



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΔΥΣΚΑΤΕΡΓΑΣΤΩΝ ΕΙΔΙΚΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΝΙΚΕΛΙΟΥ

ΛΕΩΝΙΔΑΣ ΙΩΑΝ. ΤΣΙΟΥΓΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κατεργασία της Ηλεκτροδιάβρωσης αποτελεί μια ανέπαφη θερμοηλεκτρική διαδικασία αποβολής υλικού και ανήκει στην κατηγορία των προηγμένων μη συμβατικών μεθόδων κατεργασίας υλικών με πάνω από 70 χρόνια εφαρμογής. Η βασική αρχή λειτουργίας της είναι ότι εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια τα οποία βρίσκονται βυθισμένα σε διηλεκτρικό μέσο. Με κατάλληλες συνθήκες (διαφορά δυναμικού, απόσταση ηλεκτροδίων, παρουσία διηλεκτρικού μέσου) τοπικά ανάμεσα στα ηλεκτρόδια εκδηλώνονται ελεγχόμενες εκκενώσεις. Η θερμική ενέργεια των σπινθήρων οδηγεί στην αποβολή του υλικού από το οποίο αποτελείται καθένα από τα ηλεκτρόδια, λόγω της ανάπτυξης φαινομένων τήξης ή/και εξάχνωσης. Έτσι, κατά τη διάρκεια της εν λόγω κατεργασίας επιτυγχάνεται η απομάκρυνση υλικού από το τεμάχιο δίχως την επιβολή κάποιας δύναμης, σε αντίθεση με τις συμβατικές κατεργασίες αποβολής υλικού.

Η ηλεκτροδιάβρωση προσφέρει την δυνατότητα κατεργασίας αγωγίμων υλικών ανεξαρτήτως σκληρότητας, αντοχής ή άλλης μηχανικής ιδιότητας, καθώς και δυσκατέργαστων μετάλλων επιτυγχάνοντας την κατασκευή τεμαχίων πολύπλοκης γεωμετρίας, με μεγάλη διαστασιολογική ακρίβεια, και εξαιρετική ποιότητα επιφανείας.

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της κατεργασιμότητας του Νικελίου με συσκευή Ηλεκτροδιάβρωσης. Αρχικά παρουσιάζεται μια θεωρητική προσέγγιση της κατεργασίας, με αναφορά στα βασικά στοιχεία μιας συσκευής ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι παράμετροι ελέγχου και απόδοσης μιας κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης. Ακολούθως αναφέρονται οι συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιήθηκε η συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία και τέλος καταγράφονται τα αποτελέσματα αυτής.

ABSTRACT

The EDM (Electrical Discharge Machining) represents a contactless thermo-electric process of material removal. It belongs to unconventional advanced machining processes and is being applied for at least 70 years. Its principal function is the application of electric potential difference between two electrodes which are submerged in dielectric fluid. Under the appropriate conditions of voltage and distance, controlled electrical discharges are developed locally between the electrodes. The thermal energy of the sparks causing melting effect and vaporization of their material. Thus, during this process the workpiece material exclusion is achieved without any force in contrast to conventional processes.

The EDM offers the machinability of any conductive material irrespective of hardness, durability and other mechanical properties. It also allows the construction of complex geometries with excellent accuracy and surface quality, using materials which are difficult to machine.

The aim of this study is the investigation of the machinability of Nickel based alloys using EDM die sinking process. The theoretical approach of the manufacturing process is initially presented in the aspect of the fundamental elements of an EDM machine. Next, the process control and performance parameters are presented. Furthermore, the specific conditions under which the experimental procedure was carried out are reported and finally the results are recorded.

Αφιερωμένη στην μνήμη του πατέρα μου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό οφείλω να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου, κ.Μανωλάκο Δημήτριο καθηγητή στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και τον κ. Βαξεβανίδη Νικόλαο καθηγητή της ΑΣΠΑΙΤΕ, για την εμπιστοσύνη και την αμέριστη στήριξη τους, η καθοδήγηση των οποίων υπήρξε καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερω τον κ. Κωνσταντίνο Κερασιώτη η συνεισφορά του οποίου ως τεχνικό προσωπικό των Εργαστηρίων υπήρξε καθοριστική για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	13
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	15
ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	16
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	18
1. ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ (EDM).....	19
1.1 Βασικές Αρχές Ηλεκτροδιάβρωσης.....	20
1.2 Βασικά Στοιχεία Ηλεκτροδιάβρωσης Αποτύπωσης	22
1.2.1 Τεμάχιο (Workpiece).....	24
1.2.2 Ηλεκτρόδιο (Electrode).....	25
1.2.3 Διηλεκτρικό Μέσο (Dielectric Fluid)	28
1.2.4 Μηχανισμός Κίνησης Αξόνων X – Y (X – Y Positioning).....	30
1.2.5 Σερβομηχανισμός Ελέγχου (Servo Control System)	31
1.2.6 Μονάδα Παροχής Ισχύος (Power Supply Unit) – Γεννήτρια Παλμών (Pulse Generator)	33
1.2.7 Δοχείο Εργασίας (Work Tank).....	35
1.2.8 Το Σύστημα Κυκλοφορίας και Έκπλυσης (Fluid Circulation and Washing System)	36
2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	38
2.1 Διαφορά Δυναμικού	38
2.2 Ένταση Ρεύματος	38
2.3 Χαρακτηριστικά Παλμού – Κυματομορφή.....	39
2.4 Ενέργεια Ηλεκτρικής Εκκένωσης	48
2.5 Έλεγχος Κενού μεταξύ Ηλεκτροδίου και Υλικού	48

3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	50
3.1 Ρυθμός Αποβολής Υλικού (Material Removal Rate – MRR).....	50
3.2 Λόγος Φθοράς Εργαλείου (Tool Wear Rate - TWR).....	50
3.3 Τραχύτητα Επιφανείας	51
4. ΙΟΝΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΥΛΙΚΟΥ	53
4.1 Μηχανισμός Ιονισμού.....	53
4.2 Πολικότητα	55
4.3 Μηχανισμός Απομάκρυνσης Υλικού	56
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	59
5.1 Νικέλιο	59
5.2 Κράματα Νικελίου	59
5.3 Πειραματική Διάταξη.....	62
5.4 Πειραματικές Συνθήκες Κατεργασιών	66
5.5 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας.....	67
5.5.1 Διαδικασία Έναρξης Κατεργασίας	67
5.5.2 Μέτρηση Τραχυτήτων Κατεργασμένης Επιφάνειας.....	68
5.5.3 Μέτρηση Σκληρότητας Κατεργασμένης Επιφάνειας.....	69
5.5.4 Μεταλλογραφική Ανάλυση Κατεργασμένης Επιφάνειας.....	70
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	73
6.1 Μετρήσεις Τραχύτητας Κατεργασμένης Επιφανείας	75
6.2 Υπολογισμός Ρυθμού Αποβολής Υλικού	81
6.3 Μέτρηση Σκληρότητας Κατεργασμένης Επιφανείας.....	84
6.4 Χαρακτηρισμός Μικροδομής Κατεργασμένης Επιφάνειας.....	89
6.4.1 Τοπογραφία Επιφανείας.....	90
6.4.2 Μικροδομή Υποστρώματος	93
6.4.3 Μικρορωγμές.....	94

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	98
8. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	100
ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	105

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Τρόποι υπολογισμού της μέσης έντασης ρεύματος.....	39
Διάγραμμα 2: Απεικόνιση τυπικών κυματομοφών χωρίς/με ιονισμό.....	42
Διάγραμμα 3: Απεικόνιση τυπικών κυματομορφών χωρίς/με χρονική υστέρηση.....	42
Διάγραμμα 4: Απεικόνιση τυπικών κυματομορφών χωρίς/με καθυστέρηση ιονισμού....	43
Διάγραμμα 5: Τυπικής κυματομορφή σταθερής διάρκειας σπινθήρα.....	43
Διάγραμμα 6: Απεικόνιση της λειτουργίας ενός RC κυκλώματος.....	45
Διάγραμμα 7: Απεικόνιση τάσης, έντασης ρεύματος σε φάση φόρτισης/εκφόρτισης.....	46
Διάγραμμα 8: Τυπική κυματομορφή RC κυκλώματος.....	47
Διάγραμμα 9: Απεικόνιση «χαμένων παλμών» σε κύκλωμα Switch on/off και σε RC κύκλωμα.....	48
Διάγραμμα 10: Ενέργεια ανά παλμό σε συνάρτηση με την τραχύτητα.....	80
Διάγραμμα 11: Ένταση του ρεύματος του παλμού σε συνάρτηση με την τραχύτητα.....	80
Διάγραμμα 12: Ενέργεια παλμού σε συνάρτηση με τον ρυθμό αποβολής για 100μsec.	82
Διάγραμμα 13: Ενέργεια παλμού σε συνάρτηση με τον ρυθμό αποβολής για 300μsec.	83
Διάγραμμα 14: Ενέργεια παλμού σε συνάρτηση με τον ρυθμό αποβολής για 500μsec.	83
Διάγραμμα 15: Ενέργεια παλμού σε συνάρτηση με τον ρυθμό αποβολής για 100μsec, 300μsec και 500μsec.....	83
Διάγραμμα 16: Διακύμανση σκληρότητας στο κυρίως σώμα των δοκιμίων.....	86
Διάγραμμα 17: Διακύμανση της σκληρότητας στην ζώνη αναδιαμόρφωσης.....	88
Διάγραμμα 18: Απεικόνιση των τιμών της σκληρότητας στην ζώνη αναδιαμόρφωσης (μπλε κουκίδες) σε σύγκριση με τις τιμές της σκληρότητας στο κυρίως σώμα (κόκκινες κουκίδες).....	89

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Βασικά μέρη μιας διάταξης Ηλεκτροδιάβρωσης (die-sinking EDM).	23
Εικόνα 2: Εργαλειομηχανή EDM AGIETRON EMT 1.10.	24
Εικόνα 3: Απεικόνιση του μηχανισμού κίνησης σε συσκευή EDM.	30
Εικόνα 4: Σερβομηχανισμός ελέγχου με ηλεκτροκινητήρα.	32
Εικόνα 5: Σερβομηχανισμός ελέγχου με υδραυλική οδήγηση.	33
Εικόνα 6: Κύκλωμα παλμογεννήτριας τύπου τρανζίστορ.	34
Εικόνα 7: Κύκλωμα παλμογεννήτριας τύπου RC.	35
Εικόνα 8: Το εσωτερικό του δοχείου εργασίας της συσκευής EDM AGIETRON EMT 1.10.	36
Εικόνα 9: Απεικόνιση του συστήματος φιλτραρίσματος του διηλεκτρικού.	36
Εικόνα 10: Είδη φθορών του εργαλείου σε EDM.	51
Εικόνα 11: Απεικόνιση απλοποιημένης δομής του ατόμου.	54
Εικόνα 12: Απλοποιημένη αναπαράσταση ηλεκτρικής εκκένωσης σε EDM	54
Εικόνα 13: Αλληλεπίδραση θετικών ιόντων και ελεύθερων ηλεκτρονίων στο spark gap.	55
Εικόνα 14: Επίδραση της έντασης του ρεύματος εκκένωσης στο μέγεθος των κρατήρων.	56
Εικόνα 15: Επίδραση της διάρκειας του παλμού εκκένωσης στο μέγεθος των κρατήρων.	56
Εικόνα 16: Ηλεκτρικό νέφος κατά την εκκένωση με αρνητικό ηλεκτρόδιο.	57
Εικόνα 17: Ηλεκτρικό νέφος κατά την εκκένωση με θετικό ηλεκτρόδιο.	58
Εικόνα 18: Εργαλειομηχανή Ηλεκτροδιάβρωσης AGIETRON EMT1.10.	63
Εικόνα 19: Ηλεκτρόδιο Χαλκού ορθογώνιας γεωμετρίας.	64
Εικόνα 20: Αποτυπώσεις ορθογώνιας γεωμετρίας σε πλάκα Νικελίου.	65
Εικόνα 21: Τραχύμετρο Surtronic 3+ της εταιρείας Taylor – Hobson.	68
Εικόνα 22: Ακίδα τραχύμετρου.	68
Εικόνα 23: Μικροσκληρόμετρο Brinell EQUOTIP 2	70

Εικόνα 24: Δισκοτόμος Discotom-2.	70
Εικόνα 25: Δοκίμια εγκιβωτισμένα στην ειδική ρητίνη.	71
Εικόνα 26: Λειαντικός δίσκος DAP-V.	72
Εικόνα 27: Οπτικό στερεομικροσκόπιο DMR.	72
Εικόνα 28: Υπό μελέτη δοκίμια Νικελίου.	73
Εικόνα 29: Λήψη του στρώματος αναδιαμόρφωσης από το μικροσκληρόμετρο.	84
Εικόνα 30: Λήψη των αποτυπωμάτων του μικροσκληρομέτρου στην κάθετη στην κατεργασμένη επιφάνεια εγκοπή.	85
Εικόνα 31: Λήψη του αποτυπώματος του μικροσκληρομέτρου εντός του επαναστερεοποιημένου στρώματος.	87
Εικόνα 32: Τοπογραφία επιφάνειας δοκιμίου 1.	90
Εικόνα 33: Τοπογραφία επιφάνειας δοκιμίου 3.	90
Εικόνα 34: Τοπογραφία επιφάνειας δοκιμίου 4.	90
Εικόνα 35: Τοπογραφία επιφάνειας δοκιμίου 6.	91
Εικόνα 36: Τοπογραφία επιφάνειας δοκιμίου 7.	91
Εικόνα 37: Τοπογραφία επιφάνειας δοκιμίου 9.	91
Εικόνα 38: Σταδιακή αύξηση της θαμπάδας των δοκιμίων.	92
Εικόνα 39: Απεικόνιση του λεπτού στρώματος αναδιαμόρφωσης.	94
Εικόνα 40: Λήψη ρωγμών στο υπόστρωμα του δοκιμίου.	96
Εικόνα 41: Λήψη ρωγμών στο υπόστρωμα του δοκιμίου.	96
Εικόνα 42: Λήψη φυσαλίδων ως «θυλάκων» στην κατεργασμένη επιφάνεια.	97
Εικόνα 43: Λήψη φυσαλίδας ως «θύλακα» στην κατεργασμένη επιφάνεια.	97

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Κατάλογος Υλικών Ηλεκτροδίων.....	27
Πίνακας 2: Σύγκριση ιδιοτήτων και παραμέτρων για μεταλλικά ηλεκτρόδια και ηλεκτρόδια γραφίτη.....	27
Πίνακας 3: Προτεινόμενες συνθήκες κατεργασίας για διάφορα υλικά τεμαχίου.	28
Πίνακας 4: Συγκριτικός Πίνακας Διηλεκτρικών Υγρών.	29
Πίνακας 5: Επίδραση της πίεσης έκπλυσης στις παραμέτρους κατεργασίας.	37
Πίνακας 6: Επίδραση παραμέτρων κατεργασίας EDM στους παράγοντες απόδοσης. .	52
Πίνακας 7: Ιδιότητες ηλεκτρολυτικού χαλκού.	64
Πίνακας 8: Ιδιότητες διηλεκτρικού μέσου.	65
Πίνακας 9: Συνθήκες κατεργασίας και αντίστοιχο βάθος κοπής.	66
Πίνακας 10: Πειραματικές συνθήκες του κάθε δοκίμιου.	73
Πίνακας 11: Ενέργεια παλμού για κάθε δοκίμιο.	74
Πίνακας 12: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 1.	75
Πίνακας 13: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 2.	75
Πίνακας 14: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 3.	75
Πίνακας 15: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 4.	76
Πίνακας 16: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 5.	76
Πίνακας 17: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 6.	76
Πίνακας 18: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 7.	76
Πίνακας 19: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 8.	77
Πίνακας 20: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 9.	77
Πίνακας 21: Μέσος όρος R_a τραχύτητας.....	77
Πίνακας 22: Μέσος όρος R_q τραχύτητας.....	78
Πίνακας 23: Μέσος όρος R_t τραχύτητας.	78
Πίνακας 24: Μέσος όρος R_y τραχύτητας.....	79

Πίνακας 25: Μέσος όρος τραχυτήτων.....	79
Πίνακας 26: Συνολικό βάθος και χρόνος για κάθε δοκίμιο.	81
Πίνακας 27: Ρυθμός αποβολής υλικού V_w για κάθε δοκίμιο.....	82
Πίνακας 28: Τιμές σκληρότητας στο κυρίως σώμα.	85
Πίνακας 29: Τιμές σκληρότητας στην ζώνη αναδιαμόρφωσης.....	87

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα Εργαστήρια του Τομέα της Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και στο πλαίσιο του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών». Το αντικείμενό της είναι η «ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΗΛΕΚΤΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΔΥΣΚΑΤΕΡΓΑΣΤΩΝ ΕΙΔΙΚΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΝΙΚΕΛΙΟΥ». Η Ηλεκτροδιάβρωση είναι μια θερμο-ηλεκτρική διαδικασία αποβολής υλικού που περιλαμβάνει την διαδικασία εξάτμισης υλικού μέσω θερμικής ενέργειας που παράγεται λόγω εφαρμογής ηλεκτρικού σπινθήρα μεταξύ ενός δοκιμίου και ενός εργαλείου που βρίσκονται εντός διηλεκτρικού υγρού. Κατά την κατεργασία αποτυπώνεται το επιθυμητό σχήμα από το εργαλείο στο δοκίμιο. Στην παρούσα εργασία μελετάται η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου σε Νικέλιο και γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με βάση τα αντίστοιχα διεξαχθέντα πειράματα.

ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Εισαγωγή: Σύντομη και γενική αναφορά στον τομέα της συνεχώς εξελισσόμενης Επιστήμης των Υλικών καθώς και στον τομέα των μεθόδων κατεργασίας των Υλικών.

1. Ηλεκτροδιάβρωση (EDM): Στο 1^ο κεφάλαιο της εργασίας αρχικά γίνεται μια γενική περιγραφή των συσκευών ηλεκτροδιάβρωσης. Έπειτα περιγράφεται συγκεκριμένα η μη συμβατική κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης βύθισης (die sinking EDM). Αναφέρονται οι βασικές αρχές λειτουργίας που την διέπουν και περιγράφονται τα επιμέρους στοιχεία από τα οποία αποτελείται (τεμάχιο, ηλεκτρόδιο, διηλεκτρικό μέσο, μηχανισμός κίνησης, γεννήτρια, δοχείο εργασίας κτλ).

2. Παράμετροι Ελέγχου της Κατεργασίας: Στο 2^ο κεφάλαιο ορίζονται οι παράμετροι ελέγχου της κατεργασίας (διαφορά δυναμικού, ένταση ρεύματος, χρόνος και διάρκεια του παλμού, ενέργεια εκκένωσης, διάκενο κτλ). Περιγράφονται οι ιδιαιτερότητες και τα χαρακτηριστικά της κάθε παραμέτρου. Είναι εξαιρετικά σημαντική η κατανόηση του πώς η μεταβολή της καθεμίας παραμέτρου επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα της κατεργασίας.

3. Παράμετροι Απόδοσης της Κατεργασίας: Στο 3^ο κεφάλαιο ορίζονται οι παράμετροι απόδοσης της κατεργασίας (ρυθμός αποβολής υλικού, λόγος φθοράς εργαλείου, τραχύτητα επιφανείας κτλ). Η επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος προϋποθέτει την γνώση των παραμέτρων της αποδοτικότητας της κατεργασίας ώστε να είναι εφικτός ένας σωστός σχεδιασμός της κατεργασίας.

4. Ιονισμός και Μηχανισμοί Απομάκρυνσης Υλικού: Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται μια πιο θεωρητική προσέγγιση του μηχανισμού της ηλεκτρικής εκκένωσης. Περιγράφονται οι φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο διάκενο μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου (ιονισμός, ανάπτυξη στήλης πλάσματος) και οδηγούν στην δημιουργία σπινθήρα και στην τελική απομάκρυνση του υλικού.

5. Πειραματική Διαδικασία: Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα μελέτη. Αρχικά αναφέρονται κάποια θεωρητικά δεδομένα σχετικά με το υλικό που χρησιμοποιήθηκε (Νικέλιο) και εν συνεχεία παρουσιάζονται τα επιμέρους συστατικά του πειράματος (εργαλειομηχανή, ηλεκτρόδιο, τεμάχια, επιμέρους όργανα). Στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφονται αναλυτικά όλα τα επιμέρους στάδια της πειραματικής διαδικασίας.

6. Αποτελέσματα και Αξιολόγησή τους: Στο 6^ο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του πειράματος και η αξιολόγησή τους. Αρχικά γίνεται αξιολόγηση της ποιότητας της κατεργασμένης επιφάνειας με βάση τις μετρήσεις της τραχύτητας και σχολιασμός των φωτογραφιών που πάρθηκαν στο οπτικό μικροσκόπιο (τοπογραφία, μικροδομή υποστρώματος, μικρο ρωγμές, ζώνη αναδιαμόρφωσης από επαναστερεοποιημένο υλικό). Στο τέλος του κεφαλαίου αναφέρονται οι μετρήσεις της σκληρότητας των κάθετων τομών των δοκιμίων καθώς και ο υπολογισμός του ρυθμού αποβολής του υλικού.

7. Συμπεράσματα: Στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της πειραματικής διαδικασίας.

8. Προτάσεις: Στο 8^ο κεφάλαιο παρατίθενται προτάσεις για μελλοντικές διατριβές στο αντικείμενο της κατεργασίας της ηλεκτροδιάβρωσης.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι συνεχείς εξελίξεις στο πεδίο της Επιστήμης των Υλικών έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία νέων δεδομένων αντίστοιχα στον τομέα των μεθόδων κατεργασίας αυτών. Ειδικότερα, η συνεχής έρευνα στην τεχνολογία των υλικών οδηγεί στην ανάπτυξη νέων υλικών υψηλής αντοχής, τα οποία είναι δύσκολο να κατεργαστούν με συμβατικές κατεργασίες, αλλά με μη συμβατικές. Οι μη συμβατικές κατεργασίες ταξινομούνται ανάλογα με το είδος της ενέργειας που χρησιμοποιούν, τους μηχανισμούς στους οποίους βασίζονται και το πεδίο εφαρμογής τους.

Η Ηλεκτροδιάβρωση είναι μια από τις πιο κοινά χρησιμοποιούμενες μη συμβατικές μεθόδους.

1. Ηλεκτροδιάβρωση (EDM)

Η κατεργασία της Ηλεκτροδιάβρωσης (EDM, Electrical Discharge Machining) αποτελεί μια μη συμβατική κατεργασία αφαίρεσης υλικού, θερμικού - θερμοηλεκτρικού χαρακτήρα. Αν και αναπτύχθηκε σχετικά πρόσφατα, αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μη-συμβατική κατεργασία και εφαρμόζεται ευρύτατα λόγω των εξαιρετικών δυνατοτήτων που προσφέρει σε αγώγιμα υλικά ανεξαρτήτως μηχανικών ιδιοτήτων. Τα πλεονεκτήματα αυτής είναι κυρίως η δημιουργία πολύπλοκων και ασυνήθιστων γεωμετρικών σχημάτων με υψηλό βαθμό διαστασιολογικής ακρίβειας και ποιότητα επιφανείας, σε υλικά υψηλής σκληρότητας και μικρής κατεργασιμότητας. Με την χρήση συμβατικών μεθόδων κατεργασίας οι ανωτέρω απαιτήσεις θα ήταν υπερβολικά χρονοβόρο και δαπανηρό να επιτευχθούν.

Ιστορικά, η προέλευση της διαδικασίας της ηλεκτροδιάβρωσης δύναται να τοποθετηθεί περίπου στο 1700, όταν ο επιστήμονας Benjamin Franklin ανέφερε το φαινόμενο της ηλεκτρικής διάβρωσης των υλικών από ηλεκτρικούς σπινθήρες. Αργότερα, στο 1770 ο Άγγλος επιστήμονας Joseph Priestly παρατήρησε την διαβρωτική επίδραση των ηλεκτρικών εκκενώσεων. Δηλαδή, ότι κάθε φορά που πλησιάζουν μεταξύ τους τα άκρα δύο αγωγών συνδεδεμένων με τους πόλους ηλεκτρικής πηγής, προκαλείται ηλεκτρική εκκένωση, και από τον παραγόμενο σπινθήρα, την υψηλή θερμοκρασία και τη δράση ηλεκτρικών μοριακών δυνάμεων αποσπάται ποσότητα υλικού και από τους δύο αγωγούς. Παρ' όλα αυτά, δεν υπήρξε καμία εφαρμογή της ηλεκτροδιάβρωσης μέχρι το 1943, όταν δύο Σοβιετικοί επιστήμονες, οι B.R. και N.I. Lazarencο κατάφεραν να εφαρμόσουν το φαινόμενο αυτό για την κατεργασία υλικών. Αρχικά η μέθοδος παρουσίαζε αρκετά προβλήματα και δυσκολίες, καθώς οι πρώτες μηχανές ήταν απλοϊκές και η κίνηση του ηλεκτροδίου γινόταν χειροκίνητα. Όμως με την ανάπτυξη από τους ίδιους επιστήμονες του πρώτου σερβομηχανισμού ελέγχου για την διατήρηση του κενού ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια, αυξήθηκε ο βαθμός ελέγχου της κατεργασίας.

Η ηλεκτροδιάβρωση είναι κατεργασία κατά την οποία γίνεται αφαίρεση υλικού από κάποιο ηλεκτρικά αγώγιμο κατεργαζόμενο τεμάχιο με την χρήση ηλεκτρισμού. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινιστεί η έννοια του ηλεκτρικά αγώγιμου υλικού. Με την ηλεκτροδιάβρωση μπορούμε να κατεργαστούμε και κάποια υλικά που δεν είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού, αλλά υπάγονται στους ημιαγωγούς. Υπάρχει μια τιμή της ειδικής αντίστασης ρ του υλικού, κάτω από την οποία η ηλεκτροδιάβρωση είναι εφικτή. Αυτό το όριο μπορούμε να το ονομάσουμε και κατώφλι αγωγιμότητας, και η τιμή του είναι $\rho=100 \Omega \cdot \text{cm}$ (ειδική αγωγιμότητα $0,01 \text{ S/cm}$). Ορθότερα, υπάρχει μια περιοχή τιμών της ειδικής αντίστασης ρ των υλικών, με κέντρο την τιμή $100 \Omega \cdot \text{cm}$, στην οποία με τα βίαις εμφανίζεται σπινθήρας. Είναι δηλαδή πιθανό κάποιο υλικό με λίγο μεγαλύτερη ειδική αντίσταση από $100 \Omega \cdot \text{cm}$ να ηλεκτροδιαβρώνεται, ενώ ένα υλικό με μικρότερη ειδική αντίσταση να μην ηλεκτροδιαβρώνεται. Τα περισσότερα αγώγιμα υλικά εμφανίζουν τα λιγότερα προβλήματα ηλεκτροδιάβρωσης.

Η EDM διακρίνεται σε τρεις βασικούς τύπους:

α. Στην ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης (die-sinking EDM), όπου με σταθερό εργαλείο γίνεται η πρόσδοση της μορφής του εργαλείου – ηλεκτρόδιου στο κατεργαζόμενο τεμάχιο – ηλεκτρόδιο. Η κατεργασμένη επιφάνεια που παράγεται στο αντικείμενο είναι η εικόνα καθρέφτης του σχήματος του εργαλείου. Οι δύο άξονες

κίνησης, το ρεύμα, η τάση και οι άλλες συνθήκες του κενού παρακολουθούνται αριθμητικά από ένα σύστημα ελέγχου.

β. Στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire EDM ή WEDM), όπου το σταθερό ηλεκτρόδιο έχει αντικατασταθεί από ένα κινούμενο μεταλλικό αγώγιμο σύρμα. Το μεταλλικό αυτό σύρμα κινείται με μια συγκεκριμένη ταχύτητα και η διάστασή του γενικά κυμαίνεται από 0.005-0.03 cm. Η WEDM θεωρητικά ήρθε στο φως της δημοσιότητας το 1968 και το 1975 άρχισε να χρησιμοποιείται πρακτικά.

γ. Στην ηλεκτροδιάβρωση γεώτρησης (drilling EDM), η οποία δύναται να χρησιμοποιηθεί για γεώτρηση κυκλικών οπών με πολύ μικρό μέγεθος και μεγάλο βάθος.

Η drilling EDM χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή οπών σε πτερύγια αεροκινητήρων, όπου προσφέρουν μια καλύτερη εναλλακτική ή μερικές φορές την μοναδική εναλλακτική.

Όλοι οι τύποι EDM έχουν μεγάλες δυνατότητες και η έρευνα στοχεύει στο πεδίο αυτό της βελτίωσης της διαδικασίας και του εξοπλισμού. Η EDM εφαρμόζεται ευρέως σε βιομηχανίες χύτευσης και καλουπιών, στην αεροδιαστημική και στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην στρατιωτική βιομηχανία και βιομηχανίες κατασκευής χειρουργικών εργαλείων καθώς δύναται να επιτύχει σύνθετα σχήματα και πολύπλοκες γεωμετρίες.

1.1 Βασικές Αρχές Ηλεκτροδιάβρωσης

Οι βασικές αρχές λειτουργίας είναι ίδιες τόσο για την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης, όσο και την ηλεκτροδιάβρωση σύρματος, με τις όποιες διαφορές υπάρχουν να αναφέρονται σε «θέματα» διάταξης και παραμέτρων κατεργασίας. Η λειτουργία της βασίζεται στην Αρχή της Διάβρωσης με Ηλεκτρική Εκκένωση. Στην κατεργασία της EDM, το υλικό από το ηλεκτρικά αγώγιμο τεμάχιο απομακρύνεται λόγω της ενέργειας πολλών ελεγχόμενων και επαναλαμβανόμενων σύντομων ηλεκτρικών σπινθήρων που παράγονται από μια παλμική γεννήτρια. Οι εν λόγω σπινθήρες προκαλούν αντίστοιχες εκκενώσεις ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο – εργαλείο και στο τεμάχιο - ηλεκτρόδιο, τα οποία πλαισιώνονται από ένα διηλεκτρικό υγρό μέσο.

Τόσο το τεμάχιο όσο και το χρησιμοποιούμενο εργαλείο πρέπει να είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Το εργαλείο, που συχνά είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο του συστήματος, πρέπει να μπορεί να κινείται για να πλησιάζει συνεχώς και να κρατά σταθερή μια μικρή απόσταση, το διάκενο κατεργασίας (spark gap), από την επιφάνεια του κομματιού, από την οποία και αφαιρείται υλικό. Το τεμάχιο (workpiece), που ηλεκτρικά συνήθως αποτελεί το θετικό ηλεκτρόδιο, προσδένεται πάνω στο τραπέζι της εργαλειομηχανής. Και τα δύο, τεμάχιο και εργαλείο, είναι εμβαπτισμένα μέσα σε δοχείο γεμάτο με μονωτικό διηλεκτρικό υγρό που ανακυκλοφορεί συνεχώς.

Κατά τη διαδικασία της ηλεκτροδιάβρωσης εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο, με ύπαρξη καθορισμένου διακένου ανάμεσά τους. Καθώς το ηλεκτρόδιο πλησιάζει το τεμάχιο παρουσία του διηλεκτρικού μέσου, το οποίο συνήθως είναι απιονισμένο νερό ή κάποιο έλαιο και το οποίο λειτουργεί ταυτόχρονα ως μονωτής και ως ψυκτικό, δημιουργείται μια «στήλη» έντονης ηλεκτρομαγνητικής ροής (column of intense electromagnetic flux).

Η ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων εργαλείο - τεμάχιο γίνεται μόνο, όταν η εφαρμοζόμενη από την τροφοδοτική μονάδα τάση είναι ίση προς την “τάση διασπάσεως” του μεταξύ τους διακένου. Αρχικά δεν υπάρχει ροή ρεύματος ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, γιατί στο διάκενο υπάρχει διηλεκτρικό το οποίο είναι μονωτής. Ωστόσο, καθώς το διάκενο μειώνεται, μειώνεται και η αντίστασή του, με αποτέλεσμα μετά από ένα συγκεκριμένο διάκενο και κάτω να δημιουργείται ηλεκτρική εκκένωση και να έχουμε ροή ρεύματος, η οποία συντελεί στην ανάπτυξη θερμότητας. Η τάση διασπάσεως του διακένου εξαρτάται τόσο από το σχήμα και την απόσταση στην οποία βρίσκονται μεταξύ τους τα δύο ηλεκτρόδια, όσο και από τις μονωτικές ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου διηλεκτρικού υγρού, και είναι της τάξεως των 15 έως 25 Volt.

Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται έχει τη μέγιστη ισχύ, με πυκνότητα ενέργειας από $10^{11} - 10^{14} \text{ W/m}^2$, στο σημείο που ελαχιστοποιείται η απόσταση ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο. Υπό την επίδραση του έντονου ηλεκτρικού πεδίου «σπάει» διηλεκτρική σταθερά του μέσου, που παρεμβάλλεται και δημιουργείται ηλεκτρικός σπινθήρας (single spark to be discharge). Ο σπινθήρας αυτός εμφανίζεται στο μικρό διάκενο ανάμεσα σε ηλεκτρόδιο και τεμάχιο (spark gap,) όπου αναπτύσσονται θερμοκρασίες $6000 - 12000 \text{ }^\circ\text{C}$ ανάλογα με τις συνθήκες ψύξης, και έχει ως αποτέλεσμα την εξάχνωση και τήξη υλικού, και το σχηματισμό ενός κρατήρα. Η θερμότητα, που διοχετεύεται μέσω του σπινθήρα προκαλεί «κατάρρευση» της ηλεκτρομαγνητικής ροής και κατά συνέπεια και του ίδιου του σπινθήρα, με το σύστημα να επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση.

Στην πραγματικότητα μετά από κάθε εκκένωση παρατηρείται εξάχνωση και επιφανειακή τήξη από την παραγόμενη κατά την διάσπαση του διακένου θερμότητα. Στις αντίστοιχες θέσεις των εκκενώσεων δημιουργούνται πολύ μικροί αβαθείς κρατήρες λόγω εξάχνωσης, ενώ στην άμεσα γειτονική περιοχή που πλαισιώνει τον κρατήρα δημιουργείται ένα στρώμα αναδιαμόρφωσης λόγω επιφανειακής τήξης του υλικού. Στο τέλος κάθε εκκενώσεως υπάρχει και λιωμένο υλικό σε σφαιροειδή μορφή που παρασύρεται από το διηλεκτρικό υγρό που κυκλοφορεί, απομακρύνεται από τον κρατήρα και συγκρατείται μέσα στο φίλτρο. Αφαίρεση υλικού παρατηρείται και στα και στα δύο ηλεκτρόδια σε διαφορετικό όμως ποσοστό.

Συνοπτικά, κατά την εκκένωση δημιουργούνται σπινθήρες στο πολύ μικρό διάκενο (σταθερό, από 25 έως 50 μm) μεταξύ των δύο επιφανειών. Η θερμοκρασία του σπινθήρα που παράγεται βρίσκεται συνήθως μέσα σε ένα εύρος από 8000°C έως 12000°C , με αποτέλεσμα μετά από κάθε εκκένωση να έχουμε επιφανειακή τήξη ή και εξάχνωση των υλικών - από την παραγόμενη κατά τη διάσπαση του διακένου θερμική ενέργεια - και αφαίρεση υλικού και στα δύο ηλεκτρόδια.

