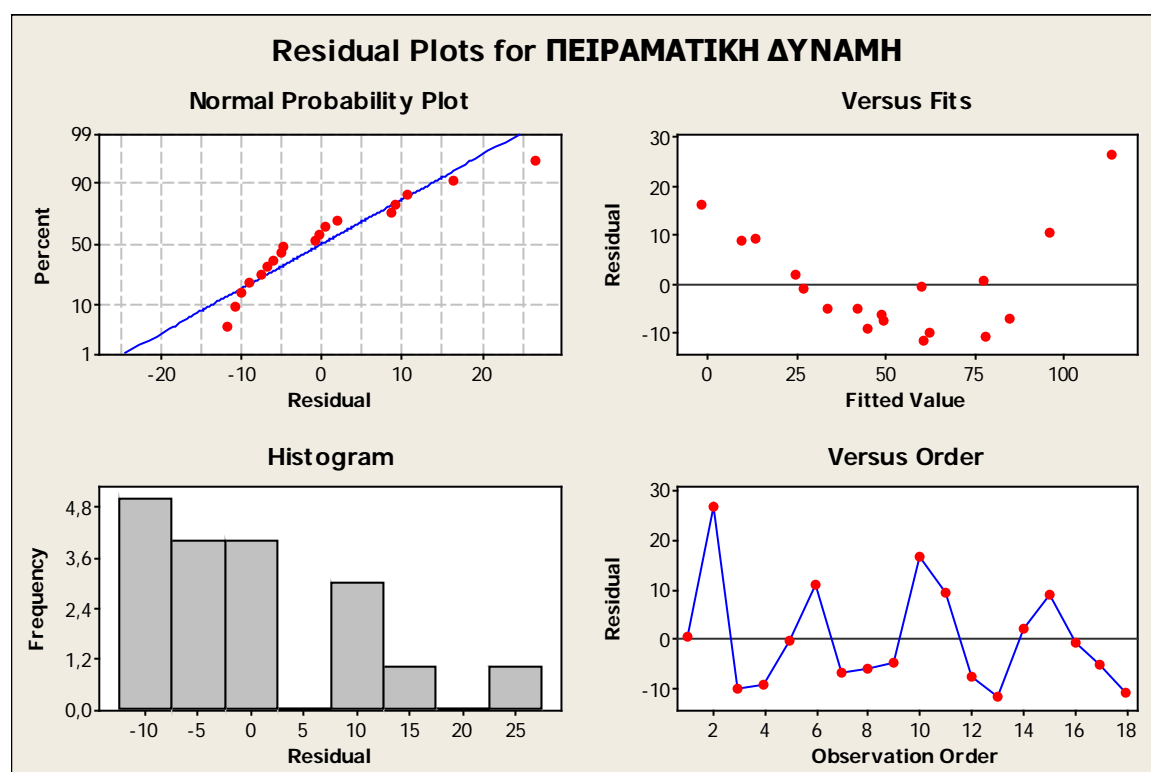
Factor	Type	Levels	Values
ΤΑΧΥΤΗΤΑ	random	3	264; 352; 440
ΠΡΟΩΣΗ	random	3	0,06; 0,08; 0,12
ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ	random	2	0,1; 0,2

Analysis of Variance for ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ

Source	DF	SS	MS	F	P
ΤΑΧΥΤΗΤΑ	2	2442,4	1221,2	7,68	0,007
ΠΡΟΩΣΗ	2	8252,2	4126,1	25,94	0,000
ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ	1	5635,7	5635,7	35,43	0,000
Error	12	1909,0	159,1		
Total	17	18239,2			

S = 12,6128    R-Sq = 89,53%    R-Sq(adj) = 85,17%

#### Residual Plots for ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ



## ANOVA

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ versus ΤΑΧΥΤΗΤΑ; ΠΡΟΩΣΗ; ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ

