

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ
ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

Σύγκριση κινηματικής ομόρροπου - αντίρροπου φραιζαρίσματος, για την κατεργασία Τιτανίου με διάφορες προώσεις κοπής.



Αμανατίδης Στυλιανός

ΑΕΜ : 2370

Επιβλέπων Καθηγητής : Στέφανος Γεράρδης

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ
ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

Σύγκριση κινηματικής ομόρροπου - αντίρροπου φραιζαρίσματος, για
την κατεργασία Τιτανίου με διάφορες προώσεις κοπής.

Αμανατίδης Στυλιανός

AEM : 2370

Επιβλέπων Καθηγητής : Στέφανος Γεράρδης

Κοζάνη, Μάρτιος 2024

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ξεκινήσω εκφράζοντας ένα μεγάλο ευχαριστώ προς τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Γεράρδη Στέφανο που με εμπιστεύτηκε για την διεκπεραίωση της. Με τον κύριο Γεράρδη είχαμε μία άψογη συνεργασία και χάρις την καθοδήγηση του κατάφερα να ολοκληρώσω την διπλωματική μου εργασία. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους καθηγητές και τις καθηγήτριες του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών για όλες τις γνώσεις και τις εμπειρίες που μου προσέφεραν τα τελευταία πέντε χρόνια.

Στην συνέχεια θα ήθελα εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ προς την οικογένεια μου για τις θυσίες και την υποστήριξη τους ώστε να μπορώ να βρίσκομαι σήμερα εδώ, στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας και να κάνω τα πρώτα μου βήματα ως μηχανικός, μιας και χωρίς την βοήθεια τους δε θα μπορούσα να ακολουθήσω το όνειρο μου. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου που είχα την χαρά να γνωρίσω, οι οποίοι μου στάθηκαν όλα τα χρόνια των σπουδών μου και μοιραστήκαμε πολλές όμορφες στιγμές.

Περίληψη

Στην παρακάτω εργασία αρχικά γίνεται η ανάλυση της θεωρίας του φραιζαρίσματος το οποίο αποτελεί μία μεγάλη κατηγορία των μηχανουργικών κατεργασιών με αφαίρεση υλικού. Παρουσιάζονται οι τρεις τύποι μηχανών φραιζας που μπορούμε να συναντήσουμε, οι οποίοι είναι: κάθετη φραιζα, οριζόντια φραιζα και κέντρα κατεργασίας (CNC), αλλά οι δύο μεγάλες κατηγορίες φραιζαρίσματος, οι οποίες είναι το μετωπικό φραιζάρισμα και το περιφερικό φραιζάρισμα. Το τελευταίο είναι και η περιοχή έρευνας της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Για να ασχοληθεί κάποιος με το φραιζάρισμα, θα πρέπει πρώτα να έχει μελετήσει καλά την κινηματική του φραιζαρίσματος και πιο συγκεκριμένα τις παραμέτρους που θα επηρεάσουν το τελικό αποτέλεσμα. Αυτές είναι: η ταχύτητα κοπής και η πρόωση κοπής, οι οποίες μαζί ορίζουν την συνολική κίνηση του κοπτικού εργαλείου τόσο στην περιστροφική όσο και στην μεταφορική. Το βάθος κοπής που χωρίζεται σε ακτινικό και αξονικό βάθος κοπής είναι άλλη μία παράμετρος που ορίζει κατά πόσο θα εισχωρήσει το κοπτικό εργαλείο στο τεμαχίο μας. Επιπλέον οι θερμοκρασίες και οι δυνάμεις κοπής είναι δύο πολύ σημαντικές παράμετροι που θα μας απασχολήσουν στην εργασία μας.

Για να μπορέσουμε να κατεργαστούμε ένα υλικό με την τεχνική του φραιζαρίσματος, θα πρέπει να προσέξουμε τι κοπτικό εργαλείο θα χρησιμοποιήσουμε. Πιο συγκεκριμένα, τα κοπτικά εργαλεία αποτελούνται από ένα υλικό υποστρώματος και ένα υλικό επικάλυψης, τα οποία, ανάλογα και με το υλικό του τεμαχίου ορίζουν και την φθορά του κοπτικού εργαλείου.

Για την συγκεκριμένη εργασία έχουμε επιλέξει να ασχοληθούμε με την ορθογωνική κοπή, ενώ το υλικό κατεργασίας που επιλέγουμε είναι το τιτάνιο. Αφού αναλύσουμε τα χαρακτηριστικά της ορθογωνικής κοπής αλλά και τις ιδιότητες των κραμάτων τιτανίου, θα επιχειρήσουμε να συγκρίνουμε τις δύο κατηγορίες του μετωπικού φραιζαρίσματος (αντίρροπο-ομόρροπο) με τη χρήση προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων DEFORM.

Abstract

In the following work, we initially present the theory of milling, which constitutes a significant category of material removal machining processes. The three types of milling machines encountered are vertical milling, horizontal milling, and machining centers (CNC), but the two major categories of milling, namely peripheral milling and face milling, are presented. The latter is the one that will concern us. To engage in milling, one must first study the kinematics of milling, specifically the parameters that will affect the final result. These are the cutting speed and feed rate, which together define the overall motion of the cutting tool in both rotational and translational aspects. The cutting depth, divided into radial and axial cutting depths, is another parameter that determines how much the cutting tool will penetrate into our workpiece. Additionally, cutting temperatures and forces are two very important parameters that will be addressed in our work.

To be able to machine a material using milling, we must pay attention to the cutting tool we will use. Specifically, cutting tools consist of a substrate material and a coating material, which, depending on the workpiece material, also determine the wear of the cutting tool.

For this particular work, we have chosen to focus on orthogonal cutting, while the processing material selected is titanium. After analyzing the characteristics of orthogonal cutting and the properties of titanium alloys, we will attempt to compare the two categories of face milling (up milling and down milling) using finite element programs DEFORM.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περίληψη	3
Abstract	4
1. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	7
2. Εισαγωγή	8
3. Θεωρία Φραιζαρίσματος	9
3.1 Εργαλειομηχανές φραιζαρίσματος	10
3.1.1 Οριζόντια φραιζομηχανή	10
3.1.2 Κάθετη φραιζομηχανή	12
3.1.3 Κέντρα κατεργασίας (CNC)	13
3.2 Κατηγορίες ειδών φραιζαρίσματος	16
3.2.1 Περιφερικό φραιζάρισμα	16
3.2.2 Μετωπικό φραιζάρισμα	17
3.3 Κινηματική φραιζαρίσματος	17
3.3.1 Ταχύτητα κοπής	17
3.3.2 Πρόωση κοπής	17
3.3.3 Βάθος κοπής	18
3.3.4 Θερμοκρασίες κοπής	18
3.3.5 Δυνάμεις κοπής	19
3.4 Κοπτικά εργαλεία φραιζαρίσματος	20
3.4.1 Υλικά υποστρώματος κοπτικών εργαλείων	22
3.4.2 Υλικά επικάλυψης κοπτικών εργαλείων	26
3.4.3 Ανάπτυξη φθοράς κοπτικών εργαλείων	28
4. Ορθογωνική κοπή	29
4.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ορθογωνικής κοπής	29
4.2 Ανάλυση ζώνης διάτμησης ορθογωνικής κοπής	30
4.3 Ανάλυση δυνάμεων κατά την ορθογωνική κοπή	31
4.4 Ανάλυση θερμοκρασιακών πεδίων κατά της ορθογωνική κοπή	32

5. Το τιτάνιο ως υλικό κατεργασίας	33
5.1 Κράματα Τιτανίου.....	34
• Κράματα που παρουσιάζουν μέτρια εργασιμότητα για σκλήρυνση, επιτρέποντας τη θερμική εργασία σε λεπτές τομές και εύκολη συγκόλληση, όπως το Ti-6Al-4V.	35
• Κράματα που παρουσιάζουν υψηλή εργασιμότητα για σκλήρυνση, επιτρέποντας θερμική εργασία σε μεγάλες διατομές αλλά είναι δύσκολο να συγκολληθούν, όπως το Ti-6Al-6V-2Sn [21,23,24].....	35
5.2 Εφαρμογές Κραμάτων Τιτανίου	35
5.3 Το κράμα Ti-6Al-4V	36
6. Ομόρροπο - Αντίρροπο φραιζάρισμα	37
6.1 Αντίρροπο φρεζάρισμα	37
6.2 Ομόρροπο φραιζάρισμα	39
6.3 Αντίρροπο ή Ομόρροπο Φραιζάρισμα;	40
7. Η χρήση πεπερασμένων στοιχείων στους υπολογισμούς δυνάμεων - τάσεων και θερμοκρασιών στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού (FEM γενικά, plane strain model)	42
8. Ανάπτυξη μοντέλου για τον υπολογισμό των δυνάμεων και θερμοκρασιών κατά την κατεργασία με ομόρροπο και αντίρροπο φραιζάρισμα (DEFORM 3D) [τεμάχιο].....	46
8.1 Εισαγωγή στο deform.....	46
8.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις δυνάμεις κοπείς	60
8.2.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης Αντίρροπου Φραιζαρίσματος με πρόωση 20 mm/sec	60
8.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης Αντίρροπου Φραιζαρίσματος με πρόωση 40 mm/sec	63
8.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης Ομόρροπου Φραιζαρίσματος με πρόωση 20 mm/sec	65
8.2.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης Ομόρροπου Φραιζαρίσματος με πρόωση 40 mm/sec	68
8.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις θερμοκρασίες τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου	70
9. Συμπέρασμα και εκλογή καλύτερης τεχνικής φραιζαρίσματος.....	78
10. Προβληματισμοί και ιδέες για μελλοντική έρευνα	80
11. Βιβλιογραφία	81

1. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

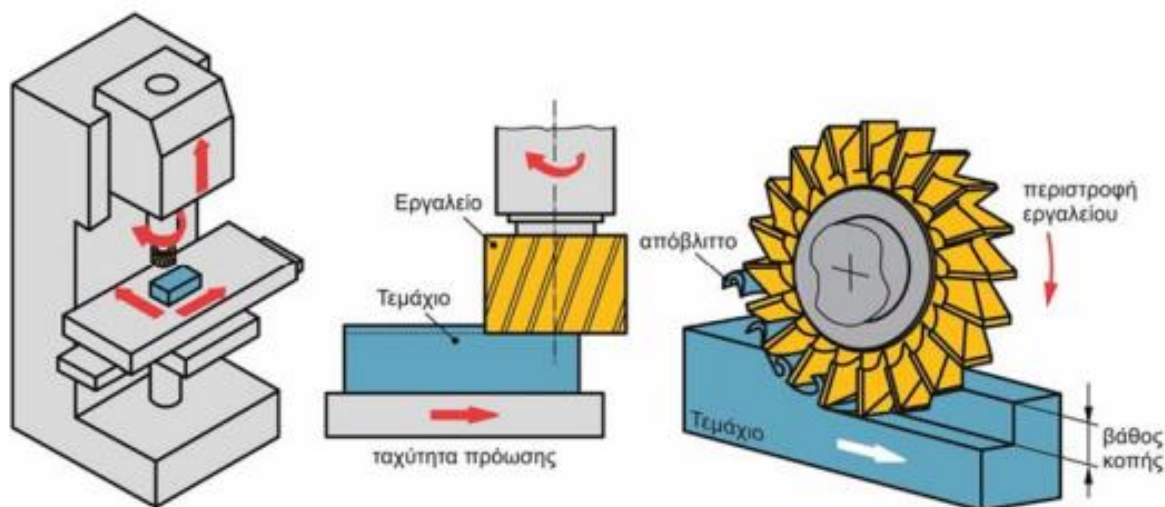
Στην παρακάτω εργασία θα επιχειρήσουμε να μελετήσουμε την μηχανική διεργασία του φραιζαρίσματος χρησιμοποιώντας προγράμματα προσομοίωσης και πεπερασμένων στοιχείων για να προκύψουν αποτελέσματα που θα αφορούν παραμέτρους όπως τη θερμοκρασία, τη φθορά και την παραγωγή αποβλίτων. Σκοπός της εργασίας είναι να απαντήσουμε στο μεγάλο ερώτημα: Αντίρροπο ή Ομόρροπο φραιζάρισμα; Επειδή οι απόψεις δίστανται, θα δημιουργήσουμε τέσσερις διαφορετικές προσομοιώσεις, δύο για τον κάθε τύπο φραιζαρίσματος σε δύο διαφορετικές ταχύτητες κοπής αντίστοιχα. Καλούμαστε λοιπόν να αποφανθούμε μέσα από διάφορα διαγράμματα που θα λάβουμε από τις τιμές που θα προκύψουν από τις προσομοιώσεις ποιος είναι ο καλύτερος τύπος φραιζαρίσματος, συγκρίνοντας τις δυνάμεις που ασκούνται σε τρισδιάστατο άξονα (X,Y,Z). Επίσης μέτρο σύγκρισης θα αποτελέσουν οι διάφορες κατανομές θερμοκρασίας στο τεμάχιο αλλά και στο κοπτικό εργαλείο μας, όπως επίσης και οι αναπτυσσόμενες τάσεις μεταξύ αυτών. Για να μπορέσουμε όμως να χρησιμοποιήσουμε ένα πρόγραμμα προσομοιώσεων και πεπερασμένων στοιχείων, θα πρέπει αρχικά να μελετήσουμε το υλικό κατεργασίας, το υλικό του κοπτικού εργαλείου και τις ιδιότητες τους. Οπότε, αρχικά θα πρέπει να γίνει βιβλιογραφική αναφορά στο τιτάνιο και στα κράματά του καθώς το Ti-6Al-4V θα είναι το υλικό το οποίο θα κατεργαστούμε, αλλά και στα διάφορα υλικά κοπτικών εργαλείων και στις επικαλύψεις τους, ώστε να μπορέσουμε να κάνουμε την κατάλληλη εκλογή για την κοπή μας.

2. Εισαγωγή

Η ιστορία του φραιζαρίσματος εκτείνεται σε διάφορους αιώνες, και η ανάπτυξη των μηχανών φραιζας και τεχνικών φραιζας έχει εξελιχθεί με την πάροδο του χρόνου. Εδώ υπάρχει μια χρονολογική επισκόπηση των βασικών σταθμών στην ιστορία του φραιζαρίσματος: προ-βιομηχανική επανάσταση: Οι πρώιμες μορφές φραιζαρίσματος περιλάμβαναν χειροκίνητη εργασία με χρήση πετρωμάτων για τον άλεσμα δημητριακών και άλλων υλικών. βιομηχανική επανάσταση (τέλη 18ου - αρχές 19ου Αιώνα): πρώιμες μηχανές φραιζας. Τα τέλη του 18ου και αρχές του 19ου αιώνα, διάφοροι εφευρέτες ανέπτυξαν μηχανές που μπορούσαν να εκτελούν εργασίες φραιζαρίσματος αποτελεσματικότερα από τις χειροκίνητες μεθόδους. Μέσος 19ος αιώνας: ανάπτυξη εργαλείων ακριβείας. Κοπτικά εργαλεία φραιζας: Ο σχεδιασμός και η κατασκευή εξειδικευμένων κοπτικών εργαλείων φραιζας έγιναν πιο εξελιγμένοι, επιτρέποντας μια ευρύτερη γκάμα εργασιών φραιζας. Τέλη 19ου αιώνα: εισαγωγή μηχανών φραιζας με περιστρεφόμενο κεφάλι: Η μηχανή φραιζας με περιστρεφόμενο και κινούμενο κεφάλι σε διάφορες κατευθύνσεις παρείχε μεγαλύτερη ευελιξία στις εργασίες φραιζας. Αρχές 20ού αιώνα: άνοδος κάθετων και οριζόντιων μηχανών φραιζας: διάφορες διαμορφώσεις μηχανών φραιζας, συμπεριλαμβανομένων των κάθετων και οριζόντιων, έγιναν πιο διαδεδομένες. Οι κάθετες μηχανές φραιζας έγιναν δημοφιλείς για τη δυνατότητά τους να χειρίζονται μεγαλύτερα έργα. Μέσα 20ού αιώνα: εμφάνιση του CNC Φραιζαρίσματος: Η εμφάνιση του ελέγχου αριθμητικού ελέγχου υπολογιστή (CNC) στα μέσα του 20ού αιώνα ανατρέπει το φραιζάρισμα. Οι μηχανές φραιζας CNC επέτρεψαν την αυτοματοποίηση, την προγραμματιζόμενη και υψηλής ακρίβειας μηχανουργία. Υψηλής ταχύτητας φραιζαρίσματος: τεχνολογικές εξελίξεις επέτρεψαν υψηλότερες στροφές άξονα και πιο γρήγορη τροφοδοσία κοπής, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα των διεργασιών φραιζαρίσματος. Από τα τέλη του 20ού αιώνα μέχρι σήμερα: προχωρήσεις στην τεχνολογία CNC: Οι CNC φραιζοκοπτικές συνέχισαν να εξελίσσονται, ενσωματώνοντας προηγμένα χαρακτηριστικά όπως πολυάξονη επεξεργασία, προσαρμοστικοί έλεγχοι και βελτιωμένα εργαλεία. Φραιζάρισμα στον τομέα του πρωτότυπου και της τρισδιάστατης εκτύπωσης: Το φραιζάρισμα έγινε ουσιώδες μέρος των διαδικασιών πρωτοτύπου και χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης για τη δημιουργία λειτουργικών πρωτοτύπων. Υλικά υψηλής απόδοσης: οι τεχνικές φραιζαρίσματος προσαρμόστηκαν για την επεξεργασία υλικών υψηλής απόδοσης, συμπεριλαμβανομένων κραμάτων, σύνθετων υλικών και προηγμένων πλαστικών μηχανικών. Ελαχιστοποίηση και Μικρο-Φραιζάρισμα: Οι διαδικασίες φραιζαρίσματος διευρύνθηκαν για να περιλαμβάνουν την ελαχιστοποίηση και το μικρο-φραιζάρισμα για την ακριβή μηχανοκίνηση μικρών εξαρτημάτων. Η χρονολογία του φραιζαρίσματος αντανακλά μια συνεχή εξέλιξη, κίνητρο της οποίας είναι οι τεχνολογικές καινοτομίες, οι βιομηχανικές ανάγκες και η επιδίωξη μεγαλύτερης ακρίβειας, αποδοτικότητας και ευελιξίας στις διεργασίες αφαίρεσης υλικού. Η ανάπτυξη του φραιζαρίσματος έχει διαδραματίσει κεντρικό ρόλο στον σχηματισμό των πρακτικών κατασκευής και μηχανικής σε διάφορους τομείς βιομηχανίας.

3. Θεωρία Φραιζαρίσματος

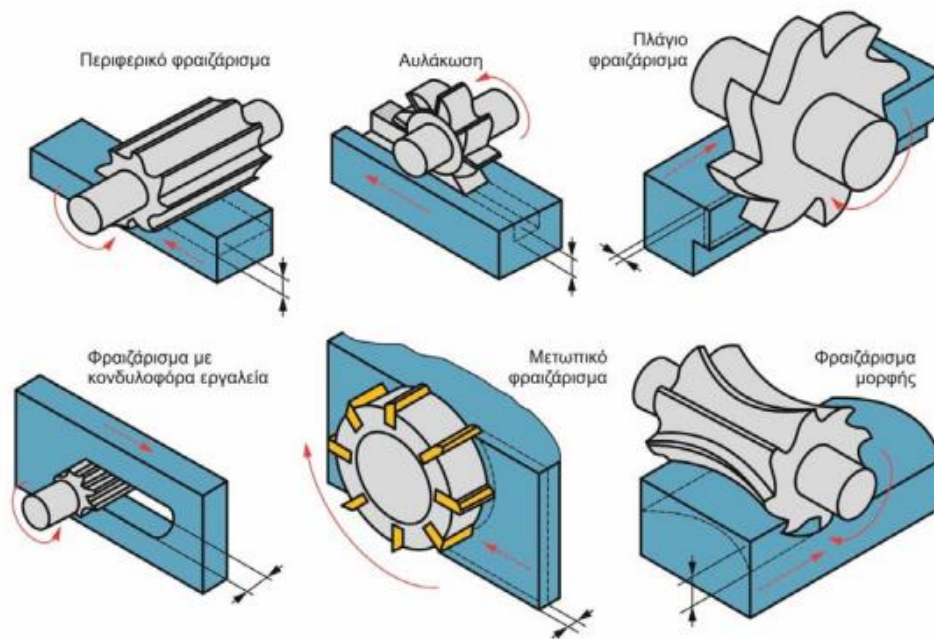
Η κίνηση που καθορίζει την κοπή κατά το φραιζάρισμα είναι η περιστροφική και προέρχεται από το εργαλείο που επιλέγουμε για να εκτελέσουμε μία κοπή. Καθοριστικό παράγοντα παίζει η γωνιακή ταχύτητα για την ταχύτητα με την οποία κόβουμε. Αυτός είναι ο λόγος που την ορίζουμε ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας, όπως είναι το υλικό του τεμαχίου μας και του εργαλείου κοπής, αλλά και τον τρόπο φραιζαρίσματος που επιλέγουμε κάθε φορά. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας στο φραιζάρισμα είναι η ταχύτητα πρόωσης, η οποία ορίζεται από την οριζόντια μετατόπιση του κομματιού που πρόκειται να κατεργαστεί πάνω στην τράπεζα την φραιζομηχανής μας [1].



Εικόνα 3.1 Η κινηματική του φραιζαρίσματος [1]

Το φραιζάρισμα προσφέρει μία ποικιλία όσον αφορά τα υλικά, αλλά και τις επιφάνειες, τις οποίες θέλουμε να κατεργαστούμε. Μπορούμε να κατεργαστούμε χάλυβα, χυτοσίδηρο και πολλά άλλα υλικά όπως είναι και τα συνθετικά, σε διάφορες επιφάνειες όπως κυρτές, στενές και φυσικά επίπεδες. Οι συχνότερες κατεργασίες που γίνονται κατά το φραιζάρισμα είναι η εκχόνδιση και το φινίρισμα, ενώ αν θέλουμε πολύ καλό αποτέλεσμα, μπορούμε να επιλέξουμε να λειάνουμε το κατεργαζόμενο κομμάτι. Η γεωμετρία του εργαλείου κοπής μας είναι αυτή που ορίζει τα απόβλητά της κοπής. Επίσης το κοπτικό εργαλείο διαθέτει πολλές ακμές που πρέπει να έχουν σφηνοειδή μορφή, οι οποίες κατανέμονται ομοιόμορφα σε κυκλική γεωμετρία [2].

Η πρόωση, η οποία αποτελεί την δευτερεύουσα κίνηση, ορίζεται ως ο ρυθμός μετακίνησης είτε της τράπεζας της εργαλειομηχανής, ή του τεμαχίου που είναι εδραιωμένο σε αυτήν. Ενώ η μηχανή βρίσκεται σε λειτουργία, στην κατεργασία, οι κοπτικές ακμές έρχονται σε επαφή με το τεμάχιο εισχωρώντας και αποχωρώντας από αυτό ακολουθώντας το κομμάτι ολόκληρης περιστροφής του κοπτικού.



Εικόνα 3.2 Είδη φραιζαρίσματος [1]

Ως αποτέλεσμα αυτού, τα “δόντια” του κοπτικού καταφέρνουν να ψυχθούν για όση ώρα δεν συμμετέχουν στην κοπή. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγουμε την οποιαδήποτε φθορά λόγω θερμότητας [2].

Το φαινόμενο αυτό, κατά την κατεργασία με φραίζα, ονομάζεται διακοπτόμενη κοπή.

Κάθε κατεργασία φραιζαρίσματος έχει διαφορετικές απαιτήσεις, όπως επίσης και τα κομμάτια που πρόκειται να τοποθετηθούν στην μηχανή. Για το λόγο αυτό, λαμβάνοντας υπόψιν τον οικονομικό παράγοντα και την γεωμετρία της κάθε κοπής, κατατάσσουμε τις φραιζομηχανές σε τρεις μεγάλες κατηγορίες :

- Οριζόντια φραιζομηχανή
- Κάθετη φραιζομηχανή
- CNC Κέντρα κατεργασίας [2]

3.1 Εργαλειομηχανές φραιζαρίσματος

3.1.1 Οριζόντια φραιζομηχανή

Έχοντας πάρει το όνομά της από τον κύριο άξονα, ο οποίος μετακινεί το κοπτικό στην οριζόντια επιφάνεια, η συγκεκριμένη φραίζα, χρησιμοποιείται για κυρίως απλές εφαρμογές που δεν έχουν πολύ υψηλές απαιτήσεις.

Η οριζόντια φραίζα αποτελείται από:

- τη βάση,
- τον κορμό-ορθοστάτη,

- την κύρια άτρακτο,
- το τραπέζι. [2]



Εικόνα 3.3 Οριζόντια Φραιζομηχανή [2]

Το κομμάτι πάνω στο οποίο τοποθετείται σταθερά ο ορθοστάτης ονομάζεται βάση. Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις φραιζομηχανών όπου ορθοστάτης και βάση αποτελούν ενιαίο σώμα της μηχανής. Για να μπορέσει να συγκρατήσει τις δυνάμεις και τα φορτία που αναπτύσσονται σε μια φραιζομηχανή, το στοιχείο αυτό αποτελείται από διάφορα νεύρα. Το σημαντικότερο στοιχείο μιας φραιζομηχανής ονομάζεται κορμός. Ρόλος του κορμού είναι η στήριξη της τράπεζας και του προβόλου. Τοποθετημένος στην κορυφή του ορθοστάτη και έχοντας την μορφή «γερανού», ο πρόβολος αποτελείται από ένα ζευγάρι ή περισσότερα ρουλεμάν για την στήριξη του άξονα της εργαλειομηχανής [2]. Η όψη του ορθοστάτη περιέχει ολισθητήρες έτσι ώστε το κομμάτι της τράπεζας να είναι σε θέση να ανεβαίνει και να κατεβαίνει. Για δύο κινήσεις είναι υπεύθυνος ο ορθοστάτης και αυτές είναι η μεταφορική για την τράπεζα και η περιστροφική για την κύρια άτρακτο. Ρόλος της τελευταίας είναι να εδραιώνει στο πέρας της, τον άξονα της εργαλειομηχανής. Οι ταχύτητες περιστροφής βρίσκονται στην κύρια άτρακτο [2]. Σε αυτήν επιδρούν επίσης τόσο αξονικές όσο και ακτινικές δυνάμεις που πηγάζουν από τις διάφορες φορτίσεις κατά την κοπή. Για να μπορέσουμε να μειώσουμε αυτές τις ανεπιθύμητες φορτίσεις τοποθετούνται αξονικά και ακτινικά ρουλεμάν για την στήριξη της άτρακτου. Το συγκρότημα τραπεζιού. Όπου φαίνεται στο κάτω μέρος της διαφάνειας, αποτελείται από:

- Κάτω φορείο. Ρόλος του είναι η μετακίνηση της τράπεζας πάνω-κάτω. Οδηγείται και ολισθαίνεται πάνω σε κατακόρυφους ολισθητήρες, οι οποίοι βρίσκονται στο μέτωπο του κορμού της φραιζομηχανής.
- Άνω φορείο. Χαρακτηριστικό του είναι η ικανότητα ολίσθησης εσωτερικά και εξωτερικά πάνω σε γλισιέρες, οι οποίες αποτελούν στοιχεία του κάτω φορείου. Ρόλος του είναι να ελέγχει τις εγκάρσιες κινήσεις μετωπικά του κορμού [2].

- Τράπεζα. Ο χώρος όπου τοποθετείται το κομμάτι της κατεργασίας μας. Όπως και η σύνδεση άνω και κάτω φορείου έτσι και η σύνδεση τράπεζας και άνω φορείου γίνεται μέσω γλασιέρων έτσι ώστε να μπορεί η τράπεζα να ολισθαίνει[2].



Εικόνα 3.4 Συγκρότημα τραπεζιού [2]

3.1.2 Κάθετη φραιζομηχανή

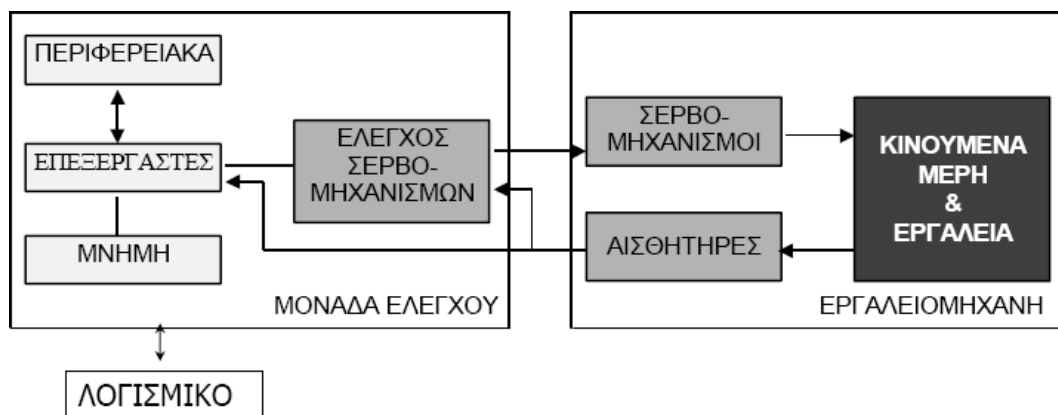
Η μόνη διαφορά της κάθετης φραιζας σε σχέση με την οριζόντια είναι ο άξονας κίνησης της εργαλειομηχανής, ο οποίος, όπως και το όνομα αυτής είναι κάθετος. Τα υπόλοιπα μέρη της φραιζομηχανής δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές σε σχέση με την οριζόντια.[2]



Εικόνα 3.5 Κατακόρυφη Φραιζομηχανή

3.1.3 Κέντρα κατεργασίας (CNC)

Το σύνολο όλων εκείνων των μηχανημάτων που χρειάζονται για την εκτέλεση μιας κατεργασίας ονομάζεται Εργαλειομηχανή (EM). Τα σημαντικότερα μέρη μιας εργαλειομηχανής φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα. [3]



Εικόνα 3.6 Τα σημαντικότερα μέρη μιας εργαλειομηχανής [3]

Μια Εργαλειομηχανή CNC λειτουργεί υπό τις αρχές του Αριθμητικού Ελέγχου. Ο όρος CNC προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων: Computer Numerical Control (Αριθμητικός Έλεγχος με χρήση Η/Υ). Ψηφιακά καθοδηγούμενη εργαλειομηχανή ονομάζεται η εργαλειομηχανή (Ε/Μ), στην οποία ο χειριστής χρησιμοποιεί ηλεκτρονικό υπολογιστή ανάμεσα στα μηχανικά μέρη της μηχανής.[3]

Κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με :

- 1) Την ακρίβεια
 - Συνήθους ακριβείας (10 μm)
 - Ακριβείας (1 μm)
 - Υψηλής ακριβείας (0.1 μm)
 - Υψίστης ακριβείας (< 0.01 μm) [3]
- 2) Τον βαθμό αυτοματισμού
 - Χαμηλού βαθμού αυτοματισμού.
 - Υψηλού βαθμού αυτοματισμού.

Οι κινήσεις που πραγματοποιούνται είναι μόνο αυτές των αξόνων χωρίς να φέρουν ελέγχους θέσης και ανάδραση στους αυτοματισμούς.

Μέσω αισθητήρων και εξελιγμένων συστημάτων αυτομάτου ελέγχου (ΣΑΕ) με ανάδραση γίνεται ο έλεγχος θέσεων και γενικότερης κατάστασης της EM [3].

- 3) Το είδος της κατεργασίας
 - Τόρνοι – Κέντρα Τόρνευσης
 - Φρέζες – Κέντρα Κατεργασιών
 - Γ. Κέντρα διάτρησης - απότμησης και κάμψης ελάσματος

- Ηλεκτροδιάβρωση (Electromagnetic Discharge Machine tool - EDM)
- Κέντρα κατεργασιών laser
- Κέντρα κοπής με δέσμη ρευστού (νερού, ελαίου, νερού με κοπτικούς κόκκους κτλ.) ή με δέσμη ενέργειας (δέσμη plasma ή οξυακετυλενίου)
- Εργαλειομηχανές Μέτρησης (Computer Measuring Machine tool – CMM)
- Μηχανές Ταχείας Προτυποποίησης (Rapid Prototyping ή 3D Printing) [3]



Εικόνα 3.7 CNC Φραιζομηχανή [4]

Πλεονεκτήματα

- Παραγωγή δύσκολων γεωμετριών με υψηλή ακρίβεια και ποιότητα
- Έχει την δυνατότητα επανάληψης
- Ελαχιστοποίηση νεκρών χρόνων
- Ευκολία προγραμματισμού
- Ασφαλέστερο περιβάλλον εργασίας [3]

Μειονεκτήματα

- Μεγάλο κόστος αγοράς και διατήρησης
- Απαιτεί συγκεκριμένη εξειδίκευση

Τρόποι προγραμματισμού Ε/Μ - CNC

- 1) Συμβατικός (χειροκίνητος), πραγματοποιείται:
 - Με βάσει του μηχανολογικού σχεδίου του τεμαχίου
 - Ενσωματώνοντας γνώσεις από την τεχνολογία της κατεργασίας
 - Χρησιμοποιείται ένα προκαθορισμένο φασεολόγιο [3]
- 2) Με βοήθεια Η/Υ αλληλεπιδραστικά.

- Χρήση δισδιάστατου ή τρισδιάστατου σχεδίου του κατεργαζόμενου τεμαχίου για την δημιουργία κώδικα CNC έχοντας προετοιμασμένο φασειολόγιο και αντίστοιχες συνθήκες κατεργασίας.
 - Από μοντέλο του τεμαχίου σε σύστημα CAD βρίσκονται οι συντεταγμένες κινήσεων της E/M CNC.
- 3) Πλήρως αυτόματα σε H/ Y από λογισμικό τύπου CAM.
- Από σειρά τυπικών γεωμετρικών μορφών και θέση των αντίστοιχων στρατηγικών κατεργασίας γίνεται αυτόματη ανάλυση του τεμαχίου.
 - Για την αποφυγή «λογικών» λαθών, τα οποία δεν μπορεί να ξεχωρίσει το λογισμικό προϋπόθεση αποτελεί η καλή γνώση της κατεργασίας, της εργαλειομηχανής και των χρησιμοποιούμενων εργαλείων [3].

Κώδικας G

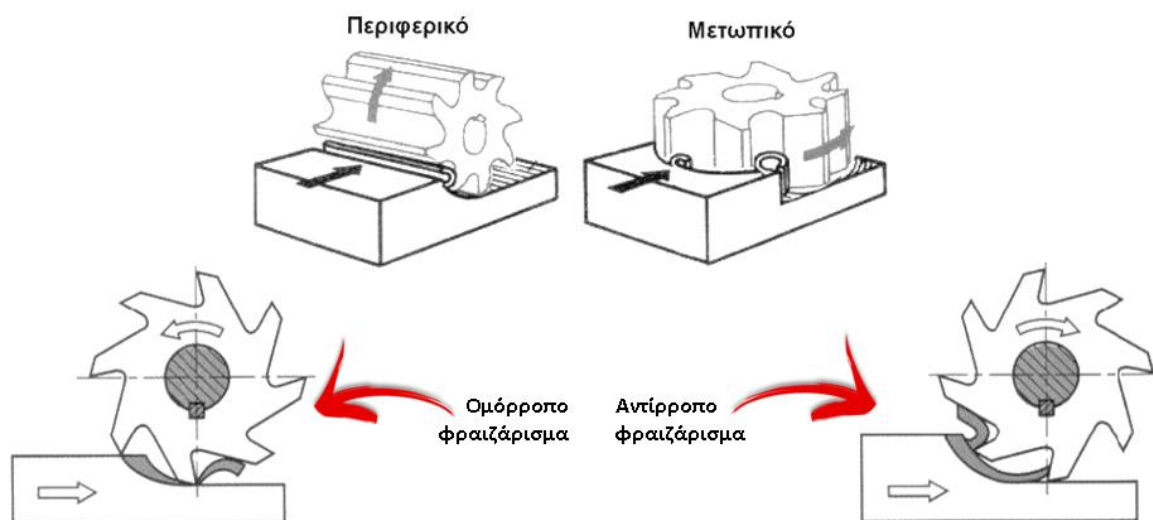


Εικόνα 3.8 Κώδικας G [5]

Όλες οι λέξεις σε ένα πρόγραμμα CNC, που ξεκινούν με το γράμμα G, ονομάζονται και προπαρασκευαστικοί κώδικες, είναι οι κώδικες G. Οι κώδικες αυτοί στην ουσία λένε στην εργαλειομηχανή ποια είναι η ακριβώς επόμενη ενέργεια που πρέπει να εκτελέσει, για παράδειγμα:

- Γρήγορη κίνηση (κίνηση του κοπτικού εργαλείου όσο το δυνατόν πιο σύντομα σε ένα σημείο όπου δεν πραγματοποιείται κοπή) [3]
- Ελεγχόμενη πρόωση σε προκαθορισμένη πορεία (ευθεία ή τόξο)
- Ειδικές κινήσεις που θα αποτελούν διάτρηση μιας οπής ή κατασκευή ενός πολυμορφικού τεμαχίου όπως ένα γρανάζι
- Δήλωση πληροφοριών σχετικά με τα εργαλεία κοπής, όπως απόκλιση
- Ορισμός νέου συστήματος συντεταγμένων [3]

3.2 Κατηγορίες ειδών φραιζαρίσματος



Εικόνα 3.9 Είδη Φραιζαρίσματος [2]

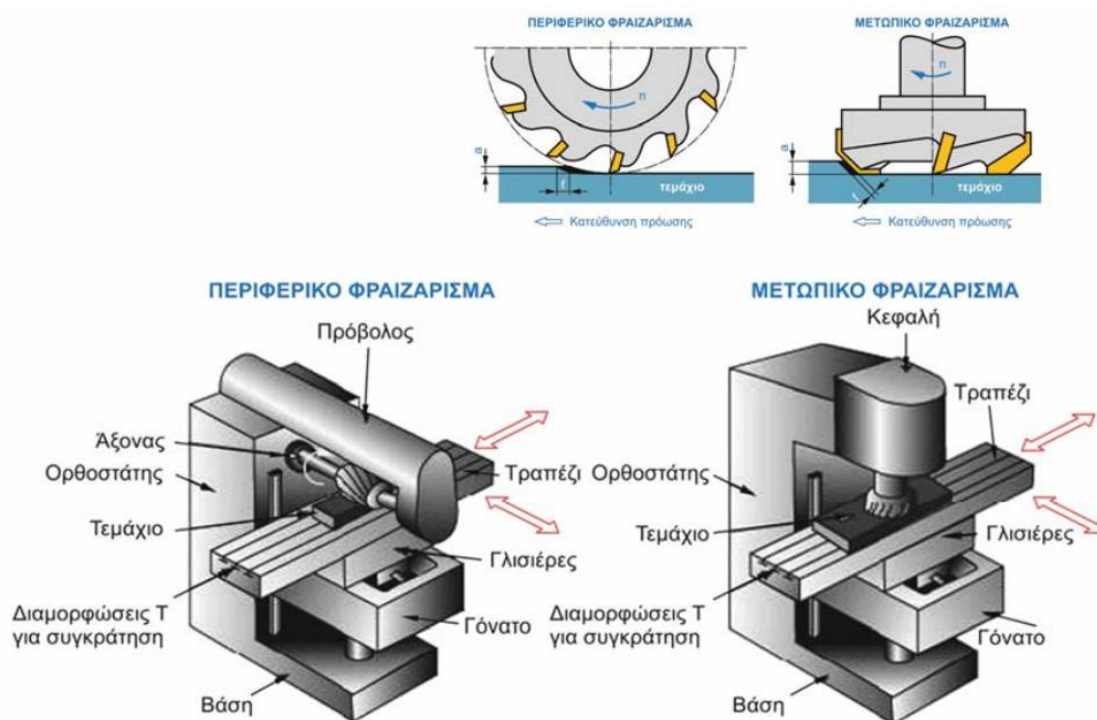
3.2.1 Περιφερικό φραιζάρισμα

Το φραιζάρισμα ταξινομείται είτε ως περιφερειακό είτε ως μετωπικό φραιζάρισμα με βάση τον προσανατολισμό του άξονα του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με την επιφάνεια που κατεργάζεται. Στο περιφερειακό φραιζάρισμα, ο άξονας του κυλινδρικού εργαλείου κοπής είναι παράλληλος με την κατεργαζόμενη επιφάνεια και τα απόβλητα απομακρύνονται με κοπτικές ακμές διατεταγμένες με κυκλικό τρόπο, με αποτέλεσμα τα υπολείμματα να έχουν σφηνοειδή σε σχήμα [2]

Κατά το περιφερικό φραιζάρισμα, η πρόωση του τεμαχίου συνήθως είναι αντίθετη στην περιστροφή του εργαλείου, αλλά μπορεί να συμβεί και το αντίθετο. Ανάλογα με την επιλογή που θα κάνουμε για την κίνηση του τεμαχίου ορίζεται το ομόρροπο και το αντίρροπο φραιζάρισμα.

