



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ

ΥΨΗΛΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Φοιτητής : ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΗΛΙΑΣ (93065)

Επιβλέπων Καθηγητής : Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ
2008

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όσους συνέβαλαν στη εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα προς:

Τον Καθηγητή , κ. Μάμαλη Αθανάσιο , Διευθυντή του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών , για τη δυνατότητα ανάληψης της διπλωματικής εργασίας και την παροχή των υποδομών για την εκτέλεση και ολοκλήρωσή της .

Τον Καθηγητή , κ. Μανωλάκο Δημήτριο για τη δυνατότητα ανάληψης της διπλωματικής εργασίας και την παροχή των υποδομών για την εκτέλεση και ολοκλήρωσή της .

Τον κ. Γαλάνη Νικόλαο για τις πολύτιμες συμβουλές και διορθώσεις του .

Τους γονείς μου για τη συνολική συμπαράστασή τους .

Και τον Θεό που με προστάτευε σε κάθε μου βήμα .

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| Περιεχόμενα | 1 |
| Εισαγωγή | 5 |
| Κεφάλαιο 1 | 7 |
| 1.1 Μηχανισμοί αποβολής υλικού σε κατεργασίες ακριβείας νέων υλικών | 7 |
| 1.2 Ελεύθερη λείανση | 8 |
| 1.3 Εύπλαστη περιοχή κατεργασίας | 11 |
| 1.4 Αρχές της εύπλαστης περιοχής κατεργασίας | 13 |
| 1.5 Μηχανισμοί αποβολής υλικού στην εύπλαστη περιοχή κατεργασίας | 15 |
| 1.6 Αποβολή υλικού σε γυαλιά και κεραμικά | 16 |
| 1.7 «Απαλή» λείανση | 19 |
| 1.8 Αποβολή υλικού με μικρορωγμές | 20 |
| 1.9 Αποβολή υλικού χωρίς μικρορωγμές | 22 |
| Κεφάλαιο 2 | 24 |
| 2.1 Κατεργασία EDM | 24 |
| 2.2 Πειραματική διαδικασία | 24 |
| 2.3 Πειραματικά αποτελέσματα και σχεδιασμός | 28 |
| 2.4 Επίδραση της πολικότητας | 28 |
| 2.5 Επίδραση της διαμέτρου του ηλεκτροδίου στην εξάπλωση της μικρής οπής και στο ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου | 30 |
| 2.6 Επίδραση της περιστροφικής ταχύτητας του ηλεκτροδίου στο μέγεθος της οπής και στο ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου | 33 |
| 2.7 Επίδραση του πλάτους της εγκοπής του ηλεκτροδίου με εγκοπή από τη μια πλευρά του στο μέγεθος της κατεργαζόμενης οπής και στο ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου | 34 |

| | |
|--|----|
| 2.8 Επίδραση της περιστροφικής ταχύτητας ηλεκτροδίου με εγκοπή από τη μια πλευρά στο μέγεθος της κατεργαζόμενης οπής και στο ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου. | 35 |
| 2.9 Παρατήρηση του σχήματος της κατεργαζόμενης οπής. | 37 |
| Κεφάλαιο 3 | 38 |
| 3.1 Σύγχρονες εξελίξεις στην μέθοδο EDM και θέματα έρευνας | 38 |
| 3.2 Θέματα έρευνας πάνω στη μέθοδο EDM | 39 |
| 3.3 Διαχείριση ηλεκτροδίων και εξαρτημάτων | 40 |
| 3.4 Προετοιμασία ηλεκτροδίου και κατεργαζόμενου κομματιού | 41 |
| 3.5 Διαδικασία EDM | 43 |
| 3.6 Μέτρηση | 44 |
| 3.7 Πηγές σφαλμάτων | 44 |
| 3.8 Σφάλματα μηχανής | 46 |
| 3.9 Ακρίβεια και επαναληψιμότητα τοποθέτησης | 46 |
| 3.10 Μέτρηση κυκλικών λαθών (ΔX_{meas} , ΔY_{meas} , ΔD) | 47 |
| 3.11 Προετοιμασία ηλεκτροδίου | 48 |
| 3.12 Σφάλμα θερμοκρασιακής αστάθειας (Δy_{unit}) | 50 |
| 3.13 Κενό ανάφλεξης (Δge , Δgd) | 50 |
| 3.14 Προβλήματα και λύσεις | 51 |
| 3.15 Φθορά ηλεκτροδίου | 52 |
| Κεφάλαιο 4 | 56 |
| 4.1 Εφαρμογή μεθόδου EDM για την κατεργασία μικρών οπών | 56 |
| 4.1.1 Πειραματικός σχεδιασμός | 56 |
| 4.1.2 Υλικά | 57 |
| 4.2 Διαδικασία της κατεργασίας | 59 |

| | |
|---|----|
| 4.3 Πειραματικά αποτελέσματα και συζήτηση. | 60 |
| 4.3.1 Επίδραση του δυναμικού στη φθορά του ηλεκτροδίου | 60 |
| 4.3.2 Επίδραση του διακένου στη διακύμανση της διαμέτρου της κατεργαζόμενης οπής . | 61 |
| 4.3.3 Επίδραση της διαφοράς δυναμικού στο διάκενο στη διάμετρο της κατεργαζόμενης οπής. | 62 |
| 4.4 Η μέθοδος HFDG | 63 |
| 4.5 Η επίδραση του ηλεκτροδίου στην τραχύτητα επιφανείας. | 64 |
| 4.6 Η επίδραση της έντασης ρεύματος στην ποιότητα της επιφανείας. | 65 |
| 4.7 Επίδραση του δυναμικού συντονισμού στην ποιότητα επιφανείας | 67 |
| 4.8 Επίδραση της διάρκειας επιβολής της μεθόδου στην τραχύτητα της επιφανείας | 70 |
| Κεφάλαιο 5 | 72 |
| 5.1 Μελέτη της τραχύτητας επιφανείας κατεργαζόμενου τεμαχίου κατά την κατεργασία της λείανσης υψηλών ταχυτήτων | 72 |
| 5.2 Πειραματική μελέτη | 74 |
| 5.3 Πειραματικό σχέδιο | 74 |
| 5.4 Πειραματικά δεδομένα και ανάλυση σφάλματος | 75 |
| Κεφάλαιο 6 | 78 |
| 6.1 Αντοχή εργαλείων σε υψηλές ταχύτητες | 78 |
| 6.2 Πειραματικός σχεδιασμός | 80 |
| 6.3 Ισοδύναμη ταχύτητα | 80 |
| 6.4 Πειραματικά αποτελέσματα και συζήτηση | 82 |
| Κεφάλαιο 7 | 92 |
| 7.1 Μελέτη της ακριβείας κατεργασίας φρεζαρίσματος κονδυλιού με σφαιρική απόληξη μέσω βελτιστοποίησης της ταχύτητας κοπής | 92 |

| | |
|---|-----|
| 7.2 Τεχνική βελτιστοποίησης της ταχύτητας κοπής | 94 |
| 7.3 Εφαρμογή του προγράμματος βελτιστοποίησης της ταχύτητας κοπής | 99 |
| 7.4 Αποτελέσματα του προγράμματος βελτιστοποίησης ταχύτητας κοπής | 104 |
| Συμπεράσματα | 106 |
| Βιβλιογραφία | 110 |

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Εισαγωγή

Η πρόοδος της νανοτεχνολογίας καθώς και η ανάπτυξη νέων υλικών τα τελευταία χρόνια έχουν βρει πλήθος εφαρμογών στον κατασκευαστικό αλλά και βιομηχανικό τομέα . Η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη εξαρτημάτων υψηλής ποιότητας κατασκευής και ανάλογης ακριβείας διαστάσεων , η ανάπτυξη της βιομηχανίας ηλεκτρονικών , οπτικών , οι νέες πρόοδοι στην ιατρική αλλά και σε πλήθος άλλων τομέων οδήγησε στην ανάπτυξη νέων τεχνικών κατεργασίας των υλικών αλλά και στην εξέλιξη και βελτίωση των ήδη υπαρχόντων .

Ως κατεργασία υψηλής ακριβείας ορίζεται η κατεργασία εκείνη που συνδυάζει υψηλή πιστότητα διαστάσεων καλή ποιότητα κατασκευής και ποιότητα επιφανείας . Ανάλογα με το υλικό που κατεργάζεται το σχήμα του θέλουμε να επιτύχουμε καθώς και τη χρήση που θέλουμε να κάνουμε στο κατεργασμένο τεμάχιο το είδος της κατεργασίας αλλάζει . Πληθώρα τεχνικών για κατεργασίες υψηλής ακριβείας έχει αναπτυχθεί καθώς και συνεχώς εξελίσσονται νέες τεχνικές . Εξαιτίας ακριβώς του πλήθους των υπαρχουσών τεχνικών δεν είναι δυνατή μια πλήρη αναφορά τους μέσα στα πλαίσια της παρούσης εργασίας .

Στα παρακάτω εξετάζονται πιο αναλυτικά οι μηχανισμοί αποβολής υλικού οι οποίοι λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία τόσο ευθραύστων όσο και εύπλαστων υλικών κατά τη κατεργασία της λείανσης τους . Στη συνέχεια εξετάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της κατεργασίας με τη χρήση ηλεκτρικής εκκένωσης (EDM) , καθώς και

γίνεται εκτενέστερη ανάλυση της χρήσης αυτής της κατεργασίας σε συγκεκριμένες περιπτώσεις . Αναλύεται ο μηχανισμός και οι συνθήκες υπό τις οποίες λαμβάνει χώρα αυτή η κατεργασία ενώ εξετάζονται και προτάσεις για περαιτέρω εξέλιξη αυτής της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία σε ορισμένες περιπτώσεις . Τέλος γίνεται μια αναφορά στις κατεργασίες που χρησιμοποιούν σαν κύριο χαρακτηριστικό τους την υψηλή ταχύτητα κοπής . Στο τελευταίο κομμάτι κρίθηκε αναγκαίο να γίνει μια αναφορά στην επίδραση των υψηλών ταχυτήτων στη φθορά του κοπτικού εργαλείου , την ανάλυση της ποιότητας επιφανείας καθώς και τις μαθηματικές σχέσεις που επηρεάζουν την τραχύτητα επιφανείας, ίσως το βασικότερο παράγοντα αξιολόγησης της ποιότητας επιφανείας , καθώς και τους παράγοντες συνθηκών κοπής που την επηρεάζουν . Τέλος αναπτύσσεται αναλυτικότερα η περίπτωση μιας τέτοιας κατεργασίας , ενώ ταυτόχρονα γίνεται και παρουσίαση ενός προγράμματος βελτιστοποίησης της ταχύτητας κοπής που συμβάλει στην αποτελεσματικότερη χρησιμοποίηση της μεθόδου .

Κεφάλαιο 1

1.1 Μηχανισμοί αποβολής υλικού σε κατεργασίες ακριβείας νέων υλικών

Τα σύγχρονα προϊόντα χαρακτηρίζονται από συστατικά υψηλής ακρίβειας .Η τεχνολογία κατεργασίας υψηλής ακρίβειας έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια για την κατασκευή οικονομικών και ποιοτικών εξαρτημάτων για διάφορες εφαρμογές όπως laser ,ημιαγωγούς ,διαστημική τεχνολογία, εφαρμογές αυτοκίνησης .Οι συγκεκριμένες κατεργασίες αποσκοπούν στην κατασκευή κομματιών με καλή ακρίβεια σχήματος και υψηλή ποιότητα επιφανείας (τόρνευση,λείανση,στίλβωση,υπερλείανση)

Οι κατεργασίες υψηλής ακριβείας έχουν αναπτυχθεί ραγδαία μετά τη δεκαετία του 80 κυρίως λόγω της υψηλής ακριβείας και παραγωγικότητας οπτικών μηχανολογικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων για βιομηχανική χρήση. Για πολλά συστήματα υψηλής τεχνολογίας η κατασκευή τους περιπλέκεται λόγω της χρήσης ευθραύστων υλικών .Την περασμένη δεκαετία παρατηρήθηκε μια αναζωπύρωση στη χρήση των κεραμικών σε κατασκευαστικές εφαρμογές. Οι εξαιρετικές θερμικές ιδιότητες και η αντοχή τόσο σε χημική όσο και μηχανική φθορά αυτών των υλικών όσο και έρευνες και ανακαλύψεις σ' αυτόν τον τομέα συντέλεσαν στο γεγονός.

Τα κεραμικά υλικά εκτός από δομικά υλικά χρησιμοποιούνται πλέον όλο και συχνότερα στην κατασκευή εξαρτημάτων υψηλής ακριβείας .Ήπαρ' όλα αυτά η υψηλή ακρίβεια διαστάσεων και η καλή ποιότητα επιφανείας που απαιτείται για εξαρτήματα ακριβείας δεν επιτυγχάνεται πάντα με τις συμβατικές μεθόδους

μορφοποίησης και πυροσυσσώματωσης των κεραμικών. Έτσι η αποπεράτωση υψηλής ακριβείας μετά το πέρας των προηγούμενων τεχνικών αναγνωρίζεται ως βασική μέθοδος στην κατασκευή κεραμικών εξαρτημάτων. Η ποσότητα του αποβαλλόμενου κεραμικού υλικού από την κατεργασία αποπεράτωσης πρέπει να είναι πολύ μικρή ώστε οι μικρορωγμές να μην παραμείνουν στην κατεργασμένη επιφάνεια. Λειαντικές τεχνικές όπως κονιοποίηση και στίλβωση με διαμαντένια λειαντικά έχουν υιοθετηθεί για αποπεράτωση υψηλής ακριβείας των κεραμικών. Παρόλα αυτά καλύτερη ποιότητα επιφανείας και υψηλότεροι παραγωγικά οι ρυθμοί μπορούν να επιτευχθούν μέσα από διαδικασίες κοπής. Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους η κοπή πλεονεκτεί στην κατηγορία συνθετών μορφών.

Τα εύθραυστα υλικά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες

1) άμορφα γυαλιά 2) σκληροί κρύσταλλοι και 3) εξελιγμένα κεραμικά

Τα εξελιγμένα κεραμικά είναι μια σύγχρονη πρόοδος. Αποτελούνται από υψηλής ποιότητας πορώδη συστατικά που μορφοποιούνται και επεξεργάζονται θερμικά κάτω από ακριβείς ελεγχόμενες συνθήκες. Η χρήση αυτών των υλικών επιτρέπει την ανάπτυξη συσκευών υψηλής τεχνολογίας και συστημάτων τα οποία θα ήταν αδύνατον να παρασκευαστούν διαφορετικά. Το ίδιο ισχύει και για ειδικά κρυσταλλικά υλικά (ημιαγωγοί) καθώς και για εξελιγμένα υψηλής θερμοκρασίας γυαλιά.

1.2 Ελεύθερη λείανση (free abrasive machining FAME)

Η ελεύθερη λείανση είναι μια κατεργασία η οποία χρησιμοποιεί λειαντικά όπως διαμάντι, καρβίδιο σιλικόνης και οξείδιο αλουμινίου για αφαίρεση υλικού και αποπεράτωση. Το λειαντικό αυτήν την περίπτωση συνήθως αναμιγνύεται μέσα υγρό για την κατασκευή λάσπης. Λάσπη τοποθετείται ανάμεσα σε έναν σκληρό (60-62Arc)

περιστρεφόμενο τροχό και το κατεργασμένο τεμάχιο . Ο περιστρεφόμενος τροχός είναι συνήθως κατασκευασμένος από σκληρυμένο χάλυβα .Ένα σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας φαίνεται στο σχήμα 1.

P.S. Sreejith, B.K.A. Ngoi / International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001) 1831–1843 1833

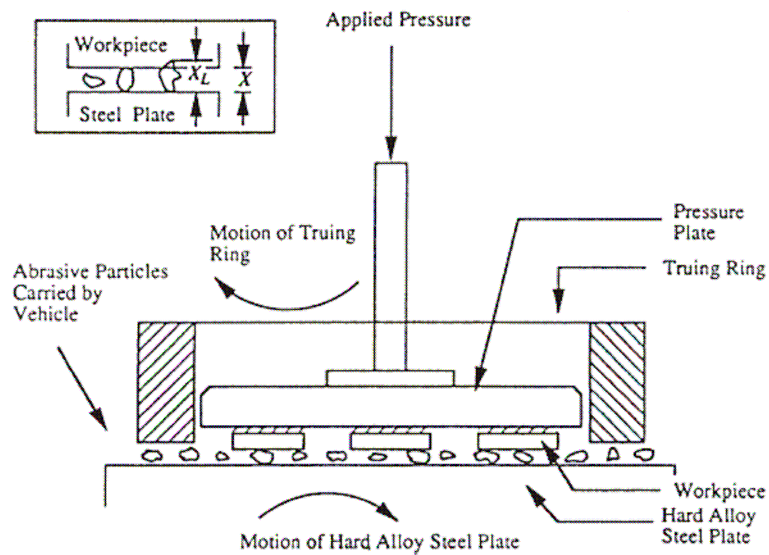
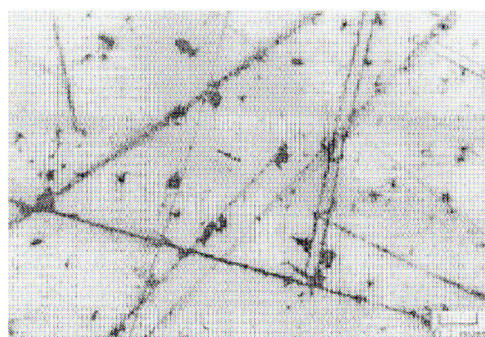


Fig. 1. Schematic diagram of free abrasive machining.

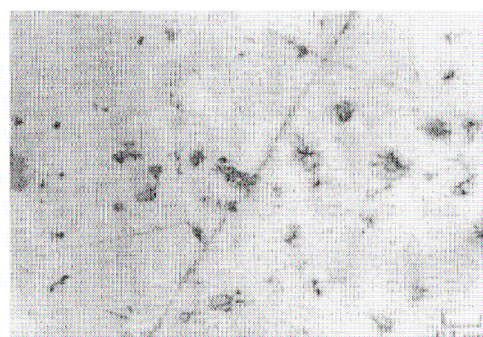
Σχ 1 Σχηματικό διάγραμμα της κατεργασίας

Τα λειαντικά υλικά δεν σφηνώνονται μέσα στον τροχό και για αυτό το λόγο επιλεγούμε αυτός να είναι σκληρός .Όσο πιο σκληρός ο τροχός τόσο καλύτερη ποιότητα επιφανείας επιτυγχάνουμε.

Ο μηχανισμός της αποβολής υλικού κατά τη διάρκεια της ελεύθερης λείανσης (FAME) ευθραύστων υλικών είναι πολύ διαφορετικός σε σύγκριση με αυτόν των εύπλαστων υλικών . Αξιοσημείωτη πλαστική παραμόρφωση λαμβάνει χώρα πριν την αποβολή υλικού στα εύπλαστα υλικοί πλαστικές τάσεις στην επιφάνεια και κάτω από αυτήν βοηθούν τη δημιουργία ρωγμών που τελικά οδηγούν στην αποβολή υλικού .Παρατηρήσεις κατά τη λείανση ευθραύστων στερεών επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι οι ρωγμές παίζουν σημαντικό ρόλο στην αποβολή υλικού έξω από την εύπλαστη περιοχή κατεργασίας .Μικροσκοπικές παρατηρήσεις κεραμικών επιφανειών επεξεργασμένων με τη μέθοδο της ελεύθερης λείανσης αποκαλύπτουν ότι η αποβολή υλικού λαμβάνει χώρα μέσω θραύσης.



Ni-Zn ferrite surface

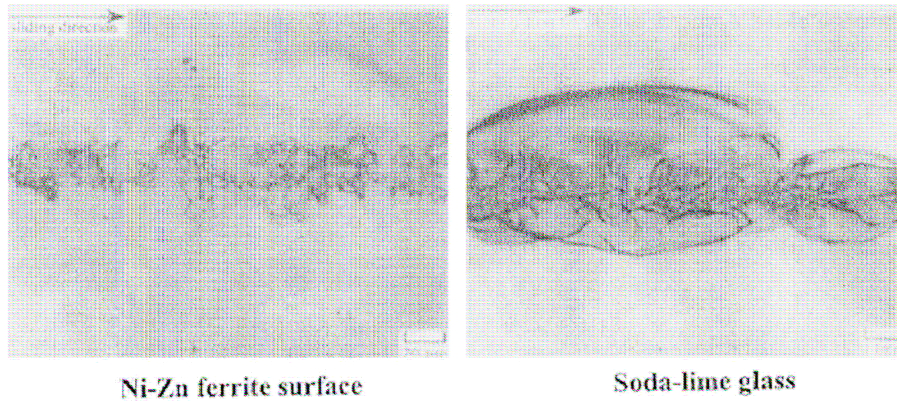


Soda-lime glass

Fig. 2. Micrographs of highly polished surfaces abraded by free abrasive machining.

Σχ.2 επιφάνειες κατεργασμένες με τη μέθοδο της ελεύθερης λείανσης για δυο διαφορετικά υλικά

ενώ στο σχήμα 3 απεικονίζονται οι επιφάνειες μετά από συμβατική λείανση φορτιού 100g για τα ίδια υλικά .



Σχ.3 επιφάνειες μετά από συμβατική λείανση φορτιού 100g για τα ίδια υλικά .

1.3 Εύπλαστη περιοχή κατεργασίας

Βελτιώσεις στις αντοχές των κατεργασιών έδωσαν στους ερευνητές τη δυνατότητα να αποκαλύψουν την εύπλαστη περιοχή αποβολής υλικού των ευθραύστων υλικών .Υπό συγκεκριμένες ελεγχόμενες συνθήκες είναι δυνατό να κατεργαστούν τα εύθραυστα υλικά όπως τα κεραμικά με χρήση διαμαντιών μιας ή πολλαπλών αιχμών έτσι ώστε το υλικό να αποβάλετε ακολουθώντας πλαστική ροή αφήνοντας τελικά επιφάνεια χωρίς ρωγμές .Όπως φαίνεται στο σχήμα 4

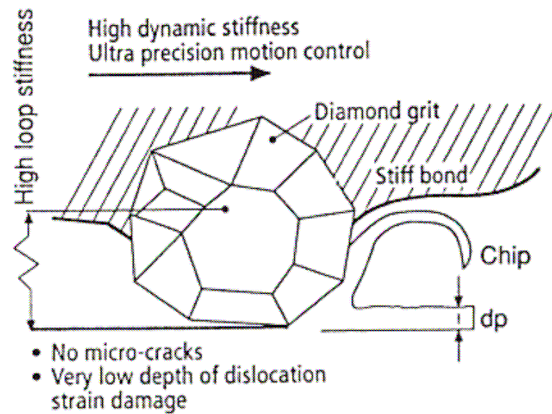


Fig. 4. The mechanism of ductile or shear mode grinding of brittle materials.

Σχ 4 Μηχανισμός «εύπλαστης» κατεργασίας κατά τη λείανση εύθραυστων υλικών

.Αυτή η κατεργασία ονομάζεται εύπλαστη περιοχή κατεργασίας εύπλαστη περιοχή κατεργασίας βασίζεται στο γεγονός ότι όλα τα υλικά παραμορφώνονται πλαστικά όταν η παραμόρφωση είναι πολύ μικρό ρυθμός αποβολής υλικού για λείανση και γυάλισμα συγκρίνεται και υπάρχει μια περιοχή ρυθμών αποβολής υλικού ανάμεσα αυτές τις δυο κατεργασίες για την οποία κάμπια από αυτές τις κατεργασίες δε λαμβάνει χώρα .Αυτή η περιοχή μπορεί να ονομαστεί κενό μικρολειανσης (micro-grinding gap) διότι βρίσκεται ανάμεσα στη λείανση και το γυάλισμα (σχ.5).

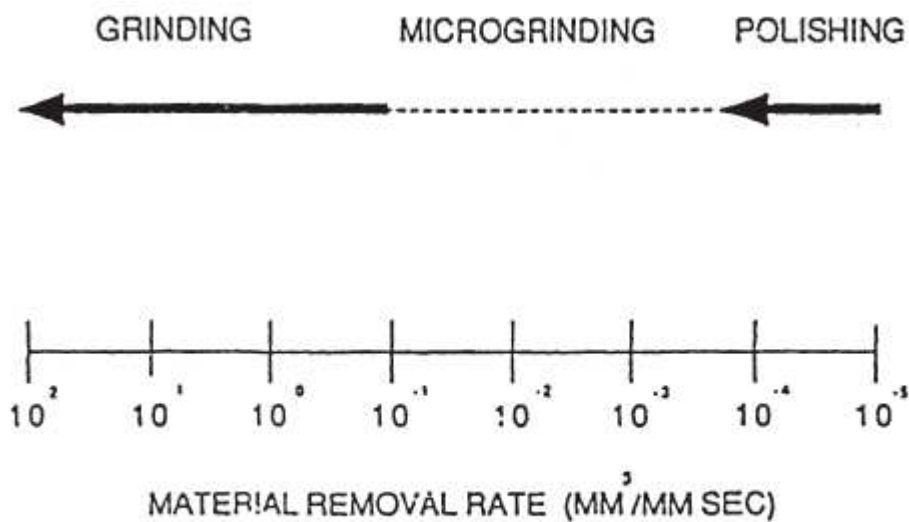


Fig. 5. Achievable material removal rates in abrasive machining.

Σχ.5 Ρυθμοί αποβολής υλικού σε διάφορες κατεργασίες λείανσης

Είναι σημαντική γιατί αντιπροσωπεύει το όριο ανάμεσα εύπλαστη και εύθραυστη περιοχή λείανσης για μια πλατιά γκάμα υλικών όπως τα κεραμικά, τα γυαλιά και τους ημιαγωγούς.

1.4 Αρχές της περιοχής εύπλαστης κατεργασίας

Η μετάβαση από την εύθραυστη στην εύπλαστη κατάσταση κατά την κατεργασία ευθραύστων υλικών περιγράφεται ενεργειακά ως μια ισορροπία ανάμεσα στην ενεργεια παραμόρφωσης και την ενεργεια επιφανείας. Τοπικές ρωγμές που δημιουργούνται κατά την επιβολή φορτίου έχουν ενδιαφέρον στην κατεργασία ευθραύστων υλικών. Η κατεργασία είναι μια οδοντωτή διαδικασία κατά την οποία

οδοντωτές ρωγμές δημιουργούνται και παίζουν σημαντικό ρολό στην οδοντωτή περιοχή κατεργασίας. Ένα κρίσιμο βάθος ρωγμής d_c ορίζεται ακολούθως

$$d_c = b(K_c/H)^2(E/H)$$

οπου K_c είναι η τραχύτητα επιφανείας της ρωγμής το ελαστικό Ντόιλ και b σταθερά που εξαρτάται από τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου.

Το σχήμα 6 δείχνει μια προβολή του εργαλείου κάθετη στην κατεύθυνση της κοπής. Σύμφωνα με τη θεωρία της ενεργειακής ισορροπίας, η ζημιά της ρωγμής θα ξεκινήσει στο ενεργό βάθος κοπής και θα αναπαραχθεί μέχρι ένα μέσο βάθος y_c . Αν η ρωγμή δε συνεχιστεί κάτω από το επίπεδο της επιφανείας κοπής τότε οι προϋποθέσεις της εύπλαστης περιοχής κατεργασίας επιτυγχάνονται. Η εγκάρσια πρόωση (cross feed) f καθορίζει τη θέση του d_c κατά μήκος της αιχμής του κοπτικού εργαλείου. Μεγαλύτερες τιμές του f οδηγούν το d_c πιο κοντά στην κεντρική γραμμή της αιχμής του κοπτικού εργαλείου.

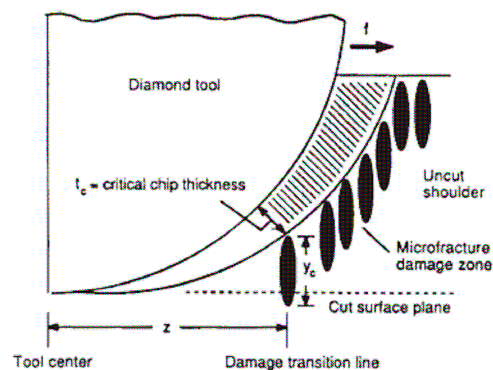
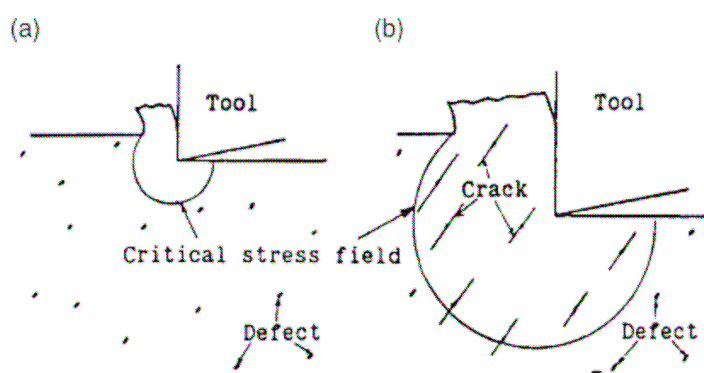


Fig. 6. Projection of the tool perpendicular to the cutting direction.

Σχ 6 προβολή του εργαλείου κάθετη στην κατεύθυνση της κοπής

Μια άλλη ερμηνεία του φαινομένου της μετάβασης στην εύπλαστη περιοχή βασίζεται στις ρωγμές εξαιτίας σχισμάτων που προκαλούνται από την ύπαρξη ελαττωμάτων. Οι κρίσιμες τιμές εμφάνισης σχισμών και πλαστικής παραμόρφωσης εξαρτώνται από την πυκνότητα των ελαττωμάτων στο εργαζόμενο κομμάτι. Σε εύθραυστα υλικά η πυκνότητα των ελαττωμάτων δεν είναι μεγάλη, συνεπώς η κρίσιμη τιμή δημιουργίας ρωγμών εξαρτάται από το πεδίο τάσεων. (επεξήγηση σχεδίου 7)



Model of chip removal with size effects. (a) Small depth of cut; (b) large depth of cut.

