



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ ΜΕ
ΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
ADVANTEDGE**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΧΑΤΖΗΔΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2011

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή κο Δημήτριο Ε. Μανωλάκο, Διευθυντή του Εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών, ο οποίος με τίμησε με την ανάθεση της παρούσης διπλωματικής εργασίας, μου παραχώρησε το εργαστήριο υπολογιστών ώστε να έχω τη δυνατότητα εκπόνησής της και μου πρόσφερε κατά τη θητεία μου στο ίδρυμα πληθώρα γνώσεων που με βοήθησαν να την φέρω εις πέρας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον διδάκτορα κο Άγγελο Μαρκόπουλο για τη πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε, καθώς και για τις χρήσιμες συμβουλές του.

Τέλος, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον μεταπτυχιακό φοιτητή κο Κωνσταντίνο Καντζάβελο για την αμέριστη βοήθειά του.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

Χατζηδάκης Κωνσταντίνος

Πρόλογος

Οι διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις για ολοένα και μικρότερες διαστάσεις σε εξαρτήματα και κατασκευές, που βρίσκουν εφαρμογή σε τομείς όπως η βιομηχανία και η ιατρική, έχουν καταστήσει τις μικροκατεργασίες ένα ραγδαία αναπτυσσόμενο πεδίο εφαρμογής αλλά και έρευνας.

Το ζητούμενο να αναλυθούν οι μηχανισμοί των κατεργασιών σε επίπεδο μικροκλίμακας, να ερευνηθούν φαινόμενα που παρουσιάζονται σε αυτές τις διαστάσεις, καθώς επίσης να κατασκευαστούν εργαλεία μικροκοπής με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος αλλά και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, χρήζουν εκτεταμένης μελέτης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελέσματα πειράματος ορθογωνικής κοπής θα επαληθευτούν μέσω του προγράμματος Advantedge. Θα γίνει προσομοίωση μικροκοπής μεταβάλλοντας μεγέθη όπως η ταχύτητα κοπής και η ακτίνα καμπυλότητας του κοπτικού εργαλείου. Χρήσιμα συμπεράσματα θα ληφθούν για τις δυνάμεις κοπής και τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κάτω από διαφορετικές συνθήκες, ενώ παράλληλα θα γίνει ανάλυση φαινομένων που εμφανίζονται, όπως η επίδραση κλίμακας (size effect) και η επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας σε σχέση με το βάθος κοπής.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την κατεργασία της μικροκοπής. Μελετά τις δυνάμεις και τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κάτω από ποικίλες συνθήκες και αναλύει φαινόμενα που εμφανίζονται σε επίπεδο μικροκλίμακας.

Αρχικά γίνεται αναφορά στην κατεργασία της κοπής με ανάλυση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της κοπής και επιμέρους αναφορές στη διαδικασία της τόννευσης, του τόννου και των κοπτικών εργαλείων.

Κατόπιν παρατίθεται το μοντέλο κοπής και γίνεται ανάλυση των δυνάμεων στη μικροκοπή, ενώ γίνεται αναφορά σε σημαντικά φαινόμενα που εμφανίζονται σε επίπεδο μικροκλίμακας, όπως η επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας, ο λόγος a/r και η επίδραση κλίμακας (size effect).

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, ενώ γίνεται παρουσίαση του λογισμικού Advantedge.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή της προσομοίωσης της μικροκοπής, από την καταχώρηση των δεδομένων στο περιβάλλον του Advantedge για τεμάχιο, εργαλείο κοπής και διαδικασία κοπής, μέχρι και τη λήψη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης μέσω του προγράμματος Tecplot.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στο πείραμα ορθογωνικής μικροκοπής που εκπονήθηκε από τους ερευνητές K. S. Woon, M. Rahman, F. Z. Fang, K. S. Neo και K. Liu[1], του οποίου τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία. Γίνεται περιγραφή της πειραματικής διάταξης και των πειραματικών δεδομένων ενώ ακολουθεί και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία της προσομοίωσης του πειράματος μικροκοπής στο Advantedge ενώ γίνεται σύγκριση των τιμών των πειραματικών μετρήσεων με τις τιμές της προσομοίωσης. Κατόπιν ακολουθούν δοκιμές προσομοίωσης ορθογωνικής μικροκοπής μεταβάλλοντας την ταχύτητα κοπής και την ακτίνα καμπυλότητας. Χρήσιμα συμπεράσματα εξάγονται για τις δυνάμεις κοπής και για τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κάτω από ποικίλες συνθήκες κοπής, ενώ αναλύονται φαινόμενα που εμφανίζονται, όπως η επίδραση κλίμακας (size effect) και η επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας.

Το τελευταίο μέρος συγκεντρώνει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτή την εργασία, βασισμένα στη βιβλιογραφία και την υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε.

Περιεχόμενα

1	Η κατεργασία της κοπής	1
1.1	Γενικά.....	1
1.2	Ορθογωνική κοπή.....	2
1.3	Εκτέλεση τόννευσης	2
1.4	Τόρνος.....	3
1.5	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοπής	5
1.6	Σχηματισμός αποβλήτου.....	7
1.7	Κοπτικά εργαλεία	7
2	Μοντέλο Μικροκοπής και Ανάλυση Δυνάμεων Μικροκοπής.....	10
2.1	Διαμόρφωση επιφάνειας κοπής και μοντέλου κοπής.....	10
2.2	Ανάλυση της κοπτικής δύναμης στη μικρο-κοπή	12
2.2.1	Ανάλυση κοπτικής δύναμης στην επιφάνεια αποβλήτου	13
2.2.2	Ανάλυση της κοπτικής δύναμης στην επιφάνεια του καμπύλου τμήματος.....	14
2.2.3	Ανάλυση της κοπτικής δύναμης στην επιφάνεια ελευθερίας.....	16
2.3	Συνολική κοπτική δύναμη και οι εξισώσεις κοπής.....	16
2.4	Επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας και του λόγου a/r	17
2.5	Επίδραση κλίμακας (size effect)	22
3	Προσομοίωση με τον Κώδικα Πεπερασμένων Στοιχείων Advantedge....	26
3.1	Γενικά.....	26
3.2	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	26
3.3	Προβλήματα κατά τη μοντελοποίηση	31
3.4	Παρουσίαση λογισμικού Advantedge.....	32
3.4.1	Μοντελοποίηση του υλικού του τεμαχίου στο Advantedge	33
3.4.2	Μοντελοποίηση μεταφοράς θερμότητας στο Advantedge.....	34
4	Καταχώρηση Δεδομένων για Μικροκοπή στο Περιβάλλον Advantedge .	36
4.1	Γενικά.....	36
4.2	Κατεργαζόμενο τεμάχιο.....	37
4.3	Εργαλείο κοπής	38
4.4	Διαδικασία κοπής.....	40
4.5	Προσομοίωση	41
4.6	Εμφάνιση αποτελεσμάτων	43
5	Πειραματική Διαδικασία.....	47
5.1	Γενικά.....	47

5.2	Περιγραφή πειραματικής διάταξης	47
5.3	Τεχνικές Προκλήσεις.....	49
5.4	Δεδομένα Πειράματος.....	50
5.5	Αποτελέσματα Πειράματος	51
5.6	Παρατηρήσεις	52
6	Προσομοίωση στο Advantedge	53
6.1	Γενικά.....	53
6.2	Επαλήθευση πειραματικών τιμών με τη χρήση του Advantedge	53
6.2.1	Καταχώρηση δεδομένων πειράματος στο Advantedge	53
6.2.2	Αποτελέσματα.....	59
6.2.3	Σύγκριση πειραματικών τιμών με προσομοίωσης	62
6.2.4	Συμπεράσματα	66
6.2.5	Εικόνες προσομοίωσης από το Tecplot	67
6.3	Σύγκριση δυνάμεων με κριτήριο την ταχύτητα κοπής	78
6.3.1	Γενικά	78
6.3.2	Καταχώρηση δεδομένων	78
6.3.3	Αποτελέσματα.....	78
6.3.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων για όλες τις ταχύτητες κοπής	81
6.3.5	Συμπεράσματα	87
6.4	Σύγκριση δυνάμεων με κριτήριο την ακτίνα καμπυλότητας.....	87
6.4.1	Γενικά	88
6.4.2	Καταχώρηση δεδομένων	88
6.4.3	Αποτελέσματα.....	88
6.4.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων με κριτήριο την r	92
6.4.5	Συμπεράσματα	98
7	Τελικά συμπεράσματα	101
8	Βιβλιογραφία.....	103

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1-Ορθογωνική κοπή	2
Εικόνα 2-Ο τόννος και τα κυριότερα μέρη του	4
Εικόνα 3-Εργαλειομηχανή με βιντεοκάμερα και μικροσκόπια	5
Εικόνα 4-Απεικόνιση κοπής και γεωμετρικών χαρακτηριστικών	6
Εικόνα 5-Διαμόρφωση κατεργαζόμενης επιφάνειας στη μικροκοπή	11
Εικόνα 6-Μοντέλο μικροκοπής	11
Εικόνα 7-Κατανομή δύναμης σε 2D στη μικροκοπή πλαστικού υλικού.....	13
Εικόνα 8-Κατανομή δυνάμεων στην επιφάνεια αποβλήτου.....	14
Εικόνα 9-Κατανομή δυνάμεων στην επιφάνεια του καμπύλου τμήματος	15
Εικόνα 10-Πολύ μεγάλες τιμές για a/r με μικρές τιμές για r - Αρχικό στάδιο κοπής ..	18
Εικόνα 11-Μικρές τιμές για a/r με μεγαλύτερες τιμές για r - Αρχικό στάδιο κοπής ...	18
Εικόνα 12-Κρίσιμη τιμή για a/r - Αρχικό στάδιο κοπής	19
Εικόνα 13-Πολύ μεγάλες τιμές για a/r με μικρές τιμές για r	20
Εικόνα 14-Μικρές τιμές για a/r με μεγαλύτερες τιμές για r	20
Εικόνα 15-Κρίσιμη τιμή για a/r	21
Εικόνα 16-Παραμόρφωση με μεγάλη αρνητική πραγματική γωνία αποβλήτου μπροστά από την ακτίνα καμπυλότητας στο κρίσιμο a/r	21
Εικόνα 17-Απεικόνιση πραγματικής γωνίας αποβλήτου.....	25
Εικόνα 18-Μοντελοποίηση τεμαχίου και εργαλείου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.....	27
Εικόνα 19-Μοντέλο του Euler	29
Εικόνα 20-Μοντέλο Lagrange	30
Εικόνα 21-Καμπύλες που αναπαριστούν την κατανομή κανονικής τάσης και τάσης τριβής στην επιφάνεια αποβλήτου	34
Εικόνα 22-Παράθυρο επιλογής κατεργασίας	36
Εικόνα 23-Παράθυρο καταχώρησης διαστάσεων του τεμαχίου.....	37
Εικόνα 24-Παράθυρο επιλογής υλικού του τεμαχίου.....	38
Εικόνα 25-Παράθυρα καταχώρησης παραμέτρων κοπτικού εργαλείου.....	39
Εικόνα 26-Παράθυρο επιλογής υλικού κοπτικού εργαλείου.....	40
Εικόνα 27-Παράθυρο καταχώρησης παραμέτρων της διαδικασίας κοπής.....	40
Εικόνα 28-Παράθυρο καταχώρησης συντελεστή τριβής.....	41
Εικόνα 29-Κεντρικό παράθυρο Advantedge με δεδομένα	41
Εικόνα 30-Επιλογή γρήγορης ή κανονικής μοντελοποίησης	42
Εικόνα 31-Επιλογή μεγέθους στοιχείων τεμαχίου.....	43
Εικόνα 32-Εικόνα από Tecplot	44
Εικόνα 33-Λίστα επιλογών διαφόρων μεγεθών.....	45
Εικόνα 34-Επιλογή φίλτρου για ομαλοποίηση δυνάμεων	45
Εικόνα 35-Εικόνες δυνάμεων πριν και μετά την εφαρμογή του φίλτρου	46
Εικόνα 36-Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.....	49
Εικόνα 37-Απεικόνιση μεγεθών στο Advantedge	54
Εικόνα 38-Εικόνα από Tecplot πριν την εφαρμογή φίλτρου.....	56
Εικόνα 39-Εικόνα από Tecplot μετά την εφαρμογή φίλτρου	56
Εικόνα 40-Επιλογή 'Tool to probe data'.....	58
Εικόνα 41-Επιλογές 'Probe' και 'Probe at'.....	59
Εικόνα 42- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $a = 2\mu\text{m}$	68

Εικόνα 43- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 4\mu\text{m}$	69
Εικόνα 44- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 6\mu\text{m}$	70
Εικόνα 45- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 8\mu\text{m}$	71
Εικόνα 46- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 10\mu\text{m}$	72
Εικόνα 47- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 12\mu\text{m}$	73
Εικόνα 48- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 14\mu\text{m}$	74
Εικόνα 49- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 16\mu\text{m}$	75
Εικόνα 50- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 18\mu\text{m}$	76
Εικόνα 51- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 20\mu\text{m}$	77
Εικόνα 52- Προσομοίωση μικροκοπής για $V=50 \text{ m/min}$	86
Εικόνα 53- Προσομοίωση μικροκοπής για $V=100\text{m/min}$	86
Εικόνα 54- Προσομοίωση μικροκοπής για $V=200\text{m/min}$	87
Εικόνα 55- Λήψη εικόνας από Tecplot για $\alpha=2\mu\text{m}$ και $r=15\mu\text{m}$	99

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1- Δεδομένα πειράματος	50
Πίνακας 2- Πειραματικές μετρήσεις	51
Πίνακας 3- Δεδομένα καταχώρησης στο Advantedge	55
Πίνακας 4- Μέσες τιμές δυνάμεων προσομοίωσης	60
Πίνακας 5- Μέσες τιμές δυνάμεων	61
Πίνακας 6- Συνισταμένες δυνάμεων πειράματος και προσομοίωσης	63
Πίνακας 7- Ειδικές δυνάμεις πειράματος και προσομοίωσης	64
Πίνακας 8- Θερμοκρασιακές μεταβολές συναρτήσει α	65
Πίνακας 9- Μέσες τιμές δυνάμεων κοπής για $V= 50 \text{ m/min}$	79
Πίνακας 10- Μέσες τιμές δυνάμεων για $V=200\text{m/min}$	80
Πίνακας 11- Μέσες τιμές δυνάμεων για όλες τις ταχύτητες κοπής	81
Πίνακας 12- Μέσες τιμές συνισταμένων δυνάμεων για όλες τις ταχύτητες κοπής	82
Πίνακας 13- Μέσες ειδικές δυνάμεις για όλες τις ταχύτητες κοπής	83
Πίνακας 14- Θερμοκρασιακές μεταβολές συναρτήσει του α για κάθε ταχύτητα κοπής	85
Πίνακας 15- Μέσες δυνάμεις για $r=5 \mu\text{m}$	89
Πίνακας 16- Μέσες δυνάμεις για $r=15\mu\text{m}$	90
Πίνακας 17- Μέσες κύριες δυνάμεις κοπής για όλα τα r	91
Πίνακας 18- Μέσες δυνάμεις άπωσης για όλα τα r	92
Πίνακας 19- Μέσες ειδικές κύριες δυνάμεις κοπής για όλα τα r	93
Πίνακας 20- Μέσες ειδικές δυνάμεις άπωσης για όλα τα r	93
Πίνακας 21- Θερμοκρασιακές μεταβολές συναρτήσει του α για όλες τις ακτίνες καμπυλότητας	94

Περιεχόμενα Γραφημάτων

Γράφημα 1- Μέσες δυνάμεις πειράματος συναρτήσει του πάχους του αδιαμόρφωτου αποβλήτου	51
Γράφημα 2- Γράφημα $F=f(l)$ - Γράφημα 3- Γράφημα $F=f(t)$	57
Γράφημα 4- Μέσες δυνάμεις προσομοίωσης	61
Γράφημα 5- Σύγκριση δυνάμεων πειράματος με προσομοίωσης	62

Γράφημα 6-Σύγκριση συνισταμένων δυνάμεων πειράματος με προσομοίωσης	63
Γράφημα 7-Σύγκριση ειδικής κύριας δύναμης κοπής πειράματος με προσομοίωσης	64
Γράφημα 8-Σύγκριση ειδικής δύναμης άπωσης πειράματος με προσομοίωσης	65
Γράφημα 9-Θερμοκρασιακές μεταβολές συναρτήσει του α	66
Γράφημα 10-Σύγκριση δυνάμεων για όλες τις ταχύτητες κοπής.....	81
Γράφημα 11-Σύγκριση συνισταμένων δυνάμεων για όλες τις ταχύτητες	82
Γράφημα 12-Σύγκριση ειδικών κύριων δυνάμεων κοπής για όλες τις ταχύτητες κοπής	84
Γράφημα 13-Σύγκριση ειδικών δυνάμεων άπωσης για όλες τις ταχύτητες κοπής	84
Γράφημα 14-Σύγκριση θερμοκρασιακών μεταβολών για όλες τις ταχύτητες κοπής .	85
Γράφημα 15-Σύγκριση κύριων δυνάμεων κοπής για όλα τα r	91
Γράφημα 16-Σύγκριση δυνάμεων άπωσης για όλα τα r	92
Γράφημα 17-Σύγκριση ειδικών κύριων δυνάμεων κοπής για όλα τα r	93
Γράφημα 18-Σύγκριση ειδικών δυνάμεων άπωσης για όλα τα r	94
Γράφημα 19-Σύγκριση θερμοκρασιακών μεταβολών για όλα τα r	95
Γράφημα 20-Συσχέτιση κύριων δυνάμεων κοπής με δυνάμεις άπωσης για όλα τα r	99

1 Η κατεργασία της κοπής

1.1 Γενικά

[5][9][10]

Με τον όρο κατεργασίες αποβολής υλικού εννοούνται όλες εκείνες οι κατεργασίες στις οποίες, προκειμένου να πετύχουμε μία συγκεκριμένη μορφή στο υλικό που κατεργαζόμαστε, αφαιρούμε υλικό με τη μορφή αποβλήτου. Η αφαίρεση υλικού γίνεται μέσω ενός κοπτικού εργαλείου το οποίο παραμορφώνει πλαστικά το κατεργαζόμενο υλικό. Στις συμβατικές μηχανικές μικροκατεργασίες οι τάσεις που αναπτύσσονται από το κοπτικό εργαλείο ξεπερνούν την αντοχή του υλικού δημιουργώντας το απόβλητο, προσδίδοντας τη ζητούμενη μορφή. Παρόλο που οι παραπάνω κατεργασίες που αναφέρθηκαν αποτελούν τις πιο συνηθισμένες κατεργασίες, η συνεχής βελτίωση στην ακρίβεια που επιτυγχάνουν τους επιτρέπει να εφαρμόζονται στις μικροκατεργασίες. Οι βελτιώσεις αυτές αφορούν τα κοπτικά εργαλεία αλλά και τις εργαλειομηχανές.

Οι πρώτες CNC εργαλειομηχανές που εμφανίστηκαν γύρω στα τέλη της δεκαετίας του '70 μπορούσαν να αναπαράγουν κινήσεις της τάξεως των 0,5 μm. Στη δεκαετία του '90 το όριο αυτό έγινε 0,05 μm φτάνοντας την ακρίβεια στην τάξη του 1 μm, δηλαδή επετεύχθη μείωση μιας τάξης μεγέθους, ενώ σήμερα υπάρχουν εργαλειομηχανές με ακρίβεια κινήσεων 0,01 μm. Με επιπλέον βελτιώσεις στους σερβοκινητήρες, όπως και στα έδρανα ή στα όργανα μετρήσεων οδηγούμαστε σε καλύτερα αποτελέσματα. Με τη βοήθεια επίσης των ηλεκτρονικών υπολογιστών καταφέρνουμε καλύτερο έλεγχο της κατεργασίας και με περαιτέρω αύξηση της ακρίβειας, χωρίς να επιβαρύνεται το κόστος ή να αυξάνεται ο χρόνος κατεργασίας.

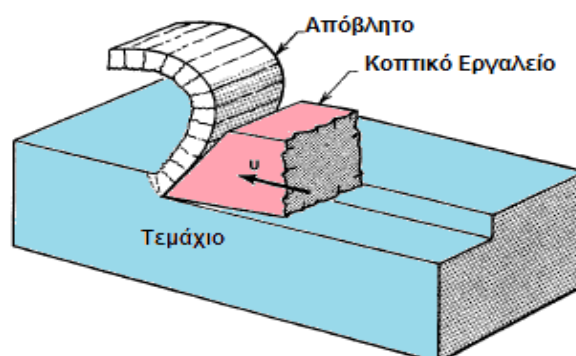
Πριν ξεκινήσουμε την ανάλυση της μικροκοπής-μικροτόρνευσης είναι χρήσιμο να αναφέρουμε κάποιες γενικές πληροφορίες περί κοπής-τόρνευσης, οι οποίες όμως ισχύουν και για τη μικροκοπή. Σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι οι γενικές αυτές πληροφορίες έχουν να κάνουν με την ορθογωνική κοπή.

1.2 Ορθογωνική κοπή

[10][13][15]

Στην ορθογωνική κοπή η τέμνουσα άκρη του εργαλείου είναι ευθεία και κάθετη στην κατεύθυνση κίνησης. Εδώ το επίπεδο της κοπής είναι παράλληλο προς την επιφάνεια του προς κατεργασία τεμαχίου, δηλαδή θεωρείται ότι η ροή του υλικού είναι διδιάστατη και η κατεργασία είναι επίπεδη παραμορφωσιακή με την προϋπόθεση ότι το πλάτος του κοπτικού εργαλείου είναι μεγάλο σε σχέση με το πλάτος του αποβλήτου.

Οι βασικοί συντελεστές κατά την κοπή είναι το Κατεργαζόμενο Τεμάχιο, το Κοπτικό Εργαλείο και το Απόβλητο. Η κίνηση του Κοπτικού Εργαλείου (προσομοιάζεται με σφήνα) ως προς το Τεμάχιο σε συγκεκριμένη κατεύθυνση (διεύθυνση κοπής) με ταχύτητα u προκαλεί τον σχηματισμό του αποβλήτου, λόγω της ισχυρής πλαστικής παραμόρφωσης του Τεμαχίου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 1-Ορθογωνική κοπή

1.3 Εκτέλεση τόννευσης

[13][15]

Η εργαλειομηχανή μέσω της οποίας εκτελείται η κατεργασία της τόννευσης, είναι ο τόννος. Το τεμάχιο που πρόκειται να κατεργαστεί προσδένεται στο σφιγκτήρα των τεμαχίων γνωστό και ως τσοκ. Το τσοκ είναι ενωμένο με ηλεκτροκινητήρα ο οποίος το περιστρέφει και επομένως περιστρέφεται το τεμάχιο. Το κοπτικό εργαλείο τοποθετείται στον εργαλειοδέτη ο οποίος έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει τη θέση του κοπτικού σε σχέση με το τεμάχιο. Ο εργαλειοδέτης ο οποίος είναι προσαρμοσμένος στο εργαλειοφορέιο το οποίο ολισθαίνει πάνω στο τραπέζι του τόννου, ολισθαίνει και

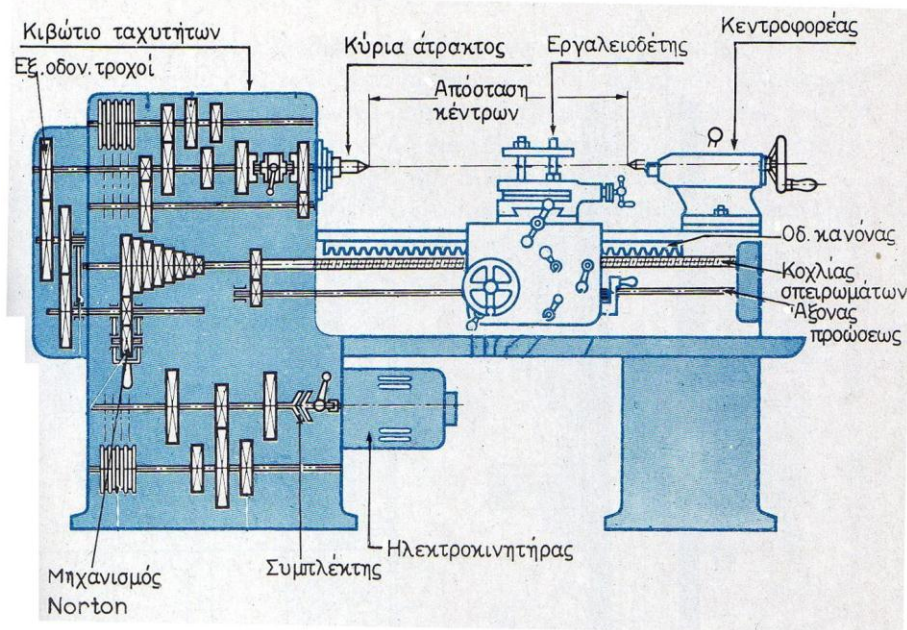
αυτός, με αποτέλεσμα να πετυχαίνουμε την επιθυμητή πρόωση. Τόσο οι στροφές του ηλεκτροκινητήρα όσο και η πρόωση ρυθμίζονται ανάλογα τις εκάστοτε ανάγκες. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι η κατασκευή πρέπει να είναι στιβαρή ώστε να μπορεί να απορροφήσει όλες τις δυνάμεις που ασκούνται και να μην υπάρχουν κραδασμοί οι οποίοι θα καταστρέψουν το τεμάχιο.

1.4 Τόρνος

[12][14][15][16]

Τα κυριότερα μέρη ενός τόρνου είναι:

- **Ο σφιγκτήρας τεμαχίων (τσοκ)**, όπου δένονται τα προς κατεργασία τεμάχια και ο οποίος περιστρέφεται οπότε μπορεί να επιτευχθεί η κοπή.
- **Ο εργαλειοδέτης**, όπου δένεται το κοπτικό εργαλείο και ο οποίος είναι προσαρμοσμένος πάνω στο εργαλειοφορείο.
- **Το εργαλειοφορείο**, το οποίο ουσιαστικά φέρει το κοπτικό εργαλείο και με τη δική του ανεξάρτητη κίνηση επιτυγχάνεται η επιθυμητή πρόωση.
- **Ο κεντροφορέας(κουκουβάγια)**, ο οποίος χρησιμεύει ως στήριγμα της ελεύθερης πλευράς του τεμαχίου.
- **Ο ηλεκτροκινητήρας**, ο οποίος δίνει την κίνηση στην άτρακτο μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων.
- **Το κιβώτιο ταχυτήτων**, το οποίο μεταφέρει την κίνηση στην άτρακτο ρυθμίζοντας την ταχύτητα περιστροφής της ανάλογα τις απαιτήσεις.



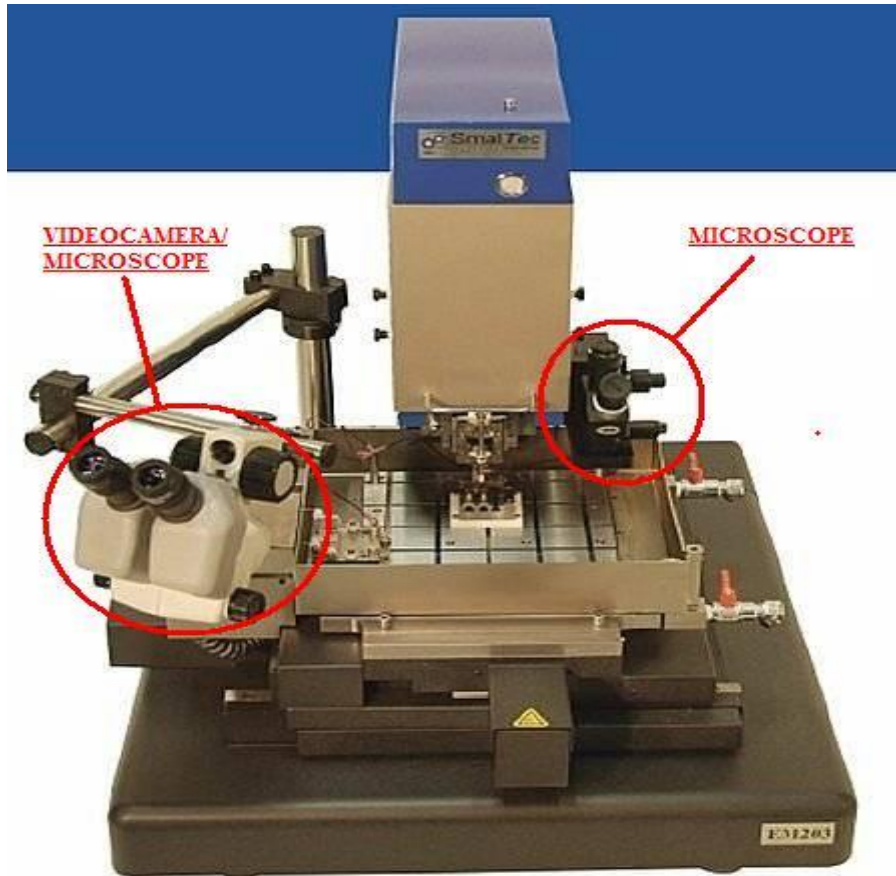
Εικόνα 2-Ο τόννος και τα κυριότερα μέρη του

Στην ταξινόμηση των τόννων ανάλογα με τον βαθμό αυτοματισμού έχουμε:

- Απλός τόννος, στον οποίο οι βοηθητικές κινήσεις δίνονται με το χέρι
- Αυτόματος τόννος, μηχανικού προγραμματισμού
- Αυτόματος τόννος με αριθμητικό προγραμματισμό μέσω Η/Υ (CNC)
- Ημιαυτόματος (ή πλέον σήμερα αυτόματος) τόννος, γνωστός ως ρεβόλβερ

Σήμερα, η κατεργασία της μικροκοπής εκτελείται σε σύγχρονους CNC τόννους λίαν υψηλής ακριβείας (Ultra precision), διαθέτοντας εξαιρετικής κατασκευαστικής ακριβείας ολισθητήρες και έδρανα (hydrostatic slights, air bearing spindles).

Σημαντική συνεισφορά στον έλεγχο των μικροκατεργασιών και στη μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την εκτέλεσή τους έχουν οι βιντεοκάμερες/μικροσκόπια που προσαρμόζονται στις εργαλειομηχανές και μπορούν να απεικονίζουν την κατεργασία με τη βοήθεια οθόνης καθώς και τα μικροσκόπια με τη βοήθεια των οποίων μπορεί να ελέγχεται η ευθυγράμμιση των τεμαχίων κατά την κατεργασία τους (εικόνα 3).

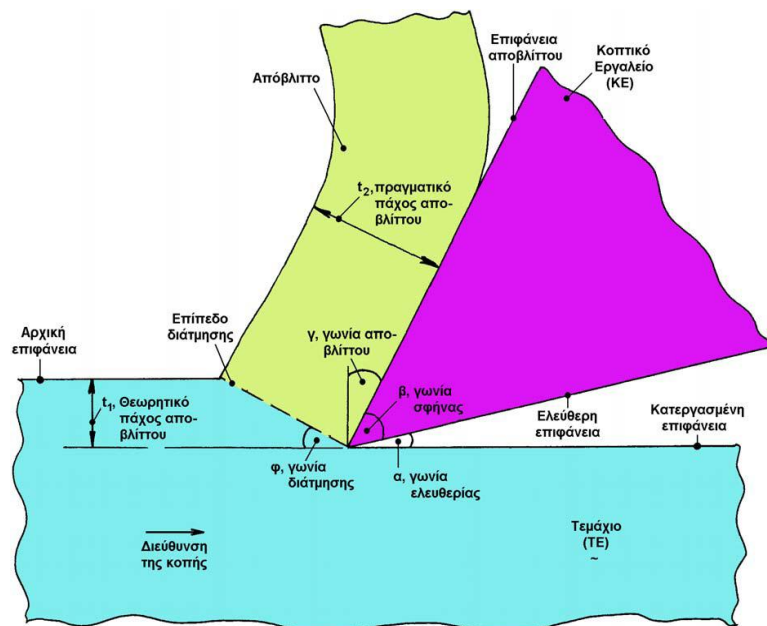


Εικόνα 3-Εργαλειομηχανή με βιντεοκάμερα και μικροσκόπια

1.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοπής

[9][10][13][14]

Κάποια συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά καθορίζουν το κοπτικό εργαλείο. Στο σχήμα που ακολουθεί παρατηρούμε αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως επίσης και ότι το κοπτικό εργαλείο έχει δύο κοπτικές πλευρές, την κύρια και τη δευτερεύουσα.



Εικόνα 4-Απεικόνιση κοπής και γεωμετρικών χαρακτηριστικών

Τα σημαντικότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου είναι:

- **Η γωνία ελευθερίας (α)**, η οποία σχηματίζεται από την κατεργασμένη επιφάνεια και την ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου. Συμβάλλει στη μείωση της τριβής μεταξύ ΤΕ(τεμαχίου) και ΚΕ(κοπτικού εργαλείου). Παίρνει τιμές από 5° - 15° .
- **Η γωνία σφήνας (β)**, η οποία σχηματίζεται από την επιφάνεια αποβλήτου και την ελεύθερη επιφάνεια.
- **Η γωνία αποβλήτου (γ)**, η οποία σχηματίζεται μεταξύ του νοητού κάθετου άξονα στην κατεργασμένη επιφάνεια ο οποίος ξεκινά από την αιχμή του ΚΕ και την επιφάνεια αποβλήτου. Όσο αυξάνεται η τιμή της τόσο μειώνονται οι δυνάμεις κοπής. Για μεγάλες γωνίες αποβλήτου το ΚΕ γίνεται πιο αιχμηρό με αποτέλεσμα να υπερθερμαίνεται και να φθείρεται πιο εύκολα η αιχμή του. Παίρνει τιμές από 0° - 20° . Για μεγάλες ταχύτητες κοπής και μικρή διατομή αποβλήτου η γωνία γ λαμβάνει αρνητικές τιμές. Όπως συμπεραίνουμε από το σχήμα πρέπει να ισχύει $\alpha + \beta + \gamma = 90^{\circ}$.
- **Η γωνία διατμήσεως (φ)** : το ΤΕ παραμορφώνεται πλαστικά κατά μήκος του επιπέδου διάτμησης σχηματίζοντας το απόβλητο με πάχος t_2 . Όπως φαίνεται στο σχήμα το επίπεδο διατμήσεως κλίνει προς την διεύθυνση κοπής κατά μια γωνία φ.

Όσον αφορά τη λειτουργία του τόννου, οι βασικότερες συνθήκες οι οποίες χρειάζονται ρύθμιση για τη σωστή κατεργασία είναι:

- **Η ταχύτητα κοπής**, η οποία είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ του ΚΕ και του ΤΕ η οποία αναφέρεται στην κύρια κίνηση κοπής.
- **Το βάθος κοπής**, το οποίο είναι το βάθος που εισχωρεί το κοπτικό εργαλείο μέσα στο τεμάχιο κατά την κοπή.
- **Η πρόωση**, η οποία είναι η σχετική κίνηση μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου που προσφέρει με σταθερό ρυθμό στο εργαλείο νέο υλικό προς κοπή. Το σύνηθες είναι να επιτυγχάνεται με κίνηση του κοπτικού εργαλείου ενώ είναι το τεμάχιο σταθερό αλλά μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να συμβαίνει και το αντίθετο. Στον τόρνο, πρόωση είναι η κατά την έννοια του άξονα περιστροφής μετακίνηση του κοπτικού εργαλείου ανά στροφή του αντικειμένου.

1.6 Σχηματισμός αποβλήτου

[9]

Το απόβλητο δημιουργείται από την κύρια κοπτική ακμή, τη μύτη του εργαλείου και ένα μικρό μέρος της δευτερεύουσας κοπτικής ακμής. Το υλικό ρέει πάνω στο εργαλείο, στην πλευρά αποβλήτου, και διαχωρίζεται από το κυρίως τεμάχιο ενώ υπόκειται πλαστική παραμόρφωση. Η πλαστική παραμόρφωση είναι η αιτία που το θεωρητικό πάχος του αποβλήτου t_1 είναι μικρότερο από το πραγματικό πάχος του αποβλήτου t_2 όπως βλέπουμε στην εικόνα 4.

1.7 Κοπτικά εργαλεία

[14][12][10]

Η επιτυχία σε κάθε κατεργασία αποβολής υλικού καθορίζεται από το τι συμβαίνει στο σημείο επαφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου με το κοπτικό εργαλείο. Η αξία της παγκόσμιας βιομηχανίας κατεργασιών με αποβολή υλικού είναι πάνω από \$40 δισεκατομμύρια, από τα οποία τα \$10 δισεκατομμύρια αποτελούν τα κοπτικά εργαλεία. Η επιλογή του κατάλληλου κοπτικού εργαλείου ανάλογα με την κατεργασία και το υλικό του τεμαχίου, γίνεται με γνώμονα τη γεωμετρία και το υλικό του εργαλείου. Γι' αυτό τα κοπτικά εργαλεία καθορισμένης γεωμετρίας οφείλουν να έχουν μεγαλύτερη σκληρότητα από αυτή του τεμαχίου, να διατηρούν της ιδιότητές τους σε υψηλές θερμοκρασίες, να παρουσιάζουν μικρή φθορά κατά τη λειτουργία και να είναι εργονομικά κατά την τοποθέτησή τους.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι τα βασικότερα χαρακτηριστικά των κοπτικών εργαλείων είναι:

- **Η ανθεκτικότητα**, έτσι ώστε οι μεταβαλλόμενες δυνάμεις που δέχεται το εργαλείο σε διακεκομμένες κοπές, να μην προκαλέσουν απότομη θραύση του εργαλείου. Η ανθεκτικότητα είναι απαραίτητη έτσι ώστε το εργαλείο να αντεπεξέρχεται των μηχανικών κλονισμών στις διαδικασίες διακοπτόμενης κοπής. Οι κλονισμοί εμφανίζονται ακόμα και στις διαδικασίες σχηματισμού συνεχούς αποβλήτου, όταν το εργαλείο αντιμετωπίσει κάποιο σκληρό σημείο.
- Η **σκληρότητα**, ειδικά στις υψηλές θερμοκρασίες (σκλήρυνση εν θερμώ), ώστε η σκληρότητα και η αντοχή του εργαλείου να διατηρούνται στις υψηλές θερμοκρασίες κατά την κοπή. Το εργαλείο πρέπει να είναι σκληρότερο από το σκληρότερο συστατικό του υλικού που κατεργάζεται, όχι μόνο σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά και στις πραγματικές συνθήκες κοπής. Η υψηλή σκλήρυνση εν θερμώ αποτρέπει την πλαστική παραμόρφωση, εξασφαλίζει την διατήρηση της γεωμετρίας του εργαλείου κοπής κάτω από τις ακραίες συνθήκες κατά τον σχηματισμό αποβλήτου, και βοηθά επίσης στην αντίσταση σε φθορά.
- Η **χημική σταθερότητα**, ώστε να αποφεύγονται οι αντιδράσεις μεταξύ των υλικών του εργαλείου και του τεμαχίου οι οποίες συνηγορούν στην φθορά του πρώτου.
- Η **αντοχή σε φθορά**, ώστε η διάρκεια ζωής του να διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα προτού το εργαλείο θα πρέπει να αλλαχθεί.
- **Παραδεκτό κόστος**: απόκτησης χωρίς να επιβαρύνει σε μεγάλο ποσοστό το συνολικό τελικό κόστος άλλα και να καθιστά την κατεργασία αποδοτική.

Όσον αφορά τα υλικά κατασκευής των κοπτικών εργαλείων, σήμερα υπάρχει μία πληθώρα υλικών με διαφορετική σύσταση και ιδιότητες ανάλογα την εφαρμογή. Οι κυριότερες κατηγορίες που διακρίνονται είναι:

- Οι ανθρακούχοι χάλυβες
- Οι ταχυχάλυβες(HSS)
- Τα σκληρομέταλλα
- Τα κεραμικά υλικά
- Το διαμάντι
- Το CBN(κυβικός βοριονιτρίτης)

Σημαντικό ρόλο για τα κοπτικά εργαλεία παίζουν οι επικαλύψεις. Τα υλικά των επικαλύψεων ποικίλουν αλλά συνήθως είναι είτε κεραμικά (Al_2O_3) είτε καρβίδια ή νιτρίδια του τιτανίου (TiC) (TiN), αναμειγμένα πολλές φορές με αλουμίνιο (TiAlN) ή

και μεταξύ τους (TiCN) (TiAlCN). Η επικάλυψη μπορεί να γίνει από πολλές στρώσεις, κάθε μία με ένα υλικό, ενώ τελευταία χρησιμοποιείται και το διαμάντι ως υλικό επικάλυψης. Το εξωτερικό στρώμα συνήθως είναι TiC χάριν της καλής θερμικής του αγωγιμότητας. Οι επικαλύψεις, μπορεί να μην ξεπερνούν συνήθως τα 10μm σε πάχος, όμως συμβάλλουν σημαντικά στην αύξηση της διάρκειας ζωής, της αντοχής σε υψηλή θερμοκρασία, της σκληρότητας και της αντοχής σε φθορά πάσης φύσεως. Ακόμη μειώνουν την δύναμη κοπής και την θερμότητα που παράγεται από την τριβή με το απόβλητο.

2 Μοντέλο Μικροκοπής και Ανάλυση Δυνάμεων Μικροκοπής

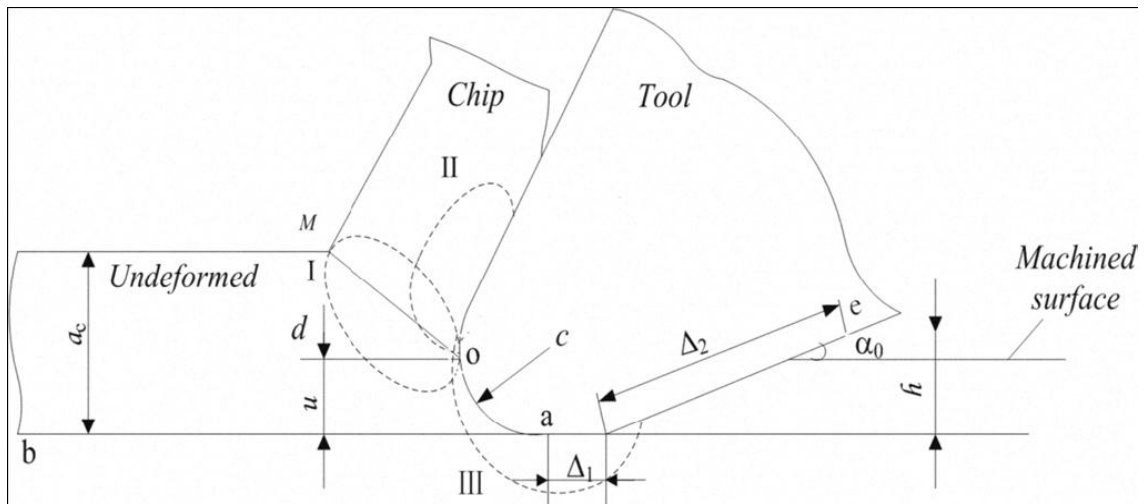
[3]

2.1 Διαμόρφωση επιφάνειας κοπής και μοντέλου κοπής

Παρόμοια με την παραδοσιακή διαδικασία κοπής, η μικρο-κοπή έχει τέσσερα στάδια: έλαση, ολίσθηση, θραύση και αποκοπή. Παρ' όλα αυτά, το βάθος κοπής a_c είναι πολύ μικρό και συγκρίσιμο με την ακτίνα καμπυλότητας r_n στην μικρο-κοπή, γι' αυτό, η παραμόρφωση της στρώσης κοπής είναι διαφορετική από αυτήν της παραδοσιακής κοπής.