Στο σχήμα 3.11, είναι προφανές ότι στο αντίρροπο φραιζάρισμα, το πάχος των αποβλίττων ξεκινά από το μηδέν στην αρχή της ακμής του δοντιού του κοπτικού εργαλείου και αυξάνεται στο μέγιστο στο άκρο της άκρης. Αντίθετα, στο ομόρροπο φραιζάρισμα, το πάχος των αποβλίττων είναι μηδέν στο άκρο του δοντιού και μέγιστο στο άκρο του άκρου. Αυτή η διαφορά έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη πίεση στο εργαλείο κοπής στην αρχή του παράλληλου φραιζαρίσματος, αυξάνοντας τον κίνδυνο θραύσης. Ωστόσο, στο ομόρροπο φραιζάρισμα, το κοπτικό εργαλείο σταθεροποιεί την κοπή πιέζοντας το τεμάχιο εργασίας πάνω στο τραπέζι εργαλειομηχανής λόγω κινηματικής. Στο μετωπικό φραιζάρισμα, το εργαλείο κοπής έχει κοπτικές ακμές στην μπροστινή του όψη εκτός από τις περιφερειακές κοπτικές ακμές, με τον άξονα του εργαλείου κάθετο στην επιφάνεια κατεργασίας.

3.2.2 Μετωπικό φραιζάρισμα



Εικόνα 3.10 Μετωπικό – Περιφερικό Φραιζάρισμα [1]

3.3 Κινηματική φραιζαρίσματος

3.3.1 Ταχύτητα κοπής

Η ταχύτητα κοπής στο φραιζάρισμα ορίζει την κίνηση του κοπτικού δοντιού κατά τη διάρκεια του χρόνου. Αυτός ο ρυθμός κοπής απεικονίζεται από την ταχύτητα κοπής, η οποία είναι η περιστροφή του εργαλείου στην κύρια κίνηση. Όπως και στην κοπή με τόρνο, έτσι και στο φραιζάρισμα, για ένα κοπτικό εργαλείο διαμέτρου D [mm] που περιστρέφεται με n στροφές ανά λεπτό (rpm), η ταχύτητα κοπής v_c είναι: $v_c = \pi \cdot D \cdot n$ [2]

3.3.2 Πρόωση κοπής

Η Πρόωση είναι ο παράγοντας αυτός που ορίζει την μετατόπιση του τραπεζιού της εργαλειομηχανής και εν συνεχεία του κατεργαζόμενου τεμαχίου σε ένα λεπτό. Η πρόωση, καλείται ταχύτητα πρόωσης επειδή εκφράζεται ως η ταχύτητα κίνησης του τραπεζιού της εργαλειομηχανής. Η επιλογή της τιμής της πρόωσης για την κοπή καθορίζεται από παράγοντες όπως το εργαλείο κοπής, το υλικό του τεμαχίου εργασίας, το βάθος κοπής και την επιθυμητή ποιότητα επιφάνειας.

Η πρόωση στο φραιζάρισμα εκφράζεται σε δύο μορφές:

- πρόωση ανά λεπτό f : ορίζεται ως η μετατόπιση του τραπεζιού ανά λεπτό.
- πρόωση ανά δόντι f_z : ορίζεται ως η μετατόπιση του τραπεζιού από την χρονική στιγμή που εισχωρεί ένα δόντι της φραιζας στο τεμάχιο μέχρι να εισχωρήσει και το επόμενο [2].

Η σχέση που συνδέει τις δύο αυτές προώσεις προκύπτει ως εξής:

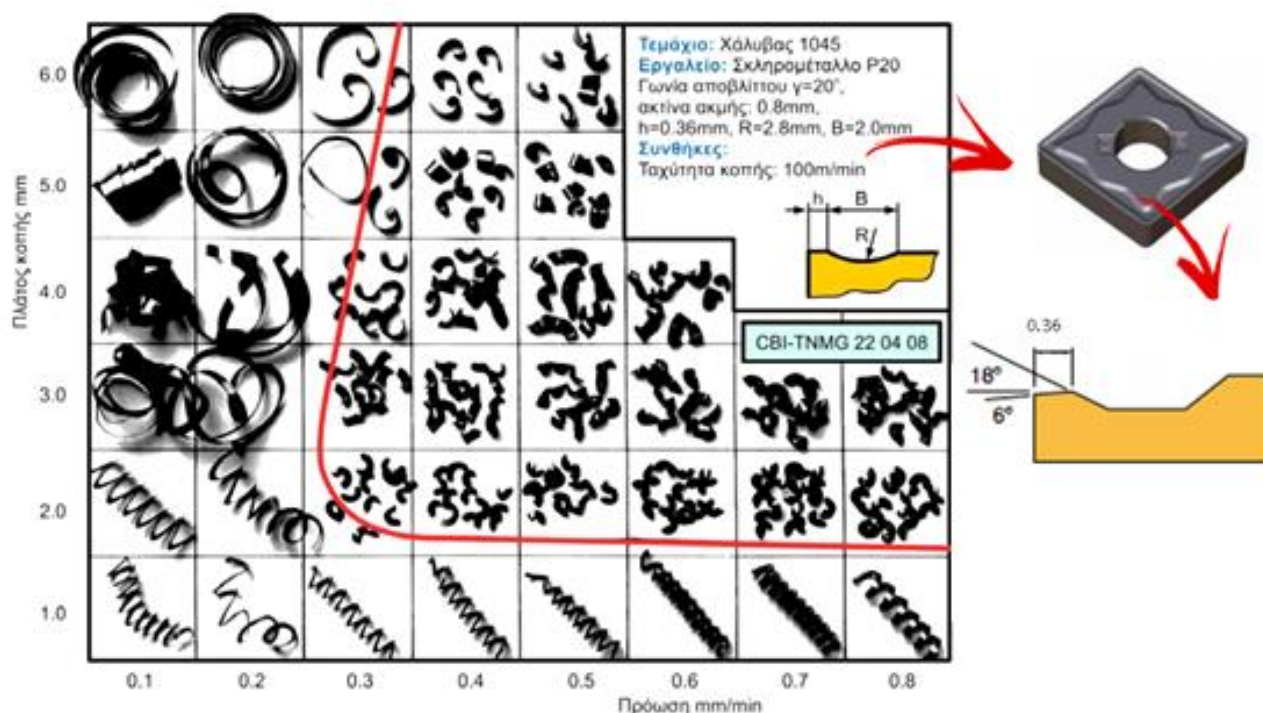
Σκεφτείτε ένα φραιζά με z κοπτικά άκρα (δόντια), που περιστρέφεται με n στροφές ανά λεπτό ενώ το τραπέζι κινείται με τροφοδοσία ανά λεπτό f (προχωρώντας σε s χιλιοστά ανά λεπτό). Ο τύπος που συνδέει τις δύο προώσεις βρίσκεται στο κάτω μέρος της διαφάνειας. Επιπροσθέτως, στο κάτω μέρος της διαφάνειας παρουσιάζονται και οι σχέσεις για τον χρόνο κοπής και την απόσταση κοπής (όμοιες με τόννευση). Χρόνος κοπής. Είναι το πηλίκο της απόστασης που διανύει το τραπέζι της εργαλειομηχανής διά την ταχύτητα της πρόωσης. $th=L/s$ [2].

3.3.3 Βάθος κοπής

Η αφαίρεση του υλικού στις εργαλειομηχανές μπορεί να επιτευχθεί μέσω της διαφορετικής κινηματικής του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, με συγκεκριμένο βάθος (το οποίο ονομάζεται βάθος κοπής) και προκαθορισμένη ταχύτητα εισχώρησης.[5]

Αύξηση βάθους κοπής προφανώς δίνει πιο παχιά απόβλιττα.[6]

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε διάφορες μορφές αποβλήτου συναρτήσει βάθους κοπής και πρόωσης:



Εικόνα 3.11 Διάφορες μορφές αποβλήτου συναρτήσει βάθους κοπής και πρόωσης [6]

3.3.4 Θερμοκρασίες κοπής

Μία άλλη σημαντική παράμετρος είναι και η θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την κοπή, όχι μόνο βέβαια η μέγιστη τιμή της αλλά και πως αυτή κατανέμεται στο εργαλείο, στο απόβλιττο και στην κατεργασμένη επιφάνεια.

Υψηλή θερμοκρασία αναπτύσσεται από:

- Μεγάλα χαρακτηριστικά στοιχεία κοπής (ταχύτητα κοπής, πρόωσης και βάθος κοπής), καθώς σε μικρό χρόνο κόβεται το μεγαλύτερο μέρος του τεμαχίου και η θερμότητα δεν διαχέεται επαρκώς.
- Υψηλή σκληρότητα του τεμαχίου, καθώς η τριβή που αναπτύσσεται και παραμορφώνει το υλικό του τεμαχίου είναι μεγαλύτερη.
- Υλικά με κακή θερμική αγωγιμότητα ή με μικρή μάζα, γι' αυτό κατά τις κατεργασίες υψηλής ταχύτητας επεξεργαζόμαστε συνήθως μεγάλα τεμάχια και με καλή θερμική αγωγιμότητα. Παράλληλα, η αγωγιμότητα επηρεάζεται και από της επικαλύψεις των κοπτικών εργαλείων, με αυτές να είναι πλέον απαραίτητες για καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας.
- Μη χρήση ψυκτικού υγρού.
- Μεγάλη γωνία κοπής, ενώ αντίθετα όταν οι γωνίες ελευθερίας και αποβλίπτου είναι μικρότερες τότε η θερμοκρασία αυξάνεται.
- Μικρή ακτίνα καμπυλότητας, διότι συγκεντρώνεται η θερμότητα σε μικρότερη επιφάνεια εφόσον η ακμή του κοπτικού εργαλείου είναι μικρότερη [7,8,9,10,11,12].

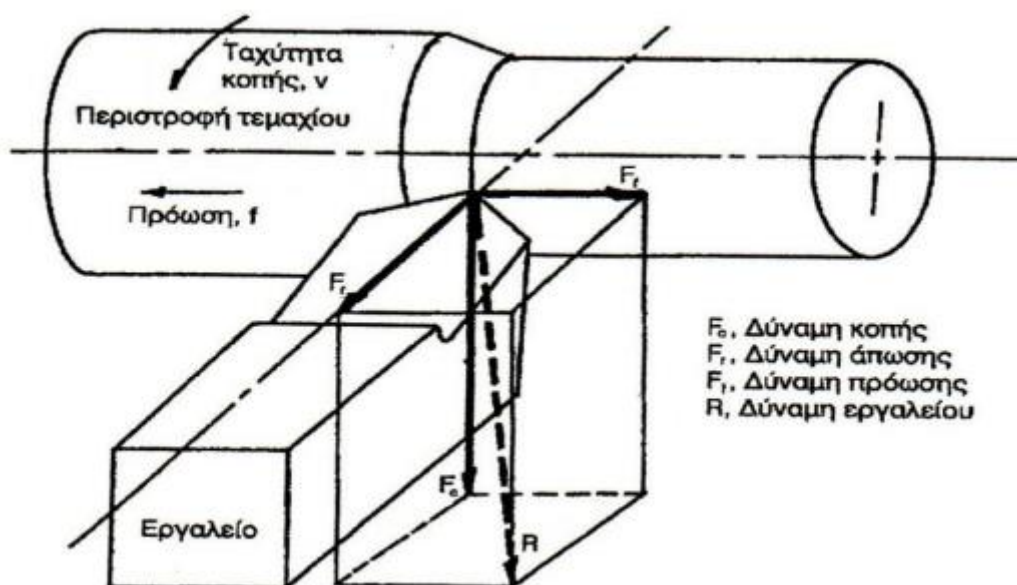
3.3.5 Δυνάμεις κοπής

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

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

Η διάρκεια ζωής του εργαλείου επηρεάζεται τόσο από τη θερμοκρασία όσο και από τη δύναμη κοπής. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να κάνουν τη μηχανική κατεργασία ευκολότερη αλλά και να υποβάλουν το εργαλείο σε μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση. Εν τω μεταξύ, είναι ιδανικό να ελαχιστοποιηθεί η δύναμη κοπής. Επομένως, είναι επιθυμητό να έχουμε χαμηλή θερμοκρασία και δύναμη στη μηχανική κατεργασία. Ωστόσο, παρατηρούμε συχνά ότι οι

συνθήκες που οδηγούν σε μειωμένη δύναμη οδηγούν επίσης σε αυξημένη θερμοκρασία. Επιπλέον, η αύξηση της θερμοκρασίας τείνει να μειώσει τη δύναμη κοπής. Είναι επίσης σημαντικό να ληφθεί υπόψη η ακρίβεια της επιφάνειας [7,8,9,10,11,12].



Εικόνα 3.12 Δυνάμεις κοπής [13]

Σύμφωνα με το σχήμα της εικόνας 3.12 έχουμε:

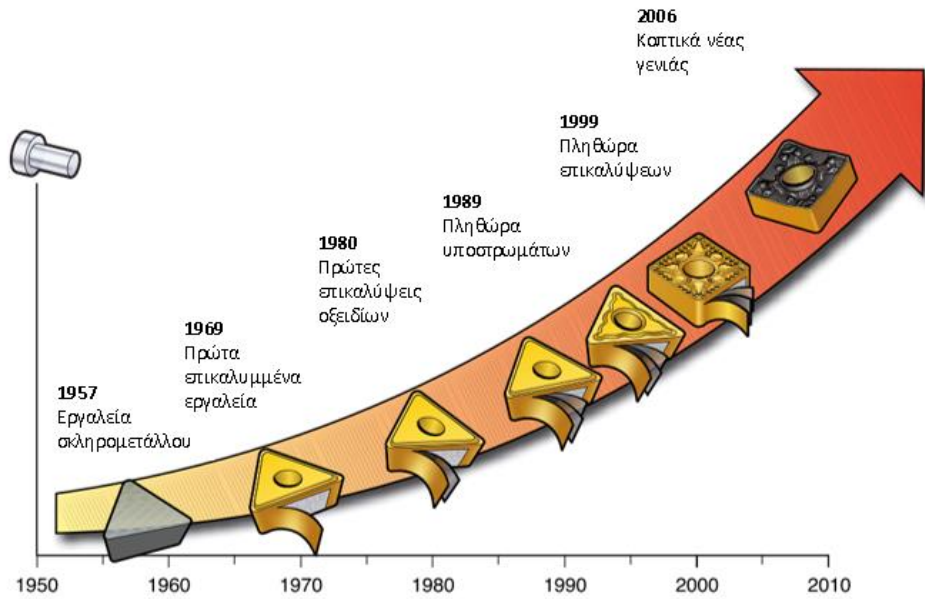
- F_c : Δύναμη κοπής (Άξονας X)
- F_f : Δύναμη πρόωσης (Άξονας Y)
- F_r : Δύναμη άπωσης (Άξονας Z)

Φυσικά ισχύει: $F_{total}^2 = F_c^2 + F_f^2 + F_r^2$

3.4 Κοπτικά εργαλεία φραιζαρίσματος

Στην παρακάτω εικόνα (3.13) βλέπουμε ότι τα πρώτα κοπτικά εργαλεία ήταν φτιαγμένα από σκληρομέταλλα και δημιουργήθηκαν το 1957, στη συνέχεια δημιουργήθηκαν τα πρώτα επικαλυμμένα κοπτικά εργαλεία, για να φτάσουμε στο 1980 όπου έχουμε για πρώτη φορά επικαλύψεις οξειδίων. Εννέα χρόνια αργότερα έχουμε κοπτικά εργαλεία με πολλά υποστρώματα, ενώ με το κλείσιμο της χιλιετίας (1999) δημιουργούνται τα πρώτα κοπτικά εργαλεία με πληθώρα επικαλύψεων. Σήμερα χρησιμοποιούνται τα πιο εξελιγμένα κοπτικά εργαλεία, τα οποία ονομάστηκαν κοπτικά νέας γενιάς.

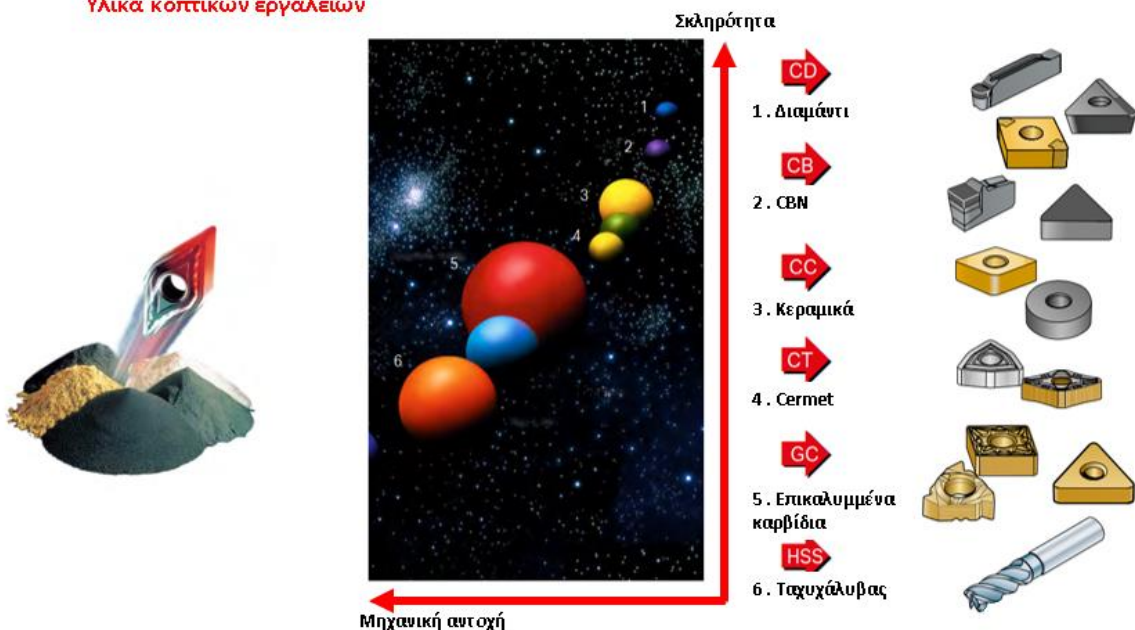
Υλικά κοπτικών εργαλείων



Εικόνα 3.13 Ιστορική αναδρομή κοπτικών εργαλείων [14]

Στην εικόνα 3.14 βλέπουμε την κατανομή των κοπτικών εργαλείων με βάση τη σκληρότητά τους, αλλά και την μηχανική αντοχή. Το πιο σκληρό υλικό κοπτικού εργαλείου είναι το διαμάντι, ενώ το λιγότερο σκληρό ο ταχυχάλυβας. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η μηχανική αντοχή και η σκληρότητα είναι δύο έννοιες αντιστρόφως ανάλογες.

Υλικά κοπτικών εργαλείων



Εικόνα 3.14 Ταξινόμηση υλικών κοπτικών εργαλείων με βάση την σκληρότητα [14]

3.4.1 Υλικά υποστρώματος κοπτικών εργαλείων

A) Ανθρακούχοι χάλυβες



Εικόνα 3.15 Ανθρακούχοι Χάλυβες

Οι ανθρακούχοι χάλυβες έχουν ένα ποσοστό άνθρακα (C) που κυμαίνεται από 0 έως 1 τοις εκατό, μαζί με ίχνη πυριτίου, χρωμίου, μαγγανίου και άλλων στοιχείων. Οι ανθρακοχάλυβες βάζονται σε νερό για να τους δώσουν σκληρότητα. Αυτοί οι χάλυβες χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία κοπτικών οργάνων με εξειδικευμένες λειτουργίες και μικρή διάρκεια ζωής. Αυτά τα όργανα μορφής είναι τέτοια. Η μορφή αυτών των εργαλείων είναι πανομοιότυπη με το σχήμα που θα έπρεπε να έχει το επεξεργασμένο αντικείμενο. Από όλα τα εργαλεία κοπής, είναι τα πιο οικονομικά. Τα εργαλεία από ανθρακούχο χάλυβα έχουν ένα σημαντικό μειονέκτημα ότι χάνουν τη σκληρότητά τους σε θερμοκρασίες πάνω από 200°C, καθιστώντας την τρέχουσα χρήση τους για κατεργασία ουσιαστικά άσκοπη. [15]

B) Ταχυχάλυβες



Εικόνα 3.16 Ταχυχάλυβες

Υπό αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες, αυτοί οι υψηλής κραματοποίησης χάλυβες βάζονται με λάδι. Οι χάλυβες υψηλής ταχύτητας πήραν το όνομά τους από το γεγονός ότι αντέχουν σε

εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες διατηρώντας παράλληλα τη σκληρότητα, την αντοχή και την ευκρίνεια της αιχμής.

Ο χάλυβας υψηλής ταχύτητας διατίθεται σε δύο μεγάλες ποικιλίες:

- βολφράμιο W, με περιεκτικότητα 12–20%, (τύπου T) και τα υπόλοιπα κύρια στοιχεία κραμάτων, Cr, V και Co.
- Μολυβδαίνιο τύπου M (περιεκτικότητα 3–10 τοις εκατό), με τα υπόλοιπα κύρια στοιχεία κράματος να είναι Cr, V, W και Co. [15].

Καλύτερη συμπεριφορά κατά της τριβής, μειωμένη παραμόρφωση κατά τις θερμικές επεξεργασίες και χαμηλότερο κόστος χαρακτηρίζουν τον τύπο M σε σύγκριση με τον τύπο T. Ως αποτέλεσμα, αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 80% της παραγωγής χάλυβα υψηλής ταχύτητας. Οι χάλυβες υψηλής ταχύτητας είναι γενικά κατάλληλοι για χρήση σε εργαλειομηχανές χαμηλής αντοχής και σε διαλείπουσες κοπές λόγω της καλής αθραύσεως και αντοχής τους ταχυχάλυβες κατασκευάζονται με σύντηξη και για καλύτερη ομοιογένεια με κωνιομεταλλουργία [15].

Γ) Σκληρομέταλλα



Εικόνα 3.17 Σκληρομέταλλα

Η κοπή μετάλλων έφερε πραγματικά επανάσταση με την ανακάλυψη και τη χρήση καρβιδίων. Τα καρβίδια με τιμνένο δεν προέρχονται από σύντηξη μετάλλων και δεν περιέχουν σίδηρο, γεγονός που τα κάνει να διακρίνονται από τα κράματα μετάλλων. Αυτοί είναι συνδυασμοί καρβιδίων τανταλίου (TaC), τιτανίου (TiC) και βολφραμίου (WC) με κοβάλτιο (Co) που δρα ως συνδετικό. Πριν συνδυαστούν, συμπιεστούν σε καλούπια και θερμανθούν σε υψηλή θερμοκρασία ταυτόχρονα, τα προαναφερθέντα καρβίδια και το κοβάλτιο μετατρέπονται πρώτα σε σκόνης. Η διαδικασία της «συσσωμάτωσης», η οποία παράγει πλακίδια, περιλαμβάνει την εφαρμογή πίεσης και θερμότητας ταυτόχρονα στα μόρια. [15].

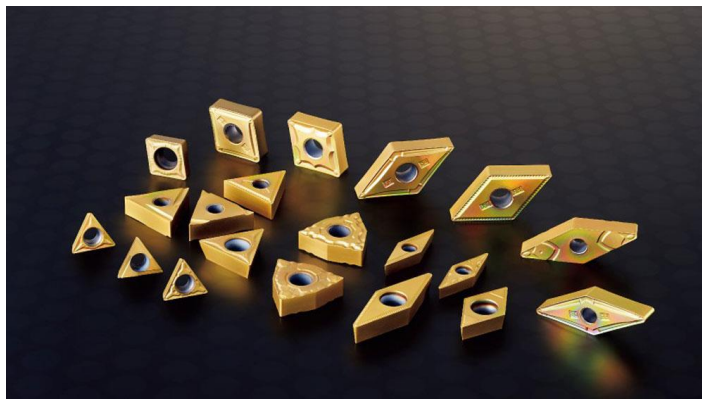
Τα σκληρά μέταλλα έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Είναι μεταξύ 900°C και 1000°C που διατηρούν τη σκληρότητά τους. Εξαιτίας αυτού, έχουν τη δυνατότητα να κόβουν με ταχύτητες έως και πέντε φορές μεγαλύτερες από τον χάλυβα υψηλής ταχύτητας, ανάλογα με την κατάσταση. Μπορούν να κατεργασθούν

βαμμένο χάλυβα σε σχετικά μικρές ταχύτητες, πράγμα αδύνατον να γίνει με ταχυχάλυβα. [15]

- Έχουν μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, με αποτέλεσμα να «αποποιούνται» εύκολα από πάνω τους τη θερμότητα. Έτσι η θερμότητα που αναπτύσσεται με την κοπή, απομακρύνεται χωρίς να υπερθερμανθεί η κόψη.
- Εργάζονται χωρίς υγρά κοπής (ξηρά κοπή). Αν όμως χρησιμοποιηθεί υγρό, πρέπει αυτό να είναι άφθονο και αδιάκοπο γιατί τα σκληρομέταλλα είναι ευαίσθητα σε θερμοκρασιακές μεταβολές.
- Κραδασμούς και απότομες μεταβολές του φορτίου τους τα καθιστούν ιδιαίτερα ευαίσθητα γι' αυτό και σπάζουν εύκολα. Για το λόγο αυτό τα σκληρομέταλλα δεν πρέπει να κόβουν διακοπτόμενη επιφάνεια.
- Η τρόχισή τους απαιτεί μεγάλη προσοχή και πολύ χρόνο. Γι' αυτό τον λόγο απαιτεί ειδικευμένο προσωπικό [15].

Δ) Κεραμικά



Εικόνα 3.18 Κεραμικά [16]

Συνήθως αποτελούνται από 100%στερεάφάση,όπως Al_2O_3 με πολύ λεπτά σωματίδια, στα οποία προστίθενται μικρές ποσότητες TiC ή άλλων υλικών για τη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων. Τα βορίδια και τα cermets (συνήθως 70% Al_2O_3 και 30% TiC) εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι η αυξημένη αντοχή στη φθορά, η υψηλή σκληρότητα και η χημική αδράνεια σε σύγκριση με τα υλικά που κατεργάζονται. Ωστόσο, υπάρχει ένα σημαντικό μειονέκτημα, πολύ χαμηλή αντοχή και ευθραυστότητα, που τα καθιστά επιρρεπή σε θανάσιμα σπασίματα. Τα χρησιμοποιούμε σε πλάκες όπως σκληρά μέταλλα σε πολύ υψηλές ταχύτητες ασταμάτητης κοπής χωρίς ψυκτικό μέσο για την αποφυγή θερμικών σοκ. Χρησιμοποιούνται αρνητικές γωνίες απογύμνωσης για την αποφυγή αποκόλλησης και αποκόλλησης, η χρήση εξαιρετικά άκαμπτων και ακριβών μηχανών SiN και $Sialon$ δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα κατά την κοπή χυτοσιδήρου και κραμάτων αέρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα κεραμικά εργαλεία είναι ακριβότερα από τα εργαλεία από τσιμεντοποιημένο καρβίδιο και φθείρονται ταχύτερα σε χαμηλές ταχύτητες κοπής. Αξίζει να σημειώσουμε ότι τα κεραμικά

εργαλεία είναι ακριβότερα των σκληρομετάλλων και φθείρονται γρηγορότερα σε χαμηλές ταχύτητες κοπής [15].

Ε) CBN (Κυβικός βοριο-νιτρίτης)



Εικόνα 3.19 CBN βιοχημικό διαμάντι [17]

Είναι το δεύτερο σκληρότερο υλικό μετά το διαμάντι. Τα εργαλεία αποτελούνται από ένα βασικό υλικό καρβιδίου που παρέχει αντοχή σε "δυναμικά" φορτία και μια πολύ κρυσταλλική επίστρωση CBN που παρέχει αντοχή στη φθορά και σκληρότητα. Σε αντίθεση με το διαμάντι, το υλικό είναι χημικά αδρανές σε σίδηρο και νικέλιο σε υψηλές θερμοκρασίες. Είναι επίσης ανθεκτικό στην οξείδωση. Επομένως, είναι κατάλληλο για την κοπή σκληροσμένου σιδήρου και κραμάτων υψηλής θερμοκρασίας [15].

Στ) Διαμάντι



Εικόνα 3.20 Το διαμάντι ως υλικό επικάλυψης

Έχει υψηλή σκληρότητα, υψηλή αντοχή στη φθορά, χαμηλό συντελεστή τριβής, χαμηλή θερμική διαστολή και υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Χρησιμοποιείται σε εργασίες φινιρίσματος για εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας και ακρίβεια. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες σχεδόν τις ταχύτητες κοπής, αλλά σε συνθήκες που ταιριάζουν στην ψαθυρότητά του. Ενώπροσανατολισμόςτωνκρυστάλλωνπαιζισημαντικόρόλοσταμονοκρυσταλλικάυλικά,στοπολυκρυσταλλικό συνθετικό διαμάντι η τυχαιότητα της κατανομής των διευθύνσεων αποτρέπει τη διάδοση των ρωγμών και τον σχηματισμό μικρο-αποξεστικών κόκκων. Το συνθετικό διαμάντι σε σκληρές μεταλλικές επιφάνειες (πάχος στρώματος έως 1 mm) χρησιμοποιείται κυρίως για μη σιδηρούχα κράματα, συνήθως κράματα Al-Si, WC, κεραμικά, πορσελάνη και πλαστικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού [15].

3.4.2 Υλικά επικάλυψης κοπτικών εργαλείων

Οι σκληρές επιστρώσεις λεπτών υμενίων χρησιμοποιούνται για την τροποποίηση της επιφάνειας που βελτιώνει την αποδοτικότητα και την παραγωγικότητα πολλών εξαρτημάτων μηχανών, κοπτικών εργαλείων και άλλων εξαρτημάτων και στοιχείων. Γενικά, οι σκληρές επιστρώσεις λεπτών υμενίων εφαρμόζονται ευρέως σε μηχανολογικά και άλλα προϊόντα με ιδιαίτερα σκληρές συνθήκες λειτουργίας. Οι μηχανικές, φυσικές, θερμικές, τριβολογικές, χημικές και βιολογικές (βιοσυμβατές) ιδιότητές τους, καθώς και η ποικιλία τύπων και μεθόδων επίστρωσης, τις καθιστούν την πλέον ιδανική λύση για τη βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας και την ενίσχυση της απόδοσης πολλών εξαρτημάτων. Οι επικαλύψεις αυτές παράγονται με τη χρήση εξοπλισμού υψηλής τεχνολογίας και διαφόρων τεχνικών, όπως η φυσική και χημική εναπόθεση ατμών (PVD, CVD), η τεχνολογία μεταφοράς με λέιζερ-πλάσμα (PLD) και ο θερμικός ψεκασμός. Το πάχος αυτών των επικαλύψεων είναι μόνο μερικά (1-10) μικρόμετρα (μm), εκτός από εκείνες που παράγονται με θερμικό ψεκασμό, αλλά οι επιφανειακές ιδιότητες των εξαρτημάτων στα οποία εφαρμόζεται αυτή η τεχνολογία βελτιώνονται σημαντικά [18].

Χαρακτηρίστηκα των υπέρσκληρων επικαλύψεων:

- Η δυνατότητα απόκτησης υψηλής επιφανειακής σκληρότητας, εξαιρετικών τριβολογικών ιδιοτήτων και μοναδικής αντοχής στη φθορά και την οξείδωση (χαμηλή χημική συμπεριφορά) με βάση παραδοσιακά υλικά (χάλυβας, αλουμίνιο, πλαστικά) με χαμηλό κόστος και εξαιρετική ολκιμότητα. Έτσι, κατέχουν τεχνολογική και οικονομική θέση όχι μόνο σε "παραδοσιακές" βιομηχανικές εφαρμογές, όπως ρουλεμάν, γρανάζια, κοπτικά εργαλεία και μεταδόσεις ακριβείας, αλλά και σε "προηγμένες" εφαρμογές, όπως η νανοτεχνολογία, η αεροδιαστημική τεχνολογία, τα οχήματα υψηλών επιδόσεων και τα αγωνιστικά αυτοκίνητα. Δυνατότητα ανάπτυξης, αξιολόγησης και εφαρμογής εξαιρετικών χαρακτηριστικών βιο-συμβατότητας και αντοχής στο χρόνο, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες στην βελτίωση ιατρικών εργαλείων αλλά και στην τεχνολογία των τεχνητών οργάνων ή συσκευών (αρθρώσεις, βηματοδότες, εν οδοντική κ.λπ.). Επίσης τα ίδια χαρακτηριστικά βρίσκουν ιδανικό πεδίο εφαρμογής στη βιομηχανία τροφίμων [18].

- Η δυνατότητα επίτευξης εξαιρετικά υψηλών οπτικών ιδιοτήτων. Αυτό οδηγεί σε εφαρμογές στην οπτοηλεκτρονική και την ιατρική οπτική μικροχειρουργική.
- Η ικανότητα επίτευξης υψηλής θερμικής αντίστασης ή θερμικού φραγμού (θερμικό φράγμα, θερμική υπεραγωγιμότητα) και η αντίστοιχη συμπεριφορά στην ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ιδιότητες που χρησιμοποιούνται σε προηγμένες εφαρμογές στην ηλεκτρολογία, την ηλεκτρονική, τη μικροηλεκτρονική και τη μηχανική [18].

