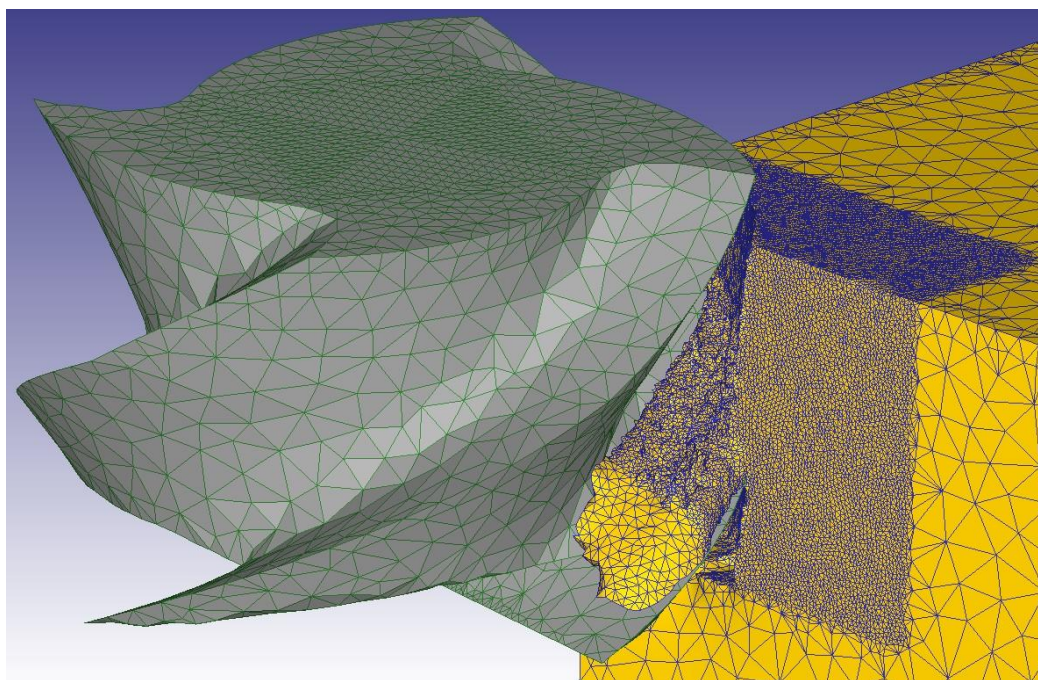




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΟΥ
ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ
7075

ΜΙΧΑΗΛ ΚΟΥΡΜΟΥΚΗΣ Α.Ε.Μ.: 2432

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΓΕΡΑΡΔΗΣ

ΚΟΖΑΝΗ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΟΥ
ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ
7075**

ΜΙΧΑΗΛ ΚΟΥΡΜΟΥΚΗΣ Α.Ε.Μ.: 2432

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΓΕΡΑΡΔΗΣ

ΚΟΖΑΝΗ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αλουμίνιο 7075 είναι ένα κράμα που πρωταγωνιστεί στη σύγχρονη βιομηχανία, με πληθώρα εφαρμογών να βασίζονται σε αυτό. Η δημοτικότητα του αυτή έχει να κάνει με ιδιότητες όπως την εξαιρετικά αντοχή κατά βάρος, την αντοχή στη διάβρωση, αλλά και την ολκιμότητα του. Το αλουμίνιο αποτέλεσε και αποτελεί ένα βασικό μέταλλο στον τομέα της μεταλλουργίας.

Οι κατεργασίες αφαίρεσης υλικού είναι ένας από τους αρχαιότερους τομείς της τεχνολογίας και της ιστορίας, συμβαδίζοντας με την πρόοδο και τα επιτεύγματα του ανθρώπου. Στη σημερινή ημέρα βασίζονται σε προηγμένα υλικά όπως τα σκληρομέταλλα για την επιτυχή κατεργασία, ανοίγοντας το δρόμο στην κατασκευή αδύνατων, μέχρι πρότινος, γεωμετριών από χρησιμότερα υλικά όπως το αλουμίνιο 7075, με τη χρήση CNC εργαλειομηχανών. Αυτές οι διεργασίες, καθώς και η βιομηχανία γύρω τους, βασίζονται στην βελτιστοποίηση των μεθόδων κατεργασίας, την μέγιστη παραγωγικότητα και την ελαχιστοποίηση του κόστους της κατεργασίας.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται ευρέως στη Μηχανολογία με στόχο ακριβώς την προσομοίωση και πρόβλεψη της αστοχίας ή διαφόρων παραμέτρων ενός συστήματος. Μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων DEFORM 2D/3D προσομοιώθηκαν δυο περιπτώσεις πρόωσης και ταχύτητας περιστροφής στο μετωπικό φρεζάρισμα αλουμινίου 7075. Οι κατεργασίες προσομοιώθηκαν με τη χρήση κοπτικού εργαλείου καρβιδίου με προσμίξεις κοβαλτίου ποσοστού 19% από την βιβλιοθήκη του DEFORM 2D/3D, το οποίο σχεδιάστηκε μέσω του CAD προγράμματος Autodesk Inventor Professional 2023. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν καθαρίστηκαν από τυχόν θόρυβο και σφάλματα και παρουσιάστηκαν σε γραφήματα μέσω του λογισμικού MathWorks MATLAB R2023a.

ABSTRACT

Aluminum 7075 is an aluminum alloy starring in the modern manufacturing industry, with a wide variety of applications based on it. This popularity is based on properties like the strength to weight ratio, the corrosion resistance, or the ductility it possesses. Aluminum was and still is a basic metal in the metalworking industry.

Material removal machining is one of the oldest fields of technology and history, keeping pace with man's progress and achievements. In today's age, it relies upon advanced materials such as carbides for successful machining, opening the way to the manufacturing of previously impossible geometries made with materials such as Al7075, using CNC machines. These processes, and the surrounding industry, are based on the optimization of the various machining methods, maximizing productivity, and minimizing machining costs.

The finite element method is widely used in engineering aiming at simulating and predicting a system's failure or other parameters. By means of the DEFORM 2D/3D finite element software, two cases of feed and rotation speed face milling of aluminium 7075 were simulated. The milling processes were simulated using a carbide milling tool of 19% cobalt impurity, designed through the CAD program Autodesk Inventor Professional 2023. The results obtained were cleaned from any noise or errors and were presented by means of MathWorks MATLAB R2023a software.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Φίλε μου Περικλή Σταυρόπουλε, μου κίνησες το ενδιαφέρον για το αντικείμενο της Μεταλλουργίας και, για αυτό, θα σε θυμάμαι πάντα.

Με την διπλωματική μου εργασία ολοκληρώνονται οι υποχρεώσεις μου προς το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Ευχαριστώ όλους τους παράγοντες που συντέλεσαν στην μεταβολή μου, από απόφοιτο Γενικού Λυκείου, σε Μηχανολόγο Μηχανικό. Υπό αυτή τη σκέψη, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τον υπεύθυνο καθηγητή μου, κ. Γεράρδη Στέφανο, για την υπομονή και την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Οι συμβουλές και η πειθαρχία που μου δίδαξε μέσω αυτής της εργασίας μου φάνηκαν πολύτιμες και θα με συνοδεύουν σε όλη την επαγγελματική μου καριέρα.

Ακόμα, πολύ σημαντική συμβολή στην παρούσα εργασία αποτέλεσε η δουλειά της αδερφής μου, Κουρμούκη Αρσενίας, φοιτήτριας του Τμήματος Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, στην εικονογράφηση μεγάλου μέρους της διπλωματικής μου. Την ευχαριστώ επίσης για την τεράστια υπομονή προς το πρόσωπό μου, όλα αυτά τα χρόνια της συγκατοίκησης μας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς, τους παππούδες και την οικογένειά μου για την ηθική και υλική στήριξη των σπουδών μου σε τόπο τόσο μακρινό από την Πάρο μας, αλλά και τους φίλους μου σε Κοζάνη και Πάρο οι οποίοι έκαναν όλα αυτά τα χρόνια ως φοιτητής λίγο πιο ευχάριστα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
2. ΘΕΩΡΙΑ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ.....	9
2.1. ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ	11
2.1.1. ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΕΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ – ΤΟΡΝΟΙ.....	11
2.1.2. ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΕΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ – ΦΡΕΖΕΣ	13
2.1.3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ – NUMERICAL CONTROL (NC)	13
2.1.4. ΤΟΡΝΟΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	14
2.1.5. ΤΟΡΝΟΙ CNC	15
2.1.6. ΦΡΕΖΕΣ CNC	16
2.1.7. ΠΟΛΥΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	16
2.1.8. ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΥΠΟ ΓΩΝΙΑ	17
2.2. ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ.....	17
2.2.1. ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΚΟΠΗ	17
2.2.2. ΜΕΤΩΠΙΚΟ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ.....	19
2.3. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ – ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	20
2.3.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΑΙΧΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΡΟΩΣΗΣ ΤΟΥ ΚΟΠΤΙΚΟΥ ΣΤΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΤΕΜΑΧΙΟΥ	22
3. ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ.....	23
3.1. ΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΟΥ ΚΟΠΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ	23
3.2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ	23
3.3. ΥΛΙΚΑ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ.....	24
3.3.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	24
3.3.2. ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΠΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΕΣ.....	25
3.3.3. ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΠΟ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΑΛΛΟ.....	27
3.3.4. ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΠΟ ΚΕΡΑΜΙΚΑ	28
3.3.5. ΚΥΒΙΚΟ ΒΟΡΙΟ – ΝΙΤΡΙΔΙΟ (CBN).....	29
3.3.6. ΔΙΑΜΑΝΤΙ.....	29
3.4. ΕΙΔΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ	29
3.4.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΛΕΠΤΩΝ ΣΚΛΗΡΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ	30
3.4.2. PVD ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ	30
3.4.3. CVD ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ.....	34
3.5. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ	35
3.5.1. ΨΕΥΔΟΚΟΨΗ	38
4. ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 7075 ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ.....	40
4.1. ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	40
4.2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075.....	42

4.3.	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	42
4.3.1.	ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	42
4.3.2.	ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	43
4.3.3.	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	43
4.3.4.	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ AL7075-T6 ΣΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ SAE AMS ΚΑΙ ASTM	44
4.3.5.	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ – ΟΝΟΜΑΣΙΕΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075 ΑΝΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ	44
5.	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ – ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΟΠΗ	45
5.1.1.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ ΑΝΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ	47
6.	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΟΠΗ	50
7.	Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ	52
8.	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΟΠΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ – AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2023.....	54
8.1.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	54
8.2.	ΒΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	54
9.	ΠΑΚΕΤΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – DEFORM 3D.....	60
9.1.	ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ (PRE-PROCESSOR).....	61
9.2.	ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ DEFORM 3D.....	68
9.3.	ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ	69
9.4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	70
9.4.1.	ΜΑΤLAB	70
10.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	74
11.	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	80
12.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	81
13.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	89

ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε αναλυτική μεθοδολογία για την δημιουργία μοντέλου και την προσομοίωση της κατεργασίας μετωπικού φρεζαρίσματος αλουμινίου 7075. Μέσα από την προσομοίωση λήφθηκαν αποτελέσματα για τις δυνάμεις της κοπής, τη ροπή, τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο κοπτικό εργαλείο, τις τάσεις και τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο τεμάχιο, οι οποίες δίνουν μια σαφή εικόνα για την καταπόνηση και την φθορά η οποία υπεισέρχεται κατά την κατεργασία στο κοπτικό εργαλείο.

Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε σχεδιάστηκε και αναλύθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Inventor Professional της εταιρείας Autodesk. Για την προσομοίωση της κοπής, αλλά και για το στήσιμο του προβλήματος αξιοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων DEFORM 2D/3D. Ως υλικό του κοπτικού εργαλείου επιλέχθηκε καρβίδιο με πρόσμιξη κοβαλτίου κατά ποσοστό 19%.

Τα συστήματα τα οποία αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία είχαν να κάνουν με την επίδραση της πρόωσης και της περιστροφικής ταχύτητας στη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Έλαβαν χώρα δυο προβλήματα πρόωσης και ταχύτητας περιστροφής. Το πρώτο με πρόωση 0,4 χιλιοστά ανά κοπτική ακμή και 1500 στροφές ανά λεπτό, και το δεύτερο με πρόωση 0,8 χιλιοστά ανά κοπτική ακμή και 3000 στροφές ανά λεπτό.

Με γνώμονα την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, δημιουργήθηκε κώδικας στο πρόγραμμα MATLAB R2023a της εταιρείας MathWorks. Μέσα από αυτόν αφαιρέθηκε μεγάλο μέρος του θορύβου και των σφαλμάτων που περιστασιακά προέκυψαν στα αποτελέσματα. Τέλος, παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν τα αποτελέσματα σε μορφή γραφημάτων με βάση το χρόνο και το μήκος κοπής.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κατεργασίες αφαίρεσης υλικού είναι ένας από τους κυριότερους πυλώνες της δευτερογενούς παραγωγής. Η μεταλλουργία, στο βάθος των αιώνων της Ελληνικής και της Παγκόσμιας Ιστορίας, βρίσκεται στον πυρήνα της προόδου και της εξέλιξης της τεχνολογίας. Δεν είναι τυχαίο ότι η άνοδος του βιοτικού επιπέδου στη σύγχρονη κοινωνία ταυτίζεται χρονικά με την ανακάλυψη και βελτίωση των διαφόρων υλικών, κυρίως των μετάλλων, καθώς και των μεταλλουργικών διαδικασιών. Από την μετάβαση στην εποχή του χαλκού από την νεολιθική περίοδο, και από την εποχή του σιδήρου, στην ελληνιστική και ρωμαϊκή, στα βυζαντινά και από εκεί στα σύγχρονα έτη, τα επιτεύγματα της ανθρώπινης διανόησης προέκυψαν από την πρόοδο στην μεταλλουργία και την διαμόρφωση αντικειμένων.

Παραδείγματα αυτού του φαινομένου υπάρχουν πολλά: σίδηρος με επίστρωση μολύβδου στους κίονες του Παρθενώνα, μέθοδοι βαφής στα μεσαιωνικά σπαθιά και ξίφη, και σήμερα σύγχρονα υπερωκεάνια και ηλεκτρονικά ελεγχόμενα πολυβόλα εμβέλειας πολλών χιλιομέτρων. Είναι προφανές ότι οι άνθρωποι βασίζονταν ανέκαθεν στις ιδιότητες των μετάλλων, με στόχο οι εφευρέσεις τους, τόσο να είναι λειτουργικές, όσο και να αντέχουν στην δοκιμασία του χρόνου. Έτσι, τυχαία ή ηθελημένα, δημιουργούσαν κράματα, αμβλύνοντας τα μειονεκτήματα ή οξύνοντας τα πλεονεκτήματα τους μέσω προσμίξεων. Ένα σύγχρονο και πολύ σημαντικό κράμα για την αεροναυπηγική, αλλά και πολλές άλλες βιομηχανίες, είναι το αλουμίνιο 7075, γνωστό και ως AL7075.

Όπως παρουσιάζεται και εκτενέστερα σε αυτή τη διπλωματική εργασία, το AL7075 εκμεταλλεύεται κάποιες πολυπόθητες ιδιότητες του κοινού αλουμινίου, όπως την χαμηλή πυκνότητα και την αντοχή σε διάβρωση, και μέσα από προσμίξεις διαφόρων χημικών στοιχείων και κατεργασίες θερμικές (όπως η T6) ή μορφολογικές (όπως η έλαση), γίνεται ένα εξαιρετικό υλικό για μεταλλικές κατασκευές. Η αντοχή σε διάβρωση, η υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος καθώς και το χαμηλό κόστος κτήσης κατέστησαν το AL7075 ένα πολύ δημοφιλές υλικό στην σημερινή βιομηχανία.

Το μετωπικό φρεζάρισμα προσομοιώνεται με τη χρήση λογισμικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι μια σύγχρονη μέθοδος μελέτης της συμπεριφοράς ενός αντικειμένου, που βασίζεται στην διαίρεση του συστήματος σε πολλά μικρά στοιχεία πεπερασμένου όγκου και ιδιοτήτων (πεπερασμένα στοιχεία), των οποίων οι ιδιότητες και συμπεριφορές σε διάφορους παράγοντες υπολογίζονται μέσω διαφορικών εξισώσεων μητρικής μορφής. Η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει εφαρμογή σε πληθώρα εφαρμογών, όπως στη στατική και δυναμική ανάλυση κατασκευών, στην μεταφορά μάζας και ενέργειας, και φυσικά στην μεταλλουργία, σε διαδικασίες όπως η σφυρηλάτηση και οι κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Γενικά, τα συστήματα πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν ένα από τα ισχυρότερα βέλη στην φαρέτρα του σύγχρονου μηχανικού.

2. ΘΕΩΡΙΑ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ

Η συνηθέστερη κατεργασία αφαίρεσης υλικού εργαλείου πολλαπλής σημειακής επαφής είναι το φρεζάρισμα. Το φρεζάρισμα είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα κοπτικό εργαλείο πολλαπλών κοπτικών ακμών κυκλικής μορφής χρησιμοποιείται με στόχο την διαμόρφωση γεωμετρικών σχημάτων και μορφών σε ένα σταθερά πακτωμένο τεμάχιο. Οι κοπτικές ακμές φέρουν σφηνοειδή μορφή, ομοιάζουσα του κοπτικού εργαλείου τόννευσης, με στόχο την επιτυχημένη εισχώρηση του κοπτικού εργαλείου στο τεμάχιο κατεργασίας. Η κατεργασία βασίζεται στην περιστροφή του κοπτικού εργαλείου γύρω από τον άξονά του (κύρια κίνηση κοπής) και την ταχύτητα πρόωσης, την μετατόπιση του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

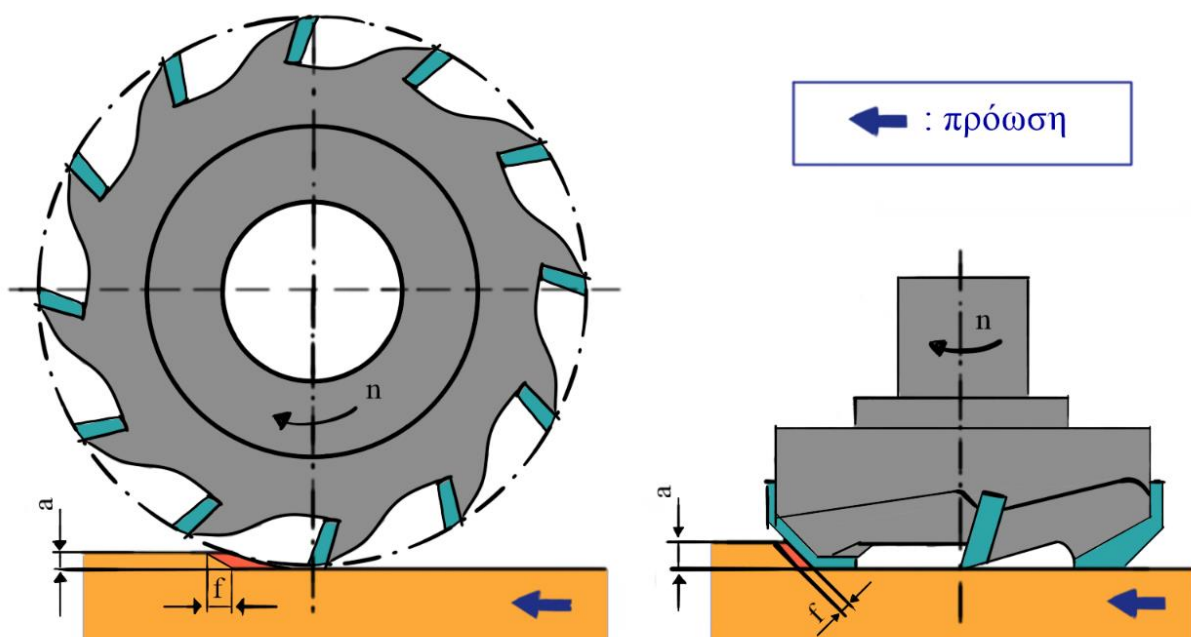
Οι βασικές συνθήκες κοπής κατά το φρεζάρισμα είναι:

- Η πρόωση, η σχετική ταχύτητα του τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου. Δίνεται με δυο τρόπους: 1) Πρόωση ανά περιστροφή (f), ουσιαστικά η μετατόπιση του εργαλείου ανά μια πλήρη περιστροφή του, και 2) πρόωση ανά δόντι (f_z), η οποία ορίζει την σχετική μετατόπιση του εργαλείου στο χρόνο που μεσολαβεί από την επαφή μιας ακμής του κοπτικού, μέχρι την επόμενη. Για αριθμό ακμών κοπτικού z και περιστροφική ταχύτητα n (rpm), ισχύει:

$$f = f_z \cdot z \cdot n$$

- Η ταχύτητα κοπής v_c , ο ρυθμός κοπής στην κύρια κίνηση, την περιστροφή του εργαλείου, αν D η εξωτερική διάμετρος του κοπτικού (mm):

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



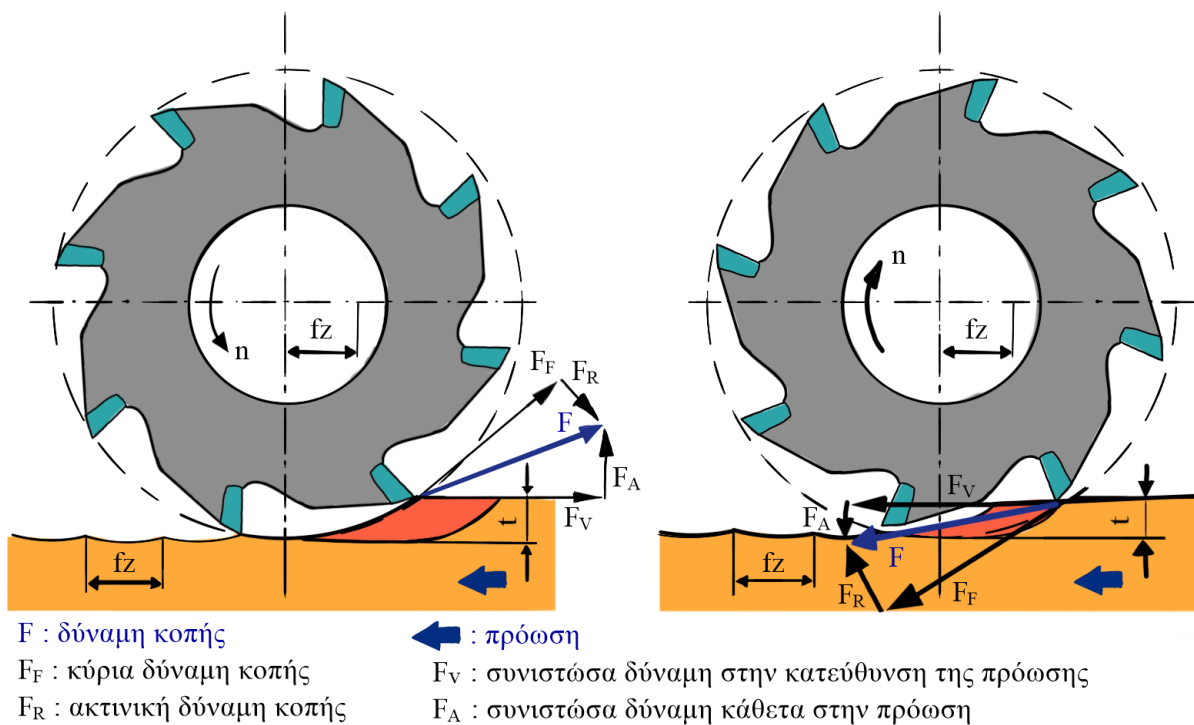
Εικόνα 2.1: Περιφερικό (αριστερά) και Μετωπικό (δεξιά) Φρεζάρισμα

- Το βάθος (ή πλάτος) κοπής t , το καθορισμένο βάθος κατεργασίας το οποίο επιτυγχάνεται μέσω της κινηματικής του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου. Στο περιφερικό φρεζάρισμα ονομάζεται αλλιώς πλάτος κοπής ενώ στο μετωπικό φρεζάρισμα είναι το αξονικό βάθος κοπής (a_z).
- Το μέγεθος επαφής e , που αντιστοιχεί στην επαφή του κοπτικού εργαλείου με την επιφάνεια ανά περιστροφή και κάθετα προς την κατεύθυνση της πρόωσης.

Στο φρεζάρισμα παρουσιάζεται μια ιδιομορφία αναφορικά με το απόβλιττο. Η γεωμετρία του αποβλίττου στο φρεζάρισμα παρουσιάζει μεταβαλλόμενο πάχος διατομής, που προκύπτει από την σύνθετη κίνηση του εργαλείου, την περιστροφή του, και την πρόωση του τεμαχίου. Κατά την κοπή, τα δόντια του κοπτικού εισέρχονται και εξέρχονται από το τεμάχιο, "χαράσσοντας", ή, απλούστερα, κόβοντας, μικρά τμήματα από το τεμάχιο, με διακοπτόμενο τρόπο. Η εκπεριτροπής αυτή κοπή έχει ως αποτέλεσμα κάθε ακμή να απάγει την θερμότητα που παράγεται κατά την κοπή καλύτερα, στο μεσοδιάστημα της περιστροφής του κοπτικού, στο οποίο η συγκεκριμένη ακμή δεν έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μικρότερη θερμική καταπόνηση του κοπτικού εργαλείου, αλλά την αυξημένη καταπόνηση σε κρουστικά φορτία, λόγω της συνεχόμενης εμπλοκής – απεμπλοκής που λαμβάνει χώρα.

Η κατεύθυνση του άξονά του εργαλείου διακρίνει το φρεζάρισμα σε δυο κατηγορίες:

- Περιφερικό φρεζάρισμα: κατεργασία στην οποία το κονδύλι κόβει και σχηματίζει την επιφάνεια χρησιμοποιώντας την περιφέρεια του κονδυλίου, δηλαδή τις αιχμηρές ακμές του κατά μήκος. Σε αυτή την περίπτωση ο άξονας περιστροφής του κοπτικού εργαλείου είναι παράλληλος με την επιφάνεια.



Εικόνα 2.2: Αντίρροπο και Ομόρροπο Φρεζάρισμα (αντίστοιχα)

- **Μετωπικό φρεζάρισμα:** το κοπτικό τοποθετείται κάθετα προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια, και το φόρτο της κατεργασίας (και των δυνάμεων – τάσεων) βρίσκεται στις κορυφές του κοπτικού εργαλείου. Σε αυτό το είδος κατεργασίας το μοντέλο των δυνάμεων άλλες φορές προσεγγίζει φαινόμενα διάτρησης, και άλλες φορές περιφερικού φρεζαρίσματος, ενώ τα σχήματα και μεγέθη των κοπτικών εμφανίζουν μεγαλύτερη ποικιλία ανάλογα τις ανάγκες της κατεργασίας.

Η κίνηση του τεμαχίου σε αναφορά με την περιστροφή του τεμαχίου στο περιφερικό φρεζάρισμα ορίζει το ομόρροπο ή αντίρροπο φρεζάρισμα. Στο αντίρροπο φρεζάρισμα η πρόωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου αντιτίθεται στην περιστροφή του κοπτικού εργαλείου, ενώ στο ομόρροπο φρεζάρισμα η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου και η πρόωση του τεμαχίου έχουν την ίδια κατεύθυνση.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.2, στο αντίρροπο φρεζάρισμα η κοπή ξεκινά από λεπτότερο απόβλιττο και καταλήγει σε παχύτερο, αντίθετα από ότι στο ομόρροπο φρεζάρισμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στο ομόρροπο φρεζάρισμα, ισχυρότερες καταπονήσεις κατά την είσοδό του κοπτικού εργαλείου στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και έτσι αύξηση του κινδύνου θραύσης του.

Η κινηματική των δυο περιπτώσεων από την άλλη, προδίδει ότι στο ομόρροπο φρεζάρισμα, το κοπτικό εργαλείο εφαρμόζει δύναμη στο κατεργαζόμενο τεμάχιο με φορά προς το τραπέζι της εργαλειομηχανής, προσδίδοντας σταθερότητα στην κοπή. Αυτό υποδεικνύει και η συνισταμένη δύναμη κοπής F στα δύο είδη φρεζαρίσματος. Στο αντίρροπο φρεζάρισμα η συνισταμένη δύναμη κοπής F έχει φορά προς τα έξω, κάτι το οποίο, αν η στήριξη στην τράπεζα δεν είναι επαρκής, θα ανασηκώσει ή θα αποσταθεροποιήσει το τεμάχιο. Αντίθετα, στο ομόρροπο φρεζάρισμα η συνισταμένη των δυνάμεων κοπής έχει φορά προς το τραπέζι της εργαλειομηχανής, ή προς το εσωτερικό του τεμαχίου, ενισχύοντας, συνήθως, τη σταθερότητα της σύνδεσης τεμαχίου – τραπεζιού. [1]

2.1. ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ

Υπάρχουν δύο κύριες ταξινομήσεις για τις εργαλειομηχανές: αυτές που διαμορφώνουν ελάσματα και αυτές που διαμορφώνουν κομμάτια. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τόνους, φρέζες και πλάνη. Αυτά τα εργαλεία παίζουν καθοριστικό ρόλο στους τομείς της βιομηχανίας και των κατασκευών καθώς έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν ακατέργαστες και ακανόνιστες μάζες μετάλλου σε επιθυμητά σχήματα. Επιπλέον, οι τόννοι και οι φρέζες έχουν αγκαλιάσει τις εξελίξεις των συστημάτων αριθμητικού ελέγχου και CNC, επεκτείνοντας ακόμη περισσότερο τις δυνατότητές τους.

2.1.1. ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΕΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ – ΤΟΡΝΟΙ

Ο τόννος, μια εργαλειομηχανή που έχει αντέξει στη δοκιμασία του χρόνου, αναγνωρίζεται ευρέως και χρησιμοποιείται εκτενώς. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο, στερεωμένο με ασφάλεια στον σφιγκτήρα του τεμαχίου εργασίας (τσοκ), τίθεται σε κίνηση με την περιστροφή της κίνησης της κεφαλής τόννου. Η συνολική στιβαρότητα του συστήματος είναι υψίστης σημασίας,

διασφαλίζοντας τη λήψη των απαραίτητων δυνάμεων κοπής και την ομαλή, χωρίς κραδασμούς λειτουργία, για αυτό η σωστή τοποθέτηση του τεμαχίου είναι πολύ σημαντική.

Στο χειροκίνητο τόρνο, ο χειριστής του μηχανήματος χρησιμοποιεί τη σωματική του δύναμη, και μέσω της βοήθειας διαφόρων διακοπών και μοχλών, μετακινεί το κοπτικό κατάλληλα ώστε να διαμορφώσει τις γεωμετρίες πάνω στο σταθερά περιστρεφόμενο τεμάχιο, το οποίο ομοιάζει κυλινδρικού σχήματος, αρχικά. Οι γεωμετρίες που επιτυγχάνονται στον συμβατικό τόρνο είναι συνήθως συμμετρικές ως προς τον άξονα περιστροφής του τεμαχίου.



Εικόνα 2.3: Χειροκίνητος Τόρνος Bulunmaz B10. Πηγή: <https://www.3dmarket.gr/product/category=644/product=bulunmaz-manual-lathe.html>

Πρέπει να τονιστεί ότι η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου είναι βασικός παράγοντας του αποτελέσματος της κατεργασίας. Τα κοπτικά εργαλεία χαρακτηρίζονται από ορισμένα χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη. Διαθέτουν δύο επιφάνειες κοπής: την κύρια επιφάνεια κοπής και την δευτερεύουσα επιφάνεια κοπής. Υπάρχουν τρεις κύριες γωνίες που χαρακτηρίζουν ένα κοπτικό εργαλείο:

- Η γωνία ελευθερίας (α) είναι η περιοχή του εργαλείου που γειτνιάζει με τις δύο κοπτικές ακμές, η οποία μπορεί να μειώσει την τριβή μεταξύ του τεμαχίου και του εργαλείου. Σε πραγματικές συνθήκες κυμαίνεται σε εύρος 5 – 15 μοιρών.
- Η γωνία αποβλίττου (γ), ελέγχει αποτελεσματικά την κοπή. Η αύξηση της γωνίας διάτμησης μειώνει τη δύναμη κοπής. Ωστόσο, μια μεγάλη γωνία αποβλίττου κάνει το κοπτικό εργαλείο πιο αιχμηρό, οδηγώντας σε υπερθέρμανση και φθορά της κοπτικής ακμής, και μειώνοντας την αντοχή του. Στην πράξη κυμαίνεται μεταξύ 0 και 20 μοιρών. Εάν η ταχύτητα κοπής είναι υψηλή και η διατομή αποβλίττου μικρή, η γωνία γ λαμβάνει αρνητική τιμή.
- Η γωνία τοποθέτησης (k) επηρεάζει τη διάρκεια ζωής του εργαλείου και το μέγεθος των δυνάμεων κοπής. Καθώς η γωνία k αυξάνεται, το μέγεθος της δύναμης κοπής μειώνεται λόγω του αυξημένου πάχους των αποβλίττων. Καθώς η γωνία k μειώνεται, το μήκος της κοπτικής ακμής αυξάνεται, άρα και η επιφάνεια για την απαγωγή της θερμότητας κοπής, βελτιώνοντας τη διάρκεια ζωής του εργαλείου.

Οι βασικές συνθήκες κατεργασίας στην τόρνευση είναι:

- Ταχύτητα κοπής, δηλαδή η σχετική ταχύτητα ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο. Η ταχύτητα κοπής αφορά την κύρια κίνηση του εργαλείου και είναι η γραμμική ταχύτητα του προς τόννευση τεμαχίου.
- Το βάθος κοπής, ή αλλιώς το βάθος διείδυσης του κοπτικού εργαλείου.
- Πρόωση, η σχετική κίνηση μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου, η οποία τροφοδοτεί συνεχώς το εργαλείο με νέο κοπτικό υλικό. Στους τόννους, η πρόωση παρέχεται από το κοπτικό εργαλείο και είναι η κίνηση του κοπτικού εργαλείου κατά μήκος του άξονα περιστροφής ανά περιστροφή του τεμαχίου.

2.1.2. ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΕΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ – ΦΡΕΖΕΣ

Η άλλη γνωστή κατεργασία κοπής που χρησιμοποιεί εργαλεία πολλαπλής σημειακής επαφής είναι το φρεζάρισμα. Η αρχή λειτουργίας αναλύεται στα προηγούμενα κεφάλαια. Στην χειροκίνητη φρέζα, ο εργάτης μετακινεί την τράπεζα στην οποία είναι πακτωμένο το τεμάχιο, κάτω από το περιστρεφόμενο κοπτικό εργαλείο, δημιουργώντας γεωμετρίες συγκεκριμένου βάθους στην επιφάνεια του τεμαχίου. Η τράπεζα, ή το κοπτικό, έχουν ρυθμιζόμενο ύψος, οπότε κανείς μπορεί να σχηματίσει και πιο περίπλοκες γεωμετρίες, αλλά δεν είναι δυνατή η αλλαγή του ύψους αυτού ενώ η μηχανή λειτουργεί.



Εικόνα 2.4: Φρέζα WM 6432. Πηγή: <https://machines.gr/el/mixanimata/mixanourgika-mixanimata/frezes/item/72-wm-6432>

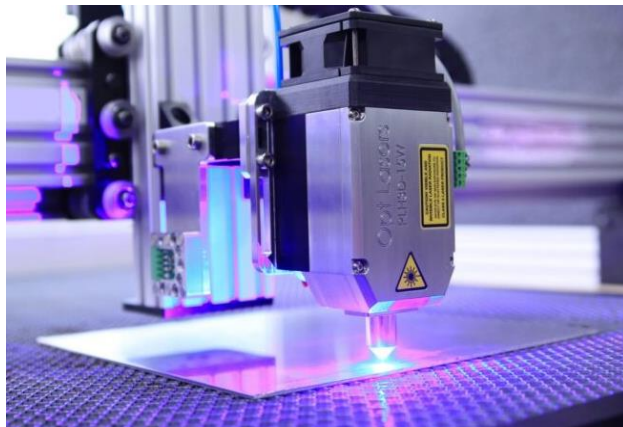
2.1.3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ – NUMERICAL CONTROL (NC)

Οι μηχανές αυτής της κατηγορίας είναι κατάλληλες για μικρούς και μεσαίους όγκους παραγωγής, πολύπλοκες γεωμετρίες, διαστάσεις, κατεργασίες και μεθόδους κατασκευής αντικειμένων. Στις μηχανές με δυνατότητα αριθμητικού ελέγχου, διάφορες πληροφορίες κατεργασίας, κινήσεις μηχανής, συνθήκες κατεργασίας, διαδρομές εργαλείων, χρήση ψυκτικού υγρού κ.λπ. παρέχονται με τη μορφή αριθμητικών πληροφοριών που είναι αποθηκευμένες στη μνήμη του υπολογιστή. Η κίνηση του εργαλείου ή του αντικειμένου εξαρτάται από ψηφιακά σήματα που δίνονται σε σερβοκινητήρες που κινούν τα διάφορα τμήματα της μηχανής.

Ο αριθμητικός έλεγχος εισήχθη για πρώτη φορά στη βιομηχανία πριν από περίπου 50 χρόνια, όταν η τεχνολογία των υπολογιστών βρισκόταν ακόμη στα σπάργαλα. Έχουν αναπτυχθεί τρεις κύριοι τύποι αριθμητικού ελέγχου: σύστημα κατεργασίας θέσης, σύστημα ευθύγραμμης κοπής και σύστημα συνεχούς γραμμής. Τα συστήματα κατεργασίας θέσεων ελέγχουν την τοποθέτηση του εργαλειοφόρου σε μια συγκεκριμένη θέση όπου λαμβάνει χώρα η κατεργασία, χωρίς να

ελέγχουν τη διαδρομή μεταξύ της κίνησης από τη μια θέση στην άλλη, ενώ τα συστήματα γραμμικής κοπής, εκτός από τα παραπάνω, επιτρέπουν στο εργαλείο να κινείται γραμμικά από τη μια θέση στην άλλη. Οι τόννοι με αριθμητικό έλεγχο είναι ως επί το πλείστον εξοπλισμένοι με συστήματα συνεχούς γραμμής που ελέγχουν συνεχώς τη διαδρομή κοπής.

Εκτός από το είδος του αριθμητικού ελέγχου, ένα σύνολο κανονισμών που κωδικοποιούν τις βασικές παραμέτρους της διαδικασίας κοπής, οι οποίες πρέπει να ελέγχονται ρητά, έπαιξε καθοριστικό ρόλο από τα πρώτα στάδια αυτής της τεχνολογίας. Οι κανονισμοί αυτοί εισήχθησαν στις ΗΠΑ, οι οποίες βρίσκονται στην πρωτοπορία αυτής της τεχνολογίας εδώ και δεκαετίες. Κατ' αρχήν, οι κανονισμοί αυτοί αφορούν τους άξονες και τις κινήσεις των μηχανών. Τα προβλήματα



Εικόνα 2.5: Προηγμένο σύστημα κατεργασίας μέσω CNC
Πηγή: <https://www.metadosi-ischios.gr/ergaleiomichanes->

που πρέπει να επιλυθούν όσον αφορά την κίνηση των μηχανών είναι, πρώτον, η επιλογή των αξόνων (X, Y, Z) που χαρακτηρίζουν την κίνηση (π.χ. πρόωση του τόννου) και, δεύτερον, τη φορά του θετικού άξονα.

Αυτό το θεμελιώδες πρόβλημα της κίνησης του τόννου (τουλάχιστον όσον αφορά το μαθηματικό μοντέλο και συνεπώς τον ψηφιακό προγραμματισμό) έχει επιλυθεί με τη χρήση του παραδοσιακού μαθηματικού συστήματος συντεταγμένων βάσει της δεξιάς χειρός. Μια παρόμοια προσέγγιση υιοθετήθηκε για την κωδικοποίηση των αξόνων, όπου η ονομασία των αξόνων του τόννου μέσω των κανόνων ορίζεται γραφικά. Ωστόσο, ο προγραμματισμός της λειτουργίας της εργαλειομηχανής με αριθμητικό έλεγχο απαιτούσε επίσης την τυποποίηση του συστήματος αναφοράς του αριθμητικού ελέγχου. Έτσι, αναπτύχθηκε η βηματική μέθοδος, η οποία συσχετίζει το προηγούμενο σημείο της διαδικασίας με μια σειρά από επόμενα σημεία, και η απόλυτη μέθοδος, η οποία αναφέρεται πάντα στο σημείο μηδέν του συστήματος συντεταγμένων της μηχανής.

2.1.4. ΤΟΝΝΟΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Οι τόννοι αριθμητικού ελέγχου έχουν επεκτείνει τις δυνατότητες της τόννευσης. Η κύρια διαφορά με τον παραδοσιακό τόννο έγκειται στον αριθμό των εργαλείων που είναι τοποθετημένα στον φορέα εργαλείων, γεγονός που οδηγεί σε έναν καινοτόμο σχεδιασμό. Η ανάλυση των τεμαχίων που συνήθως εισέρχονται στη διαδρομή του τόννου αποκάλυψε ότι μόνο 6 έως 12 εργαλεία απαιτούνται για την πλήρη κατεργασία. Επομένως, ο αριθμός των εργαλείων σε έναν αυτόματο τόννο δεν χρειάζεται να είναι μεγαλύτερος. Τα εργαλεία διατάσσονται ακτινικά γύρω από την κεφαλή του τόννου και μεταφέρονται στη θέση εργασίας από περιστρεφόμενους εργαλειοφορείς. Οι εργαλειοφορείς μπορούν να φέρουν 6, 9, 12 ή 18

εργαλεία σε πολλές μηχανές αυτού του τύπου. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ωστόσο, χρησιμοποιούνται έξι εργαλεία.

Καθώς οι μηχανές αυτές έχουν εξελιχθεί, χρησιμοποιούνται πρόσθετοι εργαλειοφορείς τοποθετημένοι βέλτιστα ως προς την εργαλειομηχανή και η αλλαγή εργαλείων πραγματοποιείται αυτόματα από μηχανισμό της εργαλειομηχανής ή από ρομπότ. Στα πιο συνηθισμένα συστήματα αλλαγής εργαλείων, αλλάζει μόνο το κοπτικό εργαλείο, ενώ η βάση του εργαλείου στο turret head παραμένει σταθερή. Ωστόσο, τα συστήματα αλλαγής εργαλείων απαιτούν πολύπλοκα συστήματα ελέγχου με πρόσθετες



Εικόνα 2.6: NC Τόρνος EPPLE MASCHINEN. Πηγή: <https://www.papadopouloostools.com/product/tornos-metalloy-michanikos-epple-maschinen-series-md-360-1000-digi-245-1180-metal-lathe/>

πληροφορίες σχετικά με τα εργαλεία που απαιτούνται για κάθε τεμάχιο. Αυτό το γεγονός καθιστά τη γνώση αυτών των συστημάτων απαραίτητο προσόν κάθε εργάτη, τεχνίτη, επιστάτη μηχανικού αλλά και άλλου εποπτικού προσωπικού εμπλεκόμενου με τέτοια προηγμένα μηχανήματα, ώστε να διασφαλίζεται τόσο η μεγιστοποίηση της παραγωγής, όσο, κρισιμότερα, και η ασφάλεια του ανθρωπίνου προσωπικού και η αποφυγή ατυχημάτων.

2.1.5. ΤΟΡΝΟΙ CNC

Οι τόρνοι CNC χρησιμοποιούν τεχνολογία CNC, που σημαίνει ηλεκτρονικός αριθμητικός έλεγχος (CNC). Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του αριθμητικού ελέγχου εισάγονται με προγραμματισμό υπολογιστή. Το κεντρικό σύστημα ελέγχου CNC είναι η κύρια θέση αποθήκευσης στον υπολογιστή από όπου περνούν όλα τα δεδομένα κατεργασίας. Αυτό επιτρέπει σε έναν χειριστή με ανάλογη εμπειρία να εισάγει δεδομένα στο σύστημα κατεργασίας με ένα απλό πληκτρολόγιο και να παρακολουθεί τα αποτελέσματα στην οθόνη ώστε να εποπτεύει και να επεξεργάζεται τις παραμέτρους της κατεργασίας κατά το δοκούν.

Μέσα από ειδικά προγράμματα παρέχεται δυνατότητα προσομοίωσης διαφόρων σφαλμάτων της διαδικασίας παραγωγής. Έτσι προσδιορίζονται τα σφάλματα ή τα διάφορα προβλήματα στο σχεδιασμό της κατεργασίας πριν καν τοποθετηθεί δείγμα στην τράπεζα. Ο τεράστιος όγκος πληροφοριών που καθίσταται διαθέσιμος μέσα από αυτά τα πλέον «συνηθισμένα» μέσα παραγωγής χρησιμοποιείται για τη δημιουργία "έμπειρων συστημάτων κατεργασίας", μία σύγχρονη εξέλιξη του λογισμικού που υποστηρίζει την κατεργασία, βασισμένη σε αρχές της τεχνητής νοημοσύνης.

2.1.6. ΦΡΕΖΕΣ CNC

Η τεχνολογία που έκανε δυνατή την σχετική κίνηση διαφόρων μελών μιας εργαλειομηχανής μέσω Η/Υ έφερε μεγάλες αλλαγές στον σχεδιασμό των φρέζων. Πλέον συναντώνται φρέζες παραπλήσιες με τις παραδοσιακές, αλλά και μηχανήματα που εμφανισιακά είναι εντελώς διαφορετικά με την γνωστή φρέζα. Κάποια από τα επακόλουθα αυτών των αλλαγών είναι:

- Απαραίτητη γνώση CNC από τον χειριστή της φρέζας
- Μικρότερη ποικιλία, και συνεπώς και κόστος κατασκευής σε κοπτικά εργαλεία φρέζας
- Απαιτήσεις για εργαλεία με εναλλάξιμα πλακίδια από σκληρομέταλλο, τα οποία είναι σε θέση να εκμεταλλευτούν τις δυνατότητες των καινούργιων μηχανημάτων
- Μεγαλύτερες ταχύτητες κατεργασίας
- Επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων ακριβείας και κόστους, ακόμα και σε εξαιρετικά δύσκολες, για μια τυπική φρέζα, γεωμετρίες
- Ανανέωση της θέσης του φρεζαρίσματος στην παραγωγική διαδικασία. Δυνατότητες όπως η αυτόματη τροφοδότηση αλλά και ο ποιοτικός έλεγχος επί της μηχανής μετατρέπουν τη φρέζα από εργαλείο υποστήριξης σε εργαλείο γραμμής παραγωγής.
- Δυνατότητα φρεζαρίσματος σε διαφορετικές εργαλειομηχανές, οι οποίες δεν αποτελούν αποκλειστικά μηχανές φρεζαρίσματος.