Σχ .7 Μοντέλο αποβολής υλικού: (α) μικρό βάθος κοπής, (β) μεγάλο βάθος κοπής

1.5 Μηχανισμοί αποβολής υλικού στην εύπλαστη περιοχή κατεργασίας

Η κατεργασία δημιουργεί μια ωφέλιμη επιφάνεια επαφής των δυο συνεργαζομένων επιφανειών, του κατεργαζόμενου κομματιού και του λειαντικού εργαλείου. Παρόλα αυτά οι μικρομηχανισμοί αποβολής υλικού διαφέρουν από υλικό

σε υλικό και εξάρτιούνται τόσο από τη μικροδομή του κατεργαζόμενου κομματιού όσο και του υλικού κατασκευές του εργαλείου.

Γενικά κατά την κατεργασία υψηλής ακριβείας ευθραύστων υλικών χρησιμοποιούνται εργαλεία με μεγάλη αρνητική γωνιά αποβλήτου (της τάξης των -30C) . Η αρνητική γωνιά αποβλήτου προκαλεί την απαιτούμενη υδροστατική πίεση αναγκαία για την πλαστική παραμόρφωση του εργαζομένου κομματιού .Κατά τη διάρκεια συμβατικής κατεργασίας με εργαλείο απλής αιχμής η γωνιά αποβλήτου θα είναι θετική η μηδενική .Με θετική γωνιά αποβλήτου η κοπτική δύναμη θα είναι γενικά 2 φορές μεγαλύτερης της δύναμης θραύσης .Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας λείανσης συνηθίζεται το εργαλείο να έχει μεγάλη αρνητική γωνιά και η δύναμη κοπής να είναι περίπου η μισή της δύναμης θραύσης . Στις κατεργασίας υψηλής ακριβείας ευθραύστων υλικών σε βάθη κοπής μικρότερα της ακτίνας της αιχμής του κοπτικού εργαλείου , το εργαλείο σχηματίζει μεγάλη αρνητική γωνιά .Η αιχμή του κοπτικού εργαλείου σ αυτή την περίπτωση εισχωρεί στο κατεργαζόμενο κομμάτι όπως περίπου ένας οδοντωτός τροχός σ έναν άλλον δημιουργεί μεγάλες πιέσεις που προκαλούν πλαστική παραμόρφωση,

1.6 Αποβολή υλικού σε γυαλιά και κεραμικά.

Η πλαστική λείανση του οπτικού γυαλιού θεωρείται ως η πιο τελεία εφαρμογή κατεργασίας στο υλικό .Το γυαλί είναι ανόργανο υλικό και ψύχεται από τη λειωμένη κατάσταση στη στερεά χωρίς το σχηματισμό κρυστάλλων γυαλί είναι μη

κρυσταλλικό (η άμορφο) και έχει συμπεριφορά ανάμεσα σε στερεό και ρευστό .Για παράδειγμα σε θερμοκρασία δωματίου συμπεριφέροντε σαν εύθραυστα υλικά αλλά πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης του γυαλιού αποκτούν συμπεριφορά ρευστοί υψηλή ευθραυστότητα του γυαλιού οφείλεται στην άτακτη διεύθυνση των ατόμων .Στα κρυσταλλικά υλικά όπως τα μέταλλα τα άτομα έχουν μια καθορισμένη διεύθυνση που περιγράφεται στους καταλόγους του Miller,ενώ η δομή του γυαλιού δεν παρουσιάζει κάποια συγκεκριμένη διεύθυνση.

Οι μοναδικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των κεραμικών όπως σκληρότητα αντοχή ,χημική αδράνεια και υψηλή αντίσταση στη φθορά, έχουν συμβάλει στην αυξημένη χρήση τους ως μηχανικά και ηλεκτρικά εξαρτήματα. Το είδος του ατομικού δεσμού καθορίζει τη σκληρότητα του υλικού όπως και το module του Young..Για εύπλαστα μεταλλικού τύπου δύσνου υλικά ο λόγος E/H είναι περίπου 250,ενώ για τα εύθραυστα υλικά , δηλαδή υλικά με δεσμούς μεταξύ των ατόμων τους ανάλογους με αυτούς των ευθραύστων υλικών είναι γύρω στο 20.Ο λόγος κυμαίνεται μεταξύ των δυο παραπάνω τιμών για υλικά με τύπο ιονικού δεσμοί χαμηλή πυκνότητα καθώς και η χαμηλή κινητικότητα των ελαττωμάτων είναι οι λόγοι για την υψηλή σκληρότητα κάποιων ευθραύστων υλικών.

Ανάλογα με το ύφος του μεταλλικού δεσμού διαφορετικοί μηχανισμοί αποβολής υλικού ανακύπτουν .Τα μέταλλα , που χαρακτηρίζονται από μεταλλικό δεσμό οπότε τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μοιράζονται μεταξύ των ατόμων βρίσκονται στην εύπλαστη περιοχή παραμόρφωσης. Η κατεργασία των γυαλιών και των κεραμικών αν λάβει χώρα στην εύπλαστη περιοχή δημιουργεί κάθετες ρωγμές κατά την εφαρμογή του φορτίου και πλευρικές ρωγμές κατά την απομάκρυνση του φορτίου , αλλά ο σχηματισμός καθέτων ρωγμών δημιουργεί σημαντική ζημιά κάτω από την επιφάνεια της κατεργασίας .Παρόλα αυτά αν επιλεγεί ένα πολύ μικρό βάθος κοπής ακόμα και

εύθραυστα υλικά όπως το γυαλί και τα κεραμικά μπορούν να κατεργαστούν στην εύπλαστη περιοχή .Γυαλιά και κεραμικά μπορούν να κατεργαστούν στην εύπλαστη περιοχή αν το βάθος κοπής κρατηθεί κάτω από τα 10 mm.

Οι μηχανισμοί αποβολής υλικού στα γυαλιά και στα κεραμικά αποτελούνται από εύθραυστες ρωγμές και πλαστική παραμόρφωση .Στην πρώτη περίπτωση μια σκληρή αιχμή κοπτικού εργαλείου εισχωρεί στο εύθραυστο υλικό προκαλώντας κάθετες και πλευρικές ρωγμές , η δεύτερη περίπτωση είναι ανάλογη της διαδικασίας σχηματισμού αποβλήτου κατά τη λείανση του μετάλλου .Το φορτίο στο σημείο κοπής και οι ιδιότητες του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι οι παράγοντες που καθορίζουν την έκταση των ευθραύστων ρωγμών .

Συμφωνά με την υπόθεση της εύπλαστης κατεργασίας όλα τα υλικά , ακόμη και τα εύθραυστα ,μεταβαίνουν από την εύθραυστη στην πλαστική περιοχή κατεργασίας, όταν το βάθος κοπής πέσει κάτω από ένα κρίσιμο σημείο. Η ενεργεία που απαιτείται για την δημιουργία των ρωγμών, πιστεύεται πως είναι μεγαλύτερη από την ενεργεία που απαιτείται για την πλαστική παραμόρφωση.

Η κατεργασία στην εύπλαστη περιοχή είναι πολύ σημαντική για υψηλής ποιότητας γυαλιά και κεραμικά.

Κατά την λείανση στην περιοχή της πλαστικότητας, όταν οι κόκκοι έρχονται σε επαφή με το υλικό παρατηρείται συγκέντρωση θερμότητας στο σημείο επαφής εξ αιτίας της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού. Δηλαδή η θερμότητα δεν εισχωρεί στο εσωτερικό με αποτέλεσμα να συσσωρεύετε στο σημείο επαφής. Το παραπάνω γεγονός σε συνδυασμό με την υψηλή επιβαλλομένη από το φορτίο τάση , είναι αρκετό ώστε να προκαλέσει τοπική εύπλαστα ώστε να έχουμε πλαστική παραμόρφωση.

Στην περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης η αποβολή υλικού δε λαμβάνει χωρά εξ ολοκλήρου με πλαστικό τρόπο. Στην πραγματικότητα η αποβολή υλικού λαμβάνει χωρέςαν ένας συνδυασμός πλαστικότητας και εκτεταμένων μικρορωγμών .Η κατεργασία στην εύπλαστη περιοχή είναι μια αλληλεπίδραση μεταξύ της γεωμετρίας της αιχμής του κοπτικού εργαλείου και της ταχύτητας πρόωσης, ενώ το κρίσιμο βάθος κοπής καθορίζει το μέγεθος και το είδος των ρωγμών. Καθαρή εύπλαστη ανταπόκριση θα έχουμε όταν το ωφέλιμο βάθος κοπής θα είναι μικρότερο από το κρίσιμο βάθος κοπής .Κατά την αποπεράτωση ευθραύστων υλικών η ανταπόκριση του υλικού είναι πολύ σημαντική και επιδρά στην ποιότητα της επιφανείας. Η ανταπόκριση του υλικού εξαρτάται από το μέγεθος και την ένταση του πεδίου τάσεων καθώς και από την αλληλεπίδραση με το υλικό του κοπτικού εργαλείου κατά τη διαδικασία της κοπής .Στις μελέτες του ανάμεσα στη μετάβαση από την εύθραυστη στην εύπλαστη περιοχή ο Yoshikawa κατηγοριοποιεί τα πεδία τάσεων στις επόμενες 4 περιοχές

1)Περιοχή Α Η αποβολή του υλικού λαμβάνει χωρά εξαιτίας μηχανικών τάσεων αλλά και χημικών-θερμοκρασιακών φαινομένων .Αυτήν την περιοχή πολύ μικρή ποσότητα υλικού αποβάλετε.

2)Περιοχή Β Εδώ δεν υπάρχουν παραμορφώσεις και το υλικό θεωρείται ως ένας ιδανικός κρύσταλλος .Παραμορφώσεις δημιουργούνται πριν από τη δημιουργία ευθραύστων ρωγμών .Μετά τη δημιουργία των παραμορφώσεων το υλικό θεωρείται πως συμπεριφέρεται όπως στην περιοχή Γ.

3)Περιοχή Γ Πλαστική παραμόρφωση λαμβάνει χωρά ενώ ακολουθείται από δημιουργία ρωγμών στη ζώνη παραμόρφωσης.

4)Περιοχή Δ Η αποβολή υλικού λαμβάνει χωρά εξ' ολοκλήρου εξαιτίας των ρωγμών.

Συμπεραίνουμε από τα παραπάνω ότι για πολύ μικρό βάθος κοπής η αποβολή υλικού λαμβάνει χώρα εξαιτίας χημικής διάβρωσης που ακολουθείται από μια πλαστική φάση παραμόρφωσης και δημιουργίας μικρορωγμών ανάλογα με τις συνθήκες.

1.7 «Απαλή» λείανση

Υπάρχει μια εναλλακτική υπόθεση που ονομάζεται «απαλή» κατεργασία οπής εικάζεται πως η πλαστική παραμόρφωση δεν επηρεάζει καταλυτικά την αποβολή υλικού . Συμφωνά με αυτή τη θεωρία το είδος της παραμόρφωσης (πλαστική-εύθραυστη) εξαρτάται από τη από τη μορφή του πεδίου τάσεων και όχι την ένταση του .Είναι δύσκολο να υποθέσει κανείς ότι το είδος της παραμόρφωσης θα αλλάξει αλλάζοντας μονό το βάθος κοπής και κρατώντας όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές .Έρευνες έδειξαν ότι για να παραμορφωθούν τα εύθραυστα υλικά με πλαστικό τρόπο απαιτείται η εφαρμογή της ανάλογης υδροστατικής πίεσης ή και θερμοκρασίας μείωση του βάθους κοπής θα μειώσει απλά την τάση χωρίς να μεταβάλει το είδος της . Για αυτό η καλύτερη ποιότητα επιφανείας που παρατηρείται σε μικρά βάθη κοπής οφείλεται κυρίως στα παραπάνω και όχι αναγκαστικά στην πλαστική παραμόρφωση .Σε μικρότερα βάθη κοπής μικρορωγμές μπορεί να σχηματίζονται αλλά δεν αναπαράγονται ώστε να σχηματίσουν μεγαλύτερες ρωγμές .Γη αυτό η κατεργασία σε πολύ μικρά βάθη κοπής μπορεί να ονομαστεί «απαλή» λείανση αντί για εύπλαστη λείανση.

1.8 Αποβολή υλικού με μικρορωγμές

Κατά τη διάρκεια συμβατικών κατεργασιών ευθραύστων υλικών το περισσότερο υλικό αποβάλλεται μέσω ευθραύστων ρωγμών με αποτέλεσμα να έχουμε υψηλούς ρυθμούς αποβολής υλικού. Το σχ 10 δείχνει διάφορα στάδια της διαδικασίας.

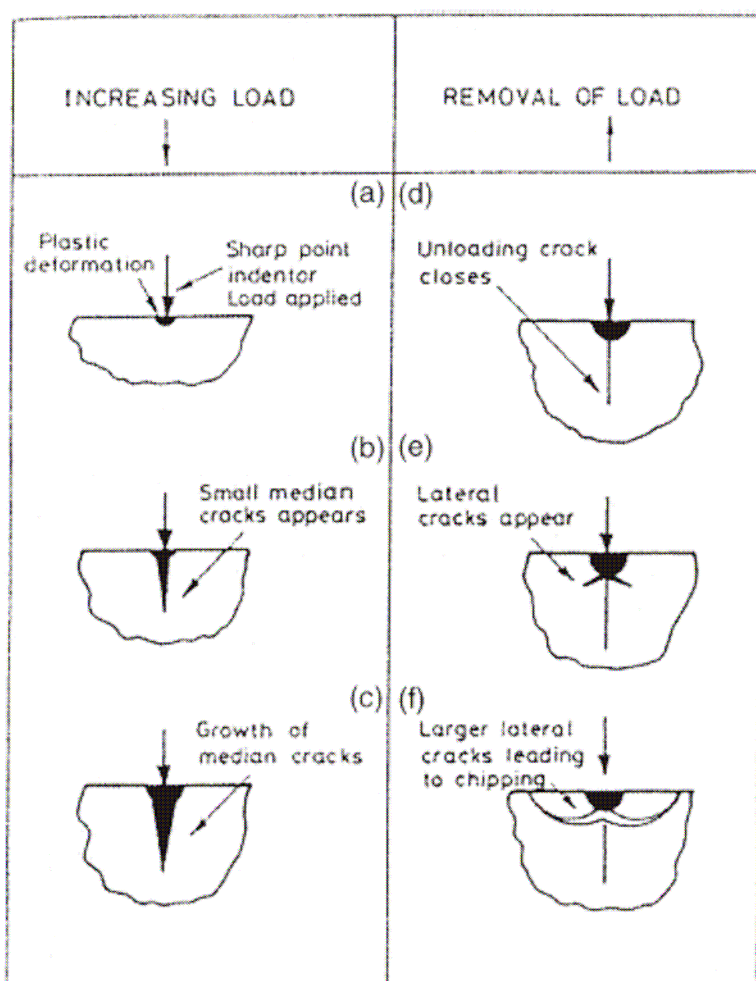


Fig. 10. Various stages of indentation.

Σχ. 7 διάφορα στάδια της διαδικασίας αποβολής υλικού με μικρορωγμές

Το υλικό κάτω από το κοπτικό εργαλείο υποβάλλεται σε πλαστική παραμόρφωση. Όσο η διαδικασία συνεχίζεται το υλικό υποβάλλεται σε υψηλές υδροστατικές πιέσεις και δημιουργείται μια ζώνη ανελαστικών-πλαστικών παραμορφώσεων. Σε κάποιο σημείο κάποιο ελάττωμα που προκλήθηκε από παραμόρφωση μετατρέπεται σε κάθετη σχισμή που θα εξελιχθεί με τη σειρά της σε ρωγμή κατά τη φάση της απομάκρυνσης του φορτίου (10b). Αύξηση της έντασης του φορτίου προκαλεί μεγάλωμα της σχισμής (10c). Κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης η σχισμή αρχίζει να στενεύει (10d). Κατά τη διαρκεί βατής απομάκρυνσης του φορτίου μεταγενέστερες σχισμές συνεχίζουν να δημιουργούνται ακριβώς κάτω από τη ζώνη της πλαστικής παραμόρφωσης και απλώνονται σε ένα επίπεδο σχεδόν παράλληλο αυτού της επιφανείας κατεργασίας. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη ενός πεδίου παραμενουσών τάσεων. Μετά την απομάκρυνση του φορτίου οι μεταγενέστερες σχισμές συνεχίζουν να επεκτείνονται προς την κατεργασμένη επιφάνεια και μπορεί τελικά να οδηγήσουν στην αποβολή υλικού με το σχηματισμό απόβλητοι δημιουργία ρωγμών οφείλεται κυρίως στο πεδίο παραμενουσών τάσεων, το οποίο δημιουργείται εξαιτίας ανισοροπίας στη διαδικασία ελαστικής-πλαστικής παραμόρφωσης.

1.9 Αποβολή υλικού χωρίς μικρορωγμές

Είναι γνωστό ότι το μέγεθος της πλαστικής παραμόρφωσης καθορίζεται από την ένταση των υδροστατικών τάσεων. Υπό υψηλές υδροστατικές πιέσεις εύθραυστα υλικά είναι δυνατό να συμπεριφερθούν κατά εύπλαστο τρόπο σε θερμοκρασία δωματίου.

Μια τέτοια κατάσταση προκύπτει από χαμηλά φορτία ανάμεσα σε κατεργαζόμενο τεμάχιο και κοπτικό εργαλείο. Ακριβώς κάτω από το κοπτικό εργαλείο το υλικό

υποτίθεται πως συμπεριφέρεται σαν ένας ακτινικά επεκτεινόμενος ρίνας ο οποίος υποβάλλει σε ομοιόμορφη υδροστατική πίεση τον περίγυρο του περικλείοντας τον ρίνα σε μια ιδεατή πλαστική περιοχή .Πέρα από την πλαστική περιοχή υπάρχει μια ελαστική μήτρα το σχ 11 δείχνει ένα μοντέλο για την ελαστική – πλαστική κατεργασία ευθραύστων υλικών.

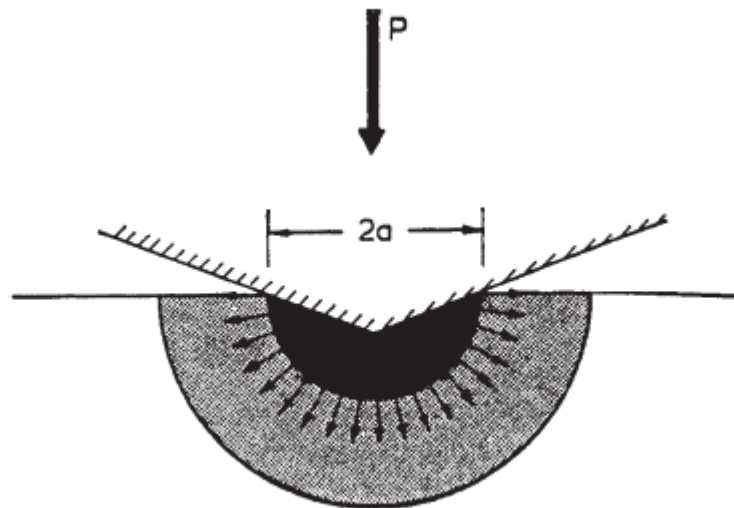


Fig. 11. Model of elastic-plastic indentation of brittle materials [31].

Σχ.8 μοντέλο για την ελαστική – πλαστική κατεργασία ευθραύστων υλικών.

Ένα μοντέλο για την αποβολή υλικού χωρίς σχηματισμό μικρορωγμών αναπτύχθηκε από τον Lawn.

Κεφάλαιο 2

2.1 Κατεργασία EDM

Η κατεργασία με τη μέθοδο της ηλεκτρικής εκκένωσης (EDM) χρησιμοποιεί ηλεκτρική εκκένωση υψηλής συχνότητας παλμού ανάμεσα στο κατεργαζόμενο κομμάτι και το ηλεκτρόδιο για να προκαλέσει τήξη και εξάτμιση στο σημείο της ηλεκτρικής εκκένωσης. Την ίδια στιγμή το διηλεκτρικό ανεβάζει τη θερμοκρασία του τόσο ώστε να προκαλέσει τήξη μικρού μέρους του κατεργαζόμενου κομματιού, το τηκόμενο μέρος του κομματιού αποβάλετε. Στο EDM το ηλεκτρόδιο δεν έρχεται σε φυσική επαφή με το κατεργαζόμενο κομμάτι και είναι σχεδόν αφόρτιστο. Η διαδικασία είναι πολύ αποτελεσματική για την κατεργασία ήπαρ' όλες τις σχετικές δημοσιεύσεις όμως δε χρησιμοποιείται ευρέως.

Στο πείραμα που ακολουθεί χρησιμοποιείται η μέθοδος EDM για τη διάτρηση μικρών οπών σε τεμάχιο από καρβίδιο με χάλκινο ηλεκτρόδιο. Η επίδραση ορισμένων παραμέτρων της κατεργασίας ερευνάται παρακάτω.

2.2 Πειραματική διαδικασία

Για το πείραμα χρησιμοποιείται die sinking EDM μηχανή. Η πειραματική διάταξη διακρίνεται στο σχήμα που ακολουθεί

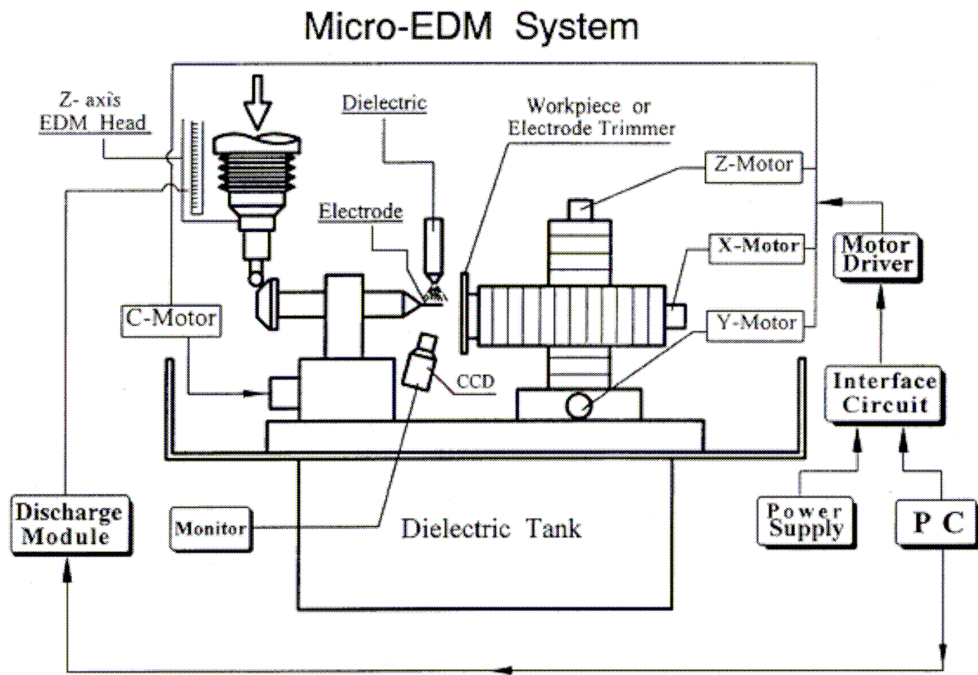


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental equipment.

Σχ.1 πειραματική διάταξη

Η πειραματική διαδικασία έχει ως εξής.

- 1) Κατεργασία του ηλεκτροδίου στο επιθυμητό σχήμα
- 2) Κατά την κατεργασία το ηλεκτρόδιο δε συναρμολογείται για να διατηρηθεί η συγκέντρωση και η ευθυγράμμιση κατά τη διαδικασία .Μεταφέρουμε το κατεργασμένο τεμάχιο στην επιθυμητή θέση.
- 3) Καθώς το ηλεκτρόδιο περιστρέφεται χρησιμοποιούμε τη λειτουργία εύρεσης αιχμής της μηχανής ώστε το ηλεκτρόδιο να έρθει σε επαφή με το κατεργαζόμενο κομμάτι.. Στη συνέχεια το ευθυγραμμίζουμε κατά μήκος του άξονα των Z
- 4) Καθορίζουμε τις παραμέτρους κατεργασίας , ρεύμα εκκένωσης, διάρκεια παλμού, βάθος εργασίας , ταχύτητα περιστροφής του ηλεκτροδίου.
- 5) Αρχίζουμε την κατεργασία και ο υπολογιστής θα καταγράψει τον χρόνο εκκίνησης της κατεργασίας αυτόματα.

- 6) Όταν η κατεργασία τελειώσει η μηχανή θα σταματήσει αυτόματα και ο χρόνος τέλους της κατεργασίας θα καταγραφεί αυτόματα και αυτός.
- 7) Απομακρυνθούμε το κατεργαζόμενο τεμάχιο για μικρή απόσταση (της τάξης των 0,5 mm) και χρησιμοποιούμε πάλι τη λειτουργία εύρεσης αιχμής για να μετρήσουμε το βαθμό φθοράς του ηλεκτροδίου.
- 8) Παρατηρούμε το σχήμα του ηλεκτροδίου . Πλένουμε το κατεργαζόμενο κομμάτι και μετράμε το σχήμα και το μέγεθος της μικρής οπής που δημιουργήσαμε .Κρατάμε στη συνέχεια το ηλεκτρόδιο.
- 9) Καταγραφούμε όλα τα αποτελέσματα στον υπολογιστή.

Ο πίνακας 1 δείχνει τις συνθήκες τέλεσης της κατεργασίας.

Table 1
Experimental conditions

| Conditions | Polarity | |
|-----------------------------|---|-------------------------|
| | Negative (-) | Positive (+) |
| Electrode size | Cu (φ 50– φ 150 μ m) | |
| Workpiece | Carbide (ISO K10), $t = 1$ mm | |
| Electrode shape | Straight | Notched (15–55 μ m) |
| Dielectric | Kerosene | |
| Peak current (I_p) | 0.5 A | |
| High voltage (V) | 280 V | |
| Gap voltage (V) | 25 V | |
| Duty factor | 0.55 | |
| Pulse duration (τ_p) | 20 μ s | |
| Revolution of electrode | 5, 20, 35, 50, 65, 80, 95 r.p.m. | |

Η κατασκευή του ηλεκτροδίου είναι η πιο σημαντική και δύσκολη εργασία σ αυτή την κατεργασία, γιατί η διάμετρος του ηλεκτροδίου θα πρέπει να είναι η μισή της διαμέτρου της επιθυμητής μικρής οπής. Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε χάλκινο σύρμα διαμέτρου 0,6mm ως το ηλεκτρόδιο .Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται μερικά σχήματα και μεγέθη ηλεκτροδίων.

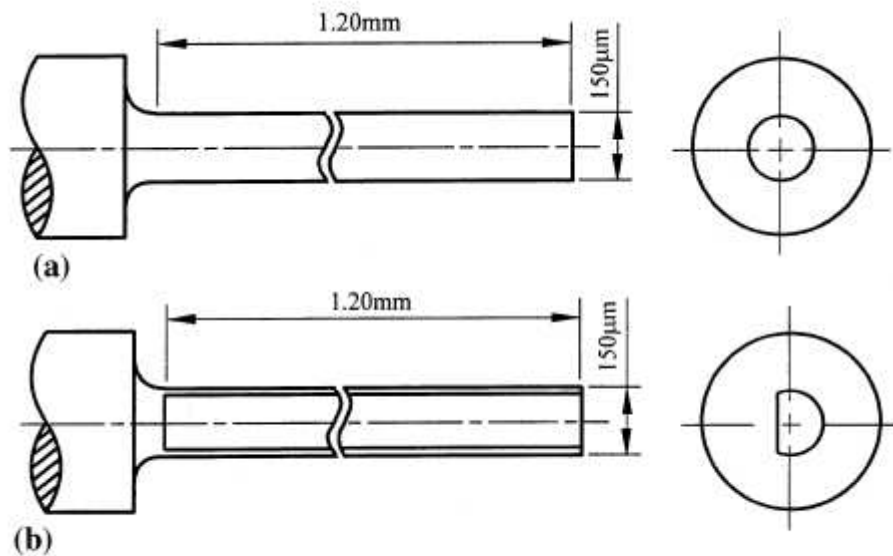


Fig. 2. Shape of: (a) a straight electrode; and (b) an electrode with a single-side notch.

Σχ.2 (α) ίσιο ηλεκτρόδιο , (β) ηλεκτρόδιο με εγκοπή

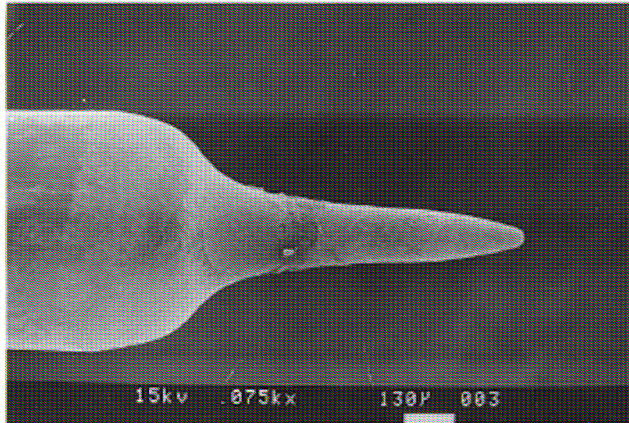
2.3 Πειραματικά αποτελέσματα και σχολιασμός.

Παρακάτω ασχολούμαστε με την επίδραση διάφορων παραγόντων της κατεργασίας. Συγκεκριμένα 1)πολικότητα 2) διάμετρος ηλεκτροδίου 3) περιστροφική ταχύτητα ηλεκτροδίου 4) το πλάτος εγκοπής του ηλεκτροδίου με εγκοπή από τη μια πλευρά 5) την ταχύτητα περιστροφής ηλεκτροδίου με εγκοπή από τη μια πλευρά του στην ακρίβεια της κατεργασμένης μικρής οπής αλλά και στο ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου.

