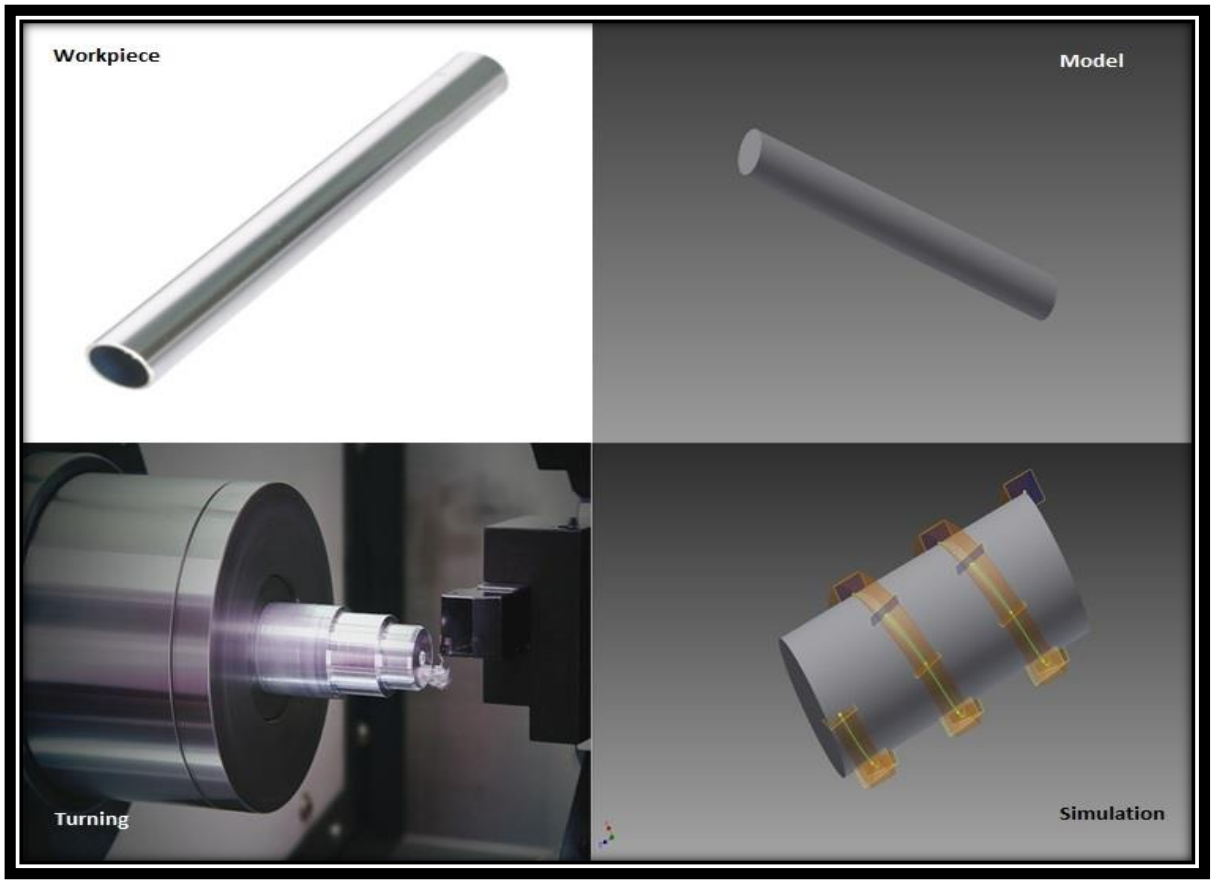
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Κατεργασίες αφαίρεσης υλικού και προσομοιώσεις. Μοντελοποίηση τόρνευσης με API-VB προγραμματισμό σε περιβάλλον CAD.



Φραγκάκης Δημήτρης

Χανιά 2015

Επιβλέπον Καθηγητής
Δρ. Δημητρίου Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 6
Εισαγωγή 6
1.1 Προσομοίωση κατεργασιών 6
1.2 Υπολογιστικές μέθοδοι προσομοίωσης κατεργασιών 8
1.2.1 CAD – Computer Aided Design 8
1.2.2 CAM – Computer Aided Manufacturing 9
1.2.3 FEM - Finite Element Method 11
1.2.4 CAE - Computer Aided Engineering 12
1.2.5 Programming - Προγραμματισμός στα λογισμικά συστήματα 13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 15
Κοπές 15
2.1. Κατεργασίες Αφαίρεσης Υλικού 15
2.1.1 Αρχές της κοπής 17
2.1.2 Εργαλεία και κοπή 27
2.1.3. Υλικά κοπτικών εργαλείων 29
2.1.4 Εργαλειομηχανές και κατεργασίες 37
2.1.4.1 Η Τόρνευση 37
2.1.4.2 Το Φρεζάρισμα 39
2.1.4.3 Η Διάτρηση 41
2.1.4.3 Η Λείανση 45
2.1.4.3 Ο Αριθμητικός έλεγχος (CNC-Computer Numerical Control) 46
2.2. Φθορά Εργαλείων και συνθήκες κοπής 47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 53
Προγραμματισμός & API – Autodesk Inventor® 53
3.1. Visual Basic 53
3.2. API-Application programming interface ή διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών 55
3.3 Autodesk Inventor API 56
3.3.1. Autodesk Inventor 57
3.3.2 Οι κύριες δυνατότητες του Autodesk Inventor 58
3.3.3.Τα βασικά της διεπαφής προγραμματισμού inventor 60
3.3.4.Αντικείμενα 61

3.3.5.Το Object Model 62
3.3.6.Το Application Object 63
3.3.7.Τα Collection Objects 63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 65
4.1. Δημιουργία αρχείων και προετοιμασία προγραμματισμού 65
4.2. Φόρμες εργασίας 69
4.3. Κύριος κώδικας-Modules 75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 91
Συζήτηση-Συμπεράσματα 91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 92
Βιβλιογραφία 92

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Επίκουρο Καθηγητή Βασίλη Δημητρίου, του Τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, για την δυνατότητα που μου έδωσε να πραγματοποιήσω την πτυχιακή μου εργασία. Οι σημαντικές υποδείξεις και συμβουλές του με κατεύθυναν σ' ένα σωστό τρόπο σκέψης του αντικειμένου ασχολίας και μου προσέφεραν σημαντικές γνώσεις για την μετέπειτα ζωή μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με στήριξαν και με "ανέχτηκαν" όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου. Πέραν όμως από την πολύτιμη στήριξη και "ανοχή", μου έδωσαν σημαντικά εφόδια για την περεταίρω σταδιοδρομία μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον Εργαστηριακό Συνεργάτη Θοδωρή Παπαδουλή για τη βοήθεια του και τις συμβουλές του στο μηχανολογικό κομμάτι της εργασίας καθώς και την Εργαστηριακή Βοηθό Ελένη Βαριαντζά για την βοήθειά της στην μορφοποίηση του γραπτού μέρους της εργασίας αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος Τ.Ε., του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν όλα τα χρόνια των σπουδών μου και φυσικά την οικογένεια μου που μου έδωσε την δυνατότητα και την βοήθεια να τα αποκομίσω όλα αυτά.

Χανιά 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή γίνεται μελέτη με προγραμματισμό προηγμένων συστημάτων CAD με Visual Basic σε περιβάλλον API για την προσομοίωση κατεργασιών. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται συνοπτική περιγραφή των κατεργασιών και των προγραμμάτων που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτρονική προσομοίωσή τους. Επίσης, γίνεται αναφορά στους λόγους για τους οποίους είναι αναγκαία η προσομοίωση. Στο δεύτερο, γίνεται εκτενής αναφορά στον προγραμματισμό σε περιβάλλον CAD στα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία της τόρνευσης, στην οποία επικεντρώνεται η παρούσα εργασία, αναλύοντας τα εργαλεία κοπής τις συνθήκες κοπής και την επιρροή τους στο τελικό τεμάχιο. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα στάδια που ακολουθούνται για την κατασκευή του κώδικα προγραμματισμού καθώς και της μοντελοποίησης τεμαχίου στο προηγμένο λογισμικό CAD (Computer Aided Design) τρισδιάστατης παραμετρικής μοντελοποίησης Autodesk Inventor®. Στο πέμπτο γίνεται η εκτέλεση του προγράμματος και η απόδοση των αποτελεσμάτων και τέλος παρατίθενται τα συμπεράσματα και η Βιβλιογραφία.

Η όλη διαδικασία μοντελοποίησης και προσομοίωσης υλοποιήθηκε στο Διατμηματικό Εργαστήριο Προσομοιώσεων και Μηχανολογικών Κατασκευών - SMM του ΤΕΙ Κρήτης, στο Παράρτημα Χανίων με Επιβλέπων Καθηγητή το Δρ. Βασίλη Δημητρίου, υπεύθυνο του Διατμηματικού Εργαστηρίου.

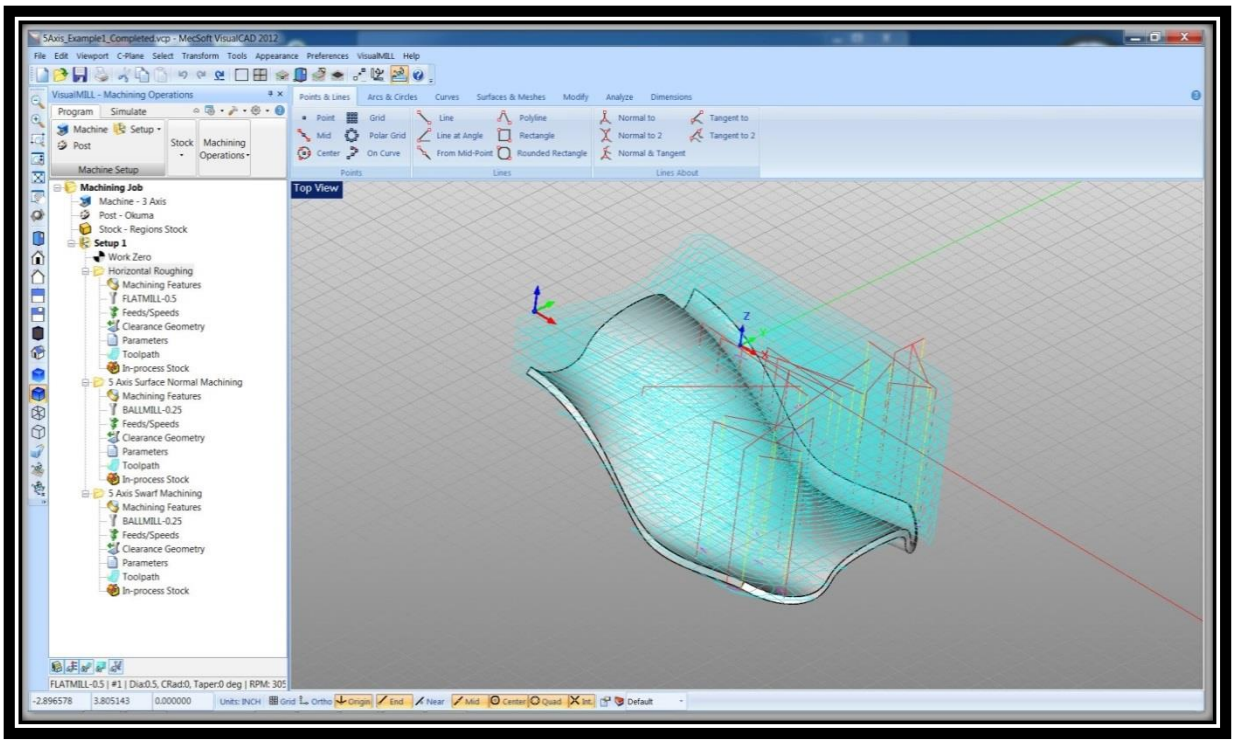
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Η προσομοίωση αποτελεί μέθοδο με τη χρήση της οποίας γίνεται προσπάθεια αναπαράστασης της λειτουργίας ενός συστήματος παραγωγής, χωρίς να είναι απαραίτητη η δημιουργία ή και η λειτουργία του πραγματικού συστήματος. Η χρήση προσομοίωσης με στόχο την μελέτη συστημάτων παραγωγής αναφέρεται ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1960. Η προσομοίωση χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις όπως η προσομοίωση της τεχνολογίας για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης, της μηχανικής ασφάλειας, τον έλεγχο, την κατάρτιση, την εκπαίδευση και τα βιντεοπαιχνίδια. Προσομοίωση χρησιμοποιείται επίσης στην επιστημονική μοντελοποίηση των φυσικών συστημάτων ή ανθρώπινων συστημάτων ώστε να αποκτηθεί εικόνα για τη λειτουργία τους. Επιπλέον, προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξει τις ενδεχόμενες πραγματικές επιπτώσεις των εναλλακτικών όρων και τρόπους δράσης [1].

1.1 Προσομοίωση κατεργασιών

Για να γίνει η προσομοίωση κατεργασιών κοπής, όπως η τόρνευση που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία, είναι αναγκαία η σχεδίαση και η μοντελοποίησή του τεμαχίου. Το προς κατεργασία τεμάχιο θα σχεδιαστεί στο προηγμένο λογισμικό CAD τρισδιάστατης παραμετρικής μοντελοποίησης Autodesk Inventor® με την χρήση προγραμματισμού. Η υπολογιστική ανάλυση της κατασκευής θα πραγματοποιηθεί με την βοήθεια του ίδιου προγράμματος όπως φαίνεται στην εικόνα 1.1. Τα θεωρητικά μοντέλα τέτοιας μορφής δύναται να επαληθευτούν με βάση πειραματικά αποτελέσματα από πραγματικές κατεργασίες. Εφόσον τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκριθούν με τα πειραματικά, η περαιτέρω μελέτη και ανάλυση της κοπής θα μπορεί να πραγματοποιηθεί υπολογιστικά χωρίς την ανάγκη υλοποίησης πειραμάτων. Τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης γεωμετρίας των αποβλίττων αλλά και του τελικού τεμαχίου, που θα είναι η έξοδοι της προσομοίωσης της παρούσας εργασίας, θα μπορούν να αποτελέσουν τα δεδομένα άμεσης εισόδου σε οποιοδήποτε λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων - ΠΣ για περεταίρω μελέτη.



Εικόνα 1.1 Προσομοίωση κατεργασίας.

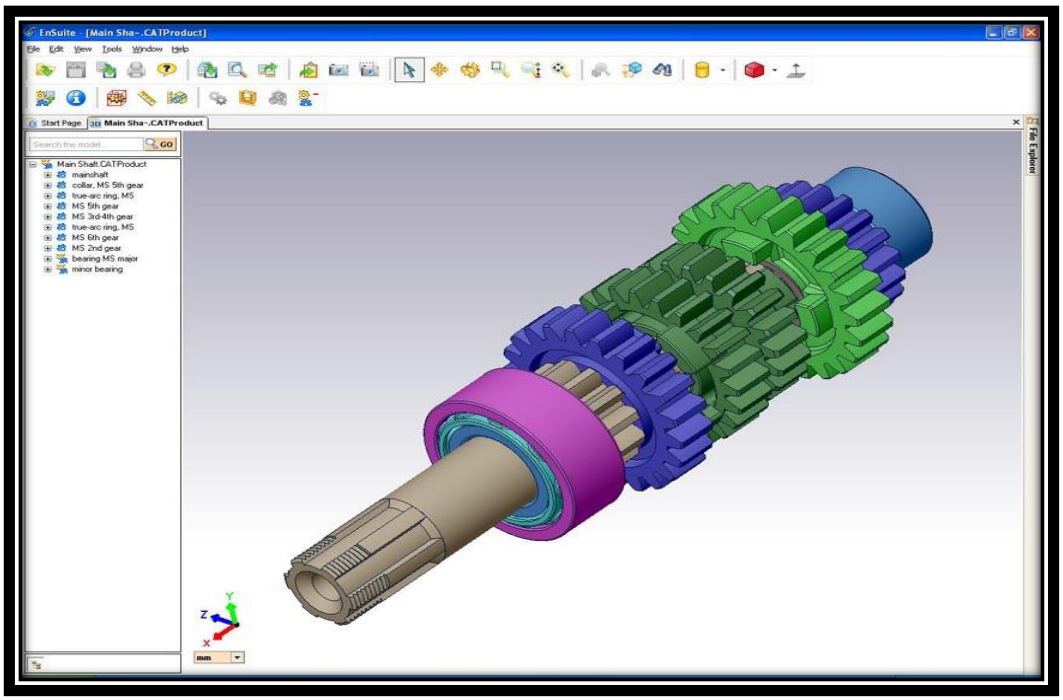
Τα οφέλη χρήσης των ΠΣ δύναται να συμπεριλάβουν δοκιμές αλλαγής υλικών στην κοπή, δοκιμές αλλαγής στην γεωμετρία (π.χ. πάχη, διάταξη και διαμέτρους τεμαχίων, κα) και να μελετηθεί η επίδραση και η συμπεριφορά αυτού, χωρίς την οποιαδήποτε επέμβαση στην πραγματική διαδικασία της κατεργασίας. Έτσι επιτυγχάνεται άμεση οικονομία αλλά και αποφυγή σφαλμάτων, αλλά και χρόνου που θα χρειαζόταν για τις πραγματικές κατασκευαστικές αλλαγές. Επίσης με τη χρήση της προσομοίωσης είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση της κοπής ή να κατευθυνθεί η κατασκευή στην παραγωγή ιδιοτιμών σε συγκεκριμένες συχνότητες. Ακόμη, η υπολογιστική ανάλυση παρέχει το πλεονέκτημα της άμεσης καταγραφής όλων των μετρήσεων του τελικού τεμαχίου χωρίς τον κίνδυνο της εμπλοκής του ανθρώπινου «ματιού» που είναι απαραίτητο στην καταγραφή τους κατά την πειραματική διεξαγωγή. Τέλος στην περίπτωση που τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υποδείξουν βελτίωση συμπεριφοράς με την υλοποίηση κάποιων αλλαγών, το κόστος και ο χρόνος που θα χρειαστεί για να γίνουν αυτές θα είναι άμεσα εκτιμήσιμες και εκ των προτέρων γνωστές [2].

1.2 Υπολογιστικές μέθοδοι προσομοίωσης κατεργασιών

Τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση με τη βοήθεια Ηλεκτρονικού Υπολογιστή (Η/Υ) αναφέρονται συνήθως με τη συντομογραφία CAD/CAM/FEM – CAE.

1.2.1 CAD – Computer Aided Design

Το **CAD** – Computer Aided Design αφορά τη χρήση της τεχνολογίας των υπολογιστών για το σχεδιασμό πραγματικών ή εικονικών αντικειμένων. Το σύστημα CAD συχνά περιλαμβάνει πολύ περισσότερα από απλά σχήματα. Όπως για παράδειγμα είναι η δημιουργία εγχειρίδιου σύνταξης για τεχνικά και μηχανολογικά σχέδια. Μπορεί να επεξεργάζεται συμβολικά στοιχεία όπως υλικά, διαδικασίες, διαστάσεις και ανοχές, ανάλογα με την εφαρμογή ειδικών εντολών. Αποτελεί μέθοδο δισδιάστατου (2D) ή/και τρισδιάστατου (3D) σχεδιασμού με πλήθος εφαρμογών σε όλους τους τομείς της βιομηχανίας και γενικότερα των κατασκευαστικών τεχνολογιών και των υπολογιστικών μεθόδων απεικόνισης. Στην εικόνα 1.2 απεικονίζεται η επεξεργασία αντικειμένων σε περιβάλλον CAD. Η ανάπτυξη των λογισμικών CAD συσχετίζεται άμεσα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις της βιομηχανίας. Το περιβάλλον εργασίας τέτοιων λογισμικών συχνά δεν περιορίζεται σε απλά σχήματα αλλά και σε εγχειρίδια, μηχανολογικά σχεδία, επιλογή υλικών, διαδικασίες και κατεργασίες, διαστάσεις, ανοχές, αντοχές κ.α. Το CAD χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία, τη ναυπηγική και την αεροδιαστημική, στον βιομηχανικό και αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Λόγω αυτής της τεράστιας οικονομικής επιρροής, το CAD αποτέλεσε σημαντική κινητήρια δύναμη για την έρευνα στην υπολογιστική γεωμετρία, τα γραφικά υπολογιστών (hardware και software), αλλά και στη διαφορική γεωμετρία [3].



Εικόνα 1.2 CAD Μοντελοποίηση συστήματος άξονα.

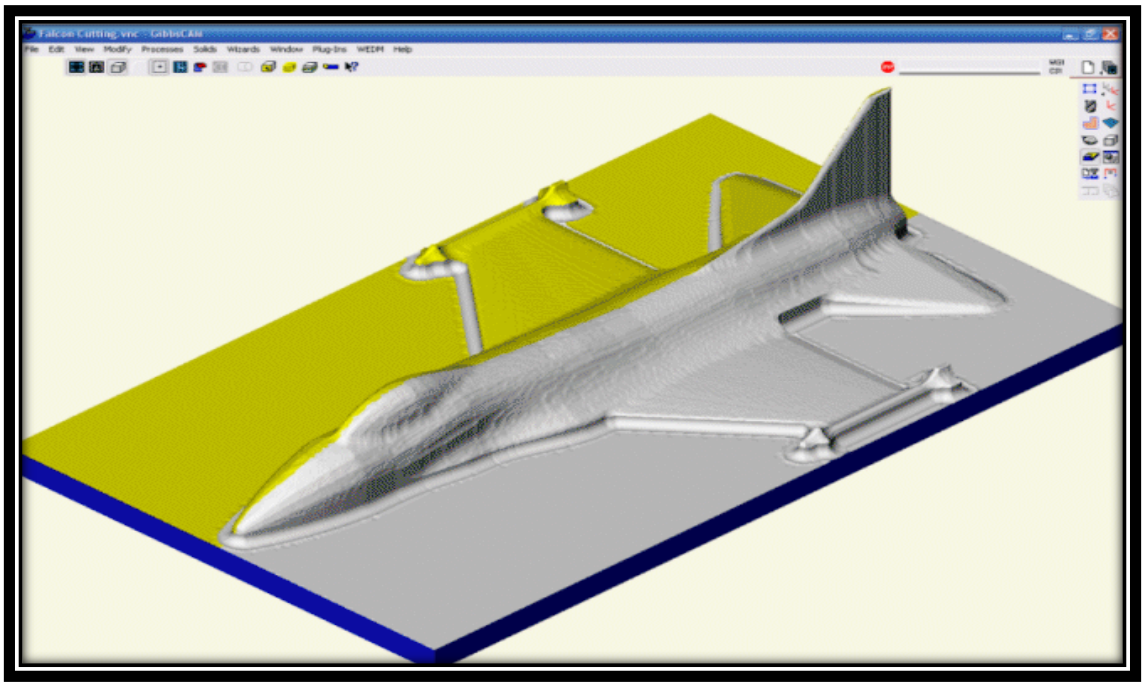
Τα βασικά πλεονεκτήματα του 3D CAD σχεδιασμού είναι:

- Ακριβής απεικόνιση τεμαχίου.
- Εποπτικός έλεγχος τεμαχίου.
- Άμεση μεταφορά σε σχέδιο 2 διαστάσεων για εξαγωγή όψεων και τομών.
- Δυνατότητα παραμετροποίησης για μαζική παραγωγή.
- Φωτορεαλισμός.

1.2.2 CAM – Computer Aided Manufacturing

Το **CAM** - Computer Aided Manufacturing αφορά τη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή με βάση τα εργαλεία λογισμικού που βοηθούν κυρίως τους μηχανικούς στον τομέα της μεταποίησης ή προτυποποίησης συστατικών, προϊόντων και εργαλείων. Το CAM εμπεριέχει λογισμικά (ή και μεθόδους) που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία προγραμμάτων κύκλων κατεργασίας σε εργαλειομηχανές CNC όπως κέντρα κατεργασίας, τόρνους, φρέζες, συστήματα ηλεκτροδιάβρωσης κα. Στην εικόνα 1.3 απεικονίζεται το γραφικό περιβάλλον CAM για την χύτευση μοντέλου αεροσκάφους. Σε περιπτώσεις που η γεωμετρία ενός σχεδίου, προς κατεργασία δεν είναι πολύπλοκη ο κώδικας ή πρόγραμμα (G-code) εισάγεται στο μηχάνημα απευθείας, πληκτρολογώντας στον πίνακα ελέγχου του μηχανήματος τις κατάλληλες εντολές. Σε περιπτώσεις όμως μηχανολογικών σχεδίων σύνθετης γεωμετρίας όπως καλούπια και μήτρες

ή σχεδίων με πολύπλοκες μηχανολογικές απαιτήσεις, τα λογισμικά CAM είναι απαραίτητα για να αναπαράγουν με απόλυτη ακρίβεια και ταχύτητα τους κύκλους κατεργασίας.



Εικόνα 1.3 CAM Προσομοίωση χύτευσης μοντέλου αεροσκάφους.

Η ανάπτυξη των λογισμικών CAM έχει κατανεμηθεί σε δυο βασικές κατηγορίες: (α) τα συστήματα CAM τα οποία χρησιμοποιούνται για σύνθετες γεωμετρικές κατασκευές και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται από το σύστημα, δίνουν υψηλής ακρίβειας διαδρομές και βέλτιστους χρόνους κατεργασίας, ώστε να υπάρχει μέγιστη ακρίβεια κοπής και διάρκεια ζωής του εργαλείου και (β) η δεύτερη κατηγορία συστημάτων CAM χρησιμοποιείται για την παραγωγή απλούστερων γεωμετρικών στοιχείων όπου απαιτείται αυτοματοποίηση ή αλλιώς μεγάλη επαναληψιμότητα σε παρεμφερείς διαδικασίες όπως διάτρηση με τέσσερα διαφορετικά μεγέθη τρυπανιών.

Τα συστήματα λογισμικού που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή καλουπιών, μητρών και γενικότερα σύνθετων γεωμετρικών στοιχείων πρέπει να ανταποκρίνονται στις τρισδιάστατες κινήσεις όχι μόνο ως προς την κατεργασία (φρεζάρισμα, τόρνευση, διάτρηση κλπ) αλλά και ως προς την επιλογή του σωστού μοτίβου διαδρομής (path) με απώτερο στόχο το βέλτιστο χρόνο και την απαιτούμενη ποιότητα της επιφάνειας. Τα μοτίβα διαδρομών ή contour paths σε ένα τέτοιο πρόγραμμα είναι υπερβολικά πολλά και μαθηματικά περίπλοκα ώστε να γραφτούν από ένα χειριστή/προγραμματιστή εργαλειομηχανών. Τα λογισμικά CAM που η λειτουργία τους βασίζεται στην εισαγωγή δεδομένων, επιτρέπουν στον προγραμματιστή

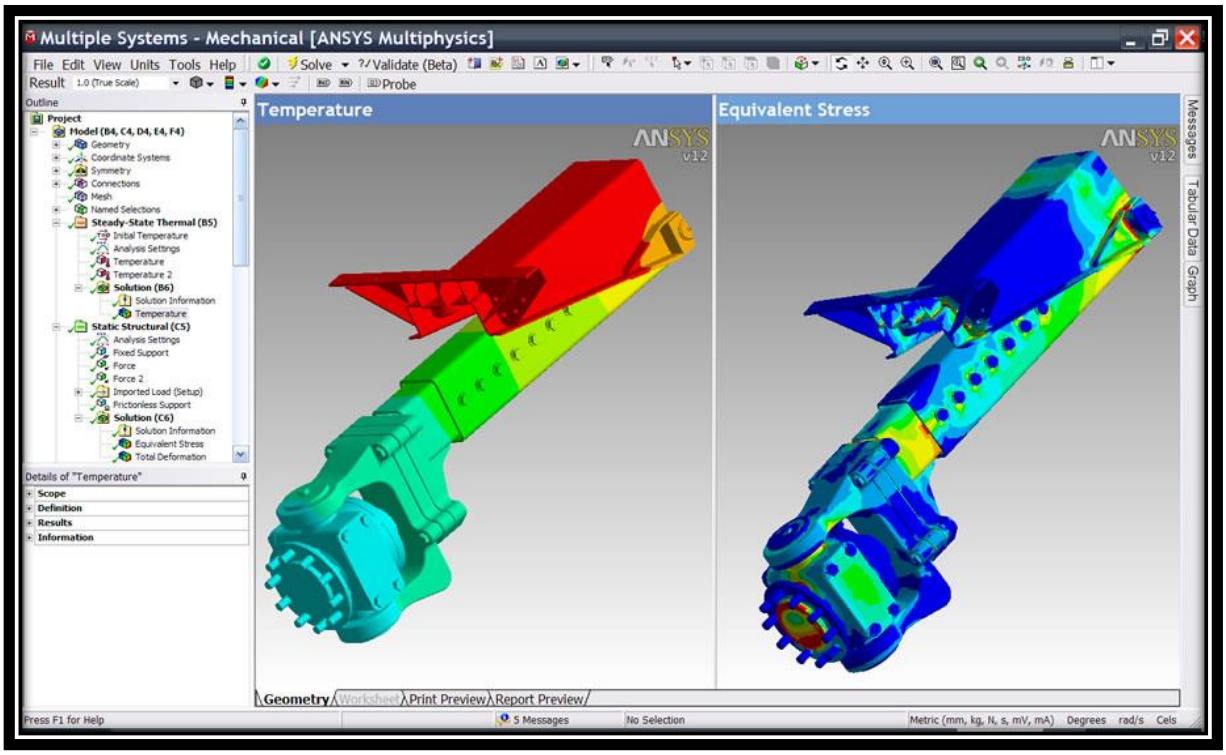
να εισάγει τη γνώση του σχετικά με τα εργαλεία, τη διαδικασία και τις υπόλοιπες παραμέτρους κοπής που αφορούν θεμελιώδη μηχανολογικά χαρακτηριστικά, έτσι ώστε το λογισμικό να μπορεί να αναγνωρίσει τα χαρακτηριστικά αυτά και στο μέλλον και να τα ανατρέξει αυτόματα εξοικονομώντας έτσι πολύτιμο χρόνο και χρήμα. Ο προγραμματιστής CNC εργαλειομηχανών πρέπει να επιβεβαιώσει ότι ένα σχέδιο CAD είναι ορθό και πλήρες, ώστε να επιλέξει τις βασικές παραμέτρους όπως εργαλεία κοπής, ταχύτητες κοπής – προώσεις, για να προχωρήσει στον προγραμματισμό του λογισμικού CAM. Με τη βοήθεια των λογισμικών CAM μπορούν επίσης να αναπτυχθούν συστήματα ελέγχου για ολοκληρωμένη παραγωγή με βήματα σχεδιασμού, διαχείρισης, μεταφοράς και αποθήκευσης τεμαχίων.

Η διαδικασία τροποποίησης εξαρτάται από τον τύπο του προ- μετά- επεξεργαστή και τη μορφή αρχείων που αυτός λαμβάνει (format). Μικρές αλλαγές στον προ- μετά- επεξεργαστή μπορούν να ληφθούν σε μερικά μόνο λεπτά, ενώ οι μεγάλες αλλαγές μπορούν να διαρκέσουν ακόμη και ημέρες. Η επιτυχημένη τροποποίηση τους για χρήση με συγκεκριμένη εργαλειομηχανή, μπορεί να απαιτεί ακόμα και μια σειρά δοκιμών μεταφοράς συγκεκριμένων εντολών ή και προγραμμάτων CAM για υλοποίηση προς την εργαλειομηχανή. Ο προγραμματιστής μηχανών CNC είναι αναγκαίο να γνωρίζει τα συστήματα ελέγχου των μηχανών που χειρίζεται σε εξαιρετικά μεγάλο βαθμό. Μια βαθειά και μεγάλης κλίμακας γνώση πάνω σε μη-αυτοματοποιημένες μεθόδους προγραμματισμού είναι πολύ βασική και συνήθως επιβάλλεται. Επιπλέον, η γνώση της μηχανουργικής τεχνολογίας είναι πολύ βασική και αναγκαία. Επίσης η γνώση μιας γλώσσας προγραμματισμού υψηλού επιπέδου μπορεί να βοηθήσει το συντάκτη του μετά-επεξεργαστή να αναπτύξει έναν αποδοτικότερο και πιο αξιόπιστο μετά-επεξεργαστή [4].

1.2.3 FEM - Finite Element Method

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, **FEM** - Finite Element Method, είναι μια αριθμητική τεχνική προσέγγιση για την εξεύρεση λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων (PDEs), καθώς και εξισώσεις ολοκληρωμάτων. Η προσεγγίσιμη λύση βασίζεται είτε στην ολοκληρωτική εξάλειψη των διαφορικών εξισώσεων (προβλήματα σταθερής κατάστασης), είτε μέσω της προσέγγισης συστημάτων των συνήθων διαφορικών εξισώσεων. Στην εικόνα 1.4 παρουσιάζεται η ανάλυση κατασκευής μηχανολογικού υποσυστήματος με FEM. Για τη μελέτη τεμαχίου με ΠΣ, το πρώτο βήμα που απαιτείται είναι η διακριτοποίησή σε στοιχεία. Σε αυτά τα στοιχεία εφαρμόζονται συγκεκριμένες συναρτήσεις, οι συναρτήσεις σχήματος, ανάλογα με την

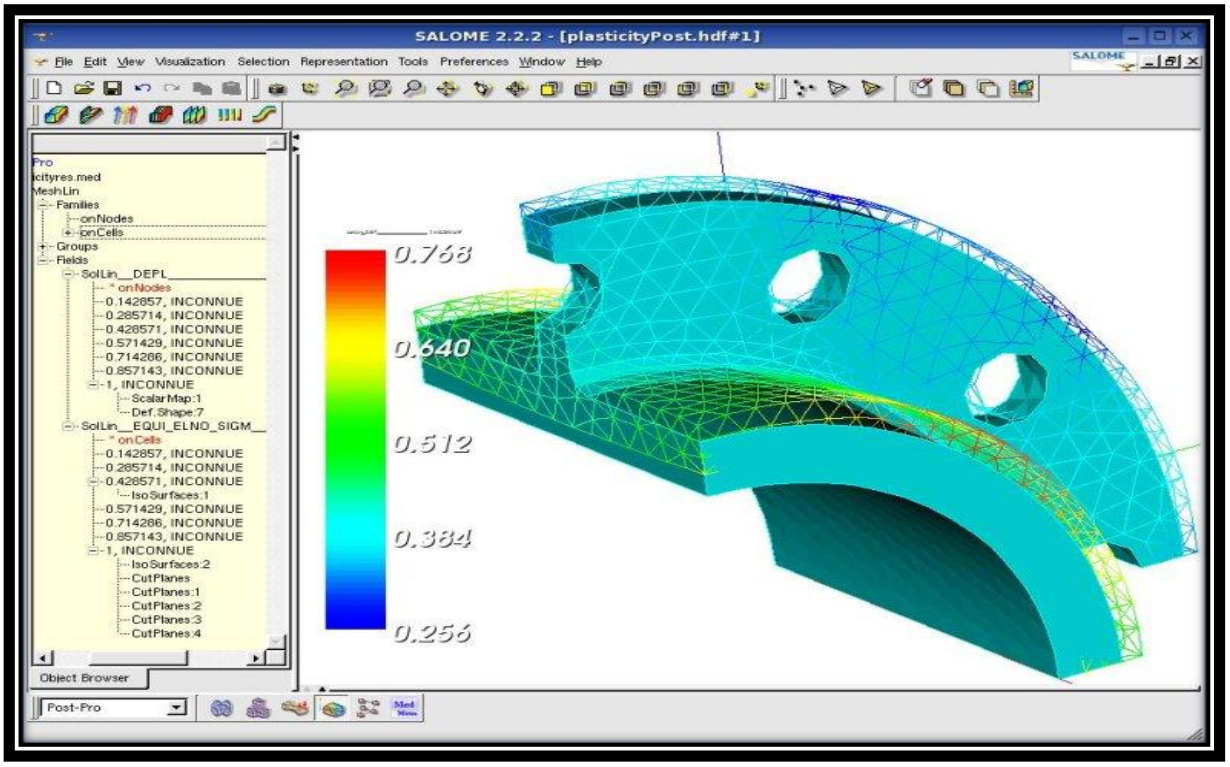
φύση του προβλήματος που έχουμε να αντιμετωπίσουμε κάθε φορά. Με τη βοήθεια αυτών υπολογίζονται παράμετροι που έπειτα αθροιστικά οδηγούν στην αριθμητική επίλυση του προβλήματος. Η εισαγωγή CAD γεωμετρίας σε ενα πρόγραμμα FEM ειναι συνήθως άμεση, ειδικά με τη χρήση λογισμικών νέας γενιάς όπως αυτό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία [5].



Εικόνα 1.4 Ανάλυση κατασκευής με FEM.

1.2.4 CAE - Computer Aided Engineering

CAE - Computer Aided Engineering, είναι η χρήση τεχνολογικών πληροφοριών για την υποστήριξη των μηχανικών σε εργασίες όπως η ανάλυση, η προσομοίωση, ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η διάγνωση και η επισκευή αντικειμένων. Τα εργαλεία CAE χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία. Στην πραγματικότητα, η χρήση τους έχει επιτρέψει τη μείωση του κόστος παραγωγής και το χρόνο βελτιώνοντας την ασφάλεια, άνεση, και διάρκεια των παραγόμενων προϊόντων. Η ικανότητα των εργαλείων CAE να προβλέπουν, έχει προχωρήσει στο σημείο όπου ένα μεγάλο μέρος της επαλήθευσης μηχανολογικών σχεδίων γίνεται χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις υπολογιστών παρά τη φυσική δοκιμή πρωτοτύπων. Στην εικόνα 1.5 φαίνεται η επεξεργασία σε περιβάλλον CAE [6].

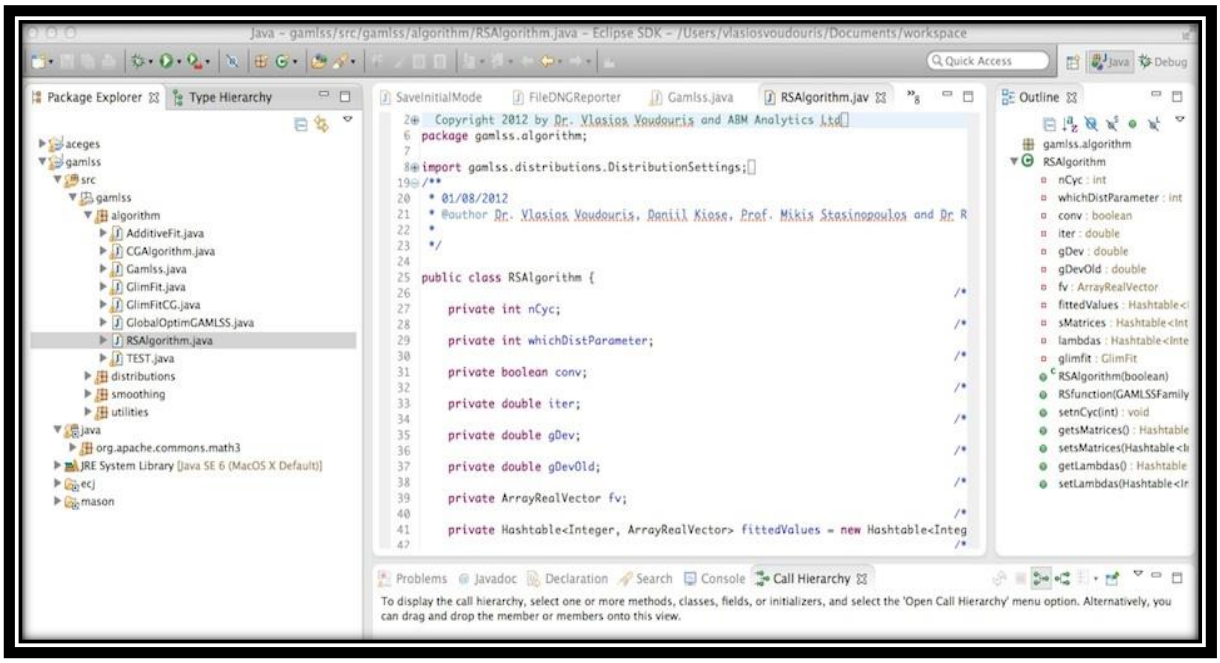


Εικόνα 1.5 Επεξεργασία με CAE.

