



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Α.Γ. ΜΑΜΑΛΗΣ

**ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ
ΛΙΑΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΑΓΓΕΛΟΣ ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΜΠ**

ΑΘΗΝΑ 2006

ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. Καθηγητής Α.Γ. Μάμαλης (Επιβλέπων)
2. Καθηγητής Δ.Ε. Μανωλάκος (μέλος της Τριμ. Συμβ. Επιτροπής)
3. Επίκ. Καθηγητής Γ.-Χ. Βοσνιάκος (μέλος της Τριμ. Συμβ. Επιτροπής)

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. Καθηγητής Α.Γ. Μάμαλης (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών)
2. Καθηγητής Κ. Σπέντζας (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών)
3. Καθηγητής Δ.Ε. Μανωλάκος (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών)
4. Καθηγητής Γ. Παπαδημητρίου (Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών)
5. Καθηγητής Χ. Παναγόπουλος (Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών)
6. Καθηγητής Δ. Νιάρχος (ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος)
7. Επίκ. Καθηγητής Γ.-Χ. Βοσνιάκος (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών)

Η έγκριση της Διδακτορικής Διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932 Άρθρο 202).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vii
SUMMARY	xi
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ	xv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ	xvii

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΚΑΙ ΛΙ- ΑΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Κατεργασίες υψηλής και λίαν υψηλής ακριβείας	4
1.3 Η κατεργασία της λείανσης	11
1.3.1 Περιγραφή της λείανσης-Βασικές έννοιες	11
1.3.2 Ο λειαντικός τροχός	19
1.3.3 Υγρά κοπή	27
1.4 Κατεργασίες κοπής μετάλλων	32
1.4.1 Σχηματισμός και είδη αποβλίττου	32
1.4.2 Τεχνικές μελέτης του σχηματισμού αποβλίττου-Ορθογωνική και λοξή κοπή	36
1.4.3 Σύγχρονες τεχνικές τόννευσης-Φιλικές προς το περιβάλλον κοπές-Μικροκοπή	39
Βιβλιογραφία	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

2.1 Γενικά για τη μοντελοποίηση	55
2.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	63
2.2.1 Περιγραφή της μεθόδου	63

2.2.2 Προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων	71
2.3 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα	77
2.3.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου	78
2.3.2 Αρχή λειτουργίας και αρχιτεκτονική των μοντέλων	82
2.3.3 Εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων	90
Βιβλιογραφία	103

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ

3.1 Γενικά για τη μοντελοποίηση της λείανσης	105
3.2 Μοντέλο του Jaeger	107
3.2.1 Ιδιότητες του κατεργαζόμενου υλικού	109
3.2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά-Προσδιορισμός του μήκους επαφής	109
3.2.3 Δυνάμεις, ενέργεια και θερμότητα	115
3.3 Επίδραση της υψηλής θερμικής φόρτισης στο κατεργαζόμενο τεμάχιο	120
3.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση της μοντελοποίησης της λείανσης	129
Βιβλιογραφία	135

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων MSC.Marc Mentat	151
4.1.1 Επίλυση προβλημάτων πεπερασμένων στοιχείων με το Marc	152
4.1.2 Σύνοψη περιγραφής των κυριότερων μενού του Mentat	158
4.2 Θερμικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων της λείανσης	168
4.2.1 Κατασκευή των θερμικών μοντέλων	168

4.2.2 Επαλήθευση των αποτελεσμάτων των μοντέλων	173
4.2.3 Πειραματική διαδικασία	177
4.2.4 Αποτελέσματα των θερμικών μοντέλων	178
4.3 Πρόβλεψη των θερμοκρασιακών πεδίων της λείανσης	180
4.4 Πρόβλεψη των θερμικά επηρεασμένων ζωνών	194
4.5 Επίδραση του υγρού κοπής	202
4.6 Επίδραση του υλικού του τεμαχίου	205
4.7 Επίδραση της κατανομής της πηγής θερμότητας	209
4.8 Θερμικά μοντέλα τριών διαστάσεων	215
4.9 Θερμομηχανικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων της λείανσης	222
4.9.1 Κατασκευή θερμομηχανικών μοντέλων	224
4.9.2 Αποτελέσματα θερμομηχανικών μοντέλων	227
4.10 Υπολογισμός των παραμενουσών τάσεων	233
Βιβλιογραφία	236