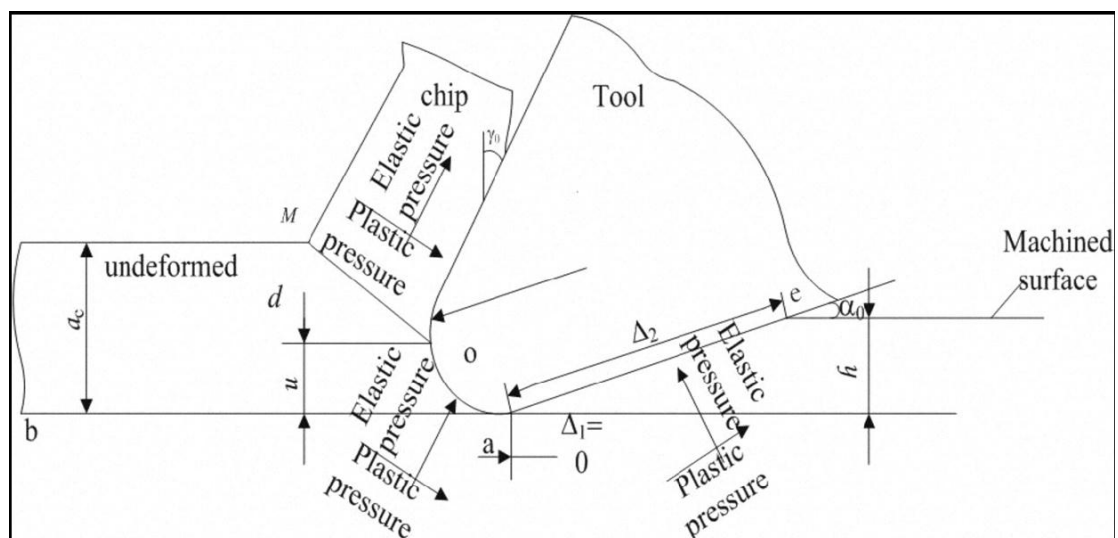
Η άκοπη στρώση ξεχωρίζει από το κύριο σώμα για να διαμορφώσει το απόβλητο κατά μήκος της κατεύθυνσης od και όχι κατά μήκος της κατεύθυνσης ab εξαιτίας της ύπαρξης της ακτίνας καμπυλότητας, όπως φαίνεται στην εικόνα 5. Το σημείο o είναι ένα οριακό σημείο. Πάνω από το σημείο o η άκοπη στρώση ολισθαίνει κατά μήκος του επιπέδου διάτμησης OM και εν συνεχεία ρέει ως απόβλητο κατά μήκος της ακτίνας καμπυλότητας και της επιφάνειας αποβλήτου, ενώ κάτω από το σημείο o ένα μέρος της άκοπης στρώσης εξωθείται δια μέσου της ακτίνας καμπυλότητας από την κατεργασμένη επιφάνεια έχοντας περάσει από την επιφάνεια ελευθερίας, και ένα άλλο μέρος της ρέει πλαγίως, γύρω από το κοπτικό εργαλείο.

Η ελεύθερη επιφάνεια θα φθαρεί στο Δ_1 καθώς γίνεται η κατεργασία για ένα χρονικό διάστημα. Η άκοπη στρώση εξωθείται μέσω της κοπτικής ακμής και έρχεται σε επαφή με το Δ_1 , και έπειτα υπόκειται ελαστική επαναφορά. Εάν το ύψος της επαναφοράς είναι h , το μήκος της κατεργαζόμενης επιφάνειας που έρχεται σε επαφή με την ελεύθερη επιφάνεια είναι Δ_2 , τότε το συνολικό μήκος της ελεύθερης επιφάνειας κάτω από το σημείο o είναι το άθροισμα του τμήματος της ακτίνας καμπυλότητας, Δ_1 και Δ_2 . I, II, III είναι οι ζώνες παραμόρφωσης στη μικρο-κοπή.



Εικόνα 5-Διαμόρφωση κατεργαζόμενης επιφάνειας στη μικροκοπή

Σε μια παραδοσιακή διαδικασία μακρο-κοπής, η παραμόρφωση συμβαίνει κυρίως όταν η άκοπη στρώση μετατρέπεται σε απόβλητο. Η παραμόρφωση κάτω από την κατεργαζόμενη επιφάνεια είναι μικρή. Παρ' όλα αυτά, στη μικρο-κοπή, η παραμόρφωση κάτω από την κατεργαζόμενη επιφάνεια είναι πολύ σημαντική διότι το απόβλητο είναι πολύ λεπτό και η παραμόρφωση που προκαλείται από την έλαση και την τριβή μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και της κατεργαζόμενης επιφάνειας παίζει σημαντικό ρόλο στη συνολική παραμόρφωση. Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση παρουσιάζεται το μοντέλο ακριβείας στη μικρο-κοπή, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.



Εικόνα 6-Μοντέλο μικροκοπής

Όπου, η φθορά της επιφάνειας ελευθερίας είναι $\Delta_1 = 0$, το οριακό σημείο είναι o , το επίπεδο διάτμησης είναι OM , η ακτίνα καμπυλότητας είναι r_n , το πάχος κοπής

είναι a_c , το ύψος επαναφοράς είναι h , η γωνία αποβλήτου είναι γ_0 και η γωνία ελευθερίας α_0 .

Εάν ο όγκος του υλικού δεν αλλάζει μετά την παραμόρφωση και δεν υπάρχει πλάγια πλαστική ροή στη μικρο-κοπή, ο συντελεστής ελαστικής επαναφοράς είναι k , οπότε $h=ku$. Όπου u ισοδυναμεί με $r_n [1 - \sin(\beta - \gamma_0)]$.

2.2 Ανάλυση της κοπτικής δύναμης στη μικρο-κοπή

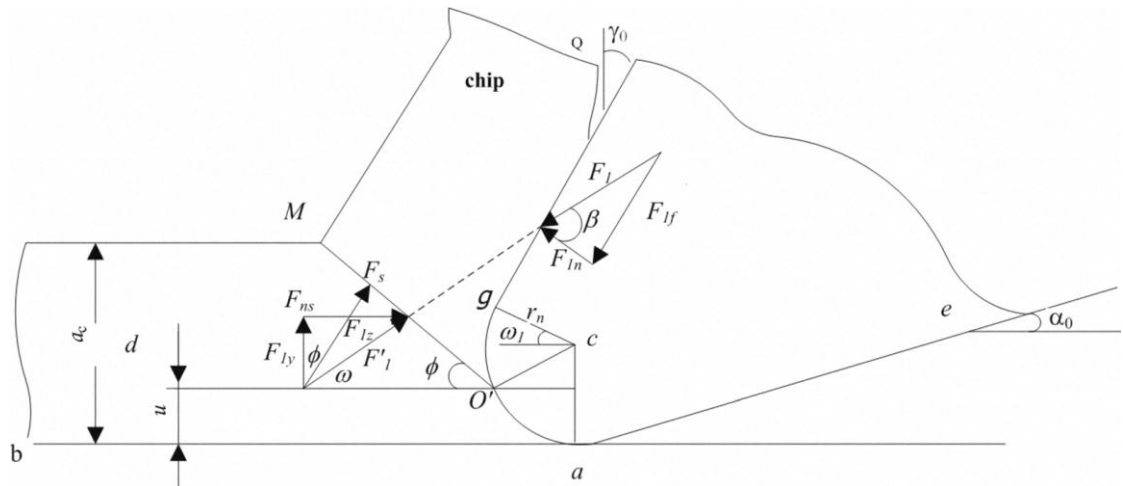
Η κοπτική δύναμη στη μικρο-κοπή έχει δύο πηγές. Η πρώτη είναι η ελαστοπλαστική παραμόρφωση που υπάρχει στην άκοπη στρώση, στο απόβλητο και στη κατεργαζόμενη επιφάνεια. Η δεύτερη είναι η τριβή μεταξύ επιφάνειας αποβλήτου και του αποβλήτου, μεταξύ ελεύθερης επιφάνειας και τεμαχίου. Η κοπτική παραμόρφωση στη μικρο-κοπή είναι πιο περίπλοκη απ' ό,τι στη μακρο-κοπή, επομένως και η δύναμη κοπής. Η διανομή κοπτικής δύναμης σε ανάλυση δύο διαστάσεων παρουσιάζεται στη εικόνα 7.

F_1 είναι η κοπτική δύναμη που ενεργεί στην επιφάνεια αποβλήτου, F_{1y} είναι η κάθετη συνιστώσα και F_{1z} είναι η οριζόντια. F_2 είναι η κοπτική δύναμη που ενεργεί στην ακτίνα καμπυλότητας κάτω από το σημείο O , F_{2y} είναι η κάθετη συνιστώσα και F_{2z} είναι η οριζόντια. F_3 είναι η κοπτική δύναμη που ενεργεί στην επιφάνεια ελευθερίας, F_{3y} η κάθετη συνιστώσα και F_{3z} η οριζόντια. F_r είναι η συνολική κοπτική δύναμη. Από την εικόνα 7 μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε:

$$\overline{F_r} = \overline{F_1} + \overline{F_2} + \overline{F_3} \quad (1) \quad \text{ή}$$

$$F_r = \sqrt{(F_{1y} + F_{2y} + F_{3y})^2 + (F_{1z} + F_{2z} + F_{3z})^2} \quad (2)$$

$$\omega = \arctg \frac{F_{1y} + F_{2y} + F_{3y}}{F_{1z} + F_{2z} + F_{3z}}$$



Εικόνα 8-Κατανομή δυνάμεων στην επιφάνεια αποβλήτου

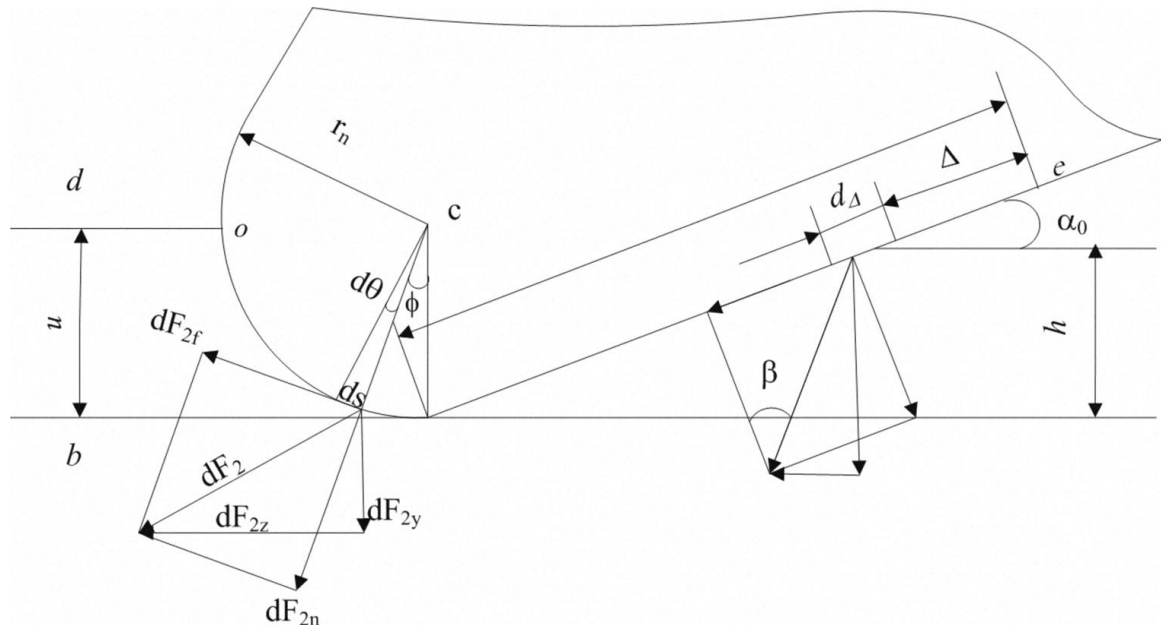
F_{1y} είναι η κάθετη συνιστώσα και F_{1z} είναι η οριζόντια

$$F_{1y} = F_1 \cdot \sin(\beta - \gamma_0) = \frac{\tau_s \cdot \alpha_\omega (\alpha_c - r_n [1 - \sin(\beta - \gamma_0)]) \cdot \sin(\beta - \gamma_0)}{\sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \beta - \gamma_0)} \quad (5)$$

$$F_{1z} = F_1 \cdot \cos(\beta - \gamma_0) = \frac{\tau_s \cdot \alpha_\omega (\alpha_c - r_n [1 - \sin(\beta - \gamma_0)]) \cdot \cos(\beta - \gamma_0)}{\sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \beta - \gamma_0)} \quad (6)$$

2.2.2 Ανάλυση της κοπτικής δύναμης στην επιφάνεια του καμπύλου τμήματος

Όπως φαίνεται στην εικόνα 9, εάν η επιφάνεια ελευθερίας είναι χωρίς φθορά ($\Delta_1 = 0$), τότε η επιφάνεια του καμπύλου τμήματος είναι οα και η επιφάνεια της επιφάνειας ελευθερίας είναι αε. Επιλέγοντας ένα διαφορετικό στοιχειώδες τμήμα d_s στο τμήμα οα, η αντίστοιχη κεντρική γωνία είναι d_φ , dF_{2f} είναι η κανονική πίεση που ενεργεί στο διαφορετικό στοιχειώδες τμήμα, dF_2 είναι η συνολική δύναμη, dF_{2y} είναι η κάθετη συνιστώσα και dF_{2z} η οριζόντια. Από την προηγούμενη ανάλυση, το άκοπτο μέταλλο δεν διαμορφώνει απόβλητο στο τμήμα οα, και το τμήμα οα πιέζει μονάχα το υλικό να διαμορφώσει μια στρώση στην κατεργαζόμενη επιφάνεια.



Εικόνα 9-Κατανομή δυνάμεων στην επιφάνεια του καμπύλου τμήματος

Εάν η κανονική πίεση της ακτίνας καμπυλότητας θεωρείται σα συνάρτηση της σκληρότητας Brinell, τότε η κανονική πίεση P_0 που ενεργεί στο τμήμα οα παρουσιάζεται ως εξής:

$$P_0 = f(\delta)[1 + \mu f(\delta)]\left(\frac{HB}{100}\right)^2 + \sin\left(\frac{\delta}{2} + r_n\right)\left(\frac{\sqrt{1+\mu^2}}{2\sin\delta}\right)\left(\frac{HB}{100}\right) \quad (7)$$

$$f(\delta) = \left(\frac{\sin\delta}{\sigma} + \sin\delta\right)/(1 - \sin\frac{\delta}{2}) \quad (8)$$

$$\Phi(\delta) = (1 - \sin\frac{\delta}{2})/\cos\frac{\delta}{2} \quad (9)$$

Όπου δ είναι η γωνία κοπής, HB είναι ο συντελεστής τριβής, r_n η ακτίνα καμπυλότητας.

$$dF_{2n} = P_0 \cdot a_\omega ds = P_0 \cdot a_\omega \cdot r_n \cdot d\Phi$$

$$dF_{2n} = \sqrt{(dF_{2n})^2 + (dF_{2f})^2} = dF_{2n}\sqrt{1 + \tan^2\beta} = \frac{P_0 \cdot a_\omega \cdot r_n \cdot d\Phi}{\cos\beta}$$

$$dF_{2y} = dF_2 \cdot \cos(\Phi + \beta) = \frac{P_0 \cdot a_\omega \cdot r_n \cdot \cos(\Phi + \beta)}{\cos\beta} \cdot d\Phi$$

$$dF_{2z} = dF_2 \cdot \sin(\Phi + \beta) = \frac{P_0 \cdot a_\omega \cdot r_n \cdot \sin(\Phi + \beta)}{\cos\beta} \cdot d\Phi$$

$$F_{2y} = \int dF_{2y} = \int_0^\theta \frac{P_0 \cdot a_\omega \cdot r_n \cdot \cos(\Phi + \beta)}{\cos\beta} \cdot d\Phi$$

$$= P_0 \cdot a_\omega \cdot r_n (\sin\theta + \mu \cdot \cos\theta - \mu) \quad (10)$$

$$F_{2z} = \int dF_{2z} = \int_0^\theta \frac{P_0 \cdot a_\omega \cdot r_n \cdot \sin(\Phi + \beta)}{\cos\beta} \cdot d\Phi$$

$$= P_0 \cdot a_\omega \cdot r_n (1 - \cos\theta + \mu \cdot \sin\theta) \quad (11)$$

$$F_2 = \sqrt{F_{2y}^2 + F_{2z}^2} = P_0 \cdot a_\omega \cdot r_n \sqrt{2(1 + \mu^2)(1 - \cos\theta)} \quad (12)$$

2.2.3 Ανάλυση της κοπτικής δύναμης στην επιφάνεια ελευθερίας

Η ελαστική επαναφορά λαμβάνει χώρα στο τμήμα ae . Επειδή η γωνία επιφάνειας ελευθερίας α_0 είναι πολύ μικρή, το τμήμα ae μπορεί να θεωρηθεί ως μια ευθεία γραμμή. Σε τέτοια περίπτωση, ο καταμερισμός και της κανονικής πίεσης και της ελαστικής επαναφοράς είναι γραμμικός.

Επιλέγοντας ένα διαφορετικό στοιχειώδες τμήμα $d\Delta$ στο τμήμα ae , η απόσταση στο σημείο e είναι Δ , dF_3 είναι η τριβή, dF_{3y} είναι η κάθετη συνιστώσα και dF_{3z} η οριζόντια. P_0 είναι η κανονική πίεση που ενεργεί στο σημείο O , και καμία δύναμη δεν ενεργεί στο σημείο e . Από τη γραμμική αναλογική σχέση μπορούμε να συμπεράνουμε:

$$dF_{3n} = \frac{\Delta \sin \alpha_0}{h} \cdot P_0 \cdot \alpha_\omega \cdot d\Delta$$

$$dF_3 = \sqrt{(dF_{3n})^2 + (dF_{3f})^2} = \sqrt{(dF_{3n})^2 (1 + \tan^2 \beta)} = \frac{dF_{3n}}{\cos \beta} = \frac{\Delta \sin \alpha_0 \cdot P_0 \cdot \alpha_\omega}{h \cdot \cos \beta} \cdot d\Delta$$

$$dF_{3y} = dF_3 \cdot \cos(\beta - \alpha_0) = \frac{\Delta \cdot P_0 \cdot \alpha_\omega \cdot \sin \alpha_0 \cos(\beta - \alpha_0)}{h \cdot \cos \beta} \cdot d\Delta$$

$$dF_{3z} = dF_3 \cdot \sin(\beta - \alpha_0) = \frac{\Delta \cdot P_0 \cdot \alpha_\omega \cdot \sin \alpha_0 \sin(\beta - \alpha_0)}{h \cdot \cos \beta} \cdot d\Delta$$

Ενσωματώνοντας τις παραπάνω εξισώσεις έχουμε:

$$\begin{aligned} F_{3y} &= \int dF_{3y} = \int_0^{\Delta_2} \frac{\Delta \cdot P_0 \cdot \alpha_\omega \cdot \sin \alpha_0 \cos(\beta - \alpha_0)}{h \cdot \cos \beta} \cdot d\Delta \\ &= \frac{1}{2} P_0 \cdot a_0 \cdot k \cdot r_n [1 - \sin(\beta - \alpha_0)] (\text{ctg} \alpha_0 + \mu) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} F_{3z} &= \int dF_{3z} = \int_0^{\Delta_2} \frac{\Delta \cdot P_0 \cdot \alpha_\omega \cdot \sin \alpha_0 \sin(\beta - \alpha_0)}{h \cdot \cos \beta} \cdot d\Delta \\ &= \frac{1}{2} P_0 \cdot a_0 \cdot k \cdot r_n [1 - \sin(\beta - \alpha_0)] (\text{ctg} \alpha_0 + \mu) \end{aligned} \quad (14)$$

Ως εκ τούτου έχουμε:

$$F_3 = \sqrt{F_{3y}^2 + F_{3z}^2} = \frac{1}{2} \cdot P_0 \cdot a_\omega \cdot k \cdot r_n [1 - \sin(\beta - \alpha_0)] \frac{\sqrt{1 + \mu^2}}{\sin \alpha_0} \quad (15)$$

2.3 Συνολική κοπτική δύναμη και οι εξισώσεις κοπής

Σύμφωνα με τις προαναφερθείσες εξισώσεις, η κάθετη συνιστώσα F_{ry} , η οριζόντια συνιστώσα F_{rz} και η συνολική κοπτική δύναμη F_r μπορούν να υπολογισθούν ως εξής:

$$F_{ry} = F_{1y} + F_{2y} + F_{ry} \quad (16)$$

$$F_{rz} = F_{1z} + F_{2z} + F_{rz} \quad (17)$$

$$F_r = \sqrt{\left[\frac{A}{\sin\Phi \cdot \cos(\Phi + \beta + \alpha_0)} + B\right]^2 + \left[\frac{C}{\sin\Phi \cdot \cos(\Phi + \beta + \alpha_0)} + D\right]^2} \quad (18)$$

Όπου,

$$A = \tau_s \cdot \alpha_\omega \{a_c - r_n [1 - \sin(\beta - \gamma_0)]\} \cdot \sin(\beta - \gamma_0) \quad (19)$$

$$B = P_0 \alpha_\omega r_n (\sin\theta + \mu \cos\theta - \mu) + \frac{1}{2} P_0 \alpha_\omega k r_n [1 - \sin(\beta - \gamma_0)] [\text{ctga}_0 + \mu] \quad (20)$$

$$C = \tau_s \alpha_\omega \{a_c - r_n [1 - \sin(\beta - \gamma_0)]\} \cos(\beta - \gamma_0) \quad (21)$$

$$D = P_0 \alpha_\omega r_n (1 - \cos\theta + \mu \cdot \sin\theta) + \frac{1}{2} P_0 \alpha_\omega k r_n [1 - \sin(\beta - \gamma_0)] [\mu \cdot \text{ctga}_0 - 1]$$

Σύμφωνα με την αρχή της ελάχιστης συνολικής κοπτικής δύναμης $\frac{dF_2}{d\Phi} = 0$,
συνεπάγεται:

$$\frac{\left[\frac{A}{\sin\Phi \cos(\Phi + \beta - \gamma_0)} + B + \frac{C}{\Phi} + D\right] (-A - C)}{\sqrt{\left[\frac{A}{\sin\Phi \cos(\Phi + \beta - \gamma_0)} + B\right]^2 + \left[\frac{C}{\sin\Phi \cos(\Phi + \beta - \gamma_0)} + D\right]^2}} \cdot \frac{\cos(2\Phi + \beta - \gamma_0)}{\sin^2\Phi \cos^2(\Phi + \beta - \gamma_0)} = 0$$

Οπότε έχουμε $\cos(2\Phi + \beta - \gamma_0) = 0$

Ως εκ τούτου,

$$\Phi = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} + \frac{\gamma_0}{2} \quad (23)$$

Όπως φαίνεται ξεκάθαρα, η εξίσωση (23) συνδέεται με το μοντέλο Merchant. Με άλλα λόγια, το μοντέλο Merchant αποτελεί μια ειδική περίπτωση.

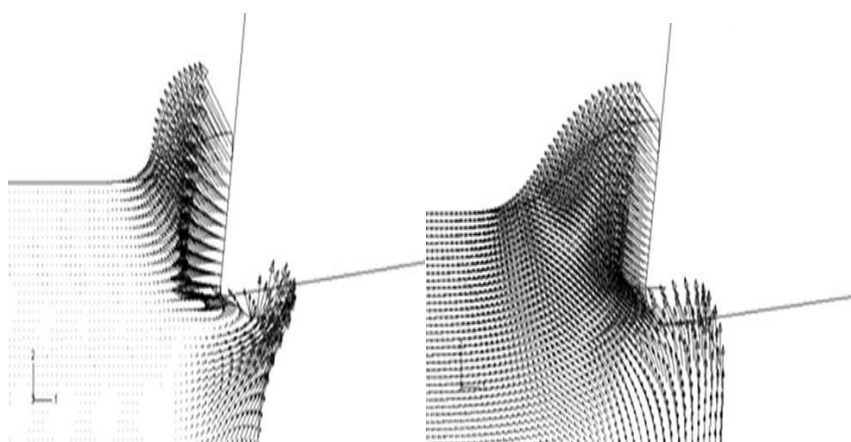
2.4 Επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας και του λόγου a/r

[2]

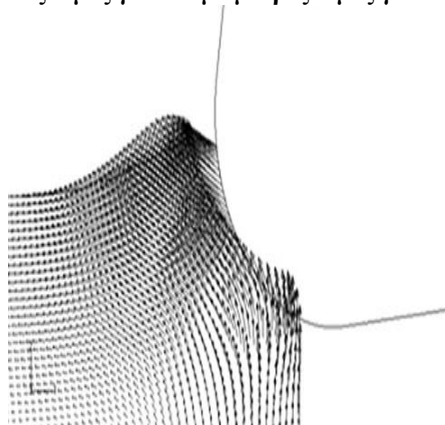
Η ακτίνα καμπυλότητας του εργαλείου είναι μια σημαντική παράμετρος για την ποιότητα της επιφάνειας στις μικροκατεργασίες. Κάτω από ορισμένες πρακτικές, η κοπτική αιχμή του εργαλείου ενισχύεται ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Για εργαλεία από καρβίδιο του βολφραμίου, η ακτίνα καμπυλότητας εξαρτάται από το μέγεθος των τμημάτων και την τεχνική της πυροσυσσωμάτωσης και συνεπώς η παραγωγή εργαλείων χωρίς καμπυλότητα είναι πρακτικά αδύνατη λόγω των τεχνολογικών περιορισμών. Ωστόσο, η γεωμετρία του εργαλείου συνήθως παραμελείται στη μοντελοποίηση της διαδικασίας συμβατικών κατεργασιών καθώς λαμβάνεται υπόψη το μοντέλο των Ernst και Merchant για μια

κοπτική αιχμή χωρίς καμπυλότητα. Τέτοια υπόθεση κρίσιμης σημασίας είναι αποδεκτή στη μοντελοποίηση των συμβατικών κατεργασιών καθώς το μη διαμορφωμένο απόβλητο πάχους a είναι πολύ μεγαλύτερο από την ακτίνα καμπυλότητας r , τουλάχιστον κατά τρεις τάξεις μεγέθους. Όμως, δεν είναι σωστή αυτή η υπόθεση στις μικροκατεργασίες όταν το a πλησιάζει το r . Από αυτή την άποψη, πιστεύεται ότι οι διαφορές μεταξύ συμβατικών κατεργασιών και μικροκατεργασιών προέρχονται από τις μεγάλες διαφορές μεγέθους μεταξύ a και r .

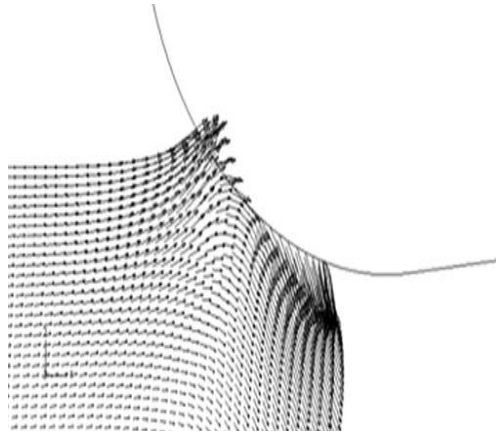
Στο παρελθόν, εκτεταμένες είναι οι έρευνες που έχουν γίνει αναφορικά με την επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας. Στις μικροκατεργασίες του χάλυβα, η συσχέτιση της επίδρασης της ακτίνας καμπυλότητας στο σχηματισμό του αποβλήτου και το μηχανισμό παραμόρφωσης του υλικού απαιτεί περαιτέρω έρευνα.



Εικόνα 10-Πολύ μεγάλες τιμές για a/r με μικρές τιμές για r - Αρχικό στάδιο κοπής



Εικόνα 11-Μικρές τιμές για a/r με μεγαλύτερες τιμές για r - Αρχικό στάδιο κοπής

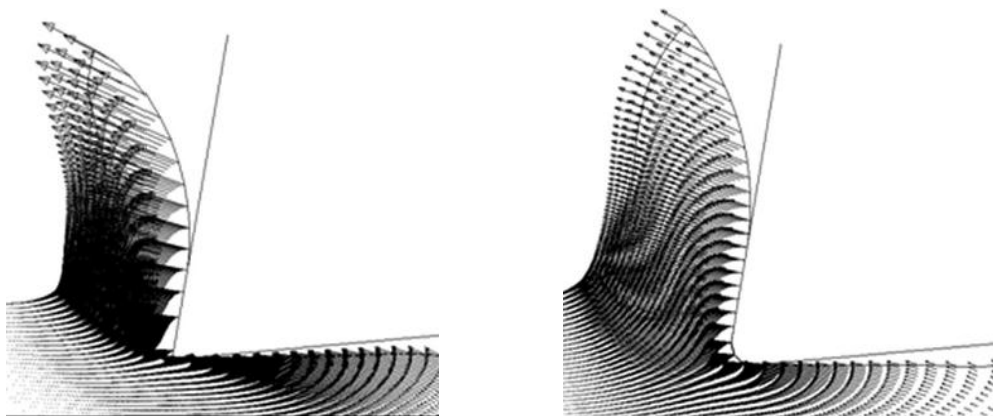


Εικόνα 12-Κρίσιμη τιμή για a/r - Αρχικό στάδιο κοπής

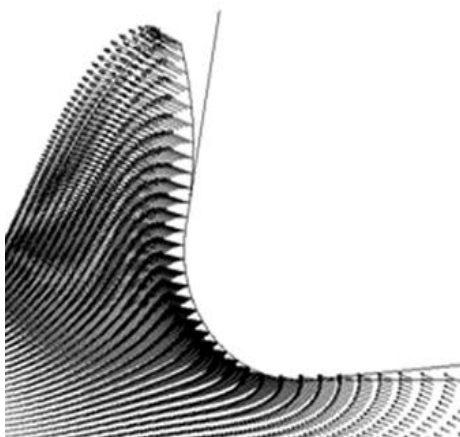
Στις παραπάνω εικόνες απεικονίζεται ο σχηματισμός του αποβλήτου και η τάση της κίνησης του υλικού κατά την παραμόρφωση του, κατά το αρχικό στάδιο, για διαφορετικά a/r . Το βέλος δείχνει την κατεύθυνση του διανύσματος της μετατόπισης ενώ το μέγεθός του αντιπροσωπεύει το σχετικό μέγεθος της μετατόπισης.

Για a/r με μεγάλες τιμές, το απόβλητο σχηματίζεται αρχικά από την πλευρά του κοπτικού εργαλείου που βλέπει το υλικό, όπως φαίνεται στην εικόνα 10. Το υλικό ρέει κάτω από την ελεύθερη πλευρά του κοπτικού, γύρω από την ακτίνα καμπυλότητας. Μικρά κλάσματα του υλικού ξεφεύγουν σαν απόβλητα ενώ το υπόλοιπο εισρέει στον κύριο όγκο του υλικού, οδηγώντας στο σχηματισμό της κατεργασμένης επιφάνειας. Τα διανύσματα της μετατόπισης έχουν κατεύθυνση προς πάνω αριστερά και γίνονται παράλληλα στον άξονα x όπως φαίνεται από τα κυρτά βέλη.

Όταν το a/r μειώνεται, η αρχική κατεργασία πραγματοποιείται από την κοπτική ακμή. Για μικρά a/r η συμπεριφορά του υλικού που διαμορφώνεται είναι παρόμοια με αυτή για μεγάλες τιμές a/r , όπως φαίνεται στην εικόνα 11, αλλά η ροή του υλικού γύρω από την ακμή του εργαλείου γίνεται πιο σταδιακά. Στο κρίσιμο a/r το υλικό μπροστά από τη άκρη του εργαλείου βρίσκεται να ρέει στη θετική κατεύθυνση του x άξονα, αντίθετα με την κίνηση του εργαλείου, όπως φαίνεται στην εικόνα 12. Μικρές ποσότητες του υλικού φαίνεται να μετατοπίζονται προς τα πάνω κατά μήκος της ακτίνας καμπυλότητας, ενώ το υπόλοιπο μέρος του υλικού φαίνεται να κινείται γύρω από το στρογγυλεμένο τμήμα της κοπτικής ακμής και κατόπιν να κινείται πίσω προς το υλικό και εν συνεχεία να συμπιέζεται κάτω από την κοπτική ακμή.

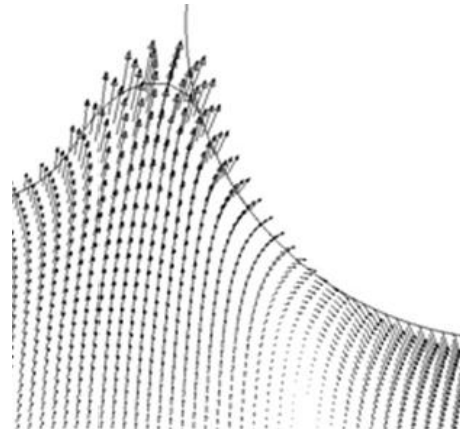


Εικόνα 13-Πολύ μεγάλες τιμές για a/r με μικρές τιμές για r



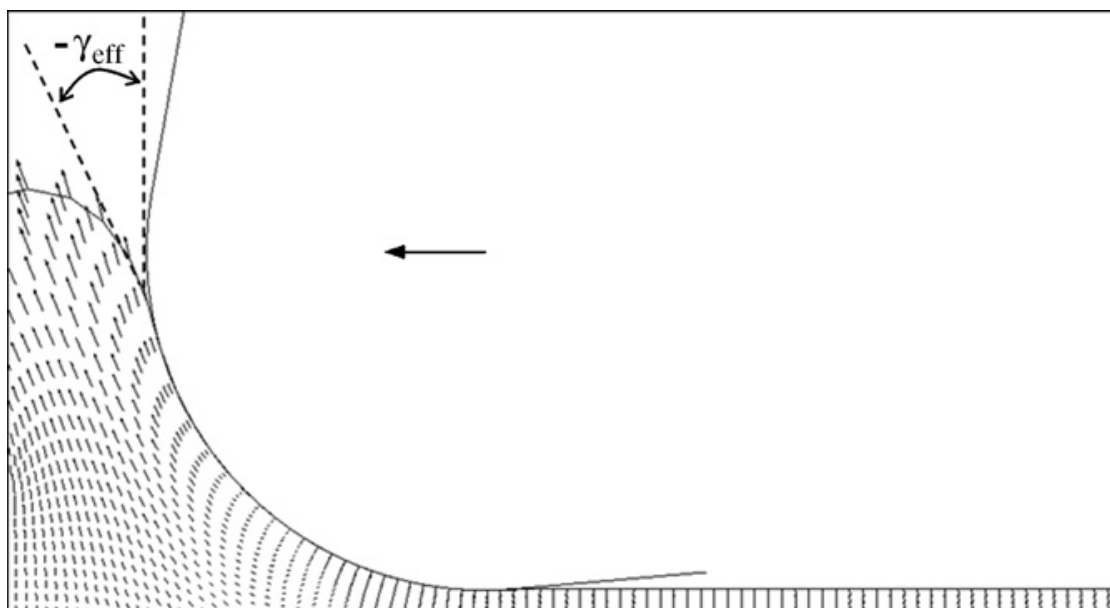
Εικόνα 14-Μικρές τιμές για a/r με μεγαλύτερες τιμές για r

Κατά την εξέλιξη της κοπής, το απόβλητο μεγαλώνει και συνεχώς ρέει κατά μήκος της επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου για a/r με μεγάλες τιμές όπως φαίνεται στην εικόνα 13. Η επαφή του εργαλείου με το απόβλητο διατηρείται στην επιφάνεια του κοπτικού, καθ' όλη τη διάρκεια της κοπής, ενώ το απόβλητο μορφοποιείται με κυκλικές καμπύλες. Για a/r σε μικρότερες τιμές, το υλικό ρέει κατά μήκος της περιφέρειας της κοπτικής ακμής και εκτείνεται στην επιφάνεια της πλευράς του κοπτικού που βλέπει πρόσωπο το τεμάχιο, σε μια επαφή μικρής έκτασης. Ένα μικρότερο καμπύλο απόβλητο παράγεται σε σύγκριση με αυτά που παρατηρούνται για μεγάλα a/r όπως φαίνεται στην εικόνα 14. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι τα διανύσματα της μετατόπισης δεν μεταβάλλονται καθ' όλη την πορεία.



Εικόνα 15-Κρίσιμη τιμή για a/r

Για το κρίσιμο a/r , οι αλλαγές στον τρόπο διαμόρφωσης του αποβλήτου είναι σημαντικές κατά τη διάρκεια ανάπτυξής του. Τα διανύσματα του υλικού που παραμορφώνεται δείχνουν μια μετατόπιση προς τα πάνω, μπροστά από την επιφάνεια της κοπτικής ακμής όσο το απόβλητο αναπτύσσεται. Αυτό δείχνει μια πιθανή έλαση όπως φαίνεται στην εικόνα 15. Η σταδιακή αλλαγή στις κατευθύνσεις των μετατοπίσεων των κόμβων και της ροής του υλικού επηρεάζεται σημαντικά από την ακτίνα καμπυλότητας του εργαλείου και την κίνησή του. Η μορφή του αποβλήτου που παράγεται μέσω αυτής της έλασης που εμφανίζεται, είναι πολύ διαφορετική από τις άλλες που παράγονται για μεγαλύτερα a/r .



Εικόνα 16-Παραμόρφωση με μεγάλη αρνητική πραγματική γωνία αποβλήτου μπροστά από την ακτίνα καμπυλότητας στο κρίσιμο a/r

Για α/r με τιμή μεγαλύτερη από την κρίσιμη, η πραγματική γωνία αποβλήτου γ_{eff} είναι κατά προσέγγιση όσο η θετική γωνία αποβλήτου γ_{tool} λόγω της ροής του αποβλήτου κατά μήκος της επιφάνειας του κοπτικού που έρχεται σε επαφή καθώς η διαδικασία προχωρεί. Αλλά δεν ισχύει το ίδιο όταν το α/r μειώνεται κάτω από την κρίσιμη τιμή. Για α/r μικρότερες ή ίσες της κρίσιμης τιμής, η ανάπτυξη του αποβλήτου γίνεται μπροστά από την καμπύλη της κοπτικής ακμής εξαιτίας των αλλαγών στη συμπεριφορά σχηματισμού του αποβλήτου, οδηγώντας στο σχηματισμό μιας αρνητικής γ_{eff} .

Στο κρίσιμο α/r , η γ_{eff} αλλάζει σταδιακά από την αρχική διαμόρφωση του αποβλήτου και γίνεται αρκετά αρνητική κατά τη συνέχεια της ανάπτυξής του. Όπως φαίνεται στην εικόνα 16, το μέγεθος της αρνητικής γ_{eff} είναι αρκετά μεγαλύτερο από την θετική γ_{tool} . Αυτή η διαπίστωση αποσαφηνίζει τα κριτήρια για τη μετάβαση της γ_{eff} σε ένα κρίσιμο α/r κάτω από κάποιες τιμές.

Γίνεται λοιπόν σαφές ότι όσο το πάχος του μη διαμορφωμένου αποβλήτου a πλησιάζει την ακτίνα καμπυλότητας r , η διαδικασία διαμόρφωσης του αποβλήτου και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται επηρεάζονται από την καμπυλότητα του εργαλείου. Η κεντρική ιδέα της επίδρασης της ακτίνας καμπυλότητας είναι ότι αυτή η επιρροή σχετίζεται με το συνδυασμό του a με το r και όχι στον κάθε παράγοντα ξεχωριστά.

Η διαμόρφωση του αποβλήτου που γίνεται με έλαση στο κρίσιμο α/r συνδέεται με μια σταδιακά αρνητική πραγματική γωνία αποβλήτου, στα αρχικά στάδια, η οποία γίνεται σταθερή όταν το απόβλητο αποκτήσει ένα σταθερό μήκος επιφάνειας με το εργαλείο.

Η διαμόρφωση του αποβλήτου με έλαση συνοδεύεται με κατανομές έντονων διατμητικών και υδροστατικών τάσεων οι οποίες κατανέμονται γύρω από τη ζώνη παραμόρφωσης.

2.5 Επίδραση κλίμακας (size effect)

[8][17][18][19][20][21][22][23][24][25]

Η μικροκοπή χαρακτηρίζεται από πολύ μικρές ποσότητες υλικού που αφαιρούνται από την επιφάνεια, όπου το πάχος του αποβλήτου κυμαίνεται από μερικά μικρόμετρα μέχρι μερικές εκατοντάδες μικρόμετρα. Σε αυτά τα μεγέθη αφαίρεσης υλικού, αναμένεται να κάνει την εμφάνισή του το φαινόμενο της επίδρασης κλίμακας, γνωστό στη βιβλιογραφία και ως “size effect”. Στις κατεργασίες

η επίδραση κλίμακας τυπικά χαρακτηρίζεται από μια μη γραμμική αύξηση της ειδικής ενέργειας ή ειδικής δύναμης όσο το πάχος του αδιαμόρφωτου αποβλήτου μειώνεται. Σε ερευνητικό επίπεδο ουκ ολίγες είναι οι πειραματικές παρατηρήσεις πάνω στην επίδραση κλίμακας που έχουν γίνει σε διαφορετικά υλικά και κάτω από διαφορετικές συνθήκες κοπής.

Οι προσπάθειες που έχουν γίνει για να εξηγήσουν και να προβλέψουν την επίδραση κλίμακας είναι αρκετές. Οι περισσότερες εξηγήσεις που έχουν δοθεί μέχρι σήμερα μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής: 1) η ενίσχυση του υλικού που οφείλεται σε παράγοντες που ποικίλουν ανάλογα με το πάχος του αδιαμόρφωτου αποβλήτου, 2) η παραμόρφωση του υλικού κάτω από την κατεργαζόμενη επιφάνεια, 3) η επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας, 4) η ενέργεια που απαιτείται για να δημιουργηθούν νέες επιφάνειες διαμέσου όλκιμης θραύσης.

Οι Show και Backer[17] απέδωσαν την επίδραση κλίμακας στα κρυσταλλογραφικά ελαττώματα όπως τα όρια των κόκκων, προσμείξεις ατόμων κ.τ.λ. Υποστήριξαν ότι δεδομένης μιας σημαντικής μείωσης του αριθμού των ατελειών που αντιμετωπίζουν κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης που γινόταν σε μικρό όγκο, η δύναμη που ασκούνταν στο υλικό αναμένεται να αυξηθεί και να πλησιάσει τη θεωρητική δύναμη.

Οι Larsen-Basse και Oxley[18] απέδωσαν την επίδραση κλίμακας στην ευαισθησία του ρυθμού παραμόρφωσης του κατεργαζόμενου υλικού. Η επιχειρηματολογία τους βασίζεται σε εμπειρικά δεδομένα από πειράματα σε απλό ανθρακούχο χάλυβα, τα οποία δείχνουν ότι ο μέγιστος ρυθμός παραμόρφωσης στην κύρια ζώνη διάτμησης είναι αντιστρόφως ανάλογος με το πάχος του αδιαμόρφωτου αποβλήτου. Ως εκ τούτου, με μια αύξηση του πάχους του αδιαμόρφωτου αποβλήτου, η παραμόρφωση στη ζώνη διάτμησης θα παραμένει αμετάβλητη, αλλά ο ρυθμός παραμόρφωσης θα αυξηθεί αντιστρόφως ανάλογα σε σχέση με το πάχος του αδιαμόρφωτου αποβλήτου. Για τα περισσότερα μέταλλα, μια αύξηση στο ρυθμό παραμόρφωσης προκαλεί μια αύξηση της τάσης διαρροής με την ευαισθησία του ρυθμού παραμόρφωσης της τάσης διαρροής να αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς στην περιοχή όπου εκτελείται η κατεργασία. Κατά συνέπεια, αυτό θα μπορούσε να εξηγήσει την αύξηση της ειδικής ενέργειας/δύναμης κοπής με τη μείωση του πάχους του αδιαμόρφωτου αποβλήτου.