1.2.5 Programming - Προγραμματισμός στα λογισμικά συστήματα

Προγραμματισμός στα λογισμικά συστήματα, είναι η χρήση ψευδό-γλωσσών προγραμματισμού ή κλήσεων εξωτερικών συναρτήσεων σε ένα εργαλείο γραφικής απεικόνισης με σκοπό την εξοικονόμηση χρόνου, κόπου και κόστους. Ο προγραμματισμός περιλαμβάνει επίσης τον έλεγχο του προγράμματος για την επαλήθευση της ακρίβειας και της ορθότητάς του (αποσφαλμάτωση), και την προπαρασκευή των οδηγιών με τις οποίες ένας υπολογιστής θα εκτελέσει τις εντολές που καθορίζονται στις προδιαγραφές του προγράμματος. Θεμελιώδη ρόλο στον υπολογιστικό προγραμματισμό διαδραματίζουν οι χιλιάδες διαφορετικές γλώσσες προγραμματισμού, δηλαδή οι προτυποποιημένες τυπικές γλώσσες απαραίτητες για τη σύνθεση ενός προγράμματος. Ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος, το κείμενο που έχει συνταχθεί σε μία γλώσσα προγραμματισμού, πρέπει στη συνέχεια να μεταφραστεί σε γλώσσα μηχανής από εξειδικευμένο λογισμικό (μεταγλωττιστής-compiler) δηλαδή πρόγραμμα στο οποίο συντάσσεται ο κώδικας στην εκάστοτε γλώσσα, αποσφαλματώνεται (debugging) και τελικά δημιουργείται το υπολογιστικό προϊόν (λογισμικό-software) ώστε να είναι σε θέση να

εκτελεστεί από τον υπολογιστή. Στην εικόνα 1.6 απεικονίζεται πηγαίος κώδικας σε περιβάλλον προγραμματισμού [7].



Εικόνα 1.6 Εισαγωγή παραμέτρων με προγραμματισμό.

Στην παρούσα Πτυχιακή Εργασία πραγματοποιείται προσομοίωση με προγραμματισμό και πιο συγκεκριμένα με την χρήση του προγράμματος Autodesk Inventor με διεπαφή προγραμματισμού - API σε περιβάλλον Visual Basic. Η επιλογή του συγκεκριμένου προγράμματος έγινε γιατί είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό CAD για μηχανολογικές κατασκευές προσφέροντας πολλές δυνατότητες στον χρήστη όπως θα αναλυθούν στη συνέχεια. Η προσομοίωση με προγραμματισμό επιλέχθηκε, ώστε να υλοποιηθεί η δημιουργία εφαρμογής, η οποία συνεργάζεται σε πραγματικό χρόνο με το κυρίως πρόγραμμα, θέτοντας τις επιθυμητές παραμέτρους κοπής, με επιθυμητές διαστάσεις δοκιμίου και τους διαθέσιμους τύπους εργαλείων. Στόχος είναι η εφαρμογή κατά την εκτέλεση της, να έχει ως είσοδο τις βασικές παραμέτρους κοπής και ως έξοδο το τελικό τεμάχιο και τα απόβλιττα της κατεργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Κοπές

2.1. Κατεργασίες Αφαίρεσης Υλικού

Οι βασικότερες κατεργασίες με αφαίρεση υλικού και οι εργαλειομηχανές στις οποίες γίνονται οι αντίστοιχες κατεργασίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. [13]

Κατεργασία	***Εργαλειομηχανή***
Τόρνευση	Τόρνος
Φραιζάρισμα	Φρέζα
Διάτρηση	Δράπανος
Πλάνιση	Πλάνη
Λείανση	Λειαντικός τροχός

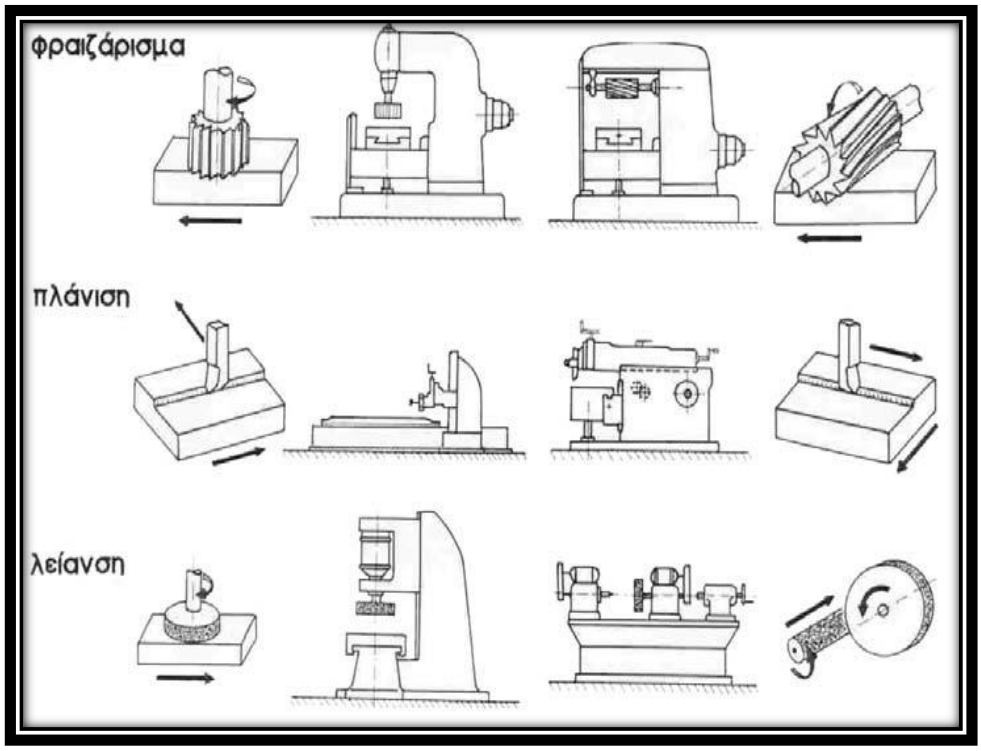
Πίνακας 2.1 κατεργασίες με αφαίρεση υλικού και οι εργαλειομηχανές

Στίς εικόνες 2.1 και 2.2 παρουσιάζονται οι βασικότερες κατεργασίες με αφαίρεση υλικού και σχηματικά οι αντίστοιχες χρησιμοποιούμενες εργαλειομηχανές. Οι συνήθεις τρόποι κατάταξης είναι :

1. **ως προς το είδος της κατεργασίας**
2. **ως προς το είδος της πρωτεύουσας κίνησης**
    - *εργαλειομηχανές με περιστροφική πρωτεύουσα κίνηση*
    - *εργαλειομηχανές με ευθύγραμμη πρωτεύουσα κίνηση*
3. **ως προς τον βαθμό εξειδικεύσεως**
    - *εργαλειομηχανές γενικής χρήσεως*
    - *ειδικές εργαλειομηχανές*
    - *εξειδικευμένες εργαλειομηχανές*
    - *εργαλειομηχανές μεταφοράς*
4. **ως προς την ακρίβεια κατεργασίας**
    - *εργαλειομηχανές συνήθους ακριβείας*
    - *εργαλειομηχανές ακριβείας*
    - *εργαλειομηχανές μεγάλης ακριβείας*

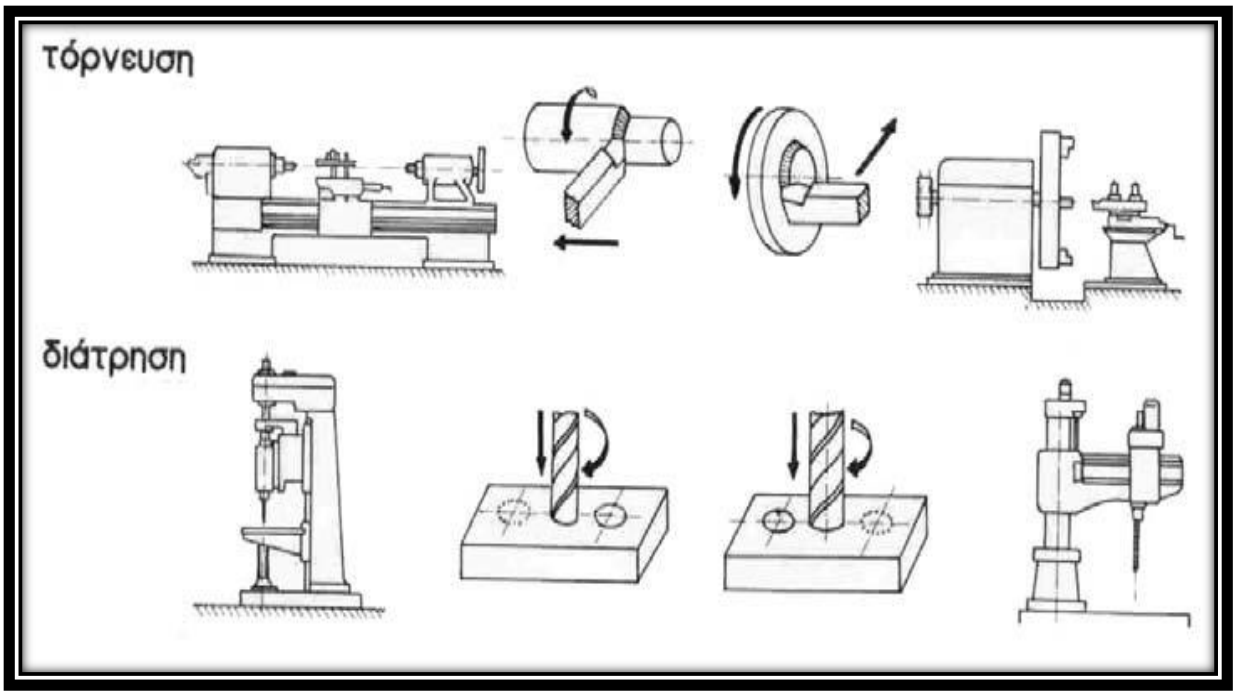
- *εργαλειομηχανές υψίστης ακριβείας*

5. **ως προς το βάρος**
    - *εργαλειομηχανές ελαφρές (βάρος μικρότερο του 1 tn)*
    - *εργαλειομηχανές μέσου βάρους (βάρος μικρότερο των 10 tn)*
    - *εργαλειομηχανές βαριές (βάρος μεγαλύτερο των 10 tn)*
6. **ως προς το βαθμό αυτοματισμού**
    - *κοινές εργαλειομηχανές,*
    - *ημιαυτόματες εργαλειομηχανές (οι κινήσεις γίνονται αυτόματα),*
    - *αυτόματες εργαλειομηχανές (οι κινήσεις και η τροφοδοσία γίνονται αυτόματα)*



Εικόνα 2.1 Φραιζάρισμα, πλάνιση, λείανση και αντίστοιχες εργαλειομηχανές [14].

.



Εικόνα 2.2 Τόρνευση, διάτρηση και αντίστοιχες εργαλειομηχανές.

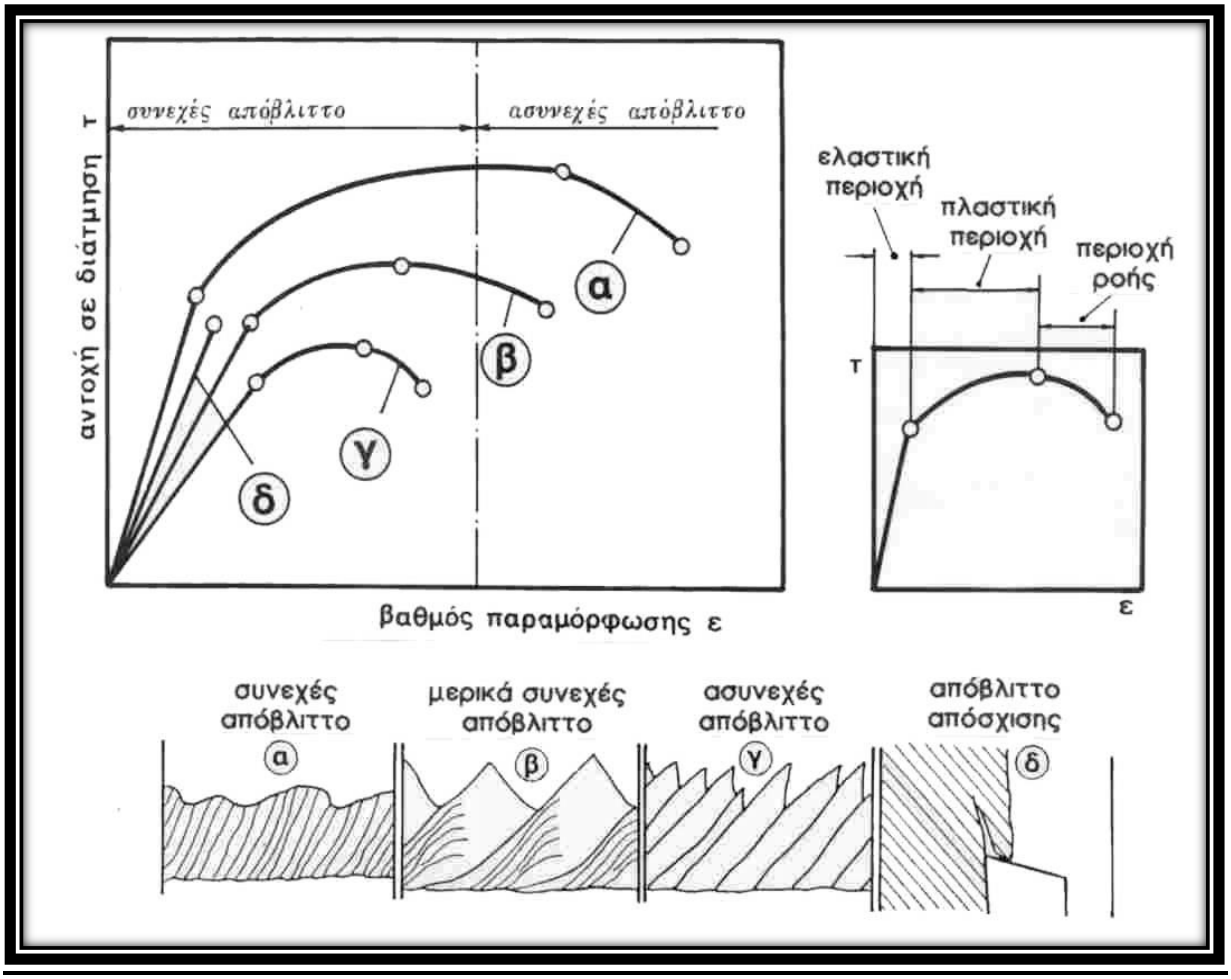
2.1.1 Αρχές της κοπής

Η αφαίρεση του υλικού στις εργαλειομηχανές επιτυγχάνεται μέσω της διαφορετικής κινηματικής του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, με καθορισμένο βάθος (το οποίο ονομάζεται βάθος κοπής) και προδιαγεγραμμένη ταχύτητα εισχώρησης. Το υλικό του τεμαχίου που απομακρύνεται λέγεται απόβλιττο (γρέζι) και μπορεί, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες κατεργασίας και το υλικό του τεμαχίου, να έχει διάφορες μορφές. Ανάλογα με τον βαθμό παραμορφώσεως ε και την αντοχή σε διάτμηση τ του κατεργαζόμενου υλικού, το παραγόμενο απόβλιττο μπορεί να είναι συνεχές ή ασυνεχές, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3. Το συνεχές απόβλιττο είναι και το επιθυμητό στην πράξη, μια και σχετίζεται με ευνοϊκές συνθήκες όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής, την καταναλισκόμενη ισχύ, την προκύπτουσα τραχύτητα επιφάνειας του τεμαχίου καθώς και την αναπτυσσόμενη φθορά στο κοπτικό εργαλείο. Το συνεχές απόβλιττο δημιουργείται από συνεχή πλαστική παραμόρφωση που υφίσταται στην περιοχή της ζώνης διάτμησης. Το γεγονός αυτό, έχει σαν συνέπεια την διαρροή του υλικού του και την ροή του σαν ταινία πάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου. Το ασυνεχές απόβλιττο δημιουργείται με την περιοδική θραύση του αποβλίττου κατά την διέλευσή του από την ζώνη διατμήσεως. Τέτοιο απόβλιττο συναντάται σε ψαθυρά υλικά όπως ο χυτοσίδηρος ή σε πολύ χαμηλές ταχύτητες κοπής, σε μεγάλες προώσεις ή σε κοπή με εργαλεία με μικρές γωνίες αποβλίττου . [15]

.

Έτσι ευνοϊκές συνθήκες κοπής όσον αφορά την δημιουργία του αποβλίττου, γενικά επιτυγχάνονται με τις εξής συνθήκες :

- *μεγάλη ταχύτητα κοπής*
- *μικρή πρόωση*
- *μεγάλη γωνία αποβλίττου*

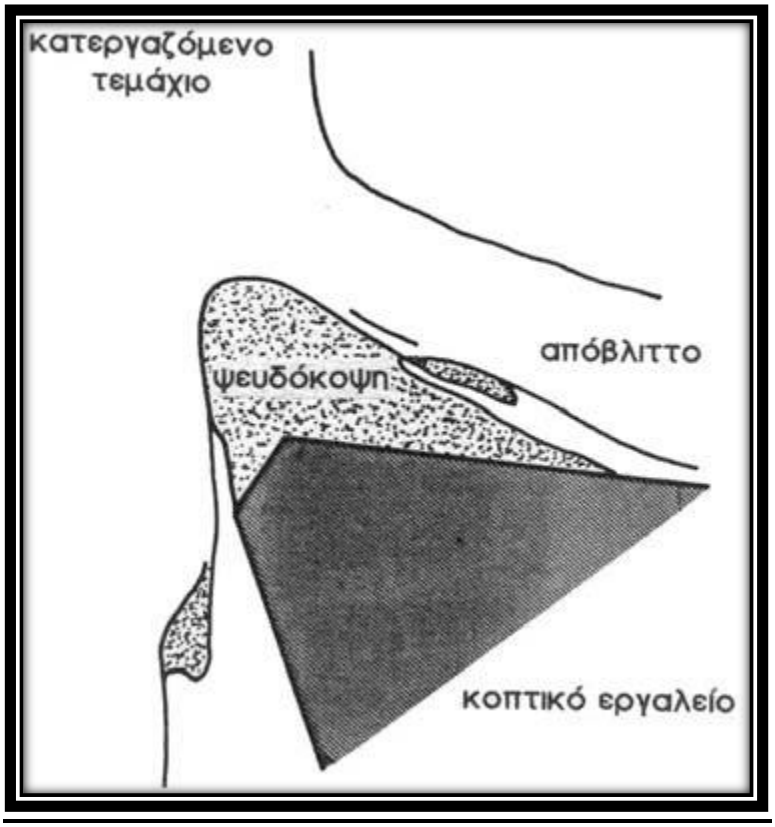


Εικόνα 2.3 Μορφές αποβλίττου σε κατεργασίες με αφαίρεση υλικού . [16]

Σε περιπτώσεις που το συνεχές απόβλιττο αποκτά μεγάλο μήκος (ιδίως στην κατεργασία όλκιμων υλικών), με αποτέλεσμα να επιφέρει δυσκολίες αλλά και κινδύνους κατά την ώρα της κατεργασίας, χρησιμοποιούνται κατάλληλες διαμορφώσεις του κοπτικού εργαλείου που ονομάζονται γρεζοθραύστες. Ένα φαινόμενο που σχετίζεται με την δημιουργία του συνεχούς αποβλίττου είναι και η δημιουργία της ψευδόκοψης . [17]

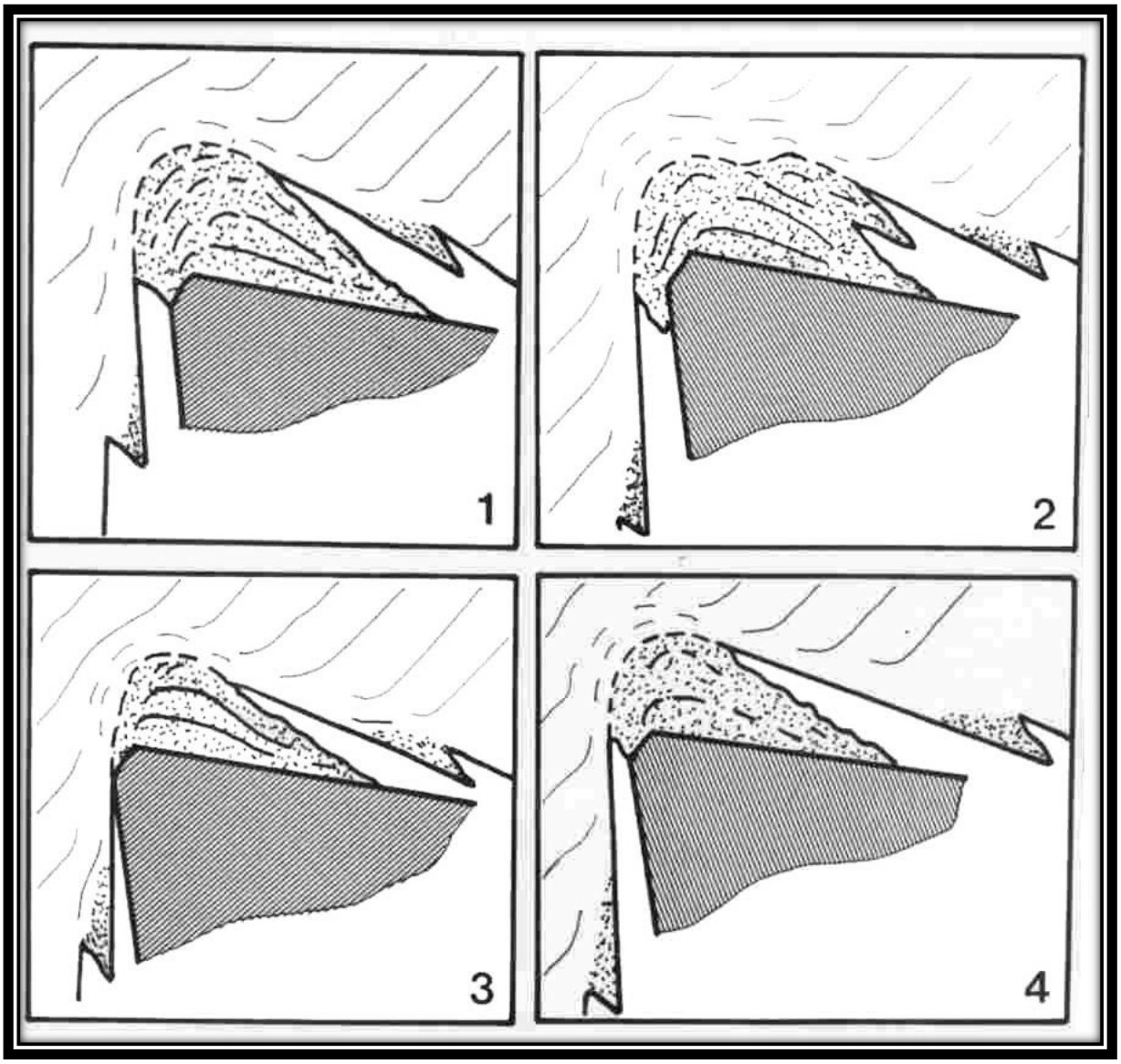
.

Κατά την διαδικασία δημιουργίας του αποβλίττου, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί στην κόψη του εργαλείου η ψευδόκοψη. Πρόκειται για σφηνοειδές, ασύμμετρο σώμα από ισχυρά παραμορφωμένο και σκληρυμένο υλικό του τεμαχίου, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4. Στο σχήμα αυτό διακρίνονται η κοπτική ακμή του εργαλείου που έχει μορφή σφήνας, το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το απόβλιττο που παράγεται και η ψευδόκοψη ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο. Η ψευδόκοψη αυτή δημιουργείται από επάλληλα στρώματα υλικού του τεμαχίου, που προσκολλώνται στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου [13]



Εικόνα 2.4 Ψευδόκοψη.

Η ψευδόκοψη αναπτύσσεται καθώς η κοπή προχωρεί. Όταν η ψευδόκοψη αποκτά ένα ορισμένο μέγεθος, αποχωρίζονται από το σώμα της, λόγω των δυνάμεων κοπής, μικρά κομμάτια τα οποία προσκολλώνται είτε στο απόβλιττο που ρέει, είτε στην νεοσχηματισμένη επιφάνεια του τεμαχίου. Ο περιοδικός αυτός σχηματισμός και τεμαχισμός της ψευδόκοψης φαίνεται στην εικόνα 2.5, όπου παρατηρείται στην φάση 2 ο διαχωρισμός της ψευδόκοψης προς το απόβλιττο και την κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου, τεμαχισμός που ολοκληρώνεται στη συνέχεια.



Εικόνα 2.5 Φάσεις δημιουργίας της ψευδόκοψης.

Η ύπαρξη της ψευδόκοψης χειροτερεύει την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, ενώ η συμπεριφορά της ως προς το κοπτικό εργαλείο εξαρτάται από τις συνθήκες κοπής. Έτσι υπάρχει περίπτωση η σταθερή παρουσία της ψευδόκοψης να προστατεύει το κοπτικό εργαλείο, μια και κόβει αυτή και όχι άμεσα η κοπτική ακμή του, ενώ υπάρχει και η περίπτωση, ανάλογα τις συνθήκες κοπής, η ψευδόκοψη να φθείρει το εργαλείο κυρίως στην επιφάνεια αποβλίττου του, με τον μηχανισμό της απόξεσης. Η δημιουργία ή αποφυγή της ψευδόκοψης μπορεί να ελεγχθεί από την κατάλληλη επιλογή των συνθηκών κατεργασίας.

Έτσι το μέγεθος της ψευδόκοψης μειώνεται αν :

• αυξηθεί η ταχύτητα κοπής,

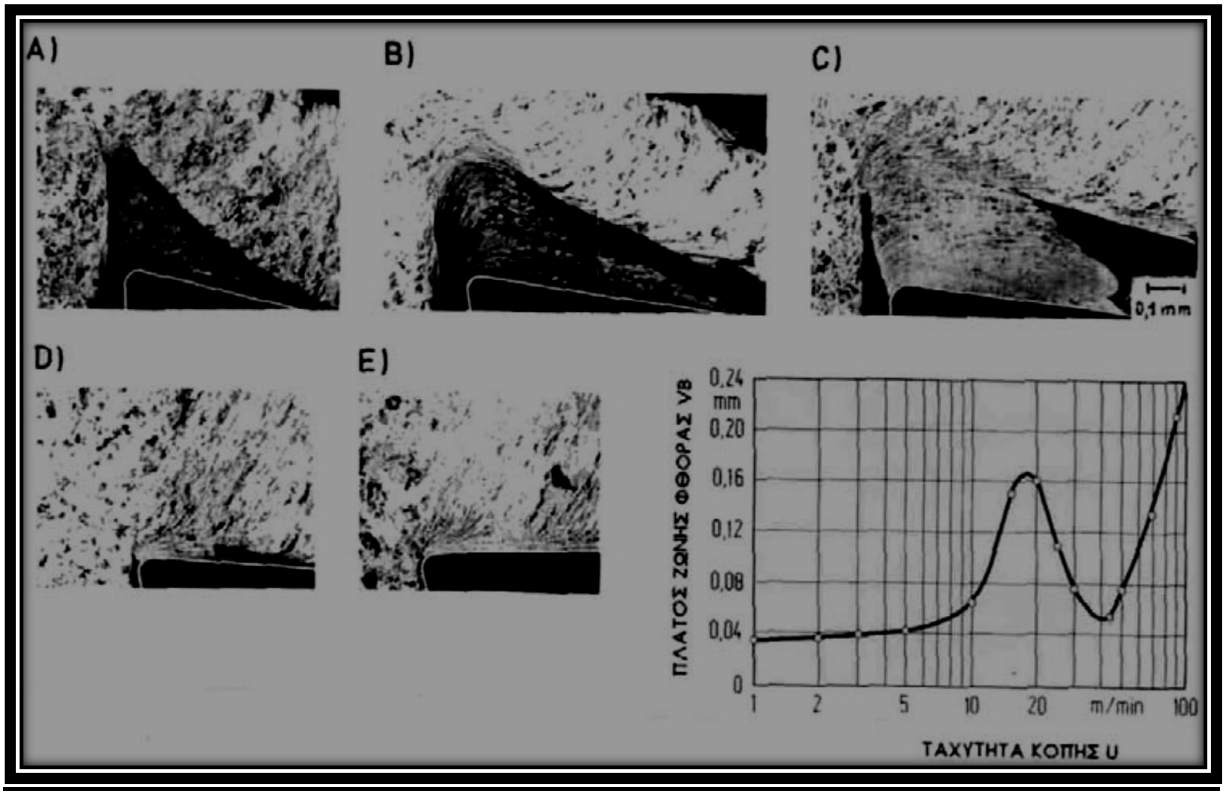
• χρησιμοποιηθεί εργαλείο με μεγαλύτερη γωνία αποβλίττου,

• μειωθεί η χρησιμοποιούμενη πρόωση,

• χρησιμοποιηθεί κατάλληλο υγρό κοπής.

Η παρουσία της ψευδόκοψης επηρεάζεται από τους παράγοντες που προαναφέρθηκαν, ενώ ισχυρότερη επίδραση παρουσιάζει η ταχύτητα κοπής. Έτσι μπορεί κανείς να διακρίνει στην εικόνα 2.6. την επίδραση της χρησιμοποιούμενης ταχύτητας κοπής στην αναπτυσσόμενη φθορά ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου, φθορά που σχετίζεται με την ύπαρξη της ψευδόκοψης. Στο σχήμα οι πέντε φωτογραφίες αντιστοιχούν σε πέντε διαφορετικές ταχύτητες κοπής :

A : v=2m/min, **B** : v=10m/min, **C** : v=20m/min, **D** : v=30m/min ,**E** : v=40m/min[14]



Εικόνα 2.6 Το φαινόμενο της ψευδόκοψης και η επίδραση της ταχύτητας κοπής.

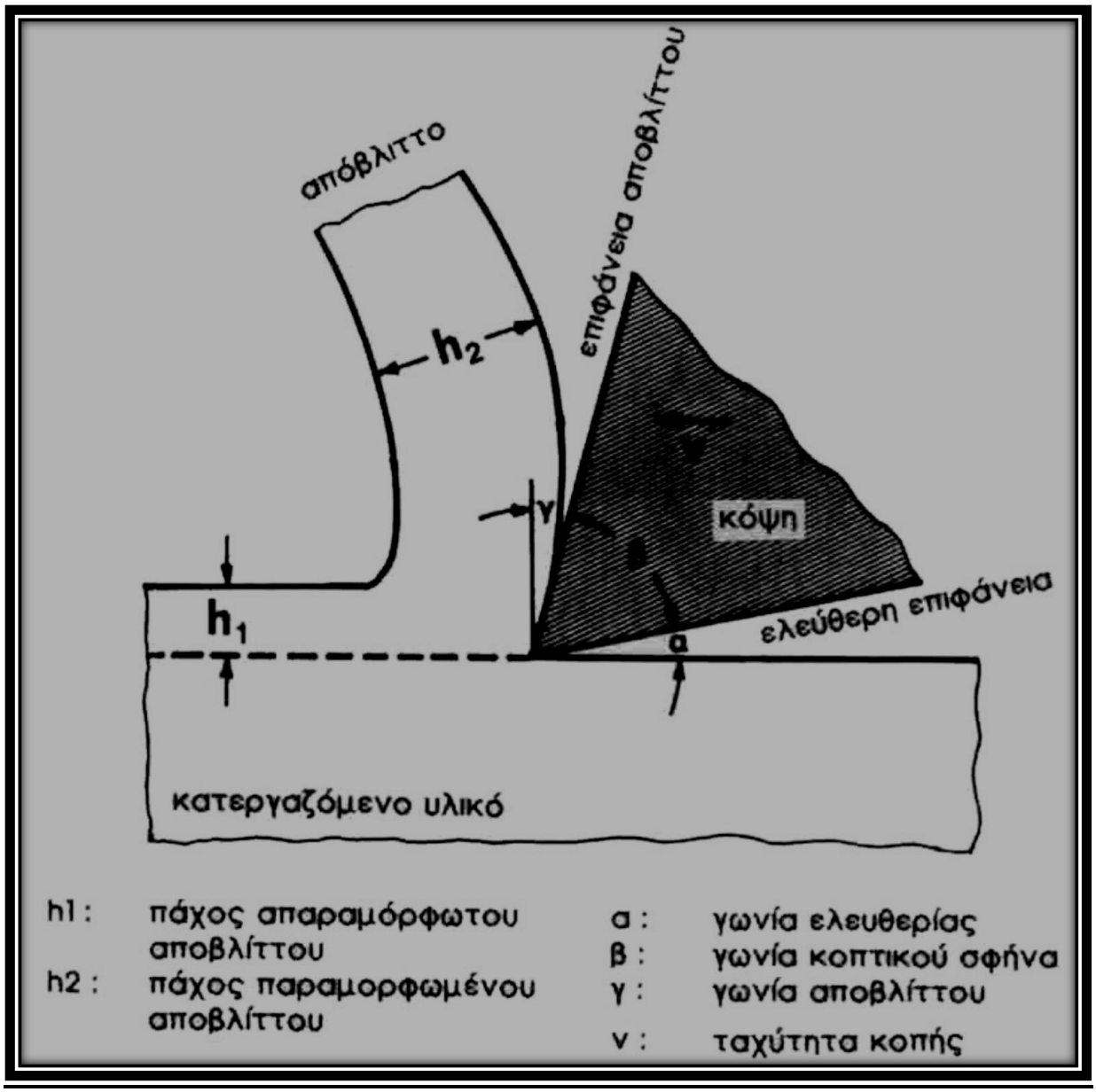
Το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι ο χάλυβας Ck 53 N, ενώ το κοπτικό εργαλείο είναι σκληρομέταλλο P30 με γωνία αποβλίττου γ=10°. Από το σχήμα γίνεται φανερό πως το πλάτος ζώνης φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου, αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας, αλλά παρουσιάζεται μια περιοχή (στην περίπτωση του σχήματος ανάμεσα στα 18 m/min και 40 m/min) όπου η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε ελάττωση της παρουσίας της ψευδόκοψης και αντίστοιχα μείωση του πλάτους ζώνης φθοράς. Όπως

διακρίνεται στην φωτογραφία C, η ψευδόκοψη στην περίπτωση αυτή δεν υπερβαίνει σε μέγεθος κάποια δέκατα του χιλιοστού.

Κατά την διάρκεια της κοπής, με την υπόθεση πως το κοπτικό εργαλείο κινείται με ταχύτητα *v* ενάντια στο σταθερό κατεργαζόμενο τεμάχιο, το υλικό του τεμαχίου που κόβεται, σχηματίζεται με συνεχή πλαστική διάτμηση που λαμβάνει χώρα ακριβώς μπροστά στην κόψη του εργαλείου. Το απόβλιττο που παράγεται κινείται πάνω στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και απομακρύνεται, ενώ η τελική παραγόμενη επιφάνεια του τεμαχίου δημιουργείται από συνεχή θραύση του υλικού του. Η πλαστική διάτμηση που γίνεται σε μια στενή περιοχή που ονομάζεται ζώνη διατμήσεως, έχει σαν συνέπεια το υλικό του τεμαχίου που περνά από την ζώνη αυτή να εφελκύεται.

Η κατεργασία με αφαίρεση υλικού μπορεί να προσομοιωθεί με την είσοδο στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, μιας κοπτικής σφήνας. Η κόψη αυτής της σφήνας έχει σχεδόν πάντα συγκεκριμένη γεωμετρία, επιλεγμένη σχετικά με το προς κατεργασία υλικό και τις συνθήκες κατεργασίας. Τα χαρακτηριστικά αυτής της γεωμετρίας αποτελούν και τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε κοπτικού εργαλείου. Το επιλεγόμενο βάθος κοπής για κάθε κατεργασία αποτελεί επίσης σημαντική παράμετρο που ανήκει στις συνθήκες κοπής. Στην εικόνα 2.7 φαίνεται η μορφή αυτής της κοπτικής σφήνας στην οποία διακρίνονται δύο κύριες επιφάνειες :

- επιφάνεια αποβλίττου : είναι αυτή στην οποία πάνω ρέει το απόβλιττο,
- ελεύθερη επιφάνεια : είναι η επιφάνεια προς το μέρος της νεοσχηματισμένης επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου.



Εικόνα 2.7 Γεωμετρία της κόψης.

Στο ίδιο σχήμα το πάχος h2 του παραμορφωμένου αποβλίττου, λόγω της συνεχούς πλαστικής διάτμησης, παρουσιάζεται μεγαλύτερο από το πάχος h1 του αντίστοιχου απαραμόρφωτου αποβλίττου ενώ διακρίνονται και οι τρεις χαρακτηριστικές γωνίες κοπής, που είναι :

- γωνία α : γωνία αποβλίττου
- γωνία β : γωνία κοπτικού σφήνα
- γωνία γ : γωνία ελευθερίας

Οι γωνίες αυτές είναι χαρακτηριστικές στην κοπή, την επηρεάζουν σημαντικά και επιλέγονται ανάλογα με τον συνδυασμό υλικού κοπτικού εργαλείου - κατεργαζόμενου

τεμαχίου και συνθηκών κοπής. Μεταξύ των τριών αυτών γωνιών, που ονομάζονται γωνίες κοπής, ισχύει η σχέση :

$$\alpha + \beta + \gamma = 90° \qquad 1.1$$

• Η γωνία ελευθερίας α, σχηματίζεται ανάμεσα στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου (δηλαδή στην επιφάνεια που κείται προς την κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου) και την κατεύθυνση της κοπής. Η γωνία α επηρεάζει την φθορά του κοπτικού εργαλείου.

• Η γωνία κοπτικού σφήνα β, είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στις επιφάνειες αποβλίττου και ελευθερίας του κοπτικού εργαλείου.

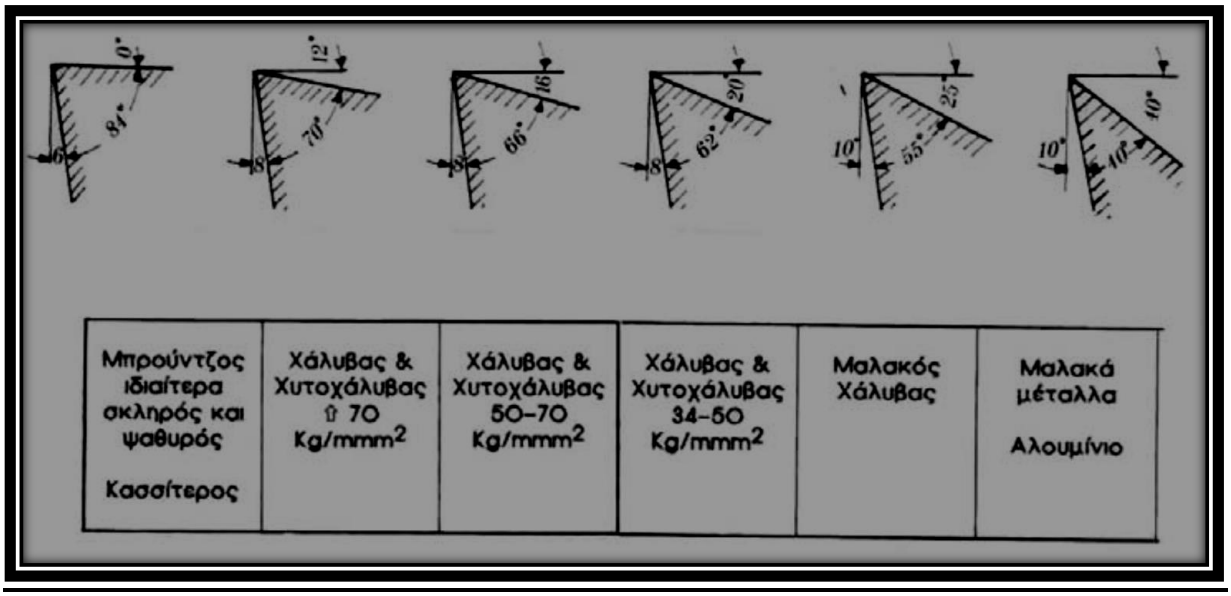
• Η γωνία αποβλίττου γ, σχηματίζεται ανάμεσα στην επιφάνεια αποβλίττου του εργαλείου (δηλαδή στην επιφάνεια επάνω στην οποία κινείται το απόβλιττο) και τη κάθετο στην κατεύθυνση της κοπής. Η γωνία γ μπορεί να πάρει τιμές θετικές, αρνητικές ή μηδέν.

