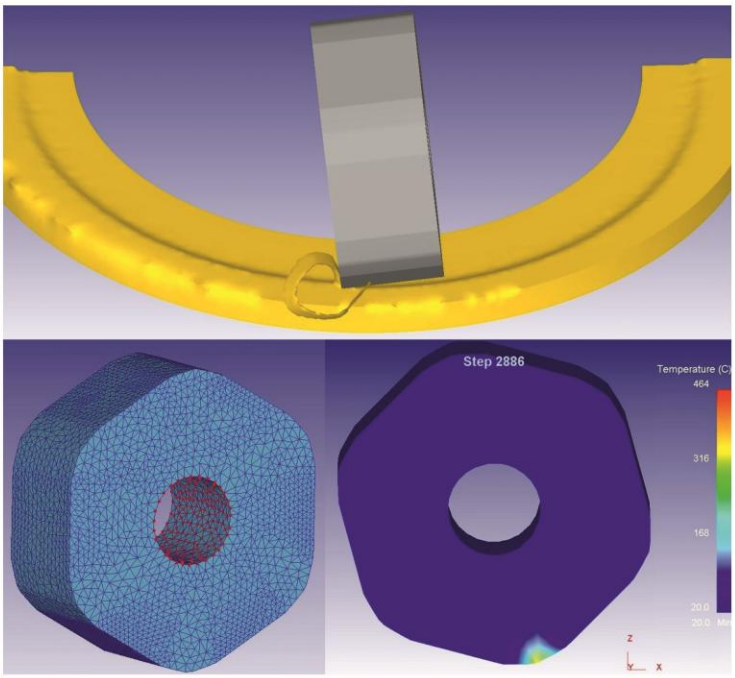
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΩΠΙΚΟΥ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ



ΜΟΥΣΤΕΡΑΚΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΡ. ΔΙΑΤΡ. : 4

ΧΑΝΙΑ 2012

Αφιερωμένη στους γονείς μου
και στον αδελφό μου Λεωνίδα
κ στο φίλο μου Αντώνη για την
πολύτιμη βοήθεια του.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι απαιτήσεις για μηχανολογικά προϊόντα καλύτερης ποιότητας και υψηλής ακρίβειας τα οποία μορφοποιούνται συχνότερα μέσω κατεργασιών αφαίρεσης υλικού ή στα αρχικά τους στάδια μέσω κατεργασιών παραμόρφωσης, καθώς και η επιδίωξη ελαχιστοποίησης του κόστους παραγωγής σε συνδυασμό με την ολοένα αυξανόμενη ποικιλία και πολυπλοκότητα των κατεργασιών τεμαχίων, οδήγησαν τα τελευταία χρόνια στην περαιτέρω εξέλιξη και αυτοματοποίηση των εργαλειομηχανών με ψηφιακή καθοδήγηση καθώς και των αντιστοιχών συστημάτων CAD/CAM. Ιδιαίτερα για τις κατεργασίες κοπής, που αποτελούν την κλασσική μέθοδο παραγωγής προϊόντων από μεταλλικά υλικά, τις τελευταίες δεκαετίες το υψηλό κόστος τους επέβαλε την αναζήτηση μεθόδων αύξησης της παραγωγικότητας που ισοδυναμεί με βελτιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων ανά περίπτωση συνθηκών κοπής.

Στο μετωπικό φραιζάρισμα, όπως και στις υπόλοιπες κατεργασίες κοπής με γνωστή κοπτική γεωμετρία, η μοντελοποίηση του κοπτικού εργαλείου, της κινηματικής του καθώς και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας που είναι κρίσιμες για την επίτευξη καλύτερης ποιότητας παραγόμενης επιφάνειας και για μικρότερη καταπόνηση της εργαλειομηχανής η οποία εκτελεί την κατεργασία.

Η μοντελοποίηση αυτή πρέπει να επαληθεύεται πειραματικά και μπορεί να οδηγήσει τελικά σε γρηγορότερη και πιο οικονομική παραγωγή προϊόντων. Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας μετωπικού φραιζαρίσματος με πεπερασμένα στοιχεία το οποίο υλοποιείται με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού FEM κατεργασιών (DEFORM 3D). Το μοντέλο αυτό επιβεβαιώθηκε με πειραματικές μετρήσεις.

Βασικός στόχος αυτής της εργασίας είναι η προσομοίωση του μετωπικού φραιζαρίσματος και η μελέτη των δυνάμεων κοπής. Για τη μελέτη των δυνάμεων κοπής χρησιμοποιείται λογισμικό προσομοίωσης κατεργασιών με πεπερασμένα στοιχεία καθώς και πειραματική μέτρησή τους που έγινε στο εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης σε ρεαλιστικές συνθήκες κοπής. Ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής έγινε για συγκεκριμένες τιμές ταχύτητας κοπής καθώς και για συγκεκριμένο αριθμό κοπτικών άκμων. Ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης και της εκτέλεσης της πειραματικής διαδικασίας εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των δυνάμεων κοπής με τη χρήση ενός μόνο ένθετου πλακιδίου καθώς και των δυνάμεων κοπής με τα χρήση τριών ένθετων πλακιδίων του κοπτικού εργαλείου.

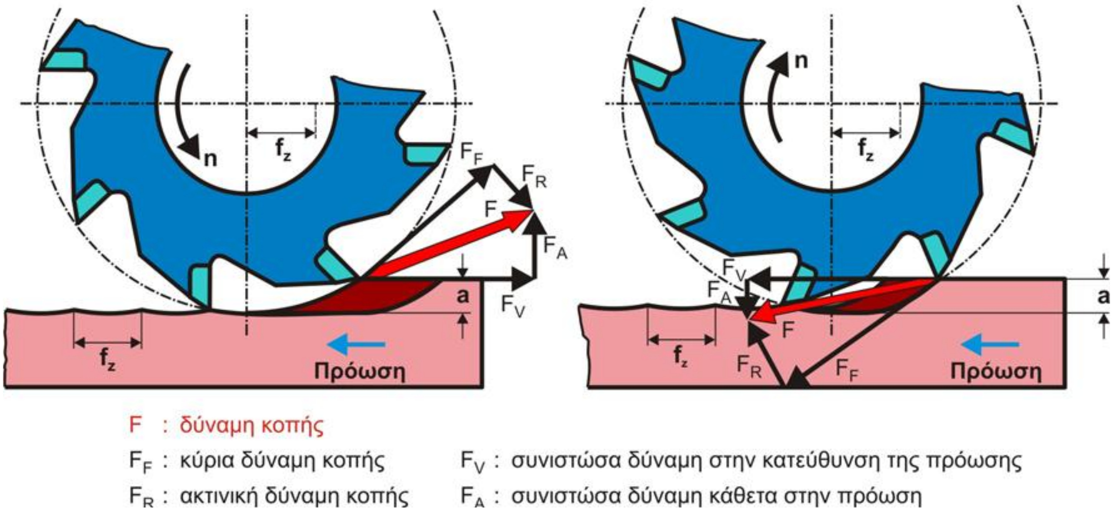
2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ

2.1 Η κατεργασία του μετωπικού φραιζαρίσματος

Η κινηματική της κατεργασίας μετωπικού φραιζαρίσματος αποτελείται από δυο βασικές κινήσεις οι όποιες παρουσιάζονται στο σχήμα 2.1. Όπως φαίνεται στο σχήμα η κατεργασία του μετωπικού φραιζαρίσματος συντίθεται από την περιστροφική κίνηση του εργαλείου και την αξονική κίνηση της τράπεζας της εργαλειομηχανής. Η κίνηση αυτή εξαρτάται από τέσσερις παραμέτρους, οι όποιες είναι το ακτινικό βάθος κοπής (t_{xy}), το αξονικό βάθος κοπής (t_z), την περιφερειακή ταχύτητα κοπής (V_c) και τέλος την πρόωση ανά δόντι (f_z).

Σχήμα 2.1 : Κινηματική μετωπικού φραιζαρίσματος

Ανάλογα με τη φορά περιστροφής του εργαλείου σε σχέση με τη μετατόπισή του και την επαφή του με το κατεργαζόμενο υλικό, μπορεί να κατηγοριοποιηθεί η κατεργασία σε ομόρροπη και αντίρροπη. Στο ομόρροπο φραιζάρισμα το κοπτικό κινείται στην ίδια κατεύθυνση με την πρόωση στη θέση κοπής, ενώ αντίθετα με αυτήν στην περίπτωση του αντίρροπου φραιζαρίσματος. Η κατηγοριοποίηση αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2



Σχήμα 2.2 : Ομόρροπο και αντίρροπο φραιζάρισμα και κατεύθυνση των δυνάμεων κοπής

Η κατεργασία του μετωπικού φραιζαρίσματος χρησιμοποιείται κυρίως στις αρχικές φάσεις της κατεργασίας ενός τεμαχίου για την αφαίρεση μεγάλων όγκων υλικού του τεμαχίου (φάση εκχόνδρισης) και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται κοπτικά με σχετικά μεγάλη διάμετρο. Για τη μείωση του χρόνου κατεργασίας χρησιμοποιούνται συνήθως αρκετά μεγάλες προώσεις με αποτέλεσμα την παράγωγη υψηλών δυνάμεων κοπής που καταπονούν το κοπτικό. Για τους δύο παραπάνω λόγους στη συγκεκριμένη κατεργασία είναι απαραίτητη η χρήση επικαλυμμένων ένθετων πλακιδίων στα κοπτικά εργαλεία. Τα κοπτικά εργαλεία, ανάλογα με τη διάμετρο τους, μπορεί να έχουν από 2 μέχρι και 40 επικαλυμμένα ένθετα πλακίδια. Τα υλικά των επικαλύψεων ποικίλουν αλλά συνήθως είναι είτε κεραμικά (Al_2O_3) είτε καρβίδια ή νιτρίδια του τιτανίου (TiC) (TiN) αναμειγμένα πολλές φόρες με αλουμίνιο (TiAlN) ή και αναμειγμένα μεταξύ τους (TiCN) (TiAlCN).

2.1.1 Υλικά κατασκευής

Σε μια κατεργασία είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γίνει σωστή επιλογή εργαλείου και σε αυτό συντελεί κυρίως το υλικό κατασκευής του. Τρείς είναι οι ιδιότητες του υλικού που καθορίζουν την επιλογή του κοπτικού εργαλείου:

- σκληρότητα
- δυσθραυστότητα
- αντοχή στη φθορά

Εκτός από τις δυνάμεις που πρέπει να αντέχει, το υλικό του κοπτικού οφείλει να μην χάνει τη σκληρότητα του όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία κατά την κατεργασία. Φυσικά στην τελική επιλογή σημασία έχει και το κόστος του υλικού. Τα κυριότερα υλικά κατασκευής κοπτικών εργαλείων είναι τα ακόλουθα:

- **Ανθρακούχοι χάλυβες:** με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0,6 - 1,5% και μικρή περιεκτικότητα σε άλλα στοιχεία (μαγγάνιο, πυρίτιο, χρώμιο κ.λπ.) είναι το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή εργαλείων κοπής. Η χρήση τους στη βιομηχανία είναι πλέων ασήμαντη, αφού η σκληρότητα τους μειώνεται σημαντικά μετά τους 200^oC. Μόνο πλεονέκτημα αποτελεί το χαμηλό τους κόστος.

- **Ταχυχάλυβες (HSS):** είναι ισχυρά κραματομένοι χάλυβες που περιέχουν βολφράμιο και χρώμιο, ενώ το πρώτο συνθετικό του ονόματος τους προήλθε από την αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες και άρα υψηλές ταχύτητες κοπής. Για θερμοκρασίες κατεργασίας μέχρι 600 ^oC και ταχύτητες κοπής μέχρι 50 m/min αποτελούν τη φθηνότερη λύση και μια αξιόπιστη επιλογή.

- **Σκληρομέταλλα:** η εφεύρεση και η εφαρμογή τους έφερε ουσιαστική επανάσταση στην κοπή των μετάλλων. Τα σκληρομέταλλα δεν είναι κράματα μετάλλων, αλλά προκύπτουν σαν προϊόντα κονιομεταλλουργίας από μίγματα καρβιδίων του βολφραμίου (WC), τιτανίου (TiC) και τανταλίου (TaC) και άλλα με συνδετικό υλικό το κοβάλτιο (Co). Τα πλεονεκτήματα τους είναι τα εξής:

  - ✓ Διατηρούν τη σκληρότητα τους σε θερμοκρασίες κοντά στους 1000 ^oC και μπορούν να φτάσουν μέχρι τους 1500 με τις κατάλληλες επικαλύψεις. Έτσι οι ταχύτητες κοπής κυμαίνονται μεταξύ 150 και 600 m/min, ενώ με μικρότερες μπορούν να κατεργαστούν χωρίς προβλήματα βαμμένο χάλυβα.
  - ✓ Έχουν μεγάλη θερμική αγωγιμότητα και έτσι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την κοπή είναι η μικρότερη από τα υπόλοιπα υλικά με ίδια ταχύτητα κοπής.
  - ✓ Έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και όριο διαρροής, είναι δηλαδή πολύ στιβαρά και με μεγάλη αντοχή στη φθορά.

- ✓ Εργάζονται βασικά χωρίς υγρό κοπής γιατί είναι πολύ ευαίσθητα σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Σε περίπτωση που χρειαστεί η χρήση υγρού κοπής τότε αυτό πρέπει να είναι άφθονο.

Καθώς τα σκληρομέταλλα δεν αποτελούν πανάκεια, εμφανίζουν τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- ✓ Είναι ευαίσθητα σε κραδασμούς και απότομες μεταβολές θερμοκρασίας και φορτίων, γι 'αυτό δεν χρησιμοποιούνται σκληρομέταλλα σε διακοπτόμενες κοπές.
- ✓ Το τρόχισμα των ακμών τους απαιτεί μεγάλη προσοχή, γι 'αυτό κατασκευάζονται με άνω της μιας ακμής, ώστε να αποφεύγεται το τρόχισμα και απλώς να αλλάζει η κορυφή του κοπτικού εργαλείου.

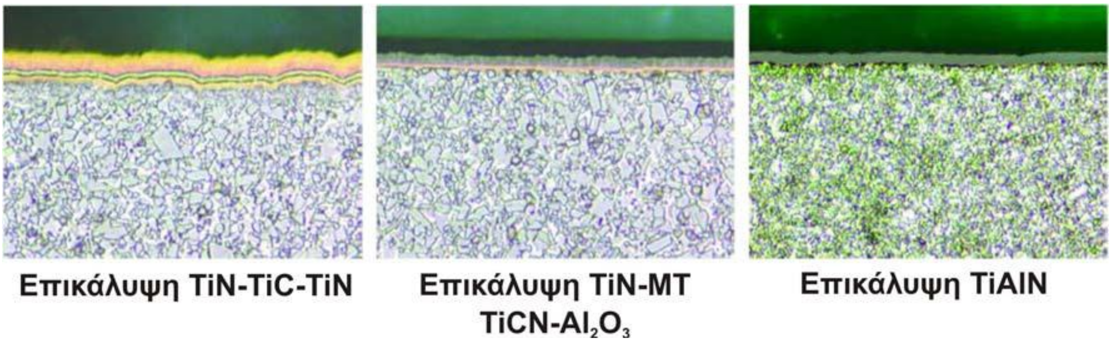
- **Κεραμικά υλικά:** κατασκευάζονται όπως τα σκληρομέταλλα με τη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας, με κύριο συστατικό τη σκόνη τεχνητού κορουνδίου (Al_2O_3) με συνδετικό μέσο μικρά ποσοστά πυρίμαχων οξειδίων Mg και Si. Έχουν περίπου τα ίδια πλεονεκτήματα με τα σκληρομέταλλα, μόνο που τα έχουν σε μεγαλύτερο βαθμό και έτσι η ταχύτητα κοπής μπορεί να είναι έως και δύο φορές μεγαλύτερη. Το κυριότερο μειονέκτημα τους είναι η πολύ μικρή δυσθραυστότητα, κάτι που τα κάνει επιρρεπή σε καταστροφική θραύση. Η χρήση τους πάντως συνεχώς αυξάνεται, παρόλο το υψηλό κόστος τους και τη μικτή αντοχή τους σε διακυμάνσεις μηχανικές ή θερμικές.

- **Διαμάντι:** έχει απεριόριστη (πρακτικά) διάρκεια ζωής και παρουσιάζει σχεδόν τα ίδια πλεονεκτήματα με τα κεραμικά υλικά. Όμως δεν αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες κοπής (μέχρι 800 ^{o}C) και έτσι χρησιμοποιείτε σε κοπές πολύ υψηλής ταχύτητας αλλά με πολύ μικρό βάθος κοπής (ιδανικό για φινίρισμα).

- **CBN (Κυβικός Βοριονιτρίτης):** είναι μια αλλοτροπική μορφή του βοριονιτρίτη και παρασκευάζεται με μεθόδους υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων. Είναι συνθετικό υπέρσκληρο υλικό, δεύτερο κατά τάξη σκληρότητας μετά το διαμάντι. Υπερέχει όμως έναντι αυτού στο γεγονός ότι δεν οξειδώνεται στον αέρα και ότι αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες. Το κυριότερο μειονέκτημα του είναι το κόστος του, που είναι 50 - 60 φορές μεγαλύτερο εκείνου του σκηρομετάλλου.

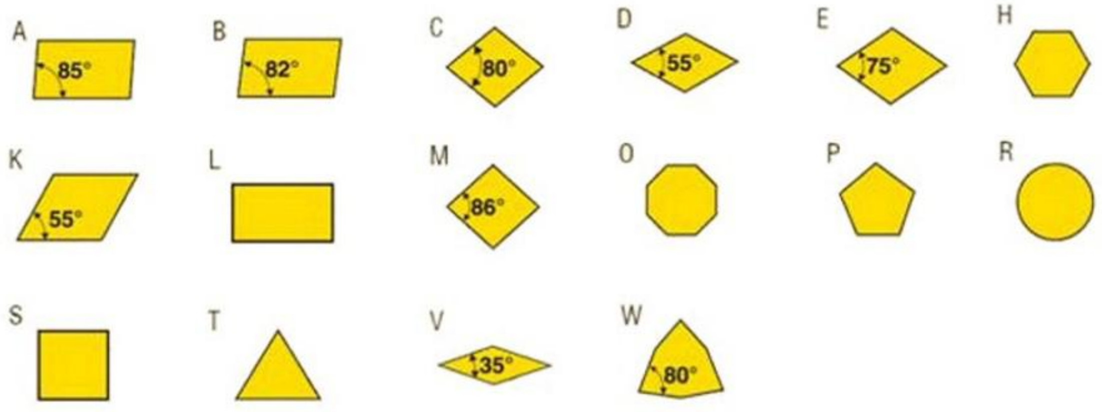
2.1.2 Επικαλύψεις

Οι επικαλύψεις των κοπτικών αποτελούνται από κράματα μετάλλων, όπως κράματα τιτανίου, χρωμίου, ζιρκονίου καθώς και αλουμίνα σε πολυστρωματική και μονοστρωματική μορφή. Εκτός από κράματα μετάλλων, συχνή είναι η επικάλυψη κοπτικών πλακιδίων με πολυκρυσταλικό τεχνητό διαμάντι (Polycrystalline diamond), καθώς και μονοκρυσταλικό διαμάντι. Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται μια σειρά από τέτοιες επικαλύψεις.



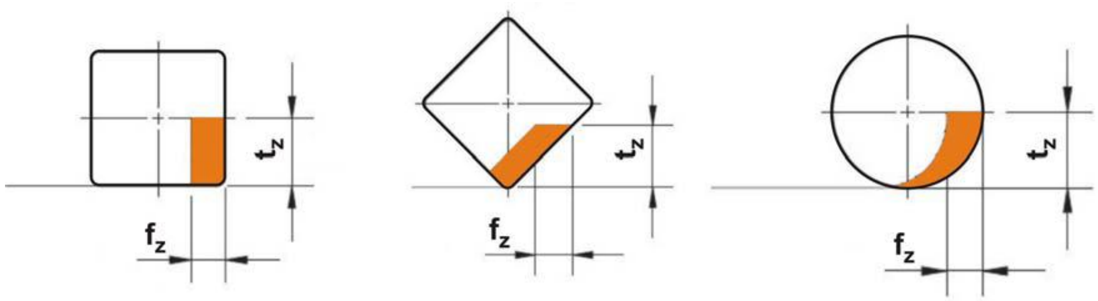
Σχήμα 2.3 : Παραδείγματα επικαλύψεων ενθέτων πλακιδίων

Η μορφή των ενθέτων πλακιδίων έχει προσδιοριστεί με βάση το ISO 1832 -1991. Οι μορφές αυτές δεν είναι απαραίτητο να ακολουθούνται από όλους τους κατασκευαστές κοπτικών, αλλά αποτελούν κατευθυντήριες γραμμές. Εκτός από τη μορφή των κοπτικών πλακιδίων στο συγκεκριμένο πρότυπο καταγράφονται πρότυπες τιμές για τη γωνία ελευθερίας (clearance angle), τις ανοχές στις διαστάσεις του κοπτικού πλακιδίου, τη γεωμετρία της περιοχής συγκράτησης καθώς και πλήθος άλλων πληροφοριών. Οι μορφές των ενθέτων πλακιδίων συμφωνά με το πρότυπο ISO παρουσιάζονται στο σχήμα 2.4.



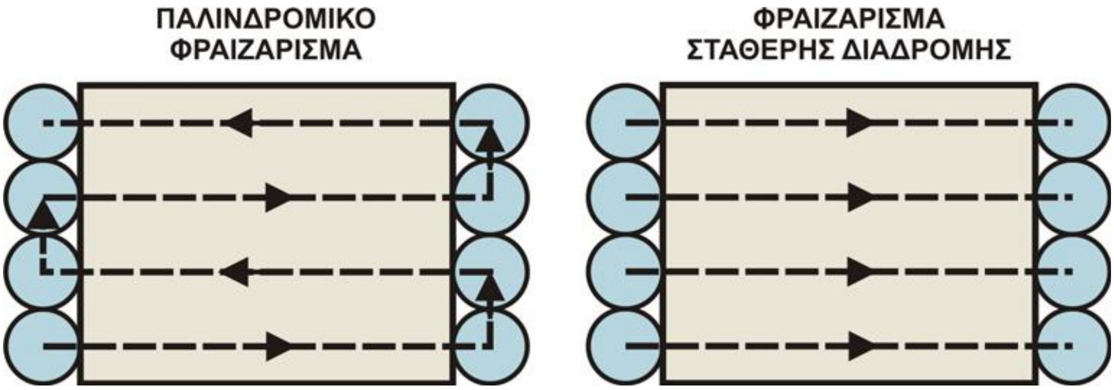
Σχήμα 2.4 : Μορφή ένθετων πλακιδίων σύμφωνα με το ISO 1832 -1991

Η χρησιμοποιούμενη μορφή του πλακιδίου καθώς και η γωνία με την οποία συγκρατείται παίζει καθοριστικό ρολό στη μορφή του παραγόμενου απαραμόρφωτου αποβλίττου, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 : Μορφή απαραμόρφωτου αποβλίττου ανάλογα με τη μορφή του πλακιδίου

Όσον αφορά τη στρατηγική κίνησης του κοπτικού κατά τη διάρκεια της κατεργασίας του προσώπου του τεμαχίου το κοπτικό διατρέχει το δοκίμιο κατά μήκος του ενός άξονα κρατώντας σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια το βάθος κοπής. Οι δυο πιο βασικοί τύποι τέτοιας στρατηγικής παρατίθεται στο σχήμα 2.6 και αφορούν το παλινδρομικό και το απλό φραιζάρισμα. Σημαντική παρατήρηση είναι ότι στο παλινδρομικό φραιζάρισμα η κατεργασία εναλλάσσεται ανάμεσα στο ομόρροπο και το αντίρροπο φραιζάρισμα.



Σχήμα 2.6 : Στρατηγικές κατεργασίας φραιζαρίσματος

<u>2.1.3 Χαρακτηριστικά στοιχεία και μεγέθη κινητήρων κύριας ατράκτου</u>

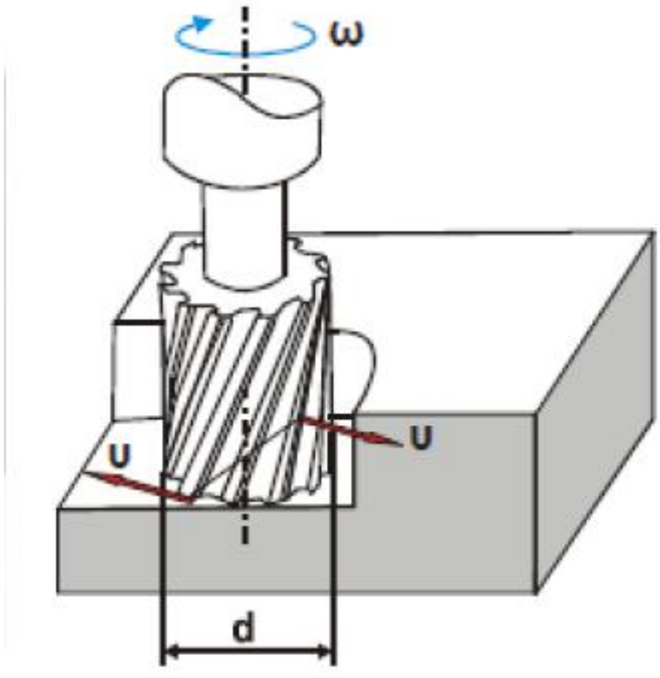
Η βασικότερη παράμετρος που επηρεάζει τις ταχύτητες κοπής και μετατόπισης σε μια κατεργασία συσχετίζεται με τον κινητήρα που κινεί το κοπτικό εργαλείο και είναι η γωνιακή ταχύτητα ω (σε rad/sec) η οποία διαφορετικά εκφράζεται και σαν ταχύτητα περιστροφής n του κινητήρα (σε στροφές ανά λεπτό - rpm) συνδεόμενες μεταξύ τους με τη σχέση:

$$\omega = 2 \times \pi \times n / 60 \text{ (rpm)} \quad (2.1)$$

Η ταχύτητα κοπής υ, εκτός από τη γωνιακή ταχύτητα ή την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα κύριας ατράκτου που καθοριστικά επηρεάζονται από την απαιτούμενη ισχύ για την επίτευξη της κοπής, εξαρτάται επίσης και από τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου. Η μαθηματική σχέση που δίνει την ταχύτητα κοπής είναι:

$$\upsilon = \pi \times d \times n / 1000 \text{ (m/min)}, \; n\text{(rpm)}, \; d\text{(mm)} \quad (2.2)$$

όπου d η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου.

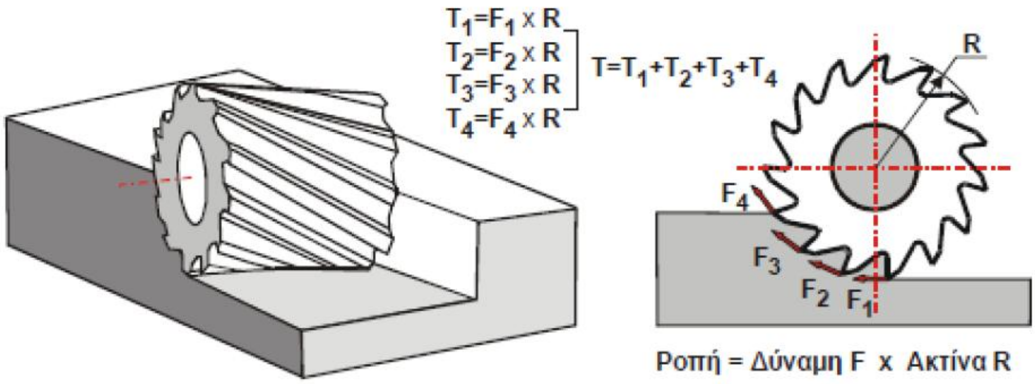


Σχήμα 2.7 : Ταχύτητα κοπής σε κατεργασίες φραιζαρίσματος

Σημαντική επίσης παράμετρος των ηλεκτρικών κινητήρων που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η αποδιδόμενη ισχύς P, η οποία μετριέται σε kWatt και σε Hp. Σε όλες τις περιπτώσεις των κινητήρων δεν ενδιαφέρει τόσο η ισχύς τους ως απόλυτο μέγεθος, όσο η συσχέτισή της ισχύος με τις στροφές λειτουργίας στις οποίες αποδίδεται αυτή. Για τη συσχέτιση αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η αναπτυσσόμενη ροπή στρέψεως Τα που μετριέται σε Nm και εκφράζεται από τη σχέση:

$$T = P / \omega \text{ (Nm)} \quad (2.3)$$

Η ροπή στρέψεως ενός κινητήρα εκφράζει τη δυνατότητα υπερνίκησης μιας αντίστοιχης ανθιστάμενης ροπής. Στην περίπτωση του κινητήρα κύριας ατράκτου μιας εργαλειομηχανής, η ροπή που πρέπει να υπερνικηθεί, οφείλεται στην αντίσταση κοπής, δηλαδή στην κάθετη δύναμη κοπής. Η ροπή αυτή περιγράφεται στο σχήμα 2.8 για το φραιζάρισμα, ως η συνολική ροπή που προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους ροπών που οφείλονται στις αντίστοιχες δυνάμεις κοπής (ανά δόντι κοπτικού).



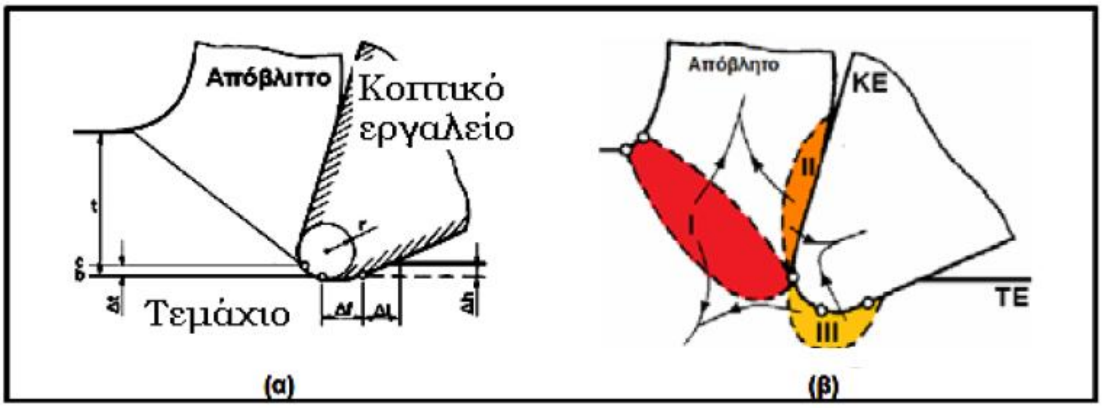
Σχήμα 2.8: Χρησιμοποίηση της ροπής για την υπερνίκηση της αντίστασης κοπής

2.1.4 Εκλυόμενη θερμότητα και αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την κοπή των μετάλλων

Η παραγόμενη θερμότητα κατά την κοπή είναι μία από τις κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν σημαντικά τη σωστή διεξαγωγή της κοπής και αυτό γιατί η θερμότητα επηρεάζει τις δυνάμεις κοπής, αυξάνει την ταχύτητα φθοράς του κοπτικού εργαλείου, μειώνει τη διάρκεια ζωής του,προκαλεί θερμική καταπόνηση στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, κ.ο.κ.

Στις κατεργασίες κοπής συνυπάρχουν και οι τρεις μηχανισμοί μεταφοράς της θερμότητας, δηλαδή με επαφή, αγωγή και ακτινοβολία. Η μεταφορά θερμότητας μέσα στο απόβλιττο, το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το κοπτικό εργαλείο και τη μανέλα συγκράτησης πραγματοποιείται με επαφή, η μεταφορά θερμότητας μεταξύ ψυκτικού υγρού/αέρα και αποβλίττου/κοπτικού εργαλείου/τεμαχίου γίνεται με αγωγή, ενώ η ακτινοβολία είναι περιορισμένη στις συμβατικές κατεργασίες κοπής. Λόγω της πολυπλοκότητας του θερμικού προβλήματος κατά την κοπή, για μια πρώτη προσέγγιση του, απαιτείται να γίνουν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Σχεδόν το σύνολο (90% - 100%) της μηχανικής ενέργειας που καταναλώνεται κατά την κοπή μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια.
- Στη γενική περίπτωση κοπτικού εργαλείου με στρογγυλεμένη κόψη, υφίστανται τρεις περιοχές που λειτουργούν ως πηγές θερμότητας κατά την κοπή: Η πρωτεύουσα ζώνη (I) (έργο διάτμησης), η δευτερεύουσα ζώνη (II) (έργο τριβής) και η περιοχή τριβής στο καμπύλο τμήμα του κοπτικού εργαλείου (III) (επιφάνεια επαφής τεμαχίου κοπτικού εργαλείου), σχήμα 2.9.

