

Μάρτιος
2012

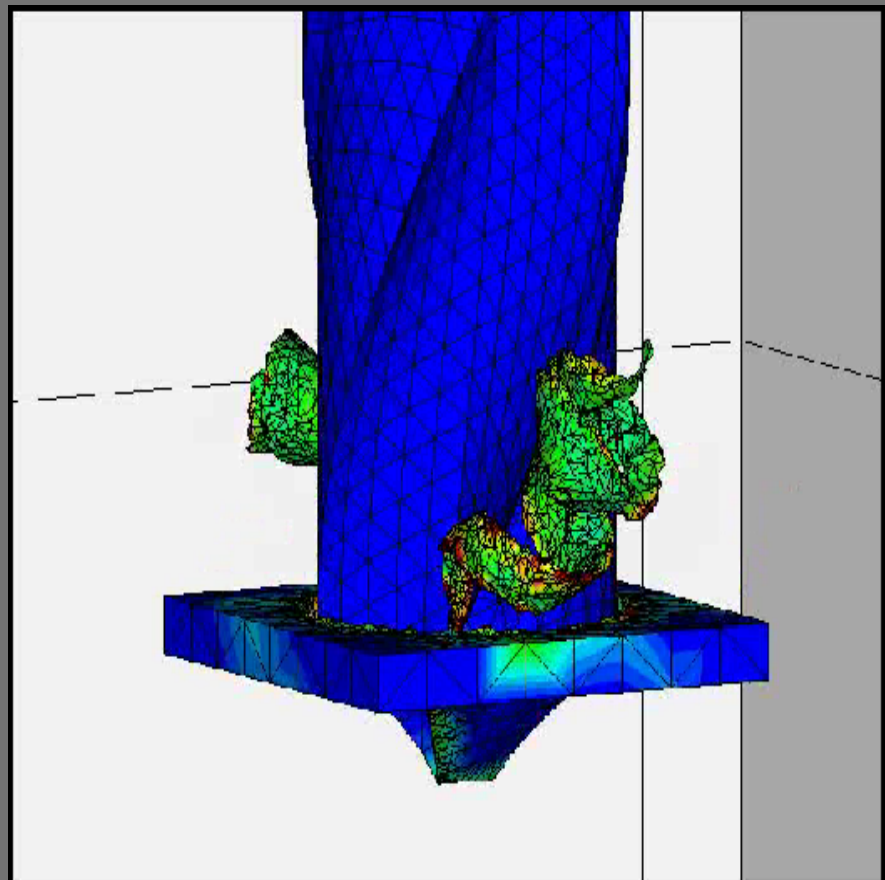


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

*Αριθμητική Προσομοίωση της Διάτρησης
Αλουμινίου*



Όνομα : Τοτόνης Ταουλάντ
Επιβλέπων : Μανωλάκος Δημήτριος



(Υπογραφή)

.....

ΤΟΤΟΝΗΣ ΤΑΟΥΛΑΝΤ

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Δημήτριο Ε. Μανωλάκο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση του θέματος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου.

Ευχαριστώ θερμά επίσης τον διδάκτορα Μαρκόπουλο Άγγελο για τη συνεργασία, την υποστήριξη καθώς και την υπομονή που έδειξε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Την μητέρα μου και τον αδερφό μου για τη συμπαράσταση και την υπομονή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου τον άνθρωπο μου, την Πλάκου Χόλτα, η οποία στάθηκε συνεχώς δίπλα μου και συνέβαλε καθοριστικά για την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι μια μελέτη της κατεργασίας διάτρησης αλουμινίου. Σκοπός είναι η μελέτη των δυνάμεων κοπής, πώς επιδρά δηλαδή η μεταβολή των συνθηκών κοπής στις δυνάμεις κοπής καθώς και ο έλεγχος της μοντελοποίησης και προσομοίωσης αυτών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η προσέγγιση με αριθμητική προσομοίωση με το εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων AdvantEdge της εταιρίας τεχνικού λογισμικού Third Wave Systems επαληθεύεται με εργαστηριακά αποτελέσματα. Η χρήση του λογισμικού μας δίνει τη δυνατότητα να μειώσουμε τον αριθμό των απαραίτητων πειραμάτων και εργαλείων μειώνοντας έτσι κατακόρυφα το κόστος.

Η οργάνωση της διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής:

1^ο κεφάλαιο. Αρχικά γίνεται παράθεση των κυριότερων χαρακτηριστικών της κοπής των μετάλλων όπως του κοπτικού εργαλείου και του αποβλήτου. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις συνθήκες κοπής και ποια είναι η σημασία τους, στα είδη κοπής, στη μορφολογία και το σχηματισμό του αποβλήτου.

2^ο κεφάλαιο. Δίνονται στοιχεία για το αλουμίνιο, τις ιδιότητες, τις χρήσεις του, τη δομή του, την κατεργασιμότητά του. Μετά περιγράφεται η μέθοδος διάτρησης με δρόπανο και τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας των εργαλείων καθώς και της κινηματικής που διέπει την κατεργασία.

3^ο κεφάλαιο. Γίνεται μια αναφορά στην ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό δυνάμεων, ροπών, θερμοκρασιών, καθώς και η παρουσίαση του εμπορικού προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης αναλύεται η επιλογή των παραμέτρων μοντελοποίησης. Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων των υπολογισμών χρησιμοποιήθηκε το ενσωματωμένο πρόγραμμα TecPlot.

4^ο κεφάλαιο. Για κάθε προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε δίνονται τα αποτελέσματα των αναπτυσσόμενων δυνάμεων, ροπών, θερμοκρασιών και ισχύων.

5^ο κεφάλαιο. Αναλύονται τα συμπεράσματα από τη διαδικασία που ακολουθήθηκε.

Τέλος, δίνεται η Βιβλιογραφία.

Πίνακας περιεχομένων

1	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΘΕΩΡΙΑ ΚΟΠΗΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ.....	7
1.1	Εισαγωγικές έννοιες	7
1.1.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου.....	7
1.1.2	Χαρακτηριστικά του αποβλήτου.....	8
1.1.3	Συνθήκες κοπής και η σημασία τους.....	9
1.1.4	Είδη κοπής.....	10
1.2	Μηχανική της κοπής των μετάλλων.....	10
1.2.1	Μορφολογία και σχηματισμός του αποβλήτου.....	10
1.2.1.1	Το ασυνεχές απόβλητο.....	11
1.2.1.2	Το συνεχές απόβλητο.....	13
1.2.1.3	Το συνεχές απόβλητο με ψευδοακμή.....	15
1.2.2	Πως επηρεάζουν το σχηματισμό του αποβλήτου η ταχύτητα κοπής v και η γωνία αποβλήτου του εργαλείου γ	17
1.2.2.1	Η ταχύτητα κοπής.....	17
1.2.2.2	Η γωνία αποβλήτου του εργαλείου.....	18
1.3	Εκλύομενη θερμότητα και αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την κοπή των μετάλλων.....	18
1.4	Φθορά του εργαλείου κοπής.....	22
1.4.1	Γενικές παρατηρήσεις - αιτίες φθοράς.....	22
1.5	Παράγοντες κοπής, που επηρεάζουν τη ζωή του εργαλείου.....	25
1.5.1	Οι συνθήκες κατεργασίας.....	25
1.5.2	Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου.....	25
1.5.3	Επιρροή του υλικού του εργαλείου.....	26
1.5.4	Πως επιδρά το υλικό του τεμαχίου στη ζωή του εργαλείου.....	27
1.5.5	Επίδραση του υγρού κοπής.....	27
1.6	Επιρροή τασικών παραγόντων της κοπής των μετάλλων επί των συνιστωσών της δυνάμεως (ή αντιστάσεως) κοπής.....	28
1.6.1	Η γωνία αποβλήτου γ του εργαλείου.....	28
1.6.2	Η γωνία ελευθερίας α	29
1.6.3	Η γωνία λοξότητας $\lambda_s = \lambda$	29

1.6.4	Η ακτίνα καμπυλότητας r της ακής του εργαλείου.....	30
1.6.5	Η γωνία θέσεως $Kr = K$ της κύριας κόψης του εργαλείου.....	30
1.6.6	Η φθορά του κοπτικού εργαλείου.....	31
1.6.7	Το υλικό του κοπτικού εργαλείου και του προς κατεργασία τεμαχίου.....	32
1.6.8	Η πρόωση και το βάθος κοπής.....	32
1.6.9	Η ταχύτητα κοπής.....	33
2	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.....	35
2.1	Εισαγωγή	35
2.2	Το αλουμίνιο και οι χρήσεις του.....	36
2.3	Γενικές ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου.....	36
2.4	Η διάτρηση ως κατεργασία.....	40
2.4.1	Γενικά.....	40
2.4.2	Γεωμετρία και χαρακτηριστικά εργαλείου.....	42
2.4.3	Κινηματική της διάτρησης.....	43
2.5	Η διάτρηση του αλουμινίου και των κραμάτων του.....	45
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	47
3.1	Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	47
3.2	Το πρόγραμμα AdvantEdge.....	50
3.2.1	Περιγραφή προγράμματος	50
3.2.2	Εισαγωγή δεδομένων.....	51
3.2.3	Εισαγωγή δεδομένων κοπτικού εργαλείου.....	51
3.2.4	Εισαγωγή δεδομένων υλικού.....	53
3.2.5	Βασικές επιλογές μοντελοποίησης.....	54
3.2.6	Εμφάνιση αποτελεσμάτων.....	55
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	58
4.1	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	58
4.1.1	Συγκεντρωτικά στοιχεία.....	67
4.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραμάτων - προσομοίωσης (για μία περιστροφή του εργαλείου).....	72
4.2.1	Δυνάμεις	72
4.2.2	Απόβλητα.....	73
4.3	Συμπεράσματα.....	74

4.4	Συγκεντρωτικά στοιχεία	84
4.5	Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραμάτων - προσομοίωσης (για τρεις περιστροφές του εργαλείου).....	85
4.6.1	Δυνάμεις.....	85
4.2.2	Απόβλητα.....	86
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	87
5.1	Συμπεράσματα από την κατεργασία και την προσομοίωση.....	87
5.2	Πιθανές αιτίες μη σύγκλισης πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων...	87
5.3	Συμπεράσματα	88
5.4	Επίλογος.....	89
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	90

Κεφάλαιο 1 Θεωρία Κοπής Μετάλλων

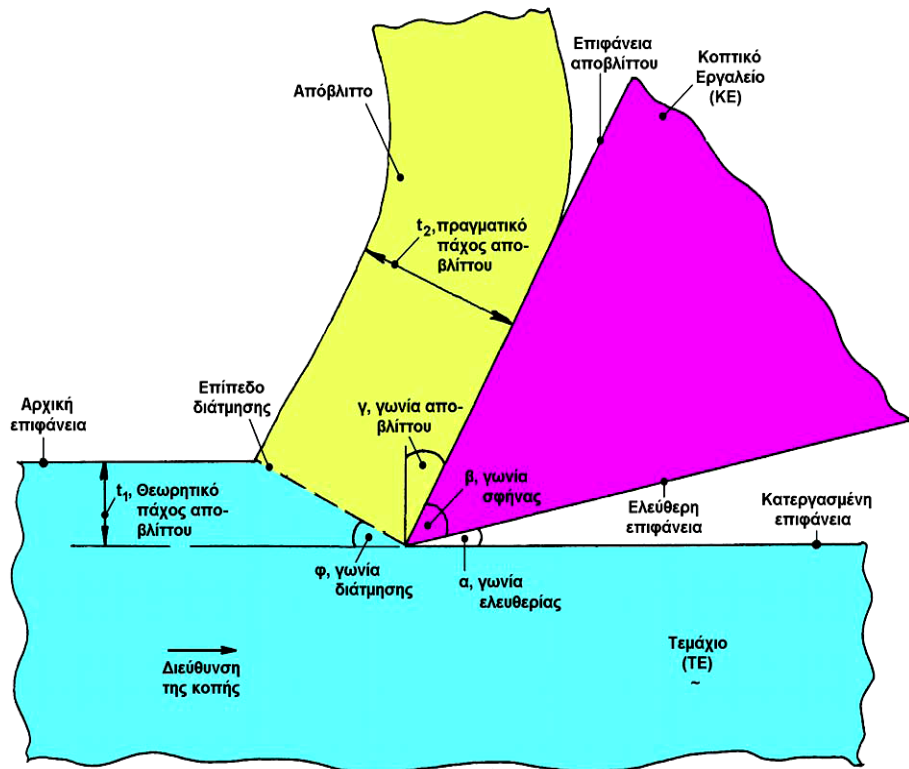
1.1 Εισαγωγικές έννοιες.

1.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου.

Το κοπτικό εργαλείο μοιάζει με σφήνα ευθύγραμμης ακμής που κινείται ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο με τέτοιο τρόπο ώστε να αφαιρείται στρώμα υλικού ορισμένου πάχους. Το πάχος του υλικού που αφαιρείται κάθε φορά είναι ανάλογο των συνθηκών κοπής. Στο κοπτικό εργαλείο διακρίνονται τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά, (Σχήμα 1.1):

- **Επιφάνεια αποβλήτου:** Είναι η επιφάνεια της σφήνας, πάνω στην οποία ολισθαίνει το απόβλητο κατά την κίνησή του.
- **Ελεύθερη επιφάνεια:** Είναι η επιφάνεια της σφήνας που βρίσκεται απέναντι από την κατεργασμένη επιφάνεια.
- **Κόψη:** Είναι η ακμή της σφήνας που προκύπτει ως τομή των δύο παραπάνω επιφανειών.
- **Γωνία αποβλήτου, γ :** Σχηματίζεται από την επιφάνεια αποβλήτου και το κάθετο επίπεδο στην κατεργασμένη επιφάνεια που διέρχεται από την κόψη του κοπτικού εργαλείου.
- **Γωνία ελευθερίας, α :** Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και την κατεργασμένη επιφάνεια.
- **Γωνία σφήνας, β :** Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια και από την επιφάνεια αποβλήτου.

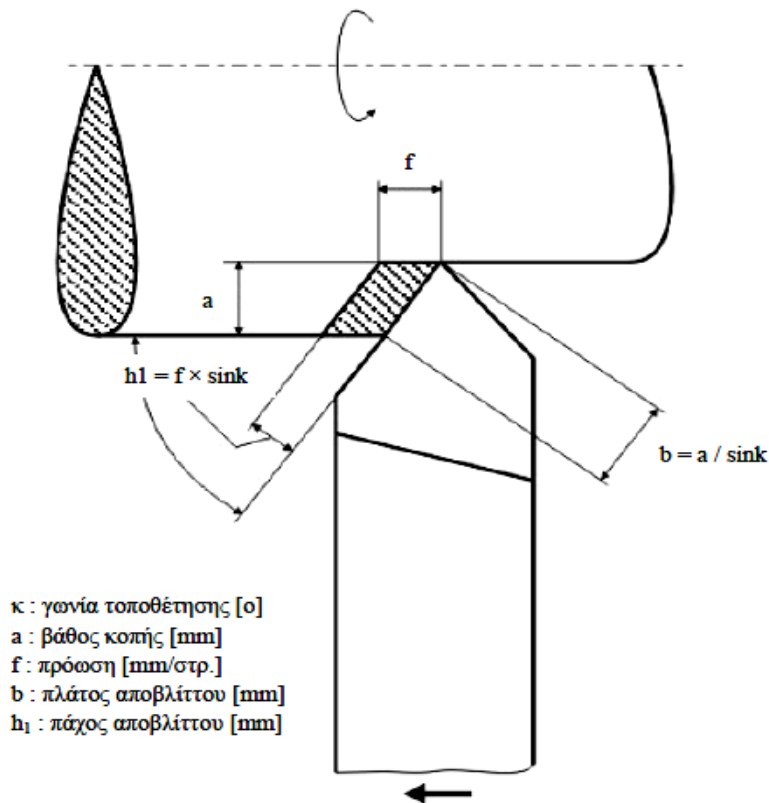
$$\text{Ισχύει : } \alpha + \beta + \gamma = 90^{\circ}$$



Σχήμα 1.1 Βασικές έννοιες της κοπής .

1.1.2 Χαρακτηριστικά του αποβλήτου.

- Θεωρητικό πάχος αποβλήτου, t_1 : Είναι το αφαιρούμενο πάχος υλικού.
- Πραγματικό πάχος αποβλήτου, t_2 : Είναι η μέση τιμή του πάχους που έχει το απόβλητο μετά την κοπή.
- Πλάτος αποβλήτου, b .
- Θεωρητική διατομή αποβλήτου, $A_1 = bxt_1$.
- Πραγματική διατομή αποβλήτου, $A_2 = bxt_2$. [3]



Σχήμα 1.2 Γεωμετρικά μεγέθη για τον υπολογισμό της διατομής του αποβλήτου

1.1.3 Συνθήκες κοπής και η σημασία τους.

- *Βάθος κοπής, a*: Είναι το βάθος στο οποίο εισχωρεί το κοπτικό εργαλείο μέσα στο υλικό τεμάχιο και μετράται σε mm.
- *Ταχύτητα κοπής, v*: Είναι η στιγμιαία ταχύτητα της ακής του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο κατά την πρωτεύουσα κίνηση και μετράται σε m/min.
- *Πρόωση, s*: Είναι η σχετική μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο ανά περιστροφή ή ενεργό διαδρομή. Μετράται σε mm/τεν ή mm/ενεργό διαδρομή και κατά την κατεύθυνση της κίνηση πρόωσης.
- *Ταχύτητα πρόωσης, v_p*: Είναι η στιγμιαία (σχετική) ταχύτητα της ακής του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο κατά την συνεχή κίνηση πρόωσης. Μετράται σε m/min και χρησιμοποιείται εναλλακτικά αντί της πρόωσης.
- *Ρυθμός μεταβολής υλικού, Θ*: Είναι ο όγκος του υλικού που αφαιρείται στη μονάδα του χρόνου. Μετράται σε cm³/min και ισχύει $\Theta = A_1 \times v$.

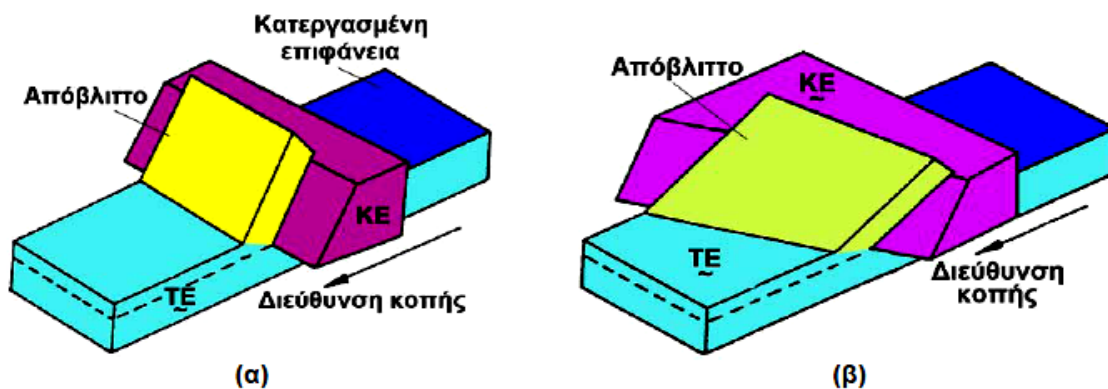
Μεταξύ των μεγεθών s και v_v ισχύει η σχέση $v_v = s \times n$ όπου n είναι η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου ή ο αριθμός ενεργών διαδρομών στη μονάδα χρόνου.

Από τον συνδυασμό v, s και a εξαρτώνται 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.[3]

1.1.4 Είδη κοπής.

- *Ορθογωνική κοπή:* Η κόψη του κοπτικού εργαλείου είναι κάθετη προς την διεύθυνση κοπής.
- *Λοξή κοπή:* Η κόψη του κοπτικού εργαλείου είναι κεκλιμένη ως προς την διεύθυνση κοπής.



Σχήμα 1.3 (α) Ορθογωνική κοπή, (β) Λοξή κοπή.

1.2 Μηχανική της κοπής των μετάλλων.

1.2.1 Μορφολογία και σχηματισμός του αποβλήτου.

Οι κατεργασίες κοπής έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό το ότι, για την μορφοποίηση των κομματιών, αφαιρείται μέταλλο και ότι το μέταλλο αυτό αφαιρείται σε μορφή

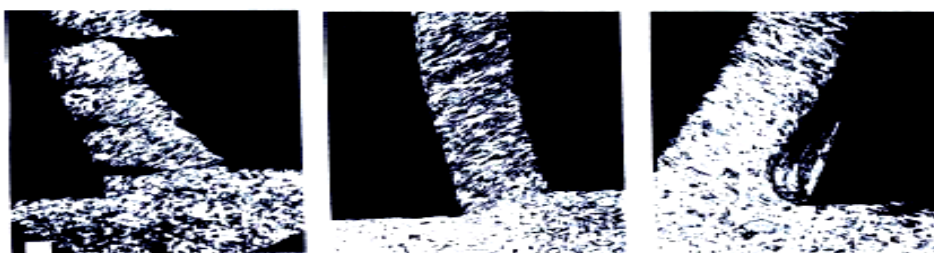
αποβλήτων. Το απόβλητο είναι το προϊόν της κοπής των μετάλλων και η μελέτη του μπορεί να δώσει ενδιαφέροντα συμπεράσματα για την διαδικασία της κοπής, όπως:

- Οι δυνάμεις κοπής.
- Η ισχύς κοπής.
- Η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας.
- Η φθορά και η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου.
- Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος εργαλειομηχανή-κοπτικό εργαλείο-τεμάχιο.

Αντίστροφα, ο μηχανισμός σχηματισμού αποβλήτου επηρεάζεται από:

- Το υλικό του τεμαχίου.
- Το υλικό και την γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου.
- Τις συνθήκες κοπής και
- τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος εργαλειομηχανή - κοπτικό εργαλείο - τεμάχιο.

Το απόβλητο, μπορεί να σχηματίζεται σε διάφορα μεγέθη και να παίρνει ποικίλες μορφές ανάλογα με την περίπτωση κατεργασίας, δηλαδή από ταινιοειδές ευθύ και μακρό μέχρι σπειροειδές τεμαχισμένο ή ακόμη κατακερματισμένο σε τεμαχίδια. Διακρίνονται τρία βασικά είδη αποβλήτου: Το ασυνεχές απόβλητο, Σχήμα 1.4.α, το συνεχές απόβλητο, Σχήμα 1.4.β και το συνεχές απόβλητο με ψευδοακμή, Σχήμα 1.4.γ. [3]



Σχήμα 1.4. Τα τρία είδη αποβλήτου: (α) Το ασυνεχές απόβλητο, (β) Το συνεχές απόβλητο, (γ) Συνεχές απόβλητο με ψευδοακμή.

1.2.1.1 Το ασυνεχές απόβλητο.

Κατά το σχηματισμό του ασυνεχούς αποβλήτου, το μέταλλο που βρίσκεται μπροστά από την κόψη του εργαλείου, δέχεται σημαντικές παραμορφώσεις, θραύεται στη ζώνη διατμήσεως, όταν η πραγματική παραμόρφωση υπερβαίνει την παραμόρφωση θραύσεως

του κατεργασμένου μετάλλου. Η θραύση και ο τεμαχισμός του αποβλήτου πραγματοποιείται συνήθως περιοδικά. Τέτοιο απόβλητο συναντούμε στην κοπή ψαθυρών μετάλλων, όπως είναι ο χυτοσίδηρος ή ο χυτευτικός ορείχαλκος κ.α. Είναι δυνατός όμως ο σχηματισμός ασυνεχούς αποβλήτου και κατά την κοπή όλκιμων μετάλλων ή κραμάτων (μαλακός χάλυβας, αργίλιο, χαλκός, μόλυβδος κλπ.) γενικά σε χαμηλές ταχύτητες κοπής, σε μεγάλες προώσεις και με εργαλεία με μικρές τιμές γωνίας αποβλήτου.[3]

Ο σχηματισμός ασυνεχούς αποβλήτου εννοείται από πολύ χαμηλές ταχύτητες κοπής, υπερβολική ελάττωση της γωνίας αποβλήτου συνοδευόμενη από αύξηση του βάθους κοπής και της ταχύτητας πρόωσης, χρησιμοποίηση ακατάλληλου υγρού κοπής και από τυχόν εγκλείσματα στο κατεργασμένο υλικό.

Ο σχηματισμός του ασυνεχούς αποβλήτου έχει θετικές και αρνητικές επιπτώσεις στη διαδικασία της κατεργασίας. Οι επιπτώσεις του ασυνεχούς αποβλήτου είναι οι ακόλουθες:

α) Ως ευνοϊκό αποτέλεσμα μπορεί να θεωρηθεί η εύκολη απομάκρυνση των μικρού μεγέθους αποβλήτων από τη θέση κατεργασίας. Αυτό είναι ένα πολύ θετικό στοιχείο για καλή και εύκολη κατεργασιμότητα του μετάλλου.

β) Κατά το σχηματισμό ασυνεχούς αποβλήτου, χειροτερεύει η τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας, γιατί δημιουργούνται ανωμαλίες και μικρορωγμές. Οι τελευταίες ασκούν δυσμενή επίδραση στην αντοχή σε κόπωση του υλικού του τεμαχίου.

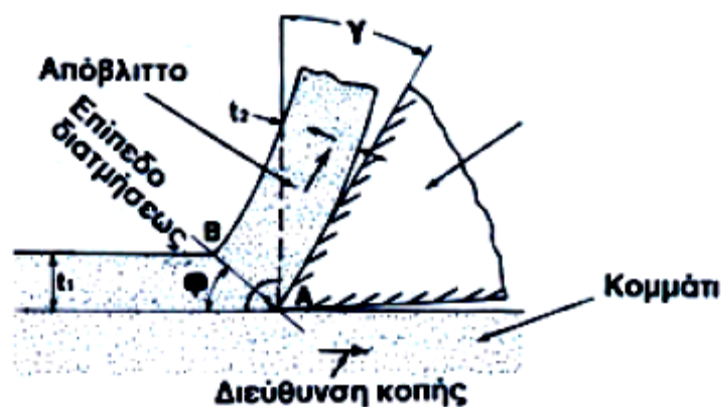
γ) Ο περιοδικός τεμαχισμός, που χαρακτηρίζει το ασυνεχές απόβλητο, αποτελεί μια πηγή εξαναγκασμένων ταλαντώσεων στο σύστημα κοπτικό εργαλείο – εργαλειομηχανή - τεμάχιο.

δ) Τέλος, εξαιτίας του τύπου του αποβλήτου, το μήκος της επιφάνειας επαφής αποβλήτου – εργαλείου εμφανίζεται σχετικά μικρό. Αυτό, πέρα από τη ευνοϊκή επιρροή που ασκεί στη δύναμη κοπής λόγω μικρότερης δύναμης τριβής, σημαίνει ότι η μέση ορθή τάση στο πρόσωπο του εργαλείου εφαρμόζεται πλησίον της κόψης, γεγονός που επιβάλλει περιορισμούς στην επιλογή της γεωμετρίας του εργαλείου, π.χ. περιορισμός στην επιλογή μικρότερης τιμής της γωνίας αποβλήτου κατά την χρήση σκληρομετάλλων, για μεγαλύτερη αντοχή του.[3]

1.2.1.2 Το συνεχές απόβλητο.

Στην περίπτωση αυτή το μέταλλο, που βρίσκεται μπροστά από την κόψη του εργαλείου, υφίσταται συνεχή πλαστική παραμόρφωση σε διάτμηση, χωρίς να θραύεται στο επίπεδο ή στη ζώνη διατμήσεως, Σχήμα 1.5 και το σχηματιζόμενο απόβλητο σε μορφή ταινίας κινείται επάνω στην επιφάνεια αποβλήτου του εργαλείου.

Το συνεχές απόβλητο το συναντούμε κατά την κοπή όλκιμων μετάλλων και κραμάτων, κυρίως σε υψηλές ταχύτητες κοπής.[3]



Σχήμα 1.5 Μηχανισμός σχηματισμού του συνεχούς αποβλήτου

Το συγκεκριμένο είδος αποβλήτου είναι επιθυμητό, γιατί ο σχηματισμός του σχετίζεται με ευνοϊκές συνθήκες αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής και καταναλισκόμενης ισχύος, καλή τραχύτητα των κατεργασμένων επιφανειών, ενώ παρατηρείται μείωση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου. Το απόβλητο όμως αυτό, λόγω της μορφής και του μεγάλου μήκους του, μπορεί να δυσχεραίνει γενικά την κοπή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται γρεζοθραύστες.

Για την μελέτη του μηχανισμού του συνεχούς αποβλήτου θέτονται κάποιες παραδοχές, όπως ότι η κοπή είναι συνεχής και ορθογωνική, ότι το εργαλείο είναι οξύ, η πλαστική παραμόρφωση για το σχηματισμό του αποβλήτου λαμβάνει χώρα μέσα σε ζώνη μικρού πάχους, η οποία πρακτικά μπορεί να παρασταθεί από το επίπεδο (AB), Σχήμα 1.5 και το απόβλητο δεν ρέει πλευρικά.

Ο μηχανισμός σχηματισμού του συνεχούς αποβλήτου συνοπτικά έχει ως εξής:

Εξαιτίας όπως δύναμης που ασκείται από το εργαλείο στο κομμάτι, δημιουργείται ένα πεδίο τάσεων ακριβώς μπροστά στην κόψη του εργαλείου. Αν το υλικό είναι όλκιμο, παραμορφώνεται συνεχώς με πλαστική διάτμηση κατά μήκος του λεγόμενου επιπέδου διατμήσεως (AB) με αποτέλεσμα το σχηματισμό του αποβλήτου με πάχος t_2 . Το απόβλητο σχηματισμένο πλέον κινείται προς τα επάνω (φορά του βέλους, Σχήμα 1.5) στην επιφάνεια αποβλήτου του εργαλείου, επαπτόμενο κατά τη ζώνη τριβής, υπό μορφή ταινίας αναπτύσσοντας σημαντική τριβή. Το επίπεδο διατμήσεως, κλίνει ως προς την διεύθυνση κοπής κατά μία γωνία ϕ , την οποία ονομάζουμε γωνία διατμήσεως. Στην πραγματικότητα, η πλαστική διάτμηση του μετάλλου δεν γίνεται ακριβώς στο επίπεδο διατμήσεως, αλλά σε μία στενή ζώνη, στη ζώνη διατμήσεως. Το πάχος της ζώνης διατμήσεως μικραίνει όσο η ταχύτητα κοπής μεγαλώνει. Γι' αυτό η ζώνη διατμήσεως είναι δυνατό να προσεγγισθεί με το επίπεδο διατμήσεως, που διευκολύνει την ανάλυση και μελέτη της κοπής.

Συμπερασματικά, μπορούμε να διατυπώσουμε τα ακόλουθα σχετικά με το μηχανισμό σχηματισμού του συνεχούς αποβλήτου:

α) Το απόβλητο σχηματίζεται με συνεχή πλαστική διάτμηση μέσα στη ζώνη διατμήσεως (πρωτεύουσα ζώνη παραμορφώσεως). Η ζώνη αυτή είναι το σύνορο μεταξύ του απαραμόρφωτου υλικού του τεμαχίου και του σχηματισμένου αποβλήτου.

β) Το σχηματισμένο απόβλητο κινείται πάνω στην επιφάνεια αποβλήτου του εργαλείου κάτω από συνθήκες ισχυρής τριβής (δευτερεύουσα ζώνη παραμορφώσεως).

γ) Η νέα επιφάνεια του τεμαχίου δημιουργείται με διαδοχικές στοιχειώδεις θραύσεις του μετάλλου, ενώ η απαιτούμενη γι' αυτό ενέργεια θεωρείται αμελητέα σε σχέση με την συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια κοπής.

δ) Σε περιπτώσεις προχωρημένης σχετικά ζώνης φθοράς του εργαλείου, είναι δυνατό να εμφανιστεί υψηλή τριβή στην επιφάνεια επαφής εργαλείου και κατεργασμένης επιφάνειας.

