



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΕΦΑΛΩΝ ΕΜΦΥΤΕΥΜΑΤΩΝ ΜΗΡΙΑΙΟΥ  
ΟΣΤΟΥ ΑΠΟ ΚΡΑΜΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ Ti-6Al-4V ΚΑΙ  
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ  
ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΥ Δ. ΙΩΑΝΝΗ

Επιβλέπων: Μανωλάκος Δημήτριος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

---



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΕΦΑΛΩΝ ΕΜΦΥΤΕΥΜΑΤΩΝ ΜΗΡΙΑΙΟΥ  
ΟΣΤΟΥ ΑΠΟ ΚΡΑΜΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ Ti-6Al-4V ΚΑΙ  
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΤΗ  
ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

του

**ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΥ Δ. ΙΩΑΝΝΗ**

**Επιβλέπων :** Μανωλάκος Δημήτριος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

---

*(Υπογραφή)*

.....

**ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

© 2010 – All rights reserved

---

## Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά στο πεδίο των κατεργασιών και ειδικότερα στη μελέτη των δυνάμεων κοπής, πως επιδρά δηλαδή η μεταβολή των συνθηκών κοπής στις δυνάμεις κοπής καθώς και ο έλεγχος της μοντελοποίησης και προσομοίωσης αυτών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται κοπή τιτανίου σε τόρνο CNC. Λόγω των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων που παρουσιάζει το υλικό αυτό, παρατηρείται αύξηση της χρήσης του τιτανίου στη βιομηχανία, και σε εφαρμογές στην αεροναυπηγική και την ιατρική. Το ζήτημα όμως είναι ότι αυτές οι φυσικές και χημικές ιδιότητες καθιστούν δύσκολη την κατεργασία του τιτανίου και των κραμάτων του, παρουσιάζοντας ορισμένες ιδιαιτερότητες κατά την μηχανουργική του κατεργασία.

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιείται πείραμα και αριθμητικός υπολογισμός με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας το πακέτο AdvantEdge FEM της Third Wave System. Συγκεκριμένα, ελέγχεται κατά πόσο τα πειραματικά δεδομένα των μετρήσεων συμφωνούν με τα αριθμητικά δεδομένα. Εν συνεχεία, διερευνάται η παραμετρική επίλυση του μοντέλου μεταβάλλοντας τις συνθήκες κοπής έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Σε αυτό το σημείο αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή κ. Μανωλάκο Δημήτριο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές του, που ήταν καθοριστικής σημασίας τόσο για την παρούσα εργασία όσο και γενικότερα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Μαρκόπουλο Άγγελο, για την πολύτιμη υποστήριξη που μου προσέφερε, αναγκαία για την ολοκλήρωση της διπλωματικής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Γαλάνη Νικόλαο για τη σημαντική βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων αλλά και για τις σημαντικές συμβουλές του.

Θα ήταν σοβαρή παράλειψη εκ μέρους μου το να μην εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους τους συμφοιτητές μου, οι οποίοι με βοήθησαν με κάθε τρόπο τόσο στην διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας όσο και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου απέναντι στην οικογένειά μου, τόσο για την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράστασή της κατά την διάρκεια των σπουδών μου, όσο και για τις διακριτικές και πάντα εύστοχες συμβουλές της.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΤΙΤΑΝΙΟ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ.....	7
1.1	Τιτάνιο .....	7
1.2	Ιστορία του τιτανίου .....	7
1.3	Χαρακτηριστικά & ιδιότητες του τιτανίου.....	9
1.3.1	Φυσικά χαρακτηριστικά.....	9
1.3.2	Μέταλλο τιτανίου – Τα κράματα και οι ενώσεις του .....	11
1.3.2.1	<i>Βασικές πτυχές της μεταλλουργίας του τιτανίου .....</i>	<i>11</i>
1.3.2.2	<i>Μηχανικές ιδιότητες.....</i>	<i>16</i>
1.3.2.3	<i>Συμπεριφορά στη διάβρωση.....</i>	<i>22</i>
1.4	Πηγές και κοιτάσματα εξόρυξης τιτανίου .....	24
1.5	Χρήση .....	26
2	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΘΕΩΡΙΑ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ.....	29
2.1	Εισαγωγικές έννοιες .....	29
2.1.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου .....	29
2.1.2	Χαρακτηριστικά του αποβλίττου.....	30
2.1.3	Συνθήκες κοπής και η σημασία τους .....	30
2.1.4	Είδη κοπής .....	31
2.2	Μηχανική της κοπής των μετάλλων.....	31
2.2.1	Μορφολογία και σχηματισμός του αποβλίττου.....	31
2.2.1.1	<i>Το ασυνεχές απόβλιττο.....</i>	<i>32</i>
2.2.1.2	<i>Το συνεχές απόβλιττο.....</i>	<i>33</i>
2.2.1.3	<i>Το συνεχές απόβλιττο με ψευδοακμή .....</i>	<i>35</i>
2.2.2	Πώς επηρεάζουν το σχηματισμό του αποβλίττου η ταχύτητα κοπής $v$ και η γωνία αποβλίττου του εργαλείου $\gamma$ .....	38
2.2.2.1	Η ταχύτητα κοπής.....	38
2.2.2.2	Η γωνία αποβλίττου του εργαλείου.....	38

2.3	Εκλυόμενη θερμότητα και αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την κοπή των μετάλλων .....	38
2.4	Φθορά του εργαλείου κοπής.....	42
2.4.1	Γενικές παρατηρήσεις – αιτίες φθοράς.....	42
2.4.2	Μηχανισμοί φθοράς του εργαλείου .....	44
2.4.2.1	<i>Μηχανισμός φθοράς με σχηματισμό και λύση συγκολλητών μικροδεσμών</i> 44	
2.4.2.2	<i>Μηχανισμός φθοράς με απόξεση.....</i>	44
2.4.2.3	<i>Μηχανισμός φθοράς με διάχυση στερεάς καταστάσεως .....</i>	44
2.4.2.4	<i>Θερμοηλεκτρική φθορά.....</i>	45
2.4.2.5	<i>Φθορά από οξείδωση.....</i>	45
2.4.2.6	<i>Αυλακοειδής ή συγκεντρωμένη φθορά.....</i>	45
2.4.2.7	<i>Χημική φθορά.....</i>	45
2.4.2.8	<i>Ηλεκτρολυτική φθορά.....</i>	45
2.5	Παράγοντες κοπής, που επηρεάζουν τη ζωή του εργαλείου .....	46
2.5.1	Οι συνθήκες κατεργασίας .....	46
2.5.2	Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου.....	47
2.5.3	Επιρροή του υλικού του εργαλείου.....	47
2.5.4	Πως επιδρά το υλικό του τεμαχίου στη ζωή του εργαλείου .....	48
2.5.5	Επίδραση του υγρού κοπής.....	48
2.6	Επιρροή τασικών παραγόντων της κοπής των μετάλλων επί των συνιστωσών της δυνάμεως (ή αντιστάσεως) κοπής κατά τη διαμήκη τόννευση 48	
2.6.1	Η γωνία αποβλίττου $\gamma$ του εργαλείου .....	49
2.6.2	Η γωνία ελευθερίας $\alpha$ .....	49
2.6.3	Η γωνία λοξότητας $\lambda_s = \lambda$ .....	50
2.6.4	Η ακτίνα καμπυλότητας $r$ της ακής του εργαλείου.....	50
2.6.5	Η γωνία θέσεως $K_r = K$ της κύριας κόψης του εργαλείου.....	51
2.6.6	Η φθορά του κοπτικού εργαλείου.....	52



2.6.7	Το υλικό του κοπτικού εργαλείου και του προς κατεργασία τεμαχίου ...	52
2.6.8	Η πρόωση και το βάθος κοπής.....	52
2.6.9	Η ταχύτητα κοπής.....	53
2.6.10	Το υγρό κοπής.....	54
2.7	Διακυμάνσεις των δυνάμεων κατά την κοπή. Ιδιόμορφες ταλαντώσεις.	54
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	56
3.1	Γενικά .....	56
3.2	Κοπή και διαμόρφωση δοκιμίων .....	56
3.3	Εργαλειομηχανή κατεργασίας – τόννος .....	58
3.4	Κοπτικά εργαλεία .....	59
3.5	Σύστημα καταγραφής δεδομένων.....	62
3.6	Κοπή .....	63
3.6.1	Προετοιμασία εργαλειομηχανής.....	63
3.6.2	Προγραμματισμός και κοπή δοκιμίου .....	64
3.7	Μέτρηση δυνάμεων .....	65
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....	67
4.1	Πειράματα 1&2 – Αποτελέσματα.....	67
4.2	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	67
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	71
5.1	Γενικά .....	71
5.2	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων .....	71
5.3	Λογισμικό .....	74
5.4	Εισαγωγή δεδομένων.....	75
5.4.1	Εισαγωγή δεδομένων κοπτικού εργαλείου .....	76
5.4.2	Εισαγωγή δεδομένων υλικού .....	77
5.4.3	Βασικές επιλογές μοντελοποίησης .....	78
5.5	Εμφάνιση αποτελεσμάτων.....	83

5.6	Προβλήματα .....	85
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	87
6.1	Αποτελέσματα μοντελοποίησης πρώτου δοκιμίου.....	87
6.2	Αποτελέσματα μοντελοποίησης δεύτερου δοκιμίου .....	92
7	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	99
7.1	Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων πρώτου δοκιμίου 99	
7.2	Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων δεύτερου δοκιμίου .....	100
8	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 - ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΟΠΗΣ .....	103
8.1	Γενικά .....	103
8.2	Επίδραση της ταχύτητας κοπής $s$ .....	103
8.2.1	Ταχύτητα κοπής $s_1=60\text{m/min}$ .....	104
8.2.2	Ταχύτητα κοπής $s_2=140\text{m/min}$ .....	108
8.2.3	Ταχύτητα κοπής $s_3=200\text{m/min}$ .....	112
8.3	Επίδραση της πρόωσης $f$ .....	115
8.3.1	Πρόωση $f_1=0.15\text{mm/rev}$ .....	116
8.3.2	Πρόωση $f_2=0.21\text{mm/rev}$ .....	119
8.3.3	Πρόωση $f_3=0.35\text{mm/rev}$ .....	123
8.4	Επίδραση του βάθους κοπής $a$ .....	127
8.4.1	Βάθος κοπής $a_1=0.25\text{mm}$ .....	128
8.4.2	Βάθος κοπής $a_2=0.5\text{mm}$ .....	131
8.4.3	Βάθος κοπής $a_1=1.0\text{mm}$ .....	135
9	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	140
9.1	Σχολιασμός αποτελεσμάτων μεταβολής της ταχύτητας κοπής $s$ .....	140
9.2	Σχολιασμός αποτελεσμάτων μεταβολής της πρόωσης $f$ .....	141

9.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων μεταβολής του βάθους κοπής a.....	143
9.4	Περεταίρω σχολιασμός – Παρατηρήσεις .....	145
10	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	151
11	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 .....	153
12	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 .....	155
13	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 .....	157
14	Βιβλιογραφία.....	163
14.1	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	163
14.2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	164
14.3	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	165
14.4	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	166
14.5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 9 ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	167

# 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΤΙΤΑΝΙΟ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

## 1.1 Τιτάνιο

Το τιτάνιο είναι ένα εξαιρετικά χρήσιμο κατασκευαστικό υλικό σε μία ευρεία γκάμα εφαρμογών. Έχει πολύ καλή αναλογία αντοχής και βάρους και παρουσιάζει πολύ καλή αντίσταση στην διάβρωση. Κατέχει σημαντική θέση στην αεροδιαστημική, στην αεροναυπηγική, στη ναυπηγική, στη χημική βιομηχανία, στη βιομηχανία πετρελαιοειδών, στη βιομηχανία οπλικών συστημάτων, στην αυτοκινητοβιομηχανία και τέλος θα πρέπει να αναφερθεί η σημαντική θέση που κατέχει στην ιατρική.

Το τιτάνιο και τα κράματά του επιδέχονται επεξεργασία με τις συνήθεις μεθόδους όπως χύτευση, σφυρηλάτηση, συγκόλληση καθώς και κατεργασίες κοπής όπως διάτρηση, φρεζάρισμα και τόννευση.

## 1.2 Ιστορία του τιτανίου

Το τιτάνιο ανακαλύφθηκε σαν κράμα μετάλλου από τον William Gregor, έναν ερασιτέχνη γεωλόγο, στην Κορνουάλλη, στην Αγγλία το 1791. Ο Gregor παρατήρησε την παρουσία ενός νέου στοιχείου μέσα στον ιλμενίτη, όταν ανακάλυψε μαύρη άμμο στην κοντινή κοινότητα του Μάνακαν, η οποία ελκύνονταν από μαγνήτη. Η ανάλυση της άμμου καθόρισε την παρουσία δύο μεταλλικών οξειδίων, του οξειδίου του σιδήρου (που εξηγεί την έλξη στο μαγνήτη) και ένα ποσοστό 45,25% που αποτελούνταν από ένα άσπρο μεταλλικό οξείδιο, το οποίο δεν μπορούσε να προσδιορίσει. Ο Gregor, αντιλαμβανόμενος ότι το μη αναγνωρισμένο οξείδιο, περιείχε ένα μέταλλο που δεν ταίριαζε με τις ιδιότητες οποιουδήποτε άλλου γνωστού στοιχείου μέχρι τότε, εξέθεσε τα συμπεράσματά του στην «*Βασιλική Γεωλογική κοινότητα*» της Κορνουάλλης και στο γερμανικό επιστημονικό περιοδικό Annalen Crell.

Περίπου την ίδια χρονική περίοδο, ο Franz Joseph Muller, παρήγαγε μια παρόμοια ουσία, την οποία επίσης δεν μπορούσε να προσδιορίσει. Το οξείδιο ( $TiO_2$ ) ανακαλύφθηκε πάλι, ανεξάρτητα το 1795 από τον γερμανό φαρμακοποιό Martin Heinrich Klaproth, σαν ορυκτό στην Ουγγαρία. Ο Klaproth διαπίστωσε ότι περιέλαβε ένα νέο στοιχείο και το ονόμασε τιτάνιο από τους μυθικούς Τιτάνες, τους γιους της θεάς Γης. Αφού πληροφορήθηκε για την προηγούμενη ανακάλυψη του Gregor, έλαβε ένα δείγμα από το Μάνακαν και επιβεβαίωσε ότι περιείχε τιτάνιο.

Οι διαδικασίες που απαιτούνται για να εξαχθεί το τιτάνιο από τα διάφορα μεταλλεύματά του είναι επίπονες και δαπανηρές, δεν είναι δυνατό να αναχθεί με τον κοινό τρόπο, δηλαδή με θέρμανση παρουσία άνθρακα, επειδή αυτός παράγει καρβίδιο του τιτανίου. Καθαρό μεταλλικό τιτάνιο (καθαρότητας 99.9%) παράχθηκε αρχικά το 1910 από Matthew A. Hunter θερμαίνοντας τετραχλωρίδιο του τιτανίου ( $TiCl_4$ ) με νάτριο (N) μέσα σε ένα χαλύβδινο δοχείο πίεσεως στους 700–800°C, έτσι

δημιουργήθηκε η μέθοδος Hunter. Το μέταλλο τιτανίου δεν χρησιμοποιήθηκε εκτός εργαστηρίου μέχρι το 1946 όταν ο William Justin Kroll απέδειξε ότι θα μπορούσε να παραχθεί εμπορικά με τη αναγωγή του τετραχλωριδίου του τιτανίου ( $TiCl_4$ ) με μαγνήσιο (Mg), έτσι δημιουργήθηκε η μέθοδος Kroll.

Αν και η έρευνα συνεχίζεται για να βρεθούν αποδοτικότερες και λιγότερο δαπανηρές διαδικασίες η διαδικασία Kroll χρησιμοποιείται ακόμα για την εμπορική παραγωγή του τιτανίου.

Τιτάνιο πολύ υψηλής καθαρότητας παράχθηκε σε μικρές ποσότητες όταν οι Anton Eduard van Arkel and Jan Hendrik de Boer ανακάλυψαν την ιωδική μέθοδο (Σχήμα 1.1) το 1925. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την αντίδραση με ιώδιο και τη μετατροπή των σχηματιζόμενων ατμών πάνω από ένα πυρακτωμένο νημάτιο σε καθαρό μέταλλο.



**Σχήμα 1.1** Κρυσταλλική ράβδος τιτανίου από την ιωδική διαδικασία.

Τις δεκαετίες του '50 και '60, η Σοβιετική Ένωση καινοτόμησε χρησιμοποιώντας το τιτάνιο στις στρατιωτικές και στις υποβρύχιες εφαρμογές, ως τμήμα προγραμμάτων σχετικών με τον ψυχρό πόλεμο. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1950, το τιτάνιο άρχισε να χρησιμοποιείται εκτενώς για στρατιωτικούς λόγους και κυρίως σε εφαρμογές αεροναυπηγικής, ιδιαίτερα σε υψηλής απόδοσης αεριωθούμενα, αρχίζοντας από τα αεροσκάφη όπως το F100 Super Sabre and Lockheed A-12.

Στις ΗΠΑ, το Υπουργείο Άμυνας αντιλήφθηκε από νωρίς τη στρατηγική σημασία αυτού του μετάλλου και υποστήριξε τις πρώτες προσπάθειες για την εμπορευματοποίησή του. Κατά τη διάρκεια της περιόδου του ψυχρού πολέμου, το τιτάνιο θεωρήθηκε στρατηγικό υλικό από την Αμερικανική κυβέρνηση, και ένα μεγάλο απόθεμα σπογγοειδούς τιτανίου διατηρήθηκε από το Κέντρο Εθνικών Αμυντικών Αποθεμάτων, το οποίο μειώθηκε τελικά το 2005.

Σήμερα, ο μεγαλύτερος παραγωγός σε παγκόσμιο επίπεδο, η ρωσική εταιρία VSMPO-Avisma, υπολογίζεται ότι κατέχει περίπου το 29% του μεριδίου της παγκόσμιας αγοράς.

Το 2006, το Υπουργείο Άμυνας των Η.Π.Α. βράβευσε με 5,7 εκατομμύρια δολάρια μια κοινοπραξία δύο επιχειρήσεων για να αναπτύξουν μια νέα διαδικασία για την παραγωγή μεταλλικής σκόνης τιτανίου. Κάτω από θερμότητα και πίεση, η σκόνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει ισχυρά και ελαφριά στοιχεία, και χρησιμοποιείται σε μεγάλη γκάμα εφαρμογών, από επενδύσεις τεθωρακισμένων μέχρι αεροδιαστημικά εξαρτήματα, μέσα μεταφοράς και χημικές βιομηχανίες επεξεργασίας.

Συνοψίζοντας, το τιτάνιο μπορεί να θεωρηθεί σχετικά νέο υλικό για την εφαρμοσμένη μηχανική. Ανακαλύφθηκε πολύ αργότερα από τα υπόλοιπα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα μέταλλα, ενώ η εμπορική του εφαρμογή αρχίζει προς το τέλος της δεκαετίας του 1940.

### 1.3 Χαρακτηριστικά & ιδιότητες του τιτανίου

#### 1.3.1 Φυσικά χαρακτηριστικά

Το τιτάνιο είναι ένα γυαλιστερό μέταλλο, με χρώμα άσπρο-αργυροειδές. Στον περιοδικό πίνακα συμβολίζεται με Ti και έχει ατομικό αριθμό 22 (Πίνακας 1.1). Είναι ελαφρύ και ταυτοχρόνως ισχυρό μέταλλο με χαμηλή πυκνότητα, διαθέτοντας εξαιρετική σχέση δύναμης έναντι του βάρους του. Το τιτάνιο σε καθαρή μορφή παρουσιάζει πολύ καλή ολκιμότητα.

**Πίνακας 1.1** Γενικά χαρακτηριστικά

ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
ΟΝΟΜΑ, ΣΥΜΒΟΛΟ, ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ	ΤΙΤΑΝΙΟ, Ti, 22
ΧΗΜΙΚΗ ΣΕΙΡΑ	ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΛΛΟ
ΟΜΑΔΑ, ΠΕΡΙΟΔΟΣ, ΤΜΗΜΑ	4, 4, d
ΕΜΦΑΝΙΣΗ	ΑΣΠΡΟ – ΑΡΓΥΡΟ ΧΡΩΜΑ
ΑΤΟΜΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	47,867 g mol <sup>-1</sup>
ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ	[Ar] 3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΑΝΑ ΚΥΨΕΛΙΔΑ	2, 8, 10, 2

Οι εμπορικές κατηγορίες του τιτανίου, οι οποίες έχουν καθαρότητα σε ποσοστό 99,2 %, παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή (για Grade 1-4) από 345 έως 540 MPa σε σύγκριση με την αντοχή ενός κοινού χάλυβα, η αντοχή του οποίου κυμαίνεται στα 210 MPa.

Ορισμένα κράματα τιτανίου παρουσιάζουν αντοχή που ξεπερνά 1000 MPa. Επίσης, το τιτάνιο είναι 60% βαρύτερο από το αλουμίνιο, αλλά δύο φορές πιο ισχυρό απ' το σύνηθες χρησιμοποιούμενο κράμα αλουμινίου 6061-T6. Παρόλα αυτά, το τιτάνιο χάνει την αντοχή του όταν θερμανθεί πάνω από τους 430 °C.

Τέλος, ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του τιτανίου είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα  $21.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  σε σύγκριση με την θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα που είναι περίπου  $80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Η ιδιότητα αυτή αποτελεί βασική αιτία για τη δυσκολία μηχανουργικής κατεργασίας του τιτανίου καθιστώντας το τιτάνιο ως ένα εξαιρετικά δυσκολοκατέργαστο υλικό.

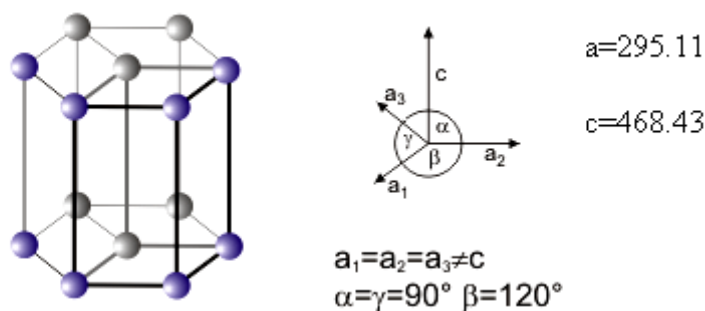
Οι κυριότερες φυσικές ιδιότητες του τιτανίου φαίνονται στον πίνακα 1.2.

**Πίνακας 1.2** Φυσικές ιδιότητες του τιτανίου

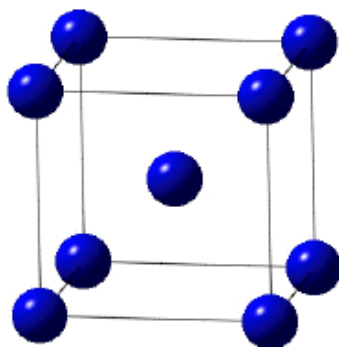
ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	
ΦΑΣΗ	ΣΤΕΡΕΟ
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	$4.506 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
ΠΙΕΣΗ ΥΓΡΟΥ ΣΕ m.p.	$4.11 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
ΣΗΜΕΙΟ ΤΗΞΗΣ	1941 K (1668° C, 3034° F)
ΣΗΜΕΙΟ ΒΡΑΣΜΟΥ	3560 K (3287° C, 5949° C)
ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΤΗΞΗΣ	$14.15 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ	$425 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ	(25° C) $25.060 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ	ΠΑΡΑΜΑΓΝΗΤΙΚΟ
ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	(20° C) $0.420 \mu\Omega \cdot \text{m}$
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	(300K) $21.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΣΤΟΛΗ	(25° C) $8,6 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΗΧΟΥ	(r.t.) $5090 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	116 GPa
ΜΕΤΡΟ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ	44 GPa
ΛΟΓΟΣ Poisson	0,32
ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ Mohs	6.0
ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ Vickers	970 MPa
ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ Brinell	716 MPa

Το τιτάνιο συναντιέται σε δύο κρυσταλλικές δομές: την εξαγωνική μέγιστης πυκνότητας (α-Ti) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και την χωροκεντρομένη κυβικού πλέγματος δομή (β-Ti), η οποία σχηματίζεται περίπου στη θερμοκρασία των 890 °C

και είναι σταθερή μέχρι και την θερμοκρασία τήξης (Σχήματα 1.2 & 1.3). Τέλος, στη φύση το τιτάνιο συναντιέται ως μίγμα πέντε σταθερών ισοτόπων του, τα οποία είναι:  $^{46}\text{Ti}$  (7,95%),  $^{47}\text{Ti}$  (7,75%),  $^{48}\text{Ti}$  (73,45%),  $^{49}\text{Ti}$  (5,51%),  $^{50}\text{Ti}$  (5,34%). Είναι επίσης γνωστός και ένας σημαντικός αριθμός τεχνητών ραδιοϊσοτόπων του.



**Σχήμα 1.2** Εξαγωνική μορφή μέγιστης πυκνότητας του τιτανίου (α - Ti)



**Σχήμα 1.3** Χωροκεντρομένη μορφή του τιτανίου (β - Ti)

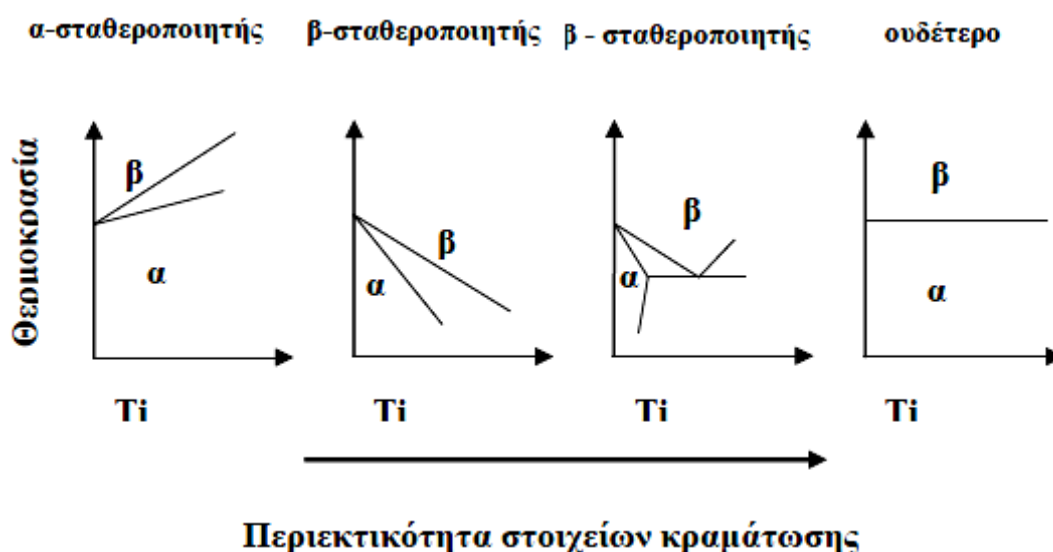
### 1.3.2 Μέταλλο τιτανίου – Τα κράματα και οι ενώσεις του

#### 1.3.2.1 Βασικές πτυχές της μεταλλουργίας του τιτανίου

Η ποικιλομορφία της μικροδομής των κραμάτων του τιτανίου είναι αποτέλεσμα του αλλοτροπικού φαινομένου. Το τιτάνιο υποβάλλεται σε έναν αλλοτροπικό μετασχηματισμό στους  $882^\circ\text{C}$ . Κάτω από αυτήν την θερμοκρασία, παρουσιάζει εξαγωνική μέγιστης πυκνότητας κρυσταλλική δομή (hcp) γνωστή ως φάση α, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες έχει κυβική χωροκεντωμένη δομή (bcc), γνωστή ως φάση β. Η τελευταία παραμένει σταθερή μέχρι και το σημείο τήξης στους  $1670^\circ\text{C}$ . Δεδομένου ότι το τιτάνιο είναι ένα μέταλλο μετάπτωσης, με μια μη συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα ηλεκτρονίων, μπορεί να σχηματίσει στερεά διαλύματα με διάφορα στοιχεία και ως εκ τούτου, η θερμοκρασία ισορροπίας των φάσεων α & β μπορεί να τροποποιηθεί.



Τα στοιχεία κραμάτωσης του τιτανίου κατηγοριοποιούνται σε τρεις κατηγορίες: Στους α-σταθεροποιητές, στους β-σταθεροποιητές και στα ουδέτερα. Ενώ στοιχεία που αναφέρονται ως α-σταθεροποιητές οδηγούν σε μια αύξηση της θερμοκρασίας αλλοτροπικού μετασχηματισμού, τα στοιχεία που κατατάσσονται στους β-σταθεροποιητές προκαλούν μείωση της θερμοκρασίας μετασχηματισμού. Όταν ένας ευτηκτικός μετασχηματισμός πραγματοποιείται, αυτός ο β-σταθεροποιητής ονομάζεται ευτηκτικός β-σταθεροποιητής, διαφορετικά, καλείται ισόμορφος β-σταθεροποιητής. Εάν δεν παρατηρηθεί καμία σημαντική αλλαγή στην θερμοκρασία αλλοτροπικού μετασχηματισμού, το στοιχείο κραμάτωσης ορίζεται ως ουδέτερο στοιχείο. Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζονται διάφορες μορφές από τα διαγράμματα φάσεων σε ισορροπία μεταξύ του τιτανίου και των στοιχείων ανάμιξής του. Κατά συνέπεια, είναι δυνατό τα κράματα του τιτανίου να έχουν μια τεράστια ποικιλομορφία στις συνθέσεις. Μεταξύ των στοιχείων α-σταθεροποιητών είναι τα μέταλλα των ομάδων IIIA & IVA (Al & Ga) και τα στοιχεία C, N και O. Αντίθετα, τα στοιχεία β-σταθεροποιητών περιλαμβάνουν τα στοιχεία μετάβασης (V, Ta, Nb, Mo, Mg, Cu, Cr και Fe) και τα ευγενή μέταλλα.

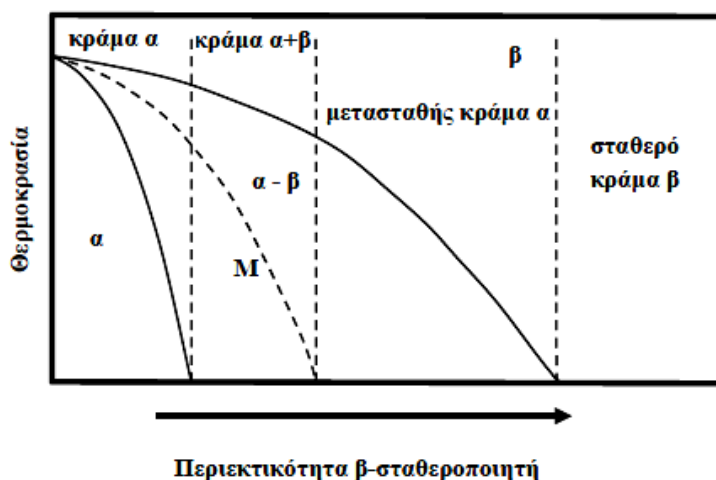


**Σχήμα 1.4** Σχηματική αναπαράσταση των τύπων διαγραμμάτων φάσης μεταξύ του τιτανίου και των στοιχείων κραμάτωσης.

Προσθήκη στοιχείων α και β-σταθεροποιητών στο τιτάνιο εμφανίζουν περιοχές στο αντίστοιχο διάγραμμα φάσεων ισορροπίας, όπου οι φάσεις α και β μπορούν να συνυπάρξουν. Τα κράματα τιτανίου παρουσιάζουν ποικίλες ιδιότητες, οι οποίες συνδέονται άμεσα με τη χημική σύνθεση και τη μεταλλουργική κατεργασία. Σύμφωνα με τη φύση της μικροδομής τους, τα κράματα του τιτανίου μπορούν να διακριθούν σε α κράματα, β κράματα και α + β κράματα.

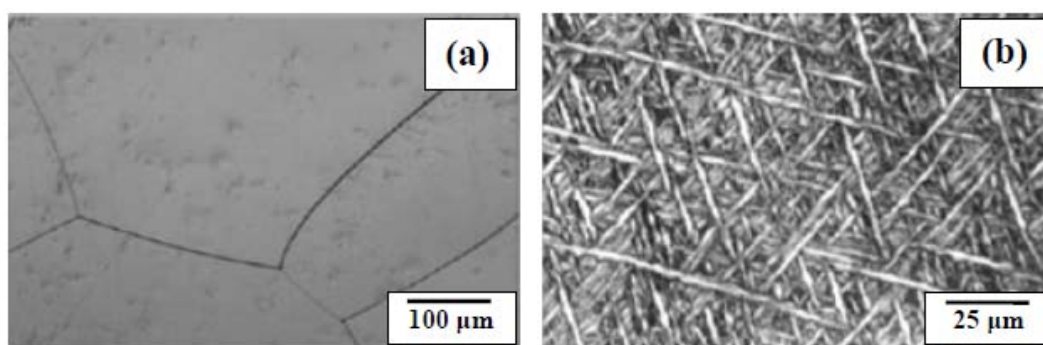
Τα άλφα κράματα ( $\alpha$ ) του τιτανίου διαμορφώνονται ειδικά από το καθαρό, εμπορικό τιτάνιο, ενώ κράματα που σχηματίζονται με στοιχεία  $\alpha$ -σταθεροποιητών και τα οποία παρουσιάζουν μόνο τη φάση  $\alpha$ , εμφανίζονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τέτοια κράματα παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση στον ερπυσμό και έτσι είναι κατάλληλα για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες. Δεδομένου ότι καμία ασταθής φάση δεν παραμένει μετά την ψύξη από υψηλή θερμοκρασία, καμία σημαντική τροποποίηση, από την άποψη της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων, δεν είναι δυνατή χρησιμοποιώντας θερμικές επεξεργασίες σε κράματα αυτού του τύπου. Όσον αφορά τις μηχανικές και μεταλλουργικές ιδιότητες, τα κράματα  $\alpha$  παρουσιάζουν ένα λογικό επίπεδο μηχανικής αντοχής, υψηλούς συντελεστές ελαστικότητας, αντοχή στη θραύση και χαμηλή ικανότητα σφυρηλάτησης, γεγονός που οφείλεται στη κρυσταλλική δομή hcp.

Τα βήτα κράματα ( $\beta$ ) του τιτανίου λαμβάνονται όταν ένα υψηλό ποσοστό στοιχείων των  $\beta$ -σταθεροποιητών προστίθενται στο τιτάνιο, τα οποία μειώνουν τη θερμοκρασία του αλλοτροπικού μετασχηματισμού του τιτανίου. Εάν το ποσοστό των  $\beta$ -σταθεροποιητών είναι αρκετά υψηλό για να μειώσει τη θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (MS), σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τη θερμοκρασία δωματίου, ο σχηματισμός πυρήνα και η αύξηση της φάσης  $\alpha$  θα είναι πολύ περιορισμένη, και ως εκ τούτου, η μετασταθής φάση  $\beta$  διατηρείται στη θερμοκρασία δωματίου με την επίδραση γρήγορης ψύξης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.5. Αυτός ο τύπος κράματος τιτανίου μπορεί να υποστεί θερμική επεξεργασία βελτιώνοντας τις μηχανικές του ιδιότητες. Σε μερικές περιπτώσεις, ανάλογα με τις παραμέτρους σύνθεσης και θερμικής επεξεργασίας, η καθίζηση της φάσης  $\omega$  είναι πιθανή. Εντούτοις, η φάση  $\omega$  μπορεί να προκαλέσει θραύση του κράματος τιτανίου και, γενικά πρέπει να αποφεύγεται.



**Σχήμα 1.5** Μερικό διάγραμμα φάσης του τιτανίου και ενός στοιχείου  $\beta$ -σταθεροποιητή

Τέλος, τα κράματα  $\alpha + \beta$  περιλαμβάνουν στοιχεία κράματωσης με αρκετούς  $\alpha$  και  $\beta$  σταθεροποιητές για να επεκτείνουν τον τομέα  $\alpha + \beta$  μέχρι τη θερμοκρασία δωματίου. Ο συνδυασμός των φάσεων  $\alpha$  και  $\beta$  επιτρέπει να ληφθεί μια βέλτιστη και ισορροπημένη κατάσταση ιδιοτήτων. Τα χαρακτηριστικά και των δύο φάσεων  $\alpha$  και  $\beta$  μπορούν να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις με την εφαρμογή των κατάλληλων θερμικών και θερμομηχανικών επεξεργασιών. Μια σημαντική ανομοιογένεια όσο αφορά τις μικροδομές μπορεί να προκύψει όταν συγκρίνονται με τα κράματα τύπου  $\alpha$ . Το κράμα Ti-6Al-4V είναι ένα κράμα τύπου  $\alpha + \beta$ . Λόγω της μεγάλης του διαθεσιμότητας, την πολύ καλή κατεργασιμότητα και άριστη μηχανική του συμπεριφορά στις χαμηλές θερμοκρασίες, είναι το πιο κοινό και διαδεδομένο κράμα τιτανίου. Το Σχήμα 1.6 παρουσιάζει τις μικροδομές των κραμάτων τιτανίου  $\beta$  και  $\alpha+\beta$ .

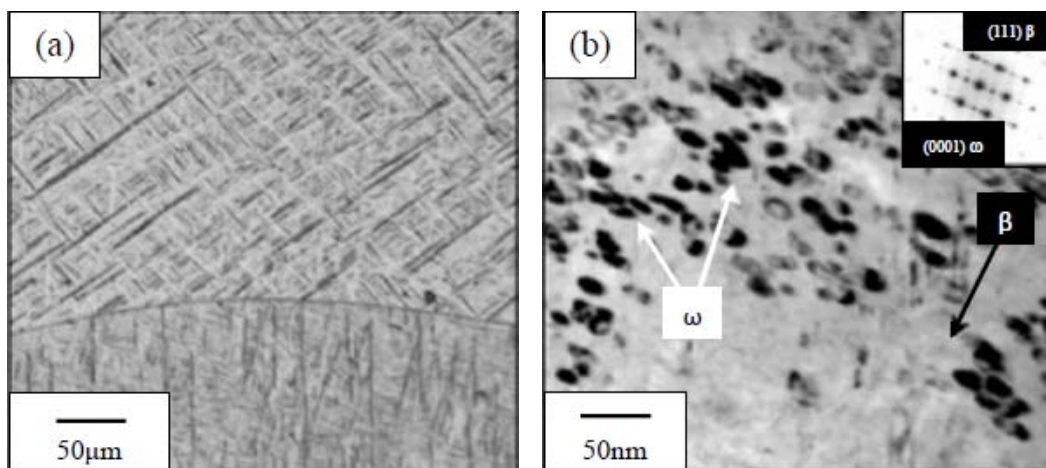


**Σχήμα 1.6** Μικροδομές των κραμάτων (a)  $\beta$  Ti-35Nb (wt.%) & (b)  $\alpha + \beta$  Ti-6Al-7Nb (wt.%) που έχουν ψυχθεί στον αέρα

Όπως και στην περίπτωση του σιδήρου (χάλυβες), ο αλλοτροπικός μετασχηματισμός είναι ο κύριος λόγος για την τεράστια ποικιλία στις μικροδομές των κραμάτων του τιτανίου. Οι μικροδομές των κραμάτων του τιτανίου χαρακτηρίζονται από σταθερές και ασταθείς φάσεις. Γενικά, για περιορισμένη περιεκτικότητα σε  $\beta$ -σταθεροποιητές και ανάλογα με τις συνθήκες ψύξης, τα κράματα του τιτανίου παρουσιάζουν μόνο τις φάσεις  $\alpha$  και  $\beta$ . Εντούτοις, εάν η θερμοδυναμική ισορροπία δεν επιτευχθεί, οι ασταθής φάσεις μπορεί να διατηρηθούν και στη θερμοκρασία δωματίου, κυρίως, μαρτενσιτικές και φάσεις τύπου  $\omega$ . Επίσης, όπως έχει αναφερθεί από διάφορους επιστήμονες, κράματα τιτανίου με στοιχεία  $\beta$ -σταθεροποιητών όπως τα Mo, Nb, Ta και V, μπορούν να διαμορφώσουν δύο τύπους μαρτενσιτικών δομών. Εάν η περιεκτικότητα σε  $\beta$ -σταθεροποιητές θεωρείται χαμηλή, η ταχεία ψύξη οδηγεί στο σχηματισμό δομής του εξαγωνικού μαρτενσίτη, που ονομάζεται  $\alpha'$ . Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν η περιεκτικότητα είναι υψηλή, ο μαρτενσίτης  $\alpha'$  υφίσταται

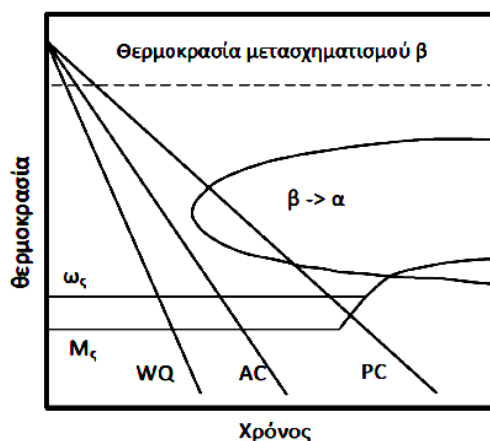
μια παραμόρφωση, χάνει τη συμμετρία του και αντικαθίσταται από τον ορθορομβικό μαρτενσίτη, που συμβολίζεται με  $\alpha''$ .

Όταν τα κράματα του τιτανίου με στοιχεία  $\beta$ -σταθεροποιητών υποβάλλονται σε ταχεία ψύξη από υψηλή θερμοκρασία, η φάση  $\beta$  μπορεί να μετασχηματιστεί είτε σε μαρτενσιτικές δομές είτε τελικά στη μεταβατική φάση  $\omega$ . Στο Σχήμα 1.7 μπορούμε να δούμε μια μικροδομή του Ti-25Nb (wt.%) μετά από ψύξη σε νερό (1.8.α) και σε αέρα (1.8.β) παρουσιάζοντας τους σχηματισμούς  $\alpha''$  και  $\omega$ .



**Σχήμα 1.8** Μικροδομή του κράματος Ti-25Nb (wt.%): (α) δείγμα που ψύχθηκε σε νερό παρουσιάζει μαρτενσιτική δομή και (β) δείγμα που ψύχθηκε σε αέρα παρουσιάζει  $\omega$  φάση που διασκορπίζεται σε βασική μάζα  $\beta$  φάσης.

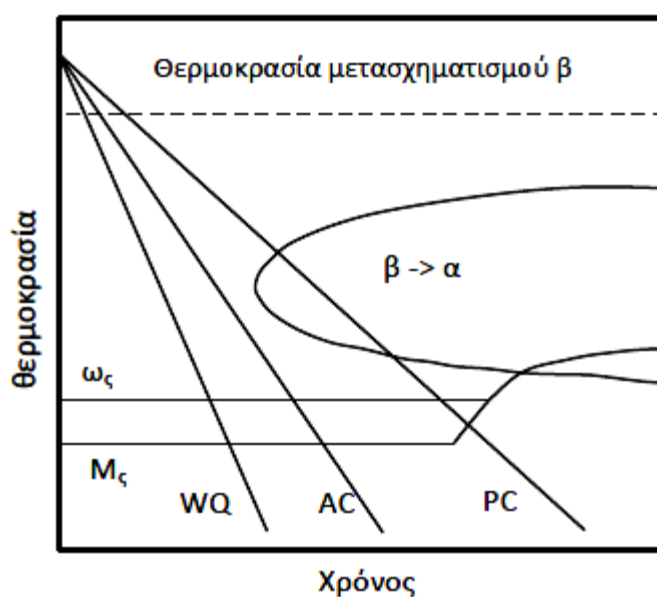
Η καθίζηση της φάσης  $\omega$  εμφανίζεται σε περιορισμένο εύρος των στοιχείων κραμάτωσης και μπορεί να προκύψει κατά τη διάρκεια της ψύξης από υψηλή θερμοκρασία ( $\beta$  φάση), θερμικά προσδιοριζόμενη έτσι φάση  $\omega$ . Εντούτοις, η φάση  $\omega$  μπορεί επίσης να διαμορφωθεί μετά από γήρανση μιας ταχείας ψύξεως δομής, σε μεσαίες θερμοκρασίες, με συνέπεια την δημιουργία ισόθερμης φάσης  $\omega$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.9.



**Σχήμα 1.9** Ένα σχηματικό διάγραμμα TTT για το μετασχηματισμό της φάσης β στα κράματα τιτανίου με στοιχεία β – σταθεροποιητών.

### 1.3.2.2 Μηχανικές ιδιότητες

Η μηχανική συμπεριφορά των κραμάτων του τιτανίου συσχετίζεται άμεσα με τη σύνθεση τους και κυρίως, με την θερμο-μηχανική επεξεργασία. Στον πίνακα 1.3 αναγράφονται τα κυριότερα κράματα τιτανίου καθώς και η χρήση αυτών και στον πίνακα 1.4 αναγράφεται η χημική σύσταση και η μηχανική αντοχή κάθε κράματος.



**Σχήμα 1. 10** Σχηματικό διάγραμμα TTT για το μετασχηματισμό της φάσης β στα κράματα τιτανίου με στοιχεία β – σταθεροποιητών

**Πίνακας 1.3** Μηχανικές ιδιότητες κραμάτων τιτανίου.

ASTM B265	
Βαθμός 1	Ανόθευτο τιτάλιο. Κύρια χρήση σε εναλλάκτες θερμότητας, αεροσκάφη, σε συστήματα αφαλάτωσης και θαλάσσια τμήματα, ανόδους λευκόχρυσου. Παρουσιάζει υψηλή σχηματιστικότητα.
Βαθμός 2	Ανόθευτο τιτάλιο. Χρήση σε τμήματα αεροσκαφών, μηχανές αεροσκαφών, θαλάσσια εξαρτήματα, σε χημικές βιομηχανίες, σε εναλλάκτες θερμότητας, σε συμπυκνωτές. Καλός συνδυασμός της δύναμης, της σχηματιστικότητας, ολκιμότητας και συγκολλησιμότητας.
Βαθμός 3	Ανόθευτο τιτάλιο. Χρήση στη χημική βιομηχανία, σε εξαρτήματα για θαλάσσιες κατασκευές, σε σκελετούς και εξαρτήματα κινητήρων αεροσκαφών που απαιτούν αντοχή, έχουν καλή συγκολλησιμότητα και αντοχή στη διάβρωση.
Βαθμός 4	Η υψηλότερη αντοχή καθαρού τιτανίου: Χρήση στη χημική βιομηχανία, σε εξαρτήματα για θαλάσσιες κατασκευές, σε σκελετούς και εξαρτήματα κινητήρων αεροσκαφών, σε χειρουργικά εμφυτεύματα, σε υψηλής ταχύτητας ανεμιστήρες, αεροσυμπιεστές. Χρησιμοποιείται σε υδραυλικές σωληνώσεις. Παρουσιάζει καλή ελατότητα και αντοχή στη διάβρωση σε συνδυασμό με υψηλή αντοχή.
Βαθμός 5	Κράμα τιτανίου με 6% αλουμίνιο, 4% βανάδιο. Δημοφιλής άλφα-βήτα, μέσης αντοχής. Κύριες χρήσεις σε σκελετούς και των εξαρτήματα κινητήρων αεροστροβίλων, σε εξοπλισμό πυρίμαχων και δοχεία πίεσης όπως περιβλήματα πυραυλοκινητήρων. Χρησιμοποιείται επίσης για χειρουργικές συσκευές και εμφυτεύματα.
Βαθμός 6	-
Βαθμός 7	Κράμα τιτανίου με περιεκτικότητα σε παλλάδιο από 0,12% έως 0,25%. Παρουσιάζει μεσαία αντοχή και ανώτερη αντίσταση στη διάβρωση.

Βαθμός 9	Άλφα-Βήτα κράμα τιτανίου που περιέχει βανάδιο σε ποσοστό 3% έως και 2,5%. Υψηλή αντοχή και αντίσταση στη διάβρωση. Χρήση στην αεροδιαστημική, σε εφαρμογές πετροχημικών, υδραυλικές σωληνώσεις και όργανα μέτρησης, τον αθλητισμό, σε υποθαλάσσιες εφαρμογές, και δοχεία πίεσης. Συνήθως χρησιμοποιείται σε ψυχρή κατεργασία με ανόπτηση και επαναφορά.
Βαθμός 11	Κράμα τιτανίου με παλλάδιο σε περιεκτικότητα από 0,12% έως και 0,25%. Χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο. Χαμηλή αντοχή. Επιτρεπόμενη περιεκτικότητα του υδρογόνου εξαρτάται από την μορφή. Προσθήκη Pd αυξάνει την αντίσταση στη διάβρωση. Παρουσιάζει πολύ καλή συγκολλησιμότητα.
Βαθμός 12	Κράμα τιτανίου που περιέχει μολυβδαίνιο 0,3% και 0,8% νικέλιο. Υψηλής αντοχής, καλός μονωτής και καλή αντίσταση στη φθορά. Χρησιμοποιείται σε κελύφη και εναλλάκτες θερμότητας και σε υδρομεταλλουργικές εφαρμογές. Πολύ καλή συγκολλησιμότητα.
Βαθμός 13	Κράμα τιτανίου που περιέχει 0,5% νικέλιο και 0,05% ρουθίνιο. Χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο.
Βαθμός 14	Κράμα τιτανίου με 0,5% νικέλιο και 0,05% ρουθίνιο. Standard οξυγόνο.
Βαθμός 15	Κράμα τιτανίου με 0,5% νικέλιο και 0,05% ρουθίνιο. Μεσαία περιεκτικότητα σε οξυγόνο.
Βαθμός 16	Κράμα τιτανίου με περιεκτικότητα σε παλλάδιο από 0,04% έως 0,08%. Standard οξυγόνο και μέση αντοχή. Χρησιμοποιείται στη χημική βιομηχανία λόγω της βελτιωμένης αντοχής στη διάβρωση.

Βαθμός 17	Καθαρό τιτάνιο με παλλάδιο από 0,04% έως 0,08%. Χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο και χαμηλή αντοχή.
Βαθμός 18	Κράμα τιτανίου με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο 3%, 2,5% βανάδιο και παλλάδιο από 0,04% έως 0,8%
Βαθμός 19	Κράμα τιτανίου με περιεκτικότητα 3% σε αλουμίνιο, 8% βανάδιο, 6% χρώμιο, 4% ζιρκόνιο και 4% μολυβδαίνιο.
Βαθμός 20	Κράμα τιτανίου με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο 3%, 8% βανάδιο, 6 χρώμιο%, 4%, ζιρκόνιο, 4%μολυβδαίνιο και παλλάδιο από 0,04% έως 0,08%.
Βαθμός 21	Κράμα τιτανίου με περιεκτικότητα σε μολυβδαίνιο 15%, 3% αλουμίνιο, 2,7% νιόβιο, 0,25% πυρίτιο.
Βαθμός 23	Κράμα τιτανίου με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο 6%, 4% βανάδιο, ELI
Βαθμός 24	Κράμα τιτανίου με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο 6%, 4% βανάδιο και παλλάδιο από 0,04% έως 0,08%.
Βαθμός 25	Κράμα τιτανίου με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο 6%, 4% βανάδιο, νικέλιο από 0,3% έως 0,6% και παλλάδιο από 0,04% έως 0,08%.
Βαθμός 26	Καθαρό τιτάνιο με ρουθίνιο από 0,08% έως 0,14% standard οξυγόνο και μέση αντοχή. Ανταγωνιστική εναλλακτική λύση στον βαθμό 7.



Βαθμός 27	Καθαρό τιτάνιο με ρουθίνιο από 0,08% έως 0,14%. Χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο και χαμηλή αντοχή.
Βαθμός 28	Κράμα τιτανίου με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο 3%, 2,5% βανάδιο και ρουθίνιο από 0,08% έως 0,14%. Υψηλής αντοχής με ενισχυμένη αντίσταση στη διάβρωση με εναλλακτική λύση στον βαθμό 9.

**Πίνακας 1.4** Χημική σύσταση κραμάτων τιτανίου.

ASTM B265	Fe max	O max	N max	C max	H max	Pd	Al	V	Mo	Ni	Elong'n %	Rp 0.2 MPa	Rm MPa
No	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	%	MPa	MPa
Βαθμός 1	0.2	0.18	0.03	0.1	0.015						24	170-310	240
Βαθμός 2	0.3	0.25	0.03	0.1	0.015						20	275-450	345- 480
Βαθμός 3	0.25	0.3	0.05	0.1	0.015						18	360-480	480- 700
Βαθμός 4	0.5	0.4	0.05	0.1	0.015						15	500-530	600- 680
Βαθμός 5	0.4	0.2	0.05	0.1	0.015		5.5- 6.7				10	800-1100	890- 1400
Βαθμός 6											16	780-820	820- 860
Βαθμός 7	0.3	0.25	0.03	0.1	0.015	0.12 - 0.25					20	275-450**	345
Βαθμός 9	0.25	0.15	0.02	0.05	0.015		2.5- 3.05				15	550	650
Βαθμός 11	0.2	0.18	0.03	0.1	0.015	0.12 - 0.25					24	170-310**	240
Βαθμός 12	0.3	0.25	0.03	0.1	0.015				0.3	0.8	25	414-460	499- 600
Βαθμός										0.5			

13													
Βαθμός										0.5			
14													
Βαθμός										0.5			
15													
Βαθμός						0.04							
16						-					27	345	485
						0.08							
Βαθμός						0.04							
17		0.18				-					35	206	345
						0.08							
Βαθμός						0.04							
18						-	3	2.5	4				
						0.08							
Βαθμός							3	8	4				
19													
Βαθμός						0.04							
20						-	3	8	4				
						0.08							
Βαθμός							3		15		15-8	880-1250	915-
21													1350

Η μηχανική αντοχή των κραμάτων του τιτανίου μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη στοιχείων κραμάτωσης, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία μιας σταθερής στερεής δομής, ή ακόμη και στην καθίζηση άλλων δευτερέων φάσεων. Επίσης, με τη χρησιμοποίηση των διαδικασιών γήρανσης του υλικού, ασταθείς δομές που προέκυψαν από την γρήγορη ψύξη στην περιοχή β μπορεί να προκαλέσουν ιζήματα, τα οποία αυξάνουν αρκετά τη μηχανική αντοχή.

Τα κράματα του τιτανίου παρουσιάζουν πολύ καλή αναλογία αντοχής προς βάρος. Η αναλογία αυτή είναι υψηλότερη απ' ό,τι στους περισσότερους χάλυβες. Ενώ το καθαρό τιτάνιο έχει αντοχή μεταξύ 170 (βαθμίδα 1) και 530 MPa (βαθμίδα 4), τα κράματα του τιτανίου μπορούν να παρουσιάσουν τιμές υψηλότερες από 1500 MPa.

Ο συντελεστής ελαστικότητας αντιστοιχεί στην ακαμψία ενός υλικού και συνδέεται με τον τρόπο που αναπτύσσονται οι δυνάμεις μεταξύ των ατόμων και οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με τις αποστάσεις μεταξύ των ατόμων των στοιχείων στη κρυσταλλική δομή. Μια σύγκριση μεταξύ των δύο κρυσταλλικών δομών του τιτανίου έχει οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η εξαγωνική δομή μέγιστης πυκνότητας (hcp)

παρουσιάζει υψηλότερες τιμές συντελεστή ελαστικότητας από την χωροκεντρομένη κυβικού πλέγματος δομή (bcc). Συνεπώς, η προσθήκη στοιχείων σταθεροποιητών τύπου β επιτρέπουν την σταθεροποίηση τη φάσης β και έτσι την επίτευξη χαμηλού συντελεστή ελαστικότητας στα κράματα. Έτσι, ενώ το καθαρό τιτάνιο παρουσιάζει συντελεστές ελαστικότητας με τιμές κοντά στα 105 GPa, το κράμα του Ti-6Al-4V τύπου α + β παρουσιάζει τιμές μεταξύ 101 και 110 GPa, κράματα τιτανίου τύπου β μπορεί να παρουσιάσουν πολύ χαμηλές τιμές, γύρω στα 55 GPa.

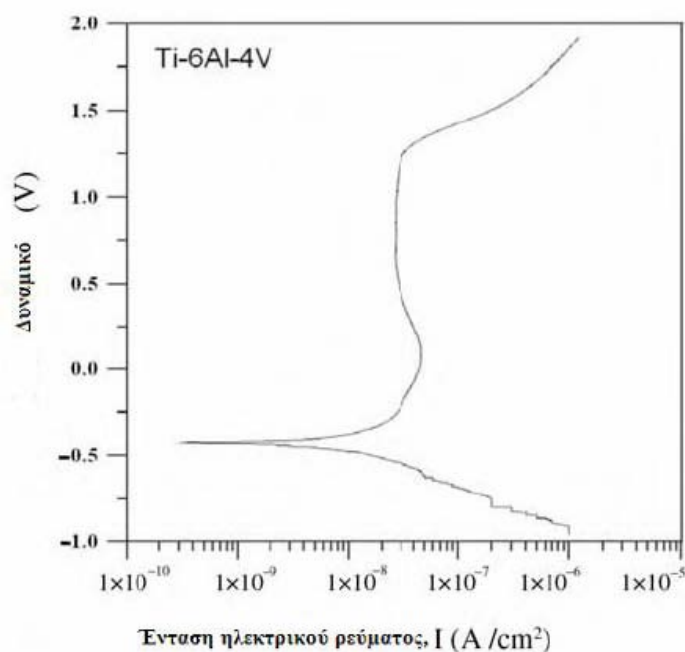
Η ανάλυση των συστημάτων ολίσθησης σε διάφορες κρυσταλλικές δομές αποκαλύπτουν ότι η πλαστική παραμόρφωση επιτυγχάνεται ευκολότερα στη κρυσταλλική δομή χωροκεντρομένου κυβικού πλέγματος (bcc) παρά στην εξαγωνική δομή μέγιστης πυκνότητας (hcp). Αυτό μπορεί να εξηγήσει την ενισχυμένη ολκιμότητα της φάσης β σε σύγκριση με τη φάση α. Επιπλέον, η ευκολία της πλαστικής παραμόρφωσης συνδέεται άμεσα με την ελάχιστη απόσταση ολίσθησης, ( $b_{min}$ ), η οποία δίνεται από τη διατομική απόσταση διαιρεμένη από την αντίστοιχη παράμετρο πλέγματος. Εφόσον, η εξαγωνική δομή μέγιστης πυκνότητας (hcp) παρουσιάζει μεγαλύτερη απόσταση ολίσθησης από την δομή χωροκεντρομένου κυβικού πλέγματος (bcc), είναι δυνατό να βγει το συμπέρασμα ότι η ολίσθηση των ατομικών επιπέδων ή η πλαστική παραμόρφωση είναι ευκολότερη στην χωροκεντρομένη κρυσταλλική δομή. Ως εκ τούτου, τα κράματα τύπου β παρουσιάζουν την καλύτερη ικανότητα διαμόρφωσης δομής μεταξύ των κραμάτων του τιτανίου.

### **1.3.2.3 Συμπεριφορά στη διάβρωση**

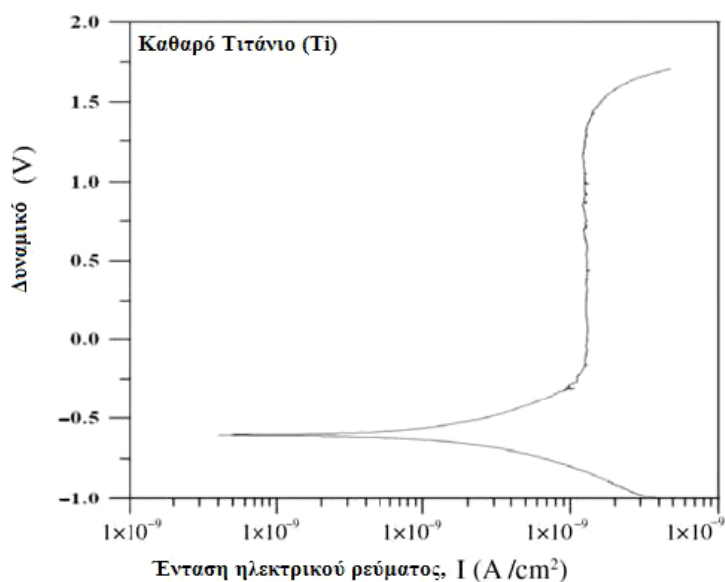
Το τιτάνιο παρουσιάζει άριστη αντίσταση στη διάβρωση, που σχετίζεται άμεσα με το σχηματισμό ενός σταθερού προστατευτικού στρώματος οξειδίων, και συγκεκριμένα το σχηματισμό του  $TiO_2$ . Η ικανότητα αντίδρασης του τιτανίου μπορεί να μετρηθεί από το ηλεκτρικό δυναμικό του που είναι 1.63 V. Μια τέτοια τιμή δείχνει ότι το τιτάνιο έχει μια υψηλή χημική ικανότητα αντίδρασης και έτσι οξειδώνεται, αναδεικνύοντας το προστατευτικό και λεπτό στρώμα οξειδίων στην επιφάνειά του. Αυτό το στρώμα οξειδίων αδρανοποιεί το τιτάνιο, πράγμα το οποίο οδηγεί σε μια προστασία ενάντια στην περαιτέρω διαδικασία διάβρωσης εφόσον διατηρείται αυτό το στρώμα. Βασικά, ο σχηματισμός λεπτών στρωμάτων αδρανοποίησης στο τιτάνιο δεν σημαίνει τη διακοπή των διαδικασιών διάβρωσης. Σημαίνει ότι το ποσοστό διάβρωσης θα μειωθεί σημαντικά. Επομένως, το τιτάνιο είναι ανθεκτικό στη διάβρωση σε όξινο περιβάλλον αλλά παρουσιάζει μικρή όμως αντίσταση σε αναγωγικά ήπια αντιδραστήρια (Lütjering and Williamw, 2003).

Γενικά, η δοκιμή ανοδικής πόλωσης είναι μια αποδοτική μέθοδος για να διαπιστωθεί η συμπεριφορά διάβρωσης ενός μεταλλικού υλικού σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον.

Τα Σχήματα 1.10 & 1.11 απεικονίζουν την καμπύλη ανοδικής πόλωσης για το καθαρό τιτάνιο και για τα κράματα Ti-6Al-4V αντίστοιχα, παρουσιάζοντας την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος ενάντια στο δυναμικό, λαμβάνοντας σαν ηλεκτρολυτικό διάλυμα 5 g/l NaCl, με pH 4 στους 310 K. Το δυναμικό ανιχνεύθηκε στα 0.1 mV s<sup>-1</sup>.



**Σχήμα 1.10** Καμπύλες πόλωσης για το κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V



**Σχήμα 1.11** Καμπύλες πόλωσης για το καθαρό εμπορικό τιτάνιο

Το ανοδικό τμήμα της καμπύλης πόλωσης επιτρέπει την αξιολόγηση της συμπεριφοράς διάβρωσης ενός μεταλλικού υλικού σε ένα ηλεκτρολυτικό μέσο. Η

αξιολόγηση λαμβάνεται με τον καθορισμό του εύρους των δυναμικών, στο οποίο οι επιστρώσεις αδρανοποίησης είναι σταθερές, και επίσης βρίσκοντας την ένταση του ρεύματος κατά την αδρανοποίηση. Δοκιμές κατά τις οποίες μελετήθηκε κατά πόσο ο σχηματισμός μιας επιφάνειας οξειδίων αδρανοποίησης, με την σταθεροποίηση του ηλεκτρικού ρεύματος, έδειξαν ότι το δυναμικό αυξάνει, η ένταση του ρεύματος αυξάνει επίσης, με αποτέλεσμα τη ρήξη του στρώματος αδρανοποίησης. Σε αυτό το σημείο, το προστατευτικό στρώμα χάνει την αποδοτικότητά του προκαλώντας διάβρωση με ρωγμές. Εντούτοις, αυτή η υπόθεση δεν επιβεβαιώνεται κατά τη διάρκεια της αντίστροφης ανίχνευσης του δυναμικού. Οι καμπύλες πόλωσης λήφθηκαν κατά τη διάρκεια των εμπρόσθιων και αντίστροφων ανιχνεύσεων του δυναμικού και δεν εμφανίστηκε καμία υποψία διάβρωσης.

#### **1.4 Πηγές και κοιτάσματα εξόρυξης τιτανίου**

Το τιτάνιο είναι το ένατο, κατά σειρά, πιο άφθονο στοιχείο στη γήινη επιφάνεια (0,63% κατά μάζα) και το έβδομο πιο άφθονο μέταλλο. Παρουσιάζεται περισσότερο στους πυριγενείς βράχους και στα ιζήματα που προέρχονται από αυτούς, καθώς επίσης και στους οργανισμούς διαβίωσης και στους φυσικούς οργανισμούς του ύδατος. Στην πραγματικότητα, από τους 801 τύπους πύρινων βράχων που αναλύθηκαν από την γεωλογική έρευνα των Η.Π.Α., οι 784 περιείχαν τιτάνιο.

Διανέμεται ευρέως και εμφανίζεται πρώτιστα στα μεταλλεύματα όπως: ανατάσης, μπρουκίτης, ιλμενίτης, περοβισκίτης, ορυκτό διοξείδιο του τιτανίου, τιτανίτης, ορυκτό τιτανίου του ασβεστίου και σε πολλά επίσης μεταλλεύματα σιδήρου.