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

5.1 Μοντελοποίηση με μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης-Βιβλιογραφική ανασκόπηση της μοντελοποίησης της λείανσης με τη μέθοδο των νευρωνικών δικτύων	241
5.2 Γενική περιγραφή του MATLAB	245
5.3 Κατασκευή μοντέλων νευρωνικών δικτύων με χρήση του MATLAB	247
5.4 Μοντέλα νευρωνικών δικτύων για τη λείανση	253
5.4.1 Κατασκευή των μοντέλων	253
5.4.2 Επιλογή βέλτιστου δικτύου και αποτελέσματα της μοντελοποίησης	256
5.5 Υβριδικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων και νευρωνικών δικτύων	262
5.6 Σύγκριση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και νευρωνικών δικτύων	266
Βιβλιογραφία	268

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

**ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ
ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΟΠΗΣ**

6.1 Γενικά για τη μοντελοποίηση των κατεργασιών κοπής	271
6.2 Μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	273
6.2.1 Μοντελοποίηση <i>Lagrange</i>	274
6.2.2 Μοντελοποίηση <i>Euler</i>	277
6.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση της μοντελοποίησης των κατεργασιών κοπής	279
Βιβλιογραφία	285

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ
ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

7.1 Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων <i>AdvantEdge</i>	291
7.1.1 Επίλυση προβλημάτων πεπερασμένων στοιχείων με το <i>AdvantEdge</i>	292
7.1.2 Σύνοψη περιγραφή των κυριότερων μενού του προγράμματος	295
7.2 Δισδιάστατα μοντέλα της τόρνευσης ακριβείας σκληρυμένων χαλύβων με CBN εργαλεία σε υψηλές ταχύτητες	303
7.3 Επίδραση της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής	304
7.4 Επίδραση της γωνίας αποβλίττου	319
7.5 Επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας της κοπτικής ακμής	324
7.6 Χρησιμοποίηση εργαλείων με διάφορες μορφές-μοντελοποίηση της προ- εξοχής που δημιουργείται κατά την έξοδο του εργαλείου από το τεμάχιο	330
7.7 Μοντελοποίηση της μικροκοπής	340
7.8 Τρισδιάστατα μοντέλα τόρνευσης-Λοξή κοπή	343
Βιβλιογραφία	353

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8:

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΝΤΑΙ
ΣΤΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

8.1 Γενικά	355
8.2 Εφαρμογές της μικρο- και νανοτεχνολογίας	356
8.3 Συμπεράσματα	377
Βιβλιογραφία	384
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	389
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	393
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	397
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ	399
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε	401
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΟΡΩΝ	403

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι κατεργασίες αποβολής υλικού υψηλής ακριβείας έχουν προκαλέσει τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας κυρίως λόγω του αυξημένου ενδιαφέροντος που υπάρχει από την πλευρά της βιομηχανίας αλλά και επειδή αποτελούν ένα πολλά υποσχόμενο νέο επιστημονικό πεδίο. Οι κατεργασίες αυτές είναι σε θέση να παράγουν προϊόντα με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια, ακόμη και σε πολύ μικρές διαστάσεις. Ειδικά η μικρο- και η νανοτεχνολογία βρίσκονται στην αιχμή της σύγχρονης τεχνολογίας και παρόλο που μόλις τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αντικείμενο εκτεταμένης μελέτης, έχει ήδη σημειωθεί σημαντική πρόοδος στα θέματα που τις αφορούν και υπάρχουν άμπολλες τεχνολογικές εφαρμογές. Ακριβώς επειδή η μελέτη των κατεργασιών ακριβείας άρχισε πρόσφατα, είναι ανάγκη να διερευνηθούν περισσότερο οι κατεργασίες αυτές προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοσή τους και να μελετηθούν οι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της αποβολής υλικού αλλά και μετά το πέρας της κατεργασίας. Ένα από τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό είναι η μοντελοποίηση με διάφορες σύγχρονες μεθόδους, όπως αριθμητικές μέθοδοι και τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή με τίτλο «Κατεργασίες αποβολής υλικού λίαν υψηλής ακριβείας» εκπονήθηκε στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου και στοχεύει στη μελέτη κατεργασιών αποβολής υλικού που χρησιμοποιούνται στις κατεργασίες υψηλής ακριβείας, μέσω σύγχρονων τεχνικών μοντελοποίησης, προκειμένου να προτείνει νέα μοντέλα για τις εν λόγω κατεργασίες. Στα κεφάλαια της διατριβής μπορεί κανείς να βρει μια αρκετά εκτεταμένη θεωρητική ανάλυση των κατεργασιών ακριβείας που λαμβάνει υπόψη τις κρατούσες θεωρίες γύρω από τα θέματα αυτά καθώς και μια εμπειριστατωμένη μελέτη μέσω μοντελοποίησης δύο ευρέως χρησιμοποιούμενων κατεργασιών ακριβείας. Συγκεκριμένα μελετάται η λείανση, μια εξ ορισμού κατεργασία ακριβείας, και η κοπή ακριβείας μέσω της μελέτης της τόνρευ-

