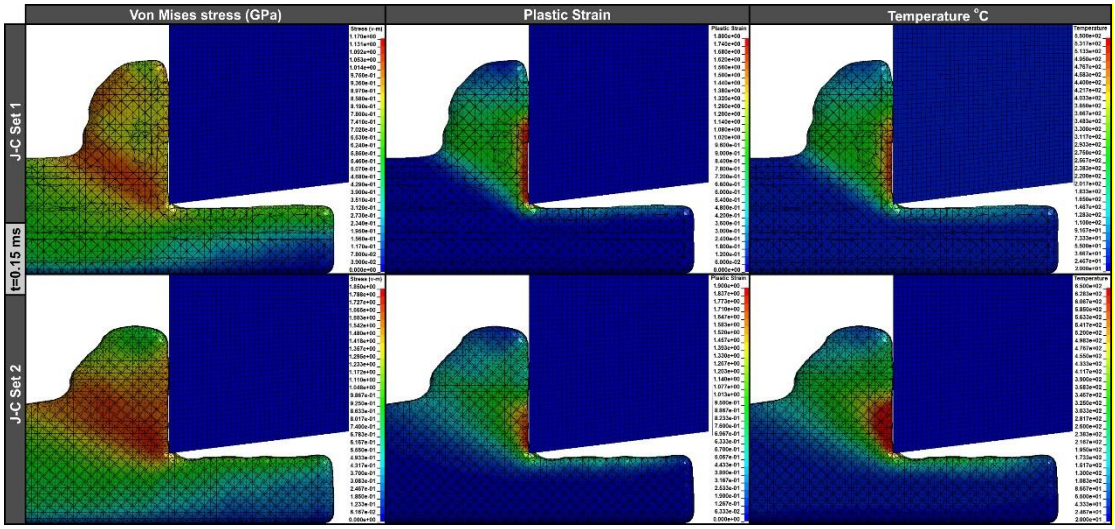
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μοντελοποίηση και προσομοίωση κατεργασίας ορθογωνικής κοπής με FEM-SPH μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων



Παπαδάκης Χρήστος

ΧΑΝΙΑ 2020

Επιβλέπων καθηγητής
Δρ. Δημητρίου Βασίλης, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Αναπληρωτή Καθηγητή Βασίλη Δημητρίου, του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, 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 και πάνω απ' όλα μου προσέφεραν σημαντικά εφόδια για την μετέπειτα ζωή μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μετά-Διδακτορικό Ερευνητή Δρ. Ευάγγελο Κασελούρηκαι μέλος της τριμελούς επιτροπής για τη βοήθεια του και τις συμβουλές του στο επιστημονικό κομμάτι της εργασίας, και τον Παπαδουλή Θεόδωρο, Εργαστηριακό συνεργάτη του εργαστηρίου Προσομοιώσεων & Μηχανολογικών Κατασκευών –SMM, για την παροχή συμβουλών στην εργασία μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Μανώλη Μαραβελάκη μέλος της τριμελούς επιτροπής για τις συμβουλές του και τις υποδείξεις του στην πτυχιακή μου εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές Τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 5

ABSTRACT 6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 7

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....7

1.1 Μηχανουργικές Κατεργασίες.....7

1.2 Εργαλειομηχανές αφαίρεσης υλικού.....9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....12

2.1 Τόρνευση 12

2.2 Είδη τόρνευσης.....13

2.3 Μέθοδοι τόρνευσης.....15

2.4 Αρχιτεκτονική Εργαλειομηχανής Τόρνου.....17

2.5 Τεχνικά Χαρακτηριστικα τόρνου.....18

2.6 Παράμετροι κοπής.....19

2.7 Γεωμετρία κοπτικών εργαλείων τόρνου.....21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....25

3.1 Αριθμητικές μέθοδοι FEMκαι SPHστην κοπή.....25

3.2 Μοντελοποίηση στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.....27

3.3 Πειραματικές μετρήσεις και ιδιότητες υλικών Ορθογωνικής κοπής του AISI 1045 με CVD.....29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....32

Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....39

Συμπεράσματα.....39

Βιβλιογραφία.....40

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μοντελοποίηση και προσομοίωση κατεργασίας ορθογωνικής κοπής με FEM-SPH μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά τη μελέτη των κατεργασιών αφαίρεσης υλικού που ανάγονται σε ορθογωνική κοπή (OrthogonalCutting) με τη βοήθεια αριθμητικών προσομοιώσεων και συγκεκριμένα με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM, FiniteElementMethod) και τη μέθοδο Υδροδυναμικής σωματιδίων (SPH, SmoothParticleHydrodynamics).

Στο 1ο Κεφάλαιο πραγματοποιείται μια εισαγωγή στις μηχανουργικές κατεργασίες και τις εργαλειομηχανές αφαίρεσης υλικού.Στο 2ο Κεφάλαιο, ακολουθεί η ανάλυση της κατεργασίας τόρνευσηςστην ορθογωνική κοπή. Παρουσιάζονται και επεξηγούνται οι χαρακτηριστικές παράμετροι της τόρνευσης, που χαρακτηρίζουν κάθε ορθογωνική κοπή. Στο 3ο Κεφάλαιο ακολουθεί εισαγωγή στις αριθμητικές μεθόδους FEM και SPHστην κοπή μετάλλων και περιγράφεται η μοντελοποίησησε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων αντιπροσωπευτικής ορθογωνικής κοπής τόρνευσης, καθώς και αναλύονται τα στάδια υλοποίησης της προσομοίωσης της κατεργασίας. Ακολούθως, στο 4^{ο}Κεφάλαιο, γίνεται η παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Τα τελικά συμπεράσματα παρουσιάζονται στο τελευταίο5ο Κεφάλαιο της εργασίας.

ABSTRACT

Modelling and Simulation of Orthogonal CuttingUsing FEM-SPH Numerical Methods

This thesis deals with the study of orthogonal cutting material removal techniques using numerical simulations and in particular the Finite Element Method (FEM) and the Smooth Particle Hydrodynamic (SPH) method.

After an introduction to machining and cutting machines in Chapter 1, in Chapter 2 follows the analysis of turning process on orthogonal cutting.The typical turning parameters that characterize orthogonal cutting are presented and described. Chapter 3 introduces FEM and SPH numerical methods in metal cutting and describes a representative case of orthogonal cuttingmodeling using a computational finite element software.The implementation steps of the machining simulationare also described. Then, in Chapter 4, the simulation results are presented and analyzed. The final conclusions are presented in the last Chapter 5 of this thesis.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται τη μελέτη των κατεργασιών αφαίρεσης υλικού που ανάγονται σε ορθογωνική κοπή (OrthogonalCutting) με τη βοήθεια αριθμητικών προσομοιώσεων και συγκεκριμένα με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) και την προσέγγιση SmoothparticleHydrodynamics (SPH). Στο παρόν Κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στις μηχανουργικές κατεργασίες και τις εργαλειομηχανές αφαίρεσης υλικού.

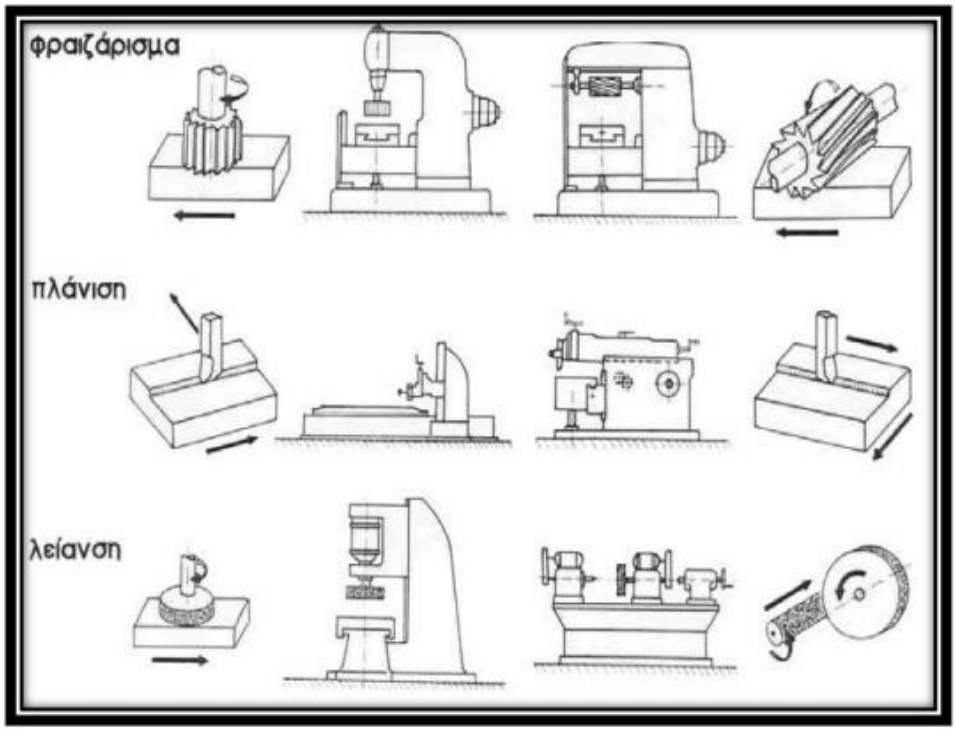
1.1 Μηχανουργικές Κατεργασίες

Για την κατασκευή οποιουδήποτε αντικειμένου, το οποίο αποτελείται από ένα ή και περισσότερα μέρη, απαιτείται συνδυασμός κατεργασιών. Οι κατεργασίες είναι δυνατόν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής [1]:

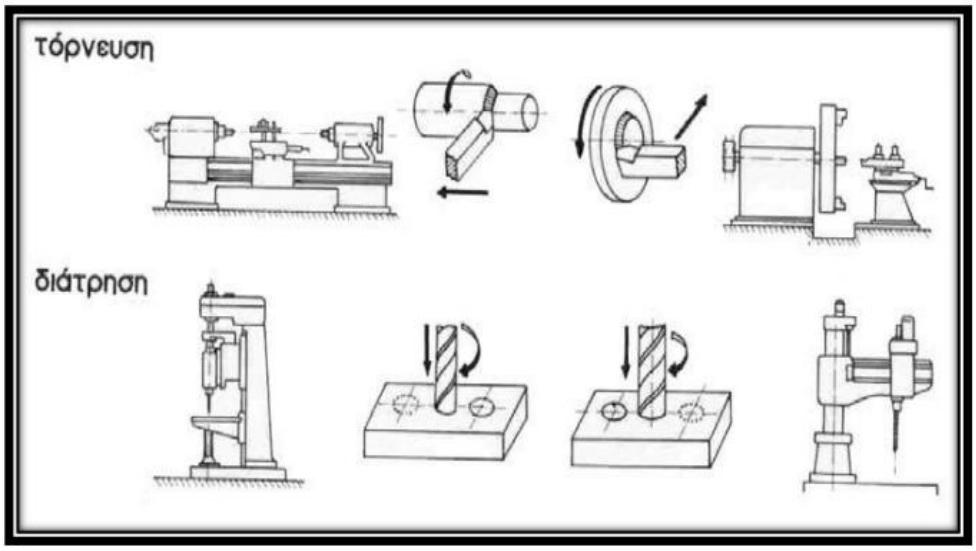
- **αρχέγονες:** χύτευση ή κονιομεταλλουργία
- **με παραμόρφωση:** απότμηση, εξέλαση, κ.α.
- **με προσθήκη:** συγκόλληση, επικάλυψη, κ.α.
- **αφαίρεσης υλικού:** τόρνευση, φραιζάρισμα, διάτρηση, πλάνιση, λείανση, κ.α.

Τα διάφορα μηχανολογικά εξαρτήματα παίρνουν την αρχική τους μορφή κατά κανόνα με κατεργασίες που δε περιλαμβάνουν την αφαίρεση υλικού (κυρίως χύτευση), αφήνοντας μικρή ποσότητα υλικού για την τελική κατεργασία.

Η τελική κατεργασία ενός τεμαχίου είναι κυρίως η αφαίρεση υλικού, καθώς αποδίδει μεγαλύτερη διαστατική ακρίβεια και καλύτερη ποιότητα τελικής επιφάνειας. Η αφαίρεση υλικού γίνεται είτε με την χρήση εργαλείων χειρός (π.χ. λίμα, πριόνι κ.α.), είτε με τη χρήση εργαλειομηχανών (τόρνος, φραίζα, πλάνη, δράπανο κ.λπ.). Οι εργαλειομηχανές παρέχουν την δυνατότητα παραγωγής απλών κυλινδρικών ή επίπεδων τεμαχίων και ειδικών διαμορφώσεων, όπως το σπείρωμα, η οδόντωση και επιφάνειες διαφόρων μορφών.Στις Εικόνες 1.1 και 1.2 παρουσιάζονται οι βασικότερες κατεργασίες με αφαίρεση υλικού.



Εικόνα 1.1 Φραιζάρισμα, πλάνιση, λείανση και αντίστοιχες εργαλειομηχανές [2].



Εικόνα 1.2 Τόρνευση, διάτρηση και αντίστοιχες εργαλειομηχανές.

Κάθε κατεργασία αφαίρεσης υλικού αποτελείται από τρία στάδια:

1) **αρχική κατεργασία:**περιλαμβάνει το πρώτο «πέρασμα» του κοπτικού εργαλείου για την απομάκρυνση άχρηστων στρωμάτων υλικού από την προηγηθείσα διαμόρφωσή του
2) **βασική κατεργασία:** το κοπτικό εργαλείο εκτελεί μια σειρά «περασμάτων», προκειμένου να δοθεί το επιθυμητό σχήμα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο
3) **κατεργασία αποπερατώσεως-φινίρισμα:** είναι το τελικό «πέρασμα» του κοπτικού εργαλείου που επιτυγχάνει τις προδιαγραφές διαστατικής ακρίβειας και τελικής ποιότητας επιφανείας

1.2 Εργαλειομηχανές αφαίρεσης υλικού

Στην εικόνα 1.3 παρουσιάζονται οι διάφορες κατηγορίες κατεργασιών με αφαίρεση υλικού.