Από αυτά τα μεταλλεύματα, μόνο το ορυκτό διοξείδιο του τιτανίου ( $TiO_2$ ) και ο ιλμενίτης, έχουν οικονομική σημασία, όμως είναι δύσκολο να βρεθούν σε υψηλή συγκέντρωση. Περισσότερο από το 90% των μεταλλευμάτων τιτανίου που παράγονται προέρχονται από τα αποθέματα μαγματικού και από «νεαρά» εκμεταλλεύσιμα επιφανειακά κοιτάσματα - που βρίσκονται στη γραμμή των ακτών - ιλμενίτη.

Σημαντικές ποσότητες τιτανίου σε ιλμενίτη υπάρχουν στη δυτική Αυστραλία, στον Καναδά, στη Νέα Ζηλανδία, στη Νορβηγία και στην Ουκρανία. Ακόμα, μεγάλες ποσότητες ορυκτού διοξείδιο του τιτανίου εξάγονται από τη Βόρεια Αμερική και τη Νότια Αφρική και συμβάλλουν στην ετήσια παραγωγή, 90.000 τόνων του ορυκτού τιτανίου και των 4,3 εκατομμυρίων τόνων του διοξειδίου του τιτανίου.

Τα συνολικά αποθέματα του τιτανίου υπολογίζονται ότι υπερβαίνουν τα 600 εκατομμύρια τόνους. Τιτάνιο περιέχεται επίσης στους μετεωρίτες και έχει ανιχνευθεί στον ήλιο και στα αστέρια. Σεληνιακοί βράχοι που εξετάστηκαν κατά τη διάρκεια της αποστολής του Απόλλο-17, έδωσαν στοιχεία ότι η σελήνη αποτελείται από 12,1%

TiO<sub>2</sub>. Τέλος, το τιτάνιο μπορεί να βρεθεί στην ανθρακική τέφρα, στα φυτά, ακόμα και στο ανθρώπινο σώμα.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.5** Ποσότητες ορυκτών που περιέχουν τιτάνιο ανά χώρα

ΤΙΤΑΝΙΟ: ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΕΩΝ, ΑΝΑ ΧΩΡΑ					
ΜΕΤΡΙΚΟΙ ΤΟΝΟΙ					
ΤΥΠΟΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΧΩΡΑ	1999	2000	2001	2002	2003
ΙΛΜΕΝΙΤΗΣ					
ΑΥΣΤΡΑΛΙΑ	1.976.000	2.146.000	2.017.000	1.917.000	2.010.000
ΒΡΑΖΙΛΙΑ	96	123	111.113	174.382	180
ΚΙΝΑ	180	250	300	750	800
ΑΙΓΥΠΤΟΣ	130	125	125	125	125
ΙΝΔΙΑ	378	380	430	460	500
ΜΑΛΑΙΣΙΑ	127.695	124.801	129,75	106.046	95.148
ΝΟΡΒΗΓΙΑ	600	750	750	750	800
ΟΥΚΡΑΝΙΑ	536.542	576.749	650	670	670
ΗΝΩΜΕΝΕΣ ΠΟΛΙΤΕΙΕΣ	W	400	500	400	500
ΒΙΕΤΝΑΜ	91	174	180	180	180
ΣΥΝΟΛΟ	4150000	5.080.000	5.220.000	5.570.000	5.910.000
ΡΟΥΤΙΛΙΟ:					
ΑΥΣΤΡΑΛΙΑ	179	208	206	218	173
ΒΡΑΖΙΛΙΑ	4,3	3.162	1.791	2.645	2,65
ΙΝΔΙΑ	16	17	19	18	18
ΝΟΤΙΟΣ ΑΦΡΙΚΗ	100	100	90	100	120
ΟΥΚΡΑΝΙΑ	49	58,6	60	70	60
ΗΝΩΜΕΝΕΣ ΠΟΛΙΤΕΙΕΣ	W	-9	-9	-9	-9
ΣΥΝΟΛΟ	348	387	377	409	374
ΤΙΤΑΝΙΚΑ ΕΛΚΥΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΛΛΩΝ:					
ΚΑΝΑΔΑΣ	950	950	950	900	875
ΝΟΤΙΟΣ ΑΦΡΙΚΗ	1.168.000	1.057.000	1.090.000	1.150.000	1.100.000
ΣΥΝΟΛΟ	2.120.000	2.010.000	2.040.000	2.050.000	1.980.000

## 1.5 Χρήση

- **Ιατρική:** Στην ορθοπεδική κατασκευή εξαρτημάτων όπως χειρουργικά σύρματα, κοχλίες και περικόχλια, πλάκες και ενδομυελικές ράβδους για την αποκατάσταση σπασμένων οστών, στην βιοϊατρική για τη κατασκευή τμημάτων, τα οποία αντικαθιστούν προβληματικές αρθρώσεις π.χ. άρθρωση γονάτου ή γοφού.



Σχήμα 1.12



Σχήμα 1.13

- **Αυτοκινητοβιομηχανία:** Κατασκευάζονται ελατήρια βαλβίδων, βαλβίδες κινητήρων, διωστήρες, έμβολα, στροβιλοσυμπιεστές, τμήματα σε εξατμίσεις κ.λπ.



Σχήμα 1.14



Σχήμα 1.15

- **Αεροναυπηγική:** Η αεροδιαστημική βιομηχανία είναι η μεγαλύτερη ενιαία αγορά για τα προϊόντα τιτανίου και αυτό οφείλεται κυρίως στην εξαιρετική αναλογία δύναμη προς βάρος, στην αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία και στην αντοχή στη διάβρωση. Η πιο σημαντική εφαρμογή του τιτανίου είναι σε κινητήρες τζετ, με εκτεταμένη χρήση στο τμήμα του συμπιεστή για την κατασκευή πτερυγίων, κατευθυντήριων πτερυγίων, πλακών κ.λπ.

Επίσης, χρησιμοποιείται και σε τμήματα των αεροσκαφών που υπόκεινται σε θερμοκρασίες μέχρι 1100° F. Το τιτάνιο μπορεί να αποτελέσει το 20% - 30% του συνολικού βάρους σε ένα αεροπορικό κινητήρα. Τέλος, το τιτάνιο χρησιμοποιείται και σε κρίσιμα δομικά στοιχεία των αεροσκαφών όπως σκελετούς αεροσκαφών, στο σύστημα προσγείωσης, σε σωληνώσεις, κ.α. Η χρήση του είναι ευρέως διαδεδομένη στα περισσότερα εμπορικά και στρατιωτικά αεροσκάφη. Το τιτάνιο χρησιμοποιείται επίσης σε διαστημικά σκάφη.



Σχήμα 1.16



Σχήμα 1.17

- **Ναυπηγική:** Λόγω της μεγάλης αντοχής του στη διάβρωση που προκαλεί το θαλασσινό νερό, το τιτάνιο χρησιμοποιείται για την κατασκευή ατράκτων για την κίνηση της προπέλας, εναλλακτών θερμότητας, μονάδων αφαλάτωσης, για την παρασκευή περιβλημάτων σε διάφορες κατασκευές που βρίσκονται μέσα σε ωκεανούς κ.α. Η πρώην Σοβιετική Ένωση είχε αναπτύξει τεχνικές για την κατασκευή υποβρυχίων σε μεγάλο βαθμό από τιτάνιο.



Σχήμα 1.18



Σχήμα 1.19

- **Χημική βιομηχανία:** Το τιτάνιο χρησιμοποιείται στην χημική βιομηχανία σε μορφή διοξειδίου (TiO<sub>2</sub>) του τιτανίου για την παρασκευή πολλών προϊόντων ευρείας



χρήσης όπως χρώματα, χαρτί, πλαστικά, τσιμέντο για έντονη λευκότητα , οδοντόκρεμες και πολλά άλλα.

- **Καθημερινότητα:** Χρησιμοποιείται για την κατασκευή κάθε λογής αντικειμένων, όπως λ.χ. κοσμήματα, σκεύη μαγειρικής, ρολόγια και πολλά άλλα.



Σχήμα 1.20



Σχήμα 1.21

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΘΕΩΡΙΑ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

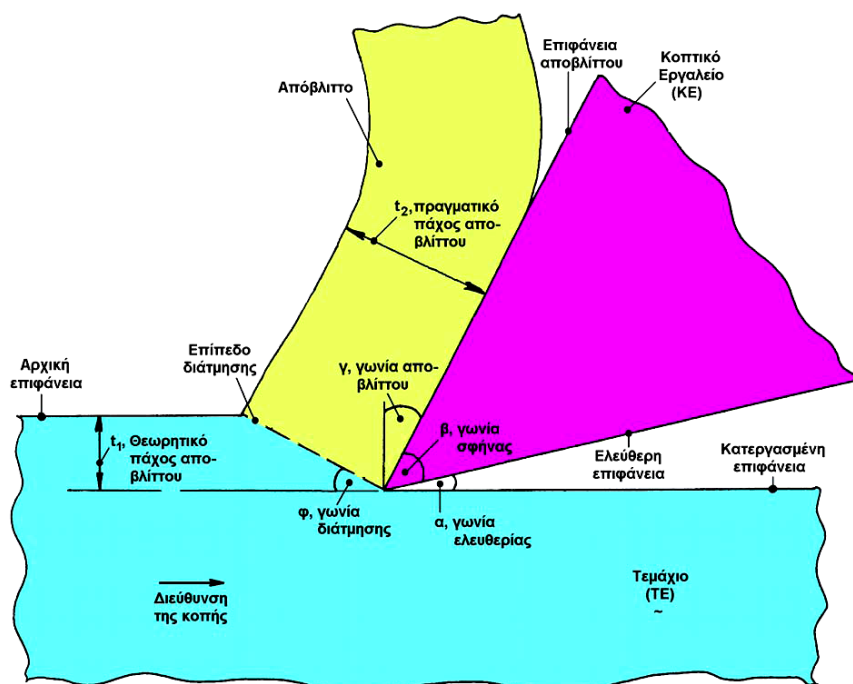
### 2.1 Εισαγωγικές έννοιες

#### 2.1.1 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 βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, (Σχήμα 2.1):

- **Επιφάνεια αποβλίττου:** Είναι η επιφάνεια της σφήνας, πάνω στην οποία ολισθαίνει το απόβλιττο 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 αποβλίττου,  $\gamma$ :** Σχηματίζεται από την επιφάνεια αποβλίττου και το κάθετο επίπεδο στην κατεργασμένη επιφάνεια που διέρχεται από την κόψη του κοπτικού εργαλείου.
- **Γωνία ελευθερίας,  $\alpha$ :** Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και την κατεργασμένη επιφάνεια.
- **Γωνία σφήνας,  $\beta$ :** Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια και από την επιφάνεια αποβλίττου.

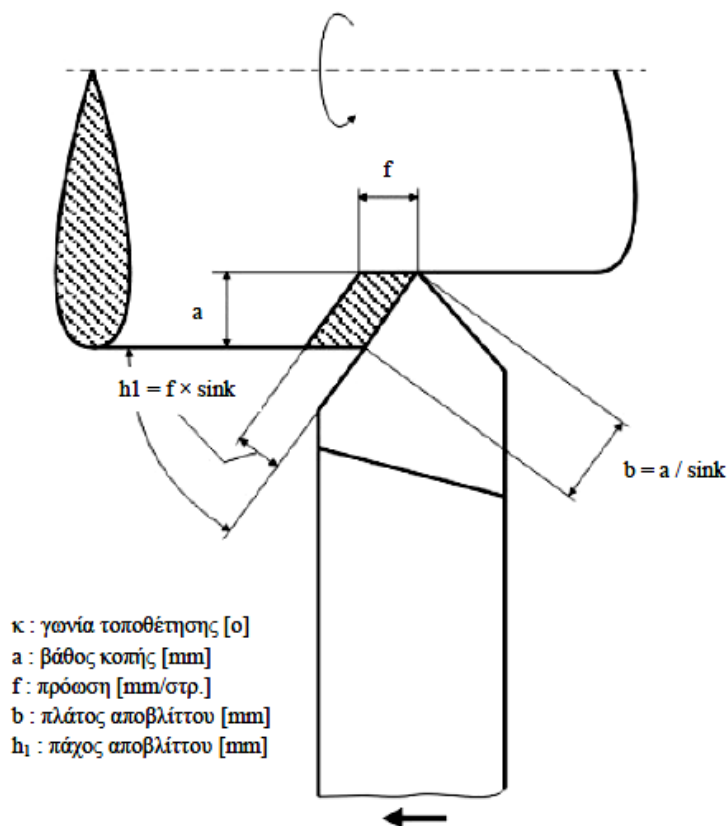
$$\text{Ισχύει : } \alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$



Σχήμα 2.1 Βασικές έννοιες της κοπής

### 2.1.2 Χαρακτηριστικά του αποβλίττου

- Θεωρητικό πάχος αποβλίττου,  $t_1$ : Είναι το αφαιρούμενο πάχος υλικού.
- Πραγματικό πάχος αποβλίττου,  $t_2$ : Είναι η μέση τιμή του πάχους που έχει το απόβλιττο μετά την κοπή.
- Πλάτος αποβλίττου,  $b$ .
- Θεωρητική διατομή αποβλίττου,  $A_1 = b \times t_1$
- Πραγματική διατομή αποβλίττου,  $A_2 = b \times t_2$



Σχήμα 2.2 Γεωμετρικά μεγέθη για τον υπολογισμό της διατομής του αποβλίττου

### 2.1.3 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/rev ή mm/ενεργό διαδρομή και κατά τη κατεύθυνση της κίνησης πρόωσης.

- Ταχύτητα πρόωσης,  $v_n$ : Είναι η στιγμιαία (σχετική) ταχύτητα της ακής του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο κατά τη συνεχή κίνηση πρόωσης. Μετράται σε m/min και χρησιμοποιείται εναλλακτικά αντί της πρόωσης.
- Ρυθμός αποβολής υλικού,  $\Theta$ : Είναι ο όγκος του υλικού που αφαιρείται στη μονάδα του χρόνου. Μετράται σε cm<sup>3</sup>/min και ισχύει:  $\Theta = A_1 \times v$ .

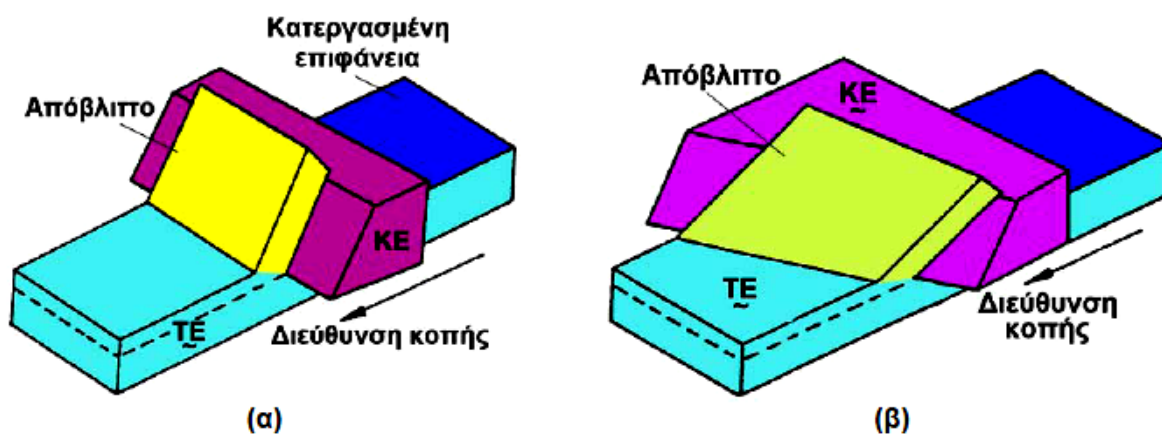
Μεταξύ των μεγεθών  $s$  και  $v_n$  ισχύει η σχέση  $v_n = s \times n$  όπου  $n$  είναι η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου ή ο αριθμός ενεργών διαδρομών στη μονάδα χρόνου.

Από το συνδυασμό των  $v$ ,  $s$  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.

#### 2.1.4 Είδη κοπής

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



Σχήμα 2.3 (α) Ορθογωνική κοπή, (β) Λοξή κοπή

## 2.2 Μηχανική της κοπής των μετάλλων

### 2.2.1 Μορφολογία και σχηματισμός του αποβλίττου

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

αποβλίττων. Το απόβλιττο είναι το προϊόν της κοπής των μετάλλων και η μελέτη του μπορεί να δώσει ενδιαφέροντα συμπεράσματα για την διαδικασία της κοπής.

Από τον μηχανισμό σχηματισμού αποβλίττου εξαρτώνται βασικά μεγέθη της κοπής, όπως:

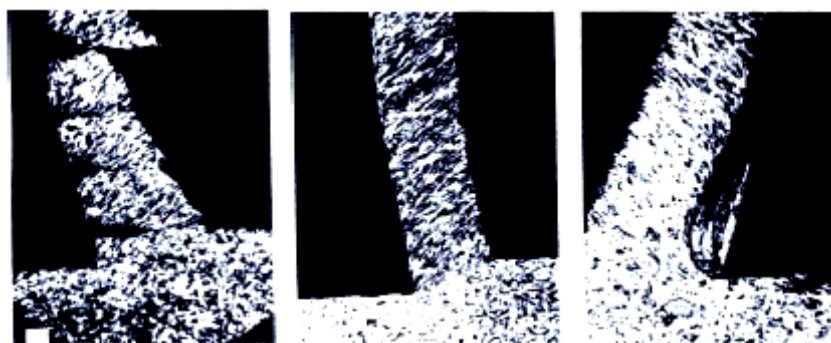
- Οι δυνάμεις κοπής,
- Η ισχύς κοπής,
- Η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας,
- Η φθορά και η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου,
- Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος εργαλειομηχανή - κοπτικό εργαλείο - τεμάχιο.

Αντίστροφα, ο μηχανισμός σχηματισμού αποβλίττου επηρεάζεται από:

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

Το απόβλιττο, 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 αποβλίττου: Το ασυνεχές απόβλιττο, Σχήμα 2.4.α, το συνεχές απόβλιττο, Σχήμα 2.4.β και το συνεχές απόβλιττο με ψευδοακμή, Σχήμα 2.4.γ.



**Σχήμα 2.4** Τα τρία είδη αποβλίττου: α) Το ασυνεχές απόβλιττο β) Το συνεχές απόβλιττο γ) Συνεχές απόβλιττο με ψευδοακμή.

#### **2.2.1.1 Το ασυνεχές απόβλιττο**

Κατά το σχηματισμό του ασυνεχούς αποβλίττου, 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 κατεργαζόμενου μετάλλου. Η θραύση και ο τεμαχισμός του αποβλίττου πραγματοποιείται συνήθως περιοδικά. Τέτοιο απόβλιττο συναντούμε στην κοπή ψαθυρών μετάλλων, όπως είναι ο χυτοσίδηρος ή ο χυτευτικός ορείχαλκος κ.α. Είναι δυνατός όμως ο σχηματισμός ασυνεχούς αποβλίττου και κατά την κοπή όλκιμων μετάλλων ή κραμάτων (μαλακός χάλυβας, αργίλιο, χαλκός, μόλυβδος κ.λπ.) γενικά σε χαμηλές ταχύτητες κοπής, σε μεγάλες προώσεις και με εργαλεία με μικρές τιμές γωνίας αποβλίττου.

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

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

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

**β)** Κατά το σχηματισμό ασυνεχούς αποβλίττου, 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 απόβλιττο, αποτελεί μια πηγή εξαναγκασμένων ταλαντώσεων στο σύστημα κοπτικό εργαλείο-εργαλειομηχανή-τεμάχιο.

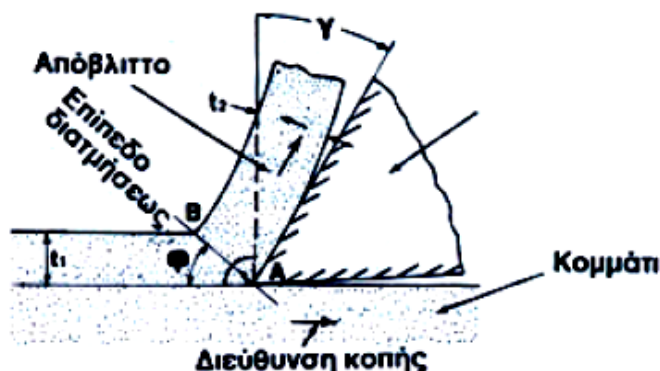
**δ)** Τέλος, εξαιτίας του τύπου του αποβλίττου, το μήκος της επιφάνειας επαφής αποβλίττου - εργαλείου εμφανίζεται σχετικά μικρό. Αυτό, πέρα από την ευνοϊκή επιρροή που ασκεί στη δύναμη κοπής λόγω μικρότερης δύναμης τριβής, σημαίνει ότι η μέση ορθή τάση στο πρόσωπο του εργαλείου εφαρμόζεται πλησίον της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

### **2.2.1.2 Το συνεχές απόβλιττο**

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 2.5 και το σχηματιζόμενο

απόβλιττο σε μορφή ταινίας κινείται επάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του εργαλείου.

Το συνεχές απόβλιττο το συναντούμε κατά την κοπή όλκιμων μετάλλων και κραμάτων, κυρίως σε υψηλές ταχύτητες κοπής.



Σχήμα 2.5 Μηχανισμός σχηματισμού του συνεχούς αποβλίττου.

Το συγκεκριμένο είδος αποβλίττου 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 απόβλιττο 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 αποβλίττου θέτονται κάποιες παραδοχές, όπως ότι η κοπή είναι συνεχής και ορθογωνική, ότι το εργαλείο είναι οξύ, η πλαστική παραμόρφωση για το σχηματισμό του αποβλίττου λαμβάνει χώρα μέσα σε ζώνη μικρού πάχους, η οποία πρακτικά μπορεί να παρασταθεί από το επίπεδο (AB), Σχήμα 2.5 και ότι το απόβλιττο δεν ρέει πλευρικά.

Ο μηχανισμός σχηματισμού του συνεχούς αποβλίττου συνοπτικά έχει ως εξής: Εξαιτίας της 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 αποβλίττου με πάχος  $t_2$ . Το απόβλιττο σχηματισμένο πλέον κινείται προς τα επάνω (φορά του βέλους, Σχήμα 2.5) στην επιφάνεια αποβλίττου του εργαλείου, εφαιπτόμενο κατά τη ζώνη τριβής, υπό μορφή ταινίας αναπτύσσοντας σημαντική τριβή. Το επίπεδο διατμήσεως, κλίνει ως προς τη διεύθυνση κοπής κατά μία γωνία  $\phi$ , 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 αποβλίττου:

**α)** Το απόβλιττο 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 αποβλίττου.

**β)** Το σχηματισμένο απόβλιττο κινείται επάνω στην επιφάνεια αποβλίττου 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 εμφανισθεί υψηλή τριβή στην επιφάνεια επαφής εργαλείου και κατεργασμένης επιφάνειας.

**ε)** Οι νεοσχηματιζόμενες επιφάνειες, δηλαδή η προς το εργαλείο επιφάνεια του αποβλίττου 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.

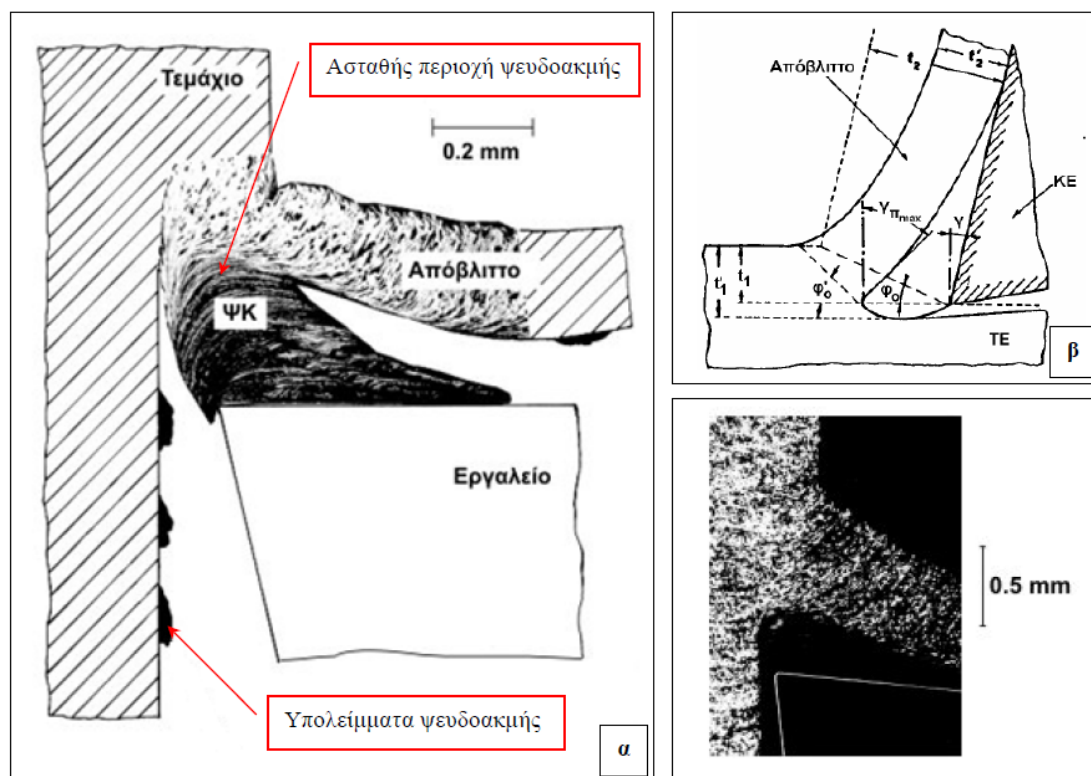
### **2.2.1.3 Το συνεχές απόβλιττο με ψευδοακμή**

Σχηματίζεται, όπως και το συνεχές απόβλιττο, με τη διαφορά ότι στην περιοχή της κόψης του εργαλείου και επάνω στην επιφάνεια αποβλίττου 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 αποβλίττου του εργαλείου, ενώ η κίνηση του αποβλίττου μεταφέρεται στην ασταθή κορυφή της. Ο σχηματισμός της ψευδοακμής αποδίδεται σε συνδυασμό ορθών θλιπτικών τάσεων και συνθηκών τριβής και θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια αποβλίττου 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 αποβλίττου (τεμαχίδιο Α) και επάνω στη νεοσχηματιζόμενη επιφάνεια του τεμαχίου (τεμαχίδιο Β), με σοβαρή συνέπεια τη χειροτέρευση της τραχύτητάς της, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.γ



**Σχήμα 2.6** Χαρακτηριστικά της ψευδοακμής. α) Τεμαχισμός της ψευδοακμής. β) Γεωμετρικά μεγέθη της ψευδοακμής

Οι βασικές προϋποθέσεις δημιουργίας ψευδοακμής είναι οι ακόλουθες:

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

Οι συνέπειες σχηματισμού της ψευδοακμής συνοψίζονται ως εξής:

- α) Αύξηση της ονομαστικής γωνίας αποβλίττου του εργαλείου από  $\gamma$  σε μία μέση τιμή  $\gamma_{\pi}$  (μέση πραγματική γωνία αποβλίττου), Σχήμα 2.6.β.
- β) Μείωση στη φυσική επιφάνεια επαφής αποβλίττου - 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.ά.).
- 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 κύριοι παράγοντες κοπής που επηρεάζουν το σχηματισμό και τα χαρακτηριστικά της ψευδοακμής είναι:

**α) Ταχύτητα κοπής.** Αύξηση της ταχύτητας κοπής συνεπάγεται αύξηση της θερμοκρασίας στη ζώνη 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 αποβλίττου.

**β) Η πρόωση, το βάθος κοπής και η ονομαστική γωνία αποβλίττου:** Οι διαστάσεις της θεωρητικής διατομής του αποβλίττου ( $t_1 \times b_1$  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 αποβλίττου - 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 αποβλίττου του εργαλείου. Αύξηση στη γωνία αποβλίττου 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 τη 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 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 την 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.

## 2.2.2 Πώς επηρεάζουν το σχηματισμό του αποβλίττου η ταχύτητα κοπής $v$ και η γωνία αποβλίττου του εργαλείου $\gamma$

### 2.2.2.1 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 αποβλίττου, μεταβάλλοντας το μέσο φαινόμενο συντελεστή τριβής  $\mu$  (ή τη μέση φαινόμενη γωνία τριβής  $\rho$ ) και από αυτόν τη γωνία επενέργειας της δύναμης κοπής  $\omega = \rho - \gamma$  και τελικά τη γωνία διατμήσεως  $\phi$ . Στην περίπτωση που σχηματίζεται ψευδοακμή τότε η επιρροή της ταχύτητας κοπής εκδηλώνεται κυρίως με μεταβολές στη μέση πραγματική γωνία αποβλίττου  $\gamma_p$ .
- Ασκεί άμεση επίδραση στο όριο διαρροής του υλικού τόσο στη ζώνη διατμήσεως, όσο και στη ζώνη τριβής μέσω της ταχύτητας παραμορφώσεως κάτω από ορισμένες συνθήκες.

### 2.2.2.2 Η γωνία αποβλίττου του εργαλείου

Η ονομαστική γωνία αποβλίττου  $\gamma$ , ασκεί άμεση και έμμεση επιρροή στο σχηματισμό του αποβλίττου:

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

**Έμμεση επίδραση:** Υπεισέρχεται στον προσδιορισμό της γωνίας  $\omega$ , άρα ασκεί επίδραση και στη γωνία διατμήσεως  $\phi$  με συνέπειες στο σχηματισμό του αποβλίττου.

## 2.3 Εκλύομενη 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 τη διάρκεια ζωής του, προκαλεί θερμική καταπόνηση στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, κ.οκ.

Στις κατεργασίες κοπής συνυπάρχουν και οι τρεις μηχανισμοί μεταφοράς της θερμότητας, δηλαδή με επαφή, αγωγή και ακτινοβολία. Η μεταφορά λ.χ. θερμότητας

μέσα στο απόβλιττο, το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το κοπτικό εργαλείο και τη μανέλα συγκράτησης πραγματοποιείται με επαφή, η μεταφορά θερμότητας μεταξύ ψυκτικού υγρού/αέρα και αποβλίττου/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 μια πρώτη προσέγγιση 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 2.7.



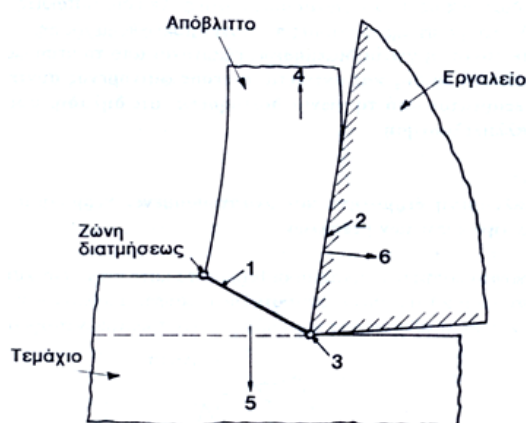
**Σχήμα 2.7** Περιοχές παραγωγής θερμότητας κατά την κοπή και η συμβολή κάθε ζώνης στη διανομή της θερμότητας

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 έκλυσης της και η κοπή μπορεί να θεωρηθεί ως ισόθερμη. Με αύξηση της ταχύτητας κοπής, ο ρυθμός απαγωγής της θερμότητας υπολείπεται του ρυθμού έκλυσης 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.

Όπως προαναφέρθηκε, η ενέργεια κοπής μετατρέπεται σε θερμότητα κατά κύριο λόγο στη ζώνη διατμήσεως και κατά δευτερεύοντα στη ζώνη επαφής αποβλίττου 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. Στην 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 2.8.



**Σχήμα 2.8** 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 αποβλίττου - εργαλείου.
- 3:** 2% της συνολικής ενέργειας κοπής μετατρέπεται σε θερμότητα στην περιοχή επαφής εργαλείου - τεμαχίου.
- 4:** 75% της συνολικής ενέργειας κοπής απάγεται από το απόβλιττο.
- 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 υποβοηθεί 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.

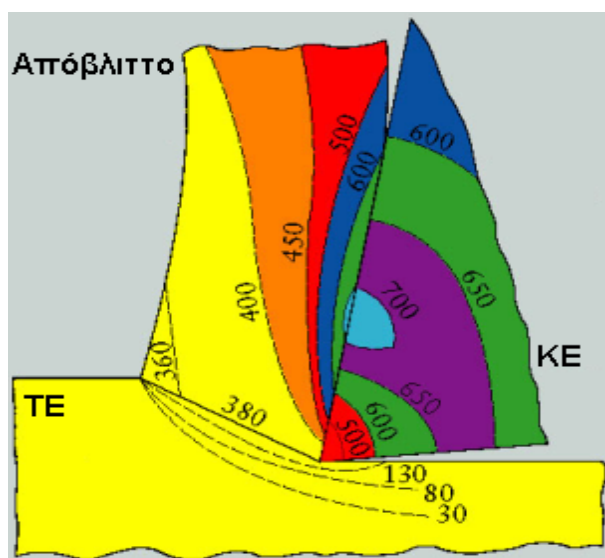
γ) Η ταχύτητα κοπής επιδρά στη μέση θερμοκρασία εντονότερα από ότι η θεωρητική διατομή του αποβλίττου. Η θερμοκρασία μεταβάλλεται περίπου ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της ταχύτητας κοπής και με την τέταρτη ρίζα της θεωρητικής διατομής του αποβλίττου.

Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η διανομή θερμοκρασιών στο εργαλείο, στο απόβλιττο 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 απόβλιττο 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.



**Σχήμα 2.9** Διανομή θερμοκρασιών στο απόβλιττο, στο κοπτικό εργαλείο και στο τεμάχιο. Χάλυβας παρόμοιος με SAE 1095,  $v = 66 \text{ m/min}$ ,  $t_s = 0,195 \text{ mm}$ ,  $\gamma = 10^\circ$  με τις θερμοκρασίες να δίδονται σε  $^\circ\text{C}$ .

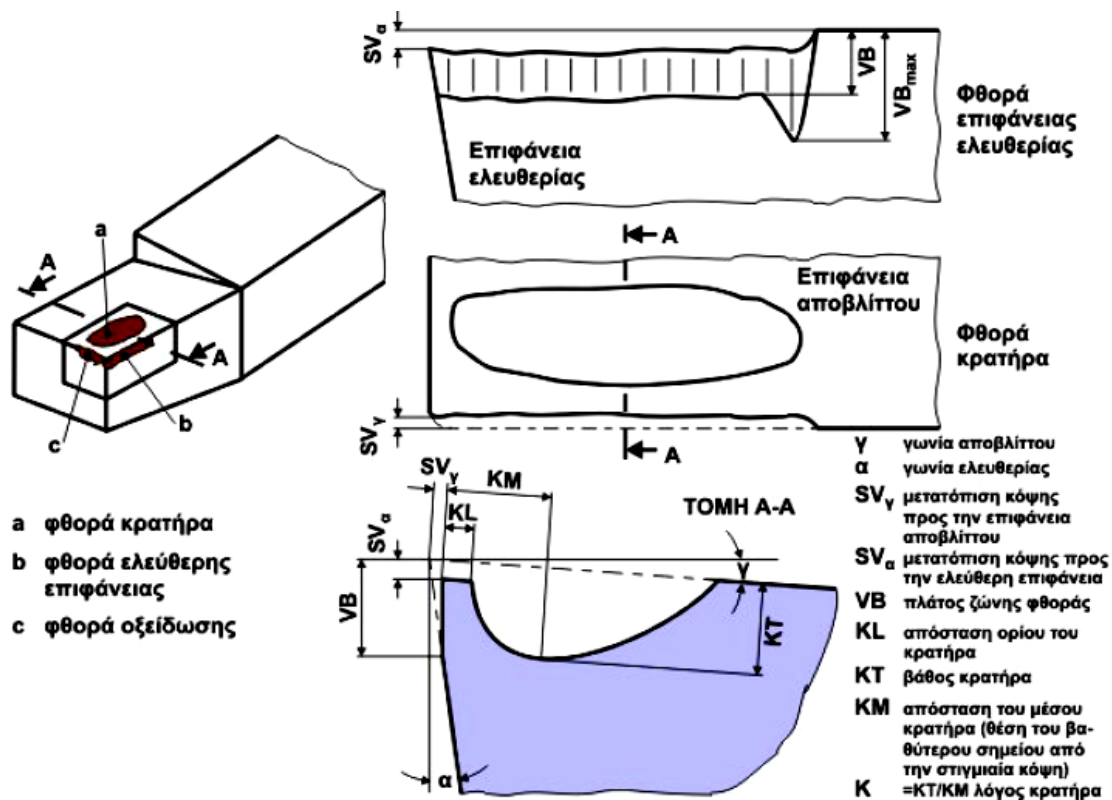
## 2.4 Φθορά του εργαλείου κοπής

### 2.4.1 Γενικές παρατηρήσεις – αιτίες φθοράς

Κατά την κοπή των μετάλλων, το κοπτικό εργαλείο υπόκειται σε υψηλές θερμοκρασίες, της τάξης των 1200 °C, των οποίων η κατανομή παρουσιάζει απότομες τοπικές μεταβολές και υψηλούς ρυθμούς αύξησης της τάξης των 10<sup>6</sup> °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 αποβλίττου στη ζώνη επαφής κοπτικού εργαλείου/αποβλίττου, 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 αποβλίττου 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 απόβλιττο 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 2.10.
- β) Στην δημιουργία φθοράς επάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του εργαλείου, η οποία καλείται **φθορά κρατήρα**, Σχήμα 2.10.
- γ) Στην απολέπιση του εργαλείου στην κόψη του και στην επιφάνεια αποβλίττου 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 2.10 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 δυνατό να αποφευχθούν, οποιαδήποτε μέτρα και αν ληφθούν και πρακτικά τα δύο αυτά είδη φθοράς αποτελούν αύξουσα συνεχή συνάρτηση του χρόνου κοπής.

Το κοπτικό εργαλείο, συνεπώς, φθείρεται προοδευτικά στην επιφάνεια αποβλίττου 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 διαφόρους 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 αποβλίττου του εργαλείου. Αντίθετα, η ζώνη φθοράς πάντοτε, χωρίς εξαίρεση, συμβάλλει στην αύξηση των δυνάμεων κοπής, από την αύξηση της δυνάμεων τριβής στην επιφάνεια επαφής εργαλείου - τεμαχίου.

Παράλληλα, η ζώνη φθοράς μεταβάλλει τη γεωμετρία του εργαλείου, με αποτέλεσμα να επηρεάζει την διαστατική ακρίβεια του τεμαχίου ή την ακρίβεια μορφής του, όταν τούτο κατεργάζεται με εργαλείο μορφής. Η τραχύτητα επιφανείας 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.

## **2.4.2 Μηχανισμοί φθοράς του εργαλείου**

### **2.4.2.1 Μηχανισμός φθοράς με σχηματισμό και λύση συγκολλητών μικροδεσμών**

Στην κοπή των μετάλλων, σχηματίζονται συγκολλητοί δεσμοί ως μέρος του μηχανισμού τριβής μεταξύ αποβλίττου και εργαλείου, όπως και ανάμεσα στο εργαλείο και στο κομμάτι. Με την καταστροφή αυτών των δεσμών, καθώς η κοπή προχωρεί, αποσπώνται τεμαχίδια από το εργαλείο και μεταφέρονται στην προς αυτό πλευρά του αποβλίττου και στην κατεργασμένη επιφάνεια του κομματιού.

### **2.4.2.2 Μηχανισμός φθοράς με απόξεση**

Στην περίπτωση αυτή, η φθορά οφείλεται στην αφαίρεση υλικού από το εργαλείο με **απόξεση** (κοπή σε μικρή κλίμακα) που προξενείται από πολύ σκληρά τεμαχίδια, τα οποία βρίσκονται στην προς το εργαλείο πλευρά του αποβλίττου, καθώς αυτά περνούν πιεζόμενα επάνω στην επιφάνεια αποβλίττου. Τα σκληρά αυτά τεμαχίδια είναι δυνατό να είναι κομματάκια της ψευδόκοψης ή του υλικού του εργαλείου που αφαιρούνται με τον προηγούμενο μηχανισμό φθοράς του (δηλαδή με δημιουργία και λύση συγκολλητών δεσμών) ή σκληρά εγκλείσματα στο υλικό του κομματιού.

### **2.4.2.3 Μηχανισμός φθοράς με διάχυση στερεάς καταστάσεως**

Κατά την κοπή των μετάλλων δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για διάχυση ατόμων από το υλικό του εργαλείου στο απόβλιττο και στο κομμάτι και αντίστροφα

από το απόβλιττο ή το κομμάτι στο εργαλείο μέσα σε στενή ζώνη στις επιφάνειες επαφής τους. Οι ευνοϊκές αυτές συνθήκες για διάχυση οφείλονται από το ένα μέρος στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την κοπή (η επιρροή της αυξήσεως της θερμοκρασίας είναι δραματική στην ταχύτητα της διαχύσεως) και από το άλλο στη μεταλλική επαφή, που αποκαθίσταται μεταξύ αποβλίττου και εργαλείου, όπως και ανάμεσα στο εργαλείο και στο κομμάτι ακόμη και ο βαθμός διαλυτότητας των εν επαφή μεταλλικών επιφανειών παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του φαινομένου της διαχύσεως. Η διάχυση έχει ως αποτέλεσμα, αλλαγές στη δομή του υλικού του εργαλείου στην επιφανειακή του στιβάδα, άρα εξασθένισή του και τελικά ταχύτερη φθορά του.

#### **2.4.2.4 Θερμοηλεκτρική φθορά**

Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, που αναπτύσσονται στην επιφάνεια επαφής ανόμοιων υλικών κατά την κοπή των μετάλλων, δημιουργείται θερμοηλεκτρική ηλεκτρεγερτική δύναμη, με συνέπεια τη ροή ρευμάτων στο ηλεκτρικό κύκλωμα εργαλείο - απόβλιττο - τεμάχιο - εργαλειομηχανή - εργαλείο. Τα ρεύματα αυτά υποστηρίζεται, ότι διευκολύνουν τη διάχυση άνθρακα από τα σκληρομέταλλα στο υλικό του τεμαχίου.

#### **2.4.2.5 Φθορά από οξείδωση**

Οξειδώνονται κατά κύριο λόγο τα σκληρομέταλλα που περιέχουν μονοκαρβίδιο του βολφραμίου. Η οξείδωση εκδηλώνεται έντονα σε υψηλές ταχύτητες κοπής και μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτατη καταστροφή του κοπτικού. Εμφανίζεται στη δευτερεύουσα κόψη, αλλά και σε άλλες περιοχές του εργαλείου.

#### **2.4.2.6 Αυλακοειδής ή συγκεντρωμένη φθορά**

Χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό έντονων αυλάκων σε θέσεις του εργαλείου, όπου λαμβάνει χώρα τριβή υλικού του τεμαχίου (στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου τρίβεται η προερχόμενη και σκληρυμένη από το προηγούμενο πέρασμα του εργαλείου επιφάνεια του τεμαχίου και στη δευτερεύουσα ελεύθερη επιφάνεια η νεοκατεργασμένη επιφάνεια) ως προς το εργαλείο.

#### **2.4.2.7 Χημική φθορά**

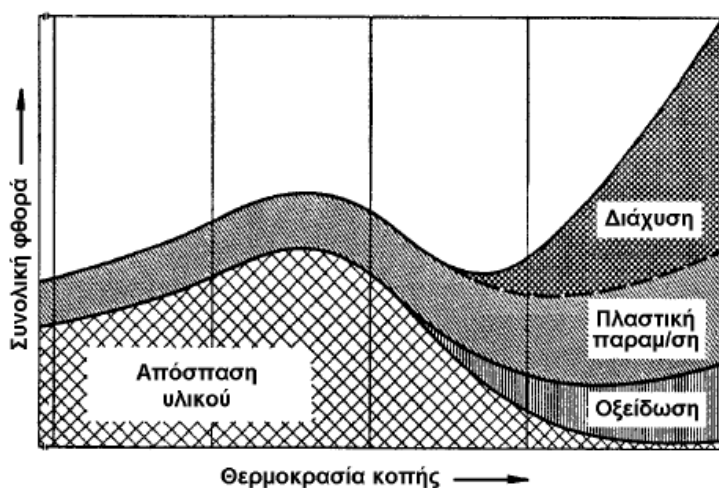
Προκαλείται από την αλληλεπίδραση εργαλείου - τεμαχίου σε ένα χημικό περιβάλλον, που δημιουργεί το συνήθως από το χρησιμοποιούμενο υγρό κοπής.

#### **2.4.2.8 Ηλεκτρολυτική φθορά**

Οφείλεται σε πιθανή γαλβανική διάβρωση μεταξύ των υλικών εργαλείου και

τεμαχίου.

Στο Σχήμα 2.11 εικονίζονται ποιοτικά οι θέσεις, που καταλαμβάνουν οι βασικοί μηχανισμοί φθοράς των κοπτικών εργαλείων στο πεδίο της θερμοκρασίας κοπής. Στον άξονα των τεταγμένων τίθεται η συνολική φθορά (ως υπέρθεση της μερικής φθοράς εξαιτίας των διαφόρων μηχανισμών).



**Σχήμα 2.11** Θέση βασικών μηχανισμών φθοράς στο πεδίο θερμοκρασιών κοπής 1 φθορά με σχηματισμό και λύση συγκολλητών μικροδεσμών, 2 φθορά από οξείδωση, 3 μηχανική φθορά (από πλαστική παραμόρφωση), 4 φθορά από διάχυση, 5 καμπύλη συνολικής φθοράς.

## 2.5 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.

### 2.5.1 Οι συνθήκες κατεργασίας

Η επιρροή των συνθηκών κατεργασίας ( $v$ ,  $f$ ,  $a$  για τόννευση) 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' ακολουθίαν το ρυθμό παραγωγής, δηλαδή την παραγωγικότητα της

κατεργασίας. Αυτό εκφράζει πολύ καθαρά στην αποκαλούμενη γενικευμένη 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

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

### 2.5.2 Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου

Όπως γνωρίζουμε, αύξηση στη γωνία αποβλίττου του εργαλείου έχει ευνοϊκά αποτελέσματα στην κοπή, άρα και στη ζωή του εργαλείου. Αυτό όμως ισχύει μέχρι ένα όριο στην τιμή της γωνίας αποβλίττου. 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 αποβλίττου του εργαλείου. Πιο συγκεκριμένα, λ.χ. για τόννευση εκχονδρίσεως σκληρού χάλυβα με εργαλείο από ταχυχάλυβα και από σκληρομέταλλο η βέλτιστη τιμή της γωνία αποβλίττου λαμβάνεται  $14^\circ$  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  $\alpha$  είναι κατά μέσο όρο  $8^\circ$  για εργαλείο από ταχυχάλυβα και  $6^\circ$  για εργαλείο από σκληρομέταλλο.

### 2.5.3 Επιρροή του υλικού του εργαλείου

Η αξιολόγηση του υλικού κατασκευής του εργαλείου βασίζεται κατά κύριο λόγο στο βαθμό διατηρήσεως της σκληρότητάς του σε αύξησή 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 κεραμεικικά 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 τη 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  $I/\eta$  της ταχύτητας κοπής εκφράζουν την επιρροή της ταχύτητας κοπής στη ζωή του εργαλείου. Έτσι, όσο μικρότερη είναι η τιμή του  $n$  (ή μεγαλύτερη η τιμή του  $I/\eta$ ), τόσο πιο έντονη είναι η επίδραση της ταχύτητας κοπής στη ζωή του εργαλείου. Έχει βρεθεί, ότι ο μικρότερος εκθέτης  $n$  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 έως 0,50 για τα σκληρομέταλλα και
- από 0,50 έως 0,70 για τα κεραμευτικά πυριμάχων οξειδίων.

#### **2.5.4 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 ικανότητα του για σκλήρωση και οι διάφορες ακαθαρσίες και εγκλείσματα που περιέχονται σε αυτό.

Η σκληρότητα του υλικού, όπως είναι 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 σχηματίσει τη σκληρότατη λειαντική ουσία οξείδιο του αργιλίου.

#### **2.5.5 Επίδραση του υγρού κοπής**

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

### **2.6 Επιρροή τασικών παραγόντων της κοπής των μετάλλων επί των συνιστωσών της δυνάμεως (ή αντιστάσεως) κοπής κατά τη διαμήκη τόννευση**

Οι ακόλουθοι παράγοντες κοπής ασκούν επίδραση επί των δυνάμεων κοπής:

- Παράγοντες σχετιζόμενοι με το κοπτικό μέρος του εργαλείου, δηλαδή, η γεωμετρία του: Γωνία αποβλίττου  $\gamma$ , γωνία ελευθερίας  $\alpha$ , γωνία λοξότητας  $\lambda_s$ , γωνία θέσεως της κύριας κόψης  $\kappa_r$ , ακτίνα καμπυλότητας  $r$  της ακής, μορφή της επιφάνειας αποβλίττου και της κόψης, βαθμός φθοράς (ζώνη φθοράς και φθορά κρατήρα), τραχύτητα επιφάνειας κρισίμων επιφανειών του εργαλείου, και υλικό κατασκευής του κοπτικού .
- Παράγοντες συνδεδεμένοι 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 όμως 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 το υγρό κοπής και με τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος (κοπτικό – εργαλειομηχανή – τεμάχιο).

### 2.6.1 Η γωνία αποβλίττου $\gamma$ του εργαλείου

Μεταβάλλοντας τη γωνία αποβλίττου  $\gamma$  του κοπτικού εργαλείου η εφαπτομενική συνιστώσα  $F_T$  μειώνεται. Η επιρροή της  $\gamma$  είναι εντονότερη, όσο πιο μαλακό και όλκιμο είναι το κατεργαζόμενο μέταλλο ή κράμα. Κατά την κοπή όμως ψαθυρών μετάλλων (π.χ. φαιός χυτοσίδηρος, κράματα χαλκού κ.α.), η  $\gamma$  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 αποβλίττου, οι δυνάμεις κοπής αυξάνονται πολύ λιγότερο από ότι με θετικές τιμές της γωνίας αποβλίττου. Επιπλέον, μικρές τιμές της γωνίας  $\gamma$  ενισχύουν την μηχανική αντοχή του κοπτικού μέρους του εργαλείου. Η επιρροή της γωνίας αποβλίττου, έχει διαπιστωθεί, ότι είναι πιο έντονη επί της δύναμης προώσεως  $F_v$  και της δυνάμεως απωθήσεως  $F_A$  του εργαλείου από εκείνη επί της κύριας δύναμης κοπής  $F_H$ . Το ποσοστό, δηλαδή, μείωσης ή αύξησέως τους με σταθερή αντίστοιχη αύξηση ή μείωση της γωνίας  $\gamma$  είναι μεγαλύτερο από εκείνο που αφορά στην  $F_H$ .

Τελικά, για κάθε συνδυασμό υλικού τεμαχίου - υλικού εργαλείου, η τιμή της γωνίας  $\gamma$  επιλέγεται από εγχειρίδια ή με διαδικασίες βελτιστοποίησης, ούτως ώστε να μεγιστοποιείται η ζωή του εργαλείου.

### 2.6.2 Η γωνία ελευθερίας $\alpha$

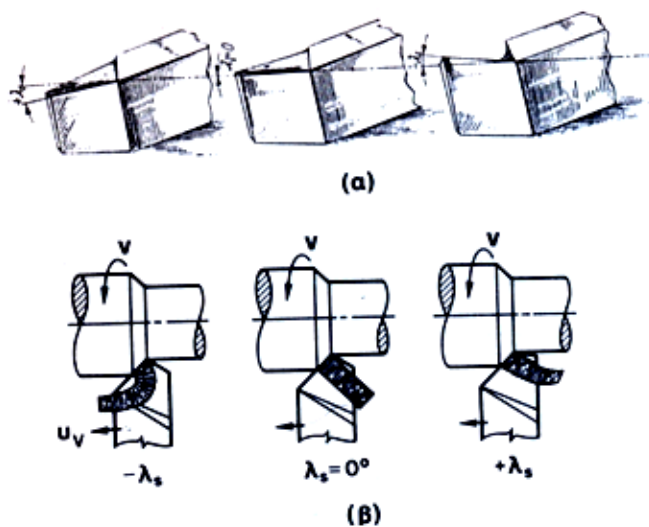
Η γωνία ελευθερίας  $\alpha$  του κοπτικού, για οξύ σχετικά εργαλείο για τις εκάστοτε συνιστώμενες τιμές, ασκεί αμελητέα επίδραση στις δυνάμεις κοπής. Καθώς όμως η

γωνία  $\alpha$  μικραίνει, η αναπτυσσόμενη στην ελευθέρα επιφάνεια του εργαλείου δύναμη τριβής αυξάνει, με συνέπεια αύξηση των δυνάμεων κοπής αφού προστίθεται μία επιπλέον συνιστώσα, η οποία δεν λαμβάνει μέρος στο σχηματισμό του αποβλίττου. 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.

### 2.6.3 Η γωνία λοξότητας $\lambda_s = \lambda$

Μεταβολές της γωνία λοξότητας επηρεάζουν την ροή του αποβλίττου, Σχήμα 2.12. Η γωνία  $\lambda$  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.

Μία γενική παρατήρηση αναφορικά με το ρόλο της  $\lambda_s$  είναι ότι αρνητικές τιμές της σταθεροποιούν την κοπή, ενώ το απόβλιττο ρέει προς την κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου, γεγονός που δυσκολεύει την εκτέλεση της κατεργασίας και χειροτερεύει την τραχύτητα.



**Σχήμα 2.12 α)** Γωνία λοξότητας σε τυπικό εργαλείο τόννευσης, **β)** Επιρροή της γωνίας λοξότητας στην διεύθυνση ροής του αποβλίττου.

### 2.6.4 Η ακτίνα καμπυλότητας $r$ της ακής του εργαλείου

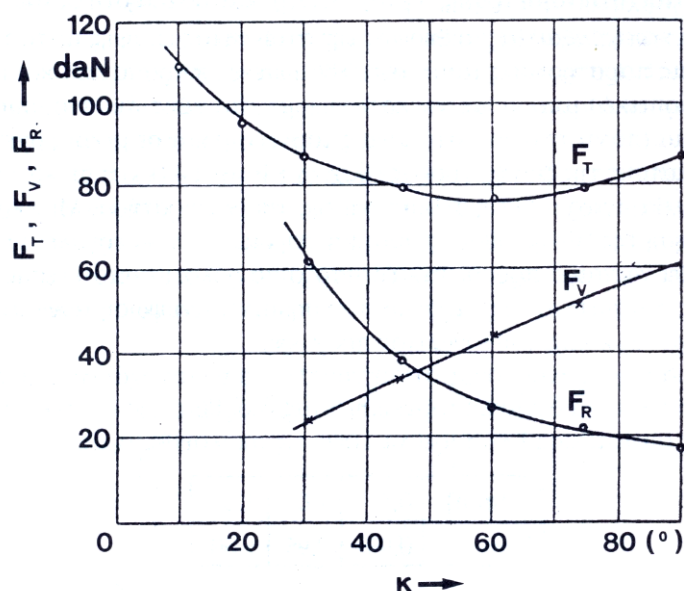
Αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας της ακής του εργαλείου συνεπάγεται αύξηση της δύναμης κοπής. Η αύξηση αυτή οφείλεται στο μεγαλύτερο σχετικά μήκος της κόψης

του κοπτικού και συνεπώς και της επιφάνειας επαφής αποβλίττου - εργαλείου, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη τιμή του πλαστικού έργου παραμόρφωσης. Επίσης, η αυξημένη καμπυλότητα της ακής μειώνει το μέσο θεωρητικό πάχος του αποβλίττου, 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 επιτευχτεί μεγαλύτερη διαστατική ακρίβεια χρησιμοποιούνται εργαλεία μικρότερων τιμών της ακτίνας  $r$ .

### 2.6.5 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 αποβλίττου, όταν οι υπόλοιποι παράγοντες κοπής παραμένουν σταθεροί. Άρα, αύξηση του θεωρητικού πάχους  $h$  του αποβλίττου 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  $\kappa$  φαίνεται στο Σχήμα 2.13. Παρατηρούμε ότι η επίδρασή της επί των συνιστωσών  $F_A$  και  $F_V$  είναι εντονότερη από εκείνη επί της κύριας συνιστώσας  $F_H$ .



**Σχήμα 2.13** Επίδραση της γωνίας θέσεως  $\kappa$  της κύριας κόψης του εργαλείου επί των συνιστωσών  $F_H$ ,  $F_A$  και  $F_V$ .



### **2.6.6 Η φθορά του κοπτικού εργαλείου**

Η εμφάνιση κρατήρα συνοδεύεται από αύξηση της γωνίας αποβλίττου 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 αποβλίττου και συνεπώς, ασκεί μικρή επίδραση επί των δυνάμεων κοπής. Από την άλλη πλευρά, η ζώνη φθοράς που δημιουργείται (στην ελευθέρα 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 κρατήρα. Με περαιτέρω όμως αύξηση της ζώνης φθοράς, η τριβή στη διεπιφάνεια εργαλείου - τεμαχίου αρχίζει να αυξάνει τη σπουδαιότητα της, με δυσμενές αποτέλεσμα για τις δυνάμεις κοπής, πράγμα που σημαίνει ανύψωση των δυνάμεων, καθώς ο χρόνος κοπής του εργαλείου προχωρεί.

### **2.6.7 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 αποβλίττου - εργαλείου και εργαλείου - κατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου.

Όσο αφορά το 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.

### **2.6.8 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 αποβλίττου 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 απόβλιτο ( $A=f \times a$ ). Άρα, η προκαλούμενη 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 αποβλίττου, ενώ το πάχος του (με σταθερή την πρόωση) παραμένει αμετάβλητο.

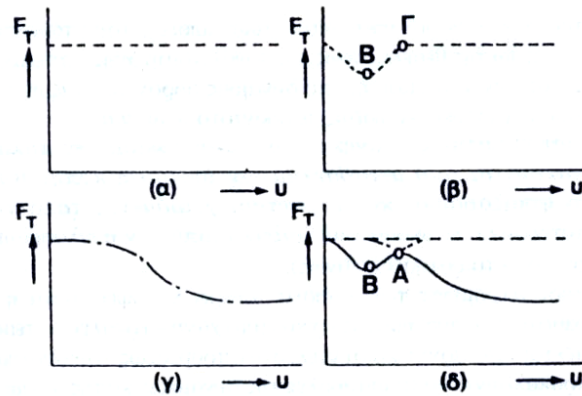
Συνεπώς, μία κατά προσέγγιση ανάλογη επιρροή του βάθους κοπής  $a$  συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις.

### 2.6.9 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 συνδέεται άμεσα με την καταναλισκόμενη ισχύ κοπής.

Μία 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 2.15.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 εξ αιτίας 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 τη χρήση σκληρομετάλλων.

Μία 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  $A$ , πρακτικώς είναι μικρότερη των 40 m/min, τιμή, που συνιστά ένα κατώτερο σύνορο στη χρησιμοποίηση σκληρομετάλλων ως κοπτικών. Άρα σε υψηλότερες ταχύτητες συνεπάγεται μείωση της συνιστώσας  $F_H$ .



**Σχήμα 2.15** Επιρροή της ταχύτητας κοπής  $u$  στην κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής  $F_H$  με σταθερούς τους υπόλοιπους παράγοντες κοπής.

**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 εξαφανίσεώς της (αύξηση της γωνίας  $\gamma$  και μείωση της επιφάνειας επαφής αποβλίττου - 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.

### 2.6.10 Το υγρό κοπής

Το υγρό κοπής ασκεί ευεργετική επιρροή επί των δυνάμεων κοπής στην κατά μήκος τόννευση.

## 2.7 Διακυμάνσεις των δυνάμεων κατά την κοπή. Ιδιόμορφες ταλαντώσεις.

Έχει παρατηρηθεί, ότι οι δυνάμεις κοπής εμφανίζουν μεταβολές του μεγέθους τους στο χρόνο, κάτω από αυστηρά σταθερούς παράγοντες κοπής. Αποτέλεσμα αυτών των μεταβολών είναι η ανάπτυξη ταλαντώσεων, οι οποίες διακρίνονται σε ταλαντώσεις ανεξάρτητες από το φαινόμενο της κοπής και σε ταλαντώσεις εξαρτώμενες από αυτό.

Στην πρώτη κατηγορία υπάγονται ταλαντώσεις, που επάγονται από το περιβάλλον (μέσω της θεμελιώσεως της εργαλειομηχανής), από μη ζυγοσταθμισμένες περιστρεφόμενες μάζες, από δυνάμεις αδρανείας μαζών που παλινδρομούν, από μεταδόσεις κινήσεως με οδοντοτροχούς κ.α.

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι εξαναγκασμένες ταλαντώσεις, που προκαλούνται από μεταβαλλόμενες δυνάμεις κοπής, όπως συμβαίνει στο φραιζάρισμα και οι αυτοδιεγχειρόμενες ταλαντώσεις, οι οποίες ονομάζονται chatter.

Οι αυτοδιεγερόμενες ταλαντώσεις μπορεί να οφείλονται ή σε κατάσταση αστάθειας του συστήματος εργαλειομηχανή - εργαλείο - τεμάχιο, που χαρακτηρίζεται από αρνητικό συντελεστή αποσβέσεως του συστήματος ή να προκαλούνται από μεταβολές της δυνάμεως κοπής, λόγω ανομοιομορφίας της επιφάνειας του κομματιού που οφείλεται σε ταλάντωση του εργαλείου κατά το τελευταίο πέρασμά του. Η δεύτερη περίπτωση αυτοδιεγερόμενης ταλάντωσης είναι γνωστή ως αναγεννώμενο chatter.

### 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

#### 3.1 Γενικά

Σκοπός του πειραματικού μέρους είναι να πραγματοποιηθεί κατεργασία τórνευσης σε κράμα τιτανίου (Ti-6Al-4V), προκειμένου να μετρηθούν οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία του. Η μέτρηση των δυνάμεων είναι απαραίτητη, προκειμένου να κατανοηθεί η διαδικασία κοπής και να προκύψουν συμπεράσματα για ένα υλικό, του οποίου οι φυσικές και χημικές ιδιότητες αφενός του προσδίδουν ελκυστικά χαρακτηριστικά για χρήση σε απαιτητικές εφαρμογές, αφετέρου όμως καθιστούν το υλικό αυτό πολύ δύσκολο στη κατεργασία του. Πραγματοποιήθηκαν δύο εργαστηριακές κοπές σε κυλινδρικά δοκίμια κράματος τιτανίου Ti-6Al-4V με αρχική διάμετρο 50 mm και μήκους 35 mm.

#### 3.2 Κοπή και διαμόρφωση δοκιμίων

Το αρχικό υλικό είναι σε μορφή μπάρας με διάμετρο 50 mm και μήκος 1000 mm. Το υλικό τοποθετείται σε ηλεκτρικό πριόνι τύπου πριονοκορδέλας της εταιρίας METAL BAND SAW, ισχύος 1.9 kW, Σχήμα 3.1 και κόβονται τεμάχια μήκους 35 mm. Για την συγκράτηση των τεμαχίων αποφασίστηκε να γίνει η κατασκευή αρσενικής κωνικότητας σε χαλύβδινο αφαλό και αντίστοιχης θηλυκής κωνικότητας στα δοκίμια. Ο χαλύβδινος αφαλός αποτελείται από την μία πλευρά από ένα διαβαθμισμένο κύλινδρο, με τον οποίο πραγματοποιείται η συγκράτηση του από το τσόκ της εργαλειομηχανής, ενώ στην άλλη πλευρά υπάρχει σπείρωμα το οποίο καταλήγει σε κωνικότητα 3.5°.

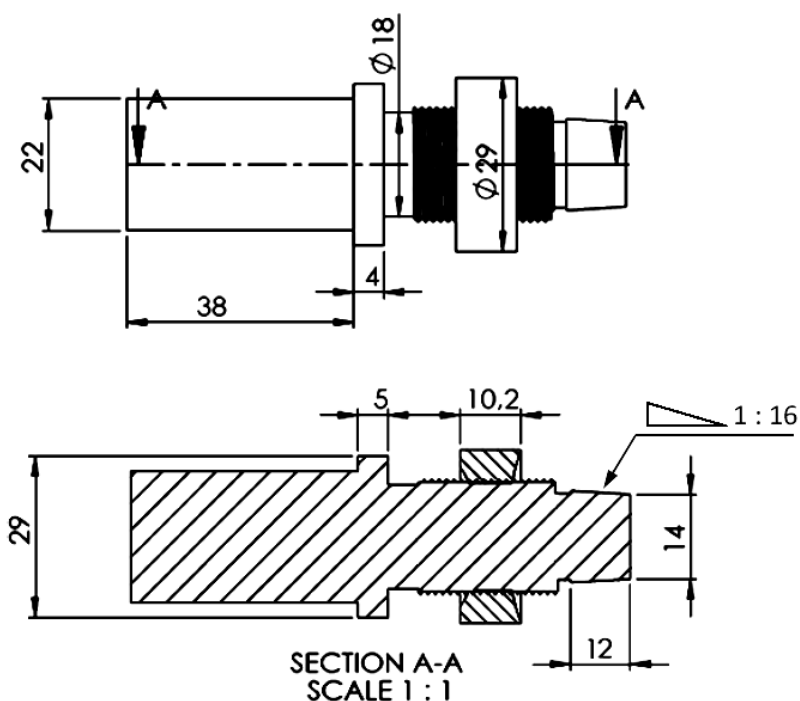


**Σχήμα 3.1** Ηλεκτρικό πριόνι τύπου πριονοκορδέλας της εταιρίας METAL BAND SAW

Επίσης, έχει κατασκευαστεί και το αντίστοιχο περικόχλιο που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του δοκιμίου από τον κώνο, όταν ολοκληρωθεί η κατεργασία, Σχήμα 3.2. Τα γεωμετρικά στοιχεία του αφαλού παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.2 Αφαλός συγκράτησης

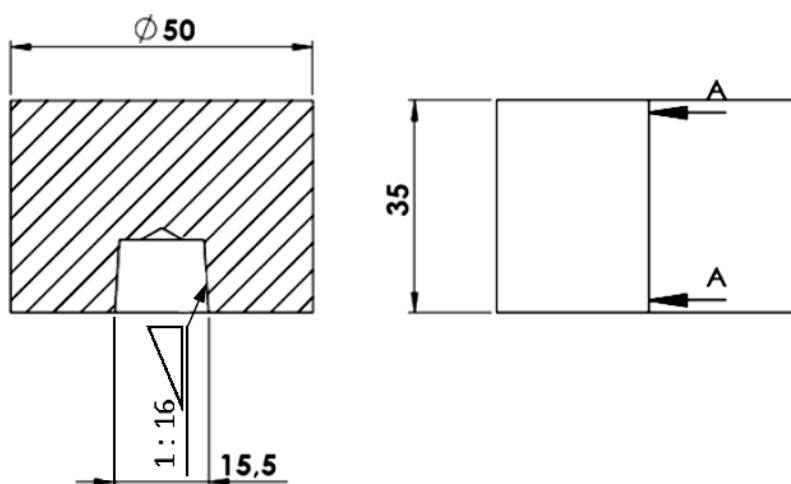


Σχήμα 3.3 Γεωμετρικά στοιχεία αφαλού συγκράτησης

Στη συνέχεια τα δύο δοκίμια κατεργάζονται σε συμβατικό τόρνο της εταιρίας Heller, ισχύος 7.5 kW και μέγιστων στροφών 1600rpm, εκτελώντας μετωπική τόνρευση για την επίτευξη γεωμετρικής ακρίβειας διότι η ακρίβεια του ηλεκτρικού πριονιού είναι αρκετά χαμηλή.