Εικόνα 2.7: Τόρνος CNC. Πηγή: <https://microsol.gr/products/puma-st10gs/>

2.1.7. ΠΟΛΥΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

Η πολυαξονική κατεργασία υλικών επιτρέπει την παραγωγή πολύπλοκων μεταλλικών κατασκευών αποδοτικότερα και αυξάνει την παραγωγικότητα της αλυσίδας παραγωγής. Η κατεργασία πολλαπλών αξόνων επιτρέπει την εκτέλεση διαφορετικών τύπων φρεζαρίσματος, τόνρευσης, σφηνοποίησης και ελικοειδούς κατεργασίας σε μία μόνο μηχανή.

Στην κατεργασία πολλαπλών αξόνων, είναι ευκολότερο να προγραμματίζεται κάθε φάση ξεχωριστά με τη χρήση των X, Y και Z, χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψη η γωνία κοπής. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω αυτοματοποιήσεων και λειτουργιών του συστήματος, το οποίο έχει τη



Εικόνα 2.8: Κέντρο Κατεργασίας 5 αξόνων. Πηγή: <https://microsol.gr/en/products/vcf-850-850l-850sr-850lsl/>

δυνατότητα να μετασχηματίζει το σύστημα συντεταγμένων σε κάθε φάση σύμφωνα με την επιθυμητή γωνία κοπής.

Τα κέντρα κατεργασίας πολλών αξόνων και πλευρών μπορούν να εξοπλιστούν με δύο περιστροφικούς φορείς NC (αριθμητικού ελέγχου) ενσωματωμένους στα πλευρικά τοιχώματα του τραπεζιού. Αυτά τα σύγχρονα κέντρα κατεργασίας είναι ιδιαίτερα ικανά με άξονες NC με γραμμική μετάδοση και στρογγυλούς φορείς.

Μπορούν να εξοπλιστούν με περιστρεφόμενο κυκλικό φορέα NC, που διακρίνεται από τη δυναμική των αξόνων C και A: η περιστροφή του άξονα C με υψηλή ταχύτητα μπορεί να επιτευχθεί με γραμμικούς κινητήρες (μοτέρ ροπής) – η περιστροφή του άξονα A με υψηλή ταχύτητα επιτυγχάνεται με σύστημα δίδυμης μετάδοσης από $+25^\circ$ μέχρι και -100° . Αυτό το εύρος περιστροφής ($-100^\circ - +25^\circ$) επιτρέπει τη μέγιστη δυνατή ελευθερία κατεργασίας στο χώρο του εργοστασίου. Η υψηλή ικανότητα φόρτωσης του τραπεζιού αυτών των κέντρων κατεργασίας επιτρέπει τη σύσφιξη τεμαχίων με μεγάλες διαστάσεις και βάρος.

2.1.8. ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΥΠΟ ΓΩΝΙΑ

Η κατεργασία γωνιακών επιφανειών πραγματοποιείται με την τοποθέτηση του άνω εργαλειοφορέα και της κεφαλής υπό γωνία στο επίπεδο που ορίζεται από τις συντεταγμένες X-Z. Το σύστημα συντεταγμένων για τη γωνιακή κατεργασία ορίζεται σε συντεταγμένες X-Y-Z. Αυτό το σύστημα συντεταγμένων προκύπτει από το σύστημα συντεταγμένων X-Y-Z της μηχανής όταν η μηχανή περιστρέφεται γύρω από το Y.

Τα αρχικά δεδομένα, τα οποία έχουν οριστεί αρχικά με απόσταση εργαλείων 0° , περιστρέφονται αυτόματα σύμφωνα με τη γωνία κατεργασίας.

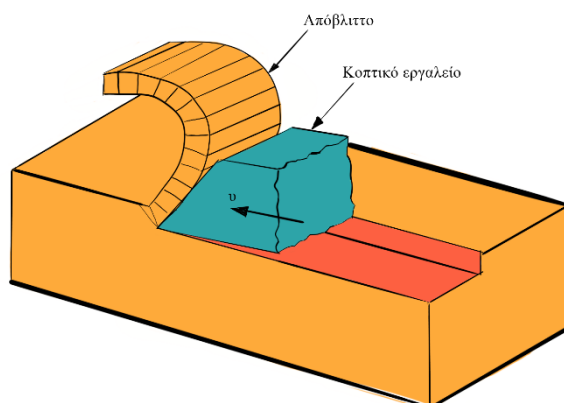
Στο φρεζάρισμα υπό γωνία, εκτελούνται γραμμικές και κυλινδρικές κινήσεις, ενώ το σύστημα εντολών ελέγχου μετατρέπει τις συντεταγμένες των αξόνων γωνιακής κατεργασίας σε συντεταγμένες της μηχανής. [2]

2.2. ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ

2.2.1. ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΚΟΠΗ

Η τομή του συστήματος τεμαχίου – κοπτικού – αποβλίττου (όπου η κόψη του εργαλείου είναι κάθετη στη διεύθυνση κοπής), δίνει την δισδιάστατη απεικόνιση της κοπής, γνωστή ως το μοντέλο της ορθογωνικής κοπής. Η ορθογωνική κοπή προσεγγίζει, σε σύστημα δυο αξόνων, τόσο το περιφερικό, όσο και, σημειακά, το μετωπικό φρεζάρισμα.

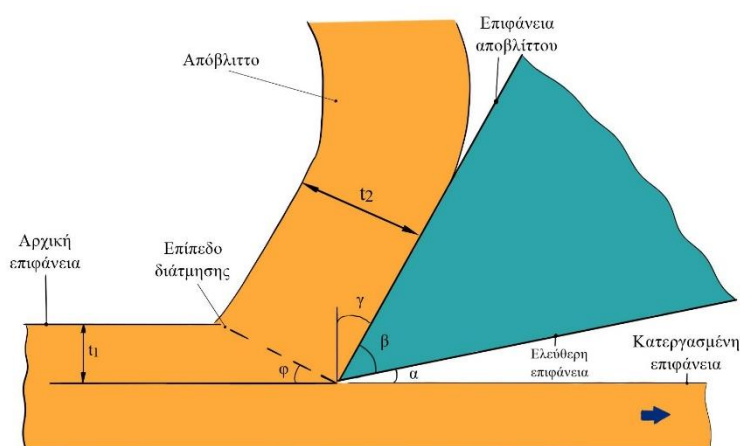
Για την μελέτη, το κοπτικό εργαλείο θεωρείται ως με σφήνα ευθύγραμμης ακμής



Εικόνα 2.9: Αναπαράσταση ορθογωνικής κοπής

κινούμενη ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο με τρόπο ώστε να αφαιρείται στρώμα υλικού ορισμένου πάχους και με την αντίστοιχη μορφή αποβλίττου κάθε φορά.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου παρουσιάζονται ως εξής:



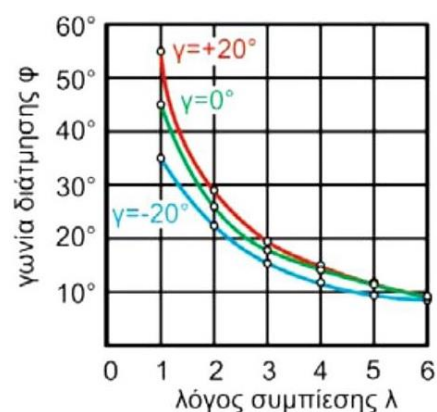
Εικόνα 2.10: Κινηματική Ορθογωνικής Κοπής

- **Επιφάνεια αποβλίττου:** Η επιφάνεια της ακμής, πάνω στην οποία ολισθαίνει το απόβλιττο κατά την κίνησή του.
- **Ελεύθερη επιφάνεια ή επιφάνεια ελευθερίας:** Η επιφάνεια της ακμής που αντικρίζει την κατεργασμένη επιφάνεια.
- **Κόψη ή κοπτική ακμή :** Η ακμή του κοπτικού εργαλείου που προκύπτει ως τομή των δύο προηγούμενων επιφανειών.
- **Γωνία ελευθερίας, α:** Η γωνία της ελεύθερης και της κατεργασμένης επιφάνειας. Κυμαίνεται σε τιμές 5-8° ανεξαρτήτως υλικού.
- **Γωνία σφήνας ή γωνία κοπτικού, β:** Η γωνία της ελεύθερης επιφάνειας και της επιφάνειας αποβλίττου.
- **Γωνία αποβλίττου, γ:** Η γωνία της επιφάνειας αποβλίττου και του καθέτου επιπέδου στην κατεργασμένη επιφάνεια σχηματίζει το απόβλιττο. Δύναται να είναι θετική, αρνητική ή μηδέν, ανάλογα τις ανάγκες και τις συνθήκες κατεργασίας. Συνήθως σε ψαθυρά υλικά ελαχιστοποιείται, αντιθέτως από ότι σε όλκιμα. Για μαλακά υλικά μπορεί να φθάσει έως και 30°, έχοντας όμως αντίκτυπο στην γωνία σφήνας, «λεπταίνοντας» το εργαλείο.
- Η γεωμετρική σχέση που εμπλέκει τις γωνίες α, β και γ είναι:

$$\alpha + \beta + \gamma = \pi/2$$

Για το απόβλιττο ισχύει:

- **Θεωρητικό πάχος αποβλίττου, t_1 :** Είναι το αφαιρούμενο πάχος υλικού (γνωστό και ως h_{cu}).
- **Πραγματικό πάχος αποβλίττου, t_2 :** Είναι η μέση τιμή του πάχους αποβλίττου (γνωστό και ως h_{cp}).
- **Πλάτος αποβλίττου, b** (δεν φαίνεται στην τομή της εικόνας 2.10 – εκτείνεται προς την κάθετη διάσταση ως προς αυτήν την όψη) .
- **Θεωρητική διατομή αποβλίττου, $A_1 = b * t_1$**
- **Πραγματική διατομή αποβλίττου $A_2 = b * t_2$**



Εικόνα 2.11: Σχέση του λόγου συμπίεσης, λ με τη γωνία διάτμησης, φ

- Γωνία διάτμησης, φ : Εκφράζει το επίπεδο της διάτμησης, στο οποίο αποκολλάται το υλικό του αποβλίττου από το τεμάχιο, παραμορφώνεται με λόγο συμπίεσης λ και αποβάλλεται ολισθαίνοντας στην επιφάνεια αποβλίττου.
- Δείκτης ή συντελεστής συμπίεσεως αποβλίττου, λ : Το μέτρο πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η παραμόρφωση του αποβλίττου δημιουργείται κυρίως στην πρωτεύουσα ζώνη παραμόρφωσης, τμήμα της κοπτικής ακμής περιορισμένου πλάτους. Δεδομένου ότι παράγεται καθ' όλη τη διάρκεια της κοπής, το απόβλιττο τραχύνεται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης, όσο προωθείται στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου. Η παραμόρφωση στη ζώνη διάτμησης συνεπάγεται αύξηση του θεωρητικού πάχους αποβλίττου, ενώ η ζώνη διάτμησης της κοπής προκαλεί εφελκυσμό του αποβλίττου.

Για τα λ , h_{cp} , h_{cu} , φ και γ ισχύει:

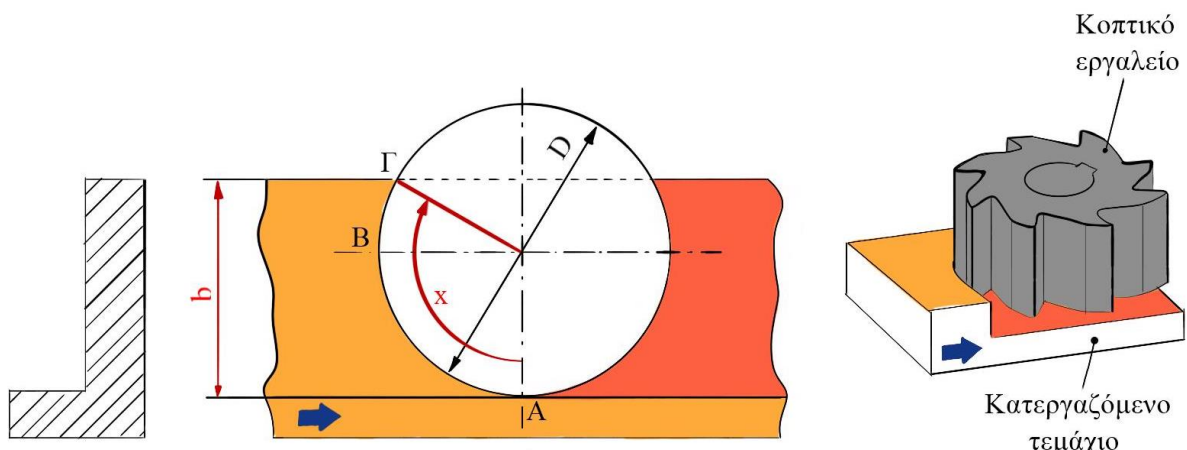
$h_{cu} = (\Phi) \sin \varphi$, και $h_{cp} = (\Phi) \cos(\varphi - \gamma)$, όπου Φ το επίπεδο διάτμησης.

$$\lambda = \frac{h_{cp}}{h_{cu}} = \frac{\cos(\varphi - \gamma)}{\sin \varphi}, \text{ από όπου για το } \varphi \text{ προκύπτει: } \varphi = \tan^{-1} \left[\frac{\cos \gamma}{\lambda - \sin \gamma} \right] [3]$$

2.2.2. ΜΕΤΩΠΙΚΟ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ

Μια αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ του μετωπικού και του περιφερικού φρεζαρίσματος είναι ότι, στο πρώτο, το είδος του φρεζαρίσματος δεν διατηρείται ίδιο σε ολόκληρη την κοπή. Αυτό σημαίνει ότι η κατεργασία, ανά δόντι, δεν διατηρείται σταθερά ομόρροπη ή αντίρροπη. Στην εικόνα 2.12 φαίνεται σχηματικά αυτό το φαινόμενο. Διακρίνεται η γωνία επαφής x η οποία μεταβάλλεται, αυξανόμενη από 0° στη θέση Α έως τη μέγιστη τιμή της στη θέση Γ.

Για το διάστημα κατεργασίας μέχρι τη θέση Β, δηλαδή για όσο $x < 90^\circ$, το φρεζάρισμα θεωρείται αντίρροπο. Από τη θέση Β και έως τη θέση Γ, για όσο δηλαδή $x > 90^\circ$ και μέχρι τις 180° , εφόσον υπάρχει κοπή, το φρεζάρισμα είναι ομόρροπο. Στην περίπτωση των προσομοιώσεων της παρούσης εργασίας, η περιοχή Β προς Γ δεν παρουσιάζει κοπή, οπότε αυτό το φαινόμενο δεν υφίσταται. [1]

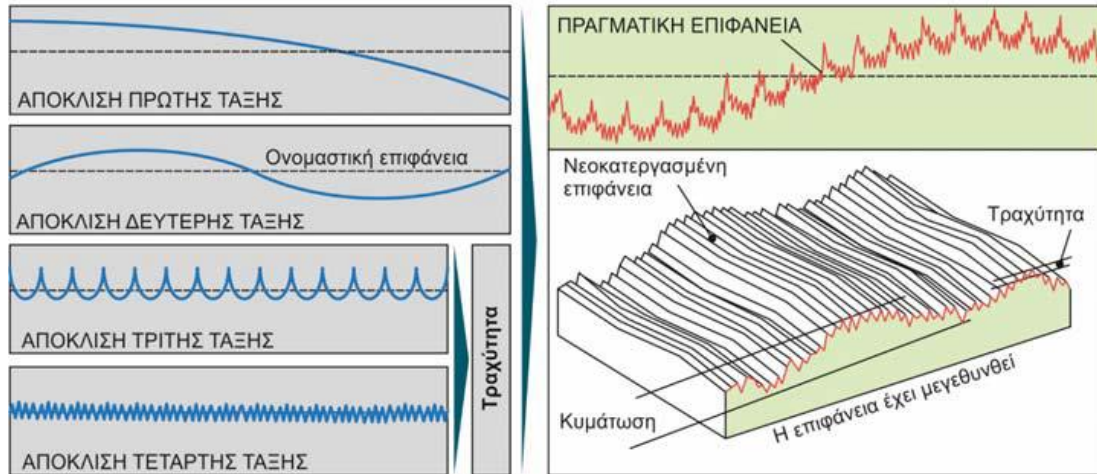


Εικόνα 2.12: Μετωπικό Φρεζάρισμα

2.3. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ – ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Ο όρος ποιότητα κατεργασμένης επιφάνειας στη μεταλλουργία αναφέρεται:

- στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας,
- στην ακρίβεια των μορφικών διαστάσεων,
- επιφανειακά, στα φυσικά, χημικά και μεταλλογραφικά χαρακτηριστικά του τεμαχίου.



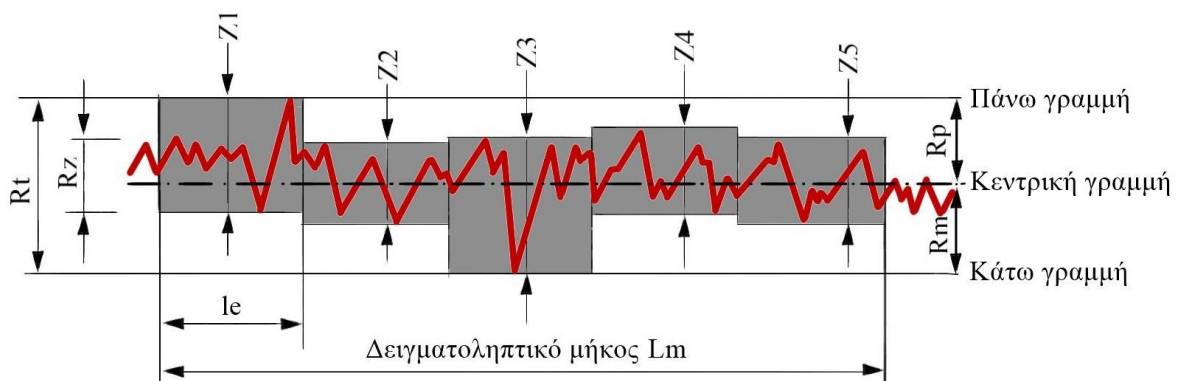
Εικόνα 2.13: Τάξεις Αποκλίσεων Επιφανειών

Σκληρότητα, αντοχή σε διάβρωση και οξείδωση, δομή και διάφορα ελαττώματα ή εναπομένουσες τάσεις αποτελούν τέτοια χαρακτηριστικά.

Γενικά μια οποιαδήποτε επιφάνεια, συμπεριλαμβανομένων και των παραγομένων επιφανειών από το φρεζάρισμα, μπορούν να προσδιοριστούν από κάποια σύνθεση εξισώσεων κυματικής. Οι εξισώσεις αυτές, οι οποίες εκφράζουν την απόκλιση της επιφάνειας, έχουν παράγοντες διαφορετικής τάξης. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.13, οι αποκλίσεις 3ης έως και 4ης τάξης αποτελούν αυτό που καλείται τραχύτητα επιφάνειας.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν, σε διαφορετικό όμως βαθμό ο καθένας, την τραχύτητα, και συνεπώς την ποιότητά των κατεργασμένων επιφανειών, είναι οι εξής:

- Η κινηματική (σχετική κίνηση εργαλείου – τεμαχίου),
- Το υλικό του τεμαχίου,



Εικόνα 2.14: Ακρότατα Εξίσωσης Τραχύτητας (δύο διαστάσεων)



Εικόνα 2.15: Μέσο Ύψος Τραχύτητας R_a

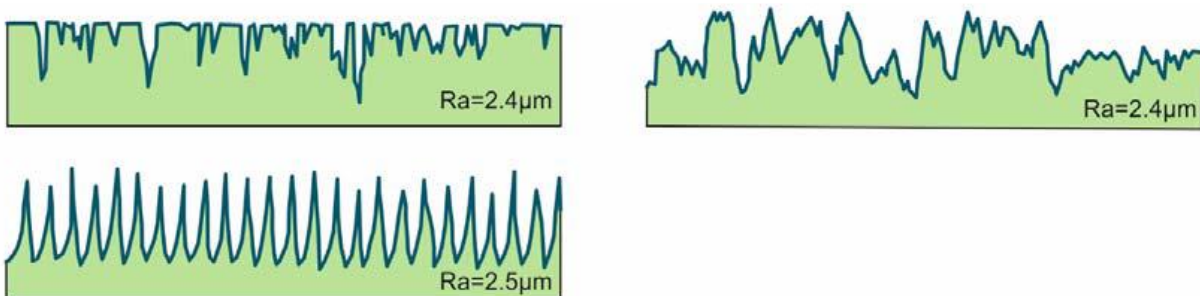
- Το σχήμα και η γεωμετρία της κοπτικής ακμής, η τραχύτητα των κοπτικών επιφανειών και η φθορά της,
- Οι συνθήκες κατεργασίας (πρόωση, ταχύτητα κοπής, βάθος κοπής),
- Το υγρό κοπής, αν χρησιμοποιείται,
- Οι δυνατότητες της εργαλειομηχανής, αναφορικά με την επιτυγχάνομενη ακρίβεια,
- Οι ταλαντώσεις του συστήματος (εργαλειομηχανή – τεμάχιο – εργαλείο).

Το πρόβλημα επίτευξης της απαιτούμενης τραχύτητας σε κατεργαζόμενα τεμάχια έχει ιδιαίτερη σημασία στη σχεδίαση μηχανολογικών εξαρτημάτων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις σφικτών συναρμογών, ή και απλώς συνεργαζόμενων επιφανειών. Η τραχύτητα των επιφανειών επιδρά κυρίως:

- Στην επαφή ανάμεσα στις επιφάνειες (συντελεστής τριβής, χαρακτηριστικά λίπανσης, φθορά κ.λπ.),
- Στις συνθήκες ροής ρευστών σε τοιχώματα,
- στους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας,
- στην αντίσταση σε διάβρωση,
- στην αντοχή σε κόπωση των υλικών.

Υπάρχουν δυο συστήματα για τον προσδιορισμό της τραχύτητας: το σύστημα κεντρικής γραμμής ή σύστημα (M) και το σύστημα περιβάλλουσας (E). Το σύστημα (M) είναι το πιο διαδεδομένο, και χρησιμοποιείται περισσότερο.

Στην εικόνα 2.14 παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά του συστήματος (M). Το σύστημα αυτό βασίζεται σε μια κεντρική γραμμή, στο πραγματικό περίγραμμα της επιφάνειας, που προσεγγίζει τη γραμμή που χωρίζει τα δυο εμβαδά ισομερώς, για κάποιο μήκος L_m . Το L_m



Εικόνα 2.16: Διαφορετικές Περιπτώσεις Τραχύτητας Με Παρόμοιο Μέσο Ύψος Τραχύτητας R_a

είναι γνωστό και ως το δειγματοληπτικό μήκος, το καθορισμένο δηλαδή μήκος στο οποίο μετρείται η τραχύτητα. Η πάνω γραμμή εφάπτεται στο ολικό μέγιστο, μέσα στο δειγματοληπτικό μήκος, ενώ η κάτω γραμμή εφάπτεται στο ολικό ελάχιστο. Η απόσταση ανάμεσα τους ορίζει το μέγιστο ύψος της τραχύτητας R_t .

Το μέσο ύψος της τραχύτητας R_a , όπως φαίνεται στην εικόνα 2.15, ορίζεται ως η αριθμητική μέση τιμή των αποκλίσεων όλων των σημείων του πραγματικού περιγράμματος από τη μέση γραμμή, μέσα στο καθορισμένο δειγματοληπτικό μήκος. Σε αυτές τις αποκλίσεις για το R_a λαμβάνονται πάντα απόλυτες τιμές.

Εξ ορισμού, το R_a είναι ένας μέσος όρος. Για αυτό το λόγο, οι διαφοροποιήσεις στην μορφολογία της επιφάνειας δεν επηρεάζουν πάντα με τον ίδιο τρόπο την τιμή του, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.16 για τρεις περιπτώσεις επιφανειών με ίδια σχεδόν τιμή του R_a , αλλά πολύ διαφορετική μορφή της επιφάνειας.

Ένα άλλο μέγεθος μέτρησης της τραχύτητας (DIN4768-1) είναι το ύψος τραχύτητας R_z , που προσδιορίζεται ως:

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5}$$

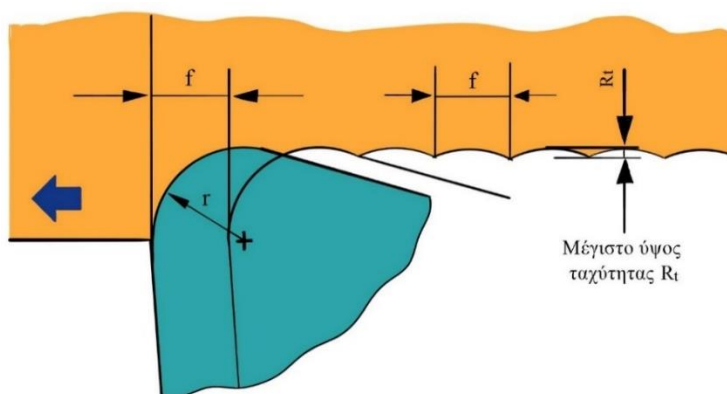
Τα υψηλότερα τοπικά μέγιστα και τα χαμηλότερα τοπικά ελάχιστα, όπως φαίνονται πίσω στην εικόνα 2.14, προσδιορίζονται μέσα σε 5 ίσα τμήματα l_e , στα οποία χωρίζεται το δειγματοληπτικό μήκος L_m . Το μήκος l_e ονομάζεται μήκος αποκοπής και η επιλογή του είναι σημαντική για την τραχυμέτρηση. [1]

2.3.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΑΙΧΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΡΩΩΣΗΣ ΤΟΥ ΚΟΠΤΙΚΟΥ ΣΤΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΤΕΜΑΧΙΟΥ

Το θεωρητικό μέγιστο ύψος στο προφίλ της επιφάνειας, αποτελεί το μέγιστο ύψος της θεωρητικής τραχύτητάς της. Υπολογίζεται μέσω ενός απλού τύπου:

$$R_{th} = \frac{f^2}{8r}$$

Οι ενδεικτικές τιμές που προκύπτουν από αυτόν το τύπο προσεγγίζουν αυτές της πραγματικής τραχύτητας. Αντίστροφα, αυτός ο υπολογισμός δίνει κατάλληλες τιμές πρόωσης, με απαίτηση μια τιμή τραχύτητας, για δεδομένη καμπυλότητα r της αιχμής του κοπτικού εργαλείου. [1]



Εικόνα 2.17: Επίδραση της Ακτίνας Καμπυλότητας r στο Μέγιστο Ύψος Τραχύτητας R_t

3. ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ

3.1. ΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΟΥ ΚΟΠΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

Η φύση των υλικών που αποδίδουν ικανοποιητικά κοπτικά εργαλεία χαρακτηρίζεται από:

- Σκληρότητα (εν θερμώ): Η σκληρότητα του υλικού πρέπει να είναι η μέγιστη δυνατή, και να μην μειώνεται σε ενδεχομένη αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο για την αιχμηρότητα της κοπτικής ακμής, και συνεπώς για την αποτελεσματικότητα του εργαλείου.
 - Αντίσταση στις απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές: Τα θερμικά σοκ στο κοπτικό ενέχουν τον κίνδυνο εμφάνισης μικρορωγμών, οι οποίες αυξάνουν την πιθανότητα αστοχίας. Σε συνθήκες διακοπτόμενης κατεργασίας κοπής όπως είναι το φρεζάρισμα, στο οποίο οι κοπτικές ακμές συντελούν περιοδικά στην κοπή, τα θερμικά σοκ είναι σύνηθες φαινόμενο και συνεπώς η αντιμετώπιση τους πρέπει να προβλεφθεί.
 - Απουσία συγγένειας με τα κατεργαζόμενα υλικά: Η συνάφεια ή χημική συγγένεια του υλικού του κοπτικού εργαλείου και του υλικού του τεμαχίου, έχει άμεση σχέση με το σχηματισμό του φαινομένου της ψευδόκοψης. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου μέσω του φαινομένου της απόξεσης και επιδείνωση της ποιότητας της κατεργαζόμενης επιφάνειας.
 - Αντίσταση στην οξειδωση: Σε κατεργασίες υψηλής ταχύτητας, και θερμοκρασίας συνήθως αναπτύσσονται φαινόμενα οξειδωσης. Αυτό συναντάται κυρίως στη δευτερεύουσα κόψη του κοπτικού, και αφορά κυρίως εργαλεία από σκληρομέταλλα. Η αντίσταση στην οξειδωση προστατεύει το εργαλείο, σε υψηλές ταχύτητες κοπής.
 - Μηχανική Αντοχή: Λόγω των μεγάλων δυνάμεων κοπής, και των μηχανικών υπερκαταπονήσεων, κρίνεται απολύτως σημαντικό το υλικό από το οποίο παράγεται ένα κοπτικό εργαλείο να χαρακτηρίζεται από μηχανική αντοχή. Σε αντίθετη περίπτωση, υπάρχει μεγάλος κίνδυνος το υλικό να αστοχήσει, ή να θρυμματιστεί η κοπτική ακμή.
- [1]



Εικόνα 3.1: Φρεζοκεφαλή αποσπώμενων πλακιδίων

3.2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ

Στο μετωπικό φρεζάρισμα υπάρχουν 6 γωνίες που καθορίζουν τη γεωμετρία της κοπής, πέραν της ακτίνας καμπυλότητας της ακμής. Στην ορθογωνική κοπή, παραπάνω, περιεγράφηκαν 3 γωνίες. Οι γωνίες στο μετωπικό φρεζάρισμα είναι οι εξής:

- Οπίσθια γωνία αποβλίττου (back rake angle)
- Πλευρική γωνία αποβλίττου (side rake angle)
- Ακραία γωνία ελευθερίας (end relief angle)
- Πλευρική γωνία ελευθερίας (side relief angle)
- Ακραία γωνία κοπής (end cutting edge angle)
- Πλευρική γωνία κοπής (side cutting edge angle)



Εικόνα 3.2: Ενδεικτικές κεφαλές κοπτικών εργαλείων φρεζαρίσματος

Η οπίσθια γωνία αποβλίττου ορίζει την διεύθυνση ροής του αποβλίττου, ενώ η πλευρική γωνία αποβλίττου παίζει ρόλο στην κατανάλωση ισχύος. Οι γωνίες ελευθερίας είναι υπεύθυνες για την «παρεμβολή» εργαλείου – τεμαχίου, ενώ οι γωνίες κοπής συνδέονται με τη δύναμη κοπής και την σταθερότητα της κατεργασίας.

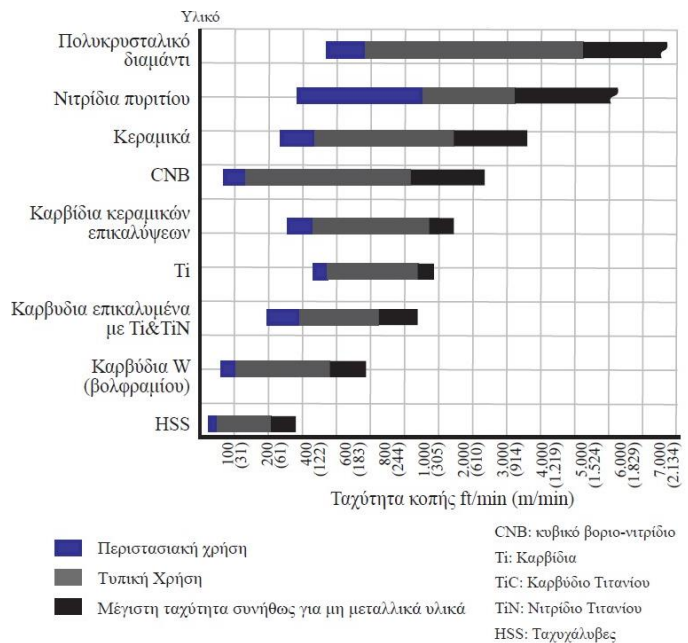
Τα κοπτικά εργαλεία έρχονται σε πολλά διαφορετικά μεγέθη και σχήματα. Ανάλογα την κατεργασία που λαμβάνει χώρα στη φρέζα, τις συνθήκες κατεργασίας και αν πρόκειται για εκχόνδριση ή για λείανση (φινίρισμα), η γεωμετρία τόσο της κεφαλής, όσο και συνολικά του κοπτικού εργαλείου προσαρμόζεται στην περίπτωση. Επίσης, τα κοπτικά εργαλεία μπορούν να αποτελούνται από διαφορετικά τμήματα, στα οποία η κοπτική ακμή είναι στην πραγματικότητα ένα ή περισσότερα πλακίδια, τα οποία προσαρμόζονται σε μια ειδικά διαμορφωμένη θέση στην κεφαλή του κονδυλίου. [1]

3.3. ΥΛΙΚΑ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ

3.3.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Στην αυγή του 20^{ου} αιώνα ο ταχυχάλυβας ήταν το πλέον σύνηθες υλικό για μηχανουργικές κατεργασίες, σαφώς ανώτερος του κοινού χάλυβα, τόσο στην αντοχή στην φθορά, όσο και στην δυνατότητα υψηλότερης ταχύτητας κοπής. Το πλεονέκτημα κρύβεται στο μοριακό επίπεδο, και στην παρουσία σωματιδίων καρβιδίων του βολφραμίου στη μεταλλική μήτρα. Πατώντας σε αυτή την ανακάλυψη εξελίχθηκαν τα κοπτικά εργαλεία από καθαρά καρβίδια βολφραμίου. Η τροποποίηση αυτή των σκληρομετάλλων έδωσε υλικά πολύ σκληρότερα, και με καλύτερη αντοχή στις υψηλές ταχύτητες κατεργασίας. Αρχικά βέβαια, η δημιουργία αυτών των εργαλείων συνοδεύτηκε από κακές επιδόσεις στη βιομηχανία, λόγω της μεγάλης ψαθυρότητας που

παρουσίαζαν σε κρίσιμες εφαρμογές. Το πρόβλημα λύθηκε το 1914, όταν ο Karl Schröter, εργαζόμενος στην εταιρεία Osram, ανακάλυψε ότι η ανάμειξη του καρβιδίου του βολφραμίου με μέταλλα όπως ο σίδηρος, το νικέλιο και το κοβάλτιο σε συγκεκριμένα ποσοστά, πυροσυσσωματώνεται στους 1500 °C, δίνοντας τελικά ένα υλικό χαμηλού πορώδους και υψηλής σκληρότητας. Το 1927, υπό την ονομασία “Widia” (wie Diamant), ο Fried Krupp παρουσίασε τα σκληρομέταλλα ως υλικά κατάλληλα για την κατασκευή κοπτικών εργαλείων, τα οποία μέχρι σήμερα αποτελούν πυλώνα, μέσω συνεχών βελτιώσεων, των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κοπτικών εργαλείων. [4]



Εικόνα 3.3: Κατάταξη Υλικών Κοπτικών Εργαλείων βάσει της Ταχύτητας Κοπής που Υποστηρίζουν

3.3.2. ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΠΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΕΣ

Ο εργαλειοχάλυβας είναι ένα σύνολο πολύ γνωστών υποκατηγοριών μεταλλικών υλικών για κατεργασίες. Εδώ ανήκουν τα πολύ πρώιμα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο ρου της ιστορίας, όπως οι απλοί ανθρακούχοι χάλυβες, τα διάφορα κράματα τους, καθώς και τα χυτοκράματα. Ιδιαίτερη αναφορά βέβαια αξίζει στους ταχυχάλυβες.



Εικόνα 3.4: Κοπτικό εργαλείο φρέζας από ταχυχάλυβα. Πηγή: <https://www.dictoolsindia.com/hss-cutting-tools/index.php>

Οι ταχυχάλυβες αποτέλεσαν μια σοβαρότατη ανακάλυψη στο τέλος του 19^{ου} αιώνα. Οι λόγοι που κυριάρχησαν στις κατεργασίες, και ειδικά ως υλικά κατασκευής κοπτικών εργαλείων είναι οι εξής:

- Μεγάλο εύρος εφαρμογών.
- Κάλυψη του πεδίου ταχυτήτων κοπής. Δυνατότητα κοπής τόσο σε πολύ χαμηλές, όσο και σε υψηλές τιμές (~60 m/min).
- Μεγάλη αντοχή σε φθορά.
- Διατήρηση της σκληρότητας μέχρι τους 600°C περίπου.
- Ικανοποιητική αντοχή σε κρούσεις και κραδασμούς.

- Μικρό σχετικά κόστος κτήσης
- Ευχερής και οικονομική επανατροχίση.

Από πλευρά σύνθεσης διακρίνονται σε 3 κατηγορίες:

- A. Με υψηλό ποσοστό W.
- B. Με υψηλό ποσοστό Mo.
- C. Με μέση συμμετοχή W και Mo.

Για τα κραματικά στοιχεία ισχύει:

- W: Σχηματισμός σύνθετων καρβιδίων με τα καρβίδια του Fe, με αποτέλεσμα την σκληρότητα σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Mo: Ομοίως
- Co: Άνοδος του σημείου ανακρυστάλλωσης λόγω της διαλυτότητας του στο φερριτικό ιστό του χάλυβα. Κατ' αυτόν τον τρόπο η σκληρότητα διατηρείται σε υψηλότερες θερμοκρασίες (αποτελεί μηχανισμό σκλήρυνσης και όχι θερμικής κατεργασίας).
- V: Εμποδίζει την ανακρυστάλλωση των κόκκων σε μεγάλο μέγεθος σε υψηλότερες θερμοκρασίες (κατά τη θερμική κατεργασία). Ευνοεί το σχηματισμό ελεύθερων πολύ σκληρών καρβιδίων, αυξάνοντας την αντοχή σε φθορά σε όλες τις θερμοκρασίες κοπής.

Η βαφή των τεμαχίων από εργαλειοχάλυβα είναι δύσκολη διαδικασία, ενώ χρειάζεται ιδιαίτερα έμπειρο προσωπικό για να επιτευχθεί σωστά. Η θερμοκρασία βαφής κυμαίνεται στους 1200 – 1300°C. Η θερμοκρασιακή ακρίβεια είναι κρίσιμη, καθώς μια απόκλιση τάξεως 20 – 30°C από την προδιαγεγραμμένη τιμή μπορεί να οδηγήσει σε αντίθετα αποτελέσματα



Εικόνα 3.5: Επικαλυμμένα κοπτικά ταχυχάλυβα (H.S.S.). Πηγή: <https://www.pesmedia.com/dormer-pramet-high-speed-steel-cutting-tools>

(μείωση σκληρότητας). Η βαφή γίνεται σε περιβάλλον λαδιού ή ειδικών λουτρών αλάτων και ακολουθεί ήρεμη απόψυξη σε ρεύμα αέρα.

Οι μέθοδοι παραγωγής ταχυχαλύβων είναι:

- Σύντηξη του μίγματος. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ο ανομοιογενής σχηματισμός των καρβιδίων κατά τη φάση στερεοποίησης μειώνοντας την απόδοση του κοπτικού εργαλείου.

- Κονιομεταλλουργία και πυροσυσσωμάτωση. Αποδίδει ομοιογενέστερη δομή στον ταχυχάλυβα και το τρόχισμα τέτοιων κοπτικών εργαλείων είναι ευκολότερο. Ακόμα, είναι λιγότερο ευαίσθητα στη θερμική τους κατεργασία και έχουν υψηλότερη κοπτική ικανότητα. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος. [6]

3.3.3. ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΠΟ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΑΛΛΟ

Τα σκληρομέταλλα είναι δημοφιλή σε μια ποικιλία εφαρμογών, κυρίως για την κοπή σκληρών υλικών. Εμφανίστηκαν πρώτη φορά κατά την δεκαετία του 1960. Ως εργαλεία κοπής εμφανίζουν καλύτερα αποτελέσματα από πολλά υλικά αυτής της κατηγορίας, ενώ επιτρέπουν υψηλότερες ταχύτητες κοπής, αυξάνοντας την απόδοση της κατεργασίας.

Η βασική χρήση των σκληρομετάλλων στην κοπή είναι ως υποστρώματα. Ως υποστρώματα, αυτά τα υλικά διατηρούν την σκληρότητα τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ιδιότητά τους αυτή είναι ιδιαίτερα περιζήτητη, μιας και η αύξηση της ταχύτητας σε μια κατεργασία αφαίρεσης υλικού συνεπάγεται και αύξηση της θερμοκρασίας. Συνεπώς,



Εικόνα 3.6: Κοπτικό επικαλυμμένου καρβιδίου. Πηγή: <https://us.metoree.com/categories/3924/>

χρησιμοποιώντας σκληρομέταλλα ως υποστρώματα σε μια κατεργασία, είναι δυνατόν να επιτευχθούν υψηλότερες ταχύτητες κατεργασίας, κάτι το οποίο είναι, είτε απλώς θεμιτό και κερδοφόρο, χάριν, για παράδειγμα, της αύξησης της παραγωγής ενός εργοστασίου, είτε απαραίτητο, όπως σε κάποια τελική κατεργασία λείανσης τεμαχίου (φινίρισμα).

Το σκληρομέταλλο είναι προϊόν της κονιομεταλλουργίας. Αποτελείται από σωματίδια καρβιδίων, κυρίως καρβίδια βολφραμίου, σε συνδυασμό με άλλα καρβίδια, τιτάνιο, ταντάλιο, νιόβιο κ.λπ. (TiC, TaC, NbC), αλλά σε μικρότερες αναλογίες. Τα καρβίδια αυτά πυροσυσσωματώνονται σε υψηλές θερμοκρασίες (1350-1500°C) και συμπιέζονται σε αναγωγική ατμόσφαιρα, συνήθως με συνδετικά υλικά όπως κοβάλτιο (Co), σίδηρο (Fe) και νικέλιο (Ni), για να σχηματίσουν σώματα με υψηλή σκληρότητα και καλή αντοχή σε θλίψη. Ο τύπος του καρβιδίου και του συνδετικού υλικού επιλέγεται ανάλογα με την εφαρμογή του σκληρομετάλλου. Το μέγεθος των χρησιμοποιούμενων κόκκων WC είναι ένας άλλος καθοριστικός παράγοντας που επηρεάζει τη συμπεριφορά στην κοπή. Τα λεπτόκοκκα σκληρομέταλλα έχουν χαμηλή τραχύτητα και πυκνή δομή, με αποτέλεσμα υψηλή απόδοση κοπής. Όταν χρησιμοποιούνται επικαλυμμένα καρβίδια, η κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας τους πριν από την εναπόθεση είναι σημαντική για την επίτευξη υψηλής συνάφειας με την επικάλυψη.

Η χρήση των σκληρομετάλλων απαιτεί υψηλούς ρυθμούς πρόωσης και ταχύτητες περιστροφής, έλλειψη κραδασμών και στιβαρές εργαλειομηχανές. Τα υγρά κοπής γενικά δεν χρησιμοποιούνται, αλλά αν χρησιμοποιηθούν, απαιτούνται σε μεγάλες ποσότητες για να αποφευχθεί η θέρμανση ή η ταχεία ψύξη του εργαλείου κατά τη διακοπόμενη κοπή.

Οι βασικές ιδιότητες των κοπτικών εργαλείων από σκληρομέταλλο είναι:

- Υψηλό μέτρο ελαστικότητας και όριο διαρροής.
- Αντοχή σε φθορά πολλαπλάσια από άλλα υλικά.
- Χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, καθιστώντας τα ιδιαίτερα.
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα.
- Εξαιρετική σκληρότητα (περίπου 850HB) και σε υψηλές θερμοκρασίες (900-1000 °C) χωρίς να επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη εκλυόμενη θερμότητα κοπής. [5]

3.3.4. ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΠΟ ΚΕΡΑΜΙΚΑ

Τυπικά αποτελούνται από 100% σκληρή φάση όπως Al_2O_3 ως ιδιαίτερα λεπτόκοκκα σωματίδια με μικρές προσθήκες π.χ. TiC, βελτιστοποιώντας τις ιδιότητες τους. Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν και τα κράματα βορίου και τα cermet (συνήθως 70% Al_2O_3 και 30% TiC). Τα κεραμικά παρουσιάζουν αξιοσημείωτη η αντοχή στη φθορά και υψηλή σκληρότητα, ενώ ακόμη είναι αδρανή σε σχέση με τα υλικά των κατεργάσιμων τεμαχίων. Βέβαια, υπάρχει ένα καίριο ζήτημα που πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπ' όψη όταν πρόκειται για κοπτικά εργαλεία από κεραμικά: πολύ μικρή δυσθραυστότητα, που σημαίνει πως είναι επιρρεπή σε καταστροφική θραύση. Διατίθενται σε



Εικόνα 3.7: Κεραμικά κοπτικά της εταιρείας BSQ TECH GmbH. Πηγή: <https://www.bsq-tech.com/en/keramikfraeser>

μορφή πλακιδίων όπως τα σκληρομέταλλα και είναι πολύ διαδεδομένα κατεργασίες υψηλότερων ταχυτήτων μη διακοπόμενης κοπής χωρίς υγρά κοπής, με στόχο την αποφυγή θερμικού σοκ. Για την αποφυγή αποκολλήσεων και αποφλοιώσεων η κοπή λαμβάνει χώρα με αρνητικές γωνίες αποβλίττου και εργαλειομηχανές υψηλής στιβαρότητας και ακρίβειας. SiN και SiAlONs (κράματα πυριτίου – Si, αλουμινίου – Al, οξυγόνου – O και αζώτου – N) χρησιμοποιούνται με πολύ καλά αποτελέσματα για κοπή χυτοσιδήρου και αεροπορικών κραμάτων. Βέβαια, τα κεραμικά εργαλεία είναι αρκετά ακριβότερα από τα αντίστοιχα

σκληρομέταλλα, ενώ είναι ακατάλληλα για κατεργασίες χαμηλών ταχυτήτων κοπής ή διακοπόμενων τάσεων, λόγω της χαρακτηριστικής ψαθυρότητας τους. [6]

3.3.5. ΚΥΒΙΚΟ ΒΟΡΙΟ – ΝΙΤΡΙΔΙΟ (CBN)

Τα εργαλεία από CNB αποτελούνται από υπόστρωμα καρβιδίου, το οποίο προσδίδει αντοχή σε δυναμικές φορτίσεις, και επίστρωση πολυκρυσταλλικού CBN, χαρίζοντας στο προϊόν εξαιρετική αντοχή στη φθορά και σκληρότητα, μιας και το κυβικό βόριο – νιτρίδιο είναι το σκληρότερο υλικό μετά το διαμάντι. Χαρακτηρίζεται ως χημικά αδρανές υλικό αναφορικά με σιδηρούχα και νικελιούχα κράματα σε υψηλές θερμοκρασίες, αντίθετα από ότι το διαμάντι, ενώ, επιπροσθέτως, έχει καλή αντοχή στην οξείδωση. Συνεπώς, το CNB καθίσταται κατάλληλο υλικό κοπτικών εργαλείων για χρήση εναντίον επισκληρυμένων σιδηρούχων και υψηλής θερμοκρασίας κραμάτων. [6]

3.3.6. ΔΙΑΜΑΝΤΙ

Το διαμάντι είναι ένα υλικό το οποίο είναι γνωστό για την υψηλότερη σκληρότητα, την πολύ καλή αντοχή στη φθορά, τους χαμηλούς συντελεστές τριβής και θερμικής διαστολής και την υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Πρωταγωνιστεί, ως κοπτικό εργαλείο, στο στάδιο της αποπεράτωσης (φινιρίσμα), δίνοντας στο τεμάχιο απαράμιλλη ποιότητα τελικής επιφάνειας και ακρίβεια διαστάσεων. Οι ιδιότητες του διαμαντιού το καθιστούν ικανό κοπτικό για πολύ μεγάλο εύρος ταχυτήτων κοπής, με μοναδικό κίνδυνο την θραύση, σε συνθήκες επικίνδυνες για ψαθυρά υλικά.