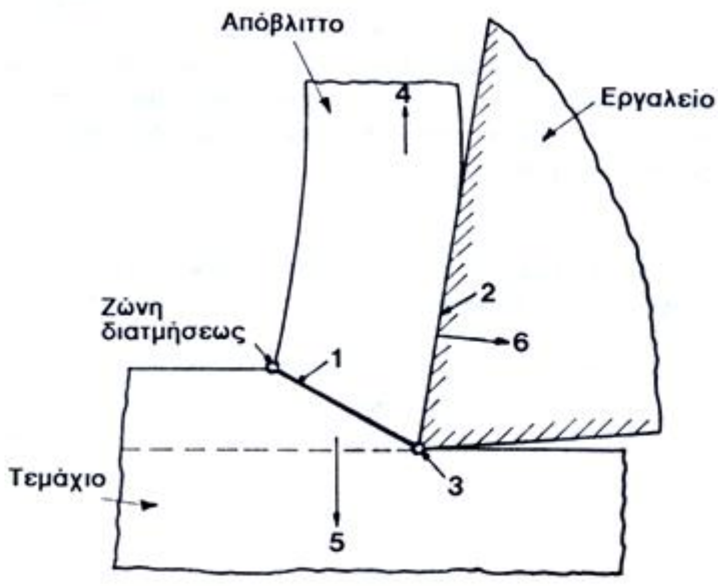


Σχήμα 2.9: Περιοχές παραγωγής θερμότητας κατά την κοπή και η συμβολή κάθε ζώνης στη διανομή της θερμότητας

Για να ολοκληρωθεί η προσέγγιση ενός τόσου σύνθετου φαινομένου, θα πρέπει να καθοριστούν και κάποιες οριακές συνθήκες. Σε χαμηλές ταχύτητες κοπής, ο ρυθμός απαγωγής της παραγόμενης θερμότητας είναι περίπου ίσος με το ρυθμό έκλυσης της και η κοπή μπορεί να θεωρηθεί ως ισόθερμη. Με αύξηση της ταχύτητας κοπής, ο ρυθμός απαγωγής της θερμότητας υπολείπεται του ρυθμού έκλυσης της, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου. Τέλος, σε πολύ υψηλές ταχύτητες κοπής, η κοπή μπορεί να θεωρηθεί ως αδιαβατική.

Όπως προαναφέρθηκε, η ενέργεια κοπής μετατρέπεται σε θερμότητα κατά κύριο λόγο στη ζώνη διατμήσεως και κατά δευτερεύοντα στη ζώνη επαφής αποβλίττου και εργαλείου. Επίσης, στις περισσότερες των πρακτικών εφαρμογών, το εργαλείο δεν είναι απολύτως οξύ, τότε παράγεται θερμότητα και στη ζώνη επαφής τεμαχίου - εργαλείου, η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Στην περίπτωση αυτή, η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία επηρεάζει τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες και την κρυσταλλική δομή της επιφανειακής στιβάδας του τεμαχίου.

Με βάση όσα αναφέρθηκαν, η αποβολή και η παραγωγή της θερμοκρασίας αποτυπώνεται στο σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10: Τυπική κατά προσέγγιση διανομή της παραγόμενης, κατά την κοπή των μετάλλων, συνολικής θερμότητας σε συνήθεις ταχύτητες κοπής

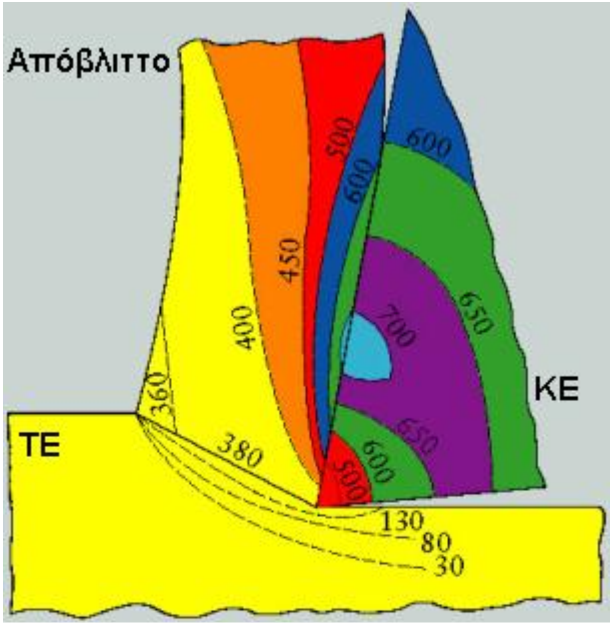
1. 80% της συνολικής ενέργειας κοπής μετατρέπεται σε θερμότητα στη ζώνη διατμήσεως
2. 18% της συνολικής ενέργειας κοπής μετατρέπεται σε θερμότητα στην περιοχή επαφής αποβλίττου - εργαλείου
3. 2% της συνολικής ενέργειας κοπής μετατρέπεται σε θερμότητα στην περιοχή επαφής εργαλείου - τεμαχίου
4. 75% της συνολικής ενέργειας κοπής απάγεται από το απόβλιττο
5. 8% της συνολικής ενέργειας κοπής απάγεται από το τεμάχιο
6. 17% της συνολικής ενέργειας κοπής απάγεται από το εργαλείο

Η θερμοκρασία, κυρίως στη ζώνη τριβής και κατά δεύτερο λόγο στη διεπιφάνεια εργαλείου - τεμαχίου (όταν η φθορά του εργαλείου στην ελεύθερη επιφάνειά του αρχίζει να βρίσκεται σε κάπως προχωρημένο στάδιο), παίζει ρυθμιστικό και κυρίαρχο ρόλο στο ρυθμό φθοράς του κοπτικού εργαλείου, γεγονός που υποβοηθά από τη μία μεριά την επιλογή του κατάλληλου υλικού κατασκευής του εργαλείου και από την άλλη των συνθηκών κοπής ώστε να μειώνεται ο ρυθμός φθοράς του εργαλείου με συνακόλουθη αύξηση της ζωής του. Ορισμένα βασικά συμπεράσματα που έχουν προκύψει από σχετικά πειράματα είναι:

1. Το μέγεθος που ασκεί τη μεγαλύτερη επιρροή στη μέση θερμοκρασία είναι η ειδική αντίσταση κοπής και μάλιστα η επίδρασή της είναι ανάλογη.
2. Τα δύο θερμικά μεγέθη του κατεργαζόμενου υλικού που υπεισέρχονται, δηλαδή η ογκομετρική ειδική θερμότητα και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, κατατάσσονται δεύτερα σε ότι αφορά το βαθμό επιρροής τους στη μέση θερμοκρασία.
3. Η ταχύτητα κοπής επιδρά στη μέση θερμοκρασία εντονότερα από ότι η θεωρητική διατομή του αποβλίττου. Η θερμοκρασία μεταβάλλεται περίπου ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της ταχύτητας κοπής και με την τέταρτη ρίζα της θεωρητικής διατομής του αποβλίττου.

Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζεται η κατανομή των θερμοκρασιών στο εργαλείο, στο απόβλιττο και στο τεμάχιο κατά την κοπή ενός χάλυβα κάτω από τους αναφερόμενους παράγοντες κοπής, όπου φαίνονται και οι θέσεις των αναπτυσσόμενων μέγιστων θερμοκρασιών. Σε αυτό μπορεί να παρατηρηθεί ότι:

- οι θερμοκρασίες είναι κατά πολύ υψηλότερες στο εργαλείο από ότι είναι στο απόβλιττο και φυσικά στο κομμάτι
- οι μέγιστες θερμοκρασίες αναπτύσσονται συνήθως σε θέσεις που απέχουν από την άκρη του εργαλείου. Πολύ συχνά, στη θέση που εμφανίζονται οι μέγιστες θερμοκρασίες αρχίζει να αναπτύσσεται φθορά κρατήρα.



Σχήμα 2.11 : Κατανομή θερμοκρασιών στο απόβλιττο, στο κοπτικό εργαλείο και στο τεμάχιο. Χάλυβας παρόμοιος με SAE 1095, υ = 66 m/min, t,=0,195 mm, γ = 10° με τις θερμοκρασίες να δίδονται σε °C.

2.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

2.2.1 Γενικά

Με το πέρασμα των χρόνων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας όλο και πιο εξειδικευμένα τεχνικά προβλήματα παρουσιάζονταν όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα ήταν ολοένα και πιο σύνθετα. Προκειμένου να λυθούν τέτοιου είδους προβλήματα έπρεπε να γίνει ο προσεγγιστικός υπολογισμός αρκετών και περίπλοκων διαφορικών εξισώσεων. Έτσι αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι επίλυσης των εξισώσεων αυτών.

Στις κατεργασίες, τα διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούνται προσπαθούν να συνδέσουν το αίτιο, δηλαδή τους παράγοντες και τις συνθήκες κοπής μιας κατεργασίας, με το αποτέλεσμα, δηλαδή τις δυνάμεις και τις θερμοκρασίες που θα αναπτυχθούν, τα απόβλιττα, τις παραμένουσες τάσεις, την ακρίβεια επιφανείας και τη φθορά του κοπτικού εργαλείου.

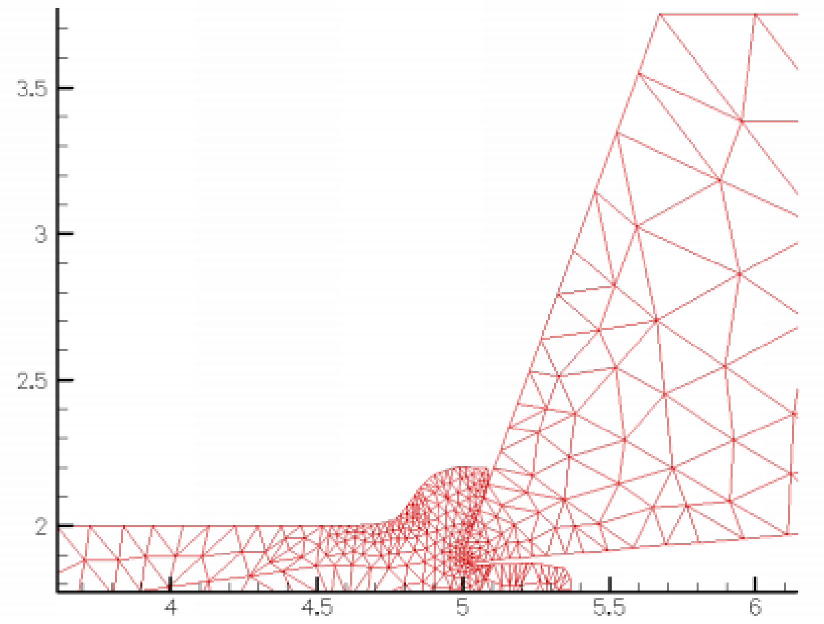
Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια τέτοια αριθμητική μέθοδος η οποία με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, αν και προσεγγιστική, μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και το βασικό της πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να βρει εφαρμογή σε όλα τα προβλήματα.

Λόγω της μεγάλης επιτυχίας της χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως τόσο στην έρευνα όσο και στη βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών.

2.2.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Το 1944 ο Merchant πρότεινε το πρώτο αναλυτικό μοντέλο που έθεσε τα πλαίσια για τη μοντελοποίηση της ορθογωνικής κοπής. Με την εφεύρεση των ηλεκτρονικών υπολογιστών και τη ραγδαία ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος, οι τεχνικές με πεπερασμένα στοιχεία άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως από τους ερευνητές για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας κατεργασιών.

Η μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ξεκινά με τη διακριτοποίηση των συνεχών μέσων της κατεργασίας. Ο χώρος που αυτά καταλαμβάνουν χωρίζεται σε τετράγωνα ή σε τρίγωνα (σε δισδιάστατο πρόβλημα, στο τρισδιάστατο αποτελείται από ανάλογο πλέγμα) και ενώνονται αυτά τα πεπερασμένα στοιχεία με κόμβους. Το πλέγμα που δημιουργείται δεν είναι πάντα ομοιόμορφο. Ειδικά σήμερα μπορούν να κατασκευαστούν πλέγματα πυκνότερα σε περιοχές του χώρου μοντελοποίησης που μας ενδιαφέρουν περισσότερο και αραιότερα σε περιοχές μικρού ενδιαφέροντος, με χρήση ειδικών αλγορίθμων.



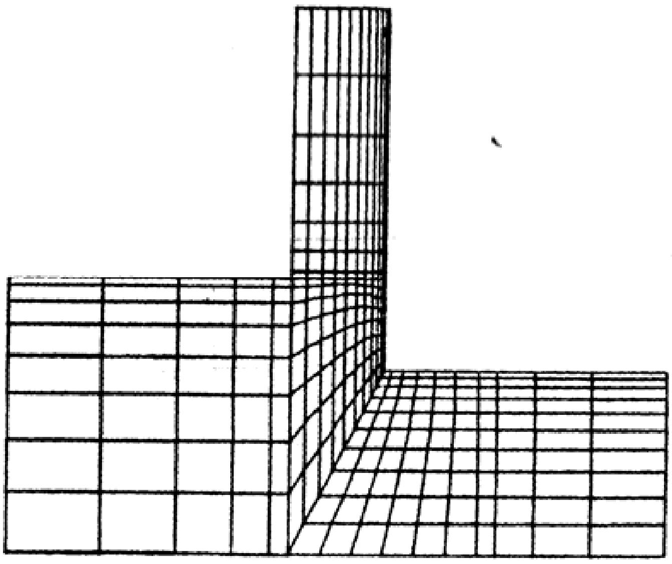
Σχήμα 2.12 : Μοντελοποίηση τεμαχίου και εργαλείου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Στη συνέχεια δίνονται ιδιότητες στα στοιχεία ανάλογα με τις ιδιότητες του μέσου που μοντελοποιούν και καθορίζονται οριακές συνθήκες στους κόμβους. Τέλος λύνονται οι αλγεβρικές εξισώσεις που είναι σε μητρωική μορφή και υπολογίζονται οι τιμές κάθε βαθμού ελευθερίας. Προφανώς όσο περισσότεροι κόμβοι υπάρχουν, τόσο πιο καλά προσεγγίζεται το πραγματικό πρόβλημα που έχει άπειρους (θεωρητικά) κόμβους. Βέβαια ο υπολογισμός κάθε πεπερασμένου στοιχείου απαιτεί υπολογιστικό χρόνο και έτσι δεν είναι δυνατό να αυξηθεί υπερβολικά ο αριθμός των κόμβων αν είναι επιθυμητό το αποτέλεσμα σε λογικό χρόνο. Η χρήση του υπολογιστή επιβάλλεται για τη μοντελοποίηση ενός προβλήματος με τη FEM και εκτός των γρήγορων υπολογισμών μπορεί να δώσει τα αποτελέσματα σε πιο παραστατική μορφή.

Πιο συγκεκριμένα για τις κατεργασίες, δεν είναι πλέον απαραίτητος ο προγραμματισμός όλης της παραπάνω διαδικασίας καθώς κυκλοφορούν αξιόπιστοι εμπορικοί κώδικες. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο μιας ορθογωνικής κοπής θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για την ταχύτητα κοπής, το βάθος κοπής και την πρόωση. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται pre processor. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται solver και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικών μεθόδων. Όταν τελειώσει η επίλυση χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα που αποκαλείται post processor για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα. Τα παραπάνω προγράμματα μπορεί να αποτελούν και επιμέρους τμήματα του ίδιου προγράμματος.

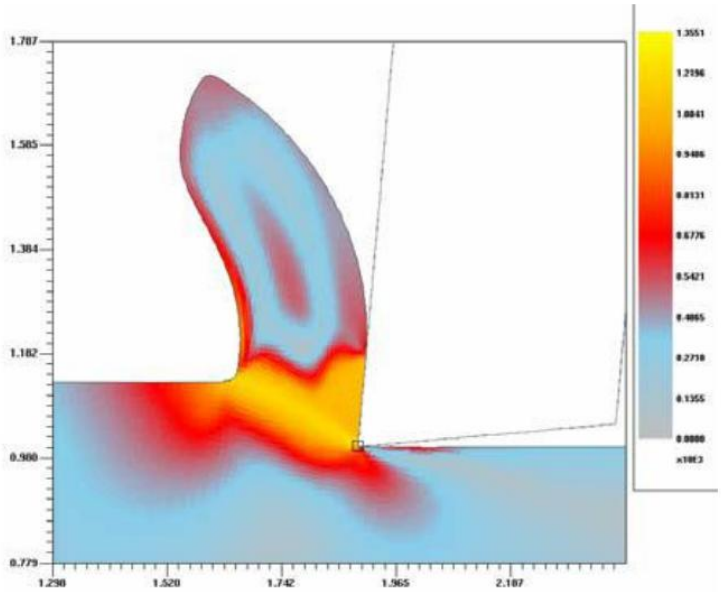
2.2.3 Euler και Lagrange

Δύο είναι οι βασικότερα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση διεργασιών κατεργασίας, του Euler και του Lagrange. Κατά τη διατύπωση του Euler, η οποία εμφανίστηκε πρώτη, το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων είναι χωρικά σταθερό και το υλικό ρέει μέσα από αυτό προκειμένου να προσομοιώσει το σχηματισμό του αποβλίττου. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι η ποσότητα των στοιχείων για τη μοντελοποίηση του τεμαχίου και του αποβλίττου που χρειάζονται για την ανάλυση είναι μικρή, επιτρέποντας τη μείωση του χρόνου ανάλυσης και το γεγονός ότι δεν υφίστανται σοβαρή στρέβλωση, δεδομένου ότι το πλέγμα και επομένως η μορφή του παραγόμενου αποβλίττου είναι εκ των προτέρων γνωστή. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί περίπλοκο προγραμματισμό και ότι τα πειραματικά δεδομένα πρέπει να είναι γνωστά πριν από την κατασκευή του μοντέλου προκειμένου να καθοριστεί η γεωμετρία του αποβλίττου. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ακόμα από μερικούς ερευνητές για την προσομοίωση της σταθερής κατάστασης της διαδικασίας κοπής.



Σχήμα 2.13 : Μοντέλο Euler

Από την άλλη, στη μεταγενέστερη μέθοδο Lagrange, τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα με το υλικό και το εργαλείο έχει προχωρήσει προς το τεμάχιο. Το απόβλιττο σχηματίζεται με τη χρήση ενός κριτηρίου διαχωρισμού μπροστά από την ακμή του εργαλείου. Μέχρι στιγμής γεωμετρικά ή φυσικά κριτήρια έχουν προταθεί με τη συμμετοχή της κρίσιμης απόστασης μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου, των κρίσιμων τιμών για παράδειγμα πίεσης ή παραμόρφωσης, ή ακόμα και κριτήρια διάδοσης της ρωγμής. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου έχει να κάνει με τη μεγάλη παραμόρφωση του πλέγματος που παρατηρείται κατά την προσομοίωση. Λόγω της σύνδεσης του πλέγματος στο υλικό του τεμαχίου το πλέγμα καταστρέφεται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης στη ζώνη κοπής. Για να ξεπεραστεί αυτό συνήθως εφαρμόζεται ένας συνεχής επανασχηματισμός του πλέγματος και μία προσαρμογή του πλέγματος που επιβαρύνουν σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο υπολογισμού. Παρ’ όλα αυτά, η πρόοδος των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει καταστήσει δυνατή τη μείωση του χρόνου που απαιτείται για μια τέτοια ανάλυση σε αποδεκτά πλαίσια.



Σχήμα 2.14 : Μοντέλο Lagrange

Σήμερα, το μοντέλο του Lagrange προτιμάται περισσότερο από το μοντέλο του Euler στον τομέα της έρευνας.

Σημαντικό είναι εδώ να αναφερθεί ότι τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένα συνδυαστικό μοντέλο Lagragnian-Eulerian (ALE) το οποίο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων.

Όλες οι προσπάθειες μοντελοποίησης της μορφής του αποβλίττου στηρίζονται στον τρόπο διαχωρισμού αυτού από το τεμάχιο. Η μέθοδος Lagrange χρησιμοποιεί συνήθως για την περιοχή αποκόλλησης του αποβλίττου από το τεμάχιο την τεχνική του διαχωρισμού των κόμβων με τη μέθοδο διάδοσης ρωγμής, όπου όταν ο τελευταίος κόμβος της κοπτικής ακμής πλησιάζει κοντύτερα από μία απόσταση τον κόμβο του τεμαχίου και ικανοποιούνται ορισμένες φυσικές παράμετροι (θερμοκρασίας και τάσεων), αυτός χωρίζεται σε δύο κόμβους. Επίσης, η μέθοδος Lagrange έχει το μειονέκτημα της υπερβολικής παραμόρφωσης του πλέγματος και έτσι απαιτείται ο συνεχής επαναπροσδιορισμός πλέγματος (remeshing) και η ομαλοποίησή του (smoothening). Και οι δύο τεχνικές υπολογιστικά στοιχίζουν πολύ ενώ παράλληλα απαιτείται και τοπική πύκνωση του πλέγματος (refinement) του πλέγματος του τεμαχίου στο σημείο κάθε φορά που έρχεται σε επαφή με το εργαλείο.

Η αριθμητική επίλυση σε όλες τις μεθόδους λύνει ουσιαστικά την παρακάτω εξίσωση: $M^* = P - I$, όπου M το μητρώο μάζας, η επιτάχυνση του κάθε κόμβου, P η εξωτερικές και I οι εσωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτόν. Για τον υπολογισμό των επιταχύνσεων δεν χρησιμοποιείται πλέον η μέθοδος των συνεχών επαναλήψεων γραμμικών εξισώσεων, αλλά η λύση βρίσκεται με τη χρήση κεντρικής διαφοράς για τη λύση των εξισώσεων κίνησης που δεν είναι γραμμικές και η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται ως άμεση (explicit) . Αυτό συμβαίνει διότι για τις επαφές των πλεγμάτων στις κατεργασίες κοπής το πρόβλημα είναι δυναμικό και θα απαιτούνταν πολλές επαναλήψεις.

2.2.4 Προβλήματα κατά τη μοντελοποίηση

Ένα κύριο πρόβλημα που εμφανίζεται κατά τη μοντελοποίηση των κατεργασιών κοπής προκύπτει από τις συνθήκες επαφής εργαλείου με τεμάχιο ή απόβλιττο. Συνήθως γίνεται χρήση της απλής συνθήκης Coulomb για την τριβή $F = \mu * N$, με F τη δύναμη τριβής, N την κάθετη δύναμη αντίδρασης που σχετίζεται με το βάρος και ο συντελεστής τριβής μ λαμβάνεται σταθερός για μικρές τάσεις που όμως σπάνια συναντούνται στις κατεργασίες κοπής. Σε αυτές ο συντελεστής τριβής δεν είναι σταθερός και εξαρτάται από την ταχύτητα, τη θερμοκρασία και τις δυνάμεις κοπής, σε άγνωστο βαθμό μέχρι στιγμής αν και έχει μελετηθεί εκτενώς. Κάθε μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιεί τη δική της τεχνική υπολογισμού του συντελεστή τριβής και μόνο το αποτέλεσμα καθορίζει την ορθότητα των απλοποιήσεων και οριακών συνθηκών που γίνονται. Και όμως, παρόλο που ο μηχανισμός της τριβής κατά την κοπή δεν είναι πλήρως αναλυμένος, από την τριβή καθορίζονται κυρίως οι παραμένουσες τάσεις.

Ένα ακόμη σημαντικό πρόβλημα εντοπίζεται στα πακέτα λογισμικών. Τα εμπορικά λογισμικά πακέτα που διατίθενται σήμερα μπορεί να απλοποιούν κατά πολύ τη μοντελοποίηση των κατεργασιών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων εφόσον μπορούν να λύσουν μη-γραμμικά προβλήματα, όπως για παράδειγμα τα θερμοδυναμικά. Οι παραδοχές που κάνουν όμως, καθώς και οι τρόποι επίλυσης δεν είναι εύκολο να εξεταστούν τις περισσότερες φορές από το χρήστη, κάτι που κάνει το αποτέλεσμα του προγράμματος αρκετά αμφισβητήσιμο. Οι πηγές αυτών των ενδεχομένων λαθών κατά τη μοντελοποίηση μια κατεργασίας κοπής μπορεί να προκύψουν από ανεπαρκή καταχώρηση δεδομένων, υπερβολικές απλοποιήσεις και παραδοχές, λανθασμένες οριακές συνθήκες, αριθμητικές στρογγυλοποιήσεις και προβληματική προσαρμογή του πλέγματος.

Παρά όμως τα προβλήματα, τα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων μπορούν σήμερα να ασχοληθούν με διάφορα είδη συνθηκών φόρτισης όπως για παράδειγμα τάσης-παραμόρφωσης, θερμική, ηλεκτρική, να κάνουν ανάλυση της δυναμικής των ρευστών ή και να κάνουν συνδυαστικά ανάλυση με παραπάνω από μία από τις προαναφερθείσες συνθήκες φόρτισης στο ίδιο μοντέλο. Παρέχουν δε δισδιάστατες ή και τρισδιάστατες αναλύσεις.

Ένα από τα πιο αξιόπιστα λογισμικά το οποίο μπορεί να προσομοιώσει κατεργασίες κοπής είναι το DEFORN 3D της εταιρίας Scientific Forming Technologies Corporation το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής και περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΣΚΟΠΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

3.1 Γενικά

Οι απαιτήσεις για μηχανολογικά προϊόντα καλύτερης ποιότητας και υψηλής ακρίβειας τα οποία μορφοποιούνται μέσω κατεργασιών με αφαίρεση υλικού καθώς και η επιδίωξη ελαχιστοποίησης του κόστους παραγωγής σε συνδυασμό με την ολοένα αυξανόμενη ποικιλία και πολυπλοκότητα των κατεργασμένων τεμαχίων οδήγησαν τα τελευταία χρόνια στην περαιτέρω εξέλιξη και αυτοματοποίηση των εργαλειομηχανών με ψηφιακή καθοδήγηση καθώς και των αντίστοιχων συστημάτων CAD/CAM/CAE. Ιδιαίτερα για τις κατεργασίες κοπής, που αποτελούν την κλασσική μέθοδο παραγωγής προϊόντων από μεταλλικά υλικά, τις τελευταίες δεκαετίες το υψηλό κόστος επέβαλε την αναζήτηση μεθόδων αύξησης της παραγωγικότητας, γεγονός που ισοδυναμεί με βελτιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων, ανά περίπτωση, συνθηκών κοπής. Αντίστοιχα, η εξέλιξη των υλικών των κοπτικών εργαλείων και ο μεγάλος ανταγωνισμός, επέτειναν αυτήν την ανάγκη για μεγαλύτερη παραγωγικότητα. Στο ίδιο πλαίσιο, οι αυτοματοποιημένες τεχνολογίες στο χώρο της παραγωγής (CNC, CAD/CAM, FMS, CIM), έχοντας μεγάλο κόστος εγκατάστασης, απαιτούν με τη σειρά τους μεγάλους ρυθμούς παραγωγής προκειμένου να αποσβεστεί αυτό το κόστος.

Προκειμένου όλα αυτά να γίνουν εφικτά και δεδομένου ότι και τα υλικά των κοπτικών εργαλείων έχουν βελτιωθεί σε σημαντικό βαθμό, το κύριο βάρος της σχετικής έρευνας στις μηχανουργικές κατεργασίες εστιάζεται από τη μια πλευρά στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας επιλογής βέλτιστων τεχνολογικών παραμέτρων κοπής πριν από την κατεργασία και από την άλλη στην υιοθέτηση και εισαγωγή κατάλληλων μετροτεχνικών μεθόδων ελέγχου των παραγόντων της κοπής, οι οποίες διασφαλίζουν την ποιότητα της κατεργασίας. Σήμερα λοιπόν, μεγάλο μέρος της έρευνας στην περιοχή των μηχανουργικών κατεργασιών πραγματοποιείται με στόχο την εξέλιξη μοντέλων προσομοίωσης των διαφόρων κατεργασιών κοπής και διαμόρφωσης με χρήση γλωσσών προγραμματισμού, λογισμικών CAD, λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων, έτοιμων λογισμικών προσομοίωσης κ.λπ.

3.2 Λογισμικό

Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο διαθέτει το Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης:

- DEFORM – 3D (έκδοση 6.0),
- H/Y Intel Core 2 Duo CPU E7400 @ 2.80 GHz, 4.0 GB RAM.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο Lagrange και μεθόδους για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων όπως: Τοπική πύκνωση, επαναπλεγματοποίηση και ομαλοποίηση του πλέγματος σε όλη τη διάρκεια της κατεργασίας. Ένα στοιχείο ελέγχεται σε καθορισμένο χρονικό διάστημα και αν έχει ξεπεράσει ένα όριο πλαστικής παραμόρφωσης, τότε επαναπροσδιορίζεται η νέα γεωμετρία του, αν δε είναι απαραίτητο, πραγματοποιείται και ομαλοποίηση.

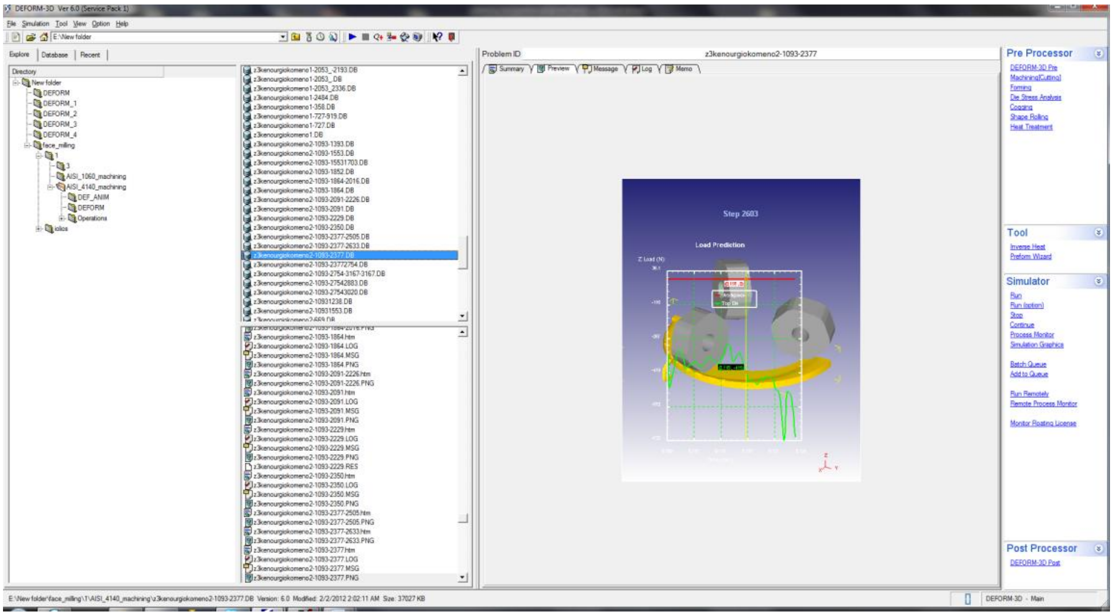
Το απόβλιττο διαχωρίζεται από το τεμάχιο με το κριτήριο της διάδοσης ρωγμής και την πλαστική ροή γύρω από την ακμή του κοπτικού εργαλείου. Το κριτήριο διάδοσης της ρωγμής καθορίζει ότι η τροχιά της ρωγμής διαδίδεται προς τη γωνία, κατά την οποία η τάση παίρνει μία μέγιστη τιμή. Όταν η τιμή αυτή ξεπεραστεί, τότε γίνεται διπλασιασμός των κόμβων στην άκρη της ρωγμής και έτσι δημιουργείται το απόβλιττο.

Η μορφή του αποβλίττου για το αν θα είναι διακοπτόμενο ή όχι, καθώς και το σημείο που αυτό θα σπάσει καθορίζεται από την υπέρβαση της τάσης διαρροής στο σημείο κοπής ή στο απόβλιττο.

3.3 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Στη συνέχεια γίνεται μια γρήγορη παρουσίαση του λογισμικού καθώς και της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τη μοντελοποίηση του προβλήματος.

Ανοίγοντας το πρόγραμμα προβάλλεται η παρακάτω οθόνη. Στην αριστερή στήλη διακρίνονται τα προβλήματα προς επίλυση. Κάθε πρόβλημα μπορεί να περιέχει επιμέρους υποπροβλήματα. Τα υποπροβλήματα αυτά εμφανίζονται στην αμέσως επόμενη στήλη. Καθώς και τα αρχεία που δημιουργούνται κατά την επίλυση του κάθε προβλήματος. Αμέσως μετά παρουσιάζεται ένα παράθυρο όπου ο επιλύτης κατά την εκτέλεση του επιστρέφει την πορεία των υπολογισμών του. Τέλος, υπάρχει η μπάρα από όπου μπορεί να επιλεχτεί η λειτουργία του προ ή μετά-επεξεργαστή. Επίσης, από το παράθυρο “simulation graphics” γίνεται ο χειρισμός της προσομοίωσης καθώς και ο έλεγχος της πορείας των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3.1 : Κυρίως πρόγραμμα

3.3.1 Προ και μετά - επεξεργαστής

Η εμπειρία της βιομηχανίας δείχνει ότι ένα αποτελεσματικό πρόγραμμα FEM μόνο του δεν αρκεί να αποτελέσει ένα πρακτικό εργαλείο προσομοίωσης. Η εισαγωγή δεδομένων και εύκολη ανάκτηση των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη για ένα πρακτικό εργαλείο προσομοίωσης FEM, δεδομένου ότι η προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει ένα σχετικά μεγάλο όγκο πληροφοριών. Η προετοιμασία των δεδομένων για οποιοδήποτε πρόγραμμα FEM είναι μια χρονοβόρα διαδικασία. Ο προ-επεξεργαστή του προγράμματος DEFORM έχει σχεδιαστεί να διευκολύνει τους χρήστες στην προετοιμασία και την επαλήθευση των δεδομένων εισόδου.