Η καθετότητα των προσώπων είναι απαραίτητη, πρώτον για να είναι δυνατή η διάνοιξη οπής για την κατασκευή της κωνικότητας και δεύτερον γιατί πρέπει να αποφύγουμε τις κρούσεις που θα εμφανίζονται στο κοπτικό εργαλείο, όταν αυτό θα προσεγγίζει το τεμάχιο κάθε φορά που θα εκτελεί ένα πάσο.

Ακολουθεί διάνοιξη οπής στο εμπρόσθιο τμήμα του τεμαχίου (πρόσωπο) με χρήση κεντραδόρου από ταχυχάλυβα και διάτρηση με τρυπάνι διαμέτρου 13 mm σε βάθος 11 mm. Τέλος, εκτελείται εσωτερική κωνική τόννευση με κλίση 3,5° και βάθος 12 mm, Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 Γεωμετρικά στοιχεία αρχικού υλικού

### 3.3 Εργαλειομηχανή κατεργασίας – τόννος

Η πειραματική κοπή πραγματοποιήθηκε σε τόννο CNC της εταιρείας OKUMA. Συγκεκριμένα, πρόκειται για το μοντέλο OKUMA LB10II, βάρους 3.5 τόνων, δύο αξόνων με δυνατότητα υποστήριξης ενός ακόμα άξονα, με ισχύ ηλεκτροκινητήρα κύριας ατράκτου 22kW, ισχύ κινητήρων πρόωσης 3kW για την πρόωση κατά τον άξονα z και 1,5kW για τον άξονα x, ταχύτητα ταχείας πρόωσης 15 και 20m/min για τον x και z άξονα αντίστοιχα και μέγιστο αριθμό στροφών 10000 rpm. Ο συγκεκριμένος τόννος διαθέτει μύλο δώδεκα θέσεων εργαλείων, ειδικό υδραυλικό τσοκ, αυτόματο υδραυλικό κεντροφορέα και παροχή ψυκτικού υγρού με υψηλή πίεση. Το σύστημα ελέγχου CNC είναι της ίδιας εταιρείας, με ανάλυση 0,1 μm, ABSO κλίμακες μέτρησης και δυνατότητες επικοινωνίας DNC-B, Σχήμα 3.5.



**Σχήμα 3.5** Τόρνος CNC της εταιρείας OKUMA

Ο τόρνος διαθέτει κονσόλα, στην οποία περιλαμβάνονται τα απαραίτητα χειριστήρια για την λειτουργία του, όπως έναρξη και διακοπή λειτουργίας, επιλογή άξονα κίνησης του εργαλειοφορείου, ρυθμιστικά για την αυξομείωση της ταχύτητας κοπής και της πρόωσης, επιλογή ή όχι ψυκτικού υγρού, χειριστήριο για την κίνηση του κοπτικού εργαλείου ανάλογα με τον άξονα που έχει επιλεγεί, ρύθμιση του βήματος κίνησης και πλήθος άλλων λειτουργιών. Επίσης, στην κεντρική κονσόλα περιλαμβάνεται πληκτρολόγιο και οθόνη.


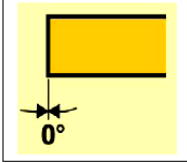
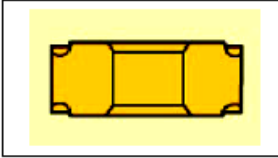
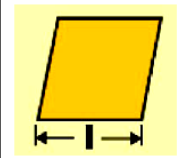
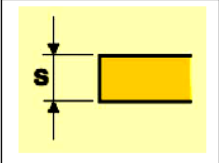
Ο τόρνος είναι εφοδιασμένος με το λογισμικό της εταιρίας ONE-TOUCH IGF-L. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα CAM, του οποίου η λειτουργία θα παρουσιαστεί στην συνέχεια εξηγώντας τον τρόπο προγραμματισμού για την κοπή της σφαίρας, με το οποίο ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει κώδικα G απευθείας στην ίδια την εργαλειομηχανή.

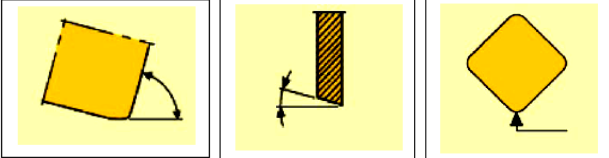
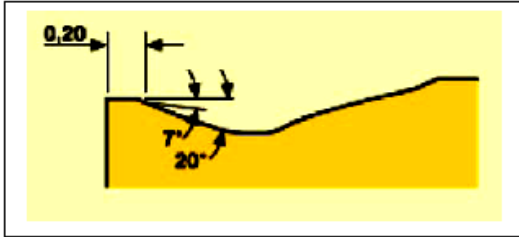
### **3.4 Κοπτικά εργαλεία**

Η κοπή της σφαίρας πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια: κόβοντας αρχικά το μισό ημισφαίριο, στο οποίο πραγματοποιήθηκε και η καταγραφή των δυνάμεων και στη συνέχεια αλλάζοντας κοπτικό εργαλείο ολοκληρώθηκε η κοπή του δεύτερου ημισφαιρίου. Για την κοπή του εμπρόσθιου ημισφαιρίου, όπου πραγματοποιείται και η μέτρηση των δυνάμεων χρησιμοποιείται κοπτικό εργαλείο της SECO DNMG 110402 M3 με επικάλυψη TP2000. Τα στοιχεία που δίνει ο κατασκευαστής παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1:



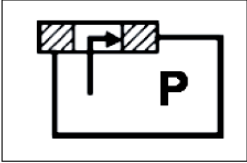

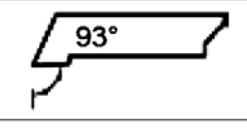
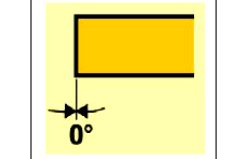
Πίνακας 3.1

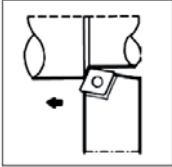


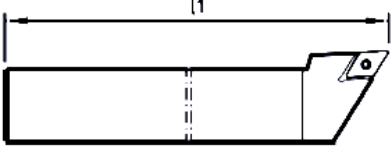
D																
N		Γωνία ελευθερίας														
M	3. Tolerances														Ανοχές	
	Tolerances +/- mm			For d, dimension mm												
	m s d			3.175	3.969	4.064	4.76	6.35	9.525	12.7	15.875	19.05	25.4	31.75		38.1
	M			0.08	0.13	0.05	.	.	.	.	.	.	.	.		.
	M			0.13	0.13	0.08	.	.	.	.	.	.	.	.		.
	M			0.15	0.13	0.10	.	.	.	.	.	.	.	.		.
G		-														
11		Μήκος κοπτικής ακμής														
04	 <p data-bbox="667 1845 841 1877" style="text-align: center;">04 = 4,76 mm</p>	Πάχος														

02	 <p style="text-align: center;">D=60°      N=0°      02=0,2 mm</p>	Καμπυλό-τητα μύτης
M3	 <p style="text-align: center;">M = Medium</p> <p style="text-align: center;">Για γενική χρήση (Συνιστάτε για προώσεις <math>f=0.15-0.5</math> mm/rev και βάθος κοπής <math>a=0,5-5</math>mm)</p>	Χαρακτη-ρισμός γρεζοσπά-στη

Τέλος, η επικάλυψη του κοπτικού πραγματοποιείται με χημική εναπόθεση ατμών (CVD) και αποτελείται από Ti(C,N), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (αλουμίνα) και TiN (νιτρίδιο του τιτανίου).

- Μανέλα SECO PDJNR 2020 K11. Τα στοιχεία της μανέλας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2:

<b>Πίνακας 3.2</b>		
P		Μέθοδος συγκράτησης
D		Γεωμετρία πλακιδίου
J		Θέση κοπής
N		Γωνία ελευθερίας

R		Διεύθυνση κοπής R=Right
20		Ύψος μανέλας
20		Πλάτος μανέλας
K		Ολικό μήκος μανέλας – κοπτικού

Για την κοπή του οπίσθιου ημισφαιρίου χρησιμοποιείται κοπτικό εργαλείο της ISCAR, VCMT 160402\_SM ME με επικάλυψη TiAlN.

### 3.5 Σύστημα καταγραφής δεδομένων

Το σύστημα καταγραφής δεδομένων αποτελείται από έναν ενισχυτή σήματος, ο οποίος λαμβάνει το ασθενές ηλεκτρικό σήμα από το δυναμόμετρο, το ενισχύει και τροφοδοτεί το καταγραφικό.

Το καταγραφικό λαμβάνει το ενισχυμένο σήμα και θέτει σε κίνηση γραφίδες, οι οποίες καταγράφουν τις δυνάμεις σε χαρτί το οποίο κινείται με ταχύτητα 6 cm/min. Το μοντέλο του καταγραφικού είναι GEORZ METRAWATT SE 460 της εταιρείας BBC, Σχήμα 3.6 .



Σχήμα 3.6 Ενισχυτής σήματος



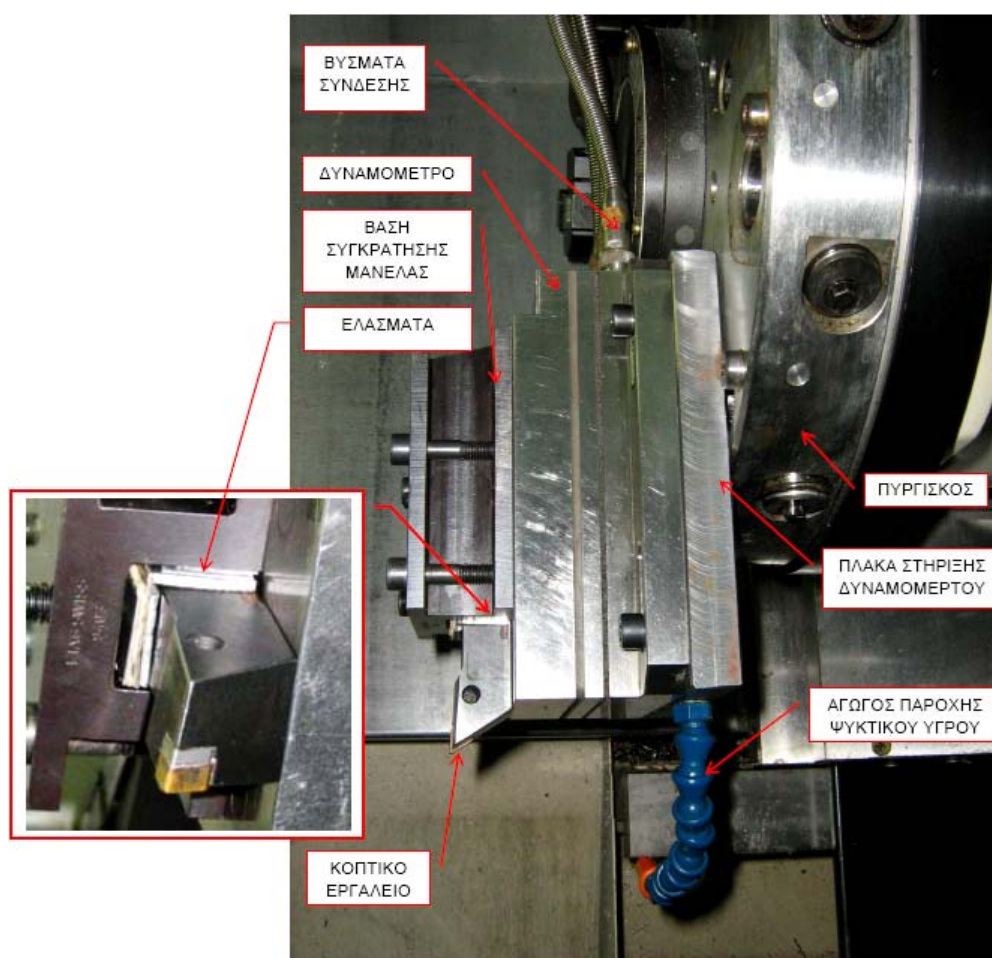
Σχήμα 3.7 Καταγραφικό δεδομένων

## 3.6 Κοπή

### 3.6.1 Προετοιμασία εργαλειομηχανής

Για την εκτέλεση των πειραμάτων απαιτηθήκαν δύο κοπτικά εργαλεία, εκ των οποίων το ένα προσαρμόστηκε επάνω στο δυναμόμετρο. Πιο αναλυτικά, η μανέλα συγκράτησης τοποθετείται σε ειδική συσκευή συγκράτησης, η οποία προσδένεται επάνω στο δυναμόμετρο με κοχλίες τύπου allen. Η θέση της μανέλας συγκράτησης ρυθμίζεται ως προς τον νοητό άξονα, που διέρχεται από το κέντρο του τσόκ και την πόντα με τη βοήθεια πρόσθετων λεπτών ελασμάτων και κοχλιών allen, Σχήμα 3.8. Το δυναμόμετρο μαζί με τη μανέλα συγκράτησης προσαρμόζεται σε μεταλλική πλάκα, η οποία τοποθετείται στην επιθυμητή θέση στο πυργίσκο της εργαλειομηχανής. Η πλάκα διαθέτει αγωγό για την παροχή κοπτικού υγρού, Σχήμα 3.8.

Το δυναμόμετρο που χρησιμοποιείται είναι της εταιρίας KIAG SWISS, τύπου KISTLER 9257A με δυνατότητα μέτρησης δυνάμεων σε τρεις διευθύνσεις και διαθέτει τρεις υποδοχές για την σύνδεση του με τον ενισχυτή σήματος.



Σχήμα 3.8 Σύστημα συγκράτησης κοπτικού εργαλείου

### 3.6.2 Προγραμματισμός και κοπή δοκιμίου

Πριν από κάθε άλλη ενέργεια ορίζεται το σημείο μηδέν του τεμαχίου. Με χειροκίνητο τρόπο, το κοπτικό εργαλείο προσεγγίζει και ακουμπά στο μέτωπο του περιστρεφόμενου τεμαχίου. Το σημείο αυτό αποτελεί το  $y=0$ . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τον άξονα  $x$ , με τη μόνη διαφορά ότι το κοπτικό προσεγγίζει και ακουμπά στην πλευρά του κυλινδρικού δοκιμίου και ορίζεται το  $x=35.8\text{mm}$ .

Πρέπει να αναφερθεί ότι έχει προηγηθεί κατεργασία του δοκιμίου για μείωση της διαμέτρου, γιατί η τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου στο δυναμόμετρο προέκτεινε αρκετά το κοπτικό προς τον άξονα  $x$ , με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος πρόσκρουσης ακόμα και όταν το εργαλειοφορείο βρισκόταν στην μέγιστη απομάκρυνση του.

Ξεκινώντας την διαδικασία του προγραμματισμού στο εγκαταστημένο λογισμικό της εργαλειομηχανής ο χρήστης ορίζει αρχικά το όνομα του προγράμματος. Για το συγκεκριμένο πείραμα, για το εμπρόσθιο τμήμα το πρόγραμμα ονομάστηκε TIT-FR, ενώ για το οπίσθιο τμήμα ονομάστηκε TIT-BK.

Ακολουθεί η επιλογή του υλικού κατεργασίας. Ο κατασκευαστής έχει εφοδιάσει το πρόγραμμα με βιβλιοθήκη υλικών, που περιλαμβάνει τα βασικά μέταλλα καθώς και τις συνθήκες κοπής τους, όπως ταχύτητα κοπής, πρόωση και βάθος κοπής. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αλλάξει τα στοιχεία ενός υλικού ή ακόμα και να προσθέσει ένα υλικό της αρεσκείας του.

Στο ίδιο παράθυρο δίνονται οι βασικές διαστάσεις ενός νοητού ακατέργαστου τεμαχίου, όπως μήκος, διάμετρος, αν το υλικό είναι κοίλο, καθώς και το σημείο αναφοράς του τεμαχίου. Αυτό το τεμάχιο χρησιμοποιείται μόνο στη διαδικασία της προσομοίωσης.

Περνώντας στο σχεδιασμό του τελικού δοκιμίου, ο χρήστης εισάγει πληκτρολογώντας τις συντεταγμένες των σημείων, ενώ ταυτόχρονα γίνεται απεικόνιση της διαδικασίας στην οθόνη της εργαλειομηχανής.

Για τη συνέχιση του προγραμματισμού, ο χρήστης εισάγει βασικές πληροφορίες για το τσοκ της μηχανής, όπως για παράδειγμα: εσωτερική και εξωτερική διάμετρος, μήκος σιαγόνων, τον τρόπο συγκράτησης του τεμαχίου (εσωτερικό ή εξωτερικό πιάσιμο) και αν είναι απαραίτητη η χρήση πόντας, ορίζεται το μήκος και η διάμετρος αυτής.

Ολοκληρώνοντας τον προγραμματισμό γίνεται η προσομοίωση στην οθόνη της μηχανής και αν το αποτέλεσμα είναι το επιθυμητό, ο χρήστης κάνει αποδοχή του προγράμματος, αποθηκεύοντας το. Το πρόγραμμα πλέον υπάρχει στη μνήμη του λογισμικού, αλλά όχι στη μνήμη της μηχανής. Ο χρήστης θα πρέπει να τερματίσει το πρόγραμμα, ώστε η οθόνη να επανέλθει στην λειτουργία της μηχανής και καλώντας το πρόγραμμα από τη μνήμη του λογισμικού να το φορτώσει στη μηχανή.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι συνθήκες κοπής που προκύπτουν από το λογισμικό μπορούν να μεταβληθούν επεμβαίνοντας στον κώδικα G.

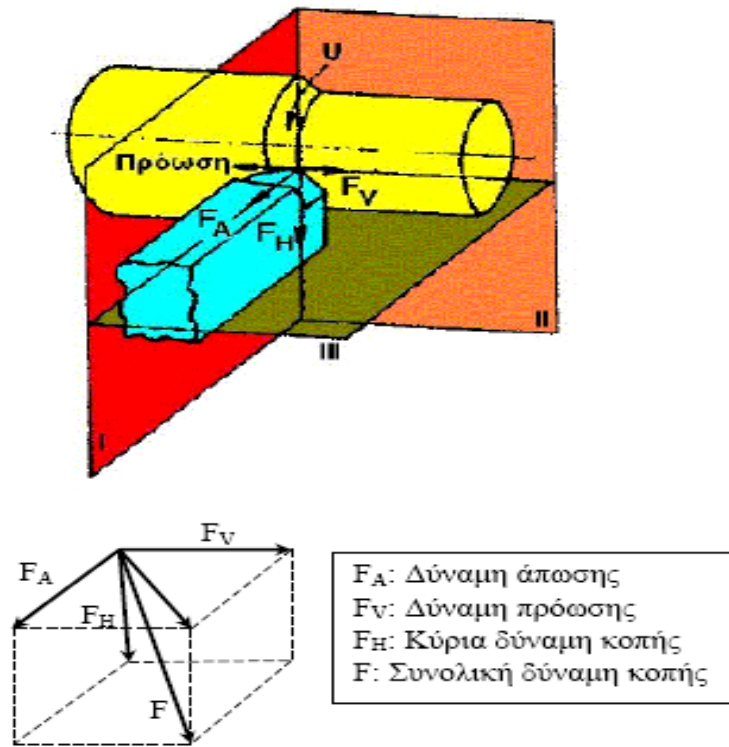
Τα τελικά δοκίμια της κατεργασίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.9.



**Σχήμα 3.9** Τελικά δοκίμια της κατεργασίας

### **3.7 Μέτρηση δυνάμεων**

Η καταγραφή των δυνάμεων πραγματοποιήθηκε μόνο για το εμπρόσθιο τμήμα της σφαίρας, όπου καταγράφηκαν δυνάμεις σε τρεις συνιστώσες, κατά  $x$ ,  $y$  και κατά  $z$ . Η δύναμη κατά την διεύθυνση  $x$  αποτελεί την κύρια δύναμη κοπής  $F_H$ , η οποία είναι και η πιο σημαντική γιατί αυτή καταναλώνει το μεγαλύτερο ποσοστό της προσφερόμενης ισχύος. Η δύναμη κατά τη διεύθυνση  $z$  είναι η δύναμη άπωσης  $F_A$  και τέλος κατά την διεύθυνση  $y$  είναι η δύναμη πρόωσης  $F_V$ , Σχήμα 3.10.

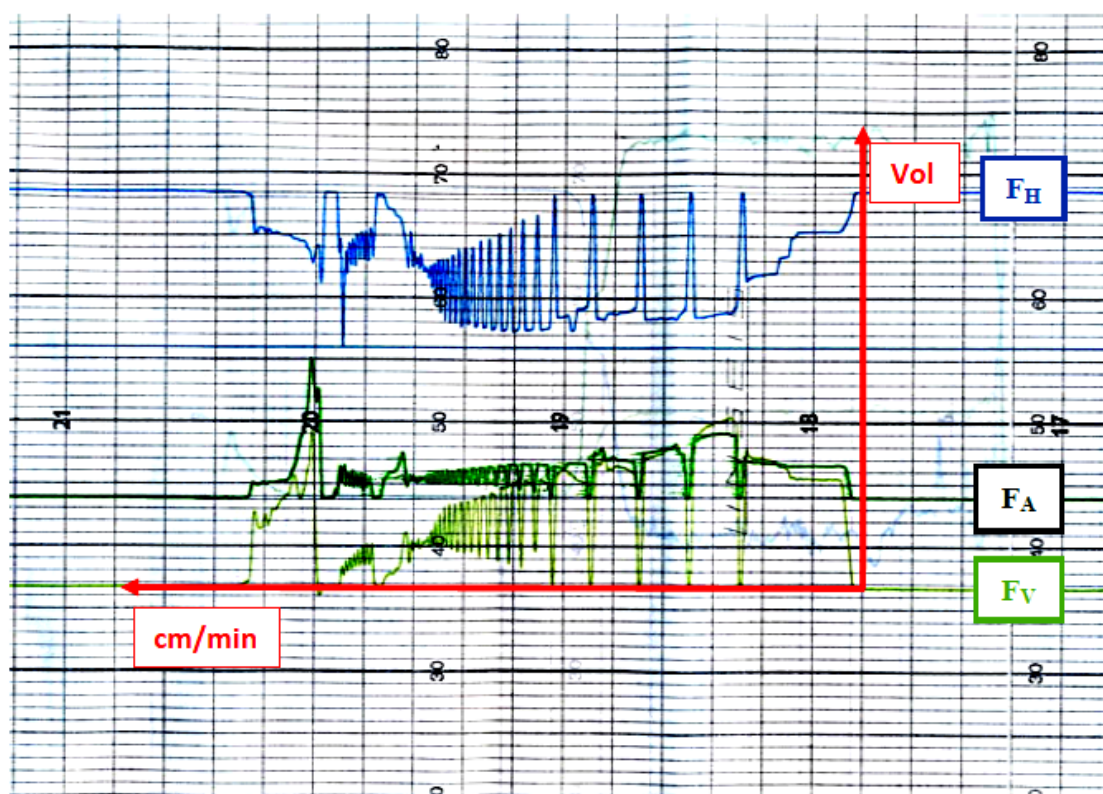


Σχήμα 3.10 Σύστημα δυνάμεων

## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

### 4.1 Πειράματα 1&2 – Αποτελέσματα

Οι δυνάμεις και η μορφή αυτών, όπως λαμβάνονται από το καταγραφικό, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1. Η ταχύτητα του χαρτιού εκτύπωσης ρυθμίστηκε στα 6 cm/min με 20 μονάδες στο διάγραμμα να αντιστοιχούν σε 1 Volt με 500N/ Volt.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα δυνάμεων

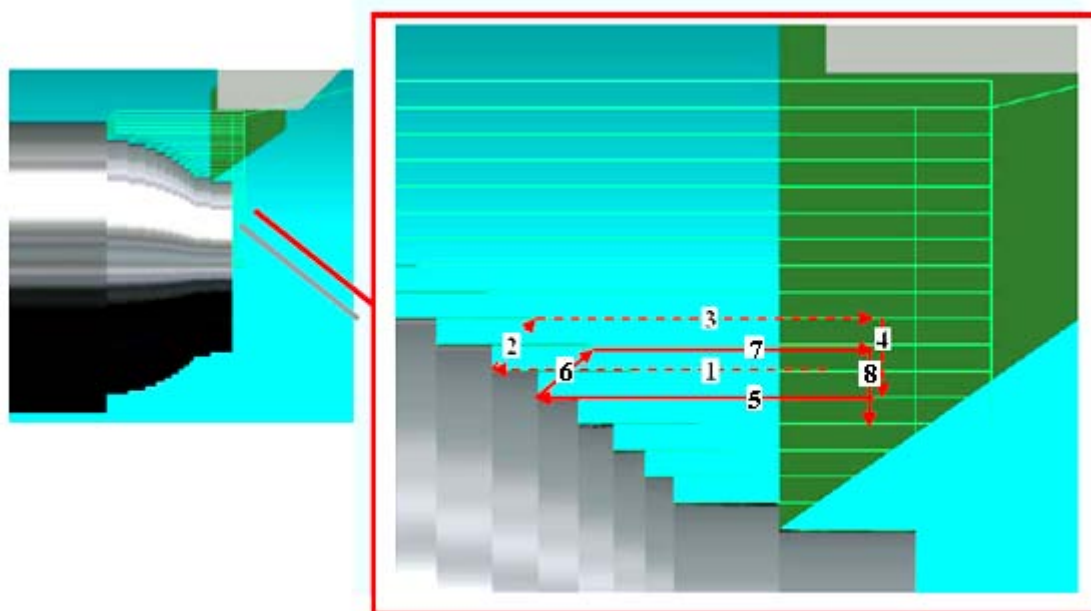
### 4.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η κοπή της σφαίρας πραγματοποιείται από το κοπτικό εργαλείο με αλληπάλληλα διαδοχικά πάσα βάθους 0.5mm. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, πριν πραγματοποιηθεί το τελικό πάσο του φινιρίσματος, το τεμάχιο να παρουσιάζει μια προσεγγιστική γεωμετρική μορφή της σφαίρας που αποτελείται από διαδοχικές διαβαθμίσεις, των οποίων το μήκος συνεχώς μειώνεται, Σχήμα 4.2. Σε αυτό το στάδιο της κατεργασίας η εργαλειομηχανή πραγματοποιεί γραμμική παρεμβολή. Με τη γραμμική παρεμβολή οι άξονες των ατράκτων κινούνται με στοιχειώδεις ορθογώνιες κινήσεις από την αρχή έως το τέλος της διαδρομής. Στην πραγματικότητα, η προγραμματιζόμενη ευθύγραμμη τροχιά διαιρείται σε ένα μεγάλο αριθμό ευθειών μικρού μήκους. Όσο περισσότερες είναι οι ευθείες αυτές, τόσο πιο πολύ προσεγγίζει η πραγματική τροχιά του εργαλείου την αντίστοιχη επιθυμητή. Θεωρητικά, όλοι οι άξονες κατεργασίας



είναι δυνατό να καθοδηγηθούν με γραμμική παρεμβολή. Έτσι, με τη χρήση γραμμικού παρεμβολέα, η μετακίνηση από μία θέση σε μία άλλη στο χώρο μπορεί να γίνει με ευκολία και με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η κατεργασία οποιασδήποτε επιφάνειας στο χώρο ή προφίλ στο επίπεδο. Όταν όμως απαιτείται πολύ καλή προσέγγιση για την παραγωγή μιας συγκεκριμένης τροχιάς, ο αριθμός των ενδιάμεσων σημείων που πρέπει να καθορισθούν, οδηγεί σε ένα πολύ μεγάλο όγκο δεδομένων υπολογισμού στον παρεμβολέα.

Στο τελικό πάσο ολοκληρώνεται η κατεργασία με την διαδικασία του φινιρίσματος, με το κοπτικό εργαλείο να κινείται ταυτόχρονα σε δύο άξονες διαγράφοντας τόξο και αποδίδοντας στο τεμάχιο το βέλτιστο γεωμετρικό σχήμα. Σε αυτό το στάδιο η εργαλειομηχανή εκτελεί κυκλική παρεμβολή. Αυτός ο τύπος της παρεμβολής περιορίζεται στο κύριο επίπεδο της επιφάνειας εργασίας.

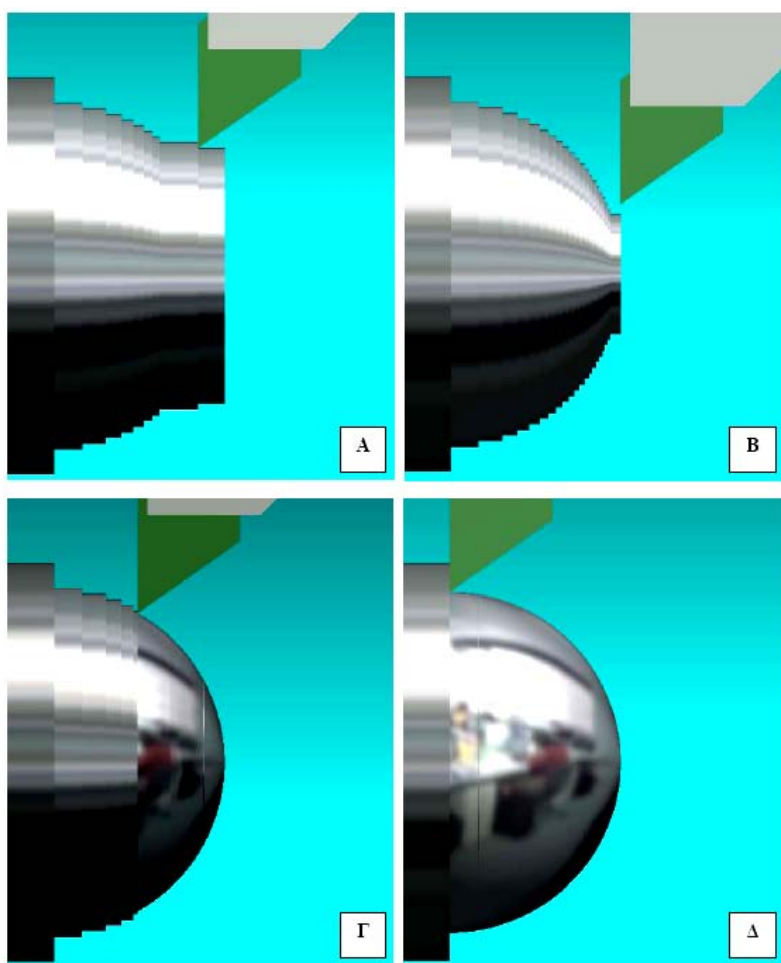


**Σχήμα 4.2** Πορεία κοπτικού εργαλείου.

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.2, καθώς το κοπτικό εργαλείο κινείται προς τον άξονα  $x$  ( $x \rightarrow 0$ ) η ενεργή διαδρομή όπου πραγματοποιείται αφαίρεση υλικού, συγκεκριμένα κατά τον άξονα  $y$  συνεχώς μειώνεται (διαδρομή 1 και 5, Σχήμα 4.2).

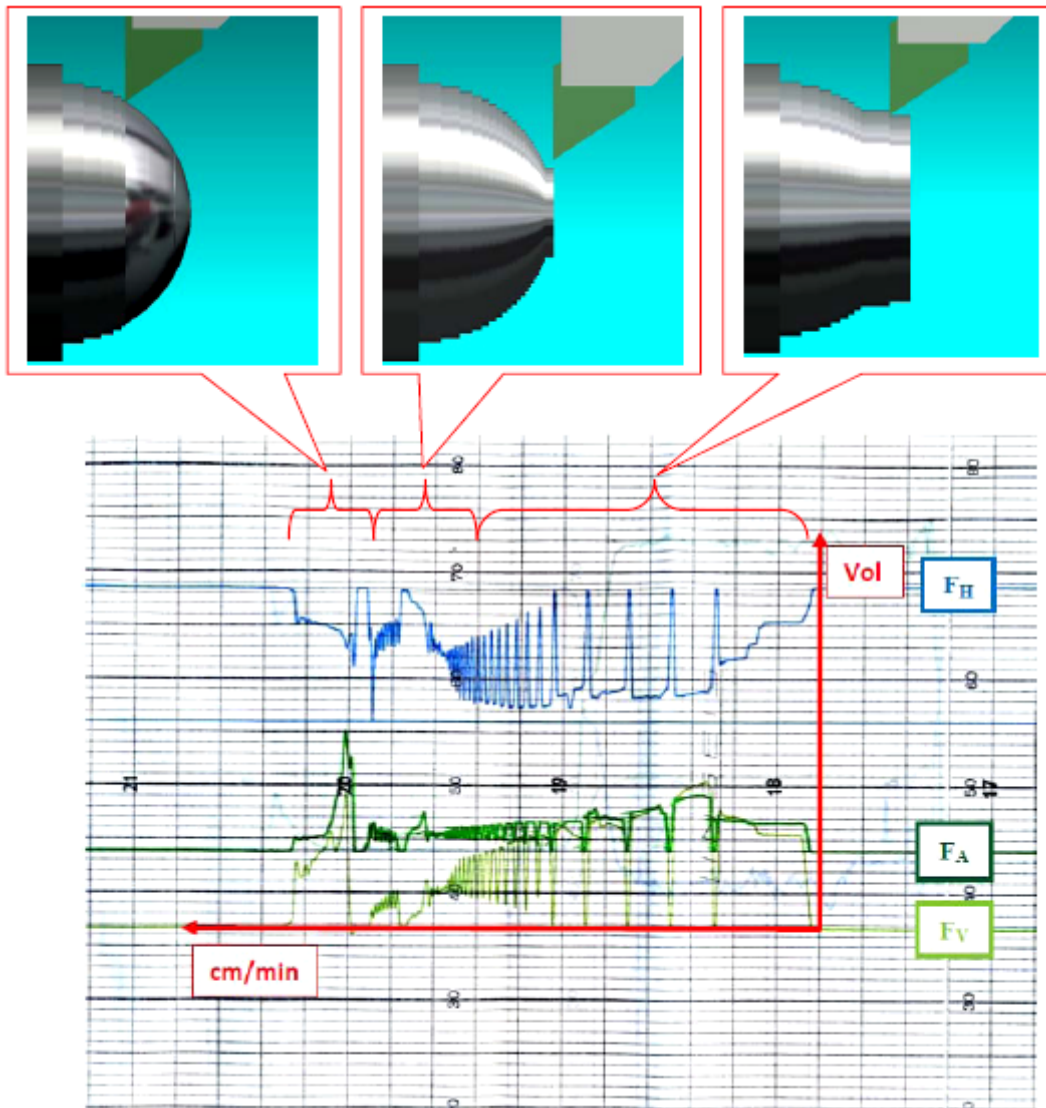
Η κοπή πραγματοποιείται με σταθερή επιφανειακή ταχύτητα  $v=140\text{m/min}$ . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα καθώς το κοπτικό εργαλείο πλησιάζει προς το κέντρο της σφαίρας, η ακτίνα  $r$  να τείνει στο μηδέν, ενώ η περιφερειακή ταχύτητα ( $v = \omega r$ ) της επιφάνειας θα πρέπει να παραμείνει σταθερή και ίση με  $140\text{m/min}$ , γεγονός που οδηγεί σε θεωρητικό επίπεδο, σε απειρισμό των στροφών, και σε πρακτικό επίπεδο στον πλήρη αριθμό στροφών της μηχανής, που φτάνει τις  $10000\text{rpm}$ .

Η κατεργασία των δοκιμίων προσομοιώθηκε στο πακέτο EDGECAM και η πορεία της κατεργασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 Πορεία κατεργασίας

Σαν αποτέλεσμα όσων αναφέρθηκαν, το διάγραμμα που καταγράφηκε μπορεί να μελετηθεί και να έχουμε ασφαλή αποτελέσματα για περιοχές όπου η κίνηση του κοπτικού εργαλείου κατά τον άξονα z είναι μεγάλη και το αντίστοιχο εύρος του μεγέθους που καταγράφεται στο χαρτί είναι αξιοποιήσιμο. Αντίθετα, οι δυνάμεις που έχουν καταγραφεί και αφορούν πάσα κοντά στο κέντρο της σφαίρας, παρουσιάζουν πολύ μικρό εύρος με αποτέλεσμα το διάγραμμα για αυτή την περιοχή να είναι πυκνό.



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα δυνάμεων

## **5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

### **5.1 Γενικά**

Οι απαιτήσεις για μηχανολογικά προϊόντα καλύτερης ποιότητας και υψηλής ακρίβειας, τα οποία μορφοποιούνται μέσω κατεργασιών με αφαίρεση υλικού, καθώς και η επιδίωξη ελαχιστοποίησης του κόστους παραγωγής σε συνδυασμό με την ολοένα αυξανόμενη ποικιλία και πολυπλοκότητα των κατεργασμένων τεμαχίων, οδήγησαν τα τελευταία χρόνια στην περαιτέρω εξέλιξη και αυτοματοποίηση των εργαλειομηχανών με ψηφιακή καθοδήγηση καθώς και των αντίστοιχων συστημάτων CAD/CAM/CAE. Ιδιαίτερα για τις κατεργασίες κοπής, που αποτελούν την κλασσική μέθοδο παραγωγής προϊόντων από μεταλλικά υλικά, τις τελευταίες δεκαετίες το υψηλό κόστος επέβαλε την αναζήτηση μεθόδων αύξησης της παραγωγικότητας, γεγονός που ισοδυναμεί με βελτιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων, ανά περίπτωση, συνθηκών κοπής. Αντίστοιχα, η εξέλιξη των υλικών των κοπτικών εργαλείων και ο μεγάλος ανταγωνισμός, επέτειναν αυτήν την ανάγκη για μεγαλύτερη παραγωγικότητα. Στο ίδιο πλαίσιο, οι αυτοματοποιημένες τεχνολογίες στο χώρο της παραγωγής (CNC, CAD/CAM, FMS, CIM), έχοντας μεγάλο κόστος εγκατάστασης, απαιτούν με την σειρά τους μεγάλους ρυθμούς παραγωγής προκειμένου να αποσβεστεί αυτό το κόστος.

Προκειμένου όλα αυτά να γίνουν εφικτά και δεδομένου ότι και τα υλικά των κοπτικών εργαλείων έχουν βελτιωθεί σε σημαντικό βαθμό, το κύριο βάρος της σχετικής έρευνας στις μηχανουργικές κατεργασίες, εστιάζεται από τη μια πλευρά στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας επιλογής βέλτιστων τεχνολογικών παραμέτρων κοπής πριν από την κατεργασία και από την άλλη στην υιοθέτηση και εισαγωγή κατάλληλων μετροτεχνικών μεθόδων ελέγχου των παραγόντων της κοπής, οι οποίες διασφαλίζουν την ποιότητα της κατεργασίας. Σήμερα λοιπόν, μεγάλο μέρος της έρευνας στην περιοχή των μηχανουργικών κατεργασιών πραγματοποιείται με στόχο την εξέλιξη μοντέλων προσομοίωσης των διαφόρων κατεργασιών κοπής και διαμόρφωσης με χρήση γλωσσών προγραμματισμού, λογισμικών CAD, λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων, έτοιμων λογισμικών προσομοίωσης κ.λπ.

### **5.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων**

Αναπτύχθηκε με σκοπό την επίλυση τασικών πεδίων στην μηχανική και με το πέρασμα των χρόνων χρησιμοποιήθηκε για προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, ρευστομηχανικής και διαφόρων άλλων προβλημάτων φτάνοντας να χρησιμοποιείται σε κατεργασίες αποβολής υλικού, μοντελοποιώντας αρχικά την ορθογωνική κοπή και καταλήγοντας σήμερα να μοντελοποιείται κάθε μορφή κατεργασία αποβολής υλικού.

Με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων διακριτοποιούνται τα συνεχή μέσα της κατεργασίας και πιο συγκεκριμένα ο χώρος που καταλαμβάνουν τα συνεχή μέσα π.χ. το κοπτικό εργαλείο χωρίζεται σε τρικομβικά, τετρακομβικά κ.λπ στοιχεία.

Τα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους μέσω των κόμβων, οι οποίοι μπορούν να έχουν δύο βαθμούς ελευθερίας εάν πρόκειται για δύο διαστάσεων πρόβλημα ή τρεις βαθμούς ελευθερίας για προβλήματα τριών διαστάσεων. Οι κόμβοι μας δίνουν πληροφορίες για τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν. Το σύνολο των στοιχείων μας δίνει το πλέγμα, το οποίο μπορεί να μην είναι ομοιόμορφο, παρουσιάζοντας αραιώσεις και πυκνώσεις, ανάλογα με την ιδιαιτερότητα και το ενδιαφέρον κάθε περιοχής.

Ακολουθεί η απόδοση ιδιοτήτων στα στοιχεία, ανάλογα με τις ιδιότητες του μέσου που μοντελοποιείται και δίνονται οριακές συνθήκες στους κόμβους. Τέλος, επιλύονται οι αλγεβρικές εξισώσεις που βρίσκονται σε μητρική μορφή υπολογίζοντας τις τιμές κάθε βαθμού ελευθερίας κάθε κόμβου.

Πλεγματοποιώντας μία συγκεκριμένη μορφή ενός δοκιμίου, όσο το μέγεθος των στοιχείων μικραίνει, το πλέγμα γίνεται πυκνότερο προσεγγίζοντας την πραγματική γεωμετρική μορφή του δοκιμίου με μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι, παρέχονται πιο αξιόπιστα και αναλυτικά αποτελέσματα, θυσιάζοντας όμως την ταχύτητα επίλυσης. Αντίθετα, επιλογή μεγάλων στοιχείων οδηγεί σε γρηγορότερη επίλυση, αλλά με κίνδυνο να χάνεται η σταθερότητα και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Γίνεται φανερό λοιπόν, ότι η πλεγματοποίηση θα πρέπει να γίνεται σταθμίζοντας τους παράγοντες ταχύτητας και ακρίβειας.

Η παραπάνω διαδικασία υλοποιείται σε εμπορικά πακέτα, κατάλληλα για κατεργασίες κοπής και ένα από αυτά είναι το AdvantEdge. Η μοντελοποίηση πραγματοποιείται σε τρία στάδια: Το πρώτο στάδιο ονομάζεται προεπεξεργασία (pre-processing), στο οποίο πραγματοποιείται η εισαγωγή δεδομένων, ακολουθεί η διαδικασία επίλυσης (solver) και τέλος το στάδιο της μετεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων (post-processing).

Για την επίλυση των εξισώσεων και τον υπολογισμό των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν, εφαρμόζονται συνήθως δύο αριθμητικοί τρόποι: Η μοντελοποίηση Lagrange και Euler.

Η μέθοδος Lagrange χρησιμοποιείται κυρίως στα προβλήματα με μηχανικά στερεά και για το λόγο αυτό προτιμάται για την μοντελοποίηση των κατεργασιών κοπής, όπου τα κομμάτια πλεγματοποιούνται ακριβώς στα όριά τους, με το μοντέλο του υλικού να είναι ελαστοπλαστικό, πλαστικό ή ρευστοπλαστικό και εξηγεί επαρκώς τα θερμικά φαινόμενα, όπως η μόνωση, όταν έχουμε επικαλύψεις στα εργαλεία κοπής.

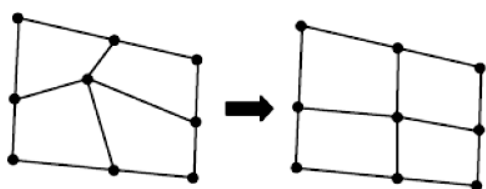
Η μέθοδος Euler μοντελοποιεί καλύτερα περιπτώσεις που έχουμε ροή ρευστού σε μεγάλο χώρο π.χ. γενικά για κατεργασίες διαμόρφωσης, καθώς πλεγματοποιείται

όλος ο χώρος. Φυσικά, παρόλο που με τη μέθοδο Lagrange έχουμε ακριβέστερη εικόνα της μορφή του αποβλήτου, κάτι πολύ σημαντικό για την μελέτη της κατεργασίας, που δεν μας προσφέρει η μέθοδος Euler, ειδικά για το διακοπτόμενο απόβλητο παρουσιάζεται πρόβλημα από τη μεγάλη πλαστική παραμόρφωση, η οποία παραμορφώνει υπερβολικά το πλέγμα και έτσι απαιτείται συνεχής επαναπροσδιορισμός του πλέγματος.

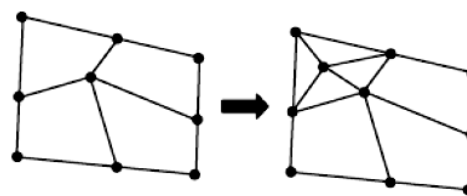
Παράλληλα, πολλές φορές στην περιοχή επαφής τεμαχίου - εργαλείου παρατηρείται μη επαρκής διαχωρισμός των κόμβων, γεγονός που καθιστά απαραίτητο το πυκνό πλέγμα στις επιφάνειες επαφής. Μία άλλη λύση λοιπόν, που μελετάται είναι η χρήση το μεγαλύτερο μέρος και Euler για την επιφάνεια επαφής της κοπτικής ακμής, το μοντέλο Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE), με το πλέγμα να κινείται στο χώρο, γεγονός που απαιτεί μεγάλη ακρίβεια και χρόνο υπολογισμών. Σήμερα πάντως, χρησιμοποιείται κυρίως η βελτιωμένη έκδοση της μεθόδου Lagrange, κατά την οποία το πλέγμα κινείται μαζί με το τεμάχιο και το εργαλείο.

Όλες οι προσπάθειες μοντελοποίησης της μορφής του αποβλήτου στηρίζονται στον τρόπο διαχωρισμού αυτού από το τεμάχιο. Η μέθοδος Lagrange 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 μία απόσταση τον κόμβο του τεμαχίου και ικανοποιούνται ορισμένες φυσικές παράμετροι (θερμοκρασίας και τάσεων), αυτός χωρίζεται σε δύο κόμβους.

Επίσης, όπως είπαμε, η μέθοδος Lagrange έχει το μειονέκτημα της υπερβολικής παραμόρφωσης του πλέγματος και έτσι απαιτείται ο συνεχής επαναπροσδιορισμός 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. Σχηματικά φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 5.1 και 5.2, πως λειτουργούν αυτές οι τεχνικές «προσαρμόσιμου» πλέγματος για τη μέθοδο Lagrange και ALE.



Σχήμα 5.1 Ομαλοποίηση πλέγματος



Σχήμα 5.2 Πύκνωση πλέγματος

Το κυριότερο πρόβλημα που μας απασχολεί με τη μοντελοποίηση των κατεργασιών κοπής είναι αυτό που 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  $\mu$  λαμβάνεται σταθερός για μικρές τάσεις, που όμως σπάνια συναντιούνται στις κατεργασίες κοπής. Σε αυτές, ο συντελεστής τριβής δεν είναι σταθερός και εξαρτάται από την ταχύτητα, τη θερμοκρασία και τις δυνάμεις κοπής, σε άγνωστο βαθμό μέχρι στιγμής. Κάθε μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιεί τη δική της τεχνική υπολογισμού του συντελεστή τριβής και μόνο το αποτέλεσμα καθορίζει την ορθότητα των απλοποιήσεων και οριακών συνθηκών που γίνονται.

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, όπως είναι τα θερμοδυναμικά. 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 μια κατεργασίας κοπής μπορεί να προκύψουν από:

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

### 5.3 Λογισμικό

Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο διαθέτει το Εργαστήριο Κατεργασιών των Υλικών :

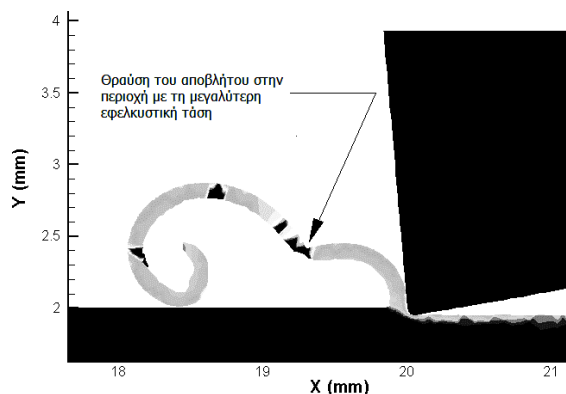
- ADVANTEDGE (έκδοση 5.4), H/Y Intel Core 2 Duo, 2.66 GHz, 1.87 GB RAM.

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 προ τη γωνία, κατά την οποία η τάση παίρνει μία μέγιστη τιμή. Όταν η τιμή αυτή ξεπεραστεί, τότε γίνεται διπλασιασμός των κόμβων στην άκρη της ρωγμής και έτσι δημιουργείται το απόβλιττο.

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



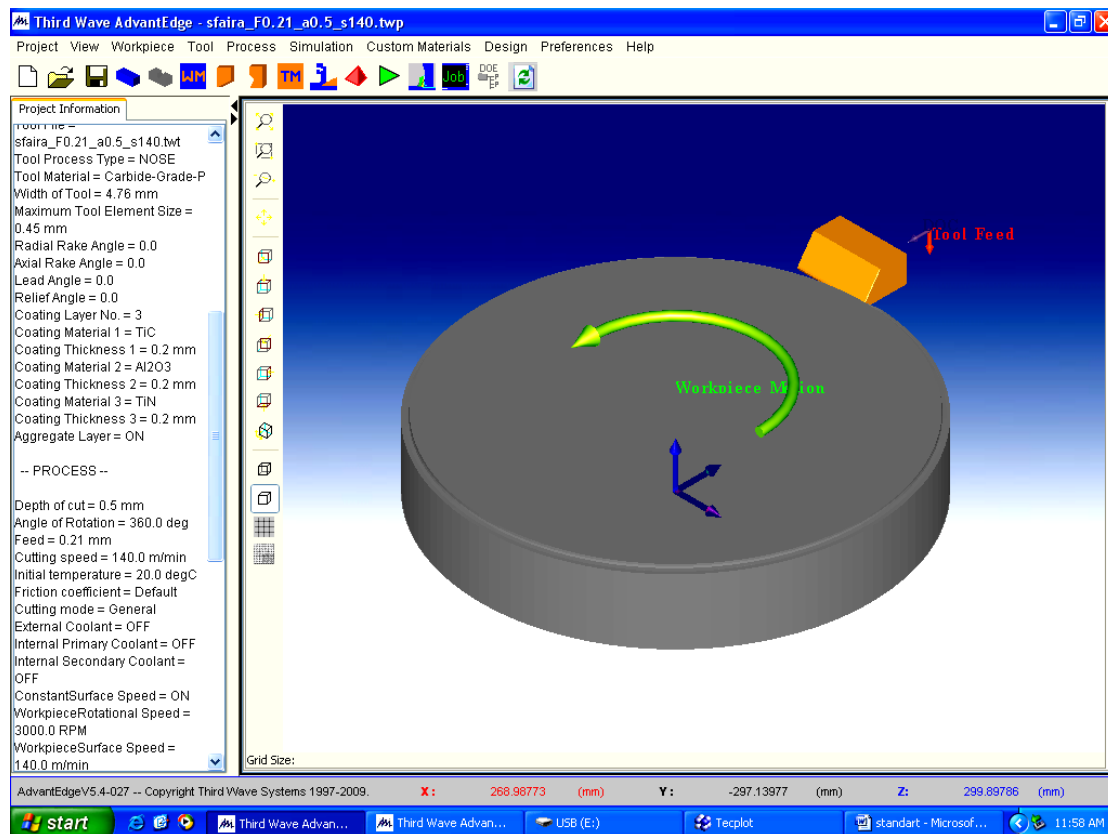
Σχήμα 5.3 Μοντέλο θραύσης αποβλήττου

## 5.4 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, Σχήμα 5.4. 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.

Η κατεργασία της σφαίρας πραγματοποιείται σε διαδοχικά πάσα βάθους 0.5 mm και για το λόγο αυτό κρίνεται ότι η κατάλληλη επιλογή για την προσομοίωση της είναι η περιφερειακή τόννευση.





Σχήμα 5.4 Βασικό παράθυρο εισαγωγής δεδομένων

#### 5.4.1 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 ορίζοντας μορφή, γωνία ελευθερίας, καμπυλότητα μύτης κοπτικού εργαλείου κ.λπ. Ο χρήστης, εκτός των τυποποιημένων κοπτικών, μπορεί να εισάγει αρχείο CAD για πιο σύνθετα και μη τυποποιημένα κοπτικά εργαλεία ή ακόμα να σχεδιάσει μορφή κοπτικών στο ίδιο το πρόγραμμα. Μία πολύ σημαντική λειτουργία είναι και η επιλογή επιστρώσεων. Το πρόγραμμα παρέχει δυνατότητα μέχρι τρεις επιστρώσεις από TiC, TiN, TiAlN και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, το υλικό καθώς και η επιστρώσεις του κοπτικού εισάγονται στο πρόγραμμα βάση των στοιχείων του κατασκευαστή του κοπτικού εργαλείου, Παράγραφος 3.4.

Στις επιλογές του κοπτικού εργαλείου, ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει το πλέγμα μεταβάλλοντας το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων, αλλάζοντας το μέγεθος μικρότερων στοιχείων (Minimum Element Size), τα οποία βρίσκονται κοντά στην ακμή του κοπτικού, 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

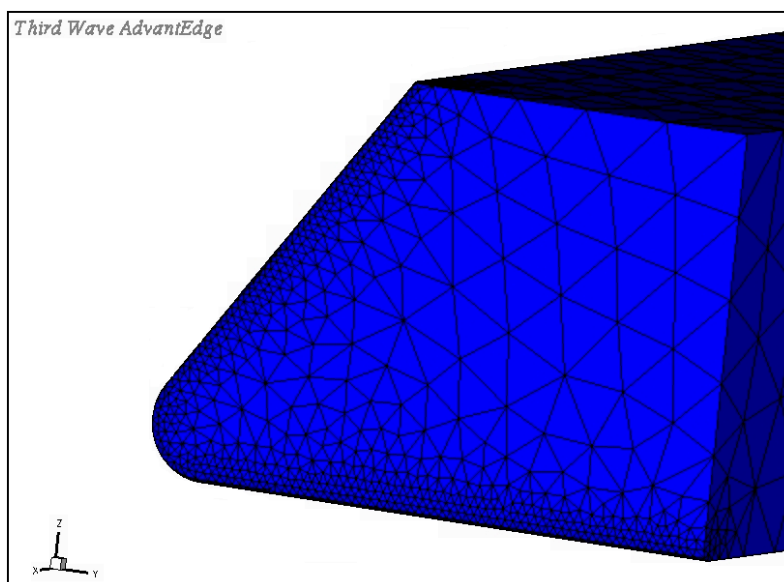
περιοχές από την ακμή και γενικά σε περιοχές που δεν παρουσιάζουν άμεσο ενδιαφέρον.

Τροποποίηση μπορεί να γίνει και στον τρόπο της εξομάλυνσης του πλέγματος (mesh grading), που καθορίζει την μετάβαση από τα μικρότερα στοιχεία προς τα μεγαλύτερα. Η εξομάλυνση του πλέγματος παίρνει τιμές από 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 το 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 μεταβάλλοντας το συντελεστή Segments per Edge από 0.2 έως την 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 βάση των προεπιλεγμένων τιμών του κατασκευαστή.



Σχήμα 5.5 Πλέγμα κοπτικού εργαλείου

#### 5.4.2 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, το τεμάχιο είναι κύλινδρος και οι μόνες επιλογές που μπορούν να γίνουν είναι η επιλογή υλικού και οι

διαστάσεις του κυλίνδρου. Το υλικό, Ti-6Al-4V, επιλέγεται από αντίστοιχη εργαλειοθήκη το προγράμματος, το οποίο μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για τη χημική σύσταση και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Η επιλογή της διαμέτρου του τεμαχίου επιλέχτηκε  $D=30\text{mm}$  αν και δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα, γιατί έχει επιλεγεί σταθερή ταχύτητα κοπής κατά την προσομοίωση.

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

Συγχρόνως ορίζεται η εξομάλυνση του πλέγματος (mesh grading), που καθορίζει τη μετάβαση από τα μικρά στοιχεία της ακμής στα μεγάλα, τα οποία βρίσκονται σε πιο πίσω θέσεις, με την τιμή της να κυμαίνεται από 0.1 μέχρι 1. Η τιμή 0.1 πραγματοποιεί μέγιστη ομαλή μετάβαση με δραματική αύξηση του χρόνου επίλυσης, ενώ η τιμή 1 οδηγεί σε απότομη μετάβαση με μικρό χρόνο επίλυσης αλλά μικρότερη σταθερότητα και 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 την 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.

Πολύ βασικές και απαραίτητες για την υλοποίηση του μοντέλου είναι οι συνθήκες κοπής, οι οποίες δίνονται από το χρήστη. Αυτές είναι: η πρόωση  $F$  (mm/rev), το βάθος κοπής  $a$  (mm) και η ταχύτητα κοπής  $V$  (m/min).

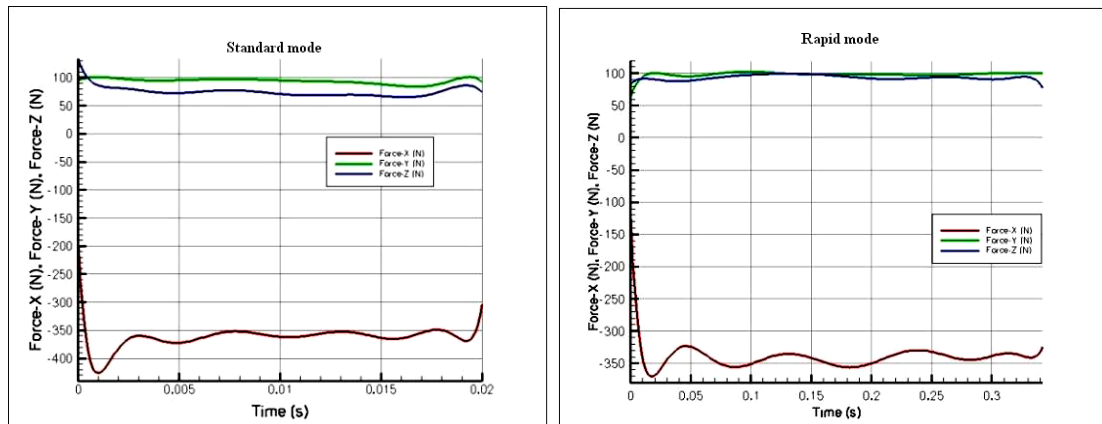
Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η εισαγωγή των δεδομένων, που αφορούν στο τεμάχιο και στο κοπτικό εργαλείο.

### 5.4.3 Βασικές επιλογές μοντελοποίησης

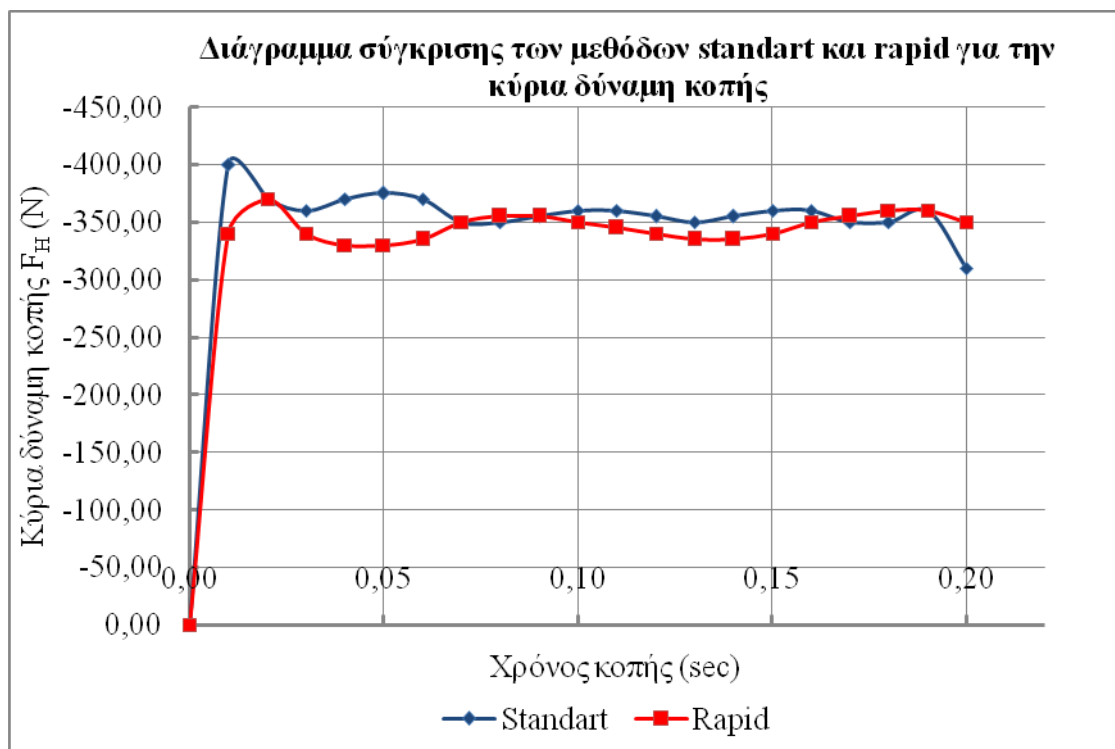
Βασικό σημείο στο στάδιο της προεπεξεργασίας είναι οι επιλογές της προσημείωσης, οι οποίες καθορίζουν το χρόνο επίλυσης και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Το πρόγραμμα δίνει δυνατότητα ταχείας (Rapid mode) και κανονικής (Standard mode) επίλυσης. 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.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την διάρκεια της εκμάθησης του πακέτου, το μοντέλο επιλύθηκε με Standard mode και χρειάστηκε περίπου έξι μέρες σε αντίθεση με την επιλογή Rapid mode, που χρειάστηκε περίπου τρεις, χωρίς να υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.6.