Είδη επικαλύψεων:



Εικόνα 3.21 Είδη επικαλύψεων [15]

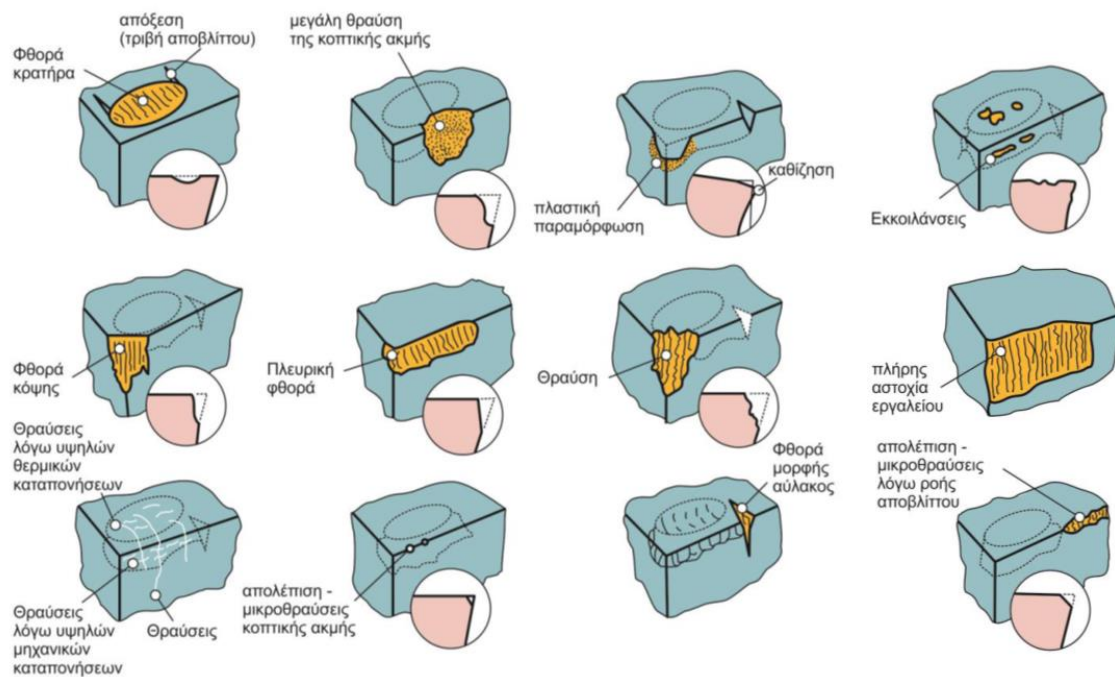
- Νιτρίδιο τιτανίου (TiN): Επίστρωση υψηλής απόδοσης που χρησιμοποιείται συνήθως για την παράταση της διάρκειας ζωής των κοπτικών εργαλείων.
- Ανθρακονιτρίδιο του Τιτανίου - Titanium Carbo-Nitride (TiCN): Η επικάλυψη TiCN προσφέρει βελτιωμένη αντοχή σε φθορά λόγω απόξεσης και τριβής, ιδιαίτερα για δύσκολα κατεργαζόμενα υλικά όπως ο χυτοσίδηρος, τα κράματα αλουμινίου, οι εργαλειοχάλυβες, κράματα τιτανίου και inconel (inconel: εμπορική ονομασία οστενιτικών κραμάτων νικελίου, χρωμίου. [15]
- Νιτρίδιο τιτανίου – αλουμινίου (TiAlN ή AlTiN). Αυτή η επίστρωση επιλέγεται για κοπτικά εργαλεία καρβιδίου όταν δεν χρησιμοποιείται ψυκτικό κατά την κατεργασία.
- Νιτρίδιο του χρωμίου – Chrome Nitride CrN: Το νιτρίδιο του χρωμίου είναι μια επίστρωση που χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση υψηλών μηχανικών φορτίων κατά την κατεργασία.

- Νιτρίδιο του Ζιρκονίου - Zirconium Nitride ZrN: Το νιτρίδιο του ζιρκονίου χρησιμοποιείται ως επικάλυψη στις εφαρμογές εκείνες όπου το νιτρίδιο του Τιτανίου αποτυγχάνει [15]

3.4.3 Ανάπτυξη φθοράς κοπτικών εργαλείων

Στη μορφοποίηση με αφαίρεση υλικού, το κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο έρχονται σε επαφή μεταξύ τους και η σχετική τους κίνηση δημιουργεί υψηλές θερμικές και μηχανικές τάσεις. Ανάλογα με τους παράγοντες που υπεισέρχονται σε κάθε κοπή (ταχύτητα κοπής, γεωμετρία κοπτικού εργαλείου), το κοπτικό εργαλείο φθείρεται σταδιακά μέχρι να σπάσει. Οι τάσεις παρατηρούνται στη ζώνη κοπής, στη ζώνη τριβής μεταξύ του εργαλείου και των λειαντικών κόκκων και στη ζώνη τριβής μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας και της κατεργασμένης επιφάνειας. Αυτές οι τρεις ζώνες είναι οι πηγές παραγωγής θερμότητας, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας απάγεται από τη ζώνη κοπής μέσω των κόκκων λείανσης. Έτσι, στις κατεργασίες κατεργασίας που περιλαμβάνουν αφαίρεση υλικού, οι διάφοροι μηχανισμοί φθοράς λειτουργούν σύμφωνα με γενικούς παράγοντες και έχουν ως αποτέλεσμα τη σταδιακή αφαίρεση υλικού από το κοπτικό εργαλείο [14].

Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζονται ορισμένοι από τους τύπους αστοχίας του κοπτικού εργαλείου που παρατηρούνται σε αποφλοιωμένες επιφάνειες, ελεύθερες επιφάνειες ή ακμές, ανάλογα με διάφορους λόγους που σχετίζονται με το είδος της κατεργασίας, τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου που χρησιμοποιείται, τις συνθήκες κάτω από τις οποίες γίνεται η κοπή και το συνδυασμό κοπτικού εργαλείου/τεμαχίου.



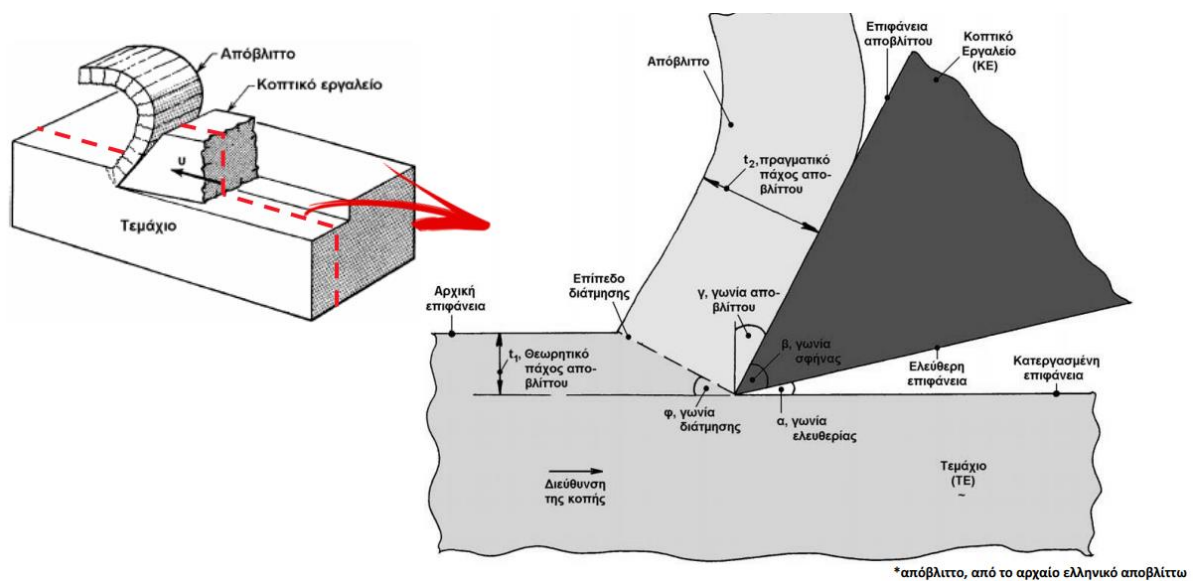
Εικόνα 3.22 Τύποι φθοράς κοπτικής ακμής [14]

Οι σημαντικότερες μορφές φθοράς των κοπτικών εργαλείων επιγραμματικά είναι οι εξής:

- φθορά της ελεύθερης επιφάνειας,
- φθορά κρατήρα της επιφάνειας αποβλίττου,
- απολέπιση της κόψης,
- μικροθραύσεις, ρωγμές της ακμής,
- πλαστική παραμόρφωση της ακμής,
- θραύση της ακμής.

Οι δυο πρώτες μορφές δεν μπορούν να αποφευχθούν σε οποιαδήποτε κατεργασία αφαίρεσης υλικού και αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες αστοχίας και ως αποτέλεσμα, της απόσυρσης των κοπτικών εργαλείων από την κατεργασία [14].

4. Ορθογωνική κοπή



Εικόνα 4.1 Σχηματική παράσταση ορθογωνικής κοπής [20]

4.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ορθογωνικής κοπής

Η ορθογωνική κοπή αποτελεί την ιδανική μορφή της διεργασίας της κοπής. Οι θεωρητικές μελέτες αποσκοπούν στην βελτιστοποίηση και τον έλεγχο της διαδικασίας κοπής. Στην ορθογωνική κοπή, το εργαλείο έχει σχήμα σφήνας με την κύρια ακμή κοπής να είναι κάθετη στην κύρια διεύθυνση της κοπής και κινείται προς το τεμάχιο με μια πρόωση f ενώ το τεμάχιο είναι πακτωμένο [19].

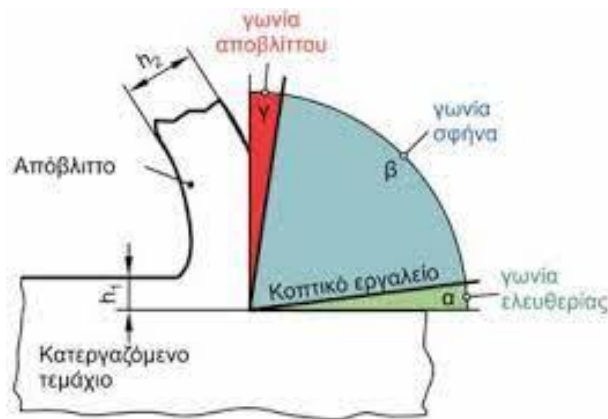
Οι πλευρές που διαθέτει το κοπτικό εργαλείο, παρουσιάζουν τις ακόλουθες χαρακτηριστικές γωνίες οι οποίες ονομάζονται γωνίες κοπής:

- γωνία ελευθερίας α : σχηματίζεται μεταξύ της επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου που είναι στραμμένη προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο και μιας γραμμής παράλληλης προς τη κατεύθυνση της κοπής.

- γωνία σφήνας β : σχηματίζεται μεταξύ της επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου που εφάπτεται στο απόβλιτο και της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού
- γωνία αποβλίτου γ : σχηματίζεται μεταξύ της επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου που εφάπτεται στο απόβλιτο και την κάθετη ευθεία στην κατεύθυνση της κοπής.

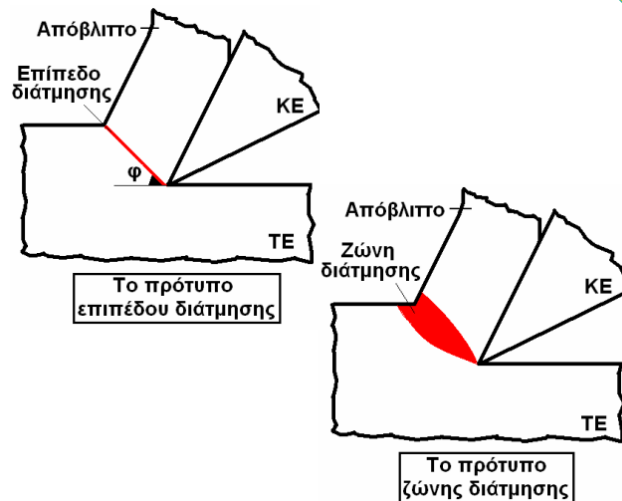
Για τις τρεις χαρακτηριστικές γωνίες κοπής ισχύει η παρακάτω ιδιότητα:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \text{ [19]}$$



Εικόνα 4.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ορθογωνικής κοπής [19]

4.2 Ανάλυση ζώνης διάτμησης ορθογωνικής κοπής

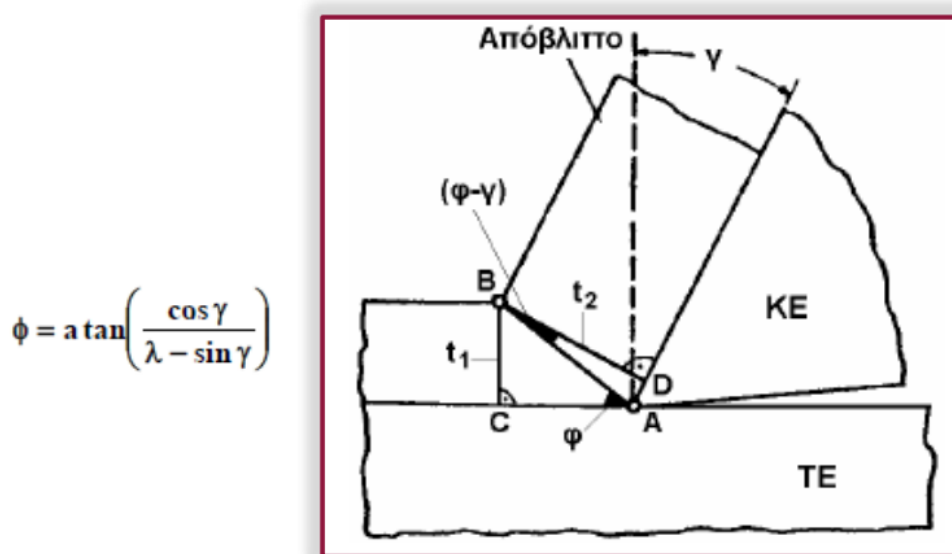


Εικόνα 4.3 Ζώνη Διάτμησης [20]

Η σύγχρονη θεώρηση του μηχανισμού της κοπής αναφέρει πως στην ορθογωνική κοπή, καθώς το κατεργαζόμενο υλικό πλησιάζει το επίπεδο διάτμησης, δεν ξεκινά η παραμόρφωσή του παρά μόνον όταν το υλικό φτάσει στο επίπεδο αυτό. Στη θέση αυτή, δηλαδή στο επίπεδο διάτμησης, το υλικό παραμορφώνεται με απλή διάτμηση καθώς κινείται κατά μήκος της λεπτής ζώνης διάτμησης με μικρό ποσό παραμόρφωσης στη δευτερεύουσα ζώνη διάτμησης που θεωρείται αμελητέα, όπως και η παραμόρφωση στην τριτεύουσα ζώνη διάτμησης, που φαίνεται στο σχήμα,

η οποία είναι ισοδύναμη με την τριβή ολίσθησης με σταθερό συντελεστή τριβής. Γενικά για την εκτίμηση της γωνίας διάτμησης έχουμε:

- 1) Από τις πληροφορίες για τη γωνία κοπής είναι δυνατός ο προσδιορισμός σημαντικών παραμέτρων κοπής. Για παράδειγμα, η δύναμη κοπής ή η ισχύς κοπής, οι τάσεις οι και παραμορφώσεις που προκύπτουν, ο ρυθμός παραμόρφωσης και το πεδίο θερμοκρασίας που προκύπτει [20].
- 2) Μέχρι σήμερα έχουν προταθεί διάφορες θεωρίες για τον θεωρητικό προσδιορισμό της γωνίας διάτμησης, οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες ομάδες, όπως φαίνεται στη διαφάνεια:
 - Θεωρίες που στηρίζονται στο πρότυπο του επιπέδου διάτμησης.
 - Θεωρίες που στηρίζονται στο πρότυπο της ζώνης διάτμησης.
- 3) Μερικές βασικές σχέσεις εκτίμησης της γωνίας διάτμησης ϕ παρουσιάζονται στην εικόνα 4.4. Σημειώνεται ότι η έρευνα, θεωρητική και πειραματική, στο θέμα αυτό συνεχίζεται με αμείωτο ενδιαφέρον. Αυτό συμβαίνει για να μπορέσουμε να συσχετίσουμε την γωνία διάτμησης μόνο με γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοπής (όχι όπως υπολογίζουμε δηλαδή την γωνία διάτμησης, αφενός με ακρίβεια αλλά στην τελική εξίσωση είχαμε και τον λόγο συμπίεσης) [20].



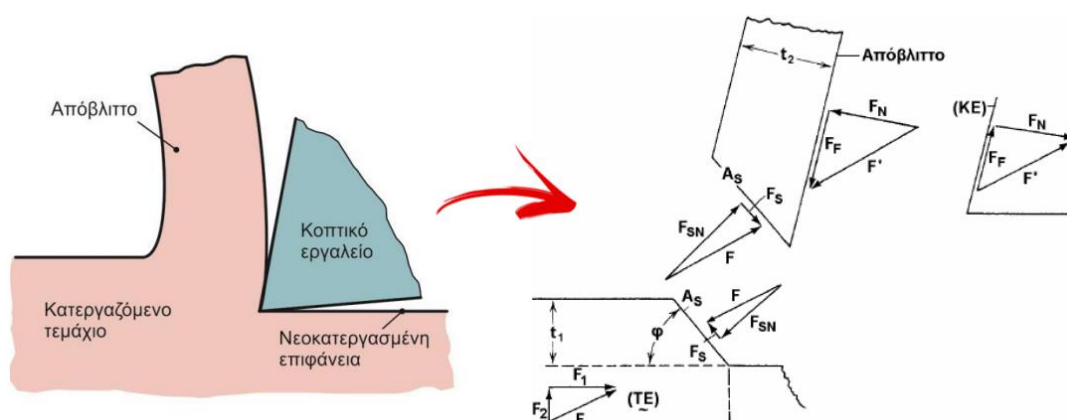
$$\phi = a \tan\left(\frac{\cos \gamma}{\lambda - \sin \gamma}\right)$$

Εικόνα 4.4 Γωνία Διάτμησης [20]

4.3 Ανάλυση δυνάμεων κατά την ορθογωνική κοπή

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στο τεμάχιο της κατεργασίας (κάτω αριστερά), στο κοπτικό εργαλείο (πάνω δεξιά) και στο απόβλητο (στη μέση). Θεωρούμε το απόβλητο ως ένα σώμα εντελώς στερεό και ελεύθερο που οριακά ευρίσκεται σε ισορροπία (όπως παρουσιάζεται σε αυτήν την διαφάνεια) και αλληλοεπιδρά ταυτόχρονα με το τεμάχιο (TE) και το κοπτικό εργαλείο (KE).

Οι δυνάμεις που ασκούνται σ' αυτό από το τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο είναι:



Εικόνα 4.5 Ανάλυση δυνάμεων κατά την ορθογωνική κοπή [20]

- F_S : αντίσταση του υλικού του τεμαχίου σε διάτμηση
- F_{SN} : κάθετη δύναμη στο επίπεδο διάτμησης (δηλ. κάθετη στην F_S).
- F_F : δύναμη τριβής στη διεπιφάνεια κοπτικού εργαλείου /αποβλίττου που αντιτίθεται στην κίνηση του αποβλίττου.
- F_N : κάθετη δύναμη στην επιφάνεια επαφής κοπτικού εργαλείου/αποβλίττου (δηλ. κάθετη στην F_F) [20].

Αν F είναι η συνισταμένη των F_S και F_{SN} και F' , η συνισταμένη των F_F και F_N , θα πρέπει να ισχύει για την ισορροπία του αποβλίττου: $F=F'$

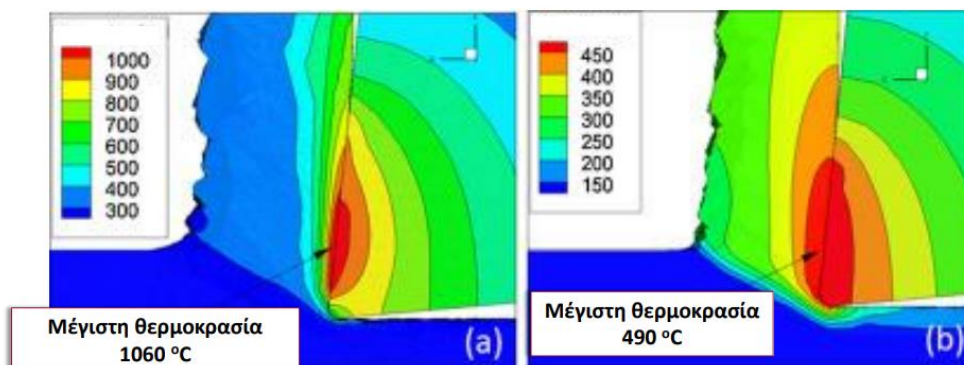
Η F' ονομάζεται δύναμη κοπής και, αν μεταφερθεί στην ακμή του κοπτικού εργαλείου, μπορεί να αναλυθεί στα εξής ζεύγη δυνάμεων:

- F_S και F_{SN}
- F_F και F_N
- F_1 (οριζόντια - κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής) και F_2 (κάθετη στην F_1 - δύναμη άπωσης) [20].

4.4 Ανάλυση θερμοκρασιακών πεδίων κατά της ορθογωνική κοπή

Η ζώνη διάτμησης και η ζώνη τριβής αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής ενέργειας που χρησιμοποιείται κατά την κοπή. Στο σημείο τριβής μεταξύ της επεξεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου εργασίας και της ελεύθερης επιφάνειας του εργαλείου κοπής, χρησιμοποιείται σημαντικά λιγότερη ενέργεια. Αυτοί οι τομείς που καταναλώνουν ενέργεια απελευθερώνουν θερμότητα. Η θερμότητα που παράγεται κατά την κοπή κυμαίνεται από 65 έως 80 τοις εκατό και παράγεται κυρίως στη ζώνη διάτμησης. Η υπόλοιπη θερμότητα παράγεται από το εργαλείο κοπής, τη ζώνη τριβής των απορριμμάτων και το σημείο όπου η ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου συναντά το τεμάχιο εργασίας. Το τεμάχιο εργασίας και το εργαλείο κοπής

αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής παραγόμενης θερμότητας, μαζί με τα απόβλητα [20].



Κατεργασία τόννευσης χάλυβα AISI 4140 με χρήση κοπτικού σκληρομετάλλου μη επικαλυμμένου

(a) $h = 0.2 \text{ mm}$, $vc = 250 \text{ m/min}$ / (b) $h = 0.1 \text{ mm}$, $vc = 75 \text{ m/min}$.

Εικόνα 4.6 Παραγωγή θερμότητας κατά την κοπή [20]

Η κατανομή θερμοκρασίας για δύο σενάρια περιστροφής χάλυβα AISI 4140 με μη επικαλυμμένο κόπτη καρβιδίου P-καρβιδίου εμφανίζεται στο Σχήμα 4.6. Οι συνθήκες κοπής στην πρώτη περίπτωση (a) είναι $h = 0,2 \text{ mm}$, $vc = 250 \text{ m/min}$, και στη δεύτερη (b), $h = 0,1 \text{ mm}$, $vc = 75 \text{ m/min}$. Οι ισοθερμικές καμπύλες του εργαλείου κοπής, των απορριμμάτων και του τεμαχίου εργασίας, καθώς και οι ρυθμοί κατανομής θερμότητας, είναι ορατές σε αυτές τις δύο εικόνες. Το σχήμα δείχνει ότι οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εργαλείο κοπής είναι υψηλότερες από αυτές που αναπτύσσονται στο απόβλητο ή στο τεμάχιο και ότι η μέγιστη θερμοκρασία του εργαλείου εμφανίζεται μακριά από την άκρη του εργαλείου. Ως αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος δημιουργείται ένας λάκκος ή κρατήρας στην επιφάνεια απορριμμάτων του κοπτικού εργαλείου, ο οποίος συνδέεται με τη ροή των απορριμμάτων σε αυτήν την επιφάνεια. Αυτό είναι γνωστό ως "φθορά κρατήρα" και είναι ένας κοινός λόγος για τη φθορά του εργαλείου κοπής (όπως θα δούμε παρακάτω). Επιπλέον, επειδή το σημείο διαρροής του υλικού μειώνεται, οι υψηλές θερμοκρασίες στην περιοχή κοπής βελτιώνουν τη μηχανική ικανότητα του τεμαχίου. Εάν το υπό επεξεργασία μέταλλο έχει υψηλότερη ειδική αντίσταση κοπής ή μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής, θα προκύψουν υψηλότερες θερμοκρασίες κοπής [20].

5. Το τιτάνιο ως υλικό κατεργασίας

Το τιτάνιο, ένα μέταλλο με μοναδική πυκνότητα, αντοχή στη διάβρωση και υψηλή μηχανική αντοχή και βάρος, ανακαλύφθηκε το 1790 αλλά δεν υποβλήθηκε σε επεξεργασία μέχρι τις αρχές του 1900. Ωστόσο, η ευρεία χρήση του ξεκίνησε μόλις το 1950 περίπου. Σήμερα, το τιτάνιο χρησιμοποιείται ευρέως στον αεροδιαστημικό σχεδιασμό, ιδιαίτερα στον στρατό και σε αεροσκάφη όπως το SR71 και οι κινητήρες αεριωθουμένων. Βρίσκεται επίσης σε άλλες εφαρμογές όπως μπαστούνια γκολφ και ποδήλατα. Οι βασικοί παράγοντες που οδήγησαν στην εκτεταμένη χρήση του είναι η χαμηλή του πυκνότητα σε σύγκριση με τον χάλυβα και άλλα

μέταλλα, η συγκρίσιμη αντοχή σε εφελκυσμό με ορισμένους τύπους χάλυβα, η αντοχή του στη διάβρωση και η ικανότητά του να χυτεύεται με τη μέθοδο χύτευσης ακριβείας. Το τιτάνιο μπορεί επίσης να υποστεί επεξεργασία μέσω της μεταλλουργίας σκόνης και μπορεί να συγκολληθεί με σύντηξη και να συγκολληθεί με διάχυση. Επιπλέον, διατίθεται σε διάφορους τύπους και σχήματα. Το κόστος του, αν και υψηλότερο από τους ανοξείδωτους χάλυβες, μπορεί να συγκριθεί με τα υπερκράματα [21].



Εικόνα 5.1 Τιτάνιο [22]

5.1 Κράματα Τιτανίου

Το τιτάνιο είναι ένα αλλοτροπικό υλικό, όπως ο σίδηρος. Ο μετασχηματισμός BCC→HCP, που οδηγεί στη μετασταθερή φάση του μαρτενσίτη με μαρτενσιτικό μετασχηματισμό, συμβαίνει στους 828°C και δεν μπορεί να κατασταλεί με ταχεία απόψηση, σε αντίθεση με τον σίδηρο στο καθαρό τιτάνιο. Στο τιτάνιο, μια σταθερή φάση α σχηματίζεται κατά την ταχεία απόψυξη. Ακόμα, ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός της β φάσης μπορεί να επιτευχθεί σε κράματα τιτανίου. Τέλος, η τυχαία απόψυξη έχει τη δυνατότητα να μετατρέψει τη φάση β σε μετασταθερή β , γ' αυτό και η φάση β βρίσκεται συχνά σε μικροδομές κράματος τιτανίου σε θερμοκρασία δωματίου. Οι φάσεις α και β ($\alpha+\beta$) συνυπάρχουν σε ένα εύρος θερμοκρασίας όπου η φάση β αλλάζει σε φάση α με την προσθήκη στοιχείων κράματος στο τιτάνιο. Τα περισσότερα κράματα τιτανίου έχουν τουλάχιστον δύο επιπλέον στοιχεία κράματος και δεν είναι δυαδικά. Τα κράματα τιτανίου εμπίπτουν σε τέσσερις γενικές κατηγορίες [21,23,24]:

- 1) Τιτάνιο εμπορικά καθαρό με περιεκτικότητα βάρους 99-99,5%.
- 2) Το τιτάνιο α και σχεδόν τα κράματα α δεν απαιτούν θερμικές επεξεργασίες σκλήρυνσης, μόνο απόψηση για τον έλεγχο μηχανικών ιδιοτήτων όπως αντοχή στην κόπωση και ερπυσμός.
- 3) Τα κράματα $\alpha+\beta$ τιτανίου, όπως το Ti-6Al-4V, περιέχουν κατάλληλες ποσότητες και αναλογίες σταθεροποιητών α και β , με αποτέλεσμα μια σύνθεση 10-50% β φάσης σε θερμοκρασία δωματίου. Χρησιμοποιούνται διαφορετικές τεχνικές απόψησης για τον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων και την επίτευξη επιθυμητών μικροδομών. Οι επεξεργασίες θερμικής σκλήρυνσης μπορούν επίσης να παράγουν πολύ μικρά ιζήματα α ή β φάσης.

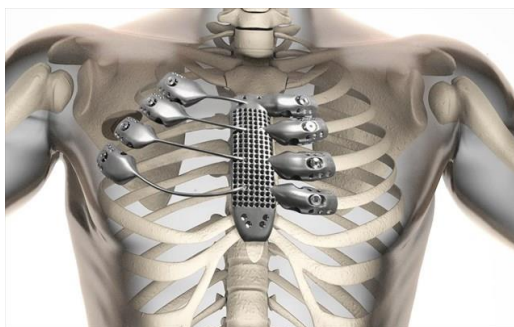
4) Τα κράματα τιτανίου β (μετασταθή) και σχεδόν τα κράματα β έχουν μικροδομή με υπεροχή της β φάσης που παραμένει σε μετασταθερή κατάσταση μετά την ψύξη. Η αναλογία των σταθεροποιητών α και β σε αυτά τα κράματα έχει ως αποτέλεσμα λιγότερο από 2-3% α φάση, και σε σχεδόν β κράματα, το ποσοστό είναι ακόμη χαμηλότερο. Τα κράματα $\alpha+\beta$ έχουν σταθεροποιητές α και β σε αναλογίες που σχηματίζουν ένα μείγμα φάσεων α και β σε θερμοκρασία δωματίου. Το ποσοστό βάρους της β φάσης κυμαίνεται από 10-50%, με μέσο όρο 20%. Οι θερμικές επεξεργασίες υπό συγκεκριμένες συνθήκες ελέγχουν την κατανομή και τη μορφολογία των δύο φάσεων, οι οποίες με τη σειρά τους ελέγχουν τις ιδιότητες του υλικού. Τα κράματα με δομή $\alpha+\beta$ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Κράματα που παρουσιάζουν μέτρια εργασιμότητα για σκλήρυνση, επιτρέποντας τη θερμική εργασία σε λεπτές τομές και εύκολη συγκόλληση, όπως το Ti-6Al-4V.
- Κράματα που παρουσιάζουν υψηλή εργασιμότητα για σκλήρυνση, επιτρέποντας θερμική εργασία σε μεγάλες διατομές αλλά είναι δύσκολο να συγκολληθούν, όπως το Ti-6Al-6V-2Sn [21,23,24].

5.2 Εφαρμογές Κραμάτων Τιτανίου

Σε αυτήν την παράγραφο θα αναφερθούν κάποιες από τις πιο αντιπροσωπευτικές εφαρμογές των κραμάτων τιτανίου. Τα κράματα $\alpha+\beta$ χρησιμοποιούνται στην :

- Αεροδιαστημική: Τουρμπίνες αερίων και σε σκελετούς αεροσκαφών.
- Βιομηχανία: Εναλλάκτης θερμότητας, ελατήρια, θαλάσσιες εφαρμογές και σε αυτοκινητοβιομηχανία.
- Αρχιτεκτονική
- Ιατρική
- Καταναλωτικές εφαρμογές
- Κραματικό στοιχείο στους χάλυβες και χυτοσιδήρους



Εικόνα 5.2 Χειρουργικά εμφυτεύματα Τιτανίου [25]

Τα κράματα τιτανίου, συγκεκριμένα οι τύποι α και β , χρησιμοποιούνται συνήθως σε κινητήρες αεροστροβίλων στρατιωτικών αεροσκαφών. Χρησιμοποιούνται επίσης σε εξοπλισμό χημικών διεργασιών και υλικά χειρουργικών εμφυτευμάτων. Η χρήση κραμάτων τιτανίου στα ιατρικά

εμφυτεύματα αυξάνεται λόγω της συμβατότητάς τους με τα σωματικά υγρά, της παρόμοιας ελαστικότητας με το οστό και της ικανότητας δημιουργίας πολύπλοκων σχημάτων μέσω επενδυτικής χύτευσης [21,23,24].

5.3 Το κράμα Ti-6Al-4V

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι κυριότερες φυσικές μηχανικές μηχανουργικές ιδιότητες του Ti6Al4V.

Φυσικές Ιδιότητες	
Πυκνότητα	4.43 g/cc

Πίνακας 5.1 Φυσικές Ιδιότητες Ti6Al4V [21]

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	
Σκληρότητα, Brinell 334	334
Σκληρότητα, Knoop 363	363
Σκληρότητα, Rockwell C 36	36
Σκληρότητα, Vickers 349	349
Αντοχή σε εφελκυσμό 950	950
Όριο διαρροής	910 MPa
Μέτρο ελαστικότητας	114 GPa

Πίνακας 5.2 Μηχανικά Χαρακτηριστικά Ti6Al4V [21]

Ηλεκτρικές Ιδιότητες	
Ηλεκτρική αντίσταση	0.000178 ohm-cm
Μαγνητική διαπερατότητα	1.00005 at 1.6kA/m

Πίνακας 5.3 Ηλεκτρικές Ιδιότητες Ti6Al4V [21]

Θερμικές Ιδιότητες	
Θερμική αγωγιμότητα	6.7 W/m-K

Σημείο τήξης	1604 - 1660 °C
Solidus	1604 °C
Liquidus	1660 °C
Beta Transus	980 °C

Πίνακας 5.4 Θερμικές Ιδιότητες Ti6Al4V [21]

Χημική Σύνθεση	V	Al	Sn	Zr	Mo	C	Si
Weight (%)	4.22	5.48	0.0625	0.0028	1.005	0.369	0.0222

Πίνακας 5.5.1 Χημικές Ιδιότητες Ti6Al4V [21]

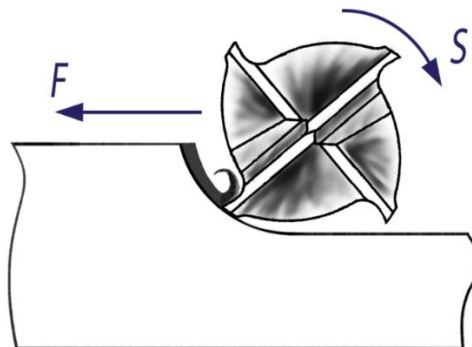
Χημική Σύνθεση	Cr	Ni	Fe	Cu	Nb	Ti
Weight (%)	0.0099	<0.001	0.112	<0.02	0.0386	90

Πίνακας 5.5.2 Χημικές Ιδιότητες Ti6Al4V [21]

6. Ομόρροπο - Αντίρροπο φραιζάρισμα

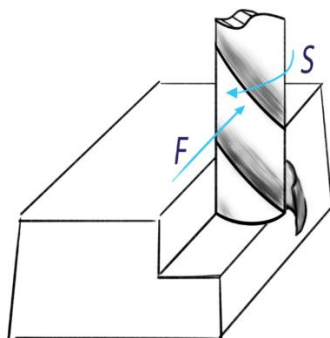
6.1 Αντίρροπο φρεζάρισμα

Το αντίρροπο φραιζάρισμα συμβαίνει όταν η ταχύτητα κοπής πηγαίνει στην αντίθετη κατεύθυνση από την κίνηση του τεμαχίου προς το εργαλείο. Αυτό αναγκάζει το εργαλείο κοπής να εμπλέξει το υλικό στο μέγιστο πλάτος κοπής και να περιστραφεί προς την ακατέργαστη πλευρά του τεμαχίου. Ως αποτέλεσμα, το απόβλιττο ξεκινά χωρίς αρχικό πάχος και καταλήγει με πάχος ίσο με την τροφοδοσία ανά δόντι, το οποίο καθορίζεται από τον πραγματικό ρυθμό τροφοδοσίας και την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου [26,27].



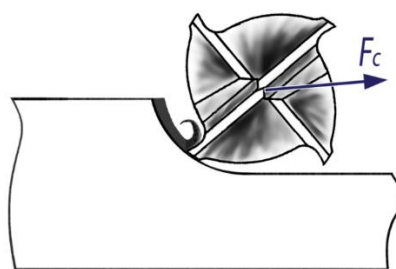
Εικόνα 6.1 Αντίρροπο Φραιζάρισμα Κινηματική Ι [26]

Επιπλέον, η αρχική επαφή μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του υλικού προκαλεί τριβή και σχηματισμό απορριμμάτων μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος για κοπή. Κατά τη διάρκεια αυτού του αρχικού σταδίου, όπου το εργαλείο κοπής τρίβεται πάνω στο κομμάτι χωρίς να κάνει καμία κοπή, το τεμάχιο μπορεί να παραμορφωθεί, οδηγώντας ενδεχομένως σε σκλήρυνση της επιφάνειας ανάλογα με το υλικό.



Εικόνα 6.2 Αντίρροπο Φραιζάρισμα Κινηματική II [26]

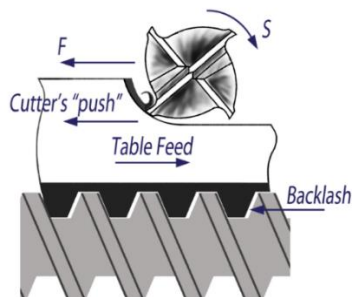
Επίσης, η ελαστική ανάκτηση της επιφάνειας που δεν παραμορφώθηκε πλαστικά κατά το στάδιο της τριβής μπορεί να οδηγήσει σε κοπή που δεν πληροί τις καθορισμένες ανοχές διαστάσεων για το τεμάχιο εργασίας. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας τη στρατηγική του αντίρροπου φραιζαρίσματος, το εργαλείο κοπής δέχεται δυνάμεις παράλληλες με την ταχύτητα τροφοδοσίας, με αποτέλεσμα την παραγωγή κατακόρυφα προσανατολισμένων επιφανειών αφού η παραμόρφωση προκάλεσε ευθυγράμμιση με την κίνηση του κοπτικού εργαλείου. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις μπορεί να προκαλέσουν την έλξη του τεμαχίου προς το εργαλείο, απαιτώντας επανεκτίμηση του τρόπου συγκράτησης του, ιδιαίτερα κατά τη διεξαγωγή επιφανειακού φραιζαρίσματος σε οριζόντιους ατράκτους [26,27].



Εικόνα 6.3 Επίδραση της δύναμης F_c κατά το αντίρροπο φραιζάρισμα [26]

Μια πτυχή της μηχανικής κατεργασίας με αντίρροπο φραιζάρισμα είναι ότι τα απόβλητα από το τεμάχιο εργασίας ωθούνται προς την κατεύθυνση της τροφοδοσίας του εργαλείου κοπής. Αυτό μπορεί μερικές φορές να έχει ως αποτέλεσμα να κολλήσει στην περιοχή κατεργασίας, επηρεάζοντας την ποιότητα της επιφάνειας. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του αντίρροπου φραιζαρίσματος είναι η ιδιότητά του να μην επηρεάζεται από το backlash της εργαλειομηχανής. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το παράλληλο φραιζάρισμα αναφέρεται ως συμβατικό

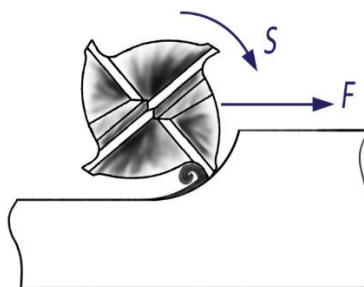
φρεζάρισμα στα αγγλικά, καθώς είναι συνήθως η προτιμώμενη επιλογή όταν χρησιμοποιείτε συμβατικές εργαλειομηχανές ή εργαλειομηχανές με αισθητή αντίδραση. Ο λόγος που η αντίστροφη αντίδραση δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα της κατεργασίας είναι επειδή οι δυνάμεις κοπής ενισχύουν τη σύζευξη μεταξύ της βίδας τροφοδοσίας και του παξιμαδιού της [26,27].



