

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. Παράλληλα η τεχνολογική ανάπτυξη των εργαλειομηχανών και η βελτιστοποίησή τους, έχει καταστήσει τις κατεργασίες αυτές εφικτές σε ένα φάσμα προϊόντων, όπως καλούπια, εξαρτήματα αεροσκαφών, ιατρικών εμφυτευμάτων κ.α. καθώς επίσης και η χρήση υψηλών ταχυτήτων κοπής κατά την κατεργασία, κάτι που προσδίδει εκτός από ακρίβεια και πολύ καλό αποτέλεσμα στην ποιότητα της επιφάνειας μετά το τέλος της κατεργασίας. Σχετικά με τα προϊόντα της κατασκευής, ένα από τα σημαντικότερα που αναφέρθηκε και πιο πάνω, είναι τα ιατρικά τεχνητά βιολογικά εμφυτεύματα. Τα συγκεκριμένα και ιδιαίτερα του ισχίου, θεωρούνται μεγαλύτερη ανακάλυψη των τελευταίων δεκαετιών, μιας και μπορούν να θεραπεύσουν πάσχουσες αρθρώσεις ασθενών, οι οποίες είτε έχουν καταπονηθεί λόγω της ηλικίας ή λόγω ασθενειών, πχ. οστεοπόρωση, είτε έχουν καταστραφεί λόγω ατυχήματος, κάτι πολύ συχνό τα τελευταία χρόνια και ιδιαίτερα στη χώρα μας, και να δώσουν την ικανότητα στους ανθρώπους αυτούς να περπατήσουν και να μπορούν να εκτελούν τις διάφορες εργασίες τους ανεξάρτητοι και χωρίς εξωτερική βοήθεια.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή με τίτλο «Κατεργασίες λίαν υψηλής ακριβείας τεχνητών βιολογικών εμφυτευμάτων ισχίου» 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, των εμφυτευμάτων ισχίου μέσω πειραματικών, υπολογιστικών τεχνικών και αριθμητικών προσομοιώσεων με τη βοήθεια πακέτων πεπερασμένων στοιχείων. Στα κεφάλαια της διατριβής μπορεί κανείς να βρει μια αρκετά εκτεταμένη θεωρητική ανάλυση των κατεργασιών ακριβείας και των κατεργασιών υψηλών ταχυτήτων, που λαμβάνει υπόψη τις κρατούσες θεωρίες γύρω από τα θέματα αυτά, καθώς επίσης και των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των εμφυτευμάτων ισχίου. Παράλληλα έχει γίνει μια εμπειριστατωμένη μελέτη μέσω πειραματικών διαδικασιών για την κατασκευή τόσο των κεφαλών ισχίου από μεταλλικά και κεραμικά υλικά, αλλά και την κατασκευή εργαλείου σφυρηλάτησης για τη κατεργασία του προθέματος ισχίου. Τα

αποτελέσματα των πειραμάτων εξετάστηκαν και συγκριθήκαν τόσο με αποτελέσματα προσομοιώσεων, όσο και με αποτελέσματα από μοντέλα υπολογισμού δυνάμεων που αναπτύχθηκαν για το σκοπό αυτό. Τέλος, παρουσιάζεται ο έλεγχος των εμφυτευμάτων τόσο από άποψη διαστατικής ακρίβειας και τραχύτητας, με βάση την οποία εξάγεται και ένα δεύτερο μοντέλο για τον υπολογισμό της, αλλά και από τη σκοπιά της στατικής αντοχής των εμφυτευμάτων πάντα ακολουθώντας τις επιταγές των αυστηρών προδιαγραφών των διεθνών προτύπων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα παραπάνω υποστηρίζονται από 160 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.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα μου, Καθηγητή Δ. Ε. Μανωλάκο 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 Ακαδημαϊκό Καθηγητή Α. Γ. Μάμαλη και τον Ομότιμο Καθηγητή Π. Ν. Σουκάκο, μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και επισημάνσεις τους, καθώς και τη συνεχή συμπαράσταση του σε όλο το διάστημα της διατριβής.

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 Δρ. Α. Μαρκόπουλο, Π. Κωστάζο, Α. Βορτσέλα, Σ. Γεωργιόπουλο και Γ. Κούζιλο, καθώς και το τεχνικό προσωπικό του εργαστηρίου για την άριστη καθημερινή συνεργασία.

Τέλος, σε προσωπικό επίπεδο θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ηθική και υλική συμβολή και υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει σκοπό την παρουσίαση και τη μελέτη της κατεργασίας εμφυτευμάτων ισχίου, καθώς και εργαλείων για την κατασκευή αυτών με βάση τις κατεργασίες λίαν υψηλής ακριβείας και συγκεκριμένα κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων. Η εργασία χωρίζεται σε επτά κεφάλαια, όπου σε κάθε ένα αναπτύσσεται ένα σημαντικό θεωρητικό, πειραματικό ή υπολογιστικό κομμάτι με βάση το παραπάνω θέμα.