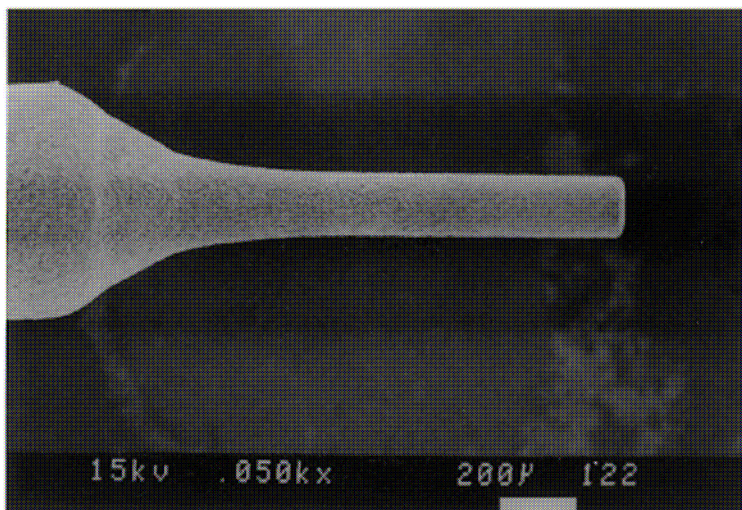
2.4 Επίδραση της πολικότητας

Η πολικότητα είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου και την εξάπλωση της κατεργαζόμενης οπής .Στην αρνητική πολικότητα παρατηρείται μεγάλη φθορά του ηλεκτροδίου , γεγονός που έχει αρνητική επίδραση και στην ποιότητα του αποτελέσματος της κατεργασίας ,αντιθέτως στην θετική πολικότητα το ηλεκτρόδιο παραμένει σχεδόν ανέπαφο, πράγμα που μας εξασφαλίζει καλύτερα αποτελέσματα.

Παρακάτω φαίνονται φωτογραφίες ηλεκτροδίων μετά από κατεργασία με θετική αλλά και αρνητική πολικότητα.



(a)



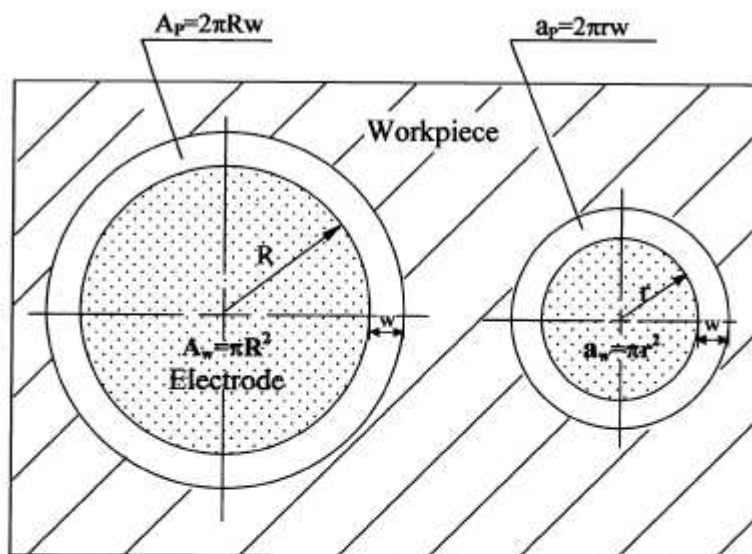
(b)

Fig. 4. Shapes of the tool electrode after machining with different polarity; (a) negative polarity; and (b) positive polarity.

Σχ.3 (α) αρνητική πολικότητα ,(β) θετική πολικότητα

2.5 Επίδραση της διαμέτρου του ηλεκτροδίου στην εξάπλωση της μικρής οπής και στο ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου .

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5 όταν η διάμετρος του ηλεκτροδίου διπλασιαστεί η περιοχή εργασίας τετραπλασιάζεται , αλλά το διάκενο μεταξύ του ηλεκτροδίου και του κατεργαζόμενου κομματιού διπλασιάζεται όπως και η διάμετρος του ηλεκτροδίου άλλωστε .Αυτό το τελευταίο γεγονός οδηγεί σε ανεπιθύμητα φαινόμενα που οδηγούν στη διεύρυνση της κατεργαζόμενης οπής .Στο σχ.6 φαίνονται το ηλεκτρόδιο και η οπή μετά την κατεργασία.



If $R=2r$

then $A_w=4a_w$ $A_p=2a_p$

therefore $D=2d$

A_p : area of debris discharge channel of large electrode

a_p : area of debris discharge channel of small electrode

w : width of debris discharge channel

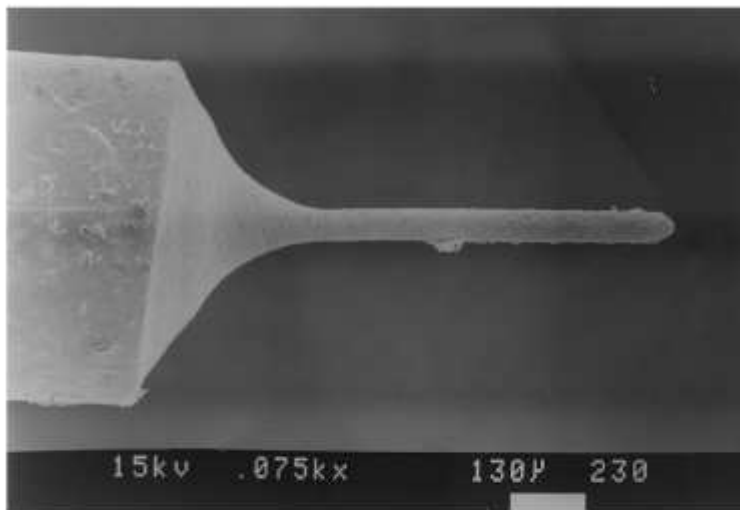
A_w : work area of large electrode

a_w : work area of small electrode

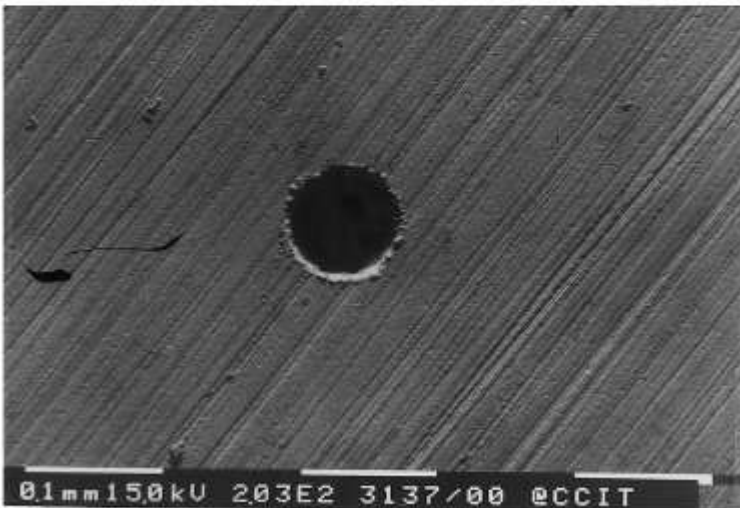
D : concentration of debris in large electrode

d : concentration of debris in small electrode

Fig. 5. Effect of the variable diameter of the electrode on the expansion of the micro-hole.



(a)



(b)

Fig. 6. Showing the shape of: (a) the straight tool electrode (ϕ 50 μm); and (b) the micro-hole of the carbide (ϕ 90 μm) after EDM.

Σχ.6 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ (ΧΩΡΙΣ ΕΓΚΟΠΗ) ΚΑΙ ΟΠΗ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

Στο σχήμα 6. φαίνεται η σχέση μεταξύ της διαμέτρου του ηλεκτροδίου ,του μεγέθους της κατεργαζόμενης οπής και του ρυθμού φθοράς του ηλεκτροδίου .Από το σχήμα προκύπτει ότι η διάμετρος του ηλεκτροδίου δεν έχει γραμμική σχέση με το μέγεθος της οπής αλλά ούτε και με το ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου , γεγονός που

μας οδηγεί να υποθέσουμε πως υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος της οπής.

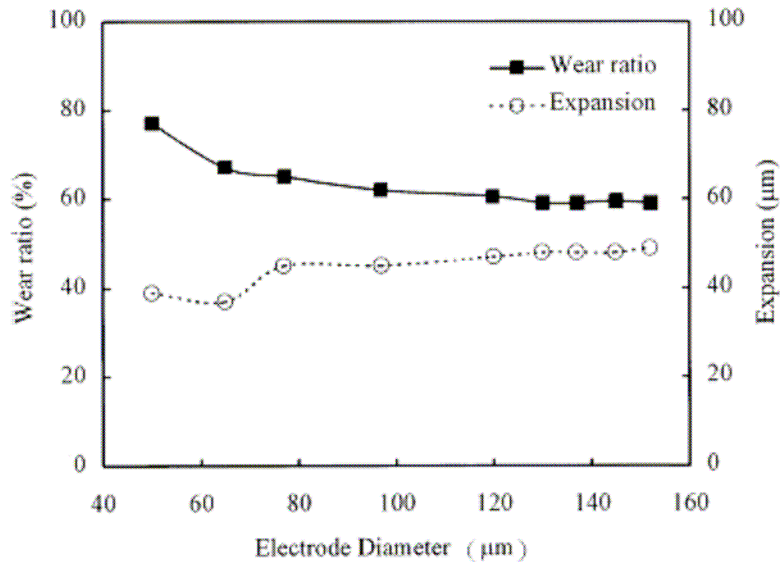


Fig. 7. Effect of the electrode diameter on the tool electrode wear ratio and the expansion of the micro-hole.

Σχ.6 επιρροή της διαμετρου του ηλεκτροδίου στη εξάπλωση της οπής και στο πυθμό φθοράς του

Διαφορετικές εφαπτόμενες ταχύτητες προκύπτουν από διαφορετικές διαμέτρους ηλεκτροδίων σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής εφαπτομένη ταχύτητα επηρεάζει την κατάσταση ροής του εργαζομένου ρευστού κοντά στο ηλεκτρόδιο και επομένως και την κατάσταση του διακένου με αποτέλεσμα της μεγένθυσης της οπής , αλλά και του ρυθμού φθοράς του ηλεκτροδίου .Παρακάτω εξετάζεται διεξοδικότερα η επίδραση διαφορετικών εφαπτομένων ταχυτήτων για σταθερή διάμετρο ηλεκτροδίου.

2.6 Επίδραση της περιστροφικής ταχύτητας του ηλεκτροδίου στο μέγεθος της οπής και στο ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου

Για να εξεταστεί η επίδραση της εφαπτομένης ταχύτητας του ηλεκτροδίου έγιναν διαφορετικές μετρήσεις με το ίδιο ηλεκτρόδιο για διαφορετικές περιστροφικές ταχύτητες. Παράλληλα μετρήθηκε ο βαθμός φθοράς του ηλεκτροδίου και το σχήμα και το μέγεθος της κατεργαζόμενης οπής. Τα αποτελέσματα του πειράματος απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα.

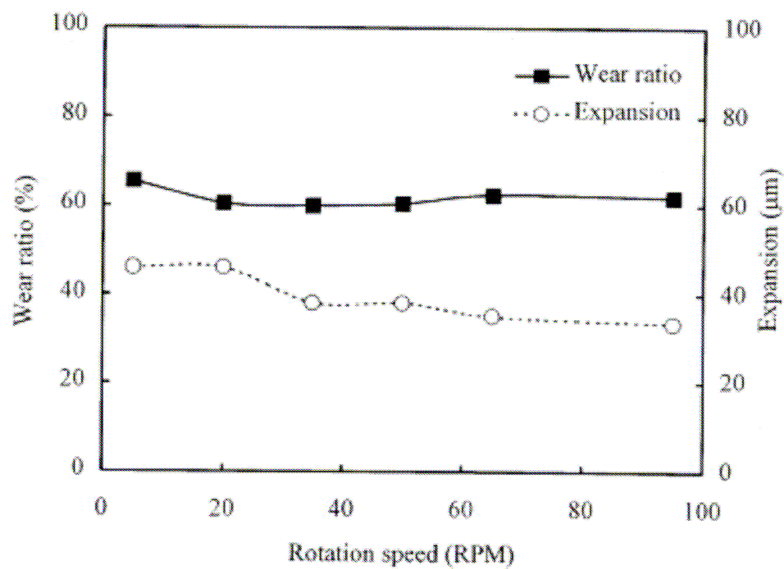


Fig. 12. Effect of the rotational speed of the tool electrode with a single-side notch on the electrode wear ratio and the expansion of the micro-hole.

Σχ.7 επιρροή της περιστροφικής ταχύτητας του ηλεκτροδίου στην εξάπλωση της οπής και στο ρυθμο φθοράς του

Από τον πίνακα προκύπτει ότι το μέγεθος της κατεργαζόμενης οπής μειώνεται καθώς η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται, ενώ αντίστοιχα δεν μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για τη σχέση περιστροφικής ταχύτητας και ρυθμού φθοράς ηλεκτροδίου.

Η φυσική εξήγηση της μείωσης του μεγέθους της οπής είναι η εξής .Αυξανόμενη της περιστροφικής ταχύτητας , αυξάνεται η ταχύτητα ροής του διηλεκτρικού στο διάκενο, με αποτέλεσμα να μειώνεται η πιθανότητα δευτερευουσών ηλεκτρικών εκκενώσεων.

2.7 Επίδραση του πλάτους της εγκοπής του ηλεκτροδίου με εγκοπή από τη μια πλευρά του στο μέγεθος της κατεργαζόμενης οπής και στο ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου.

Έχει παρατηρηθεί ότι η χρησιμοποίηση ηλεκτροδίου με εγκοπή μειώνει τις πιθανότητες δευτερευουσών εκκενώσεων και οδηγούν στην αποτελεσματικότερη και ομαλότερη διεξαγωγή της κατεργασίας . Ήπαρ όλα αυτά το πλάτος της εγκοπής οφείλει να μελετηθεί ώστε να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα .Εδώ γίνονται διαφορές μετρήσεις για διαφορετικά πλάτη εγκοπών του ίδιου ηλεκτροδίου σε σχέση με το ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου και το μέγεθος της κατεργαζόμενης οπής.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα.

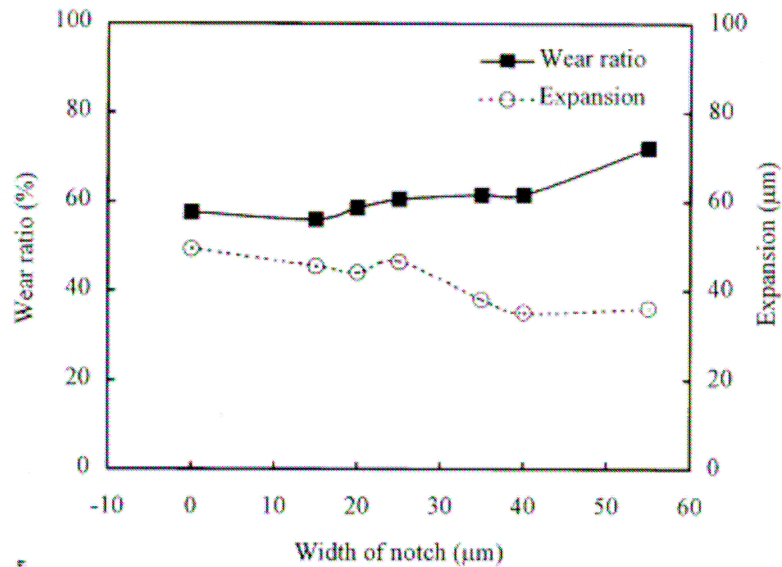


Fig. 9. Effect of the width of the single-side notch on the tool electrode wear ratio and the expansion of micro-hole.

Σχ.8 επίδραση του πλάτους της εγκοπής στο ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου και στην εξάπλωση της οπής

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι για πλάτος εγκοπής μικρότερο των 40mm το μέγεθος της οπής μειώνεται , ενώ αυξάνεται ο ρυθμός φθοράς του ηλεκτροδίου, ενώ για πλάτη εγκοπών μεγαλύτερα των 40mm το μέγεθος της κατεργαζόμενης οπής σταθεροποιείται ,αλλά ο ρυθμός φθοράς του ηλεκτροδίου αυξάνεται σημαντικά.

2.8 Επίδραση της περιστροφικής ταχύτητας ηλεκτροδίου με εγκοπή από τη μια πλευρά στο μέγεθος της κατεργαζόμενης οπής και στο ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου.

Από τα προηγούμενα πειραματικά αποτελέσματα, προέκυψε ότι για πλάτος εγκοπής 30-40mm παρατηρήθηκαν τα βέλτιστα αποτελέσματα της κατεργασίας από πλευράς

φθοράς ηλεκτροδίου και μεγέθους της οπής. Για σταθερό πλάτος εγκοπής επαναλαμβάνουμε το πείραμα με διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής του ηλεκτροδίου.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα που καταγράφονται στο επόμενο διάγραμμα προκύπτει ότι για αυξανόμενη ταχύτητα περιστροφής το μέγεθος της οπής μικραίνει, ενώ ο ρυθμός φθοράς του ηλεκτροδίου παραμένει σταθερός. Αύξηση της εφαπτομένης ταχύτητας αυξάνει την ταχύτητα ροής του διηλεκτρικού μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες δευτερεύουσας ηλεκτρικής εκκένωσης.

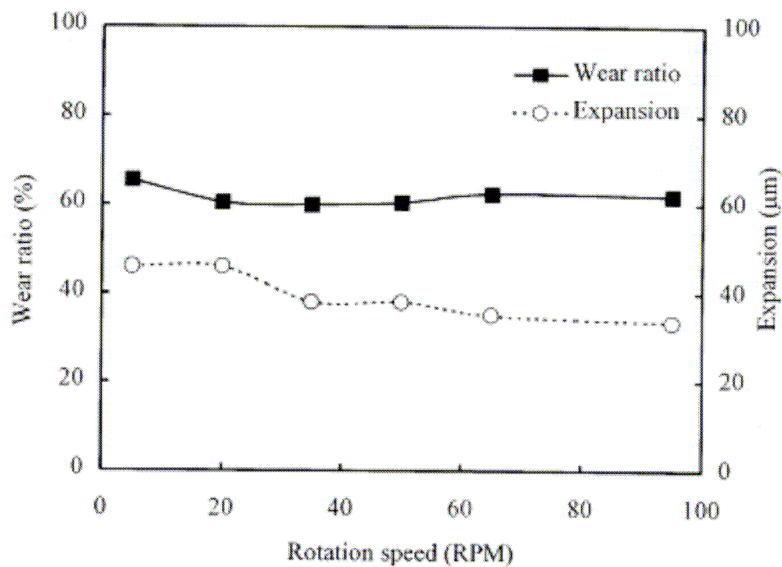


Fig. 12. Effect of the rotational speed of the tool electrode with a single-side notch on the electrode wear ratio and the expansion of the micro-hole.

Σχ.9 επίδραση της περιστροφικής ταχύτητας του ηλεκτροδίου στην εξαπλωση της οπής και στο ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου

2.9 Παρατήρηση του σχήματος της κατεργαζόμενης οπής.

Στο επόμενο σχήμα παριστάνονται διαφορετικές οπές για διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας .

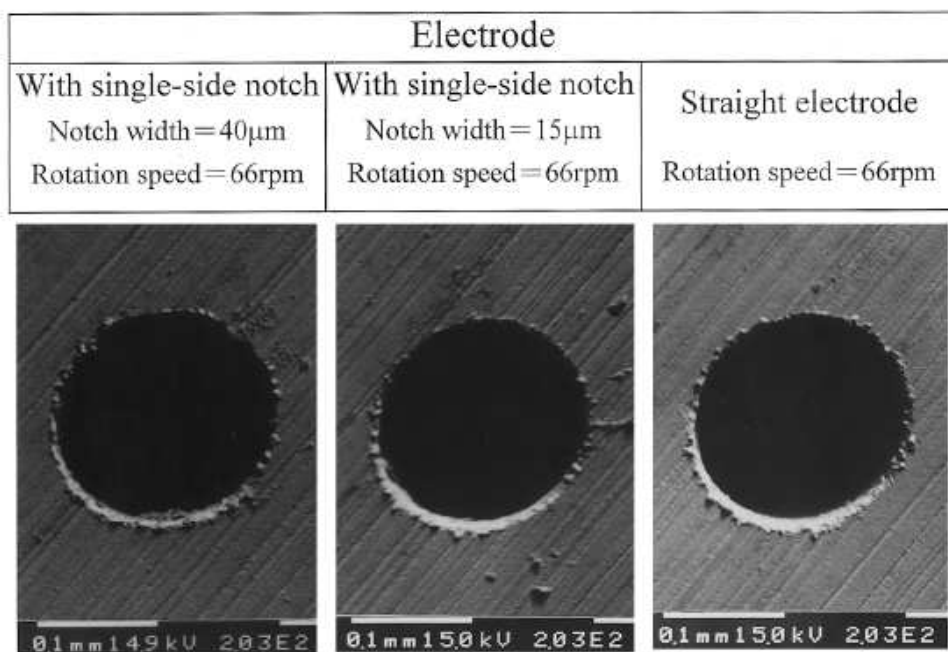


Fig. 13. Shapes of typical micro-holes of carbide after machining under different conditions.

Σχ.10 διαφορετικές οπές για διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας

Κεφάλαιο 3

3.1 Σύγχρονες εξελίξεις στην μέθοδο EDM και θέματα έρευνας

Η κατεργασία μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης (EDM) βασίζεται στη θερμοηλεκτρική ενεργεία που δημιουργείται μεταξύ του κατεργαζόμενου τεμαχίου και ενός ηλεκτροδίου βυθιζόμενου σε διηλεκτρικό υγρό. Όταν το κατεργαζόμενο τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο χωριστούν από ένα συγκεκριμένο μικρό διάκενο το επονομαζόμενο «διάκενο ανάφλεξης» προκαλείται μια παλμική εκκένωση μέσω της οποίας αποβάλλεται υλικό από το κατεργαζόμενο κομμάτι λόγω τήξεως και εξάτμισης.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές εξελίξεις στον τομέα της κατεργασίας με τη συγκεκριμένη μέθοδο (EDM) και έχουν επικεντρωθεί στη δημιουργία μικρό-ρωγμών στο κατεργασμένο τεμάχιο , αυτές οι εξελίξεις κατέστησαν δυνατές λόγω της διαθεσιμότητας νέων συστημάτων CNC. και εξελιγμένων αναφλεκτήρων που βοήθησαν στην παραγωγή καλύτερης ποιότητας επιφανείας κατεργασίας .Επίσης οι πολύ μικρές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία και η υψηλή επαναληψιμότητα της μεθόδου έκαναν τη συγκεκριμένη κατεργασία την καλύτερη, ώστε να επιτύχουμε υψηλού βαθμού και ποιότητας μικροχαρακτηριστικά.

Η σύγχρονη τεχνολογία που χρησιμοποιείται γη αυτή την κατεργασία σήμερα, μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους.

-Κατεργασίας ηλεκτρικής εκκένωσης μέσω μικροκαλωδίου (micro- wire EDM) όπου καλώδιο διαμέτρου 0,02 mm χρησιμοποιείται – Die sinking micro EDM.

-Micro EDM drilling,

-Micro EDM milling

Παρά τον αριθμό των δημοσιεύσεων που εκθειάζουν τις βελτιωμένες δυνατότητες αυτών των μεθόδων, αυτές δεν χρησιμοποιούνται ακόμα ευρέως. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα διαθέσιμα μηχανήματα δεν είναι ακόμη αξιόπιστα.

3.2 Θέματα έρευνας πάνω στη μέθοδο EDM

Σ αυτή την παράγραφο αναφέρονται οι τέσσερις τύποι EDAM και επισημαίνονται τα προβληματικά σημεία σ αυτές τις εφαρμογές. Στο σχήμα 1 αναφέρονται σχηματικά τα σημεία στα οποία μπορεί να ανακύψουν προβλήματα.

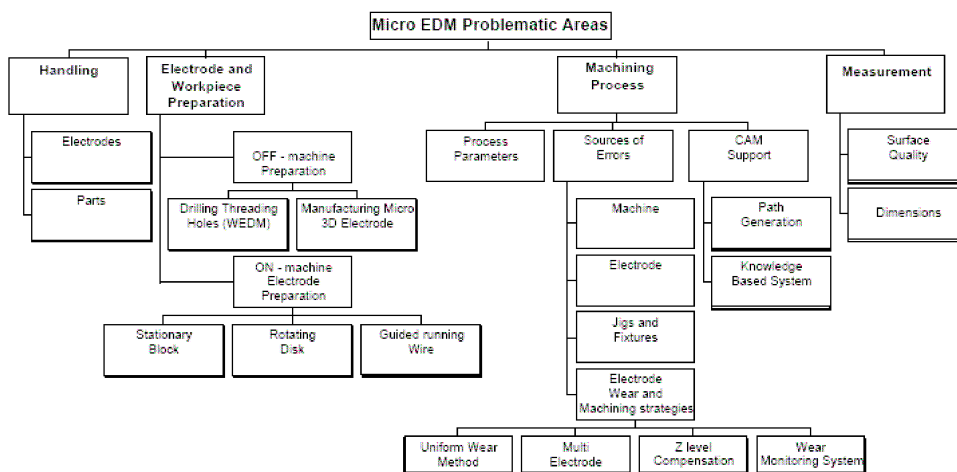


Fig. 1. Problematic areas for micro-EDM.

Σχ1 σημεία στα οποία μπορεί να ανακύψουν προβλήματα

3.3 Διαχείριση ηλεκτροδίων και εξαρτημάτων

Στις μηχανές EDM με καλώδιο, η τάση να μειώνεται η διάμετρος του καλωδίου έχει προκαλέσει πολλά προβλήματα στη χρήση ηλεκτροδίων και εξαρτημάτων. Αρχικά, οι υπάρχουσες μηχανές καλωδίου είχαν προσαρμοστεί ώστε να δέχονται καλώδια μικρότερων διαμετρών (της τάξης των 0,03mm) αλλά αυτό απαιτούσε μεγάλο χρόνο προετοιμασίας της μηχανής απόσταση από τη θέση του εμβόλου και του Ακρισίου ήταν μεγάλη και προκαλούσε προβλήματα στην εγκατάσταση του καλωδίου δυνάμεις στα φρένα δεν ήταν δυνατόν να γίνουν ανεκτές από το λεπτό καλώδιο με αποτέλεσμα αυτό να σπάει και να απαιτείται επέμβαση από τον χειριστή.

Ακόμα και στις πιο σύγχρονες και εξελιγμένες μηχανές EDM η χρήση καλωδίων διαμέτρου της τάξης των 0, 02-0, 03 mm είναι δύσκολη.

Κατά την κατασκευή μικροεξαρτημάτων με τη μέθοδο ΑΪ με χρήση καλωδίου πρέπει να δοθεί ειδική προσοχή στη μεταχείριση των εξαρτημάτων καθώς μετά από κατεργασία δια κοπής διαχωρισμού αυτά μπορεί να χαθούν στη δεξαμενή της μηχανής.

Κατά την κατεργασία του micro-EDM die sinking, milling διαφορετικές τεχνικές και συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταχείριση και χρησιμοποίηση μικρών ηλεκτροδίων και εξαρτημάτων, Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για EDAM drilling και milling είναι W (Βολφράμιο) η WC (καρβίδιο Βολφραμίου) ράβδοι η σωλήνες διαμέτρου τάξης 0,1-0,4 mm και η μεταχείριση τους είναι δύσκολη , γιατί εύκολα μπορούν να πάθουν ρωγμές .Για αυτό το λόγω υποσυστήματα

ενσωματώνονται σ αυτές τις μηχανές .Τέτοια υποσυστήματα είναι κεραμικοί οδηγοί και μονάδες για άνοιγμα και τον καθορισμό του τροχού (σχ. 2) .

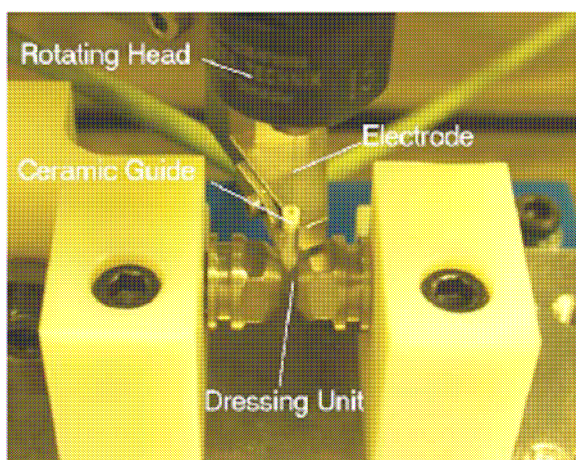


Fig. 2. Dressing unit and ceramic guiding system.

Σχ.2 μονάδα κοπής και κεραμικός οδηγός

3.4 Προετοιμασία ηλεκτροδίου και κατεργαζόμενου κομματιού.

Στην κατεργασία EDM με μικροκαλώδιο το βασικό πρόβλημα στην προετοιμασία του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι η δημιουργία μικρών οπών που χρησιμεύουν για να περάσει το σύρμα στο κατεργαζόμενο κομμάτι .Ανάλογα με το προφίλ της επιθυμητής κατεργασίας αυτές οι οπές έχουν διαφορές μικροδιαμέτρους.

Συνήθως κατασκευάζονται μέσω διάτρησης η EDM – διάτρησης.

Η ακρίβεια της τοποθέτησης των οπών πρέπει να είναι μεγάλη , ώστε να διευκολυνθεί το αυτόματο πέρασμα του καλωδίου στο κατεργασμένο τεμάχιο, αλλά και για την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων , μετά το πέρασμα του καλωδίου ,ήπαρ όλα αυτά η αυτοματοποίηση του πέρασματος του καλωδίου , ακόμα και σε εξελιγμένες ειδικές μηχανές είναι δύσκολο να επιτευχθεί.

Καθώς το μέγεθος της κατεργασίας μικραίνει μπορούν να προκληθούν παραμορφώσεις χαλώντας τη γεωμετρία παραγωγή τέτοιων ηλεκτροδίων τρισδιάστατου προφίλ είναι ακριβά καθώς και χρονοβόρα.

Η διάτρηση μέσω EDM χρησιμοποιεί ηλεκτρόδιο σχήματος σύρματος ή σωλήνα διαμέτρου 0,1-0,4mm.

Προς αποφυγή προβλημάτων χειρισμού , χρησιμοποιούνται ειδικές συσκευές για την προετοιμασία του ηλεκτροδίου .Τέτοιες συσκευές φαίνονται στα επόμενα σχήματα.