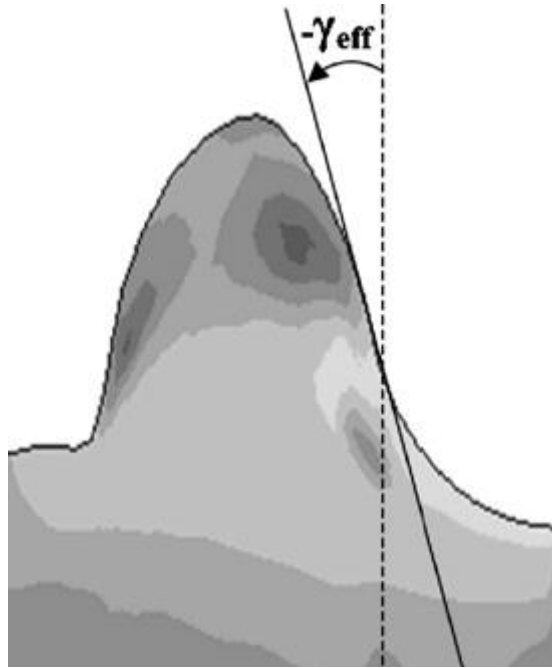
Οι Korpalinsky και Oxley[19], λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της θερμοκρασίας απέδωσαν την επίδραση κλίμακας(size effect) σε μείωση της γωνίας διάτμησης εξαιτίας της μείωσης της θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια εργαλείου-αποβλήτου. Υποστήριξαν ότι αυτό οδηγεί σε μια αύξηση της αντοχής του υλικού του τεμαχίου. Επιπλέον, αναγνώρισαν ότι η επίδραση της θερμοκρασίας δεν εξηγεί την

επίδραση κλίμακας, μελετώντας πάχη αδιαμόρφωτου αποβλήτου κάτω από 50 μm , το οποίο είναι πιθανό λόγω της αύξησης της ευαισθησίας της τάσης διαρροής στο ρυθμό παραμόρφωσης σε αυτό το εύρος. Ο Marusich[20] έδωσε επίσης μια παρόμοια εξήγηση βασισμένη σε προσομοίωση ορθογωνικής κοπής σε πολύ υψηλές ταχύτητες μέσω πεπερασμένων στοιχείων.

Οι Nakayama και Tamura[21] ανέλυσαν την επίδραση κλίμακας μέσω πειραμάτων μικροκοπής που εκτελέστηκαν σε πολύ χαμηλή ταχύτητα κοπής (0,1 m/min) ώστε να ελαχιστοποιηθεί η θερμοκρασία και οι επιδράσεις του ρυθμού παραμόρφωσης. Παρατήρησαν λοιπόν πλαστική διαρροή στο στρώμα κάτω από την επιφάνεια του τεμαχίου και ανέφεραν ότι η συμβολή της επίδρασης κλίμακας γίνεται σημαντική με μείωση του πάχους του αδιαμόρφωτου αποβλήτου. Η κύρια αιτία αυτής της πλαστικής διαρροής πιστεύεται ότι είναι η επέκταση της ζώνης διάτμησης κάτω από την κατεργαζόμενη επιφάνεια. Ως εκ τούτου, απέδωσαν την επίδραση κλίμακας στο γεγονός ότι η ενέργεια που καταναλώνεται στην πλαστική διαρροή στο στρώμα κάτω από την επιφάνεια δεν είναι ανάλογη με το πάχος του αδιαμόρφωτου αποβλήτου και στη μείωση της γωνίας διάτμησης με τη μείωση του πάχους του αδιαμόρφωτου αποβλήτου.

Ο Kim[22] ανέλυσε την επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας στη διαδικασία κοπής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο ήταν βασισμένο στο μοντέλο του Euler με πεπερασμένη ακτίνα καμπυλότητας και άκαμπτο ρευστοπλαστικό υλικό τεμαχίου. Οι κοπτικές δυνάμεις που ελήφθησαν από το πρόγραμμα προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία βρέθηκαν να έχουν καλό συσχετισμό με τις πειραματικές μετρήσεις. Κατέληξε λοιπόν ότι η κύρια αιτία της επίδρασης κλίμακας είναι η ακτίνα καμπυλότητας.

Ο Lucca[23] μελέτησε το ρόλο της πραγματικής αρνητικής γωνίας αποβλήτου που προκαλείται από την ακτίνα καμπυλότητας, όταν η τελευταία γίνεται συγκρίσιμη με το πάχος του αδιαμόρφωτου αποβλήτου, όπως φαίνεται στην εικόνα 17. Όσο το πάχος του αδιαμόρφωτου αποβλήτου μειώνεται, παρατηρείται μια περιστροφή του διανύσματος της συνολικής δύναμης κάτω προς το τεμάχιο. Η δύναμη άπωσης γίνεται η κύρια συνιστώσα κάτω από ένα ορισμένο πάχος αδιαμόρφωτου αποβλήτου. Ανέφερε ότι η διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως μετάβαση από μια κύρια διαδικασία κοπής σε όργανο-ολίσθηση κύρια διαδικασία όταν το πάχος του αδιαμόρφωτου αποβλήτου μειώνεται.



Εικόνα 17-Απεικόνιση πραγματικής γωνίας αποβλήτου

Παρομοίως, οι Argarego και Brown[24] ανέφεραν ότι η αύξηση της ειδικής κοπτικής δύναμης με μείωση του πάχους αδιαμόρφωτου αποβλήτου ήταν λόγω της μεγαλύτερης σχετικής συμβολής της δύναμης οργώματος που προκύπτει από την τριβή και το όργωμα, που συνδέονται με την αφαίρεση υλικού από ένα αμβλύ εργαλείο.

Πρόσφατη έρευνα από τον Άτκινς[25] αποδίδει την επίδραση κλίμακας στην κοπή, στην ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία νέας επιφάνειας μέσω όλκιμης θραύσης. Ο συγγραφέας βρήκε μέσω προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία ότι το έργο είναι κοντά στην τυπική τιμή αντοχής σε θραύση για το υλικό σε μηχανισμούς όλκιμης θραύσης. Υπέδειξε ότι η ενέργεια που απαιτείται για τη διαμόρφωση της νέας επιφάνειας δε μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα στην ανάλυση κοπής μετάλλων. Αυτή η ενέργεια είναι ανεξάρτητη του βάθους κοπής και κατά συνέπεια η συμβολή της στη συνολική ειδική ενέργεια θα πρέπει να αυξηθεί όσο μικραίνουν οι τιμές του πάχους του αδιαμόρφωτου αποβλήτου.

Τελευταίες έρευνες εστιάζουν στη συσχέτιση του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης με την επίδραση κλίμακας.

Είναι σαφές, από τη βιβλιογραφία, ότι η επίδραση κλίμακας στη μικροκοπή μπορεί να προκύψει λόγω πολλαπλών μηχανισμών. Είναι επίσης προφανές ότι η επίδραση κλίμακας μπορεί να προκύψει ακόμα και κατά την κοπή με αιχμηρά εργαλεία ή και όταν οι επιπτώσεις της θερμοκρασίας και του ρυθμού παραμόρφωσης αμελούνται (π.χ. για πολύ μικρές ταχύτητες κοπής).

3

Προσομοίωση με τον Κώδικα Πεπερασμένων Στοιχείων Advantedge

3.1 Γενικά

[26]

Με το πέρασμα των χρόνων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας όλο και πιο εξειδικευμένα τεχνικά προβλήματα παρουσιάζονταν, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα ήταν ολοένα και πιο σύνθετα. Προκειμένου να λυθούν τέτοιου είδους προβλήματα έπρεπε να γίνει ο προσεγγιστικός υπολογισμός αρκετών και περίπλοκων διαφορικών εξισώσεων. Έτσι αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι επίλυσης των εξισώσεων αυτών.

Στις κατεργασίες, τα διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούνται προσπαθούν να συνδέσουν το αίτιο, δηλαδή τους παράγοντες και τις συνθήκες κοπής μιας κατεργασίας, με το αποτέλεσμα, δηλαδή τις δυνάμεις και τις θερμοκρασίες που θα αναπτυχθούν, τα απόβλητα, τις παραμένουσες τάσεις, την ακρίβεια επιφανείας και τη φθορά του κοπτικού εργαλείου.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια τέτοια αριθμητική μέθοδος η οποία με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, αν και προσεγγιστική, μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και το βασικό της πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να βρει εφαρμογή σε όλα τα προβλήματα.

Λόγω της μεγάλης επιτυχίας της χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως τόσο στην έρευνα όσο και στη βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών.

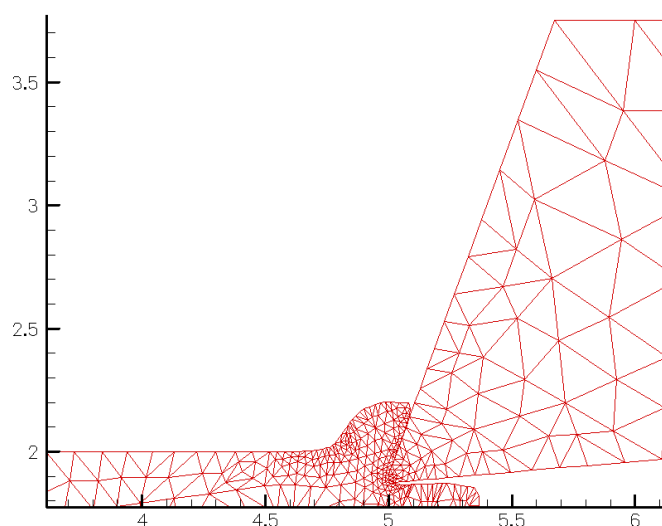
3.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

[8][12][26][27][28][29]

Το 1944 ο Merchant πρότεινε το πρώτο αναλυτικό μοντέλο που έθεσε τα πλαίσια για τη μοντελοποίηση της ορθογωνικής κοπής. Με την εφεύρεση των

ηλεκτρονικών υπολογιστών και τη ραγδαία ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος, οι τεχνικές με πεπερασμένα στοιχεία άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως από τους ερευνητές για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας κατεργασιών.

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



Εικόνα 18-Μοντελοποίηση τεμαχίου και εργαλείου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

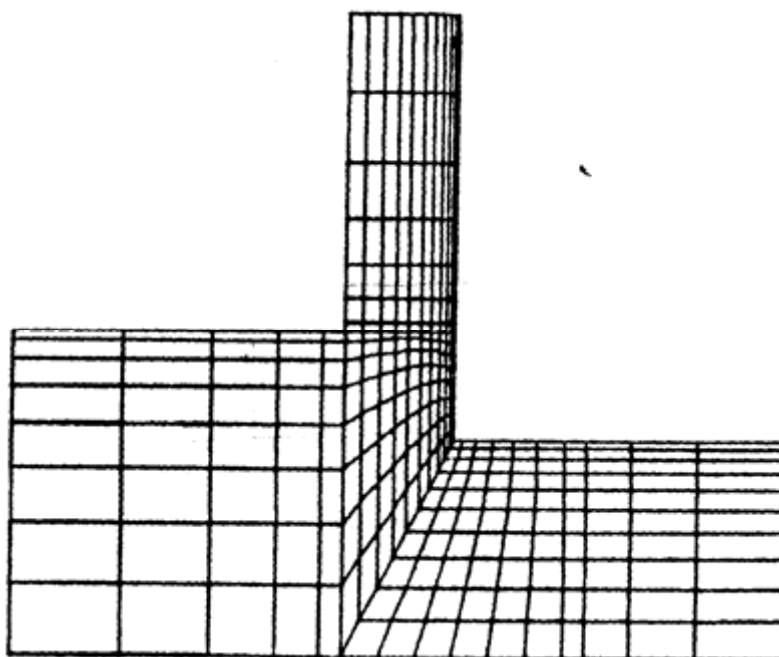
Στη συνέχεια δίνονται ιδιότητες στα στοιχεία ανάλογα με τις ιδιότητες του μέσου που μοντελοποιούν και δίνονται οριακές συνθήκες στους κόμβους. Τέλος λύνονται οι αλγεβρικές εξισώσεις που είναι σε μητρική μορφή, και υπολογίζονται οι τιμές κάθε βαθμού ελευθερίας. Προφανώς όσο περισσότερους κόμβους έχουμε,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

μοντελοποίηση ενός προβλήματος με την FEM και εκτός των γρήγορων υπολογισμών, μπορεί να δώσει τα αποτελέσματα σε πιο παραστατική μορφή.

Πιο συγκεκριμένα για τις κατεργασίες, δεν είναι πλέον απαραίτητος ο προγραμματισμός όλης της παραπάνω διαδικασίας, καθώς κυκλοφορούν αξιόπιστοι εμπορικοί κώδικες που είναι συμβατοί με προσωπικούς υπολογιστές. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο μιας ορθογωνικής κοπής θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για την ταχύτητα κοπής, το βάθος κοπής και την πρόωση. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται pre processor. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται solver και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους. Όταν τελειώσει η επίλυση πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται post processor, για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα. Τα παραπάνω προγράμματα μπορεί να αποτελούν και επιμέρους τμήματα του ίδιου προγράμματος.

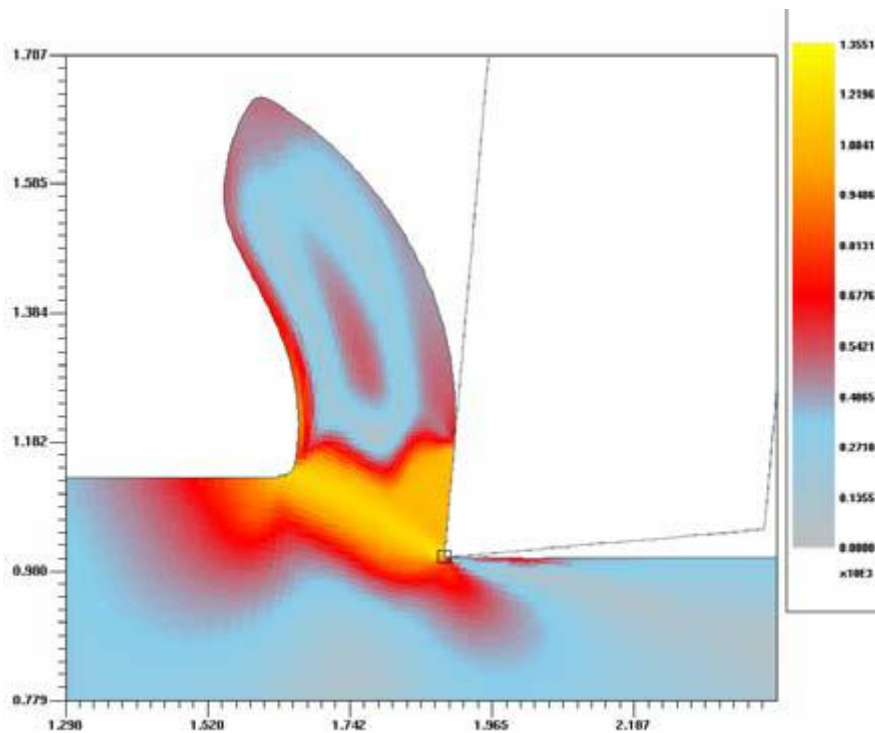
Δύο είναι οι βασικότερα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση διεργασιών κατεργασίας, του Euler και του Lagrange.

Κατά τη διατύπωση του Euler, η οποία εμφανίστηκε πρώτη, το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων είναι χωρικά σταθερό και το υλικό ρέει μέσα από αυτό, προκειμένου να προσομοιώσει το σχηματισμό του αποβλήτου. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι η ποσότητα των στοιχείων για τη μοντελοποίηση του τεμαχίου και του αποβλήτου που χρειάζονται για την ανάλυση είναι μικρή, επιτρέποντας τη μείωση του χρόνου ανάλυσης και το γεγονός ότι δεν υφίστανται σοβαρή στρέβλωση, δεδομένου ότι το πλέγμα και επομένως η μορφή του παραγόμενου αποβλήτου είναι εκ των προτέρων γνωστή. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί περίπλοκο προγραμματισμό και ότι τα πειραματικά δεδομένα πρέπει να είναι γνωστά πριν από την κατασκευή του μοντέλου, προκειμένου να καθοριστεί η γεωμετρία του αποβλήτου. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ακόμα από μερικούς ερευνητές για την προσομοίωση της σταθερής κατάστασης της διαδικασίας κοπής.



Εικόνα 19-Μοντέλο του Euler

Από την άλλη, στη μεταγενέστερη μέθοδο Lagrange, τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα με το υλικό και το εργαλείο έχει προχωρήσει προς το τεμάχιο. Το απόβλητο σχηματίζεται με τη χρήση ενός κριτηρίου διαχωρισμού μπροστά από την ακμή του εργαλείου. Μέχρι στιγμής γεωμετρικά ή φυσικά κριτήρια έχουν προταθεί, με την συμμετοχή της κρίσιμης απόστασης μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου, των κρίσιμων τιμών για παράδειγμα πίεσης ή παραμόρφωσης, ή ακόμα και κριτήρια διάδοσης της ρωγμής. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου έχει να κάνει με τη μεγάλη παραμόρφωση του πλέγματος που παρατηρείται κατά την προσομοίωση. Λόγω της σύνδεσης του πλέγματος στο υλικό του τεμαχίου, το πλέγμα καταστρέφεται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης στη ζώνη κοπής. Για να ξεπεραστεί αυτό, συνήθως εφαρμόζεται ένας συνεχής επανασχηματισμός του πλέγματος και μία προσαρμογή του πλέγματος, που επιβαρύνουν σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο υπολογισμού. Παρ' όλα αυτά, η πρόοδος των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει καταστήσει δυνατή τη μείωση του χρόνου που απαιτείται για μια τέτοια ανάλυση σε αποδεκτά πλαίσια.



Εικόνα 20-Μοντέλο Lagrange

Σήμερα, το μοντέλο του Lagrange προτιμάται περισσότερο από το μοντέλο του Euler στον τομέα της έρευνας.

Σημαντικό είναι εδώ να αναφέρουμε ότι τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένα συνδυαστικό μοντέλο Lagrangian-Eulerian (ALE), το οποίο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων.

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 πλέγματος του τεμαχίου στο σημείο κάθε φορά που έρχεται σε επαφή με το εργαλείο.

Η αριθμητική επίλυση σε όλες τις μεθόδους λύνει ουσιαστικά την παρακάτω εξίσωση: $M \cdot \ddot{u} = P - I$, όπου M το μητρώο μάζας, \ddot{u} η επιτάχυνση του κάθε κόμβου, P

η εξωτερικές και I οι εσωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτόν. Για τον υπολογισμό των επιταχύνσεων δεν χρησιμοποιείται πλέον η μέθοδος των συνεχών επαναλήψεων γραμμικών εξισώσεων, αλλά η λύση βρίσκεται με τη χρήση κεντρικής διαφοράς για τη λύση των εξισώσεων κίνησης που δεν είναι γραμμικές και η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται ως άμεση (explicit) . Αυτό συμβαίνει διότι για τις επαφές των πλεγμάτων στις κατεργασίες κοπής το πρόβλημα είναι δυναμικό και θα απαιτούνταν πολλές επαναλήψεις.

3.3 Προβλήματα κατά τη μοντελοποίηση

[26][12][7][8]

Ένα κύριο πρόβλημα που εμφανίζεται κατά τη μοντελοποίηση των κατεργασιών κοπής προκύπτει από τις συνθήκες επαφής εργαλείου με τεμάχιο ή απόβλητο. Συνήθως γίνεται χρήση της απλής συνθήκης Coulomb για την τριβή $F = \mu N$, με F τη δύναμη τριβής, N την κάθετη δύναμη αντίδρασης που σχετίζεται με το βάρος και ο συντελεστής τριβής μ λαμβάνεται σταθερός για μικρές τάσεις που όμως σπάνια συναντούνται 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, αν και έχει μελετηθεί εκτενώς. 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. Και όμως, παρόλο που ο μηχανισμός της τριβής κατά την κοπή δεν είναι πλήρως αναλυμένος, από την τριβή καθορίζονται κυρίως οι παραμένουσες τάσεις.

Ένα ακόμη σημαντικό πρόβλημα εντοπίζεται στα πακέτα λογισμικών. Τα εμπορικά λογισμικά 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 για παράδειγμα τα θερμοδυναμικά. Οι παραδοχές που κάνουν όμως, καθώς και οι τρόποι επίλυσης δεν είναι εύκολο να εξεταστούν τις περισσότερες φορές από τον χρήστη, κάτι που κάνει 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 και προβληματική προσαρμογή του πλέγματος.

Παρά όμως τα προβλήματα, τα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων μπορούν σήμερα να ασχοληθούν με διάφορα είδη συνθηκών φόρτισης όπως για παράδειγμα

τάσης-παραμόρφωσης, θερμική, ηλεκτρική, να κάνουν ανάλυση της δυναμικής των ρευστών ή και να κάνουν συνδυαστικά ανάλυση με παραπάνω από μία από τις προαναφερθείσες συνθήκες φόρτισης στο ίδιο μοντέλο. Παρέχουν δε δισδιάστατες ή και τρισδιάστατες αναλύσεις.

Ένα από τα πιο αξιόπιστα λογισμικά το οποίο μπορεί να εξομοιώσει κατεργασίες κοπής είναι το Advantedge της εταιρίας Third Wave Systems, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής και περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

3.4 Παρουσίαση λογισμικού Advantedge

[30][31][12]

Το AdvantEdge της εταιρείας Third Wave Systems είναι ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης και προσομοίωσης κατεργασιών κοπής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το πακέτο μπορεί να χαρακτηριστεί ως φιλικό προς το χρήστη, καθώς μέσα από εύχρηστους πίνακες και επιλογές, μπορεί να μοντελοποιήσει κατεργασίες καταχωρώντας δεδομένα για το τεμάχιο, το κοπτικό εργαλείο και τις συνθήκες κοπής. Κατόπιν είναι σε θέση να προσομοιώσει την κατεργασία και να εξάγει αποτελέσματα για μία πληθώρα από μεγέθη που θα ήταν δύσκολο να παρατηρηθούν και να μελετηθούν πειραματικά.

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο Lagrange για τη μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων και κάνει χρήση των αναγκαίων τεχνικών επαναπροσδιορισμού και ομαλοποίησης πλέγματος με τοπική πύκνωση, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης της κατεργασίας. Κατορθώνει έτσι να απομακρύνει από τα στοιχεία τα οποία είναι τριγωνικά κατασκευασμένα με τη μέθοδο Delaunay τις έντονες παραμορφώσεις. Όταν ξεπεραστεί ένα συγκεκριμένο όριο πλαστικής ισχύος γίνεται ο επαναπροσδιορισμός της γεωμετρίας ενός στοιχείου, ενώ ο έλεγχος γίνεται ανά τακτές χρονικές στιγμές. Η ομαλοποίηση ακολουθεί όταν μετά τον επαναπροσδιορισμό του πλέγματος παρατηρείται ακόμη υπέρβαση των επιτρεπτών παραμορφώσεων.

Ο διαχωρισμός του αποβλήτου από το τεμάχιο δε γίνεται με κάποιο κριτήριο διαχωρισμού του υλικού αλλά σχηματίζεται από την πλαστική ροή του υλικού του κομματιού γύρω από την ακμή του κοπτικού εργαλείου και τη διάδοση της ρωγμής. Ο διαχωρισμός του αποβλήτου υπακούει στο κριτήριο διάδοσης της ρωγμής, το οποίο καθορίζει ότι η τροχιά της ρωγμής διαδίδεται προς τη γωνία κατά την οποία η τάση παίρνει μια σχετική μέγιστη τιμή. Όταν ξεπεραστεί η τιμή αυτή, γίνεται διπλασιασμός των κόμβων στην άκρη της ρωγμής και έτσι σχηματίζεται το απόβλητο. Αυτή η

υπέρβαση της τάσης διαρροής καθορίζει τη μορφή του αποβλήτου, καθώς και το σημείο που αυτό θα σπάσει.

3.4.1 Μοντελοποίηση του υλικού του τεμαχίου στο Advantedge

[6]

Το υλικό του τεμαχίου μοντελοποιείται ως ιστροπικό ελαστοπλαστικό και με ιστροπική μηχανική παραμόρφωση, η οποία στις κατεργασίες κοπής προκύπτει ανάλογα με τις τάσεις και την θερμοκρασία. Η τάση διαρροής επηρεάζεται κυρίως από τη θερμοκρασία, την παραμόρφωση, το ποσοστό έντασης και άλλους παράγοντες. Ένα ακριβές και αξιόπιστο μοντέλο τάσης διαρροής είναι απαραίτητο για να αναπαραστήσει τη συμπεριφορά του υλικού κατά τη διαδικασία κοπής. Η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του υλικού γίνεται με τη χρήση της εξίσωσης:

$$\left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_o^p}\right) = \left(\frac{\bar{\sigma}}{g(\varepsilon^p)}\right), \text{ αν } \dot{\varepsilon}^p \leq \dot{\varepsilon}_t \quad (1)$$

$$\left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_o^p}\right) \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}_t}{\dot{\varepsilon}_o^p}\right)^{M_1/M_2-1} = \left(\frac{\bar{\sigma}}{g(\varepsilon^p)}\right)^{M_2}, \text{ αν } \dot{\varepsilon}^p > \dot{\varepsilon}_t \quad (2)$$

όπου $\bar{\sigma}$ είναι η ένταση κατά Von Mises, g είναι η τάση διαρροής, $\dot{\varepsilon}^p$ είναι ο ρυθμός συσσώρευσης πλαστικής έντασης, $\dot{\varepsilon}_o^p$ είναι ο ρυθμός αναφοράς πλαστικής έντασης, M_1 και M_2 είναι ο χαμηλός και ο υψηλός εκθέτης ευαισθησίας ποσοστού έντασης αντίστοιχα, και $\dot{\varepsilon}_t$ είναι το όριο του ποσοστού έντασης που χωρίζει τις δύο καταστάσεις. Ο τύπος της σκλήρυνσης με γραμμική θερμική αποσκλήρυνση είναι:

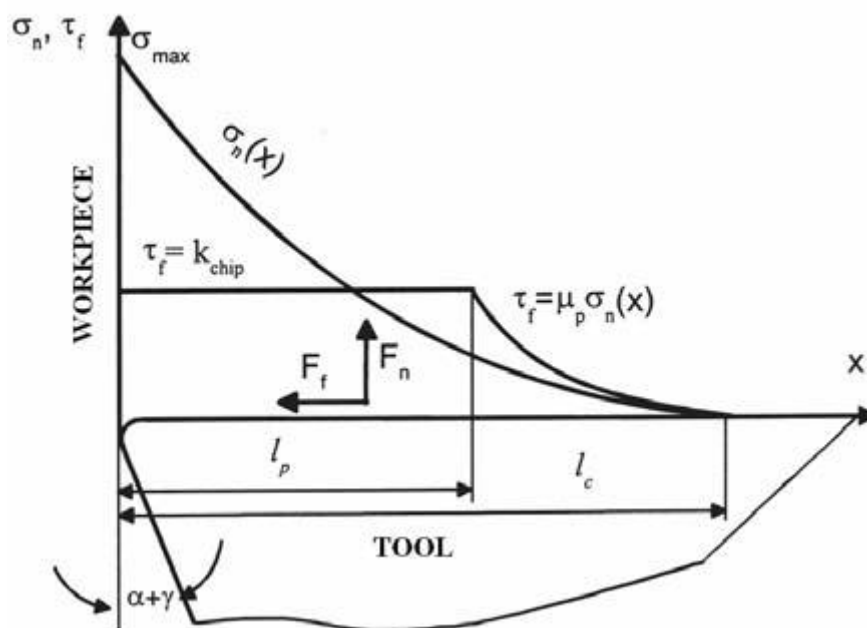
$$g = [1 - a(T - T_0)] \sigma_0 \left(1 + \frac{\varepsilon^p}{\varepsilon_o^p}\right)^{\frac{1}{n}}$$

όπου n είναι ο εκθέτης σκληρότητας, T είναι η υπάρχουσα θερμοκρασία, T_0 είναι μια θερμοκρασία αναφοράς, a είναι ένας συντελεστής αποσκλήρυνσης και σ_0 είναι η οριακή τάση στο T_0 . Το πακέτο περιέχει μεγάλη βιβλιοθήκη υλικών με τις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του καθενός και ο χρήστης μπορεί απλά να επιλέξει το υλικό.

3.4.2 Μοντελοποίηση μεταφοράς θερμότητας στο Advantedge

[6]

Για να αποκτήσουμε αξιόπιστα και ρεαλιστικά αποτελέσματα προσομοίωσης της κοπής μετάλλου, είναι απαραίτητο να ερευνήσουμε την αλληλεπίδραση μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του αποβλήτου. Η δύναμη τριβής επηρεάζεται έντονα από την ταχύτητα κοπής, την πίεση επαφής και τη θερμοκρασία κοπής. Το μοντέλο του Zoren αποκαλύπτει δυο διακριτές περιοχές στη διεπιφάνεια αποβλήτου – εργαλείου, την περιοχή ολίσθησης και την περιοχή sticking. Η κατανομή της κανονικής διατμητικής τάσης και της διατμητικής τάσης τριβής στη διεπιφάνεια αποβλήτου – εργαλείου φαίνεται στην εικόνα 21.



Εικόνα 21-Καμπύλες που αναπαριστούν την κατανομή κανονικής τάσης και τάσης τριβής στην επιφάνεια αποβλήτου

Από την άκρη του εργαλείου μέχρι ενός σημείου, η τάση τριβής θεωρείται σταθερή σε μια περιοχή 'στομώματος'. Μετά από αυτό το σημείο, η τάση τριβής μειώνεται στην επιφάνεια αποβλήτου του εργαλείου σε μια περιοχή ολίσθησης όπου

ο νόμος τριβής του Coulomb μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Αυτό παρουσιάζεται ως εξής:

$\tau_f = \mu \sigma_n$, όταν $\mu \sigma_n < k_{chip}$ (ολίσθηση)

$\tau_f = k$, όταν $\mu \sigma_n \leq k_{chip}$ (sticking),

όπου τ_f είναι η τάση τριβής, σ_n είναι η κανονική τάση, μ ο συντελεστής τριβής και k_{chip} η διατμητική τάση του αποβλήτου.

4

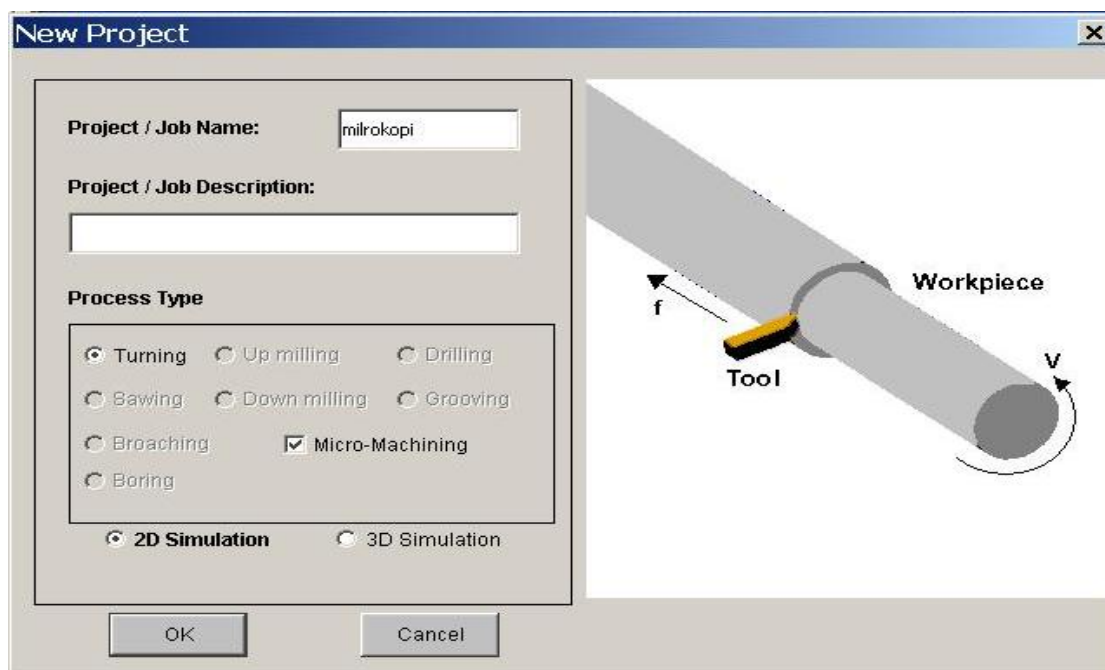
Καταχώρηση Δεδομένων για Μικροκοπή στο Περιβάλλον Advantedge

4.1 Γενικά

[30]

Παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο καταχωρούνται τα δεδομένα που είναι απαραίτητα, προκειμένου να ξεκινήσει το πρόγραμμα την κατεργασία της μικροκοπής.

Ανοίγοντας το πρόγραμμα και επιλέγοντας Project→New παρουσιάζεται ένα παράθυρο όπου ο χρήστης πρέπει να εισάγει έναν τίτλο για την κατεργασία, να επιλέξει ανάμεσα σε ένα πλήθος κατεργασιών την τόννευση (Turning), να επιλέξει την μικροκατεργασία (Micro-Machining) και τέλος να επιλέξει την 2D simulation (εικόνα 22).



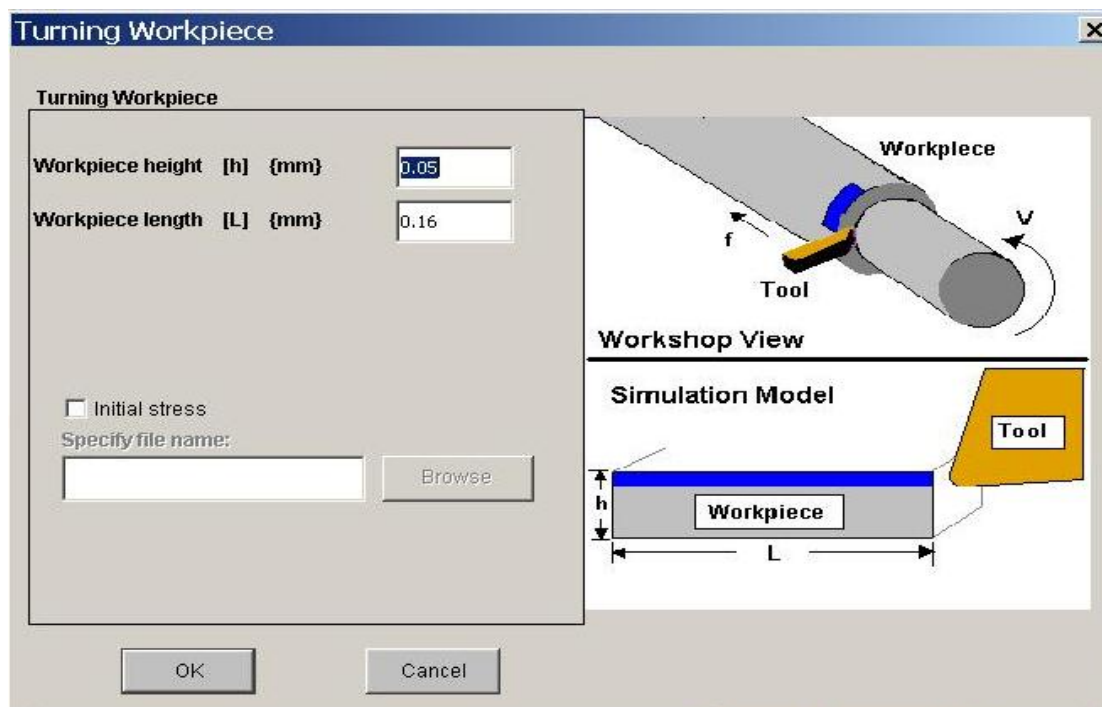
Εικόνα 22-Παράθυρο επιλογής κατεργασίας

Κατόπιν, πρέπει να εισαχθούν βασικές πληροφορίες για τη γεωμετρία καθώς και το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, γεωμετρικά χαρακτηριστικά, υλικό και πιθανές επικαλύψεις για το εργαλείο κοπής καθώς και παράμετροι που καθορίζουν τη διαδικασία κοπής.

4.2 Κατεργαζόμενο τεμάχιο

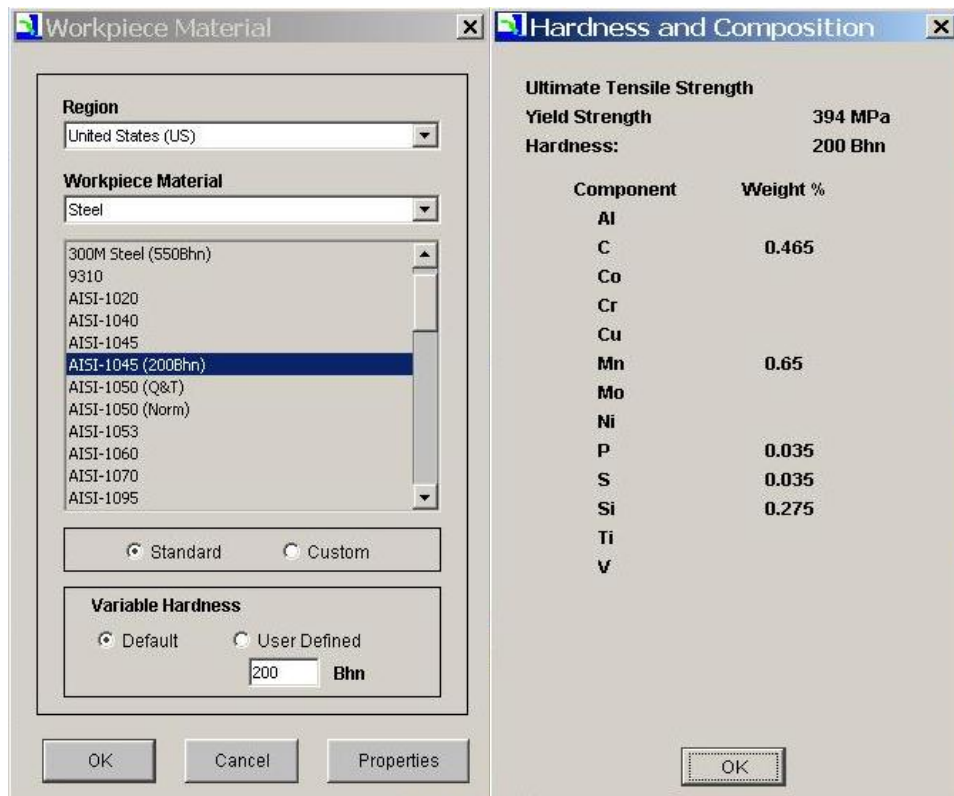
[30]

Επιλέγοντας από τη γραμμή εργαλείων Workpiece → Create / Edit Standard Workpiece ζητείται από το πρόγραμμα να εισαχθεί ένα ύψος και ένα μήκος για το τεμάχιο(εικόνα 23)



Εικόνα 23-Παράθυρο καταχώρησης διαστάσεων του τεμαχίου

ενώ επιλέγοντας Workpiece → Workpiece Material το πρόγραμμα ανοίγει μία ευρεία γκάμα υλικών, εκ των οποίων μπορεί να γίνει επιλογή του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Επιλέγοντας κατόπιν, από το παράθυρο Workpiece Material την επιλογή Properties παρατίθενται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του κάθε υλικού(εικόνα 24).



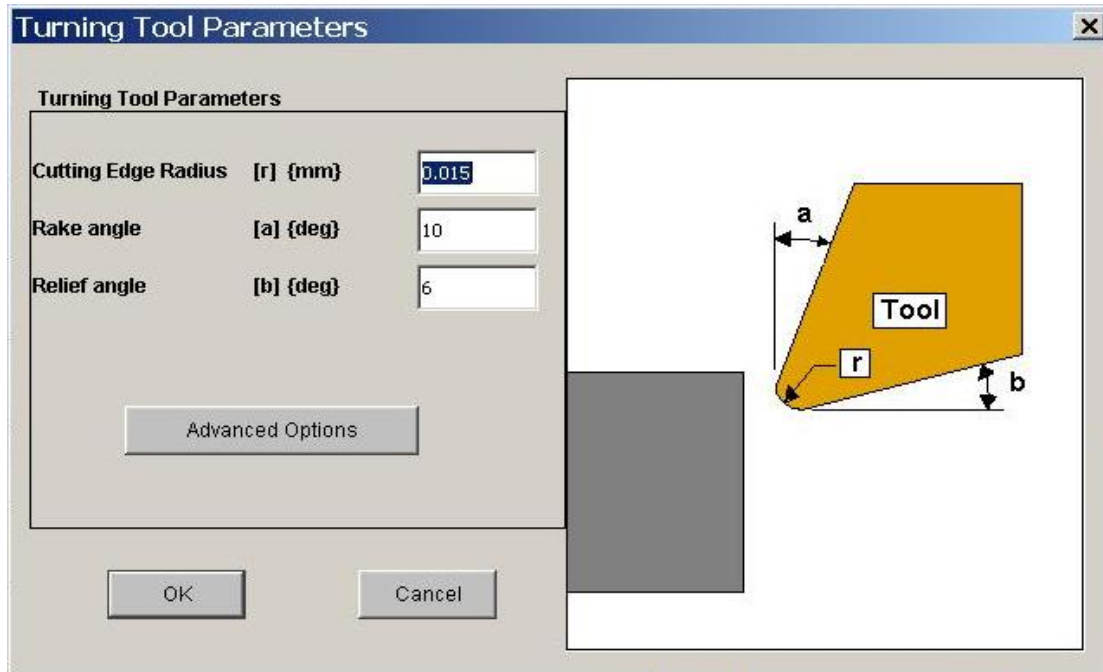
Εικόνα 24-Παράθυρο επιλογής υλικού του τεμαχίου

Το πρόγραμμα προσφέρει επίσης τη δυνατότητα δημιουργίας ενός υλικού δίνοντας του τις απαραίτητες πληροφορίες όσον αφορά τη σύσταση και τις μηχανικές του ιδιότητες.

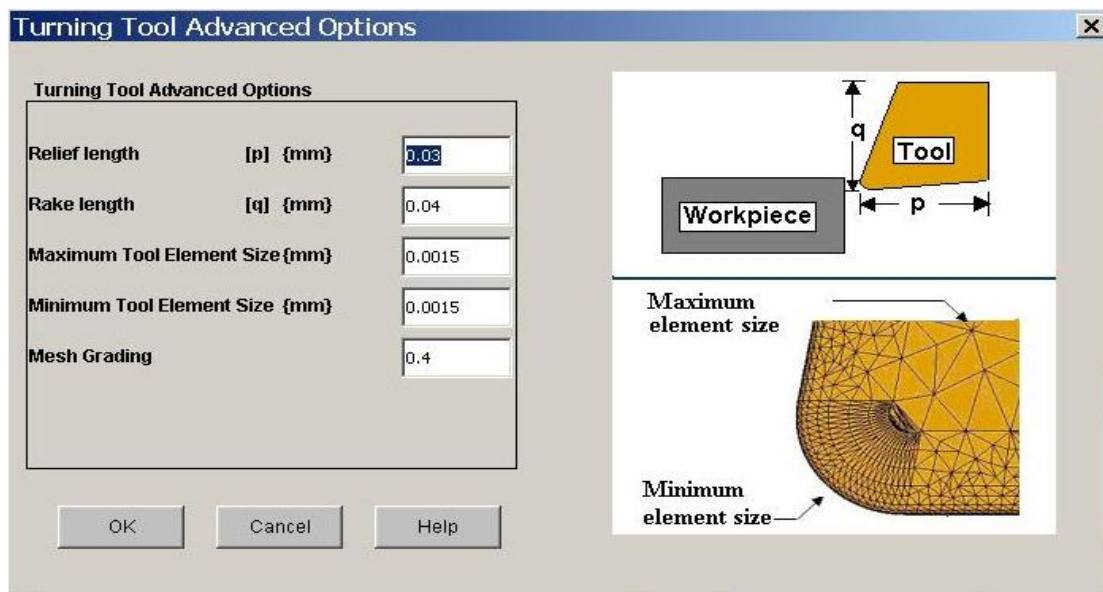
4.3 Εργαλείο κοπής

[30]

Επιλέγοντας από τη γραμμή εργαλείων Tool → Create / Edit Standard Tool ζητείται από το πρόγραμμα να γίνει καταχώρηση τιμών για την ακτίνα καμπυλότητας, τη γωνία αποβλήτου και τη γωνία ελευθερίας(εικόνα 25.α), ενώ επιλέγοντας από το παράθυρο Turning Tool Parameters την επιλογή Advanced Options μπορεί να καταχωρηθεί το μήκος της προβολής των πλευρών αποβλήτου και ελευθερίας καθορίζοντας τη γεωμετρία του εργαλείου. Ακόμη μπορούν να καταχωρηθούν πληροφορίες αναφορικά με το μέγιστο και το ελάχιστο μέγεθος των στοιχείων του εργαλείου(εικόνα 25.β).

