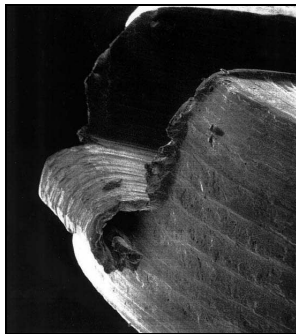




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

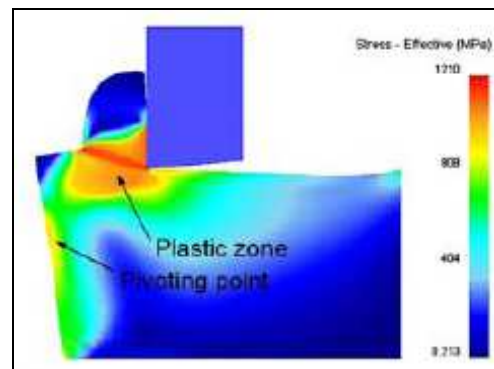
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Θέμα: «Μελέτη του φαινομένου σχηματισμού
'burr' στις κατεργασίες αποβολής υλικού»

Κατσαώρας Ν. Ιωάννης

Επίβλεψη:
Μανωλάκος Δημήτριος
Καθηγητής



Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

ΑΘΗΝΑ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, η οποία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Μανωλάκου Δ. στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, έχει σαν στόχο την μελέτη του φαινομένου σχηματισμού «burr» στις βασικές κατεργασίες αποβολής υλικού. Πιο συγκεκριμένα, έγινε αναλυτικός υπολογισμός του εμφανιζόμενου «burr» στις βασικές κατεργασίες κοπής (τόρνευση, φρεζάρισμα) και κατόπιν αυτού κατεβλήθη προσπάθεια ανάλυσης και ερμηνείας των αποτελεσμάτων και παράλληλα σύγκρισης με τα θεωρητικώς αναμενόμενα. Τελικά πιστεύω πως τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζουν αξιοσημείωτο ενδιαφέρον ιδιαίτερα για όσος θελήσουν είτε να ασχοληθούν με το θέμα που πραγματεύεται η εργασία είτε να χρησιμοποιήσουν το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνησή της.

Προτού ξεκινήσω να παρουσιάζω το αποτέλεσμα της ενασχόλησής μου με το θέμα της εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μανωλάκο Δ. που μου έδωσε την δυνατότητα, στα πλαίσια της μεταπτυχιακής μου εργασίας, να έρθω σε επαφή με ένα θέμα το οποίο συνδυάζει την, απαραίτητη παντού, θεωρητική ενασχόληση με την διεξαγωγή μοντελοποίησης, τα οποία μαζί με το πείραμα, μετά την εμπειρία που απέκτησα, θεωρώ πως καθιστούν πλήρη και ολοκληρωτική την ενασχόληση με οποιοδήποτε θέμα σε οποιοδήποτε επιστημονικό πεδίο. Παράλληλα μου δόθηκε η δυνατότητα να γνωρίσω και να εμβαθύνω σε ικανοποιητικό επίπεδο και ακόμη καλύτερα σε σχέση με τις προπτυχιακές μου σπουδές, σε ένα από τα βασικά αντικείμενα ενασχόλησης του τομέος, τις κοπές των μετάλλων. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μαρκόπουλο Άγγελο διδάκτορα μηχανολόγο μηχανικό για την πολύτιμη υποστήριξή του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, καθώς επίσης και το όλο προσωπικό του εργαστηρίου χωρίς την βοήθεια του οποίου η πραγματοποίηση του πειράματος θα ήταν αδύνατη.

*Αθήνα, 10 – 07 – 2012
Κατσαώρας Ιωάννης*

<i>Κεφάλαιο 1^ο: Κατεργασίες κοπής (γενικά)</i>	
1.1 Κατεργασίες κοπής	σελ. 6
1.2 Μηχανικές κατεργασίες κοπής	σελ. 7
1.2.1 Κατεργασίες κοπής μονού σημείου επαφής	σελ. 8
1.2.1.1 Τόρνευση	σελ. 9
1.2.1.2 Πλάνισμα	σελ. 15
1.2.2 Κατεργασίες κοπής πολλαπλών σημείων επαφής	σελ. 18
1.2.2.1 Φρεζάρισμα	σελ. 18
1.2.2.1.1 Περιφερειακό φρεζάρισμα	σελ. 19
1.2.2.1.2 Φρεζάρισμα προσώπου	σελ. 21
1.2.2.2 Διάτρηση	σελ. 21
<i>Βιβλιογραφία 1^ο κεφαλαίου</i>	σελ. 23

<i>Κεφάλαιο 2^ο: Το μοντέλο της ορθογωνικής κοπής και ο μηχανισμός δημιουργίας του αποβλίττου</i>	
2.1 Γεωμετρία – Βασικές έννοιες – Συνθήκες κοπής	σελ. 24
2.2 Ορθογωνική κοπή	σελ. 26
2.2.1 Οι δυνάμεις στην ορθογωνική κοπή	σελ. 27
2.3 Το απόβλιττο και ο σχηματισμός του	σελ. 29
2.3.1 Τα είδη του αποβλίττου	σελ. 30
<i>Βιβλιογραφία 2^ο κεφαλαίου</i>	σελ. 34

<i>Κεφάλαιο 3^ο: Ο σχηματισμός του «burr»</i>	
3.1 Γιατί μελετάμε το «burr»	σελ. 35
3.2 Περιγραφή του «burr»	σελ. 37
3.3 Ορισμός του «burr»	σελ. 37
3.4 Η γεωμετρία του «burr»	σελ. 38
3.5 Πρότυπα για την κατάταξη των λειτουργικών ακμών εξαρτημάτων	σελ. 40
3.6 Ο σχηματισμός του «burr»	σελ. 41
3.6.1 Τα είδη του «burr»	σελ. 41
3.6.1.1 «Poisson burr»	σελ. 42
3.6.1.2 «Ρολαριστό burr»	σελ. 43
3.6.1.3 «Δάκρυ» ή «Σκίσιμο»	σελ. 44
3.6.1.4 Προεξοχές «cutoff»	σελ. 45
3.6.2 Η εμφάνιση των διαφόρων «burrs» σε σχέση με τις βασικές κατεργασίες	σελ. 45
3.6.2.1 «Burrs» κατά την τόρνευση	σελ. 46
3.6.2.2 «Burrs» κατά το φρεζάρισμα	σελ. 47
3.6.2.3 «Burrs» κατά την διάτρηση	σελ. 53
3.6.3 Μηχανισμοί ανάπτυξης του «burr»	σελ. 54
3.6.4 Από τι επηρεάζεται το «burr»	σελ. 60
<i>Βιβλιογραφία 3^ο κεφαλαίου</i>	σελ. 74

<i>Κεφάλαιο 4^ο: Μοντελοποίηση και σχηματισμός του «burr»</i>	
4.1 Το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων – AdvantEdge	σελ. 76
4.1.1 Οι βασικές κατεργασίες του AdvantEdge v5.8	σελ. 77
4.1.2 Κοπτικά εργαλεία και υλικά	σελ. 77
4.1.3 Ανάλυση και αποτελέσματα	σελ. 77

4.2 Γνωριμία με τις κατεργασίες	σελ. 77
4.2.1 2D τόνρευση	σελ. 78
4.2.2 2D φρεζάρισμα	σελ. 84
4.2.3 3D τόνρευση	σελ. 87
4.2.4 3D διάνοιξη αυλάκων	σελ. 90
4.2.5 3D φρεζάρισμα	σελ. 93
4.2.6 Μελέτη περιπτώσεων	σελ. 98
4.2.6.1 Ο μηχανισμός ανάπτυξης του «burr» στο AdvantEdge	σελ. 98
4.2.6.2 Ποσοτική και ποιοτική διερεύνηση του προγράμματος	σελ. 114
4.3 Διερεύνηση της εξάρτησης του «burr» από τους διάφορους παράγοντες της κοπής με την χρήση του AdvantEdge	σελ. 128
<i>Βιβλιογραφία 4^ο κεφαλαίου</i>	<i>σελ. 136</i>

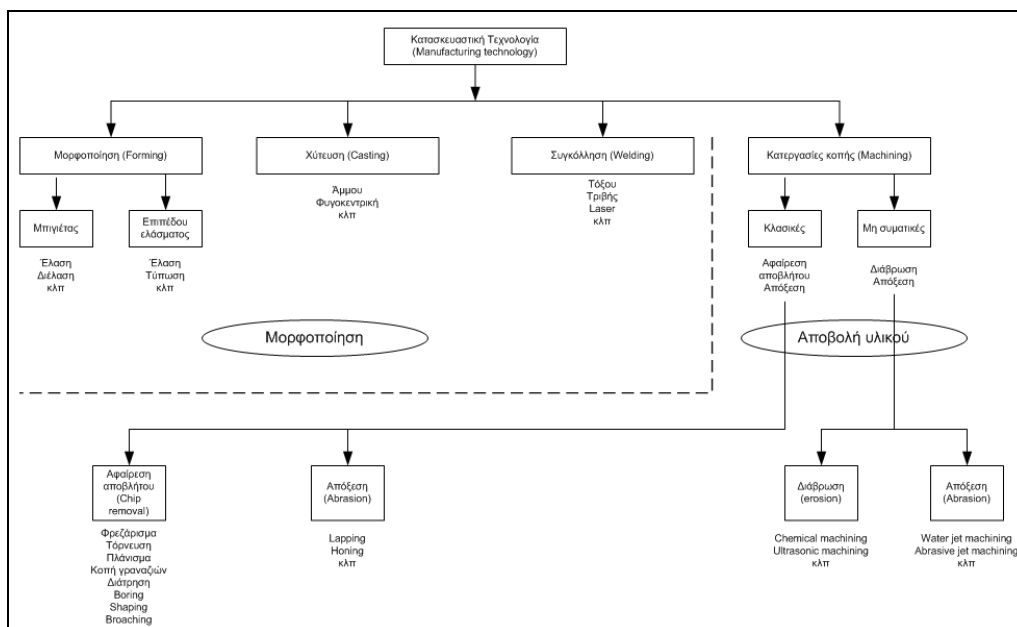
Κεφάλαιο 1^ο: Κατεργασίες κοπής (γενικά)

1.1 Κατεργασίες κοπής

Οι κατεργασίες κοπής (ή απλούστερα κοπές - αγγλ. *Machining*) είναι οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι μορφοποίησης των μετάλλων στην κατασκευαστική βιομηχανία. Οι παγκόσμιες επενδύσεις στην τεχνολογία των κατεργασιών κοπής γενικά εμφανίζουν αυξητικές τάσεις καταδεικνύοντας έτσι τη σημασία τους στο χώρο των μηχανολογικών κατασκευών [1].

Με τον όρο “κατεργασία κοπής” εννοούμε την αφαίρεση ανεπιθύμητου υλικού από ένα τεμάχιο (αγγλ. *workpiece*) έτσι ώστε να πάρουμε ένα ολοκληρωμένο προϊόν επιθυμητού μεγέθους, διαστάσεων και ποιότητας επιφάνειας. Η υλοποίηση της αφαίρεσης του υλικού μέσω τεχνικών κοπής αρχικά επετεύχθη χρησιμοποιώντας χειρωνακτικά εργαλεία (κατασκευασμένα από κόκκαλα ή πέτρα και στη συνέχεια από χαλκό ή σίδηρο). Το νερό, ο ατμός και αργότερα η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιήθηκαν για να αποτελέσουν την πηγή κίνησης τέτοιων εργαλείων ενταγμένων σε μηχανές κοπής [2].

Η αφαίρεση του υλικού στις κατεργασίες κοπής είναι δυνατό να γίνει είτε σε μακροσκοπικό επίπεδο με τη βοήθεια των κοπτικών εργαλείων (παραδοσιακές μέθοδοι κατεργασιών κοπής) είτε σε μικροσκοπικό επίπεδο με την επίδραση μηχανικών, χημικών ή ηλεκτρικών μέσων (μη συμβατικές κατεργασίες κοπής) [3]. Στην πρώτη περίπτωση τα κοπτικά εργαλεία εισχωρούν στην μάζα του μετάλλου και αποσπούν κομμάτια σημαντικών διαστάσεων. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση η αφαίρεση του υλικού πραγματοποιείται με επιφανειακή φθορά του υλικού και τα υπολείμματα της κατεργασίας έχουν την μορφή σκόνης. Οι πιο κοινές κατεργασίες κοπής (κλασικές) βασίζονται στη σχετική κίνηση ανάμεσα στο τεμάχιο και σε ένα κοπτικό εργαλείο (αγγλ. *cutting tool*) το οποίο αφαιρεί μηχανικά το «ανεπιθύμητο» υλικό υπό μορφή αποβλήτου (γρέξι - αγγλ. *chip*). Στις κατεργασίες αυτές εντάσσονται όλες οι παραδοσιακές όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 1 (βλ. παρακάτω) [4].




























Σχήμα 1-1: Κατάταξη κατασκευαστικών διεργασιών (γενικά) & κατεργασιών κοπής [2]




Η τεχνολογία κατεργασιών κοπής, σε σύγκριση με αυτή της μορφοποίησης, χρησιμοποιείται συνήθως όταν απαιτείται σημαντική ακρίβεια τελικών διαστάσεων των τεμαχίων και υψηλή ποιότητα επιφανείας. Η τεχνολογία της αφαίρεσης υλικού «μεταφέρεται» στο κοπτικό εργαλείο το οποίο είναι υπεύθυνο για την υλοποίηση των κινήσεων που απαιτούνται για να ληφθεί τελικά η επιθυμητή γεωμετρία του τεμαχίου. Γενικά, τα κοπτικά εργαλεία χαρακτηρίζονται από την υψηλή ακρίβεια παραγωγικότητας τους σε σύγκριση μάλιστα με τα αντίστοιχα των κατεργασιών μορφοποίησης. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός πως οι κατεργασίες κοπής αποτελούν σήμερα το 20% των συνολικών κατασκευαστικών κατεργασιών στις ΗΠΑ [2].

Επανερχόμενοι στην γενική κατάταξη των κατασκευαστικών κατεργασιών που παρατίθενται παραπάνω (Σχήμα 1) πρέπει να επισημάνουμε πως στην παρούσα εργασία θα μας απασχολήσουν αποκλειστικά οι κατεργασίες κοπής (*machining operations*) και πιο συγκεκριμένα οι κλασικές (οι οποίες συναντώνται στην βιβλιογραφία και ως μηχανικές κατεργασίες κοπής) οι οποίες συνδέονται με τη δημιουργία αποβλίττου. Τις βασικότερες από αυτές στις οποίες εμφανίζεται και το *burr formation* θα παρουσιάσουμε συνοπτικά ακολούθως.

1.2 Μηχανικές κατεργασίες κοπής (*mechanical machining methods*)

Οι περισσότερες μηχανικές κατεργασίες κοπής βασίζονται στην δημιουργία επίπεδων ή κυλινδρικών επιφανειών καθώς είναι οι απλούστερες που μπορούν να υλοποιηθούν. Η δημιουργία μίας νέας επιφάνειας γενικά απαιτεί σχετική κίνηση κοπτικού εργαλείου – τεμαχίου σε δύο διευθύνσεις. Η κύρια κίνηση ορίζει την *ταχύτητα κοπής* (*cutting speed – v*) και η δευτερεύουσα κίνηση ορίζει την *πρόωση* (*cutting feed – f*). Αυτές οι δύο κινήσεις, μαζί με το *βάθος κοπής* (*cutting depth – d_c*), παράγουν τη νέα επιφάνεια. Οι τρεις παράμετροι (συνθήκες κοπής) που προαναφέραμε επηρεάζουν πολλούς παράγοντες της κατεργασίας, όπως τον ρυθμό αφαίρεσης του υλικού, τον χρόνο κατεργασίας, την φθορά του εργαλείου, την ποιότητα επιφανείας και τις απαιτήσεις ισχύος. Πρέπει να επισημανθεί ότι η ταχύτητα κοπής προκύπτει από την κίνηση του τεμαχίου και η πρόωση από την κίνηση του εργαλείου. Γενικά υπάρχουν και κατεργασίες κοπής που χρησιμοποιούν διαφορετικό συνδυασμό σχετικών κινήσεων όπως π.χ. μόνο κίνηση εργαλείου, μόνο κίνηση τεμαχίου ή άλλους συνδυασμούς. Μια γενική και κατατοπιστική κατάταξη των κινήσεων των κοπτικών εργαλείων δίνεται στον Πίνακα 1-1. Γενικά στις κλασικές κατεργασίες κοπής τα κοπτικά εργαλεία έχουν το ελάχιστο κινήσεις κατά δύο διευθύνσεις, άξονες X και Y, σε συνδυασμό με τις περιστροφικές κινήσεις που γίνονται. Αντίστοιχος πίνακας συναντάται στη βιβλιογραφία και για τις μη συμβατικές κατεργασίες κοπής. Εδώ δεν παρατίθεται καθώς ξεφεύγει από τους σκοπούς της εργασίας.

Κατεργασία	Κινήσεις εργαλείου (EP) & τεμαχίου (TE)	
		
Αφαίρεση αποβλήτου		
Τόρνευση	TE 	EP 
Διάτρηση	EP 	EP 
Φρεζάρισμα	EP 	TE 
Shaping	EP 	TE 
Γλάνισμα	TE 	EP 
Slotting	EP 	TE 
Broaching	EP 	TE 
Κοπή γραναζιών	EP 	TE 
Abrasion		
Επιφανειακή λείανση	EP 	TE 
Κυλινδρική λείανση	EP 	TE 
Honing	EP 	EP ή TE 
Superfinishing	TE 	EP 

Σημ.  Περιστροφή ● Στατικό  Γραμμική κίνηση  Διακοπτόμενη κίνηση

Πίνακας 1-1: Κινήσεις εργαλείου & τεμαχίου στις κλασικές κατεργασίες κοπής [2].

Τέλος ένας ακόμη πολύ σημαντικός παράγοντας είναι η επαφή κοπτικού εργαλείου – τεμαχίου. Αυτή μπορεί να γίνεται κατά μόνο ένα σημείο (*σημειακό εργαλείο - single point tool*) ή κατά παραπάνω από ένα σημεία (*εργαλείο πολλαπλής επαφής - multiple point tool*) με παραπάνω από μία κοπτικές ακμές [2, 4].

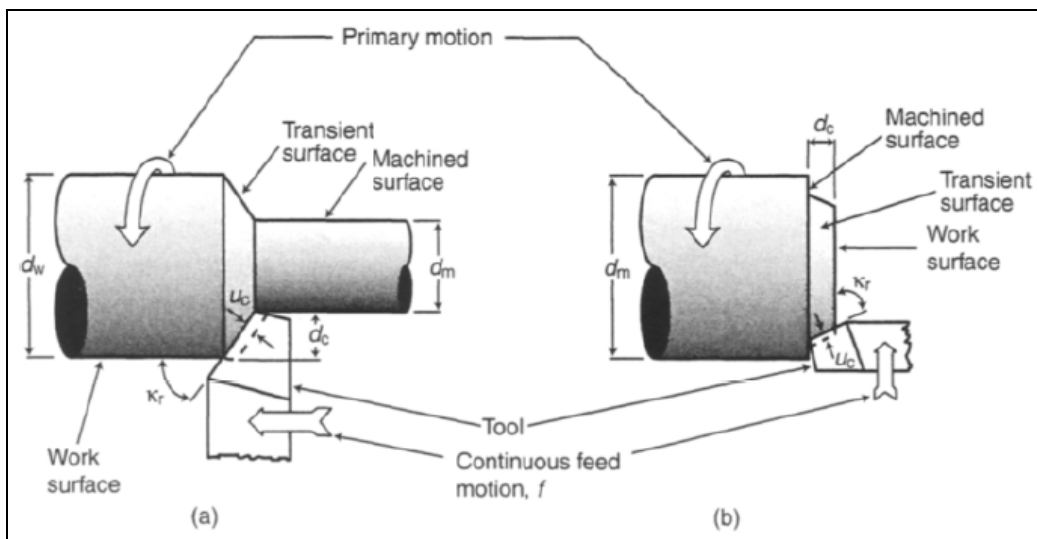
1.2.1 Κατεργασίες κοπής μονού σημείου επαφής (*single-point methods*)

Τα εργαλεία κοπής μονού σημείου επαφής έχουν σχετικά απλή γεωμετρία με μία κύρια ακμή κοπής. Η ακμή αυτή είναι υπεύθυνη για τον σχηματισμό του αποβλήτου (στον οποίο θα αναφερθούμε εκτενέστερα στη συνέχεια σε ειδική παράγραφο). Τα κοπτικά εργαλεία μιας κοπτικής ακμής συνήθως είναι προσαρμοσμένα σε κατάλληλο εργαλειοδέτη μέσω του οποίου προβλέπεται η ρύθμιση της θέσης της κοπτικής ακμής και της γωνίας σε σχέση πάντα με το τεμάχιο.

1.2.1.1 Τόρνευση

Η τόρνευση (αγγ. *turning*) ορίζεται σαν μία τεχνολογία κοπής μετάλλων στην οποία η κίνηση της κοπής (κύρια κίνηση – ταχύτητα κοπής v) υλοποιείται από το τεμάχιο, ενώ το εργαλείο κοπής πραγματοποιεί την βοηθητική κίνηση (δευτερεύουσα κίνηση – πρόωση f). Το εργαλείο που χρησιμοποιείται στην τόρνευση έχει μία κύρια κοπτική ακμή, ενώ η τελική μορφή στο τεμάχιο προσδίδεται σε περισσότερα του ενός βήματα (πάσσα) [5, 6]. Είναι μια κατεργασία κατάλληλη για όλους τους τύπους μεταλλικών και μη μεταλλικών υλικών και έχει την δυνατότητα να παράγει κυλινδρικά τεμάχια με απλά ή πολύπλοκα προφίλ. Πέρα από το εργαλείο κύριας κοπτικής ακμής που είναι και το πιο συνηθισμένο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και εργαλείο μορφοποίησης (*form tool*).

Η βασική λειτουργία της κατεργασίας φαίνεται στο σχήμα 1-2, όπου το τεμάχιο συγκρατείται σε κατάλληλη διάταξη (τσωκ – αγγλ. *chuck*) και περιστρέφεται σε κάποιες στροφές (σε rpm) και το κοπτικό εργαλείο κινείται κατά μήκος του τεμαχίου (πρόωση σε mm/στροφή ή in/στροφή) αφαιρώντας υλικό σε ακτινικό βάθος (βάθος κοπής d_c) μειώνοντας την διάμετρο του τεμαχίου από d_w σε d_m [5].



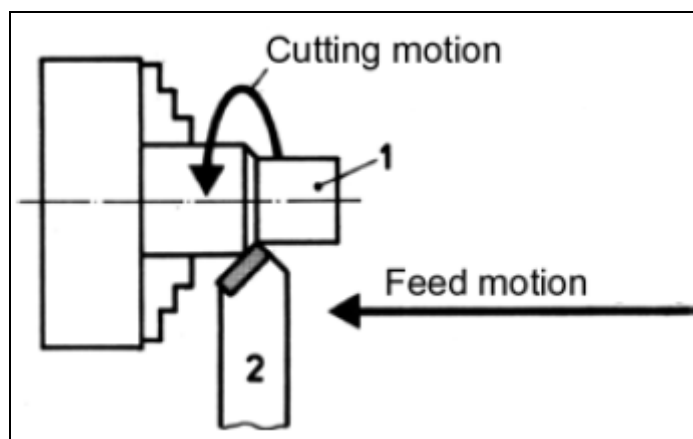
Σχήμα 1-2: Η υλοποίηση της «κλασσικής» τόρνευσης [4]. Το τεμάχιο περιστρέφεται (κύρια κίνηση – *primary motion*) και το κοπτικό εργαλείο (*tool*) εισέρχεται στο τεμάχιο σε βάθος κοπής d_c κινούμενο κατά μήκος αυτού (πρόωση f – δευτερεύουσα κίνηση) μειώνοντας τη διάμετρο του. Μπορούμε να διακρίνουμε την αρχική επιφάνεια (*work surface*), την ενδιάμεση (*transient surface*) και την τελική ή κατεργασμένη επιφάνεια (*machined surface*). Το σχήμα αναφέρεται σε (a) κυλινδρική τόρνευση (*cylindrical turning*) και (b) σε μετωπική τόρνευση (*facing*).

Στην κατεργασία της τόρνευσης εντάσσονται πολλές άλλες συμπληρωματικές κατεργασίες μέσω των οποίων διευρύνεται η γκάμα της τελικής μορφής του τεμαχίου που μπορούμε να πάρουμε. Οι κατεργασίες αυτές συμπληρώνουν τις δύο βασικότερες και συνηθέστερες που παρουσιάζονται στο σχήμα 1-2 (κλασσική τόρνευση). Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν συνοπτικά όλες τις κατεργασίες που εντάσσονται στην

ευρεία οικογένεια της τόννευσης για να έχουμε μία ολοκληρωμένη εικόνα της κατεργασίας και των δυνατοτήτων της.

Κυλινδρική τόρνευση (cylindrical turning)

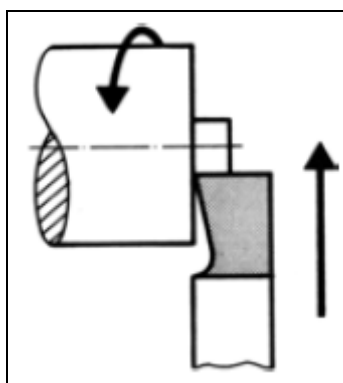
Στην κυλινδρική τόρνευση, το κοπτικό εργαλείο κινείται παράλληλα με τον άξονα του τεμαχίου από τα δεξιά προς τα αριστερά υλοποιώντας έτσι ένα κυλινδρικό τεμάχιο σε συγκεκριμένες διαμέτρους.



Σχήμα 1-3: Κυλινδρική τόρνευση. Φαίνεται η κύρια κίνηση (cutting motion) και η πρόωση (feed motion)

Μετωπική τόρνευση (facing)

Κατά την μετωπική τόρνευση το κοπτικό εργαλείο κινείται συνήθως προς τον άξονα του τεμαχίου. Χρησιμοποιείται συνήθως για την υλοποίηση μίας μετωπικής επιφάνειας ή για την διαμόρφωση ενός άκρου. Η κίνηση του εργαλείου εξαρτάται από το είδος της κατεργασίας, την κοπτική ακμή, την θέση του εργαλείου καθώς και την γεωμετρία του τεμαχίου. Γενικά, στην εκχόνδριση (αγγλ. *roughing*) προτιμάται μία κίνηση από έξω προς τα μέσα, ενώ στο φινίρισμα (αγγλ. *finishing*) το αντίθετο.



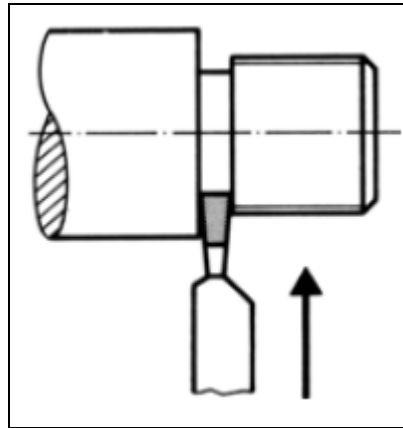
Σχήμα 1-4: Μετωπική τόρνευση

Απότμηση (parting)

Στην απότμηση, το κοπτικό εργαλείο κινείται είτε προς τον άξονα του τεμαχίου είτε παράλληλα με αυτόν. Το τελικό περίγραμμα υλοποιείται «βυθίζοντας» το κοπτικό εργαλείο έως το προκαθορισμένο βάθος κοπής.

Δημιουργία εσοχών (recessing)

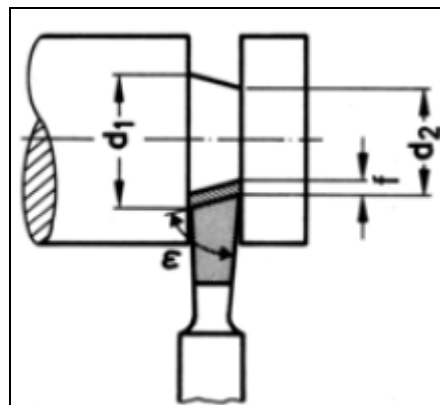
Η δημιουργία εσοχής χρησιμοποιείται για την κατασκευή αυλακιών συγκεκριμένης μορφής, π.χ. αυλάκια στο τέλος σπειρωμάτων. Εάν η μορφή του αυλακιού είναι ευθεία και παράλληλη με τον άξονα του τεμαχίου (δες σχήμα 1-5) τότε εκμεταλλευόμαστε το πλήρες πλάτος της κοπτικής ακμής με γωνία εργαλείου 90° ως προς τον άξονα του τεμαχίου.



Σχήμα 1-5: Δημιουργία αυλακώσεων (ευθύ αυλάκι)

Δημιουργία κεκλιμένων εσοχών (cutting off)

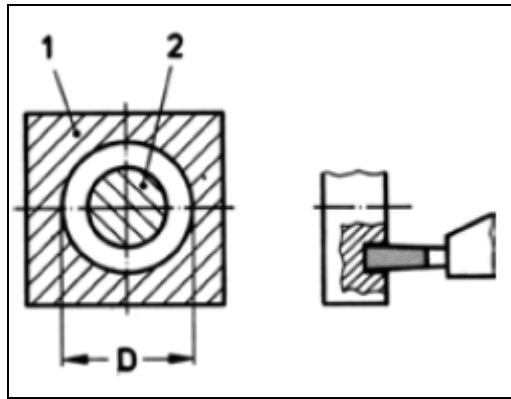
Παρουσιάζει ομοιότητα με την προηγούμενη περίπτωση. Σημαντική διαφορά είναι πως το αυλάκι που δημιουργείται παρουσιάζει κλίση σε σχέση με τον άξονα του τεμαχίου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της κλίσης της κοπτικής ακμής του εργαλείου και τελικά δημιουργούνται δύο διαφορετικές «διάμετροι» (στην αρχή και το τέλος του «κώνου»).



Σχήμα 1-6: Δημιουργία αυλακώσεων (κεκλιμένο αυλάκι). Είναι ορατές οι δύο «διάμετροι» d_1 & d_2 .

Bitting

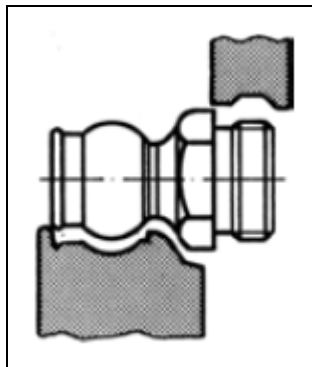
Πρόκειται για μία υποκατηγορία τόννευσης η οποία χρησιμοποιείται για διεργασίες φινιρίσματος (στα τελειώματα της κοπής), στην οποία η διεύθυνση πρόωσης του κοπτικού εργαλείου είναι παράλληλη με τον άξονα του τεμαχίου. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται π.χ. για την αποκοπή ενός δακτυλίου από μία πλάκα ή για την δημιουργία αυλακιών στο πρόσωπο του τεμαχίου.



Σχήμα 1-7: Bitting για την δημιουργία οπής. (1) τεμάχιο (2) απόβλητο κατεργασίας D διάμετρος οπής

Τόρνευση μορφής (form turning)

Σε αυτή την υποκατηγορία της τόρνευσης, η κύρια κοπτική «ακμή» έχει την μορφή της επιφάνειας (υπό μία μορφή “καλουπιού”) που θέλουμε να δημιουργήσουμε στο τεμάχιο. Καθώς το τεμάχιο περιστρέφεται, το εργαλείο «αγκαλιάζει» το τεμάχιο δίνοντας του την επιθυμητή μορφή.

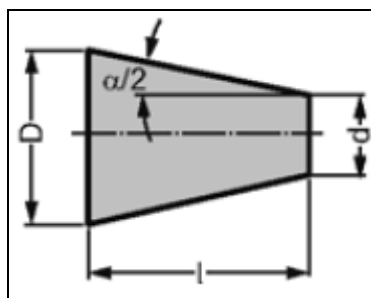


Σχήμα 1-8: Form turning

Τόρνευση κωνικότητας (taper turning)

Χρησιμοποιείται για την δημιουργία αξόνων με τμήματα συνεχώς μεταβαλλόμενης διαμέτρου (κωνικότητας). Η γωνία του κώνου μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση

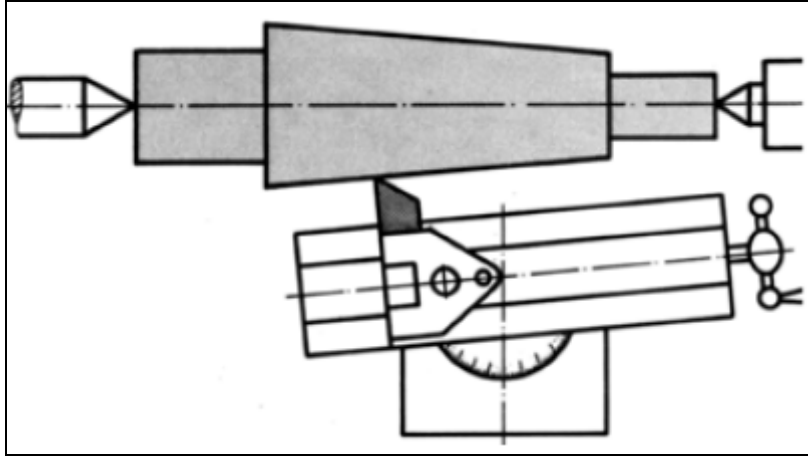
$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{D-d}{2 \cdot l} \quad (\text{δες και σχήμα 1-9})$$



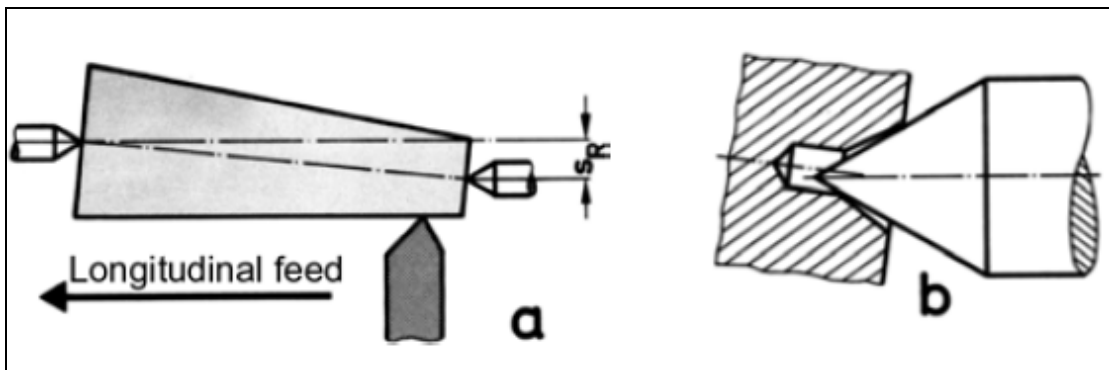
Σχήμα 1-9: Δημιουργία κωνικότητας (taper turning)

Η δημιουργία της κωνικότητας επιτυγχάνεται με δύο κυρίως τρόπους:

- (i) Με τοποθέτηση του εργαλείου σε κλίση μέσω του εργαλειοφορέα.



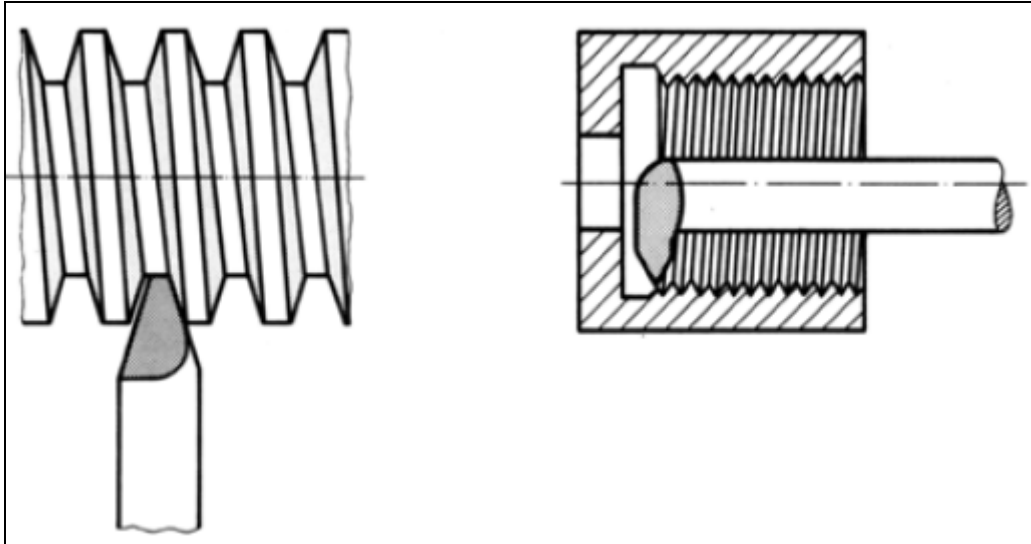
- (ii) Με μετατόπιση της «ουράς» του τεμαχίου μέσω της πόντας.



Σχήμα 1-9: Δημιουργία κωνικότητας (taper turning)

Σπειροτόμηση (thread cutting)

Κατηγορία κυλινδρικής τόννευσης στην οποία η πρόωση αντιστοιχεί στο βήμα του κοχλία για το σπείρωμα που θέλουμε να δημιουργήσουμε.



Σχήμα 1-10: Τόρνευση σπειροτόμησης (thread cutting). (α) εξωτερικό (β) εσωτερικό σπείρωμα.

Τόρνευση με την βοήθεια αριθμητικού ελέγχου (Computer Numerical Control turning)

Ξεφεύγει αρκετά από τον κλασικό τρόπο τόρνευσης ως προς τον καθορισμό της τελικής μορφής του τεμαχίου και τον τρόπο «εισαγωγής» της στην εργαλειομηχανή γι' αυτό και δε θα κάνουμε εκτενή αναφορά. Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί πως ό,τι ισχύει στην κλασική τόρνευση ως προς τα θέματα κοπής που θα εξεταστούν στη συνέχεια (δημιουργία του αποβλήτου, burr formation) εξακολουθούν να ισχύουν και εδώ.

1.2.1.2 Πλάνισμα

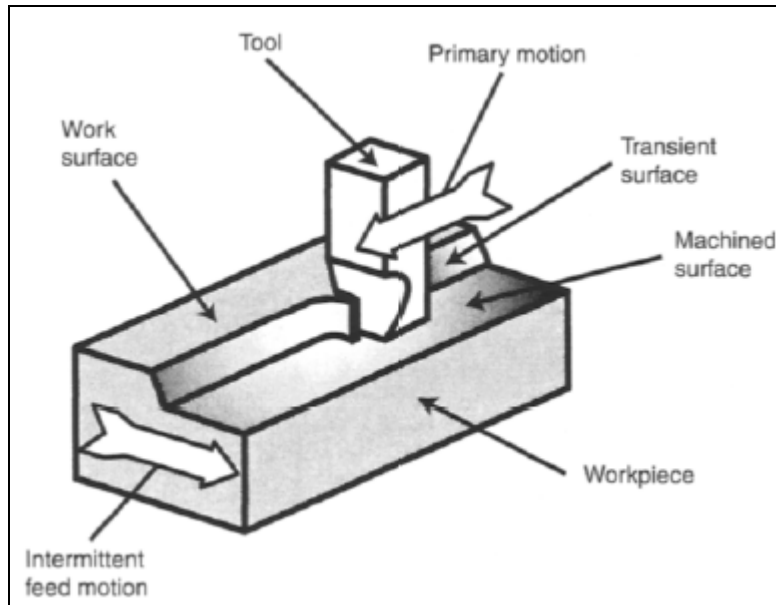
Το πλάνισμα (αγγλ. *planing*) ορίζεται σαν μία κατεργασία κοπής στην οποία η κοπή / κατεργασία του τεμαχίου γίνεται σε «φέτες» (ή «λωρίδες») με εργαλείο μίας κοπτικής ακμής, το εργαλείο πλανίσματος. Το πλάνισμα μπορεί να γίνει πιο κατανοητό εάν το θεωρήσουμε σαν μία μορφή τόρνευσης η οποία εφαρμόζεται σε τεμάχιο άπειρης διαμέτρου. Στην περίπτωση αυτή η κίνηση της κοπής γίνεται κατά μήκος μίας ευθείας γραμμής. Αυτό σημαίνει πως έχουμε γραμμική κύρια κίνηση.

Το πλάνισμα είναι σχετικά απλή κατεργασία κοπής και δεν περιλαμβάνει πλήθος υποπεριπτώσεων όπως είδαμε για την περίπτωση της τόρνευσης. Εδώ έχουμε μόνο δύο περιπτώσεις τις οποίες θα εξετάσουμε στη συνέχεια.

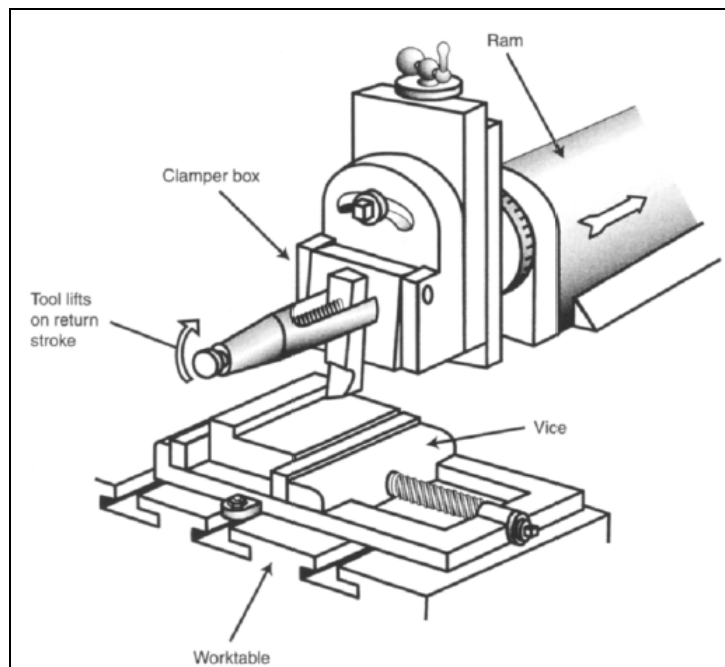
Πλάνισμα «μορφής» (*shaping*)

Το πλάνισμα «μορφής» γενικά εφαρμόζεται σε επίπεδες πλάκες και χυτά τεμάχια τα οποία χαρακτηρίζονται γεωμετρικά από επίπεδες επιφάνειες και ευθείες συνοριακές γραμμές (θα μπορούσαμε να πούμε «παραλληλεπίπεδα»). Θεωρείται κατάλληλο για τεμάχια σχετικά μικρών διαστάσεων, καθώς σε αντίθετη περίπτωση απαιτούνται μεγάλες διαδρομές κίνησης του κοπτικού εργαλείου, γεγονός που οδηγεί σε αλλοίωση της ακρίβειας κατεργασίας. Σε περιπτώσεις μεγάλων

διαστάσεων προτιμάται η κίνηση να πραγματοποιείται από το τεμάχιο το οποίο έχει προσδεθεί σε κατάλληλη τράπεζα για την κατεργασία.



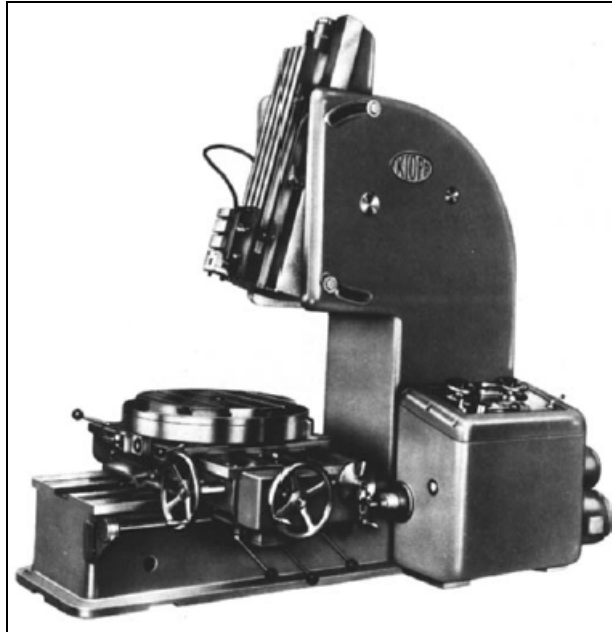
Σχήμα 1-11: Πλάνισμα «μορφής» (shaping). Μπορούμε να διακρίνουμε το εργαλείο (tool), την κύρια κίνηση κατεργασίας (primary motion), το τεμάχιο (workpiece), την κατεργασμένη επιφάνεια (machined surface), την ενδιάμεση επιφάνεια (transient surface), την αρχική επιφάνεια (work surface) και τέλος την διακοπτόμενη κίνηση πρόωσης (intermittent feed motion) [4].



Σχήμα 1-12: Διάταξη εργαλειομηχανής για πλάνισμα (πλάνισμα μορφής). Διακρίνονται το παλινδρομόν έμβολο (ram), ο εργαλειοδέτης (clamper box), η μέγγενη πρόσδεσης του τεμαχίου (vice) και το τραπέζι της εργαλειομηχανής (worktable) [4].

«Κάθετο» πλάνισμα (vertical planing or slotting)

Εφαρμόζεται για την υλοποίηση εσωτερικών διαμορφώσεων σε διάφορα στοιχεία μηχανών, π.χ. εσωτερικών αυλακώσεων ή κάθετων οπών. Είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται στην διάνοιξη των οπών των μητρών διαμόρφωσης (blanking dies).



Σχήμα 1-13: Εργαλειομηχανή κάθετου πλανίσματος (slotting machine) [6].



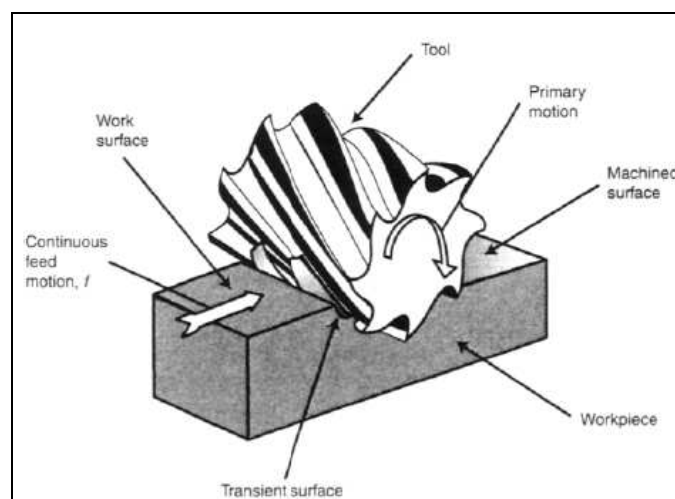
Σχήμα 1-14: Κοπή ακριβείας δέκα εσωτερικών αυλάκων σε εργαλειομηχανή κάθετου πλανίσματος (slotting machine) [φώτο από Franklin Machine & Gear Corporation - www.franklingear.com].

1.2.2 Κατεργασίες κοπής πολλαπλών σημείων επαφής (*multiple-point methods*)

Τα εργαλεία κοπής πολλαπλών σημείων έχουν περισσότερες από μία κοπτικές ακμές και κατά συνέπεια πολυπλοκότερη γεωμετρία και μεγαλύτερο κόστος. Πλεονέκτημά τους είναι ο μεγαλύτερος ρυθμός απομάκρυνσης υλικού που οδηγεί σε αυξημένη παραγωγικότητα. Τα εργαλεία αυτά διατίθενται σε ευρεία γκάμα μεγάλο μέρος της οποίας προορίζεται για εξειδικευμένες κατεργασίες. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τις δύο πιο κοινές μεθόδους κατεργασίας πολλαπλών σημείων επαφής, το φρεζάρισμα και την διάτρηση, καθώς αυτές θα μας απασχολήσουν στα πλαίσια της μελέτης του burr formation.

1.2.2.1 Φρεζάρισμα

Στο φρεζάρισμα (*αγγ. milling*) η αφαίρεση υλικού επιτυγχάνεται μέσω ενός περιστρεφόμενου εργαλείου πολλών κοπτικών ακμών. Ο ρυθμός αποβολής του υλικού ρυθμίζεται μέσω της ταχύτητας περιστροφής του κοπτικού εργαλείου ενώ επιτυγχάνεται γενικά καλύτερη ποιότητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας λόγω των πολλών κοπτικών ακμών του εργαλείου. Πολύ σημαντικό είναι να επισημανθεί πως πρόκειται για κατεργασία κοπής διακοπτόμενης δράσης καθώς υπάρχει ένα απειροελάχιστο χρονικό διάστημα μεταξύ των επαφών κάθε κοπτικής ακμής με το κατεργαζόμενο τεμάχιο και κάθε φορά παράγεται απόβλιττο ποικίλου πάχους [2,7]. Το απόβλιττο που παράγεται κατά το φρεζάρισμα θεωρείται γενικά μικρού πάχους [7]. Η κύρια κίνηση του φρεζαρίσματος υλοποιείται από την περιστροφή του κοπτικού εργαλείου (ταχύτητα κοπής) ενώ η δευτερεύουσα από την κίνηση του τεμαχίου (πρόωση) η οποία υλοποιείται κατάλληλα μέσω κινήσεων της εργαλειομηχανής. Μία τυπική διάταξη τεμαχίου - εργαλείου για το φρεζάρισμα φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Σχήμα 1-15: Τυπική διάταξη φρεζαρίσματος επίπεδης επιφάνειας [4]. Μπορούμε να διακρίνουμε το τεμάχιο (*workpiece*), την επιφάνεια του τεμαχίου (*work surface*), την κατεργασμένη επιφάνεια (*machined surface*), το εργαλείο (*tool*), την κύρια κίνηση (*primary motion*), την πρόωση (*continuous feed motion, f*) και την διεπιφάνεια εργαλείου – τεμαχίου (*transient surface*).

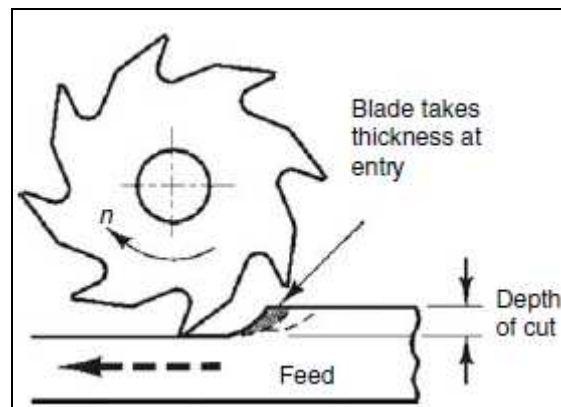
Με τις εργαλειομηχανές φρεζαρίσματος μπορούμε να πετύχουμε ευρεία γκάμα γεωμετρίας όπως επίπεδες επιφάνειες, γωνίες, οδοντώσεις και εγκοπές [2]. Το φρεζάρισμα θεωρείται γενικά πιο αποτελεσματικό όταν το τεμάχιο δεν είναι πιο σκληρό από 25 HRC. Παρόλα αυτά χάλυβας σκληρότητας έως 35 HRC είναι κοινός για κατεργασία φρεζαρίσματος ενώ φρεζάρισμα έχει επιτευχθεί σε χάλυβα σκληρότητας έως 56 HRC [7]. Η κατεργασία φρεζαρίσματος μπορεί να διαχωριστεί στο περιφερειακό (απλό) φρεζάρισμα και στο μετωπικό φρεζάρισμα (φινίρισμα).

1.2.2.1.1 Περιφερειακό φρεζάρισμα (*peripheral milling*)

Στο περιφερειακό φρεζάρισμα η κοπή υλοποιείται από την περιφέρεια του κοπτικού εργαλείου και η κατεργασμένη επιφάνεια είναι παράλληλη με τον άξονα κοπής. Το περιφερειακό φρεζάρισμα συνήθως υλοποιείται σε οριζόντια εργαλειομηχανή (φρέζα) γι' αυτό και πολλές φορές ονομάζεται και οριζόντιο φρεζάρισμα. Η ποιότητα της επιφάνειας καθώς και η μορφή του αποβλίττου επηρεάζονται από την κατεύθυνση περιστροφής του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με την κίνηση του τεμαχίου. Σχετικά με αυτό, διαχωρίζουμε δύο περιπτώσεις, το ομόρροπο και το αντίρροπο φρεζάρισμα.

Ομόρροπο φρεζάρισμα (*down-milling*)

Το ομόρροπο φρεζάρισμα υλοποιείται όταν η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου γίνεται προς την ίδια κατεύθυνση με την κίνηση του τεμαχίου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1-16.



Σχήμα 1-16: Ομόρροπο φρεζάρισμα. Διακρίνονται η κατεύθυνση περιστροφής του εργαλείου, η κίνηση του τεμαχίου (πρόωση – *feed*) και το βάθος κοπής (*depth of cut*). Το πάχος του αποβλίττου καθορίζεται με την «είσοδο» της κοπτικής ακμής στο τεμάχιο [2].

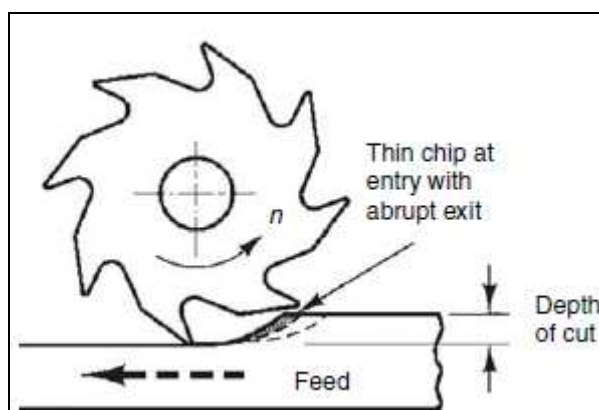
Παρατηρώντας το σχήμα μπορούμε να πούμε πως το κοπτικό εργαλείο τείνει να «σκαρφαλώσει» στο τεμάχιο. Το απόβλιττο έχει το μέγιστο πάχος αμέσως με την εμπλοκή τεμαχίου – εργαλείου και τείνει να μηδενιστεί στο τέλος αυτής. Οι δυνάμεις της κοπής έχουν διεύθυνση «προς τα κάτω». Το ομόρροπο φρεζάρισμα πρέπει να αποφεύγεται σε εργαλειομηχανές που δεν είναι αρκετά στιβαρές και δεν διαθέτουν τρόπο να αντισταθμίσουν τον τζόγο μεταξύ του κοχλία πρόωσης και τους τραπεζιού

της εργαλειομηχανής καθώς υπάρχει κίνδυνος βλάβης της ατράκτου. Τα πλεονεκτήματα του ομόρροπου φρεζαρίσματος είναι τα εξής:

- Το δέσιμο εργαλείου και τεμαχίου είναι απλούστερο και λιγότερο κοστοβόρο, καθώς οι δυνάμεις κοπής κατευθύνονται προς τα κάτω.
- Επίπεδα τεμάχια τα οποία δεν μπορούν να συγκρατηθούν επαρκώς, είναι προτιμότερο να κατεργάζονται με ομόρροπο φρεζάρισμα.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί κοπτικό εργαλείο με μικρότερη γωνία αποβλίττου, ελαττώνοντας έτσι τις απαιτήσεις ισχύος.
- Το ομόρροπο φρεζάρισμα χαρακτηρίζεται από μικρότερες τάσεις για κραδασμούς και chattering, δίνοντας έτσι καλύτερη ποιότητα επιφάνειας.

Αντίρροπο φρεζάρισμα (up-milling)

Το αντίρροπο φρεζάρισμα υλοποιείται όταν η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου γίνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με την κίνηση του τεμαχίου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1-17.



Σχήμα 1-17: Αντίρροπο φρεζάρισμα. Διακρίνονται η κατεύθυνση περιστροφής του εργαλείου, η κίνηση του τεμαχίου (πρόωση – feed) και το βάθος κοπής (depth of cut). Το πάχος του αποβλίττου αυξάνει με την πάροδο της επαφής κάθε ακμής εργαλείου - τεμαχίου [2].

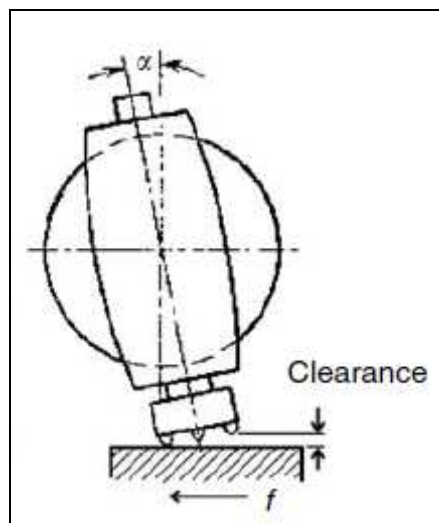
Παρατηρώντας το σχήμα βλέπουμε πως η κοπτική ακμή απομακρύνει απόβλιττο σταδιακά αυξανόμενου πάχους. Αρχικά ξεκινά από σχεδόν μηδενικό και αυξάνεται καθώς το εργαλείο εισέρχεται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Αυτό σημαίνει πως ο «κύκλος» του μηχανισμού αφαίρεσης – απομάκρυνσης του αποβλίττου ξεκινά σαν ολίσθηση, κατόπιν ακολουθεί η θραύση και τελικά λαμβάνει χώρα η κοπή. Σε μερικά μέταλλα το αντίρροπο φρεζάρισμα οδηγεί σε σκλήρυνση της κατεργασμένης επιφάνειας καθώς επίσης και σε chattering και άμβλυση - στόμωμα των κοπτικών ακμών. Τα πλεονεκτήματα του αντίρροπου φρεζαρίσματος είναι:

- Δεν απαιτείται αντιστάθμιση τζόγου κοχλία πρόωσης - τράπεζας.
- Είναι ασφαλέστερη σαν διαδικασία (το εργαλείο δεν «σκαρφλώνει» πάνω στο τεμάχιο).
- Τα φορτία στην κοπτική ακμή δρουν σταδιακά.
- Αποφεύγεται ο σχηματισμός ψευδοακμής (δες και επόμενο κεφάλαιο).

- Το κοπτικό εργαλείο δεν επηρεάζεται από τις μη επίπεδες επιφάνειες του τεμαχίου.

1.2.2.1.2 Φρεζάρισμα προσώπου (face milling)

Στο φρεζάρισμα φινιρίσματος η κατεργαζόμενη επιφάνεια βρίσκεται υπό γωνία σε σχέση με το άξονα κοπής. Όταν χρησιμοποιούνται κοπτικά εργαλεία μεγάλης διαμέτρου θεωρείται καλή πρακτική η ελαφρά κλίση της κεφαλής της ατράκτου κατά 1 έως 3° (δες και σχήμα 1-18) έτσι ώστε να δημιουργείται ένα μικρό διάκενο το οποίο οδηγεί σε καλύτερη ποιότητα επιφανείας και ελαχιστοποιεί το στόμωμα του εργαλείου. Το φρεζάρισμα προσώπου συνήθως υλοποιείται σε κάθετες εργαλειομηχανές φρεζαρίσματος και για το λόγο αυτό ονομάζεται και κάθετο φρεζάρισμα.



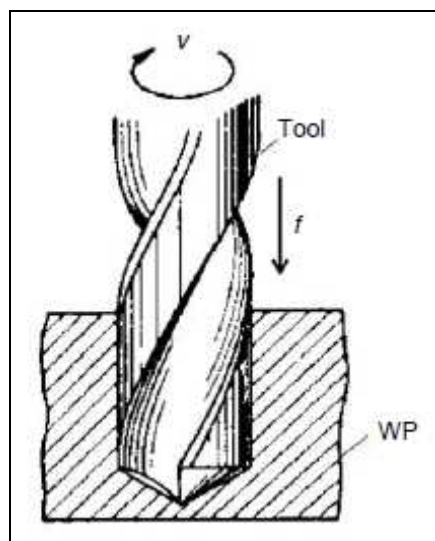
Σχήμα 1-18: Φρεζάρισμα φινιρίσματος. Είναι ορατό το διάκενο που δημιουργείται από την κλίση του άξονα του κοπτικού εργαλείου (clearance) [2].

1.2.2.2 Διάτρηση

Η διάτρηση (αγγ. *drilling*) είναι μία κατεργασία μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η διάνοιξη οπών (τυφλών ή διαμπερών) σε ένα τεμάχιο. Υλοποιείται μέσω ενός εργαλείου (τρυπάνι, αγγ. *drill*) το οποίο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του και παράλληλα κινείται κατά την διεύθυνση αυτού προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο [2]. Το κοπτικό εργαλείο μπορεί να έχει μία ή περισσότερες κοπτικές ακμές, ενώ διαθέτει ταυτόχρονα και αυλάκια για την απομάκρυνση του αποβλίττου και την τροφοδοσία του κοπτικού υγρού. Η διάτρηση θεωρείται η αποτελεσματικότερη και πιο οικονομική μέθοδος για την διάνοιξη οπών σε συμπαγή μέταλλα [7]. Πρόκειται για κατεργασία εκχόνδρισης και κατά συνέπεια δεν μας ενδιαφέρουν ιδιαίτερα η ακρίβεια και η ποιότητα επιφανείας. Στην περίπτωση που πρέπει να ληφθεί μέριμνα και για αυτά η διάτρηση ακολουθείται συνήθως και από άλλες διαδικασίες – κατεργασίες που συμβάλλουν στην επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Γενικά τα περισσότερα μέταλλα που υφίστανται διάτρηση είναι

μαλακότερα από 30 HRC, αλλά συνήθως είναι η διάτρηση μετάλλων με σκληρότητα έως 50 HRC, ενώ έχει επιτευχθεί η διάτρηση χαλύβων με σκληρότητα 60 HRC [7].

Στην διάτρηση, η κύρια κίνηση είναι η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου γύρω από τον άξονά του, ενώ η δευτερεύουσα κίνηση – πρόωση είναι η κίνηση του τρυπανιού κατά μήκος του άξονα περιστροφής του, από και προς το ακίνητο κατεργαζόμενο τεμάχιο (να σημειωθεί εδώ πως υπάρχει η δυνατότητα υλοποίησης της «ανάποδης» διαδικασίας με περιστροφή του τεμαχίου και κίνησή του προς το κοπτικό εργαλείο η οποία όμως υλοποιείται σε διαφορετικού τύπου εργαλειομηχανή και η αναφορά σε αυτή ξεφεύγει από τους σκοπούς μας).



Σχήμα 1-19: Η κατεργασία της διάτρησης. Το κοπτικό εργαλείο (tool) εισέρχεται περιστρεφόμενο (με ταχύτητα v) στο κατεργαζόμενο τεμάχιο (WP) μέσω της κίνησης του κατά τον άξονα περιστροφής του (πρόωση f) [2].

Ολοκληρώνοντας την σύντομη αυτή αναφορά μας στη διάτρηση, αξίζει να επισημάνουμε μία σημαντική παράμετρο της κατεργασίας πέρα από αυτές που συναντάμε σε όλες σχεδόν τις κατεργασίες (πρόωση, βάθος κοπής κλπ). Πρόκειται για τον λόγο της διαμέτρου προς το μήκος της οπής (length-to-diameter ratio) ο οποίος ανάλογα και με το υλικό καθορίζει σε ποιες διαμέτρους και ποια βάθη μπορούμε να φτάσουμε. Στην απλούστερη μορφή της διάτρησης (όπως περιγράφεται στο σχήμα 1-19) βέλτιστα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν το μήκος της οπής είναι το πολύ τριπλάσιο της διαμέτρου της. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιώντας κατάλληλα εξειδικευμένο εξοπλισμό και τεχνικές, μπορούμε να φτάσουμε σε μήκη οκταπλάσια της διαμέτρου [7].

Βιβλιογραφία 1^ο κεφαλαίου

Έντυπη

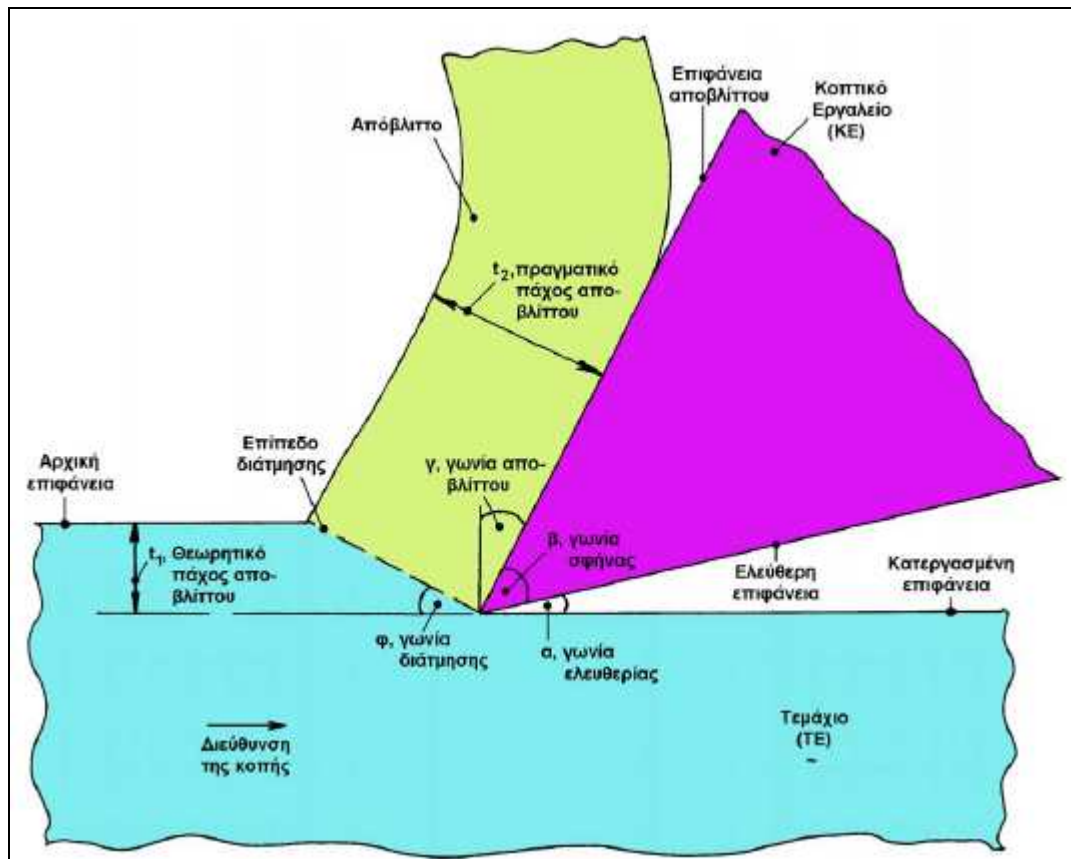
- [1] T. Childs, K. Maekawa, T. Obikawa, Y. Yamane “Metal Machining – Theory and Applications”, εκδ. Arnold.
- [2] H.A. Youssef, H. El-Hoffy, “Machining Technology – Machine tools and Operations”, εκδ. CRC Press.
- [3] Π.Ν. Μπότσαρης, Π.Δ. Σπάρης “Στοιχεία Τεχνολογίας Παραγωγής”, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.
- [4] J. Beddoes, M.J. Bibby, “Principles of Metal Manufacturing Processes”, εκδ. Elsevier
- [5] “Marks’ Standard Handbook for Mechanical Engineers, 11th edition”, εκδ. McGraw – Hill.
- [6] H. Tschatsch, “Applied Machining Technology”, εκδ. Springer.
- [7] “ASM Handbook, vol. 16 – Machining”, American Society for Metals (ASM International).
- [8] Α.Γ. Μάμαλης, “Κατεργασίες των Υλικών”, εκδ. ΕΜΠ 1991.
- [9] S. Kalpakjian, S.R. Schmid, “Manufacturing Engineering and Technology”, εκδ. Prentice Hall
- [10] Δ.Ε. Μανωλάκος, “Κατεργασίες ΙΙ – Πανεπιστημιακές Σημειώσεις”

Κεφάλαιο 2^ο: Το μοντέλο της ορθογωνικής κοπής και ο μηχανισμός δημιουργίας του αποβλίττου

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί το μοντέλο βάσει του οποίου θα εξετάσουμε την κοπή, τη δημιουργία του αποβλίττου και κατά συνέπεια του φαινομένου εμφάνισης burr. Αρχικά θεωρούμε πως η κοπή είναι μία συνεχής διαδικασία και άρα μπορούμε να αναπτύξουμε ένα «συνεχές» μοντέλο των συνθηκών και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την κοπή.

