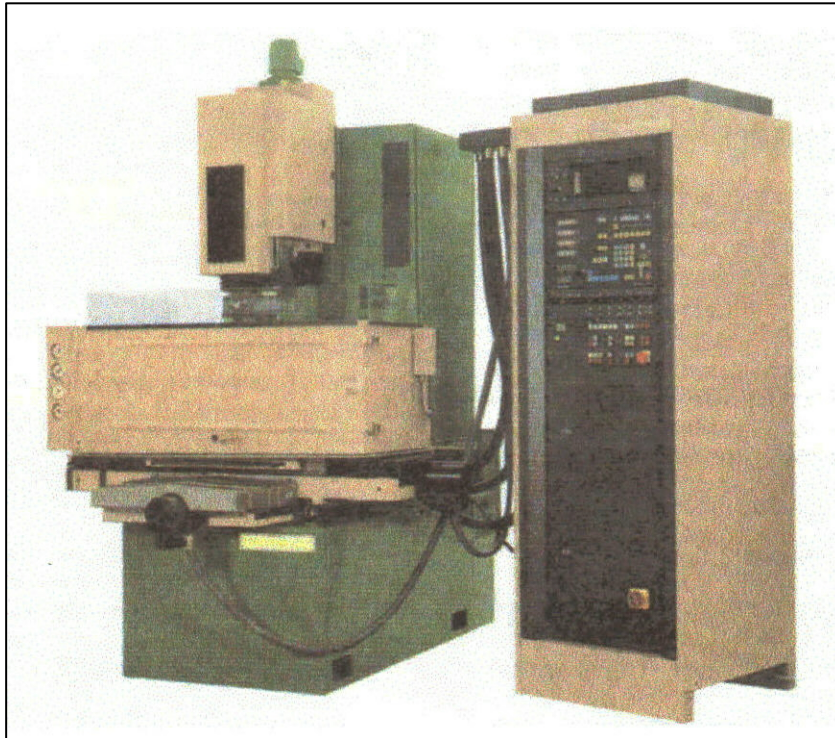


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ (Electrical Discharge Machine, EDM) ΚΑΙ
ΝΕΩΤΕΡΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ**



Emini Ndzinga Alain Desire

Επιβλέπων:
Καθηγητής Δ. Ι. Παντελής

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο συγγραφέας της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιθυμεί να εκφράσει τις ευχαριστίες του στον Κύριο Δημήτρη Παντελή, Καθηγητή της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση εκπόνησης της μελέτης αυτής.

Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται και προς τους συναδέλφους πτυχιούχους της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Γιώργο Διαμάντη και Ελισάβετ Τζαμαλή για την βοήθεια που του προσέφεραν για την μετάφραση τεχνικών όρων.

Τέλος θα ήθελε να ευχαριστήσει την οικογένειά του, και ιδιαίτερα τη μητέρα του Justine Emini και τη φίλη του Mabola Onyori Mokube για την ηθική συμπαράσταση που του προσέφεραν, καθώς και όσους τον στήριξαν στην προσπάθεια μελέτης, εκπόνησης και συγγραφής της διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα:

Περιεχόμενα.....	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ I	7
1.1. Χαρακτηρισμός της διαδικασίας.....	7
1.2. Φυσικές αρχές της EDM.....	7
1.3. Είδη μηχανών EDM.....	7
1.4. Ηλεκτρικές και μηχανικές συνδέσεις μιας EDM.....	11
1.5. Μέρη μιας EDM.....	12
1.6. Υλικό ηλεκτροδίου.....	22
1.6.1. Ηλεκτρολυτικός χαλκός.....	22
1.6.2. Γραφίτης.....	22
1.6.3. Κατεργασία σε χάλυβα.....	23
1.7. Επιλογή διηλεκτρικού.....	23
1.8. Flushing.....	24
1.8.1 Flushing με σάρωση.....	25
1.8.2 Flushing με έγχυση.....	25
1.8.3 Flushing με απόθεση	26
1.8.4 Flushing με πλάγια σάρωση.....	26
1.8.5 Flushing με έγχυση σφυγμού.....	27
1.8.6 Συνδυασμένες μέθοδοι flushing	27
1.8.7 Πίεση flushing	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ II : ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ.....	29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ : ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΜΕ EDM ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	36
3.1. Γενικά.....	36
3.2. Επίδραση της EDM στην επιφάνεια του μετάλλου.....	39
3.3. Χαρακτηριστικά επιφάνειας μετά από την εφαρμογή της μεθόδου EDM.....	40
3.4. Παράμετροι κατεργασίας	41
3.5. Μορφολογία επιφάνειας μετά από τις πολλαπλές κοπές.....	43
3.6. Μέτρηση ανοδικής πολικότητας	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙV : ΨΗΦΙΑΚΗ ΟΔΗΓΗΣΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΕΛΕΓΚΤΗ CNC.....	46
4.1. Εισαγωγή.....	46
4.2. Ανάπτυξη μηχανής.....	47
4.2.1. Μηχανή CNC τραπέζης (tabletop).....	48
4.2.2. Μηχανισμός μικροκοπής σύρματος	49
4.2.2.1. Έλεγχος τάσης στο ορειχάλκινο μικροσύρμα.....	49
4.2.2.2. Έλεγχος της ταχύτητας του σύρματος	50
4.2.3. Κύκλωμα παραγωγής παλμών και έλεγχος σεβρό-τροφοδοσίας	51
4.3. Καθορισμός του σωστού πυκνωτή του κυκλώματος εκκένωσης.....	52
4.4. Πιστοποίηση της ικανότητας κατεργασίας	54
4.4.1. Παραδείγματα κάθετης κοπής σύρματος	55
4.4.2. Παραδείγματα οριζόντιας κοπής σύρματος	56
4.4.3. Παραδείγματα οριζόντιας και κάθετης κοπής σύρματος.....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ V : ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ EDM.....	59
5.1. Εισαγωγή.....	59
5.2. Μέθοδος HSC στη βιομηχανία κατασκευής εργαλείων.....	59
5.3. Κατεργασία φινιρίσματος εργαλείων χάλυβα ύστερα από θερμική επεξεργασία.....	61
5.4. Θεωρητικό υπόβαθρο.....	62
5.5. Γρήγορη δημιουργία εργαλείων	66
5.5.1 Η CAM αντίληψη από κατασκευαστικής άποψης	66

5.5.2. Επιλογή της κατάλληλης διαδικασίας στην κατασκευή εργαλείων.....	66
5.5.3 Ιδιότητες των μεθόδων HSC και EDM.....	67
5.6. Συστήματα CAD-CAM	69
5.7 Συμπεράσματα.....	69
6. Γενικά Συμπεράσματα.....	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	74

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ηλεκτροδιάβρωση (Η/Δ) αποτελεί μια αντιπροσωπευτική μη συμβατική μέθοδο κατεργασίας θερμικού χαρακτήρα. Η ιδιαίτερη σημασία της έγκειται στη δυνατότητα κατεργασίας ασυνήθιστα σκληρών αγώγιμων υλικών και εξαιρετικά πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών. Η θεωρητική της βάση απαιτεί περαιτέρω ανάπτυξη, ενώ οι τεχνολογικές της παράμετροι, όπως ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού και η ομοιομορφία επιφάνειας, δεν έχουν διερευνηθεί σε βάθος.

Στην παρούσα εργασία γίνεται κατ' αρχήν μια αναφορά στη δυνατότητα αφαίρεσης υλικού μεταλλικών αντικειμένων χρησιμοποιώντας τον ηλεκτρισμό. Το υπό κατεργασία αντικείμενο τοποθετείται σε λουτρό ελαίου και η αφαίρεση υλικού επιτυγχάνεται με τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου ανάμεσα στο αντικείμενο και στο ηλεκτρόδιο χαλκού (ή γραφίτη, ή άλλου υλικού), το οποίο βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την κατεργαζόμενη επιφάνεια. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αφαίρεση μετάλλου από την επιφάνεια του υλικού.

Η διαδικασία αν και είναι μικρής ταχύτητας, επιτρέπει την κοπή μεταλλικών αντικειμένων με ακρίβεια, ή αντικειμένων που είναι αδύνατον να κατεργασθούν με άλλους τρόπους λόγω της σκληρότητάς τους, ή άλλων μηχανικών ιδιοτήτων τους, ή ακόμη και λόγω του μικρού μεγέθους τους. Η μέθοδος επιτρέπει, επίσης, τη δημιουργία ασυνήθιστων σχημάτων και εγχοπών, όπως για παράδειγμα την κατασκευή ρωγμών σε δοκίμια κόπωσης.

Επίσης παρουσιάζεται η δυνατότητα επιφανειακής σκλήρυνσης/κραμάτωσης εργαλειοχαλύβων με τη χρήση κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης. Με αυτήν την τεχνική λαμβάνει χώρα μεταφορά υλικού από το ηλεκτρόδιο εργασίας (στυλίσκος από πυροσυσσωμάτωση Fe-WC) στο χαλύβδινο υπόστρωμα, οδηγώντας στο σχηματισμό ενός επιφανειακού κραματωμένου στρώματος, το οποίο συνίσταται από αντιτριβικά συστατικά (όπως αδιάλυτα καρβίδια), με μεγάλες δυνατότητες βιομηχανικής εφαρμογής.

Ακόμη, με την ψηφιακή οδήγηση του ηλεκτροδίου εργασίας από μηχανή CNC είναι δυνατή η δημιουργία γεωμετρικών μοτίβων (patterns) στην επιφάνεια του εργοτεμαχίου, π.χ. κρατήρων μικρών διαστάσεων, εγχοπών κλπ, που είναι απαραίτητες σε ειδικές εφαρμογές, όπως στον έλεγχο της ροής λιπαντικού, στην αποτύπωση του γεωμετρικού μοτίβου σε άλλο υλικό κ.α.. Τυπική εφαρμογή της ψηφιακής οδήγησης είναι η κατασκευή καλουπιών υψηλής ακρίβειας για χρήση στη βιομηχανία πλαστικών, χύτευση μετάλλων, διαμόρφωση ελάσματος κλπ. Η ψηφιακή οδήγηση του ηλεκτροδίου εργασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πλανητική ηλεκτροδιάβρωση, όπου με μικρό ηλεκτρόδιο είναι δυνατή η κατεργασία μεγάλης επιφάνειας υπό τύπο φρεζαρίσματος.

Τέλος, με κατάλληλο σχεδιασμό του ηλεκτροδίου είναι δυνατό να επιτευχθούν γεωμετρικές μορφές τεμαχίων πολύ μικρών διαστάσεων (micro-scale), με εφαρμογές στη βιοιατρική, στην ηλεκτρονική και γενικότερα στην κατασκευαστική βιομηχανία ακριβείας.

ABSTRACT

The Electrical Discharge Machining (EDM) constitutes a representative non-conventional process of thermal character. The particular importance of this method lies to the capability of processing extraordinarily hard material and exceptionally complicated forms. The theoretical base requires further research while the technological parameters of the process such as the of material abstraction rate and the surface integrity have not been extended.

In the present study, we refer to the possibility producing of cutting tools using thermoelectric source of energy. Both the workpiece and the and the tool made of copper (or graphite or another material) are submerged in a dielectric fluid and are separated with one gap. The result is the material removal is due to a controlled erosion through a series of electric sparks between the workpiece and the tool.

The process has been commonly applied for the machining and micro-machining of parts with intricate shapes and varying hardness requiring high profile accuracy and tight dimensional tolerances. However the main disadvantage of the process is the relatively low machining speed largely due to its thermal machining technique.

There is also a possibility surface hardening/ surface alloying of steels materials with the use of EDM method. With this technique, the material is deported from the electrode to the alloyed layer of the surface.

Moreover, with the use of the Computer Numerical Control method (CNC), the electrode tool can be controlled creating patterns on the surface of the worpiece such as carters, which are very important for certain applications like the control of the lubricating oil system. One typical application of CNC is the manufacturing of higher accuracy molding for plastic industries.

To conclude with the convenient design of the tool electrode, it is possible to obtain tool with micro-scale geometrical shape, which can be used in medical application, in electronic application, and generally in industries where accuracy is one of the required property.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μεγάλη εξέλιξη της τεχνολογίας στη σύγχρονη εποχή είχε ως συνέπεια, μεταξύ άλλων και την ανάπτυξη νέων μεθόδων κατεργασιών των μετάλλων, που διαφέρουν κυρίως ως προς τις αρχές και τους νόμους της Φυσικής που εκμεταλλεύονται, από τις γνωστές και καθιερωμένες μεθόδους κοπής και διαμορφώσεως. Οι νέες μέθοδοι αναπτύχθηκαν, άλλες περισσότερο και άλλες λιγότερο και άλλες ακόμα βρίσκονται σε στάδιο εξέλιξεως, για να αντιμετωπίσουν προβλήματα κατεργασίας νέων πολύ σκληρών υλικών, προβλήματα σύνθετων κομματιών από ειδικά υλικά με μεγάλες απαιτήσεις ακρίβειας και ποιότητας, προβλήματα, τέλος, υψηλού κόστους ή χρόνου κατεργασίας ή και πλήρους αδυναμίας εφαρμογής των γνωστών συμβατικών μεθόδων.

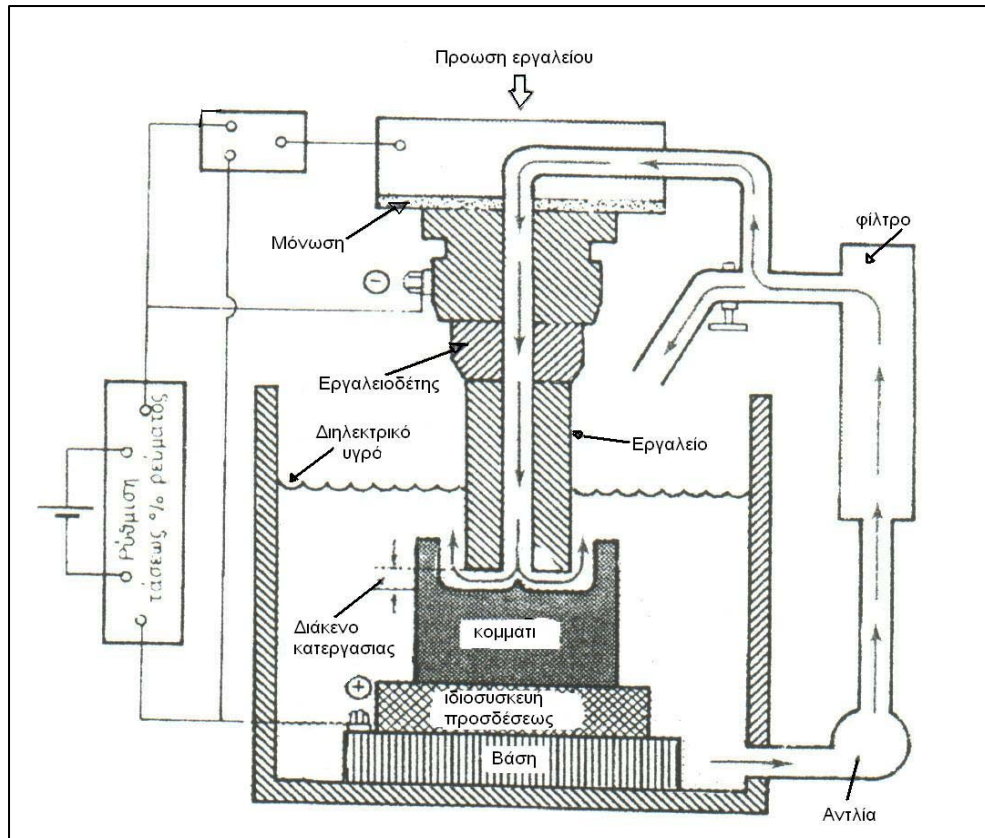
Υπάρχουν τουλάχιστον 26 νέες “μη συμβατικές”, όπως χαρακτηρίστηκαν, μέθοδοι κατεργασιών που διακρίνονται στις εξής τέσσερις κύριες ομάδες: Μηχανικές, Ηλεκτρικές, Θερμικές και Χημικές. Από αυτές μόνο 4 ή 5 κυρίως βρίσκουν μέχρι σήμερα εφαρμογή στη βιομηχανική πράξη: Η ηλεκτροδιάβρωση, η ηλεκτροχημική κατεργασία, οι κατεργασίες με plasma, με Laser, και με υπερήχους. Πρωτίστως όμως η ηλεκτροδιάβρωση εξακολουθεί να υπερέχει σαφώς απ’ όλες τις άλλες, τόσο σε πλήθος εφαρμογών όσο και σε αριθμό εγκατεστημένων ανά τον κόσμο σχετικών εργαλειομηχανών.

Η ηλεκτροδιάβρωση (electro-discharge machining/EDM) είναι μια αντιπροσωπευτική κατεργασία θερμικού / θερμοηλεκτρικού χαρακτήρα. Η ιδιαίτερη σημασία της έγκειται στη δυνατότητα κατεργασίας ασυνήθιστα σκληρών αγωγίμων υλικών και εξαιρετικά πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών. Η θεωρητική της βάση απαιτεί περαιτέρω ανάπτυξη, ενώ και οι τεχνολογικές της παράμετροι, όπως ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού και η ομοιομορφία της προκύπτουσας επιφάνειας, δεν έχουν διερευνηθεί σε βάθος. Παρ’ όλα αυτά αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μη συμβατική κατεργασία και εφαρμόζεται ευρύτατα λόγω των εξαιρετικών δυνατοτήτων που προσφέρει σε υλικά μικρής κατεργασιμότητας. Τυπική διάταξη της ηλεκτροδιάβρωσης δίνεται στο σχήμα Ε.1.

Η ηλεκτροδιάβρωση συνίσταται στην αποβολή ηλεκτρικά αγωγίμου υλικού από το κατεργάσιμο τεμάχιο μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων μεταξύ δυο ηλεκτροδίων (κατεργάσιμο τεμάχιο και εργαλείο) κάτω από ένα μέσο κατεργασίας (διηλεκτρικό υγρό) με σκοπό την πρόσδοση της επιθυμητής μορφής στο τεμάχιο.

Με τον όρο ηλεκτροδιάβρωση γίνεται αναφορά σε δυο διαφορετικές τεχνικές:

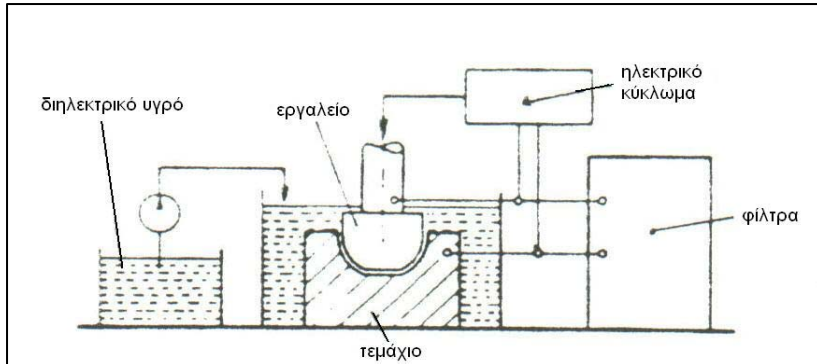
- Στην ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης (die sinking EDM) όπου με σταθερό εργαλείο γίνεται η πρόσδοση της μορφής του εργαλείου-ηλεκτροδίου στο “κατεργάσιμο τεμάχιο-ηλεκτρόδιο”
- Στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire EDM) όπου το σταθερό ηλεκτρόδιο έχει αντικατασταθεί με μεταλλικό αγωγίμο σύρμα.



Σχίμα Ε.1- Τυπική διάταξη της ηλεκτροδιαβρωσεως

Ε.1. Ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης

Η αρχή της μεθόδου φαίνεται διαγραμματικά στο σχήμα Ε.2 ενώ στο σχήμα Ε.3 φαίνεται μια τυπική μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης. Το τεμάχιο προσδέεται στο τραπέζι της εργαλειομηχανής και το εργαλείο κινείται με μια σταθερή πρόωση, ώστε μεταξύ του τεμαχίου και του εργαλείου να σχηματίζεται ένα ορισμένο “διάκενο”. Το εργαλείο και το τεμάχιο βρίσκονται μέσα σε ένα διηλεκτρικό υγρό. Μεταξύ των ηλεκτροδίων επιβάλλεται μια τάση μεγαλύτερη από την τάση διάσπασης του διακένου μεταξύ των ηλεκτροδίων, που εξαρτάται από το σχήμα και την απόσταση των ηλεκτροδίων, και τις μονωτικές ιδιότητες του διηλεκτρικού υγρού, με συνέπεια την πραγματοποίηση της εκκένωσης.



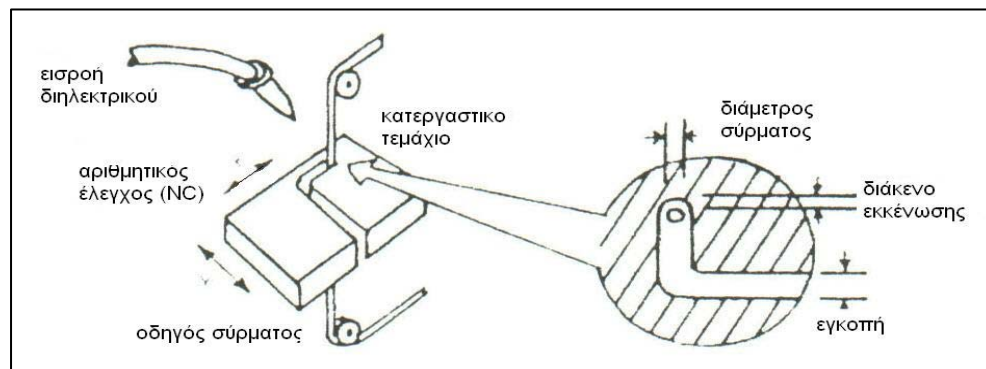
Σχήμα Ε.2-Μέθοδος ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης



Σχήμα Ε.3-Μηχανή ηλεκτροδιαβρωσης αποτύπωσης

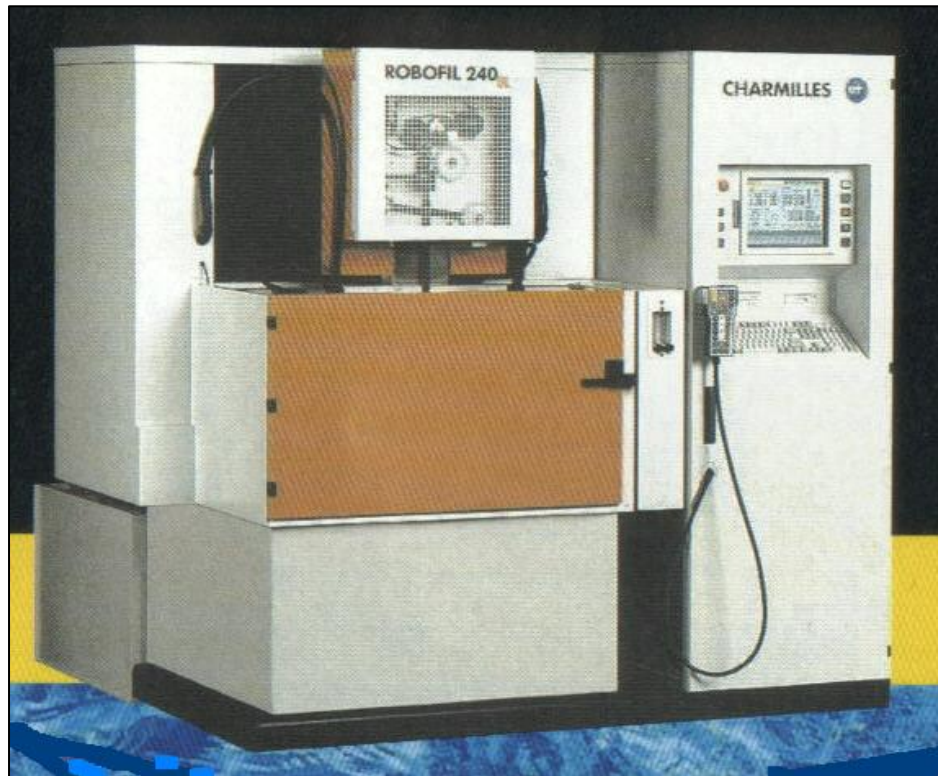
E.2. Ηλεκτροδιάβρωση σύρματος

Τα παραπάνω αναφερθέντα για την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης με σταθερό εργαλείο καθορισμένης γεωμετρικής μορφής, ισχύουν σε γενικές γραμμές και για την ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire EDM). Στην κατεργασία αυτή, που είναι τεχνική ελεγχόμενη από Η/Υ, η επιθυμητή γεωμετρία του κατεργάσιμου ταμαχίου δημιουργείται από ένα λεπτό αγώγιμο σύρμα, διαμέτρου 0,05-0,25 mm, που κινείται από ένα σύστημα NC ή CNC, βλ. Σχήμα E.4. Το υλικό του σύρματος είναι συνήθως χαλκός η ορείχαλκος, ενώ ως διηλεκτρικό υγρό, χρησιμοποιείται απιονισμένο νερό που ψεκάζεται στο διάκενο.



Σχήμα E.4-Μέθοδος Ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος

Ενώ στην ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης το κατεργάσιμο τεμάχιο συνδέεται συνήθως στην κάθοδο, στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος συνδέετε στην άνοδο και, επιπλέον, εφαρμόζονται παλμοί μικρότερης διάρκειας, tr , αλλά πολύ μεγαλύτερης έντασης. Στο σχήμα E.5 φαίνεται μια τυπική μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος.



Σχήμα Ε.5-Μηχανή Ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος

Η ηλεκτροδιάβρωση σύρματος χρησιμοποιήθηκε στις αρχές του 1970 ως εναλλακτική λύση στη μηχανική κοπή σωλήνων, κελυφών κ.λ.π. Σήμερα, με την πρόοδο της τεχνολογίας CNC και τη χρήση επικαλυμμένων συρμάτων (coated wires), η μέθοδος βρίσκει ευρύτερες εφαρμογές στην κατασκευή μητρών, εξαρτημάτων και γενικά τριδιάστατων γεωμετριών με μικροκοπή ακριβείας (precision micro machining) στην αεροναυπηγική και σε βιοτεχνολογικά εξαρτήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι

ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

1.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ (EDM)

Η διαδικασία EDM χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι η αποβολή του υλικού πραγματοποιείται μέσω μιας επιτυχούς μεταβλητής ηλεκτρικής εκκένωσης, ξεχωριστής για κάθε σημείο σε σχέση με το χρόνο, πράγμα που σημαίνει ότι το ένα κομμάτι από τα δυο ηλεκτρόδια μεταβάλλει τη μορφή του. Το φαινόμενο είναι μοναδικό και περιοδικό. Οι εκκενώσεις παράγονται από μια ηλεκτρική πηγή με τάση μεγαλύτερη των 20 Volts, και πραγματοποιούνται πάντα σε περιβάλλον το οποίο καλύπτεται από διηλεκτρικό υλικό. Η μηχανή ηλεκτρικών εκκενώσεων είναι γνωστή ως Electrical Discharge Machine (EDM) και σπανιότερα αναφέρεται ως Sparkerosion.

1.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ EDM

Κατά το φαινόμενο του ηλεκτρικού τόξου, για τη δημιουργία ενός σπινθήρα μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων χρειάζεται ένταση ρεύματος μεγαλύτερη από την ένταση που παρατηρείται στο διάκενο (gap) μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων (Σχήμα 1.1).

Η ένταση μεταξύ των ηλεκτροδίων εξαρτάται από :

1. Την απόσταση μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων
2. Τις προδιαγραφές και την ποιότητα του διηλεκτρικού
3. Το βαθμό καθαρότητας του χώρου μεταξύ των ηλεκτροδίων.

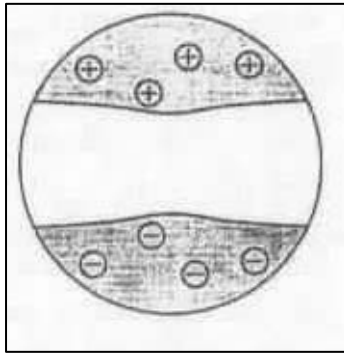
Στο σημείο όπου το ηλεκτρικό πεδίο είναι μεγαλύτερο, δημιουργείται μια εκκένωση η οποία είναι μια ενδιάμεση κατάσταση της όλης διαδικασίας (Σχήμα 1.2)

Υπό την επίδραση του πεδίου, ηλεκτρόνια και θετικά φορτισμένα ιόντα αποκολλούνται πολύ γρήγορα, σε υψηλές θερμοκρασίες, σχηματίζοντας ένα ιονίζον κανάλι όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3.

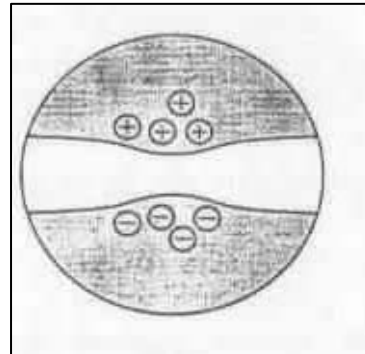
Στο σημείο αυτό ο σπινθήρας και η ροή των ιόντων λαμβάνει χώρα μεταξύ των ηλεκτροδίων προκαλώντας μεγάλο αριθμό συγκρούσεων μεταξύ των ετερόσημων ιόντων (Σχήμα 1.4)

Η διαδικασία αυτή προκαλεί δημιουργία πλάσματος, το οποίο φτάνει πολύ γρήγορα σε υψηλές θερμοκρασίες που οι τιμές τους βρίσκονται μεταξύ των 8000 °C έως 12000 °C και οι οποίες δύνανται, κάτω από τον συνεχώς αυξανόμενο αριθμό συγκρούσεων ιόντων, να προκαλέσουν στιγμιαία τοπική τήξη ενός τμήματος του υλικού στην επιφάνεια των δυο ηλεκτροδίων (Σχήμα 1.5)

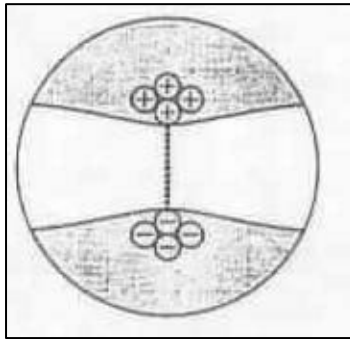
Όταν το ρεύμα κλείσει, η απότομη ελάττωση της θερμοκρασίας προκαλεί θραύση του πτερού του πλάσματος αυξάνοντας τις δυνάμεις οι οποίες προκαλούν μια προεξοχή του τηγμένου υλικού πέρα από τον κρατήρα, όπως φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα. Το διαβρωμένο αποκολλημένο υλικό στερεοποιείται ξανά με τη μορφή μικρών σφαιρών και μετακινείται μέσα στο διηλεκτρικό υγρό (Σχήμα 1.6)



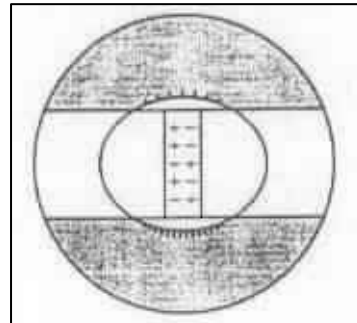
Σχήμα 1.1-Δημιουργία σπινθήρα



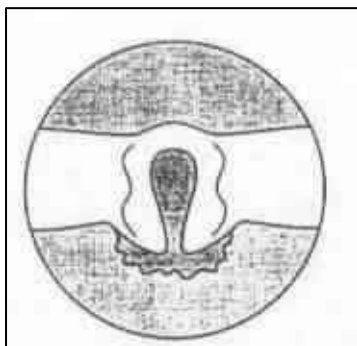
Σχήμα 1.2-Δημιουργία εκκένωσης



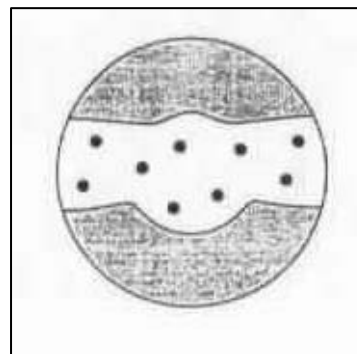
Σχήμα 1.3-Δημιουργία ιονίζοντος καναλιού



Σχήμα 1.4-Συγκρούσεις μεταξύ ετερόσημων ιόντων



Σχήμα 1.5-Στιγμαία τοπική τήξη ενός τμήματος του υλικού στην επιφάνεια των δύο ηλεκτροδίων



Σχήμα 1.6-Αποκολλημένο υλικό στερεοποιείται με τη μορφή μικρών σφαιρών και μετακινείται μέσα στο διηλεκτρικό υγρό

Η διάβρωση μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου υπό κατεργασία είναι ασύμμετρη και εξαρτάται από την πολικότητα, τη θερμική αγωγή, τα σημεία τήξης των υλικών και τη

διάρκεια και μορφή της εκκένωσης. Η διάβρωση καλείται φθορά όταν γίνεται πάνω στο ηλεκτρόδιο, ενώ όταν λαμβάνει χώρα στο τεμάχιο καλείται αποβολή υλικού.

1.3 ΕΙΔΗ ΜΗΧΑΝΩΝ EDM

(α) Κατασκευής καλουπιών

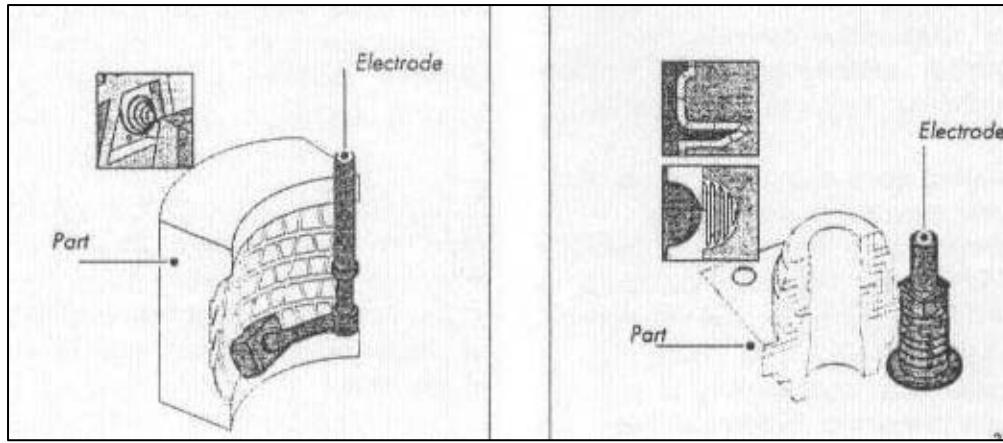
Χρησιμοποιείται για την κατασκευή καλουπιών ψεκασμού, για καλούπια με ειδικά σχήματα και κοιλότητας ή για πολύπλοκα σχήματα. Η κοιλότητα παράγεται με τη βοήθεια ενός ηλεκτροδίου το οποίο έχει το αντίθετο σχήμα (αρνητικό) από το επιθυμητό αποτέλεσμα, όπως ακριβώς φαίνεται στο Σχήμα 1.7 που ακολουθεί.

(β) Κοπής σύρματος

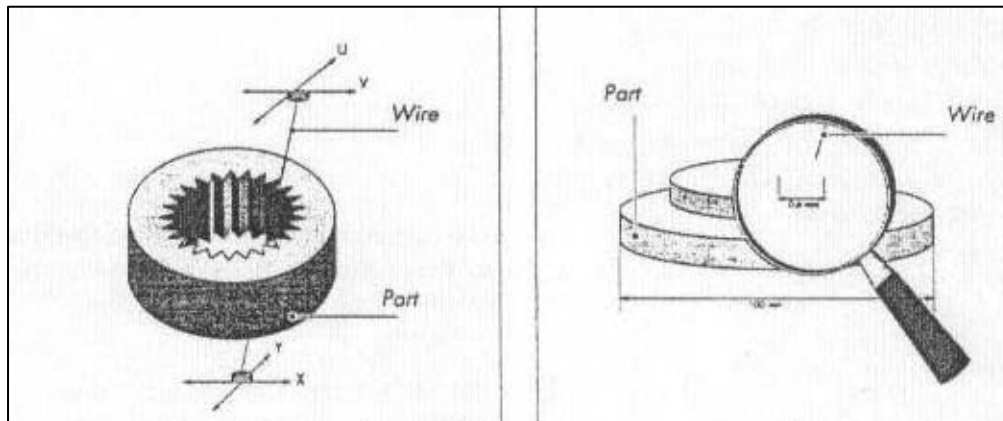
Χρησιμοποιείται για την παραγωγή ακμών και οπών, αφαίρεση τμημάτων με σχήμα κύβου και οτιδήποτε άλλο με πολύπλοκη κατανομή. Οι κατανομές αυτές παράγονται με τη βοήθεια ενός ηλεκτροδίου μικρής διαμέτρου όμοιο με καλώδιο, το οποίο όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 1.8 μπορεί να κινηθεί ταυτόχρονα προς τους άξονες x,y και u,v.