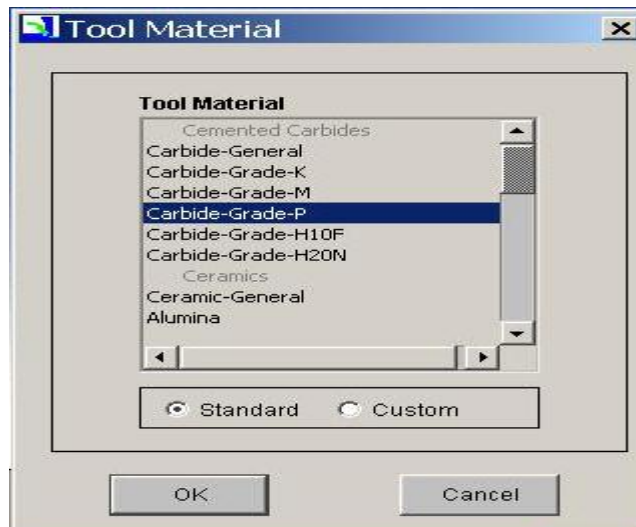


(α)



Εικόνα 25-Παράθυρα καταχώρησης παραμέτρων κοπτικού εργαλείου (β)

Πηγαίνοντας από τη γραμμή εργαλείων Tool → Tool Material το πρόγραμμα ανοίγει μια μεγάλη λίστα απ' όπου μπορεί να γίνει επιλογή του υλικού του εργαλείου(εικόνα 26).



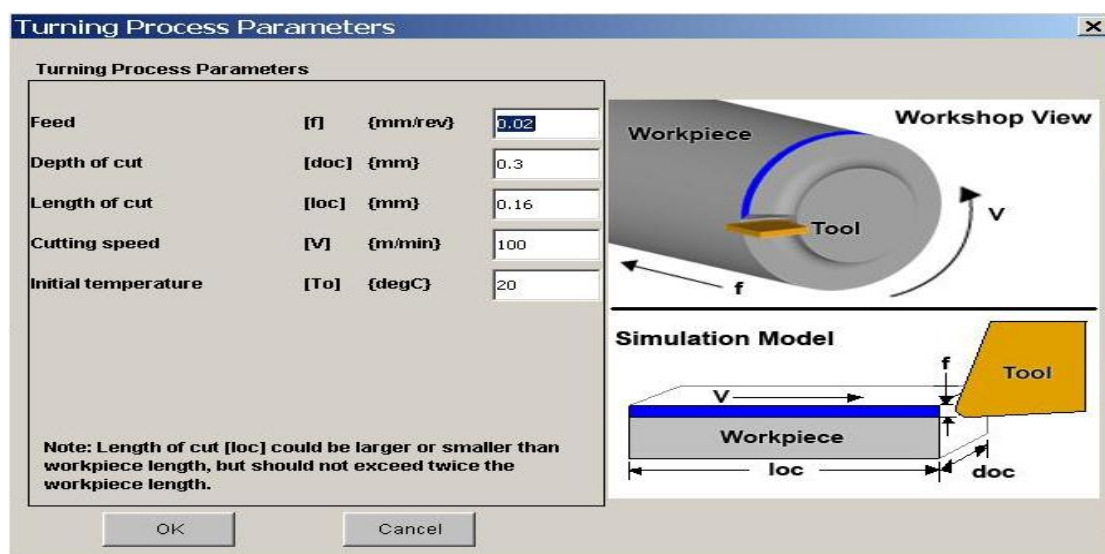
Εικόνα 26-Παράθυρο επιλογής υλικού κοπτικού εργαλείου

Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας, όπως και με το κατεργαζόμενο τεμάχιο, ένα υλικό που δε βρίσκεται στη λίστα, ενώ μπορούν να καταχωρηθούν πληροφορίες σχετικά με τις επικαλύψεις και τη φθορά του εργαλείου.

4.4 Διαδικασία κοπής

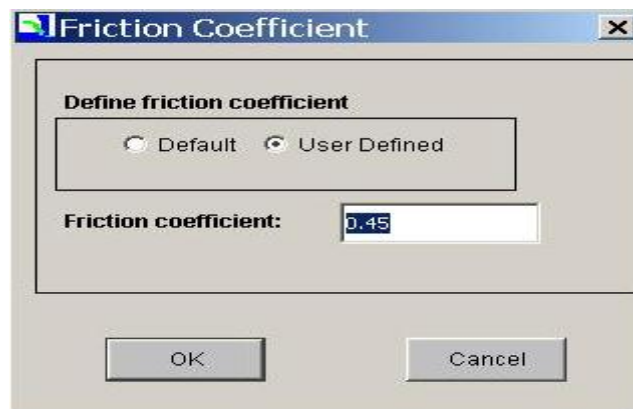
[30]

Από τη γραμμή εργαλείων επιλέγοντας Process → Process Parameters ζητούνται από το πρόγραμμα πληροφορίες που να καθορίζουν τη διαδικασία κοπής, όπως πρόωση, βάθος κοπής, μήκος κοπής, ταχύτητα κοπής και αρχική θερμοκρασία(εικόνα 27).



Εικόνα 27-Παράθυρο καταχώρησης παραμέτρων της διαδικασίας κοπής

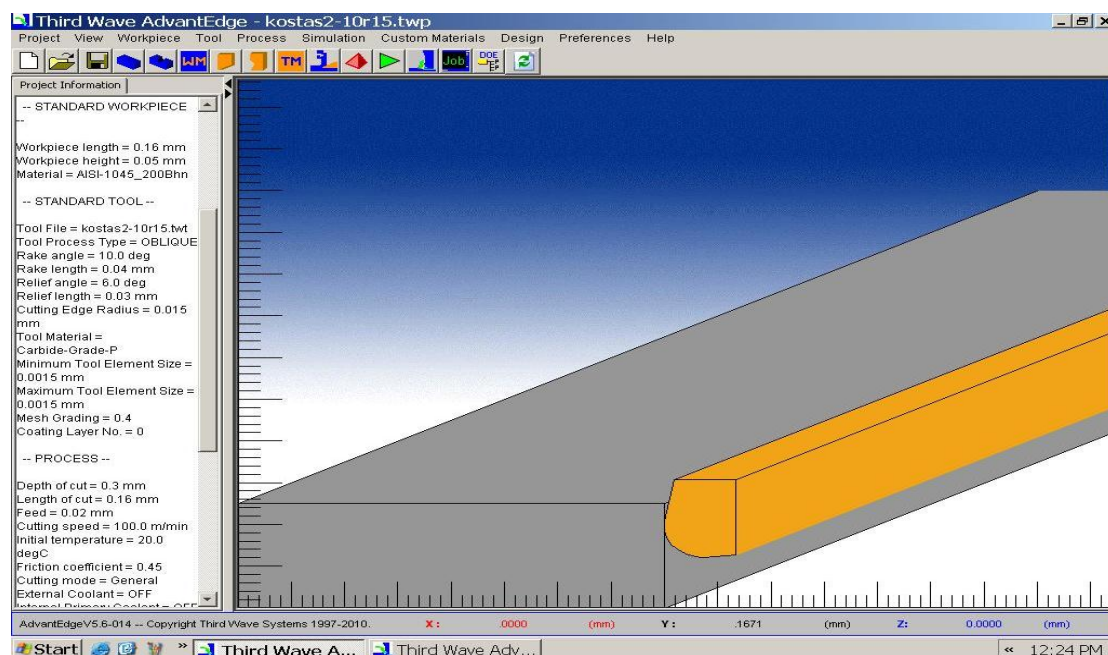
Επιλέγοντας Process → Friction το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα επιλογής ενός συντελεστή τριβής(εικόνα 28).



Εικόνα 28-Παράθυρο καταχώρησης συντελεστή τριβής

Παρέχεται επίσης η δυνατότητα, δίνοντας πληροφορίες για τη διαδικασία, να καταχωρηθούν δεδομένα για την ψύξη κατά την κοπή (coolant).

Τα δεδομένα που έχουν καταχωρηθεί, φαίνονται στην κατακόρυφη στήλη αριστερά, ενώ δεξιά εμφανίζεται το τεμάχιο με το κοπτικό εργαλείο, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



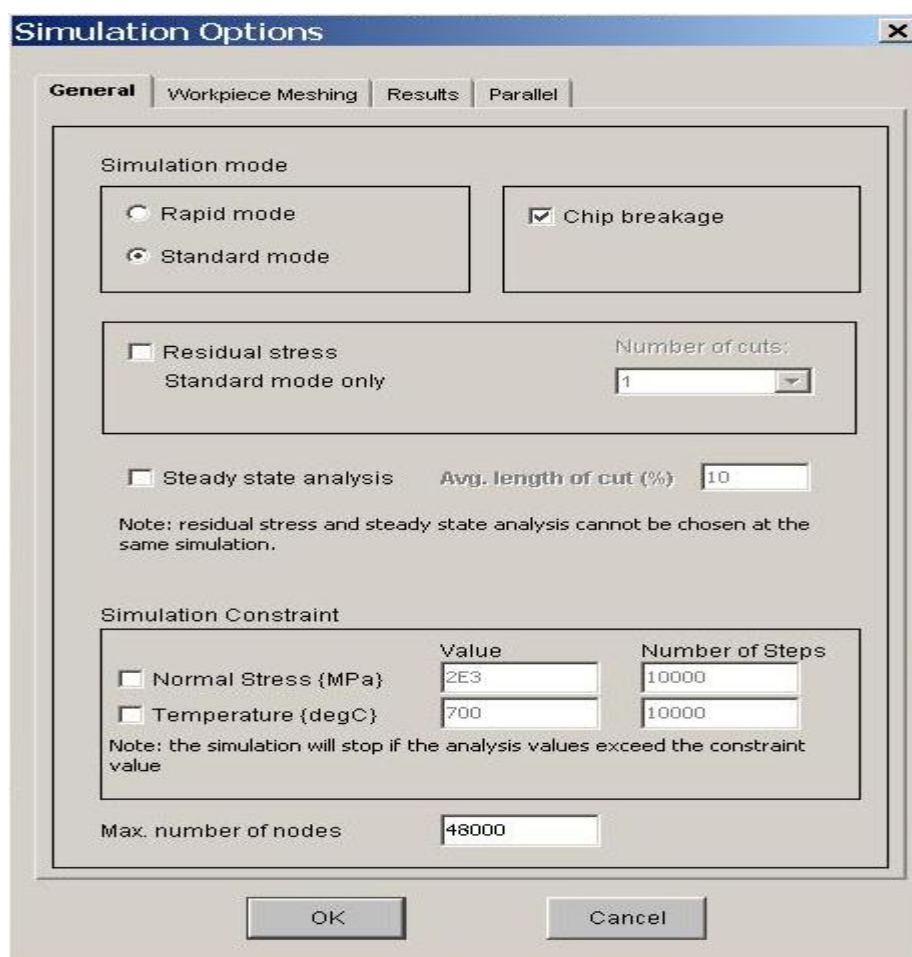
Εικόνα 29-Κεντρικό παράθυρο Advantedge με δεδομένα

4.5 Προσομοίωση

[30]

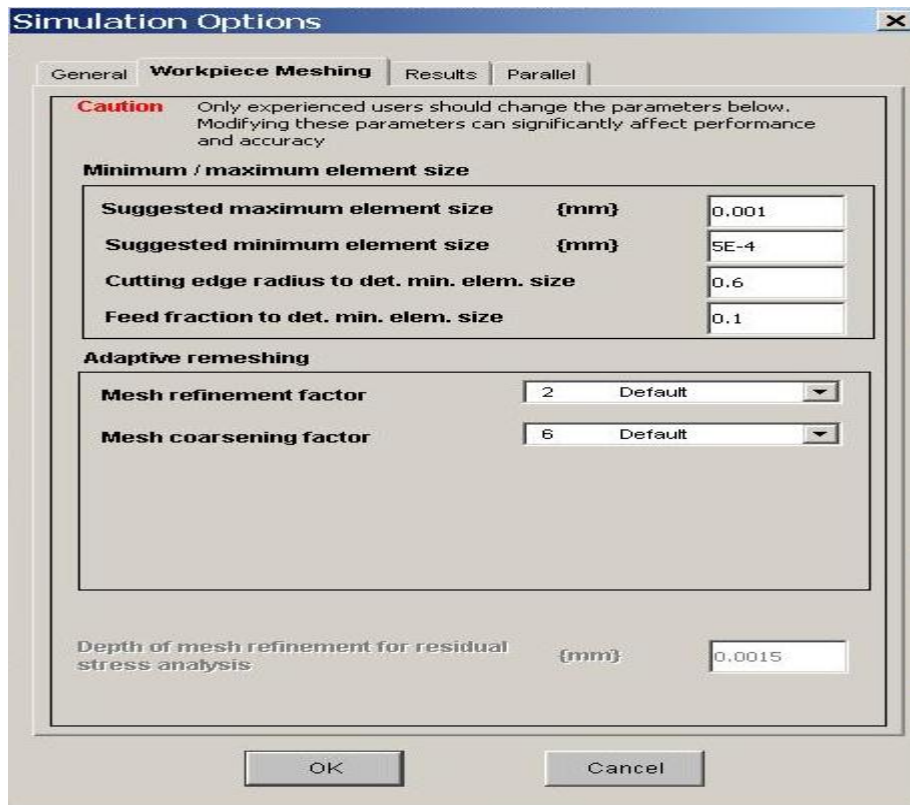
Αφού έχουν καταχωρηθεί όλες οι απαραίτητες πληροφορίες οι οποίες θα καθορίσουν το τεμάχιο, το κοπτικό εργαλείο και τη διαδικασία κοπής, το πρόγραμμα είναι σε θέση να ξεκινήσει την προσομοίωση.

Επιλέγοντας από τη γραμμή εργαλείων Simulation → Simulation Options το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα καθορισμού του μέγιστου αριθμού των κόμβων ενώ μπορεί να γίνει επιλογή μιας γρήγορης ή μιας κανονικής προσομοίωσης διαλέγοντας Rapid Mode ή Standard Mode αντιστοίχως(εικόνα 30). Επιλέγοντας Standard Mode το πρόγραμμα κάνει ανάλυση των στοιχείων σε πιο τακτά χρονικά διαστήματα απ' ότι με την πρώτη επιλογή. Σαφώς σ' αυτή την περίπτωση απαιτείται πολύ περισσότερος χρόνος προκειμένου να τελειώσει η μοντελοποίηση. Οι δύο αυτοί τρόποι έχουν μεταξύ τους από 0 έως 20% απόκλιση στα αποτελέσματα.



Εικόνα 30-Επιλογή γρήγορης ή κανονικής μοντελοποίησης

Επιλέγοντας από το παράθυρο που ήδη έχει ανοίξει *Workpiece Meshing* μπορεί να καθοριστεί το μέγιστο και το ελάχιστο μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος του τεμαχίου(εικόνα 31).



Εικόνα 31-Επιλογή μεγέθους στοιχείων τεμαχίου

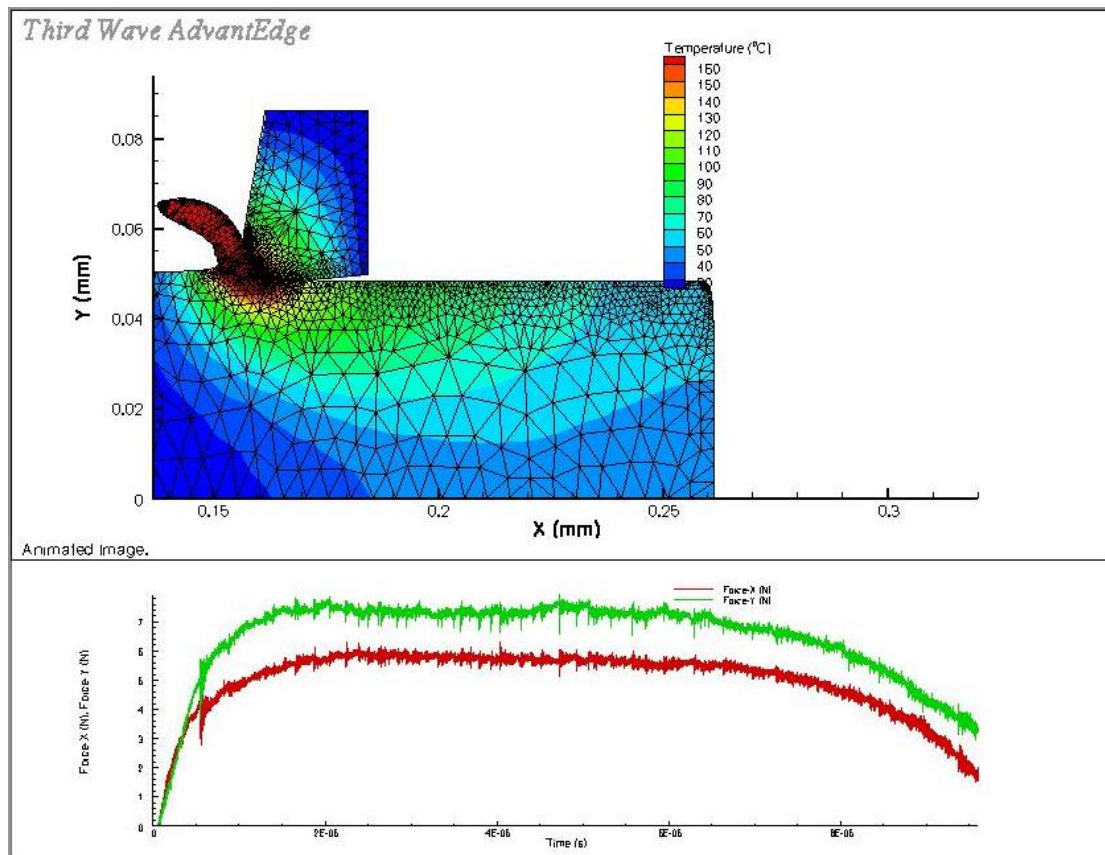
Τέλος επιλέγοντας *Simulation* → *Submit* → *Submit Current Job* το πρόγραμμα ξεκινάει την προσομοίωση.

4.6 Εμφάνιση αποτελεσμάτων

[30][32]

Προκειμένου να ληφθούν τα αποτελέσματα από την προσομοίωση της μικροκοπής στο *Advantedge*, από τη γραμμή εργαλείων επιλέγεται *Simulation* → *results* και αυτομάτως ανοίγει το πρόγραμμα *Tecplot*, ένα πρόγραμμα μετά-επεξεργασίας που συνοδεύει το *Advantedge*.

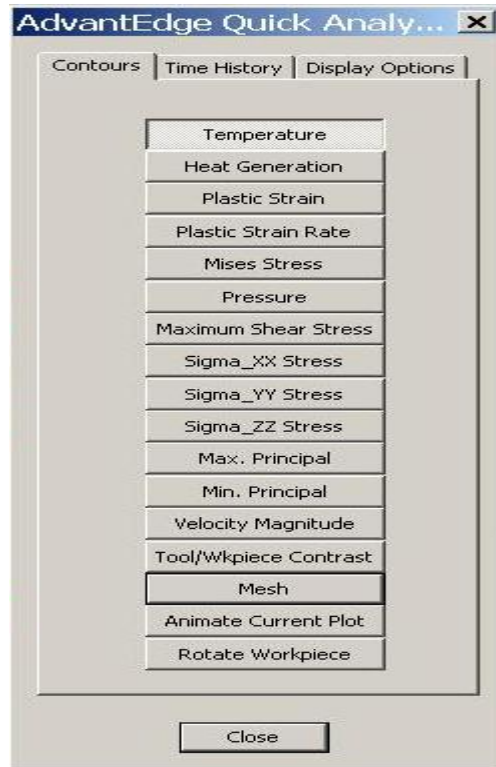
Με την εισαγωγή στο *Tecplot* εμφανίζεται μια εικόνα χωρισμένη σε δυο μέρη, όπου στο πάνω μέρος της γίνεται μια γρήγορη απεικόνιση (video) της διαδικασίας κοπής, ενώ με χρώματα φαίνονται οι θερμοκρασιακές κατανομές σε τεμάχιο και εργαλείο. Στο κάτω μέρος της εικόνας φαίνονται οι κατανομές της κύριας δύναμης κοπής και της δύναμης άπωσης συναρτήσει του χρόνου(εικόνα 32).



Εικόνα 32-Εικόνα από Tecplot

Μαζί με την εικόνα ανοίγει και ένα παράθυρο *Advantedge Quick Analysis* (εικόνα33). Από εκεί μπορούμε να πάρουμε αποτελέσματα για μια σειρά από μεγέθη όπως:

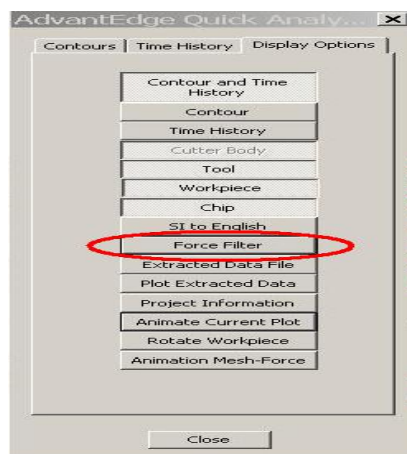
- Θερμοκρασία (°C ή °F)
- Ρυθμός έκκλησης θερμότητας (W/mm³)
- Πλαστική παραμόρφωση
- Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης (s⁻¹)
- Τάσεις Von Mises (MPa ή Psi)
- Τάσεις φορτίσεων (MPa ή Psi)
- Μέγιστη Διατμητική Τάση (MPa ή Psi)
- Κύριες & Διατμητικές Τάσεις (MPa ή Psi)
- Ταχύτητα ανά X,Y,Z (m/min ή ft/min)



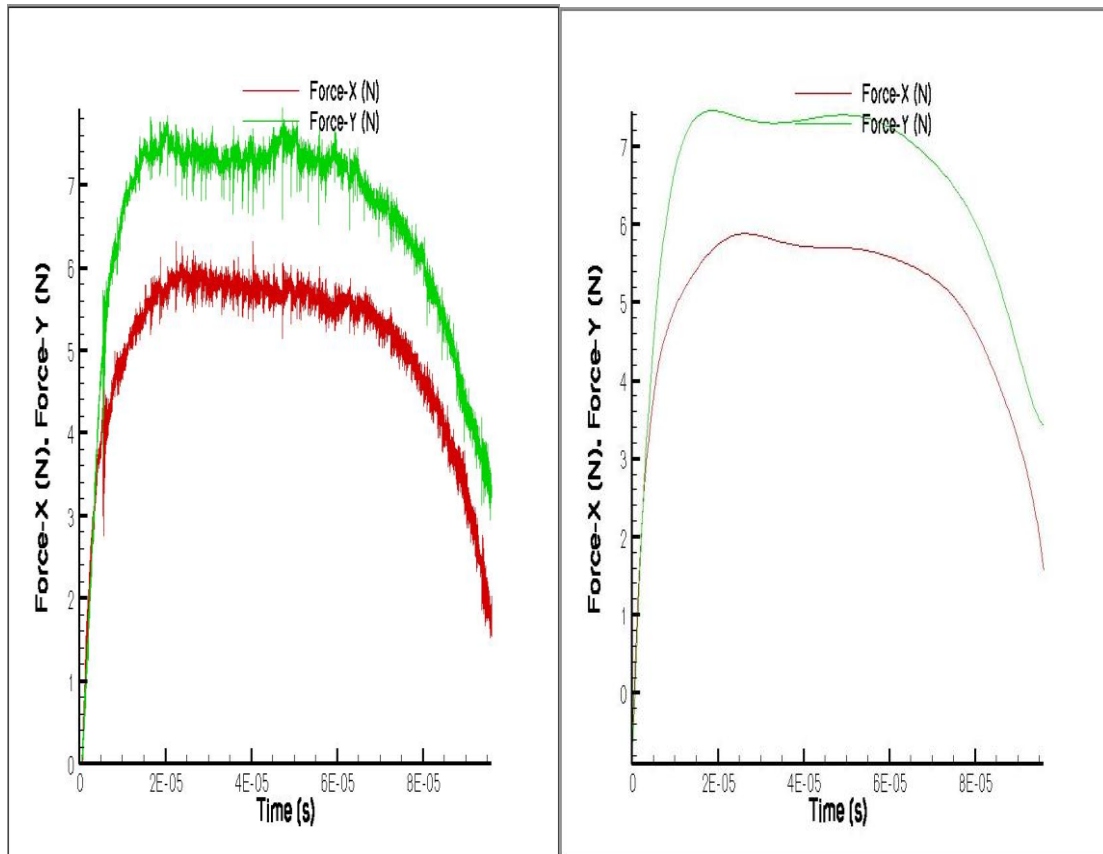
Εικόνα 33-Λίστα επιλογών διαφόρων μεγεθών

Ένα βασικό στοιχείο του *Tecplot* είναι ότι μπορεί να κάνει εξομοίωση της κοπής (video) και με χρώματα να δείξει πάνω στο τεμάχιο και το εργαλείο τις κατανομές των παραπάνω μεγεθών.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι οι αρχικές δυνάμεις, οι οποίες μας ενδιαφέρουν και ως μέγεθος στην παρούσα εργασία, περιέχουν αρκετό «θόρυβο» και γι' αυτό είναι δύσκολο να βγουν σταθερά αποτελέσματα. Το *Tecplot* διαθέτει ένα φίλτρο το οποίο ομαλοποιεί τις καμπύλες των δυνάμεων. Στο παράθυρο *Advantedge Quick Analysis* επιλέγοντας *Display Options* και μετά *Force Filter* το πρόγραμμα ομαλοποιεί τις δυνάμεις, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 34-Επιλογή φίλτρου για ομαλοποίηση δυνάμεων



Εικόνα 35-Εικόνες δυνάμεων πριν και μετά την εφαρμογή του φίλτρου

5

Πειραματική Διαδικασία

[1]

5.1 Γενικά

Το πείραμα [1] το οποίο έχει εκτελεστεί από ερευνητές, μας παρέχει αποτελέσματα για τη μέση κύρια δύναμη κοπής καθώς και τη μέση δύναμη άπωσης, συναρτήσει του πάχους του αδιαμόρφωτου αποβλήτου. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες κοπής, μετρώνται οι παραπάνω δυνάμεις για μεταβολές του πάχους του αδιαμόρφωτου αποβλήτου από 2μm έως 20μm με λήψη αποτελεσμάτων ανά 2μm. Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας με ανάλυση της συγκεκριμένης πειραματικής διάταξης, γίνεται αναφορά στα προβλήματα που εμφανίζονται σε μία πειραματική διάταξη και παρατίθενται τα αποτελέσματα του πειράματος που έχει εκτελεστεί από τους ερευνητές .

5.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

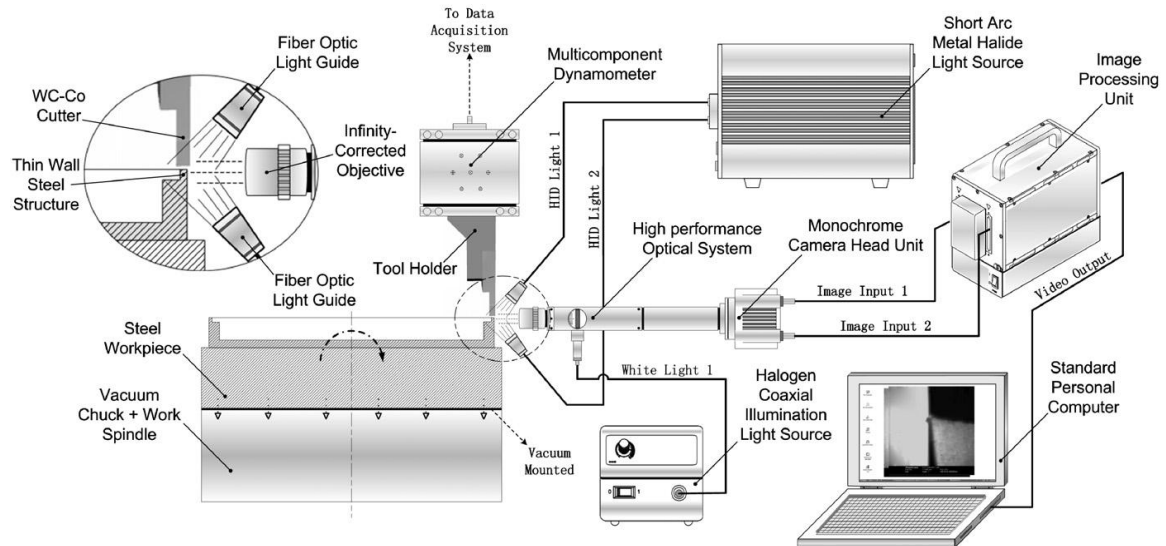
Η πειραματική διάταξη, η οποία περιλαμβάνει τον τόρνο ορθογωνικής κοπής, το οπτικό σύστημα και σύστημα απεικόνισης καθώς και το σύστημα φωτισμού φαίνονται στην εικόνα 36 . Τα δοκίμια από χάλυβα, έχουν κυλινδρικό σχήμα πάχους 0,3 mm και διαμέτρου 90mm. Το κοπτικό εργαλείο είναι ένα καρβίδιο WC-CO (ISO P-Type) με ευθεία κοπτική αιχμή 0,5mm. Τα κοπτικά WC-CO χρησιμοποιούνται αντί του διαμαντιού. Τα πρώτα δεν είναι χημικά συμβατά με σιδηρούχα υλικά όπου η στιγμιαία φθορά του εργαλείου μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες θερμοκρασίες (~800°C), ενώ το δεύτερο, αν και προσφέρει καλή ποιότητα κατεργασίας στο χάλυβα, δεν αποτελεί οικονομική λύση για εφαρμογή σε μεσαίους ανθρακούχους χάλυβες. Το κοπτικό τοποθετείται στον εργαλειοδέτη και εν συνεχεία προσαρμόζεται σε ένα δυναμόμετρο (Kistler 9256C1) για τη μέτρηση των κοπτικών δυνάμεων (συχνότητα δειγματοληψίας = 24000 Hz ανά κανάλι) ενώ το τεμάχιο δένεται στο τσοκ.

Τα πειράματα της μικροκοπής εκτελέστηκαν σε μια μηχανή λίαν υψηλής ακριβείας (Toshiba ULG-100{H3}), η οποία βρίσκεται σε ένα θερμοκρασιακά ελεγχόμενο και απαλλαγμένο από κραδασμούς περιβάλλον. Κάτω από αυτές τις

συνθήκες μπορεί να επιτευχθεί, σε επίπεδο μικροκλίμακας, σταθερότητα σε ένα ευρύ φάσμα στροφών.

Ένα υψηλής ταχύτητας σύστημα απεικόνισης (Photron Ultima APX) με υψηλή φωτοευαισθησία χρησιμοποιείται για τη μαγνητοσκόπηση της διαδικασίας σχηματισμού του αποβλήτου. Ο CMOS αισθητήρας της κάμερας έχει ανάλυση πάνω από ένα εκατομμύριο pixels για να αυξάνεται η φωτοευαισθησία, έτσι ώστε να μπορεί να παράγει πλήρη ανάλυση εικόνας κάτω από συνθήκες χαμηλού φωτισμού και υψηλών ταχυτήτων. Το σύστημα απεικόνισης αποτελείται από μια μονάδα ασπρόμαυρης κάμερας, από μια μονάδα επεξεργασίας της εικόνας και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η διαδικασία κοπής αποθανατίζεται από την κάμερα, επεξεργάζεται από τη μονάδα επεξεργασίας και εν συνεχεία αποθηκεύεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για να επιτευχθεί εικόνα σε επίπεδο μικροκλίμακας, χρησιμοποιείται ένα οπτικό σύστημα με ανάλυση εικόνας 300lp/mm σε συνδυασμό με ένα σύστημα απεικόνισης υψηλής ταχύτητας. Ένας πρόσθετος μεγεθυντικός φακός συνδέεται με το οπτικό σύστημα για μεγαλύτερη μεγέθυνση και καλύτερη ανάλυση.

Για τους σκοπούς του φωτισμού, χρησιμοποιείται ένα σύστημα φωτισμού υψηλής έντασης με εξοπλισμό οπτικών ινών (Iwasaki MLD5250-2). Το σύστημα φωτισμού χρησιμοποιεί ένα μικρό τόξο από λάμπες αλογόνου (350W) ώστε να παράγει μια πηγή φωτός μεγάλης έντασης χωρίς αυξομειώσεις. Έπειτα, η φωτεινή δέσμη επικεντρώνεται στη ζώνη κοπής με δύο οδηγούς οπτικών ινών ώστε να μειωθούν οι επιπτώσεις των σκιάσεων. Ο φωτισμός από τις λάμπες αλογόνου λειτουργεί μόνο κατά τη διαδικασία κοπής ώστε να μην υπερθερμαίνονται τα εξαρτήματα. Κατ' αυτό τον τρόπο, μια ξεχωριστή ομοαξονική πηγή φωτισμού αλογόνου συνδυάζεται με το οπτικό σύστημα για τη διευκόλυνση της εστίασης στο σημείο ενδιαφέροντος. Μέσω του ομοαξονικού φωτισμού, το ψυχρό λευκό φως που παράγεται από την πηγή αλογόνου ανακλάται κάθετα, πάνω στη ζώνη κοπής έτσι ώστε να μπορέσει να εστιάσει στο επίμαχο σημείο.



Εικόνα 36-Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης

5.3 Τεχνικές Προκλήσεις

Κοινές πειραματικές τεχνικές για την έρευνα της αλληλεπίδρασης εργαλείου – αποβλήτου περιλαμβάνουν: τη χρήση κοπτικών εργαλείων με περιορισμένο μήκος επαφής, φωτοελαστικές τεχνικές, quick – stop μηχανές κοπής, μετρήσεις των ιχνών επαφής και τεχνική υψηλής ταχύτητας βίντεο και φωτογραφίας. Μεταξύ αυτών, η τεχνική βιντεοσκόπησης και φωτογραφίας φαίνεται να είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος, αφού η διαμόρφωση του αποβλήτου μπορεί να μελετηθεί αξιόπιστα, χωρίς προηγούμενες υποθέσεις και παραδοχές. Εντούτοις, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένα τεχνικά προβλήματα στην καταγραφή της βίντεο – φωτογραφίας κατά την κατεργασία.

Αρχικά, πρέπει να επιτευχθεί η σταθερότητα της διαδικασίας, εξαιτίας των κραδασμών λόγω των τυχαίων ταλαντώσεων, που μπορεί να οδηγήσουν σε μια θολή και κακής ποιότητας εικόνα που θα έχουμε στην έξοδο. Δεύτερον, απαιτείται ένα σύστημα υψηλής ευκρίνειας ώστε να αποθανατίσει τη διαδικασία κοπής με επαρκή ανάλυση κάτω από υψηλές ταχύτητες και χαμηλό φωτισμό. Τρίτον, η λεπτή ζώνη του διαμορφωμένου αποβλήτου θα πρέπει να φαίνεται αποτελεσματικά, μέσω της υλοποίησης μικρού οπτικού πεδίου και οπτικής μεγάλου βάθους. Τέλος, η παροχή επαρκούς φωτισμού στην περιορισμένη περιοχή κοπής είναι ένα θέμα τεράστιας σημασίας ώστε να επιτυγχάνεται κατάλληλη φωτεινότητα και να ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις από τις σκιάσεις.

5.4 Δεδομένα Πειράματος

Τα δεδομένα που αφορούν τις συνθήκες κοπής, το κατεργαζόμενο τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο παρατίθενται παρακάτω:

Συνθήκες Ορθογωνικής Κοπής	
Ταχύτητα κοπής (m/min)	100
Βάθος κοπής (μm)	2, 4, 6, 8...20
Πρόωση (μm)	11.8, 23.6, 35.4....118.0
Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου(rpm)	354
Πλάτος κοπής (mm)	0.3
Συντελεστής τριβής	0.45
Ψύξη	ΟΧΙ
Αρχική θερμοκρασία (°C)	20
Ιδιότητες κατεργαζόμενου τεμαχίου	
Υλικό	χάλυβας(AISI 1045)
Σχήμα	κυλινδρικό
Πάχος (mm)	0.3
Διάμετρος (mm)	90
Ιδιότητες κοπτικού εργαλείου	
Υλικό (Type)	καρβίδιο WC-CO (ISO P-
Επικαλύψεις	ΟΧΙ
Γωνία αποβλήτου (deg)	10
Γωνία ελευθερίας (deg)	6
Ακτίνα καμπυλότητας (μm)	10

Πίνακας 1-Δεδομένα πειράματος

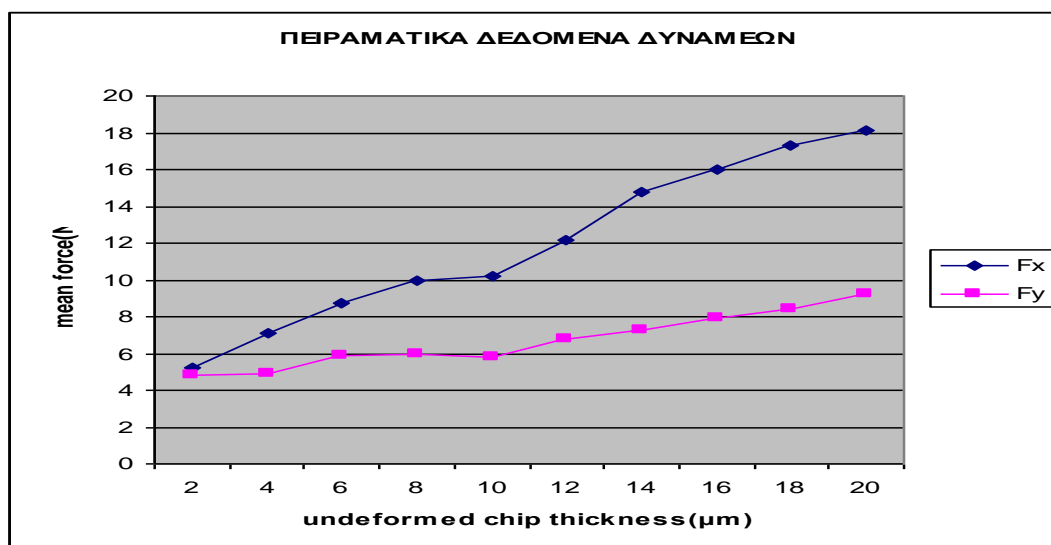
5.5 Αποτελέσματα Πειράματος

Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν κατόπιν του πειράματος παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

$\alpha(\mu\text{m})$ (Πάχος αδιαμόρφωτου αποβλήτου)	$F_x(\text{N})$ (cutting force)	$F_y(\text{N})$ (thrust force)
2	5.2	4.8
4	7.1	4.9
6	8.7	5.9
8	10	6
10	10.2	5.8
12	12.2	6.8
14	14.8	7.3
16	16	7.9
18	17.3	8.4
20	18.1	9.2

Πίνακας 2-Πειραματικές μετρήσεις

Τα αποτελέσματα μας δίνουν το παρακάτω γράφημα:



Γράφημα 1-Μέσες δυνάμεις πειράματος συναρτήσει του πάχους του αδιαμόρφωτου αποβλήτου

5.6 Παρατηρήσεις

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων και το γράφημα των δυνάμεων παρατηρούμε ότι αυξανόμενου του πάχους του αδιαμόρφωτου αποβλήτου, αυξάνονται και οι μέσες δυνάμεις.

Αυτό είναι φυσιολογικό, αφού το εργαλείο καθώς αυξάνεται το πάχος έχει να κατεργαστεί μεγαλύτερη ποσότητα υλικού και η επιφάνεια τριβής μεταξύ τεμαχίου και εργαλείου μεγαλώνει.

Παρατηρούμε επίσης ότι αυξανόμενου του πάχους, η κύρια δύναμη κοπής έχει μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης απ' ότι η δύναμη άπωσης, κάτι που επίσης είναι φυσιολογικό, αφού η δεύτερη δε συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό κατά τη διεύθυνση της κοπής.

6 Προσομοίωση στο Advantedge

6.1 Γενικά

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να γίνει επαλήθευση των πειραματικών μέσων δυνάμεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Advantedge. Θα γίνει η καταχώρηση των δεδομένων του πειράματος στο πρόγραμμα, θα ακολουθήσει η προσομοίωση και τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν, θα συγκριθούν με τις πειραματικές μετρήσεις.

Κατόπιν, θα γίνουν συγκρίσεις και σχολιασμοί για προσομοιώσεις που έγιναν σε διαφορετικές ταχύτητες κοπής και διαφορετικές ακτίνας καμπυλότητας. Σκοπός είναι να μελετηθεί πώς επηρεάζουν τα μεγέθη αυτά τις δυνάμεις κοπής και να συσχετιστούν με φαινόμενα που εμφανίζονται στην μικροκοπή.

Παράλληλα με τις παραπάνω δοκιμές θα γίνεται αναφορά στις θερμοκρασιακές μεταβολές που συμβαίνουν για την εκάστοτε περίπτωση προκειμένου να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη σχέση δυνάμεων, ταχύτητας κοπής και ακτίνας καμπυλότητας με τη θερμοκρασία.

6.2 Επαλήθευση πειραματικών τιμών με τη χρήση του Advantedge

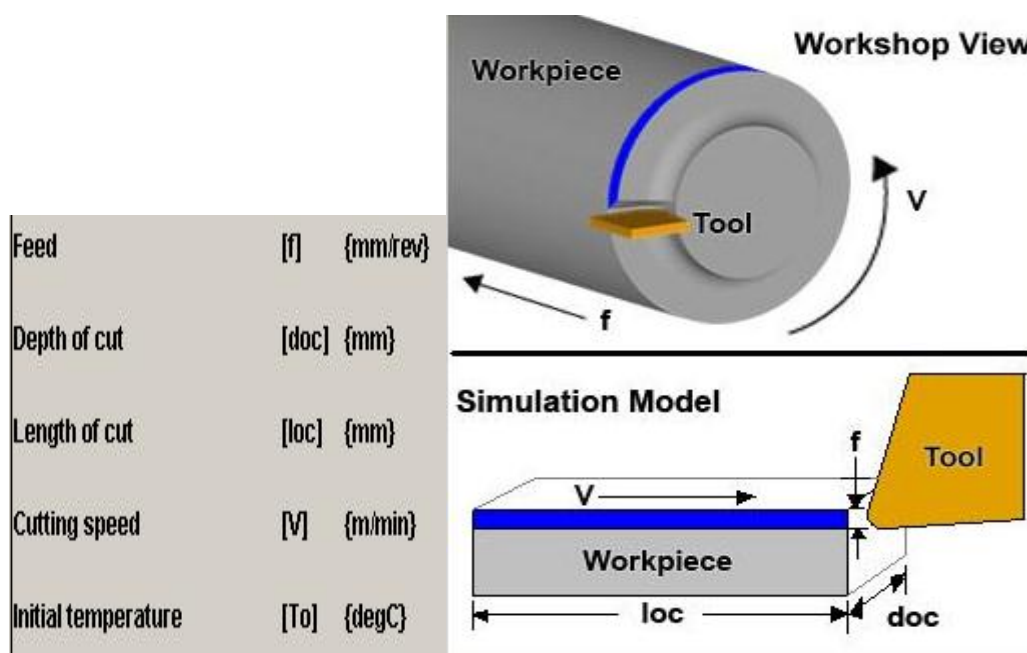
6.2.1 Καταχώρηση δεδομένων πειράματος στο Advantedge

Για να ξεκινήσουμε την προσομοίωση, επιλέγουμε ένα ορθογώνιο σχήμα για το τεμάχιο μας, το οποίο θα έχει μήκος 160mm και ύψος 50mm, ενώ το υλικό από το οποίο αποτελείται είναι ο χάλυβας AISI 1045-200Bhn. Το μεγαλύτερο και το μικρότερο μέγεθος στοιχείου για το πλέγμα του τεμαχίου ορίζονται 0,001mm και 0,0005mm αντίστοιχα. Μοντελοποιώντας το κοπτικό εργαλείο, θέτουμε ως γωνία αποβλήτου 10° , ως γωνία ελευθερίας 6° ενώ η ακτίνα καμπυλότητας είναι 10mm. Επίσης ορίζουμε ως μήκος της προβολής της επιφάνειας του αποβλήτου (Rake length) 0,04mm και ως μήκος της προβολής της επιφάνειας ελευθερίας (Relief length) 0,03mm. Το υλικό του κοπτικού είναι ένα καρβίδιο WC-CO (ISO P-type),

επομένως επιλέγουμε στο πρόγραμμα Carbide- Grade- P. Ως μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος του εργαλείου θέτουμε τα 0,0015mm.