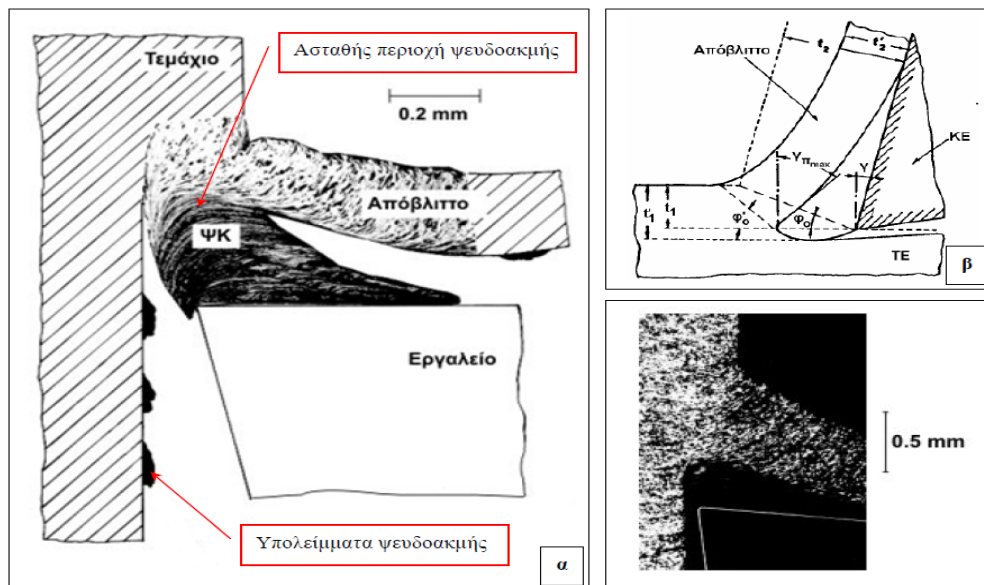
ε) Οι νεοσχηματιζόμενες επιφάνειες, δηλαδή η προς το εργαλείο επιφάνεια του αποβλήτου και η κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου, είναι καθαρές από φυσική και χημική άποψη, διευκολύνοντας το σχηματισμό οξειδίων ή άλλων χημικών ενώσεων που επηρεάζουν το μέσο φαινόμενο συντελεστή τριβής.

1.2.1.3

Το συνεχές απόβλητο με ψευδοακμή.

Σχηματίζεται, όπως και το συνεχές απόβλητο, με την διαφορά ότι στην περιοχή της κόψης του εργαλείου και επάνω στην επιφάνεια του αποβλήτου δημιουργείται η λεγόμενη ψευδοακμή.

Η ψευδοακμή αποτελεί ένα σώμα, με σχήμα ασύμμετρης σφήνας, από ισχυρά παραμορφωμένο και υπερβολικά σκληρυμένο μέταλλο, που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της κοπής από επάλληλα λεπτά στρώματα. Η ψευδοακμή παραμένει προσκολλημένη στην επιφάνεια αποβλήτου του εργαλείου, ενώ η κίνηση του αποβλήτου μεταφέρεται στην ασταθή κορυφή της. Ο σχηματισμός της ψευδοακμής αποδίδεται σε συνδυασμό ορθών θλιπτικών τάσεων και συνθηκών τριβής και θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια αποβλήτου και κοπτικού εργαλείου, ενώ σημαντικό ρόλο αποδίδεται στο κατεργαζόμενο υλικό και στο υλικό του εργαλείου. Συνήθως, η ψευδοακμή συνεχίζει να αναπτύσσεται καθώς η κοπή προχωρά και όταν αποκτήσει ορισμένο μέγεθος, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν, τότε τεμαχίδια που βρίσκονται προς την κορυφή της ψευδοακμής που είναι περισσότερο ασταθές αποκολλώνται από το κυρίως σώμα της και παρασύρονται, προσκολλώμενα στην προς το εργαλείο πλευρά του αποβλήτου (τεμαχίδιο Α) και επάνω στη νεοσχηματιζόμενη επιφάνεια του τεμαχίου (τεμαχίδιο Β), με σοβαρή συνέπεια την χειροτέρευση της τραχύτητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.6.γ.



Σχήμα 1.6. Χαρακτηριστικά της ψευδοακμής. α) Τεμαχισμός της ψευδοακμής. β) Γεωμετρικά μεγέθη της ψευδοακμής.

Οι βασικές προϋποθέσεις δημιουργίας ψευδοακμής είναι οι ακόλουθες :

- α) Να υφίσταται συνθήκες τριβής ακινησίας.
- β) Το κατεργαζόμενο υλικό να είναι κρατυνόμο και
- γ) Να μην παραβιάζεται η συνθήκη διαρροής στο ευσταθές τμήμα της ψευδοακμής.

Οι συνέπειες σχηματισμού της ψευδοακμής συνοψίζονται ως εξής:

- α) Αύξηση της ονομαστικής γωνίας αποβλήτου του εργαλείου από γ σε μία μέση τιμή γ_{π} (μέση πραγματική γωνία αποβλήτου), Σχήμα 1.6.β.
- β) Μείωση στη φυσική επιφάνεια επαφής αποβλήτου – εργαλείου.
- γ) Χειροτέρευση της τραχύτητας της κατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου.
- δ) Επιρροή στις μηχανικές και σε φυσικές ιδιότητες της κατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου (μεταβολή στην κρυσταλλοδομή, παραμένουσες τάσεις, αντοχή σε κόπωση του τεμαχίου κ.α.).
- ε) Επίδραση στη φθορά, άρα και στη ζωή, του εργαλείου.
- στ) Επίδραση στη διαστατική ακρίβεια του τεμαχίου.
- ζ) Δημιουργία ταλαντώσεων στο σύστημα κοπτικό – εργαλειομηχανή – τεμάχιο.

Οι κυριότεροι παράγοντες κοπής που επηρεάζουν το σχηματισμό και τα χαρακτηριστικά της ψευδοακμής είναι:

A) Ταχύτητα κοπής. Αύξηση της ταχύτητας κοπής συνεπάγεται αύξηση της θερμοκρασίας της ζώνης τριβής με αποτέλεσμα την μείωση και τελικά τον εκφυλισμό της ψευδοακμής σε ένα λεπτό επικόλλημα μετάλλου στο μέτωπο του κοπτικού εργαλείου με γειτονική τη ζώνη πλαστικής ροής του υλικού του αποβλήτου.

B) Η πρόωση, το βάθος κοπής και η ονομαστική γωνία αποβλήτου. Οι διαστάσεις της θεωρητικής διατομής του αποβλήτου ($t_1 \times b_1$ στην ορθογωνική κοπή ή $s \times a$ στην τórνευση) επηρεάζουν το σχηματισμό ψευδοακμής μέσω του ποσού της εκλυόμενης θερμότητας, άρα και της στάθμης της θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια αποβλήτου – εργαλείου. Όσο δηλαδή μικρότερο είναι το s ή το t_1 (για σταθερά τα a ή b_1 , αντιστοίχως, και τους λοιπούς παράγοντες κοπής), τόσο λιγότερη είναι η εκλυόμενη θερμότητα και τόσο υψηλότερη θα είναι η κρίσιμη ταχύτητα κοπής, όπου εξαφανίζεται η ψευδοακμή. Το a ή το

b_1 επηρεάζει τη δημιουργία της ψευδοακμής σύμφωνα με τον ίδιο μηχανισμό, πλην όμως σε σημαντικά μικρότερη ένταση από ότι το s ή t_1 .

Κατά τον ίδιο τρόπο δρουν και μεταβολές στην ονομαστική γωνία αποβλήτου του εργαλείου. Αύξηση στη γωνία αποβλήτου συνεπάγεται ευνοϊκότερη κοπή, δηλαδή μείωση των δυνάμεων και της εκλυόμενης θερμότητας, άρα και της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας.

Γ) Το κατεργαζόμενο μέταλλο και το χρησιμοποιούμενο υγρό κοπής. Σημαντικός παράγοντας σχηματισμού της ψευδοακμής είναι η ικανότητα κρατύνσεως του κατεργαζόμενου υλικού. Όσο πιο μεγάλος είναι ο εκθέτης κρατύνσεως, τόσο εντονότερη είναι η τάση του υλικού για δημιουργία ψευδοακμής. Με την χρησιμοποίηση κατάλληλου υγρού κοπής, ο σχηματισμός της ψευδοακμής μετατίθεται σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής, απ'ότι χωρίς υγρό κοπής. Και αυτό γιατί η λιπαντική δράση του έχει ως αποτέλεσμα μείωση στο μέσο φαινόμενο συντελεστή τριβής, ο οποίος όσο αυξάνει λειτουργεί ευνοϊκά για την δημιουργία της ψευδοακμής. Η ικανότητα αυτή του υγρού κοπής ισχύει μόνο σε χαμηλές ταχύτητες κοπής, ενώ σε υψηλότερες το υγρό κοπής καθίσταται ανενεργό από λιπαντικής απόψεως. Σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής, όπου εκμεταλλευόμαστε στην ψυκτική δράση του υγρού κοπής, ευνοείται ο σχηματισμός ψευδοακμής. Επί πλέον, σε χαμηλές σχετικά ταχύτητες κοπής και με χρησιμοποίηση υγρού κοπής με πρόσθετα υψηλής πίεσεως περιορίζεται η έκταση, όπου λαμβάνει χώρα τριβή ακινησίας και έτσι περιορίζεται το μέγεθος της ψευδοακμής.

1.2.2 Πως επηρεάζουν το σχηματισμό του αποβλήτου η ταχύτητα κοπής v και η γωνία αποβλήτου του εργαλείου γ .

1.2.2.1 Η ταχύτητα κοπής.

Η ταχύτητα κοπής είναι μία σημαντικότερη μεταβλητή της κοπής των μετάλλων, ασκώντας σημαντική επίδραση στο φαινόμενο της κοπής. Συνοπτικά :

- Επιδρά έμμεσα στο σχηματισμό του αποβλήτου, μεταβάλλοντας το μέσο φαινόμενο συντελεστή τριβής μ (ή τη μέση φαινόμενη γωνία τριβής ρ) και από αυτόν τη γωνία επενέργειας της δυνάμεως κοπής $\omega = \rho - \gamma$ και τελικά τη γωνία διατμήσεως ϕ . Στην

- Ασκει άμεση επίδραση στο όριο διαρροής του υλικού τόσο στη ζώνη διατμήσεως, όσο και στη ζώνη τριβής μέσω της ταχύτητας παραμορφώσεως κάτω από ορισμένες συνθήκες.

1.2.2.2 Η γωνία αποβλήτου του εργαλείου.

Η ονομαστική γωνία του αποβλήτου γ , ασκει άμεση και έμμεση επιρροή στο σχηματισμό του αποβλήτου:

Άμεση επίδραση: Η γωνία του αποβλήτου συμβάλλει σημαντικά στον καθαρισμό του τασικού πεδίου στη ζώνη διατμήσεως. Μεγαλύτερη γωνία αποβλήτου συνεπάγεται μικρότερη πλαστική παραμόρφωση, την οποία πρέπει να υποστεί το στρώμα μετάλλου στη ζώνη διατμήσεως καθώς αυτό μετατρέπεται σε απόβλητο. Το αντίθετο συμβαίνει με μείωση της γωνίας γ . Ελάττωση όμως της πλαστικής παραμορφώσεως στη ζώνη διατμήσεως σημαίνει, προφανώς, βελτίωση εν γένει στη διαδικασία σχηματισμού του αποβλήτου (μικρότερος δείκτης συμπίεσεως αποβλήτου, μικρότερη ανηγμένη ενέργεια κοπής κ.α.).

Έμμεση επίδραση: Υπεισέρχεται στον προσδιορισμό της γωνίας ω , άρα ασκει επίδραση και στη γωνία διατμήσεως ϕ με συνέπειες στο σχηματισμό του αποβλήτου.

1.3 Εκλυόμενη θερμότητα και αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την κοπή των μετάλλων.

Η παραγόμενη θερμότητα κατά την κοπή είναι μία από τις κρίσιμες παραμέτρους, που επηρεάζουν σημαντικά την σωστή διεξαγωγή της κοπής και αυτό γιατί η θερμότητα επηρεάζει τις δυνάμεις κοπής, αυξάνει την ταχύτητα φθοράς του κοπτικού εργαλείου και μειώνει την διάρκεια ζωής του, προκαλεί θερμική καταπόνηση στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, κοκ .

Στις κατεργασίες κοπής συνυπάρχουν και οι τρεις μηχανισμοί μεταφοράς της θερμότητας, δηλαδή με επαφή, αγωγή και ακτινοβολία. Η μεταφορά λ.χ. θερμότητας μέσα στο απόβλητο, το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το κοπτικό εργαλείο και την μανέλα

συγκράτησης πραγματοποιείται με επαφή, η μεταφορά θερμότητας μεταξύ ψυκτικού υγρού/αέρα και αποβλήτου/κοπτικού εργαλείου/τεμαχίου γίνεται με αγωγή, ενώ η ακτινοβολία είναι περιορισμένη στις συμβατικές κατεργασίες κοπής.

Λόγω της πολυπλοκότητας του θερμικού προβλήματος κατά την κοπή, για μία πρώτη προσέγγισή του απαιτείται να γίνουν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Σχεδόν το σύνολο (90%-100%) της μηχανικής ενέργειας που καταναλώνεται κατά την κοπή μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια.
- Στη γενική περίπτωση κοπτικού εργαλείου με στρογγυλεμένη κόψη, υφίστανται τρεις περιοχές που λειτουργούν ως πηγές θερμότητας κατά την κοπή: Η πρωτεύουσα ζώνη (I) (έργο διάτμησης), η δευτερεύουσα ζώνη (II) (έργο τριβής) και η περιοχή τριβής στο καμπύλο τμήμα του κοπτικού εργαλείου (III) (επιφάνεια επαφής τεμαχίου – κοπτικού εργαλείου), Σχήμα 1.7.



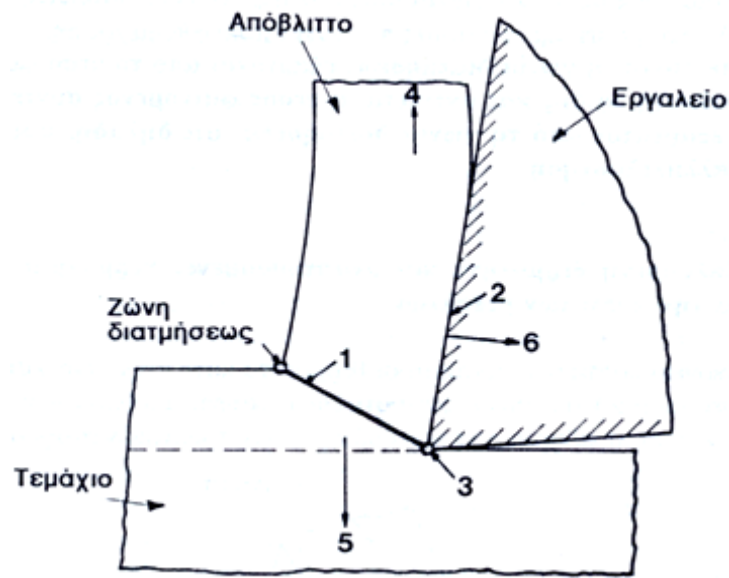
Σχήμα 1.7 Περιοχές παραγωγής θερμότητας κατά την κοπή και η συμβολή κάθε ζώνης στη διανομή της θερμότητας

Τέλος, για να ολοκληρωθεί η προσέγγιση ενός τόσο σύνθετου φαινομένου, θα πρέπει να καθοριστούν και κάποιες οριακές συνθήκες. Σε χαμηλές ταχύτητες κοπής, ο ρυθμός απαγωγής της παραγόμενης θερμότητας είναι περίπου ίσος με το ρυθμό έκλυσής της και η κοπή μπορεί να θεωρηθεί ως ισόθερμη. Με αύξηση της ταχύτητας κοπής, ο ρυθμός απαγωγής της θερμότητας υπολείπεται του ρυθμού της έκλυσής της, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου. Τέλος, σε πολύ υψηλές ταχύτητες κοπής, η κοπή μπορεί να θεωρηθεί ως αδιαβατική.[3]

Όπως προαναφέρθηκε, η ενέργεια κοπής μετατρέπεται σε θερμότητα κατά κύριο λόγο στη ζώνη διατμήσεως και κατά δευτερεύοντα στη ζώνη επαφής αποβλήτου και εργαλείου. Επίσης, στις περισσότερες των πρακτικών εφαρμογών, το εργαλείο δεν είναι

απολύτως οξύ, τότε παράγεται θερμότητα και στη ζώνη επαφής τεμαχίου – εργαλείου, η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Στη περίπτωση αυτή, η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία επηρεάζει τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες και την κρυσταλλική δομή της επιφανειακής στιβάδας του τεμαχίου.

Με βάση όσα αναφέρθηκαν, η αποβολή και η παραγωγή της θερμοκρασίας αποτυπώνεται στο Σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8. Τυπική κατά προσέγγιση διανομή της παραγόμενης, κατά την κοπή των μετάλλων, συνολικής θερμότητας σε συνήθεις ταχύτητες κοπής.

- 1: 80% της συνολικής ενέργειας κοπής μετατρέπεται σε θερμότητα στη ζώνη διατμήσεως.
- 2: 18% της συνολικής ενέργειας κοπής μετατρέπεται σε θερμότητα στην περιοχή επαφής αποβλήτου – εργαλείου.
- 3: 2% της συνολικής ενέργειας κοπής μετατρέπεται σε θερμότητα στην περιοχή επαφής – τεμαχίου.
- 4: 75% της συνολικής ενέργειας κοπής απάγεται από το απόβλητο.
- 5: 8% της συνολικής ενέργειας κοπής απάγεται από το τεμάχιο.
- 6: 17% της συνολικής ενέργειας κοπής απάγεται από το εργαλείο.

Η θερμοκρασία, κυρίως στη ζώνη τριβής και κατά δεύτερο λόγο στη διεπιφάνεια εργαλείου – τεμαχίου (όταν η φθορά του εργαλείου στην ελεύθερη επιφάνειά του αρχίζει να βρίσκεται σε κάπως προχωρημένο στάδιο), παίζει ρυθμιστικό και κυρίαρχο ρόλο στο ρυθμό φθοράς του κοπτικού εργαλείου, γεγονός που υποβοηθάει από τη μία μεριά στην εκλογή

του κατάλληλου υλικού κατασκευής του εργαλείου και από την άλλη τέτοιων παραγόντων κοπής, ώστε να μειώνεται ο ρυθμός φθοράς του εργαλείου με συνακόλουθη αύξηση της ζωής του.

Ορισμένα **βασικά συμπεράσματα** που έχουν προκύψει από σχετικά πειράματα είναι:

α) Το μέγεθος, που ασκεί τη μεγαλύτερη επιρροή στη μέση θερμοκρασία είναι η ειδική αντίσταση κοπής, και μάλιστα η επίδρασή της είναι ανάλογη.

β) Τα δύο θερμικά μεγέθη του κατεργαζόμενου υλικού, που υπεισέρχονται, δηλαδή η ογκομετρική ειδική θερμότητα και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, κατατάσσονται δεύτερα, σε ότι αφορά το βαθμό επιρροής τους στη μέση θερμοκρασία.

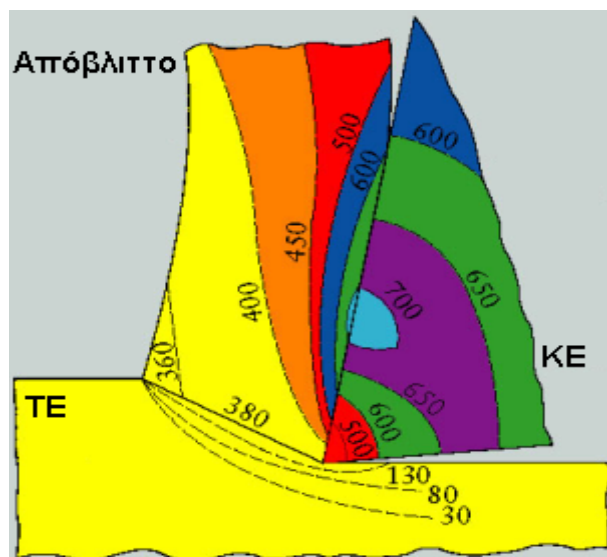
γ) Η ταχύτητα κοπής επιδρά στη μέση θερμοκρασία εντονότερα από ότι η θεωρητική διατομή του αποβλήτου. Η θερμοκρασία μεταβάλλεται περίπου ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της ταχύτητας κοπής και με την τέταρτη ρίζα της θεωρητικής διατομής του αποβλήτου.

Στο Σχήμα 1.9 παρουσιάζεται η διανομή θερμοκρασιών στο εργαλείο, στο απόβλητο και στο τεμάχιο κατά την κοπή ενός χάλυβα κάτω από τους αναφερόμενους παράγοντες κοπής, όπου φαίνονται και οι θέσεις των αναπτυσσόμενων μέγιστων θερμοκρασιών.

Σε αυτό μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι:

α) οι θερμοκρασίες είναι κατά πολύ υψηλότερες στο εργαλείο από ότι είναι στο απόβλητο και φυσικά στο κομμάτι,

β) οι μέγιστες θερμοκρασίες αναπτύσσονται συνήθως σε θέσεις που απέχουν από την άκρη του εργαλείου. Πολύ συχνά, στη θέση που εμφανίζονται οι μέγιστες θερμοκρασίες, αρχίζει να αναπτύσσεται η φθορά κρατήρα.[14]



Σχήμα 1.9 Διανομή θερμοκρασιών στο απόβλητο, στο κοπτικό εργαλείο και στο τεμάχιο. Χάλυβας παρόμοιος με SAE 1095, $v = 66$ m/min, $t = 0,195$ mm, $\gamma = 10^0$ με τις θερμοκρασίες να δίνονται σε $^{\circ}\text{C}$.

1.4 Φθορά του εργαλείου κοπής.

1.4.1 Γενικές παρατηρήσεις – αιτίες φθοράς.

Κατά την κοπή των μετάλλων, το κοπτικό εργαλείο υπόκειται σε υψηλές θερμοκρασίες, της τάξεως των 1200 $^{\circ}\text{C}$, των οποίων η κατανομή παρουσιάζει απότομες τοπικές μεταβολές και υψηλούς ρυθμούς αύξησης της τάξεως των 10^6 $^{\circ}\text{C/s}$. Επίσης, κατά την κοπή το κοπτικό εργαλείο υπόκειται σε υψηλές τάσεις λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού του τεμαχίου στη ζώνη διάτμησης, των τριβών και της πλαστικής παραμόρφωσης του αποβλήτου στη ζώνη επαφής κοπτικού εργαλείου/αποβλήτου, της θραύσης του υλικού του τεμαχίου για το σχηματισμό νέας επιφάνειας και των τριβών στη ζώνη επαφής κοπτικού εργαλείου/τεμαχίου. Ακόμα, η νεοσχηματιζόμενη επιφάνεια του αποβλήτου και του κομματιού επάνω στις οποίες τρίβεται το εργαλείο δεν προφθάνουν να οξειδωθούν ή να σκεπασθούν από άλλα στρώματα και κατά συνέπεια υπάρχει καθαρή μεταλλική επαφή ανάμεσα στο εργαλείο και στο απόβλητο και ανάμεσα στο εργαλείο και στο κομμάτι. Περιορίζεται βέβαια σημαντικά η μεταλλική αυτή επαφή με χρήση υγρού κοπής, το οποίο θα μπορεί να δράσει ως λιπαντικό. Κάτω από τις πολύ δυσμενείς αυτές συνθήκες εργασίας του, το κοπτικό εργαλείο φθείρεται ή και αστοχεί, με την έννοια ότι το εργαλείο παύει πλέον να εκτελεί ικανοποιητικά την εργασία του.

Η αστοχία ενός εργαλείου μπορεί να οφείλεται σε μία ή σε συνδυασμό από τις παρακάτω αιτίες:

α) Στην ανάπτυξη ζώνης φθοράς στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου, Σχήμα 1.10.

β) Στην δημιουργία φθοράς επάνω στην επιφάνεια του αποβλήτου του εργαλείου, η οποία καλείται **φθορά κρατήρα**, Σχήμα 1.10.

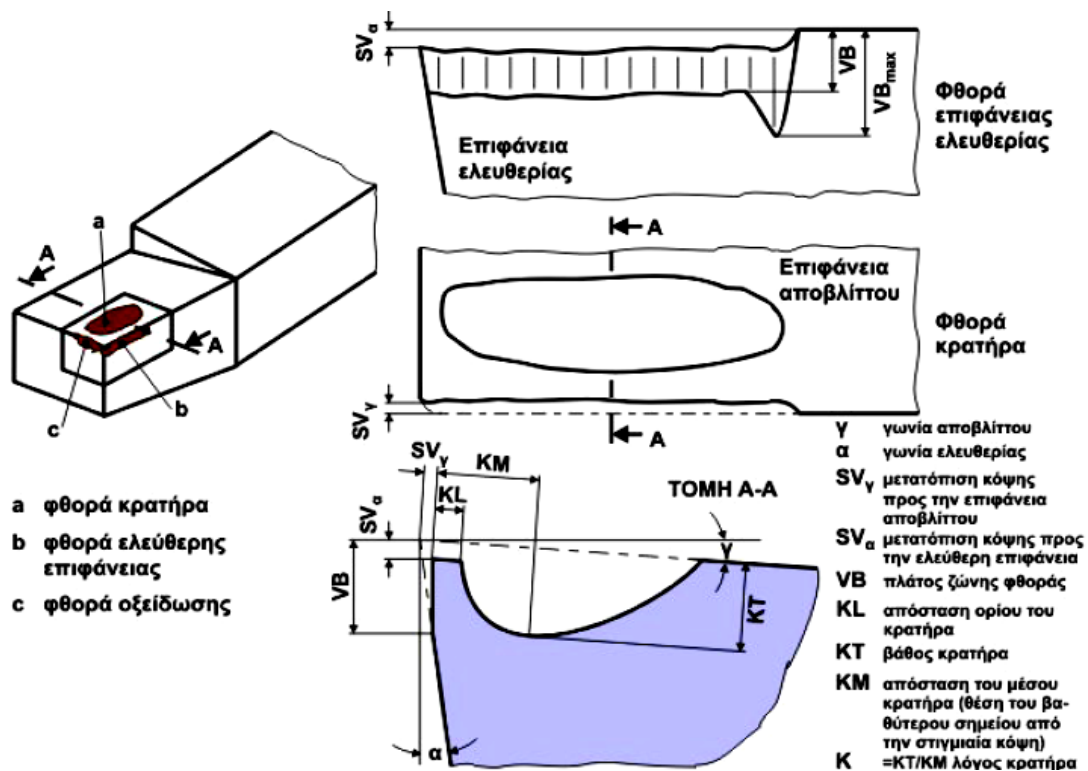
γ) Στην απολέπιση του εργαλείου στην κόψη του και στην επιφάνεια εργαλείου κατά τον τεμαχισμό της ψευδοακμής και γενικότερα εξαιτίας δημιουργίας συγκολλητών μικροδεσμών.

δ) Μικροθραύσεις την κόψη, εξαιτίας μηχανικών τάσεων ή κρούσεων.

ε) Πλαστική παραμόρφωση της ακής του κοπτικού εργαλείου, από τις υψηλές θερμοκρασίες και τάσεις, που επικρατούν στην περιοχή αυτή.

στ) Δημιουργία ρωγμών λόγω μεγάλων διαφορών θερμοκρασίας.

ζ) Θραύση της ακής του εργαλείου που οφείλεται κυρίως σε επιβολή κρουστικών φορτίων.



Σχήμα 1.10. Χαρακτηριστικά μεγέθη της φθοράς κοπτικού εργαλείου.

Από τις αναφερθείσες αιτίες αστοχίας των κοπτικών εργαλείων οι δύο πρώτες και ειδικότερα:

(α) η ανάπτυξη της ζώνης φθοράς και (β) η φθορά κρατήρα, δεν είναι δυνατόν να αποφευχθούν, οποιαδήποτε μέτρα και αν ληφθούν και πρακτικά αυτά τα δύο είδη φθοράς αποτελούν αύξουσα συνεχή συνάρτηση του χρόνου κοπής.

Το κοπτικό εργαλείο, συνεπώς, φθείρεται προοδευτικά στην επιφάνεια αποβλήτου και στην ελεύθερη επιφάνειά του μέχρι να αστοχήσει. Η αστοχία του κοπτικού είναι δυνατό να χαρακτηρίζεται είτε από στόμωση ή από θραύση της ακής του είτε από υπέρβαση προκαθορισμένης κρίσιμης τιμής κάποιου χαρακτηριστικού μεγέθους της ζώνης φθοράς ή της φθοράς κρατήρα ή και των δύο μαζί.

Γενικά, η φθορά του κοπτικού εργαλείου έχει άμεση σχέση με τον τρόπο χρήσης του, δηλαδή το είδος της κατεργασίας, τις συνθήκες κατεργασίας, τη γεωμετρική μορφή του κοπτικού εργαλείου, το συνδυασμό υλικών τεμαχίου – εργαλείου και το είδος του υγρού κοπής καθορίζουν τη μορφή και το μέγεθος της φθοράς των κοπτικών εργαλείων, ενώ σημαντικός παράγοντας είναι και η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος.

Η φθορά κρατήρα και η ζώνη φθοράς επηρεάζουν τη λειτουργία του κοπτικού εργαλείου με διάφορους τρόπους. **Οι δυνάμεις κοπής αυξάνονται εν γένει με την πρόοδο της φθοράς.** Η φθορά κρατήρα εν τούτοις, υπό ορισμένες συνθήκες, έχει ως αποτέλεσμα ελάττωση των δυνάμεων κοπής, λόγω αυξήσεως της γωνίας αποβλήτου του εργαλείου. Αντίθετα η ζώνη φθοράς πάντοτε, χωρίς εξαίρεση, συμβάλλει στην αύξηση των δυνάμεων κοπής, από την αύξηση των δυνάμεων τριβής στην επιφάνεια επαφής εργαλείου – τεμαχίου.

Παράλληλα, η ζώνη φθοράς μεταβάλλει τη γεωμετρία του εργαλείου, με αποτέλεσμα να επηρεάζει την διαστακτική ακρίβεια του τεμαχίου ή την ακρίβεια μορφής του, όταν τούτο κατεργάζεται με εργαλείο μορφής. Η τραχύτητα επιφάνειας γενικά χειροτερεύει, καθώς το εργαλείο φθείρεται στην ελεύθερή του επιφάνεια.

Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος εργαλείο – τεμάχιο – εργαλειομηχανή επηρεάζεται δυσμενώς από τη φθορά του εργαλείου. Η ζώνη φθοράς αυξάνει την τάση του κοπτικού εργαλείου για δυναμική αστάθεια. Κατεργασία κοπής, για παράδειγμα, που είναι απαλλαγμένη από ταλαντώσεις, όταν το κοπτικό εργαλείο είναι οξύ, είναι δυνατό να εμπλακεί σε απαράδεκτες ταλαντώσεις, όταν αυτό φθείρεται.

1.5 Παράγοντες κοπής, που επηρεάζουν τη ζωή του εργαλείου.

Οι παράγοντες που επιδρούν στη ζωή του εργαλείου είναι οι εξής:

- Οι συνθήκες κοπής (ταχύτητα κοπής, πρόωση, βάθος κοπής).
- Η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου.
- Το υλικό του εργαλείου.
- Το υλικό του τεμαχίου.
- Το υγρό κοπής.
- Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος εργαλειομηχανή-εργαλείο-τεμάχιο.
- Ο τρόπος προσδέσεως εργαλείου και τεμαχίου.

1.5.1 Οι συνθήκες κατεργασίας.

Η επιρροή των συνθηκών κατεργασίας (v , f , a για τόνευση) ενέχει εξαιρετική σημασία, γιατί αυτές ελέγχουν το ρυθμό αφαιρούμενου υλικού ($f \times a \times v$ ή $t_1 \times b_1 \times v$) και κατ' ακολουθία το ρυθμό παραγωγής, δηλαδή την παραγωγικότητα της κατεργασίας. Αυτό εκφράζει πολύ καθαρά στην αποκαλούμενη γενικευμένης εξίσωση ζωής του εργαλείου ή γενικευμένη σχέση Taylor :

$$Tv^{1/n} f^{1/m} a^{1/k} = C_1 \text{ όπου } n, m, k, C_1 \text{ σταθερές.}$$

Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει, ότι η ταχύτητα κοπής ασκεί την εντονότερη επίδραση στη ζωή του εργαλείου, ενώ η πρόωση και το βάθος κοπής ακολουθούν, δηλαδή

$$1/n > 1/m > 1/k.$$

1.5.2 Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου.