(γ) Φρεζαρίσματος

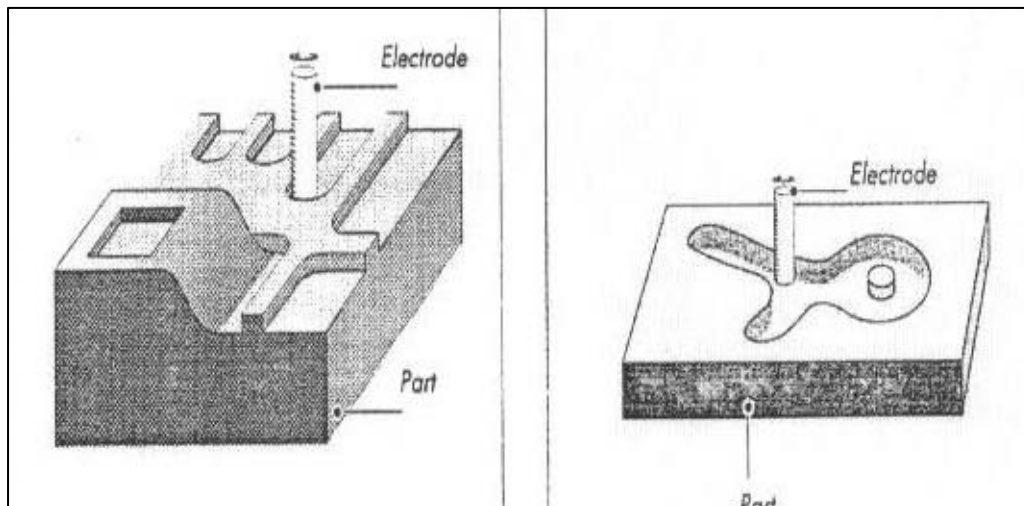
Χρησιμοποιείται για παραγωγή μικρών καλουπιών ηλεκτρικών συνδέσμων, ώστε να ταιριάζουν μεγάλες μη ομογενείς επιφάνειες με μη κανονικά σχήματα. Το ταίριασμα γίνεται απομακρύνοντας ακανόνιστα μικρές λωρίδες υλικού από το προς κατεργασία τεμάχιο με κυλινδρικά ηλεκτρόδια, όπως ακριβώς φαίνεται στο Σχήμα 1.9. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων καλουπιών με τη βοήθεια φτηνών ηλεκτροδίων.



Σχήμα 1.7-Μηχανές κατασκευής καλουπιών



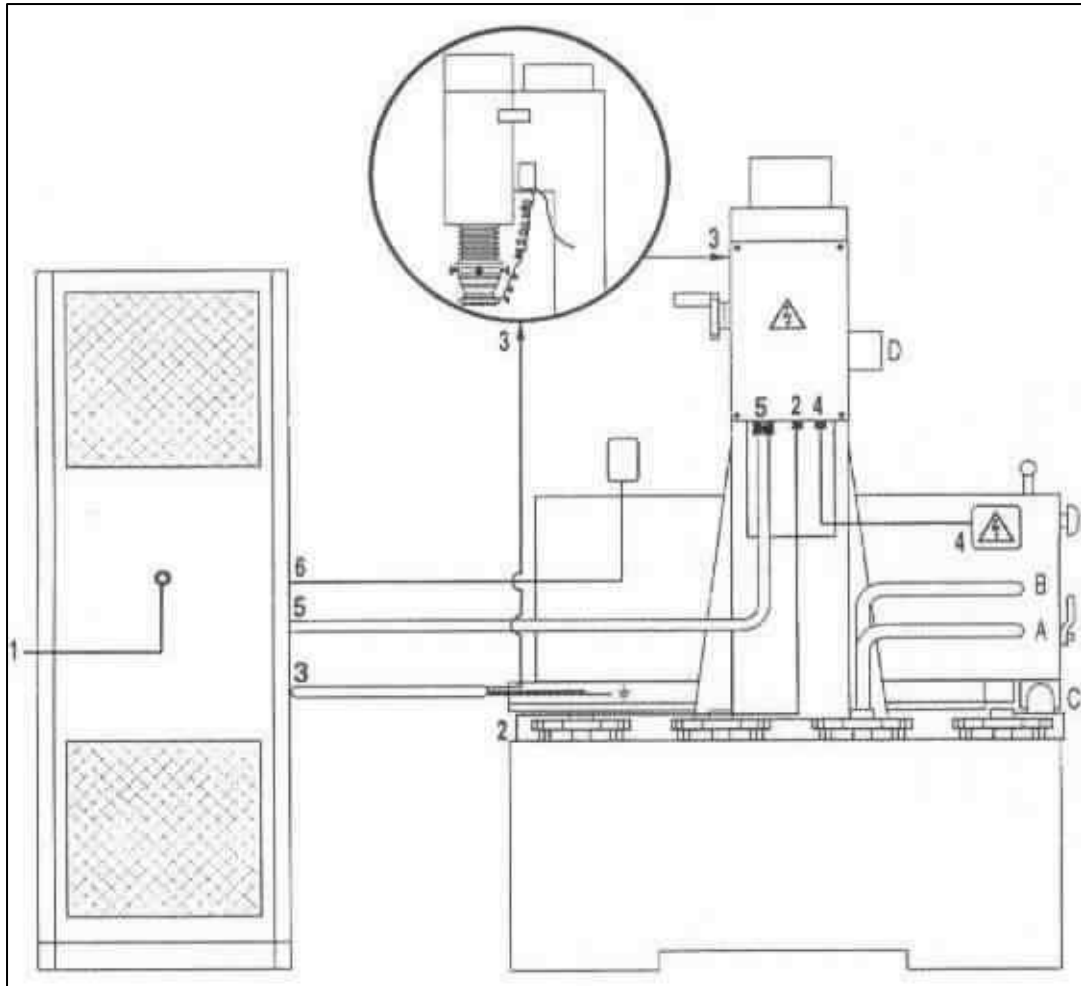
Σχήμα 1. 8-Μηχανές κοπής σύρματος



Σχήμα 1.9-Μηχανές φρεζαρίσματος

1.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΜΙΑΣ EDM [1.1]

Σαν παράδειγμα συνδέσεων που πραγματοποιούνται για τη λειτουργία μιας μηχανής EDM, στο Σχήμα 1.10 διακρίνονται οι συνδέσεις που έγιναν σε μηχανή τύπου FORM2-LC που βρίσκεται στο Εργαστήριο Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου του Ε.Μ.Π.



Σχήμα 1.10- Μηχανή EDM τύπου FORM2-LC

Οι ηλεκτρικές συνδέσεις είναι :

1. Σύνδεση με την κεντρική μονάδα. Οι τρεις φάσεις πρέπει να συνδεθούν σε σειρά.
2. Η μονάδα ισχύος συνδέεται με την αντλία. Οι τρεις φάσεις πρέπει να συνδεθούν στη σωστή σειρά. Εάν κατά την έναρξη της λειτουργίας το διηλεκτρικό υλικό δεν ανακυκλώνεται τότε πρέπει να αντιστραφούν οι δυο από τις τρεις φάσεις
3. Λειτουργικά καλώδια. Η γείωση M1 πρέπει να συνδεθεί με την τράπεζα της μηχανής. Το θετικό καλώδιο M2 πρέπει να βιδωθεί στο αντί κάτω από την κεφαλή της μηχανής. Από το σημείο αυτό ένα καλώδιο εξασφαλίζει την επαφή με το έλασμα που ανεβοκατεβαίνει (chuck).
4. Το καλώδιο τροφοδοσίας ισχύος για τον έλεγχο του διηλεκτρικού, της θερμοκρασίας και της έξαψης της μηχανής
5. Το καλώδιο τροφοδοσίας ισχύος για DC σερβοκινητήρα.
6. Σύνδεση με το τηλεχειριστήριο

Οι μηχανικές συνδέσεις είναι οι εξής:

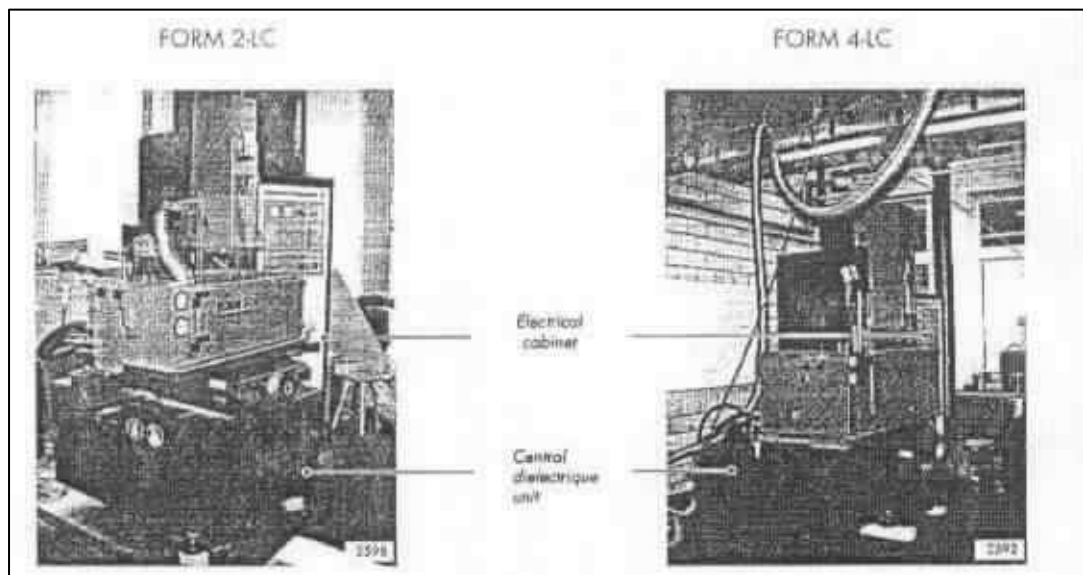
1. Γρήγορη, όχι φιλτραρισμένη ροή διηλεκτρικού προς την περιοχή κατεργασίας
2. Συνεχής εισαγωγή φιλτραρισμένου διηλεκτρικού για σταθεροποίηση σε ένα συγκεκριμένο σημείο.
3. Σύνδεση για αφαίρεση διηλεκτρικού προς τη δεξαμενή της μηχανής.
4. Σύνδεση για εξαγωγή του καπνού κατά την κατεργασία.

1.5 ΜΕΡΗ ΜΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ EDM.

Η κεντρική μονάδα αποτελείται από τρία επιμέρους τμήματα: τη μηχανή, τη μονάδα διηλεκτρικού και τον ηλεκτρικό θάλαμο.

- Η μηχανή είναι εξοπλισμένη με μια δεξαμενή θαλάμου σε μια απλή μονάδα με μια τράπεζα σχήματος σταυρού πάνω στην οποία τοποθετείται το προς κατεργασία τεμάχιο. Η δεξαμενή αυτή συνδέει το σύστημα με το τεμάχιο και περιέχει το διηλεκτρικό (η παρουσία του οποίου επιτρέπει τη διάβρωση με σπινθήρα).
- Η ανακύκλωση του διηλεκτρικού μέσα στο σύστημα γίνεται με τη βοήθεια αντλιών. Το διηλεκτρικό φιλτράρεται πριν σταλεί πίσω στη δεξαμενή συγκέντρωσής του.
- Ο ηλεκτρικός θάλαμος περιέχει όλο το κύκλωμα ώστε να ελέγχεται εύκολα και να είναι εφικτή η άμεση επέμβαση του χειριστή της μηχανής.

Οι τρεις αυτές μονάδες που ήδη περιγράψαμε παρουσιάζονται στο Σχ. 1.11 που ακολουθεί.



Σχήμα 1.11-Μέρη μιας μηχανής EDM

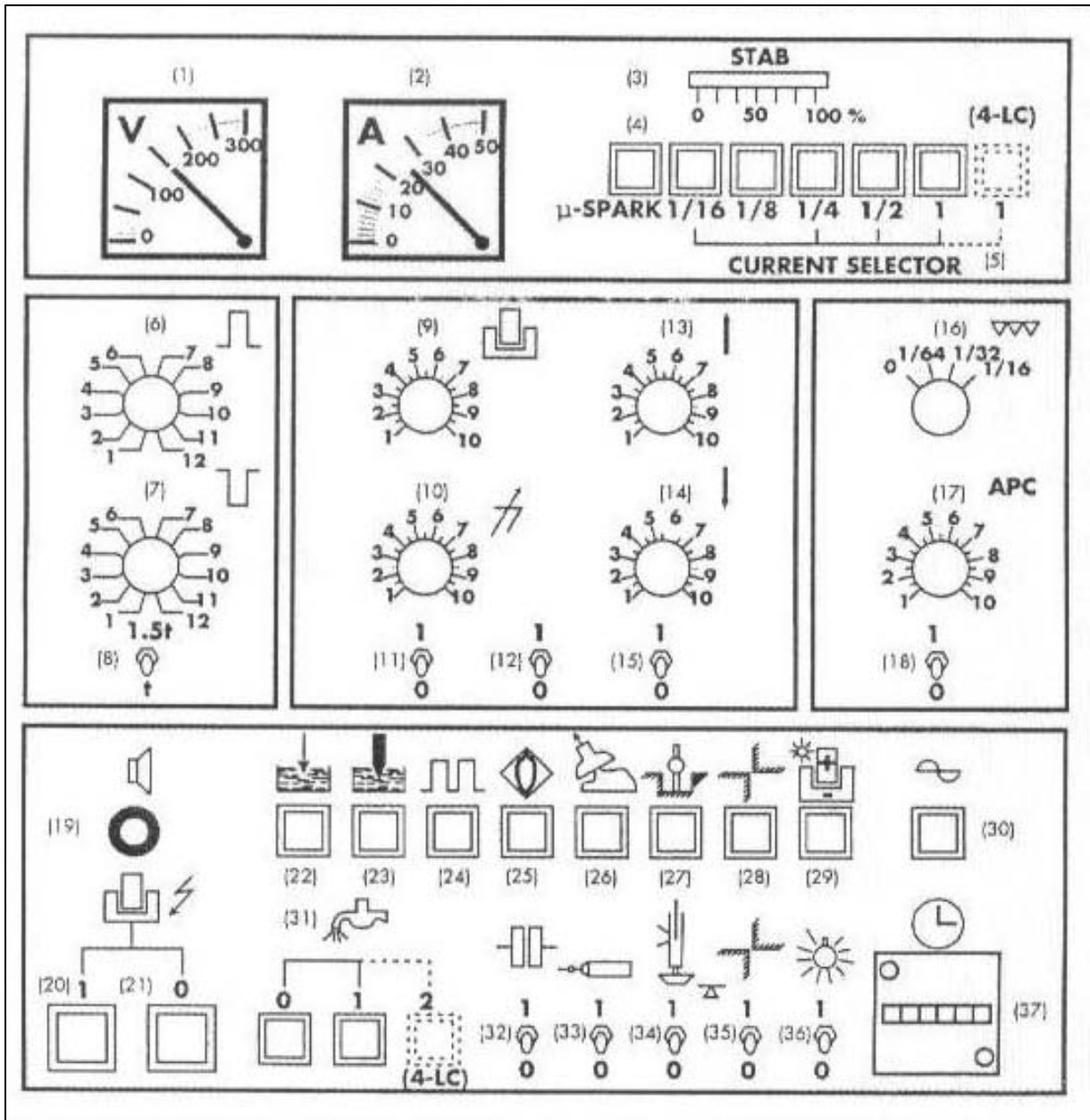
Ακολουθώντας τη σχεδιαστική φιλοσοφία του κατασκευαστή, η μηχανή είναι προγραμματισμένη να πληρεί διαφορετικές απαιτήσεις λειτουργικότητας, πιστότητας, αξιοπιστίας εφαρμογών, οι οποίες είναι ξεχωριστές η μια από την άλλη ώστε να είναι πλήρως αποτελεσματική κατά τη λειτουργία της με εγγυημένες κατεργασίες κοπής.

Για να γίνουν κατανοητά τα ανωτέρω, παρακάτω αναλύονται οι λειτουργίες της μονάδας έλεγχου μιας μηχανής EDM.

ΜΟΝΑΔΑ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTROL PANEL)

Η μονάδα αυτή επιτρέπει στο χειριστή να ανοίξει τη μηχανή και να επιλέξει τις διάφορες οδηγίες κάτω από τις οποίες θα λειτουργήσει η μηχανή – έναρξη της διαδικασίας, επιλογή μηχανικών παραμέτρων, έλεγχο του διηλεκτρικού, επιλογή της πολικότητας των ηλεκτρόδιων κ.λ.π.

Το control panel παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.12 όπως ακριβώς φαίνεται στη μηχανή ενώ στη συνέχεια περιγράφεται κάθε ένδειξη χωριστά επεξηγώντας τη λειτουργία της.



Σχήμα1. 12- Πίνακας ελέγχου (Control panel)

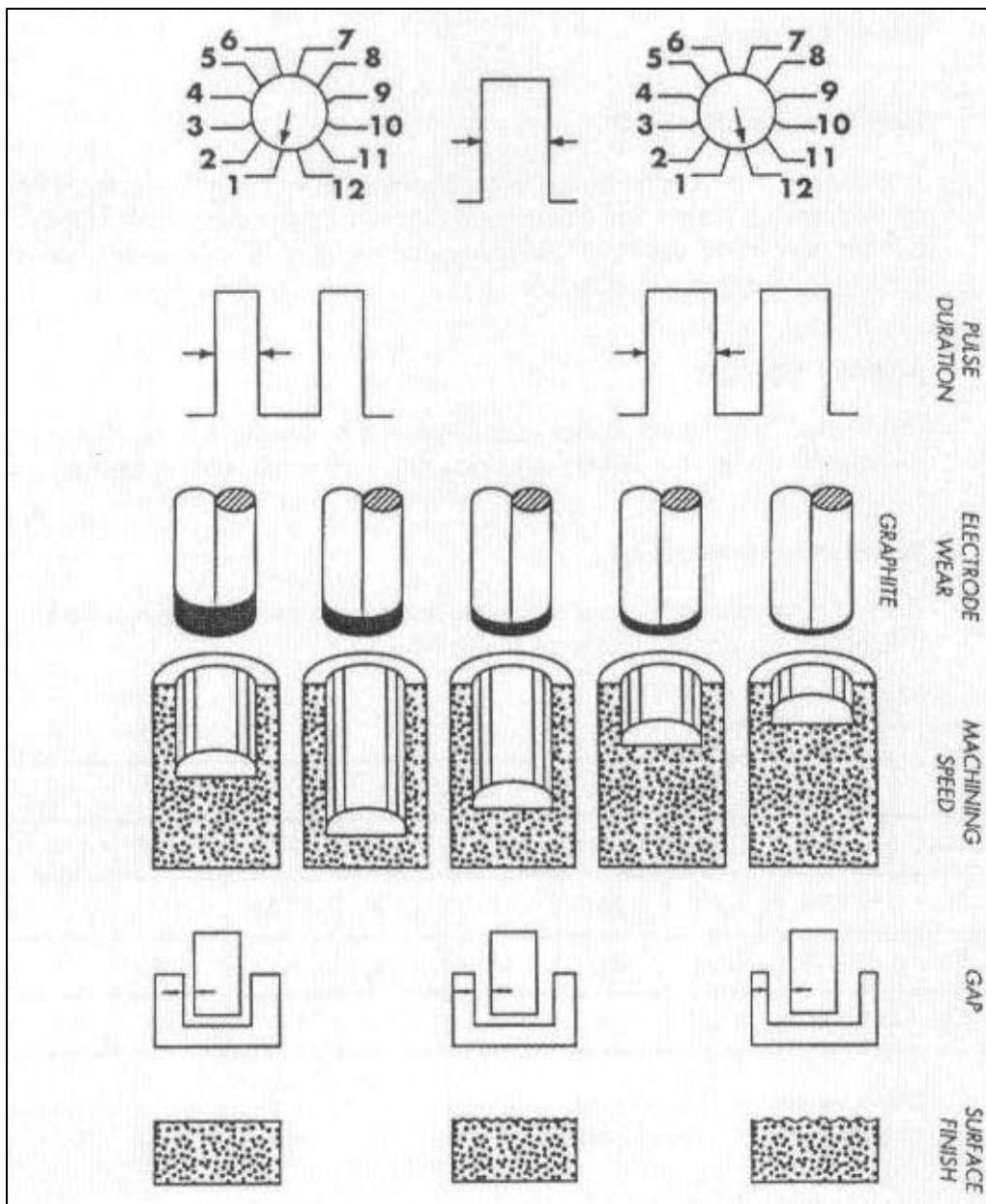
1. Βολτόμετρο: δηλώνει τη ένταση του ρεύματος του ηλεκτρόδιου και του κομματιού
2. Αμπερόμετρο: δηλώνει τη στιγμιαία τιμή της έντασης του ρεύματος σύμφωνα με εκείνη που έχει αρχικά επιλεγεί
3. Σταθεροποιητής STAB: Όταν το κίτρινο λαμπάκι ανάβει συχνά σημαίνει ότι η αποδοτικότητα της μηχανής πέφτει, γεγονός που οφείλεται σε διάφορες αιτίες όπως οι μη ικανοποιητικές συνθήκες κατεργασίας, η μηχανή δουλεύει δυνατά, ή υπάρχει πρόβλημα flushing.
4. Ένδειξη μ-spark ON/OFF: Χρησιμοποιείται για την επίτευξη του σχηματισμού καλής επιφάνειας κατά το τέλος της κατεργασίας. Όσο πιο αδύνατο είναι το ρεύμα τόσο καλύτερη είναι η επιφάνεια που αποκτάται παρά το γεγονός ότι η φθορά είναι μεγαλύτερη.
5. Επιλογή του επιπέδου ρεύματος: Όσο αυξάνεται το ρεύμα κατά τη διάρκεια ευσταθούς εκκένωσης, τόσο περισσότερο υλικό αποβάλλεται κατά την κατεργασία (Σχήμα 1.13).

MODEL	SELECTOR							
	μ-spark	1/16	1/8	1/4	1/2	1/2	1	1
36	0.75A	1.5A	3A	6A	12.5A	12.5A	-	-
50	0.75A	1.5A	3A	6A	12.5A	-	25A	-
75	0.75A	1.5A	3A	6A	12.5A	-	25A	25A

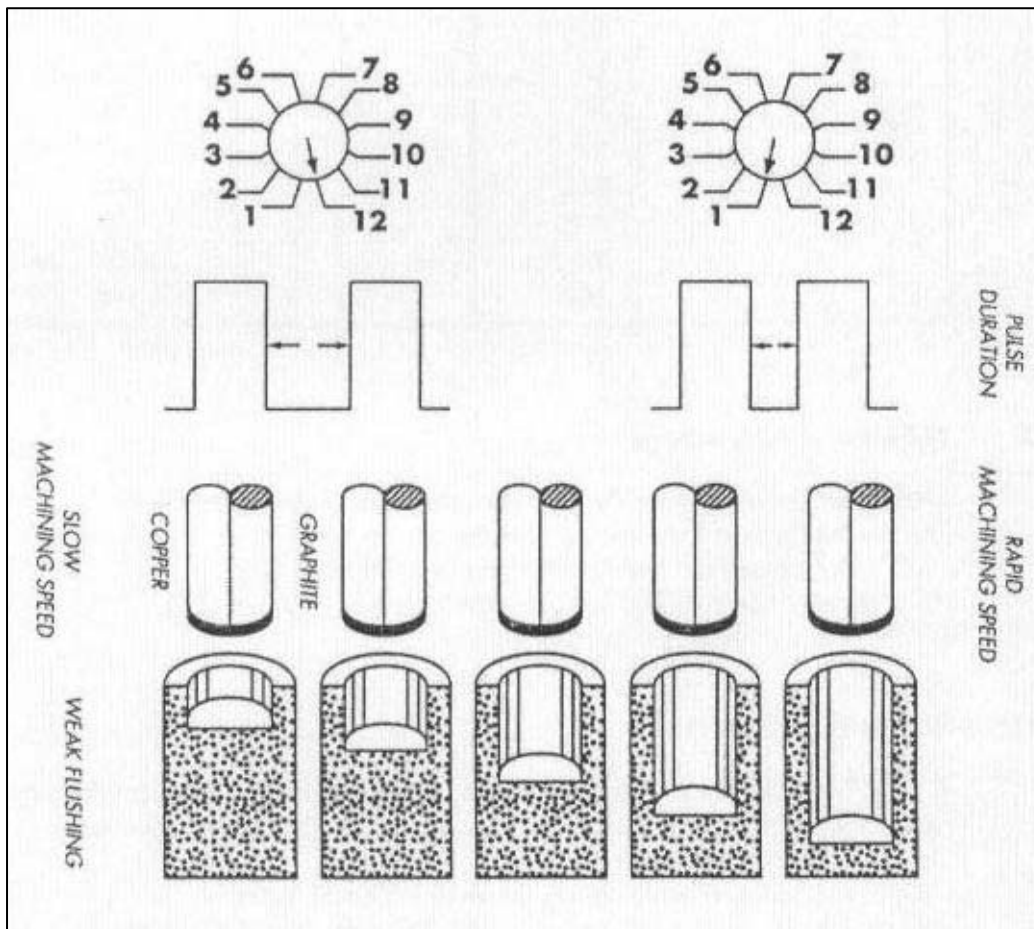
Current selector 1/4+1/2=18A
 ▽▽▽ 1/64+1/32=1A

Σχήμα1. 13- Επιλογή του επιπέδου ρεύματος

6. Διάρκεια εμφάνισης τόξου: Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για την επιλογή της διάρκειας που θα έχει ο παλμός της κατεργασίας. Με αύξηση του χρόνου και με σταθερή δύναμη κατεργασίας πρώτα έχουμε αύξηση στην αποβολή υλικού έως ένα συγκεκριμένο σημείο, ενώ στη συνέχεια η αποβολή μειώνεται. Πρέπει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι το διάκενο μεταξύ των ηλεκτρόδιων και η τραχύτητα αυξάνονται όταν μειώνεται η φθορά (Σχήμα 1.14).
7. Χρόνος επανάληψης διαδικασίας τόξου: Η εντολή αυτή χρησιμεύει στην επιλογή του χρόνου μεταξύ δύο ηλεκτρικών εκκενώσεων. Μια μείωση του χρόνου έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αποβολής υλικού χωρίς να επηρεάζεται η τελική επιφάνεια (Σχήμα 1.15). Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι είναι πιθανόν να χρησιμοποιείται πολύ μικρός χρόνος επανάληψης, καθώς έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι προκύπτουν καλύτερα αποτελέσματα όταν το επίπεδο του χρόνου αυτού βρίσκεται 3 ή 4 θέσεις χαμηλότερα του χρόνου εμφάνισης του τόξου που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.



Σχήμα 1.14- Με αύξηση του χρόνου και με σταθερή δύναμη κατεργασίας πρώτα έχουμε αύξηση στην αποβολή υλικού έως ένα συγκεκριμένο σημείο, ενώ στη συνέχεια η αποβολή μειώνεται.



Σχήμα 1.15- Μείωση του χρόνου έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αποβολής υλικού χωρίς να επηρεάζεται η τελική επιφάνεια.

8. Ένδειξη 1,5 για το T_a και το T_b ON/OFF: Όταν ο επιλογέας δείξει 1,5 τότε τα T_a και T_b αυξάνονται κατά μισή μονάδα (Σχήμα 1.16).

Division 1.0t	Time μS	Division 1.5t	Time μS
1	2	1.5	3
2	3.5	2.5	4.5
3	4	3.5	6
4	6	4.5	9
5	12	5.5	18
6	25	6.5	37.5
7	50	7.5	75
8	100	8.5	150
9	200	9.5	300
10	400	10.5	600
11	800	11.5	1200
12	1600	12.5	2400

Σχήμα 1.16- Αύξηση κατά μισή μονάδα των T_a, T_b όταν ο επιλογέας είναι στο 1,5.

9. Επιλογέας της τάσης του διακένου: Η ελάχιστη τάση του gap στη θέση '1' και η υψηλότερη στη θέση '16'. Η προσθαφαίρεση τάσης δεν επηρεάζει το πλάγιο gap. Σαν γενικό κανόνα δίνονται τιμές τάσης μεταξύ 50 και 100 V

10. Ευαισθησία SERVO: Χρησιμοποιείται για επιπρόσθετη αύξηση της ταχύτητας της ατράκτου, για το σχηματισμό ικανοποιητικής ακρίβειας κατά την ολοκλήρωση ενός κύκλου ή για το σχηματισμό μηχανικής σταθερότητας κατά την κατεργασία. Για να επιτευχθεί η καλύτερη τιμή servo παρατηρούνται συγκριτικά τα αποτελέσματα της κατεργασίας. Ο ήχος που παράγεται κατά την κατεργασία είναι μια καλή ένδειξη του τρόπου που γίνεται η κατεργασία, ελαττώνοντας το servo σε περίπτωση αρκετού θορύβου ή δόνησης της κεφαλής της μηχανής.

11. Ο διακόπτης είναι στη θέση '1' κατά την κατεργασία: Η ταχύτητα καθόδου κατά τον z-άξονα μειώνεται όταν το ηλεκτρόδιο βρίσκεται 0,15 mm από το υπό κατεργασία κομμάτι. Όταν ο άξονας ανεβαίνει, τότε η ταχύτητα επανέρχεται στις φυσιολογικές της τιμές ώστε να αποφευχθεί δόνηση της μηχανής και να διατηρηθεί η σταθερότητά της. Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για κατεργασία μεγάλων επιφανειών.

12. Ο διακόπτης είναι στη '1' και ισχύει το (15): Γρήγορο ανεβοκατέβασμα κατά το z-άξονα, προκαλεί αύξηση στις συνθήκες flushing, καθώς και καλύτερη εκκένωση των κομματιών κατά τη διάβρωση για βαθιές και στενές κοιλότητες.

13 και 14. Μηχανικοί παλμοί: Οι εντολές αυτές είναι όμοιες και χρησιμοποιούνται για την εναλλαγή των περιόδων κατεργασίας U (13) με περιόδους παλινωδίας του ηλεκτροδίου R (14). Αυτή η κίνηση πάνω κάτω του ηλεκτροδίου χρησιμοποιείται για ευκολία της κίνησης του διηλεκτρικού στην υπό κατεργασία περιοχή, καθώς καθαρίζεται το διηλεκτρικό κατά τη διάρκεια της παλινδρόμησης του ηλεκτροδίου ώστε η επόμενη επαναφορά του διαβρωμένου κομματιού να βρίσκει καθαρή περιοχή, έτοιμη για κατεργασία.

15. Σφυγμός έγχυσης: Καθώς ολοκληρώνεται μια στιγμιαία αποβολή υλικού, το ηλεκτρόδιο υψώνεται και ενεργοποιείται το flushing, οπότε κατά τη νέα κάθοδο του ηλεκτροδίου, το διηλεκτρικό είναι καθαρό.

16. Επιλογή υψηλής τάσης για καλό φινίρισμα: Χρησιμοποιείται για επιλογή υψηλής τάσης με μικρό ρεύμα κατεργασίας ακολουθώντας τρεις τιμές:

- $1/64=0,5$ A
- $1/32=1$ A
- $1/16=1,5$ A

Στη θέση 0 η τάση έχει τιμή 90 V ενώ για όλες τις άλλες τιμές είναι 250 Volts.

17. Ευαισθησία μικρών κύκλων APC: Χρησιμοποιείται για επιπρόσθετη ευαισθησία σε μικρούς κύκλους κατεργασίας. Στη θέση '1' η ευαισθησία είναι μικρότερη. Σε πολύ μικρούς κύκλους η κατεργασία διακόπτεται.

18. Διακόπτης για έλεγχο μικρών κύκλων: Συνήθως στη ένδειξη ON. Κατά την κατεργασία τίθεται στη θέση OFF και το ποτενσιόμετρο (17) έως ότου ο δείκτης ανάψει. Τότε μεταβάλλουμε την τιμή κατά τρεις μονάδες και ανάβουμε ξανά το διακόπτη.

19. Βομβητής γενικής προφύλαξης: Αναφέρεται στον έλεγχο για επαφή ηλεκτρόδιου-κομματιού, λάθος επιλογή επιπέδου, λάθος θερμοκρασία ή παραγωγή φλόγας.
20. Διακοπή κατεργασίας.
21. Έναρξη της κατεργασίας.
22. Δείκτης με φωτάκι για επίπεδο διηλεκτρικού: Ανάβει όταν παρουσιάζεται κάποια ατέλεια, η σειρήνα ηχεί και η κατεργασία σταματάει
23. Φωτεινός δείκτης για τη θερμοκρασία του διηλεκτρικού: Ανάβει όταν παρουσιάζεται κάποια ατέλεια, η σειρήνα ηχεί και η κατεργασία σταματάει προσωρινά.
24. Φωτεινός δείκτης μικρού κύκλου: Ανάβει εάν η διαδικασία διάβρωσης δεν έχει σωστή συμπεριφορά. Είναι χρήσιμο σε αυτό το σημείο να βελτιωθούν οι συνθήκες flushing.
25. Φωτεινός δείκτης σε περίπτωση φλόγας: Ανάβει όταν παρουσιάζεται ατέλεια, η σειρήνα ηχεί και η κατεργασία σταματάει.
26. Φωτεινός δείκτης σε περίπτωση καπνού: Ανάβει όταν παρουσιάζεται ατέλεια, η σειρήνα ηχεί και η διαδικασία σταματάει.
27. Φωτεινός δείκτης για τέλος κατεργασίας.
Ανάβει όταν ο βάθος κατεργασίας είναι ο επιθυμητός. Σταματάει η κατεργασία αμέσως
28. Φωτεινός δείκτης σε περίπτωση επαφής: Ανάβει όταν το ηλεκτρόδιο ακουμπήσει το κομμάτι, η σειρήνα ηχεί.
29. Διακόπτης αλλαγής πολικότητας: Ανάβει το φωτάκι όταν η πολικότητα του ηλεκτρόδιου είναι θετική. Ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει η πολικότητα την κατεργασία ποικίλει ανάλογα με το υλικό του ηλεκτρόδιου και του κομματιού.
30. Δείκτης Power-on.
31. Διακόπτης για την αντλία του διηλεκτρικού: Γρήγορη και όχι φιλτραρισμένη ροή του διηλεκτρικού στη δεξαμενή.
32. Μπλοκάρισμα της κεφαλής της μηχανής: Συνήθως στη τιμή OFF. Η επιλογή αυτή μπορεί να δονήσει την κεφαλή της μηχανής ώστε να γίνει μια καλή κατεργασία κατά μήκος του καλουπιού ή να μεγεθυνθεί η διαδικασία της κατεργασίας.
33. Παλμική ή εναλλασσόμενη ροή του διηλεκτρικού(flushing): Λειτουργεί με χρονική σταθερότητα, όταν η κεφαλή της μηχανής είναι πολύ ψηλά.

34. Διακόπτης αυτόματης ανόδου: Όταν ο διακόπτης είναι στη θέση '1' και η κατεργασία φτάσει σε επιθυμητό αποτέλεσμα, τότε η κεφαλή ανεβαίνει αυτόματα, η σειρήνα ηχεί για 12 δευτερόλεπτα και το ηλεκτρόδιο σταματάει στην αρχική του θέση.