Η ταχύτητα της κοπής ορίζεται στα 100m/min όπως και του πειράματος, η θερμοκρασία ορίζεται σταθερή στους 20°C και ο συντελεστής τριβής 0,45.

Κατά το πείραμα, έχουν γίνει δοκιμές και έχουν παρθεί αποτελέσματα για βάθη κοπής 2,4,6,8...20μm με πρόωση 11.8, 23.6, 35.4...118.0μm/sec αντίστοιχα. Στο Advantedge, το βάθος κοπής, (doc) ισοδυναμεί με το πλάτος κοπής του πειράματος που είναι 0,3mm και παραμένει σταθερό, ενώ το βάθος κοπής του πειράματος αντιστοιχεί στην πρόωση (f) του Advantedge, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 37-Απεικόνιση μεγεθών στο Advantedge

Οι δοκιμές, επομένως, που θα γίνουν στο πρόγραμμα θα είναι 10, αλλάζοντας κάθε φορά την πρόωση (feed) κατά 0,002mm/rev, ξεκινώντας από 0,002mm/rev έως 0,02mm/rev.

Συνοψίζοντας τα δεδομένα που πρέπει να καταχωρήσουμε στο πρόγραμμα έχουμε:

Κατεργαζόμενο τεμάχιο

Ύψος τεμαχίου / Workpiece height (h) (mm)	0.05
Μήκος τεμαχίου / Workpiece length (L) (mm)	0.16
Υλικό τεμαχίου / Workpiece Material	AISI 1045 (200Bhn)

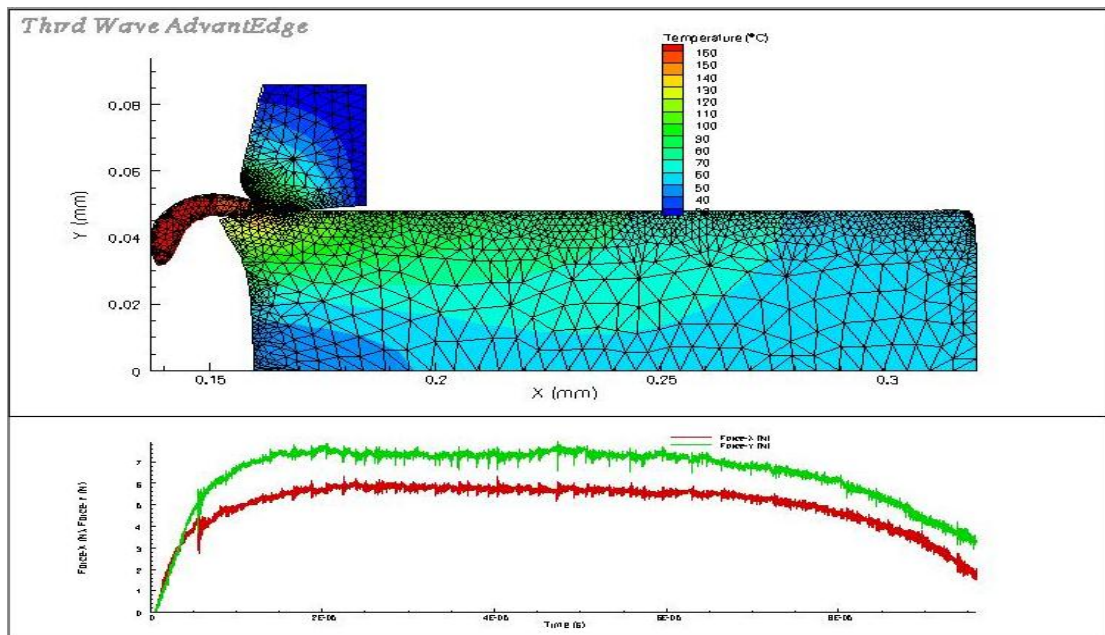
<i>Μέγιστο μέγεθος στοιχείου (mm)</i>	<i>0.001</i>
<i>Ελάχιστο μέγεθος στοιχείου (mm)</i>	<i>0.0005</i>
Εργαλείο κοπής	
<i>Ακτίνα καμπυλότητας / Cutting Edge Radius (r) (mm)</i>	<i>0.01</i>
<i>Γωνία αποβλήτου / Rake angle (a) (deg)</i>	<i>10</i>
<i>Γωνία ελευθερίας / Relief angle (b) (deg)</i>	<i>6</i>
<i>Relief length (p) (mm)</i>	<i>0.03</i>
<i>Rake length (q) (mm)</i>	<i>0.04</i>
<i>Μέγεθος στοιχείου (mm)</i>	<i>0.0015</i>
<i>Υλικό</i>	<i>Carbide-Grade-P</i>
Διαδικασία κοπής	
<i>Feed (f) (rev)</i>	<i>0.002, 0.004, 0.006...0,02</i>
<i>Depth of cut (doc) (mm)</i>	<i>0.3</i>
<i>Ταχύτητα κοπής / cutting speed (v) (m/min)</i>	<i>100</i>
<i>Αρχική θερμοκρασία / Initial Temperature (To) (°C)</i>	<i>20</i>
<i>Συντελεστής τριβής / friction coefficient</i>	<i>0.45</i>

Πίνακας 3-Δεδομένα καταχώρησης στο Advantedge

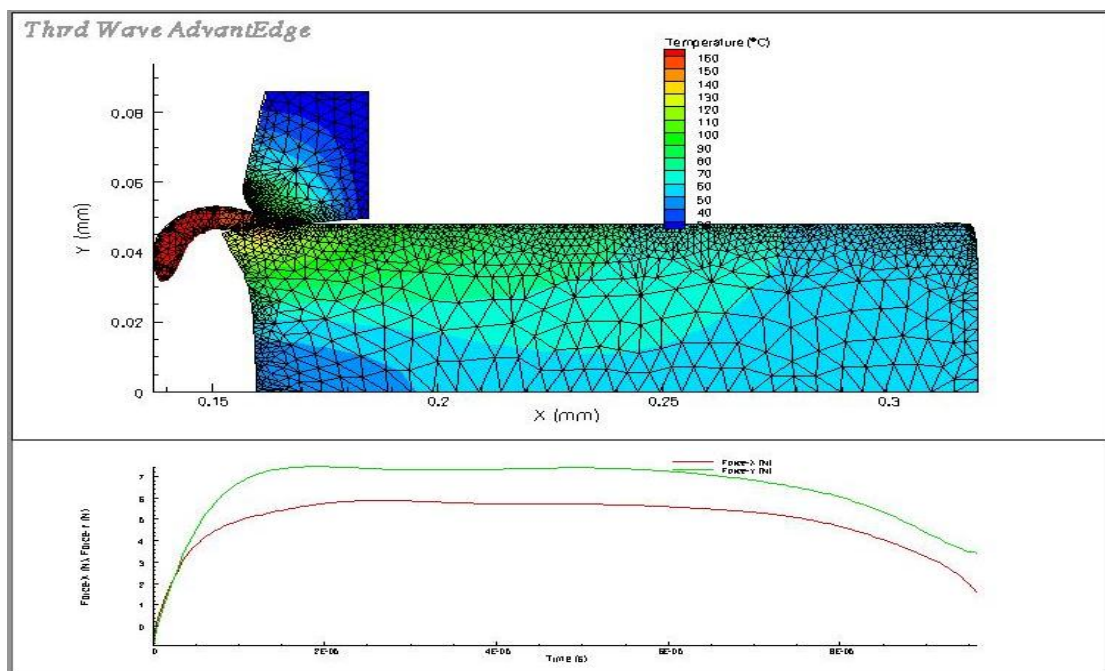
Τα παραπάνω δεδομένα έχουν απόλυτη συσχέτιση με τα δεδομένα του πειράματος. Στο κεφάλαιο 4 έχει γίνει εκτενής περιγραφή του τρόπου καταχώρησης των δεδομένων.

Αφού τελειώσει η καταχώρηση και τρέξουμε την προσομοίωση, όπως έχουμε προαναφέρει, λαμβάνουμε τα αποτελέσματα μέσω του Tecplot.

Το Tecplot μας εμφανίζει στο κάτω μέρος της οθόνης την εικόνα με την κατανομή των δυνάμεων συναρτήσει του χρόνου με αρκετό όμως «θόρυβο». Από το παράθυρο *Advantedge Quick Analysis* επιλέγουμε *Display Options* και μετά *Force Filter* οπότε το πρόγραμμα ομαλοποιεί τις δυνάμεις, όπως βλέπουμε στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 38-Εικόνα από Tecplot πριν την εφαρμογή φίλτρου

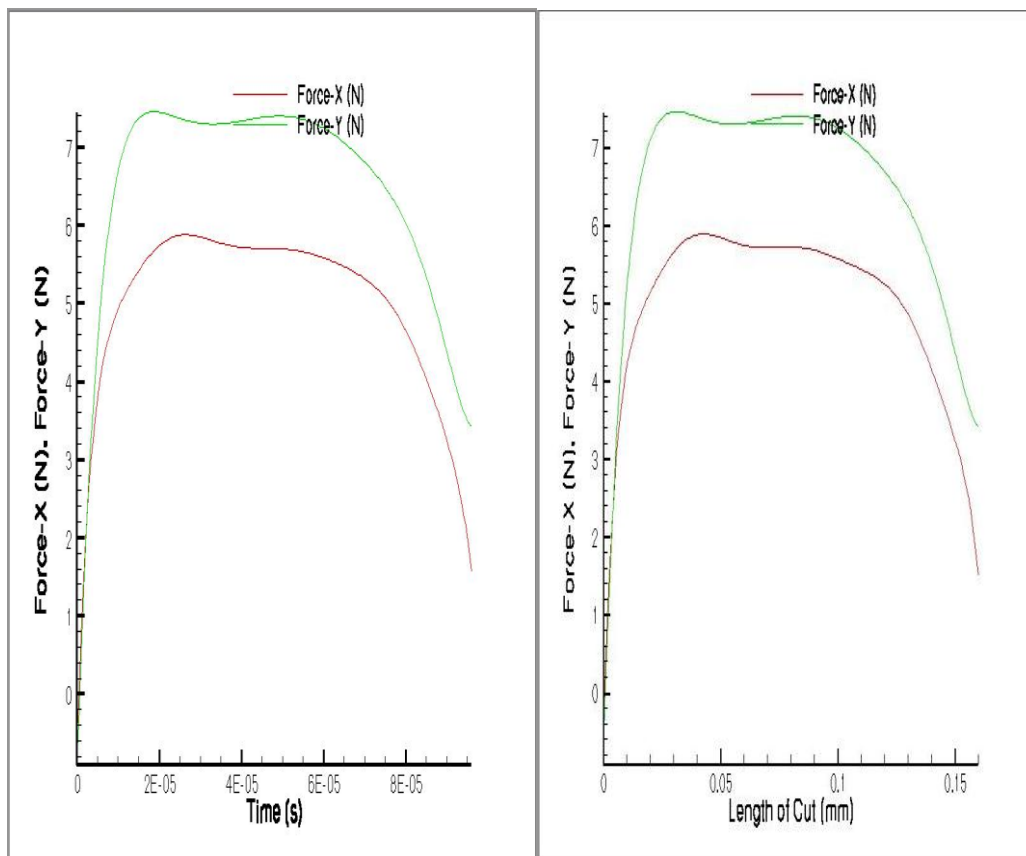


Εικόνα 39-Εικόνα από Tecplot μετά την εφαρμογή φίλτρου

Προκειμένου να βγάλουμε τις μέσες τιμές των δυνάμεων ακολουθούμε την εξής διαδικασία.

Για να έχουμε μεγαλύτερη ορατότητα του διαγράμματος $F=f(t)$ από το παράθυρο *Advantedge Quick Analysis* επιλέγουμε *Time History* και μετά *Time History*. Η εικόνα από δύο ζώνες μετατρέπεται μόνο σε μία μεγάλη εικόνα του γραφήματος $F=f(t)$.

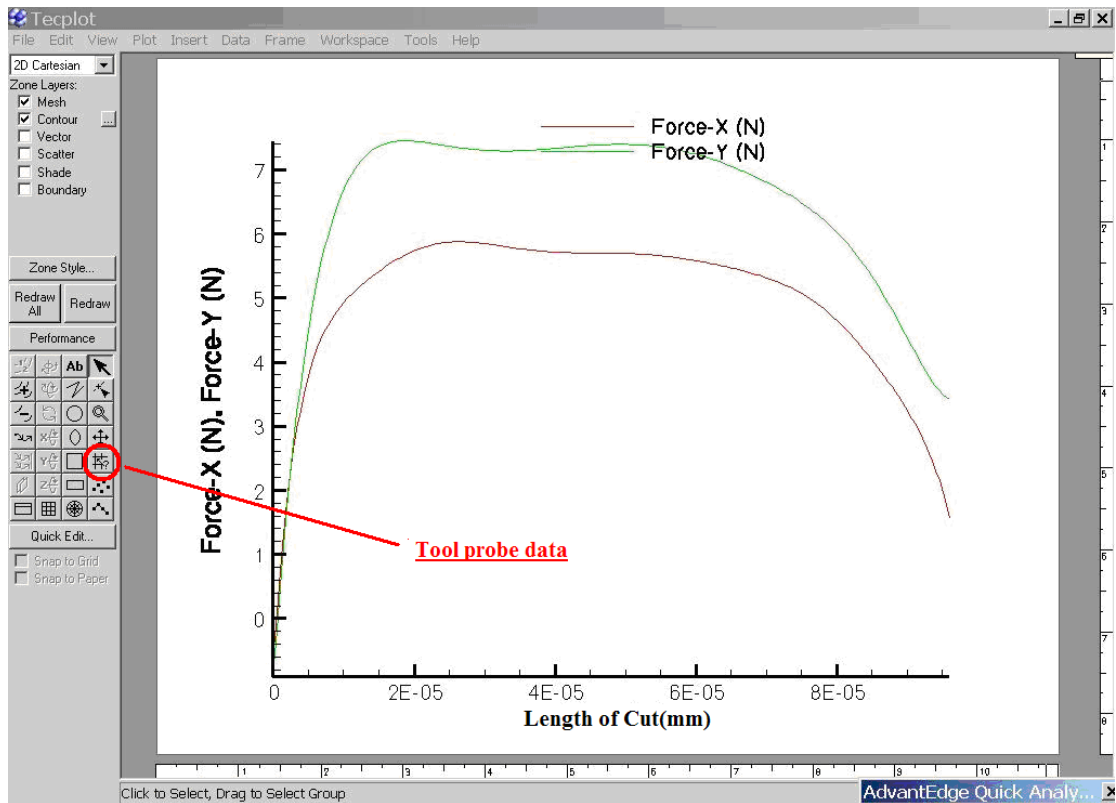
Κατόπιν μετατρέπουμε στο γράφημα το χρόνο σε μήκος. Από το παράθυρο Advantedge Quick Analysis επιλέγουμε Time History και μετά Time / Length of Cut. Αυτομάτως το γράφημά μας μετατρέπεται σε κατανομή των δυνάμεων συναρτήσει του μήκους του τεμαχίου, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.



Γράφημα 2-Γράφημα $F=f(l)$ -

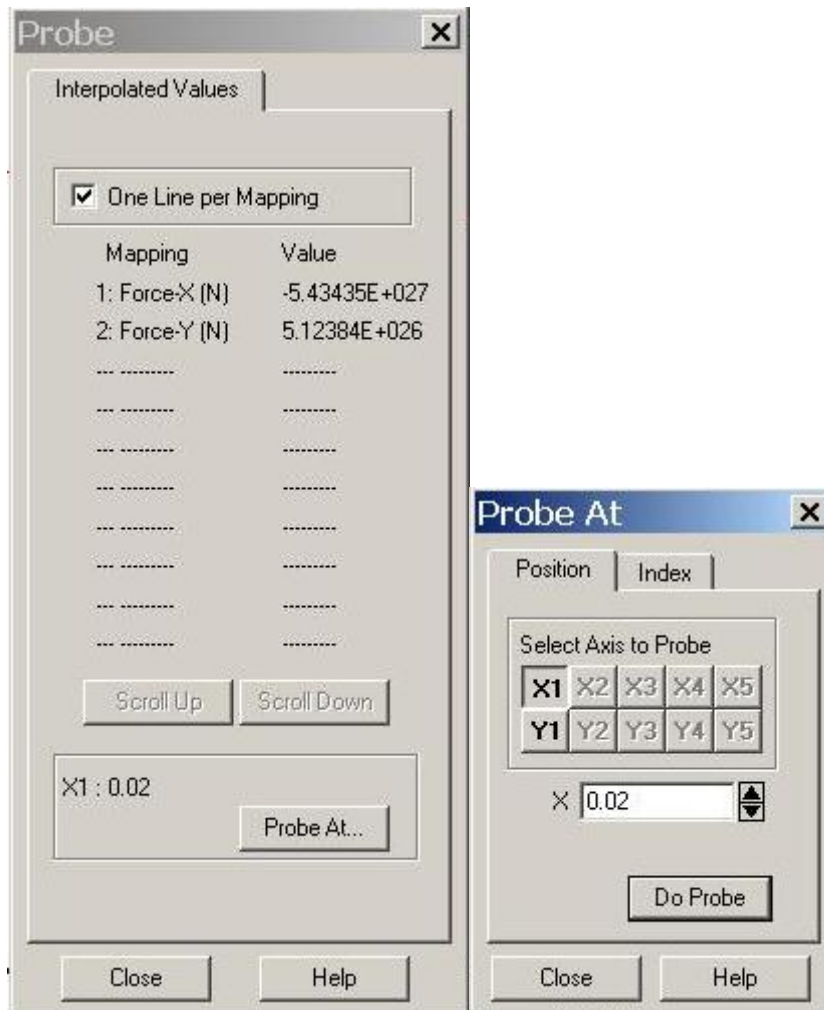
Γράφημα 3-Γράφημα $F=f(t)$

Το μήκος του τεμαχίου έχει οριστεί στα 0,16mm. Ανά 0,01mm λαμβάνουμε τιμές για κύρια δύναμη κοπής (F_x) και δύναμη άπωσης (F_y). Αυτό γίνεται πηγαίνοντας στην αριστερή κάθετη στήλη με τα εργαλεία του κεντρικού παραθύρου και επιλέγουμε Tool to probe data, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 40-Επιλογή 'Tool to probe data'

Πατώντας αριστερό κλικ πάνω στην εικόνα ανοίγει το παράθυρο Probe και πατώντας Probe at ανοίγει ένα παράθυρο όπου ζητείται από το πρόγραμμα να επιλέξουμε τιμές του άξονα X ώστε να μας δώσει τις αντίστοιχες τιμές των δυνάμεων, οι οποίες φαίνονται στο παράθυρο Probe(εικόνα 41). Μεταβάλλοντας το x κατά 0.01 mm , ξεκινώντας από το 0.01 mm και καταλήγοντας στα 0.16 mm λαμβάνουμε τις αντίστοιχες τιμές για Fx και Fy.



Εικόνα 41-Επιλογές 'Probe' και 'Probe at'

Κατόπιν βγάζουμε το μέσο όρο των δυνάμεων από 0,02mm έως 0,14mm, λαμβάνοντας έτσι τις μέσες τιμές. Αυτό γίνεται διότι, όπως βλέπουμε στην εικόνα 40 στα 0,02mm έχουμε το peak των φορτίσεων, ενώ από τα 0,14mm οι δυνάμεις δε λαμβάνονται υπόψη.

6.2.2 Αποτελέσματα

Η ίδια διαδικασία, από την καταχώρηση των δεδομένων μέχρι και την εξαγωγή των μέσων τιμών της κύριας δύναμης κοπής και της δύναμης άπωσης επαναλαμβάνεται για όλες τις τιμές του feed (f). Λαμβάνουμε λοιπόν τον πίνακα με τα ακόλουθα αποτελέσματα:

a(μm)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20										
Μήκος τεμαχίου(mm)	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy										
0	-0.74	-0.91	-1.072	-0.436	-1.053	-0.714	-0.593	-0.119	-0.187	0	0.021	-0.33	-0.03	-0.101	-0.23	-0.56	-0.44	-0.4	-0.776	-0.55
0.01	4.15	5.13	5.942	5.334	7.4	4.81	8.746	5.01	9.962	5.121	11.03	5.264	11.95	5.172	12.693	5.18	13.59	4.933	14.35	4.84
0.02	5.13	7.08	7.645	8.262	9.76	7.12	11.31	7.405	12.711	7.385	13.97	7.377	15.08	7.408	16.162	7.705	17.21	7.365	18.22	7.231
0.03	5.64	7.45	7.964	8.344	10.02	7.35	11.62	7.479	13.125	7.425	14.45	7.605	15.86	7.7	17.139	7.958	18.29	7.74	19.46	7.683
0.04	5.88	7.39	8.021	7.863	9.91	7	11.52	7.152	13.051	7.158	14.38	7.397	15.94	7.495	17.32	7.644	18.61	7.647	19.84	7.583
0.05	5.84	7.31	8.019	7.712	9.86	6.78	11.47	7.106	12.948	7.164	14.26	7.244	15.76	7.354	17.129	7.389	18.47	7.53	19.66	7.424
0.06	5.74	7.3	7.969	7.75	9.8	6.74	11.43	7.154	12.831	7.208	14.13	7.113	15.52	7.243	16.803	7.138	18.07	7.252	19.21	7.16
0.07	5.71	7.35	7.882	7.775	9.68	6.73	11.33	7.045	12.668	7.08	13.97	6.917	15.28	7.018	16.474	6.776	17.6	6.755	18.74	6.684
0.08	5.72	7.4	7.79	7.627	9.55	6.68	11.16	6.791	12.46	6.844	13.73	6.66	15	6.653	16.123	6.334	17.13	6.174	18.24	6.005
0.09	5.68	7.37	7.712	7.532	9.43	6.57	10.95	6.529	12.218	6.63	13.4	6.365	14.59	6.2	15.636	5.878	16.55	5.605	17.51	5.189
0.1	5.57	7.24	7.637	7.383	9.3	6.41	10.71	6.291	11.909	6.393	12.96	5.98	13.98	5.678	14.905	5.353	15.7	4.94	16.35	4.262
0.11	5.43	7.01	7.51	7.023	9.07	6.15	10.35	5.955	11.454	5.936	12.35	5.413	13.18	5.037	13.894	4.625	14.48	3.994	14.71	3.234
0.12	5.25	6.69	7.234	6.436	8.66	5.74	9.798	5.415	10.76	5.174	11.51	4.653	12.16	4.251	12.624	3.671	12.9	2.813	12.8	2.202
0.13	4.86	6.23	6.705	5.831	8.05	5.16	8.993	4.727	9.771	4.305	10.39	3.839	10.89	3.427	11.145	2.709	11.11	1.776	10.82	1.348
0.14	4.16	5.5	5.87	5.276	7.18	4.37	7.913	3.998	8.505	3.575	9.022	3.144	9.405	2.779	9.5828	2.039	9.314	1.21	8.945	0.731
0.15	3.25	4.39	4.74	4.304	5.89	3.37	6.535	3.129	7.054	2.858	7.544	2.621	7.968	2.452	8.1567	1.777	7.766	0.837	7.308	0.065
0.16	1.5	3.42	3.151	3.553	4.5	2.62	5.045	2.633	5.569	2.59	6.013	2.852	6.485	2.59	6.6238	2.594	6.46	0.891	6.315	-0.53
M.O. ΔΥΝΑΜΕΩΝ(N)	5.43	7.025	7.5352	7.2895	9.252	6.369	10.66	6.3882	11.878	6.329	12.96	6.1313	14.05	6.019	14.995	5.786	15.8	5.446	16.5	5.133

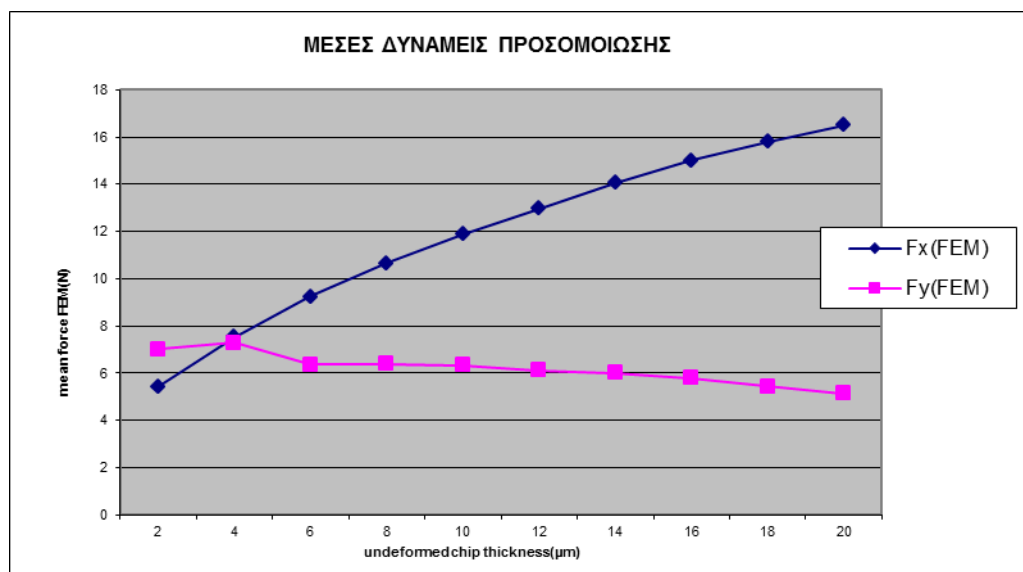
Πίνακας 4-Μέσες τιμές δυνάμεων προσομοίωσης

Συνοψίζοντας λοιπόν τις μέσες τιμές των δυνάμεων για όλα τα πάχη του αδιαμόρφωτου αποβλήτου λαμβάνουμε τον ακόλουθο πίνακα:

a (μm)	F _x (N)	F _y (N)
2	5.43	7.02
4	7.54	7.29
6	9.25	6.37
8	10.66	6.39
10	11.88	6.33
12	12.96	6.13
14	14.05	6.02
16	15	5.79
18	15.8	5.45
20	16.5	5.13

Πίνακας 5-Μέσες τιμές δυνάμεων

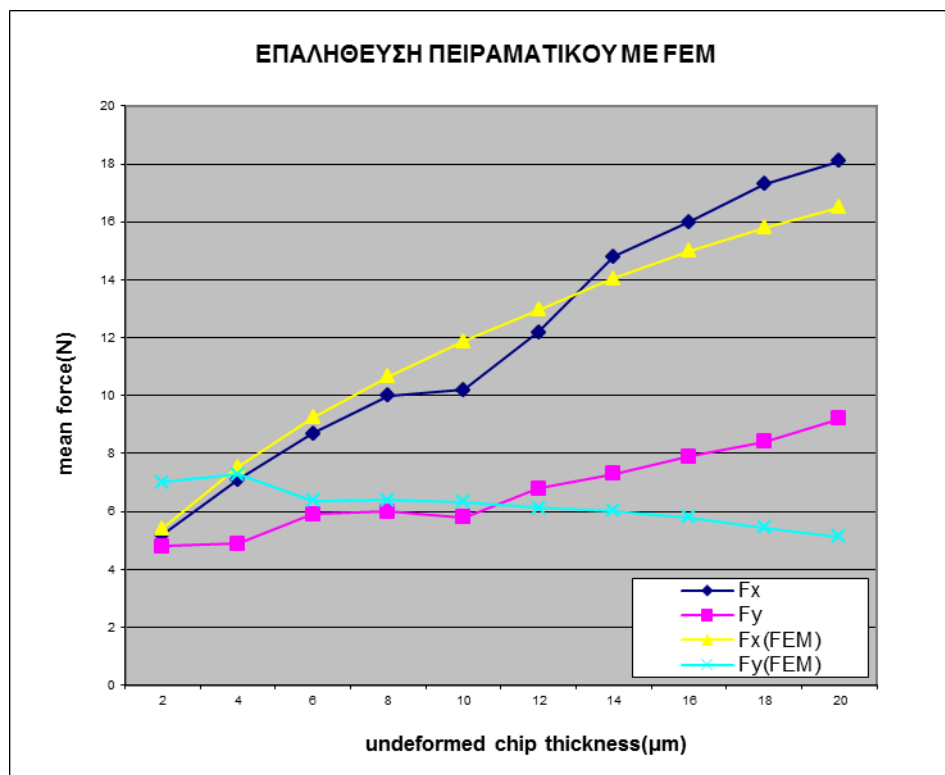
Από τις παραπάνω τιμές διαμορφώνεται το ακόλουθο γράφημα:



Γράφημα 4-Μέσες δυνάμεις προσομοίωσης

6.2.3 Σύγκριση πειραματικών τιμών με προσομοίωση

Συγκρίνοντας γραφικά τις πειραματικές τιμές με αυτές της προσομοίωσης έχουμε:



Γράφημα 5-Σύγκριση δυνάμεων πειράματος με προσομοίωσης

Παρατηρούμε ότι οι τιμές για τις κύριες δυνάμεις κοπής δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις. Αντιθέτως, οι δυνάμεις άπωσης εμφανίζουν μεγάλες αποκλίσεις από τα 2μm έως 5μm και από τα 13μm έως τα 20μm όπου η απόκλιση μεγιστοποιείται.

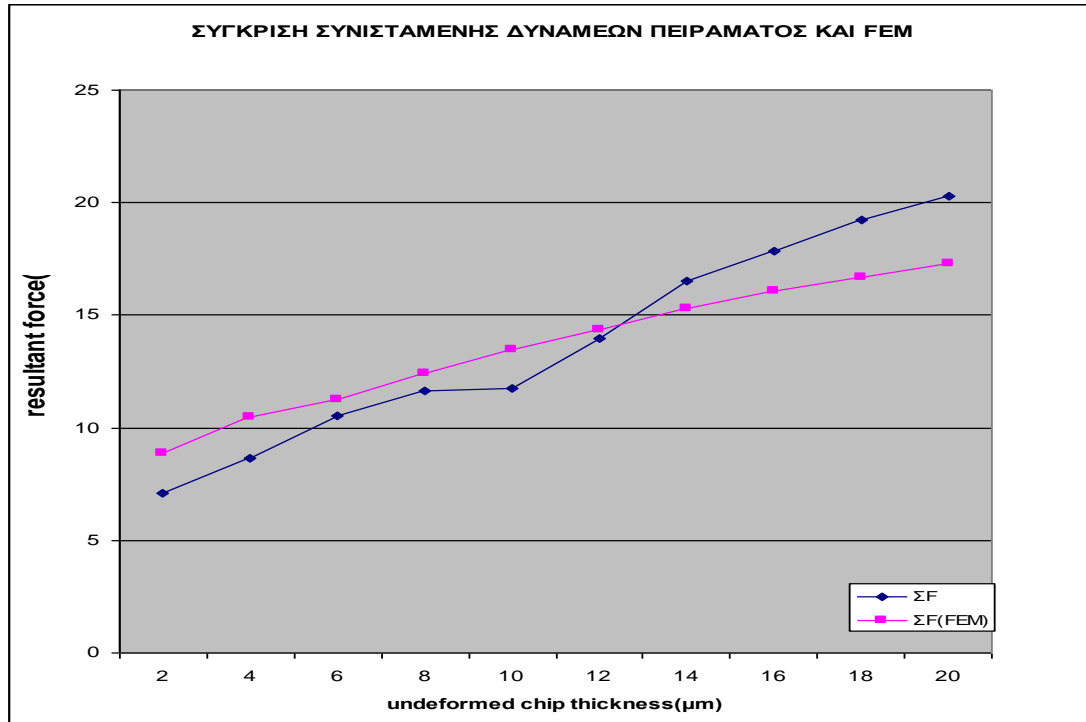
Από τον τύπο $\Sigma F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ βρίσκουμε τις συνισταμένες των δυνάμεων, τόσο για τις πειραματικές όσο και της προσομοίωσης. Ακολουθεί ο πίνακας των αποτελεσμάτων.

a (μm)	ΣF (N)	ΣF (FEM) (N)
2	7.08	8.87
4	8.63	10.49
6	10.51	11.23
8	11.66	12.43
10	11.73	13.46
12	13.97	14.34
14	16.5	15.29

16	17.84	16.08
18	19.23	16.71
20	20.3	17.28

Πίνακας 6-Συνισταμένες δυνάμεων πειράματος και προσομοίωσης

Κατόπιν ακολουθεί η γραφική παράσταση σύγκρισης των δύο συνισταμένων.



Γράφημα 6-Σύγκριση συνισταμένων δυνάμεων πειράματος με προσομοίωσης

Παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις έχουν πλέον μειωθεί αισθητά.

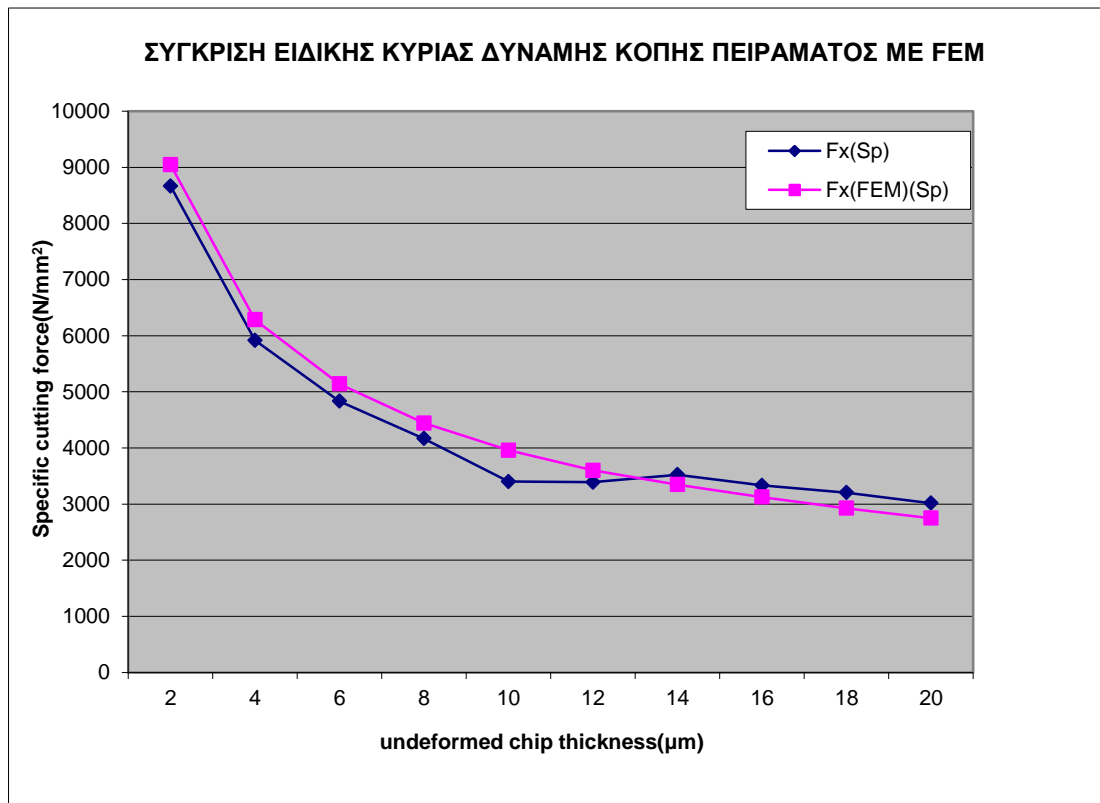
Χρησιμοποιώντας τον τύπο $F(Sp) = \frac{F}{a \cdot doc}$ μπορούμε να πάρουμε τις τιμές των ειδικών δυνάμεων, όπου F η εκάστοτε δύναμη, κύρια είτε άπωσης, a το πάχος του αδιαμόρφωτου αποβλήτου και doc το πλάτος της κοπής που στο πρόγραμμα είναι σταθερό με 0,3mm και ισούται με το βάθος κοπής του προγράμματος. Κάνοντας τις πράξεις λαμβάνουμε τον ακόλουθο πίνακα για όλες τις δυνάμεις, πειραματικές και προσομοίωσης

a (μm)	F _x (Sp)(N)	F _x (FEM)(Sp)(N)	F _y (Sp)(N)	F _y (FEM)(Sp)(N)
2	8666.7	9050	8000	11700
4	5916.7	6283.3	4083.3	6075
6	4833.3	5138.9	3277.8	3538.9
8	4166.7	4441.7	2500	2662.5
10	3400	3960	1933.3	2110
12	3388.9	3600	1888.9	1702.8
14	3523.8	3345.2	1738.1	1433.3

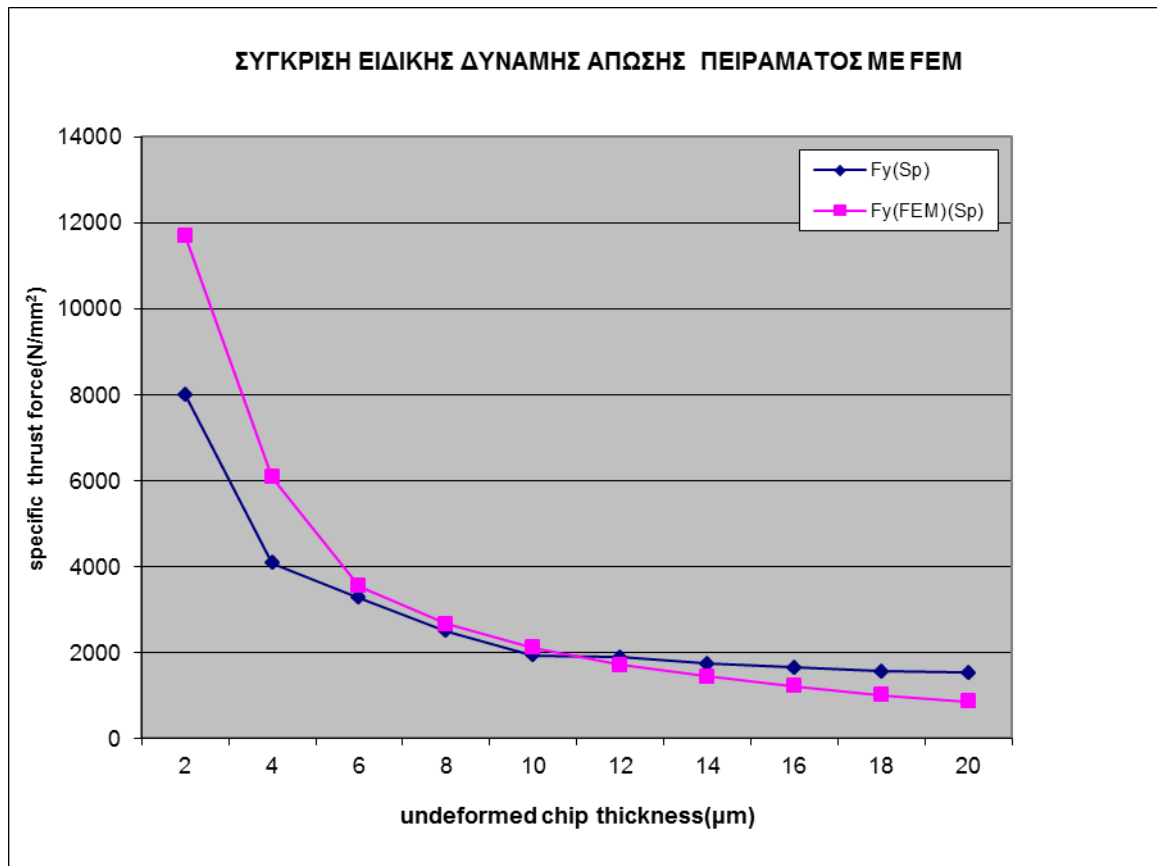
16	3333.3	3125	1645.8	1206.3
18	3203.7	2925.9	1555.6	1009.3
20	3016.7	2750	1533.3	855

Πίνακας 7-Ειδικές δυνάμεις πειράματος και προσομοίωσης

Ακολούθως παραθέτουμε τα γραφήματα σύγκρισης ειδικών κύριων δυνάμεων και ειδικών δυνάμεων άπωσης.



Γράφημα 7-Σύγκριση ειδικής κύριας δύναμης κοπής πειράματος με προσομοίωσης



Γράφημα 8-Σύγκριση ειδικής δύναμης άπωσης πειράματος με προσομοίωσης

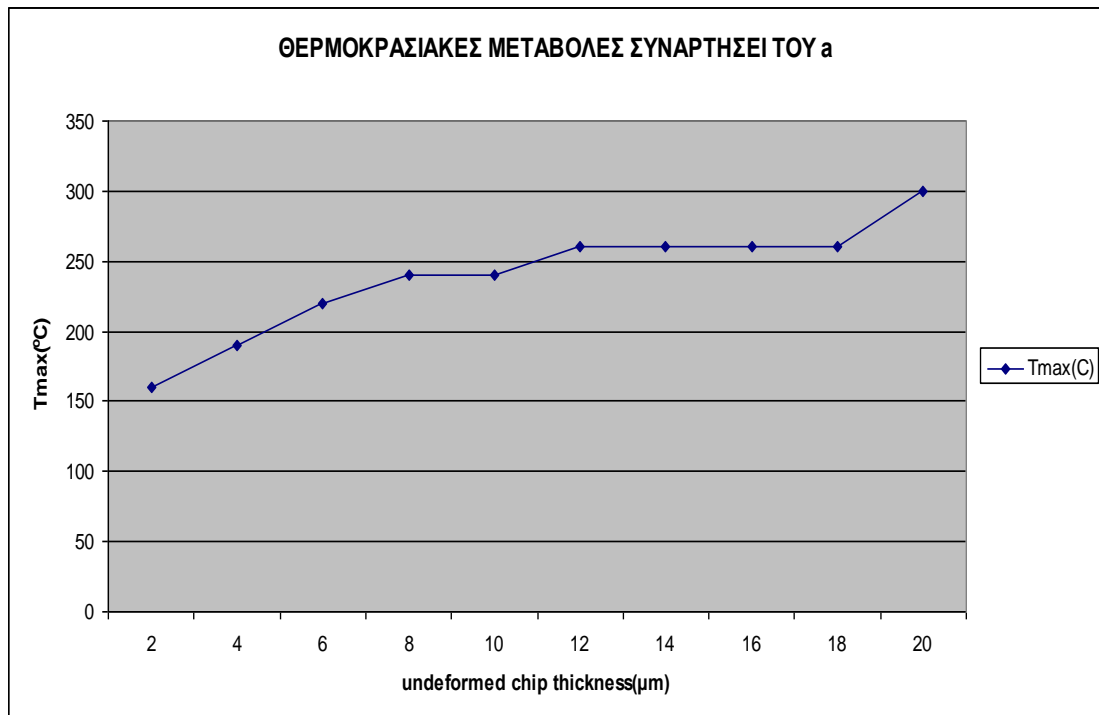
Παρατηρούμε ότι για τις ειδικές κύριες δυνάμεις κοπής δεν έχουμε σημαντικές αποκλίσεις. Όσον αφορά τις ειδικές δυνάμεις άπωσης εξακολουθούμε να έχουμε αποκλίσεις στα διαστήματα που αναφέραμε και για τις κανονικές δυνάμεις.