σης σκληρυμένων χαλύβων με εργαλεία από CBN σε υψηλές ταχύτητες, αλλά και της μελέτης της μικροκοπής. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Η κατασκευή των μοντέλων μέσω των μεθόδων αυτών πραγματοποιήθηκε με ειδικά προγράμματα που υπάρχουν στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ. Επιπλέον, για τη λείανση, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις στο Πανεπιστήμιο του Miskolc στην Ουγγαρία. Τα προτεινόμενα μοντέλα είναι δύο και τριών διαστάσεων και είναι σε θέση να προσφέρουν αξιόπιστα αποτελέσματα που συνδέονται με σημαντικά μεγέθη των κατεργασιών όπως θερμοκρασίες, τάσεις, μορφή αποβλίττου, κ.α., μελετώντας την επίδραση της μεταβολής διαφόρων παραμέτρων. Από τα αποτελέσματα μπορούν να προβλεφθούν ανεπιθύμητα φαινόμενα και να επιτευχθεί βελτιστοποίηση, ειδικά των κατεργασιών υψηλής ακριβείας, αφού τα αντίστοιχα μοντέλα είναι προσανατολισμένα στις κατεργασίες αυτές. Τα αποτελέσματα των μοντέλων είναι άμεσα αξιοποιήσιμα και ιδιαίτερα χρήσιμα για τα θέματα τα οποία πραγματεύονται. Τα ίδια τα μοντέλα καλύπτουν, συμπληρώνουν αλλά και βελτιώνουν τη σχετική βιβλιογραφία που υπάρχει σήμερα. Επιπλέον, αποτελούν μια καλή βάση για περαιτέρω έρευνα και μάλιστα μέσα στο κείμενο προτείνονται στις αντίστοιχες παραγράφους κάποιες βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν μελλοντικά. Συμπληρώνεται ότι η διδακτορική αυτή διατριβή συνοδεύεται από 330 διαφορετικές παραπομπές που αποτελούνται από δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά, συνέδρια, βιβλία, εγχειρίδια διατριβές και δικτυακούς τόπους, χωρισμένες κατά κεφάλαιο, οι οποίες καλύπτουν όλο το φάσμα των θεμάτων που πραγματεύεται η διατριβή, ενώ δίνεται έμφαση σε πρόσφατες δημοσιεύσεις, προκειμένου να μπορεί ο αναγνώστης να σχηματίσει μια πλήρη εικόνα για τις τελευταίες εξελίξεις. Σημειώνεται, ότι 17 από τις δημοσιεύσεις που αναφέρονται ως βιβλιογραφία, και οι οποίες είναι δημοσιευμένες σε έγκριτα διεθνή περιοδικά και πρακτικά συνεδρίων, αποτελούν ερευνητική εργασία του ίδιου του γράφοντος. Οι εργασίες αυτές αναφέρονται συγκεντρωτικά στο τέλος του προλόγου.