Όπως γνωρίζουμε, αύξηση στη γωνία του αποβλήτου του εργαλείου έχει ευνοϊκά αποτελέσματα στην κοπή, άρα και στη ζωή του εργαλείου. Αυτό όμως ισχύει μέχρι ένα

όριο στην τιμή της γωνίας του αποβλήτου. Και αυτό γιατί, αν μεγαλώσει υπέρμετρα η γωνία αυτή, τότε θα ελαττωθούν απαράδεκτα οι διατομές, μέσα από τις οποίες απάγεται η παραγόμενη στην περιοχή κοπής θερμότητα στην υπόλοιπη μάζα του εργαλείου, με συνέπεια αύξηση της θερμοκρασίας και συνεπώς χειροτέρευση της ζωής του εργαλείου. Οι αντιμαχόμενοι αυτοί δύο παράγοντες επιβάλλουν κάποια βέλτιστη τιμή στη γωνία αποβλήτου του εργαλείου. Πιο συγκεκριμένα λ.χ. για τόννευση εκχονδρίσεως σκληρού χάλυβα με εργαλείο από ταχυχάλυβα και από σκληρομέταλλο η βέλτιστη τιμή της γωνίας αποβλήτου λαμβάνεται 14° και $3,5^{\circ}$ αντίστοιχα.

Σχετικά με την γωνία ελευθερίας του εργαλείου μπορούμε να διατυπώσουμε τον κανόνα ότι αύξηση της γωνίας ελευθερίας συνεπάγεται ελάττωση του πλάτους της ζώνης φθοράς και επομένως αύξηση της ζωής του κοπτικού εργαλείου. Το αντίθετο συμβαίνει με μείωση της γωνίας ελευθερίας του εργαλείου. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειώσουμε, ότι λόγοι μηχανικής αντοχής του εργαλείου περιορίζουν την αύξηση της γωνίας ελευθερίας, λόγω της επερχόμενης εξασθένισης του εργαλείου.

Συνιστώμενες τιμές της γωνίας α και κατά μέσο όρο 8° για εργαλείο από ταχυχάλυβα και 6° για εργαλείο από σκληρομέταλλο.

1.5.3 Επιρροή του υλικού του εργαλείου.

Η αξιολόγηση του υλικού κατασκευής του εργαλείου βασίζεται κατά κύριο λόγο στο βαθμό διατηρήσεως της σκληρότητάς του σε αύξηση της θερμοκρασίας. Έχει διαπιστωθεί, ότι περισσότερο ευαίσθητοι σε μεταβολές της θερμοκρασίας είναι οι ταχυχάλυβες, ακολουθούν τα σκληρομέταλλα, τα οποία όμως είναι περισσότερο ευαίσθητα από τα κεραμευτικά πυριμάχων οξειδίων. Επειδή όμως οι αναπτυσσόμενες κατά την κοπή των μετάλλων θερμοκρασίες έχουν άμεση σχέση με την ταχύτητα κοπής και η πτώση της σκληρότητας των υλικών για κοπτικά εργαλεία συνδέεται με την φθορά και κατ' επέκταση με τη ζωή των εργαλείων, μπορούμε να διατυπώσουμε την άποψη, ότι διατηρείται αυτή η τάξη ευαισθησίας των υλικών αυτών και ως προς μεταβολές της ταχύτητας κοπής.

Πράγματι, αυτό επιβεβαιώνεται από πειραματικά δεδομένα σε πλατιά έκταση. Ο εκθέτης της ζωής του εργαλείου ή ο εκθέτης $1/\eta$ της ταχύτητας κοπής εκφράζουν την επιρροή της ταχύτητας κοπής στη ζωή του εργαλείου. Έτσι, όσο μικρότερη είναι η τιμή του η (ή μεγαλύτερη η τιμή του $1/\eta$), τόσο πιο έντονη είναι η επίδραση της ταχύτητας κοπής στη

ζωή του εργαλείου. Έχει βρεθεί, ότι ο μικρότερος εκθέτης η ανήκει στους ταχυχάλυβες, μεγαλύτερος εκθέτης χαρακτηρίζει τα σκληρομέταλλα και ο μέγιστος αναφέρεται στα κεραμευτικά πυριμάχων οξειδίων.

Αναλυτικότερα, οι εκθέτες της ζωής του εργαλείου καλύπτουν πρακτικά τις περιοχές :

- Από 0,08 – 0,20 για τους ταχυχάλυβες,
- Από 0,20 – 0,50 για τα σκληρομέταλλα και
- Από 0,50 – 0,70 για τα κεραμευτικά πυριμάχων οξειδίων.

1.5.4 Πως επιδρά το υλικό του τεμαχίου στη ζωή του εργαλείου.

Το υλικό του κομματιού ασκεί σημαντική επιρροή στη ζωή του εργαλείου. Έτσι, ενδιαφέρει η χημική σύνθεση του υλικού, η κρυσταλλική του δομή, η σκληρότητα, η ικανότητά του για σκλήρωση και οι διάφορες ακαθαρσίες και εγκλείσματα που περιέχονται σε αυτό.

Η σκληρότητα του υλικού, όπως προφανές, επηρεάζει τη ζωή του εργαλείου κατά τέτοιο τρόπο, ώστε αύξηση της σκληρότητας να έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ζωής του εργαλείου, με σταθερούς βέβαια τους υπόλοιπους παράγοντες κοπής.

Επίσης, σκληρά εγκλείσματα και επιφανειακές σκουριές επιδρούν δυσμενώς στη ζωή του εργαλείου. Επιπλέον, προσθήκη αργιλίου μπορεί να δράσει δυσμενέστατα σε αυτή, αν αντιδράσει με το οξυγόνο και σχηματίζει τη σκληρότατη λειαντική ουσία οξείδιο του αργιλίου.

1.5.5 Επίδραση του υγρού κοπής.

Η χρησιμοποίηση κατάλληλου υγρού κοπής ασκεί ευνοϊκή επίδραση στη ζωή του κοπτικού εργαλείου μέσω της λιπαντικής και ψυκτικής του δράσης.

1.6 Επιρροή τασικών παραγόντων της κοπής των μετάλλων επί των συνιστωσών της δυνάμεως (ή αντιστάσεως) κοπής.

Οι ακόλουθοι παράγοντες κοπής ασκούν επίδραση επί των δυνάμεων κοπής:

- Παράγοντες σχετιζόμενοι με το κοπτικό μέρος του εργαλείου, δηλαδή, η γεωμετρία του: Γωνία αποβλήτου γ , γωνία ελευθερίας α , γωνία λοξότητας λ_s , γωνία θέσεως της κύριας κόψης κ_r , ακτίνα καμπυλότητας r της ακής, μορφή της επιφάνειας αποβλήτου και της κόψης, βαθμός φθοράς (ζώνη φθοράς και φθορά κρατήρα), τραχύτητα επιφάνειας κρίσιμων επιφανειών του εργαλείου, και υλικό κατασκευής του υλικού.
- Παράγοντες συνδεόμενοι με το υπό κατεργασία μέταλλο, ή κράμα: Χημική σύνθεση και κρυσταλλική δομή, χαρακτηριστικά του υλικού που επηρεάζουν τις μηχανικές του ιδιότητες. Έτσι, οι μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου (όριο διαρροής υπό συνθήκες παραμορφώσεως, ταχύτητας παραμορφώσεως και θερμοκρασίας, μέγιστη αντοχή, σκληρότητα κ.α.) μαζί με τα χαρακτηριστικά της κρυσταλλοδομής του ασκούν ικανή επιρροή στις δυνάμεις κοπής και τέλος
- Παράγοντες συναπτόμενοι με τις συνθήκες κατεργασίας, όπως: με την ταχύτητα κοπής v , με την πρόωση s , με το βάθος κοπής a , με υγρό κοπής και με τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος (κοπτικό – εργαλειομηχανή – τεμάχιο).

1.6.1 Η γωνία αποβλήτου γ του εργαλείου.

Μεταβάλλοντας τη γωνία αποβλήτου γ του κοπτικού εργαλείου η εφαπτομενική συνιστώσα F_T μειώνεται. Η επιρροή της γ είναι εντονότερη, όσο πιο μαλακό και όλκιμο είναι το κατεργαζόμενο μέταλλο ή κράμα. Κατά την κοπή ψαθυρών μετάλλων (π.χ. φαιός χυτοσίδηρος, κράματα χαλκού κ.α.), η γ ασκεί ηπιότερη επίδραση, γεγονός που συμβαίνει και σε υψηλές ταχύτητες κοπής. Άρα, σε υψηλές ταχύτητες κοπής (όπως οι εφαρμοζόμενες με εργαλεία από σκληρομέταλλο) και με αρνητικές ακόμη γωνίες αποβλήτου, οι δυνάμεις κοπής αυξάνονται πολύ λιγότερο αφοτί με θετικές τιμές της γωνίας αποβλήτου. Επιπλέον, μικρές τιμές της γωνίας γ ενισχύουν την μηχανική αντοχή του κοπτικού μέρους του εργαλείου. Η επιρροή της γωνίας αποβλήτου, έχει διαπιστωθεί, ότι είναι πιο έντονη επί της δύναμης προώσεως F_V και της δυνάμεως απωθήσεως F_A του εργαλείου από εκείνη της

κύριας δύναμης κοπής F_H . Το ποσοστό, δηλαδή, μείωσης ή αύξησής τους με σταθερή αντίστοιχη αύξηση ή μείωση της γωνίας γ είναι μεγαλύτερο από εκείνο που αφορά στην F_H . Τελικά, για κάθε συνδυασμό υλικού τεμαχίου – υλικού εργαλείου, η τιμή της γωνίας γ επιλέγεται από εγχειρίδια ή με διαδικασίες βελτιστοποίησης, ούτως ώστε να μεγιστοποιείται η ζωή του εργαλείου.

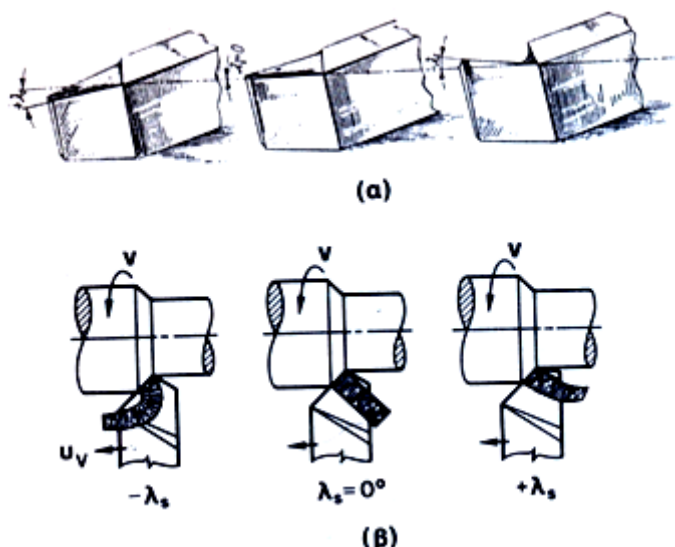
1.6.2 Η γωνία ελευθερίας α .

Η γωνία ελευθερίας α του κοπτικού, για οξύ σχετικά εργαλείο για τις εκάστοτε συνιστώμενες τιμές, ασκεί αμελητέα επίδραση στις δυνάμεις κοπής. Καθώς όμως η γωνία α μικραίνει, η αναπτυσσόμενη στην ελευθέρα επιφάνεια του εργαλείου δύναμη τριβής αυξάνει, με συνέπεια αύξηση των δυνάμεων κοπής αφού προστίθεται μία συνιστώσα, η οποία δεν λαμβάνει μέρος στο σχηματισμό του αποβλήτου. Η αύξηση αυτή των δυνάμεων αποτελεί ασήμαντο ποσοστό της δυνάμεως κοπής που όμως, υπό συνθήκες προχωρημένης ζώνης φθοράς του κοπτικού, η γωνία ελευθερίας μεταβάλλεται με αποτέλεσμα να αλλάζει χαρακτήρα και η τριβή στη διεπιφάνεια εργαλείου – κατεργασμένης επιφάνειας τεμαχίου (τριβή ακινησίας και τριβή ολισθήσεως), ασκώντας δυσμενή επιρροή επί των δυνάμεων κοπής.

1.6.3 Η γωνία λοξότητας $\lambda_s = \lambda$.

Μεταβολές της γωνίας λοξότητας επηρεάζουν τη ροή του αποβλήτου, Σχήμα 1.11. Η γωνία λ παίζει σοβαρό σχετικά ρόλο σε μεγάλες τιμές της. Δεδομένου ότι πρακτικώς οι επιλεγόμενες τιμές της είναι $\lambda_s = -5^\circ$ έως $+5^\circ$, με σχετικά μικρό εύρος μεταβολής, η επιρροή της στην κύρια συνιστώσα της δυνάμεως κοπής F_H είναι αμελητέα, γεγονός που δεν συμβαίνει και με τις συνιστώσες F_V (δύναμη προώσεως) και F_A (δύναμη απωθήσεως), όπου η επίδρασή της είναι σημαντική.

Μια γενική παρατήρηση αναφορικά με το ρόλο της λ_s είναι ότι αρνητικές τιμές της σταθεροποιούν την κοπή, ενώ το απόβλητο ρέει προς την κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου, γεγονός που δυσκολεύει την εκτέλεση της κατεργασίας και χειροτερεύει την τραχύτητα.



Σχήμα 1.11 α) Γωνία λοξότητας σε τυπικό εργαλείο τόννευσης, **β)** Επιρροή της γωνίας λοξότητας στην διεύθυνση ροής του αποβλήτου.

1.6.4 Η ακτίνα καμπυλότητας r της ακής του εργαλείου.

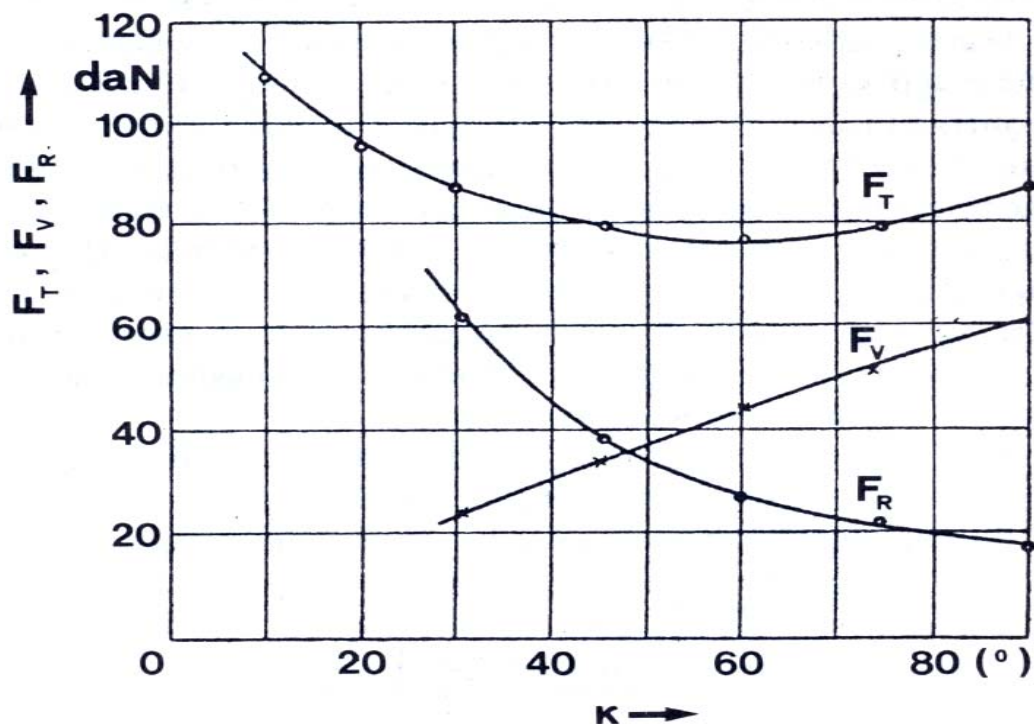
Αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας της ακής του εργαλείου συνεπάγεται αύξηση της δύναμης κοπής. Η αύξηση αυτή οφείλεται στο μεγαλύτερο σχετικά μήκος της κόψης του κοπτικού και συνεπώς και της επιφάνειας επαφής αποβλήτου – εργαλείου, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη τιμή του πλαστικού έργου παραμόρφωσης. Επίσης, η αυξημένη καμπυλότητα της ακής μειώνει το μέσο θεωρητικό πάχος του αποβλήτου, γεγονός που συνεισφέρει και αυτό στην αύξηση της δύναμης κοπής. Το τελευταίο συμβαίνει εντονότερα, σε μεγάλες τιμές της ακτίνας καμπυλότητας του εργαλείου και σε μικρές τιμές βάθους κοπής a . Η συνιστώσα F_A επηρεάζεται περισσότερο από μεταβολές της r , ενώ είναι αμελητέα η επιρροή της τελευταίας επί της συνιστώσας F_V . Στις εφαρμογές συχνά για την μείωση της F_R ώστε να αποφευχθούν ταλαντώσεις και να επιτευχθεί μεγαλύτερη διαστατική ακρίβεια χρησιμοποιούνται εργαλεία μικρότερων τιμών της ακτίνας r .

1.6.5 Η γωνία θέσεως $K_r = K$ της κύριας κόψης του εργαλείου.

Η μεταβολή της γωνίας θέσεως της κύριας κόψης οδηγεί σε μεταβολή του θεωρητικού πάχους του αποβλήτου, όταν οι υπόλοιποι παράγοντες κοπής παραμένουν σταθεροί. Άρα, αύξηση του θεωρητικού πάχους h του αποβλήτου συνεπάγεται μείωση της

ειδικής αντιστάσεως κοπής k_s , ενώ αντίθετα μείωσή του έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της τελευταίας.

Η μορφή τυπικών καμπύλων των συνιστωσών F_H , F_A και F_V συναρτήσει της γωνίας κ φαίνεται στο Σχήμα 1.12. Παρατηρούμε ότι η επίδρασή της επί των συνιστωσών F_A και F_V είναι εντονότερη από εκείνη επί της κύριας συνιστώσας F_H .



Σχήμα 2.12. Επίδραση της γωνίας θέσεως κ της κύριας κόψης του εργαλείου επί των συνιστωσών F_H , F_A και F_V .

1.6.6 Η φθορά του κοπτικού εργαλείου.

Η εμφάνιση κρατήρα συνοδεύεται από αύξηση της γωνίας αποβλήτου του εργαλείου με ευνοϊκά αποτελέσματα στην εξέλιξη του φαινομένου της κοπής και στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρείται μείωση στις δυνάμεις κοπής. Βέβαια, είναι σημαντική και η θέση του σχηματιζόμενου κρατήρα σε σχέση προς την ακή του εργαλείου. Απομακρυσμένος κρατήρας ελάχιστα συντελεί στο σχηματισμό του αποβλήτου και συνεπώς, ασκεί μικρή επίδραση επί των δυνάμεων κοπής. Από την άλλη πλευρά, η ζώνη φθοράς που δημιουργείται (στην ελεύθερα επιφάνεια του εργαλείου) προξενεί αύξηση των δυνάμεων τριβής και τελικά στη δύναμη κοπής. Άρα, σε μικρές σχετικά τιμές του πλάτους της ζώνης φθοράς υπερισχύει η συμμετοχή της φθοράς του κρατήρα. Με περαιτέρω αύξηση

της ζώνης φθοράς, η τριβή στη διεπιφάνεια εργαλείου – τεμαχίου αρχίζει να αυξάνει τη σπουδαιότητά της, με δυσμενές αποτέλεσμα για τις δυνάμεις κοπής, πράγμα που σημαίνει ανύψωση των δυνάμεων, καθώς ο χρόνος κοπής του εργαλείου προχωρεί.

1.6.7 Το υλικό του κοπτικού εργαλείου και του προς κατεργασία τεμαχίου.

Το υλικό του εργαλείου ασκεί κάποια μικρή επιρροή στην κύρια δύναμη F_H , η οποία βελτιώνεται, καθώς μεταβαίνουμε από ταχυχάλυβες σε σκληρομέταλλα και τελικά σε κεραμικά. Η επίδραση του υλικού του εργαλείου στις δυνάμεις κοπής οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στους παράγοντες, οι οποίοι διαμορφώνουν την φύση της τριβής στη διεπιφάνεια αποβλήτου – εργαλείου και εργαλείου – κατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου.

Όσο αφορά τον ρόλο που παίζει το κατεργαζόμενο μέταλλο στις δυνάμεις κοπής, το είδος της κρυσταλλικής δομής του κατεργαζόμενου μετάλλου αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει σοβαρά την αντίσταση κοπής.

1.6.8 Η πρόωση και το βάθος κοπής.

Η επίδραση του βάθους κοπής a επί των συνιστωσών F_H , F_A και F_V της δυνάμεως κοπής κατά την διαμήκη τórνευση ανθρακούχων χαλύβων, επιβελτιωμένων χαλύβων και χυτοσιδήρων με εργαλείο από ταχυχάλυβα ή από σκληρομέταλλο είναι εν γένει εντονότερη από εκείνη της προώσεως s . Για παράδειγμα, στις παραπάνω περιπτώσεις, η κύρια συνιστώσα F_H εμφανίζεται ανάλογη του a , ενώ προκύπτει μικρότερη ως προς μεταβολές του s .

Η παρατηρούμενη αυτή διαφορά μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: Οι αναπτυσσόμενες κατά την κοπή τάσεις δεν κατανέμονται ομοιόμορφα στη θεωρητική διατομή του αποβλήτου κατά τη διεύθυνση του πάχους του και μάλιστα κατά τέτοιο τρόπο που όσο απομακρυνόμαστε από την κόψη, τόσο οι τάσεις μικραίνουν, καθώς και οι συνακόλουθες πλαστικές παραμορφώσεις. Ακόμη, με σταθερούς τους λοιπούς παράγοντες κοπής, αύξηση της προώσεως συνεπάγεται παχύτερο θεωρητικό απόβλητο ($A=f \times a$). Άρα, η παρακαλούμενη αύξηση στην F_H δεν θα είναι ανάλογη αλλά θα υπολείπεται. Από την άλλη

πλευρά όμως, οποιαδήποτε αύξηση στο βάθος κοπής a , απλώς μεγαλώνει το πλάτος b_1 του αποβλήτου, ενώ το πάχος του (με σταθερή την πρόωση) παραμένει αμετάβλητο.

Συνεπώς, μία κατά προσέγγιση ανάλογη επιρροή του βάθους κοπής a συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις.

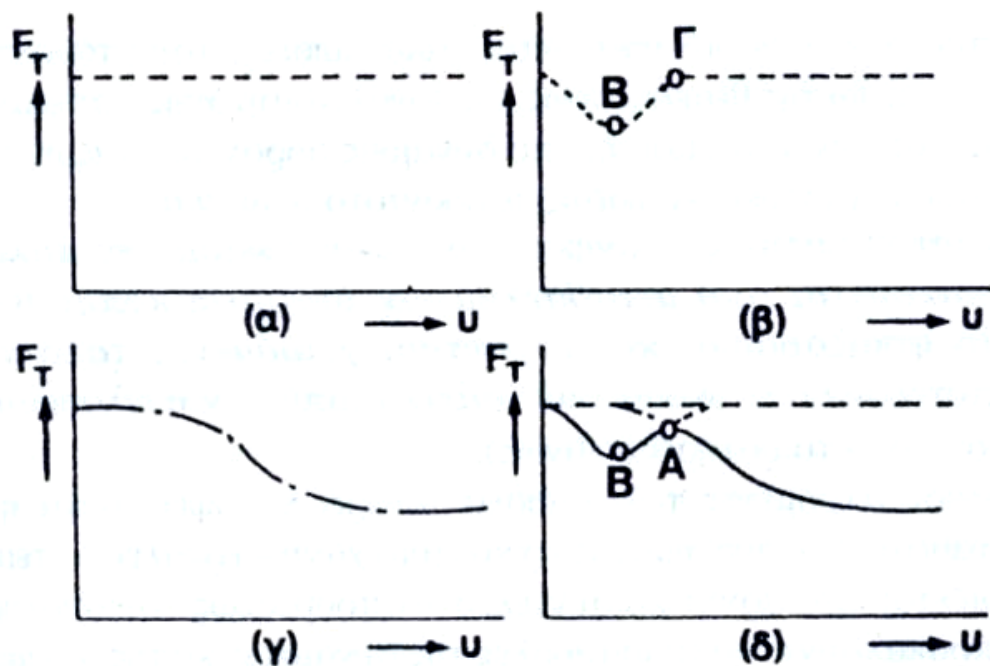
1.6.9 Η ταχύτητα κοπής .

Η ταχύτητα κοπής αποτελεί μία θεμελιώδη ανεξάρτητη μεταβλητή της κοπής των μετάλλων και η επιρροή της στην κύρια συνιστώσα F_H , παρουσιάζει μείζον ενδιαφέρον για το λόγο ότι συνοδεύεται άμεσα με την καταναλισκόμενη ισχύ κοπής.

Μια τυπική καμπύλη μεταβολής της κύριας συνιστώσας F_H συναρτήσει της ταχύτητας κοπής v , για ένα μεγάλο εύρος μεταβολών της με σταθερούς τους λοιπούς παράγοντες, φαίνεται στο Σχήμα 1.13.δ. Η μορφή αυτή της καμπύλης εξηγείται ως αποτέλεσμα συνδυασμού του σχηματισμού της ψευδοακμής και της πτώσεως του ορίου διαρροής σε διάτμηση του κατεργαζόμενου υλικού εξαιτίας της αυξημένης θερμοκρασίας κοπής. Στην περιοχή, δηλαδή, των χαμηλών ταχυτήτων κοπής, όπου ευνοείται ο σχηματισμός της ψευδοακμής (για τα υλικά, στα οποία αυτό συμβαίνει, όπως π.χ. σε ένα ανθρακούχο χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα), η δύναμη F_H μειώνεται για τους λόγους, που έχουν αναφερθεί στην παράγραφο [2.2.1].

Σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής η F_H μειώνεται. Η επίδραση της v επί της F_H μπορεί να θεωρηθεί ως ασήμαντη στην περιοχή των υψηλών ταχυτήτων κοπής, όπως συμβαίνει με την χρήση σκληρομετάλλων.

Μια γενική παρατήρηση είναι ότι, μέσα στο εύρος των ταχυτήτων κοπής, που χρησιμοποιούνται στην πράξη, υπερισχύει η έμμεση επίδραση της ταχύτητας κοπής μέσω των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών. Η ταχύτητα κοπής, που αντιστοιχεί στο σημείο Α, πρακτικώς είναι μικρότερη των 40 m/min, τιμή , που συνιστά ένα κατώτερο σύνορο στην χρησιμοποίηση σκληρομετάλλων ως κοπτικών. Άρα σε υψηλότερες ταχύτητες συνεπάγεται μείωση της συνιστώσας F_H .



Σχήμα 2.13 Επιρροή της ταχύτητας κοπής u στην κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_H με σταθερούς τους υπόλοιπους παράγοντες.

- α) Η F_T παραμένει σταθερά σε όλη την περιοχή μεταβολών της u , αν δεν ληφθεί υπόψη η επίδραση της ψευδοακμής και της θερμοκρασίας.
- β) Επιρροή της ψευδοακμής. Το σημείο B αντιστοιχεί στο μέγιστο μέγεθος της ψευδοακμής, το δε Γ στο σημείο εξαφανίσεως της (αύξηση της γωνίας γ και μείωση της επιφάνειας επαφής του αποβλήτου – εργαλείου εξαιτίας σχηματισμού της ψευδοακμής).
- γ) Λόγω αναπτύξεως υψηλών θερμοκρασιών (με αύξηση της ταχύτητας) κατά την κοπή, μειώνεται το όριο διαρροής του κατεργαζόμενου μετάλλου σε διάτμηση.
- δ) Η πραγματική καμπύλη.

Κεφάλαιο 2 Αλουμίνιο και Κράματα Αλουμινίου

2.1 Εισαγωγή.

Το χημικό στοιχείο **αργίλιο**, γνωστό και ως **αλουμίνιο** (Σχ. 2.1) είναι ένα μέταλλο μεγάλης σημασίας για την παγκόσμια οικονομία, καθώς χρησιμοποιείται ευρύτατα στην βιομηχανία καθώς επίσης και στην οικοδομή. Είναι το πιο άφθονο υλικό στο φλοιό της γης μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Σαν πρώτη ύλη για την παραγωγή αλουμινίου χρησιμοποιείται ο βωξίτης (ένυδρο οξείδιο του αλουμινίου με προσμίξεις οξειδίων του σιδήρου). Από τον βωξίτη με χημικό καθαρισμό παραμένει η αλουμίνα (Al_2O_3), από την οποία, με ηλεκτρόλυση, προκύπτει το αλουμίνιο.[1]

Οι ιδιότητες που κάνουν το αλουμίνιο τόσο σημαντικό για τη βιομηχανία είναι το χαμηλό του βάρος, η υψηλή αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις και η εξαιρετική του αντοχή στη διάβρωση, χαρακτηρίζεται από υψηλή κατεργασιμότητα, είναι μη τοξικό και μη μαγνητικό. Το καθαρό αλουμίνιο είναι αρκετά μαλακό και όλκιμο. Με την προσθήκη σιδήρου, χαλκού και άλλων κραματικών στοιχείων βελτιώνονται κατά πολύ οι μηχανικές του ιδιότητες. Παρουσιάζει επίσης πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα.



Σχ. 2.1. Ράβδος αργιλίου.

2.2 Το αλουμίνιο και οι χρήσεις του.

Το αλουμίνιο συμβολίζεται με τα γράμματα **Al**, ανήκει στην κατηγορία ελαφρών μετάλλων, έχει θερμοκρασία τήξης $660,37^{\circ}\text{C}$, θερμοκρασία βρασμού 2467°C και πυκνότητα $2.7\text{g}/\text{cm}^3$.

Τα κράματα αλουμινίου με 2,5-6,3% κ.β. χαλκό ονομάζονται ντουραλουμίνια. Περιέχουν συνήθως ως πρόσθετα κραματικά στοιχεία μαγνήσιο και σπανιότερα, μαγγάνιο και πυρίτιο. Παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες οφείλονται στη σκλήρυνσή τους με δημιουργία κατακρημνισμάτων και χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική και σε άλλες εφαρμογές όπου το χαμηλό βάρος και οι καλές μηχανικές ιδιότητες σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι ζητούμενα κράματα αλουμινίου-λιθίου.

Άλλα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία, τη βιομηχανία αθλητικών ειδών και στη ναυπηγική. Χρησιμοποιείται επίσης για την κατασκευή των κουτιών για ποτά, του αλουμινόχαρτου και άλλων εργαλείων της κουζίνας. Το οξείδιο του αργιλίου, αλούμινα, βρίσκεται στη φύση με τη μορφή ρουμπινιού, του ζαφειριού και του κορουνδίου (ένα από τα σκληρότερα υλικά στη φύση). Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται η συνθετική αλουμίνα ως λειαντικό. Τα οξείδια του αργίλου χρησιμοποιούνται επίσης στην υαλουργία και την κατασκευή λέιζερ.[2]

2.3 Γενικές ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου.

Τα κράματα του αλουμινίου, διακρίνονται σε *κράματα διαμόρφωσης* και σε *κράματα χύτευσης*. Τα κράματα των δύο αυτών κατηγοριών υποδιαιρούνται σε κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία και σε κράματα που η θερμική κατεργασία είναι αδύνατη. Οι ιδιότητες των πρώτων εξαρτώνται από την ακολουθούμενη θερμική κατεργασία, ενώ οι ιδιότητες των δεύτερων εξαρτώνται από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί.[1]

Όπως το καθαρό αλουμίνιο, έτσι και τα κράματά του έχουν χαμηλή πυκνότητα, καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και υψηλή αντοχή σε διάβρωση. Οι κύριες προσθήκες των κραμάτων αλουμινίου είναι ο χαλκός, ο σίδηρος, το μαγγάνιο, το μαγνήσιο,

το πυρίτιο και ο ψευδάργυρος. Η επίδραση των προσθηκών στις ιδιότητες του αλουμινίου φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίν.1).

Πίνακας 1. Κύριες προσθήκες κραμάτων αλουμινίου και η επίδραση.

Προσθήκη	Επίδραση στις ιδιότητες του αλουμινίου
Χαλκός	Σε ποσοστό έως 12%, προκαλεί βελτίωση της μηχανικής αντοχής και της κατεργασιμότητας.
Σίδηρος	Σε μικρά ποσοστά βελτιώνει την αντοχή και τη σκληρότητα και, ταυτόχρονα, μειώνει τις πιθανότητες θερμικής ρωγμάτωσης κατά τη χύτευση.
Μαγγάνιο	Βελτιώνει την ολκιμότητα και, σε συνδυασμό με το σίδηρο, τη χυτευσιμότητα.
Μαγνήσιο	Βελτιώνει τη μηχανική αντοχή και την αντοχή σε διάβρωση. Σε ποσοστό μεγαλύτερο από 6%, προκαλεί σκλήρυνση με κατακρήμιση.
Πυρίτιο	Βελτιώνει, κατά πολύ, τη χυτευσιμότητα και την αντοχή σε διάβρωση.
Ψευδάργυρος	Μειώνει τη χυτευσιμότητα, αλλά, σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία προσθήκης, βελτιώνει τη μηχανική αντοχή.