Για διάφορα υλικά, παρουσιάζονται στην εικόνα 2.8, ενδεικτικές γωνίες κοπής. Από την εικόνα 2.6. γίνεται φανερό πως τα πιο μαλακά κατεργαζόμενα υλικά, απαιτούν πιο αιχμηρή κόψη του κοπτικού σφήνα ενώ τα σκληρά υλικά απαιτούν στιβαρότερο και άρα πιο χοντρό σφήνα. Συνολικά μπορεί να παρατηρηθεί πως όσο πιο μαλακό είναι ένα υλικό, τόσο οι γωνίες κοπής του κοπτικού εργαλείου πρέπει να τείνουν αντίστοιχα σε :

• αύξηση της γωνίας ελευθερίας α

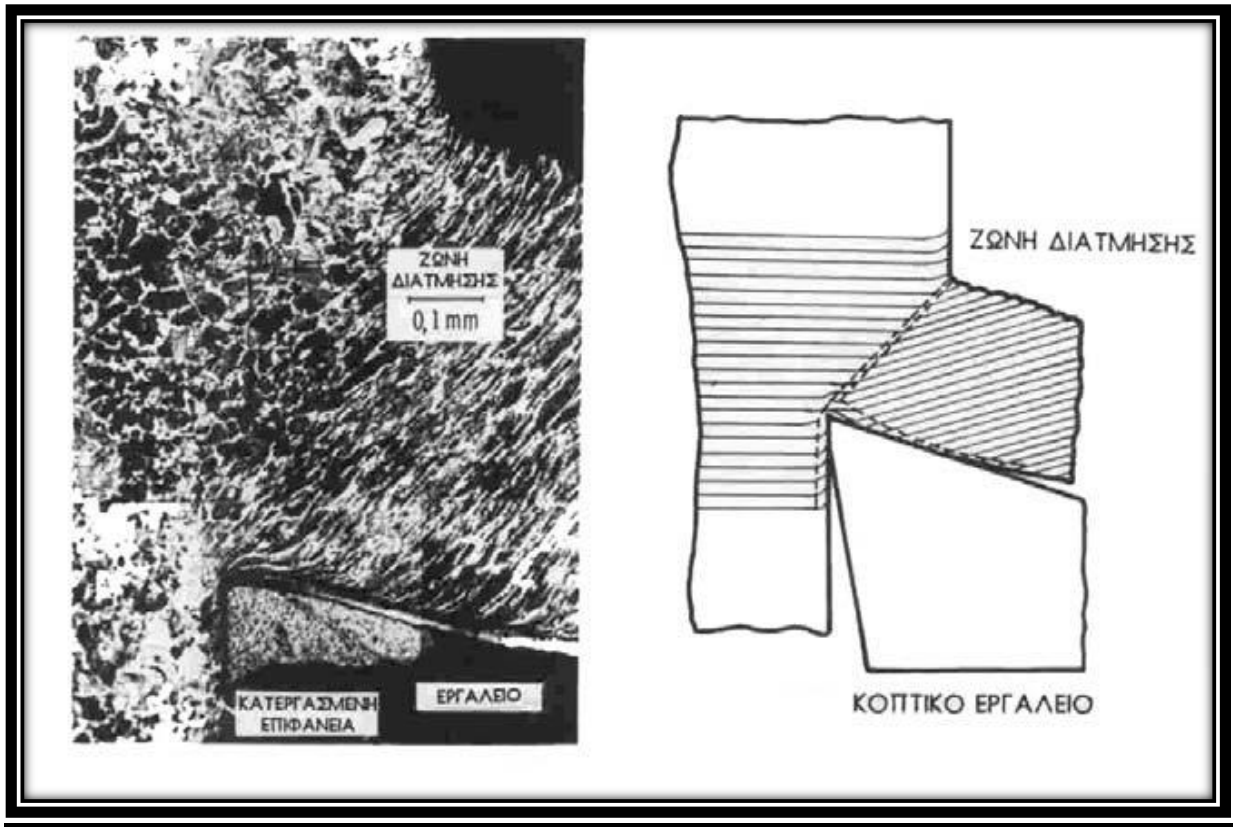
• μείωση της γωνίας σφήνας β

• αύξηση της γωνίας αποβλίττου γ



Εικόνα 2.8 Γωνίες κοπής ανάλογα με το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

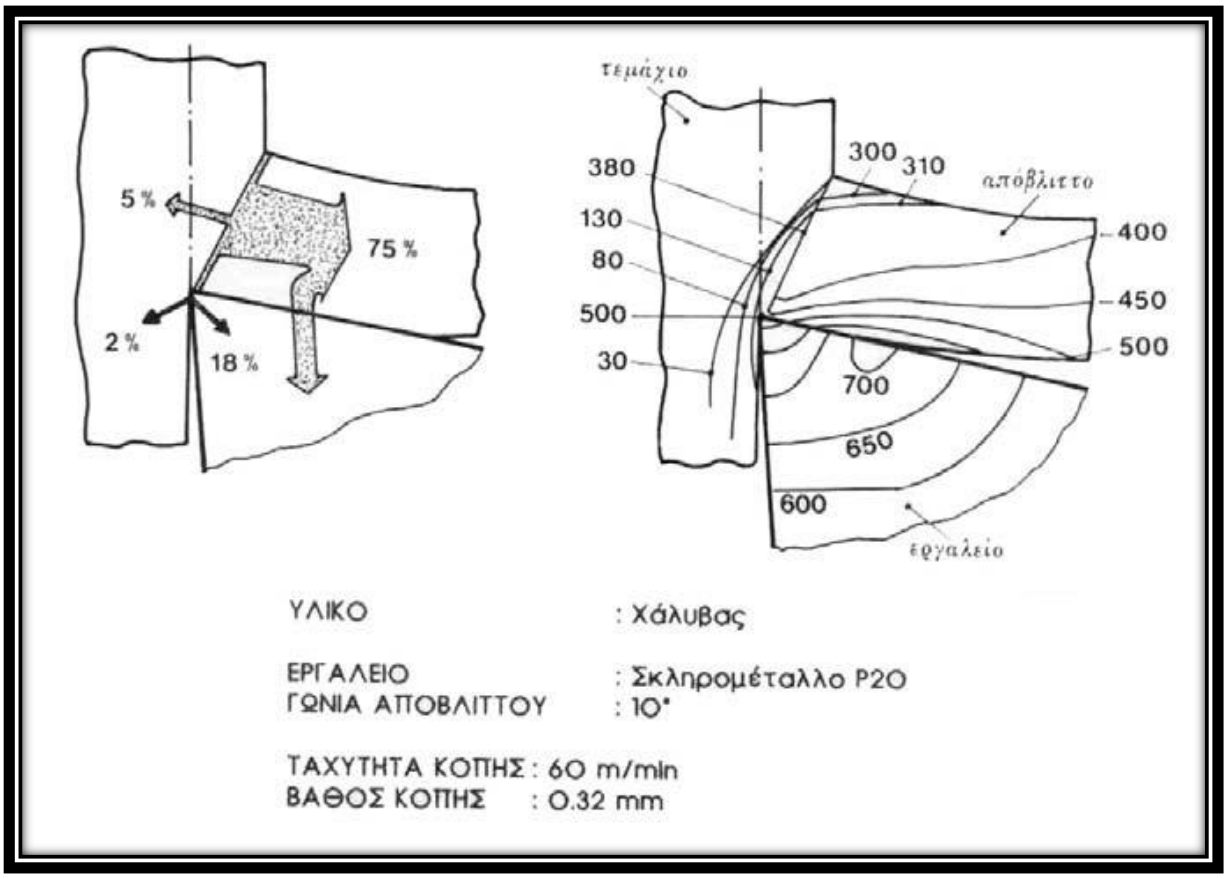
Η διαδικασία παραμόρφωσης και διάτμησης του υλικού κατά την διάρκεια της κοπής, φαίνεται στην εικόνα 2.9. Στο σχήμα αυτό παρατηρείται η θέση δημιουργίας του αποβλίττου, ενώ διακρίνονται και οι χαρακτηριστικές επιφάνειες του κοπτικού εργαλείου. Η λοξή περιοχή, όπου φαίνεται ο διαχωρισμός ανάμεσα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και το απόβλιττο, είναι η ζώνη διατμήσεως. Η φωτογραφία του σχήματος αντιστοιχεί σε κατεργασία χάλυβα Ck 53 με κοπτικό εργαλείο σκληρομέταλλο P30 και ταχύτητα κοπής 100m/min [18].



Εικόνα 2.9 Δημιουργία αποβλίττου στη ζώνη διάτμησης.

Η συνολική ενέργεια που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η κοπή, καταναλίσκεται σε δύο βασικά περιοχές, στη ζώνη διατμήσεως και στη ζώνη τριβής. Πολύ λιγότερη ενέργεια καταναλίσκεται στη θέση τριβής της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου και της κατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου. Όλες αυτές οι περιοχές ανάλωσης ενέργειας, αποτελούν και πηγές έκλυσης θερμότητας. Η παραγόμενη αυτή θερμότητα κατά την κοπή, παράγεται κατά κύριο λόγο στην ζώνη διατμήσεως και κυμαίνεται σε ποσοστό 65% έως 80 %. Η υπόλοιπη θερμότητα παράγεται στην ζώνη τριβής του αποβλίττου, πάνω στο κοπτικό εργαλείο, αλλά και στην θέση που εφάπτεται η ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου με το τεμάχιο. Η συνολική θερμότητα που παράγεται, παραλαμβάνεται από το απόβλιττο κατά κύριο

λόγο, από το κοπτικό εργαλείο και από το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Στην εικόνα 2.10, για μια περίπτωση κατεργασίας τόρνευσης χάλυβα (Kf=850 N/mm2) από κοπτικό εργαλείο σκληρομέταλλο P30 με γωνία αποβλίττου γ=10° και ταχύτητα v=60m/min, φαίνονται οι ισοθερμοκρασιακές καμπύλες στο κοπτικό εργαλείο, το απόβλιττο και το τεμάχιο καθώς και τα ποσοστά κατανομής της θερμότητας.



Εικόνα 2.10 Κατανομή θερμοκρασιών στο κατεργαζόμενο τεμάχιο – απόβλιττο και κοπτικό εργαλείο.

Από το σχήμα γίνεται φανερό πως οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο κοπτικό εργαλείο, είναι πιο υψηλές από τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο απόβλιττο ή στο τεμάχιο, ενώ η μέγιστη θερμοκρασία του εργαλείου δεν βρίσκεται στην μύτη του εργαλείου αλλά σε θέση που απέχει αρκετά από αυτήν. Το γεγονός αυτό, που έχει σχέση με την ροή του αποβλίττου πάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου, οδηγεί σε δημιουργία κοιλώματος ή κρατήρα πάνω στην επιφάνεια αυτή. Αυτή είναι χαρακτηριστική αιτία για την φθορά του κοπτικού εργαλείου. Ταυτόχρονα όμως, οι υψηλές θερμοκρασίες στην περιοχή της κοπής, έχουν και ευνοϊκή επίδραση πάνω στην κατεργαστικότητα του υλικού του τεμαχίου, μια και μειώνεται το όριο διαρροής του. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την κοπή,

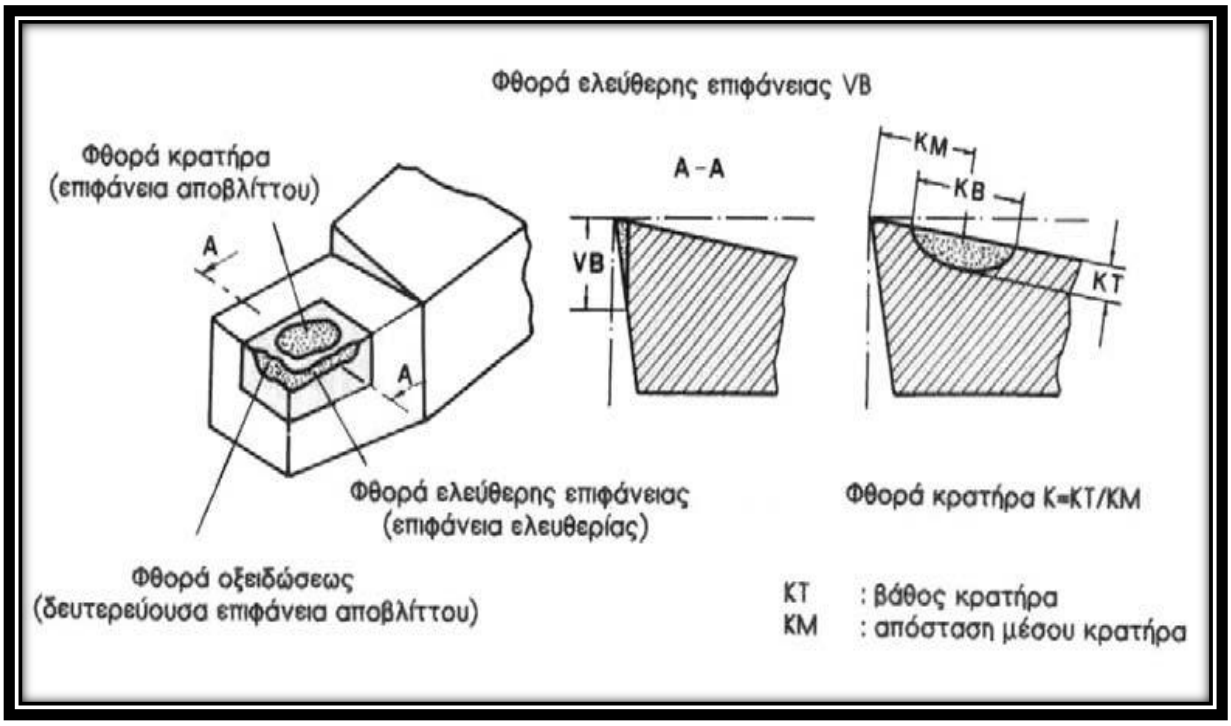
αυξάνονται όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής ή η ειδική αντίσταση κοπής του κατεργαζόμενου μετάλλου . [17]

2.1.2 Εργαλεία και κοπή

Το κοπτικό εργαλείο κατά την κοπή, υπόκειται όπως προαναφέρθηκε, σε υψηλές θερμοκρασίες και τάσεις. Αυτό έχει σαν συνέπεια το κοπτικό εργαλείο σταδιακά να φθείρεται και τελικά να αστοχεί, που σημαίνει πως είναι πλέον άχρηστο και πρέπει να επανατροχιστεί ή να απορριφθεί. Η φθορά που αναπτύσσεται παρουσιάζεται με τις παρακάτω μορφές :

- φθορά της ελεύθερης επιφάνειας
- φθορά κρατήρα στην επιφάνεια αποβλίττου
- απολέπιση της κόψης
- μικροθραύσεις, ρωγμές

Στην εικόνα 2.11. παρουσιάζονται οι μορφές φθοράς των κοπτικών εργαλείων καθώς και τα μεγέθη με τα οποία αυτή μετράται. Γενικά η φθορά του κοπτικού εργαλείου επηρεάζεται σημαντικά από το είδος της κατεργασίας, τις συνθήκες κοπής, την γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και το συνδυασμό υλικών εργαλείου – κατεργαζόμενου τεμαχίου.



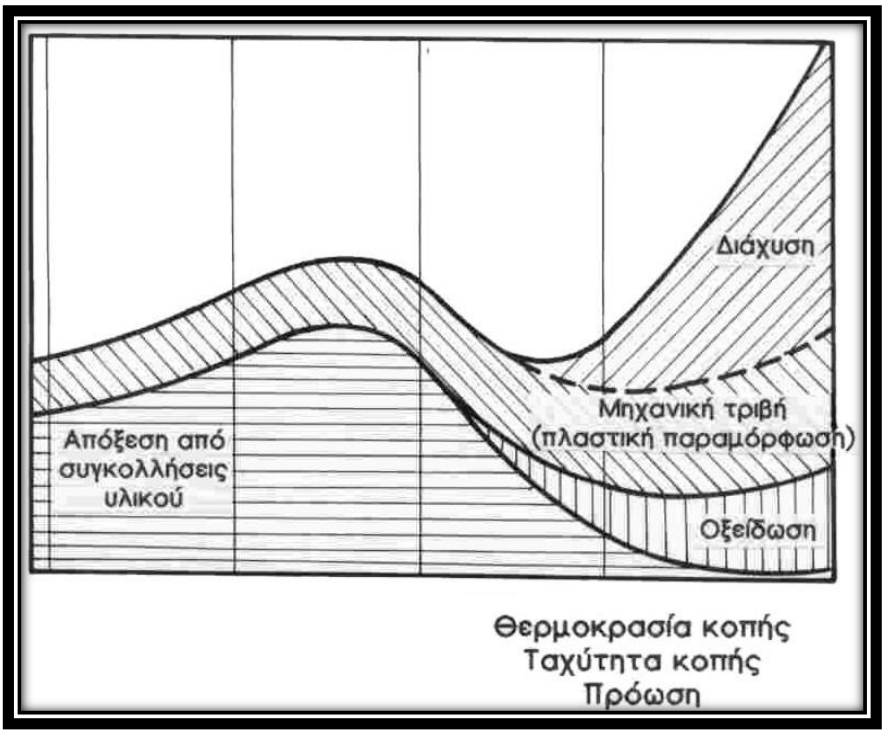
Εικόνα 2.11 Είδη φθοράς κοπτικών εργαλείων

Οι μηχανισμοί βάσει των οποίων εξελίσσεται η φθορά στα κοπτικά εργαλεία είναι οι εξής :

• *σχηματισμός και λύση συγκολλητών δεσμών* : Οι δεσμοί αυτοί δημιουργούνται λόγω της τριβής μεταξύ αποβλίττου και εργαλείου ή εργαλείου και τεμαχίου. Ο διαρκής σχηματισμός και καταστροφή των δεσμών αυτών κατά την διάρκεια της κοπής, έχει σαν συνέπεια την απόσπαση μικρών τεμαχίων από το εργαλείο προς το απόβλιττο ή το τεμάχιο αντίστοιχα.

• *απόξεση* : Σκληρά τεμαχίδια του αποβλίττου κινούμενα και συγχρόνως πιεζόμενα πάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου, την φθείρουν συνεχώς, εκτελώντας κοπή σε μικρή κλίμακα. Τα τεμαχίδια αυτά μπορεί να προέρχονται και από μικρά κομμάτια της ψευδόκοψης.

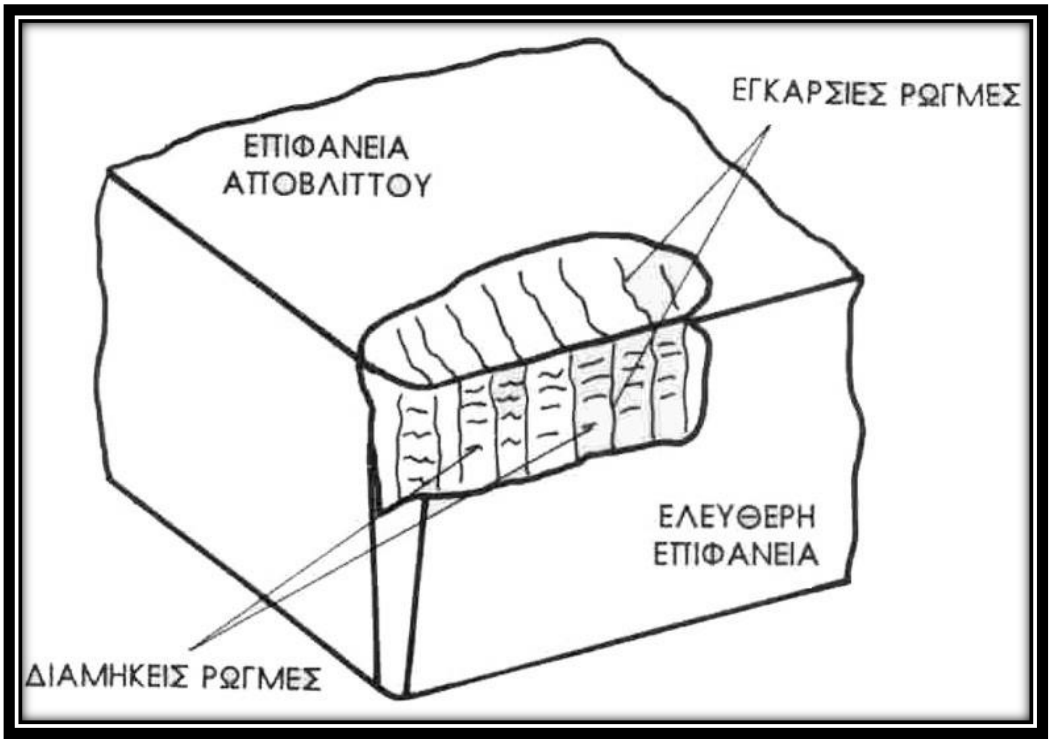
• *διάχυση στερεάς κατάστασης* : Άτομα από το υλικό του κοπτικού εργαλείου, διαχέονται προς το απόβλιττο ή το τεμάχιο, λόγω της ύπαρξης ευνοϊκών συνθηκών για διάχυση που προσφέρουν οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες και η μεταλλική επαφή του εργαλείου με το απόβλιττο ή το τεμάχιο. Συνολικά η φθορά που αναπτύσσεται στα κοπτικά εργαλεία είναι συνήθως προϊόν και των τριών προαναφερομένων μηχανισμών. Στην εικόνα 2.12, παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά την κοπή, στην ενεργοποίηση των διαφόρων μηχανισμών φθοράς.



Εικόνα 2.12 Μορφές φθοράς κατά την κοπή.

Έτσι ενώ σε χαμηλές ταχύτητες κοπής και προώσεις, άρα και αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες, η φθορά ακολουθεί κυρίως τους μηχανισμούς της απόξεσης (μέσω της ύπαρξης της ψευδόκοψης) και της φθοράς λόγω σχηματισμού και λύσης συγκολλητών δεσμών (μέσω της τριβής εργαλείου-κατεργαζόμενου τεμαχίου), όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής και η πρόωση, άρα αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες, η φθορά ακολουθεί κυρίως τον μηχανισμό της διάχυσης στερεάς κατάστασης ενώ παρουσιάζεται και οξείδωση του κοπτικού εργαλείου. Σε υψηλές θερμοκρασίες η φθορά που οφείλεται σε απόξεση είναι ελάχιστη λόγω της ελάττωσης του φαινομένου της ψευδόκοψης στις ταχύτητες αυτές.

Στην εικόνα 2.13 παρουσιάζονται οι διαμήκεις ρωγμές που αναπτύσσονται στα κοπτικά εργαλεία από σκληρομέταλλα λόγω πολύ υψηλών θερμοκρασιών κοπής. Οι αντίστοιχες διαμήκεις ρωγμές εμφανίζονται λόγω υψηλών μηχανικών καταπονήσεων. [18]



Εικόνα 2.13 Ρωγμές σε κοπτικά εργαλεία από σκληρομέταλλο.

2.1.3. Υλικά κοπτικών εργαλείων

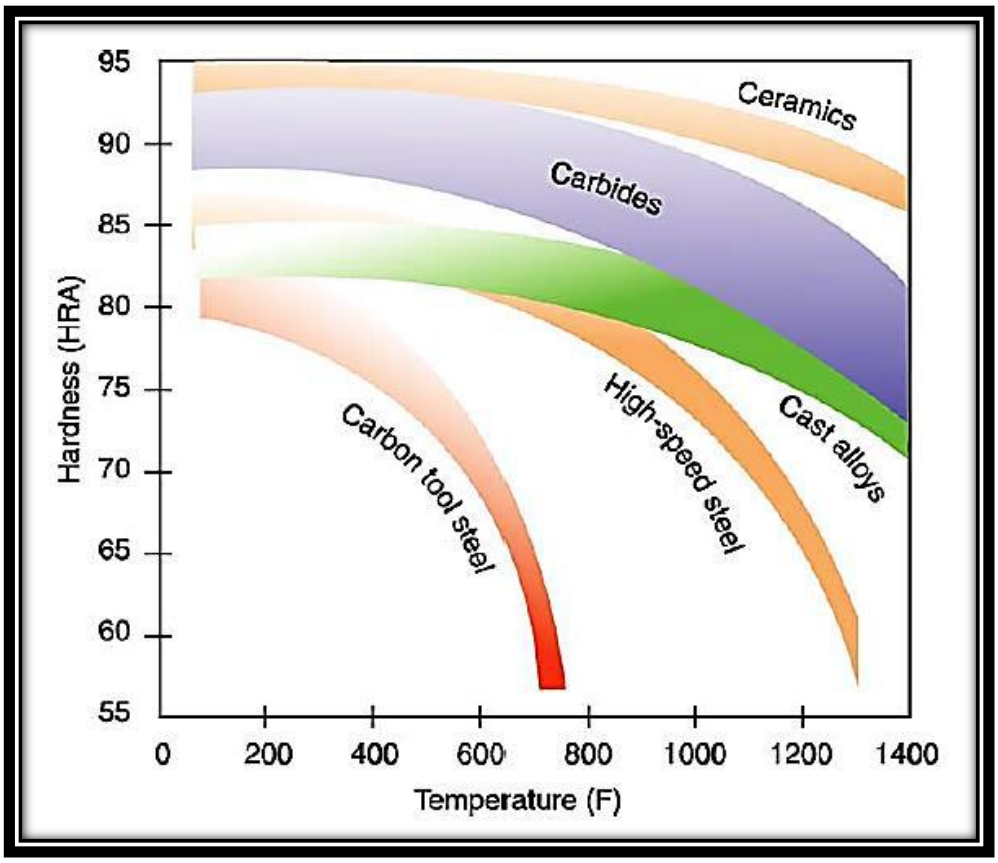
Κοπτικό εργαλείο ονομάζεται το μέσο, το οποίο χρησιμοποιείται για να απομακρύνει το ανεπιθύμητο υλικό από ένα τεμάχιο. Είναι βασικό και απαραίτητο συστατικό για την διεξαγωγή της κατεργασίας.

Στην παραγωγή κοπτικών εργαλείων, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν δύο παράγοντες, το υλικό και η γεωμετρία του. Στις μέρες μας πληθώρα υλικών, όπως οι ανθρακούχοι χάλυβες, οι ταχυχάλυβες, τα σκληρομέταλλα, τα κεραμικά, ο κυβικός βοριονιτρίτης και το διαμάντι, χρησιμοποιούνται ως κοπτικά εργαλεία στη βιομηχανία. Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό, ότι υπάρχουν διαφορές μεταξύ των διαφόρων υλικών και η κατάλληλη εφαρμογή είναι διαφορετική για κάθε τύπο υλικού.

Ένα κοπτικό εργαλείο πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- ***Σκληρότητα*:** Το υλικό του εργαλείου πρέπει να είναι σκληρότερο από το υλικό του τεμαχίου. Όσο μεγαλύτερη είναι η σκληρότητα του εργαλείου, τόσο ευκολότερο είναι να διεισδύσει στο τεμάχιο. η σκληρότητα του εργαλείου. Συνδέεται επίσης και με άλλους παράγοντες, όπως η φθορά.
- ***Θερμή σκληρότητα*:** Είναι η ικανότητα του κοπτικού εργαλείου να διατηρεί τη σκληρότητα και την αντοχή του σε αυξημένες θερμοκρασίες. Η ιδιότητα αυτή είναι σημαντική κυρίως όταν το εργαλείο χρησιμοποιείται σε υψηλές ταχύτητες κοπής, ώστε να αυξηθεί η παραγωγικότητα.
- ***Αντοχή*:** Το εργαλείο πρέπει να έχει επαρκή αντοχή, ώστε να αντέχει στα κρουστικά φορτία που εμφανίζονται κατά την έναρξη της κοπής ή όταν το εργαλείο συναντά ατέλειες στο κατεργαζόμενο υλικό και πρέπει να αντιμετωπίσει τη διακύμανση των δυνάμεων. Η αντοχή είναι απαραίτητη, ώστε το εργαλείο να μην κάνει ρωγμές, ιδίως κατά τη διάρκεια της λειτουργίας διακοπτόμενης κοπής.
- ***Αντίσταση στη φθορά*:** Οι διεπιφάνειες εργαλείου-αποβλίττου και αποβλίττου-τεμαχίου εκτίθενται σε συνθήκες, οι οποίες ευνοούν τη φθορά λόγω προσκόλλησης ή απόξεσης. Η αντίσταση στη φθορά αφορά στη διατήρηση αποδεκτής διάρκειας ζωής, προτού χρειαστεί η αντικατάσταση του εργαλείου.
- ***Χαμηλή τριβή*:** Ο συντελεστής τριβής μεταξύ του εργαλείου και του αποβλίττου πρέπει να είναι χαμηλός. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται χαμηλότερος ρυθμός φθοράς και καλύτερη ροή του αποβλίττου.
- ***Θερμικά χαρακτηριστικά*:** Λόγω του ότι παράγεται μεγάλο ποσό θερμότητας στη ζώνη κοπής, το υλικό του κοπτικού εργαλείου πρέπει να έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, ώστε να αποβάλει τη θερμότητα αυτή στο συντομότερο δυνατό χρόνο. Διαφορετικά η θερμοκρασία του εργαλείου αυξάνεται, πράγμα το οποίο μειώνει τη διάρκεια ζωής του.

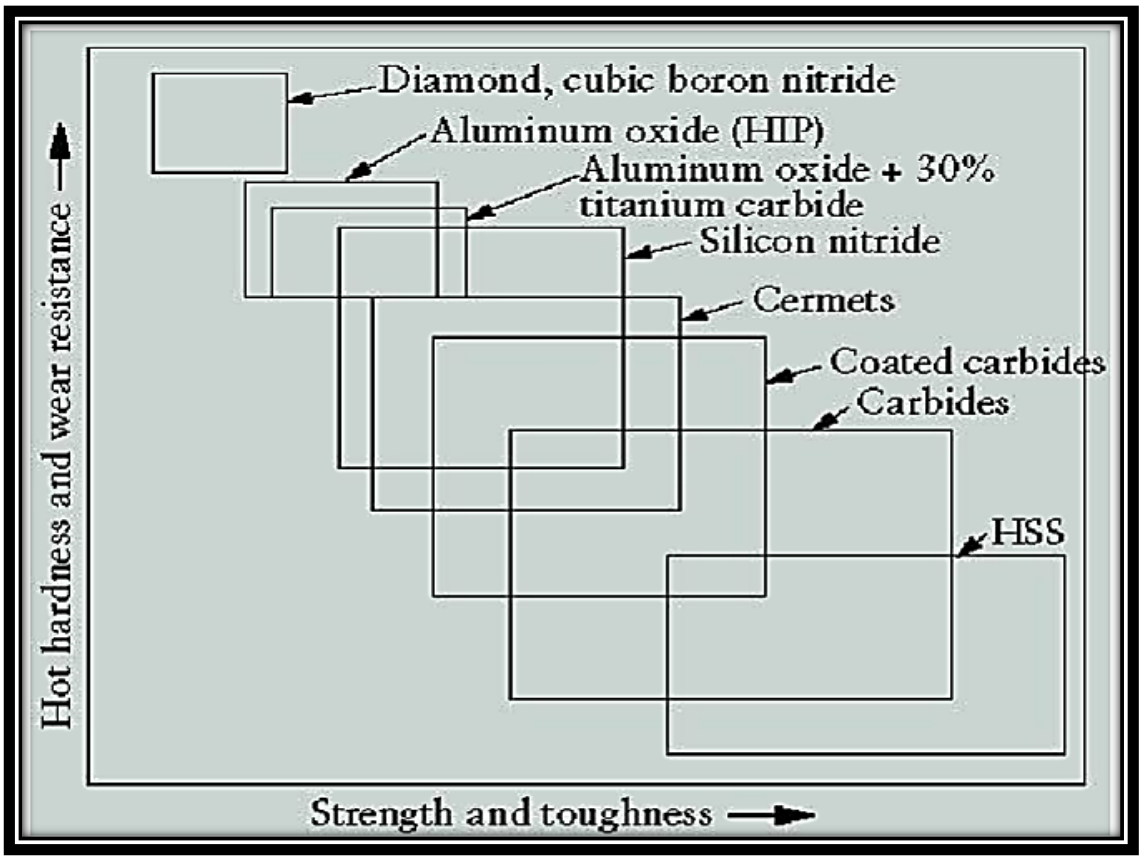
Το υλικό του κοπτικού εργαλείου πρέπει να είναι χημικά αδρανές ως προς το υλικό κατεργασίας και το υγρό κοπής. Στην Εικόνα 2.14 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα, το οποίο παρουσιάζει τη μεταβολή της σκληρότητας των βασικών κατηγοριών υλικών κοπτικών εργαλείων, οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια, ως προς τη θερμοκρασία. [19].



Εικόνα 2.14 Σκληρότητα υλικού κοπτικού εργαλείου συναρτήσει θερμοκρασίας [19].

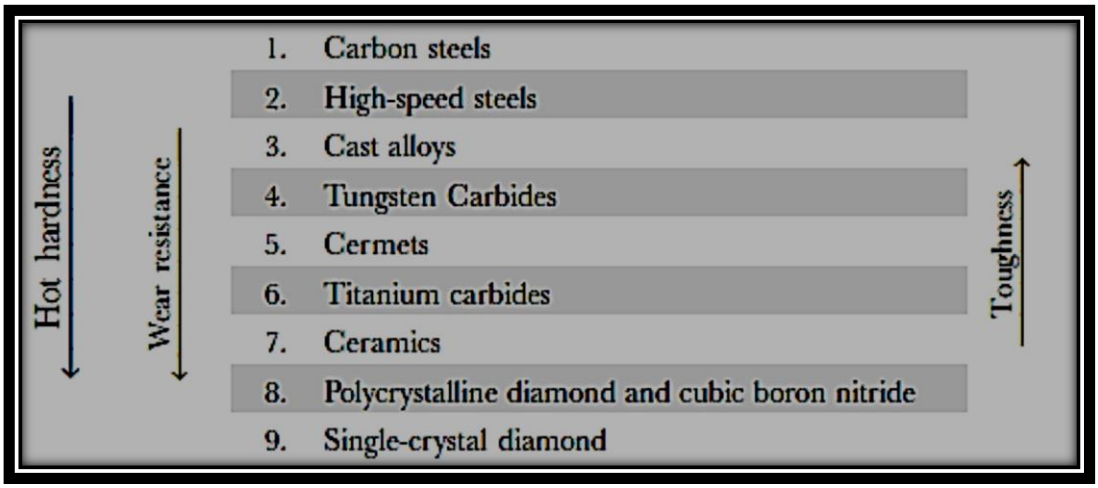
Είναι εμφανές ότι η σκληρότητα των κοπτικών εργαλείων μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας (θερμή σκληρότητα), και ανάλογα με το υλικό η μείωση αυτή είναι πιο ομαλή (π.χ. κεραμικά) ή πιο απότομα (π.χ. ταχυχάλυβας). Το εύρος που παρουσιάζεται σε κάθε κατηγορία υλικών οφείλεται στην ποικιλία που μπορεί να υπάρχει στη σύσταση του υλικού και στις διαθέσιμες επεξεργασίες σε κάθε κατηγορία, πράγμα το οποίο οδηγεί σε ορισμένες περιπτώσεις σε αλληλοεπικάλυψη των κατηγοριών.

Όμως είναι σαφές ότι οι βασικές απαιτήσεις των κοπτικών εργαλείων είναι σε ορισμένες περιπτώσεις αντικρουόμενες και κατά συνέπεια δεν υπάρχει υλικό που να ικανοποιεί όλες τις παραπάνω απαιτήσεις. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη μιας μεγάλης ποικιλίας υλικών κοπτικών εργαλείων. Μια σύγκριση μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών που θα εξεταστούν στη συνέχεια στην εικόνα 2.15.



Εικόνα 2.15 Εύρος ιδιοτήτων διαφόρων ομάδων κοπτικών εργαλείων [19].

Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η αντοχή των υλικών μειώνεται η θερμή σκληρότητα και η αντίσταση στη φθορά και αντίστροφα. Έτσι, υλικά με μεγάλη θερμή σκληρότητα και αντίσταση στη φθορά, όπως το διαμάντι και ο κυβικός βοριονιτρίτης, παρουσιάζουν χαμηλή σκληρότητα και αντοχή. Το ίδιο διάγραμμα, με μια ελαφρώς διαφορετική κατηγοριοποίηση παρουσιάζεται στην εικόνα 2.16.



Εικόνα 2.16. Σύγκριση μεταξύ των βασικών κατηγοριών υλικών κοπτικών εργαλείων.

Αναλυτικότερα οι ιδιότητες των υλικών αυτών παρουσιάζονται στην εικόνα 2.17.

Property	High-speed steel	Cast alloys	Tungsten carbides	Titanium carbide	Ceramics	Cubic boron nitride	Single-crystal diamond
Hardness	83–86 HRA	82–84 HRA	90–95 HRA	91–93 HRA	91–95 HRA	4000–5000 HK	7000–8000 HK
Compressive strength, MPa	4100–4500	1500–2300	4100–5850	3100–3850	2750–4500	6900	6900
Transverse rupture strength, MPa	2400–4800	1380–2050	1050–2600	1380–1900	345–950	700	1350
Impact strength, J	1.35–8	0.34–1.25	0.34–1.35	0.79–1.24	< 0.1	< 0.5	< 0.2
Modulus of elasticity, GPa	200	–	520–690	310–450	310–410	850	820–1050
Density, kg/m³	8600	8000–8700	10,000–15,000	5500–5800	4000–4500	3500	3500
Volume of hard phase (%)	7–15	10–20	70–90	–	100	95	95
Melting of decomposition temperature, °C	1300	–	1400	1400	2000	1300	700
Thermal conductivity, W/mK	30–50	–	42–125	17	29	13	500–2000
Coefficient of thermal expansion, × 10⁻⁶/°C	12	–	4–6.5	7.5–9	6–8.5	4.8	1.5–4.8

Εικόνα 2.17 Ιδιότητες υλικών κοπτικών εργαλείων [19].

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

Η ανάγκη για υλικά εργαλείων, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να αντέχουν σε υψηλές ταχύτητες και θερμοκρασίες, οδήγησαν στην ανάπτυξη των ταχυχάλυβων (HSS). Τα εργαλεία από ταχυχάλυβα διαφέρουν σημαντικά από τα εργαλεία από απλό χάλυβα, λόγω της προσθήκης κραματικών στοιχείων, τα οποία τα κάνουν ανθεκτικά στη θερμότητα. Μερικά από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα στοιχεία είναι το μαγγάνιο, το χρώμιο, το βολφράμιο, το βανάδιο, το μολυβδαίνιο, το κοβάλτιο και το νιόβιο. Παρόλο που το κάθε στοιχείο εισάγει κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όλα τους βοηθούν εν γένει στην ικανότητα σκλήρυνσης, στην αντίσταση στη θερμότητα και στην αποξεστική φθορά, καθώς και στην

αντοχή του εργαλείου ταχυχάλυβα. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτρέπουν υψηλότερες ταχύτητες και καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τον απλό χάλυβα.