Τα απαιτούμενα δεδομένα εισαγωγής που είναι απαραίτητα για τη διεξαγωγή προσομοίωσης FEM, εκτός από τη διακριτοποίηση, περιλαμβάνει:

- τις ιδιότητες των υλικών, όπως την τάση διαρροής ως συνάρτηση της παραμόρφωσης, του ποσοστού παραμόρφωσης και τις θερμοκρασίας καθώς και τις θερμικές ιδιότητες ως συνάρτηση της θερμοκρασίας
- τις ιδιότητες της διεπαφής όπως το συντελεστή τριβής και το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
- οριακές συνθήκες, όπως περιγραφές των κινήσεων και την πάκτωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου

- τις αρχικές συνθήκες, όπως η αρχική θερμοκρασία κ.λπ.

Για να διευκολυνθεί ο χρήστης κατά την εισαγωγή αυτών των δεδομένων, ένα διαδραστικό περιβάλλον παρέχεται από τον προ-επεξεργαστή του DEFORM για να επιτρέψει στο χρήστη να εξετάσει και να τροποποιήσει τα δεδομένα αυτά. Επίσης παρέχεται και έλεγχος των δεδομένων όποτε είναι δυνατόν. Εν ολίγοις, το πρόγραμμα για την εισαγωγή των δεδομένων έχει σχεδιαστεί για να διευκολύνει και να αυτοματοποίηση χρονοβόρες εργασίες όσο το δυνατόν περισσότερο, παρέχοντας ταυτόχρονα αρκετή ευελιξία για να επιτρέπουν στο χρήστη να προβεί στις απαραίτητες τροποποιήσεις των δεδομένων.

Ο μετά-επεξεργαστής του προγράμματος παρέχει τρεις βασικές λειτουργίες:

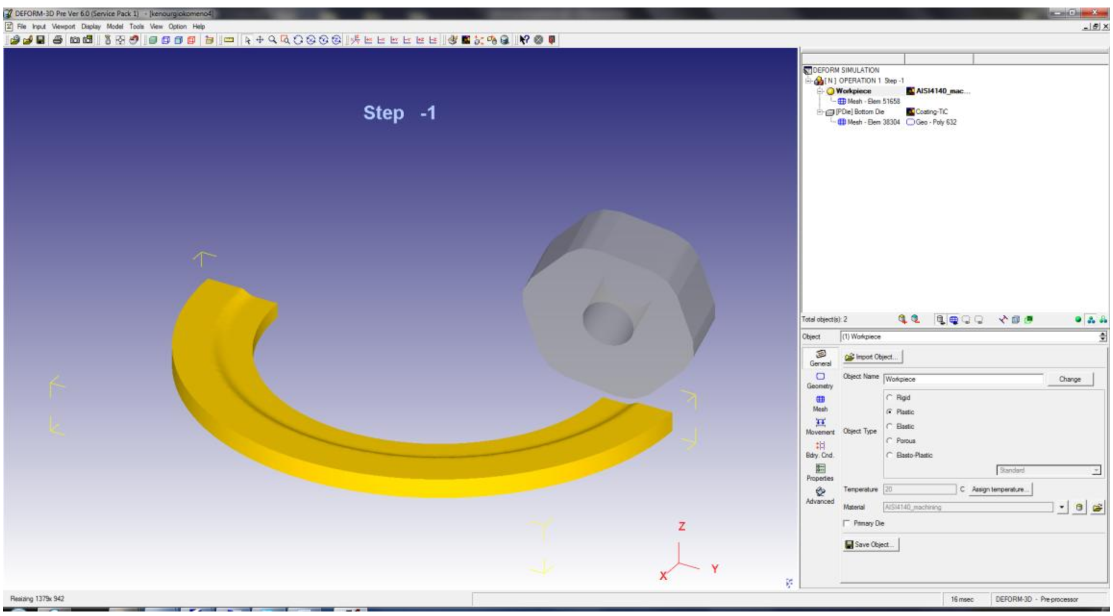
- αλφαριθμητική έξοδος των αποτελεσμάτων για την επιθεώρηση τους από τους χρήστες
- αλφαριθμητική έξοδος των αποτελεσμάτων για CAD / CAM
- γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων

Η γραφική απεικόνιση του μετά-επεξεργαστή περιλαμβάνει βασικά χαρακτηριστικά, όπως

- η απεικόνιση της διακριτοποίησης του FE
- η απεικόνιση της κατανομής της παραμόρφωσης, του ποσοστού παραμόρφωσης, τις τάσεις και τις θερμοκρασίες
- η κατανομή της ταχύτητα
- τα διαγράμματα για το φορτίο στα αντικείμενα μας κ.λπ.

3.3.2 Εισαγωγή δεδομένων στον προ-επεξεργαστή

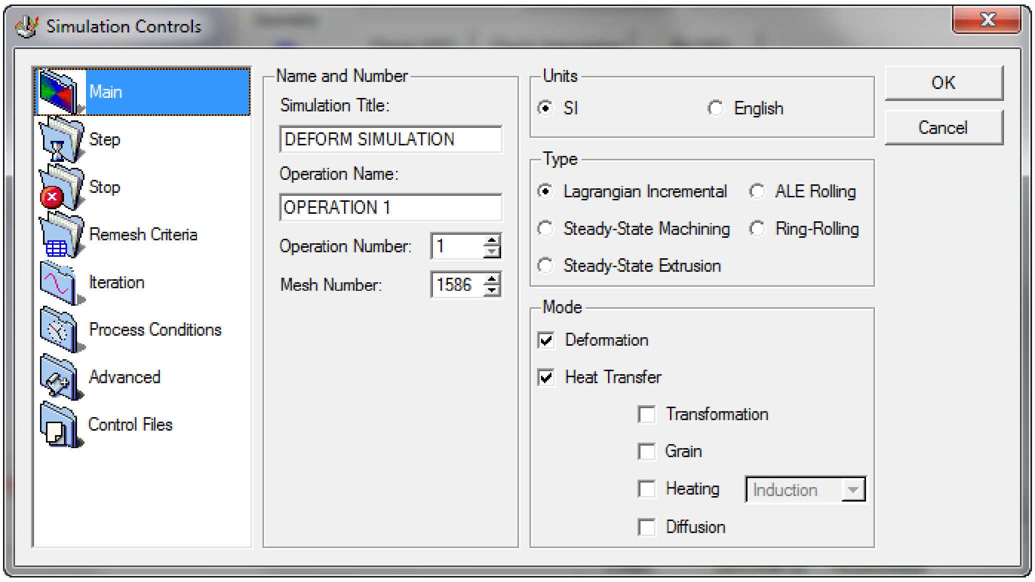
Στην παρακάτω οθόνη φαίνεται το κύριο περιβάλλον διεπαφής του προ-επεξεργαστή. Στην αριστερή οθόνη φαίνεται το στερεό μοντέλο ενώ στη δεξιά οθόνη φαίνονται τα παράθυρα εισαγωγής των δεδομένων του μοντέλου προς προσομοίωση. Τα εικονίδια πάνω από τη αριστερή οθόνη χρησιμεύουν στη διαχείριση του στερεού μοντέλου ενώ τα εικονίδια στα δεξιά χρησιμεύουν στην εισαγωγή των ρυθμίσεων προσομοίωσης, στην εισαγωγή υλικού κατεργασίας, στον καθορισμό των ιδιοτήτων επαφής των αντικειμένων καθώς και στη δημιουργία της βάσης δεδομένων της κατεργασίας τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Σχήμα 3.2 : Κυρίως παράθυρο του προ-επεξεργαστή.

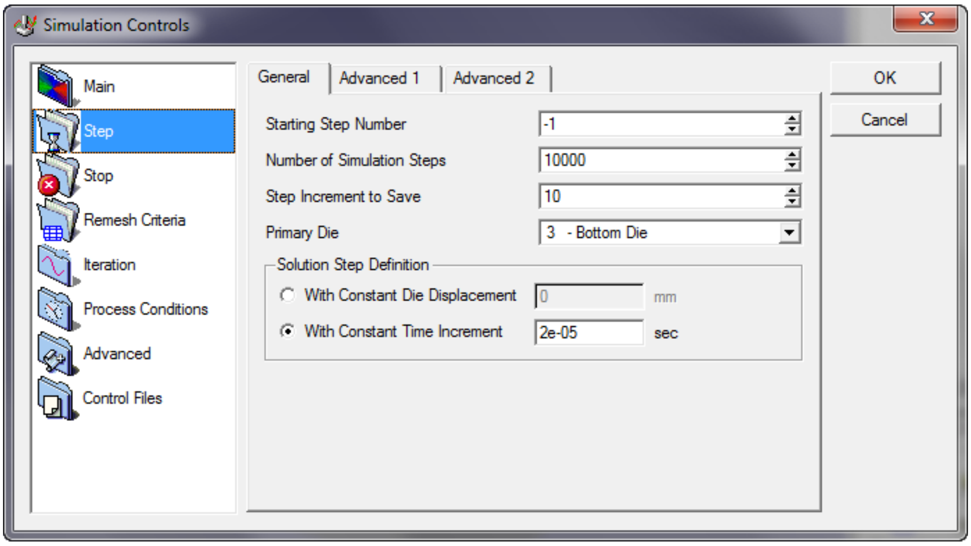
Στο σχήμα 3.3 φαίνονται οι γενικές ρυθμίσεις της προσομοίωσης. Οι κυριότερες από αυτές είναι η επιλογή του συστήματος μονάδων, ο τύπος της προσομοίωσης και η επιλογή της επίλυσης της μετάδοσης θερμότητας κατά την κατεργασία.

Ως προς τη επιλογή για τον τύπο της προσομοίωσης επιδέχθηκε η Lagrangian Incremental καθώς η επιλογή Lagrangian Incremental χρησιμοποιείτε για όλες τις συμβατικές διεργασίες διαμόρφωσης, μεταφορά θερμότητας και στις εφαρμογές θερμικών διεργασιών. Επίσης μεταβατικές φάσεις των διαδικασιών, όπως έλαση, τόρνευση φραιζάρισμα και διέλαση κ.λπ. μπορούν να μοντελοποιηθούν σε αυτό το γενικό πλαίσιο.



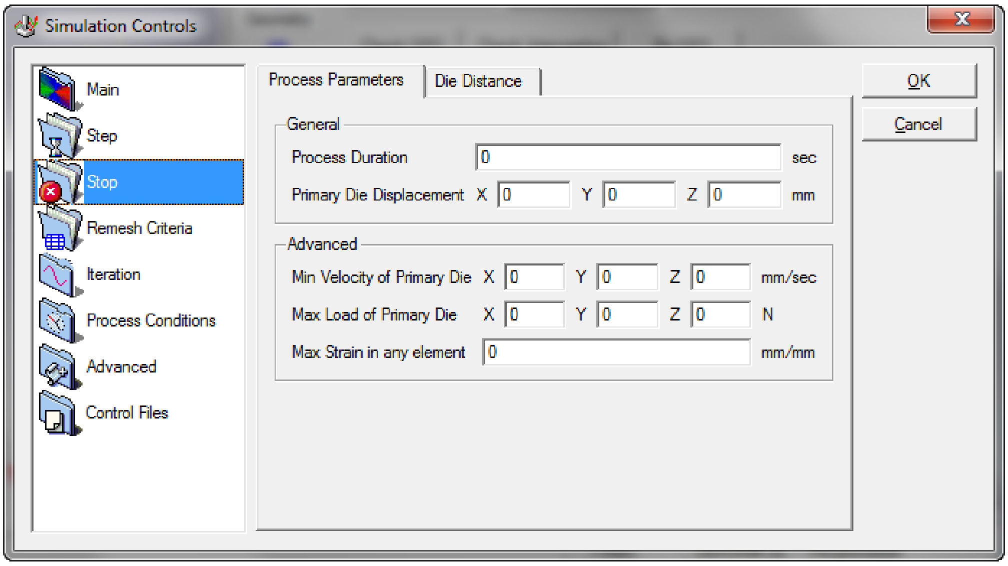
Σχήμα 3.3 : Γενικές ρυθμίσεις προσομοίωσης.

Στο σχήμα 3.4 γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων των βημάτων της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα πρέπει να ορισθεί το αρχικό βήμα (το οποίο πρέπει να είναι αρνητικό) στο οποίο ο επιλύτης υπολογίζει τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος, ο μέγιστος αριθμός των βημάτων της προσομοίωσης, το πλήθος των βημάτων στο οποίο ο υπολογιστής θα αποθηκεύει τα δεδομένα που προκύπτουν από την επίλυση και ποια θα είναι η κύρια μήτρα. Επίσης καθορίζεται το χρονικό βήμα ή η στοιχειώδης μετατόπιση εργαλείου για τη δημιουργία των αποτελεσμάτων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να ελέχθη ότι η μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου μέσα σε ένα βήμα δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μισό του μεγέθους του μικρότερου στοιχείου μας στην περιοχή όπου γίνεται η κατεργασία διότι θα υπάρξει προβλήματα κατά την προσομοίωση.



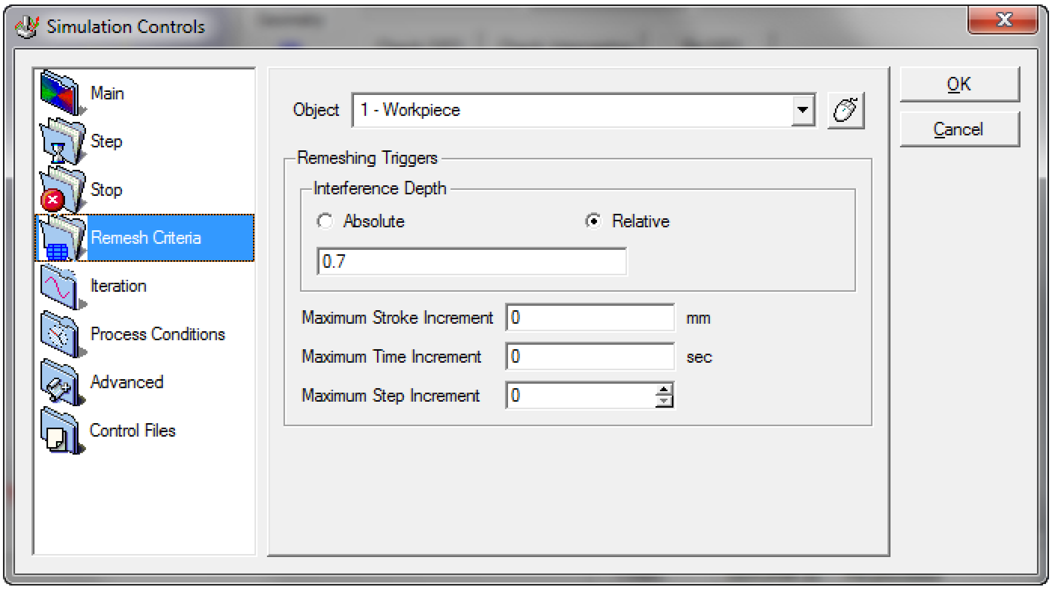
Σχήμα 3.4 : Ρύθμιση των χρονικών βημάτων και των βημάτων εργαλείου

Στο <u>σχήμα 3.5</u> έχουμε την εισαγωγή των κριτηρίων διακοπής της επίλυσης. Ως κριτήρια διακοπής μπορούν να ορισθούν η ελάχιστη ταχύτητα ή το φορτίο του εργαλείου, η μέγιστη παραμόρφωση ή η διάρκεια και στις τρείς κατευθύνσεις.



Σχήμα 3.5 : Εισαγωγή κριτηρίων διακοπής της προσομοίωσης

Στο <u>σχήμα 3.6</u> φαίνεται το παράθυρο εισαγωγής των κριτηρίων αναδιακριτοποίησης. Στα κριτήρια αυτά συμπεριλαμβάνονται τα εξής: Αναδιακριτοποίηση με μέγιστη χρονική αύξηση ή μεταβολής της κίνησης του εργαλείου ή μέγιστου βήματος της διαδικασίας ή απόλυτου ή σχετικού βάθους κοπής (μετρούμενο από το εργαλείο ως το μέγιστο ύψος της ελεύθερης επιφάνειας του τεμαχίου).



Σχήμα 3.6 : Εισαγωγή κριτηρίων αναδιακριτοποίησης

Στο παράθυρο στο σχήμα 3.7 γίνεται η επιλογή του επιλύτη και της επαναληπτικής μέθοδου καθώς και η διαχείριση των σφαλμάτων της επαναληπτικής μεθόδου επίλυσης.

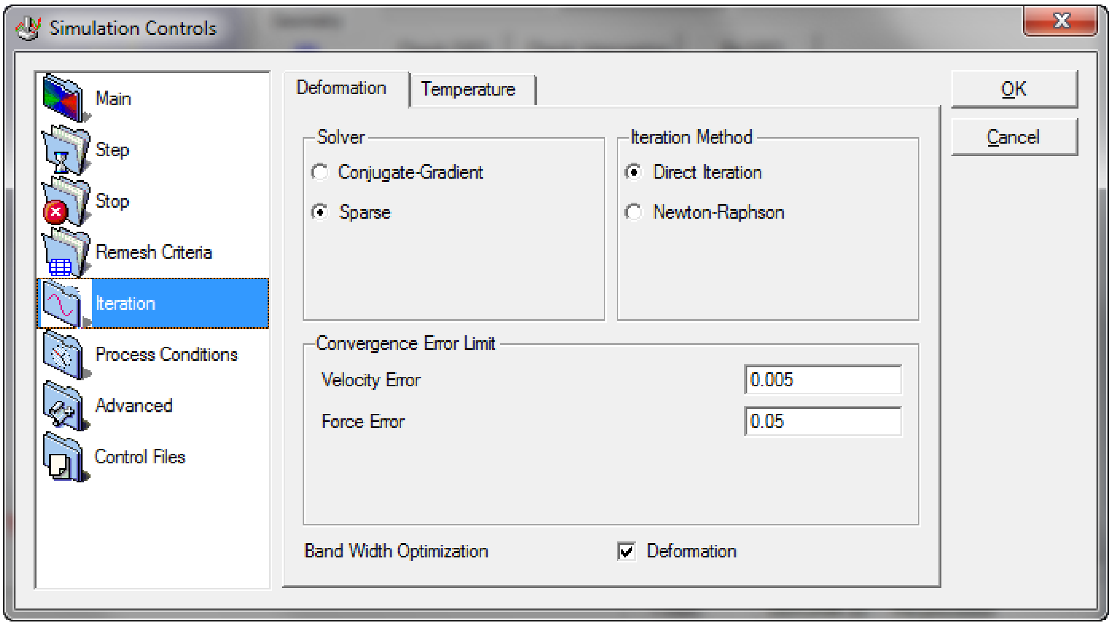
Ο αλγόριθμος επίλυσης αραιών μητρώων είναι μια απευθείας μέθοδος που κάνει χρήση του αραιού μητρώου της FEM μοντελοποίησης για να βελτιώσει την ταχύτητα επίλυσης. Ο επιλύτης συζυγών κλίσεων (conjugate-gradient) προσπαθεί να λύσει το πρόβλημα των πεπερασμένων στοιχείων με την επαναληπτικό μέθοδο προσέγγισης στην επίλυση. Για ορισμένα προβλήματα, αυτός ο επιλύτης προσφέρει τεράστια πλεονεκτήματα σε σχέση με τον επιλύτη αραιών μητρώων. Αυτά τα πλεονεκτήματα έχουν να κάνουν με προβλήματα στα οποία υπάρχει πάρα πολύ μεγάλος αριθμός στοιχείων και στην ουσία προσφέρει πολύ γρήγορη επιλύση.

Επίσης γίνεται επιλογή ανάμεσα σε δύο επαναληπτικές μεθόδους, τη Newton-Raphson και τη μέθοδος απευθείας επίλυσης (Direct).

Η Newton-Raphson συνιστάται για τα περισσότερα προβλήματα, διότι συγκλίνει γενικά με λιγότερες επαναλήψεις από τις άλλες διαθέσιμες μεθόδους. Ωστόσο, οι λύσεις είναι πιο πιθανό να μην συγκλίνουν με τη μέθοδο αυτή από ότι με την άλλη μέθοδο.

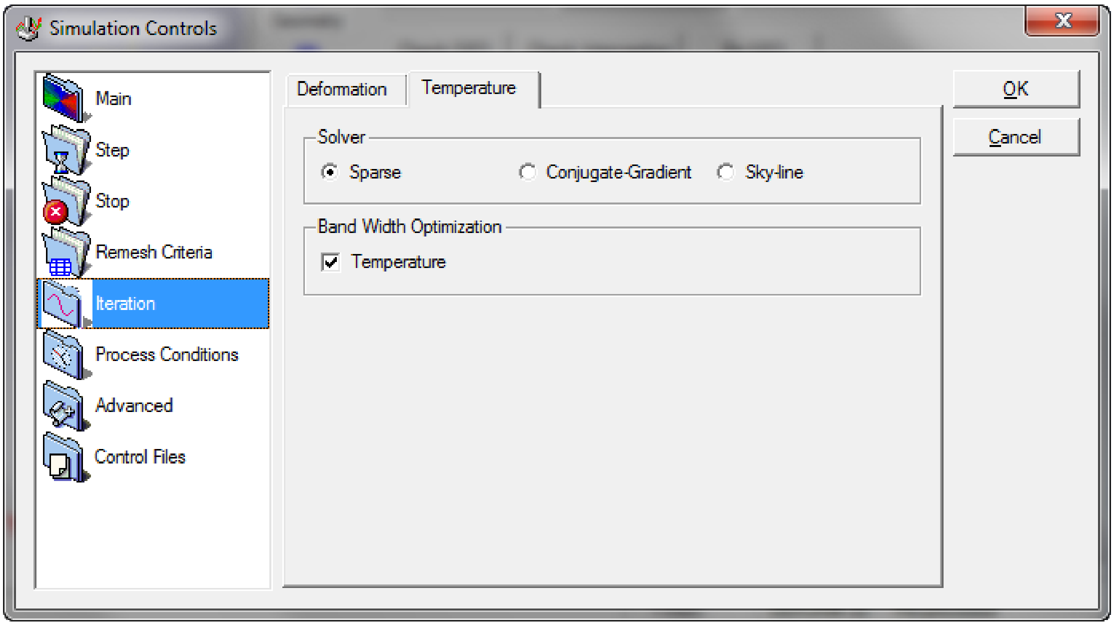
Η μέθοδος απευθείας επίλυσης είναι πιο πιθανό να συγκλίνει στο σωστό αποτέλεσμα σε σχέση με τη μέθοδο Newton-Raphson αλλά απαιτεί γενικά περισσότερες επαναλήψεις. Επίσης σε περίπτωση με πορώδη υλικά, η μέθοδος απευθείας επίλυσης είναι η μοναδική μέθοδος που μπορεί να επιλεχθεί.

Στα προβλήματα που προσομοιώνονται στην εργασία αυτή, τα στοιχεία είναι ανάμεσα 70,000 και 80,000. Για τον λόγο αυτό έγινε χρήση του αραιού επιλύτη (sparse solver) και για επαναληπτική μέθοδο επιλέχτηκε η μέθοδος απευθείας επίλυσης (Direct).



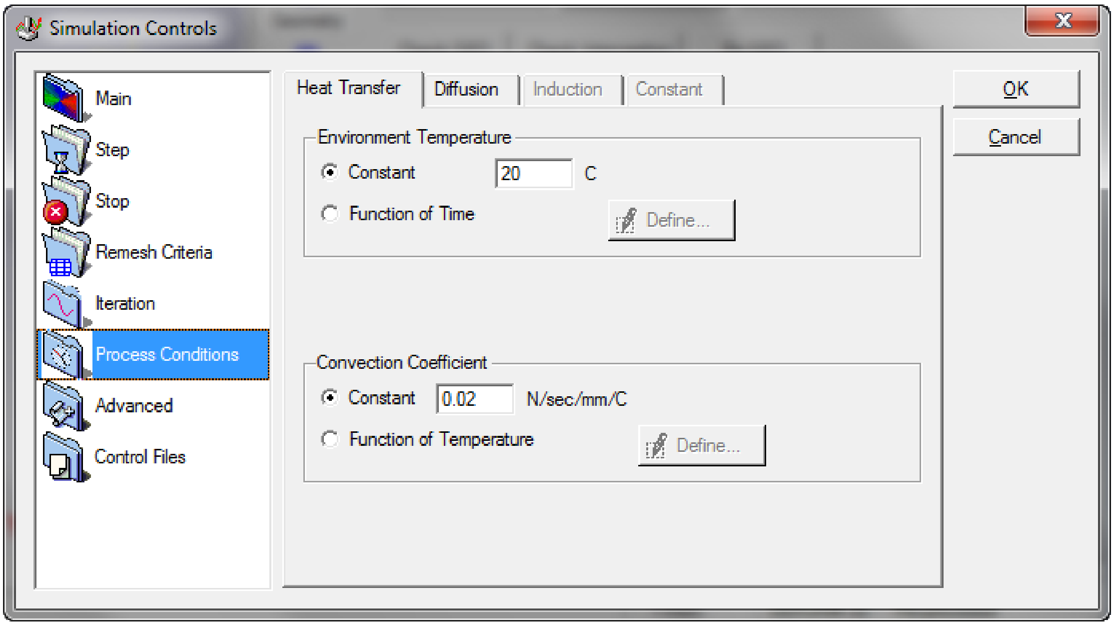
Σχήμα 3.7 : Καθορισμός επαναλήψεων.

Στο παράθυρο στο <u>σχήμα 3.8</u> επιλέγεται ο επιλύτης που υπολογίζει τις θερμοκρασίες κατά την κατεργασία. Στην ουσία ο αραιός λύτης (sparse solver) είναι και ο μοναδικός επιλύτης για προβλήματα με θερμοκρασίες. Επίσης επιλέγεται το Bandwidth optimization. Το Bandwidth optimization βελτιώνει το χρόνο επίλυσης βελτιστοποιώντας τη δομή του πίνακα κατά την επίλυση. Αυτή η επιλογή πρέπει να χρησιμοποιείτε σχεδόν για όλα τα προβλήματα.



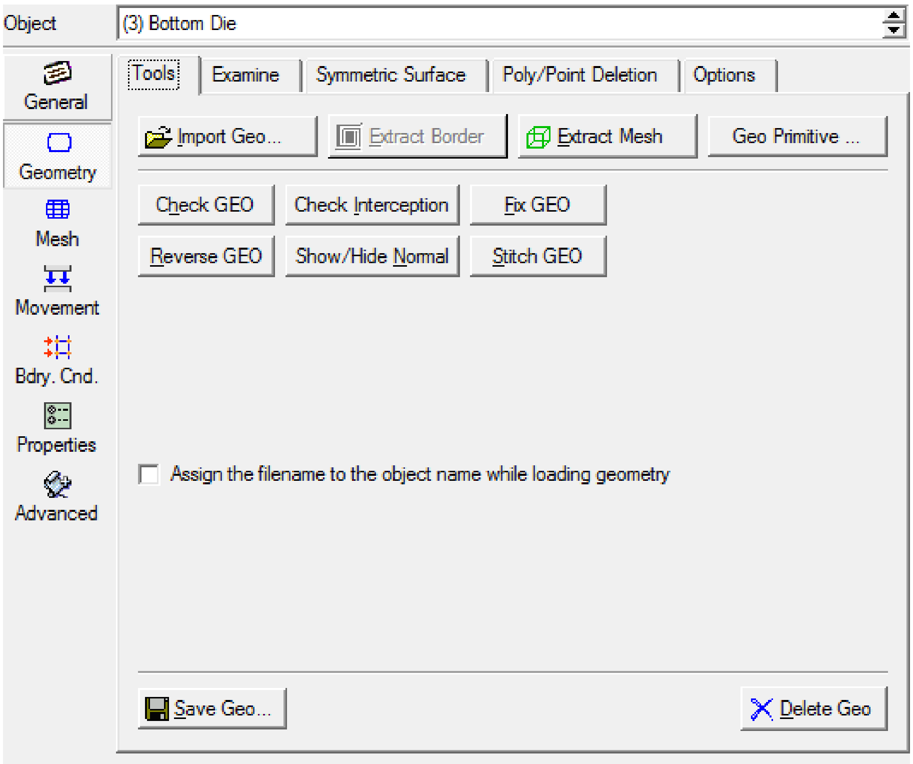
Σχήμα 3.8 : Εισαγωγή των συνθηκών κατεργασίας

Στο παράθυρο στο <u>σχήμα 3.9</u> επιλέγονται οι συνθήκες κατεργασίας όπως θερμοκρασία περιβάλλοντος και συντελεστή μετάδοσης θερμότητας. Οι συνθήκες αυτές μπορούν να είναι σταθερές ή να μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου.



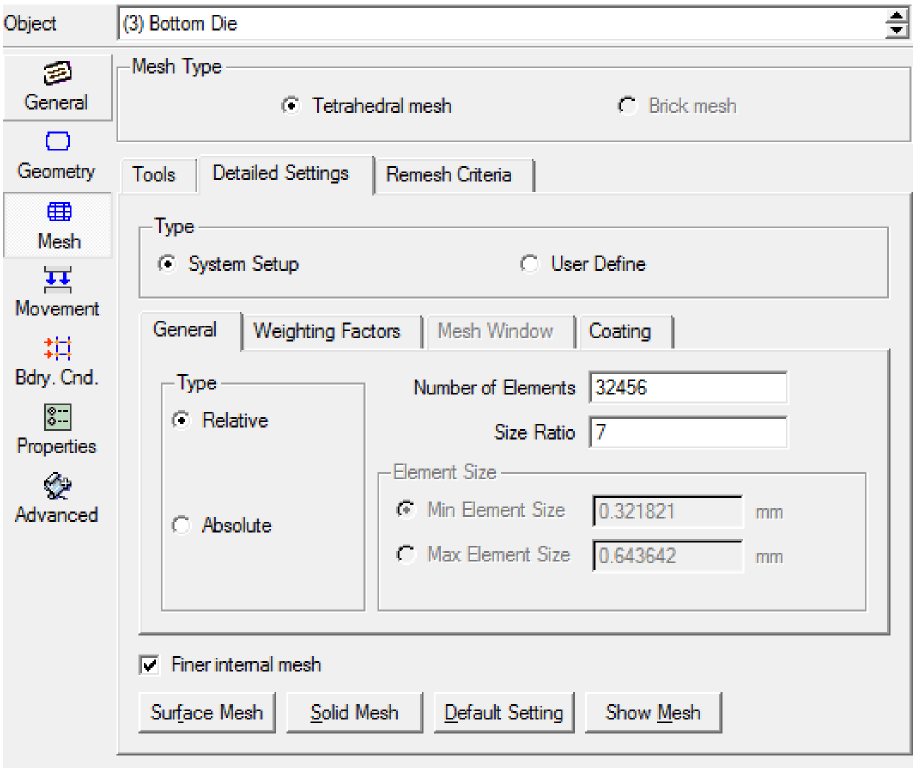
Σχήμα 3.9 : Εισαγωγή των συνθηκών κατεργασίας.

Στο παράθυρο στο <u>σχήμα 3.10</u> μπορεί να εισαχθεί ή να σχεδιαστεί (για απλά ορθογώνια ή κυλινδρικά αντικείμενα) η γεωμετρία του κατεργαζόμενου αντικειμένου. Άλλες επιλογές περιλαμβάνουν τον έλεγχο και την επιδιόρθωση της γεωμετρίας. Στην παρούσα εργασία εισήχθη το αντικειμένο το οποίο σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα Inventor της Autodesk και αποθηκεύτηκε σε μορφή stl.



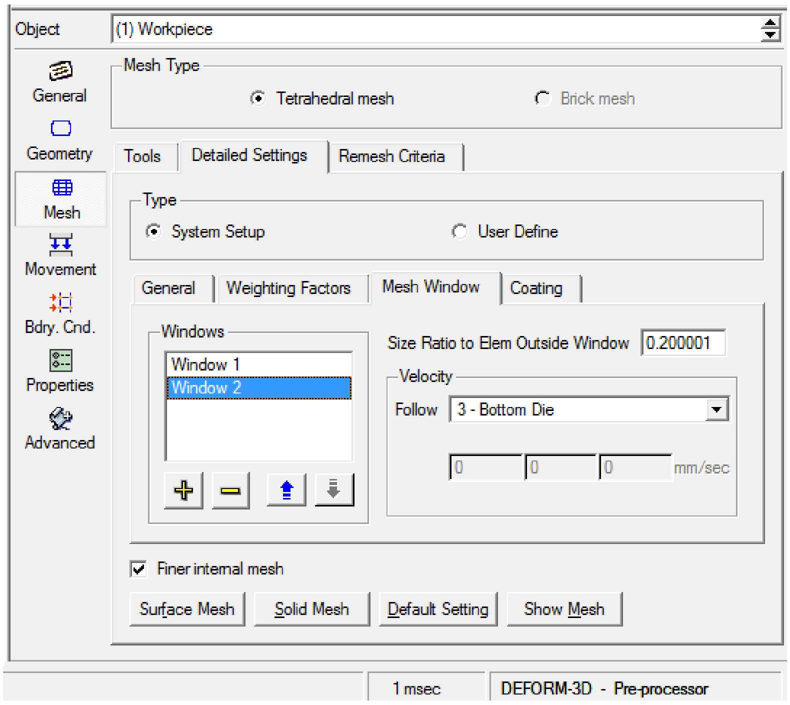
Σχήμα 3.10 : Περιβάλλον εισαγωγής γεωμετρίας

Στο <u>σχήμα 3.11</u> εισάγονται τα κριτήρια με τα οποία δημιουργείται το πλέγμα καθώς και τα κριτήρια αναδιακριτοποίησης. Η διαδικασία της διακριτοποίησης μπορεί να γίνει είτε απόλυτα, ορίζοντας ελάχιστο και μέγιστο μέγεθος στοιχείων καθώς και τον λόγο τους, είτε σχετικά καθορίζοντας απλά το πόσο πυκνό θα είναι το πλέγμα από τον αριθμό των στοιχείων. Για κατεργασίες κοπής ο λόγος αυτός πρέπει να είναι από 7-15.