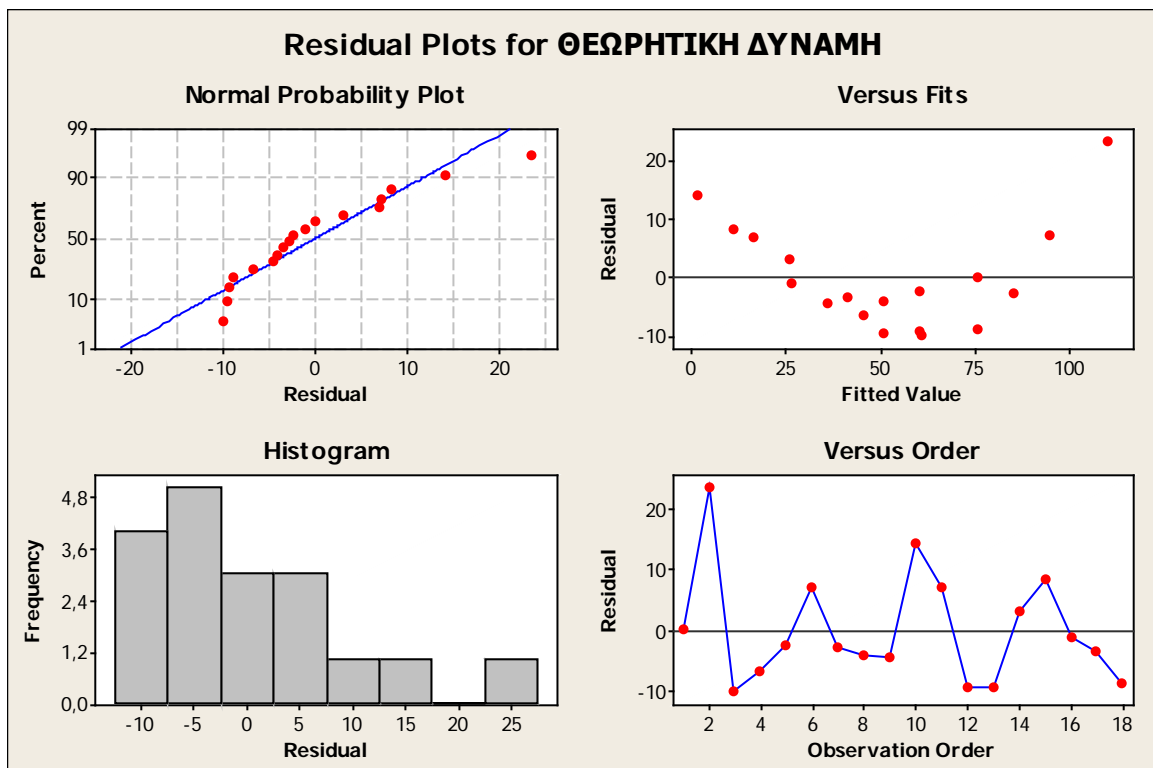
Factor	Type	Levels	Values
ΤΑΧΥΤΗΤΑ	random	3	264; 352; 440
ΠΡΟΩΣΗ	random	3	0,06; 0,08; 0,12
ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ	random	2	0,1; 0,2

Analysis of Variance for ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ

Source	DF	SS	MS	F	P
ΤΑΧΥΤΗΤΑ	2	1898,4	949,2	8,15	0,006
ΠΡΟΩΣΗ	2	7661,5	3830,7	32,89	0,000
ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ	1	5352,7	5352,7	45,95	0,000
Error	12	1397,8	116,5		
Total	17	16310,3			

S = 10,7926    R-Sq = 91,43%    R-Sq(adj) = 87,86%

### Residual Plots for ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήσαμε τις δυνάμεις στις κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων. Σκοπός μας ήταν η εύρεση ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο θα ικανοποιεί πλήρως τις συνθήκες κοπής στην κατεργασία κοπής σφαιρών.

Μέσα από προσεκτική μελέτη και επεξεργασία των υπαρχόντων μαθηματικών μοντέλων καταλήξαμε στην εύρεση του κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου.

Εφαρμόσαμε το παραπάνω μαθηματικό μοντέλο στις πειραματικές μετρήσεις των δυνάμεων κοπής που λάβαμε στο εργαστήριο. Παρατηρούμε ότι η απόκλιση μεταξύ των πειραματικών τιμών και το θεωρητικών τιμών τοποθετείται κάτω από το όριο του 10%. Από τα πειραματικά διαγράμματα, παρατηρείται ότι οι δυνάμεις όσο αυξάνεται η ταχύτητα μειώνονται ενώ αυξάνονται όσο ελαττώνεται το βάθος κοπής και η πρόωση. Από τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα της ανάλυσης της διακύμανσης παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές και η συμπεριφορά των πειραματικών και θεωρητικών τιμών της δύναμης κοπής σε σχέση με το βάθος κοπής, την ταχύτητα κοπής και την πρόωση είναι σχεδόν ίδια με ελάχιστες αποκλίσεις. Εκ των οποίων συμπεραίνουμε ότι το μαθηματικό μας μοντέλο ανταποκρίνεται των απαιτήσεων μας.