Εικόνα 1.3 Κατεργασίες με αφαίρεση υλικού-κοπής

Οι βασικότερες κατεργασίες με αφαίρεση υλικού, οι αντίστοιχες εργαλειομηχανές που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση κάθε κατεργασίας, οι τεχνικές επιφάνειες καθώς και οι κινήσεις του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου αντίστοιχα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Κατεργασία	Εργαλειομηχανή	Τεχνικές Επιφάνειες	ΚίνησηΕργαλείου	ΚίνησηΤεμαχίου
Τόρνευση	Τόρνος	Κυκλικές	Μετατόπιση	Περιστροφή
Φραιζάρισμα	Φραίζα	Επίπεδες Κυκλικές Εσοχές Αυλάκια Οδοντοτροχοί	Περιστροφή	Μετατόπιση
Διάτρηση	Δράπανο	Άνοιγμα οπών	Περιστροφή	Ακίνητο
Πλάνισμα	Πλάνη	Επίπεδες	Μετατόπιση	Μετατόπιση
Λείανση	Λειαντικός Τροχός	Επίπεδες Κυκλικές	Περιστροφή + Μετατόπιση	Μετατόπιση + Περιστροφή

Πίνακας 1.1: Οι βασικότερες κατεργασίες αφαίρεσης υλικού

Οι συνήθεις τρόποικατάταξης των εργαλειομηχανών είναι [3]

- ως προς το είδος της κατεργασίας
- ως προς το είδος της πρωτεύουσας κίνησης
  - Εργαλειομηχανές με περιστροφική κίνηση

Τόρνοι	Φραιζομηχανές	Δράπανα	Φραιζο/ δράπανα	Λειαντικοί τροχοί	Πριόνια	Γραναζο/ κόφτες
οριζόντιοι	οριζόντιες	ακτινωτά		επιπέδων επιφανειών	περιστρο-φικά	παραλλήλων οδοντωτών τροχών
κατακόρυφοι	κατακόρυφες	ειδικά (κατακόρυφα και οριζόντια με πολλές ατράκτους)		κυλινδρικών επιφανειών		κωνικών οδοντωτών τροχών
περιστροφικοί (ή Revolver)	αντιγραφής (παντογράφος)	κατακόρυφα		άνευ κέντρων		
αυτόματοι ή ημιαυτόματοι		οριζόντια		οδοντώσεων		
				σπειρωμάτων		
				ειδικά (π.χ. για στροφαλοφόρους άξονες)		
				τροχιστικά (π.χ. κοπτικών)		

  - Εργαλειομηχανές με ευθύγραμμη πρωτεύουσα κίνηση
    - Πριόνια
      - παλινδρομικά
    - Πλάνες
      - εγκάρσιες
      - επιμήκεις

- κατακόρυφες

➢ ως προς το βαθμό εξειδικεύσεως

- Εργαλειομηχανές γενικής χρήσεως (τόρνος)
- Εργαλειομηχανές ειδικής χρήσεως (γραναζοκόπτης, λειαντικός τροχός οδοντώσεων, κ.ά.)
- Εξειδικευμένες εργαλειομηχανές
- Εργαλειομηχανές μεταφοράς

➢ ως προς την ακρίβεια κατεργασίας

- Εργαλειομηχανές συνήθους ακριβείας
- Εργαλειομηχανές ακριβείας
- Εργαλειομηχανές μεγάλης ακριβείας
- Εργαλειομηχανές υψίστης ακριβείας

➢ ως προς το βάρος

- Εργαλειομηχανές ελαφρές (βάρος μικρότερο του 1 τόνου)
- Εργαλειομηχανές μέσου βάρους (βάρος μεταξύ 1 και 10 τόνων)
- Εργαλειομηχανές βαριές (βάρος μεγαλύτερο των 10 τόνων)

➢ ως προς το βαθμό αυτοματισμού

- Κοινές εργαλειομηχανές
- Ημιαυτόματες εργαλειομηχανές (οι κινήσεις γίνονται αυτόματα)
- Αυτόματες εργαλειομηχανές (οι κινήσεις και η τροφοδοσία γίνονται αυτόματες)

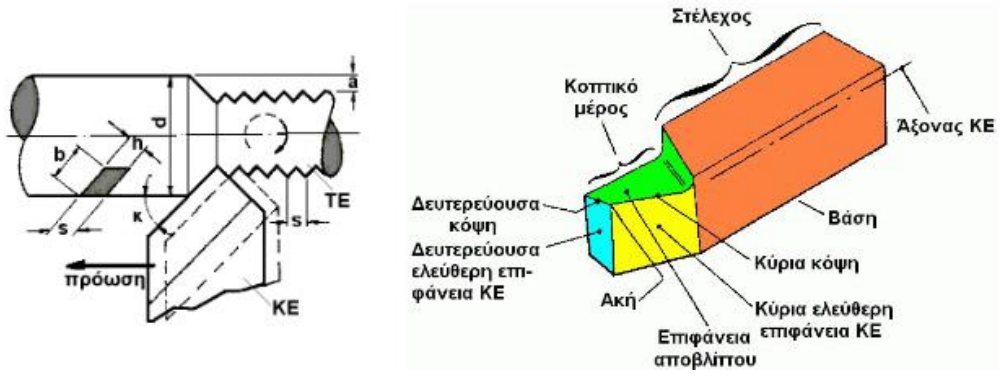
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία η κατεργασία με αφαίρεση υλικού που επιλέχθηκε να μελετηθεί είναι η ανάλυση της κατεργασίας τόρνευσης, ως της βασικότερης για αναφορά, στην ορθογωνική κοπή.

2.1 Τόρνευση

Είναικατεργασίακοπής μεκύριακίνησητηνπεριστροφικήκίνηση της ατράκτου, όπουπροσδένεταικατάλληλατο τεμάχιο ΤΕ, καιδευτερεύουσατη μεταφορικήκίνηση της πρόωσης (κίνησητου κοπτικού εργαλείου ΚΕ), εκτελείταιδε μεΚΕκαθορισμένηςγεωμετρίαςκαιαπλήςσημειακήςεπαφής.Το εργαλείο (κοπτική ακμή) είναι σταθερό και η κίνηση που εκτελεί είναι κατά μήκος της κατεργαζόμενης επιφάνειας, εφόσον η κοπή είναι διαμήκης.

Σχηματικήπαράσταση της κατεργασίαςκαιτυποποιημένη μορφήτουΚΕτόρνευσηςπαρουσιάζονται στην Εικόνα 2.1(αριστερά) και 2.1(δεξιά) αντίστοιχα.



Εικόνα 2.1 Σχηματική παράσταση της κατεργασίας και τυποποιημένη μορφή του ΚΕ τόρνευσης [4]

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 μεκατά κανόνα κυκλική διατομή. Κατά την τόρνευση, το κατεργαζόμενο τεμάχιο περιστρέφεταιγύρω από τον άξονά του, συγκρατημένο στον

σφικτήρα (τσοκ) του τόρνου. Το κοπτικό εργαλείο έχει τη δυνατότητα διαμήκης μετακίνησης, όπου το εργαλείο μετακινείται ευθύγραμμα και παράλληλα προς τον άξονα του τεμαχίου ή εγκάρσιας μετακίνησης και μετακινείται σε ορθή γωνία ως προς τον άξονα του τεμαχίου.

Οι απαιτήσεις κίνησης ενός κατεργαζόμενου τεμαχίου για να αποκτήσει την τελική του μορφή δεν περιορίζονται μόνο στην χρήση διαμηκών ή εγκάρσιων μετατοπίσεων του κοπτικού, αλλά και στο είδος του κοπτικού που χρησιμοποιείται. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση εξαρτάται αφενός από το είδος της κατεργαζόμενης επιφάνειας και αφετέρου από το αν η τόρνευση είναι εξωτερική ή εσωτερική.

2.2 Είδη Τόρνευσης

Α. Ανάλογα μετηδιάταξητουάξονατόρνευσης:

- Οριζόντια (οριζόντιος άξονας)
- Κατακόρυφη (κατακόρυφος άξονας)

Β. Ανάλογα μετηθέση της κατεργαζόμενηςεπιφάνειας:

- Εξωτερική
- Εσωτερική

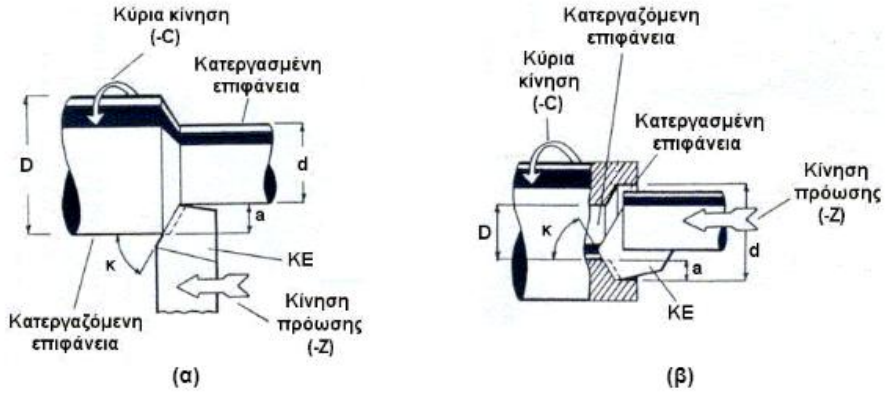
Γ. Ανάλογα μετηναμοιβαίασχέσηκύριαςκαιδευτερεύουσαςκίνησης:

- Διαμήκης τόρνευση, με κίνηση πρόωσης παράλληλη προς τον άξονα τόρνευσης, βλ. Εικόνα 2.2.
- Εγκάρσια τόρνευση, με κίνηση πρόωσης κάθετη προς τον άξονα τόρνευσης., η οποία διακρίνεται με τη σειρά της σε:
    - Μετωπική, βλ. Εικόνα 2.3(α).
    - Ακτινική (τόρνευση αποκοπής και τόρνευση μορφής, βλ. Εικόνα 2.3(β) και 2.3(γ)).
- Κωνική τόρνευση, με την διεύθυνση της κίνησης πρόωσης να τέμνει τον άξονα τόρνευσης (Εικόνα 2.4).

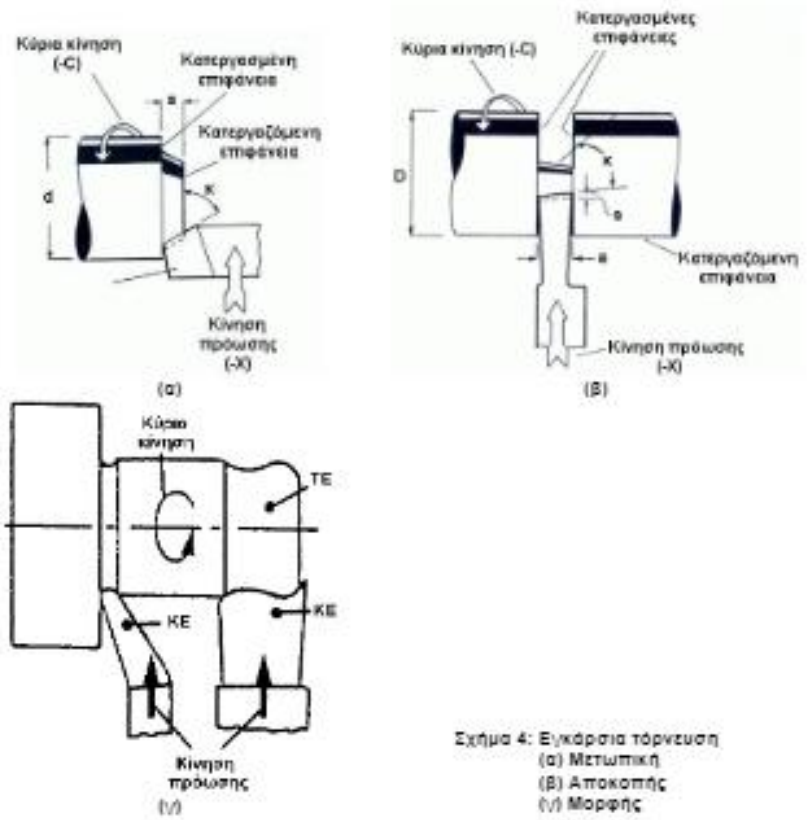
Δ. Ειδικέςτορνεύσεις (Εικόνα 2.5):

- Σπειροτόμηση (εξωτερική ή εσωτερική).