Στο πρώτο κεφάλαιο εξετάζονται οι κατεργασίες με αφαίρεση υλικού, ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της βιομηχανικής παραγωγικής διεργασίας. Δίνεται έμφαση στις κατεργασίες υψηλής και λίαν υψηλής ακριβείας και συγκεκριμένα για την τόννευση υψηλών ταχυτήτων. Επιπλέον, παρουσιάζεται όλη η τεχνογνωσία πάνω στις κατεργασίες αυτές, και ότι έχει να κάνει με την επιλογή των συνθηκών κατεργασίας και τα κοπτικά εργαλεία. Τέλος παρουσιάζονται διάφορα μοντέλα υπολογισμού των δυνάμεων για την τόννευση και ποια από αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των δυνάμεων σε υψηλές ταχύτητες, καθώς επίσης και την αποτελεσματικότητα της κατεργασίας αυτής με βάση την τελική ποιότητα επιφάνειας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται τα εμφυτεύματα ισχίου, τόσο οι κεφαλές, όσο και τα προθέματα ισχίου, τα κοτυλαία προθέματα και τα κυπέλλια. Γενικά γίνεται ένας χωρισμός των υλικών σε μεταλλικά, κεραμικά και πολυμερή και παρουσιάζονται οι γενικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητές τους. Τέλος γίνεται μια παρουσίαση των προβλημάτων και των αστοχιών που εμφανίζονται στα εμφυτεύματα, λόγω των φορτίσεων και της φθοράς τους κατά το βάδισμα του ασθενή.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η κατεργασία των μηριαίων κεφαλών, τόσο μεταλλικών όσο και κεραμικών, τις παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη, καθώς και οι παράγοντες εκείνοι που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεργασία και επηρεάζουν την επιτυχή ή όχι έκβαση της μεθόδου, όπως πχ. οι δυνάμεις κοπής. Η κατεργασία τους πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο σε τόρνο ψηφιακά καθοδηγούμενο με υψηλές ταχύτητες κοπής και κίνηση ακριβείας στους δυο άξονες. Οι συγκεκριμένες μετρήθηκαν, κατά τη διάρκεια κατεργασίας των μεταλλικών κεφαλών, και συγκρίνονται τόσο με υπολογιστικά

μοντέλα, που παρουσιάστηκαν στο πρώτο κεφάλαιο, όσο και με τα αποτελέσματα από πακέτα πεπερασμένων στοιχείων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η κατεργασία ενός καλουπιού κατασκευής μηριαίου προθέματος. Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται τα προθέματα είναι κράματα τιτανίου, τα οποία είναι δυσκολοκατεργάσιμα με κατεργασίες κοπής, για αυτό και κατασκευάζονται με τη βοήθεια θερμής σφυρηλασίας. Μια τέτοια μήτρα, κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής στο κέντρο κατεργασίας του εργαστηρίου. Επειδή τα προθέματα είναι κατασκευές, με πολύπλοκο σχήμα, άκρως καθορισμένο από τα διεθνή πρότυπα, που αποτελείται από μια σειρά καμπύλων, θεωρούνται ως γλυπτές επιφάνειες. Στο παρόν κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί ο σχεδιασμός του καλουπιού, ο καθορισμός και προγραμματισμός της κατεργασίας στο κέντρο κατεργασίας και τέλος η ίδια η κατεργασία του καλουπιού.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος ελέγχου της ακρίβειας των εμφυτευμάτων. Γενικά τα εμφυτεύματα υπόκεινται σε αυστηρή τυποποίηση, με βάση τα διεθνή πρότυπα, τόσο από άποψη κατασκευής όσο και από άποψη ελέγχου. Όσον αφορά στο δεύτερο, έχει να κάνει με δυο πράγματα, την ακρίβεια της κατασκευής που αφορά στις διαστάσεις και την ποιότητα της επιφάνειας και το δεύτερο στην αντοχή τους τόσο σε στατική όσο και δυναμική φόρτιση. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού, είναι να μελετηθεί η ακρίβεια των εμφυτευμάτων που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο, μεταλλικά και κεραμικά, και θα γίνει μια προσπάθεια να εξαχθούν αριθμητικά μοντέλα, που να περιγράφουν την ποιότητα επιφάνειας σε σχέση με τις παραμέτρους κατεργασίας. Επιπλέον θα γίνει και παρουσίαση της ακρίβειας κατασκευής του καλουπιού μιας και παίζει σημαντικότερο ρόλο στην κατασκευή του προθέματος ισχίου.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο έλεγχος στατικής αντοχής των μηριαίων κεφαλών εμφυτευμάτων ισχίου. Εκτός από τον διαστατικό έλεγχο και τον έλεγχο της επιφανειακής τραχύτητας, θα πρέπει τα εμφυτεύματα να περνούν και μια σειρά από ελέγχους αντοχής, μιας και η καταπόνησή τους στο ανθρώπινο σώμα κατά το περπάτημα είναι σημαντική και μερικές φορές, ανάλογα με το είδος της κίνησης το φορτίο φτάνει την εικοσαπλάσια τιμή του βάρους του ασθενούς. Για το λόγο αυτό μια σειρά από ελέγχους, τόσο στατικούς όσο και δυναμικούς, έχουν θεσπιστεί με βάση τα διεθνή πρότυπα για την αντοχή των εμφυτευμάτων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι στατικοί, τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά με τη