Στο σημείο αυτό αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Ακαδημαϊκό Καθηγητή Α.Γ. Μάμαλη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του ενδιαφέροντος θέματος της διδακτορικής διατριβής και για τη συνεργασία που είχαμε μέχρι την περάτωσή της. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Καθηγητή Δ.Ε. Μανωλάκο για τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και επισημάνσεις του καθώς και τη συνεχή συμπαράσταση του σε όλο το διάστημα της διατριβής. Η καθοδήγησή του αποτέλεσε σημαντική βοήθεια και συνέβαλλε τα μέγιστα στην επιτυχή αποπεράτωση της εργασίας. Θα ήθελα επίσης, να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Γ.-Χ. Βοσνιάκο για το ενδιαφέρον και τις υποδείξεις του. Ευχαριστίες οφείλω επίσης και στον Καθηγητή J. Kundrák του Πανεπιστημίου του Miskolc για τη βοήθειά του και την άψογη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της παραμονής μου εκεί, αλλά και για τη μετέπειτα συνεργασία μας.

Θα ήθελα επίσης να δώσω θερμές ευχαριστίες στους ανθρώπους με τους οποίους συνεργάστηκα στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, κατά τα χρόνια που εκπόνησα τη διδακτορική μου διατριβή, και ιδιαίτερα τους Π. Κωστάζο, Δρ. Ν. Βαξεβανίδη, Δρ. Ε. Βοττέα, Σ. Γεωργιόπουλο, Α. Βορτσέλα και Δρ. Α. Κουμούτσο, καθώς και το τεχνικό προσωπικό του εργαστηρίου για την άριστη καθημερινή συνεργασία. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τα αγαπημένα μου πρόσωπα, και ιδιαίτερα τους γονείς μου Πέτρο και Ρίτσα και την αρραβωνιαστικιά μου Ήρα, των οποίων η υποστήριξη, η ηθική συμπαράσταση και η αγάπη υπήρξε καθοριστική και κινητήριος δύναμη σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου και ιδιαίτερα τα χρόνια του διδακτορικού μου. Σε αυτούς αφιερώνω την εργασία αυτή.

Δημοσιεύσεις του γράφοντος που αναφέρονται στη βιβλιογραφία της διατριβής

1. A.G. Mamalis, J. Kundrák, K. Gyani, **A. Markopoulos**, “Finite element modelling of the temperature fields developed during grinding”, Proc. of the microCAD 2002 International Computer Science Conference, Miskolc, Hungary, pp. 141-148, 7-8 March 2002

2. A.G. Mamalis, J. Kundrák, **A. Markopoulos**, “On the simulation of surface grinding using implicit finite element techniques”, Proc. of the 4th International Scientific Conference DMC 2002, Kosice, Slovakia, pp. 46-49, 22-23 May 2002
3. A.G. Mamalis, J. Kundrák, K. Gyani, **A. Markopoulos**, “Finite element modelling of the temperature fields developed during grinding”, GEP, Vol. LIII, No 2-3, pp. 29-32, 2002
4. A.G. Mamalis, J. Kundrák, D.E. Manolakos, K. Gyani and **A. Markopoulos**, “Thermal modelling of surface grinding using implicit finite element techniques”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 21 (12), pp. 929-934, 2003
5. A.G. Mamalis, J. Kundrák, D.E. Manolakos, K. Gyani, **A. Markopoulos**, M. Horvath, “Effect of the workpiece material on the heat affected zones during grinding: numerical simulation”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 22 (11 & 12), pp. 761-767, 2003
6. A.G. Mamalis, J. Kundrák, D.E. Manolakos, **A. Markopoulos**, G. Christoforou, “Numerical analysis of surface grinding: Comparison between 2D and 3D modelling”, Proc. of the microCAD 2003 International Computer Science Conference, Miskolc, Hungary, pp. 155-160, 6-7 March 2003
7. A.G. Mamalis, J. Kundrák, K. Gyáni, **A. Markopoulos**, “Economic and Environmental Effects of Machining Hardened Bores and the Connecting Surfaces”, Proc. 9th International Workshop on Ecology and Economy in Manufacturing, ICEM 2003, Miskolc, Hungary, pp. 10-19, 18-21 October 2003
8. A.G. Mamalis, J. Kundrák, **A. Markopoulos**, “Numerical simulation for the determination of the temperature fields and the heat affected zones in grinding”, Production Systems and Information Engineering, Miskolc, Vol. I, pp. 3-16, 2003

