



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ΧΑΛΥΒΑ ΜΕ
PCBN ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΕΦΑΝΟΣ Κ. ΚΙΟΣΕΟΓΛΟΥ

Επιβλέπων: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2017

Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνονται οι σπουδές μου ως προπτυχιακός φοιτητής της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με το παρών θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή, κ. Δημήτριο Ε. Μανωλάκο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το ενδιαφέρον αυτό θέμα καθώς επίσης και για την παροχή της δυνατότητας χρήσης του εξοπλισμού του Εργαστηρίου του Τομέα των Κατεργασιών σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Θερμά θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης, τον κ. Άγγελο Μαρκόπουλο για την ουσιαστική και πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε, καθώς επίσης και για τις χρήσιμες συμβουλές του και τις υποδείξεις που μου παρείχε ανελλιπώς καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, την παρούσα διπλωματική μου εργασία την αφιερώνω στους γονείς μου, Κάρολο και Σαβίνα, και στα αδέρφια μου Μάρκο και Φίλιππο για τη στήριξη τους όλα τα χρόνια. Χωρίς αυτούς δεν θα έφτανα εδώ. Επίσης, την αφιερώνω στους φίλους μου και σε όλους όσους χαίρονται για τη σημερινή αποφοίτηση μου.

Στέφανος Κ. Κιοσέογλου

Φεβρουάριος, 2017

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Γενικά στοιχεία	10
1.1 Εισαγωγή	10
1.2 Περί κατεργασιών κοπής	12
1.2.1 Κατηγοριοποίηση κατεργασιών	12
1.3 Κύριες κατεργασίες αφαίρεσης υλικού.....	14
1.4 Βασικές αρχές κοπής	16
1.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά.....	19
1.6 Ανάλυση των παραγόντων κοπής.....	21
1.6.1 Δύναμη κοπής	21
1.6.2 Θερμοκρασία κοπής.....	22
1.6.3 Ποιότητα τελικής επιφάνειας.....	23
1.6.4 Συνολική αποτίμηση	24
1.7 Η διαδικασία της Τόρνευσης	25
1.7.1 Βασικά στοιχεία.....	25
1.7.2 Μετάβαση στη μικροτόρνευση.....	27
1.8 Από τη μακροκοπή στη μικροκοπή.....	36
1.8.1 Φαινόμενο κλίμακας (size effect) και Ελάχιστο Πάχος Αποβλίπτου ..	39
1.9 Πεπερασμένα στοιχεία	42
1.9.1 Κύρια βήματα μεθόδου.....	42
1.9.2 Meshing και remeshing	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Εργαλείο κοπής και υλικό κατεργασίας.....	47
2.1 Ο χάλυβας και τα χυτά κράματά του	47
2.2 Εργαλεία PCBN	49
2.3 Φθορά τόννου PCBN σε υλικό κατεργασίας σκληροχάλυβα.....	55
2.4 Δομή κοπτικού εργαλείου	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Αριθμητική προσομοίωση κοπής	60
3.1 Γενικά	60
3.2 Σχεδιασμός προσομοιώσεων	60
3.3 Γεωμετρία τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου	62
3.4 Παράδειγμα προσομοίωσης κοπής με το λογισμικό πακέτο MARC65	

3.4.1	Πακέτο πεπερασμένων στοιχείων MSC MARC	65
3.4.2	Εισαγωγή Γεωμετρίας στο MARC και επεξεργασία.....	69
3.4.3	Γεωμετρικές ιδιότητες και ιδιότητες υλικού του τεμαχίου.....	70
3.4.4	Ορισμός των επαφών και των αρχικών συνθηκών.....	74
3.4.5	Προσαρμογή του πλέγματος (mesh adaptivity).....	79
3.4.6	Ιδιότητες φόρτισης.....	80
3.4.7	Τελική ρύθμιση και εκκίνηση προσομοίωσης.....	82
3.4.8	Διεξαγωγή προσομοίωσης.....	84
3.4.9	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Συγκέντρωση αποτελεσμάτων – συμπερασμάτων		89
4.1	Συγκέντρωση αποτελεσμάτων	89
4.1.1	Αποτελέσματα δυνάμεων προσομοιώσεων.....	89
4.1.2	Διαγράμματα δυνάμεων	90
4.1.3	Στιγμιότυπα προσομοιώσεων.....	93
4.2	Συμπεράσματα.....	106
Βιβλιογραφία.....		107

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1: Οι βασικοί συντελεστές της κοπής	16
Εικόνα 1.2: Είδη αποβλίπτου (a) Ασυνεχές, (b) Συνεχές, (c) Συνεχές με ψευδοακμή	17
Εικόνα 1.3: Βασικά στοιχεία κοπής.....	19
Εικόνα 1.4: Κατανομή δυνάμεων στην επιφάνεια του καμπύλου τμήματος.....	22
Εικόνα 1.5: Θέσεις ανάπτυξης θερμότητας κατά την κοπή μετάλλου	22
Εικόνα 1.6: Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας τόννευσης (Venkatesh et al. 2007)	25
Εικόνα 1.7: Μέρη του τόννου (http://www.custompartnet.com/wu/turning)	26
Εικόνα 1.8: Μικροτόννευση (Senthilkumar 2012)	28
Εικόνα 1.9: Παράμετροι διαδικασίας που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της μικροτόννευσης (Senthilkumar 2012)	30
Εικόνα 1.10: Επίδραση της ταχύτητας κοπής στη φθορά του άκρου του κοπτικού εργαλείου (Zhiyu Zhang et. al. 2011)	33
Εικόνα 1.11: Δυνάμεις κοπής σε σύγκριση με τη μεταβολή του βάθους κοπής (Azizur Rahman et. al. 2006).....	34
Εικόνα 1.12: Δυνάμεις κοπής σε σύγκριση με τη μεταβολή της πρόωσης (Azizur Rahman et. al. (2006)	35
Εικόνα 1.13: Δυνάμεις κοπής σε σύγκριση με τη μεταβολή της ταχύτητας (Azizur Rahman et. al. (2006)	35
Εικόνα 1.14: Διαμόρφωση κατεργαζόμενης επιφάνειας κατά τη μικροκοπή	37
Εικόνα 1.15: Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής μικροκλίμακας κατά την κατεύθυνση πρόωσης.....	38
Εικόνα 1.16: Σχηματική απεικόνιση των χαρακτηριστικών κοπής σε σχέση με το ελάχιστο πάχος αποβλίπτου	41
Εικόνα 1.17: Μοντελοποίηση τεμαχίου και εργαλείου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων	45
Εικόνα 1.18: Δομή του μοντέλου μικροκοπής μετά τη λειτουργία Remeshing.....	46
Εικόνα 2.1: Σύγχρονα κοπτικά εργαλεία από ταχυχάλυβα	48
Εικόνα 2.2: Κοπτικά εργαλεία από πολυκρυσταλλικό κυβικό βοριοιτρίτη (http://www.secotools.com/pcb)	49
Εικόνα 2.3: Μικροδομή του πολυκρυσταλλικού κυβικού βοριοιτρίτη (Kim et al., 1999)	50
Εικόνα 2.4: Φθαρμένη κοπτική ακμή εργαλείου κυβικού βοριοιτρίτη στα 240 m/min: (a) BZN 6000 (χαμηλού ποσοστού CBN) και (b) BZN 8100 (υψηλού ποσοστού CBN) (Chou et al., 1999)	52
Εικόνα 2.5: Διάρκεια ζωής εργαλείων πολυκρυσταλλικού κυβικού βοριοιτρίτη σε διαφορετικές ταχύτητες κοπής (Atkins, 2003)	52

Εικόνα 2.6: Ρυθμός πλευρικής φθοράς και φθοράς κρατήρα του εργαλείου (Senthilkumar et al.,2012)	53
Εικόνα 2.7: Λειαντικοί τροχοί PCBN (www.vtd.de)	54
Εικόνα 2.8: Ενθέματα PCBN σε εργαλείο τόννευσης (PCBN guide)	55
Εικόνα 2.9: Φθορά πλευρικής επιφάνειας για όλα τα υλικά σε σχέση με το χρόνο κοπής (Roulachon et al. 2003)	57
Εικόνα 2.10: Σκληρότητα του υλικού του κοπτικού εργαλείου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας	59
Εικόνα 3.1: Χαρακτηριστικά κοπτικού εργαλείου	60
Εικόνα 3.2 : Δισδιάστατη γεωμετρία τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου (βάθος κοπής 0.1 mm) στο Autodesk.....	62
Εικόνα 3.3: Παράδειγμα σφυρηλάτησης με το πακέτο MSC MARC.....	67
Εικόνα 3.4: Παράδειγμα θλίψης με το πακέτο MSC MARC.....	68
Εικόνα 3.5: Η καμπύλη κοπτική ακμή του κοπτικού εργαλείου	69
Εικόνα 3.6: Το βασικό μοντέλο στο MSC MARC.....	70
Εικόνα 3.7: Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικού στο MSC MARC.....	71
Εικόνα 3.8: Παράμετροι πλαστικότητας χάλυβα 16MnCr5 κατά Johnson-Cook (MSC MARC)	72
Εικόνα 3.9: Θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα 16MnCr5	72
Εικόνα 3.10: Ειδική θερμότητα του χάλυβα 16MnCr5	73
Εικόνα 3.11: Συντελεστής Θερμικής Διαστολής του χάλυβα 16MnCr5	73
Εικόνα 3.12: Μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα 16MnCr5	74
Εικόνα 3.13: Ορισμός επαφών επιφανειών και των ιδιοτήτων τους	74
Εικόνα 3.14: Επαφή μεταξύ του κομματιού και του αποβλίπτου του	75
Εικόνα 3.15: Επαφή μεταξύ του κομματιού και του κοπτικού εργαλείου	75
Εικόνα 3.16: Επαφή μεταξύ του κομματιού και της επιφάνειας πάκτωσης	75
Εικόνα 3.17: Ιδιότητες επαφής μεταξύ του κομματιού και του αποβλίπτου του ...	76
Εικόνα 3.18: Ιδιότητες επαφής μεταξύ του κομματιού και της επιφάνειας πάκτωσης	76
Εικόνα 3.19: Ιδιότητες επαφής μεταξύ του κομματιού και του κοπτικού εργαλείου	77
Εικόνα 3.20: Σχετική ταχύτητα κοπτικού εργαλείου.....	78
Εικόνα 3.21: Εισαγωγή αρχικής θερμοκρασίας τεμαχίου.....	79
Εικόνα 3.22: Εισαγωγή ιδιοτήτων και παραμέτρων του remeshing	80
Εικόνα 3.23: Καθορισμός του Penetration	80
Εικόνα 3.24: Ιδιότητες φόρτισης.....	81
Εικόνα 3.25: Προσαρμοζόμενο βήμα φόρτισης.....	82

Εικόνα 3.26: Ιδιότητες της εργασίας	83
Εικόνα 3.27: Ορισμός ελέγχου τριβής.....	84
Εικόνα 3.28: Στοιχεία προσομοίωσης.....	85
Εικόνα 3.29: Διάγραμμα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises για $t = 0 \text{ sec}$	86
Εικόνα 3.30: Διάγραμμα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises για $t = 0.0005 \text{ mm}$	86
Εικόνα 3.31: Διάγραμμα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises για $t = 0.001 \text{ sec}$.	87
Εικόνα 3.32: Διάγραμμα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises για $t = 0.0015 \text{ sec}$	87
Εικόνα 3.33: Διάγραμμα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises για $t = 0.002 \text{ sec}$.	88
Εικόνα 3.34: Διάγραμμα δύναμης κατά τους άξονες X και Y του κοπτικού εργαλείου	88
Εικόνα 4.1: Διάγραμμα δύναμης κοπής κατά τον άξονα X συναρτήσει της ταχύτητας κοπής για όλα τα βάθη κοπής	91
Εικόνα 4.2: Διάγραμμα δύναμης κοπής κατά τον άξονα Y συναρτήσει της ταχύτητας κοπής για όλα τα βάθη κοπής	92
Εικόνα 4.3: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -80° , ταχύτητα κοπής 90 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.05 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm	93
Εικόνα 4.4: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -80° , ταχύτητα κοπής 120 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.05 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm	93
Εικόνα 4.5: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -80° , ταχύτητα κοπής 150 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.05 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm	94
Εικόνα 4.6: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -80° , ταχύτητα κοπής 180 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.05 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm	94
Εικόνα 4.7: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -80° , ταχύτητα κοπής 240 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.05 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm	95
Εικόνα 4.8: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -80° , ταχύτητα κοπής 90 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.1 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm	95
Εικόνα 4.9: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -80° , ταχύτητα κοπής 120 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.1 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm	96
Εικόνα 4.10: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -80° , ταχύτητα κοπής 150 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.1 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm	96

Εικόνα 4.25: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -80 , ταχύτητα κοπής 150 m/min, συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.25 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm	104
Εικόνα 4.26: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -80 , ταχύτητα κοπής 180 m/min, συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.25 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm	104
Εικόνα 4.27: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -80 , ταχύτητα κοπής 240 m/min, συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.25 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm	105

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1 Μη συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες	15
Πίνακας 3.1: Σύνολο παραμέτρων προσομοιώσεων	61
Πίνακας 3.2: Συντεταγμένες σημείων τεμαχίου	63
Πίνακας 3.3: Συντεταγμένες σημείων κοπτικού εργαλείου	64
Πίνακας 3.4: Παράμετροι πλαστικότητας χάλυβα 16MnCr5 κατά Johnson-Cook ..	72
Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δυνάμεων κατά τον άξονα Χ	89
Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δυνάμεων κατά τον άξονα Υ.....	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:Γενικά στοιχεία

1.1 Εισαγωγή

Η ανακάλυψη του τόννου περί τα 1700 αποτέλεσε το πρωταρχικό βήμα σε μια προσπάθεια διαρκούς έρευνας και ανάπτυξης των διαδικασιών κατεργασίας. Σήμερα οι διαδικασίες αποβολής υλικού είναι ένα από τους κύριους πυλώνες που στηρίζεται η τεχνολογία των κατασκευών σε παγκόσμιο επίπεδο, μιας και το επίπεδο πια έχει φτάσει σε μηχανές αριθμητικού ελέγχου CNC και χρήση ποικίλων πηγών ενέργειας. Οι κατεργασίες αφαίρεσης υλικού διακρίνονται για την ευελιξία, την ακρίβεια και την ποικιλία των τελικών προϊόντων. Η βασική τους αρχή είναι η σταδιακή αφαίρεση υλικού (συνήθως μετάλλου) με τη βοήθεια ενός εργαλείου, το οποίο καταλήγει υπό μορφή αποβλίπτου λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης που έχει υποστεί και σε διαφορετικά μεγέθη και σχήματα αναλόγως την κατεργασία.

Με την πάροδο των χρόνων και την αλματώδη εξέλιξης της μηχανουργικής τεχνολογίας σε παραλληλία με του άλλους τομείς, στηρίχθηκε σε σημαντικό βαθμό και η ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας, ειδικά στον 20^ο αιώνα. Η μαζική παραγωγή προϊόντων και αντικειμένων, οι οργανωμένες γραμμές παραγωγής και η εμφάνιση πρωτοποριακών εργαλείων και διαδικασιών είναι μόνο μερικά από τα θετικά των συνεχώς αυξανόμενων τεχνολογικών εξελίξεων. Από την άλλη, αν και αυξήθηκαν τα κόστη αγοράς και συντήρησης των εν λόγω μηχανημάτων, πολλαπλασιάστηκε η παραγωγή και μειώθηκε σημαντικά και το κόστος του κάθε τεμαχίου, ειδικά σε σύγκριση με το τι ίσχυε στο παρελθόν.

Πλέον, στο προσκήνιο έχει έρθει η ανάγκη κατασκευής αντικειμένων ακόμη μικρότερων διαστάσεων, στα οποία υπάρχει απαίτηση για συνεργασία των κλασικών εργαλειομηχανών με τους υπολογιστές και το συντονισμό τους από τον άνθρωπο. Δεδομένου ότι η πρόοδος της τεχνολογίας των πληροφοριακών συστημάτων αναπτύσσει την αλληλεπίδραση ανθρώπου-μηχανής από ένα κείμενο σε ένα γραφικό περιβάλλον, η μοντελοποίηση και η προσομοίωση έχει κερδίσει την προσοχή τόσο της βιομηχανίας όσο και της έρευνας.

Με τη μοντελοποίηση είναι δυνατή η απεικόνιση όσο το δυνατόν παραστατικότερα ενός αντικειμένου σε υπολογιστικό περιβάλλον. Τα πιο σύγχρονα συστήματα και λογισμικά μοντελοποίησης έχουν τη δυνατότητα αναπαράστασης και περιγραφής πολύπλοκων σχημάτων με απλές ρυθμίσεις. Ο τομέας των μοντελοποιήσεων είναι η βασική τεχνική για τομείς όπως το computer design, η παραγωγή (CAD/CAM) συστημάτων, τα γραφικά υπολογιστών, τα animation, οι προσομοιώσεις, η ρομποτική καθώς και οι κατεργασίες υλικών.

Η διεξαγωγή των μοντελοποιήσεων στηρίζεται σε μια σειρά από παραμέτρους, όπως οι καμπύλες και επιφάνειες και πολυγωνικά πλέγματα (meshes). Έτσι με τη βοήθεια των πλεγμάτων είναι δυνατό αναπαράχθει ένα μοντέλο που έχει σχεδιαστεί και θα προσεγγίζει σε σημαντικό βαθμό ένα πραγματικό αντικείμενο. Η δημιουργία πλέγματος αποτελεί την κορωνίδα των σύγχρονων συσκευών ψηφιοποίησης λόγω της απλότητά τους και της δυνατότητας επιλογής του σε ευρεία γκάμα εφαρμογών.

1.2 Περί κατεργασιών κοπής

Μετά τη βιομηχανική επανάσταση οι κατεργασίες υλικών έλαβαν σχεδόν τη μορφή που έχουν και σήμερα, αποτελούν γενικότερα διαδικασίες μορφοποίησης μεταλλικών προϊόντων και πιο ειδικά αφαίρεσης μετάλλου. Έτσι το εκάστοτε μεταλλικό τεμάχιο λαμβάνει την επιθυμητή μορφή μέσω της αφαίρεσης πλεονάζοντος υλικού με τη βοήθεια ενός κοπτικού εργαλείου. Ορισμένα από τα συγκριτικά πλεονεκτήματα των κατεργασιών κοπής είναι η ακρίβεια των διαστάσεων των τελικών προϊόντων, η δυνατότητα απόδοσης μορφής και η καλύτερη τραχύτητα επιφανείας στο κατεργαζόμενο υλικό, με το ανάλογο βέβαια κόστος παραγωγής τους.

Οι κατεργασίες κοπής ομαδοποιούνται ανάλογα με τη μορφή του κοπτικού εργαλείου, δηλαδή αν έχει γεωμετρικώς καθορισμένη μορφή ή μη. Διακρίνονται οι κατεργασίες απλής σημειακής επαφής (στην αποβολή υλικού μετέχει μόνο μία κόψη του κοπτικού εργαλείου) όπως η τόννευση και το πλάνισμα και αυτές με πολλαπλή σημειακή επαφή, όπως το φρεζάρισμα και η διάτρηση. Τέλος η κάθε κατεργασία χωρίζεται επίσης σε κατηγορίες, ανάλογα με το είδος των τεχνικών επιφανειών των τεμαχίων που αναφέρεται (επιπέδων, κυλινδρικών, ειδικής μορφής κλπ).

1.2.1 Κατηγοριοποίηση κατεργασιών

Ορισμός: μια συμβατική κατεργασία αφορά την πρόσδοση επιθυμητής μορφής σε ένα μεταλλικό κομμάτι, μέσω μηχανικής αφαίρεσης του πλεονάζοντος υλικού με τη βοήθεια κοπτικού εργαλείου.

Η ταξινόμηση DIN χωρίζει τις κατεργασίες στις ακόλουθες ευρείες κατηγορίες:

- ❖ **Αρχέγονες κατεργασίες**: το υλικό αρχικά δεν έχει συγκεκριμένο σχήμα, αλλά αποκτά καθορισμένη γεωμετρία μετά από τη μορφοποίηση (χύτευση, κονιομεταλλουργία).
- ❖ **Διαμορφώσεις**: διακρίνονται σε διαμορφώσεις του συμπαγούς υλικού (σφυρηλάτηση, έλαση, διέλαση, ολκή, κλπ.) και σε διαμορφώσεις του επιπέδου ελάσματος (κάμψη, απότμηση, βαθεία κοίλανση, κλπ.). Το βασικό τους χαρακτηριστικό είναι η πλαστική παραμόρφωση και η διατήρηση της μάζας του υλικού.
- ❖ **Κοπές ή κατεργασίες αποβολής υλικού**: σε αυτές τις κατεργασίες, η μορφοποίηση επιτυγχάνεται με συνδυασμό

πλαστικής παραμόρφωσης σε διάτμηση και αποβολή υλικού (τόρνευση, διάτρηση, φρεζάρισμα, λείανση, κλπ.).

- ❖ **Επιφανειακές κατεργασίες:** οι κατεργασίες αυτές δεν επιφέρουν αλλαγή στο σχήμα του τεμαχίου αλλά μεταβάλλουν τις ιδιότητες της κατεργασμένης επιφάνειας, όσον αφορά στην ενίσχυση και την προστασία της. Διακρίνονται σε θερμικές, θερμοχημικές και επικαλύψεις.
- ❖ **Κατεργασίες σύνδεσης:** διακρίνονται σε μεταλλουργικές συνδέσεις (συγκολλήσεις) και μηχανικές συνδέσεις (κοχλιώσεις, ηλώσεις, κλπ.).

Από την άποψη της εφαρμοζόμενης θερμοκρασίας κατεργασίας και πιο συγκεκριμένα τη θερμοκρασία τήξης T_M και τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης, η οποία ορίζεται ως εξής T_r ($0.4 - 0.5 T_M$). Με βάση αυτό το κριτήριο οι κατηγορίες των εν λόγω κατεργασιών είναι:

- *Ψυχρές κατεργασίες:* πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_e .
- *Θερμές κατεργασίες:* πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες ανάμεσα στη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης και τη θερμοκρασία τήξης του κατεργαζόμενου υλικού.
- *Ημίθερμες κατεργασίες:* συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και περιορίζουν τα μειονεκτήματα των δύο προηγούμενων κατηγοριών, ενώ λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασίες ανάμεσα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του κατεργαζόμενου υλικού.

1.3 Κύριες κατεργασίες αφαίρεσης υλικού

Αναφερόμενοι στις κατεργασίες κοπής, ως μεθόδους παραγωγής μεταλλικών προϊόντων, αφαιρείται προοδευτικά προκαθορισμένος κατά στρώσεις όγκος μετάλλου με τη βοήθεια εργαλείου σε σχήμα σφήνας, με πλαστική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου υπό μορφή αποβλίπτων σε μέγεθος και σχήμα που ποικίλλουν αναλόγως την κατεργασία. Με τις κατεργασίες κοπής προσδίδεται στο τεμάχιο η επιθυμητή (προδιαγεγραμμένη) μορφή και διαστάσεις μέσα στα επιτρεπόμενα όρια ανοχών και ακόμη η απαραίτητη ποιότητα των τεχνολογικών επιφανειών του τεμαχίου, ώστε αυτό να μπορέσει να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις λειτουργικές απαιτήσεις κατά τη χρήση, για την οποία προορίζεται. Η κοπή επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του κατάλληλου εκάστοτε κοπτικού εργαλείου, που διαθέτει την απαιτούμενη κοπτική ισχύ και εκτελεί τις αναγκαίες για την μορφοποίηση του κομματιού κινήσεις, τόσο του κομματιού, όσο και του εργαλείου.

- ❖ *Τόρνευση*
- ❖ *Φρεζάρισμα*
- ❖ *Διάτρηση*
- ❖ *Λείανση*

Οι μη συμβατικές κατεργασίες αφαίρεσεως μετάλλου έχουν ως κοινό γνώρισμα με τις κατεργασίες κοπής το ότι και στις πρώτες, για να μορφοποιηθεί το τεμάχιο, αφαιρείται από αυτό το μέταλλο που πλεονάζει. Όμως, το αποβαλλόμενο μέταλλο δεν έχει τη μορφή αποβλίπτου ούτε και σχηματίζεται με τον ίδιο μηχανισμό (υψηλού βαθμού πλαστική παραμόρφωση), αλλά παρουσιάζεται υπό μορφή ποικίλων τελικά σχημάτων, όπως σφαιριδίων, κ.ά. Ακόμη, η προσδιδόμενη, για να λάβει χώρα μία μη συμβατική κατεργασία αφαίρεσεως μετάλλου ενέργεια, δεν είναι εν γένει μηχανική, όπως συμβαίνει στις κατεργασίες κοπής, αλλά θερμική, χημική, ηλεκτροχημική ή κάποιας άλλης μορφής.. Στον Πίνακα 1.1 αναφέρονται οι κύριες μη συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες.

Κοπή με υπερήχους (ultrasonic machining)
Χημική κοπή- διάτρηση
Ηλεκτροχημική κοπή (ECM)
Ηλεκτροδιάβρωση
Κοπή με laser
Κοπή με δέσμη νερού
Κοπή με αποξεστική δέσμη
Κοπή με διαβρωτική δέσμη
Κονιομεταλλουργία

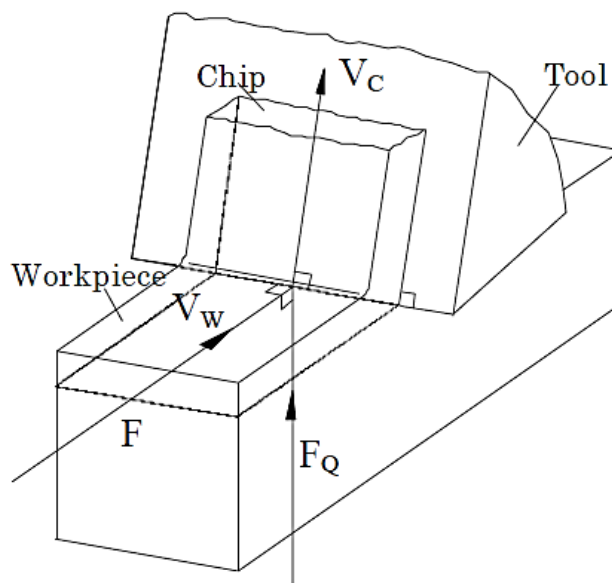
Πίνακας 1.1 Μη συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες

1.4 Βασικές αρχές κοπής

Στην Εικόνα 1.1 παρουσιάζονται οι βασικοί συντελεστές που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην κοπή. Αναλυτικότερα είναι:

- Κατεργαζόμενο τεμάχιο (TE)
- Κοπτικό εργαλείο (ΚΕ)
- Απόβλιπτο (το αφαιρούμενο υλικό)

Το ΚΕ κινείται σε σχέση προς το ΤΕ σε συγκεκριμένη κατεύθυνση (διεύθυνση κοπής) με ταχύτητα v , ενώ συγχρόνως σχηματίζεται το απόβλιπτο που κινείται επί του ΚΕ μετά από ισχυρή πλαστική παραμόρφωσή του.



Εικόνα 1.1: Οι βασικοί συντελεστές της κοπής

Δυο είναι οι κύριες κινήσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την κοπή:

- ❖ Η Πρωτεύουσα ή Κύρια κίνηση παρέχεται από την εργαλειομηχανή στο τεμάχιο ή το εργαλείο και εξασφαλίζει τοπική σχετική κίνηση του ενός ως προς το άλλο. Αποτέλεσμα αυτής της κίνησης, κατά την οποία απορροφάται και το μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος κοπής, είναι είτε η προσέγγισή τεμαχίου και εργαλείου, είτε η αφαίρεση υλικού.
- ❖ Η Δευτερεύουσα ή κίνηση Πρόωσης σε συνδυασμό με την κύρια αποδίδει σε ορισμένο μήκος του τεμαχίου την κατεργασμένη επιφάνειά του.

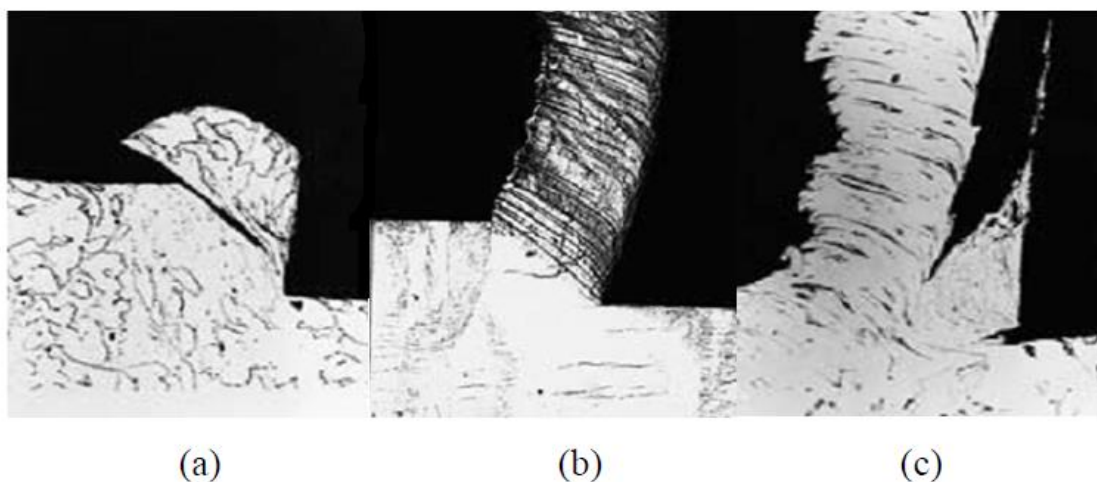
Οι κινήσεις αυτές ποικίλουν στις διάφορες εργαλειομηχανές. Για παράδειγμα κατά την τόννευση η κύρια κίνηση παρέχεται στο τεμάχιο που περιστρέφεται ενώ το εργαλείο εκτελεί την δευτερεύουσα καθώς μετατίθεται ευθύγραμμα.

Η αφαίρεση του υλικού στις εργαλειομηχανές επιτυγχάνεται μέσω της διαφορετικής κινηματικής του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, με καθορισμένο βάθος (το οποίο ονομάζεται **βάθος κοπής**) και προδιαγεγραμμένη ταχύτητα εισχώρησης.

Το υλικό του τεμαχίου που απομακρύνεται λέγεται **απόβλιπτο** (γρέζι) και μπορεί, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες κατεργασίας και το υλικό του τεμαχίου, να έχει διάφορες μορφές.

Σύμφωνα με την κατάταξη του Ernst υπάρχουν 3 είδη αποβλίπτου (Εικόνα 1.2):

- Ασυνεχές απόβλιπτο
- Συνεχές απόβλιπτο
- Συνεχές απόβλιπτο με ψευδοακμή



Εικόνα 1.2: Είδη αποβλίπτου (a) Ασυνεχές, (b) Συνεχές, (c) Συνεχές με ψευδοακμή

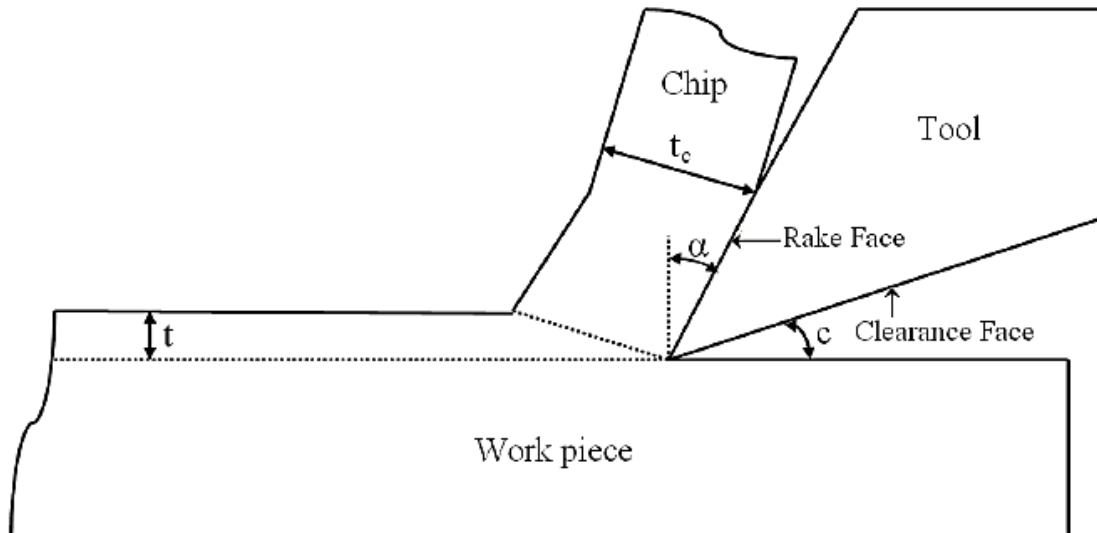
Σε περιπτώσεις που το συνεχές απόβλιπτο αποκτά μεγάλο μήκος (ιδίως στην κατεργασία όλκιμων υλικών), με αποτέλεσμα να επιφέρει δυσκολίες αλλά και κινδύνους κατά την ώρα όπως κατεργασίας, χρησιμοποιούνται κατάλληλες διαμορφώσεις του κοπτικού εργαλείου που ονομάζονται γρεζοθραύστες. Ένα φαινόμενο που σχετίζεται με

την δημιουργία του συνεχούς αποβλίπτου είναι και η δημιουργία ψευδοακμής.

Κατά την διαδικασία δημιουργίας του αποβλίπτου, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί στην κόψη του εργαλείου η ψευδοακμή. Πρόκειται για σφηνοειδές, ασύμμετρο σώμα από ισχυρά παραμορφωμένο και σκληρυμένο υλικό του τεμαχίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2. Στην εικόνα αυτή διακρίνονται η κοπτική ακμή του εργαλείου που έχει μορφή σφήνας, το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το απόβλιπτο που παράγεται και η ψευδόκοψη ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο. Η ψευδόκοψη αυτή δημιουργείται από επάλληλα στρώματα υλικού του τεμαχίου, που προσκολλώνται στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου.

1.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζονται τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά που απαρτίζουν την κοπή.



Εικόνα 1.3: Βασικά στοιχεία κοπής

Διακρίνουμε τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά (Εικόνα 1.3):

- *Επιφάνεια αποβλίπτου*: Είναι η επιφάνεια της σφήνας, πάνω στην οποία ολισθαίνει το απόβλιπτο κατά την κίνησή του.
- *Ελεύθερη επιφάνεια*: Είναι η επιφάνεια της σφήνας που αντικρίζει την κατεργασμένη επιφάνεια.
- *Κόψη*: Είναι η ακμή της σφήνας που προκύπτει ως τομή των δύο παραπάνω επιφανειών.
- *Γωνία αποβλίπτου, γ* : Σχηματίζεται από την επιφάνεια αποβλίπτου και το κάθετο επίπεδο στην κατεργασμένη επιφάνεια που διέρχεται από την κόψη του ΚΕ. Μπορεί να είναι θετική, αρνητική ή μηδενική.
- *Γωνία ελευθερίας, α* : Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια του ΚΕ και την κατεργασμένη επιφάνεια.
- *Γωνία σφήνας, β* : Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια και από την επιφάνεια αποβλίπτου.

Ισχύει :

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

Η γωνία αποβλίπτου « γ » είναι η σημαντικότερη απ' όλες. Όσο μεγαλώνει, τόσο μικραίνει η δύναμη κοπής αλλά εξασθενεί η ακμή και επέρχεται γρηγορότερα στόμωση του εργαλείου. Όσο σκληρότερο είναι το υλικό λοιπόν, τόσο η γωνία αποβλίπτου πρέπει να είναι μικρότερη. Παράλληλα πρέπει να αναφέρουμε και τη ζώνη διάτμησης, η οποία είναι μια στενή περιοχή όπου το υλικό υφίσταται εφελκυσμό και παραμορφώνεται πλαστικά.

Εξάλλου, σύμφωνα με τη θεωρία τα πιο μαλακά κατεργαζόμενα υλικά, απαιτούν πιο αιχμηρή κόψη της σφήνας ενώ τα σκληρά υλικά απαιτούν στιβαρότερο και άρα σφήνα μεγαλύτερου πάχους. Συνολικά μπορεί να παρατηρηθεί πως όσο πιο μαλακό είναι ένα υλικό, τόσο οι γωνίες κοπής του κοπτικού εργαλείου πρέπει να τείνουν αντίστοιχα σε:

- αύξηση της γωνίας ελευθερίας α
- μείωση της γωνίας σφήνας β
- αύξηση της γωνίας αποβλίπτου γ

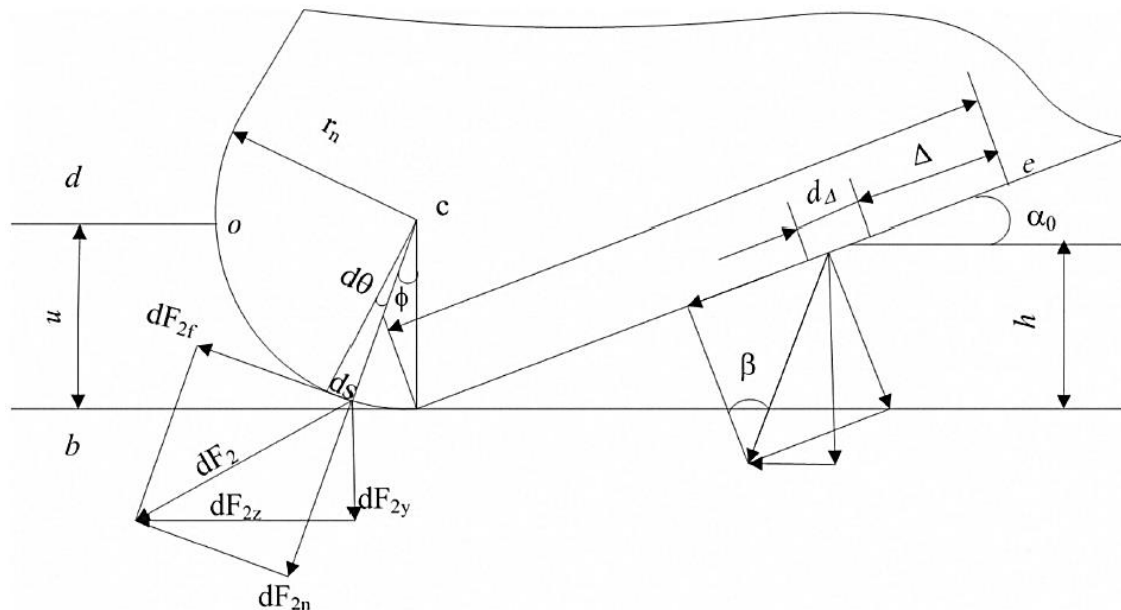
1.6 Ανάλυση των παραγόντων κοπής

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της κοπής και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών. Έτσι στις ακόλουθες ενότητες θα αναλυθούν διεξοδικότερα οι ιδιαιτερότητες τους και τα βασικά στοιχεία τους που επηρεάζουν μια κατεργασία.