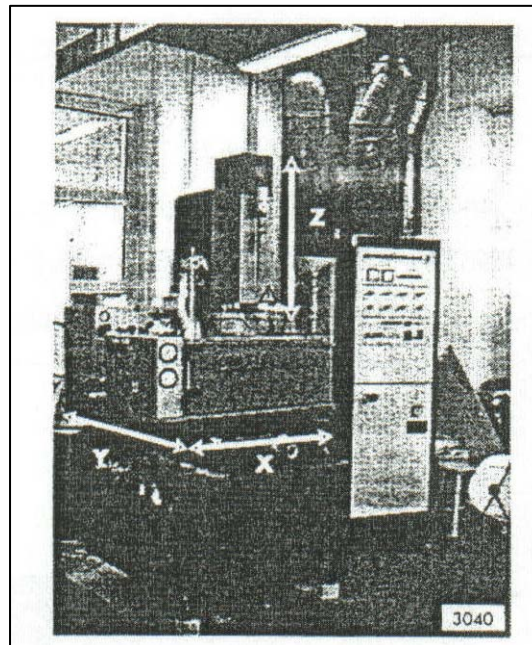
35. Διακόπτης ελέγχου επαφής: Ενεργοποιείται όταν γίνει κάποια αλλαγή στο αρχικά μεταφερόμενο σημείο.

36. Λαμπάκι κατεργασίας.

37. Μετρητής χρόνου κατεργασίας.

38. Επιλογή θέσης ηλεκτροδίου: Η επιλογή αυτή δίνει με βεβαιότητα την ακριβή θέση του ηλεκτροδίου σε σχέση με το κομμάτι. Η μηχανή έχει τρεις διαφορετικούς άξονες x , y , z (σχήμα 1.17).

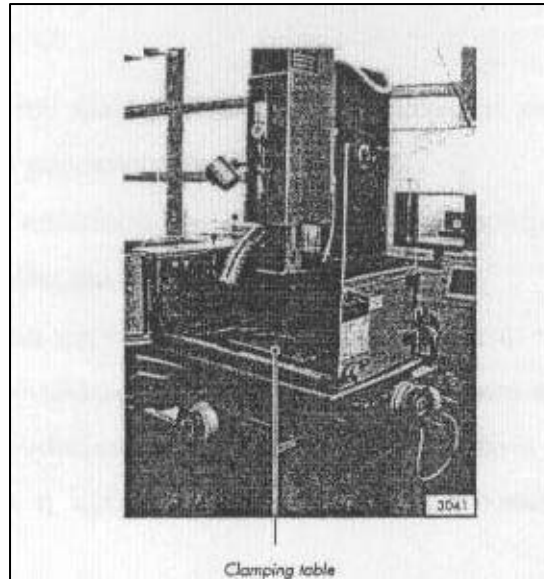
- Ο άξονας x επιτρέπει την οριζόντια-κατά μήκος κίνηση της τράπεζας (πάνω στην οποία είναι τοποθετημένο το τεμάχιο).
- Ο άξονας y επιτρέπει την εγκάρσια κίνηση της τράπεζας
- Ο άξονας z επιτρέπει την κάθετη κίνηση του ηλεκτροδίου



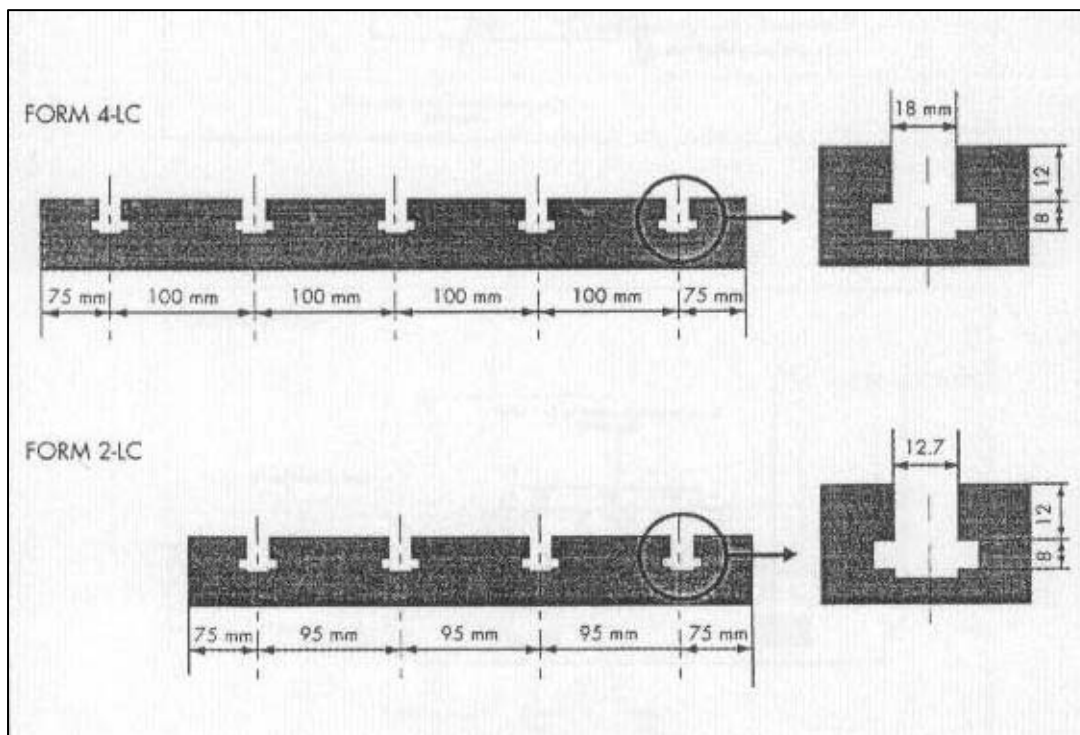
Σχήμα 1.17- Άξονες Κίνησης του ηλεκτροδίου

Η κίνηση του ηλεκτροδίου θεωρείται θετική όταν μετακινείται προς τα κάτω και αρνητική προς τα πάνω.

Στο Σχήμα 1.18 παρουσιάζεται το σημείο όπου δένεται το τεμάχιο στην τράπεζα. Η τράπεζα αυτή είναι φιξαρισμένη και περιλαμβάνει τέσσερις T εγκοπές στη μηχανή τύπου FORM 2-LC του εργαστηρίου και πέντε τύπου FORM 4-LC. Οι εγκοπές αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.19.

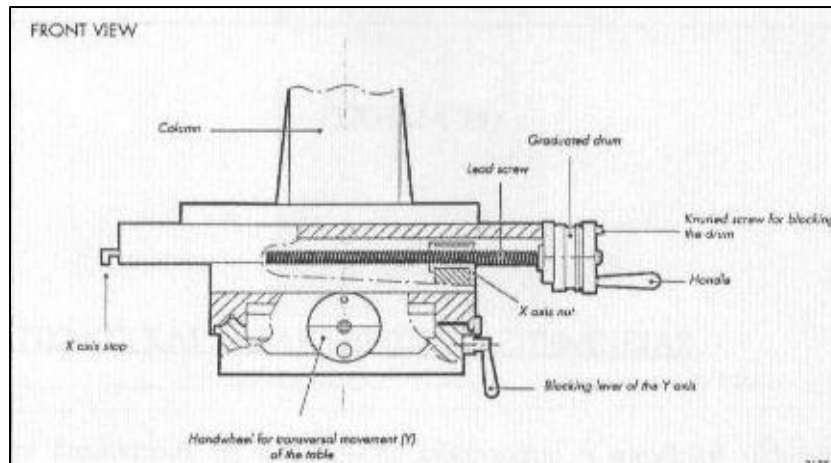


Σχήμα 1.18-Σημείο πρόσδεσης του τεμαχίου στην τράπεζα

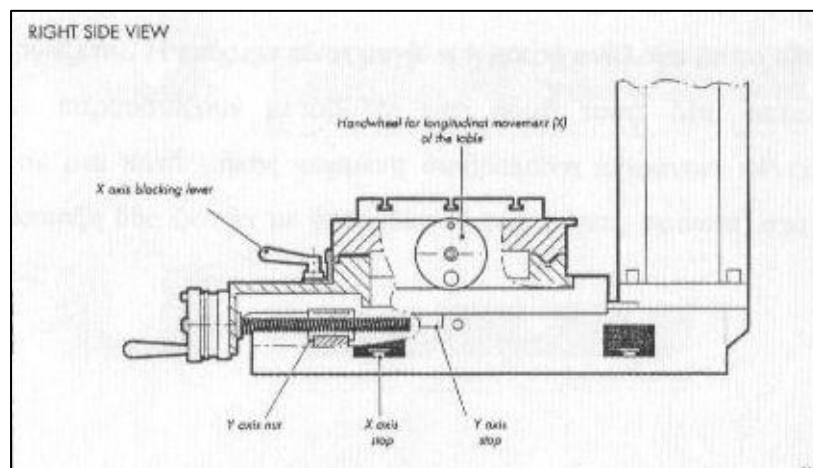


Σχήμα 1.19-Εγκοπές σε μηχανή τύπου FORM 2-LC και FORM 4-LC

- Η τοποθέτηση του ηλεκτροδίου κοντά στο κομμάτι και κατά τους άξονες x και y γίνεται με χειροκίνητη διαδικασία.
- Μετράται η απόσταση με τη βοήθεια μικρομέτρου και εν συνεχεία σφίγγονται τις βίδες για σταθεροποίηση της θέσης.
- Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κοπής, μπλοκάρεται η κίνηση κατά τους x-y άξονες. Η όλη διαδικασία φαίνεται στα σχήματα 1.20(α) και 1.20(β) που ακολουθούν. Στο Σχήμα 1.21 παρουσιάζεται η κεφαλή της μηχανής πάνω στην οποία δένεται το ηλεκτρόδιο και η κάθετη κίνηση της οποίας προκαλεί την αποβολή του υλικού.

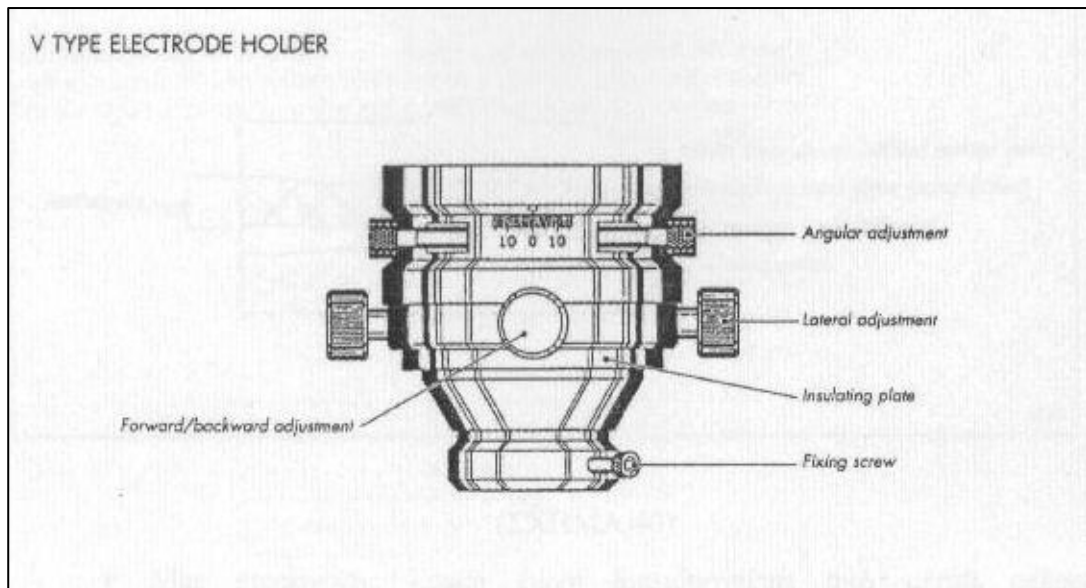


Σχήμα 1.20 (α)



Σχήμα 1.20 (β)

Σχήμα 1.20 - Μπλοκάρισμα κίνησης κατά τους άξονες x-y, κατά τη διαδικασία κοπής



Σχήμα 1.21 - Κεφαλή της μηχανής πάνω στην οποία δένεται το ηλεκτρόδιο

1.6 ΥΛΙΚΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ

Θεωρητικά όλα τα υλικά που είναι αγωγοί του ηλεκτρισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν υλικά ηλεκτροδίου και το καθένα από αυτά έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Τα καλύτερα υλικά έχουν πολύ υψηλά σημεία τήξης και πολύ χαμηλή θερμική αντίσταση. Στην πράξη χρησιμοποιούνται συχνότερα ο γραφίτης και ο ηλεκτρολυτικός χαλκός.

1.6.1 Ηλεκτρολυτικός χαλκός

- Ο ηλεκτρολυτικός χαλκός προσαρμόζεται πολύ καλά στην EDM και μπορεί να λειτουργήσει χωρίς σοβαρές δυσκολίες στις συνήθεις μηχανές.
- Τα ηλεκτρόδια μπορούν να κατασκευαστούν με πρέσα, με συρματοποίηση, με μηχανική κατεργασία ή επεξεργασία με επικάλυψη ή επιμετάλλωση.

1.6.2 Γραφίτης

- Καθώς το υλικό κατασκευάζεται με πυροσυσσωμάτωση, τα ηλεκτρικά, θερμικά και μηχανικά χαρακτηριστικά είναι άμεσα συνδεδεμένα με τη διαδικασία αυτή, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτούνται επιπρόσθετες προφυλάξεις για την ποιοτική κατεργασία του δοκιμίου (λαμβάνοντας υπόψη την αντοχή σε θραύση και τις κοφτερές γωνίες).
- Επίσης ο προσανατολισμός των κόκκων έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την πολύ καλή επιφανειακή ποιότητα στο κατεργασμένο κομμάτι.
- Η πυκνότητα του γραφίτη αποτελεί μια ένδειξη για την καλή λειτουργία του κατά την κατεργασία.

- Γραφίτης με χαμηλή πυκνότητα (1.6 έως 1.7g/cm³) επιτρέπει γενικά μεγαλύτερη αποβολή υλικού από πυκνότερους γραφίτες (1.8 έως 1.85g/cm³).
- Γραφίτες των οποίων η πυκνότητα είναι σχεδόν πέντε φορές μικρότερη από του χαλκού είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικοί για κατεργασία με ηλεκτρόδια μεγάλου σχήματος.
- Η επιλογή υλικού για το ηλεκτρόδιο πρέπει να γίνει έχοντας υπόψη το προς κατεργασία τεμάχιο, δηλαδή από το είδος υλικού από το οποίο αποτελείται.

1.6.3 Κατεργασία σε χάλυβα

- Εάν η τελική επιφάνεια μπορεί να είναι πολύ τραχεία (1.6μm Ra) τότε είναι δυνατό να χρησιμοποιήσουμε γραφίτη ή χαλκό, από την αρχή έως το τέλος της κατεργασίας.
- Εάν η απαιτείται καλύτερη τελική επιφάνεια τότε είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται χαλκός ή γραφίτης καλής ποιότητας.

1.7 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ [1.2]

Η επιλογή του διηλεκτρικού εξαρτάται από τον τύπο των εφαρμογών που συνήθως χρησιμοποιούνται στη μηχανή.

Τα διηλεκτρικά χαρακτηρίζονται κυρίως από το ιξώδες και το σημείο ανάφλεξης τους. Ένα λάδι με υψηλό δείκτη ιξώδους δεν είναι καλό για φινίρισμα καθώς το διάκενο είναι πολύ μικρό για να επιτρέψει την κυκλοφορία του διηλεκτρικού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το κομμάτι.

Γενικά, η αποδοτικότητα της κατεργασίας είναι καλύτερη για λάδι με μέσο δείκτη ιξώδους. Επιπλέον, ένα διηλεκτρικό του οποίου το σημείο ανάφλεξης είναι πολύ χαμηλό αναφλέγεται ευκολότερα και τείνει να απελευθερώσει μεγάλη ποσότητα αερίων που προκαλεί καθυστέρηση στη διαδικασία της κατεργασίας.

Οι βασικές απαιτήσεις για ιδανικό διηλεκτρικό υγρό είναι:

- Χαμηλή τιμή ιξώδους, η οποία εξασφαλίζει μικρή επιφανειακή τάση
- Χημική ουδετερότητα
- Υψηλό σημείο ανάφλεξης
- Απουσία δημιουργίας τοξικών ατμών
- Μεγάλη διηλεκτρική σταθερά
- Δυνατότητα γρήγορου αποιονισμού (αυξάνει την εκκένωση)
- Καλές θερμικές ιδιότητες
- Χαμηλό κόστος αγοράς

Το Σχήμα 1.22 δίνει τους τύπους των διηλεκτρικών υγρών που δύνανται να χρησιμοποιηθούν σε μια μηχανή EDM, καθώς και διάφορα στοιχεία όσον αφορά στο ιξώδες και το σημείο ανάφλεξης αυτών.

Description	Viscosity at 20°C cSt (mm ² /s)	Flash point (°C)		Tested by Charmilles
		PM	COC	
AVIA I.M.E 82	3.2	82		
AVIA I.M.E 110	3.4	106		x
AVIA O.H.E	5.5	126		x
BP 180	1.75	70		
BP 200 T	3.5		112	x
BP 250	6		125	x
C.M.T DASCO COOL 7.04	7		129	x
ESSO MENTOR 28	7.4		120	x
ELF FluxELF 1	2.5		90	
ELF FluxELF II	6.5		134	x
SHELL Fluid S 9608	7.9		135	x
SHELLFLUID 2	1.90		59	
SHELLFLUID 4	3.80		110	x
SHELLFLUID 6	6.0		118	
SAFCO EROLEC 84	3.7		92	x
MILL-SOREPI H	6.2		132	x
WINTER SHALL MIHAGAN 26/29	4.6		115	x
TOTAL EDM 1	1.8		65	x
TOTAL EDM 2	3.38		121	x
MOTOREX FRISCO 70	6.4		140	x
CASTROL SE-FLUID 180	3.2		160	x
UNIBREX: ERODOL 88	6.1		110	x
WYNN'S ELECTRAFLUID F	3.5	>103		
WYNN'S ELECTRAFLUID P	6	>132		
IGOL ELECTRO 102	4.9	>102		x

Σχήμα 1.22-Τύποι διηλεκτρικών υγρών

1.8 FLUSHING

Το flushing είναι η κυκλοφορία του διηλεκτρικού υγρού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το προς κατεργασία τεμάχιο. Είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία η οποία προσαρμόζεται στο σχήμα του ηλεκτρόδιου, τον τύπο της κατεργασίας και το επιθυμητό τεμάχιο, συνδυάζοντας κατάλληλες ηλεκτρικές παραμέτρους με εγγυημένα αποτελέσματα.

Προς κατανόηση της σημαντικότητας της διαδικασίας αυτής θα αναφερθεί τι ακριβώς συμβαίνει στο διάκενο μεταξύ ηλεκτρόδιου και τεμαχίου χωρίς το flushing.

Κατά την έναρξη της κατεργασίας το διηλεκτρικό είναι καθαρό, δηλαδή δεν υπάρχουν στοιχεία από την αποβολή υλικού κατά την ηλεκτροδιάβρωση, οπότε το αποτέλεσμα με καθαρό διηλεκτρικό είναι καλύτερο από αυτό όταν το διηλεκτρικό θα περιέχει προσμίξεις. Ωστόσο η παρουσία κόκκων στο υγρό βοηθά την ανάφλεξη σπινθήρων με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η απόδοση της μηχανής. Όμως, εάν η πυκνότητα των κόκκων αυτών μεγαλώνει, σε ένα συγκεκριμένο σημείο ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το καλούπι παρουσιάζεται ανωμαλία όσον αφορά στη φύση του διηλεκτρικού και αναπτύσσονται εκκενώσεις οι οποίες προκαλούν ζημιά στο κομμάτι και στο ηλεκτρόδιο. Είναι λοιπόν απαραίτητο να εξαλειφθεί ο υπερβολικά μεγάλος αριθμός κόκκων μέσω απομάκρυνσής τους, με τη βοήθεια της κυκλοφορίας του διηλεκτρικού (μέθοδος flushing) η οποία, όπως γίνεται πλέον κατανοητό, είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος της διαδικασίας EDM

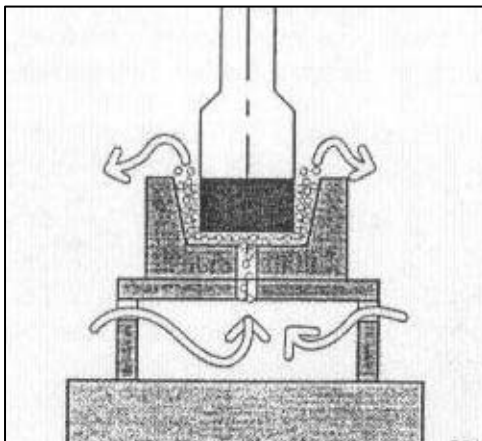
Το flushing δεν πρέπει να είναι πολύ δυνατό ούτε πολύ αδύνατο, δηλαδή πρέπει ο βαθμός απομάκρυνσης του διηλεκτρικού κατά την κατεργασία να είναι ο ιδανικός, δηλαδή εκείνος ο οποίος οδηγεί στη μέγιστη δυνατή λειτουργικότητα της μηχανής. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι flushing και είναι απαραίτητο να επιλεγεί η κατάλληλη για ένα συγκεκριμένο τύπο εργασίας. Οι μέθοδοι αυτές περιγράφονται λεπτομερώς παρακάτω.

1.8.1 Flushing με σάρωση

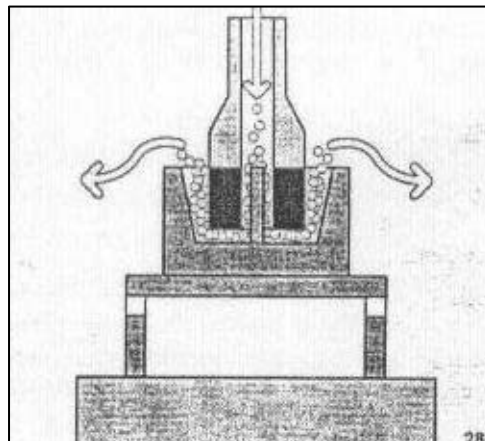
- Η μέθοδος αυτή πραγματοποιείται με κίνηση του ηλεκτρόδιου πάνω κάτω, που γίνεται με τη βοήθεια του παλμωτή.
- Κατά την παλινδρόμηση του ηλεκτρόδιου, η ταχύτητα στο διάκενο αυξάνεται, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα να έρχεται στην κοιλότητα καθαρό διηλεκτρικό το οποίο παίρνει τη θέση του ήδη χρησιμοποιημένου.
- Στη συνέχεια, καθώς το ηλεκτρόδιο κατεβαίνει, μερικοί κόκκοι είναι ήδη αποκολλημένοι, κάτι που βοηθάει στην πραγματοποίηση της επόμενης εκκένωσης.
- Με τη βοήθεια των παραμέτρων (R) και (U) του παλμωτή, είναι πιθανόν να βελτιστοποιηθεί την κατεργασία.
- Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τη διάνοιξη πολύ μεγάλων οπών χωρίς ανακύκλωση του διηλεκτρικού.

1.8.2 Flushing με έγχυση.

- Η μέθοδος γίνεται με έγχυση του διηλεκτρικού είτε από κάτω από το τεμάχιο ή από το ηλεκτρόδιο μέσω μιας οπής.
- Στην πρώτη περίπτωση, το δοκίμιο τρυπιέται και η έγχυση γίνεται μέσω αυτού με τη βοήθεια της ανακύκλωσης του διηλεκτρικού (Σχήμα 1.23).
- Στη δεύτερη περίπτωση το ηλεκτρόδιο τρυπιέται και η κυκλοφορία του διηλεκτρικού γίνεται μέσω αυτού με τη βοήθεια της ανακύκλωσης του (Σχήμα 1.24).
- Η διαδικασία αυτή απομακρύνει τους κόκκους διευκολύνοντας την επόμενη ηλεκτρική εκκένωση.
- Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν δεν απαιτούνται λεπτομέρειες στην κατεργασία μας, όπως για παράδειγμα στην κοπή κύβων.



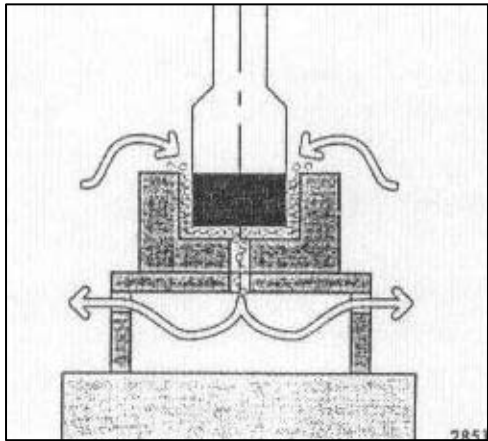
Σχήμα 1. 23- Η έγχυση του διηλεκτρικού γίνεται μέσω του τεμαχίου με τη βοήθεια της ανακύκλωσης του διηλεκτρικού.



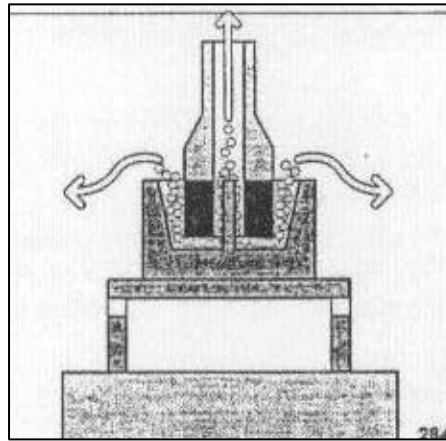
Σχήμα 1.24- Η κυκλοφορία του διηλεκτρικού γίνεται μέσω του δοκιμίου.

1.8.3 Flushing με απόθεση

- Στη μέθοδο αυτή η αποβολή διηλεκτρικού γίνεται, είτε κάτω από το τεμάχιο μέσω μιας οπής που έχει γίνει σε αυτό, είτε μέσω του ηλεκτροδίου. (Σχήματα 1.25 και 1.26).
- Πρέπει να τονιστεί ότι η μέθοδος είναι η ίδια με την flushing με έγχυση με την διαφορά ότι το διηλεκτρικό υγρό έχει αντίθετη κατεύθυνση.
- Οι κόκκοι δεν κινούνται κατά μήκος του ηλεκτροδίου, οπότε δε διευκολύνεται η περαιτέρω εκκένωση.
- Επίσης, κατά την κατεργασία μικρών εγκοπών, για παράδειγμα κατά το φινίρισμα, το ηλεκτρόδιο μπορεί να κολλήσει στην κοιλότητα με αποτέλεσμα να εμφανιστεί δυσλειτουργία κατά την κατεργασία.
- Για το λόγο αυτό η τιμή της απόθεσης δεν πρέπει να πέφτει κάτω του 0.5 έως 0.7 kg/cm² καθώς η πίεση ή η πτώση κάτω από αυτές τις τιμές μπορεί να προκαλέσει κίνηση του τεμαχίου ή παραμόρφωση του ηλεκτροδίου.



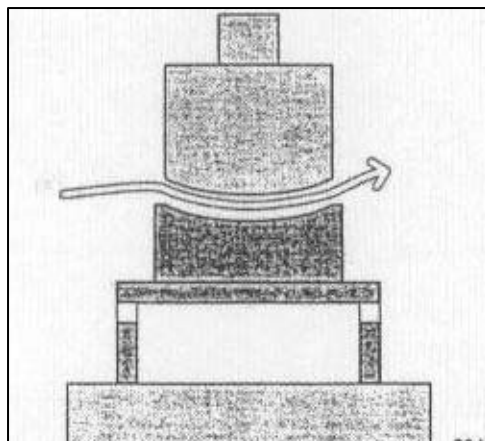
Σχήμα 1.25- Flushing με απόθεση: Αποβολή διηλεκτρικού μέσω οπής κάτω από το τεμάχιο



Σχήμα 1.26- Flushing με απόθεση: Αποβολή διηλεκτρικού μέσω ηλεκτροδίου

1.8.4. Flushing με πλάγια σάρωση

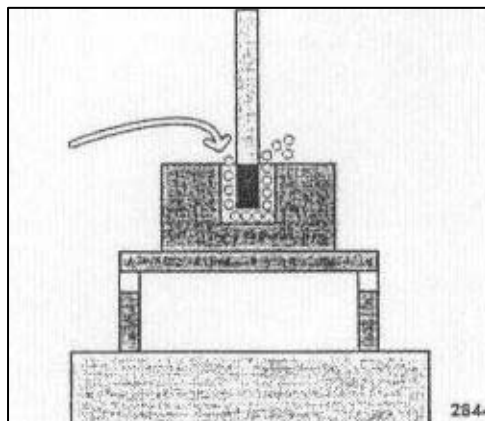
- Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν δεν επιθυμείται η διάνοιξη οπών στο ηλεκτρόδιο ή το τεμάχιο.
- Αυτές οι περιπτώσεις παρουσιάζονται κατά την κατεργασία κύβων για την παραγωγή μεταλλίων ή κατά την κατεργασία στενών εγκοπών οι οποίες εμφανίζονται συνήθως σε καλούπια χυτών πλαστικών.
- Για την πραγματοποίηση αυτής της μεθόδου απαιτείται η προσεκτική χρησιμοποίηση της έγχυσης διηλεκτρικού ώστε να πραγματοποιείται άριστη σάρωση στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου.
- Η τεχνική αυτή πραγματοποιείται με τον παλμοπήδη, ο οποίος επιτρέπει στο διηλεκτρικό να περάσει όταν το ηλεκτρόδιο παλινδρομεί (Σχήμα 1.27).



Σχήμα 1.27-Flushing με πλάγια σάρωση

1.8.5 Flushing με παλμική έγχυση

- Στην πράξη παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της κατεργασίας με μεταλλικά ηλεκτρόδια η επόμενη κατεργασία εμφανίζεται αφύσικη γύρω από την περιοχή έγχυσης η οποία αυξάνει με την πίεση της μεθόδου flushing.
- Για την εξάλειψη αυτού του φαινομένου χρησιμοποιείται η παλμική έγχυση. Η μέθοδος αυτή γίνεται με συγχρονισμό της έγχυσης του διηλεκτρικού κατά την κατεργασία του ηλεκτρόδιου, χρησιμοποιώντας τον παλμοωτή (Σχήμα 1.28).



Σχήμα 1.28-Flushing με παλμική έγχυση

1.8.6 Συνδυασμένες μέθοδοι Flushing

- Η μέθοδος η οποία συνδυάζει την απόθεση και την έγχυση, χρησιμοποιείται πολύ συχνά κυρίως για την κατεργασία καλουπιών η κύβων με πολύπλοκα σχήματα. Καθιστά δυνατή την αποβολή των αερίων και των κόκκων από το σημείο κατεργασίας και προϋποθέτει την καλή κυκλοφορία του διηλεκτρικού. Επίσης, η μέθοδος αυτή εγγυάται την ψύξη του δοκιμίου και του τεμαχίου.

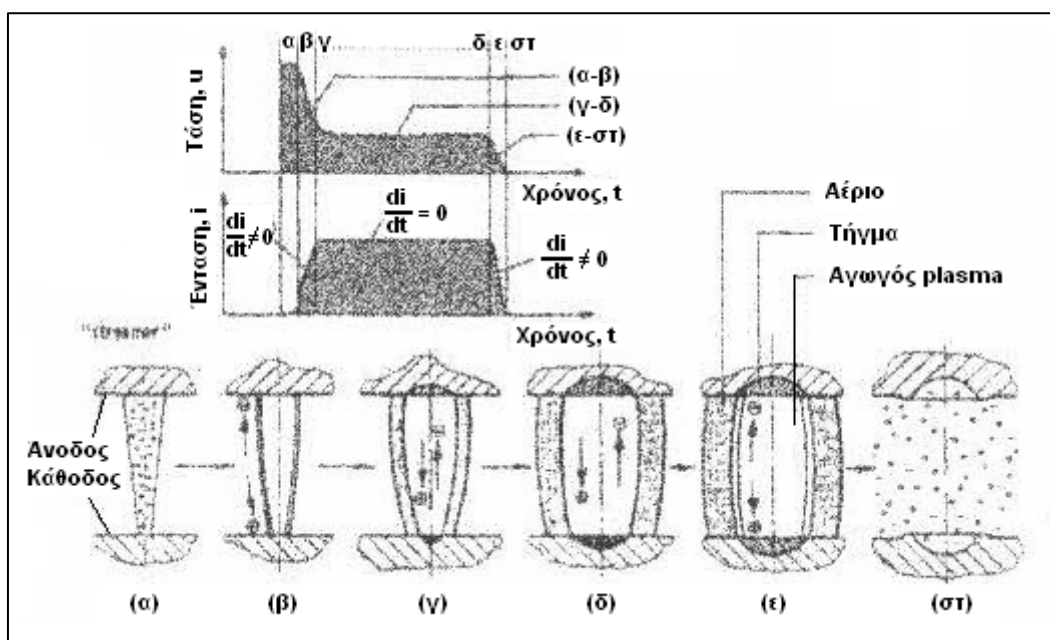
1.8.7 Πίεση flushing

- Οι τιμές της πίεσης έγχυσης και της ελάττωσης της απόθησης διαβάζονται από τις ενδείξεις που εμφανίζονται πάνω στο μπλοκ λειτουργίας της μηχανής.
- Το υπερβολικό flushing όπως προαναφέρθηκε δεν είναι καλό, και για να αποφευχθεί, ιδιαίτερα στα μεταλλικά ηλεκτρόδια και στις περιπτώσεις συνεχιζόμενου flushing, οι τιμές της πίεσης και της ελάττωσης της απόθησης διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα, κάτι που επιπλέον μπορεί να οδηγήσει σε ελάττωση των παραμορφώσεων εύθραυστων ηλεκτρόδιων και σε μεγαλύτερη σταθερότητα της κατεργασίας.
- Στη μέθοδο flushing με παλμική έγχυση, οι παραπάνω τιμές μπορεί να είναι λίγο αυξημένες.
- Στην περίπτωση κατεργασίας με ηλεκτρόδια από γραφίτη, οι τιμές πίεσης έγχυσης και ελάττωσης της απόθησης δεν πληρούν κάποιο κριτήριο, εφόσον δεν χρησιμοποιείται ο παλμοτής με το φωτοηλεκτρικό κύτταρο διάμεσου του οποίου διοχετεύεται το διηλεκτρικό υγρό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Π

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ

Ο ακριβής μηχανισμός αποβολής υλικού με τον οποίο πραγματοποιείται η κατεργασία έχει αποτελέσει θέμα εκτεταμένης έρευνας και αρκετές θεωρίες έχουν προταθεί, χωρίς καμία ωστόσο να είναι πλήρης και να εξηγεί στο σύνολό τους τα παρατηρούμενα φαινόμενα. Οι κυριότερες απ' αυτές είναι: η ηλεκτρομηχανική, η θερμομηχανική και η θερμοηλεκτρική, η οποία αποτελεί την πλέον παραδεκτή προσέγγιση. Οι διάφορες φάσεις κατά τις οποίες πραγματοποιείται η εκκένωση και η αποβολή υλικού με βάση τη θεωρία αυτή, φαίνονται σχηματικά στο Σχήμα 2.1, όπου παρουσιάζεται και η μεταβολή της εφαρμοζόμενης τάσης και της έντασης του ρεύματος εκκένωσης σε σχέση με τη χρονική διάρκειά τους.



Σχήμα 2.1- Μηχανισμός αποβολής υλικού κατά την ηλεκτροδιάβρωση

Κατά την έναρξη της εκκένωσης υπάρχει μια ταχεία μεταβολή της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και δημιουργείται ένας έντονα ιονισμένος αγωγός εκκένωσης από τη διάσπαση του διηλεκτρικού (βλ. Σχήμα 2.1-α). Με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα του διηλεκτρικού κινούνται προς την κατεύθυνση της αντίθετης πολικότητας ηλεκτροδίων (βλ. Σχήμα 2.1-β). Τα πολύ γρήγορα κινούμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται με μόρια του διηλεκτρικού, επιταχύνονται, συγκρούονται και πάλι με μόρια και, από την αλυσιδωτή αυτή αντίδραση, δημιουργείται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα ο αγωγός εκκένωσης (βλ. Σχήμα 2.1-γ). Σύμφωνα με άλλες θεωρίες, ο μηχανισμός διάσπασης πραγματοποιείται από την αναπτυσσόμενη θερμότητα που έχει ως συνέπεια την εξάτμιση του διηλεκτρικού μέσου.