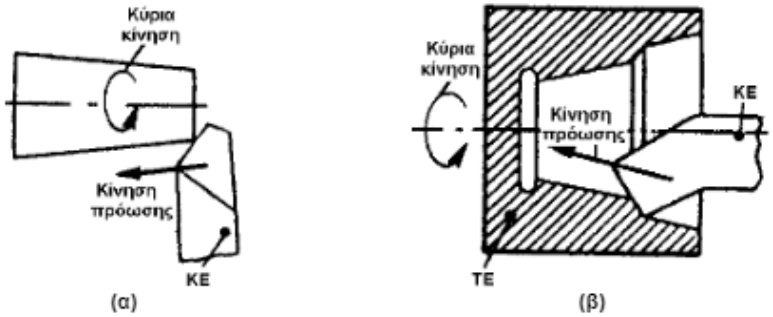
- Τόρνευση με πολλά ΚΕ, είτε με διαιρούμενη πρόωση, είτε με διαιρούμενο βάθος κοπής



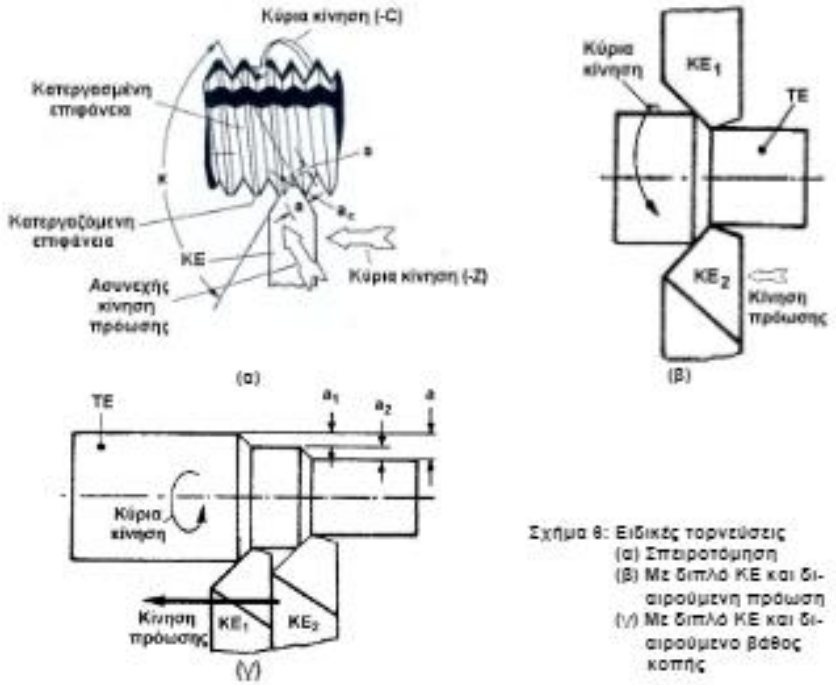
Εικόνα 2.2: Διαμήκης τόρνευσηεξωτερικής (α) και εσωτερικής τόρνευσης (β) [4]



Εικόνα 2.3: Εγκάρσια τόρνευση μετωπική (α) αποκοπής (β) και μορφής (γ) [4]



Εικόνα 2.4: Κωνική τόρνευση (α) εξωτερική (β) εσωτερική [4]



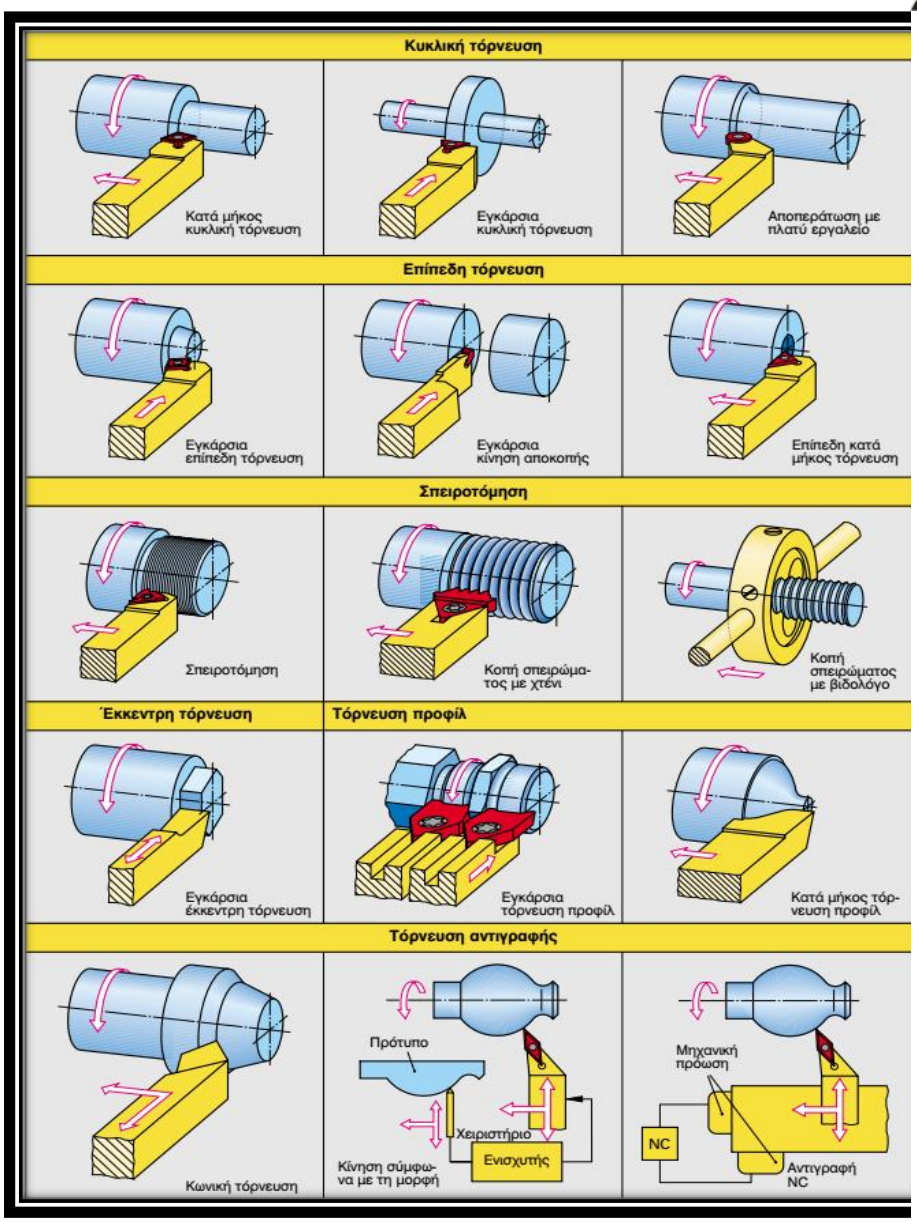
Εικόνα 2.5: Ειδικές τορνεύσεις (α) σπειροτόμηση(β) με διπλό ΚΕ και διαιρούμενη πρόωση και (γ) με διπλό ΚΕ και διαιρούμενο βάθος κοπής [4]

2.3 Μέθοδοι Τόρνευσης

Με βάση την επιφάνεια που προκύπτει μετά την κατεργασία του τεμαχίου, μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις μεθόδους τόρνευσης σε: κυκλική, επίπεδη, σπειροτόμηση, έκκεντρη, προφίλ και τόρνευση με αντιγραφή. Στη συνέχεια αναφέρονται περιγραφικά οι μέθοδοι τόρνευσης και απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 2.6:

- **κυκλική τόρνευση,** παράγει μια κυλινδρική επιφάνεια. Η κίνηση της πρόωσης γίνεται είτε κατά την διεύθυνση του άξονα περιστροφής (κυκλική κατά μήκος τόρνευση), είτε κάθετα προς τον άξονα (κυκλική εγκάρσια τόρνευση). Κατά την διαδικασία της αποπεράτωσης (φινίρισμα) με πλατύ εργαλείο, χρησιμοποιείται μεγάλη πρόωση και μικρές γωνίες θέσης.
- **επίπεδη τόρνευση,** παράγει μια επίπεδη επιφάνεια κάθετη προς τον άξονα περιστροφής. Χωρίζεται σε εγκάρσια επίπεδη τόρνευση, εγκάρσια τόρνευση αποκοπής και κατά μήκος επίπεδη τόρνευση.

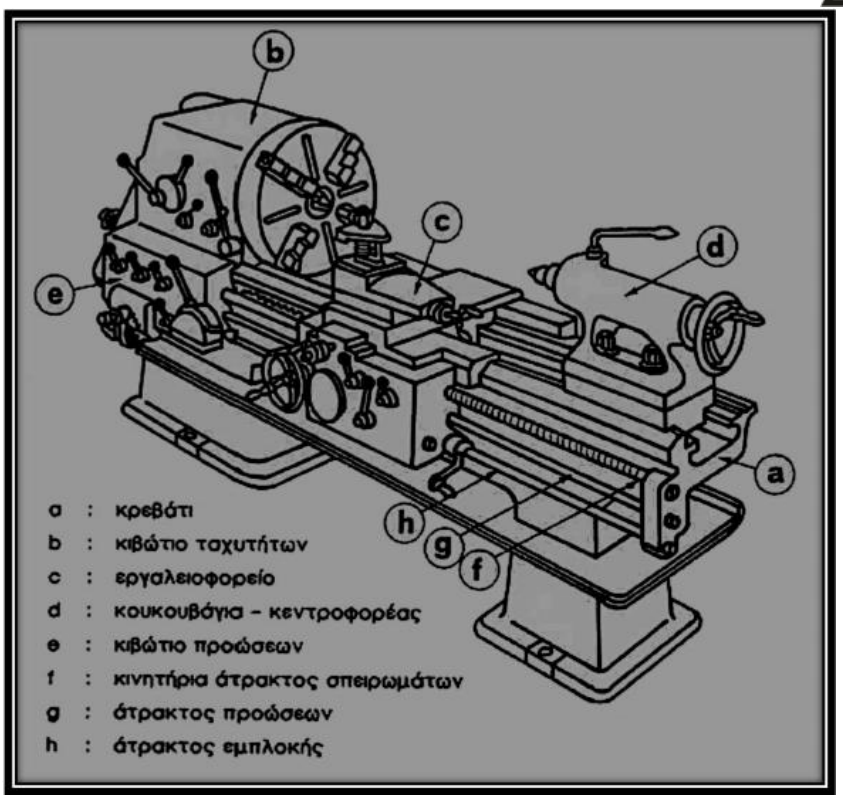
- **σπειροτόμηση,** γίνεται με τη χρήση ενός ειδικού εργαλείου, το οποίο δημιουργεί ελικοειδείς επιφάνειες και η πρόωσή του ανά στροφή είναι ίση με το βήμα της έλικας.
- **έκκεντρη τόρνευση**, κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής του αντικειμένου, μεταβάλλει τη θέση της κόψης του εργαλείου, ανάλογα με τη διατομή που θα παραχθεί.
- **τόρνευση προφίλ.** μεταφέρει τη μορφή του εργαλείου πάνω στο κατεργαζόμενο τεμάχιο.
- **τόρνευση αντιγραφής,** αποτελεί μια μέθοδο, σύμφωνα με την οποία ελέγχοντας την κίνηση της πρόωσης παράγεται η μορφή του αντικειμένου. Ο έλεγχος της πρόωσης γίνεται είτε με το χέρι (ελεύθερη αντιγραφή), είτε από κάποιο πρότυπο, είτε με αριθμητικό έλεγχο (αντιγραφή NC). [5]



Εικόνα 2.6: Κατάταξη μεθόδων τόρνευσης [6]

2.4 Αρχιτεκτονική εργαλειομηχανής τόρνου

Η αρχιτεκτονική βασικών τμημάτων της εργαλειομηχανής του τόρνου παρουσιάζεται στην εικόνα παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.7:



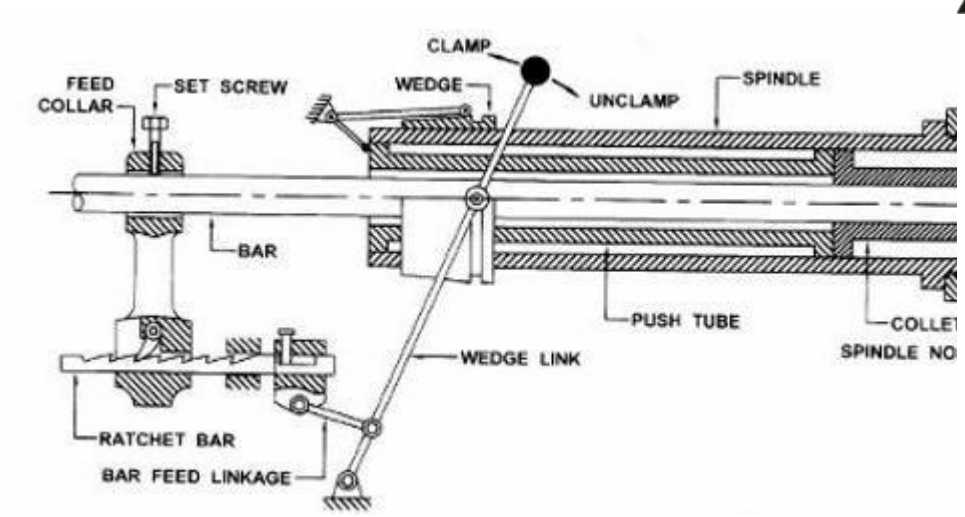
Εικόνα 2.7: Μέρη του τόρνου. [3]

Τα βασικά μέρη του τόρνου είναι:Κρεβάτι, Κιβώτιο ταχυτήτων για την κίνηση της ατράκτου, Κιβώτιο προώσεων για την κίνηση του εργαλειοφορείου, Κιβώτιο κινήσεως εργαλειοφορείου, Κεντροφορέας, Τσοκ, Εργαλειοδέτης, Εγκάρσιο φορείο, Έμβολο, Λεκάνη αποβλήτων, Άξονας προώσεων, Άξονας σπειρωμάτων, Εργαλειοφορείο, Πόντα.

Επιπλέον, πέρα από τα βασικά μέρη του τόρνου, υπάρχουν και κάποια δευτερεύοντα, εξίσου σημαντικά τα οποία θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν και ως βοηθητικά εξαρτήματα, όπως η αντλία παροχής ψυκτικού υγρού στη θέση κοπής, ο ηλεκτρικός πίνακας, τα καβαλέτα, το σύστημα φωτισμού και φυσικά οι συσκευές συγκράτησης όπως τσοκ τριών και τεσσάρων σιαγόνων και πλατό [1].

