



Πειραματική Μελέτη της
Κατεργασίας Ηλεκτροδιάβρωσης
Αποτύπωσης-Βύθισης (Die Sinking
EDM) σε Διάφορα Υλικά

Τομέας: Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Επιβλέπων: Δρ. Δημήτριος Ε. Μανωλάκος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

--- κενή σελίδα ---

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αποστολόπουλος Νικόλαος

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	6
Περίληψη	7
Abstract	8
Δομή Εργασίας.....	9
Ονοματολογία.....	10
Εισαγωγή.....	12
1. Περιγραφή της ηλεκτροδιάβρωσης (EDM).....	14
1.1 Αρχή λειτουργίας – μηχανισμός απομάκρυνσης υλικού.....	16
1.2 Βασικά τμήματα ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης-βύθισης	20
1.2.1 Τεμάχιο (workpiece).....	20
1.2.2 Ηλεκτρόδιο (tool electrode).....	20
1.2.3 Διηλεκτρικό υγρό (dielectric fluid).....	22
1.2.4 Μηχανισμός κίνησης στους άξονες X-Y	24
1.2.5 Δοχείο εργασίας (work tank).....	25
1.2.6 Σερβομηχανισμός ελέγχου (servo control system).....	25
1.2.7 Μονάδα παροχής ισχύος – γεννήτρια παλμών	26
1.2.8 Σύστημα κυκλοφορίας διηλεκτρικού και έκπλυσης διακένου	28
1.3 Τύποι εργαλειομηχανών EDM αποτύπωσης-βύθισης.....	30
2. Παράμετροι ελέγχου και απόδοσης της κατεργασίας.....	32
2.1 Παράμετροι ελέγχου της κατεργασίας	32
2.1.1 Διαφορά δυναμικού	32
2.1.2 Ένταση ρεύματος.....	32
2.1.3 Χαρακτηριστικά παλμού	32
2.1.4 Έλεγχος διακένου	35
2.1.5 Πολικότητα	36
2.2 Παράμετροι απόδοσης της κατεργασίας.....	38
2.2.1 Ισχύς κατεργασίας.....	38
2.2.2 Ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης	38
2.2.3 Ρυθμός αποβολής υλικού (MRR)	38
2.2.4 Λόγος φθοράς εργαλείου (TWR).....	39
2.2.5 Ποιότητα κατεργασμένης επιφανείας	39
3. Πειραματική Διαδικασία	41
3.1 Εργαλειομηχανή.....	41
3.2 Τεμάχιο – Ηλεκτρόδιο	43
3.3 Πειραματική Διαδικασία – Μετρήσεις.....	46
3.3.1 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας.....	47
3.3.2 Παράμετροι κατεργασίας.....	52
3.3.3 Μετρήσεις στα τεμάχια από μαλακό χάλυβα.....	53
3.3.4 Μετρήσεις στα τεμάχια από αλουμίνιο Al6061.....	54
3.3.5 Μετρήσεις στα τεμάχια από καρβίδιο βολφραμίου	55

3.3.6	Μετρήσεις στα τεμάχια από εργαλειοχάλυβα M42	58
3.3.7	Μετρήσεις στα τεμάχια από ανθρακόνημα αεροπορικών εφαρμογών 59	
3.4	Επεξεργασία Μετρήσεων	61
3.4.1	Αποτελέσματα για τα δοκίμια μαλακού χάλυβα	62
3.4.2	Αποτελέσματα για τα δοκίμια αλουμινίου Al6061	66
3.4.3	Αποτελέσματα για τα δοκίμια καρβιδίων του βολφραμίου	69
3.4.4	Αποτελέσματα για τα δοκίμια εργαλειοχάλυβα	73
3.4.5	Αποτελέσματα για τα δοκίμια ανθρακονήματος	76
4.	Μεταλλογραφική μελέτη δοκιμών	80
4.1	Τοπογραφία κατεργασμένης επιφανείας	80
4.1.1	Κρατήσεις	80
4.1.2	Επιφανειακές ρωγμές	80
4.2	Μικροδομή υποστρώματος	82
4.3	Μελέτη δοκιμών	84
4.3.1	Δοκίμια χάλυβα	85
4.3.2	Δοκίμια αλουμινίου	88
4.3.3	Δοκίμια εργαλειοχάλυβα	93
4.3.4	Δοκίμια καρβιδίου του βολφραμίου	97
4.3.5	Δοκίμια ανθρακονήματος	100
4.3.6	Άλλες οπτικές των δοκιμών	105
5.	Συμπεράσματα	107
6.	Κατάλογος Πινάκων	109
7.	Κατάλογος Σχημάτων	111
8.	Κατάλογος Εικόνων	112
9.	Βιβλιογραφία	116

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας είναι η «**Πειραματική Μελέτη της Κατεργασίας Ηλεκτροδιάβρωσης Αποτύπωσης-Βύθισης (Die Sinking EDM) σε Διάφορα Υλικά**». Η κατεργασία EDM είναι μια μη συμβατική κατεργασία θερμοηλεκτρικού χαρακτήρα, η οποία χρησιμοποιείται στη βιομηχανία για πάνω από 70 χρόνια. Η αποβολή υλικού βασίζεται στην ανάπτυξη ηλεκτρικών εκκενώσεων πολύ μικρής χρονικής διάρκειας και υψηλής θερμοκρασίας ανάμεσα στο τεμάχιο προς κατεργασία και ένα ηλεκτρόδιο, στα οποία εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού, παρουσία διηλεκτρικού υγρού, οι οποίες προκαλούν εξάχνωση και τήξη του υλικού προς κατεργασία. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν σε πέντε διαφορετικά υλικά οι συνθήκες κατεργασίας και τα αποτελέσματά τους σε ρυθμό αποβολής υλικού και μέση τραχύτητα επιφανείας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Δρ. Δημήτριο Μανωλάκο που μου ανέθεσε το συγκεκριμένο θέμα, που με εμπιστεύθηκε να φέρω εις πέρας αυτό το έργο και που ανέχτηκε τους ρυθμούς εργασίας μου. Επιπλέον οφείλω να ευχαριστήσω το προσωπικό του εργαστηρίου του τομέα των κατεργασιών για την υποστήριξη κατά τη διαδικασία των πειραμάτων και ιδιαίτερα τον κ. Κωνσταντίνο Κερασιώτη, ο οποίος προσέφερε τα μέγιστα με τη γνώση και την εμπειρία του στην πραγματοποίηση των επιμέρους σταδίων της διαδικασίας. Ευχαριστώ και τον καθηγητή Δρ. Γ.-Χ. Βοσνιάκο για τις περαιτέρω ιδέες για παραμέτρους προς μελέτη που μου έδωσε σε μια σύντομη κουβέντα που είχαμε τις ημέρες διεξαγωγής των πειραμάτων.

Τέλος, ειδικές ευχαριστίες στην οικογένειά μου και στους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου σε όλα τα στάδια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης (EDM) είναι μια από τις πιο διαδεδομένες μη συμβατικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, η οποία βρίσκει εφαρμογή στη βιομηχανία για πάνω από 70 χρόνια. Ο μηχανισμός αποβολής υλικού συνίσταται στην εκδήλωση ελεγχόμενων ηλεκτρικών σπινθήρων ανάμεσα στο τεμάχιο προς κατεργασία και το ηλεκτρόδιο, παρουσία διηλεκτρικού υγρού. Λόγω του θερμοηλεκτρικού χαρακτήρα της και του ιδιαίτερου μηχανισμού αποβολής υλικού, δύναται να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε αγώγιμο υλικό, ανεξαρτήτως μηχανικών ιδιοτήτων, όπως η σκληρότητα. Επιπλέον, μέσω της κατεργασίας αυτής μπορούν να κατασκευαστούν τεμάχια πολύπλοκης γεωμετρίας, με καλή ποιότητα επιφανείας, καθώς και με καλή διαστατική ακρίβεια.

Στην εργασία αυτή αρχικά παρατίθενται τα απαραίτητα θεωρητικά στοιχεία που αφορούν τον μηχανισμό αποβολής υλικού, τα υποσυστήματα μιας μηχανής ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης-βύθισης, καθώς και τις παραμέτρους ελέγχου και απόδοσης της κατεργασίας. Ακολουθεί η περιγραφή των διαφόρων σταδίων της πειραματικής διαδικασίας και στη συνέχεια η παράθεση των μετρήσεων και η επεξεργασία τους. Τέλος, παρουσιάζεται η μεταλλογραφική ανάλυση των τεμαχίων που κατεργάστηκαν με χρήση οπτικού μικροσκοπίου.

Βασικός στόχος της εργασίας είναι η μελέτη της κατεργασιμότητας πέντε τύπων υλικών ποικίλης σκληρότητας και σύστασης, τα οποία περιλαμβάνουν αλουμίνιο, χάλυβα και εργαλειοχάλυβα, που είναι μέταλλα, καρβίδιο του βολφραμίου, που είναι κεραμικό κράμα και ανθρακόνημα, που είναι σύνθετο υλικό. Η μελέτη περιλαμβάνει εύρεση κατάλληλων παραμέτρων κατεργασίας για την ομαλή διεξαγωγή της, υπολογισμό ρυθμού αποβολής υλικού, μέτρηση μέσης τραχύτητας και συσχέτισής τους με τις αντίστοιχες συνθήκες κατεργασίας, ενώ πραγματοποιείται και μελέτη σε μικροσκοπικό επίπεδο.

Abstract

Electrical discharge machining (EDM) is one of the most commonly used non-conventional machining operations, which is used in industry for over 70 years. The material removal mechanism is based on controlled electrical discharges between the workpiece and the tool electrode, with the presence of dielectrical fluid. Because of its thermoelectrical nature peculiar material removal mechanism, it is possible for this operation to be applied in any electrical conductive material, regardless of its mechanical abilities, like its hardness. Additionally, through this operation it is possible for workpieces with complex geometries to be constructed, with good surface quality and with good precision.

In this thesis is presented firstly the necessary theoretical background that refers to the material removal mechanism, to the sub-systems of a typical die-sinking EDM machine and to the control and efficiency parameters of the EDM operation. The description of the various stages of the experimental procedure follows, as well as the measurements taken and their analysis. Lastly a metallographic analysis of the various workpieces is presented, using an optical microscope.

The main aim of this thesis is to study the machinability of five types of materials with varying hardness and composition, that include aluminum, steel and toolsteel, which are metals, tungsten carbide, which is a ceramic alloy and carbon fiber, which is a composite material. The study includes finding appropriate control parameters for a stable machining operation, calculating the material removal rate (MRR), measuring the surface mean roughness and correlating them with the adjacent machining parameters, while a study in microscopic level is also taking place.

Δομή Εργασίας

Εισαγωγή : Σύντομη αναφορά στα βασικά στοιχεία και τις χρήσεις της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης, αναφορά στις μη συμβατικές κατεργασίες και σχηματική κατηγοριοποίηση τους.