Εν κατακλείδι, μπορούμε να πούμε ότι το τελικό αποτέλεσμα κρίνεται ικανοποιητικό γιατί καταφέραμε να βρούμε το κατάλληλο μοντέλο το οποίο να μπορεί είναι να δώσει την μεταβολή των δυνάμεων κοπής που είναι αισθητή στις κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων καθώς επίσης την αισθητή μεταβολή του βάθους κοπής.

Σαφέστατα ανοίγεται δρόμος για μεγαλύτερη μελέτη και εφαρμογή των υψηλών ταχυτήτων κοπής κατά την κατεργασία τεμαχίων. Μέσα από την εφαρμογή υψηλών ταχυτήτων στις κατεργασίες, η παραγωγικότητα των κατεργασιών έχει διαρκώς τάσεις ανάπτυξης αλλά και η ποιότητα των προϊόντων παρουσιάζει δυνατότητες βελτίωσης.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Δ. Ε. Μανωλάκος, Αδημοσίευτες σημειώσεις, Ε.Μ.Π.
- [2] Πέτρος Γ. Πετρόπουλος, “Μηχανουργική Τεχνολογία-Τεχνολογία κατεργασιών κοπής των μετάλλων”, τόμος ΙΙ-1 Εκδόσεις Ζήση-Θεσσαλονίκη 1998
- [3] S. Kalpakjian, “Manufacturing Engineering and Technology” Proceedings of the 2000 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '00), Takamatsu, Japan, October 30 - November 5 2000, pp. 245-250.
- [4] Wassila Bouzid, “Cutting parameter optimization to minimize production time in high speed turning”, Journal of Materials Processing Technology 161 (2005) 388–395
- [5] D. Dudzinski, A. Molinari, H. Schulz, “Metal cutting and high speed machining”, Kluwer Academic-Plenum Publishers, New York (2002)
- [6] John A. Schey, “Introduction to Manufacturing Processes”, Mc Graw Hill, Third edition, (2000)
- [7] Milton C. Shaw, “Metal cutting principles” Oxford science publications, 1968.  
E. M. Trent, P. K. Wright, “Metal Cutting”, Butterworth-Heineman
- [8] R.S. Pawade, Suhas S. Joshi, P.K. Brahmanekar, M. Rahmanc, “ An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718”, Journal of Materials Processing Technology 192–193 (2007) 139–146
- [9] N. Ahmed, A.V. Mitrofanov, V.I. Babitsky, V.V. Silberschmidt, “Analysis of forces in ultrasonically assisted turning”, Journal of Sound and Vibration 308 (2007) 845–854



- [10] G. Sutter, A. Molinari, “Analysis of the Cutting Force Components and Friction in High Speed Machining”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* Vol. 127, May 2005
- [11] Mustafa Bakkal, Albert J. Shih, Ronald O. Scattergood, “Chip formation, cutting forces, and tool wear in turning of Zr-based bulk metallic glass”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44 (2004) 915–925
- [12] R.S. Pawade, Suhas S. Joshi, P.K. Brahmkar, “Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008) 15–28
- [13] C.K. Toh, “Static and dynamic cutting force analysis when high speed rough milling hardened steel”, *Materials and Design* 25 (2004) 41–50
- [14] L. Li, N. He, M. Wang, Z.G. Wang, “High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts”, *Journal of Materials Processing Technology* 129 (2002) 127–130
- [15] Dr. Sinan Badrawy, “Cutting Dynamics of High Speed Machining”, *WolfTracks* Vol. 8, Issue 1 – 2001
- [16] H.K. Tonshoff, T. Friemuth, P. Andrae, C. Lapp, “High-speed cutting – fundamentals and machine tool development”, University of Hannover
- [17] W.S. Lin, B.Y. Lee, C.L. Wu, “Modeling the surface roughness and cutting force for turning”, *Journal of Materials Processing Technology* 108 (2001) 286-293
- [18] Tugrul Ozel, Taylan Altan, “Process simulation using finite element method — prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in high speed flat end milling”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40 (2000) 713–738