Σε μονοκρυσταλλικά υλικά όπως το διαμάντι ο προσανατολισμός του κρυστάλλου είναι ένας πολύ κρίσιμος παράγοντας, ο οποίος δεν είναι πρόβλημα στα πολυκρυσταλλικά συνθετικά διαμάντια. Σε αυτά, η τυχαιότητα κατανομής διεθύνσεων των κρυστάλλων εμποδίζει τη διάδοση ρωγμών και τις μικρό – αποκολλήσεις. Το συνθετικό διαμάντι, με στρώμα πάχους έως 1mm σε υπόστρωμα σκληρομετάλλου, είναι κατάλληλο για κατεργασίες μη σιδηρούχων κραμάτων, όπως κράματα αλουμινίου – πυριτίου, βολφραμίου, κεραμικών, πορσελάνης, ενισχυμένων με υαλονήματα πλαστικών και άλλων. [6]

3.4. ΕΙΔΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Λόγω του υψηλού κόστους και της σύντομης φθοράς των κοπτικών εργαλείων, είναι πολύ σημαντική η προστασία και η βελτίωσή τους. Στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται διάφορες διεργασίες για την ενίσχυση των υφιστάμενων επιφανειών. Ωστόσο, ο πιο συνηθισμένος τρόπος βελτίωσης των υλικών είναι η επικάλυψή τους με άλλα υλικά υψηλής αντοχής. Χαρακτηριστικά όπως η εύκολη ολίσθηση, ο χαμηλός συντελεστής τριβής στη διεπιφάνεια εργαλείου – τεμαχίου και η εξαιρετική αντοχή στη φθορά επιτρέπουν τη μακροχρόνια χρήση του κοπτικού εργαλείου, ενώ η ταχύτητα κοπής που επιτυγχάνεται σε διάφορες εργασίες αφαίρεσης υλικού είναι σημαντικά υψηλότερη από τα μη επικαλυμμένα πλακίδια. Επιπλέον, η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας βελτιώνεται σημαντικά και μειώνοντας την ανάγκη για πρόσθετα στάδια φινιρίσματος στην κατεργασία, παράμετρος ιδιαίτερα σημαντική στη βιομηχανία. Το

πάχος της επικάλυψης εξαιρετικά λεπτό, συνήθως στο εύρος 3 – 10 μm. Οι εσωτερικές τάσεις που εμφανίζονται στην επίστρωση επηρεάζονται όσο αυξάνεται το πάχος. Ο κύριος παράγοντας που αποθαρρύνει τη χρήση κοπτικών εργαλείων με παχύτερη επίστρωση είναι το αυξημένο κόστος εναπόθεσης της επίστρωσης. Το σχήμα του κοπτικού εργαλείου (π.χ. τριγωνικό, τετράγωνο, διαμάντι), η γωνία αποβλίττου, η γωνία ελευθερίας και οι ανοχές κατασκευής παίζουν σημαντικό ρόλο κατά την κατεργασία, τόσο αναφορικά με το προς κατεργασία τεμάχιο όσο και την αντοχή του κοπτικού εργαλείου.

3.4.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΛΕΠΤΩΝ ΣΚΛΗΡΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ

Οι διεργασίες παραγωγής λεπτών σκληρών επικαλύψεων χωρίζονται γενικά σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία, η οποία άρχισε να αναπτύσσεται τη δεκαετία του 1960, είναι η διαδικασία κατά την οποία τα υλικά επικάλυψης παράγονται με χημικές αντιδράσεις σε υψηλές θερμοκρασίες και συμπυκνώνονται με τη μορφή ατμών σε μια ψυχρή επιφάνεια (CVD, Chemical Vapour Deposition). Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει διαδικασίες όπου το υλικό επικάλυψης μετατρέπεται σε πλάσμα. Το πλάσμα είναι μια κατάσταση της ύλης στην οποία μπορούν να συνυπάρχουν ηλεκτρόνια, άτομα, ιόντα και μόρια, ανάλογα με τη διεργασία, επίσης με τη μορφή ατμών. Οι ατμοί αυτοί καθοδηγούνται από ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και εναποτίθενται στην επιφάνεια του τεμαχίου με φυσική συμπύκνωση (φυσική εναπόθεση ατμών). Οι πρώτες επιστρώσεις CVD πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασίες άνω των 1000°C και σε πιέσεις λίγο χαμηλότερες από την ατμοσφαιρική, λαμβάνοντας υπόψη την κυκλοφορία των ατμών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί ο περιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του σκληρομεταλλικού υποστρώματος, χρησιμοποιείται τέτοιου τύπου υλικό, λόγω της παρατεταμένης έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες. Η διαδικασία CVD δεν μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την επικάλυψη υλικών ασταθών σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως οι ταχυχάλυβες. Ο περιορισμός του πεδίου των θερμοκρασιών στην περιοχή των 800°C (MTCVD) μειώνει το πρόβλημα των δυσμενών επιδράσεων στις μηχανικές ιδιότητες του σκληρομετάλλου περιορίζοντας τη διάρκεια ζωής του εργαλείου σε εργασίες με εναλλασσόμενη φόρτιση, όπως το φρεζάρισμα. Η ανάπτυξη της διαδικασίας PVD έδωσε ισχυρή ώθηση στην επικάλυψη κοπτικών εργαλείων. Η διαδικασία PVD πραγματοποιείται σε χαμηλές πιέσεις περίπου 10^{-1} Pa και σε θερμοκρασίες κάτω των 600°C, οι οποίες μπορούν να μειωθούν σε θερμοκρασία δωματίου υπό ορισμένες συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές είναι κατάλληλες για την επικάλυψη σχεδόν όλων των μεταλλικών και μη μεταλλικών υλικών. [7]

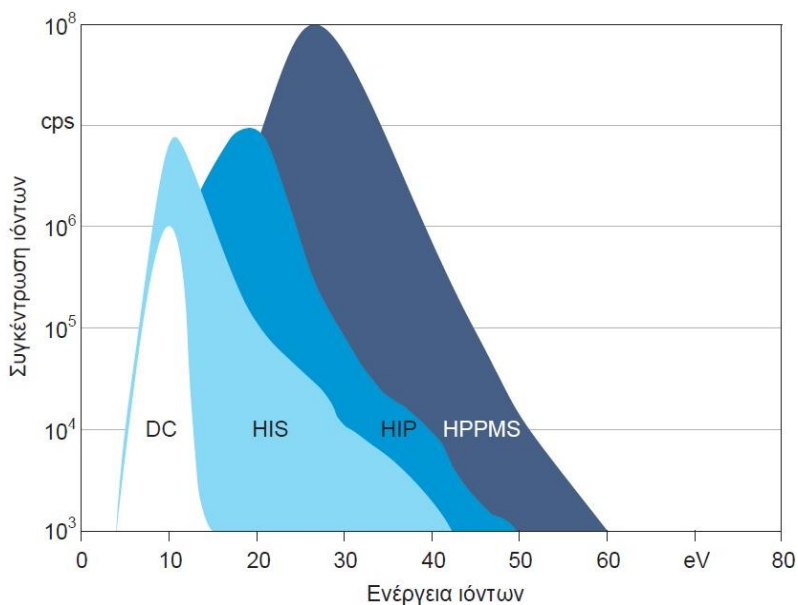
3.4.2. PVD ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ

Η φυσική εναπόθεση ατμών (PVD) καλύπτει μια ευρεία κατηγορία διεργασιών επικάλυψης κατά τις οποίες το υλικό απομακρύνεται φυσικά από την πηγή με εξάτμιση ή επιμετάλλωση, οδηγείται από την ενέργεια των μορίων ατμών μέσω κενού ή μερικού κενού και συμπυκνώνεται σε ένα φιλμ στην επιφάνεια ενός κατάλληλα τοποθετημένου δείγματος. Οι χημικές ενώσεις εναποτίθενται χρησιμοποιώντας παρόμοια υλικά πηγής ή με την προσθήκη αντιδραστικών

αερίων (άζωτο, οξυγόνο ή απλοί υδρογονάνθρακες) που αντιδρούν με τα μέταλλα από την πηγή PVD.

Στις μεθόδους PVD το υλικό επικάλυψης μετατρέπεται σε κατάσταση πλάσματος μέσω τήξεως και εξάτμισης σε πολύ χαμηλή πίεση (εξάτμιση υπό κενό), μέσω μικρό-εκκενώσεων με ηλεκτρικό τόξο (arc – PVD) ή με βομβαρδισμό ιόντων (sputtering). Στη μέθοδο ιοντικού βομβαρδισμού, ένα αδρανές αέριο, συνήθως αργό (Ar), εισάγεται στο θάλαμο επικάλυψης σε πίεση περίπου 10^{-1} Pa. Τα άτομα Ar συγκρούονται με ελεύθερα ηλεκτρόνια στην περιοχή του

ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του θαλάμου που γειτνιάζει με το στόχο. Κατά τη σύγκρουση απελευθερώνονται άτομα από το στόχο και, αποκτώντας κινητική ενέργεια, κατευθύνονται προς το υπόστρωμα. Αυτό καλύπτει σταδιακά το υπόστρωμα. Όσο υψηλότερη είναι η ενέργεια των ιόντων Ar⁺ που προσκρούουν στο στόχο, τόσο υψηλότερη είναι η ενέργεια των σωματιδίων που εκτοξεύονται από το στόχο. Όσο πιο κάθετη

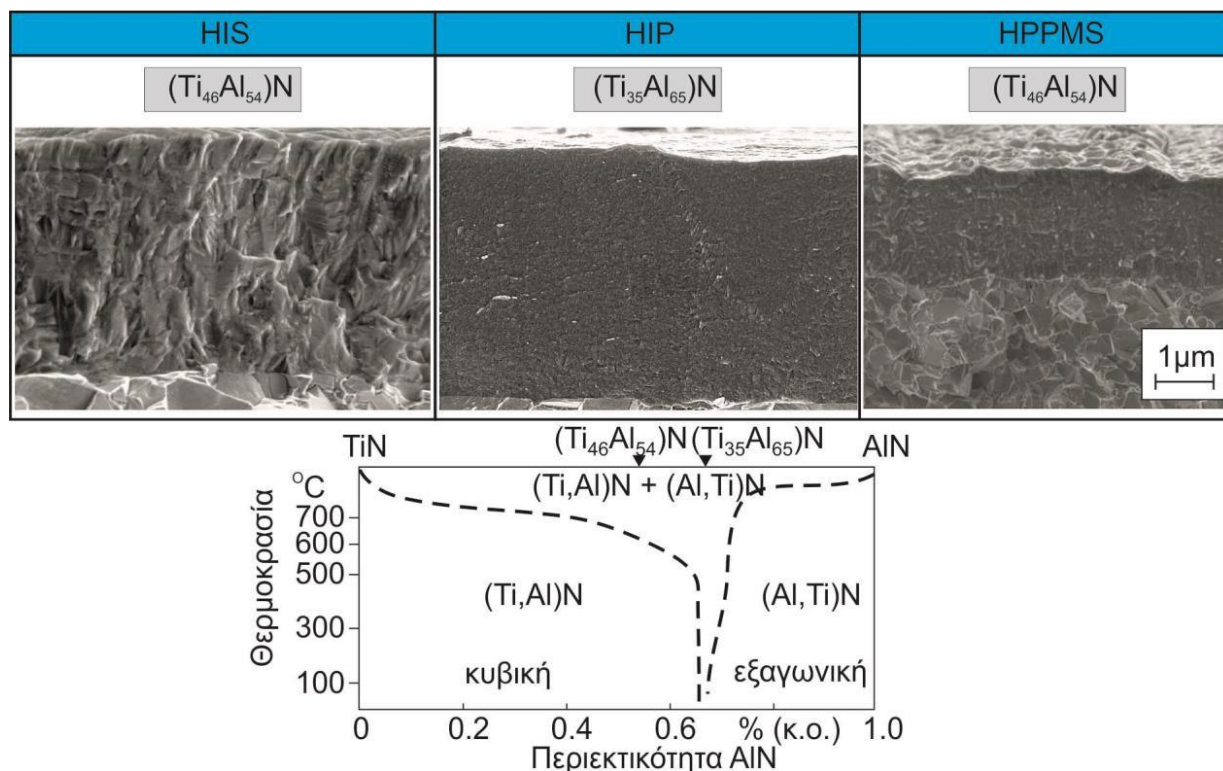


Εικόνα 3.8: Ενέργεια ιόντων κατά τις διάφορες διαδικασίες αύξησης του ενεργειακού επιπέδου πλάσματος κατά την εναπόθεση PVD επικαλύψεων

είναι η ακτινοβολία στο στόχο, τόσο περισσότερη ενέργεια των ιόντων Ar⁺ αξιοποιείται στη σύγκρουση και οι τροχιές των ατόμων και ιόντων που εκτοξεύονται είναι κάθετες στο στόχο. Με τον τρόπο αυτό, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας χρησιμοποιείται για την αύξηση της συγγένειας της επίστρωσης, την αύξηση της πυκνότητας του πλέγματός της και τη σταδιακή δόμησή της. Η δύναμη πρόσκρουσης των ιόντων Ar⁺ στο στόχο μπορεί να αυξηθεί με περαιτέρω αύξηση της τάσης ρεύματος. Εν προκειμένω, η υψηλή τάση συνεχούς ρεύματος του στόχου μπορεί να μετατραπεί σε υψηλότερη τάση εναλλασσόμενου ρεύματος με κατάλληλη διαμόρφωση μέσω ηλεκτρονικών ισχύος.

Ο συνδυασμός των παραγόμενων πλαστικών δίνει στη διαδικασία επικάλυψης υψηλό βαθμό ευελιξίας και διευρύνει το φάσμα των εφαρμογών και σε μονωτικά υλικά. Αυτές οι διεργασίες μπορούν να χαρακτηριστούν ως μέθοδοι υψηλού ιοντικού βομβαρδισμού HIS (High Ionization Sputtering) και να εξελιχθούν σε μεθόδους κρούσης υψηλού ιονισμού HIP (High Ionization Pulsing), συμβάλλοντας στην περαιτέρω αύξηση της ενέργειας και του ρυθμού ιονισμού του πλάσματος των ιόντων Ar⁺ πριν αυτά προσκρούσουν στο στόχο. Η ενέργεια του πλάσματος μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με τη μεταφορά ενέργειας στην περιοχή του πλάσματος με εκκένωση ηλεκτρονίων από κατάλληλη πηγή. Τέτοιες πηγές ενέργειας υψηλού παλμού,

υποστηριζόμενες από μόνιμους μαγνήτες, τοποθετούνται πίσω από έναν μεταλλικό στόχο και μεταφέρουν ενέργεια στα άτομα και τα ιόντα στην περιοχή του πλάσματος μέσω ηλεκτρικών μικρό-εκκενώσεων. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως HPPMS (High Power Pulsing Magnetron Sputtering). Στο σχήμα της εικόνας 3.8 παρουσιάζονται οι επιστρώσεις που παράγονται με τις τρεις παραπάνω τεχνολογίες (HIP, HIS και HPPMS). Το πλάσμα τοποθετείται υπό τάση πόλωσης (BIAS-voltage) για να κατευθύνει αποτελεσματικά τα μεταλλικά ιόντα του πλάσματος στην επιφάνεια του προς επίστρωση τεμαχίου. Η διαδικασία είναι πολύ ευαίσθητη στην αύξηση της τάσης πόλωσης, η οποία οδηγεί σε μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων. Τα τελευταία χρόνια



Εικόνα 3.9: Επικαλύψεις PVD παραγόμενες μέσω HIS, HIP και HPPMS τεχνικών

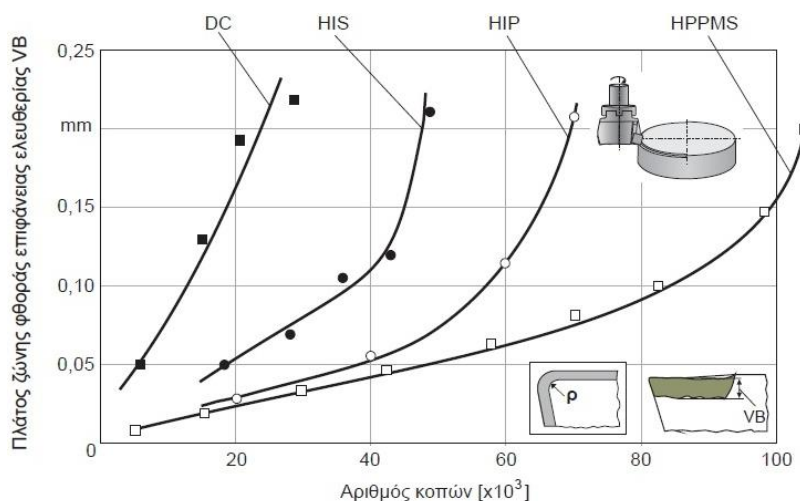
έχουν αναπτυχθεί υβριδικές διεργασίες που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των παραπάνω μεθόδων.

Δεδομένου ότι τα πλακίδια τοποθετούνται σε διαφορετικές θέσεις στην περιοχή κατασκευής της επικάλυψης, δεν είναι δυνατόν να εξασφαλιστεί ο ίδιος προσανατολισμός των γραμμών μαγνητικής ροής σε όλες τις επιφάνειες προς επικάλυψη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές διαφορές στη σκληρότητα των επικαλύψεων σε μια στοιβάδα – η διαδικασία επικάλυψης HPPMS περιορίζει σημαντικά αυτό το πρόβλημα.

Στην εικόνα 3.9 παρουσιάζεται η δυνατότητα αύξησης της ενέργειας και της συγκέντρωσης ιόντων πλάσματος που παράγονται κατά την εξάτμιση του στόχου με βομβαρδισμό ιόντων στη διαδικασία επίστρωσης PVD. Η συμβολή των διαφόρων διεργασιών, ιδίως της HPPMS, στην αύξηση του ενεργειακού επιπέδου των ιόντων πλάσματος είναι προφανής. Συγκρινόμενη με τις άλλες διεργασίες προκαλεί μικρή αύξηση της ενέργειας των ιόντων, αλλά κυρίως σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της κινητικότητας

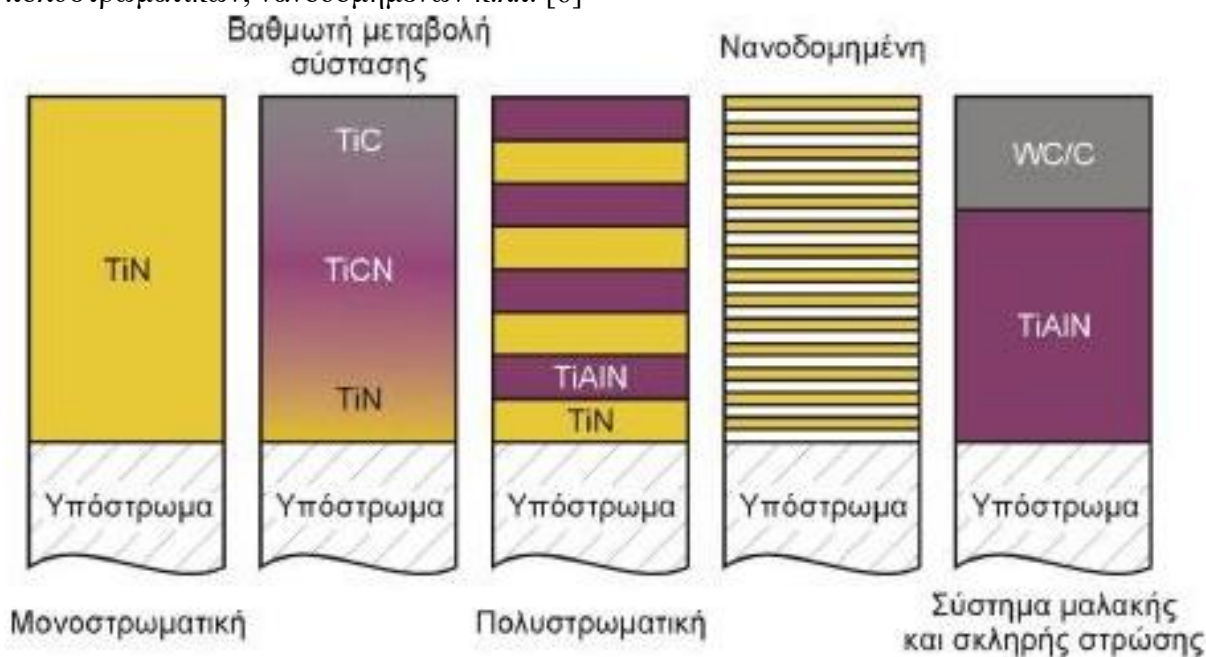
των ιόντων στο θάλαμο κενού, επιταχύνοντας τους ρυθμούς εναπόθεσης και καθιστώντας τη διαδικασία επίστρωσης πιο οικονομική.

Η επίδραση αυτών των διεργασιών στη φθορά των κοπτικών εργαλείων με επικάλυψη φαίνεται στην εικόνα 3.10. Κατά την εναπόθεση πανομοιότυπης χημικής σύστασης επικάλυψης TiAlN, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω για τον βομβαρδισμό στόχων και τη δημιουργία πλάσματος. Η σταδιακή αύξηση του ενεργειακού δυναμικού του πλάσματος βελτίωσε σημαντικά τη συνάφεια και τις μηχανικές ιδιότητες των στοιβάδων μέσω των διαδικασιών DC, HIS, HIP και τέλος HPPMS. Ως αποτέλεσμα, η συμπεριφορά των κοπτικών πλακιδίων σκληρομετάλλου με επικάλυψη σε φθορά βελτιώθηκε εξαιρετικά, όπως φαίνεται από την τροχιά της αύξησης του πλάτους ζώνης φθοράς VB.



Εικόνα 3.10: Εξέλιξη φθοράς επιφάνειας ελευθερίας της στιβάδας TiAlN για διαφορετικούς τρόπους παραγωγής πλάσματος κατά την PVD εναπόθεση της επικάλυψης

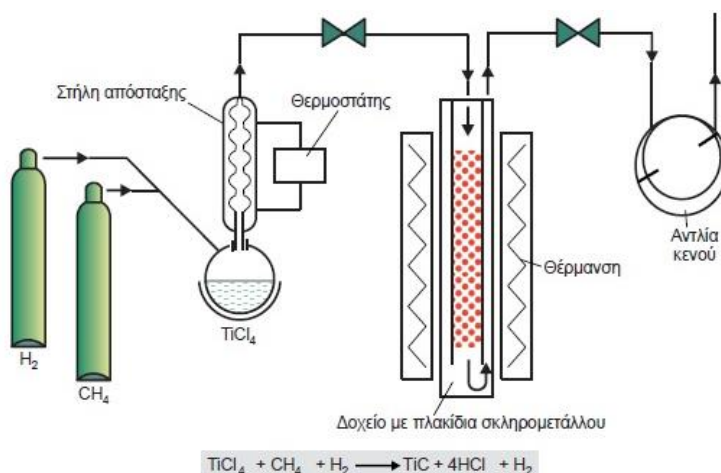
Η μακροδομή της επικάλυψης PVD επηρεάζεται από την κινηματική του τεμαχίου κατεργασίας και τις προσαρμογές του χρόνου εξάτμισης του υλικού του στόχου. Ορισμένα παραδείγματα τέτοιων μικροδομών παρατίθενται στην εικόνα 3.11. Οι παραπάνω ρυθμίσεις επιτρέπουν την παραγωγή επικαλύψεων μονοστρωματικών, με συνεχώς μεταβαλλόμενες χημικές συνθέσεις, πολυστρωματικών, νανοδομημένων κ.λπ. [6]



Εικόνα 3.11: Παραλλαγές επικαλύψεων ανάλογα με την εσωτερική σύσταση (ποιοτικά)

3.4.3. CVD ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ

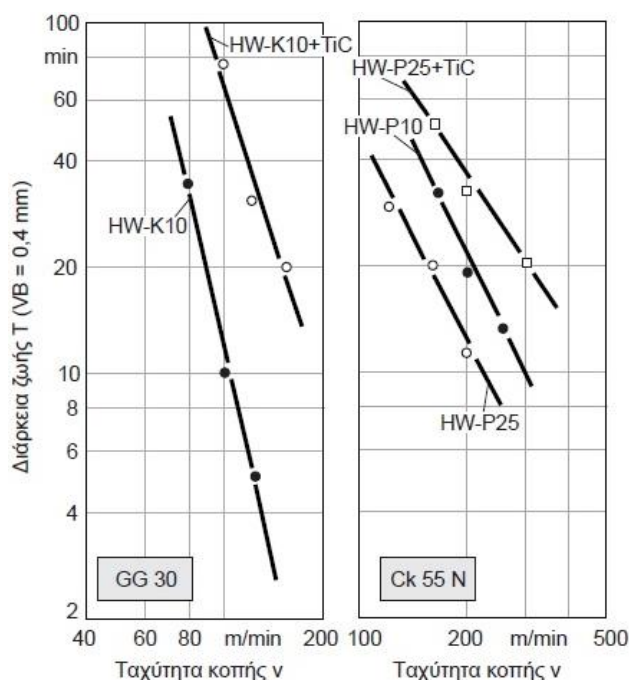
Ο όρος χημική εναπόθεση ατμών (CVD) αναφέρεται σε μια σειρά μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή λεπτών σκληρών επικαλύψεων με χημική εναπόθεση ατμών. Οι CVD διαδικασίες χαρακτηριστικά διεξάγονται σε υψηλότερο θερμοκρασιακό επίπεδο από τις PVD. Στην εικόνα 3.12 παρουσιάζεται μια τυπική διαδικασία επίστρωσης CVD, η επίστρωση καρβιδίου τιτανίου TiC.



Εικόνα 3.12: Σχηματική παράσταση διαδικασίας CVD επικάλυψης με καρβίδιο του τιτανίου κοπτικών πλακιδίων από σκληρομέταλλο (κατά Sandvik).

Οι ατμοί καρβιδίου του τιτανίου παράγονται σύμφωνα με την χημική εξίσωση της εικόνας και κατευθύνονται σε ένα δοχείο – φορέα των κοπτικών πλακιδίων που πρόκειται να επικαλυφθούν. Εδώ ο ατμός συμπυκνώνεται και επικαλύπτει την επιφάνεια του πλακιδίου. Χρησιμοποιείται, ακόμα, αντλία κενού που δημιουργεί συνθήκες ελαφριάς υποπίεσης στη διαδικασία επικάλυψης. Δεδομένου ότι το σύνηθες πάχος των επικαλύψεων και ο ρυθμός εναπόθεσης CVD είναι αρκετά υψηλότερα από τα αντίστοιχα μεγέθη στις PVD επικαλύψεις, η συνάφεια και οι μηχανικές ιδιότητες των επικαλύψεων CVD είναι γενικά καλύτερες. Όλα τα παραπάνω καθιστούν την διαδικασία αποδοτικότερη οικονομικά. Τα πλεονεκτήματα αυτά αντικατοπτρίζονται επίσης στη

συμπεριφορά φθοράς. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.13, κατά την τόννευση φαιού χυτοσιδήρου ή ανοπτημένου χάλυβα, τα πλακίδια καρβιδίου με επικάλυψη CVD σημειώνουν σημαντικά αυξημένη διάρκεια ζωής. Το κύριο μειονέκτημα της διαδικασίας CVD είναι η υψηλή θερμοκρασία που απαιτείται, κάτι που υποβαθμίζει τις μηχανικές ιδιότητες του σκληρομετάλλου. Ταυτόχρονα, οι υψηλές θερμοκρασίες περιορίζουν το εύρος των υποψήφιων υλικών που είναι πρόσφορα για επικάλυψη με τέτοιες διαδικασίες. Η σχετικά πρόσφατη ανάπτυξη των επικαλύψεων CVD σε συνδυασμό με την εναπόθεση με τη βοήθεια πλάσματος (PA-CVD) συνέβαλε στην αυξημένη χρήση των διεργασιών CVD. [6]

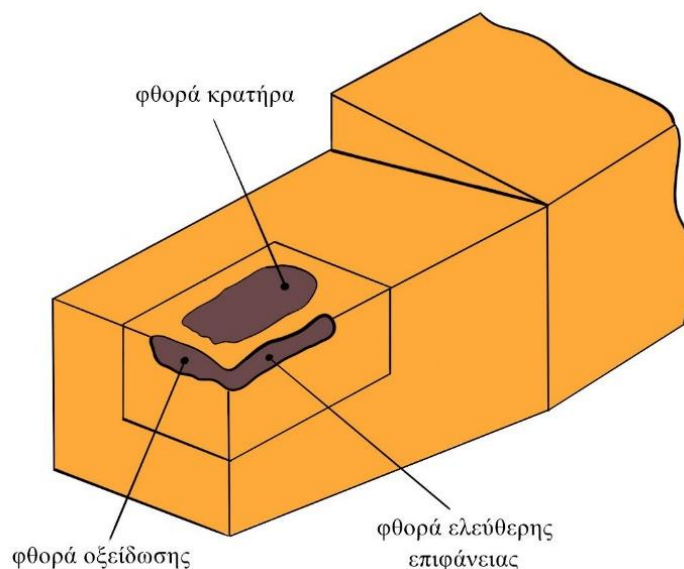


Εικόνα 3.13: Συμπεριφορά της διάρκειας ζωής και της ταχύτητας κοπής κατά την τόννευση διαφόρων υλικών με CVD επικαλυμμένα σκληρομέταλλα.

3.5. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ

Με τον όρο φθορά (wear) περιγράφεται η διαδικασία απομάκρυνσης υλικού από ένα ή και από τα δύο σώματα, τα οποία βρίσκονται σε επαφή και σε σχετική κίνηση μεταξύ τους.

Κατά την αφαίρεση υλικού (κοπή) εφαρμόζονται στο κοπτικό εργαλείο υψηλές τάσεις στην περιοχή ακριβώς της κοπτικής ακμής, προκαλώντας ισχυρότατη καταπόνηση. Οι τάσεις προκαλούνται από την διεργασία που λαμβάνει χώρα στη διεπαφή της κοπτικής ακμής με το κατεργαζόμενο τεμάχιο: πλαστική παραμόρφωση στη ζώνη διάτμησης του τεμαχίου, πλαστική παραμόρφωση και τριβές στο απόβλιττο στη ζώνη επαφής εργαλείου – αποβλίττου και θραύση του κατεργαζόμενου υλικού προς το σχηματισμό της νέας επιφάνειας του τεμαχίου.



Εικόνα 3.14: Μηχανισμοί φθοράς ελεύθερης επιφάνειας, κρατήρα και οξείδωσης

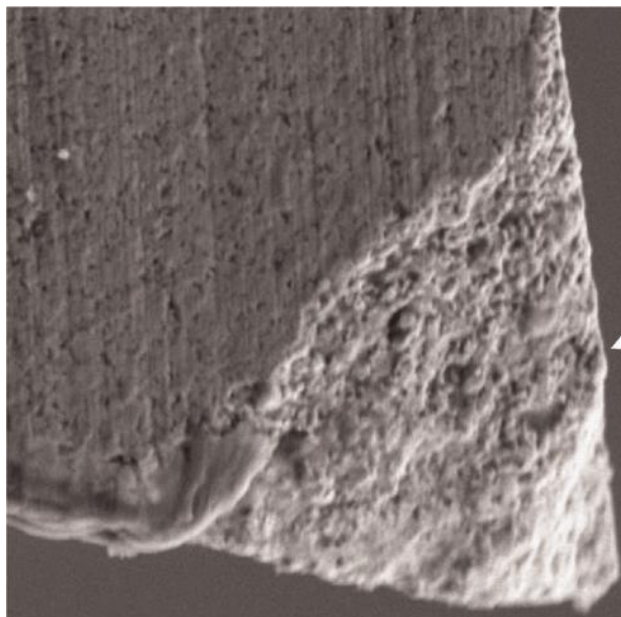
Οι τριβές, η θραύση, αλλά και η πλαστική παραμόρφωση του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας στη διεπαφή κοπτικής ακμής – τεμαχίου. Οι θερμοκρασίες που μπορούν να σημειωθούν, ανάλογα τις συνθήκες της κατεργασίας, και τα υλικά που εμπλέκονται, μπορούν να κυμανθούν από ~200°C έως και πάνω από 1500°C. Σε εξέχουσες περιπτώσεις, συνήθως σε κατεργασίες εξαιρετικά δυσκατέργαστων υλικών (χυτοσίδηρος, Inconel, τιτανιούχα κράματα κ.α.) καταγράφονται θερμοκρασίες μεγαλύτερες ακόμα και από αυτό το εύρος. Επιπρόσθετα, η θερμοκρασιακή κατανομή φαινομενικά συμβαίνει ακανόνιστα, με την αύξηση της θερμοκρασίας να λαμβάνει χώρα εξαιρετικά τοπικά και με μεγάλες μεταβολές ανά μονάδα μήκους στο κοπτικό εργαλείο, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει τόσο σε προβληματική διεργασία λόγω φαινομένων όπως η θερμική διαστολή, όσο και σε κόπωση της



Εικόνα 3.15: Φθορά λόγω πλαστικής παραμόρφωσης στην κοπτική ακμή

κοπτικής ακμής και του κονδυλίου. Και τα δυο αυτά ζητήματα προκαλούνται λόγω του μεγάλου ρυθμού αύξησης θερμοκρασίας στην ακμή του κοπτικού (της τάξης των 100°C/sec).

Όλα αυτά, συνδυαζόμενα με διάφορες φυσικοχημικές αντιδράσεις των υλικών αποβλήτου με το κοπτικό εργαλείο επιταχύνουν την εξέλιξη της φθοράς των εργαλείων. Είναι γνωστό ότι η διάρκεια ζωής ενός κοπτικού εργαλείου επηρεάζει αποφασιστικά το κόστος κατεργασίας. Συνεπώς είναι ύψιστης σημασίας η ακριβέστερη, κατά το δυνατό, γνώση της σχέσης μεταξύ της διάρκειας ζωής του κοπτικού και των συνθηκών κοπής όπως: η ταχύτητα κοπής, η πρόωση (fz), τα βάθη κοπής (ακτινικό και αξονικό) κ.ά.. Οι προηγμένες τεχνολογίες και τα συστήματα

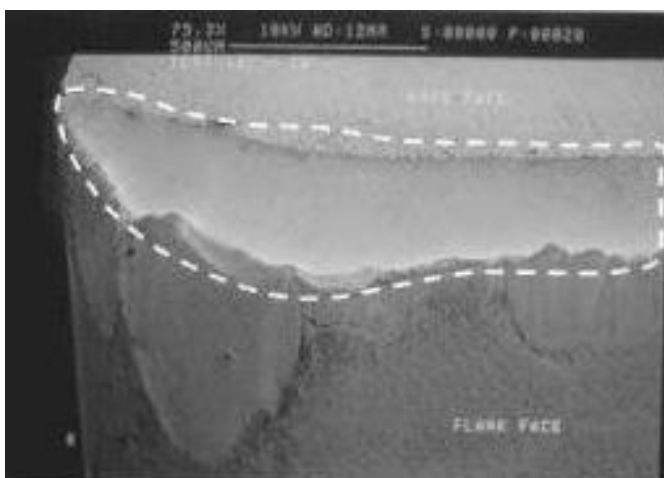


Εικόνα 3.16: Φθορά λόγω μικροσυγκολλήσεων

αριθμητικού ελέγχου οξύνουν σημαντικά αυτόν το γεγονός, προσφέροντας τεράστιες δυνατότητες από άποψη ακρίβειας, ισχύος και φάσματος στροφών και προώσεων, με υψηλό, όμως, κόστος αγοράς και λειτουργίας. Για να αποδώσει, επομένως, μια τέτοια επένδυση, η μέγιστη αποδοτικότητα (βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας, ελαχιστοποίηση της φθοράς, ελαχιστοποίηση των νεκρών χρόνων) πρέπει να αποτελεί το κύριο μέλημα του υπεύθυνου τμήματος.

Λεπτές επιστρώσεις PVD χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως με στόχο την επιβράδυνση της εξέλιξης της φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Πλέον υπάρχει μια πληθώρα επιλογών και παραλλαγών λεπτών σκληρών επικαλύψεων με στόχο την προστασία των κοπτικών εργαλείων.

Οι μηχανισμοί της κοπής που οδηγούν σε βλάβη των κοπτικών εργαλείων με επικάλυψη χωρίζονται σε εκείνους που σχετίζονται με τη φθορά της επικάλυψης και σε εκείνους που σχετίζονται με τη φθορά του υποστρώματος.



Εικόνα 3.17: Φθορά λόγω διάχυσης

Οι επικαλύψεις προστατεύουν το κοπτικό εργαλείο με διάφορους τρόπους:

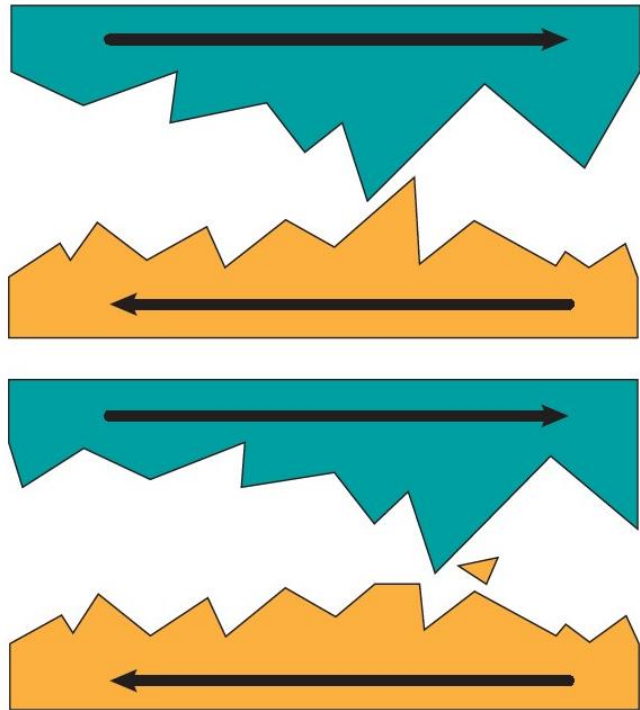
- Εξαιτίας των πολύ ανώτερων μηχανικών ιδιοτήτων τους σε σχέση με τις αντίστοιχες του

υποστρώματος, οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις είναι χαμηλότερες του ορίου διαρροής τους

- Λόγω της πυκνής κρυσταλλοδομής τους
- Λόγω των θερμομονωτικών ιδιοτήτων τους, που προστατεύει το υπόστρωμα από τα μεγάλα ποσά θερμότητας που παράγονται κατά την κοπή. [4]

Οι μηχανισμοί φθοράς της επικάλυψης που λαμβάνουν χώρα κατά την εξέλιξη της φθοράς των κοπτικών εργαλείων είναι:

- Φθορά της ελεύθερης επιφάνειας, κόπωση (Εικόνα 3.14). Από τους πιο συνηθισμένους τύπους φθοράς, εμφανίζεται στην πλευρική όψη του εργαλείου. Κατά τη διάρκεια της κοπής, το υλικό του εργαλείου φθείρεται στην πλευράς της επιφάνειας ελευθερίας λόγω τριβής στην επιφάνεια του υλικού του τεμαχίου εργασίας. Η φθορά ξεκινά συνήθως από την άκρη.
- Φθορά κρατήρα της επιφάνειας αποβλίττου (Εικόνα 3.14). Συμβαίνει ως αποτέλεσμα της επαφής του αποβλίττου με την επιφάνεια αποβλίττου του εργαλείου.



Εικόνα 3.18: Σχηματική Αναπαράσταση Φθοράς Απόξεσης

- Φθορά πλαστικής παραμόρφωσης (Εικόνα 3.15) – φθορά λόγω μηχανικής υπερφόρτισης – αστοχία θραύσεως. Η κοπτική άκρη υπόκειται σε υψηλές δυνάμεις κοπής και θερμοκρασίες με αποτέλεσμα μια κατάσταση έντονης πίεσης, που υπερβαίνει την αντοχή του εργαλείου ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Φθορά λόγω οξείδωσης (Εικόνα 3.14).
- Φθορά λόγω διάχυσης (Εικόνα 3.17)
- Φθορά – αστοχία, λόγω κακής συνάφειας υποστρώματος-επικάλυψης.
- Φθορά λόγω αυξημένης ψαθυρότητας της επικάλυψης, παράγοντας που μπορεί να επιδράσει καταλυτικά, ιδιαίτερα σε διακοπτόμενη κοπή (φρεζάρισμα).
- Φθορά λόγω συναφειακών μικρό-συγκολλήσεων (Εικόνα 3.16). Η αποκόλληση τμημάτων συμβαίνει συνήθως κατά την κατεργασία όλκιμων - μαλακών υλικών. Ένα συγκολλητικό φορτίο μπορεί να ασκήσει εφελκυστικές τάσεις στην κοπτική άκρη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αποκόλληση της επικάλυψης, εκθέτοντας το υπόστρωμα.

- Φθορά – αστοχία, λόγω μικρορωγμών. Πρόκειται για στενά ανοίγματα στα οποία έχουν σχηματιστεί νέες οριακές επιφάνειες μέσω ρήξης. Άλλοτε περιορίζονται στην επικάλυψη, και άλλοτε εκτείνονται προς τα κάτω, περίπου κάθετες στη γραμμή των ακμών μέσα στο υπόστρωμα. Σχηματίζονται ως αποτέλεσμα απότομων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας
- Φθορά λόγω μικροθραύσεων. Πρόκειται για μικρή ζημιά στην κόψη της ακμής. Η διαφορά από τον θρυμματισμό έγκυται στο ότι με τις μικροθραύσεις το εργαλείο ίσως είναι ακόμα χρήσιμο, εάν δεν αυξάνει την τραχύτητα στην επιφάνεια του τεμαχίου.
- Φθορά προσκολλήσεων. Παρατεταμένη ή περιοδική συσσώρευση υλικού στην επιφάνεια αποβλίττου, μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα όπως αυξημένες δυνάμεις κοπής, αφαίρεση τμημάτων της επικάλυψης, στρωμάτων από το υπόστρωμα ή και ολική αστοχία του κοπτικού εργαλείου. Συμβαίνει λόγω μεγάλου χρονικού διαστήματος παραμονής του αποβλίττου στην κοπτική ακμή.
- Φθορά λόγω απόξεσης (τριβής). Ανάλογα με τη σκληρότητα των υλικών κατά τη διείδυση εμφανίζονται ψαθυρές θραύσεις υλικού, μικρό – απόβλιττα λόγω μικροκοπής, ακόμα και μικροθραύσεις λόγω υπερκαταπόνησης ή ενδοτράχυνσης του υλικού. Η απόξεση είναι αναπόφευκτη λόγω της συνεχής επαφής του κοπτικού εργαλείου με το τεμάχιο, φθείρει το κοπτικό εργαλείο καθ' όλη τη διάρκεια της κοπής. Τα σωματίδια – προϊόντα των μηχανισμών απόξεσης, εξαιτίας της σκληρότητας τους πρέπει να απομακρύνονται από τη περιοχή επαφής των επιφανειών κοπής διότι συμβάλουν στην επιτάχυνση του φαινομένου. [3]

3.5.1. ΨΕΥΔΟΚΟΨΗ

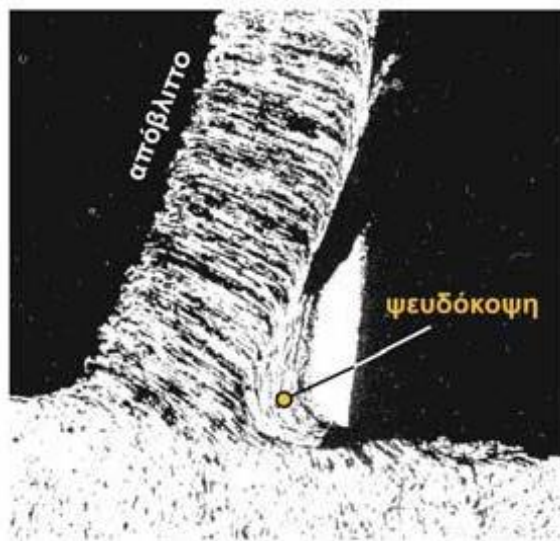
Πολλά από τα παραπάνω φαινόμενα, είτε μεμονωμένα, είτε σε συνδυασμό, μπορούν να οδηγήσουν στο φαινόμενο της ψευδόκοψης. Η προσκόλληση υλικού, οι μικρό – συγκολλήσεις, φαινόμενα οξειδωσης, διάχυσης, ακόμα και ενδοτράχυνσης μπορούν να δημιουργηθούν ομογενής συνδέσεις σε επίπεδο ατομικών ηλεκτρονικών στοιβάδων μεταξύ των υλικών των επαπτόμενων μικροπεριοχών. Σε μεγαλύτερη κλίμακα, αυτές οι συνδέσεις μπορούν να εξελιχθούν σε ομάδες υλικού οι οποίες προσκολλώνται στην κορυφή της κοπτικής ακμής, χωρίζοντας την από το τεμάχιο, για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα.

Όσο η κατεργασία συνεχίζεται, αυτή το στρώμα υλικού, το στρώμα ψευδόκοψης, συσσωρεύει περισσότερο υλικό. Η αύξηση αυτή συνεπάγεται μεγαλύτερες δυνάμεις οι οποίες ασκούνται πάνω του, με αποτέλεσμα την αποκόλληση και απομάκρυνση του με το υπόλοιπο απόβλιττο, προκαλώντας απόξεση στο κοπτικό, και αποκαλύπτοντας ξανά την κοπτική ακμή στο τεμάχιο. Στη συνέχεια, η κανονική κοπή που λαμβάνει χώρα ευνοεί αυτό το φαινόμενο, λόγω των διαφόρων συνθηκών και χαρακτηριστικών της, το οποίο επανεμφανίζεται, έως ότου αποκολληθεί ξανά. Η ψευδόκοψη, συνεπώς, δημιουργεί ένα περιοδικό φαινόμενο αλλαγής της γεωμετρίας της κοπτικής ακμής. Επηρεάζει τόσο την γεωμετρική ακρίβεια και τραχύτητα της

τελικής επιφάνειας, όσο και το διάγραμμα των δυνάμεων και τάσεων που μετρούνται πάνω στο κοπτικό, λόγω της περιοδικής αλλαγής στη γεωμετρία.