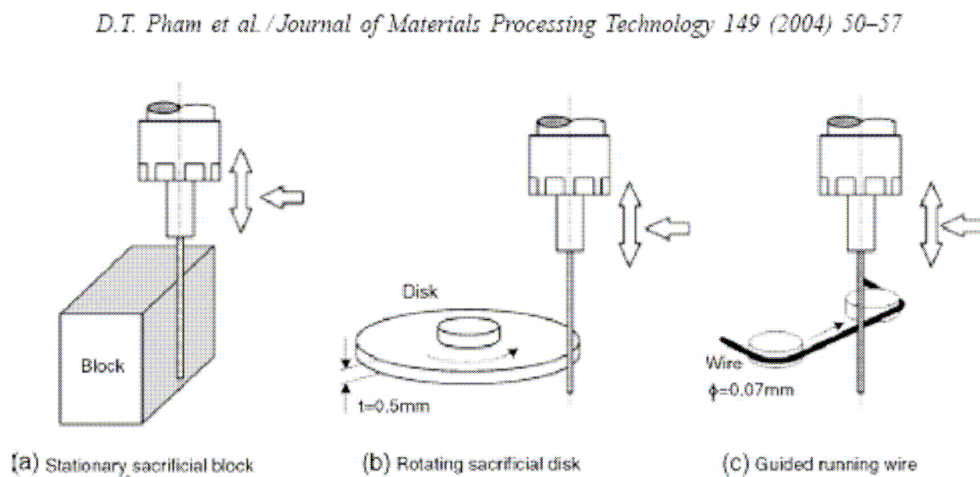


Fig. 3. Three types of electrode grinding devices.

Σχ.3 τύποι συσκευών λείανσης

3.5 Διαδικασία EDM

Ο σχεδιασμός της διαδικασίας είναι ένα κομμάτι το οποίο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατεργασίας είναι πολύ μικρά και επομένως το ίδιο και οι ανοχές, όσον αφορά τις κατεργαζόμενες επιφανείες. Κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας αλλά και κατά τη διάρκεια της ίδιας της κατεργασίας ένας αριθμός λαθών είναι δυνατό να προκύψει με κίνδυνο αντιμετώπισης απογοητευτικών αποτελεσμάτων. Αυτά τα λάθη μπορεί να οφείλονται σε ατέλειες του εξοπλισμού ή να είναι επίσης στοχαστικής φύσεως.

Έρευνες με σκοπό τη βελτιστοποίηση της μεθόδου EDM ασχοληθήκαν με το ρυθμό αποβολής υλικού, το ρυθμό φθοράς των εργαλείων και την ποιότητα της κατεργαζόμενης επιφανείας. Οι παράμετροι αυτοί ακόμα εξελίσσονται και η επίδραση τους δεν έχει πλήρως διασαφηνιστεί. Εξαιτίας της στοχαστικής θερμικής φύσεως της διαδικασίας EDM είναι δύσκολο να εξηγήσει κανείς τις επιδράσεις αυτές πλήρως.

Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων βασίζεται στη νηματική ανάλυση, ώστε να αποκαλυφθεί η επίδραση κάθε παραμέτρου στα χαρακτηριστικά της κατεργασίας έλλειψη πληροφοριών σ αυτόν τον τομέα, είναι ο βασικός λόγος για την αδυναμία κατάρτισης γνωστικών συστημάτων, που θα βοηθούν την κατεργασία EDM.

Παρά τη χρήση εξελιγμένων CNC μηχανών και τον υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης των μηχανών EDM υπάρχει έλλειψη εργαλείων CAM που να υποστηρίζουν τη μέθοδο. Ένας από τους βασικούς λόγους των περιορισμένων εφαρμογών της

μεθόδου διάτρησης EDM συνθετών τρισδιάστατων κοιλοτήτων είναι η δυσκολία δημιουργίας εργαλείων με τη χρήση των υπαρχόντων συστημάτων CAM .

3.6 Μέτρηση

Η μέτρηση των διαστάσεων και της ποιότητας επιφανείας δεν είναι μια απλή εργασία . Δεν υπάρχουν προκαθορισμένες μέθοδοι που να ορίζουν την τραχύτητα της επιφανείας .

3.7 Πηγές σφαλμάτων

Για την περιγραφή των τυπικών πηγών σφαλμάτων και της συνολικής τους επίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα χρησιμοποιείται σαν παράδειγμα η κατεργασία διάτρησης απλού περάσματος με τη μέθοδο EDM .

Η επιθυμητή διάμετρος H της κατεργαζόμενης οπής εξαρτάται από τη διάμετρο d του κατάλληλα υπενδεδυμένου ηλεκτροδίου που χρησιμοποιείται που χρησιμοποιείται για τη μέθοδο και του κενού ανάφλεξης ge .

Ισχύει η σχέση

$$H=2*ge+d$$

Η απόκλιση από το ονομαστικό H (ΔH) είναι η συνάρτηση με μεταβλητές την απόκλιση του κενού ανάφλεξης Δge και της διαμέτρου του ηλεκτροδίου Δd .

$$\Delta H=2*\Delta ge+\Delta d$$

Η θέση της κατεργαζόμενης οπής δίνεται από τη σχέση

$$X_H = X_{pos} - X_{set}$$

$$Y_H = Y_{pos} - Y_{set}$$

Οπού οι μεταβλητές είναι αυτές που απεικονίζονται στο σχήμα 4.

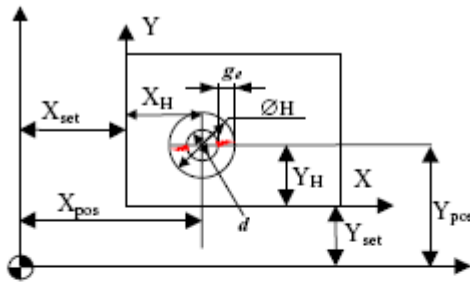


Fig. 4. Achieved dimensions.

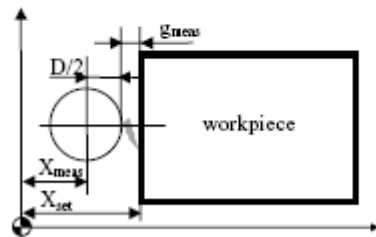


Fig. 5. Setting up process.

Σχ.4 και 5

Για την τοποθέτηση του κατεργαζόμενου κομματιού στη θέση εργασίας, χρησιμοποιείται ο άξονας της μηχανής, ο οποίος είναι ένα ηλεκτρόδιο ονομαστικής ωφέλιμης διαμέτρου D , που λειτουργεί σαν αισθητήρια κεφαλή.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χρησιμοποίηση εξωτερικών αισθητηρίων κεφαλών θα πρέπει να αποκλειστεί διότι τότε θα χρειαστεί επανατοποθέτηση και επαναρυθμισμό του με υψηλές ταχύτητες περιστρεφόμενου άξονα και του κεραμικού οδηγού, πράγμα που σημαίνει αυξημένες πιθανότητες παρουσίασης σφαλμάτων. Η διαδικασία της προετοιμασίας απεικονίζεται στο σχήμα 5.

$$X_H = X_{pos} (X_{meas} + 1/2 * D + g_{meas})$$

$$Y_H = Y_{pos} - (Y_{meas} + 1/2 * D + g_{meas})$$

Οι αποκλίσεις θα είναι αντίστοιχα

$$\Delta X_H = \Delta X_{pos} + \Delta X_{meas} + 1/2 * \Delta D + \Delta g_{meas}$$

$$\Delta Y_H = \Delta Y_{pos} + \Delta Y_{meas} + 1/2 * \Delta D + \Delta g_{meas}$$

Η ακρίβεια στην τοποθέτηση της οπής θα εξαρτηθεί από την ακρίβεια στην τοποθέτηση της μηχανής (ΔX_{pos} , ΔY_{pos}), από την ακρίβεια της ανίχνευσης επαφής με την επιφάνεια εργασίας (ΔX_{meas} , ΔY_{meas} , Δg_{meas}) και την απόκλιση από την αρχική ωφέλιμη διάμετρο (ΔD) του ηλεκτροδίου

3.8 Σφάλματα μηχανής

3.9 Ακρίβεια και επαναληψιμότητα τοποθέτησης

Η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα της τοποθέτησης της μηχανής είναι μια από τις βασικές πηγές σφαλμάτων. Μερικά αποτελέσματα μετρήσεων σύμφωνα με το πρότυπο ISO 230-2:1997 απεικονίζονται στον πίνακα 1.

Table 1
Repeatability and accuracy of positioning

| | Repeatability of positioning | | | Accuracy of positioning | | |
|------------------|------------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|
| | X (μm) | Y (μm) | Z (μm) | X (μm) | Y (μm) | Z (μm) |
| Unidirectional ↑ | 3.76 | 4.49 | 1.48 | 14.03 | 5.03 | 2.39 |
| Unidirectional ↓ | 2.95 | 4.92 | 1.27 | 11.85 | 5.18 | 1.82 |
| Bi-directional | 5.33 | 7.83 | 1.90 | 15.70 | 7.91 | 2.73 |

Για τη διάτρηση μιας μικρής οπής σε μια συγκεκριμένη θέση (X_{pos} , Y_{pos}) θα απαιτηθούν πολλαπλά ενδεδυμένα ηλεκτρόδια και γι αυτό η ακρίβεια της τοποθέτησης

της μηχανής θα επηρεάσει κυρίως τη θέση της οπής , ενώ η επαναληψιμότητα της τοποθέτησης θα επηρεάσει το σχήμα και το μέγεθος της οπής.

Σε μια συγκεκριμένη μηχανή με δεδομένη ακρίβεια και επαναληψιμότητα τοποθέτησης ο μόνος τρόπος να βελτιώσει κανείς το ΔX_{pro} και το ΔY_{pro} είναι μια έμμεση προσέγγιση της οπής.

3.10 Μέτρηση κυκλικών λαθών (ΔX_{meas} , ΔY_{meas} , ΔD)

Κατά την προετοιμασία του κατεργαζόμενου κομματιού , όταν έχουμε ηλεκτρική επαφή ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το προς κατεργασία κομμάτι ένα σήμα επαφής καταγράφεται στον επεξεργαστή του συστήματος της μηχανής.

Ο επεξεργαστής θέτει προτεραιότητες στον έλεγχο κάθε σήματος κατάστασης της μηχανής , πράγμα που σημαίνει πως ο έλεγχος σήματος κατάστασης δεν είναι συνεχής . Υπάρχει ένα χρονικό βήμα (V_{mesa}) ανάμεσα σε κάθε έλεγχο κατάστασης . Αυτό προκαλεί σφάλμα στον καθορισμό της θέσης του κατεργαζόμενου κομματιού κατά τη μέτρηση της M_{esa} και Y_{mesa} . Αν η ταχύτητα προσέγγισης της επιφανείας οριστεί ως V_{mesa} τότε θα ισχύει ,

$$\Delta X_{\text{meas}} * \Delta Y_{\text{meas}} = V_{\text{meas}} * t_{\text{meas}}$$

Συνήθως το σήμα επαφής ελέγχεται κάθε 2-5ms, ανάλογα με το σύστημα, προφανώς η ταχύτητα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερη (για την αποφυγή σφαλμάτων) αλλά αρκετά υψηλή για την αποφυγή slick-slip .

Κατά τη διάρκεια του κύκλου των μετρήσεων εφαρμόζεται τάση ανάμεσα στο κρεβάτι του τόρνου και τον άξονα . Η μηχανή κινείται μέχρι να γίνει ηλεκτρική επαφή . Καθώς οι επιφάνειες τείνουν να οξειδωθούν ένα διαφορετικό κενό η μια διαφορετική πίεση επαφής χρειάζεται για την πρόκληση της ανάφλεξης . Όλοι αυτοί οι παράγοντες συμβάλλουν στο σφάλμα ανίχνευσης επιφανείας.

Το ΔA οφείλεται στην κυκλική κίνηση του ηλεκτροδίου στους άξονες XI μέσα στον κεραμικό οδηγό καθώς το ηλεκτρόδιο περιστρέφεται , για αυτό η επαφή μεταξύ ηλεκτροδίου και επιφανείας μπορεί να λάβει χωρά σε διαφορετικές θέσεις μέσα στον κύκλο .

3.11 Προετοιμασία ηλεκτροδίου

Η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτάται από την ταχύτητα προσέγγισης προς την επιφάνεια κατεργασίας . όσο χαμηλότερη είναι αυτή σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του ηλεκτροδίου τόσο μικρότερο θα είναι το σφάλμα . Με σκοπό να μειωθεί η αρχική ωφέλιμη διάμετρος D του ηλεκτροδίου σε μια μικρότερη ωφέλιμη διάμετρο d χρησιμοποιείται μια μονάδα λείανσης μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης όπως φαίνεται στο σχήμα 6 .

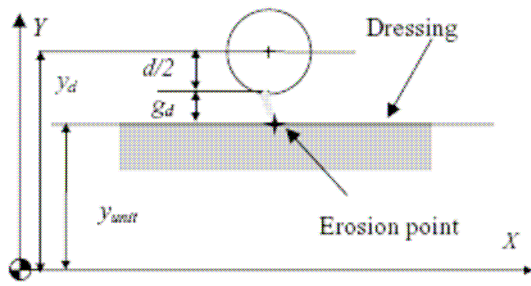


Fig. 6. Dressing process.

Σχημα 6 Διαδικασία κοπής

Στο παρόν πείραμα η κίνηση κατά τη διαδικασία της επένδυσης λαμβάνει χώρα κατά μήκος του Y-άξονα . Η απόσταση y_{unit} δίνει τη θέση του σημείου διάβρωσης στην περιοχή εργασίας της μηχανής σε σχέση με το σημείο αναφοράς της μηχανής . Το ηλεκτρόδιο διαβρώνεται μέχρι το κέντρο του άξονα να φτάσει σε ένα σημείο θέσης y_d με αποτέλεσμα ένα υπενδεδυμένο ηλεκτρόδιο διαμέτρου d . Αν λάβουμε υποψιών και το κενό ανάφλεξης g_d ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και τη μονάδα επένδυσης η ωφέλιμη διάμετρος d ορίζεται από τη σχέση

$$D = 2 * (y_d - y_{ent} - g_d)$$

Η μεταβολή του d (Δd) θα εξαρτηθεί από τη μεταβολή της θέσης της σύσκευσης λείανσης Δy_{ent} , η μεταβολή της θέσης του κέντρου του ηλεκτροδίου Δy_d και η μεταβολή του κενού ανάφλεξης κατά τη λείανση Δg_d .

$$\Delta d = 2 * (\Delta y_d + \Delta y_{ent} + \Delta g_d)$$

Τέλος η μεταβολή της διαμέτρου της οπής θα ορίζεται από την εξίσωση

$$H = 2 * (g_d - y_{unit} - g_d)$$

$$H \Delta = 2 * (\Delta g_d + \Delta y_d + \Delta y_{unit} + \Delta g_d)$$

Η μεταβολή Δy_d θα εξαρτηθεί από την ακρίβεια της μηχανής και την επαναληψιμότητα της τοποθέτησης .

3.12 Σφάλμα θερμοκρασιακής αστάθειας (Δy_{unit})

Το y_{unit} ορίζεται ως η θέση του σημείου διάβρωσης στη συσκευή επένδυσης στο σύστημα αναφοράς της μηχανής .Αλλαγές της θερμοκρασίας δωματίου αλλά και της δομής της μηχανής προκαλούν αλλαγές της σχετικής θέσης της περιστρεφόμενης κεφαλής και του κρεβατιού του τόνου με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η θέση της μονάδας επικάλυψης του ηλεκτροδίου και του μηδενικού σημείου της μηχανής .

Ο προφανής τρόπος να ελαχιστοποιηθούν αυτές οι μεταβολές είναι η κατεργασία να λαμβάνει χώρα υπό σταθερή θερμοκρασία .

3.13 Κενό ανάφλεξης ($\Delta g_e, \Delta g_d$)

Το g_e ορίζεται ως το κενό ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το εργαζόμενο κομμάτι . Η ονομαστική του τιμή ορίζεται από παραμέτρους όπως σχήμα ,μήκος ,συχνότητα και το διηλεκτρικό που χρησιμοποιείται . Έκτατη συμβατική κατεργασία EDM η επιλογή του μήκους , της συχνότητας και του σχήματος έχουν άμεση σχέση με το ρυθμό αποβολής υλικού και την απαιτούμενη τραχύτητα της επιφανείας . Στην κατεργασία micro EDM η φθορά του ηλεκτροδίου είναι ένα ακόμα σημαντικό κριτήριο που

πρέπει να ληφθεί υπόψη . Επιπροσθέτως για να έχουμε υψηλή ποιότητα κατεργασίας το κενό ανάφλεξης οφείλει να είναι πολύ μικρό .

Μεταβολές του κενού ανάφλεξης g_e (Δg_e) οδηγούν σε τυχαία σφάλματα .

Ως g_d ορίζεται το κενό μεταξύ του ηλεκτροδίου και της μονάδας επικάλυψης , όπως και στην περίπτωση του κενού ανάφλεξης g_e , η τιμή του g_d εξαρτάται από τις ίδιες παραμέτρους . Οι παράμετροι αυτοί ορίζονται σε σχέση με την τραχύτητα της επιφανείας που απαιτείται και την ταχύτητα της επικάλυψης .

Επειδή το ηλεκτρόδιο περιστρέφεται , η τραχύτητα της επιφανείας του δε θα πρέπει να επηρεάσει σημαντικά την τραχύτητα της κατεργαζόμενης επιφανείας . Παρά όλα αυτά εξαιτίας των μικρών διαστάσεων υψηλή τραχύτητα της επιφανείας του ηλεκτροδίου μπορεί να επηρεάσει την αντοχή του ηλεκτροδίου το οποίο είναι πιθανό να σπάσει κατά τη διαδικασία .

Η εκτίμηση της μεταβολής Δ είναι δύσκολο να γίνει αλλά μπορεί να υποθέσει κανείς ότι δε θα ξεπεράσει τη μεταβολή Δ ακόμα και στη χειρότερη των περιπτώσεων . Αυτό οφείλεται κυρίως στις συνθήκες που επικρατούν κατά την επικάλυψη οι οποίες είναι και πιο ήπιες .

3.14 Προβλήματα και λύσεις

Η πιο συνηθισμένη συσκευή υποστήριξης του μακριοί λεπτού ηλεκτροδίου από WC είναι ο κεραμικός οδηγός . Η ωφέλιμη διάμετρος του ηλεκτροδίου D καθορίζεται από την αρχική διάμετρο D_{init} και τις συνθήκες που επικρατούν ανάμεσα στον κεραμικό οδηγό και το ηλεκτρόδιο . Η διαφορά μεταξύ της διαμέτρου D_{init} και της διαμέτρου του κεραμικού οδηγού D_{guide} δημιουργεί ένα κενό το οποίο μπορεί να προκαλέσει πιθανά σφάλματα .

Έτσι μεταβολές στην ωφέλιμη διάμετρο του ηλεκτροδίου ΔD μπορούν να προκύψουν πράγμα που επηρεάζει τις ανοχές του ηλεκτροδίου και τις συνθήκες στήριξης ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και τον κεραμικό οδηγό .

Η μέγιστη μεταβολή της ωφέλιμης διαμέτρου του ηλεκτροδίου μπορεί να δοθεί από τη σχέση

$$\Delta D = D_{\text{guide}} + 2 * (D_{\text{guide}} - D_{\text{initmin}}) * Z_{\text{guide}} / L_{\text{guide}} - D_{\text{initmin}}$$

Όπου στην παραπάνω σχέση D_{guide} είναι η διάμετρος του οδηγού , D_{init} είναι η ελάχιστη διάμετρος του αρχικού ηλεκτροδίου σύμφωνα με τις ανοχές για τις οποίες κατασκευάστηκε και Z_{guide} είναι το μήκος του ηλεκτροδίου που προεξέχει του κεραμικού οδηγού .

Στα πειράματα που έγιναν η διάμετρος του ηλεκτροδίου ήταν $D_{\text{init}} = 0.146 \pm 0.002 \text{mm}$ συνεπώς $D_{\text{initmin}} = 0.144 \text{mm}$ και η μετρηθείσα διάμετρος του κεραμικού οδηγού ήταν $D_{\text{guide}} = 0.154 \text{mm}$ $L_{\text{guide}} = 12 \text{mm}$ και $Z_{\text{guide}} < 2 \text{mm}$. Σύμφωνα με αυτές τις τιμές η μέγιστη μεταβολή ΔD που υπολογίστηκε ήταν $\Delta D = 13.3 \mu\text{m}$.

Παρά όλα αυτά αυτή η μέγιστη μεταβολή μπορεί να προκύψει στην περίπτωση που θα έχουμε υψηλή κινητικότητα του ηλεκτροδίου στους άξονες X και Y σε σχέση με τον οδηγό . Πράγμα όχι ιδιαίτερα πιθανό .

3.15 Φθορά ηλεκτροδίου

Η φθορά του ηλεκτροδίου δεν είναι το βασικό πρόβλημα στη μέθοδο EDM μικρού σύρματος εκτός από το γεγονός ότι υψηλός βαθμός φθοράς μπορεί να προκαλέσει συχνά σπασίματα του ηλεκτροδίου .

Η φθορά του ηλεκτροδίου είναι πιο σημαντικό πρόβλημα όταν έχουμε να κάνουμε με ηλεκτρόδια με μικροχαρακτηριστικά στη μέθοδο die-sinking καθώς ο συνδυασμός μικρο και μακροχαρακτηριστικών σε ένα ηλεκτρόδιο εισάγει διαφορετικούς βαθμούς φθοράς . Η περιοχή ανάφλεξης αλλάζει καθώς το ηλεκτρόδιο κινείται καθοδικά γεγονός που δημιουργεί διαφορετικές συνθήκες ανάφλεξης κατά τη διαδικασία με αποτέλεσμα χειρότερη ποιότητα κατεργασίας .

Στη διάτρηση με τη μέθοδο EDM μικρού σύρματος υπάρχουν προβλήματα κατά τη διάτρηση τυφλών οπών καθώς η φθορά διαρκώς μειώνει το μήκος του ηλεκτροδίου , με αποτέλεσμα όταν η διάβρωση προχωρήσει σε ένα συγκεκριμένο σημείο προκαθορισμένο από πριν το πραγματικό βάθος της οπής θα είναι σημαντικά μικρότερο .

Μια μέθοδος εξισορρόπησης της φθοράς του ηλεκτροδίου είναι η συνεχής συμπλήρωση του ηλεκτροδίου . Η μέθοδος αυτή ένα ακριβές μοντέλο ώστε να υπολογίζουμε τον ογκομετρικό βαθμό φθοράς αλλά μερικοί παράγοντες είναι δύσκολο να ελεγχθούν με αποτέλεσμα να προκύπτουν νέα σφάλματα κατά τη χρησιμοποίηση και αυτής της μεθόδου .

Μια άλλη λύση είναι η επανάληψη της μεθόδου αρκετές φορές με νέο ηλεκτρόδιο κάθε φορά μέχρι να πετύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα . Αυτή η μέθοδος ονομάζεται μέθοδος πολλαπλών ηλεκτροδίων και είναι Αλκέτα χρονοβόρα ενώ είναι δύσκολο να εκτιμήσει κανείς τον αριθμό των ηλεκτροδίων που θα απαιτηθούν .

Τα προβλήματα που προκαλούνται από τη φθορά του ηλεκτροδίου γίνονται περισσότερο περίπλοκα όταν κατεργαζόμαστε συνθέτες τρισδιάστατες μικροκοιλότητες , είτε η φθορά του ηλεκτροδίου θα είναι πολύ μεγάλη ώστε να επιτραπεί η χρήση συνθετών ηλεκτροδίων ή η γεωμετρία θα είναι αδύνατη .

Για την κατεργασία μικρών τρισδιάστατων κοιλοτήτων η κατεργασία διάτρησης EDM με χρησιμοποίηση ηλεκτροδίων απλού σχήματος φαίνεται να είναι η πιο κατάλληλη .

Μια βασική μέθοδος είναι η κατεργασία κατά στρώματά η όπια αντισταθμίζει τη φθορά του ηλεκτροδίου με συνεχή τροφοδοσία του ηλεκτροδίου κατά τον άξονα του Z , συμφωνά με την εκτίμηση του ρυθμού φθοράς . Υποθέτουμε ότι για την κατεργασία ικανοποιητικά λεπτών στρώματων η φθορά του ηλεκτροδίου λαμβάνει χώρα κατά μέτωπο και όχι πλευρικά . Εδώ απαιτείται πολύ καλή εκτίμηση της φθοράς , λάθος εκτίμηση θα έχει αθροιστική επίδραση σε κάθε στρώμα .

Στη μέθοδο UWM ο δρόμος που ακολουθεί ένα ηλεκτρόδιο είναι ειδικά σχεδιασμένος ώστε να εξασφαλίσει ότι μετά την κατεργασία κάθε στρώματος θα αποκατασταθεί το αρχικό σχήμα του ηλεκτροδίου . Αυτό πετυχαίνει με συνδυασμό προσεχτικά σχεδιασμένων διαδρομών των εργαλείων και επιλογή πολύ λεπτού στρώματος κατεργασίας (0,5-10 μ m) . Η χρήση λεπτών στρώματων έχει σαν αποτέλεσμα καλύτερη διαδικασία διάβρωσης και πιο προβλέψιμο ρυθμό φθοράς .

Παρουσιάζεται παρακάτω μια νέα πρόταση που βασίζεται στη μέθοδο πολλαπλών ηλεκτροδίων , η οποία μπορεί να αποφέρει καλύτερα επίπεδα επαναληψιμότητας και ακρίβειας για διάτρηση EDM . Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι η κατεργασία της κοιλότητας μέσω διαφορετικών διαδρομών ενώ πριν το ξεκίνημα κάθε διαδρομής φροντίζουμε να επαναθέτουμε διαφορετικό ηλεκτρόδιο .Μια σχηματική παράσταση αυτής της μεθόδου απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα .

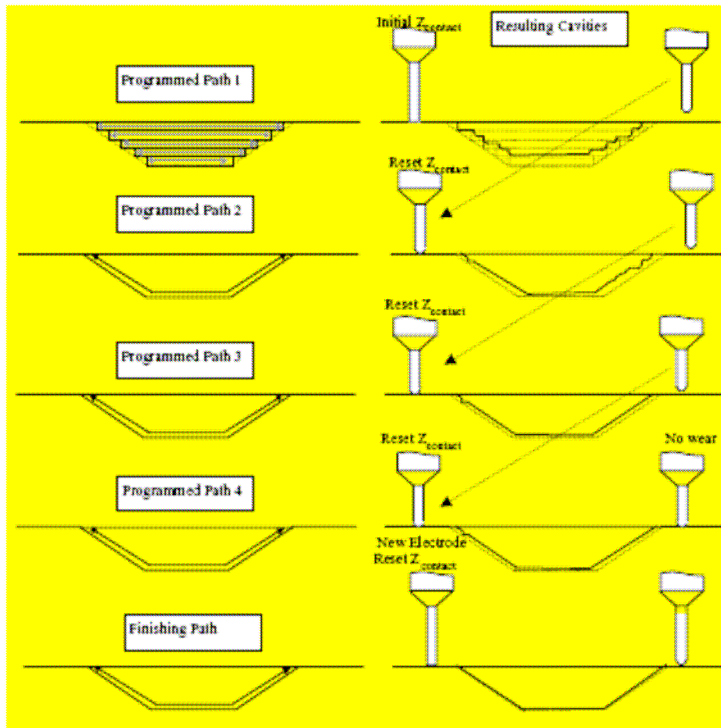


Fig. 9. Proposed strategy for wear compensation.

Σχημα 7 σχηματική παράσταση μεθόδου για την αποφυγή φθοράς στο ηλεκτρόδιο

Κεφάλαιο 4

4.1 Εφαρμογή μεθόδου EDM για την κατεργασία μικρών οπών

4.1.1 Πειραματικός σχεδιασμός

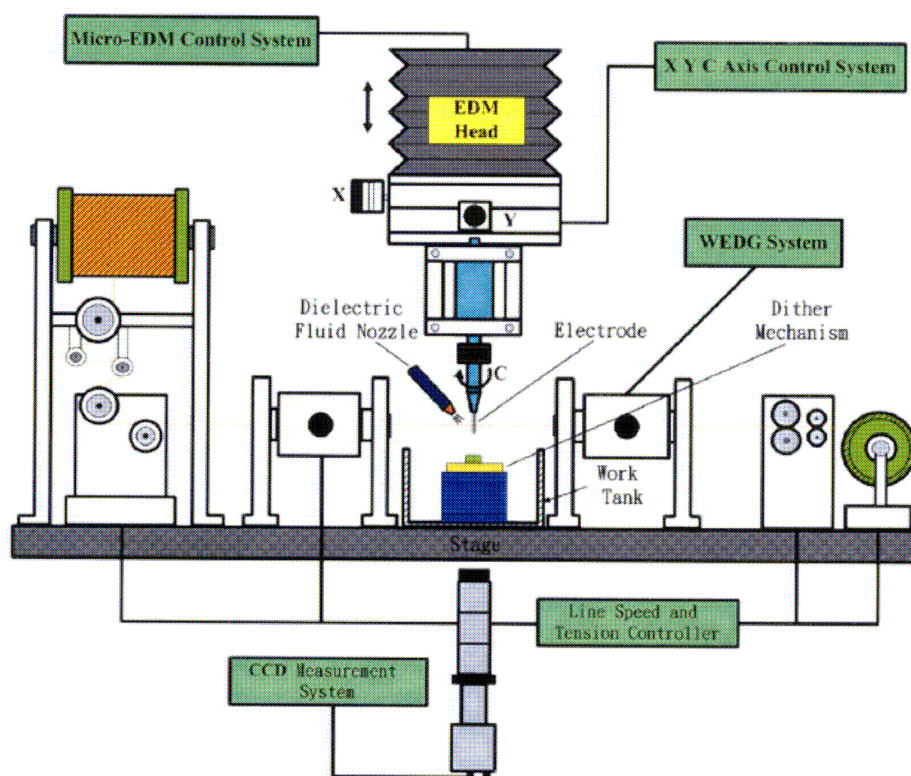


Fig. 1. Configuration of micro-EDM system with built-in WEDG.