2.5Τεχνικά χαρακτηριστικά τόρνου

Για να υλοποιηθεί μια κατεργασία τόρνευσης, σε οποιονδήποτε τόρνο, θα πρέπει να καθοριστούν οι βασικοί παράμετροι κοπής, οι οποίοι εξαρτώνται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του τόρνου. Στην Εικόνα 2.8 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του τόρνου.



Εικόνα 2.8: Τεχνικά χαρακτηριστικά τόρνου.

Τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του τόρνου είναι:

a) Η απόσταση που καθορίζει το μέγιστο μήκος του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

b) Το ύψος του νοητού άξονα των κέντρων από το κρεβάτι. Καθορίζει τη μέγιστηδιάμετρο του προς κατεργασία τεμαχίου.

c) Η μέγιστη διάμετρος και το μήκος τόρνευσης σε περίπτωση που υπάρχει «γονατιά».

Οι διάμετροι καιεπάνω από το τραπέζι και το εργαλειοφορείο.

d) Το πλήθος των ταχυτήτων και ο μέγιστος και ελάχιστος αριθμός στροφών.

e) Η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα.

f) Το ολικό του βάρος.

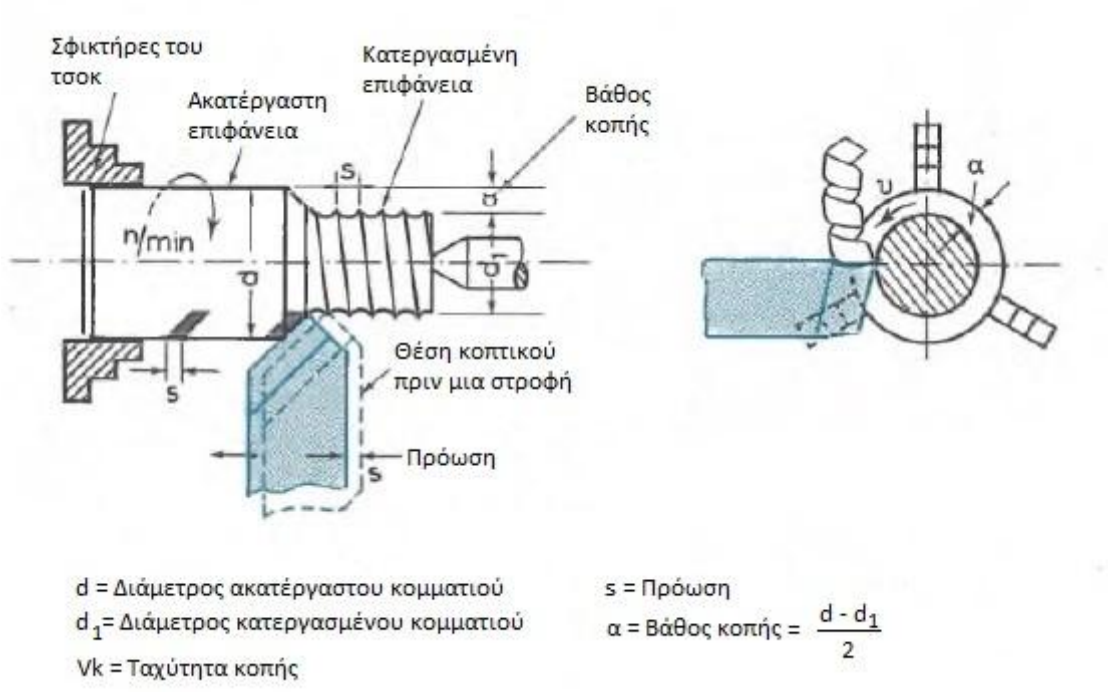
g) Η διάμετρος οπής της ατράκτου. Καθορίζει την μέγιστη διάμετρο του τεμαχίου πουμπορεί να δεθεί στο τσοκ και μπορεί να προεξέχει από τον καθρέπτη του τόρνου.

h) Η βαθμονόμηση των χειριστηρίων και χειροστροφάλων. Προσδιορίζει τη μέγιστηακρίβεια κατασκευής τεμαχίων [5].

2.6Παράμετροι κοπής

Στην τόρνευση οι συνθήκες κοπής είναι η ταχύτητα κοπής που σχετίζεται με τις στροφέςπεριστροφής 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 επιλογήτους, αποτελεί απαραίτητη γνώση του χειριστή ενός τόρνου Στην Εικόνα 2.9 παρουσιάζονται οι συνθήκες κοπής, οι οποίες αποτελούνται από

βασικές παραμέτρους, οι οποίες χαρακτηρίζουν την κάθε κατεργασία τόρνευσης και αναλύονται ακολούθως:



Εικόνα2.9: Συνθήκες κοπής

a) **Ταχύτητα κοπής:** η περιφερειακή ταχύτητα του κομματιού που τορνεύεται. Υπολογίζεται με βάση την διάμετρο *d* (mm) που είχε το κομμάτι πριν την τόρνευση και εκφράζεται σε μέτρα ανά λεπτό (m/min).

$$V_k = \frac{\pi d s}{1000} \text{(m/min)}$$

Όπου:

- $\boldsymbol{V_k}$ η ταχύτητα κοπής σε m/min
- ***d*** η διάμετρος του κομματιού σε mm
- ***s*** ο αριθμός στροφών ανά λεπτό (rpm)

➢ η ταχύτητα κοπής δείχνει τα παραγόμενα μέτρα του μήκους του αποβλήτου ανά λεπτό.

Είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ ΤΕ και ΚΕ αναφερομένη στην κύρια κίνηση κοπής.

b) **Πρόωση*:*** η μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου κατά τη διεύθυνση του νοητού άξονα τόρνευσης σε κάθε στροφή του κομματιού. Συμβολίζεται με *s*και εκφράζεται σε χιλιοστά ανά στροφή (mm/στροφή).

- η πρόωση χαρακτηρίζει το πάχος του αποβλήτου.

Είναι η κατά τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής του ΤΕ μετακίνηση του ΚΕ ανά στροφή της ατράκτου.

c) **Βάθος κοπής:**Είναι η απόσταση της ακατέργαστης από την κατεργασμένη επιφάνεια, όταν αυτή μετριέται κατά την ακτίνα. Συμβολίζεται με το γράμμα α εκφράζεται σε χιλιοστά (mm) και είναι:

$$\alpha = \frac{d - d_1}{2} \text{(mm)}$$

- το βάθος κοπής α χαρακτηρίζει το πλάτος του αποβλήτου.

Είναι το βάθος διείσδυσης του ΚΕ μέσα στο ΤΕ.

d) **Ταχύτητα προώσεως:**η συνολική μετατόπιση του εργαλείου παράλληλα προς τον νοητό άξονα του σε ένα λεπτό. Συμβολίζεται με το S και εκφράζεται σε mm/min. Αφού σε μία στροφή το εργαλείο μετατοπίζεται κατά την πρόωση *s*, σε ένα λεπτό, θα μετακινηθεί συνολικά κατά $s{\cdot}n$. Δηλαδή:

$$S = s \cdot n \ (mm/min)$$

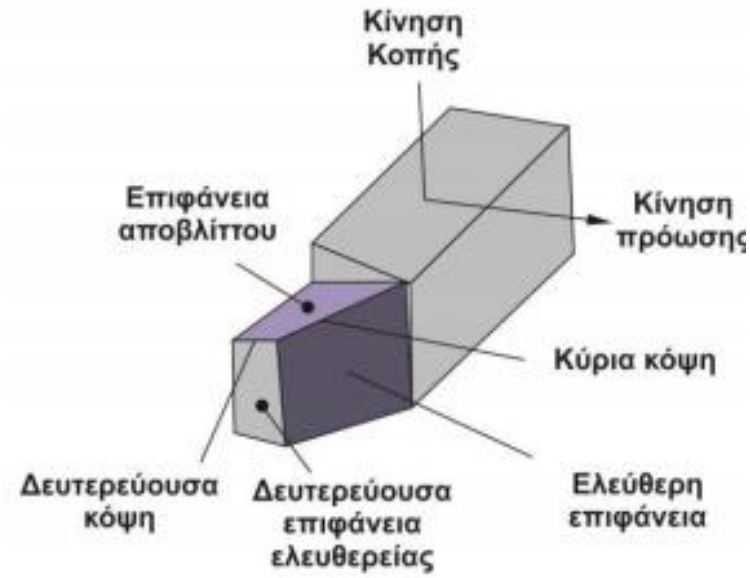
e) **Χρόνος κατεργασίας:**Έστω ότι τορνεύεται κομμάτι με μήκος *l*, με πρόωση *s*(mm/στροφή) και *n* (στροφές/min). Το κοπτικό εργαλείο του τόρνου, που σε μία στροφή προχωρεί κατά *s*, σε *n*στροφές στο λεπτό θα προχωρήσει κατά *S*=*s*·*n*(ταχύτητα προώσεως). Αν *t*(min) ο χρόνος τόρνευσης για μήκος *l*, η μετατόπιση σε *t*λεπτά θα είναι:

$$l = t \cdot S => l = t \cdot s \cdot n => t = l/(s \cdot n) \ \text{(min)}$$

2.7Γεωμετρία κοπτικών εργαλείων τόρνου

Η γεωμετρία του ΚΕ που χρησιμοποιείται για την κατεργασία της τόρνευσης καθορίζεται από τις κοπτικές γωνίες και επιφάνειες του εργαλείου. Στην Εικόνα 2.10α διακρίνονται οι βασικές επιφάνειες του ΚΕ:

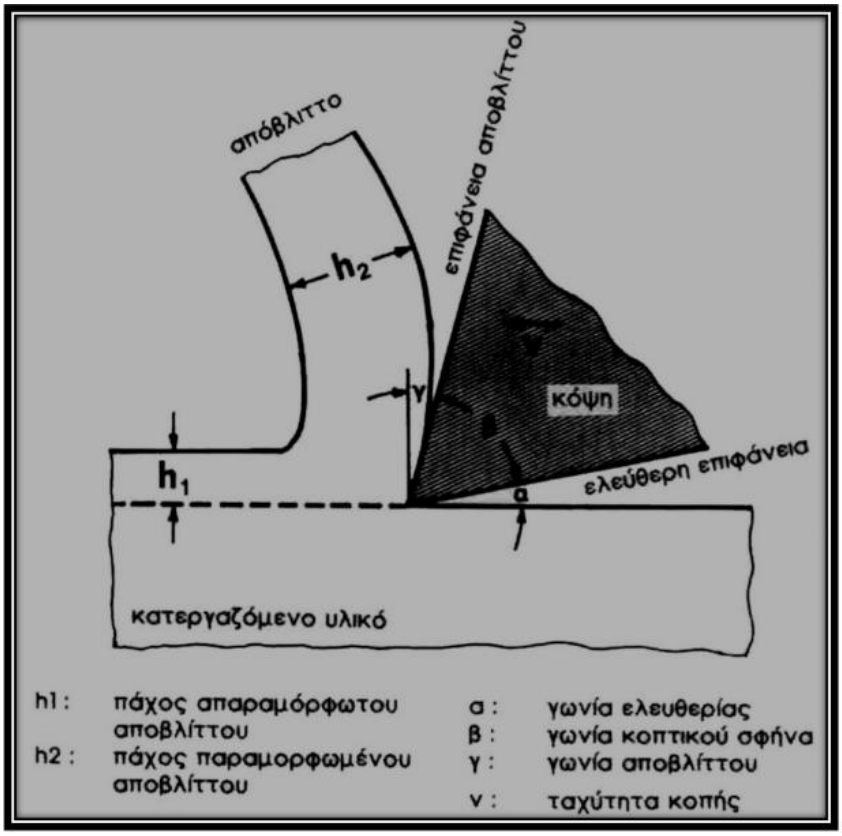
- *Επιφάνεια αποβλήτου*, πάνω στην οποία ολισθαίνει το απόβλητο κατά την κίνησή του.
- *Ελεύθερη επιφάνεια κύριας κόψης,* είναι η επιφάνεια που αντικρίζει την κατεργασμένη επιφάνεια.
- *Ελεύθερη επιφάνεια δευτερεύουσας κόψης,* είναι η επιφάνεια που αντικρίζει την κατεργαζόμένη επιφάνεια.
- *Κύρια κόψη,* είναι η ακμή που προκύπτει από την τομή της επιφάνειας αποβλήτου και της ελεύθερης επιφάνειας κύριας κόψης
- *Δευτερεύουσα κόψη,* είναι η ακμή που προκύπτει από την τομή της επιφάνειας αποβλήτου και της ελεύθερης επιφάνειας δευτερεύουσας κόψης
- *Πλάτος στελέχους εργαλείου*
- *Ύψος στελέχους εργαλείου*



Εικόνα 2.10:Επιφάνειες κοπτικού εργαλείου.

Κατά την πραγματοποίηση της κοπής και αφού υποθέσουμε ότι το κοπτικό εργαλείο κινείται με ταχύτητα ***v*** σε σχέση με το σταθερό κατεργαζόμενο τεμάχιο, το υλικό που κόβεται από το τεμάχιο, δημιουργείται λόγω της συνεχούς πλαστικής παραμόρφωσης που συμβαίνει ακριβώς μπροστά στη μύτη του κοπτικού. Η πλαστική παραμόρφωση οφείλεται στις διατμητικές δυνάμεις που ασκούνται. Στη συνέχεια το απόβλητο που γεννιέται κινείται πάνω στην επιφάνεια του κοπτικού και απομακρύνεται. Αντιθέτως, η τελική παραγόμενη επιφάνεια του τεμαχίου

δημιουργείται από τη συνεχή θραύση του υλικού. Συνεπώς, όταν το υλικό του τεμαχίου περνά την ζώνη διατμήσεως, εφελκύεται.