Λαμβάνοντας τις τιμές των μέγιστων θερμοκρασιών που εμφανίζονται κατά την κατεργασία του εκάστοτε πάχους αδιαμόρφωτου αποβλήτου από τις εικόνες του Tecplot παίρνουμε τον παρακάτω πίνακα.

a (μm)	Tmax
2	160
4	190
6	220
8	240
10	240
12	260
14	260
16	260
18	260
20	300

Πίνακας 8-Θερμοκρασιακές μεταβολές συναρτήσει a

Κατόπιν παραθέτουμε τη γραφική παράσταση.



Γράφημα 9-Θερμοκρασιακές μεταβολές συναρτήσει του α

Όπως παρατηρούμε, η θερμοκρασία εμφανίζει μια αυξητική τάση αυξανόμενου του βάθους κοπής.

6.2.4 Συμπεράσματα

Χρησιμοποιώντας τον τύπο $\frac{F_{\text{πειραματική}} - F_{\text{υπολογιστική}}}{F_{\text{max}}}$ όπου F_{max} η μέγιστη εκ των δυο, πειραματικής και υπολογιστικής, μπορούμε να υπολογίσουμε τις αποκλίσεις.

Οι κύριες δυνάμεις κοπής δεν εμφανίζουν μεγάλη απόκλιση. Η μεγαλύτερη είναι της τάξης του 8,8% που εμφανίζεται στα 20μm. Αντιθέτως, οι δυνάμεις άπωσης εμφανίζουν μεγάλες αποκλίσεις, φθάνοντας το 44% στα 20μm. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο απλοποιημένο μοντέλο μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα. Όσον αφορά τα μικρά βάθη κοπής, έχει παρατηρηθεί και σε προηγούμενες έρευνες ότι το πρόγραμμα παρουσιάζει μια δυσλειτουργία στη μοντελοποίηση σε πολύ μικρά βάθη κοπής.

Οι συνισταμένες δυνάμεις έχουν μικρές αποκλίσεις της τάξης του 15% και αυτό οφείλεται στο ότι κατά την κοπή, το μεγαλύτερο έργο το συντελεί η κύρια δύναμη κοπής, με τη δύναμη άπωσης να βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Επομένως οι αποκλίσεις που εμφανίζει η δεύτερη, μειώνονται κατά πολύ στις συνισταμένες.

Παρατηρείται ότι οι ειδικές κύριες δυνάμεις κοπής και άπωσης παρουσιάζουν μία μη γραμμική μείωση με την αύξηση του βάθους κοπής, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη της επίδρασης κλίμακας (size effect).

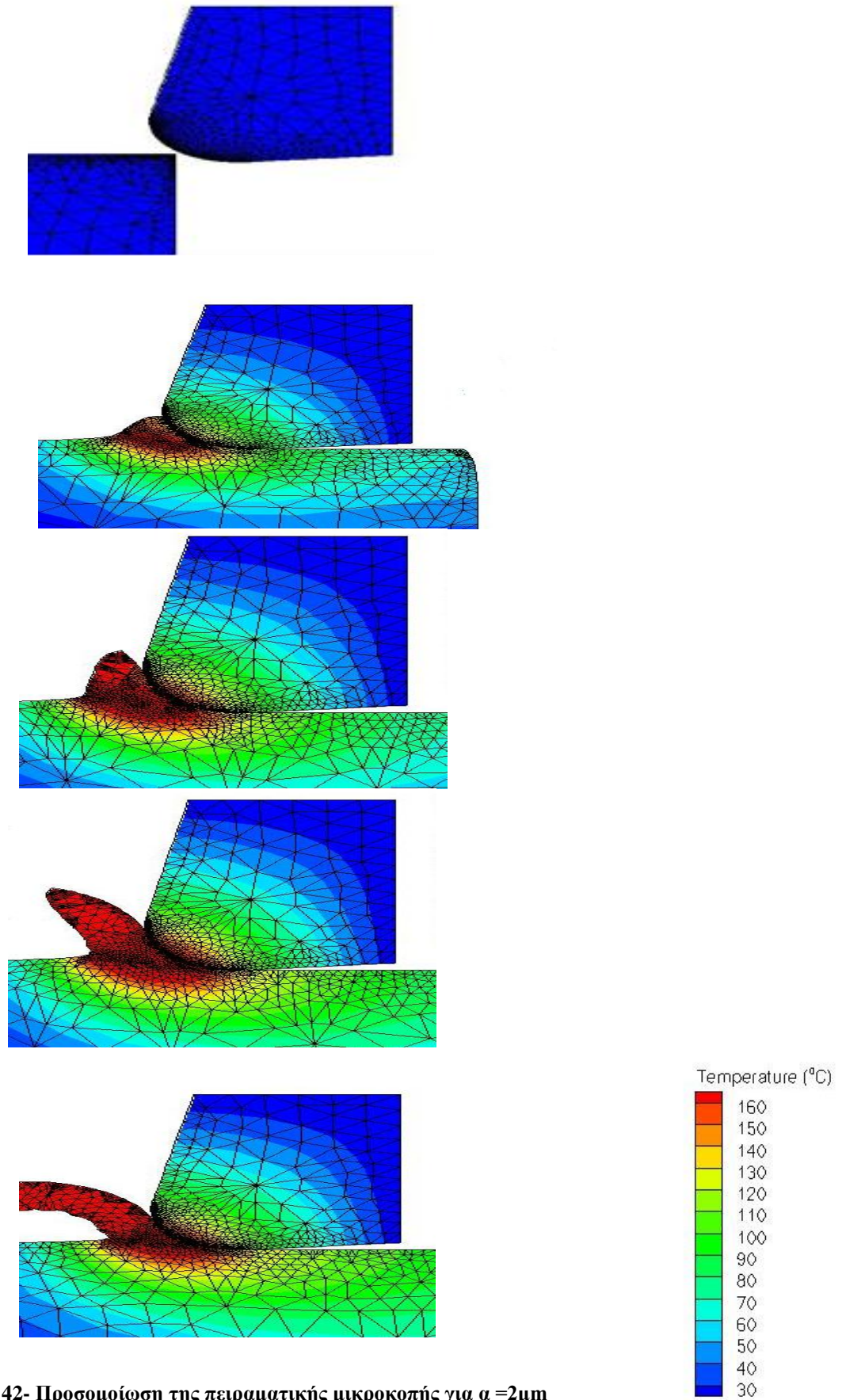
Παρατηρείται επίσης ότι η θερμοκρασία έχει αυξητική τάση συναρτήσει του πάχους.

6.2.5 Εικόνες προσομοίωσης από το Tecplot

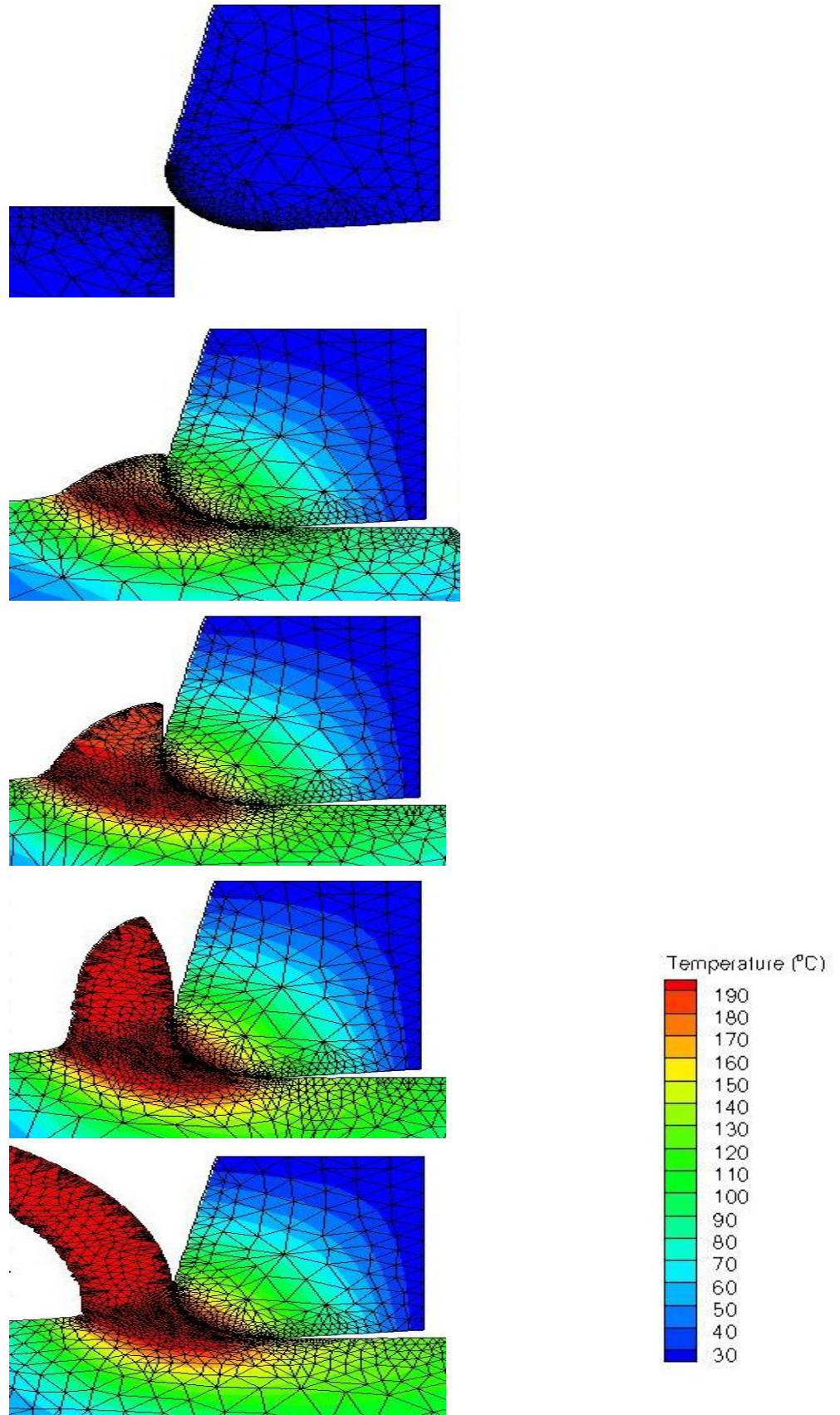
Ακολουθούν εικόνες που έχουν ληφθεί από το Tecplot προκειμένου να φανεί ρεαλιστικά η διαδικασία της μικροκοπής που ακολουθήθηκε στο πείραμα.

Για κάθε βάθος κοπής έχουν ληφθεί πέντε καρέ κατά την εξέλιξη της κατεργασίας. Τα καρέ έχουν ληφθεί τις ίδιες χρονικές στιγμές για όλα τα βάθη κοπής .

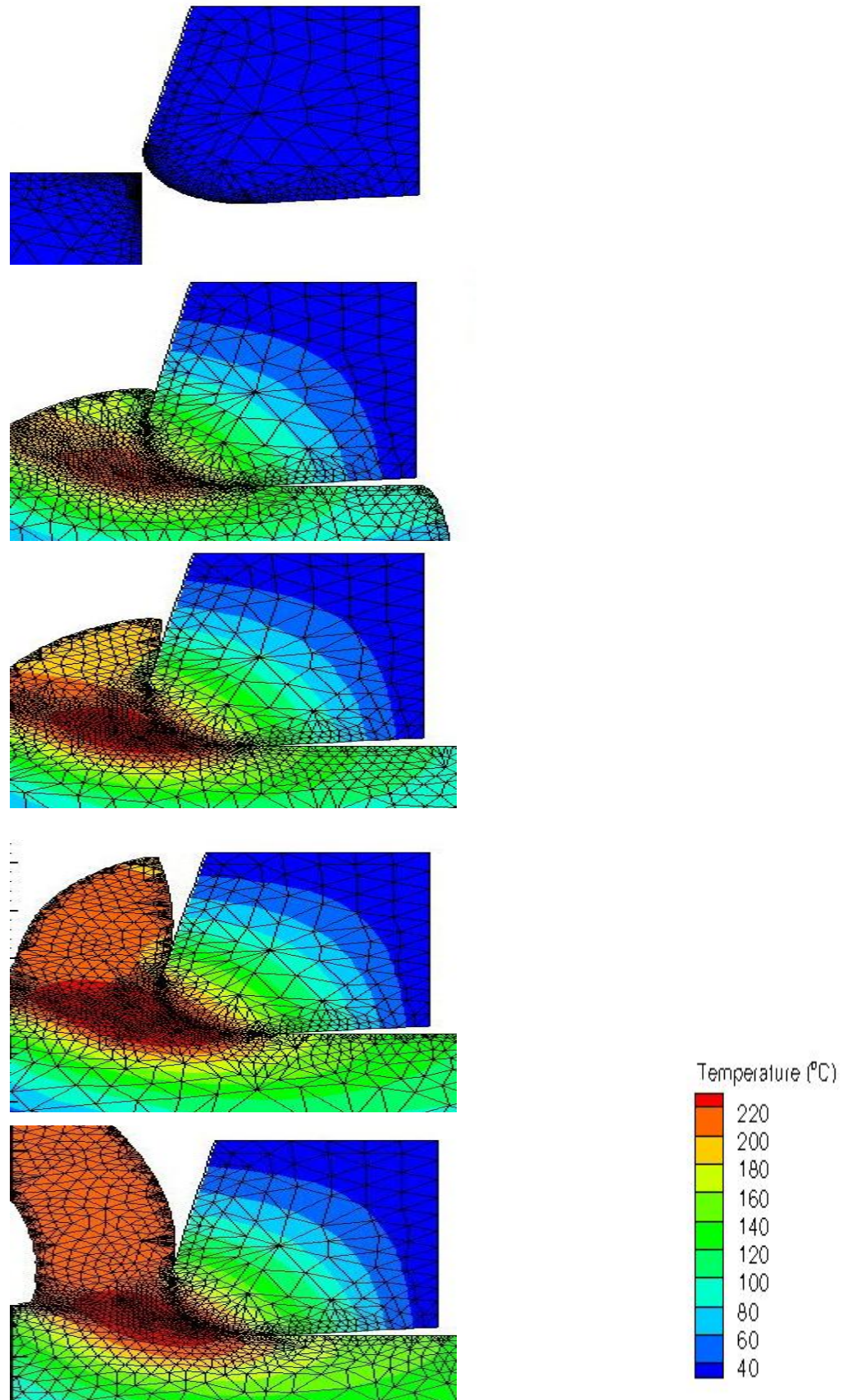
Τα χρώματα υποδηλώνουν μία συγκεκριμένη θερμοκρασία, ώστε να γίνεται κατανοητό πως κατανέμεται η θερμότητα, ενώ στο αριστερό κάτω μέρος κάθε σελίδας παρατίθεται και στήλη αντιστοιχίας χρωμάτων με θερμοκρασίες.



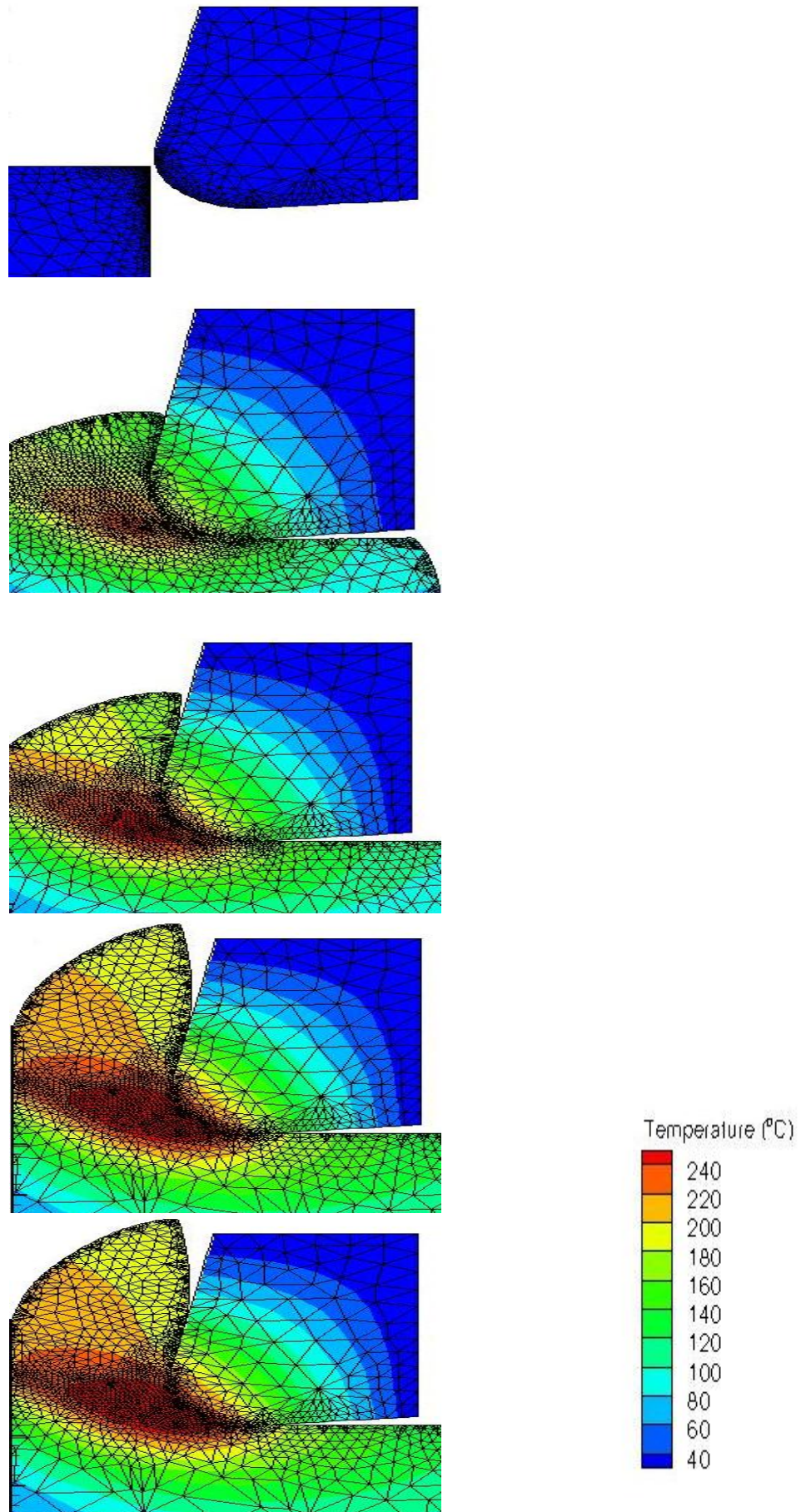
Εικόνα 42- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 2\mu\text{m}$



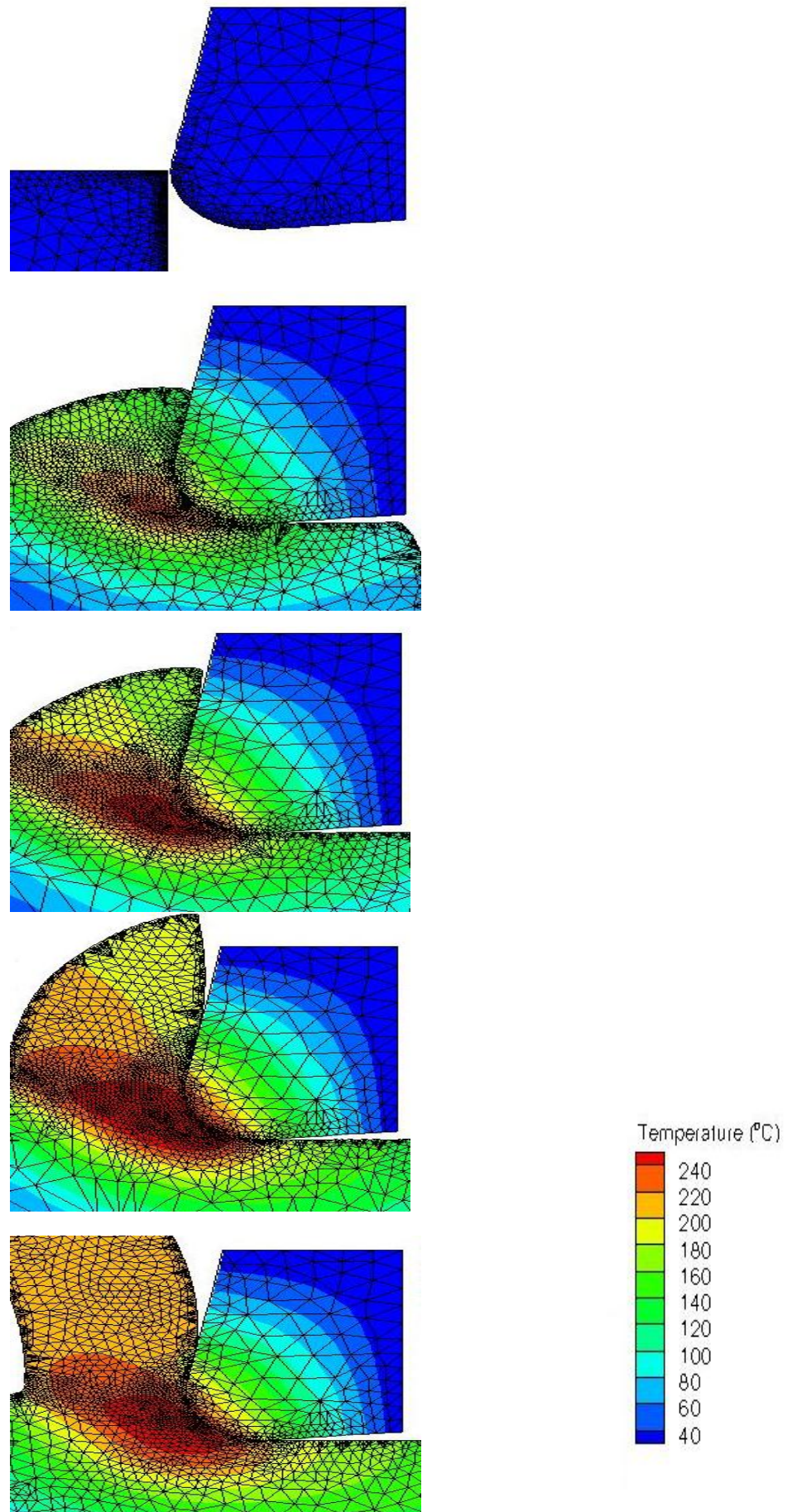
Εικόνα 43- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $a = 4\mu\text{m}$



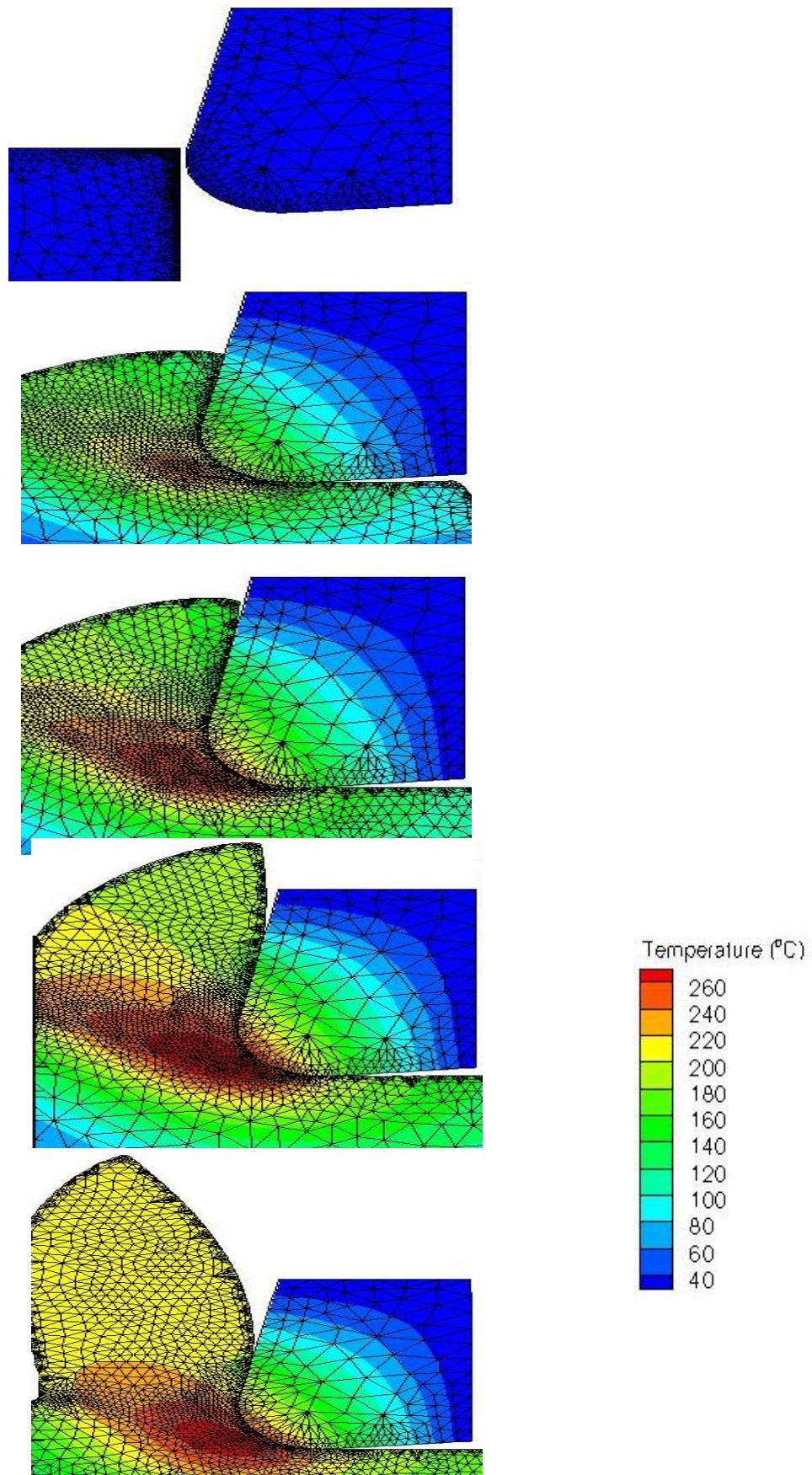
Εικόνα 44- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 6\mu\text{m}$



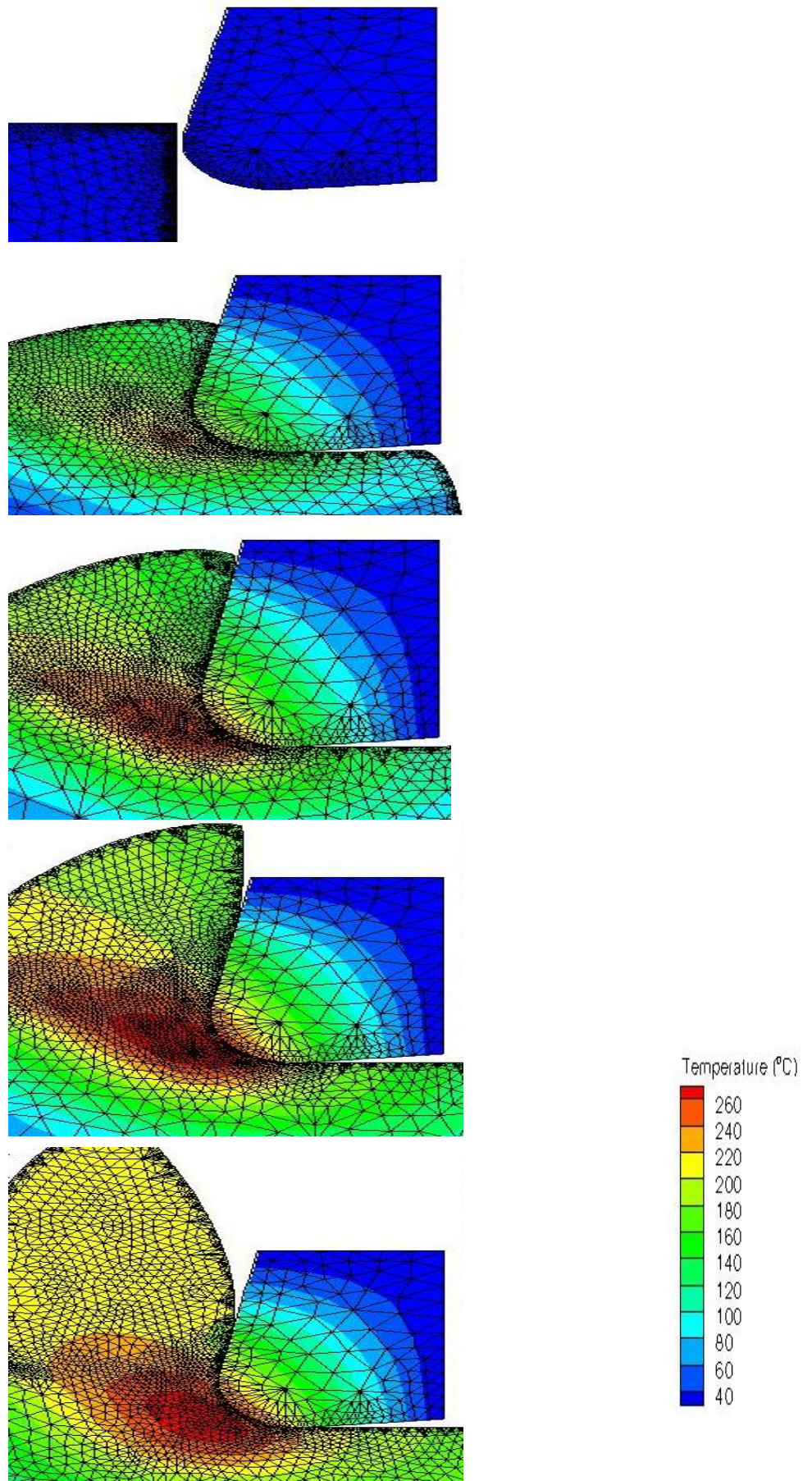
Εικόνα 45-Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 8\mu\text{m}$



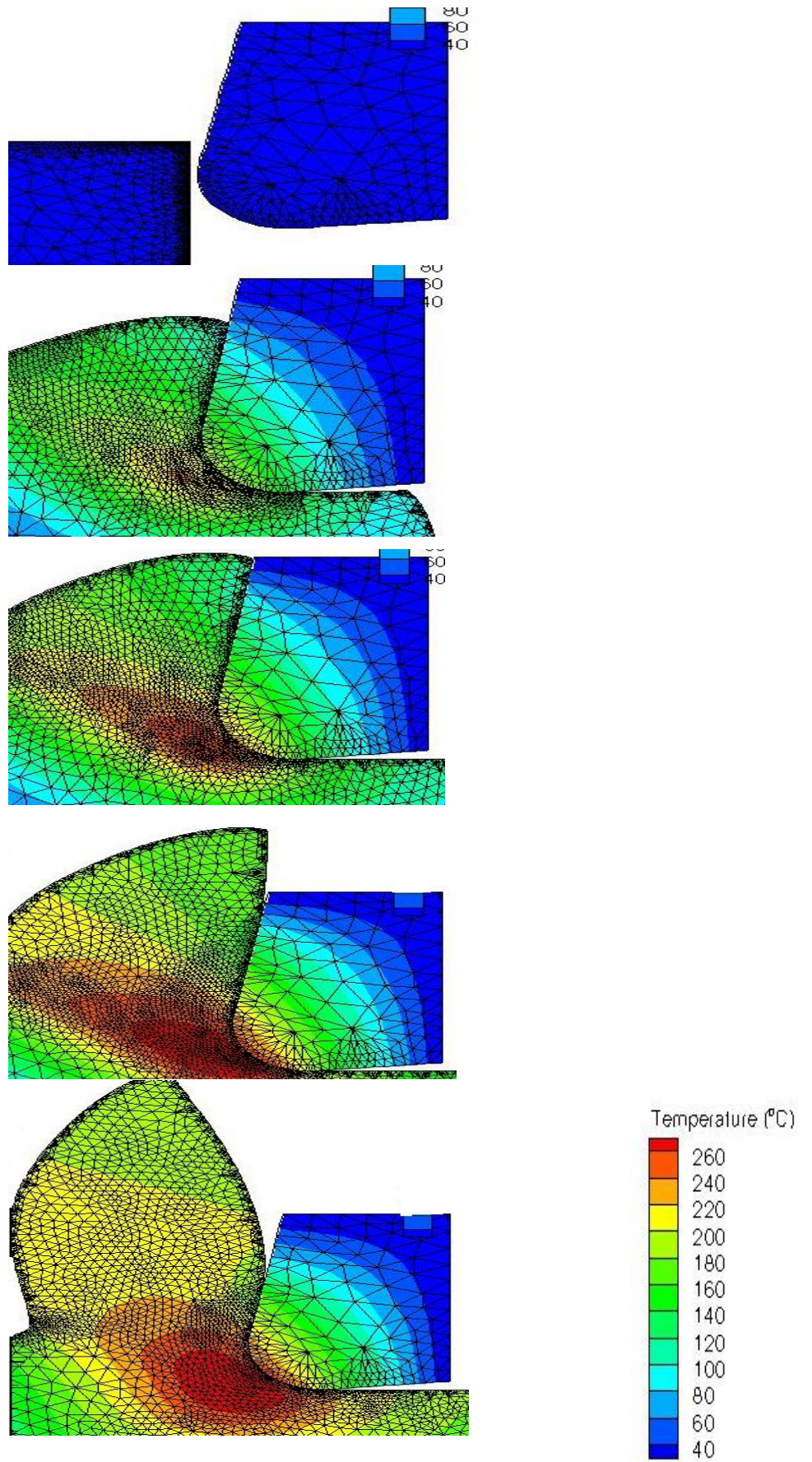
Εικόνα 46-Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 10\mu\text{m}$



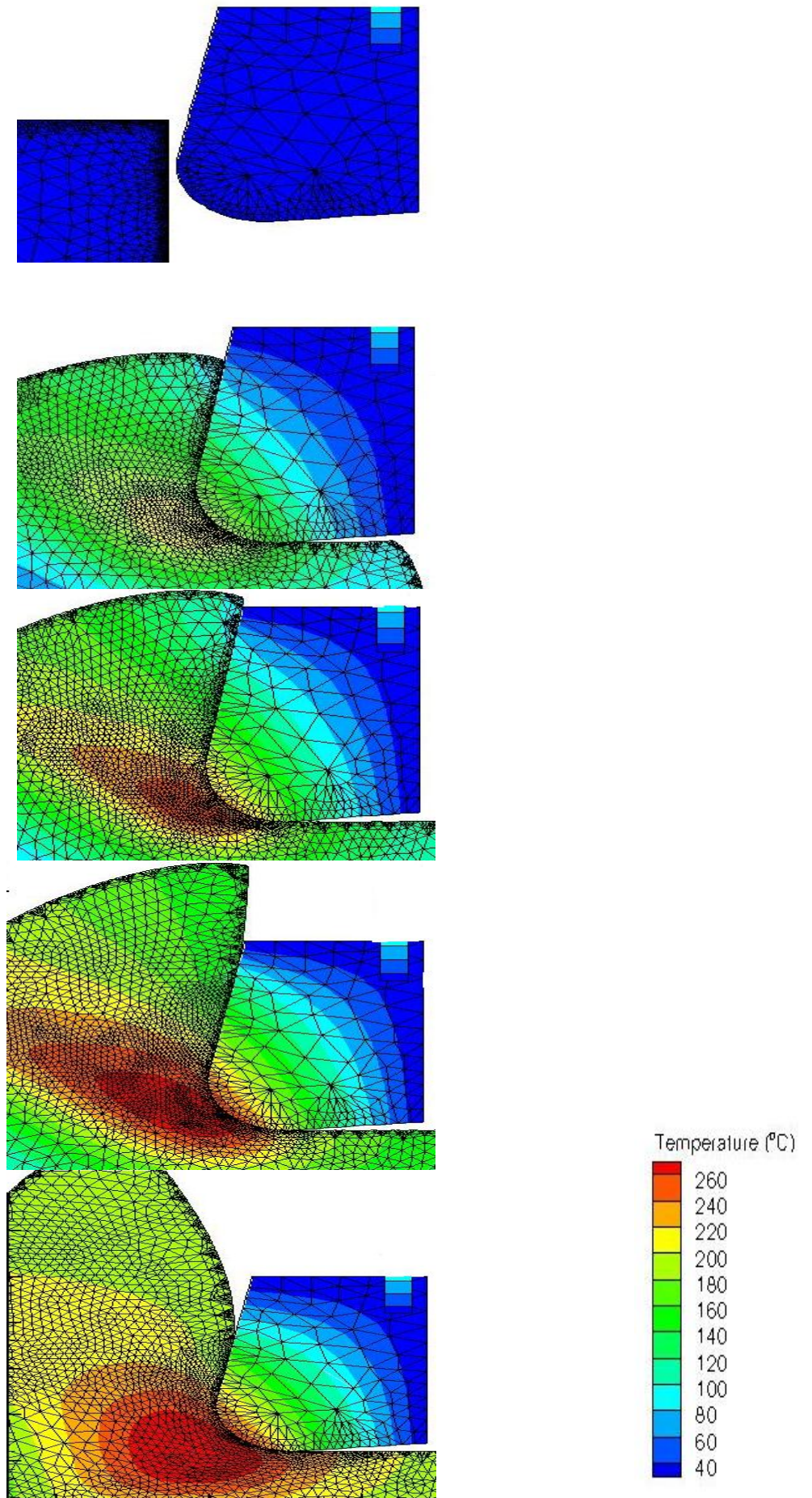
Εικόνα 47- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 12\mu\text{m}$



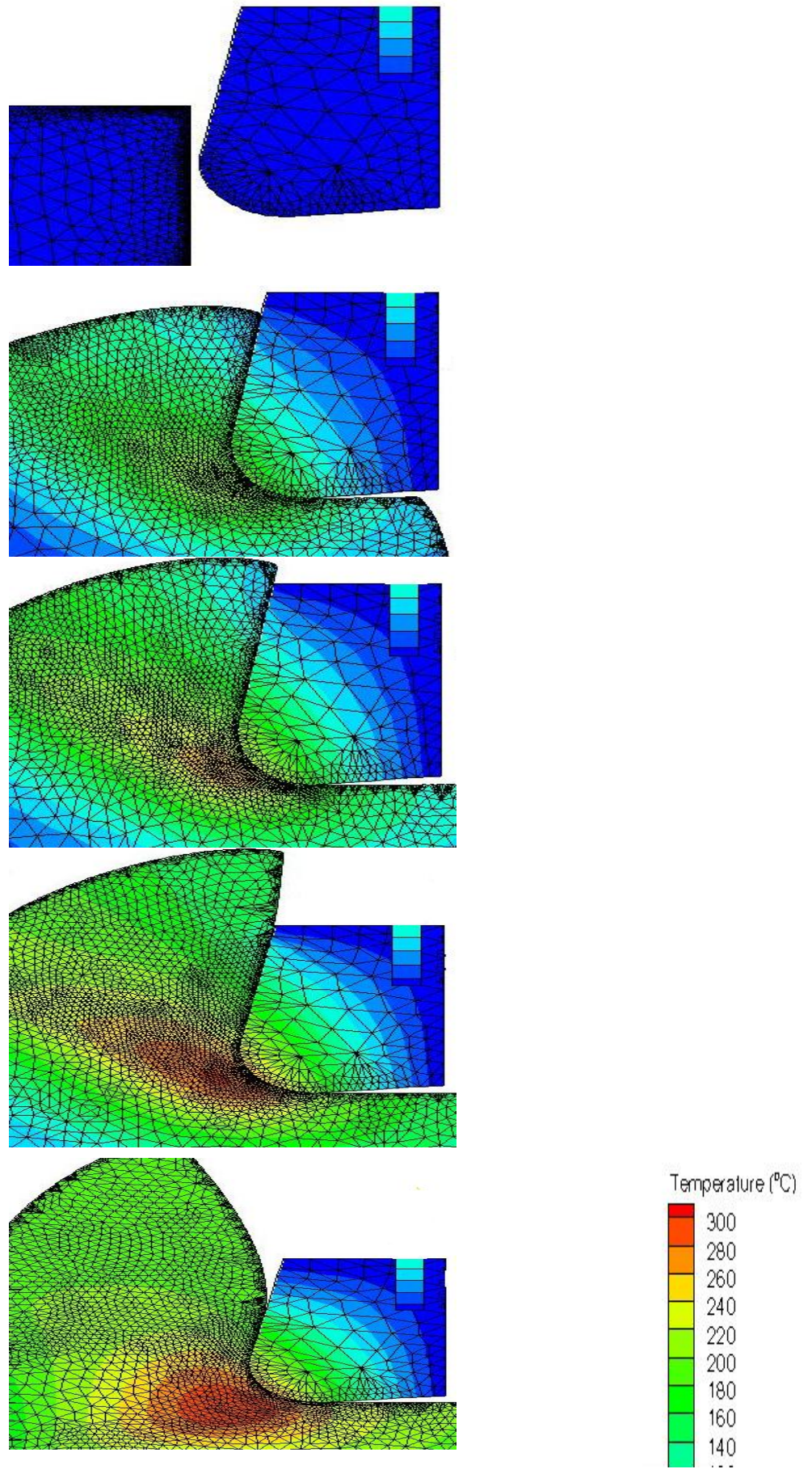
Εικόνα 48-Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $a = 14\mu\text{m}$



Εικόνα 49- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 16\mu\text{m}$



Εικόνα 50- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 18\mu\text{m}$



Εικόνα 51- Προσομοίωση της πειραματικής μικροκοπής για $\alpha = 20\mu\text{m}$

6.3 Σύγκριση δυνάμεων με κριτήριο την ταχύτητα κοπής

6.3.1 Γενικά

Στην παρούσα παράγραφο γίνεται προσομοίωση κοπής μεταβάλλοντας την ταχύτητα κοπής προκειμένου να εξαγάγουμε συμπεράσματα για τη συσχέτιση της ταχύτητας με τις δυνάμεις κοπής και τη θερμοκρασία. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την προσομοίωση για ταχύτητα κοπής $V=100\text{m/min}$ με αποτελέσματα από δοκιμές για $V=50\text{m/min}$ και $V=200\text{m/min}$.

6.3.2 Καταχώρηση δεδομένων

Η καταχώρηση δεδομένων έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η μόνη διαφοροποίηση σε σχέση με τις προηγούμενες δοκιμές είναι η ταχύτητα κοπής. Επομένως, χρησιμοποιούνται τα ίδια αρχεία του προγράμματος με τις προηγούμενες δοκιμές, αλλάζοντας μόνο το $V=100\text{m/min}$, αρχικά σε $V=50\text{m/min}$ και κατόπιν σε $V=200\text{m/min}$.

6.3.3 Αποτελέσματα

Έχοντας αναλύσει τον τρόπο λήψης των αποτελεσμάτων, παραθέτουμε παρακάτω τους πίνακες αποτελεσμάτων των δοκιμών για $V=50\text{m/min}$ και $V=200\text{m/min}$.