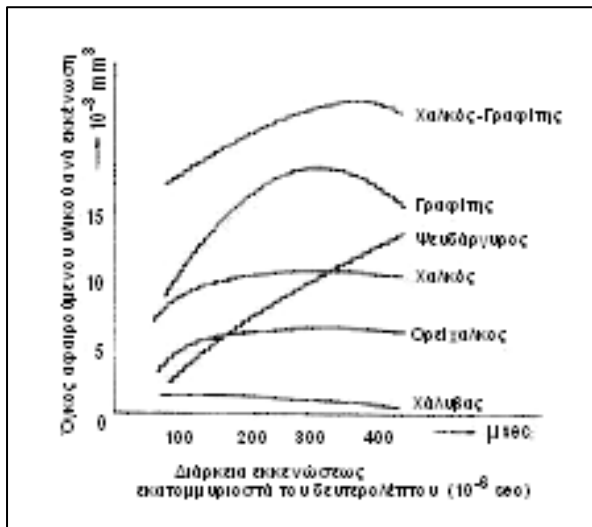
Ο έντονα ιονισμένος αγωγός εκκένωσης επιτρέπει τη διόδο ηλεκτρικού ρεύματος μεγάλης έντασης. Η εκλυόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την εκκένωση μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια, που έχει ως αποτέλεσμα να αρχίζει η τήξη και η ακαριαία εξάτμιση ορισμένου όγκου

υλικού από την επιφάνεια των ηλεκτροδίων (βλ. Σχήμα 2.1-δ). Η ένταση του ρεύματος εκκένωσης αποκτά τότε τη μέγιστη τιμή της. Δημιουργείται στο χώρο της εκκένωσης ένας αγωγός πλάσματος (ιονισμένο αέριο μεγάλης θερμοκρασίας 8000-12000°K), που αποτελείται από θετικά φορτισμένα ιόντα μετάλλου και αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια από την εξάτμιση των υλικών των ηλεκτροδίων και από ουδέτερα μεταλλικά άτομα.

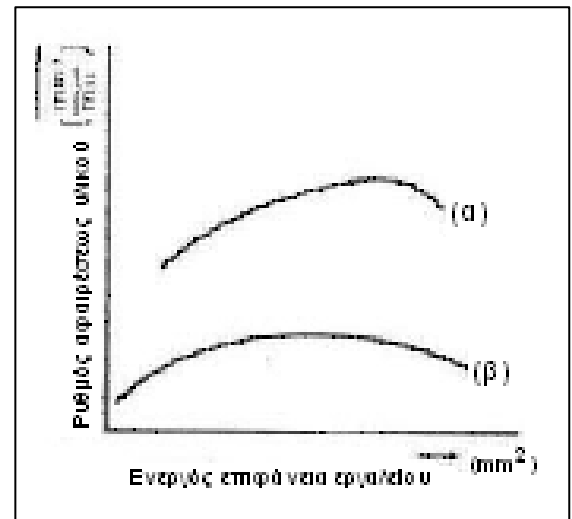
Στις επόμενες φάσεις, η ένταση του ρεύματος εκκένωσης παραμένει χρονικά σταθερή ενώ στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων ένας ορισμένος όγκος μετάλλου τήκεται ή εξατμίζεται ακαριαία σχηματίζοντας ένα νέφος αερίου υψηλής πίεσης (της τάξης αρκετών εκατοντάδων ατμοσφαιρών) και δημιουργείται ένας κρατήρας. Ο αγωγός πλάσματος και το νέφος του αερίου αυξάνονται σταθερά.

Με διακοπή της ηλεκτρικής τάσης, βλ Σχήμα 2.1 (ε), η πίεση του νέφους μειώνεται απότομα, ο αγωγός πλάσματος και το νέφος διασπώνται και το, εν μέρει ρευστό εν μέρει εξαερωμένο, υλικό απομακρύνεται υπό σφαιροειδή μορφή από τον κρατήρα μέσω του διηλεκτρικού υγρού, (βλ Σχήμα 2.1-στ). Ο όγκος του υλικού που αφαιρείται από το εργαλείο και το κατεργασμένο τεμάχιο σε μια εκκένωση δεν είναι ο ίδιος. Εξαρτάται κυρίως από την πολικότητα και τις ιδιότητες του υλικού των ηλεκτροδίων καθώς επίσης από τη διάρκεια και το ρεύμα εκκένωσης (βλ. Σχήμα 2.2). Με κατάλληλη επιλογή του υλικού του εργαλείου-ηλεκτροδίου και με αλλαγή των παραμέτρων εκκένωσης όπως της ενεργού επιφάνειας του εργαλείου (βλ. Σχήμα 2.3), μπορεί να επιτευχθεί μια σημαντική ασυμμετρία, π.χ. 99,5% αφαίρεση του υλικού στο τεμάχιο- ηλεκτρόδιο και 0,5% εργαλείο- ηλεκτρόδιο

Η παραπάνω περιγραφή αναφέρεται σε απλή εκκένωση (single discharge). Στην πραγματικότητα, οι βιομηχανικές εφαρμογές της ηλεκτροδιάβρωσης αναφέρονται σε πολλαπλές εκκενώσεις (multiple discharges) σε τυχαίες θέσεις μεταξύ τεμαχίου – εργαλείου. Η στοχαστική φύση του φαινομένου αυτού καθιστά την θεωρητική προσέγγιση αδύνατη, και μέχρι στιγμής, μόνο η εκτεταμένη πειραματική εργασία μπορεί να συσχετίσει τις παραμέτρους της κατεργασίας με τις μηχανικές ιδιότητες της προκύπτουσας επιφάνειας.[2.2]



Σχήμα 2.2 - Αφαίρεση υλικού ανά εκκένωση για διάφορα υλικά

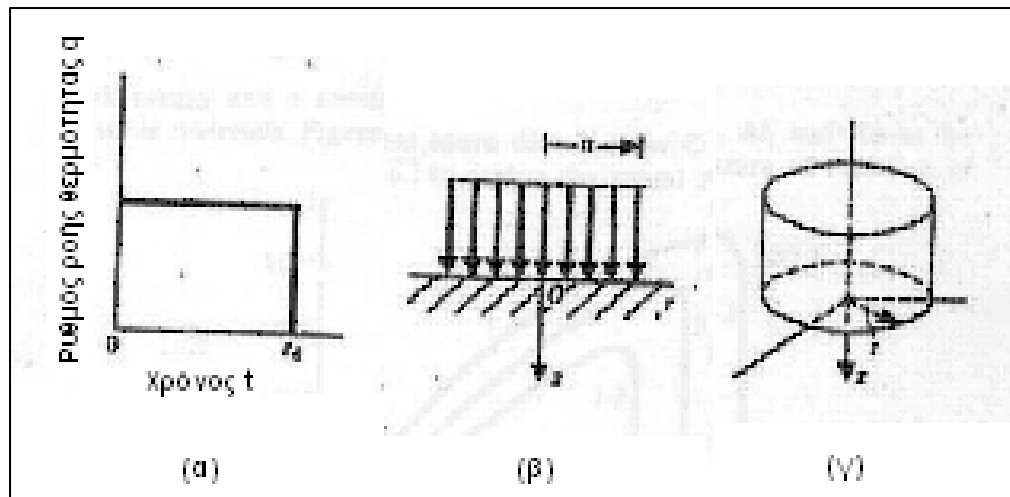


Σχήμα 2.3- Μεταβολή του ρυθμού αφαιρέσεως υλικού με την αύξηση της ενεργού επιφάνειας του εργαλείου σε: α) εκχόνδριση, β) τελική κατεργασία (φινιρίσμα).

Μια ακριβής μαθηματική σχέση του μηχανισμού αποβολής δεν είναι μέχρι τώρα γνωστή, ενώ, μια πρώτη προσέγγιση των πολύπλοκων φαινομένων που υπεισέρχονται μπορεί να γίνει με το μοντέλο της θερμικής πηγής (heat source) που παρουσιάζεται στη συνέχεια. Η θεωρία αυτή συσχετίζει τον όγκο που αποβάλλεται κατά τη διάρκεια απλής εκκένωσης με τις παραμέτρους κατεργασίας και στηρίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

- Ο σπινθήρας / εκκένωση θεωρείται ομοιόμορφη κυκλική πηγή θερμότητας με σταθερή διάμετρο.
- Η επιφάνεια του ηλεκτροδίου θεωρείται ημιάπειρο μέσο και εκτός από το τμήμα που καλύπτει η θερμική πηγή, είναι μονωμένο.
- Ο ρυθμός της ροής της θερμότητας παραμένει σταθερός καθ'όλη τη διάρκεια της εκκένωσης.
- Οι ιδιότητες των υλικών δεν αλλάζουν με τη θερμοκρασία.
- Αγνοούνται τα φαινόμενα ατμοποίησης.

Το απλοποιημένο μοντέλο θερμικής πηγής εικονίζεται στο σχήμα 2.4



Σχήμα 2.4: Μοντέλο θερμικής πηγής για την ηλεκτροδιάβρωση
 (α) Χρονική μεταβολή της ροής θερμότητας
 (β) Ομοιομορφία της ροής θερμότητας
 (γ) Κυκλική θερμική πηγή

Η αγωγή θερμότητας σε κυλινδρικές συντεταγμένες περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

με αρχικές και οριακές συνθήκες:

$$\begin{aligned} t \leq 0, \quad \Theta(r, z, t) &= 0, \\ t > 0, \quad r > a, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial z} &= 0, \\ 0 < r \leq a, \quad -k \frac{\partial \Theta}{\partial z} &= \frac{H}{\pi a^2 t_d}. \end{aligned} \quad (2)$$

όπου H είναι το ποσό θερμότητας, Θ η θερμοκρασία, t ο χρόνος, K η θερμική αγωγιμότητα, a ο συντελεστής θερμικής διάχυσης, t_d η διάρκεια εκκένωσης και Θ_m η θερμοκρασία τήξης.

Δεδομένου ότι το μέγιστο βάθος Z , όπου επιτυγχάνεται η θερμοκρασία τήξης Θ_m (ισόθερμη καμπύλη τήξης), βρίσκεται στον άξονα συμμετρίας, προκύπτει κατά συνέπεια για $r = 0$:

$$\Theta(0, z, t_d) = \frac{1}{2} \frac{H}{\pi k a t_d} \int_0^{\infty} J_0(\xi a) J_1(\xi a) \left[e^{-\zeta z} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{z}{2\sqrt{at_d}} - \xi \sqrt{at_d} \right\} \right] \frac{d\xi}{\xi}, \quad (3)$$

$$\Theta_m = \frac{2H\sqrt{at_d}}{\pi k a^2 t_d} \left[\operatorname{ierfc} \frac{Z}{2\sqrt{at_d}} - \operatorname{ierfc} \frac{\sqrt{Z^2 + a^2}}{2\sqrt{at_d}} \right], \quad (4)$$

όπου:

$$\operatorname{ierfc}(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\zeta^2} - \zeta \operatorname{erfc} \zeta, \quad (5)$$

$$\operatorname{erfc}(\zeta) = 1 - \operatorname{erf}(\zeta), \quad (6)$$

$$\operatorname{erf}(\zeta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\zeta} e^{-x^2} dx. \quad (7)$$

Αν ληφθεί υπόψη και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, η παροχή θερμότητας στο κατεργασμένο υλικό, Q_{Θ} είναι

$$\frac{H_{total} - H_m \rho p a^2 Z}{\pi a^2 t_d} \quad (\sigma\epsilon \text{ cal} / \text{cm} \cdot \text{sec}), \quad (8)$$

Όπου H_{total} είναι η ολική εκλυόμενη θερμότητα, H_m η λανθάνουσα θερμότητα και ρ η πυκνότητα του υλικού.

Η διάμετρος του κρατήρα, d_c λαμβάνεται ίση με τη διάμετρο της θερμικής πηγής, $2a$, οπότε:

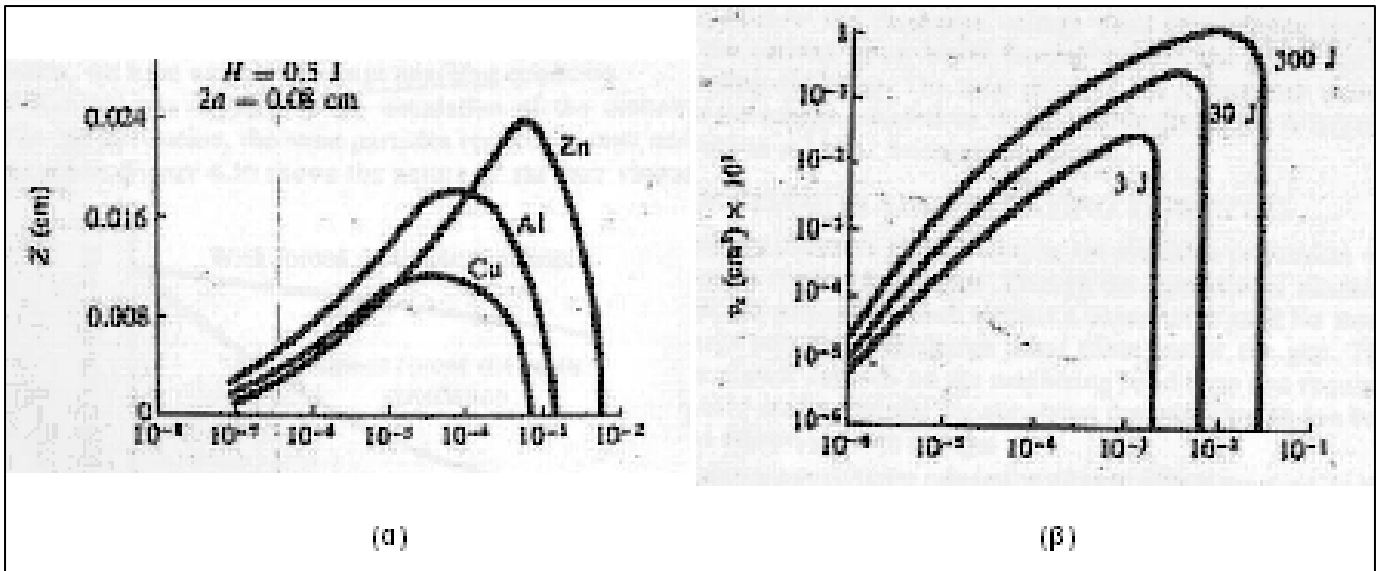
$$d_c = 2a = KW_e^{n_1} t_d^{n_2} \quad (\sigma\epsilon \text{ cm}), \quad (9)$$

όπου We είναι η ολική ενέργεια του παλμού και n_1, n_2, K σταθερές που εξαρτώνται από τις ιδιότητες των ηλεκτροδίων και του διηλεκτρικού.

Το βάθος Z της επέκτασης της ισόθερμης καμπύλης της τήξης σχετίζεται με το βάθος του κρατήρα, h_c με τη σχέση:

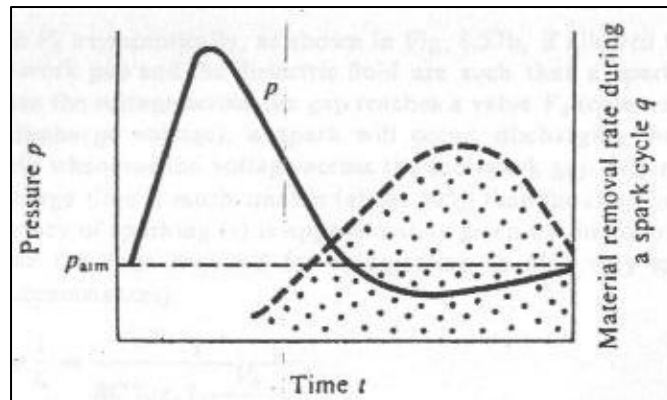
$$V_c = \frac{\pi}{6} h_c (3a^2 + h_c^2) \quad (\sigma\epsilon \text{ cm}^3), \quad (10)$$

όπου V_c είναι ο όγκος του κρατήρα. Σημειώνεται ότι, η παράμετρος Z αποτελεί ένδειξη του όγκου του αφαιρούμενου υλικού, V_{we} . Η πραγματική μεταβολή του όγκου του κρατήρα, V_c , που εξαρτάται άμεσα από το Z φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα. Είναι εμφανές ότι η ταχύτητα αποβολής υλικού φθάνει μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μηδενίζεται απότομα.



Σχήμα 2.5- Ρυθμός μεταβολής (α) Επέκτασης της ισόθερμης καμπύλης τήξης (Z), και (β) Όγκου του κρατήρα (V_c).

Η επίδραση της σπηλαίωσης στο μηχανισμό αποβολής υλικού είναι επίσης σημαντική. Το Σχήμα 2.6 δείχνει τον ρόλο της σπηλαίωσης σε σχέση με το ρυθμό αποβολής υλικού κατά τη διάρκεια μιας εκκένωσης:



Σχήμα 2.6- Επίδραση της σπηλαίωσης κατά τη διάρκεια μιας εκκένωσης.

Για μια πρώτη προσέγγιση του ρυθμού αποβολής υλικού και δεδομένου ότι το μέγεθος του κρατήρα εξαρτάται από την ενέργεια του παλμού (όταν οι άλλες παράμετροι μένουν αμετάβλητες), χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

$$h_c = (K_1 W^{1/3}) \quad (\sigma\epsilon \text{ cm}), \quad (11)$$

$$2a = (K_2 W^{1/3}) \quad (\sigma\epsilon \text{ cm}),$$

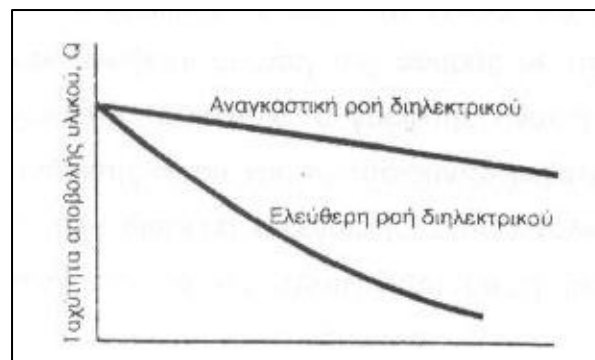
όπου W_e είναι η ενέργεια του παλμού και K_1, K_2 σταθερές. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (8) προκύπτει:

$$V_c = \frac{\pi}{6} K_1 \left(\frac{3K_2^2}{4} + K_1^2 \right) W_e \quad (12)$$

Για ηλεκτρόδιο από χαλκό (Cu) και διηλεκτρικό κηροζίνη ισχύει ότι $K_1 \approx 0,4$ και $K_2 = 0,045$, και συνεπώς:

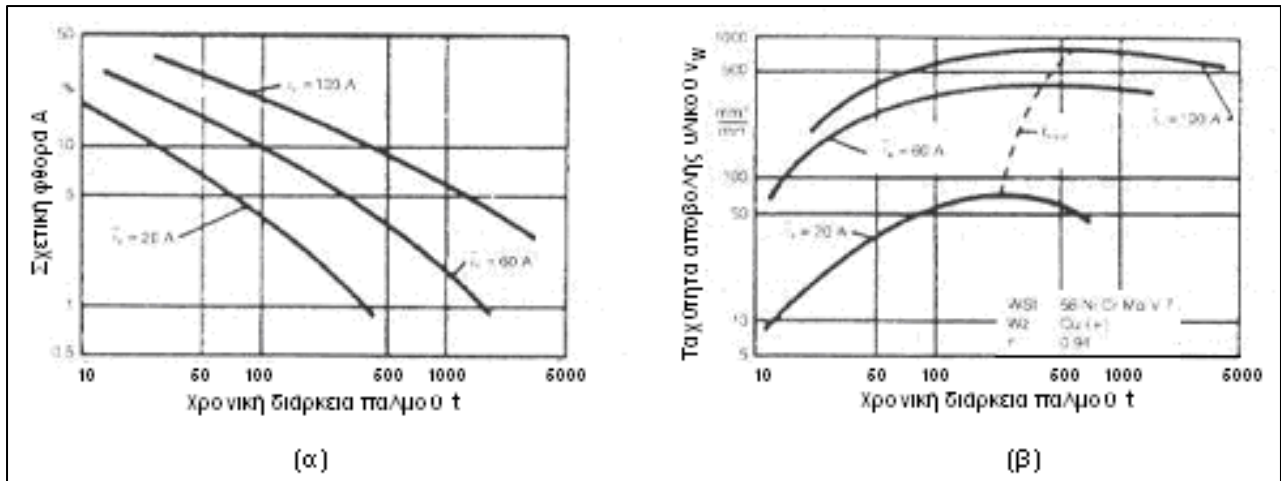
$$V_c = 0,034W_e \quad (13)$$

Ο ρυθμός αποβολής υλικού εξαρτάται και από τον τρόπο κυκλοφορίας του διηλεκτρικού υγρού. Η αναγκαστική ροή του διηλεκτρικού απομακρύνει τα σωματίδια φθοράς και η ταχύτητα της κατεργασίας βελτιώνεται (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7- Επίδραση της κυκλοφορίας του διηλεκτρικού στο ρυθμό αποβολής υλικού κατά την ηλεκτροδιάβρωση

Με αύξηση της χρονικής διάρκειας παλμού t_i , ή της εκκένωσης t_d μεγαλώνει το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων και αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της σχετικής φθοράς (Σχήμα 2.8(α)). Η ταχύτητα αποβολής υλικού του κατεργάσιμου τεμαχίου, v_w αυξάνεται στην αρχή με την αύξηση της χρονικής διάρκειας του παλμού, t_i , αποκτά μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια ελαττώνεται (Σχήμα 2.8(β)). Η ελάττωση αυτή της v_w οφείλεται στο ότι, με την αύξηση της χρονικής διάρκειας του παλμού αυξάνεται το ποσό της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του υλικού και ο αγωγός εκκένωσης μεγαλώνει. Μετά την επίτευξη της βέλτιστης διαμέτρου του αγωγού, κατά τη χρονική στιγμή t_{opt} , αυξάνουν οι απώλειες ενέργειας λόγω ακτινοβολίας και, συνεπώς, με την περαιτέρω αύξηση της διάρκειας του παλμού μειώνεται η ταχύτητα αποβολής υλικού. Επίσης, με την αύξηση της έντασης του ρεύματος μειώνεται η ταχύτητα αποβολής λόγω της αύξησης του ωφέλιμου ποσού της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του υλικού.



Σχήμα 2.8- Μεταβολή (α) της σχετικής φθοράς τεμαχίου και (β) της ταχύτητας αποβολής υλικού σε σχέση με τη χρονική διάρκεια παλμού, κατά την ηλεκτροδιάβρωση χάλυβα με εργαλείο από χαλκό, με στατική παλμογεννήτρια

Η σχετική φθορά υλικών των εργαλείων που χρησιμοποιείται συχνότερα, χαλκός η γραφίτης, σε σχέση με τη μέση ένταση εκκένωσης φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Η σχετική φθορά του χαλκού αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος εκκένωσης, επειδή με την αύξηση της ενέργειας εκκένωσης αυξάνεται επίσης το τηκόμενο υλικό του ηλεκτροδίου καθώς και το ποσό του υλικού που εξαερώνεται κατά την έναρξη της εκκένωσης. Αντίθετα, στον γραφίτη παρουσιάζεται μείωση της φθοράς με την αύξηση της μέσης έντασης της εκκένωσης. Συνεπώς, ο γραφίτης είναι πλέον κατάλληλος για κατεργασίες εκχόνδρισης όπου χρησιμοποιούνται μεγάλες εντάσεις ρεύματος εκκένωσης και μεγάλη διάρκεια εκκένωσης, ενώ ο χαλκός είναι προτιμότερος στις τελικές κατεργασίες, όπου απαιτούνται μικρή διάρκεια και ένταση ρεύματος εκκένωσης.

Γενικά έχει παρατηρηθεί ότι ο ρυθμός αποβολής υλικού από την κάθοδο είναι μικρότερος από αυτόν της ανόδου για τους εξής λόγους:

1. Η ενέργεια σύγκρουσης των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην άνοδο είναι πολύ μεγαλύτερη της αντίστοιχης των ιόντων που προσπίπτουν στην κάθοδο.
2. Από την πυρόλυση του διηλεκτρικού, σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα άνθρακα το οποίο προστατεύει την κάθοδο.
3. δυνάμεις συμπίεσης αναπτύσσονται στην κάθοδο σε μεγαλύτερο ποσοστό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ

ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΜΕ EDM ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

3.1. Γενικά

Η επιφάνεια που δημιουργείται κατά τη διαδικασία EDM περιλαμβάνει μικροσκοπικούς κρατήρες. Οι κρατήρες είναι διαμέτρου 5μm και βάθους 50 μm και είναι αντίστοιχοι των διακριτών εκκενώσεων, παρουσιάζοντας μια “ματ” εμφάνιση. Επειδή αυτή η επιφάνεια δεν είναι αποδεκτή σε αρκετές περιπτώσεις, στο παραγόμενο τεμάχιο γίνεται κατεργασία φινιρίσματος.

Το μέγεθος των κρατήρων και η τραχύτητα επιφάνειας έχουν σχέση με την ενέργεια παλμού. Για τον λόγο αυτό τα τελειώματα των κατεργασιών EDM γίνονται με καθυστέρηση. Αυτή η μικρή χάρη αφήνεται για να γίνει το φινιρίσμα, λόγω του σχήματος του ηλεκτρόδιου (εξαιτίας της αρνητικής ανάδρασης).

Άλλες επιδράσεις επί της επιφάνειας ή κοντά σε αυτήν εμφανίζονται από θερμικές ή μεταλλουργικές επιρροές, όπως επίσης από τη χημεία του συστήματος που κατευθύνει τις εκκενώσεις (δηλαδή το διηλεκτρικό υγρό, τα υλικά των εργαλείου-τεμαχίου). Αυτές οι επιδράσεις γίνονται μεγαλύτερες αυξάνοντας την ενέργεια του παλμού και ειδικότερα: παλμοί μεγάλης διάρκειας επιτρέπουν τη διείσδυση της θερμότητας στον κρατήρα δημιουργώντας ανομοιόμορφη μορφολογία (γεγονός ανεπιθύμητο).

Δίνοντας έμφαση στις μεταλλουργικές αλλαγές που συμβαίνουν κατά την EDM οι Bucklow και Cole κατηγοριοποίησαν τις υπάρχουσες έρευνες για τη φύση των επιφανειών που δημιουργούνται. Κάτι τέτοιο ήταν εφικτό μέσα από τεχνικές παρατηρήσεων όπως: οπτική μικροσκοπία, περίθλαση ακτινών X, μηχανικές και θερμικές μετρήσεις.

Δομικά η επιφάνεια περιλαμβάνει ένα επαναστεροποιημένο στρώμα (ζώνη τήξης ή λευκή στοιβάδα) με κρατήρες των οποίων η διάμετρος μεταβάλλεται από 1μm μέχρι εκατοντάδες μικρά, για μεγάλου μήκους παλμούς και υψηλής τάσης περιστροφικές γεννήτριες.

Συνήθως αυτή η ζώνη περιέχει άνθρακα από το διηλεκτρικό υγρό και στοιχεία κραμάτωσης από το αποβαλλόμενο υλικό (εργαλείου-τεμαχίου), μεταξύ των οποίων πιθανόν να υπάρχει και άνθρακας.

Κάτω από αυτή τη ζώνη και σε βάθος 35 φορές μεγαλύτερο (εξαρτάται από τις συνθήκες) υπάρχει μια μεταλλουργικά και χημικά επηρεασμένη ζώνη οφειλόμενη στην απορρόφηση θερμότητας και τη διάλυση-διάχυση υλικού από τη ζώνη τήξης. Στην περιοχή αυτή έχουμε παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις και μικρορωγμές που προέρχονται από θερμικές δράσεις.

Μικρής έντασης μετασχηματισμούς έχουμε στην περίπτωση καθαρών υλικών. Η αλλαγή είναι πιο σύνθετη σε περιπτώσεις μη σιδηρούχων κραμάτων, καθαρού σιδήρου και χαλύβων. Οι επιδράσεις εδώ είναι μεγάλες, με αποτέλεσμα να έχουμε μεταβολή στην επιφανειακή σκληρότητα και μείωση της αντιστάσεως της κατεργασμένης επιφάνειας.

Εργασία από τον Oritz επικεντρώθηκε στις συνθήκες και στα υλικά που χρησιμοποιούνται σε καλούπια σφυρηλάτησης. Από την άλλη πλευρά η έρευνα των Wilm και Wade σε χρώμιο, αλουμίνιο, σίδηρο και αντιμόνιο αντιπροσωπεύουν ένα πλήθος υλικών με μεταβαλλόμενα σημεία τήξης, ευθραυστότητα, ελατότητα.

Ο Barash και αργότερα οι Lloyd & Warren εξέτασαν τις παραμένουσες τάσεις και τη συμπεριφορά σε κόπωση. Τα αποτελέσματα συνέπεσαν σε μεγάλο βαθμό. Όπως θα περίμενε κάποιος, σε μια διαδικασία απότομης και γρήγορης θέρμανσης και ψύξης της επιφάνειας,

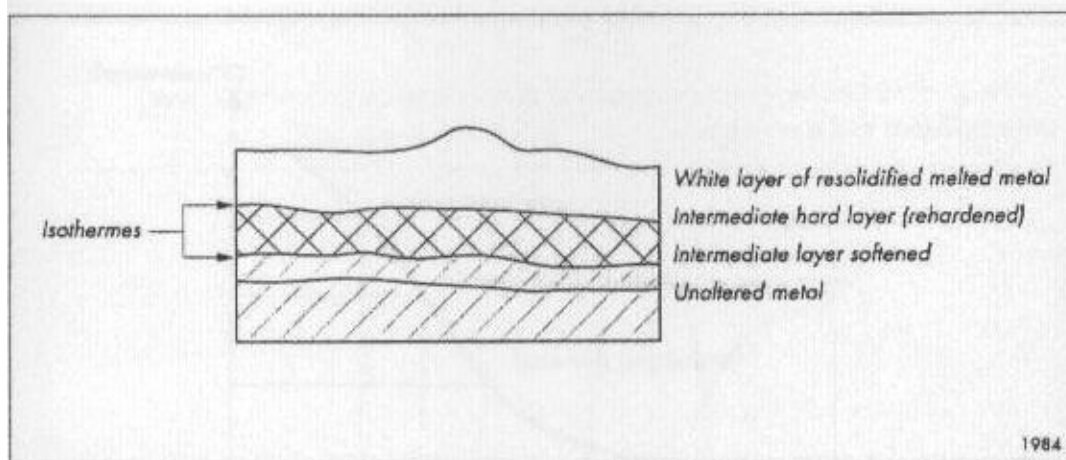
εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις αναπτύσσονται γρήγορα τέτοιες ώστε να μπορούν να προσεγγίσουν το όριο διαρροής του υλικού στην επιφάνεια. Μειώνονται όμως γρήγορα και τελικά γίνονται θλιπτικές στον πυρήνα.

Ο Barash υπολόγισε το βάθος της θερμικά κατεργασμένης ζώνης σχεδόν ίσο με 10 φορές την τιμή τραχύτητας C.L.A. της διαβρωμένης επιφάνειας. Επίσης βρήκε σημαντικές μειώσεις στο όριο αντοχής σε κόπωση (Wohler test) συγκρίνοντας με δοκίμια που είχαν υποστεί στρέψη και τα οποία είχαν την ίδια τραχύτητα επιφάνειας. Τέτοιες μειώσεις είναι συγκρίσιμες με αυτές άλλων κατεργασιών. Θα πρέπει να τονιστεί ότι φαινομενικά μια πρακτική σύγκριση είναι δύσκολη λόγω έλλειψης ολοκληρωμένης θεωρητικής προσέγγισης όπως και στις παραμένουσες τάσεις που δημιουργούνται σε συμβατική κοπή, επειδή μεταβάλλονται ανάλογα με τις συνθήκες κοπής, από τη γεωμετρία και την κατάσταση του κοπτικού εργαλείου.

Η χαλάρωση των τάσεων σε μερικά από τα δοκίμια δεν απέφερε πλήρη επαναφορά εξαιτίας των παραμενουσών επιφανειακών παραγόντων όπως μικρορωγμές, σημεία συγκέντρωσης τάσεων που υπάρχουν από τη φύση της επιφάνειας. Παρόμοια αποτελέσματα βρέθηκαν σε δοκιμές κρούσης (Charpy V-notch tests).

Κατά τη διαδικασία της ηλεκτρικής εκκένωσης η αποβολή υλικού λαμβάνει χώρα κυρίως λόγω ενός θερμικού φαινομένου, με θερμοκρασίες στην περιοχή των 8000 °C έως 12000 °C που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια του τόξου. Το γεγονός της εμφάνισης των εκκενώσεων αυτών επηρεάζει τη δομή του υλικού που κατεργάζεται. Η επήρεια είναι μεγάλη ή μικρή, ανάλογα με το υλικό. Μερικά υλικά δεν παρουσιάζουν μεταβολές στη δομή τους. Μια μεταλλογραφική εξέταση σε μια κατά μήκος κομμένη διαβρωμένη επιφάνεια κάνει δυνατό να φανεί η ύπαρξη δύο ζωνών με διαφορετική φύση όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 που ακολουθεί [1.2].

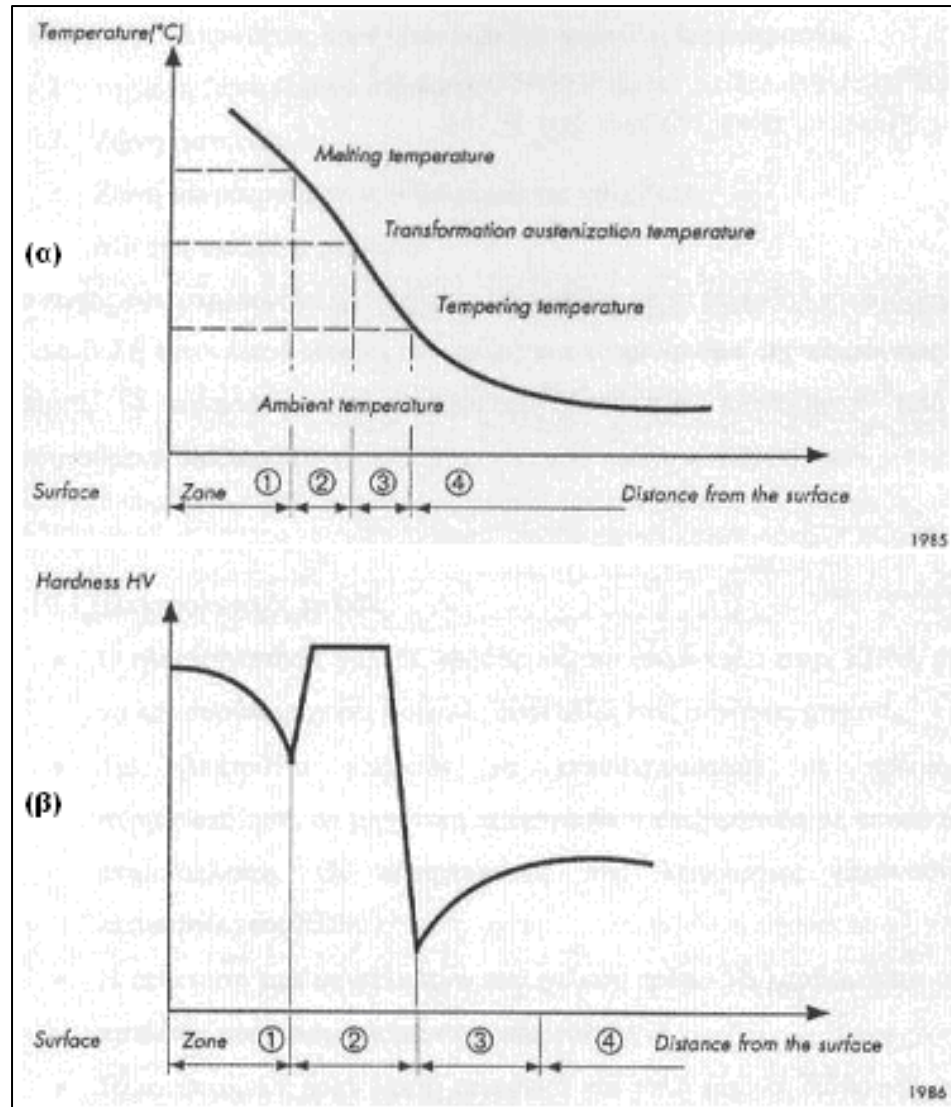
- Μιας ετερογενούς λευκής ζώνης που δημιουργείται από μίγμα στερεών διαλυμάτων πλούσιων σε άνθρακα C. Η ζώνη αυτή αποτελείται από χάλυβα και ένα μέρος αποσυντιθεμένου διηλεκτρικού υγρού (υδρογονάνθρακας) υπό την επίδραση της θερμότητας.
- Ενός ενδιάμεσου στρώματος το οποίο βρίσκεται μεταξύ του λευκού στρώματος και του μετάλλου το οποίο δεν έχει υποστεί καμία θερμική μεταβολή. Αυτή η ζώνη δεν έχει υποστεί τήξη αλλά το μέταλλο έχει θερμανθεί σε υψηλή θερμοκρασία σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και έχει ψυχθεί απότομα, με αποτέλεσμα να έχει υποστεί μεταλλουργικούς μετασχηματισμούς.