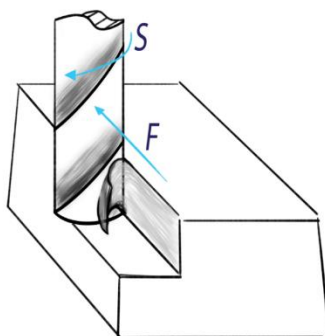
Εικόνα 6.4 Ο ρόλος του backlash στο αντίρροπο φραιζάρισμα [26]

6.2 Ομόρροπο φραιζάρισμα

Ομόρροπο φραιζάρισμα έχουμε όταν το διάνυσμα ταχύτητας κοπής ευθυγραμμίζεται με τη σχετική κίνηση του τεμαχίου εργασίας και του εργαλείου. Σε αυτήν την περίπτωση, το εργαλείο κοπής πλησιάζει το υλικό από την ακατέργαστη πλευρά και περιστρέφεται προς το μέγιστο πλάτος κοπής. Ως αποτέλεσμα, το αρχικό πάχος του αποβλίττου γίνεται ίσο με την τροφοδοσία ανά δόντι που καθορίζεται από τον πραγματικό ρυθμό τροφοδοσίας και την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου. Τελικά, όταν η κοπτική άκρη φτάσει στο μέγιστο πλάτος κοπής, το αρχικό πάχος του αποβλίττου γίνεται μηδέν [26,27].

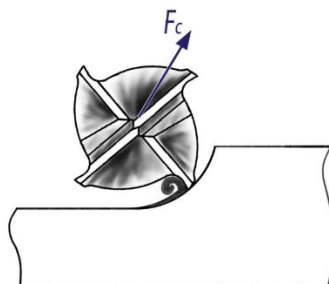


Εικόνα 6.5 Ομόρροπο Φραιζάρισμα Κινηματική I [26]



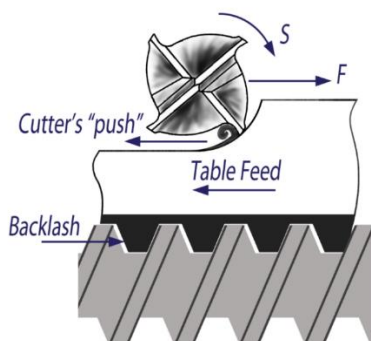
Εικόνα 6.6 Ομόρροπο Φραιζάρισμα Κινηματική II [26]

Σε αυτό το σενάριο, οι δυνάμεις κοπής ενεργούν κάθετα στην κατεργασμένη επιφάνεια, προκαλώντας την εκτροπή των εργαλείων από την επιφάνεια. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε τεμάχια που δεν πληρούν τις γεωμετρικές προδιαγραφές. Κατά το ομόρροπο φραιζάρισμα, οι δυνάμεις κοπής μπορούν να ωθήσουν τα τεμάχια προς το τραπέζι, διευκολύνοντας το κράτημα. Η στρατηγική ομόρροπου φραιζαρίσματος απομακρύνει τα απόβλητα από την περιοχή κοπής, μειώνοντας τον κίνδυνο μπλοκαρίσματος [26,27].



Εικόνα 6.7 Επίδραση της δύναμης F_c κατά το ομόρροπο φραιζάρισμα [26]

Σε αυτό το σημείο καλό θα ήταν να ειπωθεί ότι το ομόρροπο φραιζάρισμα δεν προτείνεται όταν η κατεργασία ενδέχεται να λάβει χώρα σε φραιζομηχανές με αξιόλογο backlash καθώς η σύζευξη του μεταφορικού κοχλία με το περικόχλιο επηρεάζεται από τις δυνάμεις κοπής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία κραδασμών στην κοπή οι οποίοι θα έχουν αρνητική επίδραση στη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου [26,27].



Εικόνα 6.8 Ο ρόλος του backlash στο ομόρροπο φραιζάρισμα [26]

6.3 Αντίρροπο ή Ομόρροπο Φραιζάρισμα;

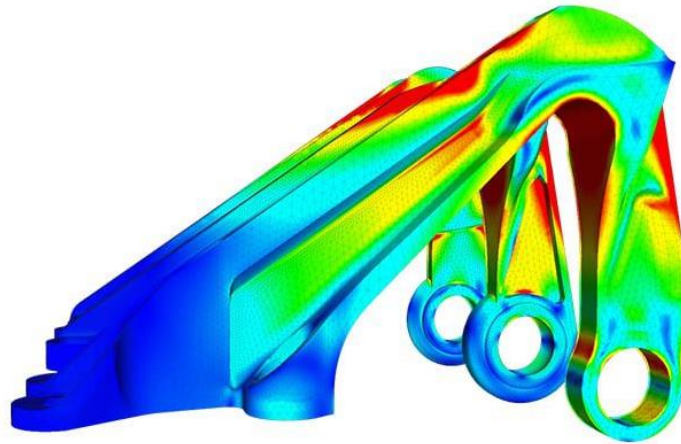
Είναι αδύνατο να απαντήσουμε σε αυτή την ερώτηση με μία μόνο λέξη γιατί πρέπει να συγκρίνουμε και να αντιπαραβάλλουμε τις δύο στρατηγικές και να εξετάσουμε πότε η μία είναι καλύτερη από την άλλη. Κατά το ομόρροπο φραιζάρισμα, τα εργαλεία ξεκινούν αμέσως την κατεργασία εμπλέκοντας την επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας, ενώ στο αντίρροπο φραιζάρισμα, τα εργαλεία τριβονται πάνω στο υλικό πριν φτάσουν στο απαραίτητο αρχικό πάχος αποθέματος για να ξεκινήσει η μηχανική κατεργασία. Αυτή η διαφορά έχει ως αποτέλεσμα ομαλό φραιζάρισμα και πιο αργή φθορά του εργαλείου στο ισορροπημένο φραιζάρισμα. Επίσης δεν υπάρχει σκλήρυνση εργασίας στην επιφάνεια του τεμαχίου και η

ακρίβεια διαστάσεων των παραγόμενων τεμαχίων είναι ανώτερη. Στο ομόρροπο φραιζάρισμα, η θερμότητα που παράγεται κατά τη δημιουργία απορριμμάτων μεταφέρεται από τα απόβλητα, ενώ στην αντίθετη άλεση, η θερμότητα μεταφέρεται σε μεγάλο βαθμό στο τεμάχιο εργασίας. Αυτό, σε συνδυασμό με την αρχική τριβή του εργαλείου στο τεμάχιο εργασίας, μπορεί να συμβάλει στην απόκλιση των ανοχών διαστάσεων. Αυτές οι διαφορές υποδηλώνουν ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι σημαντικά χαμηλότερες στην ισορροπημένη άλεση. Τέλος, η επιφάνεια που παράγεται στο ομόρροπο φρεζάρισμα είναι ανώτερη γιατί δεν υπάρχει κίνδυνος επανακατεργασίας των απορριμμάτων αφού απομακρύνονται με την κινηματική επεξεργασία τους [26,27].

Παρόλα αυτά υπάρχουν μερικές περιπτώσεις όπου το αντίρροπο φραιζάρισμα υπερτερεί του ομόρροπου. Επομένως, όταν εργαζόμαστε με επιφανειακά σκληρυσμένα τεμάχια, συνιστάται η χρήση της προσέγγισης αντίθετης φρεζαρίσματος. Αυτή η μέθοδος διασφαλίζει ότι το εργαλείο κοπής δεν έρχεται απευθείας σε επαφή με το σκληρυσμένο μέρος του υλικού, αλλά αντίθετα αρχίζει να κόβει από το εσωτερικό προς την επιφάνεια. Επιπλέον, όταν απαιτούνται υψηλότερες γεωμετρικές προδιαγραφές, θα πρέπει να χρησιμοποιείται αντίρροπο φραιζάρισμα τουλάχιστον για τη διαδικασία φινιρίσματος. Αυτό συμβαίνει επειδή οι δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη μηχανική κατεργασία (F_c) τείνουν να είναι σχεδόν παράλληλες με την επιφάνεια κατεργασίας, περιορίζοντας έτσι την επίδραση της παραμόρφωσης του εργαλείου στις γεωμετρικές αποκλίσεις. Επιπλέον, το αντίρροπο φραιζάρισμα μπορεί να παράγει καλύτερα αποτελέσματα σε κομμάτια με λεπτά τοιχώματα, καθώς οι δυνάμεις κοπής είναι λιγότερο πιθανό να παραμορφώσουν τα τοιχώματά τους. Τέλος, το αντίρροπο φρεζάρισμα είναι σχεδόν πάντα μονόδρομος στις περιπτώσεις όπου η κατεργασία πραγματοποιείται σε εργαλειομηχανές με αξιωσημείωτο backlash.

Συνοψίζοντας, το ομόρροπο φραιζάρισμα είναι συνήθως η προτιμώμενη προσέγγιση λόγω της αποτελεσματικότητάς της στις περισσότερες περιπτώσεις. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε τα οφέλη του αντίρροπου φραιζαρίσματος και να το χρησιμοποιήσουμε σε καταστάσεις όπου μπορεί να αποφέρει ανώτερα αποτελέσματα. Γενικά, η υιοθέτηση μιας τεχνικής παράλληλου φραιζαρίσματος για εκχόνδιση και φινίρισμα, ακολουθούμενη από μια στρατηγική αντίρροπου φραιζαρίσματος για περαιτέρω βελτίωση, μπορεί να οδηγήσει σε εξαιρετική διαστατική και γεωμετρική ακρίβεια. Προσοχή όμως γιατί η στρατηγική αυτή μπορεί να δώσει τεμάχια εκτός προδιαγραφών εάν το backlash της εργαλειομηχανής δεν είναι αντισταθμισμένο [26,27].

7. Η χρήση πεπερασμένων στοιχείων στους υπολογισμούς δυνάμεων - τάσεων και θερμοκρασιών στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού (FEM γενικά, plane strain model)



Εικόνα 7.1 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων του βραχίονα ρουλεμάν ενός αεροσκάφους [28]

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιείται για την επίλυση γραμμικών και μη γραμμικών φυσικών προβλημάτων. Χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορους επιστημονικούς τομείς όπως η μετάδοση θερμότητας, η δομική αντοχή και τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Στην κατεργασία αφαίρεσης υλικού, είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη αριθμητική μέθοδος. Η μέθοδος περιλαμβάνει τη διαίρεση ενός υλικού σε μικρότερα πεπερασμένα στοιχεία για να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί, μια διαδικασία που ονομάζεται διακριτοποίηση [29,30]. Ο όρος "μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων" εισήχθη το 1960 από τον Ray William Clough, αλλά υπάρχουν αναφορές σε αρχαίους μαθηματικούς που προσέγγισαν την περιφέρεια ενός κύκλου χρησιμοποιώντας ένα πολύγωνο που σχηματίζεται μέσα σε αυτόν. Το 1855, ο Schellback διακριτοποίησε την επιφάνεια του κύκλου διαιρώντας τον σε μικρότερα τρίγωνα για να υπολογίσει τη διακριτοποιημένη περιοχή [29, 31].

Η τρέχουσα μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων λύνει μια διαφορική εξίσωση αντικαθιστώντας την με ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων. Το 1943, ο Courant εισήγαγε μια μέθοδο για τον προσδιορισμό της στρεπτικής ακαμψίας ενός κοίλου άξονα με διαίρεση της διατομής σε τρίγωνα και χρησιμοποιώντας τη γραμμική μεταβολή της τάσης μέσα σε κάθε τρίγωνο. Αυτό θεωρείται το σημείο εκκίνησης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Οι μηχανικοί αεροναυπηγών εργάζονται σε κατά προσέγγιση μεθόδους για την πρόβλεψη των τάσεων στα φτερά των αεροσκαφών από τα μέσα της δεκαετίας του 1950. Το 1955-56, ο Ιωάννης Αργύρης έδωσε τη δική του άποψη για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και ο Turner υπολόγισε την ακαμψία των πτερυγίων του αεροσκάφους χωρίζοντάς τα σε τριγωνικά στοιχεία [29,32]. Η υιοθέτηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων βασίστηκε αρχικά σε διαίσθηση και φυσικά επιχειρήματα, αλλά στις αρχές της δεκαετίας του 1960, αναγνωρίστηκε ως μέθοδος

μαθηματικά κατά προσέγγιση. Ο Turner εισήγαγε μια τεχνική για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων με μεγάλες μετατοπίσεις το 1961. Ο Archer μελέτησε δυναμικά προβλήματα το 1963 και ο Zienkiewicz διεξήγαγε έρευνα για προβλήματα ανάλυσης τάσεων το 1966. Η μέθοδος Galerkin και η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων αποδείχθηκαν για τον προσδιορισμό των εξισώσεων πεπερασμένων στοιχείων. Το 1971 εισήχθη η μέθοδος εκτίμησης σφαλμάτων από τον Babuska για τον προσδιορισμό της αριθμητικής λύσης με την κατάλληλη προσαρμογή του πλέγματος. Η εισαγωγή της μεθόδου οριακών στοιχείων (BEM) ήταν ένας σημαντικός παράγοντας στην εξέλιξη των πεπερασμένων στοιχείων [29,33].

Η εμφάνιση των ψηφιακών υπολογιστών κατέστησε δυνατή την εκτέλεση των πολύπλοκων υπολογισμών που απαιτούνται για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) γρήγορα και αποτελεσματικά. Καθώς αναπτύχθηκαν υπολογιστές υψηλής ταχύτητας, η χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε διάφορες εφαρμογές αυξήθηκε ραγδαία. Πολλά προγράμματα υπολογιστών έχουν δημιουργηθεί για την επίλυση γραμμικών και μη γραμμικών προβλημάτων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, καθιστώντας ευκολότερη την κατανόηση και την οπτικοποίηση σύνθετων προβλημάτων. Αυτά τα προγράμματα αποτελούν μέρος της οικογένειας με τη βοήθεια υπολογιστή και καλύπτουν συγκεκριμένες ανάγκες σχεδιασμού, οπτικοποίησης και παραγωγής [29].

Οι επιστήμονες που μελετούν τις διαδικασίες αφαίρεσης υλικού στοχεύουν να βρουν τις πιο αποτελεσματικές συνθήκες κοπής και γεωμετρικές κοπτικών εργαλείων προκειμένου να μειώσουν τον χρόνο και το κόστος παραγωγής. Αυτές οι διαδικασίες είναι συνήθως χρονοβόρες και δαπανηρές, ανάλογα με τον τύπο του υλικού που υποβάλλεται σε επεξεργασία, γεγονός που τις καθιστά δύσκολη διαδικασία. Εδώ είναι που οι αριθμητικές μέθοδοι, και συγκεκριμένα η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM), παίζουν κρίσιμο ρόλο. Τα τελευταία είκοσι χρόνια, τα FEM χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για την ανάλυση κοπής μετάλλων. Με τη χρήση FEM, διάφοροι παράγοντες και χαρακτηριστικά της διαδικασίας κοπής μετάλλων, όπως δυνάμεις, τάσεις, θερμοκρασίες και το σχήμα του τελικού προϊόντος, μπορούν να προβλεφθούν χωρίς την ανάγκη πραγματικών εργαστηριακών πειραμάτων, αποκλειστικά με τη βοήθεια υπολογιστή [29].

Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τον καθορισμό της γεωμετρίας του μοντέλου. Το επόμενο βήμα είναι να υποδιαιρέσουμε τα στοιχεία σε μικρότερα προκειμένου να τα απλοποιήσουμε και να τα λύσουμε. Τα στοιχεία συνδέονται μέσω κόμβων, μέσω των οποίων μεταφέρονται δυνάμεις και θερμοκρασίες. Για τη διακριτοποίηση χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι στοιχείων με διάφορα σχήματα και κόμβους. Χρησιμοποιούνται μονοδιάστατα, δισδιάστατα και τρισδιάστατα στοιχεία ανάλογα με την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του μοντέλου. Τα στοιχεία κατηγοριοποιούνται σε τετραεδρικά, σφηνοειδή και εξαεδρικά για τρισδιάστατα μοντέλα. Η συλλογή των συνδεδεμένων στοιχείων σχηματίζει ένα πλέγμα. Το επόμενο βήμα αφορά τον τρόπο με τον οποίο δημιουργείται το πλέγμα. Ο κανόνας αναφέρει ότι το πλέγμα πρέπει να είναι πολύ πυκνό δηλαδή από πολλά στοιχεία. Ωστόσο ένα πιο πυκνό πλέγμα σημαίνει

ότι τα στοιχεία είναι περισσότερα με αποτέλεσμα η διαδικασία να είναι χρονοβόρα και η κατανάλωση υπολογιστικής ισχύς να αυξάνεται για την επίλυση του προβλήματος [29].

Η τεχνολογία του μηχανικού μπορεί να εξοικονομήσει χρόνο στην αντιμετώπιση συγκεκριμένων ζητημάτων, προσαρμόζοντας την πυκνότητα του πλέγματος σε σημεία με έντονες γεωμετρικές αλλαγές ή υψηλά επίπεδα τάσης. Για να προσεγγίσουμε ρεαλιστικά το πρόβλημα στις διαδικασίες αφαίρεσης υλικού, διάφορες μέθοδοι όπως Lagrangian (Λαγκανζιανή), Eulerian (Ευλεριανή) και Arbitrary Lagrangian-Eulerian (αυθαίρετη Λαγκανζιανή-Ευλεριανή) (ALE) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του μοντέλου. Στη μέθοδο Lagrange, το υλικό και τα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους, με αποτέλεσμα την παραμόρφωση τόσο του υλικού όσο και του πλέγματος λόγω του εργαλείου κοπής. Αυτή η παραμόρφωση προκαλεί το σχηματισμό απορριμμάτων, τα οποία μπορεί να είναι συνεχή ή τμηματικά. Το υλικό αφήνεται να ρέει μέχρι να επιτευχθεί μια σταθερή κατάσταση [29].

Προβλήματα παρουσιάζονται κατά την κοπή μετάλλου λόγω της έντονης πλαστικής παραμόρφωσής του, προκαλώντας παραμόρφωση των στοιχείων και καθιστώντας αναγκαία την αναμόρφωση του πλέγματος. Η χρήση του ενημερωμένου σκευάσματος Lagrangian ή της τεχνικής αυτόματης αναδιάταξης πλέγματος μπορεί να ξεπεράσει αυτά τα προβλήματα.

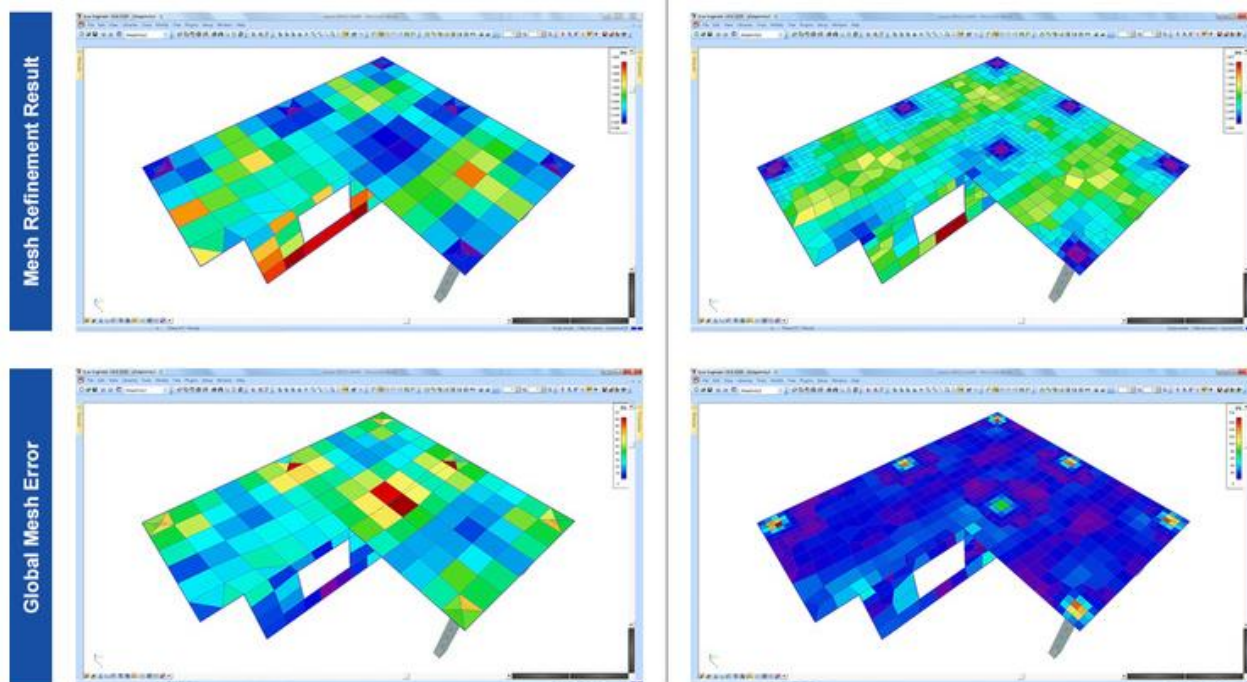
Αντίθετα, η μέθοδος Eulerian διατηρεί ένα σταθερό πλέγμα στο χώρο ενώ το υλικό ρέει μέσω του όγκου ελέγχου, αποτρέποντας την παραμόρφωση του στοιχείου. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί λιγότερα στοιχεία, μειώνοντας επομένως τον χρόνο υπολογισμού. Επιπλέον, η κοπή προσομοιώνεται από τη σταθερή κατάσταση, εξαλείφοντας την ανάγκη για κριτήρια διαχωρισμού. Ωστόσο, η μέθοδος Eulerian στερείται ακρίβειας καθώς απαιτεί προκαθορισμένα όρια σχήματος απορριμμάτων, σταθερό πάχος απορριμμάτων, μήκος επαφής και συνθήκες του τεμαχίου εργασίας. Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί, η μέθοδος Arbitrary Eulerian-Lagrangian (ALE) συνδυάζει τα καλύτερα στοιχεία των μεθόδων Eulerian και Lagrangian. Σε αυτή τη μέθοδο, το πλέγμα δεν στερεώνεται στο υλικό και μπορεί να κινηθεί ανεξάρτητα για να διατηρήσει την ποιότητα του πλέγματος κατά τη διάρκεια μεγάλων παραμορφώσεων και αφαίρεσης υλικού [29].

Ωστόσο, η μέθοδος ALE έχει περιορισμένη ικανότητα διατήρησης υψηλής ποιότητας πλέγματος σε υπερβολικά μεγάλες παραμορφώσεις λόγω της αδυναμίας τροποποίησης της τοπολογίας του πλέγματος. Η μέθοδος ALE χρησιμοποιείται στην προσομοίωση κοπής μετάλλων για τη μοντελοποίηση της περιοχής γύρω από το άκρο κοπής χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Eulerian. Αυτή η προσέγγιση αποφεύγει τη σοβαρή παραμόρφωση των στοιχείων και δεν απαιτεί επανατοποθέτηση, ενώ επιτρέπει την απεριόριστη ροή υλικού χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Lagrangian. Το σχήμα της απόρριψης καθορίζεται από την πλαστική παραμόρφωση του υλικού [29].

Η δημιουργία ενός πιο λεπτομερούς πλέγματος βελτιώνει την ακρίβεια των δυνάμεων και των παραμορφώσεων. Ωστόσο, αυτό αυξάνει την υπολογιστική διαδικασία. Έτσι, συνήθως

δημιουργείται ένα πιο ομοιόμορφο και πυκνό πλέγμα σε περιοχές έντονων παραμορφώσεων που προκαλούνται από ασκούμενες δυνάμεις, όπως η ζώνη διάτμησης και τα σημεία επαφής μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου εργασίας. Το πλέγμα που προκύπτει παρέχει μια καλύτερη αναπαράσταση του εκτρεπόμενου μοντέλου και μια ρεαλιστική απεικόνιση, η οποία σχετίζεται στενά με τις αναμενόμενες τάσεις, τους ρυθμούς παραμόρφωσης και τις θερμοκρασίες σε αυτά τα σημεία. Εφαρμόζονται οριακές συνθήκες για να επιτρέπεται στο εργαλείο να κινηθεί προς το μη κινούμενο τεμάχιο εργασίας ή αντίστροφα [29].

Το επίκεντρο αυτής της διατριβής είναι το μοντέλο ορθογώνιας κοπής στην κατεργασία αφαίρεσης υλικού. Τα πακέτα πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων 2D επιπέδου παραμόρφωσης στη γεωμετρία μηχανικής κατεργασίας. Η διαδικασία κατεργασίας περιλαμβάνει ένα αιχμηρό, σφηνοειδές εργαλείο που αφαιρεί το υλικό κάθετα στην κοπτική του άκρη. Η προσομοίωση προϋποθέτει την ίδια συμπεριφορά σε όλο το πλάτος και το ύψος του αντικειμένου, με ασκούμενες δυνάμεις και τάσεις να μεταφέρονται στο επίπεδο τάσης. Η παραμόρφωση συμβαίνει μέσα σε μια στενή ζώνη παραμόρφωσης γνωστή ως "επίπεδο διάτμησης". Στόχος της τεχνικής της δισδιάστατης μηχανικής κατεργασίας σε μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων είναι η μελέτη φαινομένων με πολύ μεγάλες παραμορφώσεις. Οι βασικές παράμετροι κατεργασίας περιλαμβάνουν τη γωνία κλίσης εργαλείου, την ταχύτητα κοπής και την τριβή διεπαφής εργαλείου-τεμαχίου εργασίας, ενώ η τάση, ο ρυθμός παραμόρφωσης και η θερμοκρασία είναι σημαντικές παράμετροι του πεδίου εξόδου [29].



Εικόνα 7.2 Παράδειγμα πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων [34]

8. Ανάπτυξη μοντέλου για τον υπολογισμό των δυνάμεων και θερμοκρασιών κατά την κατεργασία με ομόρροπο και αντίρροπο φραιζάρισμα (DEFORM 3D) [τεμάχιο]

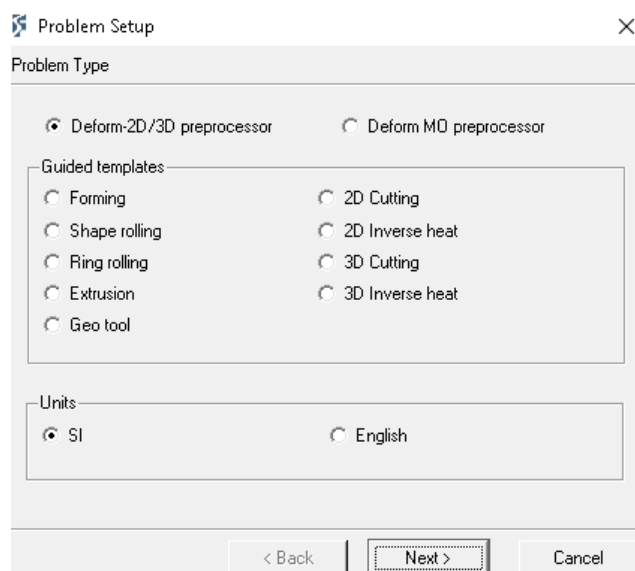
8.1 Εισαγωγή στο deform

Το Deform είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο το οποίο θα μας βοηθήσει στην ερευνά μας για να αποφασίσουμε ποιος τύπος φραιζαρίσματος είναι καλύτερος. Το Deform είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων το οποίο μπορεί να λειτουργήσει είτε σε 2D είτε σε 3D. Στην προκειμένη περίπτωση εμείς θα εργαστούμε σε 3D.



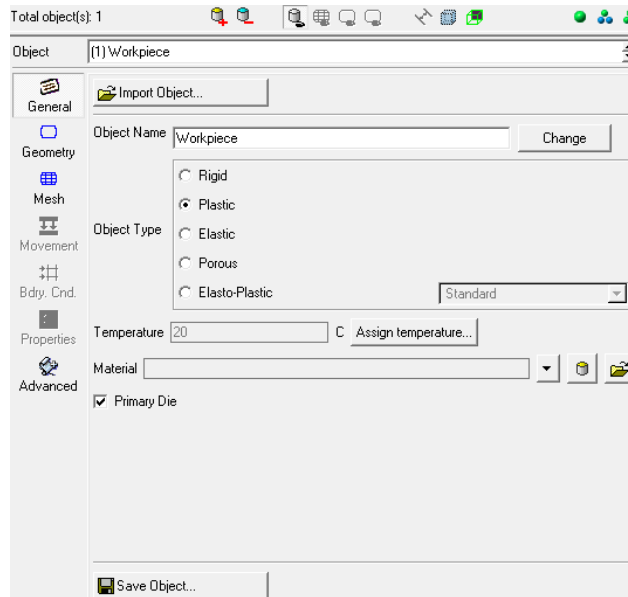
Εικόνα 8.1 Deform logo

Το Deform μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε είδους μηχανουργική κατεργασία, καθώς εμείς είμαστε αυτοί που δίνουν κίνηση στο τεμάχιο ή το κοπτικό εργαλείο. Ξεκινώντας την προσομοίωσή μας επιλέγουμε το 2D/3D preprocessor και μονάδες SI:



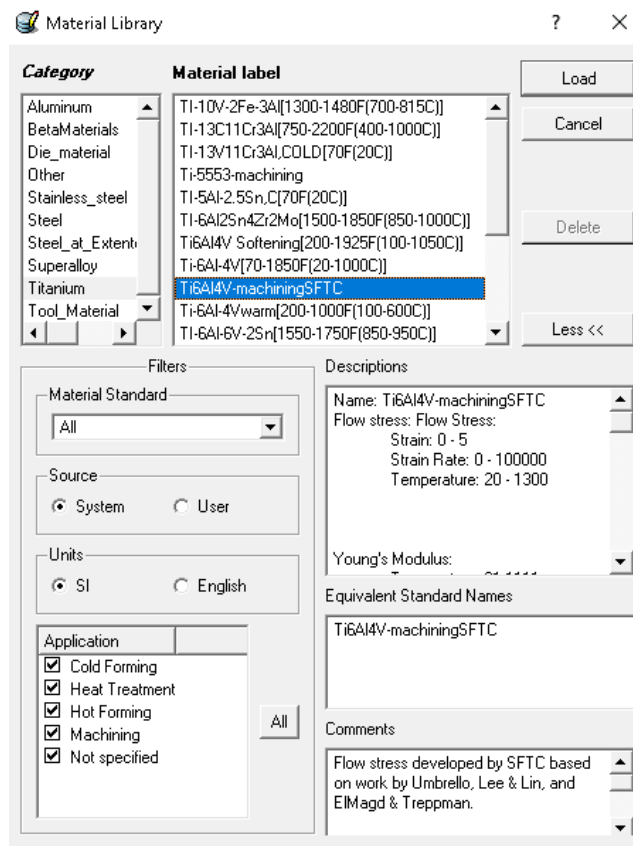
Εικόνα 8.2 Δημιουργία προβλήματος

Επιλέγουμε για το τεμάχιο μας να είναι πλαστικό και ορίζουμε από το Geometry Primitive τις διαστάσεις του (Εικόνες 8.3 και 8.5) ενώ παράλληλα ορίζουμε το υλικό κατεργασίας μας (Εικόνα 8.4).

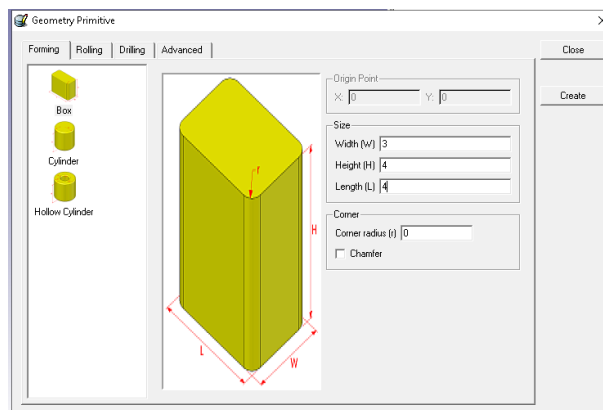


Εικόνα 8.3 Τεμάχιο πλαστικό

Για την επιλογή του υλικού τεμαχίου μπορούμε να επιλέξουμε μέσα από μία μεγάλη ποικιλία από την Material Library. Όπως μπορούμε να δούμε και στην εικόνα 8.4 έχουμε πολλές επιλογές τόσο για το τιτάνιο όσο και συγκεκριμένα για το Ti-4Al-4, το οποίο θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε. Συγκεκριμένα επιλέγουμε αυτό με την ένδειξη “machining”

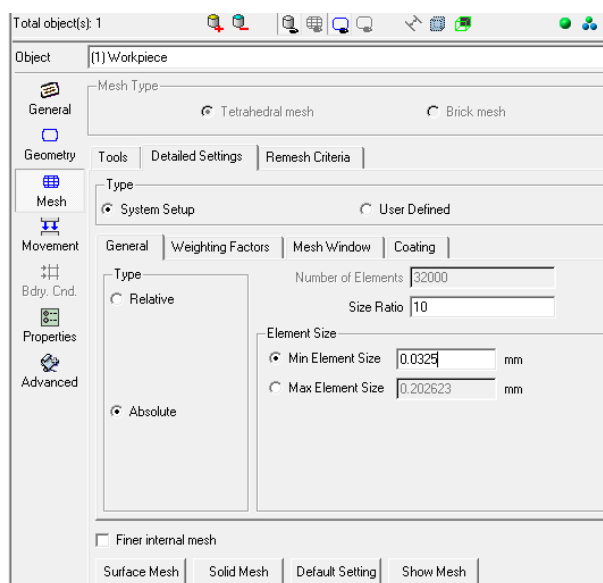


Εικόνα 8.4 Επιλογή υλικού τεμαχίου



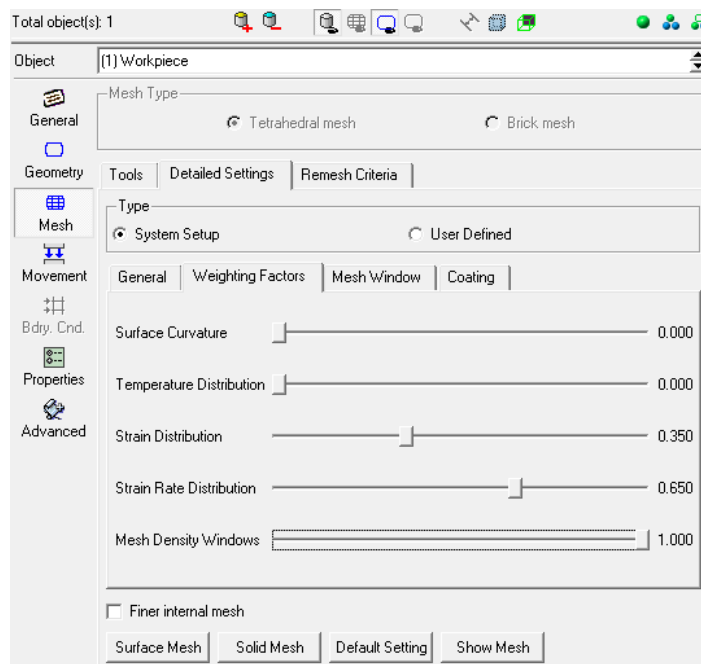
Εικόνα 8.5 Geometry Primitive

Στη συνέχεια πρέπει να ορίσουμε το mesh, δηλαδή την πυκνότητα του πλέγματος του τεμαχίου μας, αλλά και σε ποια σημεία θα δώσουμε έμφαση κατά την κοπή μας. Έτσι αρχικά ορίζουμε ένα γενικότερο mesh στο οποίο η σχέση μεταξύ της μικρότερης γεωμετρίας και της μεγαλύτερης γεωμετρίας στο πλέγμα είναι 10 (size ratio: 10) και ορίζουμε το μικρότερο στοιχείο ίσο με 0.0325mm (Εικόνα 8.6).



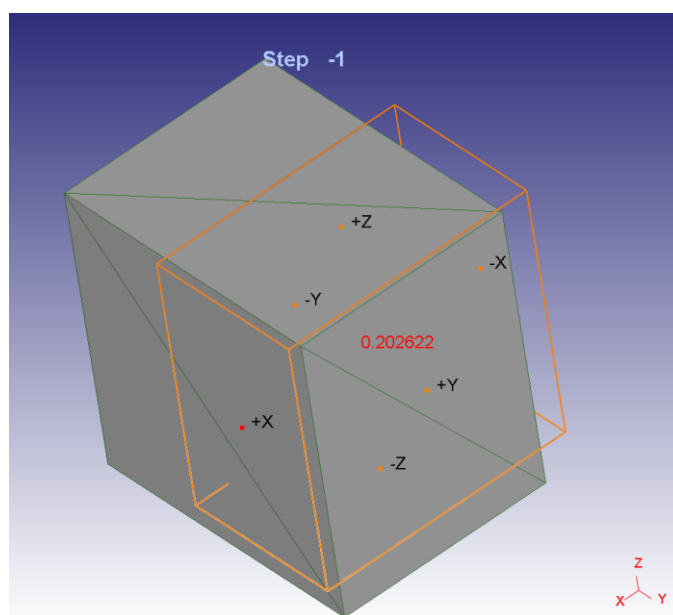
Εικόνα 8.6 Γενικό Mesh

Το επόμενο παράθυρο που ορίζουμε αφορά τους συντελεστές στάθμισης (Weighting Factors), για τους οποίους ορίζουμε ότι η καμπυλότητα της επιφάνειας είναι μηδενική και ότι δεν υπάρχει κατανομή της θερμοκρασίας. Από τις παραμέτρους Strain Distribution και Strain Rate Distribution, ορίζουμε τον ρυθμό με τον οποίο θα σταματάει κάθε φορά η προσομοίωση για να κάνει remeshing για λόγους όπως όταν ένα στοιχείο να έχει μετακινηθεί τόσο πολύ ώστε να έχει προσπεράσει το αμέσως επόμενο στοιχείο. Τέλος ενεργοποιούμε από την τελευταία μπάρα το Mesh Window για να ορίσουμε πυκνότερο πλέγμα στην περιοχή κοπής (Εικόνα 8.7).