9. A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, M.B. Ioannidis, **A. Markopoulos**, I.N. Vottea, "Simulation of advanced manufacturing of solids and porous materials", The International Journal for Manufacturing Science & Production, Volume 5, No. 3, pp. 111-130, 2003
10. A.G. Mamalis, J. Kundrák, D.E. Manolakos, **A. Markopoulos**, K. Tsimpidakis, "The effect of the heat source profile in the thermal modeling of surface grinding", Proc. of the microCAD 2004 International Computer Science Conference, Miskolc, Hungary, pp. 133-139, 18-19 March 2004
11. A.G. Mamalis, L.O.G. Vogtländer, **A. Markopoulos**, "Nanotechnology and Nanostructured Materials: Trends in Carbon Nanotubes", Precision Engineering, 28 (1), pp. 16-30, 2004
12. A.G. Mamalis, J. Kundrák, D.E. Manolakos, **A. Markopoulos**, K. Tsimpidakis, "The effect of the heat source profile in the thermal modeling of surface grinding", GEP, Vol. LV, No. 1, pp. 26-29, 2004.
13. A.G. Mamalis, J. Kundrák, D.E. Manolakos, **A. Markopoulos**, S. Georgiopoulos, "Development of artificial neural networks models for the simulation of the grinding process", Proc. of the microCAD-2004-Kharkiv, XII International Scientific & Practical Conference, Kharkiv, Ukraine, pp. 137-143, 19-21 May 2004
14. J. Kundrák, A.G. Mamalis, **A. Markopoulos**, "Finishing of hardened boreholes: Grinding or hard cutting?", Materials and Manufacturing Processes, Volume 19, Issue 6, pp. 979-993, 2004
15. A.G. Mamalis, **A. Markopoulos** and D.E. Manolakos, "Micro and nanoprocessing techniques and applications", Nanotechnology Perceptions, Vol. 1 No.1, pp. 31-52, 2005
16. A.G. Mamalis, J. Kundrák, D.E. Manolakos, **A. Markopoulos**, "Finite element modelling of hard cutting", Proc. of the microCAD 2005 International Scientific Conference, Miskolc, Hungary, 10-11 March 2005

17. J. Kundrák, A.G. Mamalis, K. Gyani, **A. Markopoulos**, “Environmentally friendly precision machining”, *Materials and Manufacturing Processes*, Volume 21, Number 1, pp. 29-37, 2006



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανά χείρας διδακτορική διατριβή σαν στόχο της έχει να μελετήσει τον πολύ σημαντικό τομέα των κατεργασιών αποβολής υλικού, που τις διακρίνει η υψηλή ακρίβεια, μέσω σύγχρονων μεθόδων μοντελοποίησης. Η εργασία χωρίζεται σε οκτώ κεφάλαια, καθένα από τα οποία πραγματεύεται ένα σημαντικό κομμάτι, θεωρητικό ή υπολογιστικό, που σχετίζεται άμεσα με τα παραπάνω θέματα