Οι πιο κοινοί ταχυχάλυβες που χρησιμοποιούνται ως κοπτικά εργαλεία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τους ταχυχάλυβες βολφραμίου (τύπος Τ) και τους ταχυχάλυβες μολυβδαινίου (τύπος Μ). Παρόλο που παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα, η κάθε κατηγορία εξυπηρετεί συγκεκριμένους σκοπούς. Ένα σημαντικό σημείο είναι το γεγονός ότι τα στοιχεία αυτά δεν είναι σε αφθονία και η χρήση τους εκτοξεύει το κόστος. Ο τύπος Μ έχει καλύτερη αντιτριβική συμπεριφορά από τον τύπο Τ, μικρότερη παραμόρφωση σε θερμικές κατεργασίες και είναι φθηνότερος. Έτσι καλύπτει πάνω από 80% της παραγωγής ταχυχαλύβων. Ταχυχάλυβες κατασκευάζονται με σύντηξη και για καλύτερη ομοιογένεια με κονιομεταλλουργία. Η πλειοψηφία των συμβατικών ταχυχαλύβων εγχύεται σε μια ράβδο, θερμή ή ψυχρή, και κατεργάζεται στην επιθυμητή μορφή. Για την κατασκευή κονιοποιημένων μετάλλων χρησιμοποιούνται τα ίδια στοιχεία, συμπιέζονται σε μια μήτρα υπό εξαιρετικά μεγάλη πίεση και πυροσυσσωματώνονται σε έναν ατμοσφαιρικά ελεγχόμενο κλίβανο [19].



Εικόνα 2.18 Κοπτικά εργαλεία από ταχυχάλυβα.

Στην προσπάθεια επέκτασης της διάρκειας ζωής των ταχυχαλύβων, μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας και ελέγχου των υπόλοιπων παραγόντων που επηρεάζουν τις συνθήκες λειτουργίας και το κόστος, έχουν αναπτυχθεί διάφορες επιφανειακές επεξεργασίες. Μερικές από αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί για χρόνια και έχει αποδειχτεί ότι έχουν θετική συνεισφορά. Για παράδειγμα, η επίστρωση καρβιδίου του τιτανίου, η οποία χρησιμοποιείται εδώ και χρόνια στους τροχούς λειτουργεί ως πρόληψη κατά της συσσώρευσης στο εργαλείο. Μια από τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στις επιστρώσεις ταχυχαλύβων είναι η χρήση νιτρικού τιτανίου μέσω της μεθόδου φυσικής απόθεσης ατμού (PVD). Μια μονάδα φυσικής εναπόθεσης ατμών παρουσιάζεται στην εικόνα 2.19. Το νιτρικό τιτάνιο αποτίθεται στην επιφάνεια του εργαλείου σε έναν από τους διαφορετικούς τύπους κλιβάνων σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, πράγμα το οποίο επηρεάζει τη θερμική επεξεργασία (σκληρότητα) του εργαλείου, στο οποίο γίνεται η επικάλυψη. Η επικάλυψη αυτή επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του εργαλείου σημαντικά και επιτρέπει στο εργαλείο να χρησιμοποιείται σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας. Η διάρκεια ζωής του εργαλείου μπορεί να επεκταθεί έως και τρεις φορές ή οι ταχύτητες κατεργασίας μπορούν να αυξηθούν ως 50%. Επικάλυψη TiN σε ταχυχάλυβες τους προσδίδει χαρακτηριστικό κίτρινο-χρυσό χρώμα [19].



Εικόνα 2.19 Μονάδα φυσικής εναπόθεσης ατμών.

Η χρήση κραματικών στοιχείων σε ταχυχάλυβες, ιδίως του κοβαλτίου, του χρωμίου και του βολφραμίου, βελτίωσε σημαντικά τις ιδιότητες κοπής, σε σημείο που οι ερευνητές μεταλλουργοί δημιούργησαν τα χυτά κράματα, μια οικογένεια τέτοιων υλικών χωρίς σίδηρο. Μια τυπική σύσταση ενός υλικού εργαλείου αυτής της κατηγορίας είναι 45% κοβάλτιο, 32% χρώμιο, 21% βολφράμιο και 2% άνθρακας. Ο σκοπός αυτής της κραμάτωσης είναι η

δημιουργία ενός κοπτικού εργαλείου με θερμή σκληρότητα μεγαλύτερη από αυτή των ταχυχαλύβων. Όταν χρησιμοποιούνται εργαλεία χυτών κραμάτων, η ευθραυστότητά τους πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και πρέπει να παρέχεται πάντα επαρκής υποστήριξη. Τα χυτά κράματα παρέχουν υψηλή αποξεστική αντίσταση και είναι κατάλληλα για τη διακοπτόμενη κοπή υλικών ή υλικών με σκληρά εγκλείσματα.

Το καθαρό βολφράμιο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του βασικού εργαλείου σκληρομετάλλου, λόγω του ότι είναι εξαιρετικά σκληρό και προσφέρει μεγάλη αντίσταση έναντι της αποξεστικής φθοράς. Τα πιο συνήθη κραματικά υλικά που προστίθενται στο βασικό υλικό βολφραμίου/κοβαλτίου είναι το καρβίδιο του τανταλίου και το καρβίδιο του τιτανίου.

Τα σκληρομέταλλα αποτελούνται από καρβίδια και ένα συνδετικό υλικό. Οι τρεις βασικές κατηγορίες σκληρομετάλλων είναι:

- το καρβίδιο του βολφραμίου με κοβάλτιο ως συνδετικό
- το καρβίδιο του τιτανίου με συνδετικό νικέλιο και μολυβδαίνιο
- επικαλυμμένα καρβίδια με καρβίδιο του τιτανίου, νιτρίδιο του τιτανίου και αλούμινα

Το καρβίδιο του βολφραμίου ανακαλύφθηκε σε μια προσπάθεια δημιουργίας ενός τεχνητού διαμαντιού. Αρχικά, τα σκληρομέταλλα αποτελούνταν από το βασικό σύστημα καρβιδίου του βολφραμίου με κοβάλτιο ως συνδετικό. Τα καρβίδια αυτά είχαν εξαιρετική επίδοση στην κατεργασία του χυτού σιδήρου, των μη σιδηρούχων και μη μεταλλικών υλικών, αλλά είχαν απογοητευτική επίδοση στην κατεργασία του χάλυβα.

Οι περισσότερες από τις εξελίξεις που ακολούθησαν αποτελούν τροποποιήσεις της αρχικής πατέντας, κυρίως μέσω της αντικατάστασης μέρους ή όλων των καρβιδίων βολφραμίου με άλλα καρβίδια, ειδικά καρβίδια του τιτανίου και/ή καρβίδιο του τανταλίου. Το κύριο πλεονέκτημά τους έναντι των ταχυχάλυβων είναι η ικανότητά τους να λειτουργούν σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής, περίπου 3-5 φορές ταχύτερα. Τα σκληρομέταλλα έχουν αντικαταστήσει τους ταχυχάλυβες σε μεγάλο βαθμό σε πολλές κατεργασίες και κατέχουν ποσοστό πάνω από το 50% της παγκόσμιας παρασκευής κοπτικών εργαλείων. Το ποσοστό των ταχυχάλυβων ανέρχεται στο 40%, ενώ το υπόλοιπο 10% μοιράζονται όλα τα υπόλοιπα υλικά.

Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη των σύγχρονων πολυκαρβιδικών υλικών κοπτικών εργαλείων, επιτρέποντας την κατεργασία υψηλής ταχύτητας του χάλυβα. Ένα νέο φαινόμενο αποτέλεσε η δημιουργία των επιστοιχειωμένων καρβιδίων και πάλι με σκοπό την αύξηση της ταχύτητας της κατεργασίας. Οι θερμικές κατεργασίες των προηγούμενων υλικών κοπτικών εργαλείων, εξαρτώνται σημαντικά από τις θερμικές ιδιότητες, ενώ με τη σειρά τους, οι

ιδιότητες αυτές μπορούν να καταστραφούν με περαιτέρω θερμική κατεργασία. Σε υψηλές ταχύτητες και κατά συνέπεια υψηλές θερμοκρασίες, αυτά τα προϊόντα μεταλλουργίας αστοχούν. Στα επιστοιχειωμένα καρβίδια όμως ισχύουν διαφορετικές συνθήκες. Η σκληρότητα του καρβιδίου είναι μεγαλύτερη από τη σκληρότητα των περισσότερων υλικών εργαλείων σε θερμοκρασία δωματίου, και το καρβίδιο έχει τη δυνατότητα να διατηρεί τη σκληρότητά του σε υψηλές θερμοκρασίες σε μεγαλύτερο βαθμό . Με τον τρόπο αυτό οι υψηλές ταχύτητες μπορούν να υποστηριχθούν ικανοποιητικά.[19]



Εικόνα 2.20.: Κοπτικά εργαλεία από καρβίδιο του βολφραμίου

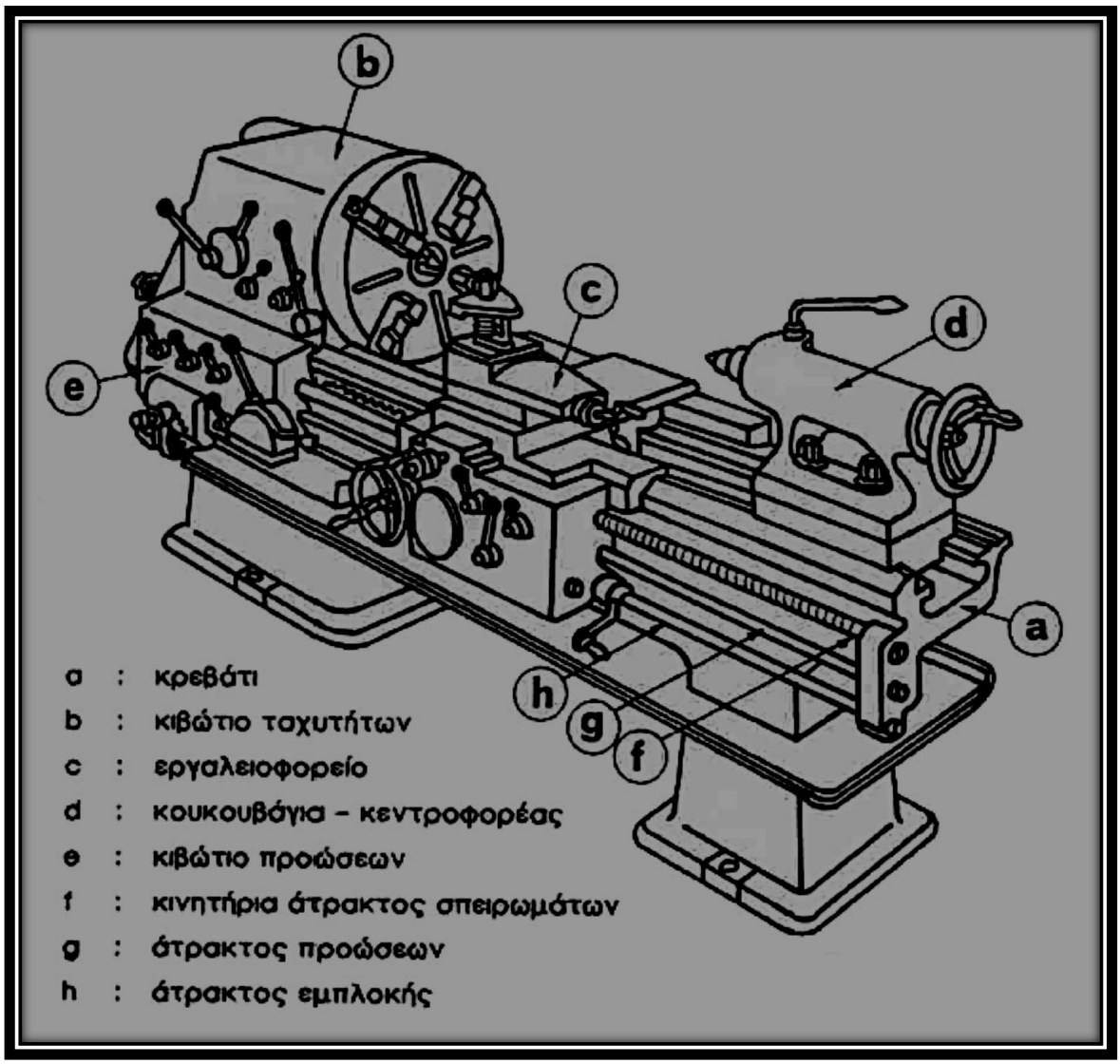
2.1.4 Εργαλειομηχανές και κατεργασίες

Κάθε κατεργασία αφαίρεσης υλικού μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια της αντίστοιχης εργαλειομηχανής που δύναται να υλοποιήσει τις κινήσεις τεμαχίου και κοπτικού/ών που απαιτούνται. Με βάση τη σημαντικότητά τους περιγράφονται η Τόρνευση, το Φρεζάρισμα, η Διάτρηση, η Λείανση και οι κατεργασίες που γενικότερα υλοποιούνται με τη βοήθεια του αριθμητικού ελέγχου.

2.1.4.1 Η Τόρνευση

Η τόρνευση σαν κατεργασία χρησιμοποιείται από πολύ παλαιά, γύρω όμως στο 1400 μ.Χ. εμφανίστηκαν οι πρώτοι τόρνοι που στην αρχή κινούνταν με μυϊκή δύναμη ή με νερό σαν τους

κατοπινούς υδρόμυλους. Με τόρνευση κατεργάζονται τεμάχια συμμετρικά εκ περιστροφής με κατά κανόνα κυκλική διατομή. Κατά την τόρνευση, το κατεργαζόμενο τεμάχιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, συγκρατημένο στον σφικτήρα (τσοκ) του τόρνου. Με αυτόν τον τρόπο, συγκρούεται με το κοπτικό εργαλείο, το οποίο έχει δυνατότητα εγκάρσιας και διαμήκους μετακίνησης και έτσι απομακρύνεται υλικό από το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Οι κινήσεις αυτές κατά την τόρνευση.



Εικόνα 2.21 Μέρη του τόρνου.

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

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

Η τεχνολογία όμως της κοπής κατά βάση παραμένει η ίδια. Έτσι οι επιλεγόμενες ταχύτητες κοπής, οι προώσεις, τα κοπτικά εργαλεία κ.λπ, καθορίζονται και στις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα. Η αυτοματοποίηση αυτή των κατεργασιών που γίνεται τις τελευταίες δεκαετίες, δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να καταργήσει την αναγκαιότητα γνώσης των υλικών, των καταλλήλων συνθηκών κοπής, της συμπεριφοράς της φθοράς των κοπτικών εργαλείων και γενικά αυτού που ονομάζεται τεχνολογία της κοπής.

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

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

Στην τόρνευση οι συνθήκες κοπής είναι η ταχύτητα κοπής που σχετίζεται με τις στροφές περιστροφής του κομματιού και την διάμετρο κοπής, η πρόωση και το βάθος κοπής. Οι τρεις αυτοί παράγοντες παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατεργασία και η σωστή κάθε φορά επιλογή τους, αποτελεί απαραίτητη γνώση του χειριστή ενός τόρνου [19].

2.1.4.2 Το Φρεζάρισμα

Με φρεζάρισμα κατεργάζονται τεμάχια από διάφορα υλικά όπως χάλυβα, χυτοσίδηρο, συνθετικά υλικά κ.λπ, με επίπεδες ή καμπύλες επιφάνειες, εσοχές, αυλάκια ακόμα και οδοντωτοί τροχοί. Τα τεμάχια αυτά, συνήθως εκχονδρίζονται ή φινιρίζονται (αποπερατώνονται) ενώ, όταν απαιτούνται πολύ καλές επιφάνειες, σαν τελική κατεργασία χρησιμοποιείται η λείανση.

Στο φρεζάρισμα τα απόβλιττα απομακρύνονται από ένα περιστρεφόμενο κοπτικό εργαλείο, το οποίο διαθέτει πολλές κοπτικές ακμές διατεταγμένες σε κύκλο, ενώ για να μπορεί να

εισέρχεται το εργαλείο στο κατεργαζόμενο κομμάτι, οι κοπτικές ακμές έχουν την μορφή του σφήνα που έχει και το εργαλείο τόρνευσης. Η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου αποτελεί και την κύρια κίνηση κοπής. Για την συνέχεια της κοπής το κατεργαζόμενο κομμάτι, το οποίο είναι "δεμένο" στο τραπέζι της εργαλειομηχανής, μετατοπίζεται με προκαθορισμένο ρυθμό, ο οποίος ονομάζεται πρόωση. Κατά την διάρκεια της κοπής, τα κοπτικά δόντια μιας φρέζας (φρέζα ονομάζεται η εργαλειομηχανή, αλλά συχνά φρέζα καλείται και το κοπτικό εργαλείο φρεζαρίσματος), εισέρχονται και εξέρχονται το καθένα από το κομμάτι μέσα σε ένα μικρό μέρος της πλήρους περιστροφής του εργαλείου. Αυτό έχει σαν συνέπεια τα κοπτικά δόντια να προλαβαίνουν να απάγουν θερμότητα στο διάστημα που δεν κόβουν και έτσι να μην καταπονούνται θερμικά, όπως το εργαλείο της τόρνευσης το οποίο εκτελεί συνεχή κοπή. Η κοπή για αυτό τον λόγο στο φρεζάρισμα, λέγεται διακοπτόμενη.

Η διαμόρφωση διαφόρων μορφών και τεμαχίων στη φρέζα, απαιτεί και διάφορους τύπους εργαλειομηχανών για οικονομικότερη κατεργασία. Έτσι διακρίνονται οι εξής βασικοί τύποι :

- Οριζόντια φρεζομηχανή
- Κάθετη φρεζομηχανή
- Κέντρο κατεργασίας

Η οριζόντια φρέζα έχει χαρακτηριστικό της, ότι ο κύριος άξονας που μεταφέρει κίνηση στο εργαλείο, είναι οριζόντιος. Χρησιμοποιείται για γενικές εργασίες σε αντίθεση με την κάθετη φρέζα η οποία χρησιμοποιείται περισσότερο για κατεργασίες αποπεράτωσης. Τέτοιες εργαλειομηχανές στην ψηφιακή καθοδήγηση χαρακτηρίζονται και ονομάζονται, από το πλήθος των κατευθύνσεων των κινήσεων οι οποίες μπορούν να καθοδηγηθούν από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και το πρόγραμμα καθοδήγησης. Έτσι μια εργαλειομηχανή η οποία μπορεί και κινεί ταυτόχρονα το τραπέζι στο οριζόντιο επίπεδο, αλλά στην κατακόρυφο δεν υπάρχει αυτόματη καθοδήγηση, είναι μια φρέζα 2 αξόνων. Αν στην κατακόρυφο υπάρχει καθοδήγηση, αλλά όχι ταυτόχρονα με την καθοδήγηση του οριζοντίου επιπέδου, τότε καλείται 2 1/2 αξόνων. Αντίστοιχα η ταυτόχρονη καθοδήγηση του τραπεζιού μιας φρέζας και στις τρεις κατευθύνσεις (δύο οριζόντιες και την κάθετη), την κατατάσσει στις φρέζες 3 αξόνων ή τριαξονικές και τέλος, ανάλογα με τις δυνατότητες περιστροφής του τραπεζιού ή της προβοσκίδας με το εργαλείο, μπορεί μια φρέζα να είναι 4, 5 ή 6 αξόνων. Φυσικά όσο οι άξονες αυξάνονται, τόσο η φρέζα παρέχει μεγαλύτερες δυνατότητες και το κόστος της είναι μεγαλύτερο.[15]

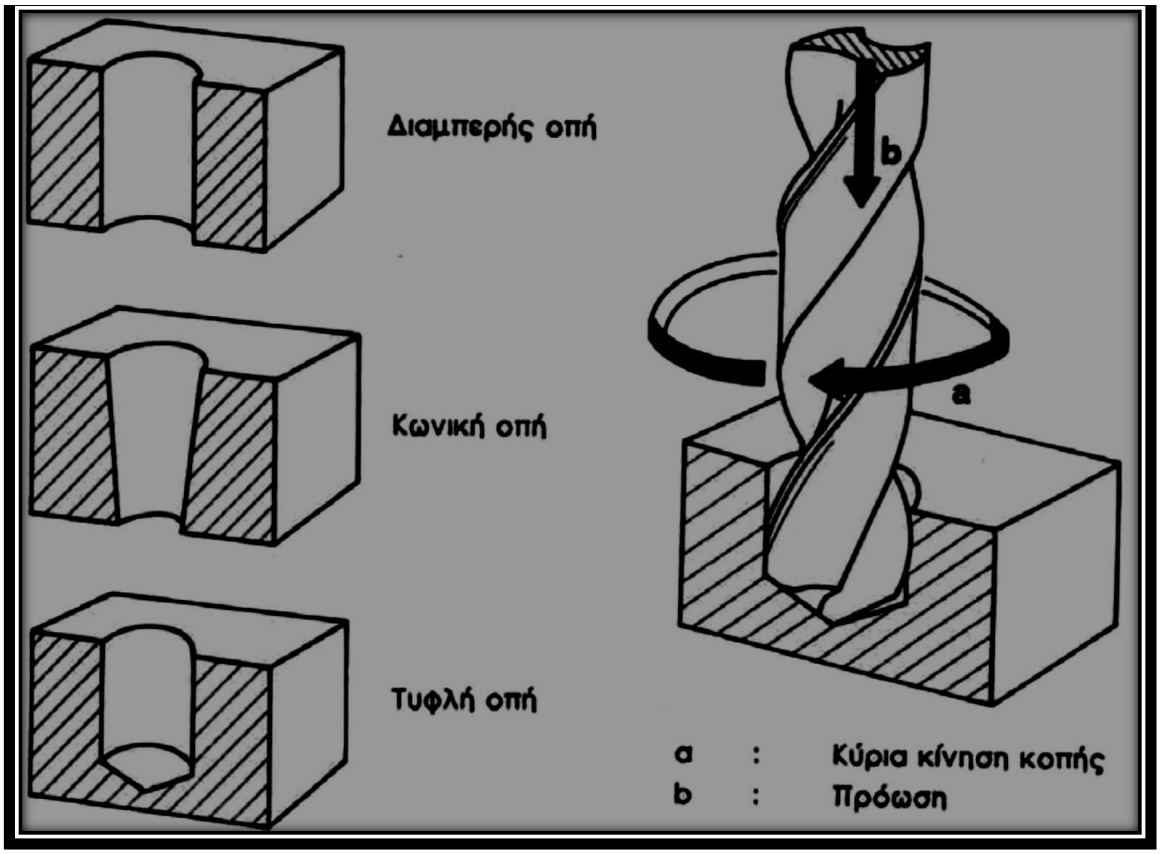


Εικόνα 2.22 Φρέζα.

2.1.4.3 Η Διάτρηση

Τα περισσότερα από τα μηχανολογικά εξαρτήματα διαθέτουν οπές διαφόρων μορφών και μεγεθών. Τις περισσότερες φορές τέτοιες οπές κατεργάζονται με διάτρηση. Η διάτρηση σαν κατεργασία χρησιμοποιείται για κατεργασία οπών σε αντικείμενα μεταλλικά ή μη μεταλλικά. Οι οπές που μπορούν να κατεργαστούν μπορεί να έχουν διάφορες μορφές. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την διάτρηση σε πλήρες υλικό έχει δύο κοπτικές ακμές, ενώ για την εξέλιξη της διάτρησης απαιτείται το κοπτικό αυτό εργαλείο να κάνει ταυτόχρονα δύο κινήσεις. Η κύρια κίνηση κοπής είναι η περιστροφή του δραπάνου, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις όπως το boring, υπάρχει δυνατότητα αυτό που περιστρέφεται να είναι το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η ταχύτητα κοπής, που εξαρτάται από τον αριθμό στροφών του εργαλείου, εκφράζεται σε [m/min] και λαμβάνει την μεγαλύτερη τιμή της στην περιφέρεια του δραπάνου, ενώ μειώνεται προς το κέντρο του. Η δεύτερη κίνηση για την διάτρηση είναι η ευθεία

μετακίνηση του τρυπανιού προς το κομμάτι. Η κίνηση αυτή καθορίζεται σαν πρόωση του εργαλείου και ελέγχει το πάχος του παραγόμενου αποβλίττου, και άρα τις αντίστοιχες αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα της πρόωσης τόσο μεγαλύτερο είναι και το πάχος του αποβλίττου και αντίστοιχα μεγαλύτερες οι δυνάμεις κοπής. Η ταχύτητα της πρόωσης εκφράζεται σε [mm/rev] [15].

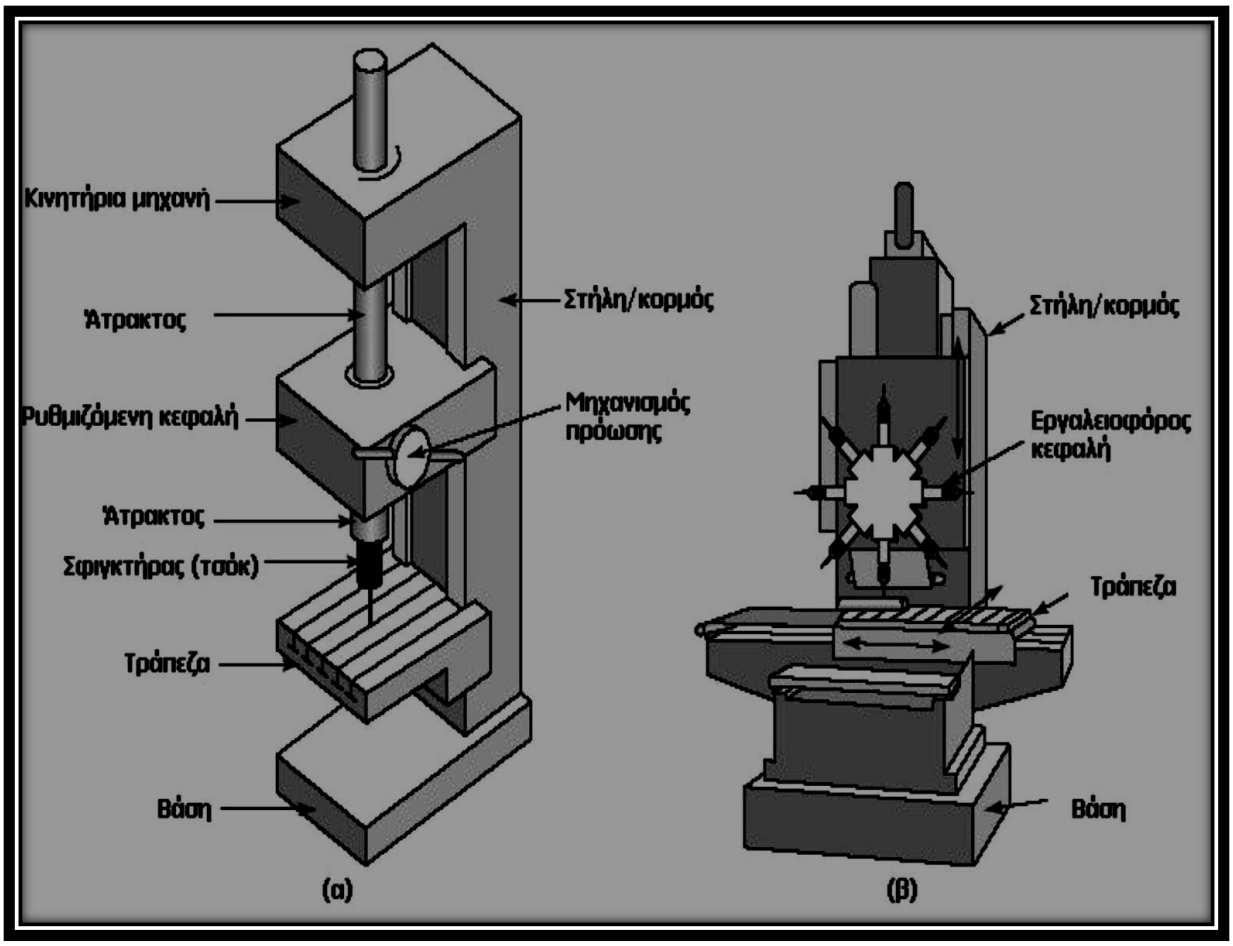


Εικόνα 2.23 Κινηματική της διάτρησης και είδη οπών.

Η εργαλειομηχανή που δίνει την δυνατότητα μετακίνησης και περιστροφής και χρησιμοποιείται για την διάτρηση είναι το δράπανο.

Πολλοί τύποι και μεγέθη εργαλειομηχανών διάτρησης χρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό τομέα. Ταξινομούνται ανάλογα με το βάρος και το μέγεθος τους, από ένα απλού τύπου ‘ευαίσθητο’ δράπανο το οποίο τοποθετείται πάνω σε ένα πάγκο μέχρι τα μεγάλα πολυάτρακτα δράπανα που είναι ικανά να καθοδηγούν πολλά εργαλεία, ταυτόχρονα.

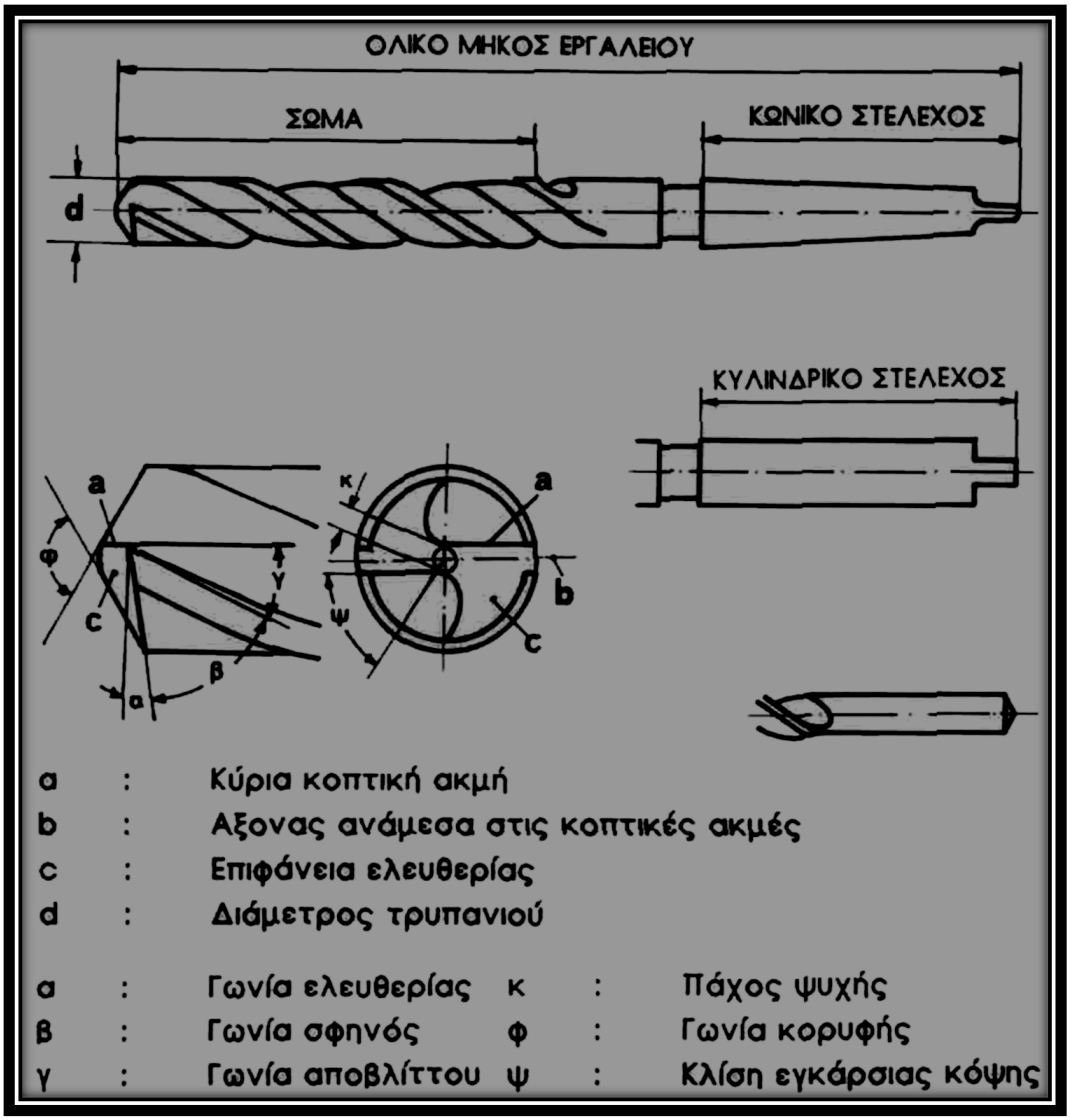
Στην εικόνα 2.24. απεικονίζονται σχηματικά ένα τυπικό κάθετο δράπανο και ένα πυργωτό δράπανο.



Εικόνα 2.24 Σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού κάθετου δραπάνου, καθώς επίσης ένα πυργωτό δράπανο.

Στην εικόνα 2.25 παρουσιάζεται η γεωμετρία ενός δραπάνου, το οποίο αναφέρεται και ως τρυπάνι. Το δράπανο χαρακτηρίζεται ως ελικοειδές λόγω των ελικοειδών αυλακιών που φέρει στο ωφέλιμο μήκος του. Τα ελικοειδή αυλάκια που φέρει το δράπανο εξυπηρετούν τους παρακάτω κυρίως σκοπούς :

- δημιουργούν τις απαραίτητες κοπτικές ακμές,
- οδηγούν τα απόβλιττα από την θέση διάτρησης προς τα έξω,
- δίνουν την δυνατότητα στο υγρό κοπής να φτάνει στη θέση κοπής.



Εικόνα 2.25 Γεωμετρία ελικοειδούς δραπάνου.

Το στέλεχος στο τρυπάνι, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.25, μπορεί να έχει μορφή κόλουρου κώνου και σπάνια κυλινδρική. Τα τρυπάνια με κυλινδρικό στέλεχος συγκρατούνται με ειδικούς σφιγκτήρες που προσαρμόζονται στην άτρακτο του δραπάνου με το κωνικό τους στέλεχος που είναι τυποποιημένο και λέγεται κώνος Μόρς. Τα μεγάλα τρυπάνια επίσης, φέρουν στελέχη με τον τυποποιημένο αυτόν κώνο. Η τυποποίηση των κώνων Μορς είναι σε επτά μεγέθη που χαρακτηρίζονται με τους αριθμούς 0 έως 6.

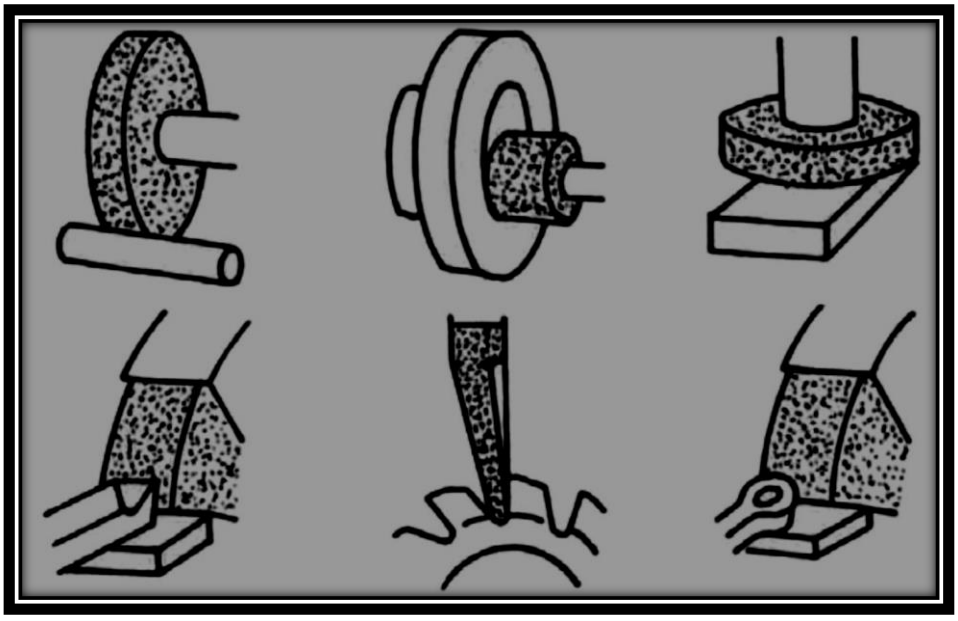
Το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται συνήθως τα τρυπάνια είναι ο ταχυχάλυβας ή σπάνια ο ανθρακούχος χάλυβας και τα σκληρομέταλλα. Για την επιλογή του κατάλληλου για κάθε εργασία εργαλείου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη αρκετοί παράγοντες που επηρεάζουν με διαφορετικούς τρόπους αυτή την επιλογή. Έτσι το μέγεθος της οπής που θα κατεργαστεί καθορίζει την διάμετρο του τρυπανιού που θα χρησιμοποιηθεί. Η γωνία ελικώσεως και η γωνία

σφήνας εξαρτώνται από το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Όσο πιο σκληρό είναι το κατεργαζόμενο υλικό τόσο μικρότερη πρέπει να είναι η γωνία ελικώσεως, ενώ η γωνία σφήνας πρέπει να είναι μεγαλύτερη.

Η φθορά που αναπτύσσεται στα τρυπάνια επηρεάζει την κοπτική ικανότητά τους και μπορεί να γίνει αντιληπτή από το στρογγύλεμα που δημιουργείται στις εξωτερικές γωνίες των κύριων κοπτικών ακμών στην μύτη του εργαλείου. Αν το κοπτικό εργαλείο συνεχίσει να κόβει, ιδιαίτερα σε διάτρηση τυφλής οπής, θερμαίνεται σημαντικά λόγω της μεγαλύτερης τριβής με τελικό αποτέλεσμα την θραύση του. Για την αποφυγή του παραπάνω προβλήματος, το κοπτικό εργαλείο πρέπει να τροχίζεται την κατάλληλη στιγμή. Το τρόχισμα του τρυπανιού μπορεί να γίνεται με το χέρι αλλά για την αποφυγή λαθών, ιδιαίτερα στις κοπτικές γωνίες, προτιμάται να γίνεται με την βοήθεια ειδικής συσκευής, ενώ η χρήση ψυκτικού υγρού κατά το τρόχισμα είναι απαραίτητη για την αποφυγή της υπερθέρμανσης των κοπτικών ακμών[15].

2.1.4.3 Η Λείανση

Το τρόχισμα των κοπτικών εργαλείων, όπως και η λείανση σκληρών ή όχι τεμαχίων, αποτελούν τις κύριες εφαρμογές της λείανσης. Η λείανση μπορεί να έχει σαν σκοπό την δημιουργία υψηλής ποιότητας επιφάνειας και υψηλής διαστατικής ακρίβειας, ενώ χρησιμοποιείται και για να δίδεται κατάλληλο σχήμα με υψηλή ακρίβεια μορφής. Στην εικόνα 2.26 παρουσιάζονται εφαρμογές λείανσης.



Εικόνα 2.26 Εφαρμογές λείανσης.

Η λείανση είναι μια κατεργασία αφαίρεσης υλικού στην οποία το κοπτικό εργαλείο είναι ένας περιστρεφόμενος λειαντικός τροχός. Ο τροχός αυτός ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζεται μπορεί να έχει διάφορα μεγέθη και σχήματα [19].