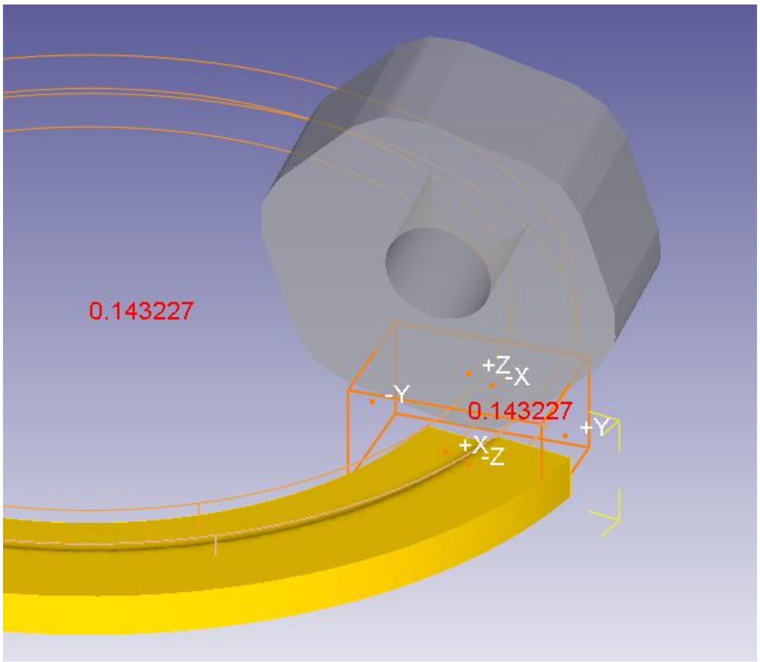


Σχήμα 3.11 : Περιβάλλον δημιουργίας πλέγματος

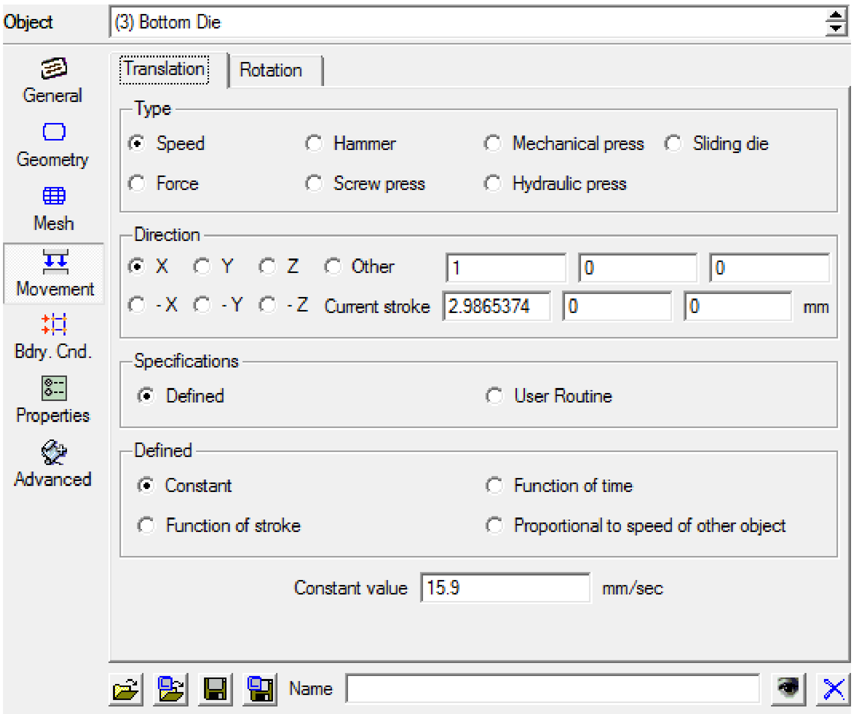
Το πρόγραμμα δίνει επίσης τη δυνατότητα να οριστεί ένα Mesh window σε περιοχή που είναι επιθυμητό να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια. Το παράθυρο αυτό χωρίζει τη συγκεκριμένη περιοχή με πιο πυκνό πλέγμα. Συγκεκριμένα χρησιμοποιηθήκαν δυο παράθυρα. Το ένα είναι ένας κύλινδρος, όπως φαίνετε και στη παρακάτω εικόνα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για μεγαλύτερη διακριτοποίηση πάνω στην κατεργαζόμενη επιφάνεια. Επίσης, εισήχθη και ένα δεύτερο τετράγωνο παράθυρο ακριβώς στην περιοχή οπού γίνεται η επαφή μεταξύ του εργαλείου μας και της κατεργαζόμενης. Στα δυο αυτά παράθυρα ο λόγος των στοιχειών μέσα στα παράθυρα προς αυτόν έξω από τα παράθυρα έχει οριστεί 0,2. Επίσης, τα παράθυρα αυτά ακολουθούν την κίνηση του κοπτικού εργαλείου και στην ουσία κινούνται μαζί.



Σχήμα 3.12 : Περιβάλλον εισαγωγής Mesh window

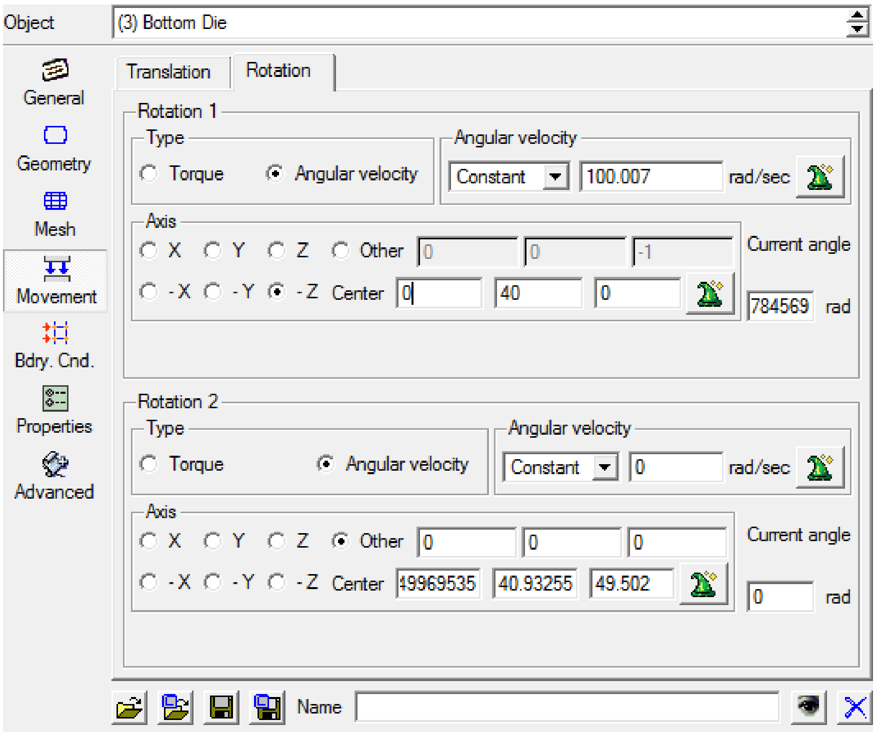


Σχήμα 3.13 : Περιβάλλον μορφοποίησης πλέγματος



Σχήμα 3.14 : Περιβάλλον εισαγωγής της κινηματικής για ευθύγραμμη κίνηση

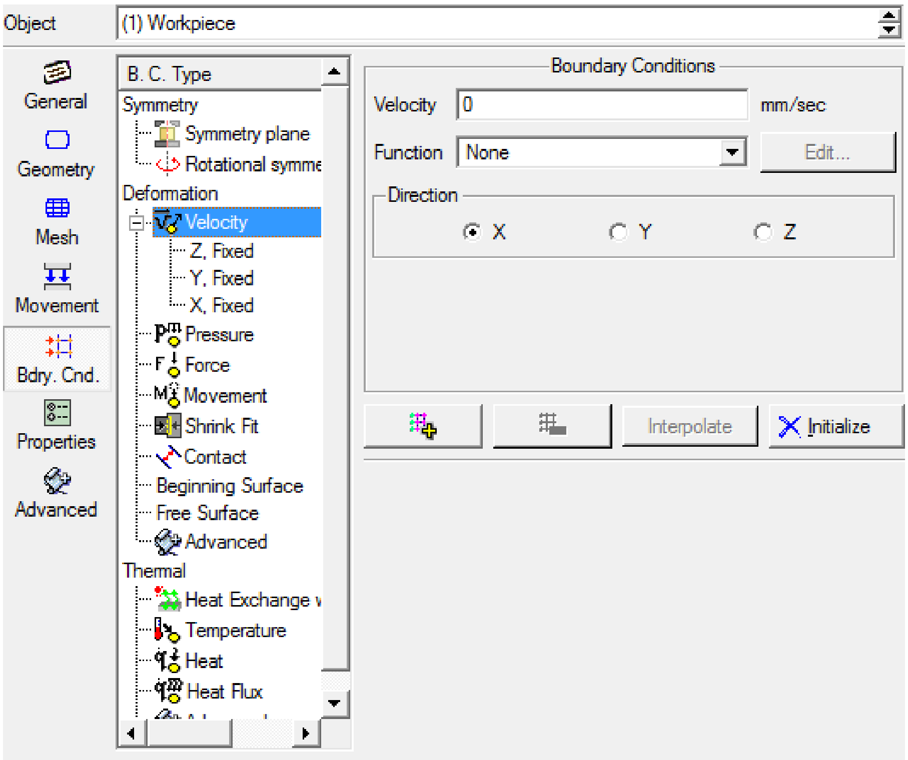
Το παράθυρο στο σχήμα 3.14 επιτρέπει την εισαγωγή κίνησης στα αντικείμενα όπου στην περίπτωσή που εξετάζεται είναι το κοπτικό εργαλείο. Οι κινήσεις μπορούν να οριστούν είτε με μετατόπιση είτε με περιστροφή. Υπάρχουν πολλοί τύποι κινήσεων ανάλογα με την κατεργασία που προσομοιώνεται. Στην περίπτωση αυτή χρειάζεται μια κίνηση μετατόπισης και μια κίνηση περιστροφής. Η κίνηση της μετατόπισης στην εξεταζόμενη περίπτωση είναι η πρόωση και όπως φαίνεται στο σχήμα 3.14 είναι ευθύγραμμη κίνηση στο άξονα x και με πρόωση 15,9 mm/sec. Ενώ στο σχήμα 3.15 παρουσιάζεται η περιστροφή, η οποία είναι η κίνηση περιστροφής του κοπτικού εργαλείου. Επίσης, οι κινήσεις αυτές μπορούν να μην είναι σταθερές αλλά να μεταβάλλονται με τον χρόνο ή με τη μετατόπιση κ.λπ..



Σχήμα 3.15 : Περιβάλλον εισαγωγής της κινηματικής για κυκλική κίνηση

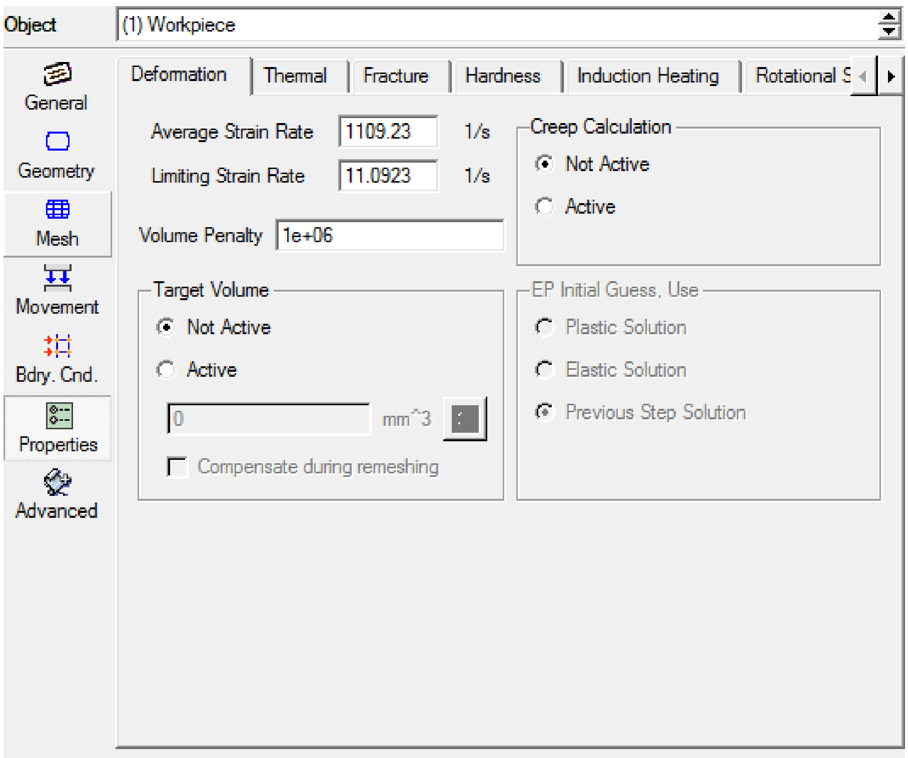
Το παράθυρο του σχήματος 3.16 εισάγονται οι οριακές συνθήκες των αντικειμένων. Σε αυτές περιλαμβάνονται οι συνθήκες ταχύτητας ή αντίστοιχα εισαγωγή πακτώσεων, πίεσης, δυνάμεων, κινήσεων, επαφής, μετάδοσης θερμότητας κ.λπ.0

.



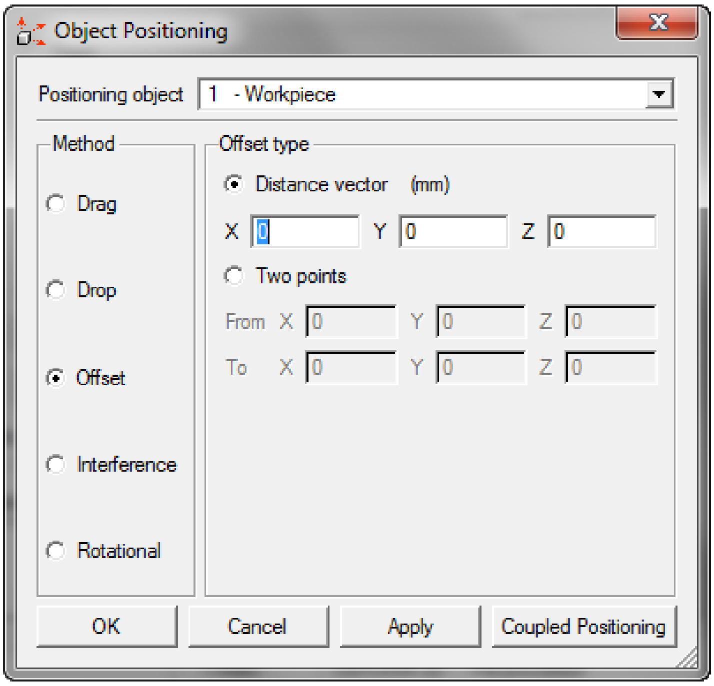
Σχήμα 3.16 : Περιβάλλον εισαγωγής οριακών συνθηκών σε κάθε αντικείμενο

Στο παράθυρο του σχήματος 3.17 εισάγονται οι ιδιότητες του αντικειμένου όπως ρυθμός παραμόρφωσης. τελικός όγκος μετά της κατεργασία, καθώς και άλλες ιδιότητες όπως σκληρότητα και θερμικές ιδιότητες.



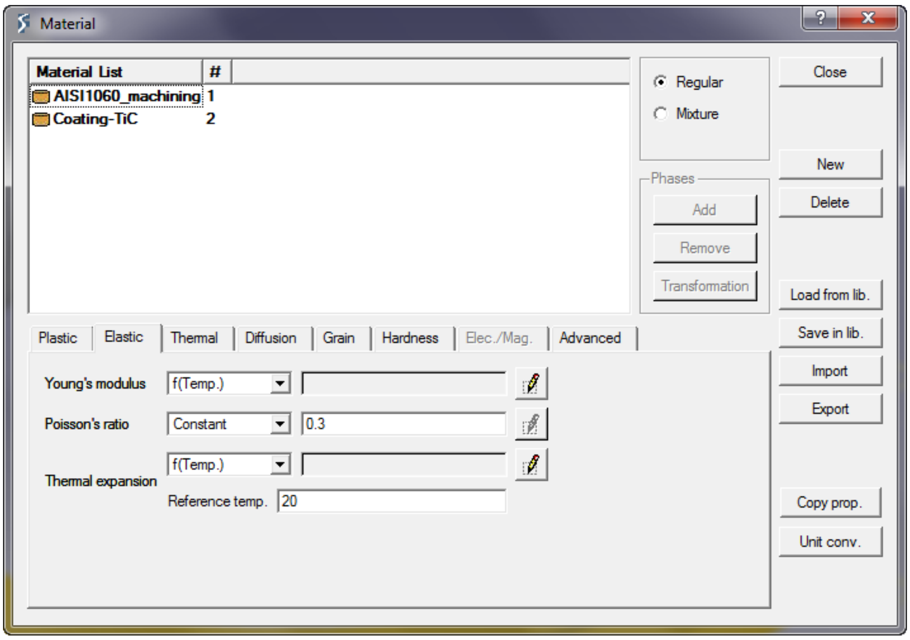
Σχήμα 3.17 : Περιβάλλον εισαγωγής ιδιοτήτων του αντικειμένου.

Στο παράθυρο του σχήματος 3.18 μετακινούνται τα αντικείμενα ώστε να έρθουν στην επιθυμητή θέση. Η επιλογή αυτή είναι καθοριστικής σημασίας καθώς το Deform έρχεται στη βασική του έκδοση χωρίς βιβλιοθήκη επιλογής προκαθορισμένων εργαλείων. Έτσι η τοποθέτηση των αντικειμένων στη σωστή θέση γίνεται μια σχετικά επίπονη διαδικασία για τον χρήστη αφού δεν υπάρχει επιλογή ώστε αυτή να γίνει αυτοματοποιημένα.



Σχήμα 3.18 : Σχετική τοποθέτηση των αντικειμένων

Το σχήμα 3.19 δείχνει το παράθυρο επιλογής των υλικών. Στο κάτω μέρος καθώς και στις επάνω καρτέλες μπορεί να εισαχθεί πληθώρα ιδιοτήτων του υλικού. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα το υλικό του τεμαχίου επιλέγεται να είναι το AISI-1060 που είναι το αντίστοιχο Ck-60. Η κατεργασία έγινε με χάλυβα Ck-60 για αυτό αναμένεται κάποια απόκλιση στα αποτελέσματα μας σε σχέση με αυτά που προέκυψαν από δυναμομέτρηση.



Σχήμα 3.19 : Περιβάλλον επιλογής υλικού και καθορισμού των ιδιοτήτων

Το <u>σχήμα 3.20</u> δείχνει το παράθυρο εισαγωγής των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Το υλικό που διαλέχτηκε AISI-1060 παρατηρούμε ότι δίνει δεδομένα για ένα μεγάλο εύρος ρυθμού παραμόρφωσης.

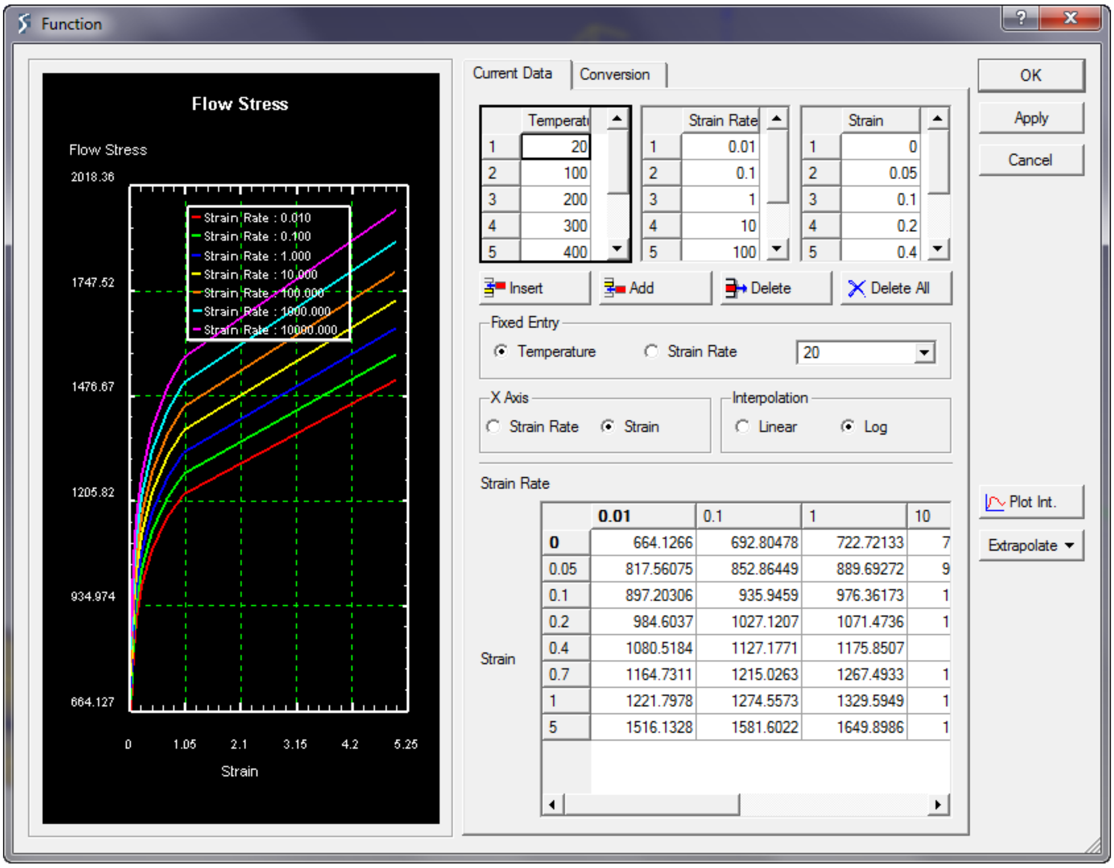
Η τάση διαρροής του συγκεκριμένου υλικού δίνεται ως εξής:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T)$$

όπου:

$\bar{\sigma}$ = τάση διαρροής
$\bar{\varepsilon}$ = πραγματική πλαστική παραμόρφωση
$\dot{\bar{\varepsilon}}$ = πραγματικός ρυθμός παραμόρφωσης
T = θερμοκρασία

Οι τιμές των τάσεων που δεν καλύπτονται από τα δεδομένα υπολογίζονται από αυτά μέσω γραμμικής παρεμβολής ή μέσω γραμμικής παρεμβολής σε λογαριθμικό χώρο.



Σχήμα 3.20 : Περιβάλλον καθορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού

Στο Deform οι τάσεις και οι παραμορφώσεις απεικονίζονται ως οι πραγματικές και υπολογίζονται σύμφωνα με τους εξής τύπους:

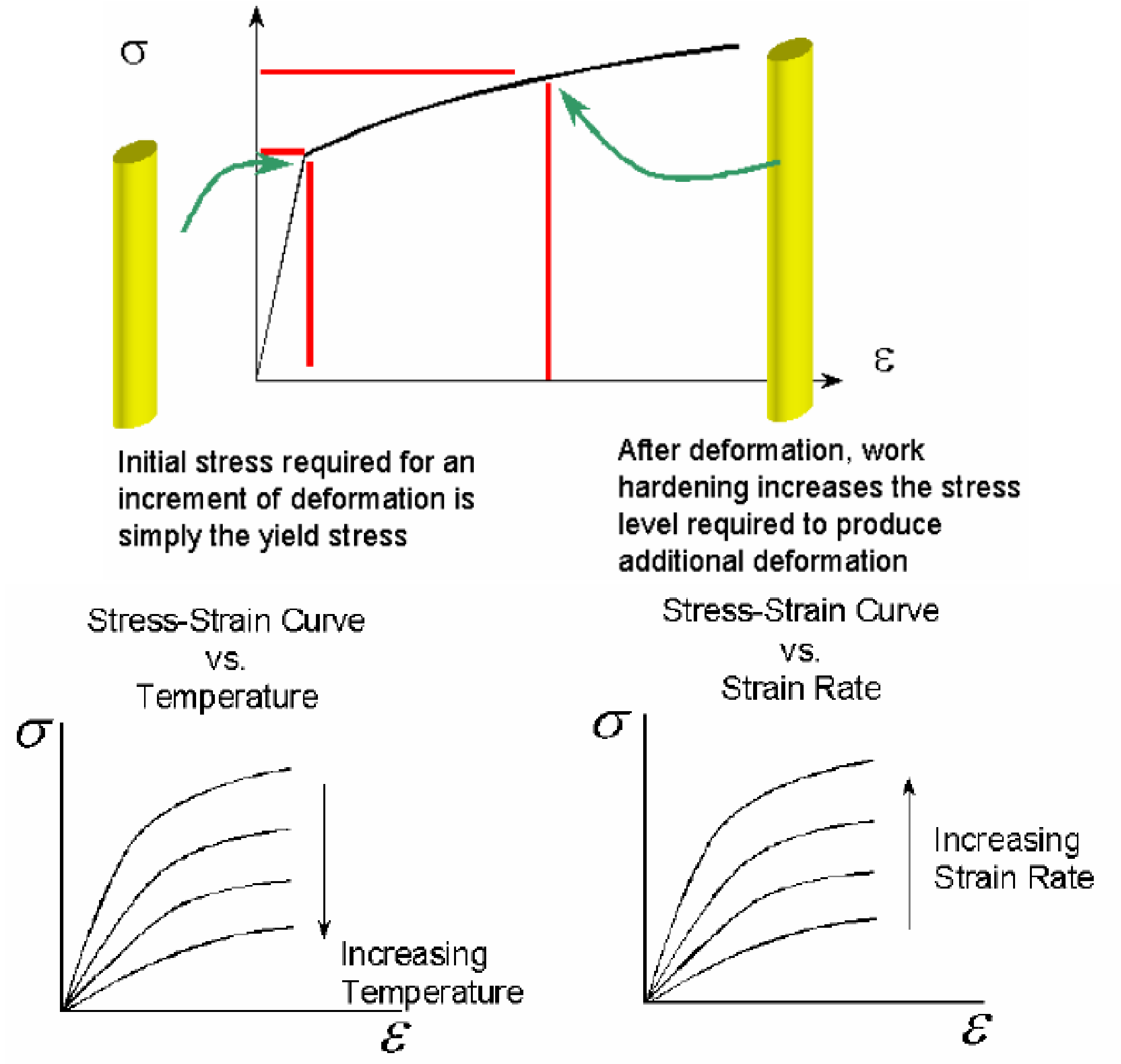
Effective (von Mises) Stress

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

Effective Strain

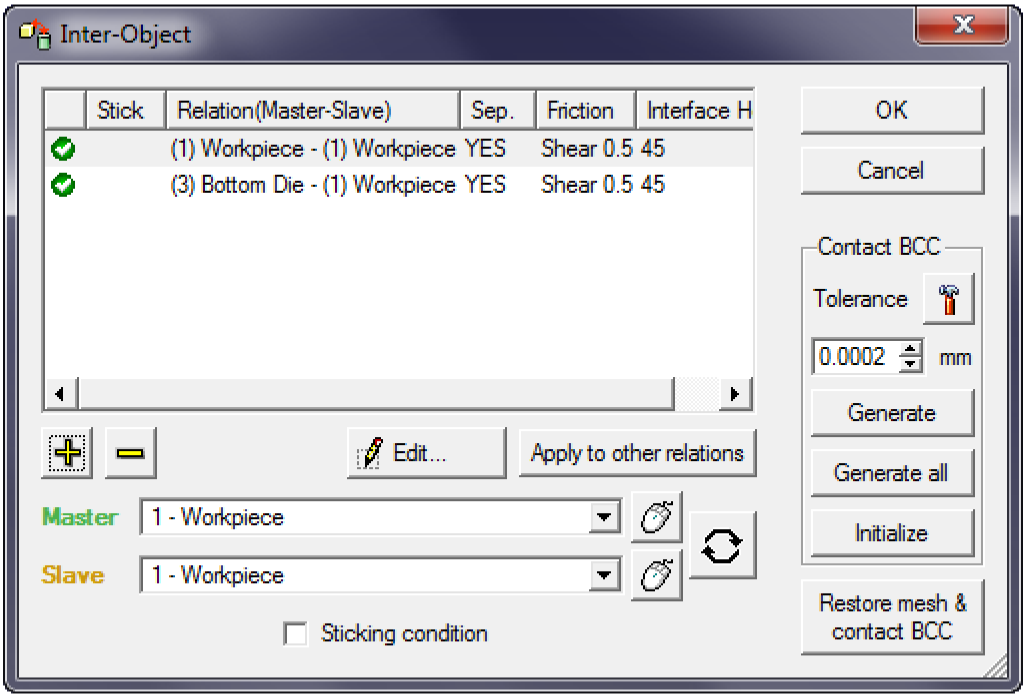
$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$$

Το Deform χρησιμοποιεί στους υπολογισμούς του την τάση διαρροής. Η μέθοδος του στερεού παραμορφώσιμου όλκιμου και ισότροπου υλικού είναι γνωστή από την αντοχή των υλικών και συνοψίζεται στο παρακάτω διάγραμμα. Επίσης λαμβάνεται υπ’ όψιν η μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας και του ρυθμού παραμόρφωσης.



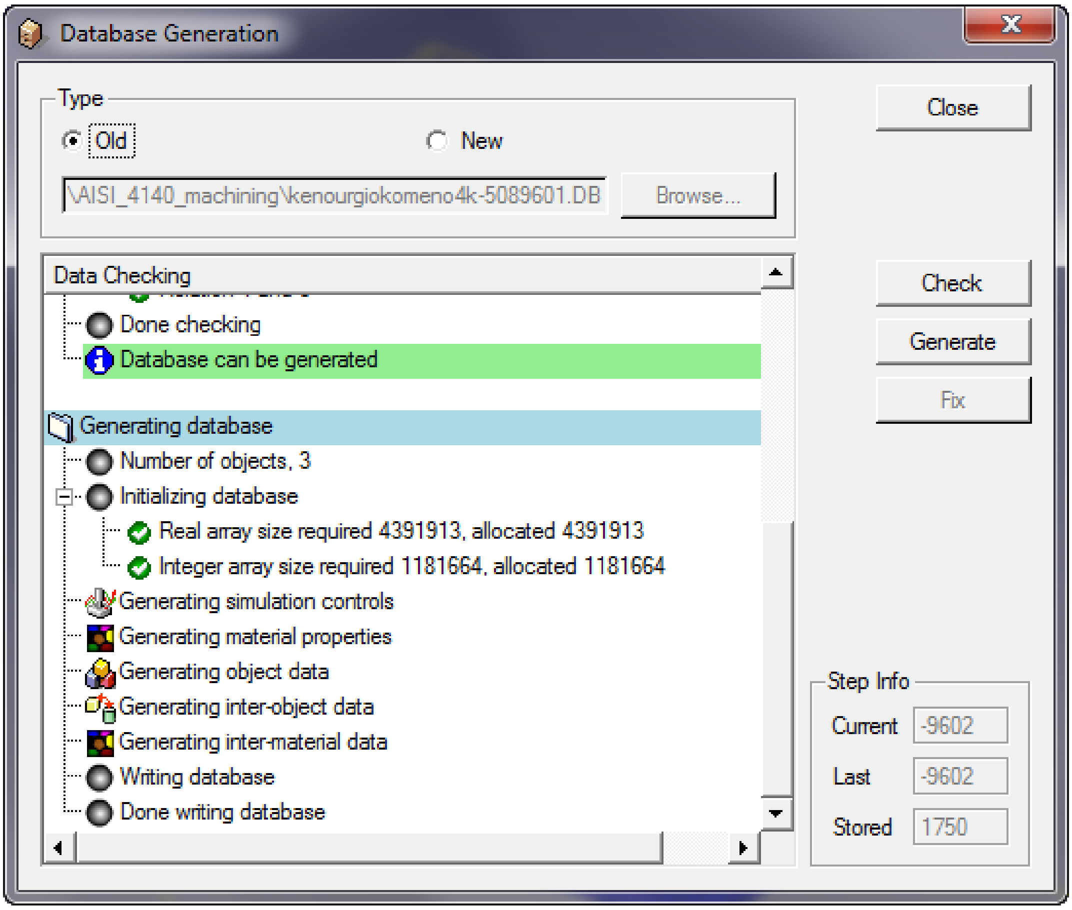
Σχήμα 3.21 : Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων

Το παράθυρο του <u>σχήματος 3.22</u> επιτρέπει την εισαγωγή των ιδιοτήτων επαφής μεταξύ των υλικών. Με αυτόν τον τρόπο εισάγονται οι τιμές για την τριβή ή τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας κ.α. Επίσης, σε περίπτωση που τα 2 αντικείμενα ακουμπάνε το ένα με το άλλο υπάρχει ρύθμιση αυτόματης αναγνώρισης της επαφής και εισαγωγής των κατάλληλων συνθηκών.