Στο πρώτο κεφάλαιο εξετάζονται γενικά οι κατεργασίες αποβολής υλικού, οι οποίες ως μέρος των κατεργασιών των υλικών, κατέχουν μια εξέχουσα θέση στη σημερινή βιομηχανία και γίνεται μια κατηγοριοποίηση τους σύμφωνα με την ακρίβεια που μπορεί να επιτύχουν. Στη συνέχεια εξετάζονται ειδικότερα οι κατεργασίες υψηλής και λίαν υψηλής ακριβείας, δίνονται ορισμοί και ιστορικά στοιχεία, με έμφαση στα όρια των σημερινών κατεργασιών και τη νανοτεχνολογία. Η λείανση αποτελεί μια από τις κατεργασίες που μοντελοποιούνται σε επόμενο κεφάλαιο και για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν με λεπτομέρεια κάποια από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της. Γίνεται μια γενική περιγραφή της μεθόδου, εξετάζεται ο λειαντικός τροχός και γίνεται αναφορά στα υγρά κοπής που χρησιμοποιούνται. Κατόπιν, εξετάζονται οι κατεργασίες κοπής μετάλλων, ο τρόπος σχηματισμού και τα είδη αποβλίττου που υπάρχουν, ενώ αναφέρονται και οι τεχνικές μελέτης του σχηματισμού αποβλίττου και περιγράφονται το μοντέλο της ορθογωνικής και της λοξής κοπής που θα χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση της τόνρευσης ακριβείας. Τέλος, μελετώνται κάποιες σύγχρονες τεχνικές τόνρευσης, όπως η κοπή σκληρυμένων χαλύβων με CBN εργαλεία και η τόνρευση υψηλών ταχυτήτων και αναφέρονται στοιχεία για τις φιλικές προς το περιβάλλον κοπές και τη μικροκοπή που αποτελούν επίσης αντικείμενο της μοντελοποίησης που παρουσιάζεται στη διατριβή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζονται οι μέθοδοι μοντελοποίησης των κατεργασιών. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις αριθμητικές μεθόδους και στην τεχνητή νοημοσύνη, αφού οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση των επόμενων κεφαλαίων είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και τα νευρωνικά δίκτυα.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται σε κάποια ειδικά θέματα που αφορούν τη μοντελοποίηση της λείανσης. Περιγράφεται το μοντέλο του Jaeger, το οποίο βασίζεται στη θεωρία των κινούμενων πηγών θερμότητας, που χρησιμοποιείται κατά κόρον στη μοντελοποίηση της λείανσης, και γίνεται μια λεπτομερής ανάλυση των επιμέρους παραγόντων που συμμετέχουν στην ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα αναλύεται η επίδραση των ιδιοτήτων του κατεργαζόμενου υλικού και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατεργασίας, και ιδιαίτερα το μήκος επαφής τεμαχίου-λειαντικού τροχού, πάνω στις δυνάμεις και την ενέργεια που παράγεται κατά τη λείανση. Η ενέργεια που καταναλώνεται μετατρέπεται σχεδόν ολόκληρη σε θερμότητα, το μεγαλύτερο κομμάτι της οποίας εισρέει στο τεμάχιο, δημιουργώντας θερμικά επηρεασμένες ζώνες και προκαλώντας πολλές φορές ελαττώματα στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό του. Τα ελαττώματα αυτά εξετάζονται με μεγάλη λεπτομέρεια στο κεφάλαιο αυτό, γιατί έχουν ιδιαίτερη σημασία στις κατεργασίες υψηλής ακριβείας χαλύβων. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται μια εκτεταμένη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που υπάρχει πάνω στη μοντελοποίηση της λείανσης, ιδιαίτερα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε να μπορεί ο αναγνώστης να έχει πλήρη εικόνα του θέματος, πριν προχωρήσει στο επόμενο κεφάλαιο το οποίο ασχολείται ακριβώς με αυτό το θέμα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η μοντελοποίηση της λείανσης ακριβείας χαλύβων που έγινε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων MSC.Marc Mentat και αφορά καταρχάς την κατασκευή θερμικών μοντέλων για τον προσδιορισμό των θερμοκρασιακών πεδίων που αναπτύσσονται στο τεμάχιο κατά την κατεργασία. Για τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην κατεργασία έγιναν πειράματα με διάφορους λειαντικούς τροχούς και βάθη κοπής και χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί χάλυβες ως υλικό κατεργαζόμενου τεμαχίου. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης καταδεικνύουν ότι το μοντέλο που κατασκευάστηκε είναι σε θέση να προβλέψει με ακρίβεια τη θερμοκρασία σε ολόκληρο το τεμάχιο. Γίνονται συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων και σχολιάζεται η μεταβολή της μέγιστης θερμοκρασίας και των θερμοκρασιακών πεδίων συναρτήσει των διαφόρων παραμέτρων.