χρήση πακέτου πεπερασμένων στοιχείων, για την καλύτερη συσχέτιση και σύγκριση των τιμών.

Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των ολικών συμπερασμάτων της εργασίας από την πειραματική και υπολογιστική μελέτη της κατασκευής των εμφυτευμάτων και του ελέγχου τους, τόσο στην αντοχή τους όσο και στην ακρίβειά τους.

SUMMARY

The present thesis has the aim of presentation and research of the manufacturing of hip joint implant and also tools for their construction, through precision and ultra precision manufacturing and specifically high speed machining. The thesis is divided in seven chapters, each one of them has a specific theoretical, experimental or numerical important part, based on above topic.

In the first chapter, it is examined the manufacturing with material removal, a basic and important aspect of the manufacturing process in industry. It emphasizes in precision and ultra precision manufacturing and particular, in high speed manufacturing. Additionally, it is presented the technology in all these processes, and everything that has to do with the better selection of cutting parameters and cutting tools. Finally, a number of models for the calculation of forces is presented, in turning and each of them can be used for the calculation of forces in high speed machining and also, the effectiveness of this process, based on the final surface's quality.

In the second chapter, there are presented the materials from which hip joint implants are manufactured, not only femoral heads but also stems, acetabular cups and acetabular implants. Generally, there is a division of materials in metallic, ceramic and polymeric, where their general mechanical and natural properties are presented. Finally, there is a presentation of all the problems and the failures that can be occurred in implants, thus of stresses acted on them and their wear during the walking of the patient.

The third chapter presents the way that the femoral heads are manufactured, not only for metallic, but also for ceramic ones, the cutting parameters that must be taken into consideration and also the factors that affect the process and play a tremendous role for its success, like cutting forces. Their manufacture took place in the CNC lathe of the laboratory, which can rotate each spindle up to 10000 rpm and move its axis with accuracy of 0.1 μ m. The cutting forces were measured during the process of manufacturing of metallic heads, and the results were compared to numerical results from calculating models, that have been presented in first chapter and also with the results of finite elements analysis.

In the fourth chapter it is presented the designing and manufacturing of a die for the construction of a stem. The materials that the stems are manufactured by are

titanium alloys, which are difficult to be machined with cutting processes and for this reason are manufactured with hot bulking. A bulking die, was manufactured in the field of the present Thesis in a CNC machining centre. Whereas, stems are parts with complex shape, special defined by the International Standards, which are consisted of a number of curves, they are considered as sculptured surfaces.

In the fifth chapter there are presented the methods of checking the accuracy of the implants. Generally, the implants are under strict standardization, according to the strict International Standards, not only from manufacturing aspect, but also from checking aspect. For the second aspect, it has to do with two things; the first is the accuracy of the dimensions and the surface quality of the construction and the second one is the resistance in static and dynamic load. The aim of this chapter is the investigation about the accuracy of the implants, which were constructed in the laboratory, metallic and ceramic, and also there will be exported some numerical models, which will predict the surface roughness, in reference to the cutting parameters. Furthermore, it will be presented the accuracy of the die construction as it plays a specific role in the manufacturing of the stem.

In the sixth chapter it is presented the testing of the resistance in static load of the femoral heads. The implants are checked not only for their accuracy in dimensions and surface roughness, but also for their resistance in loads, as they are distressed whiles the walking of the patient and consequently of the way of move the loads that act on them can reach twenty times the patient weight. For this reason, a number of tests, not only static but also dynamic, have been set down by the international standards. In this particular occasion they were used only the static tests, not only experimental, but also numerical, with the use of finite element software, for the better comparison of the results.