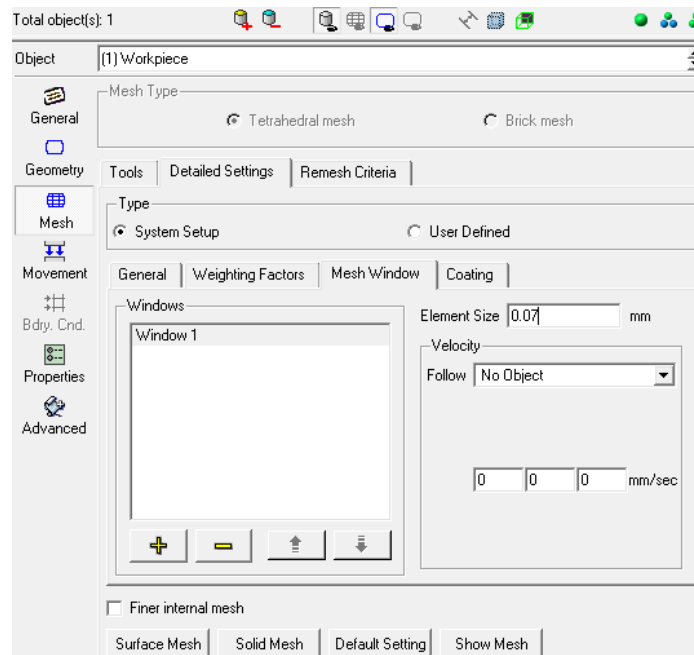
Εικόνα 8.7 Weighting Factors

Επιλέγουμε την κυβική γεωμετρία και ορίζουμε μία περιοχή στην οποία γνωρίζουμε ότι θα κοπεί το τεμάχιο μας. Η περιοχή αυτή ορίζεται από το ακτινικό και το αξονικό βάθος κοπής, τα οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι 1 και 3 χιλιοστά αντίστοιχα (Εικόνα 8.8).



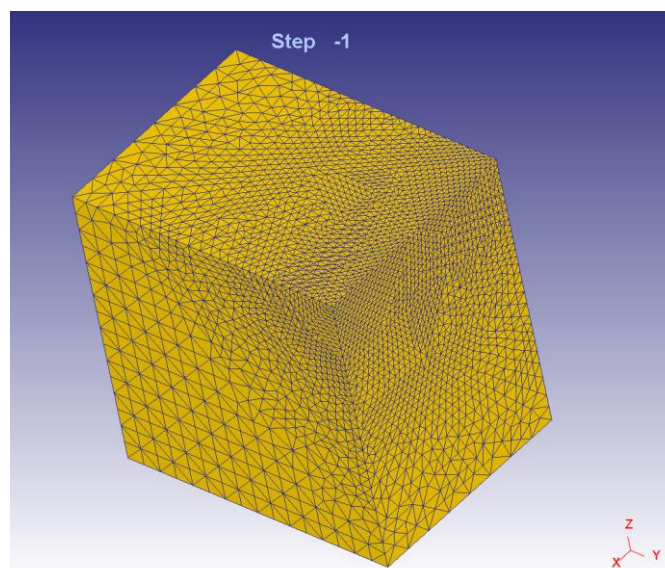
Εικόνα 8.8 Δημιουργία Mesh Cube

Έχοντας ορίσει την περιοχή κοπής, δίνουμε την επιθυμητή τιμή (0.07mm) που θέλουμε για το μέγεθος των στοιχείων (Εικόνα 8.9).



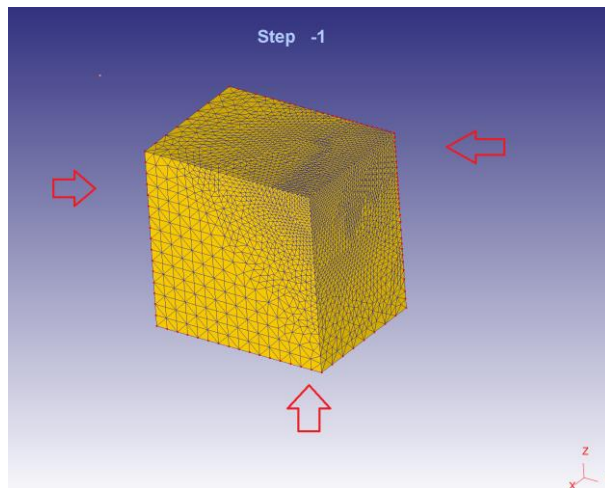
Εικόνα 8.9 Ορισμός μεγέθους στοιχείου στο mesh window

Συνεχίζουμε με τις εντολές Surface Mesh, Solid Mesh και Generate Mesh και έχουμε το τελικό μας αποτέλεσμα για το πλέγμα του τεμαχίου με 45000 στοιχεία περίπου όπως φαίνεται στην εικόνα 8.10.



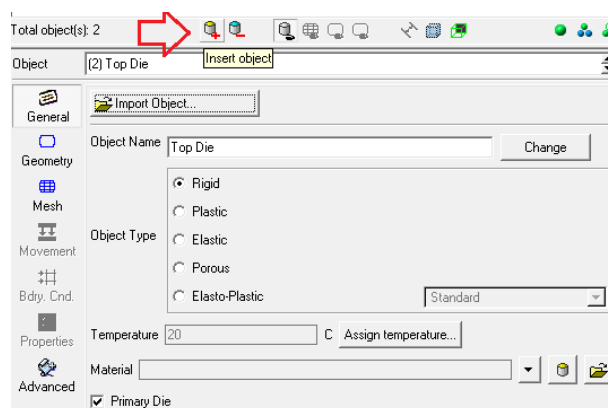
Εικόνα 8.10 Πλέγμα τεμαχίου

Συνεχίζουμε στερεώνοντας το τεμάχιο μας και αυτό γίνεται μέσω των οριακών συνθηκών, οι οποίες όπως φαίνεται και στην εικόνα 8.11 είναι πάνω στις πλευρές όπου δεν θα ακουμπήσει το κοπτικό μας εργαλείο.



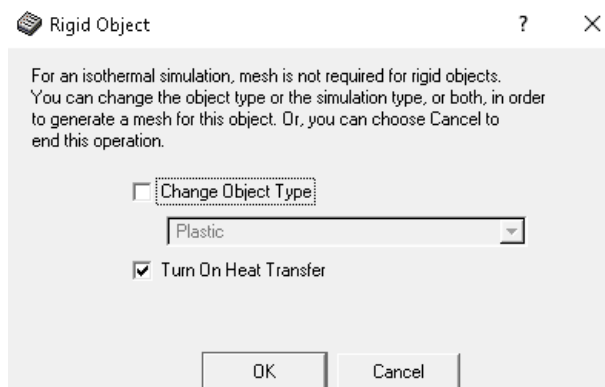
Εικόνα 8.11 Οριακές συνθήκες

Έχοντας τελειώσει με την οργάνωση του τεμαχίου μας, περνάμε τώρα στην οργάνωση του κοπτικού μας εργαλείου. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 8.12, το κοπτικό εργαλείο μας θέλουμε να είναι άκαμπτο και μη παραμορφώσιμο.



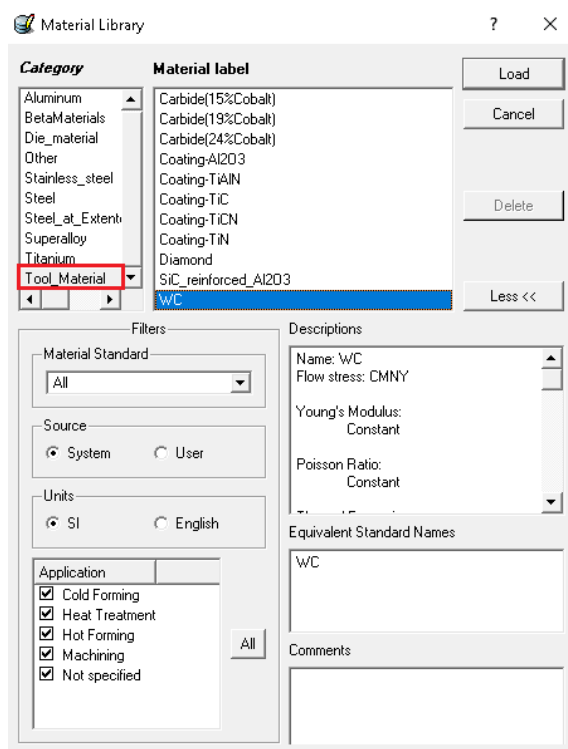
Εικόνα 8.12 Εισαγωγή κοπτικού εργαλείου

Όπως θα ήταν λογικό, αν πάμε να δημιουργήσουμε πλέγμα για το κοπτικό εργαλείο, εμφανίζεται ένα μήνυμα, που μας προτρέπει είτε να αλλάξουμε το κοπτικό από άκαμπτο σε πλαστικό είτε να επιτρέψουμε την μετάδοση της θερμότητας. Φυσικά επιλέγουμε το δεύτερο.



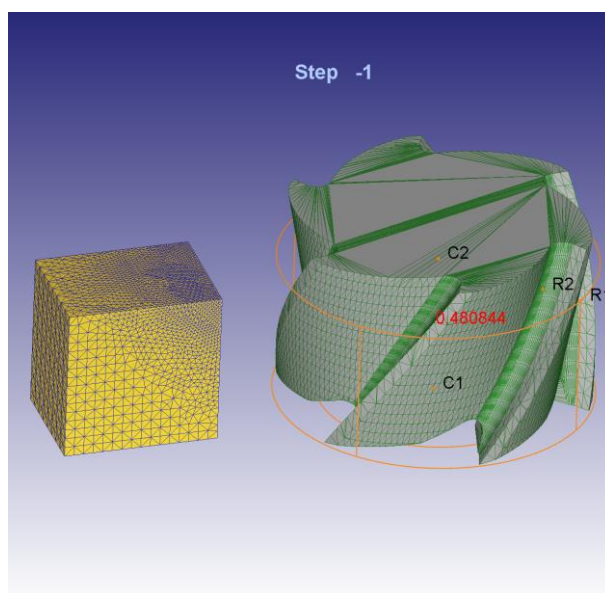
Εικόνα 8.13 Mesh για κοπτικό εργαλείο

Στη συνέχεια, με τον ίδιο τρόπο που ορίσαμε το υλικό για το τεμάχιο, έτσι και για το κοπτικό εργαλείο, επιλέγουμε από την Material Library και την κατηγορία υλικό κοπτικού εργαλείου, σκληρομέταλλο WC (Εικόνα 8.14).



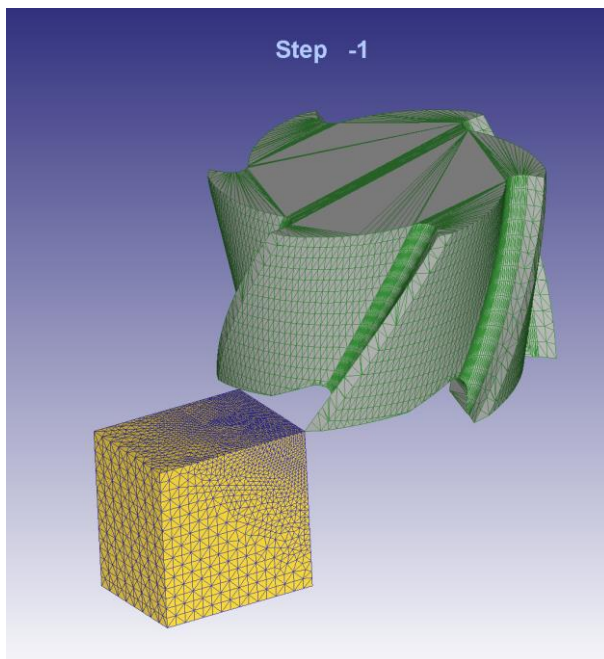
Εικόνα 8.14 Υλικό κοπτικού εργαλείου

Θέλοντας να δημιουργήσουμε πλέγμα για το κοπτικό εργαλείο, αυτή τη φορά δεν χρησιμοποιούμε την κυβική γεωμετρία αλλά αυτή του διαμπερή κυλίνδρου, με μήκος όσο περίπου το αξονικό βάθος κοπής (3mm) και πάχος κυλίνδρου περίπου ίσο με το ακτινικό βάθος κοπής (1mm).



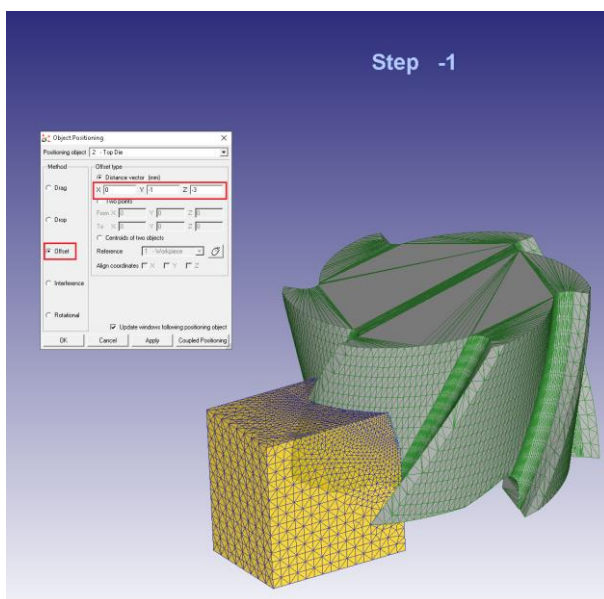
Εικόνα 8.15 Mesh για κοπτικό εργαλείο

Για το κοπτικό εργαλείο δεν υπάρχουν οριακές συνθήκες, καθώς το κοπτικό εργαλείο είναι αυτό που θα κινηθεί, όμως θα πρέπει αρχικά να τοποθετήσουμε το κοπτικό εργαλείο στην κατάλληλη θέση προτού ορίσουμε την κίνηση. Έτσι αρχικά τοποθετούμε το κοπτικό εργαλείο να ακουμπάει στην άκρη το τεμάχιο (Εικόνα 8.16).



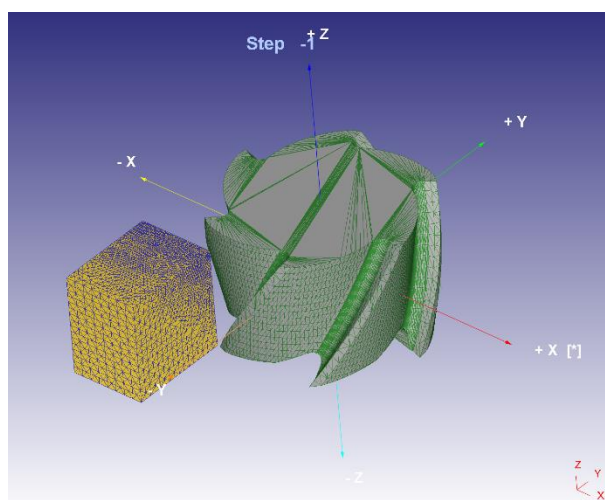
Εικόνα 8.16 Μετακίνηση κοπτικού εργαλείου

Στη συνέχεια με την εντολή Offset, το κοπτικό εισχωρεί μέσα στο τεμάχιο, όπως ακριβώς θα βρεθεί κάποια στιγμή κατά την κοπή και αυτό ορίζεται για άλλη μία φορά από το ακτινικό και το αξονικό βάθος κοπής (Εικόνα 8.17).



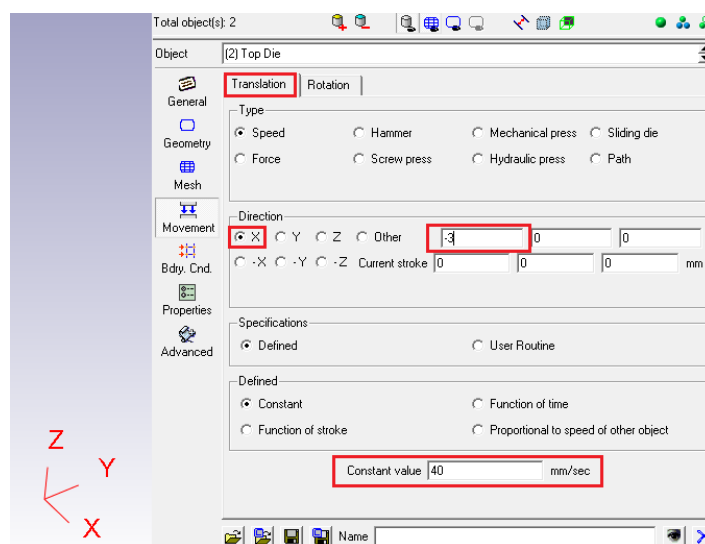
Εικόνα 8.17 Offset κοπτικού εργαλείου

Επειδή όμως, όπως είναι φυσικό δεν γίνεται να ξεκινήσει η κοπή με αυτό τον τρόπο, χρησιμοποιούμε την εντολή Drag και «τραβάμε» το κοπτικό εργαλείο προς τα έξω στο άξονα X και το αφήνουμε να ακουμπάει οριακά το τεμάχιο (Εικόνα 8.18).



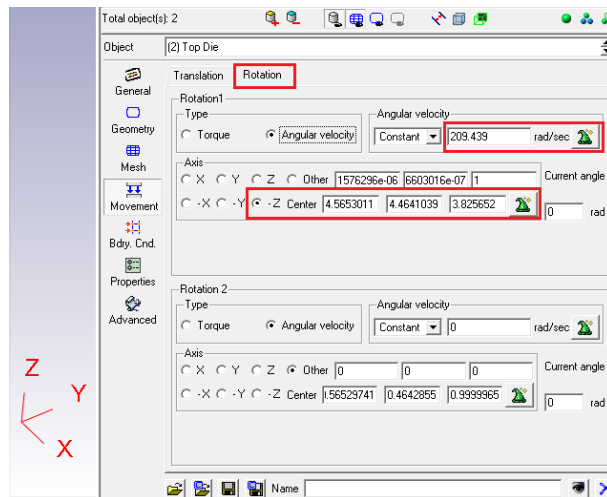
Εικόνα 8.18 Τελική τοποθέτηση κοπτικού εργαλείου

Περνάμε στο κομμάτι της κίνησης όπου αρχικά θα ορίσουμε ταχύτητα για την μεταφορά του κοπτικού εργαλείου, δηλαδή την πρόωση αυτού, η οποία είναι 40 mm/sec στην περίπτωσή μας. Επίσης ορίζουμε τον άξονα στον οποίο θα κινηθεί (άξονας X) αλλά και τα χιλιοστά που θα διανύσει (3mm). Το μήκος κίνησης έχει αρνητική τιμή καθώς η μεταφορά στην ουσία γίνεται στο -X άξονα (Εικόνα 8.17).



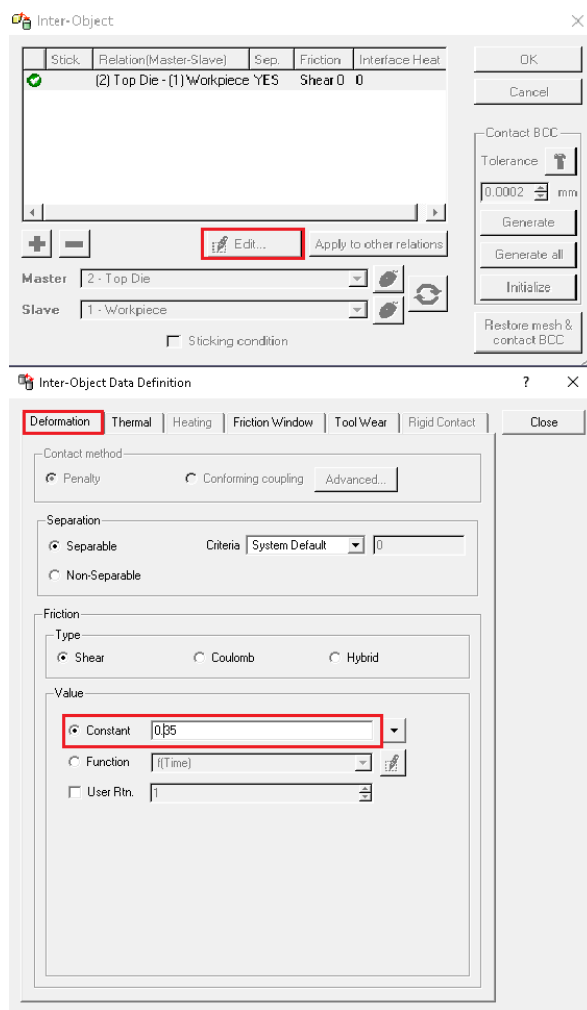
Εικόνα 8.19 Ορισμός μεταφορικής κίνησης κοπτικού εργαλείου

Συνεχίζουμε ορίζοντας και την περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου, έχοντας ως άξονα περιστροφής τον άξονα Z και με μία ταχύτητα 209,439 rad/sec που αντιστοιχεί σε 2000 στροφές το λεπτό (Εικόνα 8.20).



Εικόνα 8.20 Ορισμός περιστροφικής κίνησης κοπτικού εργαλείου

Έχοντας ορίσει την κίνηση του κοπτικού εργαλείου, μεταφερόμαστε στην καρτέλα Inter-Object όπου θα προσδιορίσουμε τους συντελεστές τριβής και θερμικής αγωγιμότητας αρχικά μεταξύ κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου (Εικόνα 8.21) και στη συνέχεια μεταξύ τεμαχίου και τεμαχίου (Εικόνα 8.23) λόγω των αποβλίττων.

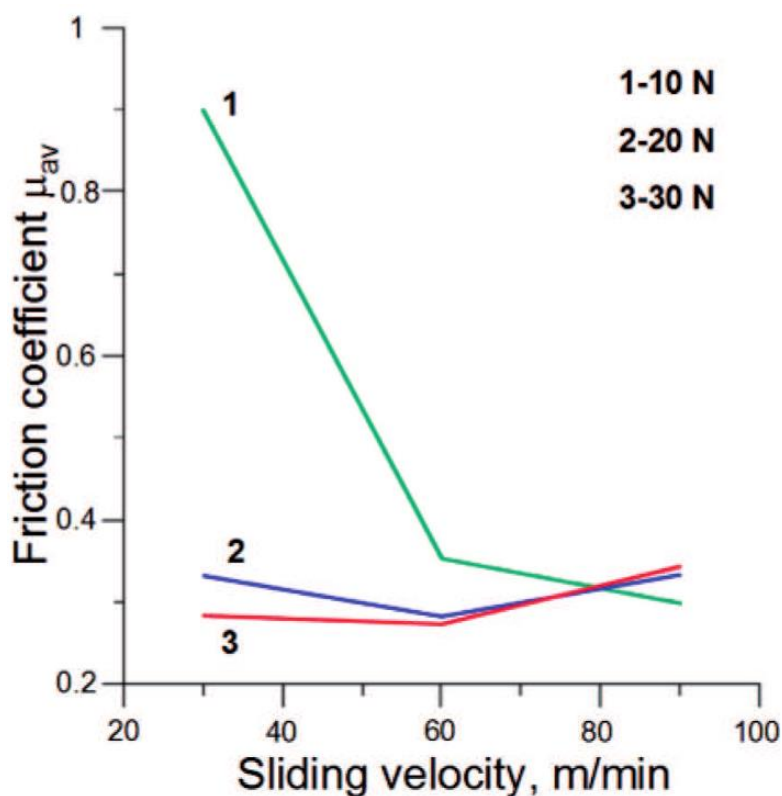


Εικόνα 8.21 Συντελεστής τριβής

Επιλέξαμε για τον συντελεστή τριβής την τιμή 0,35 μετά από ανάλυση του παρακάτω πίνακα και το διάγραμμα που συγκρίνουν τις τιμές συντελεστή τριβή στις διάφορες φορτίσεις αλλά και πρόωση κοπής για κοπή τιτανίου.

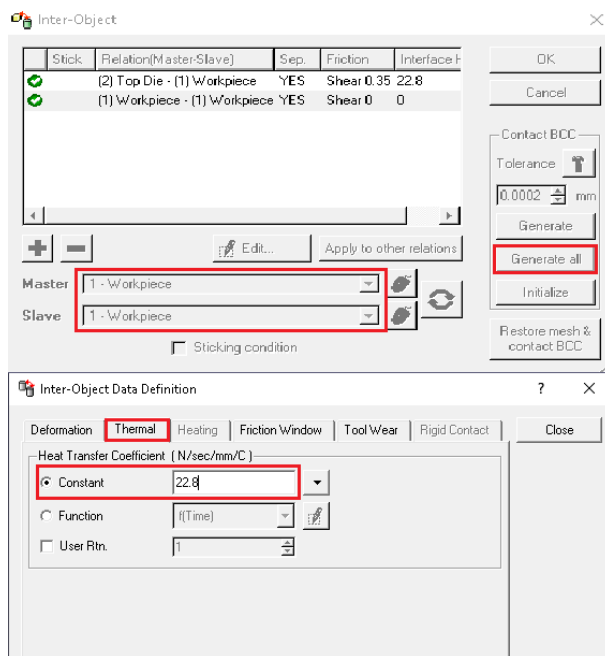
No.	Normal force F_n , N	Sliding velocity v_s , in m/min	Average friction coefficient μ_{av} max min	Average friction force F_{Tav} max min, N
1	10	30	0.91 ^{1.10} _{0.31}	9.1 ^{10.1} _{3.1}
2		60	0.36 ^{0.41} _{0.29}	3.6 ^{4.1} _{2.9}
3		90	0.29 ^{0.65} _{0.15}	2.9 ^{6.5} _{1.5}
4	20	30	0.34 ^{0.38} _{0.28}	6.8 ^{7.6} _{5.6}
5		60	0.28 ^{0.37} _{0.21}	5.6 ^{7.4} _{4.2}
6		90	0.34 ^{0.38} _{0.28}	6.8 ^{7.6} _{5.6}
7	30	30	0.28 ^{0.44} _{0.24}	8.4 ^{13.2} _{7.2}
8		60	0.26 ^{0.45} _{0.13}	7.8 ^{13.5} _{3.9}
9		90	0.34 ^{0.53} _{0.32}	10.2 ^{15.9} _{9.6}

Εικόνα 8.22 Εκλογή τιμής συντελεστή τριβής



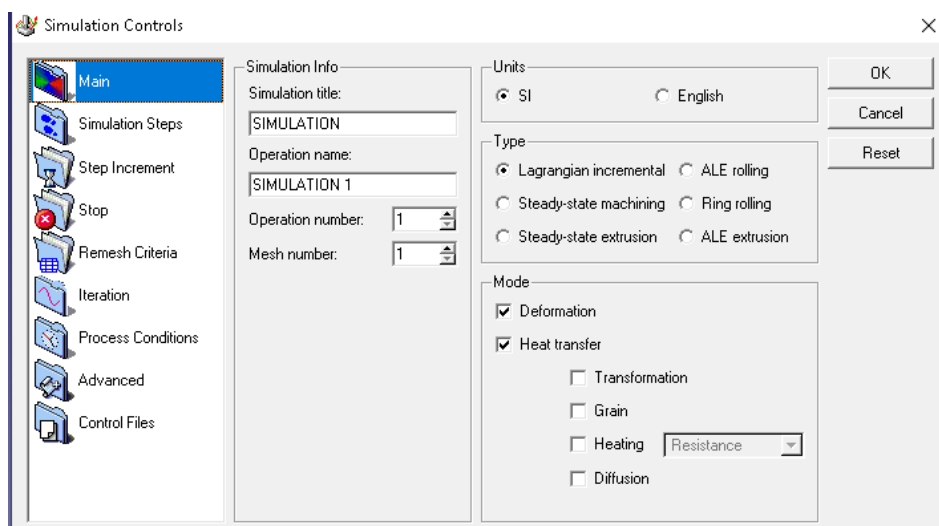
Εικόνα 8.23 Εκλογή τιμής Συντελεστή τριβής

Όσον αφορά τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, γνωρίζουμε ότι το τιτάνιο έχει μέτρια θερμική αγωγιμότητα. Έπειτα από έρευνα και μετατροπή των μονάδων μέτρησης, βρίσκουμε τον αντίστοιχο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για το κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V.



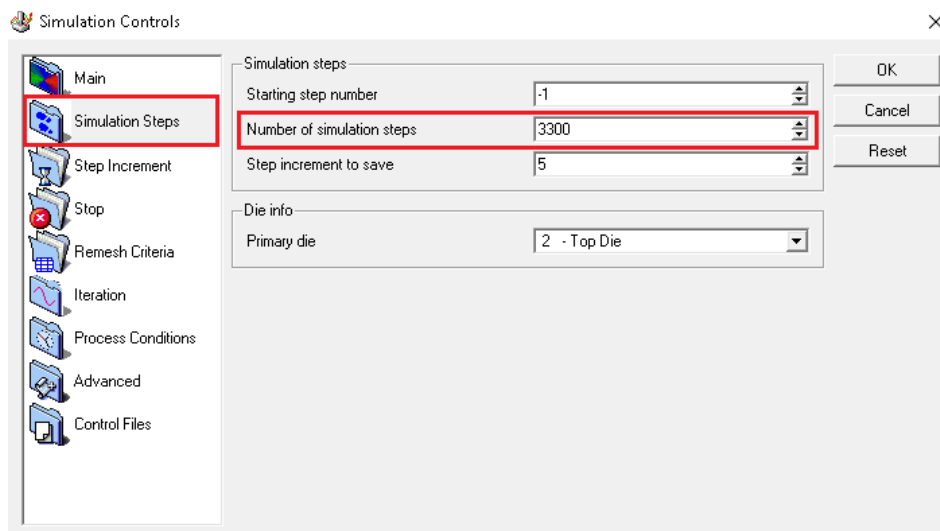
Εικόνα 8.24 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Η προσομοίωσή μας είναι σχεδόν έτοιμη. Το μόνο που μας έχει μείνει είναι να ορίσουμε τα simulation controls, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο θα τρέξει η προσομοίωσή μας.



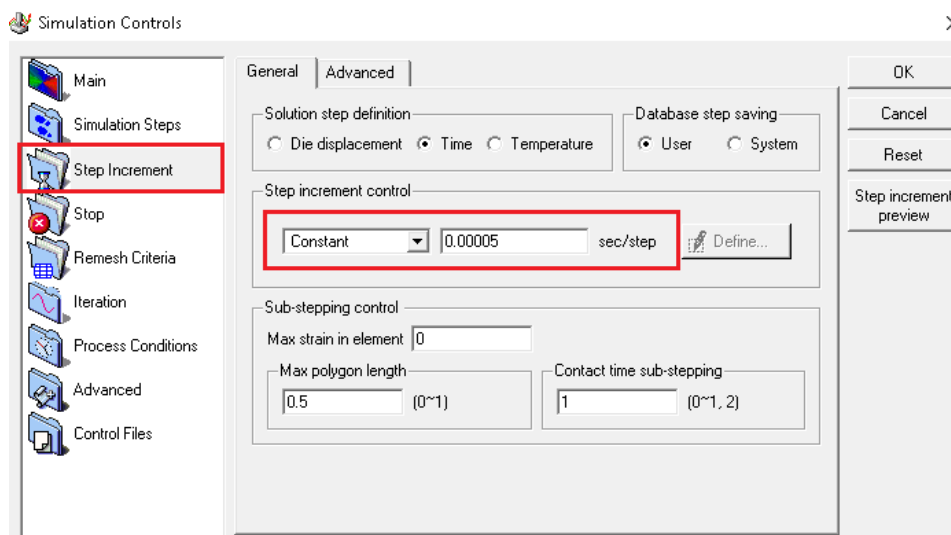
Εικόνα 8.25 Simulation Controls

Ορίζουμε τα βήματα της προσομοίωσης, έτσι ώστε μετά το πέρας της προσομοίωσης να έχουμε τουλάχιστον 5 με 6 απόβλιττα για να μελετήσουμε (Εικόνα 8.26).



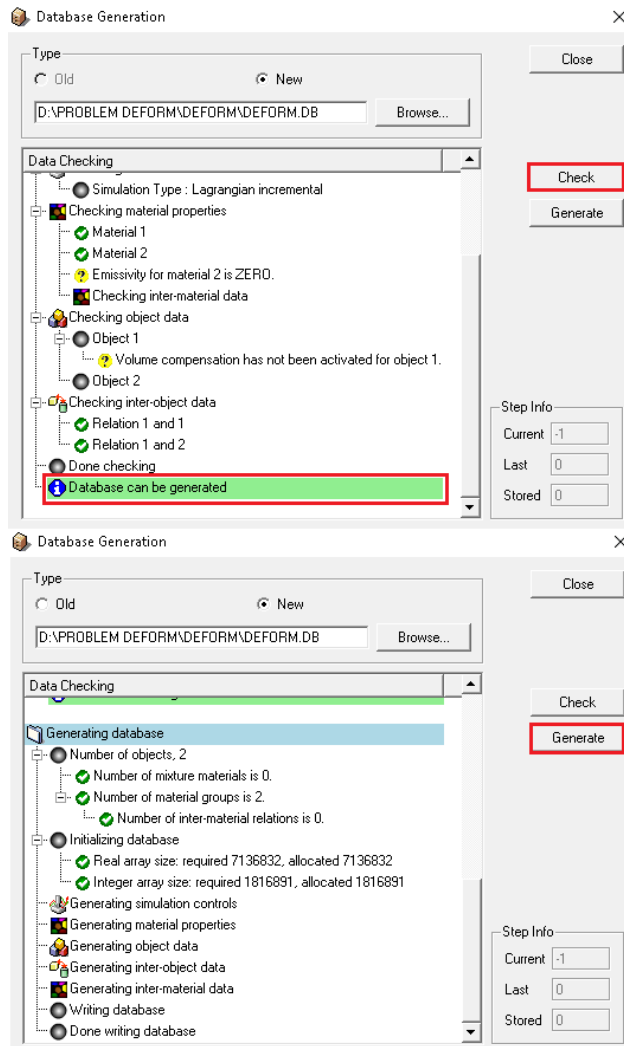
Εικόνα 8.26 Simulation Steps

Μας έχει μείνει να ορίσουμε το step increment, δηλαδή το πόσο μεγάλο θα είναι ένα βήμα προσομοίωσης. Στην περίπτωση μας επιλέγουμε πολύ μικρό αριθμό για να έχουμε όσο το δυνατόν πιο ακριβή αποτελέσματα.



Εικόνα 8.27 Step Increment

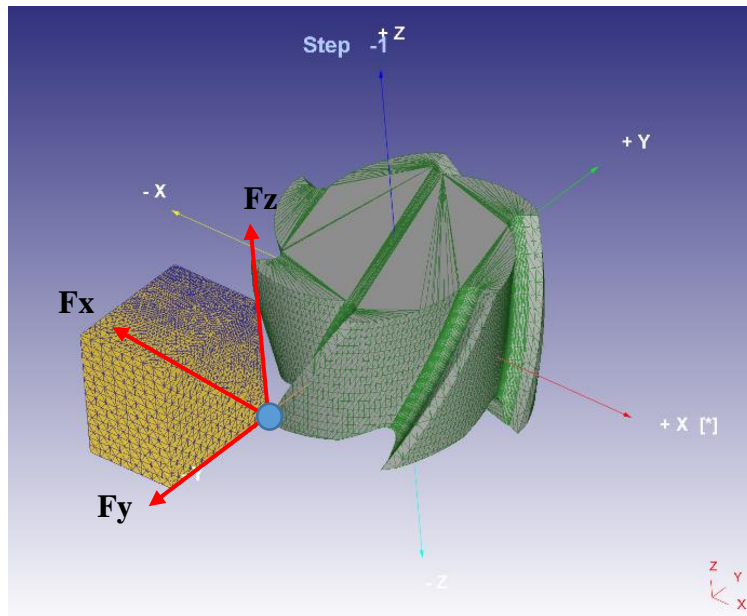
Τέλος τσεκάρουμε αν η προσομοίωση είναι έτοιμη να «τρέξει» και αφού έχουμε πάρει και την έγκριση από το πρόγραμμα, επιλέγουμε την εντολή generate και είμαστε έτοιμοι να ξεκινήσουμε την προσομοίωσή μας. Στην εικόνα 8.28 μπορούμε να δούμε το Database Generation, το οποίο αποτελεί το τελικό «τσεκ», καθώς μέσα από αυτό «τσεκάρονται» όλα τα προηγούμενα βήματα που έχουμε κάνει (υλικά, οριακές συνθήκες, κινήσεις κλπ.).