Σχήμα 3.1- Ύπαρξη δύο ζωνών διαφορετικής φύσεως σε διαβρωμένη επιφάνεια.

Ανάλογα με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται τοπικά, αυτή η θερμική δραστηριότητα σε σκληρούς χάλυβες αποτελεί μια τροποποίηση που μπορεί να κάνει το χάλυβα πιο μαλακό.

Το ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 3.2), μας δείχνει τη σχέση μεταξύ της μέγιστης θερμοκρασίας που μπορεί να εμφανιστεί κατά την EDM με τα μικρογραφικά συστατικά στις διάφορες ζώνες (Σχήμα 3.2(α)), και τις τιμές σκληρότητας στις διάφορες ζώνες (Σχήμα 3.2(β)).



Σχήμα 3.2- Επίδραση της EDM στις διάφορες ζώνες υλικού, ως προς:
 (α) τη μέγιστη θερμοκρασία και τα μικρογραφικά συστατικά,
 (β) τη σκληρότητα.

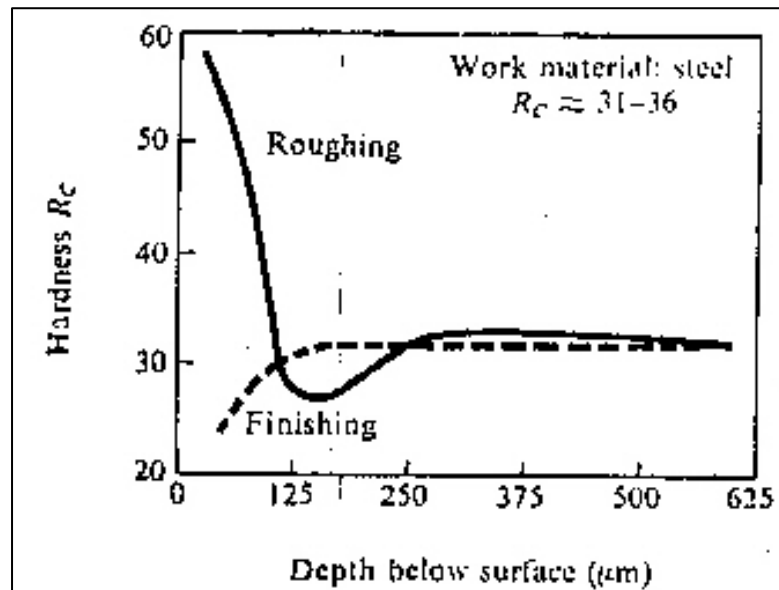
Η καμπύλη σκληρότητας παράγεται από την καμπύλη θερμοκρασίας, διαχωρίζοντας τις τέσσερις ζώνες βάσει των χαρακτηριστικών θερμοκρασιών:

1. τηγμένη ζώνη (θερμοκρασία τήξης και άνω),
2. ζώνη μετασχηματισμού (μεταξύ A_3 , A_m και A_1),
3. ζώνη ανόπτησης (μεταξύ A_1 και $T_{ανόπτησης}$, ιδιαιτέρως για χάλυβες),
4. μη επηρεασμένο μέταλλο.

Το πάχος του εναπομείναντος υλικού ελαττώνεται παράλληλα με το επίπεδο κατεργασίας. Το φινίρισμα της επιφάνειας είναι επαρκές για να εξαφανίσει τις παραγόμενες ζώνες που παρήχθησαν από την προηγούμενη διαδικασία.

3.2. Επίδραση της EDM (ηλεκτροδιάβρωση) στην επιφάνεια του μετάλλου

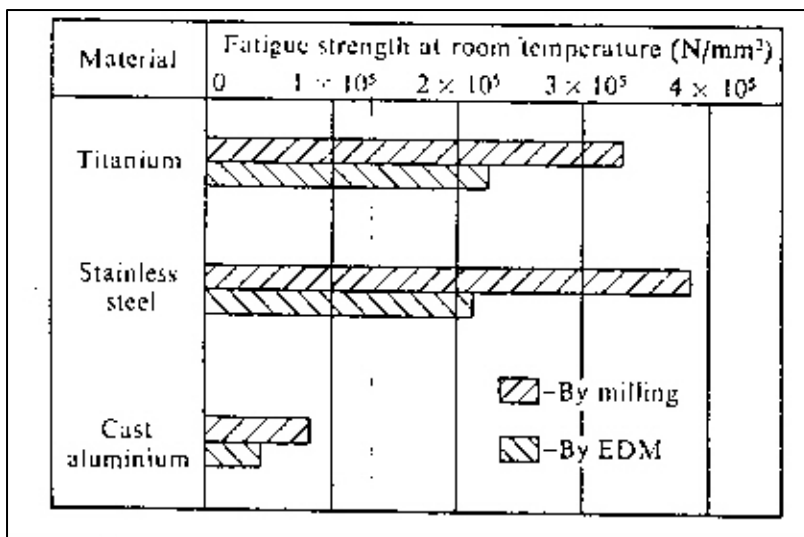
Η πολύ υψηλή θερμοκρασία που παράγεται από τις εκκενώσεις προκαλεί τήξη και ατμοποίηση του μετάλλου και προφανώς, αυτή η υψηλή θερμοκρασία επηρεάζει τις ιδιότητες των πιο πάνω στρώσεων (2.5-150 μm) της κατεργασμένης επιφάνειας. Η εξώτατη στρώση ψύχεται γρήγορα και συνεπώς είναι και η πιο σκληρή. Η αμέσως πιο κάτω στρώση βρίσκεται κατά κάποιον τρόπο σε συνθήκες επαναφοράς. Το σχήμα 3.3 δείχνει τη μεταβολή της σκληρότητας σε σχέση με το βάθος για τραχειά και για φινιρισμένη επιφάνεια χάλυβα μετά από EDM. Είναι φανερό ότι στην επιφάνεια του φινιρισμένου χάλυβα με EDM, η σκληρότητα είναι χαμηλή λόγω επαναφοράς του υλικού.



Σχήμα 3.3- Επίδραση της ηλεκτροδιάβρωσης στην επιφανειακή σκληρότητα

Η αύξηση της σκληρότητας της επιφάνειας μετά την κατεργασία με EDM της προσδίδει καλύτερη αντοχή σε φθορά. Ωστόσο, η αντοχή σε κόπωση μειώνεται. Η μείωση αυτή οφείλεται στη ύπαρξη μικρορωγμών που δημιουργήθηκαν στην επιφάνεια της στρώσης κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

Το σχήμα 3.4 συγκρίνει την αντοχή σε κόπωση τριών πανομοιότυπων κομματιών που κατεργάστηκαν σε συμβατικό φρεζάρισμα και σε EDM αντίστοιχα.



Σχήμα 3.4- Επίδραση της ηλεκτροδιάβρωσης στην αντοχή σε κόπωση

Οι μεταβολές των ιδιοτήτων των λεπτών επιφανειών δεν έχουν μεγάλη επίδραση στην αντοχή σε εφελκυσμό. Επίσης η μικροδομή τους μετατρέπεται και εξαιτίας των εκκενώσεων, η χημική τους σύσταση μεταβάλλεται. Αυτό συνήθως μειώνει την αντοχή σε διάβρωση [2.2].

3.3. Χαρακτηριστικά επιφανειών μετά από την εφαρμογή της μεθόδου EDM [3.2].

Για την καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών επιφανειών μετά από την εφαρμογή της μεθόδου WEDM θα περιγραφεί μια μελέτη που έγινε πάνω σε ένα συγκεκριμένο τύπο ταχυχάλυβα (HSS) κονιομεταλλουργίας (P/M) της εταιρείας Uddeholm στη Σουηδία (P/M High Speed Steel ASP 23 – Πίνακας 3.1)

Element	C	Cr	Mo	W	V
Weight(%)	1.3	4.2	5.0	6.4	3.1

Πίνακας 3.1: Χημική σύσταση του χάλυβα P/M HSS(ASP 23)

Εξαιτίας της εξαιρετικής σκληρότητας του υλικού αυτού, της καλής αντοχής σε φθορά και της αντοχής του, το high-speed steel (HSS) χρησιμοποιείται ευρέως για κατασκευή κοπτικών εργαλείων και εργαλείων πρέσας κοπής και διαμόρφωσης μετάλλων. Ο χάλυβας αυτός που έχει κατασκευαστεί με κονιομεταλλουργία (Powder Metallurgy) ανήκει στη σειρά ASP [3.3]. Πριν το τελείωμα της επιφάνειας ή την επίστρωσή της, ο χάλυβας αυτός υπέστη βαφή στους 1150°C-1200°C και ύστερα δυο ή τρεις επαναφορές στους 560°C για να αποκτήσει μεγάλη αντοχή και δυσθραυστότητα ταυτόχρονα. Όταν ο χάλυβας πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, το υλικό κόβεται πολλές φορές με τη μέθοδο της ηλεκτροδιάβρωσης. Ένα πλεονέκτημα της εφαρμογής της EDM είναι ότι ένας σκληρυμένος χάλυβας μπορεί εύκολα να κατεργαστεί με ακρίβεια μεγάλων διαστάσεων και καλό τελείωμα της επιφάνειας.

Οι πολλαπλές κοπές με την EDM εξηγούνται παρακάτω:

Πρώτα το κομμάτι τραχύνεται με την υψηλότερη ενέργεια ηλεκτρώδιου και ξεπλένεται με μεγάλη πίεση διηλεκτρικού υγρού και χαμηλή ένταση ρεύματος στο σύρμα για να δοθεί η γεωμετρία του σχήματος. Ύστερα, στο ημι-φινίρισμα και το φινίρισμα, αποδίδεται χαμηλή ενέργεια και στρωτή ροή του διηλεκτρικού υγρού καθώς και υψηλότερη ένταση ρεύματος στο σύρμα. Η τροφοδοσία κοπής του σύρματος είναι συνήθως της τάξης των 10 μm, αλλά για το

ημι-τελείωμα και το τελείωμα χρειάζονται μόνο λίγα μm . Ο αριθμός των πολλαπλών κοπών εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια και την τραχύτητα του υλικού. Γενικά υψηλότερη ακρίβεια απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό κοπών. Από άποψη εφαρμογής υψηλή ακρίβεια μπορεί και να επιτευχθεί με ένα και μόνο πέρασμα. Ωστόσο λιγότερη τραχεία επιφάνεια απαιτεί περισσότερες κοπές για να μειωθεί ο συνολικός χρόνος κατεργασίας.

Έχει αποδειχθεί γενικά ότι το φαινόμενο της αφαίρεσης του υλικού με τη μέθοδο της ηλεκτροδιάβρωσης οφείλεται στο θερμικό παράγοντα [3.4]. Κατά τη διάρκεια της εκκένωσης παρατηρείται κίνηση ηλεκτρονίων και πλάσματος ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το κομμάτι.

Η διαδικασία παράγει πολύ μεγάλο ποσό θερμότητας δημιουργώντας έτσι τοπική τήξη ή και ατμοποίηση του διηλεκτρικού υγρού, και δημιουργία μεγάλης πίεσης. Με αυτόν τον τρόπο διασκορπίζονται τα ατμοποιημένα ή/και τηκόμενα μέταλλα σε μικρά κομμάτια σε όλες τις διευθύνσεις. Με πιο αυξημένη έγχυση του διηλεκτρικού τα σταγονίδια απομακρύνονται από την επιφάνεια του μετάλλου. Ωστόσο αν παρατηρήσουμε την επιφάνεια του ηλεκτροδίου και του κομματιού μετά από την κατεργασία με EDM [3.5] διαπιστώνουμε τη δημιουργία μιας θερμικά επηρεασμένης ζώνης κοντά στην κομμένη επιφάνεια του κομματιού.

Πολλά άρθρα αναφέρουν ότι ο μετασχηματισμός της επιφάνειας μπορεί να αξιολογηθεί μετρώντας την ανοδική πόλωση. Γι αυτόν το λόγο σε αυτήν τη μελέτη μετρήθηκε η ανοδική πόλωση για να εντοπίσουμε το βαθμό κραμάτωσης η ακόμα και τη φάση μετασχηματισμού της επιφάνειας του χάλυβα P/M HSS μετά από πολλαπλές κοπές με τη μέθοδο της ηλεκτροδιάβρωσης.

3.4. Παράμετροι κατεργασίας

Εδώ αναφέρονται οι συνθήκες κατεργασίας. Χρησιμοποιήθηκε ορειχάλκινο ηλεκτρόδιο διαμέτρου 0.25 mm και κατά βάρους σύστασης 65% ψευδαργύρου και 35% χαλκού. Όλες οι παράμετροι ρυθμίστηκαν από το σύστημα εμπειρογνομόνων Charmilles Technologies όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα 3.2.

Cutting passes	Voltage(V)	Current(A)	A(μs)	B(μs)	WS(m/min)	WB(daN)	Flushing (Mpa)
1 st cut	-80	4	1.0	9.0	10	1.0	550
2 nd cut	-120	8	0.2	3.8	8.0	1.4	80
3 rd cut	-80	16	0.4	3.0	8.0	1.4	80
4 th cut	-80	8	0.4	3.6	8.0	1.6	80
5 th cut	+120	4	0.2	3.8	8.0	1.4	80

Πίνακας 3.2 : παράμετροι κατεργασίας για τις πολλαπλές κοπές με EDM

Όπου

A: διάρκεια εκκένωσης

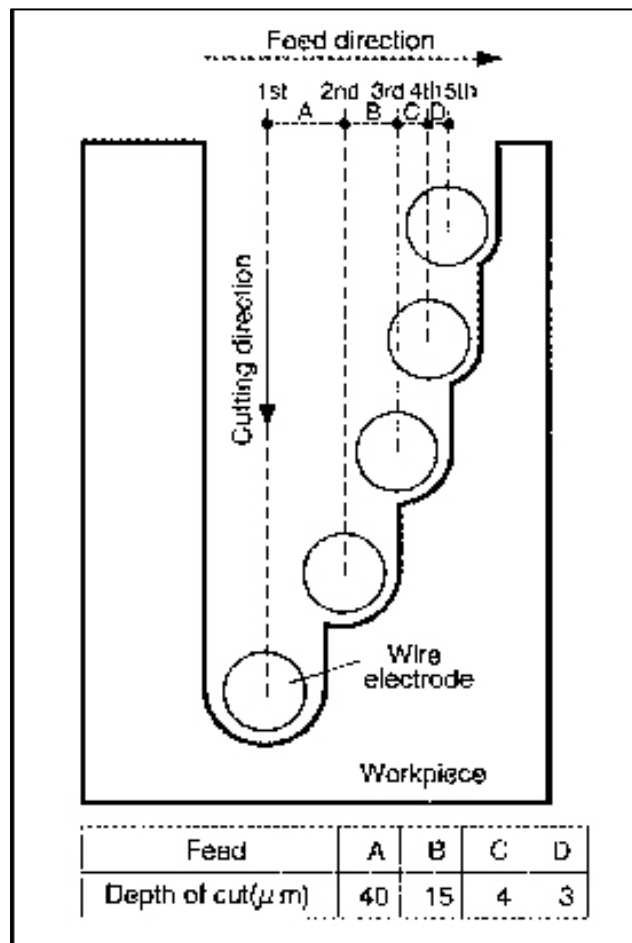
B: χρόνος ανάμεσα σε δυο παλμούς

WS: ταχύτητα τροφοδοσίας του σύρματος ηλεκτροδίου

WB: τάση του σύρματος

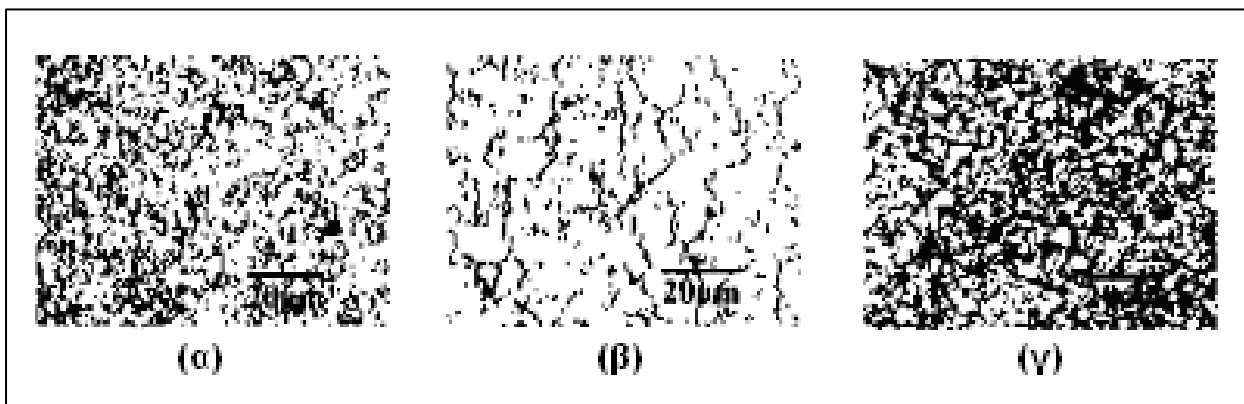
Για την 1^η κοπή εφαρμόστηκε η υψηλότερη ενέργεια και η μεγαλύτερη πίεση ξεπλύματος του διηλεκτρικού υγρού. Η 2^η και η 3^η κοπή έγιναν για την καλύτερευση της γεωμετρικής και

διασταλτικής ακρίβειας. Σε ότι αφορά την 4^η και την 5^η κοπή η επιφάνεια ήταν τελειωμένη και extra-finished με σύρμα ηλεκτροδίου, αλλά αντίθετης ηλεκτρικής πολικότητας, αρνητική για την 4^η κοπή και θετική για την 5^η. Η αγωγιμότητα του διηλεκτρικού υγρού ελέγχεται με ακρίβεια στους $5.0 \pm 0.5 \mu\text{s/cm}$ για κάθε κοπή και η θερμοκρασία κατεργασίας στους $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$. Τα χαρακτηριστικά της κοπής φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5- Πολλαπλές κοπές με την EDM

Τα δείγματα υπέστησαν χημική προσβολή με τη χημική ουσία Viella σύνθεσης 0.5 ml HCl, 2 g πικρικό οξύ και 100 ml μεθανόλη. Στο σχήμα 3.6 φαίνεται η μεταλλογραφική δομή τριών διαφορετικών δοκιμίων χαλύβων τύπου P/M HSS. Το πρώτο δεν υπέστη καμία άλλη κατεργασία μετά από την EDM. Το δεύτερο υπέστη βαφή και το τρίτο υπέστη βαφή κι επαναφορά. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό μερικά σφαιρικά καρβίδια μπορούν εύκολα να εντοπιστούν στα 3 δείγματα. Λιγότερα και λεπτότερα καρβίδια παρατηρούνται στο δείγμα που έχει υποστεί βαφή και στο οποίο η μικροδομή και τα όρια των κόκκων αποκαλύφθηκαν εύκολα. Η μικροδομή, τα όρια των κόκκων και οι διάφορες φάσεις του 1^{ου} και του 3^{ου} ήταν δύσκολο να αναλυθούν. Ωστόσο, η μέτρηση της σκληρότητας έδειξε ότι το 2^ο δείγμα χάλυβα είχε υψηλότερη σκληρότητα ($H_{RC} 67$), ενώ το 1^ο δείγμα είχε την μικρότερη ($H_{RC} 28$). Παρατηρήθηκε επίσης δημιουργία διαφόρων φάσεων στα τρία δείγματα μετά από τις κατεργασίες.



Σχήμα 3.6- Μεταλλογραφική δομή τριών διαφορετικών δοκιμίων χαλύβων P/M HSS.

3.5. Μορφολογία επιφανειών μετά από τις πολλαπλές κοπές.

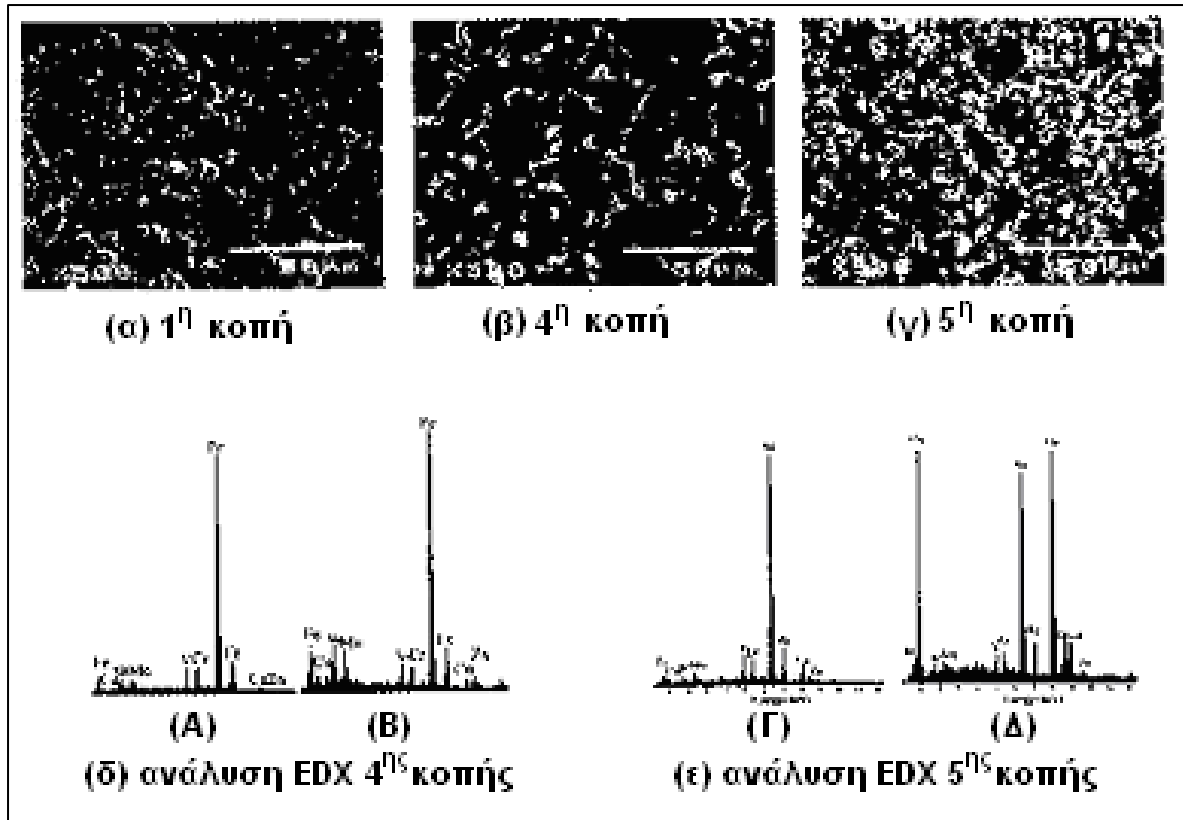
Στο σχήμα 3.7 φαίνονται 3 τυπικές μορφολογίες επιφανειών του χάλυβα P/M HSS τελειωμένες με WEDM. Στο σχήμα 3.7(α) φαίνεται η μορφολογία της τραχειάς κοπής (πρώτης κοπής), με τη “ματ” επιφάνεια και τους πόρους. Η υψηλότερη πίεση έγχυσης διηλεκτρικού υγρού εφαρμόστηκε ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο, κάτι που θα περίμενε κανείς να κάνει την επιφάνεια της πρώτης κοπής τραχύτερη από αυτές των επόμενων κοπών. Στο σχήμα 3.7(β) φαίνεται η επιφάνεια μετά από την 4^η κοπή, με κρατήρες και εγκλείσματα αερίων, τυπική τοπογραφία που αναπτύσσεται μετά την τήξη και την επανέγχυση (recast process). Στο σχήμα 3.7(γ) φαίνεται η λεία επιφάνεια μετά την 5^η κοπή, για την οποία χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο θετικού δυναμικού.

Οι επιφάνειες μετά από την 4^η και την 5^η κοπή μελετήθηκαν σε βάθος με ανάλυση EDX δέσμης ηλεκτρονίων, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στα σχήματα 3.7(δ), 3.7(ε). Τα σημεία A, B απεικονίζουν το κέντρο του κρατήρα και του κόμβου αντίστοιχα, για την επιφάνεια μετά από την 4^η κοπή. Τα αποτελέσματα και στα δύο σημεία ήταν παρόμοια. Η σύνθεση ήταν κυρίως Fe, W, Mo, V, και Cr. Η σύσταση στα σημεία Γ και Δ για την επιφάνεια μετά από την 5^η κοπή (Cu και Zn), αναφέρεται όχι μόνο στο τεμάχιο αλλά και στο ηλεκτρόδιο.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το υλικό του κομματιού κραματοποιήθηκε μαζί με το υλικό του ηλεκτροδίου στην επιφάνεια, μετά από την πέμπτη κοπή με την EDM. Σύμφωνα με τις αναλύσεις SEM/EDX, η μορφολογία της κομμένης επιφάνειας και ο βαθμός κραμάτωσης μεταξύ της 1^{ης} και της 5^{ης} κοπής επιφάνειας είναι εντελώς διαφορετικός, παρόλο που οι δυο κοπές προτείνονται συνήθως για το τελείωμα της επιφάνειας. Κατά την 4^η κοπή παράγεται η μεγαλύτερη θερμότητα στο κομμάτι με αποτέλεσμα το υλικό γύρω από το ηλεκτρόδιο να είναι τηγμένο ή ατμοποιημένο και να δημιουργείται θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ). Παρόλο που το ηλεκτρόδιο ήταν μερικώς λειωμένο, είχαμε απόθεση πολύ λίγου υλικού ηλεκτροδίου στην κομμένη επιφάνεια του ηλεκτροδίου γιατί απομακρύνθηκε μικρότερη θερμότητα και τηκόμενα και ατμοποιημένα κομμάτια απομακρύνθηκαν με έγχυση διηλεκτρικού υγρού μεγάλης πίεσης. Χρησιμοποιώντας την 5^η κοπή, ωστόσο, η εκτεθειμένη επιφάνεια του ηλεκτροδίου είναι πολύ μικρή σε σχέση με αυτήν του κομματιού και έτσι παράγεται περισσότερη θερμότητα στο ηλεκτρόδιο. Κατ’ αυτόν τον τρόπο η πυκνότητα ρεύματος που εφαρμόστηκε στο ηλεκτρόδιο ήταν πολύ υψηλή, και έτσι το εξατμισμένο υλικό ήταν τόσο πολύ που το διηλεκτρικό υγρό δεν

μπόρεσε να τα απομακρύνει ολόκληρο. Μια ποσότητα αποκολλήθηκε από την επιφάνεια εργασίας ή ακόμα κραματοποιήθηκε με το υπό κατεργασία κομμάτι.

Σχήμα 3.7- Τυπικές μορφολογίες επιφανειών χάλυβα P/M HSS τελειωμένες με WEDM.



3.6. Μέτρηση ανοδικής πόλωσης :

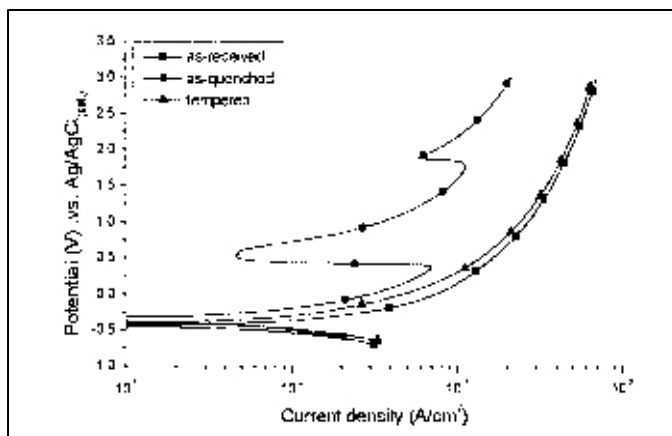
Στο σχήμα 3.8 φαίνονται οι καμπύλες ανοδικής πόλωσης του πρώτου και του τρίτου δείγματος, μετά από βαφή κι επαναφορά, σε διάλυμα οξικού οξέος (1M CH₃COOH). Εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι και τα δυο δείγματα παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια συμπεριφορά. Δηλαδή ότι η ανοδική πυκνότητα ρεύματός τους αυξάνεται με αύξηση του ανοδικού δυναμικού και συμφωνεί με τον νόμο του Tafel. Η καμπύλη ανοδικής πόλωσης του πρώτου δείγματος μετά τη βαφή έχει διαφορετική συμπεριφορά από αυτή των δύο πρώτων. Μπορεί να εντοπιστεί ένα παθητικό δυναμικό της τάξης των 0.5-0.7 V στην καμπύλη πόλωσης του ανοπτημένου. Ένα μικρότερο δεύτερο παθητικό δυναμικό εντοπίζεται μεταξύ 1.9-2.1 V (βλ. σχήμα 3.8). Το δεύτερο δείγμα έχει κυρίως μαρτενσιτική δομή. Αυτή η δομή ανιχνεύεται διαφορετικά από την δομή του τρίτου δείγματος με την ανοδική του πόλωση που δοκιμάζεται σε ένα διάλυμα οξικό οξύ. Ή αλλιώς η μαρτενσιτική δομή μπορεί να χαρακτηρίζεται με καμπύλη ανοδικής πόλωσης με παθητικό ρεύμα σε υψηλότερο δυναμικό σε διάλυμα οξικού οξέος.

Η καμπύλη ανοδικής πόλωσης του τρίτου δείγματος φαίνεται στο σχήμα 3.9. Είναι φανερό ότι η συμπεριφορά μετά από την τραχεία κοπή και του δείγματος μετά την επαναφορά είναι περίπου η ίδια και ακολουθεί τον νόμο του Tafel. Παρατηρείται μια παθητική περιοχή για υψηλότερο δυναμικό για λείες κοπές. Η συμπεριφορά ανοδικής πόλωσης έχει επηρεαστεί

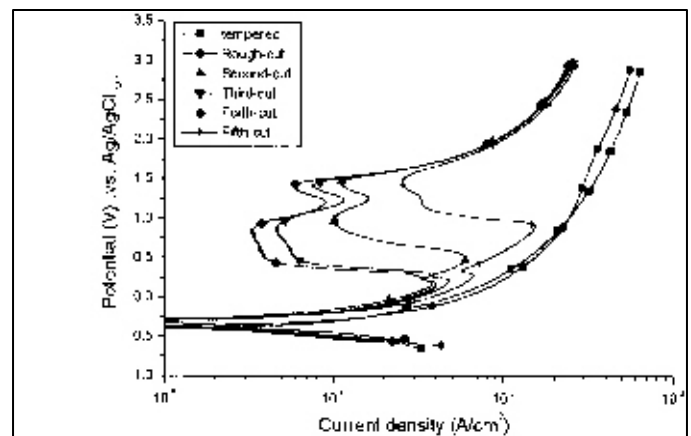
σημαντικά από τις λείες κοπές και έτσι μπορεί να παρατηρηθεί παθητική περιοχή. Ειδικά, η καμπύλη ανοδικότητας των επιφανειών μετά από την 3^η και την 4^η κοπή είχε ευρύτερη μεταβολή δυναμικού, από 0.5 μέχρι 1.7 V, της παθητικής περιοχής. Επιπλέον, παρατηρείται μια στενή παθητική περιοχή αλλά με υψηλότερο δυναμικό στη επιφάνεια μετά από την 5^η κοπή.

Αφού το σύρμα του ηλεκτροδίου είχε αρνητική πόλωση, απομακρύνθηκε περισσότερη θερμότητα στο υπό κατεργασία κομμάτι κατά την διάρκεια της 3^{ης} και της 4^{ης} κοπής. Η μαρτενσιτική δομή θα αναπτυσσόταν στην αμέσως πάνω επιφάνεια του μετάλλου εξαιτίας της ταχείας θέρμανσης από ηλεκτρική εκκένωση και ψύξη από το ξέπλυμα με διηλεκτρικό υγρό. Μπορεί να παρατηρηθεί επίσης σχηματισμός μιας λευκής ζώνης (ενός λευκού στρώματος) που αποτελείται από λεπτούς κόκκους μαρτενσίτη πάνω στην τελειωμένη επιφάνεια του εργαλείου μετά από την εφαρμογή της EDM. Στην μελέτη αυτή παρατηρήθηκε η ίδια επίδραση του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού πάνω στις καμπύλες ανοδικής πόλωσης της 3^{ης} και της 4^{ης} κομμένης επιφάνειας εξαιτίας του αρχικού παθητικού δυναμικού των 0.5 V που ήταν ίδιο με αυτό του βαμμένου δείγματος (βλ. σχήμα 3.8)

Από την καμπύλη ανοδικής πόλωσης της επιφάνειας της 5^{ης} κοπής (σχήμα 3.9), εντοπίζεται μια περιοχή παθητικού ρεύματος αλλά σε πολύ υψηλό δυναμικό (Ca. 1.0 V). Αφού το παθητικό ρεύμα στη καμπύλη ανοδικής πόλωσης ήταν πιο πάνω από 0.5 V, η επίδραση σε υψηλό βαθμό κραμάτωσης της επιφάνειας μετά από την 5^η κοπή πάνω στη συμπεριφορά πόλωσης πλησιάζει την παθητική περιοχή των 1.0 V.



Σχήμα 3.8 – Καμπύλες ανοδικής πόλωσης του κανονικού και του επαναφερομένου χάλυβα



Σχήμα 3.9- Καμπύλες ανοδικής πόλωσης μετά την τραχείας κοπής και της λείας κοπής χρησιμοποιώντας το σύρμα

Μετά από τη μελέτη των επιφανειών των τριών δειγμάτων, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι αυξάνοντας το δυναμικό ανοδικής πόλωσης, παρατηρείται μια ζώνη παθητικοποίησης στο βαμμένο δείγμα ενώ οι καμπύλες ανοδικής πόλωσης των δύο άλλων δειγμάτων δεν παρουσιάζουν παθητική συμπεριφορά σε υψηλό δυναμικό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV

ΨΗΦΙΑΚΗ ΟΔΗΓΗΣΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΕΛΕΓΚΤΗ CNC [4.1]

4.1. Εισαγωγή

Η διαδικασία μικροκατεργασίας ηλεκτρικής εκκένωσης (micro electrical discharge machining / micro-EDM) έχει αποδειχτεί κατάλληλη για την κατασκευή τριδιάστατων μικρών τεμαχίων που είναι δύσκολο ή και αδύνατο να παραχθούν με άλλες διαδικασίες. Σε αυτήν την παρουσίαση αναπτύσσεται μία υψηλής ακρίβειας CNC μηχανή σύρματος ηλεκτρικής εκκένωσης (wire electrical discharge machine / wire-EDM) σχεδιασμένης ειδικά για την κατεργασία μικρών τεμαχίων και δομών σύνθετης σχεδίασης. Στην ανεπτυγμένη μηχανή, ένας νέος μηχανισμός μικρο-κοπής σύρματος σχεδιάζεται, μία προσέγγιση στον έλεγχο της τάσης σύρματος μέσω μαγνητικής δύναμης προτείνεται και μία στρατηγική σερβο-τροφοδοσία, σε συμφωνία με τη μετρούμενη διαφορά δυναμικού σχεδιάζεται κι εφαρμόζεται. Η επαλήθευση της λειτουργίας και των ικανοτήτων της μηχανής γίνεται με την κατασκευή αρκετών φαρδιών εσωτερικών κι εξωτερικών μικρογραναζιών και μιας οδοντωτής ράβδου. Έτσι φαίνεται ότι η γωνία λέπτυνσης κατά μήκος της επιφάνειας ή κοιλότητας ενός τεμαχίου που εμφανίζεται όταν χρησιμοποιούνται μικρο-EDM μέθοδοι μπορεί να αποφευχθεί. Επιτυγχάνεται μια πολύ καλή ακρίβεια διαστάσεων της τάξης του ενός μικρομέτρου (μm) κι ένα τελείωμα επιφάνειας με μέγιστη ακτίνα ίση με 0,64 μm . Η ικανοποιητική κοπή μιας τριδιάστατης μινιατούρας παγόδας με μια δομή μικροαγγίστρων αποκαλύπτει ότι η μηχανή είναι “έξυπνη” και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένα νέο εργαλείο για την κατασκευή πολύπλοκων μικροαντικειμένων.