2.1 Γεωμετρία – Βασικές έννοιες – Συνθήκες κοπής

Στην μελέτη της κοπής τα δύο βασικά στοιχεία που εμπλέκονται είναι το κατεργαζόμενο τεμάχιο (αυτό που θέλουμε να μορφοποιήσουμε) και το κοπτικό εργαλείο (το μέσο με το οποίο θα επιτευχθεί η μορφοποίηση). Το κοπτικό εργαλείο προσομοιώνεται με σφήνα ευθύγραμμης ακμής που κινείται ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο έτσι ώστε να αφαιρείται στρώμα υλικού ορισμένου πάχους και με την αντίστοιχη κάθε φορά μορφή αποβλίττου. Επειδή γίνεται λόγος για κίνηση είναι σημαντικό να θυμόμαστε τα κινηματικά στοιχεία της κοπής, την πρωτεύουσα ή κύρια κίνηση και την δευτερεύουσα ή κίνηση πρόωσης (βλ. προηγούμενο κεφάλαιο παρ. 1.2). Στο επόμενο σχήμα φαίνονται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοπής:



Σχήμα 2-1: Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοπής όπως αποτυπώνονται σε ένα "στιγμιότυπο" αυτής [2]

- Επιφάνεια αποβλίττου: είναι η επιφάνεια εκείνη του κοπτικού εργαλείου (σφήνας) πάνω στην οποία ολισθαίνει το απόβλιττο κατά την κίνησή του.
- Ελεύθερη επιφάνεια: Είναι η επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου (σφήνας) που βρίσκεται απέναντι από την κατεργασμένη επιφάνεια.
- Κόψη ή κοπτική ακμή: Είναι η ακμή του κοπτικού εργαλείου η οποία προκύπτει ως τομή των δύο παραπάνω επιφανειών. Είναι αυτή που πραγματοποιεί την κοπή.
- Γωνία αποβλίττου, γ : Σχηματίζεται από την επιφάνεια αποβλίττου και το κάθετο επίπεδο στην κατεργασμένη επιφάνεια που διέρχεται από την κοπτική ακμή. Μπορεί να είναι θετική, αρνητική ή μηδενική.
- Γωνία ελευθερίας, α : Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια της σφήνας και από την κατεργασμένη επιφάνεια.
- Γωνία σφήνας, β : Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια και την επιφάνεια αποβλίττου. Είναι η γωνία του κοπτικού εργαλείου.
- Θεωρητικό πάχος αποβλίττου, t_1 : Είναι το πάχος του αφαιρούμενου υλικού ή αλλιώς το βάθος κοπής.
- Πραγματικό πάχος αποβλίττου, t_2 : Είναι η μέση τιμή του πάχους αποβλίττου μετά την κοπή.

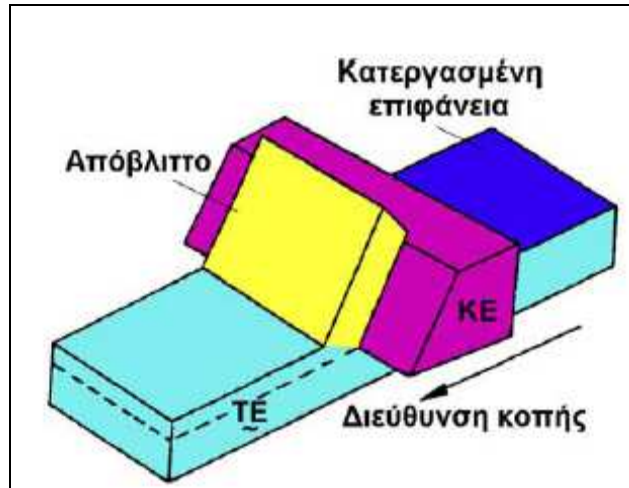
Άλλα σημαντικά γεωμετρικά στοιχεία που εμφανίζονται στην κοπή είναι το πλάτος του αποβλίττου b , και οι διατομές του αποβλίττου (θεωρητική, A_1 – πραγματική, A_2) οι οποίες προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας το πλάτος του αποβλίττου με το θεωρητικό και το πραγματικό πάχος αντίστοιχα.

Οι συνθήκες της κοπής περιλαμβάνουν τρία βασικά μεγέθη στα οποία αναφερθήκαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο (βάθος κοπής, ταχύτητα κοπής, πρόωση) καθώς επίσης και κάποια συμπληρωματικά που προκύπτουν από αυτά και τα γεωμετρικά μεγέθη.

- Ταχύτητα κοπής: η ταχύτητα κοπής v είναι η στιγμιαία ταχύτητα της κύριας κίνησης του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο (σε συγκεκριμένο σημείο της κοπτικής ακμής). Η ταχύτητα κοπής μετράται σε m/min.
- Πρόωση: η πρόωση f παρέχεται είτε στο εργαλείο είτε στο τεμάχιο (ανάλογα την περίπτωση, σχετική κίνηση του ενός ως προς το άλλο) και σε συνδυασμό με την κύρια κίνηση δημιουργούν την τελική μορφή του τεμαχίου. Η πρόωση γίνεται είτε βηματικά είτε συνεχώς. Μετράται συνήθως σε mm/rev κατά τη κατεύθυνση της κίνησης πρόωσης.
- Βάθος κοπής: Είναι το βάθος a στο οποίο εισέρχεται το κοπτικό εργαλείο μέσα στο υλικό του τεμαχίου. Μετράται σε mm.
- Ταχύτητα πρόωσης: Είναι η στιγμιαία (σχετική) ταχύτητα u_v της ακμής του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο κατά τη συνεχή κίνηση πρόωσης. Μετράται σε m/min, χρησιμοποιείται εναλλακτικά της πρόωσης και προκύπτει από το γινόμενο της πρόωσης επί τις στροφές περιστροφής της ατράκτου ή του αριθμού των ενεργών διαδρομών στη μονάδα του χρόνου.
- Ρυθμός αποβολής υλικού, Θ : είναι ο όγκος του αποβαλλόμενου υλικού από το τεμάχιο στη μονάδα του χρόνου. Μετράται σε cm^3/min και είναι $\Theta = A_1 \cdot v$.
- Χρόνος κοπής, t_c : Είναι το άθροισμα του καθαρού χρόνου κοπής και των χρόνων προσέγγισης και απομάκρυνσης του κοπτικού εργαλείου προς και από το κατεργαζόμενο τεμάχιο.

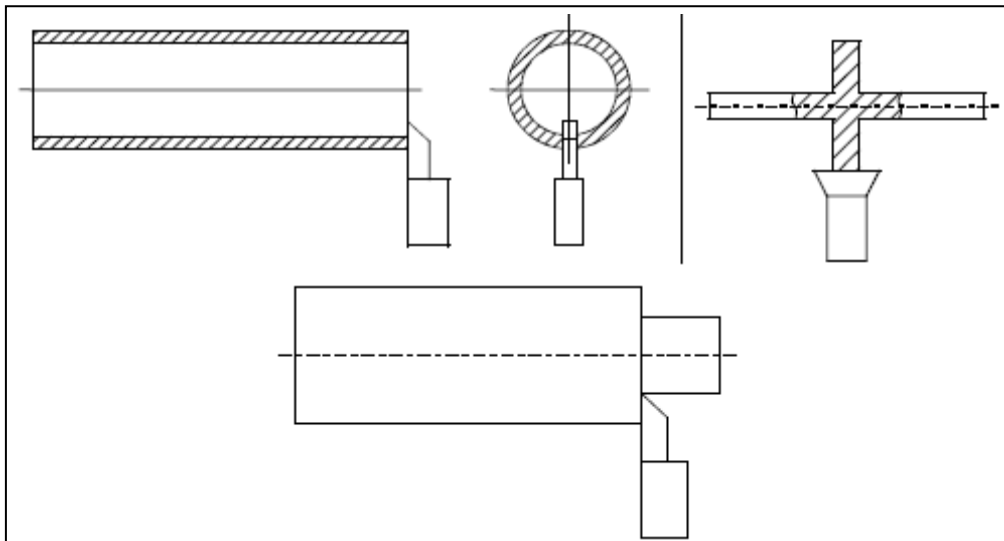
2.2 Η ορθογωνική κοπή

Υποθέτοντας ότι η κοπή είναι συνεχές φαινόμενο μπορούμε να αναπτύξουμε ένα συνεχές μοντέλο το οποίο θα περιγράφει επαρκώς το φαινόμενο της κοπής. Το πιο σύνηθες μοντέλο που περιγράφει αρκετά ικανοποιητικά το όλο φαινόμενο είναι αυτό της ορθογωνικής, κοπής στο οποίο υποθέτουμε ότι η κοπτική ακμή του εργαλείου είναι κάθετη στην διεύθυνση κοπής (κίνηση του εργαλείου). Η παραδοχή αυτή μας επιτρέπει να θεωρήσουμε πως οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στην κοπή δρουν μόνο σε ένα επίπεδο κάνοντας έτσι το έργο της μελέτης του φαινομένου ευκολότερο.



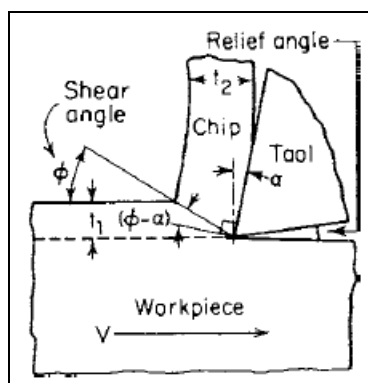
Σχήμα 2-2: Το μοντέλο της ορθογωνικής κοπής

Για την υλοποίηση του μοντέλου της ορθογωνικής κοπής μπορούμε να θεωρήσουμε την τόννευση ενός κυλίνδρου λεπτού πάχους κατά την οποία το κοπτικό εργαλείο (κοπτική ακμή) κόβει κάθετα στον άξονα του κυλίνδρου (δες σχήμα 2-3).



Σχήμα 2-3: Οι τρεις πειραματικοί τρόποι για την υλοποίηση των συνθηκών του μοντέλου ορθογωνικής κοπής. Πάνω αριστερά η τόννευση λεπτότοιχου σωλήνα από τη μία άκρη, πάνω δεξιά η τόννευση λεπτού στρογγυλού δίσκου πάνω σε ράβδο και κάτω η συμβατική τόννευση (τόννευση ράβδου, τρισδιάστατη κοπή) [6], [Kerk, 1999].

Το μοντέλο αυτό δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα, διαφέρει όμως, ως προς το γεγονός ότι δε λαμβάνει υπόψη την κίνηση που κάνει το εργαλείο παράλληλα προς τον άξονα του τεμαχίου, κίνηση η οποία τελικά τοποθετεί λοξά την κοπτική ακμή ως προς τη διεύθυνση κοπής (μοντέλο της λοξής κοπής). Εφόσον έχουμε λοιπόν το μοντέλο για τη μελέτη, ακολουθούν στη συνέχεια η ανάλυση των δυνάμεων και ο σχηματισμός του αποβλίττου. Προηγείται όμως η φυσική γεωμετρία της κοπής η οποία εξετάστηκε παραπάνω, συμπληρωματικά όμως παρατηρώντας το επόμενο σχήμα μπορούμε να προσθέσουμε μερικά στοιχεία ακόμη.



Σχήμα 2-4: Τα βασικά γεωμετρικά στοιχεία της κοπής [3]

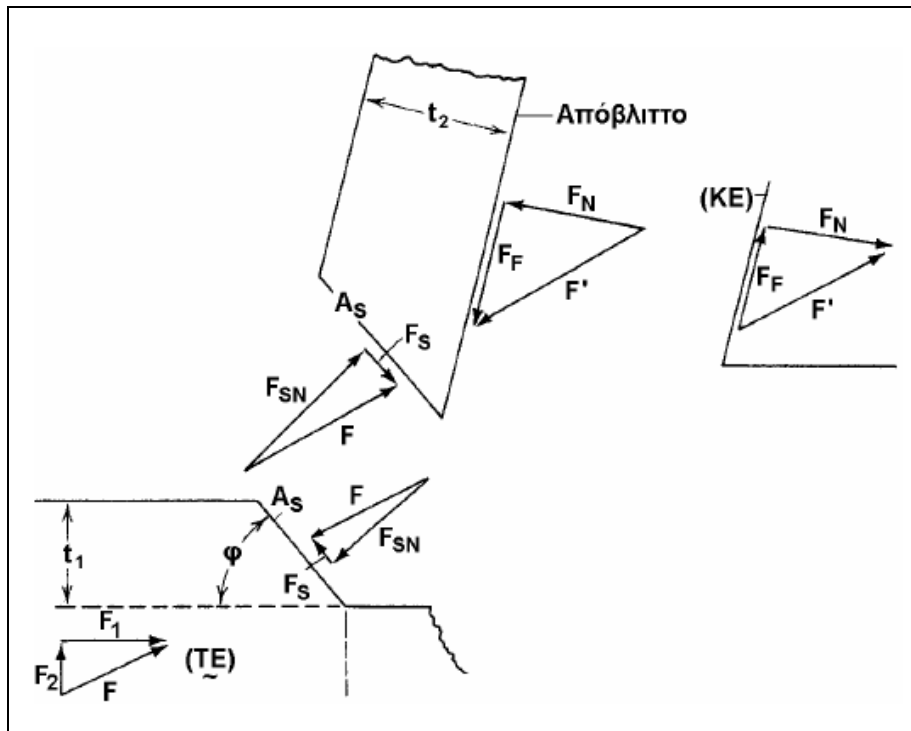
Το υλικό του τεμαχίου που βρίσκεται εμπρός από το κοπτικό εργαλείο υφίσταται διάτμηση κατά μήκος του επιπέδου διάτμησης το οποίο σχηματίζει γωνία ϕ με την επιφάνεια του τεμαχίου, η οποία καλείται γωνία διάτμησης. Η γωνία αυτή μαζί με την γωνία του αποβλίττου καθορίζουν το πραγματικό πάχος του αποβλίττου το οποίο γενικά είναι μεγαλύτερο από το θεωρητικό. Εξαιτίας των μεγάλων διατμητικών παραμορφώσεων που δέχεται το απόβλιττο γίνεται σκληρό και ψαθυρό ενώ «κατσαρώνει» απομακρυνόμενο από το εργαλείο. Πιθανά αίτια του φαινομένου αυτού είναι τα μεγάλα ανομοιόμορφα τασικά πεδία που αναπτύσσονται στο επίπεδο διάτμησης, η σκλήρυνση λόγω των παραμορφώσεων και διάφορα θερμικά φαινόμενα. Περισσότερα για τον σχηματισμό του αποβλίττου θα δούμε στη συνέχεια.

2.2.1 Οι δυνάμεις στην ορθογωνική κοπή

Για την μελέτη των δυνάμεων στην ορθογωνική κοπή θεωρούμε το απόβλιττο ως ένα απόλυτα στερεό σώμα, ελεύθερο και οριακά ευρισκόμενο σε ισορροπία εξαιτίας της δράσης των δυνάμεων που μεταφέρονται από το εργαλείο προς το απόβλιττο και αυτών που μεταφέρονται στο απόβλιττο μέσω του επιπέδου διάτμησης. Το απόβλιττο αλληλεπιδρά ταυτόχρονα με το τεμάχιο (TE) και το κοπτικό εργαλείο (KE). Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στο σύστημα εργαλείου – αποβλίττου – τεμαχίου είναι οι εξής (δες και σχήμα 2-4):

- Η αντίσταση του υλικού του τεμαχίου σε διάτμηση $[F_S]$, η οποία αναπτύσσεται κατά μήκος του επιπέδου διάτμησης.
- Η κάθετη δύναμη στο επίπεδο διάτμησης $[F_{SN}]$.
- Η δύναμη τριβής $[F_F]$ που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια τεμαχίου (αποβλίττου) – εργαλείου και αντιτίθεται στην κίνηση απομάκρυνσης του αποβλίττου.

- Η κάθετη δύναμη στη διεπιφάνεια τεμαχίου (αποβλίττου) – εργαλείου $[F_N]$ η οποία και προκαλεί την εμφάνιση δύναμης τριβής μεταξύ αποβλίττου και εργαλείου.

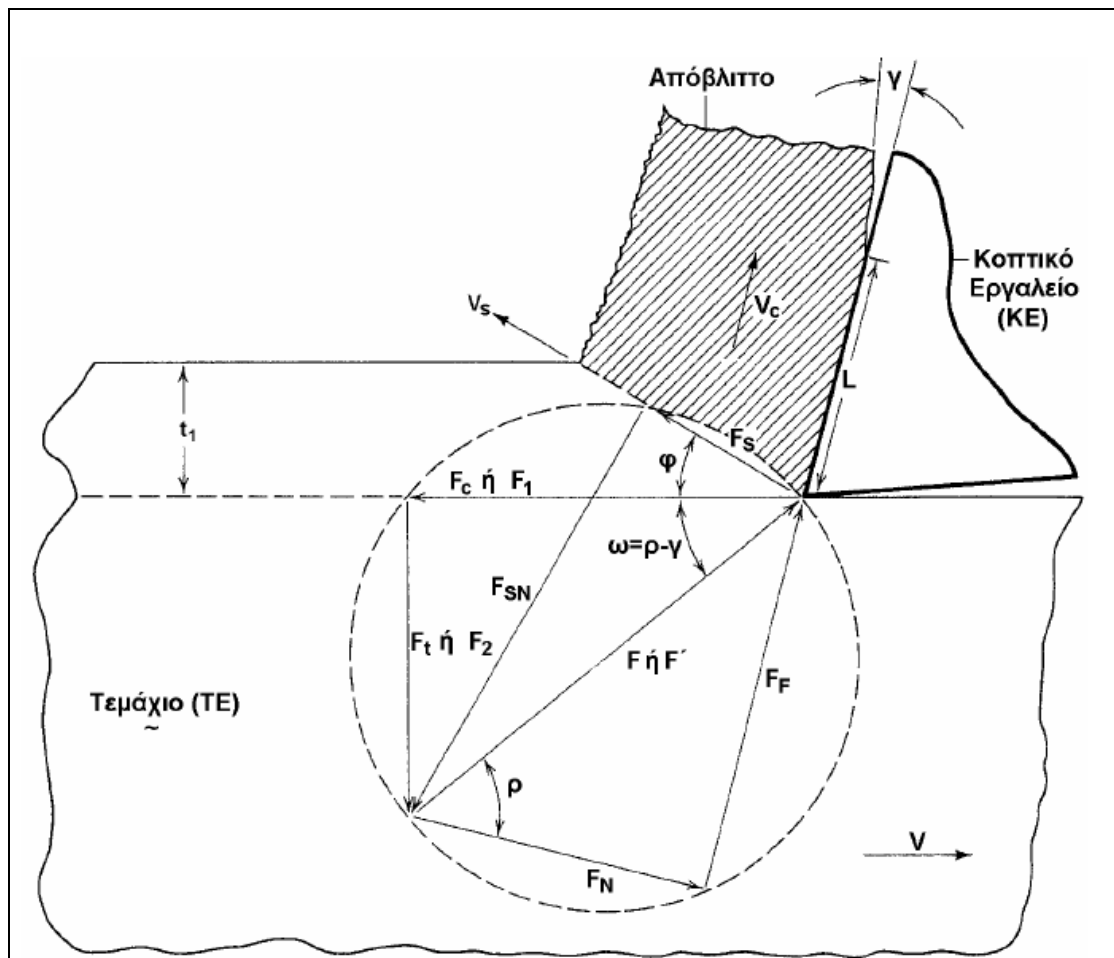


Σχήμα 2-5: Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις στο σύστημα τεμάχιο – απόβλιττο – κοπτικό εργαλείο κατά την κοπή [2].

Τα δύο «ζεύγη» δυνάμεων που έχουμε τελικά (κάθε «ζεύγος» ορίζεται ανά επίπεδο που αυτό ασκείται, ένα «ζεύγος» στο επίπεδο διάτμησης $[F_S]$ - $[F_{SN}]$ και ένα «ζεύγος» στη διεπιφάνεια επαφής αποβλίττου – εργαλείου $[F_F]$ - $[F_N]$) έχουν το καθένα από μία συνισταμένη (F για το «ζεύγος» του επιπέδου διάτμησης και F' για το «ζεύγος» της διεπιφάνειας επαφής αποβλίττου – εργαλείου). Λαμβάνοντας υπόψη τελικά το γεγονός ότι το απόβλιττο βρίσκεται οριακά σε ισορροπία θα ισχύει τελικά:

$$F = F'$$

Η F' ονομάζεται *δύναμη κοπής* και αν μεταφερθεί τελικά στην κοπτική ακμή (άκρη του κοπτικού εργαλείου) αναλύεται (πέρα από τα δύο ζεύγη που είδαμε παραπάνω) στις εξής δύο δυνάμεις, την F_1 [κύρια συνιστώσα δύναμης κοπής] που είναι παράλληλη προς την αρχική επιφάνεια του τεμαχίου (διεύθυνση κοπής) και την F_2 [δευτερεύουσα συνιστώσα δύναμης κοπής ή δύναμη άπωσης] που είναι κάθετη προς την διεύθυνση κοπής. Όλες οι παραπάνω δυνάμεις συγκεντρώνονται τελικά στο ακόλουθο σχήμα που μας δίνει την εποπτεία των δυνάμεων για το μοντέλο της ορθογωνικής κοπής.



Σχήμα 2-6: Το σύστημα των δυνάμεων που αναπτύσσονται στο μοντέλο της ορθογωνικής κοπής [2].

Όπως φαίνεται από το σχήμα λοιπόν, όλες οι δυνάμεις της κοπής εγγράφονται σε κύκλο ο οποίος ονομάζεται κύκλος του Merchant και έχει διάμετρο ίση με την δύναμη κοπής. Από το παραπάνω σχήμα προκύπτουν εύκολα οι συνιστώσες των ζευγών συναρτήσεως των συνιστωσών της δύναμης κοπής και των γωνιών που σχηματίζονται (δες και [2] παρ. 4).

2.3 Το απόβλιττο και ο σχηματισμός του

Ο σχηματισμός του αποβλίττου είναι μία πολύ σημαντική «παράπλευρη» διαδικασία των κατεργασιών κοπής καθώς μας δίνει σημαντικά στοιχεία για το υλικό που κατεργαζόμαστε και τις συνθήκες των κοπών. Επίσης παίζει σημαντικό ρόλο για την διαμόρφωση της τελικής ποιότητας επιφάνειας και σε ό,τι μας ενδιαφέρει για την παρούσα μελέτη, σχετίζεται άμεσα με την εμφάνιση του burr καθώς χονδρικά μπορούμε να πούμε πως το burr είναι ένα «κομμάτι» αποβλίττου που παραμένει επάνω στο τεμάχιο. Αναλυτικότερα όμως για αυτό θα μιλήσουμε σε επόμενο κεφάλαιο. Η σχέση ανάμεσα στον σχηματισμό του αποβλίττου και τα λοιπά χαρακτηριστικά της κοπής είναι αμφίδρομη. Από τον μηχανισμό σχηματισμού του αποβλίττου εξαρτώνται βασικά μεγέθη της κοπής, όπως:

- Οι δυνάμεις κοπής
- Η ισχύς κοπής
- Η ποιότητα της τελικής επιφάνειας
- Η φθορά και η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου

- Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στο σύστημα τεμάχιο – κοπτικό εργαλείο – απόβλιττο – εργαλειομηχανή, ενώ με τη σειρά του ο μηχανισμός δημιουργίας του αποβλίττου εξαρτάται από τα εξής χαρακτηριστικά της κοπής:

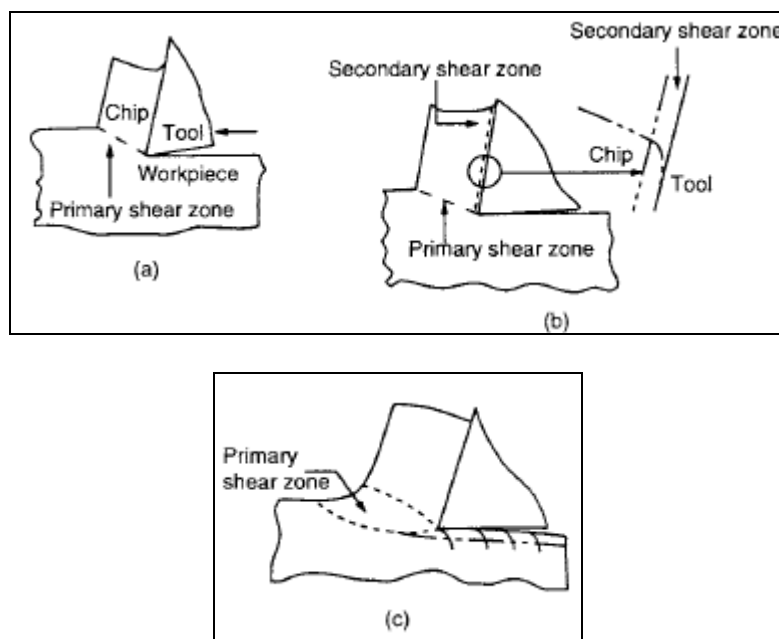
- Το υλικό του τεμαχίου
- Το υλικό και τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου
- Τις συνθήκες κοπής
- Τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος εργαλειομηχανή – τεμάχιο – κοπτικό εργαλείο.

2.3.1 Τα είδη του αποβλίττου

Ανεξάρτητα από το είδος της κατεργασίας που εφαρμόζεται, οι βασικοί τύποι αποβλίττων (ή και συνδυασμοί αυτών) που συναντώνται στην πράξη είναι οι ακόλουθοι:

Συνεχές απόβλιττο

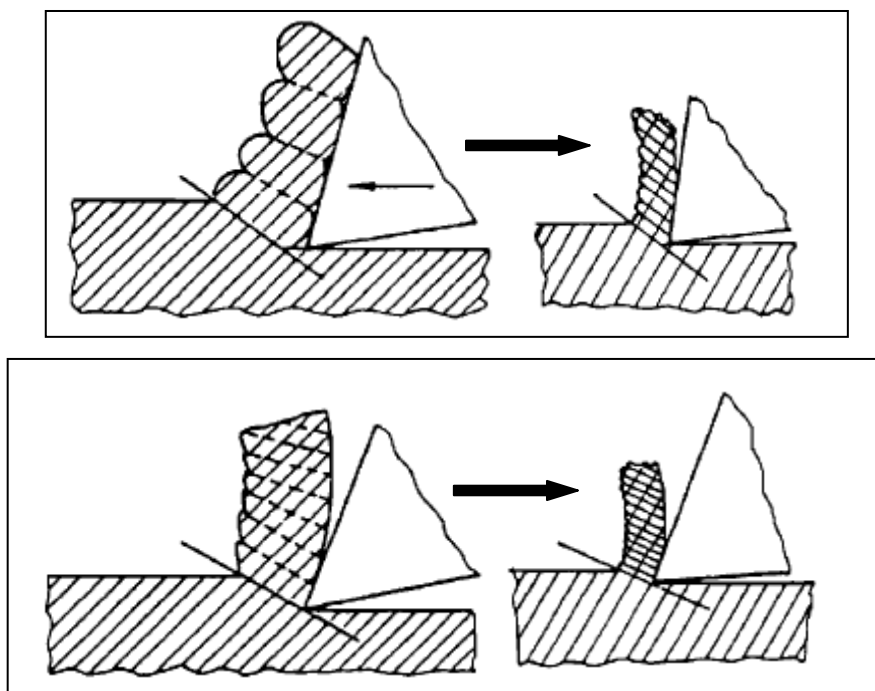
Το συνεχές απόβλιττο (αγγλ. *continuous chip*) σχηματίζεται από την ισχυρή πλαστική παραμόρφωση (από διάτμηση) του υλικού του τεμαχίου που βρίσκεται εμπρός από το κοπτικό εργαλείο, ακολουθούμενη από μία «ήπια ροή» (απομάκρυνση με τη μορφή συνεχούς ταινίας) του αποβλίττου κατά μήκος του προσώπου του εργαλείου. Συναντάται κατά την κοπή όλκιμων υλικών (π.χ. μαλακός χάλυβας, χαλκός, σφυρήλατος σίδηρος, μολυβδος κλπ) σε υψηλές ταχύτητες [2 , 3].



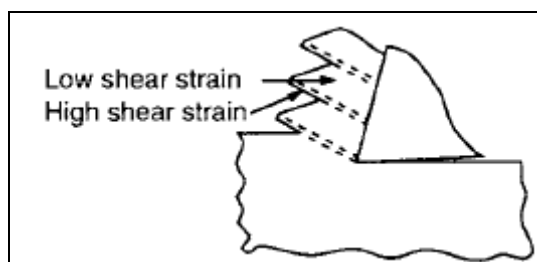
Σχήμα 2-7: Ο σχηματισμός του συνεχούς αποβλίττου. (a) Συνεχές απόβλιττο με στενή, ευθεία κύρια ζώνη διάτμησης (πρακτικά εκφυλισμός σε επίπεδο διάτμησης) (b) Λόγω της συνεχούς «ροής» του αποβλίττου στο πρόσωπο του εργαλείου παρατηρείται και δευτερεύουσα ζώνη διάτμησης στην διεπιφάνεια επαφής αποβλίττου – κοπτικού εργαλείου (c) Σχηματισμός συνεχούς αποβλίττου με πλατιά κύρια ζώνη διάτμησης [3].

Συνεχές πριονωτό απόβλιττο

Το συνεχές πριονωτό απόβλιττο (αγγλ. *inhomogeneous – serrated – chip*) αποτελείται από περιοχές μικρής και μεγάλης παραμόρφωσης. Τέτοιου είδους απόβλιττο παρατηρείται σε μέταλλα με χαμηλή απαγωγή θερμότητας ή σε μέταλλα όπου το όριο διαρροής τους μειώνεται απότομα συναρτήσει της θερμοκρασίας. Χαρακτηριστικά υλικά που δίνουν απόβλιττο τέτοιας μορφής είναι τα κράμματα τιτανίου.



Σχήματα 2-8 & 2-9: Ο σχηματισμός του συνεχούς πριονωτού αποβλίττου [1].

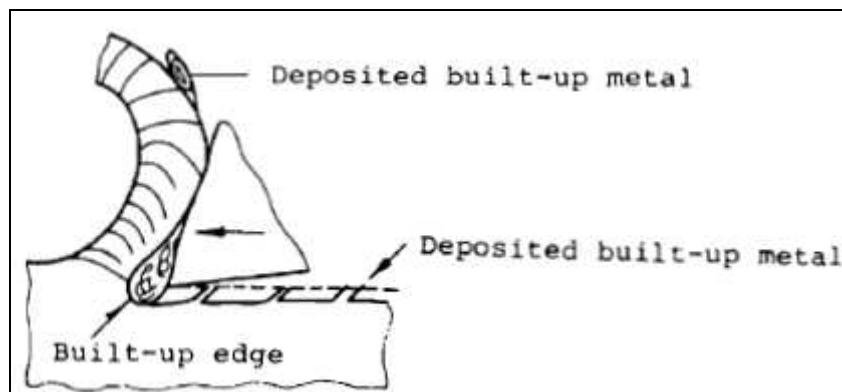


Σχήμα 2-10: Ο σχηματισμός του συνεχούς πριονωτού αποβλίττου. Είναι ορατές οι περιοχές μεγάλης διαμητικής παραμόρφωσης (*high shear strain*) στην οποία το απόβλιττο ξεκίνησε να αποχωρίζεται από το υπόλοιπο κομμάτι δημιουργώντας έτσι τα «δόντια του πριονιού» και οι περιοχές μικρής διαμητικής παραμόρφωσης (*low shear strain*) όπου τη παραμόρφωση δεν ξέπερασε το όριο διαρροής του υλικού και το απόβλιττο παρέμεινε τελικά «ενωμένο» παίρνοντας έτσι την τελική μορφή πριονιού [3].

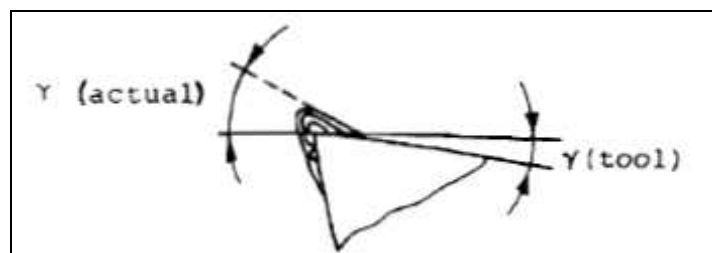
Συνεχές απόβλιττο με ψευδοακμή

Το συνεχές απόβλιττο με ψευδοακμή (αγγλ. *built-up edge chip*) αποτελείται από μία μικρή μάζα υλικού προερχόμενη από το τεμάχιο η οποία προσκολλάται επάνω στην κοπτική ακμή καθώς το απόβλιττο «ρέει» εμπρός από αυτήν. Η ψευδοακμή έχει σχήμα ασύμμετρης σφήνας που έχει προκύψει λόγω ισχυρής καταπόνησης κατά επάλληλα λεπτά στρώματα προσφυόμενα στην κόψη του

κοπτικού εργαλείου και μεταξύ τους με μηχανισμούς συγκόλλησης πίεσης (συνδυασμός ισχυρών θλιπτικών φορτίων και συνθηκών τριβής σε υψηλές θερμοκρασίες). Το υλικό της ψευδοακμής είναι εξόχως σκληρό έως ότου διασπασθεί φτάνοντας σε ένα κρίσιμο μέγεθος (ψαθυρή συμπεριφορά). Τα κομμάτια που προέρχονται από τη διάσπαση προσκολλώνται στο απόβλιττο από την πλευρά του κοπτικού εργαλείου ή στην κατεργαζόμενη επιφάνεια χειροτερεύοντας έτσι την ποιότητά της. Η παρουσία της ψευδοακμής μετατοπίζει την κοπτική ακμή του εργαλείου λόγω της προσκόλλησης του σε αυτό κάνοντάς το λιγότερο αποδοτικό διαστατικά. Από την άλλη πλευρά σχηματίζει έναν προστατευτικό «μανδύα» για την κοπτική ακμή επιβραδύνοντας τη φθορά της και άρα αυξάνοντας την διάρκεια ζωής του εργαλείου. Αυτή η μορφή αποβλίττου σχηματίζεται συνήθως σε χαμηλές ταχύτητες κοπής και η αποφυγή του (απομάκρυνση της ψευδοκοπής) επιτυγχάνεται με στιγμιαία αύξηση της ταχύτητας κοπής.



Σχήμα 2-11: Συνεχές απόβλιττο με ψευδοακμή (built-up edge). Είναι ορατά τα κομμάτια της ψευδοακμής τα οποία μετά τη θραύση της είτε προσκολλήθηκαν στο απόβλιττο από την πλευρά του κοπτικού εργαλείου είτε προσκολλήθηκαν στην κατεργαζόμενη επιφάνεια (deposited built-up metal) [1].



Σχήμα 2-12: Η αλλαγή που επιφέρει η ψευδοακμή στην γωνία σφήνας του εργαλείου. Εδώ φαίνεται η αρχική γωνία ($\gamma - tool$) και η τελική - πραγματική γωνία λόγω της εμφάνισης ψευδοακμής ($\gamma - actual$) [1].

Ασυνεχές απόβλιττο

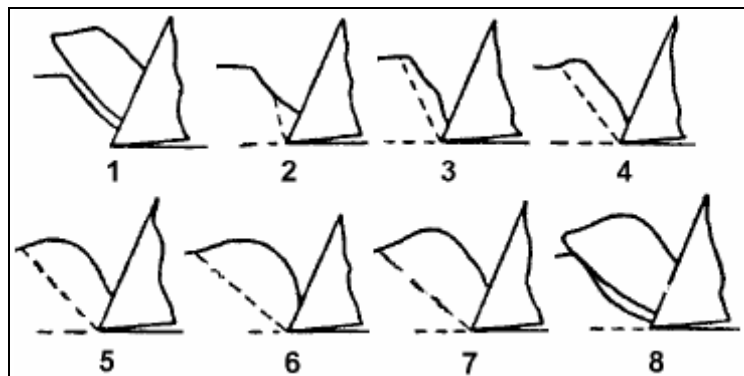
Το ασυνεχές απόβλιττο (αγγλ. *discontinuous chip*) αποτελείται από τμήματα που προήλθαν από την θραύση του αποβλίττου εμπρός από το κοπτικό εργαλείο. Στην περιοχή αυτή το υλικό του τεμαχίου παραμορφώνεται ισχυρά και τελικά θραύεται στην πρωτεύουσα ζώνη παραμόρφωσης (ζώνη διάτμησης) σε σχεδόν ομοιόμορφα κομμάτια τα οποία είτε έχουν πλήρως διαχωριστεί μεταξύ τους είτε παραμένουν ελαφρώς ενωμένα. Οι βασικές αιτίες εμφάνισης αυτής της μορφής αποβλίττου η οποία συναντάται κυρίως στην κοπή ψαθυρών υλικών (χυτοσίδηρος, χυτός ορείχαλκος κλπ) είναι οι εξής:

- Πολύ χαμηλές ταχύτητες κοπής.
- Η μικρή ή/και αρνητική γωνία αποβλίττου σε συνδυασμό με αυξημένο βάθος κοπής και ταχύτητα πρόωσης.
- Η μη χρησιμοποίηση κατάλληλου υγρού κοπής.
- Πιθανά εγκλείσματα στο κατεργαζόμενο υλικό.

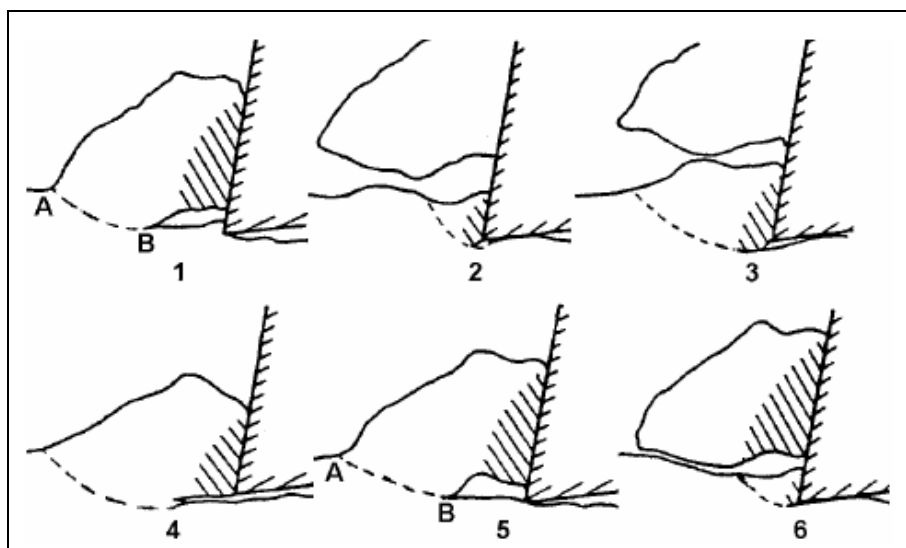
Οι βασικές επιπτώσεις της εμφάνισης του ασυνεχούς αποβλίττου είναι οι εξής:

- Η επιδείνωση της τραχύτητας της κατεργασμένης επιφάνειας (επιφανειακές ανωμαλίες και μικρορωγμές) με δυσμενή επίδραση στην αντοχή σε κόπωση του υλικού του τεμαχίου.
- Δημιουργία εξαναγκασμένης ταλάντωσης του συστήματος εργαλειομηχανή – τεμάχιο – εργαλείο λόγω της περιοδικής θραύσης του αποβλίττου.
- Μικρό μήκος επαφής εργαλείου – αποβλίττου με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικρότερων δυνάμεων κοπής και τις περιορισμένες επιλογές στην γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου.

Δύο από τους βασικότερους μηχανισμούς ανάπτυξης του ασυνεχούς αποβλίττου φαίνονται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 2-13: Τα στάδια ανάπτυξης του ασυνεχούς αποβλίττου σύμφωνα με το μοντέλο Merchant [2].



Σχήμα 2-14: Τα βασικά στάδια ανάπτυξης ασυνεχούς αποβλίττου σύμφωνα με το μοντέλο Bannerjee & Palmer [2].

Βιβλιογραφία 2^{ου} κεφαλαίου

Έντυπη

[1] Jack M. Walker “Handbook of Manufacturing Engineering”, εκδ. Marcel Dekker, Inc.

[2] Δ.Ε. Μανωλάκος, “Κατεργασίες II – Πανεπιστημιακές Σημειώσεις” – από την προσωπική ιστοσελίδα του καθηγητή ΕΜΠ κ. Δ. Μανωλάκου.

[3] “Marks’ Standard Handbook for Mechanical Engineers, 11th edition”, εκδ. McGraw – Hill.

[4] T. Childs, K. Maekawa, T. Obikawa, Y. Yamane “Metal Machining – Theory and Applications”, εκδ. Arnold.

[5] Γ. Χ. Χρυσολούρης, Δ. Μούρτζης, Σ. Καραγιάννης, Κ. Τσίρμπας “Ορθογωνική Κοπή – Σημειώσεις», Πανεπιστήμιο Πατρών – από την ιστοσελίδα του Εργαστηρίου Συστημάτων Παραγωγής & Αυτοματισμού του τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

[6] I. A. Al – Zkeri, “Finite Element Modeling of Hard Turning”, διατριβή, The Ohio State University, 2007.

[7] Γ. Χ. Χρυσολούρης, “Ορθογωνική Κοπή & Γεωμετρία Κοπτικών Εργαλείων», Πανεπιστήμιο Πατρών – από την ιστοσελίδα του Εργαστηρίου Συστημάτων Παραγωγής & Αυτοματισμού του τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, φυλλάδιο εργασίας στα πλαίσια του μαθήματος «Μηχανουργική Τεχνολογία Ι».

Διαδικτυακή

http://engineeronadisk.com/notes_manufact/cuttinga7.html

Κεφάλαιο 3^ο: Ο σχηματισμός του burr

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε οτιδήποτε σχετίζεται με την εμφάνιση του burr στις κατεργασίες κοπής με σκοπό να κατανοήσουμε τους μηχανισμούς ανάπτυξης του στις βασικές κατεργασίες που παρουσιάσαμε έως τώρα καθώς επίσης και την βαρύνουσα σημασία που αυτό κατέχει στο πεδίο της παραγωγής την σύγχρονη εποχή.

3.1 Γιατί μελετάμε το burr

Οι απαιτήσεις που τίθενται από τους σχεδιαστές για την απόδοση και την λειτουργικότητα των εξαρτημάτων αυξάνονται ραγδαία στη σύγχρονη εποχή. Σημαντική παράμετρος της συνεισφοράς των κατεργασιών στην επίτευξη των απαιτήσεων αυτών είναι οι συνθήκες που διαμορφώνονται στα (λειτουργικά) άκρα των εξαρτημάτων – τεμαχίων. Ενώ οι γεωμετρίες που υλοποιούνται από τους σχεδιαστές στα συστήματα CAD ή στα τεχνικά σχέδια είναι ξεκάθαρες, η «πραγματική» γεωμετρία των ακμών του τεμαχίου καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την εμφάνιση του burr στην τελική κατεργασία. Σε πληθώρα περιπτώσεων απαιτείται σημαντική δαπάνη χρόνου και εφαρμογή μεθόδων deburring για την εξασφάλιση της πλήρους λειτουργικότητας των τελικών εξαρτημάτων [1]. Επιπλέον, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί μεγάλη έμφαση στη βελτίωση της ποιότητας των κατεργασμένων τεμαχίων σε συνδυασμό με την μείωση του κόστους ανά τεμάχιο. Το γεγονός αυτό έχει στρέψει το ενδιαφέρον σε νέες κατευθύνσεις στις κοπές οι οποίες κινούνται σε τρεις άξονες: νέες μέθοδοι – νέα κοπτικά εργαλεία – νέα υλικά. Όλα αυτά συμπυκνώνονται σε έναν καινούργιο όρο: τις Κατεργασίες Υψηλής Απόδοσης (αγγλ. *High Performance Cuttingting – HPC*). Θεμελιώδης σε αυτή την συνεχή προσπάθεια βελτίωσης είναι η κατανόηση των μηχανισμών «φινιρίσματος ακμών» (αγγλ. *edge finishing*) και ειδικότερα του μηχανισμού ανάπτυξης burr [3].

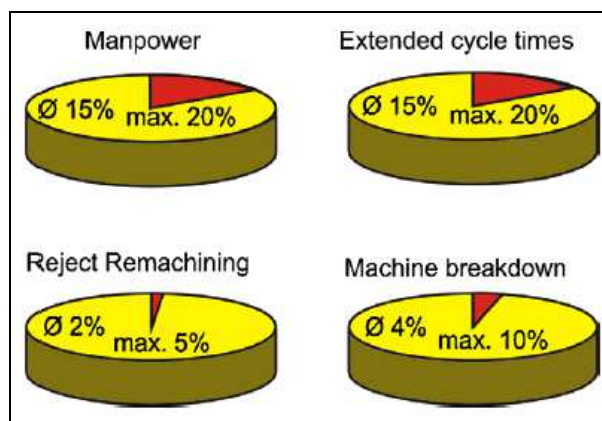
Οι περισσότερες κατεργασίες κοπής αφήνουν burr. Γενικά burr μπορούμε να ορίσουμε εκείνο το πλαστικά παραμορφωμένο κομμάτι που παραμένει προσκολλημένο στο τεμάχιο μετά το πέρας της κατεργασίας. Η εμφάνιση του burr στο τελικό τεμάχιο είναι αιτία σημαντικής μείωσης της παραγωγικότητας. Καθώς προκαλεί τα εξής προβλήματα [<http://www.scribd.com/doc/8413199/Burr-formation-in-milling>]:

- Δυσχεραίνει τη σωστή συναρμολόγηση μεταξύ τεμαχίων.
- Μειώνει την ακρίβεια των διαστάσεων και την ποιότητα της επιφάνειας.
- Αυξάνει το κόστος και τον χρόνο της κατεργασίας καθώς απαιτείται η απομάκρυνση του που είναι μία διαδικασία που επιβαρύνει χωρίς να προσθέτει αξία στο τελικό τεμάχιο.
- Μειώνει την αποτελεσματικότητα της κοπής και τον χρόνο ζωής των κοπτικών εργαλείων. Ειδικά για τα εργαλεία, πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει πως η εμφάνιση burr είναι παράγοντας – κλειδί για την φθορά του κοπτικού εργαλείου και οδηγεί στην αντικατάσταση εργαλείων τα οποία υπό κανονικές συνθήκες θα ήταν ακόμα πλήρως λειτουργικά [1].
- Επιδρά αρνητικά στο αισθητικό αποτέλεσμα του τεμαχίου.
- Ευνοεί την εμφάνιση αυξημένων τριβολογικών φαινομένων στα συγκεκριμένα σημεία.

Ακόμη όμως και εάν η εμφάνιση του burr δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις σε ό,τι αφορά την λειτουργικότητα του τεμαχίου και τις παραμέτρους της κατεργασίας αποτελεί και πάλι ένα σημαντικό πρόβλημα για τους εξής λόγους:

- Θέτει σε κίνδυνο την ασφάλεια εργατών και καταναλωτών. Αυτό διότι το burr είναι ιδιαίτερα αιχμηρό και κατά συνέπεια μπορεί να οδηγήσει σε μικροτραυματισμούς δακτύλων και δέρματος.
- Μπορεί να επιδράσει στην εμφάνιση βραχυκυκλώματος.
- Προσκολλάται σε διάφορα σημεία του τεμαχίου και μπορεί όταν το τελικό προϊόν τεθεί σε λειτουργία, να αποκολληθεί και να δημιουργήσει περαιτέρω προβλήματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μίας τέτοιας περίπτωσης είναι το burr που δημιουργείται κατά την διάτρηση στις κεφαλές των κυλίνδρων μίας μηχανής εσωτερικής καύσης. Εκεί το burr βρίσκεται στα κανάλια του κυκλώματος ψύξης και μπορεί κατά τη λειτουργία της μηχανής να παρασυρθεί από το ψυκτικό υγρό και να οδηγηθεί οπουδήποτε στο εσωτερικό της μηχανής προκαλώντας βλάβη[1].

Είναι προφανές λοιπόν πως η εμφάνιση του burr στις κοπές είναι κάτι το ανεπιθύμητο. Μελέτη που διεξήχθη εντός της γερμανικής αυτοκινητοβιομηχανίας και βιομηχανίας κοπτικών εργαλείων έδειξε τα κόστη που συνδέονται με την μείωση του burr, την απομάκρυνσή του και τον γενικότερο «καθαρισμό» των τεμαχίων. Για να εκτιμηθεί το οικονομικό αντίκτυπο της εμφάνισης burr ζητήθηκε από τις βιομηχανίες να δώσουν τα «μερίδια» των παραμέτρων της παραγωγικής διαδικασίας που σχετίζονται με το burr. Το επιπλέον κόστος οφείλεται σε ένα 15% αύξησης της δαπάνης εργατικού δυναμικού (*man power*) και κύκλων κατεργασίας (*cycle times*). Επιπλέον αναφέρθηκαν ένα 2% «μερίδιο» του burr στην τελική απόρριψη τεμαχίων και ένα 4% στις βλάβες μηχανών οι οποίες οφείλονταν σε αυτό. «Κανονικοποιώντας» την επιμέρους συνεισφορά του burr σε κάθε παράμετρο της παραγωγικής διαδικασίας με τον κατά περίπτωση συντελεστή βαρύτητας, αποδόθηκε τελικά στο burr ένα «μερίδιο» 9% στο συνολικό κόστος παραγωγής. Μία σχηματική αναπαράσταση του αντίκτυπου του burr, των αποβλήτων και των επιπλέον κατεργασιών που συνεπάγονται αυτών στο συνολικό κόστος δίνεται στο ακόλουθο σχήμα από τον Aurich [1]. Το συνολικό κόστος υπολογίζεται σε πεντακόσια εκατομμύρια ευρώ ανά έτος μόνο για την Γερμανία.



Σχήμα 3-1: Η κατανομή της κατασκευαστικής διαδικασίας (*manufacturing effort*) λόγω της εμφάνισης του burr. Αναφέρεται η επίδραση στους ανθρώπινους πόρους (*manpower* – αύξηση κόστους κατά μ.ό. 15% με μέγιστο 20%), στους κύκλους κατεργασίας (*cycle times* - αύξηση κόστους κατά μ.ό. 15% με μέγιστο 20%), στην απόρριψη τεμαχίων (*reject remachining* - αύξηση

κόστους κατά μ.ό. 2% με μέγιστο 5%) και στις βλάβες μηχανών (*machine breakdown - αύξηση κόστους κατά μ.ό. 4% με μέγιστο 10%*) [1].

Γίνεται αντιληπτό πως είναι προτιμότερο να κατευθύνουμε τις προσπάθειες μας στην εξ' αρχής εξάλειψη του burr τροποποιώντας κατάλληλα τις συνθήκες κατεργασίας παρά να επιλέξουμε την εκ των υστέρων αντιμετώπιση του προβλήματος. Για να γίνει όμως αυτό πρέπει να δούμε τι ακριβώς είναι το burr, να εξετάσουμε τις διάφορες κατηγορίες του, να μελετήσουμε τους μηχανισμούς ανάπτυξης κατά τις βασικές κατεργασίες κοπής και τελικά να δούμε την εξάρτησή του από τις παραμέτρους των κατεργασιών.

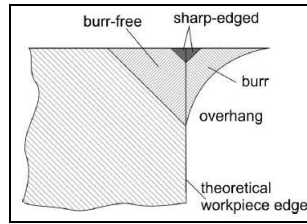
3.2 Περιγραφή του burr

Στις μέρες μας υπάρχουν διάφορα εθνικά και διεθνή πρότυπα για την περιγραφή του «burr» καθώς επίσης και για την αξιολόγηση της ποιότητας των ακμών – άκρων των διαφόρων εξαρτημάτων. Κάνοντας μία πολύ σύντομη ιστορική αναδρομή μπορούμε να πούμε πως για χιλιάδες χρόνια ο όρος «burr» δεν αναφέρεται πουθενά σε ό,τι έχει να κάνει με τις κατεργασίες. Ο πρώτος που αναφέρει την λέξη αυτή στα γραπτά του κείμενα είναι ο Έρασμος Δαρβίνος, παππούς του Κάρολου Δαρβίνου, φυσιοδίφης και ποιητής, περίπου στα 1784. Στο έγκυρο Αγγλικό Λεξικό της Οξφόρδης (*Oxford English Dictionary*) το «burr» περιγράφεται σαν μία σκληρή προεξοχή ή ακμή που έχει απομείνει σε ένα μέταλλο ή και άλλο υλικό μετά την κοπή αυτού [1]. Δόκιμος ελληνικός όρος για το «burr» δε υπάρχει ακόμη, με εξαίρεση ίσως τον όρο 'γρέζι' που συχνά χρησιμοποιείται, γι' αυτό και από εδώ και στο εξής θα αναφέρουμε απλά burr όπως άλλωστε κάναμε έως τώρα.

Στις περισσότερες περιπτώσεις σαν burr ονομάζονται ανεπιθύμητες προεξοχές υλικού οι οποίες σχηματίζονται σαν αποτέλεσμα της πλαστικής «ροής» του υλικού κατά την κατεργασία κοπής του. Μη επιθυμητά burr αναπτύσσονται στις περισσότερες κατεργασίες κοπής, συνήθως έχουν τριγωνικό σχήμα (ως προς τη διατομή) και πρέπει πάντα να αφαιρούνται χάριν της λειτουργικότητας των εξαρτημάτων [<http://www.scribd.com/doc/17313361/Seminar-Report-on-Burr-Formation>].

3.3 Ορισμός του burr

Στα τεχνικά σχέδια των τεμαχίων ή στα γεωμετρικά τους μοντέλα, οι ιδανικές γεωμετρικές μορφές απεικονίζονται χωρίς καμία παρέκκλιση και γενικά χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι συνθήκες στις ακμές απεικονίζοντας γεωμετρικές και διαστάσεις ιδανικές. Αυτό όμως απέχει από την πραγματικότητα τόσο λόγω των συνθηκών κατασκευής (ακρίβεια μηχανών) όσο και λόγω κόστους (ανοχές διαστάσεων). Γι' αυτό πολλές φορές για διαφόρους λόγους (π.χ. λειτουργικότητα τεμαχίων ή ασφάλεια) απαιτείται ο καθορισμός των ακμών ελεύθερων από burr, των οξείων ακμών ή των ακμών με burr. Το πρότυπο ISO 13715 (δες Σχήμα 3-2) ορίζει πως στην ακμή ενός τεμαχίου έχει δημιουργηθεί burr εάν υπάρχει προεξοχή «μεγαλύτερη του μηδενός» (προφανώς ως προς την ιδανική επιφάνεια).

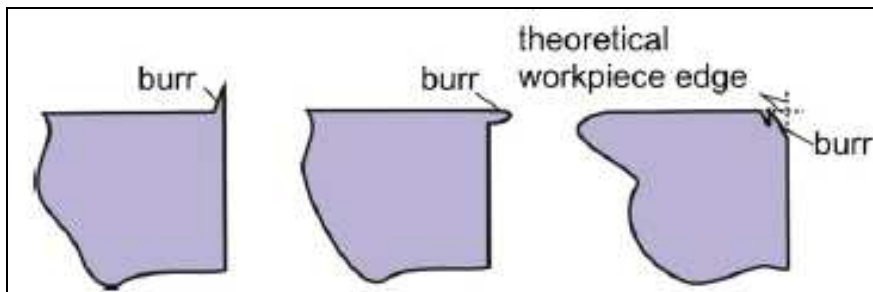


Σχήμα 3-2: Το πρότυπο ISO 13715 για τον καθορισμό του burr [1].

Ο Shafer (1975) δίνει μία από τις πιο πρόσφατες τεχνικές περιγραφές για το burr. Περιγράφει το burr σαν ένα κομμάτι του τεμαχίου το οποίο σχηματίζεται κατά την παραγωγική διαδικασία σε μία ακμή ή σε μία επιφάνεια και το οποίο κείται έξω από την επιθυμητή γεωμετρία (προεξέχει αυτής). Βασιζόμενος σε αυτόν το ορισμό, ο Κο (1991) ορίζει το burr «σαν μία ανεπιθύμητη προεξοχή του υλικού η οποία σχηματίστηκε λόγω της πλαστικής ροής αυτού κατά την κοπή».

Ένας άλλος κατανοητός ορισμός δίνεται από τον Beier (1999). Το burr είναι ένα σώμα που σχηματίζεται στην επιφάνεια ενός τεμαχίου κατά την κατεργασία του, το οποίο προεξέχει από την επιθυμητή και πραγματική επιφάνειά του, και έχει ελάχιστο όγκο σε σχέση με το τεμάχιο και πολλές φορές είναι αναπόφευκτο.

Ο ορισμός του Gillespie (1996) περιορίζεται στο πεδίο των κατεργασιών κοπής. Το burr που σχηματίζεται από αυτές τις κατεργασίες περιλαμβάνει «όλο εκείνο το υλικό που προεξέχει από την θεωρητική διασταύρωση δύο επιφανειών οι οποίες περιβάλλουν το burr». Το σημείο αναφοράς σε αυτή την περίπτωση είναι η τομή των επιφανειών και όχι η επιθυμητή επιφάνεια. Έτσι, ο ορισμός του Gillespie περιλαμβάνει και το burr που αναπτύσσεται και εσωτερικά της θεωρητικής τομής (δες Σχήμα 3-3).



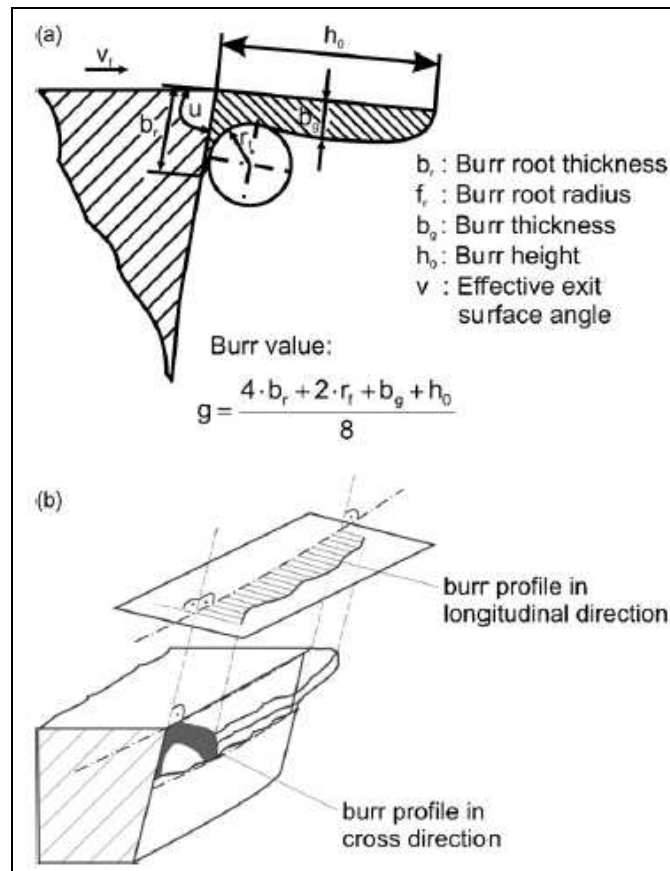
Σχήμα 3-3: Ο ορισμός του burr κατά τον Gillespie [1].

3.4 Η γεωμετρία του burr

Ο Schafer [1975] χρησιμοποιεί μία τυχαία διατομή burr για να περιγράψει τις βασικές παραμέτρους του. Ισχυρίζεται πως κάθε burr μπορεί να περιγραφεί πλήρως από το διαμήκες προφίλ του και από το προφίλ της διατομής του και ορίζει τα ακόλουθα βασικά μεγέθη (δες και Σχήμα 3-4):

- Το πάχος της «ρίζας» του burr b_f , το οποίο είναι το πάχος της «βάσης» του burr όπως αυτό μετράται στην διατομή του.
- Το ύψος του burr h_0 , το οποίο ορίζεται σαν η απόσταση ανάμεσα στην ιδανική ακμή του τεμαχίου και το υψηλότερο σημείο του burr όπως φαίνεται στην διατομή του.
- Η ακτίνα της «ρίζας» του burr r_f , η οποία ορίζεται «εγγράφοντας» ένα κύκλο στην περιοχή της «ρίζας».

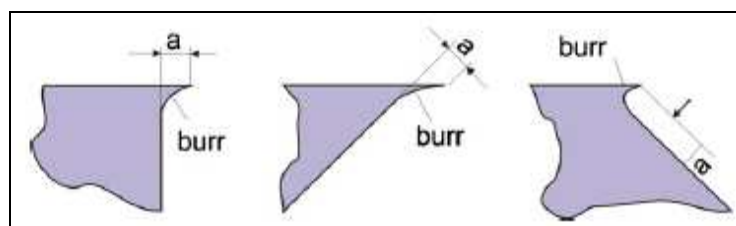
- Το πάχος του burr b_g , το οποίο περιγράφει το πάχος παράλληλα με την περιοχή της «ρίζας» σε απόσταση r_f όπως μετράται στην διατομή του burr.



Σχήμα 3-4: Η γεωμετρία του burr. Φαίνονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη στην διατομή του (a) καθώς και το διαμήκες προφίλ του (b) [1].

Το διαμήκες προφίλ του burr δε μας δίνει πολλές πληροφορίες και για τον λόγο αυτό σπάνια χρησιμοποιείται για να περιγράψει το burr. Το μήκος του burr μας ενδιαφέρει διότι μας δείχνει πόσο εξέρχει από την ιδεατή επιφάνεια. Για μία σύντομη και ενδεικτική εκτίμηση του burr χρησιμοποιείται το χαρακτηριστικό μέγεθος g (δες Σχήμα 3-4). Το μέγεθος αυτό αποτελείται από τα τέσσερα γεωμετρικά μεγέθη που περιγράψαμε παραπάνω. Οι διαφορετικοί συντελεστές βαρύτητας του καθενός έχουν προκύψει από τον αντίκτυπο του κάθε μεγέθους στην διαδικασία απομάκρυνσης του burr.

Το πρότυπο ISO 13715 (δες και Σχήμα 3-2) χρησιμοποιεί μόνο ένα μέγεθος για να δείξει την απόκλιση από την ιδανική επιφάνεια. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται «μέτρηση ακμής» a (*edge measure a*). Μετράται από την άκρη του burr κάθετα προς την επιφάνεια από την οποία αυτό προεξέρχει (δες και Σχήμα 3-5).



Σχήμα 3-5: Η γεωμετρία του burr όπως περιγράφεται στο πρότυπο ISO 13715 [1].

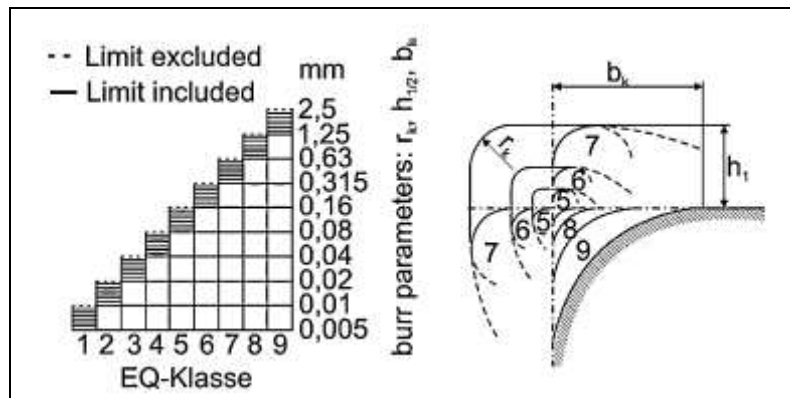
3.5 Πρότυπα για την κατάταξη των λειτουργικών ακμών εξαρτημάτων (component edges)

Παρόλα όσα είδαμε παραπάνω, δεν υπάρχουν ακόμα διεθνώς αποδεκτοί ορισμοί για το «burr». Πολλές εταιρίες και τμήματα ποιότητας θεωρούν πως μία ακμή δεν παρουσιάζει «burr» εάν δεν υπάρχει σε αυτή πλεονάζων υλικό. Για άλλους αρκεί αυτό το υλικό να μην είναι ορατό με το γυμνό μάτι. Σε άλλες περιπτώσεις αρκεί να μην εμφανίζεται κανένα λειτουργικό πρόβλημα σε απαιτούμενες συναρμολογήσεις ακόμη και αν πολλές φορές δεν είναι γνωστές οι ακριβείς προδιαγραφές της συναρμολόγησης. Πολλές φορές κατά την EDM το υλικό που έχει επαναστερεοποιηθεί μπορεί να ληφθεί υπόψη ως «burr» ή και προεξοχές τύπου *flash* να θεωρηθούν «burr» [1].

Υπάρχουν ποικίλα γενικά standards για την εκτίμηση της ποιότητας των λειτουργικών ακμών των εξαρτημάτων και για την κατάταξη των «burrs» που εμφανίζονται κατά τις κατεργασίες αποβολής υλικού. Στη συνέχεια θα αναφερθούν ήδη υπάρχουσες διεθνείς προτάσεις για την κατάταξη των άκρων των εξαρτημάτων που βρίσκονται σε άμεση συνάρτηση με το «burr».

Το πρώτο πρότυπο που σχετίζεται με το «burr» και τις ακμές εισάγει επτά βήματα ποιότητας που συνοδεύονται από ρητή γραπτή περιγραφή της διαδικασίας που συνεπάγεται το καθένα. Το περιεχόμενο του κάθε βήματος περιλαμβάνει ενέργειες που πρέπει να γίνουν ανάλογα με τον κατά περίπτωση στόχο ως προς την επιθυμητή ποιότητα του εξαρτήματος (π.χ. «Δεν απαιτείται απομάκρυνση burr», «Απομάκρυνε όλα τα ορατά burr», «Απομάκρυνε όλα τα burr που είναι ορατά σε μεγέθυνση _επί_» κλπ). Τα βήματα αυτά προσαρμόζονται στις ανάγκες τις εταιρείας κάθε φορά έτσι ώστε να υλοποιούν τους στόχους της εκάστοτε γραμμής παραγωγής. Το πρότυπο αυτό παρέχει ένα πλαίσιο δράσης για την αντιμετώπιση των εμφανιζόμενων «burrs». Βασίζεται στο σχέδιο STD14.1997 της Διεθνούς Επιτροπής Τεχνολογίας Burr (Worldwide Burr Technology Committee's Standard WBTC – STD14.1997) [Gilespie 1997]. Είναι συμβατό με τις απαιτήσεις του ISO 9000 σχετικά με τον σαφή καθορισμό των απαιτήσεων [8].

Ο Schafer (1975) προτείνει μία κατάταξη του εμφανιζόμενου «burr» εννέα βαθμίδων. Το όριο της κάθε βαθμίδας καθορίζεται ποσοτικά χρησιμοποιώντας γεωμετρικές παραμέτρους του «burr» με στόχο την επίτευξη ομογενών διαστημάτων στην κλίμακα και μικρό αριθμό βαθμίδων. Αυτό εξασφαλίζει την πρακτική εφαρμογή της βαθμονόμησης.



Σχήμα 3-6: Οι βαθμίδες ποιότητας ακμών (edge quality – EQ) κατά τον Schafer [1].

Μία πρόταση για την εκτίμηση της ποιότητας των ακμών από την οπτική γωνία ενός μηχανικού ποιότητας [Ohmori K. 1998] γίνεται στο «*The movements of ISO 13715 as the only one international standard for edge quality (EQ)*», *Proceedings of the 5th International Conference on Deburring and Surface Finishing*, 146–157. Η πρόταση αυτή βασίζεται σε μελέτη περιπτώσεων (*case studies*). Χρησιμοποιώντας κωδικοποιημένους πίνακες και οδηγίες, ορίζονται οι κατά περίπτωση αποδεκτές διαστάσεις του «burr».

Ένα επιπλέον πρότυπο σχετικό με το «burr» προτείνει και ο Kato (2007) στο «*The Standardized Classification for Edge Quality of the Precise Machining Products*», *Advanced Materials Research* 24–25:83–90. Περιγράφει τις διάφορες ποιότητες των ακμών ανάλογα με την σημασία της λειτουργικότητάς τους. Εισάγει πίνακες όπου περιγράφει τα βήματα ποιότητας των ακμών, διαχωρίζοντάς τις σε κρίσιμες και μη κρίσιμες ως προς τη λειτουργία τους. Στη συνέχεια, οι κρίσιμες ακμές επιμερίζονται σε πέντε υποκατηγορίες και αντίστοιχα οι μη κρίσιμες σε τρεις. Οι αποδεκτές διαστάσεις των ακμών δίνονται ποσοτικά και ορίζεται εύρος ανοχών.