Εικόνα 8.28 Database Generation

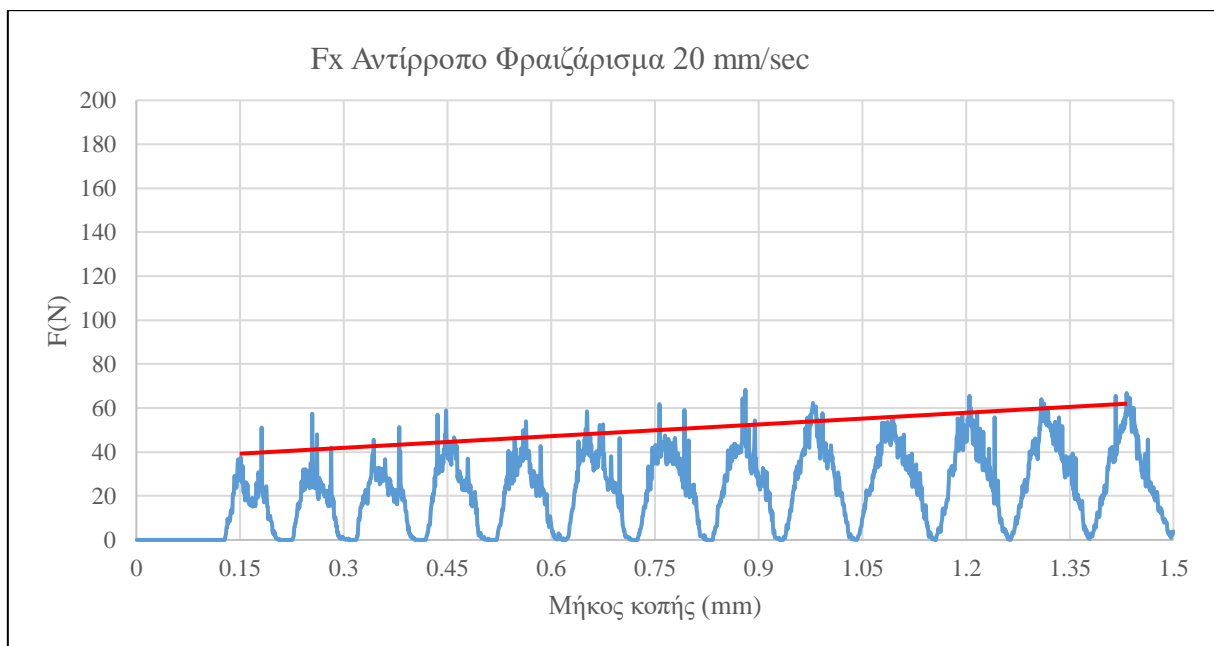
8.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις δυνάμεις κοπής

8.2.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης Αντίρροπου Φραιζαρίσματος με πρόωση 20 mm/sec



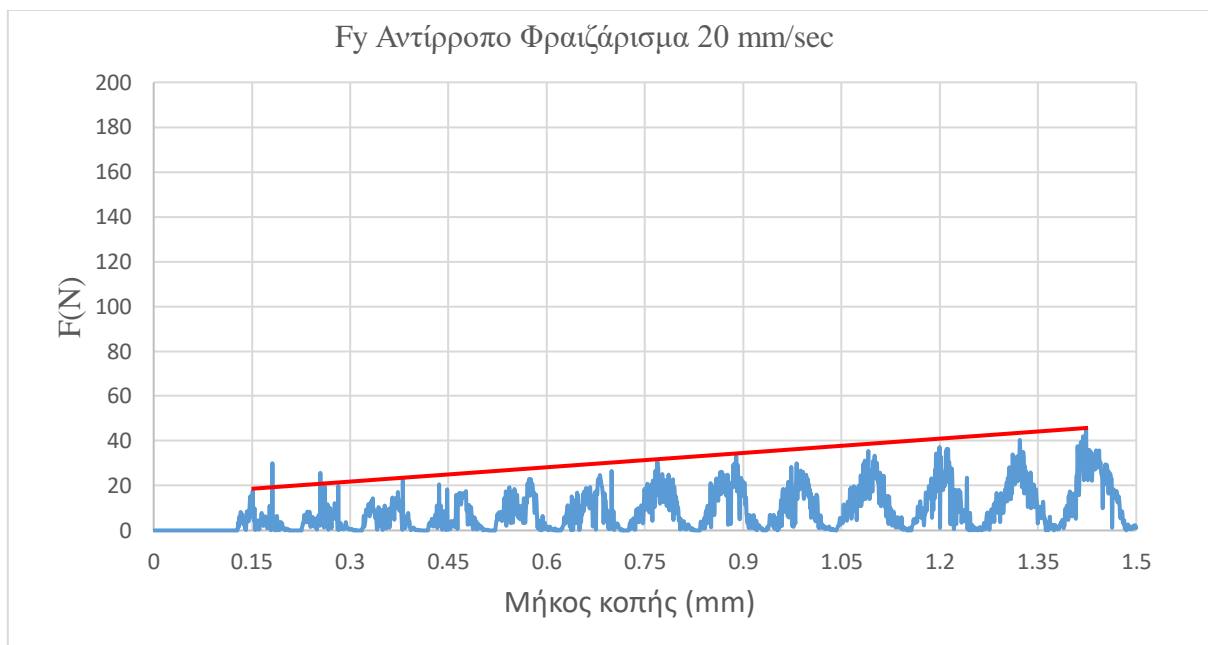
Εικόνα 8.29 Δυνάμεις κοπής

Στην εικόνα 8.29 παρουσιάζονται οι δυνάμεις κοπής, όπως αυτές δημιουργούνται στους άξονες. Από την προσομοίωση που πραγματοποιήσαμε για αντίρροπο φραιζάρισμα με πρόωση 20 mm/sec και μήκος κοπής 1,5mm παίρνουμε τα ακόλουθα 3 διαγράμματα. Βλέπουμε ότι έχουμε 13 απόβλιττα Για την δύναμη F_x , η οποία είναι και η κύρια δύναμη κοπής, παρατηρούμε ότι δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες αλλαγές όσο προχωράει η κοπή και με μία μέγιστη τιμή στα 68 N. Γενικά έχουμε μία μικρή αυξητική τάση που στην συνέχεια φαίνεται να σταθεροποιείται.



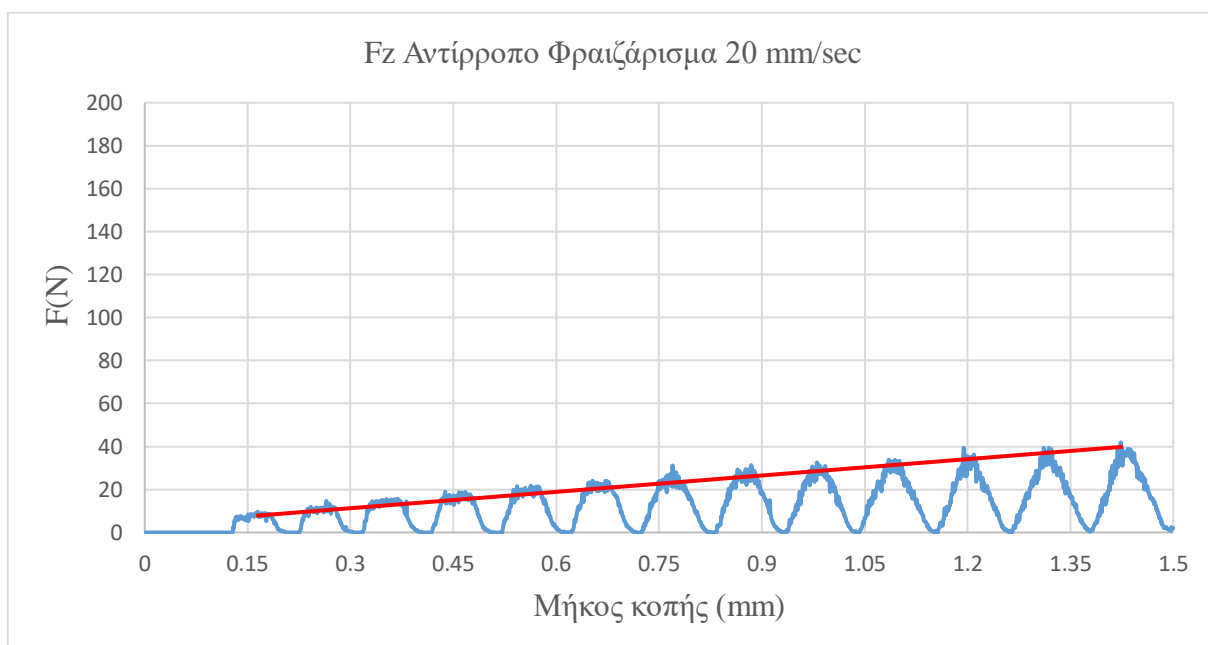
Διάγραμμα 8.1 Δύναμη F_x Αντίρροπο Φραιζάρισμα 20 mm/sec

Σε όλα τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι το πρώτο απόβλιτο εμφανίζεται περίπου στα 0,1mm. Αυτό συμβαίνει επειδή το πρώτο απόβλιτο δεν το λαμβάνουμε υπόψιν μας. Για την δύναμη F_y παρατηρούμε μία πολύ μικρή αυξητική τάση όσο προχωράει η κοπή, ενώ η μέγιστη τιμή είναι τα 45 N. Πάλι παρατηρούμε ότι από ένα σημείο και μετά έχουμε σταθεροποίηση.



Διάγραμμα 8.2 Δύναμη F_y Αντίρροπο Φραιζάρισμα 20 mm/sec

Όσον αφορά την δύναμη F_z , παρατηρούμε και πάλι ότι η πορεία που ακολουθεί είναι αύξουσα με τάση για σταθεροποίηση. Η ελάχιστη τιμή της είναι 10 N, ενώ η μέγιστη είναι 42 N.

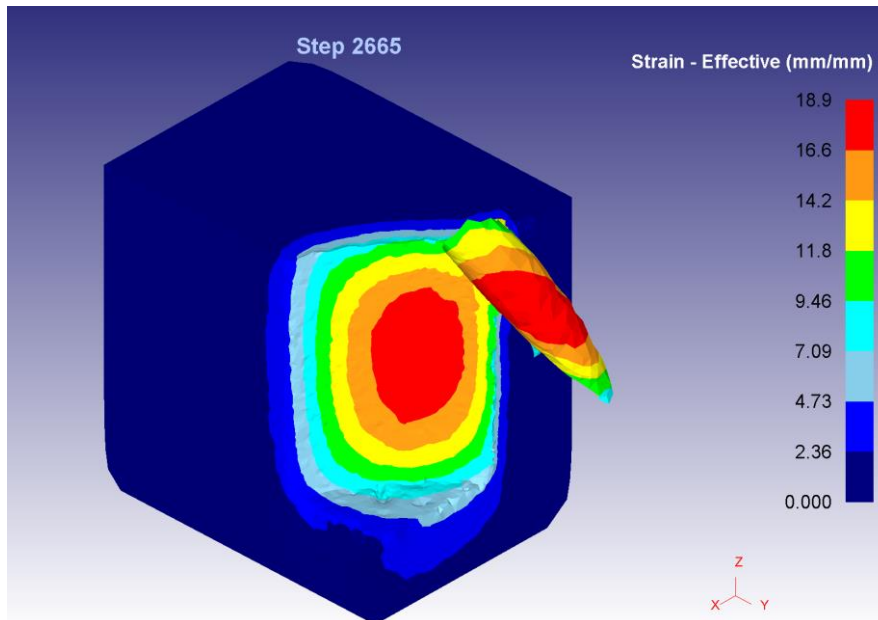


Διάγραμμα 8.3 Δύναμη F_z Αντίρροπο Φραιζάρισμα 20 mm/sec

Συνοψίζοντας για τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά το αντίρροπο φραιζάρισμα με πρόωση 20 mm/sec, οι μέγιστες τιμές είναι 68 N, 45 N, 42 N για F_x , F_y και F_z αντίστοιχα. Μπορούμε λοιπόν να υπολογίσουμε την μέγιστη συνισταμένη δύναμη ως εξής:

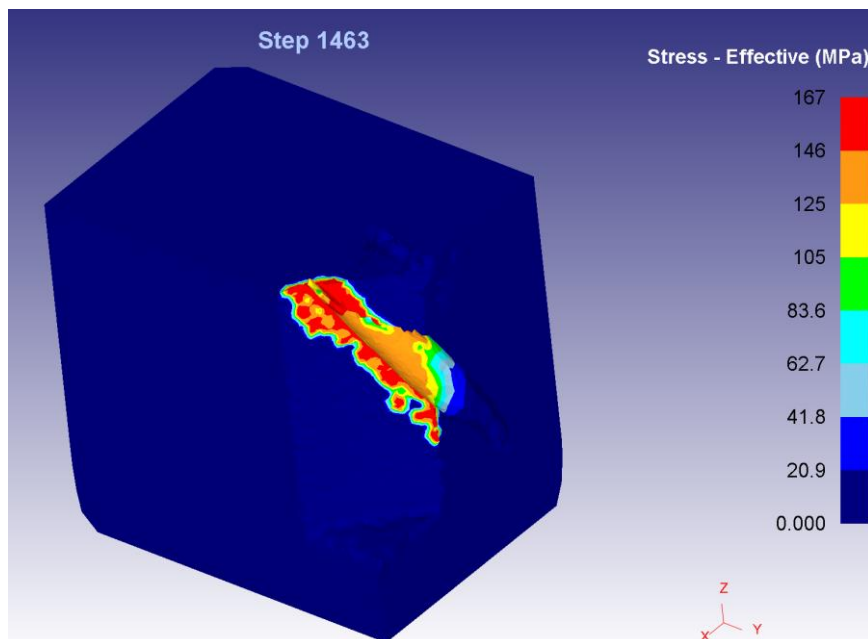
$$F_{\text{total}}^2 = F_x^2 + F_y^2 + F_z^2$$

Προκύπτει ότι $F_{\text{total,max}} = 82\text{N}$



Εικόνα 8.30 Strain Effective Αντίρροπο Φραιζάρισμα με πρόωση 20 mm/sec

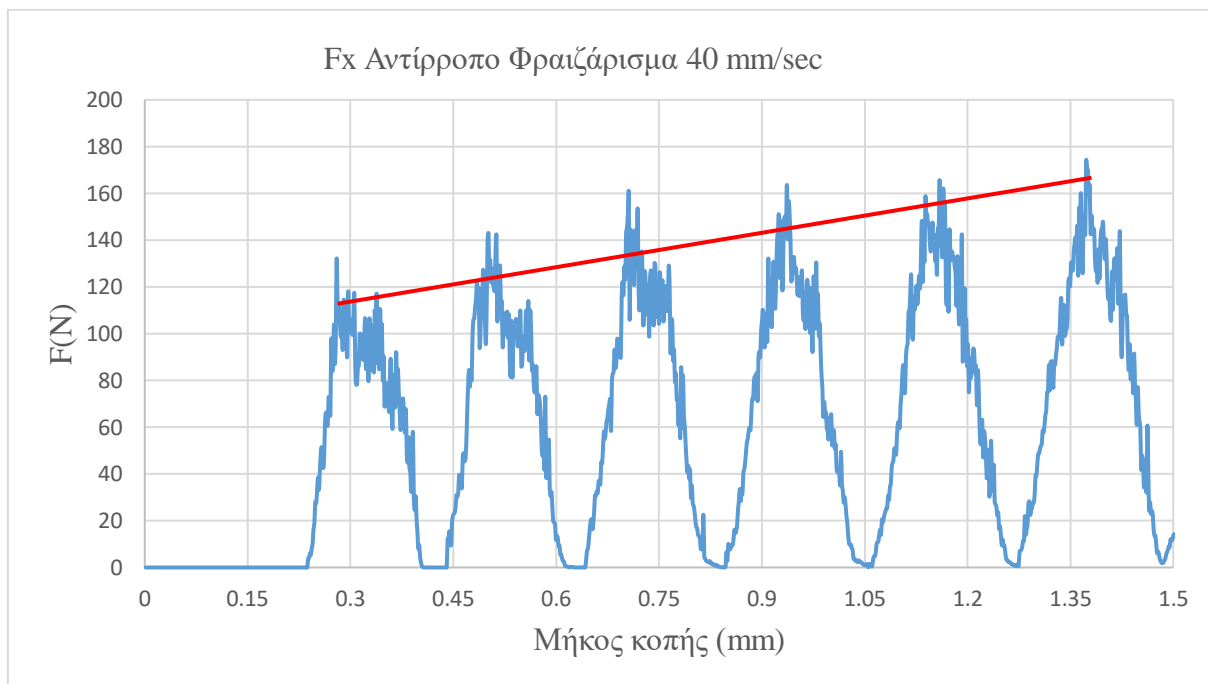
Στις εικόνες 8.30 και 8.31 βλέπουμε πως επιδρούν στο τεμάχιο η αποτελεσματική παραμόρφωση και η ισοδύναμη τάση αντίστοιχα σε δύο τυχαίες στιγμές κοπής.



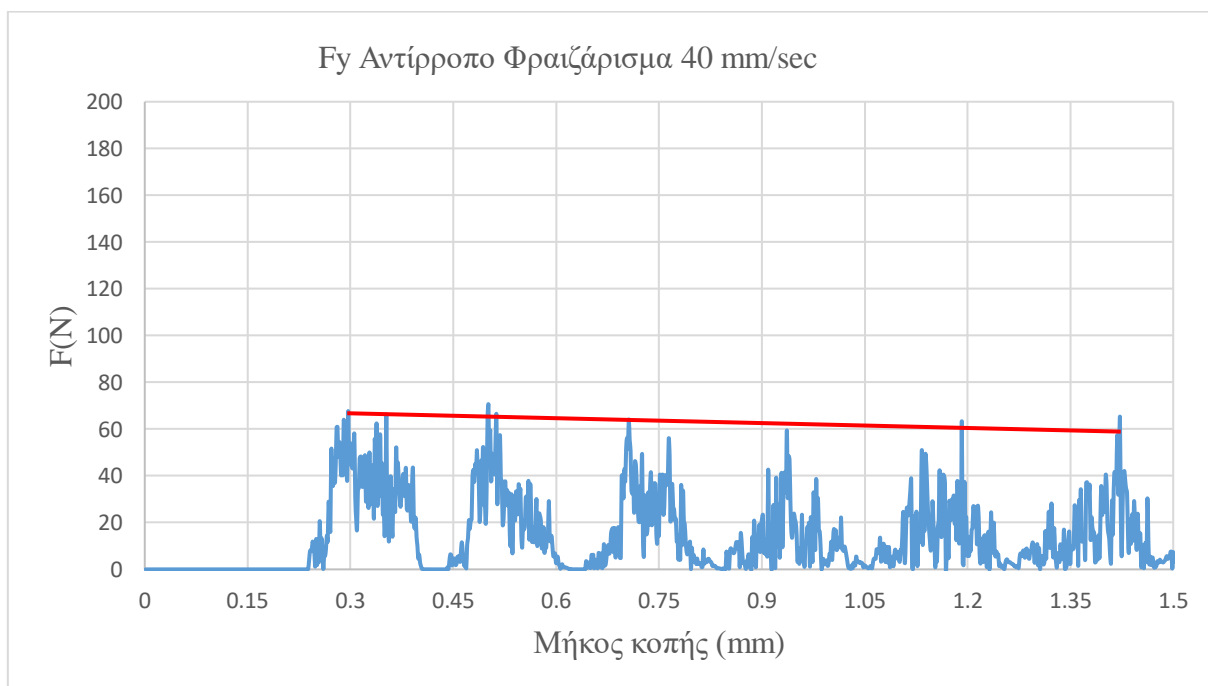
Εικόνα 8.31 Effective Stress Αντίρροπο Φραιζάρισμα με πρόωση 20 mm/sec

8.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης Αντίρροπου Φραιζάρισματος με πρόωση 40 mm/sec

Από την προσομοίωση που τρέξαμε για αντίρροπο φραιζάρισμα με πρόωση 40 mm/sec και μήκος κοπής 1,5mm παίρνουμε τα ακόλουθα 3 διαγράμματα. Βλέπουμε ότι έχουμε 6 απόβλιττα. Για την δύναμη F_x , η οποία είναι και η κύρια δύναμη κοπής, παρατηρούμε ότι δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες αλλαγές όσο προχωράει η κοπή και με μία μέγιστη τιμή στα 174 N. Γενικά έχουμε μία μικρή αυξητική τάση που στην συνέχεια φαίνεται να σταθεροποιείται.



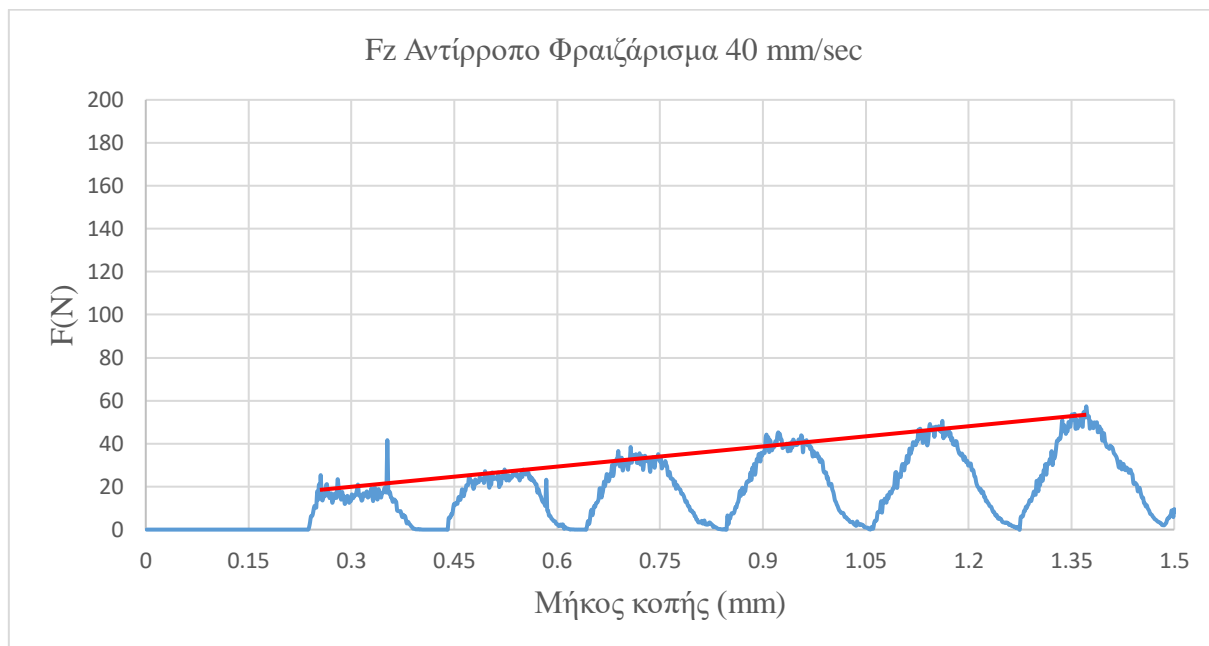
Διάγραμμα 8.4 Δύναμη F_x Αντίρροπο Φραιζάρισμα 40 mm/sec



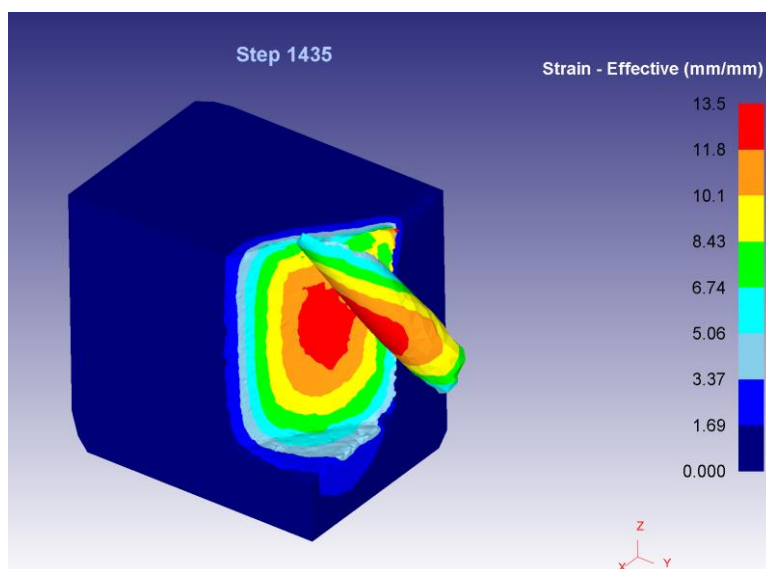
Διάγραμμα 8.5 Δύναμη F_y Αντίρροπο Φραιζάρισμα 40 mm/sec

Συνεχίζοντας με την F_y (Διάγραμμα 8.5), έχουμε μέγιστη τιμή 70 N, ενώ βλέπουμε για πρώτη φορά ότι δεν υπάρχει αυξητική τάση, αλλά φαίνεται ότι από την αρχή έχουμε σταθεροποίηση και ίσως φθίνουσα πορεία.

Για την δύναμη F_z (Διάγραμμα 8.6), η κατάσταση είναι περίπου η ίδια με αυτή που είδαμε για το αντίρροπο φραιζάρισμα με πρόωση 20mm/sec, η πορεία που ακολουθείτε είναι αύξουσα ενώ η μέγιστη τιμή είναι 57 N.



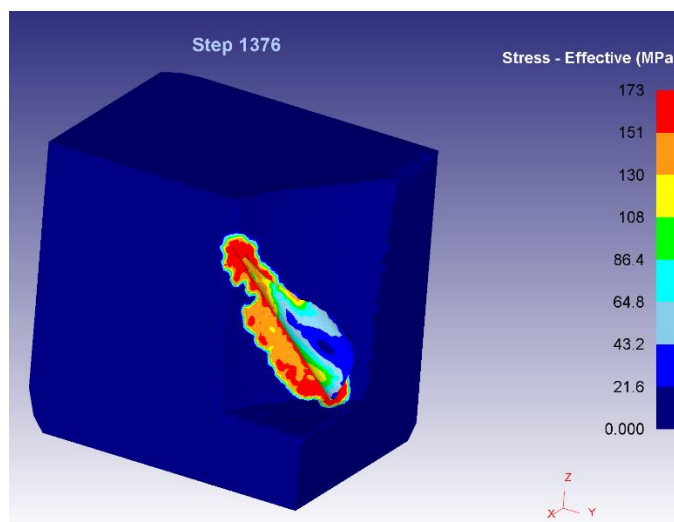
Διάγραμμα 8.6 Δύναμη F_z Αντίρροπο Φραιζάρισμα 40 mm/sec



Εικόνα 8.32 Strain Effective Αντίρροπο Φραιζάρισμα με πρόωση 40 mm/sec

Στις εικόνες 8.32 και 8.33 βλέπουμε πως επιδρούν στο τεμάχιο η αποτελεσματική παραμόρφωση και η ισοδύναμη τάση αντίστοιχα σε δύο τυχαίες στιγμές κοπής. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν

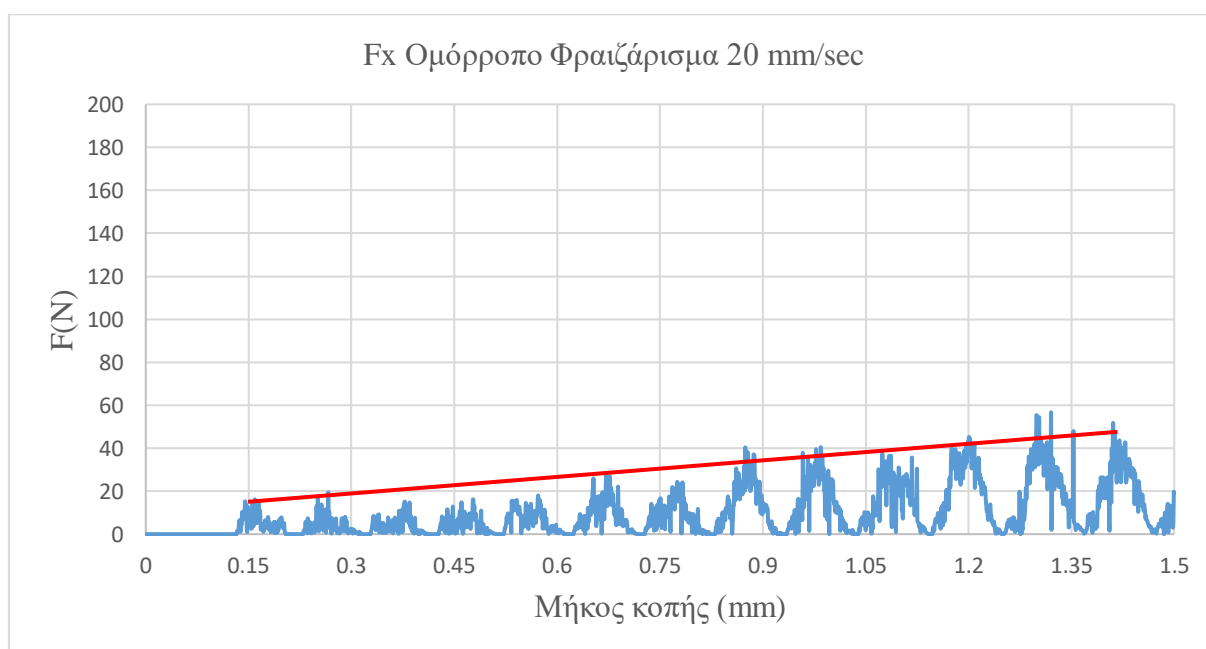
μεγάλες αλλαγές, παρά μόνο μία μικρή μείωση στη μέγιστη τιμή της αποτελεσματικής παραμόρφωσης.



Εικόνα 8.33 Stress Effective Αντίρροπο Φραιζάρισμα με πρόωση 40 mm/sec

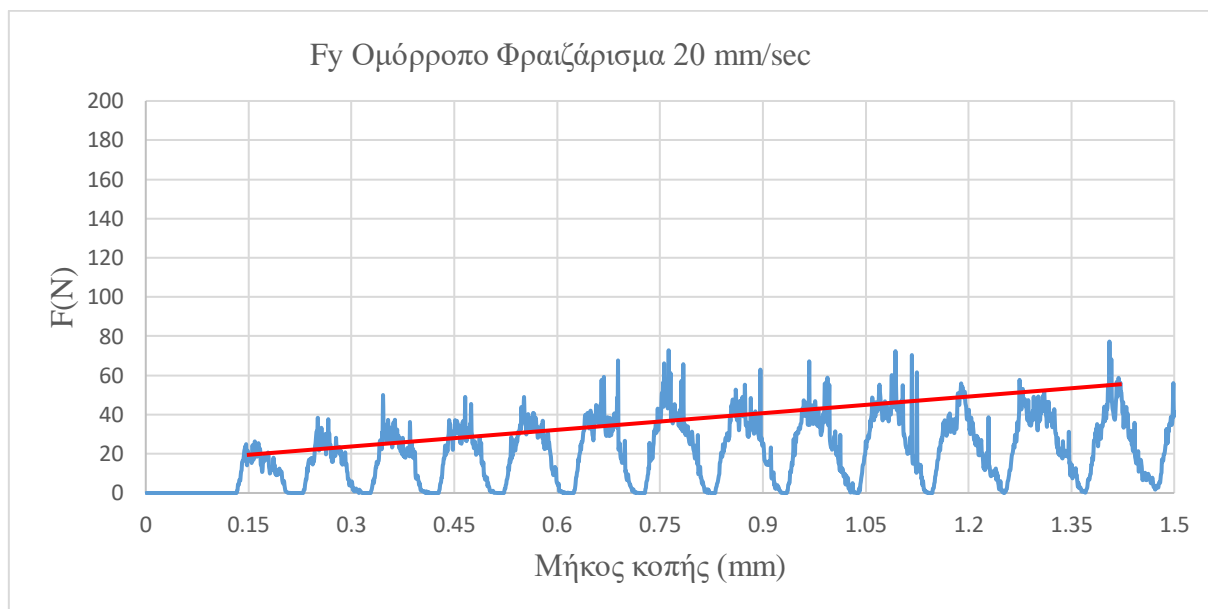
Συνοψίζοντας για τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά το αντίρροπο φραιζάρισμα με πρόωση 40 mm/sec, οι μέγιστες τιμές είναι 174 N, 70 N, 57 N για F_x , F_y και F_z αντίστοιχα. Μπορούμε λοιπόν να υπολογίσουμε την μέγιστη συνολική δύναμη. Προκύπτει ότι $F_{total,max} = 185N$. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι με διπλασιασμό την ταχύτητας πρόωσης, αρχικά μειώνονται τα απόβλιττα από 13 που είχαμε αρχικά σε 6, μπορούμε να πούμε ότι σχεδόν υποδιπλασιάζονται. Επίσης παρατηρούμε ότι οι δυνάμεις κοπής είναι πολύ μεγαλύτερες στην δεύτερη περίπτωση και πως η μέγιστη συνισταμένη δύναμη σχεδόν διπλασιάζεται με διπλασιασμό την ταχύτητας.

8.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης Ομόρροπου Φραιζαρίσματος με πρόωση 20 mm/sec



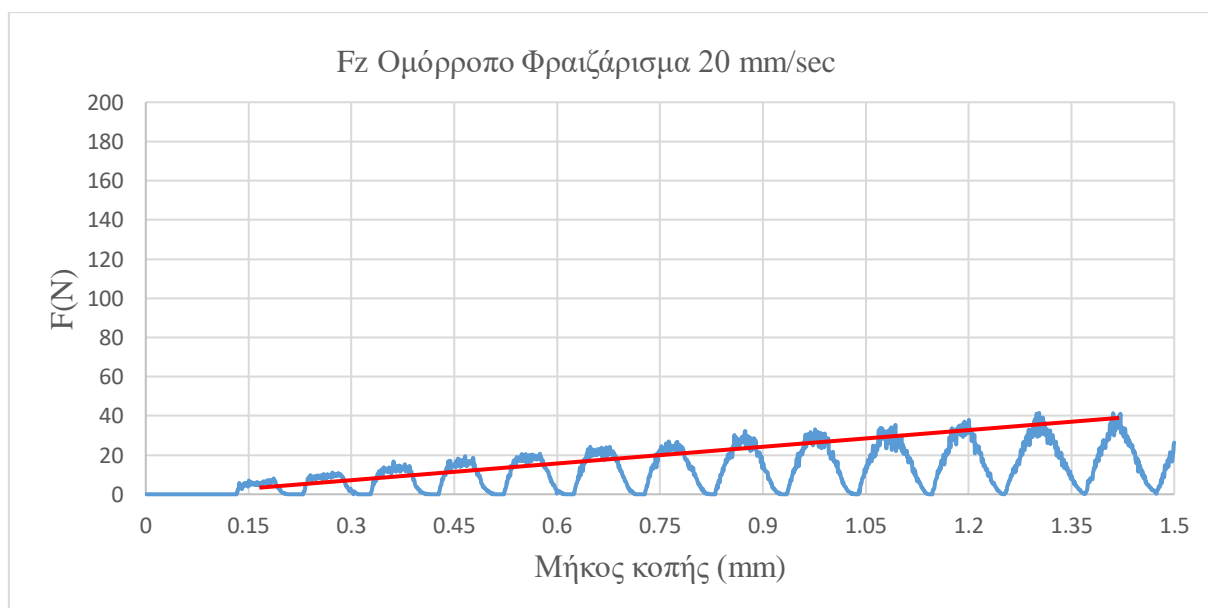
Διάγραμμα 8.7 Δύναμη F_x Ομόρροπο Φραιζάρισμα 20 mm/sec

Στη συνέχεια μελετάμε το ομόρροπο Φραιζάρισμα, αρχικά με πρόωση 20 mm/sec. Άλλη μία φορά έχουμε 13 απόβλιττα για μήκος κοπής 1,5 mm. Για την δύναμη F_x , παρατηρούμε ότι δεν είναι πολύ ομαλή, καθώς σε κάθε απόβλιττο υπάρχουν μεμονωμένες τιμές οι οποίες είναι πολύ μεγαλύτερες από τις υπόλοιπες τιμές του αποβλίττου. Η μέγιστη τιμή στα 57 N ενώ γενικά έχουμε μία μικρή αυξητική τάση που στην συνέχεια φαίνεται να σταθεροποιείται.



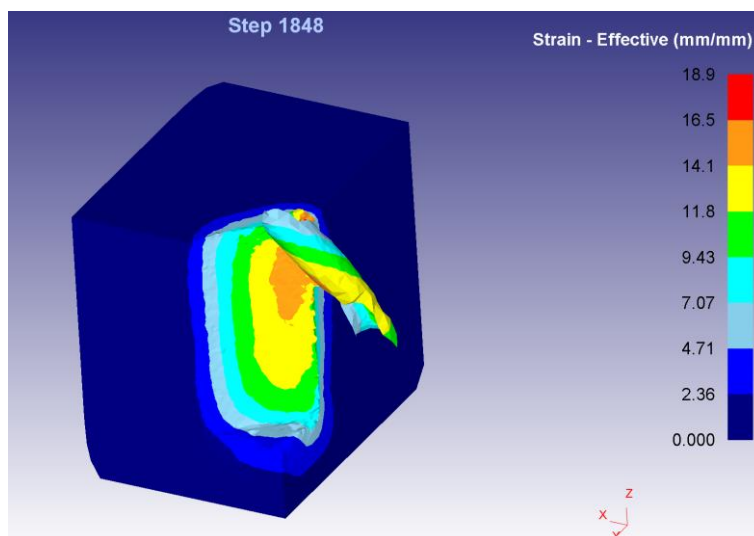
Διάγραμμα 8.8 Δύναμη F_y Ομόρροπο Φραιζάρισμα 20 mm/sec

Παρόμοια είναι η εικόνα που έχουμε για την F_y , η οποία δεν ακολουθεί ιδιαίτερα ομαλή πορεία, ενώ παρουσιάζει μέγιστη τιμή στα 77 N. Σε αντίθεση με τις F_x και F_y , η F_z παρουσιάζει πολύ πιο ομαλή εικόνα με καθαρά αύξουσα πορεία, έχοντας μέγιστη τιμή 42 N. Συνοπτικά για το ομόρροπο φραιζάρισμα με ταχύτητα πρόωσης 20 mm/sec η μέγιστη δύναμη $F_{total,max}$ είναι 83 N

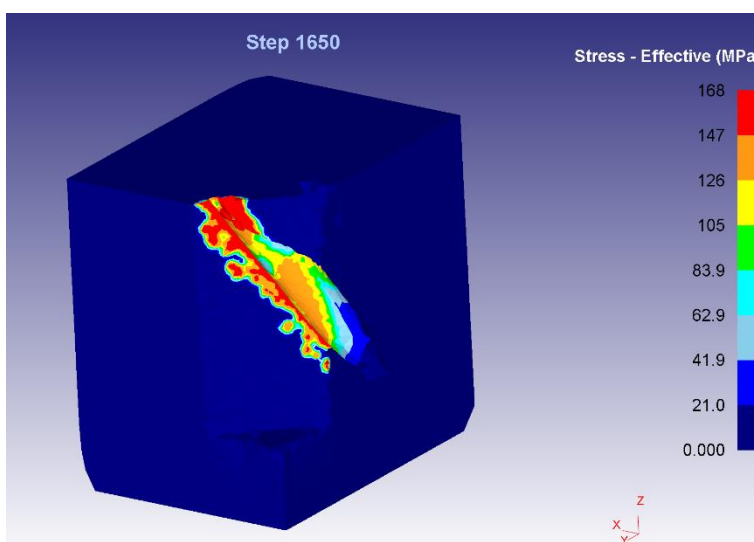


Διάγραμμα 8.9 Δύναμη F_z Ομόρροπο Φραιζάρισμα 20 mm/sec

Εάν συγκρίνουμε τις προσομοιώσεις για αντίρροπο και ομόρροπο φραιζάρισμα με πρόωση 20 mm/sec, θα δούμε ότι στο αντίρροπο φραιζάρισμα η F_x είναι συνεχώς μεγαλύτερη σε όλα τα διαστήματα. Εντελώς διαφορετικό είναι το σκηνικό, όσον αφορά την δύναμη F_y , η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη σε όλα τα διαστήματα κατά το ομόρροπο φραιζάρισμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η δύναμη F_z , φαίνεται να παραμένει ίδια και στις δύο περιπτώσεις, ενώ ένα ακόμα κοινό στοιχείο που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι και στις δύο περιπτώσεις σε όλα τα διαγράμματα, οι τιμές των δυνάμεων διαγράφουν αύξουσα πορεία και στη συνέχεια δείχνουν να σταθεροποιούνται.