Όλα τα κράματα αλουμινίου ταξινομούνται και κατατάσσονται σύμφωνα με την κωδικοποίηση AA (Aluminium Association) που περιγράφεται με τέσσερα αριθμητικά ψηφία και ένα γράμμα, βλ.Πίν.2. Το πρώτο ψηφίο καθορίζει το κύριο στοιχείο ενώ το γράμμα που ακολουθεί τα 4 ψηφία καθορίζει την κατάσταση του κράματος από άποψη θερμικής κατεργασίας (temper designation).[2]

Πίνακας 2. Ταξινόμηση κραμάτων αλουμινίου.

Κράματα διαμόρφωσης		Κράματα χύτευσης	
Κύριο στοιχείο κράματος	Σειρά	Κύρια προσθήκη	Σειρά
Αλουμίνιο (Al)	1XXX	(Al)	1XX.X
Χαλκός (Cu)	2XXX	(Cu)	2XX.X
Μαγγάνιο (Mn)	3XXX	(Si-Cu-Mg)	3XX.X
Πυρίτιο (Si)	4XXX	(Si)	4XX.X
Μαγνήσιο (Mg)	5XXX	(Mg)	5XX.X
Μαγνήσιο και Πυρίτιο (Mg ₂ Si)	6XXX	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά	6XX.X
Ψευδάργυρος (Zn)	7XXX	(Zn)	7XX.X
Άλλα στοιχεία	8XXX	Κασσίτερος (Sn)	8XX.X
Μη χρησιμοποιούμενη	9XXX	Άλλα στοιχεία	9XX.X

Οι σειρές 1000, 3000 και 5000 περιλαμβάνουν κράματα που δεν επιδέχονται σκλήρυνση με θερμικές κατεργασίες. Αντίθετα, τα κράματα των σειρών 2000, 6000 και 7000 σκληρύνονται με γήρανση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται, συνοπτικά, τα γενικά χαρακτηριστικά των σειρών κραμάτων αλουμινίου.

(α) Κράματα διαμόρφωσης

Σειρά 1000: Τα κράματα αυτής της σειράς περιέχουν τουλάχιστον 99% Al. Οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι φτωχές αλλά βελτιώνονται με ενδοτράχυνση. Είναι κατάλληλα για επεξεργασία 'έν ψυχρώ και αντέχουν σημαντικά σε υγρή και θαλάσσια ατμόσφαιρα. Παρουσιάζουν θαυμάσια ηλεκτρική αγωγιμότητα (σύρματα, καλώδια, κλπ.), θερμική αγωγιμότητα (καλοριφέρ κλπ.) και αντοχή σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Οι κυριότερες ακαθαρσίες αυτής της οικογένειας κραμάτων είναι τα Fe και Si ενώ προστίθεται μέχρι 0.14% Cu για βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων.

Σειρά 3000 (Al - Mn): Η σκλήρυνση των κραμάτων αυτών οφείλεται στη μεσομεταλλική ένωση Al_6Mn που διασπείρεται στην μεταλλική μήτρα για $\pi(Mn) < 15\%$. Επιπλέον προσθήκη Mg σε ποσοστό μικρότερο του 1.2% επιφέρει και μια δευτερογενή σκλήρυνση.

Τα κράματα Al+Mn μορφοποιούνται εύκολα, αντέχουν καλά στην ατμοσφαιρική διάβρωση και συγκολλούνται εύκολα.

Σειρά 5000 (Al - Mg): Τα κράματα της σειράς αυτής περιέχουν μαγνήσιο με $\pi(Mg) < 4.0\%$. Οι μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων της σειράς 5000 εξαρτώνται σημαντικά από την περιεκτικότητα σε Mg και μπορούν να βελτιωθούν με ενδοτράχυνση. Συγκολλούνται εύκολα, ανθίστανται πολύ ικανοποιητικά στη διάβρωση και παρουσιάζουν καλή ποιότητα στην επιφάνειά τους μετά από λείανση και ανοδίωση. Στην περίπτωση αυτή τα ποσοστά των προσμίξεων Fe και Si πρέπει να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα.

Τα κράματα των σειρών 1000, 3000, 5000, σε εφαρμογές με υψηλές λειτουργικές απαιτήσεις σε αντοχή, αντικαθίστανται από κράματα που σκληρύνονται με γήρανση. Τα τελευταία ανήκουν κυρίως στις σειρές 2000, 6000, 7000 και παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Σειρά 2000 (Al-Cu): Τα πλούσια σε Al κράματα Al-Cu που ανήκουν στη σειρά 2000 ονομάζονται και ντουραλουμίνια, και περιέχουν χαλκό σε περιεκτικότητα $2.6\div 6.3\%$ ή και μαγνήσιο σε περιεκτικότητα $0.5\div 1.5\%$. Η σκλήρυνση της δομής επιτυγχάνεται με την κατακρήμνιση των μεσομεταλλικών ενώσεων $CuAl_2$ και/ή $CuMgAl_2$ οι οποίες προσδίδουν στο κράμα εξαιρετικές ιδιότητες. Το κράμα 2024 είναι το πιο διαδεδομένο στην

αεροναυπηγική βιομηχανία. Το μειονέκτημα των κραμάτων της σειράς 2000 είναι η χαμηλή συγκολλησιμότητά τους στις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης.

Σειρά 6000 (Al – Mg – Si): Η σκλήρυνση της δομής που παρουσιάζεται στα κράματα αυτής της σειράς οφείλεται στο σχηματισμό και την κατακρήμνιση της ένωσης Mg_2Si . Προσθήκη Mn (< 0.8%) και Cr (<0.3%) συντελούν στην βελτίωση της αντοχής. Τα κράματα της σειράς 6000 έχουν καλή συγκολλησιμότητα, πολύ καλή διαμορφωσιμότητα εν θερμό και εξαιρετική αντίσταση στην ατμοσφαιρική διάβρωση και στην διάβρωση κάτω από μηχανική φόρτιση.

Σειρά 7000: Τα κράματα αυτά χαρακτηρίζονται – έπειτα από τις κατάλληλες θερμικές κατεργασίες – από τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, σε σχέση με όλα τα κράματα αλουμινίου. Ανήκουν στο τριμερές σύστημα Al – Zn – Mg ή στο τετραμερές Al – Zn – Mg – Cu με $\pi(Zn)=4\div 8\%$, $\pi(Mn)=1\div 3\%$ και $\pi(Cu)=<2\%$. Η σκλήρυνση που επιτυγχάνεται οφείλεται κυρίως στην κατακρήμνιση της ένωσης $MgZn_2$. Έχουν μέτρια συγκολλησιμότητα και μειωμένη αντοχή εν θερμώ'' ($\theta > 120^\circ C$).

(β) Κράματα χύτευσης

Παρόλο που το αλουμίνιο έχει χαμηλή θερμοκρασία τήξης η χρήση του ως κράμα χύτευσης δεν είναι διαδεδομένη λόγω της παραμόρφωσης κατά την στερεοποίηση (shrinkage) της τάσης για ρωγμάτωση (hot cracking) που το χαρακτηρίζει. Όμως με την χρήση προσθηκών επιτυγχάνεται η δημιουργία κραμάτων χύτευσης Al με αποδεκτές λειτουργικές ιδιότητες. Γενικά τα κράματα χύτευσης περιέχουν μεγαλύτερες προσθήκες στοιχείων κραματοποίησης σε σχέση με τα κράματα διαμόρφωσης γεγονός που επιτρέπει να επιτυγχάνονται χαμηλότερες θερμοκρασίες ευτηκτικών μιγμάτων. Στον πίνακα 2 στα κράματα χύτευσης το τελευταίο ψηφίο μετά την υποδιαστολή υποδηλώνει την μέθοδο χύτευσης. Οι μέθοδοι χύτευσης που εφαρμόζονται είναι οι ακόλουθες:

- *Χύτευση σε άμμο* (sand casting) – συμβολισμός S. Χρησιμοποιείται για παραγωγή μικρής ποσότητας όμοιων χυτών αντικειμένων με πολύπλοκη μορφή.
- *Χύτευση σε μόνιμη τύπο* (permanent mold casting) – συμβολισμός P. Με την μέθοδο αυτή τα κράματα είναι μονοκρυσταλλικά και κατ'επέκταση ανθεκτικότερα και παρουσιάζουν μικρότερο πορώδες σε σύγκριση με την προηγούμενη μέθοδο χύτευσης.
- *Χύτευση υπό πίεση* (die casting) – συμβολισμός D. Με την μέθοδο αυτή επιτυγχάνονται μεγάλες ταχύτητες χύτευσης και μικροκρυσταλλικές δομές,

δυνατότητα αυτοματοποίησης της διεργασίας, λείες επιφάνειες και ακρίβεια στη γεωμετρία του αντικειμένου.

Γενικά, η μικροδομή των χυτών αντικειμένων άρα και οι μηχανικές ιδιότητες του χυτού εξαρτώνται κυρίως από την ταχύτητα στερεοποίησης, άρα από τον τρόπο χύτευσης.[1]

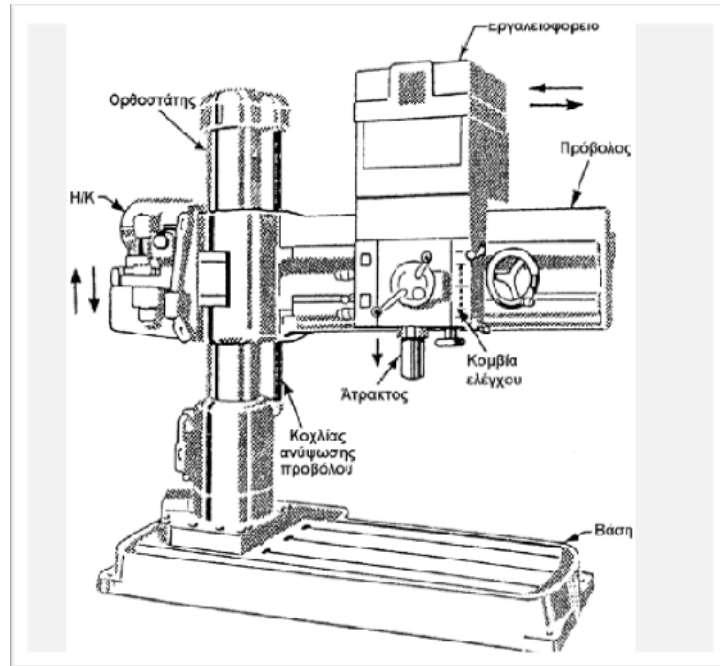
2.4 Η διάτρηση ως κατεργασία.

2.4.1 Γενικά.

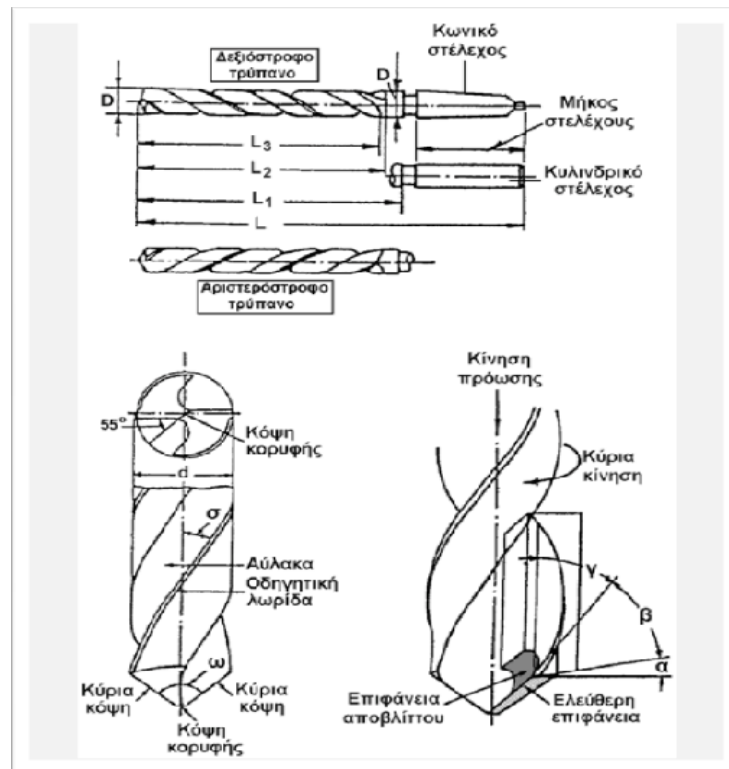
Η διάτρηση είναι κατεργασία αφαίρεσης υλικού προς διάνοιξη οπής ή διεύρυνση ήδη υπάρχουσας οπής.

Για την κατεργασία οπών γενικά υπάρχουν ποικίλες μέθοδοι, που διαφοροποιούνται στην ακρίβεια και στην ποιότητα τελικής επιφάνειας. Έτσι υπάρχει η κλασική διάτρηση, η εσωτερική τόννευση και η γλύφανση για την πρόσδοση τελικής μορφής με ακρίβεια διαστάσεων και ποιότητα επιφανείας. Εδώ θα ασχοληθούμε με την κλασική διάτρηση.[3]

Η χρησιμοποιούμενη εργαλειομηχανή είναι το δράπανο και ως κοπτικό εργαλείο χρησιμοποιείται το ελικοειδές τρύπανο, που χαρακτηρίζεται ως κοπτικό εργαλείο καθορισμένης γεωμετρίας και πολλαπλής σημειακής επαφής.



Σχ.2.2. Τυπικό δρέπανο.



Σχ.2.3. Ελικοειδές τρυπάνι.

2.4.2 Γεωμετρία και χαρακτηριστικά εργαλείου.

Γωνία κορυφής (point angle), ω

- Επιτρέπει την προοδευτική διείδυση του κοπτικού εργαλείου.
- Η ημιγωνία κορυφής ($\omega/2$) είναι η αντίστοιχη της γωνίας τοποθέτησης κ κατά την τόννευση.

Γωνία έλικας αυλάκων (helix angle), σ

- Βαίνει ελαττούμενη από την περιφέρεια προς το κέντρο του τρυπανιού.
- Προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\sigma = \arctan\left(\frac{\pi D}{h}\right),$$

όπου h είναι το βήμα της έλικας.

Γωνία αποβλήτου, γ

- Βαίνει ελαττούμενη από την περιφέρεια προς το κέντρο του τρυπανιού σύμφωνα με τη σχέση:

$$\gamma = \arctan\left[\frac{(2r/D)\tan\sigma}{\sin(\omega/2)}\right]$$

όπου r : η απόσταση από τον άξονα του τρυπανιού.

- Κατασκευάζεται ανάλογα με την ελίκωση του και με τυπικές τιμές για τα διάφορα υλικά τεμαχίων:
 - $35^\circ - 40^\circ$: Για μαλακά και ανθεκτικά υλικά (Cu, Zn, Al, πλαστικά).
 - $20^\circ - 30^\circ$: Για μέσης σκληρότητας υλικά (χάλυβας, χυτοχάλυβας, χυτοσίδηρος).
 - $10^\circ - 13^\circ$: Για σκληρά και υψηλής αντοχής υλικά.

Γωνία ελευθερίας, α

- Βαίνει αυξανόμενη από την περιφέρεια προς το κέντρο του κοπτικού εργαλείου. Συνήθεις τιμές: $6^\circ - 8^\circ$.

Γωνία σφήνας, β

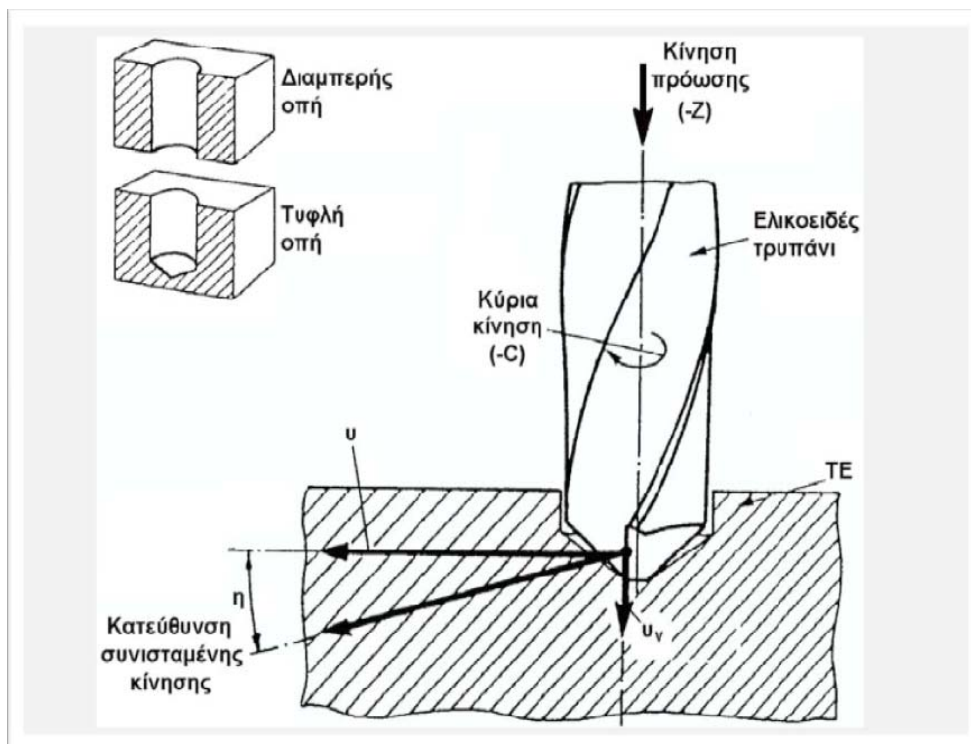
- Λαμβάνει μικρές τιμές για διάτρηση μαλακών υλικών και μεγάλες τιμές για διάτρηση σκληρών υλικών.

Γωνία κόψης κορυφής (chisel angle), ψ

- Είναι η γωνία που σχηματίζει η εγκάρσια κόψη με τις κύριες κόψεις.
- Βέλτιστη τιμή $\psi=55^\circ$, μεγαλύτερες τιμές δυσχεραίνουν σημαντικά την κοπή, ενώ μικρότερες αποδίδουν πολύ κακή κοπή και αυξάνουν τον κίνδυνο θραύσης του τρυπάνου.

2.4.3 Κινηματική της διάτρησης.

Κατά τη διάτρηση το τρύπανο συνήθως περιστρέφεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονά του (πρωτεύουσα κίνηση (-C)) και ταυτόχρονα προωθείται αξονικά (κίνηση προώσεως (-Z)) και εντός του προς διάτρηση τεμαχίου, βλέπε Σχ.2.4. Το τρύπανο στερεώνεται στην άτρακτο της εργαλειομηχανής με τη βοήθεια ειδικού σφικτήρα, ενώ το τεμάχιο συγκρατείται σταθερά στην τράπεζα της.



Σχ.2.4. Χαρακτηριστικά της διάτρησης.

Κινηματικά μεγέθη:

α) Ταχύτητα κοπής :

$$\bullet \quad v = \frac{\pi D n}{1000} \quad (\text{m/min})$$

β) Πρόωση :

$$\bullet \quad s \quad (\text{mm/rev})$$

γ) Πρόωση ανά κόψη :

$$\bullet \quad s_z = \frac{s}{z} \quad (\text{mm/κόψη})$$

δ) Ταχύτητα προώσεως :

$$\bullet \quad v_v = s n \quad (\text{mm/min})$$

ε) Βάθος κοπής :

$$\bullet \quad a = \frac{D'}{2} \quad (\text{mm})$$

Όπου D' σε mm, είναι η διάμετρος της ανοιγόμενης οπής. Στην περίπτωση διευρύνσεως κοπής θα έχουμε $a = \frac{(D'_0 - d)}{2}$, όπου D'_0 και d είναι η διάμετρος της τελικής και της αρχικής κοπής αντίστοιχα.

Επίσης έχουμε : **Θεωρητικό πάχος αποβλήτου.**

1. Περίπτωση πλήρους διατρήσεως

$$A = \frac{D s}{4} = \frac{D s_z}{2} \quad (\text{mm}^2)$$

2. Περίπτωση διευρύνσεως οπής

$$A = \frac{(D-d)s}{4} = \frac{(D-d)s_z}{2} \quad (\text{mm}^2)$$

Ρυθμός αφαίρεσης μετάλλου

1. Περίπτωση πλήρους διατρήσεως

$$\theta = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{sn}{1000} \quad (\text{cm}^3/\text{min})$$

2. Περίπτωση διευρύνσεως οπής

$$\theta = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{sn}{1000} \quad (\text{cm}^3/\text{min})$$

Όπου: D, σε mm, η ονομαστική διάμετρος του τρυπάνου

n, σε rev/min, η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου του δραπάνου

z, ο αριθμός των κόψεων του τρυπάνου

d, σε mm η διάμετρος του τρυπάνου.

2.5 Η διάτρηση του αλουμινίου και των κραμάτων του.

Η διάτρηση αυτών των υλικών έχει γίνει αρκετά κοινή διαδικασία και δε παρουσιάζει πολλές δυσκολίες, ωστόσο κάποια προβλήματα τα οποία παρουσιάζονται είναι σε κράματα αλουμινίου, όπως αυτά που περιέχουν πυρίτιο.[15]

Συγκεκριμένα για διάτρηση ελασμάτων αλουμινίου, που χρησιμοποιούνται αρκετά στην αεροναυπηγική, έχουν αναπτυχθεί τρυπάνια γενικού τύπου όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε άλλες παρόμοιες εφαρμογές. Για βαθύτερες οπές, θα πρέπει πάντα να χρησιμοποιούνται τρυπάνια με υψηλές γωνίες ελίκωσης, ενώ για τα μαλακότερα κράματα του αλουμινίου πρέπει να χρησιμοποιούνται τρυπάνια με εξαιρετικά λείες επιφάνειες αυλακίων ώστε να αποφεύγεται το ενδεχόμενο της συσσωμάτωσης των αποβλήτων.

Το σύνηθες φαινόμενο κατά τη διάτρηση βαθιών οπών, είναι η θραύση του εργαλείου. Κυρίως αυτή η θραύση οφείλεται από το φράξιμο των αυλακίων από τα απόβλητα και λόγω της λανθασμένης χρήσης του τρυπανιού, του υγρού κοπής ή λάθος επιλογή τύπου τρυπανιού. Γενικότερα, στη διάτρηση βαθιών οπών τα τρυπάνια έχουν υψηλό βήμα ελίκωσης, εκτός από κάποια ομάδα εύπλαστων υλικών όπου εκεί χρησιμοποιούνται τρυπάνια με χαμηλό βήμα ελίκωσης.

Η διάτρηση του αλουμινίου πραγματοποιείται με υψηλές ταχύτητες περιστροφής του εργαλείου κοπής μέσα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Για αυτό το λόγο, η απομάκρυνση των αποβλήτων από το εργαλείο είναι εξαιρετικά σημαντική. Για το λόγο αυτό τα εργαλεία κοπής πρέπει να διαθέτουν φαρδιά αυλάκια ώστε να απομακρύνονται εύκολα τα απόβλητα και η αναπτυσσόμενη θερμότητα να ελαχιστοποιείται.

Κράματα με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο είναι ιδιαίτερα σκληρά. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να χρησιμοποιούνται εργαλεία κοπής από καρβίδιο ή και διαμάντι το οποίο και έχει πολύ καλή απόδοση όταν πρόκειται να διανοιχθούν αρκετές οπές.

Τέλος, παρακάτω παρατίθενται πίνακες (Πίν.3-5) με τις συνιστώμενες τιμές πρόωσης και ταχύτητας κοπής για τις διάφορες συνθήκες κοπής κραμάτων αλουμινίου. [4]

Πίνακας 3. Συνιστώμενες προώσεις (κοπτικό εργαλείο : ταχυχάλυβας).

Είδος υλικού	Πρόωση (mm/στρ.) για διάφορες περιοχές ονομαστικής διαμέτρου τρυπάνου D σε mm.			
	2-10	10-20	20-40	40-60
Κράματα Al	0,05-0,24	0,24-0,3	0,3-0,45	0,45-0,56

Πίνακας 4. Συνιστώμενες προώσεις (κοπτικό εργαλείο: κόψεις σκληρομετάλλου).

Είδος υλικού	Πρόωση s (mm/στρ.) για διάφορες περιοχές ονομαστικής διαμέτρου τρυπάνου D σε mm.			
	2-10	10-20	20-40	40-60
Κράματα Al	0,06-0,1	0,1-0,18	0,18-0,25	0,25-0,32

Πίνακας 5. Συνιστώμενες ταχύτητες κοπής.

Είδος υλικού	Ταχύτητα κοπής v(m/min)	
	Ταχυχάλυβας	Σκληρομέταλλο
Κράματα Al	Έως 160	230-300

Κέφαλαιο 3 Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

3.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος μοντελοποίησης που συναντάται κυρίως στις κατεργασίες είναι των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή αρχικά αναπτύχθηκε για επίλυση τασικών πεδίων σε προβλήματα μηχανικής, εξελίχθηκε και πλέον αναλύει προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, ρευστομηχανικής κ.α. Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προοδευτικά βρήκε εφαρμογή στις κοπές μετάλλων, ξεκινώντας με τη μοντελοποίηση της ορθογωνικής κοπής και φτάνοντας σήμερα να προσομοιώσει με ακρίβεια κάθε κατεργασία κοπής.

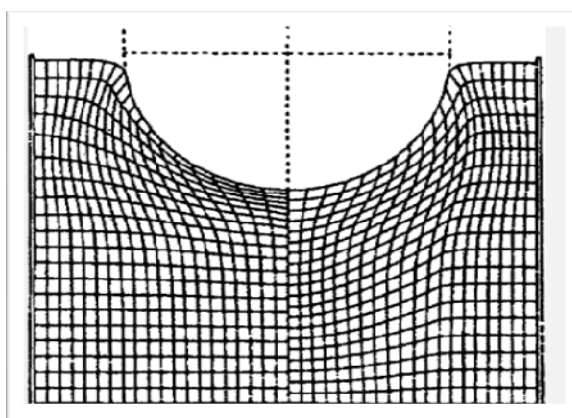
Η μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ξεκινά με τη διακριτοποίηση των συνεχών μέσων της κατεργασίας. Ο χώρος που αυτά καταλαμβάνουν χωρίζεται σε τετράγωνα ή σε τρίγωνα (σε διδιάστατο πρόβλημα, σε τρισδιάστατο έχουμε ανάλογο πλέγμα) και ενώνονται με κόμβους. Οι κόμβοι μας δίνουν πληροφορίες για το μέγεθος ή τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν και ο βαθμός ελευθερίας τους προσδιορίζεται από τον αριθμό των μεγεθών που αναφέρονται σε αυτούς, δηλαδή των αγνώστων. Το πλέγμα που δημιουργείται δεν είναι πάντα ομοιόμορφο. Ειδικά σήμερα μπορούν να κατασκευαστούν πλέγματα πυκνότερα σε περιοχές του χώρου μοντελοποίησης που μας ενδιαφέρουν περισσότερο και αραιότερα σε περιοχές μικρού ενδιαφέροντος, με χρήση ειδικών αλγορίθμων.

Στη συνέχεια δίνονται ιδιότητες στα στοιχεία ανάλογα με τις ιδιότητες του μέσου που μοντελοποιούν και δίνονται αρχικές οριακές συνθήκες στους κόμβους. Τέλος, λύνονται οι αλγεβρικές εξισώσεις που είναι σε μητρική μορφή, και υπολογίζονται οι τιμές κάθε βαθμού ελευθερίας. Προφανώς όσο περισσότερους κόμβους έχουμε, τόσο πιο καλά προσεγγίζεται το πραγματικό πρόβλημα που έχει άπειρους (θεωρητικά). Βέβαια ο υπολογισμός κάθε πεπερασμένου στοιχείου απαιτεί υπολογιστικό χρόνο και έτσι δεν είναι δυνατό να αυξήσουμε υπερβολικά τον αριθμό των κόμβων αν θέλουμε να έχουμε

αποτελέσματα σε λογικό χρόνο. Η χρήση του H/Y επιβάλλεται για τη μοντελοποίηση ενός προβλήματος με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

Πιο συγκεκριμένα για τις κατεργασίες, δεν είναι πλέον απαραίτητος ο προγραμματισμός όλης της παραπάνω διαδικασίας, καθώς υπάρχουν αξιόπιστοι εμπορικοί κώδικες που είναι συμβατοί με προσωπικούς Η/Υ. Ο γενικός τρόπος λειτουργίας τους περιλαμβάνει τον σχεδιασμό του προβλήματος ανάλογα με τις απλοποιήσεις, τις οριακές συνθήκες και τα μεγέθη προς μοντελοποίηση (αυτά που αφορούν τον χρήστη, όπως η θερμοκρασία), ακολουθεί η διακριτοποίηση του χώρου και των μέσων (τεμάχιο, εργαλείο κλπ.) ανάλογα με τις ιδιότητες και τις αρχικές συνθήκες και τέλος κατασκευάζονται τα απαραίτητα μητρώα που θα επιλυθούν με τις παραμέτρους που επιθυμεί ο χρήστης. Το παραπάνω κομμάτι συνήθως αναφέρεται ως προεπεξεργασία. Η επίλυση των μητρώων αναφέρεται συνήθως ως solver και η προβολή των αποτελεσμάτων και ενδεχομένως η επεξεργασία τους ως μετεπεξεργασία.

Για την επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση των μέσων μεταξύ τους οι οποίες υπολογίζουν τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν, εφαρμόζονται συνήθως δύο αριθμητικοί τρόποι: του Lagrange και του Euler. Η μέθοδος Lagrange χρησιμοποιείται κυρίως στα προβλήματα με μηχανικά στερεά και έτσι προτιμάται για την μοντελοποίηση των κατεργασιών κοπής. Η μέθοδος Euler μοντελοποιεί καλύτερα περιπτώσεις που έχουμε ροή ρευστού σε μεγάλο χώρο καθώς πλεγματοποιείται όλος ο χώρος. Φυσικά, παρόλο που με τη μέθοδο Lagrange έχουμε ακριβέστερη εικόνα της μορφής του αποβλήτου (κάτι πολύ σημαντικό για τη μελέτη της κατεργασίας και κάτι που δεν προσφέρει η μέθοδος Euler, ειδικά για το διακοπτόμενο απόβλητο), παρουσιάζεται πρόβλημα από τη μεγάλη πλαστική παραμόρφωση η οποία παραμορφώνει υπερβολικά το πλέγμα.[5]



Σχ.3.1. Σύγκριση πλέγματος με τη μέθοδο Lagrange (αριστερά) και τη μέθοδο ALE (δεξιά)

Παράλληλα πολλές φορές στην περιοχή επαφής τεμαχίου-εργαλείου παρατηρείται μη επαρκής διαχωρισμός των κόμβων, γεγονός που καθιστά απαραίτητο το πυκνό πλέγμα στις επιφάνειες επαφής. Μια άλλη λύση λοιπόν που μελετάται είναι η χρήση με το μοντέλο Arbitrary Lagrangian-Eulerian, με το πλέγμα να κινείται στο χώρο, κάτι που απαιτεί μεγάλη ακρίβεια και χρόνο υπολογισμών. Όλες οι προσπάθειες μοντελοποίησης της μορφής του αποβλήτου στηρίζονται στον τρόπο διαχωρισμού αυτού από το τεμάχιο. Η μέθοδος Lanrange χρησιμοποιεί συνήθως για την περιοχή αποκόλλησης του αποβλήτου από το τεμάχιο την τεχνική του διαχωρισμού των κόμβων με τη μέθοδο διάδοσης ρωγμής, όπου όταν ο τελευταίος κόμβος της κοπτικής ακμής πλησιάζει κοντύτερα από μια απόσταση τον κόμβο του τεμαχίου και ικανοποιούνται ορισμένες φυσικές παράμετροι (θερμοκρασίας και τάσεων), αυτός χωρίζεται σε δύο κόμβους. Επίσης, όπως είπαμε, η μέθοδος Langrange έχει το μειονέκτημα της υπερβολικής παραμόρφωσης του πλέγματος και έτσι απαιτείται ο συνεχής επαναπροσδιορισμός του πλέγματος (re-meshing) και η ομαλοποίησή του (smoothing). Και οι δύο τεχνικές υπολογιστικά στοιχίζουν πολύ, ενώ παράλληλα απαιτείται και τοπική πύκνωση του πλέγματος (refinement) του τεμαχίου στο σημείο κάθε φορά που έρχεται σε επαφή με το εργαλείο.