Εικόνα 2.11: Γεωμετρία της κόψης [3]

Η κατεργασία με αφαίρεση υλικού μπορεί να προσομοιωθεί με την είσοδο μιας κοπτικής σφήνας σε ένα κατεργαζόμενο τεμάχιο, όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 1.10, όπου παρατηρούνται και τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κόψης:

- $\boldsymbol{h_1}$**:** πάχος απαραμόρφωτου αποβλήτου
- $\boldsymbol{h_2}$**:** πάχος παραμορφωμένου αποβλήτου
- $\boldsymbol{v}$**:** ταχύτητα κοπής
- $\boldsymbol{\alpha}$**:** γωνία ελευθερίας
- $\boldsymbol{\beta}$**:** γωνία κόψης
- $\boldsymbol{\gamma}$**:** γωνία αποβλήτου

Στην Εικόνα 2.11 είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί ότι το πάχος $\boldsymbol{h}_2$ του παραμορφωμένου αποβλήτου είναι μεγαλύτερο από το πάχος $\boldsymbol{h}_1$ που αντιστοιχεί στο

απαραμόρφωτο απόβλητο και αυτό οφείλεται στη συνεχή πλαστική παραμόρφωση. Τέλος, διακρίνονται οι τρεις χαρακτηριστικές γωνίες κοπής (α,β,γ) για τις οποίες ισχύει η σχέση [7]

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^o.$$

Κεφάλαιο 3-Αριθμητικές μέθοδοι FEM και SPH για την ορθογωνικήκοπή

3.1 Αριθμητικές μέθοδοι FEM και SPH στην κοπή

Η κοπή μετάλλων είναι μία από τις πιο συνήθεις βιομηχανικές κατεργασίες. Πολυάριθμες παράμετροι όπως οι γωνίες εργαλείων, η ακτίνα τουκοπτικού άκρου, οι ιδιότητες των υλικών, οι συνθήκες τριβής, η ταχύτητα, το βάθος κοπήςκαι η γνώση των βέλτιστων τιμών τους είναι ζωτικής σημασίας για την κατεργασία αυτή [8,9]. Ωστόσο, οι πειραματικές δοκιμές για τον προσδιορισμό των δυνάμεων κοπής, της φθοράς των εργαλείων και της τριβής, της μορφολογίας των αποβλήτων-τσιπ και της επιφανειακής ακεραιότητας είναι δαπανηρές και χρονοβόρες και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο πολλές παράμετροι της διαδικασίας εξακολουθούν να επιλέγονται με κριτήρια που βασίζονται σε εμπειρικές γνώσεις. Συνεπώς, οι αριθμητικές προσομοιώσεις των διαδικασιών κοπής είναι απαραίτητες για την σωστή επιλογή του υλικού εργαλείου και της γεωμετρίας, για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων κοπής και την πρόβλεψη της δυναμικής απόκρισης του υλικού τεμαχίου κατά την κατεργασία.

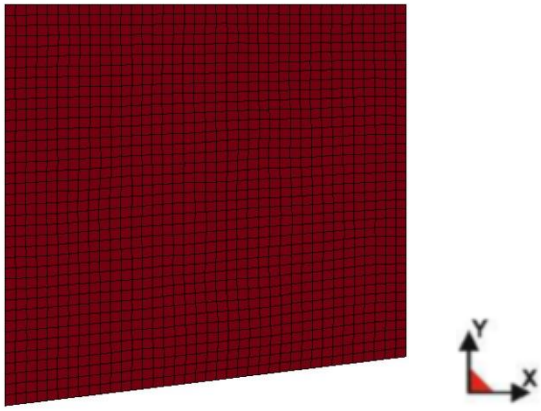
Οι προσομοιώσεις κοπής μετάλλων είναι γρήγορα δυναμικά μη γραμμικά προβλήματα, όπως οι εκρήξεις, οι διεισδύσεις, οι συγκρούσειςκαι οι δοκιμές πτώσης που επιλύονται υπολογιστικά με τη βοήθεια explicit αριθμητικών μεθόδων.Η FEM (finiteelementmethod), και η SPH (smoothparticlehydrodynamics), είναι οι δύο αντιπροσωπευτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση των συνεχών μακροσκοπικών πολυδιάστατων προβλημάτων. Στην FEM, το παραμορφώσιμο πλέγμα συνδέεται με το υλικό του τεμαχίου και παραμορφώνεται μαζί του [10-12].Η μέθοδος SPH δεν χρειάζεται πλέγμα και το πλέγμα του μοντέλου ορίζεται από έναν αριθμό σωματιδίων που προσανατολίζονται σε συγκεκριμένη απόσταση το ένα από το άλλο [13,14].

Η FEM εφαρμόζεται συνήθως στην κοπή μετάλλου με βάση την Lagrangian προσέγγιση [10-12]. Το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων προσαρτάται στο τεμάχιο εργασίας και τα δύο παραμορφώνονται, ενώ η επιλογή επιφανειών παρακολούθησης και η εφαρμογή οριακών συνθηκών μπορούν εύκολα να πραγματοποιηθούν. Αυτή η προσέγγιση είναι χρήσιμη για προβλήματα όπου συμβαίνουν σχετικά χαμηλές

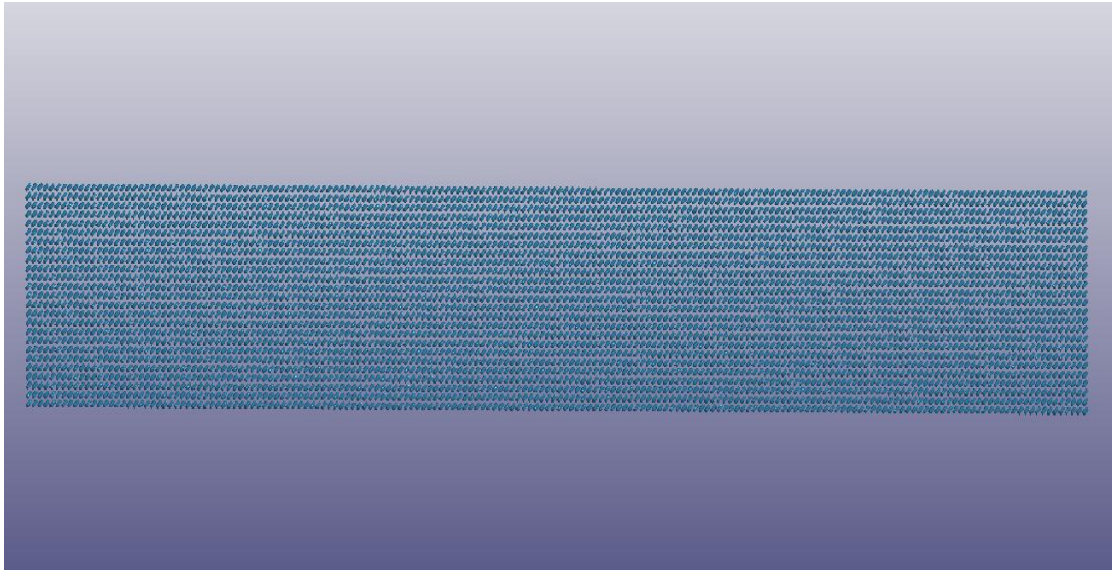
στρεβλώσεις (distortions) και μεγάλες παραμορφώσεις. Επιπλέον, διαθέτει το πλεονέκτημα να μοντελοποιεί την εξέλιξη του τσιπ από το αρχικό στάδιο σε μια σταθερή μορφή. Το σχήμα του τσιπ αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της ανάλυσης ως συνάρτηση της διαδικασίας φυσικής παραμόρφωσης, των παραμέτρων κατεργασίας και των ιδιοτήτων των υλικών. Ο σχηματισμός τσιπ πραγματοποιείται μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης των στοιχείων με βάση τα κριτήρια διάβρωσης (erosion). Ένα μειονέκτημα τησμεθόδου είναι η απώλεια σταθερότητας κατά τη διάρκεια της λύσης, όταν συναντάται πολύ μεγάλη παραμόρφωση των στοιχείων. Ωστόσο, οι στρεβλώσεις υψηλού στοιχείου μπορούν να αντιμετωπιστούν με την συχνή βελτίωση του FE πλέγματος.

Η προσέγγιση SPH δεν χρησιμοποιεί αριθμητικό πλέγμα για τον υπολογισμό των χωρικών παραγώγων. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο, μπορεί να αντιμετωπιστούν προβλήματα που αφορούν τις ακραίες συνθήκες φόρτισης και τις μεγάλες παραμορφώσεις. Στην προσέγγιση SPH, ο υπολογιστικός τομέας ορίζεται από έναν αριθμό σωματιδίων, που αποτελούν το πλαίσιο όπου οι διευθύνσεις εξισορροπούνται και όπου οι ιδιότητες των υλικών και οι μεταβλητές κατάστασης προσεγγίζονται. Τα σωματίδια τοποθετούνται σε μια συγκεκριμένη απόσταση το ένα από το άλλο(πυκνότητα σωματιδίων). Κάθε σωματίδιο αλληλεπιδρά με όλα τα άλλα σωματίδια που βρίσκονται σε μια δεδομένη απόσταση από αυτό. Συνήθως αυτή η απόσταση θεωρείται ότι είναι 2h [14], όπου h είναι το μήκος εξομάλυνσης.

3.2 Μοντελοποίηση στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA



Εικόνα 3.1 Το κοπτικό εργαλείο



Εικόνα 3.2 Το τεμάχιο

Το κοπτικό εργαλείο έχει γωνία κλίσης 0°, γωνία ανοίγματος 7° (Εικόνα 3.1). Οι διαστάσεις του τεμαχίου είναι 3,0 x 0,5 x 0,08 mm(εικόνα 3.2). Το άκαμπτο εργαλείο κοπής μοντελοποιείται με 10400 εξαεδρικά στερεά στοιχεία, ενώ το τεμάχιο με 22500 σωματίδια τα οποία έχουν ομοιόμορφη απόσταση 0.02 mm μεταξύ τους [12]. Το εργαλείο τοποθετείται σε κατακόρυφη απόσταση, που δηλώνεται ως f –(feed) τροφοδοσία από την άνω επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας, σύμφωνα με το βάθος κοπής που ορίζεται σε κάθε προσομοίωση.

Όσον αφορά τις αρχικές και οριακές συνθήκες, η κίνηση του εργαλείου επιβάλλεται στην διεύθυνση X σύμφωνα με την ταχύτητα κοπής. Όλες οι

μετατοπίσεις και οι περιστροφές της κάτω επιφάνειας και της αριστερής πλευράς του τεμαχίου εργασίας περιορίζονται πλήρως και οι μετατοπίσεις (στη διεύθυνση Z) στην εμπρόσθια και στην πίσω πλευρά του είναι επίσης περιορισμένες. Η αλληλεπίδραση SPH μεταξύ του υλικού του τεμαχίου και του εργαλείου υλοποιείται με τη βοήθεια του αλγόριθμου αυτόματης επαφής επιφανειών [12]. Όλες οι αριθμητικές προσομοιώσεις εκτελούνται σε 4-πυρήνα CPU Intel® Core ™ i7-3820 με επεξεργαστή 3,6 GHz και 32 GB μνήμης RAM με χρόνους λύσης της τάξης των 10 ωρών.

Η υϊοθέτηση ενός κατάλληλουελαστο-πλαστικού μοντέλου υλικών για το τεμάχιο εργασίας είναι απαραίτητη για την ακρίβεια των προσομοιώσεων των διεργασιών κοπής μετάλλου ανεξάρτητα από την αριθμητική μέθοδο που χρησιμοποιείται. Το μοντέλο υλικού που επιλέξαμε στη μελέτη μας είναι το J-C (Johnson-Cook), ένα καθαρά εμπειρικό, το οποίο λαμβάνει υπόψη την επίδραση της πλαστικής τάσης, του ρυθμού καταπόνησης και της θερμοκρασίας. Το μοντέλο υλικών J-C είναι σε θέση να προβλέψει τη δυναμική μηχανική συμπεριφορά των υλικών υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης και είναι ένα από τα πιο συνηθισμένα στη βιβλιογραφία, σε μοντέλα FEM. Η τάση διαρροής εκφράζεται ως:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^n)(1 + Cln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})(1 - \frac{T - T_r}{T_m - T_r})^m$$

όπου ε είναι η ισοδύναμη πλαστικήπαραμόρφωση, $\dot{\varepsilon}$ είναι ο ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης,$\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon_o}}$ είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης αναφοράς (χωρίς μονάδες), A είναι η τάση απόδοσης (διαρροής), B είναι η σταθερά σκλήρυνσης, C είναι η ευαισθησία ρυθμού παραμόρφωσης, n είναι ο εκθέτης σκλήρυνσης, m είναιο εκθέτης θερμικούsoftening, T_m είναι η θερμοκρασία τήξης του τεμαχίου εργασίας και T_r η θερμοκρασία δωματίου. Οι σταθερές των υλικών A, B, C, n, m προσδιορίζονται βιβλιογραφικά από πειραματικά αποτελέσματα, ενώ ο ρυθμός καταπόνησης $\dot{\varepsilon}_0$αντιπροσωπεύει τον υψηλότερορυθμό παραμόρφωσης για τον οποίο οι επιδράσεις του ρυθμού παραμόρφωσης στην τάση διαρροής είναι αμελητέες [12].