Finally, in the last chapter, the seventh, it is presented the final conclusions of the Thesis from the experimental and numerical investigation of the construction of implants and their examination, not only for their resistance but also for their accuracy.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

A	Εμβαδόν αποβλίττου (mm^2)
b	Πλάτος αποβλίττου (mm)
C	Σταθερά
DF	Βαθμοί ελευθερίας
f	Πρόωση (mm/rev)
F	Τιμή F αποτέλεσμα της ανάλυσης ANOVA
F_c	Δύναμη κοπής (N)
F_r	Δύναμη άπωσης (N)
F_t	Δύναμη πρόωσης (N)
h	Πάχος αποβλίττου (mm)
k_s	Ειδική δύναμη κοπής (N/mm^2)
k_r	Γωνία τοποθέτησης εργαλείου
k_{11}	Ειδική δύναμη κοπής απαραίτητη για την τομή αποβλίττου με πάχος 1mm (h) και πλάτος 1mm (b)
k_c	Συντελεστής γωνίας αποβλίττου
k_v	Συντελεστής ταχύτητας κοπής
k_a	Συντελεστής φθοράς εργαλείου
k_t	Συντελεστής υλικού εργαλείου
m	Κλίση καμπύλης
MS	Μέσο τετράγωνο
SS	Άθροισμα μέσων τετραγώνων
P	Επίπεδο σημαντικότητας
Ra	Μέση τραχύτητα
RaT	Προβλεπόμενη μέση τραχύτητα
v	Ταχύτητα κοπής
x_1	Λογαριθμικός μετασχηματισμός ταχύτητας κοπής
x_2	Λογαριθμικός μετασχηματισμός πρόωσης
x_3	Λογαριθμικός μετασχηματισμός βάθους κοπής
$\hat{y}$	Εκτιμώμενη απόκριση της επιφανειακής τραχύτητας
α	Βάθος κοπή
γ	Γωνία αποβλίττου

θ	Γωνία τοποθέτησης
ε	Τυχαίο σφάλμα
η	Πραγματική απόκριση της επιφανειακής τραχύτητας

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Περιγραφή	Σελ.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
Σχήμα 1.1 Κατεργασίες αποβολής υλικού.....	2
Σχήμα 1.2 Η εξελικτική πορεία του τórνου	4
Σχήμα 1.3 Η εξέλιξη της ακρίβειας στις κατεργασίες σύμφωνα με την κατάταξη του Taniguchi	6
Σχήμα 1.4 Έλεγχος ποιότητας επιφάνειας κατόπτρου.....	8
Σχήμα 1.5 Μινιατούρα οδοντωτού τροχού.....	8
Σχήμα 1.6 Απόλυτο μέγεθος και σχετική ακρίβεια προϊόντων λίαν υψηλής ακρίβειας	8
Σχήμα 1.7: Βασικές έννοιες της κοπής.....	11
Σχήμα 1.8: Είδη αποβλίττου (α) συνεχές και (β) διακοπτόμενο.....	13
Σχήμα 1.9 : Χαρακτηριστικά κατεργασίας.....	16
Σχήμα 1.10 : Ταχύτητες κοπής για κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων.....	17
Σχήμα 1.11 : Σκληρότητα και αντοχή υλικών εργαλείων.....	18
Σχήμα 1.12 : Περιοχή ταχυτήτων πρόωσης για διάφορα υλικά εργαλείων.....	19
Σχήμα 1.13 : Σχέση επικαλύψεων με χρόνο ζωής εργαλείου.....	21
Σχήμα 1.14: Αναπτυσσόμενες δυνάμεις κατά την τórνευση (α) Διαμήκης τórνευση, (β) Εγκάρσια τórνευση	24
Σχήμα 1.15: Περιγραφή τραχύτητας επιφάνειας.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
Σχήμα 2.1: Τα εμφυτεύματα (κεραμικο-κεραμικό, ceramic-on-ceramic) αποτελούν εναλλακτική λύση στη χρήση των συμβατικών υλικών.....	43
Σχήμα 2.2: Το οξυγόνο φυσικά διαχέεται στο κράμα ζirkονίου, όταν θερμαίνεται στον αέρα, προκαλώντας την αρχική μεταλλική επιφάνεια να μετασχηματιστεί σε κεραμικό οξιδίου του ζirkονίου.....	47