Ένα άλλο σύστημα χρησιμοποιεί σύμβολα για τις διάφορες ακμές των εξαρτημάτων τα οποία περιέχουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που απαιτούνται για την κατεργασία και την εκτίμηση της ποιότητας. Καλύπτει την πλειοψηφία των εφαρμογών της αυτοκινητιστικής βιομηχανίας και των προμηθευτών της [Berger K (2004) «*Proposal for a Standard for the Description of Edges in Automotive Engineering*», *Proceedings of the 7th International Conference on Deburring and Surface Finishing*, 67–79].

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε πως μία βιομηχανική έρευνα που διεξήχθη στα πλαίσια του, φημισμένου στη Γερμανία, σχεδίου «SpanSauber», έδειξε πως εξαιτίας της έλλειψης καθολικώς αποδεκτού τρόπου εκτίμησης και κατάταξης του «burr», περίπου το 45% των ερωτηθέντων βιομηχανιών απάντησαν πως χρησιμοποιούν δική τους μέθοδο (*in-house classification*) [1].

3.6 Ο σχηματισμός του «burr»

Η μείωση του κόστους και η αντιμετώπιση των προβλημάτων που συνεπάγονται από την εμφάνιση του «burr» κατά την κατεργασία απαιτεί γνώση του τρόπου σχηματισμού του. Απαιτείται πλήρης κατανόηση τόσο των κατηγοριών του «burr» όσο και των μηχανισμών ανάπτυξής του καθώς και των παραγόντων από τους οποίους αυτό επηρεάζεται. Το θέμα είναι αρκετά πολύπλοκο, τόσο που κάθε είδος «burr» μπορεί να έχει και επιμέρους υποκατηγορίες, ενώ η αλλαγή μίας μεταβλητής με στόχο την ελαχιστοποίησή του μπορεί να οδηγήσει σε εμφάνιση ή / και αύξηση του «burr» σε άλλα σημεία.

Σήμερα υπάρχουν ποικίλες περιγραφές του «burr» ανάλογα με την εφαρμογή, το είδος της κατεργασίας, το υλικό κλπ. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι βασικές κατηγορίες του «burr» καθώς και οι μηχανισμοί ανάπτυξής του συσχετίζοντας το παράλληλα με τις βασικές κατεργασίες κοπής που παρουσιάστηκαν στο πρώτο κεφάλαιο. Να σημειωθεί πως για πολλούς από τους όρους που θα συναντήσουμε στην συνέχεια δεν υπάρχει δόκιμη ελληνική μετάφραση και για το λόγο αυτό σε κάποιες περιπτώσεις θα διατηρηθεί ο αγγλικός όρος, όπως άλλωστε έγινε και με το «burr».

3.6.1 Τα είδη του «burr»

Τα «burrs» και όλες οι σχετικές προεξοχές υλικού σχηματίζονται με τις έξι διαδικασίες που αναφέρονται στον επόμενο πίνακα (πίνακας 3.1). Από αυτές, οι

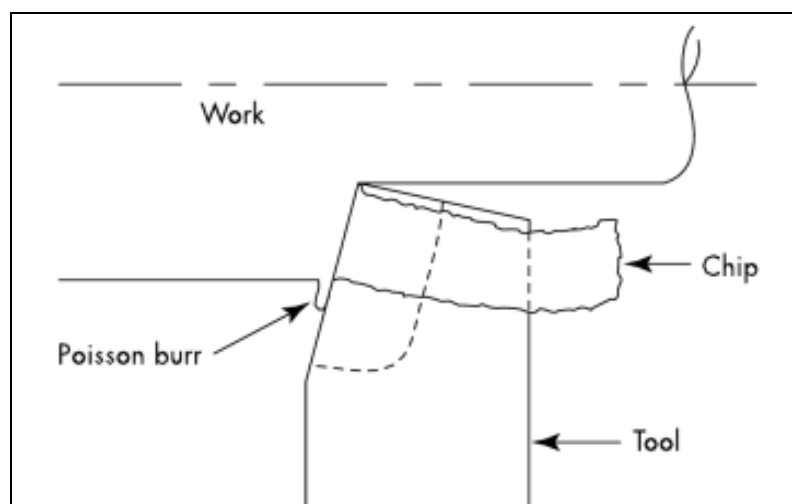
τέσσερις πρώτες σχετίζονται με την αποβολή υλικού και την πλαστική παραμόρφωση και θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια. Οι άλλες δύο εμφανίζονται όταν τα υλικά βρίσκονται σε υγρή ή «ημι - στέρεα» κατάσταση, αποτελούν προεξοχές τύπου «burr» και απλά αναφέρονται.

<i>Είδος διεργασίας / φαινόμενο</i>	<i>Τύπος προεξοχής / «burr»</i>
<i>Πλευρική «ροή» υλικού - lateral flow of material</i>	<i>«Poisson burr»</i>
<i>Λυγισμός υλικού (π.χ. «ρολάρισμα» αποβλίττου) – bending of material (such as chip rollover)</i>	<i>«ρολαριστό burr» (rollover burr)</i>
<i>«Δάκρυσμα» ή «Σκίσιμο» του αποβλίττου από το τεμάχιο – tearing of chip from workpiece</i>	<i>«Tear chip»</i>
<i>Ημιτελής αποκοπή – incomplete cutoff</i>	<i>«Προεξοχή cutoff» (cutoff projection)</i>
<i>Επαναπόθεση υλικού – redeposition of material</i>	<i>«Σταγόνα επαναχύτευσης» (Recast bead)</i>
<i>Ροή υλικού σε σχισμές – material flow into cracks</i>	<i>«flash»</i>

Πίνακας 3.1: Τα είδη του «burr»

3.6.1.1 «Poisson burr»

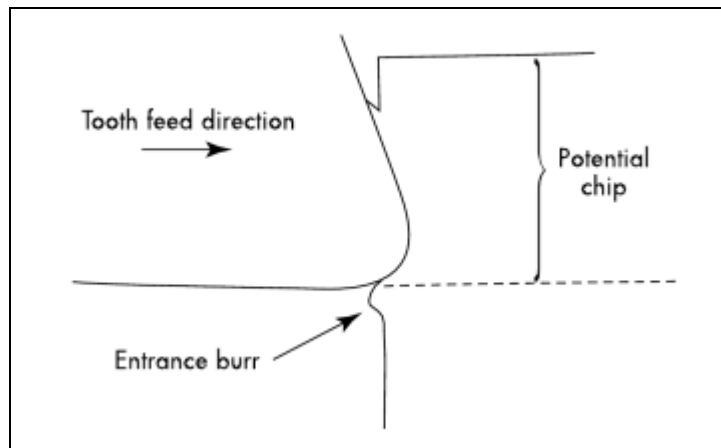
Το «Poisson burr» εμφανίζεται όταν η ακμή του κοπτικού εργαλείου κινείται ως προς μία ακμή του τεμαχίου ερχόμενη σε επαφή με αυτή (δες Σχήμα 3-7). Είναι το αποτέλεσμα της πλευρικής ροής υλικού που λαμβάνει χώρα όταν ένα στερεό συμπιέζεται. Η έκταση της παραμόρφωσης είναι συνάρτηση του υλικού, του μεγέθους και του σχήματος των ευρισκόμενων σε επαφή μερών. Γενικά πρόκειται για «burr» μικρού μεγέθους ανάλογο της ακτίνας της κοπτικής ακμής (ράδιο) και της εφαρμοζόμενης πίεσης.



Σχήμα 3-7: Ο σχηματισμός του «poisson burr» [8].

Στην ίδια κατηγορία emπίπτει και το αποκαλούμενο «burr» εισόδου (*entrance burr*) το οποίο εμφανίζεται όταν η κοπτική ακμή έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο για πρώτη φορά (σχήμα 3-8). Τοπικά το υλικό «διαρρέει» προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της κίνησης του εργαλείου. Μοιάζει πολύ με την εγκοπή που

δημιουργείται κατά την σκληρομέτρηση Brinell. Το αν θα σχηματιστεί εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού και πιθανώς και από το σχήμα της κοπτικής ακμής.

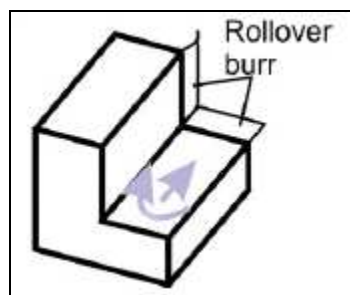


Σχήμα 3-8: Ο σχηματισμός του «burr» εισόδου (entrance burr) [8].

Η ενδοτράχυνση παίζει επίσης πολύ σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση των δύο αυτών «burrs». Το «burr» εισόδου σχηματίζεται γενικά όταν το υλικό έχει μικρό εκθέτη ενδοτράχυνσης, μικρότερο του 0.3. Υλικά με εκθέτη μεγαλύτερο τείνουν να σχηματίζουν ένα εξόγκωμα αλλά όχι ξεκάθαρο, οξύ «burr» [8].

3.6.1.2 «Ρολαριστό burr» (rollover burr)

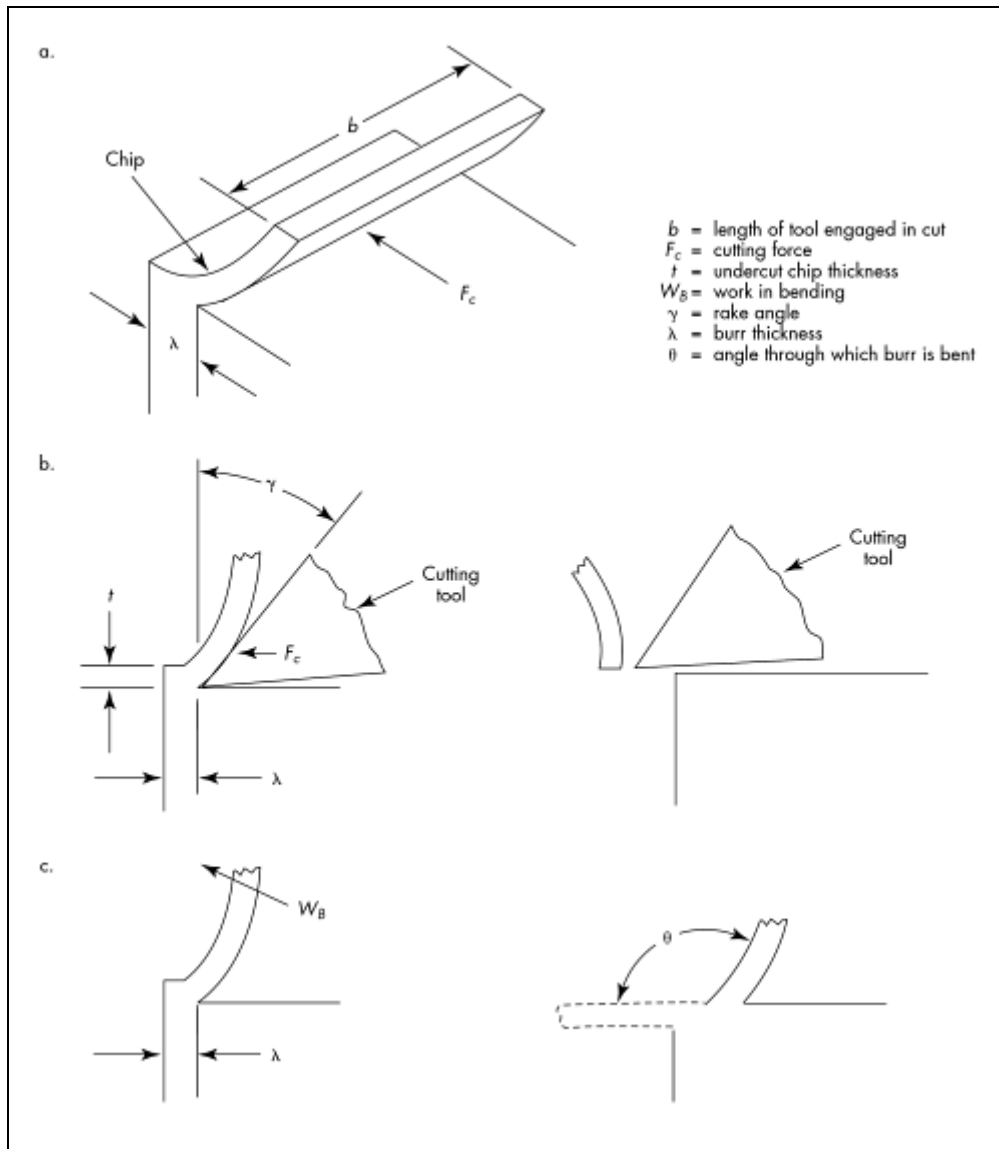
Όταν η κοπτική ακμή «εξέρχεται» από το τεμάχιο τότε συνήθως προκύπτει το ρολαριστό «burr». Αυτό συμβαίνει όταν η κάμψη του αποβλίττου είναι ευκολότερη από την αποκοπή του. Συχνά αποκαλείται και «burr» εξόδου καθώς συνήθως εμφανίζεται στο τέλος της κοπής (σχήμα 3-9).



Σχήμα 3-9: Σχηματική αναπαράσταση του «ρολαριστού burr» [8].

Μικρό βάθος κοπής και μεγάλες γωνίες διάτμησης ελαχιστοποιούν το πάχος του «rollover burr». Επίσης μεγάλες γωνίες αποβλίττου και μικρές δυνάμεις κοπής ελαχιστοποιούν το πάχος του αποβλίττου και κατά συνέπεια και του «rollover burr».

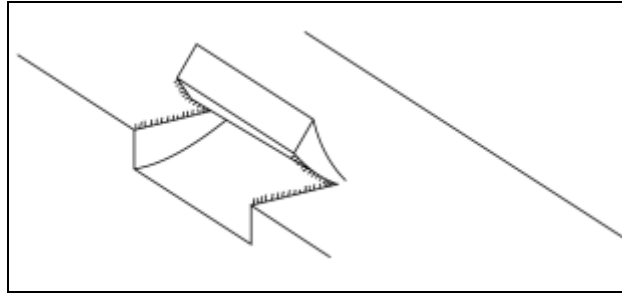
Το μήκος του ρολαριστού «burr» εξαρτάται από τις συνθήκες κοπής και από την πλαστικότητα του υλικού του τεμαχίου. Με εξαίρεση κάποιες περιπτώσεις φρεζαρίσματος, το μήκος του ρολαριστού «burr» δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το συνολικό βάθος κοπής. Εάν κατά την κάμψη του αποβλίττου η παραμόρφωση ξεπεράσει την τιμή που απαιτείται για την θραύση, τότε το «burr» θα απομακρυνθεί σε μεγάλο βαθμό αφήνοντας ένα μικρό μόνο τμήμα.



Σχήμα 3-10: Ο μηχανισμός σχηματισμού του ρολαριστού «burr» στο τέλος του μήκους κοπής. Σημειώνονται τα βασικά μεγέθη (b) – μήκος κοπής, (F_c) – δύναμη κοπής, (t) – βάθος κοπής, (γ) – γωνία αποβλίττου, (λ) – πάχος του «burr», (θ) – γωνία κάμψης του «burr» [8].

3.6.1.3 «Δάκρυ» ή «Σκίσιμο» (tear burr)

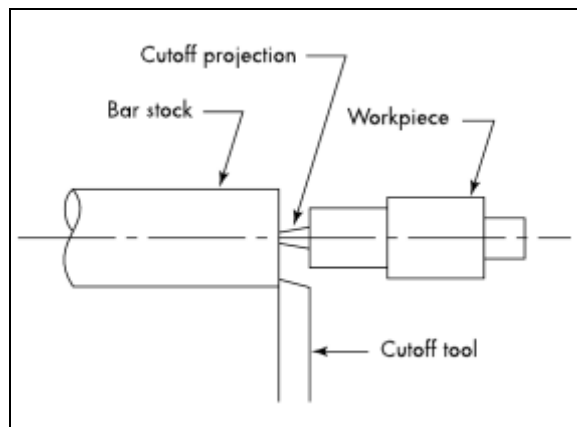
Το «burr» υπό μορφή δακρύου σχηματίζεται όταν το απόβλιττο «ξεκολλάει» ή «σκάβεται» από το κατεργαζόμενο τεμάχιο (δες σχήμα 3-11). Συναντάται γενικά σε όλες τις κατεργασίες κοπής, αλλά είναι ευκολότερο να σχηματιστεί στο φρεζάρισμα (side-milling). Το κάθε δόντι του κοπτικού εργαλείου (φρέζας) ωθεί το απόβλιττο εμπρός και πάνω. Καθώς γίνεται αυτό τα πλευρικά άκρα του αποβλίττου «ξεκολλούν» από το τεμάχιο και αυτό που απομένει σε εκείνο το σημείο είναι το «tear burr».



Σχήμα 3-11: Ο σχηματισμός του «tear burr» [8].

3.6.1.4 Προεξοχές «cutoff» (cutoff projections)

Οι προεξοχές «cutoff» προκύπτουν όταν το τεμάχιο αποκόπεται από μία «μάζα» αρχικού υλικού. Καθώς το τελικό τεμάχιο μορφοποιείται σταδιακά και πριν το επιπλέον υλικό αποκοπεί τελείως. Μπορεί να προκύψει σε οποιαδήποτε κατεργασία, κυρίως όμως στην τόννευση.



Σχήμα 3-12: Η εμφάνιση των «cutoff projections». Φαίνονται η αρχική μάζα του υλικού (bar stock), το τελικό τεμάχιο (workpiece), και το κοπτικό εργαλείο (cutoff tool) [8].

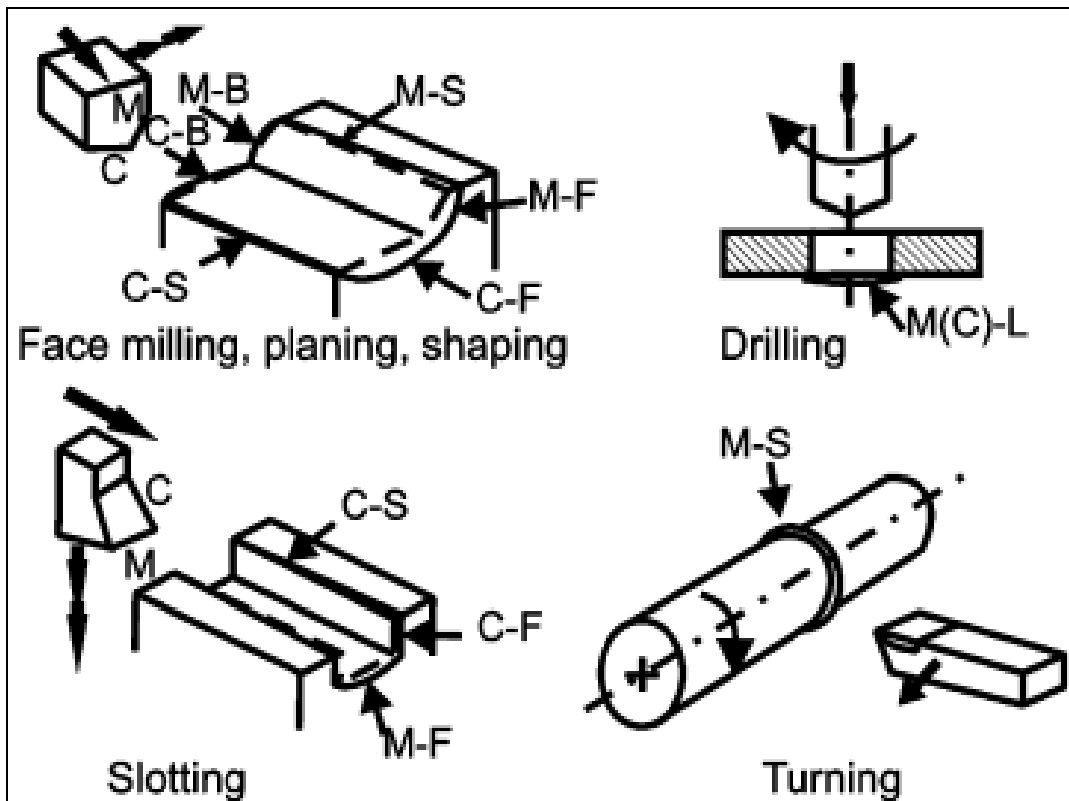
3.6.2 Η εμφάνιση των διαφόρων «burrs» σε σχέση με τις βασικές κατεργασίες

Υπολογίζεται πως στις μέρες μας υπάρχουν περισσότερες από 5.000 κατασκευαστικές διαδικασίες και παραλλαγές αυτών [8]. Είναι προφανές πως η ανάλυση του σχηματισμού «burr» για όλες αυτές είναι αδύνατη και ξεφεύγει από τους στόχους της παρούσας εργασίας. Το μεγαλύτερο μέρος της σχετικής βιβλιογραφίας επικεντρώνεται στην τόννευση, στο φρεζάρισμα, στη διάτρηση και σε κατεργασίες πρεσσών. Στη συνέχεια, θα συσχετίσουμε το «burr» με τις βασικές κατεργασίες αποβολής υλικού τις οποίες παρουσιάσαμε στο πρώτο κεφάλαιο έτσι ώστε να έχουμε μία καλή εποπτεία σχετικά με τα θεμελιώδη του «burr».

Από την πλευρά της τεχνολογίας κοπής, τα «burrs» που προκύπτουν από τις κατεργασίες περιγράφονται καλύτερα συσχετίζοντάς τα με την κοπτική ακμή η οποία συνδέεται απευθείας με τον σχηματισμό του «burr» και επίσης με την μορφή και την διεύθυνση ανάπτυξης του «burr». Βάσει αυτής της περιγραφής, ο Nakayama (1987) περιγράφει τα «burrs» που εμφανίζονται στις διάφορες κατεργασίες με τον συνδυασμό δύο συστημάτων κατηγοριοποίησης, (1) βάσει της κοπτικής ακμής και (2) βάσει του είδους και της διεύθυνσης του burr (δες πίνακα 3.2 & σχήμα 3-13).

(1) Κατάταξη βάσει κοπτικής ακμής	
Κύρια κοπτική ακμή	M
Δευτερεύουσα κοπτική ακμή	C
(2) Είδος & διεύθυνση «burr»	
Ροή «προς τα πίσω» (backward flow)	B (backward or entrance burr)
Ροή «προς το πλάι» (sideward flow)	S (sideward burr)
Ροή «προς τα εμπρός» (forward flow)	F (forward or exit burr)
Ροή «κατά την πρόωση» (leaning to feed direction)	L (leaned burr)

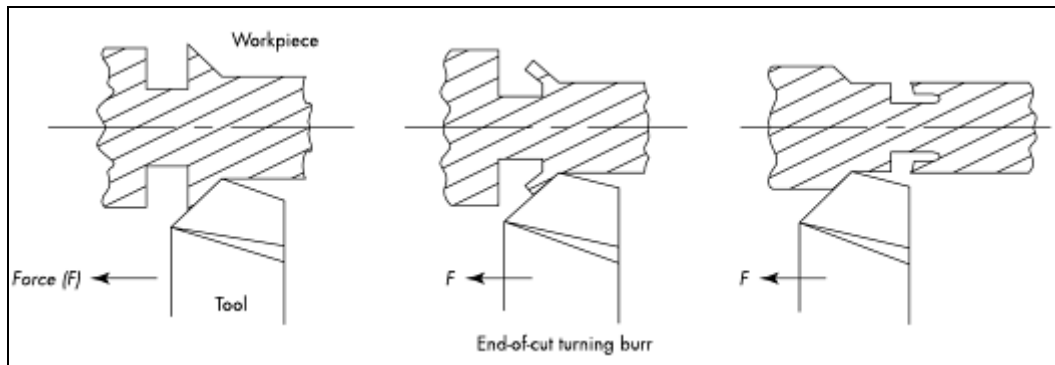
Πίνακας 3.2: Τα συστήματα κατηγοριοποίησης του «burr» κατά τον Nakayama (1987) [1], [11]



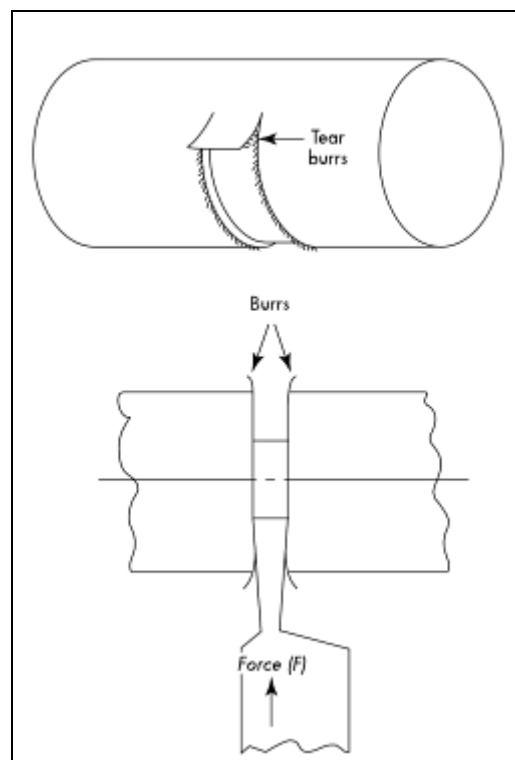
Σχήμα 3-13: Οι τύποι του «burr» στις βασικές κατεργασίες σύμφωνα με την κατάταξη του Nakayama (1987) [1].

3.6.2.1 «Burrs» κατά την τόννευση

Συνήθως, τα «burrs» που εμφανίζονται κατά την τόννευση ανήκουν στην κατηγορία του «poisson burr» (σχήμα 3-7). Στην περίπτωση κατά την οποία το κοπτικό εργαλείο θα περάσει από ένα αυλάκι ή για τον οποιοδήποτε λόγο (π.χ. γεωμετρικά χαρακτηριστικά τεμαχίου) θα πραγματοποιείται μία διακοπτόμενη τόννευση, τότε έχουμε και την εμφάνιση «rollover burr». Αυτό συνήθως εμφανίζεται στις άκρες του τεμαχίου όταν το κοπτικό εργαλείο τελειώνοντας την κοπή αποχωρίζεται από αυτό (σχήμα 3-14). Τέλος, έχουμε και την εμφάνιση «tear burr» (σχήμα 3-15) κατά την διάνοιξη αυλακιών (grooving).



Σχήμα 3-14: Ο σχηματισμός του «rollover burr» κατά την τórνευση στις περιοχές γεωμετρικής ασυνέχειας του τεμαχίου [8].

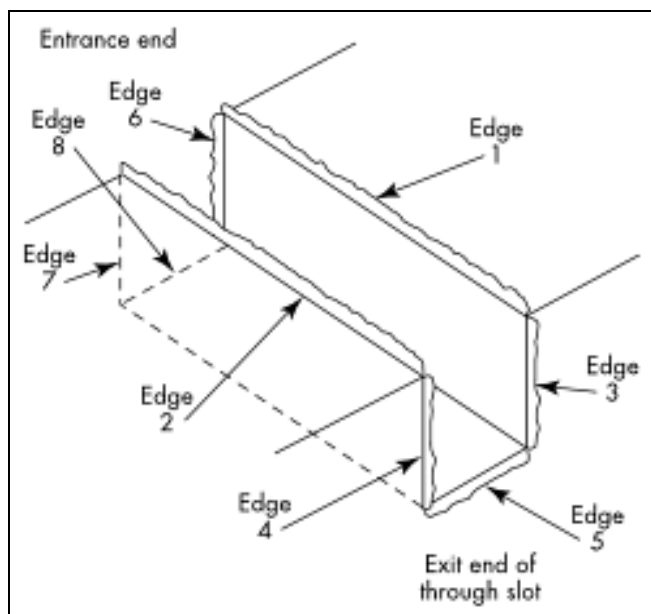


Σχήμα 3-15: Σχηματισμός «tear burr» κατά την τórνευση [8].

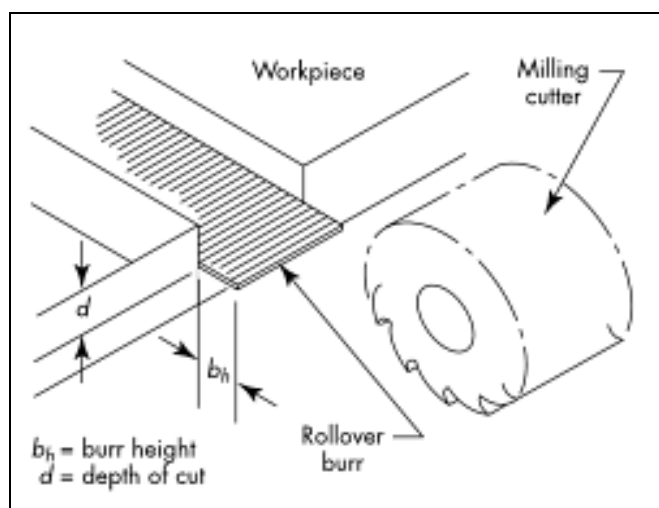
3.6.2.2 «Burrs» κατά το φρεζάρισμα

Μετωπικό φρεζάρισμα

Στο μετωπικό φρεζάρισμα (face and side milling) αναπτύσσονται «burrs» σε οκτώ ακμές επί του τεμαχίου (δες σχήμα 3-16). «Tear burr» προκύπτει στις ακμές 1, 2, 3 και 4. «Burr» εισόδου (entrance burr) αναπτύσσεται στην ακμή 8. Ένας συνδυασμός «poisson burr» και «tear burr» προκύπτει στις ακμές 6 και 7, ενώ «rollover burr» εμφανίζεται στις ακμές στις οποίες το κοπτικό εργαλείο αποχωρίζεται το τεμάχιο με το τέλος της κοπής. Στην περίπτωση που το κοπτικό εργαλείο έχει κοπτικές ακμές υπό μορφή έλικας διαφοροποιούνται τα χαρακτηριστικά των «burrs» (πάχος, ύψος, ράδια και σκληρότητα) σε όλες τις παραπάνω ακμές. Τα χαρακτηριστικά αυτά διαφοροποιούνται επίσης κατά μήκος των 8 ακμών.



Σχήμα 3-16: Οι οκτώ ακμές του τεμαχίου στις οποίες εμφανίζονται τα διάφορα «burrs» κατά το μετωπικό και περιφερειακό φρεζάρισμα [8].

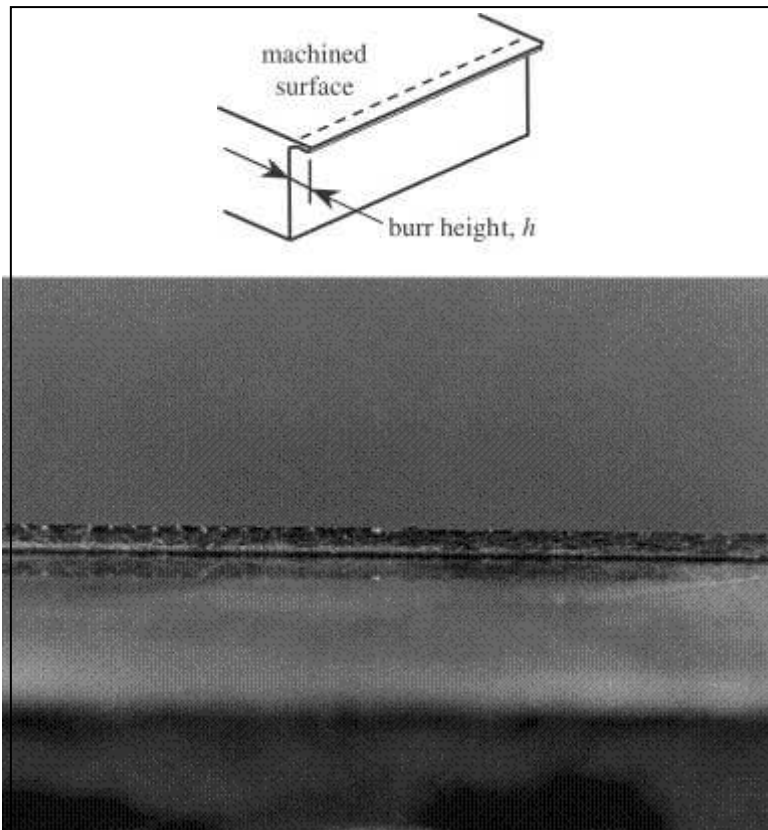


Σχήμα 3-17: Η εμφάνιση του «rollover burr» στο φρεζάρισμα. Το ύψος του σχηματιζόμενου «burr» είναι ίσο ή μικρότερο του βάθους κοπής [8].

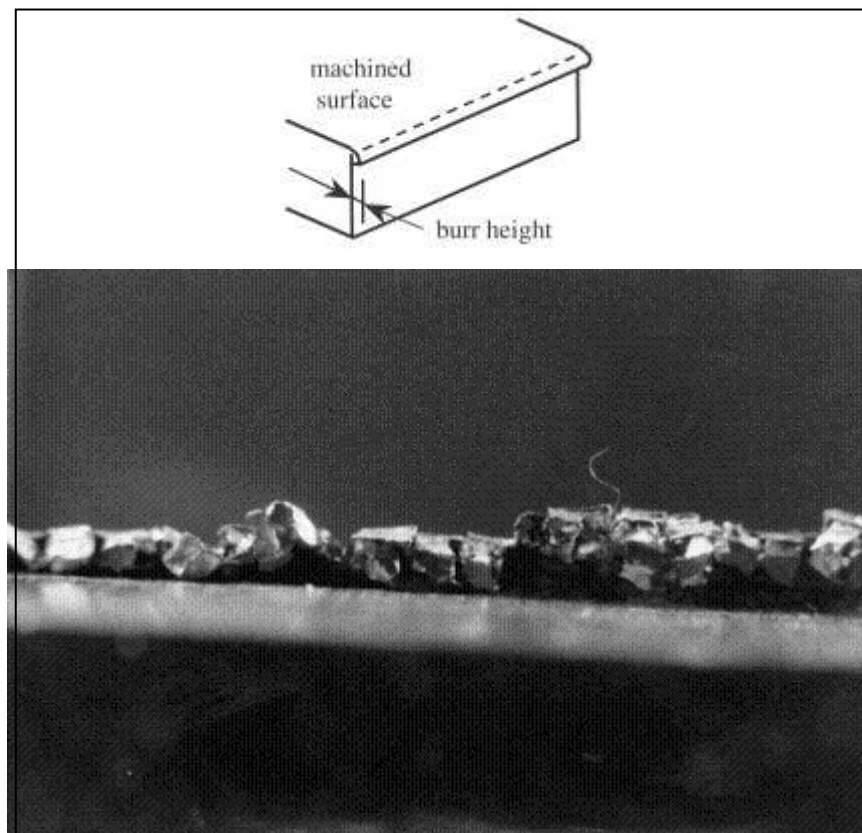
Τα «burrs» που αναπτύσσονται στις οκτώ ακμές, πέρα από την ακμή ν. 5 (σχήμα 3-16)) που είναι η ακμή εξόδου και το «burr» είναι πάντα ‘ρολαριστό’, εμφανίζουν σημαντική ποικιλομορφία ανάλογα με τις συνθήκες τις κοπής στην οποία αξίζει να αναφερθούμε. Οι μορφές των «burr» που δύναται να εμφανιστούν στις διάφορες ακμές είναι οι εξής [19, 20]:

- ‘Μαχαιρωτό’ «burr» (*knife type burr*).
- ‘Κατσαρό’ «burr» (*curl type burr*).
- Κυματιστό «burr» (*wave type burr*)
- ‘Πριονωτό’ «burr» (*edge breakout burr*)

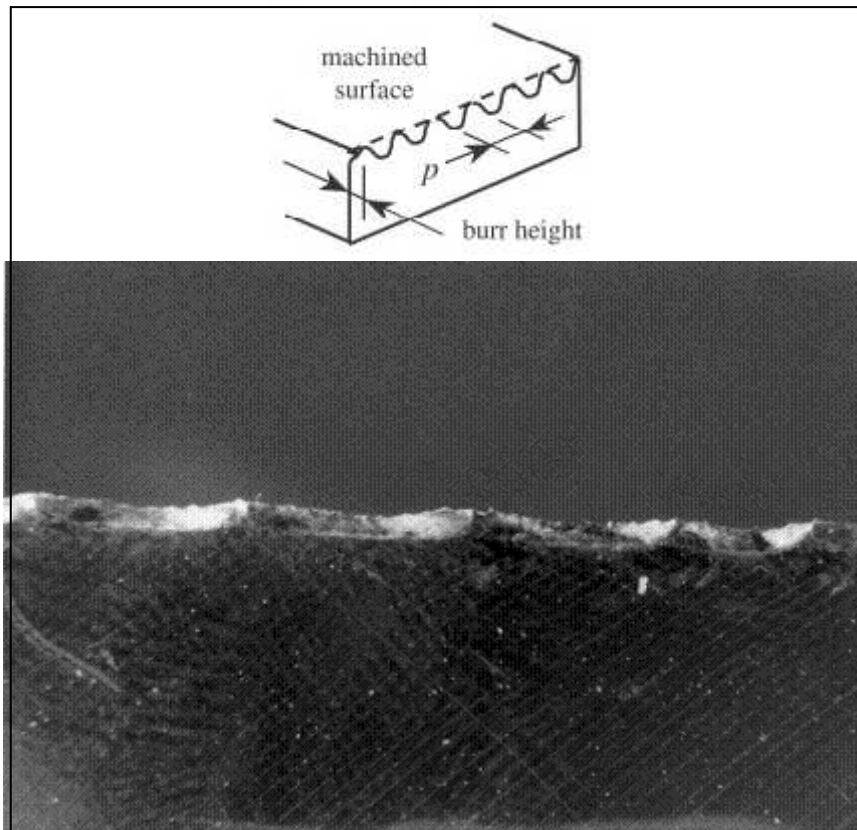
Στα επόμενα σχήματα φαίνεται η χαρακτηριστική μορφή του καθενός τόσο σε σχέδιο όσο και σε φωτογραφίες από πραγματικές κοπές.



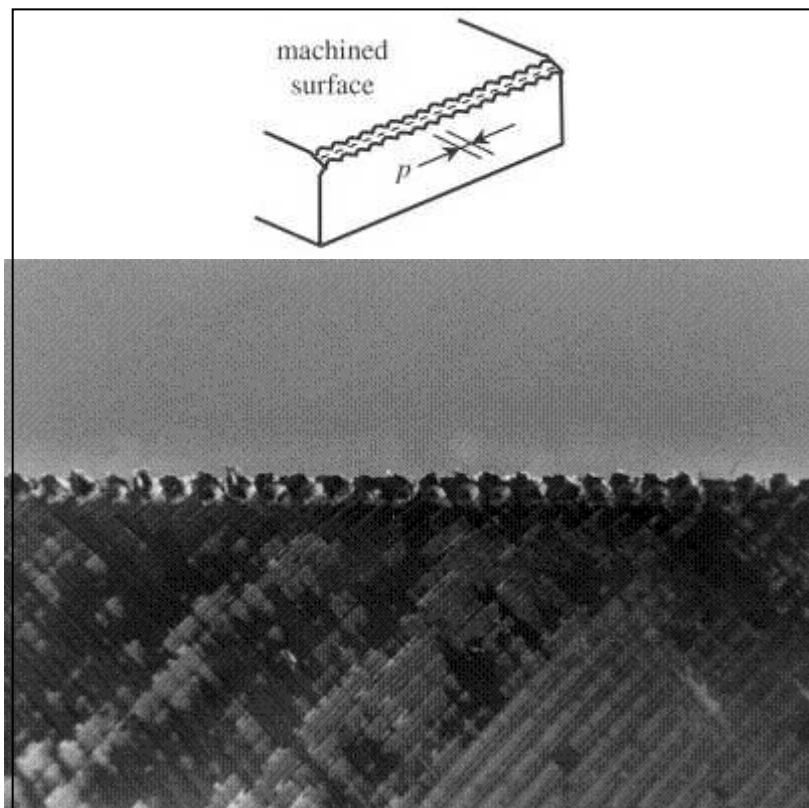
Σχήμα 3-18: 'Μαχαιρωτό' «burr» (knife type burr) [19, 20].



Σχήμα 3-19: 'Κατσαρό' «burr» (curl type burr) [19, 20].

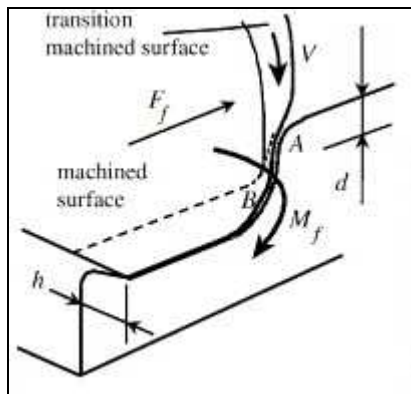


Σχήμα 3-20: Κομματοστό «burr» (wave type burr) [19, 20].



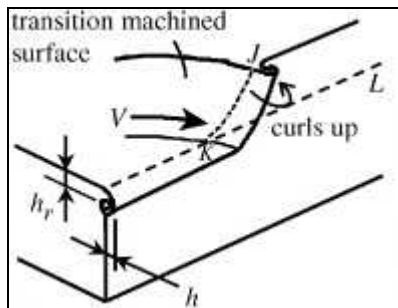
Σχήμα 3-21: 'Πριονωτό' «burr» (edge breakout burr) [19, 20].

Όπως είπαμε και παραπάνω, το τι θα εμφανιστεί κατά περίπτωση εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν κάθε φορά κατά την κοπή. Στην συνέχεια παρουσιάζουμε τον μηχανισμό ανάπτυξης καθενός από τα παραπάνω «burr» στο φρεζάρισμα.



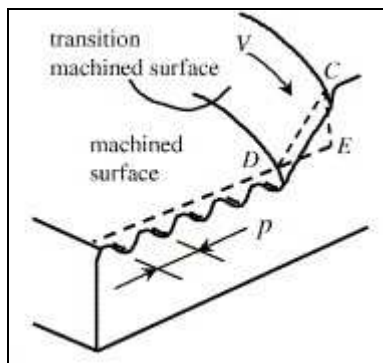
Σχήμα 3-18.α: Ο μηχανισμός ανάπτυξης του 'μαχαιρωτού' «burr» [20].

Το μαχαιρωτό «burr» δημιουργείται όταν η γωνία εξόδου της φρέζας από το τεμάχιο (γωνία Ψ , δεξ και σχήμα 3.22) πλησιάζει τις 150° και το τμήμα AB που δεν έχει αποκοπεί 'σπρώχνεται' προς την έξοδο του τεμαχίου. Οφείλεται στην πλαστική καμπτική ροπή που αναπτύσσεται εξαιτίας της δύναμης πρόωσης που ασκείται στο τμήμα AB καθώς το εργαλείο προωθείται.



Σχήμα 3-19.α: Ο μηχανισμός ανάπτυξης του 'κατσαρού' «burr» [20].

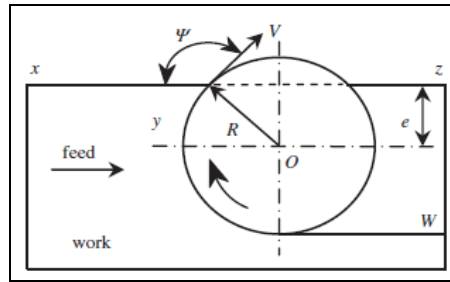
Για γωνίες Ψ μικρότερες από 45° σχηματίζεται το 'κατσαρό' «burr». Ένα 'ρολαριστό' «burr» σχηματίζεται στην πλευρά KJ (έξοδος από το τεμάχιο) το οποίο 'κατσαρώνει' με το πέρασμα του επόμενου πάσσο του εργαλείου εξαιτίας ενός 'τριψίματος' που λαμβάνει χώρα τοπικά αντί για κοπή. Το τμήμα αυτό κάμπτεται και συμπίεζεται κατά μήκος του KL.



Σχήμα 3-20.α: Ο μηχανισμός ανάπτυξης του κυματιστού «burr» [20].

Το κυματιστό «burr» δημιουργείται όταν η γωνία Ψ κυμαίνεται στις 90° . Ο μηχανισμός ανάπτυξης χαρακτηρίζεται από μία περιοδικότητα. Αρχικά, ένα 'ρολαριστό' «burr» σχηματίζεται στην ακμή CD (έξοδος από το τεμάχιο). Το «burr» αυτό αφαιρείται από το επόμενο πάσσο του εργαλείου εκτός από ένα πολύ μικρό τμήμα που βρίσκεται στην εγγύς περιοχή της γωνίας D. Το τμήμα αυτό καθώς το εργαλείο προχωρά θα καμφθεί και θα συμπίεστεί κατά μήκος του DE. Ειδικά για το κυματιστό «burr» πρέπει να πούμε πως αυξάνει την δυσκολία απομάκρυνσής του λόγω πολυπλοκότερης γεωμετρίας και μεγαλύτερου

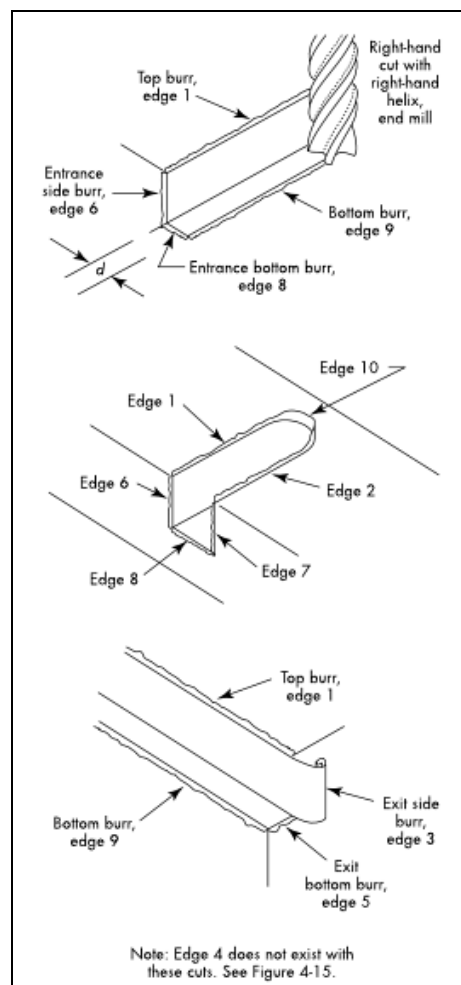
Τέλος, ειδικά για το πριονωτό «burr» (σχήμα 3.21) δεν προτείνεται κάποιος συγκεκριμένος μηχανισμός όπως στα παραπάνω. Το «burr» αυτό εμφανίζεται όταν ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού είναι πολύ υψηλός. Το μήκος των μικρών οξείων «burrs» που σχηματίζονται είναι ίσο με την πρόωση του εργαλείου.



Σχήμα 3-22: Ο ορισμός της γωνίας εξόδου Ψ της φρέζας από το τεμάχιο (in-plane exit angle) [20].

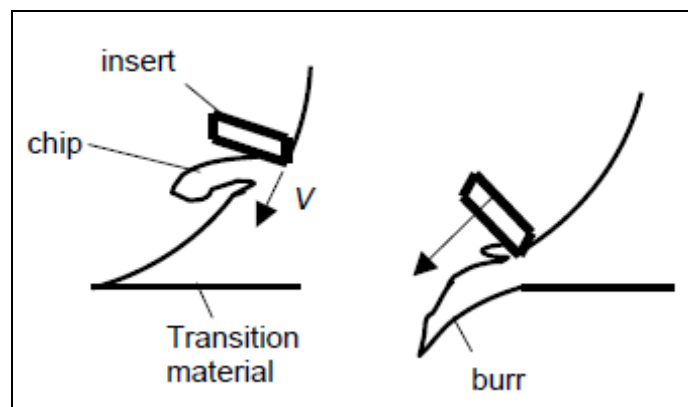
Φρεζάρισμα με κονδύλι

Στο φρεζάρισμα με κονδύλι σχηματίζεται «poisson burr» στην ακμή 1, ενώ ανάλογα και με την γεωμετρία του εργαλείου μπορεί να εμφανιστεί στις ακμές 2, 4 και 10. Στην ακμή 6 σχηματίζεται «burr» εισόδου. Στο μισό των ακμών 5 και 8 σχηματίζεται «burr» εισόδου και στο άλλο μισό «rollover burr». Γενικά και εδώ για την μορφή των «burrs» ισχύουν αυτά που παρουσιάσαμε ακριβώς από πάνω. Το ύψος του «rollover burr» ισούται με το ακτινικό βάθος κοπής έως ότου αυτό να μην υπερβαίνει το 60% της διαμέτρου του εργαλείου. Όταν αυτό συμβαίνει τότε το ύψος του «burr» παραμένει περίπου σταθερό και ίσο με το 60% της ακτίνας του κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 3-23: Τα σχηματιζόμενα «burrs» στο περιφερειακό φρεζάρισμα (end milling) [8].

Σε κάθε περίπτωση, ο μηχανισμός ανάπτυξης του «burr» είναι ο ίδιος. Η ιδιαιτερότητα του φρεζαρίσματος είναι πως το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται διαθέτει περισσότερες από μία κοπτικές ακμές («δόντια»), έτσι για να κατανοήσουμε τον μηχανισμό πρέπει να επικεντρωθούμε στην κίνηση που κάνει μεμονωμένα η κάθε μία από αυτές. Οι Kishimoto (1981), Chern (1993) και Trommer (1997) περιέγραψαν το μηχανισμό σαν ένα συγκεντρωτικό ρολάρισμα του αποβλίττου στην έξοδο του εργαλείου από το τεμάχιο [17]. Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 3-24) στο οποίο απεικονίζεται ο μηχανισμός αυτός, φαίνεται πως η ανάπτυξη του «burr» και ο σχηματισμός του αποβλίττου είναι δύο διαφορετικές διαδικασίες. Το «burr» σχηματίζεται καθώς το υλικό που παρασύρεται παραμορφώνεται πλαστικά ενώ το απόβλιττο παύει να σχηματίζεται όταν ξεκινά ο σχηματισμός του «burr» λόγω αυτής ακριβώς της πλαστικής παραμόρφωσης.

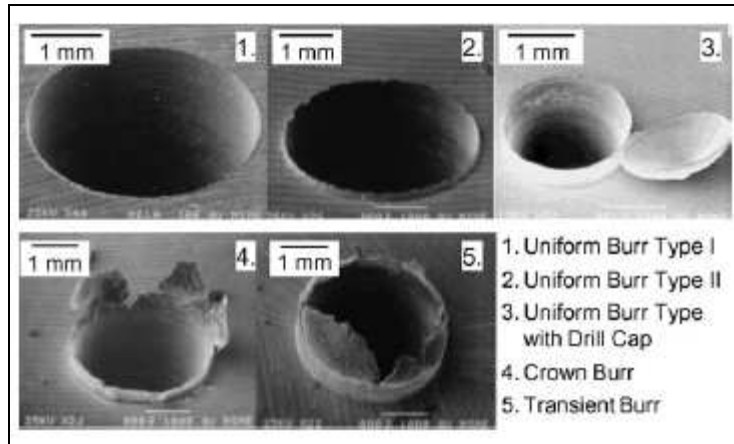


Σχήμα 3-24: Ο σχηματισμός του «burr» στο φρεζάρισμα, στο «μικροσκοπικό» επίπεδο του κάθε οδόντα [17].

3.6.2.3 «Burrs» κατά την διάτρηση

Στη διάτρηση, το «burr» που σχηματίζεται στην είσοδο της οπής είναι αποτέλεσμα «σκισίματος», μίας μορφής κάμψης που ακολουθείται από καθαρή διάτμηση ή πλευρική εξώθηση του υλικού. Το «burr» που εμφανίζεται όταν το κοπτικό εργαλείο εξέρχεται από την οπή είναι τύπου «poisson burr», ενώ στην διαμπερή οπή το «burr» που σχηματίζεται στην έξοδο είναι τύπου «rollover burr».

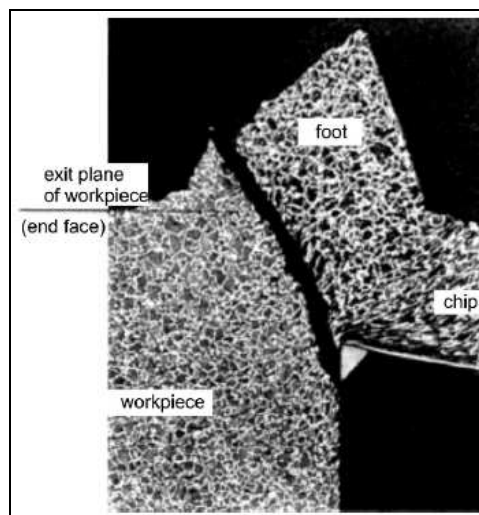
Ο Kim (2001) προτείνει τις εξής κατηγορίες «burrs» για την διάτρηση (σχήμα 3-25): ομοιόμορφο «burr» με ή χωρίς καπάκι, «burr» τύπου στέμματος και «burr» τύπου πέταλο. Στους ανοξείδωτους χάλυβες έχουμε την εμφάνιση δύο ειδών «burr», του ομοιόμορφου (τύπου I: μικρού μεγέθους και τύπου II: μεγάλου μεγέθους) και του τύπου στέμματος, ενώ στους χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης έχουμε την εμφάνιση τριών ειδών «burrs», του ομοιόμορφου (τύπου I: μικρού μεγέθους και τύπου II: μεγάλου μεγέθους), του τύπου στέμματος και του παροδικού (transient).



Σχήμα 3-25: Τα είδη του «burr» κατά την διάτρηση. 1.Ομοιόμορφο τύπου I (uniform burr type I) 2. Ομοιόμορφο τύπου II (uniform type II) 3. Ομοιόμορφο με καπάκι (uniform burr type with drill cap) 4. Τύπου στέμματος (crown burr) 5. Παροδικό (transient burr).

3.6.3 Μηχανισμοί ανάπτυξης του «burr»

Πολλοί είναι οι ερευνητές που έχουν προτείνει μοντέλα για τον σχηματισμό του «burr» στις διάφορες κατεργασίες. Πρωτοπόρος στον τομέα αυτό υπήρξε η δουλειά των Pekelharing και Gillespie. Ο πρώτος επικεντρώθηκε κυρίως στον σχηματισμό του αποβλίττου και όχι τόσο σε αυτό καθαυτό το «burr». Παρόλα αυτά, σύμφωνα και με τα όσα έχουμε δει έως τώρα είναι προφανής η άμεση σχέση «burr» και αποβλίττου. Έτσι ο Pekelharing γίνεται ο πρώτος που μιλά για σχηματισμό «burr» στις κοπές. Στο έργο του «*The exit failure in interrupted cutting (1978)*» τα πειράματα δείχνουν τον σχηματισμό του «burr» στην έξοδο του κοπτικού εργαλείου από το τεμάχιο με παράλληλο σχηματισμό αποβλίττου σε μορφή ποδιού κατά το φρεζάρισμα.



Σχήμα 3-26: Η εμφάνιση «burr» κατά την έξοδο του εργαλείου από το τεμάχιο. Είναι ορατό το απόβλιττο σε μορφή ποδιού. (Pekelharing 1978) [1].

Εξίσου σημαντική δουλειά στο θέμα αυτό κάνει και ο Schafer ο οποίος διαχωρίζει σε πρώτη φάση δύο κατηγορίες σχηματισμού του «burr»:

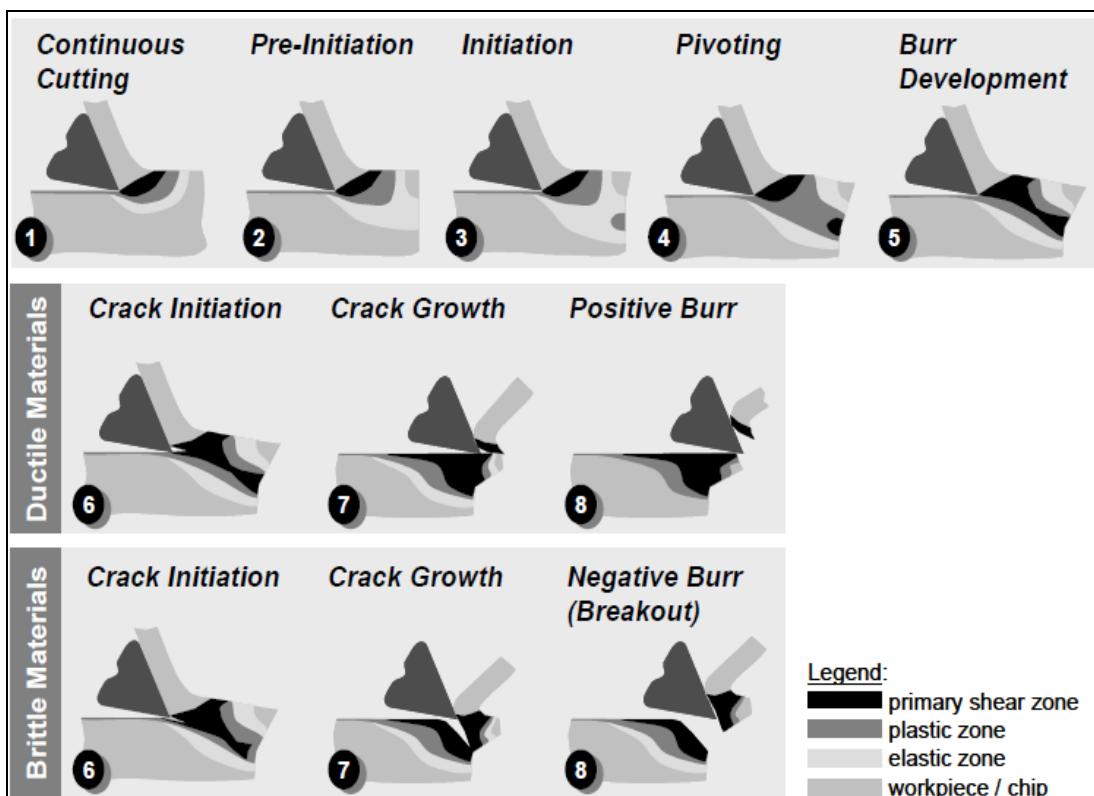
1. Την μετατόπιση του υλικού στην διεύθυνση σχηματισμού του «burr».
2. Την μετατόπιση του υλικού κάθετα στη δύναμη σχηματισμού.

Οι Schafer (1975), Beier (1999) και Thilow (2005) παρατηρούν ότι ο σχηματισμός του «burr» λαμβάνει χώρα στις κοπές όταν υπάρξει ένα κομμάτι υλικού του τεμαχίου το οποίο θα «αποφύγει» την κοπή και αυτό συνήθως συμβαίνει κατά την έναρξη ή το πέρας αυτής. Αυτό μας οδηγεί στα εξής συμπεράσματα [1]:

- Τα υλικά τείνουν να σχηματίζουν μεγαλύτερα και περισσότερα «burrs» όσο αυξάνεται η ολκιμότητα.
- Ο σχηματισμός «burr» είναι μικρότερος όταν το υλικό είναι περιορισμένο για να παραμορφωθεί προς τη διεύθυνση των δυνάμεων κοπής λόγω της γεωμετρίας του τεμαχίου και των συνθηκών κοπής.

Ο Gillespie (1999) διατυπώνει έξι φυσικές διεργασίες που οδηγούν στην εμφάνιση του «burr». Οι διεργασίες αυτές παρουσιάστηκαν στην πρώτη στήλη του πίνακα 3.1 (δες παρ. 3.6.1) [1].

Ίσως το πιο ολοκληρωμένο και κοινά αποδεκτό μοντέλο για τον σχηματισμό του «burr» προτείνουν οι Hashimura, Chang και Dornfeld οι οποίοι συσχετίζουν το μηχανισμό δημιουργίας του «burr» όχι μόνο με τις συνθήκες κοπής αλλά και με τις μηχανικές ιδιότητες του κατεργαζόμενου υλικού. Το μοντέλο αυτό περιορίζεται στην ορθογωνική κοπή [1, 9]. Στη συνέχεια παρουσιάζεται σχηματικά.



Σχήμα 3-27: Η διαδικασία σχηματισμού του «burr» κατά τους Hashimura, Chang και Dornfeld [9].

Στο μοντέλο αυτό διακρίνονται οκτώ στάδια σχηματισμού του «burr», για τα οποία από ένα σημείο και μετά γίνεται διαχωρισμός μεταξύ όλκιμων και ψαθυρών υλικών. Αυτό είναι απαραίτητο διότι η διάδοση της ρηγμάτωσης και η παραμόρφωση που είναι πολύ σημαντικές για το τελικό «burr» διαφέρουν κατά την κατεργασία όλκιμων και ψαθυρών υλικών. Διακρίνονται τα ακόλουθα οκτώ στάδια λοιπόν (δες και σχήμα 3-27):

Στάδιο 1^ο: Μόνιμη κατάσταση συνεχούς κοπής (*continuous cutting*)

Περιγράφεται η κοπή, κατά την οποία έχουν αποκατασταθεί συνθήκες μόνιμης κατάστασης με απόβλιττο συνεχούς «ροής» για τα όλκιμα υλικά είτε ασυνεχές για τα ψαθυρά. Στην φάση αυτή η παραμορφώσεις και η κατανομή των τάσεων δεν έχουν καμία επίπτωση στο «burr» καθώς δεν έχουμε πλησιάσει ακόμη την άκρη του τεμαχίου.

Στάδιο 2^ο: Φάση της προ – έναρξης (*pre – initiation*)

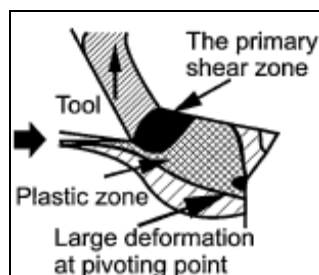
Στο στάδιο αυτό οι παραμορφώσεις και η κατανομή των τάσεων ξεκινούν να αλληλεπιδρούν με το άκρο του τεμαχίου. Η ζώνη ελαστικής παραμόρφωσης (*elastic zone*) διασταυρώνεται με το άκρο του τεμαχίου και εμφανίζεται σαν ελαστική κάμψη, ακολουθούμενη και από την ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης (*plastic zone*) η οποία και αυτή με τη σειρά της προσεγγίζει το άκρο του τεμαχίου. Καθώς το κοπτικό εργαλείο πλησιάζει την άκρη, η κάμψη από ελαστική μετατρέπεται σταδιακά σε πλαστική.

Στάδιο 3^ο: Φάση της έναρξης (*initiation*)

Εδώ ξεκινά ο σχηματισμός του «burr». Η ζώνη της πλαστικής παραμόρφωσης και η ζώνη διάτμησης (*primary shear zone*) επεκτείνονται και εκδηλώνεται εντονότερα η πλαστική κάμψη.

Στάδιο 4^ο: Περιστροφή (*pivoting*)

Στο στάδιο αυτό μία εκτεταμένη καταστροφική παραμόρφωση λαμβάνει χώρα στην άκρη του τεμαχίου. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ένα σημείο περιστροφής (*pivoting point*) στη θέση της μέγιστης παραμόρφωσης γύρω από το οποίο τείνει να «περιστραφεί» το αναπτυσσόμενο «burr».



Σχήμα 3-28: Το 4^ο στάδιο της ανάπτυξης του «burr» με την εμφάνιση του σημείου περιστροφής.

Στάδιο 5^ο: Σχηματισμός του «burr» & «αρνητικής» ζώνης διάτμησης

Στη φάση αυτή το «burr» αρχίζει πια να είναι ορατό και η εκτεταμένη παραμόρφωση στην περιοχή του «pivoting point» ενώνεται με αυτή στην περιοχή της κύριας ζώνης διάτμησης, σχηματίζοντας έτσι μία ζώνη μεγάλης παραμόρφωσης κάτω από την γραμμή κοπής η οποία ονομάζεται αρνητική ζώνη διάτμησης (*negative shear zone*). Όσο το κοπτικό εργαλείο συνεχίζει να κινείται προς την έξοδο απ' το τεμάχιο τόσο το αναπτυσσόμενο «burr» τείνει να περιστραφεί γύρω από το «pivoting point» αυξάνοντας έτσι το μέγεθος του «burr».

Καθώς η ρωγμή ξεκινά να σχηματίζεται και το απόβλιττο να αποχωρίζεται από το τεμάχιο, για τα επόμενα στάδια γίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ όλκιμων (ductile) και ψαθυρών (brittle) υλικών. Έχουμε λοιπόν:

Στάδιο 6^ο – Όλκιμο υλικό: Έναρξη ρηγμάτωσης (crack initiation)

Η ρηγμάτωση ξεκινά στην κοπτική ακμή (tool tip) του εργαλείου στην περιοχή της κύριας ζώνης διάτμησης ακολουθώντας την κοπτική γραμμή (cutting line). Αυτό εξηγείται από τις ιδιότητες των υλικών αυτών, τα οποία έχουν μεγάλες κρίσιμες παραμορφώσεις θραύσης σε τιμές ανάλογες με αυτές που εμφανίζονται στην περιοχή της κύριας ζώνης διάτμησης όπου είναι μεγαλύτερες απ' ό,τι στην περιοχή της αρνητικής ζώνης διάτμησης. Είναι προφανές λοιπόν πως η ρωγμή θα ξεκινήσει να αναπτύσσεται εκεί όπου υπάρχει η μικρότερη αντίσταση (ευνοϊκότερες συνθήκες).

Στάδιο 7^ο – Όλκιμο υλικό: Διάδοση της ρωγμής (crack growth)

Η επέκταση της ρηγμάτωσης λαμβάνει χώρα κατά την διεύθυνση της ζώνης αρνητικής διάτμησης. Το εργαλείο καθώς προχωρά όχι μόνο οδηγεί στην αύξηση της ρηγμάτωσης, αλλά παράλληλα παραμορφώνει και το τεμάχιο. Η ρωγμή μεγαλώνει κατά την διεύθυνση της κοπής.

Στάδιο 8^ο – Όλκιμο υλικό: Σχηματισμός «θετικού burr» (positive burr)

Στη φάση αυτή ολοκληρώνεται ο σχηματισμός του «burr». Η ρωγμή οδηγεί στον αποχωρισμό του αποβλίττου από το τεμάχιο και τελικά παραμένει το «burr» στην άκρη αυτού σαν «επιπλέον» υλικό (positive burr).

Αντίστοιχα έχουμε:

Στάδιο 6^ο – Ψαθυρό υλικό: Έναρξη ρηγμάτωσης (crack initiation)

Στην φάση αυτή δεν εντοπίζεται κάποια σημαντική διαφορά σε σχέση με τα όλκιμα υλικά.

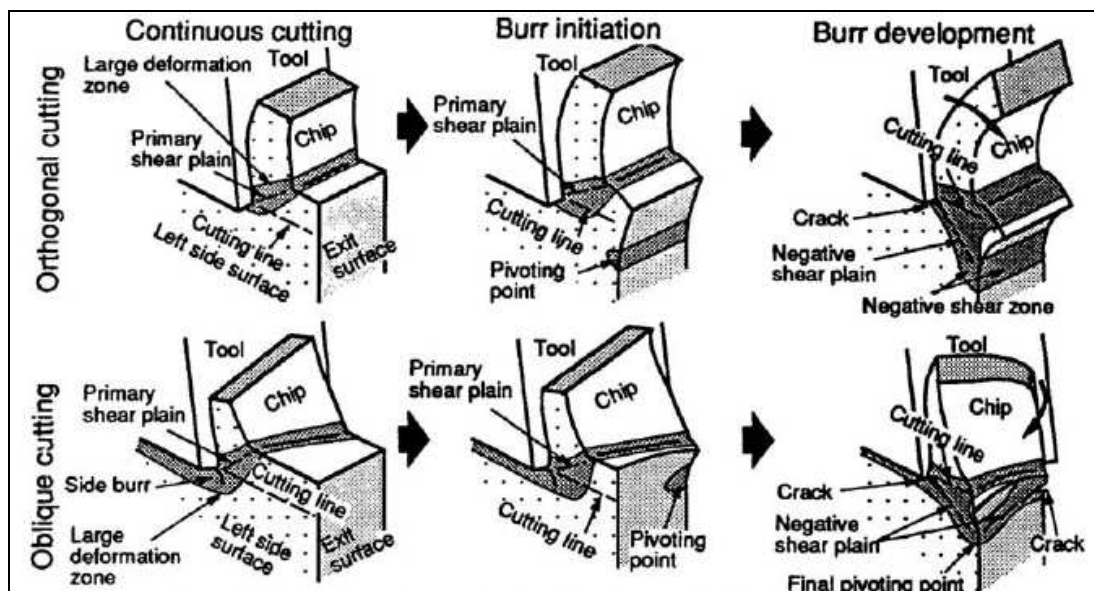
Στάδιο 7^ο – Ψαθυρό υλικό: Διάδοση της ρωγμής (crack growth)

Σε αντίθεση με τα όλκιμα υλικά, τα ψαθυρά έχουν μικρότερες παραμορφώσεις θραύσης και αυτό ευνοεί την ανάπτυξη της ρωγμής κατά την διεύθυνση της ζώνης αρνητικής διάτμησης (διεύθυνση μικρότερης αντίστασης).