1.Περιγραφή της Ηλεκτροδιάβρωσης (EDM) : Στη 2^η ενότητα της εργασίας παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της κατεργασίας EDM, σύντομη ιστορική αναδρομή, εφαρμογές και στη συνέχεια αναλύονται ο μηχανισμός αποβολής υλικού και τα βασικά υποσυστήματα της κατεργασίας.

2.Παράμετροι ελέγχου και απόδοσης της κατεργασίας : Στην 3^η ενότητα της εργασίας παρουσιάζονται και αναλύονται οι διάφορες παράμετροι ελέγχου της κατεργασίας, δηλαδή τα χαρακτηριστικά της που η μεταβολή τους επιφέρει αλλαγές στο αποτέλεσμα της κατεργασίας και οι παράμετροι απόδοσης, μεγέθη τα οποία περιγράφουν το κατά πόσο έχει λειτουργήσει σωστά και επιθυμητά η διαδικασία της κατεργασίας.

3.Πειραματική διαδικασία : Στην 4^η ενότητα της εργασίας παρουσιάζονται τα επιμέρους συστατικά του πειράματος (εργαλειομηχανή, ηλεκτρόδιο, τεμάχια, επιμέρους όργανα), περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία και ορισμένες δυσκολίες που συναντήθηκαν, παρατίθενται οι μετρήσεις και πραγματοποιείται η επεξεργασία τους. Η επεξεργασία περιλαμβάνει τον υπολογισμό του MRR – ρυθμού αποβολής υλικού, τον έλεγχο κάποιων προϋπαρχόντων εμπειρικών σχέσεων, την απόπειρα δημιουργίας νέων εμπειρικών σχέσεων με βάση τις μετρήσεις και τη δημιουργία-σχολιασμό γραφημάτων.

4.Μεταλλογραφική μελέτη δοκιμίων : Στην 5^η ενότητα παρουσιάζονται και σχολιάζονται εικόνες από οπτικό μικροσκόπιο οι οποίες περιλαμβάνουν όψεις κάθετων τομών των κατεργασμένων επιφανειών, ούτως ώστε να μελετηθεί η εικόνα του υποστρώματος. Επιπλέον παρουσιάζονται και σχολιάζονται εικόνες από την κάτοψη των κατεργασμένων επιφανειών. Προηγείται σύντομη βιβλιογραφική αναφορά.

5.Συμπεράσματα : Στην 6^η και τελευταία ενότητα παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της πειραματικής διαδικασίας και παρατίθενται προτάσεις για μελλοντικές διατριβές στο αντικείμενο αυτό.

Ονοματολογία

$D_{FOV} [mm]$ → διάμετρος οπτικού πεδίου

$E_p [mJ]$ → ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης (ανά παλμό)

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

$F_Z [\frac{mm}{s}]$ → ταχύτητα πρόωσης/απομάκρυνσης ηλεκτροδίου

$FN [mm]$ → αριθμός οπτικού πεδίου

$I_p [A]$ → ένταση ρεύματος σε έναν παλμό

$i_p(t) [A]$ → ένταση ρεύματος κατεργασίας

k → παράμετρος ελέγχου διακένου

M → μεγέθυνση φακού

$m_{aft} [g]$ → μάζα τεμαχίου μετά την κατεργασία ηλεκτροδιάθρωσης

$m_{bef} [g]$ → μάζα τεμαχίου πριν την κατεργασία ηλεκτροδιάθρωσης

$MRR [\frac{mm^3}{min}]$ → Ρυθμός Αποβολής Υλικού

$P_{av} [W]$ → μέση ισχύς κατεργασίας

$P_{nom} [W]$ → ονομαστική ισχύς κατεργασίας

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

$R_t [\mu m]$ → μέγιστη τραχύτητα επιφανείας

$t_d [\mu s]$ → χρονικό διάστημα υστέρησης

$t_e [\mu s]$ → πραγματική χρονική διάρκεια παλμού ηλεκτρικής εκκένωσης

$t_{off} [\mu s]$ → μεσοδιάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών

$t_{on} [\mu s]$ → χρονική διάρκεια παλμού ηλεκτρικής εκκένωσης

$t_{total} [sec]$ ή $[h: mm: ss]$ → συνολικός χρόνος διάρκειας κατεργασίας

$T_w [^{\circ}C]$ → θερμοκρασία τήξης υλικού τεμαχίου

$T_{w,al} [^{\circ}C]$ → θερμοκρασία τήξης αλουμινίου

$T_{w,cf} [^{\circ}C]$ → θερμοκρασία τήξης ανθρακονήματος (θεωρητική)

$T_{w,st}$ [°C] → θερμοκρασία τήξης χάλυβα

$T_{w,tc}$ [°C] → θερμοκρασία τήξης καρβιδίου του βολφραμίου

$T_{w,tst}$ [°C] → θερμοκρασία τήξης εργαλειοχάλυβα M42

TWR [%] → λόγος σχετικής φθοράς εργαλείου

$u_p(t)$ [V] → τάση κατεργασίας

V_0 [V] → τάση εν κενώ

V_E [mm^3/min] → όγκος αφαιρούμενου υλικού του ηλεκτροδίου ανά μονάδα χρόνου

V_{gap} [V] → τάση στα άκρα του διακένου

V_P [V] → τάση στα άκρα του διακένου σε έναν παλμό

V_{th} [V] → τάση αναφοράς

V_W [mm^3/min] → όγκος αφαιρούμενου υλικού του τεμαχίου ανά μονάδα χρόνου

z [μm] → βάθος κοπής

ρ [$\frac{g}{cm^3}$] → πυκνότητα τεμαχίου

ρ_{al} [$\frac{g}{cm^3}$] → πυκνότητα αλουμινίου

ρ_{cf} [$\frac{g}{cm^3}$] → πυκνότητα ανθρακονήματος

ρ_{st} [$\frac{g}{cm^3}$] → πυκνότητα χάλυβα

ρ_{tc} [$\frac{g}{cm^3}$] → πυκνότητα καρβιδίου του βολφραμίου

ρ_{tst} [$\frac{g}{cm^3}$] → πυκνότητα εργαλειοχάλυβα M42

τ [%] → κύκλος λειτουργίας (*duty ratio*) ή παράγοντας σταθερότητας

Φ → σύμβολο διαμέτρου

Εισαγωγή

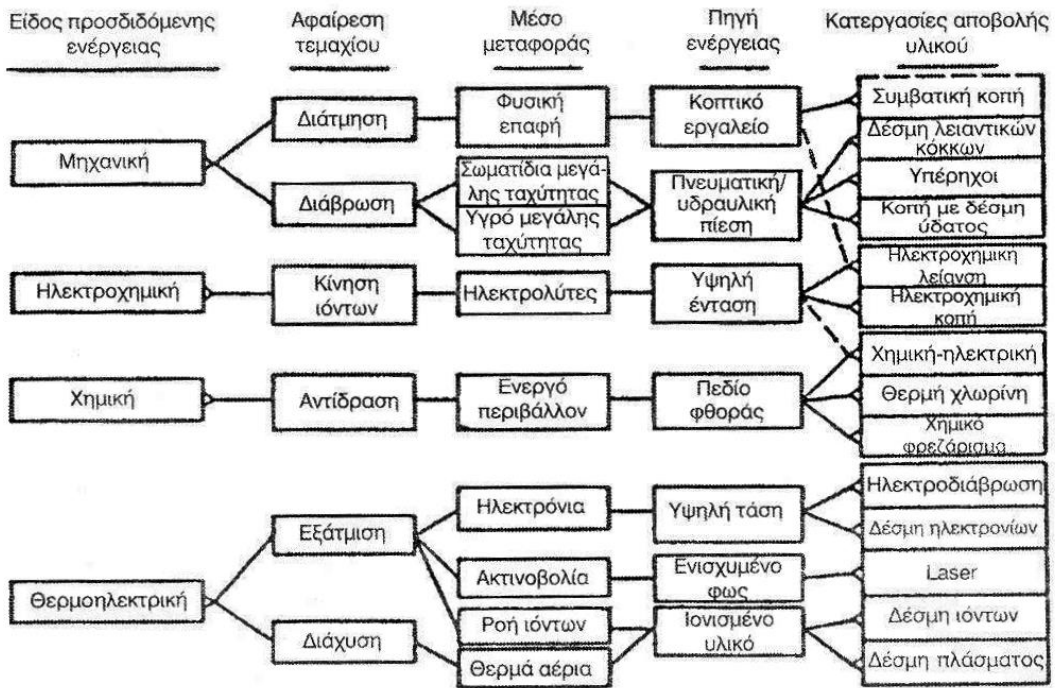
Η εξέλιξη της τεχνολογίας σε συνδυασμό με τη διαρκή απόκτηση νέων γνώσεων έχει ανοίξει δρόμους για την εκμετάλλευση υλικών και κραμάτων με ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από τα συνηθισμένα, ενώ παράλληλα επιβάλλει μεγαλύτερη ακρίβεια και πολυπλοκότητα γεωμετριών στην κατεργασία τους με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Η κατά κόρον χρησιμοποιούμενη κατηγορία κατεργασιών που πληροί τις παραπάνω απαιτήσεις είναι οι μη συμβατικές κατεργασίες, στις οποίες χρησιμοποιούνται μηχανισμοί που εκμεταλλεύονται γνώσεις από διάφορα πεδία της φυσικής. Μία εξ αυτών είναι και η ηλεκτροδιάβρωση (EDM) που βασίζεται στην παραγωγή ηλεκτρικού σπινθήρα υψηλής ισχύος για την αφαίρεση υλικού από ηλεκτρικά αγώγιμα τεμάχια, η οποία έχει βρει ευρεία χρήση στη βιομηχανία για σχεδόν 70 χρόνια. Παρόλο που χρησιμοποιείται για αρκετά χρόνια, αποτελεί ακόμα αντικείμενο προς μελέτη, καθώς ο μηχανισμός λειτουργίας της είναι αρκετά πολύπλοκος.

When to EDM by Geometry?	
When	Why
Very thin walls	No contact, no force, no deformation.
Internal radii equal to or less than 1/32 inch parallel to tool axis	Radius is as small as the spark gap. Generally, tool is not rotated.
High ratios of cavity depth to width, for example: slots and ribs	No force means very thin, long electrodes can be used.
Non-round cavities/openings	Electrodes do not have to rotate.
Intermittent cuts	Stress free.
Very small parts (fits in a 0.25-inch cube)	Easy to fixture since no stress or vibration is involved.
Recessed cuts	Cutting tools can not reach cutting area or generate desired shape.
Requires special/unique cutting tools	Electrodes often less costly than special cutting tools. Electrode is easy to machine, unlike carbide. Wire is available standard.
Capable of high tolerance machining	Can EDM conductive material of any hardness.
Different geometry at top and bottom	Wire EDM cuts ruled surfaces with a simpler program and machine than milling.
Complex shapes	Easier to program because you are using a tool of constant dimension instead of a variety of different diameter milling cutters.
Requires multiple component assemblies	Use taper or recess or depth: diameter capability to make it one piece.
Angled cuts	Ability to 3-D orbit in space.