Εικόνα 8.34 Strain Effective Ομόρροπο Φραιζάρισμα με πρόωση 20 mm/sec

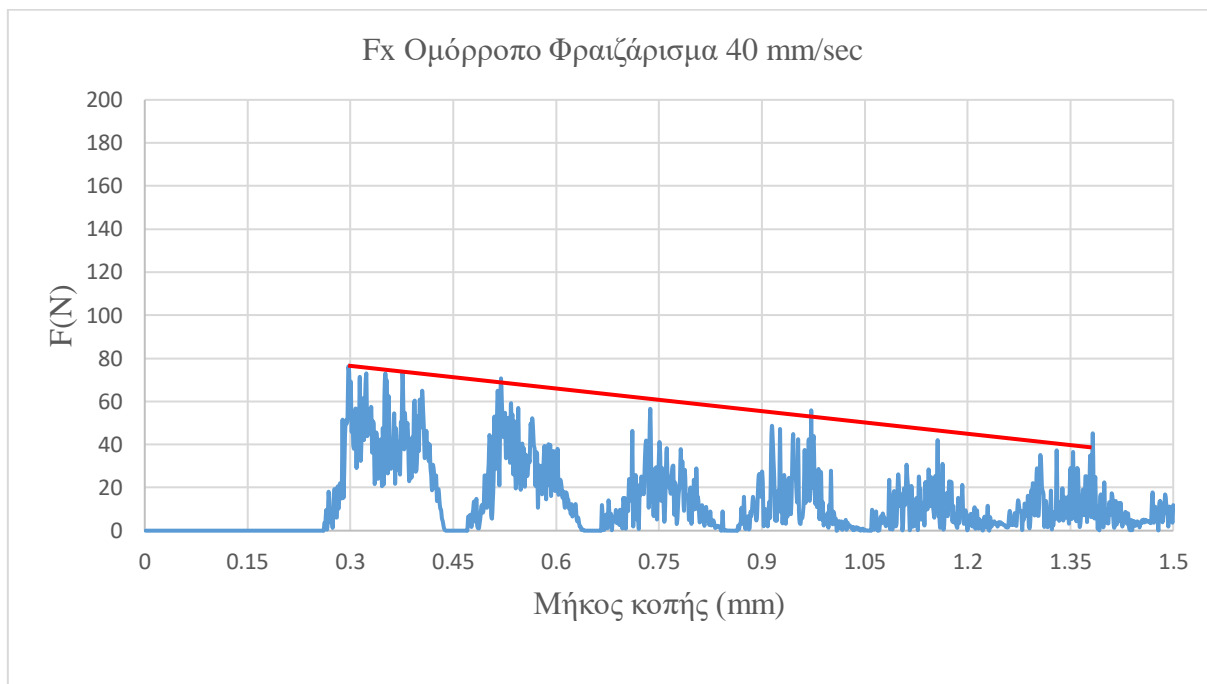


Εικόνα 8.35 Stress Effective Ομόρροπο Φραιζάρισμα με πρόωση 20 mm/sec

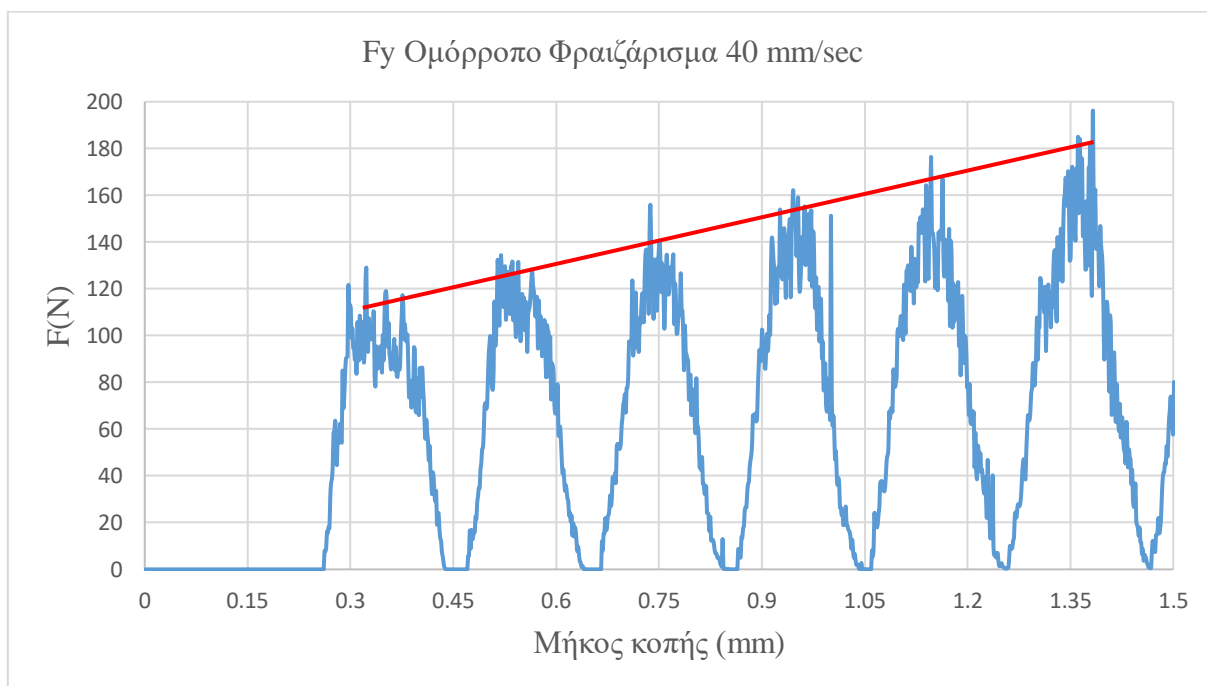
Στις εικόνες 8.34 και 8.35 βλέπουμε πως επιδρούν στο τεμάχιο η αποτελεσματική παραμόρφωση και η ισοδύναμη τάση αντίστοιχα σε δύο τυχαίες στιγμές κοπής. Παρατηρούμε ότι η με αλλαγή της τεχνικής φραιζαρίσματος έχει μειωθεί σημαντικά η αποτελεσματική παραμόρφωση, ενώ η ισοδύναμη τάση δεν εμφανίζει μεγάλες τιμές σε όλο το απόβλιττο, όπως γινόταν στο αντίρροπο.

8.2.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης Ομόρροπου Φραιζαρίσματος με πρόωση 40 mm/sec

Στη συνέχεια μελετάμε και πάλι το ομόρροπο φραιζάρισμα, αυτή τη φορά με διπλάσια ταχύτητα πρόωσης, 40 mm/sec. Παρατηρούμε ότι τα απόβλιττα που παράγονται κατά την κοπή είναι 6. Για άλλη μία φορά με διπλασιασμό της ταχύτητας πρόωσης έχουν σχεδόν τον υποδιπλασιασμό των αποβλίττων, το οποίο βέβαια είναι αναμενόμενο καθώς το κοπτικό διανύει την ίδια απόσταση στο μισό χρόνο.



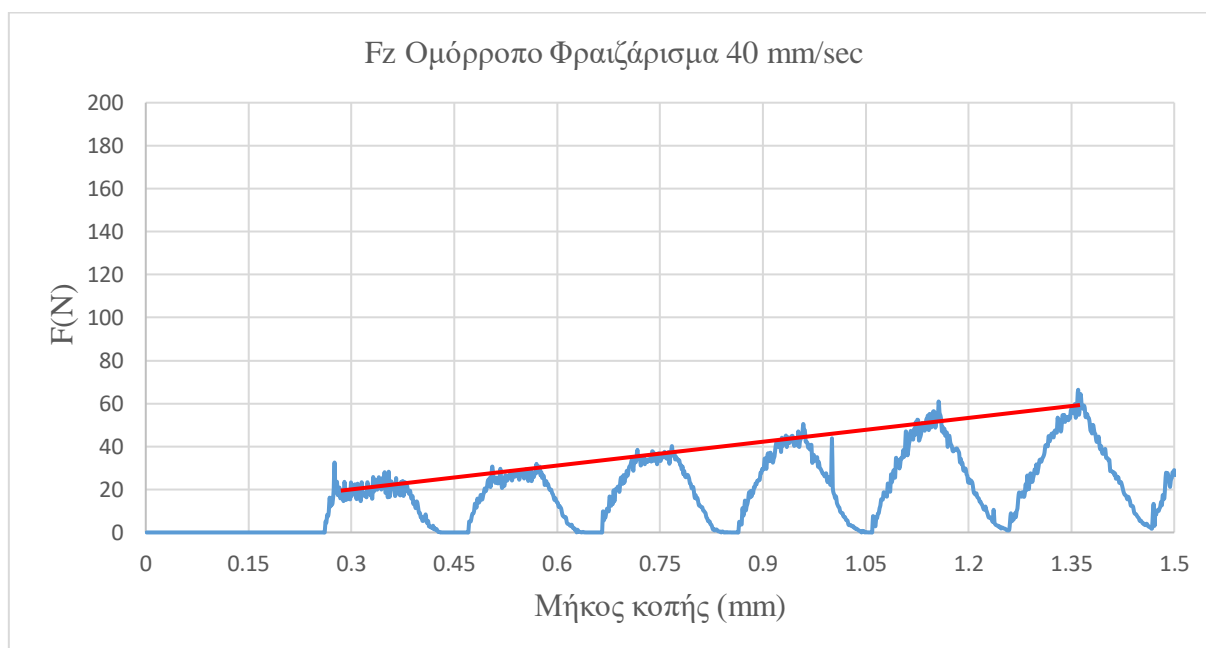
Διάγραμμα 8.10 Δύναμη F_x Ομόρροπο Φραιζάρισμα 40 mm/sec



Διάγραμμα 8.11 Δύναμη F_y Ομόρροπο Φραιζάρισμα 40 mm/sec

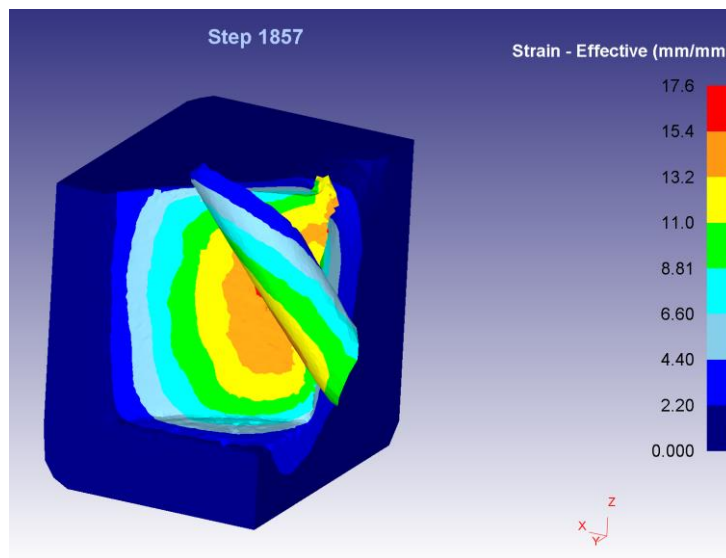
Παρατηρώντας την πορεία της F_x , βλέπουμε ότι για πρώτη φορά οι δυνάμεις που αναπτύσσονται φθίνουν από απόβλιττο σε απόβλιττο καθώς η κοπή προχωράει. Η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται στο πρώτο απόβλιττο και είναι 76 N. Αντιθέτως η F_y διαγράφει αύξουσα πορεία και μάλιστα έχουμε τη μεγαλύτερη μέγιστη τιμή από τις τέσσερις προσομοιώσεις για την F_y , η οποία είναι 196 N. Επίσης, είναι ξεκάθαρο ότι η F_y δεν δείχνει τάση να σταθεροποιηθεί μετά από κάποιο σημείο και το καταλαβαίνουμε από την κλίση της βοηθητικής γραμμής (κόκκινη γραμμή), την οποία έχουμε ορίσει με βάση τις μέγιστες τιμές κάθε αποβλίττου σε κάθε ένα από τα διαγράμματα.

Τέλος, η δύναμη F_z ακολουθεί αύξουσα πορεία όπως και στις προηγούμενες τρεις περιπτώσεις, έχοντας μέγιστη τιμή τα 66 N. Συνολικά προκύπτει ότι η μέγιστη συνολική δύναμη $F_{total,max}$ είναι ίση με 207 N. Συγκρίνοντας τις δύο προσομοιώσεις φραιζαρίσματος, συμπεραίνουμε ότι με διπλασιασμό της ταχύτητας πρόωσης έχουμε κάτι παραπάνω από διπλασιασμό της μέγιστης συνισταμένης δύναμης από 83, στα 207 N. Επίσης η δύναμη F_y παρουσιάζει πολύ μεγάλη αύξηση, σχεδόν 180-200%. Παρόμοια της F_y είναι η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων της F_z .

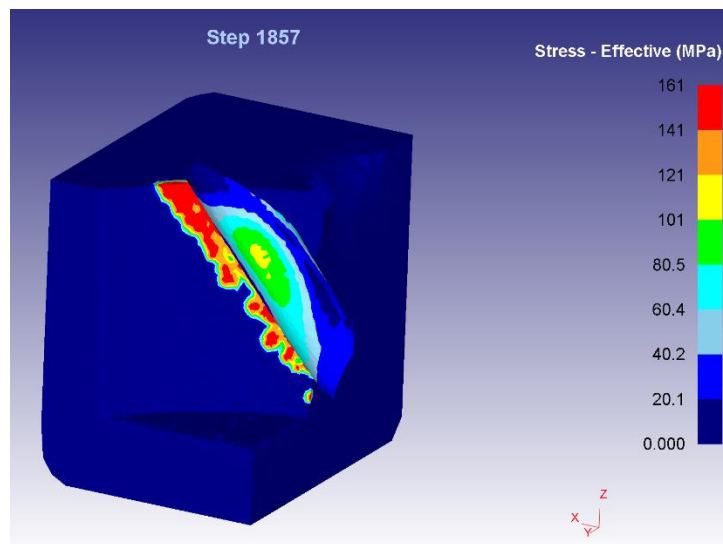


Διάγραμμα 8.12 Δύναμη F_z Ομόρροπο Φραιζάρισμα 40 mm/sec

Εάν συγκρίνουμε τις δύο περιπτώσεις όπου έχουμε ταχύτητα πρόωσης 40 mm/sec, θα δούμε ότι κατά το αντίρροπο φραιζάρισμα την F_x σε μεγάλες τιμές και αύξουσα πορεία, ενώ την F_y σε μικρές τιμές και φθίνουσα πορεία. Ακριβώς αντίθετο σκηνικό για το ομόρροπο φραιζάρισμα, όπου η F_x έχει μικρότερες τιμές με φθίνουσα πορεία, ενώ η F_y μεγαλύτερες τιμές με αύξουσα πορεία. Η F_z και στις δύο περιπτώσεις έχει παρόμοια συμπεριφορά γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι δυνάμεις στον άξονα Z δεν επηρεάζονται από τον τύπο φραιζαρίσματος που θα επιλέξουμε.



Εικόνα 8.36 Strain Effective Ομόρροπο Φραιζάρισμα με πρόωση 40 mm/sec

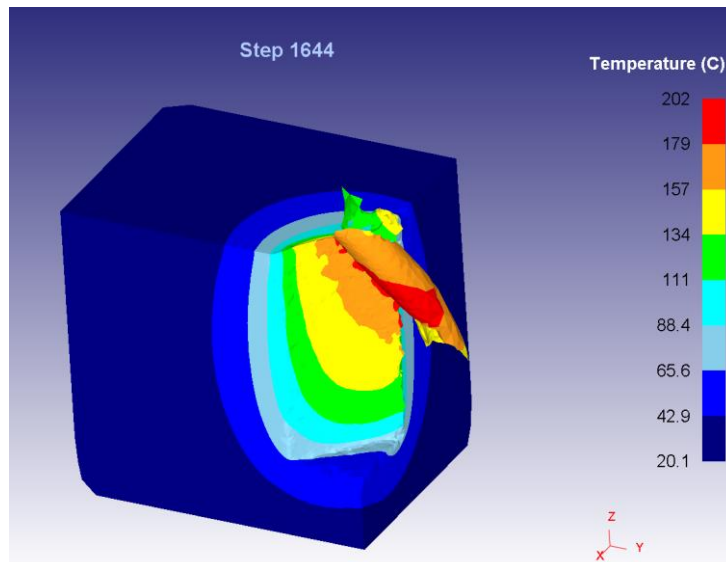


Εικόνα 8.37 Stress Effective Ομόρροπο Φραιζάρισμα με πρόωση 40 mm/sec

Στις εικόνες 8.36 και 8.37 βλέπουμε πως επιδρούν στο τεμάχιο η αποτελεσματική παραμόρφωση και η ισοδύναμη τάση αντίστοιχα σε δύο τυχαίες στιγμές κοπής. Παρατηρούμε ότι η με αλλαγή της τεχνικής φραιζαρίσματος έχει μειωθεί σημαντικά και πάλι η αποτελεσματική παραμόρφωση, ενώ η ισοδύναμη τάση εμφανίζει ακόμα πιο μικρές τιμές σε όλο το απόβλιττο, σε σχέση με τιμές για ομόρροπο φραιζάρισμα με πρόωση 20 mm/sec

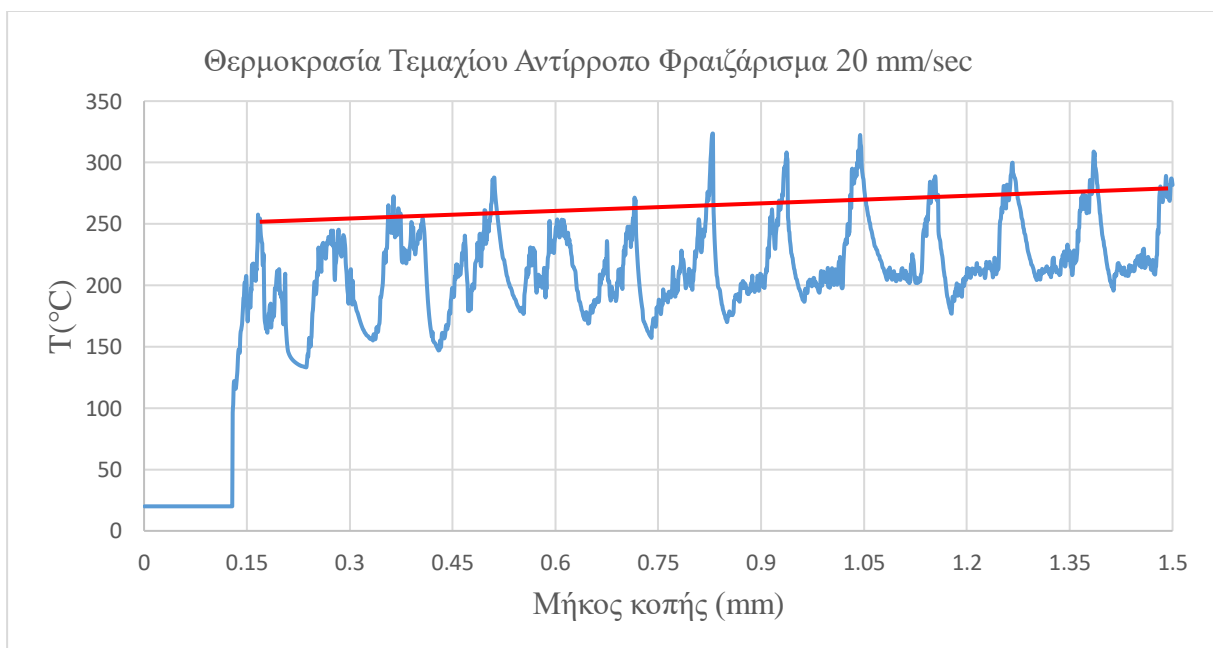
8.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις θερμοκρασίες τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου

Στην εικόνα 8.38 φαίνεται πως κατανέμεται η θερμοκρασία στο τεμάχιο κατά την κοπή, σε μία τυχαία στιγμή. Όπως ήταν αναμενόμενο, η μέγιστη θερμοκρασία εμφανίζεται στο σημείο όπου ακουμπάει το τεμάχιο στην άκρη του κοπτικού εργαλείου, ενώ γίνεται εύκολα ορατό πως όσο απομακρυνόμαστε από εκείνη την περιοχή, οι θερμοκρασία του τεμαχίου ελαττώνεται.



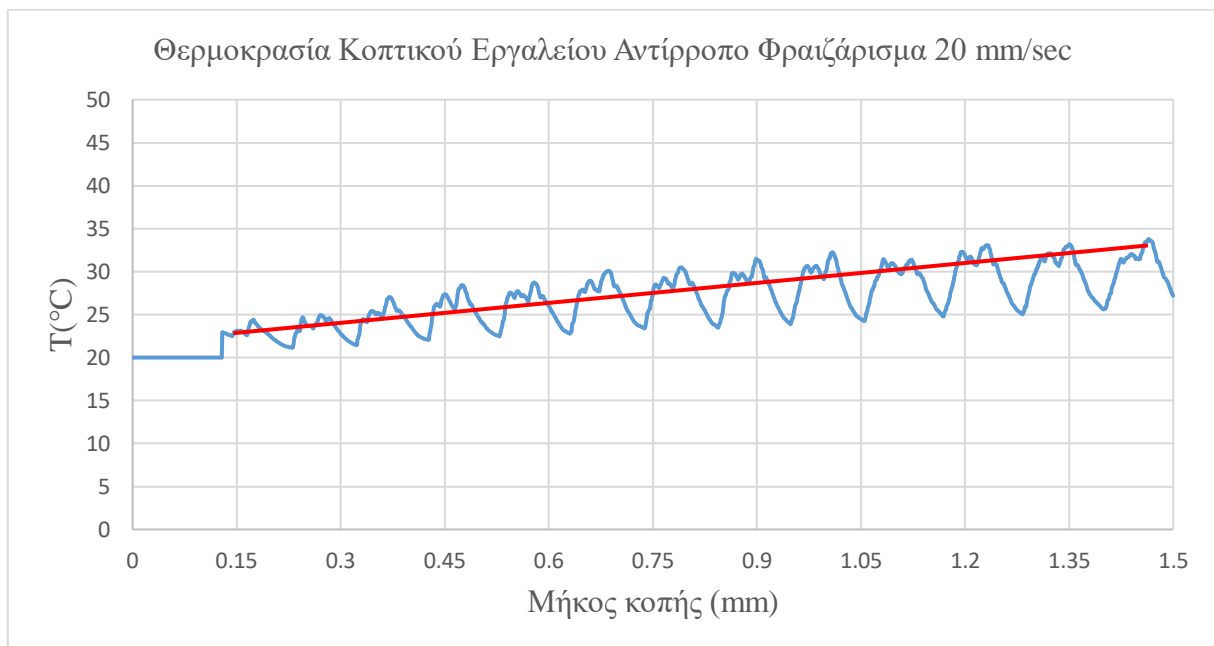
Εικόνα 8.38 Θερμοκρασία Τεμαχίου Αντίρροπο Φραιζάρισμα 20 mm/sec

Έχοντας συγκρίνει τις δυνάμεις κοπής σειρά έχουν οι θερμοκρασίες που αναπτύσσουν το τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο κατά την κοπή. Όπως και στα διαγράμματα των δυνάμεων, έτσι και στα διαγράμματα των θερμοκρασιών γίνεται ορατό πόσα απόβλιττα έχουμε στην κάθε κοπή και είναι φυσικά τα ίδια, 13 απόβλιττα για κοπή με πρόωση 20 mm/sec και 6 απόβλιττα με πρόωση 40 mm/sec.



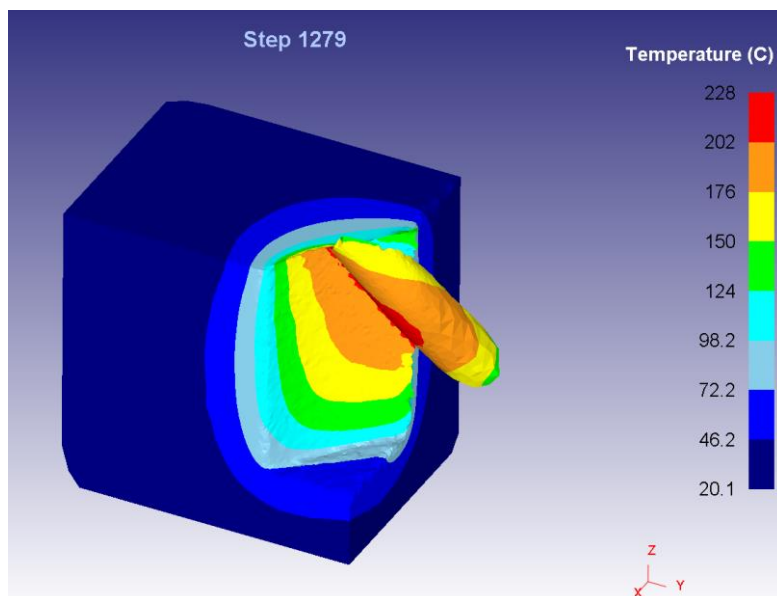
Διάγραμμα 8.13 Θερμοκρασία Τεμαχίου Αντίρροπο Φραιζάρισμα 20 mm/sec

Στο διάγραμμα 8.13 βλέπουμε την μεταβολή της θερμοκρασία του τεμαχίου για αντίρροπο φραιζάρισμα με πρόωση 20mm/sec συναρτήσεϊ του μήκους κοπής, με τις τιμές να κυμαίνονται από 133 έως 323 βαθμούς Κελσίου. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι δεν υπάρχουν ιδιαίτερες αλλαγές από απόβλιττο σε απόβλιττο όσο προχωράει η κοπή.



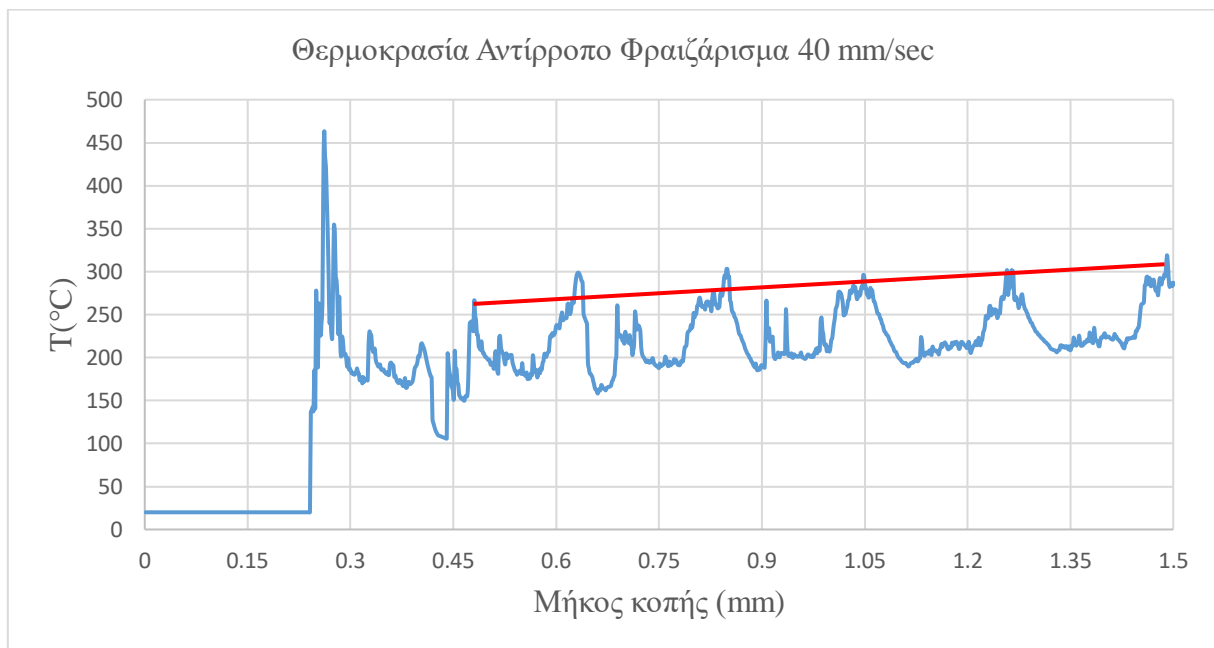
Διάγραμμα 8.14 Θερμοκρασία Κοπτικού Εργαλείου Αντίρροπο Φραιζάρισμα 20 mm/sec

Παρόμοια είναι η εικόνα για το κοπτικό εργαλείο (Διάγραμμα 8.14), καθώς δεν βλέπουμε να υπάρχουν μεγάλες αλλαγές, με την μόνη διαφορά πως η πορεία που ακολουθεί να είναι αύξουσα με μέγιστη τιμή 34 βαθμούς Κελσίου στο τελευταίο απόβλιττο.



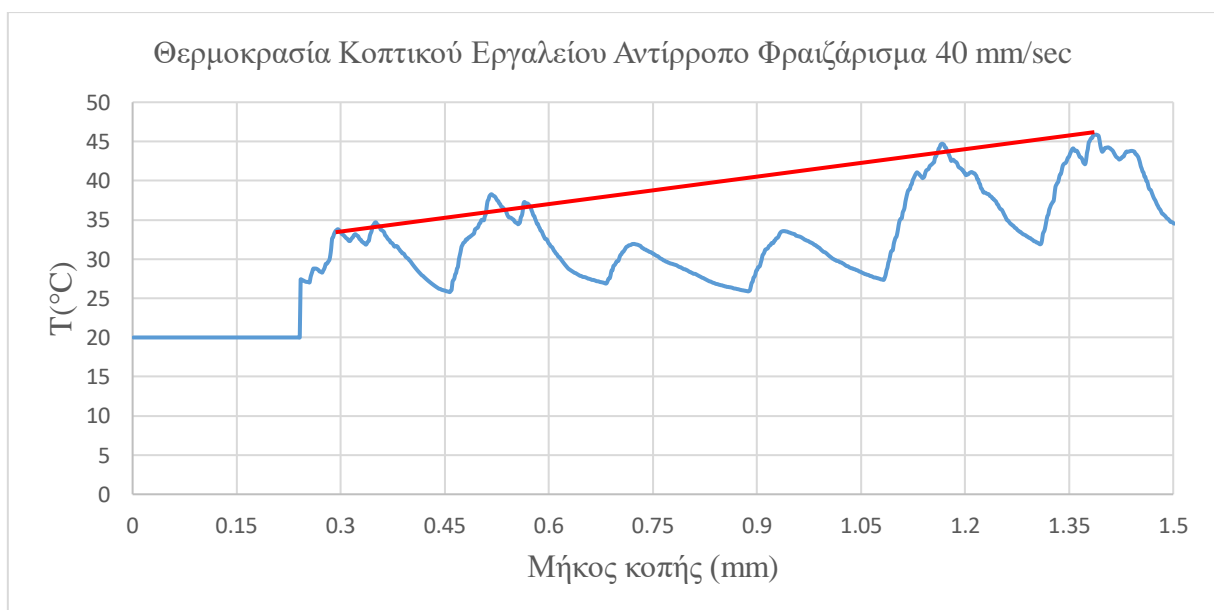
Εικόνα 8.39 Θερμοκρασία Τεμαχίου Αντίρροπο Φραιζάρισμα 40 mm/sec

Στην εικόνα 8.39 φαίνεται πως κατανέμεται η θερμοκρασία στο τεμάχιο, σε μία τυχαία στιγμή για την κοπή αντίρροπου φραιζαρίσματος με πρόωση 40 mm/sec. Εάν τη συγκρίνουμε με την εικόνα 8.38 μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι το απόβλιττο κοπής με πρόωση 40 mm/sec είναι μεγαλύτερο από αυτό της κοπής με 20 mm/sec. Γεγονός αναμενόμενο καθώς το κοπτικό κινείται με διπλάσια μεταφορική ταχύτητα (πρόωση), αλλά με την ίδια περιστροφική ταχύτητα.



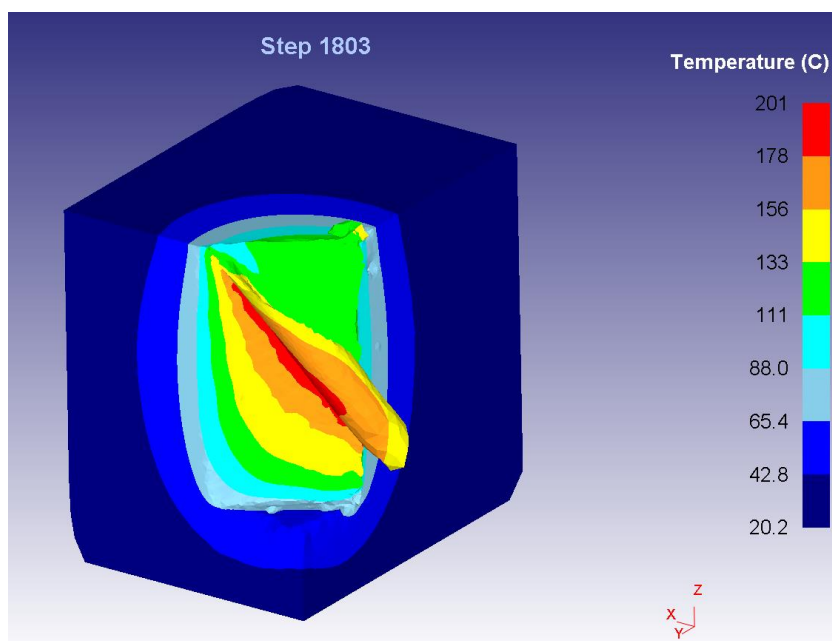
Διάγραμμα 8.15 Θερμοκρασία Τεμαχίου Αντίρροπο Φραιζάρισμα 40 mm/sec

Στο διάγραμμα 8.15, έχουμε την μεταβολή της θερμοκρασία στο τεμάχιο για αντίρροπο φραιζάρισμα όμως με διπλάσια πρόωση. Αν εξαιρέσουμε το πρώτο απόβλιττο, η θερμοκρασία δεν δείχνει να παρουσιάζει ιδιαίτερες αλλαγές με μέγιστη θερμοκρασία τους 320 βαθμούς Κελσίου. Αντίθετα, για την θερμοκρασία του κοπτικού εργαλείου (Διάγραμμα 8.16), παρατηρούμε ότι δεν ακολουθεί κάποιο μοτίβο, έχοντας παρόλα αυτά αύξουσα πορεία με μέγιστη τιμή στους 46 βαθμούς Κελσίου. Το συμπέρασμα που μπορούμε να βγάλουμε από αυτά τα πρώτα τέσσερα διαγράμματα είναι ότι αυξάνοντας την πρόωση στην κοπή αντίρροπου φραιζαρίσματος αυξάνεται τη θερμοκρασία του κοπτικού εργαλείου, ενώ η θερμοκρασία του τεμαχίου φαίνεται να παραμένει σταθερή.



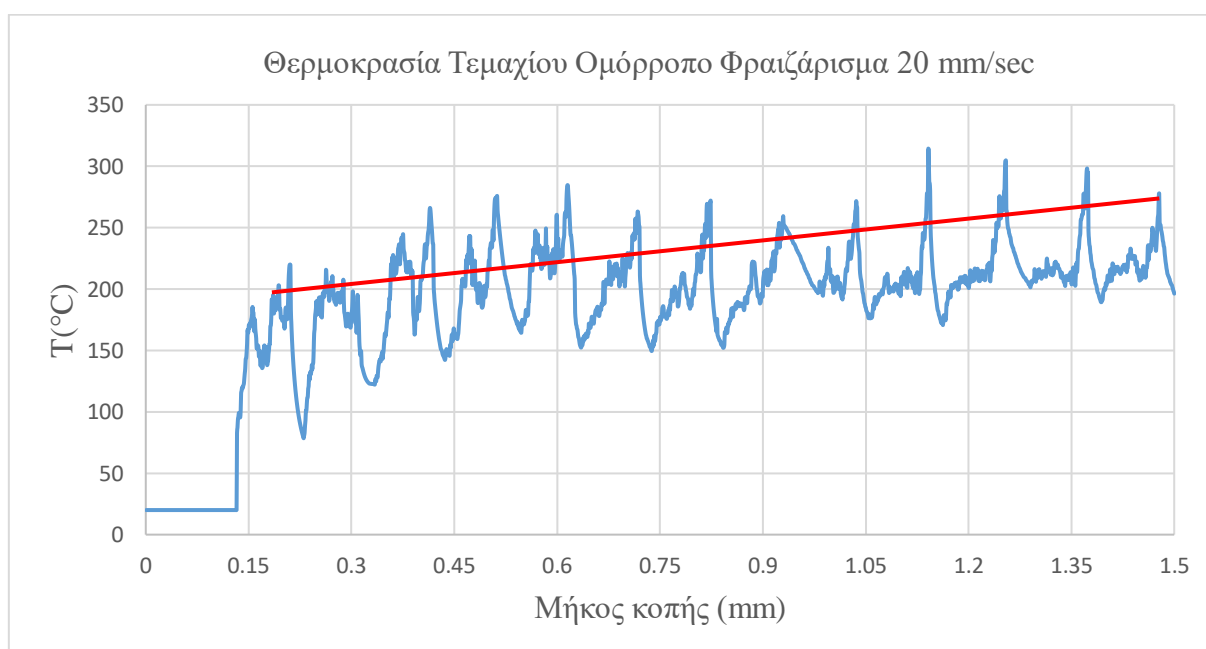
Διάγραμμα 8.16 Θερμοκρασία Κοπτικού Εργαλείου Αντίρροπο Φραιζάρισμα 40 mm/sec

Στην εικόνα 8.40 φαίνεται η θερμοκρασία του τεμαχίου για ομόρροπο φραιζάρισμα με πρόωση 20 mm/sec. Γενικά παρατηρούνται λίγο μικρότερες θερμοκρασίες από αυτές του αντίρροπου φραιζαρίσματος με πρόωση 20 mm/sec.