2.1.4.3 Ο Αριθμητικός έλεγχος (CNC-Computer Numerical Control)

Ο αριθμητικός έλεγχος, CNC-Computer Numerical Control, είναι ένας τύπος ελέγχου των μηχανών βασιζόμενος σε ψηφιακές πληροφορίες. Οι εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου είναι κατάλληλες για μικρούς και μεσαίους όγκους παραγωγής, για πολύπλοκες μορφές, διαστάσεις, κατεργασίες και μεθόδους παραγωγής αντικειμένων. Στους τόρνους (αλλά και στις άλλες εργαλειομηχανές) αριθμητικού ελέγχου οι διάφορες πληροφορίες που απαιτούνται για την κατεργασία, η κίνηση της μηχανής, οι συνθήκες κατεργασίας, η πορεία των εργαλείων, η χρήση των ψυκτικών κ.λπ. παρέχονται υπό τη μορφή αριθμητικών πληροφοριών που αποτυπώνονται στη μνήμη του υπολογιστή. Η κίνηση των εργαλείων ή του αντικειμένου εξαρτάται από ψηφιακά σήματα που δίνονται στο σερβομηχανισμό, και που οδηγούν το φορέα της μηχανής ή του εργαλείου. Ένας τέτοιος μηχανισμός φαίνεται στην εικόνα εικόνα 2.27.



Εικόνα 2.27 Panel εισαγωγής αριθμητικών πληροφοριών.

Ο αριθμητικός έλεγχος είναι μια τεχνολογία που έχει πρωτοπαρουσιαστεί πριν από πενήντα περίπου χρόνια, όταν ακόμα η τεχνολογία των υπολογιστών βρισκόταν σε νηπιακό στάδιο. Οι τύποι αριθμητικού ελέγχου που αναπτύχθηκαν αφορούσαν κατά κύριο λόγο τρία συστήματα, το σύστημα κατεργασίας θέσεων, το σύστημα ευθυγράμμου κοπής και το σύστημα συνεχούς γραμμής. Το σύστημα κατεργασίας θέσεων ελέγχει την τοποθέτηση του φορέα σε ένα προκαθορισμένο σημείο, όπου πρόκειται να γίνει η κατεργασία χωρίς να ελέγχει την πορεία κατά τη μετάβαση από το ένα σημείο στο επόμενο, ενώ το σύστημα ευθυγράμμου κοπής μπορεί πέρα από τα παραπάνω να κινεί το εργαλείο σε μια ευθεία γραμμή από τη μια θέση στην άλλη. Στους τόρνους αριθμητικού ελέγχου εφαρμόζεται κατεξοχήν το σύστημα συνεχούς γραμμής, το οποίο ελέγχει συνεχώς την πορεία της κοπής [19].



Εικόνα 2.28 3-αξονική φρέζα CNC

2.2. Φθορά Εργαλείων και συνθήκες κοπής

Η αστοχία του κοπτικού εργαλείου μπορεί να προκληθεί, είτε από φθορά του ίδιου του σώματος του εργαλείου, είτε από πρόβλημα στο σύστημα πρόσδεσης. Με την πρόοδο της τεχνολογίας όμως στην κατασκευή πολύ αξιόπιστων συστημάτων πρόσδεσης, η αστοχία συνδέεται άμεσα με την φθορά του υλικού του κοπτικού εργαλείου. Γενικά, η φθορά αυτή επηρεάζεται από τα υλικά εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου, τη γεωμετρία του

εργαλείου, τα χαρακτηριστικά στοιχεία κοπής και τη χρήση ψυκτικών-λιπαντικών υγρών. Πριν δούμε αναλυτικά τους παράγοντες της φθοράς, αξίζει να αναφερθούμε στους μηχανισμούς της.

Η φθορά εμφανίζεται προοδευτικά με απώλεια υλικού σε συγκεκριμένα σημεία του εργαλείου, μέχρι να φτάσει στην καταστροφική φθορά, δηλαδή τη θραύση η την πλαστική παραμόρφωση του εργαλείου. Οι μηχανισμοί της φθοράς ανάλογα με τη ζώνη που αυτή παρουσιάζεται είναι:

- Το πεδίο φθοράς, το οποίο εμφανίζεται στην πλευρά του εργαλείου που ορίζει τη γωνία ελευθερίας και οφείλεται στην τριβή του εργαλείου πάνω στο τεμάχιο, με αποτέλεσμα να μειώνεται σταδιακά το βάθος κοπής.

- Η φθορά κρατήρα, η οποία εμφανίζεται στην πλευρά του εργαλείου που ορίζει η γωνία αποβλίττου και οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτή την ζώνη, με αποτέλεσμα να σχετίζεται άμεσα με την μείωση της σκληρότητας του εργαλείου και ενδεχόμενη θραύση του. Παρατηρείται κυρίως στις υψηλές ταχύτητες κοπής, ενώ μελέτες έχουν δείξει ότι η φθορά κρατήρα εμφανίζεται ως λεία επιφάνεια πάνω στο κοπτικό εργαλείο, σε αντίθεση με το πεδίο φθοράς που προκαλεί τραχιά επιφάνεια.

- Οι αποκολλήσεις, οι οποίες παρουσιάζονται συνήθως στην κοπτική ακμή και οφείλονται σε μεγάλες μηχανικές ή θερμικές διακυμάνσεις (σοκ), με αποτέλεσμα την δημιουργία ρωγμών.

Για τη μέτρηση της φθοράς στο κοπτικό εργαλείο υπάρχει ο άμεσος τρόπος με τη χρήση ειδικού μηχανουργικού μικροσκοπίου και ο έμμεσος, με το συσχετισμό της φθοράς με τα μεγέθη που την επηρεάζουν. Ο έμμεσος τρόπος προφανώς είναι λιγότερο αξιόπιστος, αλλά δεν απαιτεί τη διακοπή της κατεργασίας και άρα συμφέρει κατά την εφαρμογή του.

Με τον όρο χρόνο (ή διάρκεια) ζωής του εργαλείου, εννοούμε το συνολικό ωφέλιμο χρόνο που το εργαλείο είναι σε θέση να κόβει, μέχρι να καταστραφεί ή να στομώσει.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.1.3, η σκληρότητα του εργαλείου σε σχέση με αυτήν του τεμαχίου έχει τον καθοριστικότερο ρόλο. Όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο μεγαλύτερη και η διάρκεια ζωής. Γι 'αυτό μεγάλη σημασία έχει και η θερμική αγωγιμότητα του εργαλείου, ώστε να απάγεται ευκολότερα η θερμότητα και να μην αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες μειώνεται η σκληρότητα του εργαλείου και άρα και ο χρόνος ζωής του. Τέλος, για αυξημένο χρόνο ζωής του εργαλείου είναι ανάγκη να αποφεύγεται η τάση για «συγκόλληση» μεταξύ των υλικών εργαλείου και τεμαχίου με φυσικοχημικούς μηχανισμούς, η οποία συνδέεται με τη δημιουργία ψευδοακμής στην κορυφή του κοπτικού εργαλείου και παρουσιάζεται κυρίως στις υψηλές ταχύτητες κοπής. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο με σωστή επιλογή υλικών που δεν αντιδρούν μεταξύ τους. [13]

Πρέπει να αναφερθεί ότι η διακοπτόμενη κοπή προκαλεί ταλαντώσεις, κόπωση του υλικού και θερμικές διακυμάνσεις που μειώνουν σημαντικά το χρόνο ζωής του εργαλείου. Στη συνεχόμενη κοπή, τα χαρακτηριστικά στοιχεία της κοπής που αναφέραμε και προηγούμενα είναι η ταχύτητα κοπής (Vc), το βάθος κοπής (a) και η πρόωση (s).

Η ταχύτητα κοπής επηρεάζει δραστικότερα από τις υπόλοιπες συνθήκες τον χρόνο ζωής του εργαλείου. Είναι ευνόητο ότι όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο μειώνεται η διάρκεια ζωής και αυτό γιατί, παρόλο που οι δυνάμεις κοπής είναι μικρότερες, η θερμότητα δεν διαχέεται με τους ίδιους ρυθμούς στις υψηλές ταχύτητες κοπής και έτσι η σκληρότητα μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας.

Το βάθος κοπής επίσης όταν αυξηθεί μειώνει τον χρόνο ζωής του εργαλείου, εφόσον το εργαλείο έρχεται σε επαφή με περισσότερο υλικό στον ίδιο χρόνο και οι δυνάμεις που του ασκούνται είναι μεγαλύτερες, άρα έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας κοπής.

Η ταχύτητα πρόωσης αυξανόμενη οδηγεί σε μείωση της διάρκειας ζωής του εργαλείου και μάλιστα πειραματικά έχει αναφερθεί ότι αύξηση κατά 50% της ταχύτητας πρόωσης μειώνει κατά 100% (υποδιπλασιάζει) τον χρόνο ζωής. Η αιτία είναι η ίδια με το βάθος κοπής. Η φθορά που προκαλείται είναι συνήθως κρατήρα εφόσον η επιφάνεια επαφής εργαλείου-αποβλίττου δέχεται μεγαλύτερες δυνάμεις με μεγαλύτερο απόβλιττο.

Τέλος, ο χρόνος ζωής εξαρτάται και από την κατεργασία στην οποία χρησιμοποιείται το κοπτικό εργαλείο, αφού υπόκειται σε διαφορετικές καταπονήσεις.

Οι γωνίες κοπής επηρεάζουν πιο σημαντικά από τις υπόλοιπες τη διάρκεια ζωής του εργαλείου, καθώς με μείωση τους, αυξάνεται το ενεργό μέρος του εργαλείου (η επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο στην ακμή του εργαλείου), το πάχος του αποβλίττου μεγαλώνει και έτσι απάγεται ευκολότερα η θερμότητα, με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου ζωής. Έχει μελετηθεί πειραματικά ότι η διαφορά στον χρόνο ζωής μπορεί και να πενταπλασιασθεί αν η γωνία κοπής από 45^o γίνει 30^o, ειδικά όταν κόβονται πολύ σκληρά υλικά. Φυσικά δεν είναι δυνατό να έχουμε πάντα μικρή γωνία κοπής, καθώς μπορεί να ωφελούμαστε ως προς τον χρόνο ζωής του εργαλείου, αλλά χάνουμε σε σταθερότητα κατά την κοπή και ακρίβεια.

Οι γωνίες αποβλίττου μπορούν να πάρουν θετικές και αρνητικές τιμές. Με θετικές τιμές μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας κατά την κοπή και έτσι μειώνεται η δύναμη και η θερμοκρασία κοπής. Όμως ενώ θα ήταν εύλογο να χρησιμοποιούμε μεγάλες γωνίες αποβλίττου, η πράξη στην βιομηχανία δείχνει ότι αυτό δεν είναι πάντα επιθυμητό. Με μεγάλη γωνία αποβλίττου, η ακμή του κοπτικού εργαλείου δέχεται όλο και πιο συγκεντρωμένα φορτία

και είναι ευκολότερο να φθαρεί. Σε αρνητική γωνία όμως, τα φορτία αυτά από καμπτικά γίνονται θλιπτικά, τα οποία αντέχει περισσότερο το υλικό του εργαλείου, αν και είναι μεγαλύτερα. Έτσι βλέπουμε ότι η διάρκεια ζωής δεν καθορίζεται αποκλειστικά από την μείωση ή όχι της γωνίας αποβλίττου, αλλά σημαντικό ρόλο στην επιλογή μας θα έχουν οι συνθήκες κοπής που θα καθορίσουν τις δυνάμεις στην ακμή του εργαλείου.

Οι γωνίες ελευθερίας είναι συμπληρωματικές με το άθροισμα των γωνιών αποβλίττου και γωνιών της σφήνας του εργαλείου. Άρα αν θέλουμε μεγάλη γωνία αποβλίττου θα έχουμε αναγκαστικά είτε μικρή γωνία σφήνας (που δεν το θέλουμε εφόσον έτσι μειώνεται η ενεργή περιοχή της ακμής), είτε μικρή γωνία ελευθερίας. Όμως οι γωνίες ελευθερίας σχετίζονται με την επαφή εργαλείου - κατεργασμένου τεμαχίου, με αποτέλεσμα μικρές γωνίες να επιφέρουν μεγάλες δυνάμεις τριβής και αύξηση θερμοκρασίας και άρα μείωση του χρόνου ζωής του εργαλείου. Έτσι πρέπει πάντα να βρίσκεται το μέγιστο της γωνίας ελευθερίας ώστε να μην επηρεάζονται σημαντικά οι συμπληρωματικές γωνίες και να αυξάνεται έτσι η διάρκεια ζωής του εργαλείου.

Η καμπυλότητα της ακμής του κοπτικού εργαλείου με γνώμονα τον χρόνο ζωής, οφείλει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Όμως για υψηλές ταχύτητες κοπής όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα καμπυλότητα της κοπτικής ακμής του εργαλείου, τόσο χειρότερη ακρίβεια επιφανείας έχουμε, λόγω των ταλαντώσεων που δημιουργούνται και της αύξησης της δύναμης κοπής. Φυσικά υπάρχει ένα ελάχιστο όριο για την ακτίνα καμπυλότητας ανάλογα και με το υλικό που κατεργαζόμαστε, πέρα από το οποίο η ποιότητα επιφανείας χειροτερεύει. Έτσι βλέπουμε ότι ο μηχανισμός στις υψηλές ταχύτητες κοπής διαφέρει σημαντικά και καλό είναι να επιλέγονται μικρές ή μεσαίες ακτίνες καμπυλότητας.

Γενικά τα υγρά κοπής μπορούμε να πούμε ότι όταν χρησιμοποιούνται αυξάνουν τον χρόνο ζωής του εργαλείου αφού απάγουν σημαντικό μέρος της θερμότητας. Αυτό στην περίπτωση βέβαια που η ροή τους είναι επαρκής και συνεχόμενη, ώστε να μην δημιουργούνται μεγάλες διακυμάνσεις στην θερμοκρασία κοπής. Παρόλα αυτά η χρήση των υγρών κοπής παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα όπως το κόστος τους, η βλάβη που προκαλεί η απόρριψη τους στο περιβάλλον αλλά και στους εργάτες που έρχονται σε επαφή κ.α.

Οι Bissacco et al. ερεύνησαν την επίδραση του εργαζόμενου υγρού στην ακρίβεια της μικροκατεργασίας. Τα εμπορικά διαθέσιμα μικροεργαλεία ακριβείας έχουν διακριτική ικανότητα μέχρι 1 nm σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής μέχρι 100000 rpm, αλλά η πρακτική τους ακρίβεια μειώνεται, όταν λαμβάνεται υπόψη η θερμική παραμόρφωση. Στα επίπεδα αυτά, μια μικρή αντιστάθμιση μπορεί να συμβάλει σε σημαντικά σφάλματα. Σφάλματα μπορούν

επίσης να προκληθούν και από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του υγρού κοπής και του άξονα περιστροφής.[19]

Η Φθορά εργαλείου σε κανονική λειτουργία περιγράφει τη σταδιακή αποτυχία των κοπτικών εργαλείων και είναι ένας όρος που συχνά συνδέεται με αιχμές εργαλείων, τις μύτες των εργαλείων, ή τρυπάνια που χρησιμοποιούνται με εργαλειομηχανές.

Τύποι φθοράς περιλαμβάνουν:

- Την φθορά πλευράς στην οποία το τμήμα του εργαλείου που έρχεται σε επαφή με το τελικό τμήμα διαβρώνει. Μπορεί να περιγραφεί με την εξίσωση Προσδόκιμου ζωής εργαλείου.
- Την φθορά κρατήρα στον οποίο επαφή με ρινίσματα διαβρώνει την ακμή κοπής. Αυτό είναι φυσιολογικό για την φθορά του εργαλείου και δεν υποβαθμίζει σοβαρά τη χρήση ενός εργαλείου μέχρι να γίνει αρκετά σοβαρή ώστε να προκαλέσει βλάβη ακμής κοπής.

Μπορεί να προκληθεί από πολύ χαμηλή ταχύτητα ατράκτου ή πολύ υψηλό ρυθμό τροφοδοσίας. Σε ορθογώνια κοπή, αυτό συμβαίνει συνήθως όταν η θερμοκρασία του εργαλείου είναι πολυ υψηλή. Η φθορά κρατήρα εμφανίζεται περίπου σε ένα ύψος ίσο με το βάθος κοπής του υλικού.

- Την συσσώρευση στην άκρη, όπου το προς επεξεργασία υλικό συσσωρεύεται στην άκρη κοπής. Ορισμένα υλικά (κυρίως αλουμίνιο και χαλκό) έχουν την τάση να αναδιατάσονται στην αιχμή ενός εργαλείου. Αυτό συμβαίνει πιο συχνά σε μαλακότερα μέταλλα, με χαμηλότερο σημείο τήξεως. Μπορεί να προληφθεί με την αύξηση ταχύτητας κοπής και τη χρήση λιπαντικού. Κατά τη διάτρηση μπορεί να γίνει αντιληπτό σαν εναλλασσόμενα σκούρα και λαμπερά δαχτυλίδια.
- Την στύλβωση συμβαίνει σε τροχούς λείανσης όταν η εκτεθειμένη επιφάνεια του λειαντηρα γίνεται αμβλεία. Φαίνεται ως γυαλάδα όταν ο τροχός είναι σε κίνηση.
- Την φθορά άκρης σε δράπανα όπου αναφέρεται στην φθορά τής εξωτερικής ακμής ενός τρυπανιού γύρω από το πρόσωπο κοπής και προκαλείται από την υπερβολική ταχύτητα κοπής. Αυτό εκτείνεται προς τα κάτω στίς αυλακώσεις του τρυπανιού και απαιτεί να αφαιρεθεί ένας μεγάλος όγκος υλικού από το άκρο του τρυπανιού ώστε να διορθωθεί.

Ορισμένες γενικές επιπτώσεις της φθοράς των εργαλείων περιλαμβάνουν:

- αυξημένες δυνάμεις κοπής
- αυξημένες θερμοκρασίες κοπής
- κακό φινίρισμα επιφάνειας
- μειωμένη ακρίβεια του τελικού μέρους μπορεί να οδηγήσει σε θραύση του εργαλείου

Μείωση της φθοράς του εργαλείου μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση λιπαντικών και ψυκτικών κατα την διάρκεια της κατεργασίας με αποτέλεσμα την μείωση της τριβής και της θερμοκρασίας, μειώνοντας έτσι τη φθορά του εργαλείου.

Η εξίσωση του Taylor για το προσδόκιμο ζωής των εργαλείων παρέχει μια καλή προσέγγιση.

$$V_c T^n = C \qquad 2.2$$

Μια πιο γενική μορφή της εξίσωσης είναι

$$V_c \mathrm{T}^n \times \mathrm{D}^x \mathrm{S}^y = \mathrm{C} \qquad 2.3$$

όπου

- Vc = ταχύτητα κοπής
- T = διάρκεια ζωής του εργαλείου
- D = βάθος κοπής
- S = ρυθμός τροφοδοσίας
- x και y προσδιορίζονται πειραματικά
- n και C είναι σταθερές που βρέθηκαν από τον πειραματισμό ή δημοσιευμένα στοιχεία. Είναι ιδιότητες του υλικού του εργαλείου, του τεμάχιο και του ρυθμού τροφοδοσίας.

Σε υψηλες ζώνες θερμοκρασίας εμφανίζεται η φθορά κρατήρα. Η υψηλότερη θερμοκρασία του εργαλείου μπορεί να υπερβαίνει τους 700 ° C και εντοπίζεται στήν ακμή κοπής ενώ η χαμηλότερη θερμοκρασία μπορεί να είναι 500 ° C ή χαμηλότερη ανάλογα με το εργαλείο

Η ενέργεια έρχεται με τη μορφή θερμότητας από την τριβή του εργαλείου εκ της οποίας περίπου το 80% στην κοπή βρίσκεται στα ρινίσματα. Αν δεν συνέβαινε αυτό το τεμάχιο και το εργαλείο θα ήταν πολύ θερμότερα από ότι θα ήταν στην πραγματικότητα. Το εργαλείο και το τεμάχιο φέρουν το καθένα περίπου 10% της ενέργειας. Το ποσοστό της ενέργειας που μένει στα ρινίσματα αυξάνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα τής κατεργασίας κοπής. Αυτό αντισταθμίζει κάπως τη φθορά του εργαλείου από αυξημένες ταχύτητες κοπής. Συνεπώς αν η ενέργεια που μένει στα ρινίσματα δεν αυξανόταν όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής το εργαλείο θα φθειρόταν πιο γρήγορα από ό, τι πραγματικά γίνεται [20].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Προγραμματισμός & API – Autodesk Inventor®

3.1. Visual Basic

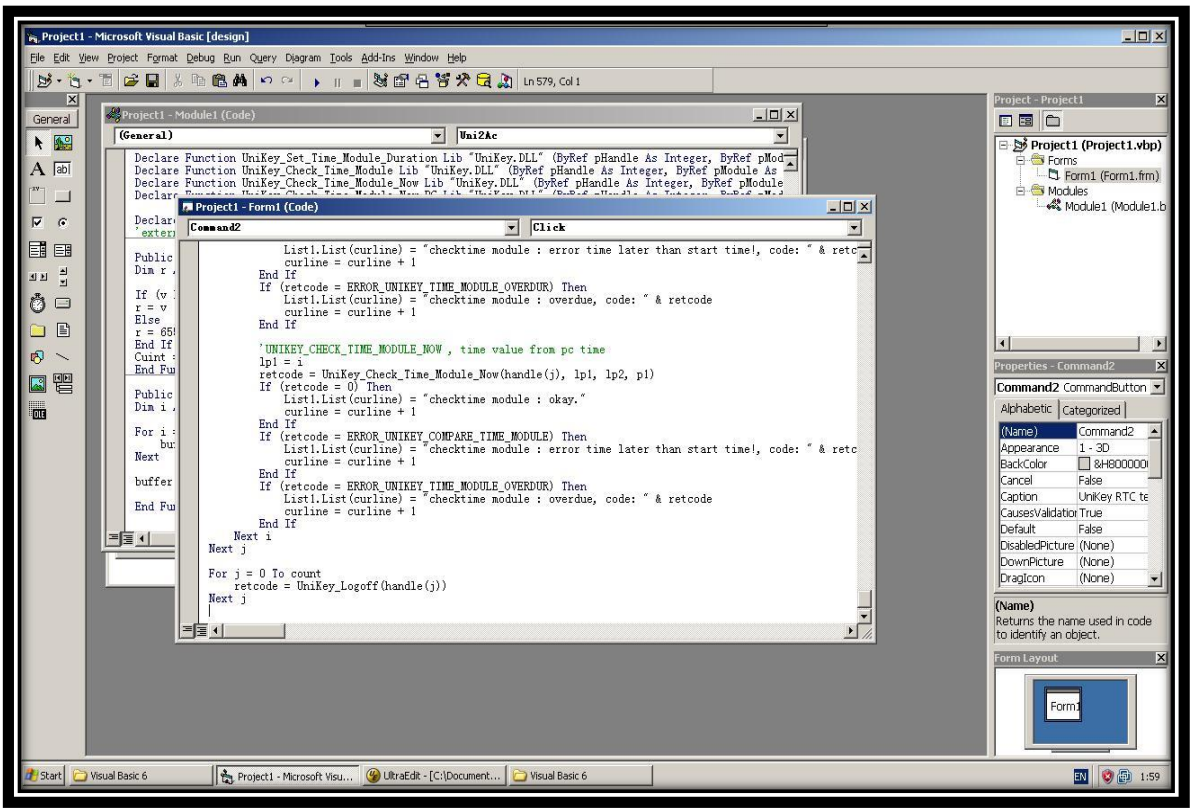
Η Visual Basic είναι ένα σύστημα προγραμματισμού ηλεκτρονικών υπολογιστών που αναπτύχθηκε και ανήκει στη Microsoft. Η Visual Basic δημιουργήθηκε αρχικά για να είναι πιο εύκολο να γράφουν προγράμματα για λειτουργικά συστήματα υπολογιστή με Windows. Η βάση της Visual Basic είναι μια παλαιότερη γλώσσα προγραμματισμού που ονομάζεται BASIC που εφευρέθηκε από το Dartmouth College από τους καθηγητές John Kemeny και Thomas Kurtz. Η Visual Basic αναφέρεται συχνά χρησιμοποιώντας μόνο τα αρχικά, VB, είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα προγραμματισμού ηλεκτρονικών υπολογιστών στην ιστορία του λογισμικού.

Η Visual Basic ήταν ένα από τα πρώτα συστήματα που κατέστησε δυνατό να γραφτούν προγράμματα για το λειτουργικό σύστημα των Windows. Αυτό ήταν εφικτό επειδή στη VB περιλαμβάνονται εργαλεία λογισμικού για να δημιουργήσει αυτόματα το λεπτομερή προγραμματισμό που απαιτείται από τα Windows. Αυτά τα εργαλεία λογισμικού δεν δημιουργούν μόνο τα προγράμματα των Windows, μπορούν επίσης να επωφεληθούν πλήρως από το γραφικό τρόπο που τα Windows λειτουργούν δίνοντας την δυνατότητα στους προγραμματιστές να "σχεδιάσουν" τα συστήματά τους με το ποντίκι του υπολογιστή. Αυτός είναι ο λόγος που ονομάζεται "Visual" Basic.

Η Visual Basic παρέχει επίσης μια μοναδική και ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική λογισμικού. "Αρχιτεκτονική" είναι ο τρόπος όπου προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών, όπως τα Windows και προγράμματα VB, εργάζονται από κοινού. Ένας από τους κυριότερους λόγους για τους οποίους η Visual Basic έχει τόσο μεγάλη επιτυχία είναι ότι περιλαμβάνει όλα όσα είναι αναγκαία για να γράψει προγράμματα για τα Windows.

Για παράδειγμα, η γλώσσα Visual Basic έχει σχεδιαστεί για να είναι «αναγνώσιμη από τον άνθρωπο», που σημαίνει ότι ο πηγαίος κώδικας μπορεί να γίνει κατανοητός χωρίς να απαιτούνται πολλά σχόλια. Το πρόγραμμα της Visual Basic περιλαμβάνει επίσης χαρακτηριστικά, όπως το "IntelliSense" και το "Code Snippets", το οποίο δημιουργεί αυτόματα

κώδικα για τα οπτικά αντικείμενα που προστίθενται από τον προγραμματιστή.Στην εικόνα 3.1 φαίνεται ο προγραμματισμος με VB σε API Ένα άλλο χαρακτηριστικό, που ονομάζεται "AutoCorrect," μπορεί να πραγματοποιήσει “αποσφαλμάτωση” τον κώδικα, ενώ το πρόγραμμα εκτελείται.



Εικόνα 3.1 Προγραμματισμός με VB

Προγράμματα που δημιουργούνται με τη Visual Basic μπορούν να σχεδιαστούν για να εκτελούνται σε Windows, στο Web, μέσα από τις εφαρμογές του Office ή σε κινητές συσκευές. Το Visual Studio, το πιο ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης VB, ή IDE, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία προγραμμάτων για όλα αυτά τα μέσα. Το Visual Studio. NET παρέχει εργαλεία ανάπτυξης για τη δημιουργία προγραμμάτων με βάση το. NET framework, όπως εφαρμογές ASP.NET, οι οποίες συχνά αναπτύσσονται στο Web. Τέλος, η Visual Basic είναι διαθέσιμη ως μια βελτιωμένη εφαρμογή που χρησιμοποιείται κυρίως από αρχάριους προγραμματιστές και για εκπαιδευτικούς σκοπούς.[9]

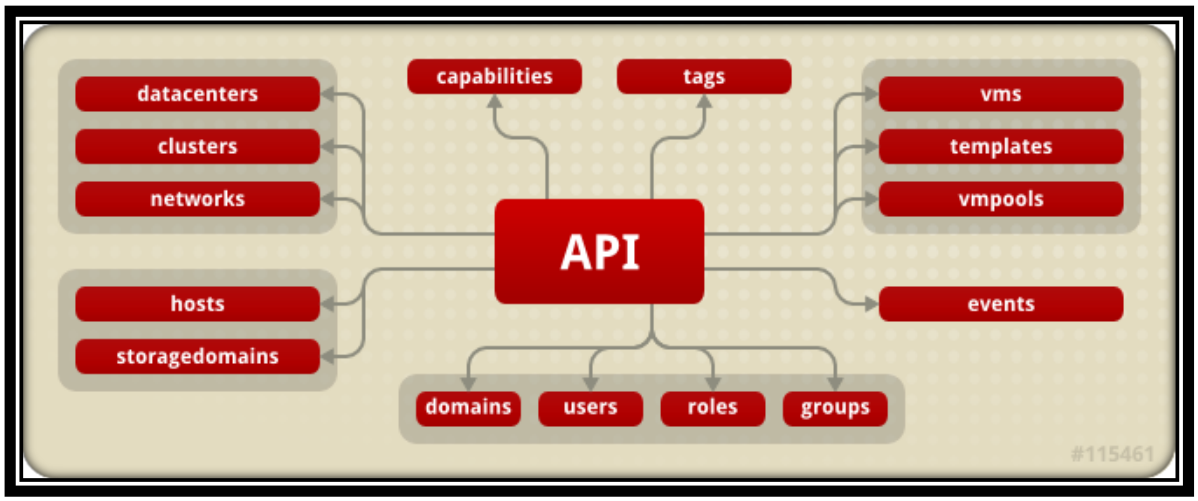
3.2. API-Application programming interface ή διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών

Ένας από τους βασικούς σκοπούς μίας διεπαφής είναι να ορίζει και να διατυπώνει το σύνολο των λειτουργιών-υπηρεσιών που μπορεί να παρέχει μια βιβλιοθήκη ή ένα λειτουργικό σύστημα σε άλλα προγράμματα, χωρίς να επιτρέπει πρόσβαση στον κώδικα που υλοποιεί αυτές τις υπηρεσίες. Η διεπαφή, ένα «συμβόλαιο κλήσης» μεταξύ καλούντος και καλούμενου, διαχωρίζει την προγραμματιστική υλοποίηση κάποιων υπηρεσιών από τη χρήση τους.

Π.χ. το ταχυδρομείο παρέχει την υπηρεσία της αποστολής γραμμάτων. Οι κανόνες οι οποίοι πρέπει να ακολουθηθούν για την υποβολή ενός αιτήματος αποστολής (μορφοποίηση διεύθυνσης παραλαβής, γραμματόσημο κτλ) είναι καλώς ορισμένοι, αλλά το πώς θα υλοποιηθεί στην πράξη αυτό το αίτημα αφορά έναν ολόκληρο μηχανισμό υπαλλήλων εν πολλοίς αθέατο στον χρήστη της υπηρεσίας. Στο εν λόγω παράδειγμα διεπαφή είναι οι υπηρεσίες που παρέχονται στους πελάτες οι οποίες συνήθως είναι γραμμένες σε ένα φυλλάδιο, τη διεπαφή του ταχυδρομείου προς τους χρήστες του.

Έτσι π.χ. το λειτουργικό σύστημα Windows έχει τη δική του διεπαφή (κλήσεις συστήματος), η μορφοποίηση της οποίας διατίθεται από την κατασκευάστρια εταιρεία Microsoft, και η οποία περιγράφει τους τρόπους αξιοποίησης από προγράμματα χρήστη του συνόλου των υπηρεσιών που παρέχει το λειτουργικό. Το τμήμα του λειτουργικού συστήματος το οποίο υλοποιεί τις υπηρεσίες που περιγράφονται στη διεπαφή, συνήθως στον πυρήνα του, λέμε ότι είναι η *υλοποίηση της διεπαφής*.

Η API (*Application programming interface*) ή Διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών, είναι διεπαφή των προγραμματιστικών διαδικασιών που ένα λειτουργικό σύστημα, βιβλιοθήκη ή εφαρμογή παρέχει προκειμένου να επιτρέπει να γίνονται προς αυτό αιτήσεις από άλλα προγράμματα ή / και ανταλλαγή δεδομένων.Η API καθορίζει το πώς τα συστατικά του λογισμικού θα πρέπει να αλληλεπιδρούν και να χρησιμοποιούνται κατά τον προγραμματισμό των χρησιμοποιούμενων συστατικών γραφικής διεπαφής χρήστη (GUI). Ένα καλό API καθιστά ευκολότερο να αναπτύχθει ένα πρόγραμμα, παρέχοντας όλα τα δομικά στοιχεία οπου Ένας προγραμματιστής στη συνέχεια τα μορφοποιεί. Στήν εικόνα 3.2 φαίνονται οι λειτουργίες που μπορούν να ελεγχθούν απο ένα API.



Εικόνα 3.2 Δυνατότητες της API.

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι των APIs για τα λειτουργικά συστήματα, εφαρμογές ή ιστοσελίδες. Το Windows, για παράδειγμα, έχει πολλά σύνολα API που χρησιμοποιούνται από το υλικό και τις εφαρμογές του συστήματος - όταν κάνετε αντιγραφή και επικόλληση κειμένου από τη μία εφαρμογή στην άλλη, είναι το API που επιτρέπει την εργασία.

Τα περισσότερα λειτουργικά περιβάλλοντα , όπως το MS-Windows , παρέχουν ένα API έτσι ώστε οι προγραμματιστές να μπορούν να γράψουν εφαρμογές που σχετίζονται με το λειτουργικό περιβάλλον.

Σήμερα, τα APIs προσδιορίζονται επίσης με ιστοσελίδες. Για παράδειγμα, το Amazon ή eBay APIs επιτρέπουν στους προγραμματιστές να χρησιμοποιούν την υπάρχουσα υποδομή λιανικής πώλησης για τη δημιουργία εξειδικευμένων καταστημάτων web. Προγραμματιστές λογισμικού τρίτων κατασκευαστών χρησιμοποιούν επίσης Web APIs για τη δημιουργία λύσεων λογισμικού για τους τελικούς χρήστες.[10]

3.3 Autodesk Inventor API

Το Autodesk Inventor, είναι ένα λογισμικό που αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ, από την εταιρεία Autodesk. Είναι 3D λογισμικό μηχανολογικής σχεδίασης CAD με σκοπό τη δημιουργία 3D πρωτότυπων ψηφιακών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό, την οπτικοποίηση και προσομοίωση των προϊόντων. και διαθέτει τη δική του API με τη βοήθεια της οποίας θα προγραμματιστεί η προσομοίωση της τόρνευσης.

3.3.1. Autodesk Inventor

Το Inventor χρησιμοποιεί ιδιόκτητο γεωμετρικό πυρήνα και ανταγωνίζεται άμεσα αντίστοιχα μεγάλα πακέτα ειδικού λογισμικού όπως: SolidWorks, Creo Elements/Pro, CATIA, και NX Unigraphics. Βασικό προτέρημα του σχεδιαστικού πακέτου είναι η παραμετρική σχεδίαση και μοντελοποίηση. Δηλαδή οι διαστάσεις των τεμαχίων εύκολα μπορούν να αλλάζουν ανάλογα με τις ανάγκες των μηχανικών και χωρίς ο σχεδιαστής να χρειάζεται να κάνει το σχέδιο από την αρχή.



Εικόνα 3.3 Autodesk Inventor® – 3D CAD σχεδιασμός με τη βοήθεια Η/Υ.

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει δύο ακόμα βασικές εφαρμογές, τη Stress Analysis και το Inventor® Studio. Η εφαρμογή Stress Analysis χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα τρισδιάστατης μοντελοποίησης Autodesk Inventor® για στατικές αναλύσεις μοντέλων μέσω πεπερασμένων στοιχείων FEM (Finite Element Method). Η συγκεκριμένη εφαρμογή παίζει πάρα πολύ σημαντικό ρόλο στην σχεδίαση και την μοντελοποίηση των αντικειμένων, καθώς με τις στατικές αναλύσεις το μοντέλο μπορεί να διορθωθεί αποφεύγοντας το κόστος και τον χρόνο που θα δημιουργούσε μια πραγματική παρέμβαση πριν να ελεγχθεί. Το Inventor® Studio χρησιμοποιείται για την παρουσίαση και την απεικόνιση του μοντέλου. Παρέχεται μεγάλη

ποικιλία επιλογών καμερών και φωτισμού και επιλέγοντας την εντολή render μπορούμε να απεικονίσουμε φωτορεαλιστικά το μοντέλο που κατασκευάστηκε.[2]

3.3.2 Οι κύριες δυνατότητες του Autodesk Inventor

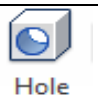
Το Inventor περιλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον προσομοίωσης (simulation) κίνησης (motion) και συναρμολόγησης (assembly) και ανάλυσης τάσεων (stress analysis). Οι χρήστες μπορούν να εισάγουν φορτία, τα χαρακτηριστικά τριβής, και δυναμικά στοιχεία, στη συνέχεια, να εκτελεστούν δυναμικές δοκιμές προσομοίωσης για να δουν πώς ένα προϊόν θα λειτουργήσει κάτω από πραγματικές συνθήκες. Το εργαλείο προσομοίωσης μπορεί να βοηθήσει τους χρήστες να βελτιστοποιήσουν τη δύναμη και το βάρος, τον εντοπισμό περιοχών υψηλών τάσεων, τον εντοπισμό και τη μείωση των ανεπιθύμητων δονήσεων, μέγεθος , κινητήρες και ενεργοποιητές για να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας.

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) επιτρέπει στους χρήστες να επικυρώσουν το σχεδιασμό με τη δοκιμή πώς τα μέρη λειτουργούν υπό φορτία (χρησιμοποιώντας πραγματικές πληροφορίες φορτίου αντί των εκτιμήσεων).

Το Inventor® αξιοποιώντας πλήρως την τρισδιάστατη μοντελοποίηση, επιτρέπει σε μηχανικούς και σχεδιαστές να δημιουργήσουν ένα ψηφιακό μοντέλο ώστε να αναλύσουν την λειτουργία και την συναρμογή του με άλλα εξαρτήματα πριν καν αυτά κατασκευαστούν. Από την στιγμή που θα δημιουργηθεί το ψηφιακό μοντέλο, πλέον μπορούν αυτόματα να παραχθούν κατασκευαστικά σχέδια, οδηγίες συναρμολόγησης, λίστες υλικών, καλούπια, κινηματικές αναλύσεις κλπ. Υπάρχουν τέσσερα είδη αρχείων τα οποία δημιουργεί το παρόν σχεδιαστικό πακέτο: α) Τεμάχιο (Part), β) Συναρμολόγημα, (Assembly), γ) Σχέδια (Drawings) δ) Παρουσίαση (Presentation). Ο σχεδιαστής δημιουργεί το κάθε τεμάχιο ξεχωριστά και το αποθηκεύει σαν αρχείο (part). Τα αρχεία αυτής της μορφής έχουν κατάληξη *.ipt. Στη συνέχεια τα συναρμολογεί και δημιουργεί την συναρμολογημένη κατασκευή (Assembly). Τα αρχεία αυτής της μορφής έχουν κατάληξη *.iam.

Με βάση το γεγονός της καθολικής μοντελοποίησης στο λογισμικό Inventor®, στο σημείο αυτό αναφέρονται οι βασικές εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση. Οι εντολές αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 3.4 που ακολουθεί.