Εικόνα 1 : Περιστάσεις που χρειάζεται η ηλεκτροδιάβρωση [9]

When to EDM by Material?	
When	Why
Hardness above Rc 38: hardened steel, Stellite, tungsten carbide	EDM vaporizes material rather than cutting it.
Toughness: Inconel, Monel, Hastelloy, Nitralloy, Waspaloy, Nimonic, Udimet	EDM is non-contact, therefore no adhesion of work piece to tool.
Tends to leave tough burrs when machined conventionally	Vaporized material is flushed away leaving no burr.
Frail/fragile (can't take stress of machining)	No contact, no force.
Expensive material	Lower chip/work piece mass ratio. Slugs from Wire EDM may be reusable whereas chips from conventional machining are recyclable at best.
Certain explosive or flammable materials	EDM takes place under water.
Materials with hazardous dust particles	Particles are flushed away to the filter. Reduced risk of fumes.

Εικόνα 2: Περιστάσεις που χρειάζεται η ηλεκτροδιάβρωση [9]

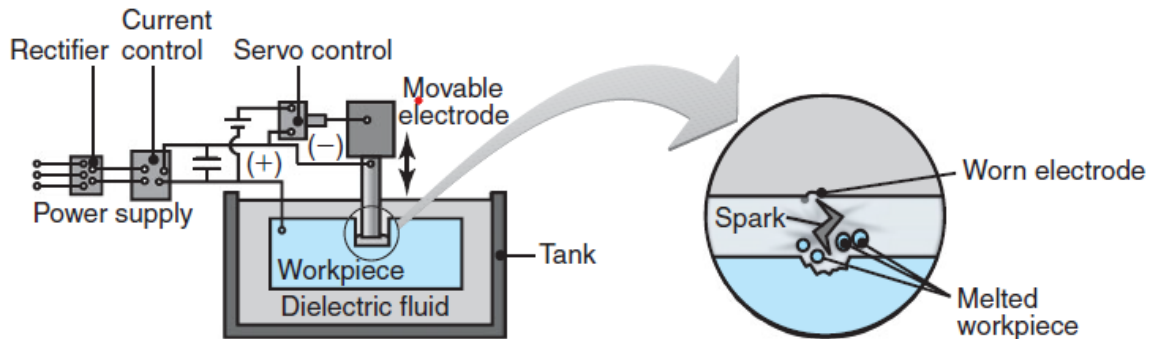


Εικόνα 3: Κατηγοριοποίηση των μη συμβατικών κατεργασιών [9]

1. Περιγραφή της ηλεκτροδιάβρωσης (EDM)

Η ηλεκτροδιάβρωση (EDM) είναι μια από τις πλέον διαδεδομένες μη συμβατικές κατεργασίες αποβολής υλικού. Βασίζεται στη διάβρωση με εκκενώσεις τόξου που αναπτύσσονται μεταξύ δύο ηλεκτρικά φορτισμένων επιφανειών, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται διηλεκτρικό υγρό [1]. Στην ηλεκτροδιάβρωση τον ρόλο των φορτισμένων αυτών επιφανειών έχουν το ηλεκτρόδιο, το οποίο εκλαμβάνεται ως το κοπτικό εργαλείο και το προς κατεργασία τεμάχιο, το οποίο μπορεί να είναι οποιοδήποτε αγωγίμο υλικό, ανεξαρτήτως σκληρότητας. Μια ειδοποιός διαφορά της ηλεκτροδιάβρωσης σε σχέση με άλλες κατεργασίες αποβολής υλικού, είναι το γεγονός πως το ηλεκτρόδιο δεν έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο και άρα υπάρχει πάντα διάκενο μεταξύ τους, γεγονός που την καθιστά ιδανική για την κατεργασία ψαθурών και ευαίσθητων τεμαχίων [2].

Για τον μηχανισμό αφαίρεσης υλικού η πιο επικρατούσα θεωρία είναι η θερμοηλεκτρική, στην οποία θεωρείται πως το υλικό αφαιρείται εξαιτίας των πολύ υψηλών θερμοκρασιών που οφείλονται σε ρεύμα εκκένωσης υψηλής πυκνότητας, η οποία ενισχύεται και από πειραματικά ευρήματα, ωστόσο συνεχίζει να υπάρχει αδυναμία εξήγησης ορισμένων λεπτομερειών [5].



Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης [5]

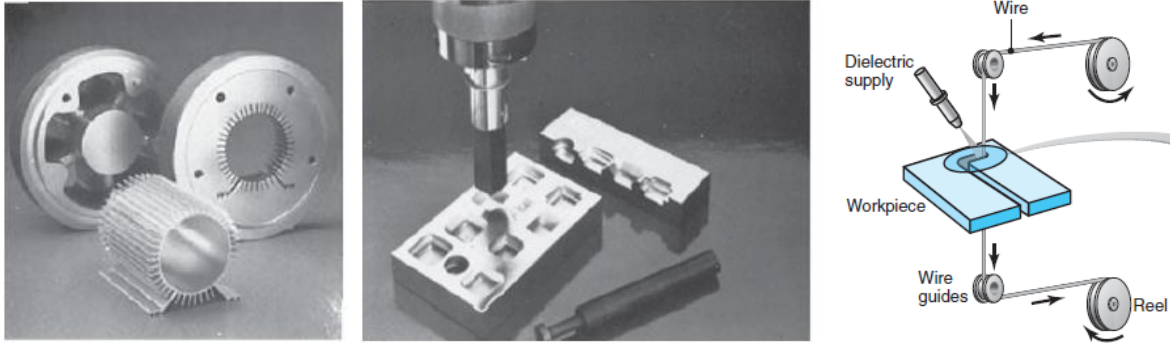
Η ηλεκτροδιάβρωση ως κατεργασία εφευρέθηκε και αναπτύχθηκε από τη δεκαετία του 1940 σχεδόν ταυτόχρονα στις ΗΠΑ από τους Stark, Harding και Beaver και στην ΕΣΣΔ από τους Lazarenko (εικόνα 5), παρόλο που το φαινόμενο της διάβρωσης με εκκένωση τόξου είναι γνωστό από τον 18^ο αιώνα, από παρατηρήσεις των Benjamin και Josef Priestley [4,15].

Έχει ποικίλες εφαρμογές και δυνατότητες, οι οποίες περιλαμβάνουν την κατασκευή καλουπιών και μητρών για σφυρηλάτηση, την κατεργασία βαθιών οπών μικρής διαμέτρου, αλλά και οπών ψύξης σε πτερύγια στροβίλου από υπερκράματα, τη διάνοιξη μικρών εγκοπών και την παραγωγή βηματικών κοιλοτήτων και άλλων περίπλοκων μορφών [5].

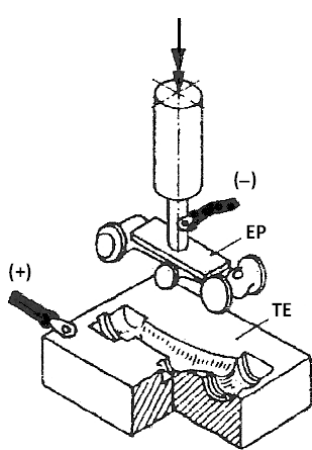


Εικόνα 5: Δρ. B.R. και Δρ. N.I. Lazarenko [15]

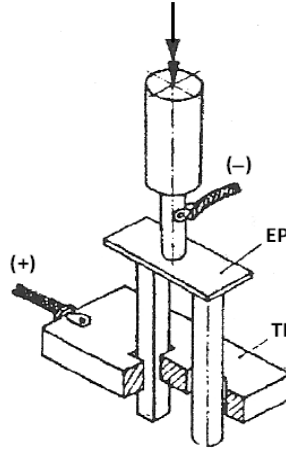
Μερικές από τις παραλλαγές της περιλαμβάνουν την κατεργασία κυανού τόξου (blue arc) με εφαρμογή σε υπερκράματα νικελίου και ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire EDM) στην οποία ένα αργά κινούμενο σύρμα που παίζει το ρόλο ηλεκτροδίου κόβει το τεμάχιο κινούμενο κατά μήκος μιας προκαθορισμένης διαδρομής [5].



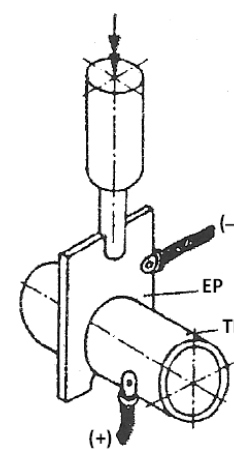
Εικόνες 6, 7, 8: Διάφορες εφαρμογές της EDM [5]



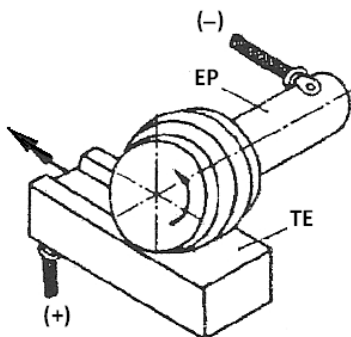
Εικόνα 9: Αποτύπωση [9]



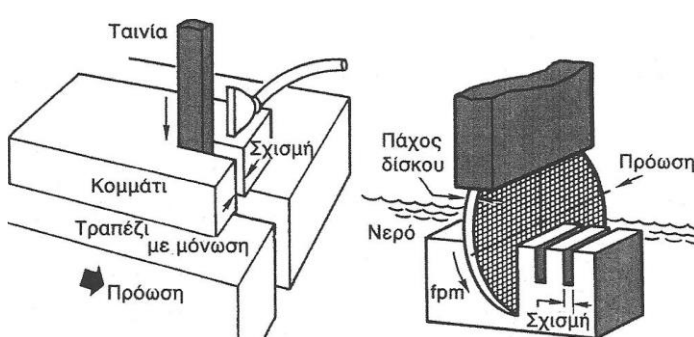
Εικόνα 10: Διάτρηση [9]



Εικόνα 11: Απότμηση [9]



Εικόνα 12: Λείανση [9]



Εικόνα 13: Πριόνισμα [9]

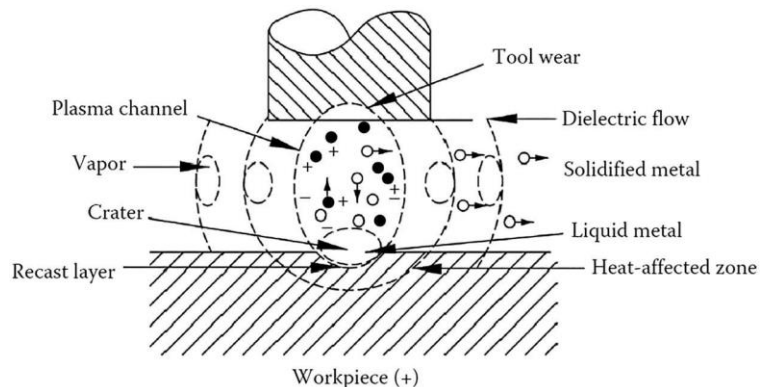
1.1 Αρχή λειτουργίας – μηχανισμός απομάκρυνσης υλικού

Η βασική αρχή λειτουργίας της κατεργασίας της ηλεκτροδιάβρωσης είναι κατ' ουσίαν η ίδια για την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης-βύθισης και για την ηλεκτροδιάβρωση με σύρμα, με τις διαφορές να εμφανίζονται στη διάταξη του συγκροτήματος εργαλειομηχανής που απαιτείται σε κάθε περίπτωση. Μέσω αυτής της κατεργασίας αφαιρείται υλικό από ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά με τη χρήση πολύ σύντομων επαναλαμβανόμενων ηλεκτρικών εκκενώσεων παρουσία διηλεκτρικού υγρού, με ταυτόχρονη εφαρμογή διαφοράς δυναμικού μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου, τα οποία δεν εφάπτονται, αλλά υπάρχουν ανάμεσά τους διάκενο, στο οποίο βρίσκεται διηλεκτρικό υγρό [4].