Το κυριότερο πρόβλημα που προκύπτει με τη μοντελοποίηση των κατεργασιών κοπής προκύπτει από τις συνθήκες επαφής εργαλείου με το τεμάχιο ή το απόβλητο. Τις περισσότερες φορές γίνεται χρήση της απλής συνθήκης Coulomb για την τριβή $F = \mu N$, με F τη δύναμη τριβής, N την κάθετη δύναμη αντίδρασης που σχετίζεται με το βάρος και ο συντελεστής τριβής μ λαμβάνεται σταθερός για μικρές τάσεις που όμως σπάνια συναντώνται στις κατεργασίες κοπής. Σε αυτές ο μ δεν είναι σταθερός και εξαρτάται από την ταχύτητα, τη θερμοκρασία και τις δυνάμεις κοπής.

Τα εμπορικά πακέτα που διατίθενται σήμερα μπορεί να απλοποιούν κατά πολύ τη μοντελοποίηση των κατεργασιών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, εφόσον μπορούν να λύσουν μη-γραμμικά προβλήματα. Όμως, οι παραδοχές που κάνουν, καθώς και οι τρόποι επίλυσης δεν είναι εύκολο τις περισσότερες φορές να εξεταστούν, πόσο μάλλον να διαφοροποιηθούν, από τον χρήστη, κάτι που καθιστά το αποτέλεσμα του προγράμματος αρκετά αμφισβητήσιμο. Οι πηγές αυτών των ενδεχομένων λαθών κατά την μοντελοποίηση μιας κατεργασίας κοπής μπορεί να προκύψουν από:

- Ανεπαρκή καταχώρηση δεδομένων.
- Υπερβολικές απλοποιήσεις και παραδοχές.
- Λανθασμένες οριακές συνθήκες.
- Αριθμητικές στρογγυλοποιήσεις.
- Προβληματική προσαρμογή του πλέγματος.

3.2 Το πρόγραμμα AdvantEdge.

3.2.1 Περιγραφή προγράμματος.

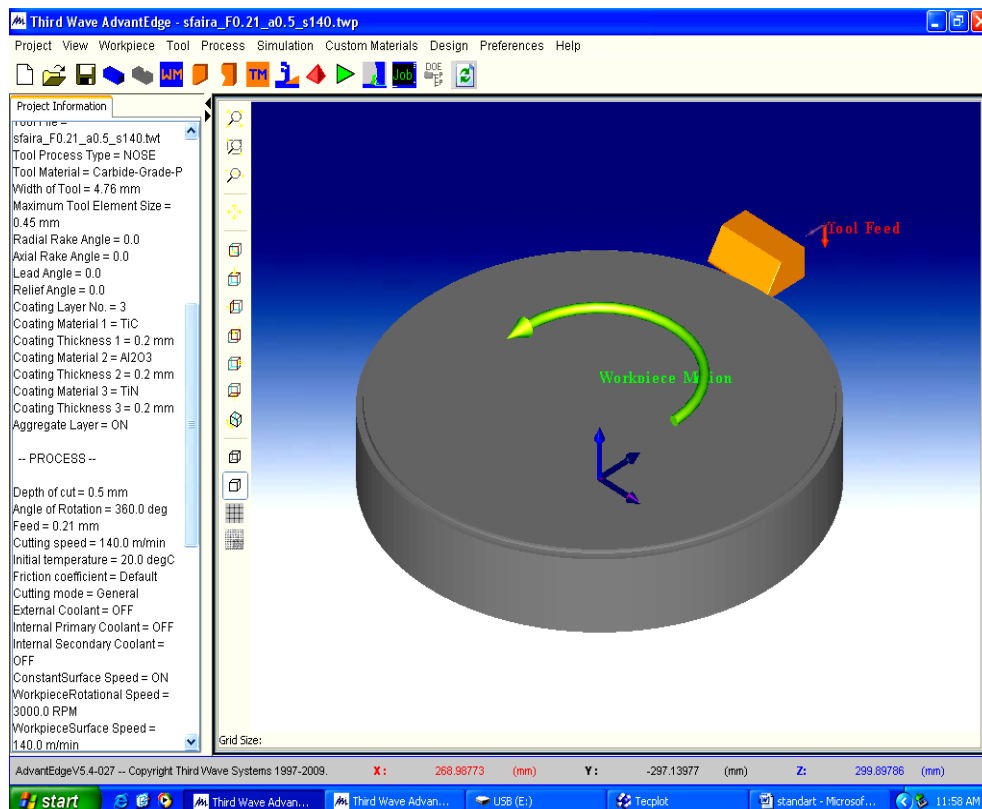
Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων AdvantEdge της εταιρίας τεχνικού λογισμικού Third Wave Systems είναι εργαλείο κατάλληλο για τον σχεδιασμό, την προετοιμασία και την βελτιστοποίηση των κατεργασιών. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο Lagrange και μεθόδους για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων όπως: τοπική πύκνωση, επαναπλεγματοποίηση και ομαλοποίηση του πλέγματος σε όλη τη διάρκεια της κατεργασίας. Ένα στοιχείο ελέγχεται σε καθορισμένο χρονικό διάστημα και αν έχει ξεπεράσει ένα όριο πλαστικής παραμόρφωσης, τότε επαναπροσδιορίζεται η νέα γεωμετρία του, αν δε είναι απαραίτητο, πραγματοποιείται και ομαλοποίηση.

Το απόβλητο διαχωρίζεται από το τεμάχιο με το κριτήριο της διάδοσης ρωγμής και την πλαστική ροή του γύρω από την ακμή του κοπτικού εργαλείου. Το κριτήριο διάδοσης της ρωγμής καθορίζει ότι η τροχιά της ρωγμής διαδίδεται προς τη γωνία, κατά την οποία η τάση παίρνει μια μέγιστη τιμή. Όταν η τιμή αυτή ξεπεραστεί, τότε γίνεται διπλασιασμός των κόμβων στην άκρη της ρωγμής και έτσι δημιουργείται το απόβλητο.

Η μορφή του απόβλητου για το αν είναι διακοπτόμενο ή όχι, καθώς και το σημείο που αυτό θα σπάσει καθορίζεται από την υπέρβαση της τάσης διαρροής στο σημείο κοπής ή στο απόβλητο.[8]

3.2.2 Εισαγωγή δεδομένων.

Το πρόγραμμα για την δημιουργία ενός νέου μοντέλου, αρχικά, απαιτεί από το χρήστη ένα όνομα, επιλογή της κατεργασίας και καθορισμό για το εάν πρόκειται για πρόβλημα δύο ή τριών διαστάσεων. Αμέσως, εμφανίζεται το κύριο παράθυρο, το οποίο χωρίζεται σε τρεις ζώνες (Σχ.3.2). Στην πρώτη ζώνη βρίσκεται η κύρια μπάρα επιλογών, στα αριστερά βρίσκεται η δεύτερη ζώνη, όπου αναγράφονται οι επιλογές της διεργασίας οι οποίες ανανεώνονται με κάθε νέα επιλογή και τέλος το υπόλοιπο τμήμα του παραθύρου που απεικονίζεται η κατεργασία με το κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο.



Σχήμα 3.2. Βασικό παράθυρο εισαγωγής δεδομένων.

3.2.3 Εισαγωγή δεδομένων κοπτικού εργαλείου

Στην συνέχεια, εισάγονται παράμετροι για το κοπτικό εργαλείο. Το πρόγραμμα παρέχει βιβλιοθήκη με μεγάλο πλήθος υλικών για κοπτικά εργαλεία, πλήρη καθορισμό της

γεωμετρίας τους κατά ISO. Ο χρήστης, εκτός των τυποποιημένων κοπτικών εργαλείων, μπορεί να εισάγει αρχείο CAD για πιο σύνθετα και μη τυποποιημένα κοπτικά εργαλεία ή ακόμα να σχεδιάσει μορφή εργαλείων στο ίδιο το πρόγραμμα. Μια πολύ σημαντική λειτουργία είναι και η επιλογή επιστρώσεων. Το πρόγραμμα παρέχει δυνατότητα μέχρι τρεις επιστρώσεις από TiC, TiN, TiAlN και Al₂O₃.

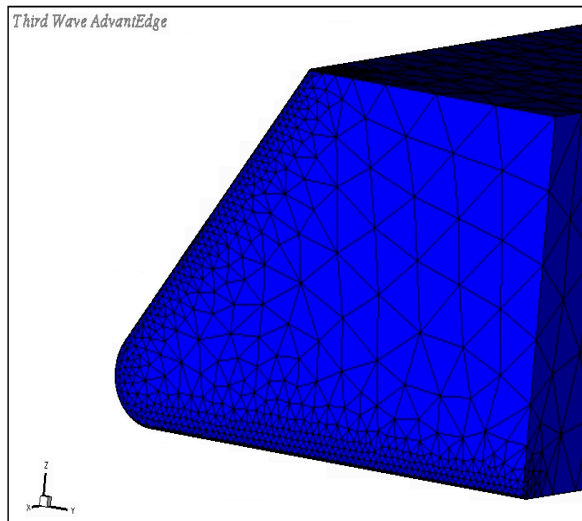
Στις επιλογές του κοπτικού εργαλείου, ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει το πλέγμα μεταβάλλοντας το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων (Minimum Element Size), τα οποία βρίσκονται κοντά στην ακμή του κοπτικού εργαλείου, περιοχή στην οποία το πλέγμα είναι αρκετά πυκνό ώστε τα αποτελέσματα να είναι αρκετά ακριβή ή να μεταβάλλει το μέγεθος των μέγιστων στοιχείων (Maximum Element Size), τα οποία βρίσκονται στις πιο απόμακρες περιοχές από την ακμή του κοπτικού εργαλείου και γενικά σε περιοχές που δεν παρουσιάζουν άμεσο ενδιαφέρον.

Τροποποίηση μπορεί να γίνει και στον τρόπο της εξομάλυνσης του πλέγματος (mesh grading), που καθορίζει τη μετάβαση από τα μικρότερα στοιχεία προς τα μεγαλύτερα. Η εξομάλυνση του πλέγματος παίρνει τιμές 0.1 έως 1. Η τιμή 0.1 πραγματοποιεί εξομάλυνση με πολύ ομαλό τρόπο, δημιουργώντας πυκνό πλέγμα και αυξάνοντας τον χρόνο επίλυσης, ενώ η τιμή 1 εξομαλύνει το πλέγμα απότομα μειώνοντας όμως τον χρόνο επίλυσης.

Για την καλύτερη προσέγγιση της γεωμετρίας από το πλέγμα, υπάρχει ρύθμιση μέσω της ασφάλειας καμπυλότητας (Curvature-Safety controls) που παίρνει τιμές από 0.2 έως 5, με την τιμή 0.2 να πραγματοποιεί την καλύτερη απόδοση της γεωμετρίας από το πλέγμα, αυξάνοντας και πάλι το χρόνο επίλυσης.

Τέλος, υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης της πυκνότητας των κόμβων στην άκρη του κοπτικού εργαλείου μεταβάλλοντας το συντελεστή Segments per Edge από 0.2 έως τη μέγιστη τιμή 5.

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι μεγαλύτερη πυκνωση του πλέγματος από τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις, που είχε ορίσει ο κατασκευαστής του προγράμματος, οδηγούσε σε μοντέλα των οποίων η επίλυση ήταν πολύ χρονοβόρα και για το λόγο αυτό η πλεγματοποίηση έγινε με βάση των προεπιλεγμένων τιμών του κατασκευαστή.



Σχήμα 3.3. Πλέγμα κοπτικού εργαλείου.

3.2.4 Εισαγωγή δεδομένων υλικού.

Η μορφή του τεμαχίου έχει επιλεγεί αυτόματα από το πρόγραμμα, τη στιγμή που ορίζουμε το είδος της κατεργασίας, που στην προκειμένη περίπτωση (κατεργασία διάτρησης), το τεμάχιο είναι τετράεδρο και οι επιλογές που γίνονται είναι του υλικού και των διαστάσεων του τεμαχίου (μήκος, ύψος, πλάτος).

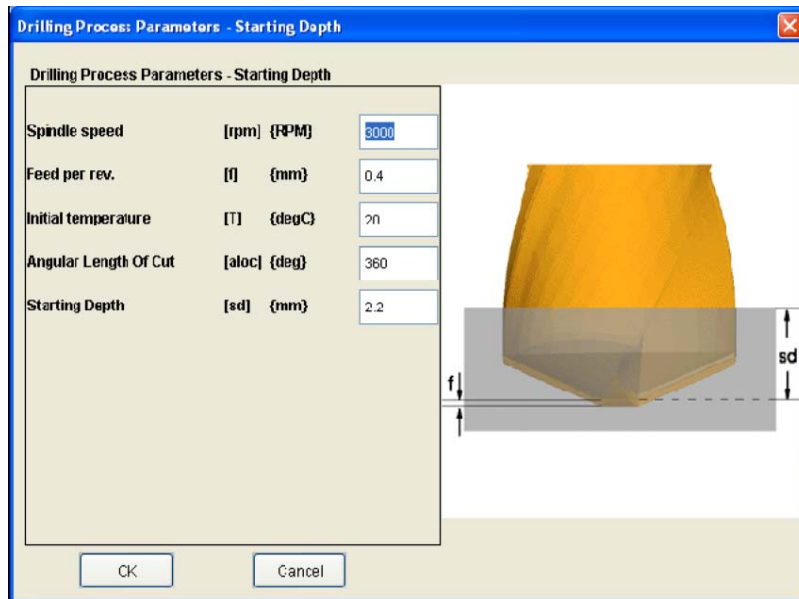
Αντίστοιχα με το κοπτικό εργαλείο υπάρχουν ανάλογες επιλογές για τις απαιτούμενες ρυθμίσεις για τα πεπερασμένα στοιχεία του τεμαχίου μεταβάλλοντας το μέγεθός τους.

Συγχρόνως ορίζεται η εξομάλυνση του πλέγματος (mesh grading), που καθορίζει τη μετάβαση από τα μικρότερα στοιχεία προς τα μεγαλύτερα τα οποία βρίσκονται σε πιο πίσω θέσεις. Η εξομάλυνση του πλέγματος παίρνει τιμές 0.1 έως 1. Η τιμή 0.1 πραγματοποιεί μέγιστη ομαλή μετάβαση, δημιουργώντας πυκνό πλέγμα και αυξάνοντας δραματικά το χρόνο επίλυσης, ενώ η τιμή 1 εξομαλύνει το πλέγμα απότομα μειώνοντας όμως τον χρόνο επίλυσης έχοντας όμως μικρότερη σταθερότητα και λιγότερο αξιόπιστα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, επιλέγεται η τιμή 0.5 για μία ενδιάμεση κατάσταση.

Παράλληλα, η ασφάλεια καμπυλότητας (curvature-safety) καθορίζει την ακρίβεια, με την οποία το πλέγμα καλύπτει τη γεωμετρία του σχήματος με ελάχιστη τιμή το 0.2 και

μέγιστη το 5, θέτοντας σε αυτή την επιλογή την τιμή 2. Για το μοντέλο αποφασίστηκε να διατηρηθούν οι προεπιλεγμένες τιμές.

Απαραίτητες για την υλοποίηση του μοντέλου είναι οι συνθήκες κοπής, οι οποίες δίνονται από το χρήστη (Σχ.3.4). Αυτές είναι η πρόωση f (mm/rev), ταχύτητα κοπής περιστροφής v (rpm) και βάθος κοπής a (mm).

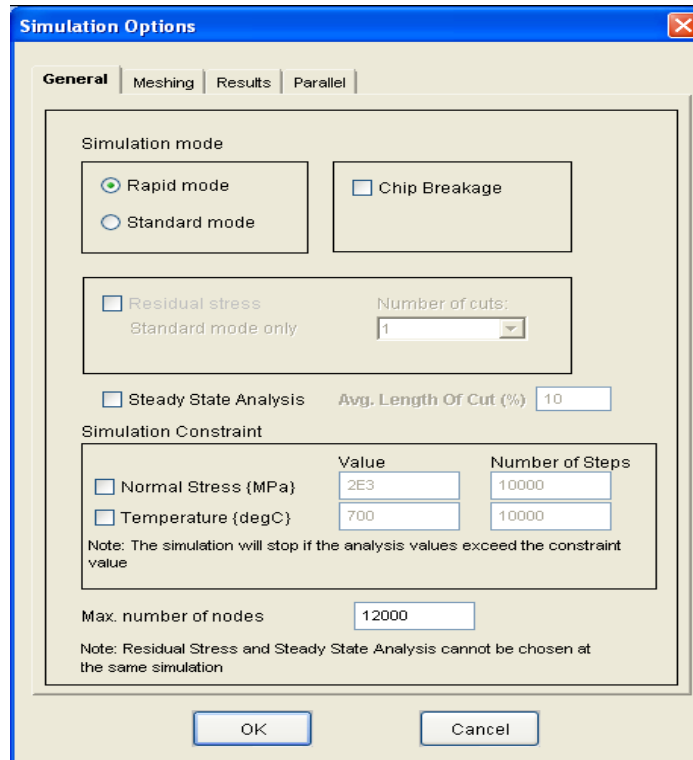


Σχήμα 3.4. Επιλογή συνθηκών κοπής.

3.2.5 Βασικές επιλογές μοντελοποίησης.

Βασικό σημείο στο στάδιο της προεπεξεργασίας είναι οι επιλογές της προσομοίωσης, οι οποίες καθορίζουν το χρόνο επίλυσης και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα ταχείας (Rapid mode) και κανονικής (Standard mode) επίλυσης (Σχ.3.5). Επιλέγοντας ταχεία επίλυση, οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται με μικρότερη ακρίβεια, συντομεύοντας σημαντικά το χρόνο επίλυσης, χωρίς να υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα. Όλα τα μοντέλα επιλύθηκαν με την ταχεία επίλυση.



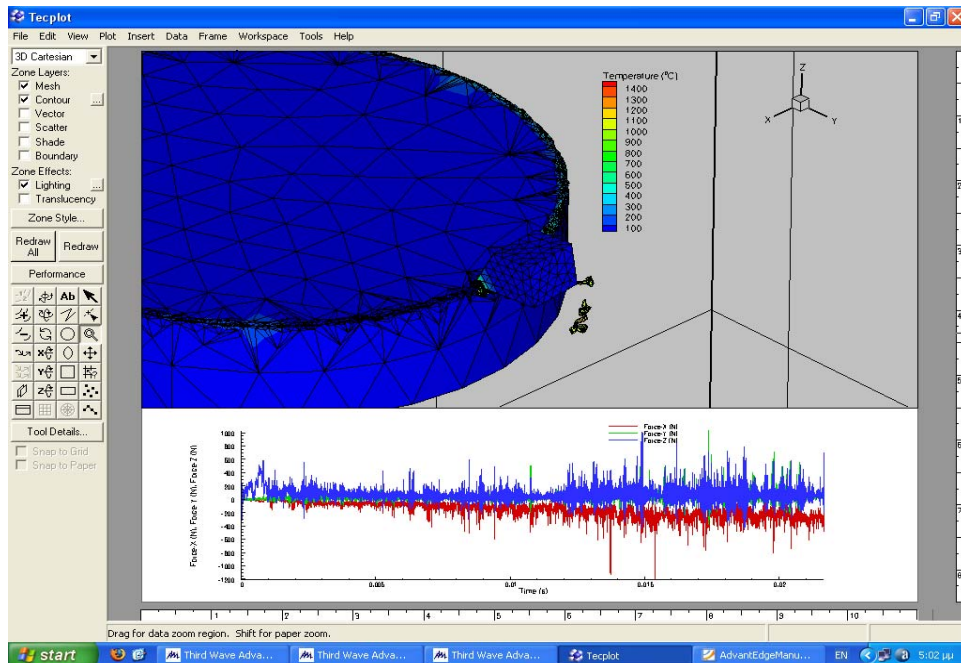
Σχήμα3.5. Επιλογή ταχείας ή κανονικής επίλυσης.

3.2.6 Εμφάνιση αποτελεσμάτων.

Η εμφάνιση καθώς και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επίλυση των μοντέλων κατά την διαδικασία επίλυσης (solver) γίνεται στο Tecplot, ένα πρόγραμμα που συνεργάζεται με το AdvantEdge και αποτελεί το τρίτο στάδιο της ανάλυσης, το στάδιο της μετεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων (post-processing). Κατά την ολοκλήρωση της ανάλυσης αποθηκεύεται ένα αρχείο με τα αποτελέσματα των δυνάμεων συναρτήσει του χρόνου (.tec) και ένα αρχείο για την δημιουργία των γραφικών (.twb).

Το παράθυρο του Tecplot αποτελείται από τρεις ζώνες (Σχ.3.6): Αριστερά βρίσκονται βασικές επιλογές για τον τρόπο προβολής των αποτελεσμάτων. Επάνω και δεξιά γίνεται η παρουσίαση των γραφικών, ενώ ακριβώς από κάτω παρουσιάζονται διαγράμματα των μεγεθών που επιλέγει ο χρήστης. Η αρχική εμφάνιση των διαγραμμάτων καθιστά δύσκολη την εξαγωγή δεδομένων λόγω της μορφής τους και γι' αυτό θα πρέπει να γίνεται χρήση της επιλογής Force Filter για το φιλτράρισμά τους (Tool-AdvantEdge Quick Analysis-Display Options).

Βασικό παράθυρο του Tecplot είναι το AdvantEdge Quick Analysis, που ενεργοποιείται από την επιλογή Tools, η οποία βρίσκεται στη βασική γραμμή εργαλείων, στο επάνω μέρος του παραθύρου.



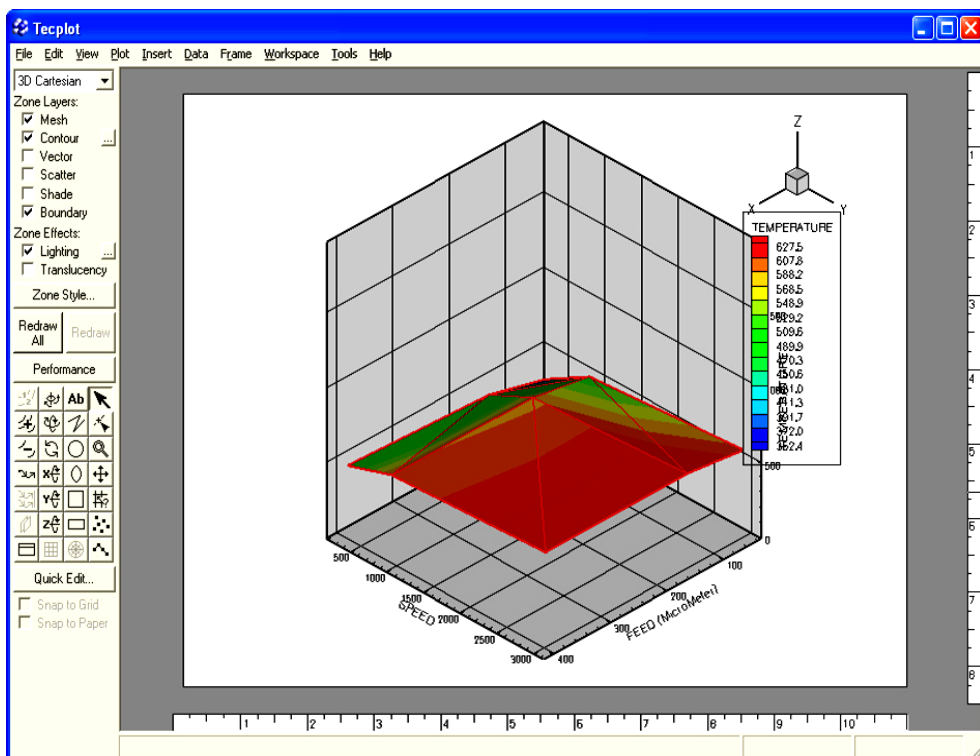
Σχήμα 3.6. Βασικό παράθυρο του Tecplot.

Με το tecplot έχουμε τη δυνατότητα μελέτης βασικών παραμέτρων που προκύπτουν από την ανάλυση, όπως:

- Θερμοκρασία (°C|°F).
- Ρυθμός έκκλησης θερμότητας (W/mm^3).
- Πλαστική παραμόρφωση.
- Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης (s^{-1}).
- Τάσεις Von Mises (MPa|Psi).
- Τάσεις φορτίσεων (για τις εφελκυστικές τάσεις το πρόσημο είναι αρνητικό)(MPa|Psi).
- Μέγιστη διαμητική τάση (MPa|Psi).
- Κύριες και διαμητικές τάσεις: XX, YY, ZZ, XY, XZ, YZ (MPa|Psi).
- Ταχύτητα ανά διεύθυνση X, Y, Z και οι συνιστώσες τους (m/min|ft/min).

Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αποθηκεύσει σε μορφή video την προσομοίωση (Tools→Animate→Zones), ενώ μπορεί να επιλέξει και συγκεκριμένα καρέ, όταν θέλει να εστιάσει σε χρονικές στιγμές της κατεργασίας που τον ενδιαφέρουν.

Σημαντικό πλεονέκτημα του προγράμματος είναι η λειτουργία AE Data Set Analysis με την οποία παρουσιάζεται η μεταβολή ενός μεγέθους συναρτήσει δύο μεταβλητών (Σχ.3.7), π.χ. της θερμοκρασίας συναρτήσει της ταχύτητας κοπής και της πρόωσης.



Σχήμα 3.7. Τρισδιάστατο γράφημα παρουσίασης ενός μεγέθους συναρτήσει δύο άλλων.

Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης

4.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων.

Η παρούσα εργασία είναι μια μελέτη της κατεργασίας διάτρησης κραμάτων αλουμινίου. Σκοπός είναι η μελέτη των δυνάμεων κοπής, πώς επιδρά δηλαδή η μεταβολή των συνθηκών κοπής στις δυνάμεις κοπής καθώς και ο έλεγχος της μοντελοποίησης και προσομοίωσης αυτών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η προσέγγιση γίνεται με αριθμητική προσομοίωση με το εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων AdvantEdge. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης επαληθεύονται με πειράματα από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι οι υπολογισμοί απαιτούν πολύ μεγάλο υπολογιστικό χρόνο ο οποίος μπορεί να αυξηθεί επ' άπειρον, έτσι ώστε να μπορούμε να έχουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό και δεδομένου ότι στα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας δεν υπάρχει άφθονος χρόνος, οι δοκιμές, άρα και τα διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω έχουν υπολογιστεί με γωνίες περιστροφής 360° δηλαδή μια περιστροφή και 1080° ή τρεις περιστροφές του εργαλείου.

Σε πρώτη φάση λοιπόν, βγήκαν αποτελέσματα των ασκούμενων δυνάμεων και ροπών όπως επίσης και τιμές των εμφανιζόμενων θερμοκρασιών έχοντας ρυθμίσει το εργαλείο να "κόψει" υλικό για μία περιστροφή του, με φυσικό ακόλουθο το πολύ μικρό βάθος κοπής. Σε επόμενη παράγραφο καταγράφονται αναλυτικά αυτές οι τιμές και γίνεται σύγκριση των δυνάμεων (μέγιστες τιμές) της αριθμητικής προσομοίωσης με αυτές της πειραματικής διαδικασίας. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση μεταξύ αυτών των δυνάμεων (κατά μέσω όρο 40%) με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να βγάλουμε ασφαλή αποτελέσματα.

Επειδή ο στόχος είναι η καλύτερη προσέγγιση της διαδικασίας με την μεγαλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων προχωρούμε σε περεταίρω δοκιμές ρυθμίζοντας αυτή τη φορά το εργαλείο κοπής με γωνία περιστροφής 1080°. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν και τα οποία παρουσιάζονται σε επόμενες παραγράφους είναι πολύ ικανοποιητικά και επιτυγχάνουν το σκοπό της παρούσας εργασίας.

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών με γωνία περιστροφής 360°. Για κάθε αλλαγή παραμέτρου παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις, ροπές, θερμοκρασίες, ισχύς καθώς και μορφή αποβλήτου.