Στάδιο 8^ο – Ψαθυρό υλικό: Σχηματισμός «αρνητικού burr» (negative burr)

Η ολοκλήρωση του σχηματισμού «burr» για το ψαθυρό υλικό γίνεται και εδώ με τον αποχωρισμό του αποβλίττου από το τεμάχιο. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την επιφάνεια όπου έγινε η θραύση με μία μικρή ποσότητα παραμορφωμένου υλικού. Σε συνδυασμό και με την απουσία του υλικού που απομακρύνθηκε πάνω από την ζώνη αρνητικής διάτμησης έχουμε τελικά τον σχηματισμό του «αρνητικού burr» (negative burr) που εκφράζει κυρίως την απουσία του υλικού στο άκρο του τεμαχίου.

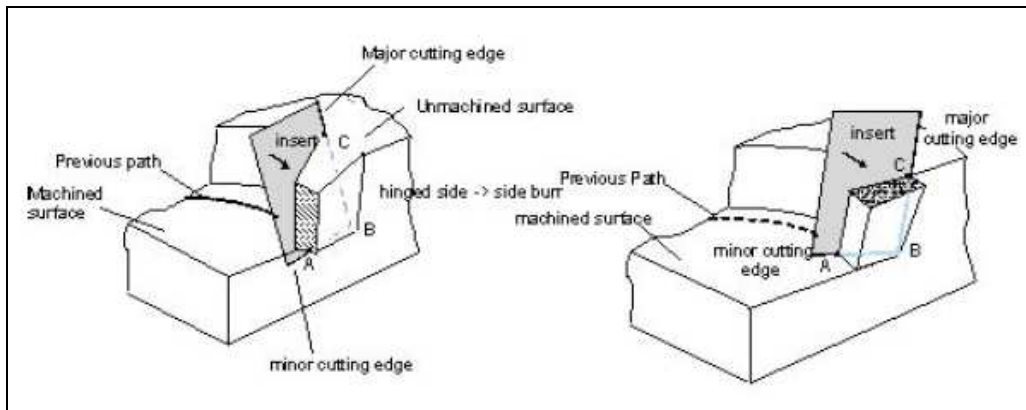
Μετά την εκτενή παρουσίαση του, ίσως, πιο αναλυτικού και κοινώς αποδεκτού μηχανισμού ανάπτυξης του «burr» ο οποίος όμως αναφέρεται μόνο στην ορθογωνική κοπή, αξίζει να κάνουμε μία αναφορά για τον αντίστοιχο μηχανισμό κατά την λοξή κοπή (oblique cut). Θα τον παρουσιάσουμε εν συντομία και παράλληλα με αυτόν της ορθογωνικής κοπής καθώς οι ουσιαστικές διαφορές δεν είναι πολλές.



Σχήμα 3-29: Ο μηχανισμός ανάπτυξης του «burr» κατά την λοξή κοπής (oblique cut). Παρουσιάζεται σε μία σύντομη εποπτεία παράλληλα με αυτόν της ορθογωνικής κοπής όπως τον είδαμε παραπάνω, σταχυολογώντας ίσως τα πιο χαρακτηριστικά στάδια, την μόνιμη κατάσταση της συνεχούς κοπής (continuous cutting), την έναρξη της εμφάνισης «burr» (burr initiation) και την φάση ανάπτυξης του «burr» (burr development) [9].

Η διερεύνηση του μηχανισμού για την λοξή κοπή έγινε από ερευνητική ομάδα του D.A. Dornfeld [9]. Η βασική διαφορά όσον αφορά στις συνθήκες έγκειται στην «λοξή» διείδυση του κοπτικού εργαλείου στο τεμάχιο. Αυτό οδηγεί τελικά στην εμφάνιση μικρότερου «burr» εξόδου απ' ότι στην ορθογωνική κοπή, όμως και στην παράλληλη εμφάνιση ενός πλάγιου «burr» που απουσιάζει από την ορθογωνική κοπή και το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι το σχηματιζόμενο απόβλιττο πέρα από την κίνηση που κάνει κατά την διεύθυνση της κοπής (όπως και στην ορθογωνική κοπή) υπόκειται και σε μία «στροφή» ή ώθηση προς το πλάι λόγω της λοξής διεύθυνσης της κοπτικής ακμής σε σχέση με την διεύθυνση κοπής.

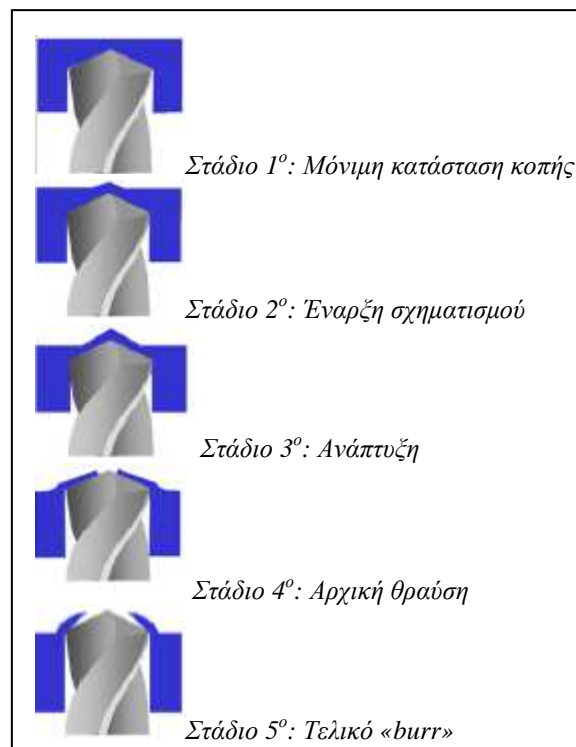
Το μοντέλο του μηχανισμού εμφάνισης του «burr» για την λοξή κοπή είναι σημαντικό καθώς μπορεί να εφαρμοστεί για να εξηγήσει τον αντίστοιχο μηχανισμό για το φρεζάρισμα. Αυτό είναι πιο ξεκάθαρο εάν απομονώσουμε την κοπή που κάνει ο κάθε οδόντας του εργαλείου φρέζας. Σημαντική δουλειά στο πεδίο αυτό έχουν κάνει οι Hashimura και Dornfeld περιγράφοντας και κατηγοριοποιώντας το «burr» για το φρεζάρισμα [1]. Σχηματική απεικόνιση μπορούμε να δούμε στο επόμενο σχήμα. Ο τρόπος εξόδου του κοπτικού εργαλείου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό του «burr», στις διαστάσεις του και την θέση όπου εμφανίζεται. Το υλικό που βρίσκεται πάνω από την γραμμή κοπής ωθείται προς τα κάτω και παραμένει στο τεμάχιο σαν «burr» αφότου το κοπτικό εργαλείο αποχωριστεί από το τεμάχιο. Γενικά τα «burrs» εμφανίζονται είτε κατά τη διεύθυνση της πρόωσης είτε κατά την διεύθυνση της κοπής είτε και τα δύο ταυτόχρονα.



Σχήμα 3-30: Ο σχηματισμός του «burr» στο μετωπικό φρεζάρισμα [10].

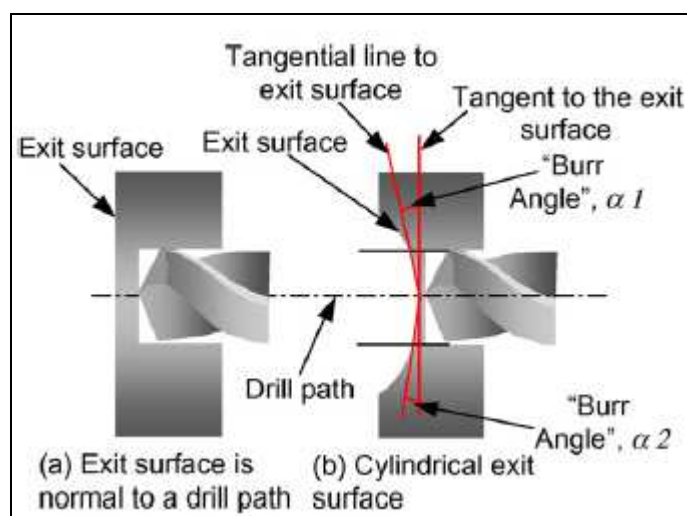
Ο τρόπος εξόδου του εργαλείου κατατάσσει το «burr» σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το πώς τα σημεία A, B και C που ορίζονται επί του εργαλείου εξέρχονται από το τεμάχιο. Έξι τρόποι εξόδου είναι πιθανοί οι όποιοι σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα είναι οι ABC, BAC, ACB, BCA, CAB και CBA και καταγράφονται με αύξουσα σειρά σε σχέση με το μέγεθος του «burr» που δημιουργείται [10].

Τελειώνοντας με τις βασικές κατεργασίες όπως τις παρουσιάσαμε στο 1^ο κεφάλαιο, για την διάτρηση προτείνεται μηχανισμός ανάπτυξης του «burr» αντίστοιχος με τα βασικά στάδια αυτού που πρότειναν οι Hashimura, Chang και Domfeld με την διαφορά πως εδώ η διαδικασία εξετάζεται ίσως πιο μακροσκοπικά καθώς απομακρυνόμαστε από την περιοχή της κοπτικής ακμής και παρακολουθούμε συνολικά την κατεργασία (δες σχήμα 3-34). Βέβαια η λογική ανάπτυξης του «burr» είναι ίδια με αυτή του βασικού μηχανισμού αποβολής υλικού, απλώς λόγω της φύσης της κατεργασίας δίνεται με σχηματική αναπαράσταση για καλύτερη κατανόηση.



Σχήμα 3-31: Ο μηχανισμός ανάπτυξης του «burr» για την διάτρηση [1].

Στο μικροσκοπικό επίπεδο ισχύουν ακριβώς τα ίδια, ενώ είναι σημαντικό να επισημάνουμε πως σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η μορφή της επιφάνειας εξόδου στο τελικό «burr» και πιο συγκεκριμένα η γωνία που σχηματίζει η εφαπτομένη της επιφάνειας με την κάθετη στη διεύθυνση διάτρησης (δες επόμενο σχήμα).



Σχήμα 3-32: Η διάτρηση σε σχέση με την διασταυρούμενη επιφάνεια [1].

Είναι προφανές βέβαια πως λόγω της φύσης της κατεργασίας το μόνο «burr» που εμφανίζεται είναι αυτό της εξόδου του κοπτικού εργαλείου από το τεμάχιο.

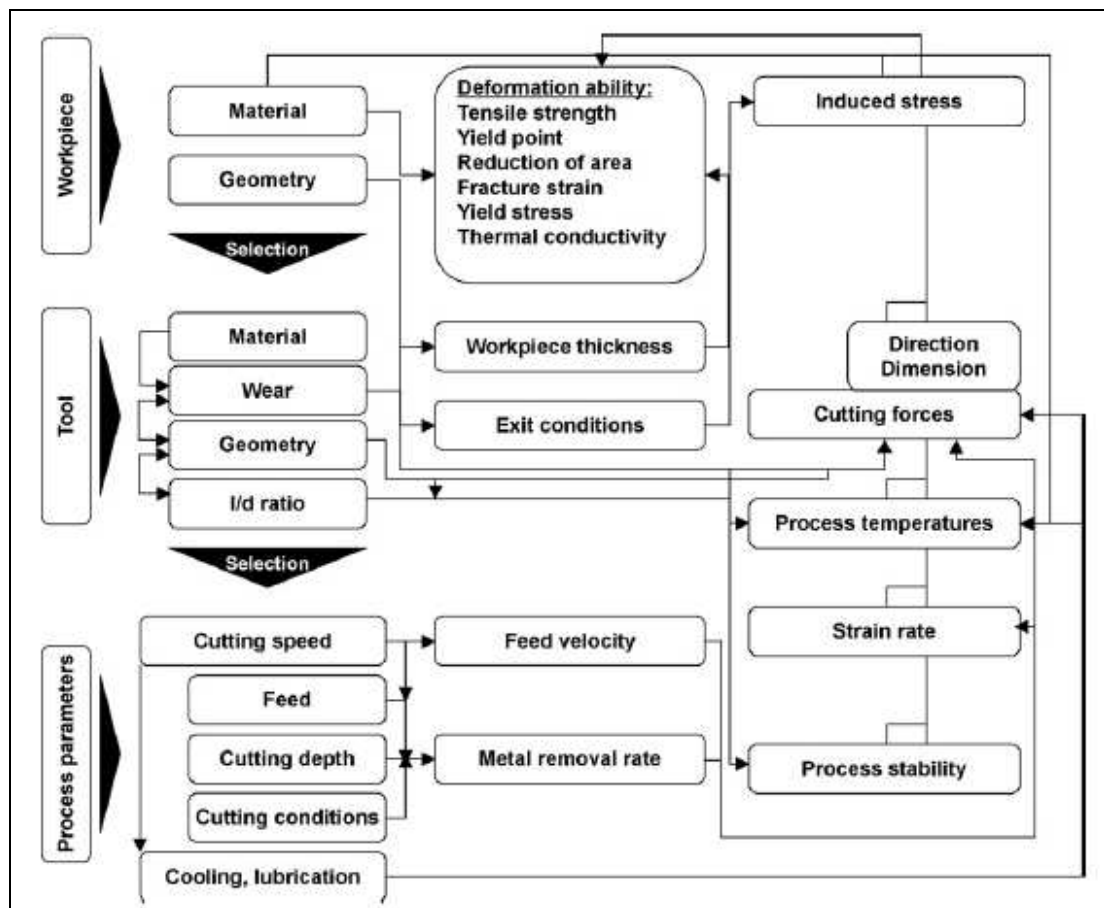
3.6.4 Από τί επηρεάζεται το «burr»

Το κομμάτι εκείνο που σχετίζεται με την διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν τον σχηματισμό του «burr» είναι αναμφίβολα το πιο σημαντικό καθώς είναι αυτό που θα μας επιτρέψει να ελέγξουμε το φαινόμενο και να περιορίσουμε την εμφάνισή του για τους λόγους που παρουσιάστηκαν στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου. Είναι σημαντικό να επισημανθεί πως η διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν το «burr» εμφανίζει μεγάλη πολυπλοκότητα καθώς έχουμε μεγάλο αριθμό από αυτούς και αυξημένη αλληλεξάρτηση τόσο μεταξύ τους όσο και με το «burr». Ήδη από το 1976 ο Gillespie επισημαίνει πως η ελαχιστοποίηση του «burr» δεν μπορεί να επιτευχθεί απλά και μόνο με μεμονωμένες αλλαγές παραμέτρων της κοπής.

Η εξέταση του φαινομένου ξεκινά από τη θεωρητική αναζήτηση η οποία περιλαμβάνει για παράδειγμα μηχανισμούς κοπής, ανάπτυξης «burr» κλπ και είναι προφανές πως πρέπει να ακολουθήσει επιβεβαίωση των συμπερασμάτων τόσο με τη βοήθεια πειραμάτων όσο και με την χρήση κατάλληλα ανεπτυγμένης μοντελοποίησης των διαδικασιών καθώς βρισκόμαστε πια σε μία εποχή που η τεχνολογία προσφέρει τέτοιες δυνατότητες.

Ξεκινώντας την διερεύνηση λοιπόν, θέλουμε να εξετάσουμε ποιοι παράγοντες επηρεάζουν την εμφάνιση του «burr» και μάλιστα με ποιο τρόπο επιδρούν σε αυτή έτσι ώστε να μπορούμε να τους χειριστούμε κατάλληλα κατά περίπτωση. Οι παράγοντες αυτοί κατηγοριοποιούνται σε τρεις μεγάλες ομάδες. Οι ομάδες αυτές έχουν σχέση με το φαινόμενο και είναι ίδιες για κάθε κοπή που μελετάται. Πρόκειται για το κατεργαζόμενο τεμάχιο, για το κοπτικό εργαλείο και για τις συνθήκες βάσει των οποίων αυτά αλληλεπιδρούν, δηλαδή τις συνθήκες κοπής. Για κάθε μία από αυτές διακρίνονται οι πιο σημαντικοί παράγοντες σε σχέση πάντα με το «burr». Έτσι

για το κατεργαζόμενο τεμάχιο είναι το υλικό και η γεωμετρία του, για το κοπτικό εργαλείο είναι το υλικό, η φθορά και η γεωμετρία του και για τις συνθήκες κοπής είναι η πρόωση, η ταχύτητα κοπής, το βάθος κοπής και το μέσο ψύξης. Όπως είπαμε και προηγουμένως δεν επαρκεί να μεταβάλλουμε έναν μόνο παράγοντα καθώς υπάρχουν πολύπλοκες εξαρτήσεις μεταξύ αυτών ούτε μπορούμε να διαχωρίσουμε με σαφήνεια κάποιους σε πρωτεύοντες και κάποιους άλλους σε δευτερεύοντες. Ο Link (1992) προτείνει το ακόλουθο σχήμα όπου φαίνονται οι έντονες αλληλεξαρτήσεις των διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν το «burr».



Σχήμα 3-33: Οι έντονες αλληλεξαρτήσεις των διαφόρων παραγόντων που υπεισέρχονται στην εμφάνιση του «burr» [1].

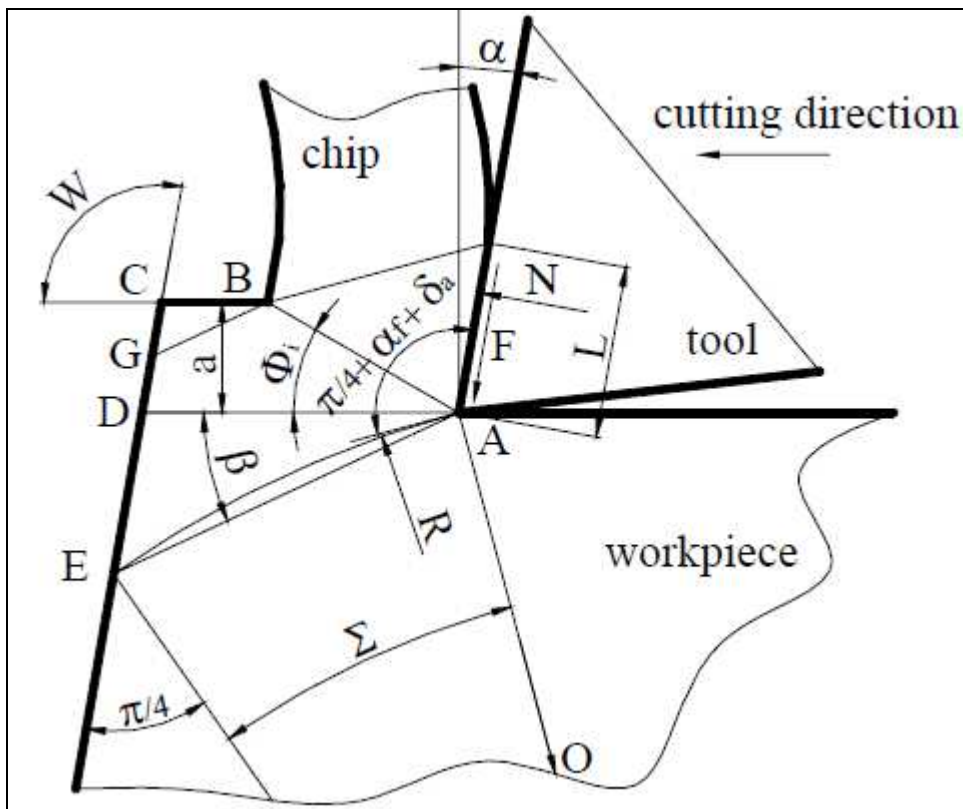
Οι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά το «burr» είναι το υλικό του τεμαχίου, η γεωμετρία του εργαλείου, η φθορά του εργαλείου, η διαδρομή που αυτό ακολουθεί και φυσικά οι συνθήκες κοπής. Βέβαια στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αδύνατη η αλλαγή υλικού του τεμαχίου, όπως επίσης και η διαφοροποίηση της διαδρομής του εργαλείου καθώς αυτό θα έδινε εκτεταμένους χρόνους κατεργασίας [1], οπότε αυτοί οι δύο παράγοντες μπαίνουν κάπως στο περιθώριο.

Η αναζήτηση της επίδρασης των παραμέτρων της κοπής ξεκινά θεωρητικά βάσει του μηχανισμού ανάπτυξης του «burr» που παρουσιάστηκε παραπάνω. Σημαντική δουλειά πάνω σε αυτό το κομμάτι έχει γίνει από τους A. Toporog και S.L. Ko [2]. Η διαδικασία μελετάται καθαρά βάσει του γεωμετρικού προβλήματος επιχειρώντας από τα διάφορα στάδια ανάπτυξης του «burr» τελικά σε δύο εξισώσεις που θα προβλέπουν τις διαστάσεις του «burr» (ύψος και πάχος «ρίζας») όπως ορίζονται στο σχήμα 3-4) συναρτήσεως των διαφόρων παραμέτρων.

Αρχικά θεωρούμε ιδανικά το κοπτικό εργαλείο απόλυτα αιχμηρό (χωρίς ράδιο στην κοπτική ακμή) και στιβαρό καθώς επίσης και πως το κατεργαζόμενο υλικό έχει ιδανικές πλαστικές ιδιότητες. Το όριο διαρροής σε διάτμηση του υλικού τ_{ϕ} δίνεται από την ακόλουθη σχέση συναρτήσει των ιδιοτήτων του υλικού:

$$\tau_{\phi} = \sigma_u \cdot (1 + 0.5 \cdot \delta) \quad (3.1)$$

όπου σ_u είναι το όριο θραύσης και δ η επί τοις εκατό επιμήκυνση. Κατά την έναρξη του σχηματισμού «burr» και ενώ πρακτικά βρισκόμαστε ακόμα σε μόνιμη κατάσταση κοπής, βάσει του μηχανισμού που παρουσιάσαμε έχουμε το ακόλουθο «στιγμιότυπο» με τα γεωμετρικά του στοιχεία.



Σχήμα 3-34: Η έναρξη του σχηματισμού «burr» [2].

Στη γενική περίπτωση η επιφάνεια εξόδου του κοπτικού εργαλείου από το τεμάχιο βρίσκεται υπό κλίση ως προς την διεύθυνση κοπής σχηματίζοντας γωνία W με αυτή η οποία γενικά ονομάζεται γωνία εξόδου (*exit angle*). Κατά τις συνθήκες μόνιμης κατάστασης στην κοπή η περιοχή παραμόρφωσης εντοπίζεται πάνω στο ευθύγραμμο τμήμα AB (δες σχήμα 3-29). Στο στιγμιότυπο αυτό η γραμμή AB τέμνει την επιφάνεια αποβλίττου στο σημείο A υπό γωνία $\pi/4 + \alpha_f$ σύμφωνα με τις οριακές συνθήκες για τις γραμμές ολίσθησης (*Kachanov L.M.: Basis of the Theory of Plasticity. Moscow, 1969*). Η γωνία α_f η οποία συχνά καλείται “γωνία πλαστικής τριβής”, δίνεται από την σχέση:

$$\alpha_f = \frac{\pi}{4} - 0.5 \cdot \alpha \cdot \cos\left(\frac{\tau_f}{\tau_{\phi}}\right) \quad (3.2)$$

και ορίζει την διεύθυνση της γραμμής ολίσθησης ως προς το όριο. Στην παραπάνω σχέση τ_f είναι η μέση τάση λόγω τριβής στη διεπιφάνεια αποβλίττου – εργαλείου. Οι γωνίες τόσο μέχρι εδώ όσο και στη συνέχεια δίνονται σε ακτίνια (rad). Καθώς το εργαλείο προχωρά, η ζώνη παραμόρφωσης επεκτείνεται με κατώτατο όριο της περιοχής αυτής το ευθύγραμμο τμήμα ΑΕ. Γενικά η “φύση” του τμήματος ΑΕ είναι πολύπλοκη. Με μία καλή προσέγγιση μπορούμε να το θεωρήσουμε ευθύ. Όμως στην πραγματικότητα παρουσιάζει μια καμπυλότητα που μας δίνει την δυνατότητα να το θεωρήσουμε τόξο κύκλου ακτίνας R. Σύμφωνα με τις οριακές συνθήκες [Kachanov L.M.: *Basis of the Theory of Plasticity. Moscow, 1969*] η γραμμή ΑΕ περνά την επιφάνεια εξόδου ΕC υπό γωνία $\pi/4$ και τη διεπιφάνεια αποβλίττου – εργαλείου υπό γωνία $\pi/4 + \alpha_f + \delta_\alpha$. Η ακτίνα R και η γωνία δ_α μπορούν να υπολογιστούν υπό την υπόθεση ότι το τμήμα ABCE που δεν υφίσταται κοπή παραμορφώνεται όπως το τμήμα ABGE, το οποίο καταπονείται από το φορτίο της γραμμής διάτμησης AB. Σύμφωνα με τον μηχανισμό το κομμάτι BCG παραμένει σχετικά ανέπαφο ενώ το κομμάτι ABGE παραμορφώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε $AB=EG$. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε γεωμετρικά τη γωνία (αρνητικής) διάτμησης β , τη γωνία δ_α και την γωνία κυκλικού τομέα Σ ως εξής:

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot (\pi - W - \Phi) \quad (3.3)$$

$$\delta_\alpha = \frac{\pi}{2} - \alpha_f + \alpha - \Phi \quad (3.4)$$

$$\Sigma = \frac{\pi}{2} - W + \Phi \quad (3.5)$$

όπου α είναι η γωνία αποβλίττου (*rake angle*) και Φ η συμβατική γωνία (θετικής) διάτμησης. Η ακτίνα R υπολογίζεται λύνοντας την ισοροπία ροπών ως προς το σημείο O, κέντρο του τόξου ΑΕ. Είναι

$$R = \frac{-[N \cdot \cos(\theta) + F \cdot \sin(\theta)] - \sqrt{[N \cdot \cos(\theta) + F \cdot \sin(\theta)]^2 - 2 \cdot \tau_f \cdot \Sigma \cdot N \cdot L}}{-2 \cdot \tau_f \cdot \Sigma} \quad (3.6)$$

όπου L είναι το μήκος επαφής εργαλείου – αποβλίττου, F και N οι δυνάμεις τριβής και κάθετης αντίδρασης αντίστοιχα και η γωνία θ υπολογίζεται γεωμετρικά ως εξής

$$\theta = -\frac{\pi}{4} + \alpha_f + \delta_\alpha \quad (3.7)$$

Εδώ υποθέτουμε πως στο μήκος επαφής εργαλείου – αποβλίττου L οι τάσεις από τις δυνάμεις F και N (σ_n και σ_f αντίστοιχα) κατανομούνται ομοιόμορφα. Στην γενική περίπτωση όπου η γωνία α_f κυμαίνεται μεταξύ 0 και $\pi/4$ έχουμε

$$\sigma_n = -2 \cdot \tau_\phi \cdot \left(0.5 - \alpha + \alpha_f - \Delta\alpha + 0.5 \cdot \arccos(2 \cdot \alpha_f) \right) \quad (3.8)$$

όπου $\Delta\alpha$ η κλίση της κατεργασμένης επιφάνειας (εδώ για το σχήμα 3-33 είναι $\Delta\alpha=0$). Ο Kushner [Kushner V.S.: *Thermo-Mechanical Theory of Continuous Cutting of Plastic Metals. Irkutsk, 1982*] βρήκε πως η τάση λόγω της τριβής τ_f εξαρτάται από την

θερμοκρασία t_r στη διεπιφάνεια αποβλίττου – εργαλείου και υπολογίζεται από την σχέση

$$\tau_f = \tau_\Phi \cdot (1 - 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot t_r) \quad (3.9)$$

Και η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια δίνεται πάλι σύμφωνα με τον Kuser, από την σχέση

$$t_r = 0.82 \cdot \frac{S_u}{C_v} \cdot \varepsilon + 105 \cdot \left(\frac{S_u}{100 \cdot C_v} \right)^{0.8} \cdot \left(\frac{v \cdot a}{v} \right)^{0.4} \quad (3.10)$$

όπου S_u είναι το πραγματικό όριο θραύσης, C_v η θερμοχωρητικότητα, ε η παραμόρφωση διάτμησης και ω η θερμική αγωγιμότητα του κατεργαζόμενου υλικού, ενώ v είναι η ταχύτητα κοπής και a το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου (πρακτικά το βάθος κοπής). Το μήκος επαφής εργαλείου – αποβλίττου L δίνεται από την σχέση των Lee και Shaffer

$$L = \alpha \cdot \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot \sin \Phi \cdot \sin \left(\frac{\pi}{4} + \Phi - \alpha \right)} \quad (3.11)$$

ενώ η γωνία διάτμησης Φ υπολογίζεται από τη σχέση

$$\Phi = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \alpha - \alpha_f - \Delta\alpha - \Phi_m \right) \quad (3.12)$$

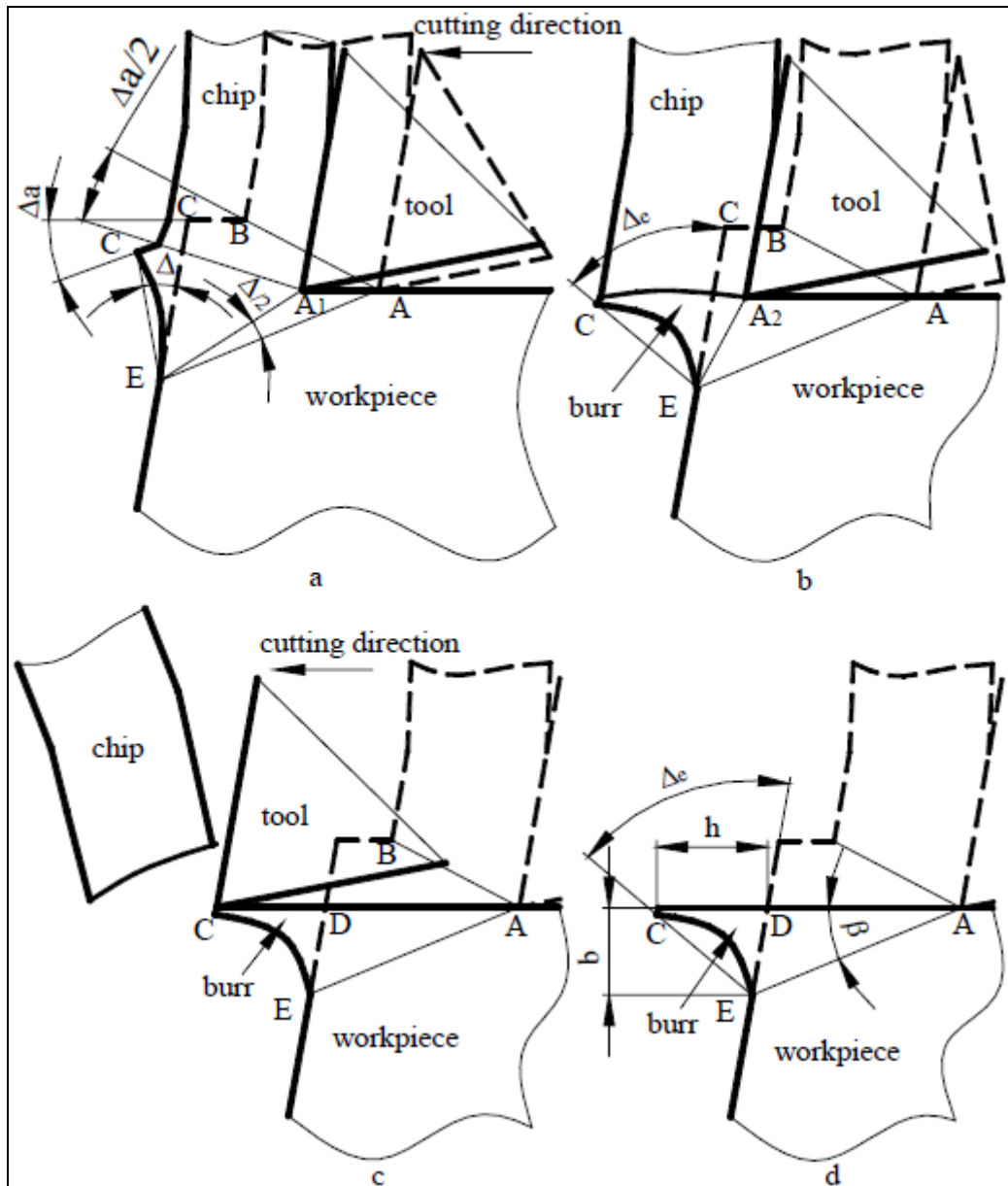
όπου Φ_m σταθερά του υλικού. Εφόσον έχουμε υπολογίσει την ακτίνα R , μπορούμε να υπολογίσουμε και το μήκος AE ως εξής

$$AE = R \cdot \sqrt{2 \cdot (1 - \cos \Sigma)} \quad (3.13)$$

Εδώ υποθέτουμε πως η γωνία α_f δεν μεταβάλλεται έως τον τελικό σχηματισμό του «burf». Μετά την έναρξη σχηματισμού του «burf», καθώς το εργαλείο μεταβαίνει στο σημείο $A1$, ο σχηματισμός του αποβλίττου συνεχίζεται και η επιφάνεια εξόδου EC περιστρέφεται κατά μία γωνία Δ (δες επόμενο σχήμα). Βάσει των νέων οριακών συνθηκών και της σχέσης (3.3) η τρέχουσα γωνία της αρνητικής διάτμησης αυξάνεται κατά $\Delta/2$ σε αυτή τη θέση. Την ίδια στιγμή η επιφάνεια BC περιστρέφεται κατά μία γωνία $\Delta\alpha$ για την οποία βάσει πειραματικών παρατηρήσεων ισχύει $\Delta\alpha = \Delta$. Όταν η επιφάνεια BC περιστραφεί τελικά κατά μία γωνία Δ_e όπου

$$\Delta_e = \frac{\pi}{2} + \alpha - \alpha_f - 2 \cdot \Phi_t - \Phi_m \quad (3.14)$$

η γωνία διάτμησης Φ σύμφωνα με τη σχέση (3.12) μηδενίζεται. Σε αυτό ακριβώς το σημείο υποτίθεται πως γίνεται η θραύση, το απόβλιττο αποσχίζεται από το τεμάχιο και ο σχηματισμός του «burf» έχει σχεδόν ολοκληρωθεί (δες σχήμα 3-35b).



Σχήμα 3-35: Τα στάδια σχηματισμού του «burr» με τα γεωμετρικά μεγέθη [2].

Την στιγμή της διάδοσης της ρωγμής το απόβλιττο απομακρύνεται από το τεμάχιο (δες σχήμα 3-35c). Στο τελευταίο στάδιο σχηματισμού του «burr» το τελικό πάχος του αποβλίττου μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το αρχικό και η καμπυλότητα της γραμμής θετικής διάτμησης να έχει αλλάξει. Το τελικό «burr» με σημειωμένες τις διαστάσεις του φαίνεται στο σχήμα 3-31d. Είναι προφανές πως το πάχος της «ρίζας» καθορίζεται από την τελική θέση του σημείου E. Βάσει της γεωμετρίας εύκολα υπολογίζεται

$$b = (AE) \cdot \sin \beta \quad (3.15)$$

Το ύψος του τελικού «burr» υπολογίζεται με βάση την παραδοχή ότι ο σχηματισμός σταματάει όταν η επιφάνεια εξόδου EC περιστραφεί κατά γωνία Δ_e . Αντίστοιχα βάσει της γεωμετρίας υπολογίζεται τελικά

$$h = \left[\frac{K \cdot \cos(\Delta_e - W)}{\sin W} \cdot (a + AE \cdot \sin \beta) + b \cdot \tan\left(W - \frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (3.16)$$

όπου K είναι μία σταθερά που χαρακτηρίζει τη στρέβλωση της επιφάνειας εξόδου κατά τον σχηματισμό του «burr». Έτσι καταλήξαμε τελικά στις σχέσεις υπολογισμού των τελικών διαστάσεων του «burr». Ρίχνοντας μία δεύτερη ματιά στην θεωρητική αυτή ανάλυση μπορούμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

- Το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου, δηλαδή πρακτικά το βάθος κοπής, έχει μεγάλη επιρροή στο τελικό «burr». Το μέγεθος του «burr» αυξάνεται πρακτικά γραμμικά καθώς αυξάνεται το βάθος κοπής.
- Η αύξηση της γωνίας αποβλίττου οδηγεί σε μείωση του «burr», όχι όμως τόσο ξεκάθαρα.
- Καθώς η γωνία εξόδου από το τεμάχιο αυξάνεται, το «burr» ελαττώνεται και σε μία κρίσιμη γωνία ανάλογα με τις συνθήκες κοπής (εδώ υπενθυμίζουμε τις πολύπλοκες αλληλεξαρτήσεις των διαφόρων παραγόντων) μπορεί και να ελαχιστοποιηθεί.

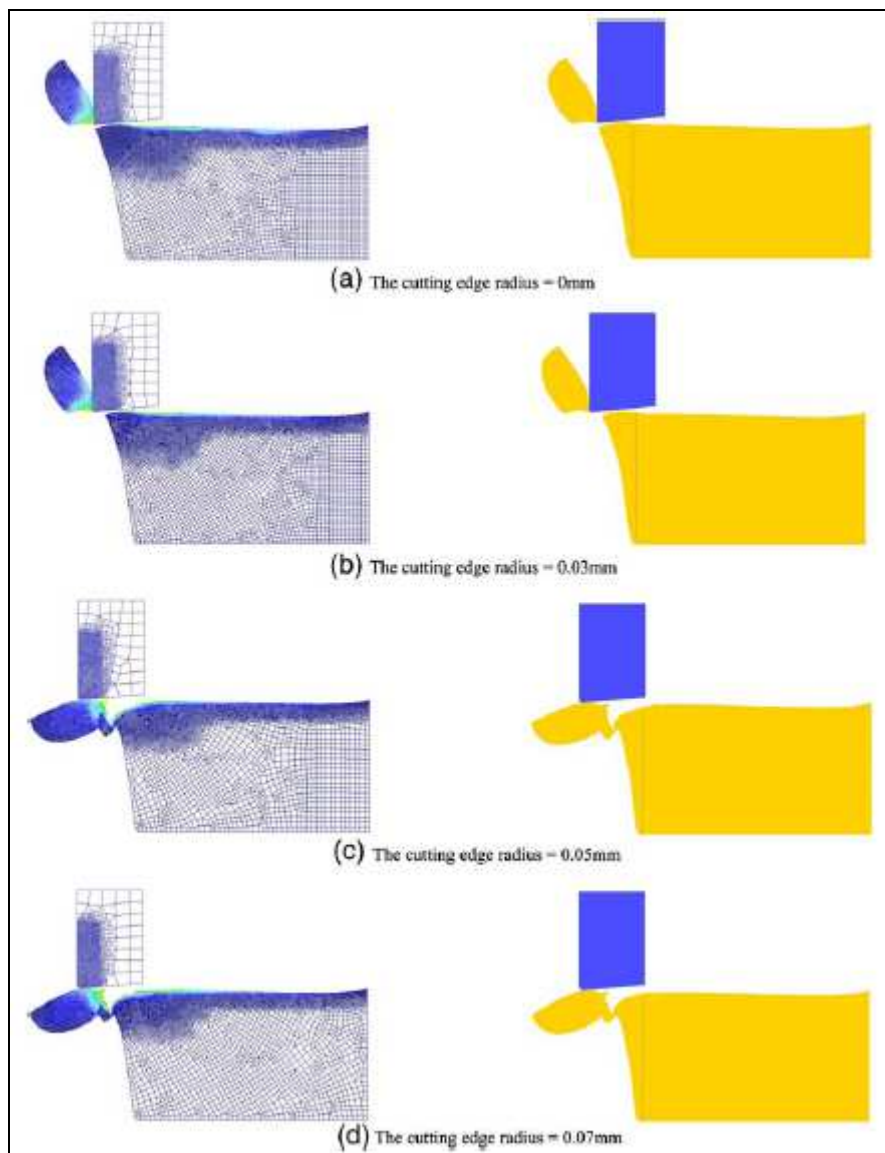
Η γεωμετρική αυτή μελέτη του σχηματισμού «burr» από τους A. Torogon και S.L. Ko διασταυρώθηκε και πειραματικά δίνοντας τέτοιες αποκλίσεις τιμών μεταξύ θεωρίας και πράξης που μας επιτρέπουν να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο για να πάρουμε τελικές τιμές «burr» πολύ κοντά στις πραγματικές. Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της μελέτης αυτής είναι πως η εφαρμογή της είναι βολική καθώς τα δεδομένα εισόδου είναι μόνο μηχανικές και θερμικές σταθερές του κατεργαζόμενου υλικού. Έτσι γνωρίζοντάς τες μπορούμε να προβλέψουμε ικανοποιητικά το τελικό «burr».

Το γεωμετρικό μοντέλο μελέτης του σχηματισμού «burr» που παρουσιάστηκε ανήκει σε μία ευρύτερη «οικογένεια» τρόπων μελέτης του «burr» που σχετίζονται με τις γραμμές ολίσθησης (*slip-line models*). Ένα παρόμοιο μοντέλο παρουσιάζουν στην εργασία τους με θέμα την μελέτη και την μοντελοποίηση του φαινομένου σχηματισμού «burr» οι J. Leopold και R. Wohlgemuth [4]. Όπως και παραπάνω έτσι και εδώ μέσω γεωμετρικής ανάλυσης καταλήγουμε τελικά σε δύο εξισώσεις προσδιορισμού των βασικών διαστάσεων του εμφανιζόμενου «burr». Επισημαίνεται επίσης ότι τα μοντέλα αυτά προσφέρονται για γρήγορους χρόνους απόκρισης στην πρόβλεψη του «burr» και μπορούν να εφαρμοστούν και στο πραγματικό κατασκευαστικό περιβάλλον. Όμως επειδή τα μοντέλα αυτά λαμβάνουν υπόψη τους ελάχιστα έως καθόλου τις συνθήκες κοπής απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση με την βοήθεια πειραμάτων και μοντελοποίησης για την καλύτερη κατανόηση των παραγόντων που επιδρούν στο φαινόμενο. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τη σημαντικότερη δουλειά που έχει γίνει πάνω στο κομμάτι αυτό σε συνδυασμό με τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

Κοινός τόπος των μελετών γύρω από τους παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνιση του «burr» είναι πως οι βασικότεροι από αυτούς είναι το υλικό του τεμαχίου, η γεωμετρία και η φθορά του εργαλείου, οι συνθήκες κοπής και η γεωμετρία στην έξοδο του τεμαχίου. Όπως είπαμε και παραπάνω, είναι προφανές πως στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι δυνατή η επέμβαση στο υλικό του τεμαχίου καθώς είναι ένας παράγοντας υποχρεωτικά προκαθορισμένος από την μελέτη αυτού που επιθυμούμε να κατασκευάσουμε και πιθανή αλλαγή του διαφοροποιεί την όλη κατασκευή. Γι' αυτό και δεν θα ασχοληθούμε με το κομμάτι αυτό. Για τους υπόλοιπους παράγοντες έχουμε τα εξής:

Γεωμετρία εργαλείου & φθορά

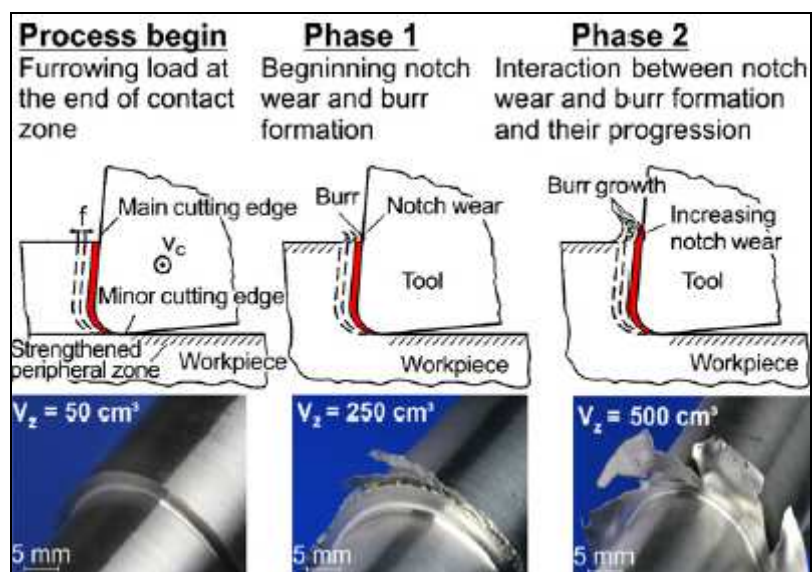
Όταν μιλάμε για γεωμετρία εργαλείου σχετικά με την εμφάνιση «burr» αναφερόμαστε πάντα στο αν το εργαλείο πρέπει να έχει ή όχι ακτινική διαμόρφωση (ράδιο) στην κοπτική του ακμή. Γενικά οι μελέτες δείχνουν πως όσο αυξάνεται το ράδιο της κοπτικής ακμής τόσο εντονότερο είναι το «burr» που εμφανίζεται [7], [14], Jones S. (1997), Avila M. & Domfeld D. (2004), Hashimura M. & Domfeld D. (1995).



Σχήμα 3-36: Η εμφάνιση «burr» με την μεταβολή της ακτίνας (ράδιο) στην κοπτική ακμή. Φαίνεται πως με την αύξηση της ακτίνας (από 0mm σταδιακά έως 0.07mm) το «burr» γίνεται εντονότερο [7].

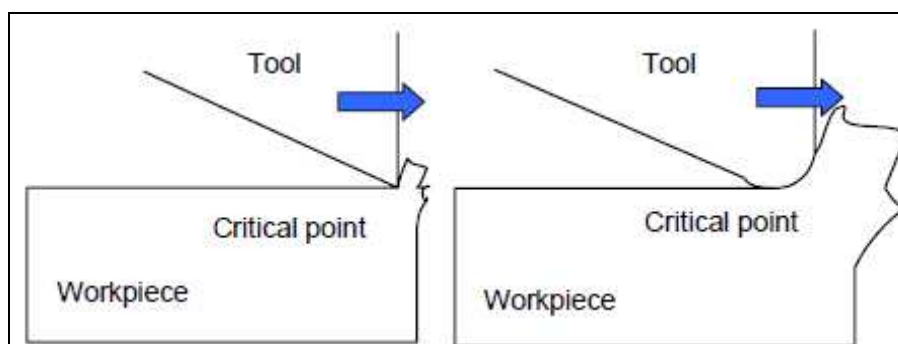
Χαρακτηριστικά αναφέρεται στην βιβλιογραφία πως όσο αυξάνεται η ακτίνα στην κοπτική ακμή το εργαλείο περισσότερο «οργώνει» παρά κόβει εισάγοντας τοπικά μεγάλες παραμορφώσεις παρασέρνοντας υλικό από το τεμάχιο και οδηγώντας τελικά στην εμφάνιση «burr». Παράλληλα παράγεται κατεργασμένη επιφάνεια κακής ποιότητας (άλλος ένας παράγοντας που λαμβάνουμε σοβαρά υπόψη κατά τις κοπές) και οδηγούμαστε σε αυξημένες τριβές και τελικά φθορά του εργαλείου. Η φθορά

αυτή με την σειρά της ευνοεί την εμφάνιση «burr». Ο Biermann (2009) διερεύνησε την σχέση φθοράς εργαλείου και «burr» δίνοντας τα ακόλουθα τρία βασικά στάδια που δείχνουν πως η φθορά βοηθά την ανάπτυξη του «burr».



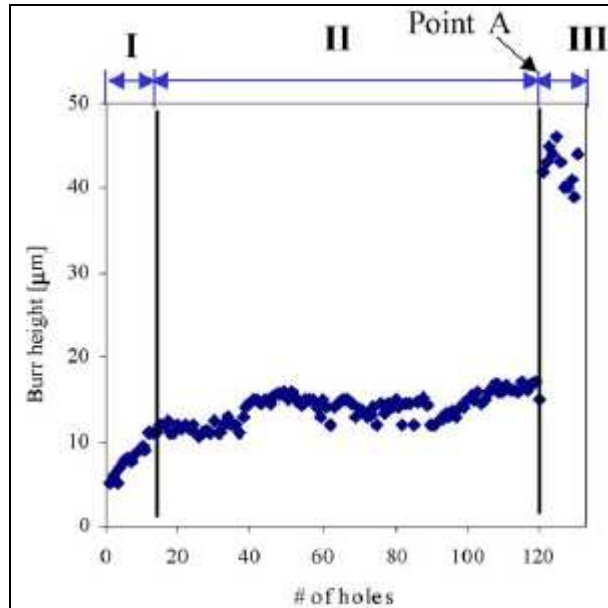
Σχήμα 3-37: Αλληλεπίδραση φθοράς εργαλείου – σχηματισμού «burr». Καθώς η φθορά του εργαλείου προχωρά ευνοεί την ανάπτυξη του «burr» [1].

Αξίζει επίσης να επισημάνουμε πως η φθορά και η καμπυλότητα της κοπτικής ακμής του εργαλείου είναι άμεσα συνδεδεμένα καθώς από το ένα οδηγούμαστε στο άλλο, δηλαδή όταν το εργαλείο φθείρεται η κοπτική του ακμή από οξεία γίνεται πιο ομαλή εμφανίζοντας καμπυλότητα. Παράλληλα με το «όργωμα» στο οποίο προαναφερθήκαμε μειώνεται και η «ενεργή» γωνία αποβλίττου μειώνοντας παράλληλα και την γωνία διάτμησης. Τότε το υλικό «πιβοτάρει» νωρίτερα σε σχέση με την οξεία κοπτική ακμή με αποτέλεσμα να εμφανίζεται εντονότερο «burr» [5].



Σχήμα 3-38: Ο σχηματισμός εντονότερου «burr» λόγω της καμπυλότητας στην κοπτική ακμή του εργαλείου. Η καμπυλότητα μπορεί να οφείλεται τόσο σε επιλογή του εργαλείου όσο και στην φθορά αυτού [5].

Χαρακτηριστικό της σχέσης μεταξύ φθοράς εργαλείου και εμφάνισης «burr» είναι το ακόλουθο σχήμα όπου απεικονίζεται το ύψος του «burr» που σχηματίζεται συναρτήσει των οπών που έχει διανοίξει το ίδιο εργαλείο (προφανώς αναφερόμαστε σε διάτρηση).



Σχήμα 3-39: Το ύψος του «burr» συναρτίζεται των διανοιχθέντων οπών σε τυπική δοκιμή διάτρησης [14].

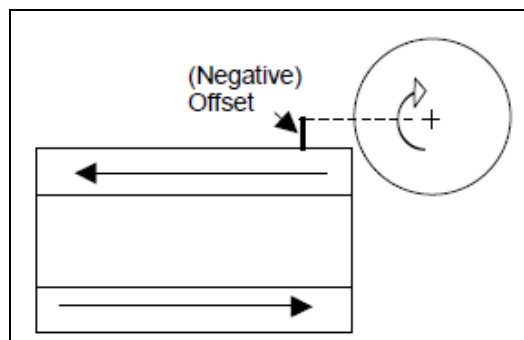
Είναι ορατή η αύξηση των διαστάσεων του «burr» προϊόντων των διατρήσεων (και άρα με την φθορά του εργαλείου να αυξάνεται) η οποία μάλιστα γίνεται ιδιαίτερα έντονη μετά από ένα κρίσιμο αριθμό διατρήσεων (σημείο A).

Συνθήκες κοπής

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικότερες συνθήκες κοπής με την επίδρασή τους στην εμφάνιση του «burr» στο κατεργαζόμενο τεμάχιο:

Έλαιο κοπής (λιπαντικό)

Πειράματα που έγιναν για λογαριασμό της DaimlerChrysler AG στην Γερμανία (Στουτγκάρδη) έδειξαν πως οι διαστάσεις του παραγόμενου «burr» σε κοπή χωρίς λιπαντικό («ξηρή» κατεργασία – dry machining) είναι αυξημένες σε σχέση με την κοπή με λιπαντικό. Τα πειράματα αναφέροντα σε περιφερειακό φρεζάρισμα τόσο για καινούργια όσο και για φθαρμένα εργαλεία ρυθμίζοντας παράλληλα και το μήκος εμπλοκής (tool engagement – πρόκειται στην ουσία για ένα είδος βάρους κοπής).

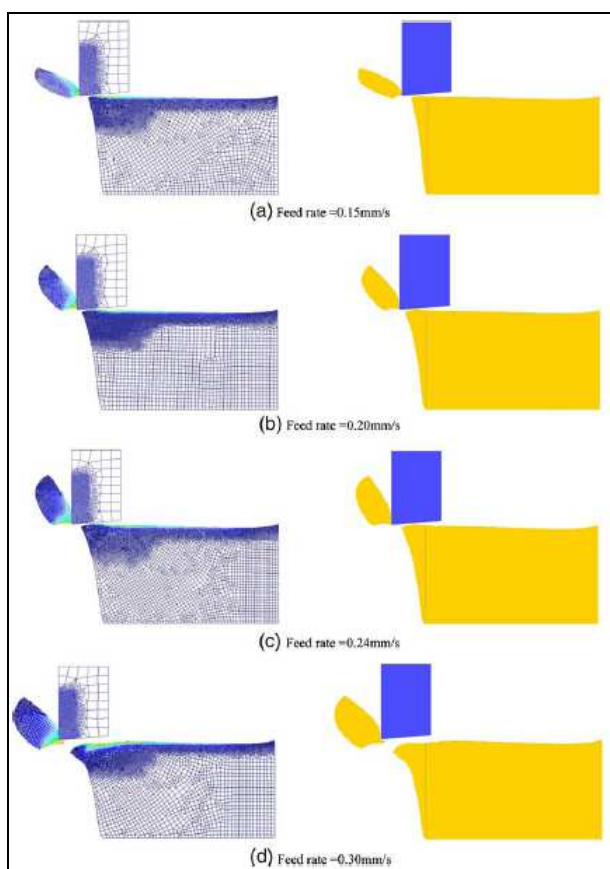


Σχήμα 3-40: Δοκιμές φρεζαρίσματος για τον έλεγχο της επίδρασης του λιπαντικού στο τελικό «burr» με παράλληλη ρύθμιση του μήκους εμπλοκής του εργαλείου [16].

Τα αποτελέσματα έδειξαν αυξημένες διαστάσεις «burr» 9% κατά μέσο όρο, ποσοστό σημαντικό αλλά όχι τέτοιο ώστε να αποκλείει εντελώς την περίπτωση της μη χρήσης λιπαντικού η οποία κατά περιπτώσεις (σε σχέση με το επιθυμητό αποτέλεσμα) μπορεί να έχει κάποια πλεονεκτήματα (π.χ. μείωση κόστους λόγω της μη χρήσης λιπαντικού και την αποφυγή των διατάξεων ψύξης). Τα συμπεράσματα μπορούν να γενικευτούν και πέρα από το φρεζάρισμα αν σκεφτούμε το γενικότερο πλαίσιο της κοπής. Κατά τη διάρκειά της λόγω των αναπτυσσόμενων τριβών και δυνάμεων η θερμοκρασία του κατεργαζόμενου υλικού το κάνει πιο όλκιμο και έτσι βάσει του μηχανισμού ανάπτυξης ενοείται η εμφάνιση του «burr» η οποία αριθμητικά εντοπίζεται σε μία κατά μέσο όρο αύξηση της τάξης του 10% [16].

Πρόωση

Οι μελέτες δείχνουν γενικά αναλογική σχέση μεταξύ πρόωσης και εμφάνισης «burr», δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η πρόωση τόσο ενοείται ο σχηματισμός του «burr» De Souza A. (2003), Hashimura M. & Domfeld D. (1995), Heisel (1999), Lee k. (2003), Schafer (1978), [1, 7, 17, 14]. Λαμβάνοντας υπόψη τον μηχανισμό ανάπτυξης που έχουμε παρουσιάσει, ένα τέτοιο συμπέρασμα είναι αναμενόμενο καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η πρόωση τότε αυξάνεται ο όγκος του υλικού που θα τείνει να παρασυρθεί χωρίς να κοπεί καθώς το κοπτικό εργαλείο εξέρχεται από το τεμάχιο. Το σημείο «πιβοταρίσματος» εμφανίζεται νωρίτερα και μάλιστα σε χαμηλότερη θέση ως προς την επιφάνεια κοπής [1]. Σχηματικά η αύξηση του «burr» με την αύξηση της πρόωσης φαίνεται χαρακτηριστικά στο ακόλουθο σχήμα που προέρχεται από μοντελοποίηση του φαινομένου.



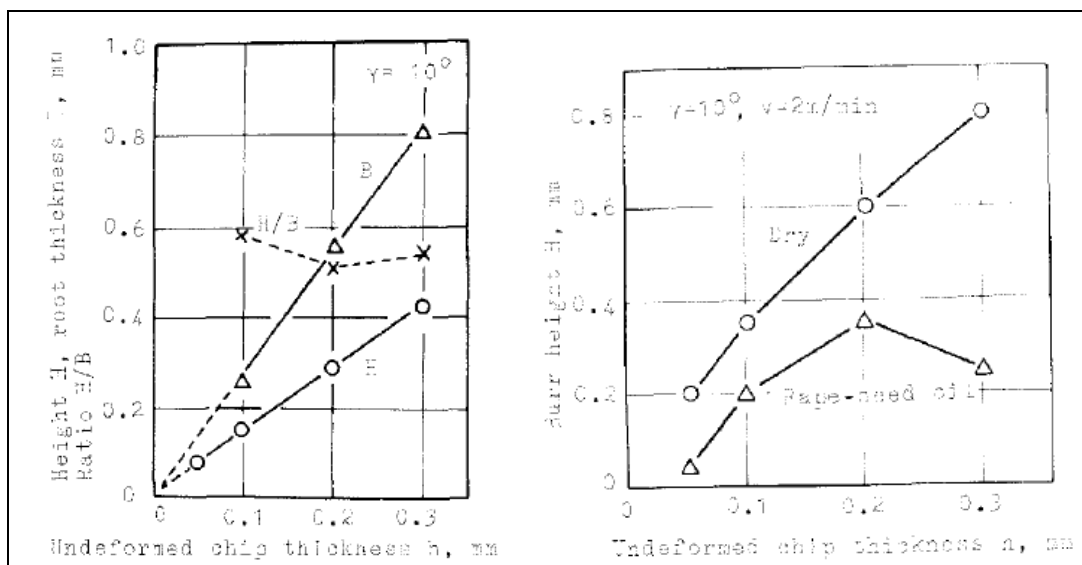
Σχήμα 3-41: Η επίδραση της πρόωσης στο «burr» Φαίνεται χαρακτηριστικά η εμφάνιση εντονότερου «burr» μη την αύξηση της πρόωσης [7].

Ταχύτητα κοπής

Η ταχύτητα κοπής είναι ένας παράγοντας που φαίνεται να έχει ιδιαίτερη σχέση με το «burr». Λαμβάνοντας υπόψη τον μηχανισμό ανάπτυξης μπορούμε να πούμε πως οι υψηλές ταχύτητες κοπής μπορούν να συμβάλλουν στην μείωση του «burr» καθώς εισάγουν μικρότερες πλαστικές παραμορφώσεις στο υλικό εμπρός από το κοπτικό εργαλείο λόγω των μικρότερων δυνάμεων κοπής που εμφανίζονται [17]. Οι μελέτες τείνουν να συμφωνήσουν με αυτό το συμπέρασμα Olivera & Barrow (1998), Trommer (1997), [5, 6, 10, 14, 17]. Παράλληλα όμως διαπιστώνεται μία μικρή διαφοροποίηση σε ένα εύρος ταχυτήτων όχι ιδιαίτερα υψηλών (π.χ. 200 έως 600 m/min περίπου) όπου το σχηματιζόμενο «burr» δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την μεταβολή της ταχύτητας κοπής.

Βάθος κοπής

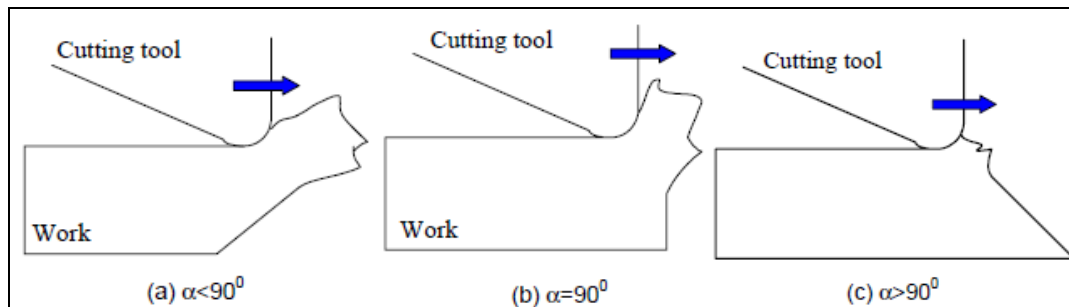
Είναι ένας από του πιο σημαντικούς παράγοντες της κοπής. Μπορούμε να το συναντήσουμε και σαν 'πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου' (αγγλ. undeformed chip thickness). Οι μελέτες δείχνουν γενικά αύξηση του εμφανιζόμενου «burr» με την αύξηση του βάθους κοπής [1, 5, 10, 12, 17].



Σχήμα 3-42: Η επίδραση του βάθους κοπής στο εμφανιζόμενο «burr». Στο δεξί διάγραμμα οι δεύτερες μετρήσεις έχουν ληφθεί με χρήση υγρού κοπής το οποίο φαίνεται να βοηθά στη μείωση του «burr» συνηγορώντας στα όσα είπαμε παραπάνω. Παρόλα αυτά και στις δύο περιπτώσεις είναι ορατή η αύξηση του «burr» με την αύξηση του βάθους κοπής [12].

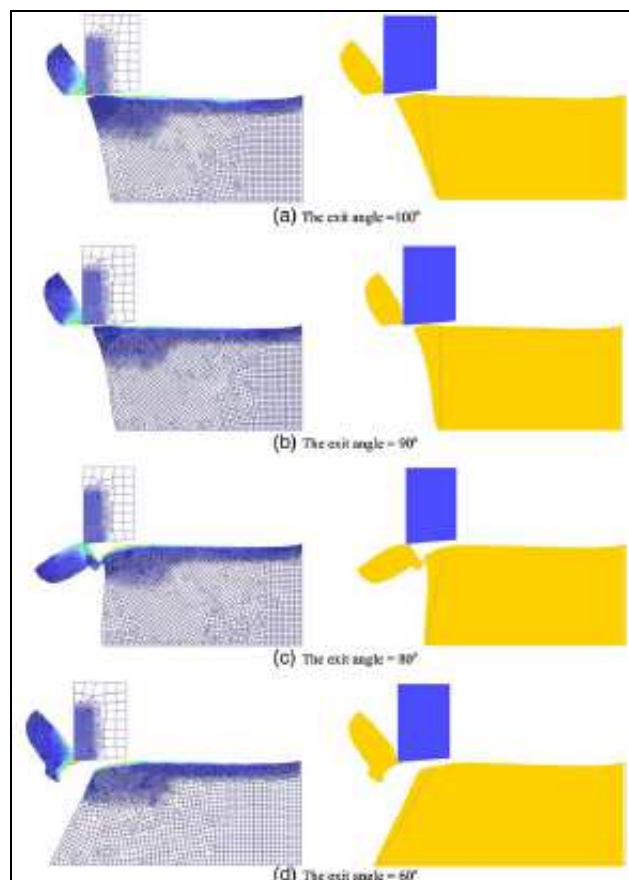
Γεωμετρία στην έξοδο του τεμαχίου

Είναι ένας παράγοντας που γενικά δύσκολα μπορούμε να διαμορφώσουμε όπως θέλουμε, παρόλα αυτά αξίζει να αναφερθούμε σε αυτόν καθώς έχει σημαντική επίδραση στην εμφάνιση του «burr». Το γεωμετρικό μέγεθος που εξετάζουμε είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο διάνυσμα της ταχύτητας κοπής (για την ορθογωνική κοπή) και στην άκρη του τεμαχίου. Όταν η γωνία αυτή είναι μεγαλύτερη από 90° (ή και το ανάποδο – εξαρτάται από το πώς κοιτάμε την εξέλιξη της κοπής) το εμφανιζόμενο «burr» ελαχιστοποιείται, ενώ όταν η γωνία μειώνεται, αυξάνεται και το «burr» (δες επόμενο σχήμα).



Σχήμα 3-43: Η ελάττωση του «burr» με την αύξηση της γωνίας εξόδου του εργαλείου από το τεμαχίο [7].

Το έντονο «burr» που εμφανίζεται όταν η γωνία που εξετάζουμε μειώνεται οφείλεται στο γεγονός ότι εμφανίζεται νωρίτερα το επίπεδο αρνητικής διάτμησης (δες παραπάνω τον μηχανισμό ανάπτυξης του «burr»). Αντίθετα, στην τρίτη περίπτωση, το αρνητικό επίπεδο διάτμησης καθυστερεί να εμφανιστεί ή μπορεί και να μην εμφανιστεί καθόλου τελικά γεγονός που μπορεί να οδηγήσει και στην απουσία αποβλίττου τοπικά. Επιπλέον, το σημείο «πιβοταρίσματος» εμφανίζεται πολύ κοντά στην κατεργαζόμενη επιφάνεια γεγονός που δεν επιτρέπει στην αποκοπτόμενη άκρη του τεμαχίου να «ρολάρει» οδηγώντας στον σχηματισμό «burr» αλλά οδηγεί στην απότομη διάτμησης της χειροτερεύοντας σημαντικά την ποιότητα της επιφάνειας [5, 7].



Σχήμα 3-44: Η μείωση του «burr» με την παράλληλη μείωση της γωνίας στην έξοδο του τεμαχίου (εδώ η κοπή εξετάζεται «ανάποδα» για αυτό μιλάμε για μείωση της γωνίας). Βλέπουμε πως για γωνίες μικρότερες από 80° παύει να σχηματίζεται «burr» τοπικά [7].

Συμπερασματικά για όσα είδαμε σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν το εμφανιζόμενο «bug» στις κοπές, βλέπουμε πως και αρκετούς παράγοντες έχουμε αλλά και συγκρουόμενες εξαρτήσεις σε σχέση πάντα με το «bug». Αν μάλιστα λάβουμε υπόψη μας όλες τις απαιτήσεις σε μία κοπή (π.χ. ποιότητα επιφανειών, χρόνους και κόστη κατεργασίας, δυνατότητες εργαλειομηχανών) διαπιστώνουμε πως δημιουργείται ένας κυκλώνας συνθηκών και απαιτήσεων που πρέπει τελικά να ρυθμιστούν ώστε να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Είναι προφανές πως αυτό δε μπορεί να γίνει μονοσήμαντα και γενικά αλλά διαφέρει ανάλογα με το πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε σε κάθε περίπτωση δημιουργώντας έτσι ένα σημαντικό πεδίο δράσης του μηχανικού στον τομέα αυτό.

Βιβλιογραφία 3^ο κεφαλαίου

Έντυπη

- [1] J.C. Aurich (1), D. Dornfeld (1), P.J. Arrazola, V. Franke, L. Leitz, S. Min, “Burrs – Analysis, control and removal”, CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009) 519–542.
- [2] A. Toropov, Sung-Lim Ko, “Burr formation model for orthogonal cutting and its experimental verification”, 2001 National Research Laboratory (NRL) program.
- [3] D. Dornfeld, “Strategies for preventing and minimizing burr formation”, Consortium on Deburring and Edge Finishing, Laboratory for Manufacturing and Sustainability, UC Berkeley, 2004.
- [4] J. Leopold, R. Wohlgemuth, “Modeling and simulation of Burr formation: State-of-the-art and future trends”.
- [5] F.Z. Fang, H. Wu, Y.C. Liu, S.T. Ng, “Burr formation in fly cutting”.
- [6] Boris Stirn, Kiha Lee, David A. Dornfeld, “Burr formation in micro – drilling.
- [7] W. J. Deng, W. Xia, Y. Tang, “FEM simulation for burr formation near the exit of orthogonal cutting”, Springer-Verlag London Limited 2008.
- [9] Sangkee Min, D.A. Dornfeld, “Technology assessment on current advanced research projects in burr formation and deburring”, AMT – The Association for Manufacturing Technology, January 2004.
- [10] Amit Bansal, Kiha Lee, “Study of burr size and surface roughness in high speed face milling”.
- [11] J. Hassamontr, D.A. Dornfeld, “Review of burr minimization approaches”, Consortium on Deburring and Edge Finishing, Laboratory for Manufacturing and Sustainability, UC Berkeley.
- [12] K. Nakayama, M. Arai, “Burr formation in metal cutting”, Yokohama National University, Japan 1987.
- [13] I.A. Al-Zkeri, “FEM modeling of hard turning”, The Ohio State University, 2007.
- [14] Kiha Lee, David A. Dornfeld, “Micro-burr formation and minimization through process control”, Consortium on Deburring and Edge Finishing, Laboratory for Manufacturing and Sustainability, UC Berkeley, 2005.
- [15] Jinsoo Kim, D.A. Dornfeld, “Development of an analytical model for drilling burr formation in ductile materials”, Consortium on Deburring and Edge Finishing, Laboratory for Manufacturing and Sustainability, UC Berkeley, 2002.