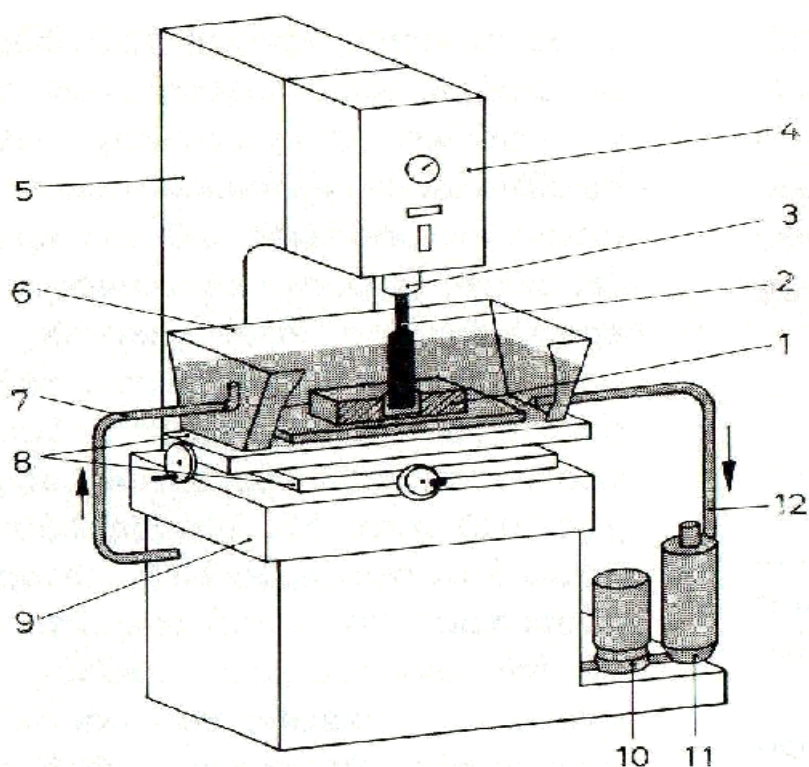
Το φαινόμενο αυτό επαναλαμβάνεται κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Η ένταση του ρεύματος υπολογίζεται από τη διαφορά δυναμικού, που εφαρμόζεται και την αντίσταση του συστήματος, ενώ προσδιορίζει την ενέργεια του σπινθήρα και κατ'επέκταση και το μέγεθος του διακένου. Ο χρόνος κατά τον οποίο έχουμε σπινθήρα (ηλεκτρικό ρεύμα), ονομάζεται διάρκεια παλμού (pulse duration) T_{on} , ο χρόνος δίχως σπινθήρα – μεσοδιάστημα (pulse interval) T_{off} και χρησιμεύει στην αποκατάσταση συνθηκών στο διάκενο, ώστε να μπορεί επαναληφθεί ο προαναφερθείς «κύκλος» (σχηματισμός εκ νέου σπινθήρα). Το υλικό, που έχει αποβληθεί λόγω του σπινθήρα,

στερεοποιείται σε μικροσκοπικά σφαιρίδια, τα οποία διασπείρονται στο διηλεκτρικό μέσο μέσω του οποίου και απομακρύνονται. Ο όγκος υλικού, που τυπικά απομακρύνεται σε κάθε ηλεκτρική εκκένωση είναι της τάξης των $10^{-6} - 10^{-4} \text{ mm}^3$ με την διαστασιολογική ακρίβεια που επιτυγχάνεται να είναι σε υψηλά επίπεδα.

Η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης είναι πλέον μια αρκετά καθιερωμένη κατεργασία, με πολλές εφαρμογές και πολύ μεγάλες δυνατότητες περαιτέρω ανάπτυξης. Χρησιμοποιείται κυρίως για την κατεργασία τεμαχίων από πολύ σκληρά υλικά και για την επίτευξη πολύπλοκων γεωμετριών, ενώ πολλές φορές μετά την περάτωσή της δεν απαιτείται επιπλέον λείανση της παραγόμενης επιφάνειας, καθώς δημιουργεί πολύ καλή επιφανειακή ποιότητα. Χρησιμοποιείται επίσης ευρέως στην κατασκευή πολύπλοκων καλουπιών. Η ανάπτυξή της έχει κάνει πολλές εργασίες ευκολότερες από ότι ήταν στο παρελθόν, ενώ σε πολλές περιπτώσεις αποτελεί το μοναδικό τρόπο κατεργασίας διαφόρων τεμαχίων.

1.2 Βασικά Στοιχεία Ηλεκτροδιάβρωσης Αποτύπωσης

Τα βασικά στοιχεία της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης (die-sinking EDM) είναι:



- 1) Κομμάτι για κατεργασία.
- 2) Εργαλείο - ηλεκτρόδιο.
- 3) Κεφαλή - φορέας του εργαλείου.
- 4) Κιβώτιο μηχανισμού προώσεως του εργαλείου.
- 5) Κορμός.
- 6) Λεκάνη.
- 7) Σωλήνας προσαγωγής του διηλεκτρικού υγρού.
- 8) Σεπόρτι για δύο κάθετες κινήσεις.
- 9) Τραπέζι.
- 10) Αντλία διηλεκτρικού.
- 11) Φίλτρο.
- 12) Σωλήνωση επιστροφής διηλεκτρικού.

Εικόνα 1: Βασικά μέρη μιας διάταξης Ηλεκτροδιάβρωσης (die-sinking EDM).

- το προς κατεργασία κομμάτι - τεμάχιο (workpiece)
- το εργαλείο - ηλεκτρόδιο (electrode)
- το διηλεκτρικό μέσο (dielectric fluid)
- ο μηχανισμός κίνησης στους άξονες X – Y (X – Y positioning)
- ο servo μηχανισμός ελέγχου (servo controller)
- η γεννήτρια ηλεκτρικών παλμών (pulse generator)
- το δοχείο – δεξαμενή εργασίας (work tank)
- δεξαμενή αποθήκευσης διηλεκτρικού μέσου (dielectric reservoir)
- αντλία και φίλτρα διηλεκτρικού μέσου (dielectric pump and filter)



Εικόνα 2: Εργαλειομηχανή EDM AGIETRON EMT 1.10.

1.2.1 Τεμάχιο (Workpiece)

Η βασική προϋπόθεση για την επιλογή ενός υλικού για κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης είναι το υλικό αυτό να είναι ηλεκτρικά αγωγίμο. Δεν υπάρχει κανένας περιορισμός ως προς τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, όπως η σκληρότητα, η αντοχή κλπ. Ενδεικτικά, υπάρχει η δυνατότητα κατεργασίας ακόμα και Τιτανίου καθώς και υπερκραμάτων Νικελίου (Nickel Superalloys). Άρα, βασική απαίτηση είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του. Πέραν αυτής, λόγω της θερμοηλεκτρικής φύσεως της κατεργασίας, οι ιδιότητες του υλικού που επηρεάζουν σε αξιοσημείωτο βαθμό την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα της κατεργασίας, είναι οι θερμικές. Οι παράμετροι λοιπόν του υλικού που πρέπει να

λαμβάνονται υπόψιν είναι η χημική σύνθεση του υλικού, η πυκνότητα, οι θερμοκρασίες τήξης και βρασμού, η θερμική αγωγιμότητα, η θερμοχωρητικότητα, ο συντελεστής θερμικής διαστολής και η ηλεκτρική αντίσταση. Τέλος, ρόλο παίζουν και οι διαστάσεις του όγκου.

1.2.2 Ηλεκτρόδιο (Electrode)

Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους κοπής, στην μη συμβατική μέθοδο της EDM δεν απαιτείται επιβολή μηχανικής δυνάμεως από το εργαλείο προς το τεμάχιο για την αφαίρεση του υλικού. Έτσι, είναι δυνατό τα εργαλεία - ηλεκτρόδια να κατασκευάζονται από σχετικά μαλακά και ευκατέργαστα υλικά. Επίσης, λόγω της θερμοηλεκτρικής φύσεως της κατεργασίας, θεωρητικά για την κατασκευή ηλεκτροδίων δύναται να χρησιμοποιηθούν μόνο υλικά τα οποία είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος. Ανάλογα με το είδος της κατεργασίας και το κατεργαζόμενο υλικό αυτής θα πρέπει να επιλέγουμε αντίστοιχα το κατάλληλο υλικό για την κατασκευή του ηλεκτροδίου. Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι για να επιτευχθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα που επιθυμούμε σε κάθε κατεργασία, επιβάλλεται κατά την επιλογή υλικών για την κατασκευή ηλεκτροδίων να λαμβάνονται κάθε φορά υπόψιν τα παρακάτω:

- το υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου
- το είδος της κατεργασίας που πρόκειται να γίνει
- τον τύπο της γεννήτριας που διαθέτει η εργαλειομηχανή
- την αντίσταση του υλικού σε φθορά
- την επιθυμητή ποιότητα παραγόμενης επιφάνειας
- το κόστος πρώτων υλών και κατασκευής

Οι απαιτήσεις από ένα υλικό ηλεκτροδίου είναι:

- Υψηλό σημείο τήξης
- Υψηλή κατεργασιμότητα
- Χαμηλό κόστος

Με βάση τα ανωτέρω, τα υλικά κατασκευής ηλεκτροδίων για κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα μεταλλικά ηλεκτρόδια και τα ηλεκτρόδια από γραφίτη. Όπως προαναφέρθηκε, κατά την κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης παρατηρείται απώλεια υλικού και από τα δύο ηλεκτρόδια (εργαλείο – τεμάχιο). Για τη μελέτη της σχετικής φθοράς τεμαχίου – ηλεκτροδίου έχει οριστεί το μέγεθος του λόγου φθοράς (Rhythm Wear Rate, RWR), οριζόμενος ως ο λόγος του όγκου του αποβαλλόμενου υλικού του τεμαχίου προς τον όγκο του φθαρμένου υλικού του ηλεκτροδίου, ο οποίος ενδεικτικά, κυμαίνεται περίπου από 3:1 για μεταλλικά ηλεκτρόδια μέχρι και 100:1 για ηλεκτρόδια από γραφίτη.

Συμπερασματικά, τα ηλεκτρόδια από γραφίτη έχουν σχετικά χαμηλότερο ρυθμό φθοράς και χρησιμοποιούνται για κατεργασίες ξεχονδρίσματος σε αντίθεση με τα μεταλλικά ηλεκτρόδια, τα οποία αν και παρουσιάζουν υψηλή φθορά, διαθέτουν ιδιότητες, που τα καθιστούν κατάλληλα για κατεργασίες φινιρίσματος. Έχει αποδειχθεί ότι ο ρυθμός φθοράς του ηλεκτροδίου μειώνεται όσο μεγαλύτερο είναι το σημείο τήξης του υλικού που το αποτελεί, γεγονός που καθιστά τα ηλεκτρόδια από γραφίτη ως τα πιο ανθεκτικά στη φθορά. Επιπλέον, η φθορά αυξάνεται και με την αύξηση της έντασης του ρεύματος.

Τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υλικά για την κατασκευή ηλεκτροδίων είναι κυρίως ο χαλκός, τα κράματά του με Τελλούριο ή Βολφράμιο, ο Γραφίτης, και σε ειδικές περιπτώσεις ο Ορείχαλκος, το καρβίδιο του Βολφραμίου και κράματα Αργύρου και Βολφραμίου. Αναλυτικότερα:

- Ορείχαλκος (brass): διαθέτει ικανοποιητική αντοχή σε φθορά για κατεργασία χάλυβα, αλλά αυξημένους ρυθμούς φθοράς σε κατεργασίες καρβιδίων βολφραμίου (tungsten carbide). Επίσης, δεν συνιστάται η χρήση του με διατάξεις RC παροχή ισχύος.

- Χαλκός (copper): χρησιμοποιείται είτε ως «καθαρός» χαλκός είτε ως κράμα τελλουρίου – χαλκού. Ο χαλκός παρουσιάζει δυσκολίες στην κατεργασία του με λειαντικούς τροχούς (grinding), αλλά έχει χαρακτηριστικά ιδανικά για κατεργασίες «μηδενικής φθοράς» (no wear – machining).

- Χαλκός – Βολφράμιο: υλικό που έχει προκύψει από πυροσυσσωμάτωση και συναντάται σε συνήθεις αναλογίες 70% βολφράμιο και 30% χαλκός. Έχει υψηλή αντοχή σε φθορά, χρησιμοποιείται συνήθως για κατεργασίες καρβιδίων του βολφραμίου, αλλά είναι μειονέκτημα η δυσκολία κατεργασίας του.

- Ψευδάργυρος (zinc): κράματα ψευδαργύρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά ηλεκτροδίων, παρουσιάζουν όμως υψηλή φθορά.

- Γραφίτης (graphite): είναι διαθέσιμος σε διαφορετικές πυκνότητες, οι οποίες εξαρτώνται από την κοκκομετρία της κόνης από την οποία παράγεται, και η οποία κυμαίνεται από 100 μm έως και 1 μm. Διαθέτει υψηλή αντοχή σε φθορά και υψηλή κατεργασιμότητα, η σκόνη όμως γραφίτη που «δημιουργείται» κατά την κατεργασία του πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν. Ο γραφίτης δεν τήκεται αλλά εξαχνώνεται (sublimes) με τη θερμοκρασία εξάχνωσης να είναι «κοντά» στη θερμοκρασία τήξης των καρβιδίων του βολφραμίου και ως εκ τούτου δεν συνιστάται η χρήση του για κατεργασία του συγκεκριμένου υλικού. Γραφίτης με λεπτή κοκκομετρία, συνιστάται για κατεργασίες αποπεράτωσης και ακριβείας (fine detailed machining), ενώ ανεξάρτητα κοκκομετρίας χρησιμοποιείται σε κατεργασίες μηδενικής φθοράς. Τέλος, πρέπει να αποφεύγεται η χρήση του σε διατάξεις με RC παροχή ισχύος.

- Χαλκός – Γραφίτης: πρόκειται για λεπτής κοκκομετρίας γραφίτη διαποτισμένο (infiltrated) με χαλκό. Συνεχίζει ως υλικό να διαθέτει τα χαρακτηριστικά του «απλού – καθαρού» γραφίτη με επιπλέον την ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού.

Επίσης, ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση σε μια κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης, σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα αυτής παίζει η πολικότητα που επιλέγεται για το ηλεκτρόδιο και για το κατεργαζόμενο υλικό. Στο παρακάτω σχήμα διακρίνονται κάποια από τα υλικά ηλεκτροδίων, με την αντίστοιχη πολικότητα που τους εφαρμόζεται και το υλικό που κατεργάζονται.

Πίνακας 1: Κατάλογος Υλικών Ηλεκτροδίων.

ELECTRODE	POLARITY*	WORKPIECE	CORNER WEAR	CAPACITANCE
Copper	+	Steel	2 - 10%	No
Copper	+	Inconel	2 - 10%	No
Copper	+	Aluminum	< 3%	No
Copper	-	Titanium	20 - 40%	Yes
Copper	-	Carbide	35 - 60%	Yes
Copper	-	Copper	35 - 45%	Yes
Copper	-	Copper Tungsten	40 - 60%	Yes
Copper Tungsten	+	Steel	1 - 10%	No
Copper Tungsten	-	Copper	20 - 40%	Yes
Copper Tungsten	-	Copper Tungsten	30 - 50%	Yes
Copper Tungsten	-	Titanium	15 - 25%	Yes
Copper Tungsten	-	Carbide	35 - 50%	Yes
Graphite	+	Steel	< 1%	No
Graphite	-	Steel	30 - 40%	No
Graphite	+	Inconel	< 1%	No
Graphite	-	Inconel	30 - 40%	No
Graphite	+	Aluminum	< 1%	No
Graphite	-	Aluminum	10 - 20%	No
Graphite	-	Titanium	40 - 70%	Yes

* Denotes Electrode Polarity

Οι παρακάτω πίνακες συγκρίνουν ιδιότητες και παραμέτρους κατεργασίας για διάφορα υλικά ηλεκτροδίων και παρουσιάζεται προτεινόμενο υλικό ηλεκτροδίου για κάθε κατεργασία.

Πίνακας 2: Σύγκριση ιδιοτήτων και παραμέτρων για μεταλλικά ηλεκτρόδια και ηλεκτρόδια γραφίτη.

Μεταλλικά ηλεκτρόδια	Ηλεκτρόδια από γραφίτη
Χαμηλό κόστος παραγωγής	Υψηλό κόστος παραγωγής
Υψηλή μηχανική αντοχή	Υψηλή μηχανική αντοχή
Υψηλότερος βαθμός ασφαλείας	Χαμηλότερος βαθμός ασφαλείας
Κατάλληλα για άπειρους χειριστές	Απαιτείται έμπειρος χειριστής
Σχετικά καθαρές επιφάνειες	Επικαθίσεις μετά το πέρας της κατεργασίας
Χαμηλός δείκτης ικανότητας λείανσης	Καλή κατεργασιμότητα
Χαμηλότερες ταχύτητες κατεργασίας και MRR	Υψηλότερες ταχύτητες κατεργασίας και MRR

Υψηλότερη φθορά	Εξαιρετική ανθεκτικότητα στη φθορά
-----------------	------------------------------------

Πίνακας 3: Προτεινόμενες συνθήκες κατεργασίας για διάφορα υλικά τεμαχίου.

Τεμάχιο	Ηλεκτρόδιο	Πολικότητα ηλεκτροδίου	Προτεινόμενες συχνότητες για εκχόνδριση	Προτεινόμενες συχνότητες για φινίρισμα
Χάλυβας	Γραφίτης	Θετική	Χαμηλές	Μέσες/Υψηλές
Αλουμίνιο	Cu/CuW	Θετική	Χαμηλές	Μέσες/Υψηλές
Χαλκός	Cu/CuW	Αρνητική	Υψηλές	Υψηλές
Τιτάνιο	Cu/CuW	Αρνητική	Υψηλές	Υψηλές
Καρβίδια (WC)	Cu/CuW	Αρνητική	Υψηλές	Υψηλές
Κράμα χαλκούβωλφραμίου	Cu/CuW	Αρνητική	Υψηλές	Υψηλές

1.2.3 Διηλεκτρικό Μέσο (Dielectric Fluid)

Όπως προαναφέρθηκε η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης αποτελεί μια θερμοηλεκτρικής φύσεως διαδικασία όπου τόσο το τεμάχιο όσο και το ηλεκτρόδιο είναι ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά βυθισμένα σε διηλεκτρικό υγρό. Το διηλεκτρικό αυτό μέσο λειτουργεί ως μονωτής για τον έλεγχο των παραγόμενων σπινθήρων, ως ψυκτικό μέσο και βοηθά στην αποτελεσματική απομάκρυνση των συντριμμιών – κατακρημνισμάτων (debris) της κατεργασίας. Αναλυτικότερα οι βασικές λειτουργίες του διηλεκτρικού υγρού είναι:

- Να λειτουργεί ως μονωτής ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο, εμποδίζοντας τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος, έως ότου υπάρξει ικανή διαφορά δυναμικού, ώστε να «σπάσει» η διηλεκτρική σταθερά (σημείο ιονισμού) και από μονωτής να γίνει αγωγός. Στο σημείο αυτό εκδηλώνεται και ο σπινθήρας.
- Λειτουργεί ως μέσο ψύξης ηλεκτροδίου και τεμαχίου. Ο σπινθήρας (ροή ηλεκτρικού ρεύματος) δημιουργεί ροή θερμότητας στην περιοχή ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο. Καθώς το διηλεκτρικό μέσο περιβάλλει την περιοχή του σπινθήρα συμβάλλει στην απομάκρυνση της παραγόμενης θερμότητας. Παρ' όλα αυτά, οι υψηλές θερμοκρασίες που εμφανίζονται στο «μέτωπο» του σπινθήρα, συνεχίζουν να επηρεάζουν τις επιφάνειες του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται η ψύξη του διηλεκτρικού μέσου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.
- Ψύξη των αποβλήτων της κατεργασίας. Κατά τη εκδήλωση κάθε σπινθήρα το υλικό του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου θερμαίνεται έως τη θερμοκρασία εξαχνωσης, δημιουργώντας ένα «σύννεφο» στο διάκενο εκδήλωσης του σπινθήρα (sparking gap area). Η θερμότητα από το «σύννεφο» αυτό μεταφέρεται στο διηλεκτρικό μέσο, με αποτέλεσμα την ψύξη και στερεοποίηση των ατμών. Η

διαδικασία ψύξης ξεκινάει από την εξωτερική επιφάνεια και συνεχίζει προς τα μέσα, δημιουργώντας έτσι σφαιρίδια με κούφιο κέντρο – πυρήνα (EDM chips).

- Απομάκρυνση αποβλήτων. Τα απόβλητα της κατεργασίας πρέπει να απομακρύνονται από την περιοχή του σπινθήρα, ιδανικά με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο παράγονται. Κατ’ αυτόν το τρόπο διατηρείται μια σταθερή πυκνότητα αποβλήτων στην περιοχή του διάκενου καθιστώντας την λειτουργία του servo μηχανισμού πιο σταθερή. Έχουν μελετηθεί διάφορες μέθοδοι για την αποτελεσματικότερη απομάκρυνση των αποβλήτων με βασική αρχή όλων το διηλεκτρικό μέσο να διέρχεται – ρέει μέσω του διάκενου παρασύροντας τα απόβλητα. Το διηλεκτρικό μέσο στη συνέχεια συλλέγεται και φιλτράρεται, ώστε να απομακρυνθούν από αυτό απόβλητα και άλλα προϊόντα της κατεργασίας διατηρώντας, έτσι, τις ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου σταθερές.

Γενικά, τα διηλεκτρικά υγρά που χρησιμοποιούνται συχνότερα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

α. Τα προϊόντα πετρελαίου που είναι υλικά άμεσα διαθέσιμα προς χρήση και δημιουργούν ένα ελεγχόμενο περιβάλλον γύρω από το σημείο του σπινθήρα. Τα συγκεκριμένα έλαια διατηρούν τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους κατά τη διάρκεια εκδήλωσης του σπινθήρα, με την εκλυόμενη από το σπινθήρα θερμότητα να διασπά το διηλεκτρικό μέσο σε υδρογόνο άνθρακα και άλλα υποπροϊόντα, ενώ ταυτόχρονα δεν επηρεάζονται από την παρουσία υπολειμμάτων – κατακρημνισμάτων. Η ηλεκτρική αυτή «σταθερότητα», που παρουσιάζουν τα καθιστά ιδανική επιλογή για την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης.

β. Το απιονισμένο νερό καθώς παρασύρει σωματίδια της κατεργασίας καθίσταται αγωγίμο με τις διηλεκτρικές του ιδιότητες να μεταβάλλονται. Η αλλαγή αυτή επηρεάζει και το σημείο ιονισμού, το οποίο με τη σειρά του επηρεάζει την αξιοπιστία, αποτελεσματικότητα και σταθερότητα της κατεργασίας. Χρησιμοποιείται συνήθως στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος, όπου το τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο δεν βρίσκονται βυθισμένα στο μέσο, αλλά έχουμε το διηλεκτρικό υγρό με υψηλή ταχύτητα να περιβάλλει το σημείο του σπινθήρα και έπειτα να επιστρέφει στη μονάδα συλλογής για καθαρισμό. Έτσι, το απιονισμένο νερό απλά διέρχεται από την περιοχή του σπινθήρα και οι ιδιότητές του παραμένουν σε επιτρεπτά όρια.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό διηλεκτρικού μέσου είναι το ιξώδες του, καθώς όσο χαμηλότερο είναι, το ρευστό ρέει με καλύτερη κινητική και μεγαλύτερη πλήρωση στο διάκενο ηλεκτροδίου – τεμαχίου. Μικρότερο διάκενο σημαίνει χαμηλότερης έντασης ρεύμα, όπως επίσης και υψηλότερες συχνότητες που χρησιμοποιούμε σε κατεργασίες αποπεράτωσης για να επιτύχουμε υψηλής ποιότητας επιφάνεια.

Επίσης, κατά την κατεργασία παράγονται αέρια προϊόντα που προέρχονται από το διηλεκτρικό μέσο κυρίως. Η αποτελεσματική απομάκρυνση αυτών είναι σημαντική κατά το σχεδιασμό της κατεργασίας, καθώς άπτεται της ασφάλειας των εργαζομένων, αλλά και της σωστής και προβλεπόμενης λειτουργίας του μηχανολογικού εξοπλισμού.

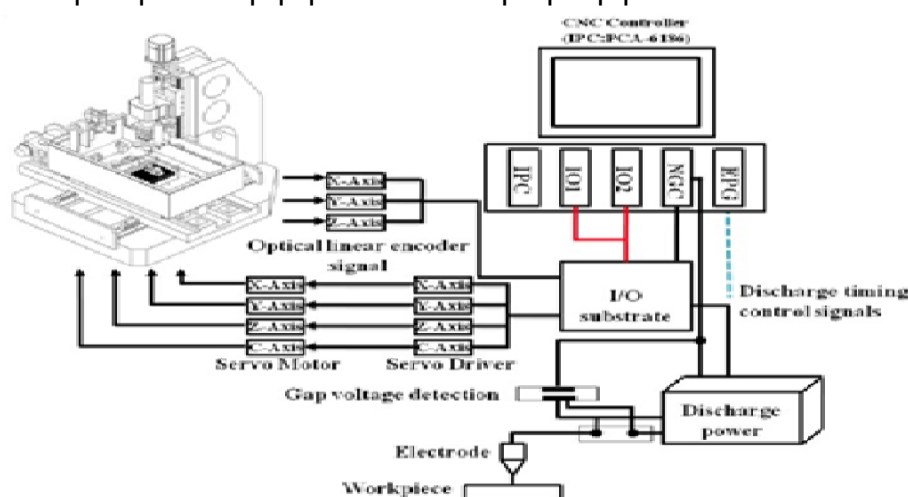
Πίνακας 4: Συγκριτικός Πίνακας Διηλεκτρικών Υγρών.

Έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο	Απιονισμένο νερό ως διηλεκτρικό μέσο
----------------------------------	---

Δεν προκαλείται ζημιά λόγω ηλεκτρόλυσης	Υπάρχει ηλεκτρόλυση, με τις επακόλουθες φθορές που αυτή μπορεί να προκαλέσει
Πιο σκληρές και άρα πιο εύθραυστες επιφάνειες στο κατεργασμένο τεμάχιο	Οι επιφάνειες μετά τη κατεργασία είναι λιγότερο σκληρές και εύθραυστες
Περιορισμένη ταχύτητα κοπής	Υψηλότερες ταχύτητες κοπής
Καλύτερη ποιότητα επιφανείας	Πιο τραχείες επιφάνειες
Συνήθως χρησιμοποιείται το ηλεκτρόδιο ως θετικός πόλος με χρήση ελαίου ως διηλεκτρικό μέσο	Συνήθως χρησιμοποιείται το ηλεκτρόδιο ως αρνητικός πόλος με χρήση νερού ως διηλεκτρικό μέσο
Χαμηλότερη φθορά ηλεκτροδίου	Έντονη φθορά ηλεκτροδίου
Χαμηλότερο λειτουργικό κόστος	Υψηλότερο λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης

1.2.4 Μηχανισμός Κίνησης Αξόνων X – Y (X – Y Positioning)

Η δυνατότητα κίνησης του ηλεκτροδίου ή / και του τεμαχίου κατά τους άξονες X – Y είναι απαραίτητη για την αποτύπωση των πολύπλοκων γεωμετριών που επιτυγχάνονται με την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης. Στα κλασικά συγκροτήματα EDM, η δυνατότητα κίνησης στο επίπεδο X-Y παρέχεται από μια τράπεζα στην οποία προσδένεται το προς κατεργασία τεμάχιο, με την εγκατάσταση κατάλληλου μηχανισμού που επιτρέπει την κίνησή της. Η τράπεζα έχει συνήθως κατάλληλους μηχανισμούς (αρπάγες) ή εσοχές για την απευθείας πρόσδεση του τεμαχίου σε αυτήν ή κάποιας άλλης αγωγίμης βάσης πάνω στην οποία εδράζεται το τεμάχιο. Συνήθως στις διατάξεις EDM αποτύπωσης-βύθισης, πάνω στην τράπεζα προσδένεται το δοχείο εργασίας και κινείται μαζί με αυτήν. Τέλος, στις σύγχρονες CNC διατάξεις δύναται και η κίνηση ολόκληρου του σερβομηχανισμού στον οποίο προσδένεται και το ηλεκτρόδιο. Η ακρίβεια κίνησης είναι μείζονος σημασίας και συνδέεται άμεσα με την επιθυμητή διαστασιολογική ακρίβεια.



Εικόνα 3: Απεικόνιση του μηχανισμού κίνησης σε συσκευή EDM.

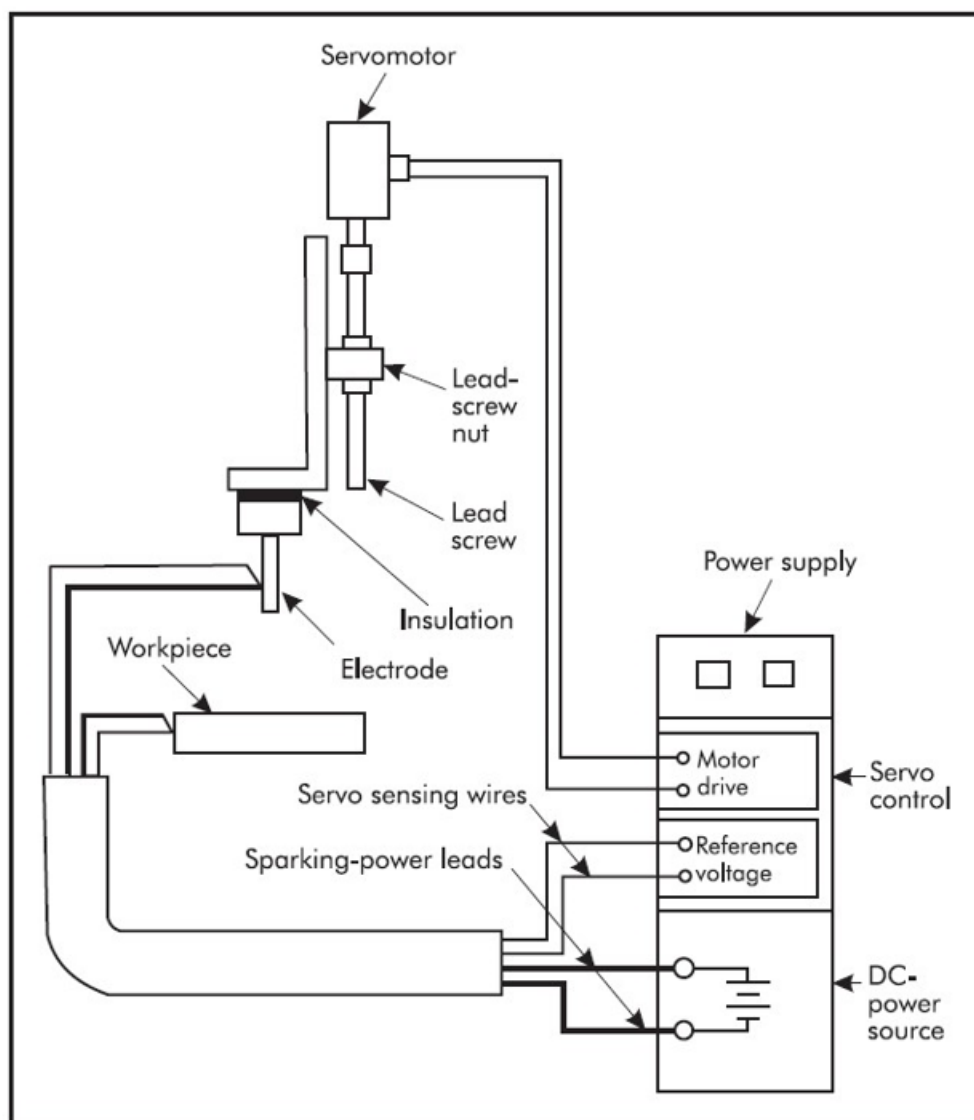
1.2.5 Σερβομηχανισμός Ελέγχου (Servo Control System)

Ο σερβομηχανισμός ελέγχου αποτελεί ένα αυτοματοποιημένο σύστημα απαραίτητο για τον έλεγχο του διακένου ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο. Κατά την διάρκεια της ηλεκτροδιάβρωσης η απόσταση ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο διάκενο θα πρέπει να είναι η κατάλληλη και σταθερή ώστε να διατηρείται σταθερή και η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η σταθερότητα και αποδοτικότητα κατά τη διάρκεια της κατεργασίας ώστε να προστατεύεται η προς κατεργασία επιφάνεια και να επιτυγχάνεται διαστασιολογική ακρίβεια. Στόχος είναι ο σχεδιασμός, ώστε να λειτουργεί αποτελεσματικά για μεγάλο εύρος μεγέθους ηλεκτροδίων από μερικά μικρά έως αρκετά εκατοστά. Έτσι, ο ρόλος του σερβομηχανισμού είναι το ηλεκτρόδιο να μην έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο και να προωθείται ή να αποσύρεται σε σχέση με το τεμάχιο ώστε να διατηρείται σταθερή η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο.

Ο σερβομηχανισμός ελέγχου λειτουργεί με βάση αυτή την διαφορά δυναμικού που ονομάζεται δυναμικό αναφοράς (reference voltage) και το οποίο ορίζεται από τον χρήστη για την κάθε περίπτωση κατεργασίας. Όταν η απόσταση ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή, έχουμε ανοιχτό κύκλωμα και το διηλεκτρικό μέσο λειτουργεί ως μονωτής. Από την στιγμή που ο σερβομηχανισμός φέρει το ηλεκτρόδιο στην κατάλληλη απόσταση από το τεμάχιο και επιτευχθεί το προαναφερθέν δυναμικό αναφοράς, τότε το σύστημα βρίσκεται σε σημείο ιονισμού και το διηλεκτρικό μέσο παύει να είναι μονωτής αλλά λειτουργεί πλέον ως αγωγός. Η απόκλιση ανάμεσα στο δυναμικό αναφοράς και το πραγματικό δυναμικό κατεργασίας χρησιμοποιείται, ώστε το σύστημα σερβομηχανισμού – ηλεκτροδίου να απομακρυνθεί, να πλησιάσει ή να παραμείνει σταθερό σε σχέση με το τεμάχιο. Στην πραγματικότητα και για πρακτικούς λόγους, το δυναμικό αναφοράς έχει ένα στενό εύρος τιμών (20 – 50 VDC), που όμως εντός των συγκεκριμένων ορίων η κατεργασία παραμένει σταθερή. Οι κατασκευαστές συνηθίζουν να ορίζουν ως δυναμικό αναφοράς (V_{th}) για μεταλλικό ηλεκτρόδια τα 30 VDC, ενώ για ηλεκτρόδια από γραφίτη ορίζεται στα 40 VDC ώστε να μην προκαλούνται μη αποδοτικοί σπινθήρες ή τόξα.

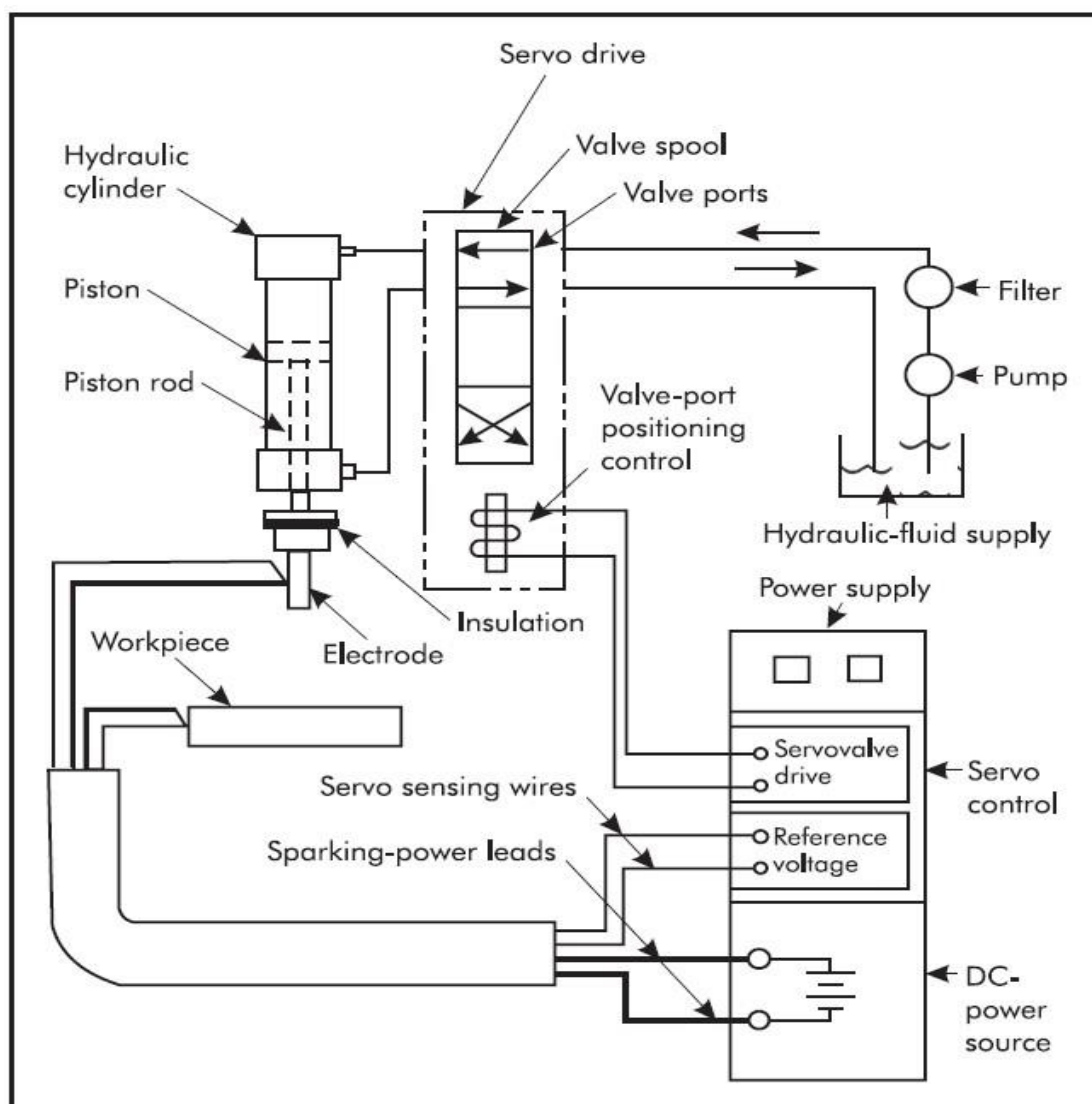
Το σύστημα «προώθησης – απόσυρσης» που χρησιμοποιείται για την κίνηση της σερβοκεφαλής, μπορεί να είναι είτε ένα ηλεκτρικό μοτέρ, είτε μια υδραυλική μονάδα. Η επιλογή εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και το βάρος των ηλεκτροδίων που θα χρησιμοποιηθούν. Υδραυλικά συστήματα επιλέγονται συνήθως σε μεγάλες εργαλειομηχανές με βαριά ηλεκτρόδια, ενώ στις μικρότερες συναντώνται κυρίως ηλεκτρικά μοτέρ, με το διαχωρισμό αυτό να είναι ενδεικτικός και όχι απαγορευτικός.