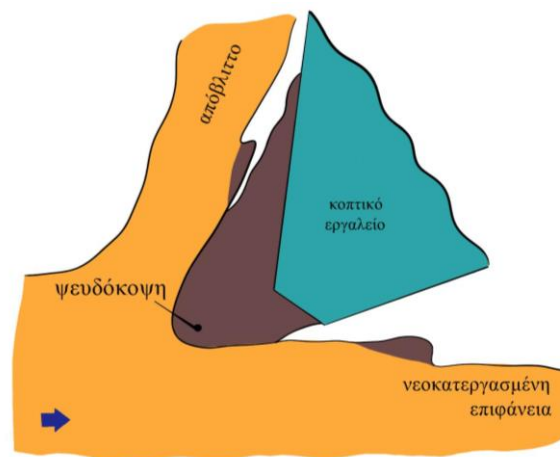
Η παρουσία της ψευδόκοψης συμπερασματικά έχει τις εξής αρνητικές συνέπειες:

- Αλλοίωση μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων της κατεργασμένης επιφάνειας
- Ανακρίβεια διαστάσεων και μορφής του δοκιμίου
- Επιδείνωση της φθοράς του κοπτικού λόγω αποξέσεων
- Μεγαλύτερη τραχύτητα στη νεοκατεργασμένη επιφάνεια
- Ενίσχυση των ταλαντώσεων



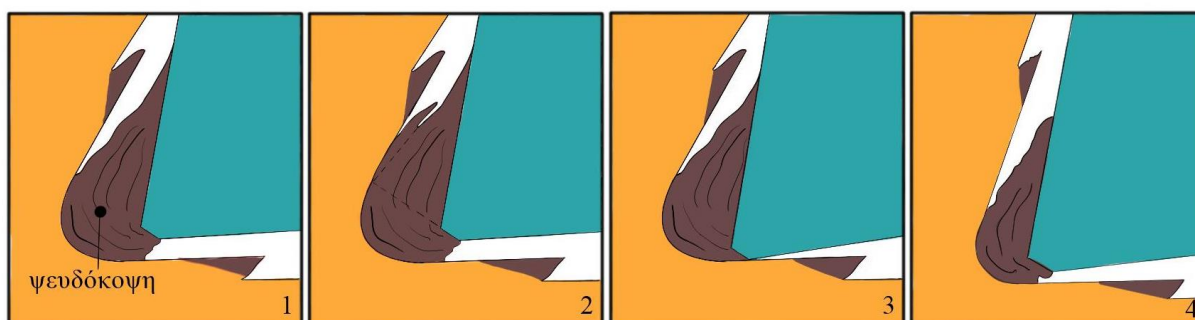
Ο έλεγχος του φαινομένου της ψευδόκοψης είναι απαραίτητος, με στόχο την δημιουργία συνθηκών υπό τις οποίες αυτή ελαττώνεται ή ακόμα και εξαφανίζεται.

Χαρακτηριστικό της ψευδόκοψης είναι ότι, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, μέσω αύξησης της ταχύτητας κοπής, η σκληρότητα και οι μηχανικές ιδιότητες της μειώνονται δραματικά, λόγω της ανακρυστάλλωσης που λαμβάνει χώρα στο υλικό της. Αυτό, σε συνδυασμό με την αύξηση των τάσεων που αναφέρεται προηγουμένως, οδηγεί στις συνεχείς θραύσεις



Εικόνα 3.19: Ψευδόκοψη

της μέχρι να σταματήσει η δημιουργία της. Τελικά, η βιομηχανία έχει παρατηρήσει ότι από κάποια ταχύτητα και πάνω η ψευδόκοψη παύει να αναπτύσσεται. Επιπρόσθετα, το φαινόμενο δείχνει να περιορίζεται με την αύξηση της γωνίας αποβλίττου, βελτιώνοντας τη ροή του, καθώς και με τη μείωση της πρόωσης (μείωση του πάχους αποβλίττου) ή τη χρήση υγρού κοπής. [3]



Εικόνα 3.20: Περιοδική Συμπεριφορά του Φαινομένου της Ψευδόκοψης

4. ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 7075 ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ

4.1. ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το αλουμίνιο ανήκει στην τρίτη ομάδα του περιοδικού πίνακα. Συμβολίζεται ως Al, και έχει ατομικό αριθμό 13. Το ατομικό βάρος του αλουμινίου είναι 26,97 και το ειδικό βάρος του 2,7 g/cm³ ενώ τήκεται περίπου στους 659,7°C και βράζει στους 2057°C.

Η κρυσταλλική δομή του αλουμινίου ακολουθεί το εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα με ατομική ακτίνα 2,856Å (1 Å ισούται με 10⁻⁸) και σταθερά πλέγματος 4,05 Å. Στην εδροκεντρωμένη κυβική δομή, η διεύθυνση της ατομικής πυκνότητας είναι η διαγώνιος του κύβου, δηλαδή η διεύθυνση <110>.



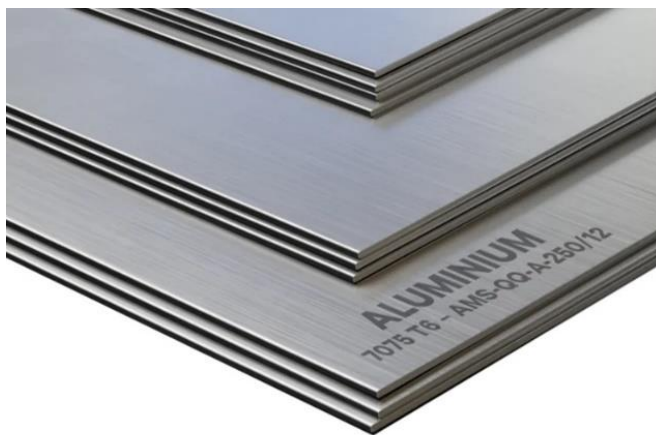
Εικόνα 4.1: Σωλήνες Αλουμινίου 7075

Η σημαντικότερη ένωση του αλουμινίου είναι το οξείδιο του αλουμινίου ή αλλιώς αλουμίνα, όχι μόνο επειδή είναι απαραίτητη για την παραγωγή αλουμινίου, αλλά και για την χρησιμότητα της σε εφαρμογές όπως οι τεχνητοί πολύτιμοι λίθοι και τα λειαντικά υλικά. Η αλουμίνα παρουσιάζει αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες και αξιοποιείται στην κατασκευή κλιβάνων και χωνευτηρίων. Άλλες σημαντικές ενώσεις είναι το χλωριούχο αλουμίνιο, ένωση αρκετά υγροσκοπική που παράγει ατμούς υδροχλωρίου σε υγρό περιβάλλον, το θειικό αλουμίνιο, το οποίο εφαρμόζεται στη βυρσοδεψία, τη βιομηχανία βαφών και τη βιομηχανία χαρτιού, και το φθοριούχο αλουμίνιο, γνωστός ως κρυόλιθος.

Το καθαρό αλουμίνιο είναι πολύ μαλακό και όλκιμο. Η προσθήκη σιδήρου, χαλκού και άλλων κραματικών στοιχείων βελτιώνει σημαντικά τις μηχανικές του ιδιότητες. Το αλουμίνιο είναι ένα μέταλλο με χρώμα ασημένιο – λευκό, ελαφρύ και εύκολο στην επεξεργασία. Εμφανίζει υψηλή χημική δραστηριότητα και εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, σε συνθήκες οξείδωσης, η επιφάνειά του καλύπτεται γρήγορα από ένα λεπτό στρώμα οξειδίου, το οποίο το προστατεύει από την διάδοση της οξείδωσης στο εσωτερικό, καθώς και από άλλες μορφές φθοράς. Σε καθαρή μορφή παράγεται σε εύκαμπτα φύλλα ή σε λεπτή σκόνη, ενώ η καύση του σε ατμόσφαιρα οξυγόνου παράγει έντονο φως (λάμπα αλουμινίου). Το αλουμίνιο είναι επίσης ανθεκτικό στην προσβολή νιτρικού οξέος σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά η επαφή με το υδροχλωρικό και το υδροφθορικό οξύ οδηγεί σε έντονη αντίδραση. Είναι άριστος αγωγός της θερμότητας και του ηλεκτρισμού, με αγωγιμότητα 62% αυτής του χαλκού, ενώ είναι φθηνότερο και έχει χαμηλότερο ειδικό βάρος από το χαλκό. Έχει μαζικό αριθμό 27 και έξι ραδιοϊσότοπα, εκ των οποίων μόνο το ένα είναι σταθερό (27Al) και έχει βρεθεί σε

ορισμένους μετεωρίτες, όπου παράγεται λόγω της κοσμικής ακτινοβολίας. Χάρη στον μεγάλο χρόνο υποδιπλασιασμού του, χρησιμοποιείται ως υλικό αναφοράς για τη μέτρηση της ραδιενέργειας και για τη διερεύνηση της διάβρωσης των κραμάτων. [8]

Το κράμα 7075 είναι ένα υψηλής αντοχής θερμικά κατεργασμένο κράμα, αναπτυχθέν από την Alcoa το 1943. Περιέχει ψευδάργυρο, μαγνήσιο, χρώμιο και χαλκό σαν παράγοντες σκληρότητας, και μικροποσότητες σιδήρου, πυριτίου, μαγγανίου και τιτανίου. Αυτό το κράμα σκληρύνεται με καθίζηση για να βελτιωθεί η αντοχή του. Οι κατηγορίες αλουμινίου 7075 αναφορικά με την θερμική τους κατεργασία εμπεριέχουν τα 7075-T6, T651, T7351, T73, T76, T7651, O, W, W51, κ.α.



Εικόνα 4.2: Φύλλα Αλουμινίου 7075. Πηγή: <https://aerocommetals.co.uk/featured-inventory/aluminium-alloy-7075/>

Το AL7075 δύναται να επεξεργαστεί θερμικά (θερμική επεξεργασία γήρανσης), η οποία οδηγεί σε εξαιρετικά καλές μηχανικές ιδιότητες. Ωστόσο, το συγκεκριμένο κράμα παρουσιάζει ως έναν βαθμό ευαισθησία εγκοπής. Οι ιδιότητες του βελτιώνονται επίσης μέσω ανόπτησης, ενώ η συμπεριφορά του είναι καλή, τόσο σε θερμική κατεργασία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όσο και σε συνθήκες T6, σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Το 7075 είναι ανθεκτικό στην διάβρωση, μια ακόμα ιδιότητα του που βελτιώνεται περαιτέρω μέσω θερμικής κατεργασίας και γήρανσης. Ενδείκνυται για την αντίσταση στην στις διαβρωτικές τάσεις ρωγμής, ειδικά στην κατηγορία του 7075-T73. Συγκολλάται μέσω ηλεκτρικής αντίστασης, όμως η συγκόλληση μέσω σύντηξης δεν συνιστάται. [9]

Μερικές από τις βασικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 7075 περιλαμβάνουν:

- Υψηλή αντοχή: Υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, καθιστώντας το ιδανική επιλογή για δομικές εφαρμογές.
- Εξαιρετική αντοχή σε κόπωση: Καλές ιδιότητες κόπωσης, μπορεί να αντέξει επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης.
- Καλή μηχανική κατεργασία: Ευκατέργαστο, αν και πιο δύσκολο από άλλα κράματα αλουμινίου λόγω της υψηλής αντοχής του.
- Αντοχή στη διάβρωση: Καλή αντοχή στη διάβρωση, αν και δεν είναι τόσο καλό όσο ορισμένα άλλα κράματα αλουμινίου.
- Θερμικά επεξεργάσιμο: Μπορεί να υποστεί θερμική επεξεργασία για περαιτέρω βελτίωση της αντοχής του.
- Πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα.

4.2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075

Το κράμα 7075 χρησιμοποιείται συχνά σε διάφορες βιομηχανίες. Μερικές από τις κοινές εφαρμογές του περιλαμβάνουν:

- Αεροδιαστημική βιομηχανία: Δημοφιλέστατο για την πληθώρα εφαρμογών του στον κλάδο, χάρη στον υψηλό λόγο αντοχής προς βάρους και αντοχής σε υψηλή καταπόνηση. Συναντάται στην κατασκευή αεροσκαφών και κρίσιμων εργαλείων προσγείωσης κ.α..
- Αμυντική Βιομηχανία: Για τους ίδιους λόγους χρησιμοποιείται ευρέως και στην αμυντική βιομηχανία. Εφαρμογές στην παραγωγή στρατιωτικών οχημάτων, όπλων και εξοπλισμού.
- Αυτοκινητοβιομηχανία: Εξαρτήματα υψηλής απόδοσης, τροχοί, τμήματα αναρτήσεων και κινητήρων αποτελούν σημείο στα οποία συνήθως προτιμάται το αλουμίνιο 7075.
- Αθλητικός εξοπλισμός: Όπως και τόσοι άλλοι κλάδοι παραγωγής, η κατασκευή αξιόπιστου αθλητικού εξοπλισμού, όπως σκελετοί ποδηλάτων, εξοπλισμός αναρρίχησης και ρακέτες τένις βασίζονται στο αλουμίνιο 7075 χάρη στο χαμηλό βάρος και τις ευνοϊκές του ιδιότητες.
- Ναυτιλιακή Βιομηχανία: Η υψηλή του αντοχή, αλλά κυρίως η αντοχή του στη διάβρωση καθιστούν το 7075 χρησιμότετο στη ναυτιλιακή βιομηχανία για την παραγωγή εξαρτημάτων και εξοπλισμού σκαφών. [10]

4.3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι ακόλουθοι πίνακες συνοψίζουν τις ιδιότητες του αλουμινίου 7075, συμπεριλαμβάνοντας χημική σύσταση, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, συγκολλησιμότητα, σκληρότητα, κατεργασιμότητα, θερμική συμπεριφορά κ.α.

4.3.1. ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ

Αλουμίνιο 7075, Χημική Σύσταση. %											
Τυποποίηση (ASTM, AMS-)	Κράμα ANSI (UNS)	Si	Fe, ≤	Cu	Mn, ≤	Mg	Cr	Zn, ≤	Ti, ≤	Άλλα στοιχεία έκαστο, (Σύνολο), ≤	Al
B209,	7075	0.40	0.50	1.2-2.0	0.30	2.1-2.9	0.18-0.28	5.1-6.1	0.20	0.05 (0.15)	Υπόλοιπο
B210,	(UNS A97075)										
B211,											
B221,											
-QQ-A-225/9,											
-QQ-A-200/11,											
-QQ-A-250/12,											
-WW-T-700/7											

[9]

4.3.2. ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Στους παρακάτω πίνακες δίνονται οι φυσικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 7075.

Φυσικές Ιδιότητες Αλουμινίου 7075	Κράμα	7075-T6
	Πυκνότητα, g/cm ³ (lb/in. ³)	2.81 (0.101)
	Ειδικό βάρος	2.81
	Σημείο τήξεως, °C	477 - 659,7
	Ειδική θερμοχωρητικότητα, J/kg·K (Btu/lb·°F)	960 (0.23) στους 20 °C (68 °F)
	Συντελεστής θερμικής διαστολής, 10 ⁻⁶ /K (μιν./in.·°F)	23.6 (13.1) στους 20-100 °C (68-212 °F)
	Θερμική διάχυση, mm ² /s	48.36
	Θερμική Αγωγιμότητα, W/m·°C (Btu·in/h·ft ² ·°F)	130 (900) στους 25 °C (77 °F)
	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα, Ισοδύναμος Όγκος (Ισοδύναμη Μάζα), % IACS	33 (105) στους 20 °C (68 °F)
	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα, Ισοδύναμος Όγκος (Ισοδύναμη Μάζα), MS/m	19 (61) στους 20 °C (68 °F)
	Ειδική Αντίσταση, Ω·mm ² /m (Ω·circ mil/ft)	0.0515 (31) στους 20 °C (68 °F)

[9], [11]

4.3.3. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου 7075-T6 συνοψίζονται παρακάτω. Για τα διάφορα μεγέθη, μορφές προϊόντων και μεθόδους παραγωγής γίνεται αναφορά σε μέσες τιμές, οι οποίες, για κάποια κατασκευή πρέπει να ληφθούν απευθείας από τον προμηθευτή, ή να επιβεβαιωθούν πειραματικά, και δεν μπορούν να ληφθούν υπ' όψη με ασφάλεια για σχεδιασμό. Αποτελούν μόνο βάση σύγκρισης με άλλα μεταλλικά κράματα και υλικά, και όχι απαιτήσεις κατασκευαστικές ή σχεδιαστικές.

Μηχανικές Ιδιότητες Αλουμινίου 7075-T6, (Όχι για σχεδιασμό)	Κράμα αλουμινίου και βελτιώσεις	7075-O	7075-T6, T651	Alclad 7075-O	Alclad 7075-T6, T651	
	Μέγιστη αντοχή εφελκυσμού, MPa (ksi)	230 (33)	570 (83)	220 (32)	525 (76)	
	Όριο διαρροής, MPa (ksi)	105 (15)	505 (73)	95 (14)	460 (67)	
	Παραμόρφωση ανά 50 mm (2 in.), %, ≥	Δείγμα πάχους 1.6mm (1/16 in.)	17	11	17	11
		Δείγμα πάχους 12.5mm (1/2 in.)	14	11	–	–
	Σκληρότητα κατά Brinell, HB (500 kgf load 10mm ball)	60	150	–	–	
	Μέγιστη Αντοχή Διάτμησης, MPa (ksi)	150 (22)	330 (48)	150 (22)	315 (46)	
	Μέτρο Ελαστικότητας, GPa (106 psi)	72 (10.4)				
	Όριο Αντοχής σε Κόπωση, MPa (ksi)	–	160 (23)	–	–	

[9]

4.3.4. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ AL7075-T6 ΣΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ SAE AMS ΚΑΙ ASTM

Μηχανικές Ιδιότητες AL7075 – Μπάρα, Δοκός και Σύρμα Ψυχρής Έλασης					
Τυποποίηση	Κράμα αλουμινίου και βελτιώσεις	Ειδική Διάμετρος ή Πάχος, in.	Αντοχή Εφελκυσμού, ksi, ≥ (ή ό,τι αναφέρεται)	Όριο Διαρροής, ksi, ≥ (ή ό,τι αναφέρεται)	Παραμόρφωση ανά 2 in. ή 4x Διάμετρος, ≥, %
ASTM B211	7075-O	≤0.124	40, ≤	12.0	–
SAE AMS-QQ-A-225/9		0.125-8.000			10
	7075-T6, T62	≤ 0.124	77	66	–
		0.125-4.000	77	66	7
	7075-T651	≤0.124	77	66	–
		0.125-4.000	77	66	7
		4.001-6.000	75	64	7
		6.001-7.000	73	62	7
	7075-T7351, T73	≤ 0.124	68	–	–
		0.125-4.000	68	56	10
		4.001-5.000	66	55	8
		5.001-6.000	64	52	8

Περισσότεροι πίνακες ιδιοτήτων, ανάλογα με τον τύπο της κατεργασίας, παρουσιάζονται στο Παράρτημα

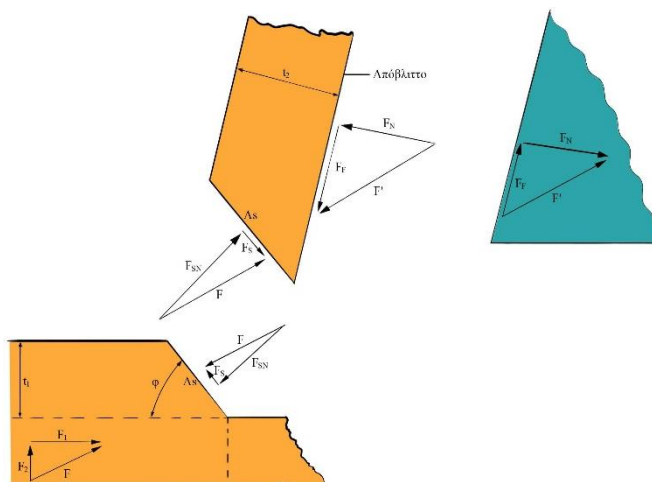
[9]

4.3.5. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ – ΟΝΟΜΑΣΙΕΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075 ΑΝΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ

Αντίστοιχο Κράματος AL7075	Η.Π.Α./US	Τυποποίηση	ASTM B209, ASTM B210, ASTM B211, ASTM B221, AMS-QQ-A-225/9, AMS-QQ-A-200/11, AMS-QQ-A-250/12, AMS-WW-T-700/7
		AISI (UNS)	7075 (UNS A97075)
	ISO	Πρότυπο	ISO 209
		Αντιστοίχιση	AW-7075
	Ευρωπαϊκή Ένωση	Πρότυπο	EN 573-3
		Αρίθμηση (Χημικός τύπος)	EN AW-7075 (EN AW-AlZn5,5MgCu)
	Γερμανία	Πρότυπο	DIN 1725-1
		Αντιστοίχιση (Αρίθμηση Υλικού)	AlZnMgCu1,5 (3.4365)
	Ιαπωνία	Πρότυπο	JIS H4000; JIS H4040
		Κατηγορία	7075
	Αυστραλία και Νέα Ζηλανδία	Πρότυπο	AS 2848.1, AS/NZS 1734, AS/NZS 1865, AS/NZS 1866
		Αντιστοίχιση	7075
	Κίνα	Πρότυπο	GB/T 3190; GB/T 3880.2
		Κατηγορία	7075

5. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ – ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΟΠΗ

Εκτός από την ποιότητα επιφάνειας και την τραχύτητα, που εξετάστηκε στο κεφάλαιο 2.3, η κατεργασία φρεζαρίσματος είναι απαραίτητο να εξετάζεται και από πλευράς δυνάμεων. Η φθορά του κοπτικού είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το μέτρο των διαφόρων δυνάμεων κοπής, ενώ επηρεάζει διάφορους οικονομικούς παράγοντες, όπως το κόστος παραγωγής, και φυσικά, την ποιότητα της τελικής επιφάνειας. Ο υπολογισμός των δυνάμεων γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά μεγέθη του αποβλίττου και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου.



Εικόνα 5.1: Δυνάμεις κοπής στη διεπαφή κοπτικού - αποβλίττου, για το σύστημα κοπτικό εργαλείο, αποβλίττο και τεμάχιο

Μελετώντας το μοντέλο απλοϊκά στην ορθογωνική κοπή, το αποβλίττο οριακά ισορροπεί αλληλοεπιδρώντας ταυτόχρονα με το τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο. Οι δυνάμεις που δέχεται από το τεμάχιο και το κοπτικό είναι:

- F_S η αντίσταση του τεμαχίου σε διάτμηση
- F_{SN} η κάθετη δύναμη στην F_S (ή κάθετη στο επίπεδο διάτμησης).
- F_F η δύναμη τριβής στη διεπιφάνεια κοπτικού – αποβλίττου, αντιτίθεται στην κίνηση του αποβλίττου.
- F_N η κάθετη δύναμη στην F_N (ή στην επιφάνεια επαφής κοπτικού εργαλείου – αποβλίττου).

Αφού η F είναι η συνισταμένη των F_S και F_{SN} και η F' , που ονομάζεται δύναμη κοπής, η συνισταμένη των F_F και F_N , για την ισορροπία του αποβλίττου πρέπει να ισχύει: $F = F'$

Μεταφέροντας την F' στην ακμή του κοπτικού εργαλείου και αναλύοντας την στα ζεύγη δυνάμεων $F_S - F_{SN}$, $F_F - F_N$, καθώς και $F_1 - F_2$, με F_1 την κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής (οριζόντια) και F_2 την δύναμη άπωσης (κάθετη στην F_1), προκύπτει το γράφημα της εικόνας 5.2, γνωστό και ως κύκλος του Merchant. Αφού:

$$\vec{F}' = \vec{F}_F + \vec{F}_N$$

$$F_F = F_1 \cdot \sin \gamma + F_2 \cos \gamma$$

$$F_N = F_1 \cos \gamma - F_2 \cdot \sin \gamma$$

$$\rho = \tan^{-1} \mu$$

με ρ τη μέση φαινόμενη γωνία τριβής στην επιφάνεια επαφής αποβλίττου – κοπτικού και μ τον μέσο συντελεστή τριβής,

Ο συντελεστής τριβής (coulomb) προκύπτει ως ο λόγος:

$$\mu = \tan \rho = \frac{F_F}{F_N} = \frac{F_2 + F_1 \cdot \tan \gamma}{F_1 - F_2 \cdot \tan \gamma}$$

Επίσης:

$$\vec{F} = \vec{F}_S + \vec{F}_{SN}$$

$$F_S = F_1 \cos \varphi - F_2 \cdot \sin \varphi$$

$$F_{SN} = F_1 \cdot \sin \varphi + F_2 \cos \varphi$$

Συνεπώς, οι φορτίσεις – τάσεις στο απόβλιττο ως ξεχωριστό σώμα ασκούνται στο επίπεδο διάτμησης και στην διεπιφάνεια εργαλείου – αποβλίττου.

$$\tau_S = \frac{F_S}{A_S}, \sigma_S = \frac{F_{SN}}{A_S}, \text{ η διατμητική και η}$$

εφελκυστική ως προς το επίπεδο διάτμησης,

$$\tau_F = \frac{F_F}{A_F}, \sigma_F = \frac{F_N}{A_F}, \text{ η διατμητική και η εφελκυστική ως προς το επίπεδο επαφής αποβλίττου,}$$

$$\mu = \frac{\tau_F}{\sigma_F} \text{ η τριβή, όπου:}$$

- τ μέση διατμητική τάση,
- σ μέση ορθή τάση,
- b το πάχος αποβλίττου,
- L το μήκος επαφής αποβλίττου – κοπτικού εργαλείου,
- $A_1 = b * t_1$ η θεωρητική επιφάνεια αποβλίττου,
- $A_S = \frac{A_1}{\sin \varphi} = \frac{b \cdot t_1}{\sin \varphi}$ η επιφάνεια διάτμησης,
- $A_F = b * L$ η επιφάνεια διεπαφής αποβλίττου – κοπτικού εργαλείου

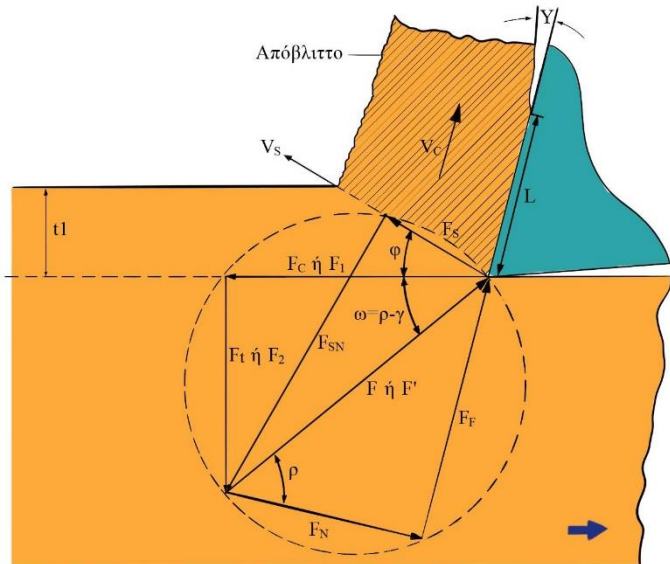
Τέλος για τις F_1 και F_2 ως προς το απαραμόρφωτο απόβλιττο (ως προς το αρχικό βάθος κοπής):

$$\cos(\varphi + \rho - \gamma) = \frac{F_S}{F} = \frac{\tau_S \cdot A_S}{F}$$

Ως προς F :

$$F = \frac{(\tau_S \cdot A_S)}{\cos(\varphi + \rho - \gamma)} \quad (1)$$

Ομοίως:



Εικόνα 5.2: Ανάλυση δυνάμεων κατά Merchant (κύκλος του Merchant)

$$\cos(\rho - \gamma) = \frac{F_1}{F}$$

$$F = \frac{F_1}{\cos(\rho - \gamma)} \quad (2)$$

Από προηγουμένως:

$$A_s = \frac{A_1}{\sin \varphi} \quad (3)$$

Από τις (1), (2),(3):

$$F_1 = \frac{A_1 \cdot \tau_s \cdot \cos(\rho - \gamma)}{\sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \rho - \gamma)}$$

Ομοίως για F_2 :

$$\sin(\rho - \gamma) = \frac{F_2}{F}$$

Ως προς F :

$$F = \frac{F_2}{\sin(\rho - \gamma)} \quad (4)$$

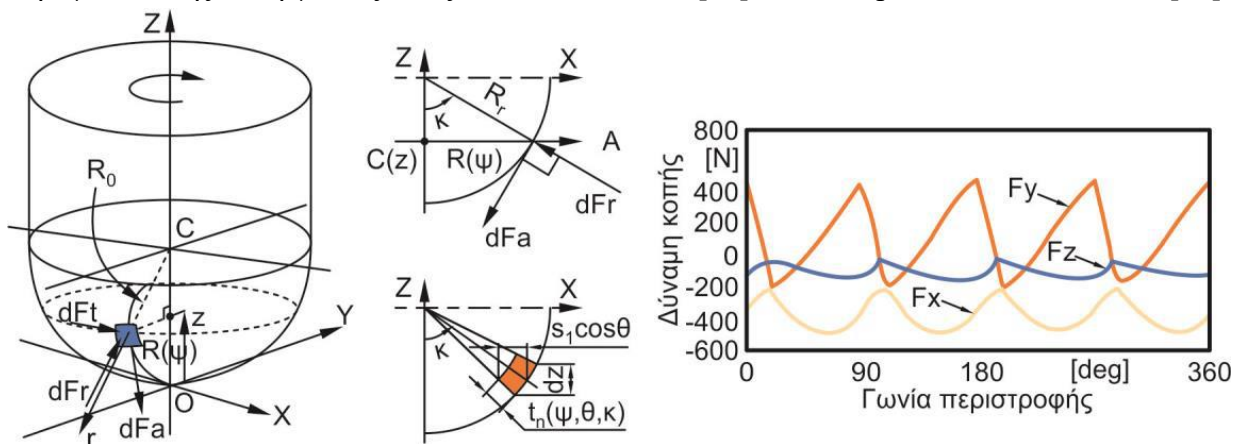
Από τις (1), (4),(3):

$$F_2 = \frac{A_1 \cdot \tau_s \cdot \sin(\rho - \gamma)}{\sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \rho - \gamma)}$$

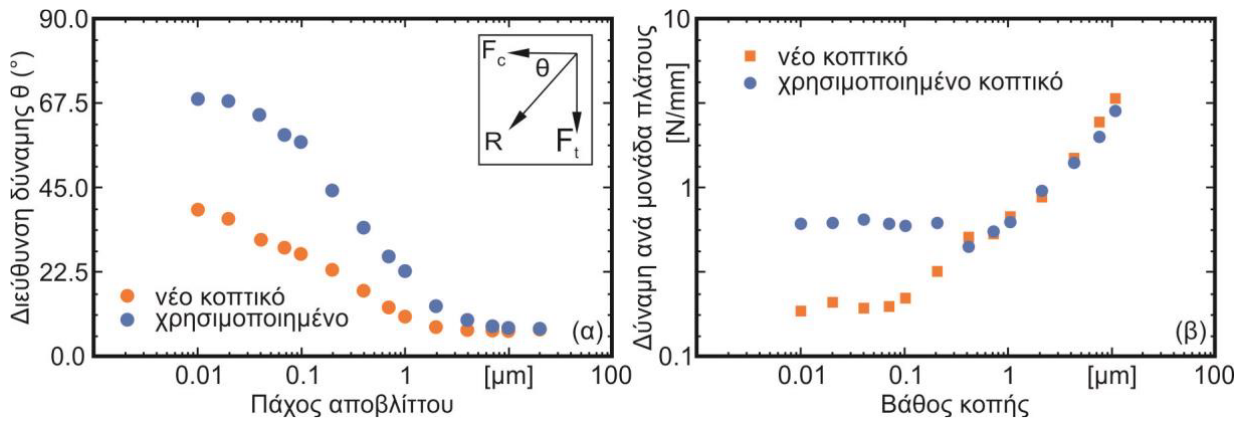
[3]

5.1.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ ΑΝΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ

Ο Βακόνδιος, Δ. [12] αναφέρει την ερευνητική δουλειά στον κλάδο, περί φρεζαρίσματος με ελικοειδή εργαλεία. Οι Lee και Altintas [13] έδειξαν ότι είναι δυνατόν να προβλεφθεί με ακρίβεια η κατανομή των δυνάμεων στις ελικοειδείς αυλακώσεις, επαληθεύοντας τα πορίσματα τους με πειράματα φρεζαρίσματος με κοπτικά σφαιρικής απόληξης. Έχουν δημιουργηθεί διάφορες μέθοδοι μοντελοποίησης από ερευνητικές ομάδες για τον υπολογισμό δυνάμεων μέσω διαφόρων παραγόντων της κατεργασίας όπως οι Altintas και Lee, [14] και ο Karpuschewski και άλλοι, [15].



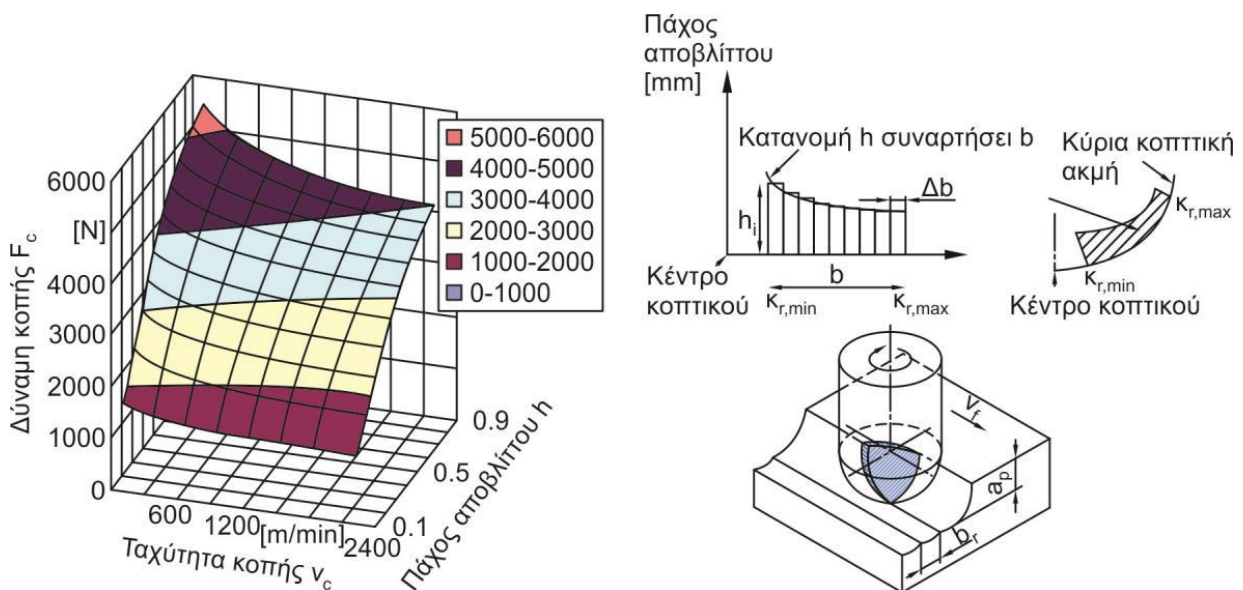
Εικόνα 5.3: Μοντέλο υπολογισμού δυνάμεων κατά Altintas και Lee



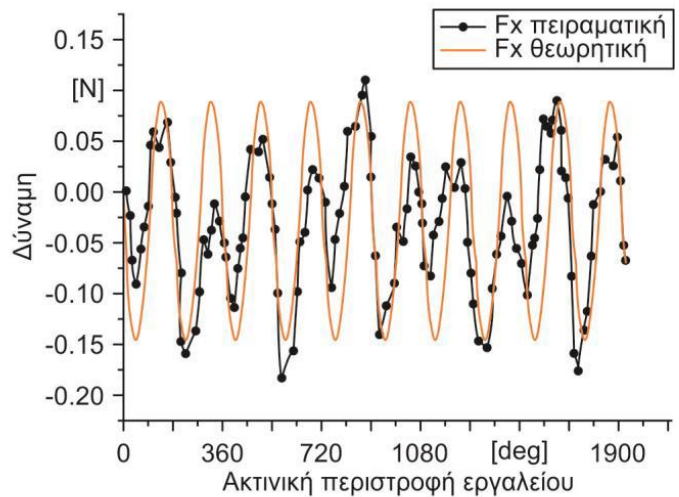
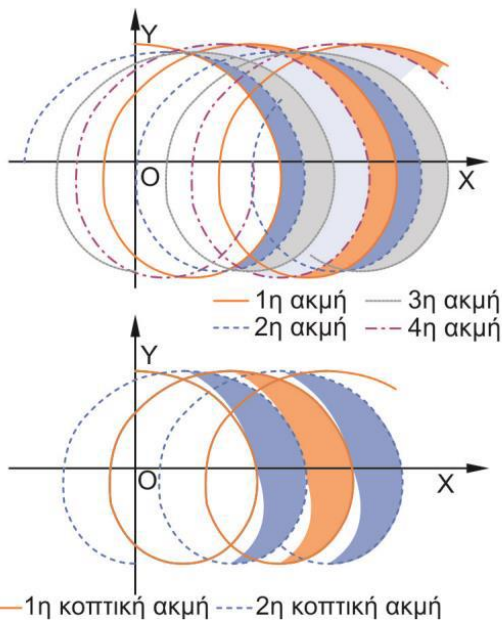
Εικόνα 5.4: Κατεύθυνση του προκύπτοντος διανύσματος δύναμης και επίδραση της κοπτικής ακμής στη δύναμη πρόωσης κατά *Lucsa et al.*

Η βιομηχανία απαιτεί μεταλλικά αντικείμενα μικροσκοπικών διαστάσεων, για αυτό και η έρευνα κατευθύνεται προς τη μελέτη της μικρο – κλίμακας, Η ερευνητική εργασία στον τομέα των μικροκατεργασιών χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες, σε αυτήν των πειραματικών μελετών και στην κατηγορία των μελετών μοντελοποίησης. Πολλές μελέτες κινούνται προς τις αλληλεξαρτήσεις διαφόρων παραγόντων της κοπής όπως η γεωμετρία ακμής και ειδική ενέργεια στα αποτελέσματα κοπής, το πάχος αποβλίττου στις τάσεις που ασκούνται και το πάχος αποβλίττου στην ενέργεια κοπής [16], [17].

Γενικά τα τελευταία χρόνια φαίνεται να υπάρχει μια άνοδος στην ανάπτυξη αναλυτικών μοντέλων μικροφρεζαρίσματος [18]. Με τη βοήθεια ηλεκτρονικών μέσων προσομοίωσης, σημειώνεται πρόοδος μέσα από την δημιουργία αλγορίθμων, ενώ παρατηρείται ολοένα και περισσότερο η εφαρμογή και των πεπερασμένων στοιχείων στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού [19]. Σε άλλες περιπτώσεις, προκύπτουν μοντέλα προσομοίωσης που λαμβάνουν υπόψιν την τροχιά του άκρου του εργαλείου και την εκκεντρότητα και πάχος του πραγματικού αποβλίττου, για την πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής στις τρεις διαστάσεις (εικόνα 5.6) [20]. Ακόμα, έχουν παρουσιαστεί εμπειρικά μοντέλα υψηλών προώσεων ανά δόντι και ακτίνα κοπτικού, για τον

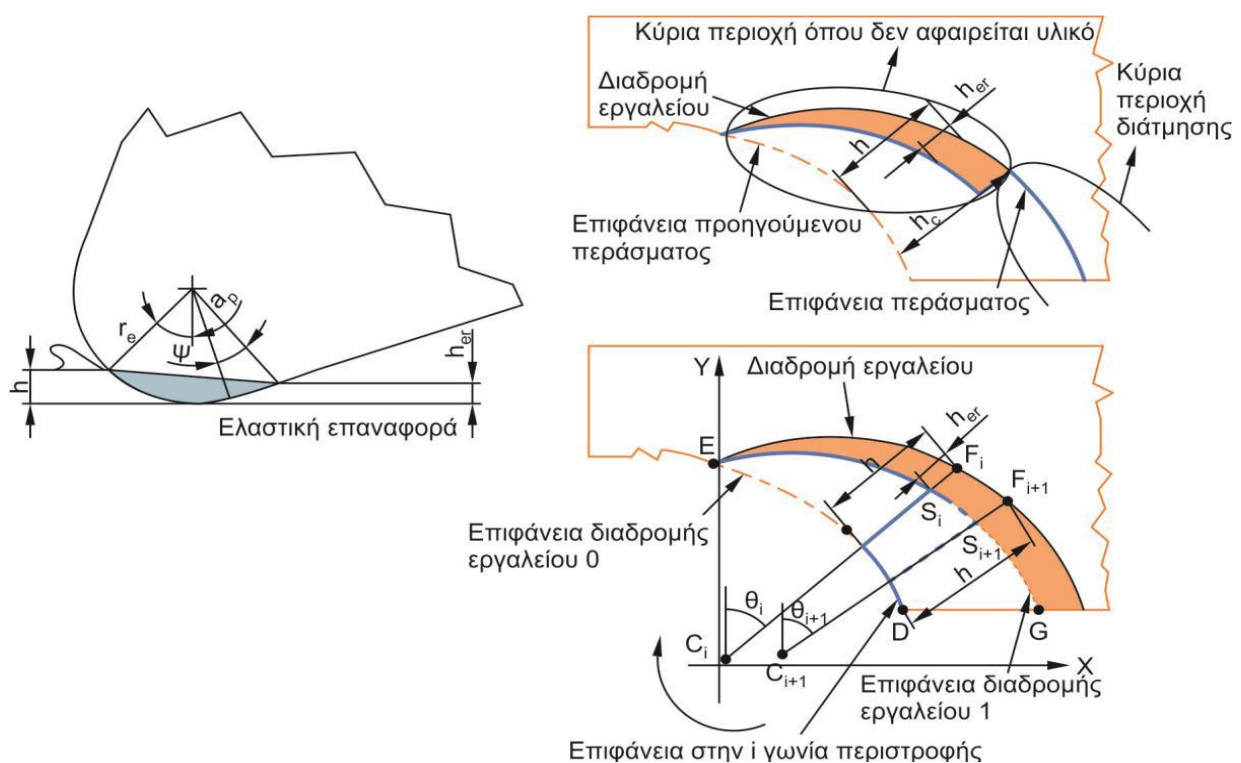


Εικόνα 5.5: Επίδραση πάχους αποβλίττου στις δυνάμεις κατά *Karpuschewski et al.*



Εικόνα 5.6: Τροχιές κοπτικών ακμών και υπολογισμός αποβλίττου κατά Li et al.

προσδιορισμό σχέσεων κατεργασίας μικροφρεζαρίσματος [21], και επαληθευμένα πρακτικώς μοντέλα επαφής εργαλείου – τεμαχίου – ακτίνας κοπτικού [22]. Στην εικόνα 5.7 αποτυπώνεται γραφικά το παράγωγο της διερεύνησης του Malekian και άλλων [23], οι οποίοι, μέσα από μηχανιστικές μοντελοποίησης των δυνάμεων μικροφρεζαρίσματος, εξετάζοντας επιπτώσεις της κατάστασης όπου το εργαλείο δεν αφαιρεί υλικό, την ελαστική παραμόρφωση, την εκκεντρότητα και τη δυναμική, συνυπολογίζουν την επίδραση της ελαστικής επαναφοράς βασιζόμενοι στον παρεμβαλλόμενο όγκο μεταξύ εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου.



Εικόνα 5.7: Ελαστική παραμόρφωση και φαινόμενο ολίσθησης κατά Malekian et al.

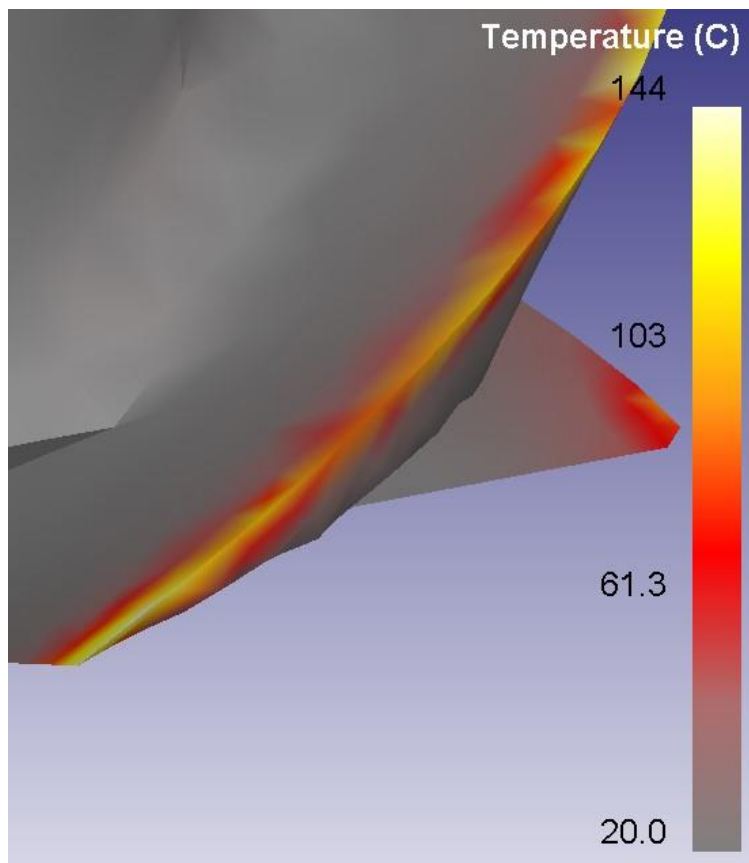
6. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΟΠΗ

Κατά το φρεζάρισμα, η ενέργεια η οποία προσδίδεται από την εργαλειομηχανή μέσω της κοπτικής ακμής στην κατεργασία, καταναλίσκεται σε δυο περιοχές πρωταρχικά, τη ζώνη διάτμησης και τη ζώνη τριβής. Δευτερευόντως καταναλίσκεται στη θέση τριβής της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού και της κατεργασμένης επιφάνειας.