Καθώς το φορτισμένο ηλεκτρόδιο πλησιάζει το προς κατεργασία τεμάχιο, προκαλείται κατάρρευση του παρεμβαλλόμενου διηλεκτρικού υγρού, μολονότι είναι καλός μονωτής του ηλεκτρικού ρεύματος, δηλαδή αρχίζουν και εμφανίζονται ιόντα, επιτρέποντας τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος από το ηλεκτρόδιο στο τεμάχιο, εξαιτίας του συνεχώς αυξανόμενου, ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου που εμφανίζεται. Η διαδικασία αυτή μπορεί να ευνοηθεί από την παρουσία σωματιδίων γραφίτη και άλλων μεταλλικών στοιχείων με δύο τρόπους, είτε λειτουργώντας ως αγωγοί, μεταφέροντας απευθείας το ηλεκτρικό φορτίο, είτε δρώντας καταλυτικά στην κατάρρευση του διηλεκτρικού υγρού. Η ισχύς του ηλεκτρικού πεδίου γίνεται μέγιστη στη μικρότερη απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίου-τεμαχίου. Στο στάδιο αυτό δεν πραγματοποιείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος (εικόνα 15).

Όσο περνάει ο χρόνος συνεχίζει περαιτέρω η κατάρρευση του διηλεκτρικού, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται το πλήθος των φορτισμένων σωματιδίων σε αυτό, με αποτέλεσμα να μειώνονται ολοένα και περισσότερο οι μονωτικές του ιδιότητες σε μια στενή ζώνη γύρω από την περιοχή όπου η ισχύς του ηλεκτρικού πεδίου είναι μέγιστη. Η εφαρμοζόμενη τάση πιάνει τη μέγιστη τιμή της χωρίς ακόμα να επιτρέπεται η διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος (εικόνα 16), κάτι που με την χρονική εξέλιξη της διαδικασίας αλλάζει, καθώς σε κάποια χρονική στιγμή στην προαναφερθείσα ζώνη οι μονωτικές ιδιότητες του διηλεκτρικού υγρού έχουν αλλοιωθεί αρκετά, ώστε να επιτρέπεται πλέον η διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος. Εκείνη τη στιγμή η τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης αρχίζει και μειώνεται (εικόνα 17).

Όσο η ένταση του διερχόμενου ηλεκτρικού ρεύματος αυξάνει, αρχίζει και αναπτύσσεται θερμότητα με ταχύτατους ρυθμούς και πιάνει τέτοιες τιμές, που εξαχνώνεται υλικό από το τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο, ενώ προκαλείται εξάτμιση και στο διηλεκτρικό υγρό.



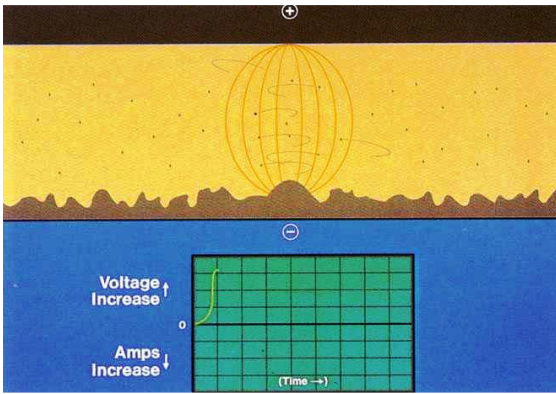
Εικόνα 14 : Μηχανισμός αποβολής υλικού κατά την EDM [1]

Ταυτόχρονα σχηματίζεται ένας αγωγός εκκένωσης (discharge channel) μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου. Η τιμή της τάσης συνεχίζει να μειώνεται (εικόνα 18). Από τα εξαχνωμένα/εξατμισμένα υλικά δημιουργείται μια φυσαλίδα ατμών (vapor bubble), η οποία προσπαθεί να εκτονωθεί προς τα έξω, όμως εμποδίζεται από τη συνεχή ροή ιόντων προς τον αγωγό εκκένωσης, στον οποίο και έλκονται λόγω του εξαιρετικά έντονου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που έχει αναπτυχθεί. Σε αυτό το στάδιο η ένταση του διερχόμενου ρεύματος συνεχίζει να αυξάνεται, η δε τάση στα άκρα συνεχίζει να μειώνεται (εικόνα 19).

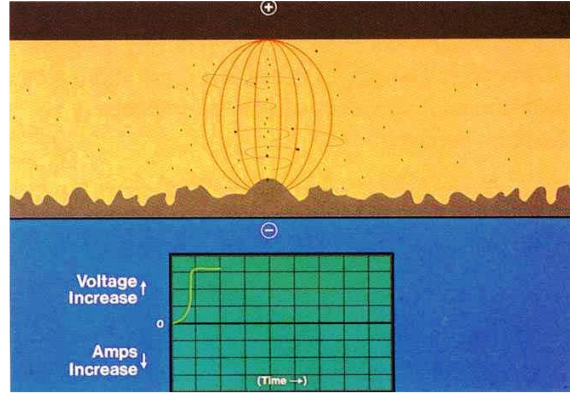
Προς το τέλος της χρονικής διάρκειας παλμού, οι τιμές σε τάση και ένταση ρεύματος έχουν σταθεροποιηθεί και η πίεση μέσα στη φούσκα ατμών έχει φτάσει στη μέγιστη τιμή της, ενώ έχει πραγματοποιηθεί και μικρή αφαίρεση υλικού από τεμάχιο και ηλεκτρόδιο. Η επιφάνεια του τεμαχίου ακριβώς κάτω από τη στήλη εκκένωσης έχει ρευστοποιηθεί, ωστόσο η φούσκα ατμών ακριβώς από πάνω της την συγκρατεί σε σταθερή θέση. Πλέον ο αγωγός εκκένωσης αποτελείται από υπερθερμασμένο πλάσμα που συνίσταται από εξαχνωμένη ύλη τεμαχίου και ηλεκτροδίου και εξατμισμένο διηλεκτρικό υγρό, ενώ ταυτόχρονα διέρχεται ρεύμα υψηλής έντασης από αυτόν (εικόνα 20).

Μετά τη λήξη της χρονικής διάρκειας παλμού, ακολουθεί το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτρικών εκκενώσεων. Στην έναρξή του, οι τιμές τάσης και έντασης ρεύματος μηδενίζονται, η θερμοκρασία μειώνεται με ταχύτατο ρυθμό, με αποτέλεσμα να καταρρεύσει η φυσαλίδα ατμών, οδηγώντας έτσι στην απομάκρυνση από το τεμάχιο του προαναφερθέντος τηγμένου υλικού που συγκρατιόταν από αυτήν και στο σχηματισμό κρατήρα (εικόνα 21). Τη θέση της φυσαλίδας καταλαμβάνει διηλεκτρικό υγρό, το οποίο απομακρύνει τα απομεινάρια της φυσαλίδας και παράλληλα βάφει την θερμικά επηρεασμένη επιφάνεια του τεμαχίου στην περίπτωση που αυτό είναι μεταλλικό. Επιπλέον πραγματοποιείται επαναστερεοποίηση όσης ποσότητας τηγμένου υλικού δεν απομακρύνθηκε, δημιουργώντας έτσι μια νέα στρώση επαναστερεοποιημένου υλικού (recast layer) (εικόνα 22).

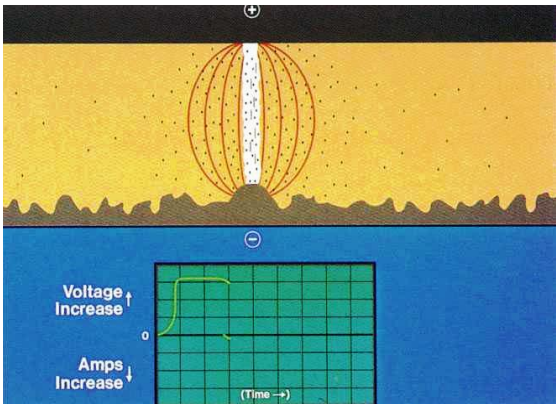
Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την επαναστερεοποίηση μέσα στο διηλεκτρικό υγρό και την απόπλυση του υλικού που έχει αφαιρεθεί από τεμάχιο και υλικό, ενώ όση ύλη παρέμεινε σε αέρια μορφή, αναδύεται στην επιφάνεια του υγρού και απομακρύνεται στην ατμόσφαιρα (εικόνα 23). Σε αυτό το στάδιο καταδεικνύεται η σημασία προγραμματισμού επαρκούς χρονικού διαστήματος για απόπλυση μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτρικών εκκενώσεων, καθώς ανεπαρκής απομάκρυνση ακαθαρσιών και τριμμάτων οδηγεί σε ασταθή σπινθήρα που πέραν της χειροτέρευσης της απόδοσης της κατεργασίας, δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για το σχηματισμό τόξου συνεχούς ρεύματος μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου, προκαλώντας ζημιά σε αμφότερα [9].