Ηλεκτρικό μοτέρ: Βρίσκεται σε άμεση σύζευξη με κοχλία ακριβείας (precision lead screw), ενώ το περικόχλιο είναι προσαρμοσμένο στον κινούμενο άξονα της μηχανής (machine axis of movement). Είναι εξαιρετικά σημαντικό να υπάρχει μηδενική χάρη – παλινδρόμηση (κατά το δυνατόν) συνολικά στο σύστημα, από τον κινητήρα έως και τον κινούμενο άξονα στον οποίο είναι τοποθετημένο το ηλεκτρόδιο. Έτσι, με κάθε κίνηση του μοτέρ θα υπάρχει η ανάλογη και προβλεπόμενη κίνηση στον άξονα και το ηλεκτρόδιο, με αποφυγή οποιασδήποτε ανεπιθύμητης αστάθειας κατά τη λειτουργία.



Εικόνα 4: Σερβομηχανισμός ελέγχου με ηλεκτροκινητήρα.

Υδραυλικό σύστημα: Ο υδραυλικός σερβομηχανισμός είναι απαλλαγμένος από χάρη – παλινδρόμηση. Όταν ασκείται πίεση από το ρευστό στην μία πλευρά του υδραυλικού εμβόλου, ρευστό εισέρχεται από αυτή τη πλευρά στον κύλινδρο και εξέρχεται από την άλλη, με το έμβολο, μαζί με το βάκτρο να πραγματοποιούν την ανάλογη κίνηση. Όταν δεν υπάρχει ούτε είσοδος, ούτε έξοδος ρευστού από το κύλινδρο το σύστημα παραμένει σταθερό (ηλεκτρόδιο ακίνητο). Η ροή του ρευστού προς και από τον κύλινδρο, ελέγχεται με σερβοβαλβίδες, οι οποίες με τη σειρά τους ελέγχονται ηλεκτρονικά από τη μονάδα του σερβομηχανισμού. Το σύστημα πρέπει να παραμένει στατικό, εκτός των περιπτώσεων, που του δίνεται η εντολή να κινηθεί. Στα περισσότερα σερβο-υδραυλικά συστήματα υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης των βαλβίδων για να διατηρούν στατικό το σύστημα και συνήθως αναφέρεται ως «μηδενική θέση» (null position). Είναι εξαιρετικά σημαντική η περίπτωση, που το υδραυλικό ρευστό αλλάζει θερμοκρασία, καθώς μπορεί να προκληθεί κίνηση του εμβόλου ανεξάρτητη από τη λειτουργία των βαλβίδων, αλλά λόγω αλλαγής των ιδιοτήτων του ρευστού. Αυτό ονομάζεται «drift» και λαμβάνεται υπόψιν κατά το σχεδιασμό των συστημάτων από τους κατασκευαστές.



Εικόνα 5: Σερβομηχανισμός ελέγχου με υδραυλική οδήγηση.

1.2.6 Μονάδα Παροχής Ισχύος (Power Supply Unit) – Γεννήτρια Παλμών (Pulse Generator)

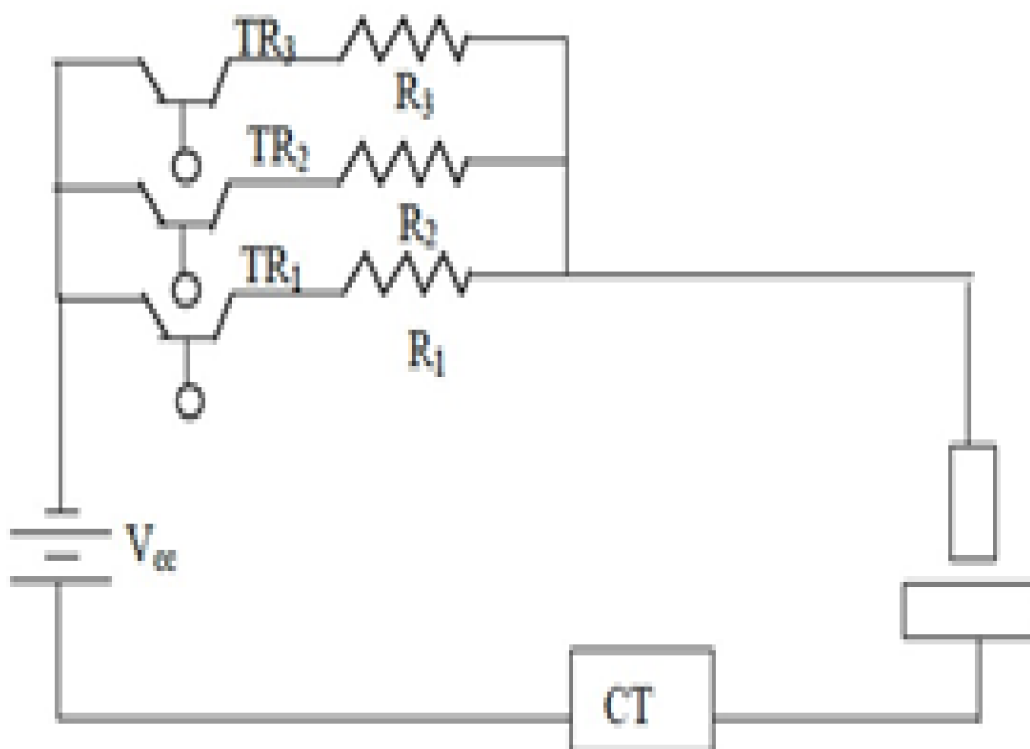
Η μονάδα παροχής ισχύος αποτελεί ένα από τα κύρια δομικά στοιχεία μιας μηχανής EDM. Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται είναι:

- Πηγή συνεχούς ρεύματος (DC Power source)
- Σερβομηχανισμός (Servo control)
- Διανομέας εναλλασσόμενου ρεύματος (AC electric power distribution)
- Μονάδα προστασίας ηλεκτρικού τόξου συνεχούς ρεύματος (DC arc protection unit)

Οι γεννήτριες παλμών διακρίνονται συνήθως σε δύο βασικούς τύπους:

- Με χρήση τρανζίστορ ή ηλεκτρονικών διακοπών
- Αντίστασης – Πυκνωτή (Resistor – Capacitor RC)

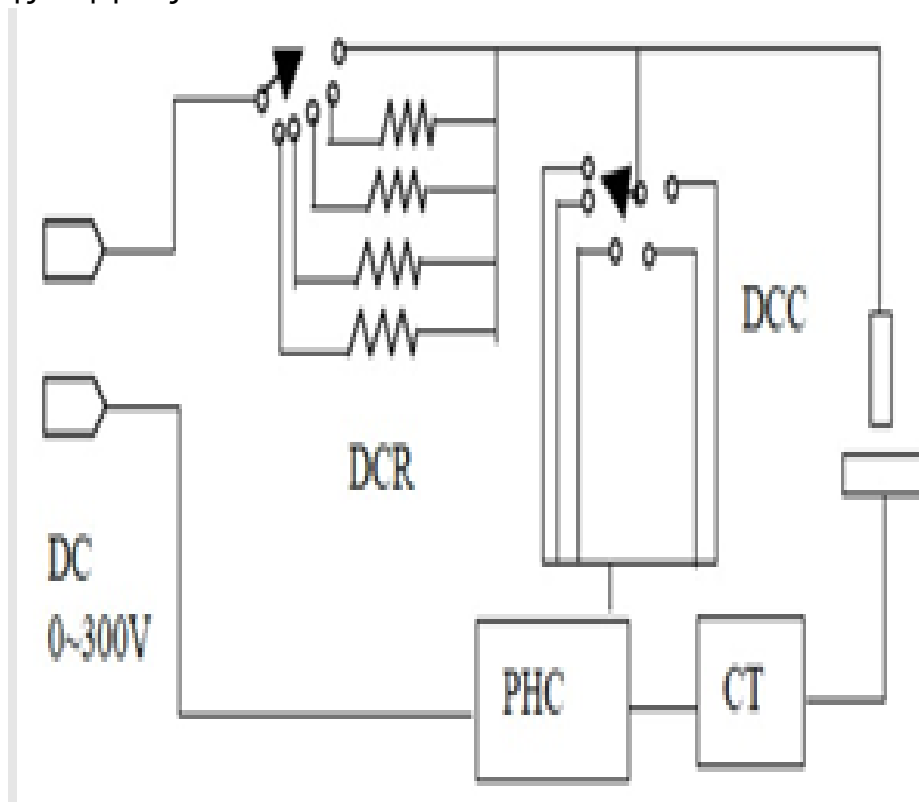
Οι γεννήτριες με χρήση τρανζίστορ διαθέτουν τρανζίστορ (TR), αντιστάσεις για το περιορισμό της έντασης ρεύματος (R), και μετασχηματιστή ρεύματος (CT). Οι αντιστάσεις και τα τρανζίστορ βρίσκονται σε παράλληλη σύνδεση ανάμεσα στην μονάδα παροχής ισχύος συνεχούς ρεύματος και στο διάκενο παραγωγής σπινθήρων. Η ένταση ρεύματος κατά την δημιουργία σπινθήρα αυξάνεται ανάλογα με το πόσα τρανζίστορ είναι «αναμμένα» (switched on) ταυτόχρονα. Ο μηχανισμός ON/OFF (που πρακτικά δημιουργεί τους ηλεκτρικούς παλμούς στην επιθυμητή συχνότητα) ελέγχεται από τρανζίστορ πεδίου (Field Effect Transistor). Ο εν λόγω τύπος παλμογεννήτριας είναι ο πλέον διαδεδομένος για εργαλειομηχανές συμβατικής ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα ακριβούς ελέγχου της διάρκειας και συχνότητας των παλμών μέσω των ηλεκτρονικών διακοπών ON/OFF, ενώ ταυτόχρονα έχουν τη δυνατότητα παροχής - δημιουργίας υψηλής ενέργειας σπινθήρων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται αυξημένος ρυθμός αποβολής υλικού κατά τη κατεργασία.



Εικόνα 6: Κύκλωμα παλμογεννήτριας τύπου τρανζίστορ.

Οι παλμογεννήτριες αντιστάσεων – πυκνωτών απαρτίζονται από τις αντιστάσεις ελέγχου της ηλεκτρικής εκκένωσης (discharge control resistors), τους πυκνωτές ελέγχου της ηλεκτρικής εκκένωσης (discharge control capacitors), το κύκλωμα ελέγχου μέγιστης έντασης (peak hold circuit) και τον μετασχηματιστή ρεύματος (CT). Η διάρκεια παλμών σε τέτοιου τύπου γεννήτριες ορίζεται από την χωρητικότητα των πυκνωτών και την αυτεπαγωγή των καλωδίων σύνδεσης του πυκνωτή με το τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο. Η συχνότητα παλμών εξαρτάται από το χρόνο φόρτισης, ο οποίος ελέγχεται μέσω της «αντίστασης R» που επιλέγεται να χρησιμοποιείται κάθε φορά στο κύκλωμα. Η «αντίσταση R» δεν πρέπει να έχει πολύ χαμηλές τιμές, καθώς υπάρχει περίπτωση δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου αντί ηλεκτρικής εκκένωσης. Για την «αντίσταση R» υπάρχει μια επιθυμητή «κρίσιμη» τιμή

για την οποία αποτρέπονται τέτοια φαινόμενα. Η ενέργεια εκκένωσης ορίζεται από τον πυκνωτή που χρησιμοποιείται, αλλά και από «διάσπαρτους πυκνωτές» (stray capacitance), που δημιουργούνται στη διάταξη συγκράτησης του ηλεκτρόδιου, στην τράπεζα εργασίας και ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο. Οι παλμογεννήτριες τέτοιου τύπου ήταν οι πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά έχουν περιορισμούς στην μέγιστη ενέργεια εκκένωσης, την οποία μπορούν να παράγουν, περιορίζοντας έτσι και το ρυθμό αποβολής υλικού. Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως σε κατεργασίες micro – EDM λόγω της δυνατότητας να παράγουν σπινθήρες πολύ χαμηλής ενέργειας.



Εικόνα 7: Κύκλωμα παλμογεννήτριας τύπου RC.

1.2.7 Δοχείο Εργασίας (Work Tank)

Το δοχείο εργασίας είναι η δεξαμενή – τμήμα της εργαλειομηχανής μέσα στην οποία εμπεριέχεται το λουτρό στο οποίο είναι βυθισμένα το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο. Εντός του δοχείου υπάρχει συνεχής ροή διηλεκτρικού μέσου το οποίο ανανεώνεται συνεχώς. Η επιθυμητή στάθμη στο λουτρό ελέγχεται μέσω ενός διακόπτη στάθμης - υπερχειλίσης, ο οποίος εξασφαλίζει ότι η μηχανή θα λειτουργεί εντός ορισμένων κατώτερων και ανώτερων ορίων στάθμης υγρού. Εντός του δοχείου επίσης η θερμοκρασία θα πρέπει να μην ξεπερνά ένα ανώτατο όριο. Για τον λόγο αυτό υπάρχει και ένας θερμοστάτης που διακόπτει την λειτουργία σε περίπτωση που η θερμοκρασία υπερβεί μια προκαθορισμένη ανώτατη τιμή. Τέλος, τα δοχεία εργασίας είναι συνήθως κατασκευασμένα από μεταλλικά ελάσματα και διαθέτουν μια μπροστινή θύρα πρόσβασης για ευκολότερη τοποθέτηση του τεμαχίου. Στα σημεία επαφής μεταξύ της θύρας και δοχείου παρεμβάλλεται ελαστομερές υλικό ώστε να αποφεύγονται οι διαρροές και να εξασφαλίζεται η στεγανότητα.



Εικόνα 8: Το εσωτερικό του δοχείου εργασίας της συσκευής EDM AGIETRON EMT 1.10.

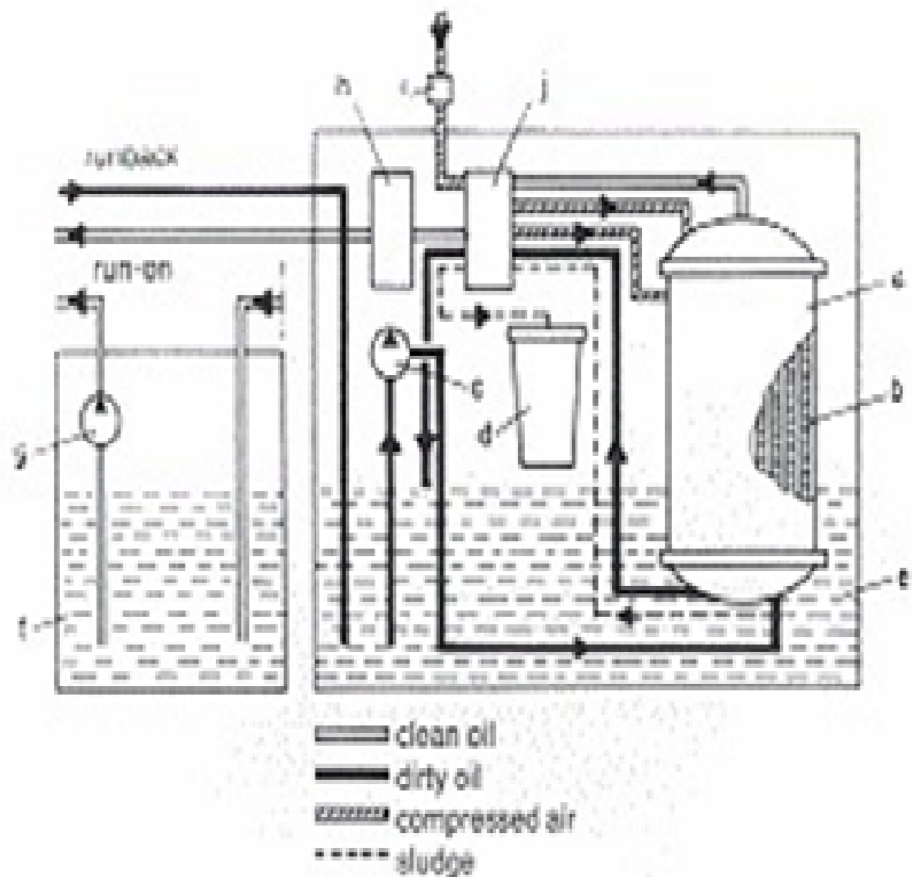
1.2.8 Το Σύστημα Κυκλοφορίας και Έκπλυσης (Fluid Circulation and Washing System)

Το σύστημα κυκλοφορίας του διηλεκτρικού υγρού και έκπλυσης με αυτό του διακένου στόχο έχει την τροφοδοσία της «ζώνης κατεργασίας» (machining zone) με «φρέσκο – καθαρό» διηλεκτρικό μέσο, και την απομάκρυνση από αυτήν των προϊόντων κατεργασίας. Τα κύρια μέρη του συστήματος είναι:

- Η δεξαμενή του διηλεκτρικού μέσου (tank / reservoir)
- Η αντλία ανατροφοδότησης
- Τα φίλτρα καθαρισμού
- Εγκατάσταση από σωληνώσεις και ακροφύσια

Diagram of a filter system for dielectrics working according to the edge filter principle

- a filter container,
- b filter rods,
- c filter pump,
- d sludge tank,
- l clean oil tank,
- g machine pump,
- h oil air cooler,
- i water trap and reducing valve for compressed air,
- j central valve with single-lever operation



Εικόνα 9: Απεικόνιση του συστήματος φιλτραρίσματος του διηλεκτρικού.

Η αντλία χρησιμοποιείται για την παροχή του διηλεκτρικού μέσου στο δοχείο εργασίας, ενώ τα φίλτρα συγκρατούν τα κατακρημνίσματα – απόβλητα της κατεργασίας καθαρίζοντάς το και εξασφαλίζοντας την χρήση σταθερής ποιότητας διηλεκτρικού μέσου. Όσο καλύτερες συνθήκες απόπλυσης επικρατούν τόσο μικρότερα «νεκρά χρονικά μεσοδιαστήματα» (T_{off}) χρειάζονται και άρα καθίσταται η κατεργασία πιο γρήγορη και αποδοτική.

Οι κύριες λειτουργίες της μονάδας κυκλοφορίας διηλεκτρικού και έκπλυσης του διακένου μεταξύ του τεμαχίου και του ηλεκτροδίου είναι :

- Η απομάκρυνση αέριων και στερεών παραπροϊόντων και αποβλήτων
- Η εισαγωγή νέου, φρέσκου διηλεκτρικού στη θέση κατεργασίας
- Η διατήρηση της θερμοκρασίας του διηλεκτρικού σε αρκετά χαμηλότερη τιμή από αυτήν του σημείου ανάφλεξης
- Η χρήση του ως ψυκτικό του τεμαχίου και του ηλεκτροδίου

Συνήθως κατά την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης τόσο το ηλεκτρόδιο όσο και το τεμάχιο παραμένουν βυθισμένα στο διηλεκτρικό μέσο με την απόπλυση να υποβοηθείται από την κίνηση του ηλεκτροδίου, η οποία δημιουργεί στροβιλισμούς του ρευστού στο διάκενο μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου, με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η απομάκρυνση των προϊόντων της κατεργασίας.

Για περαιτέρω δημιουργία επαρκούς κυκλοφορίας διηλεκτρικού υγρού στο κενό μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου χρησιμοποιούνται μηχανισμοί οι οποίοι δίνουν επιπλέον ενέργεια στο ρευστό με την δημιουργία διαφοράς πίεσης είτε με αύξηση της τιμής της στην είσοδο του δοχείου, είτε με μείωσή της στην έξοδο με τη μέθοδο της αναρρόφησης. Ένας άλλος τρόπος πιο αποτελεσματικής έκπλυσης είναι η χρήση δέσμης ρευστού (τζετ), η οποία στοχεύει απευθείας το διάκενο της περιοχής κατεργασίας.

Η πίεση του ρευστού είναι σημαντικός παράγοντας της διαδικασίας, καθώς σε πολύ χαμηλές πιέσεις είναι δύσκολη η απομάκρυνση στερεών και αέριων προϊόντων της κατεργασίας, ενώ σε υψηλές πιέσεις επιταχύνουν την φθορά του ηλεκτροδίου και δημιουργούν ανεπιθύμητους στροβιλισμούς. Επίσης, επηρεάζεται και η ποιότητα επιφανείας ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη πίεση.

Πίνακας 5: Επίδραση της πίεσης έκπλυσης στις παραμέτρους κατεργασίας.

Παράμετρος της κατεργασίας	Μεταβολή συναρτήσει της πίεσης
Ρυθμός Αποβολής Υλικού (MRR)	Μειώνεται ελαφρώς με αύξηση της πίεσης
Σχετική Φθορά Ηλεκτροδίου (RWR)	Αρχικά μειώνεται και μετά αυξάνεται καθώς αυξάνεται η πίεση. Υπάρχει ένα επιθυμητό βέλτιστο ελάχιστο για κάθε κατεργασία.
Τραχύτητα Επιφανείας (R_a)	Τείνει αρχικά να μειωθεί και στη συνέχεια αυξάνεται με αύξηση της πίεσης έκπλυσης.

2. Παράμετροι Ελέγχου της Κατεργασίας

2.1 Διαφορά Δυναμικού

Η διαφορά δυναμικού είναι η τάση που εφαρμόζεται ανάμεσα στο τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Υψηλότερες τιμές δίνουν τη δυνατότητα για μεγαλύτερο διάκενο ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο, με αποτέλεσμα την καλύτερη έκπλυση και απομάκρυνση των αποβλήτων καθιστώντας τη κατεργασία πιο σταθερή και αυξάνοντας τον ρυθμό αποβολής υλικού (MRR). Ταυτόχρονα όμως έχει ως αποτέλεσμα κατεργασμένες επιφάνειες υψηλότερης τραχύτητας (root surface roughness) και μεγαλύτερη φθορά ηλεκτροδίου.

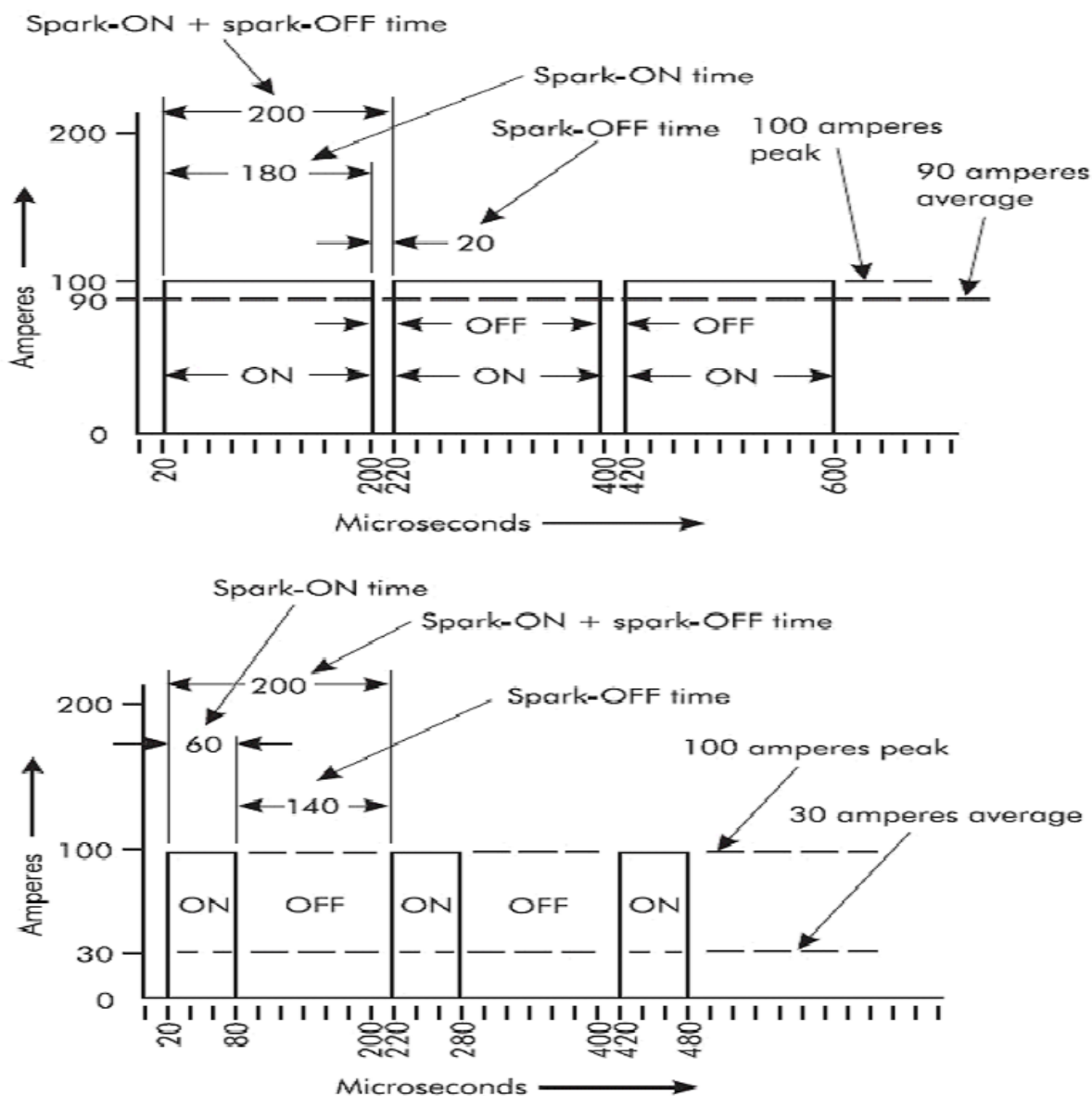
2.2 Ένταση Ρεύματος

Κατά την διάρκεια μιας κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης καταγράφονται δύο τιμές έντασης ρεύματος, η μέγιστη τιμή έντασης ρεύματος και η μέση τιμή έντασης ρεύματος. Η μέγιστη τιμή ρεύματος (peak current), καταγράφεται κατά την διάρκεια του παλμού, σε χρόνο T_{on} και ευθύνεται για τον ιονισμό του διηλεκτρικού μέσου και τη δημιουργία της στήλης πλάσματος. Όσο υψηλότερη τιμή έχει, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται ανά παλμό, με αποτέλεσμα υψηλότερο ρυθμό αφαίρεσης υλικού (MRR), παράλληλα όμως με χαμηλότερη ποιότητα τραχύτητας.

Η μέση τιμή έντασης ρεύματος αποτελεί το μέσο όρο έντασης (αμπέρ) του ρεύματος κατεργασίας που καταγράφει το αμπερόμετρο καθόλη την διάρκεια της κατεργασίας. Στον υπολογισμό «συμμετέχουν» οι χρόνοι T_{on} και T_{off} με τη μέση τιμή να υπολογίζεται ως:

$$\bar{I}_P = \frac{1}{T_{on} + T_{off}} * \int_0^{T_{on}+T_{off}} I(t)dt$$

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται ο τρόπος υπολογισμού της μέσης έντασης ρεύματος για έναν σύντομο (short) και έναν εκτεταμένο (long) κύκλο εργασίας (duty cycle).



Διάγραμμα 1: Τρόποι υπολογισμού της μέσης έντασης ρεύματος.

2.3 Χαρακτηριστικά Παλμού – Κυματομορφή

Ο παλμός τάσης που τροφοδοτεί το μηχανισμό μιας κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης είναι μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος και για τον λόγο αυτό απαιτείται η ρύθμιση πολλών χαρακτηριστικών. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η χρονική διάρκεια ενός παλμού, το μεσοδιάστημα μεταξύ δύο παλμών, ο κύκλος λειτουργίας (duty ratio) και η κυματομορφή του.

Η χρονική διάρκεια ενός παλμού T_{on} , ορίζεται ως ο χρόνος κατά τον οποίο υπάρχει ροή ρεύματος ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο και διακρίνεται στο χρονικό διάστημα υστέρησης και το πραγματικό διάστημα διάρκειας του παλμού.

Στο χρονικό διάστημα υστέρησης t_d εφαρμόζεται μεν τάση ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο αλλά ακόμα δεν έχει ιονιστεί αρκετά το διηλεκτρικό μέσο,

με αποτέλεσμα να μην ρέει ρεύμα σε αυτό και να μην πραγματοποιείται αφαίρεση υλικού.

Η πραγματική χρονική διάρκεια του παλμού t_e , εκφράζει το χρονικό διάστημα στο οποίο πραγματοποιείται η αφαίρεση υλικού, καθώς τότε υφίσταται η στήλη ρεύματος που την προκαλεί. Επομένως, ο ρυθμός αποβολής υλικού (MRR) σχετίζεται με τρόπο άμεσο και σχεδόν αναλογικό με τη διάρκεια του παλμού, καθώς ουσιαστικά είναι ο αποδοτικός χρόνος κατεργασίας. Επίσης, με την πραγματική χρονική διάρκεια παλμού συνδέεται και η τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας, καθώς μεγαλύτερη διάρκεια παλμού συνεπάγεται περισσότερο χρόνο ροής ρεύματος και άρα σχηματισμό βαθύτερων και μεγαλύτερων σε μέση διάμετρο κρατήρων. Κρατήρες μεγαλύτερου μεγέθους σημαίνουν υψηλότερο ρυθμό αφαίρεσης υλικού, αλλά και μεγαλύτερη τραχύτητα, δηλαδή χαμηλότερη ποιότητα κατεργασμένης επιφάνειας. Για χαμηλή τραχύτητα συνιστάται η χρήση «σύντομων» παλμών (shorter). Συμπερασματικά, χρειάζεται βελτιστοποίηση των συνθηκών και επιλογή της κατάλληλης διάρκειας ανάλογα με το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ισχύει ότι $t_d \ll t_e$ και μάλιστα συνήθως στην πράξη ισχύει πως $t_e \cong T_{on}$. Οι χρόνοι σε συμβατικές κατεργασίες EDM μετρούνται σε msec.

Το μεσοδιάστημα (pulse interval – T_{off}) είναι ο χρόνος ανάμεσα στην εκδήλωση δύο παλμών. Κατά τη διάρκειά του δεν υπάρχει ροή ρεύματος, ούτε εκδήλωση σπινθήρα. Παρ' όλα αυτά είναι εξαιρετικής σημασίας, καθώς είναι ο χρόνος κατά τον οποίο γίνεται η απομάκρυνση των αποβλήτων – προϊόντων από τη ζώνη κατεργασίας. Η σωστή επιλογή του μεσοδιαστήματος αποτελεί βελτιστοποίηση ανάμεσα στη σταθερότητα και στην ταχύτητα της κατεργασίας (αύξηση του μεσοδιαστήματος κάνει την κατεργασία πιο αργή, αλλά ταυτόχρονα βοηθάει στην αποτελεσματικότερη απομάκρυνση των αποβλήτων καθιστώντας τη πιο σταθερή). Τυπικές τιμές είναι της τάξης των msec.

Ο κύκλος λειτουργίας (duty ratio - η), ορίζεται ως το πηλίκο της διάρκειας ενός παλμού (T_{on}) προς το άθροισμα της διάρκειας ενός παλμού και της διάρκειας του μεσοδιαστήματος ($T_{on}+T_{off}$).

$$\eta = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \text{duty ratio}$$

Πρακτικά εκφράζει τον βαθμό απόδοσης του παλμού δηλαδή το ποσοστό του χρόνου που έχουμε ροή ρεύματος και συνεπώς απομάκρυνση υλικού. Συνδέεται αναλογικά με το MRR.

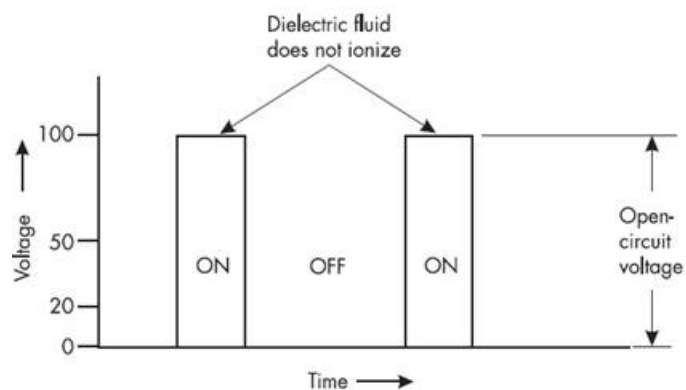
Η κυματομορφή της κατεργασίας είναι η απεικόνιση μέσω διαγραμμάτων της διαφοράς δυναμικού και της έντασης του ρεύματος της κατεργασίας σε σχέση με το χρόνο. Η διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο συνδέεται άμεσα με τη ροή ρεύματος, που εμφανίζεται όταν υπάρξει ιονισμός του διηλεκτρικού μέσου. . Οι κυματομορφές της διαφοράς δυναμικού και της έντασης του ρεύματος κατά την κατεργασία παρουσιάζουν ουσιαστικά την ροή ενέργειας προς το τεμάχιο. Η ανάλυση και των δύο μεγεθών (διαφορά δυναμικού και ένταση ρεύματος), καθώς και ο τρόπος που συνδέονται είναι απαραίτητη για την σωστή και ολοκληρωμένη κατανόηση και περιγραφή της κατεργασίας.

Αρχικά, αναφερόμενοι στην διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο διακρίνουμε τις εξής δύο περιπτώσεις: ενώ το κύκλωμα ισχύος λειτουργεί κανονικά και παρέχει την απαραίτητη ισχύ κατά τη διάρκεια ενός παλμού (T_{on}) για να εκδηλωθεί σπινθήρας, είτε θα υπάρξει ο σπινθήρας με ταυτόχρονη ροή ρεύματος, είτε δεν θα φτάσει το διηλεκτρικό μέσο σε σημείο ιονισμού και δεν θα εκδηλωθεί σπινθήρας.