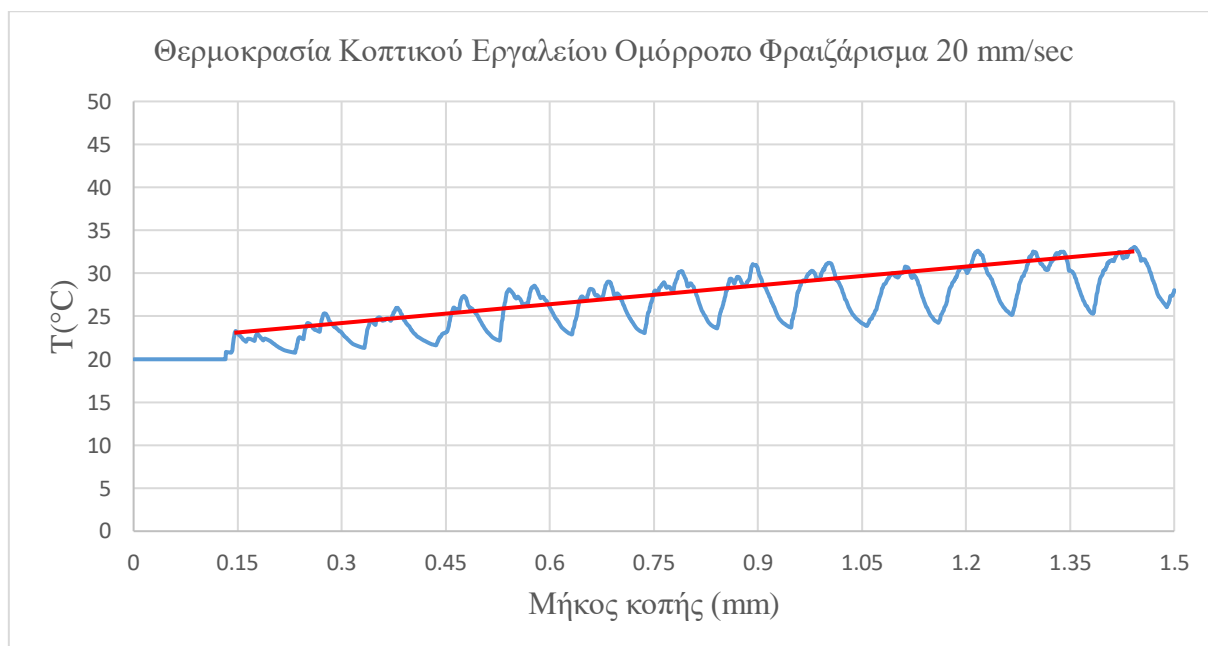
Εικόνα 8.40 Θερμοκρασία Τεμαχίου Ομόρροπο Φραιζάρισμα 20 mm/sec

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.17 η μεταβολή της θερμοκρασίας του τεμαχίου για το ομόρροπο φραιζάρισμα, στο οποίο βλέπουμε ότι καθώς εισχωρεί το κοπτικό στο τεμάχιο, η θερμοκρασία παρουσιάζει μικρή αύξηση με μέγιστη τιμή στους 314 βαθμούς Κελσίου και στη συνέχεια σταθεροποιείται κοντά στους 270 βαθμούς Κελσίου.



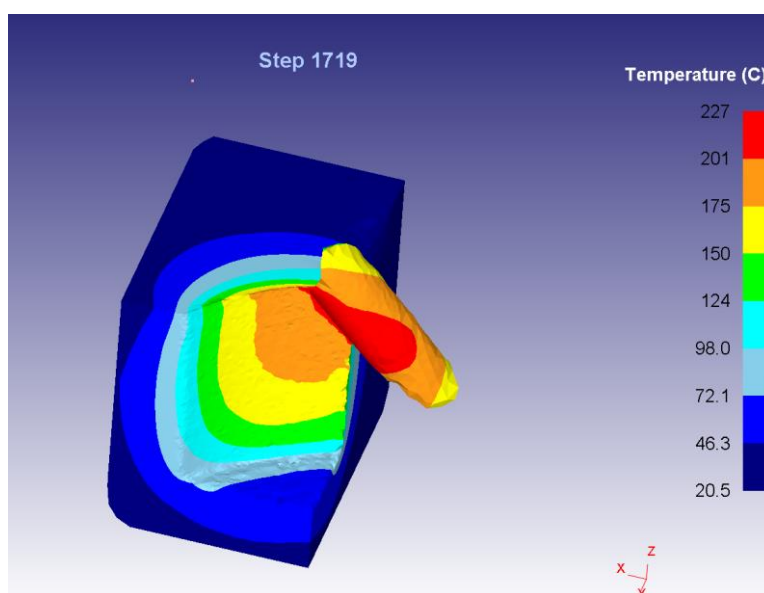
Διάγραμμα 8.17 Θερμοκρασία Τεμαχίου Ομόρροπο Φραιζάρισμα 20 mm/sec

Στο επόμενο διάγραμμα (8.18) βλέπουμε την συμπεριφορά της θερμοκρασίας του κοπτικού εργαλείου να έχει αύξουσα πορεία και μέγιστη τιμή 33 βαθμούς Κελσίου.



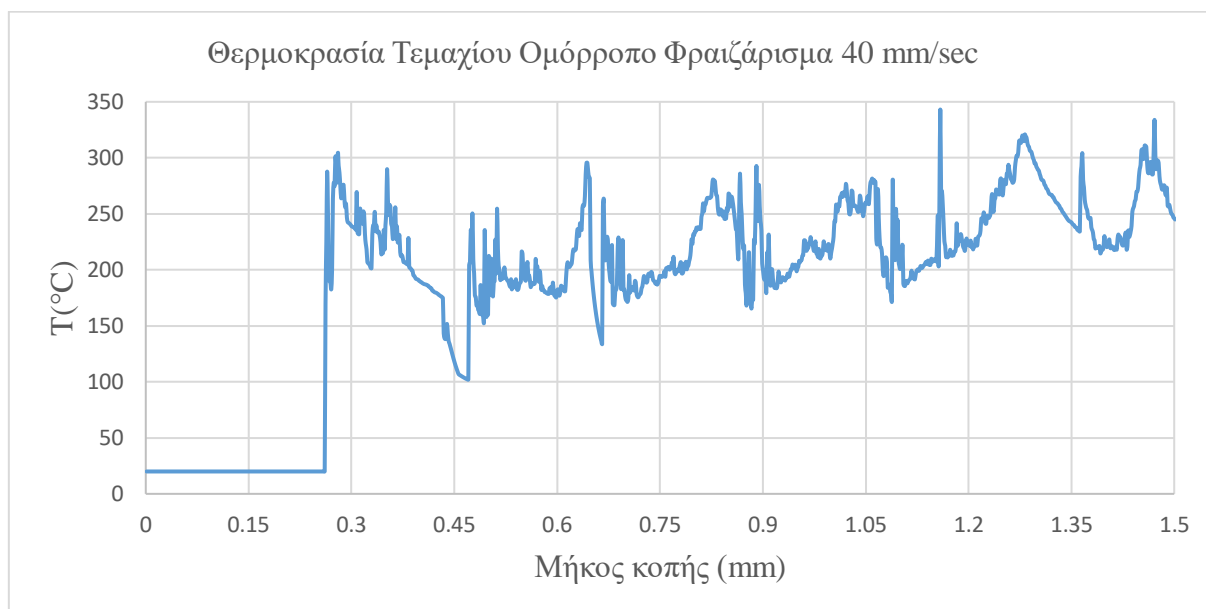
Διάγραμμα 8.18 Θερμοκρασία Κοπτικού Εργαλείου Ομόρροπο Φραιζάρισμα 20 mm/sec

Εάν συγκρίνουμε τις προσομοιώσεις για αντίρροπο και ομόρροπο φραιζάρισμα με ταχύτητα πρόωσης 20 mm/sec θα δούμε ότι τα διαγράμματα παρουσιάζουν μεγάλες ομοιότητες καθώς οι μέγιστες τιμές για κοπτικό και τεμάχιο κατά το αντίρροπο φραιζάρισμα είναι 323 και 34 βαθμοί Κελσίου αντίστοιχα, ενώ κατά το ομόρροπο 314 και 33 βαθμοί αντίστοιχα. Επίσης η κλίση της βοηθητικής γραμμής που έχουμε ορίσει φαίνεται να είναι η ίδια και στα τέσσερα διαγράμματα που αφορούν τις επιμέρους κοπές.



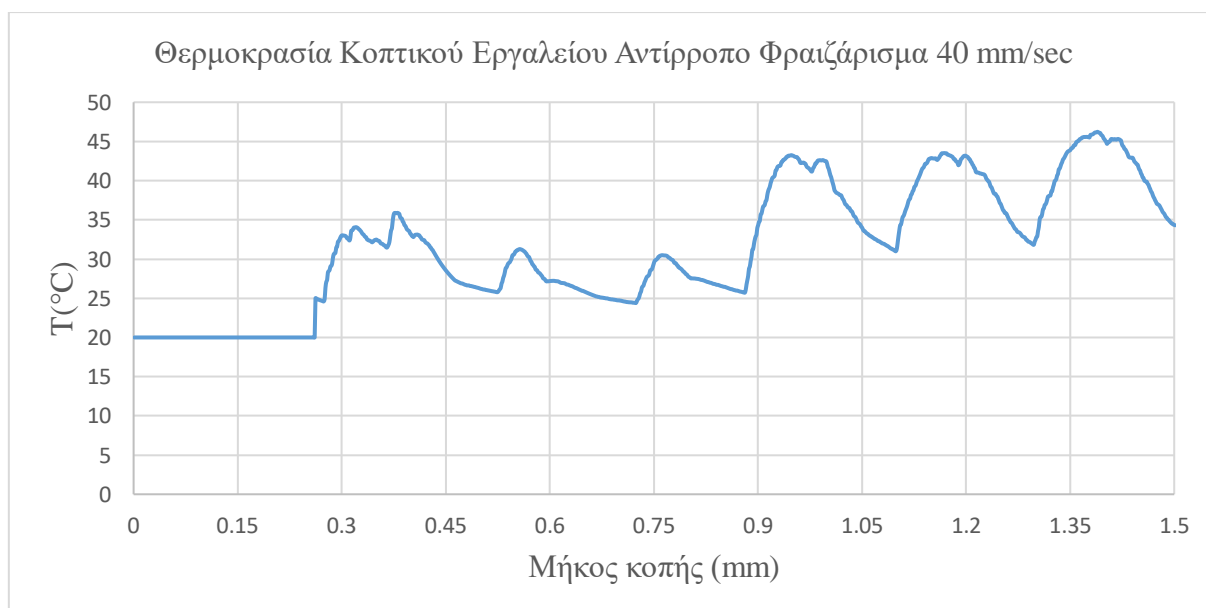
Εικόνα 8.41 Θερμοκρασία Τεμαχίου Ομόρροπο Φραιζάρισμα 40 mm/sec

Στην εικόνα 8.41 φαίνεται πως κατανέμεται η θερμοκρασία στο τεμάχιο, σε μία τυχαία στιγμή για την κοπή ομόρροπου φραιζαρίσματος με πρόωση 40 mm/sec. Παρατηρούμε και πάλι ότι το απόβλιττο είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό της κοπής ομόρροπου φραιζαρίσματος με πρόωση 20 mm/sec. Όπως και στην περίπτωση αντίρροπου με 40 mm/sec παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα 8.19 και 8.20, τα οποία αφορούν την θερμοκρασία σε τεμάχιο και κοπτικό αντίστοιχα, δεν ακολουθούν κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο.



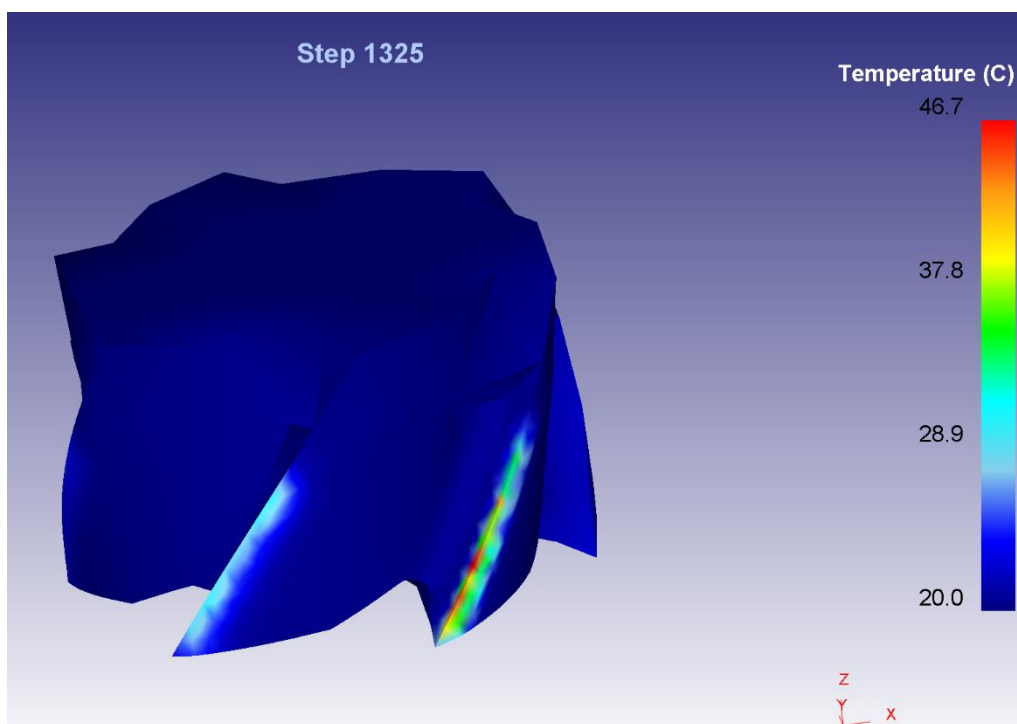
Διάγραμμα 8.19 Θερμοκρασία Τεμαχίου Ομόρροπο Φραιζάρισμα 40 mm/sec

Δεν μπορούμε να αποφανθούμε με σιγουριά ότι ακολουθούν είτε αύξουσα ή φθίνουσα πορεία, ούτε αν φαίνεται να υπάρχει σταθεροποίηση. Οι μέγιστες θερμοκρασίες που μας δείχνουν τα αποτελέσματα είναι 343 για το τεμάχιο και 46 βαθμοί Κελσίου για το κοπτικό εργαλείο.



Διάγραμμα 8.20 Θερμοκρασία Κοπτικού Εργαλείου Ομόρροπο Φραιζάρισμα 40 mm/sec

Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις όπου η πρόωση είναι 40 mm/sec, θα δούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις τα διαγράμματα διαγράφουν παρόμοια πορεία με την μόνη διαφορά ότι κατά το ομόρροπο φραιζάρισμα η μέγιστη θερμοκρασία του τεμαχίου είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή του αντίρροπου. Αντίθετα αν συγκρίνουμε τις δύο περιπτώσεις αντίρροπου φραιζαρίσματος, θα δούμε ότι δεν υπάρχει καμία ομοιότητα. Μπορούμε όμως να συμπεράνουμε, όπως ήταν και αναμενόμενο, ότι με την αύξηση της ταχύτητας πρόωσης έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας τόσο για το τεμάχιο όσο και για το κοπτικό εργαλείο.

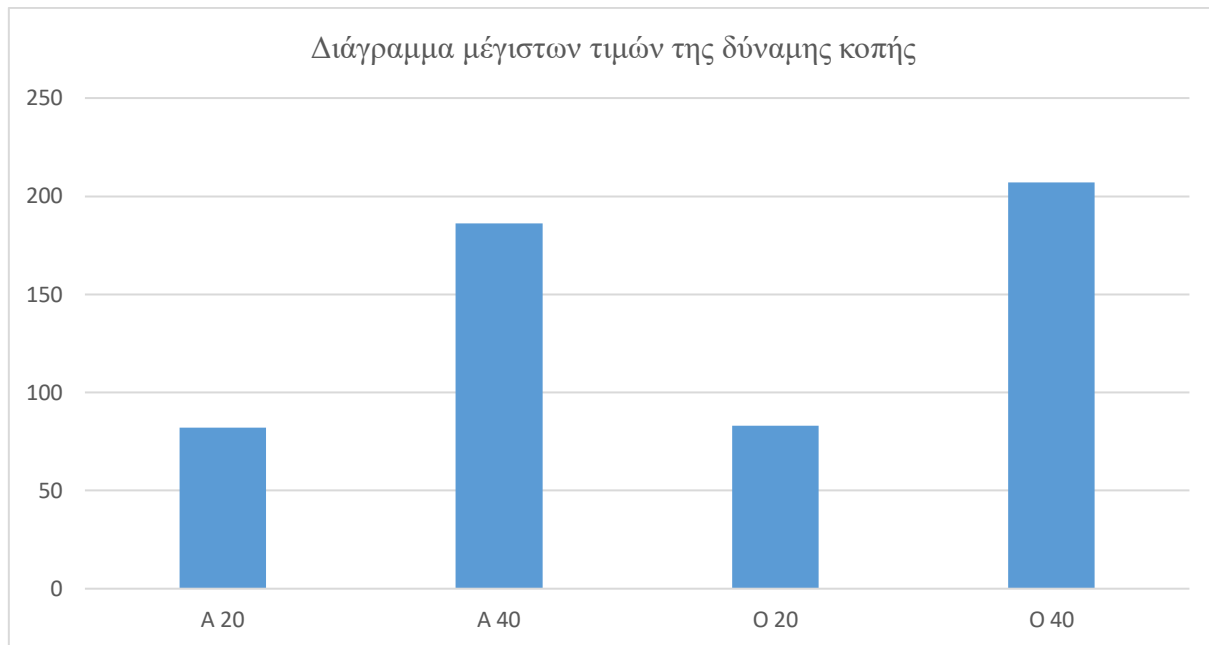


Εικόνα 8.42 Θερμοκρασία κοπτικού εργαλείου Ομόρροπο Φραιζάρισμα 40 mm/sec

Στην εικόνα 8.42 μπορούμε να δούμε πως συμπεριφέρεται το κοπτικό εργαλείο κατά την κοπή ομόρροπου φραιζαρίσματος με πρόωση 40 mm/sec. Εύκολα μπορεί κανείς να παρατηρήσει, ότι το δόντι του κοπτικού εργαλείου το οποίο εμφανίζεται στην εικόνα με τα περισσότερα χρώματα είναι αυτό που κόβει εκείνη την χρονική στιγμή το τεμάχιο. Το αμέσως επόμενο δόντι έχει μόλις αποχωρήσει από το τεμάχιο και έχει αρχίσει να ψύχεται, για αυτό και τα χρώματά του τείνουν προς το μπλε. Τέλος, το τρίτο στην σειρά δόντι, έχει προλάβει ήδη να ψυχθεί, έχοντας ακόμα ελάχιστα γαλάζια σημεία. Παρόμοια είναι η συμπεριφορά του κοπτικού εργαλείου και στις άλλες τρεις περιπτώσεις που μελετάμε.

9. Συμπέρασμα και εκλογή καλύτερης τεχνικής φραιζαρίσματος

Για την επιλογή της καλύτερης τεχνικής φραιζαρίσματος για κοπή τιτανίου, θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν τα επόμενα τρία διαγράμματα που μας δίνουν συγκεντρωτικά τις μέγιστες τιμές της συνολικής δύναμης κοπής και των θερμοκρασιών τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου.

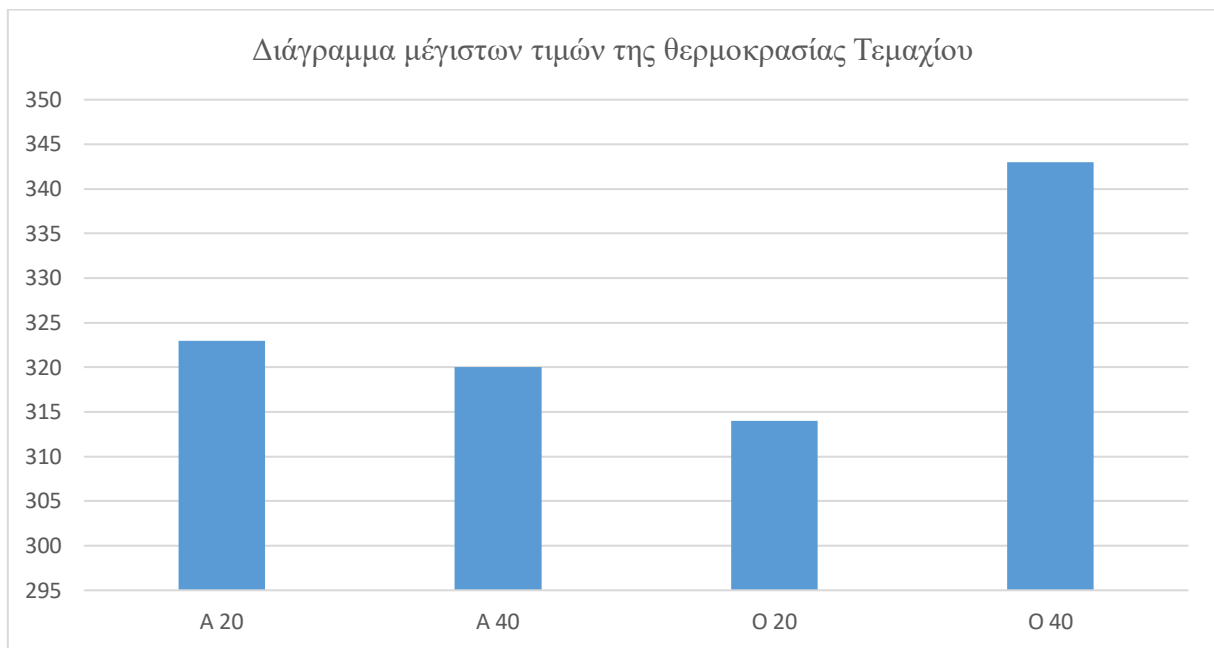


Διάγραμμα 9.1 Μέγιστες τιμές της δύναμης κοπής

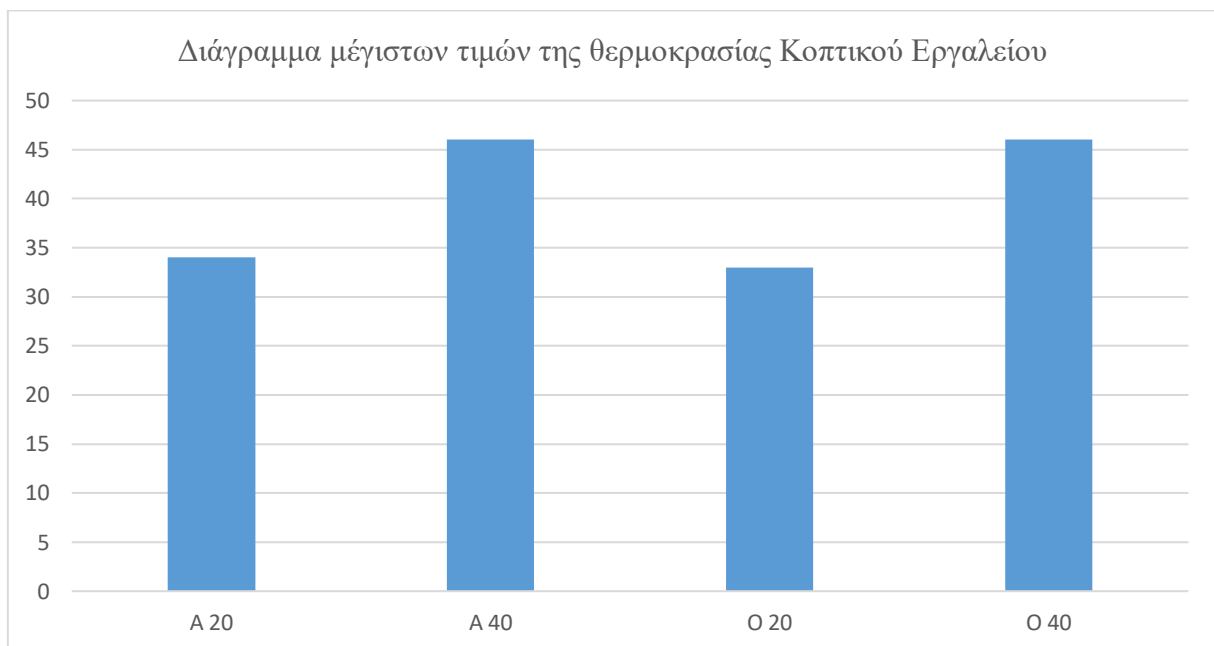
Στο Διάγραμμα 9.1 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές της συνολικής Δύναμης F , που προκύπτει από τις επί μέρους F_x , F_y και F_z . Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, αυξάνοντας την πρόωση κοπής, αυξάνεται και η μέγιστη συνισταμένη δύναμη. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει και το διάγραμμα 9.1, καθώς οι δυνάμεις βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο αν λάβουμε υπόψιν μόνο την πρόωση κοπής ανεξάρτητα τον τύπο φραιζαρίσματος.

Στο διάγραμμα 9.2, παρουσιάζονται με ιδιαίτερο ενδιαφέρον οι μέγιστες θερμοκρασίες κοπής. Σε αντίθεση με το ομόρροπο φραιζάρισμα, όπου με αύξηση της ταχύτητας πρόωσης έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας, κατά το αντίρροπο φραιζάρισμα, με αύξηση της πρόωσης, έχουμε μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας κοπής. Το γεγονός αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί θετικό, καθώς όταν αυξάνουμε οποιαδήποτε ταχύτητα σε μία κοπή φραιζαρίσματος, περιμένουμε να έχουμε και αύξηση της θερμοκρασίας τεμαχίου, η οποία είναι και επιθυμητή.

Συνδυάζοντας τα διαγράμματα 9.1 και 9.2 μπορούμε να καταλήξουμε στο ασφαλές συμπέρασμα πως για την κοπή τιτανίου θα ήταν προτιμότερο να επιλέξουμε χαμηλή ταχύτητα πρόωσης ώστε να έχουμε μικρότερες δυνάμεις κοπής.



Διάγραμμα 9.2 Μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας Τεμαχίου



Διάγραμμα 9.3 Μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας Κοπτικού Εργαλείου

Από το διάγραμμα 9.3 γίνεται αντιληπτό πως το κοπτικό εργαλείο δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τον τύπο φραιζαρίσματος, παρά μόνο ελάχιστα από την πρόωση κοπής.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 8 και 9, εκλέγεται ως καλύτερη τεχνική φραιζαρίσματος για την κοπή τιτανίου, το ομόρροπο φραιζάρισμα με ταχύτητα πρόωσης 20 mm/sec. Για να καταλήξουμε σε αυτή την επιλογή, αρχικά απορρίψαμε τις κοπές με πρόωση 40 mm/sec, καθώς αναπτύσσονται πολύ μεγαλύτερες δυνάμεις κοπής και μεγαλύτερος κίνδυνος φθοράς του κοπτικού εργαλείου λόγω μεγαλύτερων θερμοκρασιών. Στη συνέχεια έπρεπε να επιλέξουμε μεταξύ αντίρροπου και ομορρόπου. Όπως, αναφέραμε και στην

σελίδα 65, οι δύο τεχνικές παρουσιάζουμε πολύ μεγάλες συγκεντρωτικά. Ωστόσο, αυτό που τις ξεχωρίζει είναι οι δυνάμεις F_x και F_y . Κατά το ομόρροπο φραιζάρισμα έχουμε μικρές τιμές τις F_x και μεγάλες τιμές για την F_y . Ακριβώς αντίθετη είναι η κατάσταση για το αντίρροπο φραιζάρισμα, όπου η F_x παρουσιάζει μεγάλες τιμές, ενώ η F_y μικρές τιμές. Επειδή η F_x είναι η κύρια δύναμη κοπής, επιλέγουμε την τεχνική του ομόρροπου φραιζαρίσματος για κοπή τιτανίου με πρόωση 20 mm/sec ως την βέλτιστη δυνατή.

10. Προβληματισμοί και ιδέες για μελλοντική έρευνα

Σχεδόν σε όλες τις έρευνες και τις συγκρίσεις που αφορούν το αντίρροπο και το ομόρροπο φραιζάρισμα, το ομόρροπο φραιζάρισμα φαίνεται να είναι καλύτερο και πιο αποτελεσματικό. Ωστόσο, μετά από την συγκεκριμένη έρευνα θα μπορούσαμε να πούμε ότι μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το αντίρροπο φραιζάρισμα και η κινηματική του. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6, υπάρχουν μερικές σπάνιες περιπτώσεις όπου το αντίρροπο μπορεί να φανεί πιο αποδοτικό και αποτελεσματικό. Στην συγκεκριμένη εργασία παρατηρήσαμε μερικά αξιοπερίεργα αποτελέσματα, τα οποία μας έκαναν να προβληματιστούμε. Αρχικά, με αύξηση της πρόωσης (διπλασιασμό), περιμέναμε να έχουμε και αύξηση της θερμοκρασίας κοπής. Αυτό συνέβη μόνο στην περίπτωση του ομόρροπου φραιζαρίσματος, όπου η μέγιστη θερμοκρασία αυξήθηκε κατά 30 βαθμούς Κελσίου. Αντίθετα, στο αντίρροπο φραιζάρισμα, όχι μόνο δεν αυξήθηκε η θερμοκρασία τεμαχίου, αλλά μειώθηκε ελάχιστα. Επίσης, όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 9, οι δυνάμεις F_x και F_y , παρουσίασαν ακριβώς αντίθετες συμπεριφορές σε ομόρροπο και αντίρροπο φραιζάρισμα. Όμως προέκυψαν δύο διαγράμματα, ένα για την δύναμη F_x κατά το ομόρροπο φραιζάρισμα με πρόωση 40 mm/sec και ένα για την F_y κατά το αντίρροπο φραιζάρισμα με πρόωση 40 mm/sec, τα οποία ήταν τα μόνα διαγράμματα τα οποία διέγραφαν φθίνουσα πορεία. Θα μπορούσαμε, να αποδώσουμε αυτό το φαινόμενο στην αύξηση της θερμοκρασίας, ωστόσο, αυτό θα ίσχυε μόνο στην περίπτωση του ομόρροπου φραιζαρίσματος, καθώς στο αντίρροπο φραιζάρισμα δεν είχαμε αύξηση της θερμοκρασίας με αύξηση της πρόωσης. Για τους παραπάνω λόγους, θα ήταν πολύ ενδιαφέρον η συνέχιση της έρευνας και η κατεύθυνση αυτής κυρίως προς το αντίρροπο φραιζάρισμα σε ακόμα μεγαλύτερες προώσεις κοπής.

Επίσης, η σύγκριση αντίρροπου και ομόρροπου φραιζαρίσματος θα μπορούσε να συνεχιστεί με κριτήριο άλλους παράγοντες όπως η ταχύτητα κοπής (περιστροφική) και το βάθος κοπής. Τέλος, επειδή το τιτάνιο είναι ένα πολύ σκληρό υλικό το οποίο έχει εμφανιστεί τα τελευταία χρόνια τόσο στον βιομηχανικό χώρο όσο και στην καθημερινότητά μας, θα μπορούσαμε να επεκτείνουμε την έρευνα μας πάνω σε αυτό για να μπορέσουμε να βρούμε τις κρίσιμες τιμές που μπορούν να πάρουν η ταχύτητα και η πρόωση κοπής κατά το φραιζάρισμα τιτανίου, ομόρροπου ή αντίρροπου.

11. Βιβλιογραφία

- [1] CHAPTER 15 – FRAIZARISMA, ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
- [2] Τόρνος_Φραιζα_Διάτρηση_Λείανση, ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΓΕΡΑΡΔΗΣ, διδακτικό υλικό
- [3] ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 1670 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΩΝ, ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΠΑΠΠΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
- [4] Φρέζα CNC Optimum F 80 ADVANCED, Παναγιώτης Σπανούδης, <https://spanoudis.gr/product/freza-cnc-optimum-f-80-advanced/>
- [5] CNC programming software with G-code, <https://www.autodesk.com/ca-en/solutions/cnc-programming>
- [6] Μηχανική της κοπής, ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΓΕΡΑΡΔΗΣ, διδακτικό υλικό
- [7] ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Κατεργασίες Κοπής από το Μακρόκοσμο στο Μικρόκοσμο και Υλικά Κοπτικών Εργαλείων τους, Γιαννόπουλος Διονύσιος
- [8] Bert P. Erdel, “High-Speed Machining”, Society of Manufacturing Engineers, 2003
- [9]. Λαζαρίδη Λ., «Μηχανουργική Τεχνολογία», Ίδρυμα Ευγενίδου, 1997.
- [10]. Μαρκόπουλος Α. , «Κατεργασίες αποβολής υλικού λίαν υψηλής ακρίβειας», Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2006.
- [11]. Dr. Saad Kariem Shather, “Studying the Effect of Tool Nose Radius on Workpiece Run Out and Surface Finish”, Eng. & Tech Journal, 2008, pages 256-261.
- [12]. J. Chae, S.S. Park, T. Freiheit, Investigation of micro-cutting operations, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006), 313–332.
- [13] ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΚΟΠΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ, ΕΙΡΗΝΑΙΟΣ ΜΠΑΛΛΑΣ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
- [14] Κοπτικά_εργαλεία, ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΓΕΡΑΡΔΗΣ, διδακτικό υλικό
- [15] ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ Ti-6Al-4V ELI: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ LS-DYNA, ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΚΑΣΤΡΙΤΣΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π
- [16] T2500Z cermet grade for excellent machined surface quality, <https://www.sumitomotool.com/en/news/newsarticle/t2500z-cermet-grade-for-excellent-machined-surface-quality>
- [17] Κυβικό νιτρίδιο του βορίου (CBN), Υψηλής έντασης νιτρίδιο κυβικού βορίου CBN115, <https://superdiamond-zx.com/el/shop/high-intensity-cubic-boron-nitride-cbn115/>

- [18] CHAPTER 2 - ΥΛΙΚΑ ΚΟΡΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ, ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
- [19] ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΛΟΞΗΣ ΚΟΠΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, Καθ. Αριστομένης Αντωνιάδης, Διπλ. Μηχ.(MSc) Χαρά Ευσταθίου
- [20] Ορθογωνική κοπή I και II, ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΓΕΡΑΡΔΗΣ, διδακτικό υλικό
- [21] ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ HALLOGEN EFFECT ΣΕ Ti-6Al-4V ΜΕ ΧΡΗΣΗ NH₄Cl ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΣΤΟΥΣ 2000C, Καριντίας Ευάγγελος, Πολυμερίδης Αναστάσιος
- [22] 3D PERIODIC TABLE - 22 TITANIUM POSTER, <https://pixers.uk/posters/3d-periodic-table-22-titanium-45682611>
- [23] Matthew J. Donachie, Jr. Titanium A Technical Guide
- [24] Αγγελική Λεκάτου, ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΚΡΑΜΑΤΑ, Παπασωτηρίου Αθήνα (2005)
- [25] Νέα πρωτοποριακή διαδικτυακή πύλη για το αναπνευστικό, Άννα Σταυράκη, <https://iatro.gr/nea-protoporiaki-diadiktyaki-pyli-gia-to-anapnefstiko/>
- [26] CNC seminars, Αντίρροπο ή Ομόρροπο Φραιζάρισμα, <https://www.cnc-seminars.com/el/synthikes-kopis-koptika-ergaleia/omorroppo-antirropo-climb-conventional-frezarisma/>
- [27] Troubleshooting Manufacturing Processes, Adapted from Tool and Manufacturing Engineers Handbook, La Roux K. Gillespie, PE, CmfgE, FOURTH EDITION
- [28] Finite Element Method – What Is It? FEM and FEA Explained, Ajay Harish, SIMSCALE Blog
- [29] Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΟΠΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΣΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ, ΣΤΟ ΚΟΠΤΙΚΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΤΕΜΑΧΙΟ, ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ ΤΙΤΑΝΙΟΥ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΓΚΑΡΑΒΕΛΑΣ
- [30] S. S. Rao, The finite element method in engineering, Cambridge, MA: Elsevier, 2017.
- [31] F. Williamson Jr., « A historical note on the finite element method» International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1980.
- [32] R. C. H. M. L. T. M.J. Turner, «Stiffness and deflection analysis of complex structures» Journal of Aeronautical Sciences 23.
- [33] J. Przemieniecki, Theory of Matrix Structural Analysis,, New York: McGraw-Hi, 1968.
- [34] Mases Engineering software, <https://masesoft.com/scia-engineer-14.html>