Το μοντέλο υλικών J-C περιλαμβάνει επίσης ένα μοντέλο ρήξης (fracture) που λαμβάνει υπόψη την πυρήνωση, την ανάπτυξη και τη συνένωση κενών σε ένα εύπλαστο υλικό σε υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης. Ορίζει την πλαστική παραμόρφωση κατά την έναρξη της βλάβης από τη σχέση:

$$\varepsilon_f = \left(\left[D_1 + D_2 exp D_3 \frac{p}{\sigma_{VM}}\right]\left[1 + D_4 ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right]\left[1 + D_5 \frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right]\right)$$

όπου D_1, D_2, D_3, D_4 και D_5 είναι οι παράμετροι αποτυχίας του υλικού και σ_{VM}ηVonMises τάση. Η ρήξη του υλικού συμβαίνει όταν η παράμετρος βλάβης D φθάσει την τιμή 1:

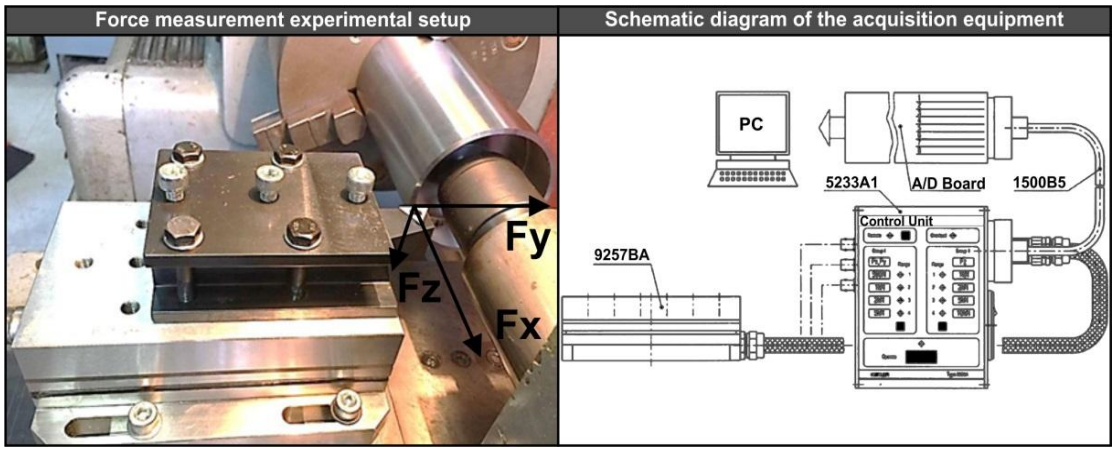
$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_f}.$$

3.3 Πειραματικέςμετρήσεις και ιδιότητες υλικών Ορθογωνικής κοπής του AISI 1045 με CVD

Επιλέχθηκε να μελετηθείη ορθογώνια μελέτη κοπής χάλυβα AISI 1045 με πλάκες καρβιδίου CVD TCMT16T308-M5, βαθμού TP2501 της SecoTools. Παράλληλα με τις προσομοιώσεις υλοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις κοπής.

Πειραματική κοπή AISI 1045 με CVD

Ένας χαλύβδινος κύλινδρος AISI 1045 προετοιμάζεται για την παραγωγή ενός χαλύβδινου σωλήνα πάχους 3 mm, που μπορεί να στηριχθεί κατάλληλα σε συμβατικό τόρνο, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3. Το κοπτικό εργαλείο έχει γωνία κλίσης 0° και γωνία ανοίγματος 7° με αιχμηρό άκρο. Για την πειραματική μέτρηση των δυνάμεων ρυθμίζεται η ταχύτητα κοπής στα 300 m/min, το βάθος κοπής είναι σταθερό και η τροφοδοσία ανά περιστροφή ρυθμίζεται σε f = 0,2 mm. Οι δυνάμεις κοπής μετρώνται με τη βοήθεια ενός τύπου Kistler δυναμόμετρου τύπου 9257BA 3 συνιστωσών που συνοδεύεται από το πρόγραμμα απόκτησης δεδομένων της KistlerDynoWare για την παρακολούθηση και καταγραφή των σημάτων δύναμης. Το ενσωματωμένο καλώδιο συνδέεται με τη μονάδα ελέγχου τύπου 5233A1 όπως φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα στα δεξιά της εικόνας 3.3. Με τη βοήθεια αυτής της πειραματικής ρύθμισης, οι δυνάμεις κοπής (cutting) και ωθήσεως (thrust) μετριούνται να έχουν τις τιμές 620 και 390 N/mm, αντίστοιχα.



Εικόνα 3.3 Πειραματικόset-up μέτρησης δυνάμεων και σχηματικό διάγραμμα του εξοπλισμού απόκτησης δεδομένων

Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες υλικών-Παράμετροι μοντέλου

Οι φυσικές ιδιότητες του χαλύβδινου τεμαχίου AISI 1045 και του εργαλείου καρβιδίου (CVD) που επιλέχθηκε για το πείραμα παρατίθενται στον Πίνακα 3.1. Το μοντέλο υλικού J-C και οι παράμετροι αποτυχίας του τεμαχίου εργασίας παρατίθενται στους Πίνακες 3.2 και 3.3 αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1 Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των AISI 1045 και CVD [11].

Ιδιότητα	Τεμάχιο	Εργαλείο
Πυκνότητα [kg/m^3]	7800	14400
Μέτρο Ελαστικότητας [GPa]	210	625
Λόγος Poisson [-]	0.30	0.20
Ειδική θερμότητα [J/kgK]	462	153
Θερμική αγωγιμότητα [W/mK]	40.2	54,4
Σημείο τήξης [K]	1730	-

Πίνακας 3.2 Παράμετροι μοντέλου υλικού Johnson-Cook του AISI 1045 [15,16].

Παράμετροι	**A [MPa]**	**B [MPa]**	**n [-]**	**C [-]**	**m [-]**
Set 1 values	553	600	0.234	0.013	1.0
Set 2 values		996.1	0.168	0.097	

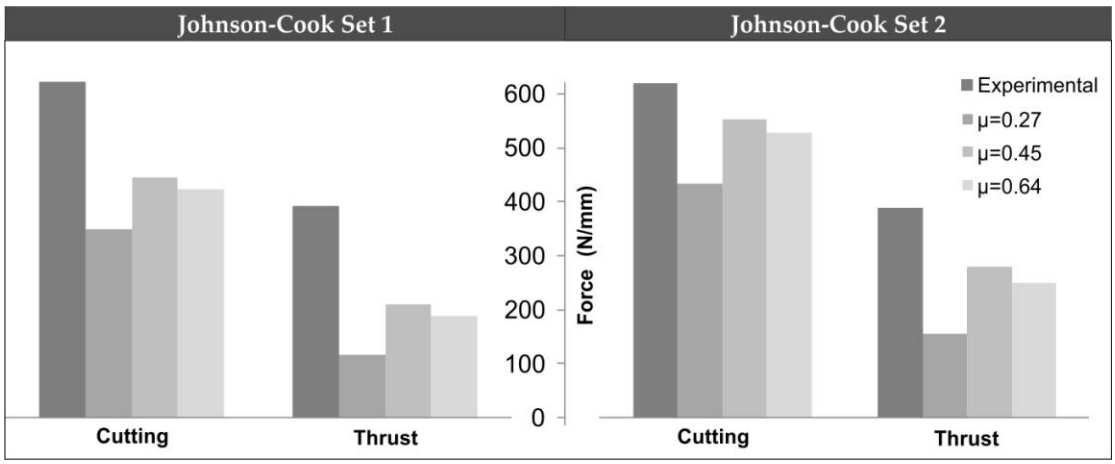
Πίνακας 3.3 Παράμετροι αστοχίας Johnson-Cook του AISI 1045 [16].

Παράμετροι	**D1 [-]**	**D2 [-]**	**D3 [-]**	**D4 [-]**	**D5 [-]**
Values	0.06	3.31	-1.96	0.0018	0.58

Οι θερμομηχανικές και φυσικές ιδιότητες για το εργαλείο και το τεμάχιο εργασίας λαμβάνονται από το [11] και χρησιμοποιούνται δύο ομάδες παραμέτρων υλικού JC [15,16] με και χωρίς την παράμετρο της τάσης διαρροής A. Οι παράμετροι αστοχίας JC βασίζονται στη μελέτη των Duanetal. [16].

Κεφάλαιο 4-Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Δύο ομάδες παραμέτρων υλικού του μοντέλου J-C [15,16] χρησιμοποιούνται με (Set1) και χωρίς (Set 2) τη παράμετρος της τάσης διαρροής A, καθώς και ένα σύνολο τιμών για τις επιλεγμένες παραμέτρους αστοχίας του J-C. Δεδομένου ότι η ακριβής τιμή του συντελεστή τριβής δεν είναι γνωστή, δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές τριβής,σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, για κάθε μοντέλο προσομοίωσης: 0.27 [16], 0.45 [17] και 0.64 [18]. Οι προσεγγιστικές μέσες τιμές των δυνάμεων κοπής (cuttingforce) και ώθησης (thrustforce) σε σχέση με την τριβή με χρήση των παραμέτρων J-C Set 1 και 2 απεικονίζονται στηνΕικόνα4.1, για ταχύτητα κοπής 300 m/min και πρόωση (ρυθμό τροφοδοσίας) 0,2 mm /rev. Αυτές οι τιμές συγκρίνονται με τις πειραματικές τιμές μέσης τιμής των δυνάμεων κοπής και ώθησης, οι οποίες μετρήθηκαν να είναι 620 και 390 N/mm αντίστοιχα.



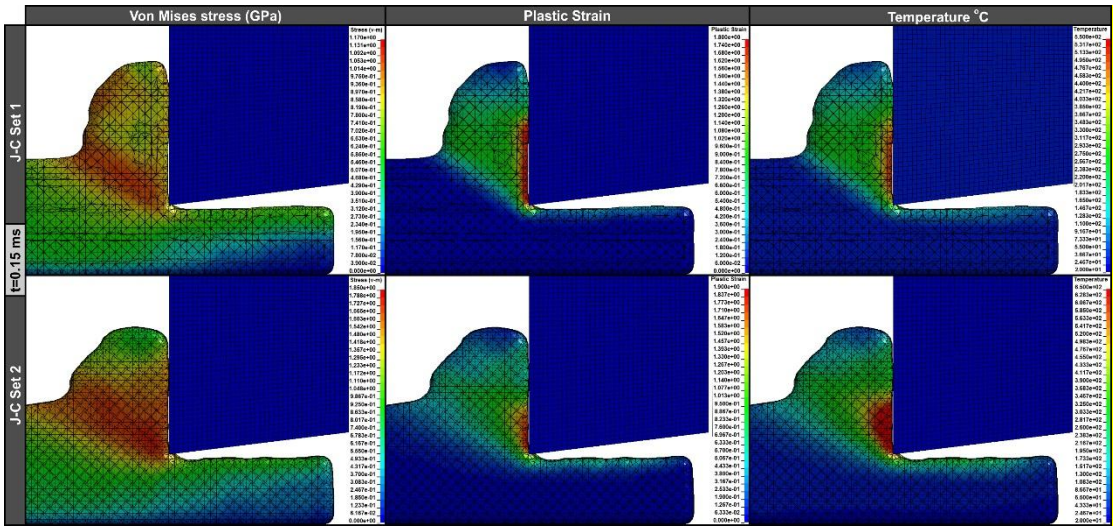
Εικόνα 4.1Σύγκριση των πειραματικών με αριθμητικά αποτελέσματα των δυνάμεων κοπής και ωθήσεως για διαφορετικές τιμές τριβής.

Όταν αγνοείται η παράμετρος A (Set 2), εμφανίζονται υψηλότερες μέσες τιμές δύναμης. Για αυτήν τη περίπτωση, όταν η τιμή τριβής έχει οριστεί σε 0,45, παρατηρείται καλή συμφωνία μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων. Οι προσομοιώσεις που υλοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το Set 1 σε σύγκριση με τις αριθμητικές προσεγγίσεις χρησιμοποιώντας το Set 2, οδηγούν σε

χαμηλότερες τιμές για τις δυνάμεις κοπής και ώθησης, σε ποσοστό 20% και 25% αντίστοιχα.

Στην Εικόνα 4.2παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα των τάσεωνVonMises, οι πλαστικές τάσεις και οι κατανομές θερμοκρασίας για ταριθμητικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους των JC Set 1 και 2 για ταχύτητα κοπής 300 m/min, πρόωση 0,2 mm/rev και γιατη χρονική στιγμή 0.15 ms. Παρατηρείται και πάλι ότι για τις προσομοιώσεις με το μοντέλο υλικού JC του Set 2, οι υπολογισμένες τάσεις, οι παραμορφώσεις και οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες σε σύγκριση με τις προσομοιώσεις που εκτελούνται χρησιμοποιώντας το Set 1 ενώ οι τιμές τους συμφωνούν με τα αποτελέσματα προσομοίωσης που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία [13].