1.6.1 Δύναμη κοπής

Παρόλο που αναπτύσσονται 3 κύριες (συνιστώσες της δύναμης) δυνάμεις κατά την κατεργασία, η βασική δύναμη που μας ενδιαφέρει είναι η δύναμη κοπής που είναι παράλληλη στην πρωτεύουσα κίνηση. Η δύναμη κοπής αυξάνεται όσο:

- μειώνεται η ταχύτητα κοπής, όταν όμως αναφερόμαστε σε υψηλές ταχύτητες κατεργασίας, λόγω της αύξησης θερμοκρασίας και της πλαστικής παραμόρφωσης του τεμαχίου.
- αυξάνεται η πρόωση και το βάθος κοπής, εφόσον κόβεται μεγαλύτερο μέρος υλικού στον ίδιο χρόνο. Η δύναμη κοπής αυξάνεται σχεδόν ανάλογα με το βάθος κοπής, ενώ κατά την πρόωση δεν σημειώνεται τόσο σημαντική μεταβολή, ίσως γιατί η κοπή εξαρτάται περισσότερο από την περιοχή της ακμής του εργαλείου.
- μεγαλύτερη είναι η σκληρότητα του υλικού κατεργασίας.
- μικρότερες είναι οι γωνίες κοπής και αποβλίπτου, ενώ η γωνία ελευθερίας δεν παίζει σημαντικό ρόλο ως προς τη δύναμη κοπής.
- αυξάνεται η ακτίνα καμπυλότητας της ακμής του κοπτικού εργαλείου, γιατί δυσχεραίνεται η παραμόρφωση του τεμαχίου και η θερμοκρασία είναι μικρότερη.

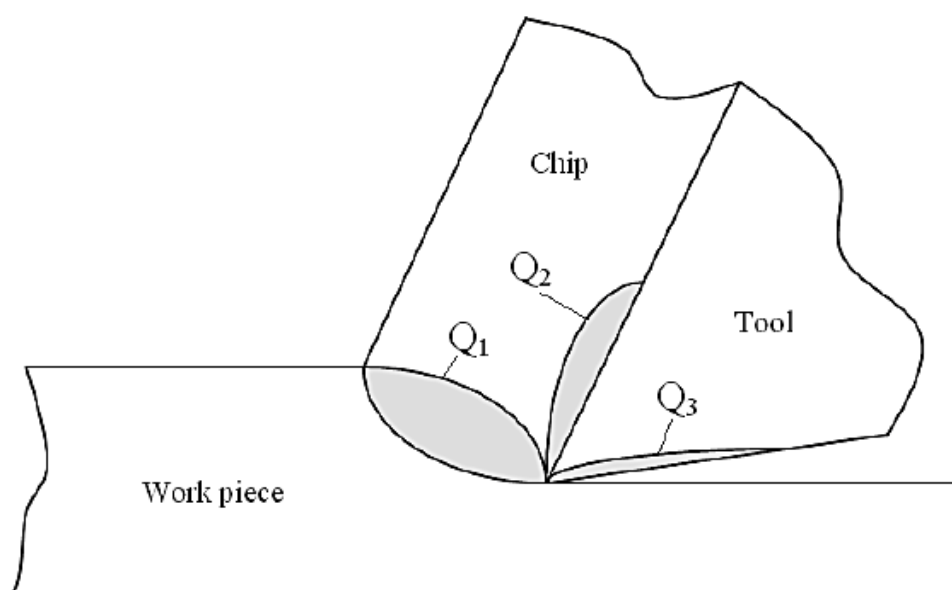


Εικόνα 1.4: Κατανομή δυνάμεων στην επιφάνεια του καμπύλου τμήματος

1.6.2 Θερμοκρασία κοπής

Μια εξίσου σημαντική παράμετρος κοπής είναι η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία στην διαδικασία της κατεργασίας, τόσο αναφορικά με τις μέγιστες τιμές της, όσο και με την κατανομή της στο κοπτικό εργαλείο, στο απόβλιπτο και στο υλικό κατεργασίας.

Στην Εικόνα 1.5 παρουσιάζονται τα κύρια σημεία που αναπτύσσονται σημαντικά ποσά θερμότητας κατά τη διαδικασία της κοπής.



Εικόνα 1.5: Θέσεις ανάπτυξης θερμότητας κατά την κοπή μετάλλου

Η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών ευνοείται από:

- *Μεγάλα μεγέθη χαρακτηριστικών κοπής* (ταχύτητα κοπής, πρόωσης και βάθος κοπής), αφού το εργαλείο κόβει μεγαλύτερο μέρος του τεμαχίου σε μικρό χρόνο και η θερμότητα δεν διαχέεται επαρκώς.
- *Υψηλή σκληρότητα του τεμαχίου*, καθώς η τριβή που αναπτύσσεται και παραμορφώνει το υλικό του τεμαχίου είναι μεγαλύτερη.
- *Υλικά με κακή θερμική αγωγιμότητα ή με μικρή μάζα*, γι' αυτό κατά τις κατεργασίες υψηλής ταχύτητας επεξεργαζόμαστε συνήθως μεγάλα τεμάχια και με καλή θερμική αγωγιμότητα. Παράλληλα, η αγωγιμότητα επηρεάζεται και από της επικαλύψεις των κοπτικών εργαλείων, με αυτές να είναι πλέον απαραίτητες για καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας.
- *Μη χρήση ψυκτικού υγρού.*
- *Μεγάλη γωνία κοπής*, ενώ αντίθετα όταν οι γωνίες ελευθερίας και αποβλίπτου είναι μικρότερες τότε η θερμοκρασία αυξάνεται.
- *Μικρή ακτίνα καμπυλότητας*, διότι συγκεντρώνεται η θερμότητα σε μικρότερη επιφάνεια, εφόσον η ακμή του κοπτικού εργαλείου είναι μικρότερη.

1.6.3 Ποιότητα τελικής επιφάνειας

Η αύξηση της θερμοκρασίας κατά την κατεργασία ενός τεμαχίου επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα της τελικής επιφάνειας. Το γεγονός αυτό συναντάται κυρίως σε υλικά με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, μιας και δεν υπάρχει ικανοποιητική απαγωγή θερμότητας από την κατεργαζόμενη επιφάνεια με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανωμαλίες. Από την άλλη, σε υλικά με καλή θερμική αγωγιμότητα, όπως ο χάλυβας, η θερμοκρασία μειώνει τη δύναμη κοπής που απαιτείται με αποτέλεσμα η τελική επιφάνεια να έχει μεγαλύτερη ακρίβεια. Πρέπει να επισημανθεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας πρέπει να βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων αναλόγως το χρησιμοποιούμενο υλικό.

Για τους καλούς αγωγούς της θερμότητας η υψηλή ταχύτητα βελτιώνει την ποιότητα επιφάνειας, όμως μέχρι κάποιο όριο, όχι μόνο λόγω της θερμοκρασίας, αλλά και για μηχανικούς λόγους. Ειδικά για το φρεζάρισμα, το οποίο περιλαμβάνει περιστρεφόμενο εργαλείο

κοπής, έχουμε διαφορετικά αποτελέσματα. Το αναμενόμενο θα ήταν μείωση της δύναμης κοπής που προκαλείται από αύξηση της ταχύτητας να μειώνονται και οι ταλαντώσεις στο κοπτικό εργαλείο, στην πραγματικότητα όσο μεγαλύτερη είναι ταχύτητα περιστροφής των εργαλείων, τόσο περισσότεροι κραδασμοί δημιουργούνται. Μάλιστα οι δυνάμεις που προκαλούν αυτές τις ταλαντώσεις αυξάνονται συναρτήσει του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής και μαζί με αυτές, μειώνεται η ποιότητα επιφάνειας και η ακρίβεια της κατεργασίας. Για την τόννευση προφανώς δεν παρουσιάζεται αυτό το πρόβλημα με το εργαλείο αλλά με τις ταλαντώσεις του τεμαχίου. Το πρόβλημα ακρίβειας λόγω υψηλής ταχύτητας περιστροφής λύνεται βέβαια με σωστή και ασφαλή πρόσδεση των περιστρεφόμενων μερών ή με καλύτερης ποιότητας εργαλειομηχανή.

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα της τελικής επιφάνειας είναι η αύξηση του βάθους κοπής και περισσότερο της ταχύτητας προώσεως, μιας και αυξάνουν τις δυνάμεις κοπής και αποσταθεροποιούν το εργαλείο κοπής. Επίσης η σκληρότητα παίζει ανάλογα σημαντικό ρόλο, μιας και όσο πιο σκληρό είναι το τεμάχιο, τόσο μεγαλύτερες θα είναι και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται και άρα τόσο χαμηλότερη θα είναι η ακρίβεια της κατεργασίας.

1.6.4 Συνολική αποτίμηση

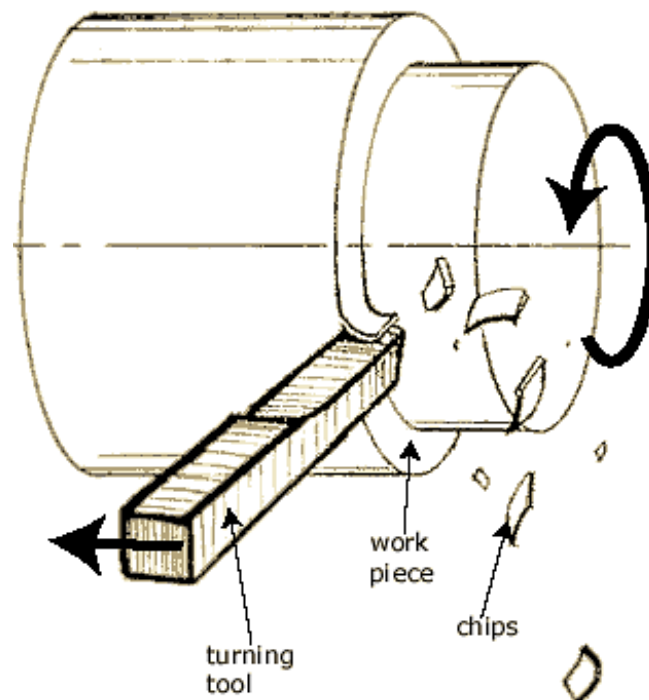
Πέρα όμως από τους προαναφερθέντες παράγοντες κοπής (θερμοκρασία, δύναμη και ακρίβεια κατεργασίας), θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και ο χρόνος ζωής του κοπτικού εργαλείου, ώστε να γίνεται η σωστότερη επιλογή των κατάλληλων συνθηκών της μεθόδου κατεργασίας.

Οι συγκεκριμένοι παράγοντες παίζουν σημαντικό ρόλο στο χρόνο ζωής του εργαλείου, μιας μπορεί η αύξηση της θερμοκρασίας να καθιστά ευκολότερη την κατεργασία, παράλληλα αυξάνεται και η θερμική καταπόνηση στο εργαλείο, ενώ η δύναμη κοπής είναι επιθυμητό να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Λογικό είναι λοιπόν σε κάθε κατεργασία να θέλουμε όσο το δυνατό μικρότερη θερμοκρασία και δύναμη, αλλά βλέπουμε ότι οι περισσότερες συνθήκες κοπής που αποφέρουν μείωση της δύναμης, αποφέρουν και αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ συγχρόνως η αύξηση της θερμοκρασίας αποφέρει μείωση της δύναμης κοπής. Είναι λοιπόν ένας συνδυασμός παραγόντων που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών της διαδικασίας κοπής.

1.7 Η διαδικασία της Τόρνευσης

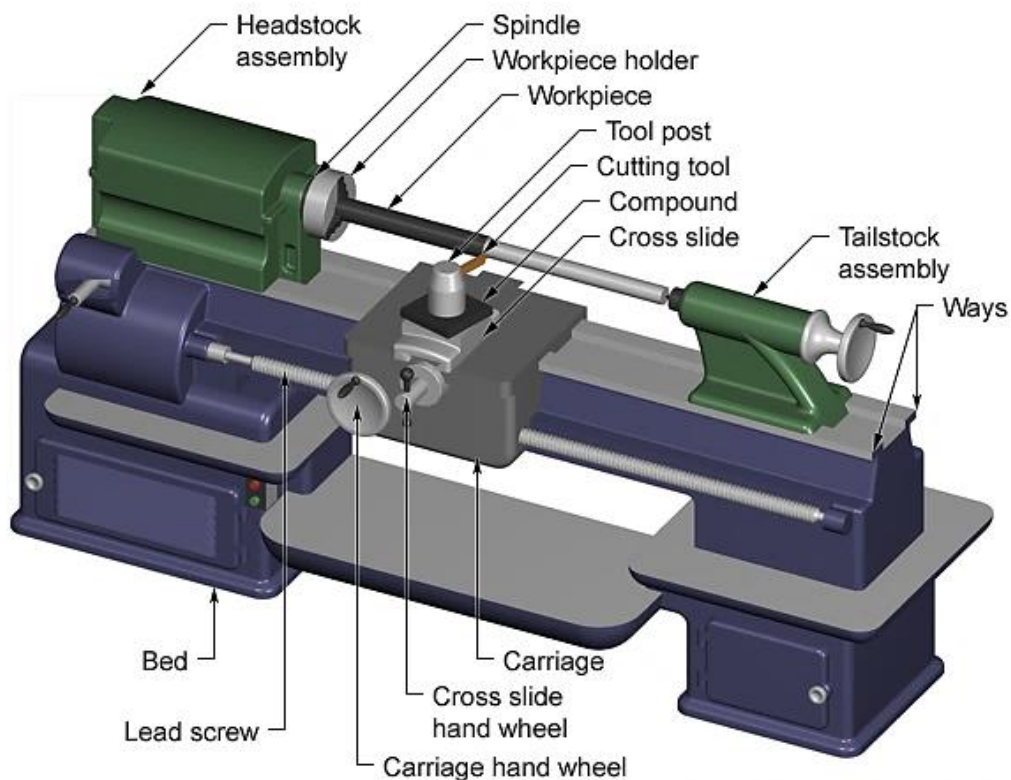
1.7.1 Βασικά στοιχεία

Η τόρνευση σαν κατεργασία χρησιμοποιείται από πολύ παλαιά, γύρω όμως στο 1400 μ.Χ. εμφανίστηκαν οι πρώτοι τόρνοι που στην αρχή κινούνταν με μυϊκή δύναμη ή με νερό σαν τους κατοπινούς υδρόμυλους. Με τόρνευση κατεργάζονται τεμάχια συμμετρικά εκ περιστροφής με κατά κανόνα κυκλική διατομή. Κατά την τόρνευση, το κατεργαζόμενο τεμάχιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, συγκρατημένο στον σφικτήρα (τσοκ) του τόρνου. Με αυτόν τον τρόπο, συγκρούεται με το κοπτικό εργαλείο, το οποίο έχει δυνατότητα εγκάρσιας και διαμήκουσ μετακίνησης και έτσι απομακρύνεται υλικό από το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Οι κινήσεις αυτές κατά την τόρνευση, παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.6. Το εγκάρσιο βάθος εισχώρησης του εργαλείου στο τεμάχιο αποτελεί και το βάθος κοπής. (Venkatesh et al. 2007, Λαζαρίδη Λ. 1997)



Εικόνα 1.6: Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας τόρνευσης (Venkatesh et al. 2007)

Η εργαλειομηχανή που εξασφαλίζει με ακρίβεια τις κινήσεις του τεμαχίου και του εργαλείου για την τόρνευση, είναι ο τόρνος. Στην Εικόνα 1.7 παρουσιάζεται σχηματικά ένας τόρνος, όπου διακρίνονται και τα μέρη από τα οποία αποτελείται.



Εικόνα 1.7: Μέρη του τόνου (<http://www.custompartnet.com/wu/turning>)

Ο τόνος αποτελεί μια από τις περισσότερο παραγωγικές εργαλειομηχανές και το 40% περίπου των εργασιών κοπής των μετάλλων γίνονται σε τόννο. Οι σύγχρονοι τόννοι έχουν δυνατότητα παραγωγής καμπύλων εξαρτημάτων, με μεγάλο αριθμό ακρίβειας και μεγάλες ταχύτητες παραγωγής.

Οι τόννοι, όπως και οι περισσότερες εργαλειομηχανές, μπορεί να είναι συμβατικοί, πράγμα που σημαίνει πως καθοδηγούνται από τον χειριστή που κάνει όλες τις απαραίτητες κινήσεις και ρυθμίσεις για την κατεργασία, ή να είναι τόννοι ψηφιακά καθοδηγούμενοι, όπου οι κινήσεις αλλά και οι ρυθμίσεις απαιτούν πολύ μικρή συμμετοχή του παραδοσιακού χειριστή μια και τις αναλαμβάνει μια ηλεκτρονική μονάδα καθοδήγησης που την χειρίζεται προγραμματιστής. (Dieter, 1997)

Η τεχνολογία όμως της κοπής κατά βάση παραμένει η ίδια. Έτσι οι επιλεγόμενες ταχύτητες κοπής, οι προώσεις, τα κοπτικά εργαλεία κ.λπ, καθορίζονται και στις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα. Η αυτοματοποίηση αυτή των κατεργασιών που γίνεται τις τελευταίες δεκαετίες δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να καταργήσει την

αναγκαιότητα γνώσης των υλικών, των καταλλήλων συνθηκών κοπής, της συμπεριφοράς της φθοράς των κοπτικών εργαλείων και γενικά αυτού που ονομάζεται τεχνολογία της κοπής.

Για την κοπή στην τόννευση χρησιμοποιούνται κοπτικά εργαλεία συνήθως από χάλυβα, ταχυχάλυβα, σκληρομέταλλα και κεραμικά. Η διάρκεια ζωής ενός κοπτικού εργαλείου εξαρτάται κατά πολύ από το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο και από την γεωμετρία της κόψης του.

Στο κοπτικό εργαλείο διακρίνονται δύο χαρακτηριστικά τμήματα, το στέλεχος και το κοπτικό άκρο. Το μεν στέλεχος χρησιμοποιείται για την συγκράτηση του εργαλείου στον εργαλειοδέκτη, ενώ το κοπτικό άκρο περιλαμβάνει τις κοπτικές ακμές που συμμετέχουν στην κοπή. Το στέλεχος είναι από μαλακό υλικό ώστε να δέχεται τα κρουστικά φορτία και τις δυναμικές καταπονήσεις κατά την διάρκεια της κοπής χωρίς να θραύεται.

Στην τόννευση οι συνθήκες κοπής είναι η ταχύτητα κοπής που σχετίζεται με τις στροφές περιστροφής του κομματιού και την διάμετρο κοπής, η πρόωση και το βάθος κοπής. Οι τρεις αυτοί παράγοντες παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατεργασία και η σωστή κάθε φορά επιλογή τους, αποτελεί απαραίτητη γνώση του χειριστή ενός τόννου. (Venkatesh 1987, Λαζαρίδη 1997,)

Κατά την τόννευση τεμαχίου διαμέτρου D [mm], το οποίο περιστρέφεται με n στροφές το λεπτό (rpm), η ταχύτητα κοπής u , προκύπτει από την σχέση :

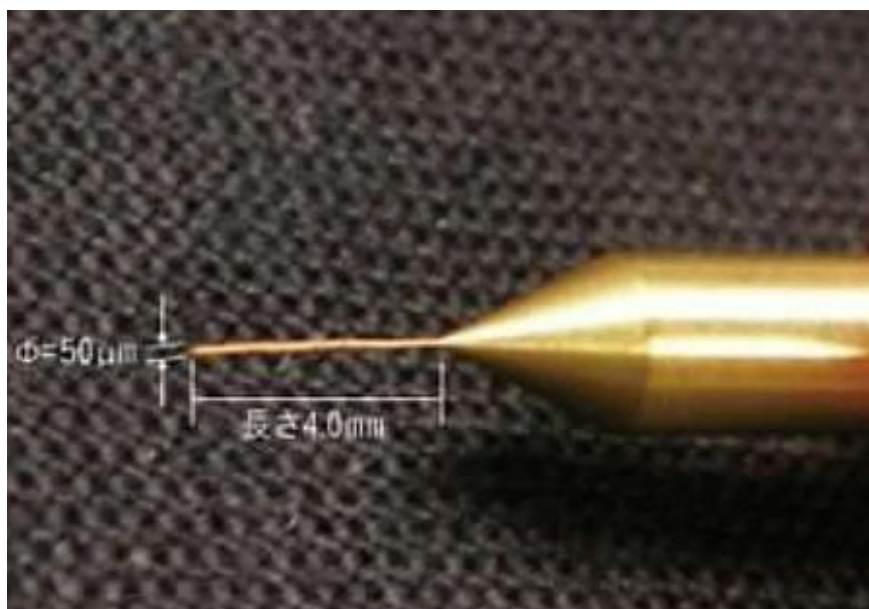
$$u = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$$

1.7.2 Μετάβαση στη μικροτόννευση

Οι πρόσφατες εξελίξεις στη μικρο και νανοτεχνολογία έχουν δημιουργήσει μεγαλύτερη ζήτηση για βιομηχανικά προϊόντα με μικρές διαστάσεις, τα οποία θα ικανοποιούν μια πληθώρα λειτουργιών και δυνατοτήτων. Οι μικροκατεργασίες είναι οι πιο βασικές τεχνολογίες για την παραγωγή μικρογραφιών τέτοιων αντικειμένων ή εξαρτημάτων. Η επιταχύνουσα τάση για μικρογραφίες αντικειμένων αυξάνεται μέρα με τη μέρα και οι τεχνολογίες μικροκατεργασιών γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων κατασκευής και τις δυνατότητες των συμβατικών κατεργασιών. Ο M.A Rahman et. al. (2003) επεσήμαναν ότι η

κατασκευή μινιατούρων έχει πλεονεκτήματα μιας και μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και το απαιτούμενο υλικό προς κατεργασία. Ο J. Mc Geough (2002) αναφέρει ότι η «μικροκατεργασία» χρησιμοποιείται γενικά για την παραγωγή τμημάτων με διαστάσεις μεταξύ 1 και 999 μm . Το νέο άνω όριο που έχει τεθεί μεταξύ των μικρο και μακροκατεργασιών είναι τα 500 μm . Σύμφωνα με τον Alberto Herrero et. al. (2006) τα αποδεκτά όρια των μικροτεχνολογιών είναι μεταξύ των 0.5 και 499 μm .

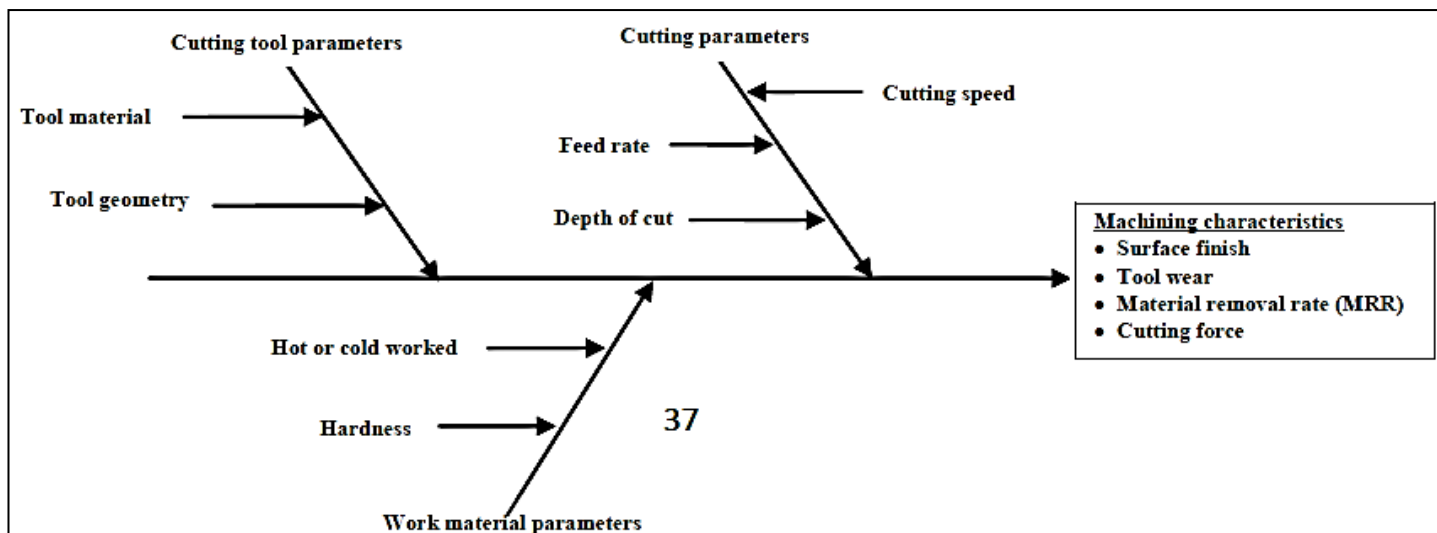
Οι Masuzawa, T. και H.K. Tonshoff (1997) χωρίζουν τις μικροκατεργασίες σε δυο κύριες ομάδες: μικροκατεργασίες με χρήση μάσκας και μικροκατεργασίες με βάση το εργαλείο. Οι τεχνικές με χρήση μάσκας έχουν περιορισμούς όσον αφορά τις τρισδιάστατες δομές και εφαρμόζονται κυρίως σε δισδιάστατα σχήματα. Από την άλλη, υπάρχουν οι συμβατικές κατεργασίες με χρησιμοποίηση εργαλείων, που αφορούν δημιουργία διαφόρων τρισδιάστατων σχημάτων, ενώ γίνεται χαρτογράφηση του μονοπατιού του εργαλείου. Από τις πιο χαρακτηριστικές τεχνολογίες μικροκατεργασίας είναι η μικροτόρνευση, όπου η συμβατική κατεργασία αποβολής υλικού έχει προσαρμοστεί σε διαστάσεις μικρών (μm). Η διαδικασία κοπής περιλαμβάνει, την κίνηση του υλικού κατεργασίας σε σχέση με κοπτικό εργαλείο, ώστε να διαχωριστεί το επιπλέον στρώμα υλικού υπό μορφή αποβλίπτου.



Εικόνα 1.8: Μικροτόρνευση (Senthilkumar 2012)

Ο M.A.Rahman et. al. (2003) πρότεινε ότι η μικροτόρνευση παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής τρισδιάστατων χαρακτηριστικών σε μικροκλίμακα, με τη χρησιμοποίηση κοπτικού εργαλείου, και ακολουθώντας διάφορα μονοπάτια κοπής. Ο M. P. Groover (2010) επεσήμανε ότι η πρωταρχική κίνηση μεταξύ του εργαλείου και υλικού επιτυγχάνεται με συγκεκριμένη ταχύτητα κοπής, ενώ το εργαλείο πρέπει να κινείται εγκάρσια του υλικού με μικρότερη κίνηση, καλούμενη πρόωση. Επίσης, η τελευταία διάσταση που πρέπει να καθορισθεί είναι το βάθος κοπής. Ο κυρίαρχος μηχανισμός κοπής στις κατεργασίες είναι η διατμηματική παραμόρφωση του υλικού κατεργασίας, η οποία δημιουργεί απόβλιπτο το οποίο απομακρύνεται, ενώ διαμορφώνεται μια νέα επιφάνεια, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.

Ο Masuzawa, T. (2000) αναφέρει ότι το κύριο μειονέκτημα της μικροτόρνευσης είναι ότι η δύναμη επηρεάζει την ακρίβεια της μεθόδου και περιορίζει το διαθέσιμο μέγεθος υλικού προς επεξεργασία. Οι Lim et. al. (2002) αναφέρουν ότι η δύναμη ώσης τείνει να εκτρέψει το υλικό κατεργασίας. Παρόλα αυτά, το υλικό κατεργασίας μπορεί να δονηθεί κατά την εφαπτομενική κατεύθυνση μεταξύ της επιφάνειας επαφής μεταξύ του υλικού – εργαλείου, μιας και η κάθετη κατεύθυνση μπλοκάρεται από το εργαλείο κοπής. Οι Lu. Z και Takeshi Yoneyama (1999) παρατήρησαν ότι όσο η διάμετρος του υλικού κατεργασίας μειώνεται, τόσο μειώνεται η ακαμψία του. Συνεπώς, ο έλεγχος της δύναμης αντίδρασης κατά την κοπή είναι σημαντικός για τη βελτίωση της ακρίβειας της κατεργασίας. Η τιμή της δύναμης κοπής πρέπει να είναι μικρότερη από την πλαστική παραμόρφωση του υλικού, ώστε να αποφεύγεται η εκτροπή. Οι παράμετροι διαδικασίας που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της κατεργασίας φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 1.9: Παράμετροι διαδικασίας που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της μικροτόρνευσης (Senthilkumar 2012)

Οι K. M. Rezaur Rahman et. al. (2006) διερεύνησαν την επίδραση διαφόρων παραμέτρων όπως η ταχύτητα περιστροφής, η πρόωση και ο χρόνος παραμονής στην απόδοση της κατεργασίας μικροτόρνευσης, όπως η φθορά του εργαλείου, η δύναμη κοπής και η τραχύτητα της επιφάνειας για επινικελωμένο υλικό. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι όσο αυξανόταν η ταχύτητα κοπής και πρόωσης τόσο αυξανόταν η δύναμη κοπής, ενώ δεν είχε καμία επίδραση στην τραχύτητα της επιφάνειας και στη φθορά του εργαλείου.

Οι Choudhury, I.A., EI-Baradie, M.A. (1997) επεσήμαναν ότι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των μικροκατεργασιών είναι η ποιότητα της επιφάνειας, η οποία καθορίζεται από την τραχύτητα της επιφάνειας. Η τραχύτητα οφείλεται στη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου (γωνία κοπής, η γεωμετρία του άκρου κοπής κτλ.) και στις συνθήκες κοπής (ο ρυθμός πρόωσης, ταχύτητα κοπής, βάθος κοπής κτλ). Ολοκληρώνοντας σημαντική παράμετρος είναι και η φθορά του εργαλείου που επηρεάζει την ποιότητα των τελικών τμημάτων.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των ερευνών που έχουν γίνει στον τομέα της μικροτόρνευσης, καθώς επίσης των προβλημάτων που ανακύπτουν κατά τη διαδικασία.

1.7.1 Ποιότητα και φινίρισμα τελικής επιφάνειας

Οι Oezel, T. και Karpat, Y (2005) έδειξαν ότι η ποιότητα της επιφάνειας αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην εκτίμηση της

παραγωγικότητας του μηχανικού εργαλείου, συνεπώς είναι σημαντική η επίτευξη υψηλής ανοχής και ικανοποιητικής ποιότητας επιφάνειας.

Οι Kai Liu και Shreyes N. Melkote (2006) διεξήγαγαν πειράματα για να προβλέψουν την τραχύτητα της επιφάνειας κατά τη μικροτόρνευση κράματος αλουμινίου, λαμβάνοντας υπόψη την πλαστική πλευρική ροή, τη γεωμετρία του εργαλείου και τις παραμέτρους της κατεργασίας. Οι παρατηρήσεις τους έδειξαν ότι η τραχύτητα της επιφάνειας μειώνεται με την πρόωση, φτάνει σε ένα ελάχιστο και στη συνέχεια αυξάνεται με επιπλέον μείωση της πρόωσης.

Οι K. A. Mahajan et. al. (2010) διερεύνησαν τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής με την τραχύτητα της επιφάνειας, βλέποντας την επίδραση παραμέτρων όπως, ο ρυθμός πρόωσης, το βάθος κοπής και η ακμή του άκρου του κοπτικού εργαλείου. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα του άκρου του κοπτικού εργαλείου, καλύτερη τραχύτητα της επιφάνειας επιτυγχάνεται με αύξηση του βάθους κοπής, της ταχύτητας περιστροφής και του ρυθμού πρόωσης.

Σε πιο εξειδικευμένες μελέτες, οι K.C. Chan., et. al. (2001) διεξήγαγαν λεπτομερή ανάλυση των παραγόντων που αφορούν τη δημιουργία επιφάνειας με τόρνευση μεταλλικού σύνθετου υλικού Al6061/SiCp υπερυψηλής ακρίβειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ποιότητα και η τραχύτητα της επιφάνειας βελτιώνονται σημαντικά χρησιμοποιώντας μεγάλη ταχύτητα περιστροφής και σωστό ρυθμό πρόωσης του εργαλείου. Το βάθος κοπής δεν αποτελεί παράγοντα επηρεασμού της τραχύτητας της επιφάνειας, παρά μόνο υπό συνθήκες χαμηλής ταχύτητας περιστροφής.

1.7.2 Ρυθμός Αποβολής Υλικού

Ο Ρυθμός αποβολής υλικού (Material removal rate - MRR) ορίζεται ως ο όγκος του αποβαλλόμενου υλικού ανά μονάδα χρόνου κατεργασίας.

Ο ρυθμός αυτός επηρεάζεται από όλες τις παραμέτρους της διεργασίας, όπως η ταχύτητα περιστροφής, το βάθος κοπής και ο ρυθμός πρόωσης, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της απαιτούμενης δύναμης για τη διατήρηση της κατεργασίας κοπής.

Οι M. Azizur Rahman et. al. (2005) μελέτησαν την κατεργασιμότητα του ορείχαλκου, κράματος αλουμινίου και του

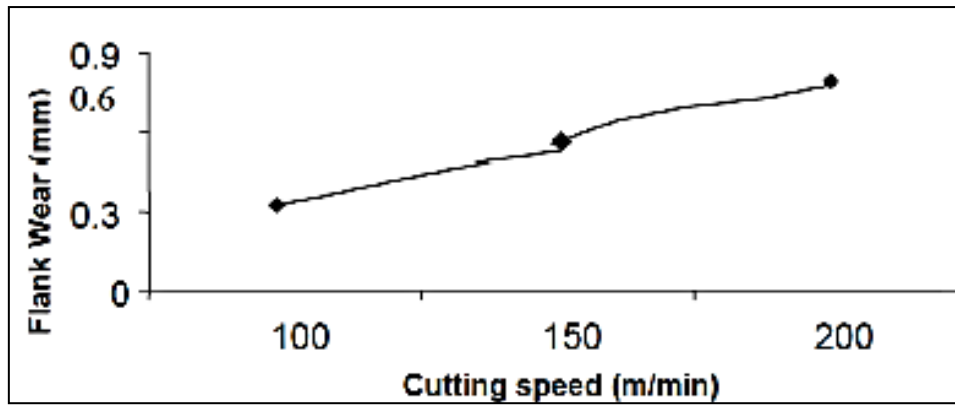
ανοξειδωτου χάλυβα υπό μακρόχρονη διαδικασία μικροτόρνευσης με διάφορους συνδυασμούς εργαλείου – τεμαχίου κατεργασίας, και μεταβάλλοντας τις παραμέτρους της διεργασίας. Διαπίστωσαν ότι αν αυξηθεί ο ρυθμός πρόωσης, αυξάνεται και η επιφάνεια επαφής μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου, αυξάνοντας επακόλουθα και το ρυθμό αποβολής υλικού.

Από την άλλη, ο Jiawang Yan. (2011) σχεδίασε ένα πείραμα με τόννευση διαμαντιού για τη διερεύνηση του μικροσκοπικού μηχανισμού αποβολής υλικού. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι ο μηχανισμός περιλαμβάνει όλκιμη συμπεριφορά του υλικού, διάσπαση ρωγμών και εκτόπιση κόκκων. Επίσης η αποβολή του υλικού εξαρτάται από το μέγεθος και το βάθος των κόκκων καθώς και από τη συνδετική δύναμη στα όρια των κόκκων.

1.7.3 Φθορά του Εργαλείου

Η φθορά του εργαλείου ορίζεται ως η αλλαγή του σχήματος του εργαλείου σε σχέση με το αρχικό του σχήμα, κατά την κοπή, λόγω βαθμιαίας απώλειας υλικού του εργαλείου. Η φθορά του εργαλείου σταδιακά θα οδηγήσει σε αστοχία του κοπτικού εργαλείου, με αποτέλεσμα να πρέπει να αντικατασταθεί ώστε να διασφαλιστεί η επιθυμητή κοπή. Η φθορά του εργαλείου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τον τύπο του εργαλείου, τη σκληρότητα του υλικού κατεργασίας και τις χρησιμοποιούμενες παραμέτρους της διαδικασίας.

Οι Zhiyu Zhang et. al (2011) μελέτησαν τα χαρακτηριστικά φθοράς του εργαλείου κατά τη μικροτόρνευση καρβιδίου του πυριτίου και συμπέραναν ότι η φθορά του εργαλείου αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα προβλήματα στην κατεργασία σκληρών, ψαθυρών υλικών. Οι M. Aruna et. al. (2010) μελέτησαν την επίδραση της ταχύτητας κοπής στη φθορά του άκρου του κοπτικού εργαλείου. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 3.10, όσο χαμηλότερη η ταχύτητα κοπής τόσο μικρότερη η προκαλούμενη φθορά.



Εικόνα 1.10: Επίδραση της ταχύτητας κοπής στη φθορά του άκρου του κοπτικού εργαλείου (Zhiyu Zhang et. al. 2011)

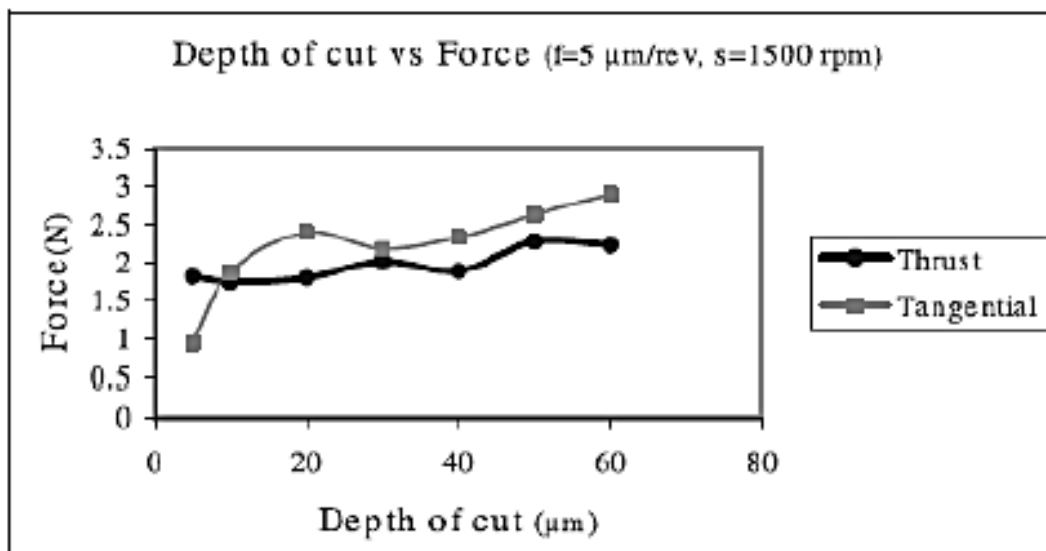
Τέλος, οι Zhiyu Zhang et. al. (2011) μέσα από πειράματα μικροτόρνευσης με διαμάντι και παρατήρησης SEM, συμπέραναν ότι η φθορά του εργαλείου αποτελείται από δυο περιοχές με διαφορετικά μοτίβα φθοράς: από περιοδικές μικροεγκοπές και από μη περιοδικά σημάδια απόξεσης. Τα τελευταία μπορεί να εξαφανιστούν με αύξηση της απόστασης κοπής. Επίσης, η μέθοδος κοπής ταλαντούμενου εργαλείου μπορεί να μειώσει την προκαλούμενη φθορά και να αυξήσει παράλληλα την απόδοση του εργαλείου.