Εικονίδιο	Εντολή	Εφαρμογή
	2D	Η συγκεκριμένη εντολή διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην

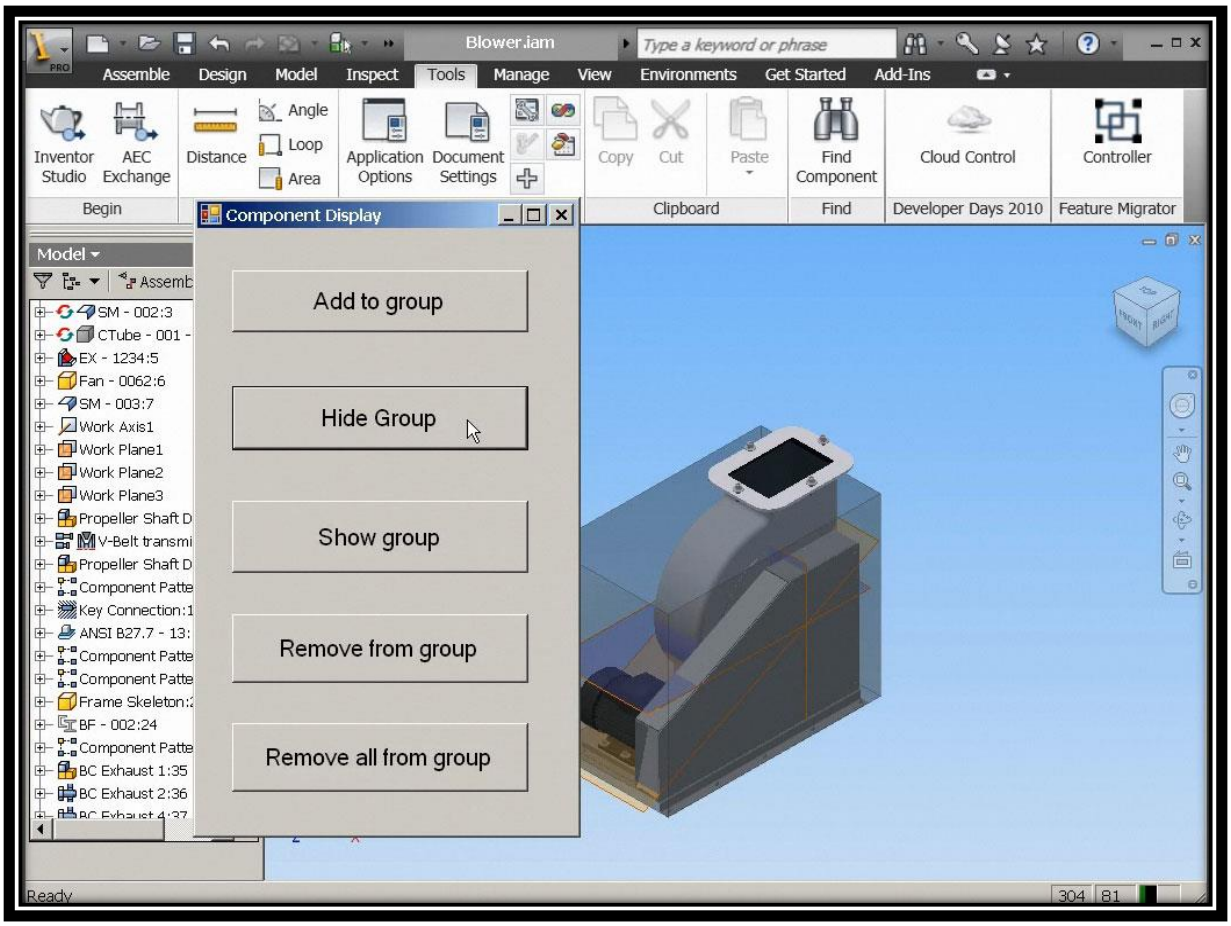
	sketch	τρισδιάστατη μοντελοποίηση κάθε επιφάνειας και γι' αυτό το λόγω ανοίγοντας το πρόγραμμα, μας μεταφέρει αμέσως στο 2D sketch. Επιλέγοντας την εντολή αυτή μεταφερόμαστε σε περιβάλλον δισδιάστατης σχεδίασης. Το περιβάλλον σχεδιασμού είναι παρεμφερές με του AutoCAD.
	3D sketch	Είναι το περιβάλλον τρισδιάστατης σχεδίασης έχοντας τις ίδιες σχεδόν επιλογές με το 2D sketch. Η μεγάλη διαφορά είναι η δυνατότητα σχεδίασης στο χώρο και η χρήση τρισδιάστατων σημείων και Splines.
	Extrude	Η εντολή extrude βρίσκεται στο περιβάλλον εργασίας της δημιουργίας του μοντέλου. Με βάση το sketch που θα επιλεχθεί δημιουργούνται ή αφαιρούνται επιφάνειες και στερεά σώματα.
	Circle	Η εντολή Circle επίσης χρησιμοποιείται σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο περιβάλλον σχεδίασης. Με την βοήθεια της εντολής αυτής μπορούν να δημιουργηθούν κύκλοι συγκεκριμένης διαμέτρου.
	Move	Με τη εντολή αυτή γίνεται μετακίνηση σχεδίων.
	Hole	Με τη εντολή hole μπορούμε σε οποιοδήποτε σημείο να ανοίξουμε οπές.

Πίνακας 3.4 Βασικές λειτουργίες του Autodesk Inventor®. [2]

Η Παραμετρική Μελέτη του Inventor και η τεχνολογία Βελτιστοποίησης επιτρέπει στους χρήστες να τροποποιούν τις παραμέτρους του σχεδιασμού μέσα από το περιβάλλον συναρμολόγησης και ανάλυσης τάσεων και να συγκρίνουν διάφορες επιλογές σχεδιασμού, στη συνέχεια να ενημερώσουν το 3D μοντέλο με τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους.

Η Visual Basic for Applications (VBA) είναι ένα περιβάλλον προγραμματισμού που αναπτύχθηκε από τη Microsoft και αδειοδοτήθηκε από άλλες εταιρείες να ενσωματώσουν στις εφαρμογές τους. Η Autodesk αδειοδότησε την VBA και την περιλαμβάνει στο AutoCAD και στο Inventor. Αυτό παρέχει σε όλους τους χρήστες τού Inventor ένα ελεύθερο περιβάλλον ανάπτυξης.στην εικόνα 3.4 απεικονίζεται η επεξεργασία μηχανισμού στο Autodesk Inventor με χρήση API. Παρακάτω είναι τα βασικά βήματα για την χρήση της VBA και την σύνθεση μίας απλής μακροεντολής.

Ένα έργο μπορεί να αποτελείται από πολλούς διαφορετικούς τύπους ‘μοντέλων’. Οι μακροεντολές είναι γραμμένες σε μια λειτουργική μονάδα κώδικα στο πλαίσιο του έργου της VBA. Υπάρχει μια ενότητα κώδικα που δημιουργείται αυτόματα για κάθε νέο έργο VBA που ονομάζεται "Module1".



Εικόνα 3.5 Περιβάλλον VB στην API του Inventor

3.3.3.Τα βασικά της διεπαφής προγραμματισμού inventor

Το inventor υποστηρίζει τη δυνατότητα αυτοματοποίησης εργασιών με προγραμματισμό. Αυτό το κάνει χρησιμοποιώντας κάποια τεχνολογία της Microsoft που ονομάζεται COM Automation. Αυτή είναι η ίδια τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την σύνταξη μακροεντολών για το Word ή το Excel. Η ίδια η τεχνολογία δεν είναι σημαντική, αλλά αυτό που είναι σημαντικό είναι αυτό που επιτρέπει να υλοποιηθεί.

Η COM Automation επιτρέπει στις εφαρμογές, όπως το Inventor, να παρέχει μια διεπαφή προγραμματισμού σε μια αρκετά τυπική δομή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις

περισσότερες δημοφιλείς γλώσσες προγραμματισμού που είναι διαθέσιμες σήμερα. Αυτό παρέχει δύο οφέλη. Κατ 'αρχάς, υπάρχουν πολλές ομοιότητες του τρόπου προγραμματίσμου με άλλες εφαρμογές που χρησιμοποιούν COM Automation (Word, Excel, AutoCAD). Δεύτερον, είναι πολύ ευέλικτο στην πρόσβαση στο περιβάλλον προγραμματισμού, ώστε να μπορείτε να επιλέξετε την αγαπημένη σας γλώσσα προγραμματισμού και να είναι δυνατόν να ενοποιηθεί με άλλες εφαρμογές.

3.3.4.Αντικείμενα

Μια διεπαφή COM Automation εκθέτει τις λειτουργείες της μέσω ενός συνόλου αντικειμένων . Ένα αντικείμενο προγραμματισμού έχει πολλές ομοιότητες με τα πραγματικά - αντικείμενα. Ενα απλό παράδειγμα για την κατανόηση πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ορολογία του αντικειμενοστραφή προγραμματισμού για να περιγράψει ένα φυσικό αντικείμενο.

Μια εταιρεία που πουλάει καθίσματα επιτρέπει σε έναν πελάτη να σχεδιάσει την δική του καρέκλα, συμπληρώνοντας μια. Οι επιλογές στην φόρμα παραγγελίας καθορίζουν τις διάφορες ιδιότητες του επιθυμητού καθίσματος. Με τον καθορισμό των ιδιοτήτων στις επιθυμητές τιμές, ο πελάτης είναι σε θέση να περιγράψει το συγκεκριμένο κάθισμα που επιθυμεί.

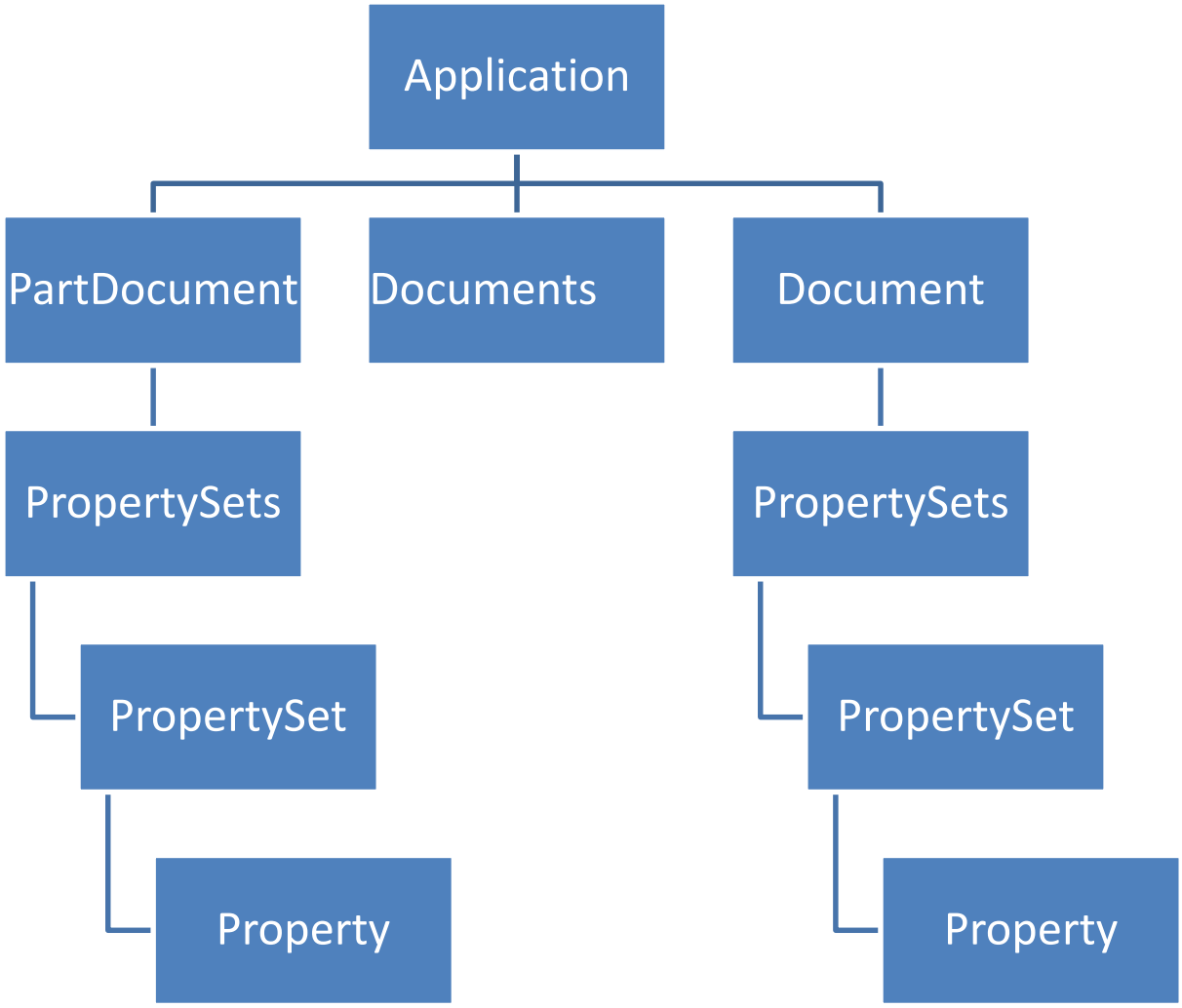
Εκτός από τις ιδιότητες, τα αντικείμενα υποστηρίζουν επίσης μεθόδους. Οι Μέθοδοι είναι κυρίως οδηγίες που το αντικείμενο καταλαβαίνει. Στον πραγματικό κόσμο, αυτές είναι ενέργειες που θα εκτελεστούν με το κάθισμα. Για παράδειγμα η καρέκλα, μπορεί να μετακινηθεί, να διπλωθεί, ή να πεταχτεί στα σκουπίδια από κάποιον. Στον κόσμο του προγραμματισμού τα αντικείμενα είναι έξυπνα και αντί να εκτελεί την ενέργεια κάποιο άτομο, το άτομο λέει στο αντικείμενο να εκτελέσει την ενέργεια από μόνο του. κινηθούν, μετακίνηση, δίπλωμα και διαγραφή.

Στο Inventor, μερικά παραδείγματα των αντικειμένων είναι χαρακτηριστικά εξώθησης, πλάνα εργασίας, περιορισμοί, παράθυρα, και iProperties. Η Διεπαφή προγραμματισμού του Inventor ορίζει το σύνολο των διαθέσιμων αντικειμένων και των συναφών μεθόδων και των ιδιοτήτων τους. Με την απόκτηση του αντικειμένου ενδιαφέροντος είναι δυνατόν να βρεθούν πληροφορίες σχετικά με αυτό εξετάζοντας τις τιμές των ιδιοτήτων του και έπειτα να επεξεργαστεί το αντικείμενο, αλλάζοντας τις τιμές αυτές ή καλώντας τις μεθόδους του αντικειμένου. Το πρώτο βήμα στο χειρισμό κάθε αντικειμένου είναι η πρόσβαση στο επιθυμητό αντικείμενο.

3.3.5.To Object Model

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η API του Inventor εκτίθεται ως ένα σύνολο αντικειμένων. Με την πρόσβαση σε αυτά τα αντικείμενα μέσω του API, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι και ιδιότητες για να δημιουργούν, να θέτονται ερωτήματα και να τα τροποποιούν. Το Object Model επιτρέπει την πρόσβαση σε αυτά τα αντικείμενα. Η κατανόηση της έννοιας του Object Model είναι σημαντική καθώς είναι μια κρίσιμη έννοια για την χρήση της διεπαφής προγραμματισμού του Inventor.

Το Object Model είναι ένα ιεραρχικό διάγραμμα που απεικονίζει τις σχέσεις μεταξύ των αντικειμένων. Ένα μικρό τμήμα του Object Model του Inventor φαίνεται στην εικόνα 3.5 όπου εμφανίζονται μόνο τα αντικείμενα που σχετίζονται με iProperties και στις περισσότερες περιπτώσεις οι σχέσεις μεταξύ των αντικειμενων ειναι ‘γονέα’-‘παιδιού’.



Εικόνα 3.6 Object Model

Για παράδειγμα, το αντικειμενο Application είναι το μητρικό όλων των αντικειμένων. Το αντικείμενο Document είναι μητρικό για τα διάφορα αντικείμενα που σχετίζονται με ιδιότητες. Για να εντοπιστεί ένα συγκεκριμένο αντικείμενο εντός του Object Model, συνήθως ξεκινόντας από την κορυφή και συνεχιζοντας προς τα κάτω απο 'γονέα'-σε 'παιδί' εντοπίζεται το επιθυμητό αντικείμενο. Για παράδειγμα, ξεκινόντας απο το αντικείμενο Application κατεβαίνοντας εντοπίζεται το επιθυμιτό Iproperty. Από το αντικειμενο Document, που είναι μητρικό του αντικειμένου PropertySet το οποίο είναι μητρικό του Iproperty εντοπίζεται το επιθυμητό αντικείμενο ιδιότητας.

3.3.6.Το Application Object

Ένα από τα πιο σημαντικά αντικείμενα στο Object Model είναι το Application Object. Αυτό το αντικείμενο αντιπροσωπεύει την εφαρμογή Inventor και είναι το πρώτο αντικείμενο στην ιεραρχία. Το Application Object υποστηρίζει μεθόδους και ιδιότητες που επηρεάζουν όλη την εφαρμογή Inventor, αλλά το πιο σημαντικό γνώρισμα της είναι ότι μέσα από αυτό δίνεται πρόσβαση σε οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο του Inventor. Χρειάζεται μόνο να είναι γνωστή η διαδικασία της περιήγησης στο Object Model για να εντοπιστεί το επιθυμητο αντικείμενο. Θα εξεταστεί πώς πρέπει να γραφθεί ένα πρόγραμμα για να υλοποιηθούν τα παραπάνω και κάποιες συντομεύσεις που μπορουν να χρησιμοποιηθούν για την διευκόλυνση της διαδικασίας. Όταν χρησιμοποιείται η VBA του Inventor υπάρχει η παγκόσμια μεταβλητή που ονομάζεται ThisApplication που περιέχει πάντα το Application Object.

3.3.7.Τα Collection Objects

Μια άλλη έννοια που είναι σημαντικό να είναι κατανοητή κατά την ενασχόληση με την διεπαφή προγραμματισμού του Inventor είναι τα Collection Objects. Τα Collection Objects εκπροσωπούνται στο Object Model του διαγράμματος με κουτιά με στρογγυλεμένες γωνίες. Στην εικόνα 3.5 του Object Model τα: Documents, PropertySets και PropertySet αντικείμενα είναι Collection Objects.

Η κύρια ιδιότητα ένος Collection Object είναι να παρέχει πρόσβαση σε μια ομάδα συνδεδεμένων αντικειμένων (ένα σύνολο σχέσεων 'γονέων'-'παιδιού'). Για παράδειγμα, το αντικείμενο Documents παρέχει πρόσβαση σε όλα τα έγγραφα που είναι εκείνη την ώρα ανοικτά στο Inventor. Μια συλλογή παρέχει πρόσβαση στο περιεχόμενό του μέσω δύο

ιδιοτήτων: την Count και την Item. Η ιδιότητα Count παρουσιάζει πόσα αντικείμενα βρίσκονται στη συλλογή και η ιδιότητα Item επιστρέφει ένα συγκεκριμένο αντικείμενο. Όλες οι συλλογές υποστηρίζουν αυτές τις δύο ιδιότητες.

Συνήθως, όταν χρησιμοποιείται η ιδιότητα Item ορίζεται ο αριθμός του επιθυμητου στοιχείου από τη συλλογή (δηλ. Item 1, 2, 3 ...). Για παράδειγμα, ο παρακάτω κώδικας εκτυπώνει τα ονόματα όλων των ανοιχτών εγγράφων με τη χρήση των ιδιοτήτων Count και Item, του Collection Object «Documents». (Στο δείγμα χρησιμοποιείται η VBA του Inventor για διευκόλυνση χρησιμοποιόντας την παγκόσμια μεταβλητή «ThisApplication».)

```
Public Sub ShowDocuments()
' Get the Documents collection object.
Dim invDocs As Documents
Set invDocs = ThisApplication.Documents
' Iterate through the contents of the Documents
collection.
Dim i As Integer
For i = 1 To invDocs.Count
' Get a specific item from the Documents collection.
Dim invDocument As Document
Set invDocument = invDocs.Item(i)
' Display the full filename of the document in the Immediate window.
Debug.Print invDocument.FullFileName
Next
End Sub
```

Μία άλλη τεχνική περιήγησης στα περιεχόμενα της συλλογής είναι η χρήση της παραμέτρου For Each. Συνήθως είναι πιο αποτελεσματική και οδηγεί σε ένα ταχύτερη πρόγραμμα. Ο παρακάτω κώδικας δίνει ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα με τον κώδικα παραπάνωμε την χρήση της παραμέτρου For Each.

```
Public Sub ShowDocuments2()
' Get the Documents collection object.
Dim invDocs As Documents
Set invDocs = ThisApplication.Documents
' Iterate through the contents of the Documents collection.
Dim invDocument As Document
For Each invDocument In invDocs
' Display the full filename of the document in the Immediate window.
Debug.Print invDocument.FullFileName
Next
End Sub
```

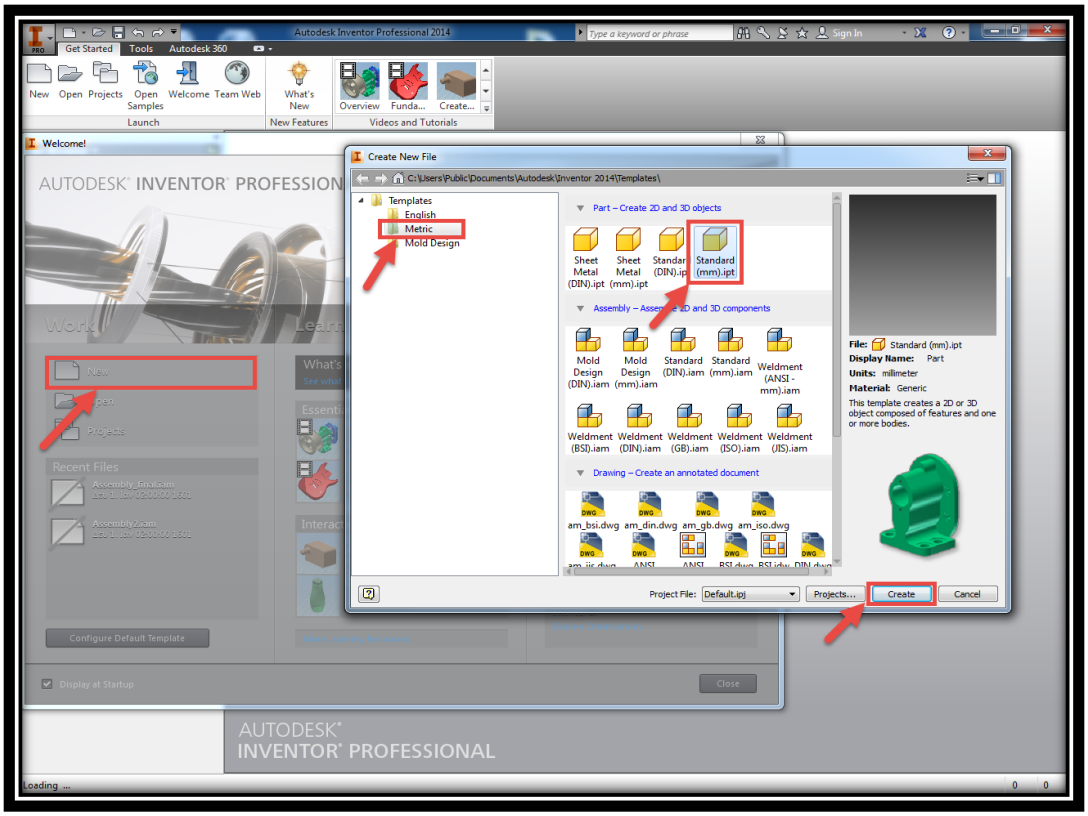
Όταν η ιδιότητα του Item χρησιμοποιείται με μια τιμή που δείχνει τον αριθμό του στοιχείου, το πρώτο στοιχείο της συλλογής είναι το 1 και το τελευταίο στοιχείο είναι η τιμή που επιστρέφεται από την ιδιότητα Count της συλλογής. Για ορισμένες συλλογές η ιδιότητα Item υποστηρίζει επίσης τον καθορισμό το ονόματος του επιθυμητού στοιχείου. Αντί να καθοριστεί ο αριθμός του στοιχείου μπορεί να καθοριστεί ένα String που καθορίζει το όνομα του στοιχειου. [11,12]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Με τη βοήθεια της Visual Basic και του περιβάλλοντος API του Autodesk Inventor® αναπτύσσονται και παρουσιάζονται οι εντολές και ρουτίνες που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση τόρνευσης.

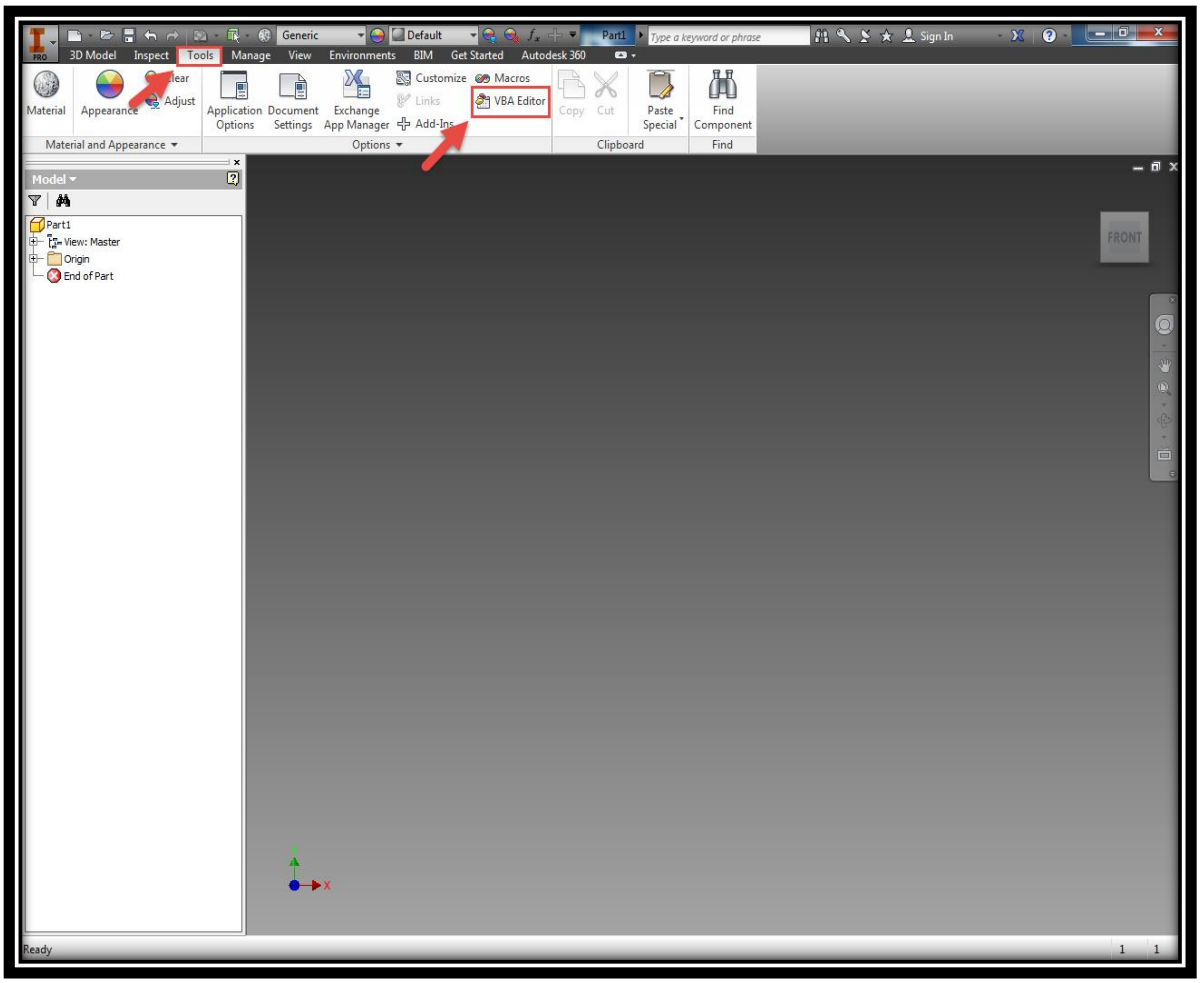
4.1. Δημιουργία αρχείων και προετοιμασία προγραμματισμού

Κατά το άνοιγμα του Autodesk Inventor® ζητείται απο τον χρήστη να δημιουργήσει ή να ανοίξει κάποιο αρχείο συμβατό με την εφαρμογή. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1 δημιουργείται ένα νέο αρχείο τύπου part στο μετρικό σύστημα (SI), πάνω στο οποίο θα εκτελεστεί ο κώδικας και θα εμφανίσει το αποτέλεσμα.



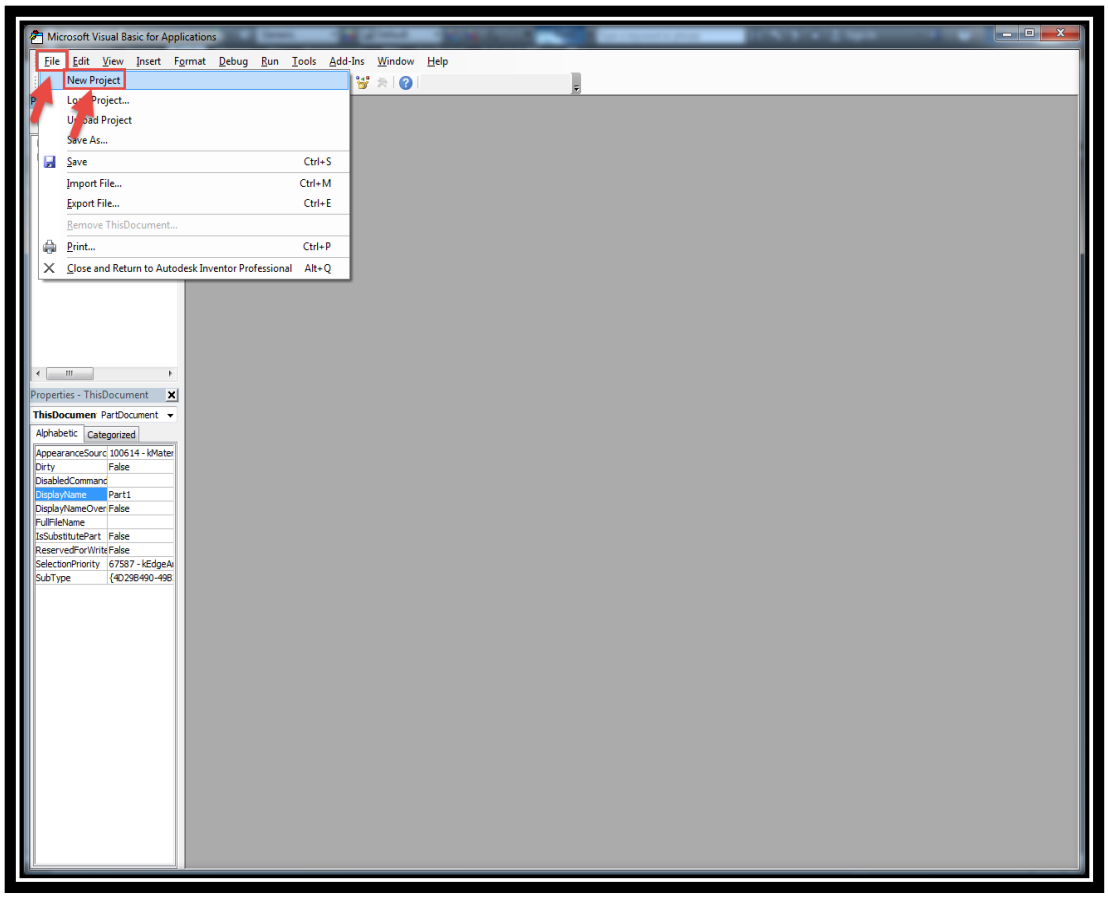
Εικόνα 4.1 Δημιουργία νέου αρχείου.

Στη συνέχεια αφού δημιουργηθεί το καινούριο αρχείο, μέσα απο τις επιλογές της εφαρμογής, επιλέγεται η καρτέλα ‘tools’ και στη συνέχεια το κουμπί ‘VBA Editor’, όπου γίνεται έναρξη της διεπαφής προγραματισμού εφαρμογής (API) σε περιβάλλον Visual Basic όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2.



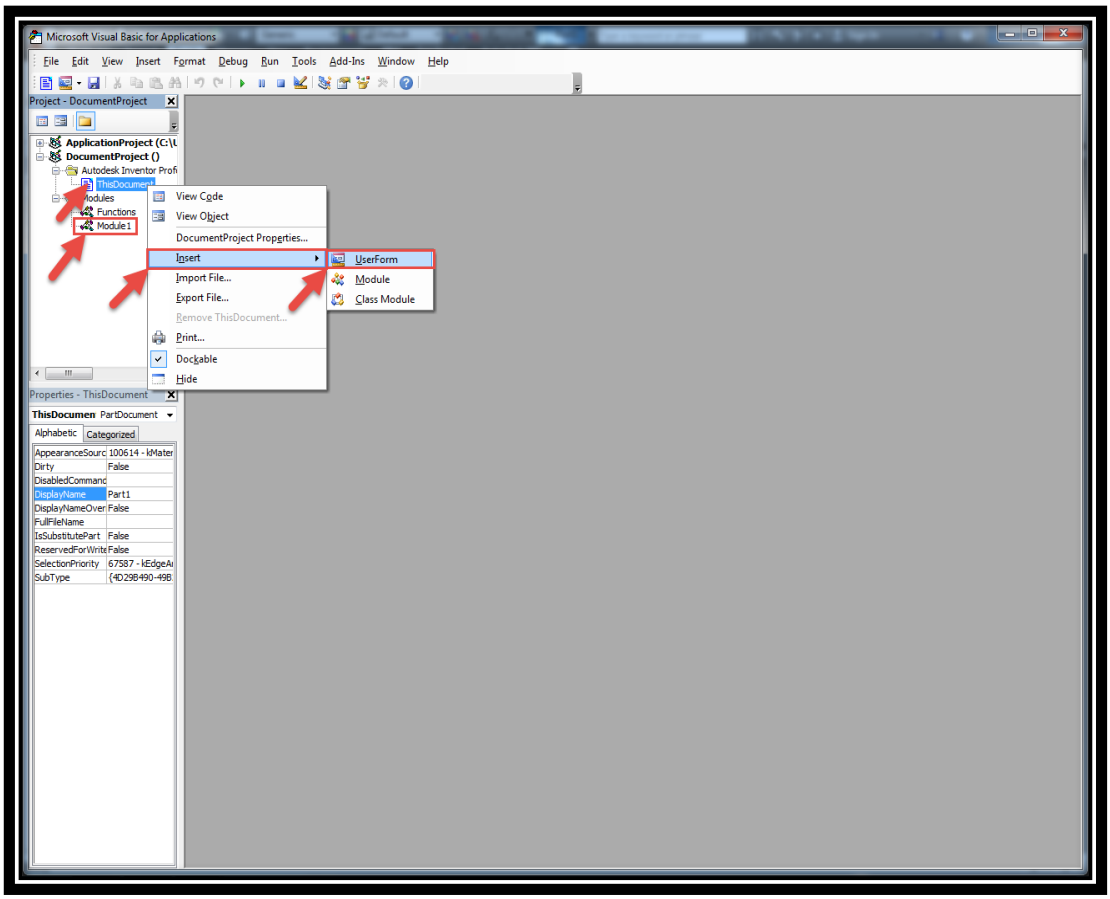
Εικόνα 4.2 Είσοδος στην API.

Στο νέο παράθυρου που εμφανίζεται, φαίνονται οι επιλογές της διεπαφής προγραματισμού. Για να ξεκινήσει η διαδικασία καταγραφής κώδικα θα πρέπει να δημιουργηθεί ενα νέο αρχείο, επιλέγοντας την καρτέλα ‘File’ και στη συνέχεια ‘New Project’, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3, το οποίο θα περιέχει το σύνολο του κώδικα και θα αποθηκέυεται ανεξάρτητα απο τα αρχεία της εφαρμογής που αλληλεπιδρά με την επέκταση ‘xxxx.ivb’.



Εικόνα 4.3 Δημιουργία καινούριου project.

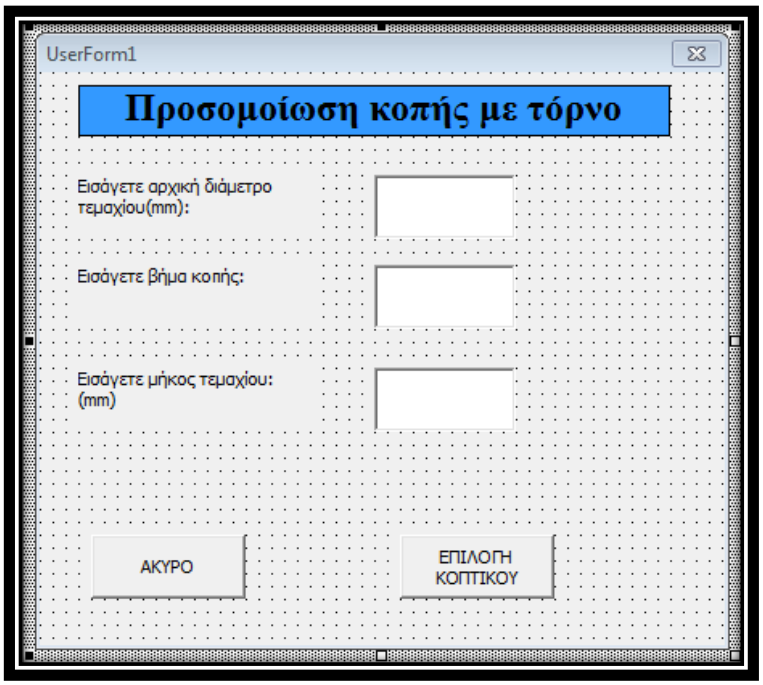
Στο αρχείο αυτό που δημιουργήθηκε υπάρχει ένας φάκελος που περιέχει τα modules. Τα modules είναι χώρος όπου κωδικοποιείται ένα αντικείμενο ή μία ομάδα αντικειμένων. Αφού κωδικοποιηθούν, εμφανίζουν στην κύρια εφαρμογή ένα αποτέλεσμα με συγκεκριμένα στοιχεία και παραμέτρους που έχουν δωθεί από τον προγραμματιστή. Το αποτέλεσμα σαφώς είναι δυνατό να αλλάξει απο τον προγραμματιστή με την εισαγωγή νέων στοιχείων, παραμέτρων ή δεδομένων στον κυρίως κώδικα. Παρόλα αυτά δεν αποτελεί μία προσεγγίσιμη λύση για έναν απλό χρήστη και είναι απαγορευτική όταν πρόκειται για πρόγραμμα κλειστού κώδικα που απευθύνεται σε τρίτους. Γι'αυτό το λόγο δημιουργείται φόρμα εργασίας κάνοντας δεξί κλικ πάνω απο τον φάκελο των modules και στη συνέχεια στις επιλογές που εμφανίζονται 'insert'και 'UserForm', όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.4. Μία φόρμα μπορεί να περιέχει ρουτίνες που ελέγχουν τα δεδομένα που δέχεται, να επιλέγεται από αυτές ποιο module θα καλείται και γενικότερα να επιδρά πάνω στα δεδομένα και τις παραμέτρους του κυρίως κώδικα.



Εικόνα 4.4 Modules και φόρμες εργασίας.

4.2. Φόρμες εργασίας

Στην έναρξη του προγράμματος εμφανίζεται η πρώτη φόρμα εισαγωγής παραμέτρων, όπου ζητείται η αρχική διάμετρος του προς κατεργασία τεμαχίου, το βήμα κοπής και το μήκος τεμαχίου, οπως φαίνεται στην εικόνα 4.5. και αναλύεται στον πίνακα 4.6.