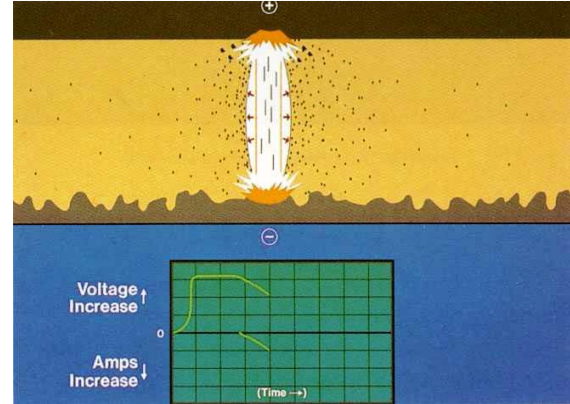
Εικόνα 15: Σχηματισμός σπινθήρα – 1^ο στάδιο [9]



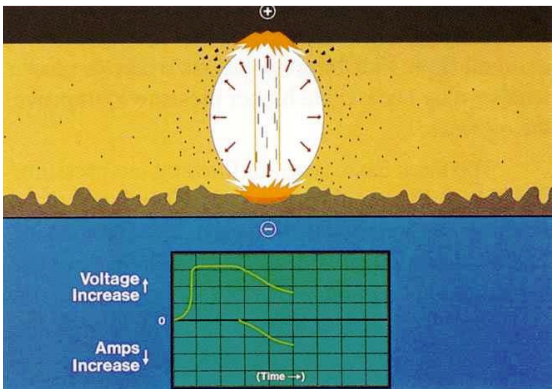
Εικόνα 16: Σχηματισμός σπινθήρα – 2^ο στάδιο [9]



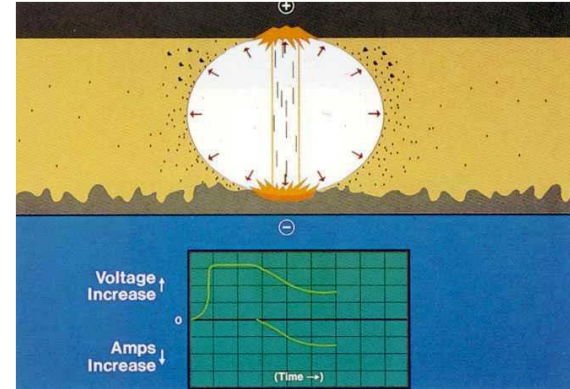
Εικόνα 17: Σχηματισμός σπινθήρα – 3^ο στάδιο[9]



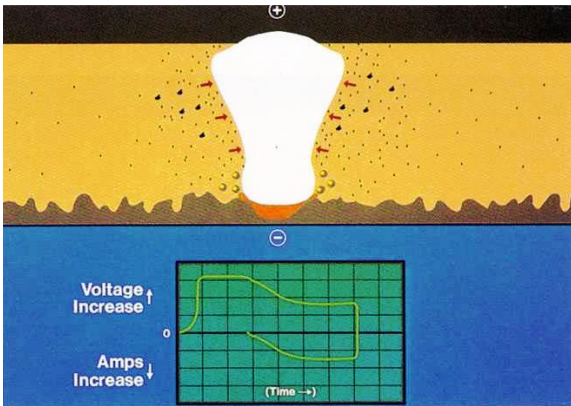
Εικόνα 18: Σχηματισμός σπινθήρα – 4^ο στάδιο[9]



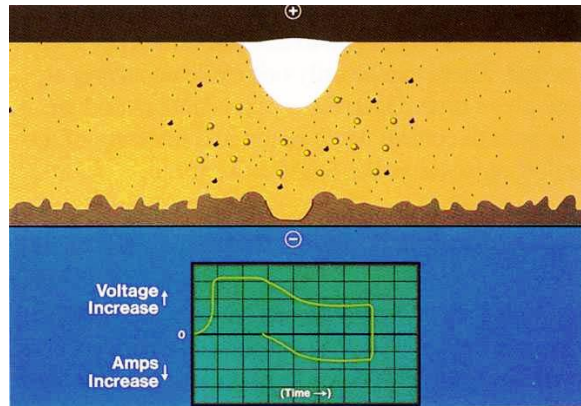
Εικόνα 19: Σχηματισμός σπινθήρα – 5^ο στάδιο[9]



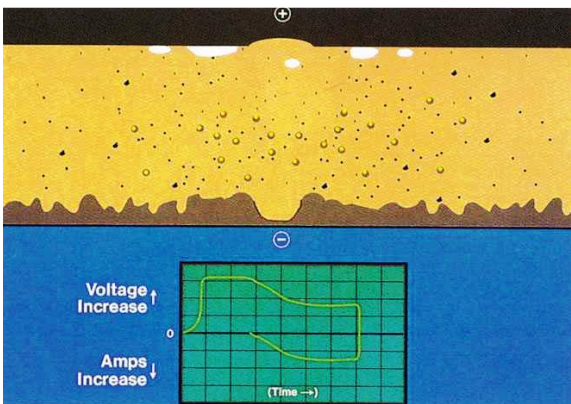
Εικόνα 20: Σχηματισμός σπινθήρα – 6^ο στάδιο[9]



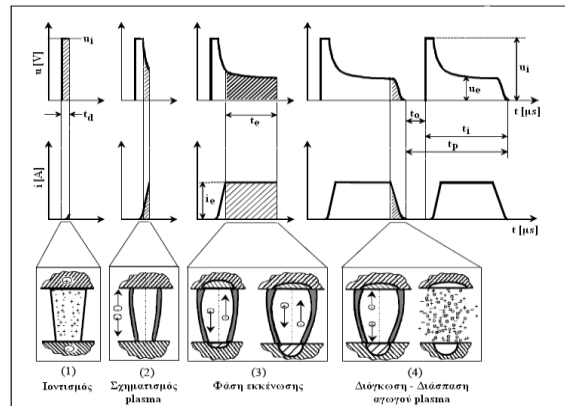
Εικόνα 21: Σχηματισμός σπινθήρα – 7^ο στάδιο[9]



Εικόνα 22: Σχηματισμός σπινθήρα – 8^ο στάδιο[9]



Εικόνα 23: Σχηματισμός σπινθήρα – 9^ο στάδιο[9]



Εικόνα 24: Φάσεις σχηματισμού σπινθήρα[9]

Σε μια τυπική κατεργασία πραγματοποιούνται αρκετοί τέτοιοι κύκλοι δημιουργίας σπινθήρων, ενώ ο όγκος του υλικού που αφαιρείται ανά κύκλο εκκένωσης σπινθήρα κυμαίνεται μεταξύ 10^{-6} και 10^{-4} mm³, αναλόγως το είδος της εφαρμογής. Ο μηχανισμός αυτός δίνει τη δυνατότητα επίτευξης αρκετά καλής ακρίβειας στις κοπές που πραγματοποιούνται, διότι η επιφάνεια που σχηματίζονται οι σπινθήρες ορίζεται από τη γεωμετρία της επιφάνειας του ηλεκτροδίου, άρα αφαιρείται και η αντίστοιχη επιφάνεια από το τεμάχιο. Μερικές ενδεικτικές τιμές μεγεθών περιλαμβάνουν την πυκνότητα ενέργειας στο σημείο μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος στον αγωγό εκκένωσης, $10^{11} - 10^{14}$ W/m² και τη θερμοκρασία του σπινθήρα, 6000-12000 °C [4].

1.2 Βασικά τμήματα ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης-βύθισης

Τα βασικά τμήματα της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης-βύθισης είναι :

- το τεμάχιο προς κατεργασία
- το ηλεκτρόδιο
- το διηλεκτρικό υγρό
- ο μηχανισμός κίνησης στους άξονες X – Y
- ο σερβομηχανισμός ελέγχου
- η γεννήτρια ηλεκτρικών παλμών
- το δοχείο – δεξαμενή εργασίας
- η δεξαμενή αποθήκευσης διηλεκτρικού μέσου
- η αντλία και φίλτρα διηλεκτρικού μέσου

1.2.1 Τεμάχιο (workpiece)

Ως τεμάχιο κατεργασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό, ανεξαρτήτως μηχανικών ιδιοτήτων όπως σκληρότητα, αντοχή κλπ, λόγω του ιδιαίτερου μηχανισμού αφαίρεσης υλικού που πραγματοποιείται. Ενδεικτικά δύναται να κατεργαστεί ακόμα και τιτάνιο, καθώς και υπερκράματα νικελίου. Πέραν της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, που αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επιλογή του τεμαχίου προς κατεργασία, για την μελέτη των παραμέτρων και της αποδοτικότητας της κατεργασίας σημαντική σημασία πρέπει να δοθεί στις λοιπές θερμο-ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού, καθώς η ηλεκτροδιάβρωση είναι μια θερμο-ηλεκτρική κατεργασία, ενώ προφανώς δεν μπορούν να αγνοηθούν και οι μηχανικές ιδιότητες. Τέλος, ρόλο παίζουν και οι διαστάσεις του όγκου προς κατεργασία [4,5].

1.2.2 Ηλεκτρόδιο (tool electrode)

Η επιλογή κατάλληλου υλικού για ηλεκτρόδιο είναι υψίστης σημασίας κατά τον προγραμματισμό της κατεργασίας, καθώς πραγματοποιείται ταυτόχρονη αφαίρεση υλικού από τεμάχιο και ηλεκτρόδιο κατά τη διαδικασία της ηλεκτροδιάβρωσης, συνεπώς πρέπει να επιλεχθεί υλικό με μεγαλύτερη αντίσταση στη φθορά από ό,τι το υλικό του τεμαχίου [4]. Συνηθέστερο υλικό κατασκευής των ηλεκτροδίων είναι ο γραφίτης, ενώ χρησιμοποιείται ακόμα ορείχαλκος, χαλκός ή κράματα χαλκού-βολφραμίου. Η μορφοποίηση της γεωμετρίας τους γίνεται μέσω συμβατικών μεθόδων κατεργασίας, όπως μέσω χύτευσης, κατεργασιών διαμόρφωσης, κονιομεταλλουργίας ή κατεργασίας με CNC [5].

Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της EDM σε σχέση με άλλες συμβατικές κατεργασίες αποβολής υλικού είναι το γεγονός πως η φθορά του ηλεκτροδίου καθιστά μερικές φορές

τη διαδικασία παραγωγής ακριβή, καθώς επηρεάζεται η γεωμετρία του, επιφέροντας έτσι ανεπιθύμητες αλλαγές στο παραγόμενο σχήμα και στη διαστασιολογική του ακρίβεια. [4, 5]. Για τη μελέτη της σχετικής φθοράς τεμαχίου – ηλεκτροδίου έχει οριστεί το μέγεθος του λόγου φθοράς (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 [5].

Έχει αποδειχτεί 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. Ένας από τους τρόπους ελαχιστοποίησης της φθοράς του εργαλείου είναι η αναστροφή της πολικότητας σε συνδυασμό με χρήση ηλεκτροδίου από χαλκό, διαδικασία που ονομάζεται EDM αντίστροφης πολικότητας (No wear EDM), ωστόσο χρειάζεται συχνό έλεγχο, καθώς δύναται το υλικό του τεμαχίου να επικαλύψει το ηλεκτρόδιο, αλλάζοντάς του τη μορφή [4].

Ακολουθούν τρεις πίνακες που συγκρίνουν ιδιότητες και παραμέτρους κατεργασίας για διάφορα υλικά ηλεκτροδίου, ενώ παρουσιάζεται και προτεινόμενο υλικό ηλεκτροδίου για την κατεργασία διαφόρων υλικών [4].