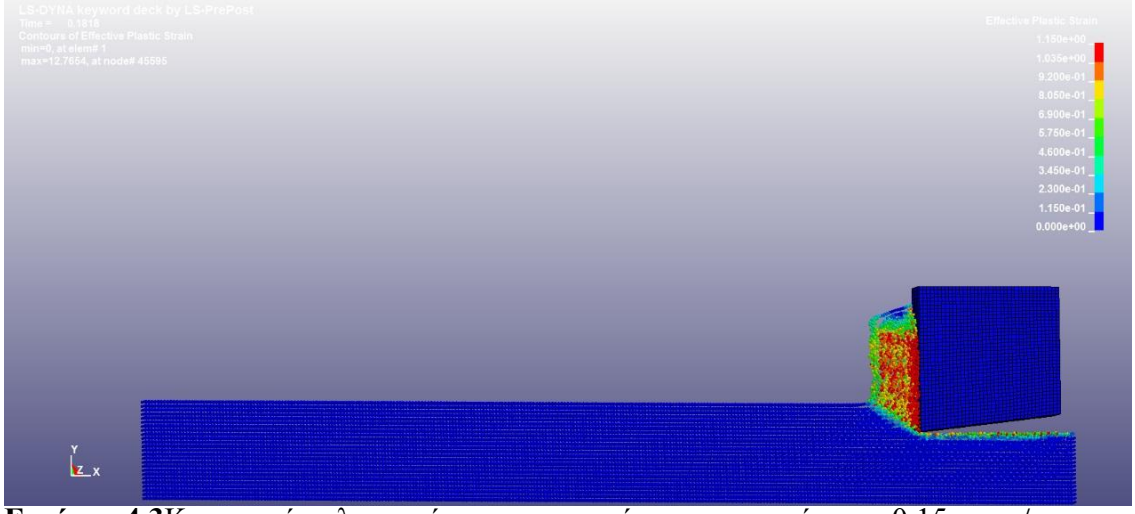
Ενδεικτικά για το μοντέλο που λαμβάνει υπόψη τις τιμές του JCSet 2 είναι 1.85 GPaγια την μέγιστη VonMisestάση, 1,9 για την μέγιστη πλαστική παραμόρφωση και 650 ^{o}Cγια τη μέγιστη θερμοκρασία, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για το μοντέλο με τις τιμές JCτου Set1οι αντίστοιχες είναι 1.17GPa για την μέγιστη VonMises τάση, 1,8 για την μέγιστη πλαστική παραμόρφωση και 550 ^{o}C για τη μέγιστη θερμοκρασία,



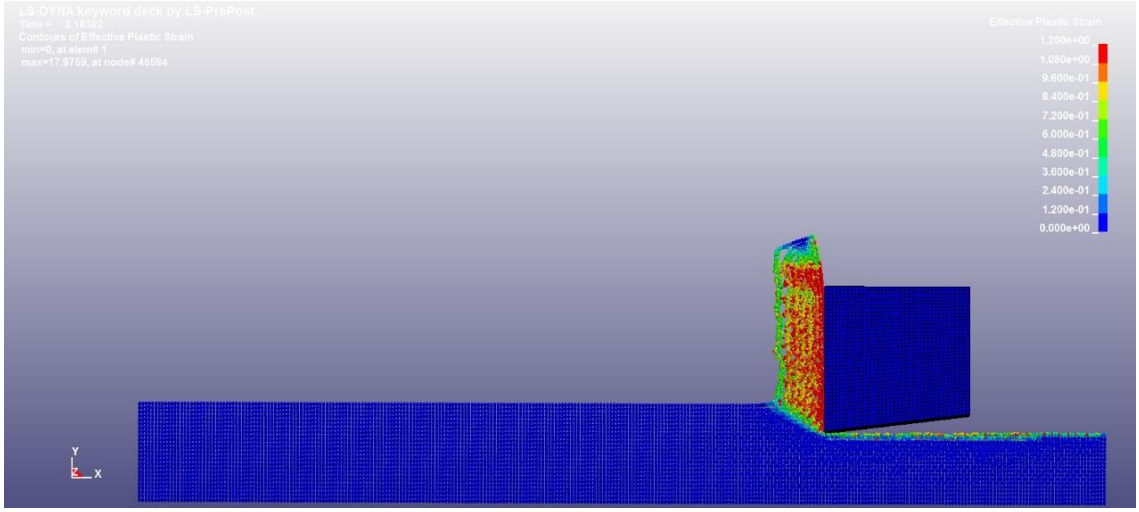
Εικόνα 4.2Τάσεις VonMises, πλαστικές τάσεις και αποτελέσματα θερμοκρασίας σε t = 0,15 ms, για παραμέτρους J-C Set 1 και 2, για ταχύτητα κοπής 300 m/min και πρόωση 0,2 mm / rev.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα κατανομής πλαστικών παραμορφώσεων στις εικόνες 4.3-4.6, κατανομής θερμοκρασίας στις εικόνες 4.7-4.9 και κατανομής VonMises τάσεων στις εικόνες 4.10-4.12 για το δεύτεροSet2

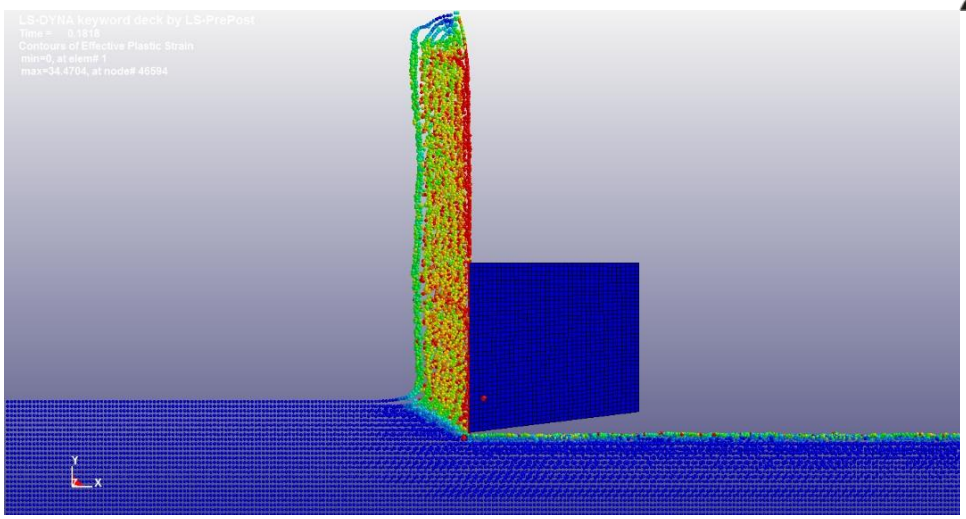
παραμέτρων του μοντέλου JC για σταθερή τιμή πρόωσης 0.15 mm/rev την ίδια χρονική στιγμή 0.18 ms για μεταβαλλόμενη ταχύτητα από 300-1500 m/sec και για συντελεστή τριβής με τιμή 0.45.



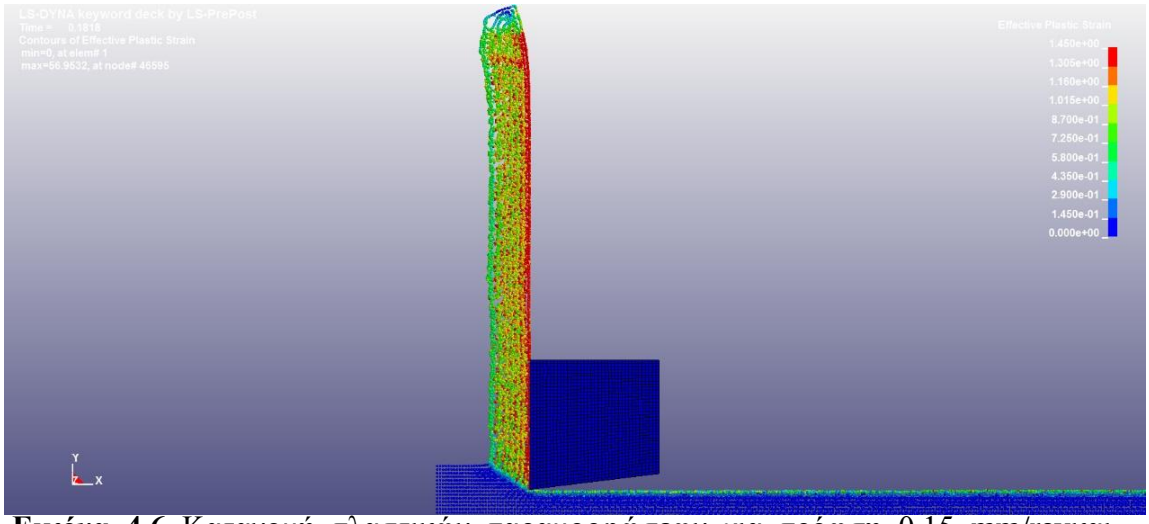
Εικόνα 4.3Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεωνγια πρόωση 0.15 mm/revκαι ταχύτητα κοπής 300 m/sec τη χρονικήστιγμή 0.18 ms.



Εικόνα 4.4 Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων για πρόωση 0.15 mm/revκαι ταχύτητα κοπής 500 m/sec τη χρονική στιγμή 0.18 ms.

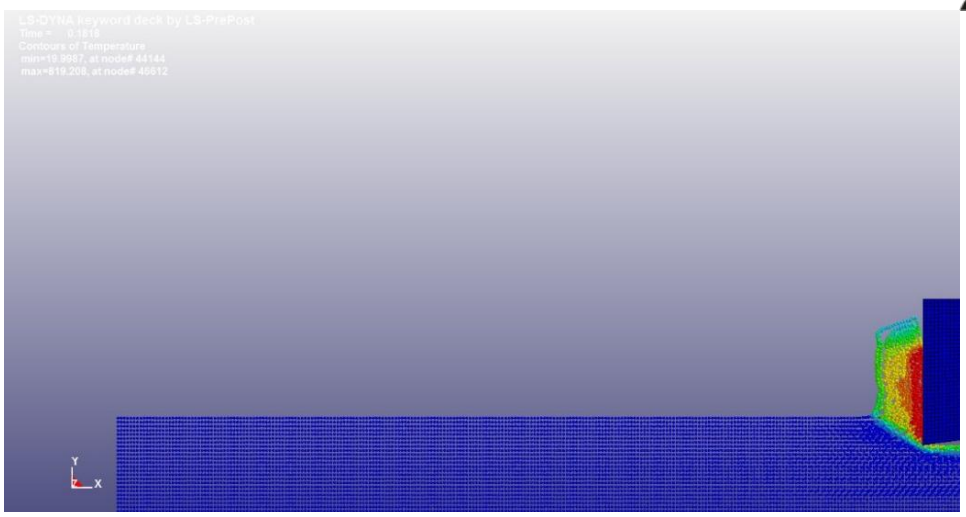


Εικόνα 4.5 Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων για πρόωση 0.15 mm/revκαι ταχύτητα κοπής 1000 m/sec τη χρονική στιγμή 0.18 ms.

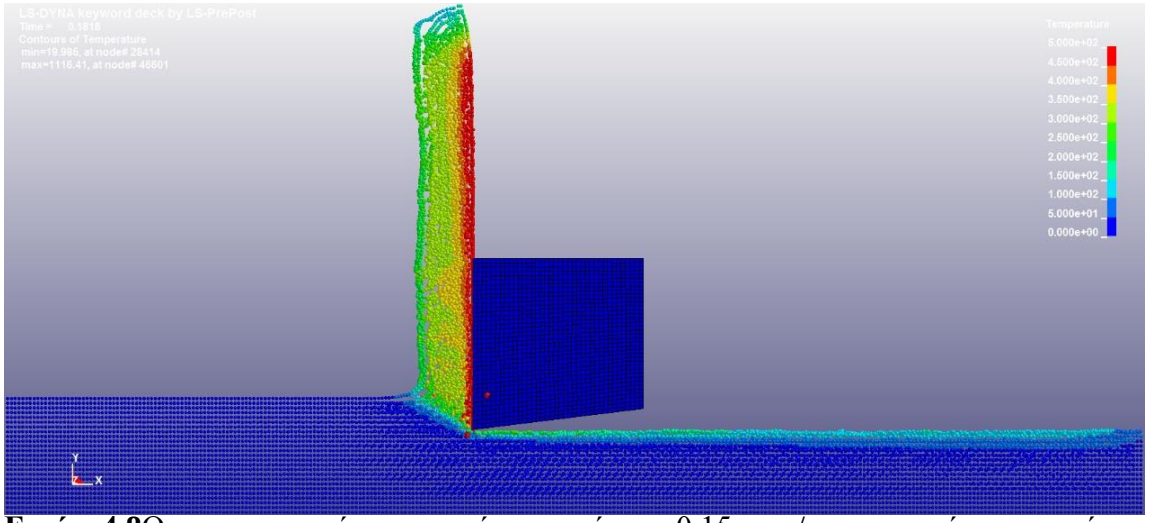


Εικόνα 4.6 Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων για πρόωση 0.15 mm/revκαι ταχύτητα κοπής 1500 m/sec τη χρονική στιγμή 0.18 ms.

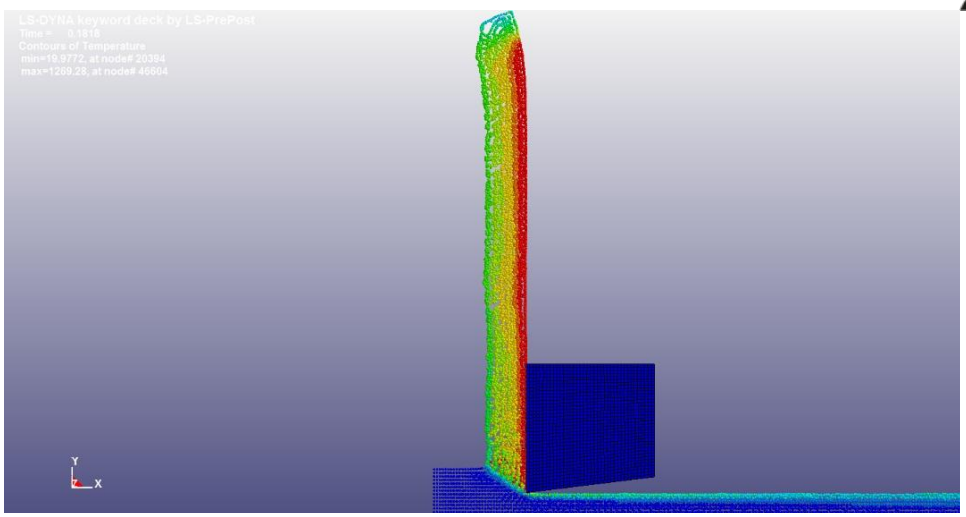
Παρατηρούμε λοιπόν, σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα Πλαστικής Παραμόρφωσης(EffectivePlasticStrain), ότι τη χρονική στιγμή t=0.18sec, για σταθερή πρόωση 0.15rev/mm, και για διαφορετικές ταχύτητες κοπής, οι μέγιστες τιμές πλαστικής παραμόρφωσης μεταβάλλονταιπαρουσιάζοντας μια μικρή αύξηση. Επομένως, γιαταχύτητα κοπής 300m/sec έχουμε EPS(max)= 1.15. Για ταχύτητα κοπής 500m/sec έχουμε EPS(max)= 1.2. Για ταχύτητα κοπής 1000m/sec έχουμε EPS(max)= 1.4 και τέλος για ταχύτητα κοπής 1500m/sec έχουμε EPS(max)= 1.4.