Σχ.1 Πειραματικός σχεδιασμός

Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται στο πείραμα απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα. Όπως φαίνεται ο πειραματικός εξοπλισμός αποτελείται από μια μηχανή EDM, ένα μηχανισμό WEDG προσαρμοσμένο πάνω στο κρεβάτι της μηχανής, ένα σύστημα ελέγχου κίνησης τεσσάρων αξόνων προσαρμοσμένο πάνω στην κεφαλή του συστήματος EDM και ένα μηχανισμό HFDG ο οποίος όπως φαίνεται στο σχήμα 2

αποτελείται από μια γεννήτρια λειτουργιών , έναν ενισχυτή και πιεζοηλεκτρικά κεραμικά .

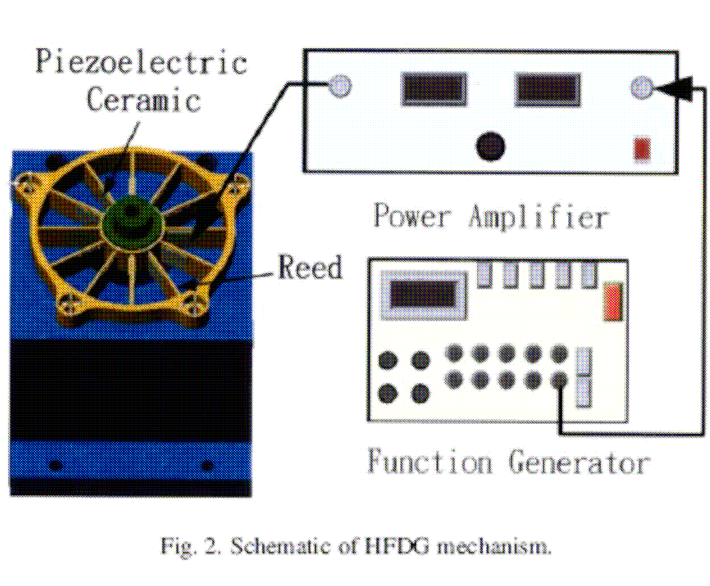


Fig. 2. Schematic of HFDG mechanism.

Σχ.2 απεικόνιση του μηχανισμού για την υλοποίηση της μεθόδου

4.1.2 Υλικά

Το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου στο πείραμα αποτελείται κυρίως από Ni (79%) και Mo (4%) . Παρουσιάζει υψηλή μαγνητική σταθερότητα , υψηλή τιμή κορεσμού , ενώ είναι μικρή η αλλαγή της μαγνητικής σταθερότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία . Αυτές οι ιδιότητες , που απεικονίζονται και στον πίνακα 1 καθιστούν το υλικό εξαιρετική ασπίδα σε μαγνητικές παρεμβολές . Συνήθως χρησιμοποιείται και σε ανάλογες εφαρμογές

Table 1
Main constituents and properties of high-nickel alloy

| Parameter | Description |
|----------------------|----------------------------|
| Chemical composition | Ni (79%), Mo (4%) |
| Tensile strength | 79000 psi |
| Specific gravity | 8.74 g/cm ³ |
| Rockwell hardness | 58 HRB |
| Elongation | 40% |
| Resistivity | 58 microhm-cm |
| Saturation | 7000–7800 Gauss |
| Workpiece | 10×10×0.35 mm ³ |

Παρά όλα αυτά το υλικό αυτό είναι πολύ ανθεκτικό και προκαλεί εύκολα φθορά στα κοπτικά εργαλεία . Έτσι δημιουργούνται προβλήματα κατά τη διάτρηση μικρών οπών σ αυτό το υλικό με τη χρήση συμβατικών μεθόδων κατεργασιών . Γι αυτό το λόγω χρησιμοποιείται εδώ για αυτήν την κατεργασία ο πειραματικός σχεδιασμός που περιγράψαμε παραπάνω .

Προσέχουμε στο ξεκίνημα κάθε διαδρομής το απομένον μήκος του επενδεδυμένου ηλεκτροδίου να είναι τουλάχιστον ίσο με το βάθος της κοιλότητας , ώστε να αποφύγουμε διάβρωση με το μη υπενδεδυμένο μέρος του ηλεκτροδίου . Μ' αυτόν τον τρόπο κάθε φορά μπορούμε να υπολογίσουμε το μέγεθος της φθοράς του ηλεκτροδίου σε κάθε πάσο . Έτσι η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να σταματήσει να παρατηρείται φθορά στο ηλεκτρόδιο .

4.2 Διαδικασία της κατεργασίας

Αρχικά, κυκλικό σύρμα διαμέτρου 500μm κατεργάζεται μέχρι της διαμέτρου των 100μm χρησιμοποιώντας την μέθοδο WEDG. Το κατεργασμένο σύρμα χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μικρών οπών στο κατεργασμένο κομμάτι Μόρια $.Al_2O_3$ προστίθενται στη δεξαμενή με το διηλεκτρικοί μηχανή EDM συνεργάζεται με τον μηχανισμό HFDG όπως φαίνεται στο σχήμα 3 για το φινίρισμα των οπών. Η όλη διαδικασία δεν εμπεριέχει λύσιμο η αντικατάσταση του ηλεκτροδίου, αποφεύγοντας μ αυτόν τον τρόπο το πρόβλημα του περιστρεφόμενου ηλεκτροδίου αλλαγή του ηλεκτροδίου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας δεν συνιστάται γιατί θα έχουμε μείωση της ακριβείας κατά αυτήν τη διαδικασία.

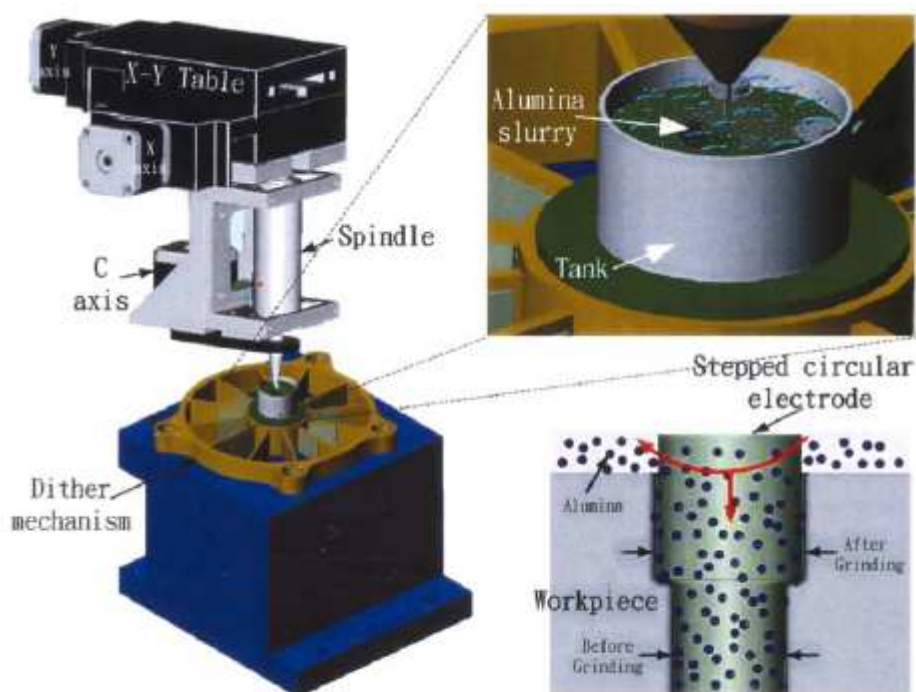


Fig. 3. Schematic of HFDG after micro-EDM.

Σχ.3 διαδικασία HFDG

4.3 Πειραματικά αποτελέσματα και συζήτηση.

4.3.1 Επίδραση του δυναμικού στη φθορά του ηλεκτροδίου .

Ο πίνακας 4 δείχνει τη σχέση μεταξύ της διαφοράς δυναμικού στο διάκενο και το ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου για διαφορετικές τιμές έντασης ρεύματος.

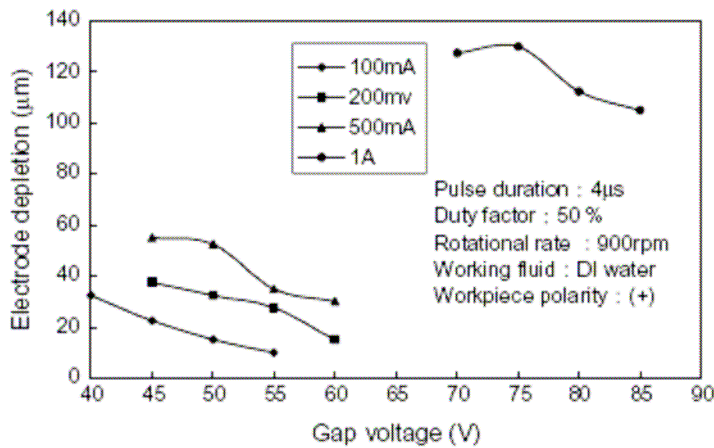


Fig. 4. Effect of electrode gap voltage on electrode depletion.

Σχ.4 επίδραση του δυναμικού διακένου στη φθορά του ηλεκτροδίου

Όπως φαίνεται η σχέση ανάμεσα στο ρεύμα εκκένωσης και το ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου είναι αντιστρόφως ανάλογη. Με σταθερή την ένταση του ρεύματος ο ρυθμός φθοράς του ηλεκτροδίου μειώνεται καθώς αυξάνεται η διαφορά δυναμικού στο διάκενο .Υψηλή διαφορά δυναμικού στο διάκενο τείνει να μεγαλώσει το διάκενο μεταξύ ηλεκτροδίου και κατεργαζόμενου κομματιού. Μεγαλύτερο διάκενο οδηγεί σε μικρότερο ρεύμα εκκένωσης, πράγμα που μπορεί να επηρεάσει το ρυθμό αποβολής υλικού χαμηλός ρυθμός αποβολής υλικού μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την

ποιότητα κατεργασίας καθώς ανεπιθύμητα υλικά τείνουν να συγκεντρώνονται στην κατεργασμένη επιφάνεια .Παρά όλα αυτά όμως ο χαμηλός ρυθμός αποβολής υλικού τείνει να μειώσει το ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου.

4.3.2 Επίδραση του διακένου στη διακύμανση της διαμέτρου της κατεργαζόμενης οπής.

Στο σχήμα 5 απεικονίζεται η σχέση της διαφοράς δυναμικού στο διάκενο του ηλεκτροδίου και η διακύμανση της κατεργαζόμενης οπής, για διαφορετικές εντάσεις ρεύματος .Όταν η διαφορά δυναμικού είναι χαμηλή το διάκενο είναι επίσης μικρό με επίδραση στο ρυθμό αποβολής υλικού.

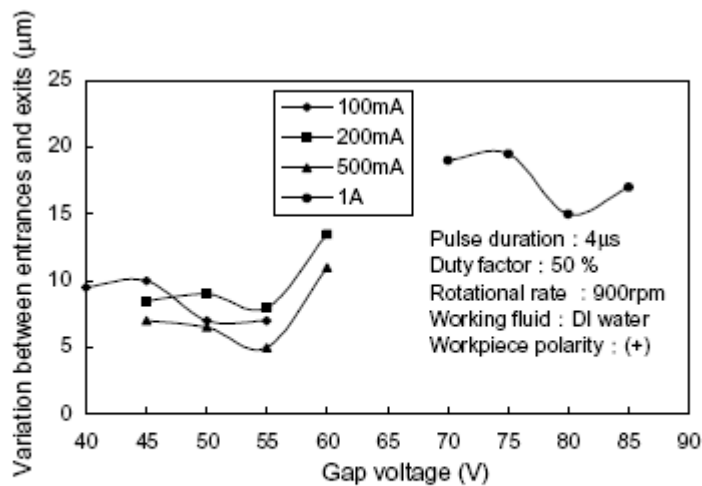


Fig. 5. Effect of electrode gap voltage on DVEE.

Σχ.5 Επίδραση του δυναμικού διακένου στην διακύμανση της διαμέτρου της οπής

4.3.3 Επίδραση της διαφοράς δυναμικού στο διάκενο στη διάμετρο της κατεργαζόμενης οπής.

Το σχήμα 6 απεικονίζει τη σχέση μεταξύ του διακένου του ηλεκτροδίου και της διαμέτρου της κατεργαζόμενης οπής. Όπως φαίνεται όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά δυναμικού τόσο επεκτείνεται η διάμετρος της οπής. Σε υψηλότερες διαφορές δυναμικού η ηλεκτρική εκκένωση κρατά περισσότερο, σε μεγαλύτερη διάρκεια της εκκένωσης τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται από τους αρνητικούς πόλους συγκρούονται με τα ουδέτερα μόρια στο μονωτικό υγρό, με αποτέλεσμα εντονότερο φαινόμενο ιονισμού. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός ηλεκτρονίων και των ιόντων που συγκρούονται τόσο περισσότερο θα επεκτείνεται η διάμετρος της οπής.

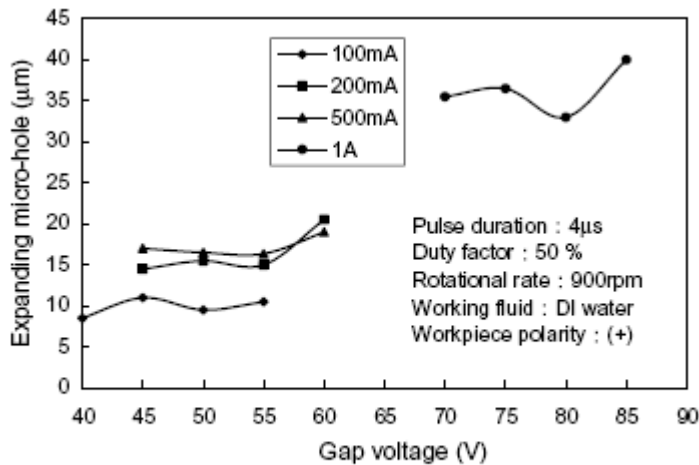


Fig. 6. Effect of electrode gap voltage on hole expansion.

Σχ.6 Επίδραση του δυναμικού διακένου στην εξάπλωση της κατεργαζόμενης οπής

4.4 Η μέθοδος HFDG

Η μέθοδος αυτή απεικονίζεται σχηματικά στο σχήμα 3. Στην ουσία η μέθοδος αυτή καλείται να δώσει λύση στο πρόβλημα της ποιότητας της κατεργαζόμενης επιφανείας. Στην ουσία είναι μέθοδος γυαλίσματος, μετά την κυρίως κατεργασία. Κατά τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται η κυματική ενέργεια που απελευθερώνεται κατά το φαινόμενο του συντονισμού.

Στο σχήμα 7 απεικονίζεται η σχεδόν γραμμική σχέση ανάμεσα στο δυναμικό και το πλάτος της ταλάντωσης γραμμική αυτή σχέση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μεγαλύτερες τιμές δυναμικού και πλάτους ταλάντωσης θα οδηγήσουν και σε καλύτερα αποτελέσματα,

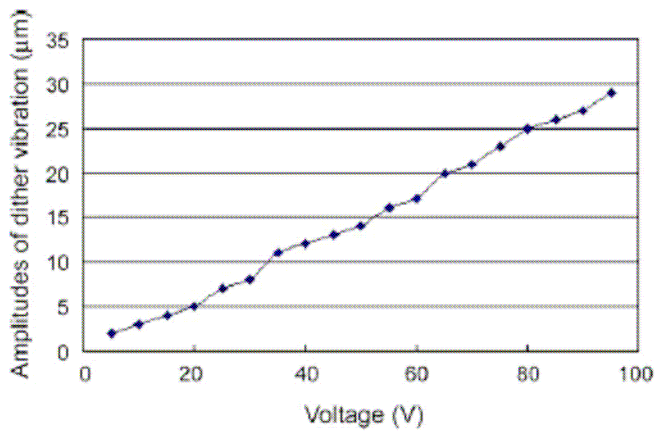


Fig. 7. Relationship between dither input voltage and amplitude of dither vibration.

Σχ.7 Σχέση δυναμικού αντανάκλασης και πλάτους ταλάντωσης

4.5 Η επίδραση του ηλεκτροδίου στην τραχύτητα επιφανείας.

Το σχήμα 8 δείχνει τα αποτελέσματα της μεθόδου με δυο διαφορετικούς τύπους ηλεκτροδίων (circular και stepped circular) έχουμε συγκριτικά καλύτερα αποτελέσματα με τον τύπο του stepped circular ,συνεπώς μπορούμε να πούμε πως είναι και ο ενδεικνυόμενος τύπος ηλεκτροδίου.

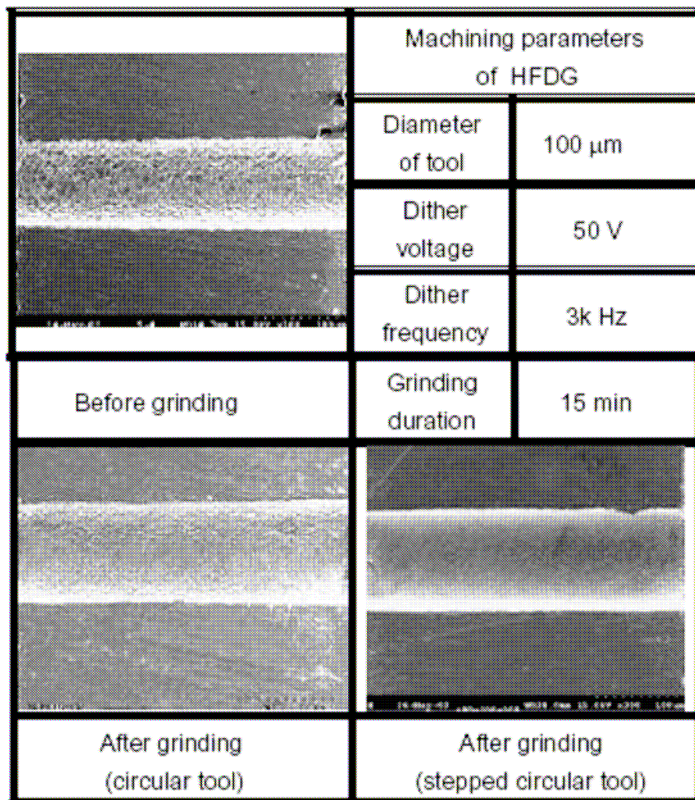


Fig. 8. SEM cross-sections of micro-holes after HFDG using circular and stepped circular tools.

Σχ.8 αποτελέσματα της μεθόδου με δυο διαφορετικούς τύπους ηλεκτροδίων (circular και stepped circular)

4.6 Η επίδραση της έντασης ρεύματος στην ποιότητα της επιφανείας.

Στο σχήμα 9 φαίνονται οι κατεργαζόμενες επιφάνειες για διαφορετικές εντάσεις ρεύματος εκκένωσης. Παρατηρούμε ότι όσο χαμηλότερη είναι η ένταση του ρεύματος ,τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα επιφανείας. Στη συνέχεια οι ίδιες επιφάνειες υπέστησαν την κατεργασία της μεθόδου HFDG. Οι συνθήκες της κατεργασίας απεικονίζονται στον πίνακα 2 .Στο σχήμα 10 απεικονίζονται οι επιφάνειες του σχήματος 9 μετά την υποβολή τους στη μέθοδο HFDG .Παρατηρούμε

βελτίωση της ποιότητας επιφανείας σε όλες τις περιπτώσεις , όμως ιδιαίτερα στις επιφάνειες οι οποίες κατεργαστήκαν αρχικά σε πιο χαμηλά ρεύματα εκκένωσης , τα αποτελέσματα της μεθόδου HFDG είναι περισσότερο θεαματικά.

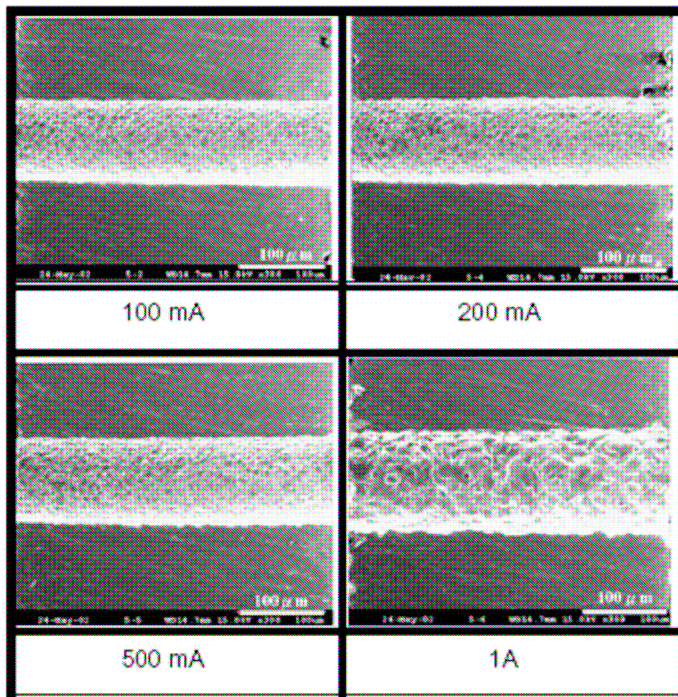


Fig. 9. The surface roughness of micro-holes cross-section using different peak current of micro-EDM.

Σχ.9 Επίδραση της εντασης του ρευματος στην τραχυτητα της επιφανειας

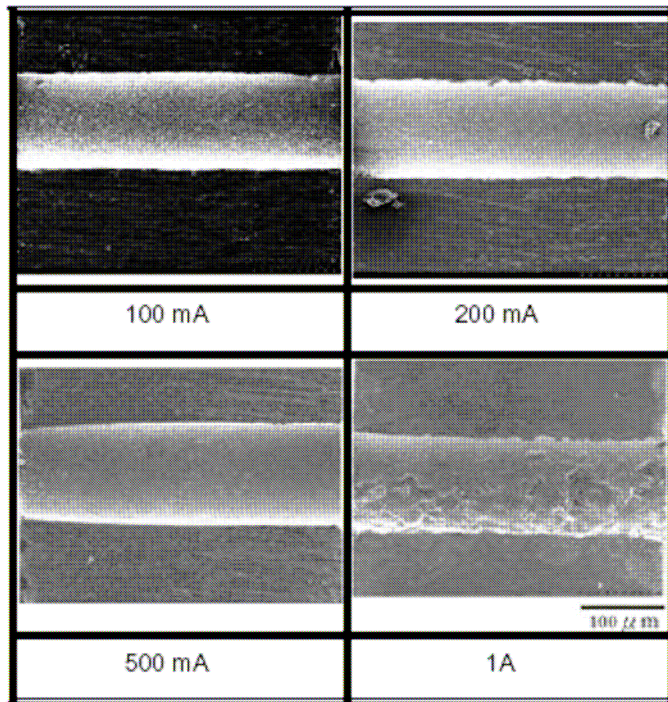


Fig. 10. SEM cross-sections of micro-holes machined under different peak currents followed by HFDG at 40 V for 15 min.

Σχ.10 Επίδραση της έντασης του ρευματος στην τραχυτητα της επιφανειας μετά τη χρήση της μεθόδου HFDG για 15 λεπτά

4.7 Επίδραση του δυναμικού συντονισμού στην ποιότητα επιφανείας.

Όπως ειπώθηκε πιο πριν , υπάρχει μια γραμμική σχέση ανάμεσα στο δυναμικό (συντονισμού)και το πλάτος της ταλάντωσης .Συνεπώς όσο μεγαλύτερο το δυναμικό τόσο καλύτερα αποτελέσματα έχουμε .Στο σχήμα 11 απεικονίζεται μια οπή κατεργασμένη υπό χαμηλό ρεύμα εκκένωσης και κατόπιν κατεργασμένη στα 40V

Στο σχήμα 12 απεικονίζονται οι τραχύτητες οπών κατεργασμένες σε διαφορετικά δυναμικά.

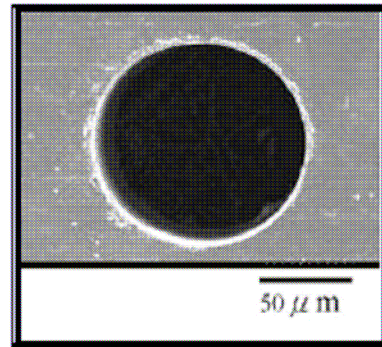


Fig. 11. Entrance of micro-hole machined under 100 mA followed by HFDG at 40 V.

Σχ.11 οπή κατεργασμένη υπό χαμηλό ρεύμα εκκένωσης και κατόπιν κατεργασμένη στα 40V

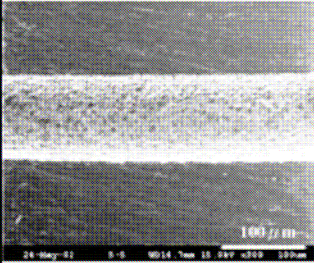
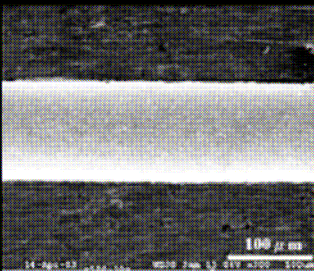
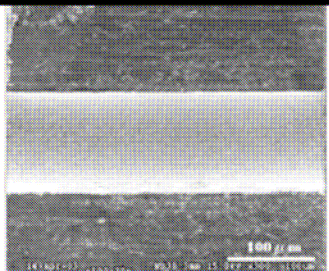
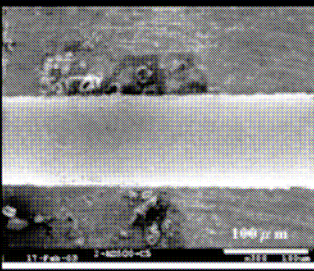
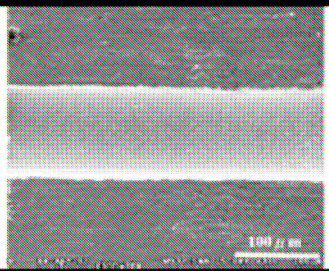
| | | |
|---|---|------------------|
|  | Machining parameters of HFDG | |
| | Shape of electrode tool | Stepped circular |
| | Front step electrode diameter | 100 μm |
| | Back step electrode diameter | 110 μm |
| | Dither voltage | 10, 30, 50, 70V |
| | Dither frequency | 3K Hz |
| (a) After micro-EDM before HFDG | Grinding duration | 15 min |
|  |  | |
| (b) dither voltage 10 V | (c) dither voltage 30 V | |
|  |  | |
| (d) dither voltage 50 V | (e) dither voltage 70 V | |

Fig. 12. SEM cross-sections of micro-holes machined by HFDG at different input voltage.

Σχ.12 τραχύτητες οπών κατεργασμένες σε διαφορετικά δυναμικά.

4.8 Επίδραση της διάρκειας επιβολής της μεθόδου στην τραχύτητα της επιφανείας .

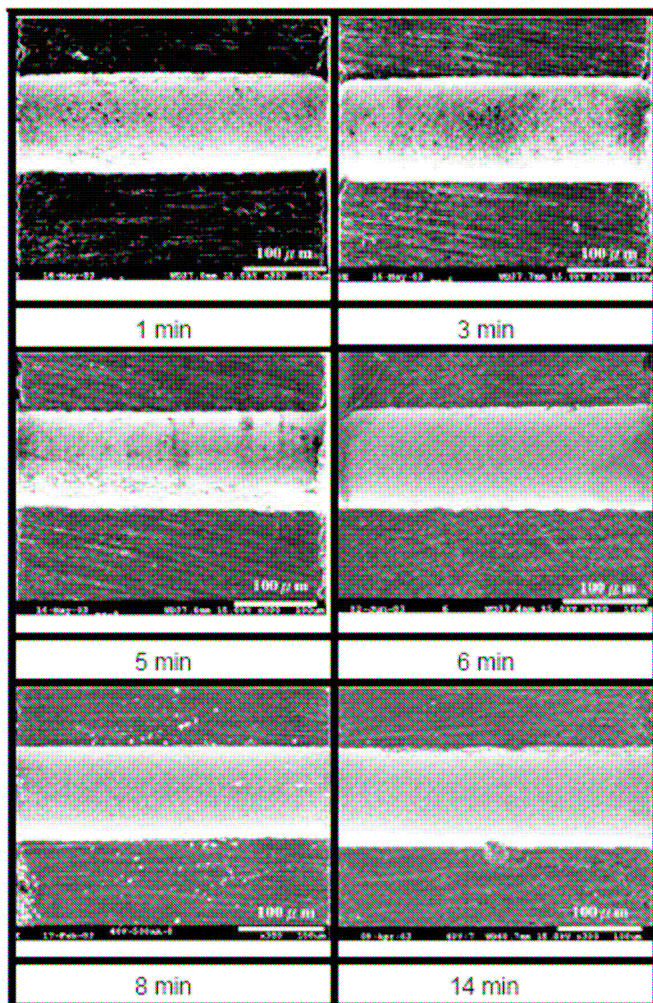


Fig. 13. SEM cross-sections of micro-holes machined under peak current 500 mA followed by HFDG at 40 V for different duration.

Σχ.13 απεικονίζονται οι τραχύτητες επιφανειών που έχουν υποστεί τη μέθοδο HFDG για διαφορετικά χρονικά διαστήματα

Στο σχήμα 13 απεικονίζονται οι τραχύτητες επιφανειών που έχουν υποστεί τη μέθοδο HFDG για διαφορετικά χρονικά διαστήματα .Είναι προφανές ότι για χρονική

διάρκεια μεγαλύτερη των 6 λεπτών , έχουμε ήδη καλά αποτελέσματα τραχύτητας. Η τραχύτητα βελτιώνεται όσο μεγαλώνει η διάρκεια επιβολής της μεθόδου. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η τραχύτητα της επιφανείας πριν και μετά την επιβολή της μεθόδου HFDG .Όλα τα παραπάνω αποδεικνύουν ότι μετά από 6-8 λεπτά επιβολής της μεθόδου ,έχουμε σημαντική βελτίωση τόσο του σχήματος της κατεργαζόμενης επιφανείας όσο και της τραχύτητας της .