Σχήμα 3.22 : Καθορισμός χαρακτηριστικών επαφής

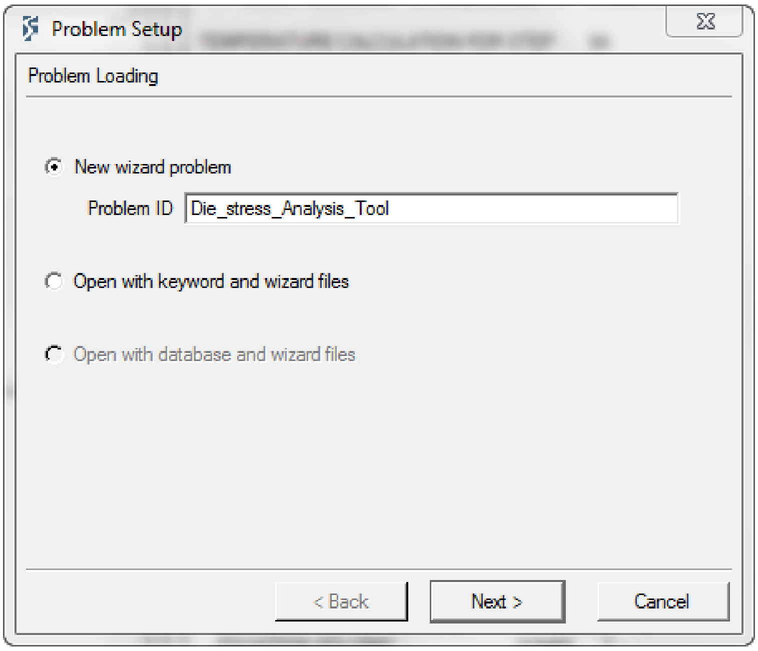
Το παράθυρο στο σχήμα 3.23 δείχνει τον αυτόματο έλεγχο των δεδομένων και τη δημιουργία της βάσης των τεχνολογικών πληροφοριών της προσομοίωσης. Η διαδικασία αυτή πρέπει να γίνει αφού έχει ολοκληρωθεί η μοντελοποίηση του προβλήματος.



Σχήμα 3.23 : Δημιουργία βάσης τεχνολογικών δεδομένων προσομοίωσης

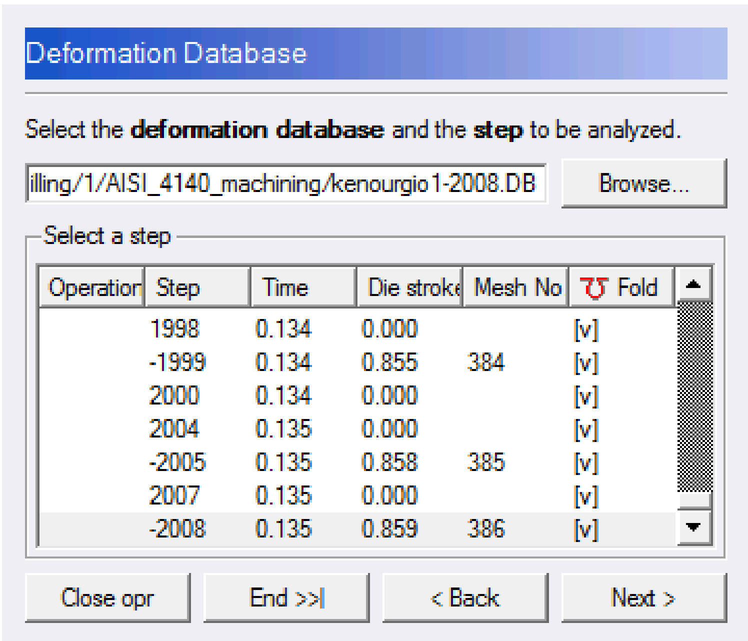
3.3.3 Ανάλυση τάσεων στο κοπτικό εργαλείο

Ένα εργαλείο του προ-επεξεργαστή είναι και η ανάλυση τάσεων στο κοπτικό εργαλείο (Die Stress Analysis). Αυτό το εργαλείο βοηθάει στον υπολογισμό των τάσεων πάνω στην κοπτική ακμή. Για να στηθεί ένα τέτοιο πρόβλημα πρέπει πρώτα να έχει τρέξει ένα πρόβλημα προσομοίωσης κατεργασίας και μετά για ένα συγκεκριμένο βήμα του να γίνει ο υπολογισμός των τάσεων πάνω στο εργαλείο. Για να ανοίξει το πρόγραμμα επιλέγεται το Die Stress Analysis που βρίσκετε δεξιά πάνω στην κεντρική οθόνη. Όταν το ανοίγει, δίνεται ένα όνομα για να μπορεί να το αποθηκευθεί όπως φαίνεται στο σχήμα 3.24.



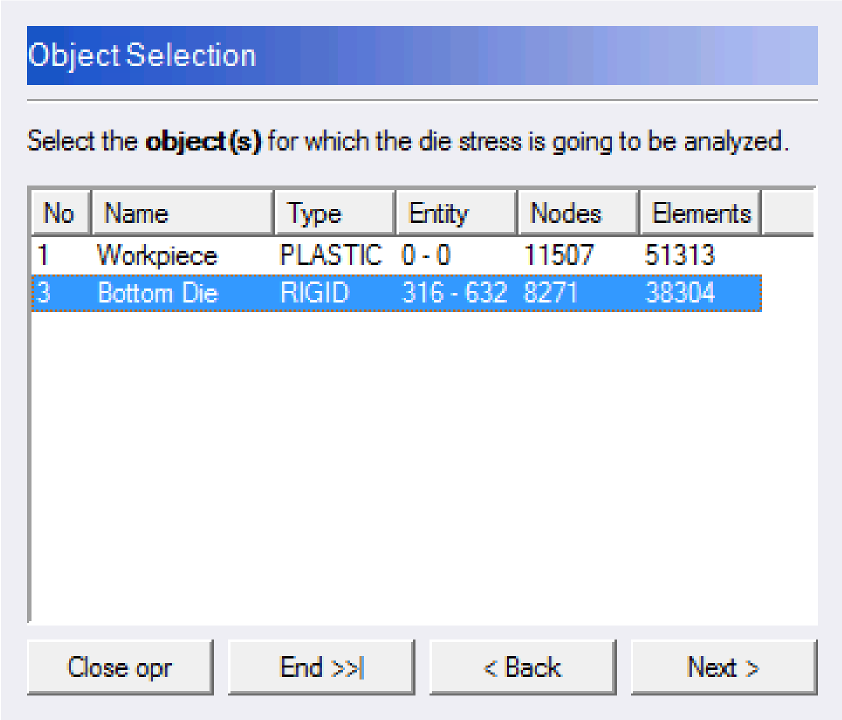
Σχήμα 3.24 : Εισαγωγή ονόματος προβλήματος

Οι τάσεις υπολογίζονται για τη χρονική στιγμή που εμφανίζονται οι μεγαλύτερες δυνάμεις κοπής. Για αυτόν τον λόγο πρέπει πρώτα να βρεθεί σε ποίο βήμα εμφανίζετε η μεγαλύτερη δύναμη στο πρόβλημα στο οποίο υπολογίζονται αυτές οι τάσεις. Το πρώτο βήμα σε αυτήν την εφαρμογή είναι να διαλεχτεί το σωστό database.

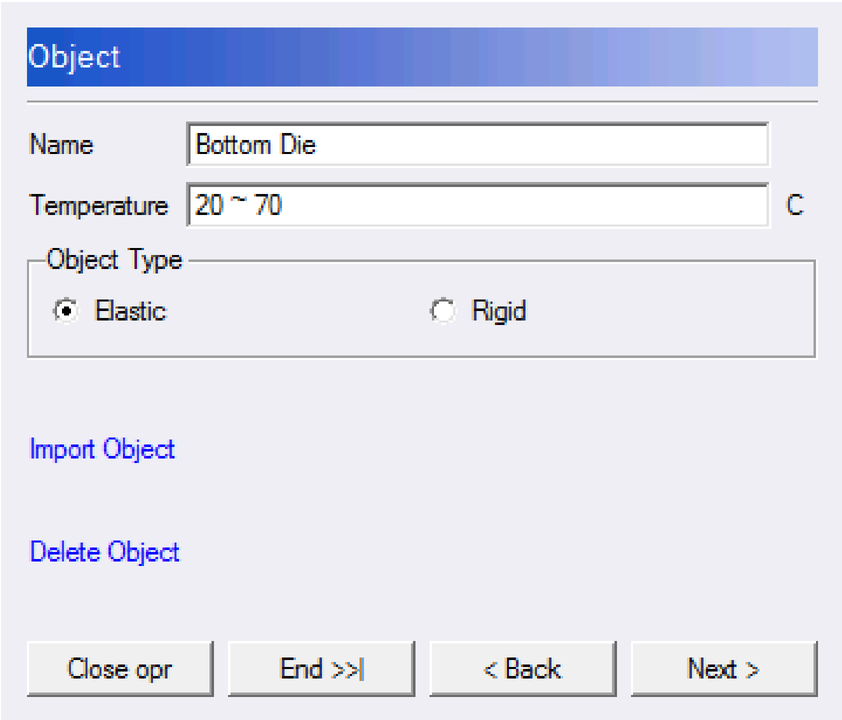


Σχήμα 3.25 : Επιλογή προβλήματος και βήματος

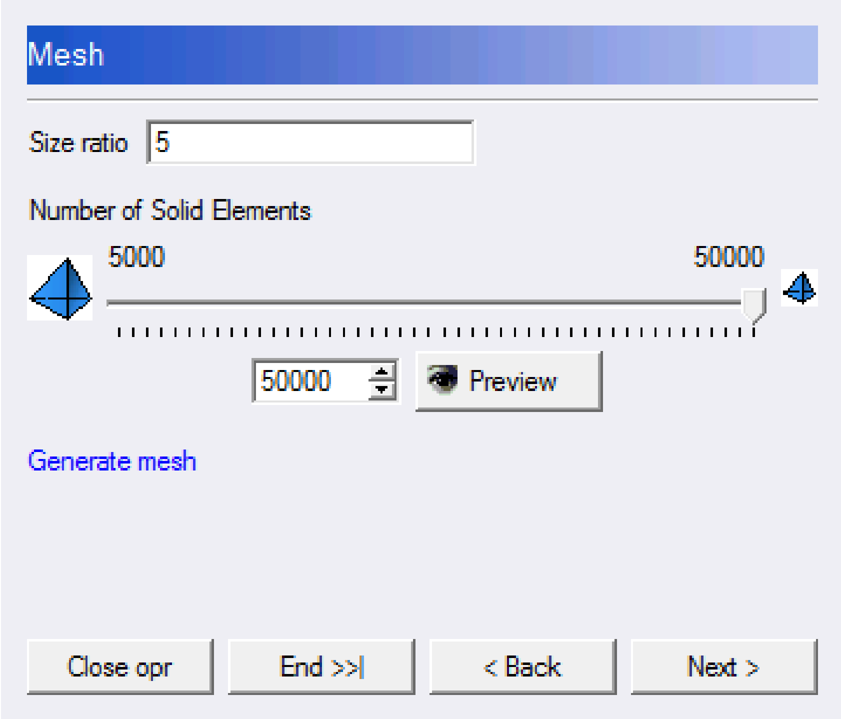
Στο επόμενο στάδιο επιλέγεται το αντικείμενο στο οποίο θα γίνει η ανάλυση τάσεων καθώς και τις ιδιότητες τις οποίες έχει το εργαλείο. Σε αυτό το σημείο επιλέγεται το κοπτικό εργαλείο.



Σχήμα 3.26 : Επιλογή αντικειμένου προς ανάλυση

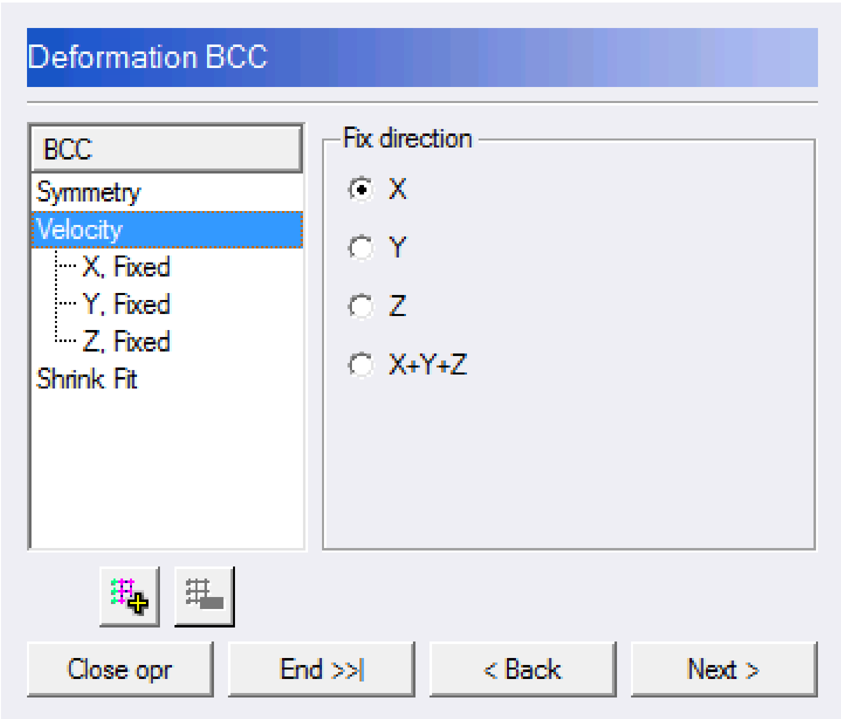


Σχήμα 3.27 : Εισαγωγή του αντικειμένου και βασικών ιδιοτήτων του

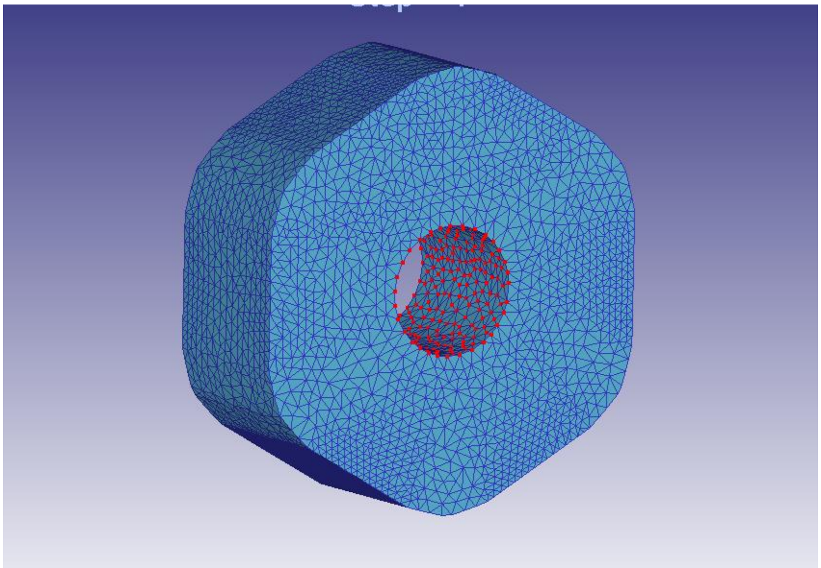


Σχήμα 3.28 : Επιλογή της διακριτοποίησης

Στο επόμενο βήμα είναι το Deformation BCC στο οποίο πρέπει να οριστεί το σημείο στο οποίο στηρίζεται το εργαλείο. Στη περίπτωση αυτή είναι η οπή η οποία βρίσκεται στο κέντρο του κοπτικό εργαλείου όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.30.

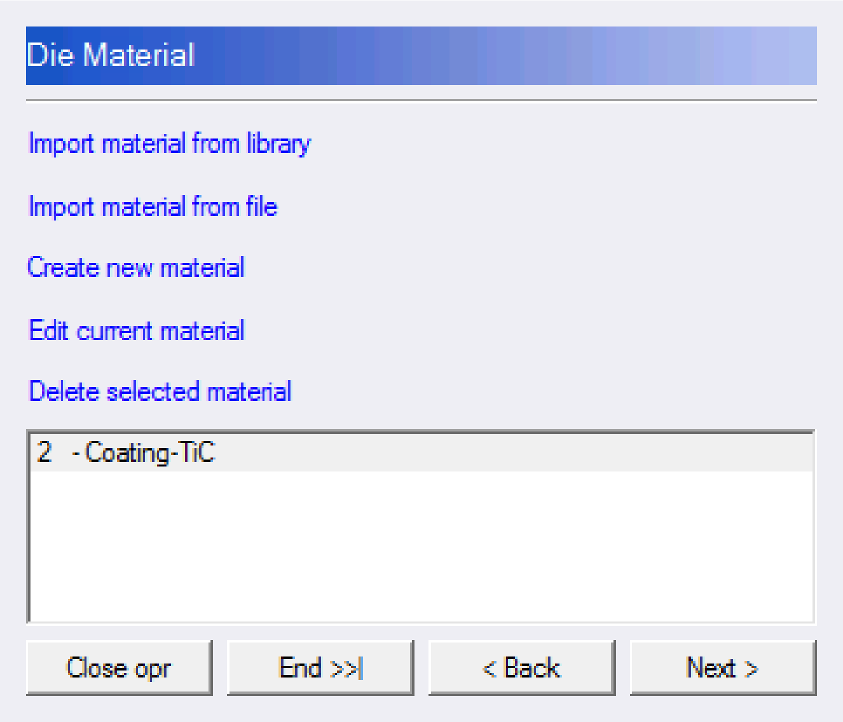


Σχήμα 3.29 : Επιλογή σημείου στήριξης του κοπτικού



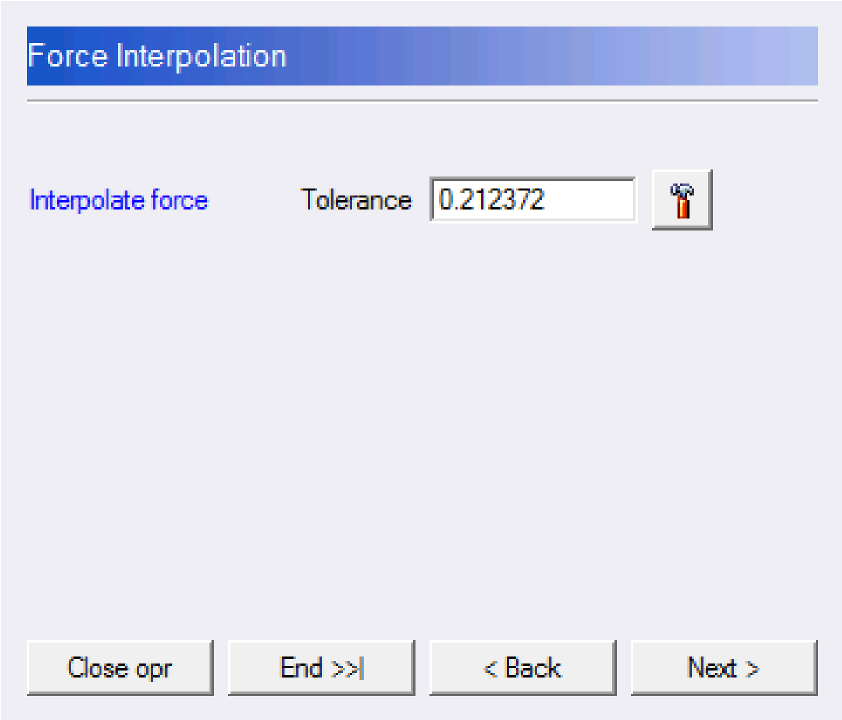
Σχήμα 3.30 : Επιλογή σημείου στήριξης του κοπτικού

Το επόμενο στάδιο είναι η επιλογή του υλικού για το αντικείμενο όπως φαίνεται και στην παρακάτω σχήμα 3.31. Σε αυτό υπάρχουν διαφορές επιλογές όπως το υλικό από τη βάση δεδομένων του προγράμματος, η εισαγωγή ενός υλικού ή ακόμα και η δημιουργία υλικού από τον χρήστη.



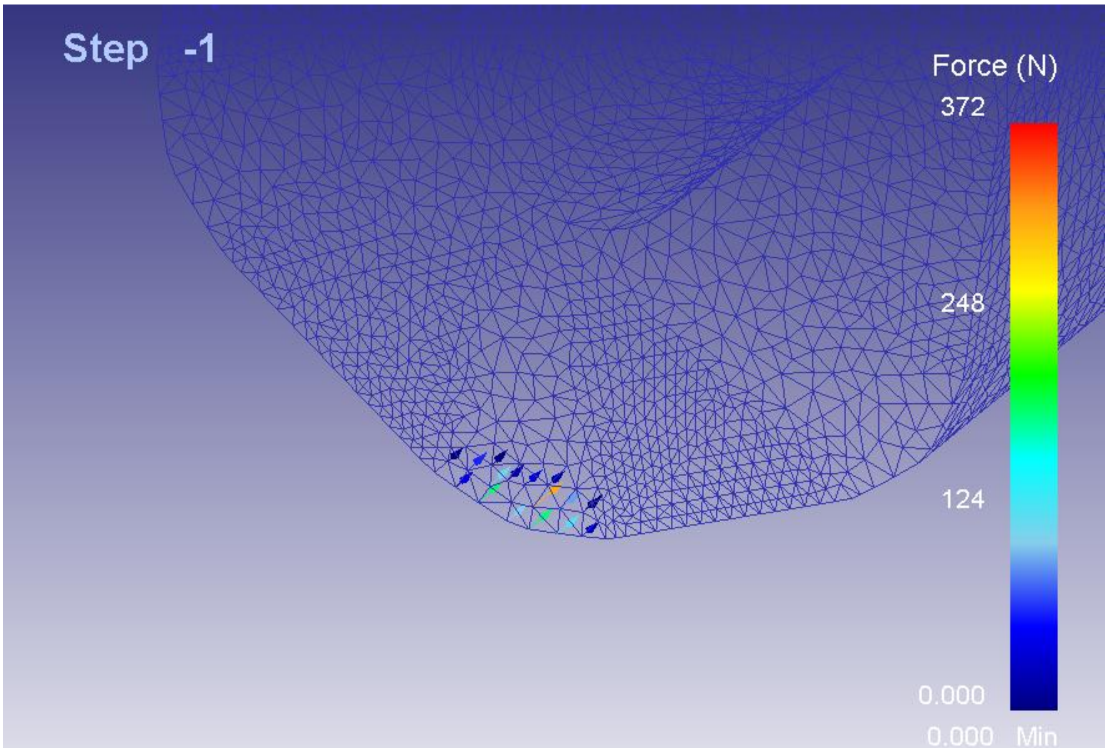
Σχήμα 3.31 : Εισαγωγή υλικού

Στο επόμενο βήμα εισάγονται οι δυνάμεις κοπείς από το δοκίμιο στο κοπτικό για να μπορέσει το πρόγραμμα να υπολογίσει τις τάσεις κοπής.



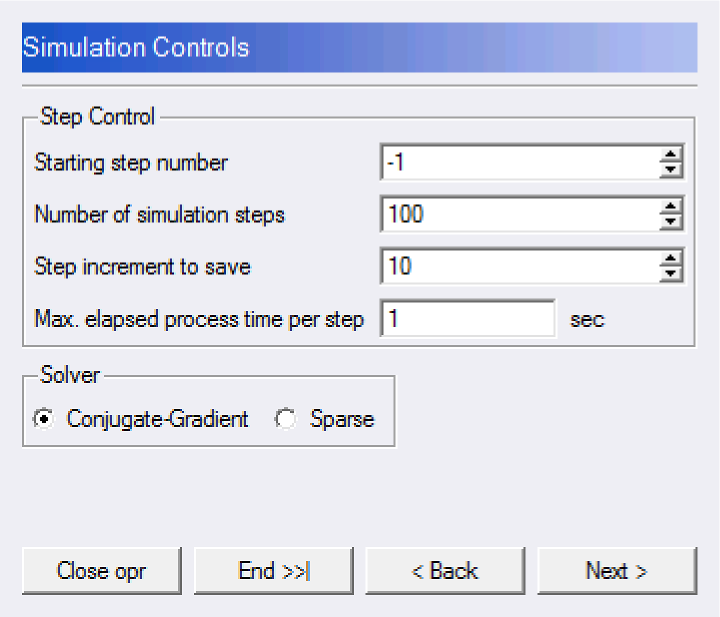
Σχήμα 3.32 : Εισαγωγή των δυνάμεων

Μετά τη μεταβίβαση των δυνάμεων μπορούν να απεικονιστούν οι δυνάμεις μέσα στο πλέγμα όπως φαίνεται στη παρακάτω σχήμα 3.33.



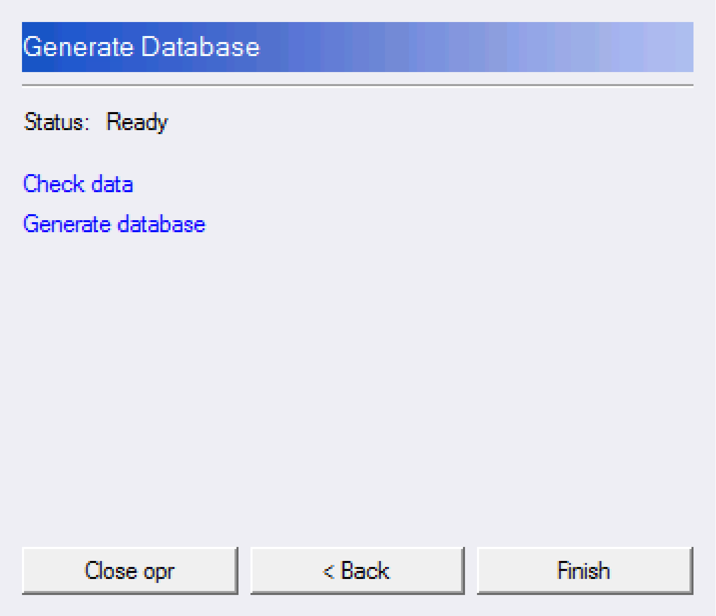
Σχήμα 3.33 : Δυνάμεις πάνω στο εργαλείο

Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.34, σε αυτό το στάδιο υπάρχουν διάφορες επιλογές για την προσομοίωση, για το πόσα θα είναι τα συνολικά βήματα και κάθε πόσα βήματα θα γίνεται αποθήκευση.



Σχήμα 3.34 : Επιλογές προσομοίωσης

Το παράθυρο στο σχήμα 3.35 δείχνει τον αυτόματο έλεγχο των δεδομένων και τη δημιουργία της βάσης των τεχνολογικών πληροφοριών της προσομοίωσης. Αυτό είναι και το τελευταίο στάδιο της μοντελοποίησης και μετά από αυτό μπορεί να τρέξει και να υπολογίσει τις τάσεις που δημιουργούνται πάνω στο εργαλείο.



Σχήμα 3.35 : Έλεγχος και αποθήκευση της βάσης δεδομένων

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ

Τα κέντρα κατεργασίας αποτελούν τις πιο κοινές εργαλειομηχανές στη ψηφιακή καθοδήγηση. Τα τυπικά χαρακτηριστικά τους είναι:

- Κατεργάζονται πολύπλευρα τεμάχια με ένα δέσιμο σε τέσσερις ή πέντε πλευρές χρησιμοποιώντας ψηφιακά καθοδηγούμενους άξονες.
- Πραγματοποιούνται όλοι οι τύποι κατεργασιών, όπως η κατεργασία προσώπου, η διάτρηση, η γλύφανση, η κοπή σπειρώματος, όπως ακόμα και η κατεργασία σύνθετων περιγραμμάτων.
- Το απαραίτητο κάθε φορά εργαλείο τοποθετείται στη θέση κοπής με αυτόματο τρόπο. Ο αριθμός των εργαλείων, που αποθηκεύονται είναι συνήθως από 30 έως 120, εξαρτώμενος από τον τύπο και το μέγεθος αποθήκης.
- Υποστηρίζεται από εξαρτήματα για φόρτωση και εκφόρτωση των προς κατεργασία τεμαχίων.

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακά καθοδηγούμενο DMU 50 eco της DMG, του εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείου Κρήτης.

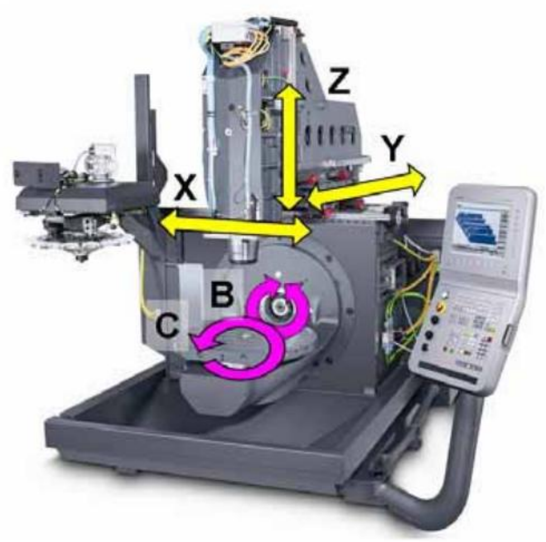
4.1 Εξοπλισμός πειραμάτων

4.1.1 Πενταξονικό κέντρο κατεργασίας DMU 50 eco

Τα πειράματα έγιναν στο Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης (m3) του Πολυτεχνείου Κρήτης, στο κέντρο κατεργασίας της Deckel Maho DMU 50 eco.

Το κέντρο κατεργασίας γενικής χρήσης CNC DMU 50 eco είναι εξοπλισμένο με ισχυρή άτρακτο μέχρι 8.000 rpm, 83 Nm (40% ED), ισχύ ατράκτου 13 kW (40% ED) και 12 m/min γρήγορη μετατόπιση. Το περιστρεφόμενο τραπέζι του καθιστά εφικτή την κατασκευή πολύ σύνθετων τεμαχίων κατεργασίας. Η υδραυλική σύσφιξη εμπεριέχεται στο περιστρεφόμενο τραπέζι και η περιοχή περιστροφής μέχρι τις 115° (-5° / +110°) καθιστά εφικτές κλίσεις μέχρι 20°. Ο εργαλειοφορέας με 16 θέσεις και το αποσπώμενο χειριστήριο καθιστούν εφικτή την απλή και άνετη εκτέλεση των διαφόρων εργασιών φραιζαρίσματος. Η κατασκευή είναι με χυτοσίδηρο σκελετό, για μέγιστη ακρίβεια και ποιότητα επιφανειών. Το εργονομικό DMG SLIMline® Panel με οθόνη TFT 15'', SIEMENS 810D powerline και λογισμικό ShopMill καθιστούν εφικτό τον απλό προγραμματισμό και την τρισδιάστατη προσομοίωση.