**Σχήμα 5.6** Σύγκριση αποτελεσμάτων του μοντέλου με χρήση Standard mode και Rapid mode.



**Σχήμα 5.7** Διάγραμμα σύγκρισης των μεθόδων standart και rapid για την κύρια δύναμη κοπής

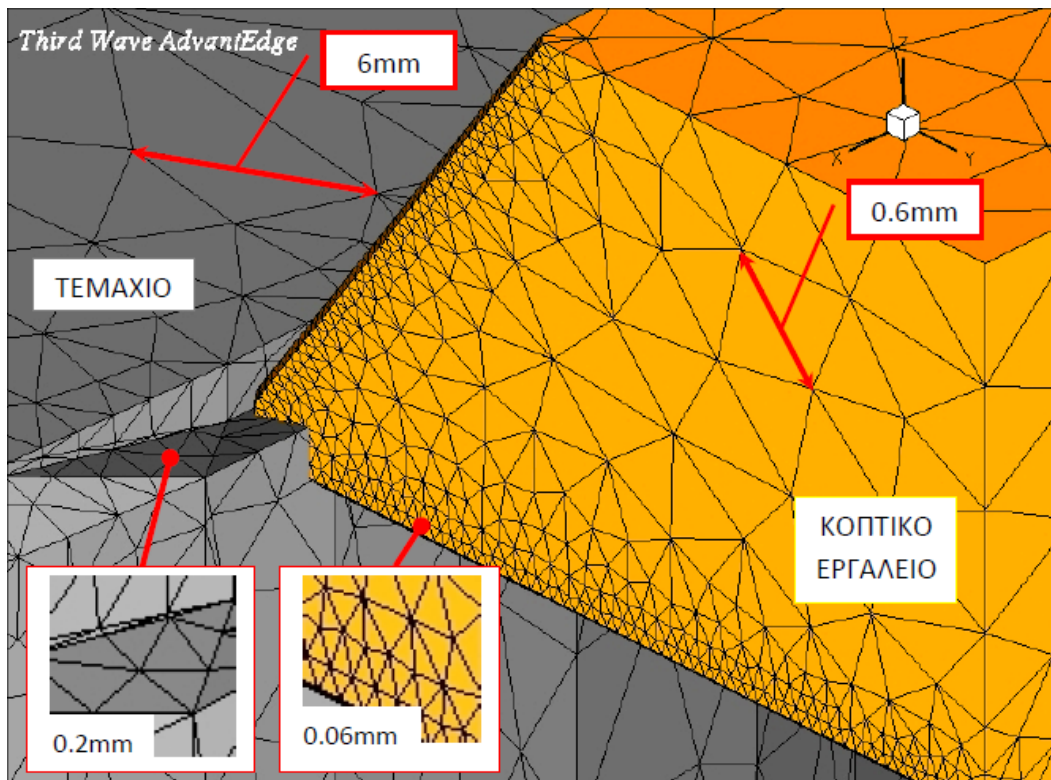
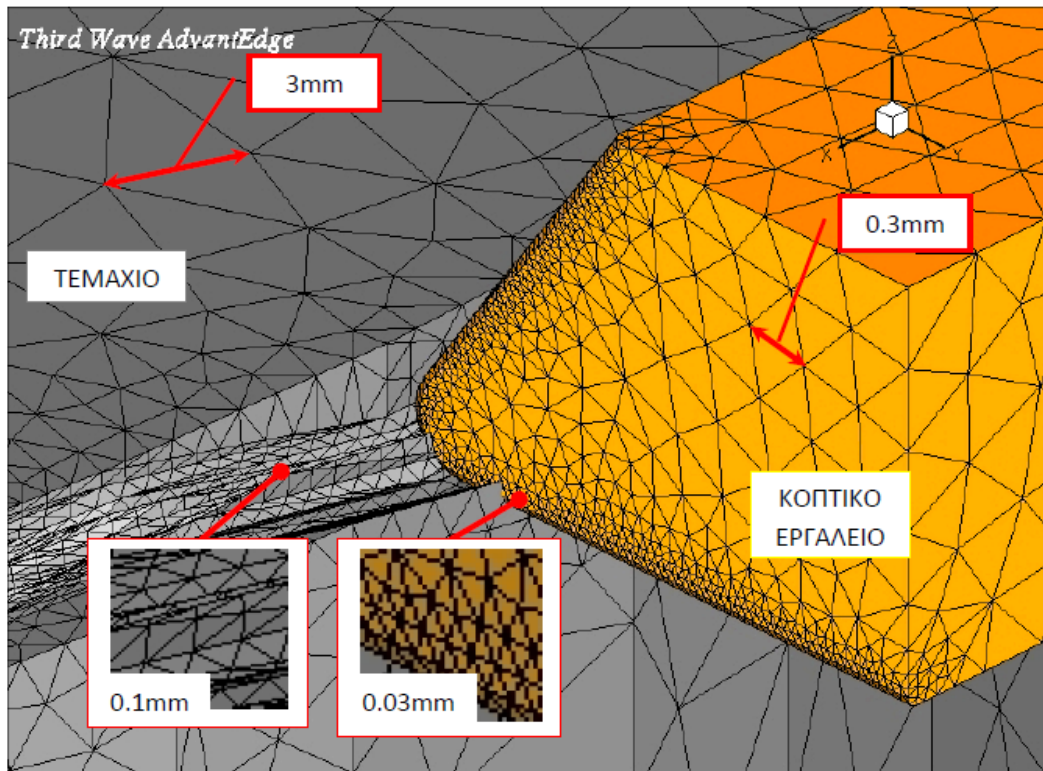
Υπολογίζοντας το μέσο όρο των δύο μεθόδων, προκύπτει ότι η κύρια δύναμη κοπής για την Standart μέθοδο είναι -358.5 N και για την μέθοδο Rapid -365.25 N, παρουσιάζοντας μια μεταβολή 1,85%. Η μεταβολή αυτή, μπορεί να θεωρηθεί αρκετά μικρή, επιτρέποντας να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Rapid ελαχιστοποιώντας έτσι

σημαντικά τον χρόνο επίλυσης σε τρεις μέρες έναντι έξι ημερών, που απαιτούνταν για τη Standart μέθοδο.

Επίσης, κατά την διαδικασία της παραμετρικής επίλυσης, όπου επιλύθηκαν τέσσερα επιπλέον μοντέλα, απαιτήθηκαν δώδεκα ημέρες με την μέθοδο Rapid έναντι είκοσι τεσσάρων ημερών, που θα χρειάζονταν αν τα μοντέλα επιλύονταν με την μέθοδο Standart.

Μικρές αλλαγές μπορούν να μεταβάλουν σημαντικά την απόδοση της προσομοίωσης και της ακρίβειας, η επιλογή αυτή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί πολύ προσεκτικά. Είναι πάντα καλή πρακτική να εκτελείται για πρώτη φορά μια προσομοίωση με τις προεπιλεγμένες τιμές των παραμέτρων. Οι προεπιλεγμένες τιμές έχουν επιλεγεί για την ισορροπία του χρόνου υπολογισμού και την ακρίβεια.

Η ρύθμιση του μεγέθους των ελάχιστων (Minimum Element Size) και των μέγιστων (Maximum Element Size) στοιχείων μπορεί να γίνει και σε αυτό το βήμα της μοντελοποίησης. Σε γενικές γραμμές, ο χρήστης θα πρέπει να μειώσει τις παραμέτρους για τον έλεγχο του πλέγματος, αν το αντικείμενο εργασίας ή η γεωμετρία του εργαλείου είναι πολύ μικρότερη από τις προκαθορισμένες τιμές. Η προσομοίωση στο Σχήμα 5.7.α παρουσιάζει το πλέγμα του τελικού μοντέλου, το οποίο διατηρεί τις αρχικές επιλογές του πακέτου, ενώ στο Σχήμα 5.7.β παρουσιάζεται ένα δοκιμαστικό μοντέλο, του οποίου οι προεπιλεγμένες τιμές έχουν διπλασιαστεί. Ο χρόνος επίλυσης αυτού του μοντέλου ήταν περίπου δύο ημέρες με Standard mode, σε αντίθεση με το χρόνο του τελικού μοντέλου που με χρήση Rapid mode απαιτήθηκαν τρεις μέρες.

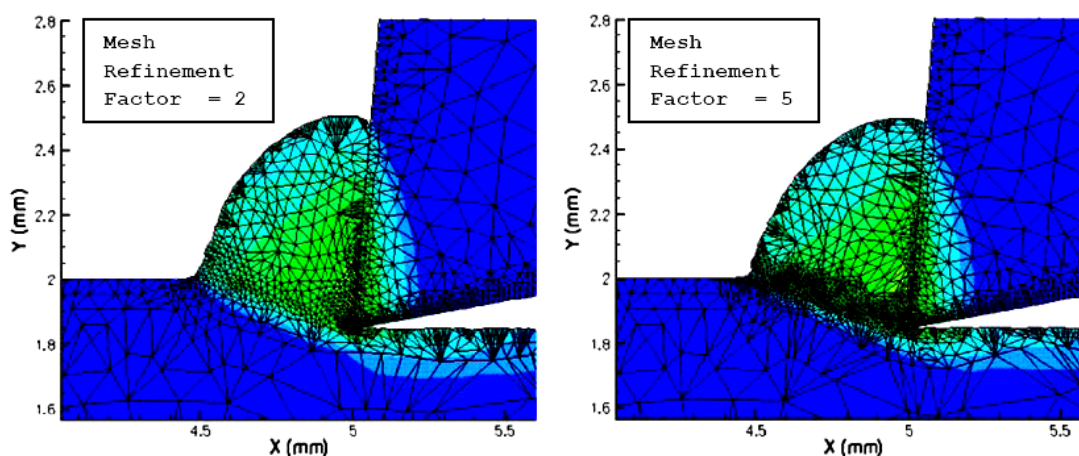


Σχήμα 5.7 α) Πλέγμα με διπλασιασμό των προεπιλεγμένων τιμών και β) πλέγμα με διατήρηση των προεπιλεγμένων τιμών

Η ακτίνα της κοπτικής ακμής καθορίζει το ελάχιστο μέγεθος των στοιχείων στην περιοχή, που γειτνιάζει με την κοπτική ακμή. Αυτό θα είναι η αναλογία του ελάχιστου μεγέθους στοιχείου, που θα έχει η κοπτική ακμή του εργαλείου. Η προκαθορισμένη τιμή των 0,6 χιλιοστών είναι επαρκή για τις περισσότερες προσομοιώσεις.

Ένας άλλος παράγοντας, ο οποίος χρησιμοποιείται για το καθορισμό του ελάχιστου μεγέθους του στοιχείου είναι ο συντελεστής πρόωσης (Feed Fraction to Determine Minimum Element Size). Όσο μικρότερη είναι η πρόωση, τόσο πιο πυκνό γίνεται και το πλέγμα.

Ο συντελεστής εξομάλυνσης (Mesh Refinement Factor) του πλέγματος καθορίζει την δραστηριότητα της εξομάλυνσης κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης. Κάνοντας την εξομάλυνση του πλέγματος περισσότερο δραστική, το πλέγμα γίνεται πιο πυκνό αυξάνοντας έτσι τον αριθμό των κόμβων στην προσομοίωση και κατά συνέπεια αυξάνεται και ο υπολογιστικός χρόνος. Η προσομοίωση στα αριστερά, Σχήμα 5.8 χρησιμοποιεί την προεπιλογή του πακέτου που είναι η τιμή 2, ενώ στην προσομοίωση στα δεξιά έχει επιλεγεί η τιμή 5, εμφανίζοντας ένα πολύ πυκνότερο πλέγμα κοντά στο εργαλείο και γύρω από περιοχές με υψηλή φόρτιση.



**Σχήμα 5.8** Επίδραση του συντελεστή εξομάλυνσης πλέγματος

Τέλος, υπάρχει και η δυνατότητα ρύθμισης του συντελεστή εκτράχυνσης (Mesh Coarsening Factor), ο οποίος εάν αυξηθεί οδηγεί σε πύκνωση του πλέγματος και ως επακόλουθο, σε αύξηση του χρόνου επίλυσης.

Συνοψίζοντας, για τις επιλογές τροποποίησης του πλέγματος διαπιστώνουμε ότι όσο το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων μικραίνει, το πλέγμα γίνεται πυκνότερο, η γεωμετρία αποδίδεται με μεγαλύτερη ακρίβεια από το πλέγμα, τα αποτελέσματα έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά όμως αυξάνεται ο χρόνος επίλυσης σημαντικά. Ο χρόνος επίλυσης και η ποιότητα των αποτελεσμάτων θα πρέπει να σταθμίζονται

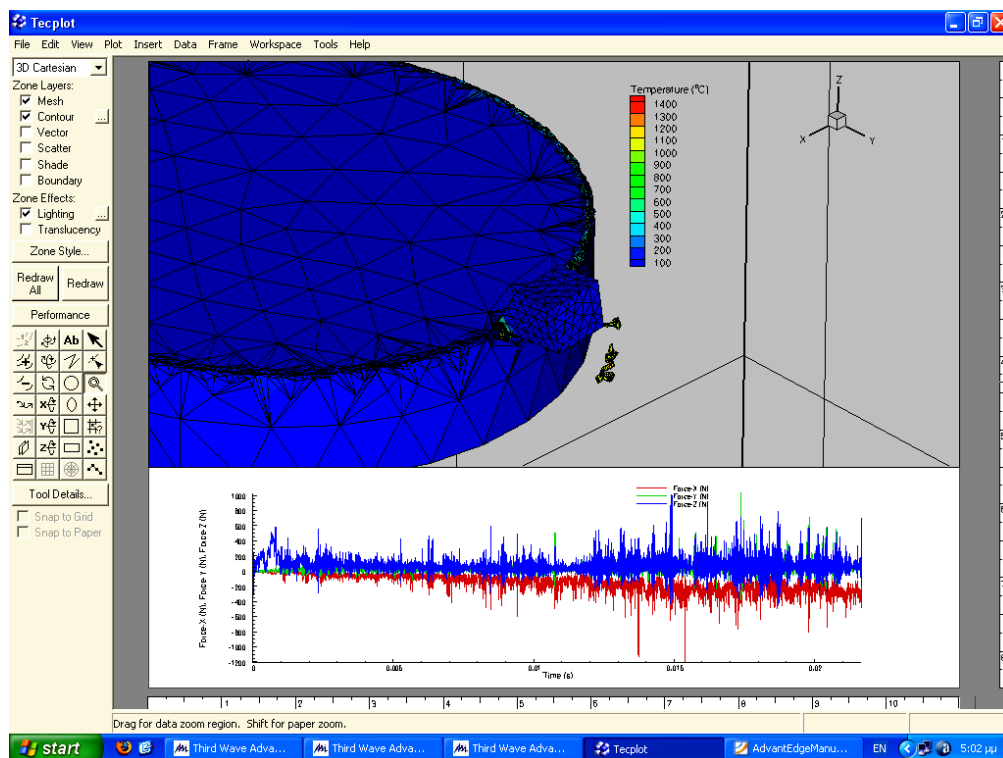
κατάλληλα, ώστε να μπορούμε να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα σε αποδεκτό χρόνο.

## 5.5 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 συνοδεύει και είναι ενσωματωμένο στο AdvantEdge και αποτελεί το τρίτο στάδιο της ανάλυσης, το στάδιο της μετεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων (post-processing).

Κατά την ολοκλήρωση της ανάλυσης αποθηκεύονται 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: 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, Σχήμα 5.9. 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 φιλτράρισμα τους ( Tools → AdvanEdge Quick Analysis → Display Options).



Σχήμα 5.9 Βασικό παράθυρο του Tecplot



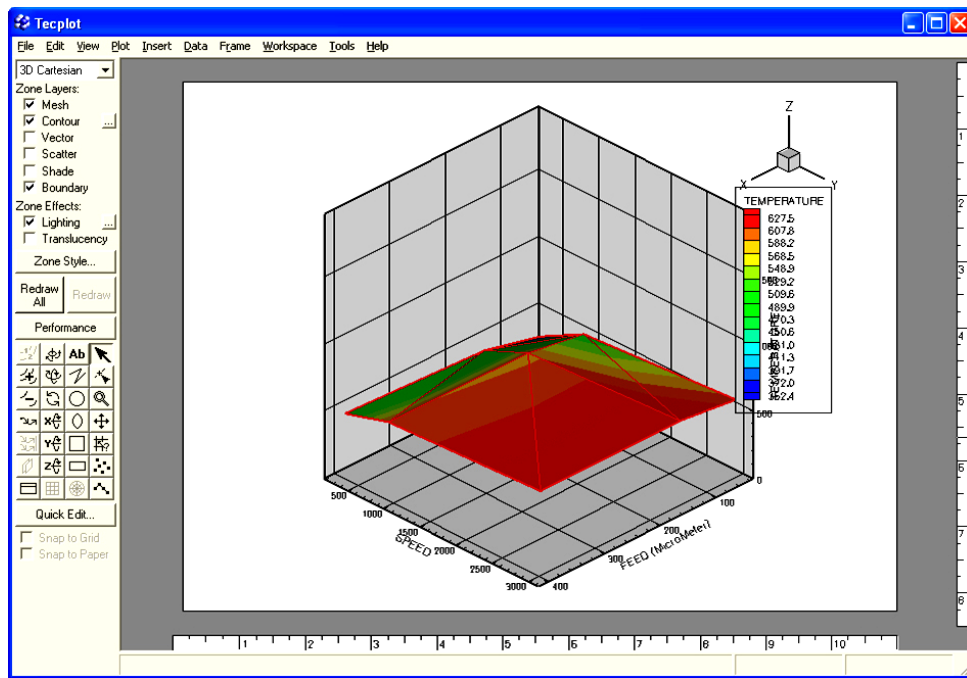
Βασικό παράθυρο του Tecplot είναι το AdvanEdge Quick Analysis, που ενεργοποιείται από την επιλογή Tools, η οποία βρίσκεται στην βασική γραμμή εργαλείων, στο επάνω μέρος του παραθύρου.

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

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

Το πρόγραμμα, δίνει την δυνατότητα στον 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 παρουσιάζονται η μεταβολή ενός μεγέθους συναρτήσει δύο μεταβλητών, π.χ. της θερμοκρασίας συναρτήσει της ταχύτητας κοπής και της πρόωσης, Σχήμα 5.10.



**Σχήμα 5.10** Τρισδιάστατο γράφημα παρουσίασης του τρόπου εξάρτησης ενός μεγέθους συναρτήσει δύο άλλων.

## 5.6 Προβλήματα

Κατά την διάρκεια της μοντελοποίησης εμφανίστηκαν κάποια προβλήματα, τα οποία δεν ήταν δυνατόν να επιλυθούν, είτε γιατί δεν μπορούμε να γνωρίζουμε τον τρόπο λειτουργίας που έχει ορίσει ο κατασκευαστής του προγράμματος, είτε γιατί το ίδιο το πρόγραμμα αγνοεί για λόγους απλότητας παραμέτρους, οι οποίες θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα, είτε ακόμα για λόγους που δεν μπορούσαν να προβλεφτούν ή δεν ελήφθησαν υπόψη. Στη συνέχεια, αναφέρονται ενδεικτικά μερικά από αυτά:

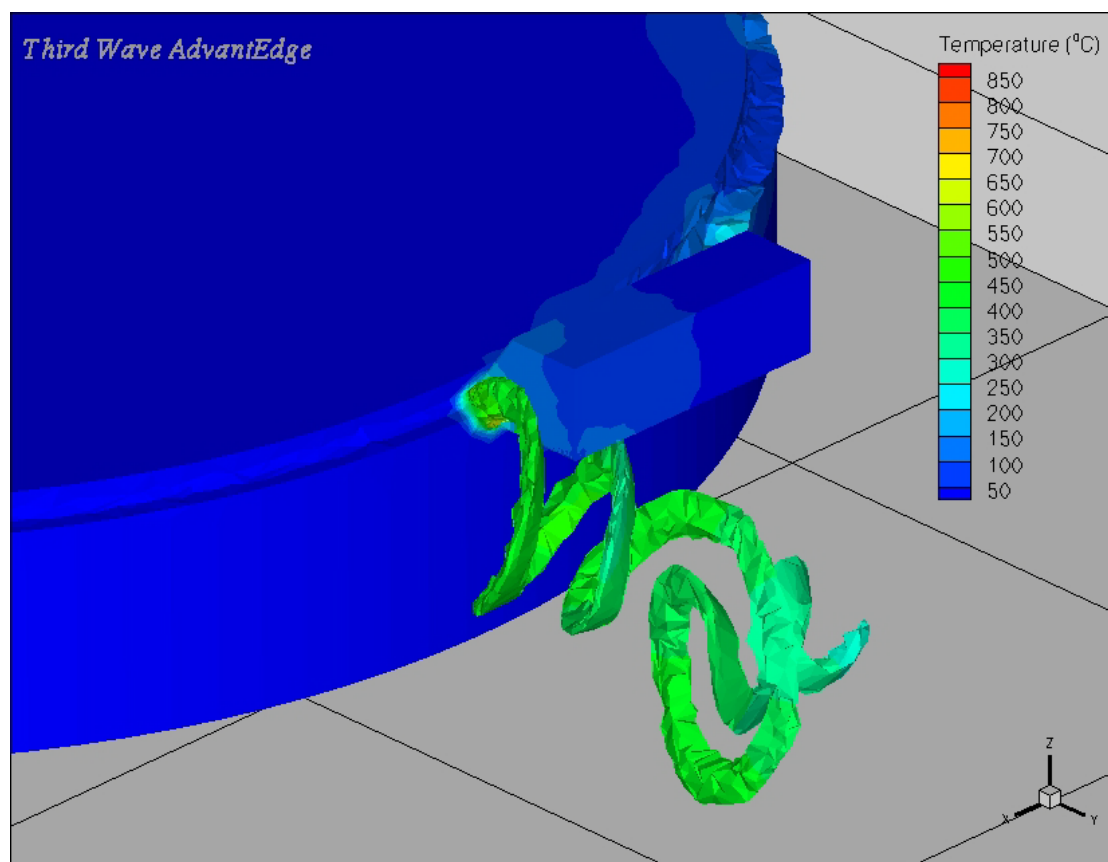
- Το πακέτο που διατίθεται στο εργαστήριο του τομέα δεν διαθέτει δυνατότητα χρήσης ψυκτικού υγρού κατά την τρισδιάστατη μοντελοποίηση, σε αντίθεση με την πειραματική διαδικασία όπου έγινε εκτεταμένη χρήση ψυκτικού υγρού.
- Στο πρόγραμμα χρησιμοποιείται ένα απλοποιημένο μοντέλο τριβής και ολίσθησης, ώστε η επίλυση να πραγματοποιείται σε συντομότερο χρονικό διάστημα έχοντας όμως μικρότερη ακρίβεια.
- Η λειτουργία AE Data Set Analysis και εξαγωγή συμπερασμάτων δεν ήταν δυνατή λόγω δυσλειτουργίας που παρουσίασε αυτή.
- Το πρόγραμμα έχει δυνατότητα να επιλύει ταυτόχρονα ένα δυσδιάστατο και ένα τρισδιάστατο μοντέλο, χωρίς να γίνεται πλήρη χρησιμοποίηση της υπολογιστικής δύναμης, ενώ η λειτουργία για την επιλογή δύο επεξεργαστών, που διαθέτε ο υπολογιστής, όταν επιλέχτηκε, δεν επέτρεπε την επίλυση του μοντέλου.

**Θα πρέπει να επισημανθεί ότι το πρόγραμμα κατάφερε να δώσει αποδεκτά αποτελέσματα για την κύρια δύναμη κοπής  $F_H$  και για την δύναμη άπωσης  $F_A$ , ενώ παρουσίασε αδυναμία για την προσέγγιση της δύναμης πρόωσης  $F_V$ .**

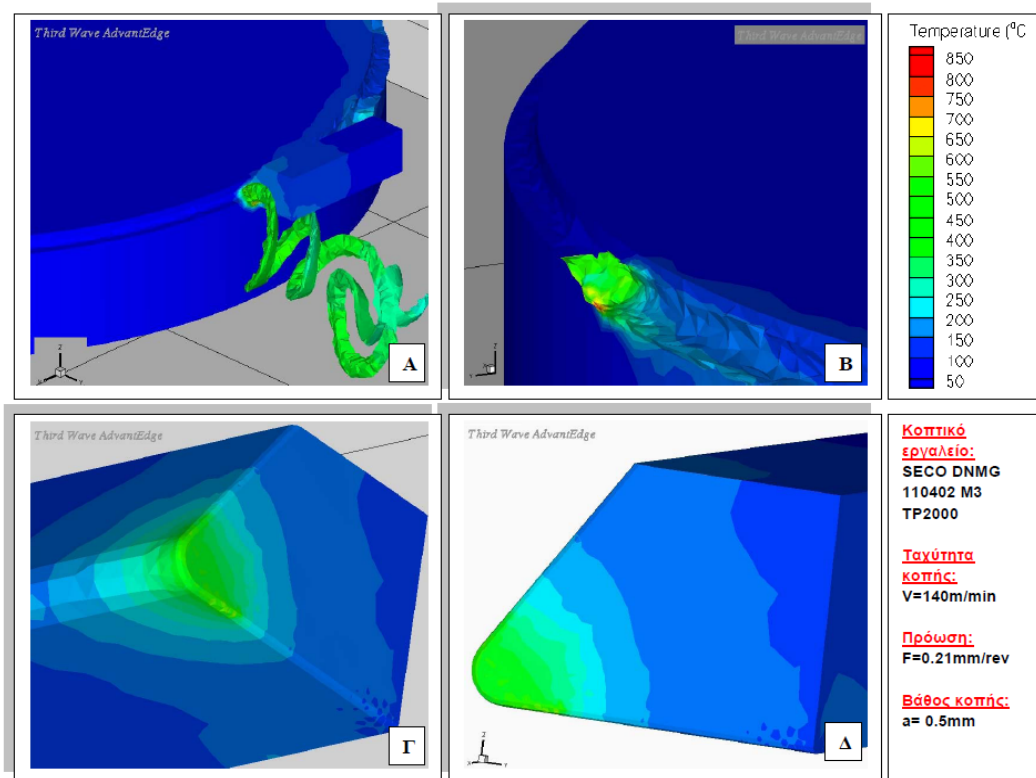
## 6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

### 6.1 Αποτελέσματα μοντελοποίησης πρώτου δοκιμίου

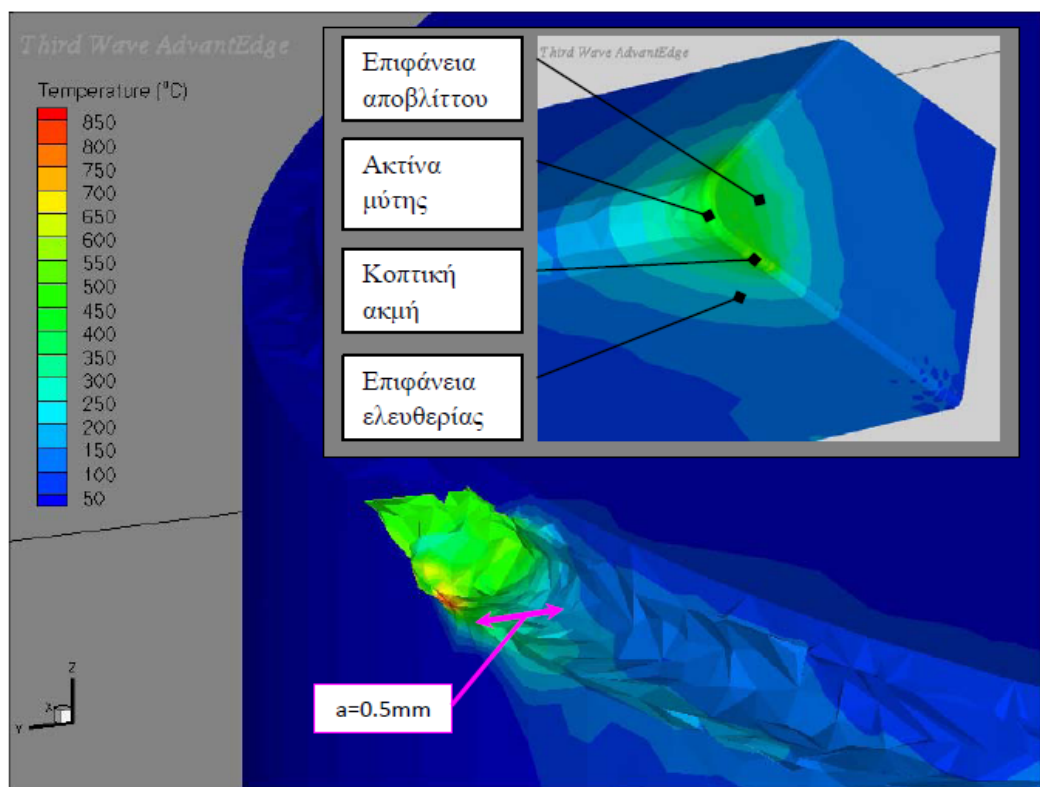
Το πρώτο μοντέλο πραγματοποιείται με ταχύτητα κοπής  $V=140$  m/min, βάθος κοπής  $a=0.5$  mm και πρόωση  $F=0.21$  mm/rev. Από την επίλυση του συγκεκριμένου μοντέλου ιδιαίτερης σημασίας κρίθηκαν οι απεικονίσεις της θερμοκρασίας, της πλαστικής παραμόρφωσης και του ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης, καθώς και τα διαγράμματα των δυνάμεων, της θερμοκρασίας και της ισχύος.



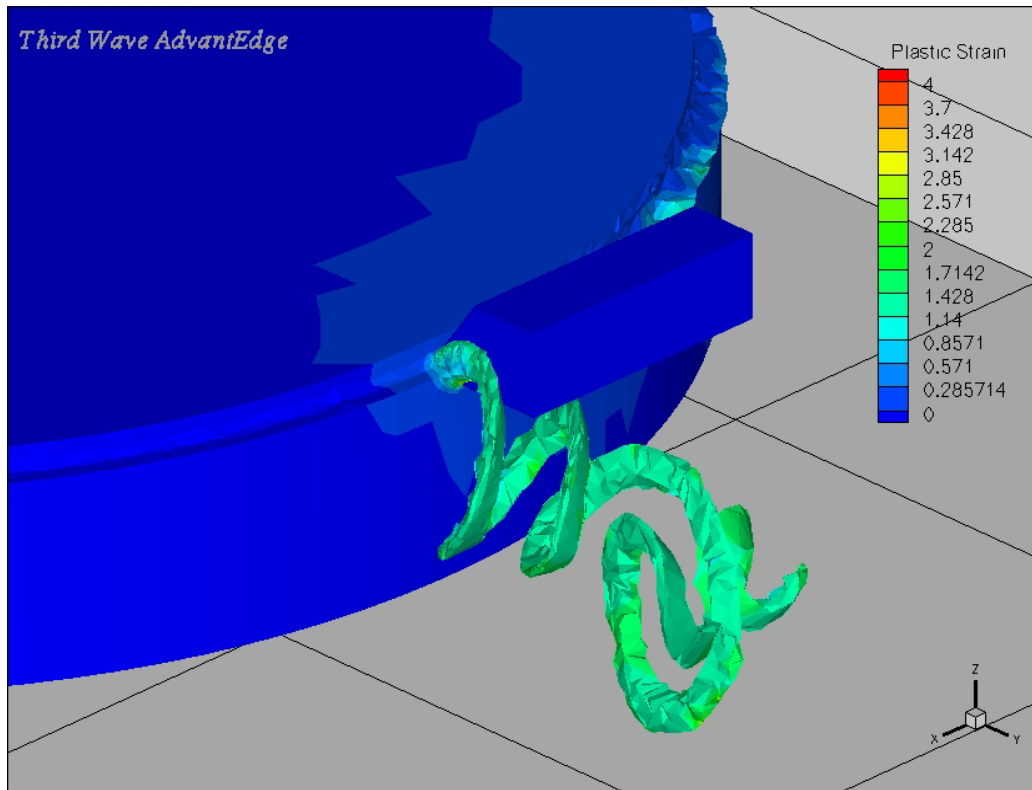
**Σχήμα 6.1** Προσομοίωση κοπής και αποτελέσματα θερμοκρασίας με κοπτικό εργαλείο: SECO DNMG 110402 M3 TP2000, ταχύτητα κοπής:  $V=140$ m/min, πρόωση:  $f=0.21$ mm/rev, Βάθος κοπής:  $a= 0.5$ mm



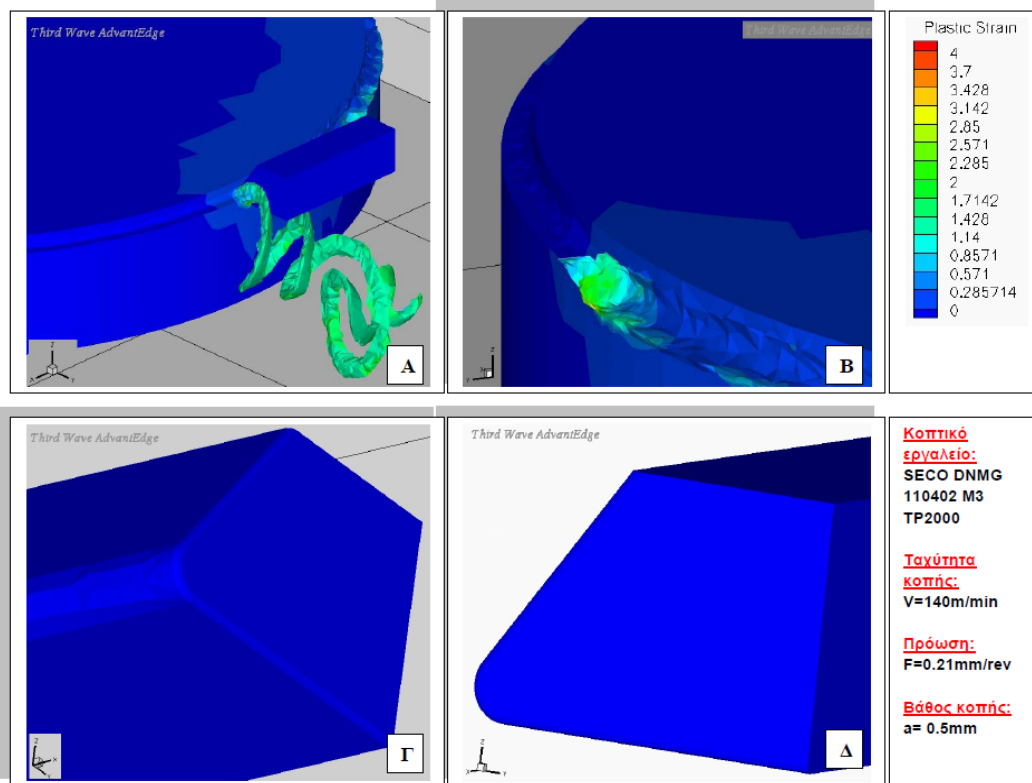
Σχήμα 6.2 Λεπτομέρειες προσομοίωσης κατανομής της θερμοκρασίας κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου



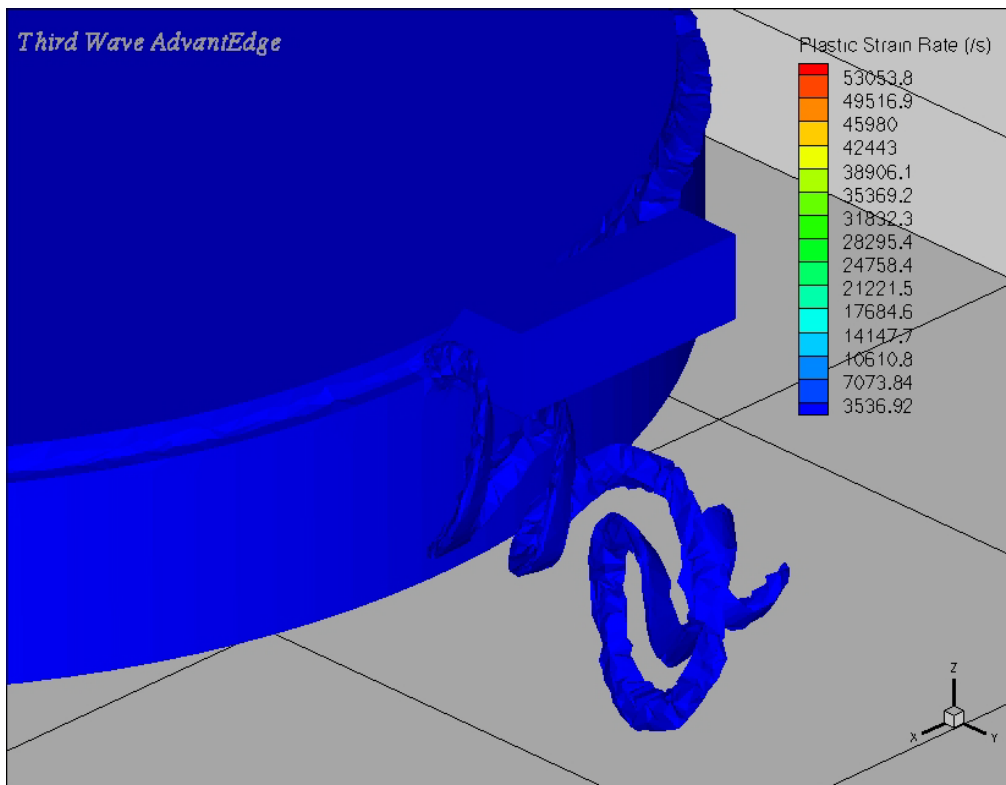
Σχήμα 6.3 Λεπτομέρεια προσομοίωσης κατανομής της θερμοκρασίας της κοπτικής ακμής και του κοπτικού εργαλείου



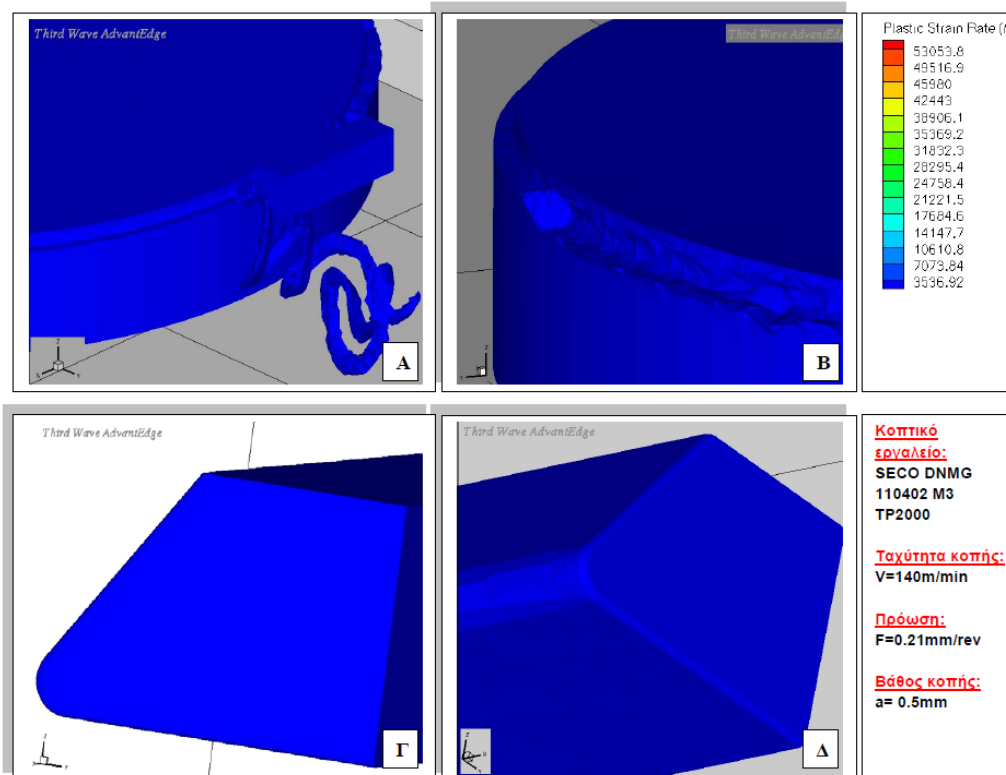
**Σχήμα 6.4** Προσομοίωση κοπής και αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης με κοπτικό εργαλείο: SECO DNMG 110402 M3 TP2000, ταχύτητα κοπής:  $V=140\text{m/min}$ , πρόωση:  $f=0.21\text{mm/rev}$ , Βάθος κοπής:  $a=0.5\text{mm}$



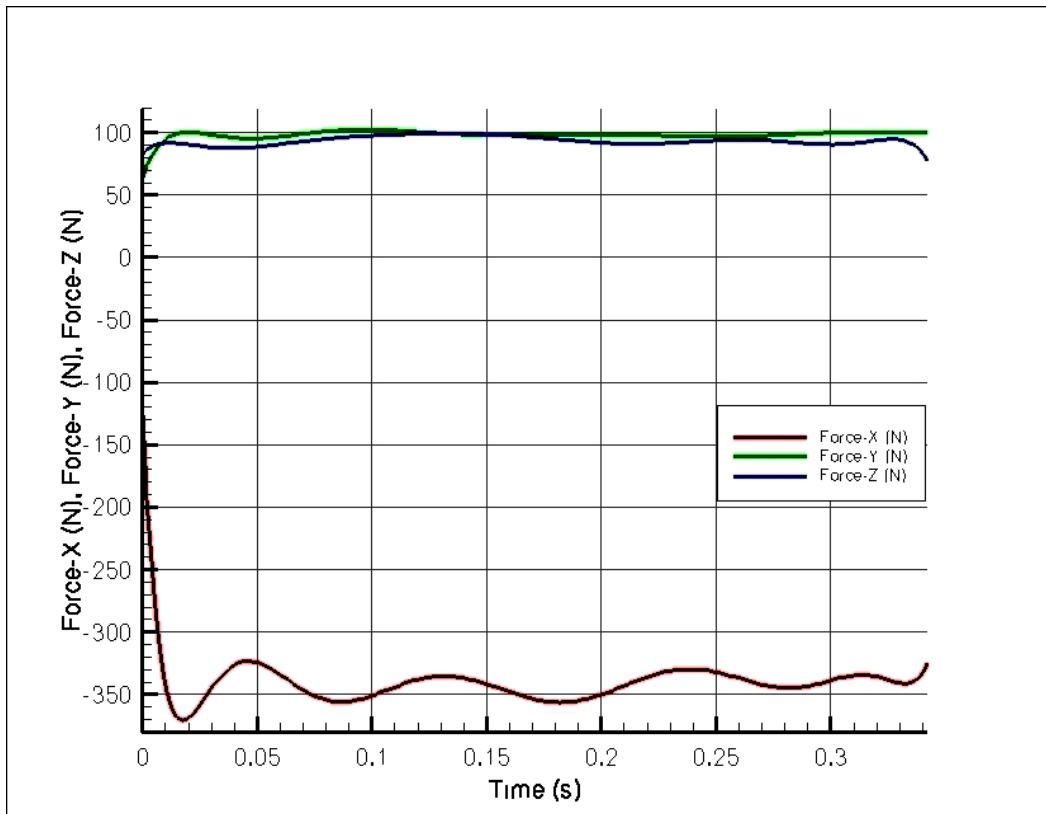
**Σχήμα 6.5** Λεπτομέρειες προσομοίωσης αποτελεσμάτων πλαστικής παραμόρφωσης κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου



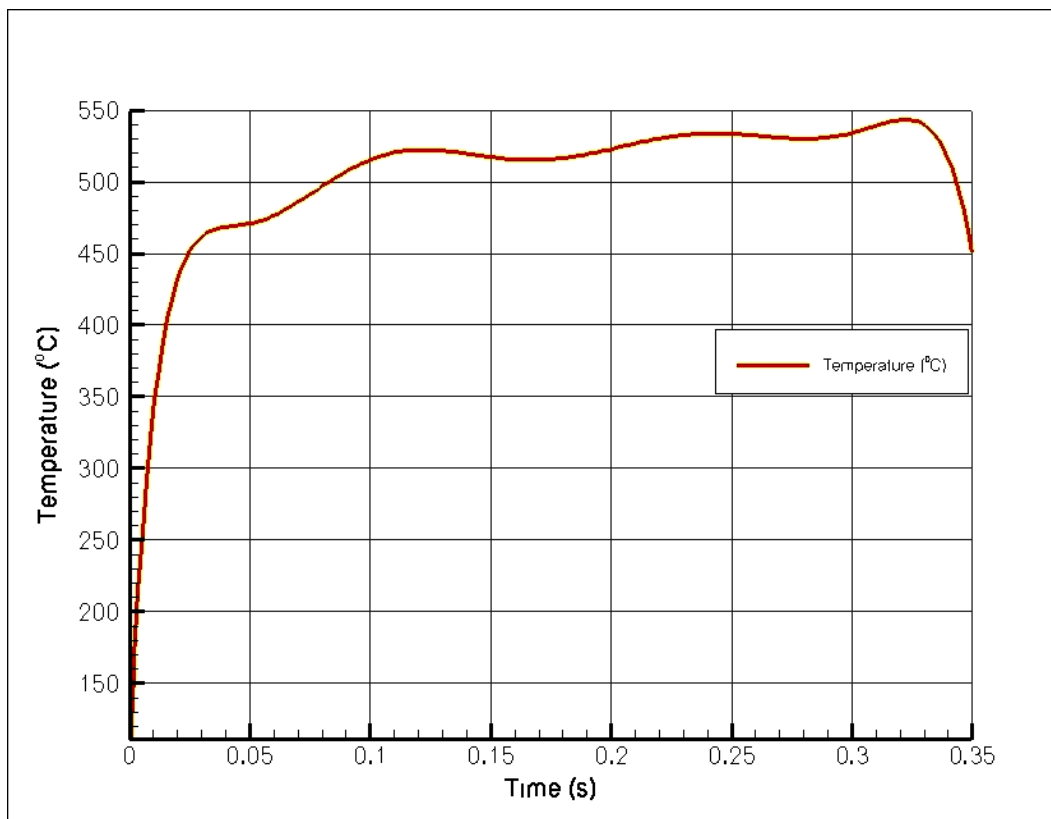
**Σχήμα 6.6** Προσομοίωση κοπής και αποτελέσματα ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης με κοπτικό εργαλείο: SECO DNMG 110402 M3 TP2000, ταχύτητα κοπής:  $V=140\text{m/min}$ , πρόωση:  $f=0.21\text{mm/rev}$ , Βάθος κοπής:  $a=0.5\text{mm}$



**Σχήμα 6.7** Λεπτομέρειες προσομοίωσης αποτελεσμάτων ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου

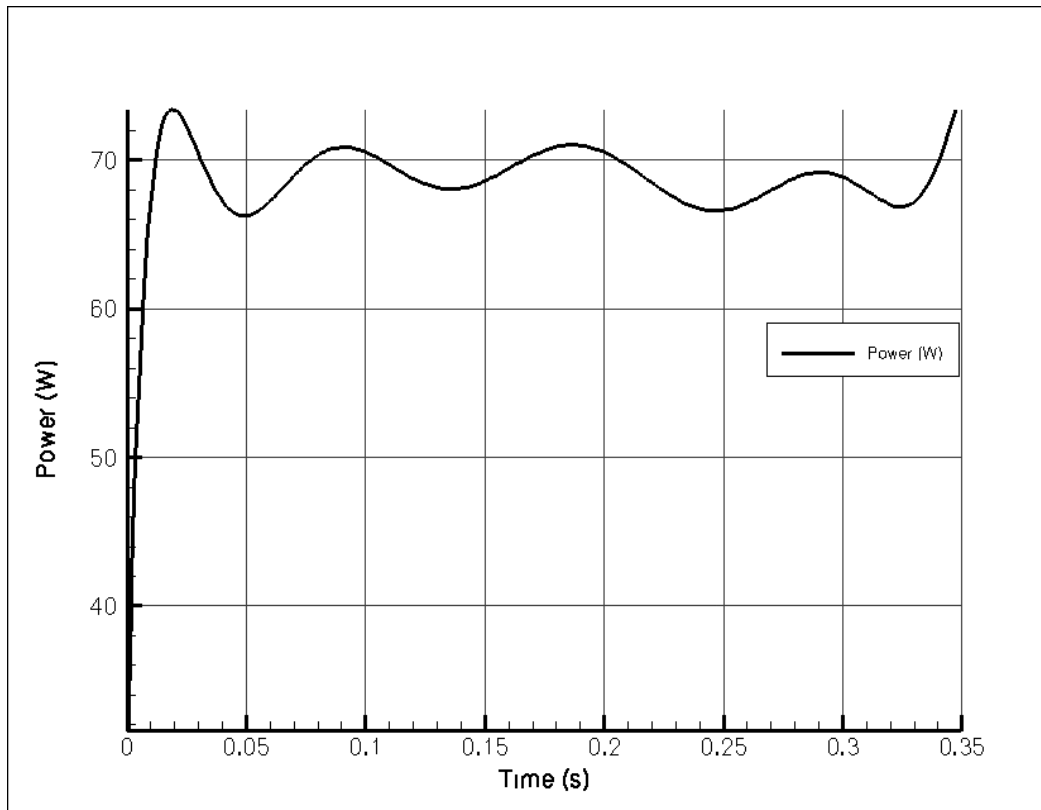


**Σχήμα 6.8** Διάγραμμα δύναμης – χρόνου



**Σχήμα 6.9** Διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου

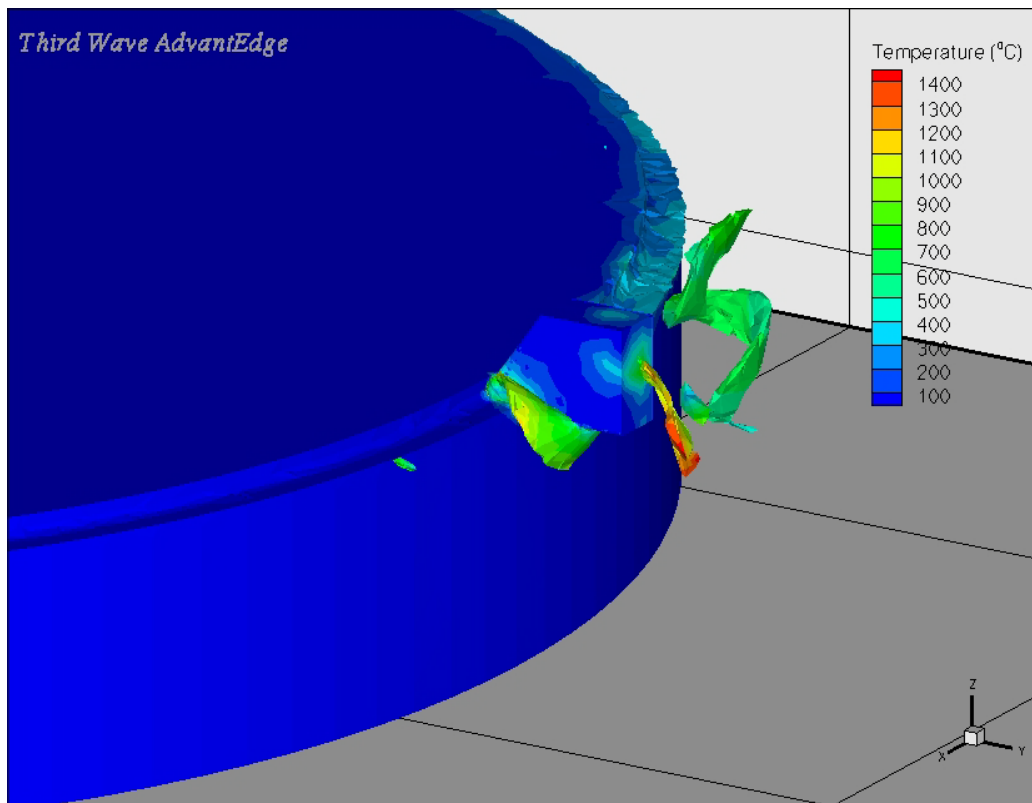




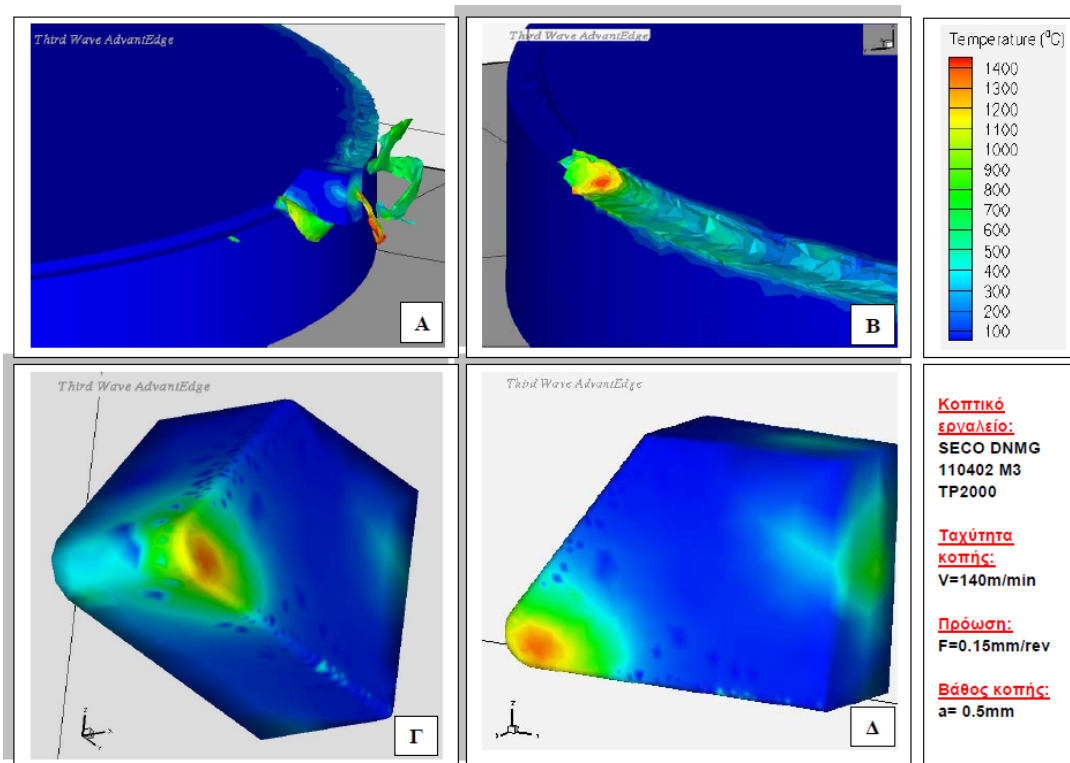
**Σχήμα 6.10** Διάγραμμα ισχύς – χρόνου

## 6.2 Αποτελέσματα μοντελοποίησης δεύτερου δοκιμίου

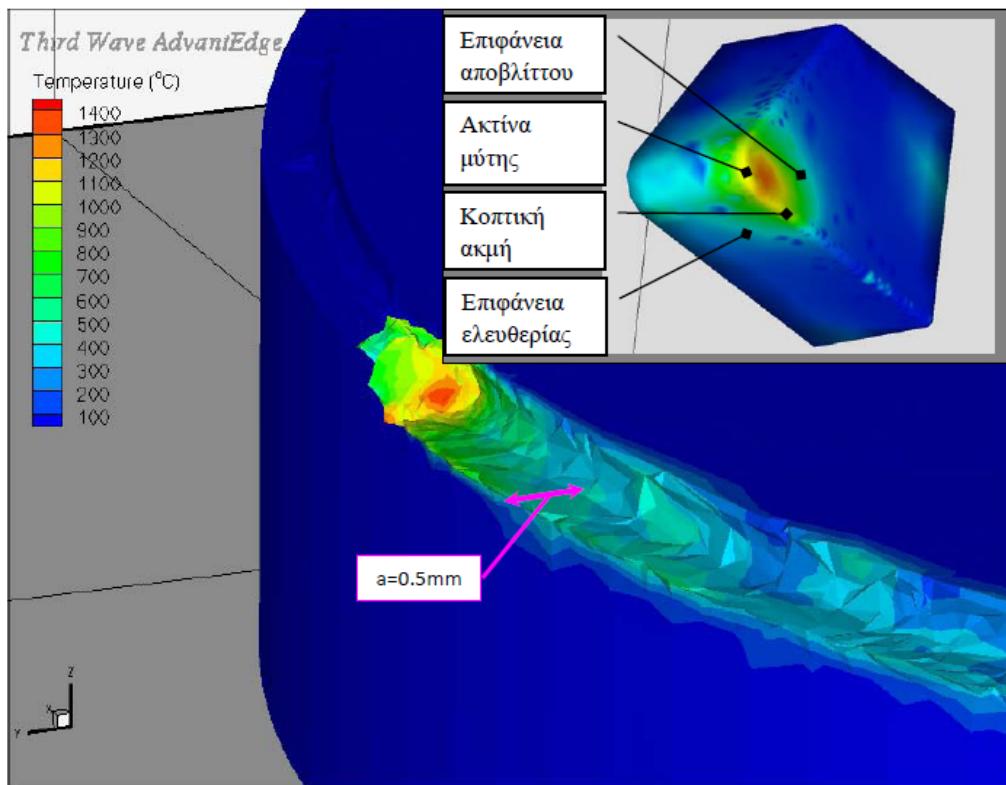
Το δεύτερο μοντέλο πραγματοποιείται με ταχύτητα κοπής  $V=140$  m/min, βάθος κοπής  $a=0.5$  mm και πρόωση  $F=0.15$  mm/rev. Από την επίλυση του συγκεκριμένου μοντέλου ιδιαίτερης σημασίας κρίθηκαν οι απεικονίσεις της θερμοκρασίας, της πλαστικής παραμόρφωσης και του ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης καθώς και τα διαγράμματα των δυνάμεων, της θερμοκρασίας και της ισχύος.



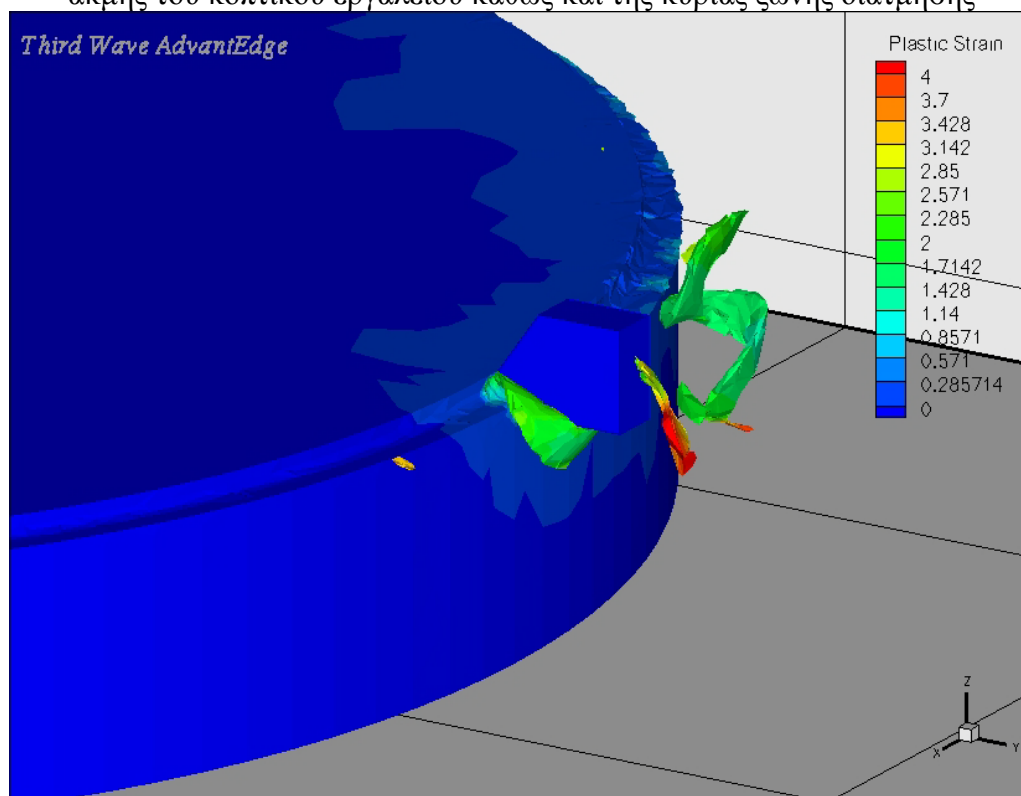
**Σχήμα 6.11** Προσομοίωση κοπής και αποτελέσματα θερμοκρασίας με κοπτικό εργαλείο: SECO DNMG 110402 M3 TP2000, ταχύτητα κοπής:  $V=140\text{m/min}$ , πρόωση:  $f=0.15\text{ mm/rev}$ , Βάθος κοπής:  $a=0.5\text{mm}$



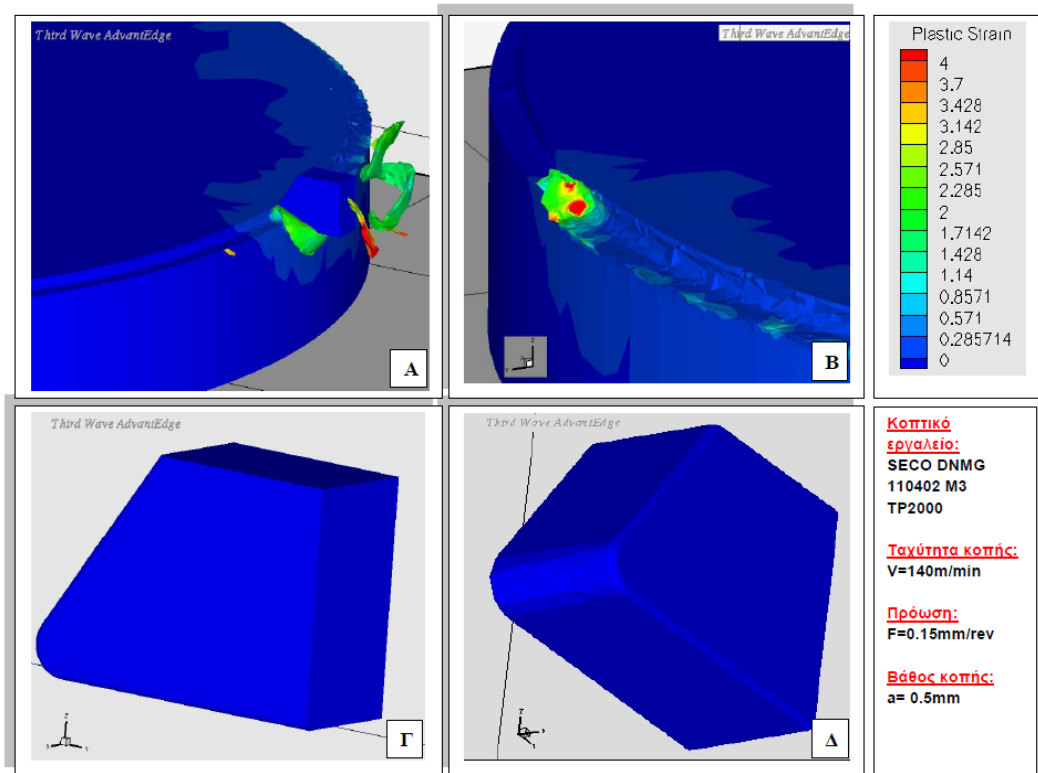
**Σχήμα 6.12** Λεπτομέρειες προσομοίωσης αποτελεσμάτων θερμοκρασίας κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου



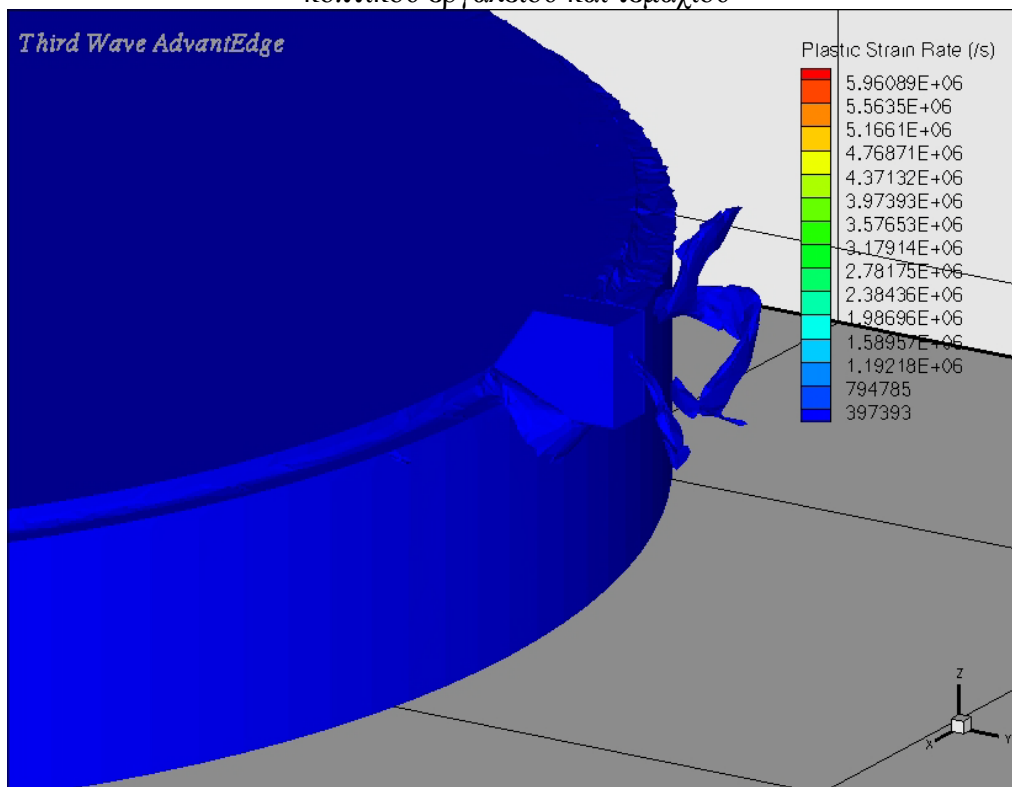
**Σχήμα 6.13** Λεπτομέρεια προσομοίωσης αποτελεσμάτων θερμοκρασίας κοπτικής ακμής του κοπτικού εργαλείου καθώς και της κύριας ζώνης διάτμησης



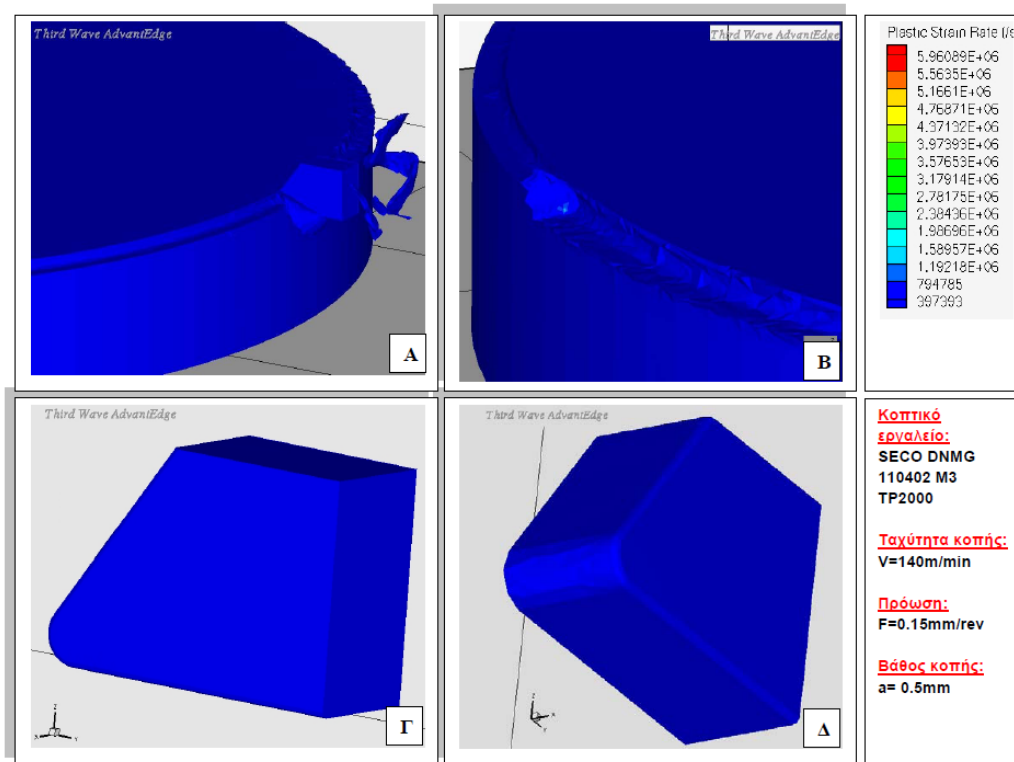
**Σχήμα 6.14** Προσομοίωση κοπής και αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης με κοπτικό εργαλείο: SECO DNMG 110402 M3 TP2000, ταχύτητα κοπής:  $V=140\text{m/min}$ , πρόωση:  $f=0.15\text{ mm/rev}$ , Βάθος κοπής:  $a=0.5\text{mm}$