Από τη σμίκρυνση ενός αντικειμένου προκύπτουν πολλά πλεονεκτήματα όπως οικονομία ενέργειας και χώρου, επιτάχυνση χημικών αντιδράσεων, ελκυστική εμφάνιση, μείωση κόστους και άλλα που οδηγούν σε ελαφρά, λεπτά, κοντά και μικρά προϊόντα εξαιρετικά χρήσιμα στη βιομηχανία, στις επικοινωνίες και στη βιοτεχνολογία. Με βάση τις σύγχρονες τάσεις γίνεται όλο και πιο δύσκολη η κατασκευή τεμαχίων σε σμίκρυνση. Ειδικά όταν το τεμάχιο είναι τριδιάστατο και πολύπλοκου σχήματος. Η μέθοδος μικρο-EDM είναι μία από τις εναλλακτικές μεθόδους που επιλέγεται μεταξύ των μη συμβατικών μεθόδων για την κατεργασία μικρών τεμαχίων. Στη διαδικασία μικρο-EDM η λέπτυνση σύρματος (Wire Electrical Discharge Grinding /WEDG) χρησιμοποιείται για την κατασκευή ενός μικροηλεκτροδίου. Το μικροηλεκτρόδιο που κατασκευάζεται έτσι χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μικρών οπών με EDM-διάνοιξη οπής ή για τη δημιουργία μικροσχισμών ή πολύπλοκων μικροκαλουπιών με διαδικασία μικρο-EDM τόνρευσης. Εφ’ όσον το μικροηλεκτρόδιο καταναλώνεται διαρκώς η αναπλήρωση της φθοράς του ηλεκτροδίου απαιτείται ώστε να διατηρηθεί υψηλή ακρίβεια διαστάσεων. Οι Yu [4.2] και Bleys [4.3] πρότειναν παρόμοιες στρατηγικές αναπλήρωσης μειώνοντας τη φθορά έτσι ώστε αυτή να συντελείται μόνο στην κάτω επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Παρ’ όλα αυτά, αυτό, αυξάνει τον χρόνο της κατεργασίας. Επίσης το πρόβλημα της γωνίας λείανσης κατά μήκος της επιφάνειας ενός τμήματος ή μιας κοιλότητας παραμένει και είναι πολύ δύσκολο αν όχι ακατόρθωτο να αποφευχθεί. Επιπλέον η διαδικασία μικρο-EDM τόνρευσης ακολουθούμενη από τη χρήση WEDG δεν ενδείκνυται όταν πρέπει να απομακρυνθεί μεγάλη ποσότητα υλικού. Σε τέτοια περίπτωση απαιτείται η χρήση ενός πολύ μακριού ηλεκτροδίου για να αναπληρώνει τη φθορά του εργαλείου αλλά τότε κραδασμοί ή αστάθεια του ηλεκτροδίου μπορεί να προκύψουν.

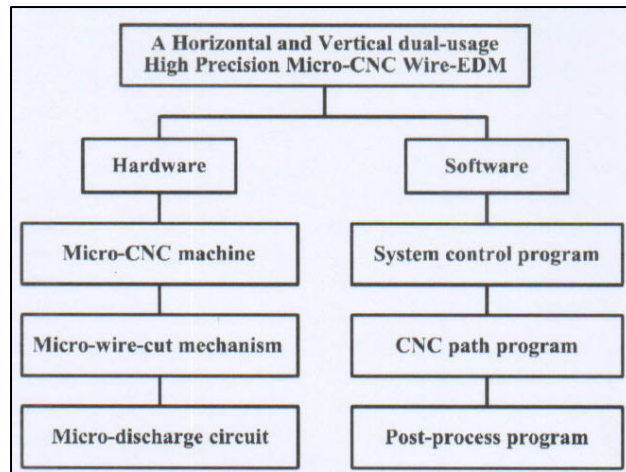
Μια άλλη κατηγορία μικροκατεργασίας είναι μια διαδικασία μικρο-κοπής σύρματος EDM στην οποία η κοπή πραγματοποιείται από ένα σύρμα διαστάσεων 0,02-0,05 mm. Αρκετοί

κατασκευαστές μηχανών EDM, όπως η ελβετική εταιρεία Agie Charmilles Ltd και οι ιαπωνικές Fanuc Ltd και Sodick Inc έχουν αναπτύξει τέτοιου είδους μηχανές. Ωστόσο, όπως και στις συμβατικές μηχανές EDM-σύρματος, όλες οι εμπορικά διαθέσιμες μηχανές EDM-μικροσύρματος μπορούν να λειτουργήσουν μόνο κατακόρυφα. Ανάλογα με την άρμωση του αντικειμένου εργασίας και τα χαρακτηριστικά του υπό κατασκευή τεμαχίου, σε ορισμένες περιπτώσεις η οριζόντια ή διαγώνια κατεργασία είναι προτιμότερη και η ακρίβεια διατηρείται καλύτερα με αυτόν τον τρόπο. Η τάση του σύρματος συνδέεται ισχυρά με την κάμψη και τους κραδασμούς του. Αυτό με τη σειρά του επηρεάζει την ευστάθεια της διαδικασίας και την ακρίβεια κατεργασίας. Ο ακριβής έλεγχος της τάσης ενός ορεχάλκινου μικροσύρματος με διάμετρο μικρότερη από 0,02 mm από ένα συμβατικό οδηγό και μηχανισμό φρένου είναι εξαιρετικά δύσκολος. Οι Kinoshita και Hayashi [4.4] πρότειναν τη χρήση ενός βραχίονα ενσωματωμένου με ένα ζεύγος μετρητών όγκου με laser για λόγους ελέγχου της τάσης του σύρματος. Μία κυψέλη φορτίου χρησιμοποιήθηκε από τον Yan [4.5]. Ωστόσο όλες αυτές οι προσεγγίσεις είναι δαπανηρές και δεν εφαρμόζονται σε μηχανές μικρού μεγέθους ειδικά σχεδιασμένες για δημιουργία μικρών τεμαχίων καθώς δεν επαρκεί ο χώρος για την τοποθέτηση των αισθητήρων μέτρησης.

Εδώ αναλύεται ένα “έξυπνο” CNC EDM-σύρματος υψηλής ακρίβειας για την κατασκευή πολύπλοκων μικρών τεμαχίων. Σχεδιάστηκε και τοποθετήθηκε ένας νέος μηχανισμός που επιτρέπει στο σύρμα την οριζόντια, κάθετη ή διαγώνια κοπή. Λεπτομέρειες των προσεγγίσεων για τη διασφάλιση της σταθερότητας της κίνησης του σύρματος συμπεριλαμβανομένης και της τάσης του σύρματος περιγράφονται επίσης. Χρησιμοποιώντας την εν λόγω μηχανή μόλις ένα τεμάχιο εργασίας αρμόζεται στη βάση της μηχανής, το μερικώς τελειωμένο μικροτεμάχιο δε χρειάζεται να απομακρυνθεί και να επανατοποθετηθεί μέχρι να ολοκληρωθούν όλες οι προγραμματισμένες εργασίες. Αυτό αυξάνει τον βαθμό ελευθερίας της κατεργασίας, μειώνει τον χρόνο που απαιτείται για φόρτωση κι εκφόρτωση και το σημαντικότερο, η ακρίβεια των διαστάσεων και η γεωμετρική ακρίβεια του υπό κατασκευή τεμαχίου μπορεί να εξασφαλιστεί. Η κοπή διαφόρων μικροτεμαχίων εκτελείται και η προκύπτουσα ακρίβεια γεωμετρίας και διαστάσεων καθώς και το τελείωμα των επιφανειών (φινίρισμα) αξιολογούνται.

4.2. Ανάπτυξη Μηχανής

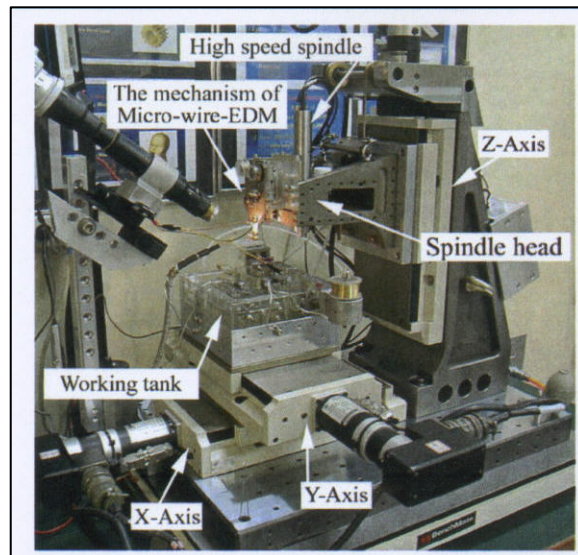
Τα χαρακτηριστικά της μηχανής φαίνονται στο σχήμα 4.1. Το υλικό μέρος περιλαμβάνει τρία βασικά τμήματα: μια CNC μηχανή τραπέζης (tabletop), έναν μηχανισμό κοπής CNC μικροσύρματος διπλής χρήσης κι ένα ζεύγος κυκλωμάτων μικροεκκένωσης. Το λογισμικό αποτελείται από τρία υποσυστήματα, δηλαδή ένα πρόγραμμα ελέγχου συστήματος, ένα CNC πρόγραμμα κι ένα πρόγραμμα μεταδιαδικαστικό.



Σχήμα 4.1- Δομή της μηχανής CNC

4.2.1 Μηχανή CNC τραπέζης (tabletop)

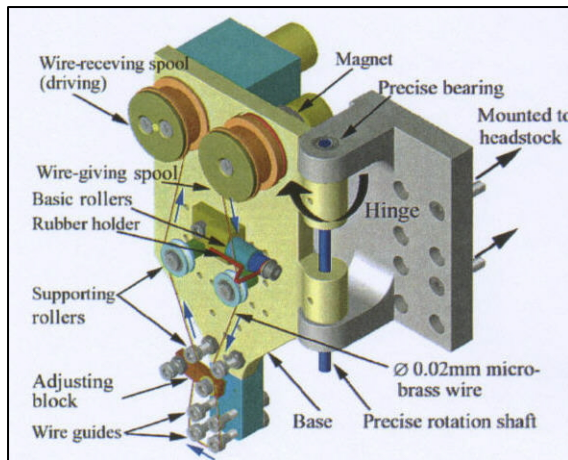
Το σχήμα 4.2 δείχνει τη φωτογραφία της μηχανής. Λόγω του τμηματοποιημένου (modularized) σχεδιασμού του συστήματος η μηχανή μπορεί να πραγματοποιήσει γενικά μικροτόρνευση, μικρο-EDM, μικροτόρνευση υψηλής ταχύτητας, μικροτόρνευση EDM καθώς και μικρο-EDM σύρματος. Το κείμενο εστιάζει μόνο στο μικρο-EDM σύρματος.



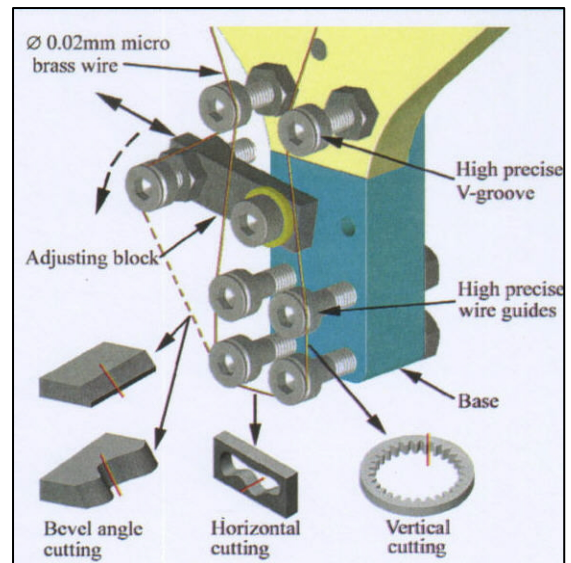
Σχήμα 4.2- Μηχανή CNC τραπέζης υψηλής ακρίβειας και μηχανισμός του σύρματος κοπής

4.2.2 Μηχανισμός μικροκοπής σύρματος

Ένας νέος μηχανισμός μικροκοπής με σύρμα σχεδιάστηκε και φαίνεται στο σχήμα 4.3. Ένα μικροσύρμα από ορείχαλκο διαμέτρου 0,02 mm αρχίζει από το πηνίο-πάροχο καλωδίου. Περνά μέσω ενός ζεύγους από λαστιχένια στηρίγματα, δύο ζεύγη από υποστηρικτικά στροφεία και τέσσερις οδηγούς σύρματος για να φτάσει στον οδηγό παραλαβής σύρματος. Δύο ζεύγη κάθετων οδηγών σύρματος επιτρέπουν κοπή με κάθετο σύρμα ενώ οι άλλοι δύο οριζόντιοι οδηγοί καλωδίου σχεδιάστηκαν για οριζόντια κοπή σύρματος. Επιπλέον, η διαδρομή του χάλκινου σύρματος μπορεί να προσαρμοστεί σε μία επικλινή επιφάνεια ώστε να εφαρμοστεί κοπή υπό γωνία προσαρμόζοντας ένα τμήμα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4. Αυτός ο μηχανισμός μπορεί να αρμωθεί κατευθείαν στη μπροστινή επιφάνεια της ατρακτοειδούς κεφαλής και μπορεί να περιστραφεί με μία κάθετη στρόφιγγα. Τρία είδη ελέγχου λαμβάνονται υπ' όψη για την ευστάθεια της κίνησης του σύρματος σε όλη τη διαδρομή, που είναι ο έλεγχος της τάσης, της ταχύτητας και των κραδασμών.



Σχήμα 4.3- Νέος μηχανισμός μικροκοπής



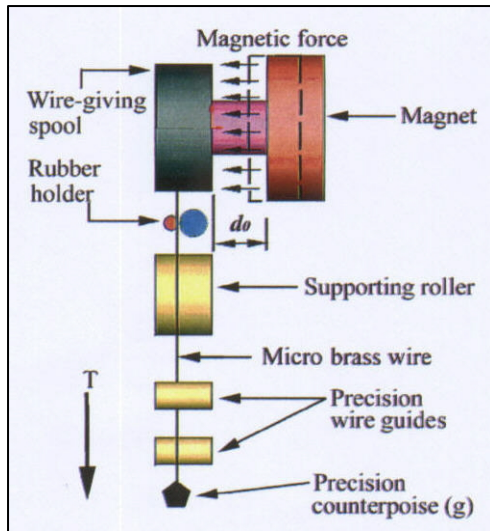
Σχήμα 4.4- Μερική μεγέθυνση του μηχανισμού μικροκοπής για οριζόντια, κάθετη και φαλτσογωνιακή κοπή.

4.2.2.1 Έλεγχος τάσης στο ορείχάλκινο μικροσύρμα.

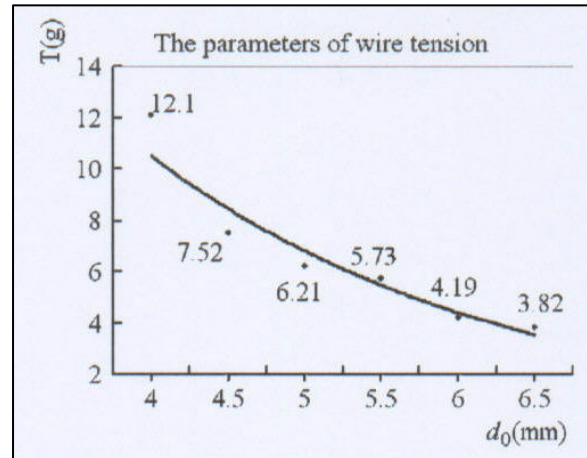
Η τάση στο μικροσύρμα ελέγχεται με τη μέθοδο μαγνητικής δύναμης όπως φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 4.5. Στο σύστημα, το πηνίο παραλαβής σύρματος είναι ο οδηγός τροχός, και το πηνίο παράδοσης σύρματος είναι ο παθητικός τροχός.

Το ορείχάλκινο μικροσύρμα μεταβιβάζεται με μία εξαιρετικά χαμηλή και σταθερή ταχύτητα στο πηνίο παραλαβής σύρματος. Μια συσκευή μαγνητικής δύναμης τοποθετείται σε μια απόσταση d_0 μακριά από το πηνίο παράδοσης σύρματος. Το πηνίο παράδοσης σύρματος υπόκειται σε μια μεγαλύτερη μαγνητική δύναμη κι έτσι σφίγγει το σύρμα όταν η απόσταση d_0 μειώνεται, και το αντίστροφο. Προκαταρκτικές μελέτες έχουν αποκαλύψει ότι λέπτυνση ενός σύρματος ορείχαλκου διαμέτρου 0,02 mm συντελείται όταν εφαρμόζεται μια τάση μεγαλύτερη από περίπου 4,5 g. Ένα απλό πείραμα διεξάγεται για να καθοριστεί η σχέση μεταξύ της τάσης του σύρματος και της απόστασης d_0 . Ένα υψηλής ακρίβειας αντίβαρο αιωρείται στο ελεύθερο

άκρο του ορειχάλκινου μικροσύρματος για να μετρήσει την τάση του. Το αντίβαρο ακριβείας θα κατέβει αργά αν το βάρος του υπερβεί τη μαγνητική δύναμη. Αλλιώς, θα είναι σε ισορροπία. Έτσι, το βάρος του αντίβαρου ακριβείας θα πρέπει να μειωθεί ανάλογα αν η απόσταση d_0 αυξηθεί ώστε να διατηρείται ισορροπία. Με άλλα λόγια, η τάση στο σύρμα μειώνεται με την αύξηση της απόστασης d_0 . Πειραματικά δεδομένα που συσχετίζουν την τάση σύρματος και την απόσταση d_0 δίνονται στο σχήμα 4.6, όπου η καμπύλη είναι η σχέση οπισθοχώρησης. Έχει βρεθεί ότι μία τάση σύρματος 4,19 g είναι κατάλληλη, και η αντίστοιχη d_0 των 6,0 mm επιλέγεται μέσω των πειραμάτων.



Σχήμα 4.5- Έλεγχος της τάσης του ορειχάλκινου ηλεκτροδίου



Σχήμα 4.6- Καμπύλη της τάσης του ορειχάλκινου ηλεκτροδίου

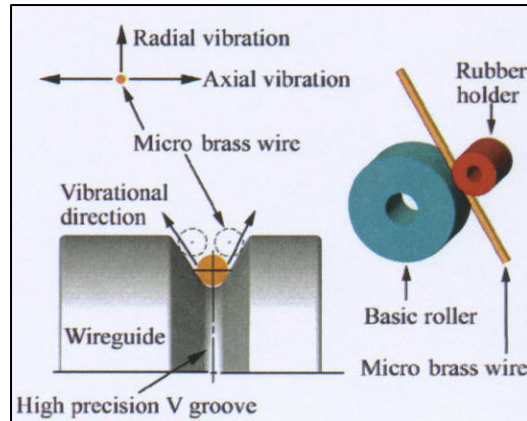
4.2.2.2 Έλεγχος της ταχύτητας του σύρματος.

Είναι ακριβό και δύσκολο να ανοιχτεί μία οπή διαμέτρου 0,02 mm στον διαμαντένιο κύβο που έλκει το σύρμα ώστε να οδηγείται το σύρμα στη διαδικασία EDM-σύρματος. Στη μηχανή που αναπτύσσεται, οι οδηγοί συρμάτων με μία υψηλής ακρίβειας αυλάκωση V χρησιμοποιούνται αντί γι αυτό. Παρατηρείται στη διαδικασία κατεργασίας ότι μία ελαφρά απόκλιση της τάσης σύρματος μπορεί να οδηγήσει σε δονήσεις του σύρματος κατά την αξονική ή ακτινική διεύθυνση στην αυλάκωση V όπως δείχνεται στο σχήμα 4.7. Η πιθανότητα και ενίσχυση της δόνησης αυξάνεται κάτω από συνθήκες υψηλότερης ταχύτητας σύρματος. Επομένως, ο έλεγχος της ταχύτητας του μικροσύρματος είναι απαραίτητος.

Προκειμένου να μειωθούν οι δονήσεις του σύρματος που προέρχονται από την κίνηση της μηχανής και το περιβάλλον, ένα λαστιχένιο στήριγμα τοποθετείται ώστε να είναι σε επαφή με τον βασικό τροχό κατά μήκος της διαδρομής του σύρματος όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7. Αυτό το λαστιχένιο στήριγμα λειτουργεί σαν ένας αποσβεστήρας κραδασμών ενώ πιέζει το σύρμα ώστε να αποφεύγονται οι δονήσεις και όποιες άλλες μικρές κινήσεις.

Το μέγεθος της δόνησης του χάλκινου μικροσύρματος παρατηρήθηκε κάτω από ένα υψηλής μεγέθυνσης μικροσκόπιο. Βρέθηκε ότι κάτω από συνθήκες τάσης 4,19 g ($d_0 = 6,0$ mm), η μέγιστη έκταση είναι εντός του 1 μm τόσο στην αξονική όσο και στην ακτινική διεύθυνση, υπό την ταχύτητα σύρματος 30 mm/min. Βρέθηκε επίσης ότι μια μικρότερη απόσταση d_0 οδηγεί σε μικρότερη επίδραση υστέρησης από τον μαγνήτη. Η επίδραση υστέρησης οδηγεί στην

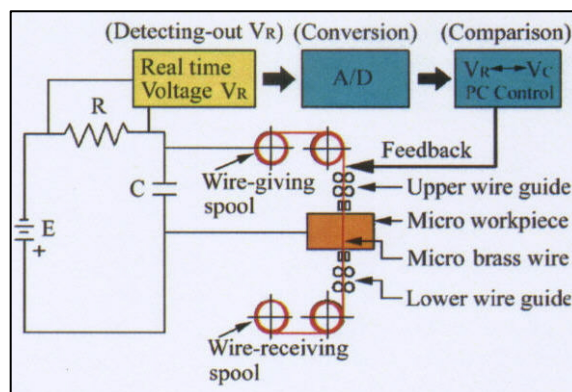
ασταθή κίνηση του ορειχάλκινου μικροσύρματος. Για την αποφυγή του φαινομένου υστέρησης και της λέπτυνσης του σύρματος εξαιτίας της μεγάλης τάσης, μία έκταση εντός του 1 μm βρέθηκε ότι είναι η πρέπουσα. Έτσι, η ταχύτητα σύρματος των 30 mm/min και η απόσταση $d_0 = 6,0$ mm επιλέγονται στα πειράματα.



Σχήμα 4.7- Ελαστικό στήριγμα σε επαφή με τον βασικό τροχό για τη μείωση των δονήσεων του σύρματος

4.2.3 Κύκλωμα παραγωγής παλμών και έλεγχος σερβο-τροφοδοσίας

Στη μέθοδο μικρο-EDM, το κύκλωμα αντίστασης-πυκνωτή (RC) εφαρμόζεται πάντα σαν κύκλωμα εκκένωσης γιατί μπορεί να προκαλέσει ένα ρεύμα εκκένωσης με βραχύ παλμό και μεγάλη κορυφή [13], που οδηγεί σε πολύ χαμηλό κοίλωμα εκκένωσης. Σαν αποτέλεσμα, επιτυγχάνεται καλύτερο τελείωμα της επιφάνειας από εκείνο ενός κυκλώματος με τρανζίστορ. Το κύκλωμα RC που χρησιμοποιείται στην υπό ανάπτυξη μηχανή φαίνεται στο σχήμα 4.8. Η προσέγγιση στον καθορισμό του κατάλληλου πυκνωτή θα αναφερθεί στην παράγραφο 4.3.

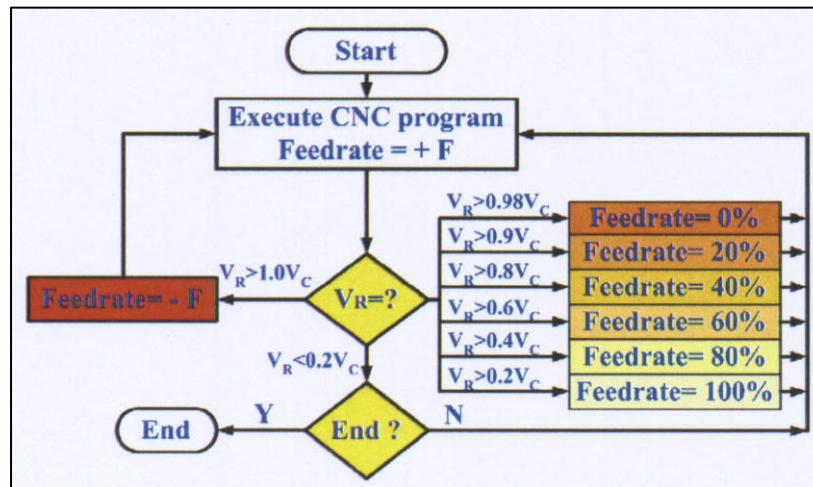


Σχήμα 4.8- Κύκλωμα τροφοδοσίας RC του μικροσύρματος της EDM

Όπως και στις συμβατικές μηχανές σύρματος-EDM, ένας καλός έλεγχος σερβοτροφοδοσίας χρειάζεται προκειμένου να διατηρείται σταθερό κενό για καλύτερη απόδοση της μηχανής. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8, το ρεύμα κατά μήκος της αντίστασης R γίνεται πολύ μικρό όταν το κενό είναι σταθερό και η εκκένωση είναι μόνιμη. Καθορίζοντας το δυναμικό και στα δύο άκρα της αντίστασης σαν “Real-time voltage V_R ”, το V_R μπορεί να ληφθεί σαν παράμετρος που θα αντικατοπτρίζει την κατάσταση του κενού στην κατεργασία. Ένα μεγάλο V_R δείχνει ότι υπάρχουν περισσότερες εκκενώσεις βραχυκυκλωμάτων. Η ποσότητα V_R είναι το προϊόν της R και των ροών ρεύματος δια του κενού (I), δηλαδή

$$V_R = R I. \quad (1)$$

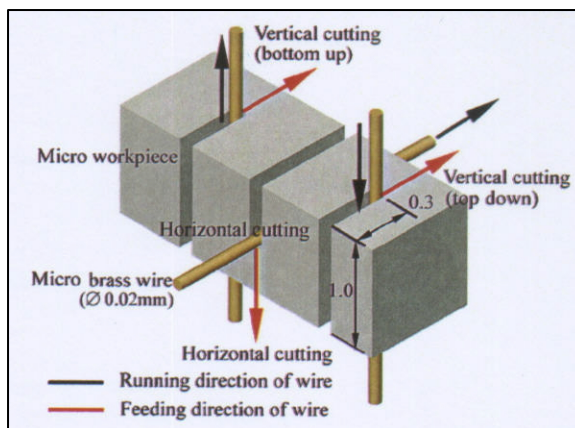
Έτσι, η κατάσταση της διαδικασίας μικροσύρματος-EDM μπορεί να παρατηρείται μέσω της συνεχούς μέτρησης του V_R . Αφού το μετρούμενο V_R είναι ένα αναλογικό σήμα, μετατρέπεται σε ψηφιακά δεδομένα μέσω ενός μετατροπέα A/D πριν εισαχθεί σε ένα PC, και μετά συγκριθεί με μία προκαθορισμένη τάση V_C . Ο ρυθμός τροφοδοσίας ενός ηλεκτροδίου μικροσύρματος ρυθμίζεται ανάλογα με τη μεταβολή του ψηφιακού V_R . Ένα διάγραμμα της διάταξης ελέγχου φαίνεται στο σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9- Διάγραμμα ελέγχου της σερβοτροφοδοσίας

4.3. Καθορισμός του σωστού πυκνωτή του κυκλώματος εκκένωσης

Προκειμένου να καθοριστεί η σωστός πυκνωτής του κυκλώματος εκκένωσης, διεξάγονται προκαταρκτικά πειράματα κοπής σχισμών. Τρεις τρόποι κοπής καταχωρούνται σύμφωνα με την κατεύθυνση στην οποία κινείται το μικροσύρμα. Αυτοί είναι κοπή από πάνω προς τα κάτω, κοπή από κάτω προς τα πάνω και οριζόντια κοπή, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10- Τρεις τρόποι κοπής με μικροσύρμα EDM

Το υλικό κατεργασίας είναι χαλκός πάχους 1,0 mm και η απόσταση κοπής είναι 0,3 mm. Κόβεται κάτω από διαφορετικές συνθήκες ενεργειακής εκκένωσης. Το διηλεκτρικό υλικό που χρησιμοποιείται είναι φωτιστικό πετρέλαιο. Το τεμάχιο εργασίας βυθίζεται στο διηλεκτρικό υλικό και μια αργή ροή του διηλεκτρικού υλικού εφαρμόζεται ταυτόχρονα κατά τη διαδικασία κατεργασίας. Οι σχετικές παράμετροι συνοψίζονται στον πίνακα 4.1.

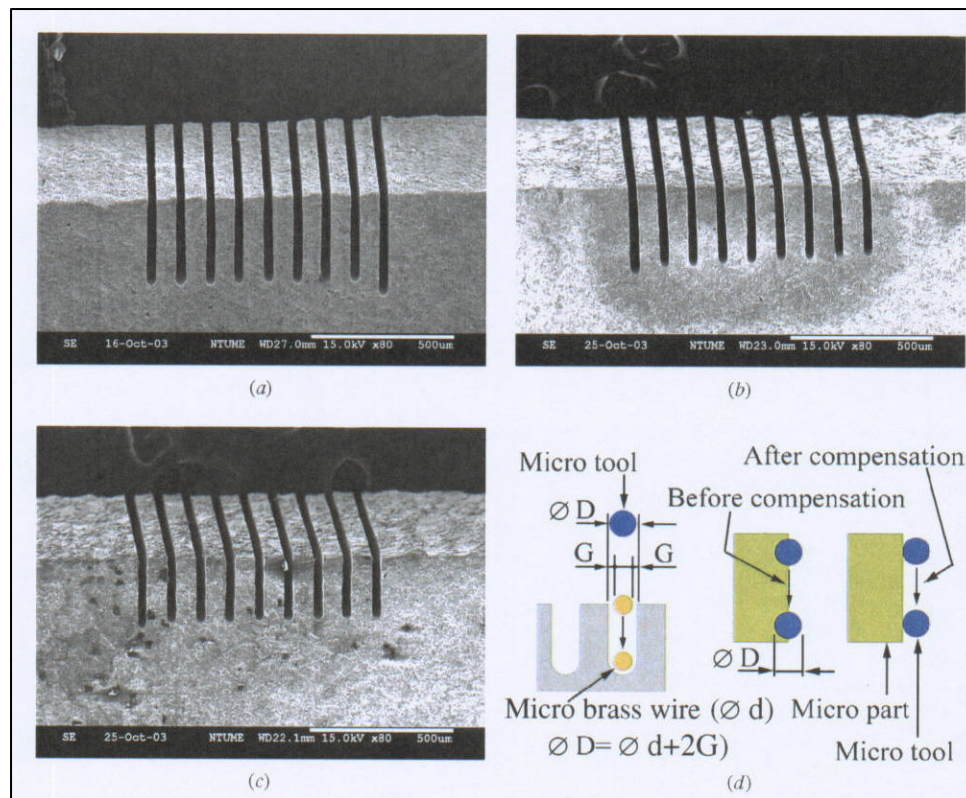
Υλικό του σύρματος	Ορείχαλκος
Διάμετρος του σύρματος	0.02mm
Υπό κατεργασία υλικό	Χαλκός
Πολικότητα	Αρνητική
Τάση εργασίας	80 V
Παροχή	0.06 mm/min
Πάχος κοπής	1.0 mm
Απόσταση κοπής	0.3 mm

Πίνακας 4.1: Παράμετροι του πειράματος

Οι σχισμές που επιτυγχάνονται από τους τρεις διαφορετικούς τρόπους κοπής φαίνονται στα σχήματα 4.11 (a)-(c). Η επιθεώρηση αυτών των σχισμών κάτω από ένα SEM αποκαλύπτει ότι οι σχισμές ικανοποιούν την απαίτηση της διαστατικής ακρίβειας, της γεωμετρικής ακρίβειας και της τραχύτητας επιφανείας. Ο πίνακας 4.2 δείχνει το πλάτος σχισμής και τον χρόνο κατεργασίας για τους διαφορετικούς τρόπους κατεργασίας και τους διαφορετικούς πυκνωτές εκκένωσης. Από αυτόν τον πίνακα, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η χρήση ενός πυκνωτή των 680 pF οδηγεί στο μικρότερο κενό εκκένωσης και στον μικρότερο χρόνο κατεργασίας, με άλλα λόγια σε καλύτερη απόδοση. Σημειώνεται επίσης ότι οι τρεις τρόποι κατεργασίας καταλήγουν σε συγκρίσιμους χρόνους κατεργασίας. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι συνθήκες της απομάκρυνσης των καταλοίπων μακριά από το κενό εκκένωσης είναι παρόμοιες. Ακόμη, η συχνότητα των βραχυκυκλωμάτων και των εκκενώσεων τόξου είναι επίσης παρόμοιες. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα ο κατάλληλος πυκνωτής εκκένωσης καθορίζεται στα 680 pF, και χρησιμοποιείται σε αυτήν την κατεργασία μικροτεμαχίων.

Τάση εργασίας	Χωρητικότητα εργασίας	Ταχύτητα σύρματος	Παροχή	Τάση σύρματος
80 (V)	680 (pF)	0.30 (mm/min)	0.06 (mm/min)	4.19 V

Πίνακας 4.2. Συνθήκες κατεργασίας που χρησιμοποιούνται για εξακρίβωση



Σχήμα 4.11- Δείγματα μικροσχισμών και έλεγχος της διαστατικής ακρίβειας
 (a) κάθετη κοπή (από κάτω προς τα πάνω)
 (b) οριζόντια κοπή
 (c) κάθετη κοπή (από πάνω προς τα κάτω)
 (d) διάμετρος του μικροεργαλείου και υπολογιζόμενη διαδρομή του εργαλείου

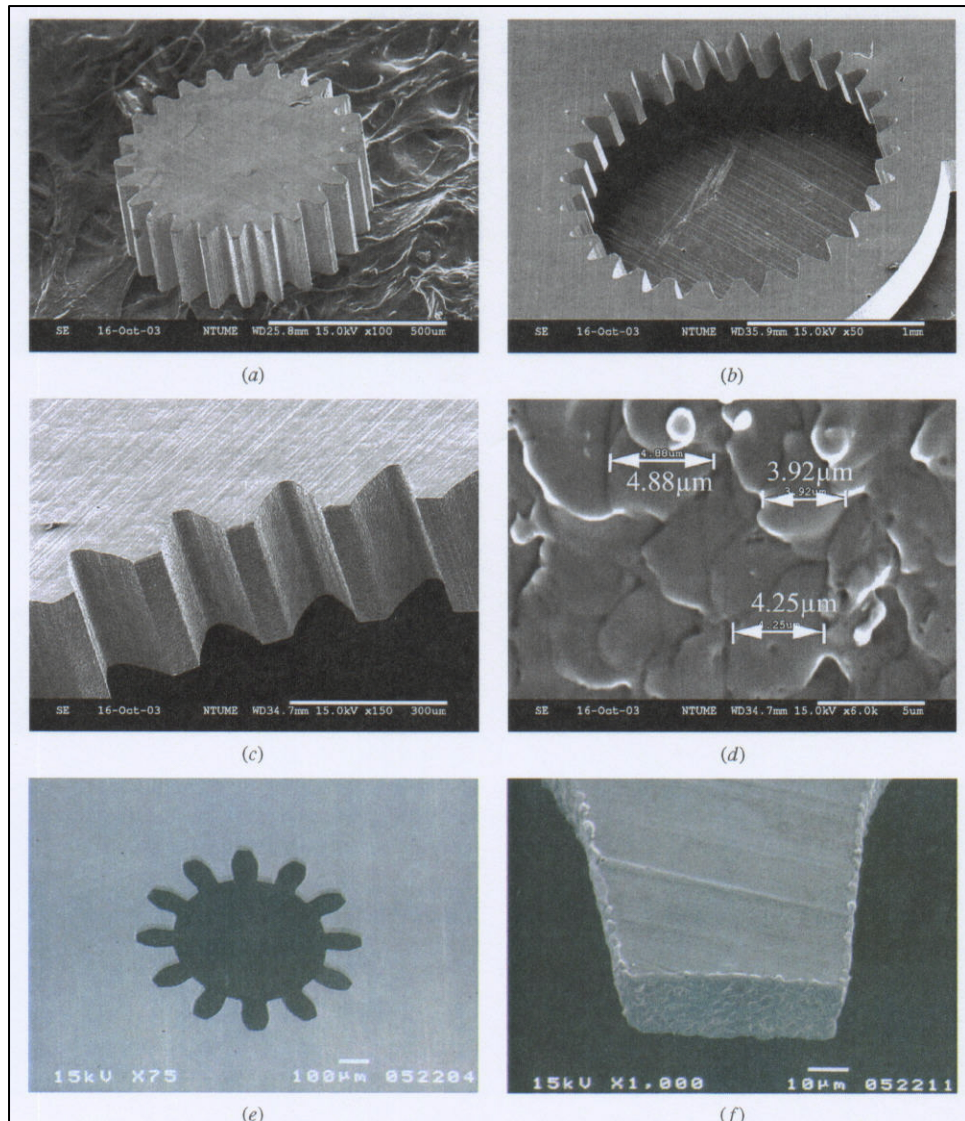
Η διαστατική ακρίβεια του πλάτους κοπής είναι πολύ σημαντική στην κοπή μικροτεμαχίων. Το δημιουργούμενο πλάτος κοπής προκύπτει από τη διάμετρο του ορειχάλκινου μικροσύρματος και δύο πλευρικά κενά εκκένωσης. Στην προσέγγισή μας το πλάτος κοπής λαμβάνεται ως η διάμετρος ενός μικροεργαλείου, και υπολογίζεται μέσω κατάλληλου σχεδιασμού της διαδρομής εργαλείου CNC. Η διάμετρος του μικροεργαλείου και της υπολογιζόμενης διαδρομής εργαλείου παρουσιάζονται στο σχήμα 4.11 (d). Με αυτόν τον τρόπο, η διαστατική ακρίβεια των κατεργαζομένων μικροτεμαχίων παραμένει εντός των ορίων ακρίβειας θέσης της μηχανής: 1 μm στην περίπτωσή μας.