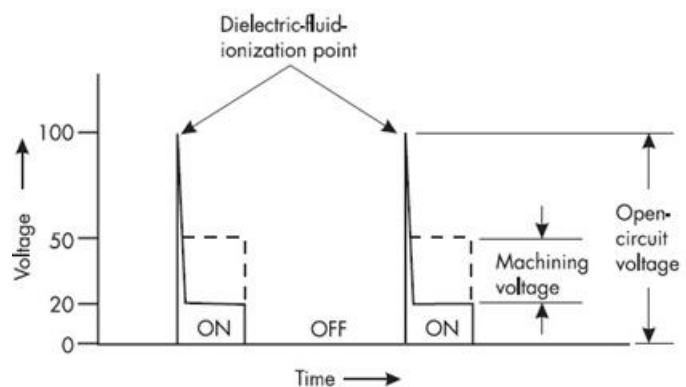
Στην πρώτη περίπτωση η διαφορά δυναμικού, που αναπτύσσεται ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του παλμού (T_{on}), καθώς δεν έχουμε εκδήλωση σπινθήρα και ροή ρεύματος. Ονομάζεται διαφορά δυναμικού ανοικτού κυκλώματος (open circuit voltage) και έχει τυπική τιμή 100V, η οποία καθορίζεται από το κατασκευαστή. Φαινόμενα μη εκδήλωσης σπινθήρα υπάρχουν όταν το διάκενο ανάμεσα στο τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο είναι μεγαλύτερο από το προβλεπόμενο (ικανό για εκδήλωση σπινθήρα).

Στη δεύτερη περίπτωση υπάρχει εκδήλωση σπινθήρα και ροή ρεύματος ανάμεσα στο τεμάχιο και στο ηλεκτρόδιο κατά τη διάρκεια του παλμού (T_{on}). Καθώς υπάρχει ροή ρεύματος η διαφορά δυναμικού, σχεδόν ακαριαία, μειώνεται από την τάση ανοικτού κυκλώματος $\approx 100V$ σε τάση κατεργασίας (machining voltage), η οποία κυμαίνεται ανάμεσα σε 20 – 50V, με την ακριβή τιμή να καθορίζεται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του διηλεκτρικού μέσου κατά τον ιονισμό του. Συνήθως, και υπό φυσιολογικές συνθήκες, ο σπινθήρας και κατά συνέπεια και η μείωση της τάσης εκδηλώνεται στην αρχή του T_{on} .

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τυπικές κυματομορφές διαφοράς δυναμικού για κάθε μια από τις δύο ανωτέρω περιπτώσεις.



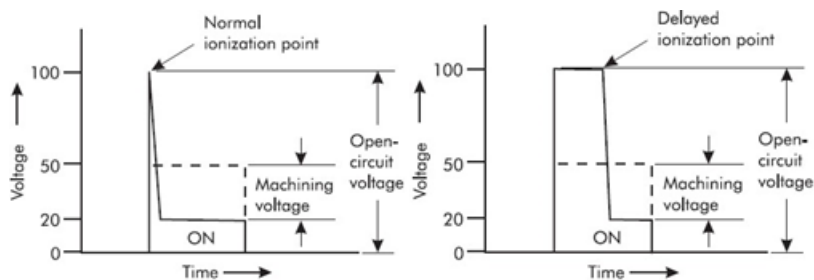
A. Sparking-gap voltage without dielectric-fluid ionization



B. Sparking-gap voltage with dielectric-fluid ionization

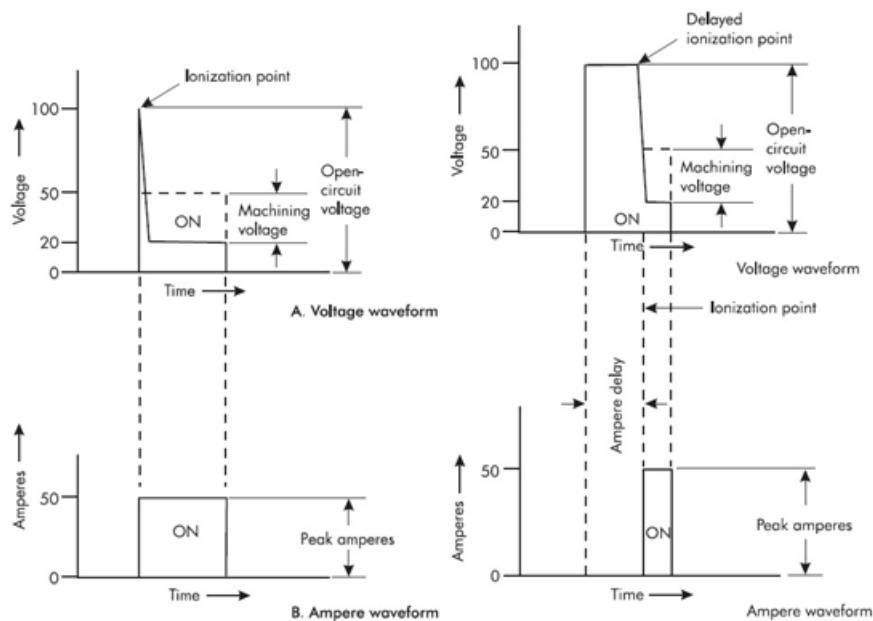
Διάγραμμα 2: Απεικόνιση τυπικών κυματομοφών χωρίς/με ιονισμό.

Στην περίπτωση που δεν εκδηλωθεί σπινθήρας στην αρχή του παλμού αλλά με χρονική καθυστέρηση (delayed dielectric fluid ionization) κάποια στιγμή κατά τη διάρκειά του, μεταβάλλεται η κυματομορφή της διαφοράς δυναμικού. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μια τυπική μορφή ορθογώνιου παλμού και μια με καθυστέρηση ιονισμού.



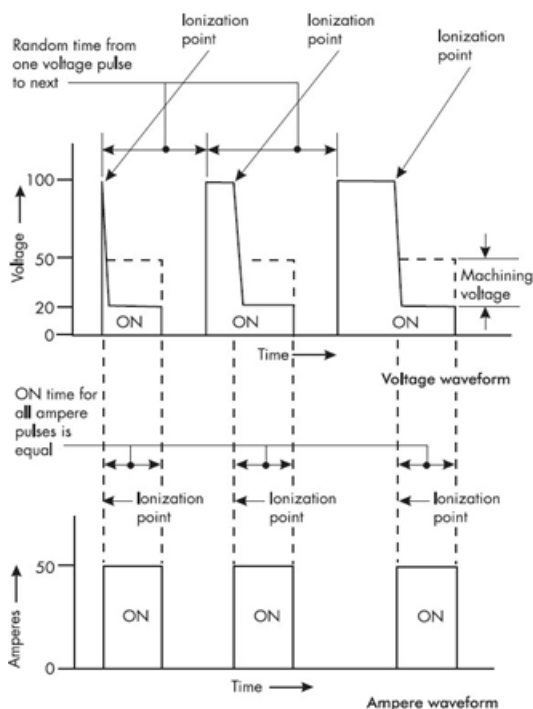
Διάγραμμα 3: Απεικόνιση τυπικών κυματομορφών χωρίς/με χρονική υστέρηση.

Ως συνέπεια της καθυστέρησης ιονισμού ο καθαρός χρόνος εμφάνισης ηλεκτρικού ρεύματος μειώνεται με αποτέλεσμα να μειώνεται αντίστοιχα και η ποσότητα υλικού που απομακρύνεται από το συγκεκριμένο παλμό. Το γεγονός αυτό παρουσιάζεται συγκριτικά, ανάμεσα σε ένα σύστημα με και χωρίς καθυστέρηση ιονισμού, στα παρακάτω διαγράμματα διαφοράς δυναμικού – έντασης ρεύματος.



Διάγραμμα 4: Απεικόνιση τυπικών κυματομορφών χωρίς/με καθυστέρηση ιονισμού.

Παρόλα αυτά στις μέρες έχει αναπτυχθεί η τεχνολογία εργαλειομηχανών που έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρικούς παλμούς με σταθερό χρόνο ηλεκτρικής εκκένωσης (sparks with equal ON time). Πλεονέκτημα τέτοιων κυματομορφών είναι η απομάκρυνση σταθερού όγκου υλικού σε κάθε παλμό – σπινθήρα και η εξασφάλιση της ομοιομορφίας στην ποιότητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται τυπική κυματομορφή για σταθερή διάρκεια σπινθήρα.



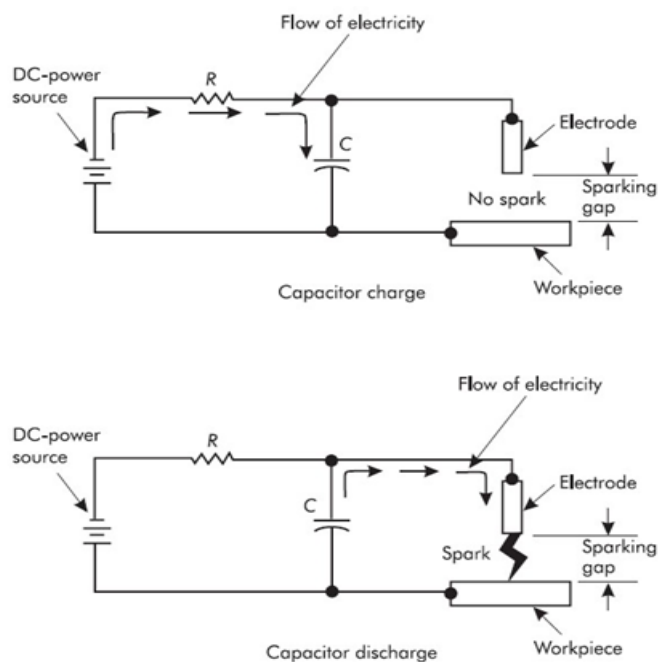
Διάγραμμα 5: Τυπικής κυματομορφή σταθερής διάρκειας σπινθήρα.

Συνοπτικά, ο μηχανισμός λειτουργίας, που όπως προαναφέρθηκε είναι καίριας σημασίας για την κατεργασία, αποτελείται από τα παρακάτω στάδια:

- Εφαρμογή διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο (διαφορά δυναμικού ανοικτού κυκλώματος $\approx 100V$ τυπική τιμή).
- Ιονισμός διηλεκτρικού μέσου και πτώση δυναμικού σε δυναμικό κατεργασίας (διαφορά δυναμικού κατεργασίας με τυπικές τιμές από 20 – 50V).
- Εμφάνιση ροής ηλεκτρονίων – ρεύμα, η ένταση του οποίου εξαρτάται από τις ρυθμίσεις της εργαλειομηχανής και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου κατά τον ιονισμό του.
- Μηδενισμός διαφοράς δυναμικού και ρεύματος κατά το μεσοδιάστημα.

Οι παραπάνω κυματομορφές αναφέρονται σε κυκλώματα με χρήση ηλεκτρονικών (electronic switch on/off). Τα συγκεκριμένα κυκλώματα απεικονίζονται σε διαγράμματα διαφοράς δυναμικού (V) ή έντασης ρεύματος (I) συναρτήσεως του χρόνου (t) ως ορθογώνιοι παλμοί. Ακολούθως γίνεται αναφορά σε κυκλώματα R/C (αντίστασης/ πυκνωτή) και στην μορφή παλμών που τα χαρακτηρίζει.

Σε ένα κύκλωμα R/C η αντίσταση (R) ουσιαστικά «δυσκολεύει» τη ροή ρεύματος από την πηγή συνεχούς ρεύματος προς τον πυκνωτή. Ο πυκνωτής (C) αποθηκεύει το ρεύμα που φτάνει σε αυτόν μέσω της αντίστασης. Όταν ολοκληρωθεί η φόρτιση του πυκνωτή, ακολουθεί η εκφόρτισή του μέσω του συστήματος ηλεκτροδίου – διάκενου – τεμαχίου με την εκδήλωση σπινθήρα. Δηλαδή, ο χρόνος φόρτισης του πυκνωτή είναι ο χρόνος T_{off} του παλμού και ο χρόνος T_{on} του παλμού είναι ο χρόνος εκφόρτισής του. Το σημείο εκδήλωσης του σπινθήρα εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου. Οι χρόνοι αυτοί (T_{on} και T_{off}) μεταβάλλονται ανάλογα με το είδος αντίστασης R(Ohm) και χωρητικότητας πυκνωτή C(F) που επιλέγεται για κάθε κατεργασία. Η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται διαγραμματικά στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 6: Απεικόνιση της λειτουργίας ενός RC κυκλώματος.

Κατά τη φόρτιση η διαφορά δυναμικού υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$V_c = V_s * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

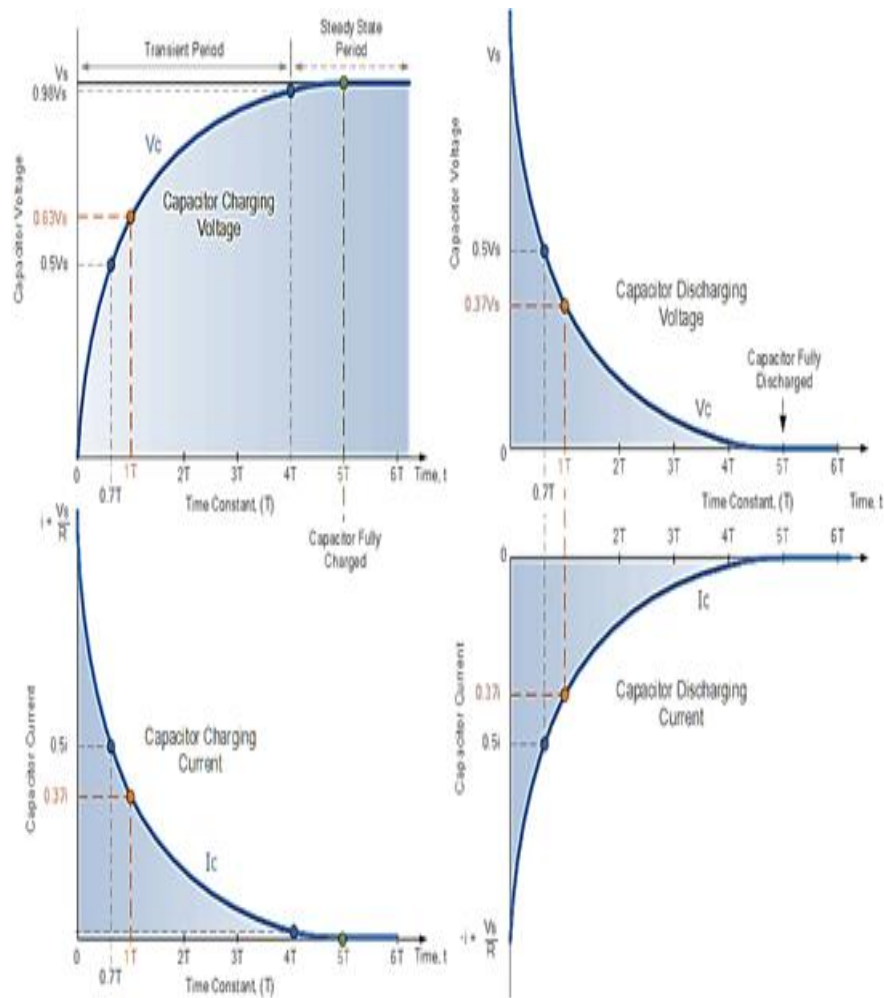
$V_c =$ διαφορά δυναμικού στο πυκνωτή [V], $V_s =$ διαφορά δυναμικού πηγής [V]
 $t =$ χρόνος [sec], $\tau =$ σταθερά χρόνου [sec]

Κατά τη εκφόρτιση η διαφορά δυναμικού υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$V_c = V_s * e^{-\frac{t}{\tau}}$$

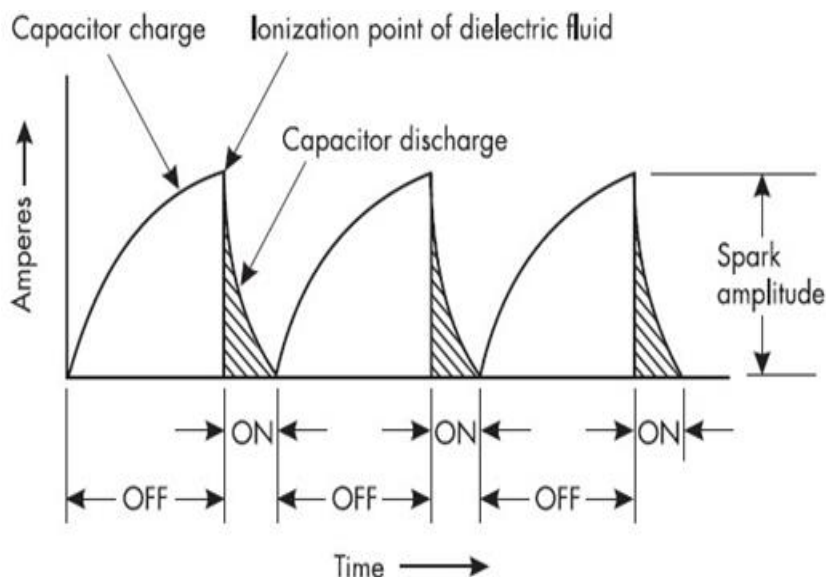
$V_c =$ διαφορά δυναμικού στο πυκνωτή [V], $V_s =$ διαφορά δυναμικού πηγής [V]
 $t =$ χρόνος [sec], $\tau =$ σταθερά χρόνου [sec]

Τα αντίστοιχα διαγράμματα διαφοράς δυναμικού στο πυκνωτή ή έντασης ρεύματος με τον χρόνο κατά την φάση φόρτισης και εκφόρτισης απεικονίζονται στην εικόνα.



Διάγραμμα 7: Απεικόνιση τάσης, έντασης ρεύματος σε φάση φόρτισης/εκφόρτισης.

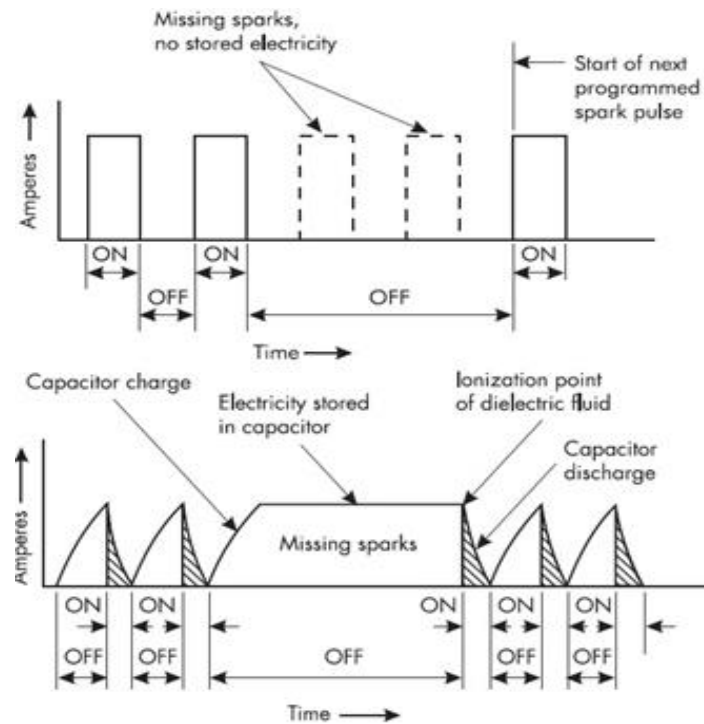
Όπως διαπιστώνεται η κυματομορφή του παλμού σε περίπτωση που η εργαλειομηχανή EDM έχει κύκλωμα R/C, διαφοροποιείται σε σχέση με την ορθογώνια των electronic switch on /off. Συγκεκριμένα σχηματίζει μια πιο ομαλή φόρτιση – εκφόρτιση σε σύγκριση με τον ορθογώνιο παλμό και έχει τη μορφή που φαίνεται στην εικόνα.



Διάγραμμα 8: Τυπική κυματομορφή RC κυκλώματος.

Εκτός από την προφανή διαφορά στη μορφή της κυματομορφής του παλμού ανάμεσα σε κύκλωμα switch on/off και R/C, υπάρχουν μερικά ακόμα βασικά σημεία – διαφορές που χρήζουν αναφοράς. Τα κυκλώματα switch on/off σε σχέση με τα R/C είναι πιο αποδοτικά για τις περισσότερες EDM εφαρμογές. Επίσης, τα R/C κυκλώματα έχουν συνήθως ένα ανώτατο όριο έντασης ρεύματος περίπου 15A. Για το λόγο αυτό, και σε συνδυασμό με το ότι χρησιμοποιούνται κυρίως με μεταλλικά ηλεκτρόδια, R/C κυκλώματα επιλέγονται σε κατεργασίες χαμηλότερης ενέργειας (έντασης ρεύματος), που σκοπό έχουν την πολύ καλή ποιότητα επιφανείας (χαμηλή τραχύτητα) και την υψηλή διαστασιολογική ακρίβεια.

Επίσης, στην περίπτωση ενός παλμού που δεν οδηγεί σε σπινθήρα, σε κυκλώματα switch on/off η διαφορά δυναμικού στο χρονικό διάστημα T_{off} , ανεξάρτητα με το αν υπήρξε εκδήλωση σπινθήρα ή όχι, μηδενίζεται και παίρνει πάλι την αναμενόμενη τιμή κατά το χρονικό διάστημα T_{on} . Αντίθετα, σε αντίστοιχη κατάσταση σε κυκλώματα R/C ο πυκνωτής παραμένει φορτισμένος, μέχρι την επόμενη φορά που θα υπάρξει σπινθήρας, και θα αρχίσει ένας νέος κύκλος φόρτισης εκφόρτισης του. Η ενέργεια εκφόρτισης δεν μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του «χαμένου παλμού» και ως εκ τούτου δεν υπάρχει κάποια «επίπτωση» στην ποιότητα επιφανείας. Η μόνη άμεση συνέπεια των «χαμένων παλμών» (και στα switch on/off κυκλωμάτων και στα R/C), είναι η μείωση του βαθμού απόδοσης της κατεργασίας. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η διαφορά ανάμεσα σε κύκλωμα switch on/off και R/C σε περίπτωση «χαμένων παλμών» στη κυματομορφή της έντασης ρεύματος.



Διάγραμμα 9: Απεικόνιση «χαμένων παλμών» σε κύκλωμα Switch on/off και σε RC κύκλωμα.

2.4 Ενέργεια Ηλεκτρικής Εκκένωσης

Η ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης W_e ή ηλεκτρική ενέργεια παλμού E_p είναι η ενέργεια ανά παλμό και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_p[mJ] = V_p[V] \cdot I_p[A] \cdot t_{on}[\mu sec] \cdot 10^3$$

όπου V_p = η διαφορά δυναμικού σε κάθε παλμό (V)

I_p = η ένταση ρεύματος σε κάθε παλμό (A)

T_{on} = ο χρόνος εκδήλωσης σπινθήρα (sec)

Προφανώς η ενέργεια μεταβάλλεται με την μεταβολή οποιουδήποτε εκ των τριών μεγεθών.

2.5 Έλεγχος Κενού μεταξύ Ηλεκτροδίου και Υλικού

Η απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίου και υλικού (spark gap) παίζει σημαντικό ρόλο στη σταθερότητα και αποτελεσματικότητα μιας κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης. Για τον λόγο αυτό το κενό θα πρέπει να παρακολουθείται προς αποφυγή βραχυκυκλώματος, ανοιχτοκυκλώματος και τόξου. Βασικός στόχος του ακριβούς ελέγχου διακένου είναι η βελτιστοποίηση - μεγιστοποίηση του ρυθμού αποβολής υλικού (MRR) και η εξασφάλιση υψηλής ποιότητας κατεργασμένης επιφάνειας. Σε περίπτωση μικρότερου διακένου από το προβλεπόμενο, αυξάνεται το ποσοστό των

παλμών που δεν εκδηλώνουν κανονικό σπινθήρα και παρατηρούνται φαινόμενα ηλεκτρικού τόξου καθιστώντας έτσι ασταθή την κατεργασία. Ταυτόχρονα, παρατηρείται αύξηση του λόγου φθοράς του εργαλείου αφού συνεχίζει να αφαιρείται υλικό από το ηλεκτρόδιο. Σε περίπτωση μεγαλύτερου από το προβλεπόμενο διακένου, αυξάνεται το ποσοστό των παλμών που δεν οδηγούν σε αποτελεσματικό σπινθήρα. Και στις δύο περιπτώσεις μειώνεται ο ρυθμός αποβολής υλικού (MRR) και δεν επιτυγχάνεται καλή ποιότητα επιφανείας.

Παρόμοια αποτελέσματα μη ομοιόμορφης και ασταθούς ηλεκτρικής εκκένωσης δύναται να επιφέρει η παρουσία υπολειμμάτων που οφείλεται είτε σε εκτός χρόνου σύντομο παλμό και/ή σε ανεπαρκές ξέπλυμα στο εν λόγω κενό. Τα αναπτύγματα αυτά αλλάζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα στο διάκενο και οδηγούν σε τόξο και ασταθή κατεργασία που έχει ως αποτέλεσμα καταστροφή στο υπό κατεργασία υλικό και στο εργαλείο και επηρεάζει αρνητικά την απόδοση της διαδικασίας.

Αναλυτική έρευνα και προσπάθειες ανάπτυξης γίνονται στο πεδίο παρακολούθησης και ελέγχου της όλης διαδικασίας της ηλεκτροδιάβρωσης αναφορικά με το συμβατικό σύστημα ελέγχου που παρακολουθεί την τάση κενού και ανασύρει το ηλεκτρόδιο κατά μήκος της κατεύθυνσης της τροχιάς εντολής. Η πρόβλεψη της δημιουργίας του συγκεκριμένου τόξου στο διάκενο, που βασίζεται στην συλλογή, μοντελοποίηση και ανάλυση δεδομένων της τάσης και της έντασης του ρεύματος στο διάκενο, έχει αποτελέσει το κύριο αντικείμενο των προσπαθειών αυτών τις τελευταίες δεκαετίες.

3. Παράμετροι Απόδοσης της Κατεργασίας

Αρχικά, για να προχωρήσουμε στην περιγραφή των εν λόγω παραμέτρων θα πρέπει να ορίσουμε τον ρυθμό αποβολής υλικού και τον ρυθμό φθοράς του εργαλείου.

3.1 Ρυθμός Αποβολής Υλικού (Material Removal Rate – MRR)

Ορίζεται ως ο όγκος υλικού που απομακρύνεται σε καθορισμένο χρόνο αναφοράς. Συνήθως εκφράζεται σε μονάδες (mm³/min) και υπολογίζεται έμμεσα από τη διαφορά βάρους του τεμαχίου πριν και μετά την κατεργασία. Αποτελεί δείκτη της ταχύτητας κατεργασίας και επηρεάζεται από την ένταση του ρεύματος και τον χρόνο παλμού και μεσοδιαστήματος. Επίσης, μειώνεται ελαφρώς με την αύξηση της πίεσης έκπλυσης, που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, και εξαρτάται από τις ιδιότητες του προς κατεργασία υλικού. Ένας απλός τύπος υπολογισμού είναι:

$MRR = \text{Απώλεια Μάζας (g)} / \text{Πυκνότητα Υλικού (g/mm}^3) * \text{Χρόνος Κατεργασίας (min)}$.

Ένας πιο αναλυτικός τύπος είναι ο παρακάτω:

$$MRR \left[\frac{mm^3}{min} \right] = \frac{W_{st.} [gr] - W_{fin.} [gr]}{\rho \left[\frac{gr}{mm^3} \right] * t_m [min]}$$

$W_{st.}, W_{fin.} =$ βάρος τεμαχίου στην αρχή και το τέλος κατεργασίας αντίστοιχα [gr]

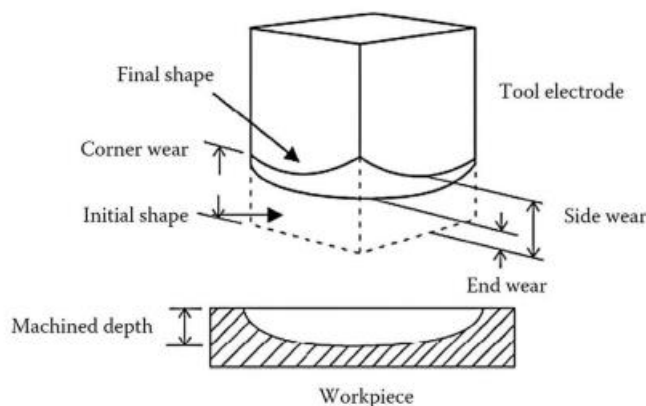
$$\rho = \text{πυκνότητα υλικού τεμαχίου} \left[\frac{gr}{mm^3} \right]$$

$$t_m = \text{χρόνος κατεργασίας} [min]$$

3.2 Λόγος Φθοράς Εργαλείου (Tool Wear Rate - TWR)

Στη βιβλιογραφία ο λόγος φθοράς εργαλείου (TWR) συναντάται και ως λόγος φθοράς ηλεκτροδίου (EWR). Ουσιαστικά πρόκειται για τον λόγο του όγκου υλικού που απομακρύνθηκε από το ηλεκτρόδιο προς τον όγκο υλικού που απομακρύνθηκε από το τεμάχιο εκφραζόμενος σε ποσοστό επί τοις εκατό. Ο λόγος φθοράς του ηλεκτροδίου αποτελεί την ακριβέστερη μέθοδο μέτρησης της φθοράς του ηλεκτροδίου κατά τη κατεργασία. Ενδεικτικά, ο λόγος φθοράς κυμαίνεται για μεταλλικά ηλεκτρόδια από 3:1 έως και 100:1 για ηλεκτρόδια γραφίτη. Όσο μικρότερος αυτός ο λόγος, τόσο πιο ανθεκτικό το ηλεκτρόδιο στην κατεργασία και άρα πιο συμφέρον οικονομικά επειδή αποφεύγεται η συχνή αποκατάσταση της γεωμετρίας του, αλλά και ο κίνδυνος αλλοίωσης της γεωμετρίας της ζητούμενης επιφάνειας προς

αποτύπωση στο τεμάχιο. Επομένως, η φθορά του ηλεκτροδίου πρέπει να είναι χαμηλότερη από αυτή του τεμαχίου. Χαμηλές τιμές TWR εκφράζουν σταθερότερες, αποδοτικότερες και οικονομικότερες κατεργασίες. Ο λόγος φθοράς εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες κατεργασίας (ένταση ρεύματος, δυναμικό διακένου, χρόνος παλμού), από τις ιδιότητες των υλικών (ηλεκτροδίου και τεμαχίου), αλλά και την πολικότητα που χρησιμοποιείται. Τέλος, με την αύξηση της πίεσης έκπλυσης, μειώνεται αρχικά ο λόγος, αλλά μετά αυξάνεται ανάλογα με αυτήν.



Εικόνα 10: Είδη φθορών του εργαλείου σε EDM.

3.3 Τραχύτητα Επιφανείας

Η τραχύτητα επιφανείας αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους απόδοσης σε μια κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης. Η τραχύτητα επιφανείας εκφράζεται συνήθως από τη «μέση τραχύτητα επιφανείας» R_a [μm], ενώ χρησιμοποιείται συχνά και η μέγιστη τραχύτητα R_{max} [μm]. Στη βιβλιογραφία για να περιγραφεί η ποιότητα της επιφάνειας με πιο γενικό και ολοκληρωμένο τρόπο χρησιμοποιείται ο όρος «ακεραιότητα επιφάνειας» (surface integrity). Σε αυτήν περιλαμβάνεται η μελέτη της τοπογραφίας της επιφάνειας, τα χαρακτηριστικά των σχηματισμένων λόγω κατεργασίας κρατήρων, το «πάχος του αναδομημένου στρώματος» (recast layer thickness), τα ελαττώματα επιφανείας και η τραχύτητα. Η τραχύτητα εξαρτάται από το δυναμικό διακένου, την ένταση ρεύματος, και το χρόνο παλμού. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι καθώς αυξάνεται η ενέργεια του σπινθήρα τόσο οι κρατήρες που σχηματίζονται είναι πιο μεγάλοι και κατά συνέπεια αυξάνεται και η τραχύτητα. Σε R/C τύπου εργαλειομηχανές το πάχος του αναδομημένου στρώματος εξαρτάται από τις τιμές των αντιστάσεων "R" και των πυκνωτών "C", ενώ σε κυκλώματα switch on/off από τις μέγιστες τιμές ρεύματος και το χρόνο των παλμών. Τέλος η τραχύτητα εξαρτάται και από παράγοντες μη «ηλεκτρικής και

ενεργειακής φύσης» όπως η πίεση του διηλεκτρικού ρευστού και το υλικό του ηλεκτροδίου.

Συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι που επηρεάζουν μια κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης και ο τρόπος με τον οποίο επιδρούν στους παράγοντες που χαρακτηρίζουν την απόδοση αυτής. Ανάλογα με το είδος του υλικού που πρόκειται να υποστεί την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης καθώς και το είδος των παραγόντων των οποίων η απόδοση προτιμάται να μελετηθεί, επιλέγονται ανάλογα και οι αντίστοιχες παράμετροι.

Πίνακας 6: Επίδραση παραμέτρων κατεργασίας EDM στους παράγοντες απόδοσης.

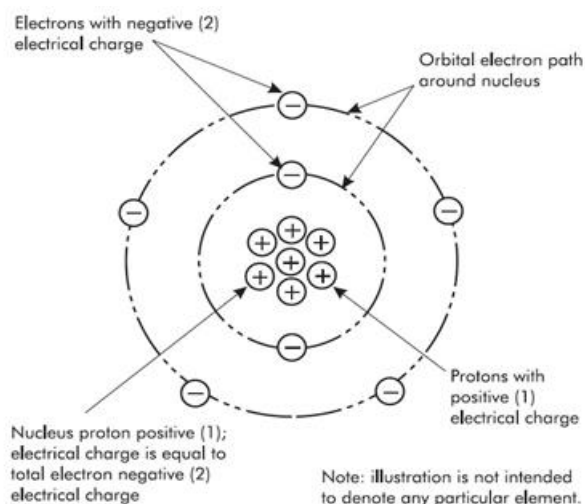
Παράμετροι κατεργασίας	Για αύξηση MRR [mm ³ min]	Για χαμηλότερο RWR[%]	Για χαμηλότερη R _a [μm]
Πολικότητα	Αρνητική	Αρνητική	Αρνητική
Δυναμικό ανοικτού κυκλώματος	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό
Μέγιστη τιμή ρεύματος	Υψηλή	Μέση	Χαμηλή
Χρόνος παλμού	Υψηλός / Μέσος	Χαμηλός	Χαμηλός
Χρόνος μεσοδιαστήματος	Χαμηλός	Μέσος	Μέσος
Duty cycle	Υψηλός	Χαμηλός	Χαμηλός
Συχνότητα παλμού	Υψηλή	Μέση / Χαμηλή	Χαμηλή
Πίεση διηλεκτρικού ρευστού	Υψηλή	Μέση	Μέση

4. Ιονισμός και Απομάκρυνση Υλικού

4.1 Μηχανισμός Ιονισμού

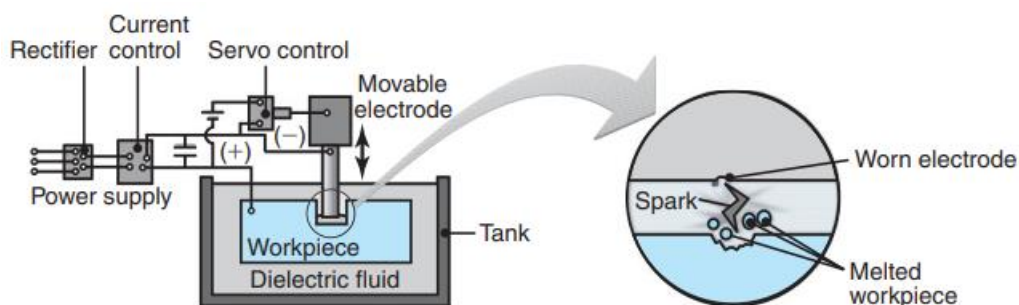
Κατά την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης λαμβάνει χώρα ο μηχανισμός ιονισμού της περιοχής μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου η οποία είναι εμβαπτισμένη στο διηλεκτρικό υγρό. Αρχικά εφαρμόζεται μια διαφορά δυναμικού μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου. Στην έναρξη της εφαρμογής το διηλεκτρικό μέσο λειτουργεί ως μονωτής μην επιτρέποντας την ροή ρεύματος. Όταν όμως οι συνθήκες (απόσταση ηλεκτροδίου - τεμαχίου) γίνουν οι κατάλληλες τότε το διηλεκτρικό μέσο ιονίζεται και από μονωτής γίνεται αγωγός. Η τάση από «τάση ανοικτού κυκλώματος» πέφτει σε «τάση κατεργασίας» και υπάρχει εκδήλωση σπινθήρα, που ουσιαστικά είναι ροή ρεύματος. Η ροή αυτή συνεχίζεται κατά τη διάρκεια του παλμού (T_{on}), και διακόπτεται κατά το μεσοδιάστημα (T_{off}), όταν το διηλεκτρικό μέσο αποκτά ξανά ιδιότητες μονωτή. Ο παραπάνω «κύκλος» επαναλαμβάνεται για κάθε σπινθήρα που εκδηλώνεται.