[16] W. Shefelbine, D.A. Dornfeld, “The effect of fry machining on burr size”, Consortium on Deburring and Edge Finishing, Laboratory for Manufacturing and Sustainability, UC Berkeley, 2004.

[17] Avila, C. Miguel, D.A. Dornfeld, “On the face milling burr formation mechanisms and minimization strategies at high tool engagements”, Consortium on Deburring and Edge Finishing, Laboratory for Manufacturing and Sustainability, UC Berkeley, 2004.

[18] Gwo-Lianq Chern, “Study on mechanisms of burr formation and edge breakout near the exit of orthogonal cutting”, Journal of Materials Processing Technology 176 (2006) 152–157.

[19] Tsann-Rong Lin, “Experimental study of burr formation and tool chipping in the face milling of stainless steel”, Department of Mechanical Manufacturing Engineering, National Huwei Institute of Technology, Hu-Wei 632, Taiwan, ROC, 1999.

[20] Gwo-Lianq Chern, “Experimental observation and analysis of burr formation mechanisms in face milling of aluminum alloys”, Department of Mechanical Engineering, National Yunlin University of Science and Technology, Taiwan, 2004.

Ηλεκτρονική

[8] LaRoux K. Gillespie, Deburring and edge finishing handbook, ASME Press. (http://books.google.gr/books?id=gdq6qajigqoC&printsec=frontcover&hl=el&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false).

Κεφάλαιο 4^ο: Μοντελοποίηση και σχηματισμός του burr

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί το τελευταίο κομμάτι της διερεύνησής μας γύρω από το σχηματισμό του «burr», το οποίο θα περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση του φαινομένου μέσω πακέτου πεπερασμένων στοιχείων (*Finite Element Method – FEM* ή *Finite Element Analysis – FEA*) μέσω της οποίας θα παρουσιαστούν τα διάφορα είδη «burr» για τις βασικές κατεργασίες, ο μηχανισμός ανάπτυξης του «burr» καθώς και μία ενδεικτική μελέτη περιπτώσεων ως προς τους παράγοντες που επηρεάζουν το «burr», προσπαθώντας σε κάθε περίπτωση να επιβεβαιώσουμε τα όσα παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

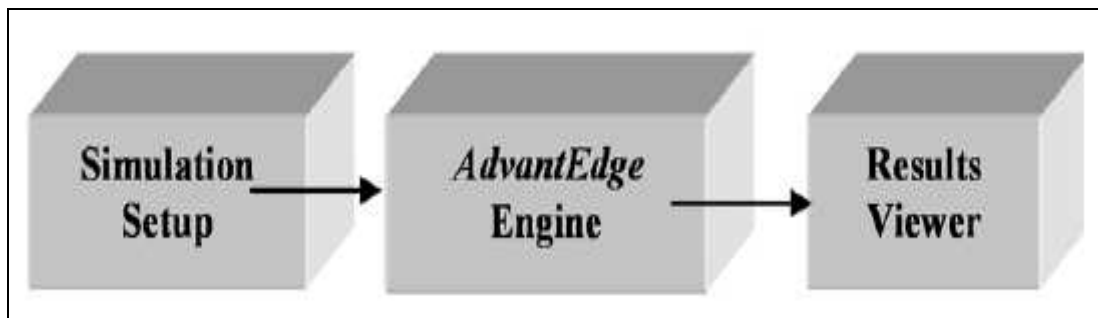
4.1 Το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων - AdvantEdge

Το βασικό μας εργαλείο για όσα θα παρουσιαστούν στο παρόν κεφάλαιο θα είναι το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων *AdvantEdge* v.5.8 της εταιρείας *ThirdWave*. Πρόκειται για ένα πακέτο που παρέχει έτοιμα μοντέλα προσομοίωσης των βασικών κατεργασιών κοπής στα οποία ο χρήστης επεμβαίνει μόνο ρυθμίζοντας τις παραμέτρους γεωμετρίας, κοπής και εργαλείου σε «off-line» διαδικασία (εκτός εργαλειομηχανής – παραγωγής). Έτσι δίνεται η δυνατότητα:

- Αποφυγής χρονοβόρων και κοστοβόρων «on-line» δοκιμών κοπής.
- Επιμήκυνση της ζωής των εργαλείων.
- Βελτίωσης των συνθηκών κοπής ως προς τις γεωμετρίες και το απόβλιττο.
- Ταχύτερης κατεργασίας & καλύτερων αποδόσεων.
- Καλύτερης κατανόηση των αποτελεσμάτων της κοπής (παραμορφώσεις, παραμένουσες τάσεις, θερμοκρασίες κλπ).
- Αυξημένων ρυθμών αποβολής υλικού και εκμετάλλευσης του εξοπλισμού.

Το πρόγραμμα AdvantEdge (FEM) διαθέτει τρία βασικά συστατικά μέρη σε ένα πακέτο software:

- Το «*simulation setup*» το οποίο επιτρέπει στον χρήστη να ‘στήσει’ την όλη προσομοίωση της κοπής συμπεριλαμβανόμενων των συνθηκών κοπής, της γεωμετρίας εργαλείων και των ιδιοτήτων των υλικών.
- Την ‘μηχανή’ του προγράμματος (*AdvantEdge engine*) η οποία πραγματοποιεί την ανάλυση και τους απαραίτητους υπολογισμούς βάσει των στοιχείων που εισήχθησαν στο προηγούμενο κομμάτι.
- Το «*result viewer*» μέσω του οποίου γίνεται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.1: Τα τρία βασικά συστατικά μέρη του προγράμματος AdvantEdge v. 5.8

4.1.1 Οι κατεργασίες του AdvantEdge v. 5.8

Οι βασικές κατεργασίες κοπής για τις οποίες το AdvantEdge μας δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης είναι οι εξής:

- Τόρνευση – turning
- Φρεζάρισμα – milling
- Διάτρηση – drilling
- Πριόνισμα – sawing
- Boring
- Tapping
- Αυλάκωση – grooving
- Broaching

Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης της μικροκοπής, ρύθμιση όλων των παραμέτρων της κοπής (βάθος κοπής, πρόωση, ταχύτητα κοπής, υγρό κοπής κλπ), μελέτη του φαινομένου σχηματισμού «burr» που είναι και το χαρακτηριστικό που μας ενδιαφέρει και μονάδες τόσο στο σύστημα SI όσο και στο αγγλικό.

4.1.2 Κοπτικά εργαλεία και υλικά

Όσον αφορά τις ρυθμίσεις για τα κοπτικά εργαλεία, δίνεται η δυνατότητα από το πακέτο για επιλογή εργαλείου από καταλόγους προτυποποιημένων εργαλείων, σχεδίαση και επιλογή μεμονωμένου εργαλείου (*custom tool geometry*), επιλογή για την ανάλυση του πλέγματος στην κοπτική ακμή, επιλογή γρεζοθραύστη και επιλογή υλικού και τυχόν επικαλύψεων.

Όσον αφορά τις ρυθμίσεις για το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, παρέχεται μία εκτενής βιβλιοθήκη υλικών με μοντέλα πειραματικά και αριθμητικά επαληθευμένα, ανεπτυγμένα ειδικά για να περιγράψουν τη συμπεριφορά του εκάστοτε υλικού σε κατεργασία κοπής. Επίσης δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής υλικού από τον χρήστη.

4.1.3 Ανάλυση και αποτελέσματα

Μέσω της ‘μηχανής’ του προγράμματος επιτυγχάνεται συνδυασμένη θερμομηχανική ανάλυση, πλήρως αυτόματη επαναδημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων, φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, τριβής και αδράνειας τόσο στο τεμάχιο όσο και στο εργαλείο, ανάλυση θραύσης του αποβλίττου, φθοράς του εργαλείου και μελέτη των παραμενουσών τάσεων.

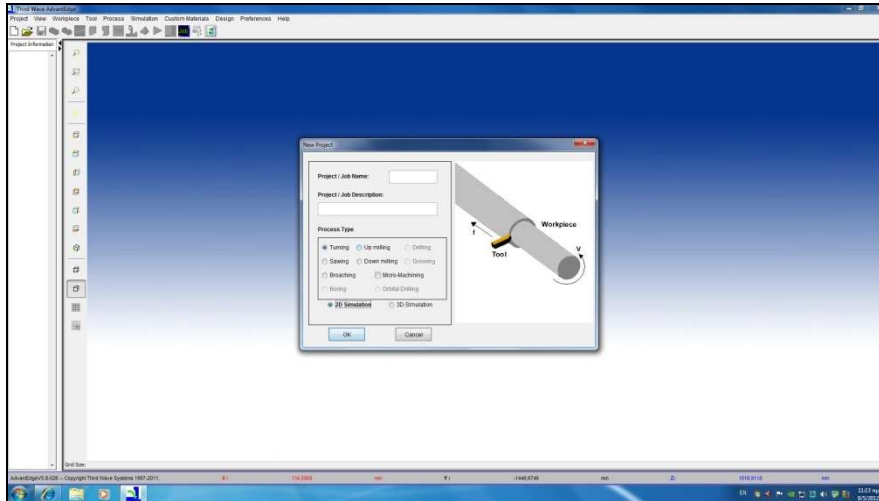
Όσον αφορά τα αποτελέσματα, παρέχονται πολλές δυνατότητες οπτικοποίησής τους με όλα τα μεγέθη που προκύπτουν από την ανάλυση και ενδιαφέρουν τον χρήστη.

4.2 Γνωριμία με τις κατεργασίες

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τις βασικές κατεργασίες όπως αυτές υλοποιούνται μέσω του πακέτου AdvantEdge και πώς παρεμβαίνει ο χρήστης με σκοπό να εξετάσει τα φαινόμενα που επιθυμεί. Βάσει και των όσων έχουμε πει μέχρι τώρα οι κατεργασίες που θα δούμε είναι η τόρνευση (turning), το φρεζάρισμα (milling) και η διάνοιξη αυλάκων (grooving) η οποία ουσιαστικά είναι μία υποκατηγορία της τόρνευσης. Δυστυχώς για την περίπτωση της διάτρησης, το πρόγραμμα δε δίνει τη δυνατότητα μελέτης του φαινομένου σχηματισμού «burr».

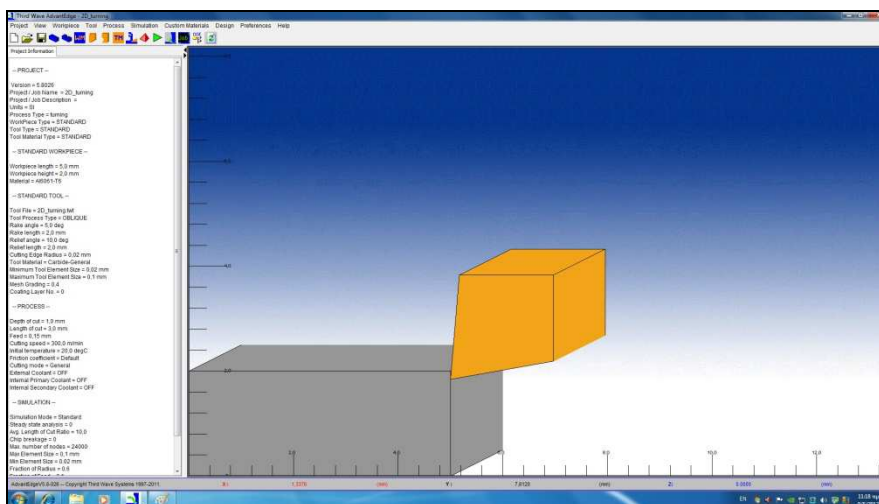
4.2.1 2D τόνρευση

Ανοίγοντας μία νέα εργασία στο πρόγραμμα (*new project*) εμφανίζεται το ακόλουθο μενού από το οποίο επιλέγουμε να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο δισδιάστατης τόνρευσης (*2D turning*). Στο παράθυρο αυτό δίνουμε και το όνομα στο μοντέλο που θα δημιουργήσουμε, ενώ έχουμε τη δυνατότητα να δώσουμε και μία σύντομη περιγραφή.



Εικόνα 4.1: Η επιλογή για την κατασκευή μοντέλου σε δισδιάστατη τόνρευση.

Αφότου κάνουμε την επιλογή αυτή 'φορτώνεται' από το πρόγραμμα στην οθόνη μας το έτοιμο μοντέλο στο οποίο εμείς θα επέμβουμε ρυθμίζοντας τις διάφορες παραμέτρους. Όπως βλέπουμε στην επόμενη εικόνα (εικόνα 4.2) έχουμε 'μεταφερθεί' από τις τρεις διαστάσεις που είδαμε αρχικά (εικόνα 4.1) στις δύο χωρίς όμως ακόμα να έχουμε δείξει πως έγινε αυτό.



Εικόνα 4.2: Το μοντέλο για την δισδιάστατη τόνρευση. Φαίνεται το τεμάχιο (γκρι χρώμα) και το εργαλείο κοπής (πορτοκαλί χρώμα).

Παρατηρούμε επίσης πως η οθόνη μας χωρίζεται πλέον σε δύο τμήματα. Ένα είναι ο χώρος στον οποίο απεικονίζεται το μοντέλο μας (δεξί μέρος) και ο δεύτερο είναι αυτό στο οποίο φαίνονται οι πληροφορίες για το μοντέλο μας (αριστερό μέρος). Αυτό ισχύει γενικά στο πρόγραμμα και είναι η εικόνα που θα έχουμε ό,τι μοντέλο και αν θελήσουμε να δημιουργήσουμε στο περιβάλλον του *AdvantEdge*. Στο

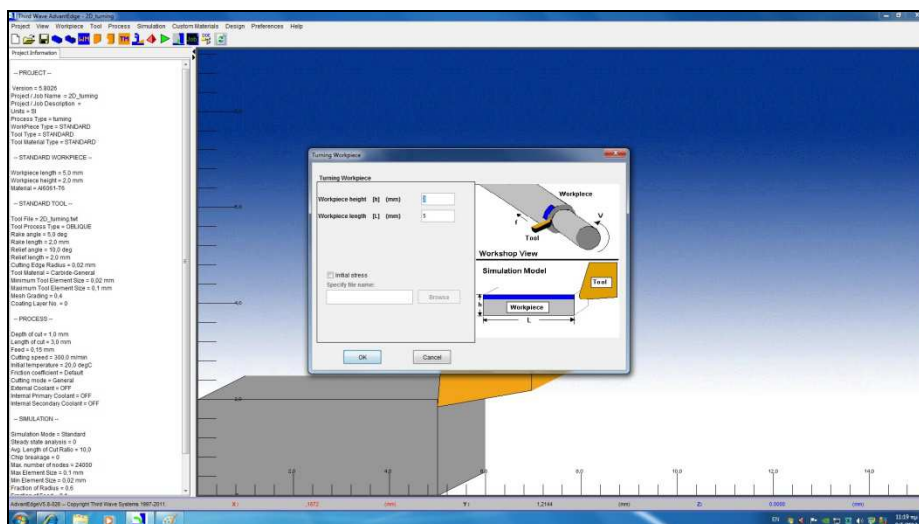
αριστερό μέρος βλέπουμε πως οι πληροφορίες που έχουμε για το μοντέλο μας εντάσσονται σε πέντε μεγάλες κατηγορίες. Πρόκειται για τις πέντε κατηγορίες παραμέτρων που εμείς μπορούμε να ρυθμίσουμε στο μοντέλο για να δούμε αυτά που θέλουμε. Η διαμόρφωση αυτή ισχύει επίσης για οποιοδήποτε μοντέλο δημιουργήσουμε και αντίστοιχα είναι διαμορφωμένα και τα μενού του προγράμματος. Στην συνέχεια θα δούμε λίγο πιο αναλυτικά την κάθε κατηγορία παρουσιάζοντας παράλληλα πως εμείς θα επέμβουμε για να δημιουργήσουμε το μοντέλο μας. Αυτό θα γίνει για κάθε μία από τις κατεργασίες που θα μοντελοποιήσουμε μέσω του *AdvantEdge*. Έχουμε λοιπόν:

- PROJECT - (η εργασία μας)

Εδώ δίνονται πολύ συνοπτικά γενικές πληροφορίες, όπως η έκδοση του προγράμματος που διαθέτουμε, το όνομα του μοντέλου και μία σύντομη περιγραφή του (εάν την έχουμε δώσει), το τρέχον σύστημα μονάδων, το είδος της κατεργασίας και το είδος τεμαχίου, κοπτικού εργαλείου και υλικού κοπτικού εργαλείου. Να σημειωθεί για τα τρία τελευταία πως πάντα εμείς θα βλέπουμε τον τύπο 'STANDARD' καθώς θα χρησιμοποιήσουμε σε όλες τις περιπτώσεις τις έτοιμες επιλογές που μας παρέχει το πρόγραμμα.

- STANDARD WORKPIECE - (πληροφορίες για το τεμάχιο)

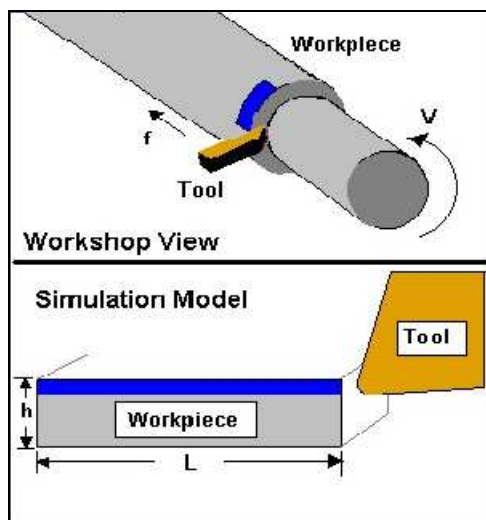
Εδώ έχουμε τις πληροφορίες που σχετίζονται με το τεμάχιο μας (διαστάσεις, υλικό και άλλες τυχόν πληροφορίες όπως π.χ. εάν για το μοντέλο μας θα θεωρούμε πως ήδη έχει εισέλθει το εργαλείο στο τεμάχιο κατά την έναρξη της κοπής κλπ). Στο τεμάχιο ρυθμίζουμε τις παραμέτρους από το αντίστοιχο μενού απ' όπου έχουμε την ακόλουθη εικόνα.



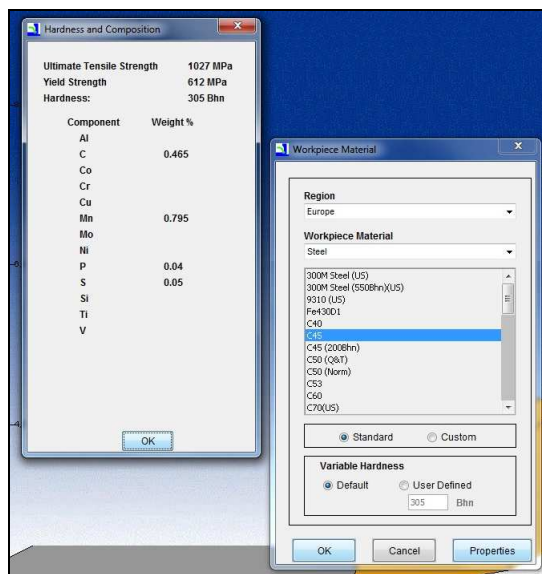
Εικόνα 4.3: Η ρύθμιση των παραμέτρων του τεμαχίου για την δισδιάστατη τόρνευση.

Μέσω της ρύθμισης των παραμέτρων του τεμαχίου ξεκινάμε να μπαίνουμε στο πνεύμα της μοντελοποίησης που έχει γίνει για κάθε περίπτωση. Εδώ για τη δισδιάστατη τόρνευση βλέπουμε πως μία 'λωρίδα' υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο αποκόπεται και 'τεντώνεται' ενώ η μεταφορά στις δύο διαστάσεις γίνεται θεωρώντας πως το κοπτικό εργαλείο έχει εισέλθει και κόβει το τεμάχιο. Έτσι στις δύο διαστάσεις η κοπή γίνεται με το βάθος κοπής να είναι ουσιαστικά η πρόωση. Επίσης το κοπτικό εργαλείο θεωρείται ακίνητο ενώ κινείται το τεμάχιο προς αυτό. Η

ταχύτητα κίνησης του τεμαχίου προς το εργαλείο για το μοντέλο μας είναι ουσιαστικά η ταχύτητα κοπής, ενώ το πραγματικό βάθος κοπής είναι κάθετο με κατεύθυνση εντός της οθόνης του υπολογιστή. Αυτή η παραδοχή που γίνεται κατά την μετάβαση στις δύο διαστάσεις χρησιμεύει για να επιτευχθούν όσο το δυνατόν καλύτερες συνθήκες απόλυτης ορθογωνικής κοπής. Αυτός ο τρόπος μοντελοποίησης θα γίνει ακόμη καλύτερα κατανοητός όταν στη συνέχεια θα δούμε και τη ρύθμιση των συνθηκών κοπής.



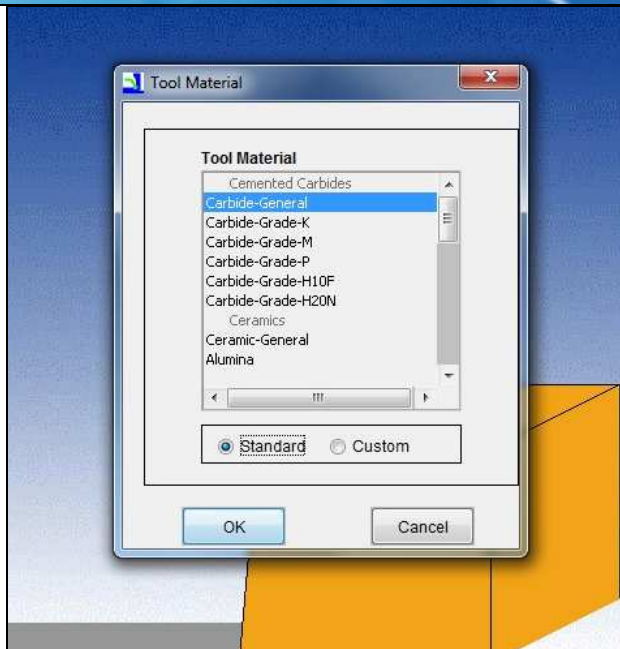
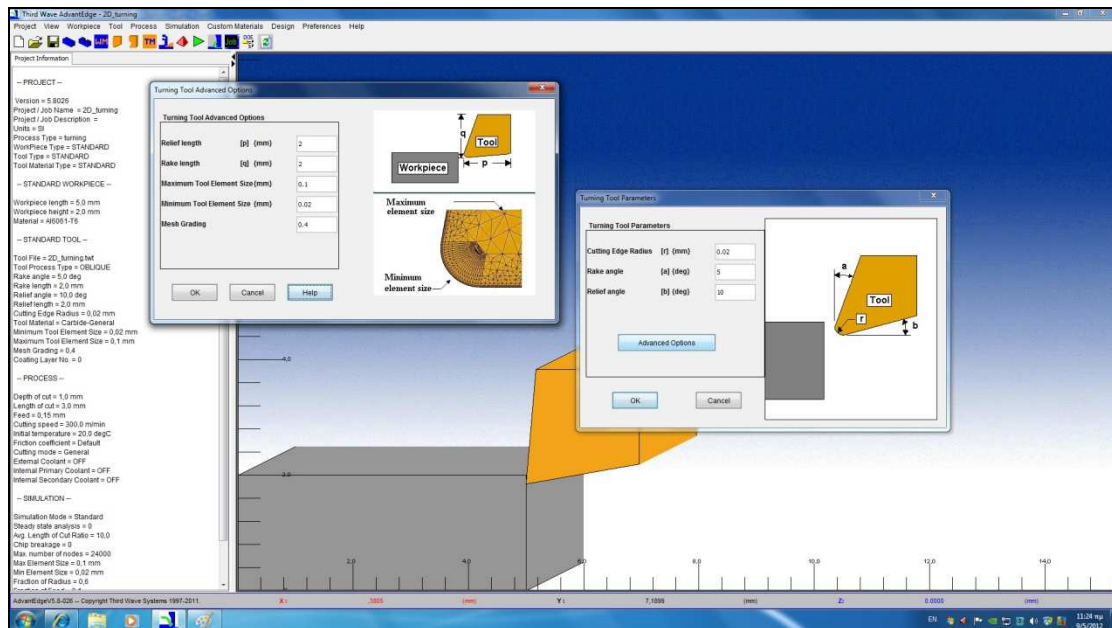
Εικόνα 4.4: Η μετάβαση από τις τρεις στις δύο διαστάσεις για τις ανάγκες της μοντελοποίησης.



Εικόνα 4.5: Η επιλογή του υλικού τεμαχίου. Το πρόγραμμα διαθέτει μία επαρκή 'βιβλιοθήκη' υλικών τα οποία έχουν καταταχθεί βάσει της ονοματολογίας τους και επίσης δίνονται και κάποια στοιχειώδη χαρακτηριστικά τους (αντοχές, σκληρότητα, σύσταση κλπ.)

- TOOL - (κοπτικό εργαλείο)

Εδώ έχουμε τις πληροφορίες που σχετίζονται με το κοπτικό μας εργαλείο (μορφή, διαστάσεις, πιθανές επικαλύψεις, υλικό, πυκνότητα πλέγματος κλπ). Οι παράμετροι αυτές ρυθμίζονται από το αντίστοιχο μενού όπου βλέπουμε τις επόμενες εικόνες:

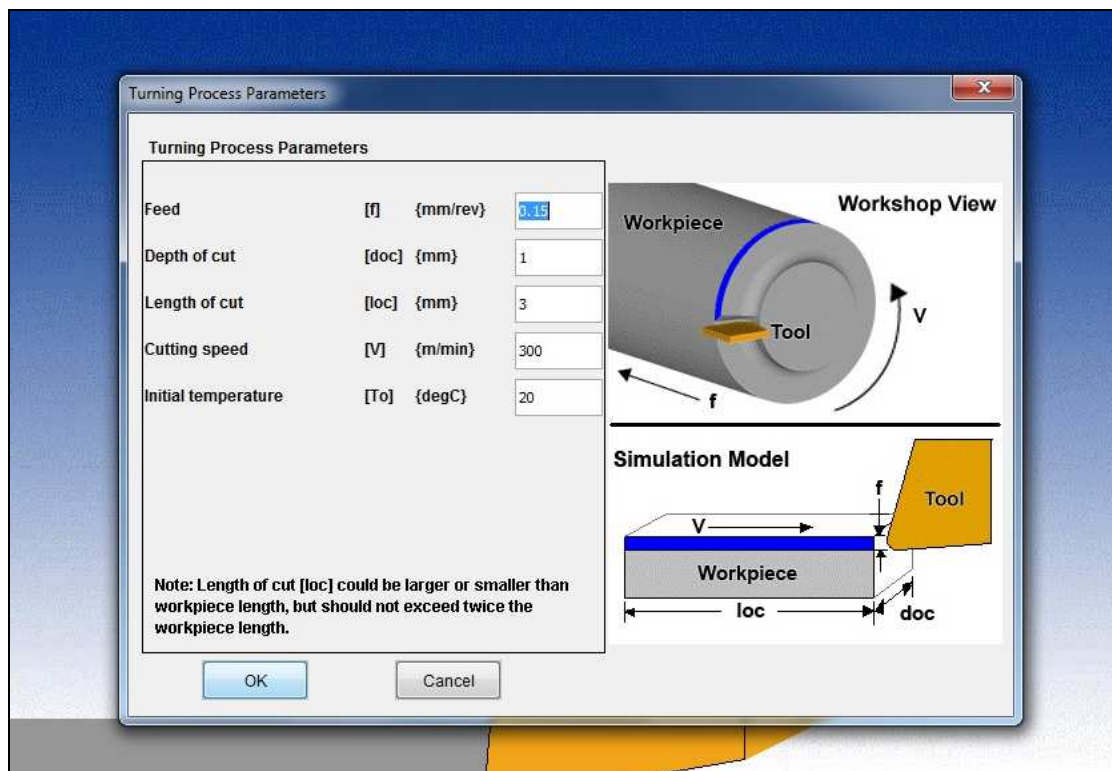


Εικόνες 4.6 & 4.7: Οι επιλογή των παραμέτρων του εργαλείου. Γενικά σε ό, τι έχει να κάνει με το πλέγμα, σε όλα μας τα μοντέλα δε θα επέμβουμε στις ρυθμίσεις του προγράμματος. Στην δεύτερη εικόνα φαίνεται η επιλογή του υλικού για το εργαλείο μας. Το μενού αυτό είναι ίδιο για όλες τις περιπτώσεις των κατεργασιών που μπορούμε να μοντελοποιήσουμε μέσω του προγράμματος.

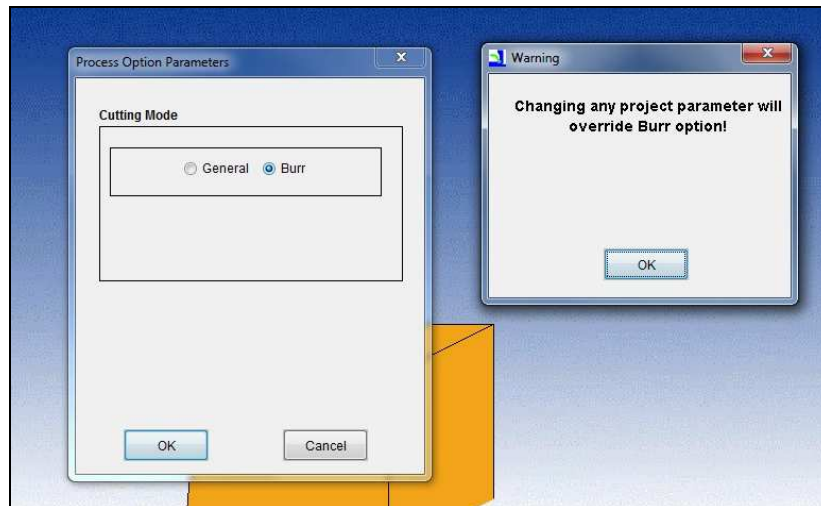
- PROCESS - (παράμετροι τις μοντελοποίησης)

Εδώ έχουμε τις πληροφορίες που σχετίζονται με τις συνθήκες για την κάθε κοπή που μοντελοποιείται. Ίσως είναι το σημαντικότερο κομμάτι στο οποίο επεμβαίνουμε καθώς είναι αυτό που θα μας επιτρέψει να διερευνήσουμε τη σχέση των συνθηκών κοπής με τον σχηματισμό του «burr». Μέσω του αντίστοιχου μενού, πέρα από τις κλασικές παραμέτρους της κατεργασίας (προώσεις, βάθη κοπής, ταχύτητες κοπής

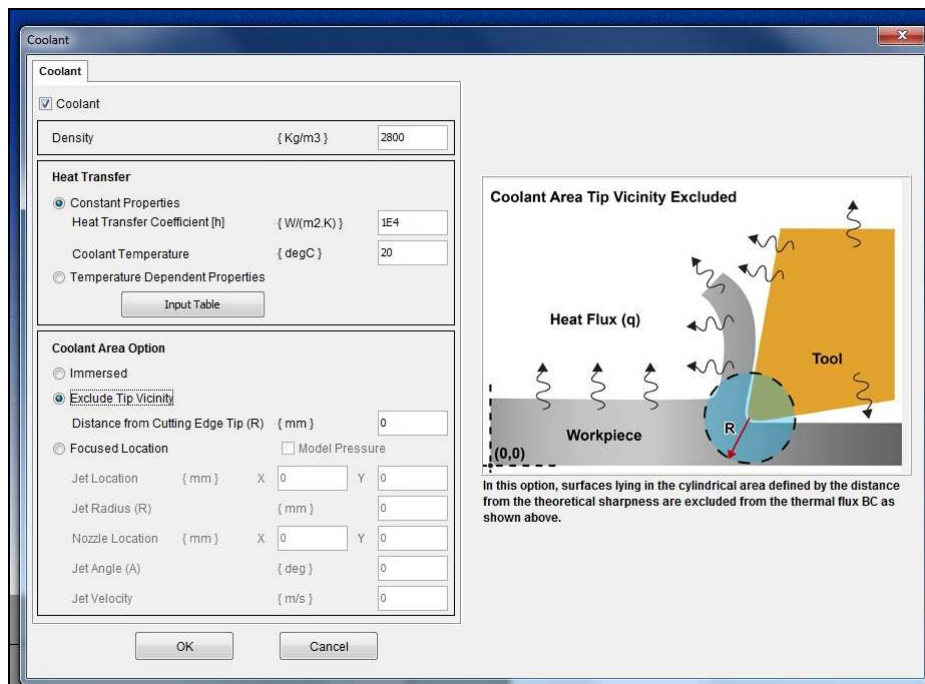
κλπ), ρυθμίζονται επίσης η χρήση ή όχι λιπαντικού και η τριβή μεταξύ των εμπλεκόμενων σωμάτων. Γενικά στα μοντέλα της τριβής που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα δεν επεμβαίνουμε και χρησιμοποιούμε τις default επιλογές. Όπως βλέπουμε στην επόμενη εικόνα η οποία προέρχεται από το μενού ρύθμισης των παραμέτρων της κοπής γίνεται ακόμα πιο ξεκάθαρη η μοντελοποίηση για τις δύο διαστάσεις στην τόννευση. Στην ουσία το τόξο κύκλου που διαγράφει το εργαλείο καθώς έχει ήδη εισέλθει στο τεμάχιο και κινείται κατά την πρόωση αποκόπεται και 'τεντώνεται' ώστε να γίνει ευθεία όντας ευκολότερο πια στο χειρισμό. Βέβαια εάν το παρατηρήσουμε καλά, η κίνηση που προσομοιώνεται δε χρησιμεύει τόσο ώστε να δείξουμε μία πραγματική κατάσταση τόννευσης (ίσως μόνο μία διακοπόμενη κοπή), όμως αποτυπώνει καλά την καθαρή ορθογωνική κοπή επιτρέποντάς μας να εξετάσουμε τον μηχανισμό ανάπτυξης του «burr» κάνοντας την σύγκριση με αυτό που παρουσιάσαμε θεωρητικά παραπάνω. Άλλωστε η επιλογή της διασπαστικής τόννευσης βάσει αυτού του μοντέλου θα χρησιμοποιηθεί από εμάς ακριβώς για τον σκοπό αυτό καθώς επίσης και για να δούμε τον σχηματισμό «burr» στην έξοδο του εργαλείου από το τεμάχιο (*exit burr*). Επίσης στη συνέχεια παρουσιάζονται και οι επιλογές ρύθμισης του «burr» και της χρήσης του υγρού κοπής.



Εικόνα 4.8: Η επιλογή των "κλασικών" συνθηκών κοπής.



Εικόνα 4.9: Η επιλογή για τη μελέτη του φαινομένου σχηματισμού «burr». Τσεκάροντας την επιλογή αυτή η μόνη από τις συνθήκες κοπής που επηρεάζεται είναι το μήκος κοπής, καθώς το πρόγραμμα το τροποποιεί ανάλογα έτσι ώστε το εργαλείο να εξέλθει από το τεμάχιο. Η επιλογή αυτή (εννοώντας σαν μενού) είναι ίδια για όλες τις κατεργασίες όπου το πρόγραμμα μας επιτρέπει μελέτη του «burr».

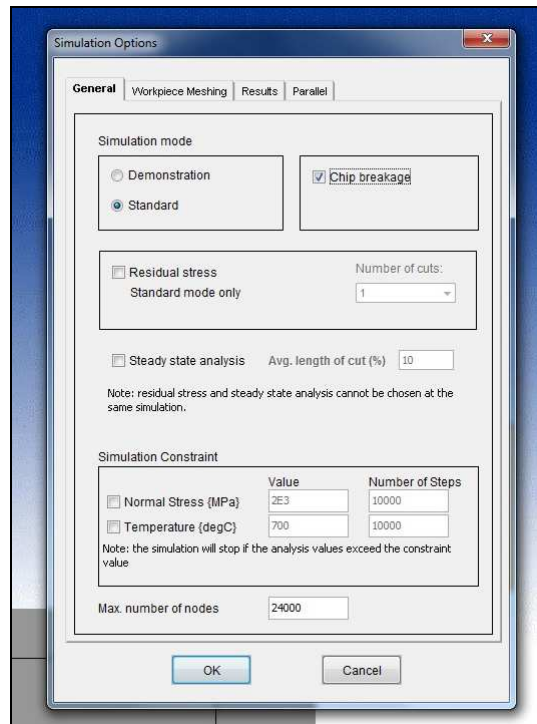


Εικόνα 4.10: Η επιλογή υγρού κοπής. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα τριών επιλογών: Μία όπου το υγρό κοπής παρέχεται σε όλη την περιοχή της κοπής, μία όπου η πρόσβαση του υγρού κοπής αποκλείεται από μία μικρή περιοχή στην κοπτική ακμή (επιλογή που έχει μια λογική καλύτερης μοντελοποίησης αν σκεφθούμε πως σε εκείνη την περιοχή έχουμε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες που δεν επιτρέπουν στο υγρό να δράσει) και μία όπως επιλέγει ο χρήστης σε πια περιοχή θα τροφοδοτήσει το υγρό κοπής.

- SIMULATION – (επίλυση του μοντέλου)

Στο τελευταίο αυτό κομμάτι ρυθμίζονται οι λεπτομέρειες που σχετίζονται με την επίλυση του μοντέλου (π.χ. θέματα που έχουν να κάνουν με το πλέγμα ή με περιορισμούς σε αναπτυσσόμενες δυνάμεις και παραμορφώσεις κλπ). Γενικά σε αυτό το κομμάτι δεν επεμβαίνουμε ιδιαίτερα χρησιμοποιώντας τις default επιλογές. Από το αντίστοιχο μενού μπορούμε να βλέπουμε την πρόοδο της επίλυσης, τα

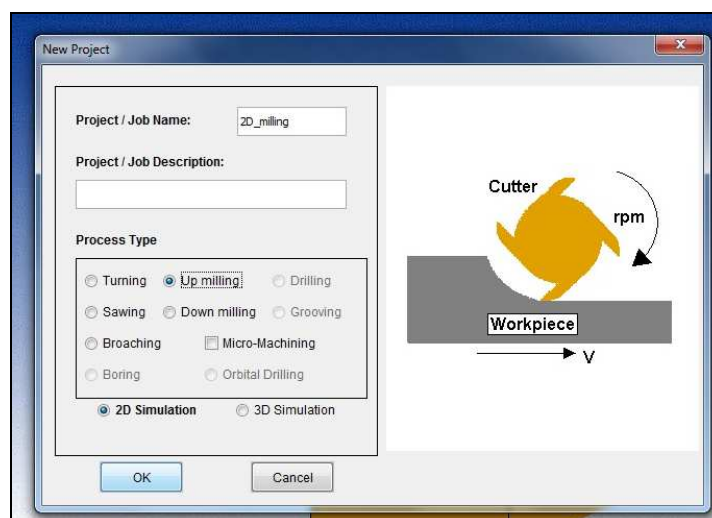
αποτελέσματα και να κάνουμε επίσης κάποιες μικρές ρυθμίσεις όπως π.χ. η επιλογή για την θραύση του σχηματιζόμενου αποβλήτου (*chip breakage*).



Εικόνα 4.11: Η ρύθμιση παραμέτρων της επίλυσης του μοντέλου.

4.2.2 2D φρεζάρισμα

Αντίστοιχα με ό,τι είδαμε για την δισδιάστατη τόννευση, ξεκινώντας μία νέα εργασία στο πρόγραμμα (new project) επιλέγουμε να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο δισδιάστατου φρεζαρίσματος.

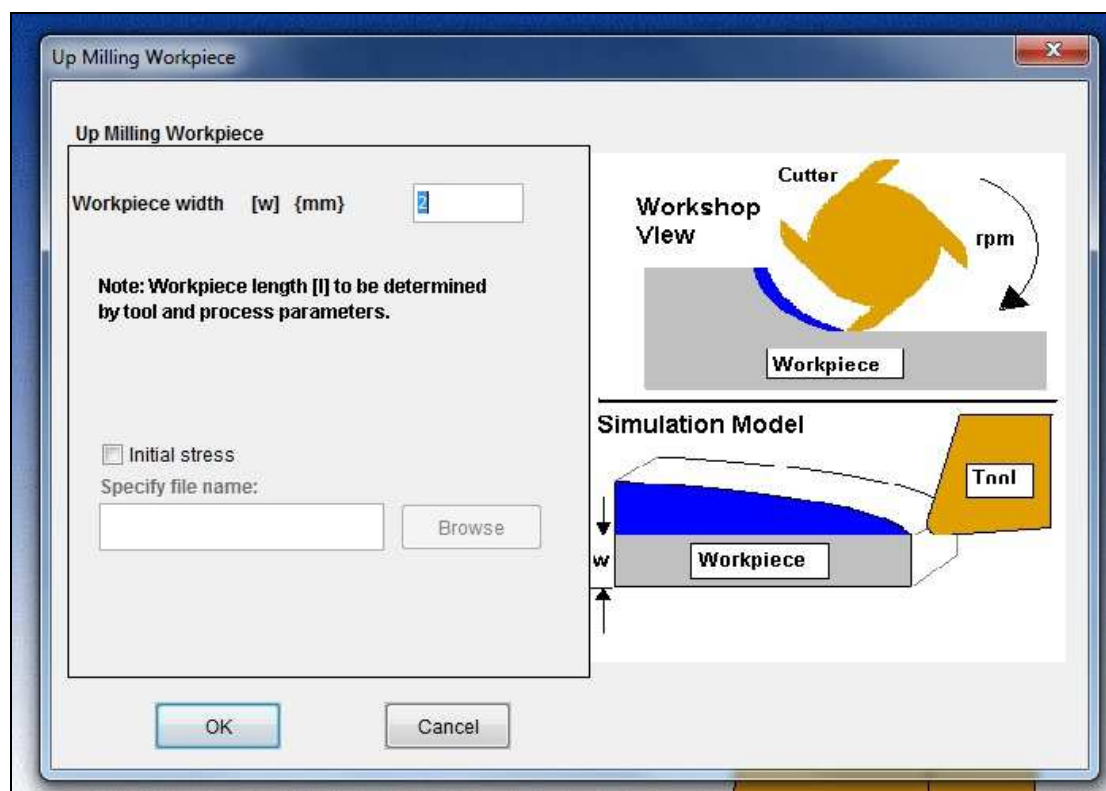


Εικόνα 4.12: Η επιλογή για την κατασκευή μοντέλου για δισδιάστατο φρεζάρισμα.

Το μενού από το οποίο επιλέγουμε το είδος της κατεργασίας εμφανίζεται πάντα κατά την έναρξη μίας νέας εργασίας και πάντα έχουμε την δυνατότητα να δώσουμε όνομα και σύντομη περιγραφή στο νέο μοντέλο που σκοπεύουμε να δημιουργήσουμε.

Ειδικά για το φρεζάρισμα μπορούμε να επιλέξουμε ομόρροπο ή αντίρροπο. Εμείς θα εργαστούμε με το αντίρροπο φρεζάρισμα (*up milling*) όπου το φαινόμενο του «burr» είναι εντονότερο.

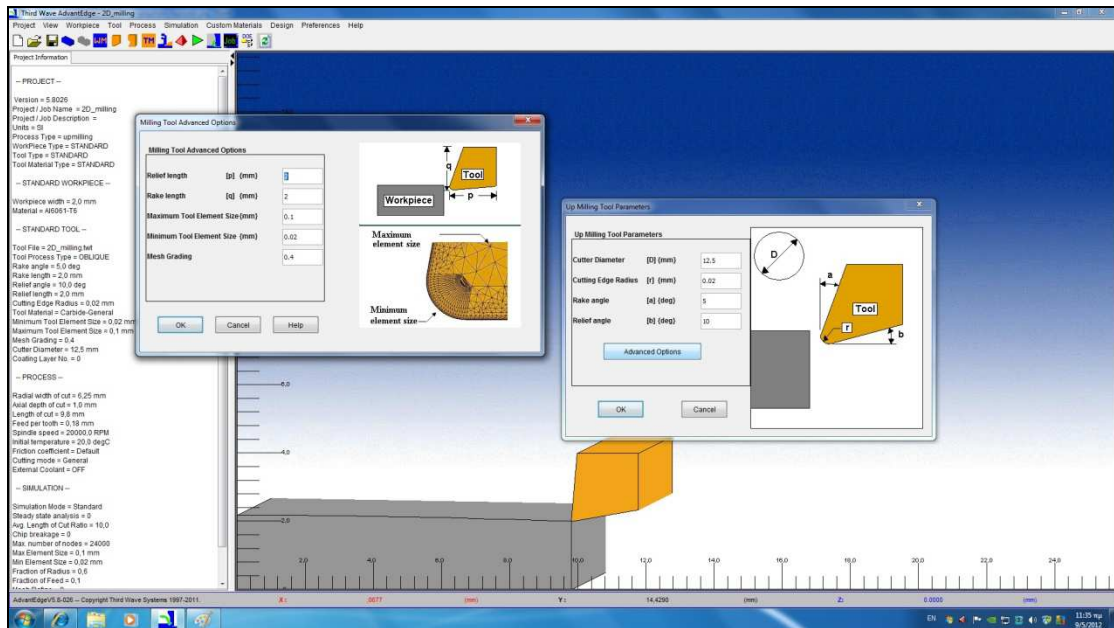
Κατόπιν της επιλογής αυτής, εμφανίζονται στην οθόνη κατά τα γνωστά το μοντέλο και οι πληροφορίες για αυτό, δεξιά και αριστερά αντίστοιχα (όπως στην εικόνα 4.2). Ξεκινώντας την διαμόρφωση των παραμέτρων, ασχολούμαστε πρώτα με αυτές του κατεργαζόμενου τεμαχίου (να σημειωθεί γενικά πως η σειρά με την οποία διαμορφώνουμε το μοντέλο μας – τεμάχιο, κοπτικό εργαλείο, συνθήκες κοπής, λιπαντικό, «burr», simulation κλπ – δεν απαιτείται να είναι συγκεκριμένη. Καλό είναι όμως να ακολουθούμε τα μενού του προγράμματος έτσι ώστε να αποφευχθούν τυχόν παραλείψεις.). Ανοίγοντας το αντίστοιχο παράθυρο βλέπουμε την επόμενη εικόνα από την οποία καταλαβαίνουμε και τον τρόπο μοντελοποίησης.



Εικόνα 4.13: Η ρύθμιση των παραμέτρων του τεμαχίου για το δισδιάστατο φρεζάρισμα.

Παρατηρούμε πως η μοντελοποίηση επικεντρώνεται στον κάθε οδόντα του κοπτικού εργαλείου, το οποίο και εδώ έχει ήδη εισέλθει στο τεμάχιο. Η κίνηση του οδόντα μετατρέπεται και εδώ από τόξο σε ευθύγραμμη ενώ πάλι το τμήμα του υλικού που αφαιρείται είναι στη διεύθυνση της πρόωσης όπως άλλωστε συμβαίνει και στην πραγματικότητα για το φρεζάρισμα. Το μήκος που θα κόψει ο οδόντας εξαρτάται από τις λοιπές συνθήκες.

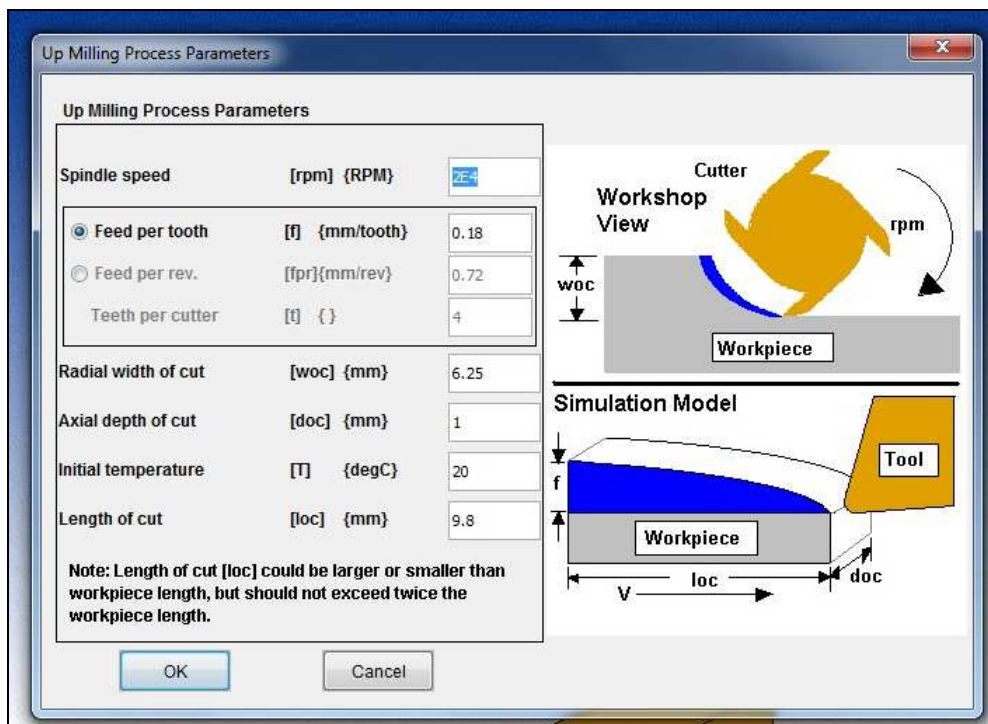
Μετά την ρύθμιση του κατεργαζόμενου τεμαχίου ακολουθεί αυτή του κοπτικού εργαλείου. Θυμίζουμε πως η επιλογή του υλικού του εργαλείου είναι κοινή για όλες της κατεργασίες (δες εικόνα 4.7). Επιλέγοντας τις παραμέτρους του εργαλείου έχουμε την εξής εικόνα:



Εικόνα 4.14: Η ρύθμιση των παραμέτρων του εργαλείου για το διαδιάστατο φρεζάρισμα.

Υπενθυμίζουμε επίσης ότι γενικά δεν επεμβαίνουμε στις παραμέτρους του πλέγματος του μοντέλου μας, παρά μένουμε στις default επιλογές.

Στη συνέχεια ακολουθεί η επιλογή των συνθηκών κοπής του μοντέλου, οι οποίες καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό τη συμπεριφορά του. Από το αντίστοιχο μενού έχουμε την εικόνα:



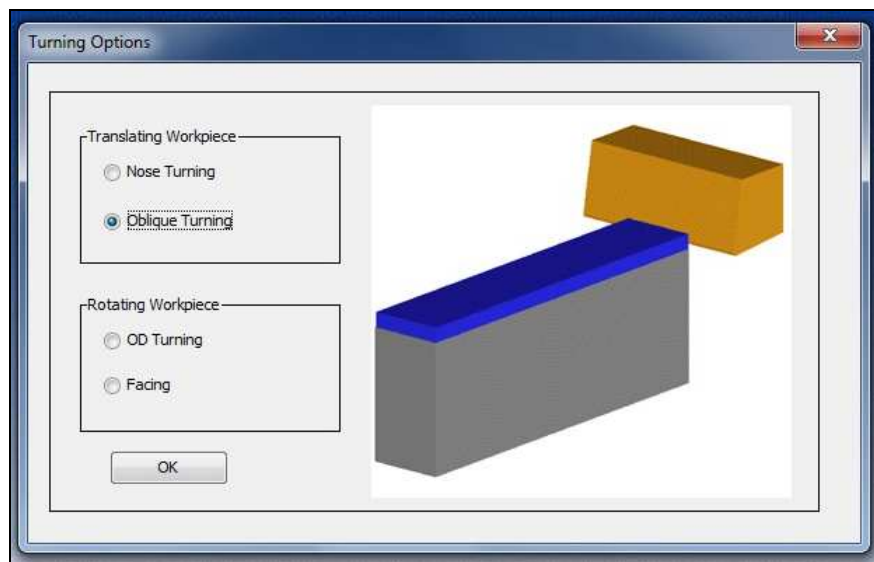
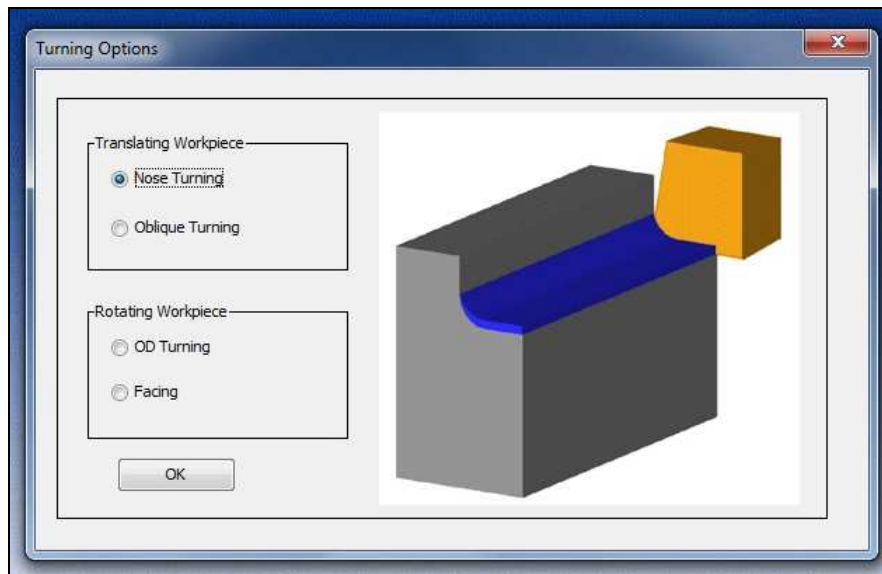
Εικόνα 4.15: Οι συνθήκες κοπής για το διαδιάστατο φρεζάρισμα.

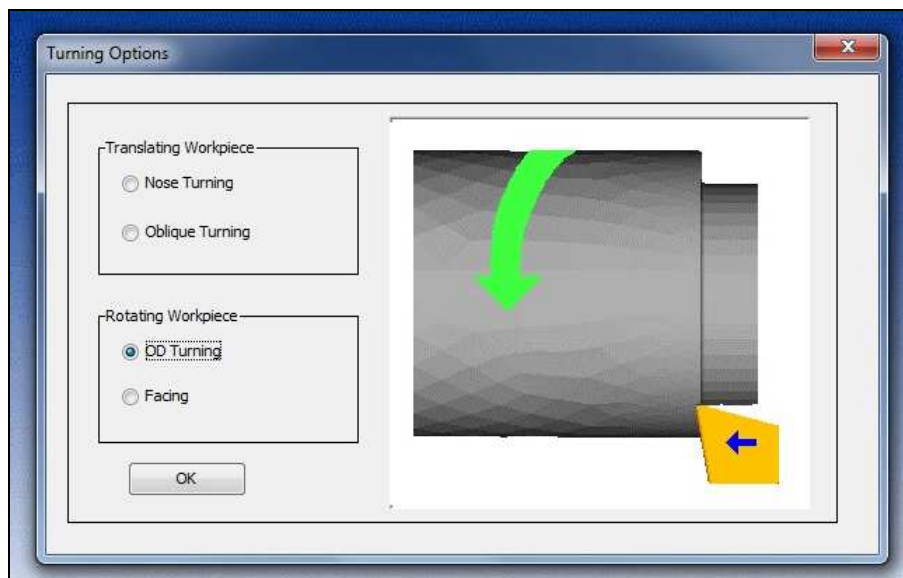
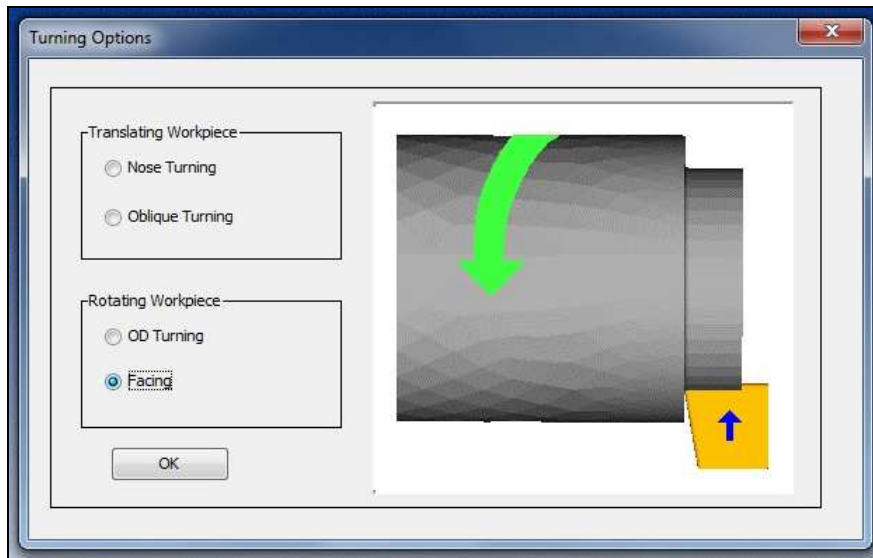
Η επιλογή των συνθηκών κοπής που αναφέρονται στην επιλογή υγρού κοπής και μελέτης του σχηματισμού «built» δε διαφέρουν και γίνονται όπως αναφέραμε και

στην προηγούμενη κατεργασία (δες εικόνες 4.9 & 4.10). Αντίστοιχα το ίδιο ισχύει και για τις επιλογές της επίλυσης του μοντέλου (δες εικόνα 4.11).

4.2.3 3D τόνρευση

Ξεκινώντας μία νέα εργασία στο πρόγραμμα επιλέγουμε *turning* και *3D simulation* αυτή τη φορά για να ξεκινήσουμε ένα μοντέλο τρισδιάστατης τόνρευσης. Τότε εμφανίζεται το μενού με τις υποκατηγορίες – επιλογές που έχουμε:

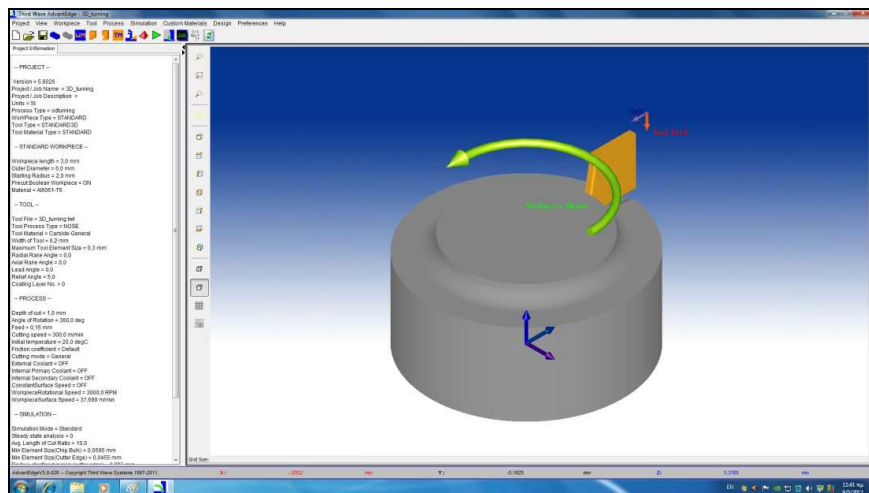




Εικόνες 4.16, 4.17, 4.18 & 4.19: Οι επιλογές για την τρισδιάστατη τόνρευση.

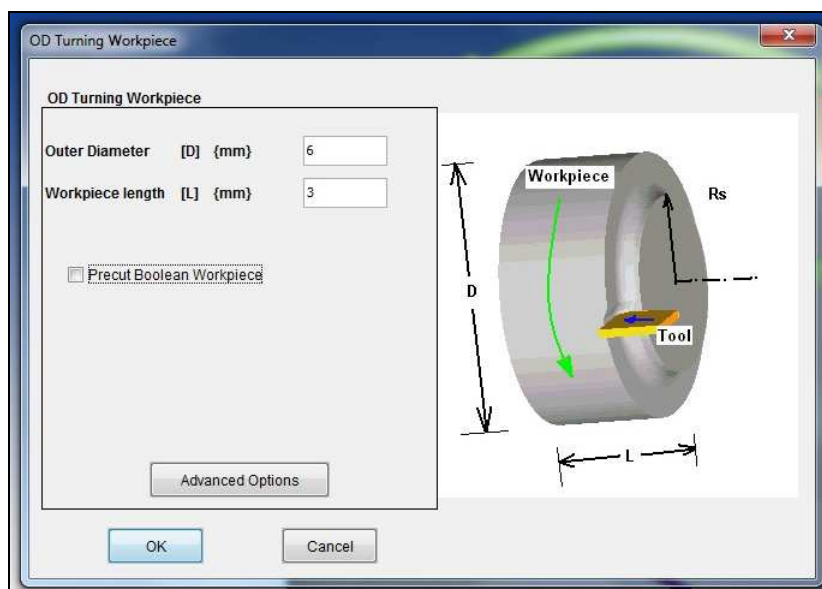
Το πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα τεσσάρων επιλογών για την τρισδιάστατη τόνρευση. Οι δύο πρώτες (*nose turning* & *oblique turning*) είναι στην λογική του 2D μοντέλου όπου το τεμάχιο είναι 'ευθύγραμμο' και είναι αυτό που κινείται προς το εργαλείο. Ειδικότερα η δεύτερη επιλογή (*oblique turning*) προσομοιώνει συνθήκες λοξής κοπής. Οι άλλες δύο επιλογές προσομοιώνουν την τόνρευση όπως την ξέρουμε σαν 3D κατεργασία. Στην πρώτη επιλογή το τεμάχιο περιστρέφεται και το εργαλείο κινείται κατά τη διεύθυνση του άξονα του τεμαχίου μειώνοντας την διάμετρο κατά μήκος αυτού (OD turning). Στη δεύτερη επιλογή το τεμάχιο περιστρέφεται και το εργαλείο κινείται μόνο ακτινικά στην άκρη του τεμαχίου τόνρευοντας το κατά πρόσωπο (face turning). Εμείς επιλέγουμε το OD turning έτσι ώστε να δούμε τα διάφορα «burr» που αναπτύσσονται με την πρόοδο της κατεργασίας έχοντας παράλληλα ένα μοντέλο κοντά με την κατεργασία όπως την γνωρίζουμε χωρίς να υπάρχει κάποια παραδοχή επ' αυτής. Σύμφωνα και με το εγχειρίδιο χρήστη, με το OD turning προσομοιώνεται η τόνρευση λαμβάνοντας υπόψη την καμπυλότητα της κοπτικής ακμής και με πιστή αναπαράσταση της

πραγματικής διαδικασίας για τεμάχια οποιασδήποτε διαμέτρου. Έτσι έχουμε την εικόνα του μοντέλου κατά τα γνωστά μαζί με τις πληροφορίες στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4.20: Το μοντέλο για την τρισδιάστατη τόνρευση.

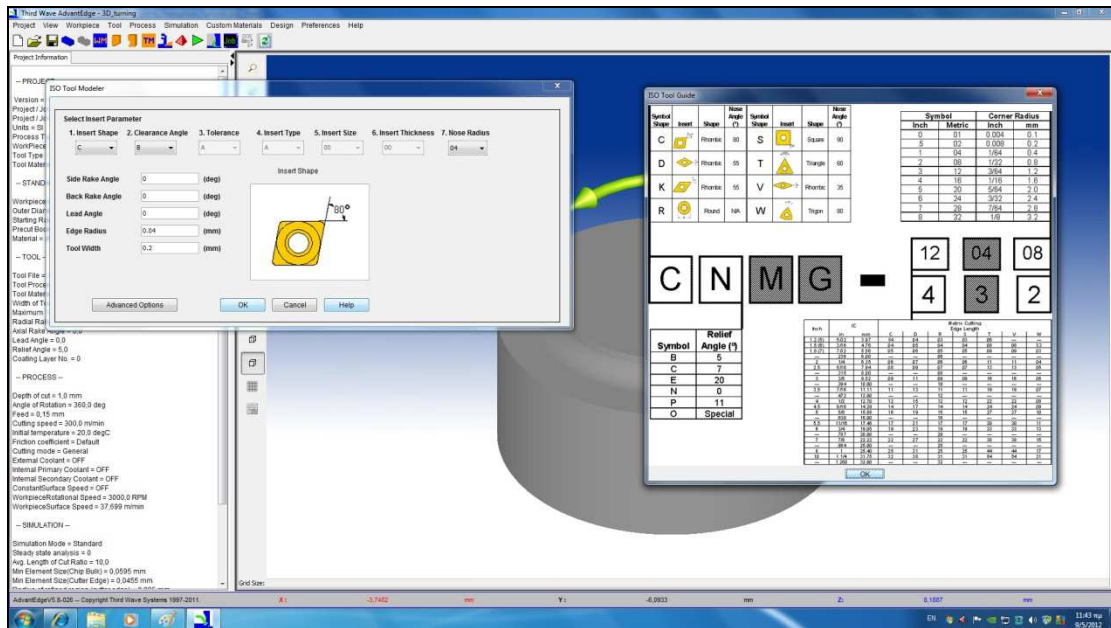
Στην συνέχεια προχωρούμε στην ρύθμιση των παραμέτρων του τεμαχίου, όπου από το αντίστοιχο μενού βλέπουμε την ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 4.21: Η ρύθμιση των παραμέτρων του τεμαχίου. Πέρα από την επιλογή των διαστάσεων έχουμε την δυνατότητα να επιλέξουμε εάν κατά την έναρξη της επίλυσης του μοντέλου, το κοπτικό εργαλείο θα έχει ήδη εισέλθει ή όχι στο τεμάχιο (επιλογή *precut Boolean workpiece*).

Η επιλογή του υλικού του τεμαχίου γίνεται όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω καθώς είναι κοινή για όλες της κατεργασίες (δες εικόνα 4.5).

Προχωρώντας, στη συνέχεια θα επιλέξουμε τις παραμέτρους του εργαλείου. Καθώς εδώ βρισκόμαστε στις τρεις διαστάσεις το πρόγραμμα μας δίνει αρκετά περισσότερες δυνατότητες επέμβασης οι οποίες περιλαμβάνουν πέρα από τη μορφή του εργαλείου και την καμπυλότητα της κοπτικής ακμής την ρύθμιση των γωνιών εισόδου, αποβλίττου (όπισθεν και πλάγιας) και του πλάτους του εργαλείου.



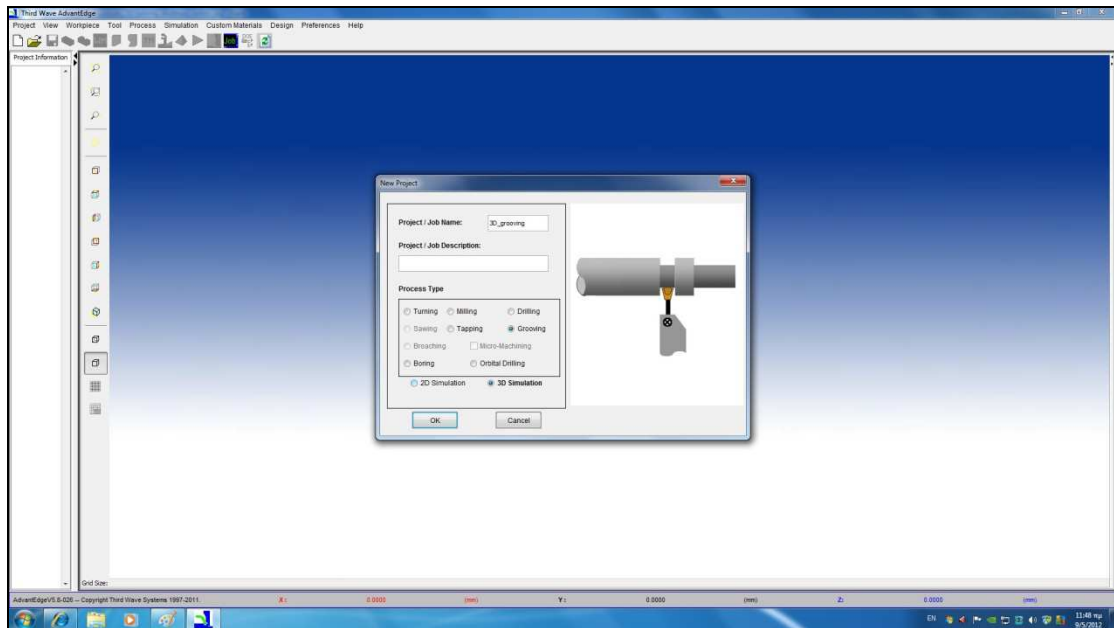
Εικόνα 4.22: Η ρύθμιση των παραμέτρων του εργαλείου στην τρισδιάστατη τόνρευση.