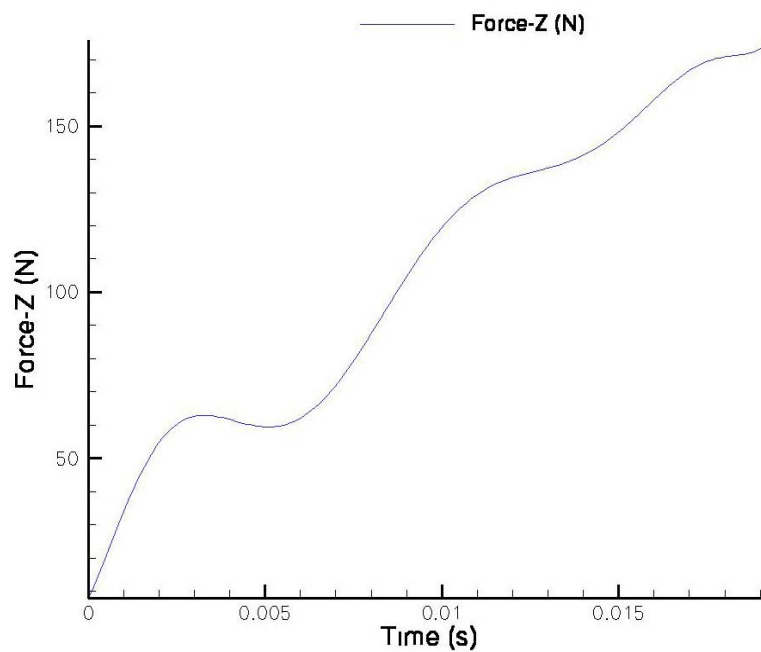
Γωνία περιστροφής 360°

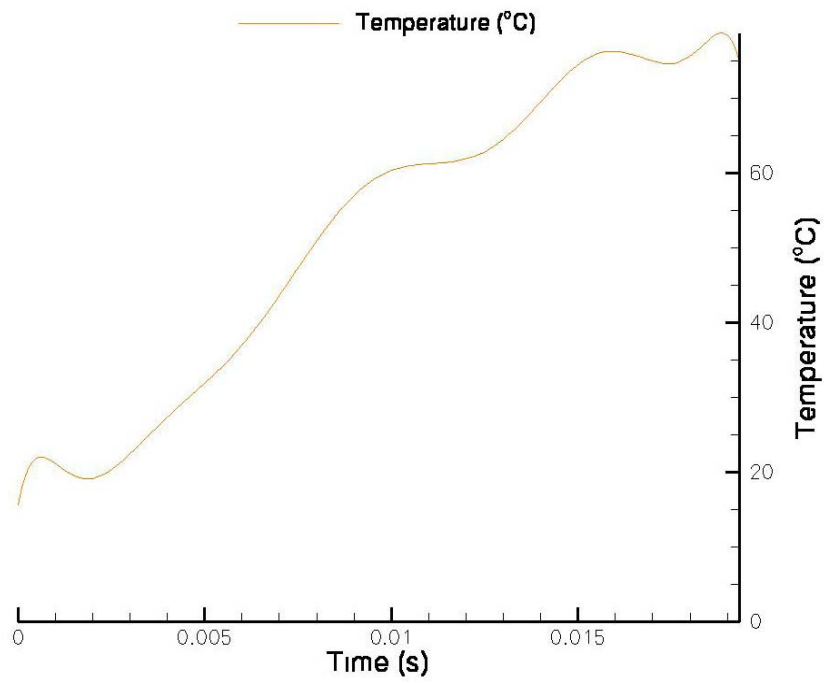
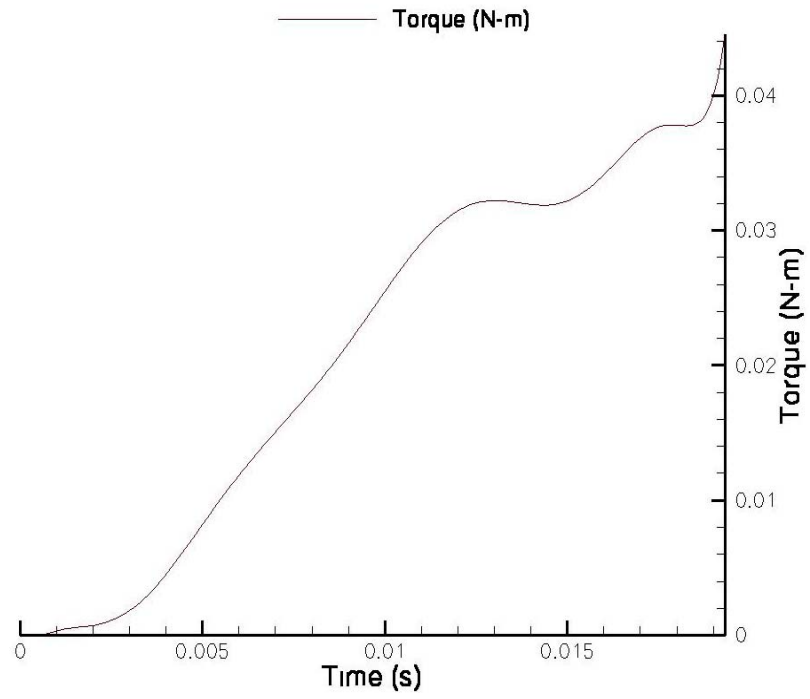
Ταχύτητα περιστροφής N=2750rpm

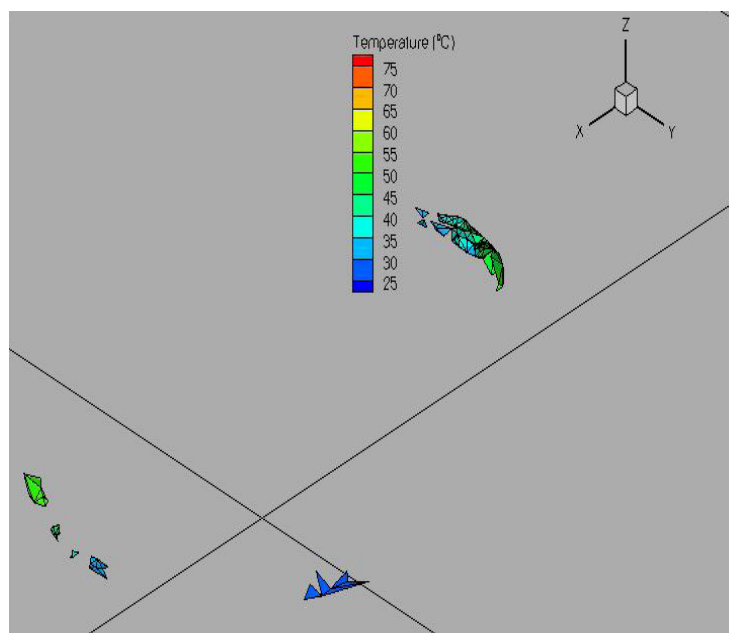
Πρόωση f=0.05mm/rev

Γωνία κορυφής 136°, γωνία έλικα 30°

Διάμετρος d=6mm







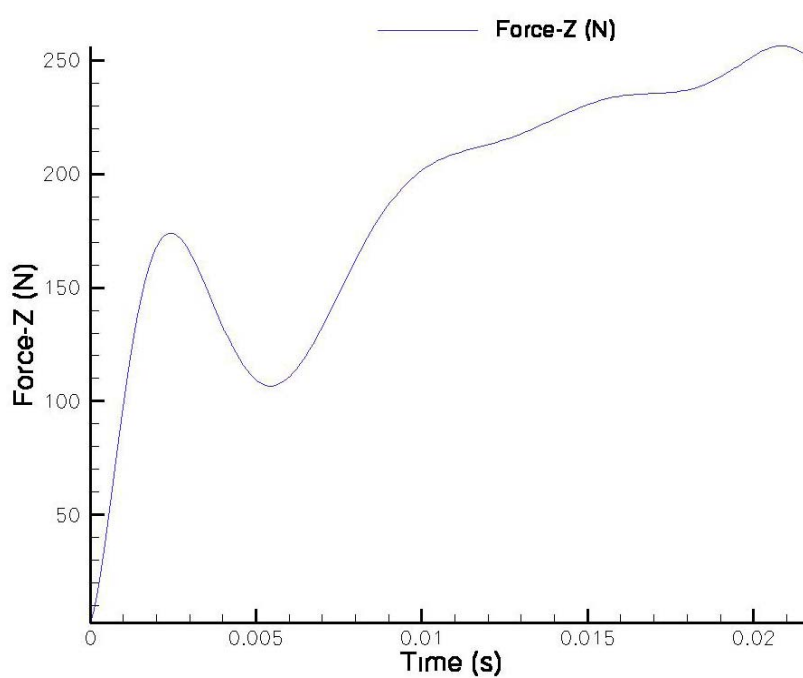
Γωνία περιστροφής 360°

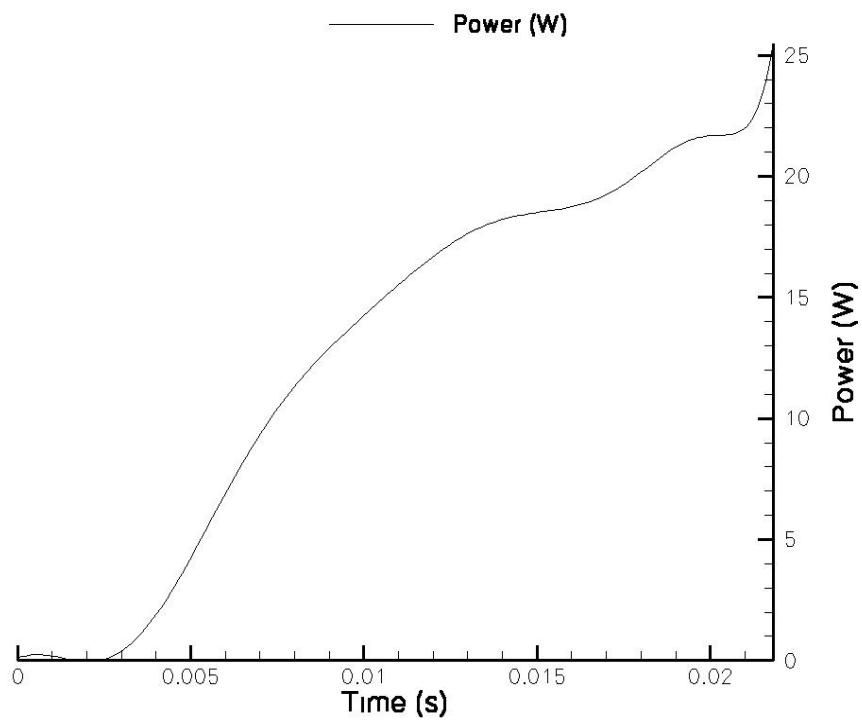
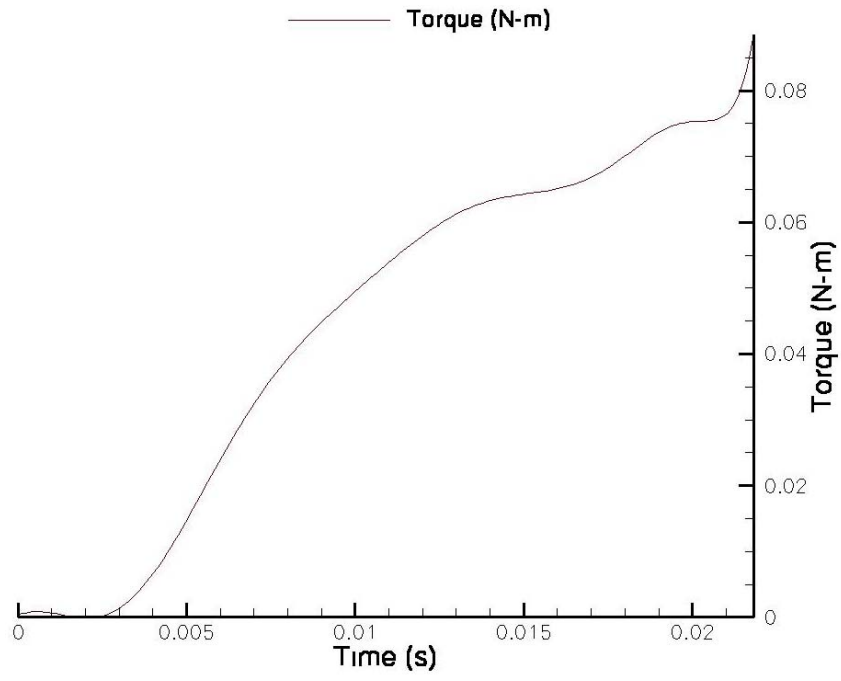
Ταχύτητα περιστροφής N=2750rpm

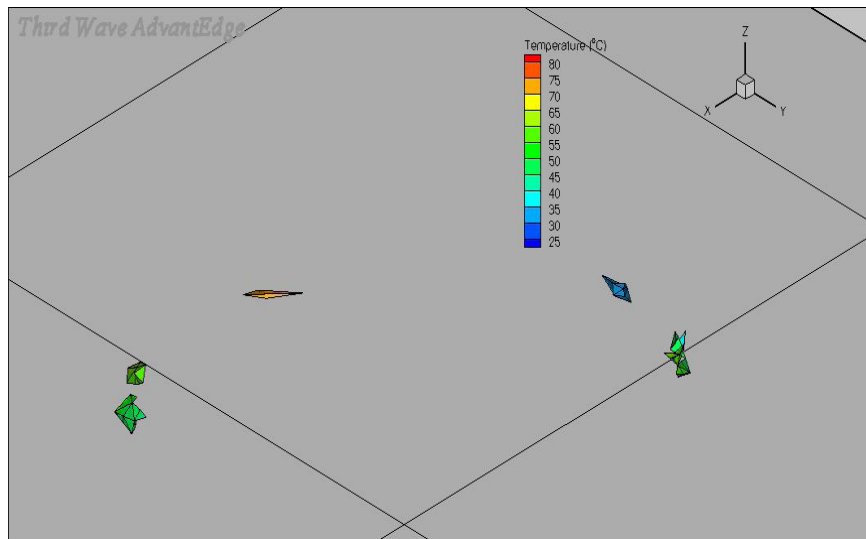
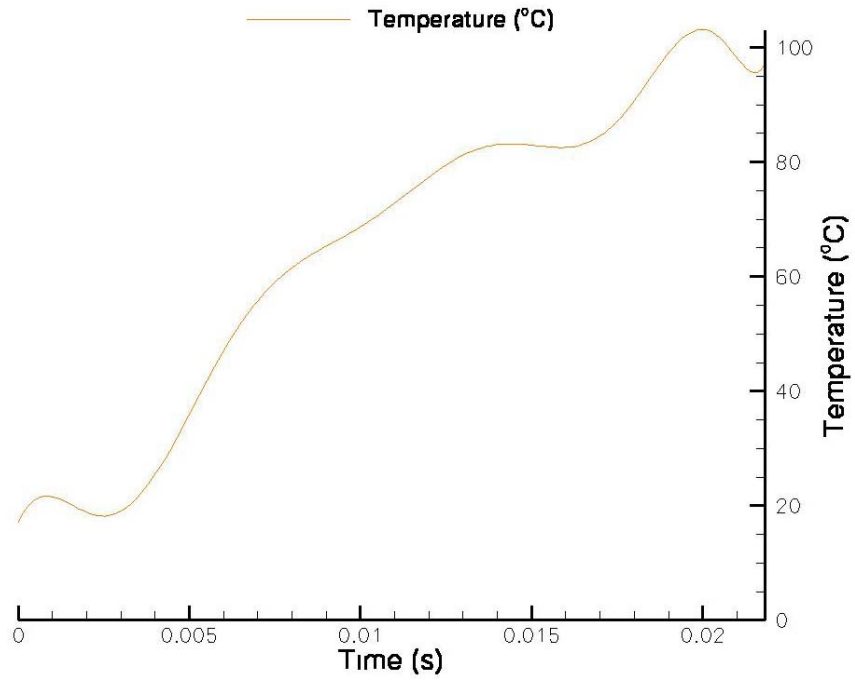
Πρόωση f=0.10mm/rev

Γωνία κορυφής 136°, γωνία έλικα 30°

Διάμετρος d=6mm







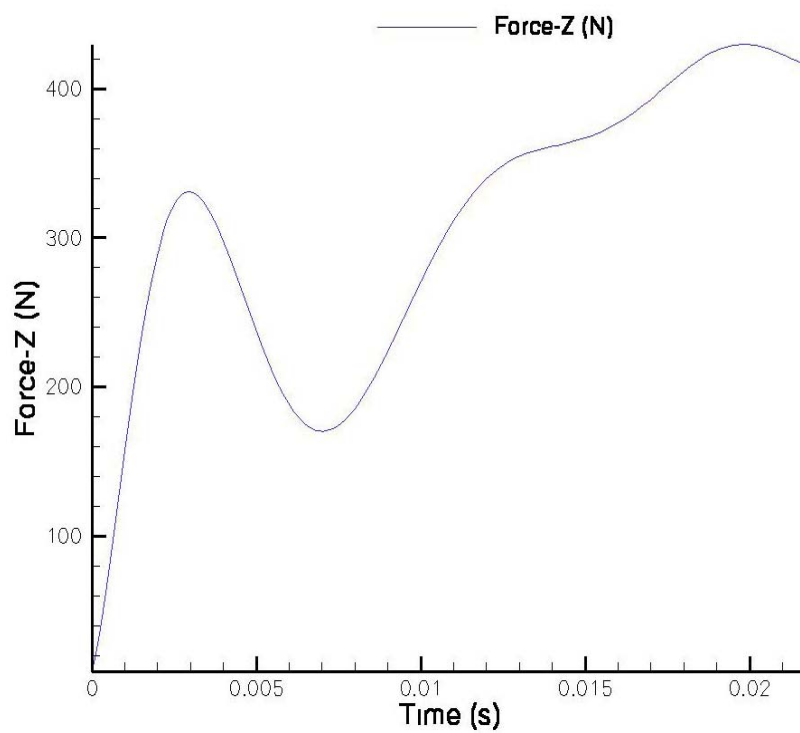
Γωνία περιστροφής 360°

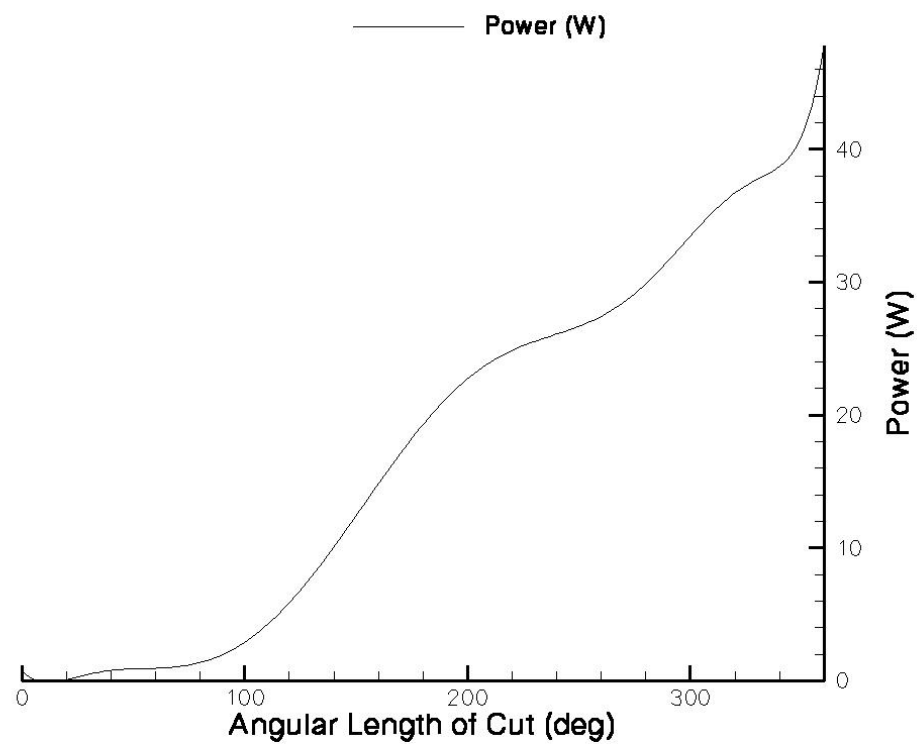
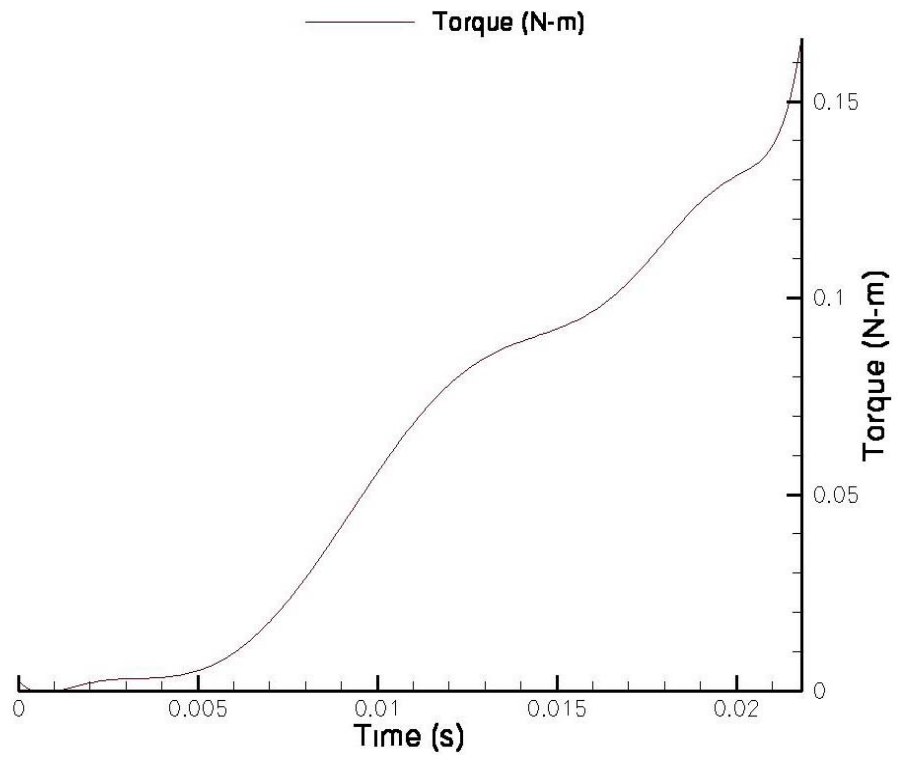
Ταχύτητα περιστροφής N=2750rpm

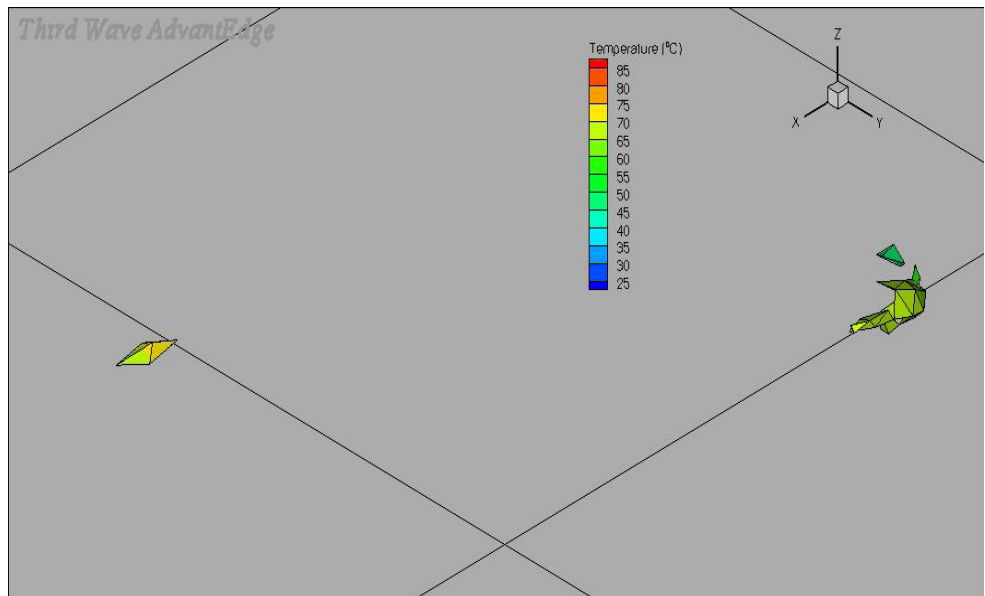
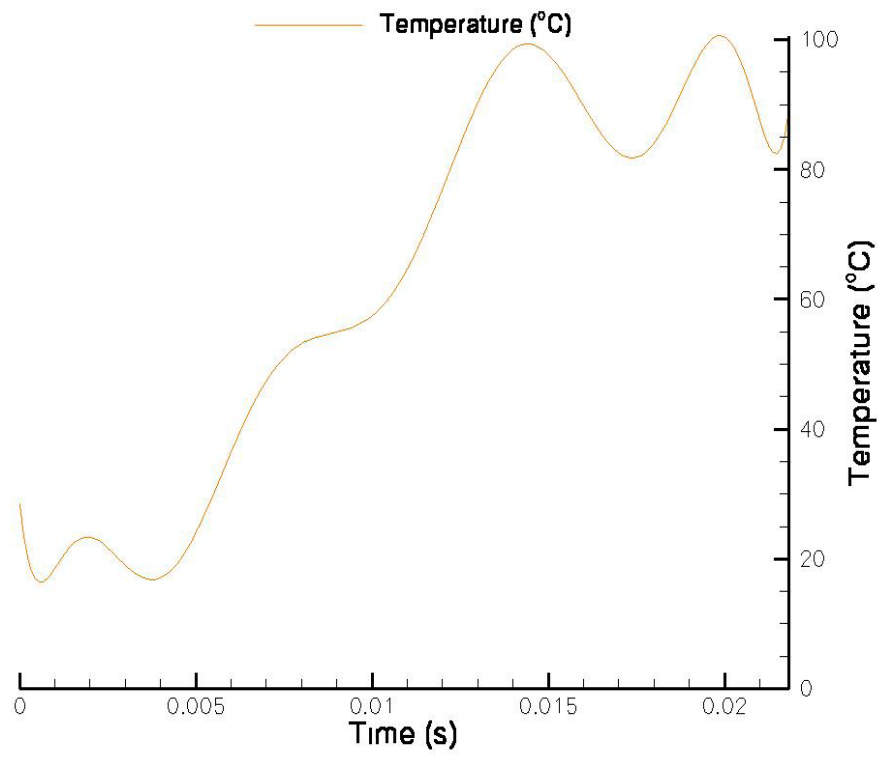
Πρόωση f=0.15mm/rev

Γωνία κορυφής 136°, γωνία έλικα 30°

Διάμετρος d=6mm







4.1.1 Συγκεντρωτικά στοιχεία.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι δυνάμεις κοπής (πειραματικές – αριθμητικές), ροπές, θερμοκρασίες, μορφή αποβλήτου καθώς και οι συνθήκες κοπής.

Πίνακας 6. Μέγιστες δυνάμεις κοπής (αριθμητικές – πειραματικές) για διαφορετικές τιμές πρόωσης.

Πρόωση f (mm/rev)	Δύναμη Κοπής Fz (N) Αριθμητική Τιμή	Δύναμη Κοπής Fz (N) Πειραματική Τιμή
0.05	180	285
0.10	250	485
0.15	420	658

Πίνακας 7. Μέγιστες ροπές και θερμοκρασίες για διαφορετικές τιμές πρόωσης.

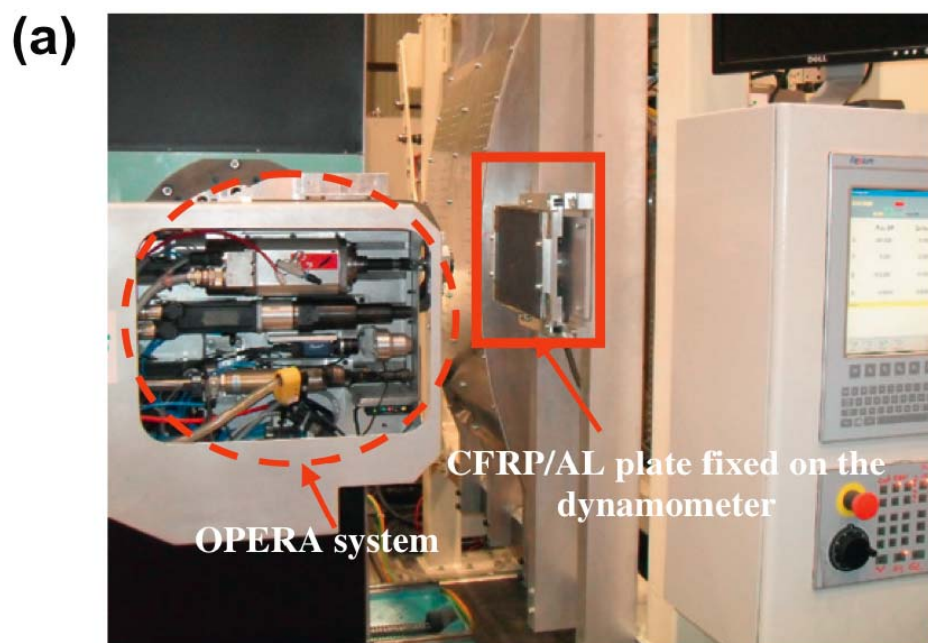
Πρόωση f (mm/rev)	Ροπή (N-m)	Θερμοκρασία (°C)
0.05	0.045	75
0.10	0.085	95.5
0.15	0.17	100

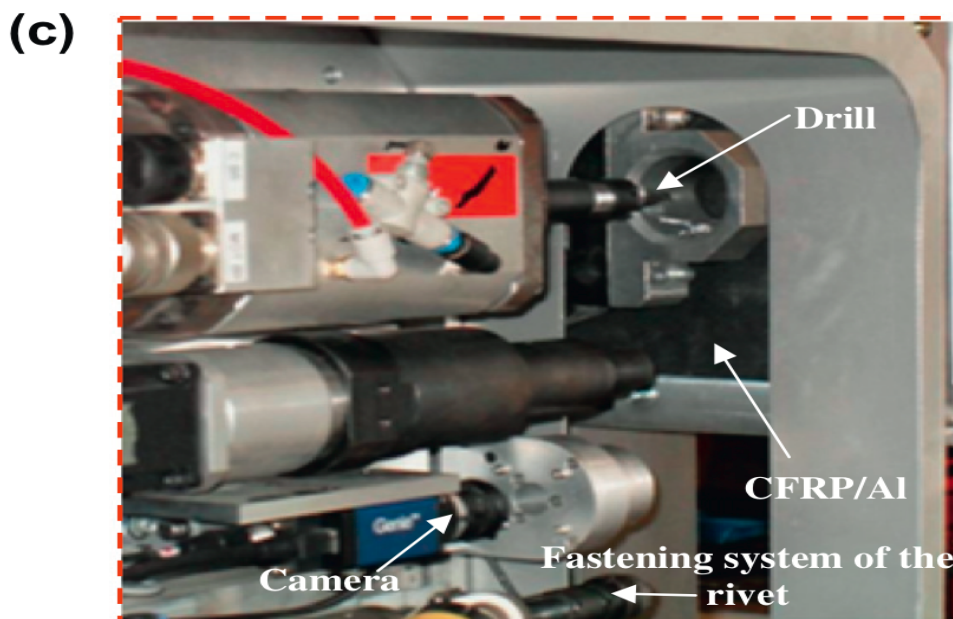
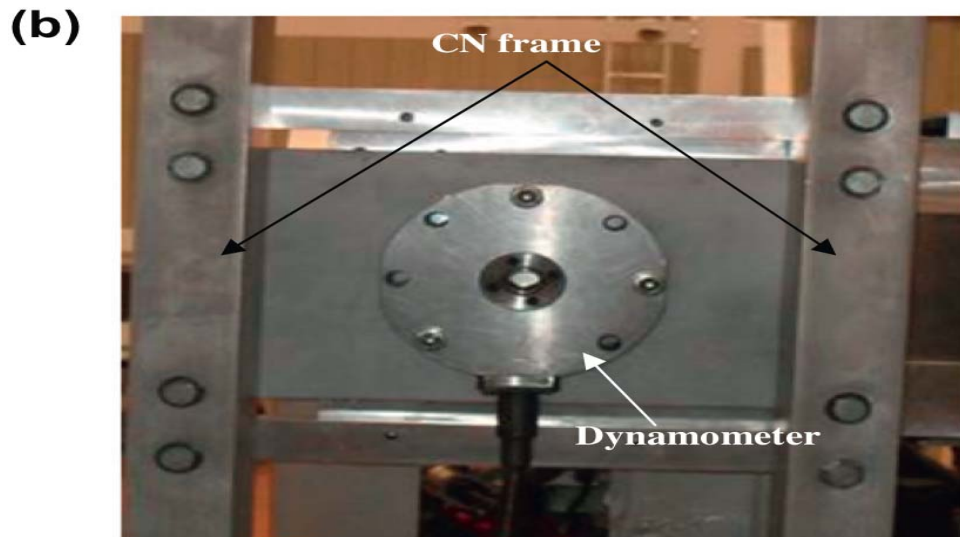
Πίνακας 8. Μορφή αποβλήτου.

Πρόωση f (mm/rev)	Μορφή Αποβλήτου
0.05	Διακοπτόμενο - Μικρού μεγέθους
0.10	Διακοπτόμενο - Μικρού μεγέθους
0.15	Διακοπτόμενο - Μικρού μεγέθους

Για τη διεξαγωγή του πειραματικού μέρους και συγκεκριμένα για τη διάτρηση χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της εργασίας των, Redouane Zitoune, Vijayan Krishnaraj,..[11]. Στο εν λόγω πείραμα χρησιμοποιήθηκε εργαλειομηχανή CNC ισχύος 10kw της εταιρίας LATECIS (Toulouse, France) εικόνα 1a. Η καταγραφή των δυνάμεων κοπής πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δυναμόμετρου Kistler, εικόνα 1b.

Το δυναμόμετρο συνδέθηκε με ένα Kistler τύπου 5019. Η έξοδος του ενισχυτή μετατρέπεται σε δύναμη κοπής μέσω ενός υπολογιστή το οποίο αποθηκεύει τα σήματα σε σχέση με το χρόνο κοπής.





Εικόνα 1. (α) Εργαλειομηχανή (CNC), (b) στερέωση δυναμόμετρου, (c) το τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο.

Κοπτικό εργαλείο: τρυπάνι καρβιδίου βαθμού K20 (Grade K20), Φ 6mm, γωνία κορυφής 136° , γωνία έλικας 30°

Τεμάχιο: αλουμίνιο Al 2024 (Al 93.5%, Si 0.5%, Cu 3.8-4.9%,Mg 1.2-1.8%, 0.1% Cr, πάχους 3mm.

Ταχύτητες περιστροφής (rpm) : $n_1=1050$, $n_2= 2020$ και $n_3= 2750$.

Προώσεις (mm/rev) : $f_1= 0.05$, $f_2=0.10$ και $f_3=0.15$.

Στους παρακάτω πίνακες (Πίν.9-10) παρουσιάζονται οι διάφορες τιμές που παίρνει η δύναμη κοπής $F(N)$ κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων από την επίδραση διαφόρων μεγεθών της πρόωσης και της ταχύτητας περιστροφής αντίστοιχα.