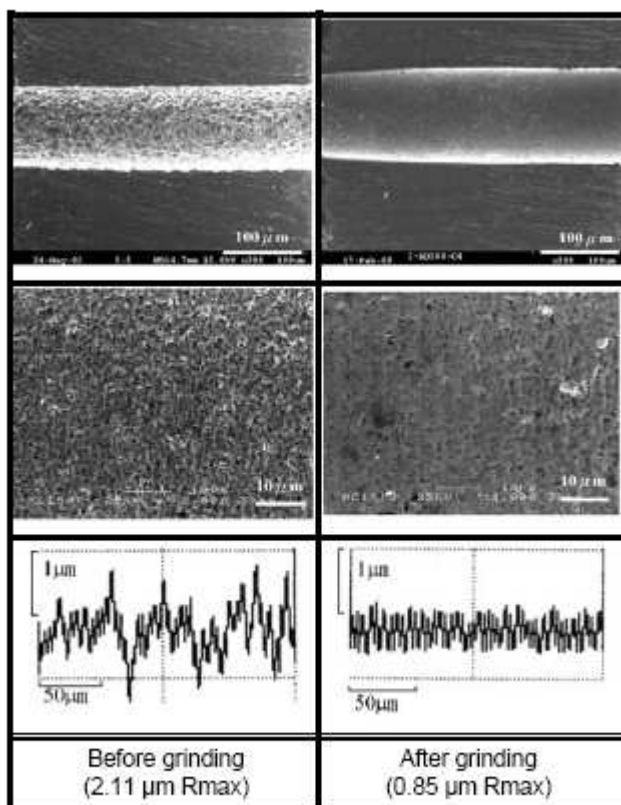


Fig. 14. Surface roughness of workpiece before and after HFDG.

Κεφάλαιο 5

5.1 Μελέτη της τραχύτητας επιφανείας κατεργαζόμενου τεμαχίου κατά την κατεργασία της λείανσης υψηλών ταχυτήτων

Κατά την παραπάνω μελέτη κρίνεται απαραίτητη η εισαγωγή μερικών δεικτών , απαραίτητων για τη μαθηματικοποίηση του μοντέλου .

1)Τετραγωνική ρίζα σφάλματος επιφανείας S_q

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{l_x l_y} \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} \eta^2(x, y) dx dy} \approx \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^2(x, y)} \quad (1)$$

Όπου $\eta(x,y)$ απεικονίζει την απόσταση κάθε σημείου της επιφανείας από το σημείο αναφοράς .

2)Τετραγωνική ρίζα ροπής αδρανείας επιφανείας ($S_{\Delta q}$) κατά τον άξονα των Z

$$S_{\Delta q} = \sqrt{\frac{1}{l_x l_y} \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} \rho^2(x, y) dx dy} \approx \sqrt{\frac{1}{(M-1)(N-1) \sum_{j=2}^N \sum_{i=2}^M \rho_y^2}} \quad (2)$$

Όπου $\rho(x,y)$ είναι η ροπή αδρανείας επιφανείας τυχαίου σημείου .

3) Μέσο μήκος κύματος επιφανείας (S_{λq})

$$S_{\lambda q} = 2\pi \frac{S_q}{S_{\Delta q}} \quad (3)$$

4) Το μέγιστο ύψους της επιφανείας (S_y) που ορίζεται ως η απόσταση ανάμεσα στο κορυφαίο σημείο και στο χαμηλότερο σημείο της επιφανείας του δείγματος

$$S_y = |\eta_{s \max}| + |\eta_{y \max}| \quad (4)$$

5) Ο λόγος της επιφανείας (S₀) που είναι ο λόγος του συνόλου της επιφανείας A προς την επιφάνεια του δείγματος F

$$A = \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} \sqrt{1 + \rho^2} dx dy = \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=1}^{M-1} \sqrt{1 + \rho^2} dx dy \quad (5)$$

Συνεπώς

$$S_0 = \frac{A}{F} = \left[\frac{A}{(M-1)(N-1)\Delta x \Delta y} - 1 \right] \times 100\% \quad (6)$$

6) Κλασματική διάσταση , η οποία σύμφωνα με τη θεωρία Weierstrass – Mandelbrot η γραμμική κλασματική διάσταση μπορεί να εκφραστεί ως εξής

$$D_L = -\frac{\log N}{\log \lambda} \quad (7)$$

Οπού N ο αριθμός των τετραγώνων που περιέχονται σε ένα δείγμα , λ το μήκος των τετραγώνων . Τέλος η περιοχή κλασματικής διάστασης ορίζεται ως

$$D_F = D_L + 1$$

5.2 Πειραματική μελέτη

Για τα πειραματική τεστ χρησιμοποιήθηκε μια μηχανή λείανσης M1420 . Ο λειαντικός τροχός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο GBZ60OR1A διαμέτρου 270 mm με ψυκτικό με βάση το νερό (5% λαδί σε διάλυμα νερού) .

5.3 Πειραματικό σχέδιο

Έγινε μια ορθογώνικη πειραματική δοκιμή . Οι παράγοντες που ελήφθησαν υπόψη ήταν η ταχύτητα του λειαντικού τροχού (V_s) , η ταχύτητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου (V_w) , η ταχύτητα πρόωσης (S_d) , το βάθος κοπής (t_d) και ο χρόνος λείανσης (T) . Οι παραπάνω παράγοντες απεικονίζονται στον επόμενο πίνακα

| Test number | A | | B | | C | | D | | E | | Experimental result index | | | | |
|-------------|---|---|---|---|---|---|---|-------|-------|-------|---------------------------|--------|----------|----------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | R_a | S_q | S_y | S_{kq} | S_0 | S_{ik} | S_{dq} | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.146 | 0.589 | 0.732 | 9.072 | 0.327 | 1.217 | 1.282 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0.130 | 0.740 | 0.068 | 38.253 | 0.010 | 1.001 | 0.134 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0.250 | 0.667 | 0.387 | 16.708 | 0.157 | 1.089 | 0.750 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0.219 | 0.774 | 0.196 | 24.883 | 0.068 | 1.008 | 0.419 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 0.315 | 0.909 | 0.625 | 11.733 | 0.567 | 1.039 | 2.093 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0.300 | 0.489 | 0.649 | 3.516 | 0.343 | 1.171 | 1.524 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0.198 | 0.778 | 1.000 | 3.338 | 0.696 | 1.202 | 2.503 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0.173 | 0.867 | 0.507 | 12.927 | 0.380 | 1.028 | 1.422 |

Τα πειράματα έγιναν με ταχύτητα λείανσης $V_d = 2.5 \mu\text{m}/\text{min}$ και ο δείκτης που μετρήθηκε ήταν η τραχύτητα επιφανείας η οποία μετρήθηκε με ένα όργανο περιγράμματος τραχύτητας επιφανείας μοντέλου 2210 .

5.4 Πειραματικά δεδομένα και ανάλυση σφάλματος

Το ορθογώνιο τεστ διεξήχθη σε δυο ομάδες επαναλαμβανομένων δοκιμών οπές φαίνεται και στον πίνακα 2 .

| Test number | Factor | | | | | | | Experimental result index | | | | | | |
|-------------|--------|---|---|---|---|---|---|---------------------------|-------|-------|-----------------|-------|----------|----------------|
| | A | B | | C | D | E | | R_a | S_q | S_y | S_{λ_q} | S_0 | S_{ik} | $S_{\Delta q}$ |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.146 | 0.589 | 0.732 | 9.072 | 0.327 | 1.217 | 1.282 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0.130 | 0.740 | 0.068 | 38.253 | 0.010 | 1.001 | 0.134 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0.250 | 0.667 | 0.387 | 16.708 | 0.157 | 1.089 | 0.750 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0.219 | 0.774 | 0.196 | 24.883 | 0.068 | 1.008 | 0.419 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0.315 | 0.909 | 0.625 | 11.733 | 0.567 | 1.039 | 2.093 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0.300 | 0.489 | 0.649 | 3.516 | 0.343 | 1.171 | 1.524 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0.198 | 0.778 | 1.000 | 3.338 | 0.696 | 1.202 | 2.503 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 0.173 | 0.867 | 0.507 | 12.927 | 0.380 | 1.028 | 1.422 |

Πίνακας 2 Πειραματικά δεδομένα δοκιμών

Από τον πίνακα προκύπτει ότι ελήφθησαν τιμές για τρία σημεία για κάθε κομμάτι το οποίο υποβλήθηκε στις δοκιμές , ενώ στη συνέχεια υπολογιστήκαν οι μέσες τιμές .

Στον επόμενο πίνακα φαίνεται με τη βοήθεια της στατιστικής ανάλυσης τετραγωνικού σφάλματος η επίδραση των διαφορών μεγεθών στους δείκτες του πειράματος .

| | R_a | S_q | S_y | S_{λ_q} | S_0 | S_{ik} | $S_{\Delta q}$ |
|---|-------|-------|-------|-----------------|-------|----------|----------------|
| A | * | | *** | *** | **** | | **** |
| B | | | | | | | |
| C | | | *** | * | **** | * | **** |
| D | | * | | * | | | |
| E | | * | | | | | |

Πίνακας 3

Η ποσοτική σχέση των δεικτών και των διαφορών μεγεθών καταγράφεται με τη βοήθεια των μαθηματικών σχέσεων που ακολουθούν

$$\begin{aligned}
 R_a &= 55.652A^{-0.883} B^{-0.221} C^{0.047} D^{0.227} E^{-0.092}, \\
 S_q &= 1.74563A^{-0.1063} B^{0.2365} C^{-0.05798} D^{0.3439} E^{-0.9185}, \\
 S_y &= 794.992A^{-2.449} B^{-0.3089} C^{-0.3778} D^{-0.3287} E^{-0.383}, \\
 S_{\lambda q} &= 5.434 \times 10^{-3} A^{2.345} B^{0.4462} C^{0.2702} D^{0.3801} E^{-0.1913}, \\
 S_0 &= 4936017.4A^{-3.861} B^{-0.612} C^{-0.2388} D^{0.0878} E^{-0.575}, \\
 S_{ik} &= 1.2736A^{-0.00846} B^{-0.0472} C^{-0.0348} D^{-0.0425} E^{0.00711}, \\
 S_{\Delta q} &= 4.204A^{-3.214} B^{-0.1203} C^{-0.3452} D^{-0.1633} E^{-0.4782}
 \end{aligned}$$

Με τη βοήθεια του πίνακα 3 και των παραπάνω σχέσεων εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα

- 1) Η ταχύτητα του λειαντικού τροχού V_s αποτελεί το βασικό παράγοντα που επηρεάζει την τραχύτητα επιφανείας R_a , πράγμα που σημαίνει πως όσο υψηλότερη η ταχύτητα του λειαντικού τροχού τόσο χαμηλότερη η τραχύτητα της επιφανείας. Επίσης όσο μικρότερο το βάθος κοπής και μεγαλύτερος ο χρόνος λείανσης τόσο χαμηλότερη θα είναι η τραχύτητα της κατεργασμένης επιφανείας.
- 2) Σε μικροσκοπική κλίμακα η μέτρηση των δεικτών S_y , S_{λ} , S_0 , $S_{\Delta\lambda}$ έχει άμεση σχέση με τις παραμέτρους της λείανσης. Οι δείκτες αυτοί έχουν ανάλογη επίδραση με την ταχύτητα λείανσης και του βάθους κοπής.
- 3) Ο δείκτης S_0 παίζει ίσως τον σημαντικότερο ρόλο μεταξύ των δεικτών. Όσο χαμηλότερος ο δείκτης αυτός τόσο καλύτερη ποιότητα επιφανείας έχουμε. Στα πειράματα φάνηκε ότι όσο υψηλότερη η ταχύτητα του λειαντικού τροχού τόσα περισσότερα περάσματα θα κάνει αυτός από την προς κατεργασία επιφάνεια στο ίδιο χρονικό διάστημα, στον αντίποδα όμως μικρό βάθος κοπής σημαίνει υψηλότερη τιμή του δείκτη S_0 . Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι μείωση του βάθους κοπής θα προκαλέσει ρωγμές και εγκοπές στο

λειαντικό τροχό με αποτέλεσμα την αποτύπωση τους στην κατεργαζόμενη επιφάνεια .

- 4) Ο δείκτης S_{DA} αποδίδει το ρυθμό μεταβολής της επιφανείας . Συνεπώς μικρή τιμή του δείκτη αυτού αντιπροσωπεύει και καλύτερη ποιότητα επιφανείας . Ο δείκτης αυτός είναι ευαίσθητος ως προς την ταχύτητα του λειαντικού τροχού και το βάθος κοπής .Μεγάλη ταχύτητα θα σημαίνει και αντίστοιχη μείωση του δείκτη ενώ μικρό βάθος κοπής θα αυξήσει την τραχύτητα της επιφανείας .
- 5) Ο δείκτης S_y αντιπροσωπεύει το ύψους των μετρηθεντων σημείων της κατεργαζόμενης επιφανείας . Η λειτουργία του είναι παρόμοια με αυτήν των προηγούμενων δεικτών .

Η κλασματική διάσταση (D^{σ}) χρησιμοποιείται για την περιγραφή των χαρακτηριστικών της επιφανείας . Η σχέση που την αποδίδει παριστάνεται παρακάτω

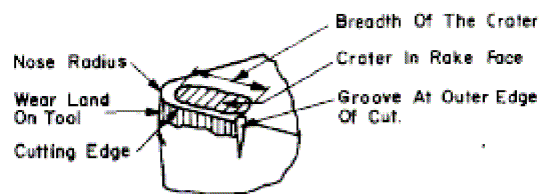
$$D = 2.653A^{-0.033} B^{-0.012} C^{0.017} D^{-0.003} E^{-0.006}$$

Από την τελευταία εξίσωση προκύπτει πως υψηλή ταχύτητα λειαντικού τροχού και μεγάλος χρόνος λείανσης θα δώσουν μικρή τιμή κλασματικής διάστασης .

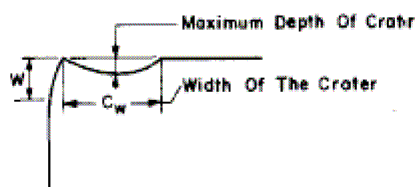
Κεφαλαίο 6

6.1 Αντοχή εργαλείων σε υψηλές ταχύτητες

Η διάρκεια ζωής εργαλείου ορίζεται ως ο συνολικός ωφέλιμος χρόνος ζωής ενός εργαλείου και συνήθως εκφράζεται σε λεπτά . Ένα τυπικό εργαλείο τόνου απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα .



Top View Of Worn Tool



Sectional View Of A Worn Tool

FIG. 1. Details of wear on a tool.

Σχ.1 τυπικό εργαλείο τόνου

Η φθορά συνήθως λαμβάνει χώρα στο πλευρικό κομμάτι του εργαλείου (φθορά ελεύθερης επιφανείας) και κατά μήκος της γωνιάς αποβλήτου (φθορά κρατήρα) . Η φθορά κατά μήκος της ελεύθερης επιφανείας παρατηρείται σε όλες τις συνθήκες κοπής και εκφράζεται ως το πλάτος της φθοράς ελεύθερης επιφανείας (w) . Σε χαμηλές ταχύτητες κοπής η τελευταία είναι πολύ συχνότερη της φθοράς κρατήρα .Η

φθορά κρατήρα λαμβάνει κατά κύριο λόγο χώρα εξαιτίας υψηλών αναπτυσσομένων τάσεων και υψηλών θερμοκρασιών και εκφράζεται συνήθως ως το μέτρο του μέγιστου ύψους κρατήρα (c) .

Ο Taylor έχοντας μελετήσει την επίδραση της ταχύτητας κοπής (V) στη διάρκεια ζώνης του εργαλείου (T) προτείνει την ακόλουθη σχέση

$$V T^n = C$$

Οπού C και η εμπειρικές σταθερές που σχετίζονται με το εργαλείο και το εργαζόμενο κομμάτι .Σε γενικές γραμμές έχει παρατηρηθεί πως η φθορά του εργαλείου αυξάνεται αυξανόμενης της ταχύτητας , ενώ όσο αυξάνονται οι ταχύτητες τόσο πιο έντονο παρουσιάζεται το φαινόμενο της φθοράς .

Η συμβατική μέθοδος εκτίμησης της ζώνης ενός εργαλείου είναι η εκτέλεση δοκιμών μέχρι το εργαλείο να ικανοποιήσει προκαθορισμένα κριτήρια αστοχίας . Στις συνηθισμένες ταχύτητες κατεργασίας αυτό μπορεί να αποδειχθεί αρκετά χρονοβόρο . Γη αυτό το λόγο έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές μέθοδοι από διαφορετικούς επιστήμονες .

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών που έγιναν σε ένα πεδίο ταχυτήτων 90-1250 m/min . Η μέθοδος περιλαμβάνει χαλύβδινους δίσκους ως κατεργαζόμενο κομμάτι σε συνθήκες ορθογωνικής κοπής σε τόρνο και η ταχύτητα κοπής ανάγεται σε όρους ισοδύναμης ταχύτητας.

6.2 Πειραματικός σχεδιασμός

Τα πειράματα διεξάγονται σε τόρνο υψηλών ταχυτήτων και υψηλής ακριβείας . Οι δίσκοι των δοκιμών προήλθαν από το ίδιο κομμάτι με σκληρότητα 190 ± 2 . Οι συνθήκες κοπής απεικονίζονται στον πίνακα που ακολουθεί .

TABLE 1.

| Cutting conditions | |
|--------------------|--|
| Machine: | HMT LB-25 Precision Lathe |
| Tool: | Sandvic Corporation throw away tool tip P 30 ISO grade with T max tool holder; Rake angle 6° ; clearance angle 11° |
| Workpiece: | Mild steel; Vickers hardness 190 ± 2 |
| Dimensions: | Diameter: 14.5-27.5 cm.; Thickness: 5 mm |
| Spindle speeds: | 160-1405 rev/min |
| Cutting speeds: | 90-1250 m/min |
| Infeed: | 0.03 mm/rev. |

6.3 Ισοδύναμη ταχύτητα

Καθώς το εργαλείο μετακινείται από την εξωτερική διάμετρο D_1 σε μια μικρότερη διάμετρο D_2 η ταχύτητα κοπής μεταβάλλεται συνεχώς . Η ισοδύναμη ταχύτητα ορίζεται ως η σταθερή ταχύτητα που θα προκαλούσε την ίδια φθορά στο εργαλείο στον ίδιο χρόνο κοπής με τη μεταβαλλόμενη ταχύτητα .

Αν υποθεθεί ότι ο ρυθμός φθοράς ελεύθερης επιφανείας είναι γραμμικός τότε θα ισχύει

$$\frac{dw}{dT} = \frac{\text{flank wear-land criterion } (w_f)}{\text{Tool life } (T)} .$$

Αν επίσης υποτεθεί ότι θα ισχύει η σχέση του Taylor για το πεδίο ταχυτήτων του εργαλείου καθώς κινείται από τη διάμετρο D_1 στην D_2 η φθορά ελεύθερης επιφανείας w_1 σε χρόνο T_1 θα υπολογίζεται από τη σχέση

$$w_1 = \int_0^{T_1} \frac{w_f}{C^{1/n}} V^{1/n} dT.$$

Η αντίστοιχη ισοδύναμη ταχύτητα μπορεί να οριστεί ως εξής

$$V_{eq} = \left[\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} V^{1/n} dT \right]^n.$$

Η ίδια σχέση μπορεί να γραφτεί και με τη βάση της διαμέτρους ως εξής

$$V_{eq} = \pi N \left[\frac{n}{n+1} \frac{(D_1^{(n+1)/n} - D_2^{(n+1)/n})}{D_1 - D_2} \right]^n.$$

Η ισοδύναμη διάμετρος μπορεί να οριστεί ως εξής

$$D_{eq} = \frac{V_{eq}}{\pi N} = \left[\frac{n}{n+1} \frac{D_1^{(n+1)/n} - D_2^{(n+1)/n}}{D_1 - D_2} \right]^n.$$

Συνεπώς το κλάσμα του χρόνου ζώνης X του εργαλείου που καταναλώνεται σε χρονικό διάστημα T_1 καθώς το εργαλείο μετακινείται από τη διάμετρο D_1 στην D_2 μπορεί να εκφραστεί ακολούθως

$$X = \frac{1}{C^{1/n}} \int_0^{T_1} V^{1/n} dT = \frac{1}{C^{1/n}} T_1 V_{eq}^{1/n}$$

ή

$$X = \left(\frac{\pi N}{C} \right)^{1/n} \left[\frac{n}{n+1} \frac{(D_1^{(n+1)/n} - D_2^{(n+1)/n})}{2fN} \right].$$

Οπού f η πρόωση ανά περιστροφή . Αν X_1 και X_2 είναι κλάσματα της ζώνης του εργαλείου που καταναλώνεται σε δυο διαφορετικές ταχύτητες N_1 και N_2 για ένα ζεύγος διαμετρών D_1 και D_2 για την ίδια πρόωση f τότε θα ισχύουν τα ακολούθως

$$\frac{X_1}{X_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{(1/n) - 1}$$

ή αντίστοιχα

$$n = \frac{1}{[\log(X_1/X_2)]/\log(N_1/N_2) + 1}$$

και

$$C = \pi N \left[\frac{n}{n+1} \frac{D_1^{(n+1)/n} - D_2^{(n+1)/n}}{2fNX} \right]^n.$$

6.4 Πειραματικά αποτελέσματα και συζήτηση

Τα πειράματα έγιναν για ένα ευρύ πεδίο ταχυτήτων περιστροφής του άξονα και διαφορετικές διαμέτρους ώστε να καταλήξουμε σε ισοδύναμες ταχύτητες εύρους από 90-1250 m/min . Η ποικιλία στις ισοδύναμες ταχύτητες επιτυγχάνεται είτε μεταβάλλοντας την ταχύτητα περιστροφής του άξονα είτε το εύρος της διαμέτρου . Τα πειράματα έδειξαν πως για οποιοδήποτε συνδυασμό ταχύτητας περιστροφής του άξονα και εύρους διαμέτρου οι σταθερές C και η της ζώνης του εργαλείου παρέμειναν ίδιες όσο η ισοδύναμη ταχύτητα παρέμενε σταθερή .

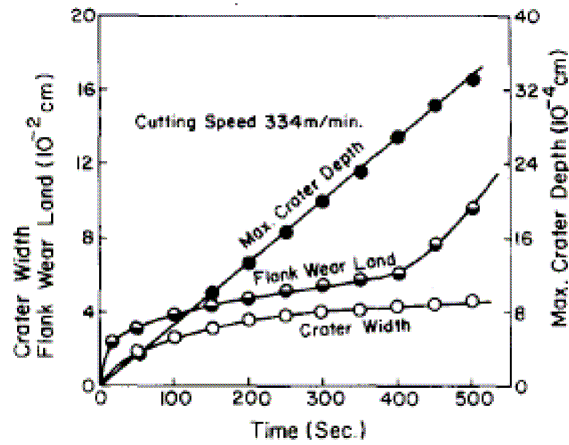


FIG. 3. Wear growth curves.

Σχ.2 Καμπύλες φθοράς κοπτικού εργαλείου

Το παραπάνω σχήμα δείχνει τη συνάρτηση της φθοράς ελεύθερης επιφανείας, του πλάτους και του βάθους κρατήρα σε συνάρτηση με το χρόνο. Παρατηρούμε ότι η φθορά ελεύθερης επιφανείας ακολουθεί τρία διακριτά στάδια, το πλάτος του κρατήρα αρχικά αυξάνεται μέχρι μιας συγκεκριμένης τιμής και από εκεί και μετά σχεδόν παραμένει σταθερό. Το βάθος του κρατήρα τέλος αυξάνει σχεδόν γραμμικά με την πάροδο του χρόνου.

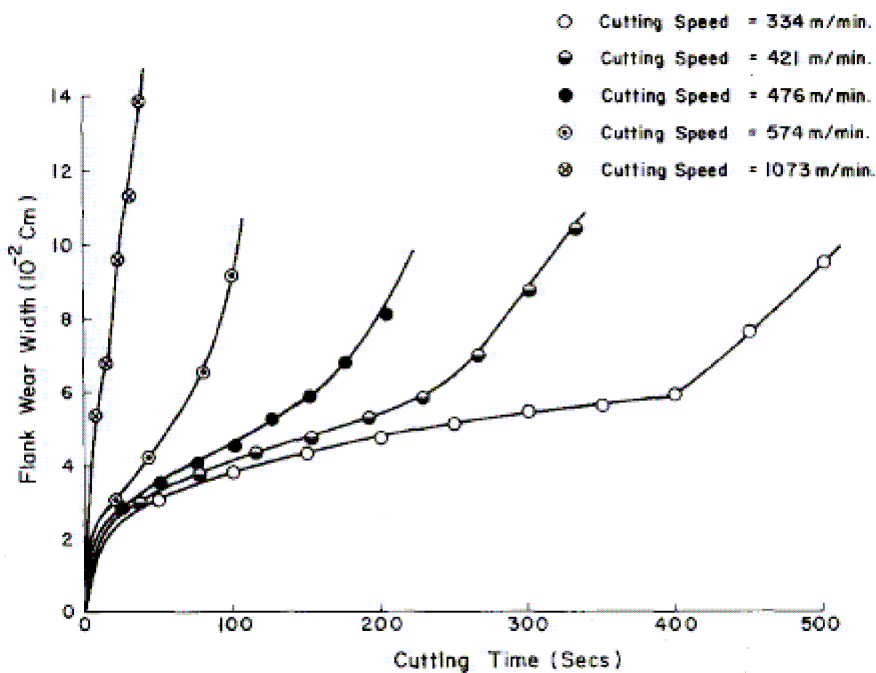


FIG. 4. Flank wear land-cutting time curves at different speeds.

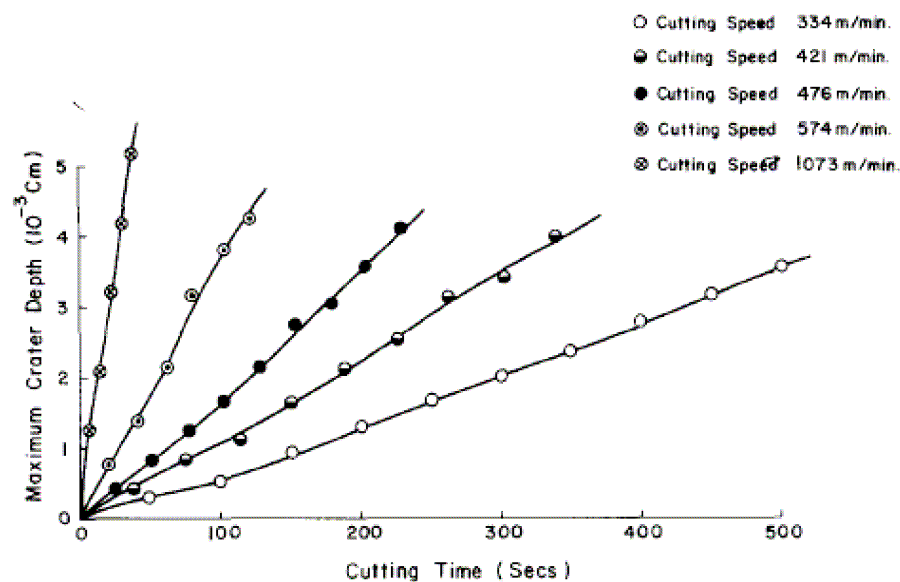


FIG. 5. Maximum crater depth-cutting time curves at different speeds.

Σχ.4

Στα σχήματα της προηγούμενης σελίδας παριστάνονται η φθορά ελεύθερης επιφανείας και το μέγιστο βάθος κρατήρα αντίστοιχα για διαφορετικές ταχύτητες κοπής και σε συνάρτηση με το χρόνο πάντοτε . Τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν γενικά με τα αποτελέσματα των συμβατικών δοκιμών οπού επίσης παρατηρείται αύξηση της φθοράς του εργαλείου αυξανόμενων των ταχυτήτων κοπής . Στις υψηλές ταχύτητες κοπής η θερμοκρασία αυξάνεται γεγονός που συμβάλει στην αύξηση του ρυθμού φθοράς .

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων του πειράματος οριστήκαν ως κριτήρια ζώνης του εργαλείου τα εξής

- 1) Κριτήριο φθοράς ελεύθερης επιφανείας (0.5mm)
- 2) Κριτήριο μέγιστου βάθους κρατήρα (0.04mm)

Με τη χρήση των σχέσεων της προηγούμενης παραγράφου καταλήξαμε στον επόμενο πίνακα αποτελεσμάτων .

TABLE 2. TOOL LIFE COEFFICIENTS USING FLANK WEAR LAND AND MAXIMUM CRATER DEPTH CRITERIA

| No. | Diameter range (cm) | | Equivalent diameter (cm) D_{ec} | Spindle speed (rev/min) | | Equivalent speed (m/min) | | Tool life coefficients | | | |
|-----|---------------------|-------|--------------------------------------|-------------------------|-------|--------------------------|-----------|------------------------|------|----------------------------|------|
| | D_1 | D_2 | | N_1 | N_2 | V_{eq1} | V_{eq2} | Wear land criterion | | Max crater depth criterion | |
| 1 | 24.8 | 23.8 | 24.30 | 1405 | 1040 | 1073 | 794 | 0.436 | 839 | 0.361 | 1282 |
| 2 | 24.8 | 23.8 | 24.30 | 1040 | 850 | 794 | 649 | 0.422 | 854 | 0.355 | 1278 |
| 3 | 20.5 | 20.5 | 20.25 | 1405 | 1040 | 894 | 662 | 0.442 | 891 | 0.371 | 1069 |
| 4 | 22.5 | 20.5 | 21.51 | 850 | 560 | 575 | 379 | 0.452 | 1039 | 0.373 | 1178 |
| 5 | 17.5 | 14.5 | 16.3 | 850 | 705 | 428 | 355 | 0.459 | 1000 | 0.381 | 1230 |

Παρατηρείται μια διαφοροποίηση στις τιμές των παραμέτρων C και η για διαφορετικές ισοδύναμες ταχύτητες αυτό αποδίδεται στις διαφορετικές θερμοκρασίες ανάμεσα στην κατεργασία υπό μεταβλητές ταχύτητες και σ αυτήν υπό σταθερή ταχύτητα γεγονός που γίνεται περισσότερο έντονο στις υψηλές ταχύτητες κοπής .