Το υλικό του εργαλείου επιλέγεται κατά τα γνωστά (δες εικόνα 4.7) ενώ δε γίνεται κάποια επέμβαση στο πλέγμα του.

Το επόμενο βήμα είναι να επιλέξουμε τις συνθήκες κοπής. Δίνοντας την γωνία περιστροφής του τεμαχίου έχουμε την δυνατότητα να δούμε την εξέλιξη της κατεργασίας για αρκετή ώρα (βέβαια μόνο για ένα πάσο), δυστυχώς όμως όχι μέχρι το εργαλείο να εξέλθει από το τεμάχιο. Αυτό δημιουργεί κάποια προβλήματα εμφάνισης μεγάλων δυνάμεων ή / και παραμορφώσεων στο μοντέλο διακόπτοντας την επίλυσή του. Άλλωστε και στο εγχειρίδιο χρήσης επισημαίνεται πως πρέπει να προστίθεται τουλάχιστον ένα χιλιοστό επιπλέον στο μήκος το τεμαχίου σε σχέση με το μήκος που θέλουμε να κόψει το εργαλείο. Η ρύθμιση της ανάλυσης για το «butt» και το υγρό κοπής γίνεται κατά τα γνωστά (δες εικόνες 4.9 & 4.10).

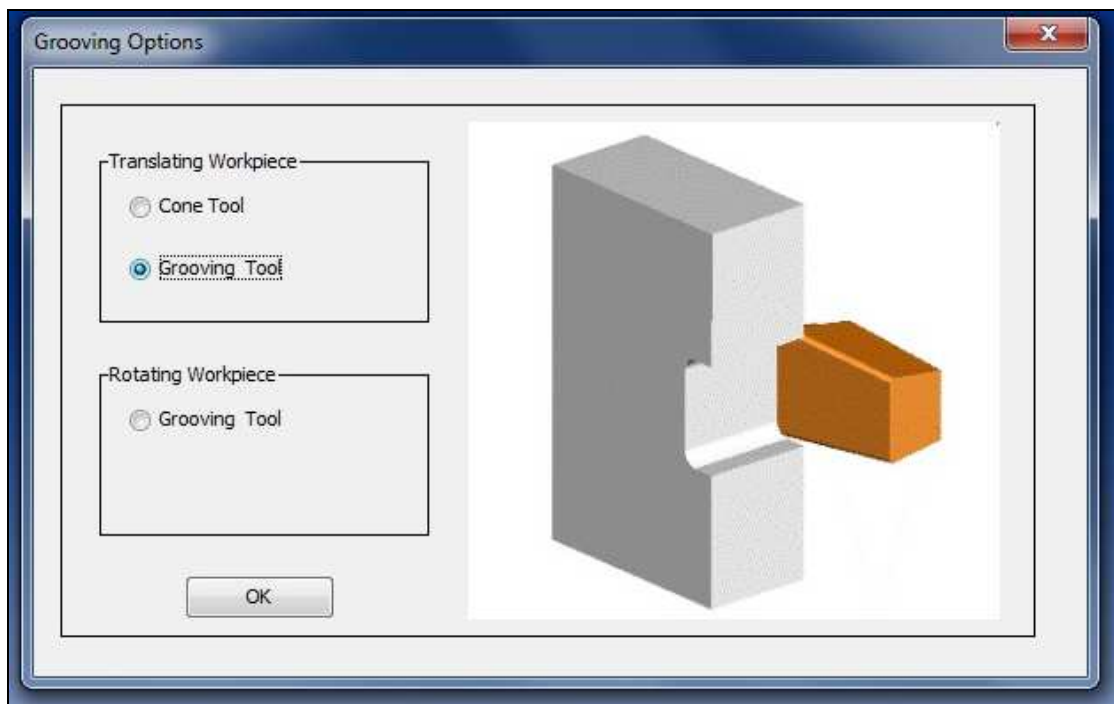
4.2.4 3D διάνοιξη αυλακιών

Ξεκινώντας μία νέα εργασία στο πρόγραμμα επιλέγουμε *3D simulation* και *grooving* για να ξεκινήσουμε ένα μοντέλο τρισδιάστατης διάνοιξης αυλάκων. Πρόκειται ουσιαστικά για μία υποκατηγορία της τόνρευσης η οποία μοντελοποιείται ξεχωριστά στο *AdvantEdge*. Στην κατεργασία αυτή το πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα να δημιουργήσουμε μοντέλο ‘ευθύγραμμου’ τεμαχίου (στην λογική που είδαμε και παραπάνω) με κωνικό εργαλείο, ‘ευθύγραμμου’ μοντέλου με κανονικό εργαλείο και κυλινδρικού εργαλείου με την κατεργασία να είναι όπως την ξέρουμε με το μειονέκτημα ότι στον συγκεκριμένο τρόπο μοντελοποίησης δεν προσφέρεται η επιλογή μελέτης του σχηματισμού «butt».

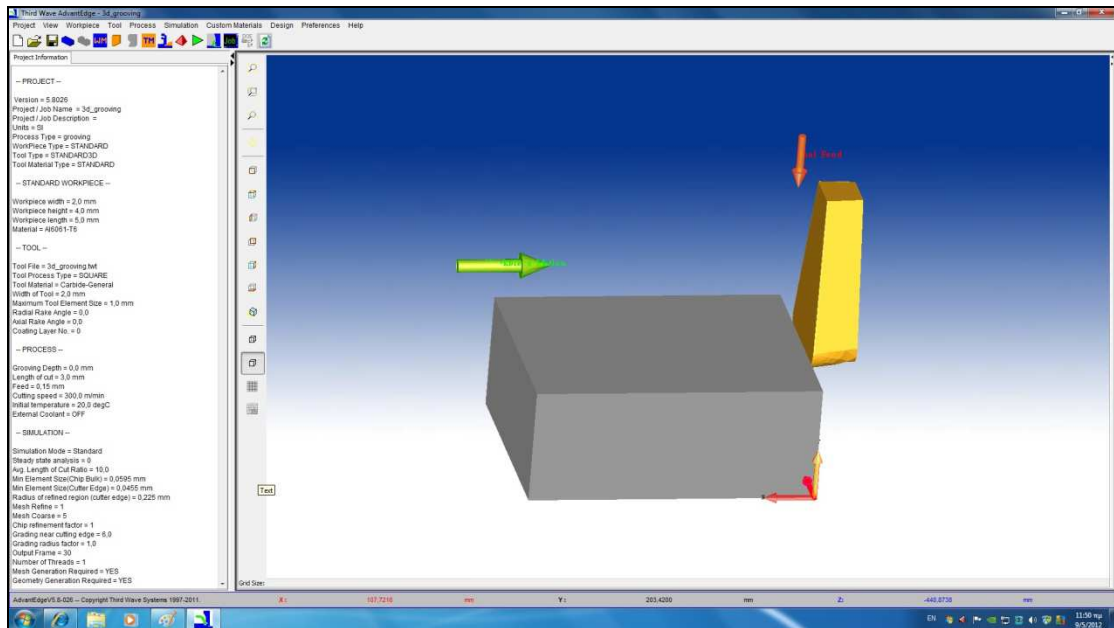


Εικόνα 4.23: Η επιλογή της κατεργασίας αυλάκωσης (grooving)

Εφόσον λοιπόν στην περίπτωση του περιστρεφόμενου τεμαχίου δεν προσφέρεται η δυνατότητα μελέτης του «butt» επιλέγουμε την περίπτωση του ‘ευθύγραμμου’ τεμαχίου με το κανονικό εργαλείο, όπου ένα απλό αυλάκι ανοίγεται στο τεμάχιο.

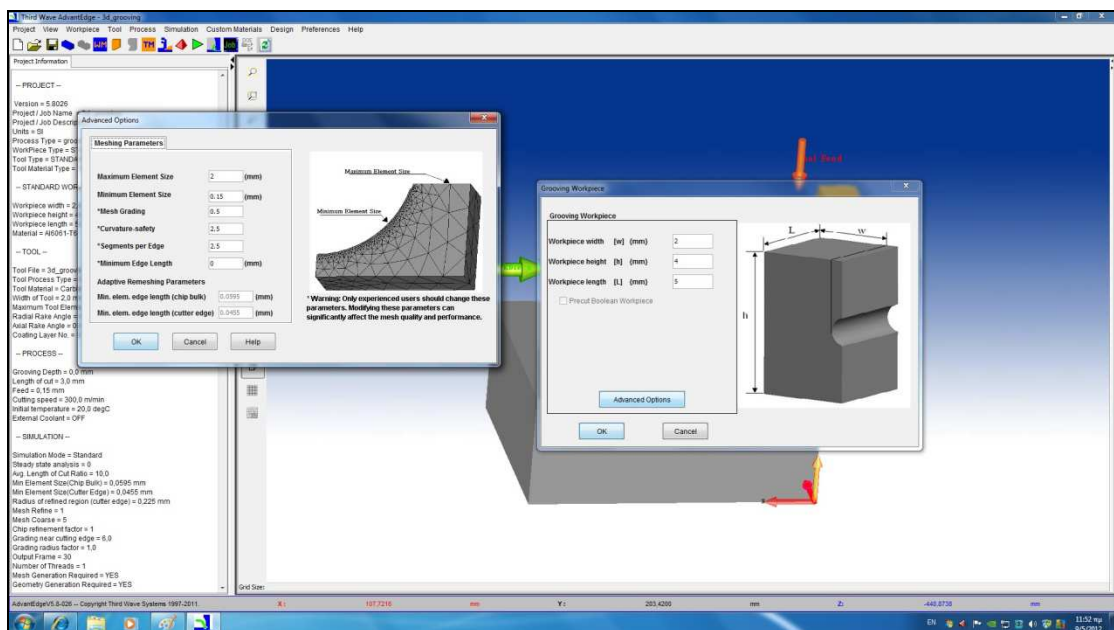


Εικόνα: 4.24: Η επιλογή της διάνοιξης αυλακιού σε ‘ευθύγραμμο’ τεμάχιο με κανονικό εργαλείο.



Εικόνα 4.25: Το μοντέλο για 3D grooving.

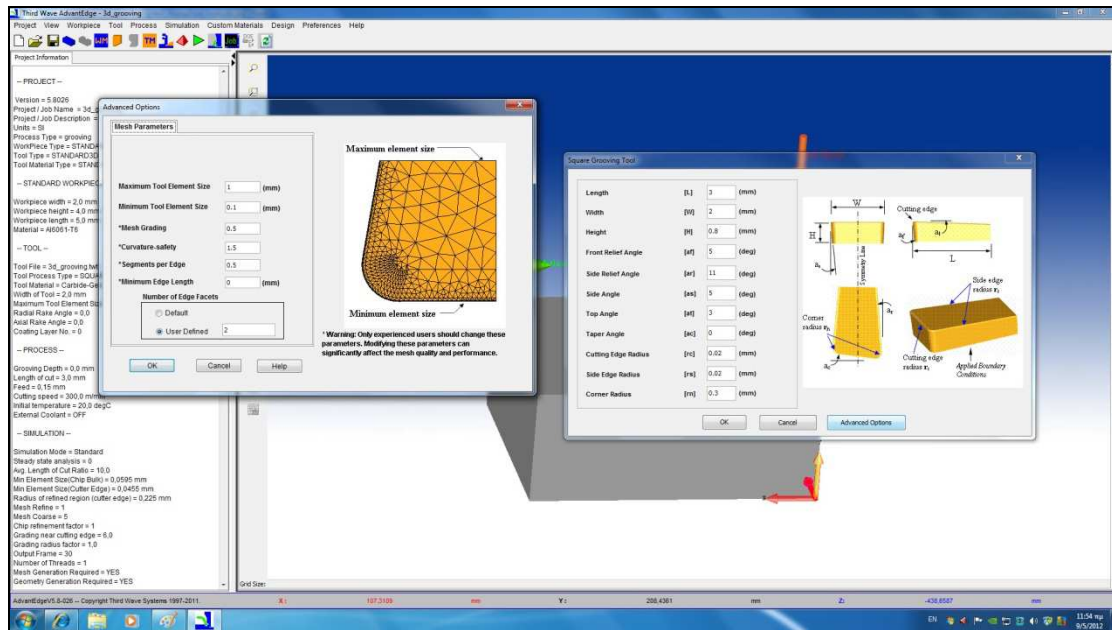
Στην συνέχεια μεταβαίνουμε στην ρύθμιση των παραμέτρων του τεμαχίου όπου όπως και προηγουμένως πέρα από την επιλογή των διαστάσεων του τεμαχίου μπορούμε να επιλέξουμε εάν το εργαλείο κατά την έναρξη της επίλυσης του μοντέλου θα έχει ήδη εισέλθει ή όχι στο τεμάχιο. Σημειώνεται και εδώ πως το πλέγμα του τεμαχίου παραμένει ως έχει ενώ το υλικό επιλέγεται όπως και παραπάνω.



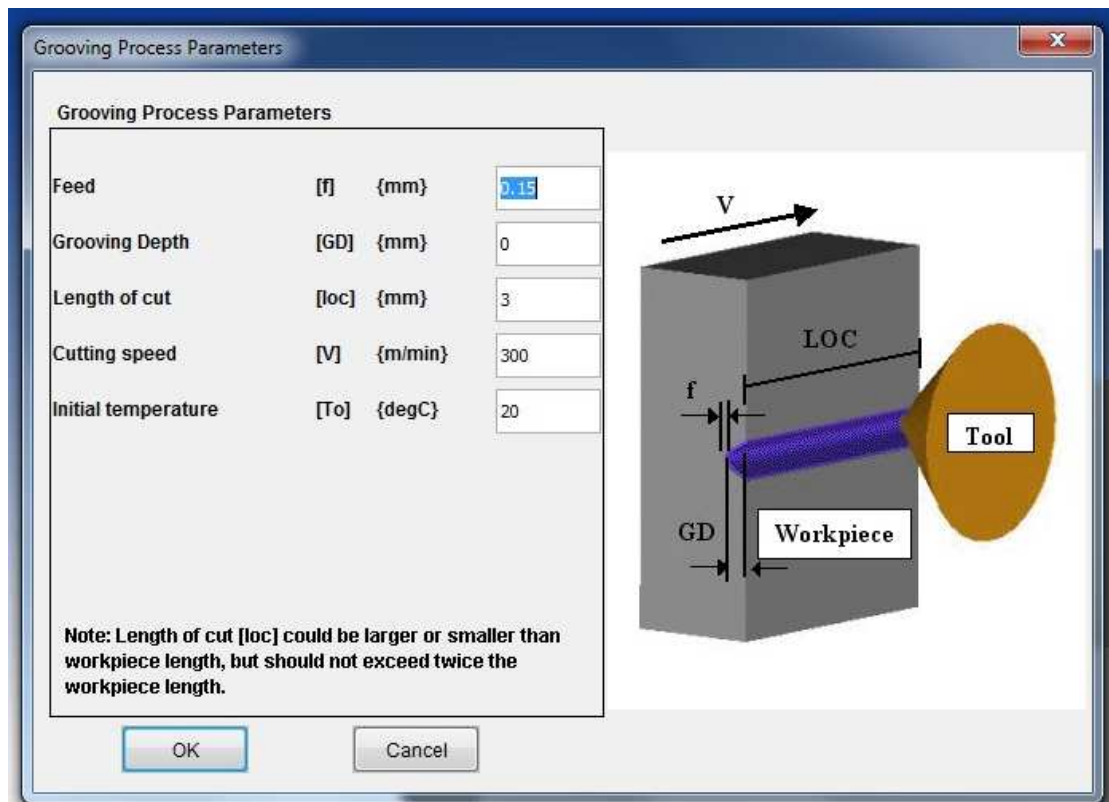
Εικόνα 4.26: Η ρύθμιση των παραμέτρων του τεμαχίου για 3D grooving.

Κατόπιν ακολουθεί η επιλογή των παραμέτρων του εργαλείου, για το οποίο όπως και παραπάνω λόγω των τριών διαστάσεων δίνεται μεγάλη γκάμα επιλογών, και στη συνέχεια εισάγονται στο μοντέλο οι συνθήκες κοπής. Για την επιλογή

υλικού εργαλείου, το πλέγμα του μοντέλου, την επιλογή «bug» και την μοντελοποίηση ισχύει ό,τι έχουμε αναφέρει παραπάνω.



Εικόνα 4.27: Η ρύθμιση των παραμέτρων εργαλείου για 3D grooving.



Εικόνα 4.28: Η επιλογή των συνθηκών κοπής για 3D grooving

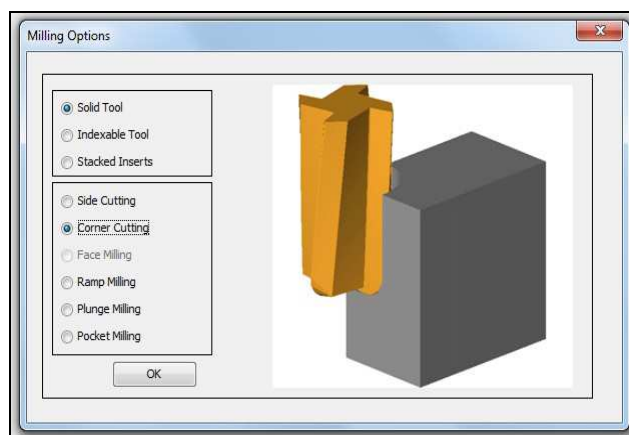
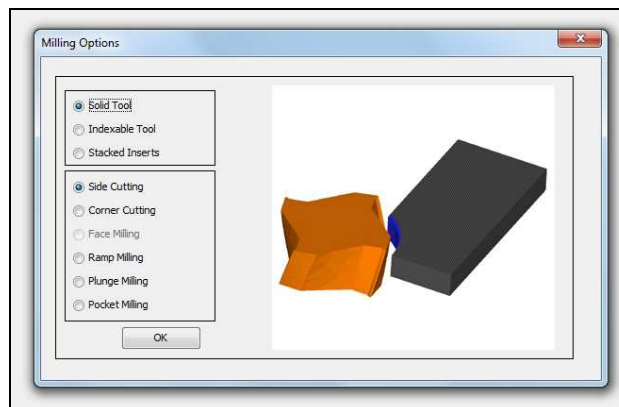
4.2.5 3D φρεζάρισμα

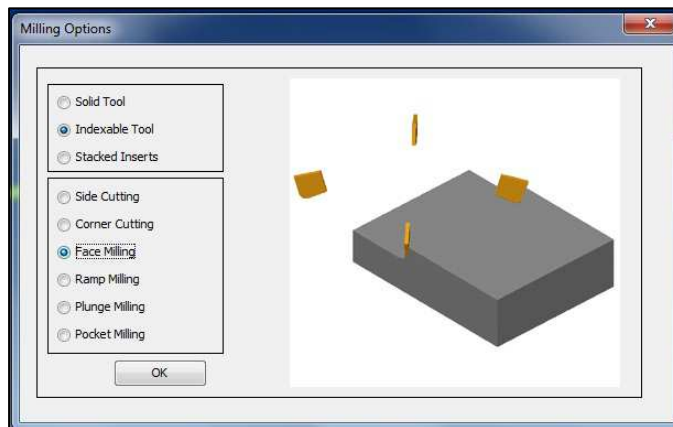
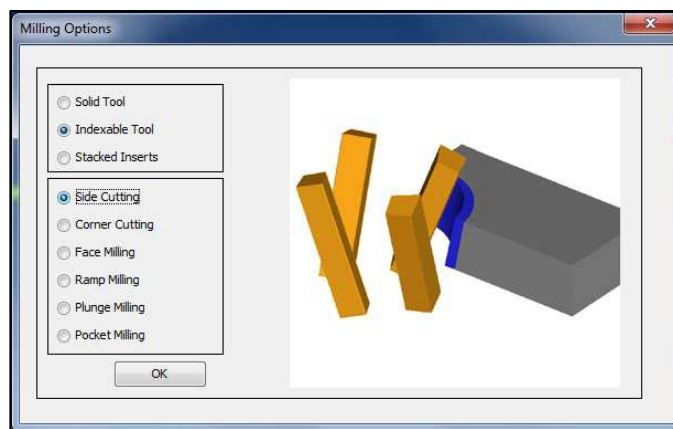
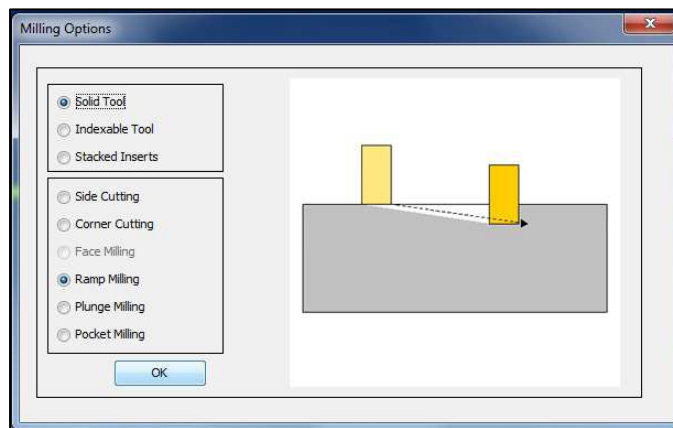
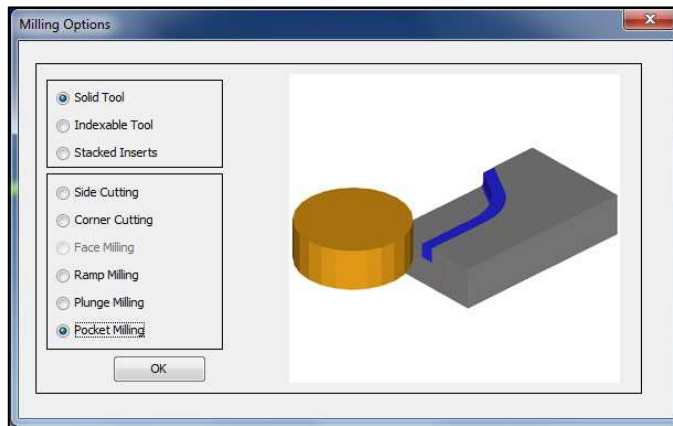
Ξεκινώντας μία νέα εργασία στο πρόγραμμα επιλέγουμε 3D simulation και

κατεργασία milling για να ξεκινήσουμε ένα τρισδιάστατο μοντέλο φρεζαρίσματος. Αμέσως έχουμε μπροστά μας τις διάφορες επιλογές που χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Μία βάσει του τρόπου που μοντελοποιείται το κοπτικό εργαλείο και μία βάσει του τύπου φρεζαρίσματος που επιθυμούμε. Το εργαλείο μοντελοποιείται σαν “συμπαγές” σώμα όπως το γνωρίζουμε οπτικά από το μηχανουργείο, είτε υλοποιώντας το μόνο με τις κοπτικές του ακμές. Εμείς από εδώ και στο εξής θα χρησιμοποιήσουμε την πρώτη δυνατότητα ως μία καλή απεικόνιση της πραγματικότητας. Όσον αφορά στις κατηγορίες του φρεζαρίσματος έχουμε τις ακόλουθες επιλογές:

- Απλό περιφερειακό φρεζάρισμα (*side cutting*).
- Περιφερειακό φρεζάρισμα στο οποίο το κοπτικό εργαλείο διαμορφώνεται σφαιρικά (*corner cutting*).
- Φρεζάρισμα προσώπου (*face milling*)
- Φρεζάρισμα “ράμπας”, με οριζόντιες και κάθετες προώσεις (*ramp milling*).
- Φρεζάρισμα με μόνο κάθετες προώσεις (*plunge milling*).
- Φρεζάρισμα ποκέτας (*pocket milling*).

Από όλα τα παραπάνω μπορούμε κατά περίπτωση να χρησιμοποιήσουμε ό,τι μας εξυπηρετεί ανάλογα με το τί είναι πιο κοντά σε αυτό που μελετάμε. Επίσης σε κάθε υποκατηγορία του φρεζαρίσματος, ανάλογα με τη φύση της, έχουμε την δυνατότητα να μοντελοποιήσουμε το κοπτικό εργαλείο μόνο μέσω της κοπτικής του ακμής αποφεύγοντας έτσι τον μεγάλο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων και άρα εξοικονομώντας υπολογιστικό χρόνο.

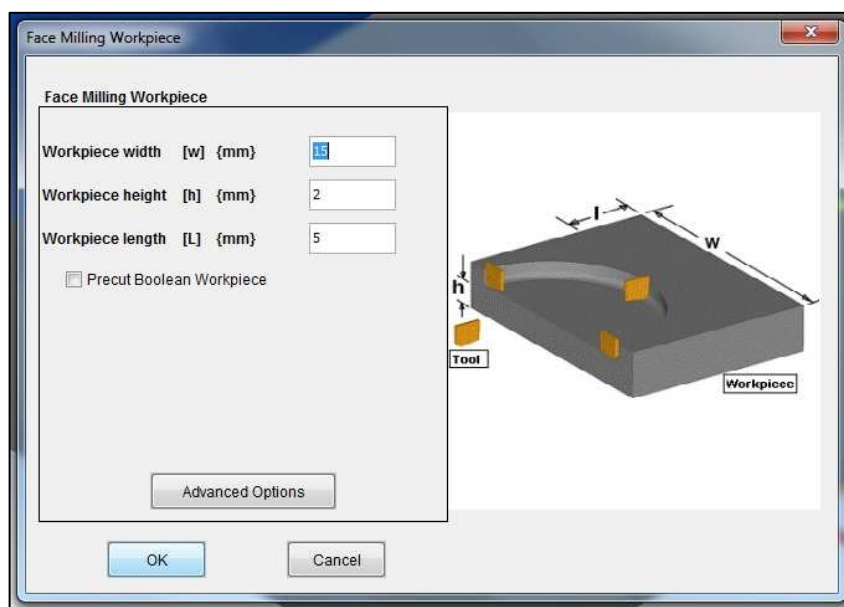




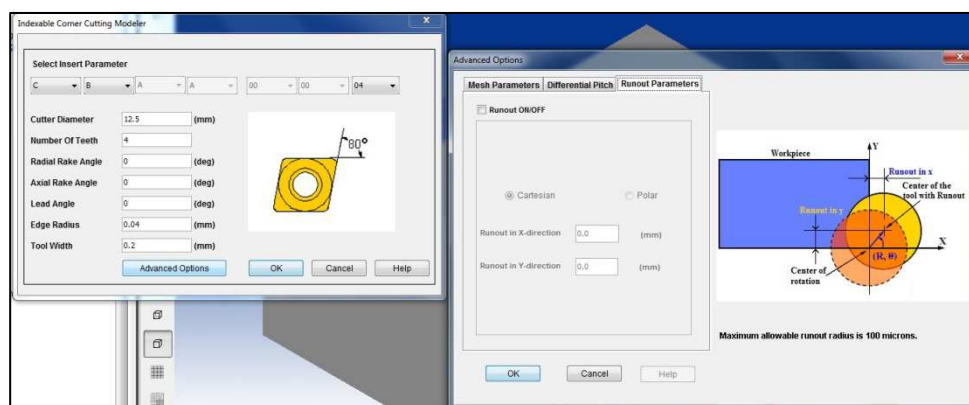
Εικόνα 4.29: Οι επιλογές του τρισδιάστατου φρεζαρίσματος

Από τις παραπάνω επιλογές θα χρησιμοποιήσουμε αυτή του φρεζαρίσματος προσώπου, τόσο γιατί όπως προαναφέραμε μοντελοποιεί το κοπτικό εργαλείο με το λιγότερο δυνατό όγκο πεπερασμένων στοιχείων, όσο και γιατί αποτελεί ένα μοντέλο πολύ κοντά στην πραγματική κατεργασία με δυνατότητα επισκόπησης της προόδου της κοπής καθώς το εργαλείο εισέρχεται στο τεμάχιο. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τη ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου. Σημειώνεται πως και για τη ρύθμιση των παραμέτρων των άλλων μοντέλων φρεζαρίσματος η λογική είναι ανάλογη όπως άλλωστε φαίνεται σε ό,τι έχουμε παρουσιάσει έως τώρα.

Αρχικά προβαίνουμε στην ρύθμιση των παραμέτρων του τεμαχίου. Μέσω του αντίστοιχου μενού πέρα από τις διαστάσεις, όπως και παραπάνω, έχουμε τη δυνατότητα να επιλέξουμε εάν το κοπτικό εργαλείο θα έχει ήδη εισέλθει στο τεμάχιο κατά την έναρξη της ανάλυσης και επίσης δεν επεμβαίνουμε στο πλέγμα του τεμαχίου.



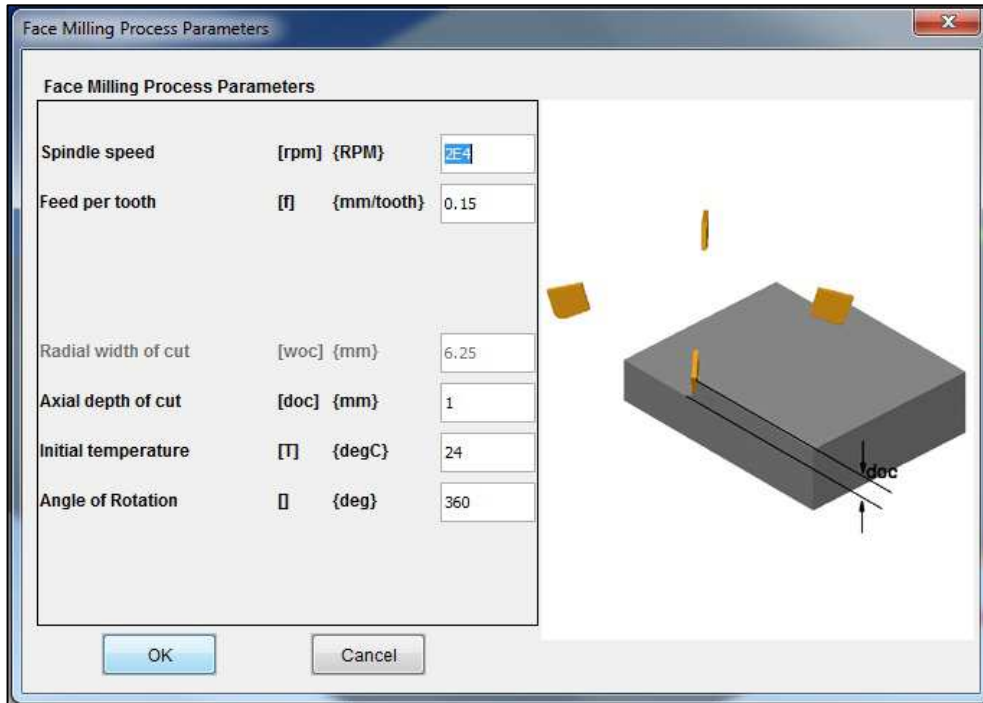
Εικόνα 4.30: Η ρύθμιση των παραμέτρων του τεμαχίου για 3D face milling. Το δοκίμιο μπορεί να είναι είτε μεγαλύτερο είτε μικρότερο (κατά πλάτος) σε σχέση με τη διάμετρο της φρέζας.



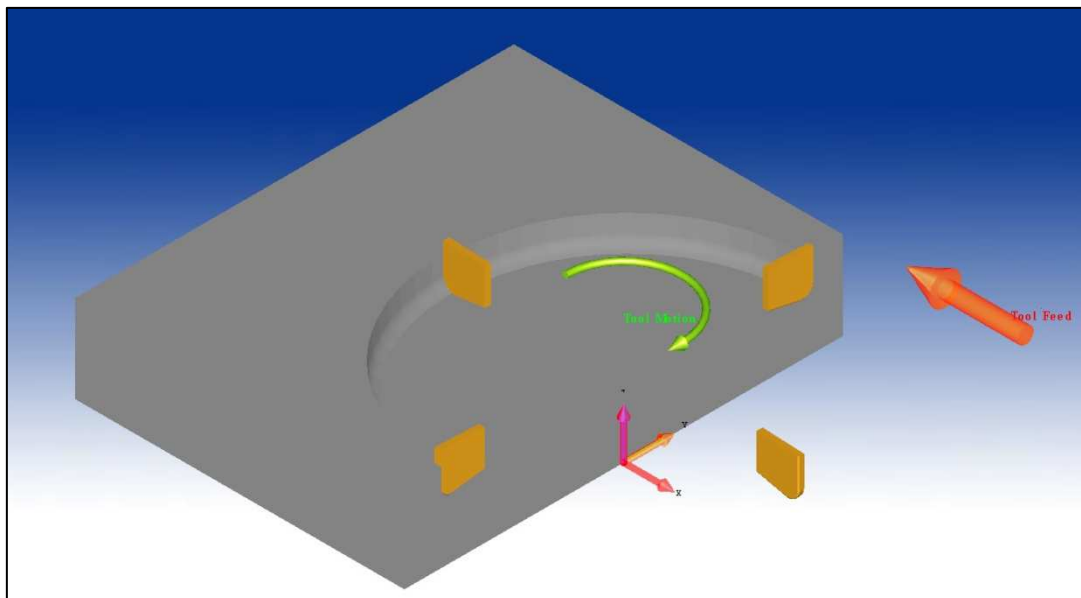
Εικόνα 4.31: Η ρύθμιση των παραμέτρων του εργαλείου για 3D face milling. Μία επιπλέον επιλογή σε σχέση με τα άλλα μοντέλα είναι η τοπολογία του εργαλείου μέσω της οποίας μπορούμε να ρυθμίσουμε ποιο τμήμα του δοκίμιου θα κατεργαστούμε.

Μετά την ρύθμιση των παραμέτρων τεμαχίου και εργαλείου ακολουθεί η επιλογή

των συνθηκών κοπής. Όπως και στην τρισδιάστατη τόννευση έτσι και εδώ εισάγοντας κατάλληλο αριθμό μοιρών περιστροφής για την φρέζα μπορούμε να εστιάσουμε την εξέλιξη της κοπής. Υπενθυμίζεται πως για το πλέγμα του εργαλείου, την επιλογή του “burr” και την προσομοίωση (*simulation*), ισχύει ό,τι έχουμε πει και παραπάνω.



Εικόνα 4.32: Η ρύθμιση των παραμέτρων της κατεργασίας για 3D face milling.



Εικόνα 4.33: Το μοντέλο για το τρισδιάστατο φρεζάρισμα προσώπου (face milling).

4.2.6 Μελέτη περιπτώσεων

Στο κομμάτι αυτό, που είναι και το τελευταίο της παρούσας εργασίας, θα εξετάσουμε μέσω του πακέτου AdvantEdge διάφορες πτυχές του φαινομένου σχηματισμού «burr» στις κοπές. Τη διερεύνηση αυτή μπορούμε να τη χωρίσουμε σε δύο στάδια, το ποιοτικό και το ποσοτικό. Στο πρώτο στάδιο θα εξετάσουμε εάν με τη βοήθεια του πακέτου μπορούμε να δούμε ποιοτικά τα είδη του «burr» που παρουσιάσαμε νωρίτερα σε θεωρητικό επίπεδο και επίσης να εξετάσουμε τον μηχανισμό ανάπτυξης του «burr» διαπιστώνοντας εάν συμπίπτει με τον θεωρητικά προτεινόμενο. Έτσι θα είμαστε σίγουροι πως το πακέτο AdvantEdge είναι ένα εργαλείο αρκούντως αξιόπιστο για την μελέτη του σχηματισμού «burr». Στο δεύτερο στάδιο θα προσπαθήσουμε να ποσοτικοποιήσουμε την εμφάνιση του «burr» συσχετίζοντας το με τους παράγοντες που το επηρεάζουν και καταλήγοντας σε στοιχειώδη συμπεράσματα σε σχέση και με όσα παρουσιάσαμε θεωρητικά.

4.2.6.1 Ο μηχανισμός ανάπτυξης του «burr» στο AdvantEdge

Σε πρώτη φάση, χρησιμοποιώντας τις επιλογές της δισδιάστατης μοντελοποίησης για την τórνευση και το φρεζάρισμα μέσω της διακύμανσης των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στο τεμάχιο καθώς το εργαλείο προχωρά και κόβει, θα δούμε τον μηχανισμό ανάπτυξης του «burr». Οι συνθήκες κοπής που εισήχθησαν στο πρόγραμμα είναι ενδεικτικές και δεν έχουν ιδιαίτερη σημασία για το τελικό αποτέλεσμα που μας ενδιαφέρει και είναι η ανάπτυξη και εξέλιξη του μηχανισμού σχηματισμού του «burr». Σημαντικό όμως είναι το υλικό που έχουμε επιλέξει για το τεμάχιο καθώς από τα χαρακτηριστικά του μεγέθη θα καθοριστούν οι ζώνες ανάπτυξης των τάσεων στο τεμάχιο. Για την πρώτη μοντελοποίηση λοιπόν έχουμε τα ακόλουθα στοιχεία:

Είδος: 2D turning

Τεμάχιο (workpiece): $h = 2\text{mm}$

$L = 5\text{mm}$

Υλικό (material): C45 steel (AISI 1045)

305 BHN

Ultimate tensile strength 1027 Mpa

Yield strength 612 Mpa

Σύσταση (% κ.β.): 0.465 C, 0.795 Mn, 0.04 P, 0.05 Si

Εργαλείο (tool): radius_0.02mm

rake angle_5°

relief angle_10°

υλικό_Carbide – general

Συνθήκες κοπής: πρόωση_0.15mm/rev

βάθος κοπής_1mm

μήκος κοπής_burr mode

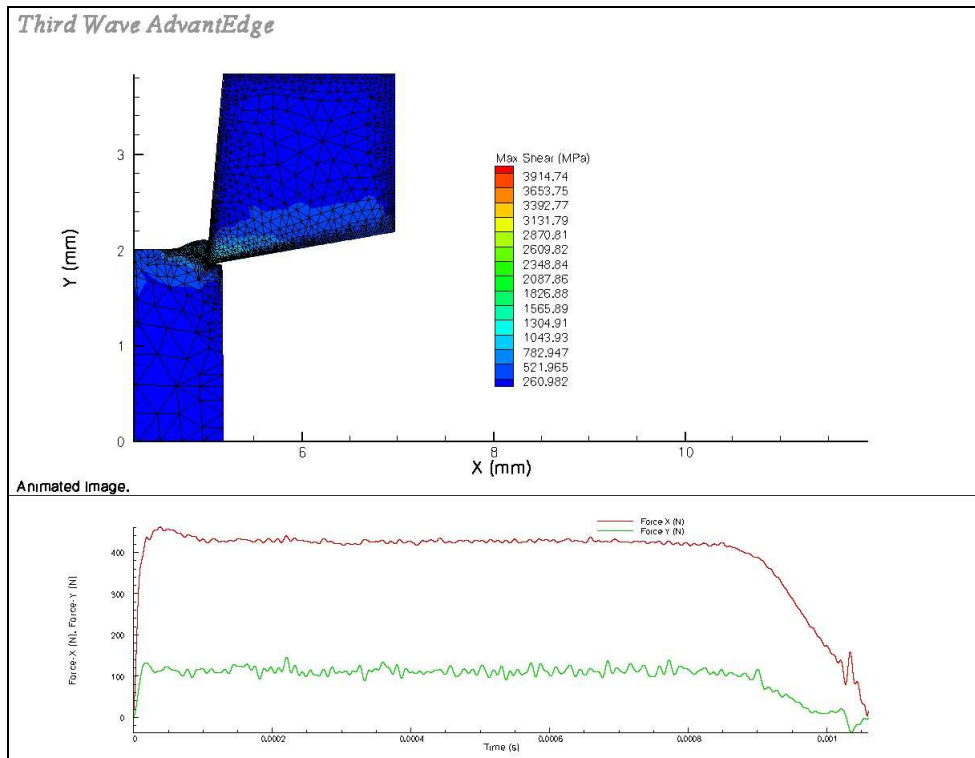
αρχική θερμοκρασία_24°C

ταχύτητα κοπής_300m/min

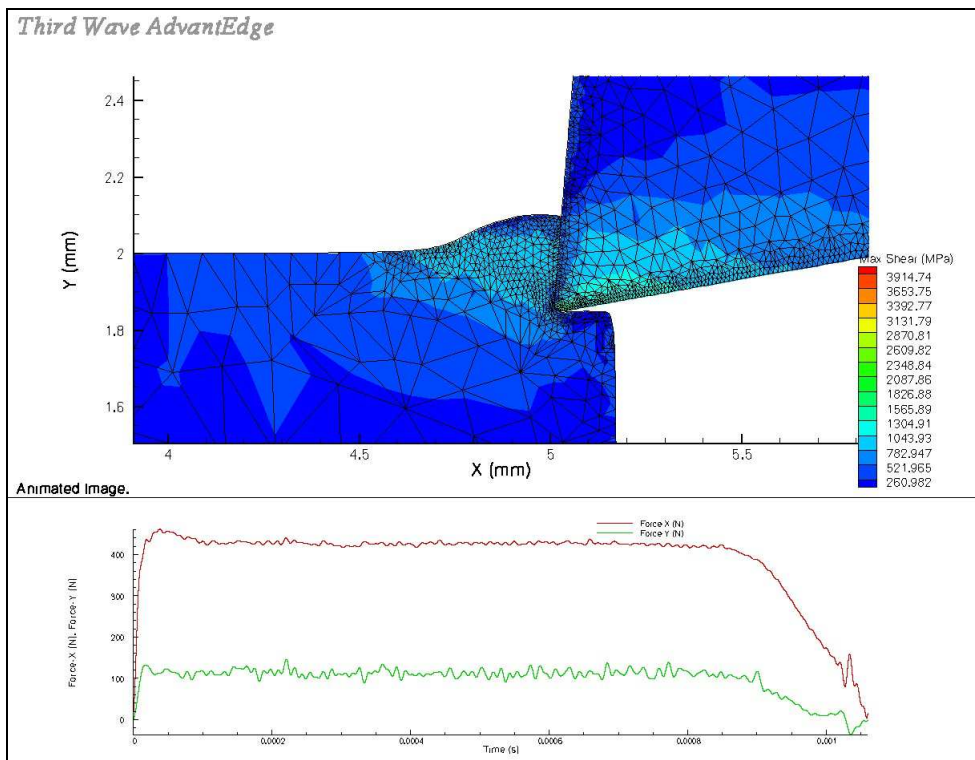
απουσία λιπαντικού_no coolant

Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα με τη βοήθεια της αναπαράστασης (*animation*) του AdvantEdge για τις διάφορες φάσεις της κοπής καθώς αυτή εξελίσσεται. Η παρουσίαση διευκολύνεται με τη χρήση χρωματικού κώδικα (*contour*) για το μέγεθος που μας ενδιαφέρει (εδώ για την μέγιστη

αναπτυσσόμενη διατμητική τάση), ενώ έχουμε παράλληλα και το γράφημα των δυνάμεων κοπής συναρτήσει του χρόνου εξέλιξης της κοπής.

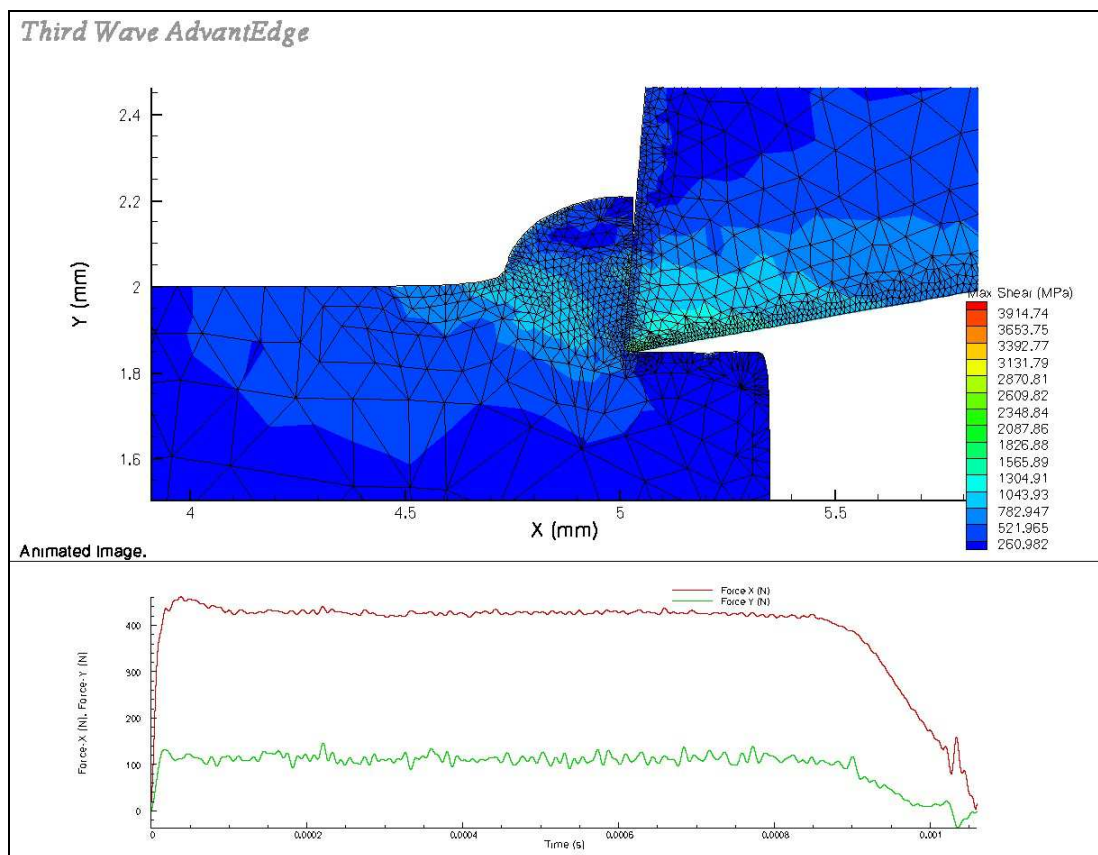


Εικόνα 4.34: Η έναρξη της κοπής, $t_{3.53342e-5sec}$.



Εικόνα 4.35: Η έναρξη της κοπής – ζουμ στην περιοχή όπου κόβει το εργαλείο.

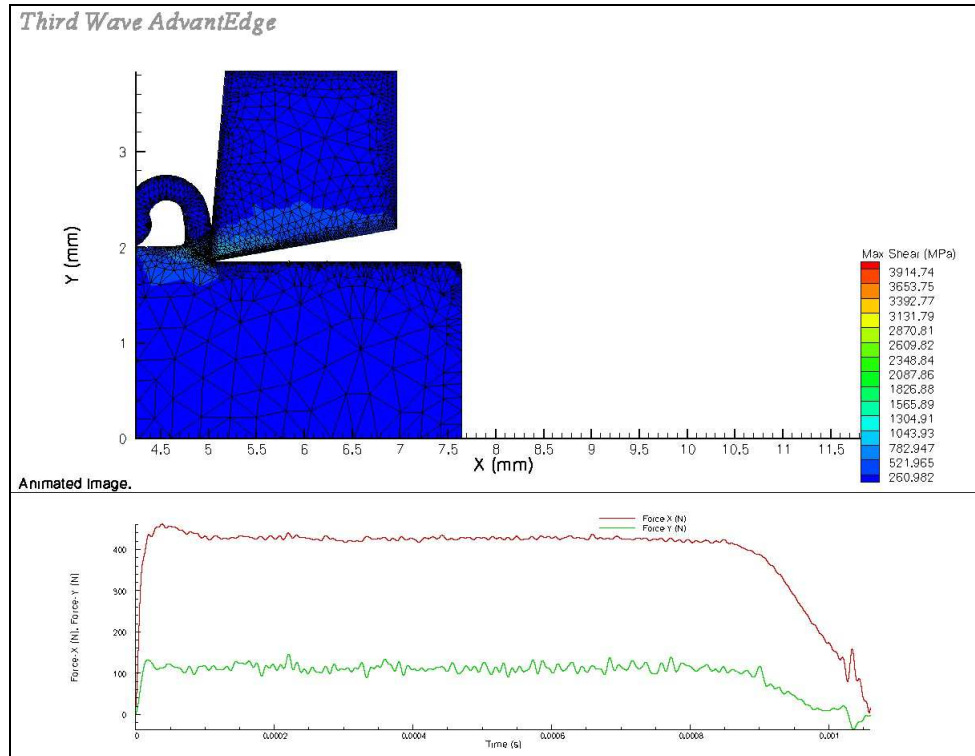
Στο πρώτο στιγμιότυπο (εικόνες 4.34 & 4.35) βλέπουμε την έναρξη της κοπής. Βρισκόμαστε περίπου στην χρονική στιγμή $3.5e-5$ sec και όπως μπορούμε να δούμε από το γράφημα (force X – κύρια δύναμη κοπής – κόκκινο χρώμα, force Y – δευτερεύουσα δύναμη κοπής – πράσινο χρώμα), οι δυνάμεις βρίσκονται σε φάση ανόδου και ακόμα δεν έχουμε φτάσει στην φάση σταθεροποίησης. Παρατηρώντας τοπικά την κοπή (εικόνα 4.37) βλέπουμε πως αρχίζουν και αναπτύσσονται διαφοροποιημένες ζώνες στο τεμάχιο μας ως προς την μέγιστη διατμητική τάση (*max shear*). Σε συνδυασμό με τον χρωματικό κώδικα βλέπουμε πως η διατμητική τάση λαμβάνει μέγιστες τιμές στην περιοχή κοντά στην κοπτική ακμή και ελαττώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από αυτή. Σε συνδυασμό με τις τιμές του χρωματικού κώδικα βλέπουμε πως η τιμή της διατμητικής τάσης στην περιοχή μεγίστου προσεγγίζει και ξεπερνά το όριο θραύσης του υλικού μας (1027 Mpa), πράγμα που σημαίνει πως στην περιοχή αυτή το υλικό μας αρχίζει και αποσχίζεται δημιουργώντας έτσι το γνωστό μας απόβλιττο. Η περιοχή αυτή είναι η ζώνη διάτμησης. Εκατέρωθεν της ζώνης διάτμησης παρατηρούμε την ύπαρξη ζώνης διαφοροποιημένων τιμών διατμητικής τάσης με τιμές μικρότερες της τάσης θραύσης, αρκετά μεγάλες όμως σε σχέση με το υπόλοιπο τεμάχιο σε στα επίπεδα του ορίου διαρροής του υλικού (612 Mpa). Άρα το υλικό μας στην περιοχή αυτή έχει διαρρεύσει οριστικά, βρισκόμαστε δηλαδή στην ζώνη της πλαστικής παραμόρφωσης. Στο υπόλοιπο τεμάχιο βρισκόμαστε ακόμη εντός της ελαστικής περιοχής. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε πως η κοπή βρίσκεται στο πρώτο στάδιο, χωρίς να έχουν αποκατασταθεί ακόμη μόνιμες συνθήκες.



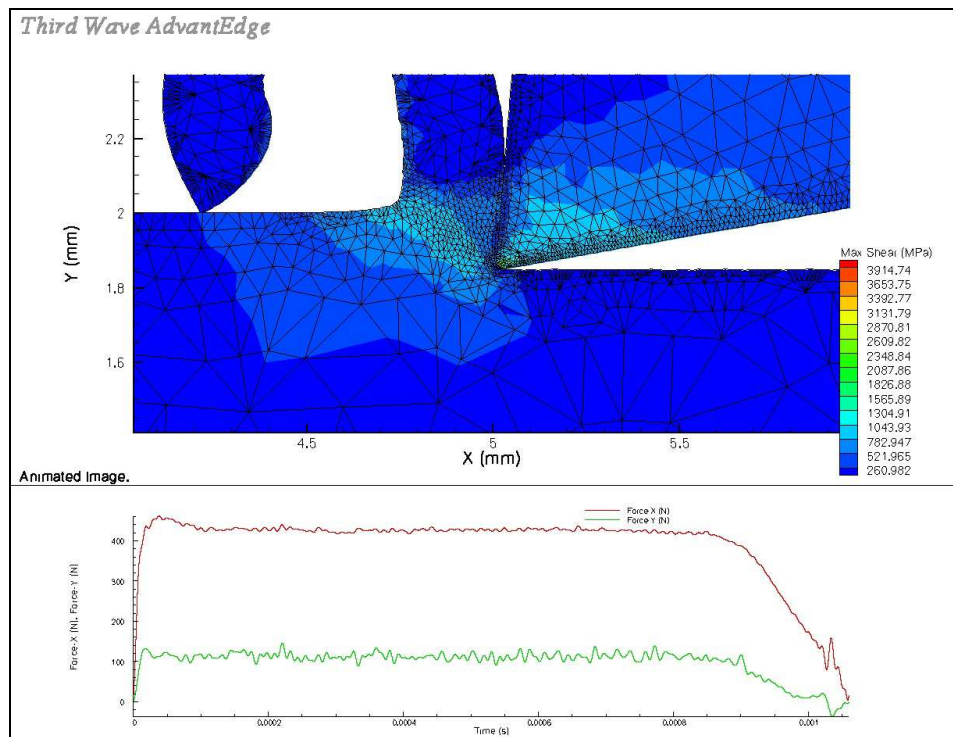
Εικόνα 4.36: Η «κανονικοποίηση» των ζωνών της διατμητικής τάσης, $t_{7.066735e-5}$ sec.

Στο επόμενο στάδιο (εικόνα 4.36), το εργαλείο έχει προχωρήσει ελαφρώς εντός του τεμαχίου. Βρισκόμαστε περίπου στην χρονική στιγμή 0.00007 sec και με

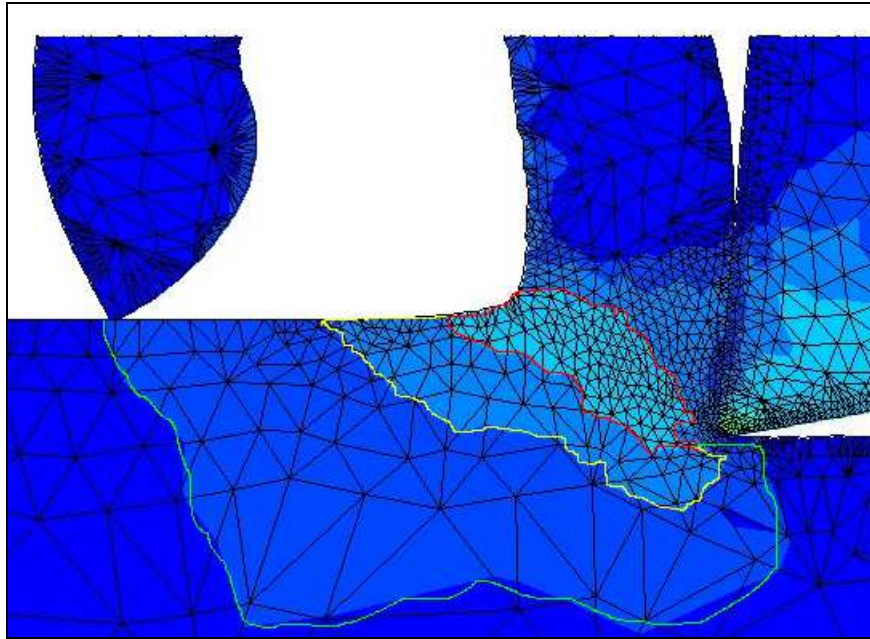
την βοήθεια του γραφήματος των δυνάμεων κοπής βλέπουμε ότι αυτές τείνουν σταδιακά να σταθεροποιηθούν. Σχετικά με τις ζώνες διάτμησης, παρατηρούμε μία «κανονικοποίηση» ως προς την μορφή τους σε συνάρτηση όσων είπαμε παραπάνω(ζώνη διάτμησης – ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης – ζώνη ελαστικής παραμόρφωσης – υπόλοιπο τεμάχιο).



Εικόνα 4.37: Η αποκατάσταση «μόνιμων» συνθηκών στην κοπή, $t_{5.3e-4sec}$.

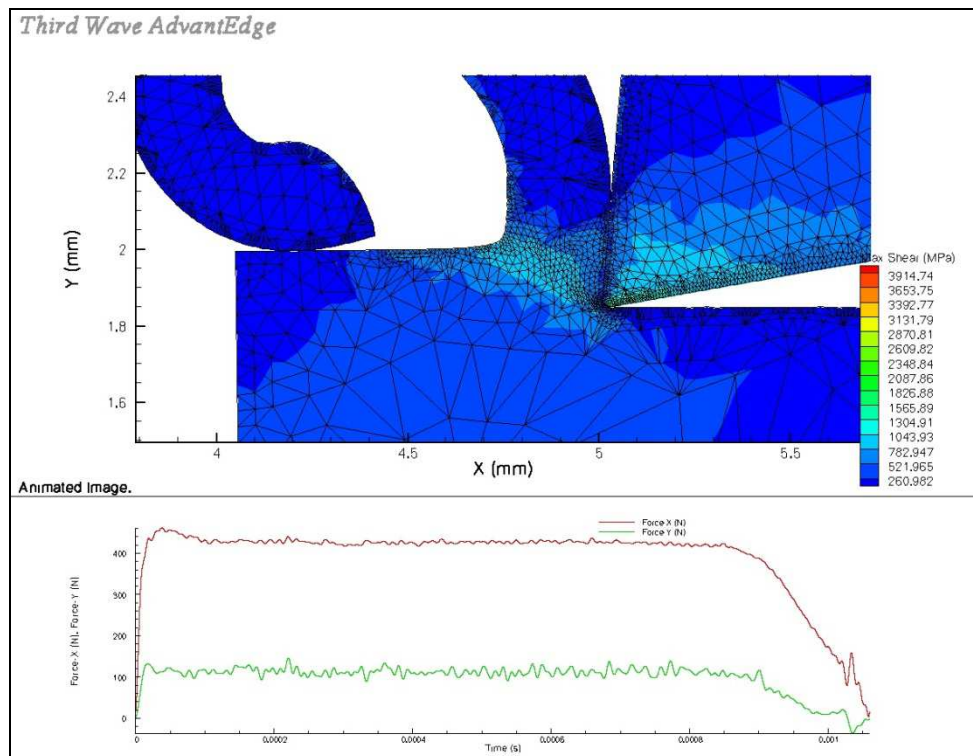


Εικόνα 4.38: Συνθήκες «μόνιμης» κατάστασης κατά την κοπή – ζουμι στην περιοχή της κοπτικής ακμής.

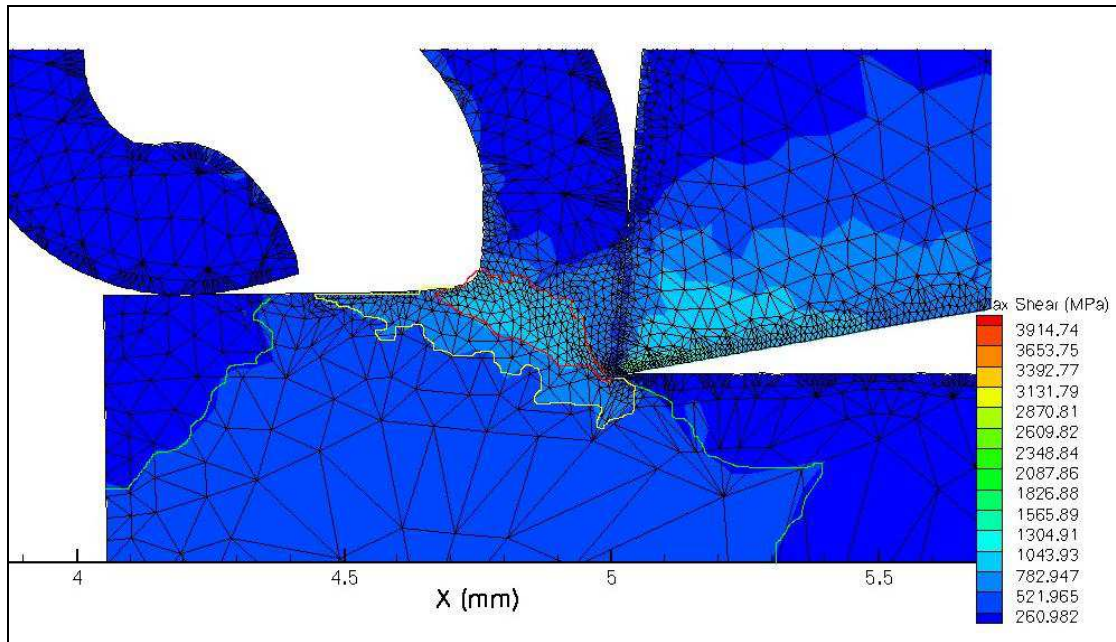


Εικόνα 4.39: Οι ζώνες της διατμητικής τάσης στην μόνιμη κατάσταση της κοπής. Φαίνονται η ζώνη διάτμησης (εντός της κόκκινης γραμμής), η ζώνη της πλαστικής παραμόρφωσης (εντός της κίτρινης γραμμής και η ζώνη της ελαστικής παραμόρφωσης (εντός της πράσινης γραμμής).

Εδώ πια βρισκόμαστε στην χρονική στιγμή των 0.0005 sec περίπου (εικόνες 4.37, 4.38 & 4.39). Οι δυνάμεις κοπής έχουν σταθεροποιηθεί και οι ζώνες της διατμητικής τάσης είναι διαμορφωμένες όπως τις περιμένουμε. Είμαστε λοιπόν στη φάση μόνιμων συνθηκών κοπής (*continuous cutting*) όπως την είδαμε στην παρουσίαση του μηχανισμού ανάπτυξης του «burr» (κεφ. 3 – σχήμα 3.22).

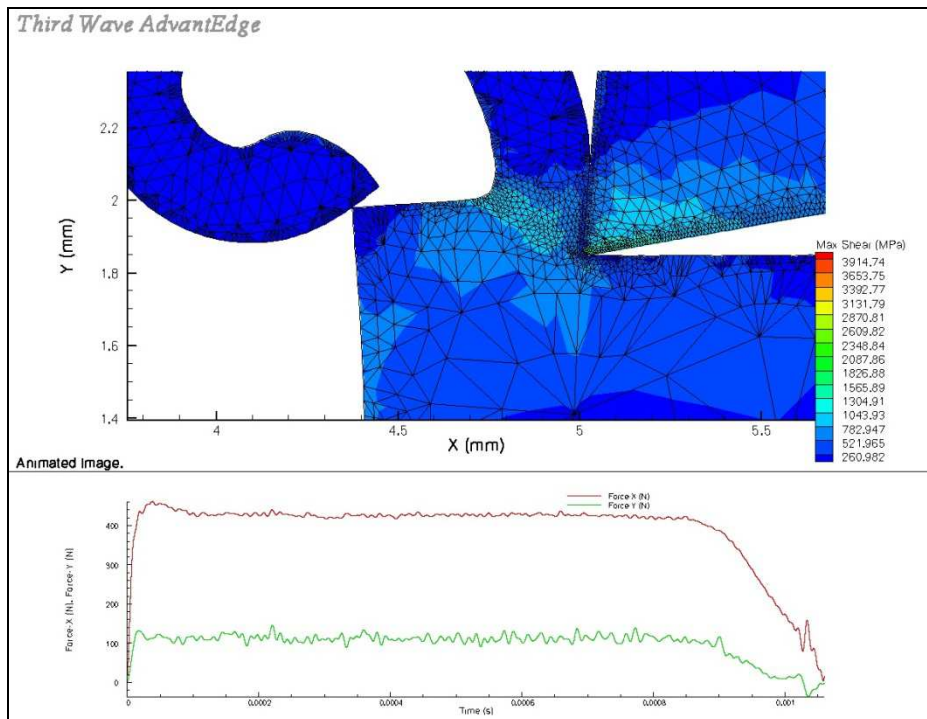


Εικόνα 4.40: Το κοπτικό εργαλείο πλησιάζει στην άκρη του τεμαχίου, $t_{8.12667e-4}$ sec.

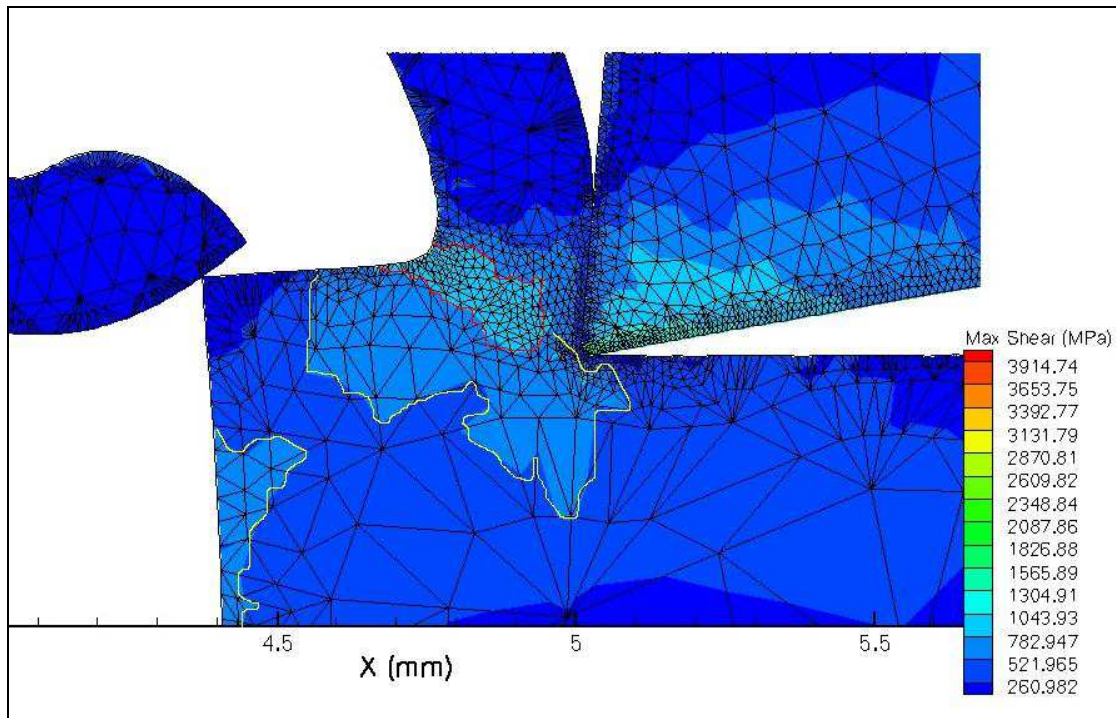


Εικόνα 4.41: Καθώς το εργαλείο πλησιάζει προς την έξοδο του τεμαχίου, η ζώνη ελαστικής παραμόρφωσης (πράσινο χρώμα) επεκτείνεται έως την άκρη του τεμαχίου.

Σταδιακά το εργαλείο πλησιάζει προς την έξοδο από το τεμάχιο (εικόνες 4.40 & 4.41). Παρατηρούμε πως η ζώνη της ελαστικής παραμόρφωσης εκτείνεται πια έως το άκρο του τεμαχίου. Σύμφωνα με τον μηχανισμό ανάπτυξης του «burr» (κεφ. 3 – σχήμα 3.22) βρισκόμαστε στην φάση της προ – έναρξης (*pre-initiation*) σχηματισμού του «burr».

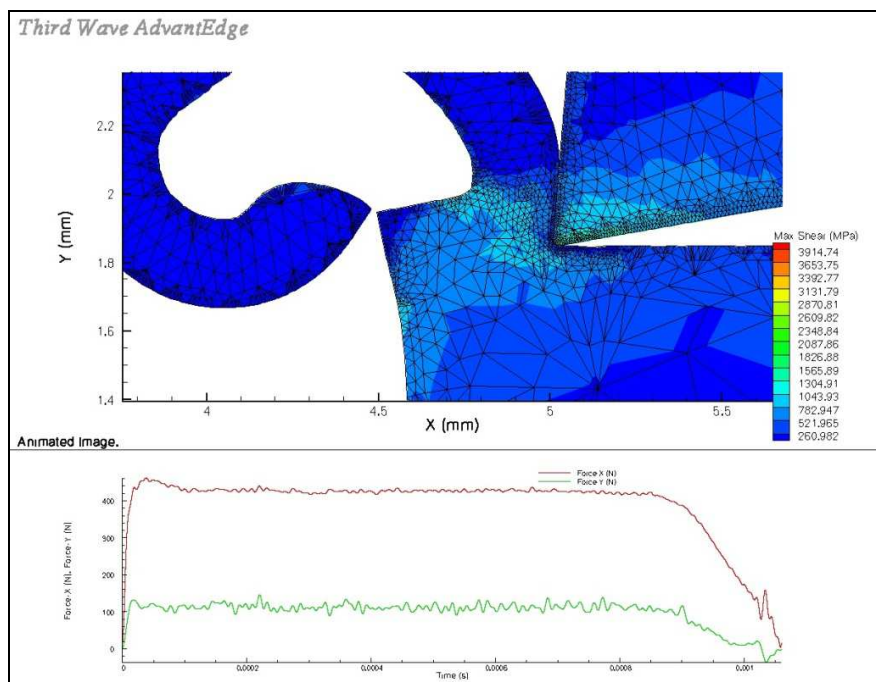


Εικόνα 4.42: Το κοπτικό εργαλείο πλησιάζει περισσότερο στην έξοδο από το τεμάχιο, $t_{.883334sec}$.