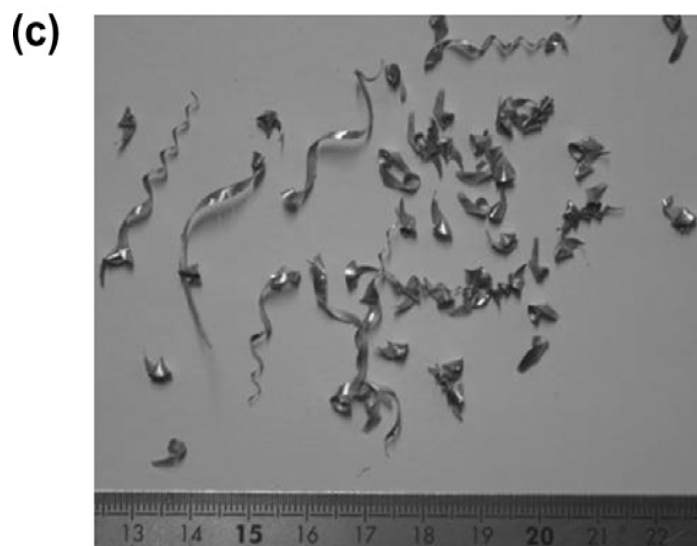
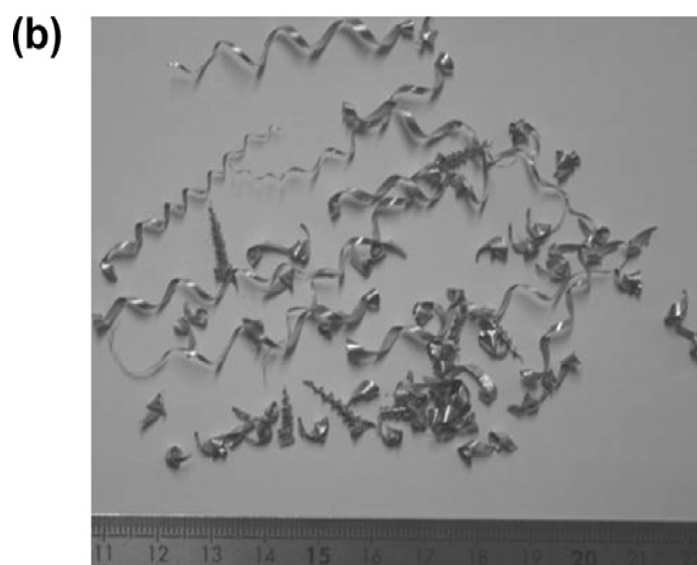
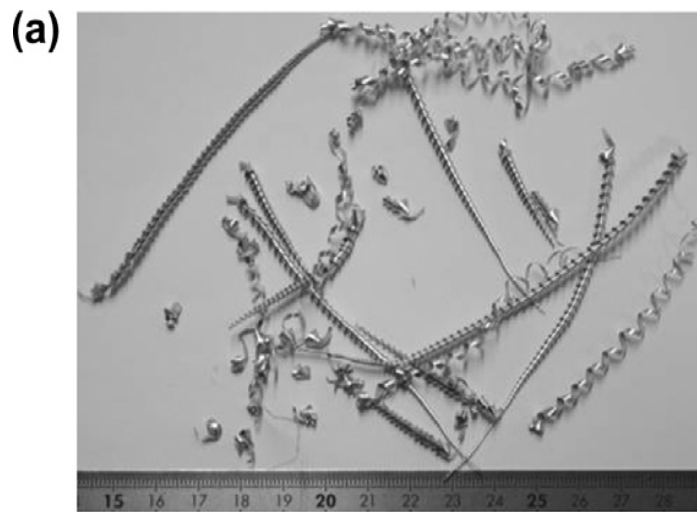
Πίνακας 9

Πρόωση f (mm/rev)	Ταχύτητα περιστροφής N (rpm)	Μέγιστη Δύναμη κοπής F_z (N)
0.05	2750	285
0.10	2750	485
0.15	2750	658

Πίνακας 10.

Πρόωση f (mm/rev)	Ταχύτητα περιστροφής N (rpm)	Μέγιστη Δύναμη κοπής F_z (N)
0,15	1050	684
0,15	2020	670
0,15	2750	658

Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 2) παρουσιάζεται η μορφή του αποβλήτου για τρεις διαφορετικές τιμές της πρόωσης a) $f=0.05$ mm/rev, b) $f=0.1$ mm/rev, c) $f=0.15$ mm/rev. Ενώ η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή και ίση με 2750 rpm.

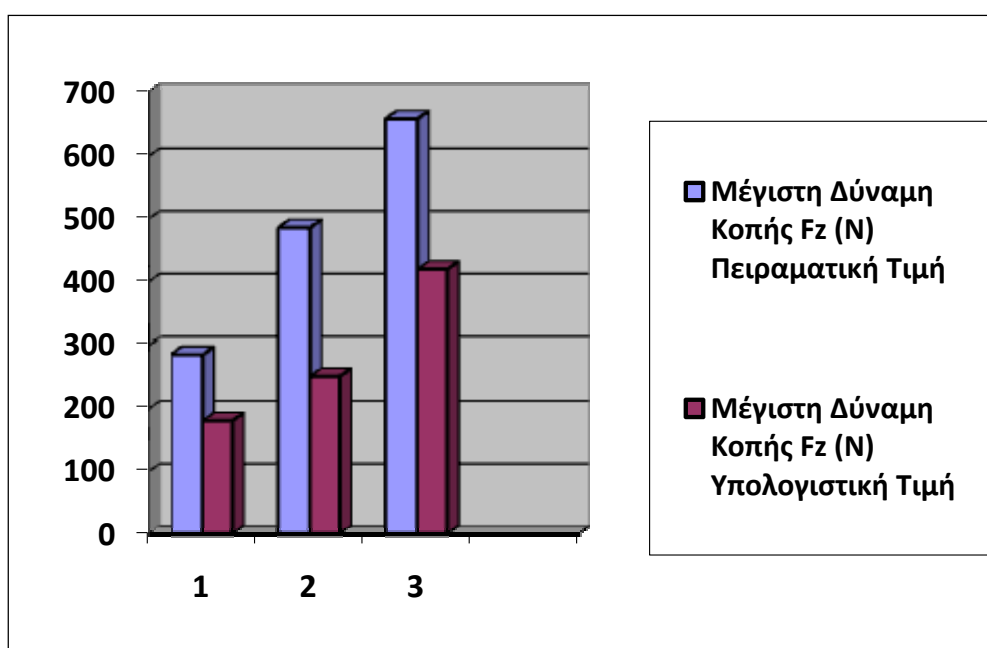


Εικόνα 2. (a) Μορφή αποβλήτου για $f=0.05$ mm/rev, (b) για $f=0.1$ mm/rev, (c) για $f=0.15$ mm/rev.

4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων Πειραμάτων – Προσομοίωσης (για μία περιστροφή του εργαλείου).

4.2.1 Δυνάμεις.

Οι δυνάμεις που προέκυψαν από τα πειράματα και το πακέτο AdvantEdge συγκρίνονται διαγραμματικά παρακάτω (Σχ.4.1).



Σχήμα 4.1. Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων για την δύναμη κοπής Fz.

Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

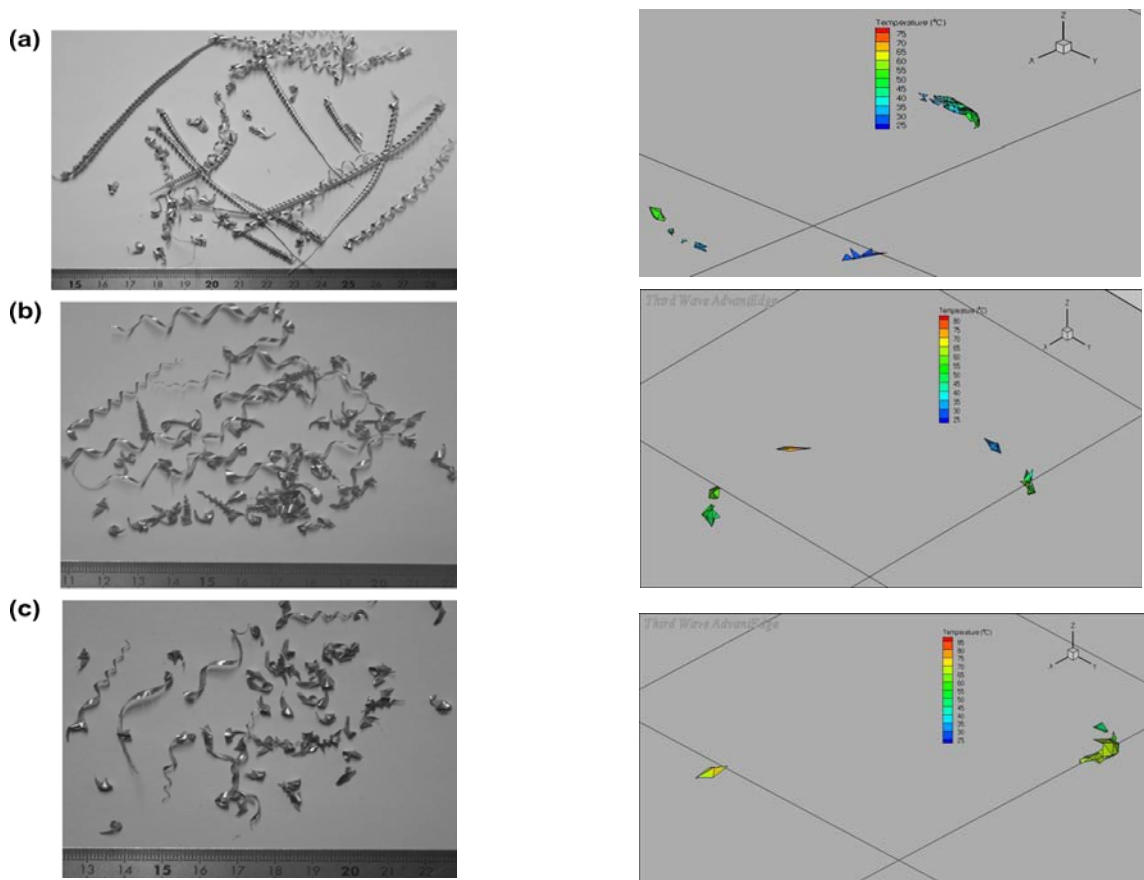
Σε ότι αφορά τις δοκιμές με τη μια περιστροφή του εργαλείου (360°) η απόκλιση της κύριας δύναμης κοπής Fz μεταξύ πειραματικού και υπολογιστικού μέρους είναι πολύ μεγάλη. Έτσι λοιπόν για $f=0.05\text{mm/rev}$, $N=2750\text{rpm}$ η πειραματική τιμή της Fz είναι $Fz=285\text{N}$ ενώ η υπολογιστική τιμή της είναι $Fz=180\text{N}$, με αποτέλεσμα να έχουμε μια απόκλιση της τάξεως 37% και επίσης δεν έχουμε μια σαφή εικόνα από το διάγραμμα για το εύρος τιμών της δύναμης. Για $f=0.1\text{mm/rev}$, $N=2750\text{rpm}$, η πειραματική τιμή της δύναμης κοπής είναι $Fz=485\text{N}$ ενώ η υπολογιστική τιμή της είναι $Fz=250\text{N}$ και με την απόκλιση να φτάνει σε

αυτήν την περίπτωση 48,4%. Τέλος, για την 3^η περίπτωση όπου $f=0.15\text{mm/rev}$, $N=2750\text{rpm}$, πειραματική τιμή $F_z=658\text{N}$ ενώ η υπολογιστική τιμή της είναι $F_z=420\text{N}$ με απόκλιση δηλαδή 36%.

4.2.2 Απόβλητα.

Πίνακας 11. Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών για τη μορφή αποβλήτου κατά τη διάτρηση.

Αριθμός Πειράματος	Μορφή Αποβλήτου Πειραματικά	Προσομοίωση Διάτρησης Μορφή Αποβλήτου	Χαρακτηρισμός ταύτισης μορφής
1	Πριονωτό - Ομοιόμορφο	Διακοπτόμενο - μικρό μέγεθος	Κακή
2	Διακοπτόμενο - Ανομοιόμορφο	Διακοπτόμενο - μικρό μέγεθος	Μέτρια
3	Διακοπτόμενο - Ανομοιόμορφο	Διακοπτόμενο - μικρό μέγεθος	Μέτρια



Εικόνα 3. Σύγκριση αποβλήτων πειραματικής και υπολογιστικής διαδικασίας.

Το απόβλητο κοπής, κατά την διαδικασία της αριθμητικής ανάλυσης του μοντέλου, παρουσιάζεται και στις τρεις περιπτώσεις διακοπτόμενο και πολύ μικρού μεγέθους και απέχει αρκετά από το δείγμα αποβλήτων της πειραματικής διαδικασίας.

4.3 Συμπέρασμα.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της πειραματικής και της υπολογιστικής διαδικασίας διαπιστώνουμε μεγάλη απόκλιση στις δυνάμεις κοπής F_z όπου η διαφορά είναι της τάξεως των 37% για $f=0.05\text{mm/rev}$, 48.4% για $f=0.1\text{mm/rev}$ και 36% για $f=0.15\text{mm/rev}$. Μεγαλύτερη βέβαια απόκλιση παρατηρείται στην μορφή του αποβλήτου. Όπως φαίνεται άλλωστε και στην Εικόνα 2. το μέγεθός του στην υπολογιστική διαδικασία είναι πάρα πολύ μικρό.

Με στόχο την καλύτερη προσέγγιση της διαδικασίας και την μεγαλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων έτσι ώστε να έχουμε ασφαλέστερα συμπεράσματα παρουσιάζονται παρακάτω νέοι υπολογισμοί σε μορφή διαγραμμάτων των αναπτυσσόμενων δυνάμεων, ροπών, θερμοκρασιών, ισχύων καθώς και η μορφή αποβλήτων. Με την διαφορά ότι σε αυτή τη φάση της υπολογιστικής διαδικασίας το κοπτικό εργαλείο θα εκτελέσει τρεις περιστροφές (1080°), άρα θα έχουμε και μεγαλύτερο βάθος κοπής.

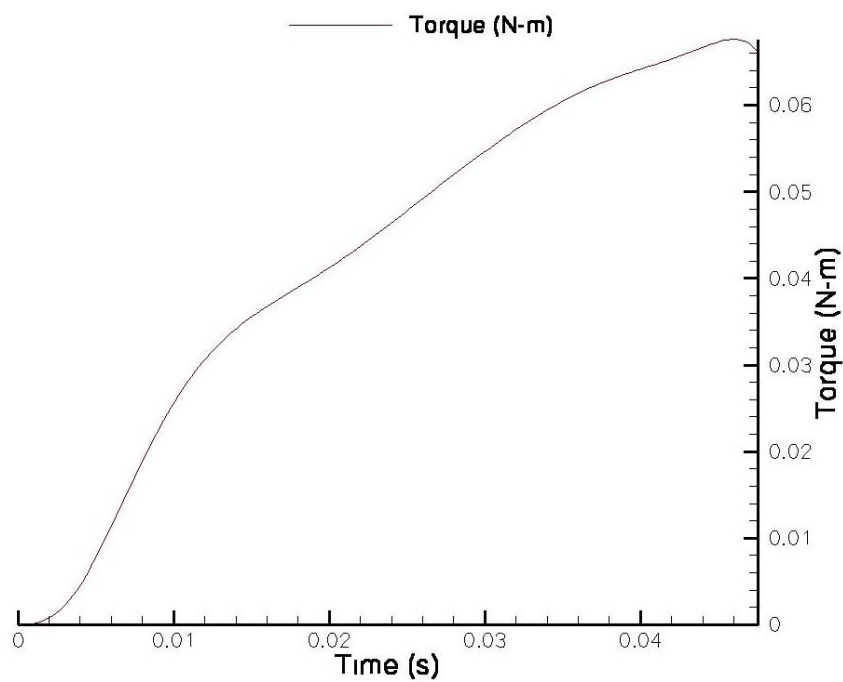
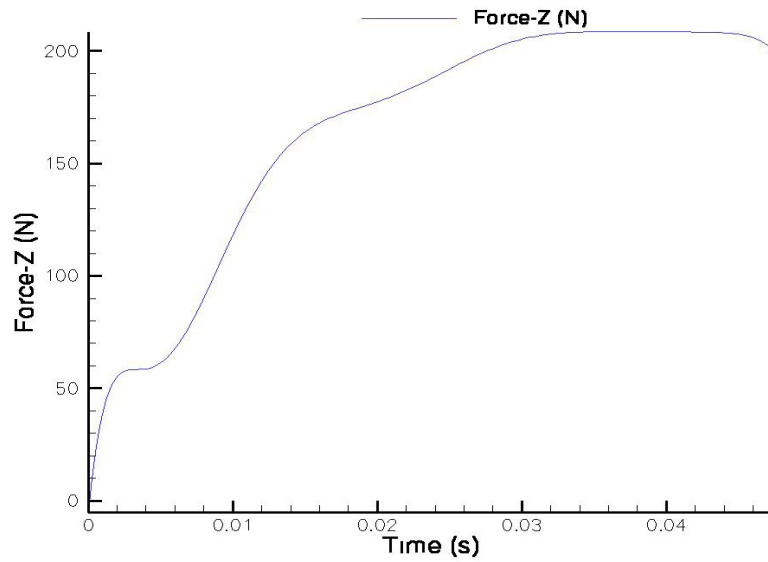
Γωνία περιστροφής 1080°

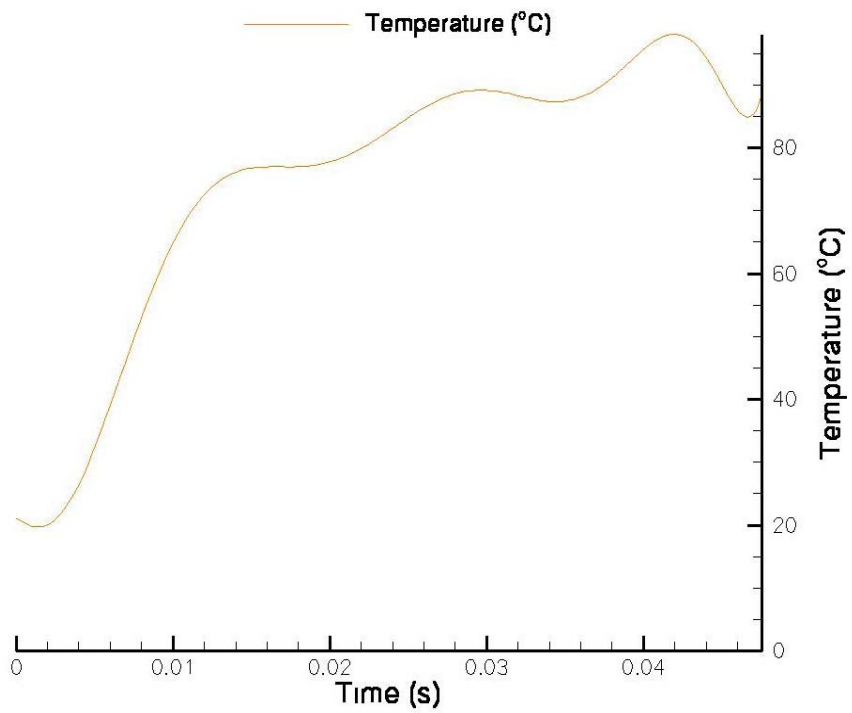
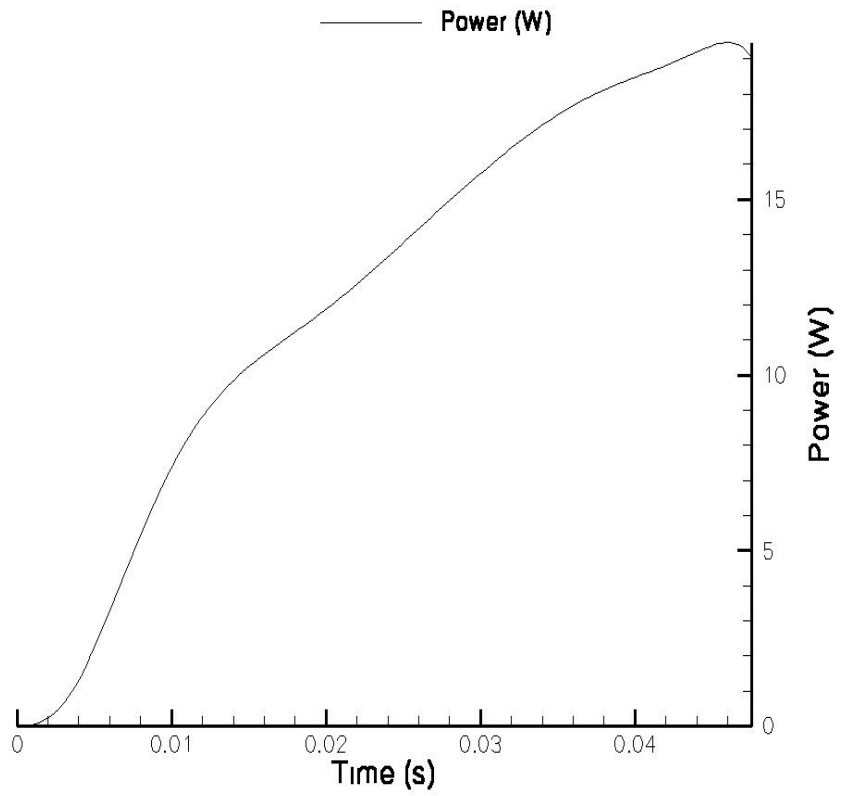
Ταχύτητα περιστροφής N=2750rpm

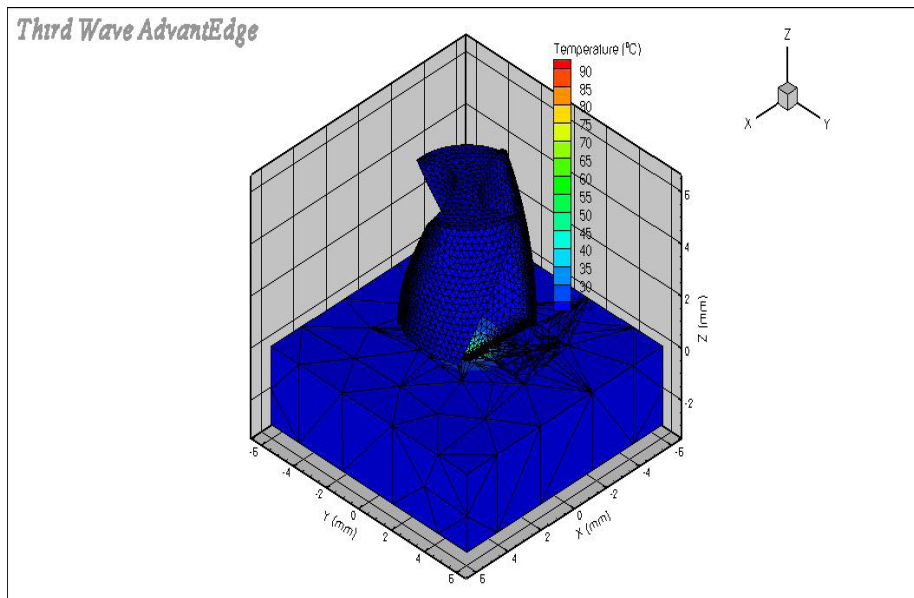
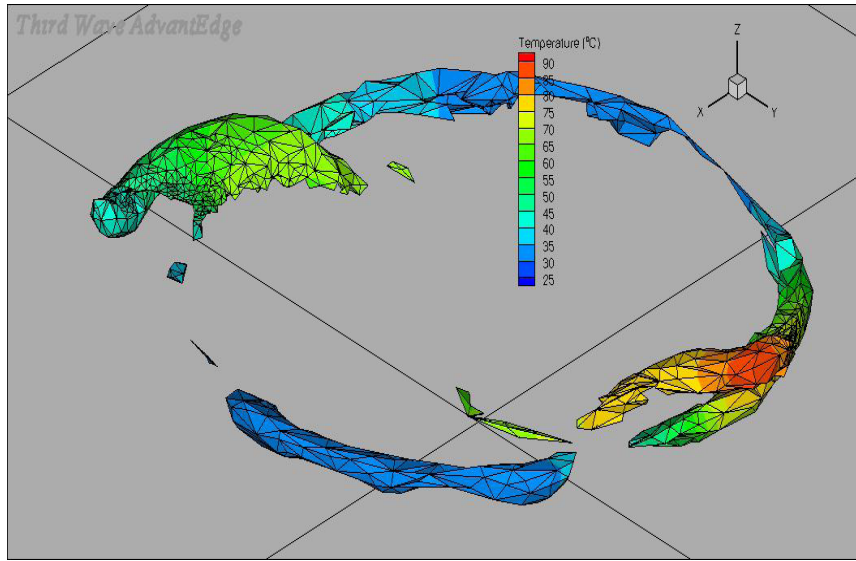
Πρόωση f=0.05mm/rev

Γωνία κορυφής 136°, γωνία έλικα 30°

Διάμετρος d=6mm







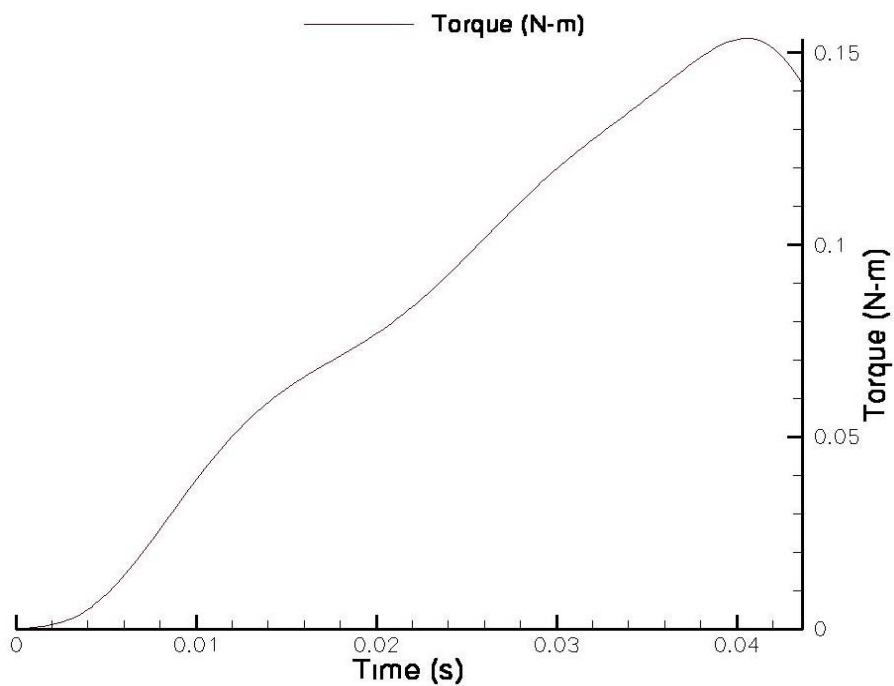
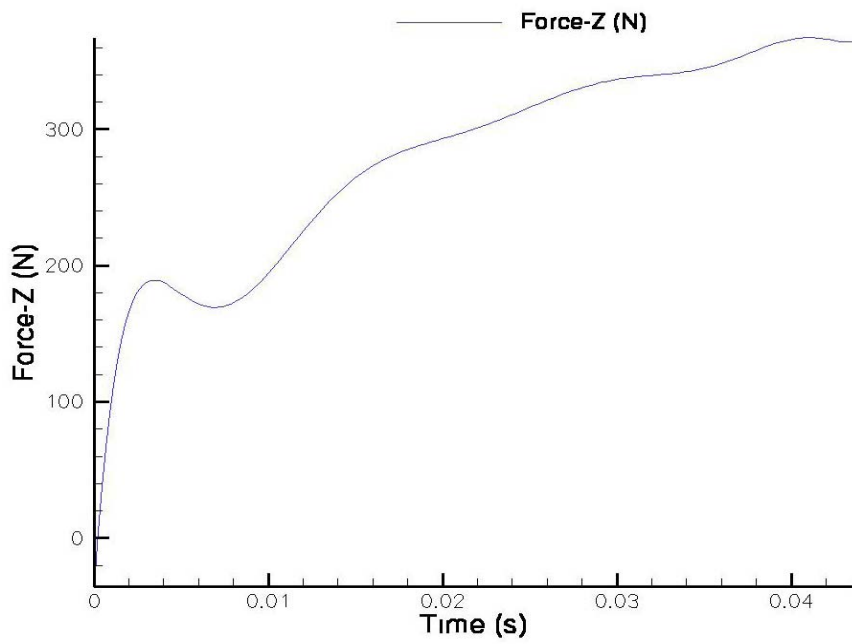
Γωνία περιστροφής 1080°

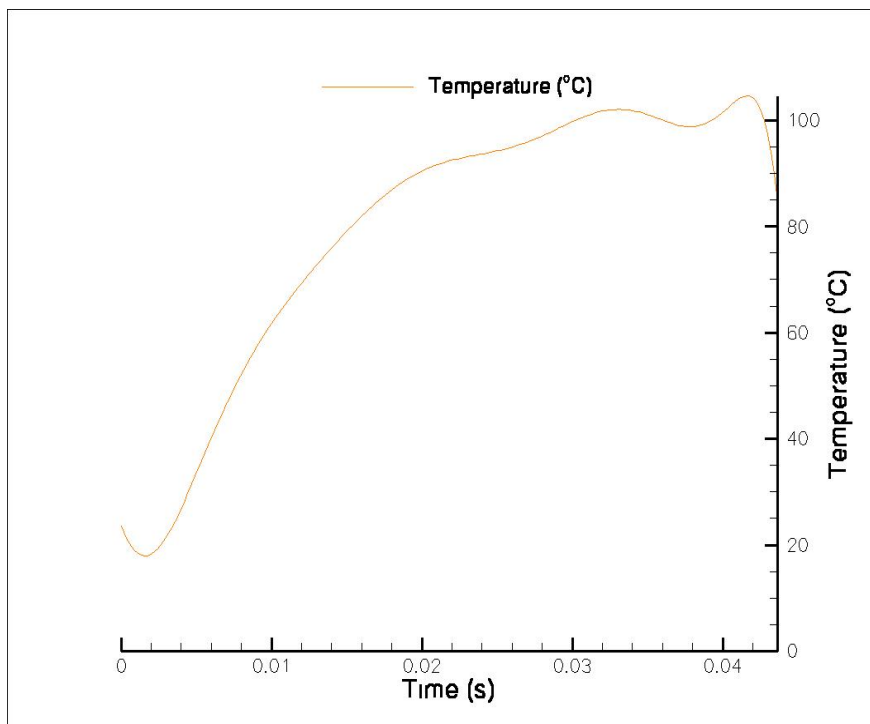
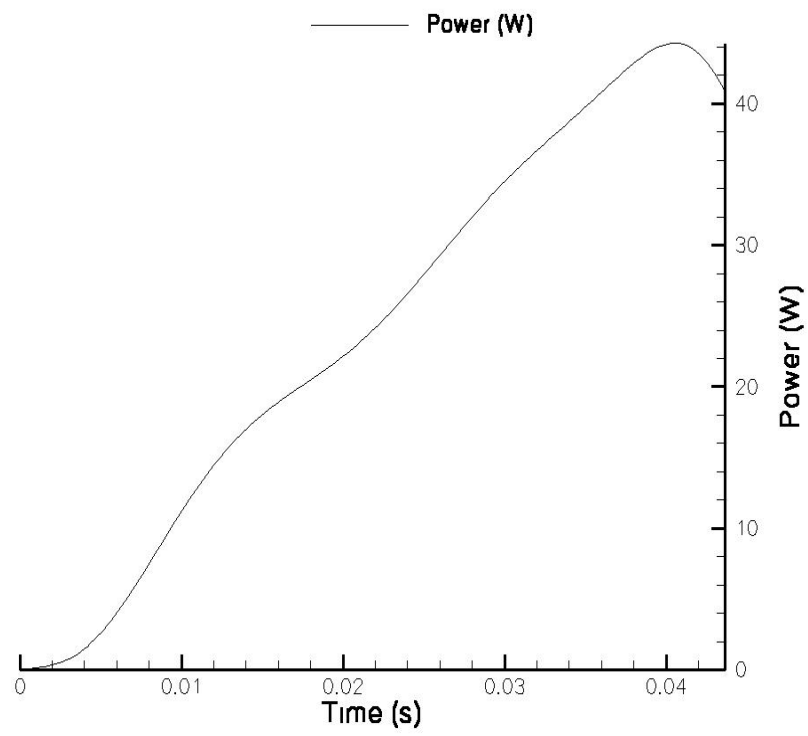
Ταχύτητα περιστροφής N=2750rpm