4.4. Πιστοποίηση της ικανότητας κατεργασίας

Διάφορα μικροτεμάχια και διάφορες μικροδομές κατεργάζονται. Οι συνθήκες κατεργασίας που χρησιμοποιούνται φαίνονται στον πίνακα 3. Η επιλογή της οριζόντιας ή της κάθετης κοπής με σύρμα εξαρτάται από τη δυσκολία στη σύσφιξη του προς επεξεργασία μικροτεμαχίου στην κλίνη.

4.4.1 Παραδείγματα κάθετης κοπής σύρματος

Μια κάθετη διάταξη σύρματος χρησιμοποιείται για την κατασκευή εσωτερικού και εξωτερικού μικρο-οδοντωτού τροχού (γρاناζιού), καθώς τόσο η σύσφιξη του τεμαχίου όσο και ο σχεδιασμός της πορείας του CNC είναι ευκολότερο να επιτευχθούν. Ο τρόπος κατεργασίας φαίνεται στα σχήματα 4.4 και 4.10. Οι παράμετροι σχεδίασης του μικρογρاناζιού υπό έλεγχο δίνονται στον πίνακα 4.1. Το ολοκληρωμένο εσωτερικό και εξωτερικό μικρογρανάζι δείχνονται στο σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12- Κατεργασία ενός μικρογρاناζιού

- (a) εξωτερικό μικρογρاناζιού
- (b) εσωτερικό μικρογρاناζιού
- (c) μικρό-μεγέθυνση εσωτερικού του μικρογρاناζιού
- (d) κοιλότητα εσωτερικού μικρογρاناζιού
- (e) μικρογρανάζι κατασκευασμένο με την μέθοδο κατασκευής καλουπιών
- (f) μερική μεγέθυνση ενός δοντιού γρاناζιού

Φαίνεται από τα σχήματα 4.12 (a)-(c) ότι δεν υπάρχει γωνία λέπτυνσης κατά το βάθος των δοντιών του γραναζιού κι επιτυγχάνεται ένα πολύ καλό επίπεδο ακρίβειας. Για λόγους σύγκρισης, ένα εσωτερικό μικρογρανάτζι κατεργασμένο από EDM τόνρευση ακολουθούμενη από WEDG του μικροηλεκτροδίου φαίνεται στο σχήμα 4.12 (e), και η μερική μεγέθυνση του ενός δοντιού δίνεται στο σχήμα 4.12 (f). Η γωνία λέπτυνσης κατά το πλάτος των δοντιών είναι εμφανής. Αυτό προκαλείται από την αναπόφευκτη φθορά του μικροηλεκτροδίου στη μέθοδο EDM, που είναι το αποτέλεσμα από εκκενώσεις τόξου που προκαλούνται από κατάλοιπα που δεν έχουν εκπλυθεί πλήρως.

Η επιφάνεια που επιθεωρείται σε SEM φαίνεται στην εικόνα 4.12 (d). Η μέση διάμετρος μιας οπής μικρο εκκένωσης είναι περίπου 4,0 μm, και η σχέση μεταξύ της οπής από μία και μόνη εκκένωση και της τραχύτητας επιφανείας R_{max} είναι [13] :

$$R_{max} = 2 h_1 + h_2 , \quad d = (10 \sim 20) h_1 \quad (2)$$

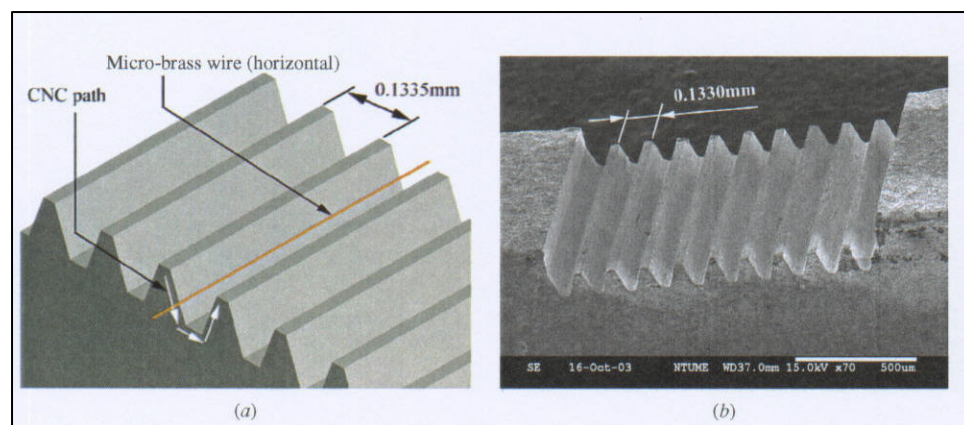
όπου d και h_1 είναι η διάμετρος και το βάθος μιας οπής από μία και μόνη εκκένωση, αντίστοιχα. Η ποσότητα h_2 είναι το προεξέχον ύψος γύρω από την οπή εκκένωσης, και είναι περίπου 0,2μm. Λαμβάνοντας $d = 4,0 \mu\text{m}$ και αν $d = 18 h_1$, τότε

$$R_{max} = 2 \times 4,0 / 18 + 0,2 = 0,64 \mu\text{m} \quad (3)$$

δηλαδή η τραχύτητα στην επιφάνεια του εσωτερικού μικρογραναζιού είναι περίπου $R_{max} = 0,64 \mu\text{m}$ ($R_a = 0,16 \mu\text{m}$).

4.4.2 Παράδειγμα Οριζόντιας κοπής σύρματος

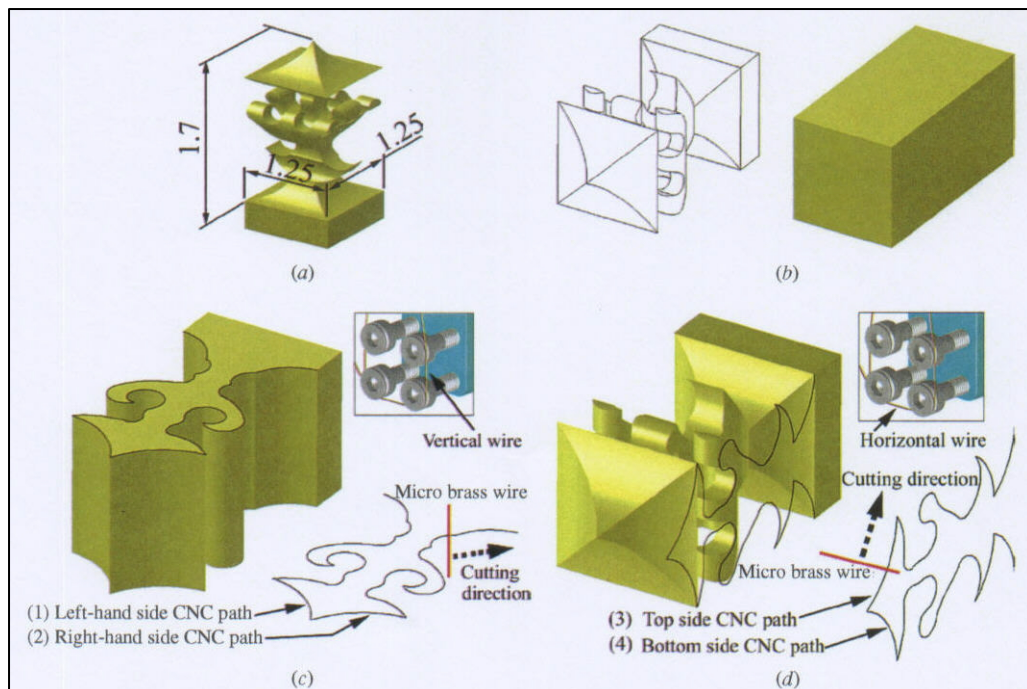
Με τη χρήση της μηχανής που αναπτύχθηκε, μικροτεμάχια μπορούν να κοπούν μέσω μιας οριζόντιας διάταξης σύρματος αν η κάθετη κοπή δεν ενδείκνυται. Η μικρο-οδοντωτή ράβδος είναι ένα παράδειγμα. Ο τρόπος κατεργασίας φαίνεται στα σχήματα 4.4 και 4.10. Η μικρο-οδοντωτή ράβδος με μία κυκλική κλίση σχεδίασης 0,1335mm φαίνεται στο σχήμα 4.13(a). Η μέτρηση σε SEM μικροφωτογράφιση αποκαλύπτει ότι η κυκλική κλίση είναι 0,1330mm (αναφέρεται στο σχήμα 4.13(b)). Έτσι, η διαστατική ακρίβεια που επιτυγχάνεται είναι εντός του 1μm.



Σχήμα 4.13- Σχεδίαση μικρο-οδοντωτής ράβδου
 (a) σχεδίαση με 3D CAD
 (b) η μικροφωτογράφιση SEM της μικρής οδοντωτής ράβδου

4.4.3 Παραδείγματα οριζόντιας και κάθετης κοπής σύρματος

Προκειμένου να δοκιμαστεί περαιτέρω η δυνατότητα της μηχανής, μια παγίδα μινιατούρα με μια ειδική δομή όπως φαίνεται στα σχήματα 4.14 (a) και (b) λαμβάνεται ως άλλο παράδειγμα. Με χρήση της συμβατικής μεθόδου κάθετης κοπής, το μικροτεμάχιο χρειάζεται να αποσυνδεθεί, να στραφεί κατά 90° και να επανατοποθετηθεί για να ακολουθήσει η κοπή των άνω και κάτω πλευρών αφού οι δομές δεξιά κι αριστερά έχουν κατεργαστεί. Αν το τεμάχιο έχει εφαρμοστεί κάθετα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος οριζόντιας κοπής σύρματος. Οι πλευρές δεξιά κι αριστερά της παγίδας κόβονται αρχικά. Στη συνέχεια, ο μηχανισμός κοπής σύρματος στρέφεται κατά 90° , και μετά η κοπή των άλλων δύο πλευρών πραγματοποιείται με τη χρήση της ίδιας μεθόδου οριζόντιας κοπής σύρματος.

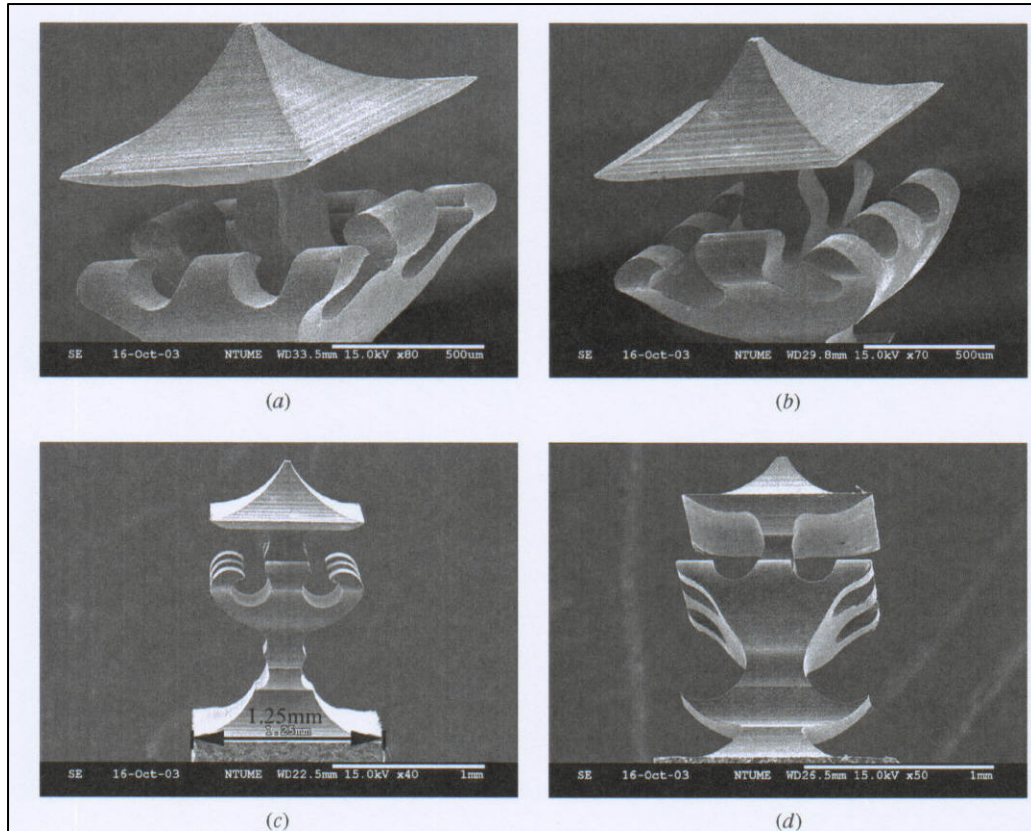


Σχήμα 4.14- Σχεδίαση και ψηφιακός έλεγχος της παγίδας μινιατούρας

- (a) σχεδίαση με 3D CAD
- (b) άλλη οπτική γωνία και υλικό εργασίας
- (c) πλάγια δεξιά και αριστερά όψη της παγίδας
- (d) άνω και κάτω πλευρά

Οποιαδήποτε από τις προαναφερθείσες προσεγγίσεις είναι κουραστική και χρονοβόρα. Η ακρίβεια τοποθέτησης είναι επίσης πολύ δύσκολο να εγγυηθεί. Αντίθετα, το έργο μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί με τη χρήση μεθόδων κάθετης και οριζόντιας κοπής σύρματος κατά σειρά (όπως αναφέρονται στα σχήματα 4.4 και 4.10). Ειδικότερα, η διαδρομή CNC αποτελείται από τέσσερα μέρη, την κοπή της αριστερής, δεξιάς, άνω και κάτω πλευράς, αντίστοιχα. Αρχικά, η αριστερή και δεξιά πλευρά της παγίδας κόβονται από το κάθετο σύρμα σύμφωνα με τη σχεδιασμένη διαδρομή CNC όπως φαίνεται στην εικόνα 4.14 (c). Ύστερα η άνω και κάτω πλευρά κόβονται με τη χρήση του οριζόντιου σύρματος όπως φαίνεται στην εικόνα 4.14 (d). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παγίδα μινιατούρα δεν εκφορτώνεται, μετακινείται ή επανατοποθετείται μέχρι να ολοκληρωθεί.

Το ολοκληρωμένο κατεργασμένο τεμάχιο φαίνεται στα σχήματα 4.15 (a) – (d). Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι κράμα αλουμινίου 6061. Προκειμένου να βελτιωθεί η έκπλυση των καταλοίπων, το τεμάχιο βυθίζεται στο διηλεκτρικό υλικό κατά την κοπή με μία αργή εφαρμογή ροής του διηλεκτρικού υλικού (στην περίπτωση μας φωτιστικού πετρελαίου). Ο χρόνος κατεργασίας είναι περίπου 1 h για κάθε πλευρά της παγόδα μινιατούρα.



Σχήμα 4.15. Η κατεργασμένη παγόδα μινιατούρα

- (a) μερική μεγέθυνση
- (b) μερική μεγέθυνση μιας άλλης οπτικής γωνίας
- (c) πρόοψη
- (d) κάτοψη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ EDM (ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΤΑΧΥΡΡΥΘΜΗΣ ΚΟΠΗΣ)

5.1. Εισαγωγή

Οι σύγχρονες μέθοδοι παραγωγής καλουπιών και εργαλείων χύτευσης διαφέρουν σε σχέση με τον παραδοσιακό τρόπο κατεργασίας. Αν και η βασική θεωρία της διαδικασίας και της γεωμετρίας της κοπής παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες, υπάρχουν διαφορές ως προς την τεχνική και την τεχνολογία. Οι αρχές της ταχύρρυθμης κοπής (HSC) δεν εφαρμόζονται με τα συμβατικά εργαλεία. Η διαφορά μεταξύ συμβατικής και ταχύρρυθμης κοπής αναλύεται στη δημιουργία των chip. Η σύγκριση μεταξύ EDM και HSM δείχνει ότι η δεύτερη μέθοδος παρουσιάζει μεγάλα πλεονεκτήματα. Ταυτόχρονα, η χρήση σύγχρονου λογισμικού (CAM) βελτιστοποιεί την παραγωγή εργαλείων και βοηθά στον περιορισμό περιττού χρόνου και κόστους κατεργασίας.

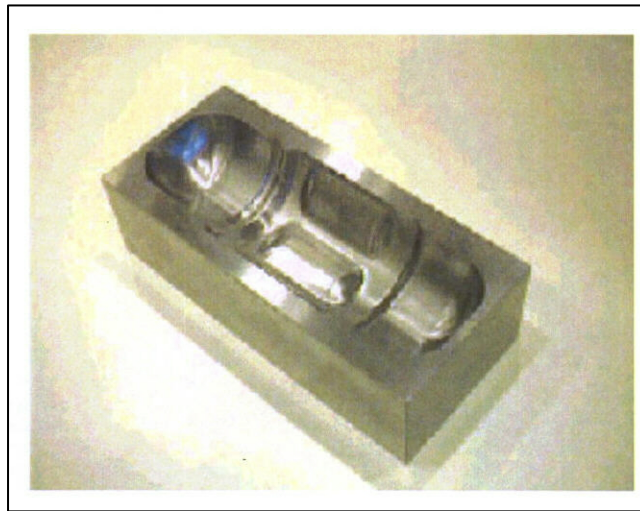
Η ταχύρρυθμη κατεργασία (που αναφέρεται ως HSM) είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία παραγωγής που επιτρέπει υψηλότερη παραγωγικότητα, άριστη επιφάνεια φινιρίσματος και καλή ακρίβεια διαστάσεων στη διαδικασία παραγωγής. Η παραγωγή εργαλείων καλουπιών περιλαμβάνει κυρίως: πλαστικά καλούπια, καλούπια χύτευσης, καλούπια κενού και μήτρες σφυρηλάτησης. Η ταχύρρυθμη διαμόρφωση είναι μια από τις σημαντικότερες ταχύρρυθμες μεθόδους κοπής [5.1-5.3]. Λόγω της προόδου στη λειτουργία των εργαλείων μηχανής, η ταχύρρυθμη διαμόρφωση είναι πια μια οικονομικά συμφέρουσα μέθοδος παραγωγής που παράγει τεμάχια με υψηλή ποιότητα επιφάνειας, χαμηλές διακυμάνσεις στην επιφάνεια κατεργασίας και ακρίβεια διαστάσεων. Η ταχύρρυθμη διαμόρφωση πρωτοχρησιμοποιήθηκε στη βιομηχανία αεροσκαφών και οχημάτων για την κατεργασία πολύπλοκων τμημάτων μηχανών από αλουμίνιο και κράματά του. Πρόσφατα, με την πρόοδο των υλικών κοπτικών εργαλείων και των τεχνολογιών, η ταχύρρυθμη διαμόρφωση χρησιμοποιήθηκε στην κατεργασία κραμάτων χάλυβα στη σκληρημένη μορφή τους (πάνω από 30 και ως 60-65 HRC) [5.4,5.5].

Οι απαιτήσεις των πελατών οδηγούν σε: προϊόντα υψηλής ποιότητας, μικρό χρονικό διάστημα κατεργασίας και χαμηλό κόστος κατεργασίας. Η ευρωπαϊκή αγορά εργαλείων δυναμώνει όλο και περισσότερο προς την πλευρά των εργαλείων HSC σε βάρος των EDM μηχανών.

5.2. Η μέθοδος HSC στη βιομηχανία κατασκευής εργαλείων

Η ταχύρρυθμη κατεργασία εξασφαλίζει 2 φορές μεγαλύτερη παραγωγικότητα, που επιτυγχάνεται αρχικά με την ταχύτητα κοπής και τελικά με το ρυθμό τροφοδοσίας. Ο συμβατικός ρυθμός τροφοδοσίας αυξάνεται ως τα 1600mm/min χρησιμοποιώντας το κατάλληλο λογισμικό και σύγχρονο σχεδιασμό εργαλείων.

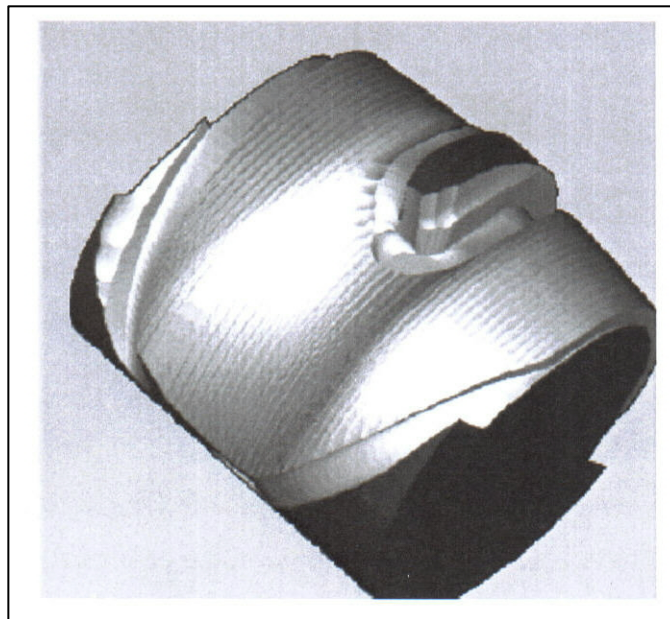
Το σχήμα 5.1 δείχνει το καλούπι ενός δοχείου νερού που υφίσταται κατεργασία με HSC χρησιμοποιώντας ένα σύγχρονο λογισμικό CAM. Στη βαθιά κοιλότητα η ποιότητα της επιφάνειας κατεργασίας είναι αμφίβολη, ειδικά στο δεύτερο μέρος όπου η λείανση χρησιμοποιείται ως διαδικασία φινιρίσματος.



Σχήμα 5.1: Καλούπι δοχείου νερού

Η ακριβέστερη κατεργασία επιφάνειας τριδιάστατων τεμαχίων επιτυγχάνεται μόνο με εργαλεία πέντε αξόνων, που επιτρέπουν διαμόρφωση οποιασδήποτε επιφάνειας. Ο προγραμματισμός NC πέντε αξόνων είναι παρόμοιος με αυτόν που εφαρμόζεται σε τριαξονική παράλληλη κατεργασία. Η κατεργασία πέντε αξόνων επιτρέπει επιπλέον πλευρικές αποκλίσεις του εργαλείου κοπής και αποκλίσεις εμπρός και πίσω, που προσομοιάζουν την επιφάνεια. Μεταξύ των δυνατοτήτων CAD-CAM, η κατεργασία πέντε αξόνων είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη διαδικασία σε παγκόσμια κλίμακα, που επιτρέπει πλευρική ή αιχμηρή διαμόρφωση οποιουδήποτε σχήματος.

Το σχήμα 5.2 παρουσιάζει ένα παράδειγμα μιας μάλλον πολύπλοκης κατεργασίας επιφάνειας. Η επιφάνεια καμπυλώνεται προς όλες τις κατευθύνσεις και περιλαμβάνει κοίλες/ κυρτές σφαίρες.



Σχήμα 5.2: Κατεργασία μιας επιφάνειας τυχαίου σχήματος

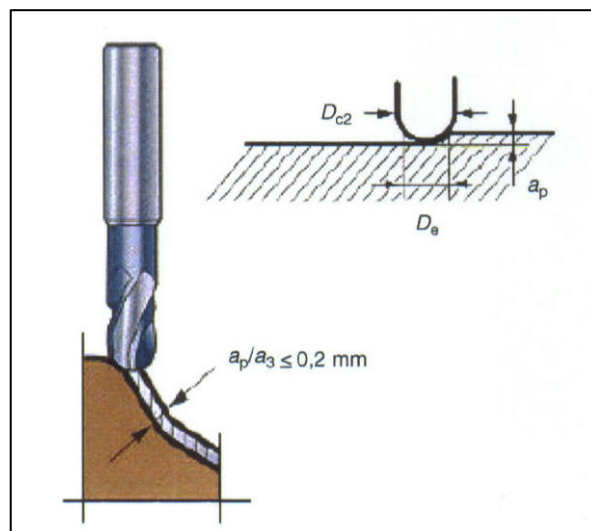
Το εργαλείο διαμόρφωσης πέντε αξόνων επιτρέπει την κλίση της κύριας ατράκτου, ώστε η άκρη του εργαλείου κοπής να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε καθορισμένη γωνία. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αποφευχθεί μια αναποτελεσματική ταχύτητα κοπής στην αιχμή του εργαλείου κοπής.

Η ταχύτητα κοπής παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια κατεργασίας όλων των επιφανειών, κάτι που είναι αδύνατο με διαδικασίες κατεργασίας τριών αξόνων.

Ο επεξεργαστής πέντε αξόνων αποτελεί σημαντικό τμήμα μιας πολύπλοκης πολυαξονικής κατεργασίας και συνδέει τα συστήματα CAM με τα εργαλεία κατεργασίας. Το πρότυπο CAM δημιουργεί ένα κώδικα NC παγκόσμιας κλίμακας, που μεταφράζεται με μια μορφή κατανοητή από ειδικούς ρυθμιστές κατεργασίας (σχήμα 5.12). Κάθε ρυθμιστής κατεργασίας έχει συγκεκριμένο επεξεργαστή που μετατρέπει διαφορετικές διατάξεις κώδικα. Οι πενταξονικοί επεξεργαστές περιέχουν παραμέτρους πολλών περιστροφών με διακυμάνσεις μηδενικού αρχικού σημείου.

5.3. Κατεργασία φινιρίσματος εργαλείων χάλυβα που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία

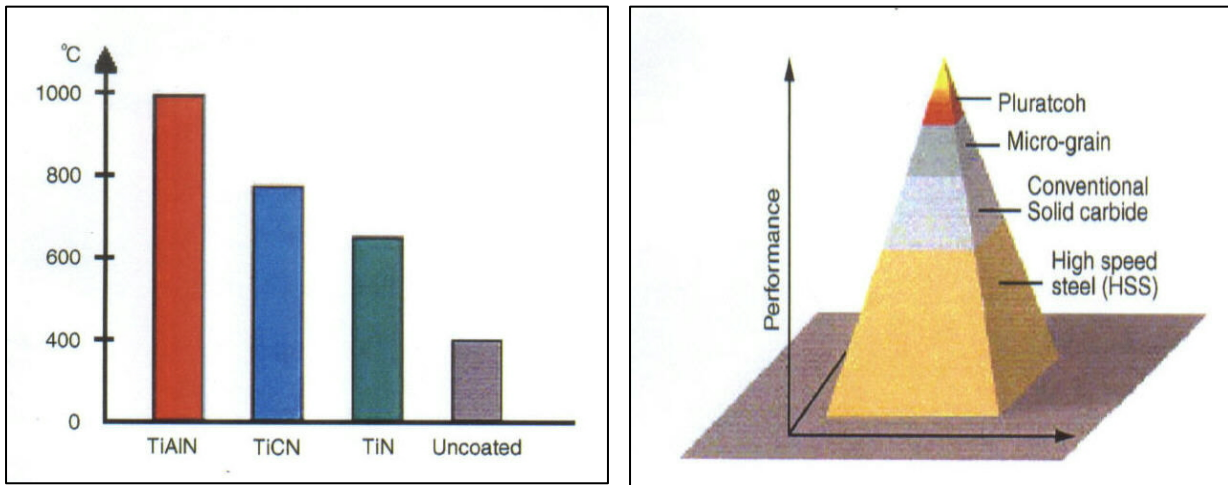
Τα σύγχρονα υλικά κοπής, με εργαλεία διαμορφωμένα σε μορφή μολυβιού, επιτρέπουν μικρό ρυθμό αποβολής μετάλλου αλλά πολύ ταχύτερη κατεργασία. Για να επιτευχθεί καλή κατεργασία είναι πολύ σημαντικό να χρησιμοποιούνται ορθές τεχνολογικές παράμετροι (σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Παράμετροι κατεργασίας της μεθόδου HSC

Ουσιώδης παράμετρος κατεργασίας ταχύρρυθμου φινιρίσματος εργαλείων χάλυβα που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία είναι το μικρό βάθος κοπής. Το βάθος κοπής δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή των 0,2/0,2 mm (a_p/a_e). Με αυτόν τον τρόπο εμποδίζεται η παραμόρφωση/ απόκλιση του εργαλείου και διατηρείται υψηλός βαθμός ακρίβειας (ανοχές και γεωμετρία). Κοπτικά

εργαλεία για κατεργασία φινιρίσματος σε υλικά που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία πρέπει να είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες και επομένως να φέρουν επίστρωση (π.χ. TiAlN). Σε σχέση με τη φθορά του εργαλείου, η διάχυση είναι ένας από τους βασικούς λόγους μείωσης της ζωής του εργαλείου. Θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 800° C είναι ιδιαίτερα επιζήμιες για όλα τα εργαλεία που δεν φέρουν επίστρωση από TiAlN και TiCN, ή πολλαπλές επιστρώσεις(σχήμα 5.4).

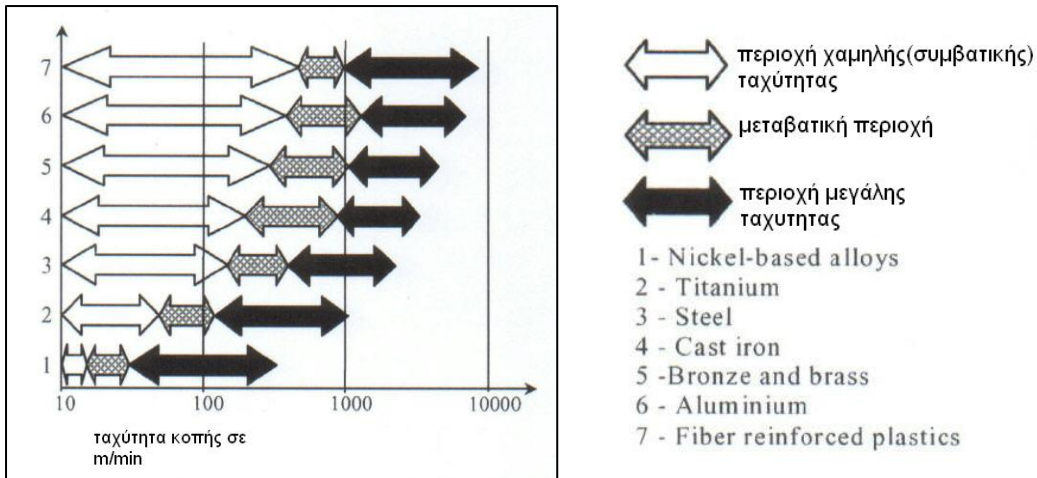


Σχήμα 5.4: Θερμική αντίσταση των επιστρώσεων

5.4. Θεωρητικό υπόβαθρο

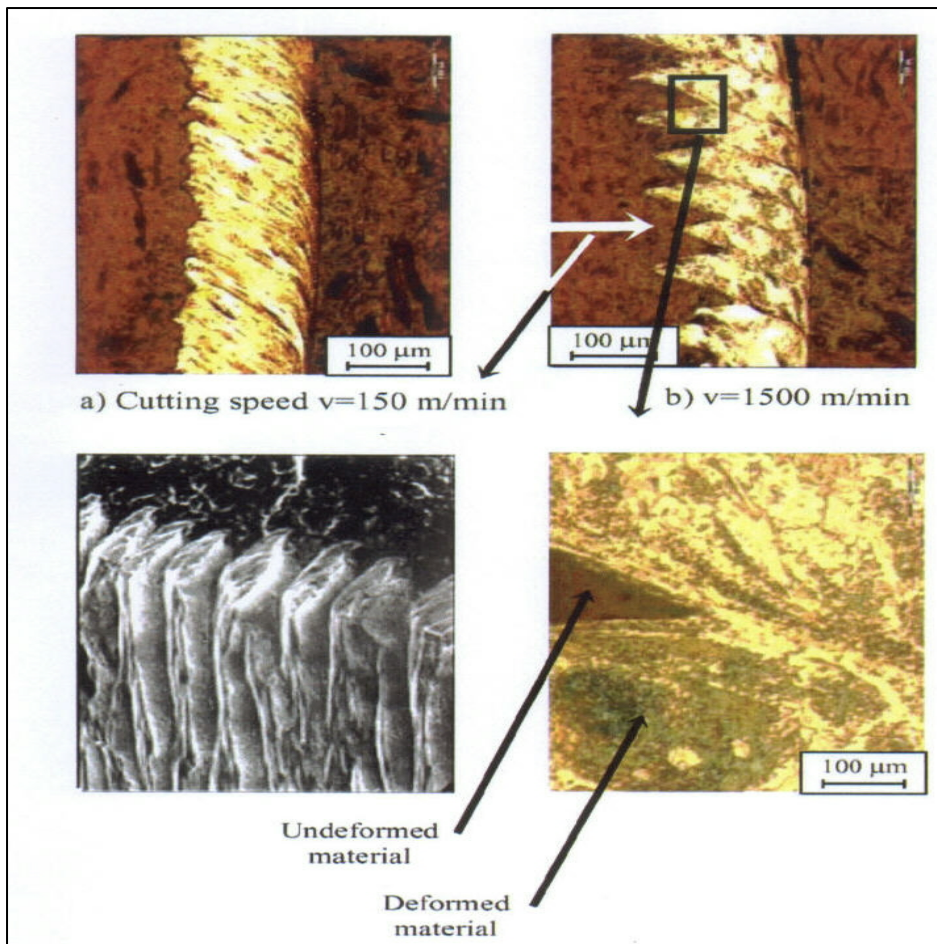
Υπάρχουν αρκετά κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της ταχύρυθμης κατεργασίας, όπως για παράδειγμα τα κριτήρια για τον καθορισμό των ορίων μεταξύ της συμβατικής και της ταχύρυθμης κατεργασίας.