Η ερμηνεία του φαινομένου του ιονισμού εκπορεύεται από την περιγραφή και κατανόηση της συμπεριφοράς των ηλεκτρονίων του ατόμου ενός στοιχείου. Ένα άτομο οποιουδήποτε στοιχείου του Περιοδικού Πίνακα αποτελείται από τον πυρήνα και τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από αυτόν. Ο πυρήνας αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια, με τα πρωτόνια να έχουν θετικό φορτίο και τα νετρόνια να είναι ηλεκτρικά ουδέτερα. Για το λόγο αυτό τα νετρόνια παραλείπονται από την προσέγγισή μας καθώς δεν παίζουν κάποιο ρόλο στην αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων και πρωτονίων. Τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό φορτίο, και καθώς ο αριθμός τους ισούται με τον αριθμό πρωτονίων, ένα άτομο στη θεμελιώδη του κατάσταση είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Μια απλοποιημένη απεικόνιση της δομής ενός ατόμου παρατίθεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 11: Απεικόνιση απλοποιημένης δομής του ατόμου.

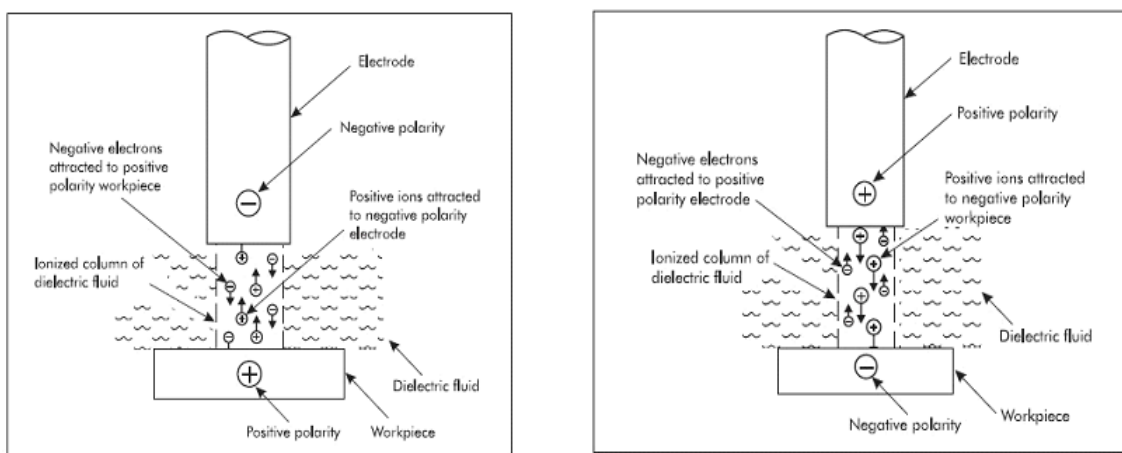
Σύμφωνα με αυτή την απλοποιημένη παραδοχή τα ηλεκτρόνια κινούνται σε τροχιές γύρω από τον πυρήνα. Όμως, υπό συγκεκριμένες συνθήκες τα ηλεκτρόνια εγκαταλείπουν τις τροχιές τους και το άτομο παύει να είναι ηλεκτρικά ουδέτερο και ονομάζεται θετικό ιόν ή κατιόν. Τα ηλεκτρόνια που φεύγουν καλούνται «ελεύθερα ηλεκτρόνια».



Εικόνα 12: Απλοποιημένη αναπαράσταση ηλεκτρικής εκκένωσης σε EDM

4.2 Πολικότητα

Κατά την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο, μέσω της κατάλληλης συνδεσμολογίας, αποκτούν θετική ή αρνητική πολικότητα. Συνήθως το ηλεκτρόδιο είναι αρνητικά φορτισμένο οπότε έλκει τα θετικά ιόντα. Αντίστοιχα το τεμάχιο, που θα είναι θετικά φορτισμένο, έλκει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Το αντίστροφο συμβαίνει όταν το ηλεκτρόδιο έχει φορτιστεί θετικά. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η αλληλεπίδραση θετικών ιόντων και ελεύθερων ηλεκτρονίων με ηλεκτρικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο και τεμάχιο.



Εικόνα 13: Αλληλεπίδραση θετικών ιόντων και ελεύθερων ηλεκτρονίων στο spark gap.

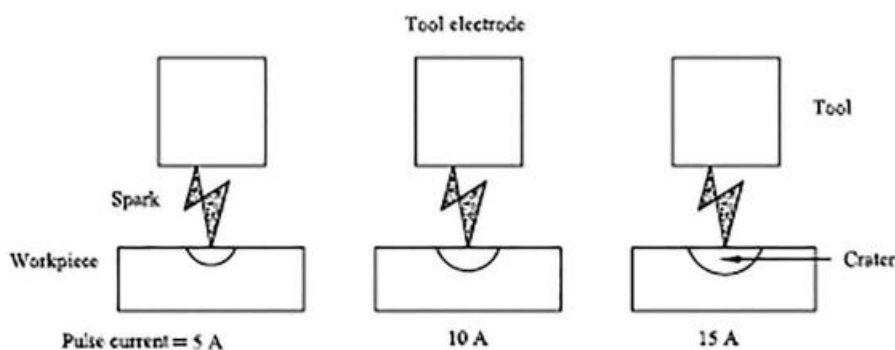
Όταν στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο δεν εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού, τα άτομα του διηλεκτρικού μέσου που βρίσκεται ανάμεσα τους, παραμένουν στη θεμελιώδη ουδέτερη κατάσταση. Έως ότου η διαφορά δυναμικού ηλεκτροδίου - τεμαχίου και η μεταξύ τους απόσταση να πάρουν τη τιμή της διηλεκτρικής αντοχής του διηλεκτρικού μέσου, δεν καταγράφεται κάποια φυσική μεταβολή. Από την στιγμή που το διηλεκτρικό μέσο ιονίζεται σε βαθμό που επιτρέπεται η ροή ηλεκτρονίων, τότε τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια έλκονται από τη θετικά φορτισμένη επιφάνεια ενώ οι θετικά φορτισμένοι πυρήνες των ατόμων που απομένουν (κατιόντα), έλκονται από την αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια. Όμως οι πυρήνες είναι χιλιάδες φορές πιο βαριοί και επιταχύνουν πολύ πιο αργά από τα ηλεκτρόνια. Ως αποτέλεσμα ο αριθμός των πυρήνων που προσκρούουν στην αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια είναι πολύ μικρότερος από τον αριθμό των ηλεκτρονίων που προσκρούουν στην θετικά φορτισμένη επιφάνεια. Για τον λόγο αυτό τα ηλεκτρόνια προκαλούν ταχύτερη και αποτελεσματικότερη αφαίρεση υλικού, από ότι οι θετικά φορτισμένοι πυρήνες, μια και η αφαίρεση υλικού συνίσταται στην πρόσκρουση φορτισμένων σωματιδίων στην επιφάνεια του τεμαχίου/ηλεκτροδίου, η οποία προκαλεί τοπική εξάχνωση/τήξη. Αυτός

είναι και ο λόγος που βασική πηγή ενέργειας για την αποβολή υλικού στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης θεωρούνται τα ηλεκτρόνια. Επειδή στις περισσότερες περιπτώσεις ηλεκτροδιάβρωσης το ηλεκτρόδιο είναι αρνητικά φορτισμένο, είναι αυτό που δέχεται τον σχετικά μικρότερο αριθμό των πυρήνων, οπότε είναι και αυτό στο οποίο παρατηρείται μικρότερη φθορά.

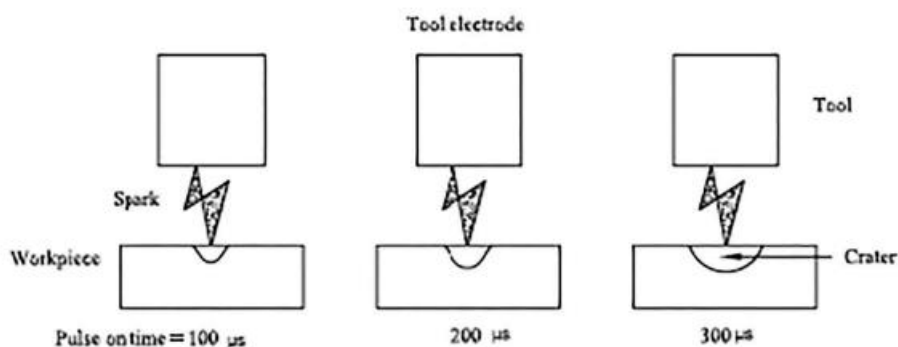
4.3 Μηχανισμός Απομάκρυνσης Υλικού

Στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης η απομάκρυνση υλικού γίνεται με χρήση θερμικής ενέργειας. Οι θερμοκρασίες, που αναπτύσσονται στον σπινθήρα είναι αρκετά υψηλές ώστε να προκαλέσουν εξαχνωση του υλικού. Η απαραίτητη θερμική ενέργεια προέρχεται από τη ροή ρεύματος ανάμεσα σε ηλεκτρόδιο και τεμάχιο (σπινθήρας). Όπως είναι γνωστό, η μονάδα μέτρησης της έντασης ρεύματος είναι τα Ampere. Ως 1 Ampere ορίζεται η ροή από συγκεκριμένο σημείο $6.25 \cdot 10^{18}$ ηλεκτρονίων σε ένα δευτερόλεπτο. Αύξηση των Ampere συνεπάγεται αύξηση της ενέργειας κατεργασίας και αύξηση της ποσότητας υλικού που απομακρύνεται.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η επίδραση της έντασης του ρεύματος εκκένωσης καθώς και της διάρκειας του παλμού στο μέγεθος των κρατήρων.

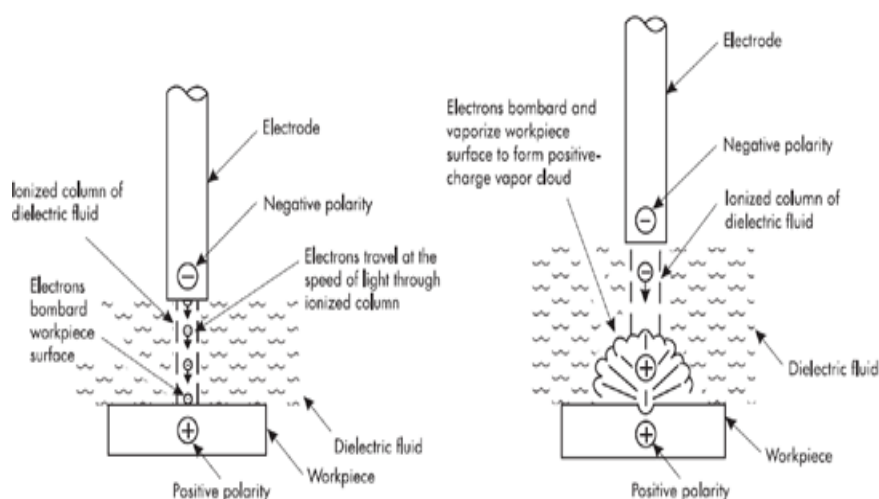


Εικόνα 14: Επίδραση της έντασης του ρεύματος εκκένωσης στο μέγεθος των κρατήρων.

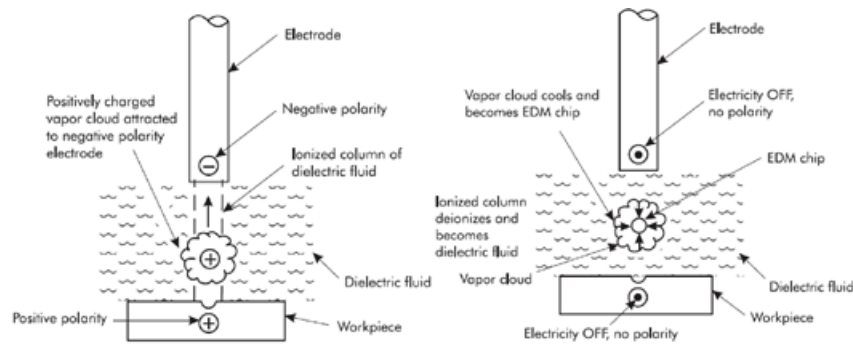


Εικόνα 15: Επίδραση της διάρκειας του παλμού εκκένωσης στο μέγεθος των κρατήρων.

Η εκδήλωση του ηλεκτρικού ρεύματος μπορεί να θεωρηθεί ως ακαριαία αφού η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρικού σπινθήρα είναι ίδιας τάξης μεγέθους με τη ταχύτητα του φωτός (299274km/sec) και το διάκενο ηλεκτροδίου – τεμαχίου είναι της τάξης των χιλιοστών (0.025 – 0.1 mm). Στην περίπτωση που έχουμε αρνητική πόλωση του ηλεκτροδίου, τα ηλεκτρόνια κινούνται δια μέσω του ιονισμένου διηλεκτρικού μέσου από το ηλεκτρόδιο που είναι αρνητικά φορτισμένο προς το τεμάχιο το οποίο είναι θετικά φορτισμένο. Κατά τη διάρκεια του παλμού τα ηλεκτρόνια κινούνται με τη προαναφερθείσα εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα δια μέσω της ιονισμένης στήλης και προσκρούουν τελικά την επιφάνεια του τεμαχίου, που λειτουργεί ως εμπόδιο στην πορεία τους. Με τον τρόπο αυτό τα ηλεκτρόνια «εναποθέτουν» την ενέργειά τους υπό μορφή θερμότητας στην επιφάνεια του τεμαχίου, με το υλικό να εξαχνώνεται και να δημιουργεί τοπικά νέφος. Επειδή το νέφος του εξαχνωμένου υλικού είναι θετικά φορτισμένο, έλκεται από το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο. Καθώς το νέφος κινείται προς το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο το σύστημα μεταβαίνει σε χρόνο μεσοδιαστήματος (T_{off}), και πλέον δεν υπάρχει κάποια ελκτική δύναμη από το ηλεκτρόδιο προς το νέφος. Ταυτόχρονα με τη διακοπή της ροής ρεύματος (δεν υπάρχει σπινθήρας) το διηλεκτρικό μέσο επανέρχεται στη αρχική του κατάσταση (deionize) και το νέφος ψύχεται. Από το νέφος που ψύχεται δημιουργούνται τα απόβλητα της κατεργασίας που είναι κούφια και σφαιρικής μορφής. Η αντίστροφη διαδικασία λαμβάνει χώρα σε περίπτωση ηλεκτροδίου με θετική πόλωση.



Εικόνα 16: Ηλεκτρικό νέφος κατά την εκκένωση με αρνητικό ηλεκτρόδιο.



Εικόνα 17: Ηλεκτρικό νέφος κατά την εκκένωση με θετικό ηλεκτρόδιο.

Όπως αναφέρθηκε, εκτός από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, έχουμε απομάκρυνση υλικού και από το εργαλείο, γεγονός ανεπιθύμητο, καθώς μειώνει τη διάρκεια ζωής του και συντελεί στην αύξηση του κόστους της κατεργασίας. Το ζήτημα αυτό όμως λύνεται με τη σωστή επιλογή των παραμέτρων ελέγχου, όπως είναι το κατάλληλο για την κατεργασία υλικό εργαλείου, η σωστή ρύθμιση της γεννήτριας τροφοδοτήσεως για την διάρκεια, την ένταση και τη συχνότητα των εκκενώσεων, και η πολικότητα των ηλεκτροδίων. Με χρήση θετικής πολικότητας στο εργαλείο φαίνεται να επιτυγχάνουμε καλύτερες τιμές για τον ρυθμό αποβολής υλικού. Ο ρυθμός αποβολής υλικού για τη θετική πολικότητα είναι πάνω από δύο φορές μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο για την αρνητική πολικότητα, για τις ίδιες διάρκειες παλμού. Γενικά παρατηρείται ότι με την χρήση θετικής πολικότητας η διεξαγωγή της κατεργασίας γίνεται ομαλότερα απ' ό,τι με χρήση αρνητικής και πως εμφανίζονται γενικά προβλήματα κατά την αποβολή υλικού. Συμπερασματικά η θετική πολικότητα είναι καταλληλότερη όσον αφορά τη βελτιστοποίηση του ρυθμού αποβολής υλικού.

5. Πειραματική Διαδικασία

Στόχος της παρούσας εργασίας και των διεξαχθέντων πειραμάτων ήταν η διερεύνηση παραμέτρων και η μελέτη της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης (die sinking EDM) για μια σειρά διαφορετικών συνθηκών έντασης ρεύματος και διάρκειας παλμών σε κράμα Νικελίου.

5.1 Νικέλιο

Το χημικό στοιχείο Νικέλιο συμβολίζεται με Ni και είναι μέταλλο με ατομικό αριθμό 28 και ατομική μάζα 58,69u. Παρουσιάζει θερμοκρασία τήξης στους 1453° C βαθμούς και θερμοκρασία βρασμού στους 2913° C. Ανήκει στην κατηγορία των στοιχείων μετάπτωσης της 1ης κύριας Ομάδας του Περιοδικού Πίνακα, έχει αργυρόλευκο χρώμα και κάτω από τους 385° C είναι ελαφρώς μαγνητικό. Παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση και καλή θερμική αντοχή.

Το Νικέλιο αποτελεί ένα δύσκολο προς κατεργασία υλικό. Είναι ελατό και όλκιμο αλλά πολύ σκληρό μέταλλο, ελαφρώς πιο σκληρό από τον Σίδηρο (Fe). Η ζήτηση για απάρτια δυσκατέργαστων υλικών, όπως το Νικέλιο, έχει απότομα αυξηθεί στην αυτοκινητοβιομηχανία, αεροδιαστημική, ηλεκτρονικά, οπτικά και ιατρικές συσκευές και στην βιομηχανία επικοινωνιών. Παρά τις εξαιρετικές τους ιδιότητες πολλά από αυτά τα δυσκατέργαστα υλικά φαίνονται να έχουν περιορισμένες εφαρμογές. Αυτά τα υλικά θέτουν πολλές προκλήσεις στις συμβατικές διαδικασίες κατεργασίας, όπως τόννευση και φρεζάρισμα. Ως αποτέλεσμα, το Νικέλιο είναι δύσκολο να κοπεί με συμβατικές μεθόδους. Η παρούσα Διερεύνηση εστιάζει στην μελέτη μη συμβατικών μεθόδων κοπής Νικελίου και συγκεκριμένα στην κατεργασιμότητα του Νικελίου με συσκευή Ηλεκτροδιάβρωσης.

5.2 Κράματα Νικελίου

Το Νικέλιο αποτελεί το βασικό στοιχείο για τα περισσότερα από τα υψηλής αντοχής σε θερμότητα κράματα. Παρόλο που το Νικέλιο είναι πιο ακριβό από τον Σίδηρο, παρέχει μια ωστενιτική δομή η οποία έχει μεγαλύτερη αντοχή και κατεργασιμότητα από μια φερριτική δομή για ίδιου επιπέδου καταπόνηση.

Τα κράματα Νικελίου αποτελούν μια ομάδα κραμάτων που συντίθενται κυρίως από Νικέλιο με ποικίλες ποσότητες από άλλα στοιχεία όπως Χρώμιο, Σίδηρο, Χαλκό και Μολυβδαίνιο. Η χημική σύσταση των κραμάτων Νικελίου ποικίλει και εξαρτάται από τον κατασκευαστή καθώς και την ειδική χρήση για την οποία προορίζονται. Η

σύνθεση των πιο κοινών κραμάτων Νικελίου αποτελείται κυρίως από Κοβάλτιο, Σίδηρο, Χρώμιο, Μολυβδαίνιο, Τιτάνιο και Αλουμίνιο. Όταν το Κοβάλτιο αντικαθιστά ένα μέρος του Νικελίου σαν βασική ουσία, βελτιώνει την αντοχή σε καταπόνηση σε υψηλή θερμοκρασία. Η πρόσθεση μικρών ποσοτήτων Σιδήρου τείνει να ενισχύει το κράμα και να μειώνει το κόστος. Το Χρώμιο προστίθεται για να αυξήσει την αντοχή και την αντίσταση σε οξειδωση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Το Μολυβδαίνιο συνεισφέρει ως ενίσχυση με στερεό. Το Τιτάνιο και το Αλουμίνιο προστίθενται στα περισσότερα θερμοάντοχα κράματα Νικελίου επιτρέποντας την σκλήρυνση με τον σχηματισμό ιζημάτων του $Ni_3(Ti, Al)$. Το Αλουμίνιο επίσης συνεισφέρει στην αντοχή σε οξειδωση.

Η φύση και ο τρόπος λειτουργίας των εν λόγω κραματικών στοιχείων σε κράματα Νικελίου καθιστά σχεδόν υποχρεωτική την τήξη υπό κενώ των κραμάτων αυτών. Παρόλα αυτά, το επιπρόσθετο κόστος της τήξης υπό κενώ αντισταθμίζεται και με το παραπάνω από τις βελτιώσεις που προκύπτουν στις ιδιότητες κάτω από συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών.

Λόγω των ιδιοτήτων που αναφέρονται παραπάνω, η εφαρμογή των κραμάτων Νικελίου είναι σε κρίσιμα απάρτια αεροστροβίλων, σύνθετα πτερύγια, λόγω αντοχής σε φθορά πτερωτής αλλά και σε ηλεκτρονικά, μπαταρίες και νομίσματα. Τα κράματα Νικελίου είναι πλήρως ενσωματωμένα στις αεροπορικές βιομηχανίες και την αεροδιαστημική λόγω της εκτεταμένης μηχανικής ικανότητας φέροντος φορτίου υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία.

Μερικά χαρακτηριστικά κράματα Νικελίου παρατίθενται παρακάτω:

Στο κράμα Inconel 718 επιτυγχάνεται ενίσχυση με ιζήματα μέσω τήξης υπό κενώ. Ως κράμα παρουσιάζει αντίσταση σε ερπυσμό, καλή αντοχή σε οξειδωση σε θερμοκρασίες άνω των 980ο C, δύναται να διαμορφωθεί και επιτρέπει συγκολλήσεις.

Το Inconel 706 παρουσιάζει παρόμοιες ιδιότητες με το Inconel 718 με αισθητά βελτιωμένη κατεργασιμότητα σε σχέση με αυτό.

Το Monel 400 είναι κράμα Νικελίου – Χαλκού με καλή αντοχή σε διάβρωση και σε κόπωση. Χρησιμοποιείται συνήθως στην μηχανική ναυπήγησης, σε χημικές διαδικασίες και σε εξαρτήματα ηλεκτρονικών.

Το Inconel 600 είναι κράμα Νικελίου - Χρωμίου. Παρουσιάζει καλή αντοχή σε διάβρωση και αντοχή σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες άνω των 1100ο C . Για τον λόγο αυτό έχει ευρεία χρήση σε εξαρτήματα κλιβάνων, χημικό εξοπλισμό και πυρηνική μηχανική.

Το Inconel 625 είναι κράμα Νικελίου – Χρωμίου - Μολυβδαινίου. Παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση και σε οξειδωση σε θερμοκρασίες άνω των 980ο C. Επειδή το κράμα αυτό αναπτύχθηκε με σκοπό να διατηρεί την καλή του αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, παρουσιάζει αντίσταση στην μορφοποίηση στις θερμοκρασίες αυτές αλλά μπορεί να διαμορφωθεί με τον κατάλληλο εξοπλισμό. Ο συνδυασμός αντοχής, αντίστασης σε διάβρωση και δυνατότητας διαμόρφωσης του κράματος καθώς και επίτευξης συγκολλήσεων με συνηθισμένες πρακτικές, αποτελούν τα ξεχωριστά γνωρίσματα του κράματος. Χρησιμοποιείται συχνά σε χημικό εξοπλισμό, στην αεροδιαστημική και στην μηχανική ναυπήγησης.

Το Nickel 200 αποτελείται μόνο από Νικέλιο. Χαρακτηρίζεται από καλή αντοχή σε διάβρωση και υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Χρησιμοποιείται συχνά σε εξαρτήματα ηλεκτρονικών, μπαταρίες και αεροδιαστημικές εφαρμογές.

Το Hastelloy C276 είναι ένα από τα πιο ανθεκτικά σε διάβρωση και θέρμανση υπερκράματα του Νικελίου, το οποίο μπορεί επαρκώς να αντέξει φορτία και την δράση χημικών σε ποικίλες συνθήκες. Αυτό καθορίζει την καταλληλότητά του για την εφαρμογή στην αεροδιαστημική μεταξύ διαφορετικών τμημάτων ατράκτου, κινητήρα και απάρτια συμπίεστή. Στις μέρες μας χρησιμοποιείται ευρέως στις βιομηχανίες χημικής επεξεργασίας για συστήματα αποθείωσης αερίου, συμπυκνωτές, αντιδραστήρες και εναλλάκτες θερμότητας εξαιτίας της αδράνειας που παρουσιάζει απέναντι σε χημικές αντιδράσεις. Επίσης, αποτελεί ένα δυνητικό κράμα για αεροδιαστημικές και πυρηνικές εφαρμογές καθώς και επεξεργασία αποβλήτων.

Το Inconel C276 είναι ένα κράμα Νικελίου – Χρωμίου - Μολυβδαινίου, με επιπρόσθετη μικρή ποσότητα Βολφραμίου, με αδράνεια στην διάβρωση σε ποικίλα επιθετικά μέσα. Σε αντίθεση με άλλα κράματα Νικελίου, κατέχει εξαιρετική αντίσταση σε εμφάνιση ρωγμών λόγω κόπωσης, σε τοπική διάβρωση και σε ερπυσμό υπό υψηλή θερμοκρασία σε ποικίλα περιβάλλοντα. Η ανεβασμένη περιεκτικότητα σε Μολυβδαίνιο επιτρέπει την αντίσταση σε σημειακή ή περιορισμένη διάβρωση. Η χαμηλή περιεκτικότητα σε Άνθρακα μειώνει την κατακρήμνιση καρβιδίων σε υψηλή θερμοκρασία. Η αντίσταση σε οξειδωτικά μέσα οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα Χρωμίου. Εξαιτίας της μεγάλης του σκληρότητας και του ρυθμού εργασιοσκλήρυνσης, είναι δύσκολη η κατεργασία του με παραδοσιακές μεθόδους. Δύναται να κοπεί εύκολα με κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης ή σύρματος. Παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση σε διάβρωση σε σύγκριση με άλλα κράματα όπως Monel 400, Inconel 625.

Το Nicrofer 5716 ή Superimphy 276 είναι ένα κράμα υψηλών αποδόσεων κατασκευασμένο από στερεό διάλυμα ενισχυμένου Νικελίου με Χρώμιο, Μολυβδαίνιο, Κοβάλτιο, Μαγγάνιο και Βολφράμιο σε ποικιλία ποσοστών δομής. Με ικανότητα να αντέχει την δράση ισχυρών οξέων και αντιδραστηρίων, χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανίες εξοπλισμού χημικών διαδικασιών, στην φαρμακοβιομηχανία, σε διαδικασίες πυρηνικού καυσίμου, πτερύγια υποβρυχίων και στην αεροδιαστημική για κατασκευή απαρτίων συμπιεστών.

5.3 Πειραματική Διάταξη

Η μηχανή στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα είναι η βιομηχανική μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης που διαθέτει το εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Η μηχανή είναι τύπου EMT1.10/AGIETRON, της εταιρείας AGIEPULS, έτους κατασκευής 1979, με τη γεννήτρια τροφοδότησης σαν ξεχωριστή μονάδα. Η άτρακτος της μηχανής έχει δυνατότητα κίνησης στον κατακόρυφο άξονα (άξονας “Z”) και διαθέτει σύστημα αυτόματης πρόωσης για τη διατήρηση σταθερού διακένου κατά την κατεργασία, το οποίο έχει δυνατότητα κίνησης στους άξονες “X” και “Y”. Η συγκεκριμένη εργαλειομηχανή αποτελείται από τρεις ανεξάρτητες μονάδες, κύρια μηχανή, μονάδα παροχής διηλεκτρικού μέσου και μονάδα παροχής ισχύος συνδεδεμένες μεταξύ τους με αγωγούς ρεύματος και διηλεκτρικού μέσου.

Στην μονάδα παροχής ισχύος πραγματοποιείται η ρύθμιση των παραμέτρων ελέγχου. Οι παράμετροι ελέγχου της κατεργασίας που επιλέχθηκαν να μεταβάλλονται στη σειρά πειραμάτων είναι:

- η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος εκκένωσης
- η χρονική διάρκεια του παλμού

Ο έλεγχος της έντασης του ρεύματος πραγματοποιείται από τους αντίστοιχους περιστροφικούς διακόπτες που βρίσκονται στη μονάδα παροχής ισχύος. Η τιμή του ρεύματος ελέγχεται έμμεσα, καθώς οι ενδείξεις των διακοπών αντιστοιχούν σε «μονάδες ρεύματος “ J_{tot} ”» και όχι σε Amperes. Το προαναφερθέν μέγεθος “ J_{tot} ” προκύπτει ως το άθροισμα των τιμών των διακοπών “ I_T ” και “ I_P ”. Το “ I_T ” δύναται να πάρει τιμές από 0 έως και 4 μονάδες ενώ το “ I_P ” από 0 έως και 5 μονάδες. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης, σε κάθε αναγραφόμενη μονάδα ρεύματος “ J_{tot} ” αντιστοιχούν περίπου 3 Amperes έντασης ρεύματος κατεργασίας I_P [A]. Επομένως η ένταση του ρεύματος εκκένωσης δύναται να ρυθμιστεί μεταξύ 0 και 27A.

Η χρονική διάρκεια του παλμού (t) μπορεί να επιλεγεί από ένα εύρος μεταξύ του 1μsec και των 1000μsec. Ο διακόπτης που ελέγχει τη χρονική απόσταση μεταξύ των παλμών (τ) δεν παρέχει τη δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης της, αλλά της δίνει τιμές συναρτήσει της χρονικής διάρκειας των παλμών εκκένωσης. Προκειμένου η εργαλειομηχανή να διατηρήσει τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της, σε τακτά χρονικά διαστήματα διακόπτει την παροχή παλμών και αποσύρει ελαφρά το ηλεκτρόδιο, ώστε να γίνει αποτελεσματική απόπλυση. Το διάστημα αυτό δεν είναι ενεργός χρόνος κατεργασίας, καθώς δεν υπάρχει παροχή ισχύος προς το τεμάχιο και πρέπει να διαχωρίζεται από το συνολικό χρόνο κατεργασίας. Αφού παρέλθει ένα τέτοιο χρονικό διάστημα, η κεφαλή κατέρχεται στην πρότερή της θέση και συνεχίζεται η κατεργασία. Η πολικότητα του τεμαχίου και του ηλεκτροδίου καθορίζεται από την συνδεσιμότητα των καλωδίων στο πίσω τμήμα της συσκευής. Επιπλέον, πάνω στην μονάδα ισχύος υπάρχουν συνδεδεμένα ένα αμπερόμετρο, που δείχνει την ένταση του ρεύματος κατεργασίας, και ένα βολτόμετρο, που δείχνει την τάση στα άκρα του διακένου.



Εικόνα 18: Εργαλειομηχανή Ηλεκτροδιάβρωσης AGIETRON EMT1.10.

Η γεννήτρια τροφοδότησης είναι στατική παλμογεννήτρια τύπου τρανζίστορ με ορθογώνιο παλμό, μέγιστου ρεύματος 30 A και μέγιστης τάσης 100V. Η τάση στο κενό μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων είναι 100V χωρίς δυνατότητα αλλαγής, ενώ η τάση λειτουργίας ποικίλει ανάλογα με την περίπτωση όπως θα δούμε παρακάτω.

Το επιθυμητό βάθος κοπής ορίζεται σε μια ειδική ψηφιακή μονάδα της R.S.F. Elektronik, η οποία είναι συνδεδεμένη με την εργαλειομηχανή. Μέσω αυτής της μονάδας δύναται ο έλεγχος κάθε στιγμή του βάθους κοπής στο οποίο έχει προχωρήσει η άτρακτος.

Το ηλεκτρόδιο που εφαρμόστηκε στην εργαλειομηχανή για τις ανάγκες της παρούσας κατεργασίας ήταν ένα ορθογώνιας γεωμετρίας κομμάτι από ηλεκτρολυτικό χαλκό (99,9%), διαστάσεων 38 X 23 (mm).



Εικόνα 19: Ηλεκτρόδιο Χαλκού ορθογώνιας γεωμετρίας.

Οι ιδιότητες του ηλεκτρολυτικού χαλκού παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7: Ιδιότητες ηλεκτρολυτικού χαλκού.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΟΥ ΧΑΛΚΟΥ	
Πυκνότητα	8,93g/cm ³
Σημείο Τήξης	1083°C
Ειδική Αντίσταση	0,009±0,07·10 ⁻⁴ Ω·cm

Το προς κατεργασία τεμάχιο που χρησιμοποιήθηκε στην κατεργασία ήταν μια ορθογώνια παραλληλεπίπεδη πλάκα Νικελίου. Πάνω σε αυτήν την πλάκα έγιναν εννέα αποτυπώσεις του ορθογώνιας γεωμετρίας ηλεκτροδίου.



Εικόνα 20: Αποτυπώσεις ορθογώνιας γεωμετρίας σε πλάκα Νικελίου.

Τέλος, σαν τρόπος έκπλυσης χρησιμοποιείται δέσμη jet διηλεκτρικού υγρού χαμηλής πίεσης μέσω ακροφυσίων πλευρικά του τεμαχίου. Πριν την έναρξη της κατεργασίας γίνεται πλήρωση της δεξαμενής με το διηλεκτρικό υγρό μέσω σωληνώσεων. Η πλήρωση της δεξαμενής γίνεται έως μια συγκεκριμένη στάθμη ώστε να καλύπτεται πλήρως η περιοχή της κατεργασίας. Το χρησιμοποιούμενο διηλεκτρικό μέσο ήταν το CUT – MAX SE 2 της εταιρείας HOUGHTON, με τα ακόλουθα φυσικά χαρακτηριστικά, όπως δίνονται στο φύλλο τεχνικών δεδομένων της εταιρείας:

Πίνακας 8: Ιδιότητες διηλεκτρικού μέσου.

CUT – MAX SE 2	
Εμφάνιση	Διαφανές Υγρό Κεχριμπαρένιου Χρώματος
Συνεκτικότητα στους 40 °C	3,5 Pa·sec
Σημείο Ανάφλεξης	123 °C
Σχετική Πυκνότητα	0,865

5.4 Πειραματικές Συνθήκες Κατεργασιών

Όπως έχει προαναφερθεί, η ηλεκτροδιάβρωση είναι μια σύνθετη κατεργασία στην οποία συνεισφέρουν ταυτόχρονα αρκετοί παράγοντες (παράμετροι), συνεπώς κρίνεται σημαντική η παράθεσή τους.

- Τάση εν κενώ : Ορισμένη στα 100 Volt
- Χαρακτηριστικά παλμού ηλεκτρικής εκκένωσης : Ο διακόπτης που ελέγχει το t_{on} είναι μεταβλητή παράμετρος των πειραμάτων, το δε t_{off} δεν ελέγχεται απευθείας, αλλά μέσω του διακόπτη «Τ», που είναι ρυθμισμένος στην ένδειξη 11.
- Ένταση ρεύματος κατεργασίας : Μεταβλητή παράμετρος των πειραμάτων
- Ηλεκτρόδιο : Υλικό από χαλκό (Cu)
- Πόλωση ηλεκτροδίου : Σε όλα τα πειράματα παραμένει θετική (+)
- Ρύθμιση διακένου : Έλεγχος με δύο περιστροφικούς διακόπτες κάτω από την ένδειξη «SERVO», ο ένας ελέγχει την τιμή της ιδεατής τάσης διακένου προς σύγκριση, ρυθμισμένος στη θέση 7, ο άλλος ελέγχει την προκαθορισμένη ευαισθησία του συστήματος, ρυθμισμένος στη θέση 7.25.
- Διηλεκτρικό μέσο : CUT – MAX SE 2, της εταιρείας HOUGHTON.