Στη συνέχεια, και μέσω των κρίσιμων θερμοκρασιών για τα υλικά που κατεργάζονται, προσδιορίζονται οι θερμικά επηρεασμένες ζώνες στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Επιπλέον, εξετάζεται η επίδραση του υγρού κοπής, το οποίο μοντελοποιείται μέσω οριακών συνθηκών συναγωγής σε όλα τα παραπάνω μοντέλα, καθώς και η επίδραση του υλικού του τεμαχίου στη μέγιστη θερμοκρασία αλλά και στην κατανομή των θερμοκρασιακών πεδίων του τεμαχίου. Διερευνάται, επίσης, η επίδραση της κατανομής της πηγής θερμότητας, και συγκεκριμένα συγκρίνονται η ομοιόμορφη και η τριγωνική κατανομή, στα θερμοκρασιακά πεδία και στις θερμικά επηρεασμένες ζώνες. Στη συνέχεια εξετάζεται η κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων αλλά και θερμομηχανικών μοντέλων τα οποία είναι σε θέση να δώσουν αποτελέσματα και για τις τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη λείανση. Με τα ίδια μοντέλα υπολογίζονται και οι παραμένουσες τάσεις που υπάρχουν στο τεμάχιο μετά το πέρας της κατεργασίας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζεται η μοντελοποίηση της λείανσης με τη μέθοδο των νευρωνικών δικτύων. Τα πεπερασμένα στοιχεία και τα νευρωνικά δίκτυα εμφανίζονται σαν εναλλακτικές μέθοδοι μοντελοποίησης, οι οποίες συγκεντρώνουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα η μία έναντι της άλλης στην επίλυση προβλημάτων και για το λόγο αυτό γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων. Προτείνεται επίσης ένα υβριδικό μοντέλο όπου τα αποτελέσματα των μοντέλων των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εκπαίδευσης των νευρωνικών δικτύων, παρέχοντας νέα αποτελέσματα.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται ειδικά θέματα που αφορούν τη μοντελοποίηση των κατεργασιών κοπής και ιδιαίτερα τη προσομοίωση της τórνευσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Γίνεται μια περιγραφή της μοντελοποίησης Lagrange και της μοντελοποίησης Euler και παρατίθεται μια εμπεριστατωμένη βιβλιογραφία πάνω σε αυτό το θέμα.

Το έβδομο κεφάλαιο αφορά την προσομοίωση της τórνευσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Κατασκευάζονται μοντέλα δύο και τριών διαστάσεων με βάση τα μοντέλα της ορθογωνικής και της λοξής κοπής. Τα μοντέλα της ορθογωνικής κοπής αφορούν τη μοντελοποίηση της τórνευσης ακριβείας σκληρυμένων χα-

λύβων με εργαλεία από CBN σε υψηλές ταχύτητες. Εξετάζεται η επίδραση της πρόωσης, της ταχύτητας κοπής, της γωνίας αποβλίττου και της ακτίνας καμπυλότητας της κοπτικής ακμής καθώς και η χρήση διαφόρων μορφών κοπτικών εργαλείων, όπως π.χ. με γρεζοθραύστη, πάνω στα θερμοκρασιακά και τασικά πεδία του τεμαχίου και στη μορφή του αποβλίττου. Τα προτεινόμενα μοντέλα είναι σε θέση επίσης να προσομοιώνουν τη δημιουργία προεξοχής κατά την έξοδο του εργαλείου από το τεμάχιο. Στα πλαίσια της μοντελοποίησης δύο διαστάσεων γίνεται και η προσομοίωση της μικροκοπής. Τέλος, κατασκευάζονται τρισδιάστατα μοντέλα λοξής κοπής για την τόννευση και εξετάζεται η επίδραση της γωνίας λοξότητας πάνω στα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Το όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρεται στις εφαρμογές των τεχνολογιών που εξετάζονται στη διατριβή και κυρίως στις εφαρμογές της μικρο- και της νανοτεχνολογίας και παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας τα οποία είναι ιδιαίτερα σημαντικά και αφορούν τόσο τις ίδιες τις κατεργασίες όσο και τα προτεινόμενα μοντέλα.

SUMMARY

The on hand doctoral thesis aims to the investigation of the very important area of the material removal processes that are characterized by high precision, through modern modeling methods. It is divided into eight chapters that each one pertains to an important aspect of the above mentioned subjects.