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 1: Σύγκριση ιδιοτήτων και παραμέτρων για μεταλλικά ηλεκτρόδια και ηλεκτρόδια γραφίτη

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 χαλκού-βολφραμίου	Cu/CuW	Αρνητική	Υψηλές	Υψηλές

Πίνακας 2: Προτεινόμενες συνθήκες κατεργασίας για διάφορα υλικά τεμαχίου

Χαρακτηριστικές παράμετροι EDM	Απόδοση ηλεκτροδίου από γραφίτη	Απόδοση ηλεκτροδίου από χαλκό (Cu)	Απόδοση ηλεκτροδίου από κράμα χαλκού-βολφραμίου (CuW)
Ρυθμός αποβολής υλικού (MRR)	Υψηλότερος	Μέτριος	Χαμηλότερος
Λόγος φθοράς (TWR)	Μέτριος	Υψηλότερος	Χαμηλότερος
Μέση τραχύτητα επιφανείας (Ra)	Υψηλότερη τιμή Ra Χειρότερη απόδοση	Χαμηλότερη τιμή Ra Καλύτερη απόδοση	Ενδιάμεση κατάσταση

Πίνακας 3: Σύγκριση απόδοσης διαφόρων υλικών ηλεκτροδίου σε διάφορες παραμέτρους κατεργασίας

1.2.3 Διηλεκτρικό υγρό (dielectric fluid)

Η παρουσία του διηλεκτρικού υγρού κατά τη διαδικασία της EDM είναι απαραίτητη, καθώς παρεμβάλλεται μεταξύ των ηλεκτρικά αγώγιμων ηλεκτροδίου και τεμαχίου. Το διηλεκτρικό παίζει το ρόλο μονωτικού μέσου, το οποίο χάνει τις ιδιότητές του και καταρρέει μόνο κατά τη διαδικασία ανάπτυξης σπινθήρα, γεγονός που σημαίνει πως χάρη σε αυτό είναι εφικτή η ελεγχόμενη παραγωγή σπινθήρων [4]. Καθώς το τεμάχιο είναι πλήρως βυθισμένο στο διηλεκτρικό υγρό κατά την κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης-βύθισης, το υγρό χρησιμοποιείται και ως μέσο απομάκρυνσης των αποβλίττων από το διάκενο, ενώ παράλληλα ψύχει την περιοχή κατεργασίας απάγοντας θερμότητα λόγω των επαναλαμβανόμενων διασπάσεων που παθαίνει [9].

Από τους παραπάνω ρόλους που διαδραματίζει το διηλεκτρικό μέσο, μπορεί εύκολα να συμπεράνει κανείς τη σημασία της σωστής επιλογής του στην αποτελεσματικότητα και στην

απόδοση της κατεργασίας. Ένα κατάλληλο διηλεκτρικό μέσο θα πρέπει να διαθέτει τις παρακάτω ιδιότητες [3, 5] :

- Υψηλή διηλεκτρική σταθερά
- Να έχει τη δυνατότητα γρήγορου απιονισμού
- Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης
- Υψηλό σημείο ανάφλεξης
- Καλές ιδιότητες απαγωγής θερμότητας
- Χαμηλό ιξώδες και χαμηλή επιφανειακή τάση
- Χαμηλό ειδικό βάρος (specific gravity)
- Χημική ουδετερότητα
- Να μην εκλύει ανθυγιεινές αναθυμιάσεις
- Να είναι διαφανές

Σαν διηλεκτρικά συνήθως χρησιμοποιούνται μίγματα υδρογονανθράκων (έλαια) όπως παραφινέλαιο, πετρέλαιο, βενζίνη, έλαια μετασχηματιστή και απιονισμένο νερό, κυρίως σε εφαρμογές EDM σύρματος [9]. Τα έλαια και το νερό έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα την εφαρμογή, συνεπώς χρειάζεται κάθε φορά κατάλληλη επιλογή. Παρακάτω ακολουθεί μια συγκριτική μελέτη των δύο αυτών οικογενειών υλικών [4]:

Έλαια ως διηλεκτρικό	Απιονισμένο νερό ως διηλεκτρικό
Δεν παθαίνουν ηλεκτρόλυση	Πραγματοποιείται ηλεκτρόλυση του νερού
Κατεργασμένα τεμάχια πιο επιρρεπή σε θερμικές ζημιές και μικρορωγμές	Ενδεχόμενη διάβρωση και σκουριά λόγω ηλεκτρόλυσης στα κατεργασμένα τεμάχια
Παράγονται σκληρότερες και άρα πιο ψαθυρές κατεργασμένες επιφάνειες	Παράγονται λιγότερο σκληρές και ψαθυρές κατεργασμένες επιφάνειες
Περιορισμένες ταχύτητες κοπής	Επιτρέπει υψηλότερες ταχύτητες κοπής
Λαμβάνεται καλή ποιότητα τραχύτητας επιφάνειας	Λαμβάνονται πιο τραχιές κατεργασμένες επιφάνειες
Τα ηλεκτρόδια συνήθως συνδέονται στην θετική πολικότητα	Τα ηλεκτρόδια συνήθως συνδέονται στην αρνητική πολικότητα
Μικρότερη φθορά ηλεκτροδίου	Σημαντική φθορά ηλεκτροδίου
Χαμηλά κόστη λειτουργίας και συντήρησης	Υψηλά κόστη λειτουργίας και συντήρησης

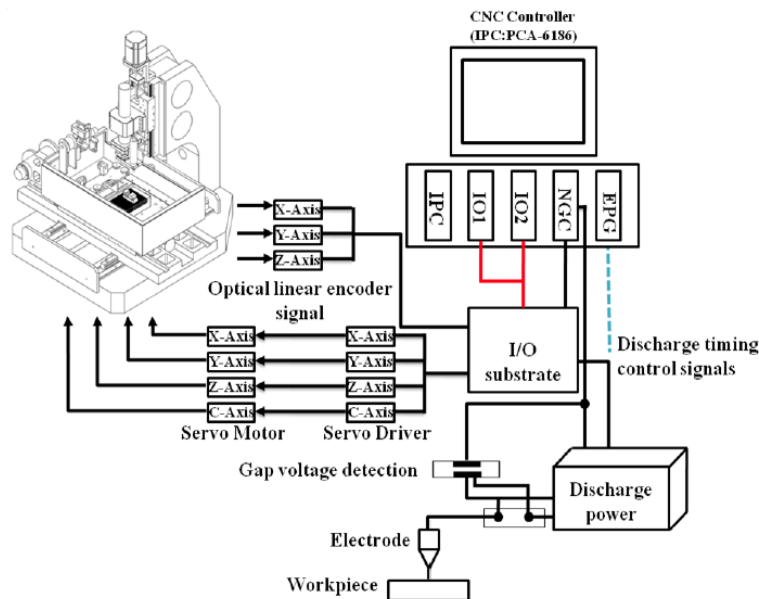
Πίνακας 4: Σύγκριση ιδιοτήτων για δυο τύπους διηλεκτρικού μέσου

Μεγάλη σημασία στην απόδοση και στα αποτελέσματα της EDM έχει και ο τρόπος κυκλοφορίας του διηλεκτρικού μέσου στη θέση κατεργασίας, ο οποίος θα αναλυθεί εκτενέστερα σε επόμενο υποκεφάλαιο. Λόγω ανεπαρκούς έκπλυσης του διακένου δύναται

να προκληθούν τοπικά ανεπιθύμητα τόξα, μείωση του χρόνου ζωής του ηλεκτροδίου και αύξηση του χρόνου παραγωγής των τεμαχίων [9].

1.2.4 Μηχανισμός κίνησης στους άξονες X-Y

Για την δημιουργία πολύπλοκων γεωμετριών στο τεμάχιο, είναι απαραίτητη η δυνατότητα κίνησης στο X-Y επίπεδο είτε του τεμαχίου, είτε του ηλεκτροδίου, όπου ως X-Y επίπεδο ορίζεται αυτό στο οποίο προβάλλεται η προς αποτύπωση στο τεμάχιο γεωμετρία του ηλεκτροδίου. 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 (machine bed) και τον έλεγχο της θέσης με ακρίβεια καλύτερη του ενός μικρομέτρου. Η τράπεζα έχει συνήθως κατάλληλους μηχανισμούς (αρπάγες) ή εσοχές για την απευθείας πρόσδεση του τεμαχίου σε αυτήν ή κάποιας άλλης αγώγιμης 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 [4].



Εικόνα 25: Διαγραμματική απεικόνιση του μηχανισμού κίνησης σε μηχανή EDM [4]

1.2.5 Δοχείο εργασίας (work tank)

Το δοχείο εργασίας είναι κατάλληλα κατασκευασμένο ώστε να γεμίζει με διηλεκτρικό υγρό, χωρίς να υπάρχουν διαρροές. Κατασκευάζεται συνήθως από ελάσματα μετάλλου και διαθέτει θύρα πρόσβασης, συνδεδεμένη είτε με αρθρώσεις, είτε είναι αποσπώμενη, για διευκόλυνση της τοποθέτησης των τεμαχίων. Μεταξύ θύρας και δοχείου, στο σημείο επαφής τους, παρεμβάλλεται ελαστομερές υλικό για την εξασφάλιση της στεγανότητας. Οι λειτουργίες που επιτελεί περιλαμβάνουν την εξασφάλιση της διαρκούς εμβάπτισης ηλεκτροδίου και τεμαχίου στο διηλεκτρικό μέσο μέσω ελέγχου της στάθμης του, τη συνεχή ανανέωση του διηλεκτρικού μέσου και τη διατήρηση του συστήματος κάτω από ένα ανώτατο θερμοκρασιακό όριο. Ο έλεγχος της στάθμης πραγματοποιείται μέσω των διακοπών στάθμης και υπερχειλίσης, οι οποίοι εξασφαλίζουν ότι η μηχανή θα λειτουργεί εντός ορισμένων κατώτερων και ανώτερων ορίων στάθμης υγρού εντός του δοχείου. Τέλος, η θερμοκρασία ελέγχεται μέσω θερμοστάτη, ο οποίος διακόπτει τη λειτουργία της μηχανής στο ενδεχόμενο που η θερμοκρασία του συστήματος υπερβεί μια ορισμένη μέγιστη τιμή [10].