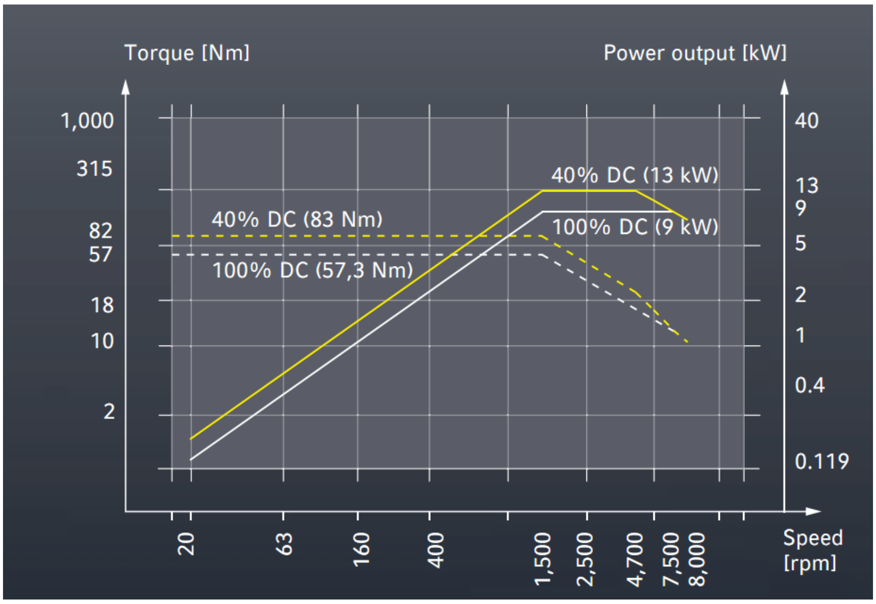
Σχήμα 4.1 : Κέντρο κατεργασίας DMU 50 eco



Σχήμα 4.2 : Άξονες κίνησης της εργαλειομηχανής

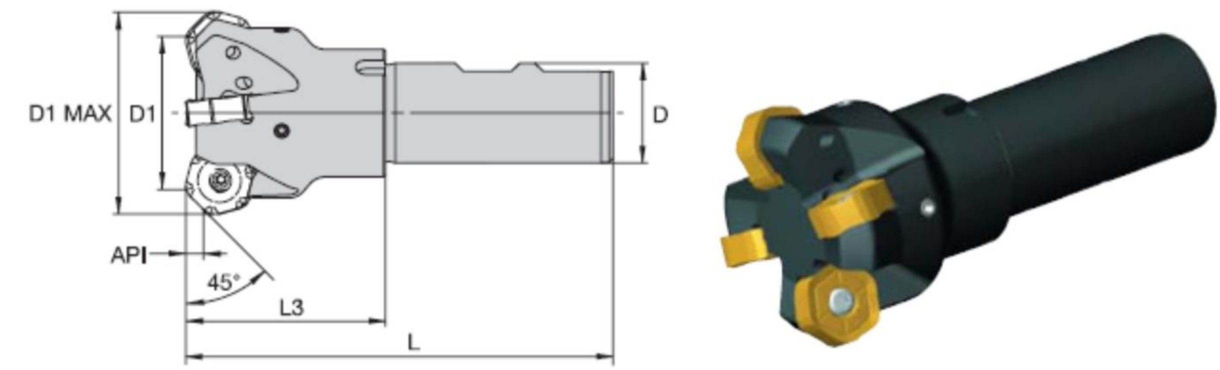
Χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής	
Διαδρομή στον άξονα X	500 mm
Διαδρομή στον άξονα Y	450 mm
Διαδρομή στον άξονα Z	400 mm
Στροφές	20-8.000
Τύπος συγκράτησης εργαλείων	CAT40/BT40
Μέγιστος αριθμός κοπτικών	16
Μέγιστο βάρος κοπτικού	6kg
Μέγιστο ύψος κοπτικού	300mm
Μέγιστη διάμετρος κοπτικού	80/130 mm
Ταχείες προώσεις	12 mm/m
Ισχύς κινητήρα ατράκτου	13/9 kW (40/100% DC)
Μεγίστη δύναμη πρόωσης	4,5 kN
Ροπή	83/57,3nm (40/100% DC)
Διαστάσεις Τράπεζας	Ø 630 mm x 500 mm
Μέγιστη διάσταση τεμαχίου	Ø 550 mm x 450 mm
Μέγιστο βάρος στην τράπεζα	200kg
Εύρος περιστροφής τράπεζας	-5/+110

Πινάκας 4.1 : Χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής



Σχήμα 4.3 : Διάγραμμα της ροπής και της ισχύς της εργαλειομηχανής

4.1.2 Κοπτικό εργαλείο
Το εργαλείο συγκράτησης που χρησιμοποιήθηκε είναι της ‘Kennametal’ από τη σειρά ‘Dodeka’ με αριθμό καταλόγου ‘KSHR40D03R50B25SHN09’ όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5.

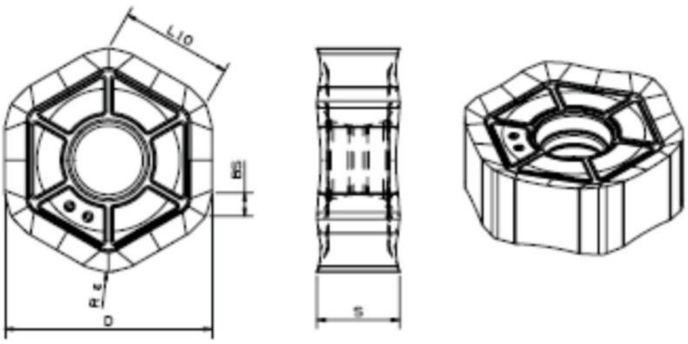


D1	Αριθμός καταλόγου	Z	D	D1.max	L3	L	Ap1.max	kg	MAX rpm	Nm
40	KSHR40D03R50B25SHN09	3	25	51	50	107	4.5	0.5	15800	3

Σχήμα 4.4 : Κοπτικό εργαλείο ‘Dodeka’ και πίνακας με τεχνικά χαρακτηριστικά

Το παραπάνω εργαλείο δέχεται μέχρι τρείς κοπτικές ακμές και είναι ιδανικό για απαιτητικές διαδικασίες εκχόνδρισης και αποπεράτωσης.

Τα ένθετα πλακίδια που χρησιμοποιήθηκαν είναι επίσης της ‘Kennametal’ από τη σειρά ‘Dodeka’ με αριθμό καταλόγου κατά ISO ‘HNGJ0905ANENLD’ και κωδικό επίστρωσης ‘KC725M’. Είναι κατασκευασμένα από καρβίδιο βολφραμίου, ένα κράμα υψηλής αντοχής μεταλλικής σύνθεσης, που περιέχει βολφράμιο και άνθρακα. Η επίστρωση είναι από προηγμένο AlTiN, το οποίο είναι κατάλληλο για γενική ή απαιτητική χρήση, για κατεργασία ατσαλιού, ανοξείδωτου ατσαλιού και κράματα, που αναπτύσσουν πολύ υψηλή θερμοκρασία (High-Temp Alloys). Η καλή θερμική αντίσταση του υποστρώματος το κάνει ιδανικό για κοπή με ή και χωρίς λιπαντικό. Στο σχήμα 4.5 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου.



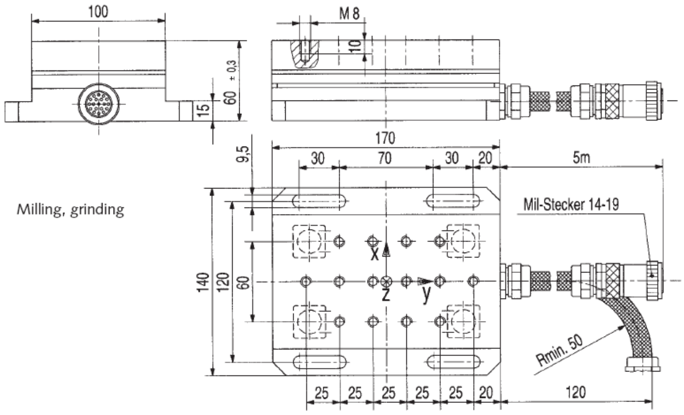
Αριθμός καταλόγου κατά ISO	Κοπτικές αιχμές	D (mm)	S (mm)	L10	Re	BS	hm
HNGJ0905ANENLD	12	15.88	6.35	9	1.2	1.2	0.1

Σχήμα 4.5 : Τεχνικά χαρακτηριστικά κοπτικού εργαλείου

4.1.3 Όργανο δυναμομέτρησης

Για τις δυναμομετρήσεις χρησιμοποιήθηκε δυναμόμετρο KISTLER 9257BA & μονάδα ελέγχου KISTLER 5233A1. Το δυναμόμετρο αποτελείται από τέσσερις αισθητήρες τριών συνιστάμενων τοποθετημένους υπό υψηλή προφόρτηση, μεταξύ μιας πλάκας για βάση και μιας πλάκας για κάλυμμα. Το δυναμόμετρο είναι ανθεκτικό στη διάβρωση και είναι προστατευμένο από τη διείσδυση νερού με ψεκασμό και τα υγρά κοπής. Η πάνω πλάκα είναι εφοδιασμένη με ένα ειδικό στρώμα θερμικής μόνωσης, γεγονός που καθιστά το δυναμόμετρο ανεπηρέαστο σε μεγάλο βαθμό στις θερμοκρασιακές επιρροές. Στο δυναμόμετρο είναι ενσωματωμένος ένας τρικάναλος ενισχυτής. Επομένως, το σήμα εξόδου στο δυναμόμετρο είναι χαμηλής αντίστασης. Το δυναμόμετρο είναι συνδεδεμένο με τη μονάδα ελέγχου τύπου 5233A1. Στη μονάδα ελέγχου υπάρχει η δυνατότητα επιλογής τεσσάρων τάξεων μεγέθους δυνάμεων σε δύο ομάδες (Fx, Fy, Fz). Το δυναμόμετρο και η μονάδα ελέγχου πληρούν τις απαιτήσεις CE σύμφωνα με την οδηγία 89/336/ΕΟΚ του Συμβουλίου της ΕΕ και συμμορφώνονται με τα βιομηχανικά πρότυπα για τον εξοπλισμό EMC.

Σχήμα 4.6 : Δυναμόμετρο KISTLER 9257BA



Σχήμα 4.7 : Μονάδα ελέγχου KISTLER 5233A

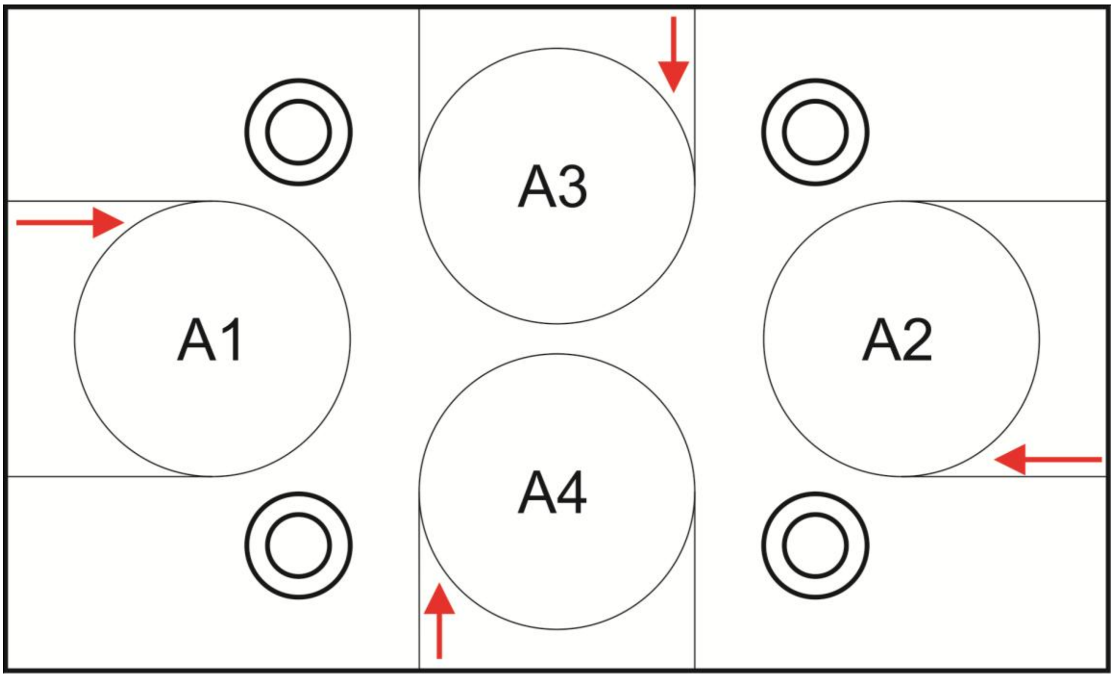
4.2 Συνθήκες κοπής

Όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκε μια σειρά από 8 πειράματα σε δύο διαφορετικά δοκίμια σε συγκεκριμένες συνθήκες κοπής, για να μελετηθεί η επίδραση της ταχύτητας προώσεως, του αριθμού των δοντιών και του ακτινικού βάθους κοπής στην τραχύτητα της τελικής προκύπτουσας επιφάνειας.

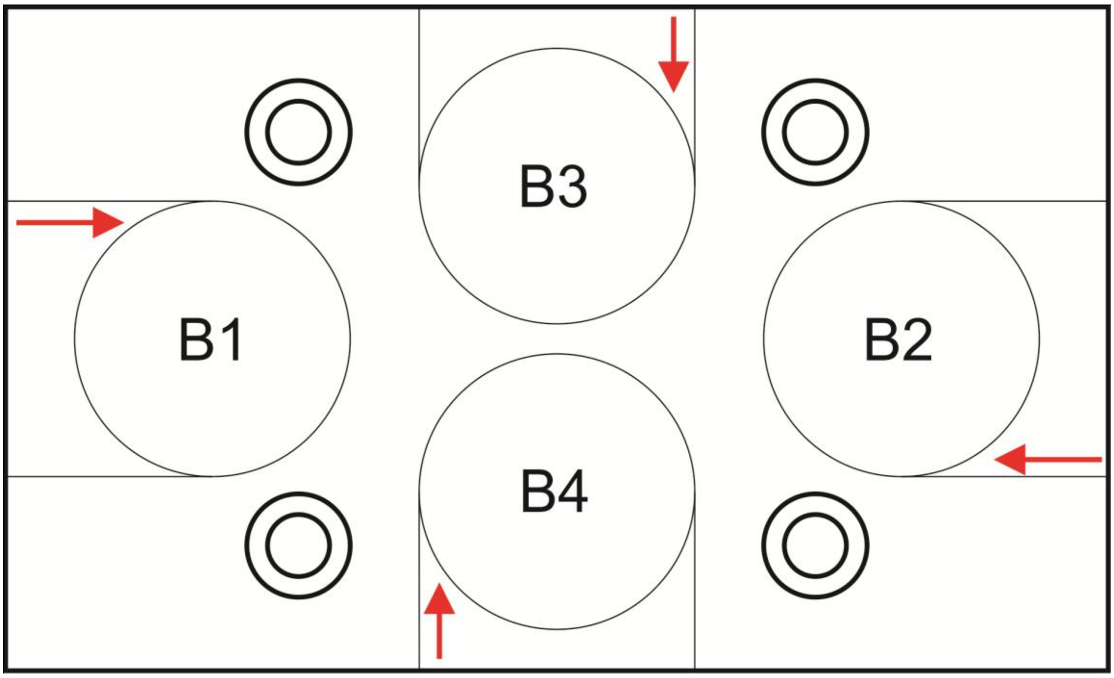
Το γενικό πλάνο των πειραμάτων είχε ως κοινούς παραμέτρους, την ταχύτητα περιστροφής V_c=120m/min, το αξονικό βάθος κοπής a_z=0.5mm και το υλικό, που είναι CK-60. Οι υπόλοιπες συνθήκες κοπής άλλαζαν κατά τη διάρκεια του πειράματος και παίρνουν τις εξής τιμές:

Πρόωση ανά δόντι (mm/tooth): f_z=1, f_z=0.8, f_z=0.6, f_z=0.4
Αριθμός δοντιών: n=3, n=1

Με αυτά τα δεδομένα εκτελέστηκαν συνολικά 8 πειράματα, τα οποία έχουν διαφορετικές συνθήκες κοπής και είναι τοποθετημένα σε τέσσερα διαφορετικά τεμάχια, όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 4.8 : Τεμάχιο Α από υλικό CK-60



Σχήμα 4.9 : Τεμάχιο Β από υλικό CK-60

Στα τεμάχια Α και Β μελετήθηκε η επίδραση της ταχύτητας προώσεως στην τραχύτητα της προκύπτουσας επιφάνειας. Στον ακόλουθο πινάκα 4.2 φαίνονται αναλυτικά οι συνθήκες κατεργασίας των 8 πρώτων πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν.

Α/Α	Τεμ.	Ν	SP(rpm)	FD(mm/min)	V_c(m/min)	f_z(mm/δόντι)
1	A1	1	955	955	120	1
2	A2	1	955	764	120	0.8
3	A3	1	955	573	120	0.6
4	A4	1	955	382	120	0.4
5	B1	3	955	2865	120	1
6	B2	3	955	2292	120	0.8
7	B3	3	955	1719	120	0.6
8	B4	3	955	1146	120	0.4

Πίνακας 4.2 : Συνθήκες κατεργασίας των οκτώ πρώτων πειραμάτων

Το αξονικό βάθος κοπής είναι t_z=0.5mm για όλα τα πειράματα και όπου ‘n’ , ο αριθμός των δοντιών.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Πειραματικά

Αρχικά γίνεται η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Δηλαδή τα πειράματα που έγιναν στην εργαλειομηχανή του εργαστηρίου και ταυτόχρονα δηναμομετρούνταν οι δυνάμεις κοπής. Επειδή έγιναν δυο σειρές πειραμάτων, μια για κοπή με ένα ένθετο πλακίδιο και άλλη μια για κοπή με τρία ένθετα πλακίδια, τα πειράματα δεν έχουν τον ίδιο προσανατολισμό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν αλλάχτηκε το δέσιμο του δοκιμίου σε κάθε πείραμα αλλά μόνο όταν αλλάξαμε κοπτικό εργαλείο. Έτσι η δύναμη F_x του πρώτου πειράματος είναι η F_y του τρίτου πειράματος ενώ η F_x του πρώτου είναι η - F_xτου δεύτερου λόγο της αντίθετης φοράς κοπής. Μόνο για την F_z η οποία είναι η κατακόρυφη δύναμη κοπής είναι κοινή για όλα τα πειράματα.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται πρώτα με ένα πίνακα ο οποίος δείχνει τις συνθήκες κοπής και έπειτα με την γραφική παράσταση από το πρόγραμμα του δυναμόμετρου DynoWare. Στα γραφήματα έχει γίνει εστίαση σε δύο ή τρεις περιστροφές του κοπτικού εργαλείου.

Α/Α	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
1	A1	1	955	955	120	1

Πίνακας 5.1 : Συνθήκες κοπής

face__milling

Page 1 of 1

Printed on 12. April 2011 at 13:20

Measuring File

Path: C:\Documents and Settings\DML\Desktop\xristos_face_milling\1.dwd
Cycle: 1 of 1
Date: Wednesday, 23 March , 2011 14: 14: 34
Size: 2 446 840 Bytes

Documentation

Remark: range II : 500N range II : 1kN

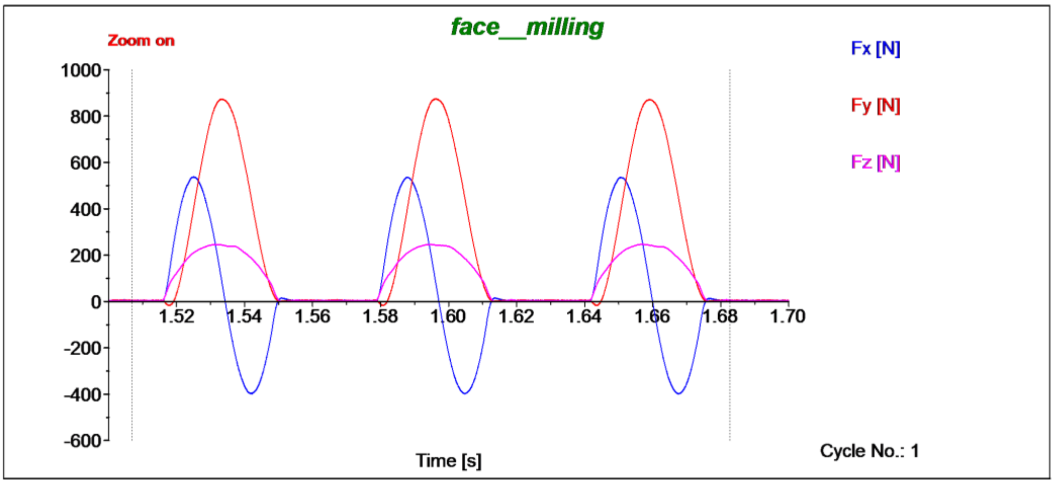
Material: CK 60
Tool: D40 Facemill

vc = 45 m/min
n = 955 rpm

f = 1 mm/rev
vf = 955 mm/min

ap = 0.5 mm
ae = 0 mm

Measuring Data



Σχήμα 5.1 : Γράφημα δυνάμεων κοπής

A/A	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
2	A2	1	955	764	120	0.8

Πίνακας 5.2 : Συνθήκες κοπής

face__milling

Page 1 of 1

Printed on 12. April 2011 at 13:23

Measuring File

Path: C:\Documents and Settings\DML\Desktop\xristos_face_milling\2.dwd
Cycle: 1 of 1
Date: Wednesday, 23 March , 2011 14: 16: 21
Size: 2 446 840 Bytes

Documentation

Remark: range II : 500N range II : 1kN

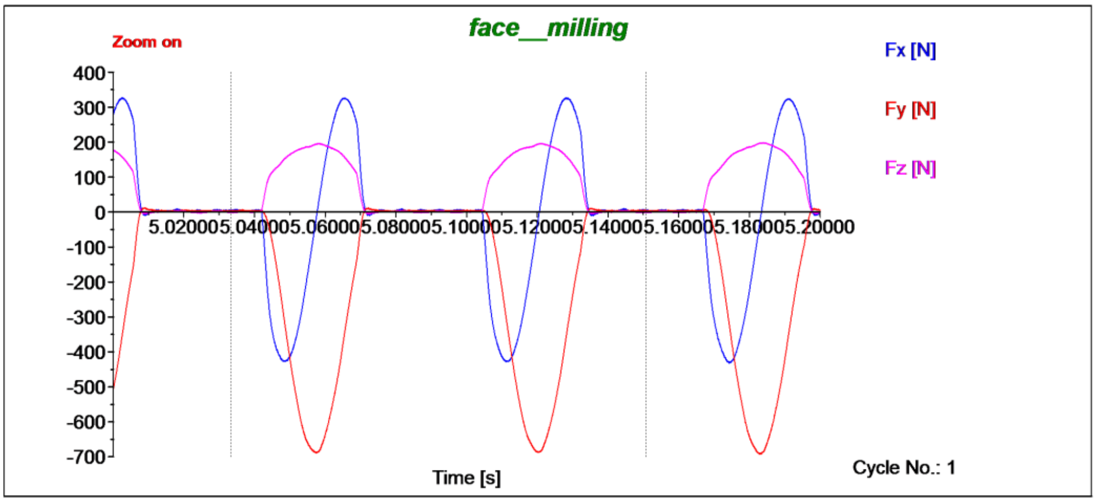
Material: CK 60
Tool: D40 Facemill

vc = 45 m/min
n = 955 rpm

f = 0.8 mm/rev
vf = 764 mm/min

ap = 0.5 mm
ae = 0 mm

Measuring Data



Σχήμα 5.2 : Γράφημα δυνάμεων κοπής

A/A	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
3	A3	1	955	573	120	0.6

Πίνακας 5.3 : Συνθήκες κοπής


face__milling

Page 1 of 1

Printed on 12. April 2011 at 13:26

Measuring File

Path: C:\Documents and Settings\DML\Desktop\xristos_face_milling\3.dwd
Cycle: 1 of 1
Date: Wednesday, 23 March , 2011 14: 18: 10
Size: 2 446 840 Bytes

Documentation

Remark: range II : 500N range II : 1kN

Material: CK 60
Tool: D40 Facemill

vc = 45 m/min
n = 955 rpm
f = 0.6 mm/rev
vf = 573 mm/min
ap = 0.5 mm
ae = 0 mm

Measuring Data

Σχήμα 5.3 : Γράφημα δυνάμεων κοπής

A/A	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
4	A4	1	955	382	120	0.4

Πίνακας 5.4 : Συνθήκες κοπής

face__milling
Page 1 of 1
Printed on 12. April 2011 at 13:29

Measuring File

Path: C:\Documents and Settings\DML\Desktop\xristos_face_milling\4.dwd
Cycle: 1 of 1
Date: Wednesday, 23 March , 2011 14: 19: 29
Size: 2 446 840 Bytes

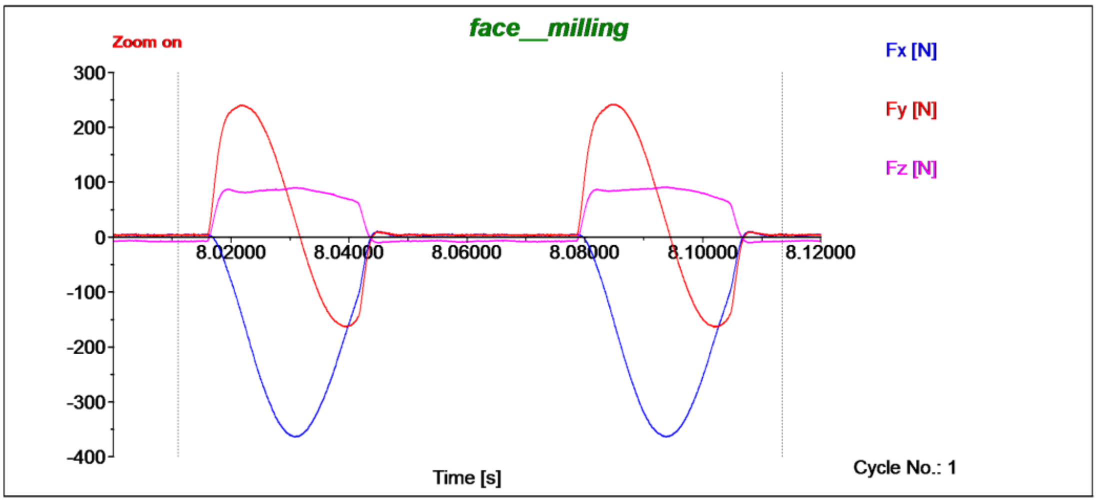
Documentation

Remark: range II : 500N range II : 1kN

Material: CK 60
Tool: D40 Facemill

vc = 45 m/min
n = 955 rpm
f = 0.4 mm/rev
vf = 382 mm/min
ap = 0.5 mm
ae = 0 mm

Measuring Data



Σχήμα 5.4 : Γράφημα δυνάμεων κοπής

A/A	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
5	B1	3	955	2865	120	1

Πίνακας 5.5 : Συνθήκες κοπής

face__milling
Page 1 of 1
Printed on 12. April 2011 at 13:17

Measuring File

Path: C:\Documents and Settings\DML\Desktop\xristos_face_milling\1.dwd
Cycle: 1 of 1
Date: Wednesday, 23 March , 2011 14: 14: 34
Size: 2 446 840 Bytes

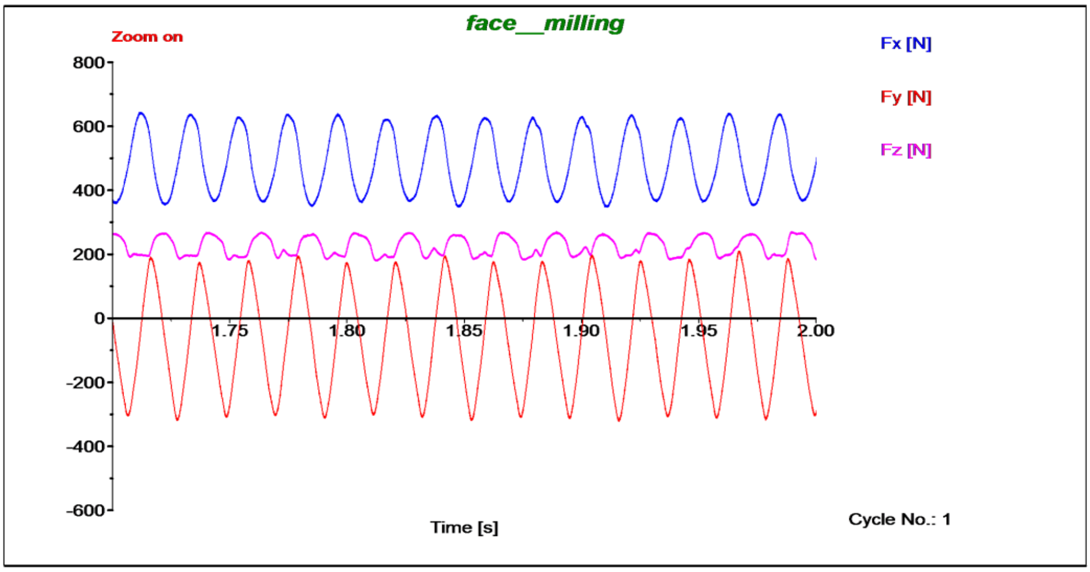
Documentation

Remark: range II : 500N range II : 1kN

Material: CK 60
Tool: D40 Facemill

vc = 45 m/min
n = 955 rpm
f = 1 mm/rev
vf = 955 mm/min
ap = 0.5 mm
ae = 0 mm

Measuring Data



Σχήμα 5.5 : Γράφημα δυνάμεων κοπής

Α/Α	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
6	B2	3	955	2292	120	0.8

Πίνακας 5.6 : Συνθήκες κοπής

6

Page 1 of 1

Printed on 12. April 2011 at 13:35

Measuring File

Path: C:\Documents and Settings\DML\Desktop\xristos_face_milling\6.dwd
Cycle: 1 of 1
Date: Thursday, 24 March , 2011 13: 14: 48
Size: 2 446 840 Bytes

Documentation

Remark: range II : 500N range II : 1kN

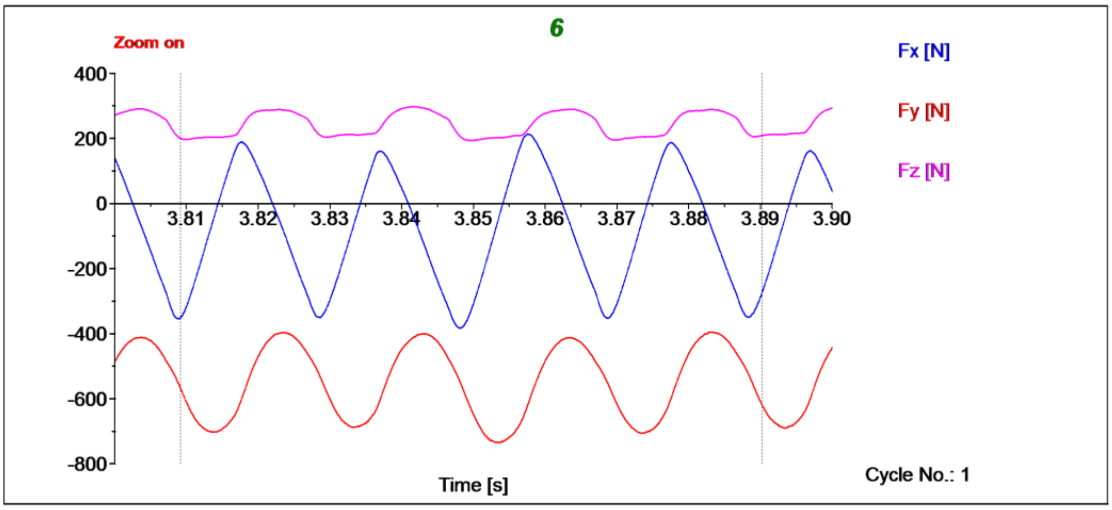
Material: CK 60
Tool: D40 Facemill

vc = 120 m/min
n = 955 rpm

f = 0.8 mm/rev
vf = 2292 mm/min

ap = 0.5 mm
ae = 0 mm

Measuring Data



Σχήμα 5.6 : Γράφημα δυνάμεων κοπής

Α/Α	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
7	B3	3	955	1719	120	0.6

Πίνακας 5.7 : Συνθήκες κοπής

10

Page 1 of 1

Printed on 12. April 2011 at 13:39

Measuring File

Path: C:\Documents and Settings\DML\Desktop\xristos_face_milling\8.dwd
Cycle: 1 of 1
Date: Thursday, 24 March , 2011 13: 36: 32
Size: 2 446 840 Bytes

Documentation

Remark: range II : 500N range II : 1kN

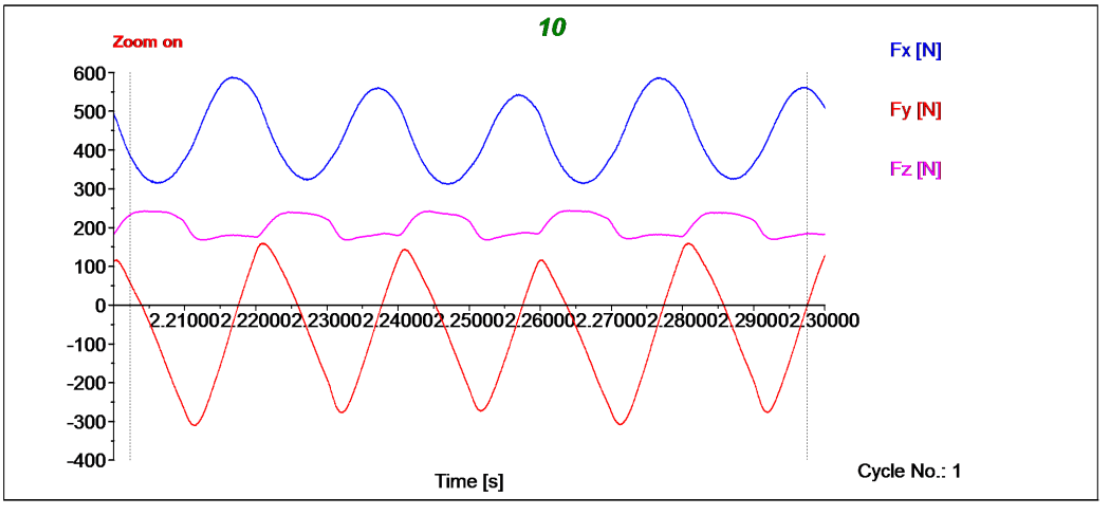
Material: CK 60
Tool: D40 Facemill

vc = 120 m/min
n = 955 rpm

f = 0.6 mm/rev
vf = 1719 mm/min

ap = 0.5 mm
ae = 0 mm

Measuring Data



Σχήμα 5.7 : Γράφημα δυνάμεων κοπής

A/A	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
8	B4	3	955	1146	120	0.4