Εικόνα 4.5 Φόρμα εισαγωγής δεδομένων

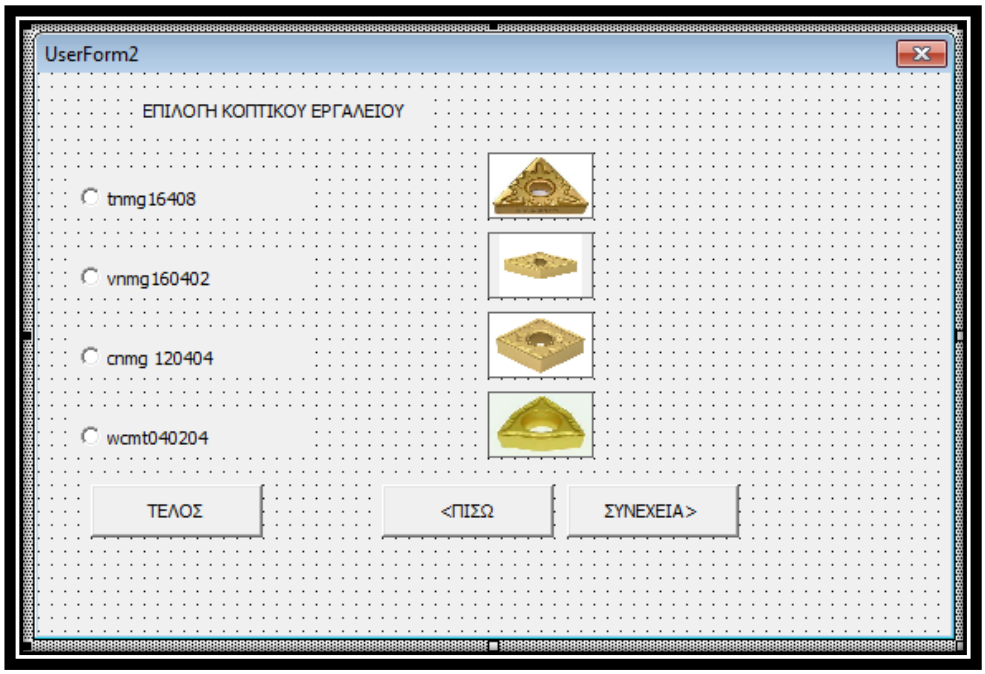
Κώδικας	Περιγραφή

Dim a As Variant
Dim b As Variant
Dim C As Variant
a = TextBox1.Text
b = TextBox2.Text
C = TextBox3.Text
If a = 0 Then
Else
If a <= 0 Then
Else
If C <= 0 Then
ElseIf a = "" Then
Else
ElseIf C = "" Then
ElseIf b = "" Then
	Αφού δηλωθούν οι 3 μεταβλητές που θα εισαχθούν στα αντίστοιχα πεδία στον πίνακα, ο κώδικας ελέγχει την εγκυρότητα τους με τις αντίστοιχες εντολές «if». Οι εντολές «if» εξετάζουν με συγκεκριμένες παραμέτρους την εγκυρότητα των δεδομένων που εισήχθησαν.

MsgBox "", 32, "" TextBox1.Text = "" MsgBox "" TextBox3.Text = "" MsgBox "", 32, "" TextBox2.Text = ""	Αν το δεδομένο δεν είναι αποδεκτό, θα εμφανιστεί ανάλογο μήνυμα που θα εξηγεί για ποιον λόγο δεν είναι αποδεκτό και στη συνέχεια θα αδειάζει το πεδίο, ώστε να εισαχθεί νέο δεδομένο.
UserForm1.Hide UserForm2.Show End If End If End If End If End Sub	Αν όλα τα δεδομένα εισαχθούν ορθώς, τότε η φόρμα παραπέμπει σε μια άλλη φόρμα. Η παρούσα εξαφανίζεται και κλείνει τις ανοιχτές της ρουτίνες με την εντολή «end if».

Πίνακας 4.6 Φόρμα εισαγωγής δεδομένων.

Στη συνέχεια εμφανίζεται η φόρμα εργαλείου κοπής, όπου επιλέγεται η επιθυμητή κοπτική ακμή, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.7 και αναλύεται στον πίνακα 4.8.



Εικόνα 4.7 Φόρμα επιλογής κοπτικού

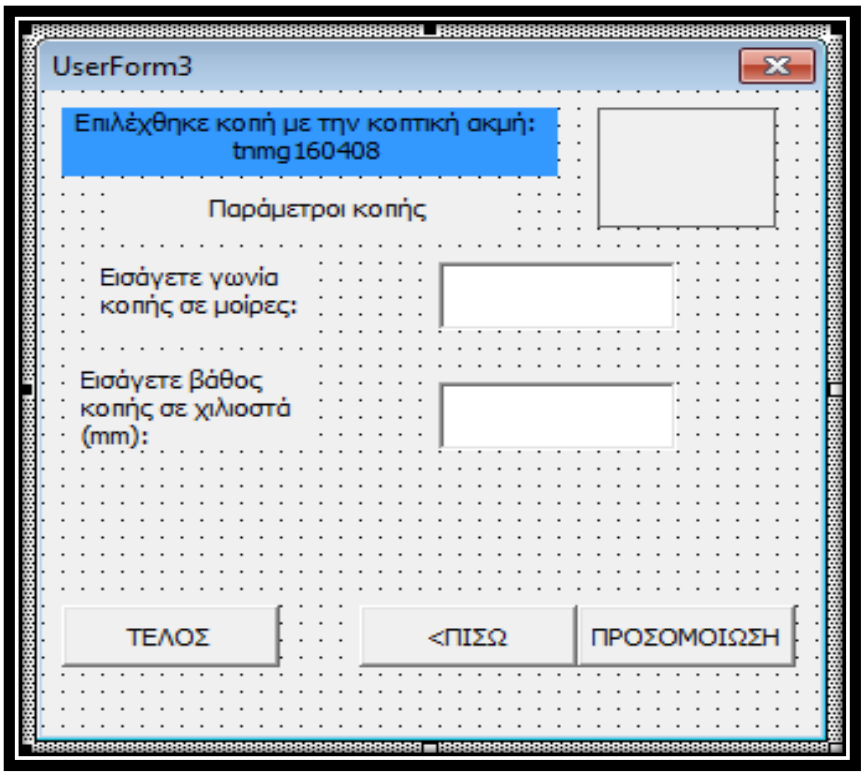
Private Sub CommandButton1_Click() End End Sub Private Sub CommandButton2_Click() UserForm2.Hide UserForm1.Show End Sub Private Sub CommandButton3_Click()	Ο κώδικας πίσω απο την συγκεκριμένη φόρμα λειτουργεί με το πάτημα του κουμπιού ‘συνέχεια’. Με το κουμπί ‘τέλος’ κλείνει η διαδικασία προσομοίωσης, ενώ με το κουμπί ‘πίσω’ εξαφανίζει την παρούσα φόρμα και εμφανίζει την προηγούμενη.

Private Sub CommandButton3_Click() If OptionButton1.Value = True Then UserForm2.Hide UserForm31.Show ElseIf OptionButton2.Value = True Then UserForm2.Hide UserForm32.Show ElseIf OptionButton3.Value = True Then UserForm2.Hide UserForm33.Show ElseIf OptionButton4.Value = True Then UserForm2.Hide UserForm34.Show	Υπάρχουν 4 δυνατές επιλογές κοπτικών ακμών εκ των οποίων πρέπει να επιλεγεί μία. Συνεπώς ο κώδικας διαρθρώνεται σε 4 option buttons και ανάλογα την επιλογή εξαφανίζει την παρούσα φόρμα και παραπέμπει σε μία άλλη αντιπροσωπευτική της επιλαχούσας κοπτικής ακμής.

Else
'UserForm2.Show
MsgBox ""
End If
	Αν δεν γίνει καμία επιλογή και πατηθεί το κουμπί ‘συνέχεια’, θα εμφανιστεί ανάλογο μήνυμα που θα προτρέπει τον χρήστη να κάνει μία επιλογή, ώστε να συνεχιστεί η εκτέλεση του κώδικα. Όταν θα πραγματοποιηθεί κάποια επιλογή, κλείνει η ρουτίνα και παραπέμπει στη φόρμα της αντίστοιχης κοπτικής ακμής.

Πίνακας 4.8 Φόρμα επιλογής κοπτικού.

Μετά την επιλογή κοπτικής ακμής θα εμφανιστεί η κατάλληλη φόρμα που θα αντιστοιχεί στην επιλαχούσα κοπτική ακμή. Στόν πίνακα 4.3 φαίνεται η φόρμα στην περίπτωση επιλογής της κοπτικής ακμής ‘tnmg160408’. Στη συνέχεια εφόσον έχουν δωθεί τα ζητούμενα μεγέθη, η φόρμα καλεί τον κυρίως κώδικα της εφαρμογής, ώστε να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση.



Εικόνα 4.9 Φόρμα παραμέτρων κοπής κοπτικής ακμής.

Κώδικας	Περιγραφή
Private Sub CommandButton2_Click() UserForm31.Hide UserForm2.Show End End Sub Private Sub CommandButton3_Click() End End Sub Private Sub CommandButton1_Click()	Ο κώδικας πίσω απο την φόρμα λειτουργεί με το πάτημα του κουμπιού ‘προσομοίωση’. Με το κουμπί ‘τέλος’ κλείνει η διαδικασία προσομοίωσης, ενώ με το κουμπί ‘πίσω’ εξαφανίζει την παρούσα φόρμα και εμφανίζει την προηγούμενη.

Private Sub CommandButton1_Click()
 	
Dim g As Variant
Dim v As Variant
 	
g = TextBox1.Text
v = TextBox2.Text
 	
If g = "" Then
Else
If v <= 0 Then
TextBox2.Text = ""
ElseIf v = "" Then
	Αφού δηλωθούν οι 2 μεταβλητές που θα εισαχθούν στα αντίστοιχα πεδία στον πίνακα, ο κώδικας ελέγχει την εγκυρότητα τους με τις αντίστοιχες εντολές «if». Οι εντολές «if» εξετάζουν με συγκεκριμένες παραμέτρους την εγκυρότητα των δεδομένων που εισήχθησαν.

End If	
MsgBox "", 32, "" TextBox1.Text = "" MsgBox "" TextBox2.Text = ""	Αν το δεδομένο δεν ειναι αποδεκτό ή το πεδίο είναι κενό, θα εμφανιστεί ανάλογο μήνυμα που θα εξηγεί για ποιόν λόγο δεν είναι αποδεκτό και στη συνέχεια θα αδειάζει το πεδίο ώστε να εισαχθεί νέο δεδομένο.

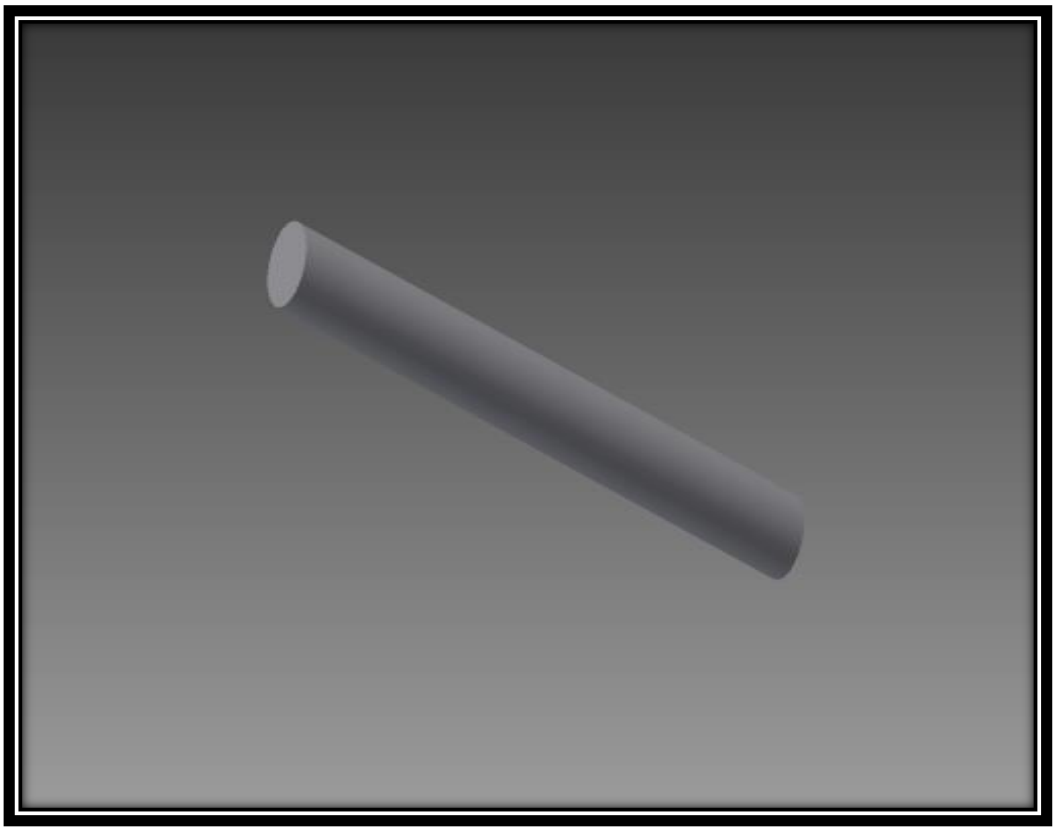
If g <> "" And v > 0 And v <> "" Then
UserForm31.Hide
Module1.tnmg160408
End If
End If
End Sub
	Αν όλα τα δεδομένα εισαχθούν ορθώς, τότε η φόρμα παραπέμπει στο αντίστοιχο module, στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση με τα εισαχθέντα δεδομένα. Η παρούσα φόρμα εξαφανίζεται και κλείνει τις ανοιχτές της ρουτίνες με την εντολή «end if».

Πίνακας 4.10 Φόρμα παραμέτρων κοπής κοπτικής ακμής.

4.3. Κύριος κώδικας-Modules

Μετά την συμπλήρωση των φορμών, το πρόγραμμα σχηματίζει ένα προς κατεργασία τεμάχιο με τις διαστάσεις που έχουν δοθεί στην αντίστοιχη φόρμα. Η εντολή που σχηματίζει το προς κατεργασία τεμάχιο είναι η εντολή extrude η οποία παίρνει ένα σχήμα στο επίπεδο και το επεκτείνει τρισδιάστατα προς την κατεύθυνση και το μέγεθος που θα οριστεί. Στην εικόνα 4.11 φαίνεται ένας κύλινδρος που δημιουργήθηκε με την εντολή extrude και αναλύεται στον πίνακα 4.12. Η εντολή αυτή μπορεί να εκτελεστεί, είτε για ανοιχτές είτε για κλειστές γεωμετρίες με την αλλαγή της παραμέτρου AddForSurface και AddForSolid αντίστοιχα. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα επιλογής της κατεύθυνσης που θα ακολουθήσει η επέκταση του σχήματος με τις εντολές:

- *SymmetricExtentDirection*: συμμετρική επέκταση και απο τις δύο πλευρές του άξονα,
- *NegativeExtentDirection*: επέκταση προς τις αρνητικές τιμές του άξονα και
- *kPositiveExtentDirection*: επέκταση προς τις θετικές τιμές του άξονα.

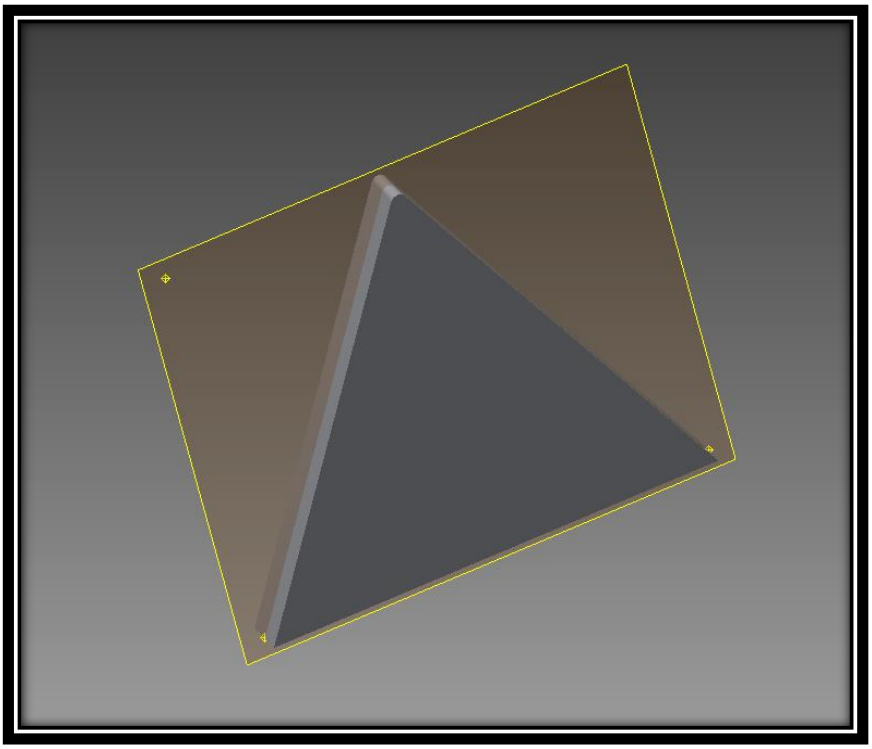


Εικόνα 4.11 Σχηματισμός κλειστής γεωμετρίας με την εντολή extrude.

Κώδικας	Περιγραφή
Dim sketch2 As PlanarSketch Set sketch2 = oCompDef.Sketches.Add(oCompDef.WorkPlanes.Item(3)) Call sketch2.SketchCircles.AddByCenterRadius(oTG.CreatePoint2d(0, 0), r) Dim cylProfile As Profile Set cylProfile = sketch2.Profiles.AddForSolid	Δήλωση του σκέτς, δηλαδή του χώρου του αντικειμένου που θα δημιουργηθεί. Η εντολή item ορίζει τους άξονες στους οποίους θα δημιουργηθεί το αντικείμενο (x-y, y-z ή x-z). Στην συνέχεια καλείται το σκέτς να δημιουργήσει έναν κύκλο με κέντρο τις συντεταγμένες (0,0) και με ακτίνα το μισό της διαμέτρου που έχει εισαχθεί στην πρώτη φόρμα που είναι δηλωμένη ως μεταβλητή 'r'. Με τα παραπάνω χαρακτηριστικά ορίζεται ένα προφίλ, το οποίο με την εντολή addforsolid ορίζεται σαν κλειστή γεωμετρία.
Dim extrudeDef As ExtrudeDefinition Set extrudeDef = extrudes.CreateExtrudeDefinition(cylProfile, kNewBodyOperation)	Ορίζεται η διαδικασία της εξώθησης (extrude) που θα πραγματοποιηθεί στο προφίλ που δημιουργήθηκε πριν. Επίσης ορίζεται ο τρόπος με τον οποίο θα απεικονιστεί το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας ως νέο σώμα, με την εντολή kNewBodyOperation.
Dim extrudes As ExtrudeFeatures Set extrudes = oPartDoc.ComponentDefinition.Features.ExtrudeFeatures Call extrudeDef.SetDistanceExtent(mt, kSymmetricExtentDirection) Dim extrude As ExtrudeFeature Set extrude = extrudes.Add(extrudeDef)	Ορίζονται τα χαρακτηριστικά της εξώθησης. Συγκεκριμένα ορίζεται προς ποιά κατεύθυνση θα πραγματοποιηθεί η εξώθηση. Με την εντολή kSymmetricExtentDirection θα επεκταθεί συμμετρικά προς τις δύο κατευθύνσεις του άξονα. Το κατά πόσο θα επεκταθεί εξαρτάται από την μεταβλητή 'mt' που εισήχθη στην πρώτη φόρμα. Τέλος ορίζεται η εξώθηση και καλείται να απεικονιστεί.

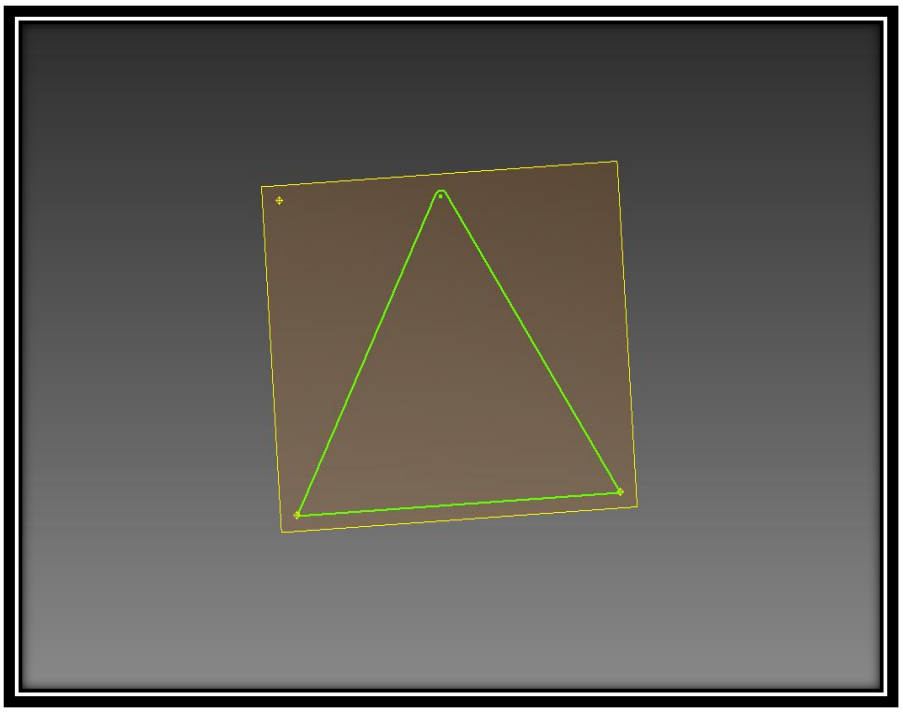
Πίνακας 4.12 Σχηματισμός κλειστής γεωμετρίας με την εντολή extrude.

Στη συνέχεια το κυρίως πρόγραμμα παίρνει την επιλαχούσα κοπτική ακμή, η οποία έχει σχηματιστεί πάνω σε ένα επίπεδο εργασίας (workplane). Την τοποθετεί στην άκρη του τεμαχίου, όπως θα γινόταν και στην πραγματικότητα κατά την τόρνευση, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί στην φόρμα παραμέτρων κοπής κοπτικής ακμής. Στην εικόνα 4.12 φαίνεται η ακμή κοπής 'tnmg160408'.



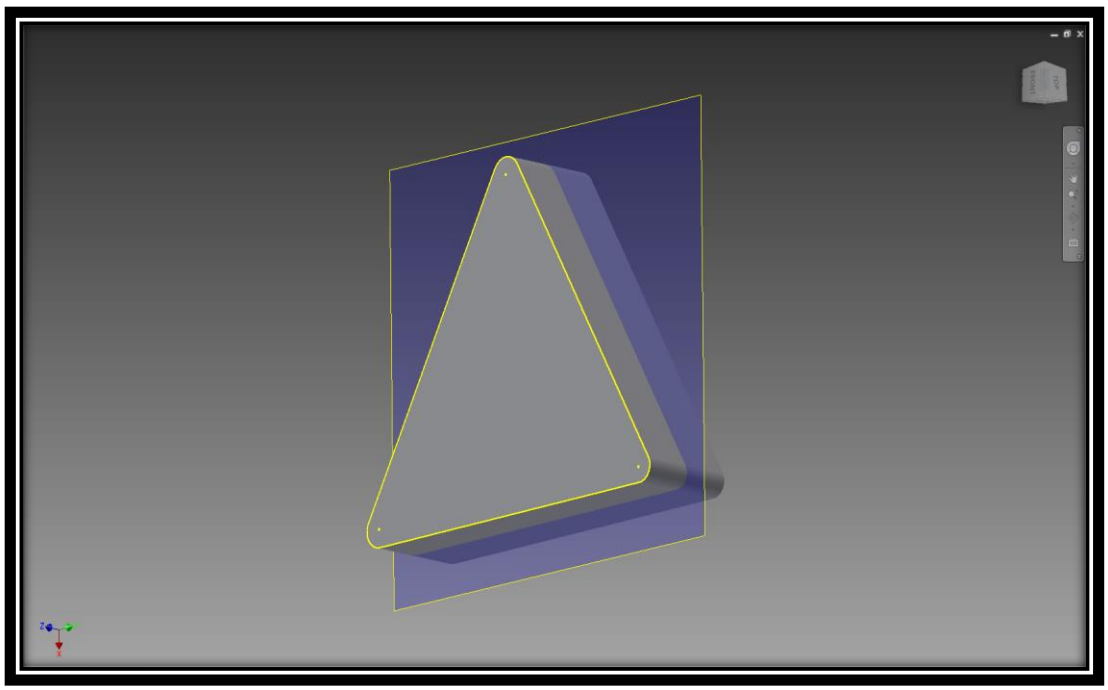
Εικόνα 4.12 Ακμή κοπής tnmg160408.

Στις κοπτικές ακμές χρησιμοποιήθηκε κλειστή γεωμετρία, ώστε να προκύψει ένας συμπαγής σχηματισμός για λόγους απεικόνησης, με την εντολή addforsolid. Το κυρίως πρόγραμμα χρησιμοποιεί τις κοπτικές ακμές με την μορφή της επιφάνειας που καταλαμβάνει το σχήμα με την εντολή addforsurface, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.13.

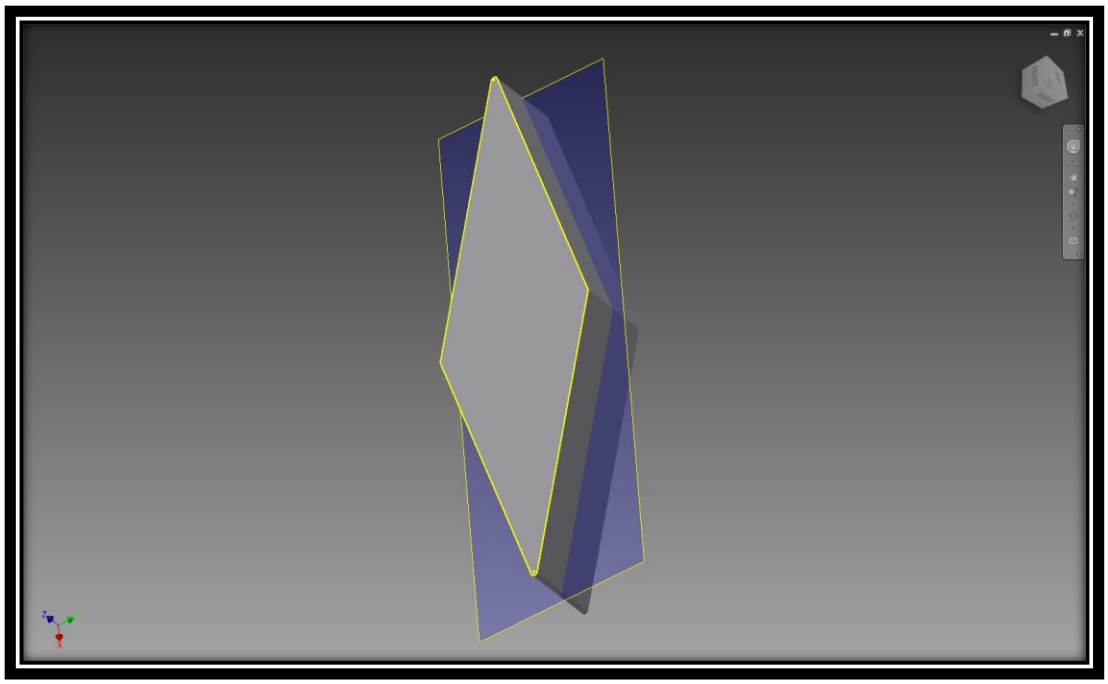


Εικόνα 4.13 Ακμή κοπής tnmg160408 σε μορφή επιφάνειας.

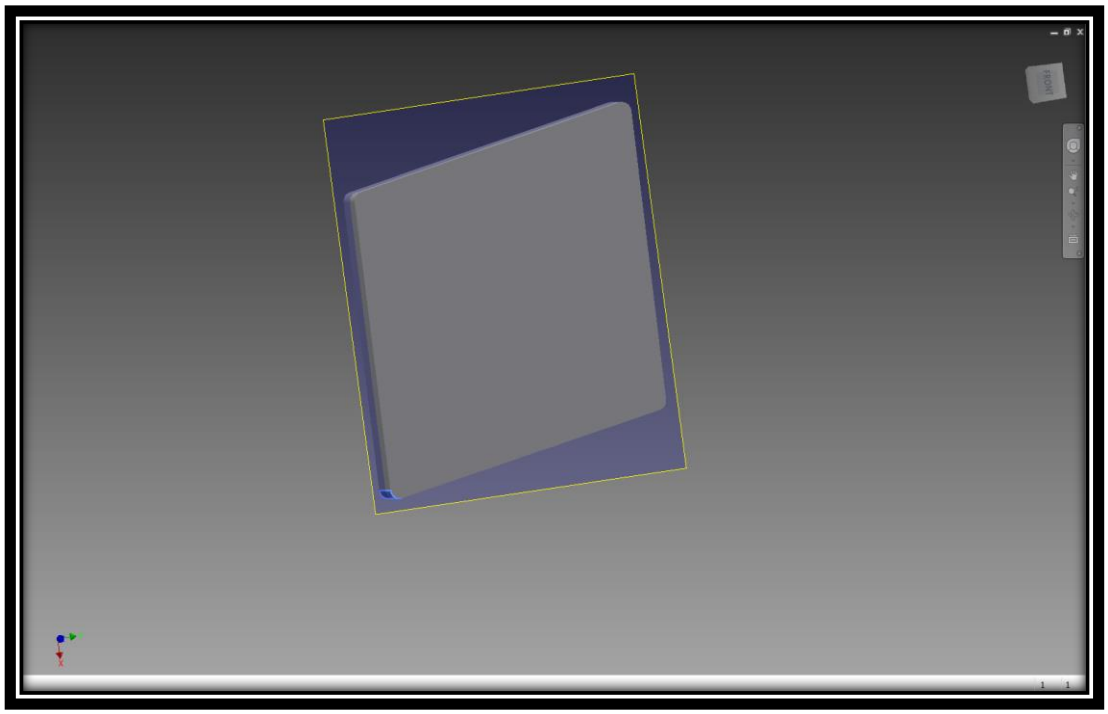
Το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα να πραγματοποιήσει κοπή με 4 διαφορετικές κοπτικές ακμές κατόπιν επιλογής του χρήστη απο τις φόρμες, όπως αυτές απεικονίζονται στην αρχή του κεφαλαίου. Οι διαθέσιμες κοπτικές ακμές φαίνονται στις εικόνες 4.14, 4.15, 4.16 και 4.17.



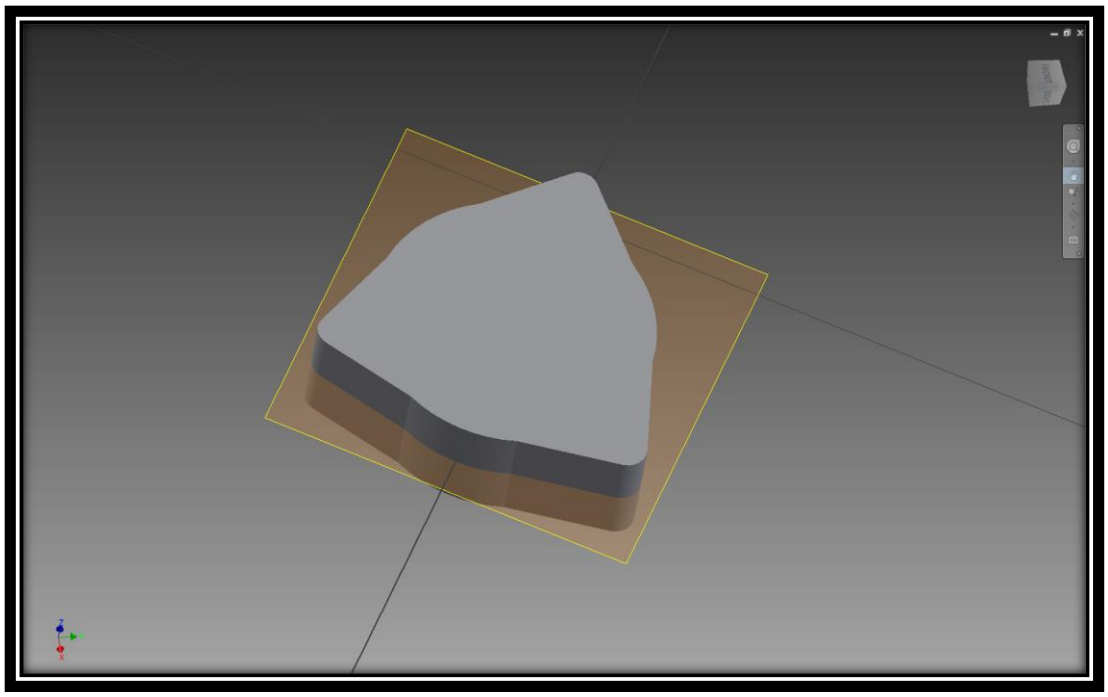
Εικόνα 4.14 Κοπτική ακμή tnmg160408



Εικόνα 4.15. Κοπτική ακμή vnmg160402



Εικόνα 4.16.Κοπτική ακμή cnmg120404



Εικόνα 4.17. Κοπτική ακμή wnmg040204

Κατά τον σχηματισμό των κοπτικών ακμών, για κάθε σημείο που δημιουργειται, χρησιμοποιείται και ένα rotation matrix το οποίο δημιουργεί μια περιστροφή στον ευκλείδιο χώρο. Τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί στην 3η φόρμα για την γωνία κοπής, χρησιμοποιούνται απο το rotation matrix για να περιστρέψουν τα σημεία σύμφωνα με την γωνία που έχει ζητηθεί. Επίσης στις συντεταγμένες των σημείων που απαρτίζουν την κοπτική ακμή, προστίθενται τα δεδομένα που έχουν δοθεί στην 3η φόρμα για το βάθος κοπής, ώστε να μετατοπιστούν σύμφωνα με το επιθυμητό βάθος κοπής.

Παρατίθεται παράδειγμα του κώδικα δημιουργίας ενός σημείου μιας κοπτικής ακμής:

x1o = 0

y1o = 0

xn = x1o * Cos(thita) - y1o * Sin(thita) + vako

yn = x1o * Sin(thita) + y1o * Cos(thita)

Set oPointC1 = oTG.CreatePoint2d(xn, yn)

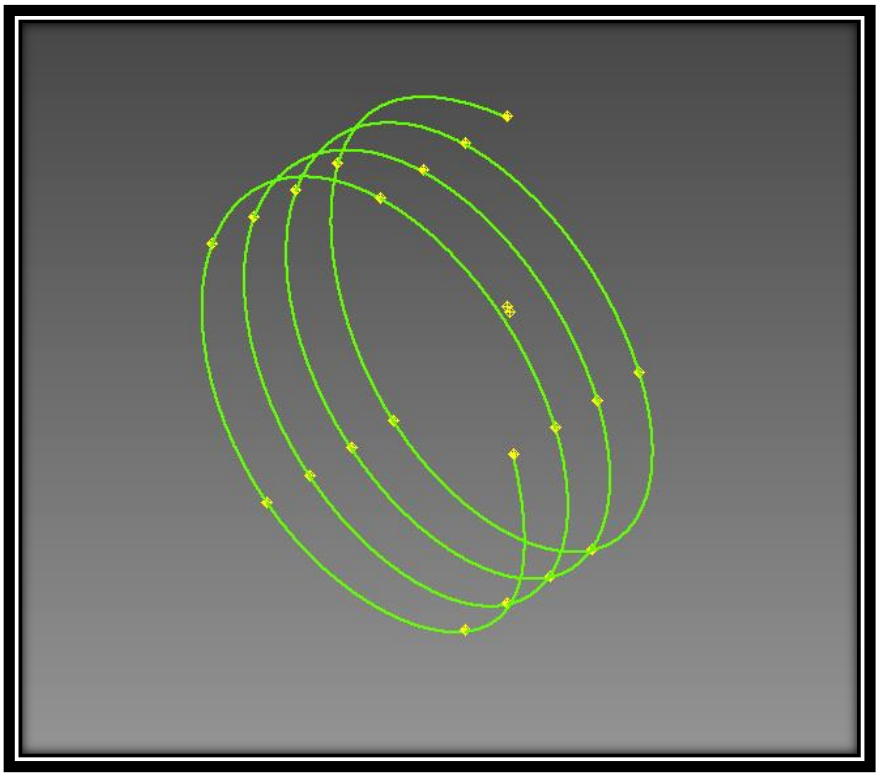
Όπου

- '*thita*', η γωνία κοπής
- '*vako*', το βάθος κοπής
- τα '*x1o*' και '*y1o*' είναι οι συντεταγμένες του σημείου στο καρτεσιανό σύστημα αξόνων και

- τα '*xn*' και '*yn*' είναι οι συντεταγμένες του σημείου στο καρτεσιανό σύστημα αξόνων, αφού περιστραφούν και μετατοπιστούν.

Στην συνέχεια με την εντολή rail και την εντολή spline, δημιουργείται χρησιμοποιώντας τον μαθηματικο τύπο της έλικας (5.1), το σπείρωμα πάνω στο οποίο θα κινηθεί η κοπτική ακμή, βάσει των δεδομένων που έχουν εισαχθεί στην φόρμα εισαγωγής δεδομένων. Στην εικόνα 4.18. φαίνεται ενα τέτοιο σπείρωμα και αναλύεται στον πίνακα 4.19.

$$\begin{Bmatrix} x = r \cdot Cos(z \cdot \frac{2pi}{b}) \\ y = r * Sin(z \cdot \frac{2pi}{b}) \end{Bmatrix} \quad (5.1)$$



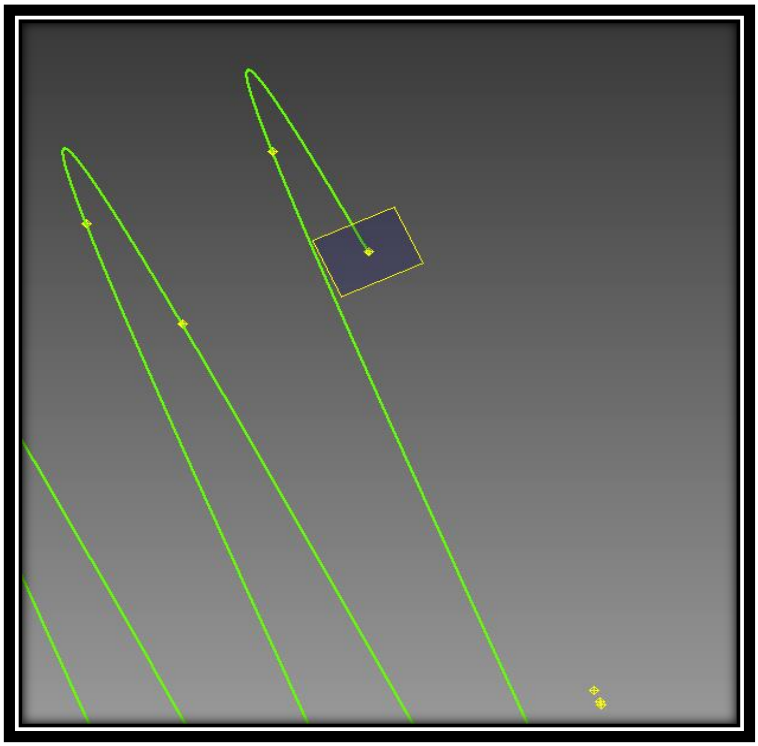
Εικόνα 4.18 Δημιουργία σπειρώματος.