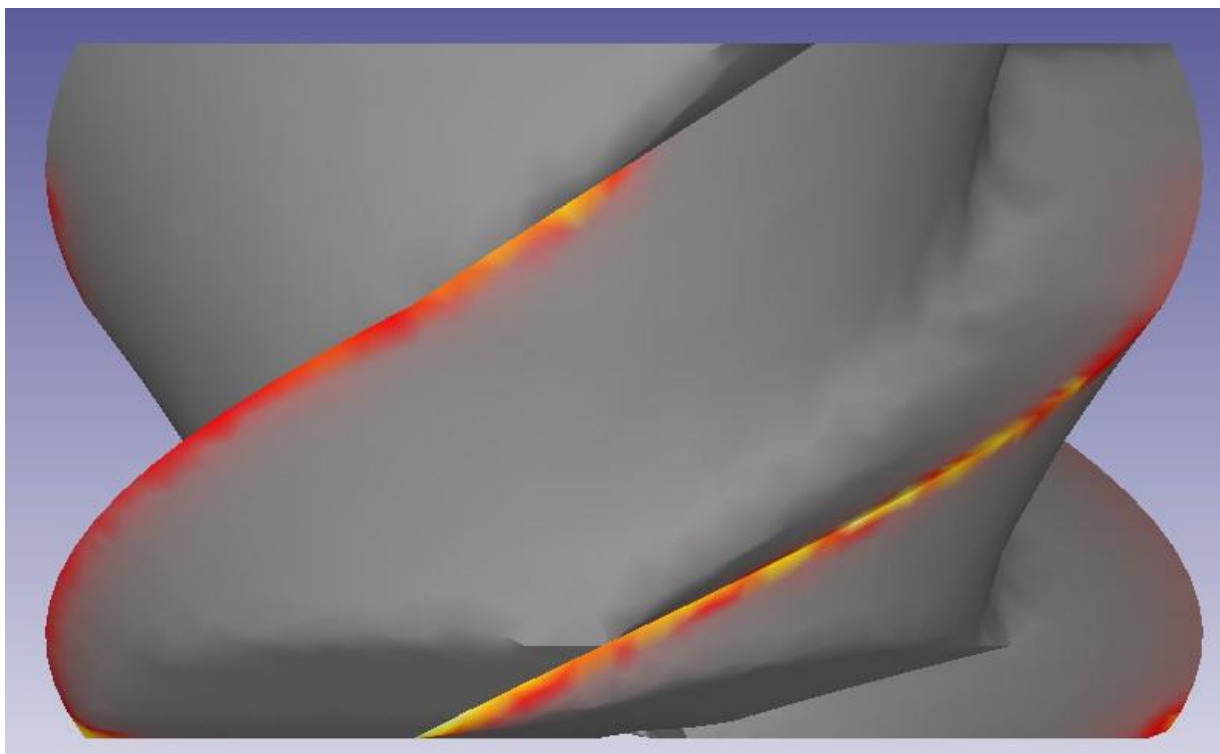
Η απορρόφηση ενέργειας σε αυτές τις περιοχές οδηγεί στην αύξηση θερμοκρασίας, και συνεπώς και στην έκλυση θερμότητας. Η θερμότητα αυτή παράγεται στη ζώνη διατμήσεως σε αναλογία 65 – 80%. Η υπόλοιπη θερμότητα παράγεται στην ζώνη τριβής του αποβλίττου, γενικά στο κοπτικό εργαλείο, αλλά και στην διεπαφή της ελεύθερης επιφάνειας του εργαλείου με το τεμάχιο. Η συνολική θερμότητα που παράγεται, παραλαμβάνεται από το απόβλιττο κατά πρώτον, από το κοπτικό εργαλείο και από το κατεργαζόμενο τεμάχιο κατά δεύτερον.

Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο κοπτικό εργαλείο είναι υψηλότερες από τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο απόβλιττο ή στο τεμάχιο. Το απόβλιττο αποβάλλεται συνεχώς από την περιοχή της κοπής, με αποτέλεσμα το θερμαινόμενο τμήμα υλικού να «αντικαθίσταται» από το επόμενο τμήμα, το οποίο δεν έχει λάβει μέρος στην κοπή, και άρα έχει ακόμα την αρχική θερμοκρασία του τεμαχίου. Για το τεμάχιο ισχύει κάτι παρόμοιο, μιας και το κοπτικό μετακινείται πάνω στην επιφάνεια, ενώ η κατεργασία λαμβάνει χώρα. Έτσι, κάθε σημείο, ανάλογα φυσικά και με τις ανάγκες ή τις απαιτήσεις διαμόρφωσης και ποιότητας, λαμβάνει συγκεκριμένο χρόνο και έργο κοπής, με αποτέλεσμα κανένα ξεχωριστό σημείο στην κατεργασμένη επιφάνεια να μην θερμαίνεται περισσότερο από τα υπόλοιπα.

Για το κοπτικό εργαλείο όμως, ισχύουν τα αντίθετα. Για κάθε τμήμα κατεργασίας στο οποίο χρησιμοποιείται κάποια ή κάποιες κοπτικές ακμές, ανεξαρτήτως κατεργασίας φρεζαρίσματος ή τορναρίσματος, η κοπτική κεφαλή σηκώνει ολόκληρο το θερμικό φορτίο το οποίο μεταφέρεται στο εργαλείο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η



Εικόνα 6.1: Θερμοκρασίες στην κοπτική ακμή

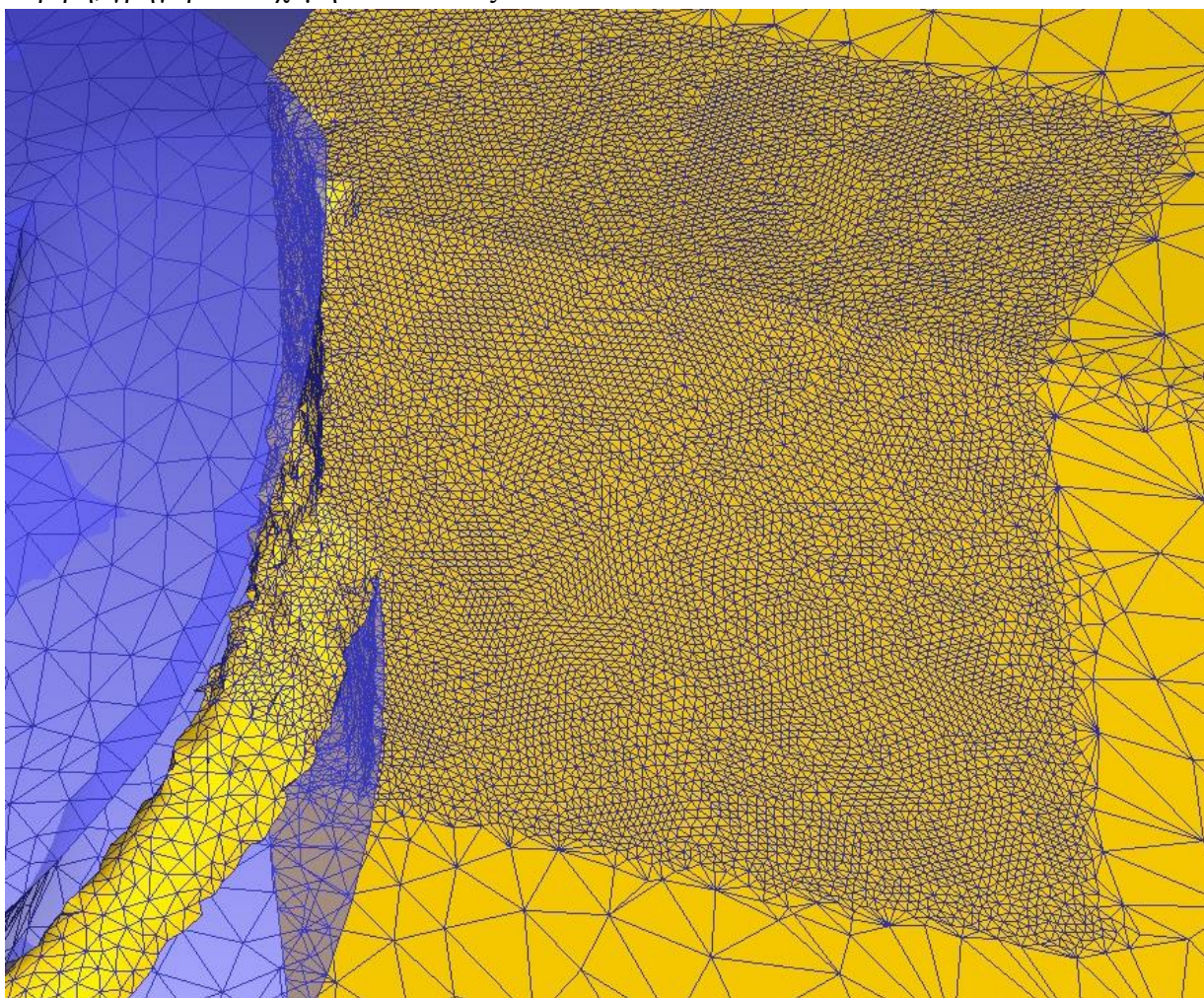


Εικόνα 6.2: Κατανομή θερμοκρασιών στο κοπτικό εργαλείο

μέγιστη θερμοκρασία δεν παρατηρείται στις κορυφές της κοπτικής ακμής, αλλά σε θέση της επιφάνειας αποβλίττου αρκετά μακριά από αυτήν. Η θέση μέγιστης θερμοκρασίας εξαρτάται φυσικά από πολλές μεταβλητές της κατεργασίας. Το σημείο μέγιστης θερμοκρασίας θεωρητικά θα πρέπει να είναι το σημείο στο οποίο επιτυγχάνεται η μέγιστη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του αποβλίττου, το οποίο, συνολικά, προσλαμβάνει το μεγαλύτερο θερμικό φορτίο, και του κοπτικού. Συνεπώς, συνήθως το σημείο μέγιστης θερμότητας θα βρίσκεται σε θέση επαρκώς κοντά στην ακμή, επάνω στην επιφάνεια αποβλίττου, αλλά και επαρκώς μακριά της. Λαμβάνοντας υπόψιν μόνο την μετάδοση θερμότητας, και την κινηματική της κοπής, ισχύει ότι όσο πιο κοντά στην ακμή βρίσκεται το απόβλιττο, τόσο καλύτερη είναι η μετάδοση, καθώς είναι μικρότερη είναι η απόσταση των σωμάτων και μεγαλύτερο το θερμικό φορτίο του, μεγιστοποιώντας την μετάδοση. Από την άλλη, όσο προωθείται το απόβλιττο πάνω στην επιφάνεια, επιβραδύνεται, λόγω τριβής, και λόγω παραμόρφωσης πάνω της, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για την απαγωγή της θερμότητας. Φυσικά, αυτό είναι μια πολύ απλοϊκή θεώρηση του φαινομένου, η οποία λαμβάνει υπ' όψη το δισδιάστατο μοντέλο της ορθογωνικής κοπής, και μόνο τον παράγοντα του θερμικού φορτίου του αποβλίττου. Παράγοντες όπως η χρήση του υγρού κοπής, και ο τρόπος που αυτό τροφοδοτείται στην κοπή, καθώς και οι υπόλοιπες συνθήκες κατεργασίας, και τα διάφορα υλικά που εμπλέκονται, περιπλέκουν αρκετά την μελέτη του θερμοκρασιακού πεδίου, ώστε είναι ίσως ευκολότερο να μελετηθεί με πειραματικές διατάξεις, ή έστω με μελέτη των αποτελεσμάτων προσομοιώσεων, όπως αυτές που εκπονήθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας.

7. Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) είναι μια αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ανάλυση συνεχών μέσων και κατασκευών. Χρησιμοποιείται για προβλήματα που δεν μπορούν να επιλυθούν με τη χρήση απλών αριθμητικών μεθόδων. Η μέθοδος ουσιαστικά εξάγει ένα πολύπλοκο σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων μέσω των οριακών συνθηκών του προβλήματος και τις επιλύει με τη χρήση υπολογιστή. Μετά την επίλυση ενός μεγάλου αριθμού εξισώσεων, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με τη μέθοδο αυτή είναι πολύ ακριβή, γρήγορα και χαμηλού κόστους.



Εικόνα 7.1: Στιγμιότυπο από την αριθμητική επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Η ανάλυση που πραγματοποιείται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να χωριστεί σε τρία βασικά βήματα:

- Το πρώτο βήμα της ανάλυσης είναι η διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου, δηλαδή η διαίρεση σε μικρότερα στοιχεία που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων, αυξάνεται ο βαθμός προσέγγισης που επιτυγχάνεται. Κάθε πεπερασμένο στοιχείο έχει απλό σχήμα και είναι ευκολότερο

να αναλυθεί από το σύνολο της δομής: για να διακριτοποιηθεί μια δισδιάστατη δομή, πρέπει να δημιουργηθεί ένα πλέγμα (mesh). Αυτό σημαίνει ότι το πλέγμα διαιρείται σε μικρά τμήματα διαφόρων σχημάτων (συνήθως τετράγωνα ή τρίγωνα). Τα τμήματα αυτά συνδέονται με κόμβους (meshing). Για παράδειγμα, σε ένα θερμικό πρόβλημα, κάθε κόμβος έχει έναν βαθμό ελευθερίας, τη θερμοκρασία του. Επομένως, ένα μοντέλο με κόμβους θα έχει n βαθμούς ελευθερίας. Προκειμένου να μοντελοποιηθεί σωστά η δομή, στους κόμβους πρέπει να δοθούν κατάλληλες οριακές συνθήκες ώστε το λογισμικό να αναγνωρίζει τη σύνδεση τους με γειτονικούς κόμβους και ότι όλα τα πεπερασμένα στοιχεία σχηματίζουν την υπό εξέταση επιφάνεια. Η ίδια λογική που εφαρμόζεται για τη μετάβαση από την μονοδιάστατη σε δισδιάστατη ανάλυση, εφαρμόζεται και στην τρισδιάστατη, με το αντίστοιχο πλέγμα και τη γεωμετρία των πεπερασμένων στοιχείων.

- Στο δεύτερο βήμα εισάγονται στα πεπερασμένα στοιχεία του πλέγματος οι ιδιότητες του προς μοντελοποίηση μέσου και οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Οι ιδιότητες αυτές σχετίζονται ή/και επηρεάζονται από το υλικό ή το περιβάλλον του μοντέλου και τοποθετούνται στις σχέσεις που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος. Στη συνέχεια, τα φορτία της κατασκευής τοποθετούνται στους κόμβους των φορτισμένων στοιχείων με τη μορφή οριακών συνθηκών.
- Το τελικό βήμα είναι η επίλυση των πινακοποιημένων αλγεβρικών εξισώσεων, στις οποίες οι άγνωστοι αντιπροσωπεύουν τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων. Έτσι, η τιμή κάθε βαθμού ελευθερίας γίνεται γνωστή για όλους τους κόμβους του μοντέλου.

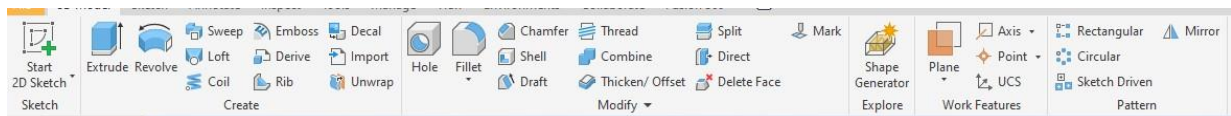
Δεδομένου ότι τα πραγματικά συστήματα έχουν άπειρους βαθμούς ελευθερίας, ενώ τα αντικείμενα των προσομοιώσεων όχι, είναι γνωστό και αποδεκτό κάποιο σφάλμα στα αριθμητικά αποτελέσματα που το λογισμικό παράγει. Φυσικά, η προσομοίωση πλησιάζει την πραγματικότητα ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων, όχι όμως και με γραμμικό τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός μείωσης του σφάλματος, μεταξύ των αποτελεσμάτων της FEA (Finite Element Analysis) και της πραγματικότητας, μειώνεται με την αύξηση των στοιχείων. Από την άλλη, αύξηση στον αριθμό πεπερασμένων στοιχείων του mesh συνεπάγεται αύξηση στην απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ, άρα και στο οικονομικό και χρονικό κόστος της προσομοίωσης. Συνεπώς, ανάλογα και τις ανάγκες ακριβείας, υπάρχει ένα βέλτιστο σημείο, πέραν του οποίου η βελτίωση της ακρίβειας είναι μηδαμινή και χωρίς πρακτική αξία.

8. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΟΠΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ – AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2023

8.1. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Για τον σχεδιασμό του κονδυλίου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό τρισδιάστατου σχεδιασμού Inventor Professional 2023 της εταιρείας Autodesk. Το Inventor είναι ένα λογισμικό το οποίο προσφέρει πληθώρα εντολών και συστημάτων, όχι μόνο για τον σχεδιασμό μηχανολογικών εξαρτημάτων, αλλά και το σχεδιασμό συναρμολογημάτων, την αυτοματοποίηση του σχεδιασμού, την προσομοίωση κατεργασιών, δυνάμεων και καταπονήσεων, τον τρισδιάστατο φωτορεαλισμό των αντικειμένων και πολλά άλλα. Φυσικά οι ανάγκες του παρόντος τεμαχίου είναι αρκετά βασικές, και σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την δημιουργία του κοπτικού εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια στην τρισδιάστατη προσομοίωση της κατεργασίας φρεζαρίσματος αλουμινίου 7075 στο DEFORM 3D.

Ως βάση αναφοράς παρατίθεται στην εικόνα 8.1 η βασική γραμμή εντολών του Inventor.

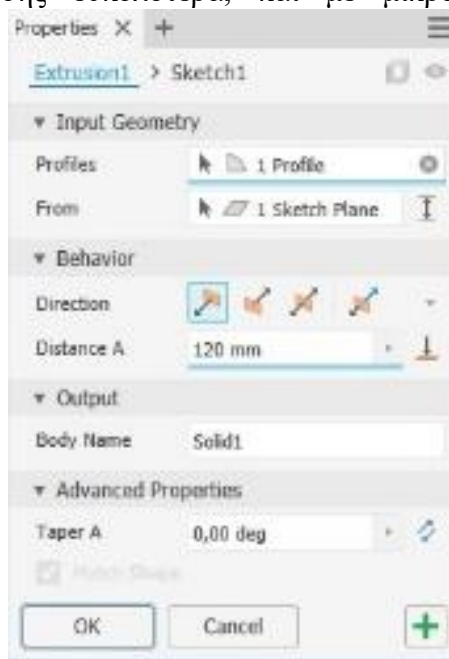


Εικόνα 8.1: Γραμμή εντολών

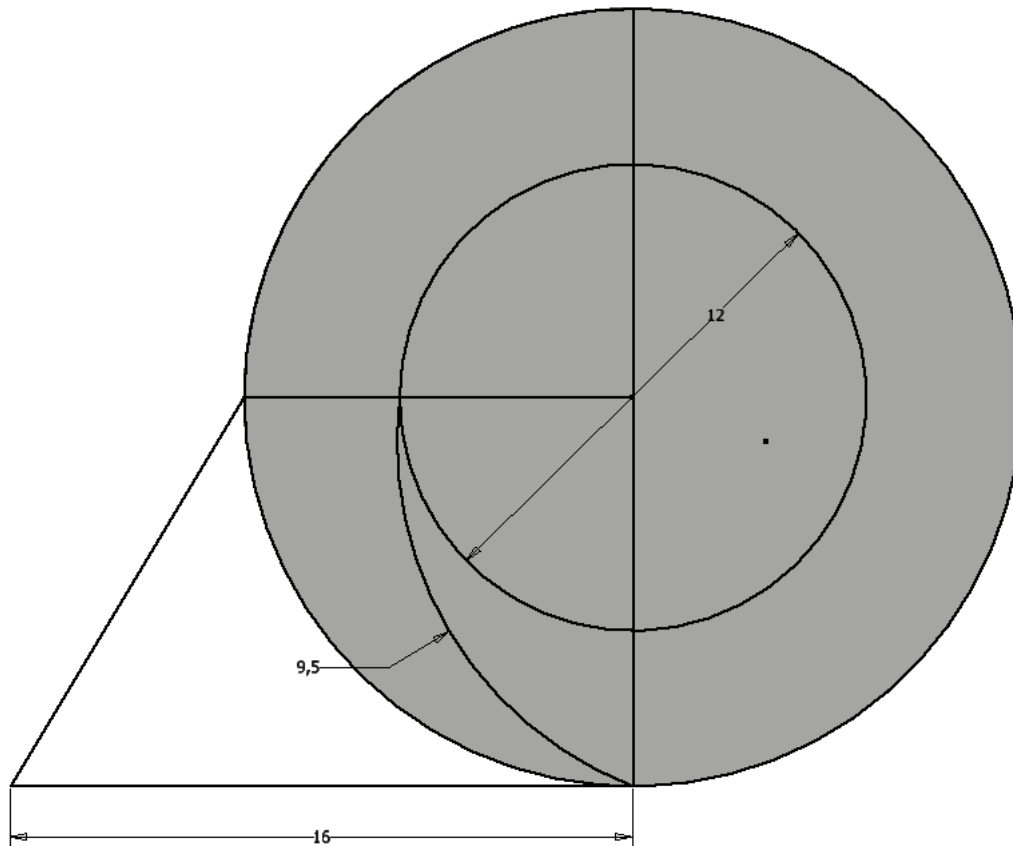
8.2. ΒΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Η φιλοσοφία του σχεδιασμού που ακολουθήθηκε στόχευε στην ακρίβεια των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κοπτικού εργαλείου στα βασικά σημεία των κοπτικών ακμών και της κεφαλής του κοπτικού, μέσω όσο το δυνατόν απλούστερης σχεδίασης. Έτσι, το κοπτικό εργαλείο μεταφέρεται στο πρόγραμμα προσομοίωσης ευκολότερα, και με μικρότερη απώλεια λεπτομερειών, ενώ εξοικονομούνται οι υπολογιστικοί πόροι της προσομοίωσης που θα σπαταλούσαν σε υπολογισμούς σε άσχετα σημεία του κοπτικού.

Αρχικά δημιουργήθηκε το βασικό κονδύλι μέσω ενός απλού sketch κύκλου διαμέτρου 20 mm στο επίπεδο X – Z και της εντολής extrude για μήκος 120 mm από την γραμμή εντολών. Κατόπιν, στο κάτω μέρος του, δημιουργήθηκε το sketch της εικόνας 8.3 για την δημιουργία της σπειροειδούς γεωμετρίας του εργαλείου.



Εικόνα 8.2: Extrude

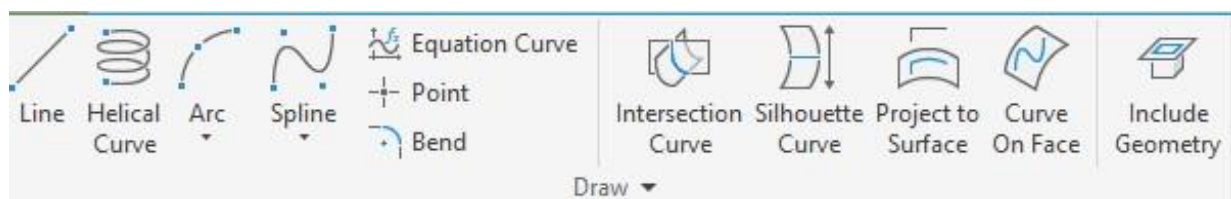


Εικόνα 8.3: Sketch σπείρας στη βάση του εργαλείου.

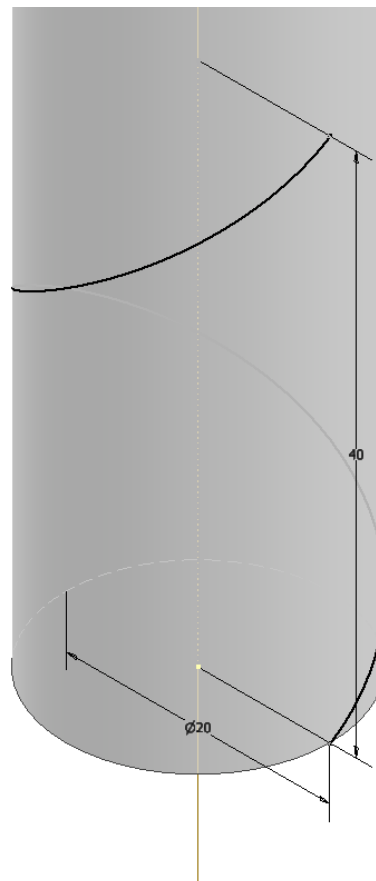
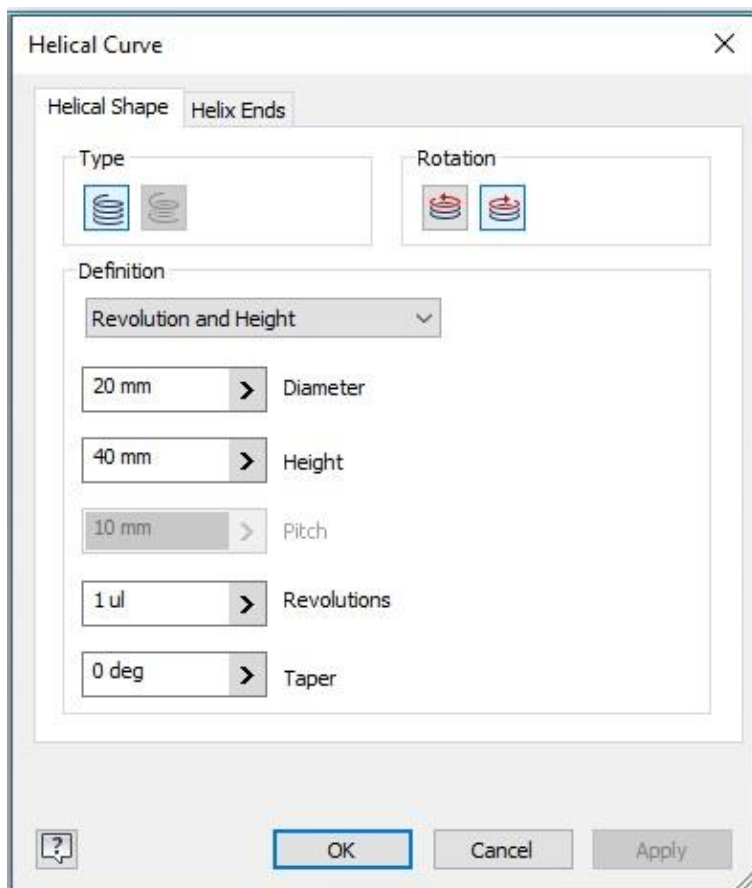
Για την δημιουργία της σπείρας χρησιμοποιήθηκε η εντολή sweep. Η sweep απαιτεί το sketch της Εικόνας 8.3, καθώς και μια διαδρομή, η οποία δόθηκε με τρισδιάστατο αντικείμενο (3D sketch)

Από τη γραμμή εντολών της Εικόνας 8.4 επιλέχθηκε η helical curve, η οποία απαιτεί κάποιες τιμές, και δίνει μια καλά ορισμένη ελικοειδή καμπύλη. Το αποτέλεσμα της εντολής παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.5. Μέσω της εντολής Circular Pattern το σπειροειδές τμήμα του κοπτικού παίρνει μορφή (Εικόνα 8.6)

Για την διαμόρφωση της ιδιάζουσας γεωμετρίας στην άκρη του αντικειμένου, χρησιμοποιήθηκε ξανά η sweep, με την helical curve σαν κατεύθυνση, και το ίδιο sketch της εικόνας 8.4, με την διαφορά ότι αυτή τη φορά αντί να αφαιρεί σημεία από το αντικείμενο, προσθέτει (Εικόνα 8.7). Οι τιμές που επιλέχθηκαν για τα δυο τμήματα της σπείρας ήταν τέτοια ώστε τα δυο τμήματα να μην δημιουργούν κάποια αιχμή ή γωνία μεταξύ τους, χάριν απλότητας. Σε πραγματικές

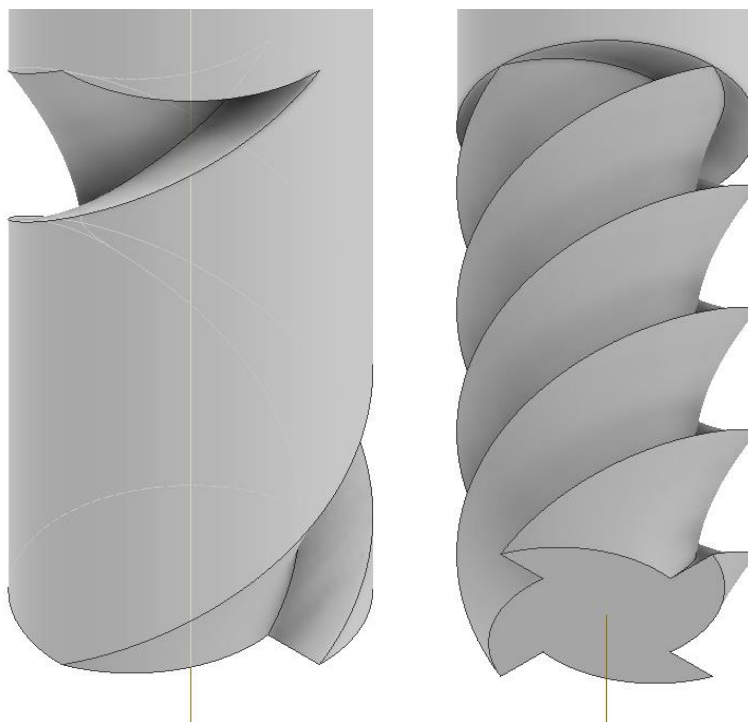


Εικόνα 8.4: Γραμμή εντολών 3D sketch

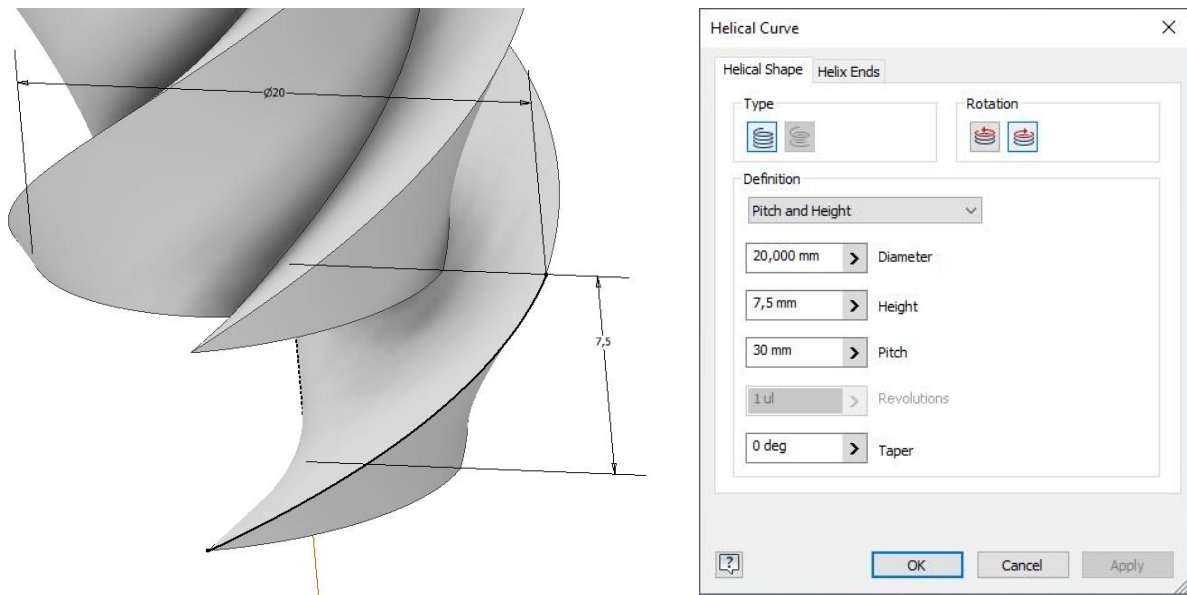


Εικόνα 8.5: Εντολή Helical Curve

συνθήκες, και ειδικά σε κοπτικά που προορίζονται για κοπή εξαιρετικά όλκιμων υλικών όπως το αλουμίνιο, η επιφάνεια αποβλίττου σχηματίζει διαφορετικές κλίσεις σε προκαθορισμένα σημεία (όπως θα ήταν εδώ η γραμμή που χωρίζει τα αποτελέσματα των δυο εντολών) οι οποίες βοηθούν στην καλύτερη απομάκρυνση του αποβλίττου και στην αποφυγή προσκολλήσεως του.

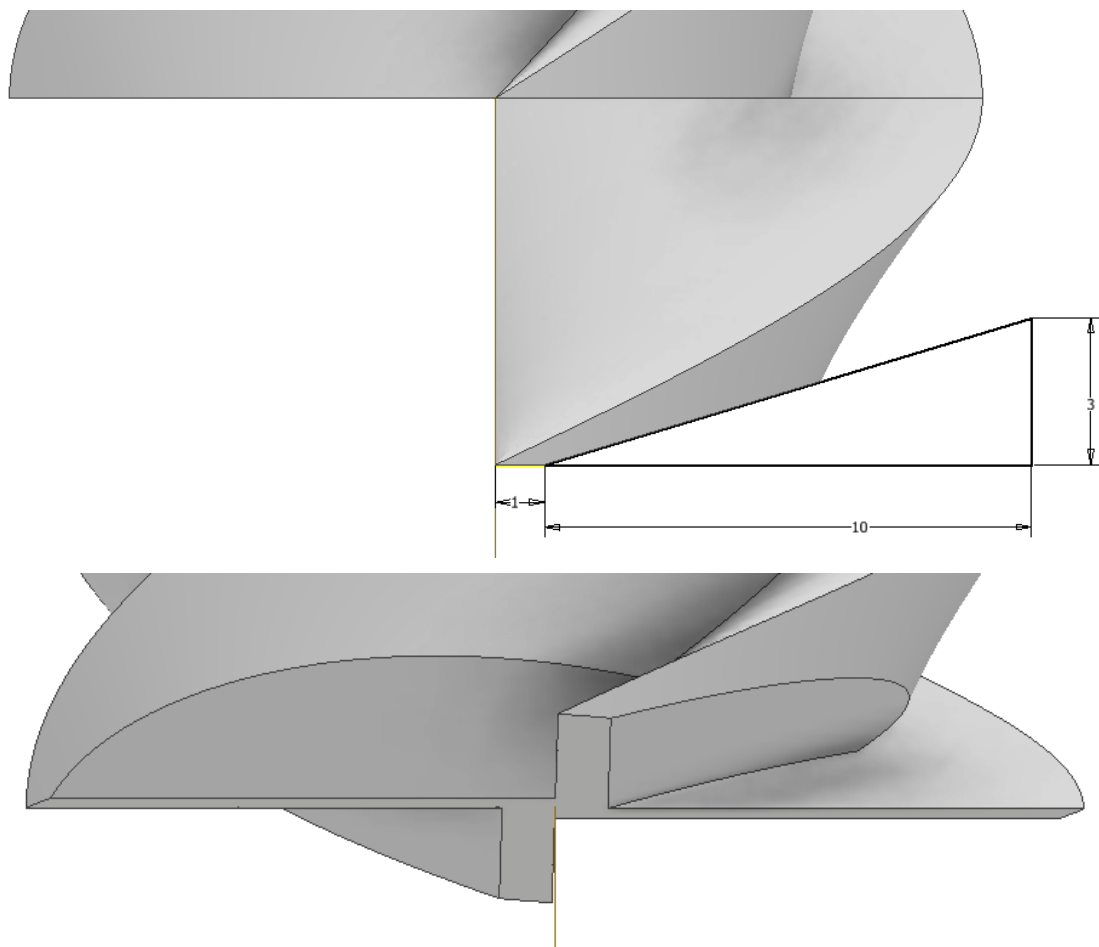


Εικόνα 8.6: Circular Pattern

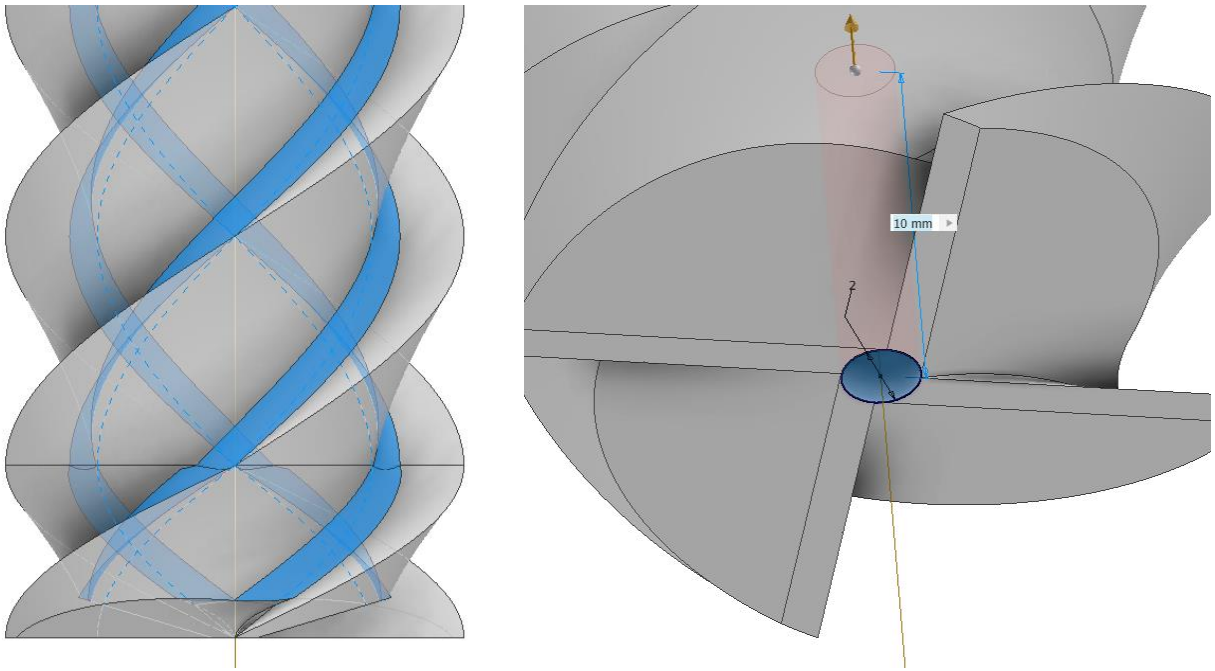


Εικόνα 8.7: Helical Curve κοπτικής ακμής

Στη συνέχεια, μέσω ενός απλού τριγωνικού sketch αφαιρείται υλικό και δημιουργείται η επιφάνεια ελευθερίας της ακμής και μέσω της circular pattern μεταφέρεται και στις 4 ακμές του κοπτικού (Εικόνα 8.8).



Εικόνα 8.8: Επιφάνεια Ελευθερίας

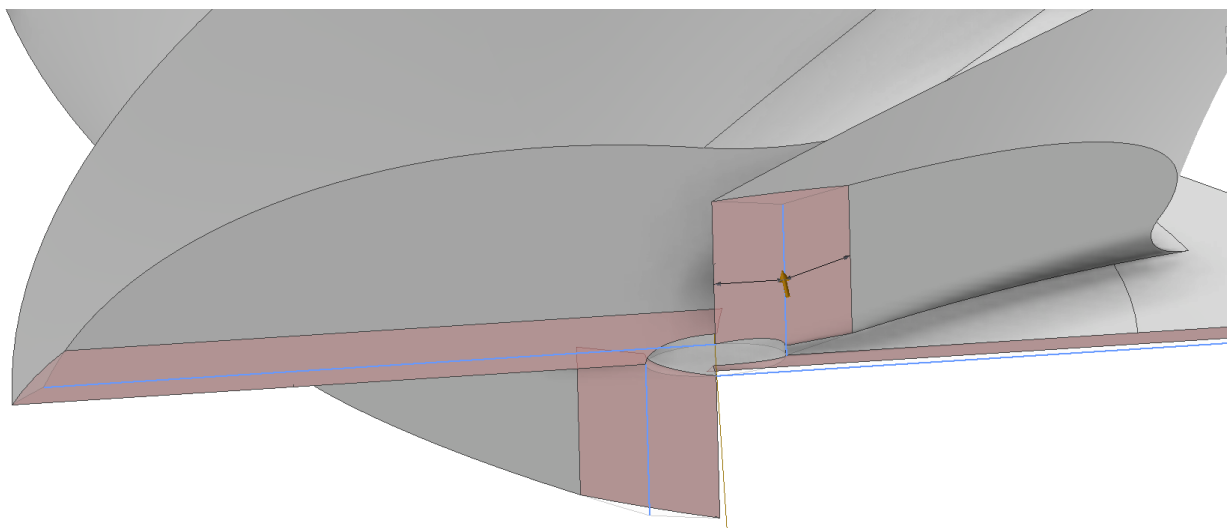


Εικόνα 8.9: Fillet εσωτερικών ακμών και οπή στον άξονα του κοπτικού εργαλείου

Σε αυτό το σημείο η γεωμετρία του κοπτικού έχει αρχίσει να φαίνεται, τουλάχιστον σε ένα πρώιμο στάδιο. Με στόχο την αποφυγή συσσώρευσης τάσεων και υλικού αποβλίπτου στην εσωτερική ακμή μεταξύ των επιφανειών των ακμών, εφαρμόζεται η εντολή fillet με πάχος 1 mm σε αυτές τις ακμές, αποσβένοντας αυτή την κατάσταση (Εικόνα 8.9).

Σε πολλές περιπτώσεις κοπτικών εργαλείων παρατηρείται η παρουσία μιας μικρής οπής στον άξονα του εργαλείου, στην κεφαλή, παράλληλα με τον άξονα περιστροφής. Αυτή η οπή είναι συνδεδεμένη με διαφορά χαρακτηριστικά του κοπτικού, όπως, κάποιες φορές, την καλύτερη συμπεριφορά στις ταλαντώσεις της διεργασίας (Εικόνα 8.9).

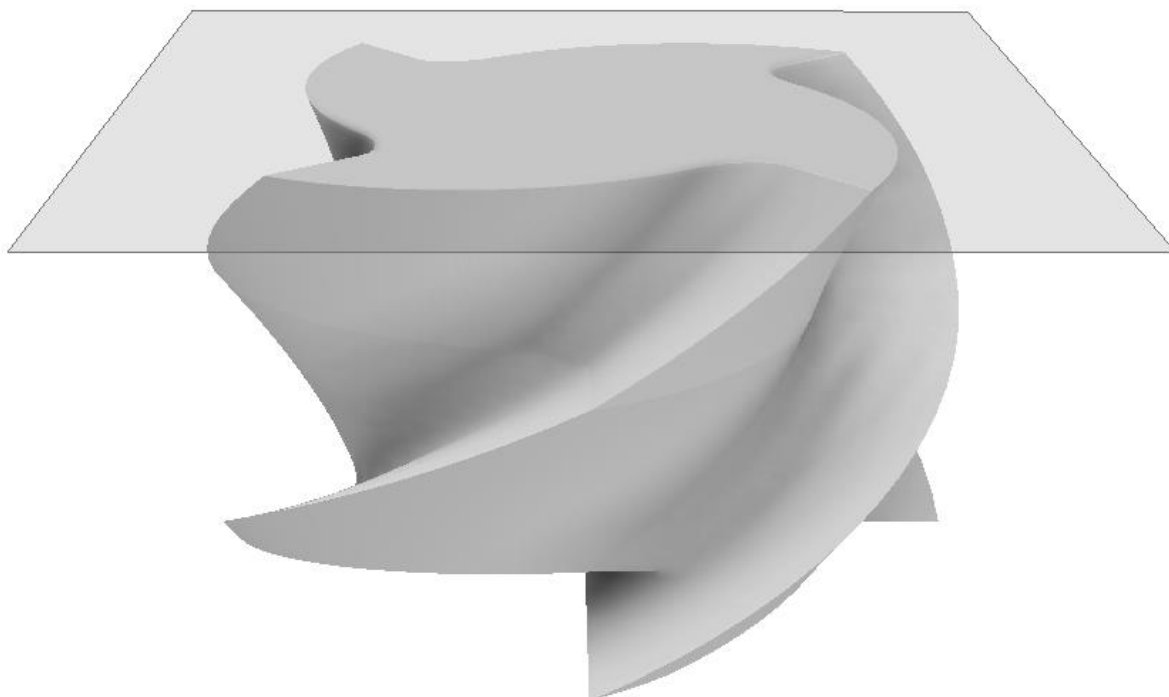
Το τελευταίο σημαντικό σημείο που, ανάλογα τις συνθήκες, χρειάζεται διαμόρφωση, είναι η γωνία σφήνας. Μέσω της εντολής chamfer δύναται ο χρήστης να διαμόρφωση μια ακμή όπως



Εικόνα 8.10: Διαμόρφωση γωνίας σφήνας

με την fillet, με τη διαφορά ότι δίνει ως αποτέλεσμα ευθύγραμμο τμήμα αντί για κοίλο, το οποίο την καθιστά κατάλληλη σε αυτή την περίπτωση (Εικόνα 8.11).

Για την εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων κατά την προσομοίωση, είναι θεμιτό να φορτωθεί στο πρόγραμμα προσομοίωσης μόνο το απαραίτητο τμήμα του εργαλείου. Συνεπώς, μέσω της δημιουργίας ενός νέου επιπέδου (plane) σε καθορισμένο ύψος από την κοπτική κεφαλή, η εντολή split χωρίζει το κοπτικό εργαλείο, κρατώντας μόνο την κεφαλή (Εικόνα 8.12). Αυτή είναι και η τελική μορφή του εργαλείου, η οποία αποθηκεύεται σε αρχείο επέκτασης .stl, και φορτώνεται στο λογισμικό πακέτο προσομοιώσεων στο κατάλληλο βήμα της διαδικασίας.



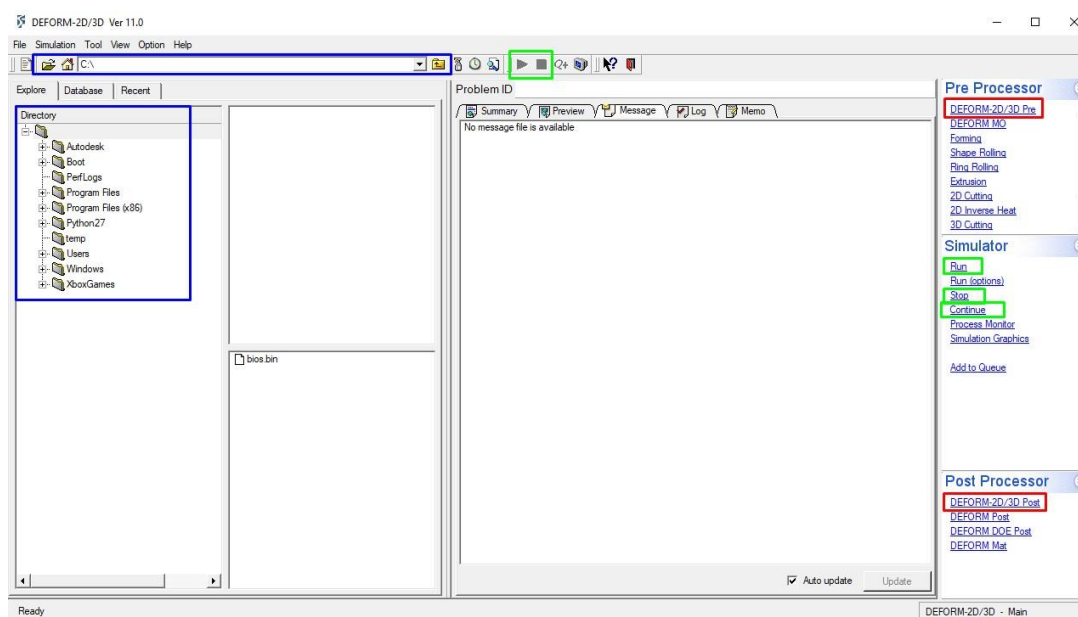
Εικόνα 8.11: Split του εργαλείου μέσω ενός νέου επιπέδου (plane)

9. ΠΑΚΕΤΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – DEFORM 3D

Το DEFORM 2D/3D είναι ένα πρόγραμμα προσομοιώσεων μέσω πεπερασμένων στοιχείων, εξειδικευμένο στο κομμάτι των κατεργασιών της μεταλλουργίας. Εξυπηρετεί διάφορες κοινές μεταλλουργικές δραστηριότητες, όπως την εξώθηση (extrusion), την έλαση (rolling), τη μορφοποίηση πλαστικής παραμόρφωσης (forming), τις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού όπως το φρεζάρισμα και το τρνάρισμα, και αλλά. Όπως και αλλά λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων, και στο DEFORM το πρόβλημα ορίζεται στον προ-επεξεργαστή, επιλύεται υπολογιστικά στον επεξεργαστή, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του, με διάφορες μορφές, στον μετά – επεξεργαστή.

Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο στήθηκαν τα διάφορα προβλήματα προσομοιώσεων της εργασίας, οι διάφορες ρυθμίσεις και τα βήματα που απαιτούνται για την ανάλυση ενός προβλήματος κατεργασιών μέσω των πεπερασμένων στοιχείων. Με στόχο την εύκολη επεξήγηση της διαδικασίας, τα βήματα παρουσιάζονται με την βοήθεια αντίστοιχων εικόνων.

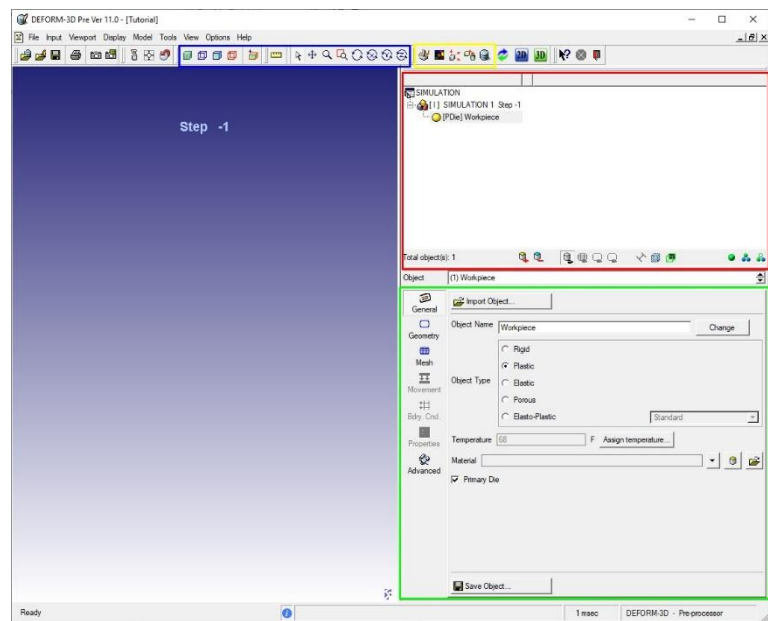
Το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού παρουσιάζεται στην εικόνα 9.1. Με μπλε παρουσιάζονται τα τμήματα του προγράμματος που αφορούν το Ευρετήριο (Directory) του υπολογιστή, ενώ στα δεξιά φαίνονται οι διάφορες επιλογές λειτουργίας που διαθέτει, αναλόγως την επεξεργασία που ο χρήστης απαιτεί. Σε κόκκινα πλαίσια επισημαίνονται ο προ – επεξεργαστής και ο μετά – επεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ σε πράσινο τα βασικά πλήκτρα χειρισμού της προσομοίωσης, όταν βρίσκεται στο στάδιο της υπολογιστικής ανάλυσης. Ενώ υπάρχουν διάφοροι οδηγοί για την γρηγορότερη και ευκολότερη εισαγωγή και ρύθμιση των δεδομένων στον προ-επεξεργαστή, ανάλογα με το είδος της κατεργασίας, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ο γενικός οδηγός, η πρώτη επιλογή στα δεξιά, λόγω του εκπαιδευτικού χαρακτήρα των προσομοιώσεων που έλαβαν χώρα.



Εικόνα 9.1: Περιβάλλον εργασίας DEFORM 2D/3D

9.1. ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ (PRE-PROCESSOR)

Επιλέγοντας τον κατάλληλο οδηγό, ανοίγει ένα καινούριο παράθυρο (Εικόνα 9.2). Με κόκκινο ξεχωρίζει η περιοχή από την οποία εισάγονται τα διάφορα αντικείμενα στο πρόβλημα, το οποίο συνοψίζει και όλες τις ρυθμίσεις που εφαρμόζει ο χρήστης στο πρόβλημα. Στο μπλε πλαίσιο βρίσκονται οι βασικές επιλογές χειρισμού και παρουσίασης των γεωμετριών. Το πράσινο είναι το βασικό πλαίσιο των διαφόρων ρυθμίσεων. Τέλος,

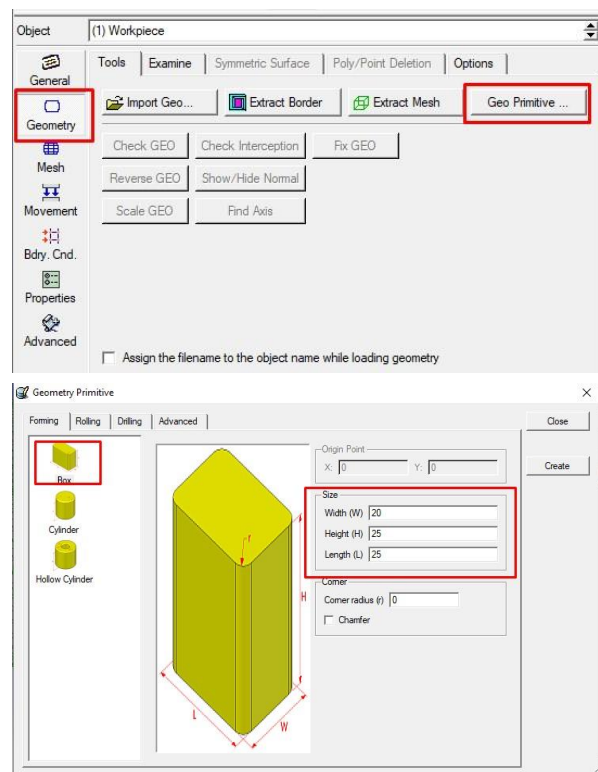


Εικόνα 9.2: UI Pre – processor

στο κίτρινο πλαίσιο βρίσκονται κάποιες σημαντικές επιλογές για την προσομοίωση, όπως οι ρυθμίσεις των υλικών, ο χειρισμός της προσομοίωσης, και η δημιουργία της βάσης δεδομένων μέσω της οποίας «τρέχει» η προσομοίωση.

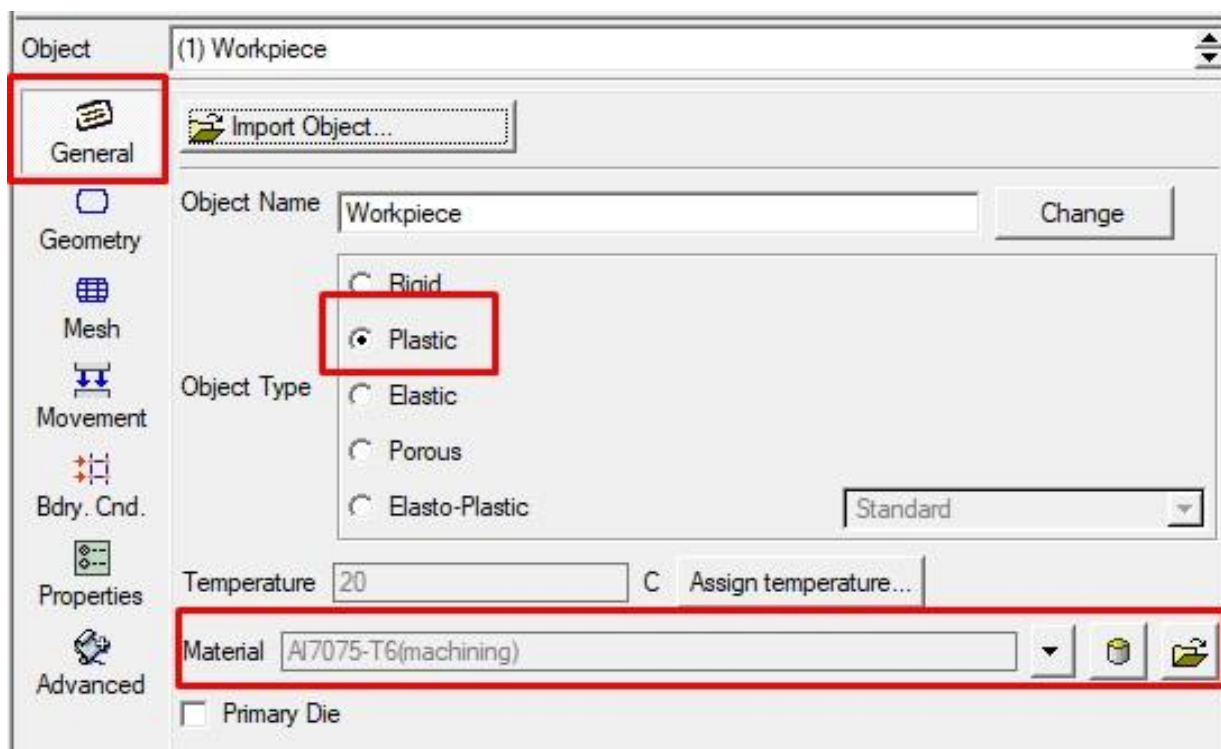
Για την δημιουργία του κατεργαζόμενου τεμαχίου επιλέγεται η εντολή Geo Primitive από τη σελίδα Geometry (εικόνα 9.3) Στο παράθυρο που εμφανίζεται εισάγονται οι κατάλληλες διαστάσεις για το τεμάχιο. Οι διαστάσεις αυτές δεν έχουν ιδιαίτερη σημασία. Βασικό ζήτημα είναι να επιλεγεί αρκετά μεγάλο τεμάχιο ώστε να μπορεί να λάβει χώρα η κατεργασία φρεζαρίσματος, αλλά ταυτόχρονα αρκετά μικρό ώστε να μην υπερφορτώνεται το σύστημα με elements που δεν απαιτούνται.

Μέσω πολλών δοκιμών διαπιστώθηκε επίσης, ότι δεν είναι πολύ καλή πρακτική το τεμάχιο κατεργασίας να έχει το ελάχιστο δυνατό μέγεθος. Λόγω των μεγάλων δυνάμεων που αναπτύσσονται στην περιοχή της κοπής, χρειάζεται επαρκής χώρος στις διαστάσεις του τεμαχίου, ώστε οι τάσεις να περιορίζονται σε κάποια όρια, και να μπορούν να απορροφήσουν από το τεμάχιο χωρίς να εμφανίζονται τεράστιες παραμορφώσεις. Στο παράρτημα, τέλος, παρουσιάζονται οι πίνακες οι οποίοι, μέσω



Εικόνα 9.3: Εισαγωγή κατεργαζόμενου τεμαχίου

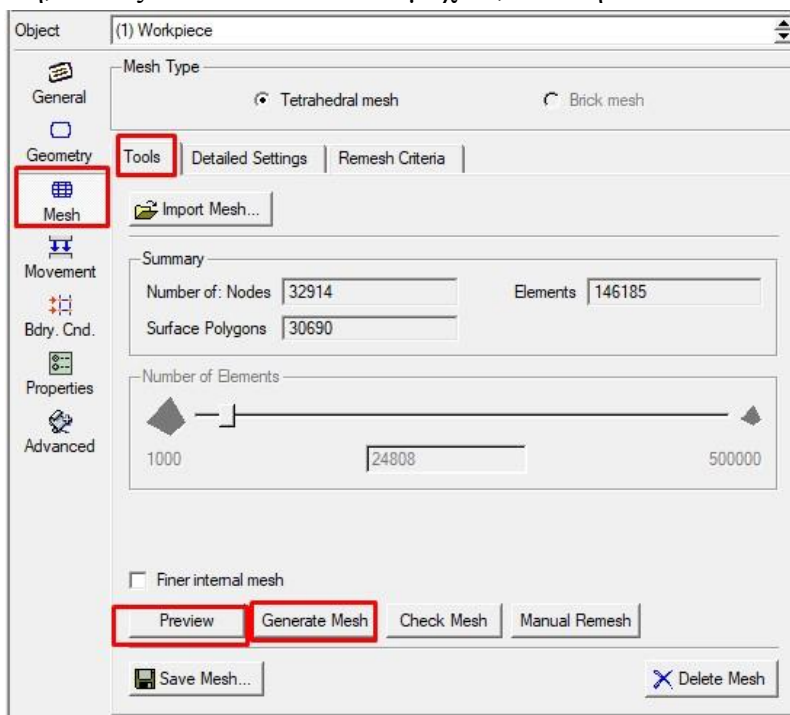
απλών εξισώσεων από τη θεωρία, μετατρέπουν τις διάφορες τιμές των συνθηκών κοπής σε τιμές μονάδων και διαστάσεων κατάλληλων για το συγκεκριμένο λογισμικό.



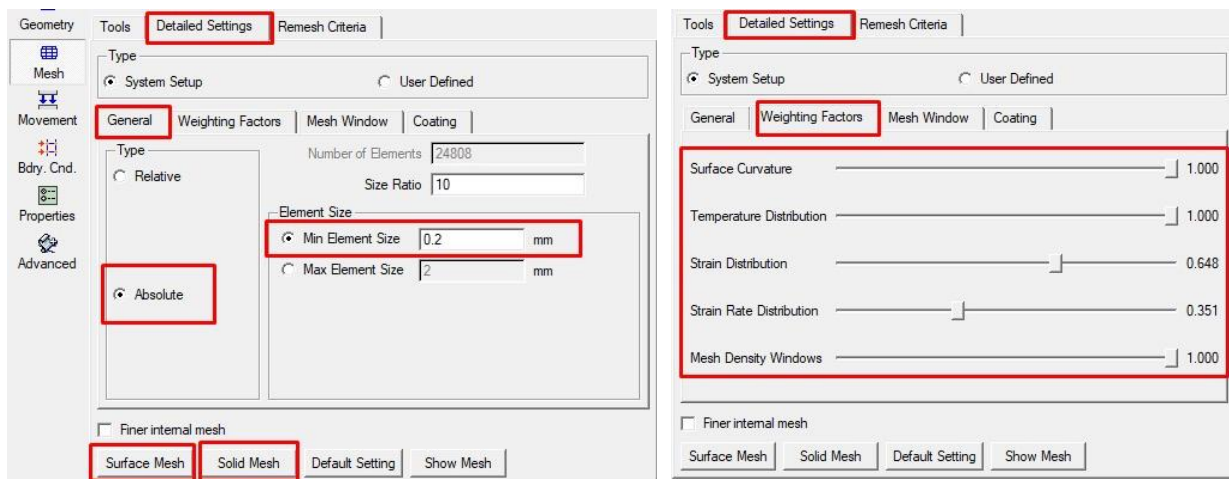
Εικόνα 9.4: Επιλογή υλικού τεμαχίου

Μετά την εισαγωγή του τεμαχίου, σειρά έχουν οι γενικές ρυθμίσεις του υλικού (Εικόνα 9.4). Επιλέγεται πλαστική παραμόρφωση, καθώς και το υλικό του τεμαχίου, από την λίστα υλικών που εμφανίζεται από το επισημασμένο πλαίσιο.

Ολοκληρώνοντας την επιλογή, ο χρήστης πρέπει να περάσει στην σημαντικότερη ρύθμιση του pre-processor, αυτή του πλέγματος (mesh). Στην εικόνα 9.5 φαίνεται το αρχικό παράθυρο που συναντά κανείς μόλις επιλέξει την αντίστοιχη καρτέλα mesh. Το πλήκτρο generate mesh είναι το τελικό που πρέπει να επιλέξει κανείς, έχοντας ολοκληρώσει τις ρυθμίσεις του mesh, για να το «κλειδώσει».

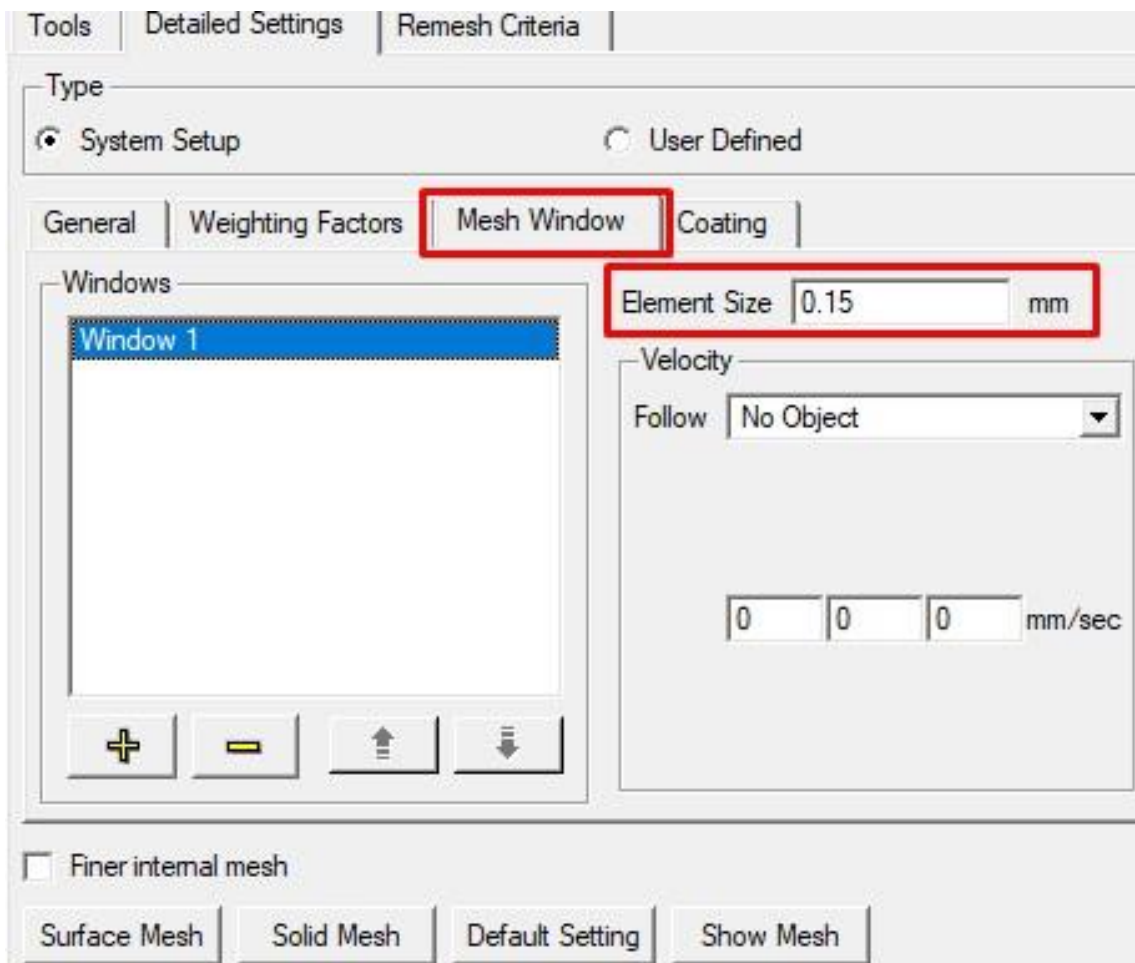


Εικόνα 9.5: Generate Mesh



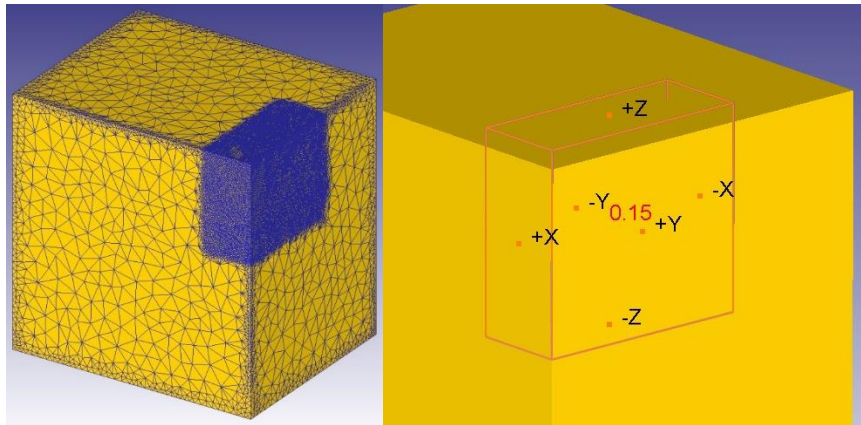
Εικόνα 9.6: Detailed Settings - Mesh

Για να δημιουργήσει το πρόγραμμα ένα πλέγμα, χρειάζεται να εισαχθούν διάφορες παράμετροι, όπως ο τρόπος συσχέτισμού του μεγέθους των στοιχείων (elements). Αυτός μπορεί να είναι σχετικός ή απόλυτος. Στην επιλογή του relative οι παράμετροι που ο χρήστης μπορεί να εισάγει είναι το συνολικό πλήθος των στοιχείων, και τον λόγο μεγέθους του μεγαλύτερου στοιχείου σε σχέση με το μικρότερο (size ratio). Στο Absolute (απόλυτο), τα στοιχεία λαμβάνουν τιμές σύμφωνα πάλι με το size ratio, αλλά αυτή τη φορά ο χρήστης επιλέγει και ένα από τα δυο άκρα αυτού του περιορισμού (Min/Max Element Size). (Εικόνα 9.6 – αριστερά)



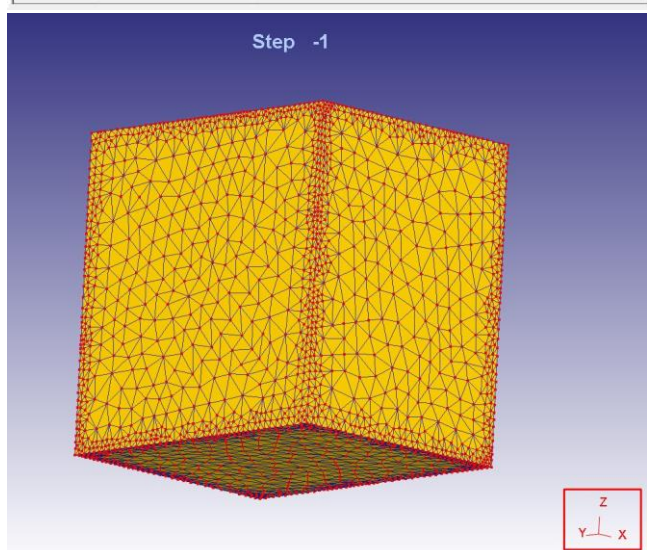
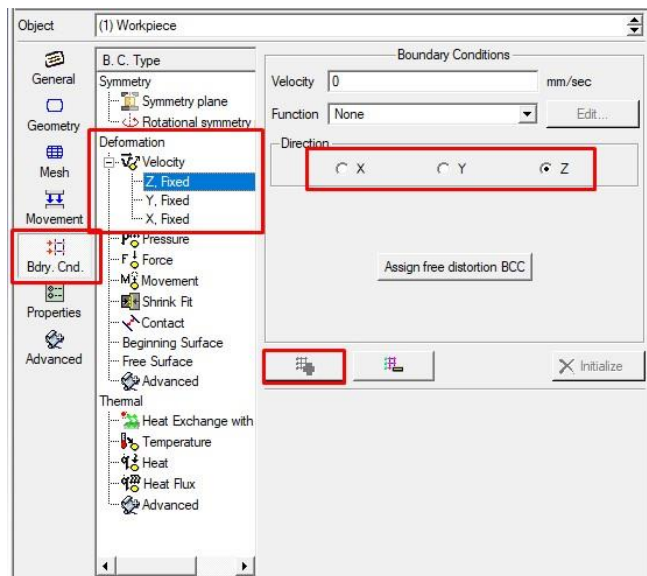
Εικόνα 9.7: Ρύθμιση Mesh Window

Στο δεξί τμήμα της εικόνας 9.6 παρουσιάζονται κάποιες εξειδικευμένες ρυθμίσεις για την συμπεριφορά των elements και τη διαμόρφωση του πλέγματος. Μέσω της δοκιμασίας δοκιμής και



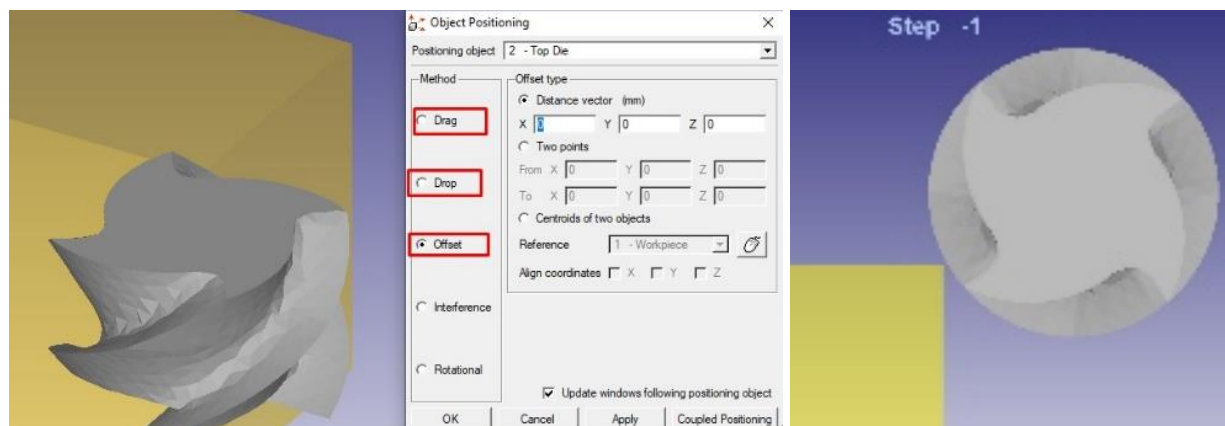
σφάλματος προέκυψαν οι ακριβείς λόγοι για τις παραμέτρους strain distribution και strain rate distribution. Οι υπόλοιπες ρυθμίσεις χρειάζονται να είναι πλήρως ενεργοποιημένες, για τη βέλτιστη συμπεριφορά του πλέγματος. Το Mesh Density Windows, συγκεκριμένα, είναι μια ρύθμιση, η οποία, όταν λάβει τιμή, ενεργοποιεί την υποκαρτέλα Mesh Window, που φαίνεται στην εικόνα 9.7. Μέσω αυτής ο χρήστης εισάγει πλαίσιο στο πλέγμα, μέσα στο οποίο μπορεί να έχει πυκνότερα και μικρότερα στοιχεία. Έχοντας ο χρήστης επιλέξει σχετικό mesh, το πλαίσιο που επισημαίνεται ρυθμίζει είτε τον λόγο του μεγέθους των στοιχείων του πλαισίου (window) σε σχέση με τα μικρότερα στοιχεία του υπολοίπου πλέγματος, είτε το απόλυτο μέγεθος των στοιχείων του πλαισίου στην περίπτωση του absolute mesh. Το Mesh Window βοηθάει με την ακρίβεια της προσομοίωσης, χωρίς όμως να αναγκάζει ολόκληρο το αντικείμενο να έχει πυκνότερο πλέγμα, εάν αυτό δεν χρειάζεται. Δεν πρέπει κανείς να ξεχνάει ότι το πλήθος των στοιχείων της προσομοίωσης αυξάνει τόσο την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, όσο και το χρονικό κόστος της υπολογιστικής διαδικασίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγεθος στοιχείων το οποίο τελικά επιλέχθηκε, ήταν μεγαλύτερο από το μέγεθος το οποίο όριζαν οι εξισώσεις και που παρατίθεται στο παράρτημα. Αυτό συνέβη για δυο λόγους. Αρχικά, το μέγεθος το οποίο προέκυπε από



Εικόνα 9.9: Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών

τις εξισώσεις αυτές οδηγούσε σε υπερβολικά μεγάλο αριθμό στοιχείων, τέτοιον ώστε πρώτα το λογισμικό, και ύστερα το σύστημα του υπολογιστή αδυνατούσαν να το «σηκώσουν» υπολογιστικά. Δεύτερον, όπως έχει προαναφερθεί, η δυσκολία υπολογισμού ενός προβλήματος αυξάνεται εκθετικά με το πλήθος των στοιχείων. Λαμβάνοντας κατά νου αυτούς τους

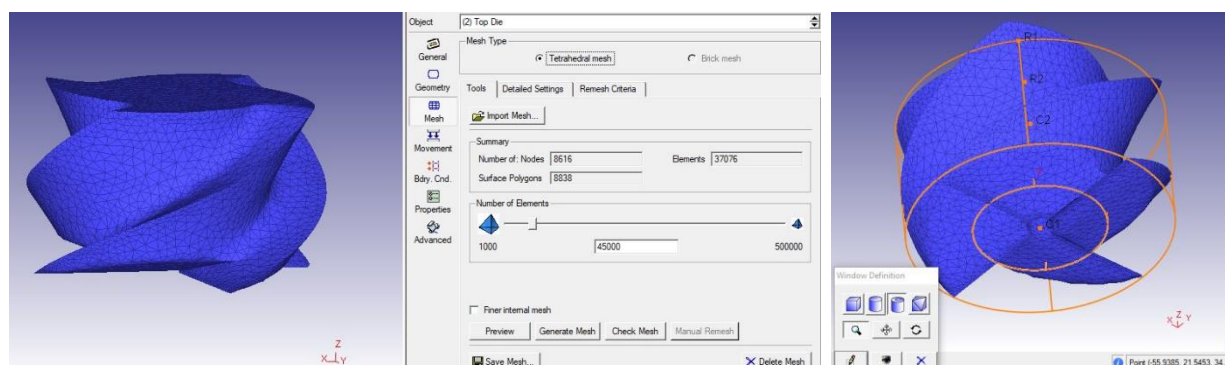


Εικόνα 9.10: Object Positioning

υπολογισμούς, κρίθηκε λογικό να περιοριστεί το πλήθος των στοιχείων σε μια τιμή κοντά στα 150.000, αριθμός ο οποίος κατέστησε την προσομοίωση αργή, αλλά όχι σε βαθμό που να καθίσταται μη εφικτή.

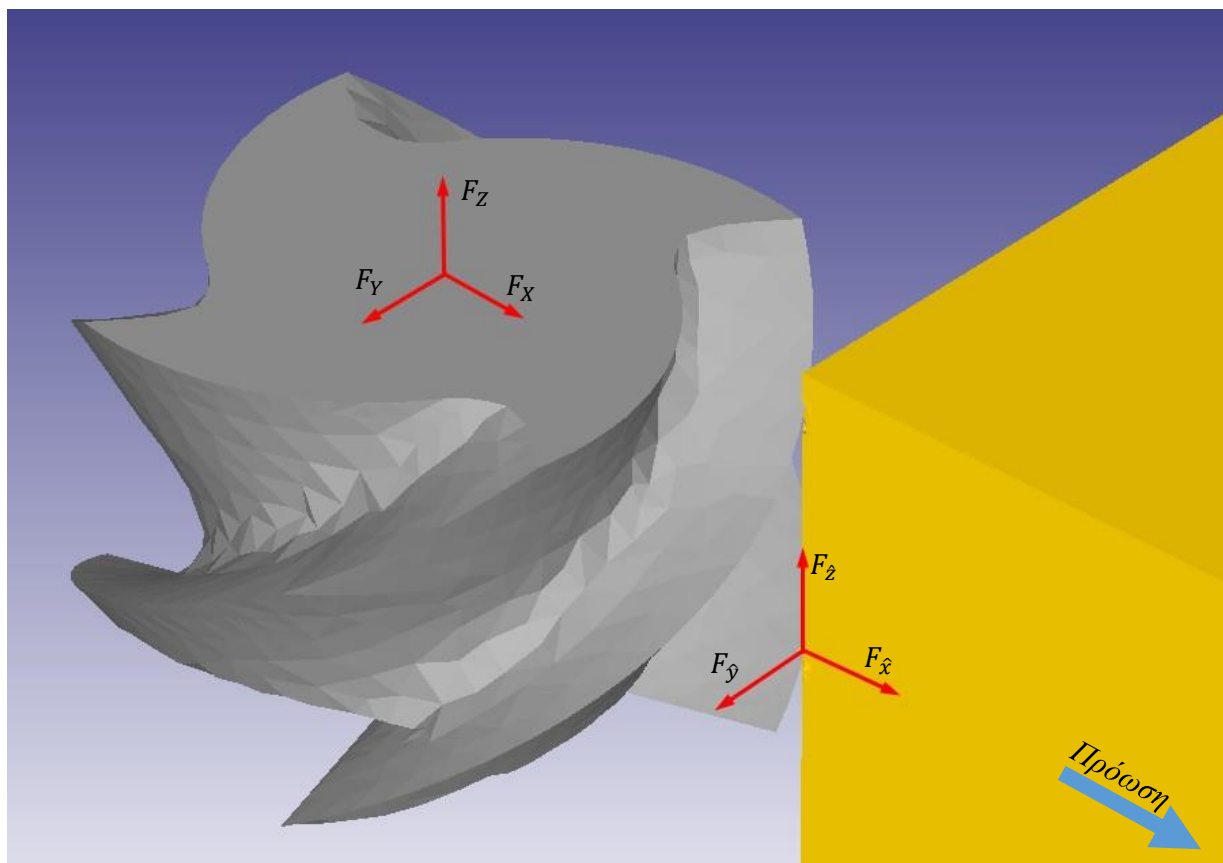
Όταν όλες αυτές οι ρυθμίσεις ολοκληρώθηκαν, οι εντολές Surface Mesh, Solid Mesh, και Generate Mesh, έδωσαν το πλέγμα. Φυσικά κάθε μια από αυτές χρειάζεται κάποιο χρόνο, ώστε το λογισμικό να διαχειριστεί τον όγκο δεδομένων και να δημιουργήσει και να παρουσιάσει το πλέγμα. Εάν το πλέγμα που προκύπτει δεν είναι ικανοποιητικό, υπάρχει η δυνατότητα επέμβασης σε οποιαδήποτε από τις προηγούμενες ρυθμίσεις, τροποποιώντας το τελικό πλέγμα, επιλέγοντας ξανά όμως το generate mesh στο τέλος. Στην εικόνα 9.8 παρουσιάζεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε, και το ανάλογο πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε.

Εν συνεχεία, είναι απολύτως απαραίτητος, για την επίλυση του αριθμητικού μοντέλου, ο ορισμός των συνοριακών συνθηκών (boundary conditions) του προβλήματος. Στο συγκεκριμένο απλοϊκό σύστημα, οι συνοριακές συνθήκες θα προσδοθούν με τη μορφή πακτώσεων στις 3 επιφάνειες του τεμαχίου οι οποίες δεν επηρεάζονται από την κοπή. Στην εικόνα 9.9 παρουσιάζεται η αντίστοιχη καρτέλα, από την οποία επιλέγεται η μορφή συνοριακών συνθηκών ταχύτητας, στις οποίες δίνεται μηδενική τιμή. Για κάθε μια από τις 3 συνοριακές συνθήκες (μια



Εικόνα 9.11: Πλέγμα κοπτικού εργαλείου

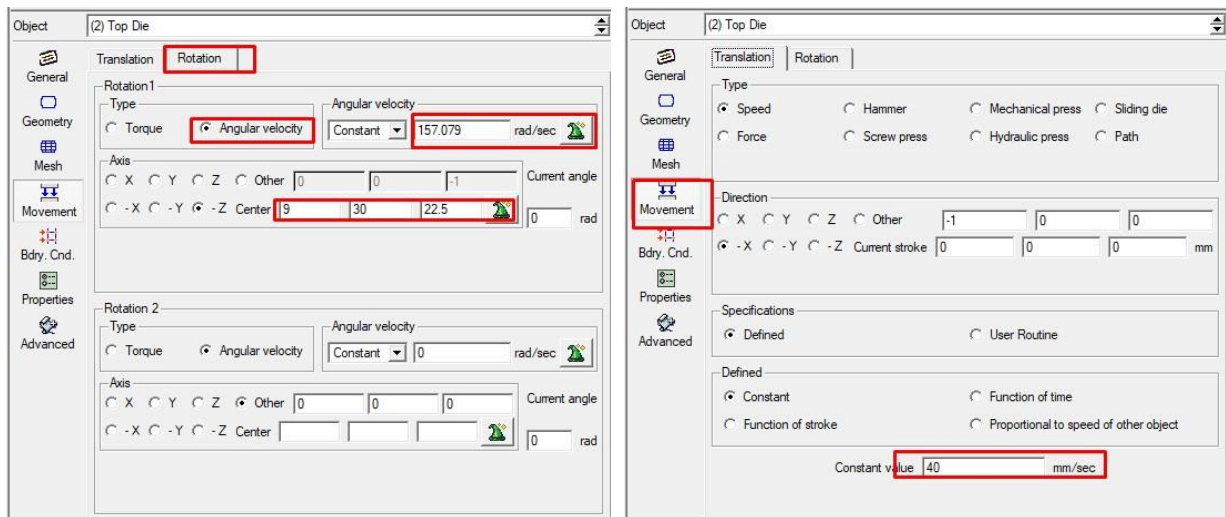
για κάθε άξονα κίνησης, X, Y, Z), επιλέγονται και οι 3 επιφάνειες της πίσω όψης του τεμαχίου. Για να επιβεβαιώσει κανείς ότι επιλεγεί τις σωστές επιφάνειες, συμβουλεύεται και το σύστημα συντεταγμένων του συστήματος (Εικόνα 9.9 & 9.12). Στην εικόνα 9.12 παρουσιάζονται οι διευθύνσεις των δυνάμεων κοπής, οι οποίες δυνάμεις αποτελούν και τα σημαντικότερα αριθμητικά αποτελέσματα που λαμβάνονται από την προσομοίωση.



Εικόνα 9.12: Ορισμός ορθογωνίου συστήματος δυνάμεων (και αξόνων) του προβλήματος

Για την εισαγωγή του κοπτικού εργαλείου που σχεδιάστηκε, ο χρήστης επιλεγεί την κατάλληλη επιλογή κάνοντας δεξί κλικ μέσα στο κόκκινο πλαίσιο της εικόνας 9.2. Αφότου εισαχθεί το κατάλληλο αρχείο, πρέπει να τοποθετηθεί κατάλληλα σε σχέση με το τεμάχιο. Μέσω του πλήκτρου Object Positioning (Εικόνα 9.2, κίτρινο πλαίσιο, 3^ο πλήκτρο), ανοίγει το παράθυρο της εικόνας 9.10. Μέσω των διαφόρων εντολών ο χρήστης μετακινεί το κοπτικό εργαλείο σε σχέση με το τεμάχιο. Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρατίθενται και στο παράρτημα, στο συγκεκριμένο πρόβλημα το κοπτικό εργαλείο τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε η κοπή να πραγματοποιηθεί με ακτινικό βάθος 5mm (το μισό της διαμέτρου του εργαλείου) και αξονικό βάθος 10mm (το τμήμα του εργαλείου που κρατήθηκε από το τελικό «κόψιμο» και το σχεδιασμό του κοπτικού έχει ύψος 12mm).

Το κοπτικό εργαλείο, εισαγόμενο στο DEFORM 3D, επιλέγεται να είναι rigid, και όχι να παραμορφώνεται όπως το τεμάχιο, το οποίο επιλέχθηκε να είναι πλαστικό (plastic) στο αρχικό μενού της εικόνας 9.4. Αυτό συνεπάγεται ότι η δημιουργία mesh στο κοπτικό εργαλείο δεν είναι απαραίτητη, για την διαδικασία. Παρά ταύτα αυτά, το mesh είναι απαραίτητο για τον



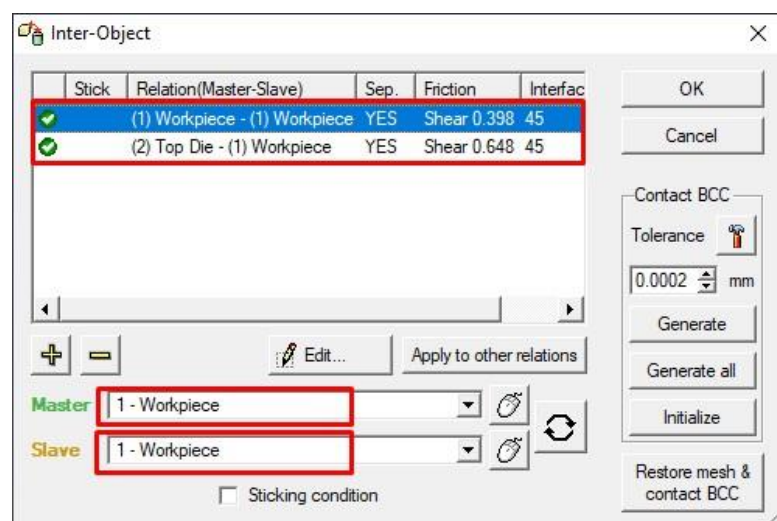
Εικόνα 9.13: Ορισμός κινήσεων κοπτικού εργαλείου

προσδιορισμό της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο κοπτικό εργαλείο κατά την διάρκεια της κοπής. Δεδομένου ότι το πλέγμα δεν απαιτείται να είναι τόσο ακριβές και λεπτομερές, ο τρόπος που δημιουργήθηκε ήταν ο ορισμός απλά του αριθμού των elements (45.000) και ένα απλό mesh window σχήματος κυλινδρικού, ούτως ώστε να εξοικονομείται και εκεί ένα μικρό τμήμα υπολογισμών από το πρόβλημα. Η πυκνωση των στοιχείων λόγω του κυλίνδρου εμφανίζεται στο εξωτερικό τμήμα του κοπτικού.

Μετά το πλέγμα, για το κοπτικό μένει να οριστεί η κίνηση η οποία προκαλεί την κοπή. Η κίνηση του κοπτικού εργαλείου, όπως αναλύθηκε και στη θεωρία, είναι διπλή: αποτελείται από την πρόωση, και την περιστροφή. Η πρόωση, δεδομένου ότι είναι η σχετική κίνηση του τεμαχίου και του κοπτικού, μπορεί να οριστεί και ως κίνηση του κατεργαζόμενου τεμαχίου, και ως κίνηση του εργαλείου. Άλλωστε και σε πολλές εργαλειομηχανές, η κίνηση στους 3 άξονες μπορεί να γίνεται είτε με την κίνηση της τράπεζας, είτε με αυτή του βραχίονα του κοπτικού εργαλείου. Με στόχο όμως να διατηρηθεί το πρόβλημα όσο το δυνατόν απλό στην κατανόηση και ανάλυση του από το λογισμικό, και οι δυο κινήσεις ορίστηκαν στο κοπτικό εργαλείο, το οποίο, για αυτό το λόγο, δεν δέχεται ορίσματα συνοριακών συνθηκών (boundary conditions).

Οι τιμές οι οποίες ορίζονται στο κοπτικό στην εικόνα 9.13 προκύπτουν, όπως και όλα τα υπόλοιπα μεγέθη που αφορούν την κοπή, από τους αντίστοιχους πίνακες που παρατίθενται στο παράρτημα.

Οι σχέσεις μεταξύ των υλικών των δυο αντικειμένων της κοπής, οι οποίες επηρεάζουν την μεταξύ τους επαφή και την συμπεριφοράς



Εικόνα 9.14: Inter – Object

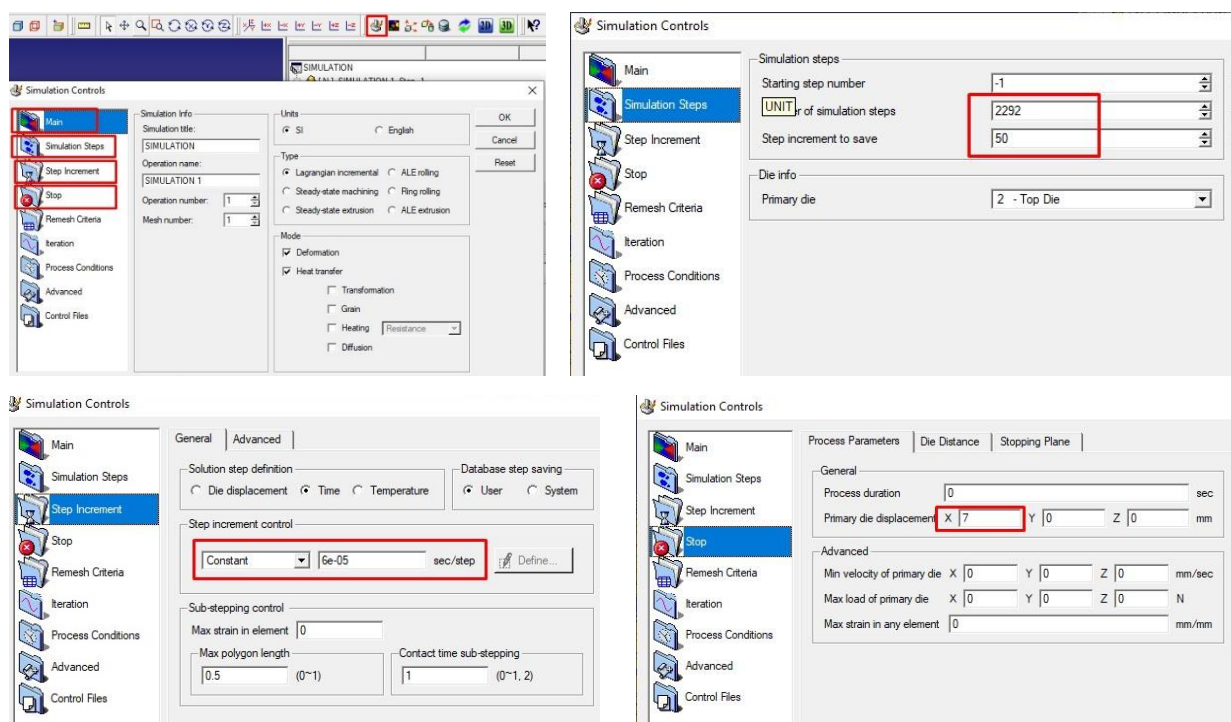
της κοπής, του αποβλήττου και τις διακυμάνσεις των δυνάμεων και της θερμοκρασίας, ορίζονται την επιλογή *inter – object* (Εικόνα 9.2. κίτρινο πλαίσιο, 4^ο πλήκτρο). Στο παράθυρο που ανοίγει πρέπει να δημιουργηθούν 2 σχέσεις, μια τεμαχίου – κοπτικού εργαλείου (Top Die), και μια τεμαχίου – τεμαχίου (Εικόνα 9.14). Στη θέση τεμαχίου – τεμαχίου εισάγεται η τιμή τριβής για το αλουμίνιο 7075 (0,398), και ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στην επαφή (προσεγγιστικά 45). Στη σχέση κοπτικού – τεμαχίου, στην οποία ορίζεται ως *master* το κοπτικό εργαλείο, εισάγονται οι αντίστοιχες τιμές για την μεταξύ τους επαφή.