Κάθε αποτύπωση πραγματοποιήθηκε υπό διαφορετικές συνθήκες έντασης του ρεύματος και διάρκειας του παλμού επιτυγχάνοντας διαφορετικό βάθος κοπής. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται αναλυτικά οι συνθήκες κατεργασίας και το βάθος κοπής για κάθε δοκίμιο.

Πίνακας 9: Συνθήκες κατεργασίας και αντίστοιχο βάθος κοπής.

A/A Δοκιμίου	Pulse Current I_e (A)	Pulse Duration t_p (μ s)	Pulse Energy W_e (mJ)	Βάθος Κοπής (μ m)
1	12 (4+0)	100	36	1200
2	18 (4+2)	100	54	1240
3	26 (4+5)	100	78	1500
4	12	300	108	1000
5	18	300	162	1200

6	26	300	234	1500
7	12	500	180	1200
8	18	500	270	1200
9	26	500	390	1200

5.5 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας

Μια συνολική περιγραφή των σταδίων της κατεργασίας που ακολουθήθηκε για κάθε δοκίμιο αποτελεί η εξής ακολουθία ενεργειών:

- Μέτρηση μάζας πριν την κατεργασία
- Κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης
- Μέτρηση μάζας μετά την κατεργασία
- Τραχυμέτρηση της κατεργασμένης επιφανείας
- Καθαρισμός και τεμαχισμός του δοκιμίου
- Εγκιβωτισμός του δοκιμίου σε ειδική ρυτίνη
- Λείανση – Χημική Προσβολή
- Μεταλλογραφική μελέτη σε οπτικό μικροσκόπιο
- Σκληρομέτρηση της εγκάρσιας στην κατεργασμένη επιφανεία

Αναλυτικότερα τα στάδια της κατεργασίας περιγράφονται παρακάτω:

5.5.1 Διαδικασία Έναρξης Κατεργασίας

Όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία ξεκινά με τη ζύγιση του δοκιμίου σε ζυγαριά ακριβείας, η οποία έχει διακριτική ικανότητα το 0.1 του γραμμαρίου. Στην συνέχεια το κατεργαζόμενο τεμάχιο στερεώνεται στο τραπέζι της εργαλειομηχανής. Κατόπιν εφαρμόζεται το ηλεκτρόδιο χαλκού στην άτρακτο της συσκευής. Έπειτα ρυθμίζονται οι συνθήκες κατεργασίας, η ένταση του ρεύματος “Jtot” και η διάρκεια του παλμού. Πριν την έναρξη της όλης διαδικασίας ορίζεται, πληκτρολογώντας στην κονσόλα της ειδικής ψηφιακή μονάδας, το επιθυμητό βάθος κοπής. Ακολουθεί η προσεκτική κατάβαση του ηλεκτροδίου, μέχρι την επιθυμητή θέση πάνω από το τεμάχιο, η οποία επιτυγχάνεται μόλις ακουστεί ένας χαρακτηριστικός ήχος από τη μηχανή. Στη συνέχεια ξεκινά η έγχυση του διηλεκτρικού υγρού στην δεξαμενή έως την κατάλληλη στάθμη. Η κατεργασία εκκινεί πιέζοντας το κουμπί της εκκίνησης και

περατώνεται με δύο τρόπους, είτε φτάνοντας στο ζητούμενο βάθος κοπής, είτε με απρογραμματίστο τρόπο, πατώντας το κουμπί με την ένδειξη «stop». Προφανώς αν η κατεργασία διακοπεί απότομα, δεν λαμβάνει χώρα εξομάλυνση της επιφάνειας όπως θα συνέβαινε σε μια ομαλή διακοπή. Μετά το πέρας της κατεργασίας το τεμάχιο καθαρίζεται και ζυγίζεται στη ζυγαριά ακριβείας.

5.5.2 Μέτρηση Τραχυτήτων Κατεργασμένης Επιφάνειας

Εν συνεχεία γίνεται η τραχυμέτρηση της κατεργασμένης επιφάνειας των δοκιμίων στο όργανο Surtronic 3+ της εταιρείας Taylor-Hobson.



Εικόνα 21: Τραχύμετρο Surtronic 3+ της εταιρείας Taylor – Hobson.



Εικόνα 22: Ακίδα τραχύμετρου.

Η συσκευή έχει την δυνατότητα ακρίβειας δεκάτων και εκατοστών του μικρόμετρου στα αποτελέσματα που προκύπτουν. Το όργανο λειτουργεί ως εξής: Ειδική ακίδα κινείται κατά μήκος ενός ευθύγραμμου τμήματος, με τη βοήθεια σερβομηχανισμού, πάνω στην επιφάνεια που θέλουμε να τραχυμετρήσουμε. Η ακίδα καταγράφει τις ανωμαλίες στην επιφάνεια και στέλνει σήμα διαφοράς δυναμικού (V) ανάλογο της κατακόρυφης μετατόπισης μιας βελόνας διαμαντιού η οποία ακολουθεί το προφίλ. Ο επεξεργαστής του οργάνου αξιοποιεί τα δεδομένα, και παρέχει στο χρήστη τα τελικά αποτελέσματα μέσω της οθόνης που διαθέτει η συσκευή. Για να είναι δυνατή η

μέτρηση της τραχύτητας της βάσης μιας οπής, δεν πρέπει το βάθος της να ξεπερνά τα 200μm, διότι η ακίδα δε μπορεί να φτάσει σε μεγαλύτερο βάθος.

Σε κάθε μέτρηση η το όργανο καταγράφει τα εξής μεγέθη:

- Ra, η οποία είναι η μέση τραχύτητα της επιφάνειας.
- Rq, η ενδεικνυόμενη τραχύτητα (RMS), που δίνεται από τη σχέση $RMS =$

$$\sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + \dots}{N}}$$

, όπου a, b, c είναι οι τεταγμένες των σημείων που ανήκουν στο προφίλ της επιφάνειας και οι προβολές τους στο επίπεδο της επιφάνειας ισαπέχουν μεταξύ τους και N είναι ο αριθμός αυτών των σημείων.

- RzDIN. Για τον υπολογισμό αυτού του μεγέθους ανιχνεύονται οι 5 μέγιστου ύψους κορυφές και οι 5 μέγιστου βάθους κοιλάδες σε ένα μήκος αναφοράς και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους.

- Rt, η οποία είναι η μέγιστη τραχύτητα της επιφάνειας (απόσταση μεταξύ μέγιστης κορυφής-βαθύτερης κοιλάδας)

- Ry. Κατά την τραχυμέτρηση, το ευθύγραμμο τμήμα στο οποίο κινείται η ακίδα διαιρείται σε 5 ίσα τμήματα. Η τιμή του Ry προκύπτει ως ο μέσος όρος των αποστάσεων μεταξύ μέγιστης κορυφής-βαθύτερης κοιλάδας των 5 αυτών τμημάτων.

- Sm, η οποία είναι η μέση απόσταση των ανωμαλιών τραχύτητας. Προφανώς, όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο καλύτερη είναι και η ποιότητα της επιφάνειας.

5.5.3 Μέτρηση Σκληρότητας Κατεργασμένης Επιφάνειας

Ακολουθεί η σκληρομέτρηση των δοκιμίων, η οποία πραγματοποιείται με την βοήθεια του σκληρομέτρου τύπου Brinell EQUOTIP 2 της εταιρείας PROCEQ. Η διαδικασία της σκληρομέτρησης περιλαμβάνει την επιτυχή δημιουργία αποτυπώματος της ακίδας της συσκευής εντός της πολύ λεπτής ζώνης κατεργασίας. Έπειτα μετρούνται οι διαγώνιοι του αποτυπώματος γεωμετρίας ρόμβου της συγκεκριμένης συσκευής. Οι τιμές των διαγώνιων χρησιμοποιούνται σε έναν αντίστοιχο τύπο αυτόματου υπολογισμού της σκληρότητας.



Εικόνα 23: Μικροσκληρόμετρο Brinell EQUOTIP 2

5.5.4 Μεταλλογραφική Ανάλυση Κατεργασμένης Επιφάνειας

Στο στάδιο της μεταλλογραφικής μελέτης των τεμαχίων απαραίτητη είναι η προετοιμασία των δοκιμών ώστε αυτά να καταστούν έτοιμα προς παρατήρηση. Πιο συγκεκριμένα, το τεμάχιο τεμαχίζεται στην μέση με την χρήση του δισκοτόμου Discotom-2 της εταιρείας Struers ώστε να μπορέσει να χωρέσει στο καλούπι εγκιβωτισμού.



Εικόνα 24: Δισκοτόμος Discotom-2.

Το καλούπι μέσα στο οποίο τοποθετείται κάθετα το τεμαχισμένο δοκίμιο είναι κυλινδρικό. Αφού τοποθετηθεί το δοκίμιο γίνεται πλήρωση του καλουπιού με ειδική ρητίνη. Η ρητίνη που χρησιμοποιείται είναι διάφανη, εποξική δύο συστατικών και η στερεοποίησή της απαιτεί περίπου 24 ώρες. Αφού στερεοποιηθεί η ρητίνη, μαζί με το δοκίμιο που εμπεριέχει, αφαιρείται από το καλούπι.



Εικόνα 25: Δοκίμια εγκιβωτισμένα στην ειδική ρητίνη.

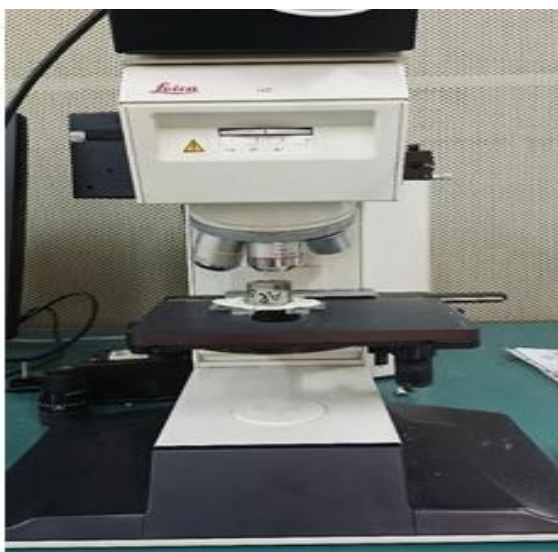
Πριν τη μελέτη στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο προηγείται η λείανση και η χημική προσβολή των δοκιμίων. Η λείανση πραγματοποιείται στο λειαντικό δίσκο DAP-V της εταιρείας Struers. Στον τροχό χρησιμοποιούνται διαδοχικά ντουκόχαρτα με πάχος κόκκων 320, 400, 800, 1000 και 2000 βαθμών. Οι στροφές ανά λεπτό του δίσκου κατά την εκχόνδριση ορίζονται στις 250 στροφές.



Εικόνα 26: Λειαντικός δίσκος DAP-V.

Η χημική προσβολή γίνεται με την χρήση ειδικού αντιδραστήριου. Το χημικό αντιδραστήριο που ήταν κατάλληλο για χρήση στην παρούσα κατεργασία ήταν ένα διάλυμα από 10gr θειικού χαλκού (CuSO_4), 50ml υδροχλωρικού οξέος (HCl) και 50ml νερού. Η δράση του διαλύματος κατά την εμβάπτιση του δοκιμίου σε αυτό, καθιστά την επιφάνεια πιο ευδιάκριτη στο οπτικό μικροσκόπιο. Η εμβάπτιση του κάθε δοκιμίου στο αντιδραστήριο διαρκεί περίπου 60seconds. Με τον τρόπο αυτό το δοκίμιο καθίσταται πλέον έτοιμο προς μελέτη.

Για την παρατήρηση χρησιμοποιείται το οπτικό στερεομικροσκόπιο DMR της εταιρείας Leica σε συνδυασμό με την ψηφιακή κάμερα DFK MKU130 της εταιρείας ImagingSource και έναν Η/Υ για απευθείας λήψεις ψηφιακών φωτογραφιών. Το δοκίμιο στερεώνεται και εξετάζεται σε μεγεθύνσεις 5x, 10x, 20x και 50x που διαθέτει η συσκευή.



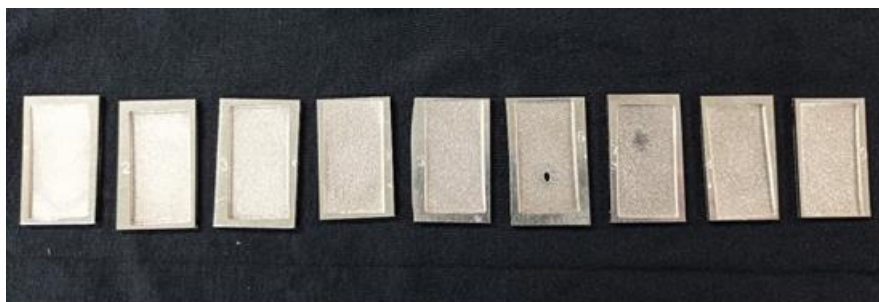
Εικόνα 27: Οπτικό στερεομικροσκόπιο DMR.

Με την παρατήρηση των δοκιμίων στο μικροσκόπιο ολοκληρώνεται η πειραματική διαδικασία.

6. Αποτελέσματα

Βασικός στόχος της σειράς των πειραμάτων που έλαβαν χώρα ήταν η μελέτη της κατεργασιμότητας του Νικελίου, δηλαδή η διερεύνηση της σχετικής ευκολίας με την οποία το Νικέλιο δύναται να κατεργαστεί από μια μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης. Σαν κριτήρια αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας λήφθηκαν οι παράμετροι απόδοσης της κατεργασίας, δηλαδή η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας εκφρασμένη μέσω της μέσης τραχύτητάς της Ra (μm) καθώς και ο ρυθμός αποβολής του υλικού MRR (mm^3/min). Επιπλέον των ανωτέρω παραμέτρων, μετρήθηκε η σκληρότητα της κατεργασμένης επιφάνειας και μελετήθηκε η μικροδομή και η μεταλλογραφία της σε οπτικό μικροσκόπιο.

Κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας το υπό μελέτη υλικό, Νικέλιο, υποβλήθηκε σε εννέα διαφορετικές συνθήκες έντασης ρεύματος και διάρκειας παλμού (συνδυασμοί 3 ρεύματα X 3 διάρκειες παλμού). Έτσι προέκυψαν εννέα υπό μελέτη δοκίμια.



Εικόνα 28: Υπό μελέτη δοκίμια Νικελίου.

Στον επόμενο πίνακα παρατίθενται οι διαφοροποιημένες για κάθε τεμάχιο πειραματικές συνθήκες της διάρκειας του παλμού και της έντασης του ρεύματος, υπό τις οποίες υποβλήθηκε το κάθε δοκίμιο:

Για μεγαλύτερη ευκολία στην ανάγνωση και ερμηνεία του εν λόγω πίνακα, επισημαίνεται ότι το συνολικό ρεύμα " J_{tot} " προκύπτει ως άθροισμα των διακοπτικών ρεύματος " J_P " και " J_T ", δηλαδή $J_{tot} = J_T + J_P$. Κάθε μονάδα ρεύματος υπολογίζεται 3 Amperes άρα η ένταση του ρεύματος κατεργασίας I_e ή $I_P = 3 \cdot J_{tot}$ (Amperes). Το I_e ρυθμίζεται άμεσα στην εργαλειομηχανή όπως επίσης και το t_p .

Πίνακας 10: Πειραματικές συνθήκες του κάθε δοκιμίου.

# Δοκιμίου	Pulse Current J_T (A)	Pulse Current J_P (A)	Pulse Current J_{tot} (A)	Pulse Current I_P (A)
1	4	0	4	12
2	4	2	6	18

3	4	5	9	26
4	4	0	4	12
5	4	2	6	18
6	4	5	9	26
7	4	0	4	12
8	4	2	6	18
9	4	5	9	26

Η ενέργεια ανά παλμό υπολογίζεται από την σχέση:

$$W_e[mJ] = I_e[A] \cdot V_p[V] \cdot t_p[\mu\text{sec}] \cdot 10^{-3}$$

Η ενέργεια παλμού, στην παρούσα πειραματική εργασία, υπολογίζεται με δεδομένο το discharge voltage $V_p = 30V$. Έτσι, για μια ενδεικτική τιμή π.χ για $J_{tot} = 9$, δηλαδή $I_e = 26A$ και $t_p = 500 \mu\text{sec}$, η ενέργεια παλμού είναι: $W_e = 26 \times 500 \times 30 / 1000 = 390 \text{ mJ}$. Ομοίως υπολογίζεται η ενέργεια παλμού και για τις υπόλοιπες τιμές έντασης ρεύματος και διάρκειας του παλμού οπότε προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 11: Ενέργεια παλμού για κάθε δοκίμιο.

# Δοκιμίου	Παράμετροι Μελέτης		
	Pulse Current I_e (A)	Pulse Duration t_p (μs)	Pulse Energy W_e (mJ)
1	12 (4+0)	100	36
2	18 (4+2)	100	54
3	26 (4+5)	100	78
4	12	300	108
5	18	300	162
6	26	300	234
7	12	500	180
8	18	500	270
9	26	500	390

6.1 Μετρήσεις Τραχύτητας Κατεργασμένης Επιφανείας

Επειδή η επιφάνεια του υλικού παρουσιάζει τοπικά διάφορες ανωμαλίες, οι μετρήσεις της τραχύτητας που πραγματοποιήθηκαν έγιναν σε διαφορετικές διευθύνσεις. Έτσι, προκειμένου να έχουμε όσο το δυνατόν γίνεται πιο αντιπροσωπευτική και συνολική εικόνα της τραχύτητας της επιφάνειας που μελετήθηκε, έγιναν τρεις μετρήσεις στην διεύθυνση κατά μήκος του ορθογώνιας γεωμετρίας του αποτυπώματος και τρεις κατά το πλάτος αυτής.

Οι μετρήσεις που προέκυψαν για κάθε δοκίμιο παρατίθενται παρακάτω:

Πίνακας 12: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 1.

ΔΟΚΙΜΙΟ #1				
Pulse Current $I_e = 12$ (A), Pulse Duration $t_p = 100$ (μ s), Pulse Energy $W_e = 36$ (mJ)				
	Ra (μ m)	Rq (μ m)	Rt (μ m)	Ry (μ m)
Κατά μήκος	4,8	5,8	29	29
	4,4	5,8	35	34
	4,6	5,8	32	29
Κατά πλάτος	4,8	6,2	31	29
	5,1	6,4	41	39
	4,4	5,6	30	30

Πίνακας 13: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 2.

ΔΟΚΙΜΙΟ #2				
Pulse Current $I_e = 18$ (A), Pulse Duration $t_p = 100$ (μ s), Pulse Energy $W_e = 54$ (mJ)				
	Ra (μ m)	Rq (μ m)	Rt (μ m)	Ry (μ m)
Κατά μήκος	5,9	7,8	44	44
	4,8	6,1	43	35
	5,8	7,6	43	39
Κατά πλάτος	5,4	4,6	31	29
	6,2	6,1	44	38
	5,1	6,4	33	30

Πίνακας 14: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 3.

ΔΟΚΙΜΙΟ #3				
Pulse Current $I_e = 26$ (A), Pulse Duration $t_p = 100$ (μ s), Pulse Energy $W_e = 78$ (mJ)				
	Ra (μ m)	Rq (μ m)	Rt (μ m)	Ry (μ m)
Κατά μήκος	5,6	7,4	46	45
	6,9	8,8	45	45
	6,8	8,4	49	42
Κατά πλάτος	5,8	7,6	53	39
	6,6	8,6	51	47
	6,4	8,2	47	45

Πίνακας 15: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 4.

ΔΟΚΙΜΙΟ #4				
Pulse Current $I_e = 12$ (A), Pulse Duration $t_p = 300$ (μ s), Pulse Energy $W_e = 108$ (mJ)				
	Ra (μ m)	Rq (μ m)	Rt (μ m)	Ry (μ m)
Κατά μήκος	5,9	7,9	55	51
	7,2	9,9	63	49
	6,8	9,8	59	57
Κατά πλάτος	8,8	10,8	60	54
	8,6	9,4	58	51
	7,8	9,8	58	58

Πίνακας 16: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 5.

ΔΟΚΙΜΙΟ #5				
Pulse Current $I_e = 18$ (A), Pulse Duration $t_p = 300$ (μ s), Pulse Energy $W_e = 162$ (mJ)				
	Ra (μ m)	Rq (μ m)	Rt (μ m)	Ry (μ m)
Κατά μήκος	8,6	10,9	61	61
	7,2	9,2	47	45
	6,6	8,1	41	39
Κατά πλάτος	7,4	10,6	57	50
	8,6	9,6	64	61
	7,8	9,1	54	47

Πίνακας 17: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 6.

ΔΟΚΙΜΙΟ #6				
Pulse Current $I_e = 26$ (A), Pulse Duration $t_p = 300$ (μ s), Pulse Energy $W_e = 234$ (mJ)				
	Ra (μ m)	Rq (μ m)	Rt (μ m)	Ry (μ m)
Κατά μήκος	8,1	9,9	53	53
	7,9	10,6	60	60
	7,6	9,6	47	45
Κατά πλάτος	9,2	8,1	48	50
	7,2	9,4	59	48
	8,2	10,8	59	55

Πίνακας 18: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 7.

ΔΟΚΙΜΙΟ #7				
Pulse Current $I_e = 12$ (A), Pulse Duration $t_p = 500$ (μ s), Pulse Energy $W_e = 180$ (mJ)				
	Ra (μ m)	Rq (μ m)	Rt (μ m)	Ry (μ m)
Κατά μήκος	6,1	7,4	38	38
	6,4	6,6	42	42
	5,8	7,4	40	38
Κατά πλάτος	6,6	9,4	57	53
	9,6	12,4	63	62
	8,8	11,4	61	55

Πίνακας 19: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 8.

ΔΟΚΙΜΙΟ #8				
Pulse Current $I_e = 18$ (A), Pulse Duration $t_p = 500$ (μ s), Pulse Energy $W_e = 270$ (mJ)				
	Ra (μ m)	Rq (μ m)	Rt (μ m)	Ry (μ m)
Κατά μήκος	7,4	9,9	53	48
	7,6	9,2	41	37
	7,6	9,4	48	41
Κατά πλάτος	8,2	9,9	54	49
	7,2	9,8	57	55
	7,6	10,6	67	67

Πίνακας 20: Μετρήσεις τραχυτήτων για το δοκίμιο 9.

ΔΟΚΙΜΙΟ #9				
Pulse Current $I_e = 26$ (A), Pulse Duration $t_p = 500$ (μ s), Pulse Energy $W_e = 390$ (mJ)				
	Ra (μ m)	Rq (μ m)	Rt (μ m)	Ry (μ m)
Κατά μήκος	7,6	9,8	52	46
	7,6	9,8	55	45
	8,2	10,4	60	60
Κατά πλάτος	11,2	13,9	67	65
	10,6	13,1	65	63
	12,2	13,8	67	67

Για κάθε τραχύτητα υπολογίστηκε ο μέσος όρος της για όλα τα δοκίμια προς κάθε διεύθυνση, είτε κατά μήκος ή κατά πλάτος του αποτυπώματος. Επιπλέον, υπολογίστηκε και ο συνολικός μέσος όρος της κάθε τραχύτητας του κάθε δοκιμίου. Παρατηρείται ότι για καθένα δοκίμιο, η μέση τιμή των κατά πλάτος του αποτυπώματος μετρήσεων των τραχυτήτων είναι αισθητά μεγαλύτερη από αυτές των κατά μήκος μετρήσεων.

Πίνακας 21: Μέσος όρος R_a τραχύτητας.

# Δοκιμίου	Pulse Current I_e (A)	Pulse Duration t_p (μ s)	Pulse Energy W_e (mJ)	M.O R_a Τραχύτητας Κατά Μήκος (μ m)	M.O R_a Τραχύτητας Κατά Πλάτος (μ m)
1	12 (4+0)	100	36	4,60	4,76
2	18 (4+2)	100	54	5,50	5,57
3	26 (4+5)	100	78	6,43	6,26
4	12	300	108	6,63	8,40

5	18	300	162	7,46	7,93
6	26	300	234	7,86	8,20
7	12	500	180	6,10	8,33
8	18	500	270	7,53	7,67
9	26	500	390	7,80	11,33

Πίνακας 22: Μέσος όρος R_q τραχύτητας.

# Δοκιμίου	Pulse Current I_e (A)	Pulse Duration t_p (μs)	Pulse Energy W_e (mJ)	M.O R_q Τραχύτητας Κατά Μήκος (μm)	M.O R_q Τραχύτητας Κατά Πλάτος (μm)
1	12	100	36	5,80	6,07
2	18	100	54	7,16	5,70
3	26	100	78	8,13	8,20
4	12	300	108	9,20	10,0
5	18	300	162	9,40	9,76
6	26	300	234	9,43	10,03
7	12	500	180	7,13	11,07
8	18	500	270	9,50	10,1
9	26	500	390	10,0	13,6

Πίνακας 23: Μέσος όρος R_t τραχύτητας.

# Δοκιμίου	Pulse Current I_e (A)	Pulse Duration t_p (μs)	Pulse Energy W_e (Mj)	M.O R_t Τραχύτητας Κατά Μήκος (μm)	M.O R_t Τραχύτητας Κατά Πλάτος (μm)
1	12	100	36	32,00	34,00
2	18	100	54	43,33	36,00
3	26	100	78	46,67	50,33
4	12	300	108	58,67	59,00
5	18	300	162	49,67	58,33
6	26	300	234	53,33	55,33
7	12	500	180	40,00	60,33

8	18	500	270	47,33	59,33
9	26	500	390	55,67	66,33

Πίνακας 24: Μέσος όρος R_y τραχύτητας.

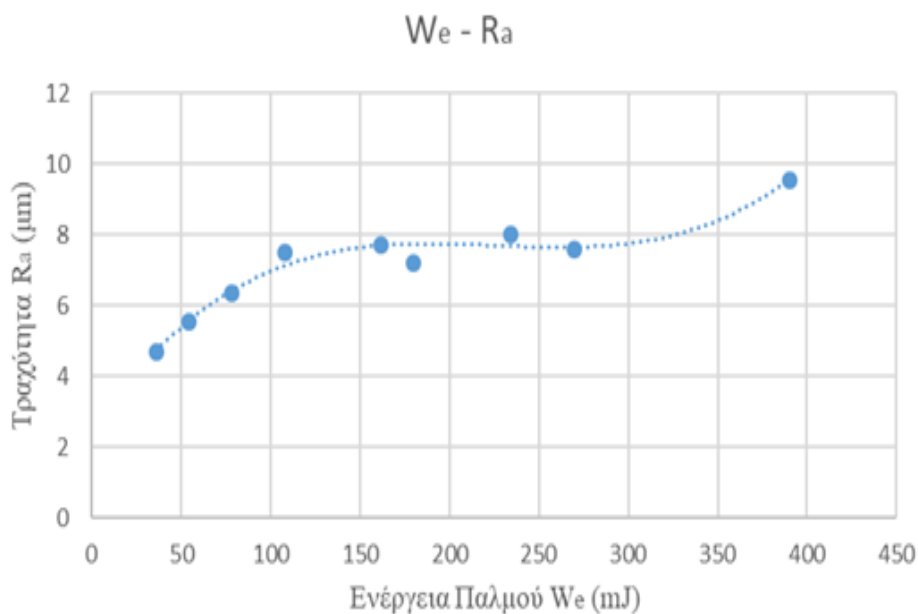
# Δοκιμίου	Pulse Current I_e (A)	Pulse Duration t_p (μ s)	Pulse Energy W_e (mJ)	M.O R_y Τραχύτητας Κατά Μήκος (μ m)	M.O R_y Τραχύτητας Κατά Πλάτος (μ m)
1	12	100	36	30,67	32,67
2	18	100	54	39,33	32,33
3	26	100	78	44,00	43,67
4	12	300	108	52,33	54,33
5	18	300	162	48,33	52,67
6	26	300	234	51,00	51,67
7	12	500	180	39,33	56,67
8	18	500	270	42,00	57,00
9	26	500	390	50,33	65,00

Πίνακας 25: Μέσος όρος τραχυτήτων.

N (#) Δοκιμίου	I_e (A)	t_p (μ s)	W_e (mJ)	R_a (μ m)	R_q (μ m)	R_t (μ m)	R_y (μ m)
1	12 (4+0)	100	36	4,68	5,93	33,00	31,66
2	18 (4+2)	100	54	5,53	6,43	39,66	35,83
3	26 (4+5)	100	78	6,35	8,16	48,50	43,83
4	12	300	108	7,52	9,60	58,83	53,33
5	18	300	162	7,70	9,58	54,00	50,50
6	26	300	234	8,03	9,73	54,33	51,83
7	12	500	180	7,22	9,10	50,16	48,00
8	18	500	270	7,60	9,80	53,33	49,50
9	26	500	390	9,56	11,80	61,00	57,66

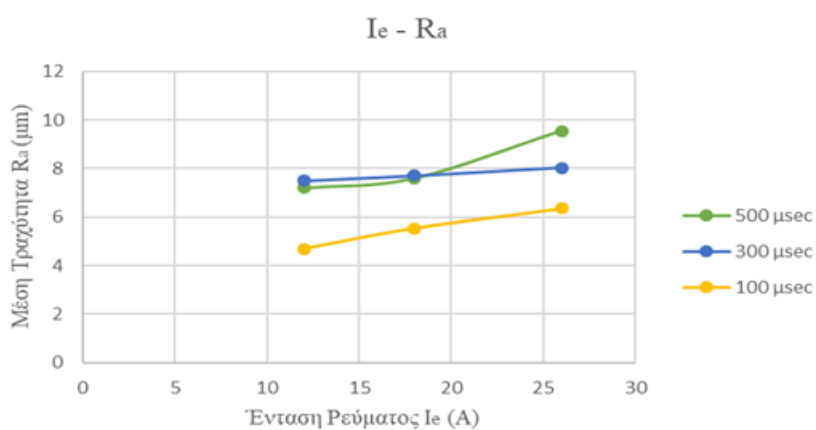
Επειδή στα πειράματα εξετάστηκαν ταυτόχρονα οι παράμετροι που αφορούν την ένταση ρεύματος κατεργασίας και τη διάρκεια παλμών, δεν είναι δυνατή η μελέτη της επίδρασης καθεμιάς από αυτές στην μέση τραχύτητα επιφανείας και στον ρυθμό αποβολής υλικού. Συνεπώς χρησιμοποιείται ένα μέγεθος που περιλαμβάνει και τις δύο προαναφερθείσες παραμέτρους, εν προκειμένω η ενέργεια ανά παλμό W_e ή E_p [mJ].

Εν συνεχεία παρατίθενται το γράφημα όπου απεικονίζεται διαγραμματικά η συσχέτιση αυτή της ενέργειας ανά παλμό με την τραχύτητα.



Διάγραμμα 10: Ενέργεια ανά παλμό σε συνάρτηση με την τραχύτητα.

Επιπλέον της προαναφερθείσας συσχέτισης, πραγματοποιήθηκε και μια συσχέτιση της τραχύτητας ταυτόχρονα με την ένταση ρεύματος του παλμού και με την διάρκεια του παλμού, η οποία απεικονίζεται στο παρακάτω γράφημα:



Διάγραμμα 11: Ένταση του ρεύματος του παλμού σε συνάρτηση με την τραχύτητα.

6.2 Υπολογισμός Ρυθμού Αποβολής Υλικού

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εύκολα διαπιστώθηκε ότι κάποιες συνθήκες κατεργασίας απέδιδαν καλύτερα από τις υπόλοιπες όσον αφορά τη χρονική διάρκεια που διαρκεί μια κατεργασία. Ως μέτρο για την ταχύτητα της κατεργασίας χρησιμοποιείται ο ρυθμός αποβολής υλικού, V_w [mm^3/min], ο οποίος δείχνει τον όγκο του υλικού που απομακρύνεται στη μονάδα του χρόνου. Δηλαδή το πηλίκο του όγκου σε mm^3 ως προς τον χρόνο κατεργασίας σε min μας δίνει τον ρυθμό αποβολής υλικού. Άρα για τον υπολογισμό του πρέπει να είναι γνωστός ο όγκος του υλικού που αφαιρέθηκε σε μια κατεργασία και η χρονική διάρκεια της κατεργασίας αυτής.

Για να υπολογιστεί ο όγκος, υπολογίστηκε το γινόμενο της επιφάνειας του ορθογώνιου αποτυπώματος επί το βάθος κοπής. Όπως προαναφέρθηκε το ορθογώνιας γεωμετρίας αποτύπωμα είναι διαστάσεων $38 \times 23 \text{ mm}$ ενώ το βάθος κοπής ποικίλει για κάθε δοκίμιο. Στις περιπτώσεις που χρειάστηκε να γίνουν πάνω από μια προσπάθειες για να διανοιχθεί το βάθος κοπής, σημειωνόταν για κάθε προσπάθεια ο χρόνος που είχε παρέλθει για τον τερματισμό της και το βάθος στο οποίο είχε φτάσει η κοπή. Έτσι, το τελικό βάθος προέκυπτε ως το άθροισμα των επιμέρους βαθών, ενώ το ίδιο έγινε και για το χρόνο.

Πίνακας 26: Συνολικό βάθος και χρόνος για κάθε δοκίμιο.

N (#)	I _e (A)	t _p (μs)	W _e (mJ)	Βάθος (μm)	Όγκος (mm ³)	Time (min)
1	12 (4+0)	100	36	1200	1048,80	260
2	18 (4+2)	100	54	1240	1083,86	150
3	26 (4+5)	100	78	1500	1311,00	25
4	12	300	108	1000	874,00	210
5	18	300	162	1200	1048,80	56
6	26	300	234	1500	1311,00	30
7	12	500	180	1200	1048,80	140
8	18	500	270	1200	1048,80	40
9	26	500	390	1200	1048,80	25

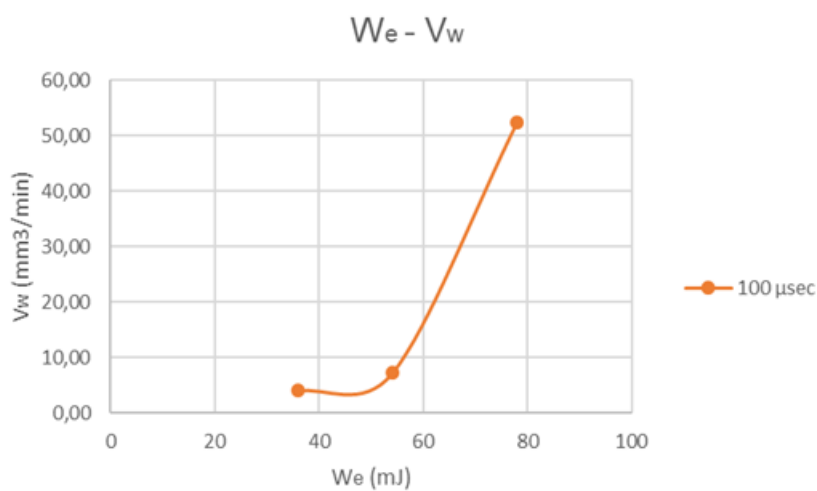
Ο συγκεκριμένος ορισμός του ρυθμού αποβολής υλικού λαμβάνει υπόψη του τη συνολική διάρκεια της κατεργασίας. Ωστόσο, επειδή η λειτουργία είναι διακοπτόμενη και άρα η μηχανή δεν αφαιρεί συνεχώς υλικό, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μόνο ο χρόνος κατά τον οποίο παράγονται σπινθήρες. Επιλέχθηκε ως αναφορά η συνολική διάρκεια της κατεργασίας, διότι μετριέται πιο εύκολα, εναλλακτικά θα έπρεπε να καταγράφονται μόνο τα χρονικά διαστήματα στα οποία παρέχει ρεύμα κατεργασίας η μηχανή, διαδικασία που χρειάζεται συνεχή επίβλεψη.

Έτσι, προέκυψε ο παρακάτω πίνακας όπου καταγράφονται οι μετρήσεις αποβολής υλικού που έγιναν στους αντίστοιχους χρόνους.