$\alpha(\mu\text{m})$	2		4		6		8		10		12		14		16		18		20		
	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	
Μήκος Τεμαχίου(mm)																					
0	0,33	1,197	-0,883	-0,766	-0,952	-0,525	-0,564	-0,311	-0,174	-0,064	-0,024	0,076	-0,07	-0,195	-0,222	-0,59	-0,524	-0,306	-0,752	-0,44	
0,01	4,037	5,024	5,849	5,292	7,2648	4,729	8,596	4,896	9,725	5,0403	10,822	5,094	11,704	5,108	12,42	4,966	13,299	4,729	14,019	4,591	
0,02	5,118	6,943	7,741	7,772	9,745	7,103	11,2608	7,0837	12,575	7,357	13,834	7,261	14,843	7,222	15,945	7,291	16,948	7,149	17,843	6,9449	
0,03	5,58	7,367	8,092	7,811	10,123	7,246	11,7203	7,2396	13,257	7,559	14,52	7,311	15,77	7,425	17,1	7,537	18,258	7,517	19,23	7,379	
0,04	5,8	7,409	8,1536	7,451	10,117	6,975	11,775	7,113	13,351	7,315	14,633	7,113	16,031	7,2442	17,427	7,295	18,785	7,428	19,835	7,2412	
0,05	5,829	7,423	8,181	7,458	10,151	6,934	11,825	7,148	13,305	7,227	14,625	7,157	15,99	7,177	17,331	7,144	18,791	7,37	19,875	7,073	
0,06	5,798	7,439	8,159	8,159	10,16	6,97	11,806	7,126	13,224	7,1865	14,565	7,156	15,83	7,122	17,081	7,027	18,4928	7,174	19,568	6,856	
0,07	5,8038	7,41133	8,0987	7,655	10,069	6,8715	11,671	6,927	13,113	7,025	14,428	6,914	15,642	6,924	16,827	6,797	18,081	6,698	19,134	6,452	
0,08	5,831	7,329	8,047	7,433	9,913	6,662	11,475	6,6839	12,938	6,764	14,174	6,553	15,394	6,566	16,533	6,423	17,585	6,04	18,594	5,815	
0,09	5,804	7,222	8,0093	7,158	9,754	6,483	11,2767	6,5282	12,6603	6,495	13,783	6,257	14,986	6,0896	16,05	5,923	16,895	5,351	17,778	4,978	
0,1	5,6785	7,11	7,916	6,993	9,584	6,363	11,041	6,3731	12,233	6,203	13,256	5,991	14,343	5,4832	15,263	5,268	15,895	4,6306	16,511	3,994	
0,11	5,474	6,968	7,683	6,881	9,317	6,161	10,654	5,994	11,689	5,754	12,581	5,5222	13,455	4,708	14,154	4,412	14,542	3,7443	14,793	2,946	
0,12	5,2187	6,707	7,287	6,582	8,863	5,721	10,02	5,321	10,934	5,072	11,708	4,722	12,34	3,834	12,777	3,43	12,876	2,655	12,821	1,985	
0,13	4,854	6,2145	6,757	5,93	8,1855	5,057	9,134	4,5757	9,91	4,278	10,565	3,806	11,004	3,094	11,208	2,574	11,0069	1,599	10,842	1,269	
0,14	4,2437	5,415	6,0155	5,047	7,247	4,3	8,018	3,951	8,606	3,582	9,166	3,14	9,5074	2,69577	9,583	2,08	9,1846	0,919	8,988	0,745	
0,15	3,303	4,307	4,811	4,208	5,9348	3,481	6,619	3,202	7,152	2,978	7,685	2,746	8,058	2,35	8,157	1,914	7,781	0,656	7,317	0,083	
0,16	2,055	2,884	3,4085	3,116	4,46	2,9738	5,119	2,98	5,702	2,686	6,143	2,894	6,682	2,865	6,795	2,47	6,4322	1,0387	6,188	-0,128	
M.O. ΔΥΝΑΜΕΩΝ(N)	5,4640538	6,99676	7,7031	7,1023	9,47912	6,37281	10,8982	6,31263	12,1399	6,29365	13,218	6,06948	14,2412	5,81421	15,175	5,631	15,949254	5,2519	16,60092	4,898315	

Πίνακας 9-Μέσες τιμές δυνάμεων κοπής για V= 50 m/min

a(μm)	2		4		6		8		10		12		14		16		18		20		
	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	
Μήκος Τεμαχίου(mm)																					
0	-0,537	-0,967	-1,0425	-0,671	-1,025	-0,573	-0,644	-0,268	-0,207	-0,128	0,022	-0,076	-0,004	-0,126	-0,228	-0,432	-0,557	-0,351	-0,897	-0,422	
0,01	4,168	5,263	5,987	5,605	7,541	5,068	8,857	5,27	10,148	5,39	11,249	5,353	12,188	5,14	12,946	4,926	13,843	5,188	14,656	5,007	
0,02	5,176	7,126	7,635	8,112	9,738	7,365	11,204	7,471	12,731	7,772	14,091	7,647	15,249	7,556	16,301	7,573	17,36	7,727	18,435	7,586	
0,03	5,471	7,413	7,814	7,825	9,683	7,25	11,313	7,451	12,875	7,767	14,335	7,741	15,752	7,97	17,065	8,16	18,3	8,048	19,542	7,927	
0,04	5,565	7,349	7,716	7,344	9,407	6,886	11,07	7,19	12,583	7,393	14,037	7,422	15,571	7,772	17,01	8,047	18,363	7,823	19,669	7,731	
0,05	5,538	7,289	7,621	7,395	9,328	6,892	10,897	7,195	12,35	7,317	13,746	7,366	15,21	7,637	16,624	7,839	17,972	7,661	19,221	7,587	
0,06	5,483	7,26	7,565	7,565	9,279	6,983	10,754	7,201	12,171	7,34	13,512	7,431	14,846	7,583	16,172	7,603	17,458	7,483	18,612	7,401	
0,07	5,462	7,2433	7,531	7,489	9,145	6,915	10,585	7,035	11,98	7,222	13,287	7,339	14,534	7,41	15,777	7,293	17,01	7,141	18,115	7,033	
0,08	5,458	7,231	7,486	7,2521	8,983	6,756	10,4097	6,81	11,767	6,988	13,034	7,025	14,239	7,015	15,403	6,907	16,587	6,6435	17,676	6,477	
0,09	5,414	7,207	7,404	7,115	8,8766	6,655	10,253	6,668	11,539	6,758	12,733	6,601	13,878	6,4595	14,941	6,435	16,03	6,044	17,038	5,74	
0,1	5,305	7,127	7,27	7,133	8,788	6,569	10,082	6,53	11,272	6,508	12,352	6,156	13,382	5,853	14,303	5,801	15,218	5,305	15,983	4,756	
0,11	5,149	6,952	7,084	7,0846	8,596	6,288	9,808	6,168	10,892	6,065	11,8265	5,6407	12,703	5,206	13,445	4,928	14,104	4,331	14,47	3,514	
0,12	4,954	6,669	6,8222	6,743	8,221	5,71	9,3439	5,499	10,301	5,322	11,061	4,936	11,787	4,416	12,319	3,881	12,664	3,157	12,592	2,248	
0,13	4,651	6,249	6,41	6,131	7,681	5	8,638	4,724	9,42	4,419	9,987	4,037	10,573	3,439	10,885	2,908	10,909	2,058	10,507	1,3506	
0,14	4,101	5,553	5,734	5,354	6,92	4,3	7,637	3,989	8,219	3,578	8,634	3,1431	9,082	2,529	9,275	2,244	9,097	1,337	8,499	0,846	
0,15	3,193	4,375	4,688	4,207	5,6628	3,335	6,27	3,01	6,745	2,786	7,177	2,519	7,555	2,18	7,887	1,871	7,768	0,944	7,029	0,0981	
0,16	1,762	3,258	3,198	3,308	4,342	2,7644	4,855	2,6194	5,278	2,611	5,738	2,327	6,201	2,115	6,444	2,223	6,21	0,978	5,723	0,072	
M.O. ΔΥΝΑΜΕΩΝ(N)	5,2098	6,9745	7,2379	7,1187	8,81889	6,4284	10,1534	6,456108	11,39231	6,496077	12,5104	6,34498	13,6005	6,2189	14,578	6,12454	15,4671	5,75065	16,1815	5,39974	

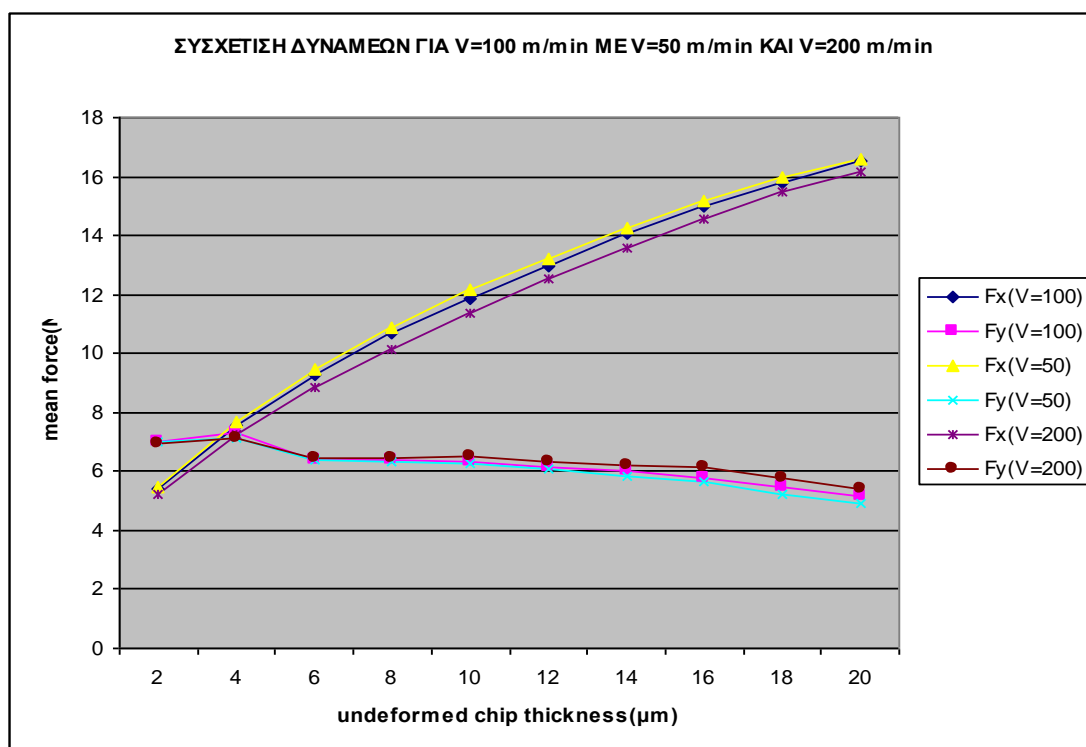
Πίνακας 10-Μέσες τιμές δυνάμεων για V=200m/min

Κατόπιν ακολουθεί ένας συγκεντρωμένος πίνακας με τις κύριες δυνάμεις κοπής και άπωσης για όλες τις ταχύτητες

$\alpha(\mu)$	$F_x(100)(N)$	$F_x(50)(N)$	$F_x(200)(N)$	$F_y(100)(N)$	$F_y(50)(N)$	$F_y(200)(N)$
2	5.43	5.46	5.21	7.02	7	6.97
4	7.54	7.7	7.24	7.29	7.1	7.12
6	9.25	9.48	8.82	6.37	6.37	6.43
8	10.66	10.9	10.15	6.39	6.31	6.46
10	11.88	12.14	11.39	6.33	6.29	6.5
12	12.96	13.22	12.51	6.13	6.07	6.34
14	14.05	14.24	13.6	6.02	5.81	6.22
16	15	15.18	14.58	5.79	5.63	6.12
18	15.8	15.95	15.47	5.45	5.25	5.75
20	16.5	16.6	16.18	5.13	4.9	5.4

Πίνακας 11-Μέσες τιμές δυνάμεων για όλες τις ταχύτητες κοπής

Από τις παραπάνω τιμές λαμβάνουμε το ακόλουθο γράφημα:



Γράφημα 10-Σύγκριση δυνάμεων για όλες τις ταχύτητες κοπής

6.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων για όλες τις ταχύτητες κοπής

Από το γράφημα παρατηρούμε ότι τόσο οι κύριες δυνάμεις κοπής όσο και οι δυνάμεις άπωσης δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις. Για τις κύριες δυνάμεις

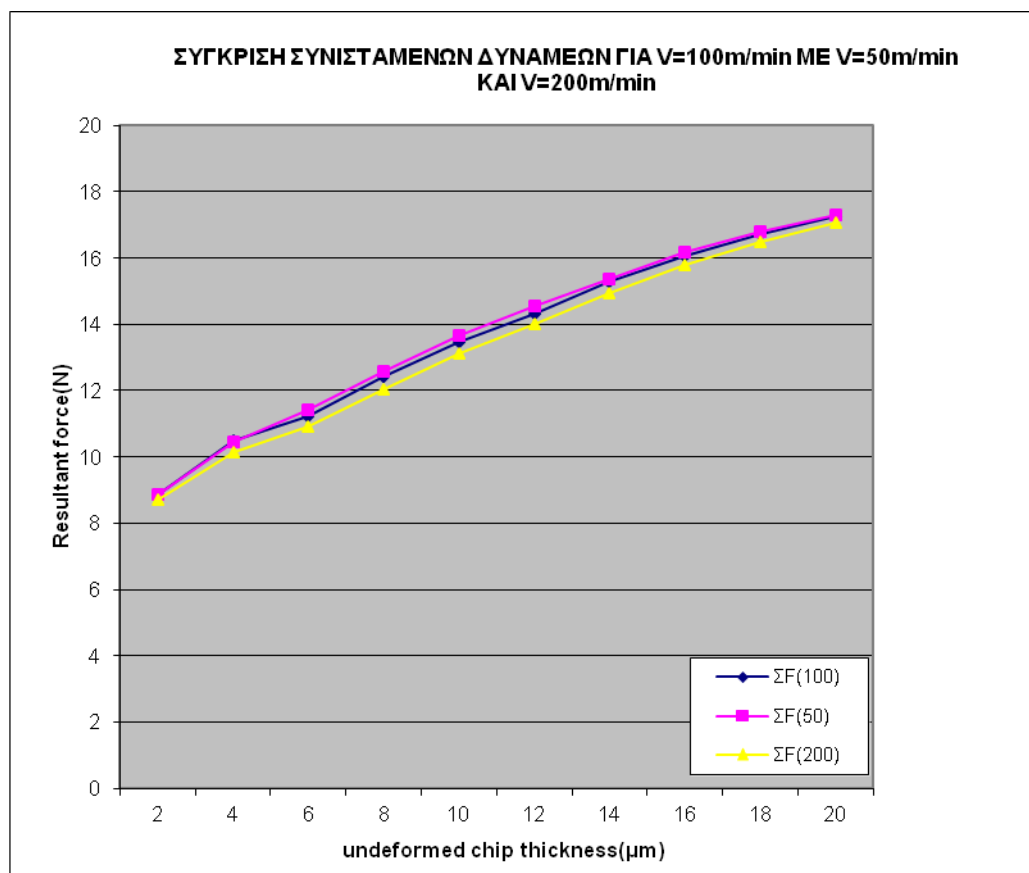
κοπής παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής τόσο η δύναμη μειώνεται για το εκάστοτε βάθος κοπής, ενώ για τις δυνάμεις άπωσης παρατηρείται το αντίθετο.

Από τον τύπο $\Sigma = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ βρίσκουμε τις συνισταμένες των δυνάμεων για όλες τις ταχύτητες. Ακολουθεί ο πίνακας:

α (μm)	$\Sigma F(100)\text{N}$	$\Sigma F(50)\text{N}$	$\Sigma F(200)\text{N}$
2	8.87	8.87	8.7
4	10.49	10.47	10.15
6	11.23	11.42	10.92
8	12.43	12.59	12.03
10	13.46	13.67	13.11
12	14.34	14.55	14.02
14	15.29	15.38	14.95
16	16.08	16.19	15.81
18	16.71	16.79	16.5
20	17.28	17.31	17.06

Πίνακας 12-Μέσες τιμές συνισταμένων δυνάμεων για όλες τις ταχύτητες κοπής

Κατόπιν ακολουθεί η γραφική παράσταση σύγκρισης των συνισταμένων δυνάμεων για όλες ταχύτητες.



Γράφημα 11-Σύγκριση συνισταμένων δυνάμεων για όλες τις ταχύτητες

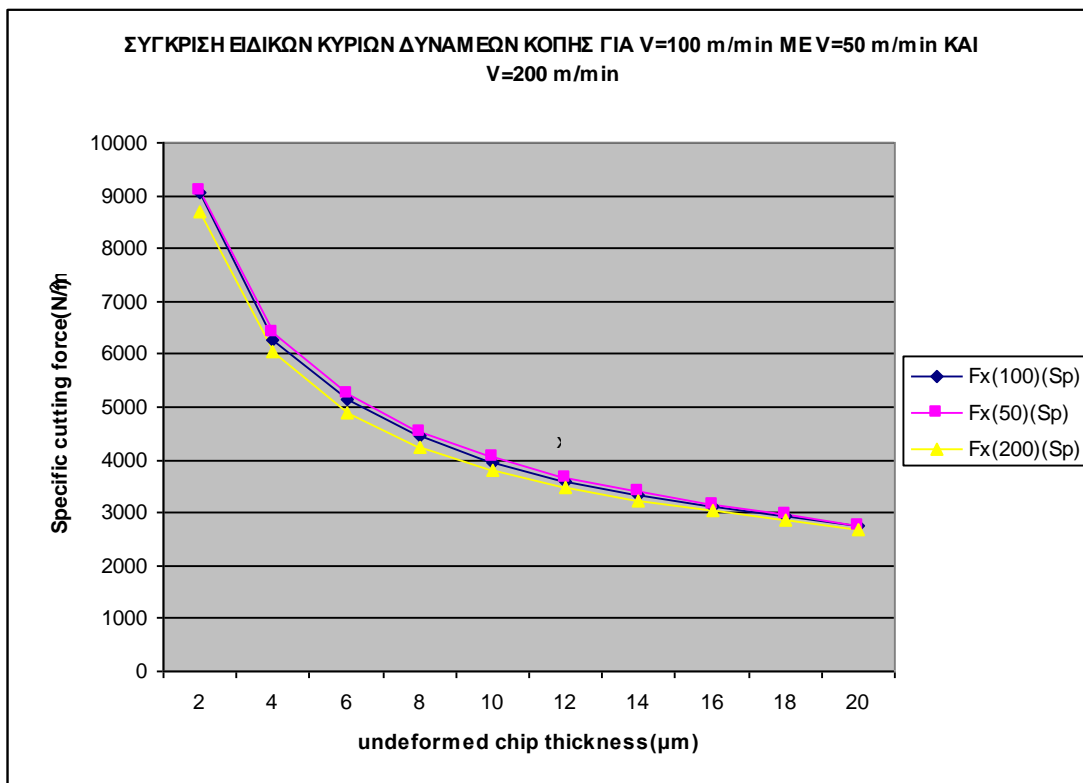
Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει η ταχύτητα κοπής, τόσο αυξάνεται και η συνισταμένη δύναμη για το εκάστοτε βάθος κοπής, αν και οι διαφορές είναι πολύ μικρές.

Χρησιμοποιώντας τον τύπο $F(Sp) = \frac{F}{a \cdot doc}$ μπορούμε να πάρουμε τις τιμές των ειδικών δυνάμεων, όπου F η εκάστοτε δύναμη, κύρια είτε άπωσης, a το πάχος του αδιαμόρφωτου αποβλήτου και doc το πλάτος της κοπής που στο πρόγραμμα είναι σταθερό με 0,3mm και ισούται με το βάθος κοπής του προγράμματος. Κάνοντας τις πράξεις λαμβάνουμε τον ακόλουθο πίνακα για τις δυνάμεις όλων των ταχυτήτων.

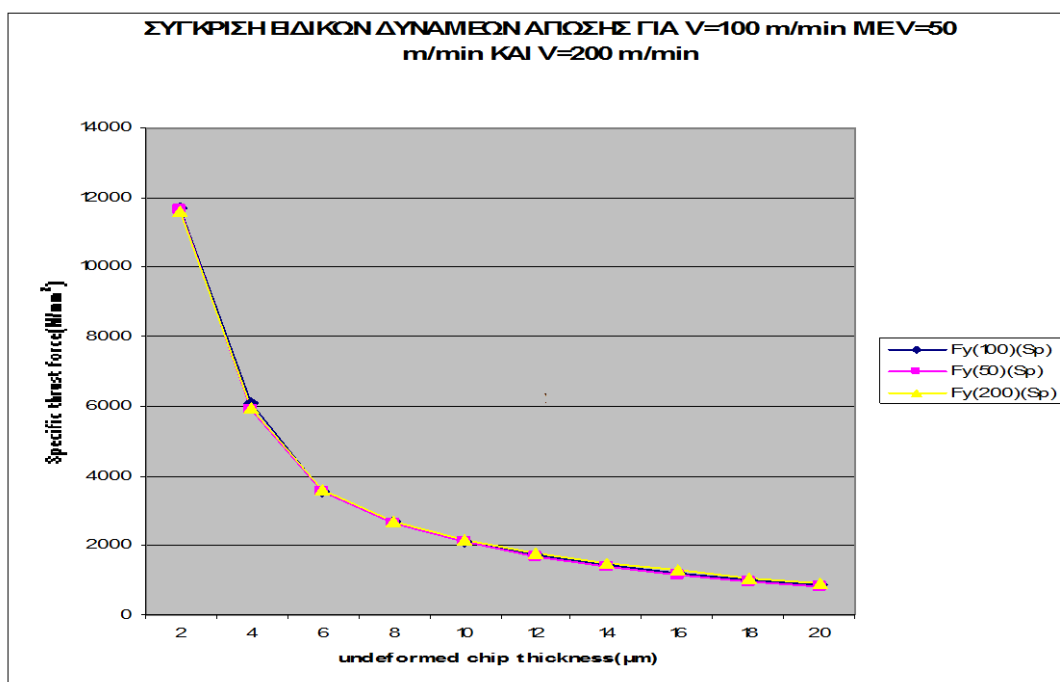
$\alpha(\mu\text{m})$	$F_x(100)(Sp)(N)$	$F_x(50)(Sp)(N)$	$F_x(200)(Sp)(N)$	$F_y(100)(Sp)(N)$	$F_y(50)(Sp)(N)$	$F_y(200)(Sp)(N)$
2	9050	9100	8683.333	11700	11666.667	11616.6667
4	6283.3	6416.667	6033.333	6075	5916.6667	5933.33333
6	5138.9	5266.667	4900	3538.9	3538.8889	3572.22222
8	4441.7	4541.667	4229.167	2662.5	2629.1667	2691.66667
10	3960	4046.667	3796.667	2110	2096.6667	2166.66667
12	3600	3672.222	3475	1702.8	1686.1111	1761.11111
14	3345.2	3390.476	3238.095	1433.3	1383.3333	1480.95238
16	3125	3162.5	3037.5	1206.3	1172.9167	1275
18	2925.9	2953.704	2864.815	1009.3	972.22222	1064.81481
20	2750	2766.667	2696.667	855	816.66667	900

Πίνακας 13-Μέσες ειδικές δυνάμεις για όλες τις ταχύτητες κοπής

Παραθέτουμε τα γραφήματα σύγκρισης ειδικών κύριων δυνάμεων κοπής και ειδικών δυνάμεων άπωσης.



Γράφημα 12-Σύγκριση ειδικών κύριων δυνάμεων κοπής για όλες τις ταχύτητες κοπής



Γράφημα 13-Σύγκριση ειδικών δυνάμεων άπωσης για όλες τις ταχύτητες κοπής

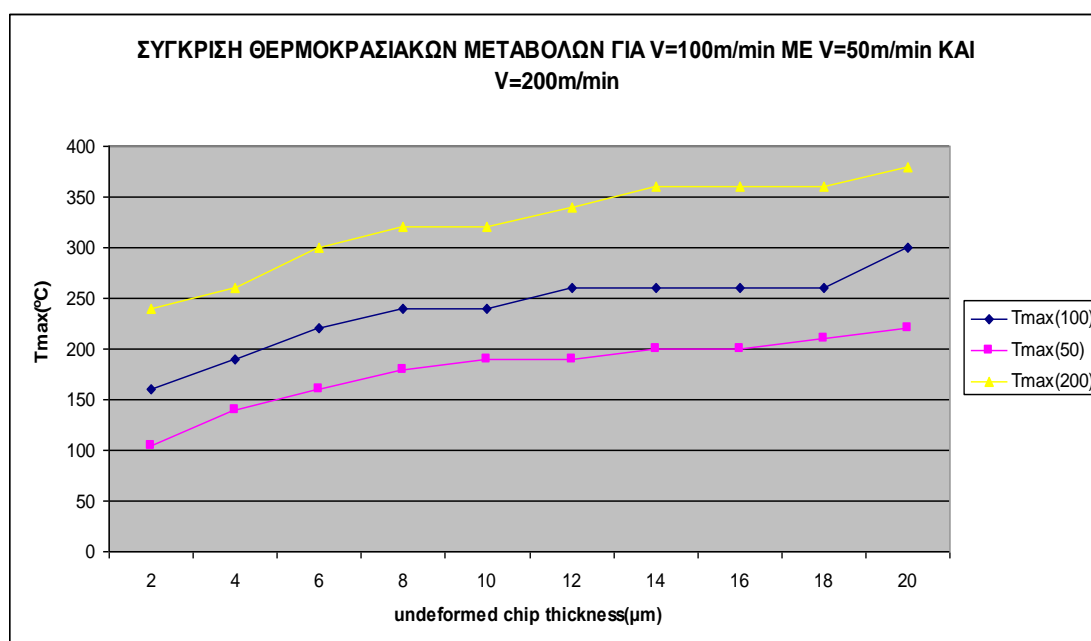
Παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές.

Λαμβάνοντας τις τιμές των μέγιστων θερμοκρασιών που εμφανίζονται κατά την κατεργασία για την κάθε ταχύτητα κοπής σε σχέση με το βάθος κοπής, παραθέτουμε τον παρακάτω πίνακα:

$\alpha(\mu\text{m})$	$T_{\text{max}}(100)(^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{max}}(50)(^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{max}}(200)^{\circ}\text{C}$
2	190	140	260
4	220	160	300
6	240	180	320
8	240	190	320
10	260	190	340
12	260	200	360
14	260	200	360
16	260	210	360
18	300	220	380
20	190	140	260

Πίνακας 14-Θερμοκρασιακές μεταβολές συναρτήσει του α για κάθε ταχύτητα κοπής

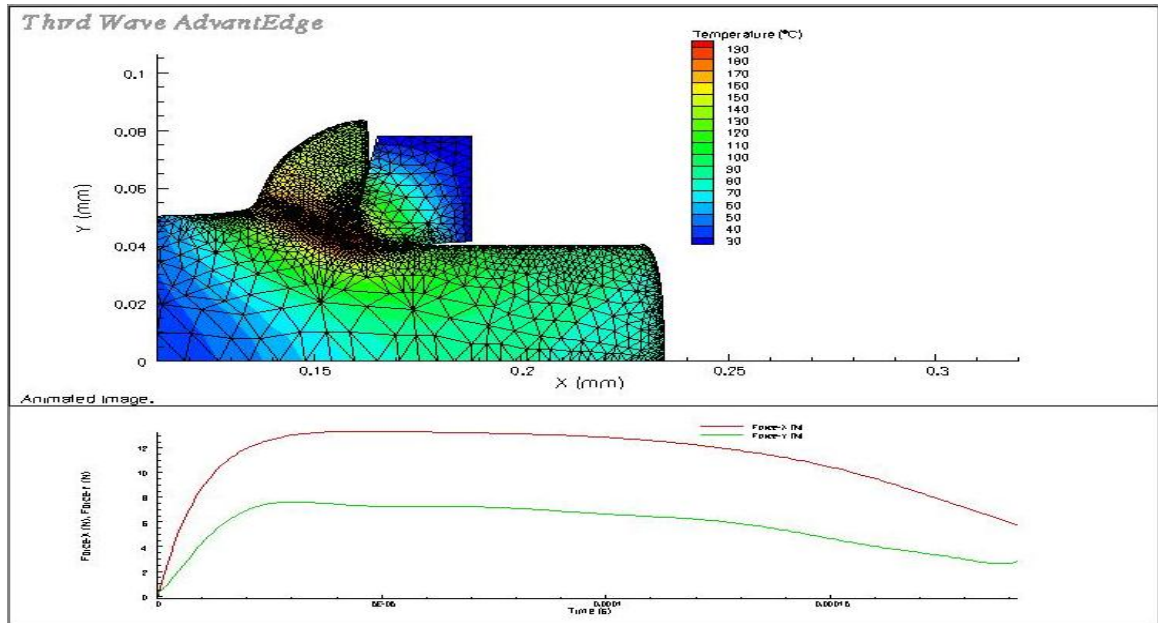
Κατόπιν παραθέτουμε τη γραφική παράσταση.



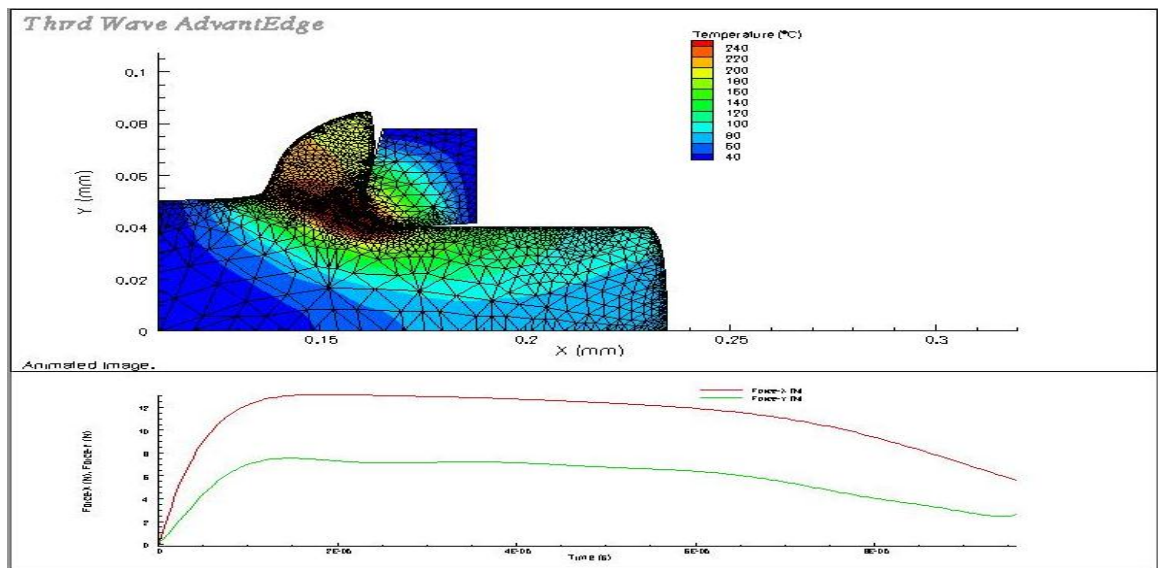
Γράφημα 14-Σύγκριση θερμοκρασιακών μεταβολών για όλες τις ταχύτητες κοπής

Παρατηρούμε ότι αυξανόμενης της ταχύτητας κοπής αυξάνεται η θερμοκρασία.

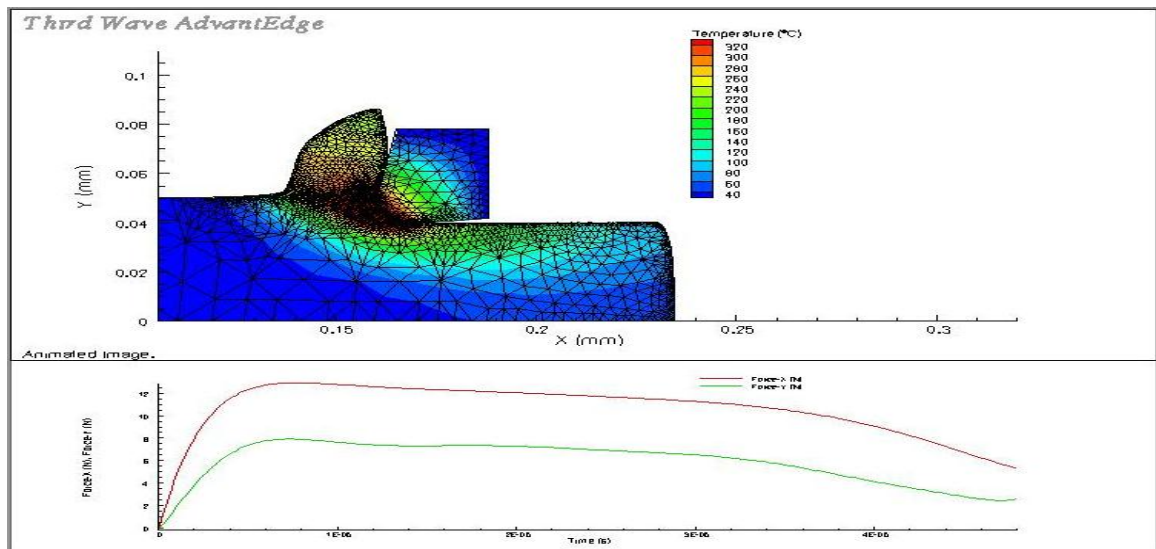
Παραθέτουμε παρακάτω εικόνες από το Tecplot για κάθε ταχύτητα, στις οποίες είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία μεταβάλλεται αισθητά ενώ οι δυνάμεις εμφανίζουν μικρές διαφοροποιήσεις.



Εικόνα 52-Προσομοίωση μικροκοπής για $V=50$ m/min



Εικόνα 53-Προσομοίωση μικροκοπής για $V=100$ m/min



Εικόνα 54-Προσομοίωση μικροκοπής για $V=200\text{m/min}$

6.3.5 Συμπεράσματα

Παρατηρούμε από τα γραφήματα, ότι αυξανόμενης της ταχύτητας κοπής μειώνονται οι κύριες δυνάμεις κοπής. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί με το γεγονός ότι όταν αυξάνεται η ταχύτητα, αυξάνεται και η θερμοκρασία, οπότε το υλικό γίνεται πιο μαλακό με αποτέλεσμα να χρειάζεται μικρότερη δύναμη για να κατεργαστεί. Η παραπάνω θεωρία επιβεβαιώνεται και από τη γραφική παράσταση των μέγιστων θερμοκρασιών που έχουμε παραθέσει. Δε φαίνεται να συμβαίνει όμως το ίδιο και με τις δυνάμεις άπωσης. Όπως όμως έχουμε δει και σε προηγούμενη ενότητα, δεν μπορούμε να θεωρήσουμε τα αποτελέσματα για τις δυνάμεις άπωσης απόλυτα αξιόπιστα λόγω του απλοποιημένου μοντέλου τριβής του προγράμματος.

Η σύγκριση των συνισταμένων δυνάμεων επιβεβαιώνει τη θεωρία για μείωση δυνάμεων με αύξηση της ταχύτητας κοπής.

Οι ειδικές δυνάμεις φαίνεται ότι μειώνονται μη γραμμικά, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη της επίδρασης κλίμακας (size effect).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση των θερμοκρασιών. Παρατηρούμε ότι διπλασιάζοντας την ταχύτητα από τα 50m/min στα 100m/min παρουσιάστηκε μέση αύξηση της θερμοκρασίας κατά 34%, ενώ για διπλασιασμό της ταχύτητας από τα 100m/min στα 200m/min εμφανίστηκε μέση αύξηση της θερμοκρασίας κατά 36%.

6.4 Σύγκριση δυνάμεων με κριτήριο την ακτίνα καμπυλότητας.

6.4.1 Γενικά

Σε αυτή τη παράγραφο θα γίνει προσομοίωση κοπής μεταβάλλοντας την ακτίνα καμπυλότητας προκειμένου να εξάγουμε συμπεράσματα για τη συσχέτιση της ακτίνας καμπυλότητας με τις δυνάμεις κοπής και τη θερμοκρασία. Θα συγκριθούν τα αποτελέσματα από την προσομοίωση για ακτίνα καμπυλότητας $r=10\mu\text{m}$ με $r=5\mu\text{m}$ και $r=15\mu\text{m}$. Επίσης θα μελετηθούν κάποια φαινόμενα που εμφανίζονται στη μικροκοπή και σχετίζονται με την ακτίνα καμπυλότητας όπως η επίδραση κλίμακας (size effect) καθώς και ο ρόλος του λόγου a/r .

6.4.2 Καταχώρηση δεδομένων

Η καταχώρηση δεδομένων έχει αναλυθεί εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται βρίσκονται στο κεφάλαιο 4, με τη διαφοροποίηση να έγκειται στην ακτίνα καμπυλότητας. Χρησιμοποιούμε λοιπόν τα αρχεία του Advantedge με τις αρχικές καταχωρήσεις, αλλάζοντας μόνο το $r=10\mu\text{m}$, αρχικά σε $r=5\mu\text{m}$ και κατόπιν σε $r=15\mu\text{m}$.

6.4.3 Αποτελέσματα

Έχοντας αναλύσει τον τρόπο λήψης αποτελεσμάτων σε προηγούμενο κεφάλαιο, παραθέτουμε εδώ τους πίνακες αποτελεσμάτων των δοκιμών για $r=5\mu\text{m}$ και για $r=15\mu\text{m}$.

$\alpha(\mu\text{m})$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20										
Μήκος τριαντάου (mm)	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy										
0,02	4,05	4,67	5,93	4,26	7,89	4,22	9,52	4,47	10,93	4,58	12,21	4,7	13,61	4,94	14,58	4,88	15,61	4,65	16,64	4,81
0,03	4,1	4,44	5,95	4,11	7,9	4,08	9,61	4,41	11,02	4,42	12,48	4,73	13,99	4,83	15,3	4,95	16,51	4,85	17,64	4,9
0,04	4,17	4,39	5,99	4,13	7,92	4,09	9,64	4,36	11,08	4,38	12,53	4,6	14,07	4,75	15,52	4,85	16,87	4,91	18,12	4,9
0,05	4,11	4,42	5,9	4,16	7,84	4,11	9,51	4,29	11	4,4	12,38	4,44	13,92	4,68	15,24	4,63	16,64	4,76	17,95	4,77
0,06	4,04	4,44	5,81	4,14	7,73	4,05	9,36	4,25	10,87	4,39	12,16	4,32	13,72	4,61	14,89	4,43	16,23	4,55	17,5	4,53
0,07	4,05	4,42	5,85	4,1	7,71	3,96	9,33	4,23	10,79	4,32	12,04	4,28	13,59	4,55	14,71	4,31	15,95	4,37	17,13	4,22
0,08	4,1	4,39	5,93	4,07	7,74	3,92	9,34	4,19	10,75	4,25	11,97	4,22	13,48	4,44	14,57	4,18	15,71	4,1	16,82	3,86
0,09	4,1	4,35	5,92	4,03	7,72	3,93	9,26	4,09	10,63	4,17	11,81	4,08	13,22	4,22	14,19	3,88	15,24	3,64	16,27	3,38
0,1	4,03	4,31	5,81	3,98	7,63	3,91	9,03	3,93	10,39	4,01	11,47	3,81	12,72	3,85	13,52	3,39	14,42	2,97	15,26	2,73
0,11	3,97	4,3	5,72	3,94	7,48	3,76	8,76	3,74	10,02	3,7	10,97	3,42	12,03	3,32	12,68	2,77	13,36	2,25	13,84	1,94
0,12	3,95	4,28	5,66	3,87	7,27	3,46	8,44	3,47	9,49	3,21	10,27	2,9	11,14	2,65	11,71	2,13	12,13	1,56	12,19	1,12
0,13	3,85	4,14	5,44	3,63	6,83	3,07	7,86	2,97	8,64	2,59	9,28	2,2	9,96	1,9	10,43	1,52	10,61	0,87	10,42	0,41
0,14	3,48	3,78	4,84	3,11	5,99	2,57	6,79	2,24	7,4	1,92	7,92	1,46	8,48	1,22	8,83	1	8,87	0,31	8,6	-0,13
0,15	2,79	3,15	3,95	2,37	4,8	1,82	5,44	1,63	5,99	1,34	6,48	1,06	7,08	1,01	7,56	0,87	7,57	0,3	7,06	-0,53
0,16	1,43	1,98	2,46	1,6	3,19	1,45	3,96	1,3	4,37	1,45	5,03	1,12	5,62	1,24	5,94	1,17	6,11	0,31	5,89	-0,78
M.O. ΔΥΝΑΜΕΩΝ(N)	4	4,33308	5,75	3,9638	7,5115	3,7792	8,95769	3,8954	10,23154	3,872308	11,3454	3,7815	12,61	3,843077	13,5515	3,60923	14,47308	3,368462	15,26	3,18769

Πίνακας 15-Μέσες δυνάμεις για $r=5 \mu\text{m}$

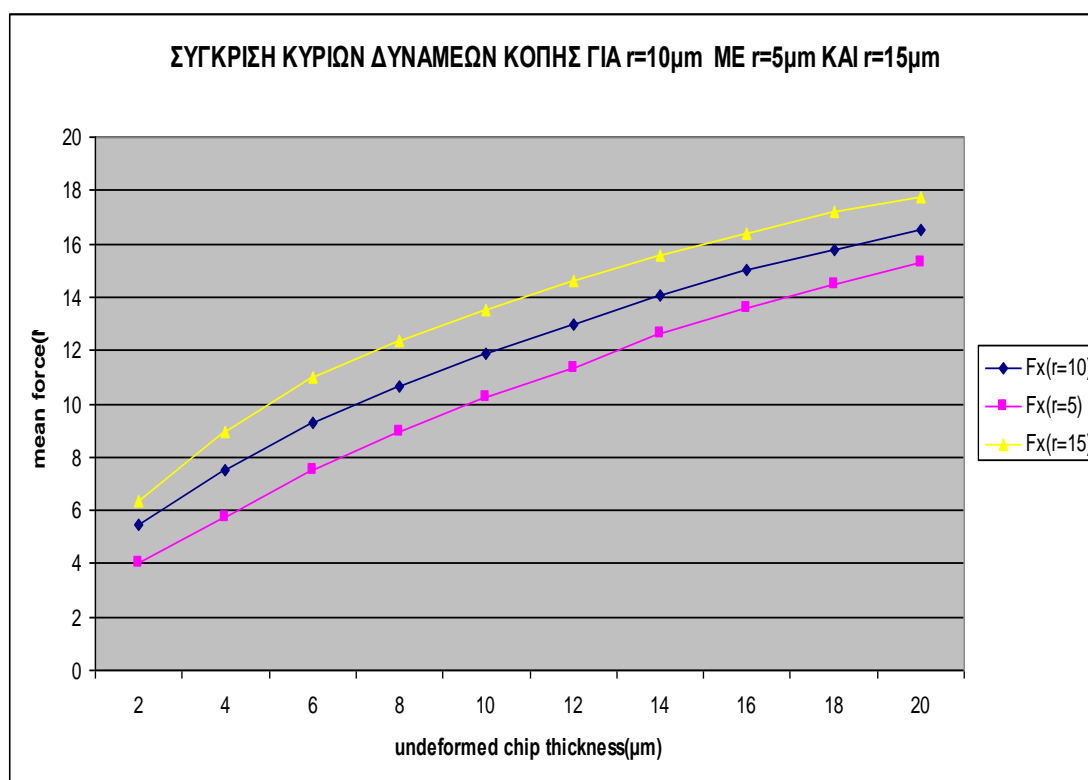
$a(\mu\text{m})$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Μήκος τεμαχίου(mm)	Fx Fy	Fx Fy	Fx Fy	Fx Fy	Fx Fy	Fx Fy	Fx Fy	Fx Fy	Fx Fy	Fx Fy
0,02	5,62 7,96	8,36 9,42	10,67 10,67	12,19 9,18	13,54 9,14	14,78 9,29	15,99 9,21	17,02 9,18	18,09 8,89	19,1 8,8
0,03	6,39 8,9	9,25 10,74	11,82 10,4	13,51 10,55	15,02 10,51	16,37 10,61	17,61 10,62	18,79 10,67	20 10,62	21,12 10,19
0,04	6,89 9,25	9,65 10,73	11,99 10,48	13,66 10,49	15,18 10,47	16,6 10,58	17,87 10,65	19,13 10,68	20,47 10,79	21,62 10,27
0,05	7,08 9,47	9,9 10,47	12,02 10,3	13,64 10,22	15,06 10,22	16,43 10,34	17,72 10,36	18,96 10,28	20,32 10,36	21,43 10,01
0,06	7,04 9,57	9,93 10,32	12,03 10,07	13,56 10,04	14,89 10,04	16,2 10,13	17,47 10,14	18,66 9,92	19,92 9,86	20,99 9,68
0,07	6,95 9,52	9,77 10,23	11,92 9,8	13,35 9,84	14,65 9,8	15,92 9,83	17,16 9,86	18,32 9,59	19,43 9,38	20,5 9,19
0,08	6,86 9,37	9,57 10,13	11,68 9,54	13,04 9,54	14,34 9,4	15,58 9,38	16,77 9,34	17,85 9,14	18,88 8,78	19,9 8,4
0,09	6,76 9,19	9,41 9,98	11,41 9,33	12,75 9,15	14 8,89	15,15 8,8	16,26 8,56	17,19 8,43	18,13 7,93	19 7,32
0,1	6,61 8,97	9,24 9,71	11,11 9,08	12,44 8,72	13,59 8,33	14,6 8,1	15,54 7,69	16,31 7,45	17,06 6,78	17,62 6,03
0,11	6,38 8,64	8,9 9,24	10,72 8,6	11,97 8,18	12,98 7,71	13,87 7,24	14,56 6,81	15,15 6,24	15,57 5,44	15,73 4,7
0,12	6,02 8,13	8,31 8,55	10,09 7,82	11,21 7,43	12,09 6,92	12,87 6,2	13,3 5,84	13,69 4,92	13,77 4,14	13,47 3,46
0,13	5,48 7,42	7,56 7,67	9,22 6,86	10,21 6,43	10,95 5,93	11,59 5,16	11,81 4,68	11,94 3,66	11,84 3,01	11,16 2,4
0,14	4,68 6,43	6,68 6,64	8,12 5,88	9,05 5,35	9,66 4,86	10,1 4,39	10,24 3,6	10,05 2,69	9,98 2,02	9,12 1,44
0,15	3,66 4,98	5,37 5,38	6,79 4,73	7,61 4,37	8,19 3,99	8,59 3,93	8,69 3,29	8,4 2,22	8,21 1,04	7,61 0,43
0,16	2,33 3,75	3,91 4,52	5,23 3,98	6,14 3,73	6,63 3,76	7,26 3,24	7,28 3,12	7,13 2,48	6,8 0,75	6,22 -0,09
M.O. ΔΥΝΑΜΕΩΝ(N)	6,366154 8,6785	8,96385 9,525385	10,98462 9,01538	12,3523 8,85538	13,5346 8,63231	14,62 8,46538	15,5615 8,25946	16,3892 7,9115	17,0823 7,5385	17,7508 7,088462

Πίνακας 16-Μέσες δυνάμεις για $r=15\mu\text{m}$

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας με τις κύριες δυνάμεις κοπής και η αντίστοιχη γραφική παράσταση.