Εικόνες 26, 27: Το εσωτερικό και το πορτάκι του δοχείου εργασίας της μηχανής AGIETRON EMT 1.10

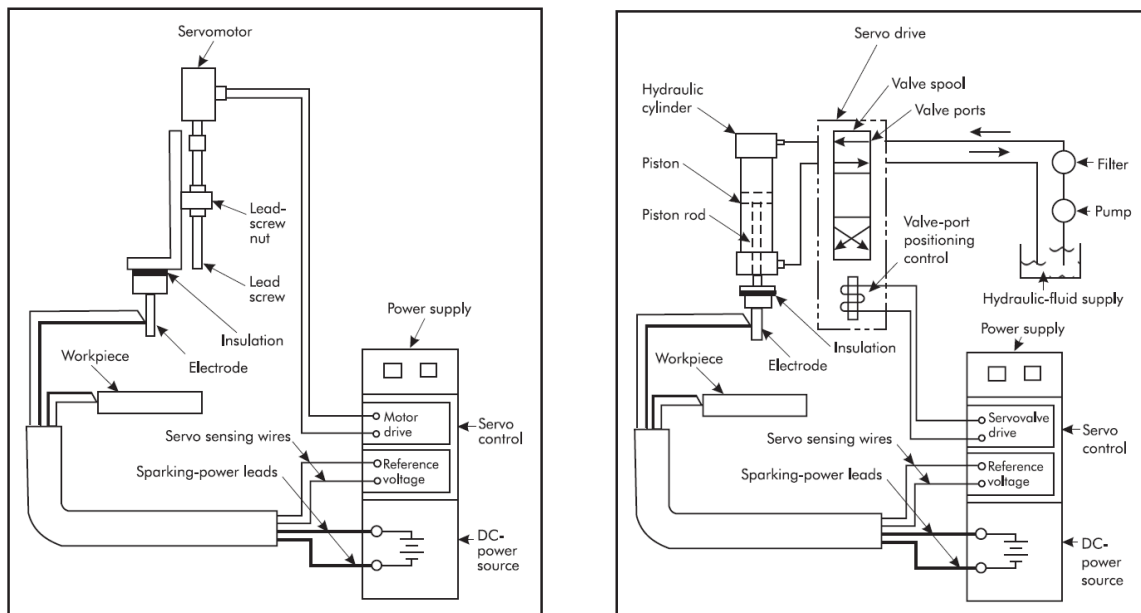
1.2.6 Σερβομηχανισμός ελέγχου (servo control system)

Ο σερβομηχανισμός ελέγχου είναι ένα σημαντικό, αυτόματο υποσύστημα της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης-βύθισης, καθώς είναι υπεύθυνος για τη διατήρηση του κατάλληλου, ορισμένου εκ των προτέρων, διακένου μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου, ούτως ώστε να πραγματοποιούνται αποτελεσματικές ηλεκτρικές εκκενώσεις. Επιπροσθέτως, ελέγχει την κίνηση του ηλεκτροδίου κατά τον άξονα Z, κάθετο στο επίπεδο κίνησης X-Y, προωθώντας το ηλεκτρόδιο στο τεμάχιο για την επίτευξη του απαραίτητου διακένου είτε απομακρύνοντάς το όταν προκαλούνται μη αποδοτικοί σπινθήρες ή τόξα, συμβάλλοντας έτσι στη διατήρηση ευσταθών συνθηκών κατεργασίας. Τέλος, διατηρεί σε σταθερή τιμή την τάση εν κενώ που εφαρμόζεται στο διάκενο μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου [4].

Είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί αποτελεσματικά με ποικίλα μεγέθη ηλεκτροδίων, με τάξη μεγέθους διαστάσεων που εκτείνεται από εκατοστά μέχρι και μικρόμετρα., ενώ

συνεργάζεται και με το υποσύστημα της παλμογεννήτριας καθώς και με τον ελεγκτή CNC, σε όσα κέντρα κατεργασιών υφίσταται ως δυνατότητα.

Το τμήμα του σερβομηχανισμού που είναι ορατό στη μηχανή είναι η σερβο-κεφαλή, στον άξονα της οποίας συνδέεται το ηλεκτρόδιο. Ανάλογα την εφαρμογή και το μέγεθος του ηλεκτροδίου, ποικίλλει ο τρόπος κίνησης του άξονα του ηλεκτροδίου, με κύριες παραλλαγές τη χρήση σερβο-υδραυλικού συστήματος σε πιο μεγάλες μηχανές με βαριά ηλεκτρόδια και τη χρήση ηλεκτρικού σερβο-κινητήρα σε μικρότερα μεγέθη. Και στις δύο περιπτώσεις, το σύστημα οδήγησης του σερβο ελέγχεται από σύστημα με μικροελεγκτές, που στέλνει ψηφιακά σήματα, τα οποία μετατρέπονται σε αναλογικά μέσω ψηφιακοαναλογικού μετατροπέα και μέσω αυτών οδηγείται το σερβο με τη χρήση εξαρτήματος PWM. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με βάση διάφορους αλγορίθμους και αρχές λειτουργίας, όπως η πρόβλεψη του μεγέθους του διακένου, ο μέσος χρόνος υστέρησης κλπ [4].

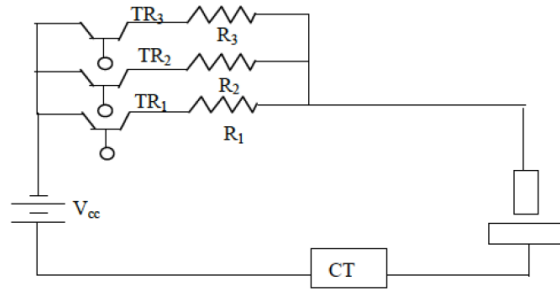


Εικόνες 28, 29: Σερβομηχανισμοί ελέγχου με ηλεκτροκινητήρα και με υδραυλική οδήγηση [2]

1.2.7 Μονάδα παροχής ισχύος – γεννήτρια παλμών

Η μονάδα παροχής ισχύος ή παλμογεννήτρια είναι το πιο σημαντικό υποσύστημα για κάθε συγκρότημα κατεργασίας EDM. Τα κύρια συστήματα που την αποτελούν περιλαμβάνουν την DC πηγή ισχύος, τον ελεγκτή σερβο, το σύστημα διανομής AC ηλεκτρικής ισχύος και τη μονάδα προστασίας από DC-τόξα. Υπάρχουν δυο κύριοι τύποι παλμογεννητριών, οι γεννήτριες αντίστασης-πυκνωτή RC και οι γεννήτριες τύπου τρανζίστορ ή ηλεκτρονικού διακόπτη ON/OFF [4].

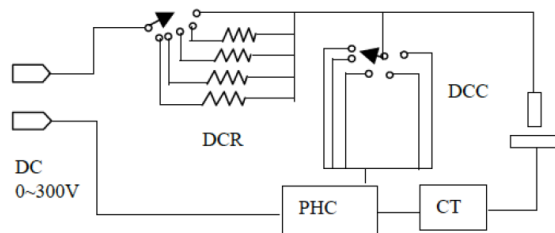
Μια τυπική παλμογεννήτρια τύπου τρανζίστορ αποτελείται από το κύκλωμα οδήγησης της πύλης, που απαρτίζεται από τρανζίστορ, TR και αντιστάσεις περιορισμού του ρεύματος, R και από έναν μετασχηματιστή ρεύματος, CT. Η διάταξη αποτελείται από αλληπάλληλα ζεύγη σε παράλληλη σύνδεση μεταξύ τους, αποτελούμενα το καθένα από ένα τρανζίστορ και μια αντίσταση σε σειρά, τα οποία συνδέονται σε σειρά με την πηγή DC ρεύματος και το διάκενο ανάπτυξης σπινθήρων κατά την κατεργασία. Το ρεύμα εκκένωσης στο διάκενο αυξάνει αναλογικά με τον αριθμό των τρανζίστορ που είναι ταυτόχρονα ενεργοποιημένα. Για να δημιουργηθεί ένας παλμός, ελέγχεται πρώτα αν υπάρχει ήδη κάποια ηλεκτρική εκκένωση, συγκρίνοντας την τιμή της τάσης εν κενώ με την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα διακένου. Τέλος, τα τρανζίστορ δουλεύουν ως διακόπτες του κυκλώματος.



Εικόνα 30: Κύκλωμα παλμογεννήτριας τύπου τρανζίστορ [4]

Ο τύπος αυτός παλμογεννητριών είναι ευρέως διαδεδομένος σε συμβατικές μηχανές EDM αποτύπωσης-βύθισης, καθώς προσφέρει ακριβή έλεγχο της χρονικής διάρκειας του παλμού και του μεσοδιαστήματος ανάμεσα σε δύο παλμούς, λόγω της φύσης των ηλεκτρονικών διακοπών ON/OFF που έχει. Επιπλέον, είναι πιο εύκολο να επιτευχθεί υψηλότερη ενέργεια κατά την εκκένωση, σε σχέση με τον άλλο τύπο παλμογεννητριών [4].

Μια τυπική RC παλμογεννήτρια απαρτίζεται από αντιστάσεις ελέγχου των εκκενώσεων, DCR, τους πυκνωτές ελέγχου των εκκενώσεων, DCC, το κύκλωμα διατήρησης τάσης, PHC και τον μετασχηματιστή ρεύματος, CT. Σε αυτόν τον τύπο γεννητριών, η χρονική διάρκεια του παλμού εκκένωσης εξαρτάται από τη χωρητικότητα των πυκνωτών και την αγωγιμότητα των καλωδίων που συνδέουν το κύκλωμα με το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο. Η τιμή της αντίστασης του κυκλώματος καθορίζει το χρόνο φόρτισης, από τον οποίο εξαρτάται η συχνότητα των εκκενώσεων, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίον παράγονται οι παλμοί, συνεπώς υπάρχει κίνδυνος για σχηματισμό DC τόξου αντί για σπινθηρισμό, αν ξεπεράσει κάποια κατώτερη τιμή. Τέλος, η ενέργεια εκκένωσης εξαρτάται από την χρησιμοποιούμενη, αλλά και από την παρασιτική χωρητικότητα φορτίου στο σύνολο της διάταξης.



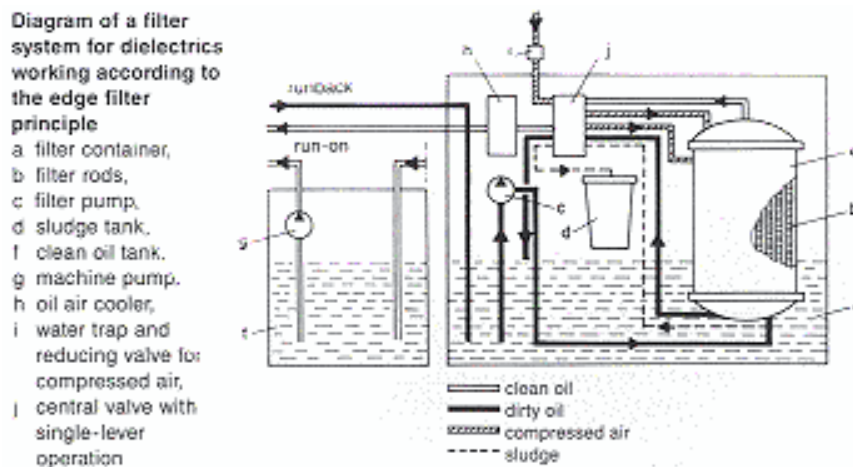
Εικόνα 31: Κύκλωμα παλμογεννήτριας τύπου RC [4]

Οι παλμογεννήτριες τύπου RC δεν μπορούν να παράγουν μεγάλες τιμές ενέργειας εκκένωσης και άρα με τη χρήση τους δεν μπορεί να επιτευχθεί υψηλός ρυθμός αφαίρεσης

υλικού (MRR). Όμως, έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν αρκετά χαμηλές τιμές της ενέργειας αυτής και έτσι χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές μικρο-ηλεκτροδιάβρωσης (micro-EDM) [4].