Πίνακας 5.8 : Συνθήκες κοπής

8

Page 1 of 1

Printed on 12. April 2011 at 13:37

Measuring File

Path: C:\Documents and Settings\DML\Desktop\xristos_face_milling\7.dwd
Cycle: 1 of 1
Date: Thursday, 24 March , 2011 13: 16: 02
Size: 2 446 840 Bytes

Documentation

Remark: range II : 500N range II : 1kN

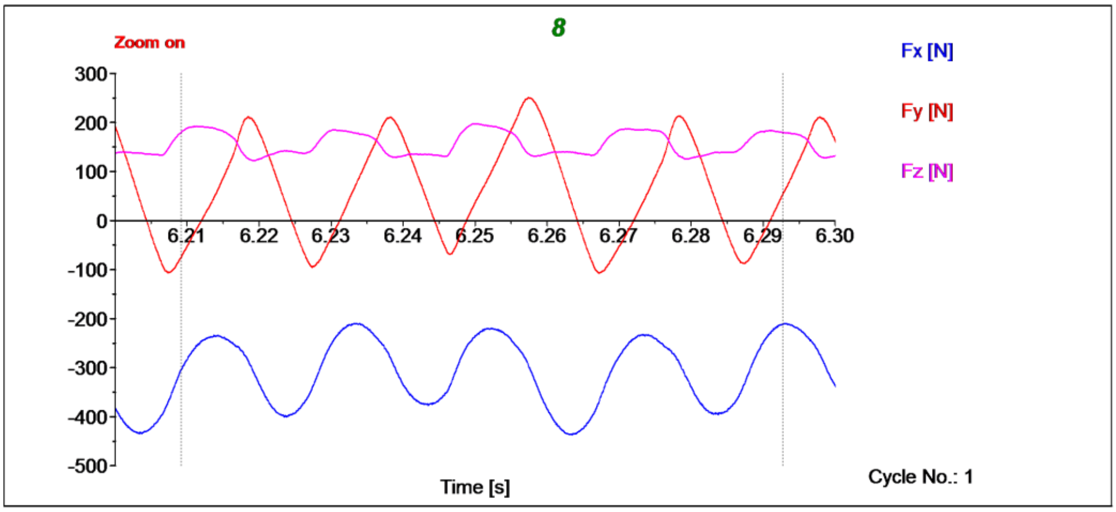
Material: CK 60
Tool: D40 Facemill

vc = 120 m/min
n = 955 rpm

f = 0.4 mm/rev
vf = 1143 mm/min

ap = 0.5 mm
ae = 0 mm

Measuring Data



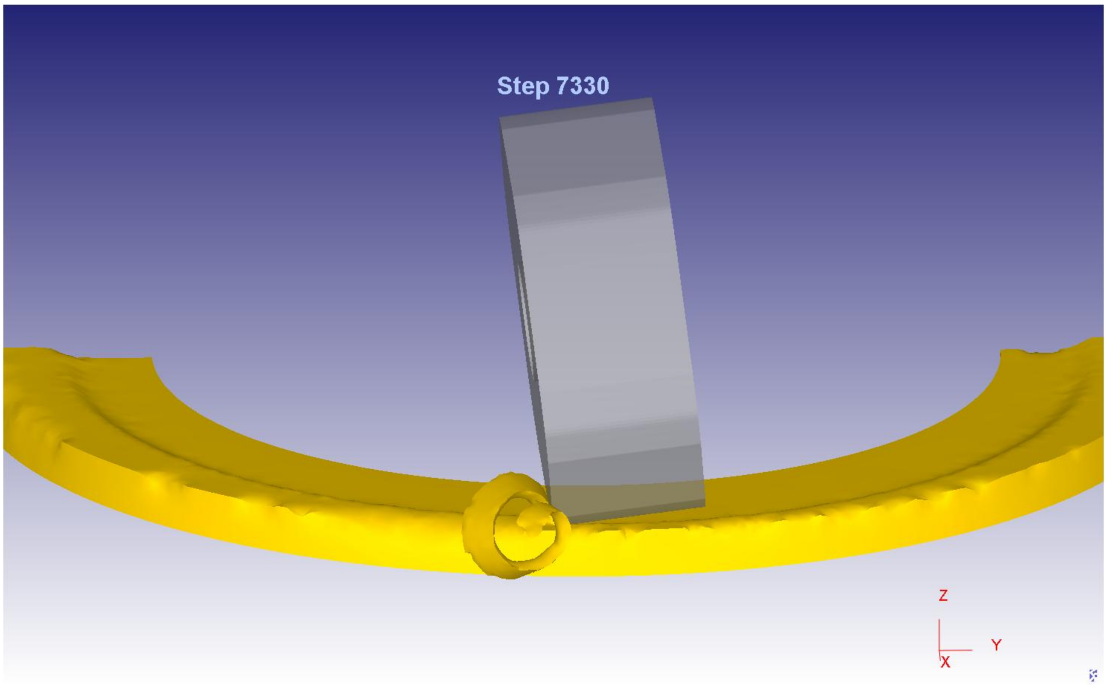
Σχήμα 5.8 : Γράφημα δυνάμεων κοπής

5.2 Υπολογιστικά

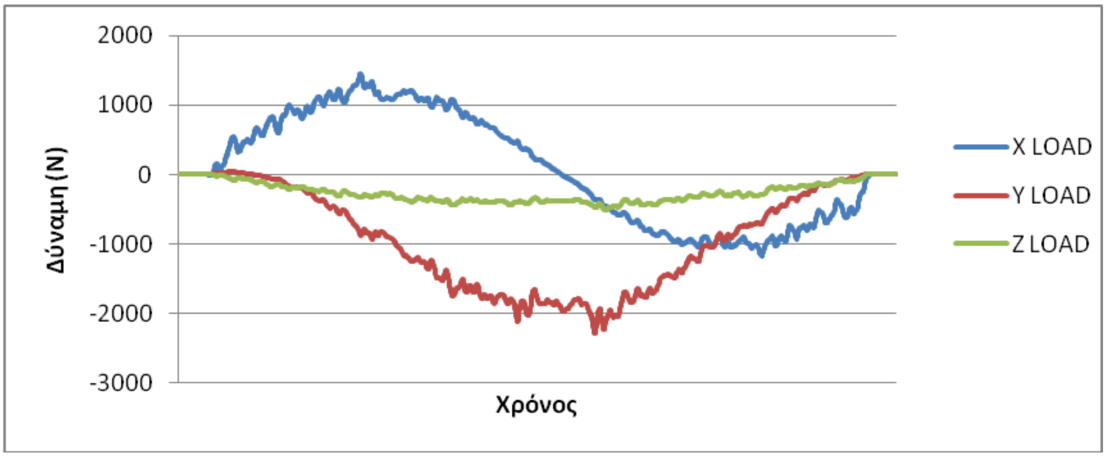
Παρακάτω γίνεται η παρουσίαση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Σε αυτά τα αποτελέσματα διακρίνονται ένας πίνακας με της συνθήκες κατεργασίας, ένα σχήμα το οποίο δείχνει τη δημιουργία του αποβλίττου κατά την προσομοίωση, ένα γράφημα το οποίο δείχνει τις υπολογιστικές δυνάμεις κοπής και άλλο ένα γράφημα που δείχνει τις δυνάμεις κοπής ομαλοποιημένες. Επίσης γίνεται και παρουσίαση για την κατανομή της θερμοκρασίας στο τεμάχιο και στην κοπτική ακμή καθώς και τις αντίστοιχη κατανομής τάσεων.

Α/Α	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
1	A1	1	955	955	120	1

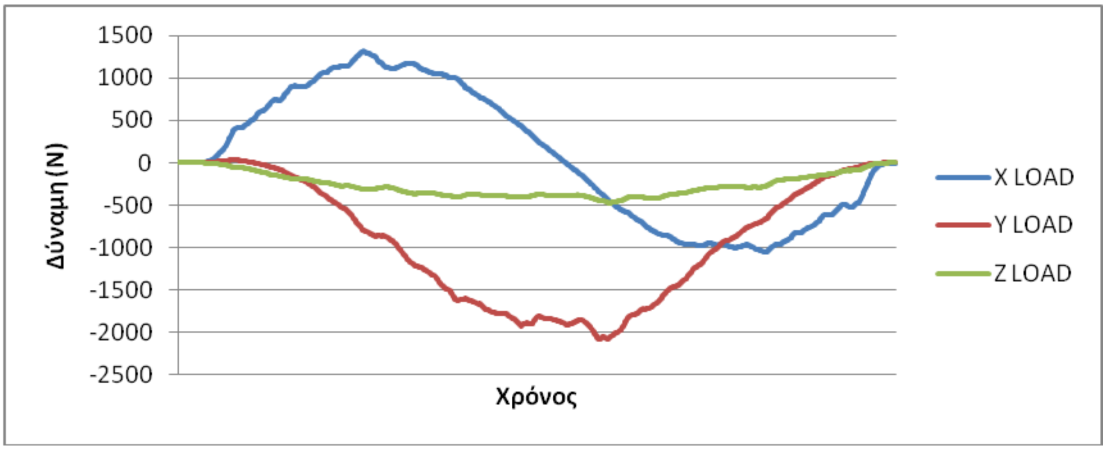
Πίνακας 5.9 : Συνθήκες κοπής



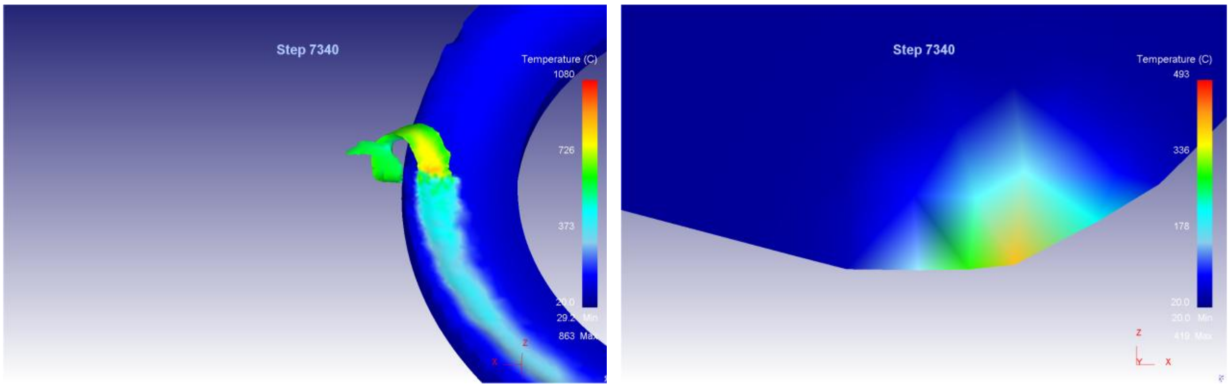
Σχήμα 5.9 : Σχηματισμός αποβλίττου



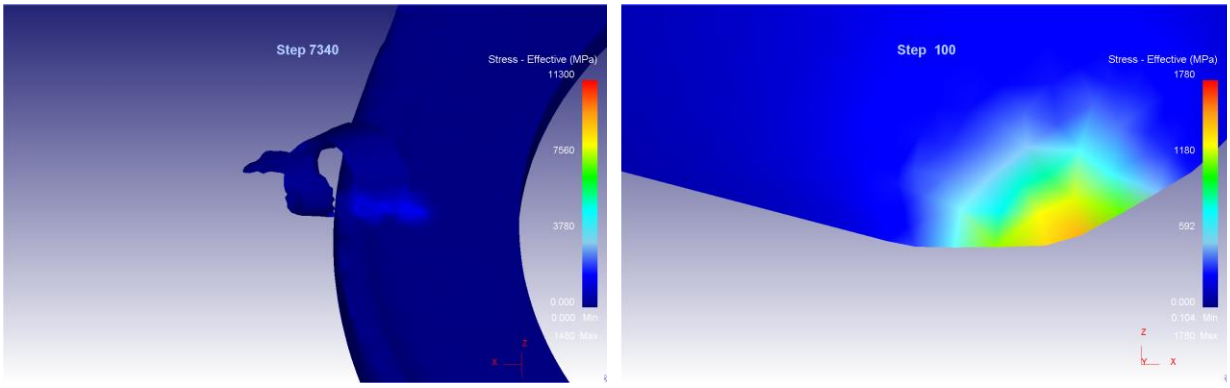
Σχήμα 5.10 : Υπολογιστικές δυνάμεις



Σχήμα 5.11 : Ομαλοποιημένες υπολογιστικές δυνάμεις



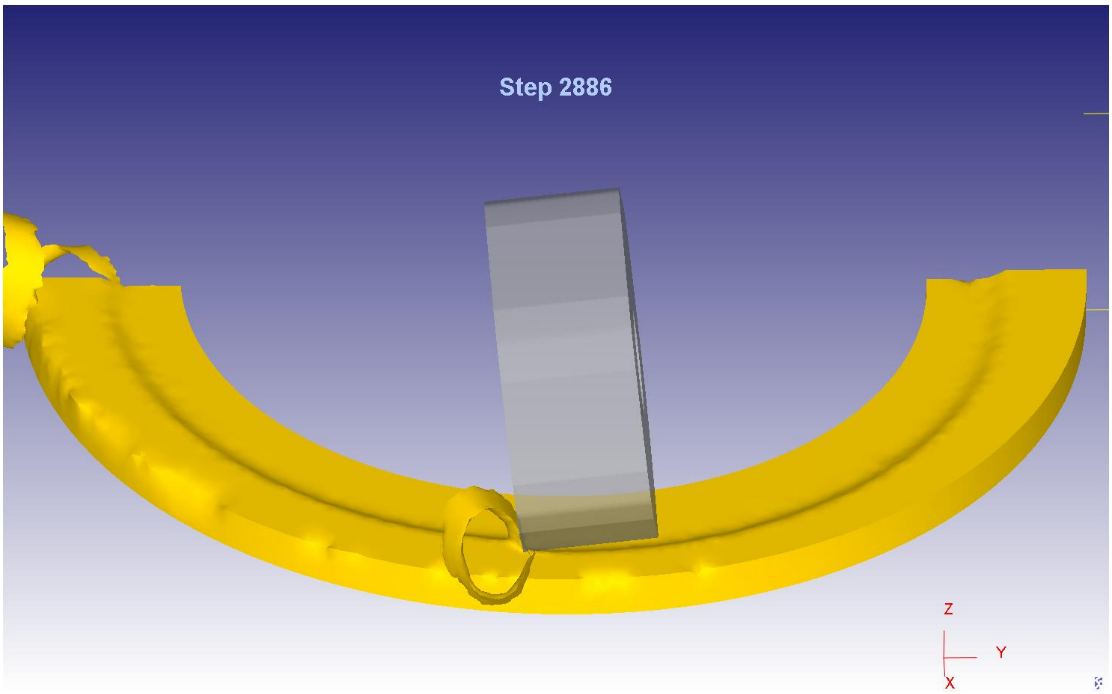
Σχήμα 5.12 : Κατανομή θερμοκρασίας κατά τη μέγιστη δύναμη στην κατεργαζόμενη επιφάνεια και στη κοπτική ακμή



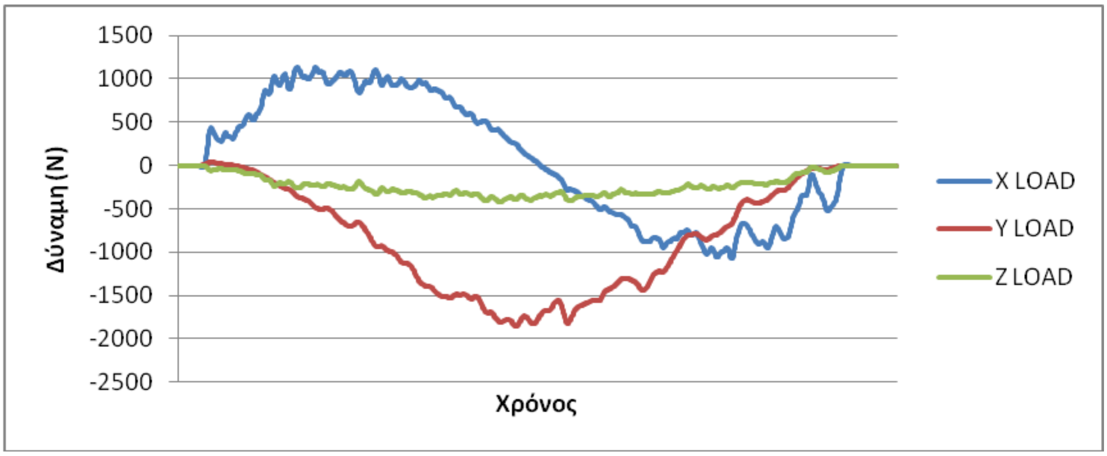
Σχήμα 5.13 : Κατανομή τάσεων κατά τη μέγιστη δύναμη στην κατεργαζόμενη επιφάνεια και στη κοπτική ακμή

Α/Α	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
2	A2	1	955	764	120	0.8

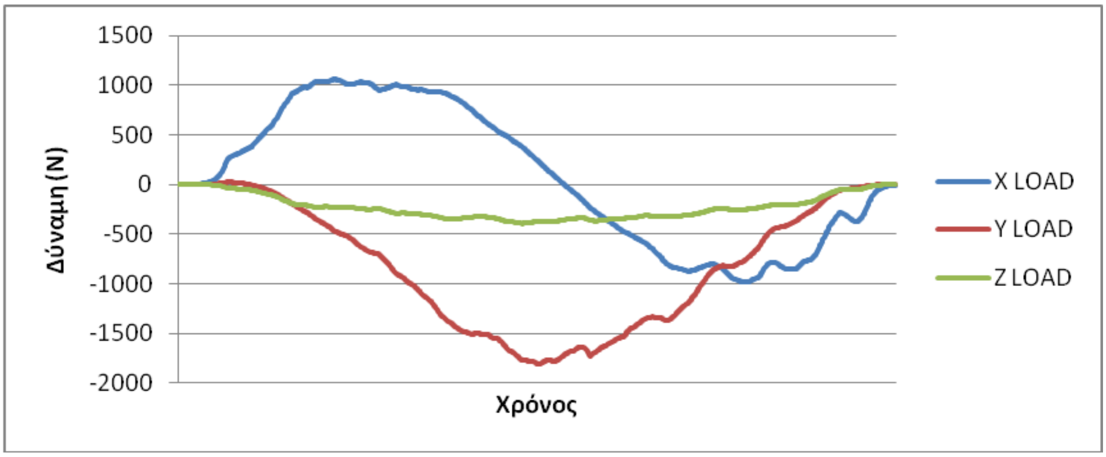
Πίνακας 5.10 : Συνθήκες κοπής



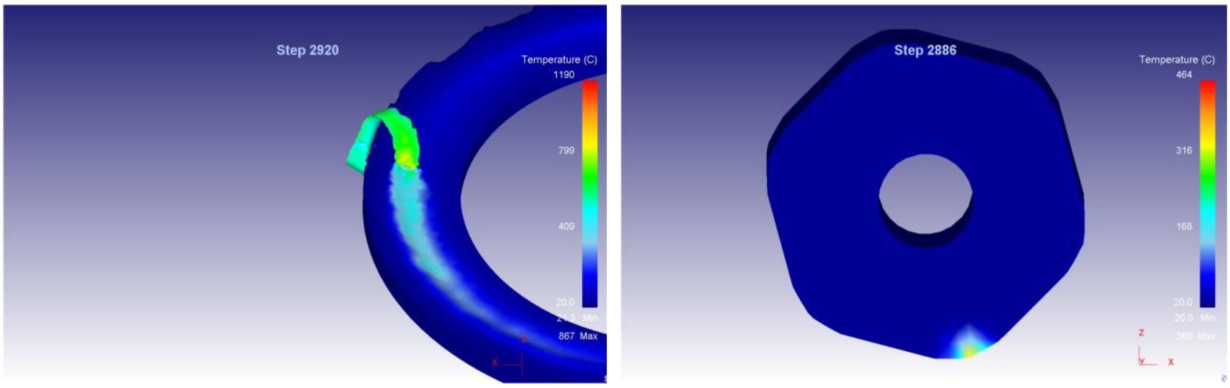
Σχήμα 5.14 : Σχηματισμός αποβλίττου



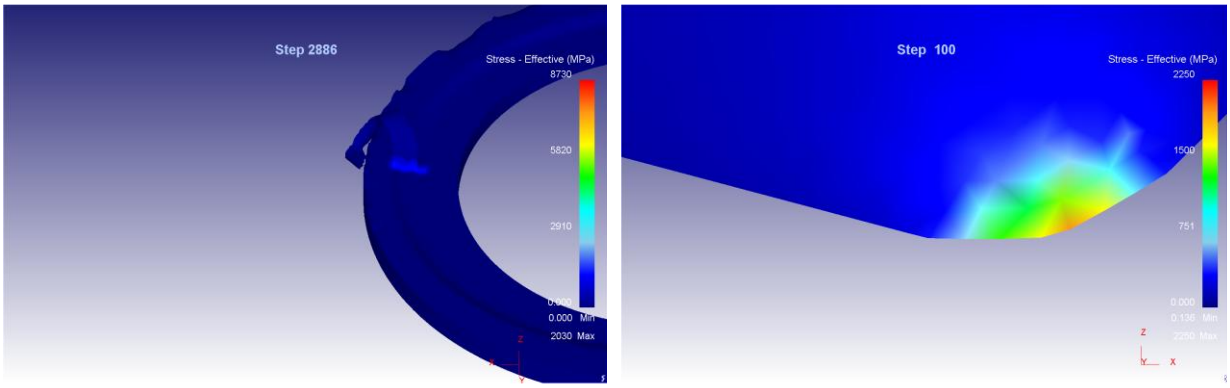
Σχήμα 5.15 : Υπολογιστικές δυνάμεις



Σχήμα 5.16 : Ομαλοποιημένες υπολογιστικές δυνάμεις



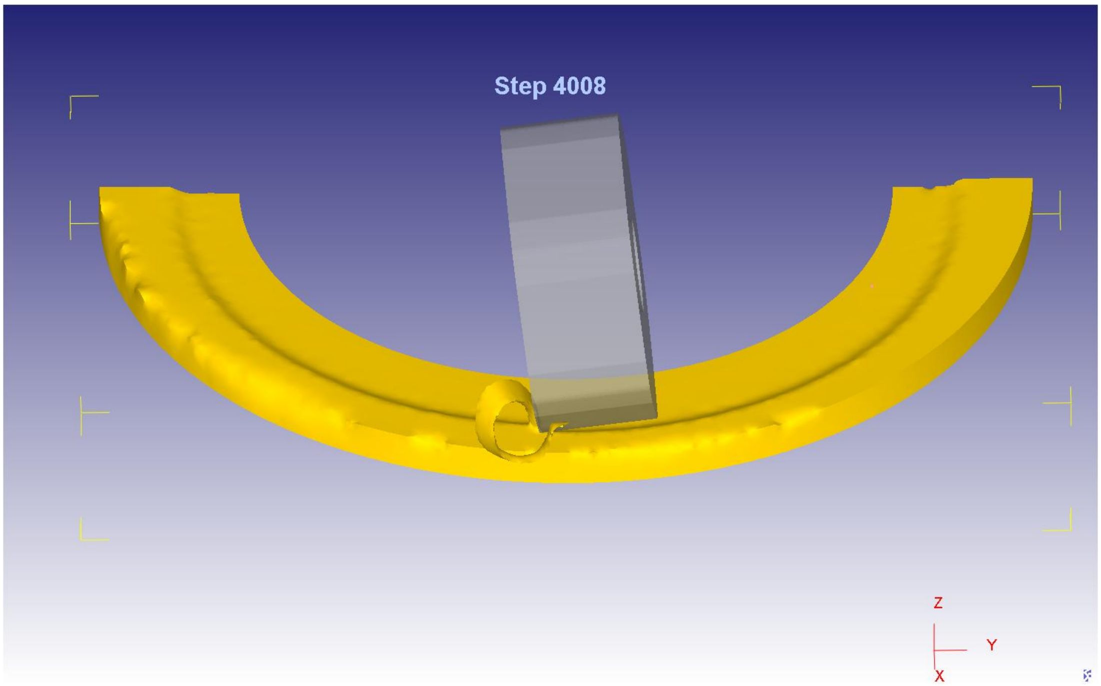
Σχήμα 5.17 : Κατανομή θερμοκρασίας κατά τη μέγιστη δύναμη στην κατεργαζόμενη επιφάνεια και στη κοπτική ακμή



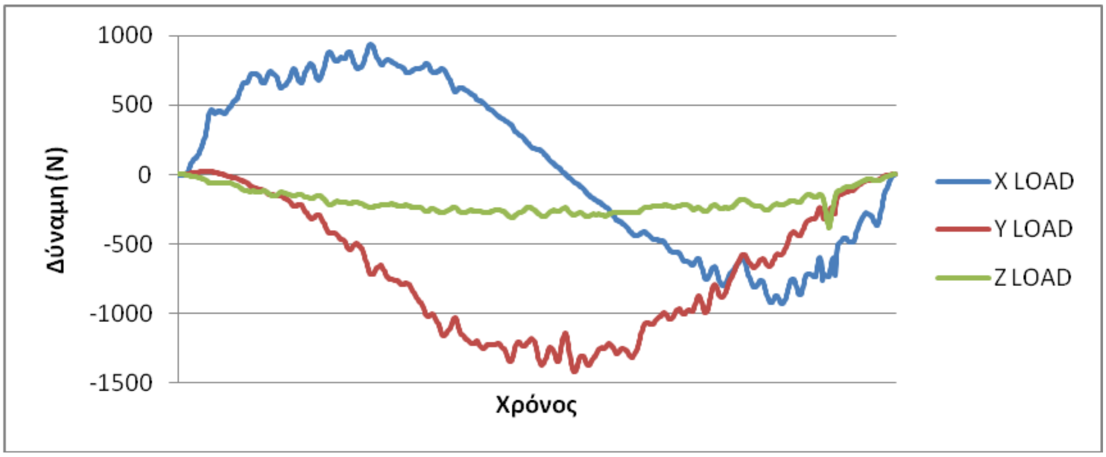
Σχήμα 5.18 : Κατανομή τάσεων κατά τη μέγιστη δύναμη στην κατεργαζόμενη επιφάνεια και στη κοπτική ακμή

A/A	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
3	A3	1	955	573	120	0.6

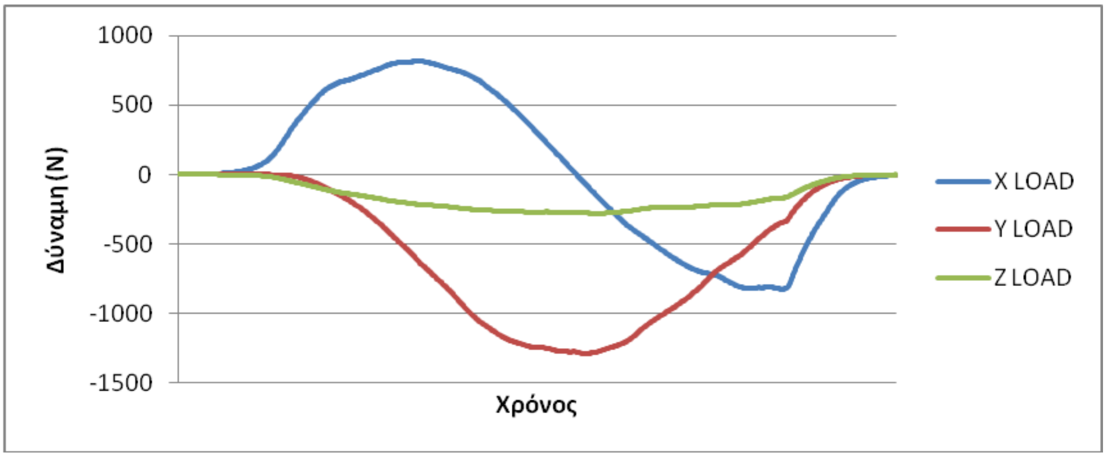
Πίνακας 5.11 : Συνθήκες κοπής



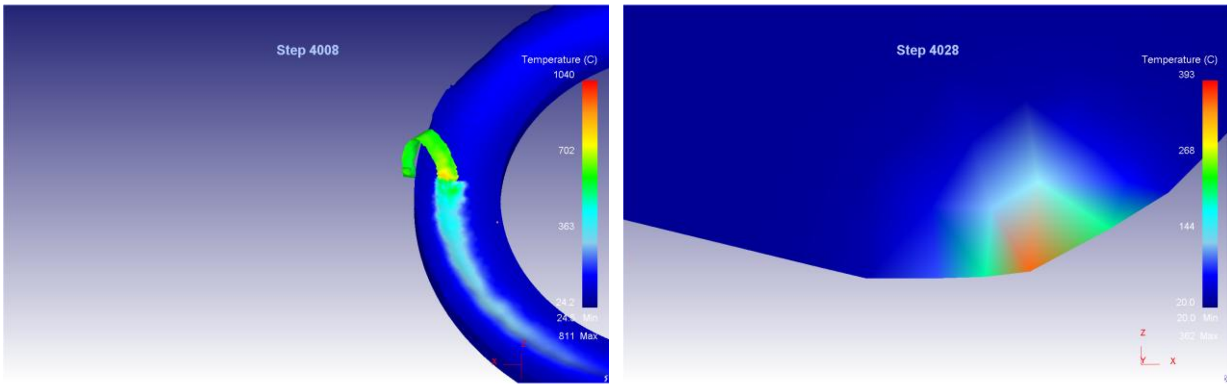
Σχήμα 5.19 : Σχηματισμός αποβλίττου



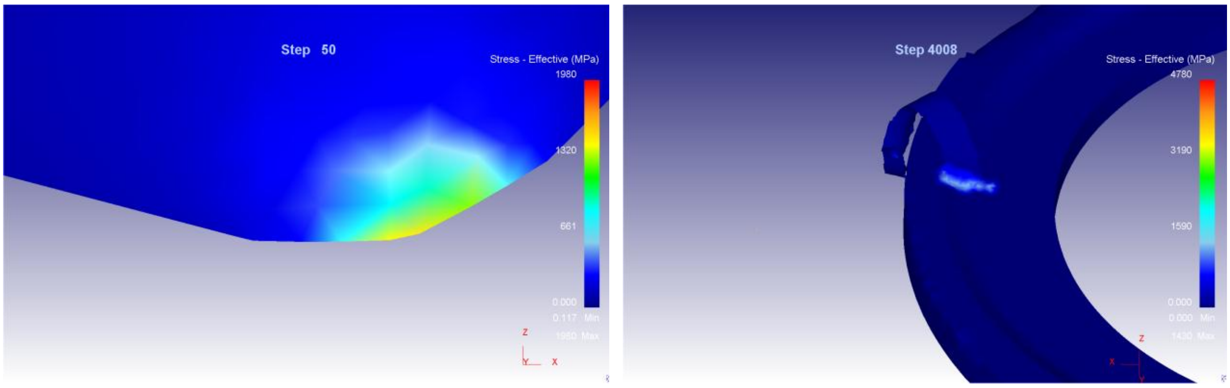
Σχήμα 5.20 : Υπολογιστικές δυνάμεις



Σχήμα 5.21 : Ομαλοποιημένες υπολογιστικές δυνάμεις



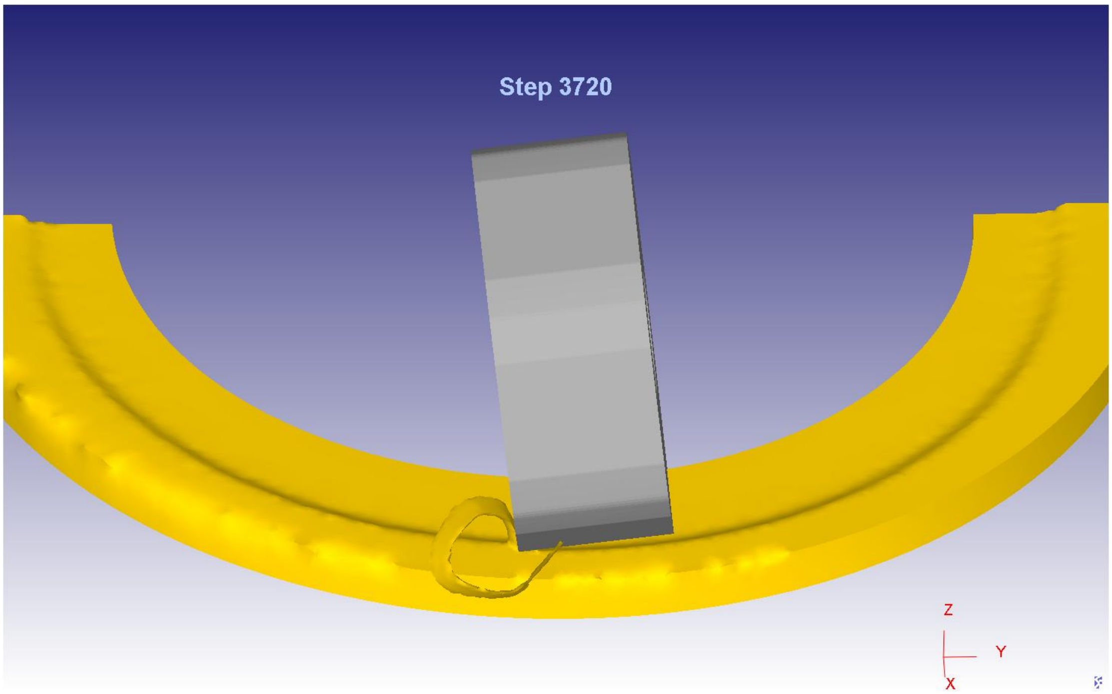
Σχήμα 5.22 : Κατανομή θερμοκρασίας κατά τη μέγιστη δύναμη στην κατεργαζόμενη επιφάνεια και στη κοπτική ακμή