1.7.4 Δύναμη Κοπής

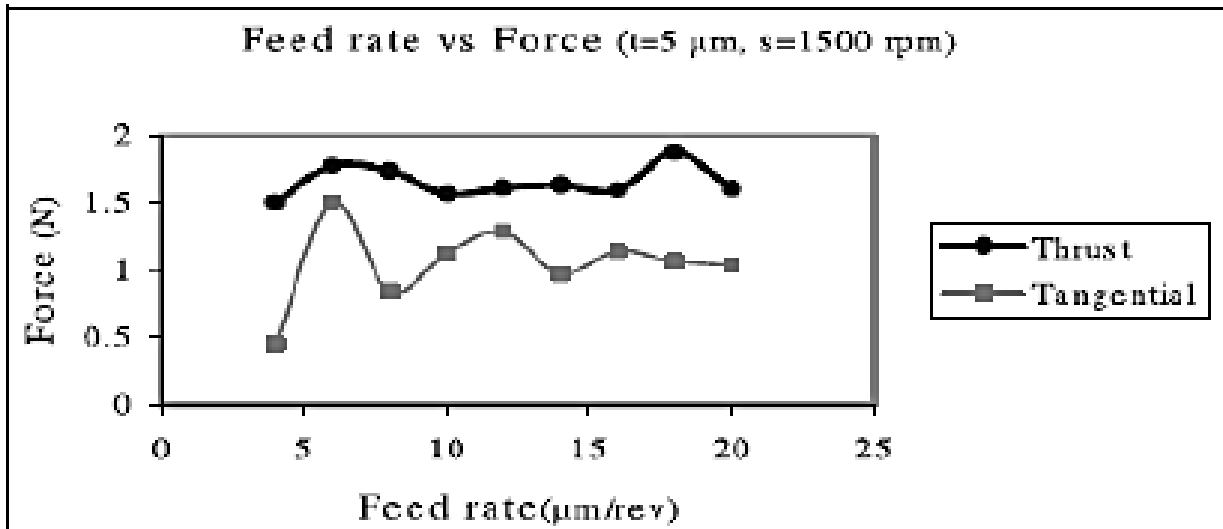
Οι δυνάμεις κοπής που παράγονται κατά την κοπή μετάλλων έχουν άμεσο αντίκτυπο στην παραγωγή θερμότητας, και κατ'επέκταση στη φθορά του εργαλείου, στην ποιότητα αλλά και στην ακρίβεια της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Λόγω των σύνθετων διατάξεων εργαλείων/συνθηκών κοπής κατεργασιών μετάλλων και λόγω αγνώστων παραγόντων και τάσεων, οι θεωρητικού υπολογισμοί των δυνάμεων κοπής απέτυχαν να δώσουν ακριβή αποτελέσματα.

Οι Zinan Lu και Takeshi Yoneyama (1999) χρησιμοποίησαν εργαλείο διαμαντιού μονού άκρου για την κοπή διαφόρων σχημάτων και μελέτησαν τη χρησιμότητά αυτών των μικροεργαλείων σε διάφορες μορφές. Η δύναμη μετρήθηκε με αισθητήρες και βρέθηκε ότι η δύναμη κοπής μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Οι Kohichi Miura, et. al. (2009) εξήγαγαν μια γραμμική σχέση μεταξύ της δύναμης ώσης και του βάθους κοπής, υπό ελεγχόμενες συνθήκες για τη γωνία προσέγγισης των πειραμάτων. Η σχέση αυτή έδειξε ότι η δύναμη κοπής αυξάνεται όσο αυξάνεται η σκληρότητα του υλικού κατεργασίας. Επίσης η δύναμη κοπής αυξάνεται, όπως ήταν

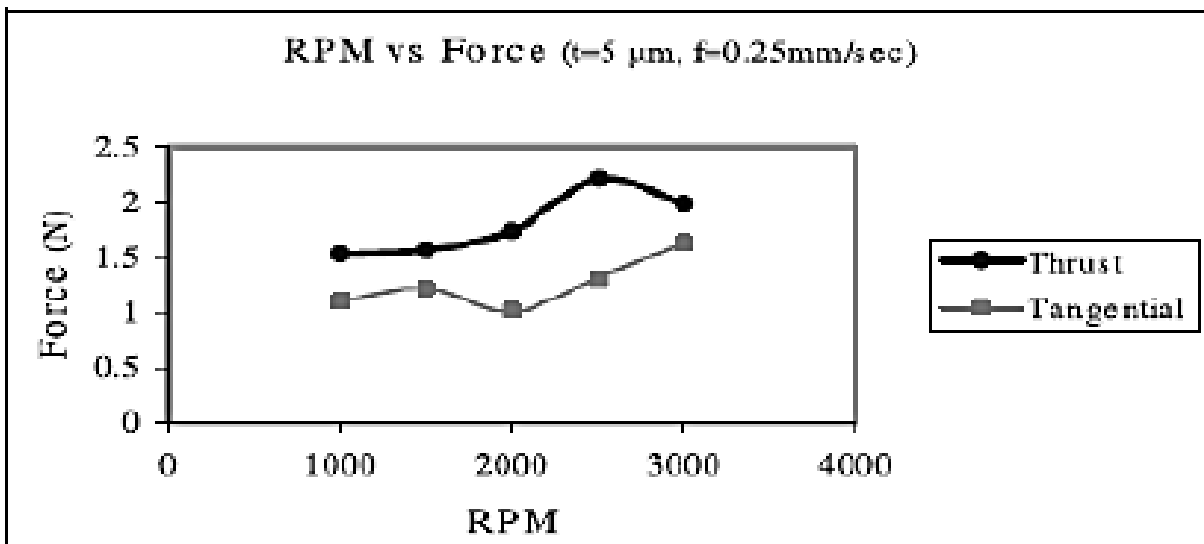
αναμενόμενο, για μεγαλύτερους ρυθμούς πρόωσης και βάθη κοπής. Οι M. Azizur Rahman et. al. (2006) κατασκεύασαν μικροακροδέκτες με τη βοήθεια κοπτικών εργαλείων καρβιδίου. Στα πειράματα που διεξήγαγαν μετέβαλλαν τις συνθήκες κοπής όπως το βάθος κοπής (t), το ρυθμό πρόωσης (f) και την ταχύτητα (s), αναλύοντας παράλληλα τις εφαπτομενικές και τις δυνάμεις ώσης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.11 αυξάνοντας το βάθος κοπής, αρχικά η δύναμη ώσης υπερिशύει της εφαπτομενικής έως ένα σημείο και στη συνέχεια η εφαπτομενική υπερिशύει έναντι της δύναμης ώσης. Από την άλλη στις Εικόνες 1.14 και 1.15 φαίνεται ότι η εφαπτομενική δύναμη υπερिशύει έναντι της δύναμης ώσης, με αύξηση της ταχύτητας και της πρόωσης.



Εικόνα 1.11: Δυνάμεις κοπής σε σύγκριση με τη μεταβολή του βάθους κοπής (Azizur Rahman et. al. 2006)



Εικόνα 1.12: Δυνάμεις κοπής σε σύγκριση με τη μεταβολή της πρόωσης (Azizur Rahman et. al. (2006))



Εικόνα 1.13: Δυνάμεις κοπής σε σύγκριση με τη μεταβολή της ταχύτητας (Azizur Rahman et. al. (2006))

Ολοκληρώνοντας τη βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις δυνάμεις κοπής, οι W B Lee et. al. (2003) παρουσίασαν μια διεπιστημονική προσέγγιση ποσοτικής ανάλυσης της τριβής για τις δυνάμεις κοπής κατά την τόννευση κρυσταλλικών υλικών με εργαλείο διαμαντιού. Τα αποτελέσματα έδειξαν η περιοδικότητα της διακύμανσης των δυνάμεων κοπής εξαρτάται όχι μόνο από την κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό των υλικών αλλά και από τις συνθήκες τριβής κατά την κοπή. Το προτεινόμενο μοντέλο εφαρμόζεται όχι μόνο σε

μονοκρυστάλλους αλλά και σε πολυκρυσταλλικά υλικά με υψηλό κρυσταλλογραφικό περιεχόμενο.

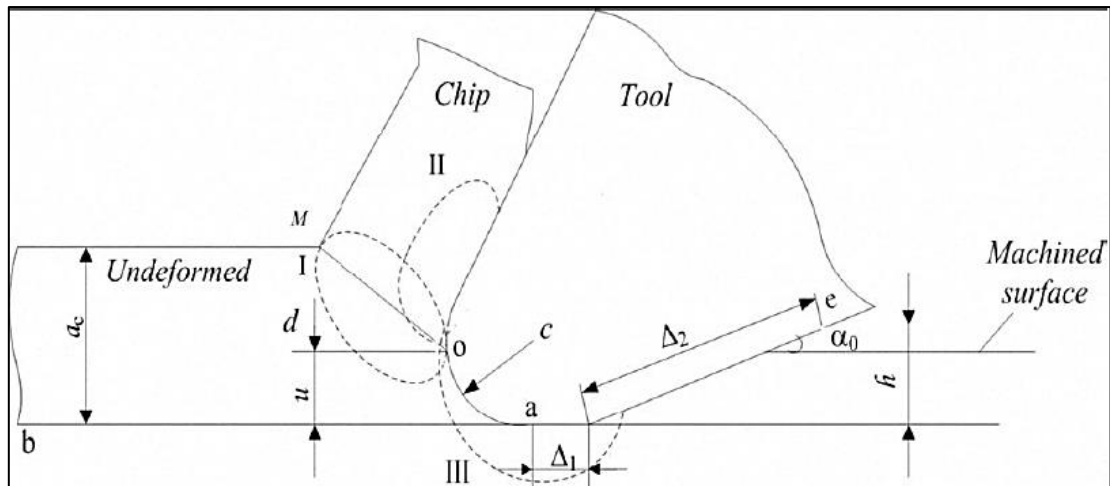
1.8 Από τη μακροκοπή στη μικροκοπή

Για να επιτευχθούν αποδοτικές και πρακτικές κατεργασίες μικρών διαστάσεων είναι απαραίτητη η μετάβαση από τη μακροκλίμακα στη μικροκλίμακα. Με τον τρόπο αυτό γίνεται επίσης κατανοητό το όριο διαστάσεων στο οποίο μπορεί να φθάσει η κοπή. Στη μακροκοπή υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής πληθώρας διαφορετικών μορφών και διαστάσεων, μέσω της μηχανικής αποβολής υλικού με τη χρήση εργαλείων καρβιδίου. Ορισμένες από τις αρχές αυτές μπορούν να μεταφερθούν και στις μικροκατεργασίες, αλλά η κατεργασία σε τόσο μικρές διαστάσεις παρουσιάζει ειδικά χαρακτηριστικά και ειδικές προκλήσεις.

Όπως και στην μακροκοπή, τα στάδια της μικροκοπής είναι τέσσερα: 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 μικροκοπή, και για το λόγο αυτό, η παραμόρφωση της στρώσης κοπής είναι διαφορετική από αυτήν της παραδοσιακής κοπής.

Συγκεκριμένα τώρα στο σημείο κοπής, το μη κατεργασμένο υλικό αποκόπεται από το κύριο σώμα και διαμορφώνει το απόβλιπτο, κατά μήκος της κατεύθυνσης oa και όχι κατά μήκος της κατεύθυνσης ab , διότι στην περίπτωση της μικροκοπής η ακτίνα καμπυλότητας είναι συγκρίσιμη με το πάχος του υλικού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.14.

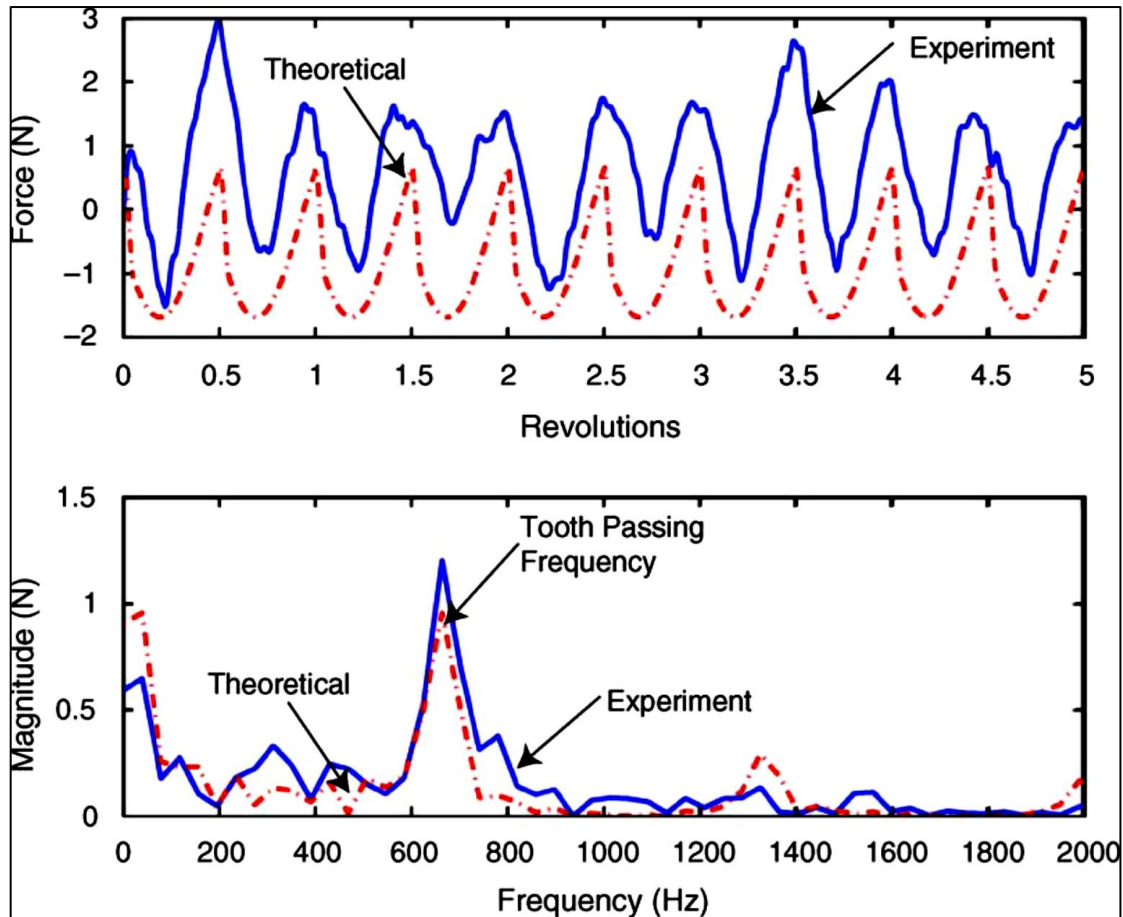
Το σημείο o είναι ένα οριακό σημείο. Πάνω από το σημείο o το μη κατεργασμένο υλικό ολισθαίνει κατά μήκος του επιπέδου διάτμησης OM και εν συνεχεία ρέει ως απόβλιπτο κατά μήκος της ακτίνας καμπυλότητας και της επιφάνειας αποβλίπτου, ενώ κάτω από το σημείο o ένα μέρος του μη κατεργασμένου υλικού εξωθείται δια μέσου της ακτίνας καμπυλότητας από την κατεργασμένη επιφάνεια, έχοντας περάσει από την επιφάνεια ελευθερίας, και ένα άλλο μέρος του ρέει πλαγίως, γύρω από το κοπτικό εργαλείο.



Εικόνα 1.14: Διαμόρφωση κατεργαζόμενης επιφάνειας κατά τη μικροκοπή

Η συνέχιση της κατεργασίας για ένα χρονικό διάστημα θα οδηγήσει σε φθορά της ελεύθερης επιφάνειας στο Δ_1 . Το μη κατεργασμένο υλικό υφίσταται εξώθηση μέσω της κοπτικής ακμής, έρχεται σε επαφή με το Δ_1 και στη συνέχεια επανέρχεται ελαστικά. Αν θεωρήσουμε h το ύψος της επαναφοράς, το μήκος της κατεργαζόμενης επιφάνειας που έρχεται σε επαφή με την ελεύθερη επιφάνεια είναι Δ_2 , και άρα το συνολικό μήκος της ελεύθερης επιφάνειας κάτω από το σημείο o είναι το άθροισμα του τμήματος της ακτίνας καμπυλότητας, Δ_1 και Δ_2 . Οι I, II, III ονομάζονται ζώνες παραμόρφωσης στη μικροκοπή.

Παρόμοια με τη μακροκοπή, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται αποτελούνται από τις συνιστώσες διάτμησης και άρωσης. Όμως, οι δυνάμεις στη μικροκοπή είναι αρκετά διαφορετικές από τις δυνάμεις στη μακροκοπή, ιδίως η στατική συνιστώσα της δύναμης. Στην Εικόνα 1.15 παρουσιάζεται ένα πείραμα κατεργασίας αυλάκωσης αλουμινίου 7075 T-6, όπου οι πειραματικές τιμές της δύναμης στη μικροκοπή συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που αναμένονται με χρήση του συμβατικού μοντέλου για τη δύναμη κοπής αιχμηρής ακμής, θεωρώντας ότι το υλικό κατεργασίας είναι ομοιόμορφο.



Εικόνα 1.15: Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής μικροκλίμακας κατά την κατεύθυνση πρόωσης

Παρατηρούμε ότι η δυναμική συνιστώσα, η οποία προκαλείται από τις διατμητικές δυνάμεις, είναι παρόμοια με εκείνη της συμβατικής προσομοίωσης κοπής, όταν το βάθος κοπής είναι μεγαλύτερο από το ελάχιστο βάθος κοπής. Όμως, η διαφορά που παρουσιάζεται στη στατική συνιστώσα αντιστάθμισης μεταξύ του πειράματος και των προβλέψεων δηλώνει ξεκάθαρα ότι το μοντέλο της μακροκοπής δε μπορεί να εκφράσει τις δυνάμεις άρωσης στις μικροκατεργασίες.

Επειδή οι δυνάμεις κοπής πρέπει να διατηρούνται κάτω από το όριο πλαστικής παραμόρφωσης του μικροεργαλείου, το βάθος κοπής υποδεικνύεται από τη συνθήκη αυτή. Αυτό σημαίνει ότι αν οι δυνάμεις κοπής μειωθούν, μπορεί να αυξηθεί το βάθος κοπής και άρα να αυξηθεί ο ρυθμός αποβολής υλικού. Όμως, η τιμή των δυνάμεων κοπής πρέπει να είναι πάνω από ένα όριο, ώστε να δημιουργηθεί απόβλιπτο, το οποίο ονομάζεται ελάχιστο πάχος απόβλιπτου.

Η επίδραση της τριβής μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου στις μικροκοπές και γενικά στις μικροκατεργασίες γενικά δεν έχει εξεταστεί

επαρκώς. Οι ερευνητές έχουν εξετάσει ως τώρα την επίδραση της φθοράς των άκρων του εργαλείου στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις άρωσης. Η αυξημένη φθορά των άκρων στο εργαλείο της μακροκοπής οδηγεί σε αύξηση της τριβής, η οποία οδηγεί στη συνέχεια σε θερμική φόρτιση μεταξύ του άκρου του εργαλείου και του υλικού του τεμαχίου κατεργασίας. Έτσι εμφανίζονται παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις και δημιουργείται ένα στρώμα με πολύ λεπτομερή μικροδομή. Όταν το πάχος αποβλίπτου της μικροκατεργασίας αυξάνεται, οι δυνάμεις άρωσης κατά το σχηματισμό του αποβλίπτου μειώνονται. Όμως οι δυνάμεις άρωσης επηρεάζονται και από την ελαστική παραμόρφωση του τεμαχίου κατεργασίας.

Στη μακροκοπή, η παραμόρφωση του υλικού εμφανίζεται κυρίως κατά τη μετατροπή της άκοπης ζώνης σε απόβλιπτο. Το υλικό κάτω από την κατεργαζόμενη ζώνη υφίσταται μικρή παραμόρφωση. Αντιθέτως στη μικροκοπή, το υλικό κάτω από την κατεργαζόμενη ζώνη παραμορφώνεται σημαντικά, διότι το πάχος του αποβλίπτου είναι πολύ μικρό 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.

1.8.1 Φαινόμενο κλίμακας (size effect) και Ελάχιστο Πάχος Αποβλίπτου

Βασικό χαρακτηριστικό της μικροκοπής είναι η αφαίρεση πολύ μικρών ποσοτήτων από την επιφάνεια του υλικού, και άρα το πάχος του αποβλίπτου μπορεί να είναι μερικά μικρόμετρα ως μερικές εκατοντάδες μικρόμετρα. Όταν το υλικό που αφαιρείται έχει τόσο μικρό πάχος, εμφανίζεται το φαινόμενο κλίμακας (size effect). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι όσο το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίπτου μειώνεται, εμφανίζεται μη γραμμική αύξηση της ειδικής ενέργειας ή της ειδικής δύναμης.

Οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί για τη μελέτη του φαινομένου κλίμακας συμπεριλαμβάνουν πολλά διαφορετικά υλικά και ποικίλες συνθήκες κοπής. Οι λόγοι στους οποίους έχει αποδοθεί το φαινόμενο κλίμακας είναι οι ακόλουθοι:

- 1) η ενίσχυση του υλικού, η οποία οφείλεται σε παράγοντες που ποικίλουν ανάλογα με το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίπτου
- 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.

Σύμφωνα με τους Show και Backer (1952), το φαινόμενο κλίμακας οφείλεται σε κρυσταλλογραφικές ατέλειες του υλικού, όπως τα όρια των κόκκων, οι προσμίξεις ατόμων κ.λπ. Λόγω της σημαντικής μείωσης του πλήθους των ατελειών σε μικρό όγκο κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης, η δύναμη που ασκείται στο υλικό αναμένεται να αυξηθεί και να φτάσει στη θεωρητική τιμή.

Οι Armarego και Brown (1962) υποστηρίζουν ότι η αύξηση της ειδικής δύναμης κοπής κατά τη μείωση του πάχους αποβλίπτου, οφείλεται στη μεγαλύτερη σχετική επίδραση της δύναμης άρωσης.

Στο πείραμα των Nakayama και Tamura (1968) αναλύθηκε το φαινόμενο κλίμακας μέσω της μικροκοπής σε πολύ χαμηλή ταχύτητα κοπής (0,1 m/min) με σκοπό να μειωθεί η επίδραση της θερμοκρασίας και του ρυθμού παραμόρφωσης στο ελάχιστο. Εμφανίστηκε πλαστική διαρροή στο στρώμα κάτω από την επιφάνεια του τεμαχίου, ενώ παρατήρησαν ότι η συμβολή του φαινομένου κλίμακας γίνεται σημαντική όταν μειωθεί το ελάχιστο πάχος κοπής.

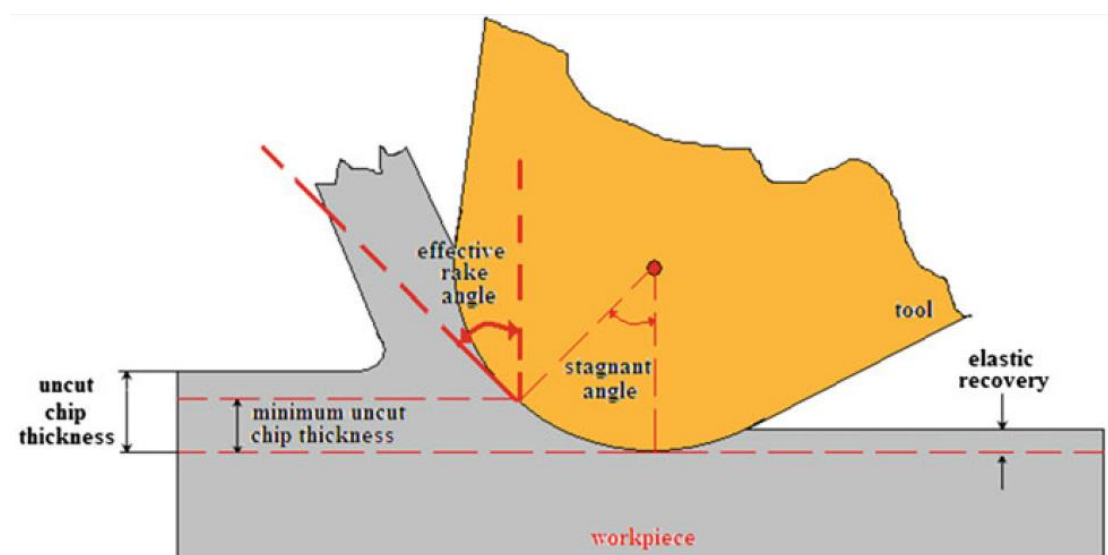
Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στην επέκταση της ζώνης διάτμησης κάτω από την κατεργαζόμενη επιφάνεια. Συνεπώς, η εμφάνιση του φαινομένου κλίμακας αποδόθηκε στο ότι η ενέργεια που καταναλώνεται στην πλαστική διαρροή κάτω από την επιφάνεια δεν είναι ανάλογη με το ελάχιστο πάχος αποβλίπτου, καθώς και στο ότι η γωνία διάτμησης μειώνεται με τη μείωση του ελάχιστου πάχους κοπής.

Οι μελέτες των Larsen-Basse και Oxley (1973) κατέληξαν στο ότι το φαινόμενο κλίμακας οφείλεται στην ευαισθησία του ρυθμού παραμόρφωσης του κατεργαζόμενου υλικού. Βασίστηκαν σε εμπειρικά δεδομένα από πειράματα σε απλό ανθρακούχο χάλυβα, σύμφωνα με τα οποία ο μέγιστος ρυθμός παραμόρφωσης στην κύρια ζώνη διάτμησης είναι αντιστρόφως ανάλογος με το πάχος απαραμόρφωτου αποβλίπτου. Αυτό σημαίνει ότι, όταν αυξάνεται το ελάχιστο πάχος απαραμόρφωτου αποβλίπτου, η παραμόρφωση στη ζώνη διάτμησης παραμένει αμετάβλητη, αλλά ο ρυθμός παραμόρφωσης αυξάνεται αντιστρόφως ανάλογα ως προς το ελάχιστο πάχος απαραμόρφωτου αποβλίπτου.

Στα περισσότερα μέταλλα, όταν αυξάνεται ο ρυθμός παραμόρφωσης προκαλείται και αύξηση της τάσης, ενώ η ευαισθησία του ρυθμού παραμόρφωσης της τάσης αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς στην περιοχή κατεργασίας. Κατά συνέπεια, αυτό θα μπορούσε να εξηγήσει την αύξηση της ειδικής ενέργειας/δύναμης κοπής με τη μείωση του ελάχιστου πάχους απαραμόρφωτου αποβλίπτου.

Ο Lucca (1993) εξέτασε το ρόλο της αρνητικής γωνίας αποβλίπτου, όταν η ακτίνα καμπυλότητας γίνεται συγκρίσιμη με το ελάχιστο πάχος αποβλίπτου. Όσο το ελάχιστο πάχος αποβλίπτου μειώνεται, παρατηρείται περιστροφή του διανύσματος της συνολικής δύναμης κάτω από το τεμάχιο. Η δύναμη άπωσης γίνεται η κύρια συνιστώσα κάτω από ένα ορισμένο ελάχιστο πάχος αποβλίπτου.

Η επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας στη διαδικασία κοπής μελετήθηκε και από τον Kim(1999), 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 προέκυψαν από το πρόγραμμα προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία είχαν καλό συσχετισμό με τις πειραματικές μετρήσεις. Κατέληξε λοιπόν ότι η κύρια αιτία της επίδρασης κλίμακας είναι η ακτίνα καμπυλότητας.



Εικόνα 1.16: Σχηματική απεικόνιση των χαρακτηριστικών κοπής σε σχέση με το ελάχιστο πάχος αποβλίπτου

1.9 Πεπερασμένα στοιχεία

Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι μια αριθμητική μέθοδος για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων με την χρήση συστήματος πολυωνυμικών παρεμβολών. Κατά την επίλυση οι πολυωνυμικές καμπύλες μπορούν να αναπαρασταθούν από ένα πλήθος σημείων, τα οποία είναι γνωστά ως κόμβοι (nodes). Η επίλυση γίνεται μόνο πάνω στα σημεία αυτά.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στοχεύει στην αναζήτηση προσεγγιστικών λύσεων ενός προβλήματος. Η διαδικασία ξεκινά από τη σύνθεση ενός μοντέλου, στο οποίο απεικονίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του προβλήματος και ακολουθεί ο χωρισμός του πεδίου μελέτης, π.χ. ένα τμήμα δοκιμίου σε προβλήματα κατεργασιών, σε μικρά στοιχεία που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (finite elements).

Μέσα σε κάθε τέτοιο στοιχείο, μια απλή συνάρτηση (συνήθως ένα μικρού βαθμού πολυώνυμο) θεωρείται ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά την κατανομή των ζητούμενων μεταβλητών. Τα στοιχεία αυτά ενώνονται σε σταθερά σημεία εντός του πεδίου που καλούνται κόμβοι (nodes) συνθέτοντας τη διακριτοποίηση (meshing). Μια γραμμική πολυωνυμική καμπύλη απαιτεί δύο σημεία ενώ μια τετραγωνική τρία σημεία. Αυτό που θέλουμε είναι η μείωση των σημειακών μερικών εξισώσεων σε μια μορφή πεπερασμένων στοιχείων αυτό επιτυγχάνεται με την μέθοδο Galerkin.

Η ακρίβεια με την οποία προσεγγίζεται το πρόβλημα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του μοντέλου προσομοίωσης, όπως το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων και η συνάρτηση που θα περιγράφει. Το υπολογιστικό μοντέλο που θα δημιουργηθεί πρέπει να μην απαιτεί υπολογιστική ισχύ μεγαλύτερη από αυτή που διαθέτει ο υπολογιστής που θα εκτελέσει το μοντέλο. Η πολυπλοκότητα του μοντέλου, οδηγεί σε μεγαλύτερη ακρίβεια λύσης, αλλά και σε μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται η εξισορρόπηση των δύο αυτών αντίθετων παραμέτρων.

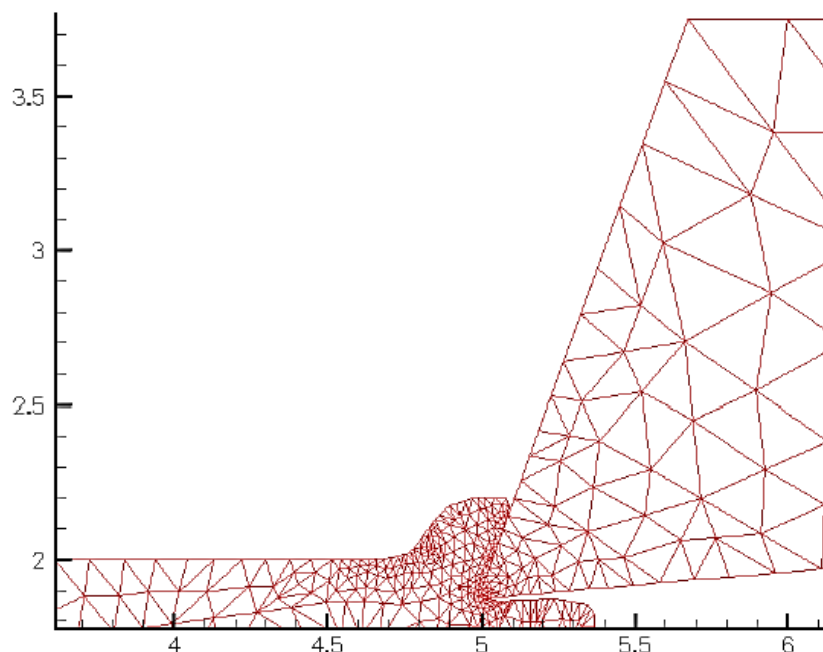
1.9.1 Κύρια βήματα μεθόδου

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι συχνά μια επαναληπτική διαδικασία, τυπικά αποτελούμενη από τα ακόλουθα βήματα:

- *1ο βήμα:* αφορά στην αναγνώριση του προβλήματος και των βασικών φυσικών φαινομένων που το επηρεάζουν. Καθορίζεται αρχικά η κατηγορία του (π.χ. ως πρόβλημα στερεού σώματος, κίνησης ρευστού, θερμοδυναμικής κλπ.). Συχνά ένα περίπλοκο πρόβλημα είναι δυνατόν να ανήκει σε περισσότερες από μια κατηγορίες αφού φυσικά φαινόμενα αλληλεπιδρούν κατά την διεξαγωγή του πειράματος.
- *2ο βήμα:* αφορά την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία που προσομοιώνει την πραγματικότητα απλοποιώντας την μέσω της κατασκευής ενός μοντέλου. Μπορούμε, για παράδειγμα, μέσω του μοντέλου να αγνοήσουμε κάποιες λεπτομέρειες στη γεωμετρία, να εξιδανικεύσουμε το υλικό του (αντιμετωπίζοντάς το π.χ. ως ομογενές, ισότροπο ή ελαστικό), έχοντας έτσι τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε απλές θεωρίες που περιγράφουν τη συμπεριφορά του. Οι απλοποιήσεις αυτές μαζί με τις θεωρίες ανάλυσης συνιστούν το μαθηματικό μοντέλο (mathematical model) ενός προβλήματος. Είναι προφανές ότι, λόγω των παραπάνω παραδοχών, η μοντελοποίηση εισάγει αποκλίσεις από την πραγματικότητα, γνωστές και ως σφάλματα μοντέλου (modeling errors).
- *3ο βήμα:* αφορά τη διακριτοποίηση του μοντέλου χωρίζοντας το σε ένα δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων (finite element mesh) με ιδεατές ευθείες, καμπύλες ή επιφάνειες (δημιουργία πλέγματος). Η μορφή της κατανομής των άγνωστων μεγεθών εντός των στοιχείων προσεγγίζεται από μια απλή συνάρτηση. Αφού η πραγματική κατανομή είναι διαφορετική, εισάγονται τα σφάλματα διακριτοποίησης (discretization errors).
- *4ο βήμα:* συνήθως πριν την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία είναι επιθυμητή μια προκαταρκτική ανάλυση με συμβατικά μέσα. Πραγματοποιείται για να αποφευχθούν χονδροειδή σφάλματα αλλά και για μια πρώτη εκτίμηση της τάξης μεγέθους και για μια αδρή προσέγγιση της κατανομής των άγνωστων ποσοτήτων (που ενδεχομένως να οδηγήσουν σε βελτίωση του μοντέλου).
- *5ο βήμα:* συνίσταται στη χρήση ενός προγράμματος ή κώδικα ηλεκτρονικού υπολογιστή και περιλαμβάνει:

- την **προεπεξεργασία** (*preprocessing*): κατά την οποία εισάγεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή το μοντέλο, δηλαδή η μορφή του, οι δράσεις σε αυτό, τα χαρακτηριστικά του υλικού (π.χ. το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson) και οι συνθήκες στήριξης του ανάλογα την κατεργασία. Στη συνέχεια επιλέγεται το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν και το μοντέλο διακριτοποιείται (συνήθως αυτόματα από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή).
- την **επεξεργασία** (*processing*): όπου συντελείται η αριθμητική επίλυση, υπολογίζονται τα άγνωστα μεγέθη στους κόμβους του δικτύου ή σε ενδιάμεσα ζητούμενα σημεία.
- **μετεπεξεργασία** (*post processing*): κατά την οποία εμφανίζονται (συνήθως και γραφικά με τη βοήθεια χρωματικής κλίμακας) τα αποτελέσματα της ανάλυσης με στόχο την αξιολόγησή τους, τον έλεγχο των αντοχών κλπ.
- **6^ο βήμα**: ελέγχεται η συμβατότητα των αποτελεσμάτων με τη φύση του προβλήματος, με τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής ανάλυσης και συχνά με τη διαίσθηση του μελετητή. Εάν δεν είναι ικανοποιητική ή εάν η ακρίβεια των αποτελεσμάτων δεν είναι η επιθυμητή, αναθεωρείται το μοντέλο ή και η διακριτοποίησή του, και η ανάλυση επαναλαμβάνεται.

Συμπερασματικά, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια ισχυρή μέθοδος αριθμητικής ανάλυσης για την επίλυση προβλημάτων οριακών συνθηκών. Αρχικός στόχος της μεθόδου ήταν η επίλυση δύσκολων προβλημάτων αεροναυπηγικής, κατεργασιών, κατασκευών και ρευστομηχανικής. Το remeshing βοηθάει στη βέλτιστη ανάλυση μιας φυσικής λύσης αυτών των προβλημάτων. Βρίσκεται στο βήμα της προεπεξεργασίας (*preprocessing*) όπου εκεί ορίζουμε τα κριτήρια και της παραμέτρους που θα λάβουμε υπόψη για το βέλτιστο επιθυμητό αποτέλεσμα.