Κώδικας	Περιγραφή
Dim points(100, 3) As Integer Dim a as integer a=r * 3 For i1 = 1 To 100 Step 1 points(i1, 3) = z points(i1, 1) = r * Cos(z * (2 * pi / b)) points(i1, 2) = r * Sin(z * (2 * pi / b)) z = z + b/a Next i1	Δήλωση ενός πίνακα 100 γραμμών και 3 στήλων. Οι γραμμές συμπληρώνονται με τιμές οι οποίες ορίζονται απο τις στήλες σε ποιόν άξονα αντιστοιχούν(x-y-z). Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια ρουτίνα for η οποία εφαρμόζοντας την εξίσωση έλικας θα δώσει τις συντεταγμένες των σημείων που συμπληρώνουν τον πίνακα τα οποία θα ορίζουν μία σπείρα. Μέσα στην εξίσωση χρησιμοποιούνται οι μεταβλητές 'r', 'a' και 'b' οι οποίες εισήχθησαν στην πρώτη φόρμα και αντιπροσωπεύουν την ακτίνα, τα σημεία σε μία έλικα και το βήμα της έλικας αντίστοιχα. Η ρουτίνα θα κλείσει όταν συμπληρωθούν όλα τα σημεία του πίνακα.
Dim n As Integer Dim WPs(1 To 100) As WorkPoint For n = 1 To 100 Step 1 Set WPs(n) = oCompDef.WorkPoints.AddFixed(oTG.CreatePoint(points(n, 1), points(n, 2), points(n, 3))) Next n	Ορίζονται τα στοιχεία που εισήχθησαν απο την προηγούμενη ρουτίνα στον πίνακα ως σημεία στον χώρο μέσα απο μία ρουτίνα η οποία παίρνει τα σημεία του πίνακα και ορίζει συγκεκριμένα τις συντεταγμένες τους. Η ρουτίνα κλείνει οταν οριστούν όλα τα στοιχεία του πίνακα,δηλαδη όταν δημιουργηθούν 100 σημεία με συντεταγμένες x-y-z.
Dim WPsf As ObjectCollection Set WPsf = ThisApplication.TransientObjects.CreateObjectCollection For i2 = 1 To 100 WPsf.Add WPs(i2) Next i2	Ορίζεται μία συλλογή αντικειμένων η οποία μέσα απο μία ρουτίνα θα παίρνει τα σημεία που δημιουργήθηκαν απο την προηγούμενη ρουτίνα και θα τα εντάσσει στην συλλογή αντικειμένων. Η ρουτίνα θα κλείσει όταν ενταχθούν στην συλλογή ολα τα σημεία.
Set oSketch3d = oPartDoc.ComponentDefinition.Sketches3D.Add Set oSpline = oSketch3d.SketchSplines3D.Add(WPsf) Set ospline2 = oSketch3d.Profiles3D.AddOpen	Ορίζεται το σκέτς ώστε να απεικονιστεί το σπείρωμα και στη συνέχεια ορίζεται η τροχιά που δημιουργείται απο τα σημεία που εντάχθηκαν στην συλλογή αντικειμένων απο την προηγούμενη ρουτίνα. Στην συνέχεια ορίζεται ως ανοιχτή γεωμετρία και στο τέλος ορίζεται το τελικο σπειρωμα ως 'oSrail' που περιέχει ολα τα προηγούμενα

Set oSrail = ThisApplication.TransientObjects.CreateObjectCollection oSrail.Add ospline2	χαρακτηριστικά και πάνω του θα κινηθεί το προφίλ της κοπτικής ακμής.

Πίνακας 4.19.Δημιουργία σπειρώματος

Αφού δημιουργηθεί το σπείρωμα το επίπεδο εργασίας (workplane) που θα περιέχει την επιλαχούσα κοπτική ακμή τοποθετείται πάνω στα σημεία του σπειρώματος όπως φαίνεται στην εικόνα 4.20. και αναλύεται στον πίνακα 4.21



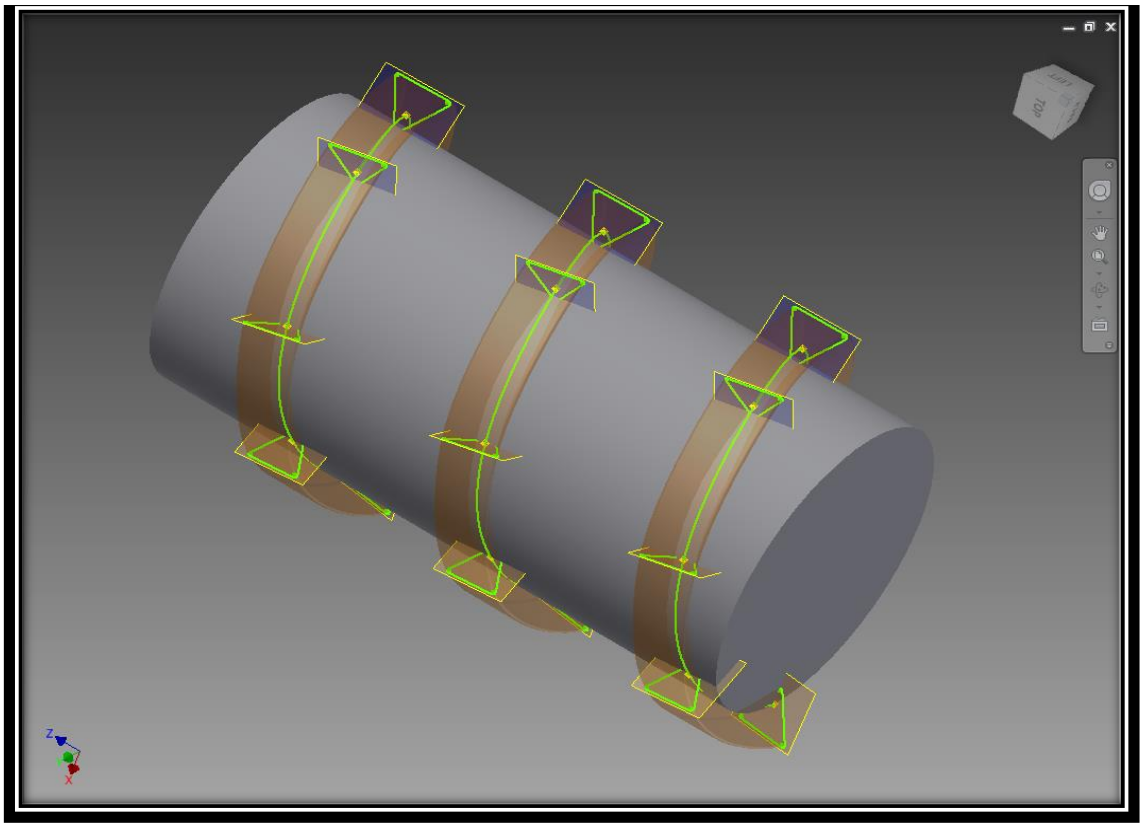
Εικόνα 4.20 Τοποθέτηση του workplane στο σημείο που ξεκινάει η κατεργασία

Κώδικας	Περιγραφή
Dim oWPos(1 To 3) As WorkPoint Set oWPos(1) = oCompDef.WorkPoints.AddFixed(oTG.CreatePoint(1, 0, 0)) Set oWPos(2) = oCompDef.WorkPoints.AddFixed(1,1,0)) Set oWPos(3) = oCompDef.WorkPoints.AddFixed(0,1,0)	Δημιουργούνται 3 workpoints με συντεταγμενες για τους 3 αξονες..

For i3 = 1 To 100 Step 1 Dim oSketchC As PlanarSketch Dim oWPlane(1 To 100) As WorkPlane Set oWPlane(i3) = oCompDef.WorkPlanes.AddByNormalToCurve(oSpline, WPs(i3)) Set oSketchC = oCompDef.Sketches.Add(oWPlane(i3))	Ξεκινάει μία ρουτίνα η οποία θα δημιουργεί ενα workplane για κάθε σημείο που ορίζει την σπείρα. Εφόσον η σπείρα έχει οριστεί με 100 σημεία θα δημιουργηθούν 100 workplanes πανω στα οποία θα σχηματιστεί η επιλεγμένη κοπτική ακμή

Πίνακας 4.21 Τοποθέτηση του workplane στο σημείο που ξεκινάει η κατεργασία

Αφού έχει δημιουργηθεί το σπείρωμα, το πρόγραμμα πραγματοποιεί την κοπή στο τεμάχιο εργασίας με τίς προτιμώμενες παραμέτρους που έχουν εισαχθεί στις φόρμες. Ένα αποτέλεσμα κοπής με τυχαίες παραμέτρους απεικονίζεται στην εικόνα 4.22 και αναλύεται στον πίνακα 4.23.

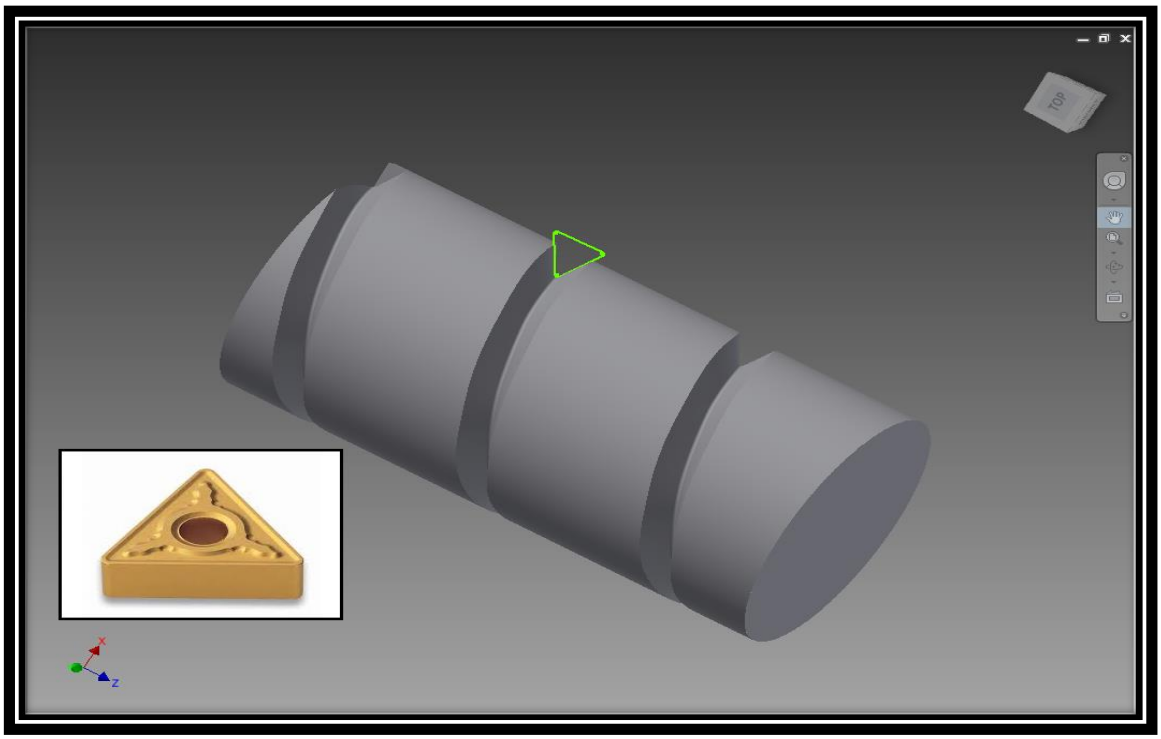


Εικόνα 4.22. Προσομοίωση κοπής με τυχαίες παραμέτρους.

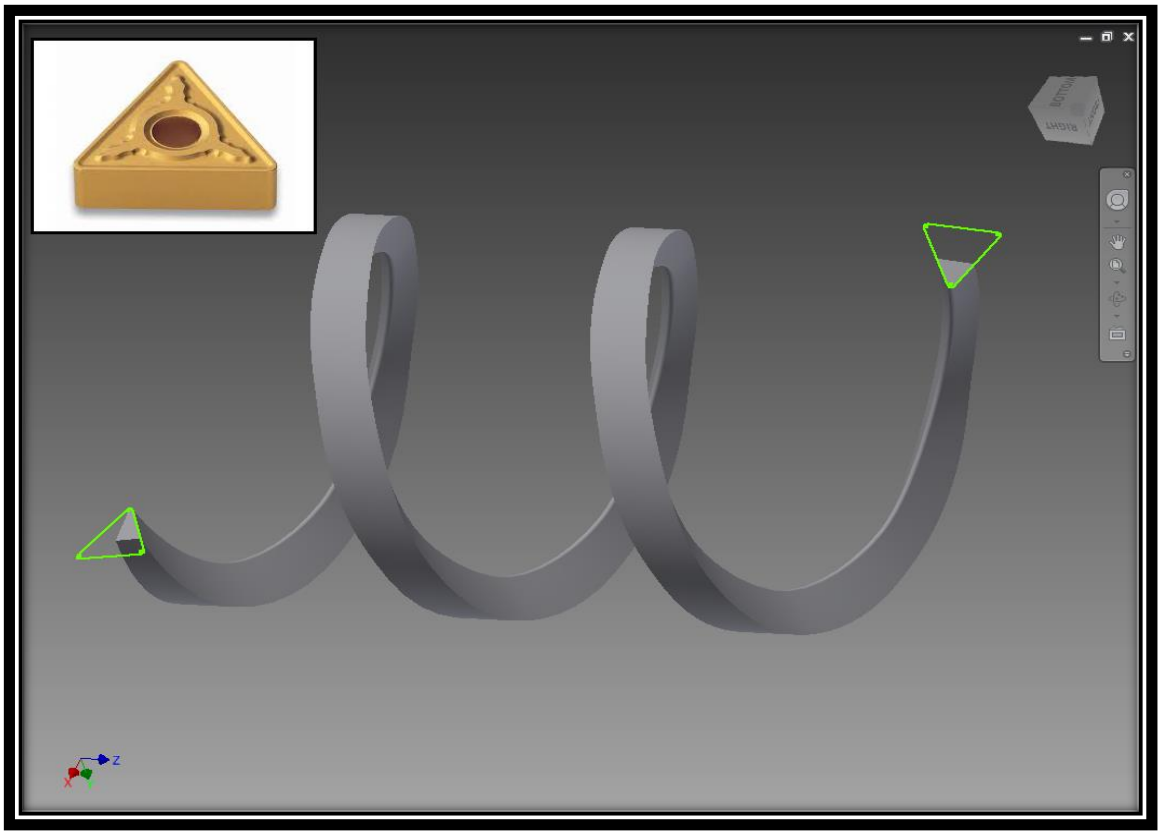
Κώδικας	Περιγραφή
Dim loProfile(1 To 100) As Profile Set loProfile(i3) = oSketchC.Profiles.AddForSolid osecprof.Add loProfile(i3) Next i3 Dim oLoftDefinition As LoftDefinition Set oLoftDefinition = oCompDef.Features.LoftFeatures.CreateLoftDefinition(osecprof, kSurfaceOperation) Dim oSections As ObjectCollection Set oSections = ThisApplication.TransientObjects.CreateObjectCollection oSections.Add oCompDef.Sketches3D(1).Profiles3D.AddOpenCall oCompDef.Features.LoftFeatures.Add(oLoftDefinition)	Ορίζονται μεσα στην ίδια ρουτίνα με τα workplanes αντίστοιχα προφίλ για να δημιουργηθεί το loft και στην συνέχεια ορίζονται να λειτουργούν σαν κλειστή γεωμετρία. Αφου κλείσει η ρουτίνα δηλώνεται το loft και ορίζεται να λειτουργεί στα προφίλ που δημιουργήθηκαν ως λειτουργία επιφάνειας με την εντολή 'kSurfaceOperation'. Δηλώνονται τα τμήματα που θα κινηθεί το Loft και στη συνέχεια ορίζεται η κινησή τους σαν ανοιχτή γεωμετρία. Καλείται η απεικόνιση του loft.

Πίνακας 4.23. Προσομοίωση κοπής με τυχαίες παραμέτρους.

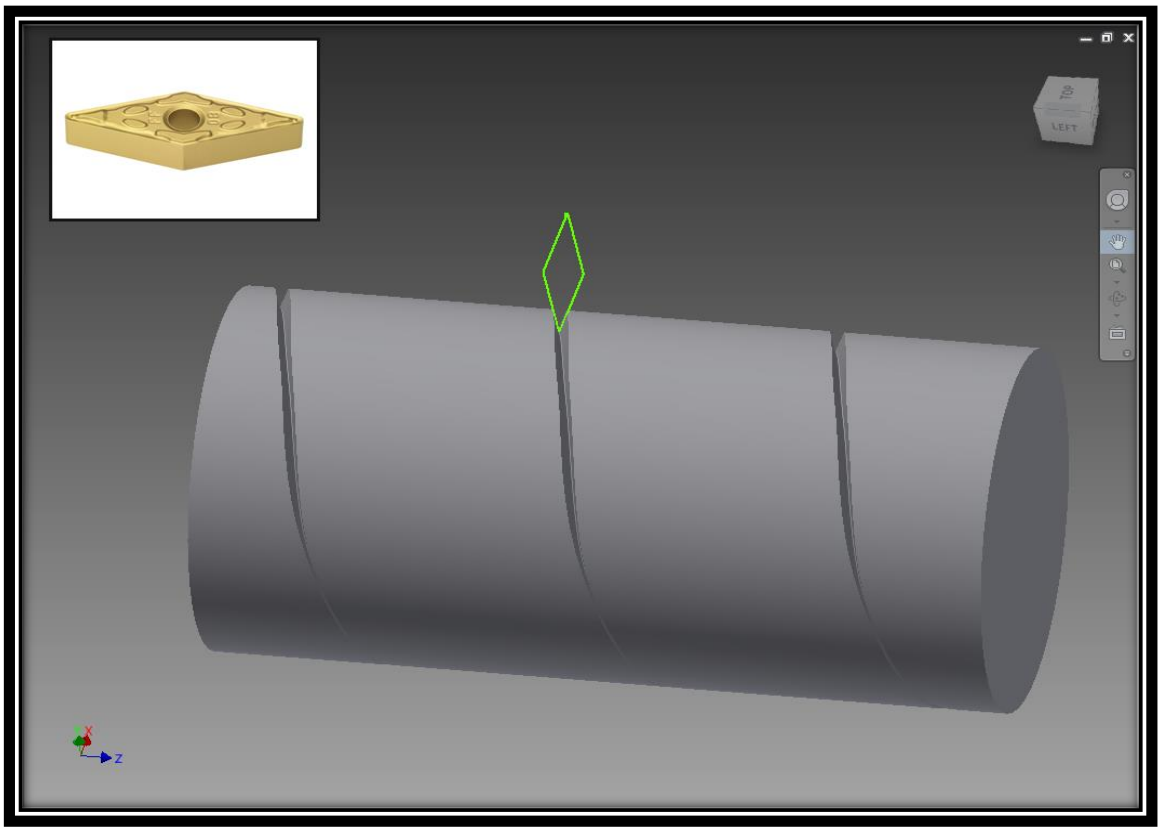
Τα αποτελέσματα κοπής με τα 4 διαφορετικά πλακίδια σε απεικόνιση κοπής σπείρας αλλα και σε απεικόνιση αποβλίττου παρουσιάζονται στις εικόνες 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30 καί 4.31.



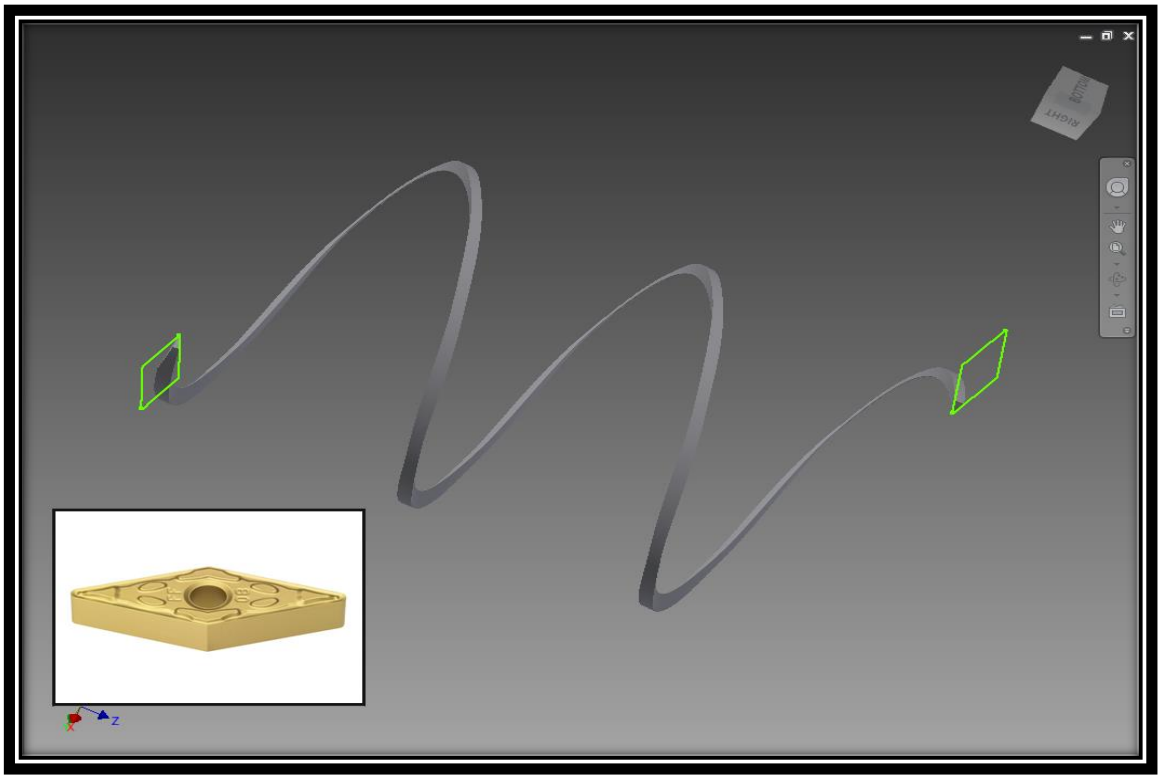
Εικόνα 4.24 Τρισδιάστατη απεικόνιση κοπής σπείρας με πλακίδιο tnmg160408.



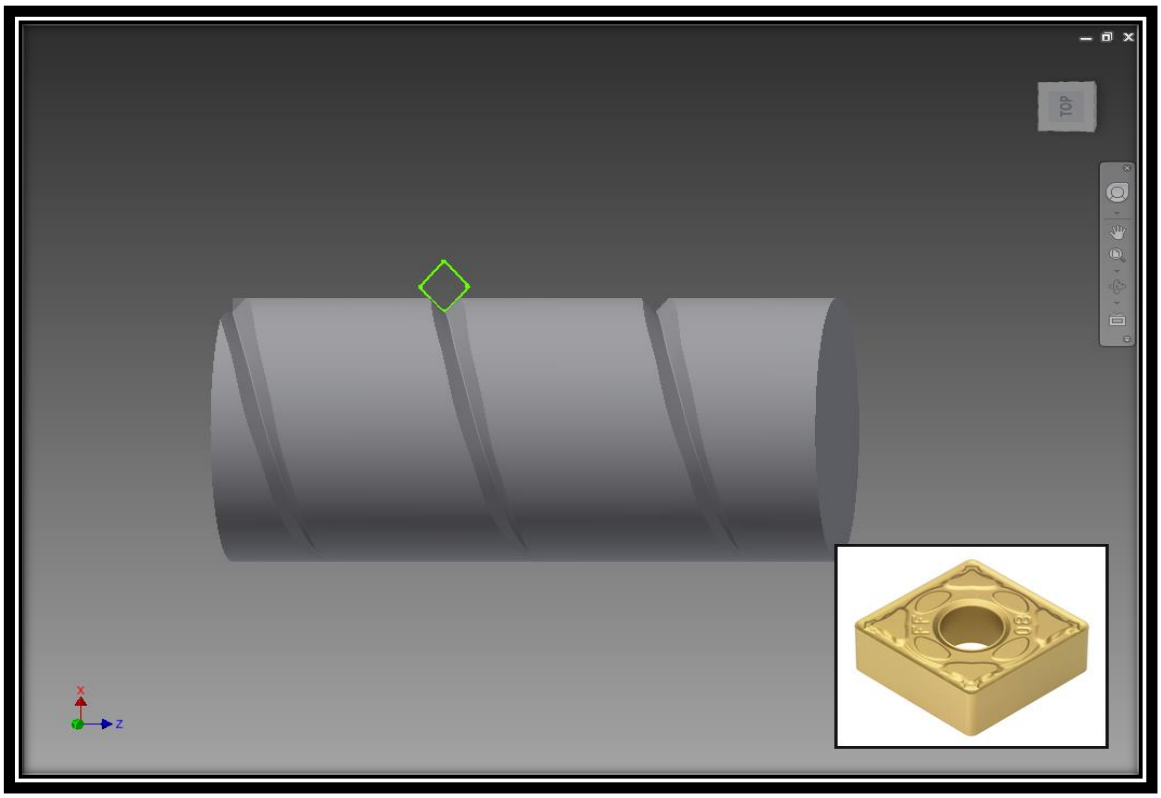
Εικόνα 4.25 Τρισδιάστατη απεικόνιση αποβλίττου με το πλακίδιο tnmg160408



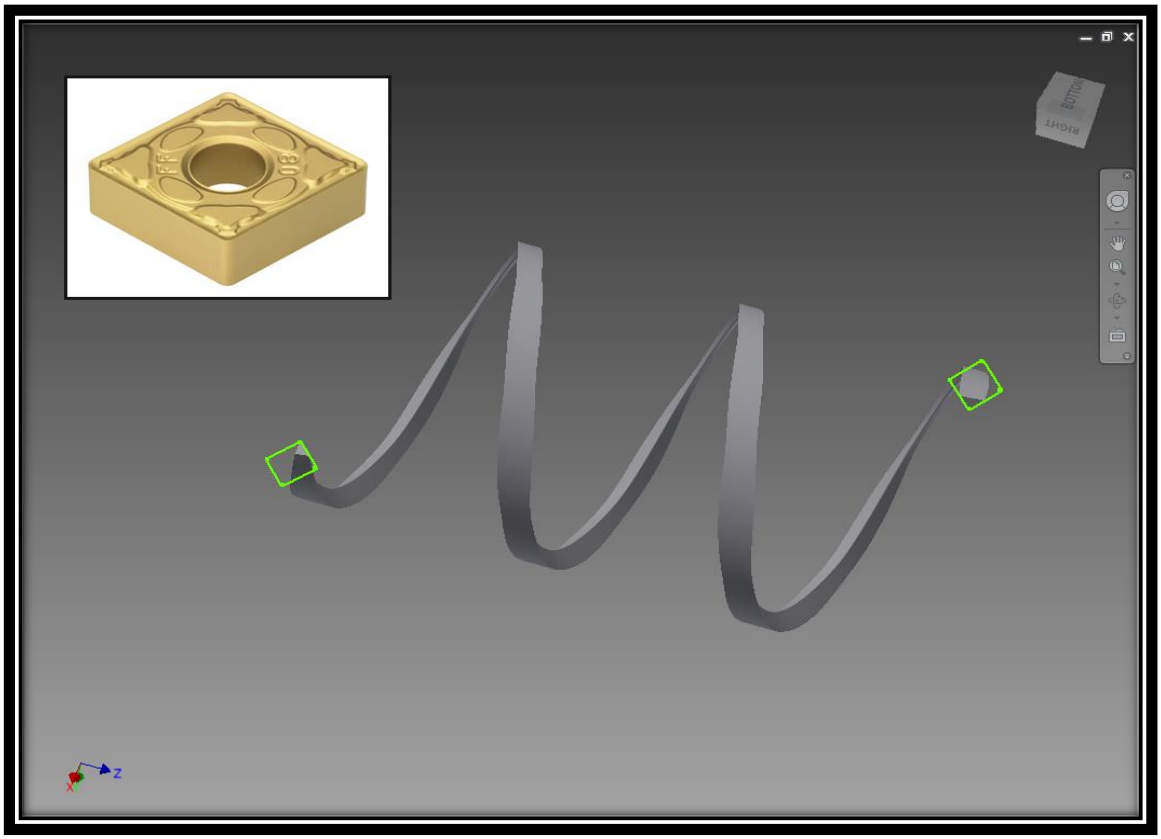
Εικόνα 4.26 Τρισδιάστατη απεικόνιση απεικόνιση κοπής σπείρας με πλακίδιο vnmg160402



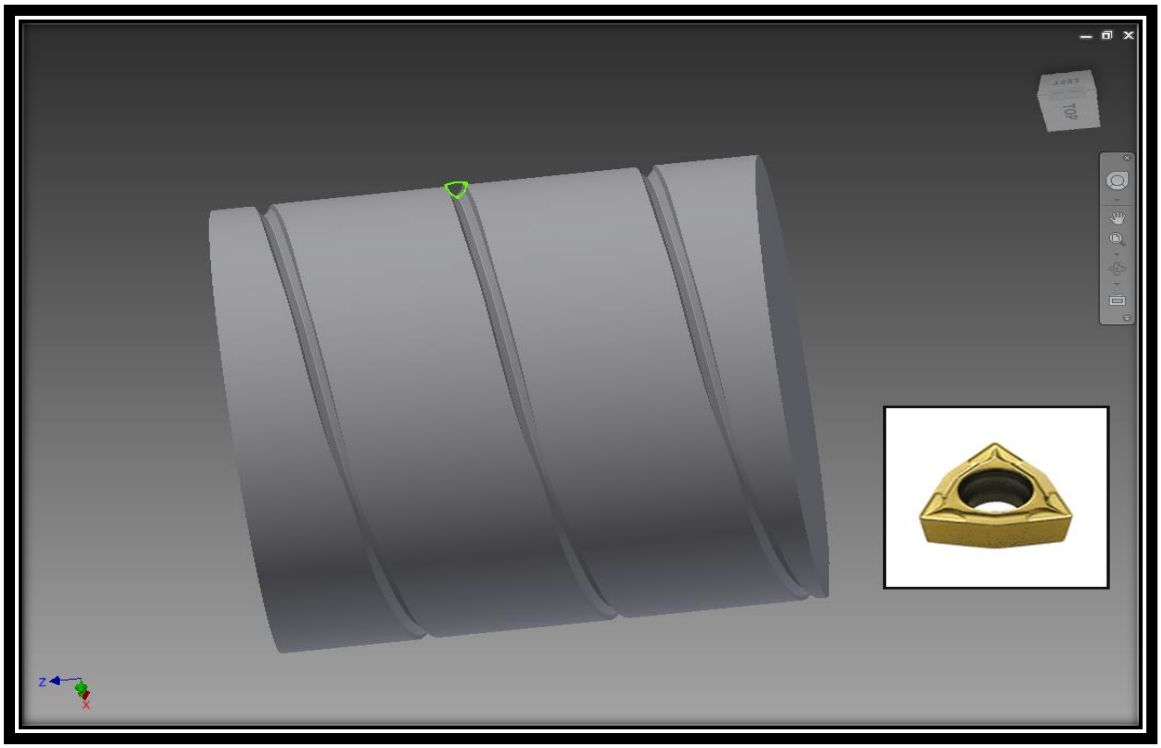
Εικόνα 4.27 Τρισδιάστατη απεικόνιση αποβλίττου με το πλακίδιο vnmg160402



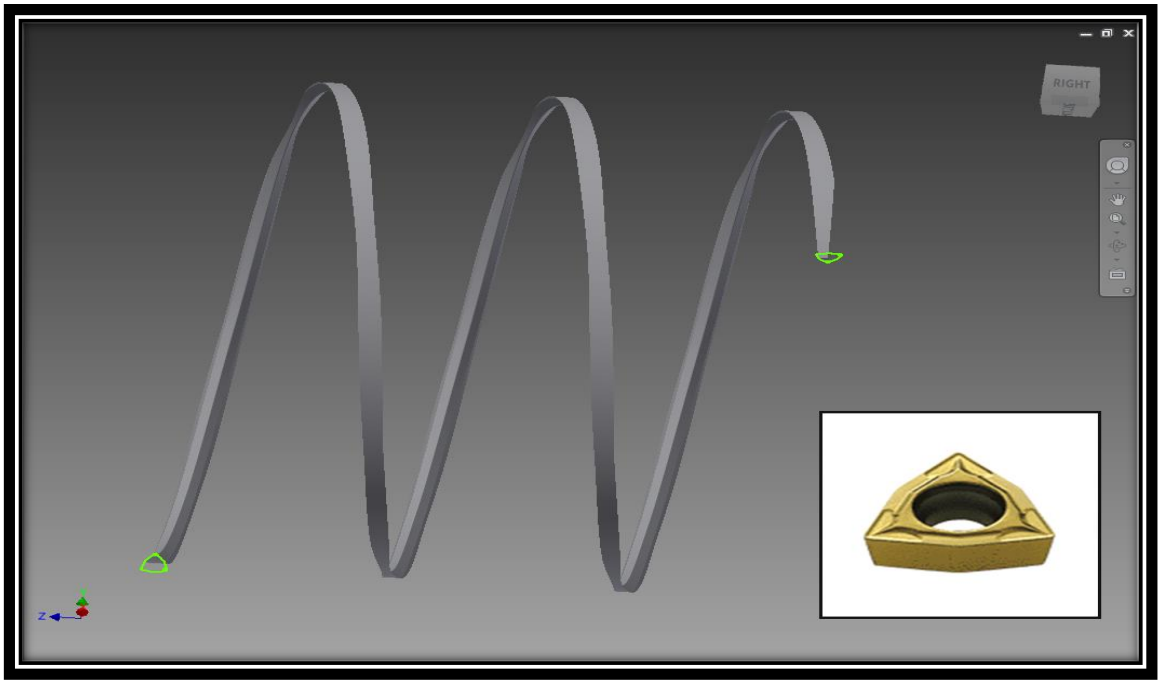
Εικόνα 4.28 Τρισδιάστατη απεικόνιση κοπής σπείρας με πλακίδιο cnmg120404.



Εικόνα 4.29 Τρισδιάστατη απεικόνιση αποβλίττου με το πλακίδιο cnmg120404.



Εικόνα 4.30 Τρισδιάστατη απεικόνιση κοπής σπείρας με πλακίδιο wnmg040204.



Εικόνα 4.31 Τρισδιάστατη απεικόνιση αποβλίττου με το πλακίδιο wnmg040204.

Με τη χρήση του αλγορίθμου, επιτεύχθηκε η σπειροειδής περιγραφή της κίνησης κοπτικού εργαλείου τόρνευσης γύρω από κυλινδρικό τεμάχιο επιθυμητών διαστάσεων.

Κατασκευάστηκαν οι 2D και 3D γεωμετρίες κοπτικών πλακιδίων που υλοποιούν την κοπή και αντιπροσωπεύουν 4 πραγματικά συνήθη κοπτικά πλακίδια. Η όλη παραμετρική ανάπτυξη του κώδικα παρέχει τη δυνατότητα επέκτασής του, ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί:

- Προσθήκη και γένεση οποιουδήποτε κοπτικού
- Χρήση συναρτήσεων και υπό-ρουτινών για υπολογισμό αποβλίττων και τελικών τεμαχίων
- Αποθήκευση και μετά - επεξεργασία των παραγόμενων CAD parts
- Μελλοντική χρήση τους σε προγράμματα FEM και CAM

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συζήτηση-Συμπεράσματα

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία περιγράφηκαν και αναλύθηκαν οι κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, όπως και τα χαρακτηριστικά και η βαρύτητά τους, καθώς και οι τρόποι προσομοίωσής τους. Με βάση το γεγονός ότι η κατεργασία της τόρνευσης αποτελεί τη βασικότερη όλων, αναπτύχθηκε με προγραμματισμό VB σε περιβάλλον API η προσομοίωσή της. Από το σύνολο των κατεργασιών κοπής που περιγράφηκαν, επιλέχθηκε η τόρνευση καθώς αποτελεί τη βασικότερη κατεργασία αφαίρεσης υλικού.

Αρχικά έγινε η δημιουργία φορμών εργασίας για την εισαγωγή δεδομένων και τον έλεγχο της ορθότητας τους. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ο κυρίως κώδικας που περιέχει την διαδικασία της κοπής κυλινδρικού τεμαχίου, σχεδιάστηκαν οι κοπτικές ακμές με πραγματικές διαστάσεις και ορίστηκαν οι παράμετροι κοπής. Στο τέλος έγινε η σύνδεση του κυρίως κώδικα με τις φόρμες για την εισαγωγή δεδομένων και την επιλογή παραμέτρων.

Με τη χρήση του κώδικα που αναπτύχθηκε, επιτεύχθηκε η σπειροειδής περιγραφή της κίνησης κοπτικού εργαλείου τόρνευσης γύρω από κυλινδρικό τεμάχιο επιθυμητών διαστάσεων. Κατασκευάστηκαν οι 2D και 3D γεωμετρίες κοπτικών πλακιδίων που υλοποιούν την κοπή και αντιπροσωπεύουν 4 πραγματικά συνήθη κοπτικά πλακίδια. Η όλη παραμετρική ανάπτυξη του κώδικα παρέχει τη δυνατότητα επέκτασής του, ώστε να επιτρέπει την προσθήκη και γένεση οποιουδήποτε κοπτικού, τη χρήση συναρτήσεων και υπό-ρουτινών για υπολογισμό αποβλίττων και τελικών τεμαχίων, την αποθήκευση και μετά - επεξεργασία των παραγόμενων CAD parts και κυρίως τη μετέπειτα χρήση τους σε προγράμματα FEM και CAM για μια πλήρη μελέτη της τόρνευσης ή και αργότερα άλλων κατεργασιών κοπής.

Με τη βοήθεια της προσομοίωσης μπορούμε να κρίνουμε τα αποτελέσματα κοπών χωρίς τις δαπάνες που προϋποθέτει μία πραγματική κατεργασία. Με αλλαγές μοντέλων και παραμέτρων μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε την διαδικασία της κοπής αλλά και την επιλογή των εργαλείων που την πραγματοποιούν. Τέλος δύναται να ελεγχτούν λεπτομέρειες καθολικής συμπεριφοράς χωρίς καμία απώλεια δεδομένων αφού η προσομοίωση βασίζεται ολοκληρωτικά στον υπολογιστή μη εμπλέκοντας τις ανθρώπινες αισθήσεις αφής, ακοής και όρασης που πολλές φορές οδηγούν σε εσφαλμένα ή ελλειπή συμπεράσματα.

.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Βιβλιογραφία

[1] http://www.lms.mech.upatras.gr/LMS/files-1/students-area/mekhanourgike-tekhnologia-ergasterio-ii/subject-files/ekpaideutiko-uliko/prosomoiose. (Ενεργό την 05-06-2014)

[2] **ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ & ΔΟΝΗΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΥΜΠΑΝΟΥ Κοκκινάκης Εμμανουήλ Ρέθυμνο 2013**.

[3] προσομοίωση κατεργασιών (Ενεργό την 05-06-2014)

[4] http://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_manufacturing. (Ενεργό την 05-06-2014)

[5] http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method. (Ενεργό την 05-06-2014)

[6] cae. (Ενεργό την 05-06-2014)

[7] programming (Ενεργό την 05-06-2014).

[8] κατεργασίες (Ενεργό την 05-06-2014).

[9] vb (Ενεργό την 05-06-2014).

[10] http://www.webopedia.com/TERM/A/API.html. (Ενεργό την 05-06-2014).

[11] inventor gen. (Ενεργό την 05-06-2014).

[12] inventor api. (Ενεργό την 05-06-2014)

[13] Κατασκευαστικές τεχνολογίες σημειώσεις εργαστηρίου Τμηματος μηχανικών φυσικών πόρων και περιβάλλοντος.

[14] Τεχνολογία Μηχανολογικών Κατασκευών, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα 1999, Ιωάννης Διακογιάννης

[15] Μηχανουργική Τεχνολογία, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα 2004, Herwig Braun

[16] Μηχανουργική Τεχνολογία, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα 1996, Σ. Δρίβας, Κ. Ζορμπά, Θ. Κουκουλάκη

[17] Μηχανουργική Τεχνολογία Εργαστήριο 2, Ιδρυμα Ευγενίδου , Ελευθερίου Δ. Παπαδανιήλ, Μιχάλης Μ. Σερατζικόπουλου.

[18] http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/CNC/SHMEIWSEIS/3-1-CUT.pdf

[19] http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/8825/1/giannopoulos_katergasieskopis.pdf.

[20] http://en.wikipedia.org/wiki/Tool_wear