Μερικά από αυτά είναι [5.7], το εύρος της ταχύτητας κοπής, ο αριθμός της περιστροφής της ατράκτου του περιστρεφόμενου εργαλείου (ταχύτητα ατράκτου), ο αριθμός DN (DN είναι η διάμετρος της ατράκτου σε mm πολλαπλασιασμένη με την ταχύτητα ατράκτου σε στροφές ανά λεπτό, η δυναμική συμπεριφορά και το υλικό του υπό κατασκευή τεμαχίου. Ο πιο κατάλληλος καθορισμός της ταχύρυθμης κατεργασίας στηρίζεται στο είδος/τύπο του υλικού που υφίσταται κατεργασία [5.7]. Στο σχήμα 5.5, για παράδειγμα, οι τιμές της ταχύτητας κοπής από 500 ως 700 m/min θεωρείται ταχύρρυθμη περιοχή για κατεργασία κραμάτων χάλυβα, ενώ οι ίδιες ταχύτητες θεωρούνται συμβατικές ή χαμηλές για κατεργασία αλουμινίου.



Σχήμα 5.5: Περιοχές διάφορων ειδών κοπής για κατεργασία διαφόρων ειδών υλικών

Οι μικροφωτογραφίες ενός γρεζιού που παράγεται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας του X63CrMoV51 (ανοπτημένου) φαίνονται στο σχήμα 5.6. Όταν $u_c = 150 \text{ m/min}$ (σχήμα 5.6α) το γρέζι μοιάζει με αυτό που παράγεται από την κατεργασία του CK15, με λίγο μικρότερο συντελεστή συμπίεσης ($\lambda = 0,17/0,1 = 1,7$) και μια μεγαλύτερη γωνία κοκκώδους υφής (δηλαδή της γωνίας μεταξύ της διεύθυνσης επιμήκυνσης του δευτερεύοντος κόκκου και του επιπέδου διάτμησης). Αυτός ο τύπος γραζιού είναι επίσης ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός συνεχούς γρεζιού που προκύπτει από σταθερή κατάσταση.



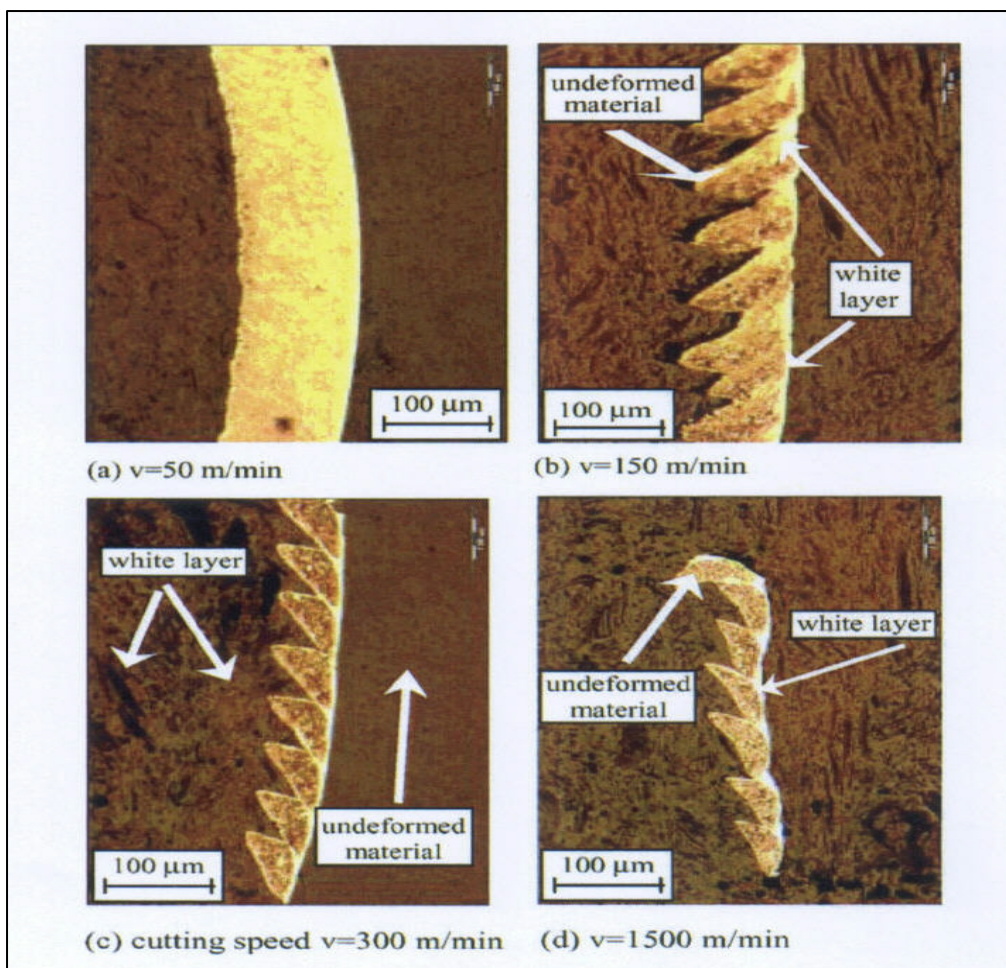
Σχήμα 5.6: Μικροφωτογραφίες ενός γρεζιού που παράγεται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας του X63CrMoV51

Ωστόσο, κατά την κατεργασία με $v_c = 1500 \text{ m/min}$ (σχήμα 5.6b) το γρέζι είναι κατατμημένο και με μορφή πριονωτών οδοντώσεων. Σε αυτήν την περίπτωση το γρέζι μορφοποιείται με μια έντονη στρέβλωση κατά μήκος των ορίων μεταξύ γειτονικών τμημάτων και προκύπτει ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα στρεβλωμένου τμηματικού γρεζιού. Αυτά τα τεμάχια έχουν σχεδόν ίδιο πλάτος (κατά μέσο όρο $0,06 \text{ mm}$) και μέγεθος, γεγονός που οφείλεται στη σταθερότητα της μορφοποίησης του γρεζιού. Αυτό φαίνεται στη φωτογραφία SEM στη λεπτομέρεια του σχήματος 5.6b. Η άλλη λεπτομέρεια της ίδιας εικόνας δείχνει καθαρά τα διαμορφωμένα και παραμορφωμένα τμήματα του γρεζιού.

Σχετικά με τη μορφή του γρεζιού που φαίνεται στο σχήμα 5.6, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι μια ταχύτητα κάτω των 150 m/min ανήκει σε εύρος συμβατικής ταχύτητας ενώ μια ταχύτητα κοπής 1500 m/min ανήκει στο εύρος υψηλής ταχύτητας.

Το σχήμα 5.7 δείχνει μια μικροφωτογραφία ενός γρεζιού κατά τη διάρκεια κατεργασίας υλικού X63CrMoV51 (βαμένο). Όταν $v_c = 50 \text{ m/min}$ (σχήμα 5.7a) ο μηχανισμός διαμόρφωσης γρεζιού είναι ο ίδιος όπως και στην περίπτωση της κατεργασίας των Ck15 και X63CrMoV51 (ανοπτημένου, σχήμα 5.5a). Πρόκειται προφανώς για συμβατική ταχύτητα κοπής. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας με ταχύτητα κοπής 150 m/min (σχήμα 5.7b) το γρέζι είναι κατατμημένο και με μορφή πριονωτών οδοντώσεων.

Σχετικά με την κατεργασία του ανοπτημένου χάλυβα αυτού του βαθμού με ταχύτητα κοπής 1500 m/min (σχήμα 5.7b), εμφανίζεται η επονομαζόμενη λευκή στιβάδα, που υποδεικνύει μια διαδικασία θερμικής μαλάκυνσης κατά τη διάρκεια μορφοποίησης του γρεζιού.



Σχήμα 5.7 : Μικροφωτογραφία ενός γρεζιού κατά τη διάρκεια κατεργασίας υλικού X63CrMoV51 (βαμένο)

Γενικά, η δημιουργία ενός γραζιού με πριονωτές οδοντώσεις είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό κατά την κατεργασία χάλυβα σε σκληρημένη κατάσταση, γεγονός που μπορεί να σχετίζεται με την ψαθυρότητα του υλικού και τη δημιουργία υψηλών θλιπτικών τάσεων στο τεμάχιο κατά τη διάρκεια της κοπής. Αντί το υλικό να διαρρέει πλαστικά κατά τη διάρκεια της κοπής, εμφανίζεται μια ρωγμή στην επιφάνεια του τεμαχίου. Η ρωγμή ανακουφίζει τη συσσωρευμένη ενέργεια, επιτρέποντας το τμήμα του γρεζιού να αποχωρίζεται από την επιφάνεια. Λόγω της υψηλής τοπικής θερμοκρασίας δημιουργείται μαρτενσίτης (άσπρες περιοχές).

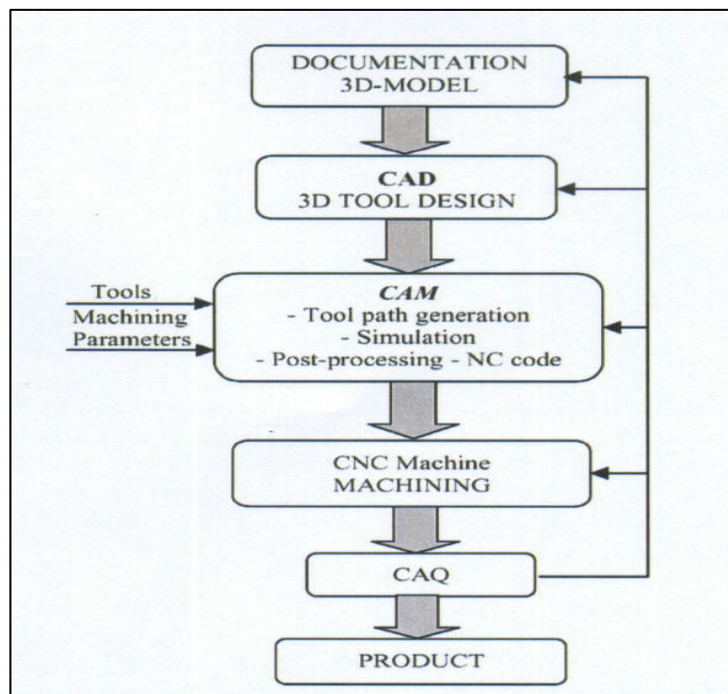
Έτσι, η θερμική μαλάκωση του υλικού γίνεται σταδιακά σημαντική και επηρεάζει όλο και περισσότερο την πλαστική συμπεριφορά του υλικού σε σύγκριση με την εργοσκλήρυνση. Η εργοσκλήρυνση είναι η κυρίαρχη διαδικασία κατά τη διάρκεια της κατεργασίας αυτού του τύπου χάλυβα με ταχύτητα κοπής 50m/min, όταν όμως η ταχύτητα κοπής φτάσει τα 150m/min κυριαρχεί η δημιουργία αρχικής ρωγμής και η θερμική μαλάκωση. Αυτό είναι ορατό στις φωτογραφίες του γρεζιού που παράγεται με ταχύτητα κοπής 300 και 1500m/min (σχήμα 5.7c και d). Όταν η ταχύτητα κοπής αυξάνει εμφανίζονται ταυτόχρονα πιο εμφανείς λευκές στιβάδες και ένα λεπτότερο γρέζι με μικρότερα τεμάχια. Είναι ξεκάθαρο από το σχήμα του γρεζιού ότι κατά

τη διάρκεια κατεργασίας του X63CrMoV51 (βαμένο, 629 HV, 52 HRC) η ταχύρρυθμη περιοχή αρχίζει όταν η ταχύτητα κοπής είναι 150m/min.

5.5. Γρήγορη εναλλαγή εργαλείων

5.5.1 Η CAM αντίληψη από κατασκευαστικής άποψης

Η επιτυχημένη HSM σχετίζεται με το κατάλληλο λογισμικό CAM. Θα πρέπει να χρησιμοποιείται το ίδιο CAD-CAM σύστημα για την ανάπτυξη (μοντελοποίηση ενός προϊόντος, σχεδίαση και προγραμματισμό εργασίας. Με τον τρόπο αυτό η μεταφορά δεδομένων δεν είναι πολύπλοκη αφού η διαμόρφωση των δεδομένων είναι η ίδια. Είναι σημαντικό το πρότυπο CAM να περιλαμβάνει προσομοίωση διαμόρφωσης, ώστε να είναι εφικτός ο ψηφιακός έλεγχος πριν την πραγματική κατεργασία. Η προσομοίωση δείχνει συνήθως τη δυναμική της αποβολής μετάλλου και τη διαδρομή του εργαλείου. Ο ρόλος ενός συστήματος CAM στην παραγωγή φαίνεται στο σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8: Ρόλος ενός συστήματος CAM στην παραγωγή

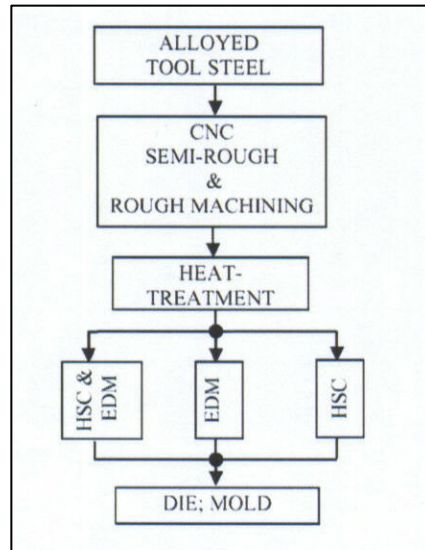
5.5.2 Επιλογή της κατάλληλης διαδικασίας στην κατασκευή εργαλείων

Οι διαδικασίες κοπής που είναι διαθέσιμες είναι η HSC, η EDM ή ένας συνδυασμός τους. Η κατεργασία μητρών από υλικά χάλυβα με διαφορετικές σκληρότητες γίνεται με την παρακάτω διαδικασία:

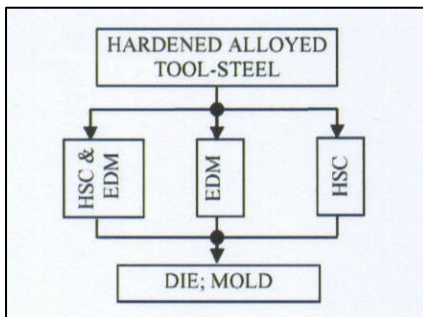
α) Η κατεργασία περιλαμβάνει κατεργασία εν ψυχρώ, που ακολουθείται από θερμική κατεργασία και τελική κατεργασία με HSC, που εξασφαλίζει άριστη ακρίβεια και επιφάνεια υψηλής ποιότητας.

β) Η κατεργασία μικρότερων μητρών από κράματα χάλυβα (σε σκληρυμένη μορφή ως 62HRC) έχει γίνει μια οικονομικά συμφέρουσα διαδικασία παραγωγής. Η HSC σε συνδυασμό με διάφορα κοπτικά εργαλεία (εργαλεία κοπής σκληρού μετάλλου, τρυπάνια και εργαλεία κοπής υπό γωνία) είναι μια διαδικασία συμφέρουσα από οικονομική και χρονική σκοπιά.

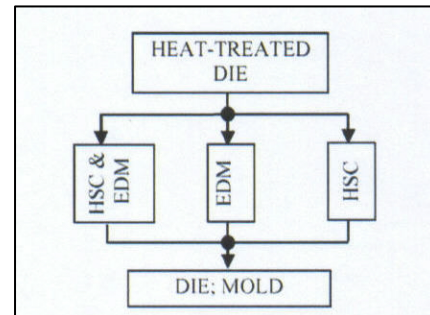
γ) Κατεργασία μητρών που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία (βλέπετε σχήματα 5.9-5.11).



Σχήμα 5.9 : Κραματοποιημένα καλούπια των 67HRC



Σχήμα 5.10 : σκληρυμένα καλούπια των 62HRC



Σχήμα 5.11 : θερμικά κατεργασμένο καλούπι από χάλυβα των 40HRC

5.5.3. Σύγκριση των μεθόδων HSC και EDM

Η σύγκριση των τεχνολογιών παραγωγής φαίνεται στον πίνακα 5.1. Από οικολογική σκοπιά η HSC ξεπερνά την EDM για τους παρακάτω λόγους:

- τεχνολογία χαμηλής ενέργειας που είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον
- μόνιμη μείωση λιπαντικών και ψυκτικών κοπής οδηγεί σε ξηρή κατεργασία.
- κατά τη διάρκεια της διαδικασίας θα πρέπει να υπάρχει συνεχής παρακολούθηση του ηλεκτρολύτη EDM καθώς και της αποβολής και διάθεσης των αποβλήτων [5.6].

Κριτήριο	EDM	HSC
Υλικά	Όλα τα αγώγιμα υλικά	Όλα τα υλικά κοπής (χάλυβας σκληρημένος μέχρι 62 HRC)
Γεωμετρία	Όλες οι γεωμετρίες	Περιορισμοί (βάθος και ακτίνα)
Εσωτερικές Γωνίες	Μπορεί να φτάσει σε ακτίνα < 0.1 mm	Ακτίνα στον πάτο > 0.3mm, ακτίνα στο τοίχωμα > 1 mm
Βαθείς εγκοπές	Εξαρτάται από το ηλεκτρόδιο κατεργασίας	Μέχρι L/D < 10
Λείανση επιφάνειας	Χρειάζεται πάντα μια επιπλέον κατεργασία φινιρίσματος	Μερικώς, χωρίς επιπλέον κατεργασία φινιρίσματος
Κόστος κατεργασίας φινιρίσματος	Υψηλό	Χαμηλό
Θαμπή επιφάνεια	Ναι	Όχι
Αλλαγή μικροδομής	Μικρορωγμές	Θλιπτικές τάσεις
Γεωμετρική ακρίβεια	+	++
Εργαλεία κατεργασίας	Ακριβά	Απλά

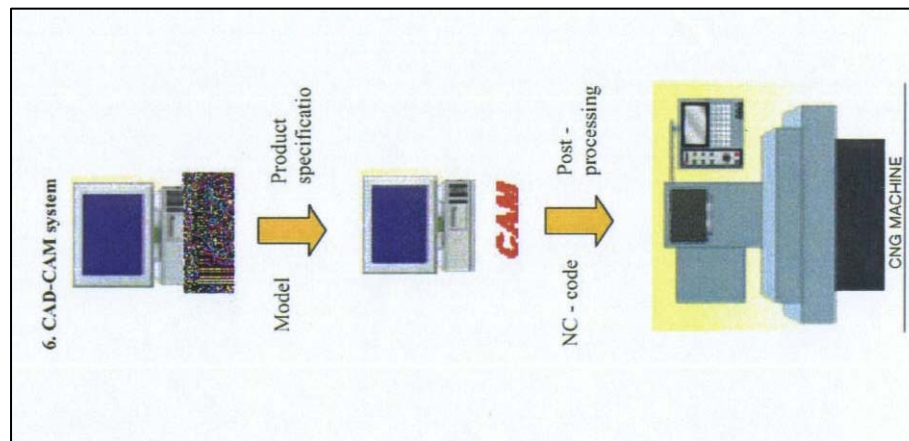
Πίνακας 5.1: Σύγκριση των κατεργασιών EDM και HSC milling

Η διαδικασία HSC μείωσε δραματικά τον κατασκευαστικό χρόνο μορφοποίησης μητρών και καλουπιών. Ωστόσο η EDM και η HSC δεν είναι ανταγωνιστικές τεχνολογίες αλλά συμπληρωματικές, αφού με την EDM μπορούν να επιτευχθούν όλες οι γεωμετρίες μορφοποίησης, κάτι που δεν ισχύει για την μέθοδο HSC [5.6].

5.6. Συστήματα CAD-CAM

Τα σημερινά λογισμικά CAD-CAM γίνονται όλο και πιο πολύπλοκα. Οι επίδοξοι χρήστες CAD-CAM έχουν να επιλέξουν μεταξύ δεκάδων επιλογών, σε τέτοιο βαθμό που είναι δύσκολο για μια επιχείρηση να αναγνωρίσει τις ανάγκες τους. Λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας της πληροφορικής, τα πακέτα CAD-CAM μπορούν να εκτελέσουν εργασίες προγραμματισμού NC που θα ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθούν χωρίς ένα ακριβό σύστημα σταθμού εργασίας. Γενικά οι μονάδες κατασκευής καλουπιών δεν θα πρέπει να αγοράζουν

συστήματα για μακροχρόνια χρήση γιατί το λογισμικό τους σύντομα θα ξεπεραστεί. Το τρέχον σύστημα θα πρέπει να καλύπτει τις δυνατότητες που χρειάζονται για το τρέχον διάστημα και να προσφέρει επιπλέον λειτουργίες που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν αλλάξουν οι ανάγκες. Η εμπειρία από την εισαγωγή των συστημάτων CAD-CAM στην παραγωγή έδειξε ότι πολλές εταιρείες αντιμετώπισαν προβλήματα στην πράξη. Η εφαρμογή του συστήματος CAD-CAM στην παραγωγή απεικονίζεται στο σχήμα 5.12



Σχήμα 5.12: Σύστημα CAD-CAM

5.7. Συμπεράσματα

Η είσοδος στην ευρωπαϊκή και δυτική αγορά τεχνολογίας και παραγωγής απαιτεί τη χρησιμοποίηση σύγχρονων μεθόδων κοπής.

Η χρήση της HSM εξασφαλίζει ανταγωνιστική θέση στον τομέα μαζικής παραγωγής της αυτοκινητοβιομηχανίας. Η μαζική παραγωγή σε κατασκευή εργαλείων υψηλής ποιότητας, που απαιτεί γρήγορη προετοιμασία των εργαλείων (μήτρες/ καλούπια/ πρεσσάρισμα), αποτελεί βασικό στοιχείο κέρδους.

Επιπλέον, η HSC παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- συντόμευση της συνολικής διαδικασίας της κατεργασίας
- βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας-περιορισμός κατεργασίας
- χαμηλότερη θερμοκρασία στη ζώνη κοπής και μεγαλύτερο χρόνο ζωής του εργαλείου
- μείωση της χρήσης EDM
- κατεργασία λεπτών ηλεκτροδίων ακριβείας
- δυνατότητες κατεργασίας πέντε αξόνων.

Ο ανταγωνισμός στην αγορά απαιτεί από μια κατασκευαστική εταιρεία να παράγει προϊόντα υψηλής ποιότητας σε αποδεκτές τιμές. Όπως οι εταιρείες σε όλους τους κλάδους, οι κατασκευαστές εργαλείων και μητρών καταβάλλουν διαρκώς προσπάθειες για τον εκσυγχρονισμό του εξοπλισμού και της οργάνωσής τους. Οι εταιρείες που δεν υιοθετούν τις νέες τεχνολογίες συνήθως δεν παραμένουν βιώσιμες, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.1. Η ιδανική περίπτωση είναι, με τη βοήθεια ομάδας μηχανικών, να παίρνονται οι σωστές αποφάσεις τη σωστή στιγμή, γνωρίζοντας ταυτόχρονα τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ακριβών επενδύσεων στις νέες τεχνολογίες.

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

Κατά τη μελέτη της μεθόδου ηλεκτροδιάβρωσης ως αντιπροσωπευτική μη συμβατική μέθοδος κατεργασίας θερμικού χαρακτήρα, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα, όπως περιγράφονται ακολούθως, σε αντιστοίχιση με τα παρατιθέμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

Η ηλεκτροδιάβρωση συνίσταται στην αποβολή ηλεκτρικά αγώγιμου υλικού από το κατεργάσιμο τεμάχιο μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων μεταξύ δυο ηλεκτροδίων (κατεργάσιμο τεμάχιο και εργαλείο) κάτω από ένα μέσο κατεργασίας (διηλεκτρικό υγρό) με σκοπό την πρόσδοση της επιθυμητής μορφής στο τεμάχιο.

Με τον όρο ηλεκτροδιάβρωση γίνεται αναφορά σε δυο διαφορετικές τεχνικές:

- Στην ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης (die sinking EDM) όπου με σταθερό εργαλείο γίνεται η πρόσδοση της μορφής του εργαλείου-ηλεκτροδίου στο “κατεργάσιμο τεμάχιο-ηλεκτρόδιο”
- Στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire EDM) όπου το σταθερό ηλεκτρόδιο έχει αντικατασταθεί με μεταλλικό αγώγιμο σύρμα.

Έτσι λοιπόν, κατά τη γενική περιγραφή της μεθόδου αναδεικνύεται η δυνατότητα κατεργασίας ασυνήθιστα σκληρών αγώγιμων υλικών και εξαιρετικά πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών. Αναφορικά στα τεχνικά χαρακτηριστικά της μεθόδου, παρουσιάζεται η δυνατότητα του καθορισμού της έντασης μεταξύ των ηλεκτροδίων μέσω της ρύθμισης της απόστασης μεταξύ τους, της ποιότητας του διηλεκτρικού και της καθαρότητας του χώρου ανάμεσα στα ηλεκτρόδια.

Επίσης, παρατηρείται ότι η διάβρωση μεταξύ του ηλεκτροδίου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι ασύμμετρη, σε βαθμό που εξαρτάται από χαρακτηριστικά όπως η πολικότητα, η θερμική αγωγή, τα σημεία τήξης των υλικών και η διάρκεια και μορφή της εκκένωσης. Αναφορικά στα υλικά, παρ’ όλο που θεωρητικά όλα όσα είναι αγωγοί του ηλεκτρισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ηλεκτρόδια, στην πράξη χρησιμοποιούνται κυρίως ο γραφίτης και ο ηλεκτρολυτικός χαλκός, λόγω του ότι αυτά τα υλικά παρουσιάζουν πολύ υψηλά σημεία τήξης και πολύ χαμηλή θερμική αντίσταση.

Σχετικά με την επιλογή του διηλεκτρικού υγρού, αυτή προκύπτει από την απαίτηση για τα εξής χαρακτηριστικά:

- Χαμηλή τιμή ιξώδους (για εξασφάλιση μικρής επιφανειακής τάσης),
- Χημική ουδετερότητα,
- Υψηλό σημείο ανάφλεξης,
- Απουσία δημιουργίας τοξικών ατμών,
- Μεγάλη διηλεκτρική σταθερά,
- Δυνατότητα γρήγορου αποιονισμού,
- Καλές θερμικές ιδιότητες,
- Χαμηλό κόστος αγοράς.

Τέλος, ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η απόπλυση (flushing) μέσω της κυκλοφορίας του διηλεκτρικού υγρού, αποτελεί σημαντική διαδικασία, και συμπεραίνεται ότι ο ρυθμός απομάκρυνσης των κόκκων κατά την κατεργασία δεν πρέπει να είναι ούτε πολύ μεγάλος προκειμένου να υπάρξει η επιθυμητή ανάφλεξη σπινθήρων, ούτε πολύ μικρός ώστε να παρουσιάζονται ανωμαλίες από τη μεγάλη πυκνότητα κόκκων που δημιουργούν ανεπιθύμητες εκκενώσεις.

Ο Μηχανισμός Αποβολής Υλικού αναλύεται στη συνέχεια της εργασίας, και προκύπτουν για αυτόν σημαντικές παρατηρήσεις, όπως ότι είναι δυνατή η επίτευξη σημαντικής ασυμμετρίας ως προς τη διάβρωση μεταξύ του υλικού του ηλεκτροδίου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου,

της τάξης του 0,5% και 99,5% αντίστοιχα, με την κατάλληλη επιλογή των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων (υλικό ηλεκτροδίου, ενεργός επιφάνεια εργαλείου, κ.λ.π.). Στο ρυθμό αποβολής υλικού επιδρά σημαντικά και η δημιουργούμενη σπηλαιώση, καθώς και ο τρόπος που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί για την κυκλοφορία του διηλεκτρικού υγρού (Αναγκαστική ροή ή Ελεύθερη ροή διηλεκτρικού). Η χρήση της αναγκαστικής ροής επιτρέπει με την απομάκρυνση των σωματιδίων φθοράς, τη βελτίωση της ταχύτητας κατεργασίας. Επίσης ο θερμικός παράγοντας επιδρά σημαντικά στην αφαίρεση του υλικού.

Η επιθυμητή αύξηση της σχετικής φθοράς, επιτυγχάνεται και με την αύξηση της χρονικής διάρκειας παλμού t_i , ή της εκκένωσης t_d , καθώς αυτή αυξάνει το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Οι λόγοι για τους οποίους ο ρυθμός αποβολής υλικού από την κάθοδο είναι μικρότερος από αυτόν στην άνοδο μπορούν να συνοψιστούν ως ακολούθως:

- Η ενέργεια σύγκρουσης των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην άνοδο είναι πολύ μεγαλύτερη της αντίστοιχης των ιόντων που προσπίπτουν στην κάθοδο.
- Από την πυρόλυση του διηλεκτρικού, σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα άνθρακα το οποίο προστατεύει την κάθοδο.
- Δυνάμεις συμπίεσης αναπτύσσονται στην κάθοδο σε μεγαλύτερο ποσοστό.

Σχετικά με τα χαρακτηριστικά της δημιουργούμενης μέσω της κατεργασίας EDM επιφάνειας, συμπεραίνεται ότι το μέγεθος των κρατήρων και η τραχύτητα της επιφάνειας είναι ανάλογα της ενέργειας παλμού καθώς και της διάρκειας αυτού, αφού παλμοί μεγάλης διάρκειας επιτρέπουν τη διείσδυση της θερμότητας στον κρατήρα δημιουργώντας ανεπιθύμητη ανομοιόμορφη μορφολογία.

Επίσης, προκειμένου να επιτευχθεί μικρότερη τραχύτητα και μεγαλύτερη ακρίβεια στην κατεργασία της επιφάνειας του υλικού, απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός κοπών. Παρουσιάζεται η δυνατότητα επιφανειακής σκλήρυνσης/κραμάτωσης εργαλειοχαλύβων με τη χρήση κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης. Με αυτήν την τεχνική λαμβάνει χώρα μεταφορά υλικού από το ηλεκτρόδιο εργασίας (στυλίσκος από πυροσυσσωμάτωση Fe-WC) στο χαλύβδινο υπόστρωμα, οδηγώντας στο σχηματισμό ενός επιφανειακού κραματωμένου στρώματος, το οποίο συνίσταται από αντιτριβικά συστατικά (όπως αδιάλυτα καρβίδια), με μεγάλες δυνατότητες βιομηχανικής εφαρμογής.

Ακόμη, με την ψηφιακή οδήγηση του ηλεκτροδίου εργασίας από μηχανή CNC είναι δυνατή η δημιουργία γεωμετρικών μοτίβων (patterns) στην επιφάνεια του εργοτεμαχίου, π.χ. κρατήρων μικρών διαστάσεων, εγκοπών κλπ, που είναι απαραίτητες σε ειδικές εφαρμογές, όπως στον έλεγχο της ροής λιπαντικού, στην αποτύπωση του γεωμετρικού μοτίβου σε άλλο υλικό κ.α.. Τυπική εφαρμογή της ψηφιακής οδήγησης είναι η κατασκευή καλουπιών υψηλής ακρίβειας για χρήση στη βιομηχανία πλαστικών, χύτευση μετάλλων, διαμόρφωση ελάσματος κλπ. Η ψηφιακή οδήγηση του ηλεκτροδίου εργασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πλανητική ηλεκτροδιάβρωση, όπου με μικρό ηλεκτρόδιο είναι δυνατή η κατεργασία μεγάλης επιφάνειας υπό τύπο φρεζαρίσματος.

Μετά τη μελέτη της μεθόδου EDM πραγματοποιήθηκε η σύγκρισή της με τη μέθοδο της ταχύρρυθμης κοπής (HSC), από την οποία προκύπτει ότι η φύση του προς κατεργασία υλικού διαδραματίζει τον πιο σημαντικό ρόλο σχετικά με το ποια από τις δύο μεθόδους θα επιλεγεί.

Πλεονέκτημα της μεθόδου ταχύρρυθμης κοπής, αποτελεί το γεγονός ότι σε αυτήν η ταχύτητα κοπής παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια κατεργασίας όλων των επιφανειών. Από οικολογικής σκοπιάς επίσης, η μέθοδος HSC πλεονεκτεί της EDM, καθώς είναι τεχνολογία

χαμηλής ενέργειας, είναι ξηρή κατεργασία (με μειωμένη χρήση λιπαντικών και ψυκτικών κοπής), ενώ δεν απαιτεί συνεχή παρακολούθηση για τη διαχείριση των αποβλήτων.

Ωστόσο οι δύο μέθοδοι δεν είναι ανταγωνιστικές τεχνολογίες αλλά συμπληρωματικές, καθώς με την EDM επιτυγχάνονται γεωμετρίες μορφοποίησης που δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν με την HSC.

Επιλέγεται λοιπόν μία από τις δύο μεθόδους, ανάλογα με χαρακτηριστικά της προς κατεργασία επιφάνειας, όπως η επιθυμητή γεωμετρία, η ύπαρξη ή μη εσωτερικών γωνιών και βαθειών εγκοπών κ.α..

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1]. Charmilles Technologies- Reference and Maintenance Manual EDM
- [1.2]. Από προσωπικό αρχείο Δ.Ι. Παντελή, Καθηγητή Ε.Μ.Π
- [2.1]. Ε. Παπαδανιήλ, Καθηγητής Ε.Μ.Π , σημειώσεις ΕΜΠ.
- [2.2]. Α Μάμαλης, Κατεργασίες των υλικών, σημειώσεις Ε.Μ.Π
- [2.3]. J. A Schey : “Introduction to Manufacturing Processes”, McGraw Hill 2000 pp 386-402 .
- [3.1]. Από προσωπικό αρχείο Δ.Ι. Παντελή, Καθηγητή Ε.Μ.Π
- [3.2]. C.A. Huang ,C.C. Hsu, H.H : “The Surface characteristics of P/M high-speed steel (ASP 23) multi-cut with electrical discharge machine(WEDM)”, Journal of Materials Processing Technology, 140(2003), 298-302
- [3.3]. ASM Metals Handbook, “P/M Tool Steel”, vol. 1, 1990, pp 780-792
- [3.4]. W. Koenig, Fertigungsverfahren Band 3: Abtragen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990.
- [3.5]. Ching An Huang , Chwen lin shih, Kung Cheng Li, Yau-Zen Chang : “The surface alloying behavior of martensitic stainless steel cut with wire electrical discharge machine”, Applied Surface Science,
- [4.1]. Yunn-Shiuan Liao, Shun-Tong Chen and Chang-Sheng Lin : “Development of a high precision tabletop versatile CNC wire-EDM for making intricate micro parts”, J.Micromech. Microeng, 15(2005), 245-253.

- [4.2]. Yu Z Y, Masuzawa T and Fujino M. : “Micro EDM for three-dimensional cavities : development of uniform wear method”, Ann. CIRP, 1998,47, 169-172.
- [4.3]. Bleys P, Kruth J P and Lauwres B, “Sensing and compensation of tool wear in milling EDM”, J. Mater. Process. Technol, 149, 2004, 139-146.
- [4.4]. Kinoshita H and Hayashi Y “Study in Micro wire EDM”, EDM Technol 2, 1996, 24-39
- [4.5]. Yan M. T, Huang C W, Fang C C and Chang CX, “Development of a prototype Micro-wire EDM machine”, J. Mater. Process. Technol 149, 2004, 99-105.
- [5.1]. P. Falbohmer, C.A. Rodriguez, T. Ozel, T. Attan, “High Speed Manufacturing of coast iron and alloy steels for die and mold manufacturing”, J. Mater Process. Technol, 98(2000), 104-105
- [5.2]. C.E. Becze, P. Clayton, L. Chen, T.I El-wardany, M.A. Elbestawi, “High Sped fixe-axis milling of hardened tool steel”, Int. J Machine Tools Manuf, 40(2000), 869-885
- [5.3]. Y. Ning M. Rahman, Y.S Wong, “Investigation of chip formation in high-speed end milling”, J. Mater. Process. Technol, 113(2001),360-367
- [5.4]. M.A. Elbestawi, L.Chen, C.E. Besze, T.I.El-Wardany, “High Speed milling of dies and moulds in their hardened state”, ann. CIRP, 46(1),(1997), 57-62
- [5.5]. H.K. Tonshoff, Carendt, R. Ben Amor, “Cutting of hardened steel”, Ann. CIRP, 44(2), (2000), 566-574
- [5.6]. K. Kuzman, b.Nardin, J.Kopac, “Comparison of HSC and EDM from energy consumption and ecology point of view”, in : Proceeding of the ICEM 99, Nuemberg 1999, pp.115-120.