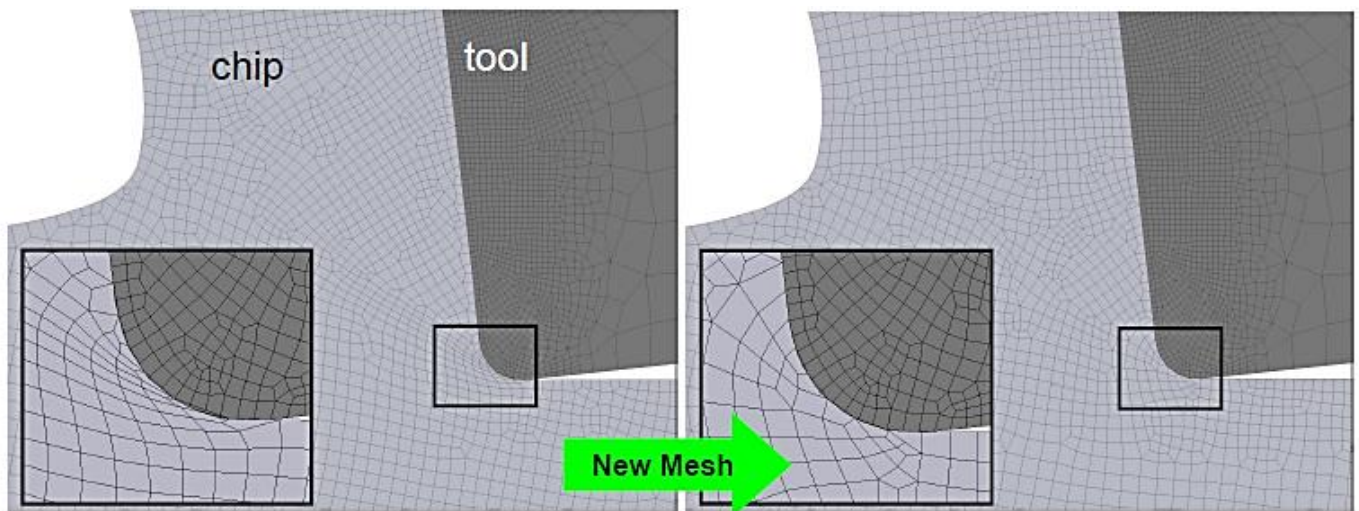
Εικόνα 1.17: Μοντελοποίηση τεμαχίου και εργαλείου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

1.9.2 Meshing και remeshing

Με βάση την εμπειρία και τις απαιτήσεις που έχουν αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων αναβαθμίστηκαν σε σημαντικό βαθμό ώστε να καλύψουν τις αυξανόμενες ανάγκες. Η βελτίωση των αλγορίθμων αφορά την ευελιξία τους, τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε περισσότερα πεδία και τη συνολική τους αξιοπιστία. Έτσι η λειτουργία remeshing στοχεύει στην ακόμη ρεαλιστικότερη αναπαράσταση των πραγματικών αντικειμένων και μοντέλων προσομοίωσης. Ο αλγόριθμος remeshing περιλαμβάνει τα εξής επιμέρους βήματα:

- (i) τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών
- (ii) τη συναρμολόγηση του πυρήνα του πλέγματος
- (iii) την αναδόμηση των κορυφών και των ακμών του παραμορφωμένου πλέγματος
- (iv) τη διόρθωση των ακμών και επιφανειών

Στην Εικόνα 1.18 παρουσιάζονται τα πλέγματα αναπαράστασης του υλικού και του εργαλείου μετά τη λειτουργία remeshing, ώστε να βελτιωθεί η αναπαράσταση και η ρεαλιστικότητα του μοντέλου κοπής.



Εικόνα 1.18: Δομή του μοντέλου μικροκοπής μετά τη λειτουργία Remeshing

(v) την εξομάλυνση των ακμών, επιφανειών και τού όγκου (Εικόνα 1.18) και

(vi) τη μεταφορά των μεταβλητών τού πεδίου μεταξύ τού παλιού και τού νέου πλέγματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Εργαλείο κοπής και υλικό κατεργασίας

2.1 Ο χάλυβας και τα χυτά κράματά του

Τα εργαλεία από απλό χάλυβα είναι τα παλαιότερα εργαλεία που κατασκευάστηκαν. Η συνήθης τους περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι περίπου 1.05%. Το υψηλό αυτό περιεχόμενο σε άνθρακα προσδίδει σκληρότητα στο χάλυβα, προσφέροντας υψηλότερη αντοχή έναντι της φθοράς. Το συγκεκριμένο υλικό χρησιμοποιήθηκε στις κοπές για πολλά χρόνια, πλέον όμως χρησιμοποιείται σπάνια λόγω της γρήγορης υπερθέρμανσής του σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Η εφαρμογή του πλέον περιορίζεται σε εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας.

Η ανάγκη για υλικά εργαλείων, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να αντέχουν σε υψηλές ταχύτητες και θερμοκρασίες, οδήγησαν στην ανάπτυξη των *ταχυχάλυβων (High Speed Steel - HSS)*. Τα εργαλεία από ταχυχάλυβα διαφέρουν σημαντικά από τα εργαλεία από απλό χάλυβα, λόγω της προσθήκης κραματικών στοιχείων, τα οποία τα κάνουν ανθεκτικά στην ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών. Μερικά από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα στοιχεία είναι το μαγγάνιο, το χρώμιο, το βολφράμιο, το βανάδιο, το μολυβδαίνιο, το κοβάλτιο και το νιόβιο. Παρόλο που το κάθε στοιχείο εισάγει κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όλα τους βοηθούν εν γένει στην ικανότητα σκλήρυνσης, στην αντοχή έναντι φθοράς και στις υψηλές θερμοκρασίες, καθώς και στην αύξηση του χρόνου ζωής του εργαλείου. Πρόκειται για χαρακτηριστικά που επιτρέπουν υψηλότερες ταχύτητες κοπής και εν γένει καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τον απλό χάλυβα.

Οι πιο κοινοί ταχυχάλυβες που χρησιμοποιούνται ως κοπτικά εργαλεία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- ταχυχάλυβες βολφραμίου (τύπος T)
- ταχυχάλυβες μολυβδαινίου (τύπος M)

Παρόλο που παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα, η κάθε κατηγορία εξυπηρετεί συγκεκριμένους σκοπούς. Ένα σημαντικό σημείο είναι το γεγονός ότι τα στοιχεία αυτά δεν είναι σε αφθονία και η χρήση τους εκτοξεύει το κόστος. Ο τύπος M έχει καλύτερη αντιτριβική συμπεριφορά από τον τύπο T, μικρότερη παραμόρφωση σε θερμικές

κατεργασίες και είναι φθηνότερος. Έτσι καλύπτει πάνω από 80% της παραγωγής ταχυχαλύβων.

Ταχυχάλυβες κατασκευάζονται με σύντηξη και για καλύτερη ομοιογένεια με κονιομεταλλουργία. Η πλειοψηφία των συμβατικών ταχυχαλύβων εγχύεται σε μια ράβδο, θερμή ή ψυχρή, και κατεργάζεται στην επιθυμητή μορφή. Για την κατασκευή κονιοποιημένων μετάλλων χρησιμοποιούνται τα ίδια στοιχεία, συμπιέζονται σε μια μήτρα υπό εξαιρετικά μεγάλη πίεση και πυροσυσσωματώνονται σε έναν ατμοσφαιρικά ελεγχόμενο κλίβανο.



Εικόνα 2.1: Σύγχρονα κοπτικά εργαλεία από ταχυχάλυβα

Για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών κοπής έγινε χρήση κραματικών στοιχείων, όπως κοβάλτιο, χρώμιο και βολφράμιο, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν τα λεγόμενα *χυτά κράματα*. Η τυπική χημική σύσταση ενός τέτοιου κράματος είναι 45% κοβάλτιο, 32% χρώμιο, 21% βολφράμιο και 2% άνθρακας. Στόχος της δημιουργίας ενός τέτοιου κράματος είναι η δημιουργία ενός κοπτικού εργαλείου με θερμή σκληρότητα μεγαλύτερη από αυτή των ταχυχαλύβων. Ένα σημείο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι ότι η ευθραυστότητα των εργαλείων χυτών κραμάτων και πρέπει πάντα να παρέχεται επαρκής υποστήριξη.

2.2 Εργαλεία PCBN

Ο πολυκρυσταλλικός κυβικός βοριοιτρίτης (PCBN) είναι παρόμοιος με το διαμάντι όσον αφορά την πολυκρυσταλλική δομή και τη σύνδεση σε βάση καρβιδίου. Με εξαίρεση τα υλικά από τιτάνιο και κράματα τιτανίου, ο πολυκρυσταλλικός κυβικός βοριοιτρίτης λειτουργεί αποδοτικά ως κοπτικό εργαλείο στα πιο συνήθη υλικά κατεργασίας. Όμως, το κοπτικό εργαλείο από PCBN πρέπει να αποφεύγεται στα πολύ σκληρά και δύσκολα στην επεξεργασία υλικά. Ο πολυκρυσταλλικός κυβικός βοριοιτρίτης είναι αποδοτικότερος σε χαμηλές ταχύτητες, γύρω στα 600 SFPM, και εκτελεί δυσκολότερες κοπές σε μεγαλύτερες γωνίες κλίσης από το διαμάντι. Επίσης, ο πολυκρυσταλλικός κυβικός βοριοιτρίτης είναι κατάλληλο υλικό εργαλείων φινιρίσματος, λόγω της εξαιρετικής σκληρότητάς του. Όπως και στην περίπτωση του διαμαντιού, η στιβαρότητα του εργαλείου κατεργασίας και του εξοπλισμού είναι σημαντική. (DeBeers Diamond Division, 1993) (Davis, 1993)

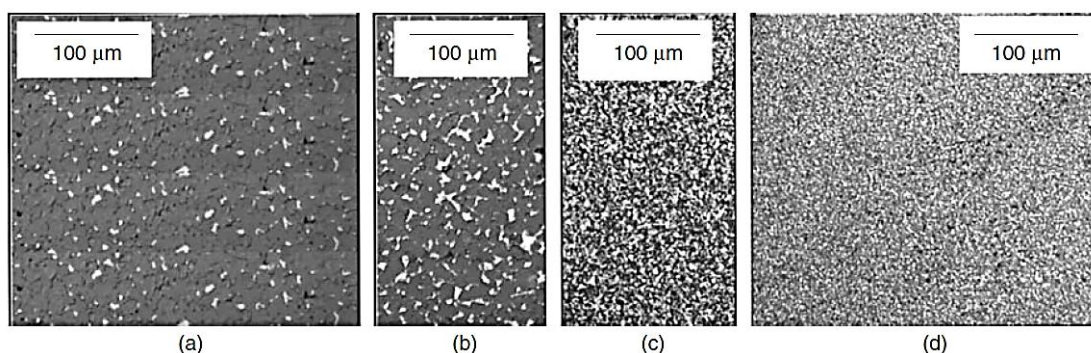


Εικόνα 2.2: Κοπτικά εργαλεία από πολυκρυσταλλικό κυβικό βοριοιτρίτη (<http://www.secotools.com/pcbn>)

Ένα εργαλείο από κυβικό βοριοιτρίτη κατασκευάζεται από ένα πυροσυσσωματωμένο προϊόν κυβικού βοριοιτρίτη, το οποίο έχει υποστεί επεξεργασία σε υψηλή θερμοκρασία (1500°C ή παραπάνω) και υψηλή πίεση (~ 40000kg/mm²). Το προϊόν αυτό κατασκευάστηκε πρώτη φορά το 1972. Καθώς ο κυβικός βοριοιτρίτης είναι ένα

πυροσυσσωματωμένο προϊόν, το μέγεθος των κρυστάλλων του PCBN, η κατανομή τους και το ποσοστό του CBN επηρεάζουν την ικανότητα κοπής του εργαλείου.

Ένα εργαλείο από πολυκρυσταλλικό κυβικό βοριονιτρίτη χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά μεγάλη σκληρότητα σε θερμοκρασία δωματίου και αποτελείται από μονοκρυστάλλους CBN σε συνδετική φάση. Ένα εύρος υλικών PCBN μπορεί να προκύψει μεταβάλλοντας το ποσοστό CBN, το μέγεθος των κόκκων του και τα υλικά σύνδεσης. Σύμφωνα με τους Nakayama et al., 1967), ένας μονοκρύσταλλος κυβικού βοριονιτρίτη σχηματίζεται με μετατροπή ενός εξαγωνικού κρυστάλλου κυβικού βοριονιτρίτη. Έχει τη μορφή δύο κυβικών εδροκεντρωμένων πλεγμάτων, βορίου και αζώτου, που εισέρχονται το ένα στο άλλο. Στην Εικόνα 2.3 φαίνονται οι μικροδομές του υλικών PCBN (Kim et al., 1999) από πολυκρυσταλλικό κυβικό βοριονιτρίτη σε διαφορετικές θερμοκρασίες επεξεργασίας, που οδηγούν σε μικροδομές διαφορετικής σκληρότητας.



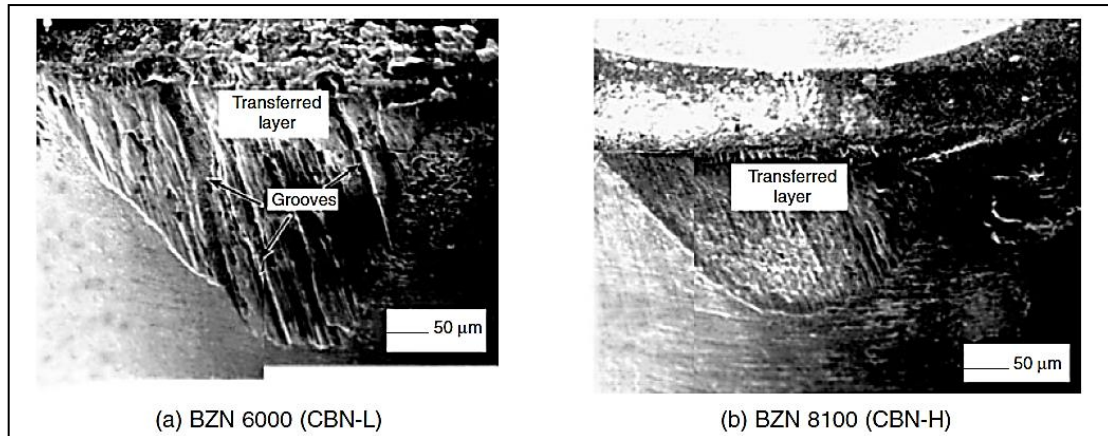
Εικόνα 2.3: Μικροδομή του πολυκρυσταλλικού κυβικού βοριονιτρίτη (Kim et al., 1999)

Μεταξύ όλων των υλικών, ο πολυκρυσταλλικός κυβικός βοριονιτρίτης θεωρείται το δεύτερο σκληρότερο υλικό, μετά το διαμάντι. Παρουσιάζει σημαντική σκληρότητα σε υψηλές θερμοκρασίες, χημική αδράνεια ως προς τα σιδηρούχα υλικά, καλή θερμική αντίσταση και υψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, συνεπώς η ικανότητα κοπής υπό υψηλή θερμοκρασία είναι καλύτερη από αυτή του διαμαντιού. Λόγω της καλής θερμικής σταθερότητας, είναι απίθανο να αντιδράσει χημικά με το τεμάχιο υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και για το λόγο αυτό τα εργαλεία βοριονιτρίτη είναι κατάλληλα για την κατεργασία δύσκολα κατεργάσιμων υλικών στη βιομηχανία.

Προς το παρόν, η εμπορική χρήση των εργαλείων κυβικού βοριοιτριτίτη περιορίζεται κυρίως σε κατεργασίες τόννευσης και κατεργασίας boring, ενώ έχουν πολύ περιορισμένες εφαρμογές στο φρεζάρισμα λόγω της μεγάλης σκληρότητας αλλά της μικρότερης αντοχής, πράγμα το οποίο τους καθιστά ακατάλληλους για βαριές κοπές ή φρεζάρισμα. Καθώς ο πολυκρυσταλλικός κυβικός βοριοιτριτίτης είναι ένα νέο υλικό κοπτικών εργαλείων, διάφορες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά κοπής, όπως η διάρκεια ζωής του εργαλείου, οι δυνάμεις κοπής, η φθορά και η ποιότητα επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο.

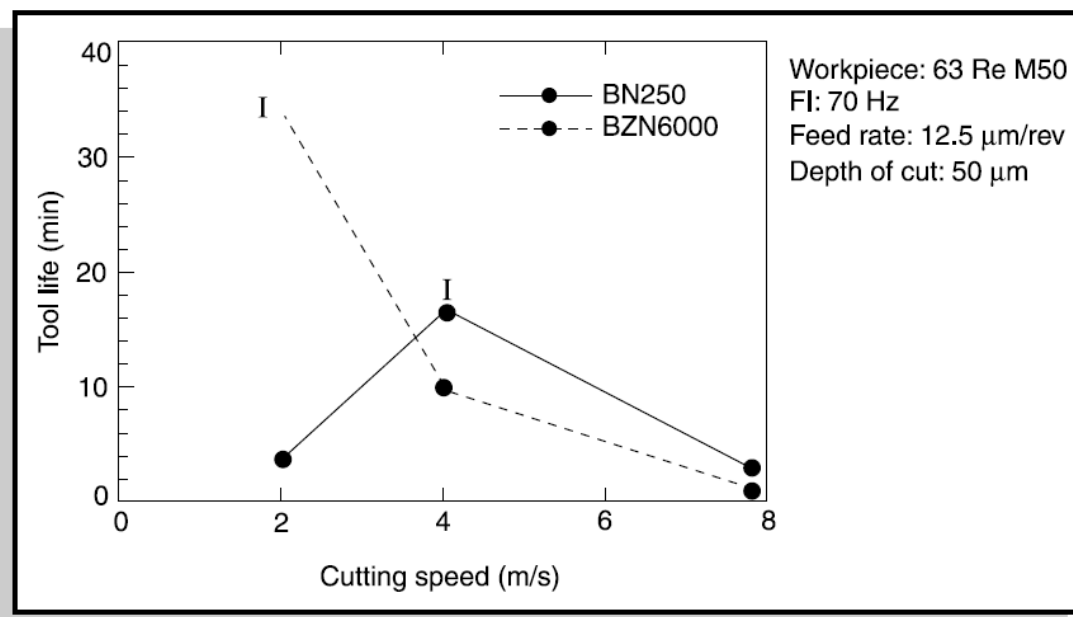
Λόγω της μεγάλης σκληρότητας και της αντίστασης στην αποξεστική φθορά τα εργαλεία από πολυκρυσταλλικό κυβικό βοριοιτριτίτη έχουν εν γένει μεγαλύτερη αντίσταση στη φθορά σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά εργαλείων, όπως τα σκληρομέταλλα και τα κεραμικά. Τα εργαλεία πολυκρυσταλλικού κυβικού βοριοιτριτίτη χωρίζονται γενικά σε δύο κατηγορίες: αυτά με υψηλό ποσοστό CBN (~ 90% vol) με μεταλλικό υλικό σύνδεσης, και αυτά με χαμηλό ποσοστό CBN (~ 50-70 % vol) με συνδετικό υλικό κεραμικό. Οι (Chou et al., 1999) διεξήγαγαν μελέτες στη φθορά του εργαλείου PCBN σε διακοπτόμενη κοπή τεμαχίου μεγάλης σκληρότητας και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα χαρακτηριστικά φθοράς είναι σημαντικά διαφορετικά μεταξύ των εργαλείων υψηλού και χαμηλού ποσοστού CBN. Η διάρκεια ζωής των εργαλείων χαμηλού ποσοστού βελτιστοποιείται σε μια μέση ταχύτητα κοπής. Από την άλλη, τα εργαλεία με υψηλό ποσοστό CBN παρουσιάζουν μονότονη μείωση της διάρκειας ζωής με αύξηση της ταχύτητας κοπής.

Οι (Chou et al., 1999) έδειξαν ότι τα εργαλεία χαμηλού ποσοστού CBN αποδίδουν καλύτερο φινίρισμα επιφάνειας και παρουσιάζουν χαμηλότερο ρυθμό πλευρικής φθοράς από τα εργαλεία υψηλού ποσοστού CBN στην τόννευση φινιρίσματος, με κατώτερες βέβαια μηχανικές ιδιότητες, έχουν καλύτερη αντίσταση στη φθορά από τα εργαλεία υψηλού ποσοστού CBN και η απόκλιση αυτή αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας κοπής.



Εικόνα 2.4: Φθαρμένη κοπτική ακμή εργαλείου κυβικού βοριοιτρίτη στα 240 m/min: (a) BZN 6000 (χαμηλού ποσοστού CBN) και (b) BZN 8100 (υψηλού ποσοστού CBN) (Chou et al., 1999)

Βάσει πειραμάτων που διεξήχθησαν (Atkins, 2003) το κύριο πρόβλημα που προκάλεσε το τέλος της διάρκειας ζωής ήταν η πλευρική φθορά και η φθορά κρατήρα για τα εργαλεία με υψηλό ποσοστό CBN και η θραύση για τα εργαλεία χαμηλού ποσοστού CBN.



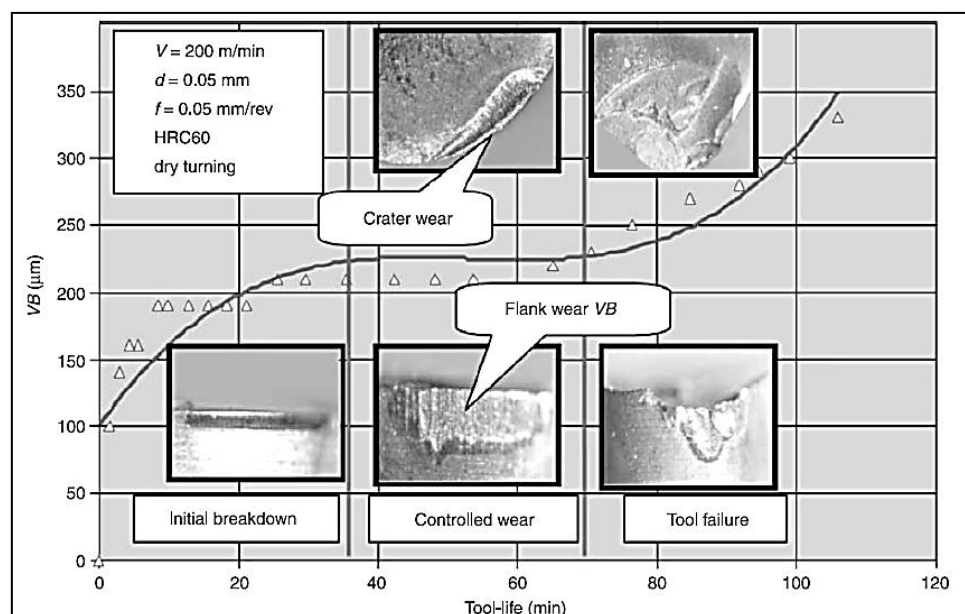
Εικόνα 2.5: Διάρκεια ζωής εργαλείων πολυκρυσταλλικού κυβικού βοριοιτρίτη σε διαφορετικές ταχύτητες κοπής (Atkins, 2003)

Η σκληρυμένη επιφάνεια του τεμαχίου στην τόννευση έχει αποξεστική επίδραση στο υλικό του εργαλείου και οι υψηλές θερμοκρασίες της κοπτικής ακμής προκαλούν διάχυση θερμοκρασίας μεταξύ του εργαλείου και του αποβλίπτου. Η τόννευση σκληρών

τεμαχίων απαιτεί κοπτικά εργαλεία υψηλής απόδοσης και εξαιρετικής στιβαρότητας.

Σε πολλές εφαρμογές η κοπή σιδηρούχων υλικών σε συνθήκες σκλήρυνσης μπορεί να αντικαταστήσει τη λείανση, πράγμα το οποίο συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του κόστους και την αύξηση της παραγωγικότητας. Τα κοπτικά εργαλεία που απαιτούνται για την τόννευση σκληρών υλικών είναι ακριβά. Η επιλογή των βέλτιστων συνθηκών κοπής μπορεί να εξισορροπήσει την αντιστάθμιση μεταξύ της παραγωγικότητας και της διάρκειας ζωής, και κατά συνέπεια την ανάγκη μελέτης της επίδρασης των συνθηκών κοπής στη συμπεριφορά φθοράς διαφόρων υλικών εργαλείων σκληρής τόννευσης.

Έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες, οι οποίες διερευνούν την επίδοση των εργαλείων PCBN στη σκληρή τόννευση, ειδικά όσον αφορά την επίδραση της σκληρότητας στο ρυθμό φθοράς. Οι (Senthilkumar *et al.*, 2012) έδειξαν ότι ο κύριος μηχανισμός φθοράς των εργαλείων πολυκρυσταλλικού βοριονιτρίτη κατά την κατεργασία του χάλυβα AISI 52100 είναι η απόξεση από τα σκληρά σωματίδια του καρβιδίου που περιέχονται στο τεμάχιο. Η απόξεση του κοπτικού εργαλείου εξαρτάται από τη φύση των καρβιδίων, το μέγεθος και την κατανομή τους. Τα διαφορετικά υλικά κατεργασίας ίδιας σκληρότητας δε μπορούν να θεωρηθούν ισάξια ως προς την άποψη της φθοράς του εργαλείου.



Εικόνα 2.6: Ρυθμός πλευρικής φθοράς και φθοράς κρατήρα του εργαλείου (Senthilkumar *et al.*, 2012)



Εικόνα 2.7: Λειαντικοί τροχοί PCBN (www.vtd.de)

2.3 Φθορά τόννου PCBN σε υλικό κατεργασίας σκληροχάλυβα

Σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες εξελίξεις σχετικά με τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις προηγμένες μεθόδους αφαίρεσης υλικού, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον έχουν προσελκύσει τα εργαλεία PCBN ειδικά λόγω της καλής συμπεριφοράς τους κατά την κοπή υλικό κατεργασίας από χάλυβα. Μια πολύ σημαντική έρευνα στον τομέα διεξήγαγαν οι Roulachon et al. (2003) για την ξηρή τόννευση 4 διαφορετικών κραμάτων χάλυβα (επεξεργασμένα στην ίδια σκληρότητα $R_c = 54$) με εργαλείο PCBN και την φθορά τους. Τα τέσσερα είδη χαλύβδινων υλικών κατεργασίας της μελέτης ήταν το X155CrMoV 12 (AISI D2), X38CrMoV5 (AISI H11), 35NiCrMo16 και το 100Cr6 (AISI 52100).

Ένα από τα κύρια προβλήματα κατά την τόννευση τέτοιων υλικών σκληροχάλυβα είναι η αυξημένη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Σε αυτό το πρόβλημα η λύση δόθηκε με την αυξημένη χρήση των κοπτικών εργαλείων PCBN, λόγω των άριστων μηχανικών τους ιδιοτήτων, όπως η αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες και διατήρηση του σχήματος και της μορφής τους σε υψηλές καταπονήσεις. Μάλιστα είναι δεύτερο στην κλίμακα σκληρότητας πίσω μόνο από το διαμάντι, με σκληρότητα στην κλίμακα Knoop ίση με 4800kg/mm^2 , ενώ τα τεμάχια σκληροχάλυβα έχουν $600\text{--}4800\text{kg/mm}^2$.

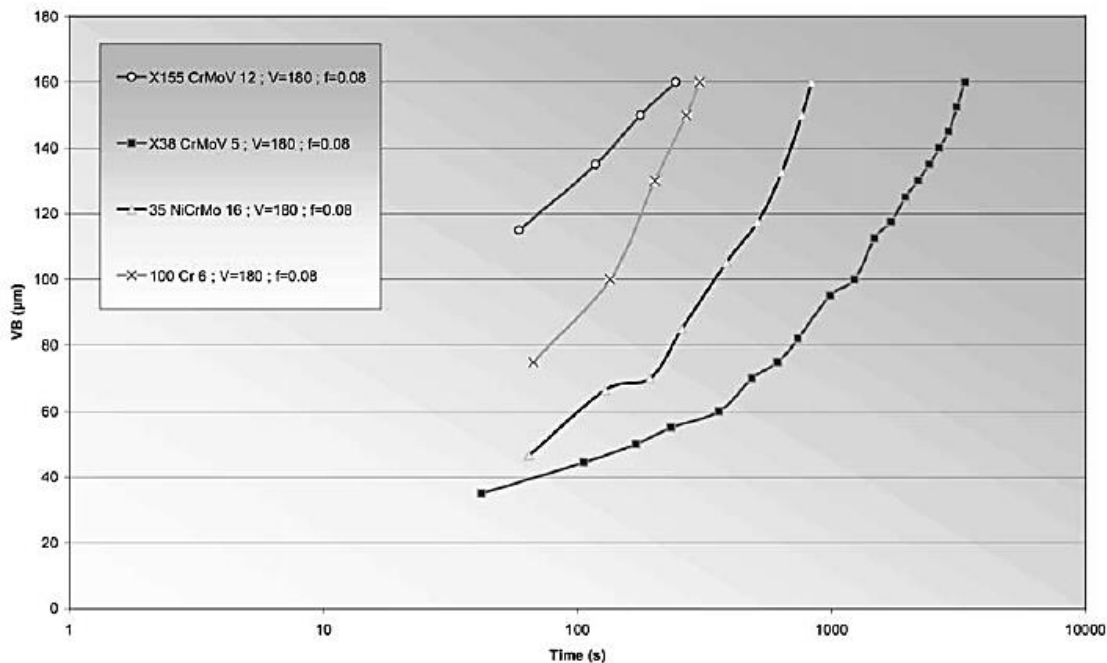


Εικόνα 2.8: Ενθέματα PCBN σε εργαλείο τόννευσης (PCBN guide)

Τα πειράματα διεξήχθησαν σε τórνο CNC Mazak ισχύος 20 kW με ενθέματα PCBN της Sandvik. Οι παράμετροι κοπής για την ξηρή τórνευση επιλέχθηκαν με γνώμονα ότι η σκληροτórνευση χρησιμοποιείται γενικότερα ως διαδικασία φινιρίσματος, ως εναλλακτική της άλεσης. Το βάθος κοπής επιλέχθηκε στα 0.2 mm, η ταχύτητα πρόωσης ήταν 0.08 και 0.12 mm/rev λόγω ότι μπορεί να δημιουργήσει ικανοποιητική τραχύτητα για ακτίνα κοπτικής ακμής της τάξεως των 0.8 mm. Η ταχύτητα κοπής επιλέχθηκε ίση με 230 and 180 m/min. Η τελευταία αυτή παράμετρος είναι η πιο σημαντική για τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με τις άλλες δυο παραμέτρους μιας και σχετίζεται άμεσα και την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία κοπής. Μάλιστα σύμφωνα με παλαιότερη μελέτη των ερευνητών η βέλτιστη ταχύτητα κοπής για κατεργασία εδράνων χάλυβα 100Cr6 είναι τα 120 m/min. Έτσι η ταχύτητα κοπής αυξήθηκε ώστε να μειωθεί ο χρόνος κοπής του πειράματος και να είναι πιο οντά οι παράμετροι στις πραγματικές βιομηχανικές συνθήκες.

Ένα από τα ευρήματά τους ήταν ότι η φθορά της πλευρικής επιφάνειας έχει σημαντική επίδραση στην ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Η φθορά του κοπτικού εργαλείου εξαρτάται από τις φυσικές, μηχανικές και χημικές ιδιότητες του υλικού κατεργασίας, τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, τις παραμέτρους κοπής και από τη χρήση υγρών κοπής. Επίσης, ο τύπος της φθοράς εξαρτάται άμεσα από το συσχετισμό αυτών των μεταβλητών. Έτσι η κοπή σκληροχάλυβα χαρακτηρίζεται από τα μεγάλα μηχανικά και θερμικά φορτία που υφίστανται τα κοπτικά εργαλεία.

Η Εικόνα 2.9 παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ της φθοράς της πλευρικής επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου με το χρόνο κοπής για τα 4 υπό μελέτη υλικά κατεργασίας, για ταχύτητα κοπής 180 m/min και ταχύτητα πρόωσης 0.08 mm/rev. Αν και η κατεργασία αφορούσε διαφορετικά υλικά χάλυβα με ίδια σκληρότητα, η φθορά των κοπτικών εργαλείων είχε σημαντική διακύμανση για κάθε υλικό. Σύμφωνα με το διάγραμμα της εικόνας τα υλικά μπορούν να χωρισθούν σε 2 διαφορετικές ομάδες αναφορικά με τη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Η μια ομάδα εμφάνισε υψηλούς ρυθμούς φθοράς και περιλάμβανε τα υλικά χάλυβα 100Cr6 και X155CrMoV12, ενώ η άλλη ομάδα των υλικών είχε μικρότερη επίπτωση στη φθορά των κοπτικών εργαλείων PCBN.



Εικόνα 2.9: Φθορά πλευρικής επιφάνειας για όλα τα υλικά σε σχέση με το χρόνο κοπής (Roulachon et al. 2003)

Τα γενικότερα συμπεράσματα της έρευνας έδειξαν ότι η μικροδομή του υλικού σκληροχάλυβα επηρεάζει τη φθορά των κοπτικών εργαλείων PCBN. Ο κύριος παράγοντας είναι η παρουσία καρβιδίων στη μικροδομή του χάλυβα. Η σκληρότητα αυτών των καρβιδίων έχει σημαντική διακύμανση οδηγώντας σε ποικίλους ρυθμούς φθοράς κατά την τórνευσή τους. Η φθορά της πλευρικής επιφάνειας προκλήθηκε από τη λείανση αυτών των καρβιδίων.

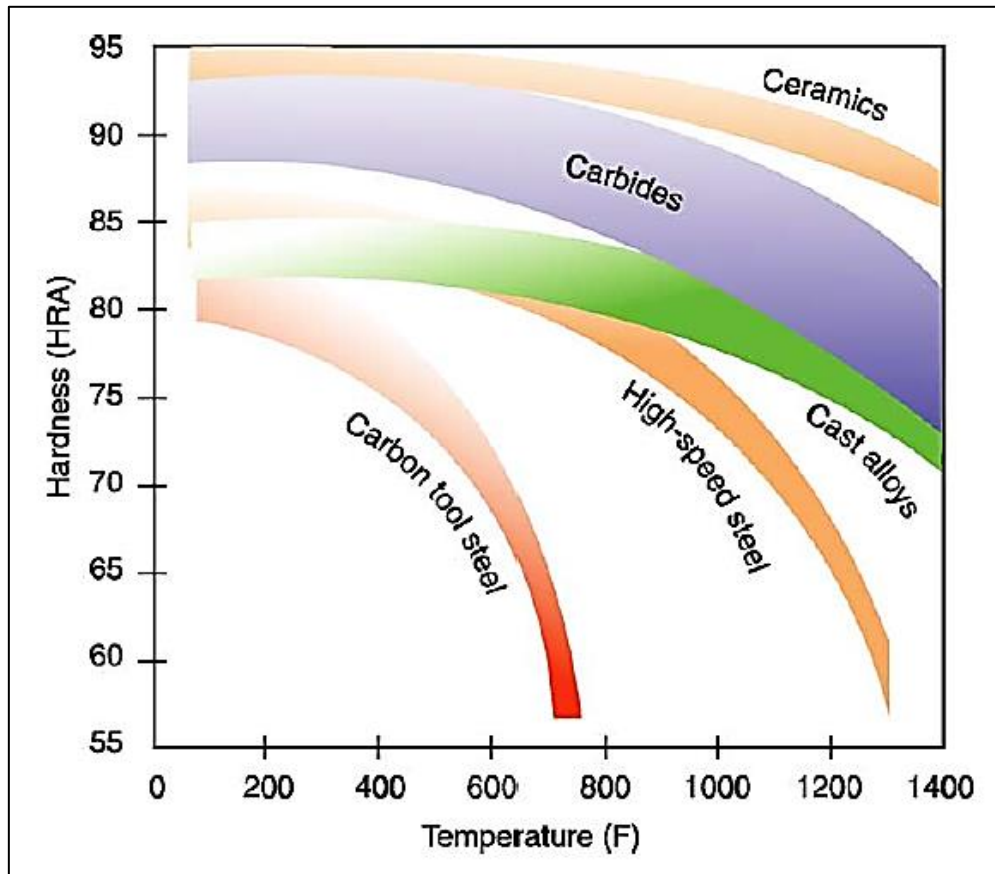
2.4 Δομή κοπτικού εργαλείου

Με τον όρο κοπτικό εργαλείο αναφερόμαστε στο μέσο το οποίο χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του ανεπιθύμητου υλικού από το τεμάχιο. Αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για οποιαδήποτε κατεργασία κοπής. Τα είδη των κοπτικών εργαλείων ποικίλουν τόσο ως προς το υλικό τους όσο και ως προς τη γεωμετρία τους. Από τα πιο συνηθισμένα υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κοπτικών εργαλείων είναι οι ανθρακούχοι χάλυβες, οι ταχυχάλυβες, τα σκληρομέταλλα, τα κεραμικά, ο κυβικός βοριοιτρίτης και το διαμάντι. Προφανώς τα εργαλεία που προκύπτουν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους και για το λόγο αυτό κάθε εφαρμογή απαιτεί και το κατάλληλο κοπτικό εργαλείο.

Συνολικά πάντως, όλα τα κοπτικά εργαλεία πρέπει να διαθέτουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Σκληρότητα: Για να είναι δυνατή η αφαίρεση υλικού από το τεμάχιο, πρέπει το υλικό του εργαλείου να είναι σκληρότερο από το υλικό του τεμαχίου. Όσο μεγαλύτερη είναι η σκληρότητα του εργαλείου, τόσο ευκολότερο είναι να δεισδύσει στο τεμάχιο. Η σκληρότητα του εργαλείου καθορίζει επίσης και άλλους παράγοντες, όπως τη φθορά του.
- Θερμή σκληρότητα: Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό αναφέρεται στην ιδιότητα που πρέπει να έχει το κοπτικό εργαλείο να διατηρεί τη σκληρότητα και την αντοχή του σε αυξημένες θερμοκρασίες. Η ιδιότητα αυτή είναι σημαντική κυρίως όταν το εργαλείο χρησιμοποιείται σε υψηλές ταχύτητες κοπής, οι οποίες προκαλούν και αύξηση της θερμοκρασίας του εργαλείου, ώστε να αυξηθεί η παραγωγικότητα.
- Αντοχή: Η ιδιότητα αυτή αφορά την ικανότητα του κοπτικού εργαλείου να αντέχει στα κρουστικά φορτία, τα οποία εμφανίζονται κατά την έναρξη της κοπής ή όταν το εργαλείο πρέπει να αντιμετωπίσει τη διακύμανση δύναμης που προκαλείται όταν συναντά ατέλειες στο κατεργαζόμενο υλικό. Η αντοχή είναι απαραίτητη, ώστε το εργαλείο να μην κάνει ρωγμές, ιδίως κατά τη διάρκεια σε συνθήκες διακοπτόμενης κοπής.
- Αντίσταση στη φθορά: Οι διεπιφάνειες εργαλείου-αποβλίπτου και αποβλίπτου-τεμαχίου υφίστανται σημαντική φθορά λόγω προσκόλλησης ή απόξεσης. Η αντίσταση στη φθορά αφορά στη διατήρηση αποδεκτής διάρκειας ζωής, προτού χρειαστεί η αντικατάσταση του εργαλείου.
- Χαμηλή τριβή: Ο συντελεστής τριβής μεταξύ του εργαλείου και του αποβλίπτου πρέπει να είναι χαμηλός. Με τον τρόπο αυτό το εργαλείο φθείρεται με πολύ χαμηλότερο ρυθμό και η ροή του αποβλίπτου είναι καλύτερη.
- Θερμικά χαρακτηριστικά: Το υλικό του κοπτικού εργαλείου πρέπει να μπορεί να αποβάλλει σύντομα τη θερμότητα που παράγεται στη ζώνη κοπής, και για το λόγο αυτό πρέπει να διαθέτει υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Διαφορετικά η θερμοκρασία του εργαλείου αυξάνεται, προκαλώντας έτσι μείωση στη διάρκεια ζωής του.
- Το υλικό του κοπτικού εργαλείου πρέπει να είναι χημικά αδρανές ως προς το υλικό κατεργασίας και το υγρό κοπής

Στην Εικόνα 2.10 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα, το οποίο παρουσιάζει τη μεταβολή της σκληρότητας υλικών κοπτικών εργαλείων ως προς τη θερμοκρασία.