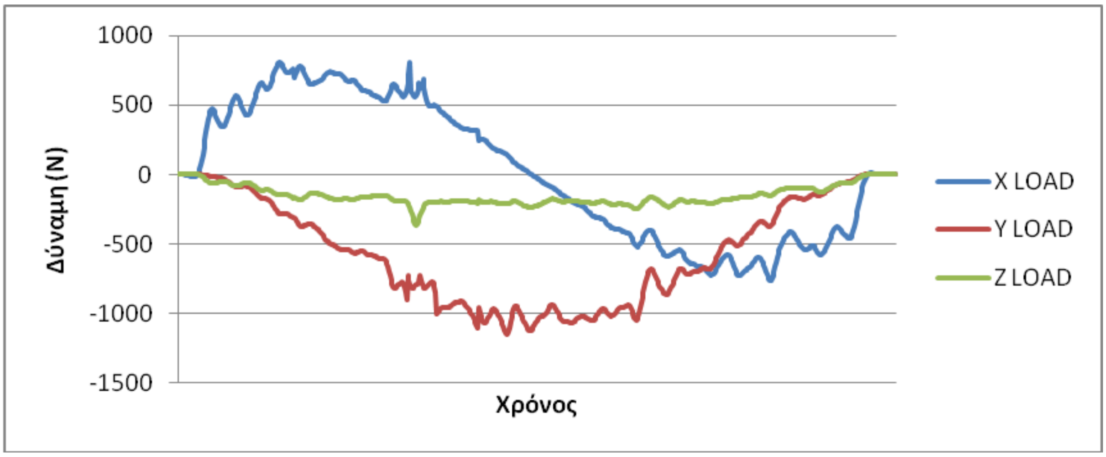
Σχήμα 5.23 : Κατανομή τάσεων κατά τη μέγιστη δύναμη στην κατεργαζόμενη επιφάνεια και στη κοπτική ακμή

A/A	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
4	A4	1	955	382	120	0.4

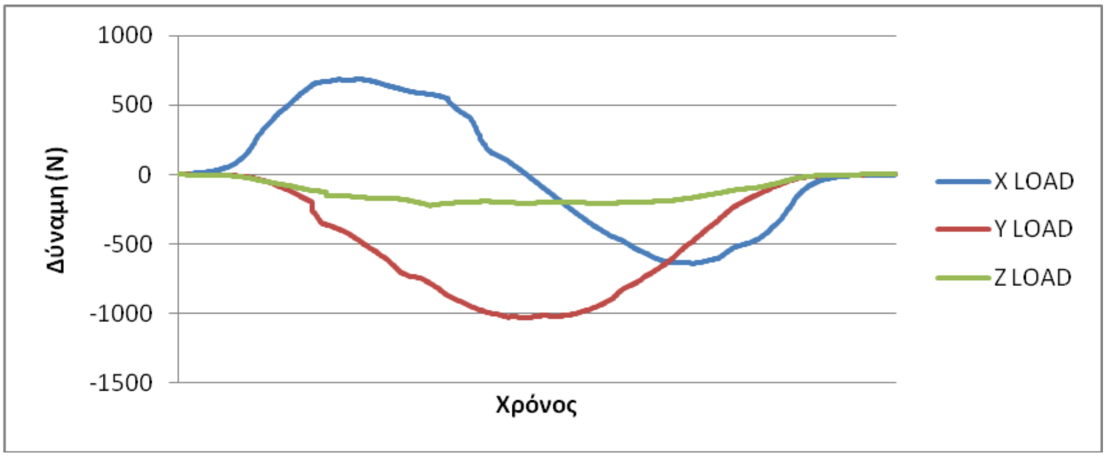
Πίνακας 5.12 : Συνθήκες κοπής



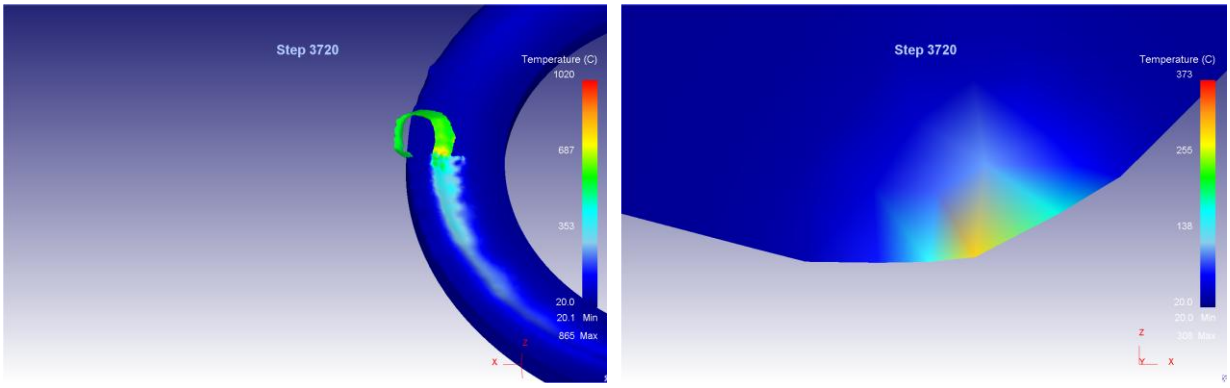
Σχήμα 5.24 : Σχηματισμός αποβλίττου



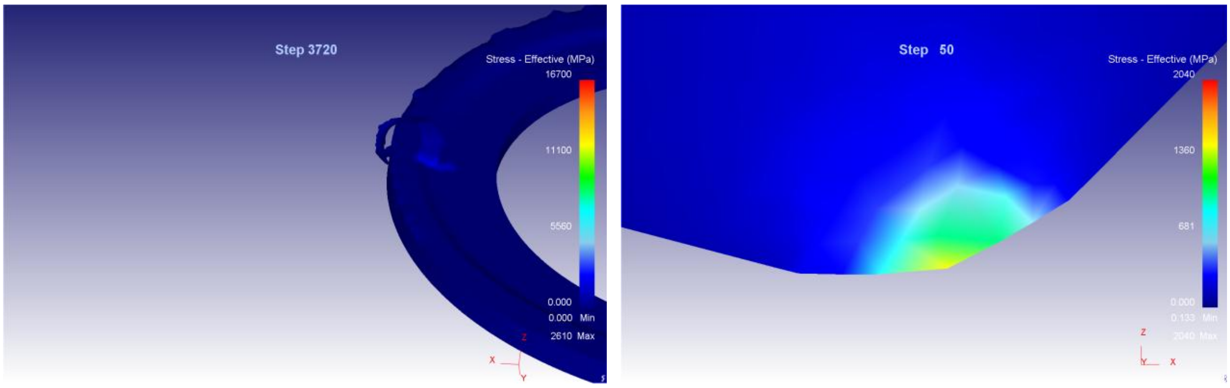
Σχήμα 5.25 : Υπολογιστικές δυνάμεις



Σχήμα 5.26 : Ομαλοποιημένες υπολογιστικές δυνάμεις



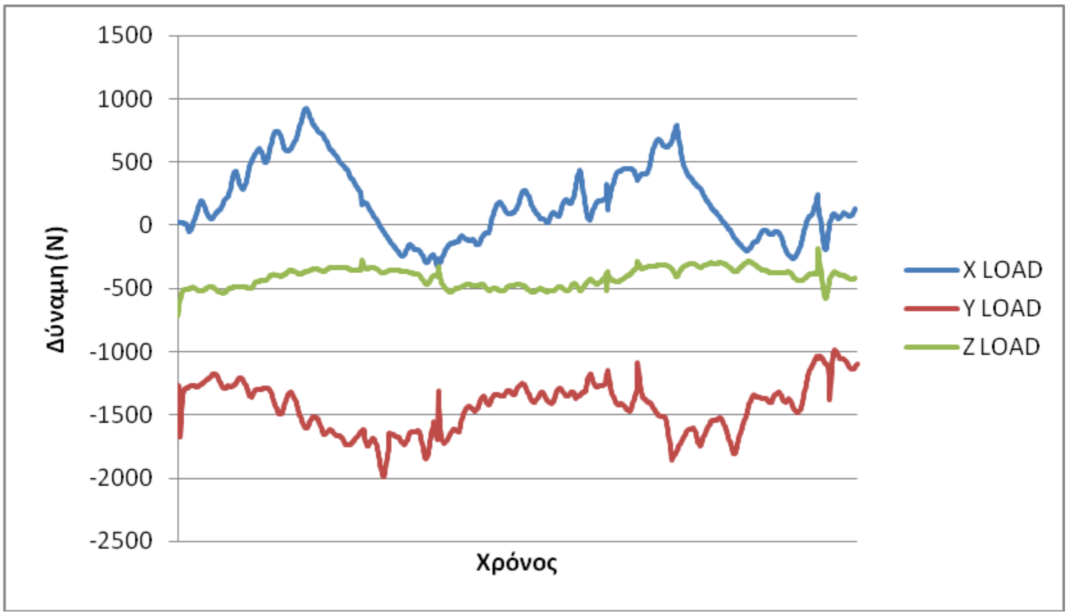
Σχήμα 5.27 : Κατανομή θερμοκρασίας κατά τη μεγίστη δύναμη στην κατεργαζόμενη επιφάνεια και στη κοπτική ακμή



Σχήμα 5.28 : Κατανομή τάσεων κατά τη μεγίστη δύναμη στην κατεργαζόμενη επιφάνεια και στη κοπτική ακμή

A/A	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
5	B1	3	955	2865	120	1

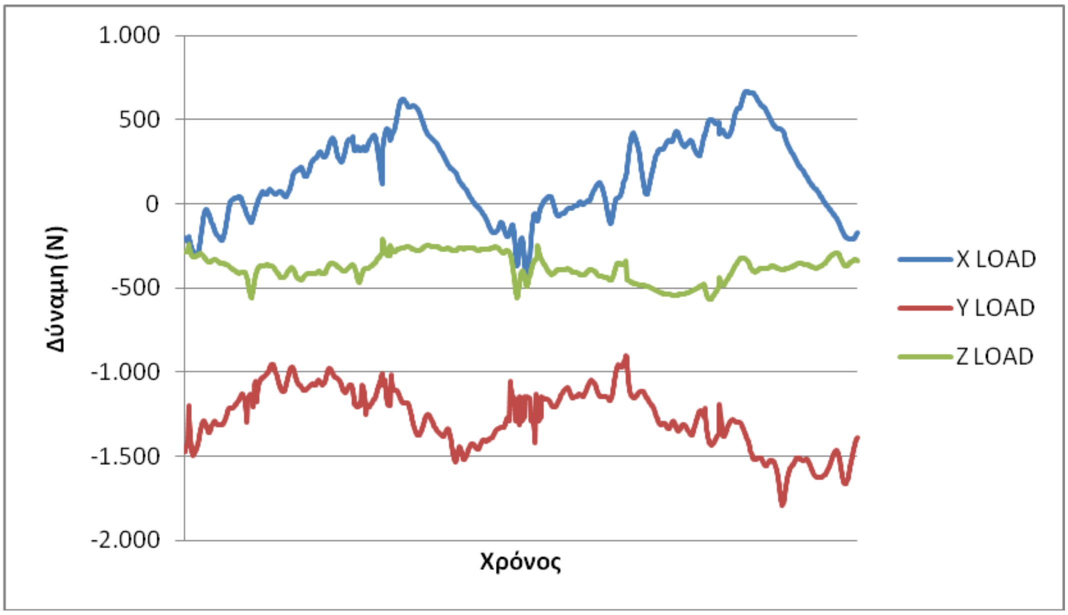
Πίνακας 5.13 : Συνθήκες κοπής



Σχήμα 5.29 : Υπολογιστικές δυνάμεις

A/A	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
6	B2	3	955	2292	120	0.8

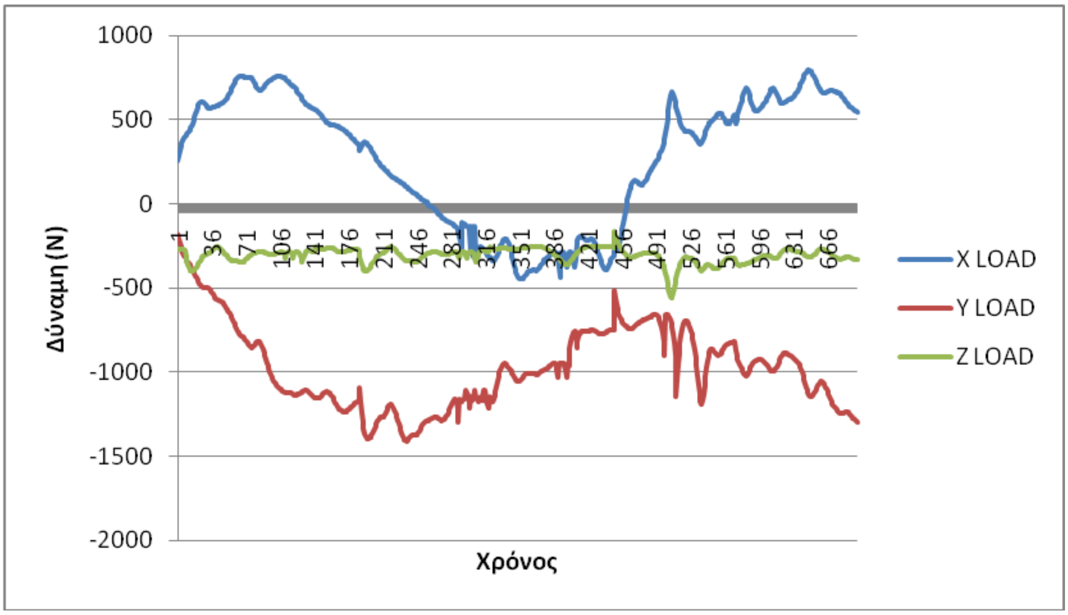
Πίνακας 5.14 : Συνθήκες κοπής



Σχήμα 5.30 : Υπολογιστικές δυνάμεις

Α/Α	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
7	B3	3	955	1719	120	0.6

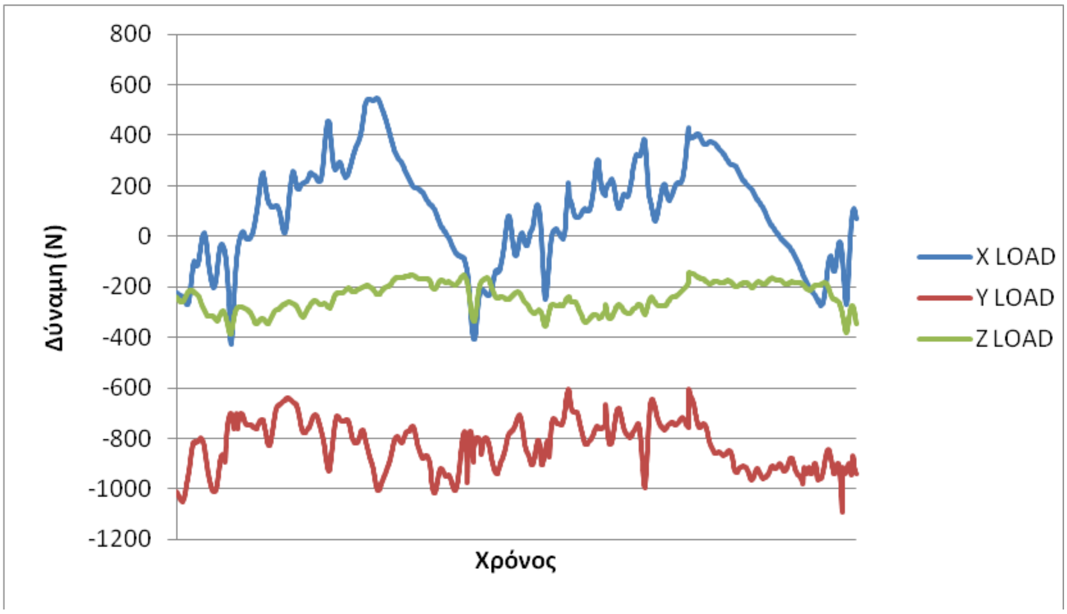
Πίνακας 5.15 : Συνθήκες κοπής



Σχήμα 5.31 : Υπολογιστικές δυνάμεις

Α/Α	Τεμ.	n	SP (rpm)	FD (mm/min)	V_c (m/min)	f_z (mm/δόντι)
8	B4	3	955	1146	120	0.4

Πίνακας 5.16 : Συνθήκες κοπής



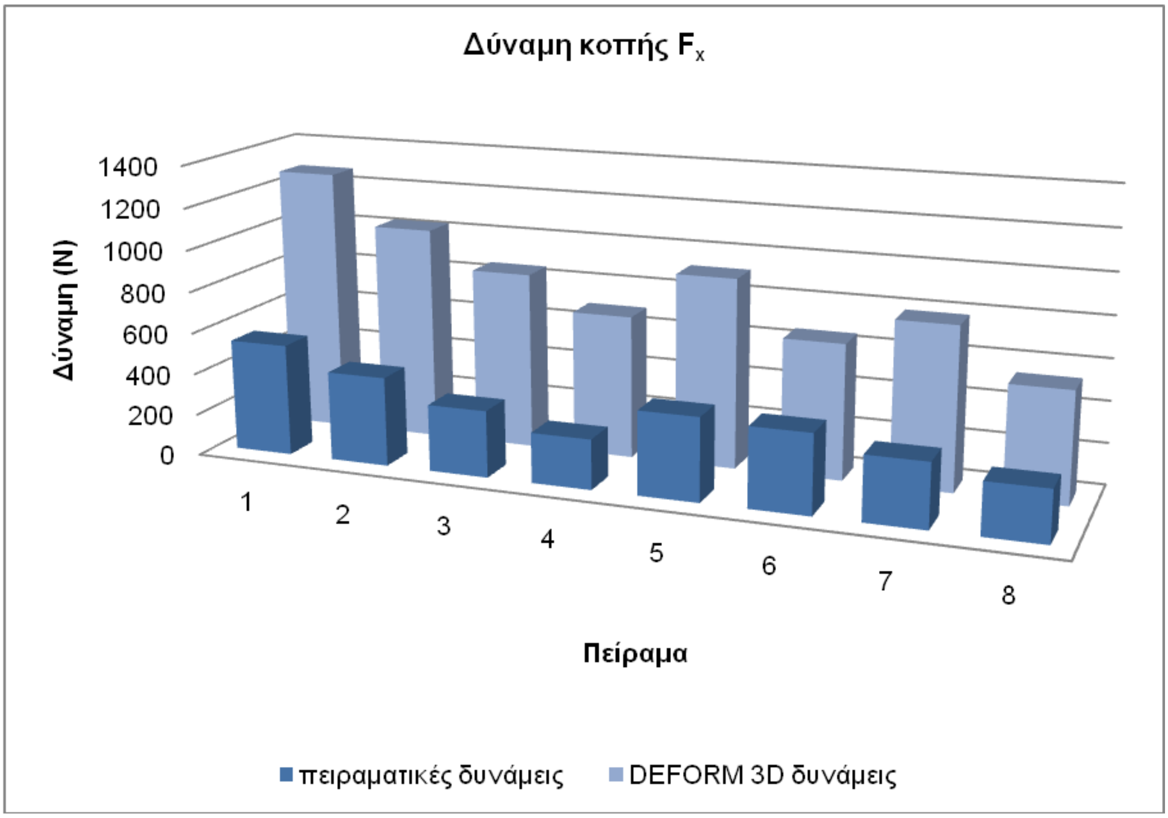
Σχήμα 5.32 : Υπολογιστικές δυνάμει

5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Παρακάτω γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για κάθε άξονα ξεχωριστά. Ως προς τα πειραματικά αποτελέσματα έχει γίνει αντιστοίχηση με τα υπολογιστικά αποτελέσματα καθώς τα πειραματικά δεν έχουν σταθερή διεύθυνση κοπής ενώ τα υπολογιστικά έχουν.

ΠΕΙΡΑΜΑ	F_x	x DEFORM
1	537,11	1272
2	428,71	1030
3	321	851
4	241	688
5	401	914
6	383	652
7	310	785
8	250	537

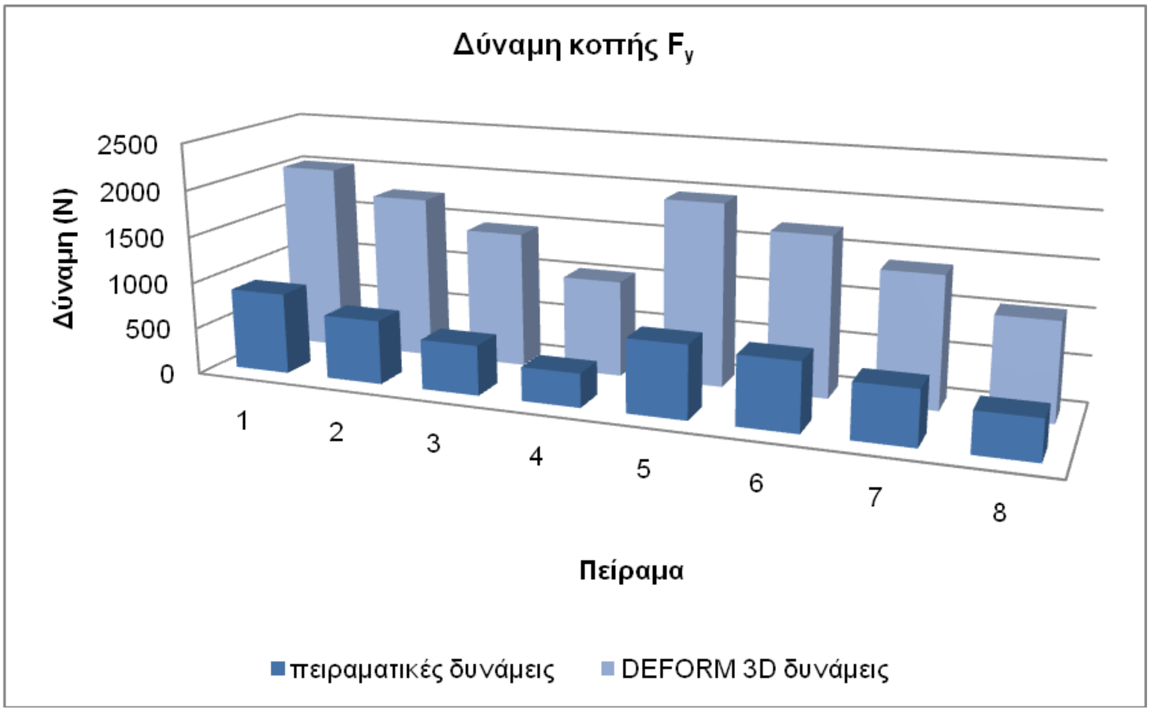
Πίνακας 5.17 : Δύναμη κοπής F_x



Σχήμα 5.33: Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών δυνάμεων κοπής F_x

ΠΕΙΡΑΜΑ	F_y	y DEFORM
1	874,02	2020
2	688	1760
3	536	1460
4	363	1033
5	783	1963
6	735	1713
7	587	1408
8	436	1049

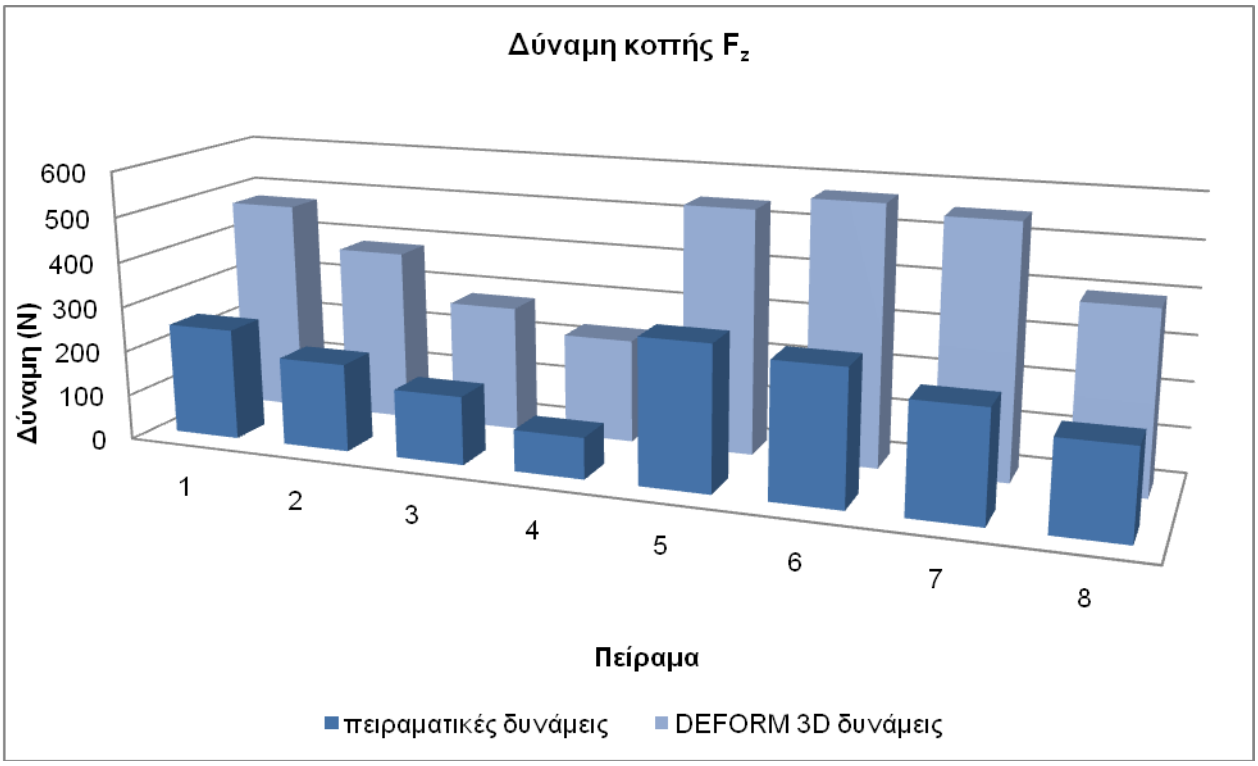
Πίνακας 5.18 : Δύναμη κοπής F_y



Σχήμα5.34 : Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών δυνάμεων κοπής F_y

ΠΕΙΡΑΜΑ	F_z	z DEFORM
1	247	474
2	195	383
3	151	279
4	91	229
5	318	539
6	296	570
7	243	551
8	197	396

Πίνακας 5.19: Δύναμη κοπής F_z



Σχήμα 5.35 : Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών δυνάμεων κοπής F_z

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων παρατηρείται ότι οι υπολογιστικές δυνάμεις κοπής και στους τρεις άξονες είναι σχεδόν διπλάσιες από τις πειραματικές δυνάμεις. Επίσης παρατηρείται ότι οι υπολογιστικές δυνάμεις κοπής έχουν σωστή συμπεριφορά ως προς το χρόνο, δηλαδή έχουν την ίδια μορφή με τις πειραματικές δυνάμεις αλλά, όπως αναφέρθηκε, διαφέρουν ως προς την μέγιστη τιμή. Επιπλέον κατά την προσομοίωση με τρεις κοπτικές ακμές το πρόγραμμα δυσκολεύεται να τρέξει μάλλον λόγω της συνεχόμενης επανα-διακριτοποίησης.

Μετά από διερεύνηση των αιτιών φαίνεται πως για τα αποτελέσματα τα οποία είναι διπλάσια σε τιμές μάλλον φταίει η επιλογή του συντελεστή τριβής ο οποίος ίσως δεν είναι κατάλληλος. Αν και επιλέχθηκε σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήστη του προγράμματος ένας μικρότερος συντελεστής έχει καλύτερα αποτελέσματα.

Επίσης στην βιβλιογραφία συναντάται πολλές φόρες η χρήση του προγράμματος OXCUT για τη δημιουργία των ιδιοτήτων ενός υλικού. Στο πρόγραμμα αυτό εισάγονται αποτελέσματα από ένα πείραμα και μετά αυτό δημιουργεί τις συναρτήσεις για το υλικό και στη συνέχεια τις χρησιμοποιει στο DEFORM και έτσι παράγονται πολύ πιο ακριβή αποτελέσματα.

Συνέχεια αυτής της εργασίας θα μπορούσε να είναι η μελέτη του συντελεστή τριβής και το πως επηρεάζει την προσομοίωση καθώς και η μελέτη για το πώς γίνεται η δημιουργία των εξισώσεων των υλικών και η χρήση προγραμμάτων για αυτό τον σκοπό.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Πετρόπουλος Π. “Μηχανουργική Τεχνολογία”, Εκδόσεις Ζήτη, ISBN 960-431-T.2-198-0

[2] Αντωνιάδης Α. “Μηχανουργική Τεχνολογία – τόμος Β’ Κατεργασίες κοπής”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010

[3] Ehmann, K. F., Hong, M. S., 1994, “*A Generalized Model of the Surface Generation Process in Metal Cutting*”, Annals of the CIRP, Vol.43, pp.483-486

[4] El Mounayri, H., Spence, A. D., Elbestawi, M. A., 1998, “*Milling Process Simulation – A Generic Solid Modeller Based paradigm*”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 120, pp. 213-221.

[5] Gu, F., Kapoor, S.G., DeVor, R. E., 1997, “*An Enhanced Cutting Force Model for Face Milling with Variable Cutter Feed Motion and Complex Workpiece Geometry*”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, pp. 467-475.

[6] Yucesan, G., Xie, Q., Bayoumi, A., 1993, “*Determination of Process Parameters through a Mechanistic Force Model of Milling Operations*”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 33, No. 4, pp. 627-641.

[7] Smith, S., Tlusty, J., 1991, “*An overview of Modeling and Simulation of the Milling Process*”, Journal of Engineering for Industry, Vol.113, pp. 169-175.

[8] Bayoumi, A. E., Yucesan, G., Kendall, L.A., 1994, “*An Analytical Mechanistic Cutting Force Model for Milling Operations: A Theory and Methodology*”, Journal of Engineering for Industry, Vol.116, pp. 324-330.

[9] Bayoumi, A. E., Yucesan, G., Kendall, L.A., 1994, “*An Analytical Mechanistic Cutting Force Model for Milling Operations: A Case Study of Helical Milling Operation,*” Journal of Engineering for Industry, Vol.116, pp. 331-339.

[10] Ehmann, K. F., Kapoor, S. G., Devor, R.E., and Lazoglu, I., 1997, “*Machining Process Modeling: A Review*”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, pp. 655-663.

[11] Μεθενίτης, Γ., “*Ανάλυση του μηχανισμού και των δυνάμεων κοπής του πολυαξονικά καθοδηγούμενου φραιζαρίσματος με σκοπό την ενσωμάτωσή του σε σύστημα CAM*”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολογίας ΑΠΘ, 1988.

[12] Patel K. M., Joshi S. S., 2006, “*Mechanics of machining of face-milling operation performed using a self-propelled round insert milling cutter*”, Journal of Materials Processing Technology 171, pp. 68–76

[13] Baroa P.K., Joshia S. S., Kapoorb S.G., 2005, “*Modeling of cutting forces in a face-milling operation with self-propelled round insert milling cutter*”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, 831–839

[14] Zheng L., Li Y., Liang S. Y., 1997 “*A Generalised Model of Milling Forces*”, The International Journal of advanced manufacturing, 14, pp. 160-171

[15] Baek D. K., Ko T. J., Kim H. S., 2001, “*Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model*”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41, pp. 451–462

[16] Engin S., Altintas Y., 2001, “*Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: helical end mills*”, Machine Tools and Manufacture, 41, pp. 2195-2212

[17] Engin S., Altintas Y., 2001, “*Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part II: Inserted cutters*”, Machine Tools and Manufacture, 41, pp. 2213-2231

[18] Benardos P. G., Vosniakos G. C., 2002, "*Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments*", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 18, pp. 343-354

[19] Antoniadis, A. "*Simulation of Milled Surface Topomorphy*", 1999, International Journal of Simulation and Modelling, (in press)

[20] Antoniadis A., Savakis C., Bilalis N., Balouksis A., 2003, "*Prediction of surface topomorphy and roughness in ball end milling*", Advanced Manufacturing Technology, 21, pp. 965-971

[21] Saı K., Bouzid W., 2005, "*Roughness modeling in up-face milling*", International journal of Advanced Manufacturing Technology, 26, pp. 324-329

[22] Franco P., Estrems M., Faura F., 2008, "*A study of back cutting surface finish from tool errors and machine tool deviations during face milling*", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48, pp. 112–123