Σχήμα 2.3: Βιοκεραμική κοτύλη που δεν απαιτεί χρήση οστικού τσιμέντου....	48
Σχήμα 2.4: Σύγκριση του ρυθμού φθοράς μεταξύ διαφόρων υλικών για εμφυτεύματα.....	50
Σχήμα 2.5: Ακτινογραφία μια ολικής αρθροπλαστικής του αριστερού ισχίου σε (A) anteroposterior και (B) lateral όψη που πάρθηκε μετά από 4 μήνες από την αρχική εγχείρηση και αποκαλύπτει 58° κλίση του τιτανιούχου κυπελλίου και μια μετατόπιση της δομής του άνω τροχαντήρα. Και τα δυο τα στοιχεία ήταν καλά στερεωμένα.....	51
Σχήμα 2.6: Κατ όγκο φθορά των κεφαλών CrN και αλουμίνιας με UHMWPE..	52
Σχήμα 2.7: Ο μέσος ρυθμός φθοράς για εκατομμύρια κύκλους.....	53
Σχήμα 2.8: Ο ρυθμός φθοράς συναρτήσει της συγκέντρωσης των σωματιδίων του τσιμέντου	54
Σχήμα 2.9: Παρουσίαση της φθοράς μηριαίων κεφαλών σε (a) μεταλλικές κεφαλές κράματος CrCo και (b) κεραμική κεφαλή Al_2O_3	55
Σχήμα 2.10: Λεπτομέρεια φθοράς μεταλλικής κεφαλής κράματος CrCo σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.....	56
Σχήμα 2.11: Ο λόγος της φθοράς της κεφαλής προς τη συνολική φθορά για εκατομμύρια κύκλους	56
Σχήμα 2.12: Οι πλάκες από οξειδωμένο ζirkόνιο είχαν 4900 φορές λιγότερη φθορά και 16- φορές λιγότερη τραχύτητα από τις μεταλλικές πλάκες χρωμίου κοβαλτίου.....	58
Σχήμα 2.13: Η τραχύτητα του χρωμίου κοβαλτίου αυξάνει περίπου πέντε με δέκα φορές στις προσομοιώσεις με το φιλτραρισμένο υγρό, ενώ στο οξειδωμένο ζirkόνιο παραμένει σταθερή και λεία	59
Σχήμα 2.14: Ταχύτητα διάδοσης ρωγμής (V) σε σχέση με τον παράγοντα πυκνότητας τάσεων (KI) για βιοσυμβατά υλικά Al_2O_3 , ZrO_2 και Al_2O_3F10 κατ. όγκο ZrO_2 νανοδόμηση.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
Σχήμα 3.1 Κατεργασία εμφυτευμάτων (α) μέσω σφυρηλάτησης και (β) μέσω τórνευσης.....	65
Σχήμα 3.2: Μέθοδος κατασκευής κεραμικών εμφυτευμάτων.....	67
Σχήμα 3.3: Πειραματική διαδικασία (a) ο τórνος CNC που χρησιμοποιήθηκε, (b) καμπίνα τórνου, όπου υπάρχουν οι συσκευές για τη συγκράτηση του	

αρχικού τεμαχίου (b1) και του δυναμόμετρου (b2), (c) κατεργασία και (d) το τελικό προϊόν.....	70
Σχήμα 3.4: Απεικόνιση του 2 ³ σχεδιασμού παραμέτρων με επιπρόσθετα σημεία	71
Σχήμα 3.5: Απεικόνιση του περιβάλλοντος του πακέτου AdvantEdge.....	72
Σχήμα 3.6: Πειραματική διαδικασία κατασκευής κεραμικών μηριαίων κεφαλών (α) Τόρνος CNC δύο αξόνων της εταιρείας OKUMA (β) Κυλινδρικό τεμάχιο (μήκους 100mm και διαμέτρου d=25mm) πολυκρυσταλλικής αλούμινας μεγάλης καθαρότητας (99.5%) (γ) Απομάκρυνση εξωτερικού στρώματος πάχους 2mm. Διακρίνονται με μεγάλη ευκρίνεια, τα παραγόμενα απόβλητα της τόννευσης (δ) Κατεργασία εμπρόσθιας επιφάνειας κεφαλής (ε) Διαμόρφωση του δεύτερου ημισφαιρίου της κεφαλής.. Εδώ, το ακριβές σετάρισμα της μηχανής CNC παίζει καθοριστικό παράγοντα στη σφαιρικότητα του τελικού προϊόντος που επιτυγχάνεται τελικά με το φινίρισμα (στ) Η τελική φάση της κεραμικής κεφαλής και (ζ) τελικό προϊόν των κεφαλών.....	74
Σχήμα 3.7: Περιγραφή της κατεργασίας της σφαίρας.....	76
Σχήμα 3.8: Σύγκριση των τιμών της θερμοκρασίας και δημιουργίας αποβλίττου (α) ταχύτητα κοπής 440m/min, πρόωση 0.06 mm/rev και βάθος κοπής 0.2mm στη θέση των 60°, (β) ταχύτητα κοπής 264m/min, πρόωση 0.06 mm/rev και βάθος κοπής 0.2mm στη θέση των 9°, (γ) ταχύτητα κοπής 352m/min, πρόωση 0.08 mm/rev και βάθος κοπής 0.2mm στη θέση των 30° και (δ) ταχύτητα κοπής 440m/min, πρόωση 0.12 mm/rev και βάθος κοπής 0.1mm στη θέση των 9°.....	79
Σχήμα 3.9: Δυνάμεις κοπής για 0,2mm βάθος κοπής στη θέση των 9°.....	84
Σχήμα 3.10: Δυνάμεις κοπής για 0,2mm βάθος κοπής στη θέση των 30°.....	84
Σχήμα 3.11: Δυνάμεις κοπής για 0,2mm βάθος κοπής στη θέση των 60°.....	85
Σχήμα 3.12: Δυνάμεις κοπής για 0,2mm βάθος κοπής στη θέση των 90°.....	85
Σχήμα 3.13: Δυνάμεις κοπής για 0,1mm βάθος κοπής στη θέση των 9°.....	86
Σχήμα 3.14: Δυνάμεις κοπής για 0,1mm βάθος κοπής στη θέση των 30°.....	86
Σχήμα 3.15: Δυνάμεις κοπής για 0,1mm βάθος κοπής στη θέση των 60°.....	87
Σχήμα 3.16: Δυνάμεις κοπής για 0,1mm βάθος κοπής στη θέση των 90°.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
Σχήμα 4.1 Εργαλεία για την κατεργασία γλυπτών επιφανειών.....	94
Σχήμα 4.2: Σειριακή μορφή διαδρομής εργαλείου.....	95
Σχήμα 4.3: Κυκλική μορφή διαδρομής εργαλείου.....	95