Εικόνα 2.10: Σκληρότητα του υλικού του κοπτικού εργαλείου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Αριθμητική προσομοίωση κοπής

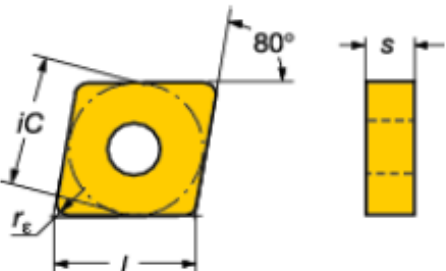
3.1 Γενικά

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο κατασκευάζουμε μοντέλο με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων και με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου MSC MARC που διαθέτει προς χρήση το εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Γίνεται αναφορά στις παραμέτρους κοπής και τα εύρη τιμών που επιλέχθηκαν ώστε να γίνει ο απαραίτητος σχεδιασμός των προσομοιώσεων. Ο σχεδιασμός των προσομοιώσεων βασίστηκε στη μελέτη των J. Kundrak, G. Szabo και A. Markopoulos (1971) [1] όπου και μελετήθηκε αναλυτικά και πειραματικά η επίδραση της ταχύτητας κοπής και του βάθους κοπής στις δυνάμεις τórνευσης χάλυβα σε τιμές οι οποίες αναφέρονται αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.

3.2 Σχεδιασμός προσομοιώσεων

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε τις παραμέτρους κοπής που επιλέξαμε να μεταβάλλονται κατά τις προσομοιώσεις καθώς και τα όρια τιμών που θα έχουν. Έτσι, το υλικό του υπό κοπή τεμαχίου επιλέχθηκε χάλυβας 16MnCr5 [1] ενώ το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι το CNGA120408S01030A 7015 [1] τα αναλυτικά στοιχεία του οποίου δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

	Type of insert Manufacturer Material Tool edge iC rE s l	CNGA120408S01030A 7015 SANDVIK COROMANT PCBN Normal 12.7 mm 0.8 mm 4.76 mm 12 mm
---	---	---

Εικόνα 3.1: Χαρακτηριστικά κοπτικού εργαλείου

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σειρά προσομοιώσεων με στοιχεία εκ των ακόλουθων παραμέτρων κοπής:

Εύρος παραμέτρων κοπής

- Ταχύτητα κοπής V [90 m/min ... 240 m/min]
- Βάθος κοπής D [0.05 mm ... 0.25 mm]
- Γωνία κοπής [-8ο]
- Γωνία ελευθερίας [+6ο]
- Συντελεστής τριβής μ [0.6]
- Πλάτος κοπής W [0.1 mm]

Συνολικά όλοι οι παράμετροι βάση των οποίων πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Ταχύτητα κοπής v (m/min)	Βάθος κοπής D (mm)	Γωνία κοπής (°)	Γωνία ελευθερίας (°)	Συντελεστής τριβής μ	Πλάτος κοπής W (mm)
90	0.05				
120	0.1				
150	0.15	-8	6	0.6	0.1
180	0.2				
240	0.25				

Πίνακας 3.1: Σύνολο παραμέτρων προσομοιώσεων

3.3 Γεωμετρία τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου

Η γεωμετρία τόσο του υπό κοπή τεμαχίου όσο και του κοπτικού εργαλείου σχεδιάζεται στο περιβάλλον του υπολογιστικού πακέτου MSC MARC. Ένας τέτοιος σχεδιασμός προϋποθέτει όμως την ακριβή γνώση των σημείων που θα εισαχθούν στο πρόγραμμα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται το σχεδιαστικό δισδιάστατο πακέτο Autodesk AutoCAD όπου διενεργείται ένας πρώτος σχεδιασμός όλων των γεωμετριών των προσομοιώσεων για να ληφθούν εν συνεχεία τα απαραίτητα σημεία. Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε ότι θεωρούμε το πρόβλημα ως επίπεδης παραμόρφωσης οπότε σχεδιάζουμε τόσο το τεμάχιο όσο και το κοπτικό εργαλείο στις διαστάσεις και θεωρούμε συγκεκριμένο πάχος μέσα στο υπολογιστικό πακέτο MSC MARC. Περεταίρω λεπτομέρειες θα δοθούν στην αντίστοιχη ενότητα.

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζεται η γεωμετρία που κατασκευάστηκε παραμετρικά στο Autodesk AutoCAD.



Εικόνα 3.2 : Δισδιάστατη γεωμετρία τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου (βάθος κοπής 0.1 mm) στο Autodesk

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε με μπλε χρώμα το τεμάχιο και με πράσινο χρώμα το κοπτικό εργαλείο ενώ μεταβάλλοντας τη διάσταση $d4$ από 0.05 mm σε 0.25 mm δημιουργούμε όλες τις υπόλοιπες γεωμετρίες σύμφωνα με τον πίνακα 3.2. Στο τεμάχιο δίνεται μήκος 10 mm έτσι ώστε να είναι αρκετό για τη δημιουργία αποβλήτου σε όλες τις διαφορετικές γεωμετρίες

Έτσι στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται όλα τα σημεία τόσο για το τεμάχιο όσο και για το κοπτικό εργαλείο τα οποία και εισάγουμε στο περιβάλλον του υπολογιστικού πακέτου MSC MARC.

A/A	Περιγραφή σημείου	Συντεταγμένη x (mm)	Συντεταγμένη y (mm)	Συντεταγμένη z (mm)
1	Θέση κάτω αριστερά	0	0	0
2	Θέση πάνω αριστερά	0	1	0
3	Θέση κάτω δεξιά	10	0	0
4	Θέση πάνω αριστερά	10	1	0

Πίνακας 3.2: Συντεταγμένες σημείων τεμαχίου

A/A	Περιγραφή σημείου	Συντεταγμένη x (mm)	Συντεταγμένη y (mm)	Συντεταγμένη z (mm)
1	Θέση κάτω δεξιά (D = 0.05 mm)	12.0890	1.1591	0
2	Θέση κέντρο (κοπτική ακμή) (D = 0.05 mm)	10.1	0.95	0
3	Θέση πάνω αριστερά (D = 0.05 mm)	9.8217	2.9305	0
1	Θέση κάτω δεξιά (D = 0.1 mm)	12.0890	1.1091	0
2	Θέση κέντρο (κοπτική ακμή) (D = 0.1 mm)	10.1	0.90	0
3	Θέση πάνω αριστερά (D = 0.1 mm)	9.8217	2.8805	0
1	Θέση κάτω δεξιά (D = 0.15 mm)	12.0890	1.0591	0

2	Θέση κέντρο (κοπτική ακμή) (D = 0.15 mm)	10.1	0.85	0
3	Θέση πάνω αριστερά (D = 0.15 mm)	9.8217	2.8305	0
1	Θέση κάτω δεξιά (D = 0.2 mm)	12.0890	1.0091	0
2	Θέση κέντρο (κοπτική ακμή) (D = 0.2 mm)	10.1	0.8	0
3	Θέση πάνω αριστερά (D = 0.2 mm)	9.8217	2.7805	0
1	Θέση κάτω δεξιά (D = 0.25 mm)	12.0890	0.9591	0
2	Θέση κέντρο (κοπτική ακμή) (D = 0.25 mm)	10.1	0.75	0
3	Θέση πάνω αριστερά (D = 0.25 mm)	9.8217	2.7305	0

Πίνακας 3.3: Συντεταγμένες σημείων κοπτικού εργαλείου

3.4 Παράδειγμα προσομοίωσης κοπής με το λογισμικό πακέτο MARC

Αμέσως παρακάτω παρατίθενται τα βήματα της προσομοίωσης της κοπής. Στην αρχή γίνεται μια αναφορά στο λογισμικό πακέτο MSC MARC το οποίο και χρησιμοποιήθηκε και στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα εκτέλεσης της προσομοίωσης και η λήψη των αποτελεσμάτων

3.4.1 Πακέτο πεπερασμένων στοιχείων MSC MARC

Το πακέτο λογισμικού **MSC MARC**, είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα CAD – CAE το οποίο υπολογίζει τις καταπονήσεις και παραμορφώσεις κατασκευών & συστημάτων που βρίσκονται σε φόρτιση.

Η προσομοίωση με **MSC MARC - FEA (Finite Element Analysis)** προσφέρει την ιδανική λύση για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση προϊόντων, αυξάνοντας την παραγωγικότητα και ελαχιστοποιώντας την ανάγκη για δημιουργία πρωτοτύπων. Με το **MSC MARC - FEA** αντιμετωπίζονται τα πραγματικά προβλήματα ανάλυσης, καθιστώντας την ανάπτυξη προϊόντος λιγότερο δαπανηρή και πιο αξιόπιστη. Το πακέτο προσομοίωσης **MSC MARC - FEA** περιλαμβάνει μια σειρά από: στοιχεία (elements), επαφές (contacts), υλικά, λύτες (solvers), ενώ εκτός της δομικής ανάλυσης αντιμετωπίζει ταυτόχρονα και μεταφορά θερμότητας, ηλεκτρομαγνητισμό και ροή ρευστών (συζευγμένη φυσική - multiphysics).

Το MSC MARC μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

- Στον αρχικό σχεδιασμό (μελέτη σκοπιμότητας) μίας κατασκευής/προϊόντος.
- Στην ανεύρεση & εντοπισμό προβλημάτων (troubleshooting).
- Αναπαράγοντας την πραγματικότητα στο εικονικό περιβάλλον του Η/Υ, αναπαράγεται και το πρόβλημα, οπότε το επόμενο βήμα είναι η λύση του.

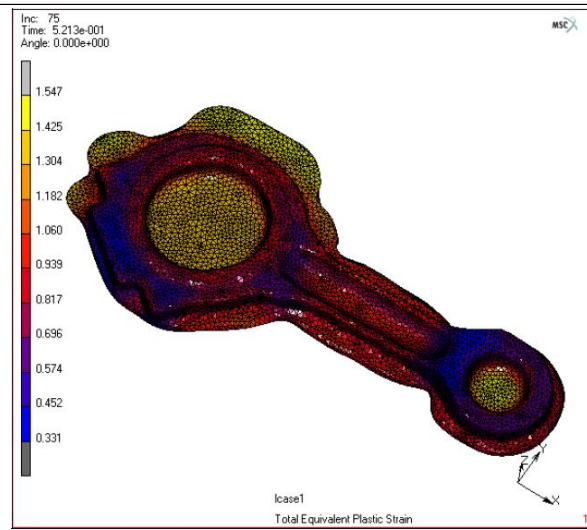
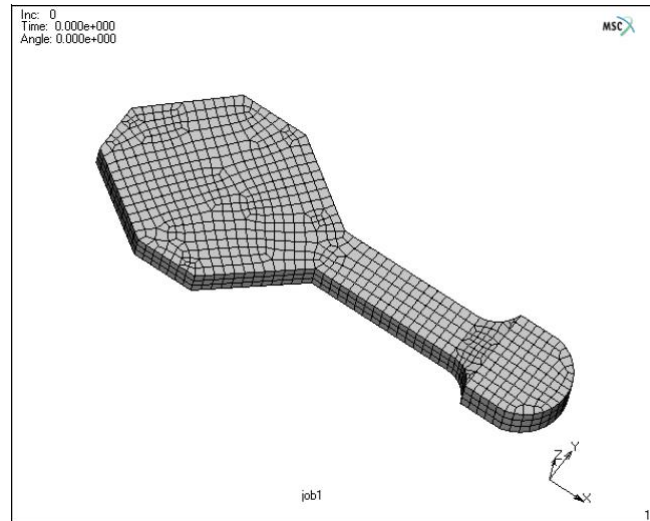
- Στη λεπτομερή ανάπτυξη του προϊόντος, όπου εξετάζουμε με λεπτομέρεια το προϊόν και τη συμπεριφορά του σε συνθήκες λειτουργίας όπως και σε ακραίες καταστάσεις.
- Στη βελτιστοποίηση του προϊόντος, με αλληπάλληλες επιλύσεις διαφορετικών σεναρίων, ώστε να δούμε ποιοι παράγοντες (διαστάσεις, υλικά, συνθήκες) είναι οι πιο επιδραστικοί.

Τα είδη ανάλυσης που μπορεί να επιλύσει το MSC Marc είναι:

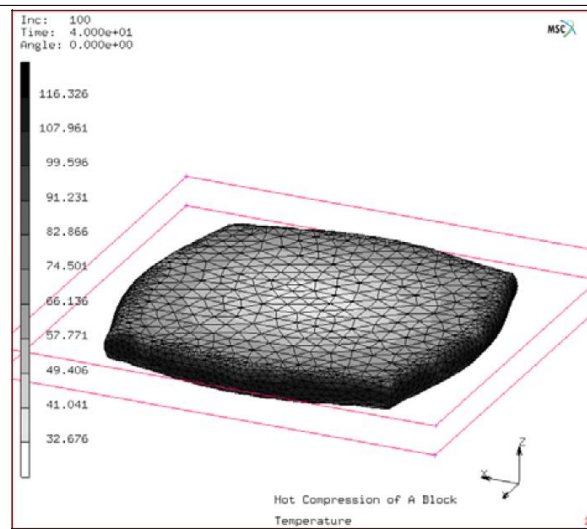
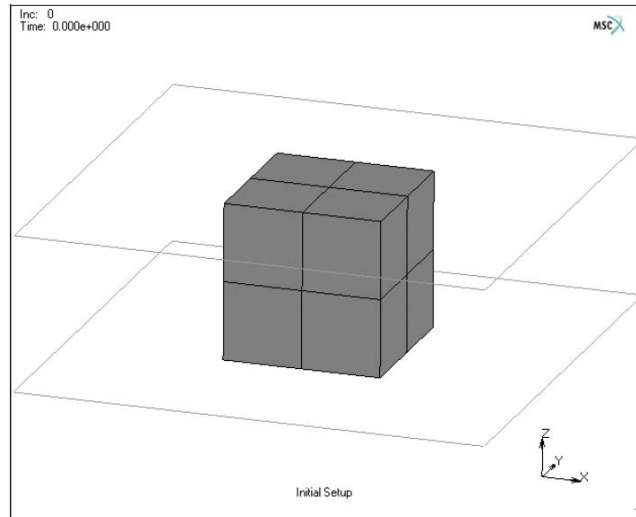
- Γραμμική στατική & δυναμική φόρτιση.
- Ρευστο-μηχανική ανάλυση.
- Εύρεση ιδιοσυχνοτήτων.
- Αρμονική ή τυχαία ταλάντωση.
- Θερμική ανάλυση (υπολογισμός θερμικών τάσεων).
- Λυγισμός.
- Αποκοπή υλικού (μεταλλικές κατεργασίες) και σύντομα γεγονότα (crash, drop).
- Κατεργασίες διαμόρφωσης.
- Μηχανικές δοκιμές.

Σημαντικό πλεονέκτημα του MSC MARC σε σχέση με τα άλλα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων είναι η δυνατότητα επαναδημιουργίας πλέγματος μετά από μεγάλη παραμόρφωση συγκεκριμένων πεπερασμένων στοιχείων, πράγμα που το καθιστά ιδανικό σε κατεργασίες διαμόρφωσης όπως η σφυρηλάτηση, η βαθεία κοίλανση, η έλαση, η διέλαση κ.τ.λ.

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα διαμορφώσεων που έχουν πραγματοποιηθεί με το λογισμικό MSC MARC και έχει πραγματοποιηθεί επαναδημιουργία πλέγματος κατά την επίλυσή τους.



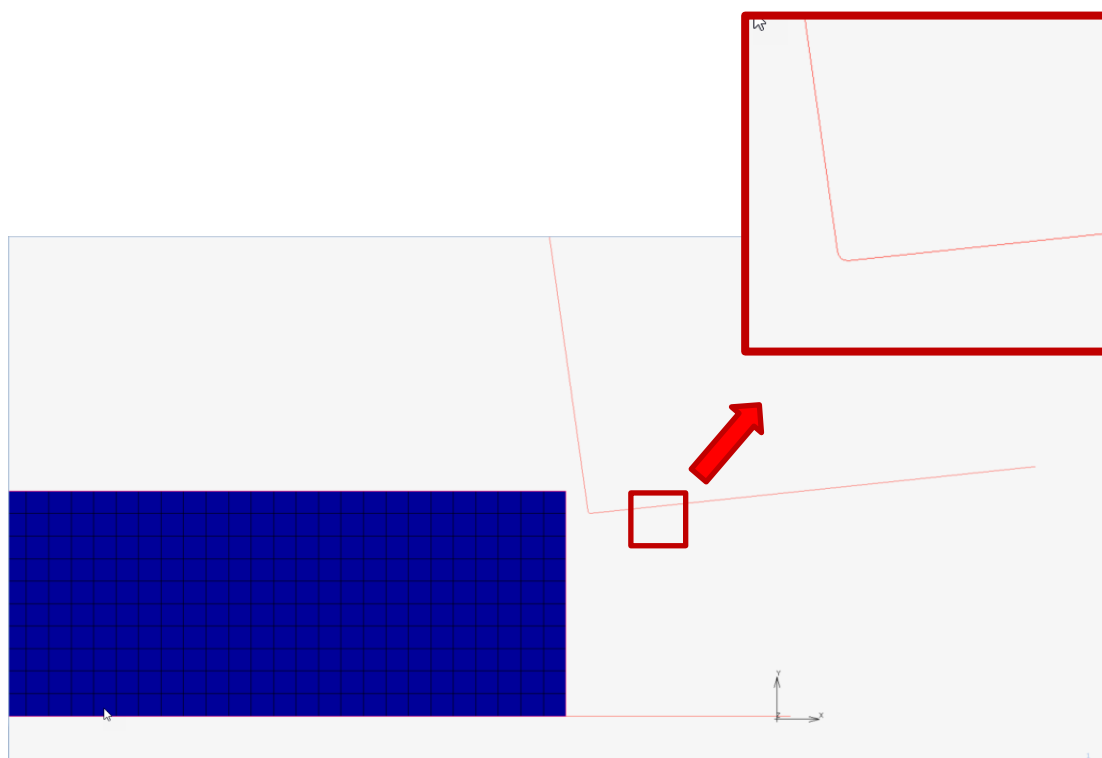
Εικόνα 3.3: Παράδειγμα σφρηλάττησης με το πακέτο MSC MARC



Εικόνα 3.4: Παράδειγμα θλίψης με το πακέτο MSC MARC

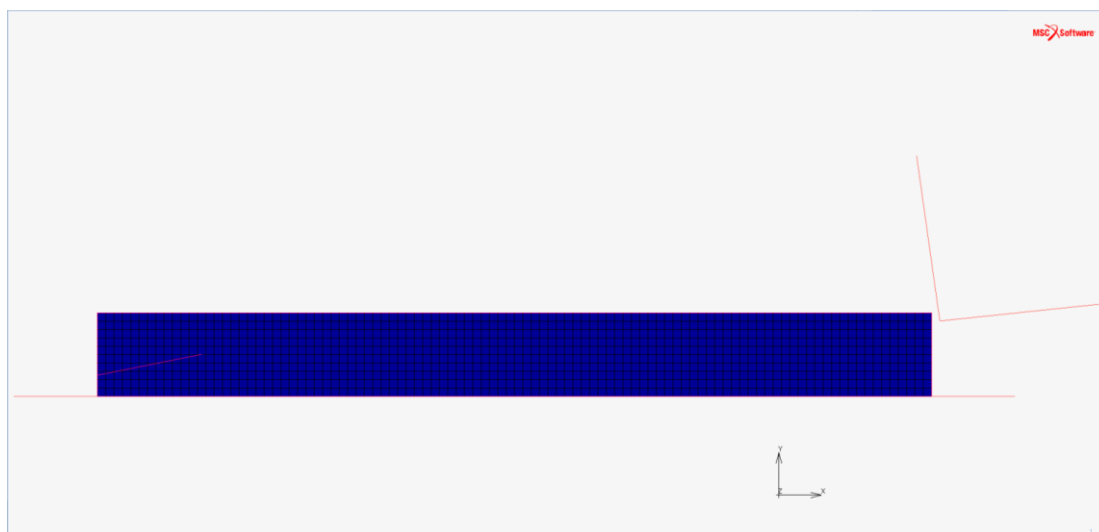
3.4.2 Εισαγωγή Γεωμετρίας στο MARC και επεξεργασία

Όπως αναφέραμε και στη παράγραφο 3.3 η γεωμετρία σχεδιάζεται στο περιβάλλον του MSC MARC βασιζόμενοι στα σημεία του Autodesk AutoCAD. Για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων θεωρούμε ότι το κοπτικό εργαλείο δεν μπορεί να παραμορφωθεί. Συνεπώς, θα θεωρηθεί άκαμπτο για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης της κοπής και θα το ορίσουμε ως καμπύλη. Οι γεωμετρικές παράμετροι του εργαλείου μας είναι η γωνία ελευθερίας, η γωνία αποβλήτου και η καμπυλότητα της κοπτικής ακμής. Από τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου έχουμε γωνία ελευθερίας $\alpha=60$ και γωνία αποβλήτου $\gamma=80$. Η κοπτική ακμή σχεδιάστηκε με ακτίνα 0,01 mm κάνοντας fillet στην κοπτική ακμή της. Το κοπτικό εργαλείο έχει την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 3.5: Η καμπύλη κοπτική ακμή του κοπτικού εργαλείου

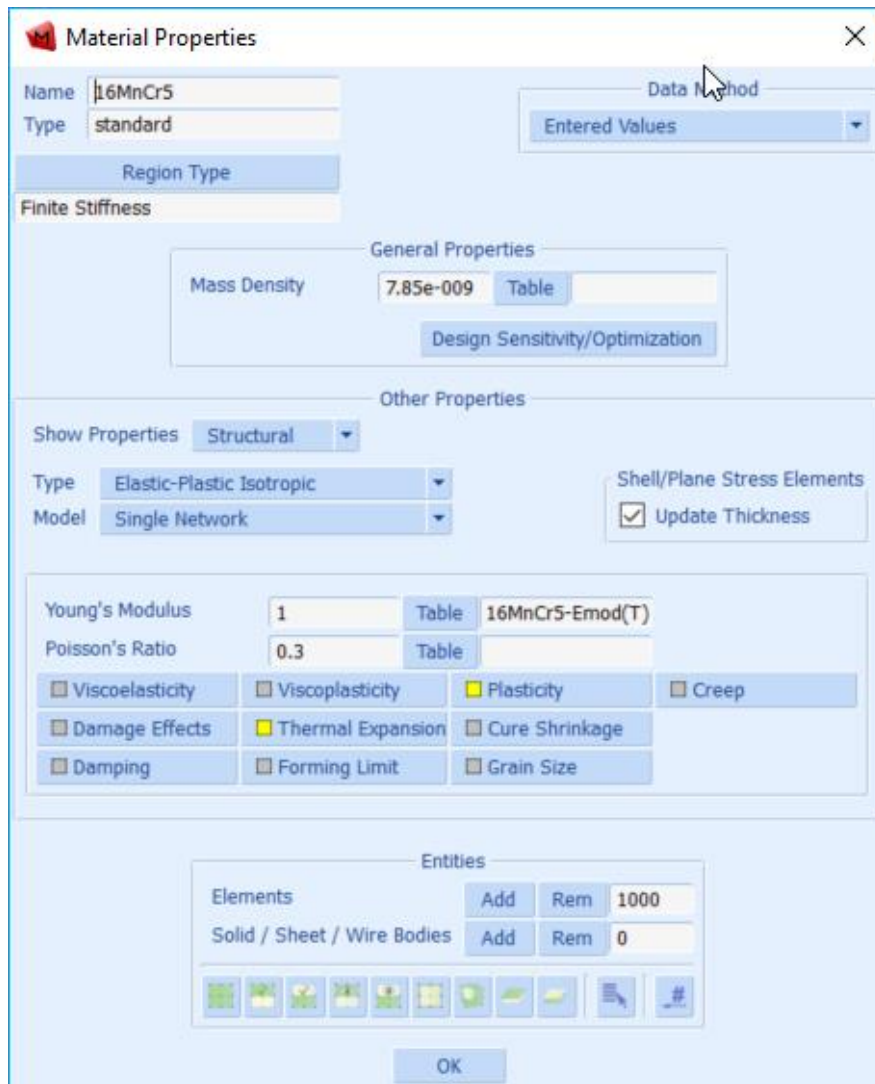
Λαμβάνοντας υπόψη τη σχεδίαση του τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου προκύπτει η παρακάτω εικόνα του μοντέλου :



Εικόνα 3.6: Το βασικό μοντέλο στο MSC MARC

3.4.3 Γεωμετρικές ιδιότητες και ιδιότητες υλικού του τεμαχίου

Στη συνέχεια ορίζουμε το υλικό του μοντέλου. Το δοκίμιο της εργασίας είναι κατασκευασμένο από χάλυβα 16MnCr5 [1]. Το βάθος κοπής της συγκεκριμένης προσομοίωσης ισούται με 0.1 mm. Για την εισαγωγή και τον ορισμό του χάλυβα χρησιμοποιήσαμε την βιβλιοθήκη υλικών του MSC MARC καθώς και τη μελέτη στην οποία βασίστηκε η εργασία [1] όπως φαίνεται παρακάτω:

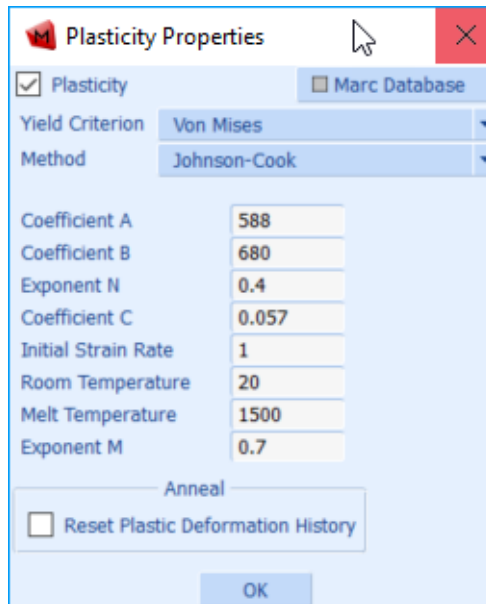


Εικόνα 3.7: Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικού στο MSC MARC

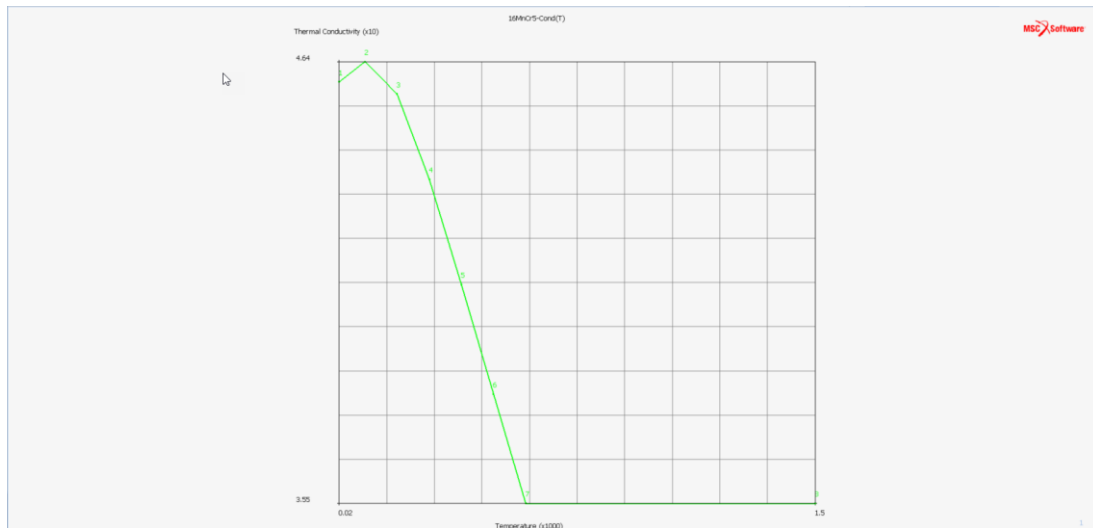
Για τη πλαστικότητα του χάλυβα 16MnCr5 χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι Johnson-Cook [1] του παρακάτω πίνακα ενώ για τις θερμικές ιδιότητες λάβαμε υπόψη τους πίνακες θερμικών ιδιοτήτων της βιβλιοθήκης του MSC.MARC που αφορούν την θερμική αγωγιμότητα, την ειδική θερμότητα, το συντελεστή θερμικής διαστολής και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Οι παραπάνω θερμικοί παράγοντες εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και απαιτούνται για τους υπολογισμούς που αφορούν την μεταφορά θερμότητας. Οι πίνακες παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.

σ_{red} [MPa]	A [MPa]	B [MPa]	C [-]	n [-]	m [-]
400	588	680	0.057	0.4	0.7

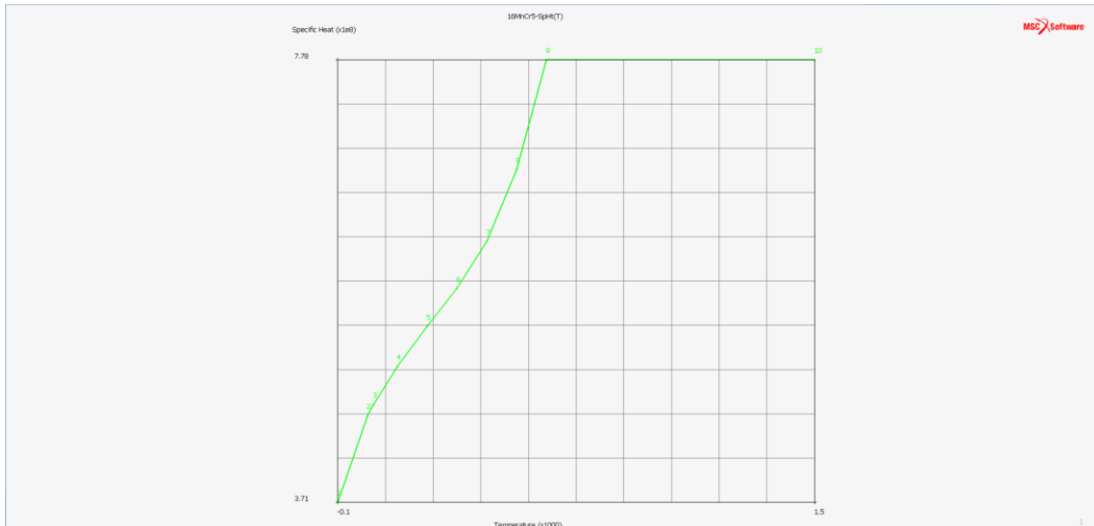
Πίνακας 3.4: Παράμετροι πλαστικότητας χάλυβα 16MnCr5 κατά Johnson-Cook



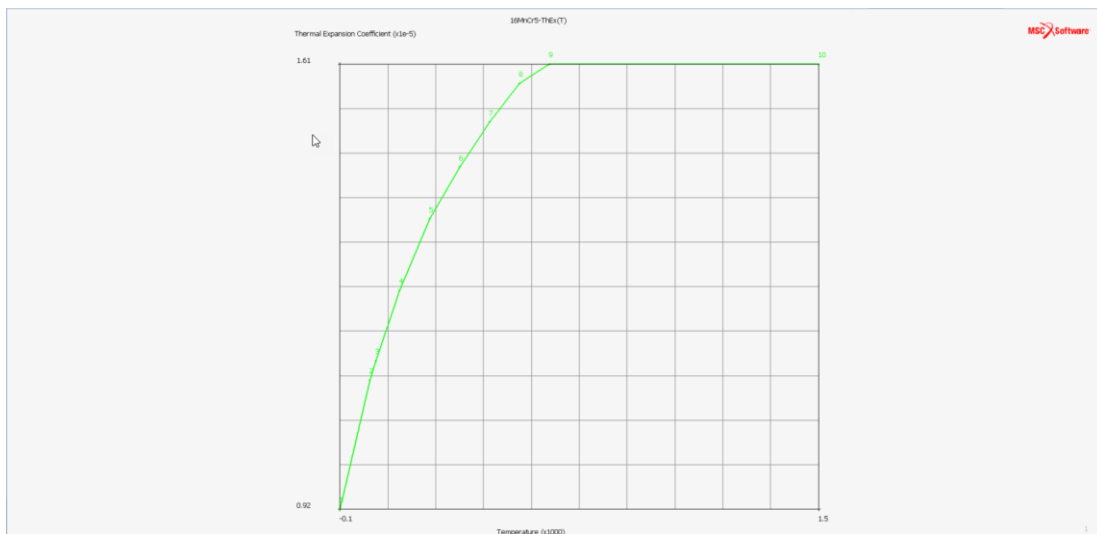
Εικόνα 3.8: Παράμετροι πλαστικότητας χάλυβα 16MnCr5 κατά Johnson-Cook (MSC MARC)



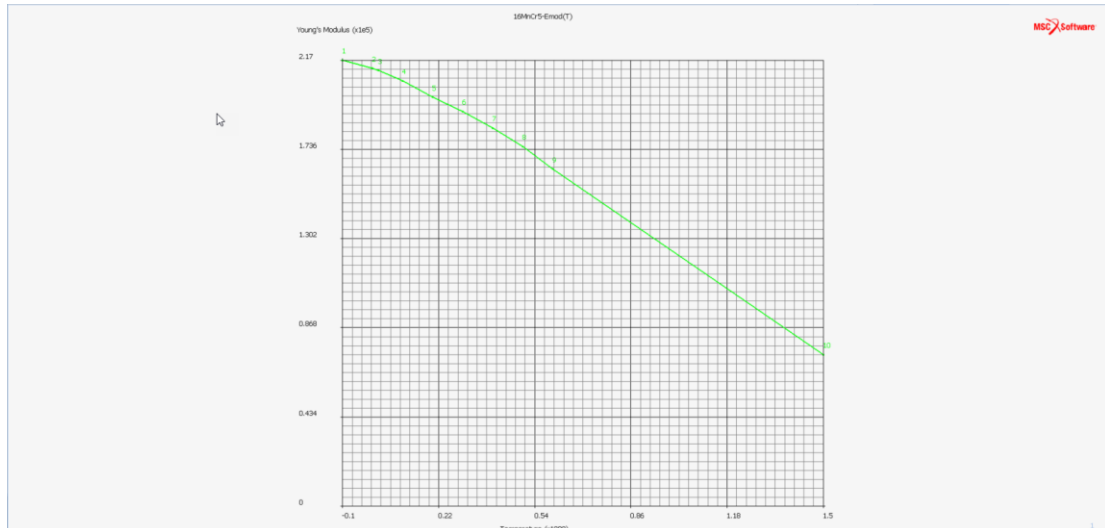
Εικόνα 3.9: Θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα 16MnCr5



Εικόνα 3.10: Ειδική θερμότητα του κάλυβα 16MnCr5



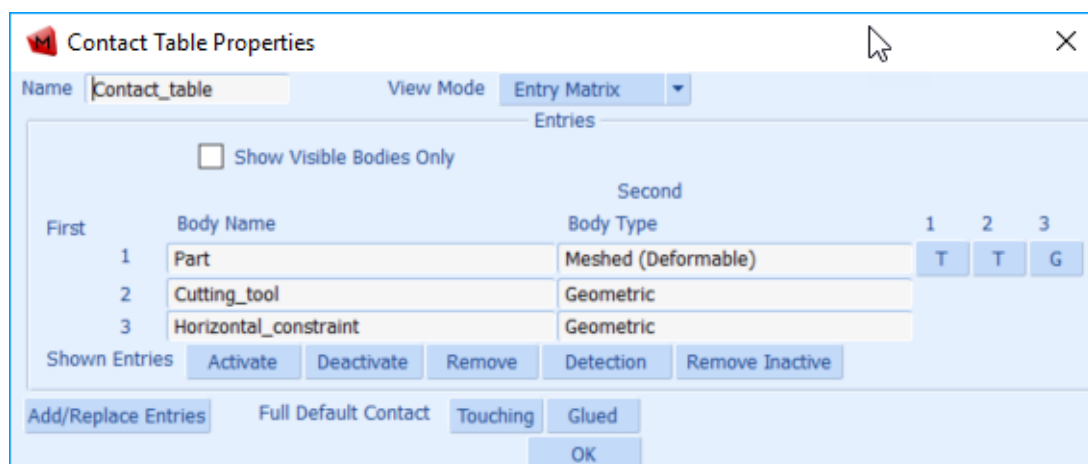
Εικόνα 3.11: Συντελεστής Θερμικής Διαστολής του κάλυβα 16MnCr5



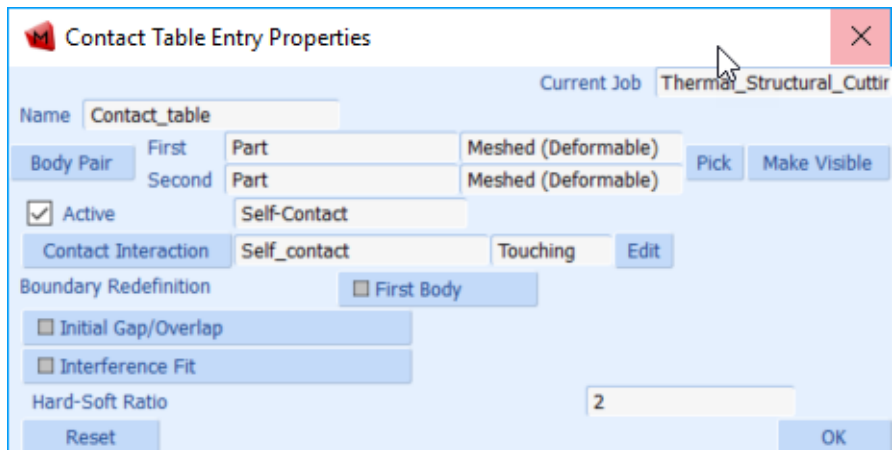
Εικόνα 3.12: Μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα 16MnCr5