$\alpha(\mu\text{m})$	$F_x(r=10)(\text{N})$	$F_x(r=5)(\text{N})$	$F_x(r=15)(\text{N})$
2	5.43	4	6.37
4	7.54	5.75	8.96
6	9.25	7.51	10.98
8	10.66	8.96	12.35
10	11.88	10.23	13.53
12	12.96	11.35	14.62
14	14.05	12.61	15.56
16	15	13.55	16.39
18	15.8	14.47	17.19
20	16.5	15.26	17.75

Πίνακας 17-Μέσες κύριες δυνάμεις κοπής για όλα τα r

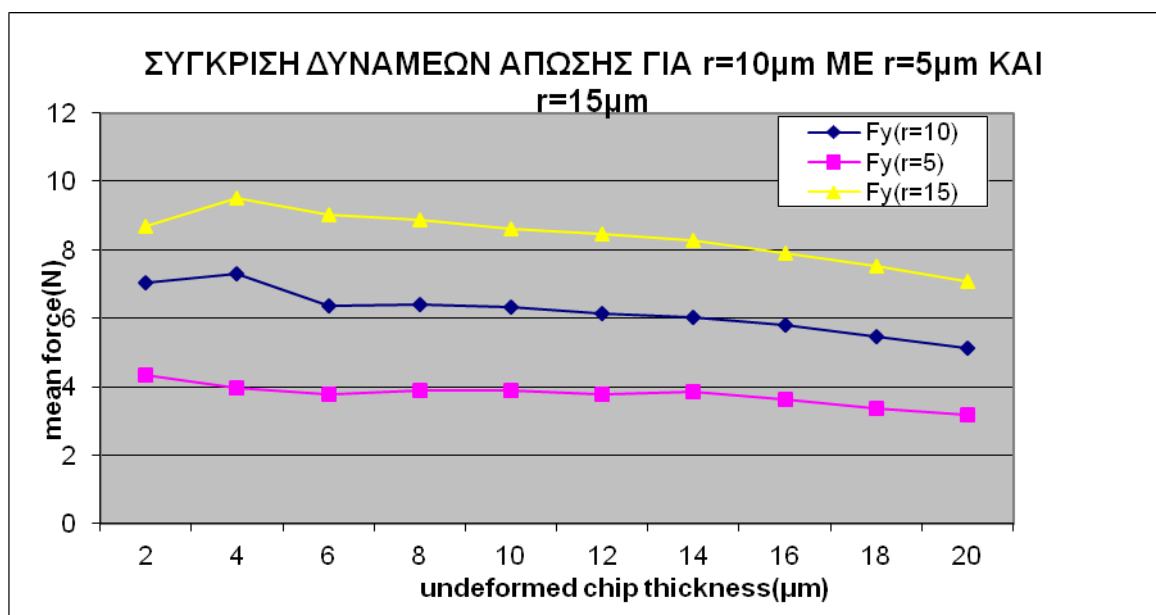


Γράφημα 15-Σύγκριση κύριων δυνάμεων κοπής για όλα τα r

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας με τις δυνάμεις άπωσης και την αντίστοιχη γραφική παράσταση.

$\alpha(\mu\text{m})$	$F_y(r=10)(\text{N})$	$F_y(r=5)(\text{N})$	$F_y(r=15)(\text{N})$
2	7.02	4.33	8.68
4	7.29	3.96	9.53
6	6.37	3.78	9.02
8	6.39	3.9	8.86
10	6.33	3.87	8.63
12	6.13	3.78	8.47
14	6.02	3.84	8.26
16	5.79	3.61	7.91
18	5.45	3.37	7.54
20	5.13	3.19	7.07

Πίνακας 18-Μέσες δυνάμεις άπωσης για όλα τα r



Γράφημα 16-Σύγκριση δυνάμεων άπωσης για όλα τα r

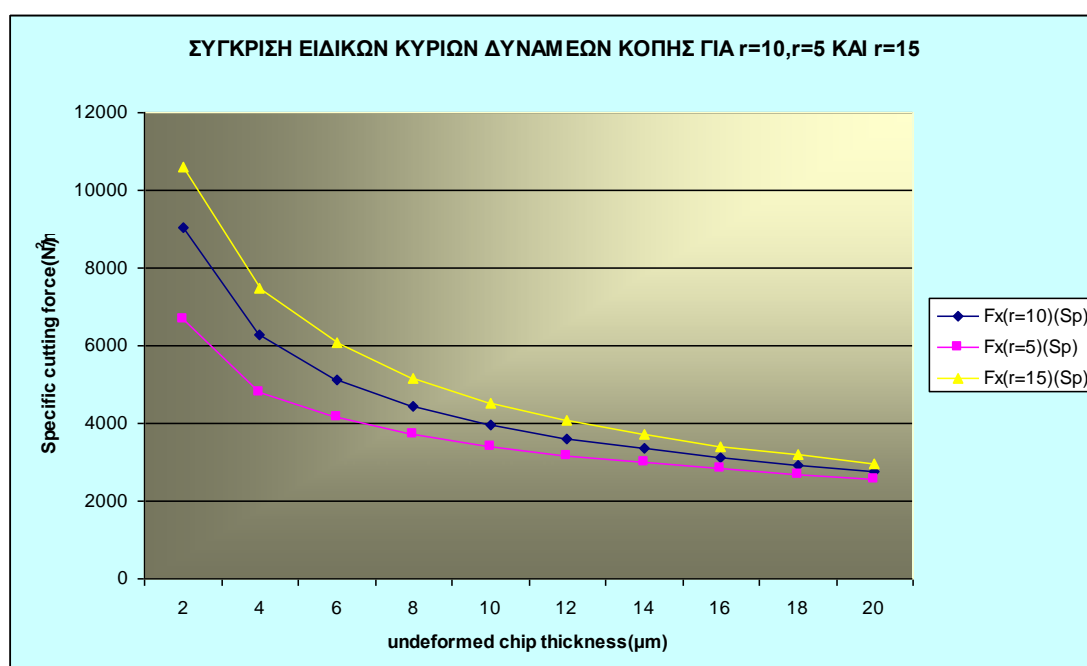
6.4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων για όλες τις ακτίνες καμπυλότητας

Από τις γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι τόσο οι κύριες δυνάμεις κοπής, όσο και οι δυνάμεις άπωσης εμφανίζουν αυξητική τάση αυξανόμενης της ακτίνας καμπυλότητας.

Παρακάτω παραθέτουμε τους πίνακες και τις γραφικές παραστάσεις των ειδικών κύριων δυνάμεων κοπής και δυνάμεων άπωσης.

$\alpha(\mu\text{m})$	$F_x(r=10)(\text{Sp})(\text{N})$	$F_x(r=5)(\text{Sp})(\text{N})$	$F_x(r=15)(\text{Sp})(\text{N})$
2	9050	6666.667	10616.67
4	6283.3	4791.667	7466.667
6	5138.9	4172.222	6100
8	4441.7	3733.333	5145.833
10	3960	3410	4510
12	3600	3152.778	4061.111
14	3345.2	3002.381	3704.762
16	3125	2822.917	3414.583
18	2925.9	2679.63	3183.333
20	2750	2543.333	2958.333

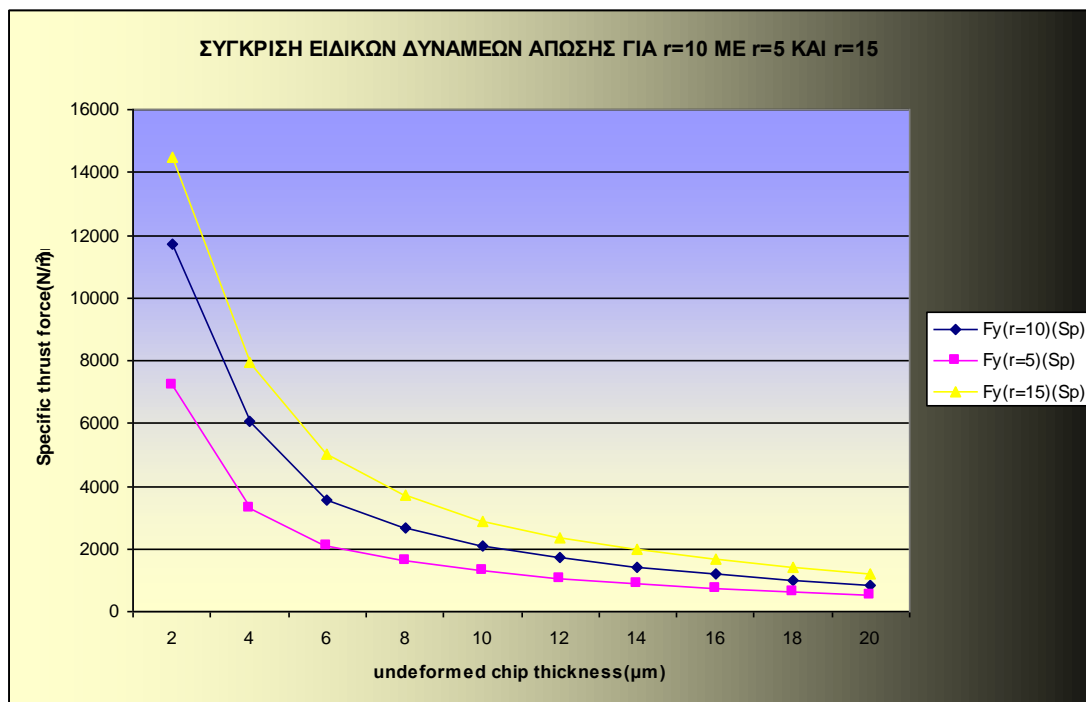
Πίνακας 19-Μέσες ειδικές κύριες δυνάμεις κοπής για όλα τα r



Γράφημα 17-Σύγκριση ειδικών κύριων δυνάμεων κοπής για όλα τα r

$\alpha(\mu\text{m})$	$F_y(r=10)(\text{Sp})(\text{N})$	$F_y(r=5)(\text{Sp})(\text{N})$	$F_y(r=15)(\text{Sp})(\text{N})$
2	11700	7216.6667	14466.6667
4	6075	3300	7941.66667
6	3538.9	2100	5011.11111
8	2662.5	1625	3691.66667
10	2110	1290	2876.66667
12	1702.8	1050	2352.77778
14	1433.3	914.28571	1966.66667
16	1206.3	752.08333	1647.91667
18	1009.3	624.07407	1396.2963
20	855	531.66667	1178.33333

Πίνακας 20-Μέσες ειδικές δυνάμεις άπωσης για όλα τα r



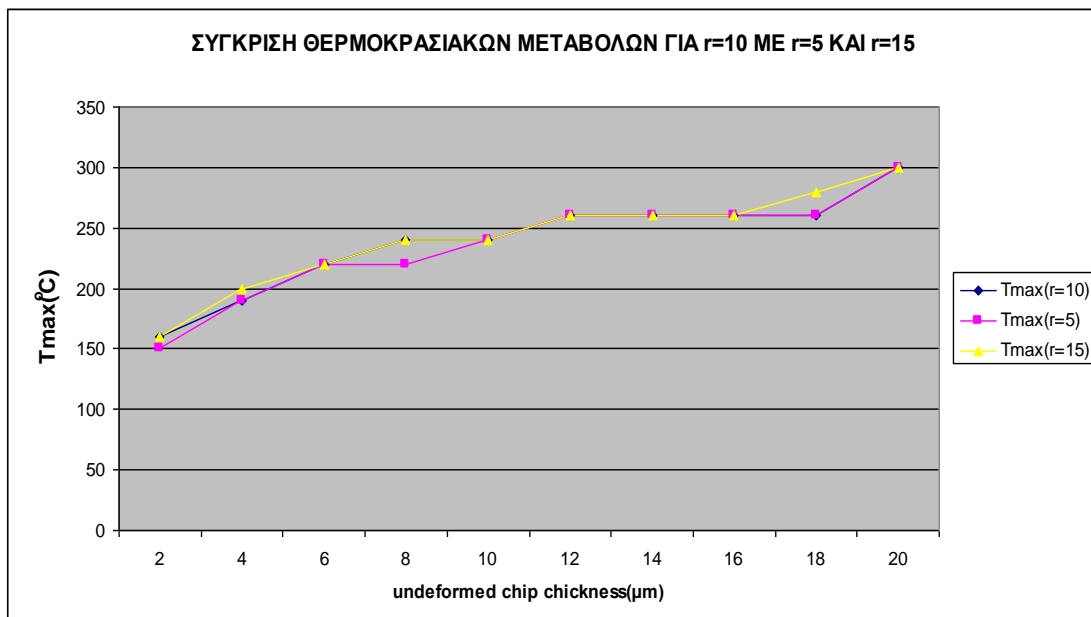
Γράφημα 18-Σύγκριση ειδικών δυνάμεων άπωσης για όλα τα r

Όπως παρατηρούμε, οι ειδικές δυνάμεις εμφανίζουν κι αυτές αυξημένες τιμές αυξανόμενης της ακτίνας καμπυλότητας, ενώ όλες έχουν πτωτική τάση αυξανόμενου του βάθους κοπής.

Λαμβάνοντας τις τιμές των μέγιστων θερμοκρασιών που εμφανίζονται κατά την κατεργασία για την κάθε ακτίνα καμπυλότητας σε σχέση με το βάθος κοπής, παραθέτουμε τον ακόλουθο πίνακα και την αντίστοιχη γραφική παράσταση.

$\alpha(\mu\text{m})$	$T_{\max}(r=10)(^{\circ}\text{C})$	$T_{\max}(r=5)(^{\circ}\text{C})$	$T_{\max}(r=15)(^{\circ}\text{C})$
2	190	190	200
4	220	220	220
6	240	220	240
8	240	240	240
10	260	260	260
12	260	260	260
14	260	260	260
16	260	260	280
18	300	300	300
20	190	190	200

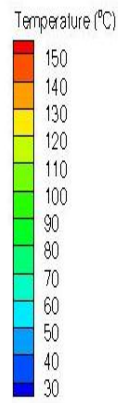
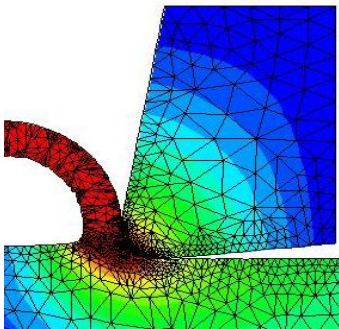
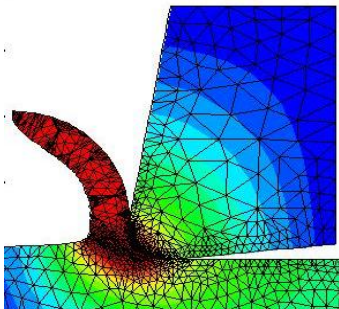
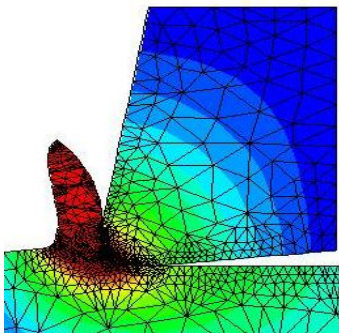
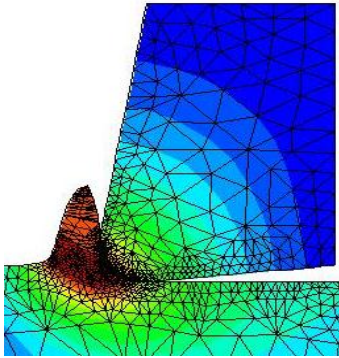
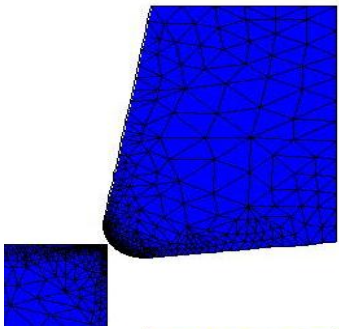
Πίνακας 21-Θερμοκρασιακές μεταβολές συναρτήσει του α για όλες τις ακτίνες καμπυλότητας



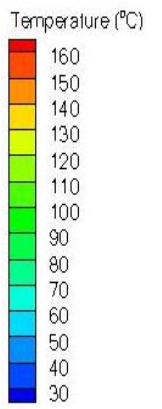
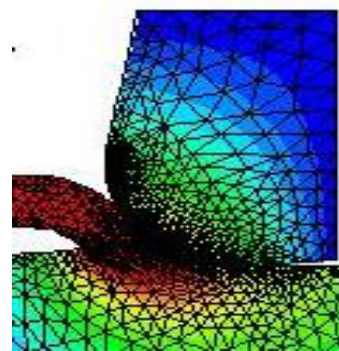
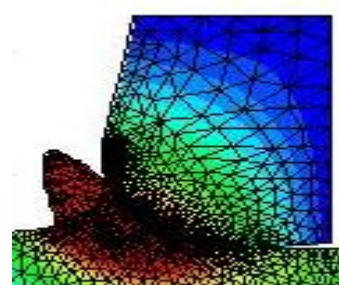
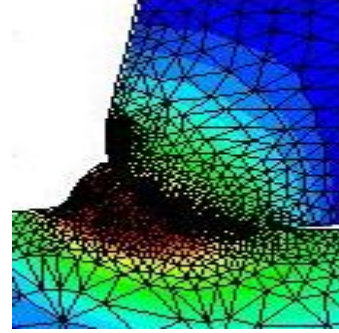
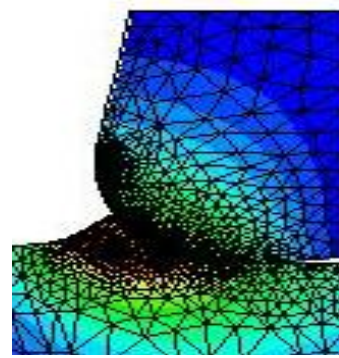
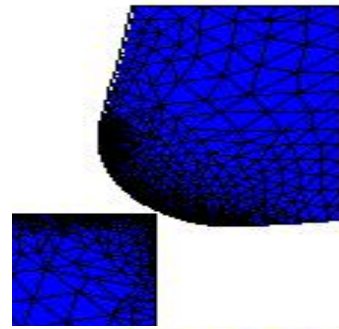
Γράφημα 19-Σύγκριση θερμοκρασιακών μεταβολών για όλα τα r

Όπως παρατηρούμε οι μέγιστες θερμοκρασίες έχουν πολύ μικρές αποκλίσεις μεταβαλλόμενης της ακτίνας καμπυλότητας.

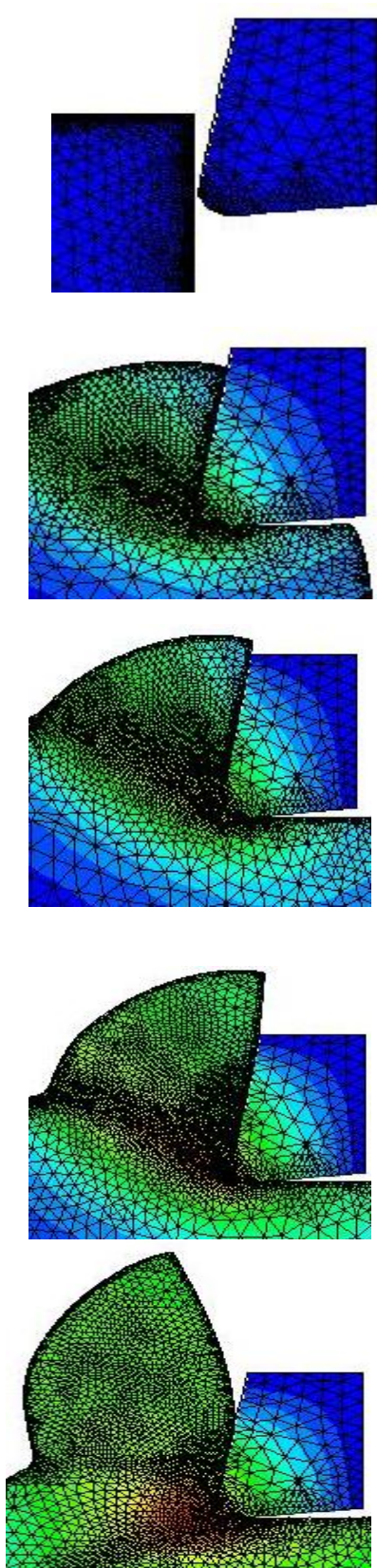
Ακολουθούν εικόνες που έχουν ληφθεί από το Tecplot προκειμένου να φανεί ρεαλιστικά η διαδικασία της μικροκοπής που ακολουθήθηκε για $r=5\mu\text{m}$ και $r=15\mu\text{m}$ στα δύο ακραία βάθη κοπής $a=2\mu\text{m}$ και $a=20\mu\text{m}$.



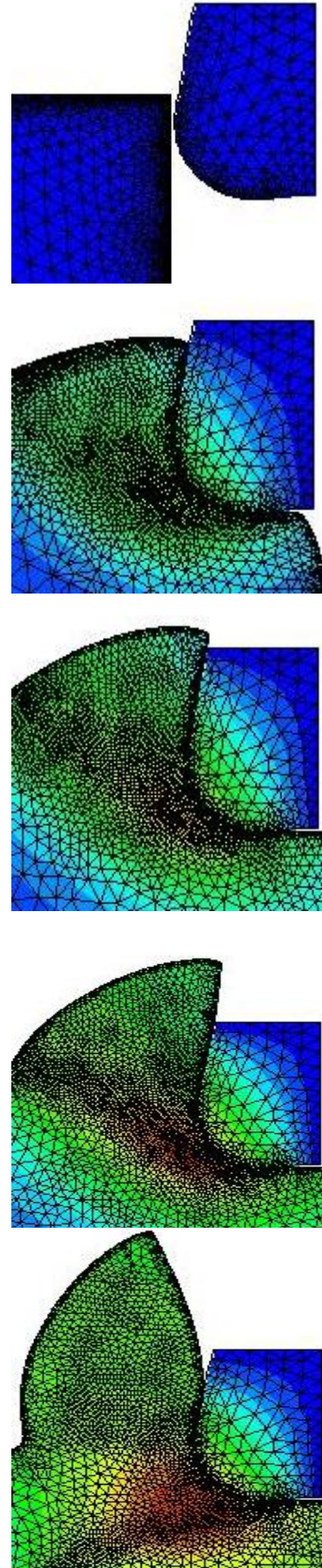
$r=5\mu\text{m}$, $\alpha=2\mu\text{m}$



$r=15\mu\text{m}$, $\alpha=2\mu\text{m}$



$r=5\mu\text{m}, \alpha=10\mu\text{m}$



$r=15\mu\text{m}, \alpha=10\mu\text{m}$

6.4.5 Συμπεράσματα

[2][23][24]

Παρατηρούμε από τα γραφήματα ότι αυξανόμενη της ακτίνας καμπυλότητας αυξάνονται και η κύρια δύναμη κοπής και άπωσης καθώς και οι αντίστοιχες ειδικές δυνάμεις.

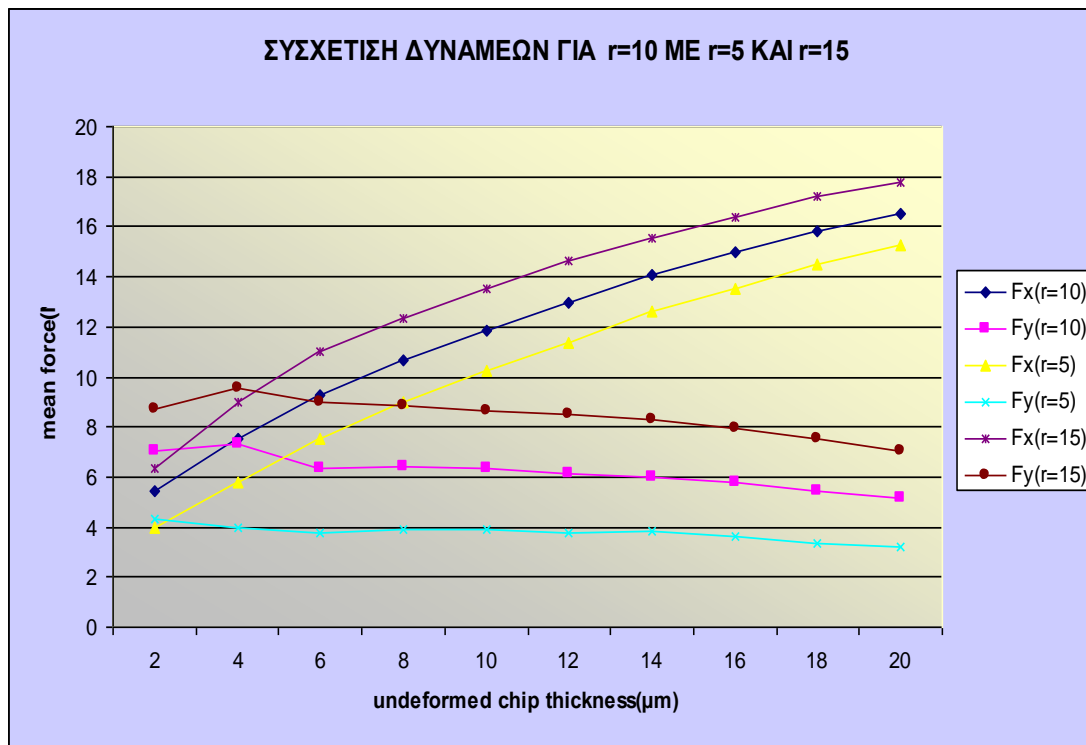
Οι αυξήσεις των τιμών των δυνάμεων συναρτήσει της αύξησης της ακτίνας καμπυλότητας είναι φυσιολογική εξέλιξη αφού η συνιστώσα της ακτίνας καμπυλότητας της συνολικής δύναμης αυξάνεται με την αύξηση του r .

Οι κύριες δυνάμεις κοπής εμφανίζουν από $r=10\mu\text{m}$ σε $r=5\mu\text{m}$ αύξηση, η οποία παρατηρούμε ότι ξεκινάει για βάθος κοπής $2\mu\text{m}$ σε ποσοστό 36% το οποίο σταδιακά μειώνεται σε ποσοστό αύξησης για βάθος κοπής $20\mu\text{m}$ στο 8%. Από $r=10\mu\text{m}$ σε $r=15\mu\text{m}$ παρατηρείται επίσης αύξηση, σε ποσοστό 17% για βάθος κοπής $2\mu\text{m}$ το οποίο σταδιακά μειώνεται σε ποσοστό αύξησης 7,5% για βάθος κοπής $20\mu\text{m}$.

Οι δυνάμεις άπωσης παρουσιάζουν μέσο σταθερό ποσοστό αύξησης που είναι 64% από $r=5\mu\text{m}$ σε $r=10\mu\text{m}$, ενώ για $r=10\mu\text{m}$ έως $r=15\mu\text{m}$ παρουσιάζουν μέσο σταθερό ποσοστό αύξησης 36%.

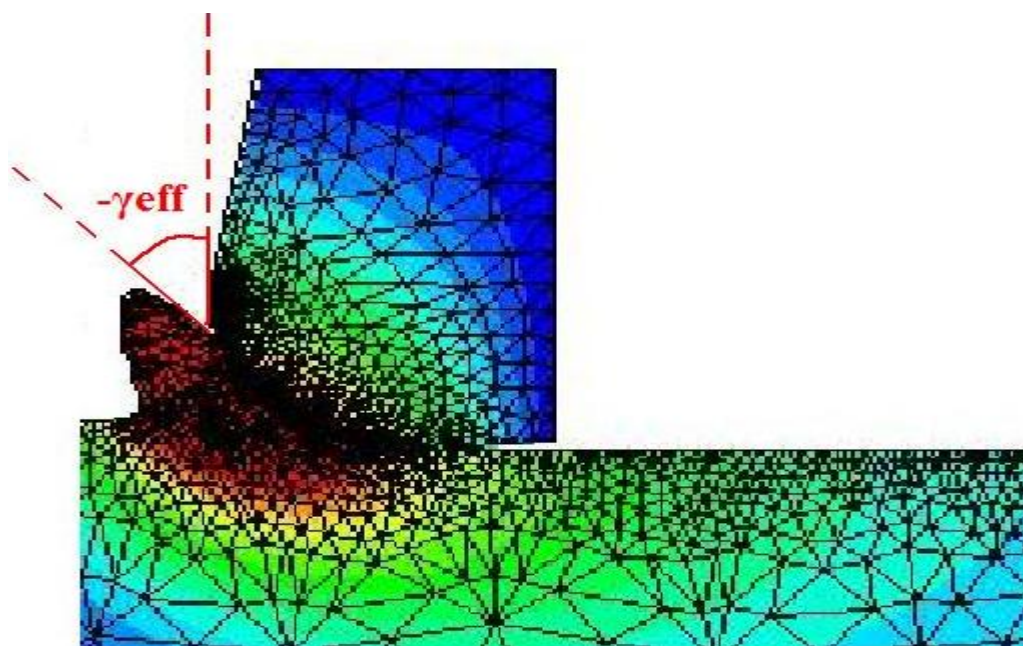
Η μείωση του ποσοστού αύξησης των κύριων κοπτικών δυνάμεων από $r=5\mu\text{m}$ σε $r=10\mu\text{m}$ και από $r=10\mu\text{m}$ σε $r=15\mu\text{m}$, συναρτήσει του βάθους κοπής, αποδίδεται στις μεγάλες τιμές του λόγου a/r αυξανόμενου του a , πλησιάζοντας το μοντέλο του Merchant για συμβατική κοπή, όπως υποστηρίζουν οι Woon, Rahman, Fang, Neo και Liu[2].

Συνοψίζοντας σε μια γραφική παράσταση(γράφημα 20) τις κύριες δυνάμεις κοπής και άπωσης παρατηρούμε ότι για τα πολύ μικρά βάθη κοπής, η δύναμη άπωσης γίνεται η κύρια συνιστώσα.



Γράφημα 20-Συσχέτιση κύριων δυνάμεων κοπής με δυνάμεις άπωσης για όλα τα r

Ο Lucca[23] έκανε αυτή την επισήμανση και ανέφερε ότι η διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως μετάβαση από μια κύρια διαδικασία κοπής σε «όργωμα». Σε αυτή την περίπτωση η πραγματική γωνία αποβλήτου είναι αρνητική όπως βλέπουμε και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 55-Λήψη εικόνας από Tecplot για $a=2\mu\text{m}$ και $r=15\mu\text{m}$

Αντίστοιχες παρατηρήσεις έκαναν οι Argarego και Brown[24]. Ανέφεραν δε, ότι η αύξηση της ειδικής κοπτικής δύναμης με μείωση του πάχους του αδιαμόρφωτου αποβλήτου, ήταν λόγω της μεγαλύτερης σχετικής συμβολής της δύναμης «οργώματος» που προκύπτει από την τριβή και το όργανο που συνδέονται με την αφαίρεση υλικού από ένα αμβλύ εργαλείο, δίνοντας έτσι και μια ερμηνεία για την επίδραση κλίμακας.

Παρατηρώντας τις γραφικές των ειδικών δυνάμεων(γραφήματα 17 και18) επιβεβαιώνουμε την ύπαρξη της επίδρασης κλίμακας, αφού οι ειδικές δυνάμεις μειώνονται μη γραμμικά καθώς αυξάνει το βάθος κοπής.

Από τη γραφική παράσταση των θερμοκρασιών(γράφημα 19), φαίνεται η ακτίνα καμπυλότητας να μην προκαλεί σημαντικές μεταβολές στις κατανομές της θερμοκρασίας.

7 Τελικά συμπεράσματα

Προσομοιώνοντας στο Advanedge την κατεργασία της μικροκοπής, παρατηρείται ότι μεταξύ των πειραματικών τιμών των δυνάμεων και των τιμών των δυνάμεων της προσομοίωσης υπάρχουν αποκλίσεις. Για τις κύριες δυνάμεις κοπής, οι αποκλίσεις θεωρούνται ασήμαντες σε αντίθεση με τις δυνάμεις άπωσης όπου οι διαφορές είναι σημαντικές.

Αρκετές είναι οι αιτίες στις οποίες μπορούν να αποδοθούν οι αποκλίσεις. Το πρόγραμμα προσομοιώνει το πείραμα σε ιδανικές συνθήκες, ενώ στην πράξη η εκτέλεση ενός πειράματος στο εργαστήριο περιλαμβάνει ατέλειες και σφάλματα. Το υλικό AISI 1045 που χρησιμοποιήθηκε από τους ερευνητές στο πείραμα πιθανόν να παρουσιάζει διαφορές στη σύσταση και τις ιδιότητες του με το υλικό που προσομοιώθηκε. Το μοντέλο τριβής που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα δεν ανταποκρίνεται επαρκώς στις συνθήκες κοπής της πραγματικότητας. Η ελαστική παραμόρφωση του τεμαχίου που επηρεάζει τις δυνάμεις άπωσης (όπου υπήρχαν και οι μεγαλύτερες αποκλίσεις) δεν προβλέπεται από τι μοντέλο του πακέτου.

Αυξανόμενου του βάθους κοπής παρατηρείται αύξηση των κύριων δυνάμεων κοπής καθώς και των συνισταμένων, παρότι οι δυνάμεις άπωσης έχουν μια πτωτική τάση κάτι που φανερώνει το δευτερεύοντα ρόλο των δυνάμεων άπωσης στη διαδικασία της κοπής. Οι μέγιστες θερμοκρασίες, επίσης, εμφανίζουν αυξητική τάση σε συνάρτηση με το βάθος κοπής.

Με κριτήριο την ταχύτητα, οι δυνάμεις εμφανίζονται να έχουν αυξητική τάση όταν η ταχύτητα μειώνεται, ενώ με αύξηση της ταχύτητας οι δυνάμεις φαίνεται να μειώνονται. Αυτό σχετίζεται άμεσα με τη θερμοκρασία, αφού αύξηση της ταχύτητας προκαλεί και αύξηση της θερμοκρασίας, καθιστώντας το υλικό πιο μαλακό και κατεργάσιμο και επομένως οι δυνάμεις μειώνονται. Οι τιμές των μέγιστων θερμοκρασιών που έχουν ληφθεί για τις διάφορες θερμοκρασίες κατά τις δοκιμές προσομοίωσης επιβεβαιώνουν αυτή τη θεωρία.

Με κριτήριο την ακτίνα καμπυλότητας παρατηρείται αύξηση των δυνάμεων με αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας, ενώ καθώς μεγαλώνει το βάθος κοπής, φαίνεται το ποσοστό αύξησης των δυνάμεων να μειώνεται, γεγονός που αποδίδεται στις

μεγάλες τιμές λόγου a/r , πλησιάζοντας το μοντέλο του Merchant για συμβατική κοπή. Στα μικρά βάθη κοπής και στους πολύ μικρούς λόγους a/r είναι έντονο το φαινόμενο η κοπή να εκτελείται υπό τη μορφή «οργώματος». Οι θερμοκρασιακές κατανομές δε φαίνεται να επηρεάζονται σημαντικά από την ακτίνα καμπυλότητας.

Οι ειδικές δυνάμεις, κύριες είτε άπωσης, εμφανίζουν μη γραμμική μείωση με την αύξηση του βάθους κοπής, ανεξαρτήτου ταχύτητας κοπής και ακτίνας καμπυλότητας, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη της επίδρασης κλίμακας (size effect) στη μικροκοπή.

Το φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον του Advantedge, μαζί με το μαθηματικό μοντέλο επαναπροσδιορισμού του πλέγματος, την πλαστική ροή του υλικού γύρω από την κοπτική ακμή και το θερμομηχανικό μοντέλο που χρησιμοποιεί γενικά, καθιστούν το πακέτο επιτυχημένο εμπορικά. Μπορεί να αποτελέσει δε, ένα σημαντικό εφόδιο στα χέρια του μηχανικού κατορθώνοντας να προσομοιώσει κατεργασίες, μειώνοντας τα πειράματα που θα έπρεπε να εκτελεστούν για τη βελτιστοποίηση μιας κατεργασίας.

8

Βιβλιογραφία

- [1] K.S. Woon , M. Rahman , K.S. Neo and K. Liu,2008, “The effect of tool edge radius on the contact phenomenon of tool-based micromachining”, International Journal of Machine Tools & Manufacture
- [2] K.S. Woon, M. Rahman, F.Z. Fang, K.S. Neo and K. Liu,2008, “Investigations of tool edge radius effect in micromachining:A FEM simulation approach”, journal of materials processing technology
- [3] Xiaozhou Li, Huadong Yu and Jinkai Xu,2009, “Model of Micro-cutting and Analysis of Micro Cutting Force”, Proceedings of the2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, August 9 - 12, Changchun, China
- [4]A.P.Markopoulos and D.E.Manolakos,2010, “Finite element analysis of micromachining”, Journal of Manufacturing Technology Research
- [5]Σημειώσεις του μαθήματος “Μικρο-Νανοκατεργασίες”,Άγγελος Μαρκόπουλος, Αθήνα 2005
- [6] D. Lu, J.F. Li, Y. Rong, A. Grevstad and S. Usui, “Temperature and stress analysis in micro-cutting of Ti-6Al-4V and Al7050-T6 with Advantedge”, Shandong University Jinan&Worcester Polytechnic Institute
- [7]A. Otieno and C.Mirman,2008,“ Finite Element Analysis of Cutting Forces and Temperatures on Microtools in the Micromachining of Aluminum Alloys”, *Proceedings of The 2008 IAJC-IJME International Conference*, Northern Illinois University
- [8] Kai Liu, 2005, “Process modeling of micro-cutting including strain gradient effects”, Georgia Institute of Technology
- [9]Νικόλαος Γαλάνης, “Κατεργασιμότητα λίαν υψηλής ακριβείας βιολογικών εμφυτευμάτων τεχνητού ισχίου”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2011
- [10]Γεωργία Μανταλιά, “Μελέτη των δυνάμεων κοπής στις κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2009
- [11]M. J. Jackson, “ Micro and Nanomachining”, Center for Advanced Manufacturing, College of Technology, Purdue University
- [12]Κωνσταντίνος Καντζάβελος, “Κατεργασίες κοπής υψηλής ταχύτητας: πειραματική μελέτη και αριθμητική προσομοίωση”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2009
- [13]Σημειώσεις του μαθήματος «Κατεργασίες II» του καθηγητή ΕΜΠ Δ. Μανωλάκου

- [14] Σημειώσεις του μαθήματος «Εισαγωγή στη μηχανουργική Τεχνολογία» του καθηγητή ΕΜΠ Γ. Βοσνιάκου
- [15] Λαζάρου Ε. Λαζαρίδη, “Μηχανουργική Τεχνολογία”, Ίδρυμα Ευγενίδου, 1997
- [16] Πέτρου Γ. Πετροπούλου, “Μηχανουργική Τεχνολογία”, Ίδρυμα Ευγενίδου, 1998
- [17] W. R. Backer, E. R. Marshall, and M. C. Shaw, 1952, “The size effect in metal cutting”, *Trans. of ASME*, pp. 74-61.
- [18] J.Larsen-Basse and P.L.B. Oxley, 1973, “Effect of strain rate sensitivity on scale phenomena in chip formation”, *Proceedings of the 13th International Machine Tool Design & Research Conference*, University of Birmingham, pp. 209-216
- [19] E. M. Kopalinsky and P.L.B. Oxley, 1984, “Size effects in metal removal processes”, *Institute of Physics Conference Series*, n70, 1984, pp. 389-396.
- [20] T.D. Marusich, 2001, “Effects of friction and cutting speed on cutting force”, *Proc. IMECE (ASME)*, Nov. 11-16, New York., Paper#: MED-23313
- [21] K. Nakayama and K. Tamura, 1968, “Size effect in metal-cutting force”, *American Society of Mechanical Engineers*, 67-Prod-9, 1967, 8p
- [22] K.W. Kim, W.Y. Lee and H.C. Sin, 1999, “A finite element analysis of machining with the tool edge considered”, *J. of Mat. Proc. Tech.*, **86**, pp. 45-55.
- [23] D. A. Lucca, R.L. Rhorer, and R. Komanduri, 1993, “Effect of tool edge geometry on energy dissipation in ultraprecision machining”, *Annals of the CIRP*, **42**(1), pp.83-86.
- [24] E.J.A. Armarego and R.H. Brown, 1962, “On the size effect in metal cutting”, *International Journal of Production Research.*, **1**, n3, pp. 75-99.
- [25] A.G. Atkins, 2003, “Modeling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanations for some longstanding problems”, *Int. J. of Mech. Sci.*, **45**, pp. 373-396.
- [26] el.wikipedia.org/wiki/Μέθοδος_πεπερασμένων_στοιχείων
- [27] Αγγέλου Μαρκοπούλου, “Κατεργασίες Αποβολής Υλικού Λίαν Υψηλής Ακριβείας”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2006
- [28] W. Grzesik, M. Bartoszuk, P. Nieslony, “ Finite element modeling of temperature distribution in the cutting zone in turning processes with differently coated tools”, *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, 2005, pages 1204-1211
- [29] T. D. Marusich, Jeffrey D. Thiele, Christopher J. Brand, “Simulation and Analysis of Chip Breakage in Turning Processes”, *Journal at Third Wave Systems*, 2001
- [30] Advant Edge Manual
- [31] www.thirdwavesys.com
- [32] TecPlot User’s Manual