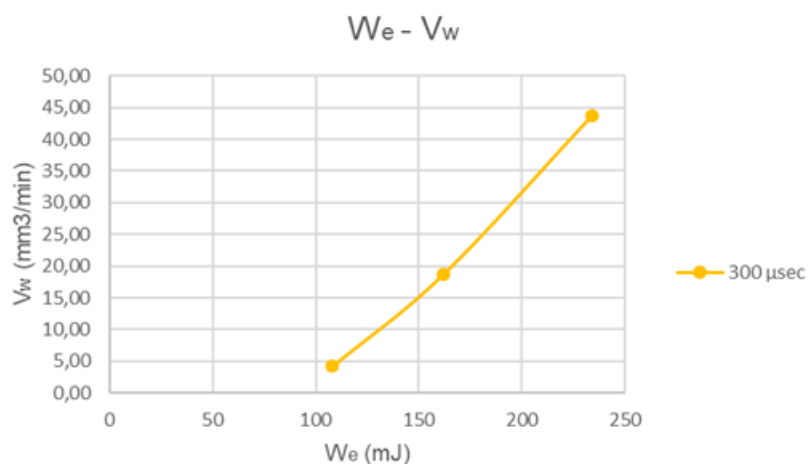
Πίνακας 27: Ρυθμός αποβολής υλικού V_w για κάθε δοκίμιο.

N (#)	I_e (A)	t_p (μ s)	W_e (mJ)	Όγκος (mm^3)	Time (min)	V_w (mm^3/min)
1	12 (4+0)	100	36	1048,80	260	4,03
2	18 (4+2)	100	54	1083,86	150	7,23
3	26 (4+5)	100	78	1311,00	25	52,44
4	12	300	108	874,00	210	4,16
5	18	300	162	1048,80	56	18,73
6	26	300	234	1311,00	30	43,70
7	12	500	180	1048,80	140	7,49
8	18	500	270	1048,80	40	26,22
9	26	500	390	1048,80	25	41,95

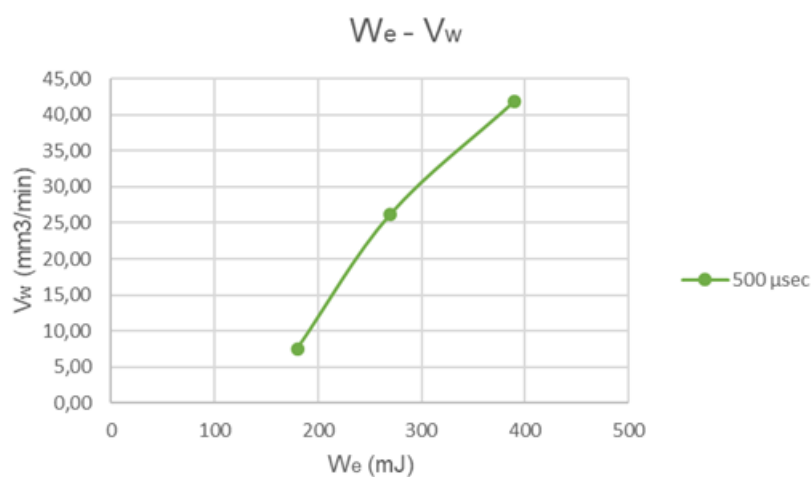
Επιπλέον, ακολούθως απεικονίζεται διαγραμματικά η συσχέτιση της ενέργειας παλμού με τον ρυθμό αποβολής υλικού τόσο ξεχωριστά για κάθε διάρκεια παλμού όσο και συγκριτικά για όλες τις διάρκειες παλμού.



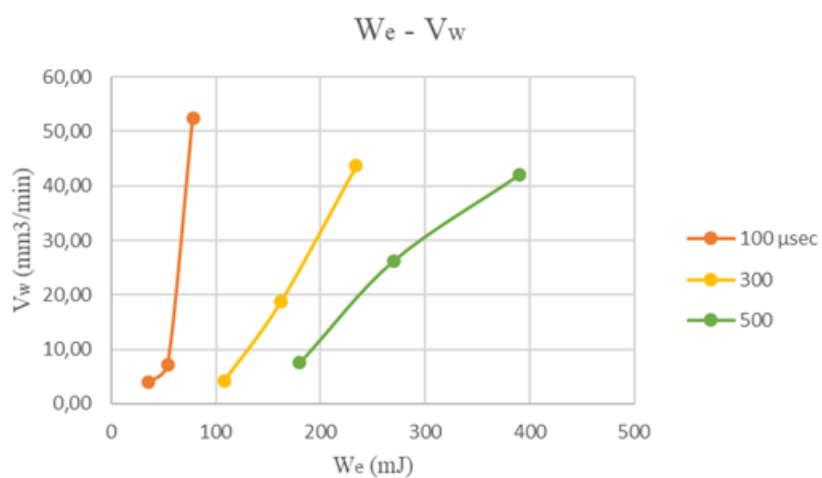
Διάγραμμα 12: Ενέργεια παλμού σε συνάρτηση με τον ρυθμό αποβολής για 100μsec.



Διάγραμμα 13: Ενέργεια παλμού σε συνάρτηση με τον ρυθμό αποβολής για 300μsec.



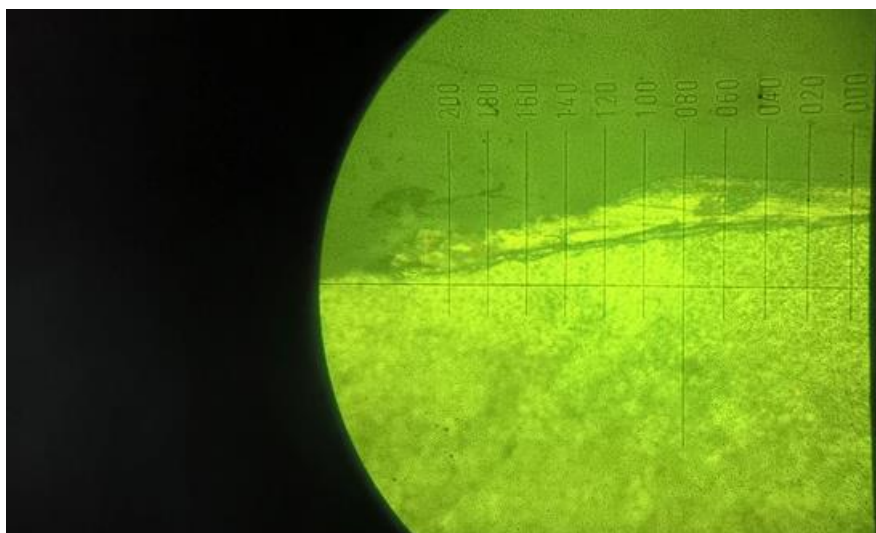
Διάγραμμα 14: Ενέργεια παλμού σε συνάρτηση με τον ρυθμό αποβολής για 500μsec.



Διάγραμμα 15: Ενέργεια παλμού σε συνάρτηση με τον ρυθμό αποβολής για 100μsec, 300μsec και 500μsec.

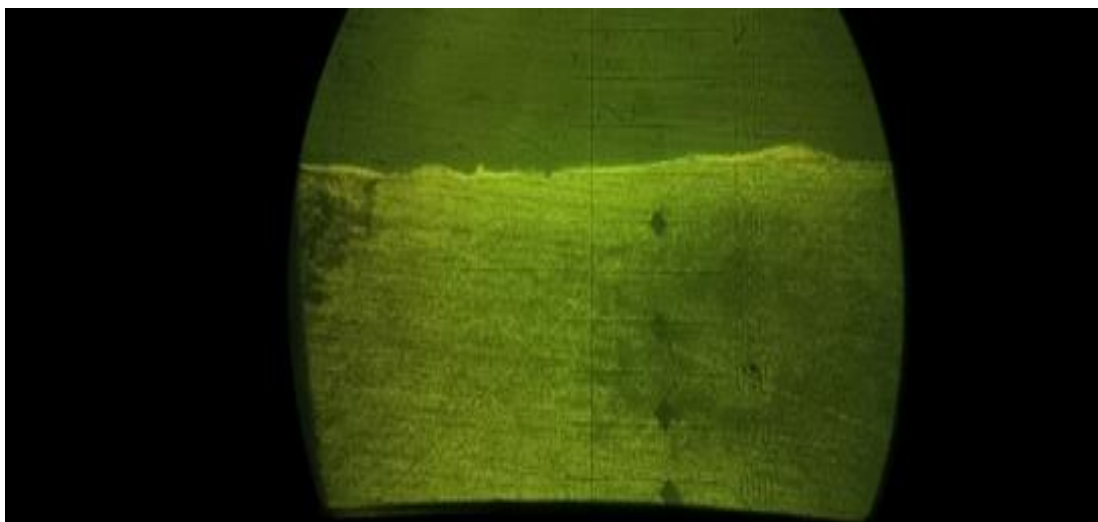
6.3 Μέτρηση Σκληρότητας Κατεργασμένης Επιφανείας

Κατά την διάρκεια μιας κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης, όπως προαναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, στην κατεργασμένη επιφάνεια δημιουργείται μια ανομοιόμορφη λεπτή ζώνη αναδιαμόρφωσης που ονομάζεται έτσι επειδή αποτελείται από τηγμένο υλικό που επαναστερεοποιείται καθώς ψύχεται. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια μέτρησης της σκληρότητας του λεπτού αυτού επαναστερεοποιημένου στρώματος ούτως ώστε να συγκριθεί με την σκληρότητα του κυρίως σώματος του υλικού κατεργασίας. Για τον λόγο αυτό έγιναν μετρήσεις σε κάθετες στις κατεργασμένες επιφάνειες τομές, ούτως ώστε να μελετηθεί η σκληρότητα του υποστρώματος. Παρακάτω δίνεται μια εικόνα του λεπτού αναδιαμορφωμένου στρώματος όπως λήφθηκε από το μικροσκληρόμετρο:



Εικόνα 29: Λήψη του στρώματος αναδιαμόρφωσης από το μικροσκληρόμετρο.

Στο πλαίσιο της προσπάθειας αυτής έγιναν μετρήσεις της σκληρότητας τόσο στο κυρίως σώμα του τεμαχίου όσο και στην ζώνη αναδιαμόρφωσης. Στο κυρίως σώμα έγιναν τέσσερις μετρήσεις στην επιφάνεια της κάθετης τομής του κάθε τεμαχίου. Οι τέσσερις αυτές μετρήσεις έγιναν είτε τυχαία μέσα στο κυρίως σώμα είτε σε σειρά κατά μήκος μιας ευθείας και με κλιμάκωση της απόστασης από την κατεργασμένη επιφάνεια, όπως φαίνεται στην παρακάτω λήψη:



Εικόνα 30: Λήψη των αποτυπωμάτων του μικροσκληρομέτρου στην κάθετη στην κατεργασμένη επιφάνεια εγκοπή.

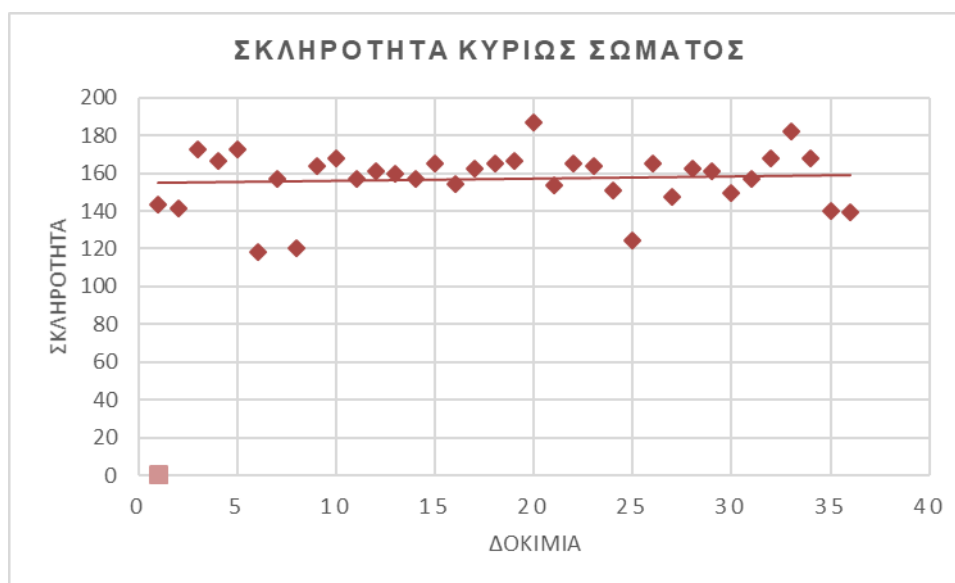
Ακολούθως, παρατίθενται σε πίνακα τα αποτελέσματα των μετρήσεων της σκληρότητας του κυρίως σώματος του δοκιμίου. Όπως προαναφέρθηκε έγιναν τέσσερις μετρήσεις σε κάθε τεμάχιο με χρησιμοποιούμενο βάρος 305gf. Η πρώτη μέτρηση για κάθε τεμάχιο, που συμβολίζεται με το γράμμα «α» (π.χ 1α, 2α κτλ), είναι η πιο κοντινή στην ζώνη αναδιαμόρφωσης, στην κατεργασμένη επιφάνεια δηλαδή. Οι επόμενες, «β», «γ», «δ» κλιμακώνονται με την «δ» να είναι η πιο απομακρυσμένη μέτρηση από την κατεργασμένη επιφάνεια.

Πίνακας 28: Τιμές σκληρότητας στο κυρίως σώμα.

ΣΗΜΕΙΑ	ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΟ				gf
	a (μm)	b (μm)	$D=(a+b)/2000$ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ Vickers : $(1,8544*1)/(D^2)$ (HV)	
1α	63	62,5	0,06275	143,6	305
1β	61,5	65	0,06325	141,4	305
1γ	56,5	58	0,05725	172,6	305
1δ	59	57,5	0,05825	166,7	305
2α	57	57,5	0,05725	172,6	305
2β	68,5	70	0,06925	117,9	305
2γ	60	60	0,06	157,1	305
2δ	68	69	0,0685	120,5	305
3α	57,5	60	0,05875	163,9	305
3β	56	60	0,058	168,1	305
3γ	60	60	0,06	157,1	305
3δ	60	58,5	0,05925	161,1	305
4α	58	61	0,0595	159,8	305
4β	59	61	0,06	157,1	305
4γ	57	60	0,0585	165,3	305

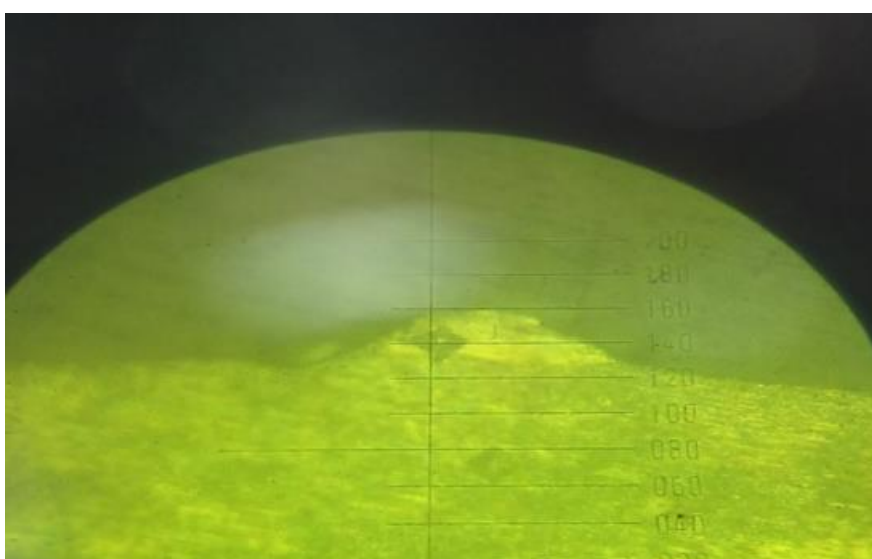
4δ	61	60	0,0605	154,5	305
5α	60	58	0,059	162,5	305
5β	60	57	0,0585	165,3	305
5γ	60	56,5	0,05825	166,7	305
5δ	58	52	0,055	187,0	305
6α	60	61,5	0,06075	153,3	305
6β	58	59	0,0585	165,3	305
6γ	59,5	58	0,05875	163,9	305
6δ	60	62,5	0,06125	150,8	305
7α	66	69	0,0675	124,1	305
7β	60	57	0,0585	165,3	305
7γ	66	58	0,062	147,1	305
7δ	58	60	0,059	162,5	305
8α	60	58,5	0,05925	161,1	305
8β	63	60	0,0615	149,5	305
8γ	60	60	0,06	157,1	305
8δ	56	60	0,058	168,1	305
9α	53	58,5	0,05575	182,0	305
9β	56	60	0,058	168,1	305
9γ	65	62	0,0635	140,3	305
9δ	65	62,5	0,06375	139,2	305

Η μέση τιμή των ανωτέρω μετρήσεων της σκληρότητας, που αφορούν το κυρίως σώμα του υποστρώματος, είναι 157,17 HV (Hardness Vickers). Διαγραμματικά η διακύμανση της σκληρότητας του κυρίως σώματος απεικονίζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 16: Διακύμανση σκληρότητας στο κυρίως σώμα των δοκιμών.

Για την μέτρηση της σκληρότητας της λεπτής ζώνης αναδιαμόρφωσης, χρησιμοποιήθηκε το μικρότερο βάρος των 55gf. Ο λόγος για τον οποίο έγινε αυτή η αλλαγή είναι ότι με το βάρος των 305gf που χρησιμοποιήθηκε στο μικροσκληρόμετρο για το κυρίως σώμα, προκύπτει ένα ρομβικής γεωμετρίας αποτύπωμα του οποίου οι διαγώνιοι είναι μεγαλύτερες σε μήκος από το πάχος της ζώνης αναδιαμόρφωσης. Έτσι, με σκοπό να προκύψει ένα μικρότερο αποτύπωμα, εντός της ζώνης, χρησιμοποιήθηκε το μικρότερο βάρος των 55gf του οποίου οι διαγώνιοι του αποτυπώματος είναι μικρότερες σε μήκος από το πάχος της ζώνης. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται μια εντός ζώνης μέτρηση, όπως λήφθηκε από το μικροσκληρόμετρο:



Εικόνα 31: Λήψη του αποτυπώματος του μικροσκληρομέτρου εντός του επαναστερεοποιημένου στρώματος.

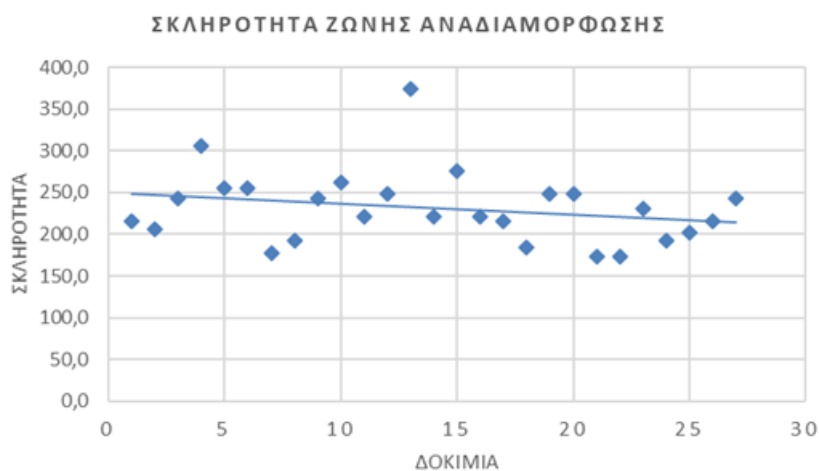
Στην ζώνη αναδιαμόρφωσης, λόγω της δυσκολίας στην λήψη μέτρησης εντός της ζώνης εξαιτίας του πολύ λεπτού πάχους της, έγιναν τρεις μετρήσεις στην κάθετη επιφάνεια τομής του κάθε τεμαχίου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της σκληρότητας της ζώνης επαναστερεοποίησης παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 29: Τιμές σκληρότητας στην ζώνη αναδιαμόρφωσης.

Ζώνη Αναδιαμόρφωσης	ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΟ				
	a (μm)	b (μm)	$D=(a+b)/2000$ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ Vickers : $(1,8544*1)/(D^2)$ (HV)	gf
1α	19,5	24	0,02175	215,6	55
1β	23	21,5	0,02225	206,0	55
1γ	21	20	0,0205	242,7	55
2α	19,5	17	0,01825	306,2	55

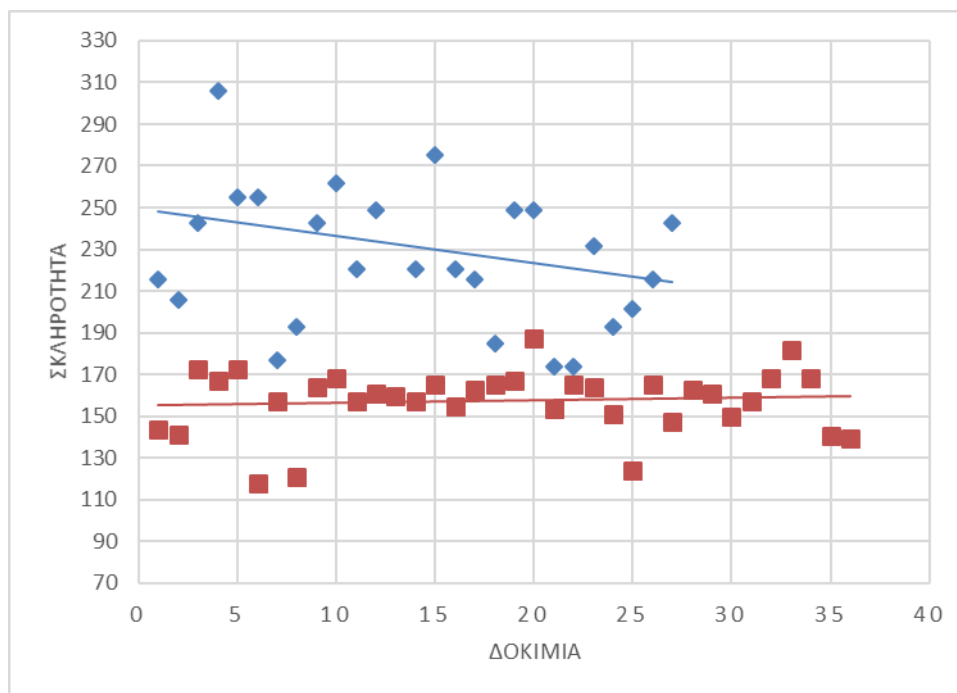
2β	20	20	0,02	255,0	55
2γ	19	21	0,02	255,0	55
3α	24	24	0,024	177,1	55
3β	23	23	0,023	192,8	55
3γ	21	20	0,0205	242,7	55
4α	22	17,5	0,01975	261,5	55
4β	18	25	0,0215	220,6	55
4γ	20,5	20	0,02025	248,7	55
5α	15	18	0,0165	374,6	55
5β	20	23	0,0215	220,6	55
5γ	19	19,5	0,01925	275,2	55
6α	21	22	0,0215	220,6	55
6β	18,5	25	0,02175	215,6	55
6γ	24	23	0,0235	184,7	55
7α	18	22,5	0,02025	248,7	55
7β	17,5	23	0,02025	248,7	55
7γ	22	26,5	0,02425	173,4	55
8α	25	23,5	0,02425	173,4	55
8β	21	21	0,021	231,3	55
8γ	24	22	0,023	192,8	55
9α	23	22	0,0225	201,5	55
9β	18,5	25	0,02175	215,6	55
9γ	21	20	0,0205	242,7	55

Η μέση τιμή των ανωτέρω μετρήσεων της σκληρότητας, που αφορούν την ζώνη αναδιαμόρφωσης του υποστρώματος, είναι 198,91 HV (Hardness Vickers). Διαγραμματικά, η διακύμανση της σκληρότητας της ζώνης αναδιαμόρφωσης φαίνεται παρακάτω:



Διάγραμμα 17: Διακύμανση της σκληρότητας στην ζώνη αναδιαμόρφωσης.

Επιπλέον, παρατίθεται και το παρακάτω διάγραμμα, όπου απεικονίζονται ταυτόχρονα η σκληρότητα τόσο του κυρίως σώματος του τεμαχίου, όσο και της ζώνης αναδιαμόρφωσης. Όπως διαπιστώνεται, οι τιμές της σκληρότητας στην λεπτή ζώνη αναδιαμόρφωσης (μπλε κουκίδες) είναι μεγαλύτερες από τις τιμές της σκληρότητας στο κυρίως σώμα (κόκκινες κουκίδες).



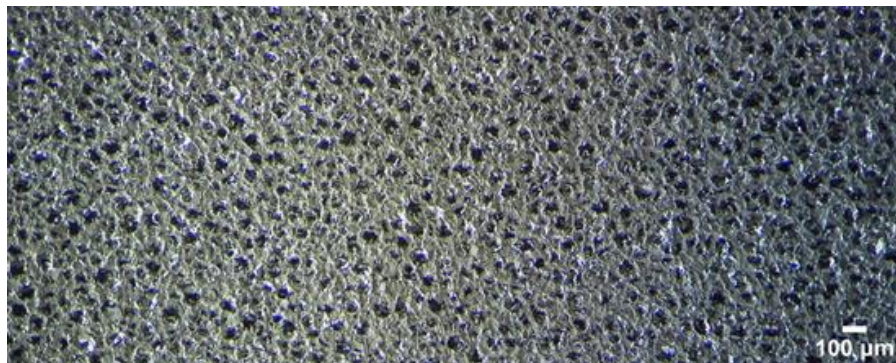
Διάγραμμα 18: Απεικόνιση των τιμών της σκληρότητας στην ζώνη αναδιαμόρφωσης (μπλε κουκίδες) σε σύγκριση με τις τιμές της σκληρότητας στο κυρίως σώμα (κόκκινες κουκίδες).

6.4 Χαρακτηρισμός Μικροδομής Κατεργασμένης Επιφάνειας

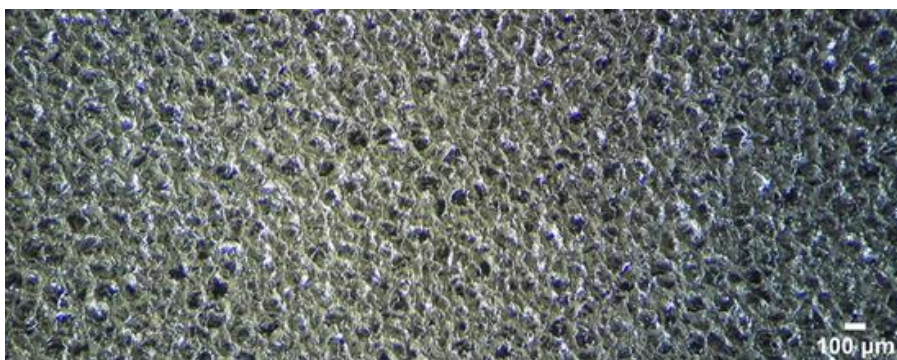
Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία της παρατήρησης των δοκιμίων που πραγματοποιήθηκε σε οπτικό στερεομικροσκόπιο. Στο πλαίσιο της μελέτης των δοκιμίων, παρατηρήθηκε τόσο η κατεργασμένη επιφάνεια των δοκιμίων όσο και το υπόστρωμα του τεμαχίου. Η μελέτη υλοποιήθηκε με την βοήθεια του οπτικού στερεομικροσκοπίου της εταιρείας Leica, που διαθέτει φακούς για μεγεθύνσεις 5x, 10x, 20x και 50x καθώς και μια λάμπα μεταβλητής στάθμης φωτεινότητας, η οποία βελτίωσε κατάλληλα την ποιότητα των εικόνων που λήφθηκαν. Οι εικόνες δέχτηκαν περαιτέρω επεξεργασία στα λογισμικό επεξεργασίας εικόνας ImageJ και τοποθετήθηκε κλίμακα αναφοράς, η οποία προέκυψε έπειτα από κατάλληλους υπολογισμούς που περιελάμβαναν στοιχεία που παρείχε ο κατασκευαστής για τους φακούς του στερεομικροσκοπίου, σε συνυπολογισμό με την ανάλυση σε εικονοστοιχεία (pixels) των εικόνων που λήφθηκαν.

6.4.1 Τοπογραφία Επιφανείας

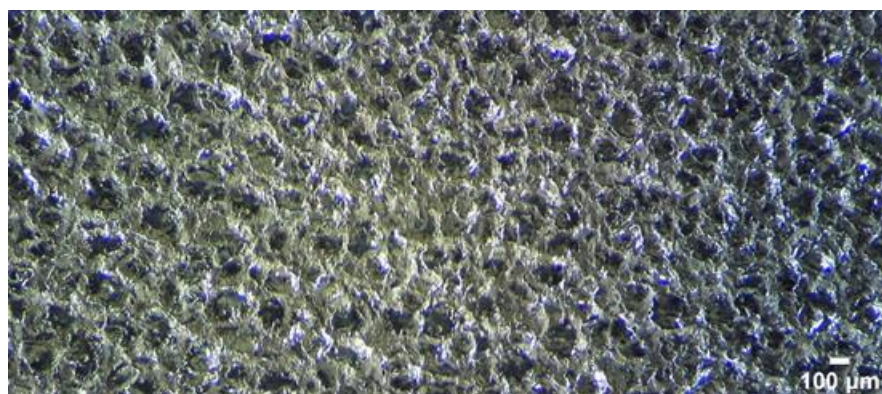
Αρχικά, αφού καθαρίστηκε το δοκίμιο και πριν τον εγκιβωτισμό του στην ρητίνη, λήφθηκαν κάποιες πρώτες φωτογραφίες της κατεργασμένης επιφάνειας με σκοπό να αντληθούν περισσότερα στοιχεία για την τοπογραφία της.



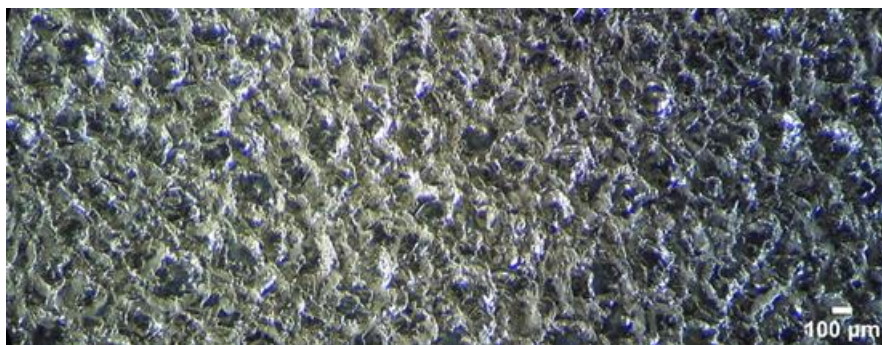
Εικόνα 32: Τοπογραφία επιφάνειας δοκιμίου 1.



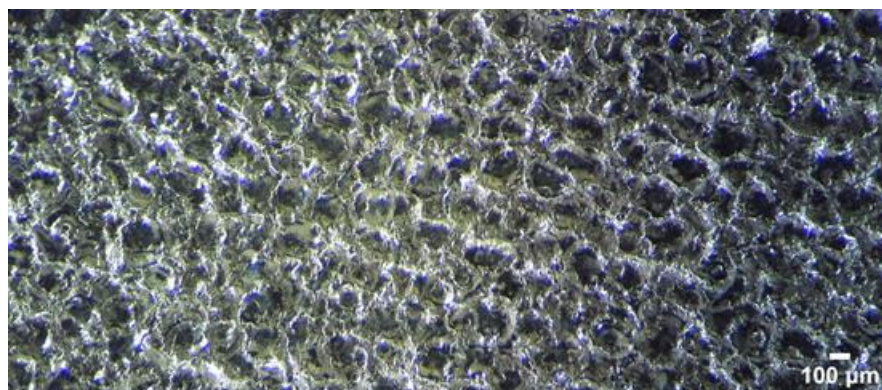
Εικόνα 33: Τοπογραφία επιφάνειας δοκιμίου 3.



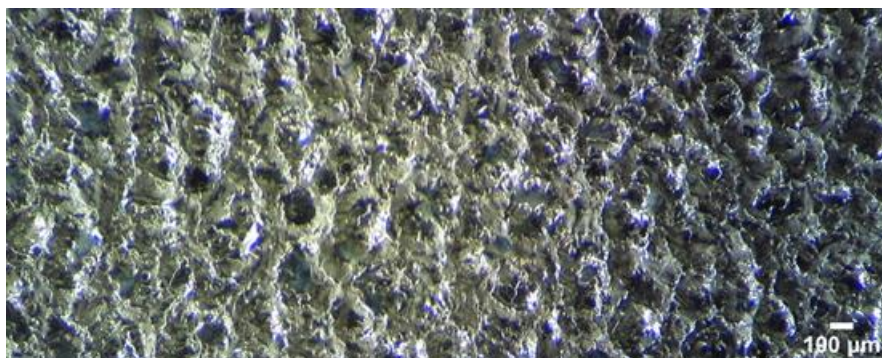
Εικόνα 34: Τοπογραφία επιφάνειας δοκιμίου 4.



Εικόνα 35: Τοπογραφία επιφάνειας δοκιμίου 6.



Εικόνα 36: Τοπογραφία επιφάνειας δοκιμίου 7.



Εικόνα 37: Τοπογραφία επιφάνειας δοκιμίου 9.

Σε αυτό το πρώτο στάδιο παρατήρησης, στο κάθε δοκίμιο, διακρίνεται μια ανομοιομόρφη επιφάνεια που αποτελείται από κρατήρες αλλά και «βουνά». Γενικά, οι επιφάνειες που έχουν υποστεί κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης είναι «θαμπές» (dull appearance) και παρουσιάζουν μια «άτακτη» κατανομή κρατήρων (arbitrary distribution) που δημιουργούνται από τις ηλεκτρικές εκκενώσεις. Επιπλέον, στην επιφάνεια παρατηρούνται και «κορυφογραμμές» (ridges) οι οποίες σχηματίζονται από τη ροή τηγμένου υλικού καθώς και σφαιρίδια - θύλακες (globules and rockmarks) σχηματιζόμενοι από εγκλωβισμένα αέρια που απελευθερώνονται από το τηγμένο υλικό προτού αυτό επαναστερεοποιηθεί απότομα.

Η κατεργασμένη επιφάνεια αποτελείται από αλληλοεπικαλυπτόμενους κρατήρες που σχηματίζονται ως αποτέλεσμα των πολύ σύντομων χρονικά ηλεκτρικών εκκενώσεων που λαμβάνουν μέρος κατά την κατεργασία. Το μέγεθος και το σχήμα τους εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού του τεμαχίου, του ηλεκτροδίου, του διηλεκτρικού μέσου, καθώς και από τις παραμέτρους κατεργασίας, όπως την ένταση ρεύματος κατεργασίας και τη διάρκεια του παλμού εκκένωσης. Σαν πρακτικός κανόνας, συνήθως η αύξηση της διάρκειας του παλμού εκκένωσης οδηγεί σε κρατήρες μεγαλύτερης διαμέτρου και η αύξηση του ρεύματος κατεργασίας οδηγεί σε κρατήρες μεγαλύτερου βάθους.

Γενικά παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει η ένταση του ρεύματος καθώς και η διάρκεια του παλμού, τόσο πιο αδρή και θαμπή γίνεται η επιφάνεια του δοκιμίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι με την αύξηση των προαναφερθεισών παραμέτρων δημιουργούνται κρατήρες μεγαλύτερης διαμέτρου καθώς και πιο έντονες κορυφογραμμές, δηλαδή οι φθορές του υλικού σημειώνουν μια σταδιακή κλιμάκωση. Η αύξηση των φθορών σε συνάρτηση με την αύξηση της διάρκειας του παλμού, οφείλεται αφ' ενός στο ότι μεγαλύτερη διάρκεια εκκένωσης σημαίνει σύγκρουση περισσότερων ιόντων με την επιφάνεια του υλικού, αφ' ετέρου στο ότι φαινόμενα όπως οι εκκενώσεις από την παράπλευρη επιφάνεια και οι διαχύσεις φορτίου είναι πιο έντονα. Παρόμοια αποτελέσματα καταγράφονται και λόγω αύξησης της ενέργειας του παλμού.



Εικόνα 38: Σταδιακή αύξηση της θαμπάδας των δοκιμίων.