3.4.4 Ορισμός των επαφών και των αρχικών συνθηκών

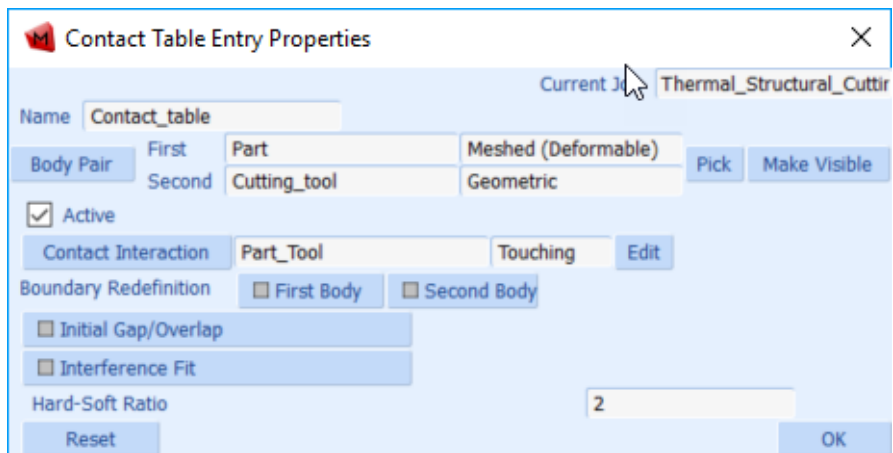
Έπειτα ορίζουμε τις επαφές μεταξύ των επιφανειών και τις αρχικές συνθήκες όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



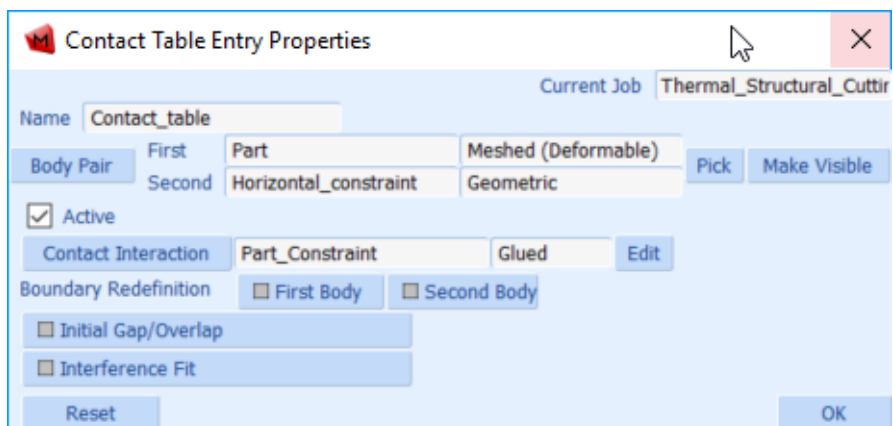
Εικόνα 3.13: Ορισμός επαφών επιφανειών και των ιδιοτήτων τους



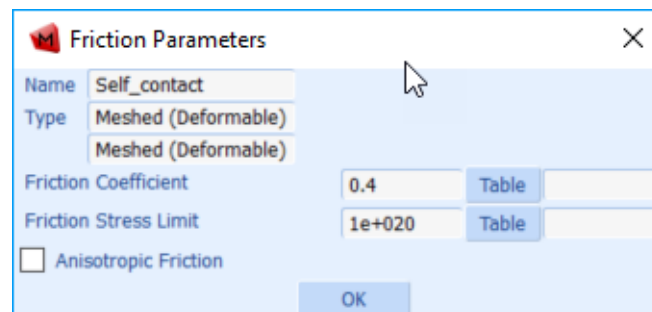
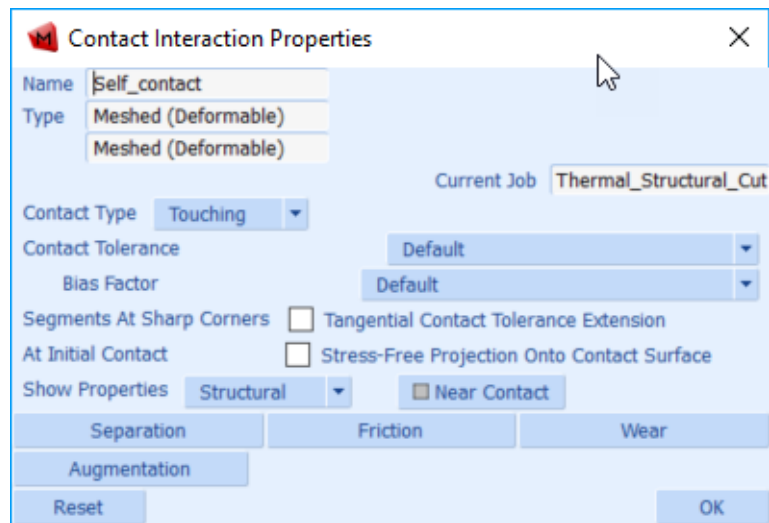
Εικόνα 3.14: Επαφή μεταξύ του κομματιού και του αποβλήττου του



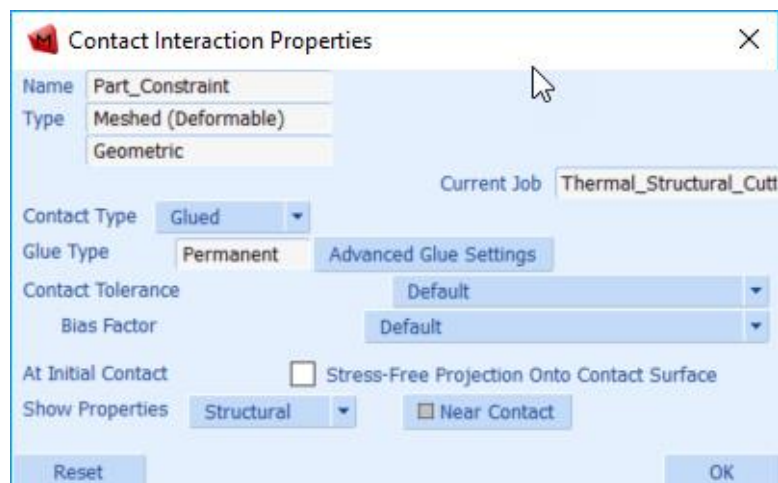
Εικόνα 3.15: Επαφή μεταξύ του κομματιού και του κοπτικού εργαλείου



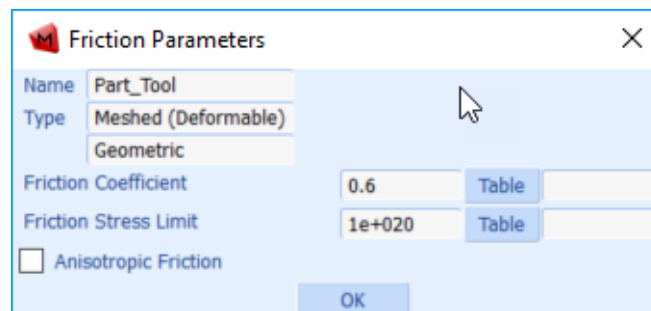
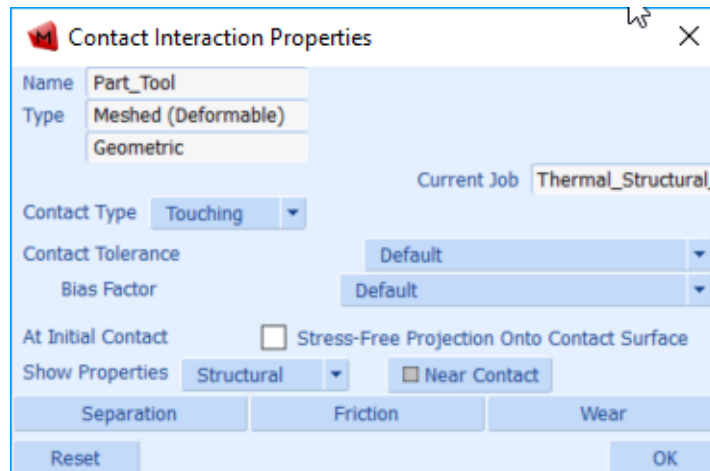
Εικόνα 3.16: Επαφή μεταξύ του κομματιού και της επιφάνειας πάκτωσης



Εικόνα 3.17: Ιδιότητες επαφής μεταξύ του κομματιού και του αποβλήτου του

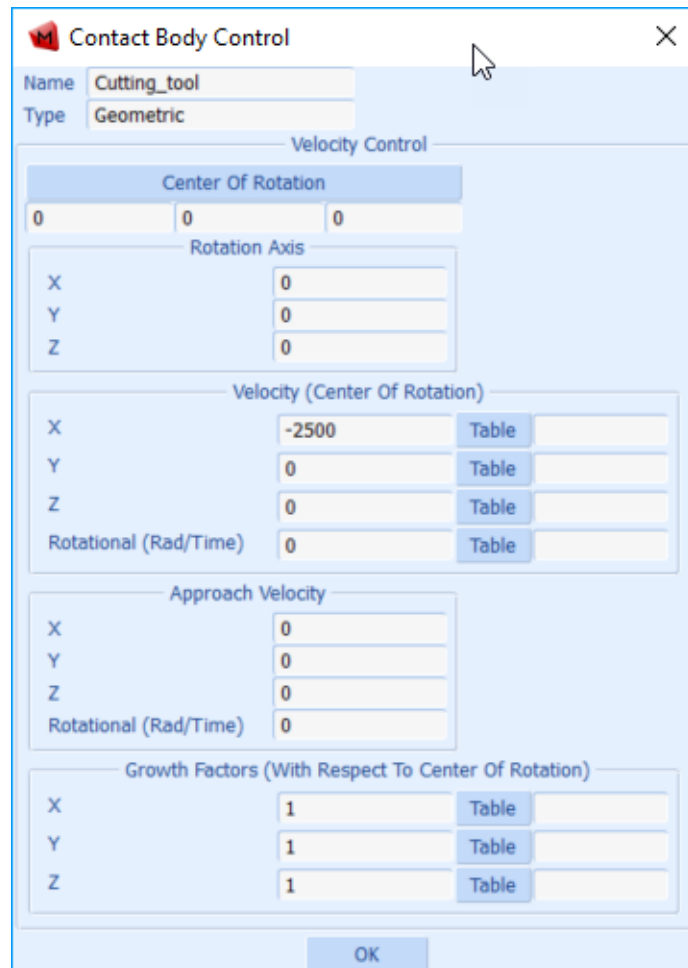


Εικόνα 3.18: Ιδιότητες επαφής μεταξύ του κομματιού και της επιφάνειας πάκτωσης



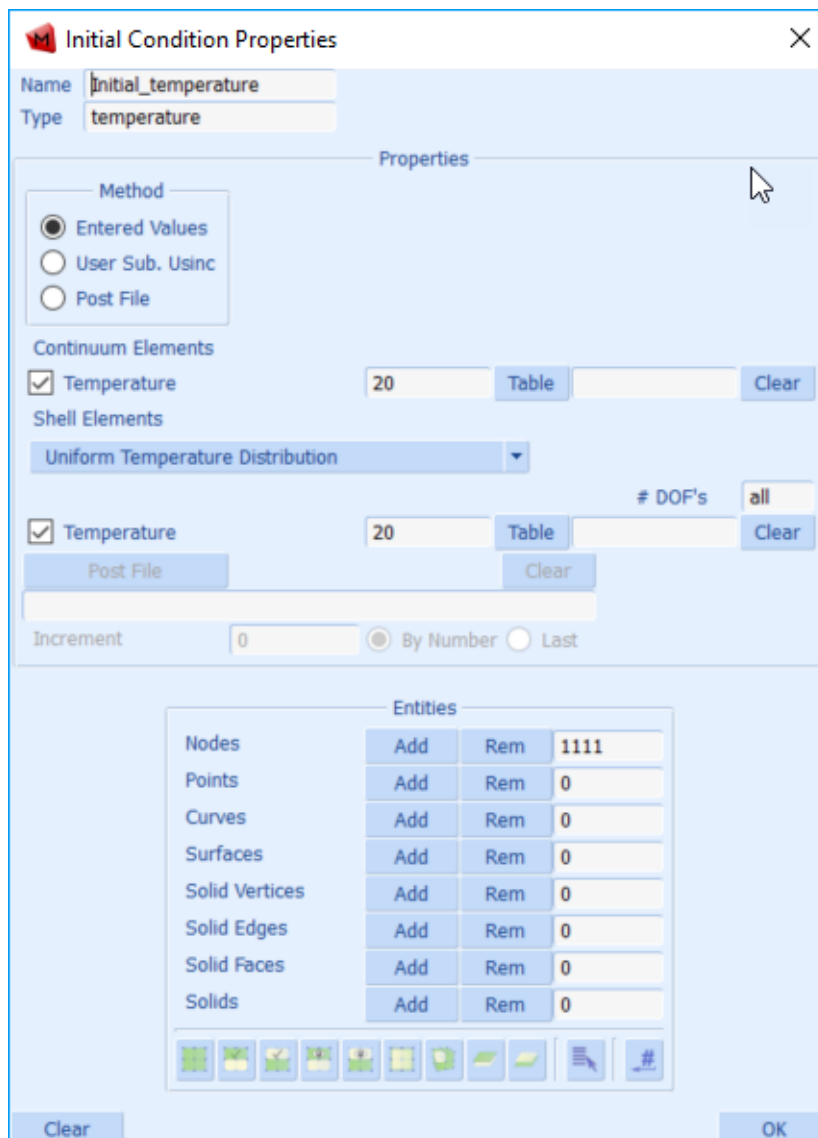
Εικόνα 3.19: Ιδιότητες επαφής μεταξύ του κομματιού και του κοπτικού εργαλείου

Από την καρτέλα των επαφών ορίζουμε και την ταχύτητα του κοπτικού μας εργαλείου για τη σθγκεκριμένη προσομοίωση. Το κοπτικό κινείται με ταχύτητα $U_x = 150 \text{ m/min} = -150 \cdot 1000 / 60 = 2500 \text{ mm/sec}$ κατά την διεύθυνση του άξονα των x . Το προς κατεργασία κομμάτι θεωρείται ακίνητο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.



Εικόνα 3.20: Σχετική ταχύτητα κοπτικού εργαλείου

Για τις αρχικές συνθήκες θεωρούμε ότι η κατεργασία λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία δωματίου 20°C και ότι η θερμοκρασία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Τα δεδομένα εισάγονται στην παρακάτω καρτέλα όπως φαίνεται στην εικόνα:

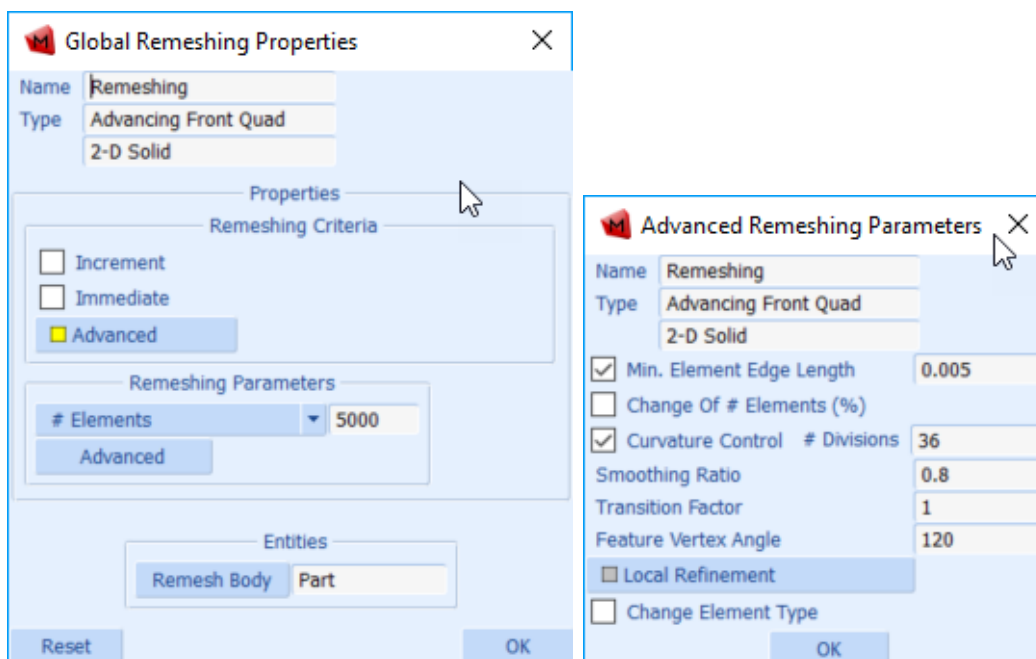


Εικόνα 3.21: Εισαγωγή αρχικής θερμοκρασίας τεμαχίου

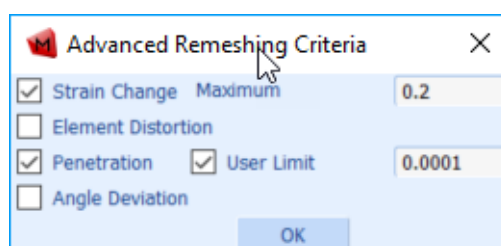
3.4.5 Προσαρμογή του πλέγματος (mesh adaptivity)

Έπειτα σειρά παίρνει ο καθορισμός του πλέγματος καθώς επίσης και ο ορισμός των παραμέτρων του global remeshing. Ο τύπος του πλέγματος επιλέχθηκε να είναι τετραγωνικός Advancing Front Quad. Στη συνέχεια ορίζεται το penetration ίσο με 0,0001 που προέκυψε μετά από σειρά δοκιμών. Ο αριθμός των στοιχείων του πλέγματος καθορίστηκε στις 5000 με άμεσο remeshing. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι τα 1000 αρχικά στοιχεία του τεμαχίου αυξάνονται στις 5000 με την εκκίνηση της σχετικής κίνησης του κοπτικού εργαλείου. Προτιμήθηκε έναντι του remeshing με την πρώτη επαφή λόγω ατελειών που

παρουσιάζονταν στο φινίρισμα της επιφάνειας του τεμαχίου. Ακόμα ορίζεται το ελάχιστο μήκος στοιχείου σε 0,005. Έτσι κατορθώσαμε να εφαρμοστεί τοπική αύξηση της πυκνότητας των στοιχείων για να αποδοθεί καλύτερα η προσομοίωση της κοπής. Η εισαγωγή των στοιχείων δίδεται στις παρακάτω εικόνες.



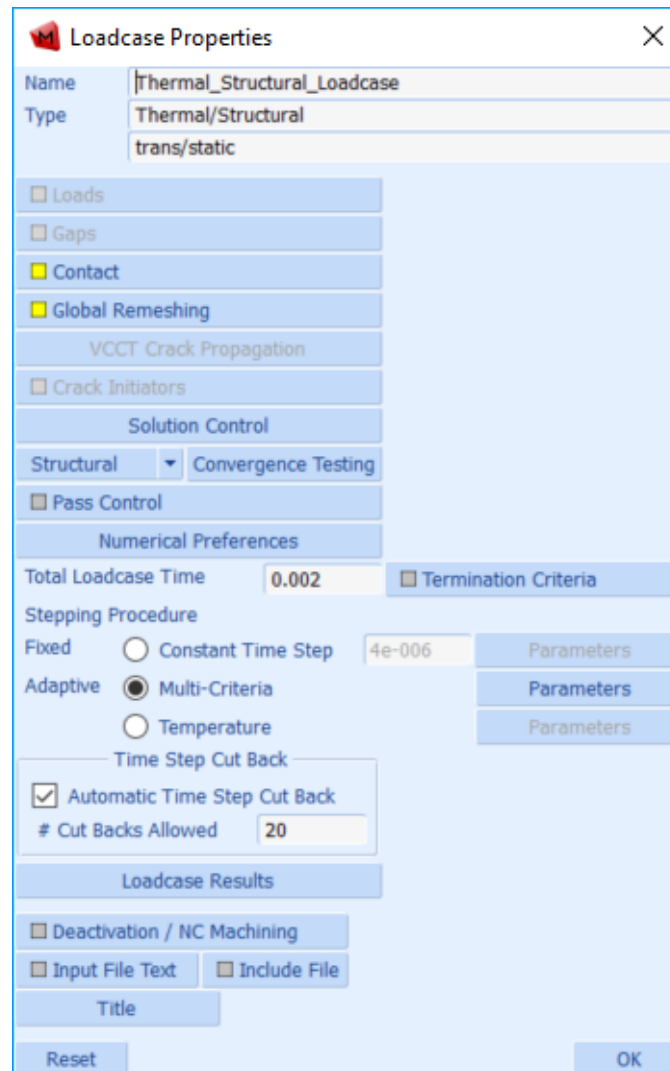
Εικόνα 3.22: Εισαγωγή ιδιοτήτων και παραμέτρων του remeshing



Εικόνα 3.23: Καθορισμός του Penetration

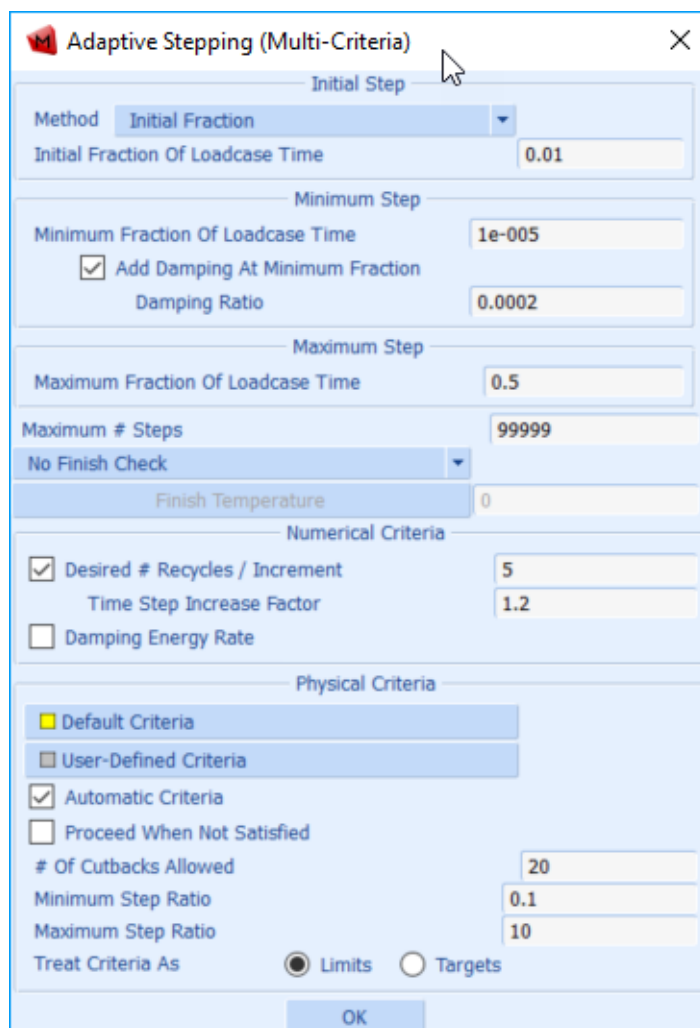
3.4.6 Ιδιοτητες φόρτισης

Για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων, το επόμενο βήμα ήταν ο ορισμός των ιδιοτήτων των φορτίσεων. Στο βήμα αυτό συνοψίζονται τα προηγούμενα βήματα και ορίζονται αυτά που θα ληφθούν υπόψη. Έτσι ορίζεται ο χρόνος που θα χρειαστεί για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, ίσος με $t = 5 \text{ mm} / 2500 \text{ m/sec} = 0.002 \text{ sec}$.



Εικόνα 3.24: Ιδιότητες φόρτισης

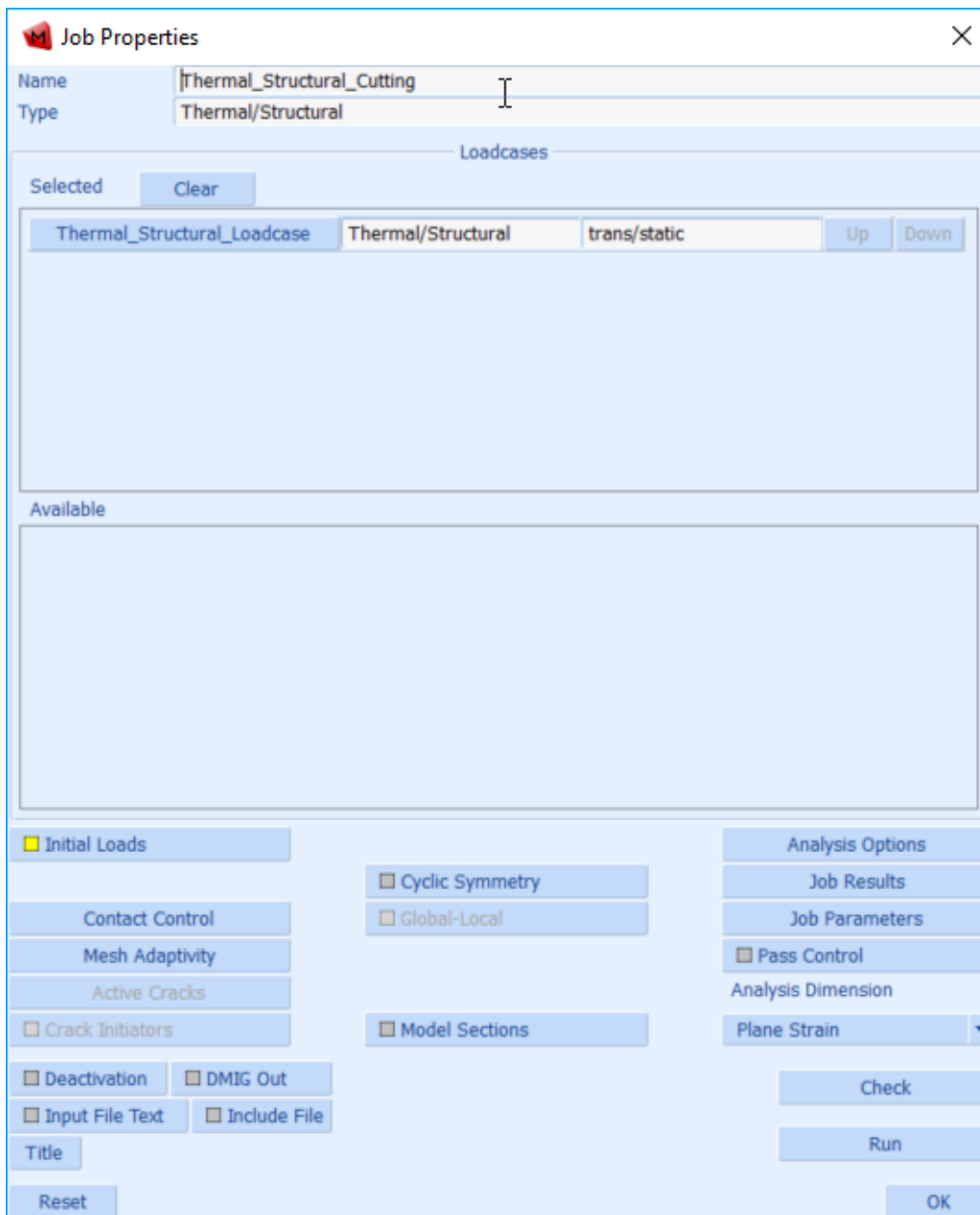
Όσον αφορά το βήμα επίλυσης της φόρτισης επιλέγουμε προσαρμοζόμενο με δυνατότητα cutbacks έτσι ώστε να προσαρμόζεται στη προσομοίωση και μεταβάλλεται έτσι ώστε να ολοκληρωθεί επιτυχώς.



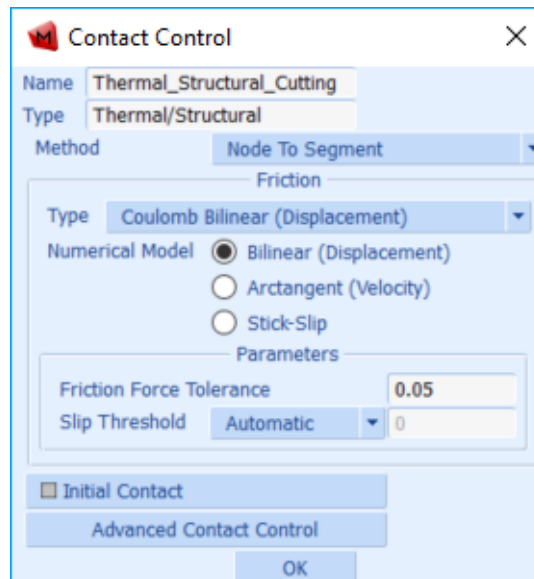
Εικόνα 3.25: Προσαρμοζόμενο βήμα φόρτισης

3.4.7 Τελική ρύθμιση και εκκίνηση προσομοίωσης

Οι τελικές ρυθμίσεις πριν την εκκίνηση της προσομοίωσης του μοντέλου, λαμβάνουν χώρα στην καρτέλα Jobs. Στην καρτέλα αυτή θα γίνει ο τελευταίος έλεγχος των ρυθμίσεων μας καθώς επίσης θα ρυθμιστούν και οι τελευταίες παράμετροι. Στις διαθέσιμες χρήσιμες ρυθμίσεις συγκαταλέγονται ο ορισμός μέγιστου αριθμού κόμβων και στοιχείων από την επιλογή Mesh Adaptivity. Στην επιλογή Contact Control ρυθμίζονται παραμέτροι χρήσιμες για την επαφή των δύο σωμάτων όπως ο τύπος του συντελεστή τριβής, οι ανοχές της και η μέθοδο που θα ακολουθηθεί. Ο ορισμός των παραπάνω φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 3.26: Ιδιότητες της εργασίας

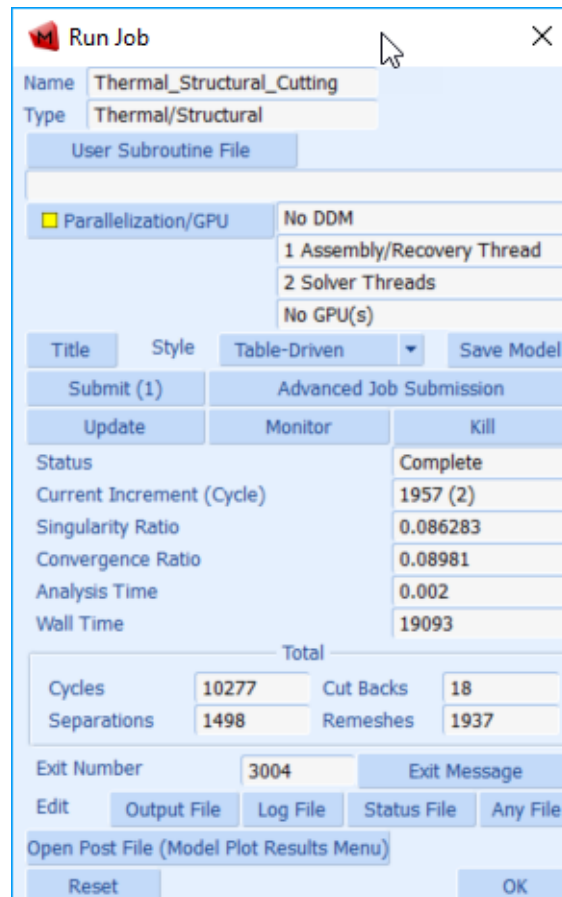


Εικόνα 3.27: Ορισμός ελέγχου τριβής

Τέλος, πριν την εκκίνηση της εκάστοτε προσομοίωσης, γίνεται ο έλεγχος για τυχόν σφάλματα και επιδιόρθωση του κώδικα πριν το ξεκίνημα της προσομοίωσης με το πάτημα της επιλογής Run.

3.4.8 Διεξαγωγή προσομοίωσης

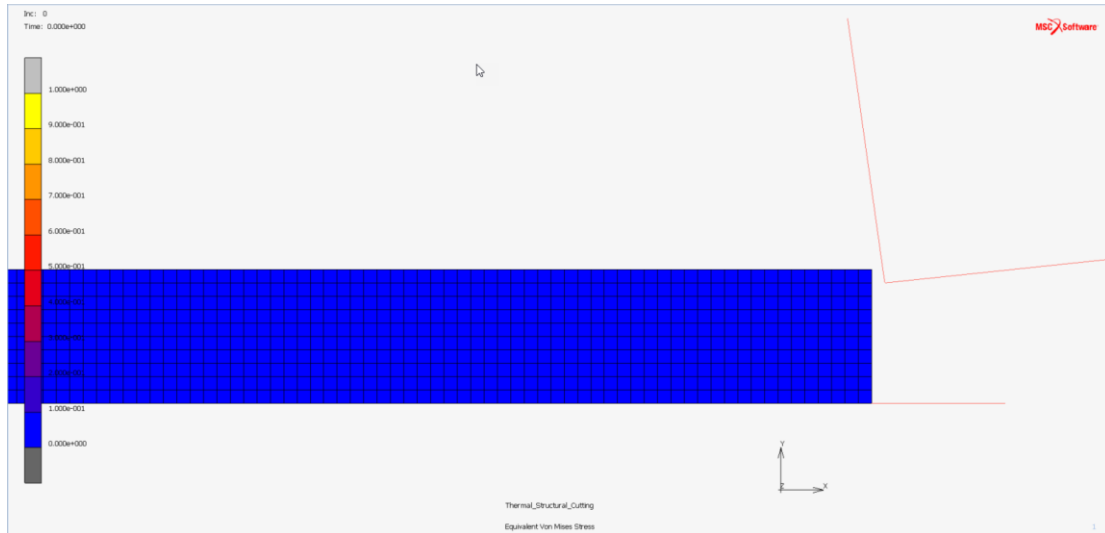
Μετά την ολοκλήρωση και τη κατασκευή του μοντέλου, διεξάγεται η προσομοίωση σύμφωνα με το σχεδιασμό που πραγματοποιήθηκε στη παράγραφο 3.2. Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθή ολοκλήρωση της κάθε προσομοίωσης είναι απαραίτητος ο αριθμός εξόδου 3004 όπως και στο παρακάτω σχήμα.



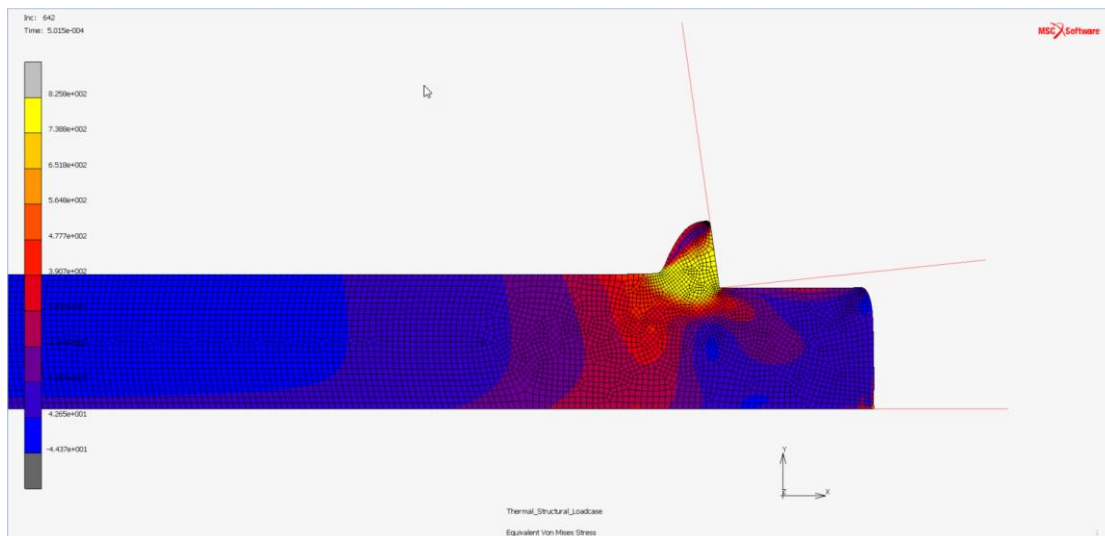
Εικόνα 3.28: Στοιχεία προσομοίωσης

3.4.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης

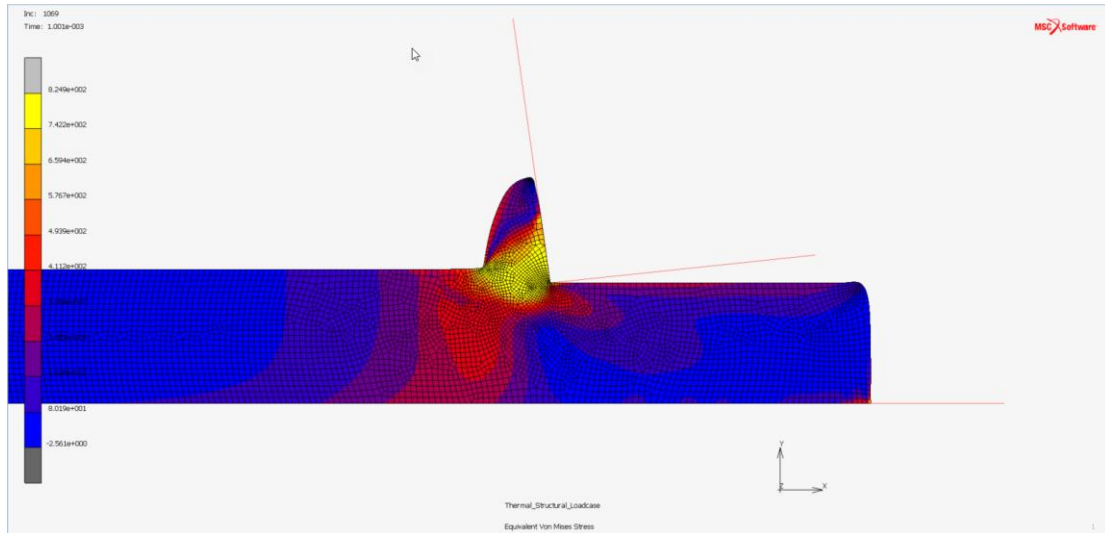
Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται οι ισοδύναμες τάσεις του τεμαχίου σε διάφορες χρονικές στιγμές κίνησης του κοπτικού εργαλείου.