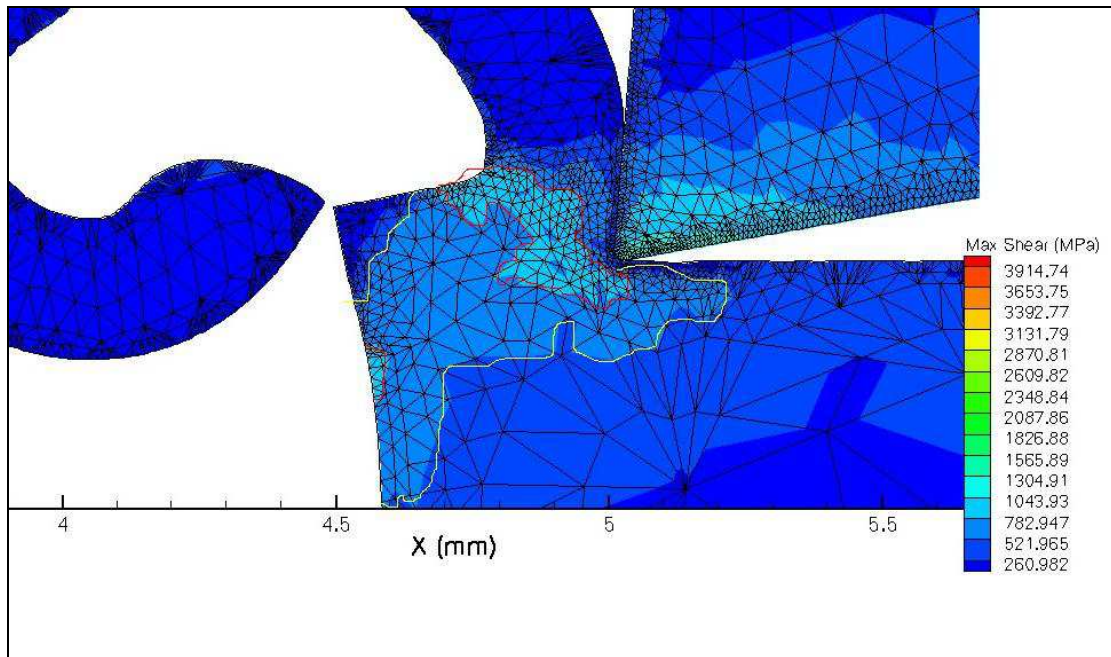


Εικόνα 4.43: Καθώς το κοπτικό εργαλείο πλησιάζει περισσότερο στην έξοδο από το τεμάχιο, εμφανίζεται μία νέα ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης στο άκρο του τεμαχίου (κίτρινο χρώμα).

Καθώς το κοπτικό εργαλείο πλησιάζει περαιτέρω προς την έξοδο από το τεμάχιο, παρατηρούμε πως δημιουργείται μια επιπλέον ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης που ξεκινά από την άκρη του τεμαχίου κάτω από την κοπτική γραμμή. Σύμφωνα με τον μηχανισμό ανάπτυξης του «burr» (κεφ. 3 – σχήμα 3.22) βρισκόμαστε στην φάση της έναρξης (*initiation*) σχηματισμού του «burr». Φαίνεται άλλωστε από τα σχήματα πως η άκρη του τεμαχίου αρχίζει να παίρνει μία μικρή κλίση.

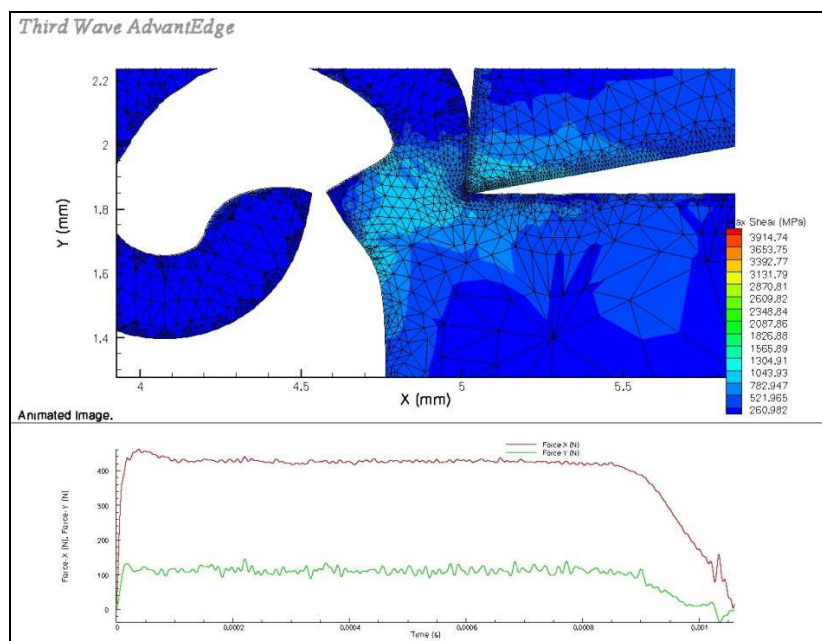


Εικόνα 4.44: Το κοπτικό εργαλείο πλησιάζει αισθητά στην έξοδο από το τεμάχιο, $t_{9.18667e-4}$ sec.

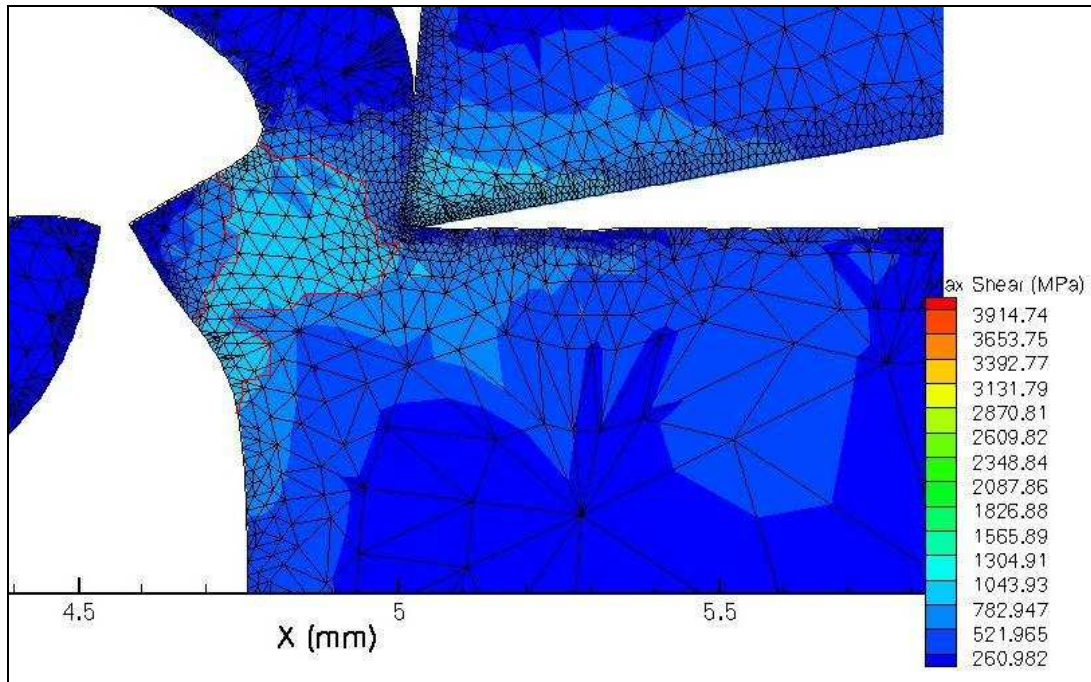


Εικόνα 4.45: Καθώς το κοπτικό εργαλείο πλησιάζει αισθητά πια στην έξοδο από το τεμάχιο, η άκρη του τεμαχίου αρχίζει να «πιβοτάρει» ενώ αναπτύσσεται μία νέα ζώνη διάτμησης με αντίθετη διεύθυνση ως προς τη αρχική (κόκκινο χρώμα).

Στην συνέχεια, το κοπτικό εργαλείο πλησιάζοντας αισθητά πια στη έξοδο από το τεμάχιο (εικόνες 4.44 & 4.45), ωθεί την άκρη του τεμαχίου σε «ρολάρισμα» και σταδιακά παρατηρούμε να δημιουργείται μία νέα ζώνη διάτμησης με αντίθετη διεύθυνση ως προς την αρχική η οποία είναι η αρνητική ζώνη διάτμησης. Σύμφωνα με τον μηχανισμό ανάπτυξης του «burr» (κεφ. 3 – σχήμα 3.22) βρισκόμαστε στην φάση της περιστροφής (pivoting). Επίσης, είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε στο γράφημα των δυνάμεων πως βρισκόμαστε πια στο στάδιο όπου αρχίζουν και μειώνονται καθώς η αντίσταση του υλικού μειώνεται και το εργαλείο θα εξέλθει από το τεμάχιο.

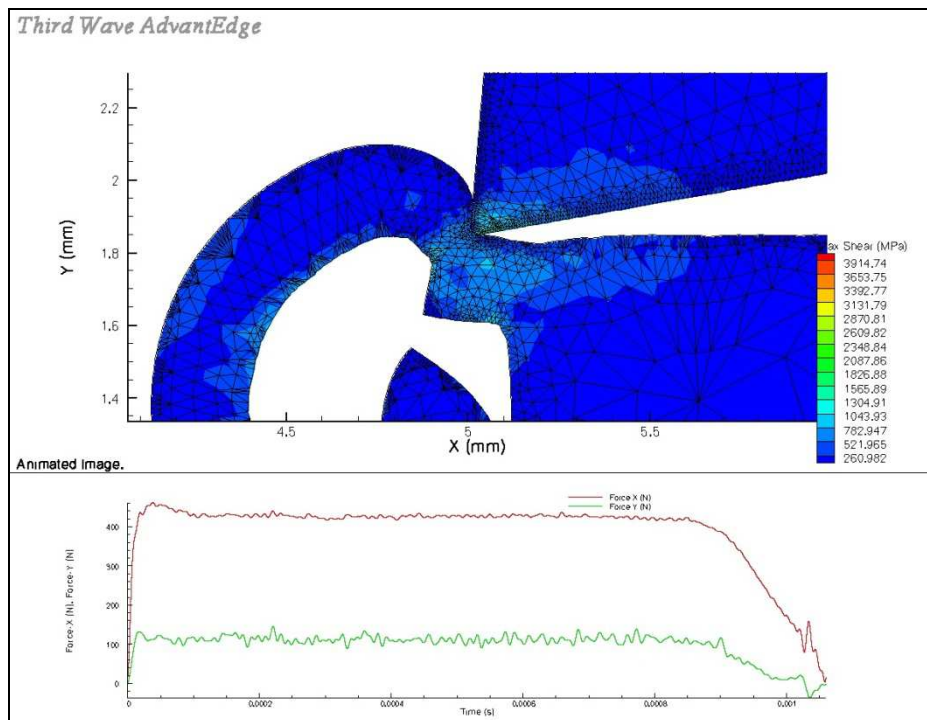


Εικόνα 4.46: Ο σχηματισμός του «burr» έχει ξεκινήσει, $t_{9.54e-4sec}$.

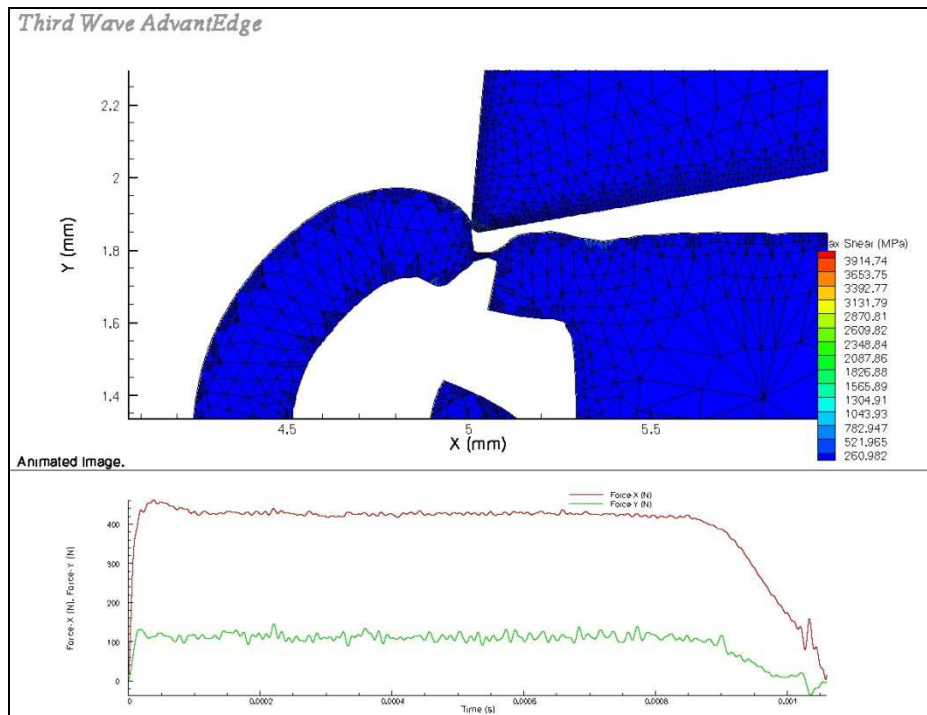


Εικόνα 4.47: Το «burr» αρχίζει και γίνεται ξεκάθαρα ορατό, ενώ η αρνητική ζώνη παραμόρφωσης έχει πλήρως αναπτυχθεί και έχει ενοποιηθεί με την αρχική.

Καθώς το «ρολάρισμα» στην άκρη του τεμαχίου συνεχίζεται (εικόνες 4.47, 4.48), οι παραμορφώσεις στην περιοχή γίνονται ακόμη εντονότερες και η αρνητική ζώνη διάτμησης αναπτύσσεται πλήρως και παράλληλα ενώνεται με την αρχική. Βρισκόμαστε στην κεντρική φάση της ανάπτυξης του «burr» (*burr development*). Η κατακόρυφη πτώση των δυνάμεων κοπής συνεχίζεται.



Εικόνα 4.48: Η ανάπτυξη του «burr» βρίσκεται στα τελευταία στάδια και η ρωγμή διαδίδεται, $t_{1.024677e-3sec}$.



Εικόνα 4.49: Η ανάπτυξη του «burr» έχει ολοκληρωθεί, $t_{1.06e-3sec}$.

Φτάνοντας στο τέλος της κοπής, το εργαλείο έχει εξέλθει από το νοητό όριο που ορίζει η επιφάνεια εξόδου του τεμαχίου και το απόβλιττο αποκόπτεται ολοκληρωτικά από το τεμάχιο μέσω της ρωγμής που αναπτύσσεται από την κοπτική ακμή και κατά την διεύθυνση της κοπτικής γραμμής (εικόνα 4.48, φάσεις έναρξης ρηγματώσης - *crack initiation* - και διάδοση της ρηγματώσης - *crack growth* -). Παράλληλα εντείνεται και η παραμόρφωση στο άκρο του παραπλεύρως της ρωγμής. Στην περιοχή αυτή οι διατμητικές τάσεις έχουν μειωθεί, πέφτοντας κάτω από τα επίπεδα του ορίου θραύσης ενώ και οι δυνάμεις κοπής τείνουν να μηδενιστούν. Έτσι έχουμε την ολοκλήρωση του σχηματισμού του «burr» (εικόνα 4.49) με τον σχηματισμό «θετικού burr» (positive burr) που αντιστοιχεί στον μηχανισμό ανάπτυξης για το όλκιμο υλικό, κάτι που ο χάλυβας που χρησιμοποιήσαμε αναμφισβήτητα είναι.

Βλέπουμε λοιπόν πως το πρόγραμμά μας με τη μοντελοποίηση που χρησιμοποιεί για τη δισδιάστατη τórνευση επιβεβαιώνει πλήρως τον θεωρητικό μηχανισμό ανάπτυξης του «burr» τουλάχιστον για το όλκιμο υλικό. Στη συνέχεια θα προβούμε σε ανάλογη επίλυση υπό τις ίδιες ακριβώς συνθήκες εισάγοντας όμως ένα ψαθυρό υλικό στο τεμάχιο μας. Κάτι τέτοιο φαντάζει εν μέρει αντιφατικό καθώς μιλάμε για μέταλλα και κοπές μετάλλων. Μπορούμε όμως να επιλέξουμε ένα μέταλλο με αρκετά «ψαθυρή συμπεριφορά», το οποίο να έχει μικρή πλαστική περιοχή σε σύγκριση πάντα με τα πιο κοινά μέταλλα. Έτσι θα ‘τρέξουμε’ ένα μοντέλο δισδιάστατης τórνευσης εισάγοντας σαν υλικό τον χυτοσίδηρο (*cast iron*). Έχουμε λοιπόν:

Είδος: 2D turning

Τεμάχιο (*workpiece*): $h = 5mm$

$L = 10mm$

Υλικό (*material*): D4512 (US) (cast iron)

162 BHN

Ultimate tensile strength 520 Mpa

Yield strength 330 Mpa

Σύσταση (% κ.β.): 3.7 C, 0.05 Cr, 0.575 Cu, 0.575 Mn, 0.055 Mo, 0.125 Ni, 0.03 P, 0.002 S, 2.3 Si

Εργαλείο (tool):

radius_0.02mm

rake angle_5°

relief angle_10°

υλικό_Carbide – general

Συνθήκες κοπής:

πρόωση_1mm/rev

βάθος κοπής_1mm

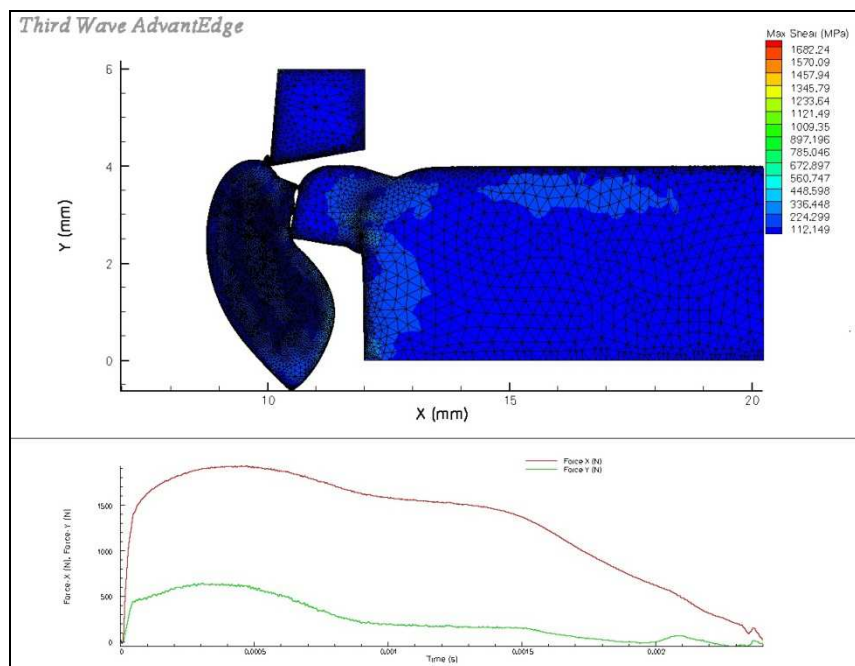
μήκος κοπής_burr mode

αρχική θερμοκρασία_24°C

ταχύτητα κοπής_300m/min

απουσία λιπαντικού_no coolant

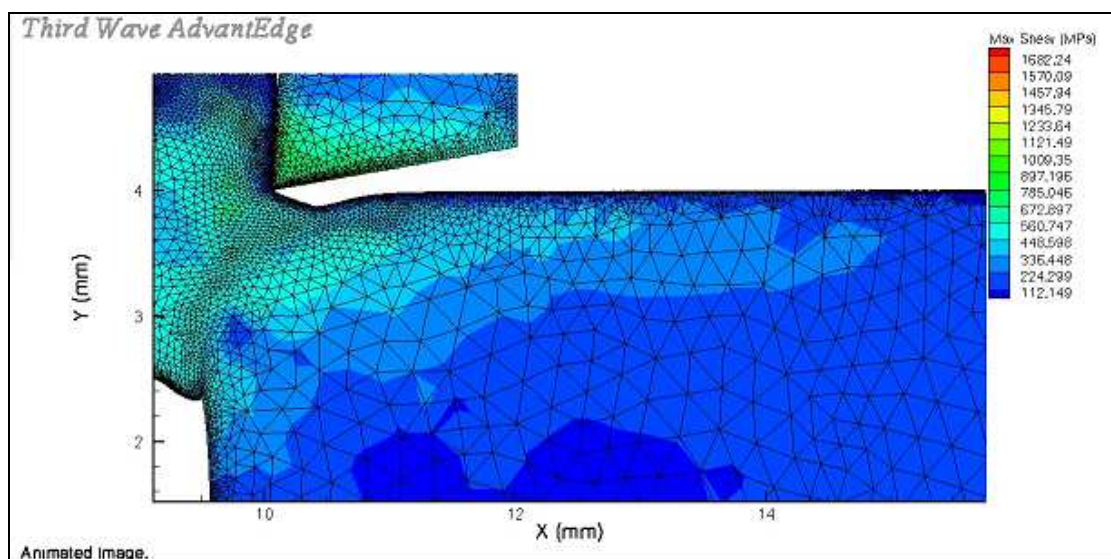
Στο μοντέλο αυτό οι συνθήκες και συγκεκριμένα οι διαστάσεις του τεμαχίου έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα έτσι ώστε να είναι ξεκάθαρα ορατό το τελικό αποτέλεσμα. Γενικά στα ενδιάμεσα στάδια της κοπής δεν παρατηρούνται διαφορές ως προς την εμφάνιση και ανάπτυξη των διαφόρων ζωνών σε σχέση με ό,τι παρουσιάσαμε παραπάνω για τον χάλυβα. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται εμφανίζεται προς το τέλος της κοπής και φαίνεται στις επόμενες εικόνες.



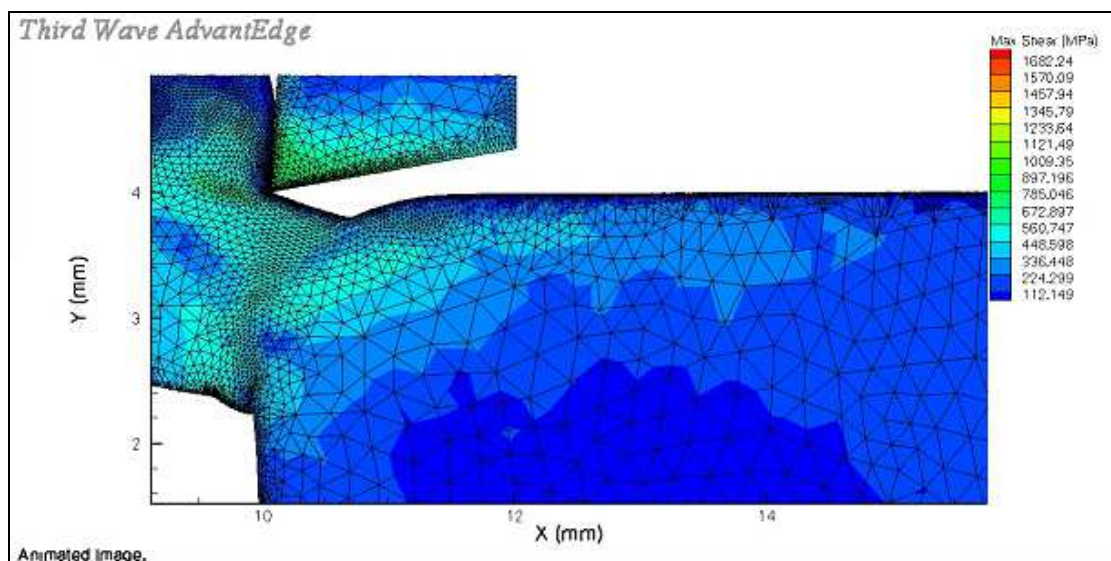
Εικόνα 4.50: Η εικόνα της κατεργασίας μετά και την έξοδο του εργαλείου από το τεμάχιο.

Παρατηρώντας την τελική εικόνα της κοπής (Εικόνα 4.50) βλέπουμε πως η επιφάνεια του τεμαχίου μετά την κοπή δεν είναι πλήρως επίπεδη σε όλο της το μήκος. Αντίθετα προς το τέλος αυτής και εκεί όπου λαμβάνουν χώρα τα τελευταία στάδια εμφάνισης του «burr» παρατηρείται ο σχηματισμός μίας μικρής εγκοπής κατά τη διεύθυνση του ύψους του τεμαχίου. Η μορφή της εγκοπής αυτής μοιάζει χαρακτηριστικά με τη μορφή που παίρνει η άκρη του τεμαχίου κατά τον σχηματισμό του «burr» στην περίπτωση ψαθυρού υλικού όταν το «burr» ‘σπάει’ κατά την διεύθυνση του αρνητικού επιπέδου διάτμησης (δες κεφ. 3, παρ. 3.6.3 & σχήμα 3-22). Η παρατήρηση

αυτή μας υποβιάζει για μία διαφορετική συμπεριφορά του μοντέλου σε σχέση με το υλικό που επιλέξαμε το οποίο μπορεί να χαρακτηριστεί ψαθυρό. Στα επόμενα σχήματα εστιάζουμε περισσότερο στην περιοχή της εγκοπής.



Εικόνα 4.51: Η εμφάνιση της ρωγμής προς το αρνητικό επίπεδο διάτμησης.



Εικόνα 4.52: Η διάδοση της ρωγμής κατά το αρνητικό επίπεδο διάτμησης.

Παρατηρώντας τώρα από πιο κοντινή απόσταση τη ρωγμή βλέπουμε πως το υλικό έχει διαρρεύσει πλήρως κατά το αρνητικό επίπεδο διάτμησης (βλέποντας μάλιστα και την μορφή του υλικού στην επιφάνεια εξόδου), ενώ παρατηρώντας επιπλέον και τις τιμές της διατμητικής τάσης στη διεύθυνση του επιπέδου θα δούμε ότι κυμαίνονται σε τιμές άνω των 550 MPa σαφώς ανώτερες των 520 MPa που είναι και το ανώτερο όριο του υλικού. Αυτό σημαίνει πως πρακτικά το υλικό έχει αποκοπεί στην περιοχή αυτή. Το γεγονός πως αυτό δε φαίνεται όπως θα το περιμέναμε στο μοντέλο οφείλεται σε εγγενείς αδυναμίες του προγράμματος να απεικονίσει επαρκώς την θραύση των αποβλίτων. Συμπερασματικά όμως σαφώς και μπορούμε να ισχυριστούμε πως επιβεβαιώνεται και το μοντέλο ανάπτυξης του «butt» για τα ψαθυρά υλικά με την εμφάνιση ‘αρνητικού’ «butt».

Αντίστοιχη διαδικασία θα ακολουθήσουμε και για την περίπτωση του δισδιάστατου φρεζαρίσματος έτσι ώστε να επιβεβαιώσουμε ποιοτικά τον μηχανισμό ανάπτυξης του «burr» και σε αυτή την περίπτωση. Όπως και προηγουμένως, συνθήκες κοπής και οι διαστάσεις είναι ενδεικτικές. Αυτό που είναι σημαντικό είναι το είδος του υλικού το οποίο θα καθορίσει τα όρια των αναπτυσσόμενων ζωνών βάσει των χαρακτηριστικών μεγεθών (όρια διαρροής κλπ). Έχουμε λοιπόν:

Είδος: 2D milling (up milling)

Τεμάχιο (workpiece): $h = 2\text{mm}$

$L = 5\text{mm}$

Υλικό (material): C60 steel (AISI 1060)

179 BHN

Ultimate tensile strength 625 Mpa

Yield strength 370 Mpa

Σύσταση (% κ.β.): 0.605 C, 0.75 Mn, 0.04 P, 0.05 Si

Εργαλείο (tool):

Φ12.5mm

radius_0.02mm

rake angle_5°

relief angle_10°

υλικό_Carbide – general

Συνθήκες κοπής:

πρόωση / οδόντα_0.15mm/rev

αξονικό βάθος κοπής_1mm

ακτινικό βάθος κοπής_6.25mm

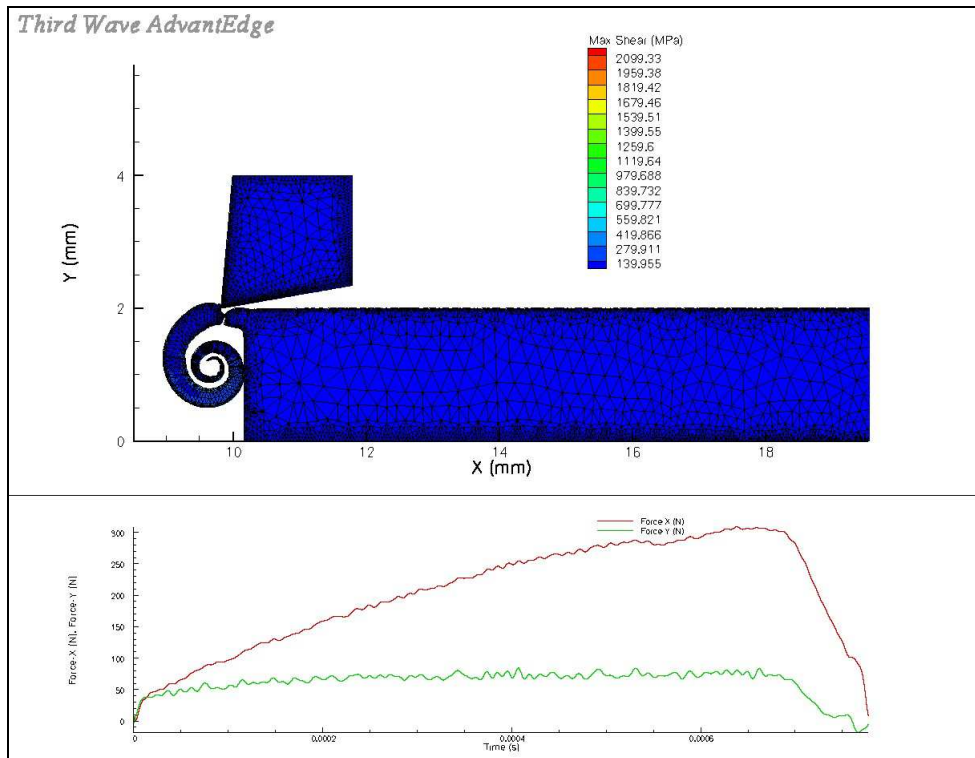
μήκος κοπής_burr mode

αρχική θερμοκρασία_24°C

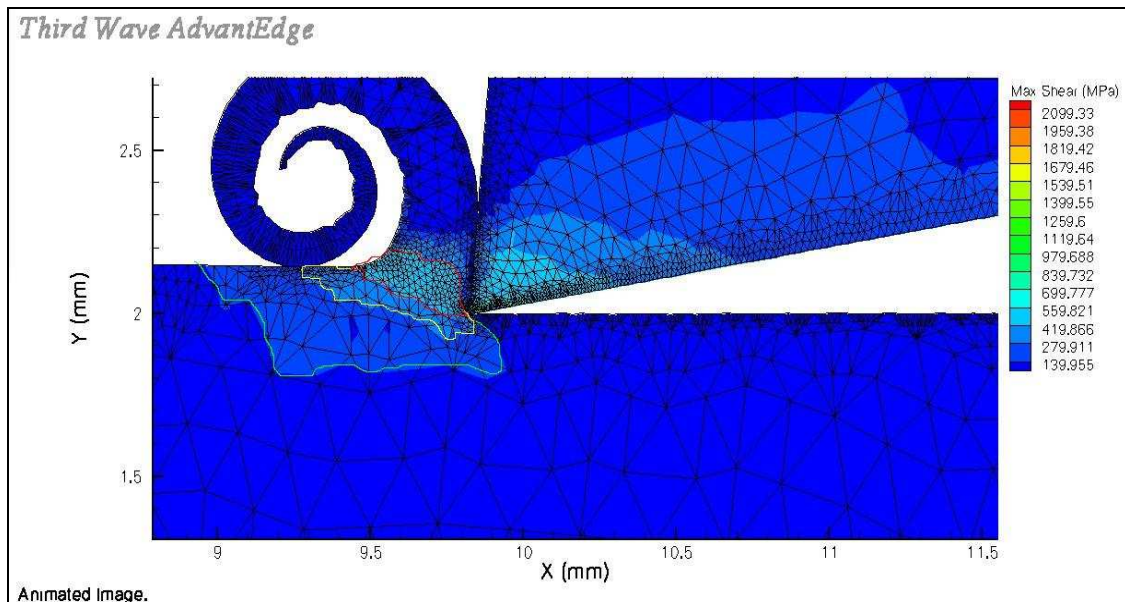
ταχύτητα περιστροφής_2e4rpm

απουσία λιπαντικού_no coolant

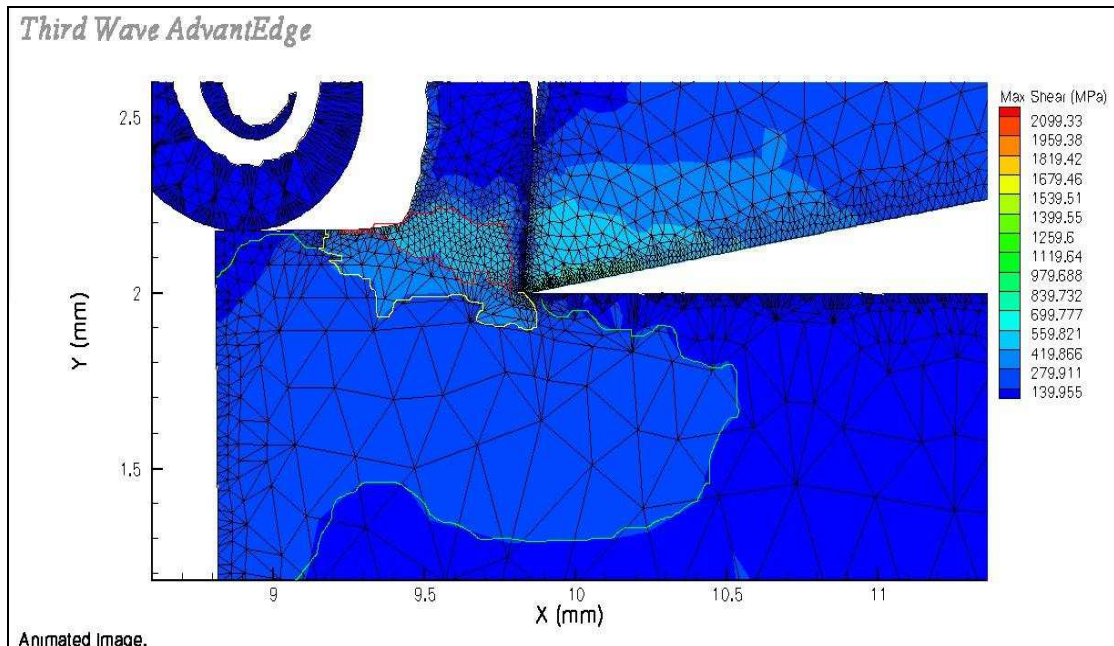
Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα του μοντέλου χρησιμοποιώντας τις εικόνες που μας δίνει η επεξεργασία των αποτελεσμάτων, λίγο πιο σύντομα σε σχέση με την τόννευση.



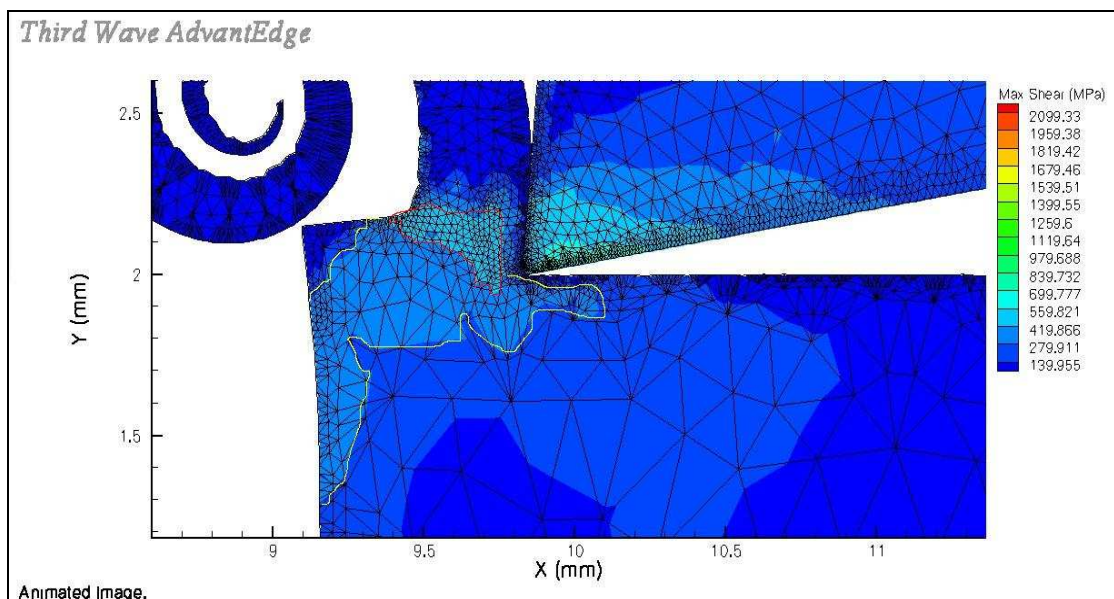
Εικόνα 4.53: Ο σχηματισμός του «burr» στο δισδιάστατο φρεζάρισμα. Από το γράφημα των δυνάμεων παρατηρούμε συνεχώς αυξανόμενη δύναμη κοπής. Αυτό οφείλεται στο συνεχώς αυξανόμενο βάθος κοπής καθώς το εργαλείο προχωρά στο τεμάχιο (δες και εικόνες 4.13 & 4.15 σχετικά με τον τρόπο μοντελοποίησης του φρεζαρίσματος).



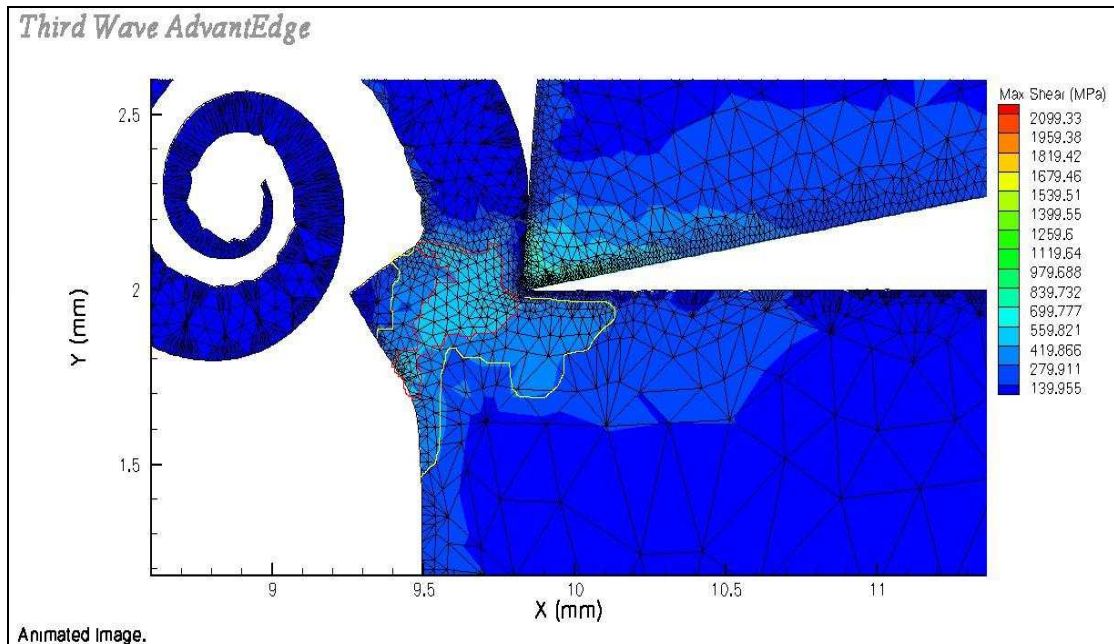
Εικόνα 4.54: Η μόνιμη κατάσταση κοπής (continuous cutting). Το εργαλείο κόβει το τεμάχιο και οι χαρακτηριστικές ζώνες έχουν αναπτυχθεί πλήρως. Ζώνη διάτμησης – κόκκινη περιοχή, Ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης – κίτρινη περιοχή, Ζώνη ελαστικής παραμόρφωσης – πράσινη περιοχή.



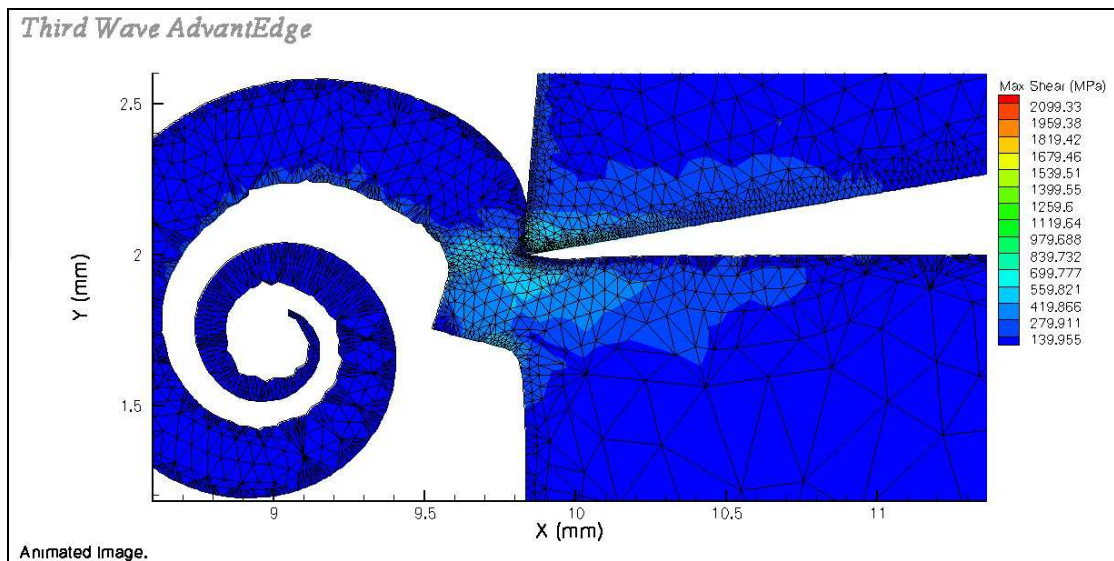
Εικόνα 4.55: Καθώς το κοπτικό εργαλείο προσεγγίζει την άκρη του τεμαχίου η ζώνη της ελαστικής παραμόρφωσης (πράσινη περιοχή) εκτείνεται πια έως την άκρη του τεμαχίου. Είναι η φάση της προέναρξης (pre – initiation) σχηματισμού του «burr».



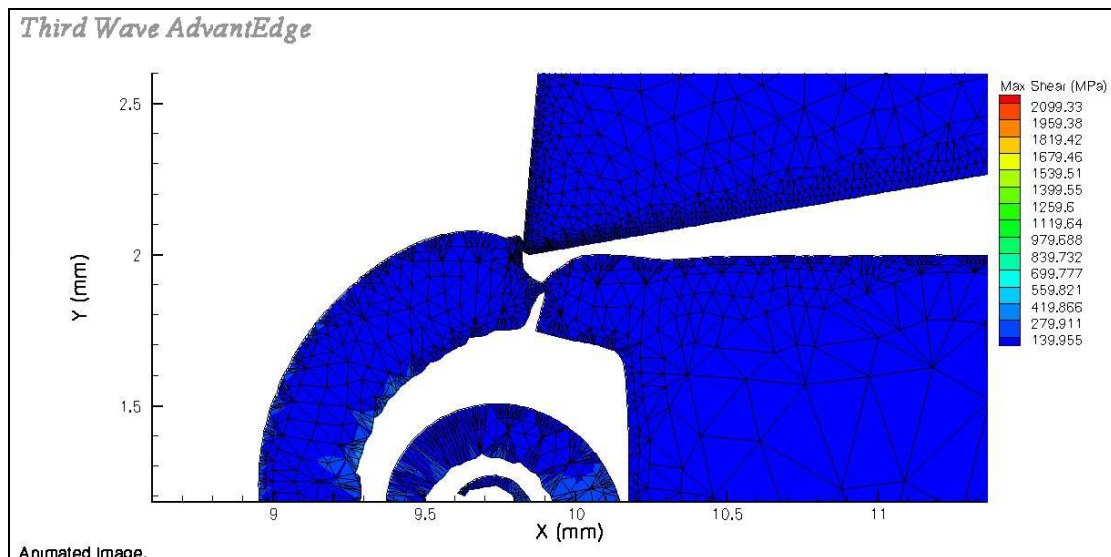
Εικόνα 4.56: Το εργαλείο προσεγγίζει περαιτέρω την άκρη του τεμαχίου. Τώρα και η ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης (κίτρινη περιοχή) εκτείνεται έως την άκρη του τεμαχίου. Επιπλέον είναι ορατή η μικρή κλίση που παίρνει η άκρη του τεμαχίου παρεκκλίνοντας από την κατακόρυφο. Βρισκόμαστε στην φάση έναρξης (initiation) σχηματισμού του «burr».



Εικόνα 4.57: Το εργαλείο έχει σχεδόν φτάσει στην άκρη του τεμαχίου και ο σχηματισμός του «burr» είναι ξεκάθαρος πια. Τώρα και η ζώνη διάτμησης (κόκκινη περιοχή) εκτείνεται έως το άκρο του τεμαχίου. Βρισκόμαστε στην φάση του «ρολαρίσματος» (rivoting).



Εικόνα 4.58: Το εργαλείο εξέρχεται πια από το τεμάχιο και το «burr» έχει σχηματιστεί σχεδόν πλήρως. Η ζώνη διάτμησης διαδίδετε τώρα σχεδόν παράλληλα με την γραμμική κοπής έως ότου και το τελευταίο τμήμα του αποβλίττου αποκοπεί από το τεμάχιο. Βρισκόμαστε στην φάση της διάδοσης ρωγμής (crack growth).



Εικόνα 4.59: Ο σχηματισμός έχει ολοκληρωθεί και το τελικό «burr» (positive burr) είναι πλήρως ορατό.

Όπως βλέπουμε λοιπόν από τα παραπάνω σχήματα, σε αντιστοιχία με την τórνευση και στο δισδιάστατο φρεζάρισμα αναπτύσσεται και εξελίσσεται ο μηχανισμός ανάπτυξης του «burr» όπως τον περιμένουμε και όπως τον έχουμε δει και θεωρητικά γεγονός που καθιστά σε πρώτη φάση το AdvantEdge ποιοτικά αξιόπιστο για την μελέτη του «burr». Παράλληλα μέσω των παραπάνω μοντελοποιήσεων παρατηρούμε και την εμφάνιση ενός από τα βασικά είδη «burr» που αναμένουμε να δούμε, το «burr» που σχηματίζεται στην έξοδο του κοπτικού εργαλείου από το τεμάχιο (*exit burr*). Περεταίρω επιβεβαίωση θα επιδιώξουμε στη συνέχεια προβαίνοντας σε τρισδιάστατες μοντελοποιήσεις όπου θα εξετάσουμε εάν το πρόγραμμα μας δίνει τα αναμενόμενα είδη «burr».

4.2.6.2 Ποιοτική και ποσοτική διερεύνηση του προγράμματος

Όπως έχουμε δει και παραπάνω, πέρα από το «burr» που σχηματίζεται στην έξοδο του εργαλείου από το τεμάχιο, τα βασικά είδη «burr» που παρατηρούνται είναι το «burr» στην είσοδο του τεμαχίου (*entrance burr*), το «burr» που αναπτύσσεται κάθετα στην διεύθυνση κοπής (*poisson burr*) και το «burr» που αναπτύσσεται σαν 'σκίσιμο' όταν το εργαλείο ανοίγει αυλάκι στο τεμάχιο (*tear burr*). Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας τα τρισδιάστατα μοντέλα, έτσι ώστε να έχουμε μία όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικότητα εικόνα για την κάθε κατεργασία, του AdvantEdge θα εξετάσουμε εάν μας δίνει τα αναμενόμενα «burr». Η χρήση των τρισδιάστατων μοντέλων παρόλο που είναι σε βάρος του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται, είναι αναγκαία όχι μόνο για την καλύτερη αναπαράσταση των κατεργασιών αλλά και γιατί τα αναμενόμενα «burrs» (εκτός του *exit burr*) αναπτύσσονται προς διαφορετικές διευθύνσεις σε σχέση με την διεύθυνση κοπής.

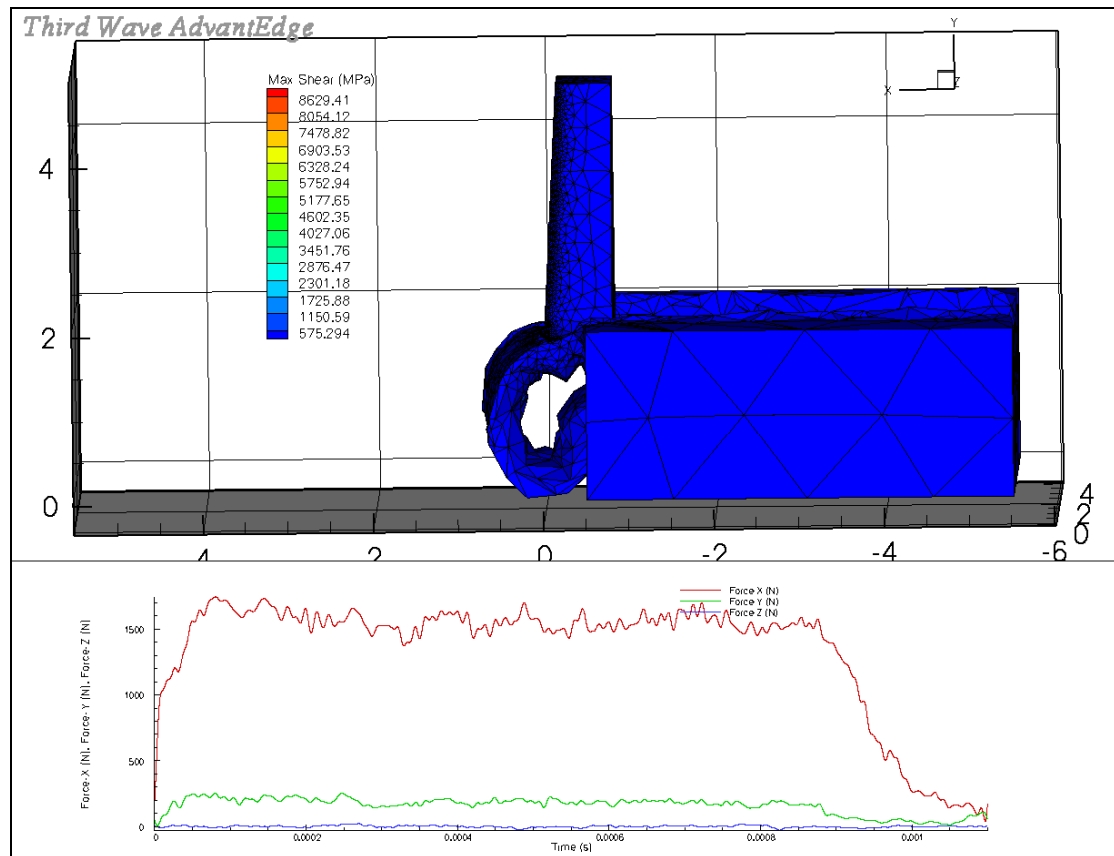
Αρχικά θα εξετάσουμε την περίπτωση της διάνοιξης αυλακών χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο μοντέλο του προγράμματος. Χρησιμοποιώντας ενδεικτικές συνθήκες κοπής κάνουμε το ακόλουθο 'τρέξιμο':

Είδος: 3D grooving

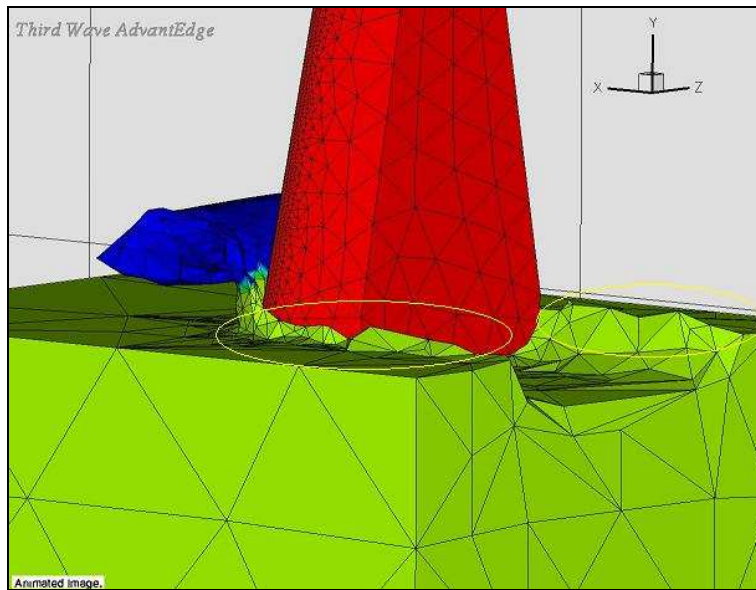
Τεμάχιο (*workpiece*): $h = 4mm$
 $w = 2mm$

$L = 5\text{mm}$
 Υλικό (material): C45 steel (AISI 1045)
 305 BHN
 Ultimate tensile strength 1027 Mpa
 Yield strength 612 Mpa
 Σύσταση (% κ.β.): 0.465 C, 0.795 Mn, 0.04 P, 0.05 Si
 Εργαλείο (tool): radius_0.02mm
 radial rake angle_0°
 axial rake angle_0°
 υλικό_Carbide – general
 Συνθήκες κοπής: πρόωση_0.25mm
 μήκος κοπής_burr mode
 αρχική θερμοκρασία_24°C
 ταχύτητα κοπής_300m/min
 απουσία λιπαντικού_no coolant

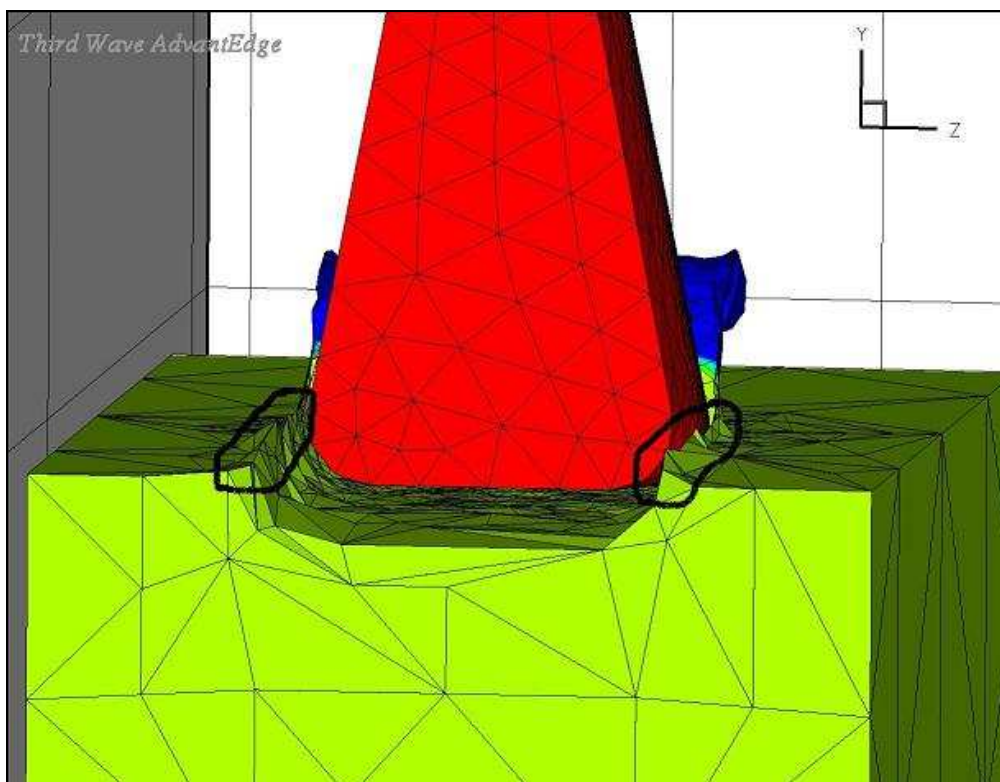
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης με την βοήθεια των εικόνων της μετα – επεξεργασίας.



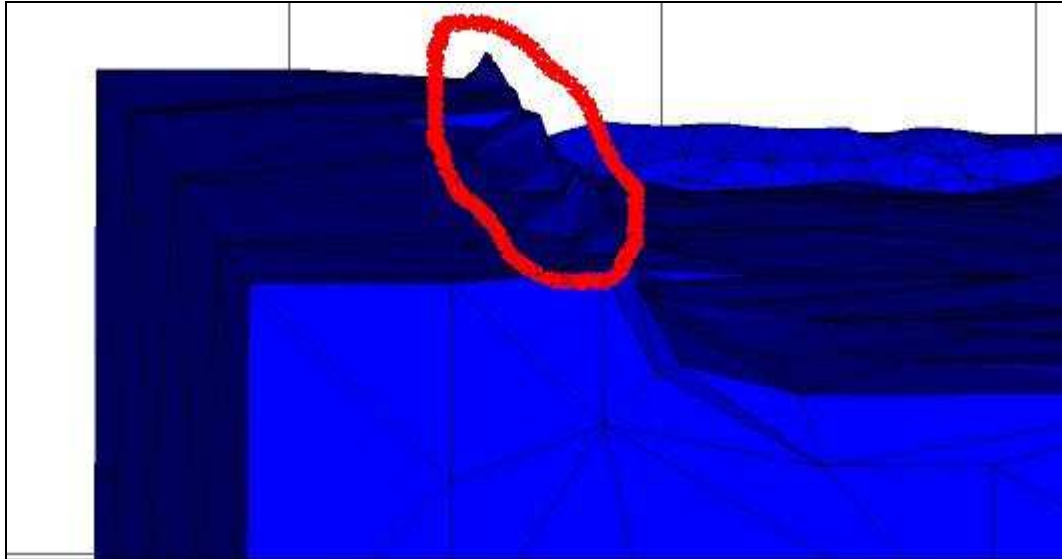
Εικόνα 4.60: Η τρισδιάστατη διάνοιξη άυλακος μετά το πέρας της κατεργασίας. Φαίνονται το εργαλείο, το τεμάχιο, το απόβλιττο και το «burr» που έχει δημιουργηθεί στην έξοδο του εργαλείου από το τεμάχιο. Επίσης παρατίθεται το γράφημα των δυνάμεων το οποίο παρατηρούμε πως είναι πρακτικά όμοιο με αυτό για τις δύο διαστάσεις που είδαμε παραπάνω. Αυτό συμβαίνει καθώς έχουμε και εδώ κίνηση ανάλογη με τις δύο διαστάσεις (για αυτό άλλωστε η δύναμη προς την τρίτη διεύθυνση z είναι πρακτικά μηδενική) με την διαφορά πως τώρα το μοντέλο διαθέτει ‘ικανό’ πάχος γι’ αυτό και οι δυνάμεις είναι κατά μέγεθος σημαντικά μεγαλύτερες.



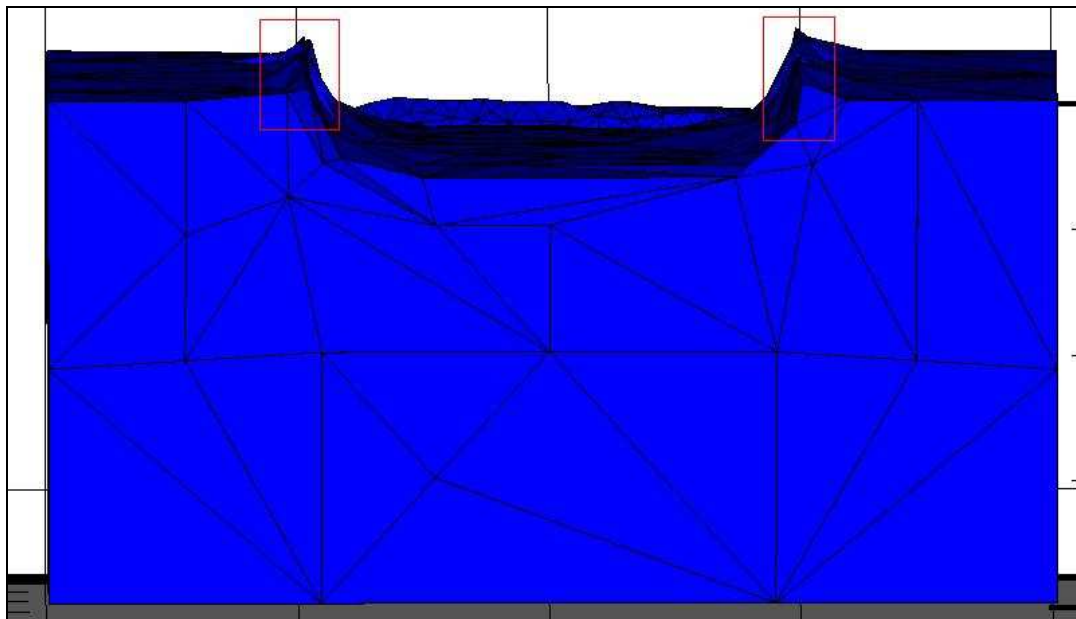
Εικόνα 4.61: Η ανάπτυξη του «burr» τύπου σκισίματος (tear burr) κατά την εξέλιξη της κοπής. Το αναπτυσσόμενο «burr» επισημαίνεται εντός των κίτρινων πλαισίων.



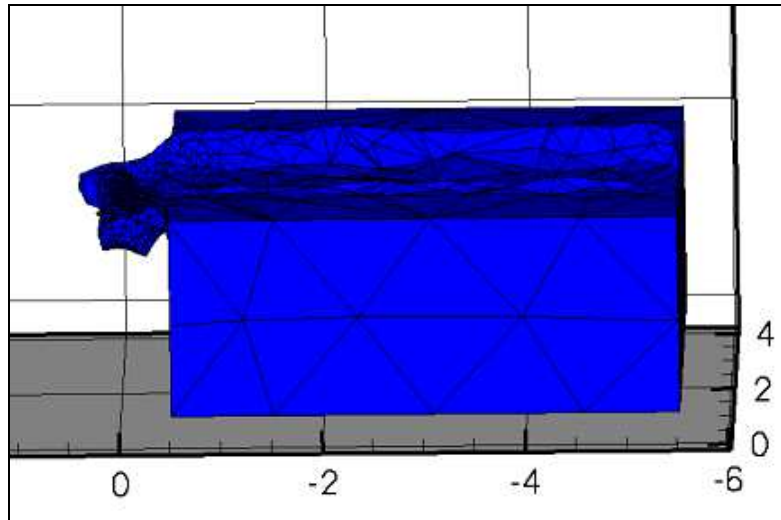
Εικόνα 4.62: Η εμφάνιση tear burr και από άλλη όψη πίσω από το κοπτικό εργαλείο. Το αναπτυσσόμενο «burr» επισημαίνεται με μαύρο χρώμα.



Εικόνα 4.63: Το τεμάχιο μετά το πέρας της κατεργασίας. Το tear burr έχει πλήρως αναπτυχθεί σαν ένα μικρό 'προπέτασμα' υλικού στα όρια του αυλακιού που ανοίχθηκε σε σχέση με την αρχική επιφάνεια του τεμαχίου.



Εικόνα 4.64: Το τεμάχιο σε πλήρη εικόνα μετά την κατεργασία. Είναι ξεκάθαρα ορατό το σχηματισμένο tear burr στα όρια του αυλακιού.



Εικόνα 4.65: Το τεμάχιο μετά την κοπή. Πέρα από το tear burr έχει αναπτυχθεί και το αναμενόμενο «burr» εξόδου.

Στην συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε το τρισδιάστατο μοντέλο της τόννευσης για να δούμε τι «burr» μας δίνει το μοντέλο. Χρησιμοποιώντας ενδεικτικές συνθήκες κοπής κάνουμε το ακόλουθο ‘τρέξιμο’:

Είδος: 3D turning (OD turning)

Τεμάχιο (workpiece): $D = 2\text{mm}$

$L = 5\text{mm}$

χωρίς precut Boolean workpiece

Υλικό (material): C45 steel (AISI 1045)

305 BHN

Ultimate tensile strength 1027 Mpa

Yield strength 612 Mpa

Σύσταση (% κ.β.): 0.465 C, 0.795 Mn, 0.04 P, 0.05 Si

Εργαλείο (tool):

insert shape_C

clearance angle_B

radius_0.04mm

side rake angle_0°

back rake angle_0°

tool width_0.2

υλικό_Carbide – general

Συνθήκες κοπής:

πρόωση_0.2mm/rev

βάθος κοπής_1mm

μήκος κοπής_burr mode

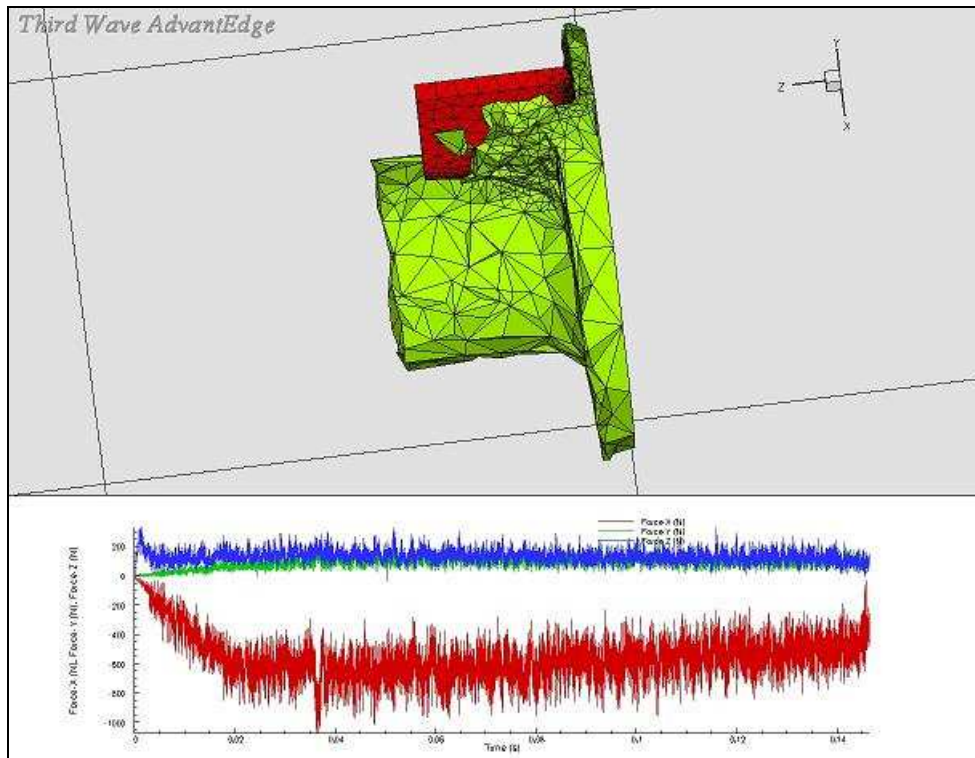
αρχική θερμοκρασία_24°C

ταχύτητα κοπής_300m/min

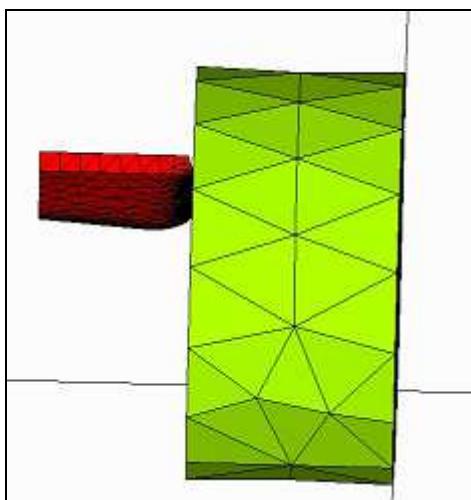
απουσία λιπαντικού_no coolant

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης με την βοήθεια των εικόνων της μετα – επεξεργασίας. Υπενθυμίζουμε πως λόγω εγγενών αδυναμιών του προγράμματος δεν έχουμε τη δυνατότητα να δούμε το εργαλείο να εξέρχεται από το τεμάχιο, έχοντας έτσι μία πλήρη εποπτεία της εξέλιξης της κατεργασίας. Στην

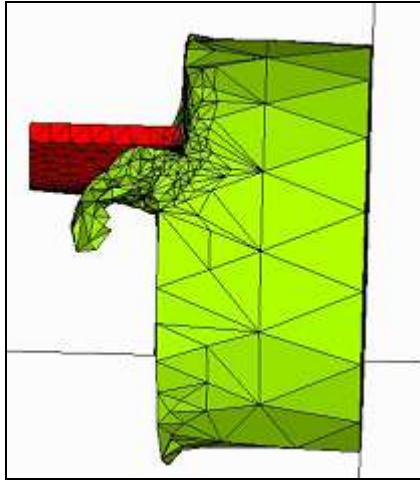
συνέχεια θα παραθέσουμε διάφορα στιγμιότυπα της κοπής μέσα από τα οποία φαίνεται καλύτερα η εμφάνιση και ανάπτυξη των διαφόρων ειδών «burr».