Εικόνα4.7Θερμοκρασιακή κατανομή για πρόωση 0.15 mm/revκαι ταχύτητα κοπής 300 m/secτη χρονική στιγμή 0.18 ms.

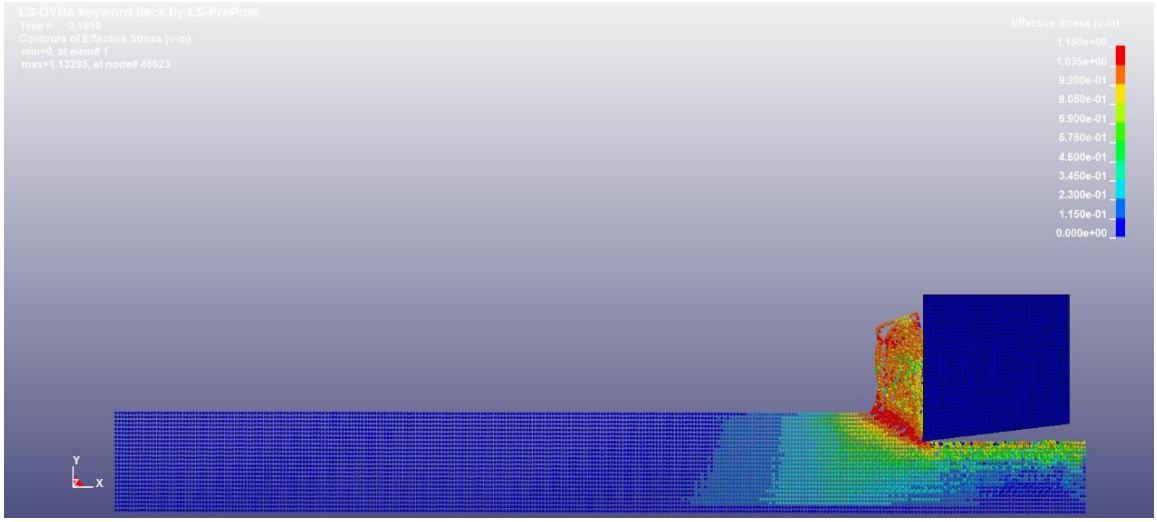


Εικόνα4.8Θερμοκρασιακή κατανομή για πρόωση 0.15 mm/revκαι ταχύτητα κοπής 1000 m/sec τη χρονική στιγμή 0.18 ms.

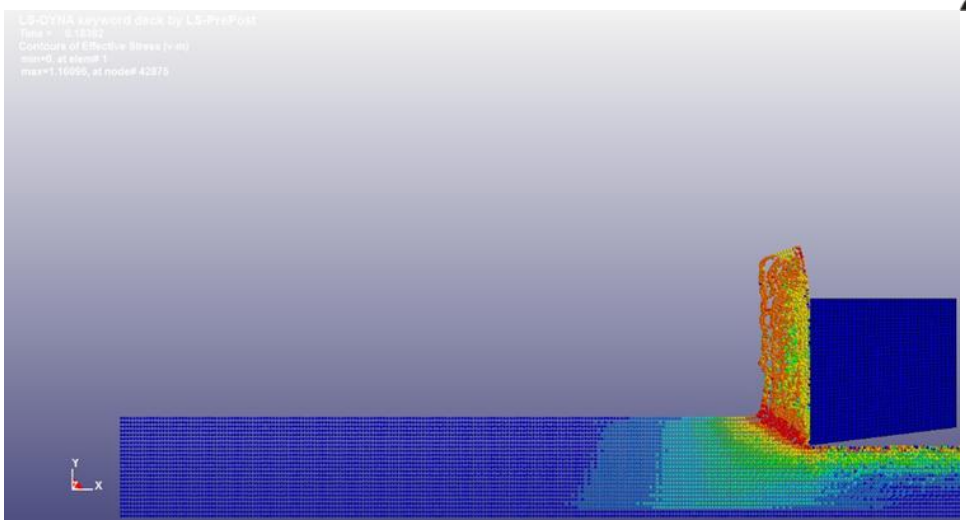


Εικόνα 4.9Θερμοκρασιακή κατανομή για πρόωση 0.15 mm/rev και ταχύτητα κοπής 1500 m/sec τη χρονική στιγμή 0.18 ms.

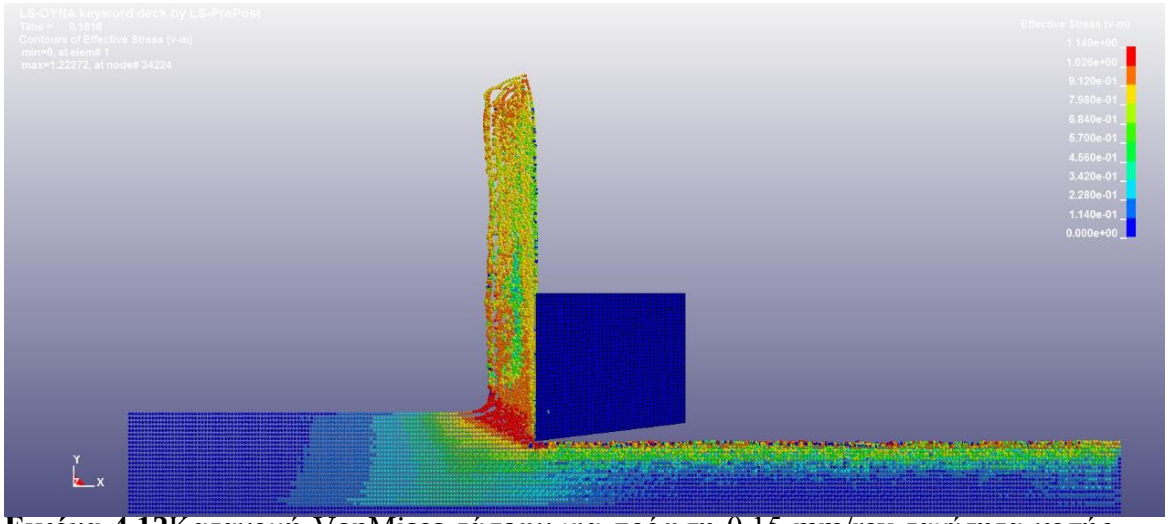
Παρατηρούμε λοιπόν, σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα Θερμοκρασιακής Κατανομής, ότι για σταθερή χρονική στιγμή t=0.18m/s και σταθερή πρόωση 0,15mm/rev, και για διαφορετικές τιμές ταχύτητας κοπής, οι μέγιστες τιμές Θερμοκρασιακής Κατανομής μεταβάλλονται. Επομένως, για ταχύτητα κοπής 300 m/sec έχουμε T(max)=400°C, για ταχύτητα κοπής 1000m/s έχουμε T(max)=500°C και τέλος για ταχύτητα κοπής 1500m/sec έχουμε T(max)=470°C.



Εικόνα 4.10Κατανομή VonMises τάσεων για πρόωση 0.15 mm/rev ταχύτητα κοπής 300 m/sec τη χρονική στιγμή 0.18 ms.



Εικόνα 4.11 Κατανομή VonMises τάσεων για πρόωση 0.15 mm/rev ταχύτητα κοπής 500 m/sec τη χρονική στιγμή 0.18 ms



Εικόνα 4.12Κατανομή VonMises τάσεων για πρόωση 0.15 mm/rev ταχύτητα κοπής 1000 m/sec τη χρονική στιγμή 0.18 ms.

Παρατηρούμε λοιπόν, σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα Κατανομής VonMises τάσεων, ότι για σταθερή χρονική στιγμή t=0.18m/s και σταθερή πρόωση 0,15mm/rev, και για διαφορετικές τιμές ταχύτητας κοπής, οι μέγιστες τιμές Κατανομής VonMises τάσεων μεταβάλλονται. Επομένως, για ταχύτητα κοπής 300m/sec έχουμε EffectiveStress=1.15GPa, για ταχύτητα κοπής 500m/sec, έχουμε ES=1.161GPa και τέλος για ταχύτητα κοπής 1000m/sec έχουμε ES=1.14GPa.

Κεφάλαιο 5-Συμπεράσματα

Για την προσομοίωση ορθογωνικής κοπής, σε κατεργασία τόρνευσης με FEM-SPHμοντέλοεξετάστηκαν περιπτώσεις με τιμές ταχύτητας από 300-1500 m/minκαι για πρόωση 0,15 και 0.2 mm/rev. Επιλέχθηκαν δύο ομάδες παραμέτρων υλικού του μοντέλου J-C με (Set1) και χωρίς (Set 2) τη παράμετρος της τάσης διαρροής A, καθώς και ένα σύνολο τιμών για τις επιλεγμένες παραμέτρους ρήξης του J-C, ενώ επιλέχθηκαν και τρεις διαφορετικές τιμές για το συντελεστή τριβής από τη βιβλιογραφία. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε ότι για ταχύτητα κοπής 300 m/minγια πρόωση 0,2 mm /rev και για τιμή τριβής 0,45 παρατηρείται καλή συμφωνία μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων.Γενικά αποδεικνύεται ότι ο συνδυασμός FEM-SPHείναι κατάλληλος για να προσομοιώσει τις κοπές μετάλλων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] https://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/CNC/SHMEIWSEIS/1-eisagwgi.pdf

[2]ΤΕΙ Κρήτης. Εργαστήριο Προσομοιώσεων & Μηχανολογικών Κατασκευών-SMM, Σημειώσεις Κατασκευαστικές Τεχνολογίες Θεωρία, Επ. Καθηγητής Δρ. Βασίλης Δημητρίου, Χανιά 2016.

[3]ΤΕΙ Κρήτης. Εργαστήριο Προσομοιώσεων & Μηχανολογικών Κατασκευών-SMM, Κατεργασίες αφαίρεσης υλικού και προσομοιώσεις. Μοντελοποίηση τόρνευσης με API-VB προγραμματισμό σε περιβάλλον CAD, Πτυχιακή εργασία, Φραγκάκης Δημήτρης, Χανιά 2015.

[4] https://docplayer.gr/16521314-Torneysi-turning-shiuatiki-parastasi-tis-katergasias-kai-typopoiiueni-uorfi-toy-ke-torneysis-paroysiazontai-sta-sh-1-kai-2-antistoiha.html

[5] ΤΕΙ Κρήτης. Εργαστήριο Προσομοιώσεων & Μηχανολογικών Κατασκευών-SMM, Προσομοίωση αφαίρεσης υλικού κατεργασιών αναγόμενων σε ορθογωνική κοπή με πεπερασμένα στοιχεία και χρήση της ALE formulation, Πτυχιακή εργασία, Βαριαντζά Ελένη, Χανιά 2018.

[6] Κατεργασίες Μετάλλων-Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές Εκδόσεις-JosefDillinger, Αθήνα 2010.

[7] Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Καθηγητής Γεώργιος Χρυσολουρης, Σημειώσεις «Γεωμετρία Κοπτικών Εργαλείων», Πάτρα 2003.

[8] K. Cheng, Machining dynamics—fundamentals. Applications and practices. Springer, 2009.

[9] A.M. El-Tamimi, T.M. El-Hossainy, Investigating the machinability of AISI 420 stainless steel using factorial design, Mater. Manuf. Process. 23 (2008) 419–426.

[10] A.G. Mamalis, J. Kundrák, A. Markopoulos, D.E. Manolakos, On the finite element modelling of high speed hard turning, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 38 (2008) 441-446.

[11] U. Heisel, M. Storchak, D. Krivoruchko, Thermal effects in orthogonal cutting, Prod. Eng. Res. Devel. 7 (2013) 203–211.

[12] E. Kaselouris, T. Papadoulis,E. Variantza, A. Baroutsos and V. Dimitriou, “A Study of Explicit Numerical Simulations in Orthogonal Metal Cutting”, Solid State Phenomena, Vol. 261, pp 339-346, 2017.

[13] E. Bagci, 3-D numerical analysis of orthogonal cutting process via mesh-free method, Int. J. Phys. Sci. 6 (2011) 1267-1282.

[14] J. Limido, C. Espinosa, M. Salaün, J.L. Lacome, SPH method applied to high speed cutting modeling, Int. J. Mech. Sci. 49 (2007) 898-908.

[15] P. Sartkulvanich, F. Koppka, T. Altan, Determination of flow stress for metal cutting simulation—a progress report, J. Mater. Process. Tech. 146 (2004) 61–71.

[16] C.Z. Duan, T. Dou, Y.J. Cai, Y.Y. Li, Finite Element Simulation and Experiment of Chip Formation Process during High Speed Machining of AISI 1045 Hardened Steel, Int. J. Recent Trends Eng. 1 (2009) 46-50.

[17] U. Heisel, W. Zaloga, D. Krivoruchko, M. Storchak, L. Goloborodko, Modelling of orthogonal cutting processes with the method of smoothed particle hydrodynamics, Prod. Eng. Res. Devel. 7 (2013) 639-645.

[18] T. Özel, E. Zeren, Finite Element Method Simulation of Machining of AISI 1045 Steel With A Round Edge Cutting Tool, Proceedings of the 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, May 10-11, 2005, Chemnitz, Germany.