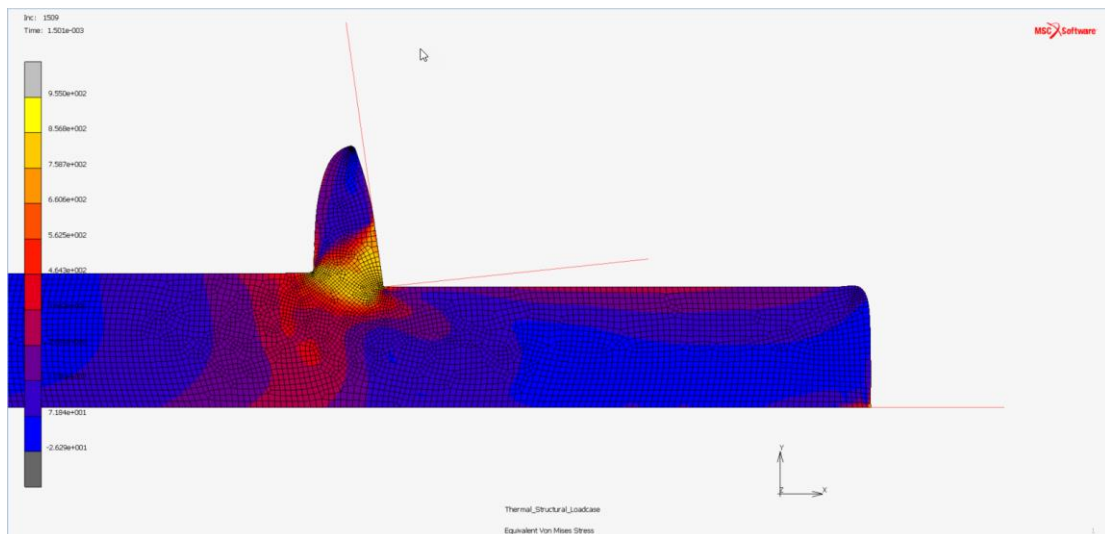
Εικόνα 3.29: Διάγραμμα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises για $t = 0$ sec



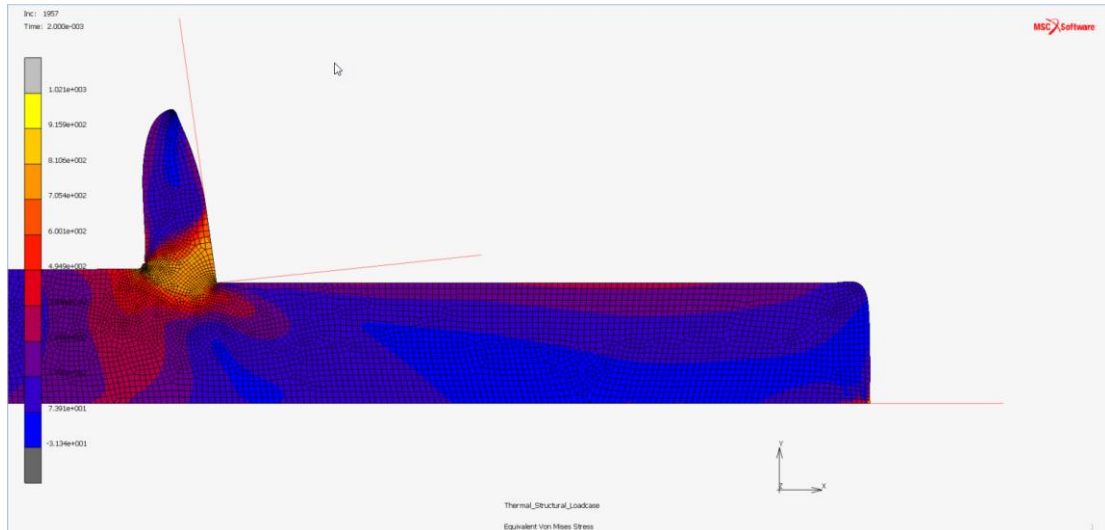
Εικόνα 3.30: Διάγραμμα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises για $t = 0.0005$ mm



Εικόνα 3.31: Διάγραμμα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises για $t = 0.001 \text{ sec}$

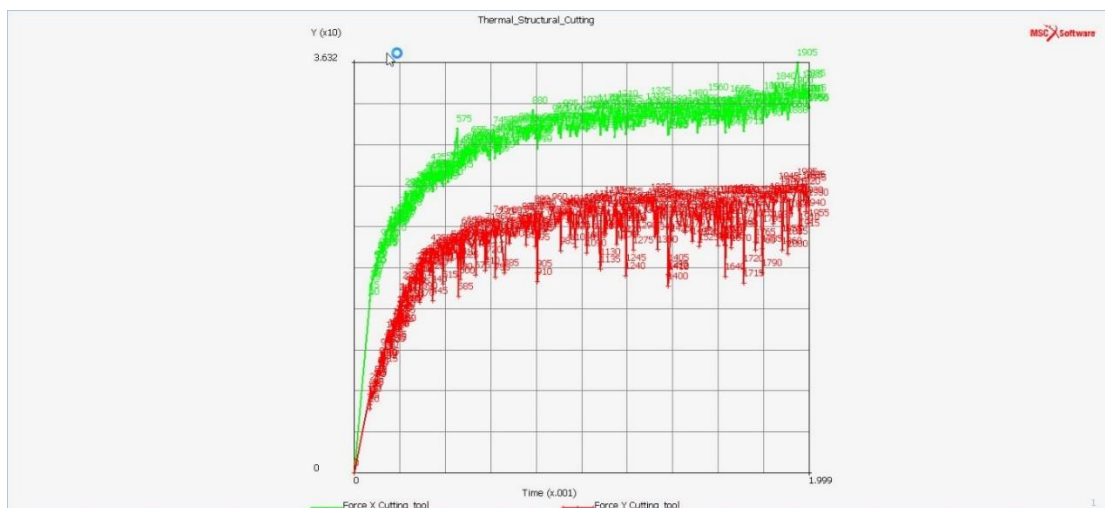


Εικόνα 3.32: Διάγραμμα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises για $t = 0.0015 \text{ sec}$



Εικόνα 3.33: Διάγραμμα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises για $t = 0.002 \text{ sec}$

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται οι δυνάμεις σε Newton του κοπτικού εργαλείου κατά τους άξονες X και Y.



Εικόνα 3.34: Διάγραμμα δύναμης κατά τους άξονες X και Y του κοπτικού εργαλείου

Συγκεντρωτικά όλα τα διαγράμματα των δυνάμεων καθώς και παρατηρήσεις – συμπεράσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Συγκέντρωση αποτελεσμάτων – συμπερασμάτων

4.1 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δυνάμεων όλων των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Και στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα όπου γίνεται σύγκριση σύμφωνα με τη ταχύτητα κοπής και το βάθος κοπής.

4.1.1 Αποτελέσματα δυνάμεων προσομοιώσεων

Αμέσως παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των δυνάμεων κατά τους άξονες X και Y.

Cutting Speed (m/min) Feed Rate (mm/rev)	Force X (N)				
	90	120	150	180	240
D = 0.05mm	20.42	18.20	17.67	18.13	17.31
D = 0.10mm	33.97	30.96	31.25	29.71	29.39
D = 0.15mm	42.81	40.97	39.97	41.28	39.76
D = 0.20mm	52.04	49.77	52.45	49.59	49.95
D = 0.25mm	61.67	59.18	60.26	56.73	56.80

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δυνάμεων κατά τον άξονα X

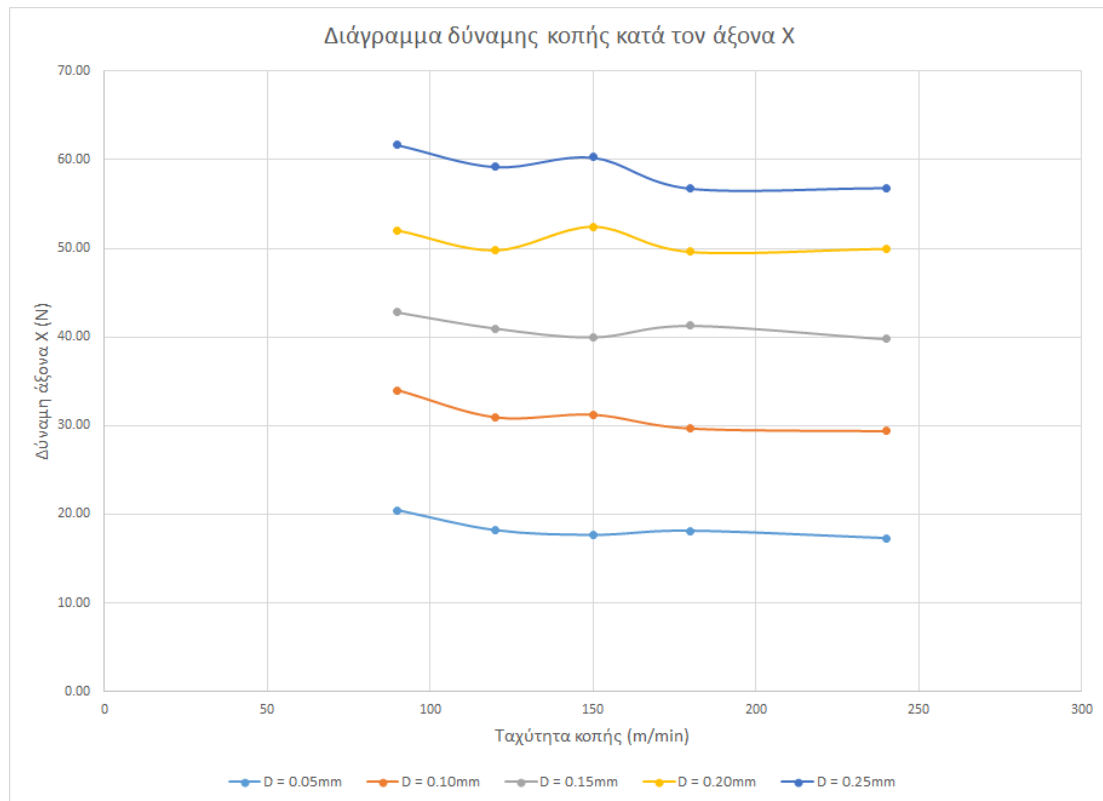
Cutting Speed (m/min) Feed Rate (mm/rev)	Force Y (N)				
	90	120	150	180	240
D = 0.05mm	13.98	12.27	11.83	13.26	12.64
D = 0.10mm	25.81	21.88	22.69	22.14	21.61
D = 0.15mm	31.58	30.13	30.81	29.37	28.69
D = 0.20mm	36.42	37.01	38.40	33.71	34.86
D = 0.25mm	47.24	39.53	41.82	40.20	38.45

Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δυνάμεων κατά τον άξονα Y

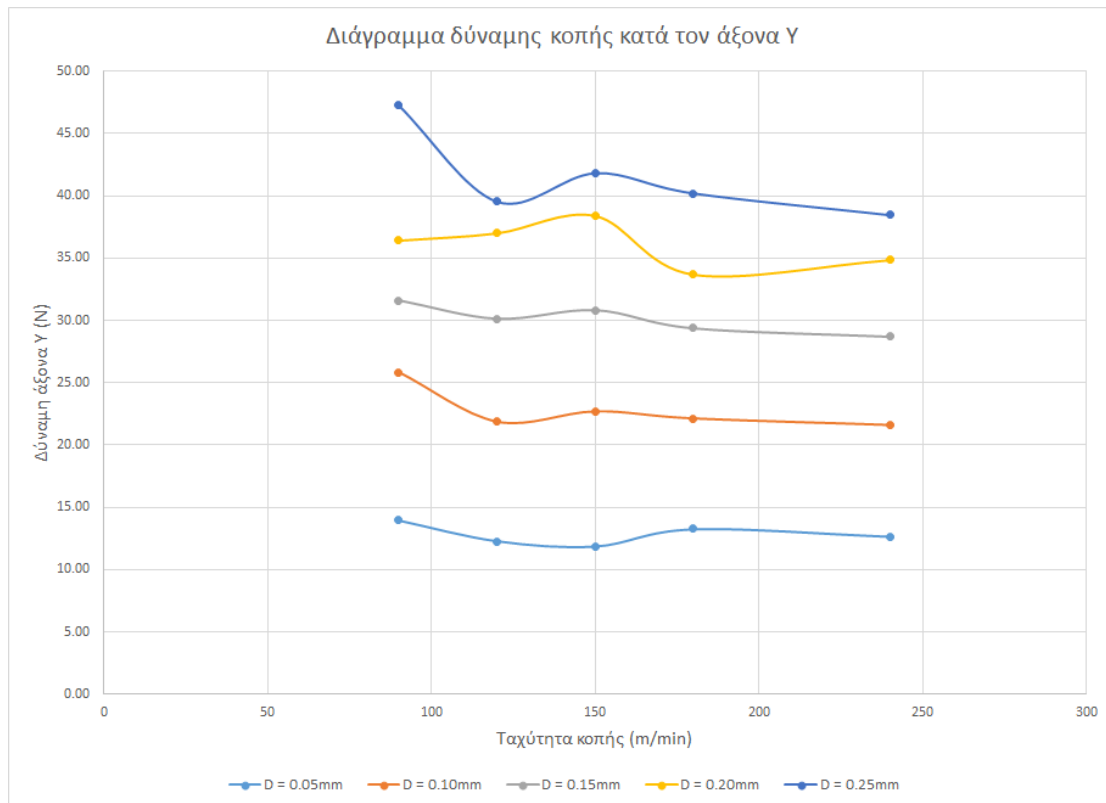
Από τα αποτελέσματα των δυνάμεων παρατηρούμε ότι η δύναμεις κατά τον άξονα X είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του άξονα Y. Περαιτέρω ανάλυση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων θα γίνει στη παράγραφο 4.2.

4.1.2 Διαγράμματα δυνάμεων

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα των δυνάμεων για κάθε άξονα στα οποία μεταβάλλεται η ταχύτητα κοπής και το βάθος κοπής σύμφωνα με τον σχεδιασμό που έγινε στη παράγραφο 3.2.



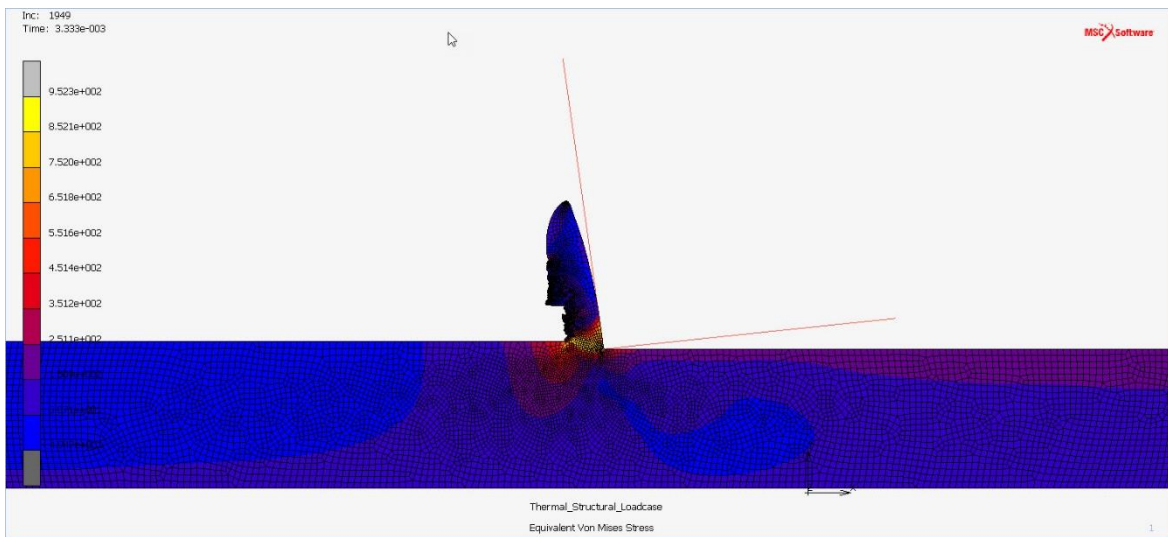
Εικόνα 4.1: Διάγραμμα δύναμης κοπής κατά τον άξονα X συναρτήσει της ταχύτητας κοπής για όλα τα βάθη κοπής



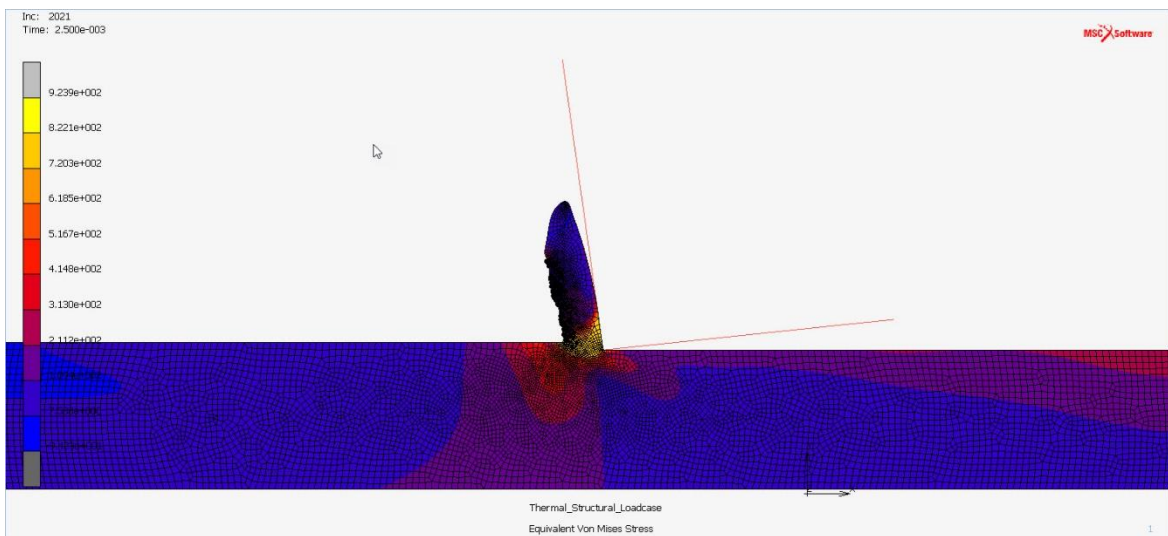
Εικόνα 4.2: Διάγραμμα δύναμης κοπής κατά τον άξονα Y συναρτήσει της ταχύτητας κοπής για όλα τα βάθη κοπής

Από τα αποτελέσματα των δυνάμεων παρατηρούμε ότι με την αύξηση της ταχύτητας κοπής με σταθερό το βάθος κοπής δεν παρατηρείται κάποια αύξηση των δυνάμεων. Από την άλλη, με την αύξηση του βάθους κοπής, κρατώντας σταθερή την ταχύτητα κοπής παρατηρείται αύξηση των δυνάμεων. Περαιτέρω ανάλυση και σχολιασμός των διαγραμμάτων θα γίνει στη παράγραφο 4.2.

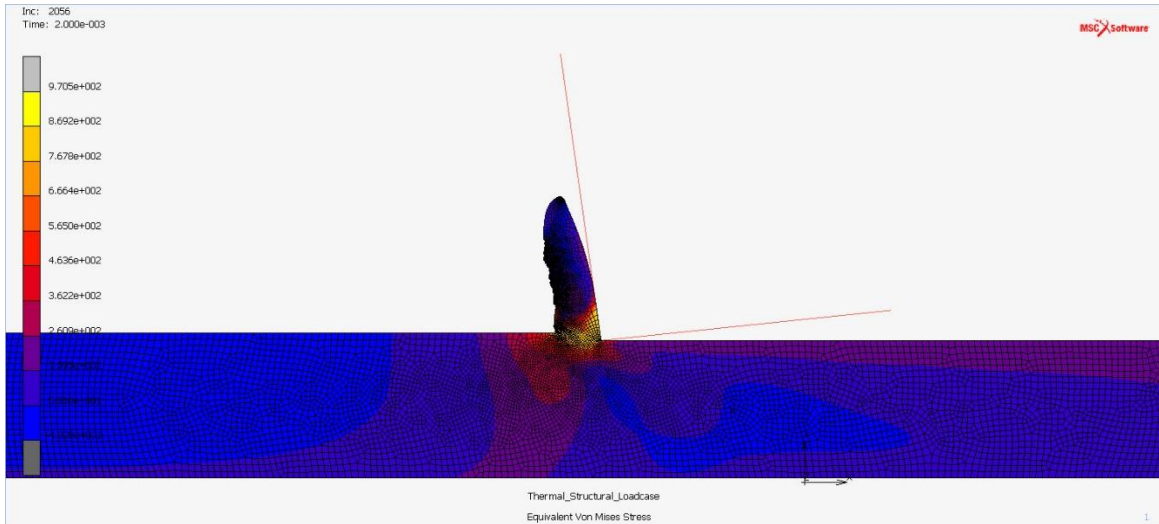
4.1.3 Στιγμιότυπα προσομοιώσεων



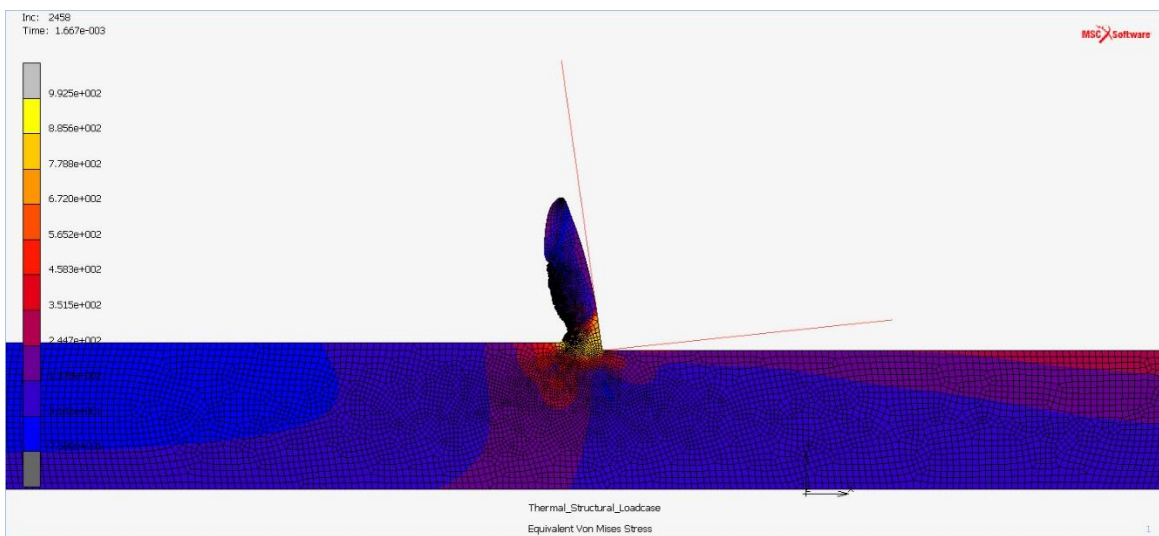
Εικόνα 4.3: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8ο, ταχύτητα κοπής 90 m/min, συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.05 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



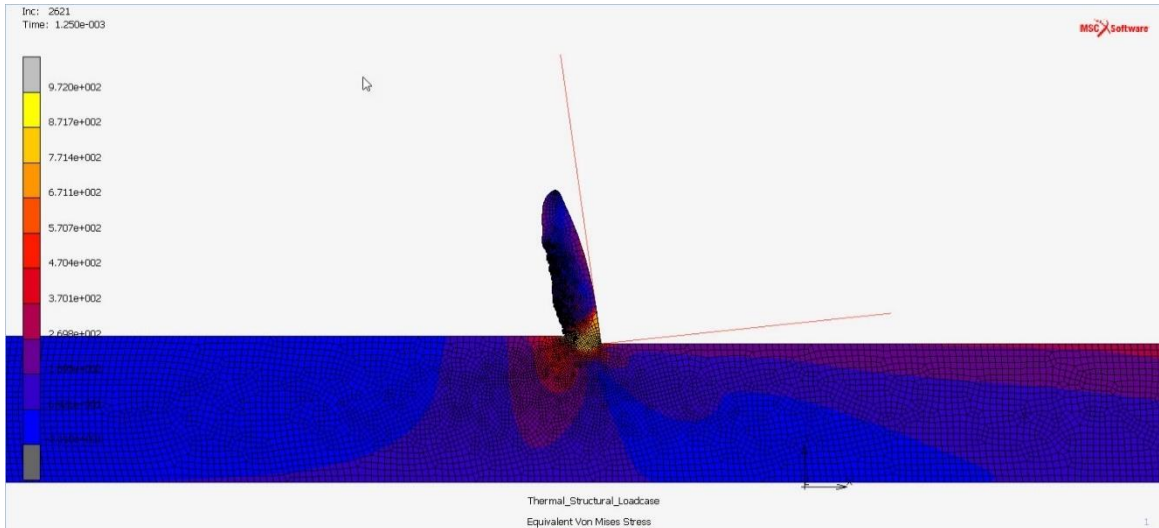
Εικόνα 4.4: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8ο, ταχύτητα κοπής 120 m/min, συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.05 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



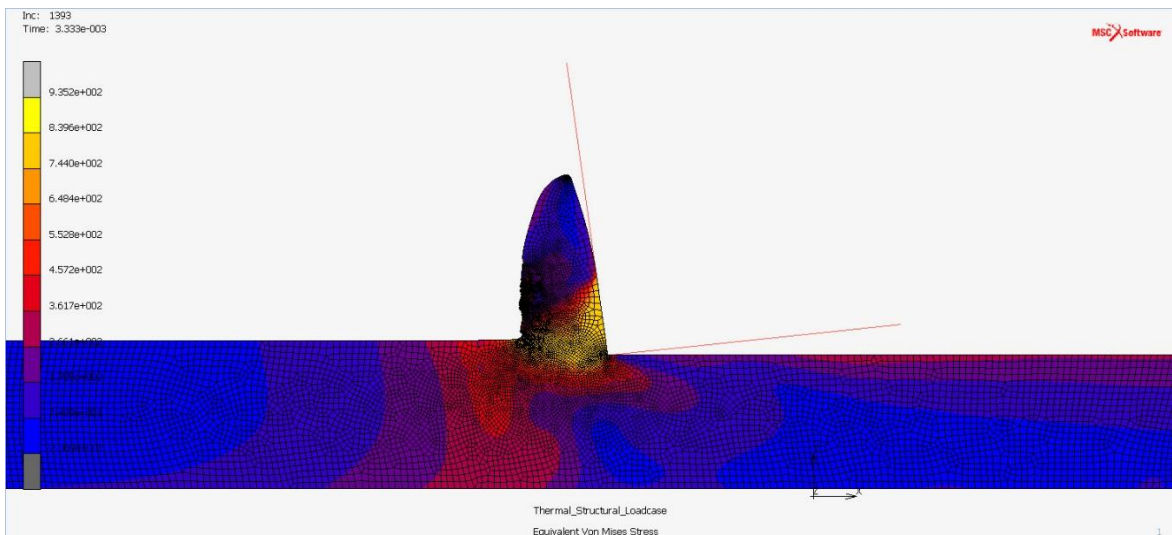
Εικόνα 4.5: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 150 m/min, συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.05 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



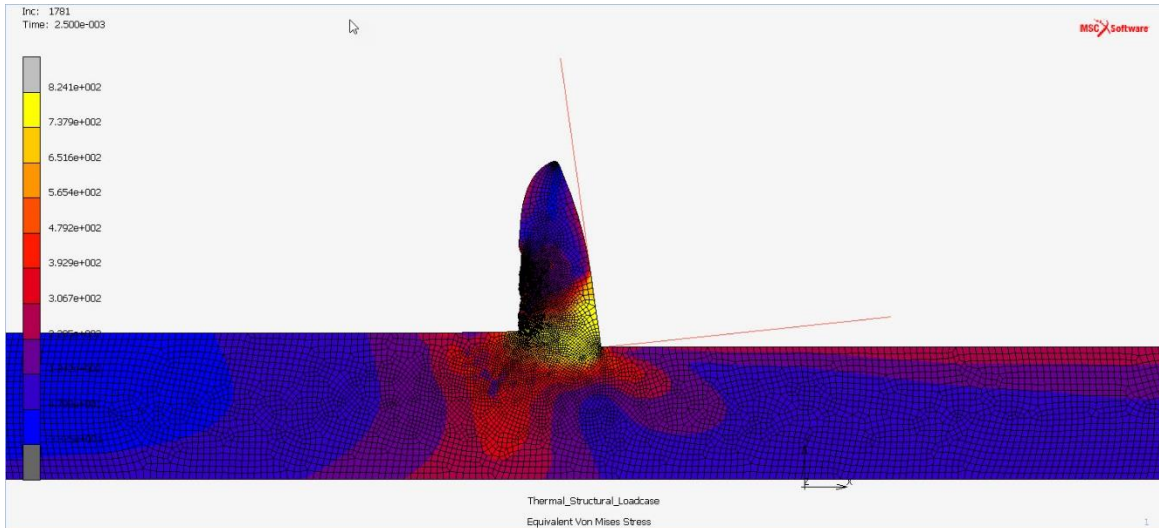
Εικόνα 4.6: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 180 m/min, συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.05 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



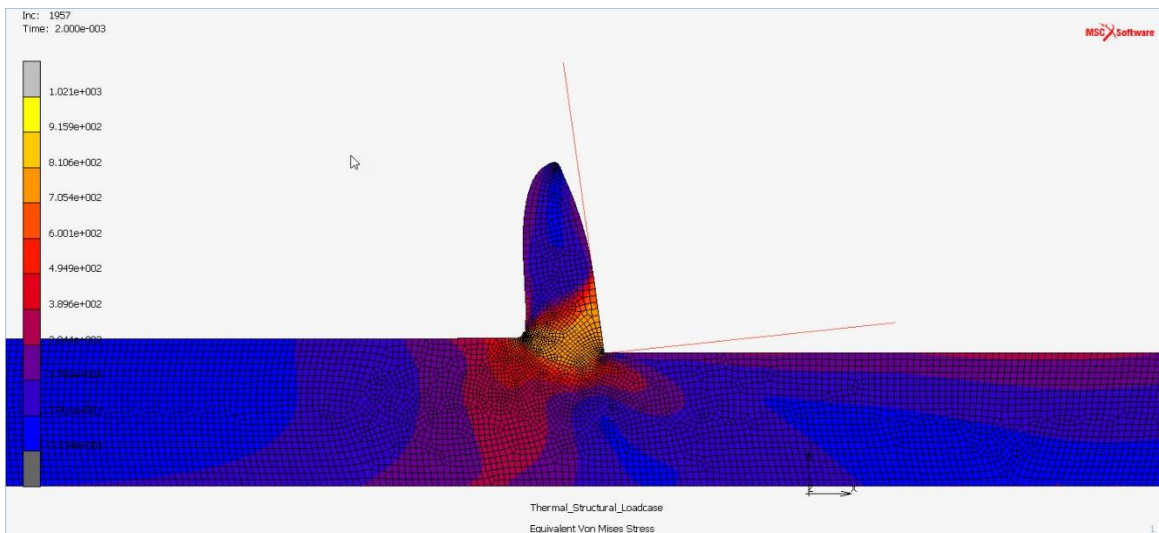
Εικόνα 4.7: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 240 m/min, συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.05 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



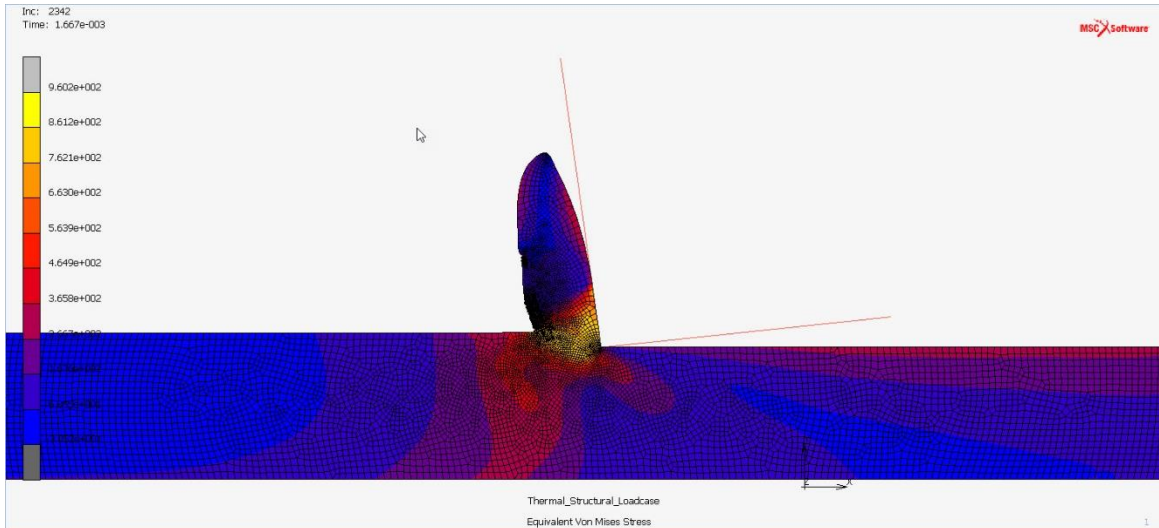
Εικόνα 4.8: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 90 m/min, συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.1 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



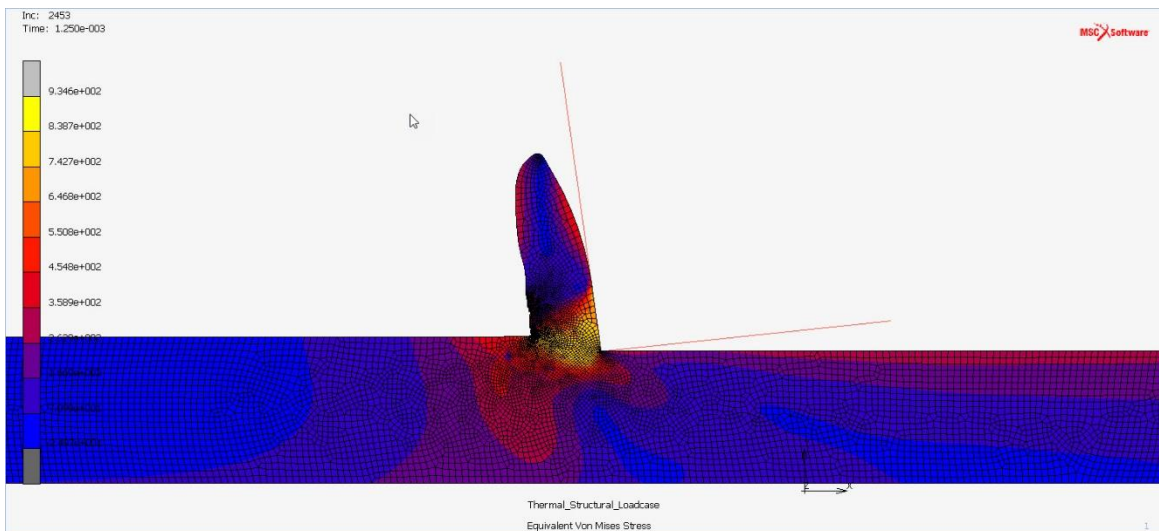
Εικόνα 4.9: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 120 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.1 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



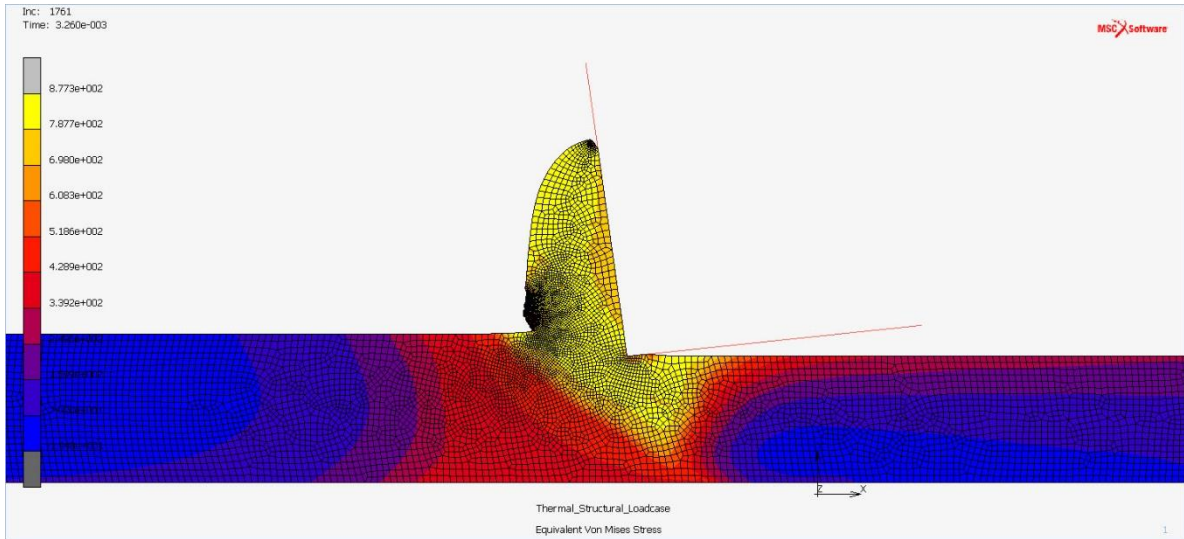
Εικόνα 4.10: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 150 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.1 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



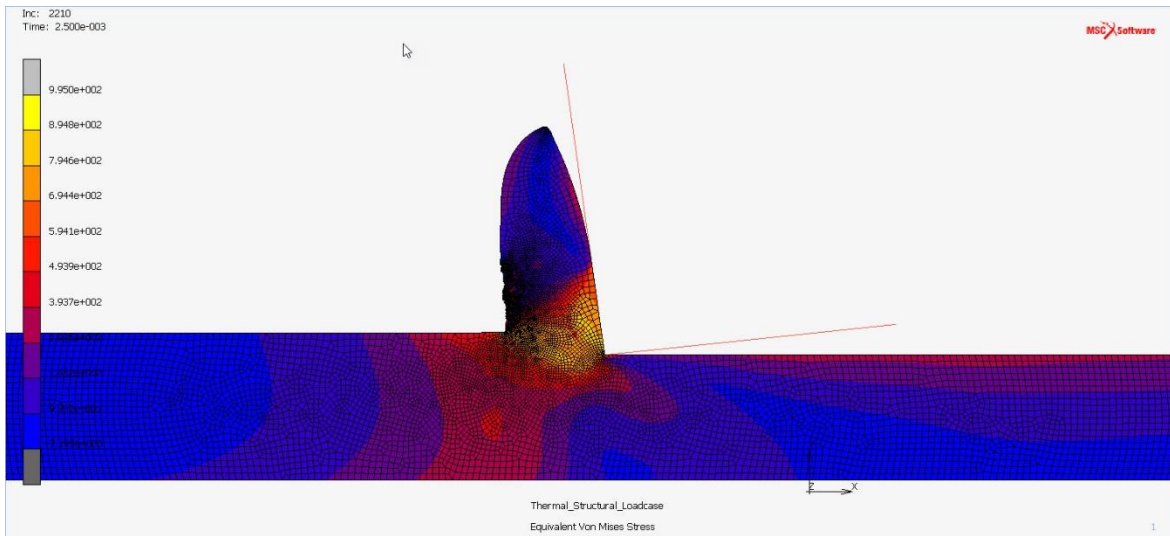
Εικόνα 4.11: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 180 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.1 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