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η σχέση της διάρκειας ζώνης του εργαλείου σε συνάρτηση με την ταχύτητα κοπής με βάση τα κριτήρια της φθοράς ελεύθερης επιφανείας και του μέγιστου βάθους κρατήρα αντίστοιχα .

$$VT^{0.452} = 958 \text{ (Flank wear-land criterion)}$$

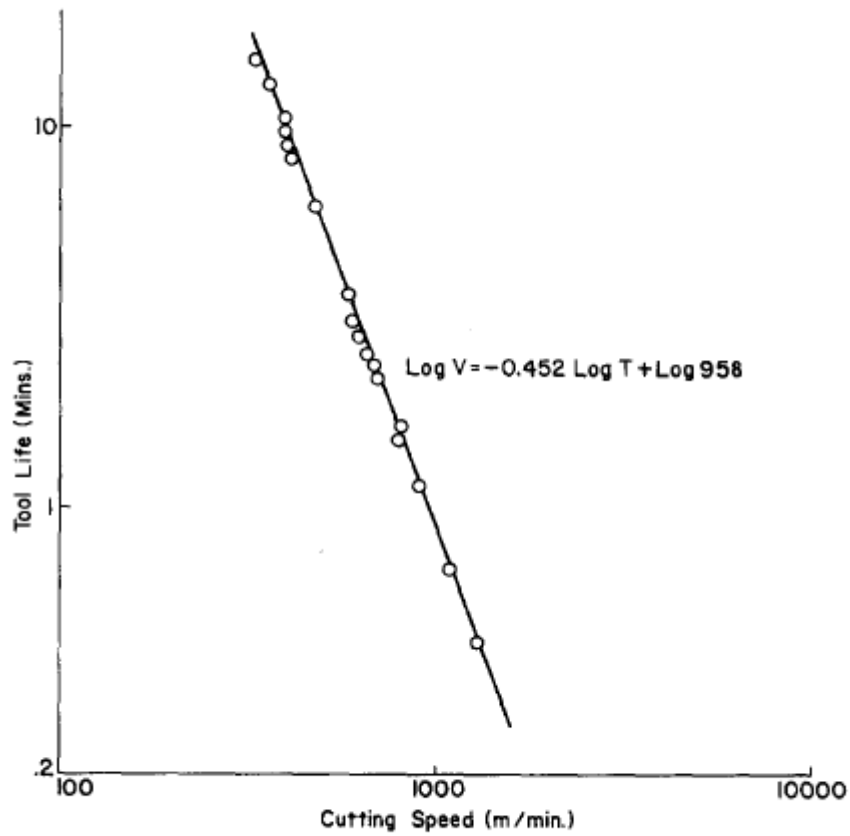


FIG. 6. Tool life-cutting speed relationship (Flank wear-land criterion).

Σχ.5 Σχέση ταχύτητας κοπής και διάρκειας ζωής εργαλείου (κριτήριο πλευρικής φθοράς)

$$VT^{0.368} = 1215 \text{ (Maximum crater depth criterion).}$$

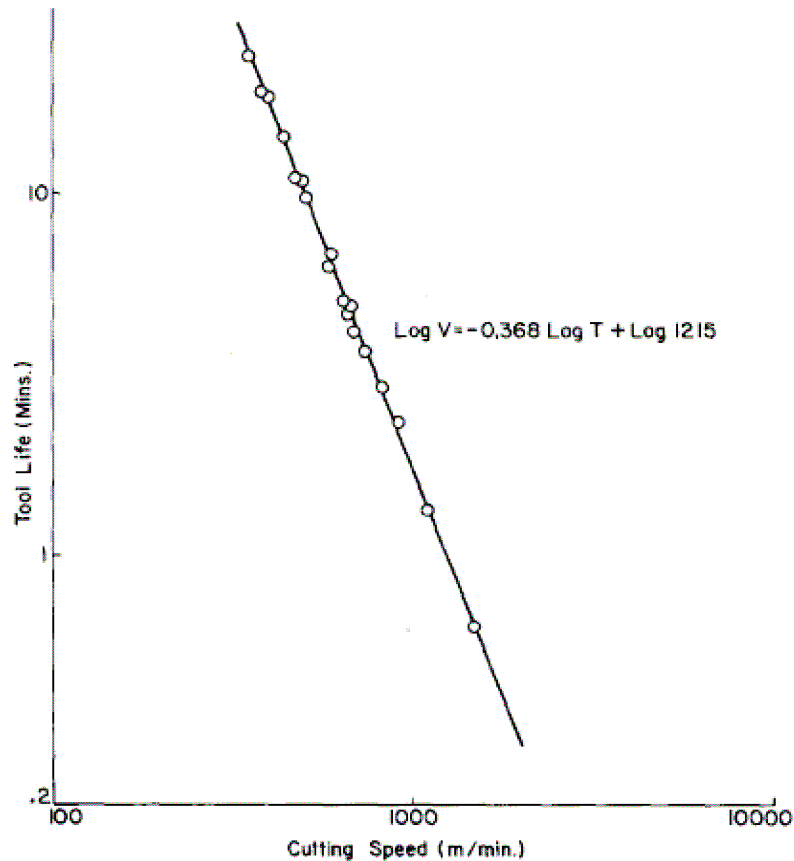


FIG. 7. Tool life-cutting speed relationship (Maximum crater depth criterion).

Σχ.6 Σχέση ταχύτητας κοπής και διάρκειας ζωής εργαλείου (κριτήριο μέγιστου βάθους κρατήρα)

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ισχύ της εξίσωσης του Taylor όσον αφορά τη διάρκεια ζώνης του εργαλείου .

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται η σχέση του συνολικού όγκου φθοράς σε σχέση με το χρόνο για διαφορετικές ταχύτητες κοπής . Ο συνολικός όγκος φθοράς ορίστηκε ως το άθροισμα του όγκου φθοράς ελεύθερης επιφανείας (V_f) και του όγκου φθοράς κρατήρα (V_c) . Οι παραπάνω τιμές υπολογιστήκαν με τη βοήθεια των σχέσεων της προηγούμενης παραγράφου και καταλήξαμε στις σχέσεις .

$$V_f = 0.5 w^2 l \tan \gamma$$

Και

$$V_c = 0.666 c_w c_b c$$

Οπού w και l είναι το πλάτος και το μήκος αντίστοιχα της φθοράς ελεύθερης επιφανείας, γ η γωνιά ελευθερίας, ενώ c_{ow} , c_{ob} και c είναι το μήκος το πλάτος και το μέγιστο βάθος κρατήρα.

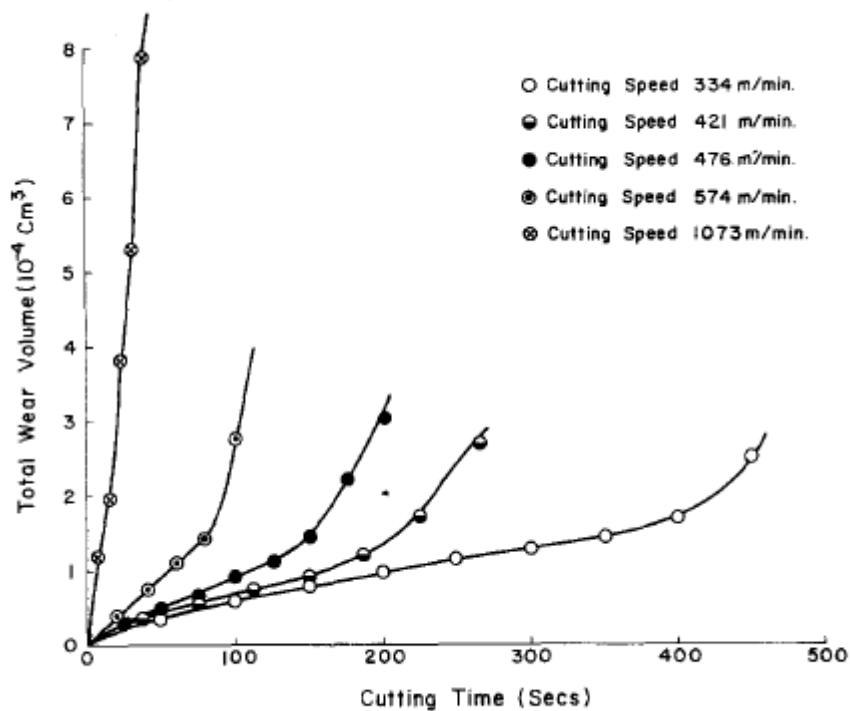


FIG. 8. Total wear volume-cutting time curves at different cutting speeds.

Σχ.7 σχέση του συνολικού όγκου φθοράς σε σχέση με το χρόνο για διαφορετικές ταχύτητες κοπής

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου κατεργασίας σε σχέση με το χρόνο, ως λόγος κατεργασίας ορίζεται το κλάσμα του υλικού που αποβάλλετε προς τον όγκο που προέρχεται από τη φθορά του εργαλείου. Παρατηρείται ότι ο λόγος κατεργασίας (M_k) αρχικά αυξάνει με την πάροδο του χρόνου ενώ στη συνέχεια μειώνεται με αποτέλεσμα να σημειώνεται μια μέγιστη τιμή.

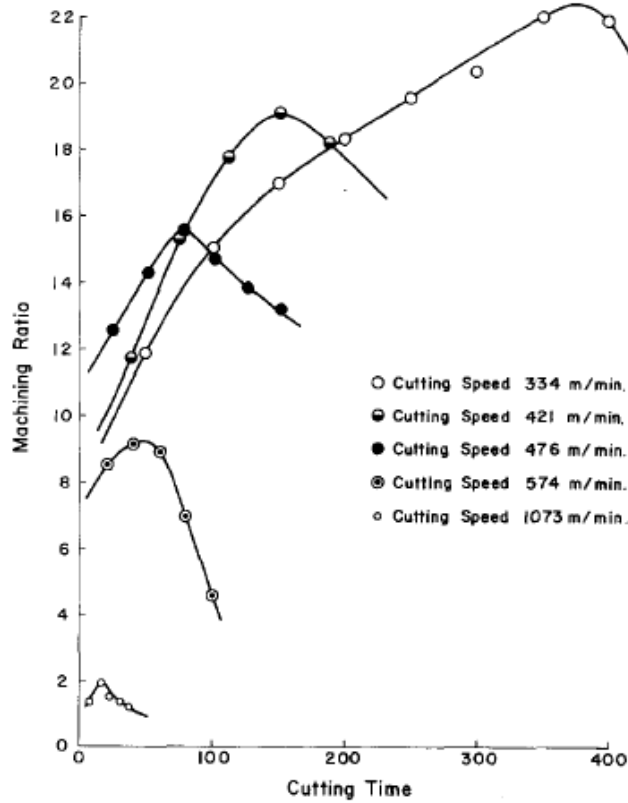


FIG. 9. Machining ratio-cutting time curves at different cutting speeds.

Σχ.8 μεταβολή του λόγου κατεργασίας σε σχέση με το χρόνο

Επιπλέον η μέγιστη τιμή του λογού κατεργασίας μειώνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται η ταχύτητα της κατεργασίας . Αυτό ακριβώς απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί .

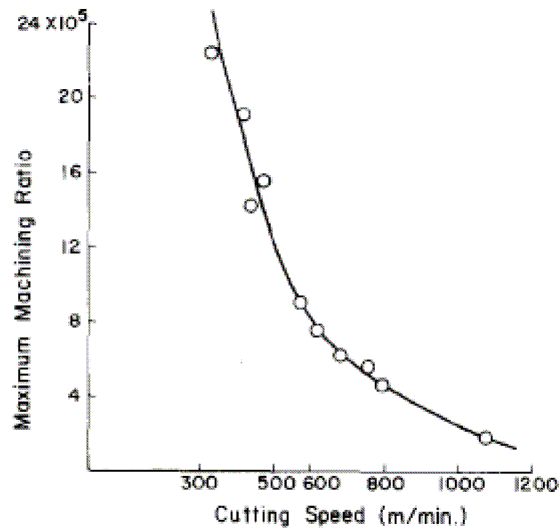


FIG. 10. Variation of maximum machining ratio with cutting speed.

Το σημείο στο οποίο παρατηρείται ο μέγιστος λόγος κατεργασίας μπορεί να θεωρηθεί και ως οριακό σημείο αφού μετά την επίτευξη του η χρησιμοποίηση του εργαλείου κρίνεται πρακτικά ασύμφορη . Μπορεί λοιπόν η επίτευξη του μέγιστου λόγου κατεργασίας να θεωρηθεί και ως κριτήριο αστοχίας του εργαλείου .

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η σχέση της ζωής του εργαλείου και της ταχύτητας κοπής . Με βάση το κριτήριο του μέγιστου λόγου κατεργασίας καταλήγουμε στην ακόλουθη εξίσωση όσον αφορά τη ζωή του εργαλείου .

$$VT^{0.381} = 1015.$$

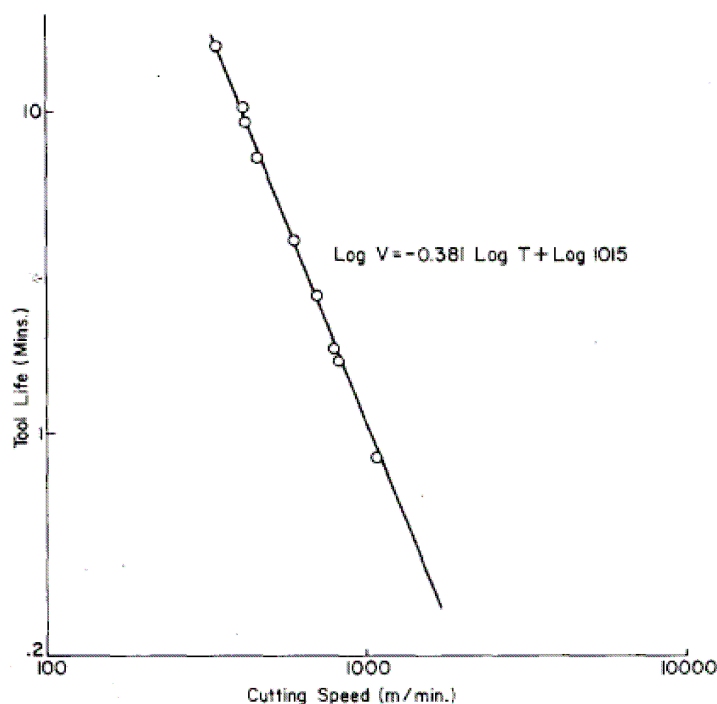


FIG. 11. Tool life-cutting speed relationship (Maximum machining-ratio criterion).

Σχ.10 σχέση της ζωής του εργαλείου και της ταχύτητας κοπής

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η σχέση του λόγου του μέγιστου λογού κατεργασίας προς το χρόνο στον οποίο αυτός επιτυγχάνεται σε συνάρτηση με την ταχύτητα κοπής .

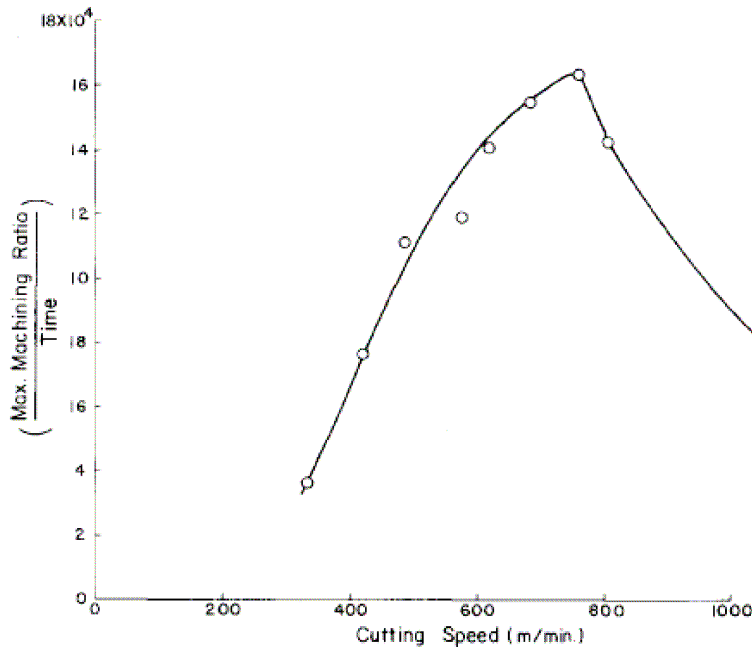


FIG. 12. Variation of M_R^*/T^* with cutting speed.

Σχ.11 σχέση του λόγου του μέγιστου λογού κατεργασίας προς το χρόνο στον οποίο αυτός επιτυγχάνεται σε συνάρτηση με την ταχύτητα κοπής

Ένα τέτοιο διάγραμμα μπορεί να αποβεί χρήσιμο όταν αναζητούμε την κατάλληλη ταχύτητα κοπής για κάποιο συνδυασμό εργαλείου – εργαζομένου κομματιού .

Κεφάλαιο 7

7.1 Μελέτη της ακριβείας κατεργασίας φρεζαρίσματος κονδυλιού με σφαιρική απόληξη μέσω βελτιστοποίησης της ταχύτητας κοπής

Η τεχνική της κατεργασίας υψηλών ταχυτήτων έχει γίνει μια από τις προηγμένες μεθόδους κατεργασίας που εξελίσσονται ανταγωνιστικά σε πολλές χώρες στο κατασκευαστικό πεδίο . Παρά τις υψηλές θερμοκρασίες κοπής με συνεπεία τη μείωση της διάρκειας ζωής των κοπτικών εργαλείων το ενδιαφέρον στις κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων συνεχίζεται γιατί οι ερευνητές ελπίζουν στη βελτίωση της παραγωγικότητας και της ακριβείας κατεργασίας με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Γι αυτό το λόγο η κατεργασία υψηλής ταχύτητας ορίζεται ως η κατεργασία που με υψηλή ταχύτητα πρόωσης και κοπής έχει ως αποτέλεσμα υψηλό ρυθμό αποβολής υλικού χωρίς να μειώνεται η ποιότητα και η ακρίβεια της κατεργασίας του προϊόντος . Η ταχύτητα κοπής αντιπροσωπεύει έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που έχουν επίδραση στη ζωή του εργαλείου προκαλώντας οξείδωση , διάχυση και φθορά στο εργαλείο . Γι αυτό στην περίπτωση του θερμικά επεξεργασμένου χάλυβα η φθορά του εργαλείου εξελίσσεται ραγδαία όταν η ταχύτητα κοπής υπερβεί το πεδίο των 150-250 m/min . Επίσης το κατεργαζόμενο κομμάτι και η ταχύτητα κοπής έχουν σχέση αλληλεπίδρασης με αποτέλεσμα να είναι παρά πολύ σημαντική η επιλογή της κρίσιμης ταχύτητας κοπής κατάλληλης για το είδος του κατεργαζόμενου κομματιού .

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει την πραγματοποίηση κατεργασιών υψηλής ταχύτητας σε προϊόντα ελευθέρων επιφανειών με τη χρησιμοποίηση της τεχνικής της

βελτιστοποίησης της ταχύτητας κοπής . Στην κατεργασία ελευθέρων επιφανειών η ταχύτητα κοπής του κοπτικού εργαλείου της φρέζας αλλάζει ακόμα και κατά τη διάρκεια της ίδιας περιστροφής του άξονα εξαιτίας της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου . Αυτή η αλλαγή της ταχύτητας κοπής έχει επιρροές στη διάρκεια ζωής του εργαλείου και στην ακρίβεια κατεργασίας των προϊόντων . Σήμερα πολλοί ερευνητές ασχολούνται ενεργά με τη μελέτη του σχήματος του κοπτικού εργαλείου της φρέζας αλλά και με τον έλεγχο του ρυθμού πρόωσης . Η μελέτη των τεχνικών βελτιστοποίησης της ταχύτητας κοπής στις κατεργασίες ελευθέρων επιφανειών δεν κρίνεται ακόμα ικανοποιητική .Στα παρακάτω ερευνάται η αποτελεσματικότητα των τεχνικών βελτιστοποίησης της ταχύτητας κοπής με βάση τη διάρκεια ζώνης του εργαλείου και την ακρίβεια της κατεργασίας κατά την κατεργασία ελευθέρων επιφανειών με τη βοήθεια του πρόσφατα εξελιγμένου προγράμματος βελτιστοποίησης της ταχύτητας κοπής .

7.2 Τεχνική βελτιστοποίησης της ταχύτητας κοπής

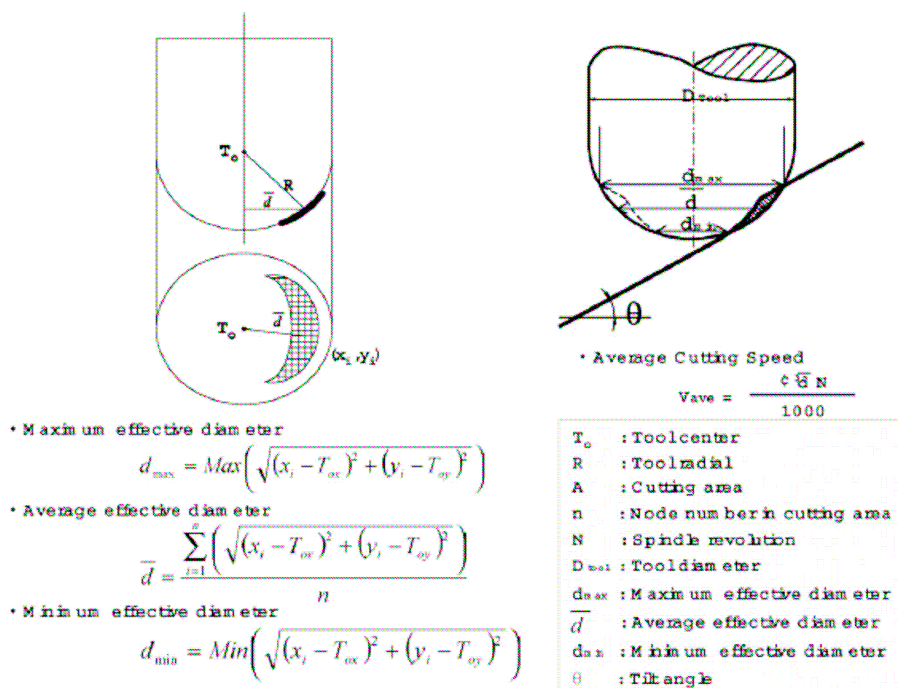


Fig. 1. The effective tool diameter calculation.

Σχ.1 Υπολογισμός ωφέλιμης διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου

Το παραπάνω σχήμα υποδεικνύει πώς να αποκομίσουμε την πραγματική ωφέλιμη διάμετρο όταν το εργαλείο και το κατεργαζόμενο κομμάτι έρθουν σε επαφή μεταξύ τους. Ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμού η πραγματική ωφέλιμη διάμετρος του εργαλείου μπορεί να εξασφαλιστεί με βάση την μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση ωφέλιμη διάμετρο. Το επόμενο σχέδιο δείχνει τις μεθόδους μοντέλων αναπαράστασης κοπής που χρησιμοποιούνται γενικά.

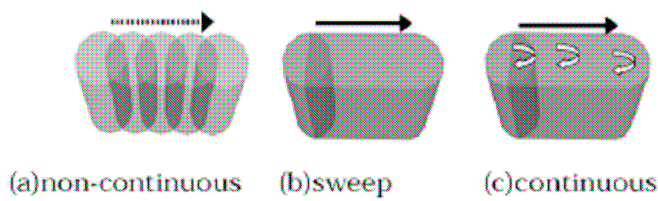


Fig. 2. The cutting simulation methods.

Σχ 2 μοντέλα προσομοίωσης

Λαμβάνοντας υπόψιν την πρόωση ανά περιστροφή η μέθοδος του μη συνεχούς μοντέλου θεωρεί την κεντρική θέση του εργαλείου μετά από μια περιστροφή ως τη θέση του επομένου υπολογισμού και υποθέτει ότι το εργαλείο περιστρέφεται στην ίδια θέση . Σε αυτή τη μέθοδο όταν η πρόωση ανά περιστροφή αυξάνεται ο ρυθμός σφάλματος αυξάνεται αναλόγως , ενώ καθώς η πρόωση ανά περιστροφή μειώνεται απαιτείται περισσότερος χρόνος για υπολογισμό .Αυτό το μοντέλο είναι βολικό στην εξασφάλιση δεδομένων σχετικών με την περιστροφή του εργαλείου καθώς είναι δυνατός ο υπολογισμός ανά περιστροφή και παράλληλα είναι εύκολη η πραγματοποίησή του . Το μοντέλο σάρωσης είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος , επιτρέπει άμεσο υπολογισμό της θέσης του σημείου κοπής και ο ρυθμός σφάλματος είναι χαμηλός ενώ ο υπολογισμός ανά περιστροφή αδύνατος όταν η πρόωση ανά περιστροφή είναι υψηλή το σφάλμα μεγαλώνει σε σύγκριση με το προηγούμενο μοντέλο . Στο συνεχές μοντέλο μπορεί να βρεθεί η ακριβής θέση του σημείου κοπής και ο υπολογισμός ανά περιστροφή είναι δυνατός όπως και ο ακριβής υπολογισμός του ίχνους του εργαλείου , απαιτεί όμως περισσότερο χρόνο για τον υπολογισμό και η μοντελοποίηση κάθε εργαλείου δεν είναι εύκολη καθώς αυξάνεται ο όγκος των δεδομένων .

Για αυτή τη μελέτη δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα διαρκούς ελέγχου της ταχύτητας κοπής με την υιοθέτηση του μη συνεχούς μοντέλου που δίνει τη

δυνατότητα αναπαράστασης συνθετών μορφών και καθιστά δυνατό τον υπολογισμό της μέσης ωφέλιμης διαμέτρου καθώς και δεδομένων ανά περιστροφή .

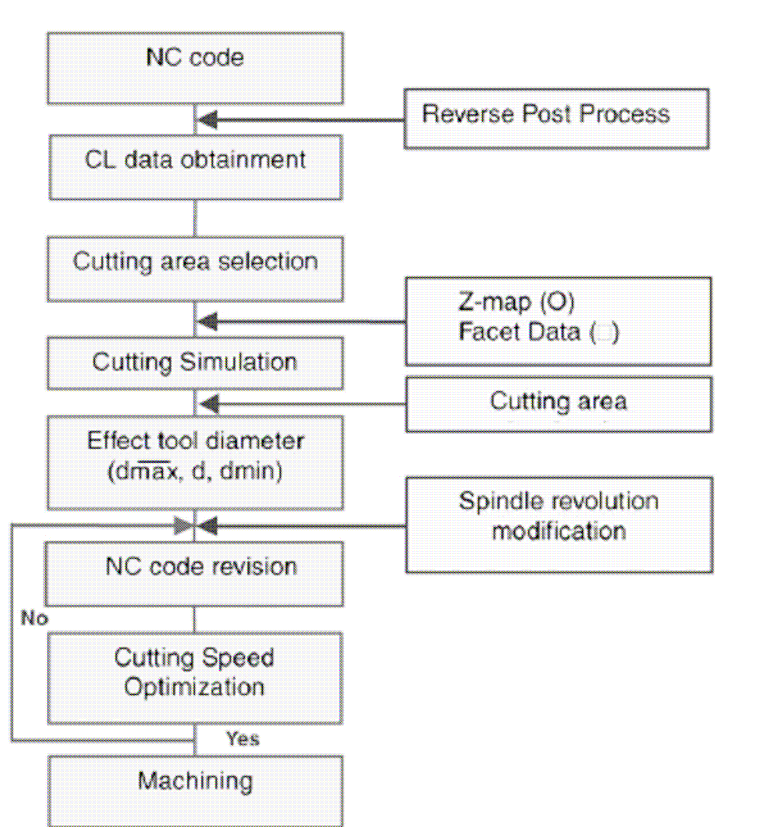


Fig. 3. Flow chart of cutting speed optimization.

Σχ.3 διάγραμμα ροής της τεχνικής βελτιστοποίησης της ταχύτητας κοπής

Το παραπάνω σχήμα αποτελεί το διάγραμμα ροής της τεχνικής βελτιστοποίησης της ταχύτητας κοπής . Τα δεδομένα CL υποκύπτουν από την αντιστροφή διαδικασία του κώδικα NC ο οποίος δημιουργείται με το πρόγραμμα CAD/CAM . Ένα μέγεθος μπορεί να εξαχθεί από τα δεδομένα CL που ανταποκρίνονται σε ένα τμήμα του κώδικα NC . Τα άμεσα μεγέθη συμπεριλαμβάνουν την (end point) , την απόσταση κοπής , την περιστροφή του άξονα , την ταχύτητα πρόωσης και τη θέση του πάνω επιπέδου δεδομένων για να γίνει η πρόσβαση στα δεδομένα που είναι υποθηκευμένα

στον κώδικα NC . Το κυκλικό μέγεθος περιλαμβάνει επίσης το κεντρικό σημείο του εργαλείου .

Το σύνολο των σημείων μπορεί να εξαχθεί από τη διαίρεση του μεγέθους που θα προκύψει προς την απόσταση της κίνησης σε μια περιστροφή . Τα σημεία που προκύπτουν με αυτό τον τρόπο γίνονται τα σημεία υπολογισμού στη διαδρομή του εργαλείου και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της περιοχής κοπής . Η μέθοδος περιγραφής του κατεργαζόμενου κομματιού είναι ο χάρτης – Z που έχει ένα βήμα πλέγματος περίπου 0,2mm . Η μέση ωφέλιμη διάμετρος του εργαλείου ανά περιστροφή όπως και οι μέγιστοι , ελάχιστοι και ωφέλιμοι διάμετροι του εργαλείου μπορούν να υποστούν από τα σημεία του πλέγματος που προκύπτουν . Οι τιμές που υπολογίζονται αποθηκεύονται προσωρινά μέχρι να υπολογιστεί η αιχμή του εργαλείου για το σχετικό μέγεθος , όταν η αλλαγή της ωφέλιμης διαμέτρου του εργαλείου είναι μέσα στην περιοχή επιτρεπόμενου σφάλματος και τα δεδομένα απαρτίζουν ένα σύνολο το οποίο χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του επομένου συνόλου δεδομένων . Όταν ο υπολογισμός ως προς ένα μέγεθος ολοκληρωθεί μπορούν να υπολογιστούν η περιστροφή του άξονα η ωφέλιμη διάμετρος του εργαλείου και η ταχύτητα κοπής . Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα όταν η αλλαγή της περιστροφής του άξονα φτάσει το 15-20% σε σύγκριση με την προηγούμενη περιστροφή είναι αναγκαία η αλλαγή της τιμής περιστροφής του άξονα στην νέα τιμή για να έχουμε καλύτερο αποτέλεσμα και καλύτερη επιφάνεια κατεργασίας . Γι αυτό είναι αναγκαία η σύγκριση της τιμής περιστροφής του άξονα που υπολογίζεται με την προηγούμενη τιμή του ώστε να γίνονται οι αναγκαίες αλλαγές κάθε φορά που αυτό απαιτείται . Η νέα τιμή της περιστροφής του άξονα μπορεί να προστεθεί ως ένας καινούργιος κώδικας (S code) μέσα στον κώδικα NC μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών .

Κατά τη διάρκεια της κοπής γύρω από το κεντρικό σημείο της αιχμής του εργαλείου η ωφέλιμη διάμετρος του εργαλείου τείνει στο μηδέν . Έτσι η ταχύτητα περιστροφής του άξονα αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό ώστε να διατηρηθεί η ταχύτητα κοπής σταθερή ενώ η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται απότομα καθώς η κατεργασία λαμβάνει χώρα με το πλευρικό κομμάτι του εργαλείου . Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίζονται με τον ορισμό μιας κρίσιμης ταχύτητας κοπής η οποία μετατρέπεται σε μια κρίσιμη μέγιστη ή ελάχιστη ταχύτητα περιστροφής του άξονα όταν αυτή αποκλίνει από ένα αντίστοιχο πεδίο τιμών .

Σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα του κώδικα NC επεξεργάζονται από μια μεταγενέστερη διαδικασία κατά την οποία ο κώδικας NC παράγεται μετά την εξαγωγή των CL δεδομένων τα οποία προκύπτουν από τα δεδομένα του μοντέλου προσομοίωσης υπολογισμού . Η βελτιστοποίηση της ταχύτητας κοπής είναι αναγκαία για την πραγματοποίηση της αντιστροφής διαδικασίας κατά την οποία ο ήδη υπάρχων κώδικας NC μετατρέπεται σε CL δεδομένα ώστε να προσδιοριστεί ένα σημείο θέσης του εργαλείου και ο κώδικας NC να αναπαραχθεί με τη βοήθεια των αλλαγμένων δεδομένων . Η μεταγενέστερη αυτή αντιστροφή διαδικασία απεικονίζεται στο επόμενο διάγραμμα .

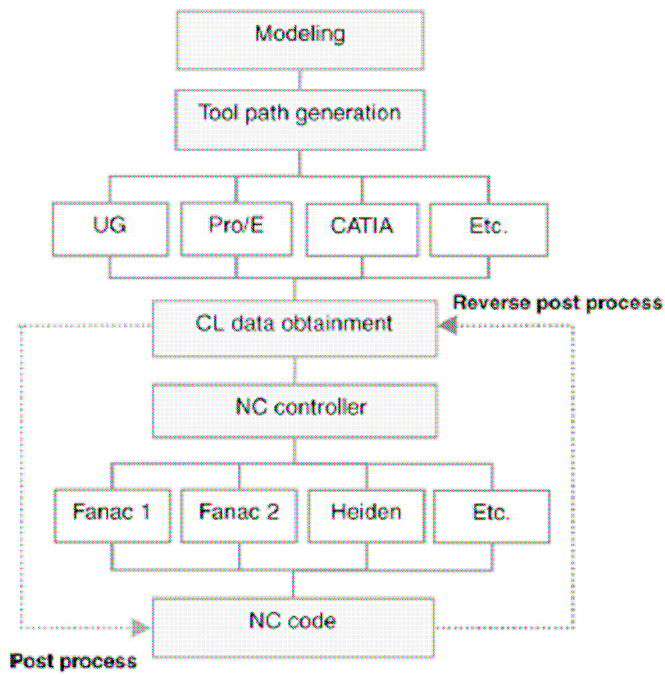
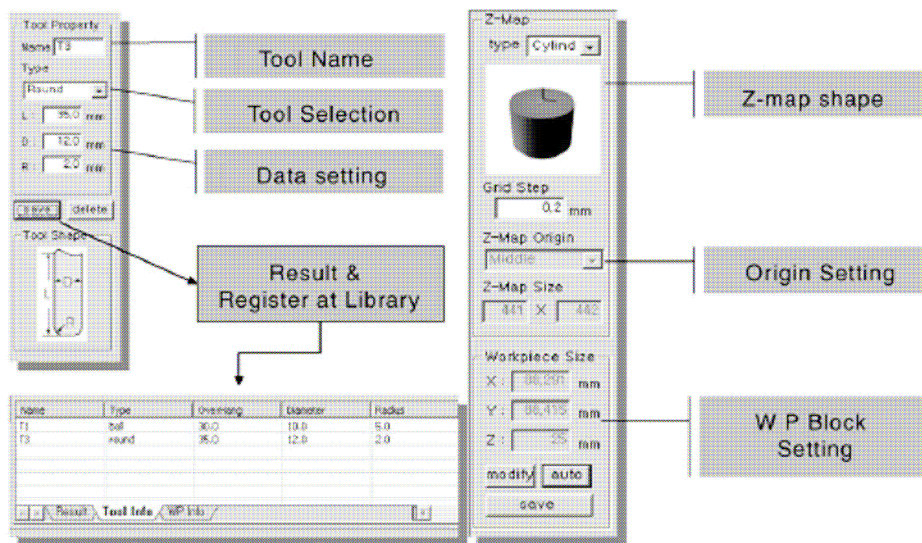
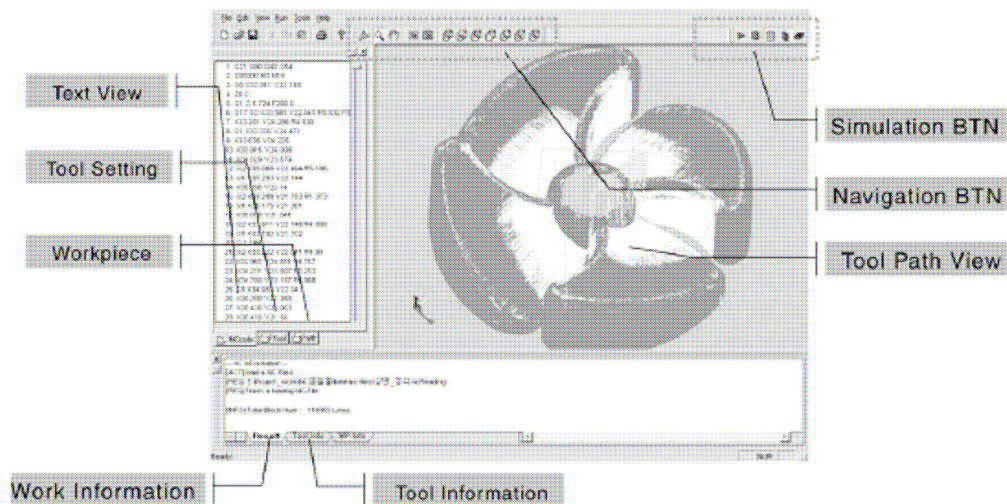


Fig. 4. Reverse post process (RPP).

Σχ.4 αντίστροφη διαδικασία

7.3 Εφαρμογή του προγράμματος βελτιστοποίησης της ταχύτητας κοπής

Το πρόγραμμα βελτιστοποίησης της κοπής παρουσιάζεται τόσο στο προηγούμενο όσο και στο σχήμα που ακολουθεί .



(a) tool setting

(b) workpiece setting

Fig. 5. The tool and workpiece setting.

Σχ.5 Παρουσίαση του προγράμματος βελτιστοποίησης της κοπής

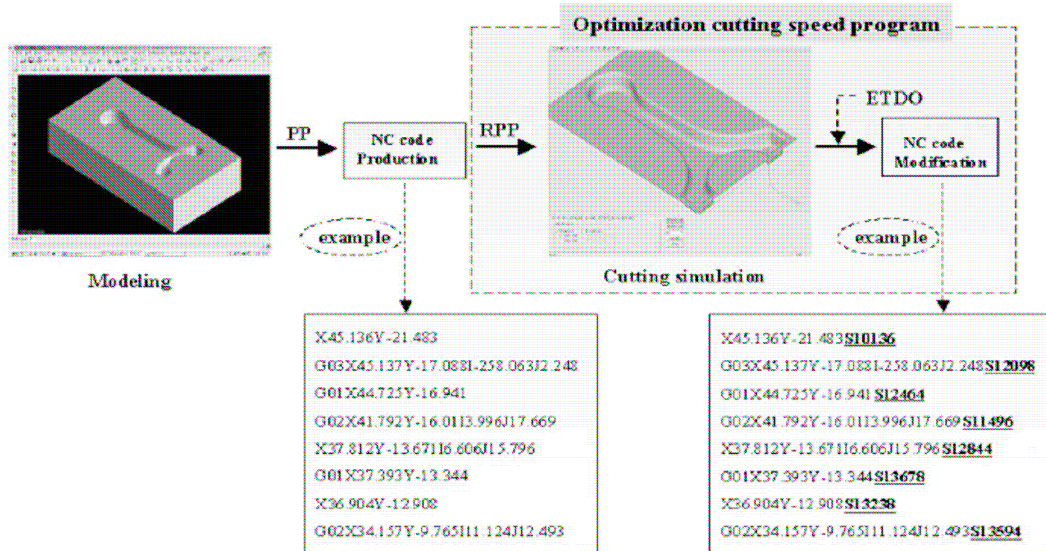
Η πλατφόρμα του προγράμματος που φαίνεται στο σχήμα 4 είναι MS Windows σαν εργαλείο ανάπτυξης χρησιμοποιήθηκε η Visual C++ ενώ σα βιβλιοθήκη 3D χρησιμοποιήθηκε η OpenGL .

Το πρόγραμμα αποτελείται από κουτιά εργαλείων , ένα παράθυρο κώδικα NC , ένα παράθυρο αποτελεσμάτων και ένα παράθυρο κατάστασης των εργαλείων . Τα κουτιά

των εργαλείων περιλαμβάνουν ένα βασικό κουτί εργαλείων για τα δεδομένα , τα αποτελέσματα , την αντιγραφή και την εκτύπωση του κώδικα NC , ένα κουτί προσομοίωσης για τη ρύθμιση της έναρξης , του τέλους και της διακοπής ώστε να τεθεί σε εφαρμογή η προσομοίωση και να φαίνονται στην οθόνη τα χαρακτηριστικά της , ένα κουτί εργαλείων πλοήγησης για μεγέθυνση , σμίκρυνση , κίνηση , σταμάτημα της προσομοίωσης και αλλαγή παραθύρου . Το παράθυρο του κώδικα NC εμφανίζεται πριν και μετά την επιλογή του κώδικα NC στη συνέχεια ένα άλλο κομμάτι του κώδικα επιλέγεται και η θέση του εμφανίζεται στην οθόνη κατά αντίστροφο τρόπο. Το σχήμα 5 δείχνει ότι το παράθυρο επιλογής εργαλείων αποτελείται από το κομμάτι εισαγωγής των ονομάτων των εργαλείων που εμπεριέχονται στον κώδικα NC και το κομμάτι εισαγωγής των ειδών των εργαλείων και των απαραίτητων δεδομένων . Σε περίπτωση που τα αναγκαία εργαλεία δεν ορίζονται στη διαδικασία της προσομοίωσης αυτή σταματά την πρόοδο της και εμφανίζεται μήνυμα επιλογής του εργαλείου . Τα καθορισμένα εργαλεία αναγράφονται στη στήλη πληροφοριών εργαλείων στο κάτω μέρος της οθόνης και τα δεδομένα που αναγράφονται εκεί αποθηκεύονται στη βιβλιοθήκη για διαγραφή ή τροποποίηση ανάλογα με τις ανάγκες που προκύπτουν . Το παράθυρο του εργαζομένου κομματιού καθορίζει το σχήμα του χάρτη Z το βήμα του πλέγματος και το σημείο έναρξης της προσομοίωσης . Το μέγεθος του κομματιού της προσομοίωσης όπως και το βήμα του πλέγματος του αποθηκεύονται στη μνήμη σε δυσδιάστατη μορφή , αν η μνήμη είναι μεγάλη περισσότερη μνήμη χρησιμοποιείται και ο υπολογισμός απαιτεί περισσότερο χρόνο αντιστρόφως μικρή μνήμη σημαίνει αύξηση του σφάλματος υπολογισμού . Το μέγεθος και ο καθορισμός του εργαζομένου κομματιού μπορούν να τροποποιηθούν . Όταν θέλουμε να επικεντρωθούμε σε ένα συγκεκριμένο μέρος του κομματιού είναι δυνατή η μεγέθυνση του και η μερική

κατεργασία στο συγκεκριμένο μέγεθος και θέση . Η προσομοίωση μπορεί επίσης να λάβει χώρα με αυξημένη ταχύτητα και βαθμό ακρίβειας .

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται το οπτικό περίγραμμα και τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του προγράμματος .



PP: Post Process, RPP : Reverse Post Process, ETDO : Effective Tool Diameter Obtainment

Σχ.6 Οπτικό περίγραμμα και αποτελέσματα της εκτέλεσης του προγράμματος

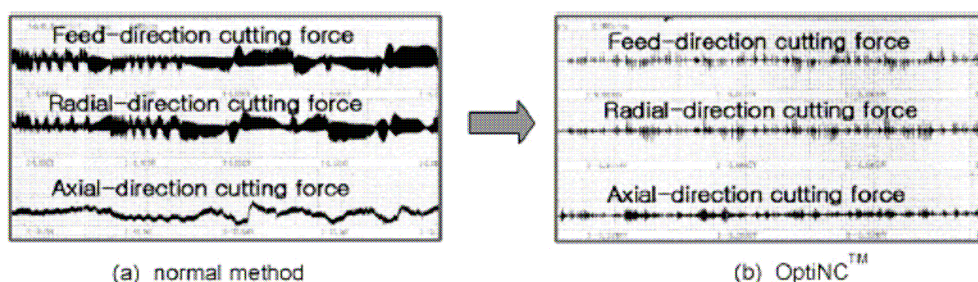
Αρχικά ο φάκελος του κώδικα NC που έχει δημιουργηθεί στο κομμάτι του εμπορικού προγράμματος CAM ανακαλείται . Τρισδιάστατοι κωδικοί NC στα πρότυπα ISO αντιπροσωπεύουν εντολές NC ενώ κατάλληλοι διαχειριστές είναι οι :FANUC Series 16 , 18-MC . Ο κώδικας NC μετατρέπεται σε δεδομένα CL τα οποία βάζουν την προσομοίωση σε λειτουργία σε συνάρτηση με τα δεδομένα του σχήματος του μονοπατιού του εργαλείου , δεδομένα όπως , γρήγορη πρόωση , ευθεία γραμμή ή

κυκλικό τόξο . Τα τροποποιημένα αυτά δεδομένα αποθηκεύονται στη συνέχεια στα συνολικά δεδομένα στα οποία περιλαμβάνονται ο αριθμός των κουτιών , ο κώδικας NC , ο αριθμός των εργαλείων , και τα δευτερεύοντα δεδομένα που αντιπροσωπεύονται με G-κωδικούς που αντιστοιχίζονται στην ομάδα 01 . Όταν οριστεί το εργαλείο και το υποθετικό εργαζόμενο κομμάτι πρέπει επίσης να τεθεί σε λειτουργία η επιλογή του συνεχούς ελέγχου ταχύτητας κοπής . Για να καταστεί αυτό δυνατό πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί το κρίσιμο πεδίο ταχύτητας κοπής . Ένα βέλτιστο πεδίο ορίζεται ανάλογα με το υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού και στη συνέχεια πρέπει να οριστεί η μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα περιστροφής του άξονα ώστε να αποφύγουμε αφύσικες της ταχύτητας περιστροφής κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης .

Το παρόν πείραμα έγινε για θερμικά κατεργασμένο χάλυβα (SKID61σε JENS;Hark52) στο πεδίο των 100-300 m/min . Στη συνέχεια επιλέγεται μια αρχική ταχύτητα κοπής μέσα από το κρίσιμο πεδίο τιμών ταχυτήτων κοπής , η ταχύτητα αυτή μαζί με την ωφέλιμη διάμετρο χρησιμοποιούνται ως παράμετροι για τον υπολογισμό της ταχύτητας περιστροφής του άξονα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης . Ανάλογα από τις περιστάσεις η τιμή αυτή μπορεί να μεταβάλλεται προσωρινά . Τελικά είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί το κρίσιμο πεδίο ταχύτητας περιστροφής του άξονα . Αυτό λειτουργεί ως μηχανισμός ασφαλείας γιατί η ταχύτητα περιστροφής του άξονα που προκύπτει από την ωφέλιμη διάμετρο του εργαλείου και την ταχύτητα κοπής ,ακόμα και όταν η τελευταία δεν αποκλίνει από το κρίσιμο πεδίο τιμών της , αυτομάτως περιορίζεται στις μέγιστες-ελάχιστες τιμές της που έχουν οριστεί προηγουμένως σε περίπτωση που αποκλίνει από αυτές . Στο παρόν πείραμα ως κρίσιμο πεδίο ταχυτήτων περιστροφής του άξονα ορίστηκε αυτό των 6000-16000 rpm .

7.4 Αποτελέσματα του προγράμματος βελτιστοποίησης ταχύτητας κοπής

Με σκοπό την επιβεβαίωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του παραπάνω προγράμματος βελτιστοποίησης της ταχύτητας έγινε μια σύγκριση μεταξύ δυο τεμαχίων τα οποία κατεργαστήκαν το μεν πρώτο με τη συμβατική μέθοδο που δε χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα βελτιστοποίησης ταχύτητας κοπής και το δεύτερο όπως περιγράψαμε στα προηγούμενα . Η δύναμη κοπής των αποτελεσμάτων των δυο παραπάνω κατεργασιών κατά τις διευθύνσεις της πρόωσης της αξονικής και της ακτινικής κατεύθυνσης απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα .



Σχ.7 . Αποτελέσματα δύναμης κοπής

Η δύναμη κοπής αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που χρησιμοποιούνται κατά την εκτίμηση της ποιότητας της κατεργασίας που λαμβάνει χώρα κατά τη σχετική κίνηση του εργαλείου και του εργαζομένου τεμαχίου . Στην περίπτωση της συμβατικής μεθόδου κοπής η μεταβολή της δύναμης κοπής είναι μεγάλη καθώς η ταχύτητα κοπής μεταβάλλεται σε συνδυασμό με την εκτροπή του εργαλείου . Όπως φαίνεται και από το σχήμα με τη χρήση της τεχνικής της μεθόδου βελτιστοποίησης της ταχύτητας κοπής οι μεταβολές της δύναμης κοπής είναι χαμηλές

όπως και η εκτροπή του εργαλείου με αποτέλεσμα πιο σταθερή κατάσταση
κατεργασίας .

Συμπεράσματα

Στο πρώτο κομμάτι της εργασίας ερευνήθηκε ο μηχανισμός αποβολής υλικού για διαφόρους τύπους υλικών κυρίως κατά την κατεργασία της λείανσης . Είδαμε πως η αποβολή του υλικού ξεκινά με την εισχώρηση των μέσων λείανσης στο προς κατεργασία τεμάχιο ενώ στη συνέχεια εξαιτίας ακριβώς της εισχώρησης αυτής προκαλούνται μεταγενέστερες ρωγμές οι οποίες συμβάλουν κατά κύριο λόγο στην αποβολή του υλικού . Τα εύθραυστα υλικά έχουν πολύ περιορισμένες ανοχές όσον αφορά την παραμόρφωση τους αλλά ήπαρ' όλα αυτά είδαμε πως τα περισσότερα υλικά υπό πολύ μεγάλες υδροστατικές πιέσεις είναι δυνατό να παραμορφωθούν πλαστικά . Έτσι εκτός από της ρωγμές λόγω θραύσης είναι επίσης δυνατό να παρατηρηθεί επίσης πλαστική παραμόρφωση με την επιβολή υψηλών φορτιών .

Στο δεύτερο κομμάτι της εργασίας ασχοληθήκαμε με τη μέθοδο αποβολής υλικού μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης (EDM) . Αρχικά κατά τη διάτρηση μικρών οπών σε τεμάχιο καρβιδίου καταλήξαμε στα ακόλουθα συμπεράσματα . Παρατηρήθηκαν καλύτερα αποτελέσματα όταν η κατεργασία έλαβε χώρα υπό θετική πολικότητα από ότι όταν συνέβη το ίδιο με αρνητική . Αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του ηλεκτροδίου μπορεί να μειώσει την ανεπιθύμητη εξάπλωση της οπής αλλά δεν έχει σημαντική επίδραση στο ρυθμό φθοράς του ηλεκτροδίου . Ηλεκτρόδιο με εγκοπή αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα από αυτό χωρίς εγκοπή ενώ σε μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής είναι καλό να χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα πλάτη εγκοπής . Η οριζόντια τοποθέτηση του ηλεκτροδίου μπορεί τέλος να οδηγήσει σε οπές εκλειπτικής μορφής ενώ η επιπλέον αύξηση της ταχύτητας περιστροφής είναι δυνατό να οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα .

Στη συνέχεια έγινε μια περισσότερο θεωρητική προσέγγιση της μεθόδου όπου και ερευνηθήκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της μεθόδου αλλά και συχνά περιορίζουν την εφαρμοσιμότητα της. Έγινε μια προσπάθεια καθορισμού των ανοχών ώστε η οποία κατεργασία να προγραμματιστεί σύμφωνα με αυτές. Όταν καθορίζουμε τις ανοχές της κατεργασίας αυτής οι παράγοντες όπως λείανση ηλεκτροδίου, τρόπος τοποθέτησης του, διάρκεια κατεργασίας πρέπει να ληφθούν υπόψη. Όλοι αυτοί οι παράγοντες θα εμπεριέχουν ποσοστά σφάλματος τα οποία θα πρέπει να συμπεριληφθούν στον υπολογισμό της ανοχής. Η συνολική αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ διαφορών παραγόντων της κατεργασίας και η προσπάθεια βελτιστοποίησης της βασίζεται κυρίως σε εμπειρικές μεθόδους. Ένας ασφαλής τρόπος για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου είναι η χρήση καταλλήλων αλγορίθμων και τεχνικών βασισμένων στην επαναληψιμότητα.

Στο τελευταίο κεφάλαιο που αναφέρεται στη μέθοδο κατεργασίας μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης χρησιμοποιήθηκε το παράδειγμα της κατεργασίας κράματος υψηλής περιεκτικότητας σε νικέλιο με ταυτόχρονη χρησιμοποίηση της μεθόδου (HFDG) δηλαδή λείανσης μέσω επιβολής δυναμικού υψηλής συχνότητας. Γενικά κατά την κατεργασία κραμάτων υψηλής περιεκτικότητας σε νικέλιο το ρεύμα εκκένωσης πρέπει να συνδυαστεί με το βέλτιστο δυναμικό διακένου ώστε να επιτύχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Κατά τη μέθοδο HFDG το ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται ως εργαλείο λείανσης και δεν αντικαθίσταται ούτε γίνεται οποιαδήποτε επέμβαση σε αυτό κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Αυτό εξασφαλίζει ακριβές μέγεθος διαμέτρου και σχήματος της κατεργαζόμενης οπής. Το ενδεικνυόμενο ηλεκτρόδιο για την κατεργασία αυτή είναι το κυκλικό ηλεκτρόδιο με νηματική διάμετρο (δηλαδή κυκλικό ηλεκτρόδιο του οποίου η διάμετρος

μεταβάλλεται μέσω πατούρας) ενώ με παράλληλη χρήση λάσπης αλουμινίου επιτυγχάνουμε μέσω της μεθόδου HFDC καλύτερα αποτελέσματα τραχύτητας επιφανείας από ότι με τη συμβατική χρήση της κατεργασίας μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης . Με τη χρήση της μεθόδου που περιγράψαμε στο τελευταίο κεφαλαίο για ρεύμα εκκένωσης 500mA δυναμικό αντανάκλασης 40V και χρόνο κατεργασίας 6-8 λεπτά επιτυγχάνουμε ακριβή και ικανοποιητικά αποτελέσματα .

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας γίνεται αναφορά στις κατεργασίες υλικών με κύριο χαρακτηριστικό τους την υψηλή ταχύτητα κοπής . Αρχικά γίνεται αναφορά στις μαθηματικές σχέσεις που διέπουν τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη τραχύτητα επιφανείας κατά τη λείανση επιφανειών με υψηλές ταχύτητες ενώ στη συνέχεια οι σχέσεις αυτές αποδυνκνούνται με πειραματικό τρόπο . Γίνεται κατανοητό ότι η ποιότητα επιφανείας είναι δυνατό να περιγράψει βάση συγκεκριμένων μετρήσιμων δεικτών . Οι δείκτες αυτοί με τη σειρά τους επηρεάζονται άμεσα από τις παραμέτρους λείανσης και κυρίως την ταχύτητα του λειαντικού τροχού και το βάθος κοπής . Έτσι καθίσταται δυνατό να καθορίσουμε τις παραμέτρους της λείανσης ανάλογα με το τελικό αποτέλεσμα ποιότητας επιφάνεια οπου θέλουμε να επιτύχουμε . Στη συνέχεια λόγω της μεγάλης φθοράς που προκαλούν οι υψηλές ταχύτητες στα κοπτικά εργαλεία κρίθηκε αναγκαίο να γίνει μια αναφορά στη διάρκεια ζώνης των κοπτικών εργαλείων τα οποία υποβάλλονται σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής .Έγινε μια πρόταση ενός τρόπου ελέγχου της διάρκειας ζώνης των κοπτικών εργαλείων με τον οποίο θα γίνεται ευκολότερη η διαπίστωση του ποτέ ένα κοπτικό εργαλείο θα πλήρη τις συνθήκες αστοχίας του .

Τέλος έγινε μια προσπάθεια εύρεσης της βέλτιστης ταχύτητας κοπής μέσω προγράμματος προσομοίωσης . Η κατεργασία για την οποία έγινε η προσομοίωση ήταν φρεζάρισμα μέσω κονδυλιού με σφαιρική απόληξη . Η τεχνική της

προσομοίωσης στην ουσία χρησιμοποιεί μια εικονική κατεργασία ώστε να καταλήξει στη βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής του άξονα κάτω από την οποία θα έχουμε τα καλύτερα επιθυμητά αποτελέσματα . Για να γίνει αυτό δυνατό πρέπει να καθοριστεί ένα κρίσιμο πεδίο ταχυτήτων περιστροφής του άξονα μέσα στο οποίο οφείλει να κινηθεί η όλη διαδικασία , ενώ τα τελικά αποτελέσματα της μεθόδου κρίνονται ικανοποιητικά αφού και υψηλή ακρίβεια κατεργασίας επιτυγχάνουμε και οι δυνάμεις κοπής καταφέρνουμε να κινηθούν σε χαμηλά επίπεδα .

Βιβλιογραφία

1. Α.Γ Μαμαλης Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών : Μη συμβατικές κατεργασίες Αθήνα 2000
2. Α.Γ Μαμαλης Κατεργασίες των υλικών ΕΜΠ 1991
3. A.G Mamalis , D.E Manolakos and G.L viegelahm “ Deformation characteristics of crashworthy components” Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften , Reihe 18 Nr 62 Dusseldorf 1989
4. Mamalis A.G , Petrossian G.L and Manolakos D.E “limit design of porous sintered metal powder machine elements “ J. Mat.Proc.Tech ,98,335 (2000)
5. Μαμαλης Α.Γ Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών : Δυναμικές καταπονήσεις Αθήνα 1998
6. Α.Γ Μαμαλης Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών : Μεταλλικά τεχνικά υλικά Αθήνα 1996
7. M.K Brown and M.Lee , F.Gorsler Wear characteristics of various hard materials for machining SiC-reinforced Aluminium alloy 1985
8. J.Y Shen , C.B Luo , W.M Zeng , X.P Xu , Y.S Gao Ceramics grinding under the constant pressure . Journal of materials processing Technology 129 (2002)
9. K.P Rajurkar, Z.Y Wang , A. Kuppattan Micro removal of ceramic material (Al_2O_3) in the precision ultrasonic machining . Precision engineering (1999)
10. Dal Koshal Manufacturin Engineer’s reference book Butterworth-Heinemann (1993)
11. M.C Shaw Precision finishing Arizona State University , Tempe , AZ , USA 1995

12. M. Rahman , H.S Lim, K.S Neo , A. Sentil Kumar, Y.S Wong, X.P. Li Tool based nanofinishing and micromachining Journal of Materials Processing Technology 185 (2007)
13. S.Nikumb,Q.Chen,C.Li,H,Resher,H.Y Zheng,H.Qiu,D.Low Precisioglass machining , drilling and profile cutting by short pulse lasers Thin Solid Films 477 (2005)
14. Masanori Kumeda , Chika Furudate High precision finish cutting by dry WEDM Tokyo University of Agriculture and Technology Tokyo , Japan
15. P.S Sreejith , B.K.A Ngoi Material removal mechanisms in precision machining of new materials International Journal of machine Tools and Manufacturing 41 (2001)
16. B.H Yan , F.Y Huang , H.M Chow , J.Y. Tsai Micro hole machining of carbide by electric discharge machining Journal of Materials Technology 87 (1999)
17. Hung Sung Liu , Biing Hwa Yan , Chien Liang Chen,Fuang Yuan Huang Application of micro-EDM combined with high frequency dither grinding to micro hole machining International Journal of Machine Tools and Manufacture 46 (2006)
18. D.T Pham , S.S Dimov , S. Bigot , A.Ivanov , K. Popov Micro-EDM recent developments and research issues Journal of Materials Processing 149 (2004)
19. Li Shanngping , Liang Jie , Li Li , Cao shousheng , Shu Wenghi , Peng Huiqin Study of the ground workpiece surface topography in high speed precision grinding using a scanning tunneling microscopy Journal of Materials Processing Technology 139 (2003)

20. I.V Rao , G.K Lal Tool life at high cutting speeds Pergamon Press 1977
21. Kyung- Kyoon Kim , Myung – Chang Kang , Jeong-Suk Kim , Young- Ho Jung , Nam-Kyung Kim A study on the precision machinability of ball end milling by cutting speed optimization .