Με το *Inter – Object* έχει ολοκληρωθεί η εισαγωγή των διαφόρων χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων της κατεργασίας. Το μόνο που μένει για να ξεκινήσει η επίλυση του μοντέλου είναι ο ορισμός του μοντέλου επίλυσης, των κριτηρίων τερματισμού της διαδικασίας, και του χρονικού βήματος της επαναληπτικής διαδικασίας.

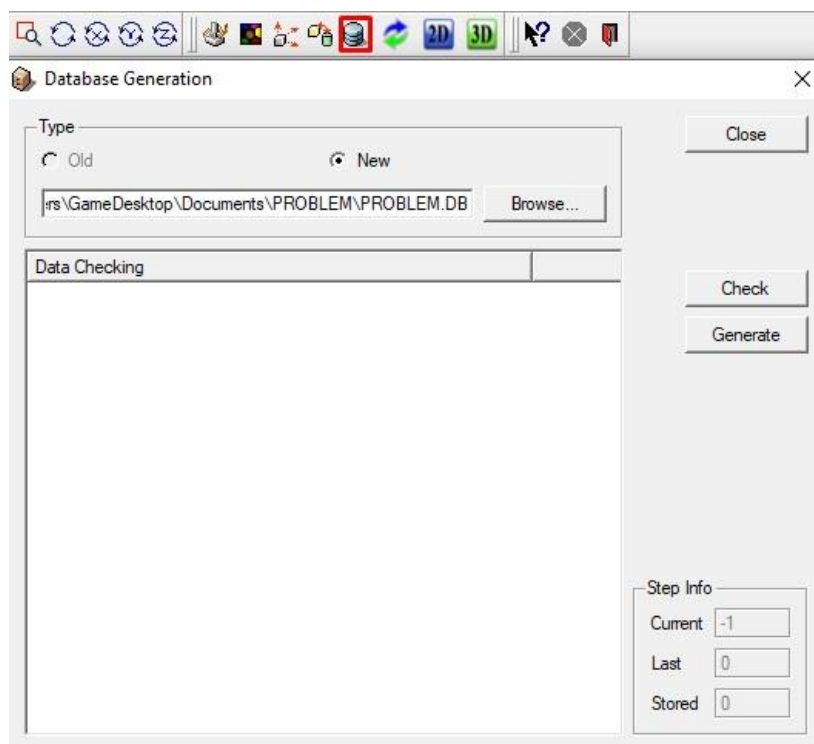
9.2. ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ DEFORM 3D

Τα ορίσματα για την λειτουργία του προγράμματος εισάγονται από μια επιλογή που ονομάζεται *Simulation Controls*. Επιλέγοντας της, εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο ο χρήστης εισάγει όλες τις απαραίτητες ρυθμίσεις για τον τρόπο επίλυσης. Τα στάδια στα οποία εισηχθη κάποια τιμη στα πεδια αυτων των ρυθμισεων, παρουσιαζονται στην Εικόνα 9.15. Οι παραμετροι οι οποίες εισαγονται, όπως και προηγουμενω, προκυπτουν μεσω εξισωσεων οι οποίες παρουσιαζονται με τη μορφη πινακα στο παραρτημα.

Ολοκληρωνοντας αυτες τις ρυθμισεις το προβλημα θεωρειται ολοκληρωμενο, και η δημιουργια βασης δεδομενων database είναι το μονο που απομενει, πριν την ενεργοποιηση του solver του λογισμικου. Στην Εικόνα 9.16 παρουσιάζεται το αντιστοιχο παραθυρο επιλογων. Σε αυτό, με



Εικόνα 9.15: Ρυθμίσεις Προσομοίωσης



Εικόνα 9.16: Database Generation

την επιλογή check το λογισμικό ελεγχει εάν το πρόβλημα είναι σωστα ορισμενο και αν μπορεί να δημιουργηθει το database, ενώ με το generate database η εργασία στον pre-processor ολοκληρωνεται. Επιλεγοντας την επιλογή Run από τη λιστα εντολων του Simulator η αριθμητικη επίλυση εκκινει.

9.3. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ

Κατά την διάρκεια της επίλυσης από τον Processor (Simulator), εμφανίζονται διάφορα μηνύματα στο παράθυρο διαλόγου του προγράμματος. Εκεί παρουσιάζονται διάφορες πληροφορίες για την πρόοδο της ανάλυσης, καθώς και το βήμα (step) στο οποίο βρίσκεται η διαδικασία, καθώς πληροφορίες για το τελευταίο remesh. Remesh είναι μια αυτόματη διαδικασία η οποία επαναδημιουργεί το πλέγμα στο τεμάχιο, το οποίο αλλάζει συνεχώς σχήμα λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων στα στοιχεία από την κατεργασία. Από αυτές τις πληροφορίες, καθώς και από τα μηνύματα τερματισμού ή σφάλματος που πιθανόν να εμφανιστούν σε κάποιο συμπεραίνονται οι απαραίτητες δράσεις από τον χρήστη. Τα περισσότερα σφάλματα που εμφανίζονται στο σύστημα παρουσιάζονται λόγω υπερβολικών παραμορφώσεων, και λόγω αυτού, προβλημάτων στο πλέγμα και στο Remesh. Συνεπώς, όταν ο επιλυτής σταματήσει τη λειτουργία του, μια λύση είναι να επέμβει μέσω του post processor ο χρήστης, και να δημιουργήσει χειροκίνητα το πλέγμα, επεμβαίνοντας όμως, όχι στο αρχικό βήμα -1 της προσομοίωσης, αλλά σε κάποιο κοντινό στο πρόσφατο που εμφάνισε πρόβλημα. Μια καλή τακτική η οποία δύναται να εξαφανίσει πολλά σφάλματα, αν και αρχικά φαίνεται πιο χρονοβόρα, είναι ο χρήστης να επεμβαίνει σε κάποιο προγενέστερο βήμα σε σχέση με το τελευταίο, για παράδειγμα 50 – 100 βήματα πριν το σφάλμα, ή 10 – 20 Remesh πριν από αυτό.

Αυτό φαίνεται να βοηθάει διότι τα σφάλματα πιθανόν να δημιουργούνται σταδιακά, και όχι μόνο σε ένα ή δυο βήματα, ή, αντίστοιχα, Remeshes.

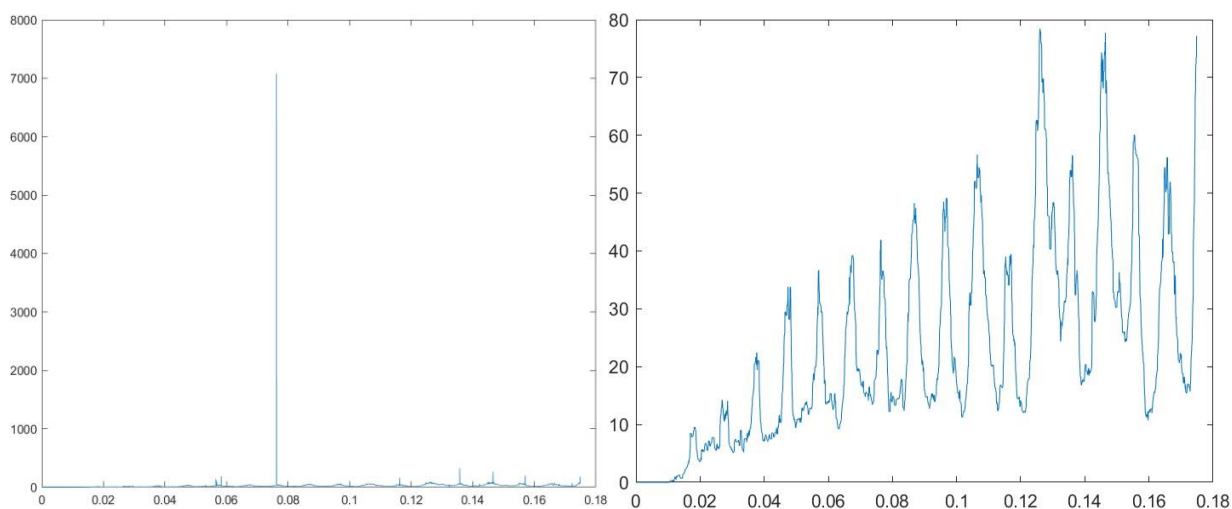
9.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την απεικόνιση αλλά και την επεξεργασία και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων από την αριθμητική επίλυση του προβλήματος, υπεύθυνος είναι ο μετά – επεξεργαστής (Post Processor).

Όταν η διαδικασία της προσομοίωσης ολοκληρωθεί, με το κατάλληλο μήνυμα τέλους στο παράθυρο διαλόγου, υπάρχει η δυνατότητα να εξαχθούν γραφήματα διαφόρων μεγεθών από τη διαδικασία, καθώς και να παρακολουθηθεί βήμα προς βήμα η κατεργασία, και η συμπεριφορά των διαφόρων παραγόντων, τα αντίστοιχα πλέγματα, και αλλά. Από το περιβάλλον του Post – Processor εξάγονται πολλά διαγράμματα με τη μορφή πινάκων, σε αρχεία επέκτασης .txt.

9.4.1. MATLAB

Λόγω της μεγάλης έκτασης των προσομοιώσεων, καθώς και των διαφόρων σφαλμάτων που υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστούν, στα διαγράμματα που εξάγονται από το λογισμικό ίσως εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές κάποιας μεταβλητής. Κάποιες συνηθισμένες μορφές τέτοιων σφαλμάτων σε προσομοιώσεις, αλλά και σε πραγματικά προβλήματα και πειραματικές διατάξεις, είναι τα singularities (μαθηματικές μοναδικότητες), οι πολύ «αιχμηρές» κορυφές στη συμπεριφορά της μεταβλητής στο διάγραμμα, αλλά και ο «θόρυβος».

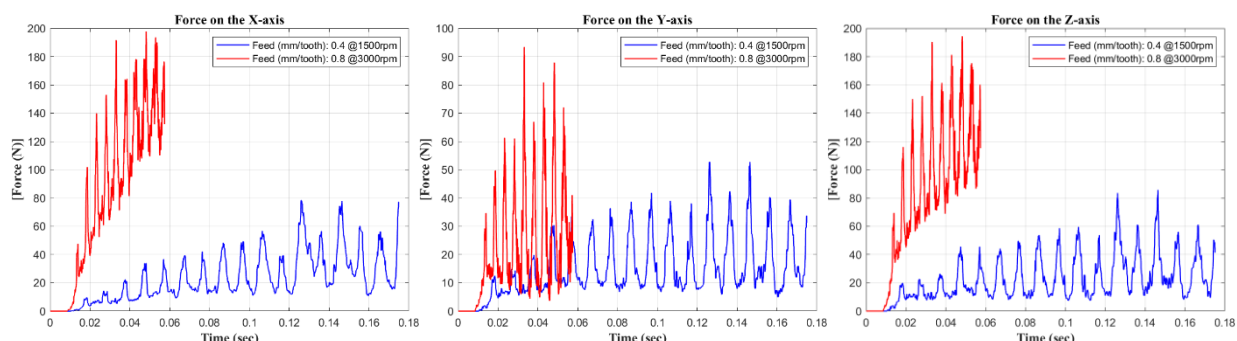


Εικόνα 9.17: Αφαίρεση θορύβου

Με στόχο την επίλυση τέτοιων προβλημάτων, σε κάποιο βαθμό, αλλά και την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων, ώστε να μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα, επιστρατεύθηκε το λογισμικό MATLAB R2023a, της εταιρείας MathWorks. Σε αυτό αναπτύχθηκε απλοϊκής μορφής κώδικας, με στόχο την αφαίρεση τέτοιων περιπτώσεων αποκλίσεων.

Ενδεικτικά παρατίθεται σύγκριση του διαγράμματος της δύναμης F_x στο πρώτο από τα δυο προβλήματα που έλαβαν χώρα, πριν και μετά την αφαίρεση του θορύβου (Εικόνα 9.17).

Από την εικόνα 9.17 γίνεται αντιληπτό ότι, για την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων από τα διαγράμματα, είναι απαραίτητη η αφαίρεση τέτοιων περιπτώσεων. Συνεπώς, παρατίθενται τα διαγράμματα μόνο μετά την επεξεργασία τους στο MATLAB. Ο κώδικας ο οποίος χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο παράρτημα.

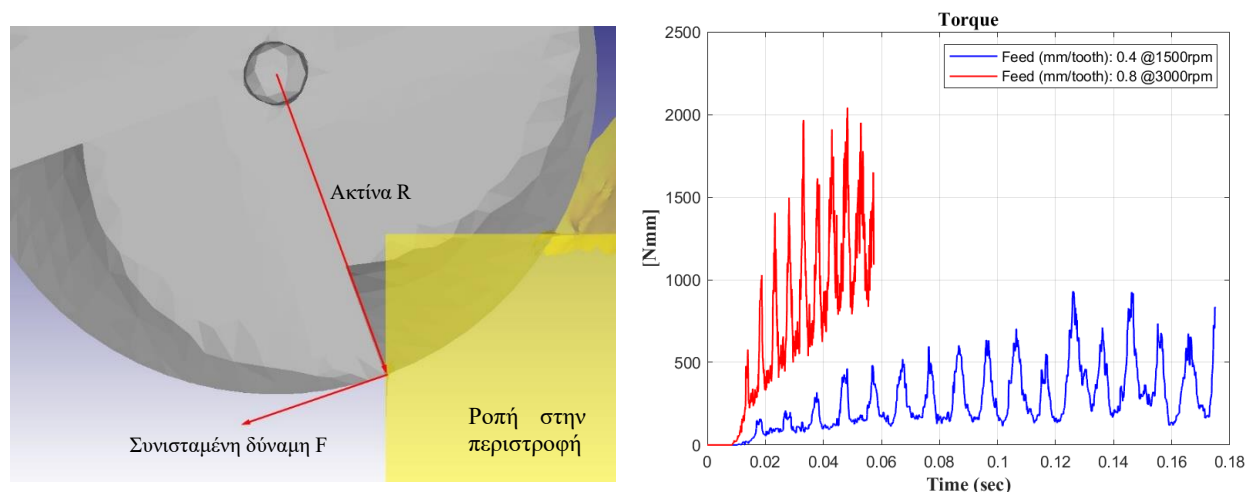


Εικόνα 9.18: Δυνάμεις κοπής

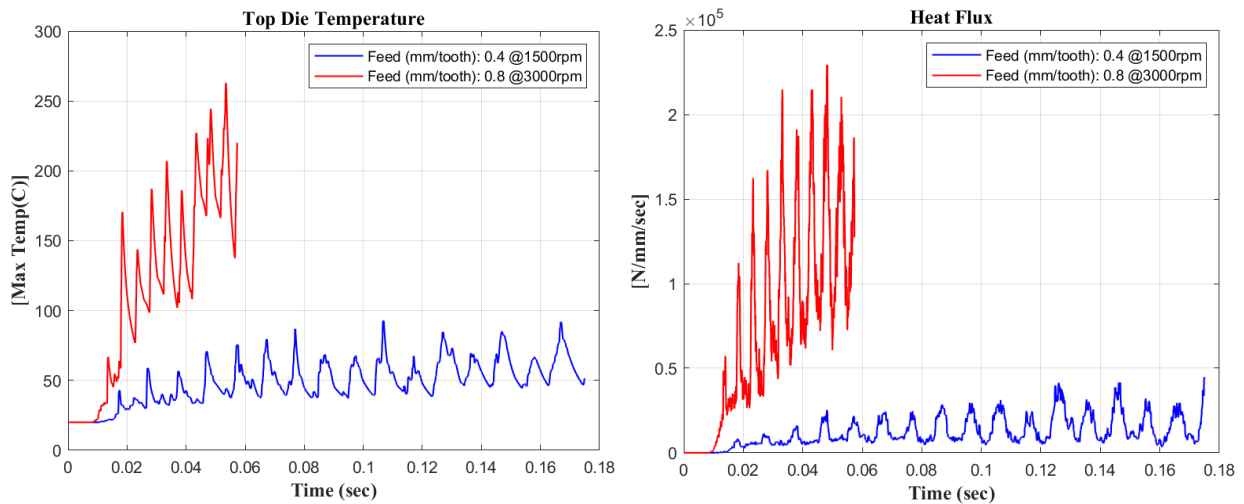
Τα δυο προβλήματα τα οποία προσομοιώθηκαν έχουν ως σημείο σύγκρισης την πρόωση και την περιστροφή του κοπτικού εργαλείου. Στο πρώτο πρόβλημα χρησιμοποιήθηκε πρόωση ίση με 0,4mm ανά ακμή της κοπτικής κεφαλής και ταχύτητα περιστροφής ίση με 1500rpm (στροφές ανά λεπτό), ενώ στο δεύτερο τα μεγέθη αυτά διπλασιάστηκαν, άρα η κατεργασία έγινε με πρόωση ίση με 0,8mm ανά κοπτική ακμή και 3000rpm. Τα διαγράμματα που ακολουθούν συγκρίνουν τις τιμές διαφόρων μεταβλητών για αυτές τις συνθήκες ως προς το χρόνο κατεργασίας.

Στην εικόνα 9.18 παρατίθενται τα διαγράμματα τιμών των τριών δυνάμεων του καρτεσιανού συστήματος. Είναι εμφανές ότι η αύξηση της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής είναι με κάποιο τρόπο συνδεδεμένη με την αύξηση των δυνάμεων στο κοπτικό εργαλείο. Η ροπή η οποία προκύπτει από τις δυνάμεις κοπής απεικονίζεται στην εικόνα 9.19. Ως γνωστόν, η ροπή αποτελεί το γινόμενο των διανυσμάτων ακτίνας και δύναμης.

Αυτή η αυξητική τάση στη συμπεριφορά του συστήματος επαληθεύεται και από την αύξηση στο θερμοκρασιακό πεδίο στην κοπτική κεφαλή (Εικόνα 9.20). Φυσικά, η κυματική συμπεριφορά, όπως και στις δυνάμεις, έχει να κάνει με τις διάφορες φάσεις της κοπής του εκάστοτε

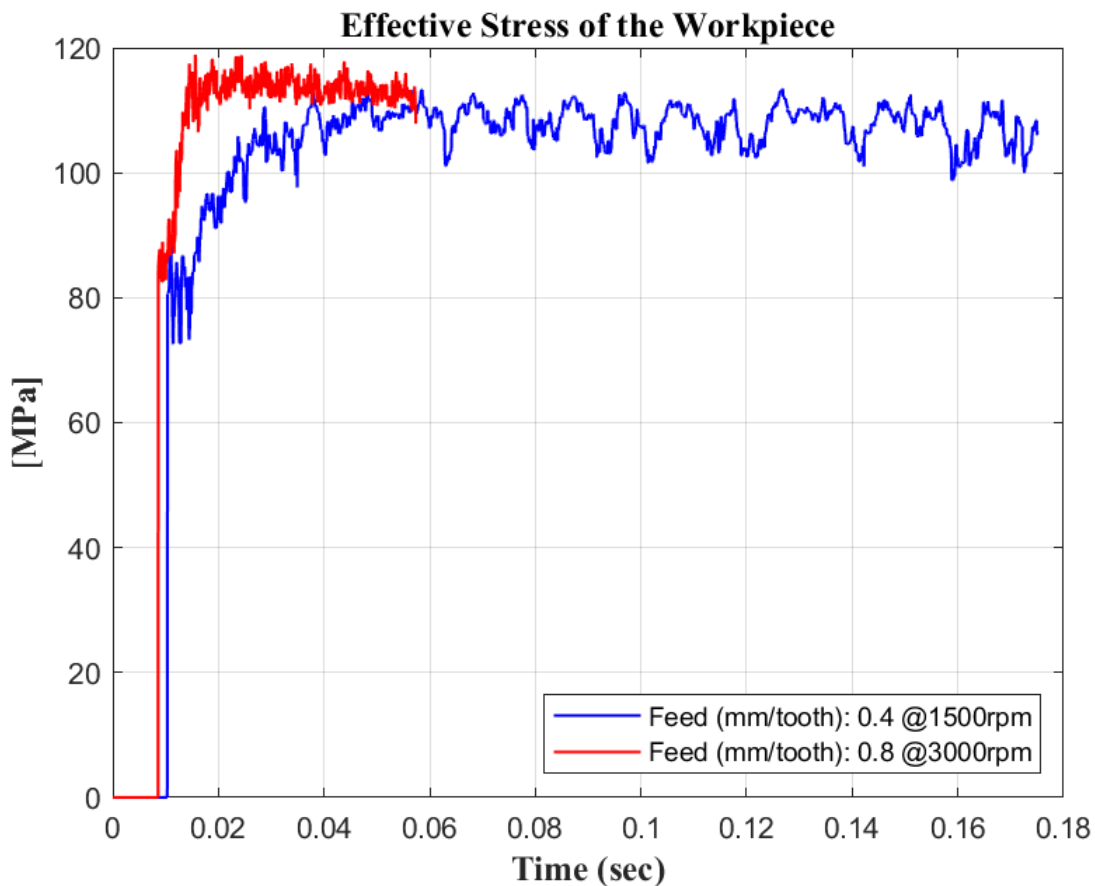


Εικόνα 9.19: Σχηματική αναπαράσταση της ροπής και διάγραμμα ροπής των προσομοιώσεων



Εικόνα 9.20: Θερμοκρασία και θερμοκρασιακή ροή στο κοπτικό εργαλείο (Top Die)

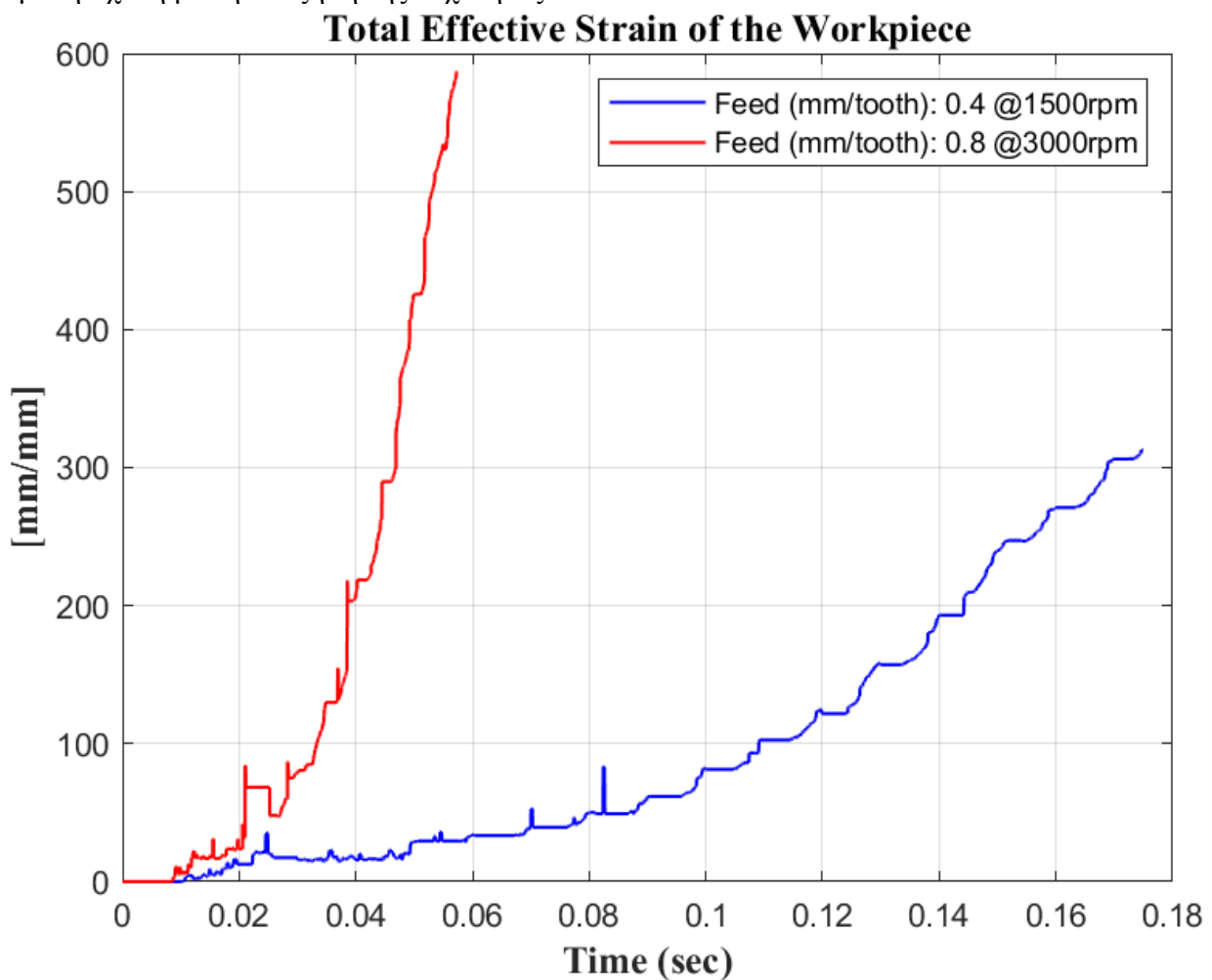
αποβλίττου. Υπενθυμίζεται ότι η κοπή και στις δυο περιπτώσεις πρόωσης ξεκινάει από την ίδια γεωμετρική διάταξη: μετωπικό φρεζάρισμα σε ένα τεμάχιο σχήματος κύβου, και συγκεκριμένα από την άκρη του τεμαχίου. Έτσι, τα πρώτα απόβλιττα που δημιουργούνται είναι αρκετά μικρότερα σε μέγεθος, εφαρμόζοντας συνεπώς και πολύ μικρότερη φθορά στο κοπτικό εργαλείο. Η αύξηση αυτή στο μέγεθος των αποβλίτων οδηγεί και στην άνοδο της θερμοκρασίας, αλλά και των δυνάμεων κοπής. Κατά την συνεχή περιοδική κίνηση η οποία λαμβάνει χώρα κατά το φρεζάρισμα, η συμπεριφορά των τιμών των μεγεθών τείνει να σταθεροποιείται σε μια κατάσταση η οποία ονομάζεται Steady State (Σταθερή κατάσταση).



Εικόνα 9.21: Εφαρμοζόμενη τάση στο τεμάχιο

Παρατηρώντας την τάση που εμφανίζεται στο τεμάχιο, αναγνωρίζει κανείς αμέσως ότι η εφαρμοζόμενη τάση στις δυο περιπτώσεις δεν διαφέρει πολύ (Εικόνα 9.21). Η τάση, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα μεγέθη της κοπής στις δυο περιπτώσεις προσομοίωσης διατηρείται σχετικά σταθερή. Το υλικό του αποβλίττου, με μικρές αποκλίσεις ανάλογα τη θερμοκρασία, απαιτεί περίπου το ίδιο έργο για να αποσχιστεί από το τεμάχιο, ανεξάρτητα από την ταχύτητα. Για αυτό τον λόγο η διακύμανση της τάσης και η διαφορά της ανάμεσα στις δυο περιπτώσεις συνθηκών είναι τόσο μικρότερη.

Τέλος, ένας άλλος δείκτης της συμπεριφορά της κοπής είναι η συνολική εφαρμοζόμενη παραμόρφωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου (Εικόνα 9.22). Πρόκειται για ένα αδιάστατο μέγεθος, το οποίο υπολογίζεται στο DEFORM 2D/3D λαμβάνοντας σε κάθε βήμα το μέγιστο παραμορφωμένο στοιχείο (element) σε σχέση με το προηγούμενο του μέγεθος. Για κάθε επόμενο βήμα, η παραμόρφωση αυτή λειτουργεί αθροιστικά. Έτσι προκύπτει ένα διάγραμμα το οποίο δείχνει την έκταση της παραμόρφωσης ανάλογα τις συνθήκες ταχύτητας, στο οποίο, όπως και στα διαγράμματα δυνάμεων και θερμοκρασιών, η αύξηση της παραμόρφωσης φαίνεται ότι έχει άμεση σχέση με την αύξηση της ταχύτητας.

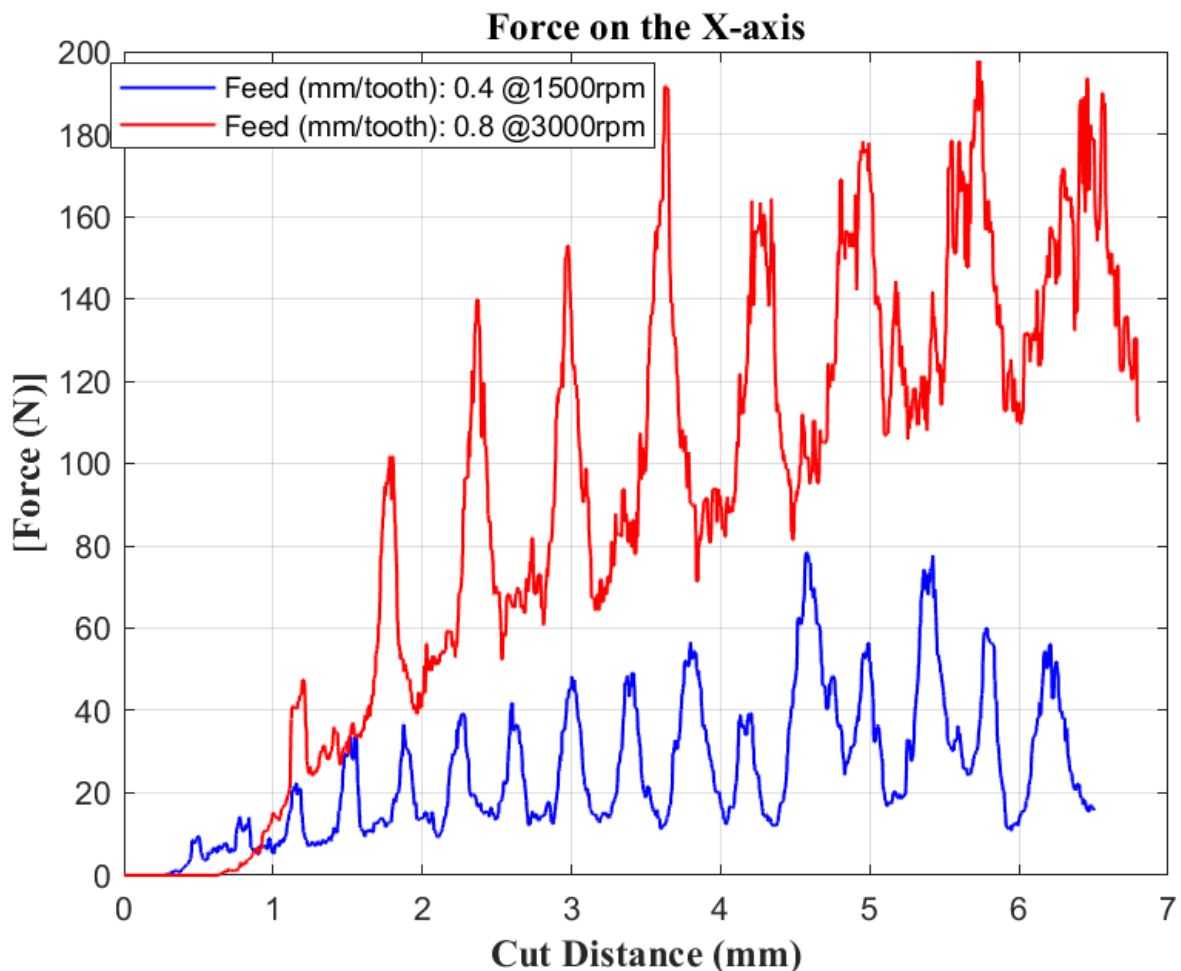


Εικόνα 9.22: Συνολική εφαρμοζόμενη παραμόρφωση

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως μπορεί κανείς να συμπεράνει και από την παράγραφο των αποτελεσμάτων, είναι σαφές ότι υπάρχει μια σύνδεση μεταξύ του διπλασιασμού της πρόωσης και της ταχύτητας περιστροφής με την αυξητική τάση των παραμέτρων που αναλύονται στην προηγούμενη ενότητα.

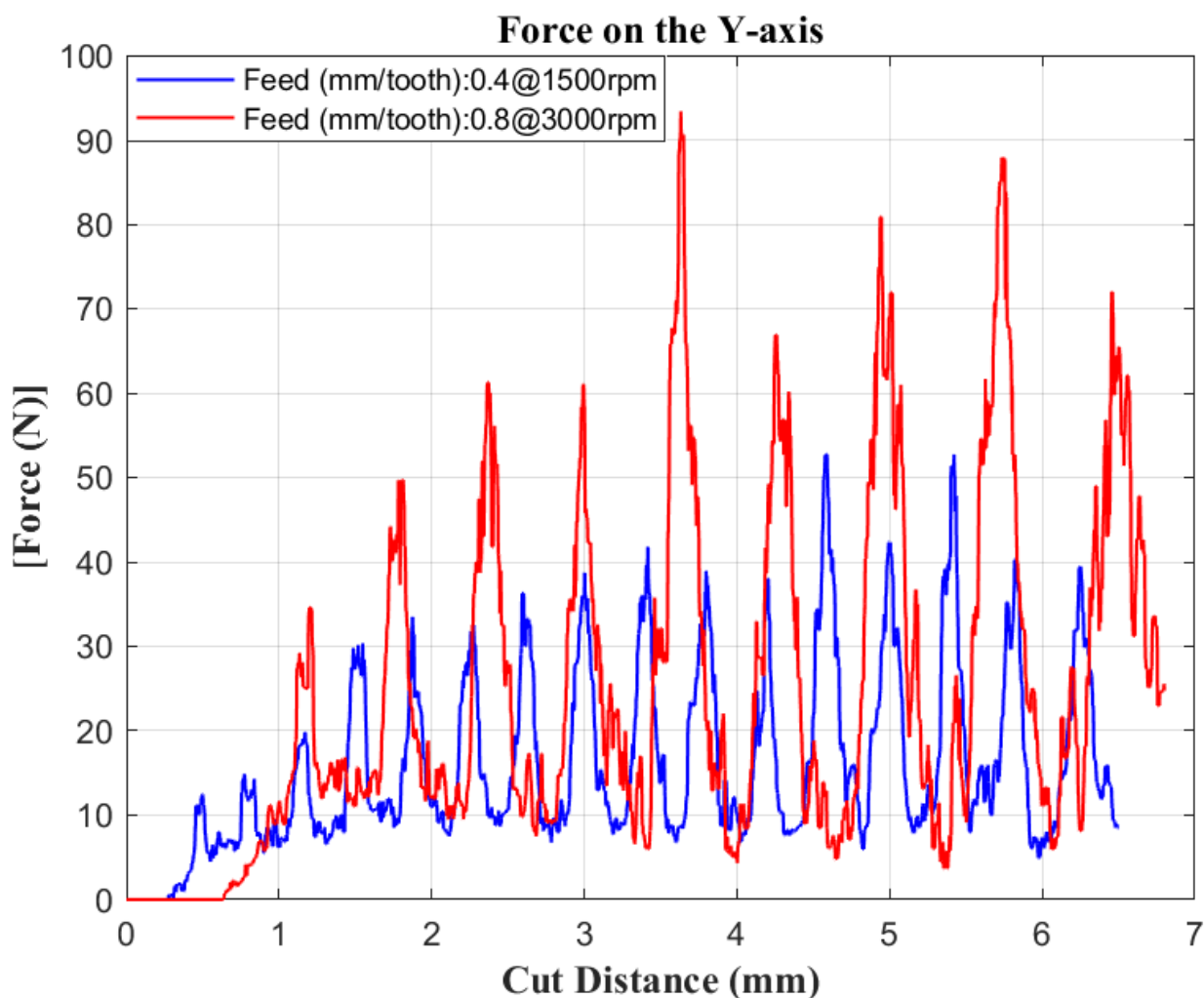
Εστιάζοντας αρχικά στα διαγράμματα των δυνάμεων, είναι προφανές ότι οι κυματοειδείς μορφές που παρατηρούνται, οι διάφορες «καμπάνες», είναι τα σημεία που συμβολίζουν το χρόνο στον οποίο η κάθε κοπτική ακμή εισάγεται στο τεμάχιο, ξεκινά να δημιουργεί ένα απόβλιττο, το απόβλιττο αυτό μεγαλώνει σε μέγεθος λόγω της προόδου της κοπής, και τελικά εξέρχεται, ώστε η δύναμη να επανέρχεται σε μια τοπικά ελάχιστη τιμή, έως ότου εισαχθεί η επόμενη ακμή στο τεμάχιο και το φαινόμενο να επαναλαμβάνεται. Οι δυο προσομοιώσεις κοπής πραγματοποιήθηκαν για περίπου την ίδια απόσταση κοπής (Cutting Distance), ενώ τερματίστηκαν προσεγγιστικά στο σημείο στο οποίο το ακτινικό βάθος κοπής αγγίζει το μέγιστο (5mm), το οποίο προκύπτει και από την γεωμετρική διάταξη των δυο συστημάτων. Το συγκεκριμένο σημείο αποτελεί, επιπροσθέτως, το σημείο στο οποίο το μέγεθος του αποβλίττου αρχίζει και σταθεροποιείται, και έτσι η κοπή προσεγγίζει την σταθερή κατάσταση (Steady State). Με άλλα λόγια, παρατηρείται η προσέγγιση των ταλαντώσεων των γραφημάτων προς ένα άνω όριο τιμής, προς το τέλος των προσομοιώσεων.



Εικόνα 10.1: Δύναμη κοπής F_x ανά mm κοπής

Η κατάσταση η οποία δημιουργείται χάρη στον διπλασιασμό της πρόωσης και της ταχύτητας περιστροφής έχει επίδραση και στην δημιουργία των αποβλίτων. Μετρώντας τις περιόδους στα γραφήματα που προηγήθηκαν, καταλήγει κανείς ότι η διπλάσια ταχύτητα δημιουργεί τα μισά απόβλιττα, τα οποία, δεδομένου ότι τελικά καταλήγει στο ίδιο μήκος κοπής, θα είναι μεγαλύτερου μεγέθους έχοντας υποστεί μεγαλύτερη παραμόρφωση, όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο διάγραμμα παραμόρφωσης (9.22). Με στόχο την καλύτερη αντιστοίχιση των μεγεθών στις δυο προσομοιώσεις, μέσω του MATLAB τα διαγράμματα ανήχθησαν ως προς την απόσταση κοπής, η οποία ήταν προσεγγιστικά η ίδια. Στις εικόνες αυτού του κεφαλαίου αναπαρίστανται αυτά τα διαγράμματα μεταξύ της εκάστοτε μεταβλητής στον άξονα της απόστασης κοπής.

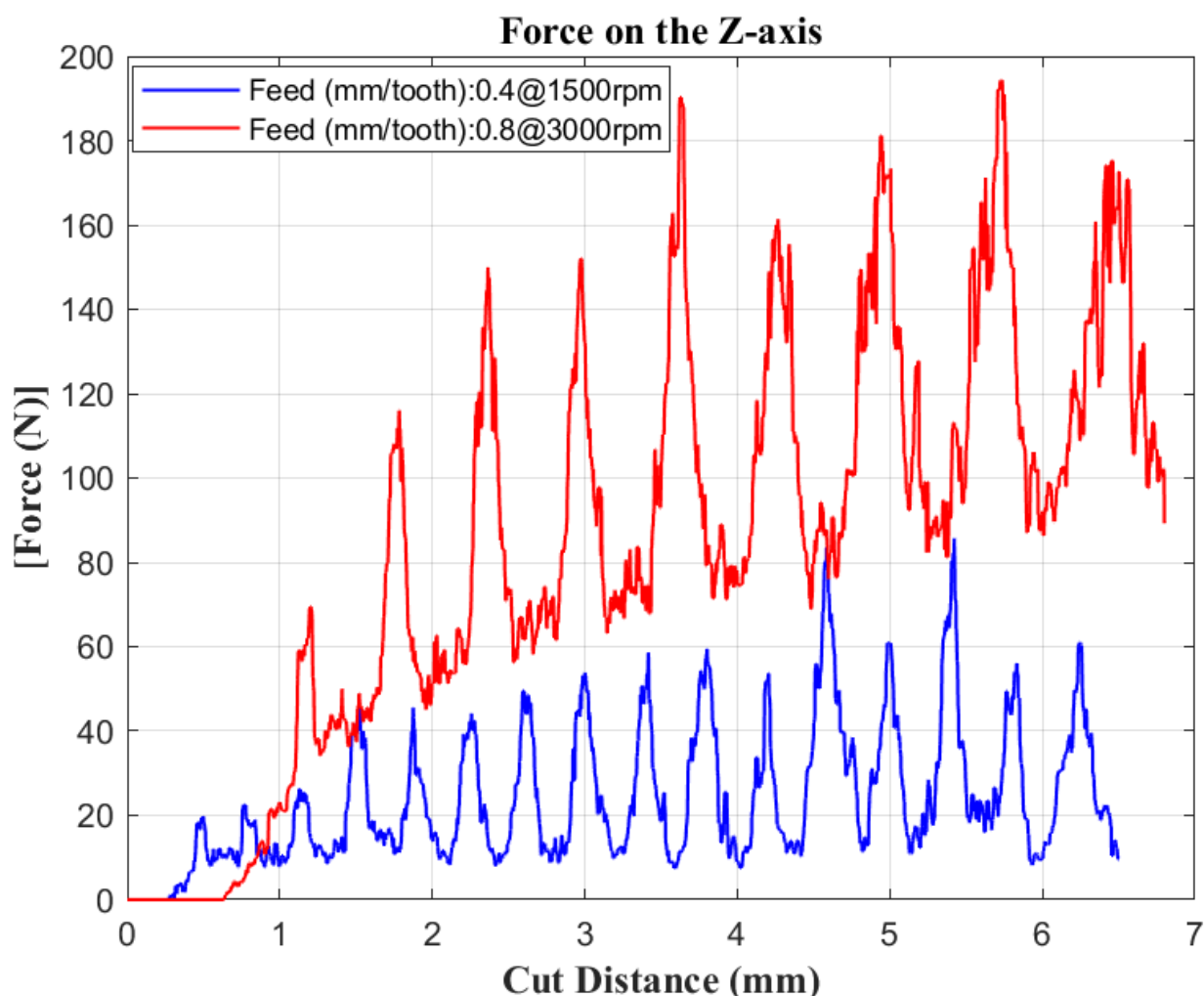
Η δύναμη F_x (κύρια δύναμη κοπής) είναι η δύναμη της κατεύθυνσης της πρόωσης (Εικόνα 10.1). Είναι αναμενόμενο ότι το μέτρο της θα είναι αρκετά μεγαλύτερο από τις άλλες δυο δυνάμεις. Η δύναμη F_y απεικονίζεται στην εικόνα 10.2. Σε αντίθεση με την F_x , στην οποία ο διπλασιασμός των συνθηκών επιφέρει σε μεγάλο βαθμό διπλάσιες δυνάμεις, για την F_y αυτό δεν ισχύει. Παρατηρείται ο διπλασιασμός στα μέγιστα κάθε περιόδου, κάτι το οποίο μπορεί να ερμηνευθεί ως ύπαρξη μεγαλύτερου μεγέθους αποβλίτου. Γενικά παρατηρείται ότι η δύναμη F_y είναι



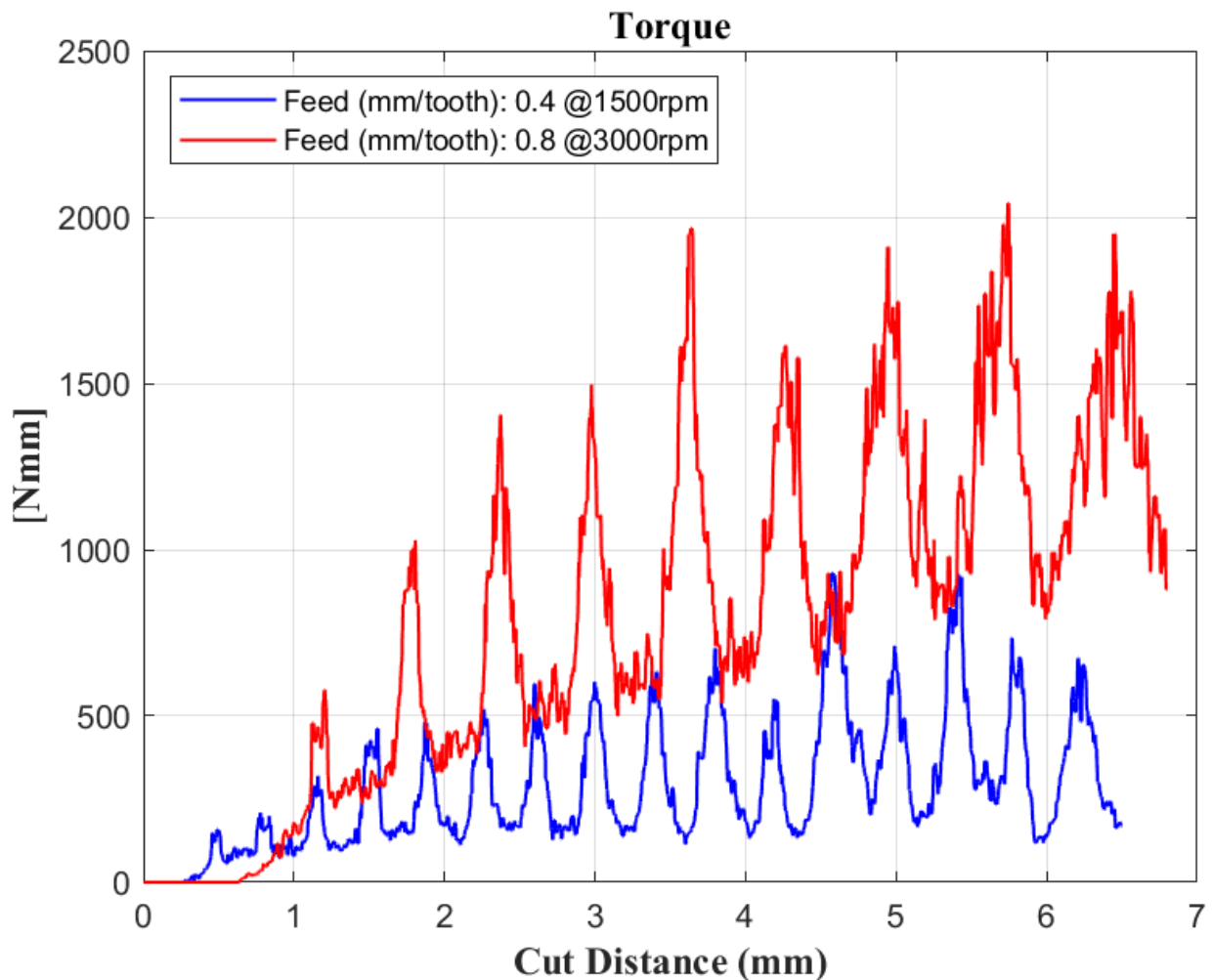
Εικόνα 10.2: Δύναμη κοπής F_y ανά mm κοπής

αρκετά μικρότερη από την F_x , το οποίο συνεπάγεται ότι η κατεύθυνση της συνισταμένης δύναμης κοπής F επηρεάζεται κυρίως από την συνιστώσα στον άξονα x , και, όπως παρουσιάζεται παρακάτω, και από την συνιστώσα στον άξονα z .