Σχήμα 4.4: Γραμμική μορφή διαδρομής εργαλείου	96
Σχήμα 4.5: Περιγραμματική μορφή διαδρομής εργαλείου.....	96
Σχήμα 4.6: Κατεργασίες κοπής με εργαλεία σφαιρικής απόληξης.....	97
Σχήμα 4.7: Γραμμές και αυλάκια από την κοπτική σφαιρική μορφή.....	98
Σχήμα 4.8: Σχεδιασμός προθέματος και καλουπιού.....	100
Σχήμα 4.9: Κέντρο κατεργασίας στο οποίο έγινε η κατεργασία του καλουπιού...	102
Σχήμα 4.10: Εργαλεία για την κατεργασία του καλουπιού (α) σφαιρικής απόληξης 8mm και (β) λεπτομέρεια του ίδιου, (γ) σφαιρικής απόληξης 6mm και (δ) λεπτομέρεια του ίδιου.....	103
Σχήμα 4.11: Εισαγωγή αρχικής γεωμετρίας στο λογισμικό.....	104
Σχήμα 4.12: Καθορισμός αρχικής γεωμετρίας τεμαχίου.....	104
Σχήμα 4.13: Προγραμματισμός διαδικασίας εκχόνδρισης για εργαλείο με σφαιρική απόληξη διαμέτρου 8mm.....	105
Σχήμα 4.14: Μορφή διαδρομής εργαλείου εκχόνδρισης διαμέτρου 8mm.....	105
Σχήμα 4.15: Προγραμματισμός διαδικασίας εκχόνδρισης για εργαλείο με σφαιρική απόληξη διαμέτρου 6mm.....	106
Σχήμα 4.16: Μορφή διαδρομής εργαλείου εκχόνδρισης διαμέτρου 6mm.....	106
Σχήμα 4.17: Προγραμματισμός διαδικασίας αποπράτωσης για εργαλείο με σφαιρική απόληξη διαμέτρου 6mm.....	107
Σχήμα 4.18: Μορφή διαδρομής εργαλείου αποπεράτωσης διαμέτρου 6mm.....	107
Σχήμα 4.19: Διεργασία εκχόνδρισης (α) προσομοίωση και (β) κατεργασία στη μηχανή με εργαλείο σφαιρικής απόληξης διαμέτρου 8mm και εκχόνδριση (γ) κατεργασία στη μηχανή και (δ) προσομοίωση με εργαλείο σφαιρικής απόληξης διαμέτρου 6mm.....	108
Σχήμα 4.20: Αποτέλεσμα διεργασία εκχόνδρισης (α) προσομοίωση και (β) κατεργασία στη μηχανή.....	109
Σχήμα 4.21: Διεργασία αποπεράτωσης (α) προσομοίωση και (β) κατεργασία στη μηχανή.....	109
Σχήμα 4.22: Αποτέλεσμα κατεργασίας αποπεράτωσης (α) κατεργασθέν τεμάχιο στην εργαλειομηχανή και (β) κατεργασθέν τεμάχιο βάση της προσομοίωσης.....	110
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
Σχήμα 5.1: Επιρροή των παραμέτρων κοπής στην τραχύτητα επιφάνειας μετά από αποπεράτωση σκληρής κατεργασίας.....	115