In the first chapter material removal processes, which are an important part of manufacturing processes and they possess foremost place in today's industry, are in general examined and are categorized according to the accuracy they can achieve. The precision and ultraprecision processes are examined in particular, definitions and historical data are given, emphasizing on the limits of today's processes and nanotechnology. Some important aspects of grinding, one of the manufacturing processes modeled in one of the following chapters, are investigated. A general account of the process is given, the grinding wheel is described and data on the use of cutting fluids are mentioned. Furthermore, besides abrasive processes, metal cutting ones, e.g. turning, the forming and the types of the chip in these processes as well as the techniques used for investigating chip formation are elaborated and the orthogonal and oblique cutting models are examined. Finally, some modern metal cutting techniques like hard turning and high speed machining are considered, along with environmentally friendly machining techniques and microcutting that are also modeled in this thesis.

In the second chapter methods used for the modeling of manufacturing processes are examined, emphasizing on numerical and artificial intelligence methods, since the methods used for modeling in the following chapters are the finite element method and the artificial neural networks method.

The third chapter refers to some special issues pertaining to modeling of grinding. Jaeger's model, which is based on the moving heat source theory, and is commonly used for the modeling of grinding, is described. Some important factors, like the material properties of the workpiece and geometrical properties

of the process, e.g. the contact length between the grinding wheel and the workpiece, are considered. The influence of these factors on the grinding forces and energy is investigated. Almost all of the energy required for grinding is turned into heat, most of which is contacted into the workpiece. This intensive heat load is responsible for the formation of heat affected zones in the workpiece that are responsible for defects on its surface and subsurface layers. These defects are examined in detail within this chapter because they are of great importance in the case of precision processing of steels. In the same chapter there is a thorough review of the published work on the modeling of grinding and especially when the finite element method is used, which is the subject of the next chapter.

In the fourth chapter the precision grinding of steels, using the finite element program MSC.Marc Mentat, is analyzed. The first models are thermal ones used for the prediction of the temperature fields developed in the workpiece during grinding. The input data used in the models were acquired by experiments, where different grinding wheels and depths of cut were used for grinding three different types of steel. The numerical results show that the proposed model is in position of predicting the workpiece temperature fields with accuracy. Comparisons between different models are made and the variation of the maximum temperature and the temperature fields are commented. The heat affected zones in the workpiece are assessed by connecting areas of the workpiece with critical temperatures of the particular steels. Furthermore, the influence of the use of cutting fluid, which is modeled by convection boundary conditions in all the aforementioned models, as well as the type of the workpiece material on the maximum temperature and the temperature fields are investigated. The effect of the heat source profile in the thermal modeling of grinding is also examined, by comparing the results between models with triangular and rectangular heat source profiles. Three-dimensional modeling of grinding and thermomechanical models are also considered, the latter being able to provide data for the stresses

developed in the workpiece during grinding. The same models are able to predict the residual stresses in the workpiece after the end of the process.

In the fifth chapter neural networks modeling of grinding is examined. Finite elements and neural networks could be two alternative methods used for analyzing the same problems, each one having advantages over the other. In this chapter there is a special paragraph where the two methods are compared. Moreover, a hybrid model, where the output of the finite element models are used for the training of neural networks, is proposed, offering new results.

The sixth chapter pertains to special issues regarding machining processes modeling and especially to the simulation of turning with the finite element method. The Lagrangian and Eulerian formulation are discussed and a thorough review of the published work on the modeling of this subject is presented.

The seventh chapter includes two and three dimensional modeling, based on the orthogonal and oblique cutting modeling respectively, of turning, using the finite element method. The orthogonal cutting models refer to the simulation of high speed hard turning. Examined are the influence of the feed rate, the cutting speed, the rake angle and the tool edge radius, as well as the use of different cutting tools, e.g. with chip breaker, on temperatures and stresses of the workpiece and chip formation. Furthermore, the burr at the end of the workpiece can be modeled with the same models. Additionally, a two-dimensional model of microcutting is provided. Finally, three-dimensional models of oblique cutting are proposed for the simulation of turning and the influence of the inclination angle on the analysis results is investigated.

The eighth and last chapter refers to the applications of the technologies mentioned within the thesis and especially on the applications of micro- and nanotechnology. Furthermore, the conclusions of the thesis are discussed, which are very important for the processes and the proposed models as well.