Η εικόνα 10.3 αφορά την δύναμη κοπής κατά τον άξονα z . Και εδώ παρατηρείται μια συμπεριφορά παρόμοια με τον άξονα x . Βέβαια, η δύναμη στον άξονα z , ο οποίος είναι ο κάθετος άξονας που ταυτίζεται και με τον άξονα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου, φαίνεται λίγο ασύνηθες ή εσφαλμένο να εμφανίζει συγκρινόμενες τιμές με την F_x . Για να ερμηνευθεί σωστά το συγκεκριμένο φαινόμενο, αρκεί να παρατηρήσει κανείς την κλίση των επιφανειών αποβλίπτου του κοπτικού εργαλείου. Ήδη από την *helical curve* η οποία χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργηθούν οι κοπτικές κεφαλές και οι αυλακώσεις στο εργαλείο, προδίδεται μια γωνία που, ανάλογα και το αξονικό και ακτινικό βάθος κοπής, πλησιάζει τις 45° γωνία (Παράγραφος 8.2, Εικόνες 8.5 & 8.7). Έτσι, ένα μεγάλο ποσοστό της καταπόνησης την οποία υπομένει το εργαλείο «διοχετεύεται» στον κάθετο άξονα του εργαλείου. Αυτό, αφενός μπορεί να έχει θετική επίδραση, υπό τις κατάλληλες συνθήκες, στην τελική επιφάνεια του αντικειμένου. Αφετέρου όμως, ελλοχεύει κινδύνους θραύσης του κοπτικού εργαλείου, λόγω των εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων που σε αυτό αναπτύσσονται. Επίσης, σε μαλακά υλικά όπως είναι το αλουμίνιο, αρκετές φορές επιχειρούνται πιο «επιθετικές» γωνίες αποβλίπτου, οι οποίες

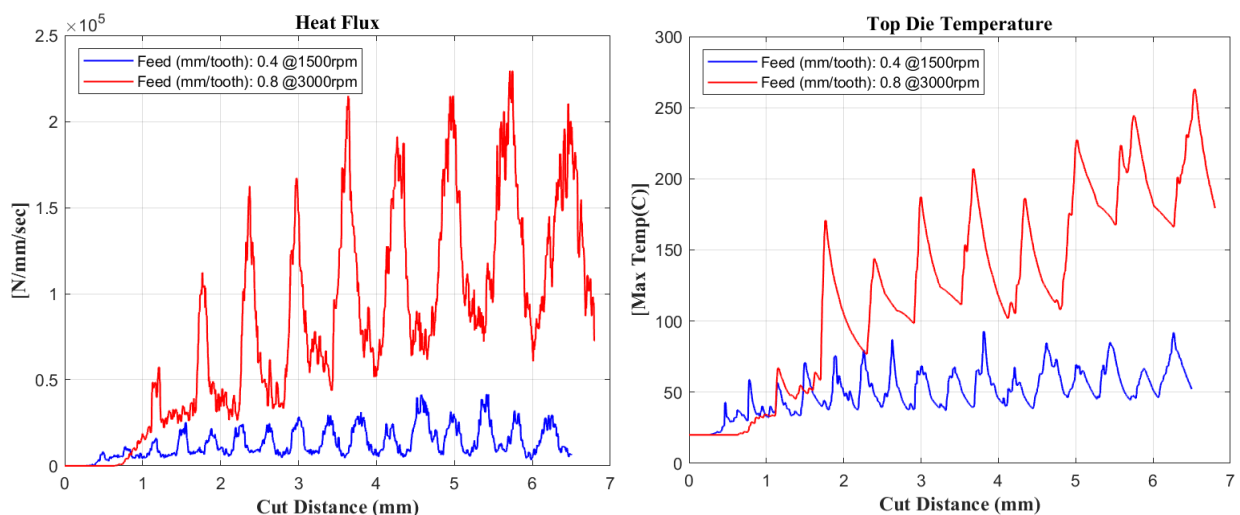


Εικόνα 10.3: Δύναμη κοπής F_z ανά mm κοπής



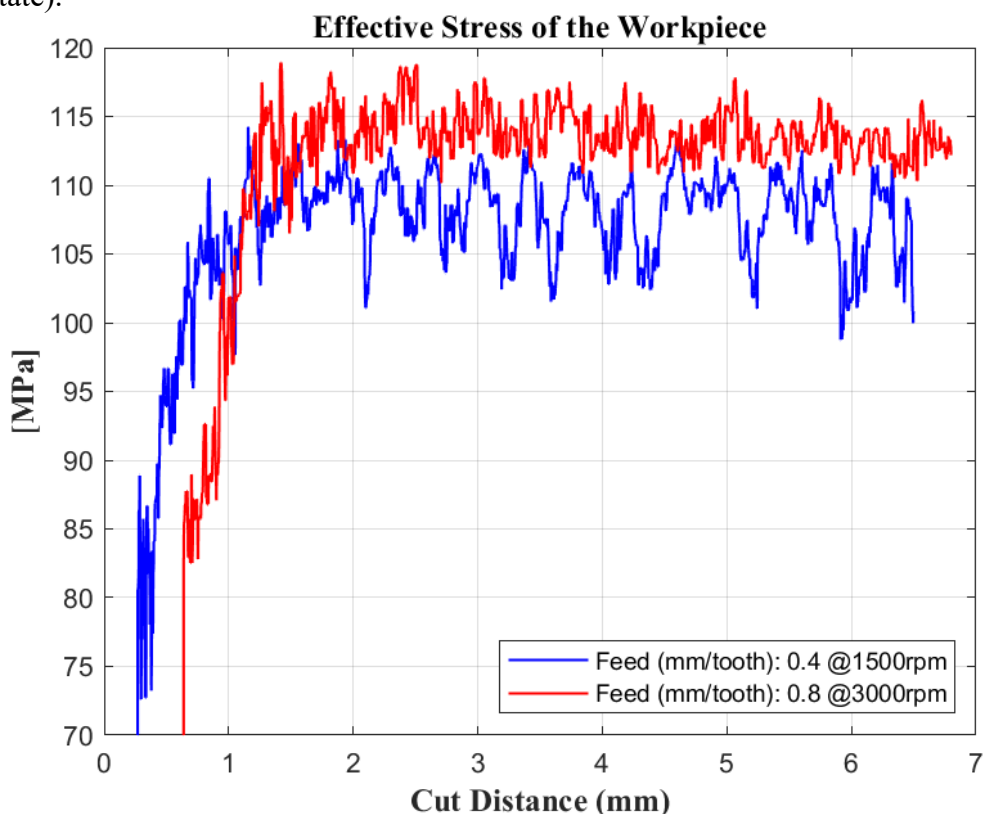
Εικόνα 10.4: Ασκούμενη ροπή στο κοπτικό εργαλείο κατά την κοπή ανά mm κοπής πλησιάζουν περισσότερο το όριο της κάθετης γωνίας, με στόχο βέβαια την εύκολη απομάκρυνση του αποβλίττου των τόσο όλκιμων υλικών και την αποφυγή προσκόλλησης.

Η ροπή που ασκείται στο κοπτικό εργαλείο είναι το αποτέλεσμα του γινομένου της συνισταμένης δύναμης κοπής F και της ακτίνας του κοπτικού εργαλείου (Εικόνα 10.4). Όπως και στα διαγράμματα των δυνάμεων, έτσι και εδώ παρατηρείται παρόμοια περιοδικότητα, που



Εικόνα 10.5: Ροή θερμότητας και κατανομή θερμοκρασίας στο κοπτικό εργαλείο ανά mm κοπής

παραπέμπει στο σχηματισμό των αποβλίττων, ενώ η κατάσταση σταθεροποιείται προς το τέλος (steady state).

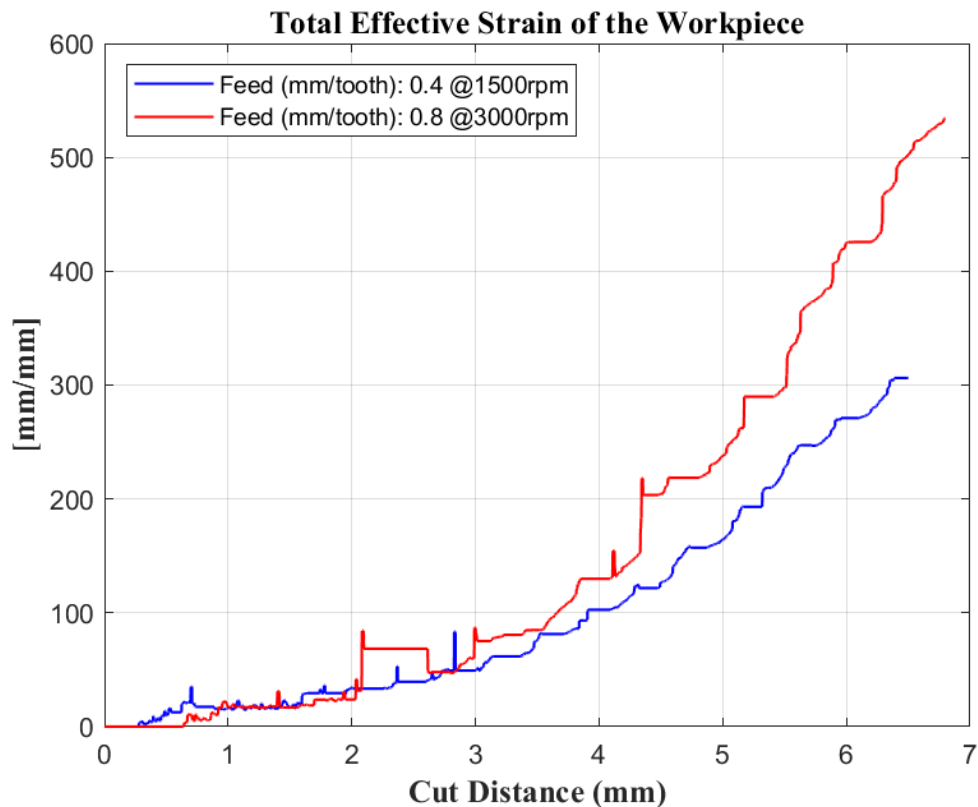


Εικόνα 10.6: Εφαρμοζόμενη τάση στο τεμάχιο ανά mm κοπής

Η ροή θερμότητας προς το κοπτικό εργαλείο, και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε αυτό ακολουθούν στα διαγράμματα της εικόνας 10.5. Φυσικά, το ένα επαληθεύει το άλλο, καθώς, μεγαλύτερη θερμική ροή συνεπάγεται και μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Η κατανομή των θερμοκρασιών στο κοπτικό εργαλείο παρουσιάζονται ενδεικτικά στις εικόνες 6.1 & 6.2. Και εδώ φαίνεται, μετά την αρχική ραγδαία ανάπτυξη των δυο μεγεθών, η σταθεροποίηση του σε ένα σταθερό εύρος τιμών.

Όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, η τάση δεν έχει μεγάλες αποκλίσεις στις δυο περιπτώσεις. Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 10.6, ανά χιλιοστό κοπής κατεργασίας. Ένα ασφαλές συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί βέβαια είναι το γεγονός ότι η τάση φτάνει την σταθεροποιημένη τιμή της πιο απότομα σε μεγαλύτερες ταχύτητες, παρουσιάζει αυξημένες τιμές της τάξεως του 10%, και οι τιμές της παρουσιάζουν μικρότερο πλάτος ταλάντωσης.

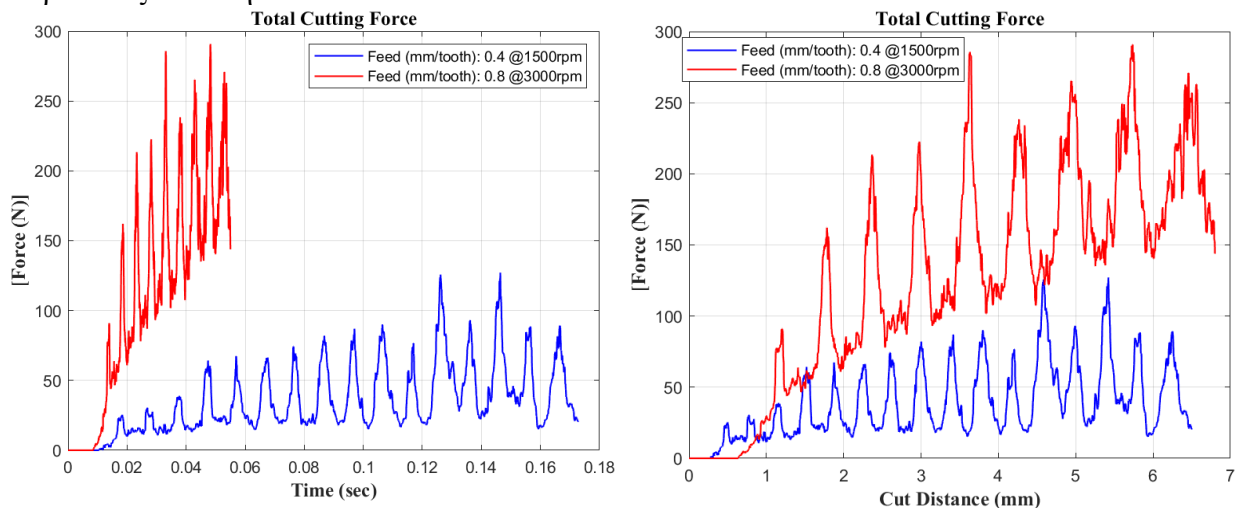
Σχετικά με το διάγραμμα της συνολικής παραμόρφωσης του τεμαχίου (Εικόνα 10.7), το πόρισμα που αναφέρθηκε στα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται και στην ανάπτυξη των τιμών ως προς το μήκος κοπής. Έχοντας παρατηρήσει και όλες τις προηγούμενες παραμέτρους, είναι σαφές ότι ο διπλασιασμός της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής οδηγούν σε διπλασιασμό της παραμόρφωσης του τεμαχίου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα. Βέβαια, η θερμοκρασία στην οποία κάθε στιγμή λαμβάνει χώρα η κοπή, επηρεάζει και το ρυθμό αυτής της παραμόρφωσης. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι η κλίση των εξισώσεων αυξάνεται με την πρόοδο της κοπής, όπως



Εικόνα 10.7: Συνολική εφαρμοζόμενη παραμόρφωση ανά mm κοπής

δηλαδή και η θερμοκρασία. Φτάνοντας στη σταθερή κατάσταση (steady state) της κοπής, αυτός ο ρυθμός μεταβολής φαίνεται να σταθεροποιείται, όπως και το μέγεθος τελικά των αποβλίτων της κοπής. Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται το συγκεκριμένο μέγεθος και στο DEFORM 2D/3D, άλλωστε, είναι αθροίζοντας σε κάθε βήμα το μέγιστο παραμορφωμένο σε σχέση με το προηγούμενο μέγεθος στοιχείο. Για αυτόν τον λόγο, σε κάποια σημεία στα αρχικά στάδια της κοπής, παρατηρείται ακόμα και μείωση της παραμόρφωσης, η οποία ερμηνεύεται ως συμπίεση υπό τις υψηλές τάσεις ενός στοιχείου κατά την εισχώρηση της κοπτικής ακμής.

Τελικά, προσθέτοντας διανυσματικά τις δυνάμεις κοπής F_x , F_y , F_z προκύπτει το διάγραμμα της συνολικής δύναμης F της κοπής. Αυτό, ανά δευτερόλεπτο κοπής και ανά mm κοπής παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.8.



Εικόνα 10.8: Συνολική δύναμη κοπής ανά sec και ανά mm

11. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η διπλωματική αυτή εργασία πραγματοποιήθηκε τη συμπεριφορά των διαφόρων παραμέτρων, δυνάμεων, θερμοκρασιών και παραμορφώσεων μετωπικού φρεζαρίσματος σε προσομοίωση κοπής αλουμινίου 7075. Προτάσεις που προτείνονται, βασιζόμενες στην δουλειά που έγινε είναι:

- Διερεύνηση επίδρασης γωνίας αποβλίττου στη φθορά της κοπτικής ακμής
- Πειραματική επαλήθευση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης μετωπικού φρεζαρίσματος με κοπή σε CNC φρέζα
- Προσομοίωση περισσότερων περιπτώσεων πρόωσης και περιστροφικής ταχύτητας για να εξαχθεί μια πειραματική σχέση με την φθορά του κοπτικού εργαλείου
- Επίδραση του πλέγματος και του μεγέθους των στοιχείων στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης κοπής αλουμινίου 7075 με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων
- Μελέτη επίδρασης της πρόωσης της κοπής στην ποιότητα της τελικής επιφάνειας

12. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παράγραφος 4.3.1

ASTM B209: Δίσκοι και Φύλλα Αλουμινίου και κραμάτων αλουμινίου.
ASTM B210: Έλαση σωλήνα χωρίς ραφή.
ASTM B211: Μπάρα, Ράβδος και Σύρμα ψυχρής έλασης.
ASTM B221: Εκτυλισσόμενη Μπάρα, Ράβδος, Σύρμα, Σωλήνας, Προφίλ.
AMS-QQ-A-225/9: Μπάρα, Δοκός, Σύρμα και Ειδικά Σχήματα Αλουμινίου 7075. Μορφοποιήσεις: Θερμή και Ψυχρή Έλαση
AMS-QQ-A-200/11: Εκτυλισσόμενη Μπάρα, Ράβδος, Σχήματα, Σωλήνας, Καλώδιο αλουμινίου 7075
AMS-QQ-A-250/12: Δίσκοι και Φύλλα Αλουμινίου 7075
AMS-WW-T-700/7: Έλαση σωλήνα χωρίς ραφή.

Εικόνα 12.1: Διαφορετικές ονομασίες – Τυποποιήσεις του κράματος 7075

Παράγραφος 4.3.2

$10^{-6} \cdot K^{-1} = 10^{-6}/K = 1 \mu m/m \cdot ^\circ C$	$1 \Omega \cdot mm^2/m = 1 \mu\Omega \cdot m$
$1 g/cm^3 = 1 kg/dm^3 = 1000 kg/m^3$	$1 GPa = 1 kN/mm^2$
$1 MPa = 1 N/mm^2$	$MS/m = 0.58 \cdot \% IACS$
$1 cal/(g \cdot C) = 1 Btu/(lb \cdot F)$	

Εικόνα 12.2: Ισοδυναμίες Μονάδων

Για τον πίνακα ισχύει ότι: α) το σημείο τήξεως αφορά σφυρήλατα προϊόντα με πάχος 6.35 mm (1/4 in.) ή μεγαλύτερο, και β) η ομογενοποίηση μπορεί να αυξήσει την ευτηκτική θερμοκρασία τήξεως 10 με 20 °C, όμως συνήθως δεν επηρεάζει την ευτηκτική τήξη.

Παράγραφος 4.3.4

Για το όριο διαρροής, ισχύει η 0.2% αντιστάθμιση. Λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς της παραμόρφωσης του αλουμινίου, δεν υπάρχει ακριβές σημείο ορίου διαρροής. Ο αριθμός στους πίνακες συμβολίζει την τάση που αντιστοιχεί στο 0.2% πλαστικής παραμόρφωσης. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικοί πίνακες ιδιοτήτων.

Μηχανικές Ιδιότητες AL7075 – Σωλήνας από Έλαση χωρίς ραφή					Παραμόρφωση σε 2 in. ή 4x Διάμετρος, \geq , %	
Τυποποίηση	Κράμα αλουμινίου - βελτιώσεις	Ειδική Διάμετρος ή Πάχος, in.	Αντοχή Εφελκυσμού, ksi, \geq (ή ό,τι αναφέρεται)	Όριο Διαρροής, ksi, \geq (ή ό,τι αναφέρεται)	Δείγμα Πλήρους Μεγέθους	Δείγμα σε τομή
ASTM B210	7075-O	0.025-0.049	40, \leq	21, \leq	10	8
SAE AMS-WW-T-700/7		0.050-0.500	40, \leq	21, \leq	12	10
	7075-T6, T62	0.025-0.259	77	66	8	7
		0.260-0.500	77	66	9	8

Μηχανικές Ιδιότητες AL7075 – Εκτυλιγμένη Μπάρα, ράβδος, καλώδιο, προφίλ και σωλήνας						
Τυποποίηση	Χρώμα αλουμινίου – βελτιώσεις	Ειδική Διάμετρος ή Πάχος, in.	Εμβαδόν, in ²	Αντοχή Εφελκυσμού, ksi, ≥ (ή ό,τι αναφέρεται)	Όριο Διαρροής, ksi, ≥ (ή ό,τι αναφέρεται)	Παραμόρφωση σε 2 in. ή 4x Διάμετρος, ≥, %
ASTM B221	7075-O	όλα	όλα	40, ≤	24, ≤	10
SAE AMS-QQ-A-200/11	AA 7075-T6, T62, T6510, T6511	≤ 0.249	όλα	78	70	7
		0.250-0.499	όλα	81	73	7
		0.500-1.499	όλα	81	72	7
		1.500-2.999	όλα	81	72	7
		3.000-4.499	≤ 20	81	71	7
			>20, ≤32	78	70	6
		4.500-5.000	≤32	78	68	6
	AA 7075-T73, T73510, T73511	0.062-0.249	≤ 20	68	58	7
		0.250-1.499	≤ 25	70	61	8
		1.500-2.999	≤ 25	69	59	8
		3.000-4.499	≤ 20	68.0	57.0	7
			>20, ≤32	65.0	55.0	7
	AA-7075-T76, T76510, T76511	≤ 0.049	όλα	73	63	7
		0.050-0.124	όλα	74	64	
		0.125-0.249	≤20	74	64	
		0.250-0.499	≤20	75	65	
		0.500-1.000	≤20	75	65	
		1.001-2.000	≤20	75	65	
		2.001-3.000	≤20	74	64	
		3.001-4.000	≤20	74	63	

Μηχανικές Ιδιότητες AL7075 – Δίσκοι και Φύλλα						
Πρότυπο	Χρώμα αλουμινίου – βελτιώσεις	Ειδικό Πάχος, in.	Αντοχή Εφελκυσμού, ksi, ≥ (ή ό,τι αναφέρεται)	Όριο Διαρροής, ksi, ≥ (ή ό,τι αναφέρεται)	Παραμόρφωση σε 2 in. ή 4x Διάμετρος, ≥, %	Παράγοντας διαμέτρου κάμψης, N
ASTM B209	7075-O	0.015-0.020	40, ≤	21, ≤	10	1
SAE AMS-QQ-A-250/12		0.021-0.062				2
		0.063-0.091				3
		0.092-0.125				4
		0.126-0.249				5
		0.250-0.499				6
		0.500-2.000				–
		7075-T6, T62				0.008-0.011
	0.012-0.020		76.0	67.0	8	7
	0.021-0.039		76.0	67.0	8	8
	0.040-0.062		78.0	68.0	9	8
	0.063-0.091		78.0	68.0	9	9

		0.092-0.125	78.0	68.0	9	10
		0.126-0.187	79.0	69.0	9	11
		0.188-0.249	80.0	69.0	9	11
	7075 T651, T62	0.250-0.499	78.0	67.0	9	14
		0.500-1.000	78.0	68.0	7	–
		1.001-2.000	77.0	67.0	6	–
		2.001-2.500	76.0	64.0	5	–
		2.501-3.000	72.0	61.0	5	–
		3.001-3.500	71.0	58.0	5	–
		3.501-4.000	67.0	54.0	3	–
		Φύλλο 7075 T73	0.040-0.249	67.0	56.0	8
	AA-7075 T7351 Δίσκος	0.250-1.000	69.0	57.0	7	–
		1.001-2.000	69.0	57.0	6	–
		2.001-2.500	66.0	52.0	6	–
		2.501-3.000	64.0	49.0	6	–
		3.001-3.500	63.0	49.0	6	–
		3.501-4.000	61.0	48.0	6	–
	Φύλλο 7075-T76	0.063-0.125	73.0	62.0	8	–
		0.126-0.249	73.0	62.0	8	–
	7075-T7651 Δίσκος	0.250-0.499	72.0	61.0	8	–
		0.500-1.000	71.0	60.0	6	–
		1.001-2.000	71.0	60.0	5	–
	7075 F	0.250-4.000	–	–	–	–
	Alclad 7075-O	0.008-0.014	36.0, ≤	20.0, ≤	9	1
		0.015-0.032	36.0, ≤	20.0, ≤	10	1
		0.033-0.062	36.0, ≤	20.0, ≤	10	2
		0.063-0.125	38, ≤	20.0, ≤	10	3
		0.126-0.187	38, ≤	20.0, ≤	10	4
		0.188-0.249	39, ≤	21.0, ≤	10	4
		0.250-0.499	39, ≤	21.0, ≤	10	6
		0.500-1.000	40, ≤	–	10	–
	Alclad 7075-T6, T62	0.008-0.011	68.0	58.0	5	6
		0.012-0.020	71.0	61.0	8	6
		0.021-0.039	71.0	61.0	8	7
		0.040-0.062	72.0	62.0	9	7
		0.063-0.091	74.0	64.0	9	8
		0.092-0.125	74.0	64.0	9	9
		0.126-0.187	74.0	64.0	9	10
		0.188-0.249	76.0	65.0	9	10
	Alclad 7075-T651, T62	0.250-0.499	75.0	65.0	9	12
		0.500-1.000	78.0	68.0	7	–
		1.001-2.000	77.0	67.0	6	–
		2.001-2.500	76.0	64.0	5	–
		2.501-3.000	72.0	61.0	5	–
		3.001-3.500	71.0	58.0	5	–
	3.501-4.000	67.0	54.0	3	–	
	Φύλλο Alclad 7075 T76	0.040-0.062	67.0	56.0	8	–
		0.063-0.125	68.0	57.0	8	–
		0.126-0.187	68.0	57.0	8	–
		0.188-0.249	70.0	59.0	8	–
	Alclad 7075 T7651 Δίσκος	0.250-0.499	69.0	58.0	8	–
		0.500-1.000	71.0	60.0	6	–
	Alclad 7075 F	0.250-4.000	–	–	–	–
	Alclad 7075-O, 1-Side	0.015-0.032	38.0, ≤	21.0, ≤	10	1
		0.033-0.062	38.0, ≤	21.0, ≤	10	2
		0.063-0.125	39.0, ≤	21.0, ≤	10	3
		0.092-0.125	39.0, ≤	21.0, ≤	10	4

		0.126-0.187	39.0, ≤	21.0, ≤	10	5
		0.188-0.249	39.0, ≤	21.0, ≤	10	5
		0.250-0.499	39.0, ≤	21.0, ≤	10	6
		0.500-1.000	40, ≤	–	10	–
	Alclad 7075-T6, T62, 1-Side	0.008-0.011	71.0	60	5	–
		0.012-0.020	74.0	64	8	–
		0.015-0.032	74.0	64	8	7
		0.033-0.03	74.0	64	8	8
		0.040-0.062	75.0	65	9	8
		0.063-0.091	76.0	66	9	9
		0.092-0.125	76.0	66	9	10
		0.126-0.187	77.0	67	9	11
		0.188-0.249	78	67	9	11
		Alclad 7075- T651, T62, 1- Side	0.250-0.499	76.0	66.0	9
	0.500-1.000		78.0	68.0	7	–
	1.001-2.000		77.0	67.0	6	–
	Alclad 7075 F, 1-Side	0.250-2.000	–	–	–	–

9.1. Πίνακες συνθηκών κοπής

Tool	Carbide (19% Co)	
Tool height (H)	12	mm
Tool diameter (D)	20	mm
Spindle speed (N)	1500	rpm
feed/tooth (fz)	0,4	mm/tooth
Axial depth (az)	10	mm
radial depth (axy)	5	mm
Number of tooth (z)	4	

Workpiece	AL7075-T6	12500	Volume (mm ³)
Workpiece width	25	mm	
Workpiece height	25	mm	
Workpiece length	20	mm	
Cutting length	5	mm	
Feeding velocity (fr)	2400	mm/min	40 mm/sec
cutting speed (V)	94	m/min	
Time for one rev	0,04	sec	
Degrees / steps	1		
Steps / rev	720		
Size ratio	10		
Step increment	6,00E-05	sec/step	
Number of Steps	2292		
Stop (Primary Die displacement-mm)	7		
Minimum element size	0,05		
Maximum element size	0,5		

produced chips **13**

Εικόνα 12.3: Πρόβλημα πρώτο (PROBLEM_3_1)

Tool	Carbide (19% Co)		
Tool height (H)	12	mm	
Tool diameter (D)	20	mm	
Spindle speed (N)	3000	rpm	50,0 rps
feed/tooth (fz)	0,8	mm/tooth	
Axial depth (az)	10	mm	
radial depth (axy)	5	mm	
Number of tooth (z)	4		

Workpiece	AL7075-T6		12500	Volume (mm ³)
Workpiece width	25	mm		
Workpiece height	25	mm		
Workpiece length	20	mm		
Cutting length	5	mm		
Feeding velocity (fr)	9600	mm/min	160	mm/sec
cutting speed (V)	188	m/min		
Time for one rev	0,02	sec		
Degrees / steps	1			
Steps / rev	720			
Size ratio	10			
Step increment	3,00E-05	sec/step		
Number of Steps	1146			
Stop (Primary Die displacement-mm)	7			
Minimum element size	0,1			
Maximum element size	1			

produced chips **6**

Εικόνα 12.4: Πρόβλημα δεύτερο (PROBLEM_6_1)

Παρακάτω παρατίθεται το Script από το MATLAB που χρησιμοποιήθηκε:

```

1 clear; clc; format long
2 %PROBLEM_3
3 load FX_3_1.txt;
4 load FY_3_1.txt;
5 load FZ_3_1.txt;
6 load TEMP_TOP_DIE_3_1.txt
7 load EFF_STRAIN_TOTAL_3_1_WORKPIECE.txt
8 load EFF_STRESS_3_1_WORKPIECE.txt
9 load HEAT_FLUX_TOP_DIE_3_1.txt
10 load TORQUE_3_1.txt
11 time_3 = FX_3_1(:,1);
12 force_x_3 = FX_3_1(:,2);
13 force_y_3 = FY_3_1(:,2);
14 force_z_3 = FZ_3_1(:,2);
15 temp_top_die_max_3 = TEMP_TOP_DIE_3_1(:,3);
16 eff_strain_tot_3 = EFF_STRAIN_TOTAL_3_1_WORKPIECE(:,3);
17 eff_stress_3_w = EFF_STRESS_3_1_WORKPIECE(:,3);
18 heat_flux_3 = HEAT_FLUX_TOP_DIE_3_1(:,2);
19 torq_3 = TORQUE_3_1(:,2);
20 %PROBLEM_6
21 load FX_6_1.txt;
22 load FY_6_1.txt;
23 load FZ_6_1.txt;
24 load TEMP_TOP_DIE_6_1.txt
25 load EFF_STRAIN_TOTAL_6_1_WORKPIECE.txt
26 load EFF_STRESS_6_1_WORKPIECE.txt
27 load HEAT_FLUX_TOP_DIE_6_1.txt
28 load TORQUE_6_1.txt
29 time_6 = FX_6_1(:,1);
30 force_x_6 = FX_6_1(:,2);
31 force_y_6 = FY_6_1(:,2);
32 force_z_6 = FZ_6_1(:,2);
33 temp_top_die_max_6 = TEMP_TOP_DIE_6_1(:,3);
34 eff_strain_tot_6 = EFF_STRAIN_TOTAL_6_1_WORKPIECE(:,3);
35 eff_stress_6_w = EFF_STRESS_6_1_WORKPIECE(:,3);
36 heat_flux_6 = HEAT_FLUX_TOP_DIE_6_1(:,2);
37 torq_6 = TORQUE_6_1(:,2);
38 %CLEANER PROBLEM 3
39 med_filt_fx_3 = medfilt1(force_x_3,15);
40 med_filt_fy_3 = medfilt1(force_y_3,15);
41 med_filt_fz_3 = medfilt1(force_z_3,15);
42 med_filt_temp_top_die_3 = medfilt1(temp_top_die_max_3,11);
43 med_filt_eff_strain_tot_3 = medfilt1(eff_strain_tot_3,9);
44 med_filt_eff_stress_3_w = medfilt1(eff_stress_3_w,11);
45 med_filt_heat_flux_3 = medfilt1(heat_flux_3,11);
46 med_filt_torq_3 = medfilt1(torq_3,11);
47 %CLEANER PROBLEM 6
48 med_filt_fx_6 = medfilt1(force_x_6,15);
49 med_filt_fy_6 = medfilt1(force_y_6,15);
50 med_filt_fz_6 = medfilt1(force_z_6,15);
51 med_filt_temp_top_die_6 = medfilt1(temp_top_die_max_6,11);
52 med_filt_eff_strain_tot_6 = medfilt1(eff_strain_tot_6,9);
53 med_filt_eff_stress_6_w = medfilt1(eff_stress_6_w,11);
54 med_filt_heat_flux_6 = medfilt1(heat_flux_6,11);
55 med_filt_torq_6 = medfilt1(torq_6,11);
56 %PLOTS
57 figure(1),plot(time_3,med_filt_fx_3,'b',time_6,med_filt_fx_6,'r','LineWidth',1),...
58 grid on...
59 ,title('Force on the X-axis','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
60 ,ylabel('[Force (N)]','rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
61 ,xlabel('Time (sec)','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
62 ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm')
63 figure(2),plot(time_3,med_filt_fy_3,'b',time_6,med_filt_fy_6,'r','LineWidth',1),...
64 grid on...
65 ,title('Force on the Y-axis','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
66 ,ylabel('[Force (N)]','rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
67 ,xlabel('Time (sec)','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
68 ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm')
69 figure(3),plot(time_3,med_filt_fz_3,'b',time_6,med_filt_fz_6,'r','LineWidth',1),...
70 grid on...
71 ,title('Force on the Z-axis','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
72 ,ylabel('[Force (N)]','rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
73 ,xlabel('Time (sec)','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
74 ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm')

```

```

75 figure(4),plot(time_3,med_filt_temp_top_die_3,'b',time_6,med_filt_temp_top_die_6,'r','LineWidth',1),...
76 grid on...
77 ,title('Top Die Temperature','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
78 ,ylabel('Max Temp(C)'),'rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
79 ,xlabel('Time (sec)'),'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
80 ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm')
81 figure(5),plot(time_3,med_filt_eff_strain_tot_3,'b',time_6,med_filt_eff_strain_tot_6,'r','LineWidth',1),...
82 grid on...
83 ,title('Total Effective Strain of the Workpiece','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
84 ,ylabel('mm/mm'),'rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
85 ,xlabel('Time (sec)'),'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
86 ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm')
87 figure(6),plot(time_3,med_filt_eff_stress_3_w,'b',time_6,med_filt_eff_stress_6_w,'r','LineWidth',1),...
88 grid on...
89 ,title('Effective Stress of the Workpiece','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
90 ,ylabel('MPa'),'rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
91 ,xlabel('Time (sec)'),'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
92 ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm','location','southeast')
93 figure(7),plot(time_3,med_filt_heat_flux_3,'b',time_6,med_filt_heat_flux_6,'r','LineWidth',1),...
94 grid on...
95 ,title('Heat Flux','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
96 ,ylabel('N/mm/sec'),'rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
97 ,xlabel('Time (sec)'),'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
98 ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm')
99 figure(8),plot(time_3,med_filt_torq_3,'b',time_6,med_filt_torq_6,'r','LineWidth',1),...
100 grid on...
101 ,title('Torque','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
102 ,ylabel('Nmm'),'rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
103 ,xlabel('Time (sec)'),'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
104 ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm')
105 %Αποτελέσματα ανά mm κοπής
106 cut_distance_3 = linspace(0,6.5,4174);
107 cut_distance_6 = linspace(0,6.8,3058);
108 filt_cut_fx_3 = med_filt_fx_3(1:4174);
109 filt_cut_fy_3 = med_filt_fy_3(1:4174);
110 filt_cut_fz_3 = med_filt_fz_3(1:4174);
111 filt_cut_temp_top_die_3 = med_filt_temp_top_die_3(1:4174);
112 filt_cut_eff_strain_tot_3 = med_filt_eff_strain_tot_3(1:4174);
113 filt_cut_eff_stress_3_w = med_filt_eff_stress_3_w(1:4174);
114 filt_cut_heat_flux_3 = med_filt_heat_flux_3(1:4174);
115 filt_cut_torq_3 = med_filt_torq_3(1:4174);
116 filt_cut_fx_6 = med_filt_fx_6(1:3058);
117 filt_cut_fy_6 = med_filt_fy_6(1:3058);
118 filt_cut_fz_6 = med_filt_fz_6(1:3058);
119 filt_cut_temp_top_die_6 = med_filt_temp_top_die_6(1:3058);
120 filt_cut_eff_strain_tot_6 = med_filt_eff_strain_tot_6(1:3058);
121 filt_cut_eff_stress_6_w = med_filt_eff_stress_6_w(1:3058);
122 filt_cut_heat_flux_6 = med_filt_heat_flux_6(1:3058);
123 filt_cut_torq_6 = med_filt_torq_6(1:3058);
124 figure(101),plot(cut_distance_3,filt_cut_fx_3,'b',cut_distance_6,filt_cut_fx_6,'r','LineWidth',1),...
125 grid on...
126 ,title('Force on the X-axis','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
127 ,ylabel('Force (N)'),'rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
128 ,xlabel('Cut Distance (mm)'),'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
129 ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm','Location','northwest')
130 figure(102),plot(cut_distance_3,filt_cut_fy_3,'b',cut_distance_6,filt_cut_fy_6,'r','LineWidth',1),...
131 grid on...
132 ,title('Force on the Y-axis','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
133 ,ylabel('Force (N)'),'rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
134 ,xlabel('Cut Distance (mm)'),'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
135 ,legend('Feed (mm/tooth):0.4@1500rpm','Feed (mm/tooth):0.8@3000rpm','Location','northwest')
136 figure(103),plot(cut_distance_3,filt_cut_fz_3,'b',cut_distance_6,filt_cut_fz_6,'r','LineWidth',1),...
137 grid on...
138 ,title('Force on the Z-axis','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
139 ,ylabel('Force (N)'),'rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
140 ,xlabel('Cut Distance (mm)'),'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
141 ,legend('Feed (mm/tooth):0.4@1500rpm','Feed (mm/tooth):0.8@3000rpm','Location','northwest')
142 figure(104),plot(cut_distance_3,filt_cut_temp_top_die_3,'b',cut_distance_6,filt_cut_temp_top_die_6,'r','LineWidth',1),...
143 grid on...
144 ,title('Top Die Temperature','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
145 ,ylabel('Max Temp(C)'),'rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
146 ,xlabel('Cut Distance (mm)'),'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
147 ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm','Location','northwest')
148 figure(105),plot(cut_distance_3,filt_cut_eff_strain_tot_3,'b',cut_distance_6,filt_cut_eff_strain_tot_6,'r','LineWidth',1),...
149 grid on...
150 ,title('Total Effective Strain of the Workpiece','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
151 ,ylabel('mm/mm'),'rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
152 ,xlabel('Cut Distance (mm)'),'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
153 ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm','Location','northwest')
154 figure(106),plot(cut_distance_3,filt_cut_eff_stress_3_w,'b',cut_distance_6,filt_cut_eff_stress_6_w,'r','LineWidth',1),...
155 grid on...
156 ,title('Effective Stress of the Workpiece','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
157 ,ylabel('MPa'),'rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
158 ,xlabel('Cut Distance (mm)'),'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
159 ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm','Location','southeast'),
160 ylim([70 120])

```



```

161 figure(107),plot(cut_distance_3,filt_cut_heat_flux_3,'b',cut_distance_6,filt_cut_heat_flux_6,'r','LineWidth',1),...
162     grid on...
163     ,title('Heat Flux','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
164     ,ylabel(['N/mm/sec'],'rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
165     ,xlabel('Cut Distance (mm)','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
166     ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm','Location','northwest')
167 figure(108),plot(cut_distance_3,filt_cut_torq_3,'b',cut_distance_6,filt_cut_torq_6,'r','LineWidth',1),...
168     grid on...
169     ,title('Torque','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
170     ,ylabel(['Nmm'],'rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
171     ,xlabel('Cut Distance (mm)','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
172     ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm','Location','northwest')
173 Ftot_3 = ((filt_cut_fx_3.^2 + filt_cut_fy_3.^2 + filt_cut_fz_3.^2).^(1/2));
174 Ftot_6 = ((filt_cut_fx_6.^2 + filt_cut_fy_6.^2 + filt_cut_fz_6.^2).^(1/2));
175 cut_time_3 = time_3(1:4174);
176 cut_time_6 = time_6(1:3058);
177 figure(9),plot(cut_time_3,Ftot_3,'b',cut_time_6,Ftot_6,'r','LineWidth',1),...
178     grid on...
179     ,title('Total Cutting Force','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
180     ,ylabel(['Force (N)'],'rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
181     ,xlabel('Time (sec)','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
182     ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm')
183 figure(109),plot(cut_distance_3,Ftot_3,'b',cut_distance_6,Ftot_6,'r','LineWidth',1),...
184     grid on...
185     ,title('Total Cutting Force','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
186     ,ylabel(['Force (N)'],'rotation',90,'fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
187     ,xlabel('Cut Distance (mm)','fontsize',12,'fontweight','bold','fontname','times new roman')...
188     ,legend('Feed (mm/tooth): 0.4 @1500rpm','Feed (mm/tooth): 0.8 @3000rpm','Location','northwest')

```

13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Αντωνιάδης, Α.Θ. (2017) Μηχανουργική Τεχνολογία, 3^η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα
- [2] Μαλιώτης, Γ. (2008) Διαμόρφωση τεμαχίων με εργαλειομηχανές CNC, Διαθέσιμο από: <https://www.metadosi-ischios.gr/diamorfosi-temachion-me-ergaleiomichanes-cnc/> (Accessed 16 November 2023)
- [3] Γεράρδης, Σ.(2023) Κατεργασίες Αφαίρεσης Υλικού, Σημειώσεις Μαθήματος
- [4] Αστράς, Κ. (2017) Θεωρητική FEM – υποστηριζόμενη διερεύνηση της επίδρασης του πάχους αποβλίττου και της ταχύτητας κοπής με διάφορες κινηματικές κατά το φρεζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων στην θερμομηχανική καταπόνηση των κοπτικών εργαλείων, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- [5] Κοτσάνης, Τ. (2018) Αύξηση της απόδοσης κοπής επικαλυμμένων κοπτικών εργαλείων μέσω βελτιστοποίησης των τεχνολογικών χαρακτηριστικών τους, με τη χρήση πειραματικών διαδικασιών και αναλυτικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- [6] Καστρίτσης Χ.(2012) Πειραματική και αριθμητική ανάλυση μετωπικού φρεζαρίσματος κραμάτων τιτανίου, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [7] Νικολάου Λίλη, Ε. (2010) Προσδιορισμός συμπεριφοράς PVD επικαλύψεων επί κοπτικών εργαλείων σε επαναλαμβανόμενη κρούση με διάφορα φορτία και θερμοκρασίες, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- [8] Μουζουλάς, Κ. (2012) Μηχανικές κατεργασίες κράματος αλουμινίου 7075, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [9] ASM Aerospace Specification Metals Inc., Aluminum 7075-T6; 7075-T651 [online]. Διαθέσιμο από: <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma7075t6> (Accessed 21 January 2024)
- [10] Shanghai Miandi Metal Group CO., LTD. Τι είναι το κράμα αλουμινίου 7075; Διαθέσιμο από: <https://www.aviationaluminum.com/el/news/what-is-7075-aluminum/> (Accessed 25 November 2023)
- [11] The World Material, 7075 Aluminum Alloy Properties, AA 7075-T6, T7351, T651, Density, Composition, Yield Strength. ; Διαθέσιμο από: <https://www.theworldmaterial.com/al-7075-aluminum-alloy/> (Accessed 10 September 2023)
- [12] Βακόνδιος, Δ. (2015) Προσομοίωση κατεργασίας φρεζαρίσματος σε μικρο-κλίμακα και πειραματική μελέτη του AL7075-T651, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης

- [13] Lee, P., and Altıntaş, Y., 1996, "Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(9), pp. 1059-1072.
- [14] Altıntaş, Y., and Lee, P., 1996, "A general mechanics and dynamics model for helical end mills," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 45(1), pp. 59-64.
- [15] Karpuschewski, B., Binh, N.T., and Beo, J., 2007, "An empirical cutting-force model in high-speed-milling process with spherical cutter," *Vrobné Inzinierstvo Technical University of Kosice*, 3(6), pp. 5-8.
- [16] Lucca, D.A., Seo, Y.W., and Rhorer, R.L., 1994, "Energy dissipation and tool-workpiece contact in ultra-precision machining," *S T L E Tribology Transactions*, 37(3), pp. 651-655.
- [17] Taminiau, D.A., and Dautzenberg, J.H., 1991, "Bluntness of the Tool and Process Forces in High-Precision Cutting," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 40(1), pp. 65-68.
- [18] Bao, W.Y., and Tansel, I.N., 2000, "Modeling micro-end-milling operations. Part I: Analytical cutting force model," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(15), pp. 2155-2173.
- [19] Vogler, M.P., Kapoor, S.G., and DeVor, R.E., 2004, "On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, part II: Cutting force prediction," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 126(4), pp. 695-705.
- [20] Li, C., Lai, X., Li, H., and Ni, J., 2007, "Modeling of three-dimensional cutting forces in micro-end-milling," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17(4), art. no. 001, pp. 671-678.
- [21] Newby, G., Venkatachalam, S., and Liang, S.Y., 2007, "Empirical analysis of cutting force constants in micro-end-milling operations" *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193, pp. 41-47.
- [22] Kang, I.S., Kim, J.S., Kim, J.H., Kang, M.C., and Seo, Y.W., 2007, "A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process," *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188, pp. 250-255.
- [23] Malekian, M., Park, S.S., and Jun, M.B.G., 2009, "Modeling of dynamic micro-milling cutting forces," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(7-8), pp. 586-598.