Σχήμα 5.2: Ra ως συνάρτηση του χρόνου κοπής για τους πρώτους τύπους δοκιμών φθοράς με συνεχόμενη κοπή με (Α) $V = 125\text{m/min}$ (Β) $V = 175\text{m/min}$	116
Σχήμα 5.3: Απεικόνιση κεφαλής μικροσκοπίου.....	119
Σχήμα 5.4: Απεικόνιση σχεδιασμού πειραμάτων για τρεις παραμέτρους.....	120
Σχήμα 5.5: Επιφανειακή τοπογραφία των κατεργασμένων κεφαλών (α) με 356m/min ταχύτητα κοπής, 0.06 mm/rev πρόωση και 0.2mm βάθος κοπής, (β) με 440m/min ταχύτητα κοπής, 0.06 mm/rev πρόωση και 0.2mm βάθος κοπής, (γ) με 440m/min ταχύτητα κοπής, 0.06 mm/rev πρόωση και 0.1mm βάθος κοπής, (δ) με 356m/min ταχύτητα κοπής, 0.08 mm/rev πρόωση και 0.1mm βάθος κοπής.....	122
Σχήμα 5.6: Τραχύτητα επιφάνειας σε σχέση με τις συνθήκες κοπής.....	124
Σχήμα 5.7: Μετρητική μηχανή CMM.....	126
Σχήμα 5.8: Απεικόνιση σημείων μέτρησης ακτίνας σε μηριαία κεφαλή. Τα υπόλοιπα βρίσκονται με άξονα συμμετρίας τον άξονα της κεφαλής στην πίσω πλευρά.....	127
Σχήμα 5.9: Αποτελέσματα μέτρησης τραχύτητας (α) Κεφαλή No.1 μετά την τελική έψηση, σημείο 1 ^ο :στον πόλο (β) Κεφαλή No.2 μετά την τελική έψηση, σημείο 2 ^ο :στον ισημερινό (γ) Κεφαλή No.1 μετά την τελική έψηση, σημείο 2 ^ο :στον ισημερινό (δ) Κεφαλή No.2 μετά την τελική έψηση, σημείο 1 ^ο :στον πόλο	129
Σχήμα 5.10: Σημεία μέτρησης τραχύτητας επιφάνειας καλουπιού.....	131
Σχήμα 5.11: Τιμές μέσης τραχύτητας Ra επιτυγχανόμενες με διάφορες κατεργασίες.....	132
Σχήμα 5.12: Σημεία και στοιχεία που μετρήθηκαν πάνω στο καλούπι.....	133
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	
Σχήμα 6.1: Κατάστρωση προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία.....	143
Σχήμα 6.2α: Πλέγμα και των τριών κομματιών σε επαφή με κωνική επιφάνεια..	146
Σχήμα 6.2β: Πλέγμα και των τριών κομματιών σε επαφή με επίπεδη επιφάνεια.	146
Σχήμα 6.3: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων.....	147
Σχήμα 6.4: Ανάλυση von misses κεφαλής από χάλυβα 316L σε επαφή με κωνική επιφάνεια και φορτίο (α) 3kN , (β) 5kN , (γ) 10kN , (δ) 20kN και (ε) 30kN	150
Σχήμα 6.5: Ανάλυση von misses κεφαλής από χάλυβα 316L σε επαφή με	

επίπεδη επιφάνεια και φορτίο (α) 3kN, (β) 5kN, (γ) 10kN, (δ) 20kN και (ε) 30kN.....	151
Σχήμα 6.6: Ανάλυση von misses κεφαλής από κεραμική Al_2O_3 σε επαφή με επίπεδη επιφάνεια και φορτίο (α) 3kN, (β) 5kN, (γ) 10kN, (δ) 20kN και (ε) 30kN	152
Σχήμα 6.7: Ανάλυση von misses κεφαλής από κεραμική Al_2O_3 σε επαφή με κωνική επιφάνεια και φορτίο (α) 3kN, (β) 5kN, (γ) 10kN, (δ) 20kN και (ε) 30kN	153
Σχήμα 6.8: Περιβάλλον εργασίας Bluehill2.....	154
Σχήμα 6.9: (α) Φωτογραφία κατά την διάρκεια στατικού ελέγχου κεραμικής κεφαλής με κωνική επιφάνεια και (β) με επίπεδη επιφάνεια σύμφωνα με το ISO 7206-10.....	156
Σχήμα 6.10: (α) Φωτογραφία κατά την διάρκεια στατικού ελέγχου μεταλλικής κεφαλής με επίπεδη επιφάνεια και (β) με κωνική επιφάνεια σύμφωνα με το ISO 7206-10.....	156
Σχήμα 6.11: (α)Επαφή κεφαλής με κωνική επιφάνεια και (β) με επίπεδη επιφάνεια σύμφωνα με το ISO 7206-10.....	157
Σχήμα 6.12: Αποτελέσματα στατικού ελέγχου κεφαλών χάλυβα 316L σε κωνική επιφάνεια για φορτίο (α) 3kN, (β) 5kN, (γ) 10kN, (δ) 20kN και (ε) 30kN	158
Σχήμα 6.13: Αποτελέσματα στατικού ελέγχου κεφαλών χάλυβα 316L σε επίπεδη επιφάνεια για φορτίο (α) 3kN, (β) 5kN, (γ) 10kN, (δ) 20kN και (ε) 30kN.....	159
Σχήμα 6.14: Αποτελέσματα στατικού ελέγχου κεραμικών κεφαλών Al_2O_3 σε κωνική επιφάνεια για φορτίο (α) 3kN, (β) 5kN, (γ) 10kN, (δ) 20kN και (ε) 30kN	160
Σχήμα 6.15: Αποτελέσματα στατικού ελέγχου κεραμικών κεφαλών Al_2O_3 σε επίπεδη επιφάνεια για φορτίο (α) 3kN, (β) 5kN, (γ) 10kN, (δ) 20kN και (ε) 30kN.....	161
Σχήμα 6.16: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 3 kN σε υλικό 316L σε επίπεδη επιφάνεια.....	162
Σχήμα 6.17: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 5 kN σε υλικό 316L σε επίπεδη επιφάνεια.....	162
Σχήμα 6.18: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 10 kN σε υλικό 316L σε επίπεδη επιφάνεια.....	163