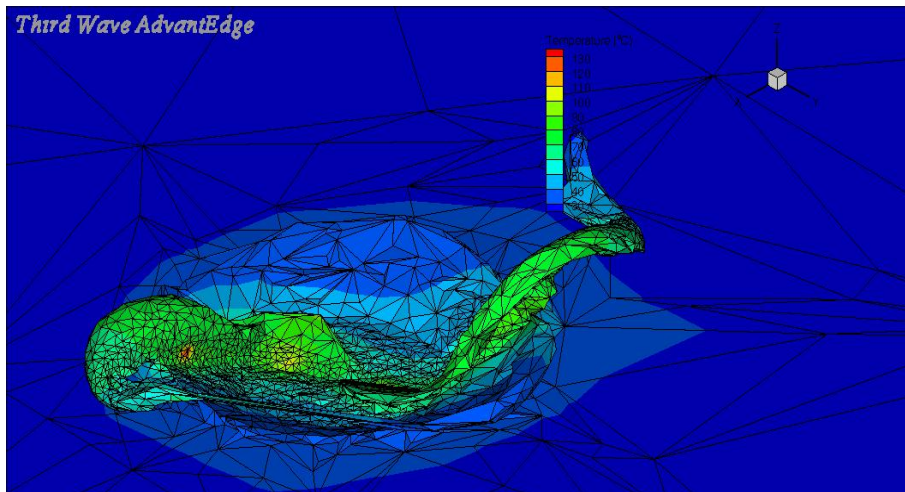
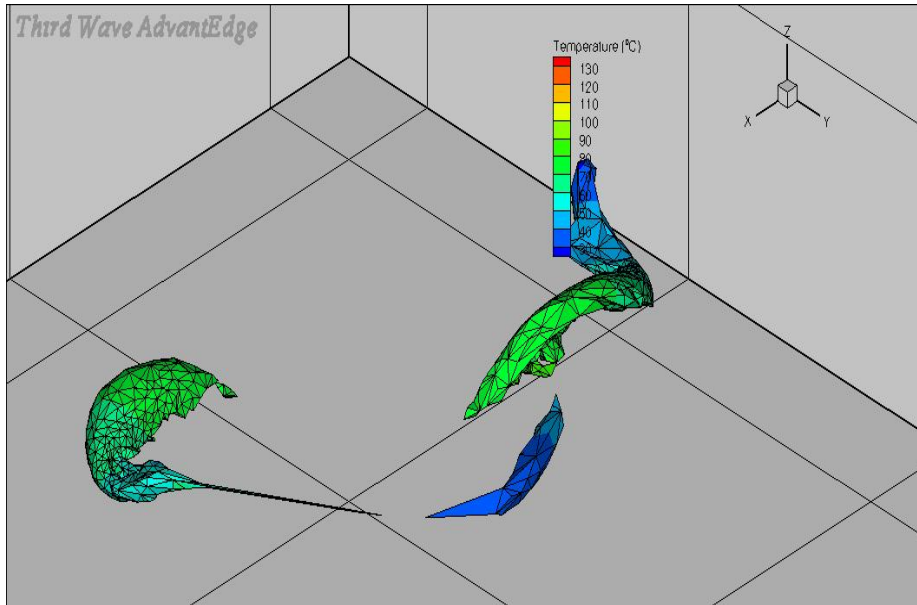
Πρόωση f=0.10mm/rev

Γωνία κορυφής 136°, γωνία έλικα 30°

Διάμετρος d=6mm







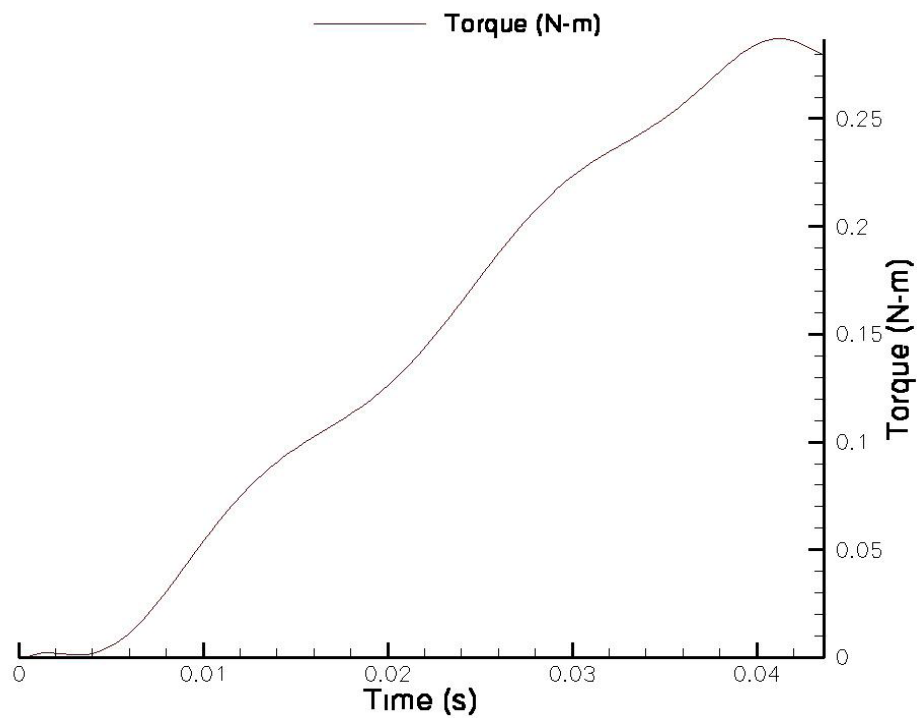
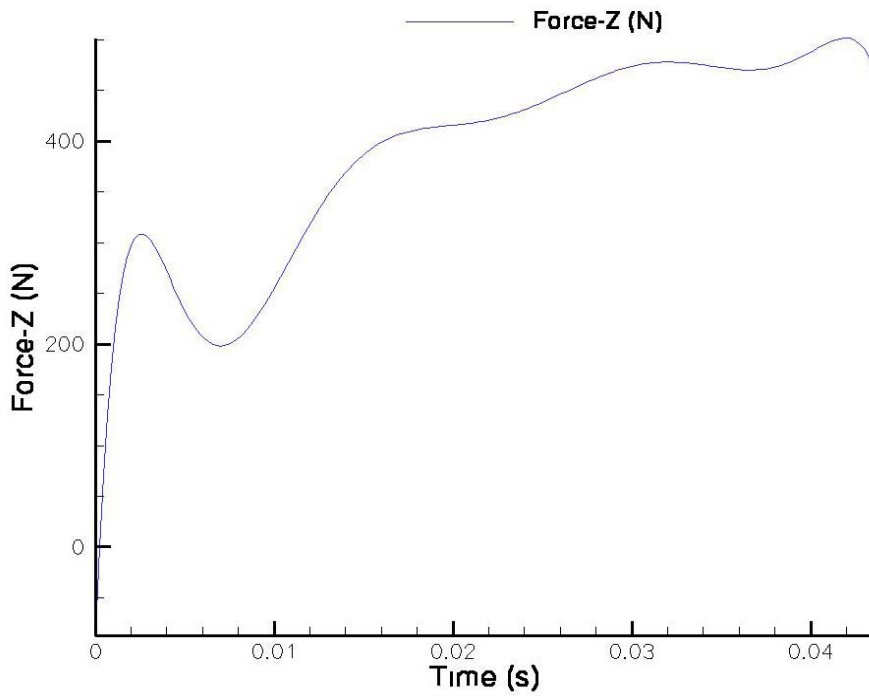
Γωνία περιστροφής 1080°

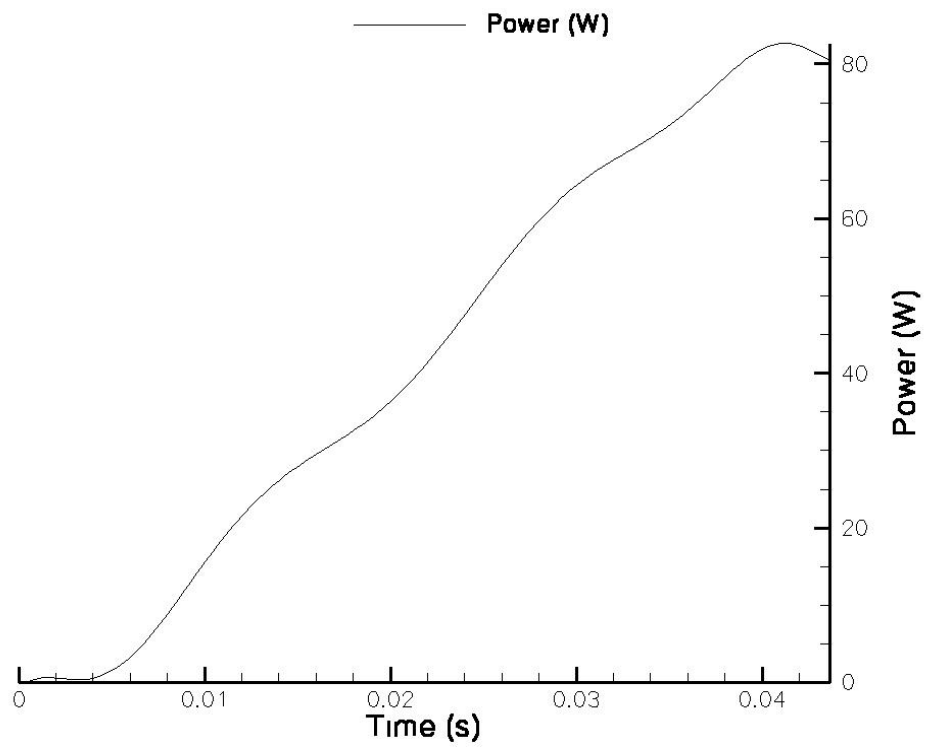
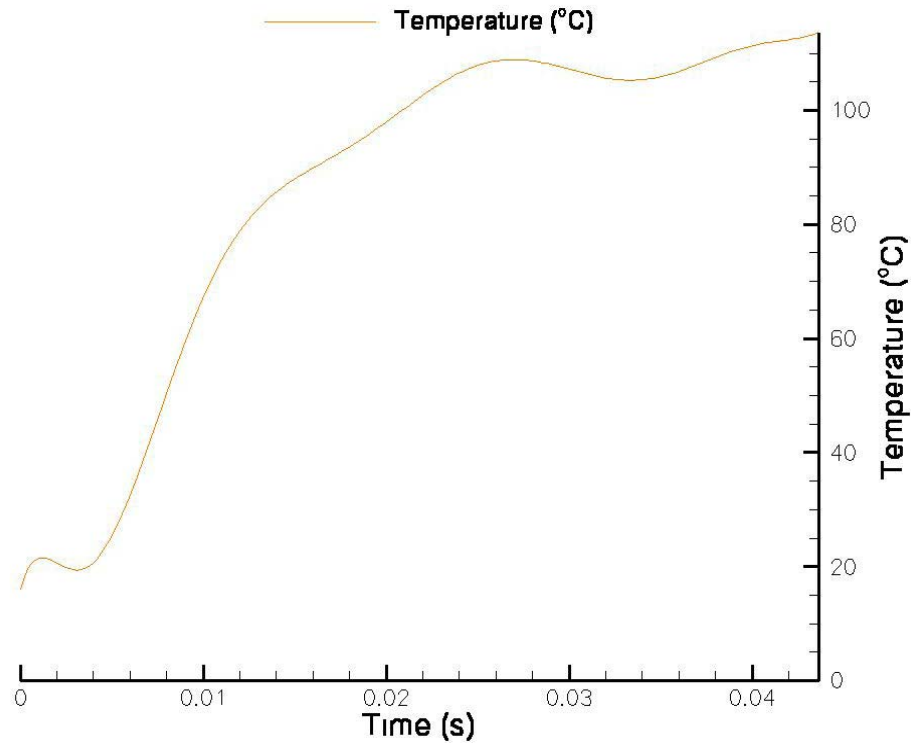
Ταχύτητα περιστροφής N=2750rpm

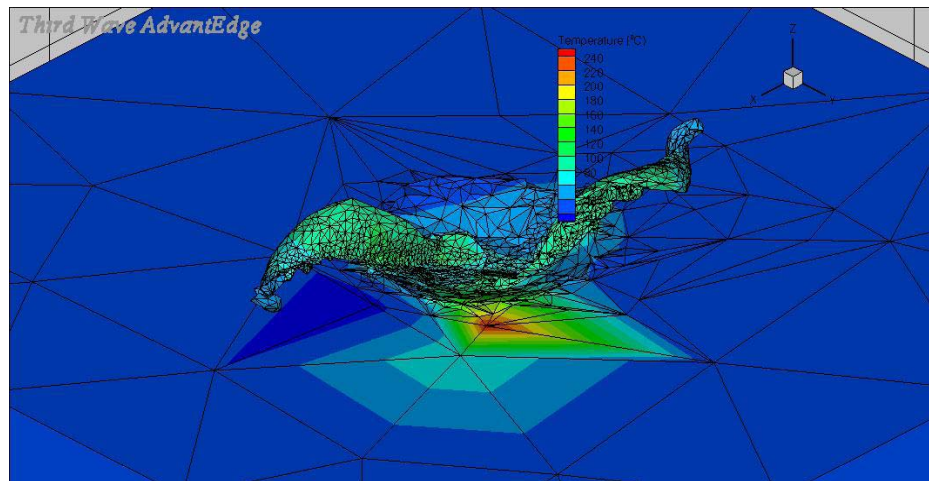
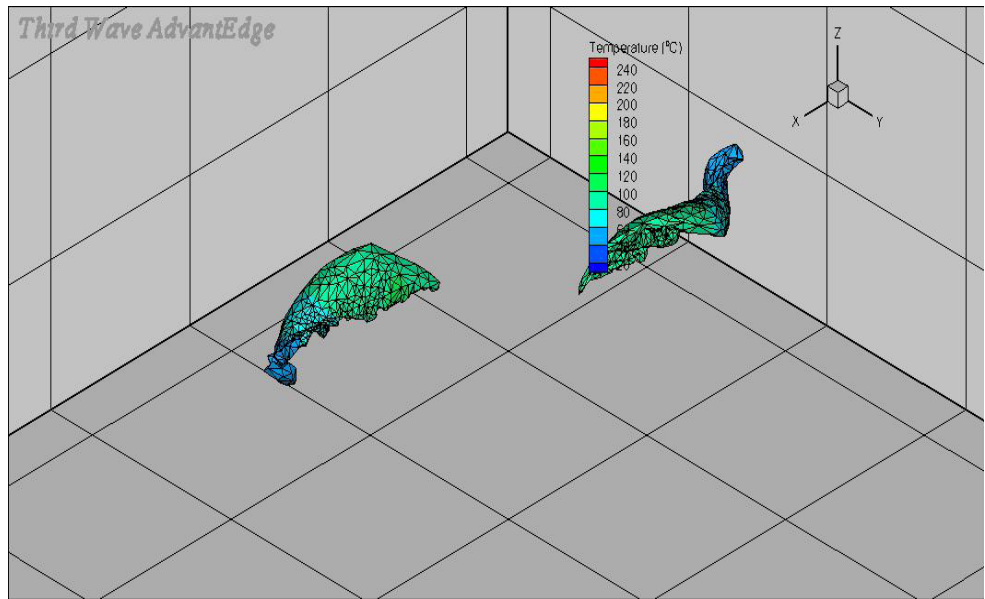
Πρόωση f=0.15mm/rev

Γωνία κορυφής 136°, γωνία έλικα 30°

Διάμετρος d=6mm







4.4 Συγκεντρωτικά στοιχεία.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι δυνάμεις κοπής (πειραματικές – αριθμητικές), ροπές, θερμοκρασίες, μορφή αποβλήτου καθώς και οι συνθήκες κοπής.

Πίνακας 12. Μέγιστες δυνάμεις κοπής (αριθμητικές – πειραματικές) για διαφορετικές τιμές πρόωσης.

Πρόωση f (mm/rev)	Δύναμη Κοπής Fz (N) Αριθμητική Τιμή	Δύναμη Κοπής Fz (N) Πειραματική Τιμή
0.05	210	285
0.10	380	485
0.15	500	658

Πίνακας 13. Μέγιστες ροπές και θερμοκρασίες για διαφορετικές τιμές πρόωσης.

Πρόωση f (mm/rev)	Ροπή (N-m)	Θερμοκρασία (°C)
0.05	0.065	90
0.10	0.15	100
0.15	0.30	110

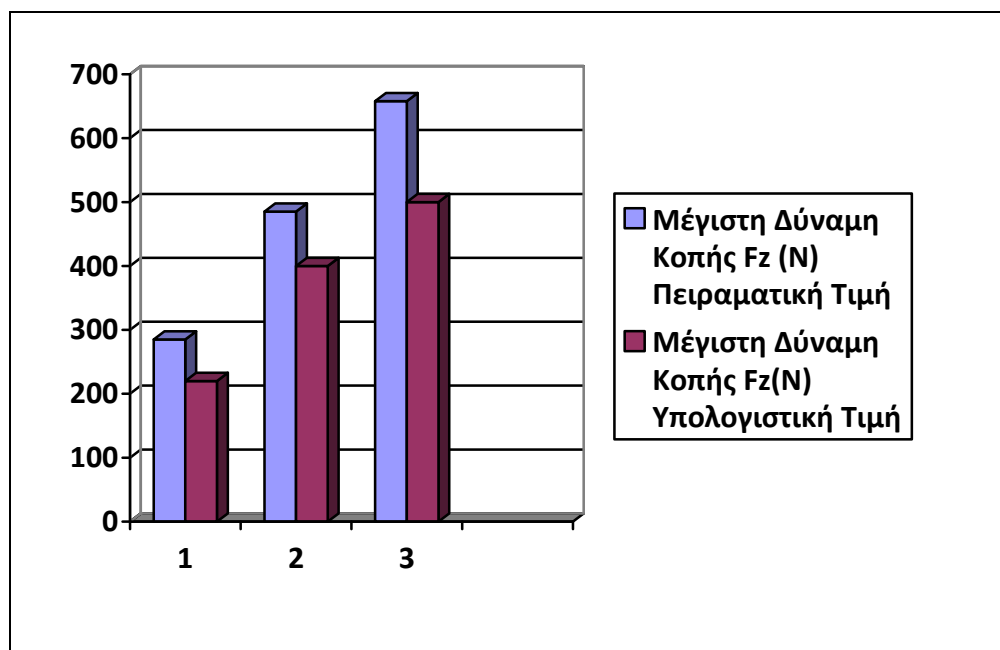
Πίνακας 14. Μορφή αποβλήτου.

Πρόωση f (mm/rev)	Μορφή Αποβλήτου
0.05	Συνεχές - Ομοιόμορφο
0.10	Διακοπτόμενο - Ανομοιόμορφο
0.15	Διακοπτόμενο - Ανομοιόμορφο

4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων Πειραμάτων – Προσομοίωσης (για τρεις περιστροφές του εργαλείου).

4.5.1 Δυνάμεις.

Οι δυνάμεις που προέκυψαν από τα πειράματα και το πακέτο AdvantEdge συγκρίνονται διαγραμματικά παρακάτω:



Σχήμα 4.4. Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων για τη δύναμη κοπής Fz.

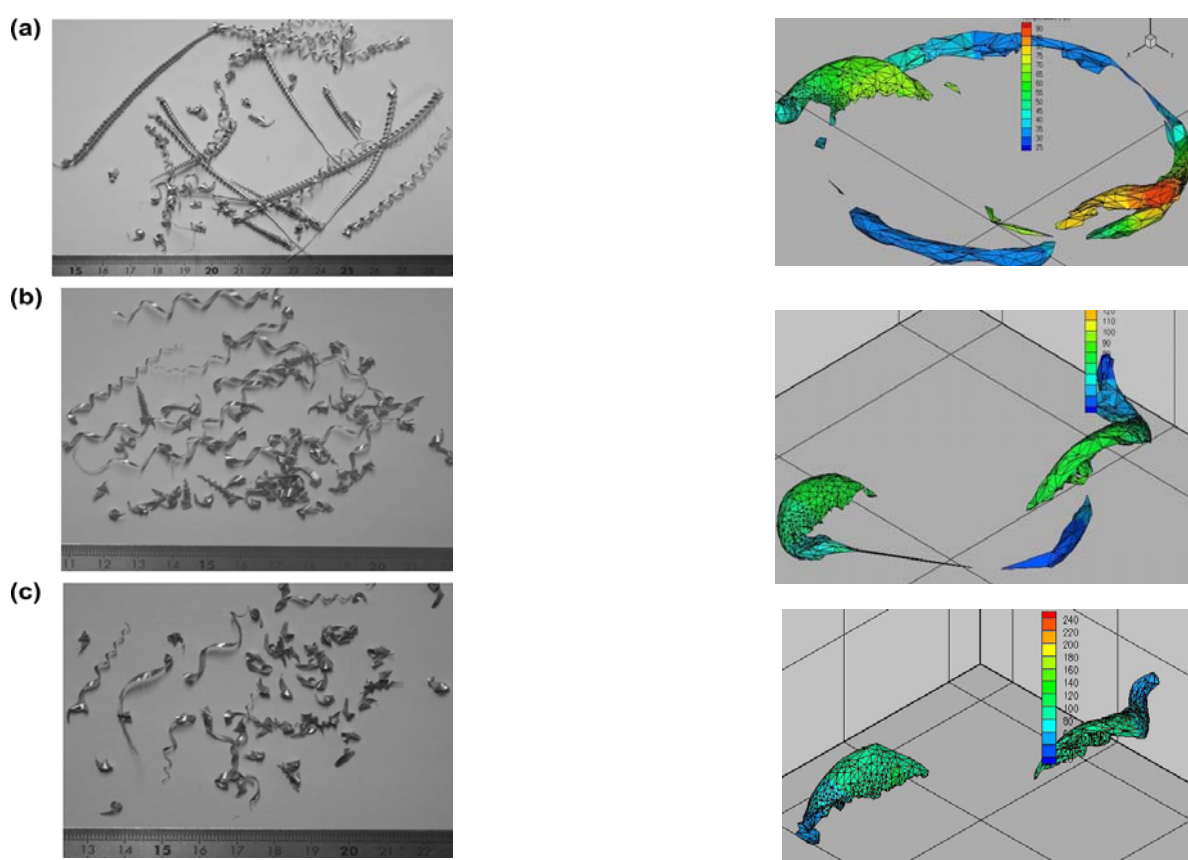
Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

Σε ότι αφορά τώρα, τις δοκιμές όπου έχουμε τρεις περιστροφές του εργαλείου, άρα και αύξηση του βάθους κοπής έχουμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις: για $f=0.05\text{mm/rev}$, $N=2750\text{rpm}$, η πειραματική τιμή της δύναμης κοπής είναι $F_z=285\text{N}$, ενώ η υπολογιστική τιμή της είναι $F_z=210\text{N}$, με απόκλιση 26%. Για $f=0.1\text{mm/rev}$, $N=2750\text{rpm}$, η πειραματική τιμή της δύναμης κοπής είναι $F_z=485\text{N}$, ενώ η υπολογιστική τιμή της είναι $F_z=380\text{N}$, με απόκλιση 21,5%. Τέλος, για $f=0.15\text{mm/rev}$, $N=2750\text{rpm}$, η πειραματική τιμή της δύναμης κοπής είναι $F_z=658\text{N}$, ενώ η υπολογιστική τιμή της είναι $F_z=500\text{N}$, με απόκλιση 24%. Παρατηρούμε ότι έχουμε σαφώς μια καλύτερη προσέγγιση του αποτελέσματος.

4.5.2 Απόβλητα.

Πίνακας 9. Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών για τη μορφή αποβλήτου κατά τη διάτρηση.

Αριθμός Πειράματος	Μορφή Αποβλήτου Πειραματικά	Προσομοίωση Διάτρησης Μορφή Αποβλήτου	Χαρακτηρισμός ταύτισης μορφής
1	Πριονωτό - Ομοιόμορφο	Συνεχές - Ομοιόμορφο	Καλή
2	Διακοπτόμενο - Ανομοιόμορφο	Διακοπτόμενο - Ανομοιόμορφο	Πολύ καλή
3	Διακοπτόμενο - Ανομοιόμορφο	Διακοπτόμενο- Ανομοιόμορφο	Πολύ καλή



Εικόνα 4. Σύγκριση αποβλήτων πειραματικής και υπολογιστικής διαδικασίας.

Γενικά η διαφορά στη μορφή του αποβλήτου δεν ήταν σημαντική, μεγαλύτερη η διαφορά ήταν σε μικρά βάρη κοπής (μια περιστροφή ή αλλιώς γωνία περιστροφής 360°) όπου το απόβλητο είχε μεγάλη απόκλιση με το πραγματικό, είχαμε δηλαδή πολύ μικρά κομμάτια ή γρέζια.

Κεφάλαιο 5 Τελικά Συμπεράσματα

5.1 Συμπεράσματα από την κατεργασία και την προσομοίωση.

Ανακεφαλαιώνοντας τα όσα αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια συμπεραίνουμε πως επετεύχθη ο σημαντικότερος σκοπός της παρούσας εργασίας, ο οποίος είναι η ακριβής προσέγγιση και προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων της κατεργασίας διάτρησης αλουμινίου. Αυτό είναι ένα πρώτο στάδιο σε αυτή τη μεθοδολογία προσέγγισης των κατεργασιών κοπής με σκοπό την εξαγωγή έρευνας με τη βοήθεια μόνο του H/Y.

Η επικύρωση του μοντέλου που δημιουργήθηκε για την προσομοίωση του υλικού έγινε με απευθείας σύγκριση των αποτελεσμάτων της πραγματικής εργαστηριακής κοπής με τα εξαγόμενα από το πρόγραμμα δεδομένα. Έγινε προσπάθεια για την όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσέγγιση της κατεργασίας, δεδομένου ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων μιας προσομοίωσης με αριθμητικές μεθόδους είναι ανάλογη του διαθέσιμου υπολογιστικού χρόνου που μπορεί να αυξηθεί επ'άριστον.

Λαμβάνοντας υπόψη κάποια απόκλιση η οποία είναι αναμενόμενη εξαιτίας μιας ποικιλίας αιτιών οι οποίες καταγράφονται αναλυτικά παρακάτω, παρατηρούμε ότι είμαστε αρκετά κοντά στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Το υπολογιστικό πρόγραμμα όμως μας δίνει τη δυνατότητα της καταγραφής των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών και της εφαρμοζόμενης ισχύος κ.α. Σε ότι αφορά τις θερμοκρασίες παρατηρούμε μικρές τιμές οι οποίες απέχουν από το σημείο τήξης του υλικού. Με την αύξηση όμως του βάθους κοπής, ταχύτητας και προώσεως έχουμε αντίστοιχα και αύξηση της θερμοκρασίας σε χαμηλά όμως επίπεδα.

5.2 Πιθανές αιτίες μη σύγκλισης πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

- Οι ιδανικές συνθήκες κατά τις οποίες προσομοιώνεται το πείραμα και οι ατέλειες και τα διάφορα πιθανά προβλήματα κατά την εκτέλεση των πειραμάτων στο εργαστήριο.

- Το υλικό AI 2024 που προσομοιώθηκε με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ενδέχεται να παρουσιάζει διαφορές στη σύστασή του και άρα και στις ιδιότητες.
- Η πιθανή φθορά των κοπτικών εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.
- Η χρήση Rapid Mode (Simulation→Simulation Options→General) αναφέρεται στις οδηγίες χρήσης ότι ενδέχεται να παρουσιάσει πιθανή απόκλιση έως 20% των υπολογισμένων τιμών. Γενικά καλό είναι να χρησιμοποιείται το Standard Mode.
- Το απλοποιημένο μοντέλο τριβής που χρησιμοποιεί το υπολογιστικό πακέτο, στα φαινόμενα θραύσης και πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού κατά τη δημιουργία του αποβλήτου τα οποία το πρόγραμμα δεν μπορεί να προσομοιώσει επαρκώς με τα πλαστικά κριτήρια παραμόρφωσης που χρησιμοποιεί.
- Στις εφαρμογές με μικρή πρόωση και βάθος κοπής που παρουσιάστηκαν οι μεγαλύτερες αποκλίσεις ενδέχεται να έπαιξε ρόλο ο τρόπος πλεγματοποίησης.

5.3 Συμπεράσματα.

Σύμφωνα με τη θεωρία τα αποτελέσματα που προέκυψαν συμφωνούν σε ικανοποιητικό βαθμό. Η θερμοκρασία που αναπτυσσόταν, αυξανόταν με την αύξηση της πρόωσης και του βάθους κοπής και λιγότερο με την αύξηση της ταχύτητας. Σε ότι αφορά τη δύναμη κοπής (F_z), παρουσίασε μικρή αύξηση όταν η ταχύτητα κοπής αυξήθηκε, ενώ η αύξηση της F_z ήταν σημαντική όταν αυξήθηκε το βάθος κοπής και η πρόωση.

Η μοντελοποίηση της διάτρησης χωρίς τη χρήση ψυκτικού υγρού έγινε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων AdvantEdge το οποίο περιορίζεται στις κλασσικές κατεργασίες κοπής και είναι πολύ φιλικό προς το χρήστη. Αυτό μαζί με το μαθηματικό μοντέλο επαναπροσδιορισμού του πλέγματος, την πλαστική ροή του υλικού γύρω από την κοπτική ακμή και γενικά το θερμομηχανικό μοντέλο που χρησιμοποιεί, έχουν κάνει το πακέτο το πλέον πετυχημένο εμπορικά γύρω από τις κατεργασίες κοπής. Η απόκλιση που παρατηρήθηκε κατά τη σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων ήταν πολύ μεγαλύτερη στις εφαρμογές με μικρό βάθος κοπής και πρόωσης. Δεν παύει όμως η χρήση του πακέτου AdvantEdge να είναι ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στα χέρια του μηχανικού με στόχο την προσομοίωση των κατεργασιών και τη μείωση των πειραμάτων για τη βελτιστοποίηση μιας κατεργασίας και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

5.4 *Επίλογος*

Η προσέγγιση των κατεργασιών των υλικών με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων έχει φέρει εντυπωσιακά αποτελέσματα. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι ανάλογη της προσπάθειας και του χρόνου που διατίθεται από τον ερευνητή. Η μεγαλύτερη ακρίβεια στη προσέγγιση απαιτεί βελτίωση του μετρητικού εξοπλισμού για τη διεξαγωγή πειραμάτων με στόχο τη μείωση σφάλματος και αστοχιών. Επίσης, επέκταση των υπολογισμών σε μεγαλύτερο φάσμα τιμών των παραμέτρων της κάθε κατεργασίας όπως διαφορετικές τιμές πρόωσης, ταχύτητας κοπής, βάθους κοπής βοηθούν προς αυτή τη κατεύθυνση. Οι πολλές δοκιμές με διαφορετικές γεωμετρίες εργαλείων όπως γωνίες κορυφής, έλικας, αποβλήτου, θα βοηθήσουν καθοριστικά στη βελτιστοποίηση των κατεργασιών της διάτρησης (και όχι μόνο) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Τέλος, οι συνθήκες κοπής στην κατεργασία αποβολής υλικού της διάτρησης, οι οποίες αναλύθηκαν και προσομοιώθηκαν στην παρούσα εργασία, στοχεύουν στην υψηλή παραγωγικότητα με την επιθυμητή ακρίβεια, το μικρό κόστος και χρόνο κατεργασίας. Η αύξηση της ταχύτητας συνοδεύεται με αύξηση της θερμοκρασίας που αποτελεί το κύριο πρόβλημα φθοράς για το εργαλείο, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε μέσω της προσομοίωσης που και πώς αυτή αναπτύσσεται ώστε με επιλογή κατάλληλων συνθηκών κοπής να διαχέεται καλύτερα η θερμότητα και με αυτόν τον τρόπο να βελτιστοποιηθεί η κατεργασία.

Βιβλιογραφία

- [1] Αθανασίου Γ. Μάμαλη, «Τεχνολογία Κατεργασιών των Υλικών: Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά», ΕΜΠ.
- [2] Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης, Δημήτρης Ι. Παντελής, «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», ΕΜΠ.
- [3] Δ. Ε. Μανωλάκος, Σημειώσεις «Κατεργασίες ΙΙ», ΕΜΠ.
- [4] Αθανασίου Γ. Μάμαλη, «Κατεργασίες των Υλικών ΙΙ», ΕΜΠ.
- [5] A. G. Mamalis, J. Kundrak, A. Markopoulos, D. E. Manolakos, «On the finite element modeling of high speed hard turning».
- [6] Lars-Erik Lindgren, Vahid Kalhori, Mikael Lundblad, «Machining Simulations And Their Use In Industry», Barcelona, 2005.
- [7] Vahid Kalhori, «Modelling and Simulation of Mechanical Cutting», Lulea University of Technology, Sweden.
- [8] AdvantEdge Manual.
- [9] TecPlot User's Manual.
- [10] Ιστοσελίδα, www.thirdwavesys.com, AdvantEdge.
- [11] Redouane Zitoune, Vijayan Krishnaraj, Belkacem Sofiane Almabouacif, Francis Collombet, Michal Sima, Alain Jolin, «Influence of machining parameters and new nano-coated tool on drilling performance of CFRP/Aluminium sandwich», ScienceDirect, 27 April 2011.
- [12] Γ. Βοσνιάκος, Σημειώσεις «Εισαγωγή στην Μηχανουργική Τεχνολογία», ΕΜΠ.
- [13] Γιώργος Χρυσολουρίδης, «Γεωμετρία Κοπτικών Εργαλείων», Πανεπιστήμιο Πατρών, 2003.
- [14] John A. Schey, «Introduction to Manufacturing Processes», Mc Graw Hill, Third edition, (2000).
- [15] Βατάλης Αργύρης, «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών», Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας, 2009.
- [16] Πέτρου Γ. Πετρόπουλου, «Μηχανουργική Τεχνολογία Κατεργασιών Κοπής των Μετάλλων», Τόμος ΙΙ, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1998.

- [17] S.Kaplakjian, «Manufacturing Engineering and Technology» Proceedings of the 2000 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '00), Takamatsu, Japan, October 30 – November 5 2000.
- [18] <http://books.google.gr>
- [19] www.matweb.com
- [20] www.en.wikipedia.org