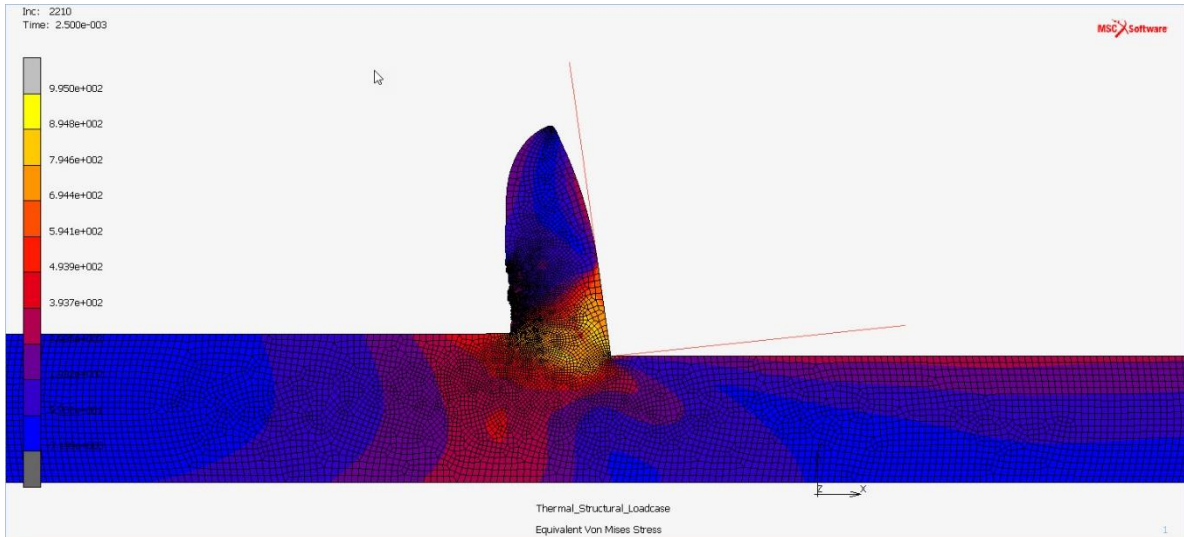
Εικόνα 4.12: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 240 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.1 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



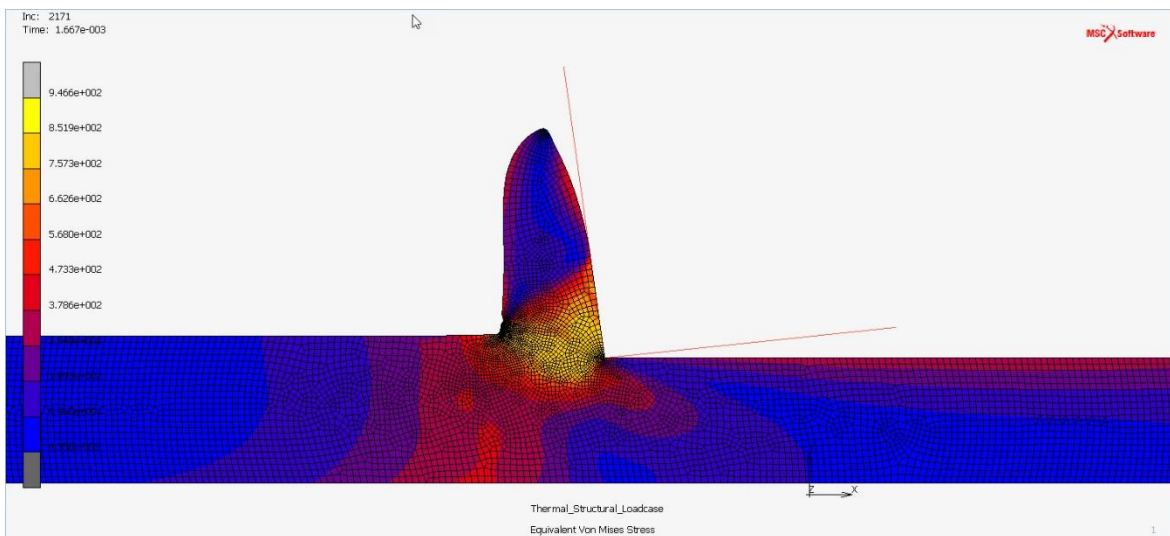
Εικόνα 4.13: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8θ , ταχύτητα κοπής 90 m/min, συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.15 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



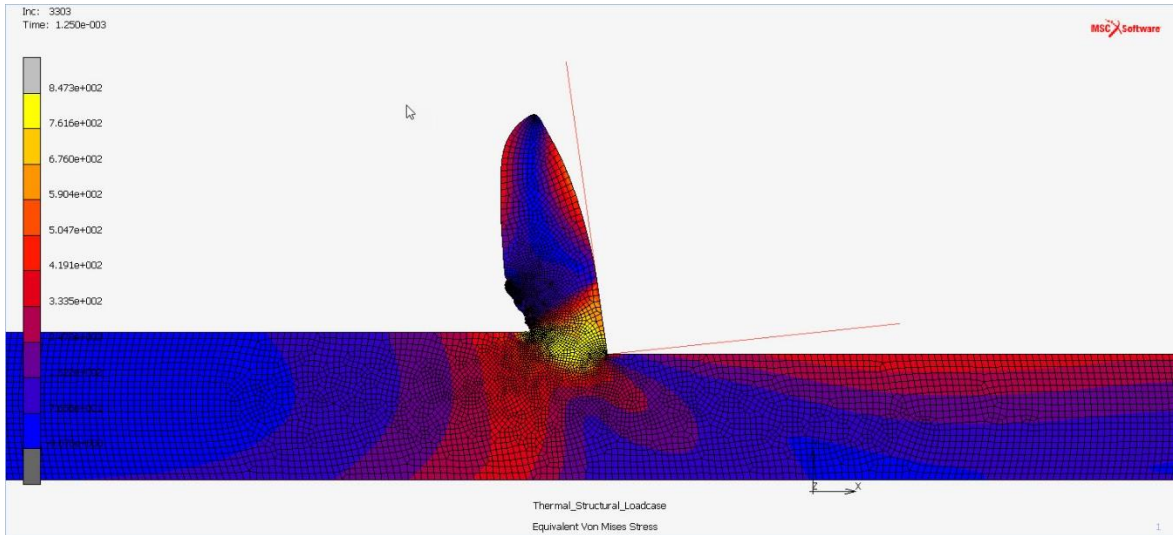
Εικόνα 4.14: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8θ , ταχύτητα κοπής 120 m/min, συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.15 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



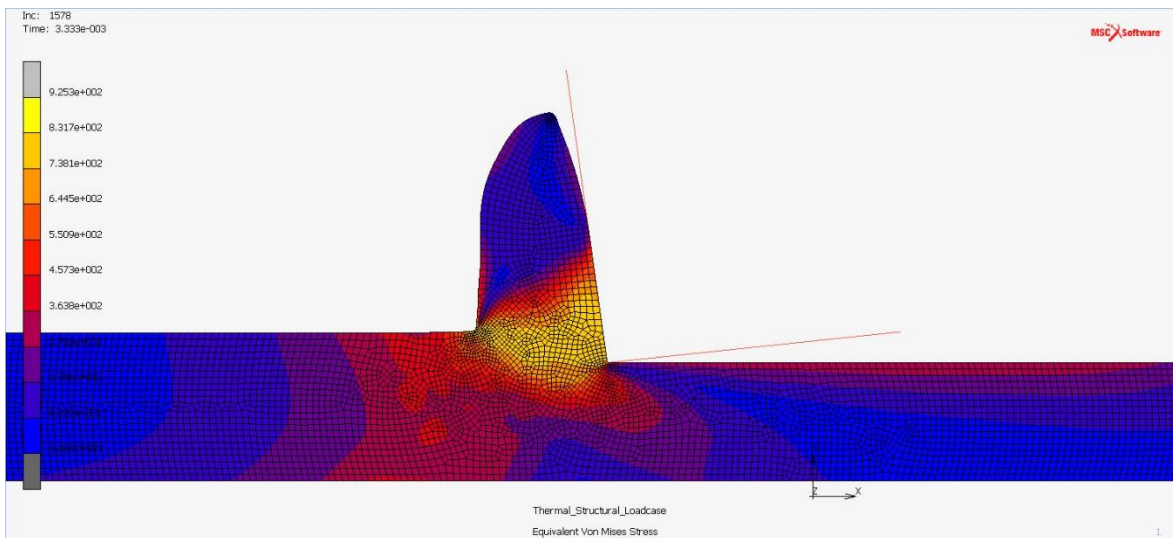
Εικόνα 4.15: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -80 , ταχύτητα κοπής 150 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.15 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



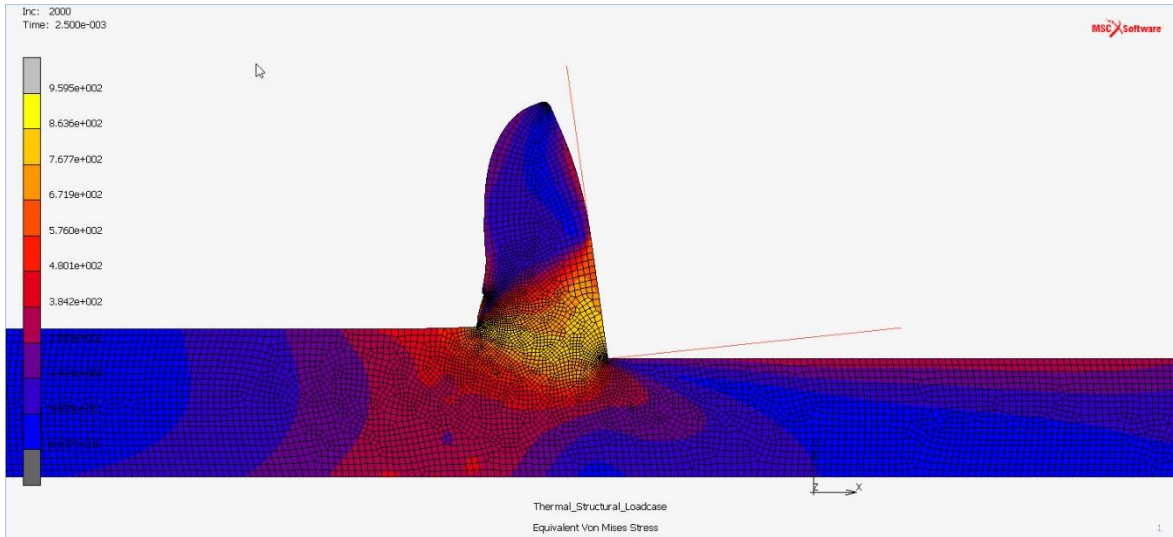
Εικόνα 4.16: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -80 , ταχύτητα κοπής 180 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.15 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



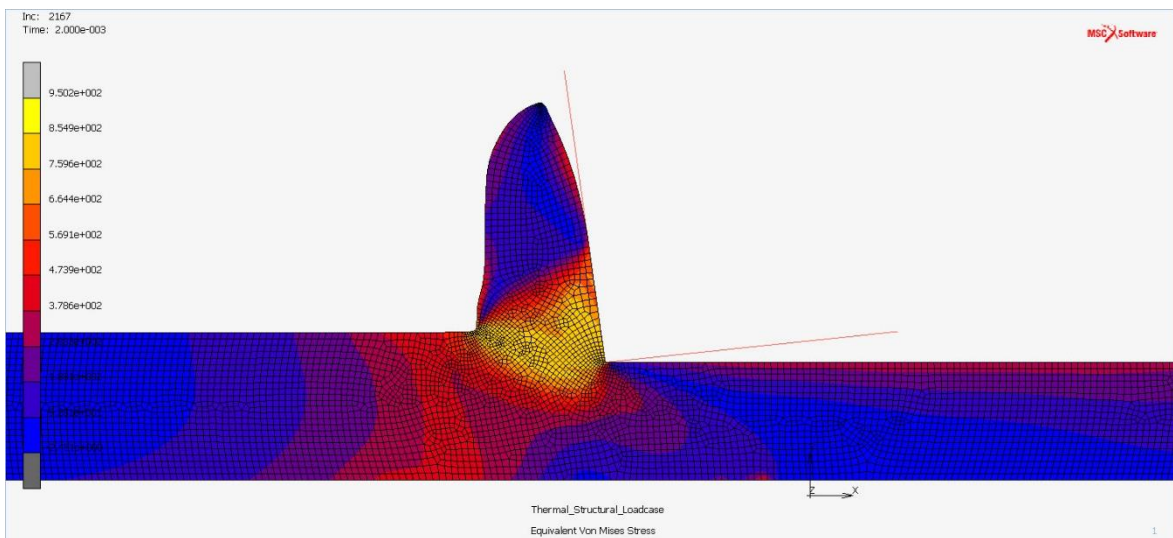
Εικόνα 4.17: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 240 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.15 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



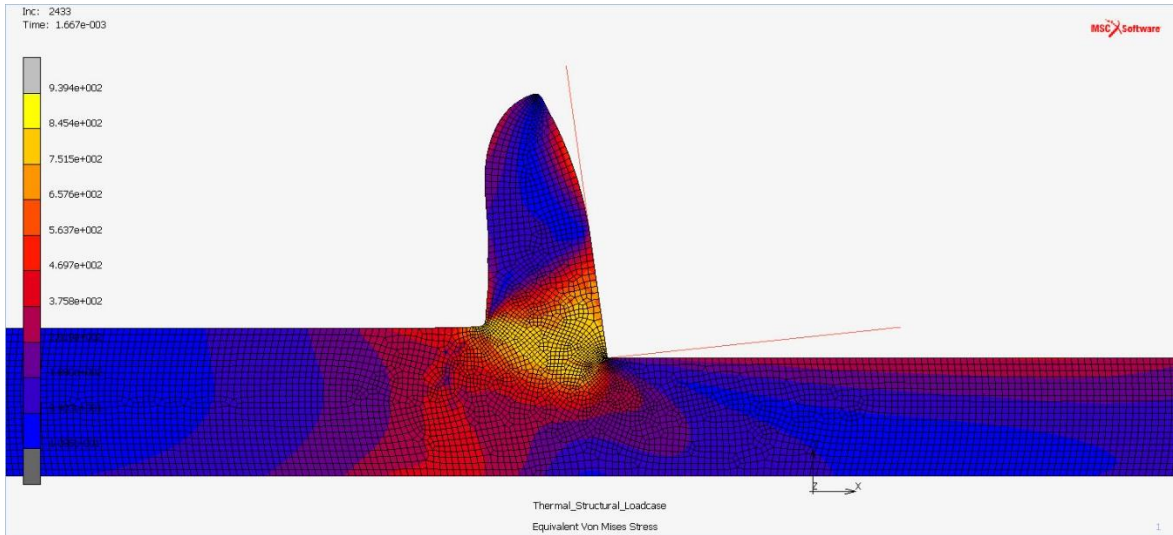
Εικόνα 4.18: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 90 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.2 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



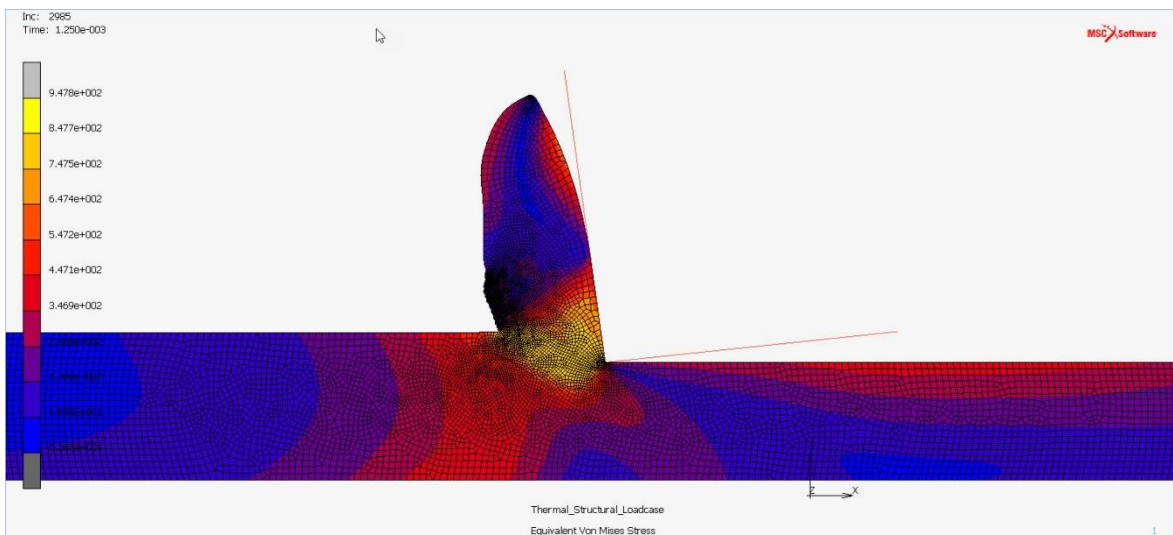
Εικόνα 4.19: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 120 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.2 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



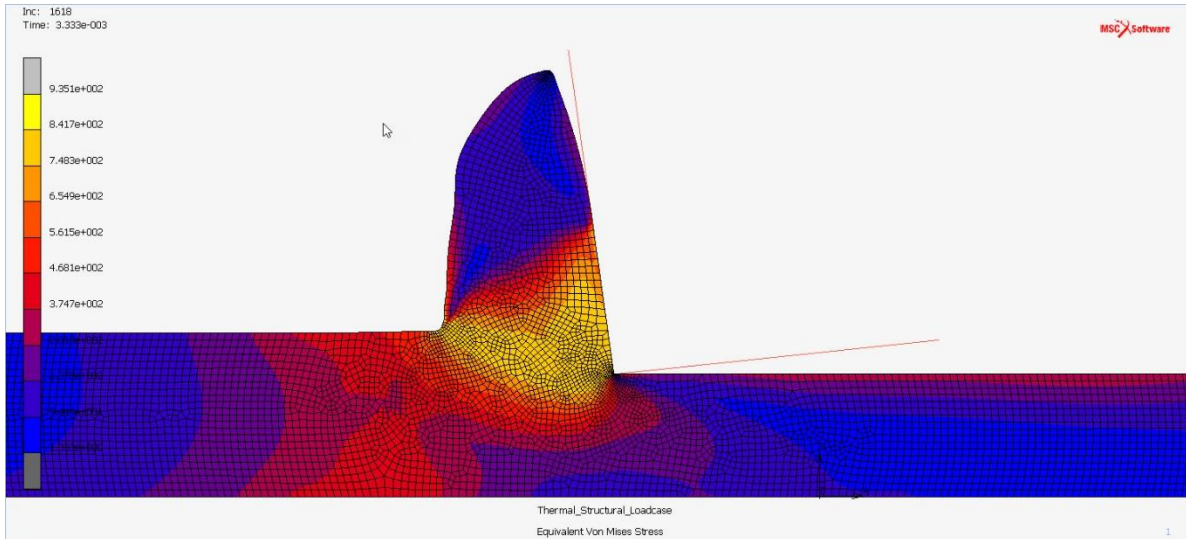
Εικόνα 4.20: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 150 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.2 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



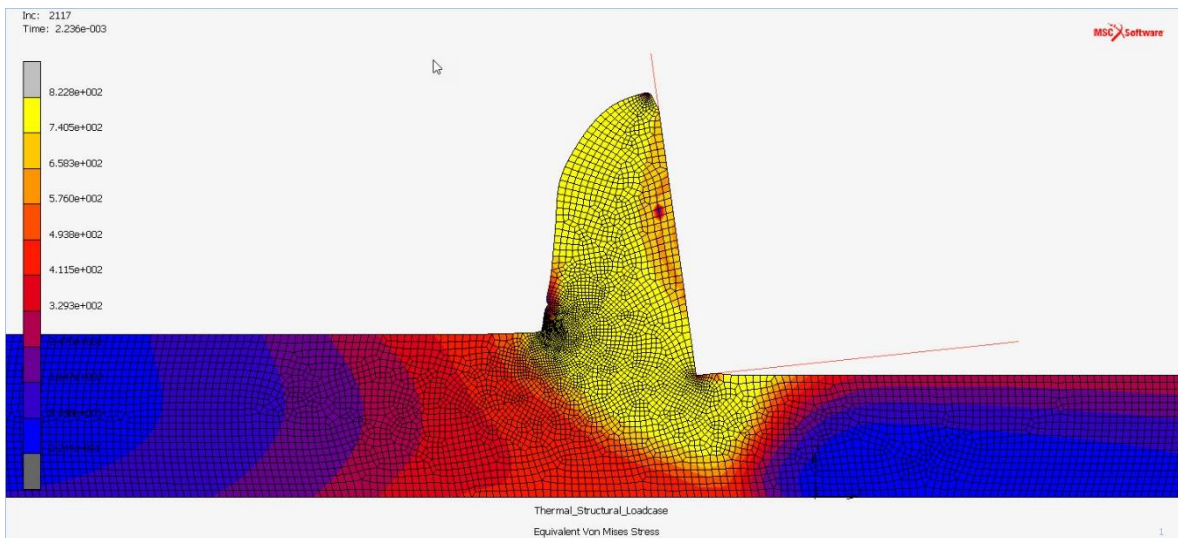
Εικόνα 4.21: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8θ , ταχύτητα κοπής 180 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.2 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



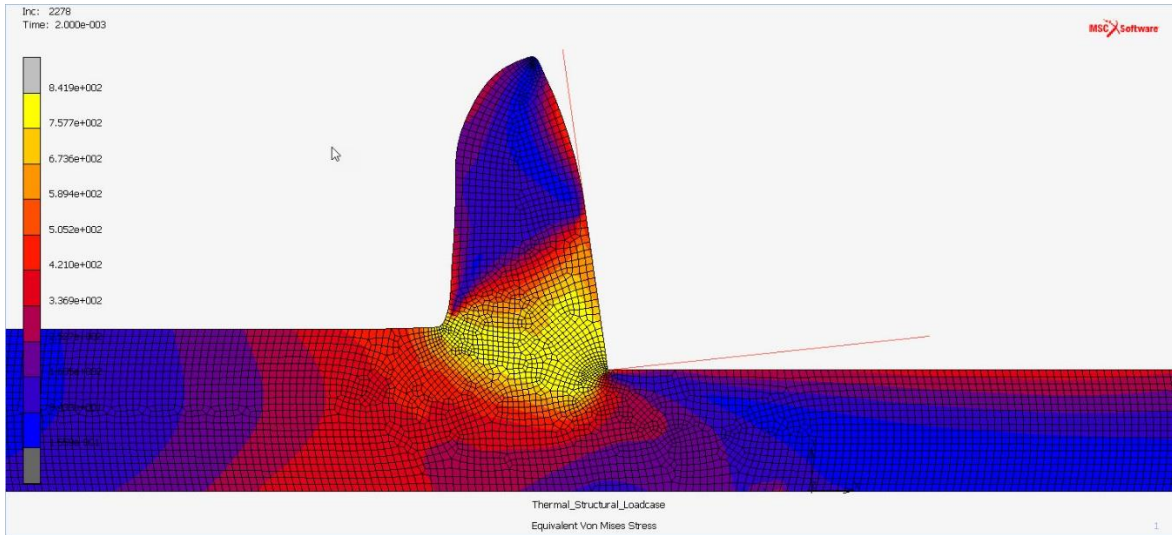
Εικόνα 4.22: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8θ , ταχύτητα κοπής 240 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.2 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



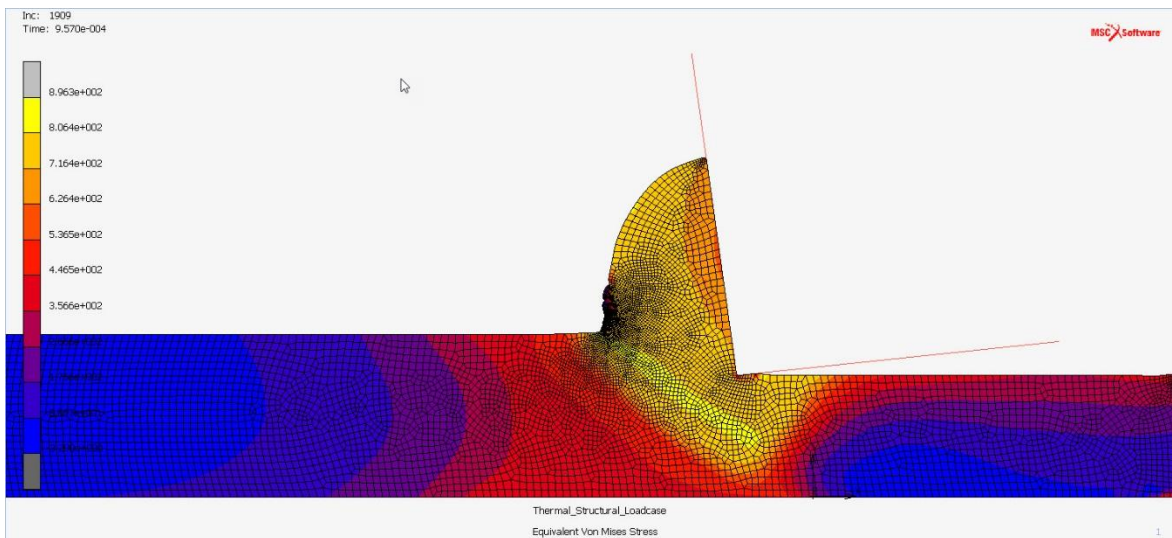
Εικόνα 4.23: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 90 m/min, συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.25 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



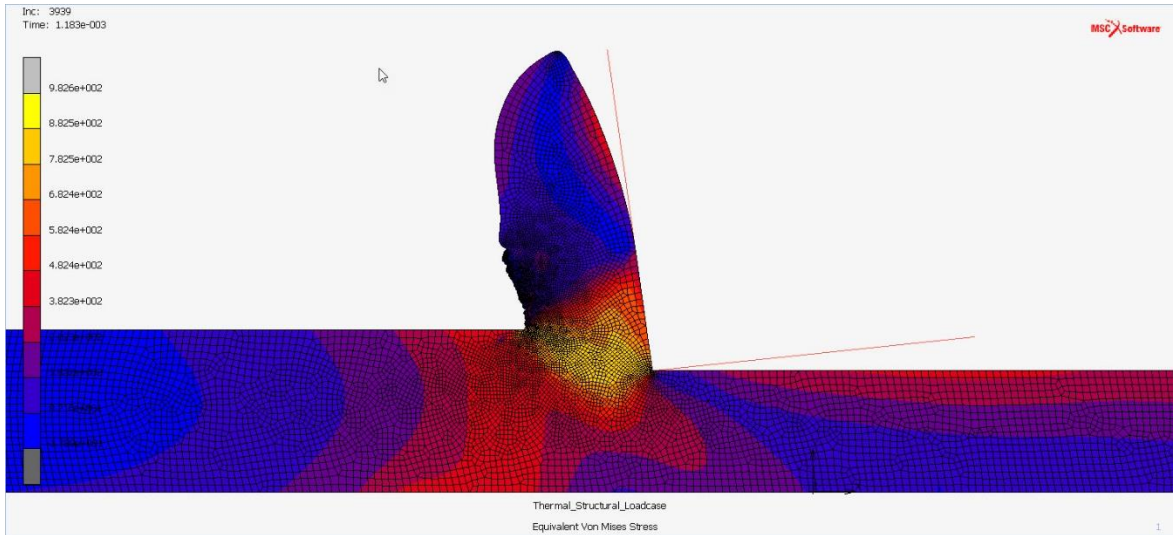
Εικόνα 4.24: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 120 m/min, συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.25 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



Εικόνα 4.25: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 150 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.25 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



Εικόνα 4.26: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8° , ταχύτητα κοπής 180 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.25 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm



Εικόνα 4.27: Στιγμιότυπο προσομοίωσης με γωνία κοπής -8σ , ταχύτητα κοπής 240 m/min , συντελεστή τριβής $\mu = 0.6$, βάθος κοπής 0.25 mm και πλάτος κοπής 0.1 mm

Περαιτέρω ανάλυση και σχολιασμός των διαγραμμάτων θα γίνει στη παράγραφο 4.2 όπου και αναγράφονται τα συμπεράσματα από τις προσομοιώσεις

4.2 Συμπεράσματα

Από τα διαγράμματα των δυνάμεων παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το βάθος κοπής ενώ η ταχύτητα κοπής παραμένει σταθερή, οι δυνάμεις τόσο κατά τον άξονα x όσο και στον άξονα y παρουσιάζουν σημαντική αύξηση.

Όσων αφορά τα διαγράμματα δυνάμεων όπου το βάθος κοπής παραμένει σταθερό ενώ αυξάνουμε τη ταχύτητα κοπής, οι δυνάμεις τόσο κατά τον άξονα x όσο και στον άξονα y δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διακυμάνσεις πράγμα το οποίο είναι πιθανόν να οφείλεται στο μικρό βάθος κοπής.

Παρατηρούμε δημιουργία αποβλίπτου σε όλες τις προσομοιώσεις εκτός δύο περιπτώσεων για βάθος κοπής 0.25 mm και ταχύτητες κοπής 120 m/min και 180 m/min χωρίς όμως να παρατηρείται κάποια μεγάλη διακύμανση στις τιμές των δυνάμεων. Τέλος, σε όλες τις περιπτώσεις η δύναμη F_x είναι μεγαλύτερη της F_y γεγονός που είναι φυσιολογικό όταν έχουμε γωνία κοπής -8° .

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

A. Ginting, M. Nouari, "Experimental and numerical studies on the performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace material", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Elsevier, 2004, pages 758-768.

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.

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.

Alberto Herrero, Igor Goenaga, Sabino Azcarate, Luis Uriarte, Atanas Ivanov, Andrew Rees, Christian Wenzel and Claas Muller, "Mechanical Micro-Machining Using Milling, Wire EDM, Die-Sinking EDM and Diamond Turning", *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 52, 2006, 484-494.

Ali R. Hadjesfandiari, Gary F. Dargush, Analysis of bi-material interface cracks with complex weighting functions and non-standard quadrature, Department of Mechanical and Aerospace Engineering University at Buffalo, State University of New York Buffalo, NY 14260 USA.

Angelos P. Markopoulos and Dimitrios E. Manolacos, Chapter 11 - Modeling of Micromachining, Laboratory of Manufacturing Technology, National Technical University of Athens, Greece.

Bert P. Erdel, "High-Speed Machining", Society of Manufacturing Engineers, 2003.

Cenk Kiliçaslan, Modelling And Simulation Of Metal Cutting By Finite Element Method, School Of Engineering And Sciences Of İzmir Institute Of Technology, 2009.

Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T. and Yamane, Y. 2000. *Metal Machining Theory and Applications*, London: Arnold.

Chou, Y.K. and Evans, C.J., "Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting," *Wear*, 1999, 234–245

Choudhury, I.A., EI-Baradie, M.A.: Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments. *J. Mater. Process. Technol.* 67(1–3), 1997, 55–61.

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.

Davis, R.F., *Diamond Films and Coating*, Noyes Publications, USA, 1993.

DeBeers Diamond Division, *Introduction to PCD and PCBN Cutting Tool Materials*, Berkshire, UK, 1993.

Dr. Saad Kariem Shather, "Studying the Effect of Tool Nose Radius on Workpiece Run Out and Surface Finish", *Eng. & Tech Journal*, 2008, pages 256-261.

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.

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.

G. Byrne, D. Dornfeld, B. Denkena, *Advancing cutting technology*, *Annals of CIRP* (2003) 483.

George E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, 3rd edition, McGraw – Hill Book Company: London, 1988.

George E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, 3rd edition, McGraw – Hill Book Company: London, 1988.

George E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, 3rd edition, McGraw – Hill Book Company: London, 1988

Gerard Poulachon, B.P. Bandyopadhyay, I.S. Jawahir, Se´bastien Pheulpin, Emmanuel Seguin, The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 139–144.

Groover, M. P., *Fundamentals of Modern Manufacturing*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2010, pp. 484.

<http://www.custompartnet.com/wu/turning>

<http://www.mitchellmckinney.com/high-speed-steel-cutting-tools.html>

<http://www.secotools.com/pcbn>

J. Chae, S.S. Park, T. Freiheit, Investigation of micro-cutting operations, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006), 313–332.

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.

JiwangYan , ZhiyuZhang,TsunemotoKuriyagawa, "Mechanism for material removal in diamond turning of reaction-bonded silicon carbide", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 49, 2009, 366–374.

K. Nakayama and K. Tamura, 1968, "Size effect in metal-cutting force", American Society of Mechanical Engineers, 67-Prod-9, 1967, 8p.

K. Nakayama and K. Tamura, 1968, "Size effect in metal-cutting force", American Society of Mechanical Engineers, 67-Prod-9, 1967, 8p.

K.A.Mahajan, Dr. M. Sadaiah and S. H. Gawande, "Experimental investigations of surface roughness on OFHC copper by diamond turning machine", International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(10), 2010, 5215-5220.

K.C. Chan, C.F. Cheung, M.V. Ramesh, W.B. Lee, S. To, A theoretical and experimental investigation of surface generation in diamond turning of an Al6061/SiCp metal matrix composite", International Journal of Mechanical Sciences, Vol 43, 2001, 2047–2068.

K.M. Rezaur rehman, M. Rahamn, K.S. Neo, M. Sawa, Y. Maeda, "Micro grooving on electroless nickel plated materials using a single crystal diamond tool", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 27, 2006, 911-917.

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.

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.

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.

Kai Liu, 2005, "Process modeling of micro-cutting including strain gradient effects", Georgia Institute of Technology.

Kai Liu, Shreyes N. Melkote, "Effect of plastic side flow on surface roughness in micro-turning process", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol 46, 2006, 1778–1785.

Kohichi Miura, Takazo Yamada and Hwa-Soo Lee, "Study on Turning of Micro Shaft : Control of Thrust Force Considering Vickers Hardness of Workpiece(Advanced machining technology)", Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century : LEM21 2009(5), 347-352.

Lim, H.S., A. Senthil Kumar and M. Rahman. Improvement of Form Accuracy in Hybrid Machining of Microstructures, Journal of Electronic Materials, 31, 2002, 1032-1038.

Lu, Z. and Takeshi Yoneyama. Micro cutting in the micro lathe turning system, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39, 1999, 1171-1183.

M. Aruna, V. Dhanalakshmi and S. Mohan, "Wear analysis of ceramic cutting tools in finish turning of INCONEL 718", International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(9), 2010, 4253-4262.

M. Azizur Rahman, M. Rahman, A. Senthil Kumar, H.S. Lim and A.B.M.A. Asad, "Development of micropin fabrication process using tool based micromachining", Int J Adv Manuf Technol, 27, 2006, 939–944.

M. Azizur Rahman, M. Rahman, A. Senthil Kumar, H.S. Lim, "CNC microturning: an application to miniaturization", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 45, 2005, 631–639.

M.A.Rahman, M.Rahman, A.Senthil Kumar, H.S.Lim, A.B.M.A.Asad, "Fabrication Of Miniature Components Using Microturning", Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering 2003(ICME2003), Dec 2003, 1-6.

M.A.Rahman, M.Rahman, A.Senthil Kumar, H.S.Lim, A.B.M.A.Asad, "Fabrication Of Miniature Components Using Microturning", Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering 2003(ICME2003), Dec 2003, 1-6.

Masuzawa, T. and H.K. Tonshoff. "Three-Dimensional Micromachining by Machine Tools", Annals of the CIRP, 46/2, 1997, 621-628.

Masuzawa, T. State of the Art of Micromachining, Annals of the CIRP, 49/2, 2000, 473-488.

McGeough J, Micromachining of engineering materials, Dekker, New York, 2002, iii – iv.

N. Sukumar, Z. Y. Huang, J.-H. Privost and Z. Suo, Partition of unity enrichment for bimaterial interface cracks, INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING Int. J. Numer. Meth. Engng 2004; 59:1075–1102.

Norio Taniguchi. Current status in, and future trends of, ultraprecision machining and ultrafine materials processing. CIRP Annals, 32: 573 – 582, 1983.

Oezel, T., Karpat, Y., "Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks", Int. J. Mach. Tools Manuf. 45(4-5), 2005, 467–479.

PCBN technical guide, Version IV, SECO.

T. Masuzawa. State of the art of micromachining. CIRP Annals, 49: 473 – 488, 2000.

V. C. Venkatesh, Sudin Izman, Precision Engineering, Faculty of Engineering & Technology, Multimedia University Melaka, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 2007.

V. C. Venkatesh, Sudin Izman, Precision Engineering, Faculty of Engineering & Technology, Multimedia University Melaka, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 2007.

V. Senthilkumar, S. Muruganandam, State of the Art of Micro Turning Process, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 2, Issue 2, February 2012.

V. Senthilkumar, S. Muruganandam, State of the Art of Micro Turning Process, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 2, Issue 2, February 2012.

Venkatesh, V.C. and Chandrasekaran, Experimental Techniques in Metal Cutting, Prentice Hall of India,1987.

Venkatesh, V.C. and Chandrasekaran, Experimental Techniques in Metal Cutting, Prentice Hall of India,1987.

W B Lee, C F Cheung and S To, "Friction-induced fluctuation of cutting forces in the diamond turning of aluminium single crystals", Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part B: J. Engineering Manufacture, IMechE 2003, 615-631.

W. R. Backer, E. R. Marshall, and M. C. Shaw, 1952, "The size effect in metal cutting", Trans. of ASME, pp. 74-61.

www.vtd.de

X. Liu, R.E. DeVor, S.G. Kapoor, K.F. Ehman, The mechanics of machining at the micro scale: assessment of the current state of the science, Journal of Manufacturing Science and Engineering 126 (2004) 666–678.

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.

Zhiyu Zhang & Jiwang Yan & Tsunemoto Kuriyagawa, "Study on tool wear characteristics in diamond turning of reaction-bonded silicon carbide", Int J Adv Manuf Technol, 57, 2011, 117–125.

Zhiyu Zhang & Jiwang Yan & Tsunemoto Kuriyagawa, "Study on tool wear characteristics in diamond turning of reaction-bonded silicon carbide", Int J Adv Manuf Technol, 57, 2011, 117–125.

Zinan Lu, Takeshi Yoneyama, "Micro cutting in the micro lathe turning system", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol 39, 1999, 1171–1183.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Α. Μαρκόπουλος, «Μικροκατεργασίες», Αθήνα, 2005.

Δ. Μανωλάκος, Σημειώσεις μαθήματος «Κατεργασίες 1».

Λαζαρίδη Λ., «Μηχανουργική Τεχνολογία», Ίδρυμα Ευγενίδου, 1997.

Μαρκόπουλος Α. , «Κατεργασίες αποβολής υλικού λίαν υψηλής ακρίβειας», Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2006.