- [19] Sabahudin Ekinovic, Edin Begovic, Amira Silajdzija, “Comparison of machined surface quality obtained by high-speed machining and conventional turning”, *Machining Science and Technology*, 11:4, 531 — 551
- [20] Li Qian, Mohammad Robiul Hossan, “Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts”, *Journal of Materials Processing Technology* 191 (2007) 274–278
- [21] Mehdi Remadna, Jean Francois Rigal, “Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts”, *Journal of Materials Processing Technology* 178 (2006) 67–75
- [22] D.I. Lalwani, N.K. Mehta, P.K. Jain, “Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel”, *journal of materials processing technology* 206 (2008) 167–179
- [23] Pasko, R. - Przybylski, L. & Slodki, B, “High speed machining (HSM) – the effective way of modern cutting”, *International Workshop CA Systems and Technologies*
- [24] R. Malz, E. Brinksmeier, W. Preuß, J. Kohlscheen, H.R. Stock, P.Mayr, “Investigation of the diamond machinability of newly developed hard coatings”, *Precision Engineering* 24 (2000) 146–152
- [25] P.F. Feng, D.W. Yu, Z.J. Wu, E. Uhlmann, “Jaw-chuck stiffness and its influence on dynamic clamping force during high speed turning”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (2008)
- [26] [www.kistler.com](http://www.kistler.com), 3-Component Dynamometer
- [27] S. Ekinovic, S. Dolinsek E. Begovic, “Machinability of 90MnCrV8 steel during high-speed machining”, *Journal of Materials Processing Technology* 162–163 (2005) 603–608

- [28] Rodolfo Haber-Guerra, Rodolfo Haber-Haber, José R. Alique, “Controlling Force Based on Radial Fuzzy Functions in High-Speed Machining Processes”
- [29] G. Sutter, A. Molinari, L. Faure, J. R. Klepaczko, D. Dudzinski, “An Experimental Study of High Speed Orthogonal Cutting”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* Vol. 120, February 1998
- [30] S. Smith, J. Tlustý, “Current Trends in High-Speed Machining”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* Vol. 11, November 1997
- [31] C. Liu, Q. Bi, A. Matthews, “Tribological and electrochemical performance of PVD TiN coatings on the femoral head of Ti–6Al–4V artificial hip joints”, *Surface and Coatings Technology* 163–164 (2003) 597–604
- [32] Tugrul özel, Tsu-Kong Hsu, Erol Zeren, “Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel”, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 2004
- [33] Μηνιαία Τεχνική Επιθεώρηση, “Εργαλειομηχανές: High speed machining” Μάρτιος 2001
- [34] Wei-Shin Lin, Tun-Hao Liang, Po-Chun Huang, Tzu-Lun Huang and Hsin-Hsien Wu, “The study of high speed turning of the harden mold steel by CBN cutting tools”, *Journal of Chinese Society of Mechanical Engineering*
- [35] T. I. El-Wardany, H. A. Kishawy, M. A. Elbestawi, “Surface Integrity of Die Material in High Speed Hard Maching, Part 1: Micrographical Analysis”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* November 2000, Vol. 122/620-631
- [36] T. I. El-Wardany, H. A. Kishawy, M. A. Elbestawi, “Surface Integrity of Die Material in High Speed Hard Maching, Part 2: Microhardness Variations and

Residual Stresses”, Journal of Manufacturing Science and Engineering November 2000, Vol. 122/632-641

- [37] D. Dudzinski, A. Devillez, A. Moufki, D. Larrouquere, V. Zerrouki, J. Vigneau, “A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 439–456
- [38] R. Komanduri, “Cutting-tool materials”, The encyclopedia of materials science & technology, Mechanical and aerospace engineering, Oklahoma state university, USA
- [39] E. M. Trent, P. K. Wright, “Metal Cutting”, Butterworth-Heineman
- [40] E. Brinksmeier, P. Mayr, T. Lubben, P. Pouteau, P. Diersen, “Influence of material properties on surface integrity and chip formation in high speed turning”.