Σχήμα 6.19: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 20kN σε υλικό 316L σε επίπεδη επιφάνεια.....	163
Σχήμα 6.20: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 30 kN σε υλικό 316L σε επίπεδη επιφάνεια.....	164
Σχήμα 6.21: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 3 kN σε υλικό 316L σε κωνική επιφάνεια.....	164
Σχήμα 6.22: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 5 kN σε υλικό 316L σε κωνική επιφάνεια.....	165
Σχήμα 6.23: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 10 kN σε υλικό 316L σε κωνική επιφάνεια.....	165
Σχήμα 6.24: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 20 kN σε υλικό 316L σε κωνική επιφάνεια.....	166
Σχήμα 6.25: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 30 kN σε υλικό 316L σε κωνική επιφάνεια.....	166
Σχήμα 6.26: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 3 kN σε υλικό Al2O3 σε κωνική επιφάνεια.....	167
Σχήμα 6.27: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 5 kN σε υλικό Al2O3 σε κωνική επιφάνεια.....	167
Σχήμα 6.28: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 10 kN σε υλικό Al2O3 σε κωνική επιφάνεια.....	168
Σχήμα 6.29: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 20 kN σε υλικό Al2O3 σε κωνική επιφάνεια.....	168
Σχήμα 6.30: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 30 kN σε υλικό Al2O3 σε κωνική επιφάνεια.....	169
Σχήμα 6.31: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 3 kN σε υλικό Al2O3 σε επίπεδη επιφάνεια.....	169
Σχήμα 6.32: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 5 kN σε υλικό Al2O3 σε επίπεδη επιφάνεια.....	170
Σχήμα 6.33: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 10 kN σε υλικό Al2O3 σε επίπεδη επιφάνεια.....	170
Σχήμα 6.34: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 20 kN σε υλικό Al2O3 σε επίπεδη επιφάνεια.....	171
Σχήμα 6.35: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου μέγιστης δύναμη 30 kN σε υλικό	

Al ₂ O ₃ σε επίπεδη επιφάνεια.....	171
--	-----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Περιγραφή	Σελ.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
Πίνακας 2.1: Συγκριτικός πίνακας με τις ιδιότητες των μετάλλων για εμφυτεύματα αρθροπλαστικής ισχίου	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
Πίνακας 3.1: Ιδιότητες υλικού.....	69
Πίνακας 3.2: Επίπεδα ανεξάρτητων μεταβλητών.....	69
Πίνακας 3.3: Δεδομένα εισαγωγής στο λογισμικό.....	73
Πίνακας 3.4: Πειραματικές συνθήκες και αριθμητικά αποτελέσματα.....	78
Πίνακας 3.5: Πειραματικές συνθήκες και αποτελέσματα προσομοιώσεων	80
Πίνακας 3.6: ANOVA για τα πειραματικά αποτελέσματα.....	82
Πίνακας 3.7: ANOVA για τα αριθμητικά αποτελέσματα.....	82
Πίνακας 3.8: ANOVA για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
Πίνακας 5.1: Πειραματικές συνθήκες, αποτελέσματα και αποτελέσματα σφάλματος για επιφανειακή τραχύτητα.....	121
Πίνακας 5.2: Ανάλυση διακύμανσης του μοντέλου δεύτερης τάξης.....	123
Πίνακας 5.3: Ανάλυση διακύμανσης του μοντέλου πρώτης τάξης.....	125
Πίνακας 5.4: Μετρήσεις τραχύτητας κεφαλών	128
Πίνακας 5.5: Μετρήσεις τραχύτητας επιφάνειας καλουπιού.....	131
Πίνακας 5.6: Μετρήσεις διαστάσεων καλουπιού.....	134