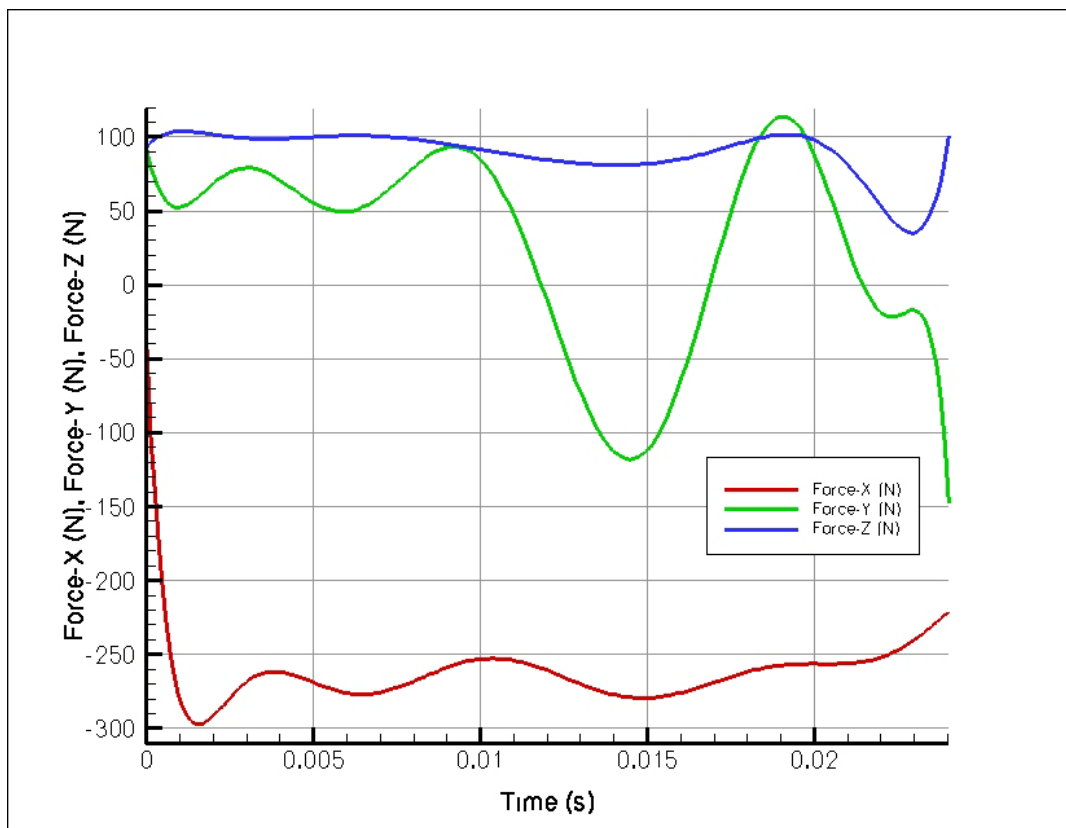
Σχήμα 6.15 Λεπτομέρειες προσομοίωσης αποτελεσμάτων πλαστικής παραμόρφωσης κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου



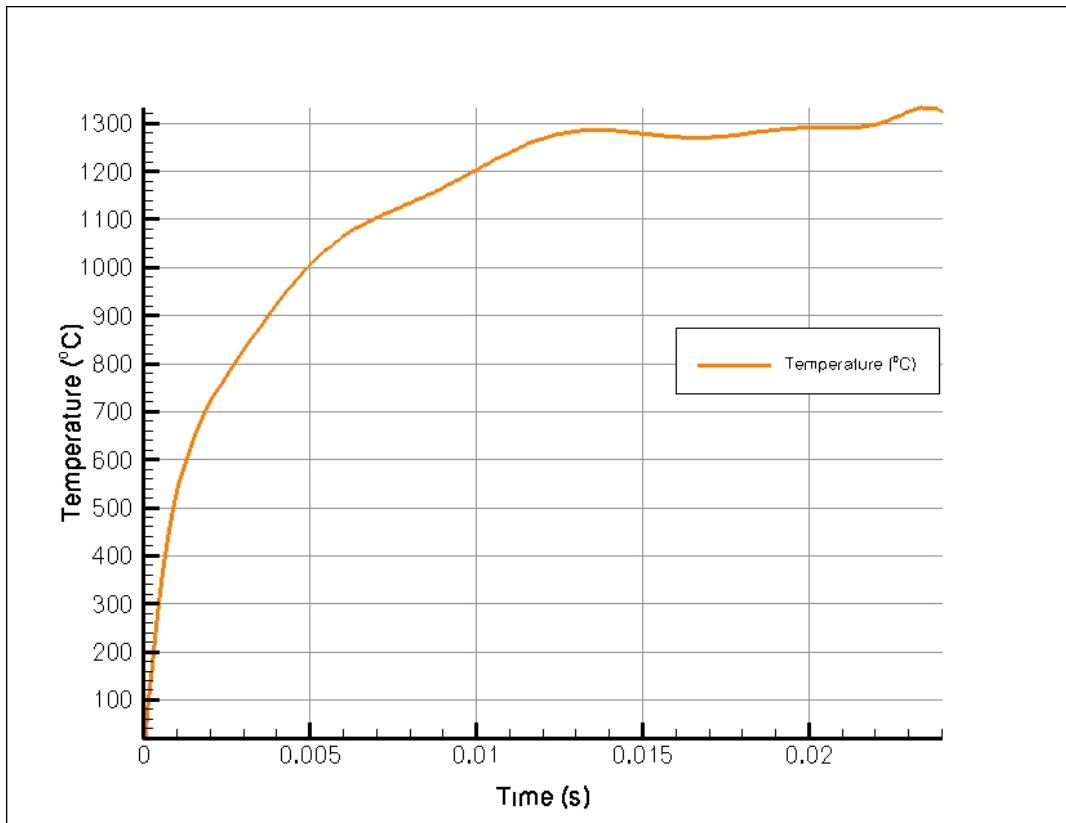
Σχήμα 6.16 Προσομοίωση κοπής και αποτελέσματα ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης με κοπτικό εργαλείο: SECO DNMG 110402 M3 TP2000, ταχύτητα κοπής: V=140m/min, πρόωση: f=0.15 mm/rev, Βάθος κοπής: a= 0.5mm



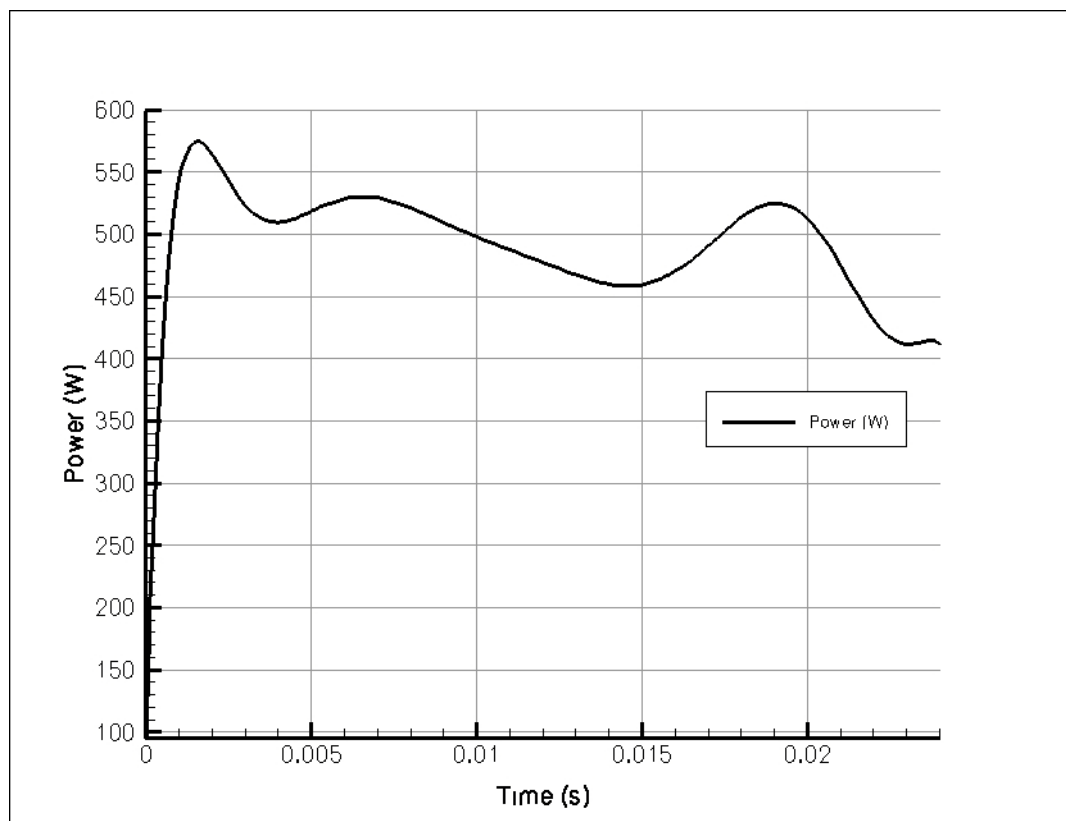
Σχήμα 6.17 Λεπτομέρειες προσομοίωσης αποτελεσμάτων ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου



Σχήμα 6.18 Διάγραμμα δύναμης – χρόνου



**Σχήμα 6.19** Διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου



**Σχήμα 6. 20** Διάγραμμα ισχύς – χρόνου

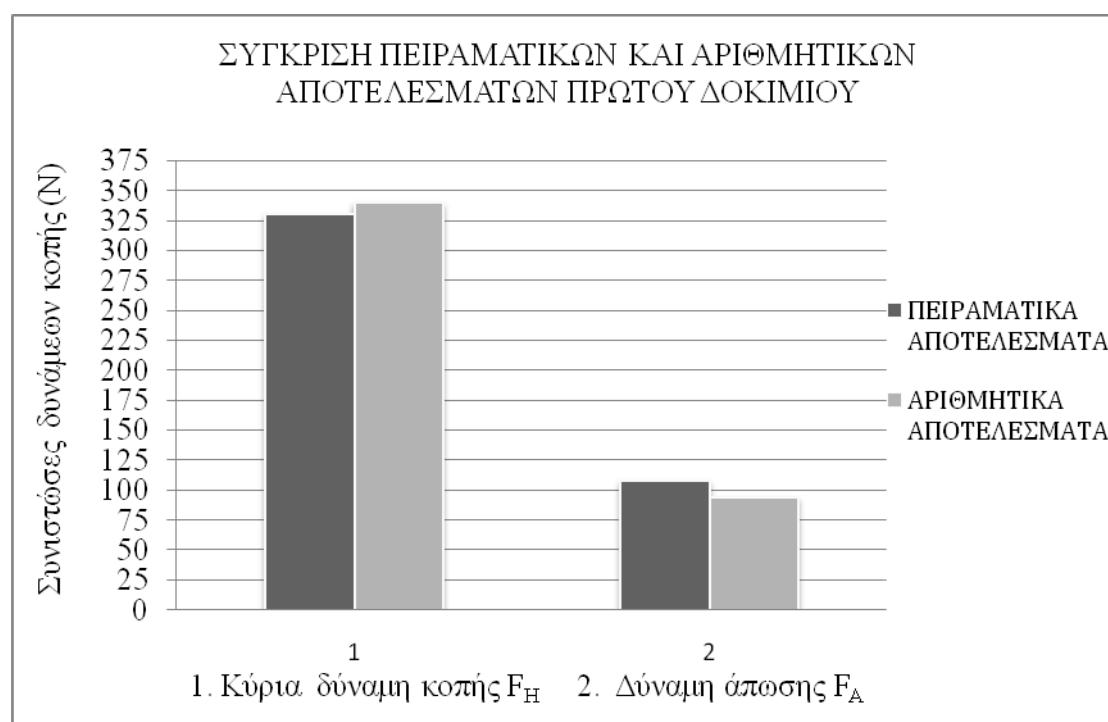


## 7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 7.1 Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων πρώτου δοκιμίου

Η σύγκριση των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων περιλαμβάνει τη σύγκριση της κύριας δύναμης κοπής  $F_H$  και της δύναμης άπωσης  $F_A$ . Και τα δύο μοντέλα, που υλοποιήθηκαν, δεν κατάφεραν να αποδώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για την δύναμη προώσεως  $F_V$ .

Από το διάγραμμα του πρώτου δοκιμίου η μέση τιμή της κύριας δύναμης κοπής  $F_H$  προκύπτει κατά απόλυτη τιμή **330.2 N**, ενώ από τα αριθμητικά αποτελέσματα η τιμή της είναι **339.4 N**, δηλαδή μία απόκλιση των αποτελεσμάτων περίπου **2.7%** θεωρώντας το αποτέλεσμα πολύ ικανοποιητικό. Επίσης, η μέση τιμή της δύναμης άπωσης  $F_A$  από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει **107.8 N**, ενώ από τα αριθμητικά αποτελέσματα η τιμή της είναι **93.6 N**, με απόκλιση των αποτελεσμάτων περίπου **13.2%** θεωρώντας και σε αυτή την περίπτωση, τα αποτελέσματα ικανοποιητικά.



**Σχήμα 7.1** Σύγκριση κύριας δύναμης κοπής  $F_H$  και δύναμης άπωσης  $F_A$  πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων



Το απόβλλιτο κοπής, κατά την διαδικασία της αριθμητικής ανάλυσης του μοντέλου, παρουσιάζεται συνεχόμενο ταινιοειδές, με άτακτη μορφή και προσεγγίζει ικανοποιητικά το δείγμα αποβλίτων της πειραματικής διαδικασίας, Σχήμα 7.2.



**Σχήμα 7.2** Σύγκριση αποβλίτου πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων πρώτου δοκιμίου

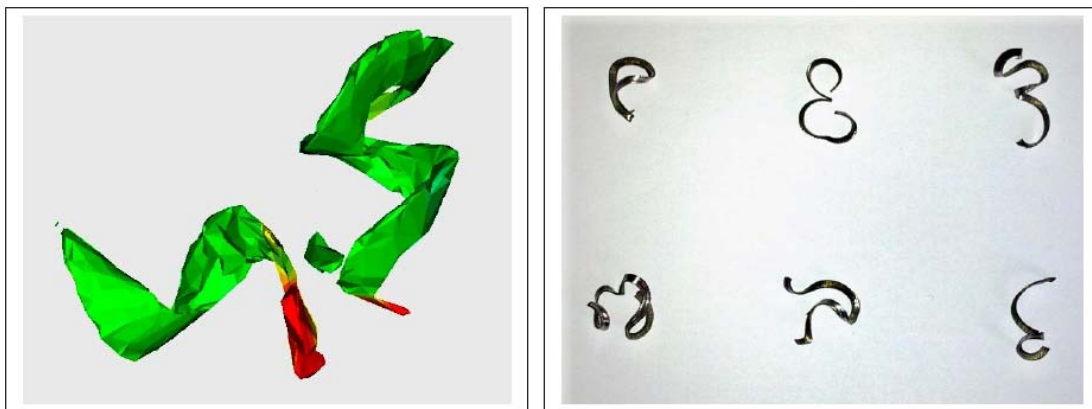
## **7.2 Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων δεύτερου δοκιμίου**

Από το διάγραμμα του δεύτερου δοκιμίου προκύπτει η μέση τιμή της κύριας δύναμης κοπής  $F_H$  κατά απόλυτη τιμή ίση με **252,4 N**, ενώ από τα αριθμητικά αποτελέσματα η τιμή της είναι **265 N**, δηλαδή μία απόκλιση των αποτελεσμάτων περίπου **4.8%** θεωρώντας το αποτέλεσμα πολύ ικανοποιητικό. Επίσης, η μέση τιμή της δύναμης άπωσης  $F_A$  από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει **72 N**, ενώ από τα αριθμητικά αποτελέσματα η τιμή της είναι **89 N**, με απόκλιση των αποτελεσμάτων περίπου **19%** θεωρώντας και σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματά ικανοποιητικά.



**Σχήμα 7.3** Σύγκριση κύριας δύναμης κοπής  $F_H$  και δύναμης άπωσης  $F_A$  πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων

Το απόβλιτο, κατά την διαδικασία της αριθμητικής ανάλυσης του δεύτερου μοντέλου, παρουσιάζει μορφή τεμαχισμένων τεμαχιδίων και προσεγγίζουν ικανοποιητικά το δείγμα αποβλίττου της πειραματικής διαδικασίας, Σχήμα 7.4.



**Σχήμα 7.4** Σύγκριση αποβλίττου πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων δεύτερου δοκιμίου

**Συνοψίζοντας**, μπορούμε να δεχτούμε, ότι το αριθμητικό μοντέλο που επιλύθηκε δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, όσον αφορά στη κύρια δύναμη κοπής  $F_H$ , προσεγγίζει ικανοποιητικά τα πειραματικά αποτελέσματα της δύναμης άπωσης  $F_A$ ,

ενώ καταφέρνει και στις δύο περιπτώσεις να προσομοιώσει τη μορφή του παραγόμενου αποβλίττου της κατεργασίας. Η αδυναμία του μοντέλου εντοπίζεται στην κακή προσέγγιση της δύναμης πρόωσης  $F_V$ .

## 8 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 - ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ

### ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΟΠΗΣ

#### 8.1 Γενικά

Κατόπιν συγκρίσεως των πειραματικών και των αριθμητικών αποτελεσμάτων κρίθηκε ότι το υπολογιστικό μοντέλο μπορεί να αποδώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για τον τρόπο με τον οποίο επιδρούν οι συνθήκες κοπής στην κατεργασία του Ti-6Al-4V.

Πιο συγκεκριμένα, διερευνάται ο τρόπος που επιδρά η ταχύτητα κοπής ( $v$ ), το βάθος κοπής ( $a$ ) και η πρόωση ( $f$ ) επί των δυνάμεων κοπής, της θερμοκρασίας και της ισχύος.

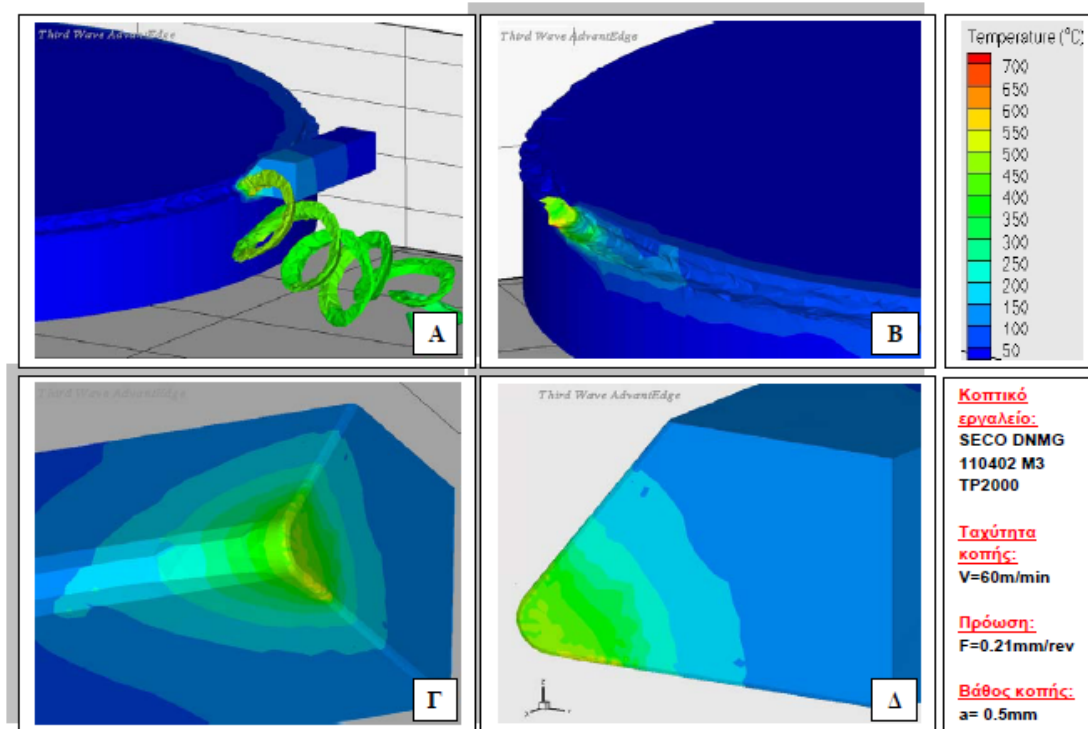
Το αριθμητικό μοντέλο επιλύθηκε συνολικά εννέα (9) φορές. Σε κάθε επίλυση του μοντέλου διατηρούνται σταθερές δύο συνθήκες κοπής και μεταβάλλεται η τρίτη. Οι συνθήκες κοπής που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1		
<b>f=0.21mm/rev</b>	<b>a=0.5 mm</b>	<b>s=60 m/min</b>
		<b>s=140 m/min</b>
		<b>s=200 m/min</b>
<b>f=0.21 mm/rev</b>	<b>s=140 m/min</b>	<b>a=0.25 mm</b>
		<b>a=0.5 mm</b>
		<b>a=1.0 mm</b>
<b>a=0.5 mm</b>	<b>s=140 m/min</b>	<b>f=0.15 mm/rev</b>
		<b>f=0.21 mm/rev</b>
		<b>f=0.35 mm/rev</b>

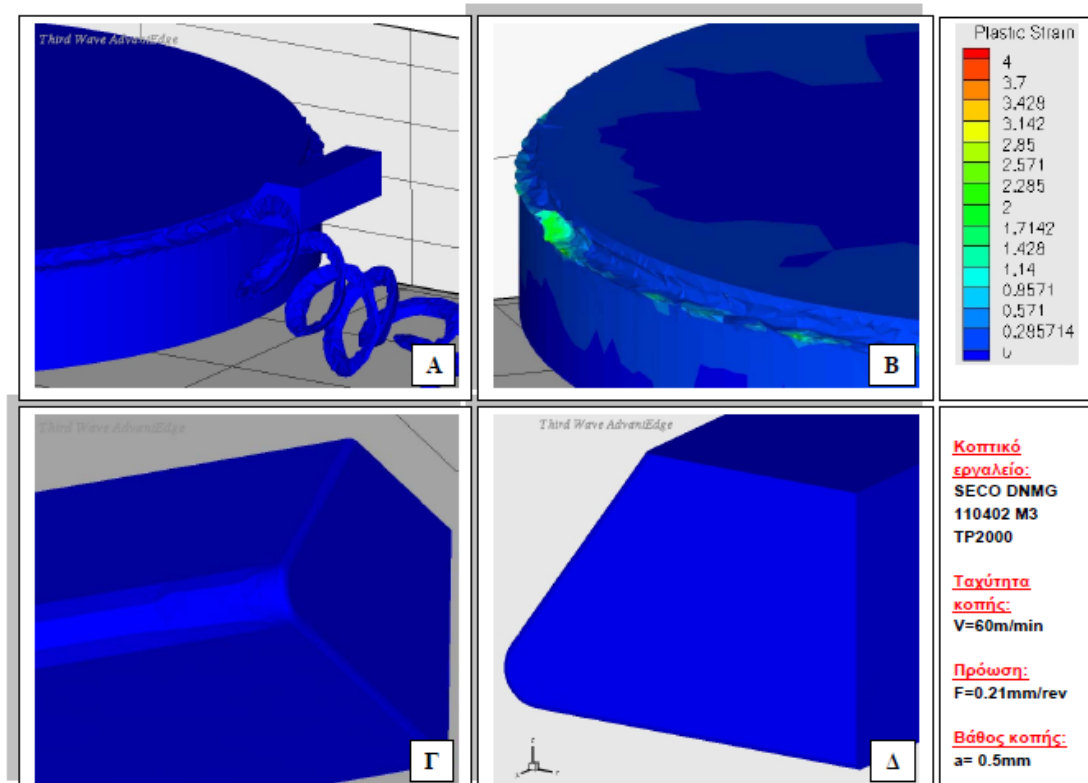
#### 8.2 Επίδραση της ταχύτητας κοπής $s$

Με σταθερό βάθος κοπής  $a=0.5\text{mm}$ , σταθερή πρόωση  $f=0.21\text{mm/rev}$  και ταχύτητα κοπής  $s_1=60\text{m/min}$ ,  $s_2=140\text{m/min}$ ,  $s_3=200\text{m/min}$ .

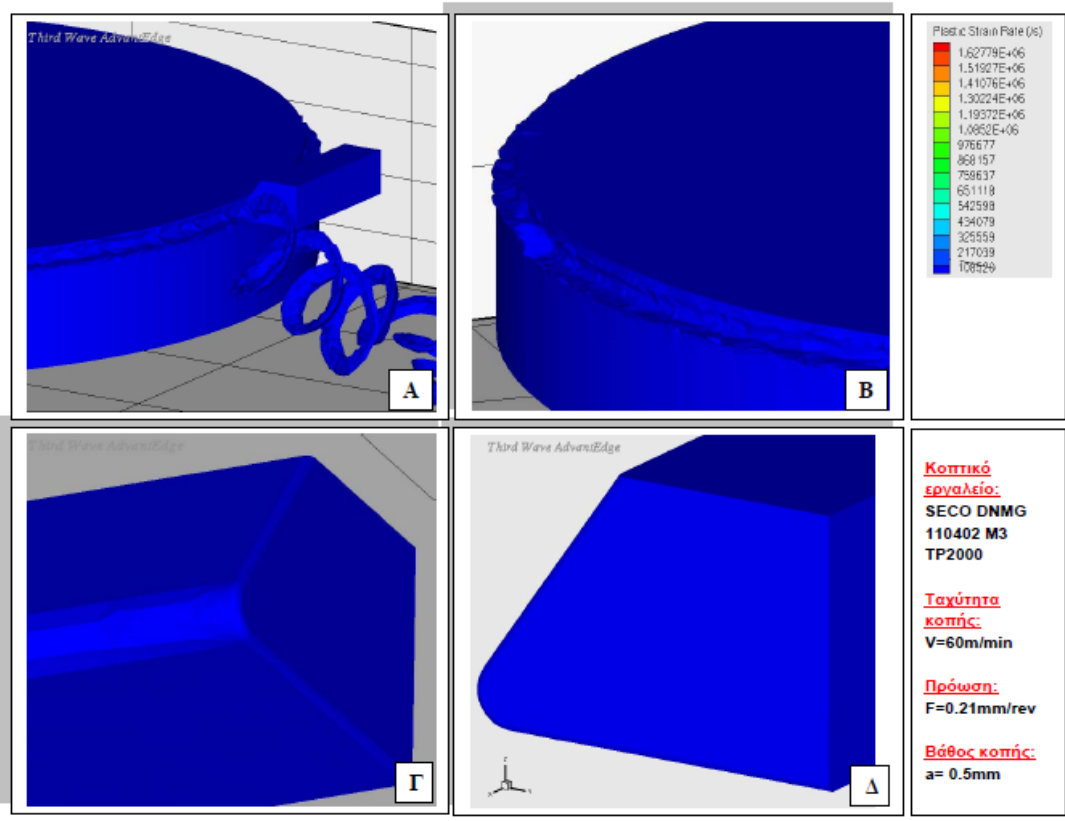
### 8.2.1 Ταχύτητα κοπής $s_1=60\text{m/min}$



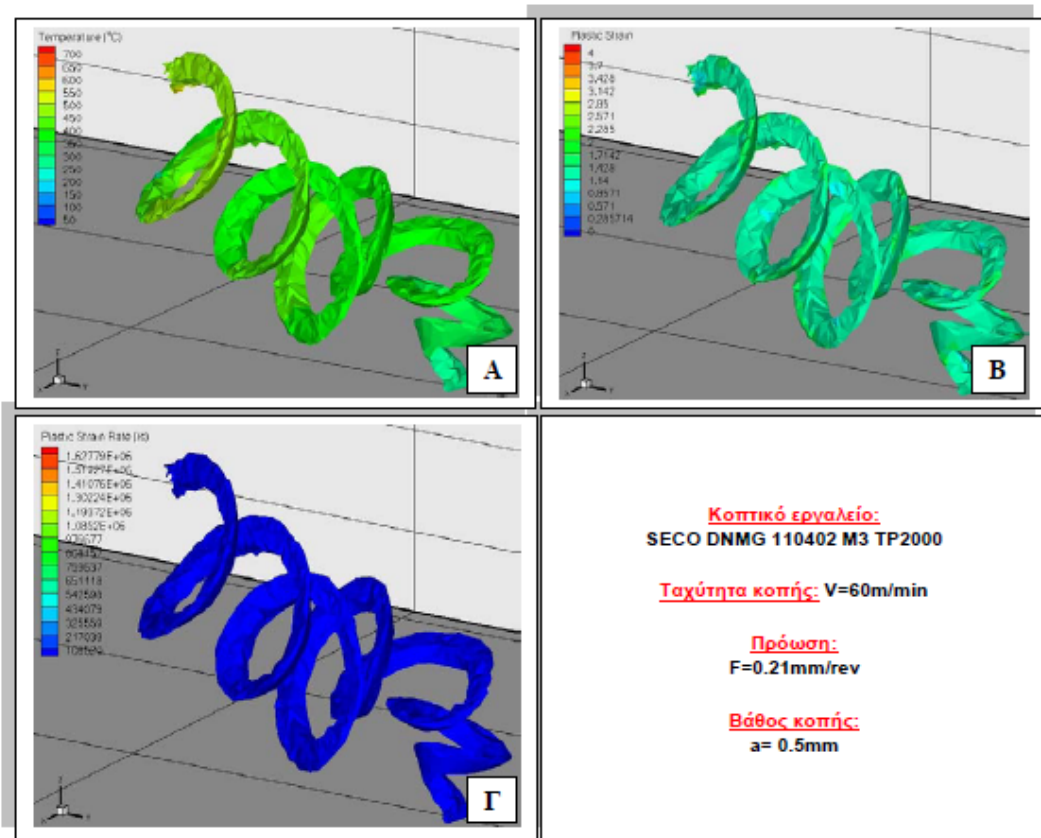
Σχήμα 8.1 Αποτελέσματα κατανομής θερμοκρασίας



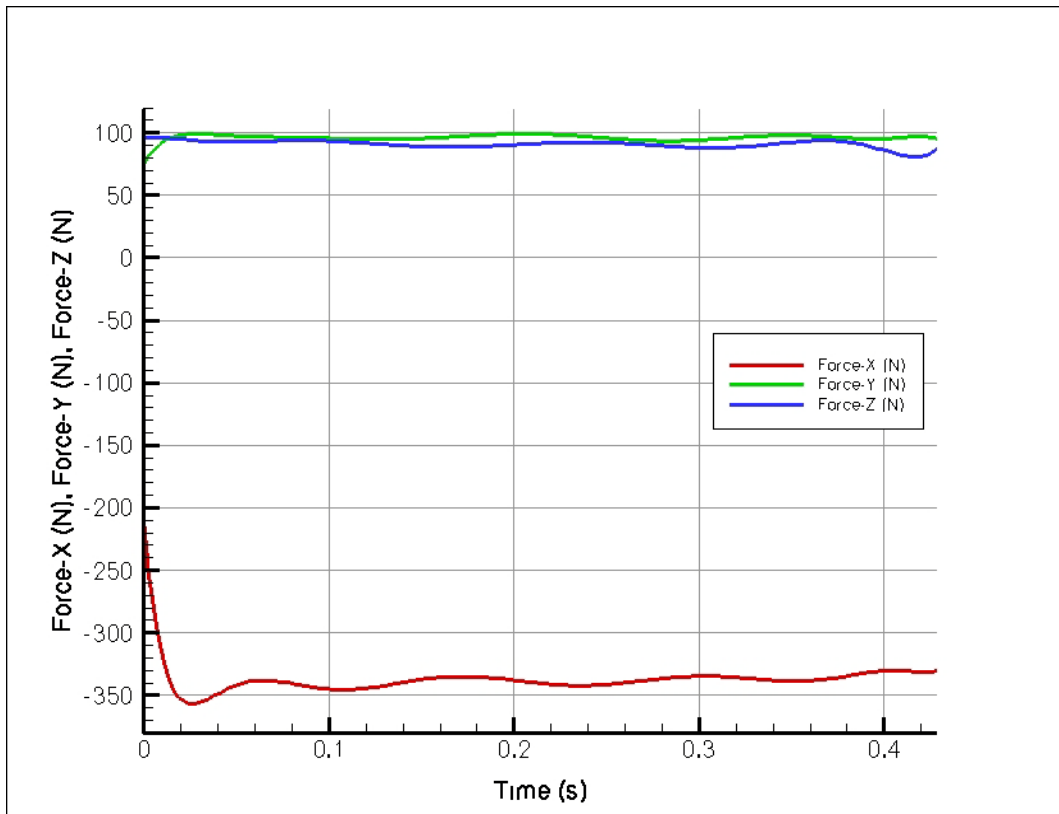
Σχήμα 8.2 Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης



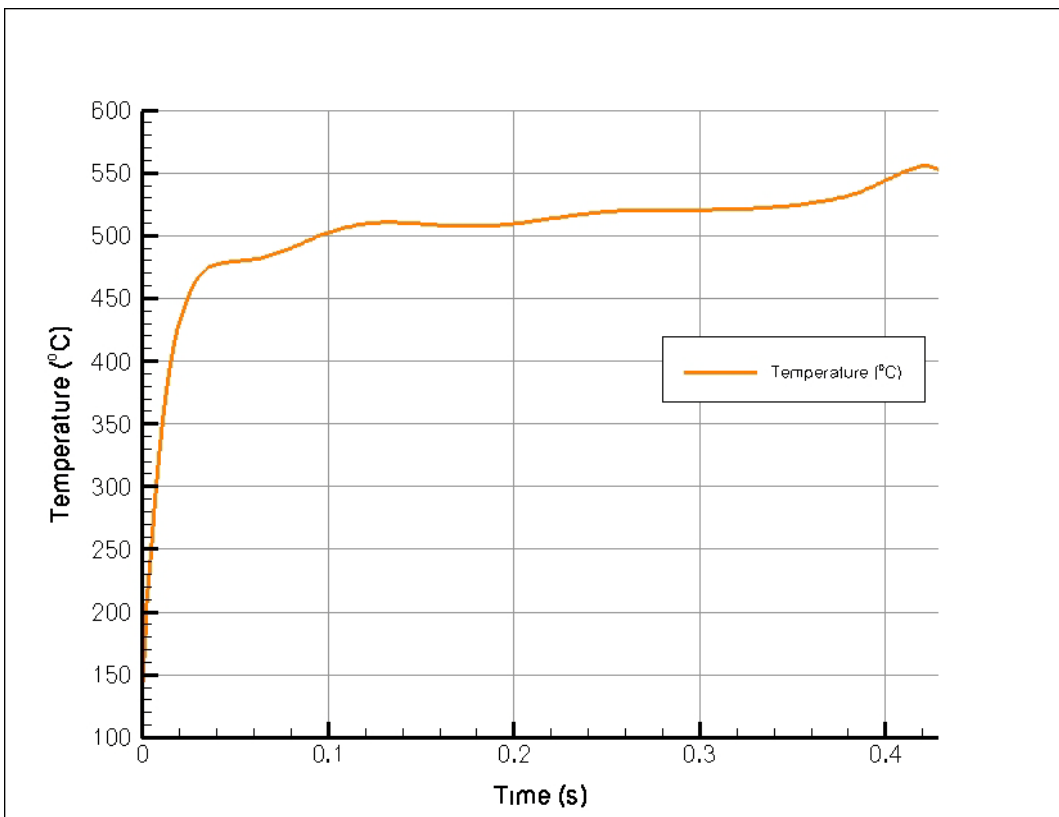
Σχήμα 8.3 Αποτελέσματα ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης



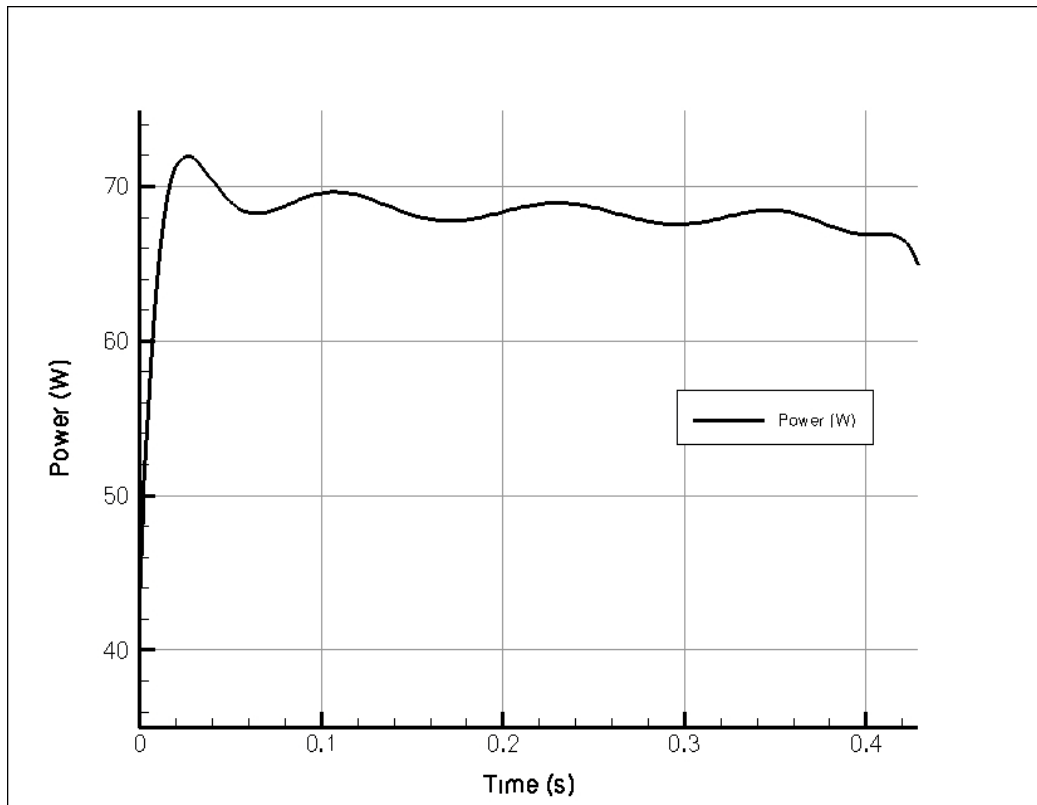
Σχήμα 8.4 Αποτελέσματα μορφής και κατανομής μετρούμενων μεγεθών στο απόβλιττο



Σχήμα 8.5 Διάγραμμα δυνάμεων – χρόνου



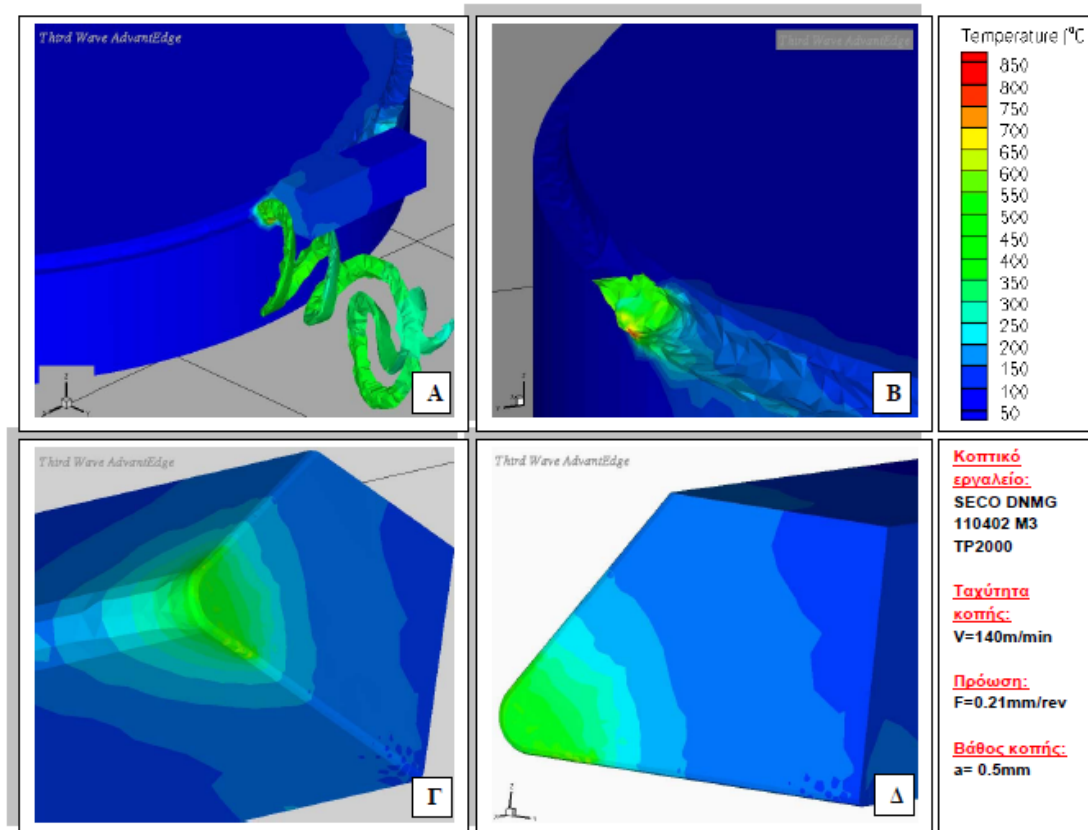
Σχήμα 8.6 Διάγραμμα θερμοκρασίας - χρόνου



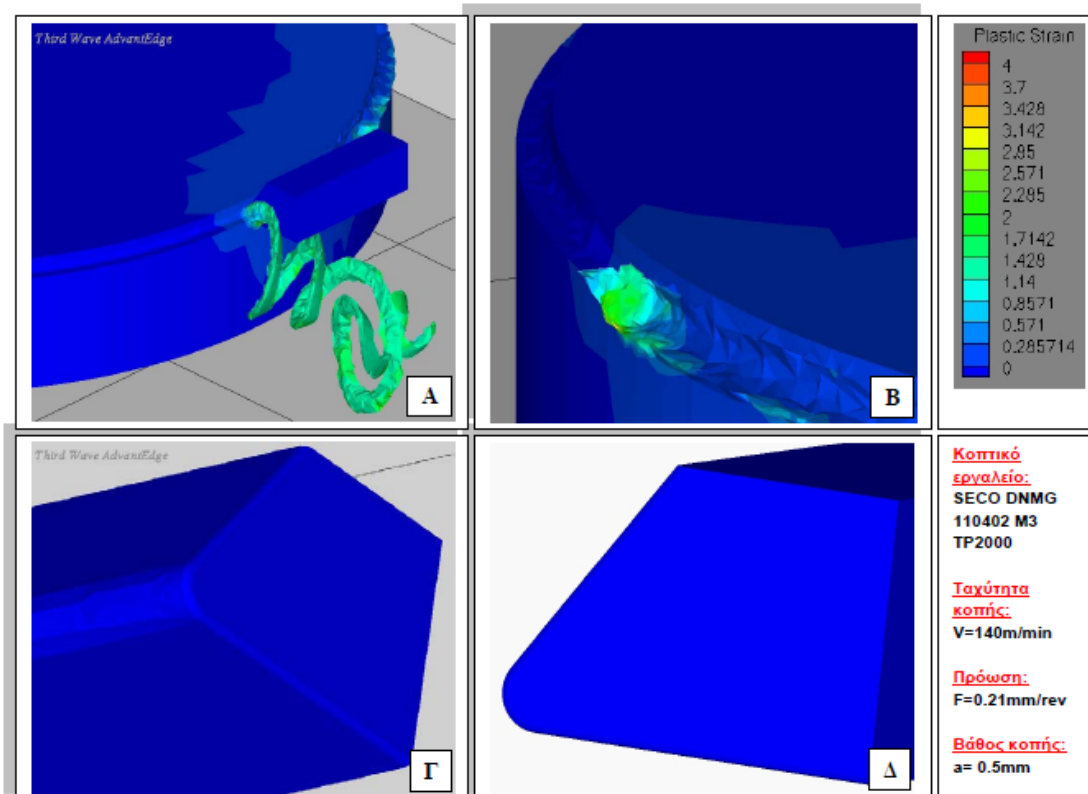
Σχήμα 8.7 Διάγραμμα ισχύος - χρόνου



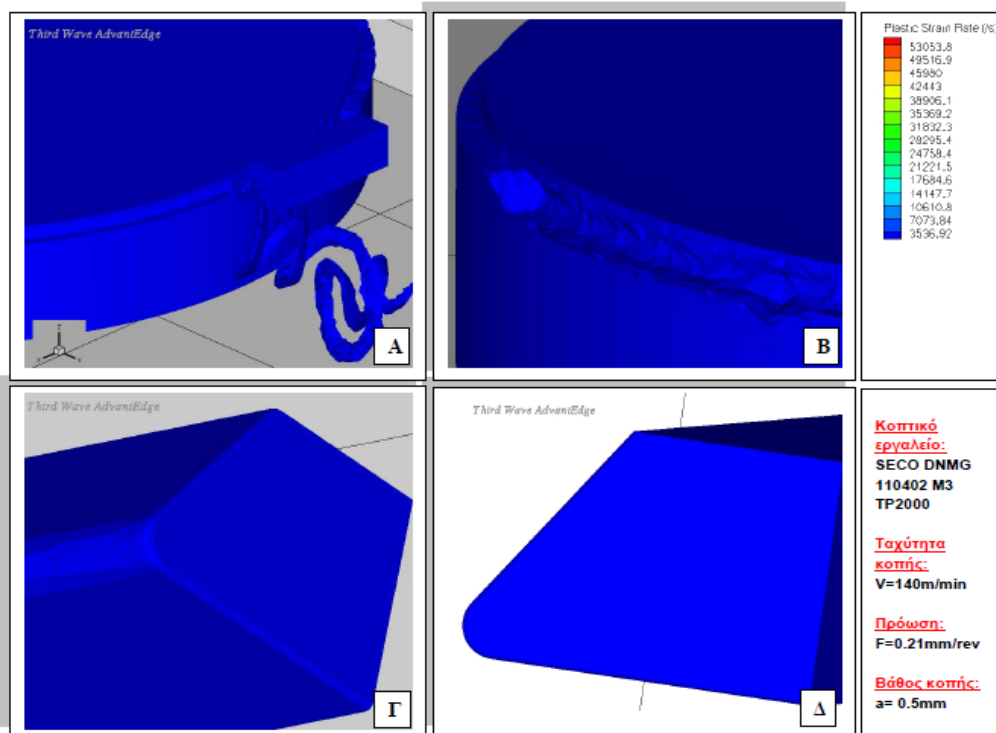
### 8.2.2 Ταχύτητα κοπής $s_2=140\text{m/min}$



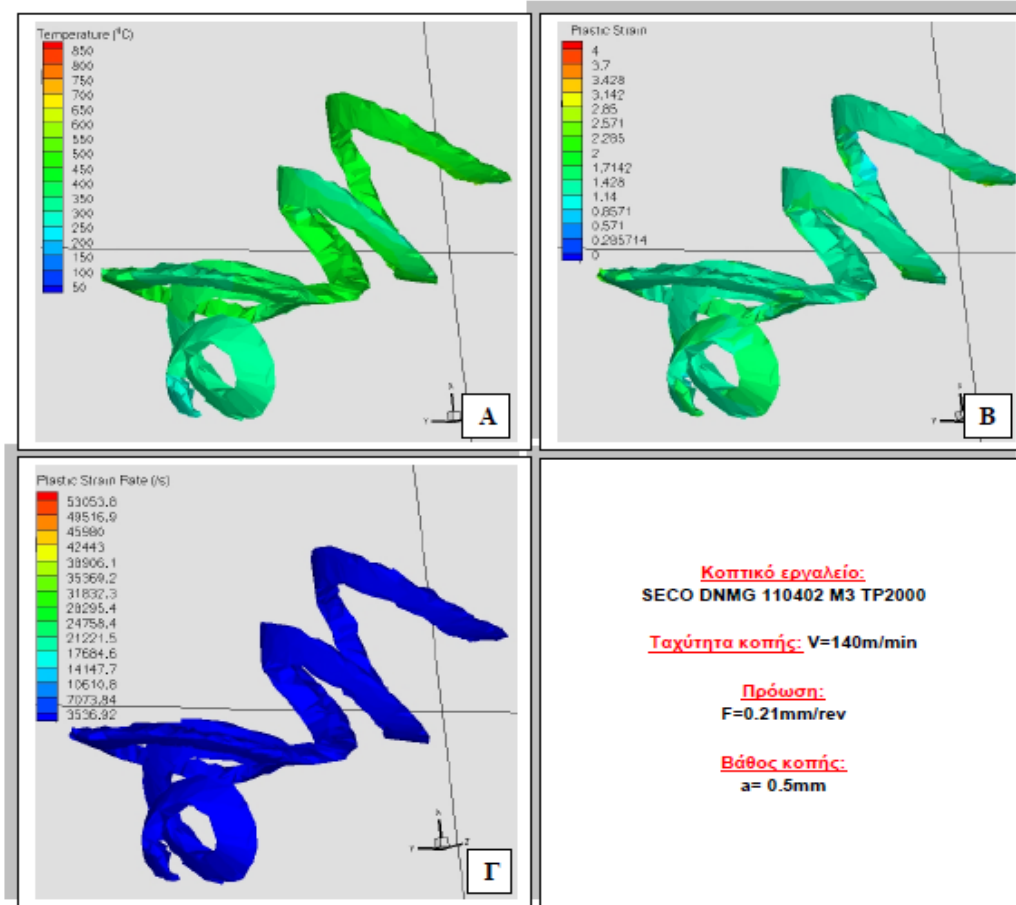
Σχήμα 8.8 Αποτελέσματα κατανομής θερμοκρασίας



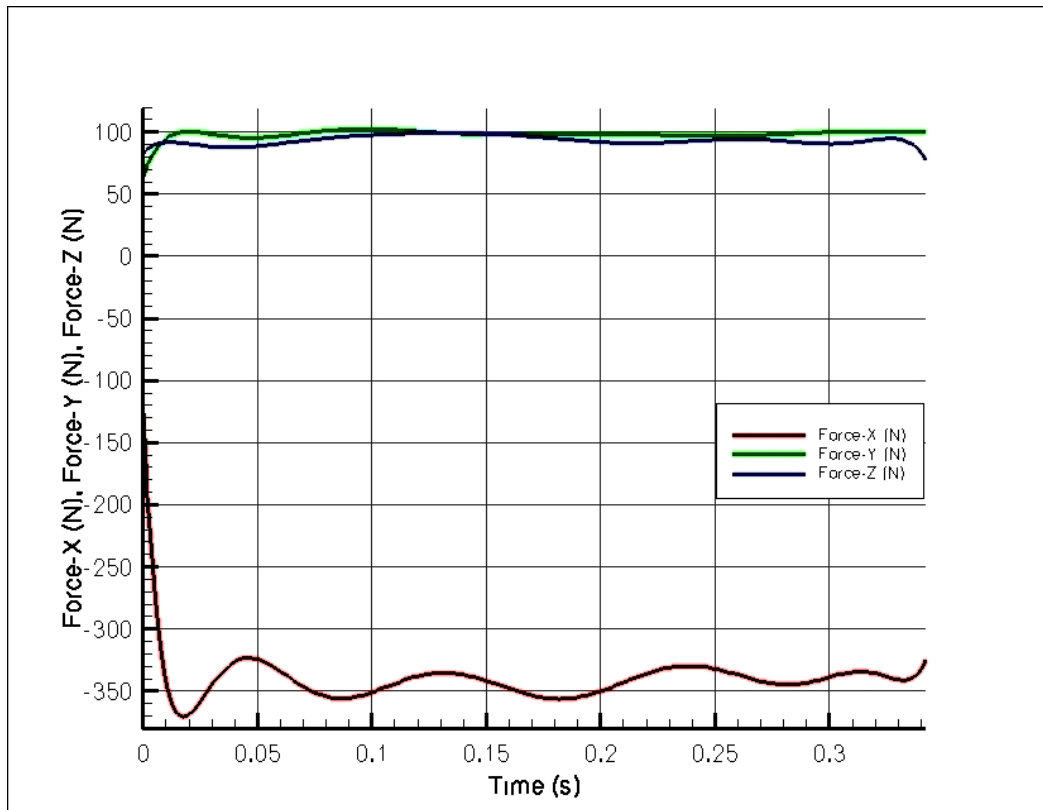
Σχήμα 8.9 Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης



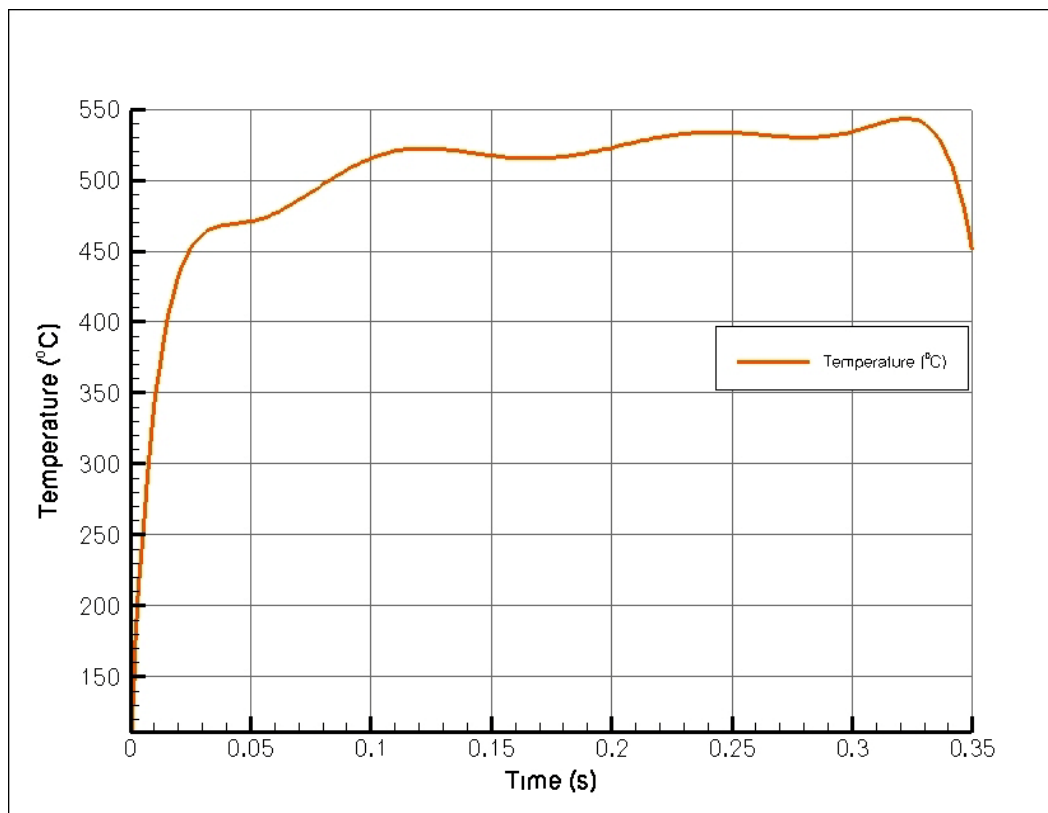
Σχήμα 8.10 Αποτελέσματα ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης



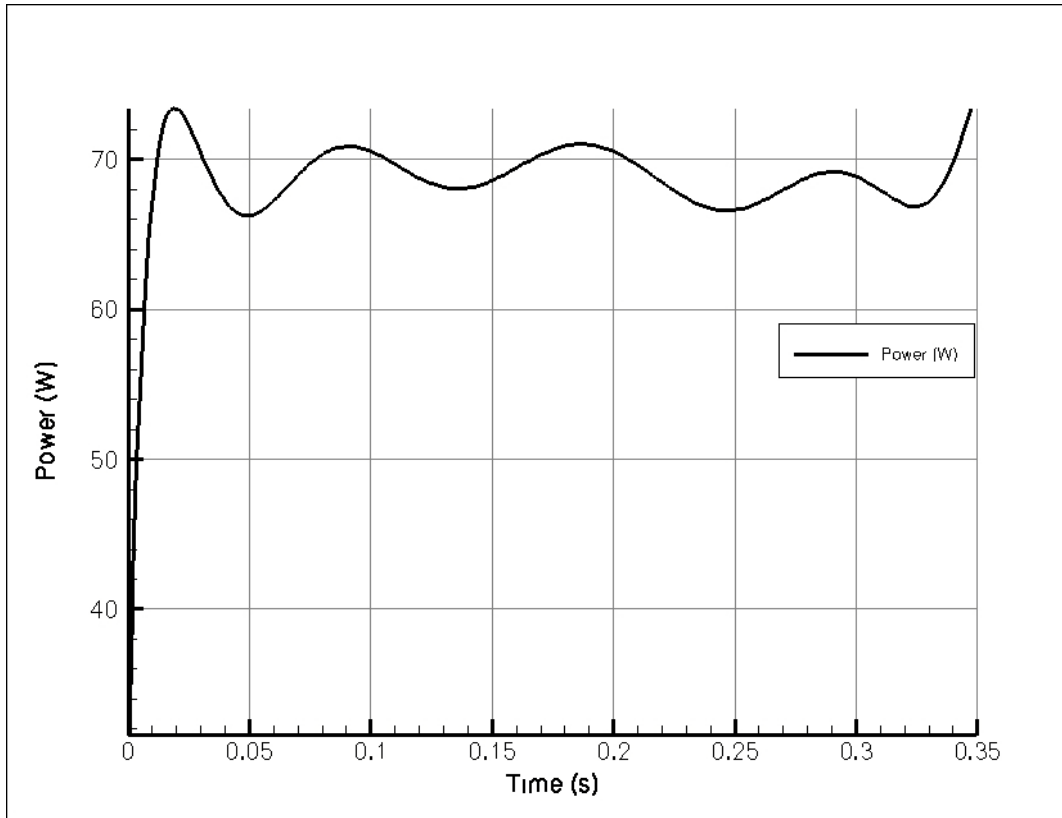
Σχήμα 8.11 Αποτελέσματα μορφής και κατανομής μετρούμενων μεγεθών στο απόβλιττο



Σχήμα 8.12 Διάγραμμα δυνάμεων – χρόνου

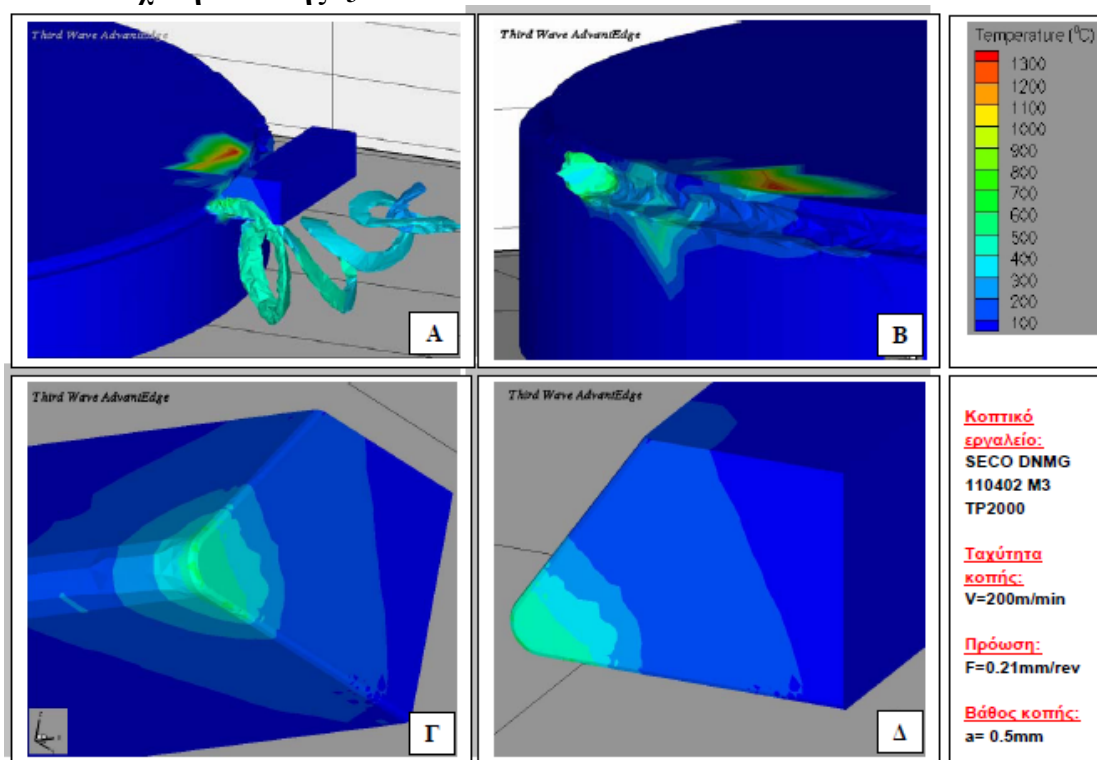


Σχήμα 8.13 Διάγραμμα θερμοκρασίας - χρόνου

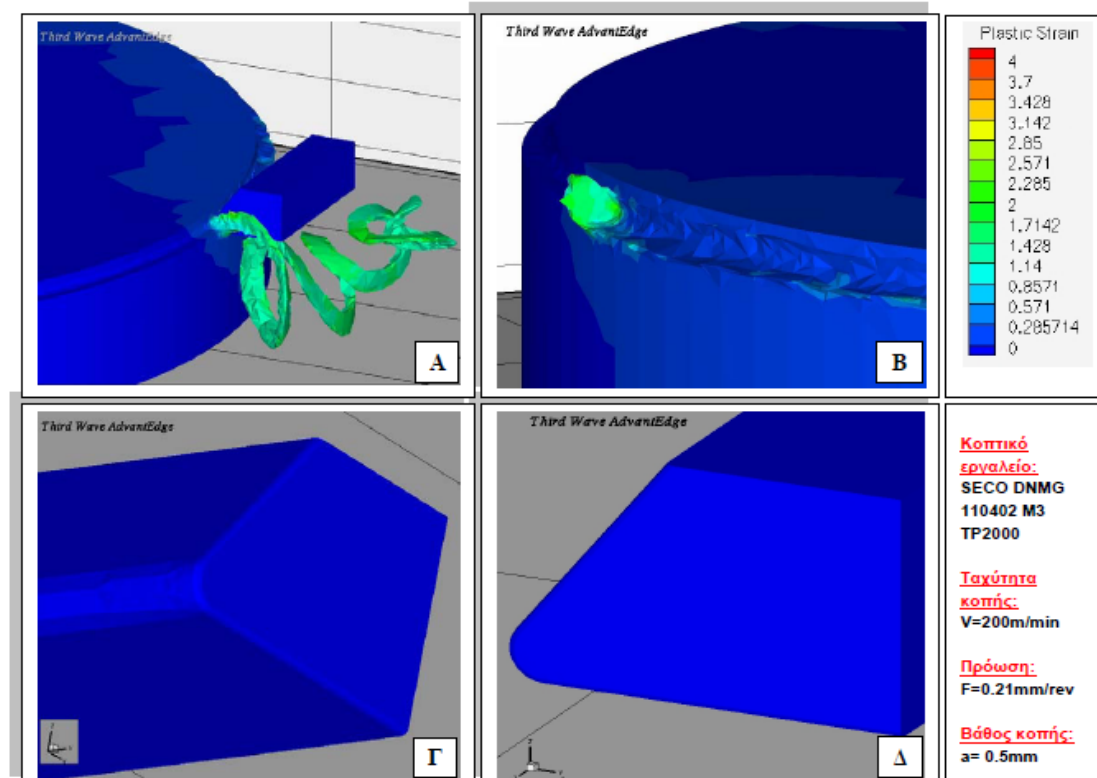


**Σχήμα 8.14** Διάγραμμα ισχύος - χρόνου

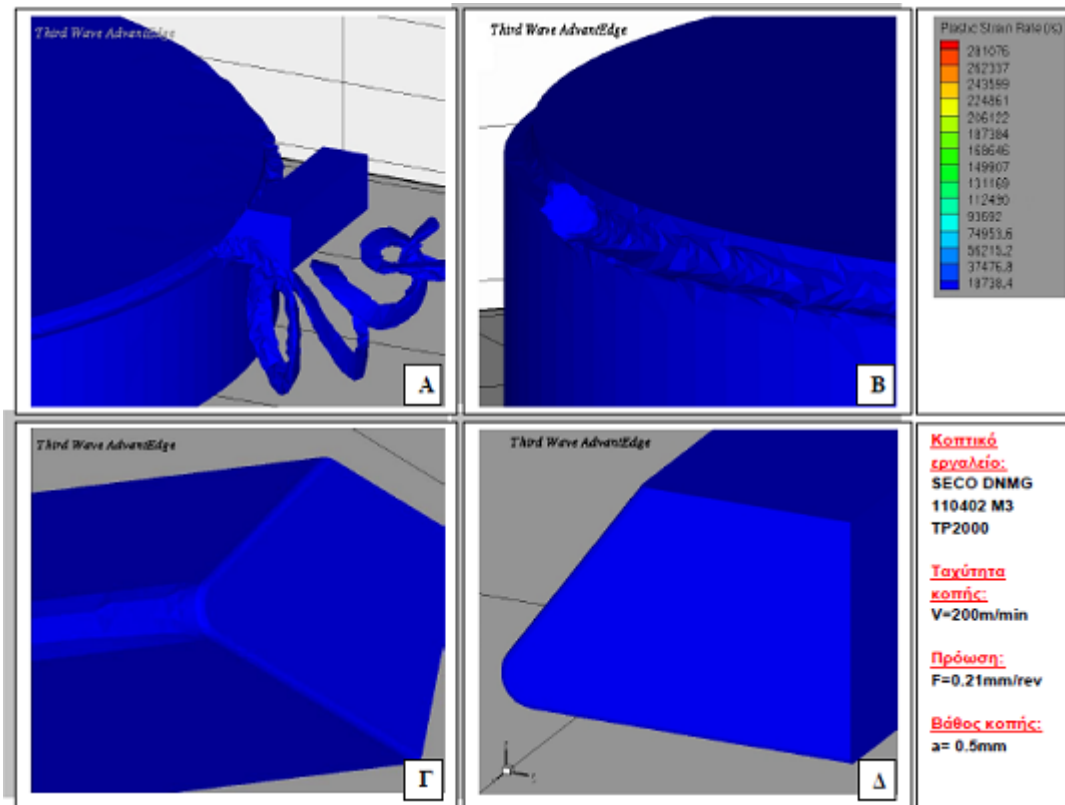
### 8.2.3 Ταχύτητα κοπής $s_3=200\text{m/min}$