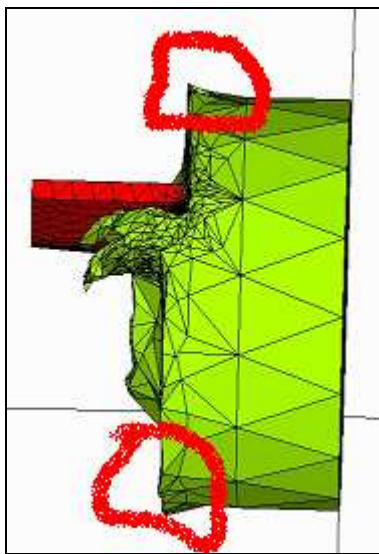
Εικόνα 4.66: Το μοντέλο τρισδιάστατης τόνρευσης στο AdvantEdge. Εδώ απεικονίζεται στο στιγμιότυπο όπου το μοντέλο σταματά να 'τρέχει'. Παράλληλα παρατίθεται και το γράφημα των αναπτυσσόμενων δυνάμεων. Παρατηρούμε πως η δευτερεύουσα δύναμη κοπής (πράσινο χρώμα) είναι πρακτικά μηδενική προσομοιώνοντας κατάσταση ορθογωνικής κοπής. Για την κύρια δύναμη κοπής παρατηρούμε πως το πρόσημό της δεν εναλλάσσεται όπως ίσως αναμενόταν. Αυτό οφείλεται στο ότι για τη μοντελοποίηση το σύστημα συντεταγμένων είναι 'προσδεμένο' επάνω στο κοπτικό εργαλείο το οποίο παραμένει ακίνητο. Τέλος αναπτύσσεται και μία μικρή δύναμη κατά την τρίτη διεύθυνση η οποία οφείλεται στην πρόωση.



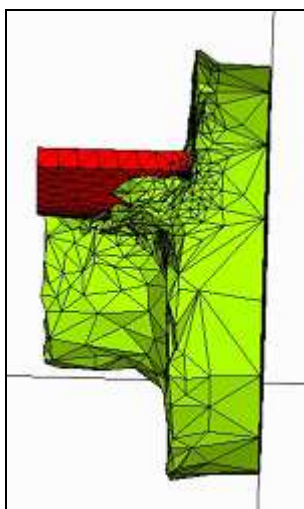
Εικόνα 4.67: Η στιγμή κατά την οποία το εργαλείο ξεκινά να εισέρχεται στο τεμάχιο. Το τεμάχιο είναι πλήρως κυλινδρικό



Εικόνα 4.68: Το εργαλείο έχει εισέλθει στο τεμάχιο και αφαιρεί υλικό. Είναι ορατό το σχηματιζόμενο απόβλιττο. Παρατηρείται μία αλλοίωση της κυλινδρικότητας του τεμαχίου από την πλευρά όπου εισέρχεται το εργαλείο σε αυτό.

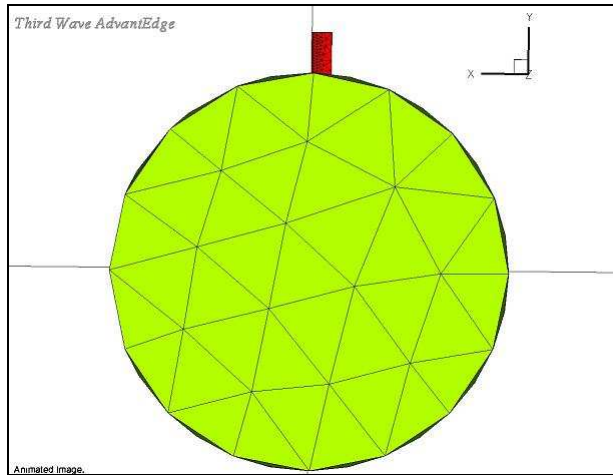


Εικόνα 4.69: Το εργαλείο έχει προχωρήσει αρκετά εντός το τεμαχίου αφαιρώντας το υλικό, τόσο που φαίνεται πια η νέα διάμετρος που διαμορφώνεται. Η αλλοίωση της κυλινδρικότητας είναι τώρα εντονότερη (σημειώνεται με κόκκινο χρώμα). Το 'προπέτασμα' αυτό του υλικού είναι το σχηματιζόμενο poisson burr που αναπτύσσεται ακτινικά, κάθετα τόσο προς την κατεύθυνση της κοπής όσο και προς την πρόωση.

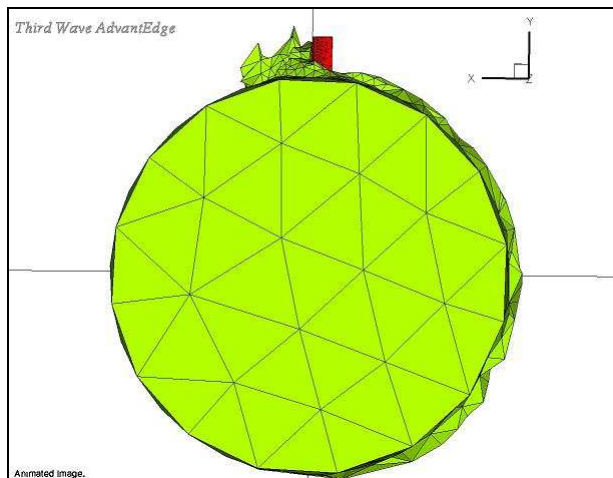


Εικόνα 4.70: Το εργαλείο έχει εισχωρήσει ακόμη περισσότερο στο τεμάχιο και το 'προπέτασμα' του υλικού που αλλοιώνει την κυλινδρικότητα του τεμαχίου εξακολουθεί να υπάρχει. Καθώς το τεμάχιο περιστρέφεται το εργαλείο αφαιρεί το υλικό αυτό που δημιουργήθηκε στην προηγούμενη περιστροφή και παράλληλα δημιουργείται ένα νέο poisson burr λόγω της τρέχουσας περιστροφής. Σημειώνεται επίσης πως με αυξημένη διακριτοποίηση στοιχείων θα μπορούσαμε να δούμε ακόμη καλύτερα τον τοπικό χαρακτήρα του φαινομένου.

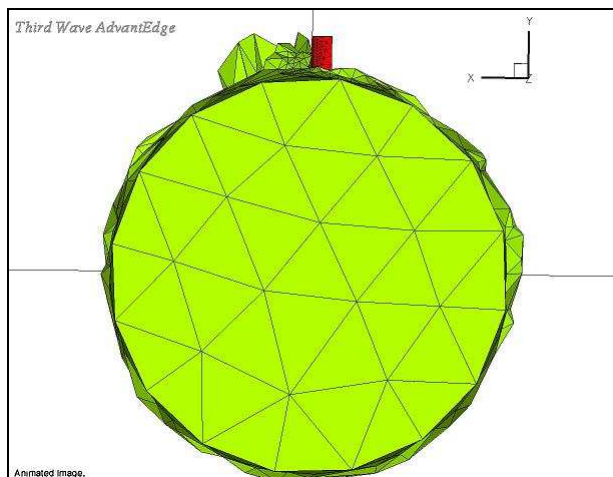
Στην συνέχεια θα παραθέσουμε τα αντίστοιχα στιγμιότυπα της κοπής όπως όμως τα βλέπουμε από την πίσω όψη του τεμαχίου, την πλευρά δηλαδή από την οποία κανονικά θα έβγαινε το εργαλείο. Αυτό θα μας δώσει την δυνατότητα να κατανοήσουμε καλύτερα την αλλοίωση της κυλινδρικότητας και την δημιουργία του μικρού αυτού πτερυγίου περιφερειακά, που αποτελεί το «poisson burr».



Εικόνα 4.71: Η στιγμή κατά την οποία το εργαλείο θα ξεκινήσει να εισέρχεται στο τεμάχιο. Παρατηρούμε πλήρη κυλινδρική του τεμαχίου χωρίς επιπλέον υλικό να εμφανίζεται πέρα από τα όρια της κυκλικής περιφέρειας.

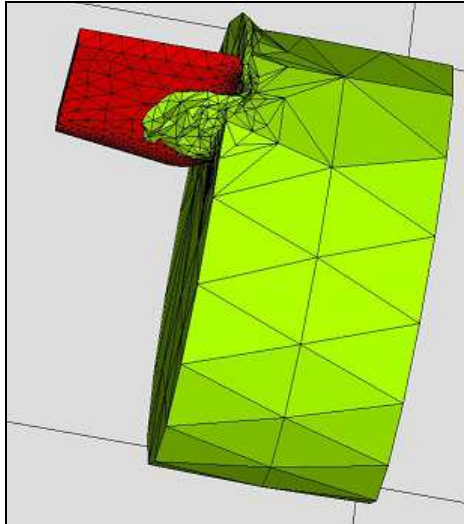


Εικόνα 4.72: Το εργαλείο έχει ξεκινήσει την αφαίρεση του υλικού. Παρατηρούμε πως σταδιακά αρχίζει και αναπτύσσεται το μικρό 'πτερόγιο' του υλικού έξω από την κυκλική περιφέρεια του τεμαχίου.

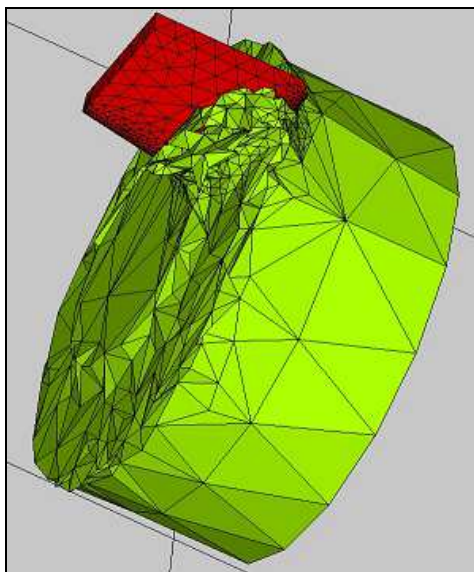


Εικόνα 4.73: Η μόνιμη κατάσταση της κοπής έχει αποκατασταθεί και το εργαλείο συνεχίζει να αφαιρεί υλικό από το τεμάχιο. Όπως φαίνεται το εμφανιζόμενο poisson burr έχει αναπτυχθεί πλήρως.

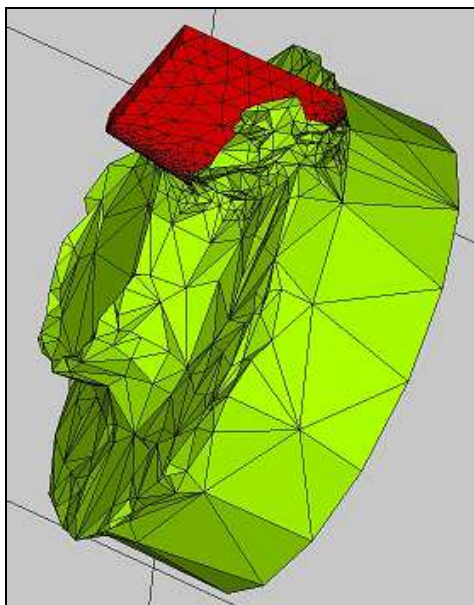
Αντίστοιχα με τα παραπάνω στιγμιότυπα θα παρουσιάσουμε εκείνα όπου φαίνεται η διαμόρφωση της νέας μειωμένης διαμέτρου που ξεκινά από την πλευρά από την οποία εισέρχεται το εργαλείο στο τεμάχιο. Το στοιχείο που θα εξετάσουμε είναι επιπεδότητα της επιφάνειας εισόδου.



Εικόνα 4.74: Η επιφάνεια εισόδου του τεμαχίου κατά την στιγμή της εισόδου του κοπτικού εργαλείου σε αυτό. Παρατηρούμε την πλήρη επιπεδότητα αυτής.



Εικόνα 4.75: Το εργαλείο εισέρχεται σταδιακά στο τεμάχιο και ξεχωρίζει η νέα, μειωμένη, διάμετρος που διαμορφώνεται. Η επιφάνειά της θεωρείται ακόμη πρακτικά πλήρως επίπεδη.



Εικόνα 4.76: Το εργαλείο έχει εισέλθει αρκετά στο τεμάχιο έχοντας αποκαταστήσει μόνιμες συνθήκες κοπής. Παρατηρούμε πως η επιφάνεια της νέας διαμέτρου δεν είναι πια πλήρως επίπεδη καθώς στο όριο της εξέχει υλικό αντίθετα προς την κατεύθυνση της πρόωσης δημιουργώντας ένα 'στέμμα'. Το τμήμα αυτό που προεξέχει ονομάζεται «burr» εισόδου (entrance burr).

Συμπερασματικά πλέον, από όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάσαμε παραπάνω και προέκυψαν από το μοντέλο της τρισδιάστατης τόνρευσης, μπορούμε να πούμε με

ασφάλεια πως το AdvantEdge ποιοτικά επιβεβαιώνει αυτά που περιμένουμε και άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εργαλείο μελέτης του φαινομένου σχηματισμού του «burr». Απομένει τώρα μόνο η ποιοτική διερεύνηση της επάρκειάς του για την κατεργασία του φρεζαρίσματος, με την οποία θα ασχοληθούμε στη συνέχεια. Για το φρεζάρισμα κάνουμε το ακόλουθο ‘τρέξιμο’:

Είδος: 3D milling (face milling)

Τεμάχιο (workpiece): $D = 2mm$

$L = 5mm$

Υλικό (material): AlSi7Mg Aluminium (Al356 US)

305 BHN

Ultimate tensile strength 1027 Mpa

Yield strength 612 Mpa

Σύσταση (% κ.β.): 0.465 C, 0.795 Mn, 0.04 P, 0.05 Si

Εργαλείο (tool):

insert shape_C

clearance angle_B

radius_0.04mm

axial rake angle_0°

radial rake angle_0°

tool width_0.2

υλικό_Carbide – general

Συνθήκες κοπής:

πρόωση_0.14mm/rev

βάθος κοπής_0.86mm

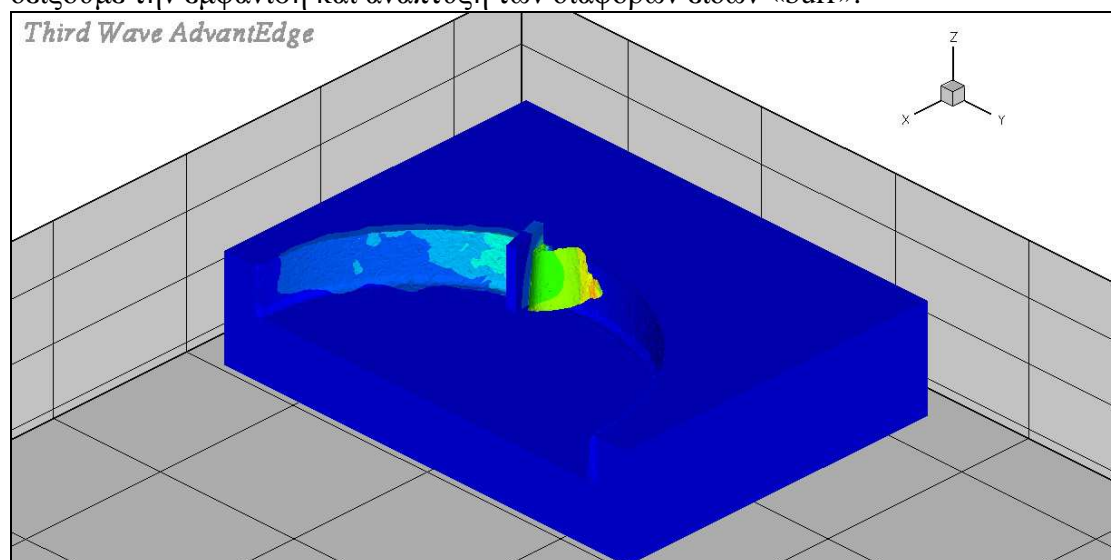
μήκος κοπής_burr mode

αρχική θερμοκρασία_24°C

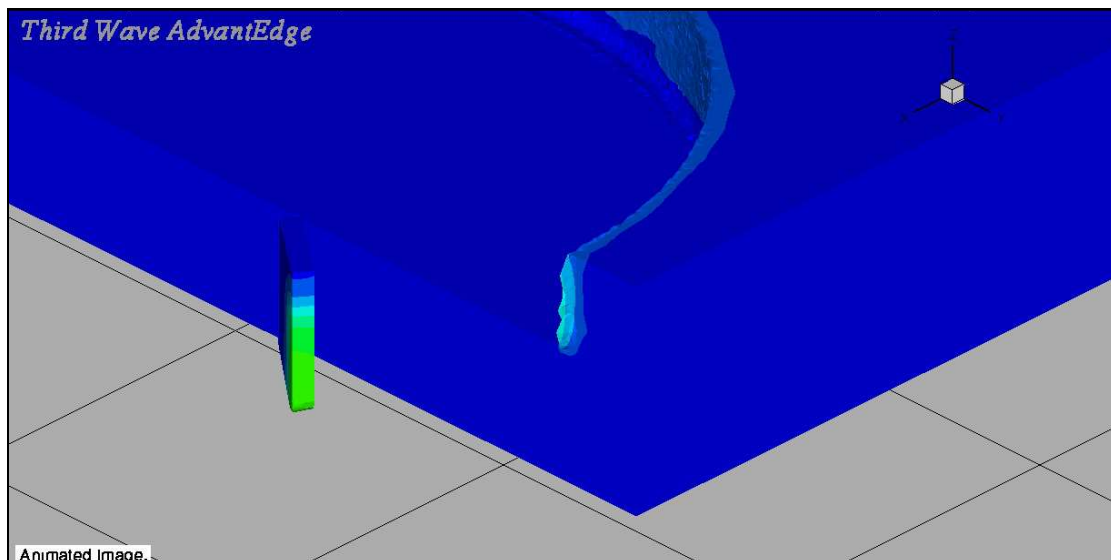
ταχύτητα περιστροφής_20000rpm

απουσία λιπαντικού_no coolant

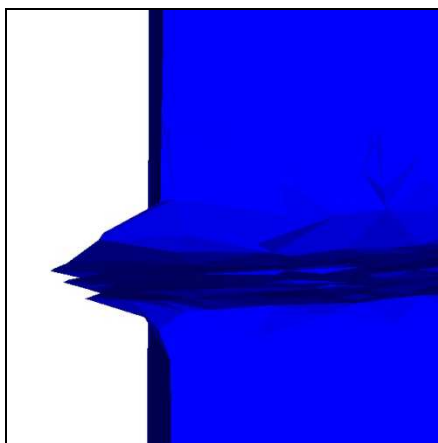
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης με τη βοήθεια των εικόνων της μετα – επεξεργασίας. Με την βοήθεια στιγμιότυπων της κοπής θα δείξουμε την εμφάνιση και ανάπτυξη των διαφόρων ειδών «burr».



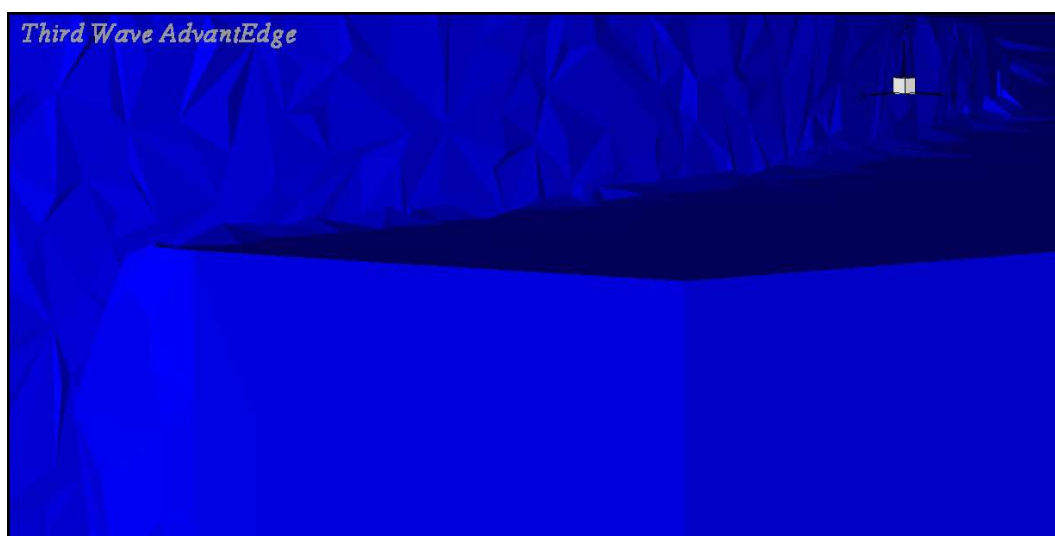
Εικόνα 4.77: 3D μετωπικό φρεζάρισμα (face milling). Το κοπτικό εργαλείο έχει εισέλθει στο τεμάχιο και αφαιρεί υλικό.



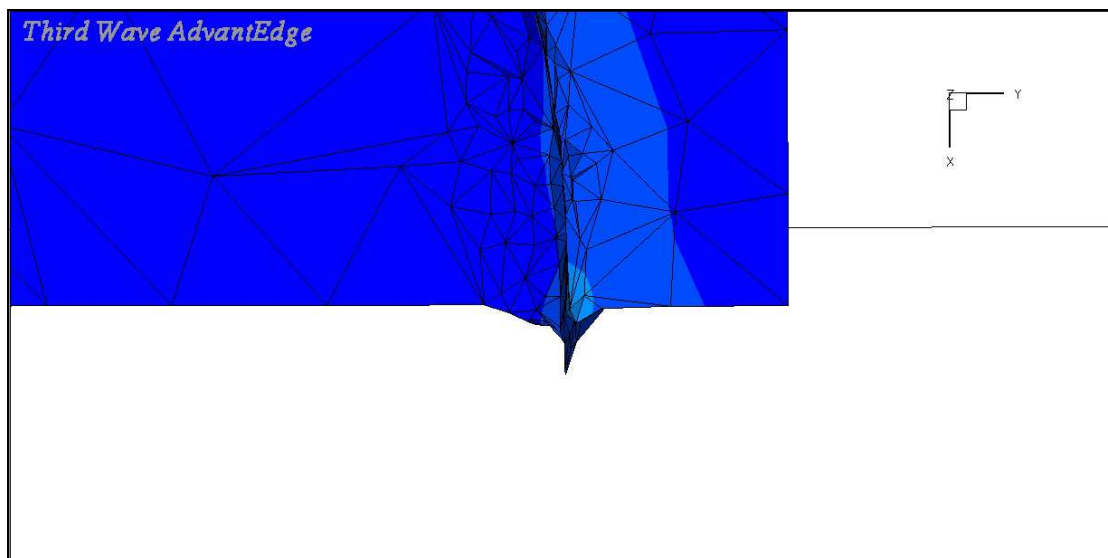
Εικόνα 4.78: Το κοπτικό εργαλείο έχει εξέλθει από το τεμάχιο. Είναι ορατό το «burr» εξόδου ανεπτυγμένο κατά την διεύθυνση που το εργαλείο εξέρχεται από το τεμάχιο. Επίσης διακρίνεται οριακά το «burr» που αναπτύσσεται σε διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια του τεμαχίου (άξονας z). Πρόκειται για το poisson burr.



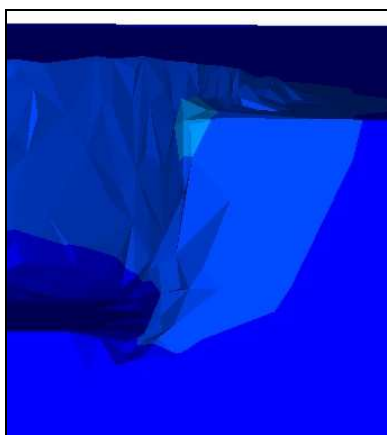
Εικόνα 4.79: Το «burr» εξόδου (exit burr) όπως φαίνεται από πάνω από το τεμάχιο σε ζουμ.



Εικόνα 4.80: Εδώ φαίνεται πιο καθαρά το poisson burr. Αναπτύσσεται σε διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο περιστροφής του κοπτικού εργαλείου (επίπεδο κοπής). Σχηματίζεται σαν μικρή προεξοχή από την επιφάνεια του τεμαχίου.



Εικόνα 4.81: Εδώ φαίνονται το «burr» εξόδου το οποίο είδαμε και στις παραπάνω εικόνες αλλά επίσης και το τελικό «burr» της κατεργασίας όπως το είδαμε στην παράγραφο 3.6.2.2. Αναπτύσσεται προς την έξοδο από την κατεργασμένη επιφάνεια και αποτελεί προϊόν σχηματισμού της συμπίεσης του «burr» εξόδου με το πέρασ των πάσων του εργαλείου.



Εικόνα 4.82: Εδώ μπορούμε να διακρίνουμε και τα τρία «burr» της κατεργασίας. Το *poisson burr* το οποίο αναπτύσσεται κατά την διεύθυνση του βάθους κοπής και φαίνεται σαν προεξοχή από την αρχική επιφάνεια του τεμαχίου, το «burr» εξόδου που αναπτύσσεται στην έξοδο του εργαλείου από το τεμάχιο και το τελικό «burr» της κατεργασίας που αναπτύσσεται σαν πλευρική προεξοχή από την κατεργασμένη πια επιφάνεια του τεμαχίου.

Μετά την ποιοτική επαλήθευση του προγράμματος κρίνεται σκόπιμο να γίνει και μία ποσοτική του επαλήθευση. Σε αυτή θα χρησιμοποιηθούν αριθμητικά δεδομένα από προηγούμενες έγκριτες δημοσιεύσεις – μελέτες πάνω στο θέμα του «burr» τα οποία θα συγκριθούν με αυτά που θα μας δώσει το πρόγραμμα. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να εισάγουμε στο AdvantEdge τα στοιχεία που δίνονται στις δημοσιεύσεις και κατόπιν να εξετάσουμε τα αποτελέσματα του προγράμματος. Η ποσοτική επαλήθευση θα γίνει χρησιμοποιώντας τόσο δεδομένα μίας άλλης μοντελοποίησης με τη χρήση αντίστοιχου λογισμικού όσο και με πειραματικά δεδομένα για φρεζάρισμα.

Για την σύγκριση με ένα άλλο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για τις κοπής θα χρησιμοποιήσουμε τα στοιχεία από το «*Finite element simulation for burr formation near the exit of orthogonal cutting*» των W.J. Deng, W. Xia, Y. Tang στο οποίο γίνεται διερεύνηση της εξάρτησης του «burr» από τις διάφορες συνθήκες κοπής [5]. Χρησιμοποιείται μοντέλο 2D τórνευσης για το οποίο δίνονται οι διαστάσεις, η πρόωση, η ταχύτητα κοπής, η γωνία του αποβλίττου, το υλικό τεμαχίου και εργαλείου, η γωνία εξόδου από το τεμάχιο και η ακτίνα καμπυλότητας του κοπτικού εργαλείου. Εμείς θα κατασκευάσουμε το ίδιο μοντέλο για 2D

τόρνευση στο *AdvantEdge* και μετά την επίλυση θα συγκρίνουμε το γράφημα των δυνάμεων σε κάθε περίπτωση και την τελική μορφή του τεμαχίου (μετά την κοπή). Έχουμε λοιπόν:

Είδος: *2D turning*

Τεμάχιο (*workpiece*): $h = 2\text{mm}$

$L = 3.5\text{mm}$

Υλικό (*material*): AISI 1020

Εργαλείο (*tool*): radius_0.02mm

rake angle_0°

relief angle_10°

υλικό_Custom με θερμική αγωγιμότητα $33.5\text{W}/\text{m}\cdot\text{C}$, ειδική

θερμοχωρητικότητα $234\text{J}/\text{kg}\cdot\text{C}$, πυκνότητα $12700\text{kg}/\text{m}^3$.

Συνθήκες κοπής: πρόωση_0.30mm/rev

βάθος κοπής_1mm

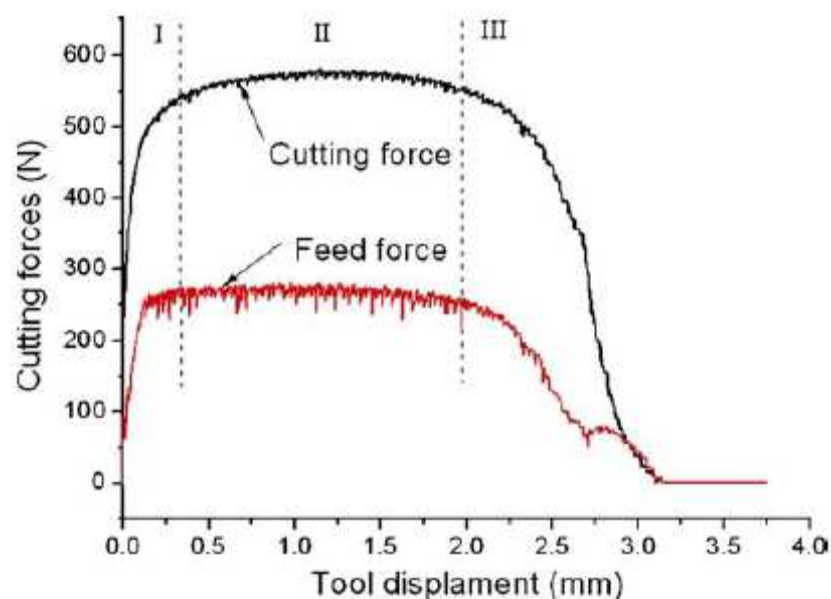
μήκος κοπής_burr mode

αρχική θερμοκρασία_24°C

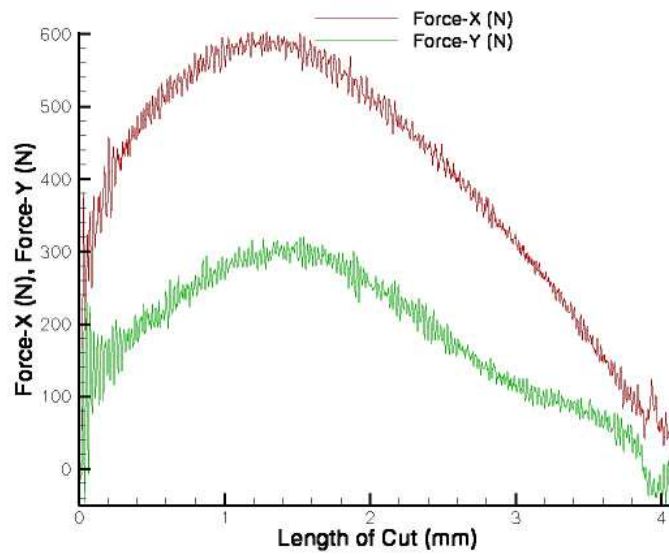
ταχύτητα κοπής_59.46m/min

απουσία λιπαντικού_no coolant

Το γράφημα των δυνάμεων που παίρνουμε από την εργασία των *W.J. Deng, W. Xia, Y. Tang* είναι το ακόλουθο:



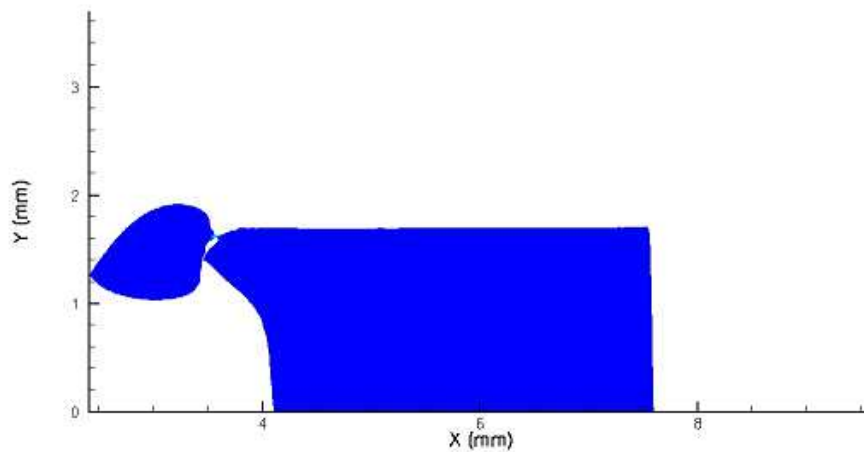
και το αντίστοιχο από το δικό μας μοντέλο είναι το εξής



Παρατηρώντας τα δύο διαγράμματα των δυνάμεων συναρτήσει του μήκους κοπής (ή της διαδρομής του κοπτικού εργαλείου) μπορούμε να διαπιστώσουμε σημαντική σύγκλιση κυρίως ως προς τις τιμές των δυνάμεων που αναπτύσσονται (ταύτιση της μέγιστης τιμής της κύριας δύναμης κοπής - cutting force, force X – περίπου στα 600N και αντίστοιχα της μέγιστης τιμής της δευτερεύουσας δύναμης κοπής - feed force, force Y – περίπου στα 300N) αλλά και των περιοχών του γραφήματος (μέγιστες κλίσης αύξησης και μείωσης των δυνάμεων σε αντίστοιχα ίδιες θέσεις του εργαλείου). Το γεγονός ότι στο δικό μας μοντέλο οι δυνάμεις μηδενίζονται σχετικά καθυστερημένα οφείλεται στα προβλήματα που εντοπίζονται στο *AdvantEdge* σχετικά με τον αποχωρισμό του αποβλίττου στα οποία άλλωστε έχουμε ήδη αναφερθεί. Η μορφή του τεμαχίου μετά την κοπή στην εργασία των *W.J. Deng, W. Xia, Y. Tang* είναι η ακόλουθη:



και η αντίστοιχη από το δικό μας μοντέλο είναι η εξής:



Παρατηρώντας τα δύο σχήματα διαπιστώνουμε και εδώ σημαντική σύγκλιση των δύο τελικών μορφών του τεμαχίου. Για το *AdvantEdge* βλέπουμε πως το απόβλιττο δεν έχει απομακρυνθεί πλήρως γεγονός που οφείλεται στα προβλήματα που προαναφέραμε.

4.3 Διερεύνηση της εξάρτησης του «burr» από τους διάφορους παράγοντες της κοπής με την χρήση του *AdvantEdge*.

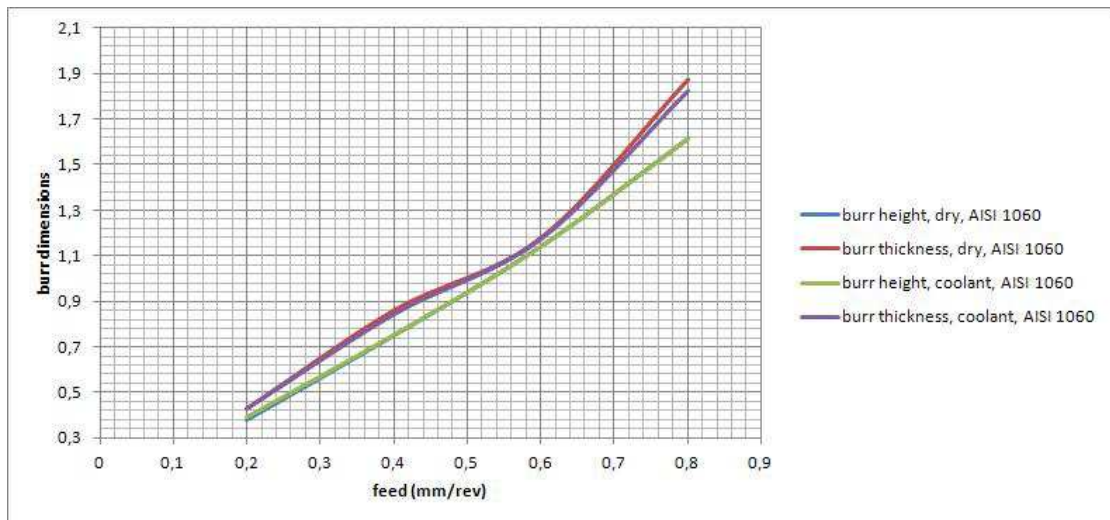
Στο κομμάτι αυτό που είναι και το τελευταίο της παρούσας εργασίας, θα εξετάσουμε την επίδραση ορισμένων παραμέτρων της κοπής στο αναπτυσσόμενο «burr» με την βοήθεια του *AdvantEdge*. Αφού επιλέξουμε ποιες συνθήκες κοπής θα μελετήσουμε, θα ‘τρέξουμε’ τα αντίστοιχα μοντέλα διατηρώντας κάθε φορά σταθερές συνθήκες και μεταβάλλοντας μόνο την παράμετρο που μας ενδιαφέρει. Έτσι θα έχουμε τελικά την αυξομείωση των διαστάσεων του αναπτυσσόμενου «burr» συναρτήσει βασικών παραμέτρων της κοπής έχοντας την δυνατότητα να προβούμε στα σχετικά σχόλια και συμπεράσματα. Οι δοκιμές θα γίνουν τόσο σε μοντέλα δύο διαστάσεων τα οποία έχουν το πλεονέκτημα της γρήγορης επίλυσης και άρα μας δίνουν τη δυνατότητα πολλών δοκιμών αλλά προσφέρονται κυρίως για ποιοτικά συμπεράσματα και όχι για ακριβή καταγραφή διαστάσεων του «burr» λόγω του τρόπου μοντελοποίησης, όσο και σε μοντέλα τριών διαστάσεων τα οποία ναι μεν κοστίζουν σε υπολογιστικό χρόνο, προσφέρουν όμως μία ακριβή αναπαράσταση της πραγματικής κατεργασίας με αξιόπιστα τελικά αποτελέσματα όχι μόνο ποιοτικά αλλά και ποσοτικά.

Οι παράμετροι της κοπής που θα εξεταστούν στα μοντέλα των δύο διαστάσεων επιλέχθηκαν να είναι η πρόωση, η γωνία αποβλίττου του εργαλείου, η ακτίνα καμπυλότητας της κοπτικής ακμής του εργαλείου και η χρήση υγρού κοπής. Όλα αυτά για μοντέλα δισδιάστατης τórνευσης. Μεταφερόμενοι στις τρεις διαστάσεις θα εξετάσουμε την επίδραση του βάθους κοπής στο «burr» (κάτι που λόγω της δομής των μοντέλων δεν είναι δυνατό να γίνει στις τρεις διαστάσεις) χρησιμοποιώντας τρισδιάστατο μοντέλο μετωπικού φρεζαρίσματος. Επίσης οι δοκιμές για τις δύο διαστάσεις θα γίνουν για δύο διαφορετικά υλικά, κοινά στο χώρο των μηχανολογικών κατασκευών, τον χάλυβα και το αλουμίνιο. Στους ακόλουθους πίνακες φαίνονται συγκεντρωτικά οι παράμετροι που θα εξεταστούν.

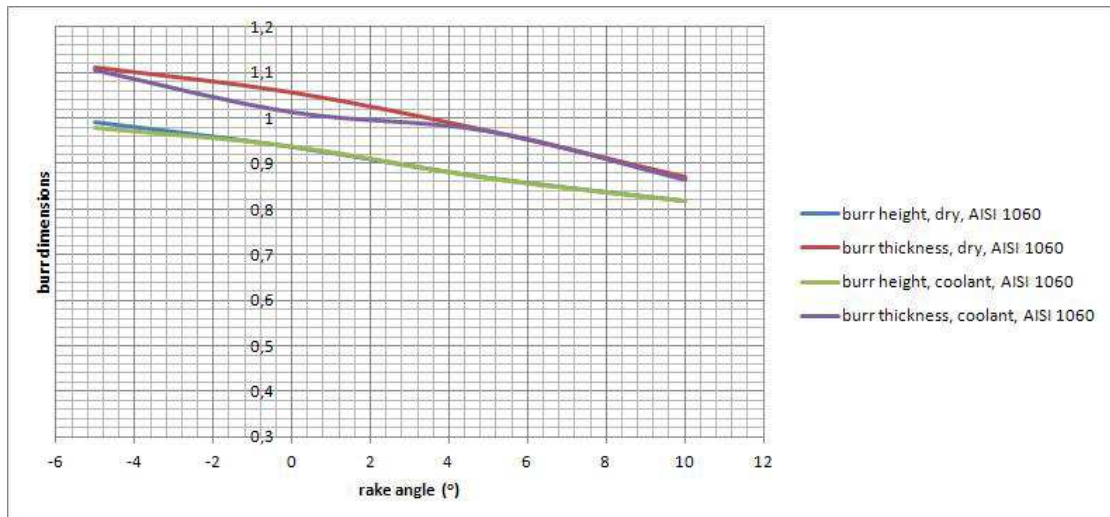
2D	AISI 1060 (179 Bhn) 'medium / plain carbon steel'				Al6061-T6 'silicon aluminium alloy'			
	πρόωση (mm/rev)	0.2	0.4	0.6	0.8	0.4	0.6	0.8
	0.5				0.7			
γωνία αποβλίττου	-5°	0°	+5°	+10°	-5°	0°	+5°	+10°
	0°				0°			
καμπυλότητα ΚΕ (mm)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.02	0.04	0.06	0.08
	0.02				0.02			
κοπτικό υγρό	με / χωρίς				με / χωρίς			
	10% Chrysan C225 soluble oil (9933 W/m ² K, 981 kg/m ³)							
υλικό ΚΕ	καρβίδιο γενικής χρήσης							
γωνία ελευθερίας ΚΕ	10°							
βάθος κοπής	1mm							
ταχύτητα κοπής	250m/min				800m/min			
αρχική θερμοκρασία	24° C							

Πρέπει να σημειωθεί εδώ πως το εύρος των προώσεων, οι ταχύτητες κοπής και τα στοιχεία του υγρού κοπής προέρχονται από τεχνικούς καταλόγους κατασκευαστών και ιστοσελίδες τεχνικού περιεχομένου στον χώρο των κατεργασιών (παρατίθενται στην βιβλιογραφία στο τέλος του κεφαλαίου).

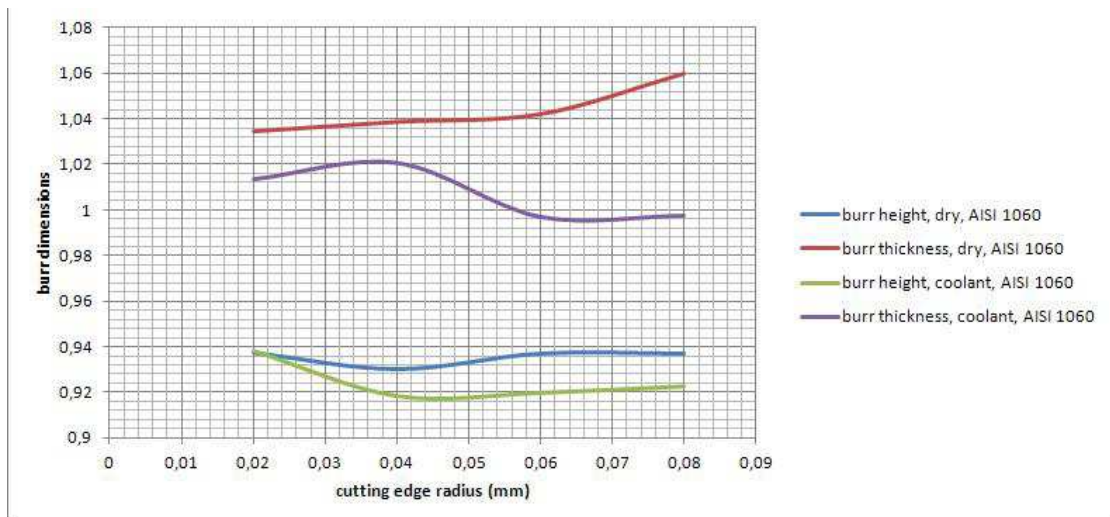
Βάσει λοιπόν, των παραπάνω πινάκων και χρησιμοποιώντας το AdvantEdge παίρνουμε τελικά τα ακόλουθα γραφήματα που συσχετίζουν τις διαστάσεις του «burr» με την μεταβολή των συνθηκών κοπής.



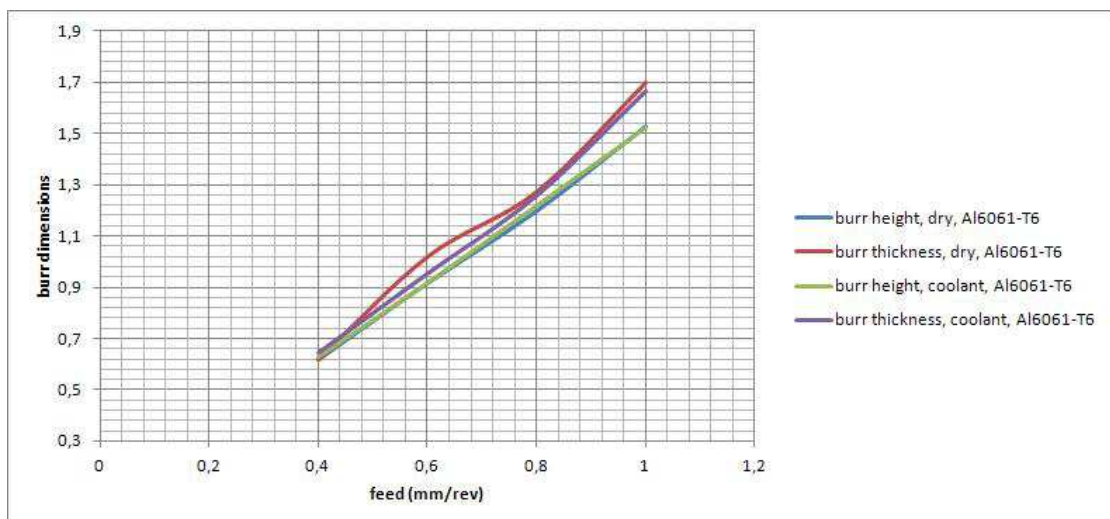
Γράφημα 4.3: Η μεταβολή των διαστάσεων του «burr» συναρτήσει της πρόωσης για διασδιάστατη τόννευση του χάλυβα. Φαίνονται οι μεταβολές τόσο με όσο και χωρίς την χρήση κοπτικού υγρού.



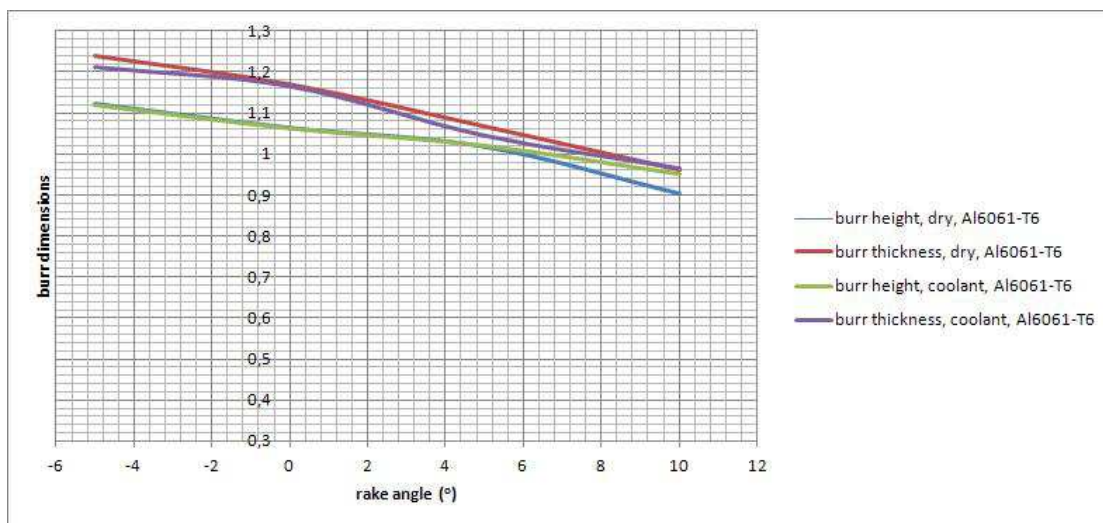
Γράφημα 4.4: Η μεταβολή των διαστάσεων του «burr» συναρτήσει της γωνίας αποβλίττου για δισδιάστατη τόνρευση του χάλυβα. Φαίνονται οι μεταβολές τόσο με όσο και χωρίς την χρήση κοπτικού υγρού.



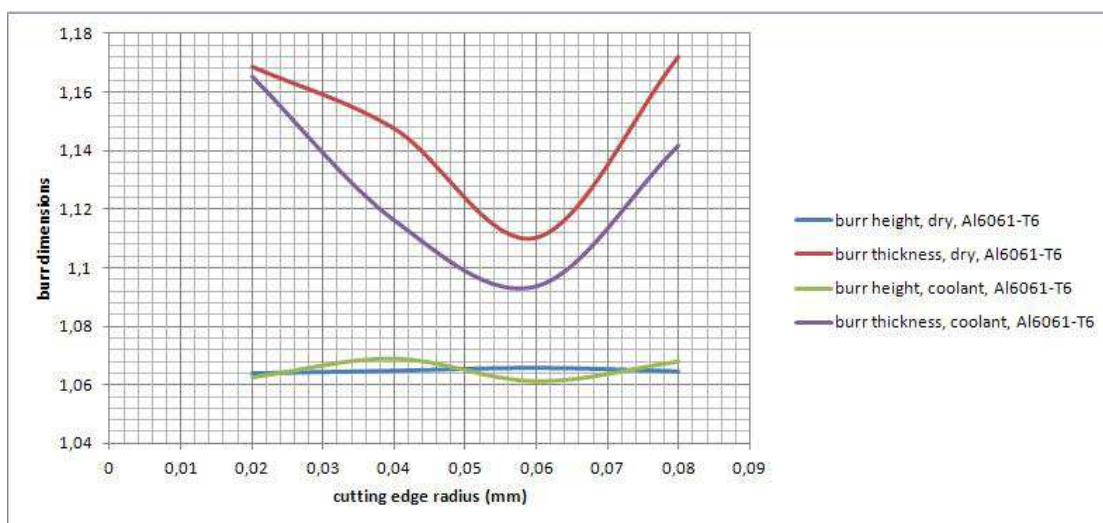
Γράφημα 4.5: Η μεταβολή των διαστάσεων του «burr» συναρτήσει της καμπυλότητας της κοπτικής ακμής για δισδιάστατη τόνρευση του χάλυβα. Φαίνονται οι μεταβολές τόσο με όσο και χωρίς την χρήση κοπτικού υγρού.



Γράφημα 4.6: Η μεταβολή των διαστάσεων του «burr» συναρτήσει της πρόωσης για δισδιάστατη τόνρευση του αλουμινίου. Φαίνονται οι μεταβολές τόσο με όσο και χωρίς την χρήση κοπτικού υγρού.



Γράφημα 4.7: Η μεταβολή των διαστάσεων του «burr» συναρτήσει της γωνίας αποβλίττου για δισδιάστατη τόνρευση του αλουμινίου. Φαίνονται οι μεταβολές τόσο με όσο και χωρίς την χρήση κοπτικού υγρού.



Γράφημα 4.8: Η μεταβολή των διαστάσεων του «burr» συναρτήσει της καμπυλότητας της κοπτικής ακμής για δισδιάστατη τόνρευση του αλουμινίου. Φαίνονται οι μεταβολές τόσο με όσο και χωρίς την χρήση κοπτικού υγρού.

Από τα παραπάνω γραφήματα μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

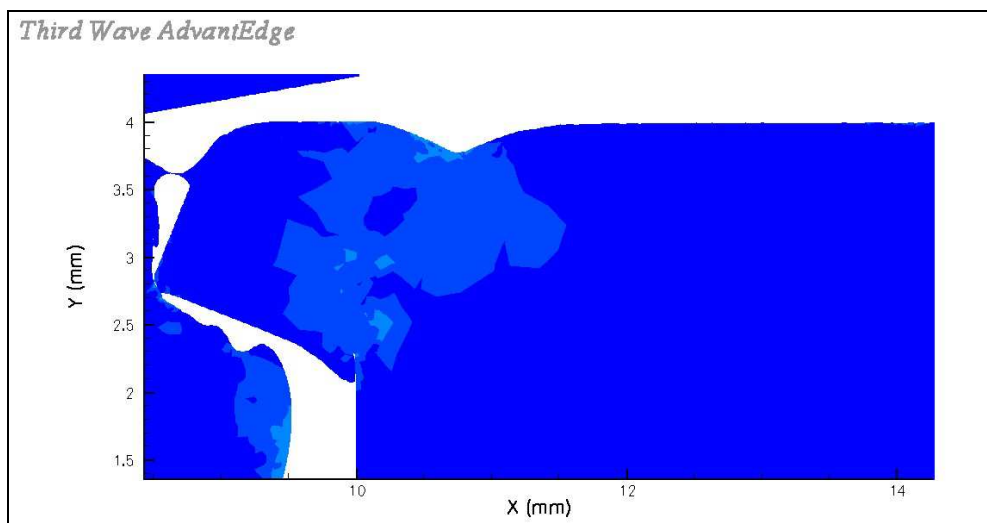
- Η πρόωση φαίνεται να είναι πολύ σημαντικός παράγοντας επιρροής ως προς την ανάπτυξη του «burr». Παρατηρούμε τη μεγαλύτερη κλίση κατά τη μεταβολή της, ενώ είναι σαφές πως οι υψηλές τιμές πρόωσης επηρεάζουν αρνητικά την ανάπτυξη του «burr» οδηγώντας σε μεγαλύτερες διαστάσεις. Η χρήση του λιπαντικού φαίνεται να επηρεάζει ελάχιστα το αναπτυσσόμενο «burr». Όπου παρατηρείται κάποια μεταβολή αυτή είναι θετική (μείωση των διαστάσεων του

«burr») γεγονός που, όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω (παρ. 3.6.4), αναμενόταν.

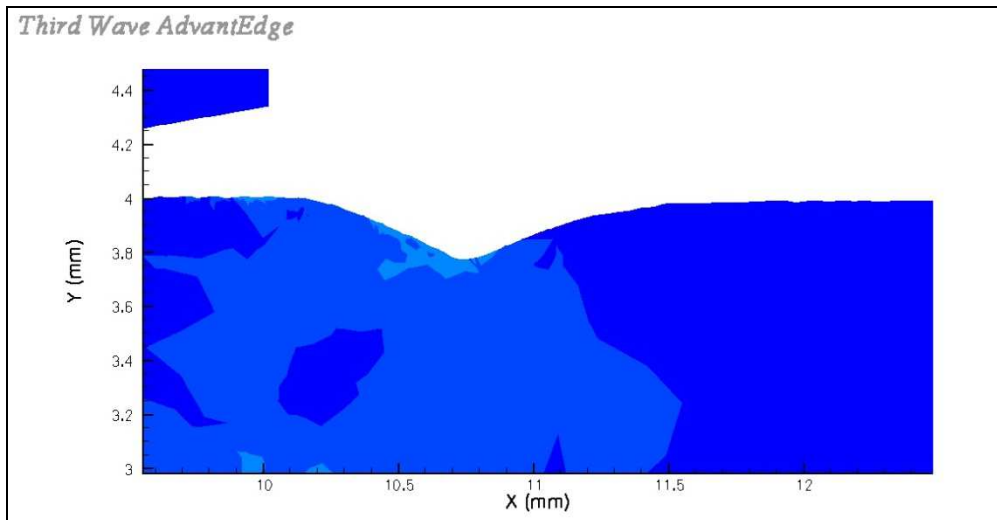
- Η γωνία του αποβλίττου φαίνεται να επηρεάζει και αυτή αρκετά το αναπτυσσόμενο «burr» με μικρότερες βέβαια κλίσεις μεταβολής. Όσο η γωνία αποβλίττου αυξάνει τόσο μειώνονται και οι διαστάσεις του εμφανιζόμενου «burr». Η παρατήρηση αυτή μπορούμε να πούμε πως είναι αναμενόμενη καθώς με την αύξηση της γωνίας αποβλίττου το κοπτικό εργαλείο τείνει να γίνει πιο 'οξύ' (μορφή σφήνας) εισάγοντας έτσι τοπικά μεγαλύτερες παραμορφώσεις και ευνοώντας την κοπή του υλικού. Επίσης σε μικρές και κυρίως αρνητικές γωνίες αποβλίττου το αποκοπτόμενο υλικό παρασύρεται με τέτοιο τρόπο που στην έξοδο από το τεμάχιο ευνοείται η κάμψη του και η εμφάνιση του σημείου «πιβοταρίσματος» χαμηλότερα και νωρίτερα με αποτέλεσμα την εντονότερη εμφάνιση του «burr». Σχετικά με την χρήση του υγρού κοπής παρατηρούμε και εδώ μικρή μεταβολή η οποία όμως εκεί που εμφανίζεται είναι προς την θετική κατεύθυνση (μείωση των διαστάσεων του «burr») όπως αναμενόταν.
- Η καμπυλότητα της κοπτικής ακμής δε φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά το αναπτυσσόμενο «burr» καθώς οι τιμές των διαστάσεων διατηρούνται πρακτικά σταθερές με την μεταβολή της ακτίνας καμπυλότητας. Αυτή είναι μία παρατήρηση που έρχεται σε αντίθεση με όσα αρχικά αναμέναμε (παρ. 3.6.4). Βέβαια ανατρέχοντας στην βιβλιογραφία μπορούμε να συναντήσουμε μελέτες που χρησιμοποιούν μία αντίστοιχη μοντελοποίηση και καταλήγουν σε αντίστοιχα συμπεράσματα [1]. Αυτό ίσως να σημαίνει πως οι συγκεκριμένες μέθοδοι μοντελοποίησης αδυνατούν να καταγράψουν την επίδραση της παραμέτρου αυτής. Επίσης σχετικά με την καμπυλότητα του κοπτικού εργαλείου πρέπει να γίνει ακόμη μία επισήμανση. Ίσως πρόκειται για έναν παράγοντα που σχετίζεται περισσότερο με την φθορά της κοπτικής ακμής κατά την πρόοδο της κατεργασίας (άμβλυνση της κοπτικής ακμής και άρα αύξηση της καμπυλότητας) παρά με την αρχική επιλογή της παραμέτρου οι τιμές της οποίας για τα κοινά κοπτικά εργαλεία είναι ούτως ή άλλως μικρές για να επηρεάσουν το τελικό «burr». Έτσι ίσως μπορούμε να πούμε πως απαιτείται επιλογή μεγαλύτερων τιμών καμπυλότητας από αυτές που εμείς χρησιμοποιήσαμε οι οποίες στην ουσία θα προσομοιώνουν την αύξηση της φθοράς του εργαλείου. Σχετικά με την χρήση του υγρού κοπής παρατηρούμε και εδώ μία μικρή επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα με μείωση όμως των διαστάσεων του «burr».
- Σχετικά με την χρήση του κοπτικού υγρού αξίζει να κάνουμε και μία πιο συγκεντρωτική παρατήρηση. Βλέπουμε πως για όλες τις δοκιμές που κάνουμε η μείωση των διαστάσεων είναι πολύ μικρή. Αυτό μπορεί από την μία πλευρά να σχετίζεται με τα υλικά και τις συνθήκες που έχουν επιλεγεί στα οποία η επίδραση του υγρού είναι τόσο μικρή που μπορεί και να μη δικαιολογεί τη χρήση του (δες και παρ. 3.6.4). Ούτως ή άλλως όπως είδαμε και παραπάνω το περιθώριο βελτίωσης που δίνει η χρήση του υγρού κοπής είναι μικρό (της τάξης του 10%) και κάποιες φορές μπορεί να μη δικαιολογεί τη χρήση του. Από την άλλη πλευρά μπορεί να σχετίζεται με αυτή καθεαυτή τη μοντελοποίηση της χρήσης του λιπαντικού. Όταν αυτό εφαρμόζεται σε πραγματικό περιβάλλον κοπής δεν είναι και τόσο ξεκάθαρο σε ποιες περιοχές επιδρά ή αν μπορεί να διεισδύσει πλήρως στην περιοχή της κοπτικής ακμής ή τελικά και ποιο είναι το πραγματικό ποσό θερμότητας που απάγει. Οπότε όταν μεταβαίνουμε στο περιβάλλον της μοντελοποίησης οι επιλογές - παραδοχές που γίνονται γύρω από την χρήση του κοπτικού υγρού μπορεί τελικά να έχουν μικρή επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Πρέπει επίσης να αναφέρουμε πως παρά τις όποιες αμφιβολίες σχετικά με την θετική επίδραση του κοπτικού υγρού σε βιομηχανικό

περιβάλλον καμία κοπή δε γίνεται χωρίς την χρήση του. Αυτό οφείλεται περισσότερο στην θετική του επίδραση στο κοπτικό εργαλείο - μείωση του ρυθμού φθοράς του – το οποίο είναι κάτι που δεν λαμβάνει υπόψη το δικό μας μοντέλο και άρα για αυτό πιθανόν να εμφανίζεται μικρή επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Το τελευταίο σχόλιο μπορεί να συσχετιστεί άμεσα και με ό,τι αναφέραμε παραπάνω για την καμπυλότητα της κοπτικής ακμής.

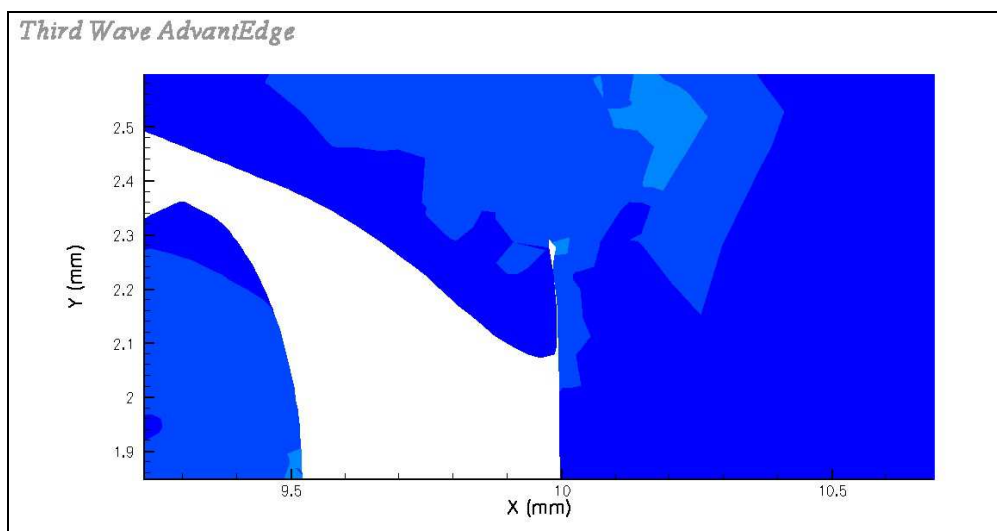
Τα παραπάνω συμπεράσματα, παρατηρώντας τα αντίστοιχα γραφήματα χάλυβα (γραφήματα 4.3 έως 4.5) και αλουμινίου (γραφήματα 4.6 έως 4.8), μπορούμε να πούμε ότι ισχύουν και για τα δύο υλικά που επιλέξαμε. Συνεπώς θεωρούμε πως ο παράγοντας υλικό δε διαδραματίζει πρωτεύοντα ρόλο στην ανάπτυξη του «burr» όσον αφορά τουλάχιστον σε κοινώς χρησιμοποιούμενα υλικά των μηχανολογικών κατασκευών. Για να παρατηρηθούν διαφοροποιήσεις που οφείλονται στο χρησιμοποιούμενο υλικό θα πρέπει να εξετάσουμε κάποιες αρκετά ίσως ‘έξωτικές’ περιπτώσεις υλικών με αρκετά υψηλές ή χαμηλές τιμές αντοχών και σκληροτήτων αντίστοιχα τα οποία δεν συναντάμε ιδιαίτερα συχνά στις μηχανολογικές κατασκευές. Σε σχέση με την διαφοροποίηση του υλικό και το «burr» αξίζει να επισημανθούν δύο παρατηρήσεις. Πρώτον, το εμφανιζόμενο «burr» στο αλουμίνιο κυμαίνεται σε ελαφρώς υψηλότερα επίπεδα από αυτό στον χάλυβα. Δεύτερον, σε όλες τις περιπτώσεις συνθηκών, το «burr» που εμφανίζεται στο αλουμίνιο τείνει να γίνει αρνητικό (εικόνα 4.83, θραύση κατά την διεύθυνση του αρνητικού επιπέδου διάτμησης, δεξ και παρ. 3.6.3).



Εικόνα 4.83: Η εμφάνιση αρνητικού «burr» στην δισδιάστατη τόρνευση του αλουμινίου.



Εικόνα 4.83.α: Η έναρξη της θραύσης για τον σχηματισμό του αρνητικού «burr» στο αλουμίνιο.



Εικόνα 4.83.β: Η θραύση του υλικού στην έξοδο του αρνητικού επιπέδου διάτμησης για τον σχηματισμό του αρνητικού «burr» στο αλουμίνιο.

Η πρώτη παρατήρηση οφείλεται στο γεγονός ότι το αλουμίνιο είναι μαλακότερο υλικό από τον χάλυβα με αποτέλεσμα τοπικά εκεί όπου εισάγονται οι παραμορφώσεις, αντί για την απότομη θραύση – διάτμηση του υλικού να ευνοείται το ‘σκίσιμο’ αυτού, αυξάνοντας έτσι το εμφανιζόμενο «burr».

Η δεύτερη παρατήρηση οφείλεται στο γεγονός ότι για το αλουμίνιο έχουμε μικρότερη ελαστική περιοχή και κατά συνέπεια μικρότερες πλαστικές παραμορφώσεις και παραμορφώσεις θραύσης από τον χάλυβα, με αποτέλεσμα οι παραμορφώσεις αυτές να γίνουν ίσες πρώτα με αυτές που εμφανίζονται κατά το αρνητικό επίπεδο διάτμησης και το υλικό τελικά να ‘σπάσει’ προς αυτή τη διεύθυνση.

Βιβλιογραφία 4^ο κεφαλαίου

Έντυπη

[1] Amit Bansal, Kiha Lee, “Study of burr size and surface roughness in high speed face milling”.

[2] AdvantEdge user’s manual (εγχειρίδιο χρήσης προγράμματος).

[3] A. Toporov, S.L. Ko, B.K. Kim, “Experimental study of burrs formed in feed direction when turning aluminium alloy Al6061-T6”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004.

[4] C.M. Daniel, K.V.C. Rao, W.W. Olson, J.W. Sutherland, “Effect of cutting fluid properties on heat transfer in turning and boring operations”, Japan/Usa symposium on flexible automation, vol. 2, ASME 1996.

[5] W. J. Deng, W. Xia, Y. Tang, “FEM simulation for burr formation near the exit of orthogonal cutting”, Springer-Verlag London Limited 2008.

Ηλεκτρονική

[6] <http://www.matweb.com> (ιστοσελίδα αναζήτησης υλικών και των ιδιοτήτων τους).

[7] <http://www.substech.com> (ιστοσελίδα αναζήτησης υλικών και των ιδιοτήτων τους).

[8] <http://www.custompartnet.com> (ιστοσελίδα επιλογής συνθηκών κατεργασιών και εκτίμησης κόστους)

[9] <http://its.foxvalleytech.com/MachShop4/> (ιστοσελίδα τεχνικού κολλεγίου foxvalley υπό μορφή διαδικτυακής βιβλιοθήκης).

[10] <http://www.stanford.edu/group/prl/documents/> (ιστοσελίδα πανεπιστημίου Stanford υπό μορφή διαδικτυακής βιβλιοθήκης).

[11] <http://littlemachineshop.com/> (ιστοσελίδα προϊόντων σχετικών με τις κατεργασίες των υλικών).

[12] <http://www.kennametal.com> (κατασκευαστής κοπτικών εργαλείων).

[13] <http://www.secotools.com> (κατασκευαστής κοπτικών εργαλείων).