Παρατηρούμε πως η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης δημιουργεί τοπικές καταστροφές στο υλικό, οι οποίες περιλαμβάνουν κρατήρες, ρωγμές και αποκολλησεις στρωμάτων γύρω από το χείλος της κοπής. Στο Δοκίμιο 1 (12A, 100μsec, 36mJ) οι καταστροφές αυτές δεν είναι ιδιαίτερα αισθητές. Αντίθετα στο Δοκίμιο 6 (26A, 300μsec, 234mJ) η εικόνα των καταστροφών γύρω από την οπή είναι πολύ έντονη. Η διαφορά αυτή στην θαμπάδα της κατεργασμένης επιφάνειας, στην τραχύτητά της και στο μέγεθος των κρατήρων, είναι διακριτή ακόμα και με γυμνό μάτι. Γενικά παρατηρούμε πως όσο κλιμακώνονται τα φαινόμενα λόγω της

αύξησης της ενέργειας, επειδή μεγαλώνει τόσο η διάρκεια του παλμού όσο και της έντασης του ρεύματος, τόσο πιο αξιοσημείωτες γίνονται οι φθορές του υλικού, ακολουθώντας και αυτές μια σταδιακή κλιμάκωση από το πρώτο έως και το τελευταίο δοκίμιο.

Συμπερασματικά, οι παράγοντες, που επηρεάζουν το μέγεθος των κρατήρων και κατ' επέκταση και τη μορφολογία της επιφάνειας είναι η διάρκεια του παλμού, η ένταση ρεύματος, οι θερμικές ιδιότητες του υλικού και η σύσταση του διηλεκτρικού μέσου. Ο όγκος του κρατήρα εξαρτάται από την ενέργεια ανά παλμό με τον χρόνο παλμού και την ένταση ρεύματος να έχουν διακριτές επιπτώσεις στα χαρακτηριστικά του κρατήρα (διάμετρο και βάθος αντίστοιχα). Ως γενικός κανόνας μπορεί να ειπωθεί ότι ο χρόνος παλμού επιτρέπει στην στήλη πλάσματος να «επεκταθεί» σχηματίζοντας κρατήρες μεγάλης διαμέτρου, ενώ η ένταση ρεύματος επηρεάζει σημαντικά το βάθος του κρατήρα. Με αυτά υπόψιν μπορεί να αποκτηθεί μια «αίσθηση» για το πώς σχετίζεται η τραχύτητα επιφανείας με τις συνθήκες κατεργασίας, με το ακριβές πάντως σχήμα των κρατήρων να μην είναι συνήθως κυκλικό. Η απόκλιση αυτή εξαρτάται κυρίως από την ενέργεια του παλμού με παλμούς μικρότερους των 50[μJ] να διατηρούν κυκλικό σχήμα και να έχουν πιο «καλοσχηματισμένα» όρια. Το βάθος των κρατήρων παραμένει σε τιμές ρεαλιστικές, ακόμα και για τις προσομοιώσεις με υψηλούς χρόνους παλμού. Η διάμετρος του κρατήρα είναι πάντα μεγαλύτερη του βάθους.

6.4.2 Μικροδομή Υποστρώματος

Σε αυτό το στάδιο παρατήρησης μελετήθηκε η δομή τόσο της κατεργασμένης επιφάνειας όσο και του υποστρώματος του κάθε δοκιμίου. Για τον λόγο αυτό τα δοκίμια τεμαχίστηκαν στην μέση με μια εγκάρσια τομή κάθετη στην επιφάνειά τους. Έπειτα καθαρίστηκαν και στερεοποιήθηκαν εντός μιας ειδικής ρητίνης που να διευκολύνει την παρατήρησή τους στο οπτικό στερεομικροσκόπιο. Απαραίτητη προϋπόθεση ως προετοιμασία πριν την τοποθέτηση των δοκιμίων στο οπτικό στερεομικροσκόπιο ήταν η λείανσή τους με διάφορα υαλόχαρτα.

Ακολούθησαν λήψεις της επιφάνειας εγκοπής με την βοήθεια των διαφόρων φακών του οπτικού στερεομικροσκοπίου (5x, 10x, 20x, 50x). Η πρώτη παρατήρηση ήταν ότι στην επιφάνεια επεξεργασίας όπου έλαβαν μέρος οι ηλεκτρικές εκκενώσεις είχε διαμορφωθεί ένα στρώμα αναδιαμόρφωσης από το υλικό που επαναστερεοποιείται, που οφείλεται στον υψηλής ενέργειας σπινθήρα που παράγεται στην διεπιφάνεια εργασίας μεταξύ εργαλείου - υλικού. Σε ορισμένα σημεία δεν

εμφανίζεται καθόλου, ενώ σε ορισμένα άλλα σχηματίζει λοφίσκους. Η διαδικασία επαναστερεοποίησης του τηγμένου υλικού δεν είναι πάντως απλή, καθώς η άνω επιφάνεια ψύχεται λόγω συναγωγής, ενώ η κάτω λόγω αγωγής, δημιουργώντας έτσι έντονες θερμοκρασιακές διαφοροποιήσεις. Αναλυτικότερα, στα πρώτα δοκίμια, σε καταστάσεις δηλαδή όπου εφαρμόστηκαν μικρότερα ποσά ενέργειας παλμού, στην επιφάνεια αποδόθηκε ένα λεπτό ασυνεχές στρώμα αναδιαμόρφωσης και παράχθηκε μια αφεγάδιαστη κατεργασμένη επιφάνεια με μεγάλη ακρίβεια. Στα επόμενα δοκίμια, καθώς η ενέργεια παλμού αυξήθηκε σταδιακά, παρατηρήθηκε αντίστοιχα ότι το στρώμα αναδιαμόρφωσης ήταν πιο εμφανές και εντονότερο, παρουσίαζε δηλαδή μια κλιμακωτή αύξηση του πάχους του όπως επίσης και μεγαλύτερη συνέχεια της δομής του διατηρώντας όμως παρόμοιο βαθμό ανομοιομορφίας.



Εικόνα 39: Απεικόνιση του λεπτού στρώματος αναδιαμόρφωσης.

6.4.3 Μικρορωγμές

Οι επιφανειακές ρωγμές είναι ατέλειες που προκαλούνται λόγω πολύ υψηλών θερμοκρασιών, καθώς και διαφορών πίεσης και τάσης σε διάφορα σημεία της επιφάνειας. Η ύπαρξή τους υποβαθμίζει τις μηχανικές και τις χημικές ιδιότητες της κατεργασμένης επιφάνειας, συνεπώς είναι ανεπιθύμητος ο σχηματισμός τους. Οι παράμετροι κατεργασίας που επηρεάζουν την πιθανότητα σχηματισμού τους περιλαμβάνουν τη διάρκεια του παλμού εκκένωσης, το ρεύμα κατεργασίας καθώς και τις ιδιότητες του υλικού τεμαχίου, ηλεκτροδίου και του διηλεκτρικού υγρού.

Η τοπογραφία του δικτύου ρωγμών δεν είναι ικανή από μόνη της να περιγράψει επαρκώς το μηχανισμό ρωγμάτωσης, καθώς πρόκειται για ένα σύνθετο φαινόμενο που εμπλέκει την αλληλεπίδραση της επιφάνειας του τεμαχίου με το διηλεκτρικό και το ηλεκτρόδιο. Η πιθανότητα εμφάνισης ρωγμών αυξάνεται με το συνδυασμό υψηλού

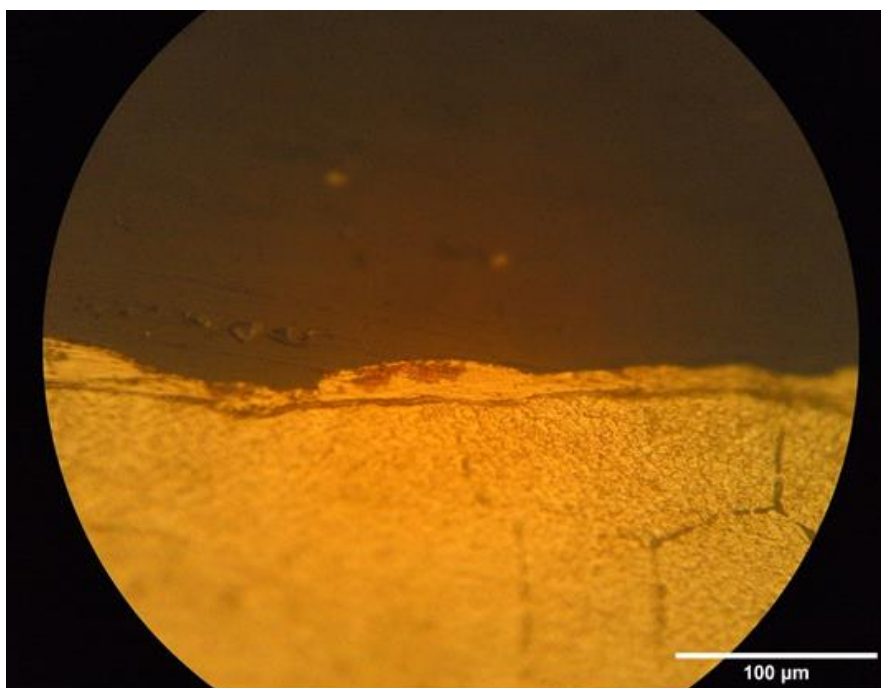
χρόνου διάρκειας παλμού και χαμηλού ρεύματος κατεργασίας, διότι δημιουργείται επιφάνεια με κρατήρες μεγάλης διαμέτρου και μικρού βάθους, κάτω από τους οποίους υπάρχει ένα μικρό υπόστρωμα λιωμένου υλικού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία προφίλ τάσεων με μεγάλη απόκλιση. Στον διαφορισμό τάσεων που διευκολύνουν το σχηματισμό ρωγμών συμβάλλει ακόμα και η στερεοποίηση λιωμένων κοιλοτήτων.

Η παρατήρηση της ύπαρξης ρωγμών αναφέρεται στο κυρίως υλικό που έρχεται άμεσα σε επαφή με το επαναστερεοποιημένο στρώμα. Η επαναστερεοποιημένη ζώνη αποτελείται από διάφορες μικροσκοπικές υποζώνες ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας. Το τηγμένο υλικό κατά τη στερεοποίησή του συρρικνώνεται, συστέλλεται περισσότερο από το υπόλοιπο αναπτύσσοντας έτσι τοπικά τάσεις, οι οποίες όταν ξεπεράσουν το όριο αντοχής του υλικού εξελίσσονται σε ρωγμές. Μελέτες έχουν δείξει ότι αυξάνοντας την ενέργεια ανά παλμό αυξάνεται και η πιθανότητα να ανάπτυξης ρωγμών, χωρίς όμως να αποτελεί η συγκεκριμένη συσχέτιση ντετερμινιστικό και καθολικό κανόνα. Πειραματικά, στην παρούσα εργασία, διαπιστώθηκε ύπαρξη ρηγματώσεων σε όλα τα δοκίμια.

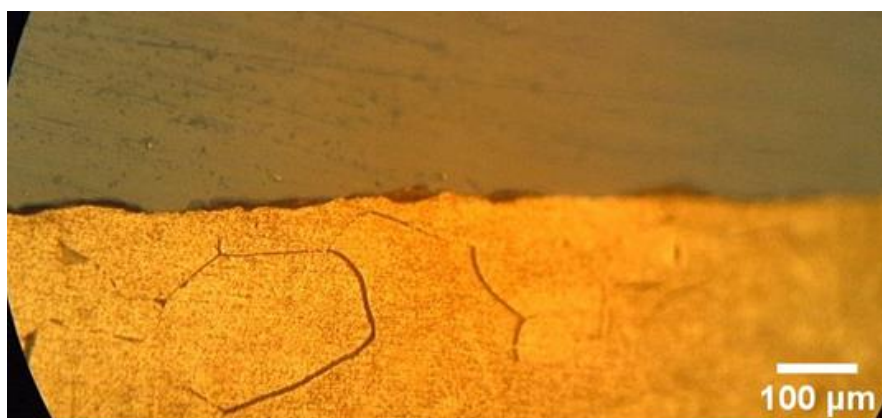
Ρεύματα υψηλής έντασης, όπως έχει προαναφερθεί, σχηματίζουν βαθύτερους κρατήρες με παχύτερες επαναστερεοποιημένες περιοχές ως αποτέλεσμα της εκτίναξης τηγμένου υλικού στα όρια των κρατήρων κατά το πέρας του παλμού. Στις περιοχές αυτές αναπτύσσονται ισχυρές τάσεις μετασχηματισμού (transformational stress). Αντίθετα, μεγάλης χρονικής διάρκειας παλμοί δημιουργούν μεγαλύτερους σε διάμετρο κρατήρες, μικρού βάθους, με το ρυθμό εκτίναξης υλικού στα όριά τους να είναι περιορισμένος. Το τηγμένο υλικό στο κέντρο του κρατήρα σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα, το οποίο ψύχεται, στερεοποιείται και συρρικνώνεται ταχύτατα και «γρηγορότερα» από το υπόλοιπο υλικό. Οι παραπάνω μηχανισμοί περιγράφουν συνοπτικά τα αίτια δημιουργίας ρωγμών στην κατεργασμένη επιφάνεια, τόσο για υψηλής έντασης ρεύματα, όσο και για μεγάλους χρόνους παλμού.

Η περιοχή αυτή αλληλοεπιδρά έντονα με τα υλικά του ηλεκτροδίου και του διηλεκτρικού μέσου, και ως εκ τούτου, εντός της συγκεκριμένης ζώνης συναντώνται ρηγματώσεις καθώς και διάφορα κραματικά στοιχεία. Η διάρκεια παλμών, η ένταση ρεύματος, το υλικό του τεμαχίου και οι ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου, είναι οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την πιθανότητα σχηματισμού ρωγμών στην κατεργασμένη επιφάνεια. Η ταχεία στερεοποίηση του τηγμένου υλικού δημιουργεί ισχυρές τάσεις συστολής (contraction stress), σε ορισμένες περιπτώσεις υψηλότερες του ορίου θραύσης του υλικού. Η πιθανότητα για ρηγμάτωση αυξάνεται για τους

μεγάλους χρόνους παλμών, οι οποίοι δημιουργούν μεγάλους κρατήρες και για χαμηλή ένταση ρεύματος, όπου το «στρώμα» τηγμένου και επαναστερεοποιημένου υλικού είναι πολύ λεπτό με αποτέλεσμα τη μεγάλη κλίση αναπτυσσόμενων τάσεων. Τέλος, η αλληλεπίδραση της κατεργαζόμενης επιφάνειας με το διηλεκτρικό μέσο και το υλικό του ηλεκτροδίου αποτελεί σημαντική παράμετρο στην δημιουργία ρωγμών. Οι ανωτέρω ρωγμές διακρίνονται στις ακόλουθες λήψεις που έγιναν με διάφορους φακούς.



Εικόνα 40: Λήψη ρωγμών στο υπόστρωμα του δοκιμίου.



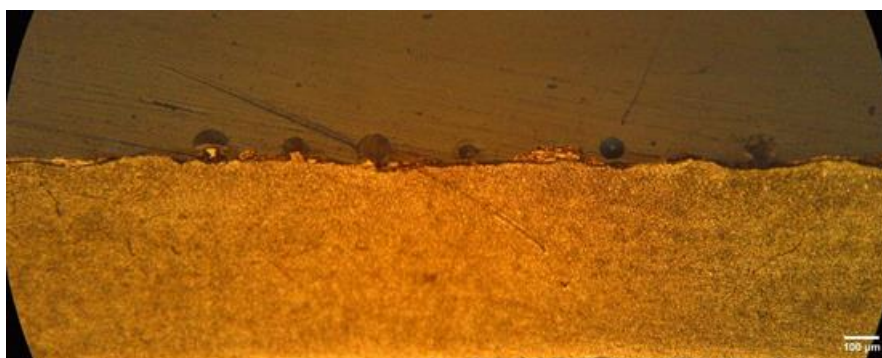
Εικόνα 41: Λήψη ρωγμών στο υπόστρωμα του δοκιμίου.

Στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης, τόσο το έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο όσο και το υλικό του ηλεκτροδίου, όπως έχει διατυπωθεί και προηγουμένως, επηρεάζουν ιδιαίτερα τη μικροδομή της επαναστεροποιημένης περιοχής και τις φάσεις που συναντώνται σε αυτή. Οι ρωγμές εσωτερικά της ζώνης είναι ένδειξη υψηλών εφελκυστικών τάσεων μετασχηματισμού, οι οποίες εξελίσσονται λόγω της

παρουσίας παραμενουσών τάσεων. Τέλος, η ύπαρξη εγκλεισμάτων σε ρωγμές με βάθος οφείλεται στο ότι οι συγκεκριμένες ρωγμές, κατά πάσα πιθανότητα, σχηματίστηκαν κατά τα πρώτα στάδια στερεοποίησης του τηγμένου υλικού.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι τα αίτια εμφάνισης των ρωγμών είναι οι πολύπλοκοι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα στην ζώνη του επαναστερεοποιημένου υλικού πρωτίστως, αλλά και στη θερμικά επηρεασμένη περιοχή δευτερευόντως. Περιλαμβάνουν την ανάπτυξη τάσεων κυρίως λόγω: συρρίκνωσης του υλικού κατά της στερεοποίησης του, την ύπαρξη έντονης κλίσης θερμοκρασίας καθώς υπάρχει ταυτόχρονη ψύξη με αγωγή και συναγωγή.

Τελευταία παρατήρηση είναι η ύπαρξη στην επιφάνεια κατεργασίας φυσαλίδων με την μορφή θηλάκων (rockmarks) που έχουν διαμορφωθεί σαν σφαιρίδια (globules) κατά την διάρκεια της ηλεκτρικής εκκένωσης. Πρόκειται για ευδιάκριτα μικρά κομμάτια και σφαιρίδια επαναστερεοποιημένου υλικού πάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια που σχηματίζονται από εγκλωβισμένα αέρια που απελευθερώνονται από το τηγμένο υλικό, προτού αυτό στερεοποιηθεί απότομα και συσσωματώνονται σαν σε ομάδες - φυλές μικροσκοπικών αυγών ακάρεων πάνω στην επιφάνεια κατεργασίας.



Εικόνα 42: Λήψη φυσαλίδων ως «θυλάκων» στην κατεργασμένη επιφάνεια.



Εικόνα 43: Λήψη φυσαλίδας ως «θύλακα» στην κατεργασμένη επιφάνεια.

Συνοπτικά παρατηρούμε ότι η επιφάνεια της κατεργασίας είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό ανομοιομορφη και έχει σχηματιστεί από επαλληλίες κρατήρων και συσσωρευμένου υλικού. Παρατηρούμε επίσης πως η ανομοιομορφία είναι πολύ μεγαλύτερη στα τελευταία δοκίμια σε σύγκριση με τα πρώτα. Το γεγονός αυτό δηλώνει ότι με αύξηση της έντασης του ρεύματος έχουμε πιο εκτεταμένες καταστροφές. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της ενέργειας εκκένωσης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μια πιο βίαιη κατεργασία. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει επίσης ότι η μεγαλύτερη ένταση ρεύματος οδήγησε σε αύξηση της μέσης τραχύτητας επιφανείας R_a όπως εξίσου και στο πάχος του επηρεαζόμενου υποστρώματος. Η συσσώρευση του υλικού οφείλεται πιθανότατα στην καύση του υλικού και του διηλεκτρικού σε ορισμένα σημεία, ως αποτέλεσμα της υψηλής ενέργειας και των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Τέλος, στην ανομοιομορφία της επιφάνειας συντελεί και το φαινόμενο της τήξης του υλικού, το οποίο είναι πιο έντονο στα υψηλά ρεύματα. Τμήμα του τηγμένου υλικού, το οποίο δεν απομακρύνεται από το τεμάχιο, ρέει ακανόνιστα στη βάση της οπής και στερεοποιείται σε τυχαία σημεία, δημιουργώντας μεγάλη τραχύτητα. Οι φθορές που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του υλικού μπορούν να δημιουργήσουν συγκέντρωση τάσεων, με συνέπεια την ελάττωση της αντοχής του, την αλλαγή των ιδιοτήτων του, τη μείωση της αξιοπιστίας του και αυξημένο κίνδυνο αστοχίας του.

7. Συμπεράσματα

Τα βασικότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα εργασία είναι τα εξής:

- Η ηλεκτροδιάβρωση είναι μια κατεργασία η οποία είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τη διάτρηση πολύπλοκων γεωμετριών και την παραγωγή πολύπλοκων σχημάτων σε οποιοδήποτε αγωγίμο υλικό με μεγάλη ακρίβεια διάστασης. Μεγαλύτερη ακρίβεια διάστασης πετυχαίνουμε διατηρώντας μικρή διάρκεια παλμών και διατηρώντας μικρή ένταση ρεύματος. Παρόλα αυτά, στην συγκεκριμένη περίπτωση της κατεργασιμότητας με ηλεκτροδιάβρωση του Νικελίου, επειδή πρόκειται για ένα σκληρό και ανθεκτικό μέταλλο, προτείνεται η χρήση σχετικά υψηλής έντασης ρεύματος και μεγάλης διάρκειας του παλμού ούτως ώστε να προκύψουν εμφανή αποτελέσματα σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα. Αυτό όμως δεν συμβαίνει σε όλους τους συνδυασμούς συνθηκών, διαπιστώνεται δηλαδή ότι η φύση της κατεργασίας είναι αρκετά στοχαστική.

- Η ηλεκτροδιάβρωση συνεπάγεται μια θερμική δράση στην επιφάνεια κατεργασίας, η οποία δύναται να προκαλέσει την δημιουργία παραμενουσών τάσεων. Η ύπαρξη των εν λόγω τάσεων εντοπίζεται σε συγκεκριμένες περιοχές, όπου παρατηρείται αλλαγή της micro σκληρότητας. Η μέτρηση της σκληρότητας έγινε τόσο στο στρώμα αναδιαμόρφωσης όσο και στην υπό-επιφάνεια η οποία έρχεται σε άμεση επαφή με το επαναστερεοποιημένο υλικό, καθώς και στο κυρίως υλικό. Διαπιστώθηκε ότι οι τιμές της σκληρότητας που αφορούν στην υπό-επιφάνεια καθώς και στο κυρίως σώμα δεν παρουσιάζουν κάποια αισθητή διακύμανση αλλά κυμαίνονται σε λογικές αποκλίσεις μεταξύ τους. Η μέση τιμή των μετρήσεων της σκληρότητας, που αφορούν στο κυρίως σώμα του υποστρώματος, είναι 157,17 HV (Hardness Vickers). Ομοίως, ούτε οι μετρήσεις της σκληρότητας που έγιναν εντός του στρώματος αναδιαμόρφωσης παρουσιάζουν κάποια αισθητή απόκλιση μεταξύ τους. Όμως, η μέση τιμή των μετρήσεων της σκληρότητας, που αφορούν στην ζώνη αναδιαμόρφωσης του υποστρώματος, είναι 198,91 HV (Hardness Vickers). Διαπιστώνεται δηλαδή μια αισθητή διαφορά της σκληρότητας στο επαναστερεοποιημένο στρώμα σε σύγκριση με την σκληρότητα στο κυρίως υλικό, με το στρώμα αναδιαμόρφωσης να παρουσιάζει μεγαλύτερη σκληρότητα.

- Από τα διαγράμματα ενέργειας παλμού – ρυθμού αποβολής υλικού φαίνεται ότι ο ρυθμός αποβολής υλικού είναι ανάλογος της ενέργειας του παλμού. Επιπλέον, σε μεγάλο βαθμό η κοπή των τεμαχίων που κατεργαστήκαμε δεν είναι γραμμική, δηλαδή ο ρυθμός αποβολής υλικού δεν είναι σταθερός σε σχέση με το χρόνο. Αυτό προκύπτει προφανώς από το ότι το βάθος κοπής δεν μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με το χρόνο, αν εξαιρέσει βέβαια κανείς κάποια συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Η μη γραμμικότητα της κοπής μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, μερικοί από τους οποίους είναι ότι κατά τη διάρκεια της κοπής ενδέχεται να μην έχουμε καλή κυκλοφορία του διηλεκτρικού μέσου και σωστή απομάκρυνση των αποβλήτων, είτε λόγω κακής ρύθμισης του συστήματος απομάκρυνσής τους (flushing), είτε επειδή παρεμποδίζεται η σωστή απομάκρυνσή τους. Αυτό έχει ως συνέπεια τη συσσώρευσή τους στην επιφάνεια κοπής και την επαναστερεοποίησή τους, με αποτέλεσμα να πρέπει να ξανακοπούν και να καθυστερεί η κατεργασία. Το τελευταίο συμβαίνει συνήθως όταν ο ρυθμός αποβολής υλικού είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από το ρυθμό απομάκρυνσης των παραπροϊόντων, δηλαδή όταν έχουμε πολύ έντονες συνθήκες κατεργασίας.

- Η επιφανειακή ακεραιότητα είναι μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους της ηλεκτροδιάβρωσης. Η παλμική ενέργεια εκκένωσης είναι ένας από τους

σημαντικούς παράγοντες που επιδρούν στην επιφανειακή ακεραιότητα η οποία αξιολογείται με την μέτρηση της επιφανειακής τραχύτητας. Διαπιστώθηκε ότι η μεταβολή της τραχύτητας σε συνάρτηση με τη διάρκεια του παλμού είναι σχεδόν ανάλογη και έχει αύξουσα τάση. Σε μμεγάλες τιμές έντασης ρεύματος και διάρκειας παλμού η καταστροφή της παραγόμενης επιφάνειας είναι αισθητή και γίνεται αντιληπτή ακόμα και με γυμνό μάτι. Παρατηρείται αύξηση όλων των μεγεθών της τραχύτητας σε συνάρτηση με την αύξηση του παλμού. Ομοίως, η επιφανειακή τραχύτητα του υλικού αυξάνει με την αύξηση του ρεύματος και της τάσης με μια σταδιακή κλιμάκωση. Το μέγεθος του κρατήρα παρουσιάζει διακυμάνσεις και αλλάζει με την παλμική ενέργεια αν και αυτό εξαρτάται επίσης από τις ιδιότητες του υλικού.

8. Προτάσεις

Η παρούσα εργασία αδυνατεί προφανώς να καλύψει πλήρως το θέμα της κατεργασιμότητας του Νικελίου έναντι ηλεκτροδιάβρωσης. Ακολούθως παρατίθενται κάποιες προτάσεις που αφορούν στην περαιτέρω διερεύνηση του θέματος.

Το γεγονός ότι η κοπή δεν είναι γραμμική και η ταχύτητά της σχετικά απρόβλεπτη, δημιουργεί δυσκολίες στην εκτίμηση του χρόνου κατεργασίας με μεγάλη ακρίβεια. Έτσι, δεν υπάρχει δυνατότητα σφιχτού χρονικού προγραμματισμού για τη χρήση της συγκεκριμένης κατεργασίας σε βιομηχανική κλίμακα. Για μια τέτοια περίπτωση, θα έπρεπε να γίνουν αρκετές σειρές πειραμάτων κάτω από τις ίδιες συνθήκες, προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο εύρος μέσα στο οποίο μεταβάλλεται ο ρυθμός αποβολής υλικού, για να είναι δυνατή σε ικανοποιητικό βαθμό η εκτίμηση του χρόνου κατεργασίας. Αναγκαία είναι επίσης η ανάπτυξη, με βάση τα ανωτέρω στοιχεία, ενός ικανοποιητικού θεωρητικού μοντέλου για τη συγκεκριμένη κατεργασία και τους μηχανισμούς που διέπουν την αποβολή του υλικού.

Προτείνεται η διεξαγωγή σειρών πειραμάτων που θα εξετάζουν και θα προσδιορίζουν τη μεταβολή της ακρίβειας διάστασης ανάλογα με τις συνθήκες της κατεργασίας, για να δημιουργηθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα που θα δίνουν την ποσοστιαία απόκλιση της διάστασης. Έτσι ίσως θα μπορεί να προβλεφθεί πόσο μικρότερο πρέπει να είναι το χρησιμοποιούμενο εργαλείο για να επιτευχθεί η επιθυμητή διάσταση.

Θα πρέπει να διερευνηθεί σε πιο σύγχρονες εργαλειομηχανές και με πιο ενδεδειγμένο τρόπο η συμπεριφορά των υλικών αυτής της φύσης, σε εντάσεις ρεύματος μεγαλύτερες από 1,5A και με δυνατότητα επιλογής ρευμάτων σε ενδιάμεσες τιμές

από τις διαθέσιμες της εργαλειομηχανής που χρησιμοποιήθηκε. Προτείνεται επίσης η διερεύνηση της επίδρασης της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών και της τάσης κατεργασίας στο τελικό αποτέλεσμα.

Προκειμένου να μετρηθεί με αξιοπιστία η σχετική φθορά εργαλείου, προτείνεται μετά το πέρας κάθε δοκιμής, να ζυγίζεται το εργαλείο σε ειδική ζυγαριά ακριβείας και να υπολογίζεται η διαφορά στο βάρος του. Έπειτα, με γνωστή την πυκνότητα του υλικού, να υπολογίζεται και η διαφορά στον όγκο του και συνεπώς η απώλεια υλικού.

Τέλος, προτείνεται η διεξαγωγή αρκετών σειρών πειραμάτων κάτω από τις ίδιες συνθήκες, προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο εύρος μέσα στο οποίο μεταβάλλεται ο ρυθμός αποβολής υλικού. Έτσι, θα είναι δυνατή σε ικανοποιητικό βαθμό η εκτίμηση του χρόνου κατεργασίας. Αναγκαία είναι τέλος η ανάπτυξη ενός ικανοποιητικού θεωρητικού μοντέλου για την κατεργασία και τους μηχανισμούς που διέπουν την αποβολή του υλικού.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

$\bar{I}_P[A]$ → μέση ένταση ρεύματος κατά τη διάρκεια της κατεργασίας

$F_W[\%]$ → ποσοστό ενέργειας που απορροφάται από το τεμάχιο

$F_a[\%]$ → ποσοστό ενέργειας που απορροφάται από την άνοδο

$F_c[\%]$ → ποσοστό ενέργειας που απορροφάται από την κάθοδο

$F_z \left[\frac{mm}{sec} \right]$ ή $\left[\frac{\mu m}{sec} \right]$ → ταχύτητα πρόωσης του ηλεκτροδίου προς το τεμάχιο

$I_P[A]$ → μέγιστη ένταση ρεύματος κατά τη διάρκεια του παλμού

L_g → χαρακτηριστικό μήκος συστήματος

$Q_V \left[\frac{J}{m^3} \right]$ → παραγόμενη θερμότητα ανά μονάδα όγκου

$R_a[\mu m]$ → μέση τραχύτητα επιφανείας

$R_{max}[\mu m]$ → μέγιστη τραχύτητα επιφανείας

$T_b[K]$ → θερμοκρασία ζέσεως

$T_{melt.}[K]$ → θερμοκρασία τήξεως

$T_{off}[sec]$ ή $[\mu sec]$ → χρόνος μεσοδιαστήματος

$T_{on}[sec]$ ή $[\mu sec]$ → χρόνος παλμού

U_i → ενέργεια ιονισμού

$V_P[V]$ → διαφορά δυναμικού κατά τη διάρκεια του παλμού

$V_c[V]$ = διαφορά δυναμικού στο πυκνωτή

$V_s[V]$ → διαφορά δυναμικού πηγής

$V_{th}[V]$ → δυναμικό αναφοράς σε servo – μηχανισμό

$W_{fin.}[gr]$ → βάρος τεμαχίου στο τέλος της κατεργασίας αντίστοιχα

$W_{st.}[gr]$ → βάρος τεμαχίου στην αρχή της κατεργασίας

$f_{eff.}[\%]$ → αποδοτικότητα κατεργασίας

f_{wave} → συνάρτηση κυματομορφής της έντασης ρεύματος

k_B → σταθερά Boltzman

k_{EDM} → συντελεστής ελέγχου διακένου (*gap control factor*)

n_e → πυκνότητα ηλεκτρονίων

n_i → πυκνότητες ιονισμένων σωματιδίων

n_n → πυκνότητες ουδέτερων σωματιδίων

q_e → στοιχειώδες φορτίο

$q_o \left[\frac{W}{m^2} \right]$ → ροή θερμότητα ανα μονάδα επιφάνειας

$r_p [m]$ ή $[\mu m]$ → ακτίνα πλάσματος

$t_m [min]$ → χρόνος κατεργασίας

$t_p [sec]$ ή $[\mu sec]$ → χρόνος πλάσματος

$u_g \left[\frac{m}{sec} \right]$ → ταχύτητα θερμικής κίνησης

$u_{melt} [m/sec]$ → ταχύτητα πλέγματος λόγω αφαίρεσης υλικού

$\hat{E} [J]$ → μέση κινητική ενέργεια

$E_p [W]$ → μέση ισχύς κατεργασίας

N_D → αριθμός των σωματιδίων

$T_{off} [sec]$ → χρόνος μεσοδιαστήματος

ϵ_o → διηλεκτρική σταθερά κενού

λ_D → μήκος Debye

τ_g → μέσος χρόνος μεταξύ συγκρούσεων με ουδέτερα άτομα

$MRR \left[\frac{mm^3}{min} \right]$ → ρυθμός αποβολής υλικού

$TWR [\%]$ → λόγος φθοράς εργαλείου

$a \left[\frac{m^2}{sec} \right]$ → συντελεστής θερμικής διάχυσης υλικού

g → στατιστικό βάρος που λαμβάνει υπ όψιν καταστάσεις εκφυλισμού

Τίτλος εργασίας

$k \left[\frac{W}{m * K} \right] \rightarrow$ θερμική αγωγιμότητα υλικού

$t[sec] \rightarrow$ χρόνος

$T[K] \rightarrow$ θερμοκρασία

$\eta[\%] \rightarrow$ duty ratio

$\rho \left[\frac{gr}{mm^3} \right] \rightarrow$ πυκνότητα υλικού τεμαχίου

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “FUNDAMENTALS OF MACHINING PROCESSES, Conventional and Nonconventional Processes”, Third Edition, HASSAN EL – HOFY, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [2] “MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING, An Introduction”, Tenth Edition, WILLIAM D. CALLISTER, JR, DAVID G. RETHWISCH, Wiley.
- [3] “MANUFACTURING ENGINEERING AND TECHNOLOGY”, Sixth Edition, SEROPE KALPAKJIAN, STEVEN R. SCHMID.
- [4] «ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ», Διπλωματική Εργασία, ΓΟΥΡΓΟΥΛΕΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, Ε.Μ.Π. 2009.
- [5] «ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ – ΒΥΘΙΣΗΣ (DIE – SINKING EDM) ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΛΙΚΑ», Διπλωματική Εργασία, ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, Ε.Μ.Π. 2023.
- [6] «ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΒΥΘΙΣΗΣ (DIE – SINKING EDM) ΜΕΣΩ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ & ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ», Μεταπτυχιακή Εργασία, ΛΑΖΑΡΟΥ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Ι. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ, Ε.Μ.Π. 2018.
- [7] W. König, D. F. Dauw, G. Levy, and U. Panten, “EDM-Future Steps towards the Machining of Ceramics,” CIRP Annals, vol. 37, no. 2, pp. 623–631, Jan. 1988, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60759-8.

- [8] R. Maurya and R. Kumar Porwal, "EDM of Hastelloy – An overview," *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 311–315, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.298.
- [9] A. Khan et al., "Machinability of nickel based alloys using electrical discharge machining process," *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, vol. 346, p. 012044, Apr. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/346/1/012044.
- [10] K. P. Rajurkar, M. M. Sundaram, and A. P. Malshe, "Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining," *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 13–26, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.03.002.
- [11] E. Uhlmann and D. C. Domingos, "Development and Optimization of the Die-Sinking EDM-Technology for Machining the Nickel-based Alloy MAR-M247 for Turbine Components," *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 180–185, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.03.102.
- [12] R. Choudhary, V. K. Gupta, Y. Batra and A. Singh, "Performance and Surface Integrity of Nimonic75 Alloy Machined by Electrical Discharge Machining," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 2, no 4–5, pp 3481-3490, 2015, doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.324.
- [13] A. Torres, C. J. Luis, and I. Puertas, "Analysis of the influence of EDM parameters on surface finish, material removal rate, and electrode wear of an INCONEL 600 alloy," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 80, no. 1, pp. 123–140, Sep. 2015, doi: 10.1007/s00170-015-6974-9.
- [14] P. Pant and P. S. Bharti, "Electrical Discharge Machining (EDM) of nickel-based nimonic alloys: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 25, pp. 765–772, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.09.007.