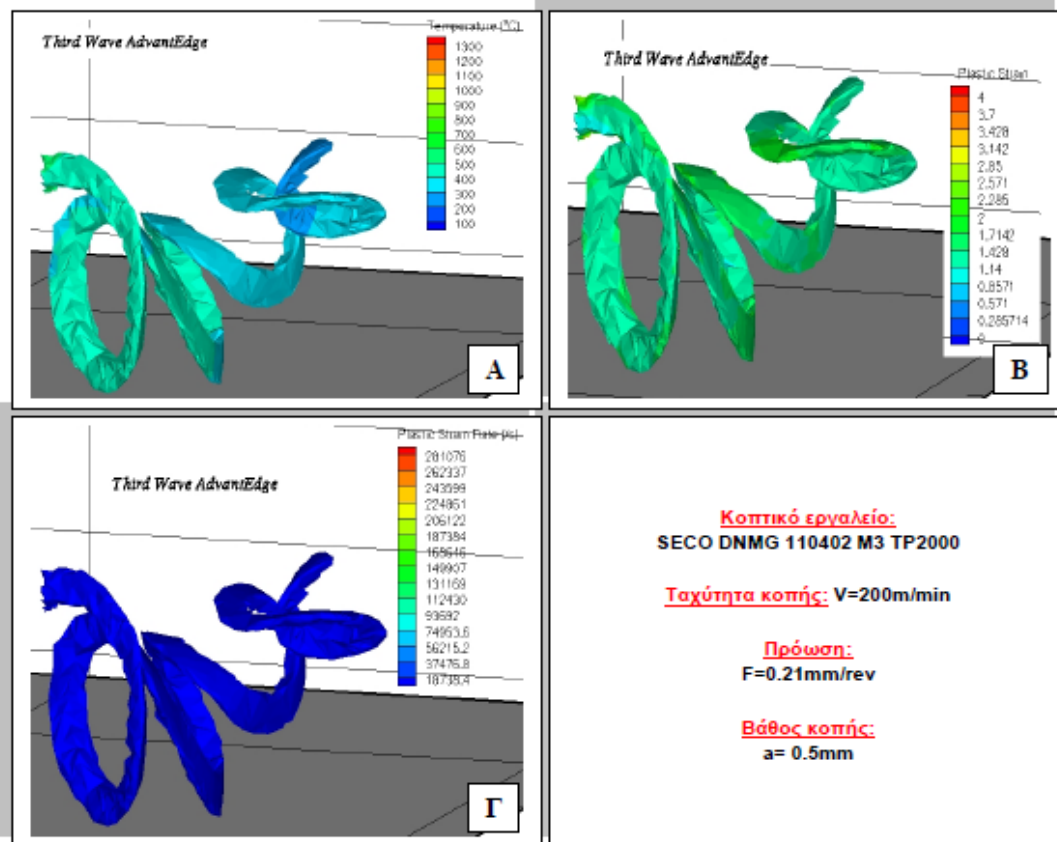
Σχήμα 8.15 Αποτελέσματα κατανομής θερμοκρασίας



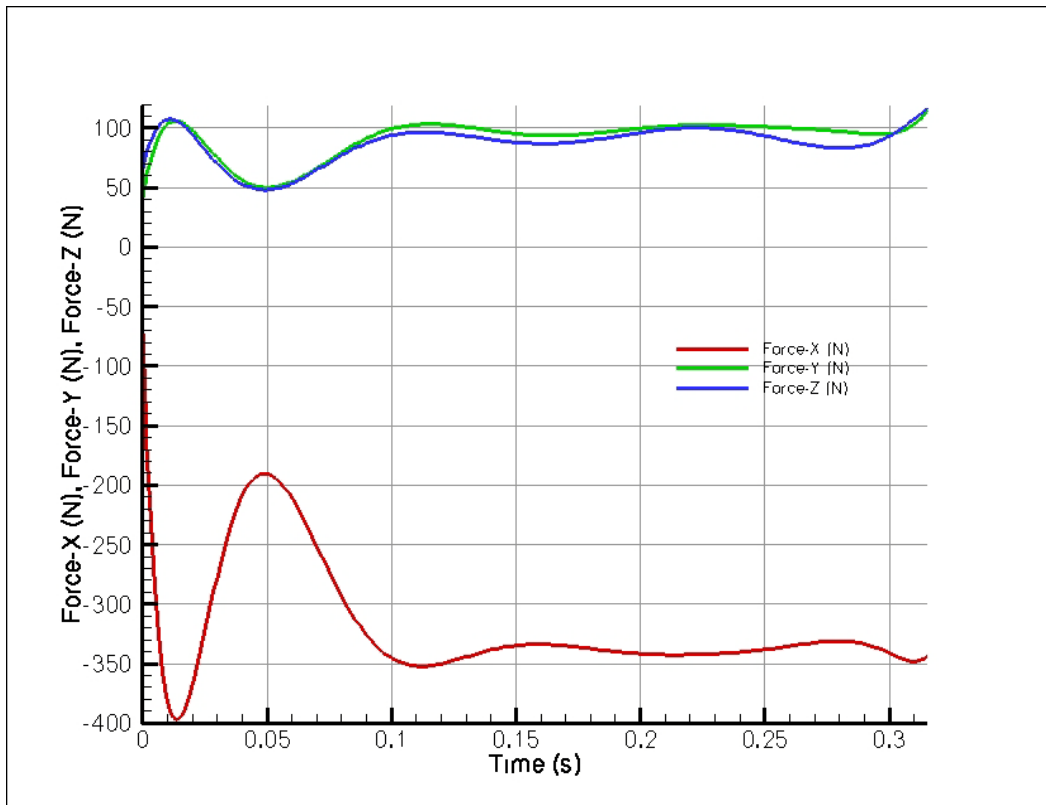
Σχήμα 8.16 Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης



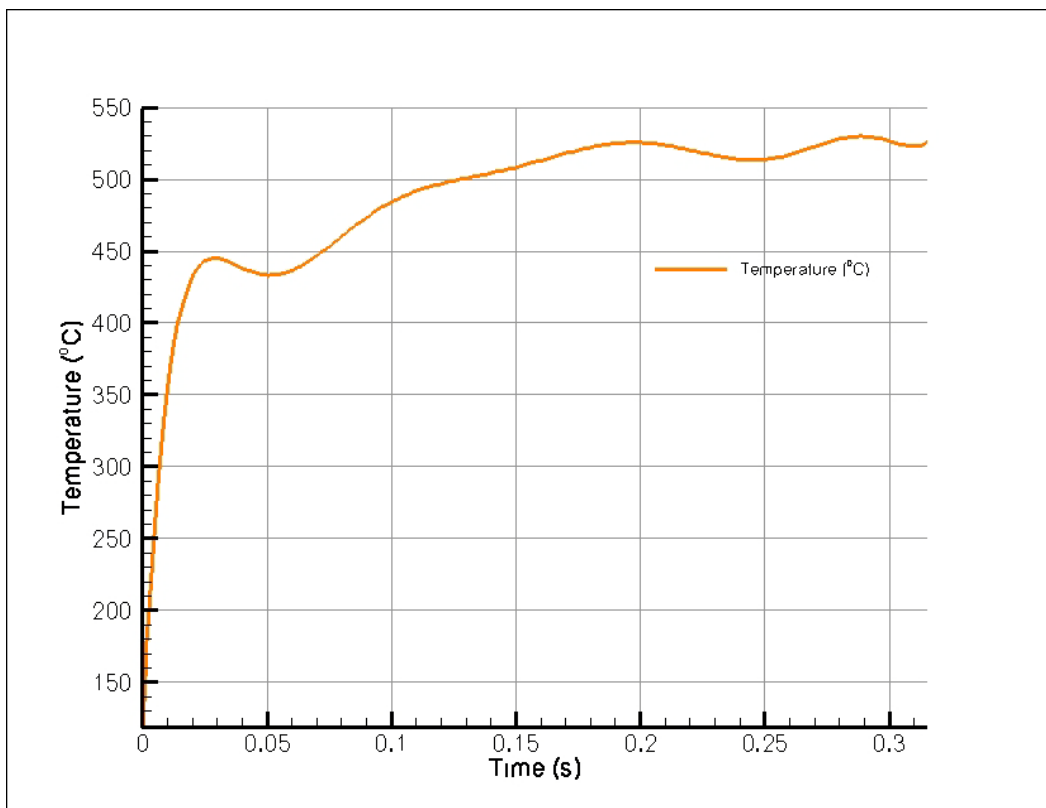
Σχήμα 8.17 Αποτελέσματα ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης



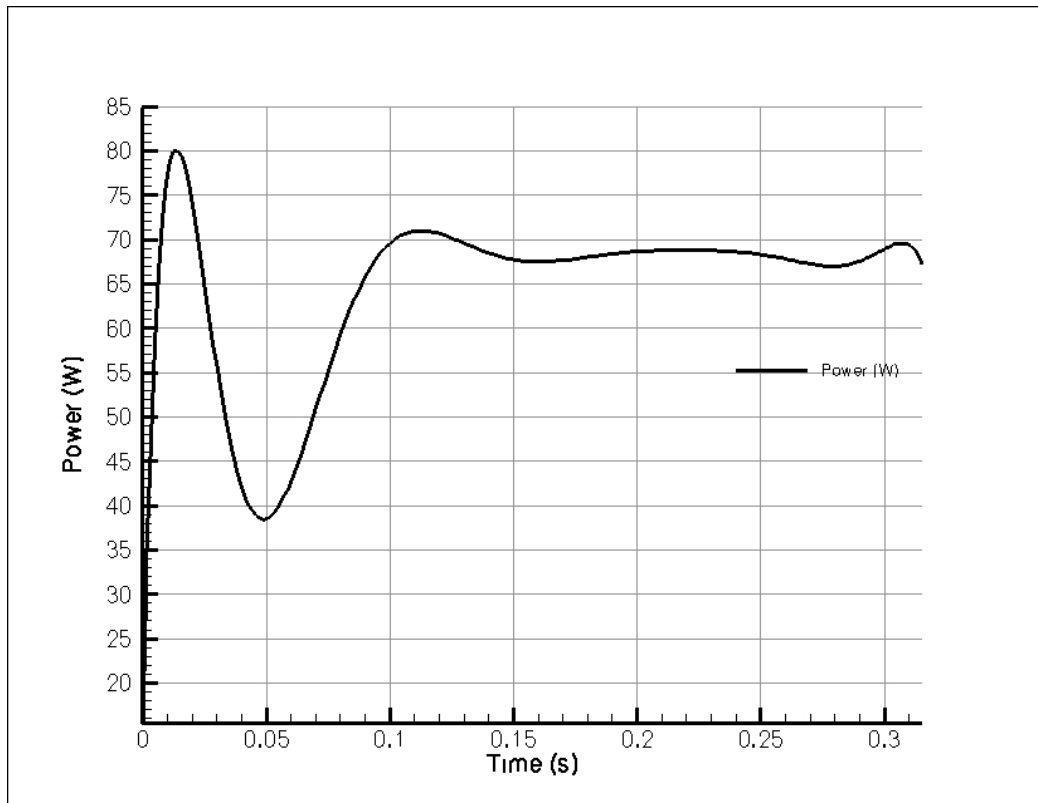
Σχήμα 8.18 Αποτελέσματα μορφής και κατανομής μετρούμενων μεγεθών στο απόβλιττο



Σχήμα 8.19 Διάγραμμα δυνάμεων – χρόνου



Σχήμα 8.20 Διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου



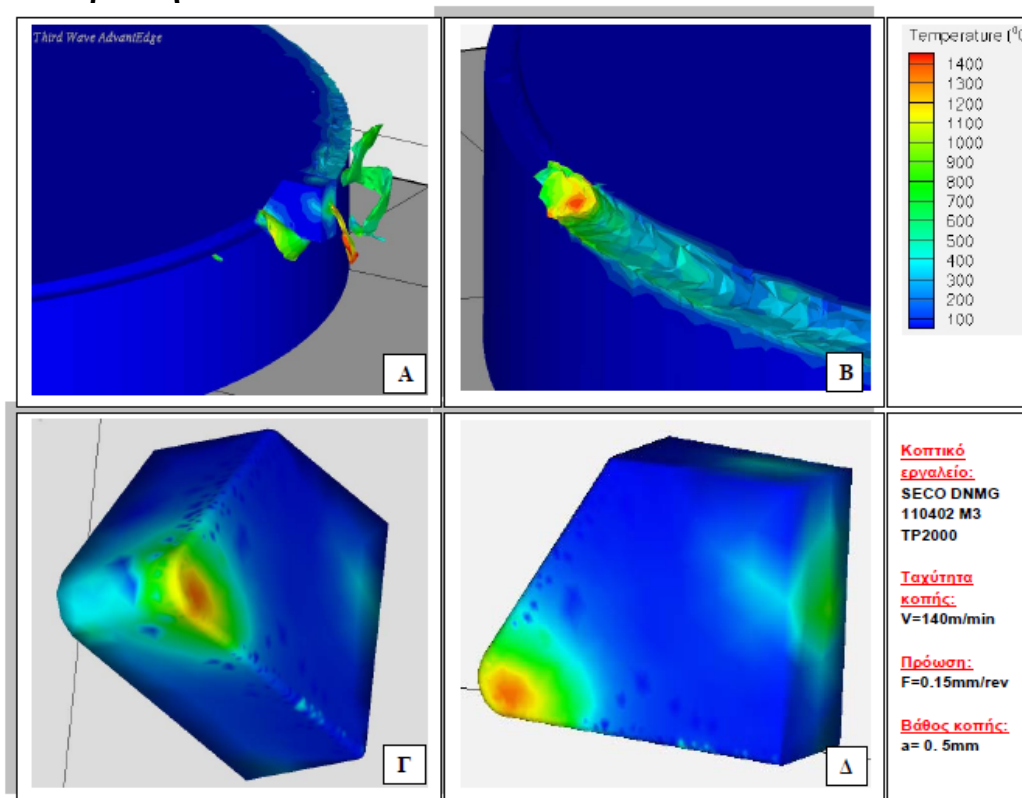
**Σχήμα 8.21** Διάγραμμα ισχύος - χρόνου

### 8.3 Επίδραση της πρόωσης $f$

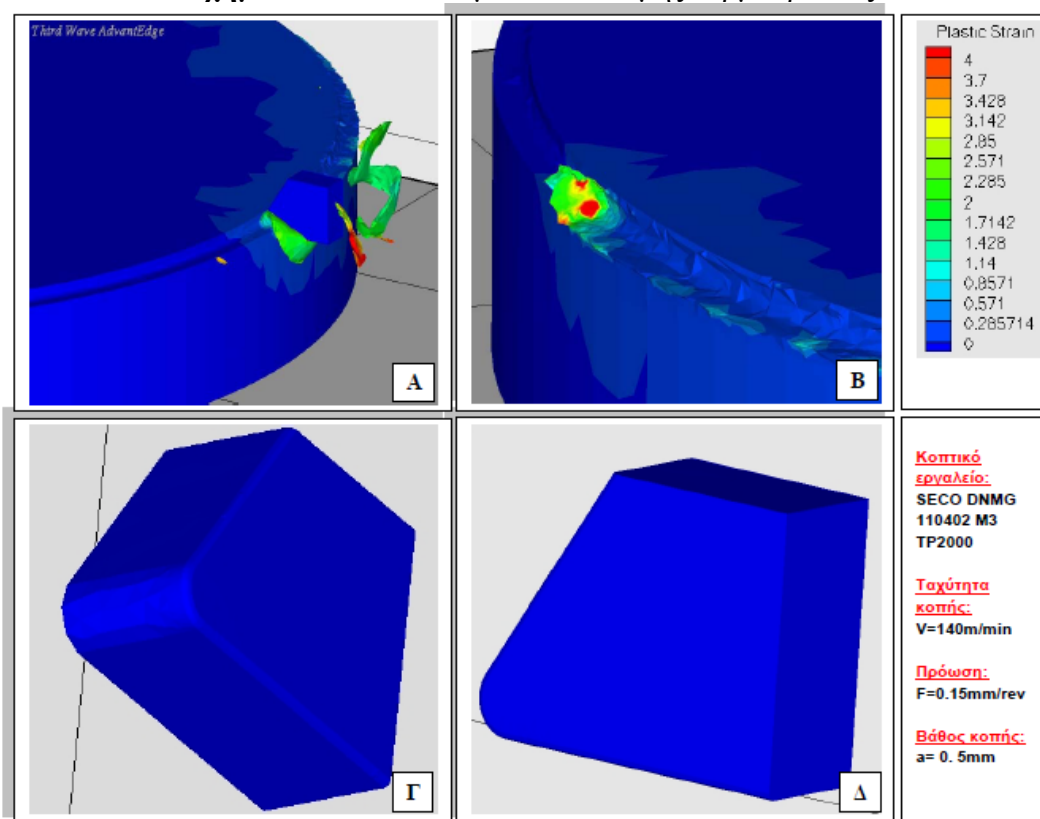
Με σταθερό βάθος κοπής  $a=0.5\text{mm}$ , σταθερή ταχύτητα κοπής  $s=140\text{m/min}$  και πρόωσης  $f_1=0.15\text{mm/rev}$ ,  $f_2=0.21\text{mm/rev}$ ,  $f_3=0.35\text{mm/rev}$



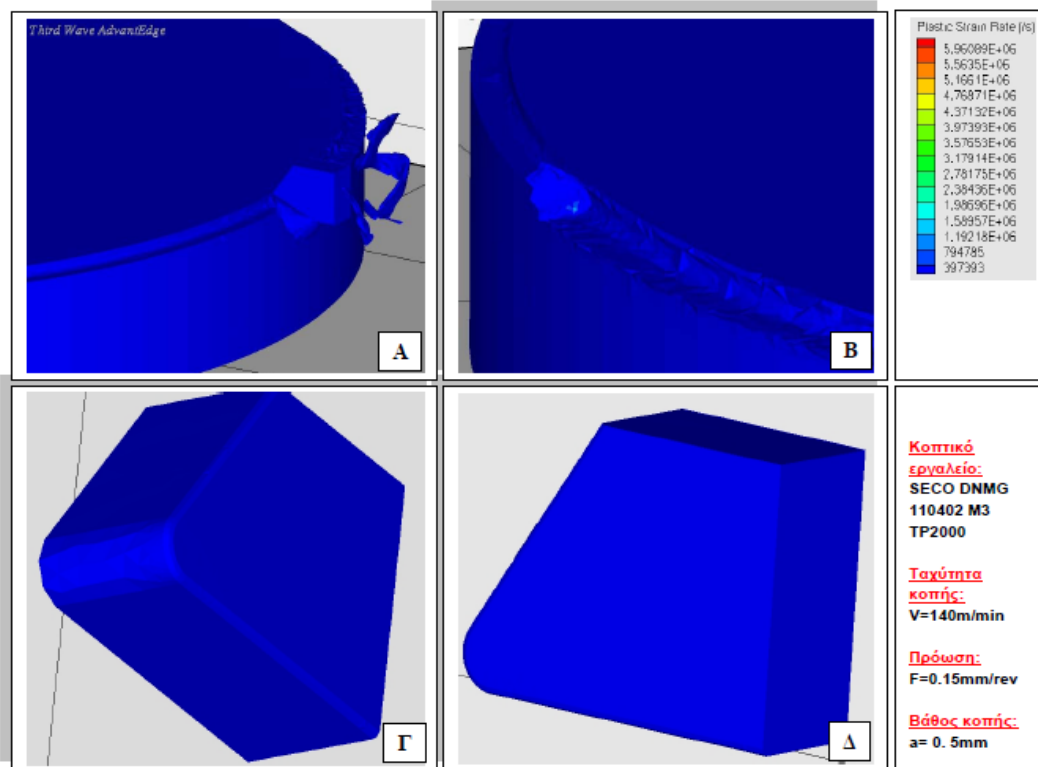
### 8.3.1 Πρόωση $f_1=0.15\text{mm/rev}$



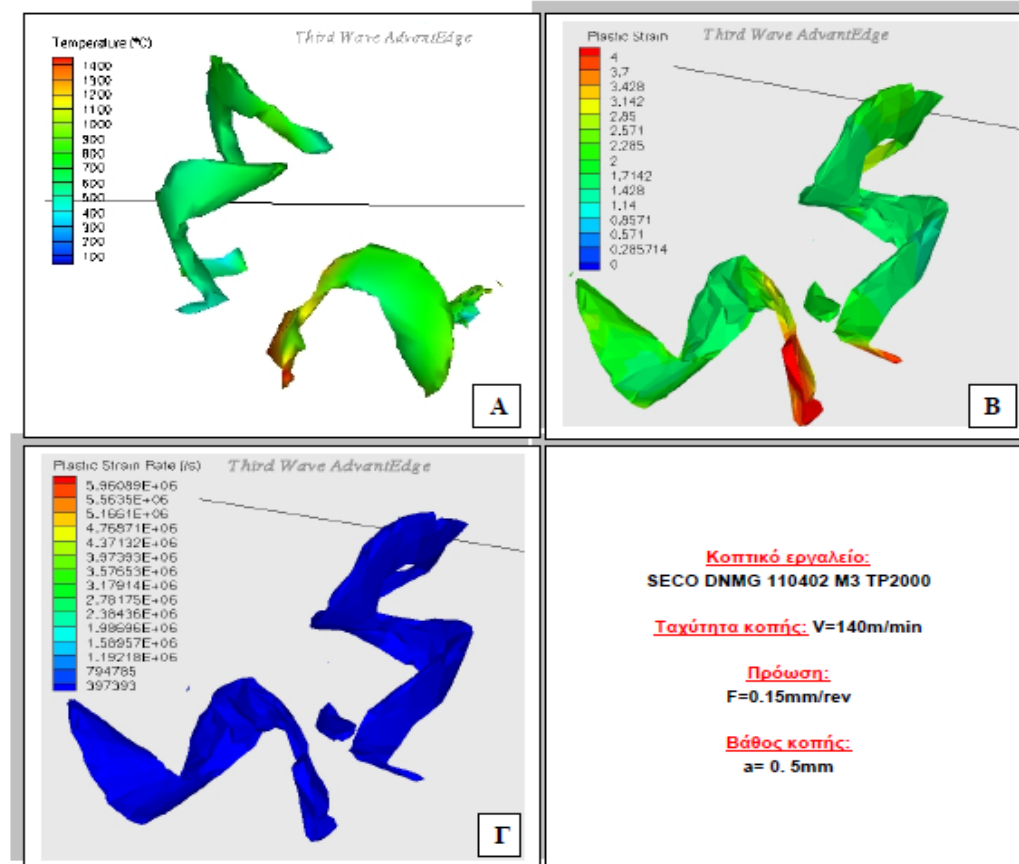
Σχήμα 8.22 Αποτελέσματα κατανομής θερμοκρασίας



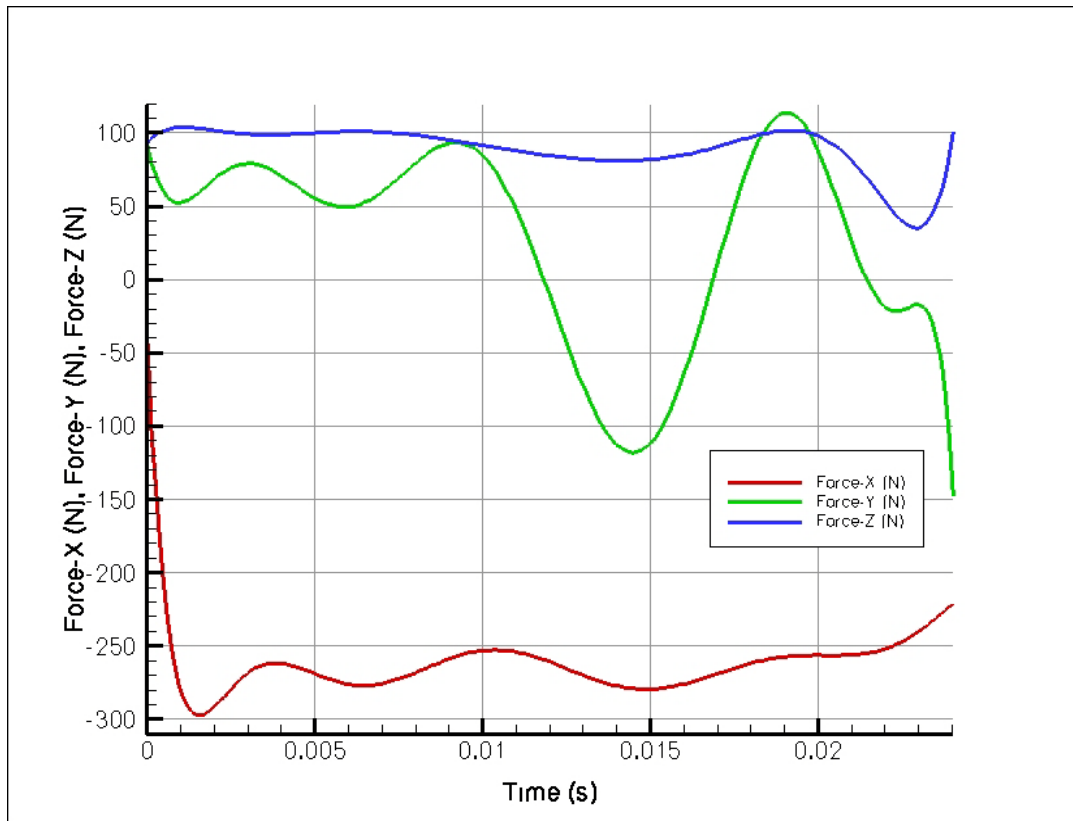
Σχήμα 8.23 Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης



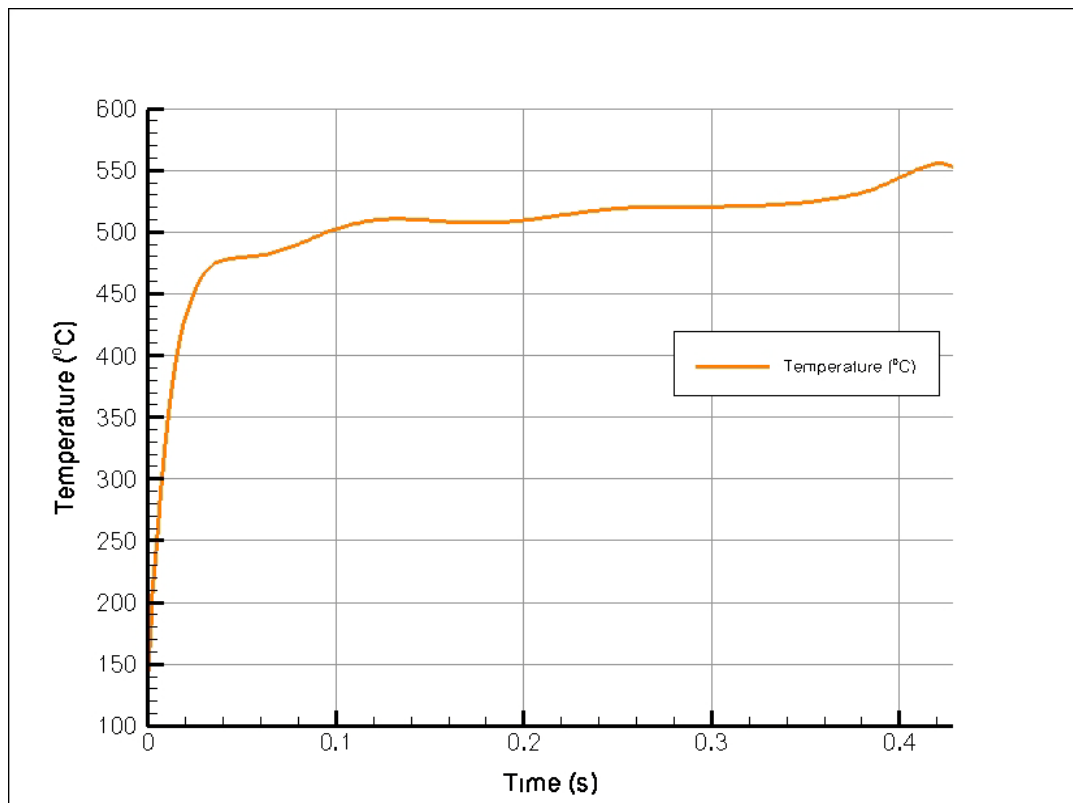
Σχήμα 8.24 Αποτελέσματα ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης



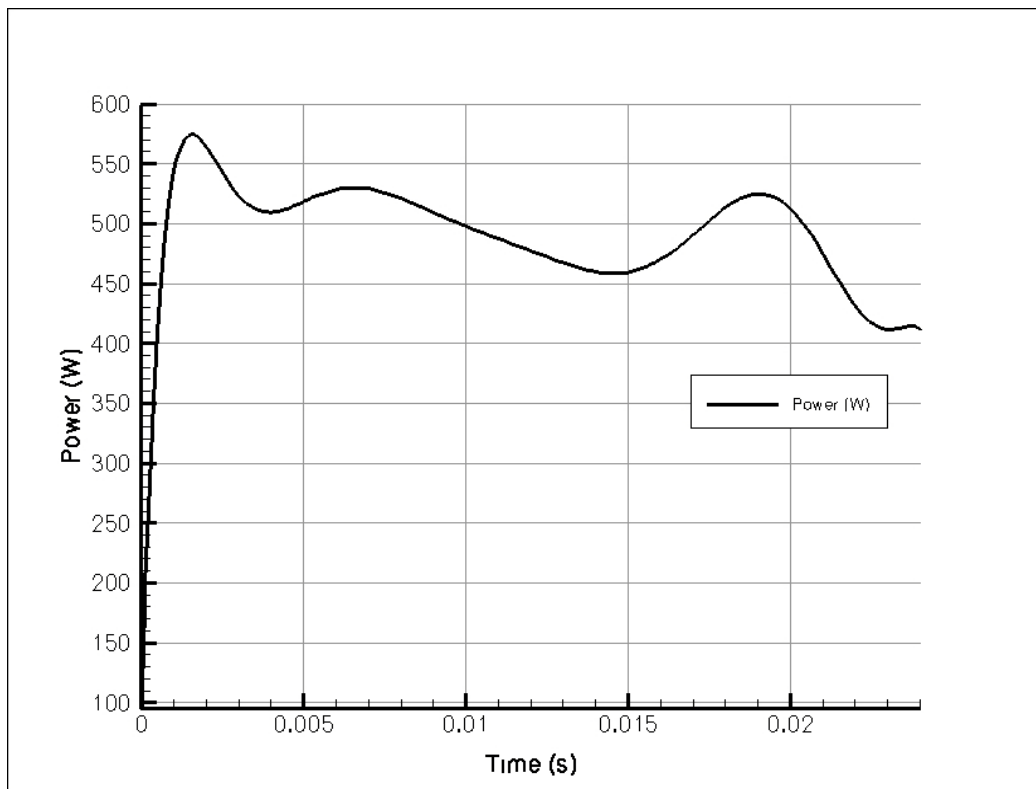
Σχήμα 8.25 Αποτελέσματα μορφής και κατανομής μετρούμενων μεγεθών στο απόβλιττο



Σχήμα 8.26 Διάγραμμα δυνάμεων – χρόνου

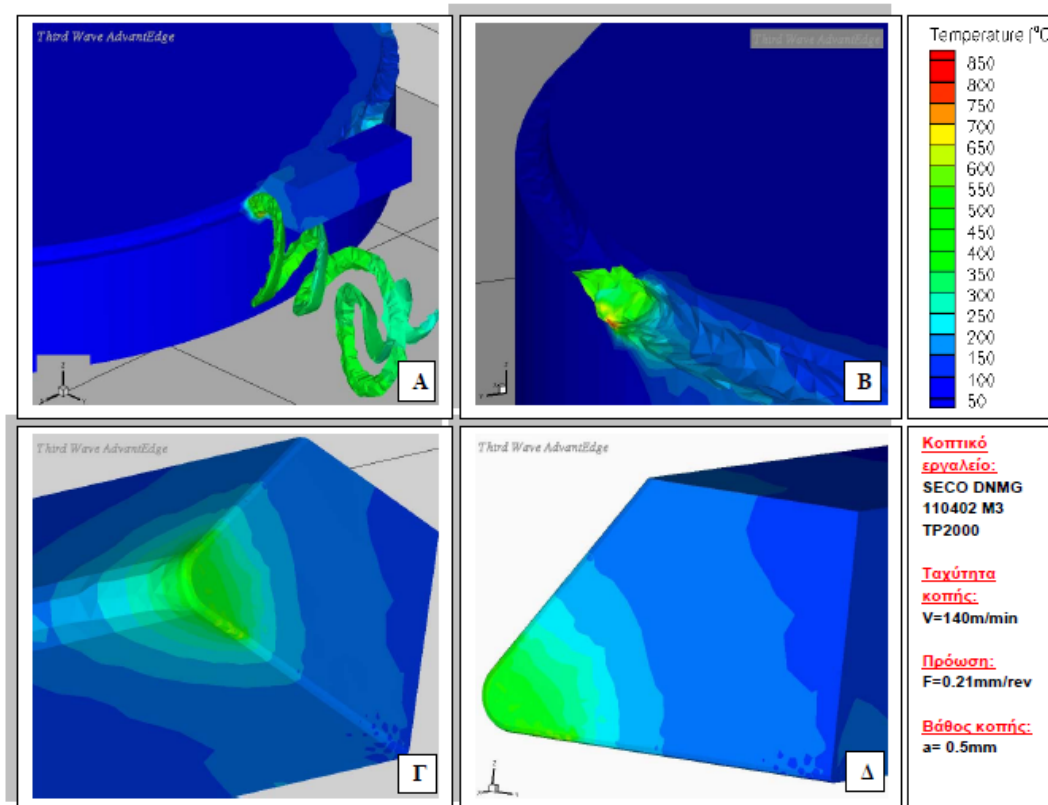


Σχήμα 8.27 Διάγραμμα θερμοκρασίας - χρόνου

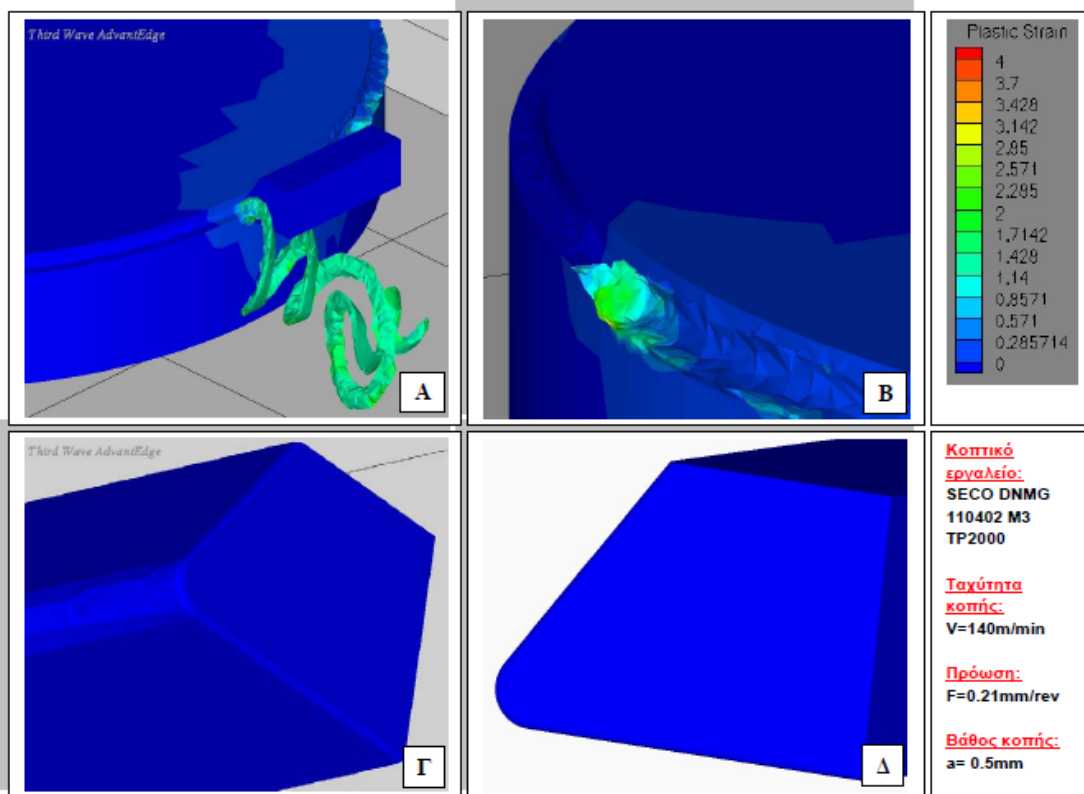


Σχήμα 8.28 Διάγραμμα ισχύος - χρόνου

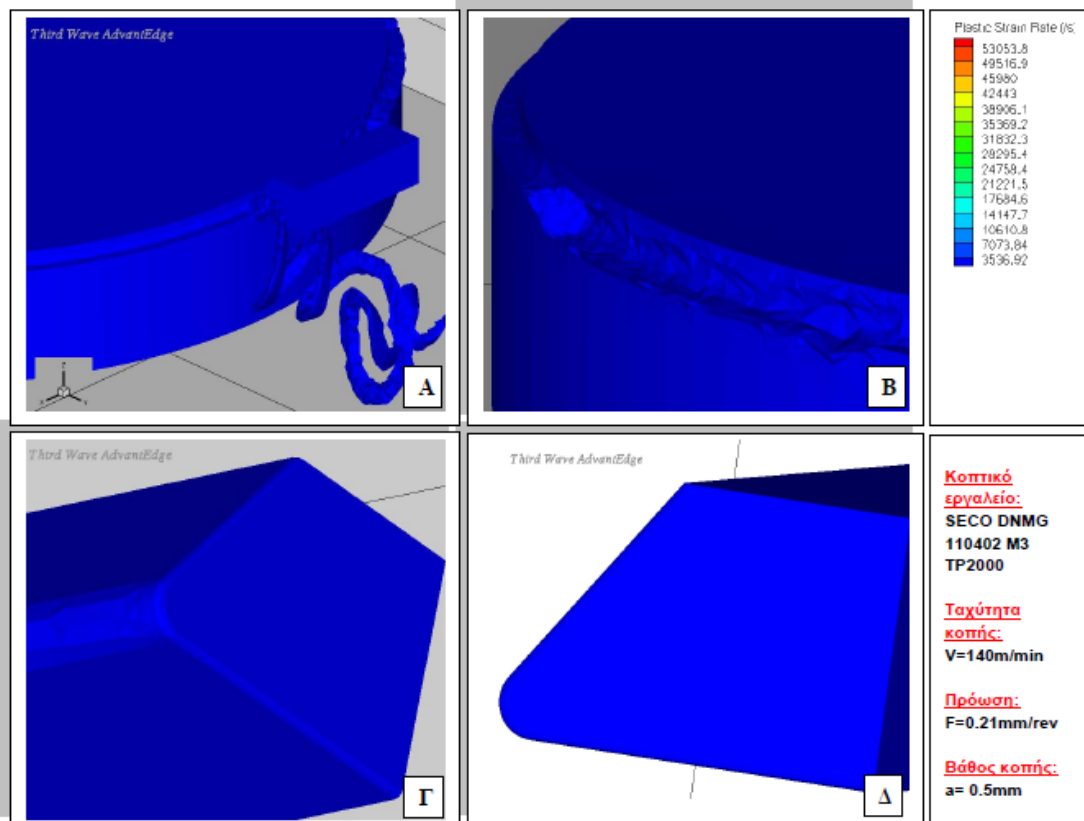
### 8.3.2 Πρόωση $f_2=0.21\text{mm/rev}$



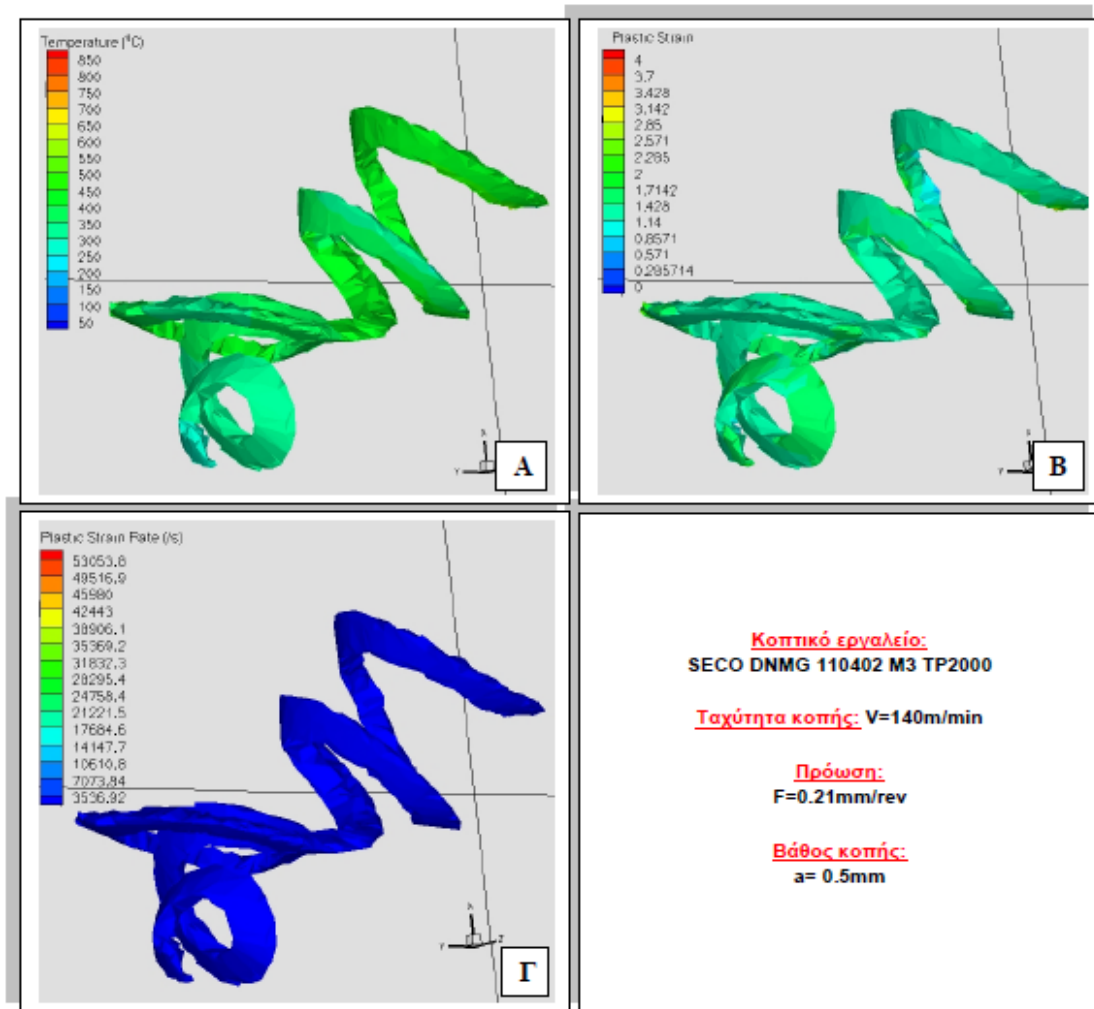
Σχήμα 8.29 Αποτελέσματα κατανομής θερμοκρασίας



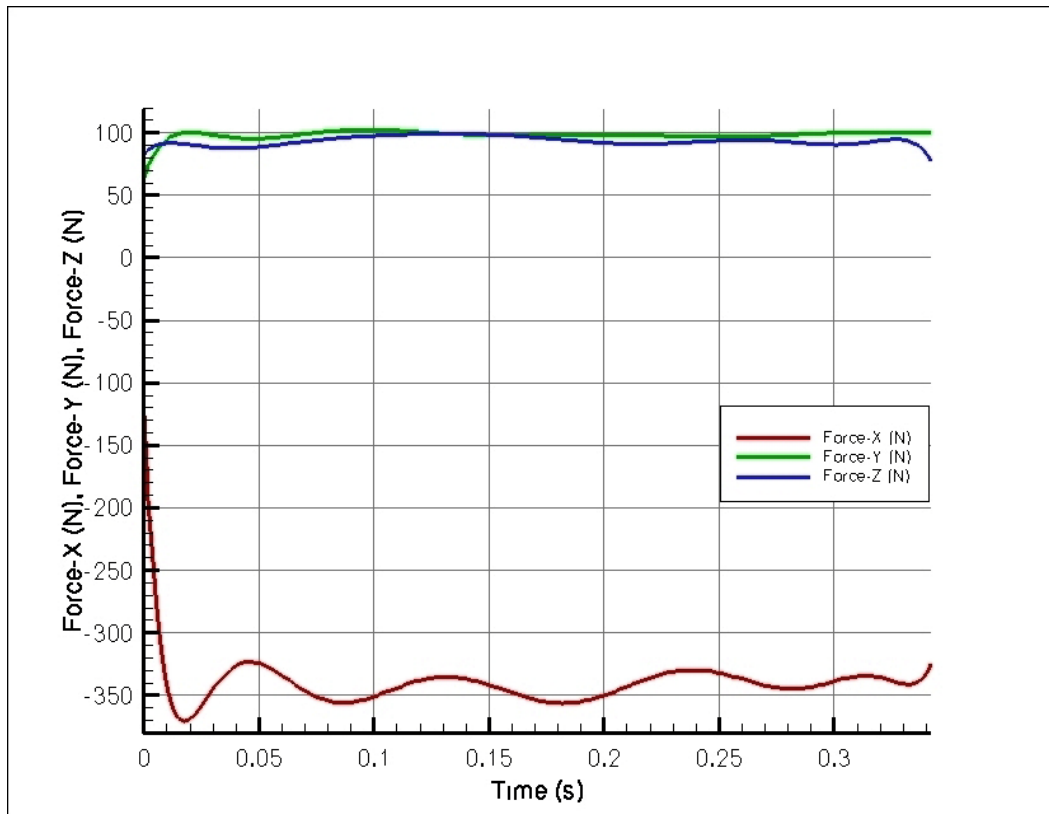
Σχήμα 8.30 Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης



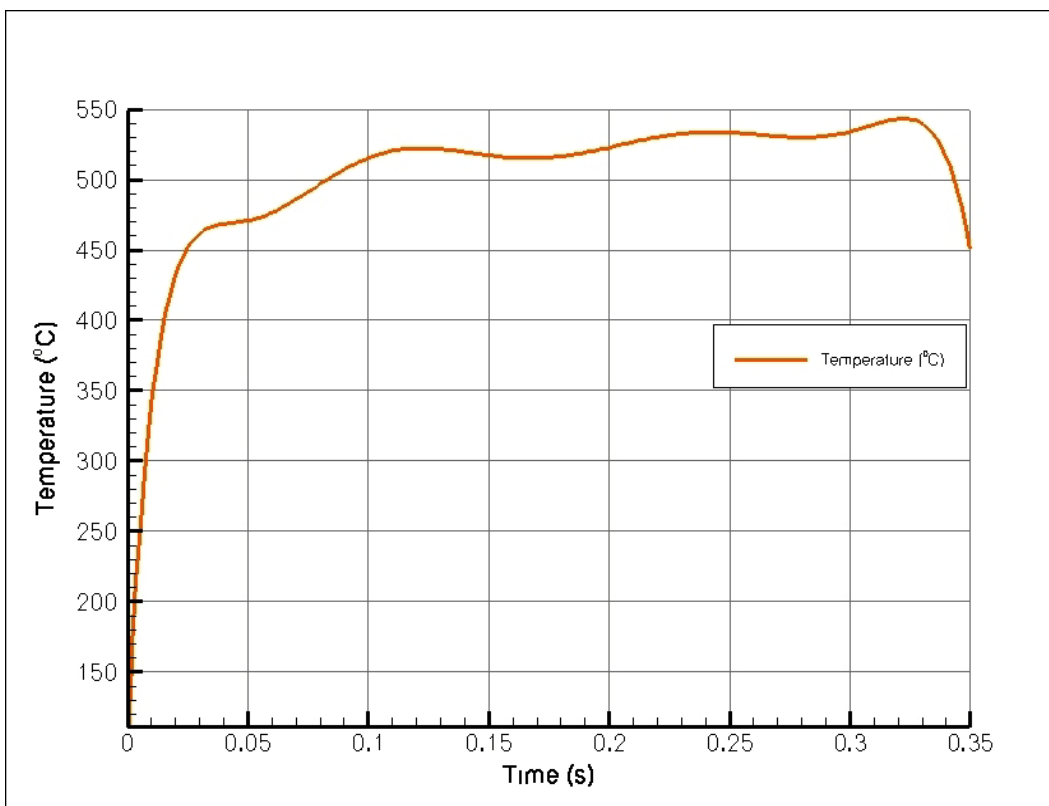
Σχήμα 8.31 Αποτελέσματα ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης



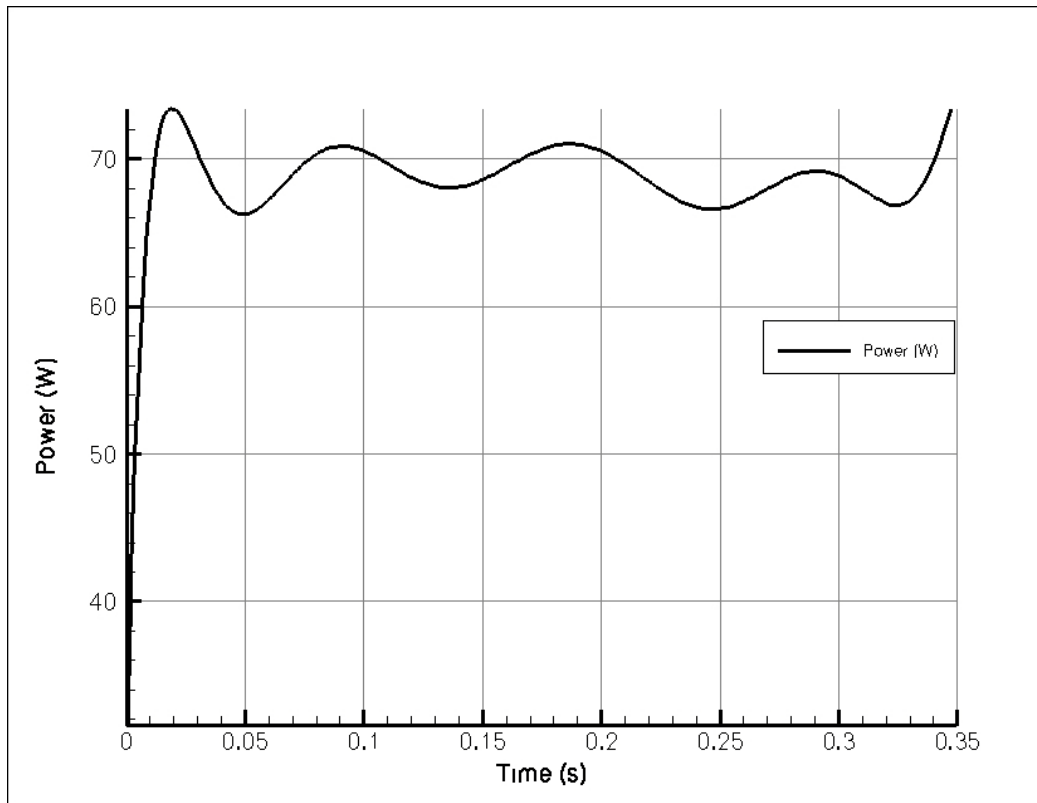
Σχήμα 8.32 Αποτελέσματα μορφής και κατανομής μετρούμενων μεγεθών στο απόβλιττο



Σχήμα 8.33 Διάγραμμα δυνάμεων - χρόνου

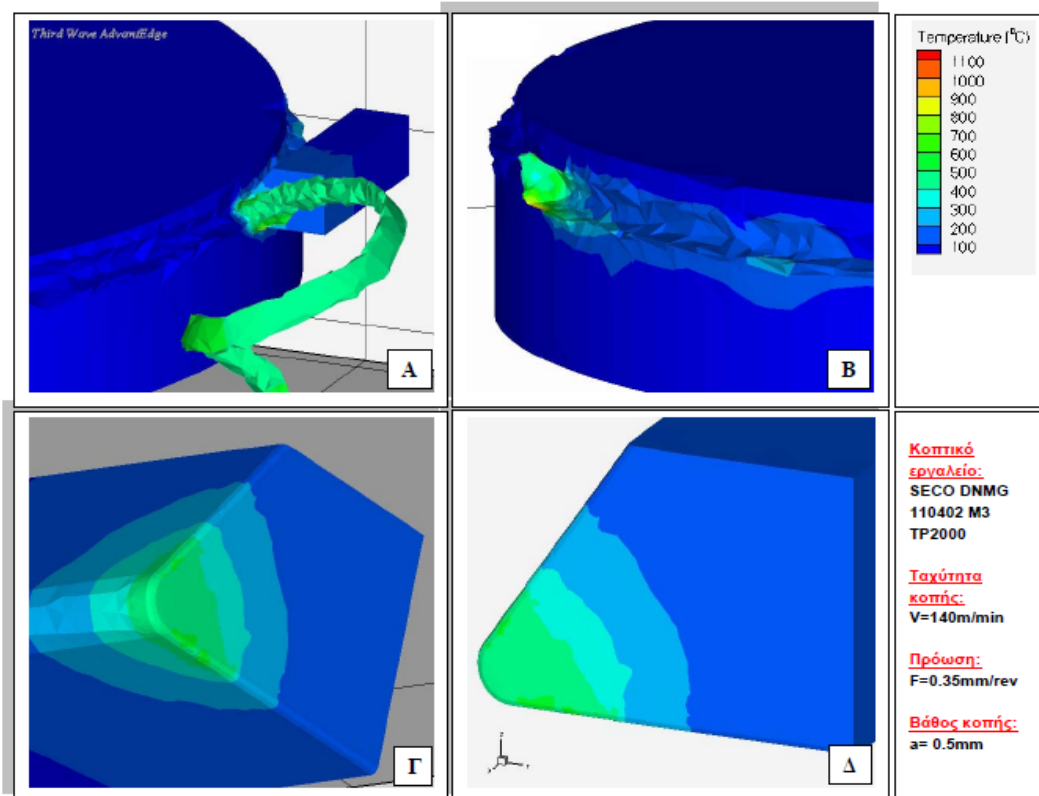


Σχήμα 8.34 Διάγραμμα θερμοκρασίας - χρόνου



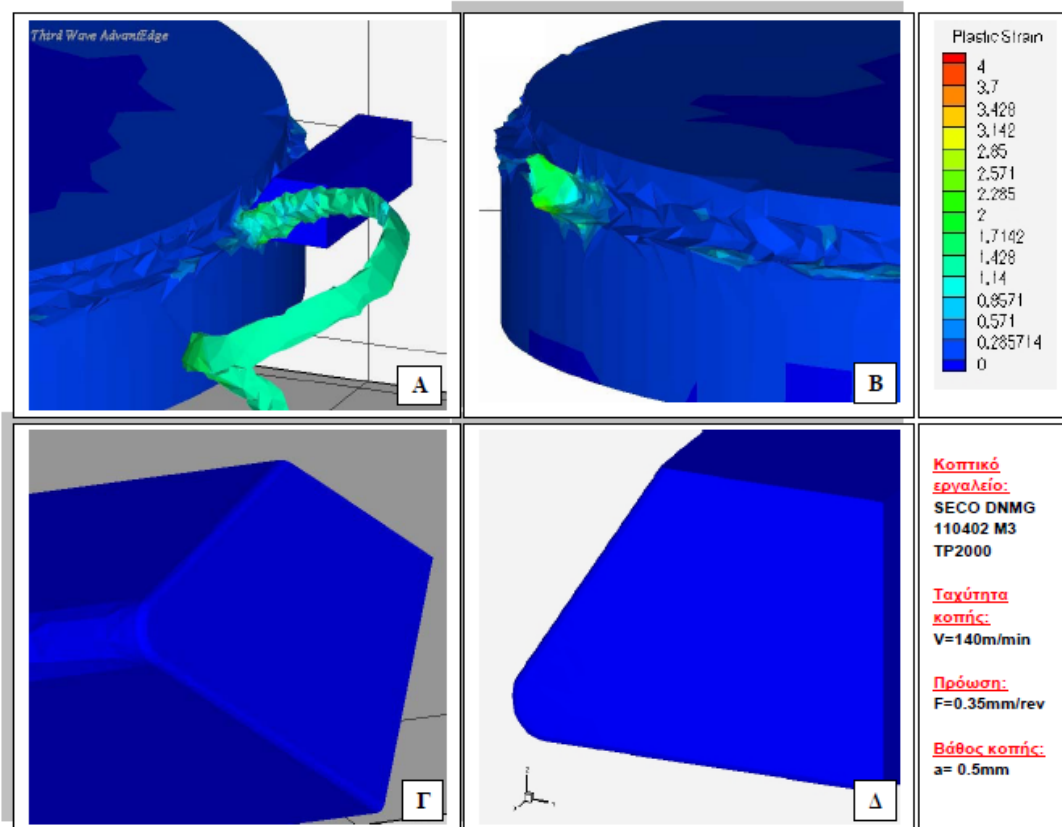
Σχήμα 8.35 Διάγραμμα ισχύος - χρόνου

### 8.3.3 Πρόωση $f_3=0.35\text{mm/rev}$

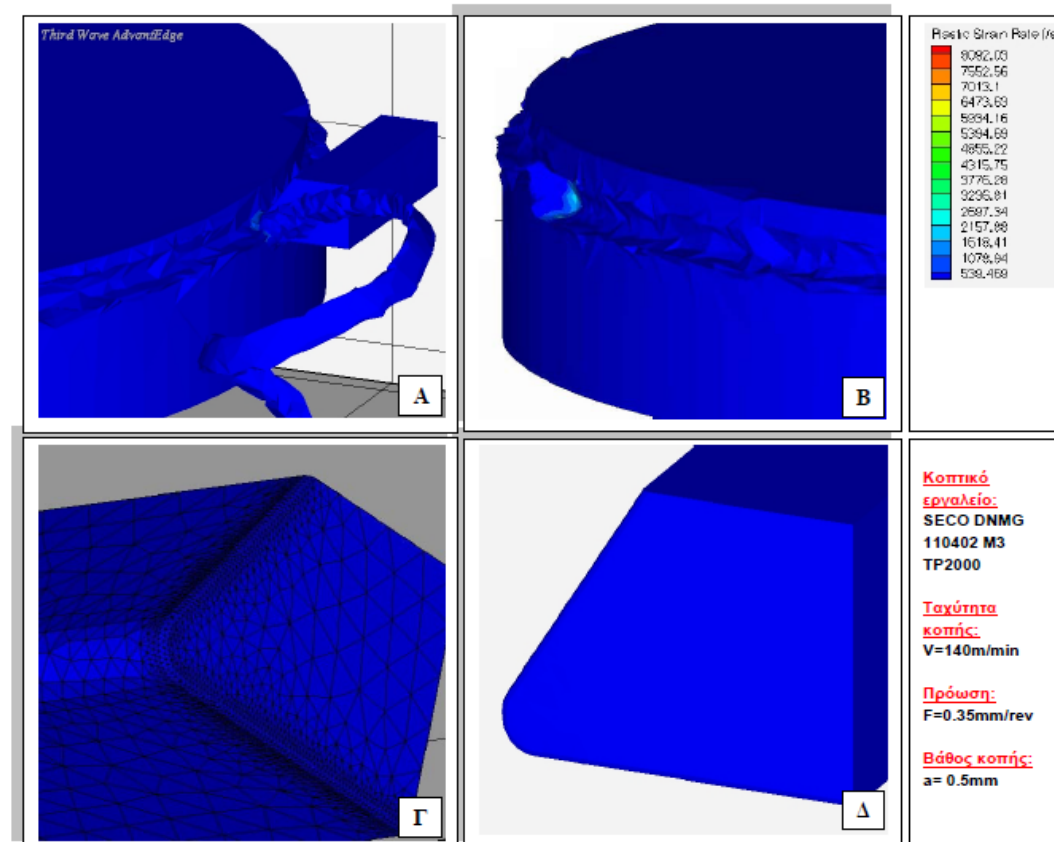


Σχήμα 8.36 Αποτελέσματα κατανομής θερμοκρασίας

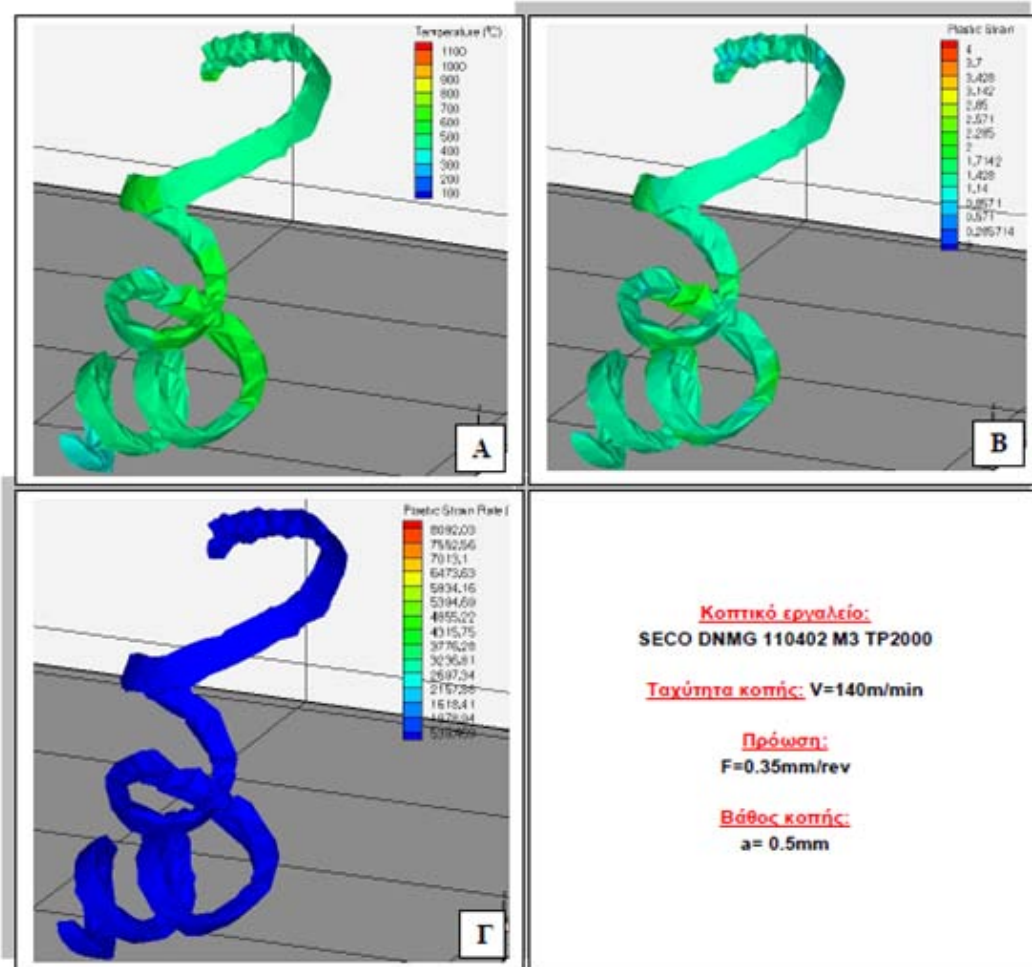




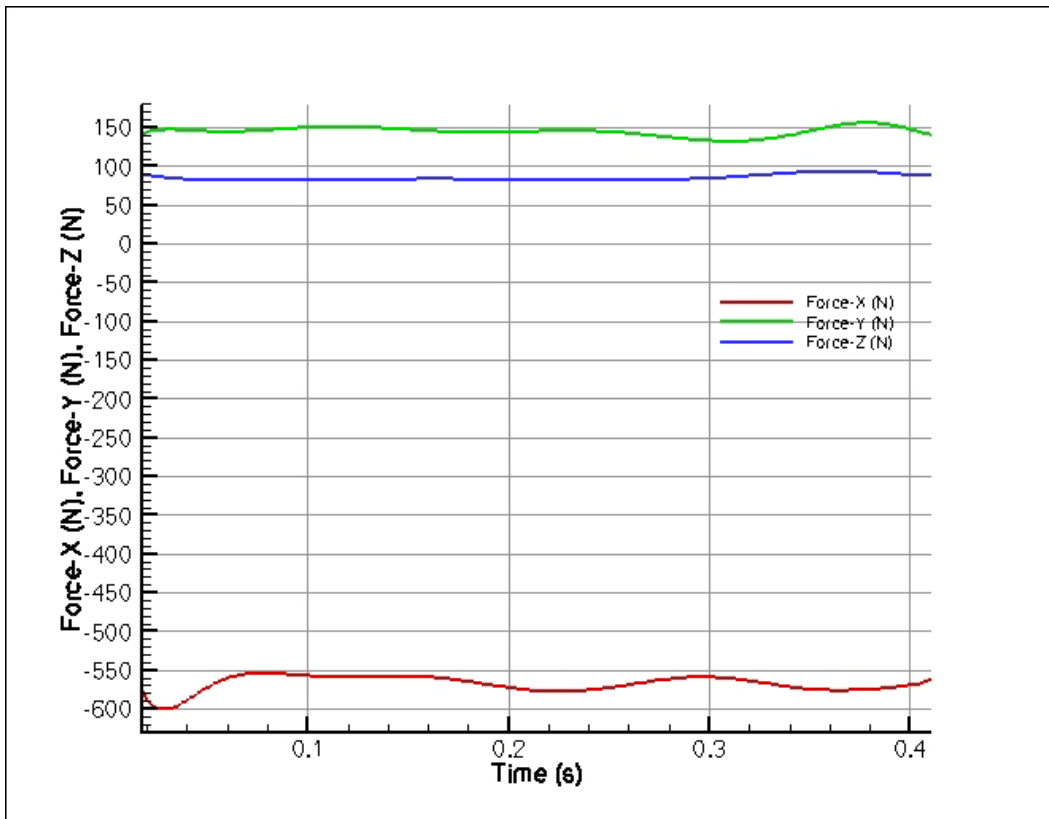
Σχήμα 8.37 Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης



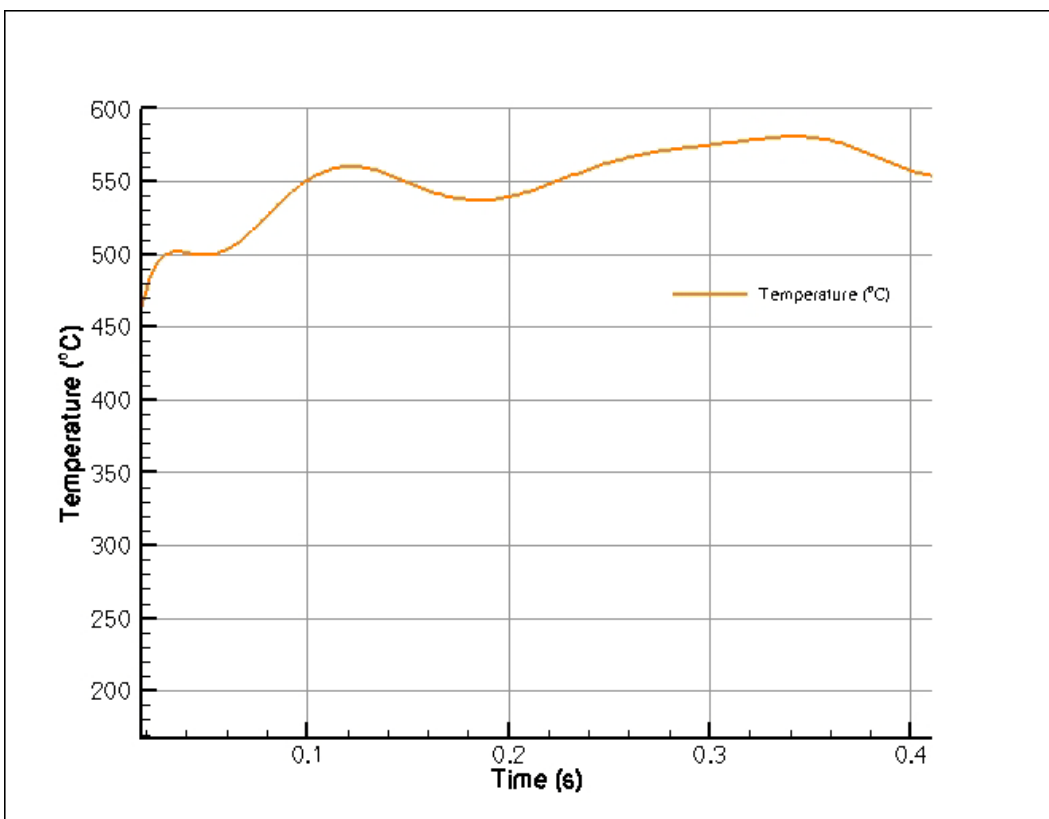
Σχήμα 8.38 Αποτελέσματα ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης



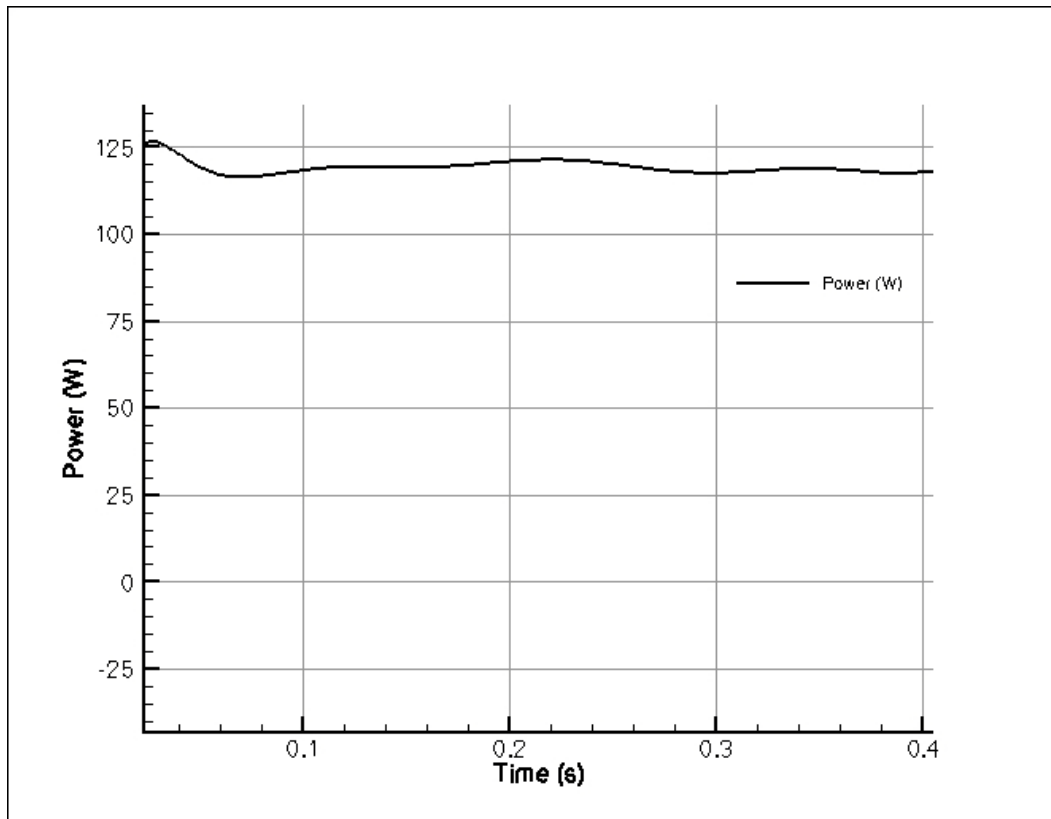
Σχήμα 8.39 Αποτελέσματα μορφής και κατανομής μετρούμενων μεγεθών στο απόβλιττο



Σχήμα 8.40 Διάγραμμα δυνάμεων - χρόνου



Σχήμα 8.41 Διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου

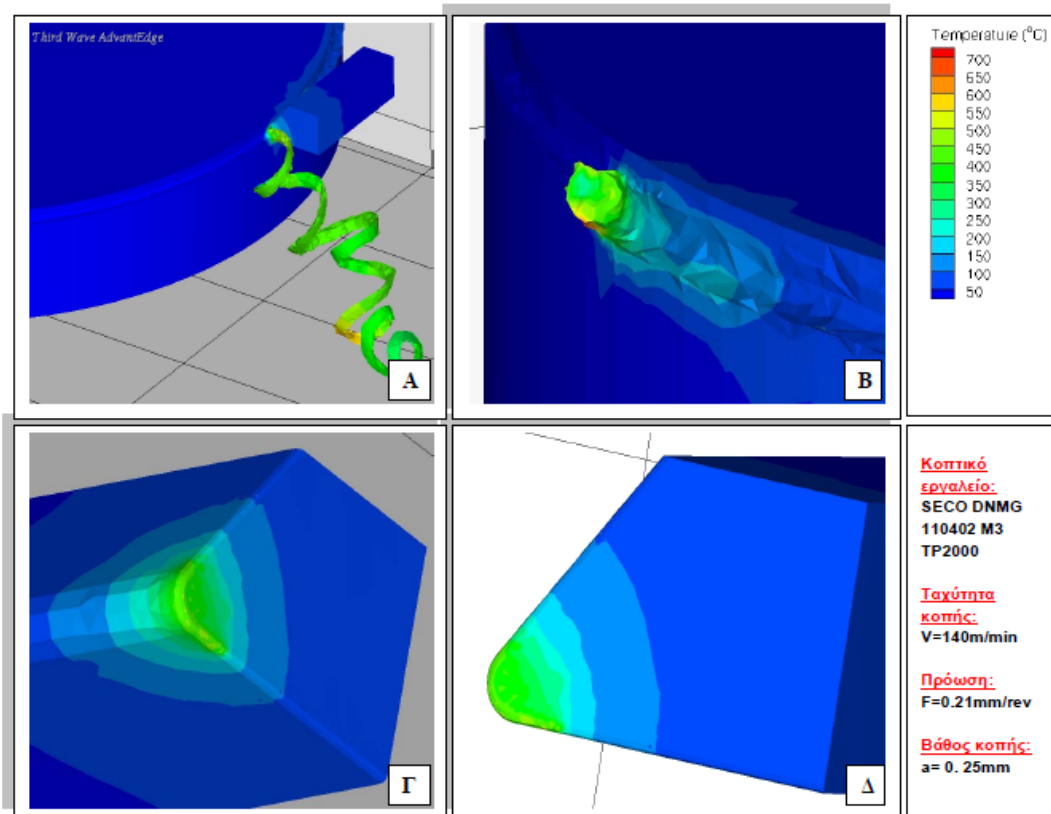


Σχήμα 8.42 Διάγραμμα ισχύος - χρόνου

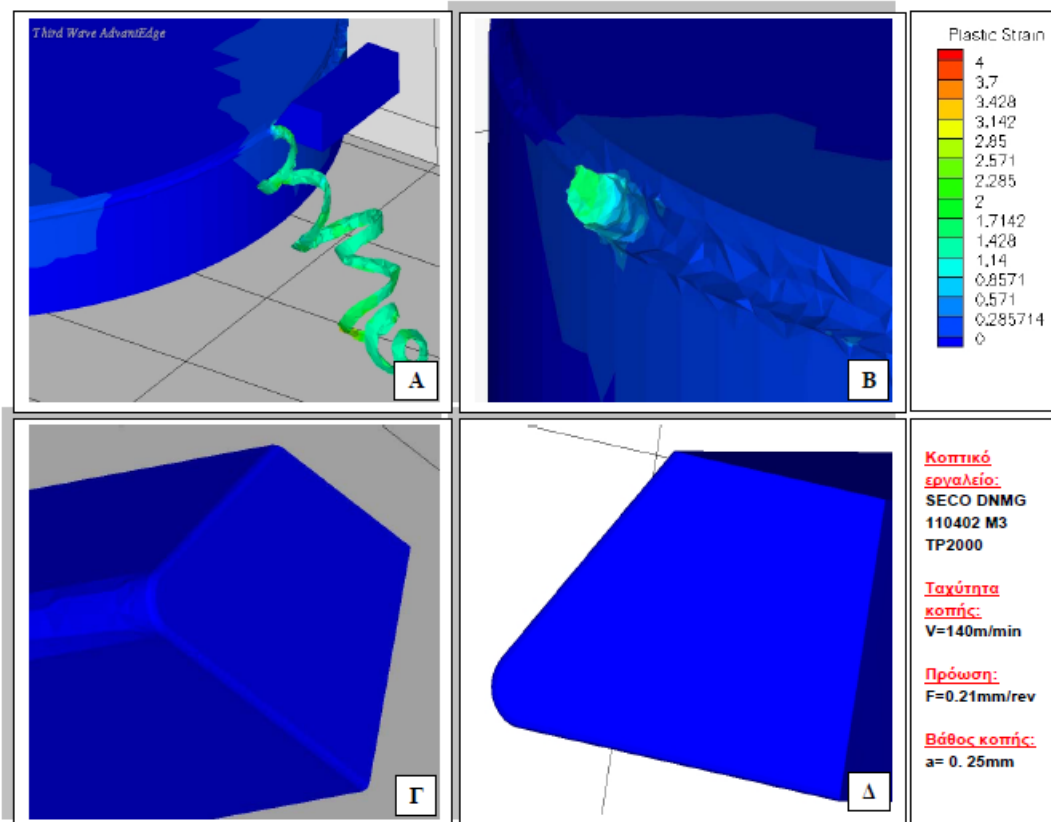
#### 8.4 Επίδραση του βάθους κοπής $a$

Με σταθερή ταχύτητα κοπής  $s=140\text{m/min}$ , σταθερή πρόωση  $f=0.21\text{mm/rev}$  και βάθος κοπής  $a_1=0.25\text{mm}$ ,  $a_2=0.5\text{mm}$ ,  $a_3=1.0\text{mm}$

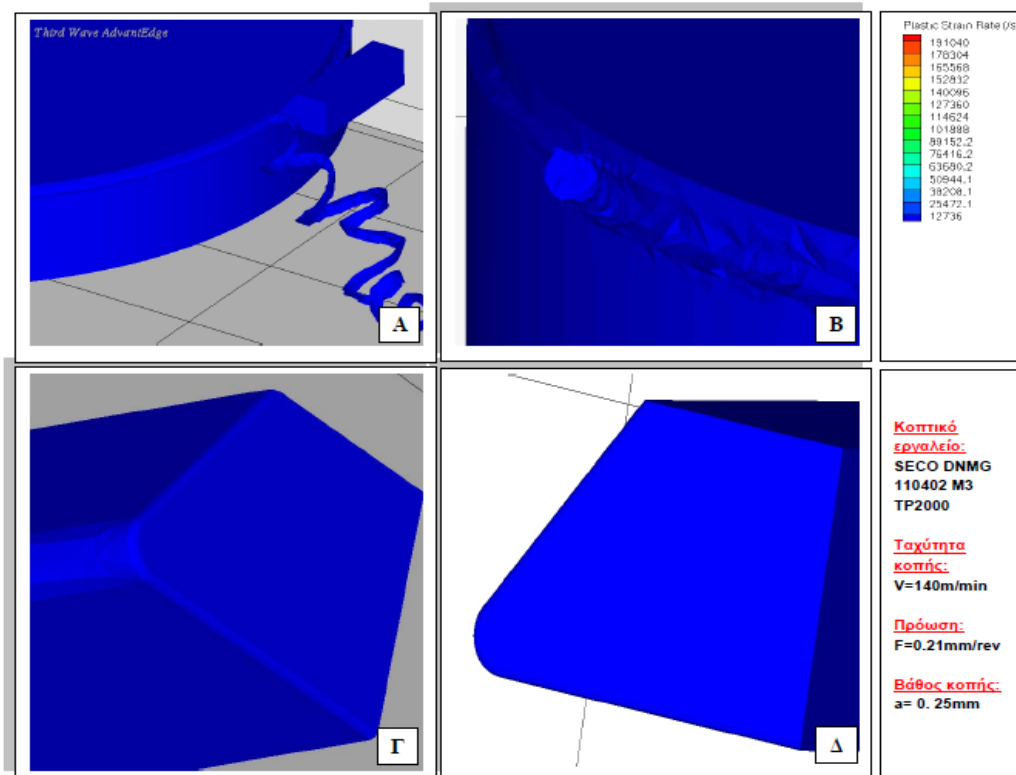
### 8.4.1 Βάθος κοπής $a_1=0.25\text{mm}$



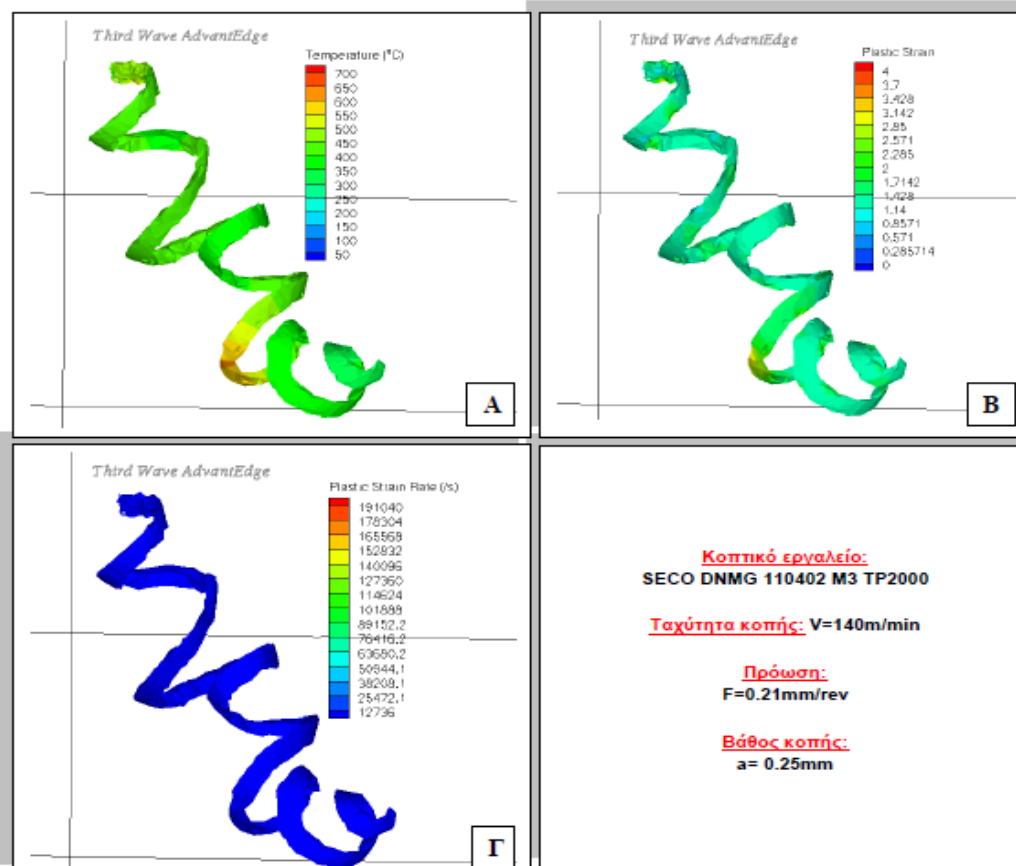
Σχήμα 8.43 Αποτελέσματα κατανομής θερμοκρασίας



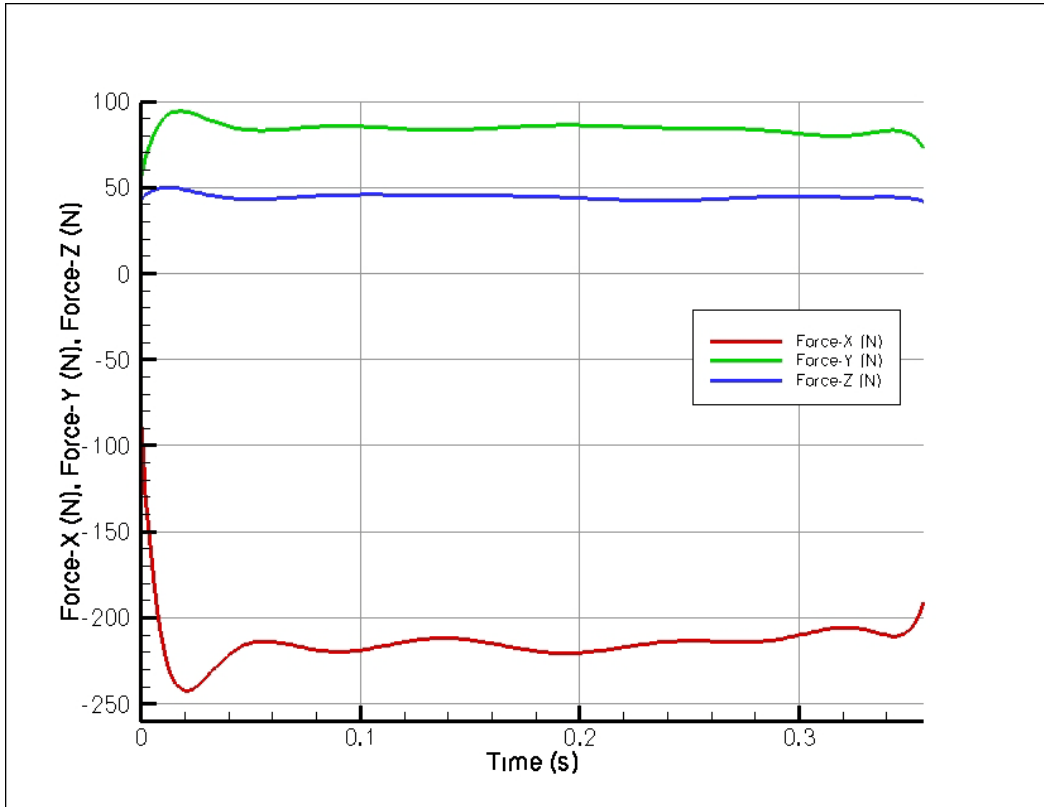
Σχήμα 8.44 Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης



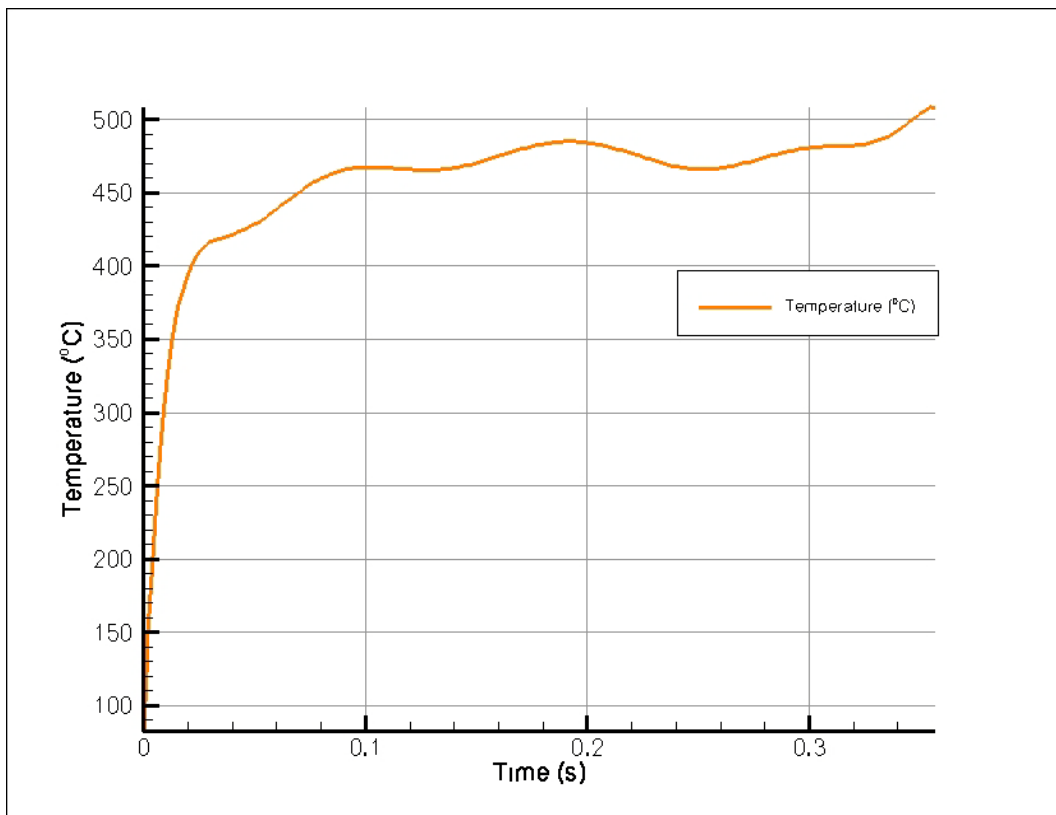
Σχήμα 8.45 Αποτελέσματα ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης



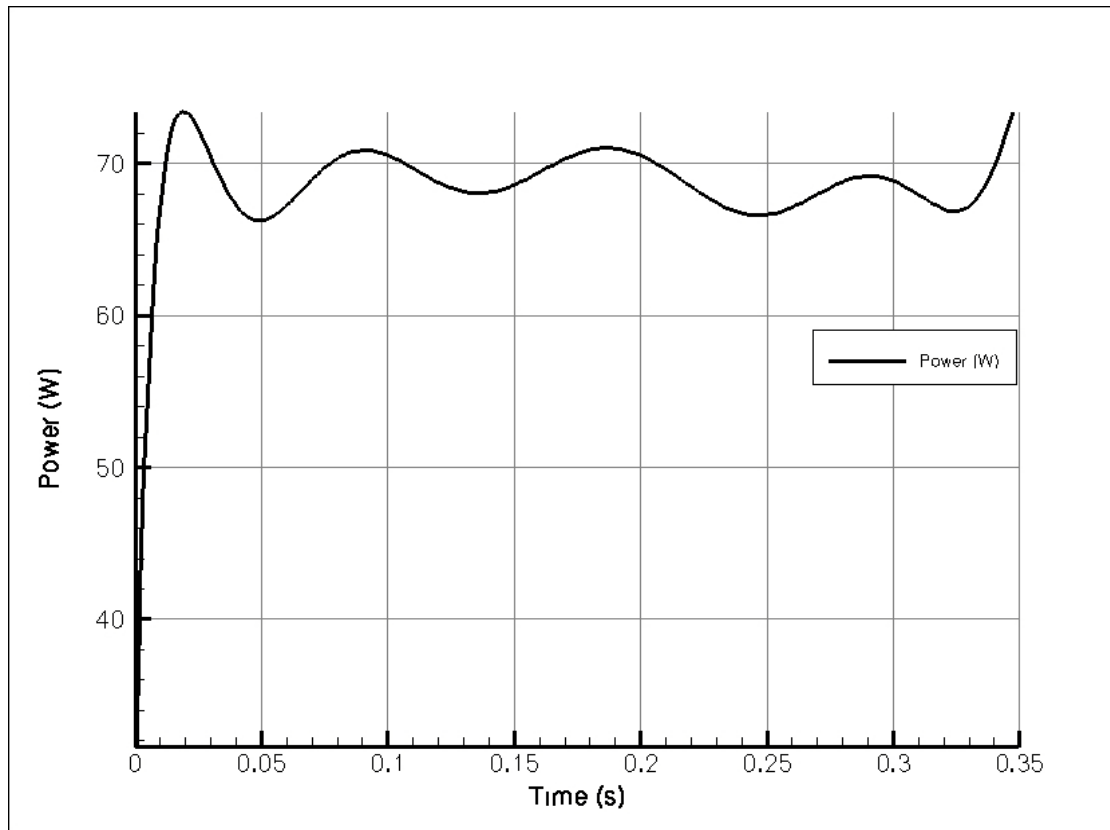
Σχήμα 8.46 Αποτελέσματα μορφής και κατανομής μετρούμενων μεγεθών στο απόβλιττο



Σχήμα 8.47 Διάγραμμα δυνάμεων – χρόνου

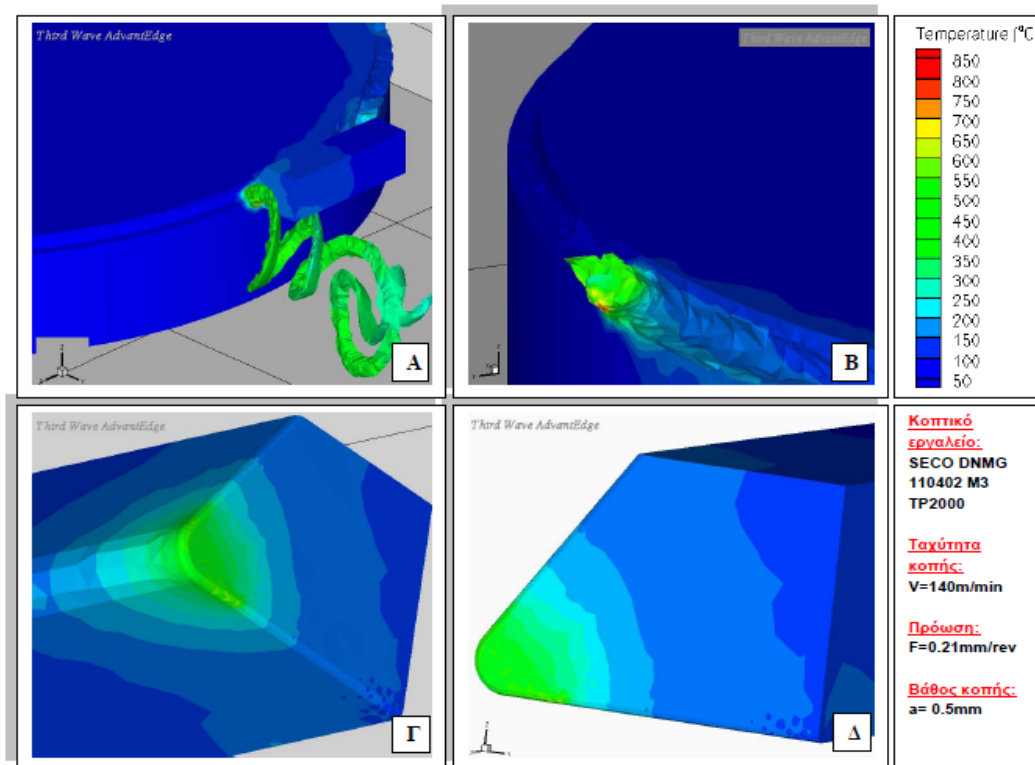


Σχήμα 8.48 Διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου



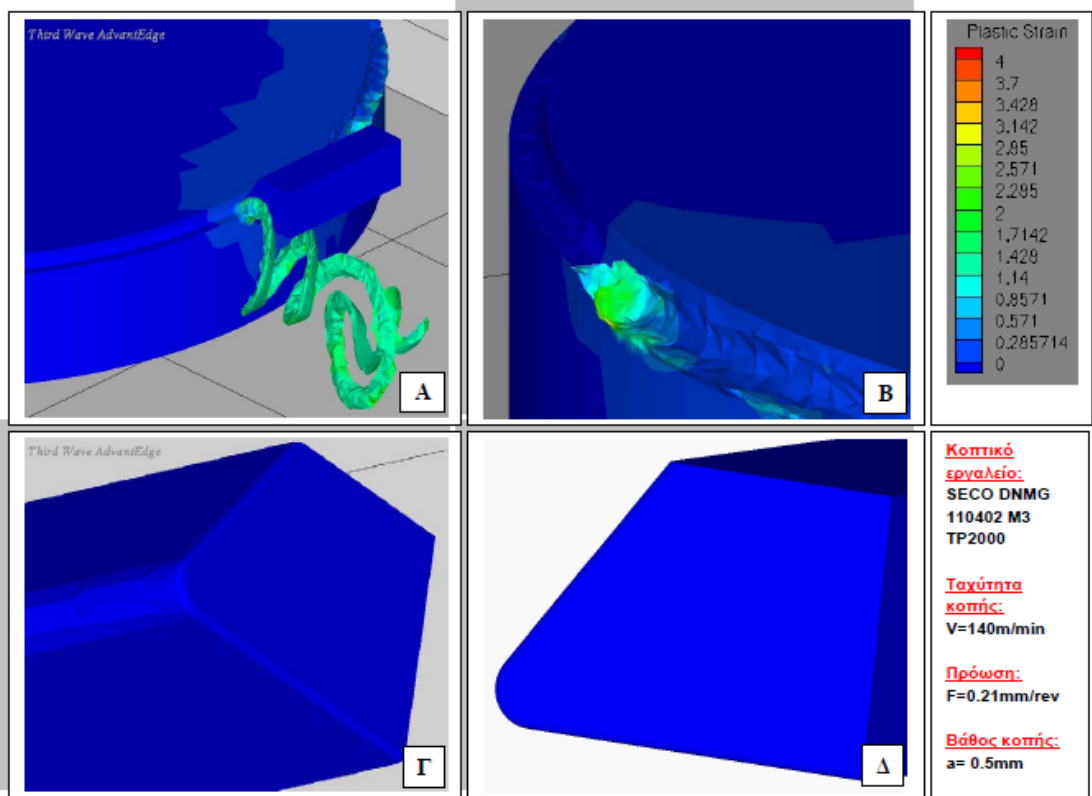
Σχήμα 8.49 Διάγραμμα ισχύος - χρόνου

#### 8.4.2 Βάθος κοπής $a_2=0.5\text{mm}$

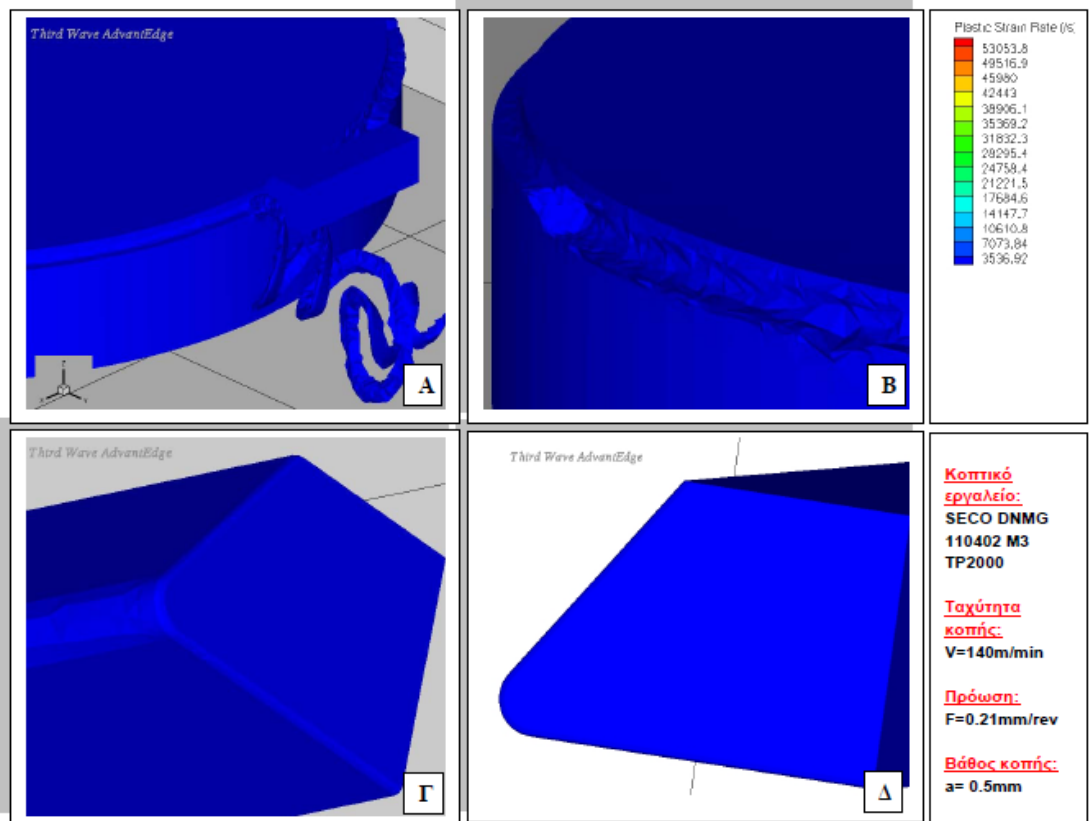


Σχήμα 8.50 Αποτελέσματα κατανομής θερμοκρασίας

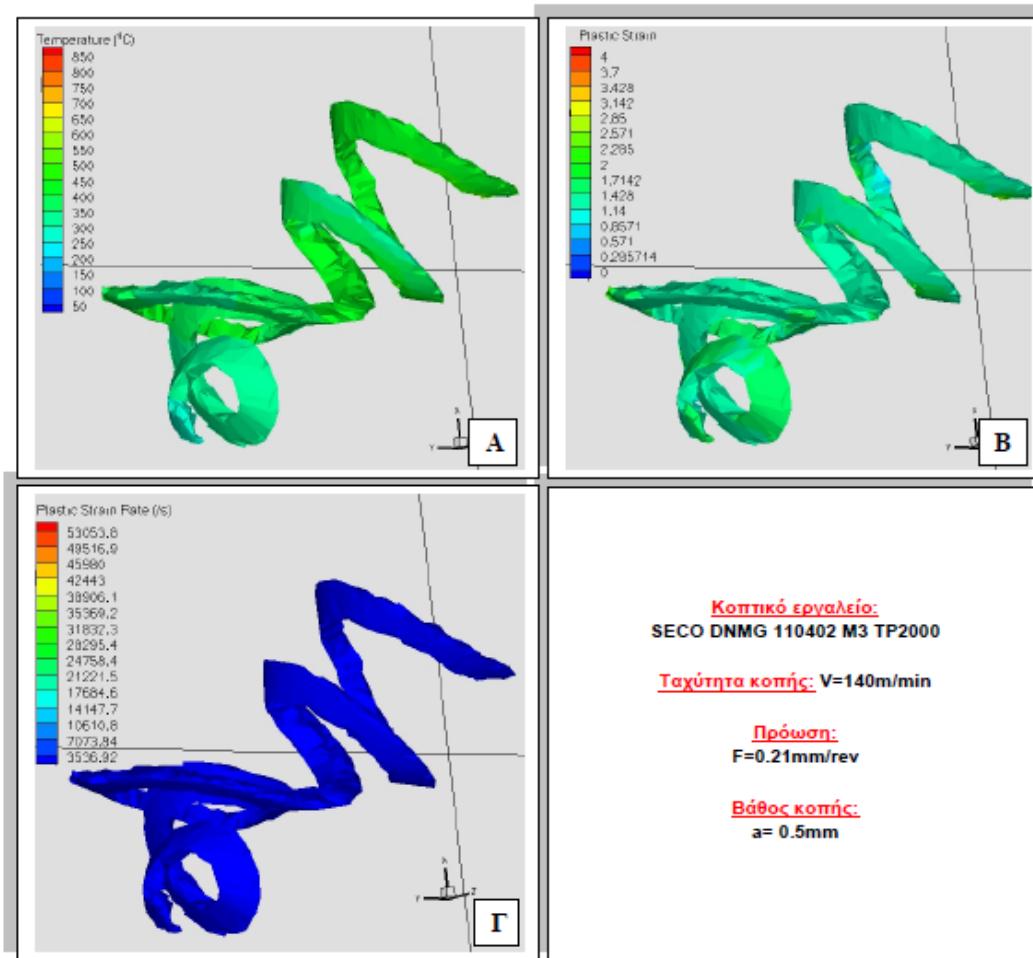




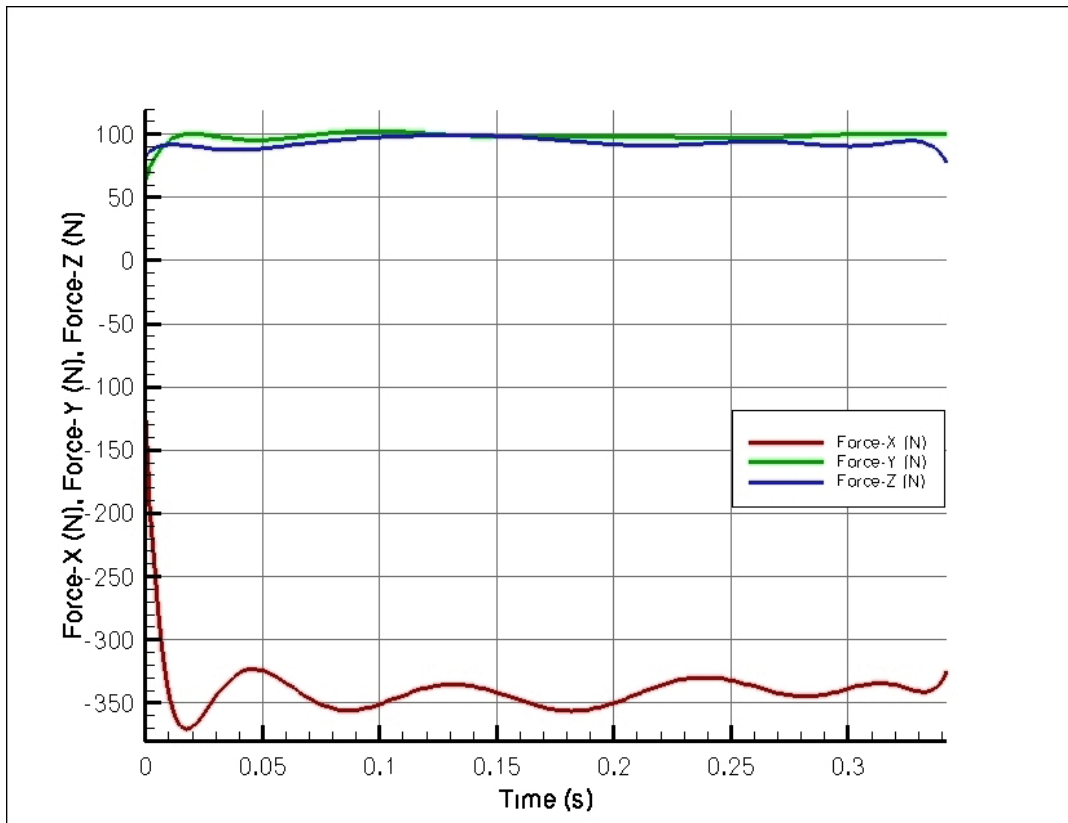
Σχήμα 8.51 Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης



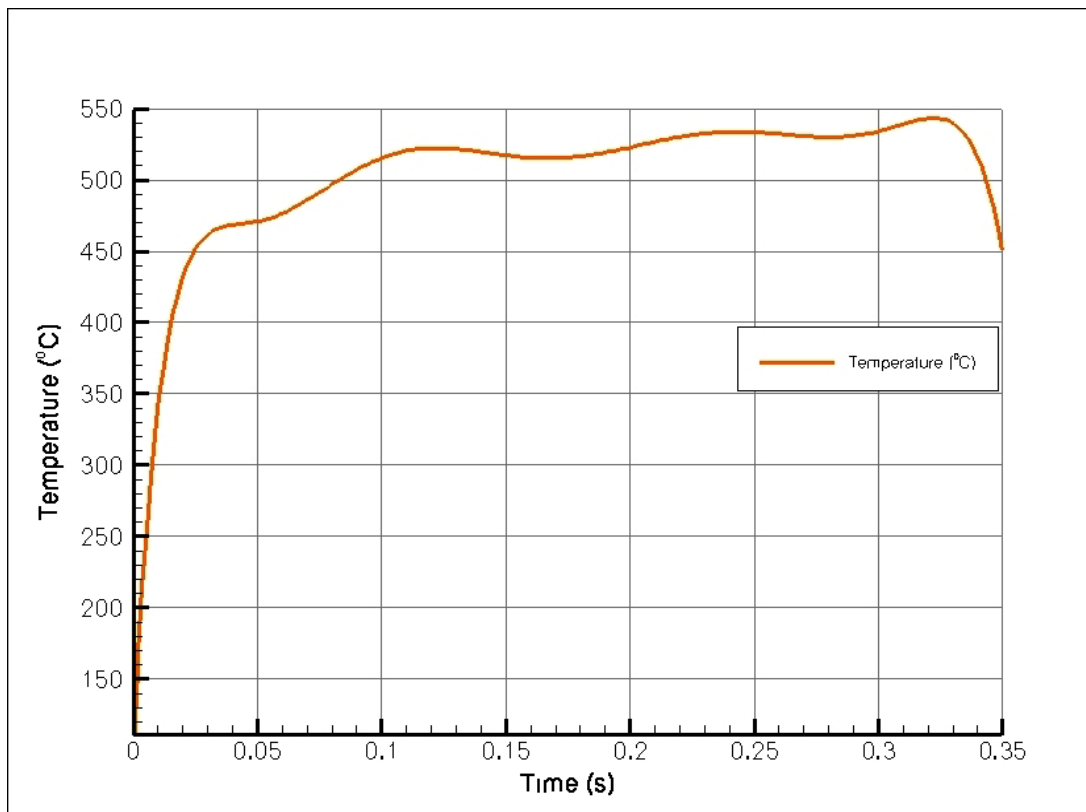
Σχήμα 8.52 Αποτελέσματα ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης



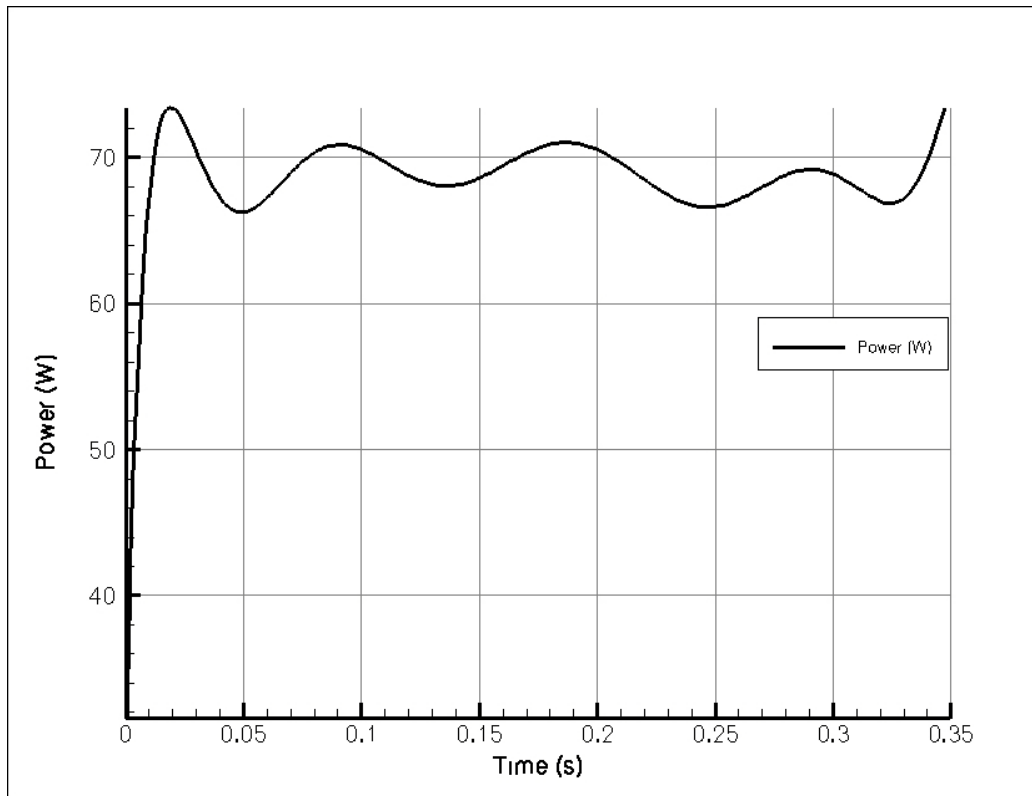
Σχήμα 8.53 Αποτελέσματα μορφής και κατανομής μετρούμενων μεγεθών στο απόβλιττο



Σχήμα 8.54 Διάγραμμα δυνάμεων - χρόνου

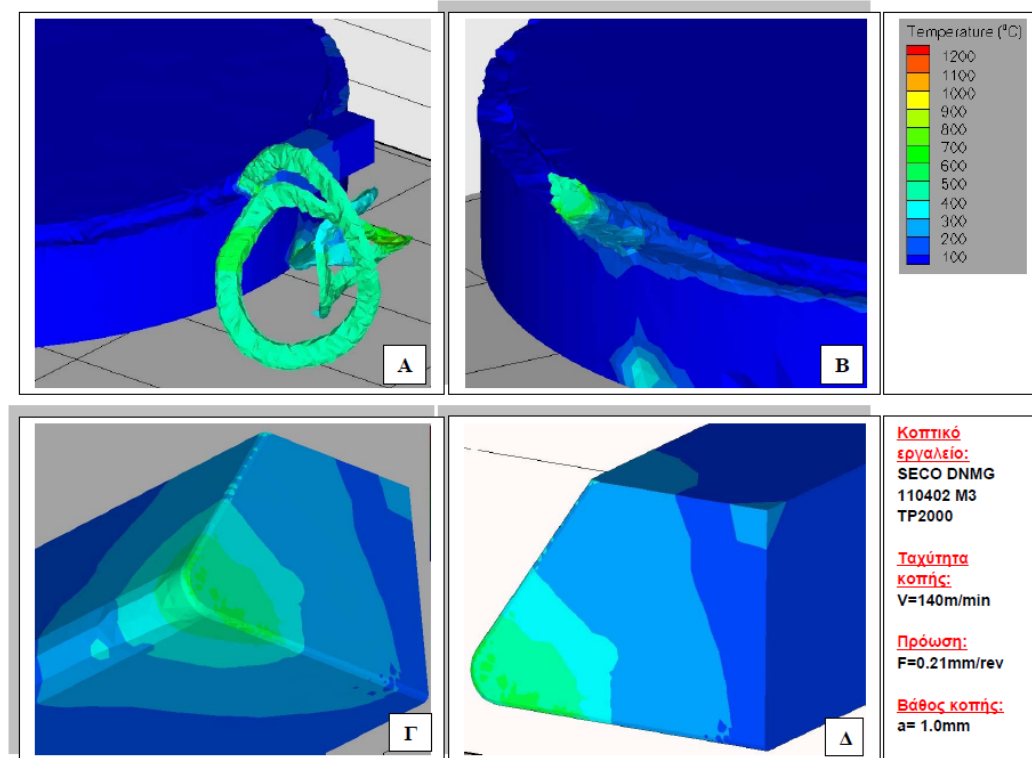


Σχήμα 8.55 Διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου

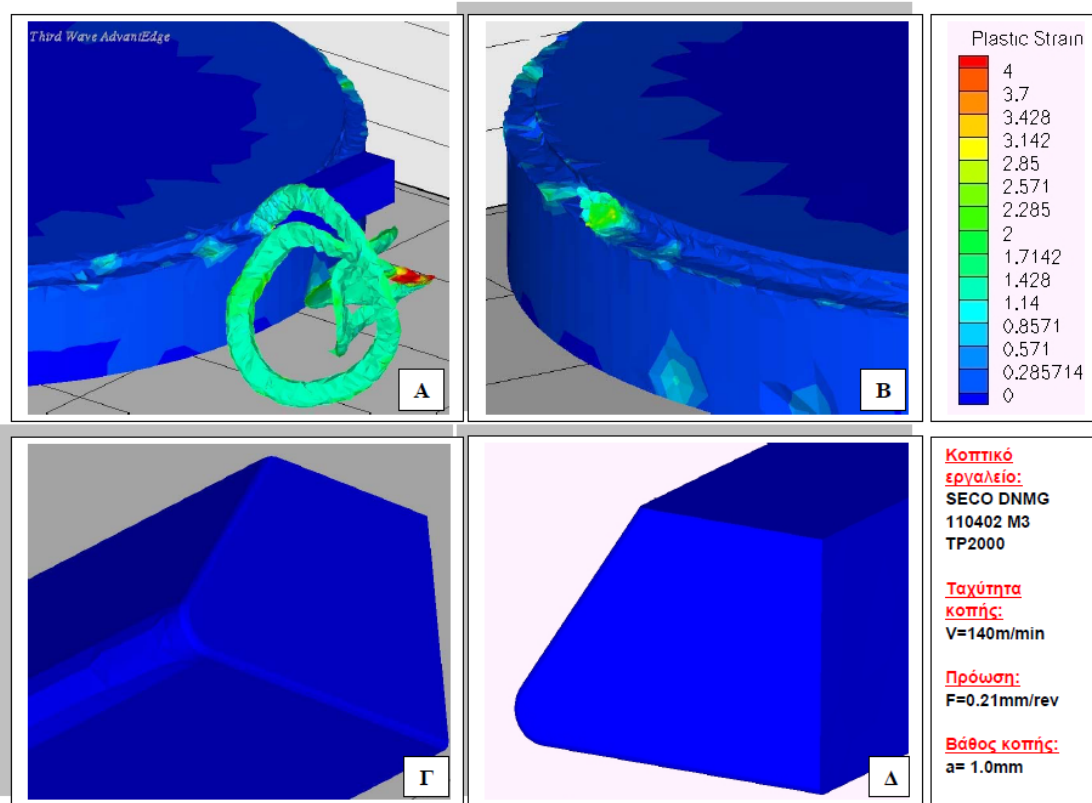


Σχήμα 8.56 Διάγραμμα ισχύος - χρόνου

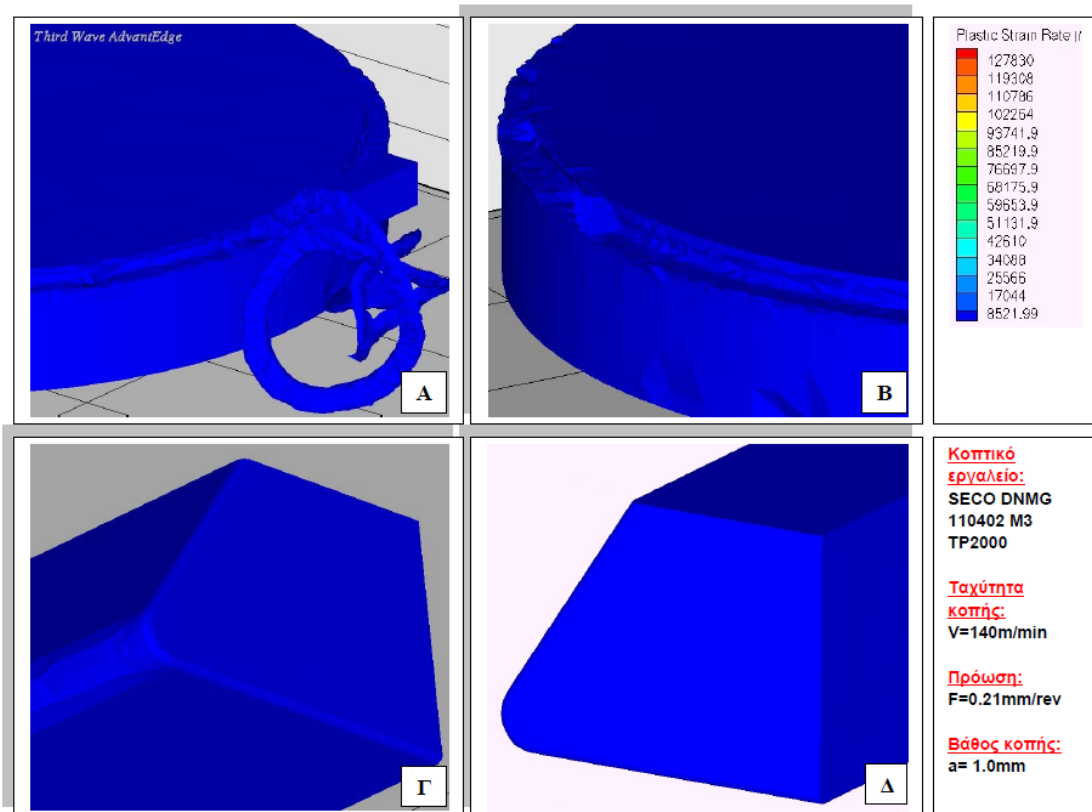
#### 8.4.3 Βάθος κοπής $a_1=1.0\text{mm}$



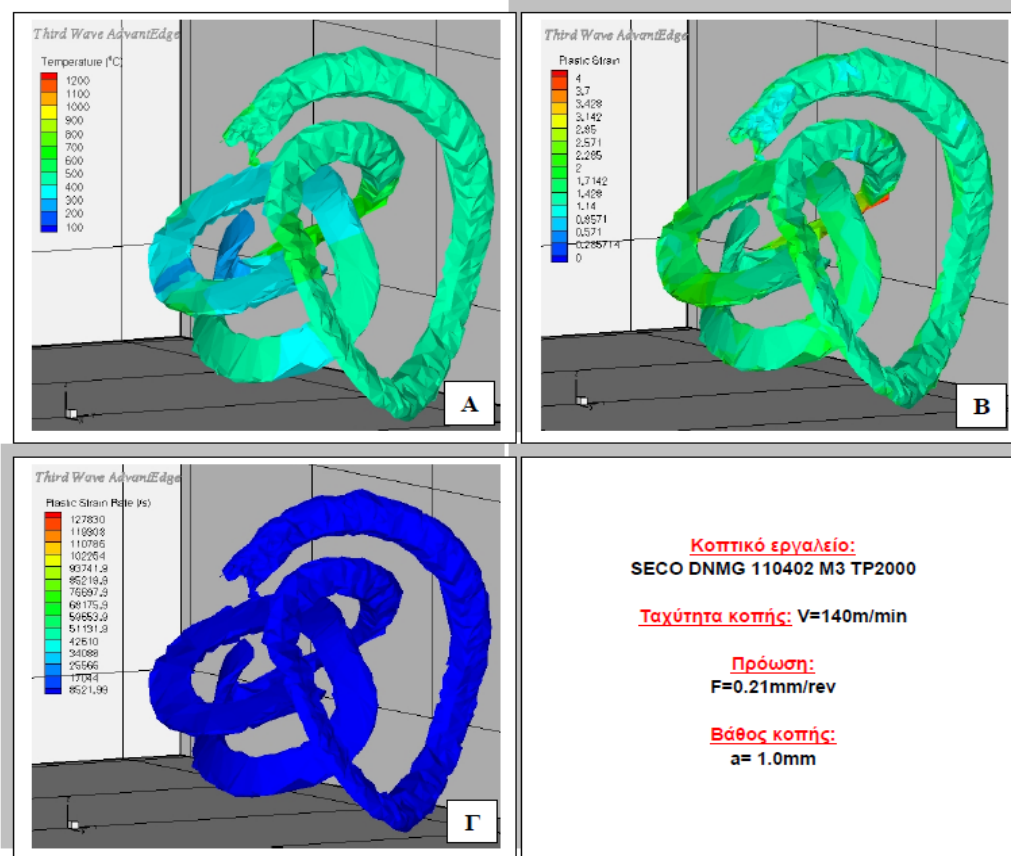
Σχήμα 8.57 Αποτελέσματα κατανομής θερμοκρασίας



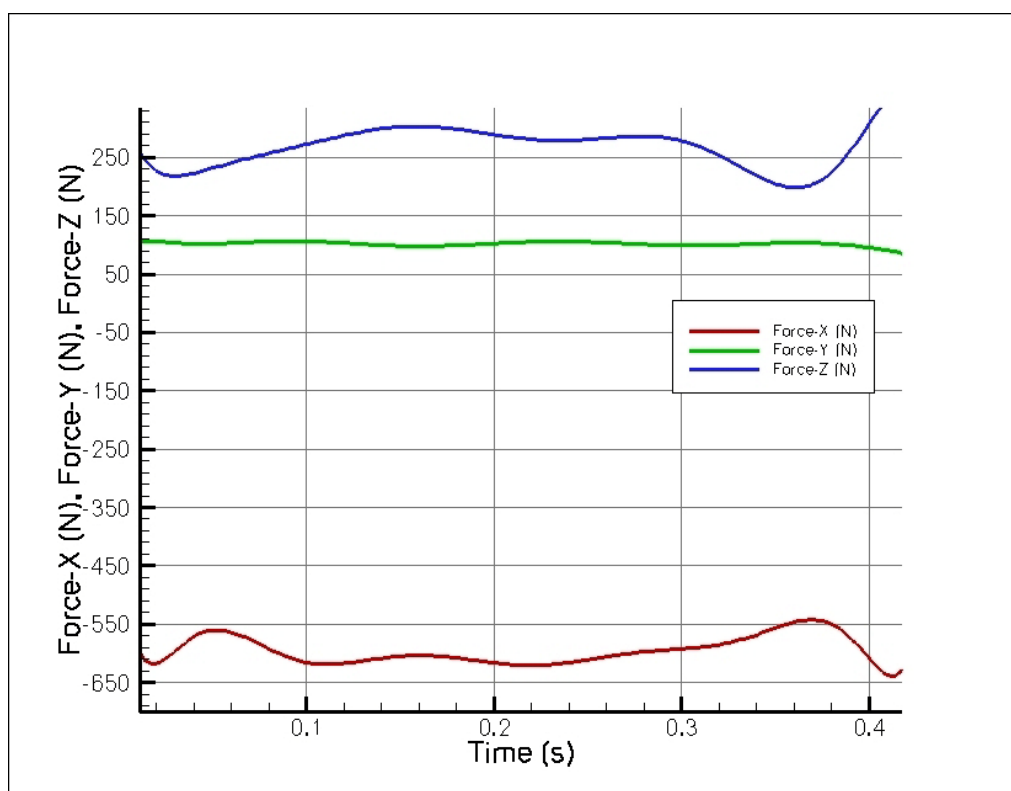
Σχήμα 8.58 Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης



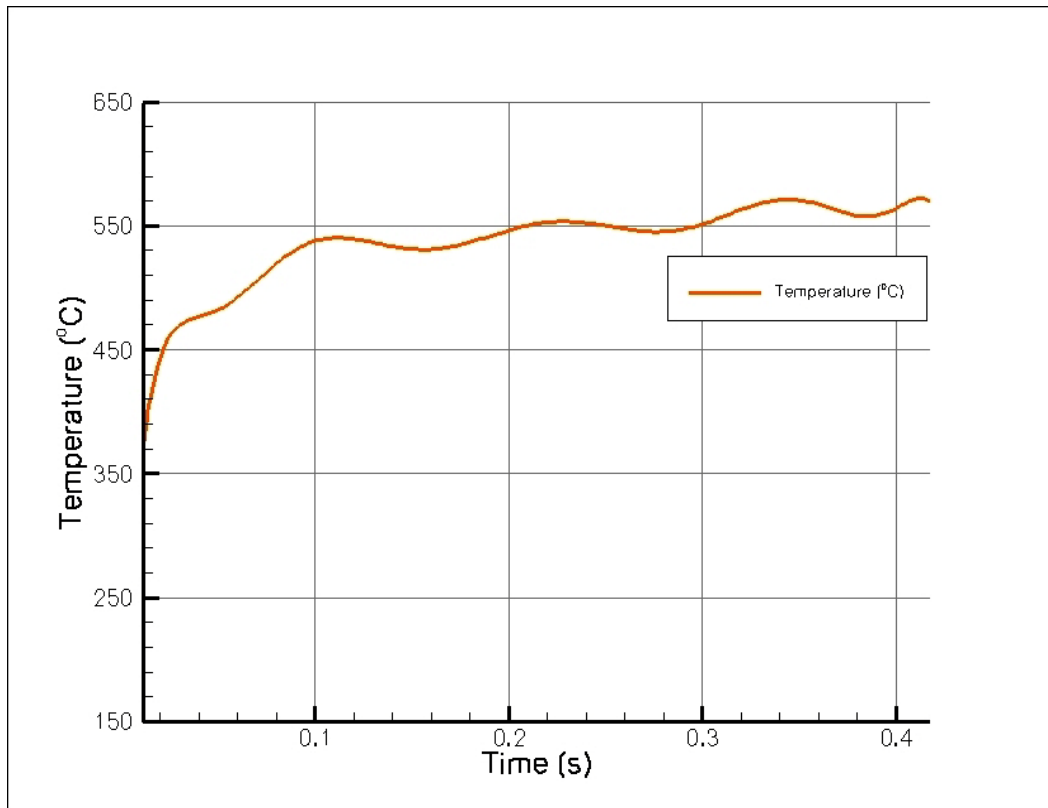
Σχήμα 8.59 Αποτελέσματα ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης



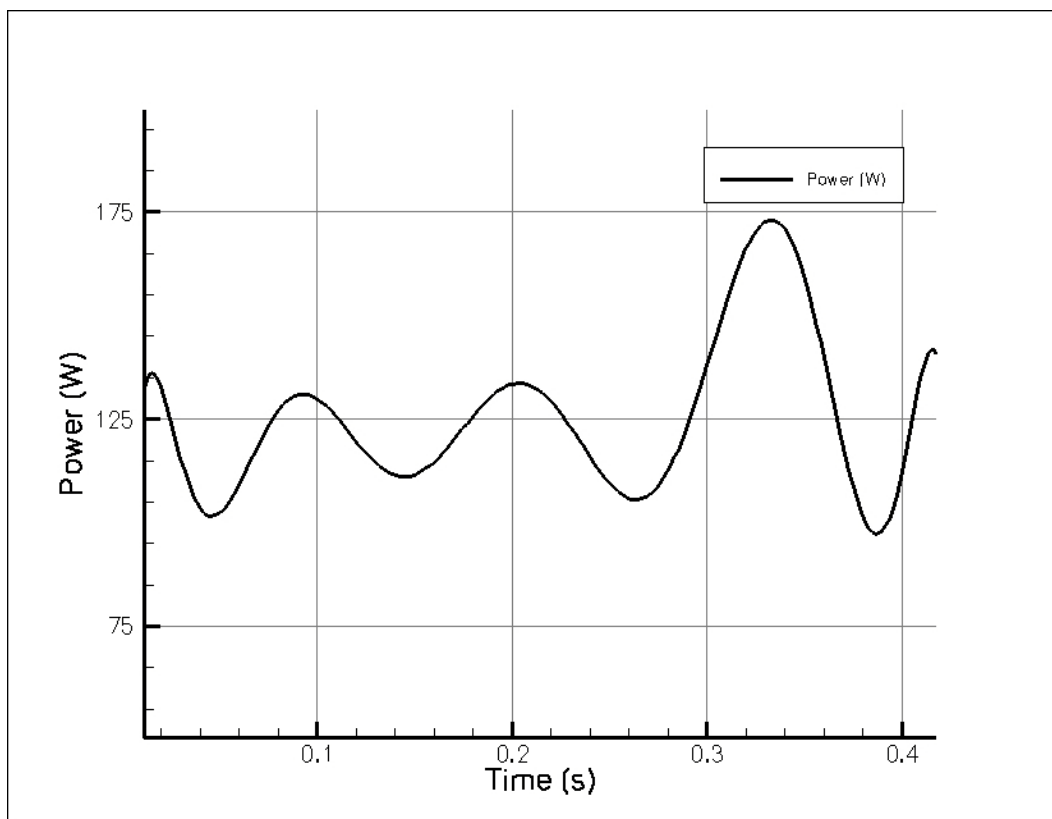
Σχήμα 8.60 Αποτελέσματα μορφής και κατανομής μετρούμενων μεγεθών στο απόβλιττο



Σχήμα 8.61 Διάγραμμα δυνάμεων - χρόνου



**Σχήμα 8.62** Διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου



**Σχήμα 8.63** Διάγραμμα ισχύος - χρόνου



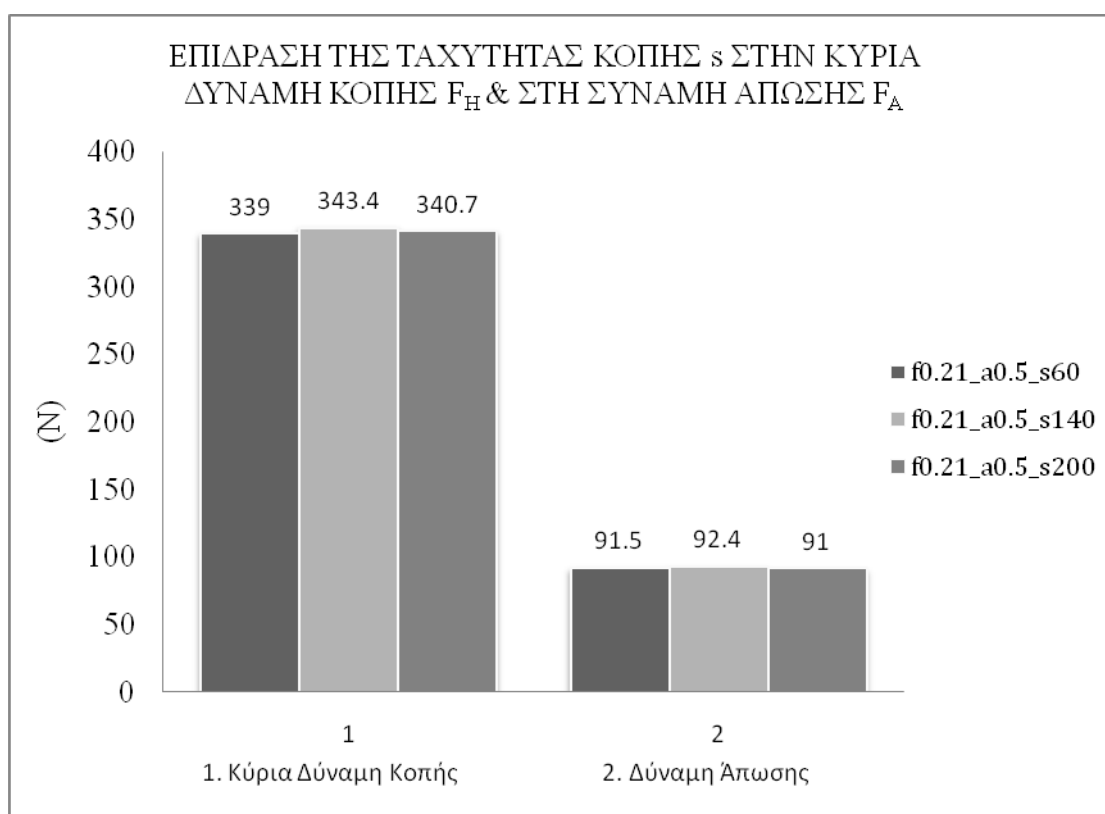


## 9 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

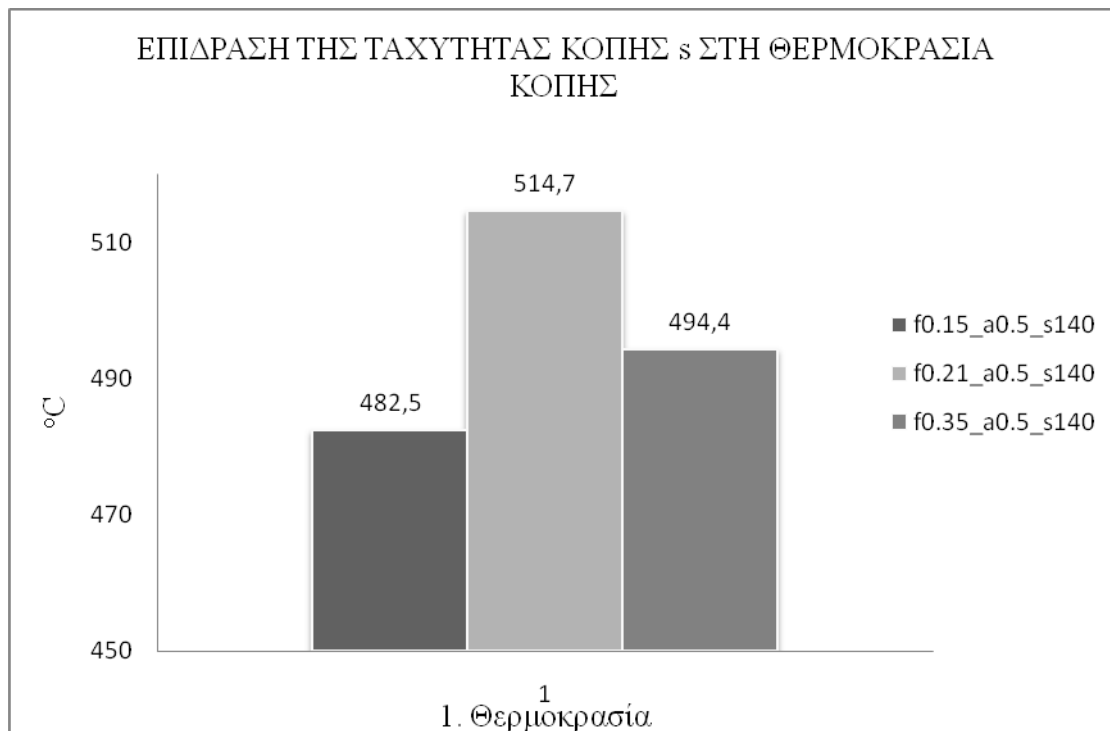
### 9.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων μεταβολής της ταχύτητας κοπής $s$

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση των αντίστοιχων μοντέλων διαπιστώνεται ότι με αύξηση την ταχύτητα κοπής  $s$ , η κύρια δύναμη κοπής  $F_H$  καθώς και η δύναμη άπωσης  $F_A$  δεν παρουσιάζουν σημαντική αύξηση, ενώ για ταχύτητα κοπής 200m/min και οι δύο δυνάμεις παρουσιάζουν μείωση, Σχήμα 9.1.

Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της ταχύτητας κοπής από 60m/min σε 140m/min, ποσοστό αύξησης 133.4% οδήγησε σε αύξηση της κύριας δύναμης κοπής  $F_H$  καθώς και της δύναμης άπωσης  $F_A$  κατά 1.3% και 1% αντίστοιχα, ενώ περεταίρω αύξηση της ταχύτητας κοπής από 140m/min σε 200m/min, ποσοστό αύξησης 42.9% οδήγησε σε μείωση της κύριας δύναμης κοπής  $F_H$ , καθώς και της δύναμης άπωσης  $F_A$  κατά 0.8% και 1.5% αντίστοιχα.



**Σχήμα 9.1** Σύγκριση της κύριας δύναμης κοπής  $F_H$  και της δύναμης άπωσης  $F_A$  κατά την μεταβολή της ταχύτητας κοπής  $s$ .

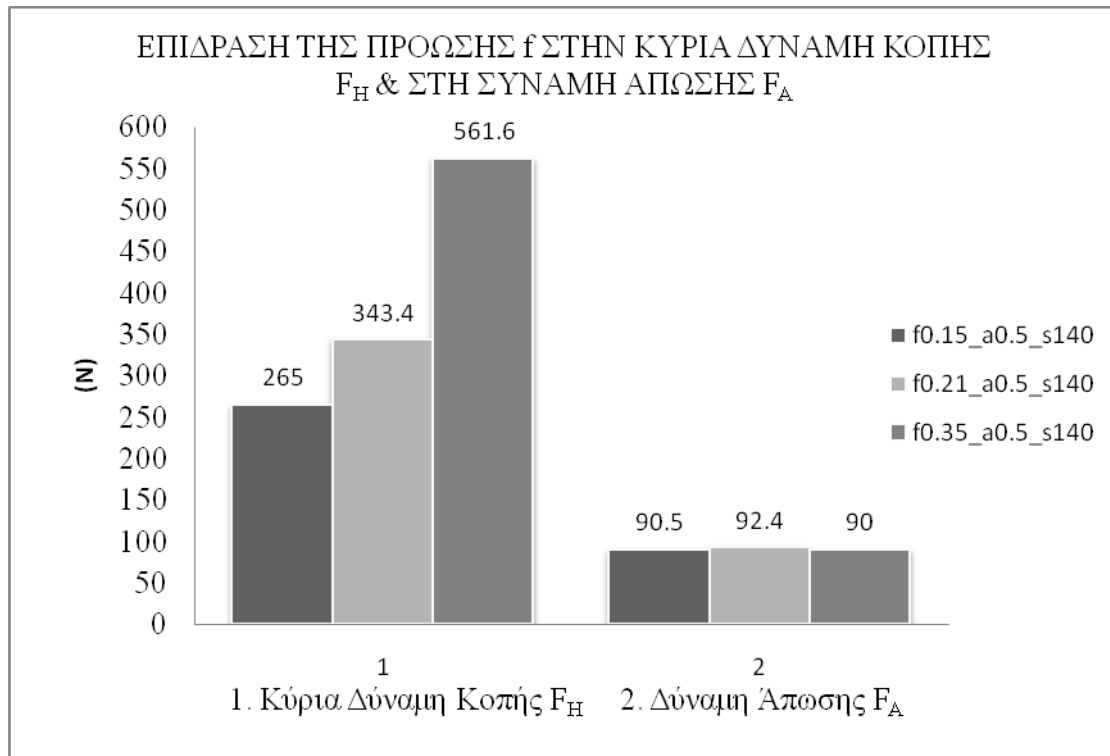


**Σχήμα 9.2** Σύγκριση της θερμοκρασίας κατά την μεταβολή της ταχύτητας κοπής  $s$

Η θερμοκρασία παρουσίασε αύξηση από 482.5°C σε 514.7°C, ποσοστό αύξησης 6.7%, για αύξηση της ταχύτητας κοπής από 60m/min σε 140m/min, ποσοστό αύξησης 133.4%, ενώ για περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής από 140m/min σε 200m/min, ποσοστό αύξησης 42.9% οδήγησε σε πτώση της από 514.7 σε 494.4, ποσοστό περίπου 4%, Σχήμα 9.2.

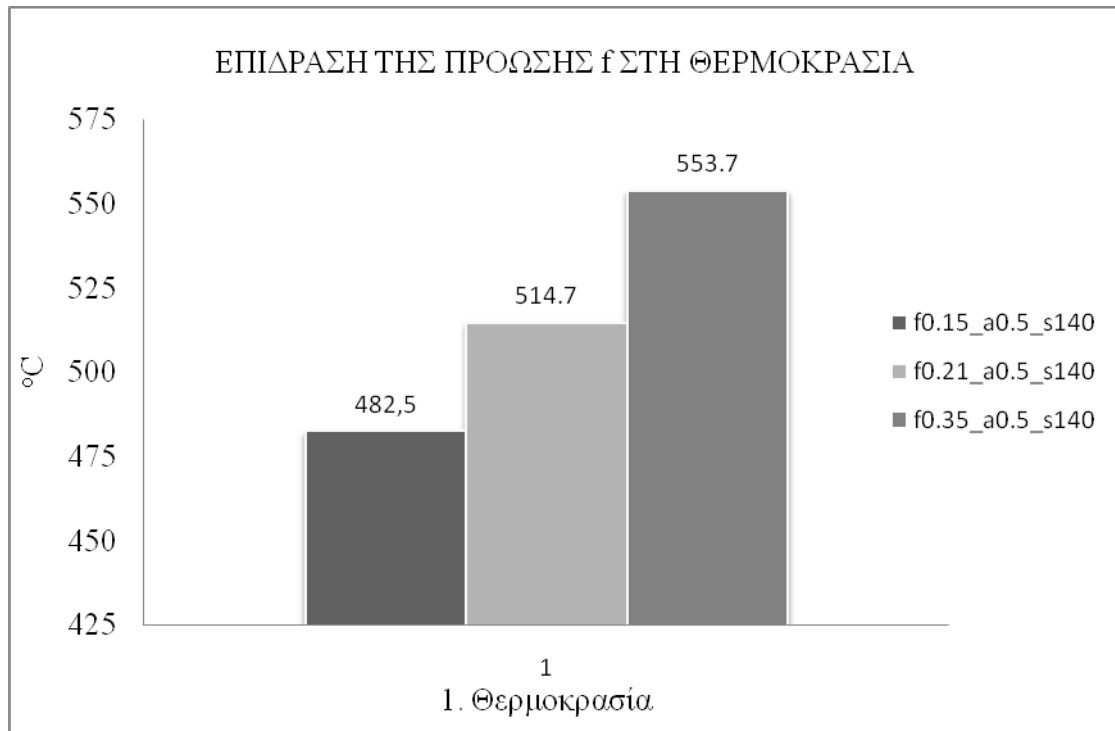
## 9.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων μεταβολής της πρόωσης $f$

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρατηρούμε ότι αυξάνοντας την πρόωση  $f$ , η κύρια δύναμη κοπής  $F_H$  παρουσιάζει σημαντική αύξηση, ενώ η δύναμη άπωσης  $F_A$  παραμένει σχεδόν σταθερή. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση της πρόωσης  $f$  από 0.15mm/rev σε 0.21mm/rev, ποσοστό αύξησης 40% οδήγησε σε αύξηση της κύριας δύναμης κοπής  $F_H$  από 265N σε 343.4N, ποσοστό αύξησης 29.6% και της δύναμης άπωσης  $F_A$  από 90.5N σε 92.4N, ποσοστό αύξησης 2.1%. Περαιτέρω, αύξηση της πρόωσης  $f$  από 0.21mm/rev σε 0.35mm/rev, ποσοστό αύξησης 66,7% οδήγησε σε αύξηση της κύριας δύναμης κοπής  $F_H$  από 343.4N σε 561.6N, ποσοστό αύξησης 63.5% και μείωση της δύναμης άπωσης  $F_A$  από 92.4N σε 90N, ποσοστό μείωσης 2.6%, Σχήμα 9.3.



**Σχήμα 9.3** Σύγκριση της κύριας δύναμης κοπής  $F_H$  και της δύναμης άπωσης  $F_A$  κατά την μεταβολή της πρόωσης  $f$

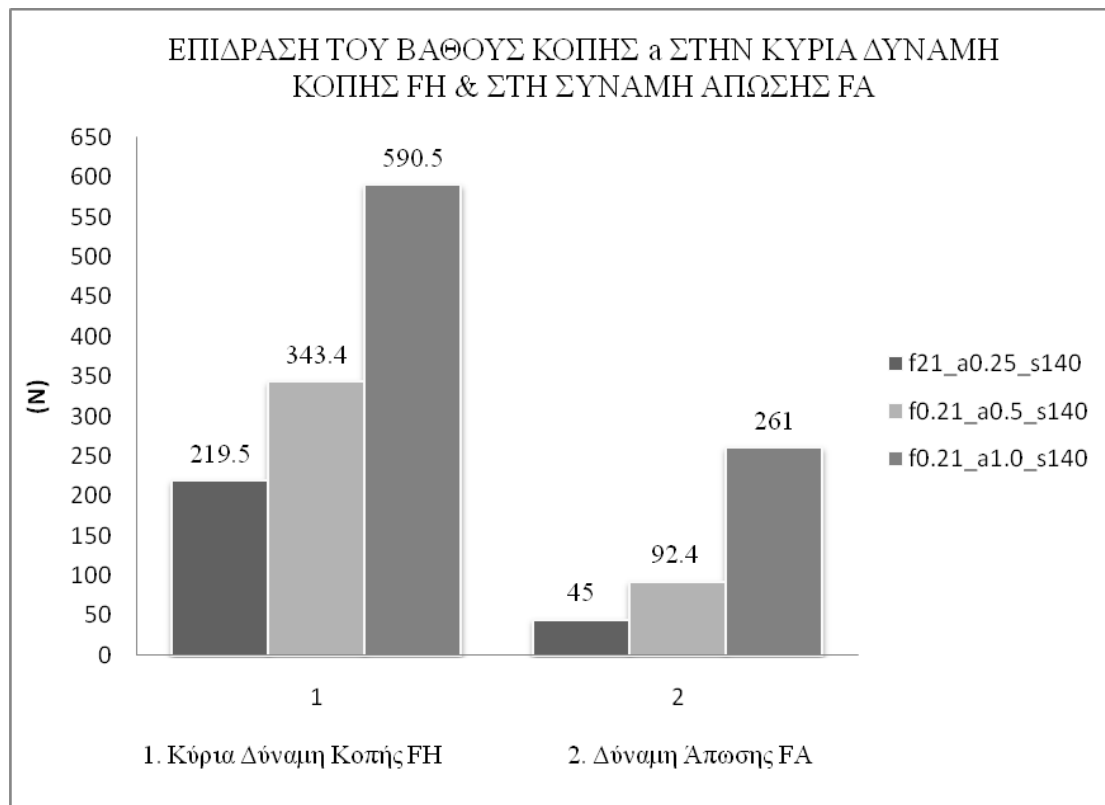
Η θερμοκρασία, παρουσίασε και αυτή αύξηση από  $482.5^{\circ}\text{C}$  σε  $514.7^{\circ}\text{C}$ , ποσοστό αύξησης 6.7% για αύξηση της πρόωσης από 0.15mm/rev σε 0.21mm/rev, ποσοστό αύξησης 40%, ενώ για περαιτέρω αύξηση της πρόωσης από 0.21mm/rev σε 0.35mm/rev, ποσοστό αύξησης 66.7% οδήγησε σε αύξηση της θερμοκρασίας από  $514.7^{\circ}\text{C}$  σε  $553.7^{\circ}\text{C}$ , ποσοστό περίπου 7.6%, Σχήμα 9.4.



**Σχήμα 9.4** Σύγκριση της θερμοκρασίας κατά τη μεταβολή της πρόωσης  $f$

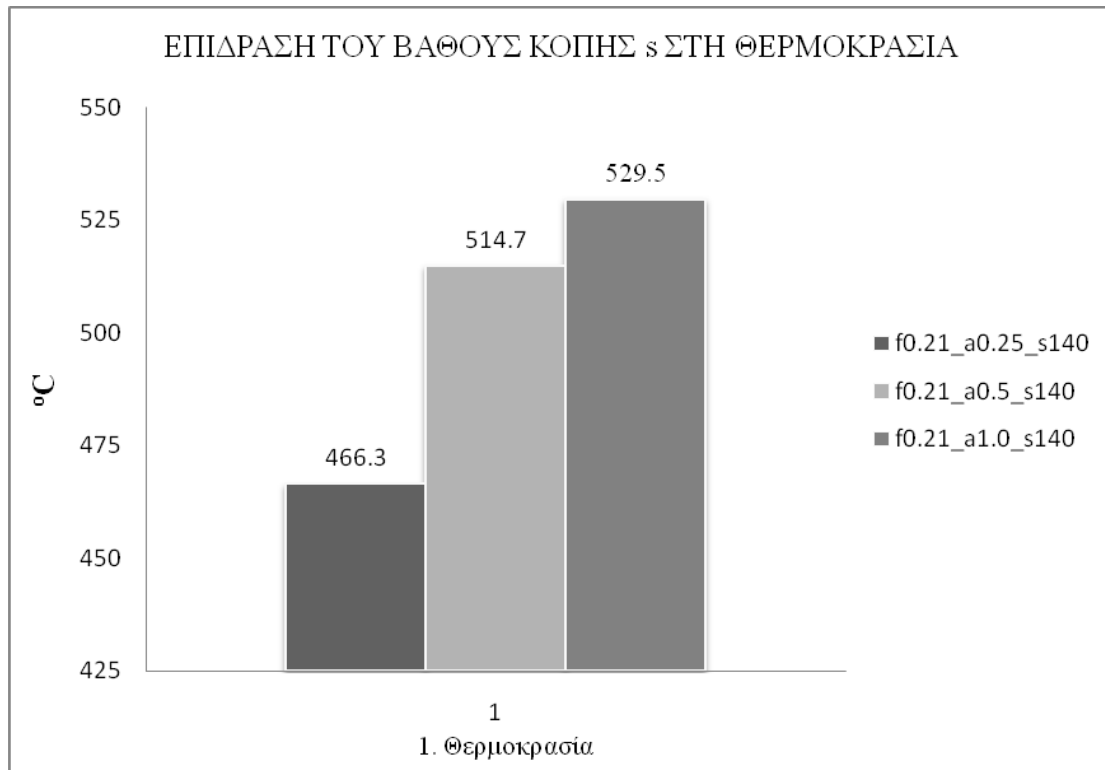
### 9.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων μεταβολής του βάθους κοπής $a$

Αυξάνοντας το βάθος κοπής  $a$ , η κύρια δύναμη κοπής  $F_H$ , καθώς και η δύναμη άπωσης  $F_A$  παρουσιάζουν σημαντική αύξηση. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση του βάθους κοπής  $a$  0.25mm σε 0.5mm, ποσοστό αύξησης 100% οδήγησε σε αύξηση της κύριας δύναμης κοπής  $F_H$  από 219N σε 343.4N, ποσοστό αύξησης 56.5% και της δύναμης άπωσης  $F_A$  από 45N σε 92.4N, ποσοστό αύξησης 105.3%. Επιπλέον αύξηση του βάθους κοπής από 0.5mm σε 1.0mm, ποσοστό αύξησης 100% οδήγησε σε αύξηση της κύριας δύναμης κοπής  $F_H$  από 343.4N σε 590.5N, ποσοστό αύξησης 72% και αύξηση της δύναμης άπωσης  $F_A$  από 92.4N σε 261N, ποσοστό μείωσης 182,5%, Σχήμα 9.5.



**Σχήμα 9.5** Σύγκριση της κύριας δύναμης κοπής  $F_H$  και της δύναμης άπωσης  $F_A$  κατά την μεταβολή του βάθους κοπής  $a$

Η θερμοκρασία παρουσίασε και αυτή αύξηση: από  $466.3^{\circ}\text{C}$  σε  $514.7^{\circ}\text{C}$ , ποσοστό αύξησης 10.4% για αύξηση του βάθους κοπής από 0.25mm σε 0.5mm, ποσοστό αύξησης 100%, ενώ για περαιτέρω αύξηση του βάθους κοπής από 0.5mm σε 1.0mm, ποσοστό αύξησης 100% οδήγησε σε αύξηση από  $514.7^{\circ}\text{C}$  σε  $529.5^{\circ}\text{C}$ , ποσοστό περίπου 2.9%, Σχήμα 9.6.



**Σχήμα 9.6** Σύγκριση της θερμοκρασίας κατά την κατά την μεταβολή του βάθους κοπής  $a$

#### **9.4 Περεταίρω σχολιασμός – Παρατηρήσεις**

Τα κράματα τιτανίου είναι υλικά, τα οποία κατεργάζονται εξαιρετικά δύσκολα. Κατά την κατεργασία του τιτανίου, η φθορά του κοπτικού εργαλείου εξελίσσεται ταχύτητα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας κοπής και τις ισχυρής πρόσφυσης μεταξύ του εργαλείου και του υλικού κατεργασίας, λόγω του χαμηλού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του τιτανίου και της υψηλής χημικής δραστηριότητάς του.

Το κύριο πρόβλημα σε κατεργασία κραμάτων τιτανίου είναι οι υψηλές θερμοκρασίες, που δημιουργούνται και οι δυσμενείς κατανομές της θερμοκρασίας στο εργαλείο.

Η ροή στη ζώνη διάτμησης και το μικρό μήκος επαφής του εργαλείου-αποβλίττου έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη θερμοκρασία κοντά στην αιχμή του εργαλείου.

Παράλληλα, λόγω της κακής θερμικής αγωγιμότητας η θερμοκρασία στην επιφάνεια αποβλίττου, ακόμη και σε μέτρια ταχύτητα κοπής μπορεί να είναι πάνω από 1100 °C.

Η θερμοκρασία αυτή, σε συνδυασμό με την ισχυρή επαφή ανάμεσα στο εργαλείο και το τεμάχιο εργασίας, εξασφαλίζει ένα ιδανικό περιβάλλον για διάχυση του εργαλείου και του υλικού του αντικειμένου εργασίας σε όλη την διεπαφή εργαλείου-αποβλίττου.

Ατμοσφαιρική οξείδωση κατά τη συνεχή κοπή δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί στη ζώνη επαφής, στην επιφάνεια αποβλίττου, λόγω της υψηλής πίεσης ανάμεσα στο τσιπ και το εργαλείο.

Μεγάλη πιθανότητα προσκόλλησης τιτανίου στο κοπτικό εργαλείο μπορεί να υπάρξει στο σημείο επαφής του κοπτικού εργαλείου και του υλικού κατεργασίας, δημιουργώντας ένα οριακό στρώμα. Αυτό το νεκρό οριακό στρώμα γρήγορα γίνεται κορεσμένο, περιορίζοντας την μάζα που μεταφέρεται από το κοπτικό εργαλείο. Μόλις το αντιδρών στρώμα, μεγαλώσει με το χρόνο κοπής θα παραμένει προσκολλημένο στο εργαλείο, μέχρι να φτάσει η τάση κάποια τιμή που θα προκαλέσει θραύση. Οι ισχυρές δυνάμεις συγκόλλησης μεταξύ του αντιδρώντα επιπέδου και του υλικού του εργαλείου, πολύ συχνά, προκαλούν αποκόλληση των σκληρών σωματιδίων από το υλικό μέσο κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας θραύσης και έχει ως αποτέλεσμα δημιουργία κρατήρα στην επιφάνεια αποβλίτου.

Η έκταση του κρατήρα από αυτή τη διαδικασία σαφώς εξαρτάται από την αντοχή του υλικού του εργαλείου, την ταχύτητα κοπής και την θερμοκρασία. Τα σκληρά σωματίδια που αποσπώνται από το στρώμα και το εργαλείο, στη συνέχεια μεταφέρονται μακριά με τα απόβλιστα. Αυτό προκαλεί γρήγορη φθορά που συνδέεται τόσο με το πεδίο φθοράς όσο και την επιφάνεια αποβλίτου.

Σε αυτό το στάδιο, οι συνδυασμένες επιπτώσεις του κρατήρα και του πεδίου φθοράς αποδυναμώνουν την αιχμή και μπορούν να προκαλέσουν βλάβη του εργαλείου από σπάσιμο.

Γενικά όμως, θερμοκρασίες άνω των 700°C θα πρέπει να αποφεύγονται. Η θερμοκρασία αυτή θεωρείται ως κρίσιμη για εργαλεία CBN στην κατεργασία του τιτανίου, γιατί υπάρχει πιθανότητα για μείωση της σκληρότητας και της αντοχής τους με αποτέλεσμα την πλαστική παραμόρφωση της ακής του εργαλείου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας του κοπτικού και την πρόωρη καταστροφή του.

Οι κλίσεις της θερμοκρασίας είναι πολύ πιο απότομες στην αιχμή, όταν κατεργαζόμαστε κράματα τιτανίου, λόγω της παραγωγής λεπτότερου αποβλήτου (εξ ου και το μικρό μήκος επαφής του εργαλείου και του υλικού) και η παρουσία μιας πολύ λεπτής ζώνης ροής μεταξύ των αποβλήτων και του εργαλείου (περίπου 8 μm συγκριτικά με 50 μm για κοπή σιδήρου υπό τις ίδιες συνθήκες κοπής), προκαλεί υψηλές θερμοκρασίες στο άκρο του εργαλείου μέχρι και 1100° C.

Για να ελαχιστοποιηθεί το πρόβλημα της θερμοκρασίας, θα πρέπει να εφαρμοσθεί υγρό υποχρεωτικά. Το ψυκτικό θα πρέπει να εφαρμόζεται σωστά, διαφορετικά τα εργαλεία τείνουν να φθαρούν γρήγορα ή να αστοχήσουν. Το υγρό δεν λειτουργεί μόνο ως ψυκτικό υγρό, αλλά και ως λιπαντικό, μειώνοντας τις θερμοκρασίες στο εργαλείο και τις δυνάμεις κοπής, βελτιώνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής του. Η σωστή επιλογή του υγρού κοπής έχει σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Αφθονη και αδιάλειπτη ροή του ψυκτικού υγρού θα παρέχει επίσης ελαχιστοποίηση των θερμικών σοκ και θα αποτρέψει την ανάφλεξη των αποβλίτων

του τιτανίου. Έχει διαπιστωθεί, ότι χρήση γαλακτώματος, με μεγάλη πίεση, δίνει λογικά αποτελέσματα, ενώ υγρά κοπής που περιέχουν φωσφορικά άλατα δίνουν καλύτερα αποτελέσματα, λόγω των καλών ιδιοτήτων τους για ψύξη και της καλής ιδιότητας που έχουν, ώστε να εμποδίσουν το φαινόμενο της συγκόλλησης.

Δυσκολίες, ωστόσο, παρουσιάζονται λόγω της δραστηριότητας του υγρού, το οποίο προκαλεί διάβρωση των εργαλειομηχανών. Υγρά κοπής που περιέχουν χλωριωμένους υδρογονανθράκες, είναι επίσης αποτελεσματικά, αλλά αυτά έχουν απαγορευτεί λόγω της τοξικότητάς τους.

Γενικά, το κοπτικό υγρό κατά την κατεργασία τιτανίου αντιμετωπίζει πολύ υψηλές θερμοκρασίες έως και 1100°C ή και περισσότερο. Αυτή η τεράστια θερμότητα δημιουργεί υπέρθερμο ατμό, ο οποίος θα εμφανιστεί σε ψυκτικά υγρά που έχουν σαν βάση το νερό, κάνοντας το ψυκτικό μέσο να ατμοποιείται πριν να αγγίξει ακόμη το κομμάτι προς κατεργασία. Αυτό οδηγεί σε όλα τα προβλήματα που αναφέρθηκαν, αλλά και στην πρόσθετη θέρμανση του κομματιού προς κατεργασία αντί της ψύξης, κάνοντας την κατεργασία ακόμα πιο δύσκολη. Μία πρακτική, που έχει μελετηθεί, είναι η παροχή ψυκτικού υγρού με εφαρμογή υψηλής πίεσης (έως και 1000 PSI), δημιουργώντας πίεση για την εξάλειψη δημιουργίας υπέρθερμου ατμού και ανάρμοστης απομάκρυνσης αποβλίττου με ταυτόχρονη ψύξη της υπό επεξεργασία επιφάνειας του αντικειμένου αλλά και του αποβλήτου.

Το σύστημα αυτό εξαλείφει προβλήματα του ψυκτικού με επίκεντρο τη αδυναμία ροής του ψυκτικού μέσου στην περιοχή κατεργασίας σε υψηλές πιέσεις, επιτρέποντας εκτεταμένη διάρκεια ζωής του εργαλείου.

Εκτός της λιπαντικής και της ψυκτικής δράσης που έχει το κοπτικό υγρό, ένας ακόμα σημαντικός ρόλος που διαδραματίζει είναι η απομάκρυνση των αποβλίττων. Κατά την κατεργασία με υψηλές ταχύτητες, ακατάλληλη απομάκρυνση των αποβλίττων μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία. Εάν τα απόβλιττα πέφτουν πάλι πίσω στη διεπαφή αποβλίττου-εργαλείου θα έχει σαν αποτέλεσμα την πρόκληση ζημιάς, λόγω εμπλοκής των αποβλίττων στην περιοχή κοπής.

Τα απόβλιττα πρέπει να απομακρύνονται από τη ζώνη τριβής, που επίσης πρέπει να ψύχεται έτσι ώστε να διασπώνται εύκολα τα απόβλιττα σε μικρότερα και πιο εύχρηστα κομμάτια. Επειδή πολλά τυποποιημένα συστήματα ψεκασμού ψυκτικού ψεκάζουν σε μεγάλη έκταση, σε μια προσπάθεια να καλυφθεί ολόκληρη η περιοχή τόννευσης, το ψυκτικό μέσο συχνά δεν ξεπλένει σωστά ή δεν δροσίζει τα απόβλητα, και ιδίως σε σκληρά υλικά που επεξεργάζονται σε υψηλές ταχύτητες.

Κατά την κατεργασία του τιτανίου, οι δυνάμεις που καταγράφονται είναι παρόμοιες με εκείνες που έχουμε όταν κατεργαζόμαστε χάλυβα, όμως στην κατεργασία του τιτανίου οι μηχανικές καταπονήσεις που εμφανίζονται δίπλα στην αιχμή του εργαλείου είναι έως και τέσσερις φορές μεγαλύτερες από αυτές που παρατηρήθηκαν



κατά την κατεργασία χάλυβα. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ασυνήθιστα μικρή περιοχή επαφής του αποβλίττου και του εργαλείου.

Το *chattering*, είναι ένα ακόμη πρόβλημα που πρέπει να ξεπεραστεί όταν κατεργάζονται κράματα τιτανίου, ειδικά κατά την διαδικασία φινιρίσματος. Το χαμηλό όριο ελαστικότητας του τιτανίου είναι η κύρια αιτία του *Chatter* κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Όταν υποβάλλεται σε πίεση το τιτάνιο, εκτρέπεται σχεδόν διπλάσια από ότι ο ανθρακούχος χάλυβα. Το *Chatter* μπορεί επίσης να αποδοθεί εν μέρει στην υψηλή δυναμική δύναμη κοπής κατά τη μηχανική κατεργασία του τιτανίου που σχετίζεται με το μηχανισμό δημιουργίας του αποβλίττου. Η δύναμη αυτή, μπορεί να είναι μέχρι και το 30% της τιμής της στατικής δύναμης.

Η επίδραση κάθε παράγοντα κοπής είναι διαφορετική. Η ταχύτητα κοπής έχει την πιο σημαντική επίδραση στην διάρκεια ζωής του εργαλείου. Μπορεί να διαπιστωθεί, ότι η διάρκεια ζωής του εργαλείου είναι εξαιρετικά μικρή σε υψηλές ταχύτητες κοπής, αλλά βελτιώνεται δραστικά όσο η ταχύτητα μειώνεται. Μια άλλη σημαντική μεταβλητή που επηρεάζει τη ζωή του εργαλείου είναι η πρόωση. Συχνά, η διάρκεια ζωής του εργαλείου δεν αλλάζει δραματικά με αλλαγή στην πρόωση, αλλά στα κράματα τιτανίου, τα οποία είναι πολύ ευαίσθητα στις μεταβολές της πρόωσης. Τέλος, σημαντική επίδραση στην ζωή του κοπτικού έχει και το βάθος κοπής.

Όταν κατεργάζονται κράματα τιτανίου, η γεωμετρία του εργαλείου έχει σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής του. Το τιτάνιο απαιτεί χαμηλές δυνάμεις διάτμησης άρα θα πρέπει να επιλέγεται κοπτικό εργαλείο κατάλληλης γεωμετρίας, Υποστηρίζεται ότι ένα εργαλείο με γεωμετρία, που αποτελείται από μεγάλη γωνία ελευθερίας (από 10 έως 15°) μαζί με μία υψηλή αρνητική γωνία αποβλίττου (από -10 έως -15), αυξάνει τη διάρκεια ζωής του εργαλείου σημαντικά σε σύγκριση με εργαλείο με τυποποιημένη γεωμετρία. Σε γενικές γραμμές όμως, τα κοπτικά εργαλεία στην κατεργασία του τιτανίου παρουσιάζουν διάφορες μορφές φθοράς, οι οποίες εξαρτώνται από τη θερμοκρασία.

Στην συγκεκριμένη εργασία σε όλες τις περιπτώσεις κοπής που επιλέχθηκαν, το απόβλιττο είναι συνεχόμενο με άτακτη μορφή. Σε γενικές γραμμές, η μορφή του είναι η επιθυμητή 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.

Συνοψίζοντας:

- Η κατεργασία του τιτανίου είναι δύσκολη, κυρίως λόγω της υψηλής χημικής συγγένειας του και τις υψηλές θερμοκρασίες που δημιουργούνται τοπικά και λόγω της φτωχής θερμικής αγωγιμότητας του.
- Μία κρίσιμη θερμοκρασία 700 °C μπορεί να αποτελέσει κριτήριο για την ζωή του κοπτικού εργαλείου.
- Ένα εύρος 185 έως 220 m/min μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικό για την κατεργασία τιτανίου.
- Για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του εργαλείου, είναι απαραίτητο να μειωθεί η θερμότητα, όσο το δυνατόν περισσότερο.
- Για να επιτευχθούν υψηλότερες ταχύτητες κοπής, θα πρέπει να καταστέλλεται η θερμότητα όσο το δυνατό είναι εφικτό και παράλληλα, να υπάρχει όσο το δυνατό μεγαλύτερη απομάκρυνση αυτής.
- Στην διάρκεια της κατεργασίας, θα πρέπει να γίνεται χρήση κατάλληλου κοπτικού υγρού και πάντα σε μεγάλες ποσότητες.
- Κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου, τα κοπτικά εργαλεία δέχονται μεγάλα θερμικά και μηχανικά φορτία, τα οποία επηρεάζουν σημαντικά το ποσοστό φθοράς και εξ ου και η διάρκεια ζωής του εργαλείου. Η φθορά πεδίου και φθορά κρατήρα μπορούν να αποδοθούν σε διάλυση-διάχυση, τριβή και πλαστική παραμόρφωση, ανάλογα με τις συνθήκες κοπής και το υλικό του κοπτικού.
- Η φθορά του κρατήρα και η φθορά πεδίου δεν μπορούν να αποφευχθούν και γενικά πρόκειται για δύο φαινόμενα, τα οποία εξελίσσονται με τον χρόνο κοπής. Παράλληλα, οι ιδιότητες του υλικού δεν μπορούν να μεταβληθούν, όμως υπάρχουν βασικοί κανόνες οι οποίοι μπορούν να μειώσουν τον ρυθμό φθοράς του εργαλείου και να βελτιώσουν την ποιότητα της κατεργασίας.
- Κατά την διάρκεια της κατεργασίας του τιτανίου, θα πρέπει όσο το εργαλείο και το κομμάτι βρίσκονται σε επαφή, η πρόωση να είναι αδιάκοπη, χωρίς ενδιάμεσα σταματήματα, διατηρώντας υψηλά ποσοστά πρόωσης. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η συγκόλληση του κατεργαζόμενου υλικού με το κοπτικό εργαλείο λόγω της υψηλής δραστηριότητας του τιτανίου με τα υλικά των εργαλείων, φαινόμενο το οποίο ενισχύεται από την υψηλή πίεση και την υψηλή θερμοκρασία, η οποία θα αυξηθεί ακόμα περισσότερο αν το εργαλείο ακινητοποιηθεί όταν αφαιρεί υλικό.
- Η αντικατάσταση των εργαλείων κοπής, θα πρέπει να γίνεται άμεσα με την πρώτη ένδειξη φθοράς. Εκτός από τα κριτήρια φθοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια για την αξιολόγηση της απόδοσης του κοπτικού η αύξηση της δύναμης κοπής, όταν η κατεργασία πραγματοποιείται με σταθερή

πρόωση, σταθερή ταχύτητα κοπής και σταθερό βάθος κοπής, η αύξηση της ισχύος, η αύξηση της θερμοκρασίας, η μεταβολή του αποβλίττου όταν οι συνθήκες κοπής διατηρούνται σταθερές ή ακόμα και από την επιφάνεια που προκύπτει στο κατεργαζόμενο τεμάχιο.

- Τέλος, ένα από τα βασικά συστατικά για την επιτυχία της επεξεργασίας του τιτανίου είναι η χρήση μιας άκαμπτης και στιβαρής εργαλειομηχανής, με αντίστοιχο εργαλειοδέτη. Είναι ζωτικής σημασίας οι εργαλειομηχανές και οι ιδιοσυσκευές να είναι ικανές, ώστε να εξασφαλίσουν την σταθερότητα του τεμαχίου, όταν αυτό τείνει να αρχίσει να δονείται, τάση την οποία έχουν όλα τα σκληρά υλικά. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο κατασκευές, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί για κατεργασίες που απαιτούν σταθερότητα και ακαμψία. Οι μηχανές για την ικανοποιητική και αποτελεσματική κατεργασία του τιτανίου, θα πρέπει να έχουν μερικά βασικά χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένης της σταθερότητας, έναν άξονα υψηλής ροπής, ένα ψυκτικό μέσο υψηλής πίεσης και ικανότητα για γρήγορες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις.

## 10 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με τη θεωρία που αναλύθηκε στο 2 και 5 Κεφάλαιο και τη σχετική βιβλιογραφία, τα αποτελέσματα που προέκυψαν συμφωνούν σε ικανοποιητικό βαθμό. Η θερμοκρασία που αναπτυσσόταν, αυξανόταν σημαντικά με αύξηση της πρόωσης και του βάθους κοπής και λιγότερο με την αύξηση της ταχύτητας. Αντίστοιχα αποτελέσματα, προέκυψαν για τις δυνάμεις κοπής, οι οποίες παρουσίασαν μικρή αύξηση ύστερα από αύξηση της ταχύτητας κοπής. Αντίθετα, η αύξηση τους ήταν σημαντική όταν αυξήθηκε το βάθος κοπής και η πρόωση. Συγκεκριμένα η επίδραση της αύξησης της προώσεως ήταν σημαντικότερη στην κύρια δύναμη κοπής ενώ η επίδραση της αύξησης του βάθους κοπής είχε σημαντικότερη επίδραση στην δύναμη άπωσης.

Το απόβλιττο για όλες τις συνθήκες κοπής που προσομοιώθηκαν ήταν συνεχόμενο άτακτης μορφής.

Η μοντελοποίηση της τόννευσης χωρίς τη χρήση ψυκτικού υγρού έγινε με το πρόγραμμα AdvantEdge. Το πρόγραμμα αυτό με το μαθηματικό μοντέλο επαναπροσδιορισμού του πλέγματος, την πλαστική ροή του υλικού γύρω από την κοπτική ακμή και γενικά το θερμομηχανικό μοντέλο που χρησιμοποιεί, καθιστά το πακέτο ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό πακέτο γύρω από τις κατεργασίες κοπής, με στόχο την προσομοίωση κατεργασιών και την μείωση των πειραμάτων που θα έπρεπε να εκτελεστούν από μια βιομηχανία για τη βελτιστοποίηση μιας κατεργασίας και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Οι αποκλίσεις κατά τη σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων ίσως να οφείλονται στο απλοποιημένο μοντέλο τριβής που χρησιμοποιεί το υπολογιστικό πακέτο, στα φαινόμενα θραύσης και πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού κατά την δημιουργία του αποβλίττου, τα οποία το πρόγραμμα δεν μπορεί να προσομοιώσει επαρκώς με τα πλαστικά κριτήρια παραμορφώσεως που χρησιμοποιεί, καθώς και η ελαστική παραμόρφωση του τεμαχίου που επηρεάζει τις δυνάμεις κατά την κύρια δύναμη κοπής και δύναμη άπωσης.

Θα πρέπει να αναφερθεί, ότι **το κυριότερο πρόβλημα εντοπίστηκε στην αδυναμία για ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την δύναμη πρόωσης**, χωρίς να μπορεί να δοθεί ικανοποιητική εξήγηση και χωρίς να υπάρχει δυνατότητα εύρεσης αντίστοιχης βιβλιογραφίας, λόγω του ότι ελάχιστες εργασίες έχουν πραγματοποιηθεί γύρω από την τρισδιάστατη προσομοίωση σε κατεργασία τιτανίου.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί και ο σημαντικός χρόνος που απαιτείται για την επίλυση των αριθμητικών μοντέλων. Το πακέτο απαιτεί 2-4 μέρες για να υπολογίσει μια εφαρμογή τρισδιάστατης τόννευσης και με επιλογή γρήγορης επίλυσης, όπως έχει εξηγηθεί στο κεφάλαιο 5 και μάλιστα για μία μόνο περιστροφή του τεμαχίου.

**Συνοψίζοντας** μπορούμε να πούμε, ότι το ενδιαφέρον για χρήση των κραμάτων του τιτανίου είναι συνεχώς αυξανόμενο, οδηγώντας πολλούς ερευνητές στη μελέτη και στην διερεύνηση τρόπων για την βέλτιστη κατεργασία αυτού του τόσο ιδιαίτερου υλικού, του οποίου οι μοναδικές φυσικές και χημικές ιδιότητες το καθιστούν ως ένα εξαιρετικά δύσκολο υλικό προς κατεργασία.

Μελλοντική επέκταση της συγκεκριμένης εργασίας μπορεί να γίνει για την μελέτη του μηχανισμού του αποβλίττου, από τον οποίο εξαρτώνται βασικά μεγέθη της κοπής, όπως: Οι δυνάμεις κοπής, η ισχύ της κοπής, η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, η φθορά και η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου, η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος εργαλειομηχανή – κοπτικό εργαλείο – τεμάχιο. Ακόμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μελέτη του τρόπου φθοράς του κοπτικού εργαλείου.

Σε κάθε περίπτωση, η χρήση της συγκεκριμένης εργασίας αποσκοπεί στην κατανόηση βασικών μηχανισμών στοχεύοντας στην υψηλή παραγωγικότητα με την επιθυμητή ακρίβεια, το μικρό κόστος και χρόνο κατεργασίας.

## 11 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Αρχείο κώδικα G του πακέτου CAM, ONE-TOUCH IGF-L της εργαλειομηχανής για την κοπή του εμπρόσθιου τμήματος της σφαίρας

```
N0001 G00 X300 Z200
N0002 G50 S9999
NAT01
N0100 G97 S1245 M41 M03 M08
N0101 G00 X35.8 Z0.52 T010101
N0102 G96 S140
N0103 G85 N0104 D1 F0.3 M85
N0104 G83
N0105 G01 X0 Z0
N0106 X35
N0107 Z-33
N0108 G81
N0109 G00 X0 Z0.12 G42
N0110 G01 Z-2.81 E0.3
N0111 G03 X30.4 Z-18.01 K-15.2
N0112 G01 Z-32.8
N0113 X35.24 E0.45
N0114 G40
N0115 G80
N0116 G00 X35.8
N0117 G97 S1245 M09
NAT01
N0200 G97 S9999 M42 M08
N0201 G00 Z-2.81 T010101
N0202 X0.4
N0203 G96 S180
N0204 G87 N0205
N0205 G81
N0206 G00 X-0.8
N0207 G01 Z-3.01 G42 F0.18
N0208 X0
N0209 G03 X30 Z-18.01 K-15
N0210 G01 Z-33
```

N0211 X35.8  
N0212 G40  
N0213 G80  
N0214 G01 X36 Z-32.62  
N0215 G00 X35.8  
N0216 G97 S1600 M05 M09  
N0217 X300 Z200 T0100  
N0218 M02

## 12 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Αρχείο κώδικα G του πακέτου CAM, ONE-TOUCH IGF-L της εργαλειομηχανής για την κοπή του οπίσθιου τμήματος της σφαίρας

```
N0001 G00 X300 Z200
N0002 G50 S9999
NAT02
N0100 G97 S1245 M41 M03 M08
N0101 G00 X35.8 Z0.52 T020202
N0102 G96 S140
N0103 G85 N0104 D1 F0.3 M85
N0104 G83
N0105 G01 X30.4 Z0
N0106 X35
N0107 Z-33
N0108 G81
N0109 G00 X30.4 Z0.12 G42
N0110 G01 Z-18.0096 E0.3
N0111 G03 X15.4 Z-31.1149 I-15.2
N0112 G01 Z-32.8
N0113 X35.24 E0.45
N0114 G40
N0115 G80
N0116 G00 X35.8
N0117 G97 S1245 M09
NAT02
N0200 G97 S1885 M08
N0201 G00 Z0.2 T020202
N0202 X30.4
N0203 G96 S180
N0204 G87 N0205
N0205 G81
N0206 G00 X30
N0207 G01 Z0.4 G42 F0.18
N0208 Z-18.01
N0209 G03 X15 Z-31 I-15 K0.0004
N0210 G01 Z-33
```



N0211 X35.8  
N0212 G40  
N0213 G80  
N0214 G01 X36 Z-32.62  
N0215 G00 X35.8  
N0216 G97 S1600 M05 M09  
N0217 X300 Z200 T0200  
N0218 M02

### 13 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

Αρχείο κώδικας G του πακέτου CAM, Edgcam που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της κοπής του εμπρόσθιου τμήματος της σφαίρας

```
Turret No. : 0      ZSet : 80.000      XSet : 200.000
Description : New Tool3
*
* WARNING - New Code Generator File
* Check that all parameters and formats have been correctly
set
*
* These comments may be removed when Code Generator file is
finished
*
*****
*****
* Machine Tool      : 2 Axis Generic ISO G-code + C Y B
SubSpindle
* Part Name         : dokimio
* Sequence          :
* Programmed By     :
* Date              : 08/04/10
* Time              : 18:28:30
*
* Total Machining Time (including Toolchange) : 12.780
Minutes
* Idle Time          (including Toolchange) : .000
Minutes
*****
*****
%
O0001
  G21G80 G40G54 G18
  M303
  G10 L2 P1 X0.0 Y0.0 Z210.0 (MainSpindle0)
  G10 T0000 X200.0 Z80.0 I0.0 K0.0
  G54 (USER DEFINED)
```

G0 T0000  
M303  
M46  
M68  
G97 S140 M3  
T0000  
G18  
M69  
G00 X36.584 Z16.443 M8  
G99 X35.584  
G01 Z0.0 F0.15  
G00 X37.584 Z1.0  
Z16.443  
X34.584  
G01 Z0.0  
G00 X36.584 Z1.0  
Z16.443  
X33.584  
G01 Z0.0  
G00 X35.584 Z1.0  
Z16.443  
X32.584  
G01 Z0.0  
G00 X34.584 Z1.0  
Z16.443  
X31.584  
G01 Z0.0  
G00 X33.584 Z1.0  
Z16.443  
X30.584  
G01 Z0.0  
G00 X32.584 Z1.0  
Z16.443  
X29.584  
G01 Z2.489  
G00 X31.584 Z3.489  
Z16.443  
X28.584

G01 Z4.554  
G00 X30.584 Z5.554  
Z16.443  
X27.584  
G01 Z5.898  
G00 X29.584 Z6.898  
Z16.443  
X26.584  
G01 Z6.951  
G00 X28.584 Z7.951  
Z16.443  
X25.584  
G01 Z7.834  
G00 X27.584 Z8.834  
Z16.443  
X24.584  
G01 Z8.597  
G00 X26.584 Z9.597  
Z16.443  
X23.584  
G01 Z9.271  
G00 X25.584 Z10.271  
Z16.443  
X22.584  
G01 Z9.874  
G00 X24.584 Z10.874  
Z16.443  
X21.584  
G01 Z10.418  
G00 X23.584 Z11.418  
Z16.443  
X20.584  
G01 Z10.912  
G00 X22.584 Z11.912  
Z16.443  
X19.584  
G01 Z11.363  
G00 X21.584 Z12.363

Z16.443  
X18.584  
G01 Z11.775  
G00 X20.584 Z12.775  
Z16.443  
X17.584  
G01 Z12.153  
G00 X19.584 Z13.153  
Z16.443  
X16.584  
G01 Z12.5  
G00 X18.584 Z13.5  
Z16.443  
X15.584  
G01 Z12.817  
G00 X17.584 Z13.817  
Z16.443  
X14.584  
G01 Z13.108  
G00 X16.584 Z14.108  
Z16.443  
X13.584  
G01 Z13.374  
G00 X15.584 Z14.374  
Z16.443  
X12.584  
G01 Z13.617  
G00 X14.584 Z14.617  
Z16.443  
X11.584  
G01 Z13.837  
G00 X13.584 Z14.837  
Z16.443  
X10.584  
G01 Z14.035  
G00 X12.584 Z15.035  
Z16.443  
X9.584

G01 Z14.214  
G00 X11.584 Z15.214  
Z16.443  
X8.584  
G01 Z14.373  
G00 X10.584 Z15.373  
Z16.443  
X7.584  
G01 Z14.513  
G00 X9.584 Z15.513  
Z16.443  
X6.584  
G01 Z14.634  
G00 X8.584 Z15.634  
Z16.443  
X5.584  
G01 Z14.738  
G00 X7.584 Z15.738  
Z16.443  
X4.584  
G01 Z14.824  
G00 X6.584 Z15.824  
Z16.443  
X3.584  
G01 Z14.893  
G00 X5.584 Z15.893  
Z16.443  
X2.584  
G01 Z14.944  
G00 X4.584 Z15.944  
Z16.443  
X1.584  
G01 Z14.979  
G00 X3.584 Z15.979  
Z16.443  
X0.584  
G01 Z14.997  
G00 X2.584 Z15.997

Z16.443  
X0.0  
G01 Z15.0  
G00 X2.0 Z16.0  
Z16.443  
X36.584  
Z15.0  
X0.0  
G03 X30.0 Z0.0 R15.0 F0.12 S180  
M30  
%

## 14 Βιβλιογραφία

### 14.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials* , January 2003
- [2] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, *Metallic Materials Properties Development and Standardization*, January 2003
- [3 ] C. Leyens and M. Peters . *Titanium and Titanium Alloys*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim , 2003
- [4] Vydehi Arun Joshi , *TITANIUM ALLOYS An Atlas of Structures and Fracture Feature* , Taylor & Francis Group, LLC , 2006
- [5] Gerd Lutjering James C. Williams , *Titanium* , Springer 2nd edition , 2002
- [6] Matthew J. Donachie, Jr, *Titanium – A technical Guide* , ASM INTERNATIONAL
- [7] F.C. Campbell , *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Material*, First edition 2006
- [8] Ιστοσελίδα, <http://www.astm.org> , ASTM International
- [9] Ιστοσελίδα, <http://rtiintl.com> , International Metals (<http://rtiintl.com/forming-titanium.html>)



## 14.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] Δ. Ε. Μανωλάκος, *Αδημοσίευτες σημειώσεις “ Κατεργασίες II”*, ΕΜΠ
- [2] Γ. Βοσνιάκος, *Αδημοσίευτες σημειώσεις “ Εισαγωγή στην μηχανουργική τεχνολογία”*, ΕΜΠ
- [3] Πέτρου Γ. Πετρόπουλου , *Μηχανουργική Τεχνολογία, Τεχνολογία Κατεργασιών Κοπής Των Μετάλλων*, Τόμος II, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1998
- [4] S. Kalpakjian, “Manufacturing Engineering and Technology” Proceedings of the 2000 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '00), Takamatsu, Japan, October 30 - November 5 2000
- [5] John A. Schey, “Introduction to Manufacturing Processes”, Mc Graw Hill, Third edition, (2000)
- [6] Γιώργος Χρυσολουρίδης, *Γεωμετρία Κοπτικών Εργαλείων*, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2003
- [7] Myer Kutz, *Mechanical Engineers’ Third edition Handbook - Manufacturing and Management*, John & Sons , Third edition, 2006
- [8] Κ.-Δ. Μπουζάκης , *Σημειώσεις Μορφοποίηση με αφαίρεση υλικού*, Εργαστήριο Εργαλειομηχανών Διαμορφωτικής Μηχανολογίας

### 14.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] Ιστοσελίδα, <http://www.secotools.com/>, Seco Tools, Turning,
- [2] Ιστοσελίδα, <http://www.kistler.com/>, 3-Component Dynamometer
- [3] OKUMA Manuals, *ONE-TOUCH IGF-L, OPRETION GUIDE* , 1 st Edition , May 1998
- [4] OKUMA Manuals, *ONE-TOUCH IGF-L, OPRETION-APPLICATION*, 2 st Edition, Oc. 2000
- [5] OKUMA Manuals, *ONE-TOUCH IGF-L, OPRETION-BASIC*, 1 st Edition , Mar. 1998
- [6] Βοσνιάκος Γεώργιος – Χριστόφορος, Computer Numerical Control , Computer Aided Manufacturing, Πρόχειρες Σημειώσεις, Αθήνα 2001
- [7] OKUMA Manuals
- [8] Edgecam Manuals

## 14.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] A. G. Mamalis, J. Kundrák, A. Markopoulos, D. E. Manolacos, *On the finite element modelling of high speed hard turning*, 14 August 2007
- [2] Lars-Erik Lindgren, Vahid Kalhori, Mikael Lundblad, *Machining Simulations And Their Use In Industry*, Barcelona, 2005
- [3] Vahid Kalhori, *Modelling and Simulation of Mechanical Cutting*, Lulea University of Technology, Sweden
- [4] Vahid Kalhori, Mikael Lundblad, *Finite Element Modelling of Orthogonal Metal Cutting*, Lulea University of Technology, Sweden
- [5] Halil Bil, A. Erman Tekkaya, S. Engin Kılıç, *2D FE Modelling of Machining : A Comparison of Different Approachers with Experiments*, Institute for Manufacturing Engineering and Production Management – FBK Kaiserslautern University of Technology, Department of Manufacturing Engineering, ATILIM University, Department of Mechanical Engineering, Middle East Technical University
- [6] Βοσνιάκος Γεώργιος – Χριστόφορος, *Computer Numerical Control , Computer Aided Manufacturing, Πρόχειρες Σημειώσεις*, Αθήνα 2001
- [7] AdvantEdge Manual
- [8] TecPlot User’s Manual
- [9] Ιστοσελίδα, [www.thirdwavesys.com](http://www.thirdwavesys.com), AdvantEdge

## 14.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 9 ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[1] Z.A. Zoya\*, R. Krishnamurthy, *The performance of CBN tools in the machining of titanium alloys*, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Chennai 600036, India 15 August 1998

[2] S. K. Bhaumik, C. Divakar and A. K. Singh, *Machining Ti-6Al-4V alloy with a wBN-cBN composite tool*, Materials Science Division, National Aerospace Laboratories, Bangalore- 0 17, India, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 7 December 1995

[3] S. Sun<sup>a,c</sup>, M.Brandt<sup>a,c</sup>, M.S.Dargusch<sup>b,c</sup>, *Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys*,

<sup>a</sup> Industrial Laser Applications Laboratory, IRIS, Faculty of Engineering and Industrial Sciences, Swinburne University of Technology, Hawthorn, Victoria 3122, Australia

<sup>b</sup> School of Engineering, University of Queensland, Queensland, Australia

<sup>c</sup> CAST Cooperative Research Centre, Australia,  
International Journal of Machine Tools & Manufacture

[4] J.D. Puerta Velasquez<sup>a</sup>, B. Bolle<sup>a</sup>, P. Chevrier<sup>b</sup>, G. Geandier<sup>c</sup>, A. Tidu<sup>a</sup>  
*Metallurgical study on chips obtained by high speed machining of a Ti-6 wt.%Al-4 wt.%V alloy*

<sup>a</sup> Laboratoire d'Etude des Textures et Applications aux Matériaux (LETAM), CNRS UMR 7078, Université Paule Verlaine-Metz, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz (ENIM), F-57045 Metz Cedex 01, France

<sup>b</sup> Laboratoire de Fiabilité Mécanique (LFM), Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz (ENIM), F-57045 Metz Cedex 01, France

<sup>c</sup> European Synchrotron Radiation Facilities (ESRF), BP 220, F-38043 Grenoble Cedex 9, France

Materials Science and Engineering, 18 October 2006

[5] Norihiko Narutaki and Akio Murakoshi, *Study on Machining of Titanium Alloys*, Hiroshima University/Japan

[6] E.O. Ezugwu \*, Z.M. Wang, *Titanium alloys and their machinability a review*, School of Engineering Systems and Design, South Bank University, London, UK, Journal of Materials Processing Technology, 20 October 1995

- [7] P. D. Hartung and B. M. Kramer, *Tool Wear in Titanium Machining*, 1982,
- [8] C.H. Che-Haron, *Tool life surface integrity in turning titanium alloy*, Department of Mechanical and Materials Engineering, University Malayaia, Malaysia, *Journal of Materials Processing Technology*
- [9] N. Fang and Q. Wu, A comparative study of the cutting forces in high speed machining of Ti-6Al-4V and Inconel 718 with a round cutting edge tool, College of Engineering, Utah State University, Logan, UT 84322-6000, USA, *Journal of Materials Processing Technology*, 5 October 2008
- [10] M.V. Ribeiro<sup>a</sup>, M.R.V. Moreira<sup>a</sup>, J.R. Ferreira<sup>b</sup>, *Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining*, <sup>a</sup>Department of Materials Engineering, FAENQUIL, Lorena, SP, Brazil, <sup>b</sup>Department of Production Engineering, EFEI, Itajubá, MG, Brazil, *Journal of Materials Processing Technology* 143-144 (2003) 458-463, 2003
- [11] M. H. Sadeghi & M. J. Haddad & T. Tawakoli & M. Emami, *Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy*, *Int J Adv Manuf Technol* (2009) 44:487-500 July 2008
- [12] Y.B. Guo<sup>a</sup>, David W. Yen<sup>b</sup>, A FEM study on mechanisms of discontinuous chip formation in hard machining, <sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Alabama, Tuscaloosa, AL 35487, USA, <sup>b</sup> Delphi E&C Dayton Technical Center, Dayton, OH 45408, USA, *Journal of Materials Processing Technology* 155-156 (2004) 1350-1356, 2004
- [13] 1\_SIMULATION AND ANALYSIS OF CHIP BREAKAGE  
Troy D. Marusich, Jeffrey D. Thiele and Christopher J. Brand, *SIMULATION AND ANALYSIS OF CHIP BREAKAGE IN TURNING PROCESSES*, 28-Mar-01
- [14] T. Kitagawa<sup>a</sup>, A. Kubo<sup>a</sup>, K. Maekawa<sup>b</sup>, *Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn*  
<sup>a</sup>Department of Mechanical Engineering, Kitami Institute of Technology, 165 Kaen-cho, Kitami 090. Japan  
<sup>b</sup>Department of Mechanical Engineering, Ibaraki University 4-12-1 Nakanarusawa. Hitachi 316. Japan, 17 January 1996

- [15] Z. G. Wang & M. Rahman & Y. S. Wong & K. S. Neo & J. Sun & C. H. Tan & H. Onozuka, *Study on orthogonal turning of titanium alloys with different coolant supply strategies*, Springer-Verlag London Limited 2008
- [16] S. A. Iqbal & P. T. Mativenga & M. A. Sheikh, *A comparative study of the tool–chip contact length in turning of two engineering alloys for a wide range of cutting speeds*, Int J Adv Manuf Technol (2009) 42:30–40, 8 February 2008
- [17] Jiang Hua, Rajiv Shivpuri, *Prediction of chip morphology and segmentation during the machining of titanium alloys*, Industrial Welding and Systems Engineering Department, The Ohio State University, 210 Baker System Engineering Building, 1971 Neil Avenue, Columbus, OH 43210, USA, Journal of Materials Processing Technology 150 (2004) 124–133, 2004
- [18] Madalina Calamaz, Dominique Coupard, Franck Girot, *A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti–6Al–4V*, Laboratoire Materiaux Endommagement Fiabilite´ Ingenierie des Procédés (LAMEFIP), ENSAM CER Bordeaux, Esplanade des Arts et Metiers, 33405 Talence Cedex, France, International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008) 275–288, 28 June 2007
- [19] R. Komanduri and B. F. Von Turkovich, *New Observations on the Mechanism of Chip Formation when Machining Titanium Alloys*, General Electric Corporate Research and Development, Schenectady, NY 12301 (U.S.A.), Mechanical Engineering Department, The University of Vermont, Burlington, VT 05401(U.S.A.), August 12,1980
- [20] C. Leyens and M. Peters . *Titanium and Titanium Alloys*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim , 2003
- [21] Vydehi Arun Joshi , *TITANIUM ALLOYS An Atlas of Structures and Fracture Feature* , Taylor & Francis Group, LLC , 2006
- [22] Gerd Lutjering James C.Williams , *Titanium* , Springer 2nd edition , 2002
- [23] Matthew J. Donachie, Jr, *Titanium – A technical Guide* , ASM INTERNATIONAL

[24] F.C. Campbell , *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Material*,  
First edition 2006

[24] Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS), U.S.  
Department of Transportation Federal Aviation Administration, January 2003

[25] Ιστοσελίδα, <http://www.titanium.com>, Machining Titanium Alloys By Dr. H.E.  
Trucks