1.2.8 Σύστημα κυκλοφορίας διηλεκτρικού και έκπλυσης διακένου

Το σύστημα έκπλυσης και κυκλοφορίας του διηλεκτρικού είναι υπεύθυνο για την απομάκρυνση των δημιουργούμενων αποβλήτων από τη θέση κατεργασίας και για την παροχή νέου, φρέσκου διηλεκτρικού σε αυτήν. Το σύστημα απαρτίζεται από τη δεξαμενή του υγρού, την αντλία, το φίλτρο, το δίκτυο σωληνώσεων και το ακροφύσιο. Το διηλεκτρικό εκτελεί κυκλική διαδρομή από το ρεζερβουάρ στο δοχείο εργασίας και πίσω σε αυτήν. Η αντλία είναι υπεύθυνη για την κυκλοφορία του διηλεκτρικού στις σωληνώσεις και την τροφοδοσία του δοχείου εργασίας με αυτό, ενώ το φίλτρο χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των ακαθαρσιών από το ήδη χρησιμοποιημένο στο δοχείο εργασίας διηλεκτρικό, καθιστώντας το κατάλληλο για ανατροφοδότηση. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, οι συνθήκες έκπλυσης επηρεάζουν την αποδοτικότητα και το χρόνο της κατεργασίας.

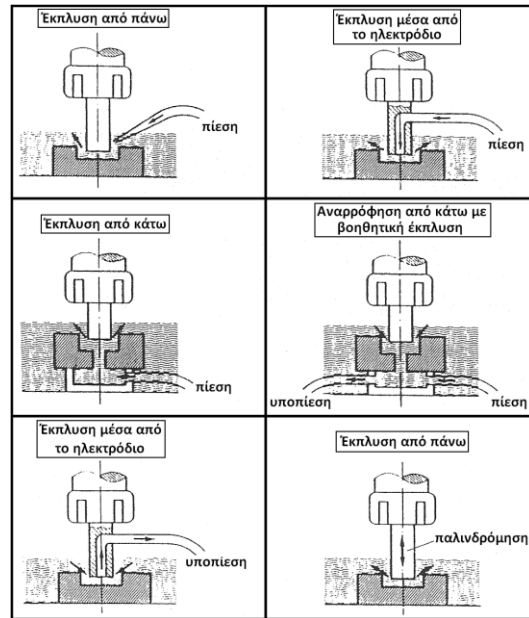


Εικόνα 32: Διάγραμμα του συστήματος φιλτραρίσματος του διηλεκτρικού [10]

Οι κύριες λειτουργίες της μονάδας κυκλοφορίας διηλεκτρικού και έκπλυσης διακένου 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

Στις περισσότερες εφαρμογές κατεργασίας με EDM αποτύπωσης-βύθισης, και το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο είναι βυθισμένα στο διηλεκτρικό υγρό. Η έκπλυση συμβαίνει εξαιτίας της τύρβης στο υγρό που εισάγει η κίνηση του ηλεκτροδίου προς το τεμάχιο, καθώς και τα διάφορα ηλεκτρικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά το σχηματισμό σπινθήρα. Για περαιτέρω δημιουργία επαρκούς κυκλοφορίας διηλεκτρικού στο κενό ηλεκτροδίου-τεμαχίου χρησιμοποιούνται μηχανισμοί που δίνουν επιπλέον ενέργεια στο ρευστό, οι οποίοι περιλαμβάνουν τη δημιουργία διαφοράς στην πίεση είτε με αύξηση της τιμής της στην είσοδο του δοχείου, είτε με μείωσή της στην έξοδο με τη μέθοδο της αναρρόφησης. Ένας άλλος τρόπος είναι η χρήση δέσμης ρευστού (τζετ), η οποία προσβάλλει απευθείας το διάκενο της περιοχής κατεργασίας, για πιο στοχευμένη και αποτελεσματική έκπλυση, ταυτόχρονα μέσω αυτού του αγωγού πληρείται και η δεξαμενή με διηλεκτρικό [4].



Εικόνα 33: Μέθοδοι έκπλυσης διακένου [9]

Η πίεση με την οποία πραγματοποιείται η έκπλυση αποτελεί σημαντική παράμετρο που επηρεάζει την κατεργασία, καθώς αφενός για αρκετά χαμηλές τιμές δυσχεραίνεται η απομάκρυνση στερεών και αερίων παραπροϊόντων, αφετέρου για αρκετά υψηλές τιμές ελλοχεύει ο κίνδυνος αυξημένης φθοράς του ηλεκτροδίου και εισαγωγής υψηλών τιμών τύρβης στο διάκενο, κάτι που είναι ανεπιθύμητο. Ακολουθεί πίνακας με την επίδραση της πίεσης έκπλυσης σε διάφορες παραμέτρους της κατεργασίας [4]:

Παράμετρος κατεργασίας	Επίδραση της πίεσης έκπλυσης
Ρυθμός αποβολής υλικού (MRR)	Υψηλές πιέσεις μειώνουν ελαφρώς το MRR
Λόγος σχετικής φθοράς (TWR)	Με την αύξηση της πίεσης, ο TWR αρχικώς μειώνεται και στη συνέχεια αυξάνεται, απαιτείται βελτιστοποίηση
Μέση τραχύτητα επιφανείας (R_a)	Με την αύξηση της πίεσης, η τραχύτητα αρχικώς μειώνεται και στη συνέχεια αυξάνεται

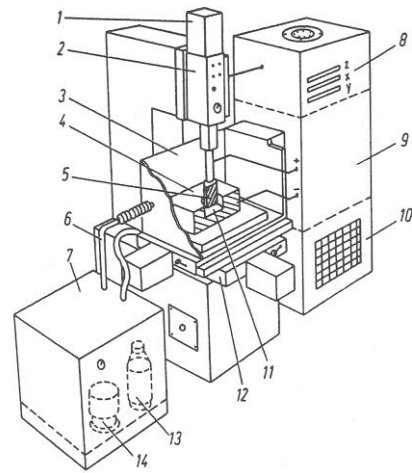
Πίνακας 5: Επίδραση της πίεσης έκπλυσης στις παραμέτρους της κατεργασίας

1.3 Τύποι εργαλειομηχανών EDM αποτύπωσης-βύθισης

Τα προαναφερθέντα υποσυστήματα της EDM μπορούν να συναρμολογηθούν σε ποικίλες διατάξεις για να αποτελέσουν ένα συγκρότημα εργαλειομηχανής. Στην περίπτωση της EDM αποτύπωσης-βύθισης συναντώνται δύο κύριοι τύποι συγκροτημάτων με ειδοποιό διαφορά τον τρόπο σχετικής κίνησης ηλεκτροδίου-τεμαχίου στο Χ-Υ επίπεδο. Οι δύο τύποι διατάξεων της εργαλειομηχανής είναι :

- **Διάταξη τύπου C (C-frame style)**

Σε αυτήν την διάταξη ο σερβομηχανισμός κεφαλής είναι σταθερός και το κινητό μέλος στο Χ-Υ επίπεδο είναι η τράπεζα. Πάνω στην τράπεζα στερεώνεται η δεξαμενή εργασίας, η οποία διαθέτει και πορτάκι για διευκόλυνση της πρόσβασης στο εσωτερικό της, για την τοποθέτηση του τεμαχίου κλπ. Η σερβοκεφαλή, που φέρει και το ηλεκτρόδιο, δύναται να κινηθεί μόνο στον κατακόρυφο άξονα. Η ονομασία του τύπου (C-frame) παίρνει το όνομά της από το σχήμα της μηχανής όταν φαίνεται από το πλάι, το οποίο θυμίζει το γράμμα του λατινικού αλφαβήτου «C». Στην εικόνα 35 φαίνεται μια τυπική διάταξη τύπου C [2].

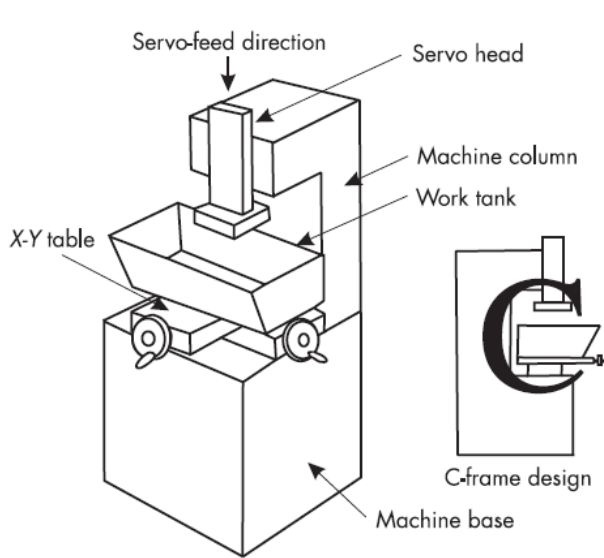


1 Πρόωση, 2 Κεφαλή, 3 Δεξαμενή, 4 Κομμάτι, 5 Ηλεκτρόδιο, 6 Απορροή, 7 Δεξαμενή διηλεκτρικού, 8 Έλεγχος της κίνησης των αξόνων, 9 Γεννήτρια, 10 Παροχή τ-σχός, 11 Διάκενο διάσπασης, 12 Κίνηση του τραπεζιού με αριθμητικό έλεγχο, 13 Φίλτρο, 14 Αντλία

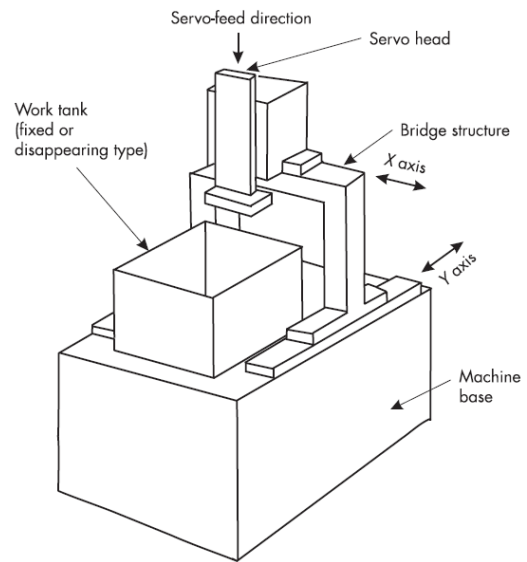
Εικόνα 34: Συγκρότημα κατεργασίας EDM αποτύπωσης- βύθισης [9]

- **Διάταξη τύπου γέφυρας (bridge style)**

Σε αυτήν την διάταξη το σταθερό μέλος είναι το δοχείο εργασίας και το κινούμενο στον Χ-Υ άξονα η σερβοκεφαλή. Η κίνηση επιτυγχάνεται μέσω μιας πλαισιωτής κατασκευής η οποία περιβάλλει το δοχείο εργασίας και μπορεί να κινείται σε ράγες γύρω από αυτό, αναφέρεται δε και ως γέφυρα, στην οποία οφείλεται και η ονομασία της διάταξης. Πάνω σε αυτήν την κατασκευή στερεώνεται και μπορεί να κινείται ο σερβομηχανισμός κεφαλής. Το δοχείο εργασίας δύναται να αποσπάται ή να αποσύρεται εντός της μηχανής, για τη διευκόλυνση της τοποθέτησης του τεμαχίου σε αυτό. Συχνά αυτός ο τύπος μηχανής χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μεγάλων σε μέγεθος τεμαχίων, μια και είναι πιο εύκολο να μετακινείται το ηλεκτρόδιο σε σχέση με αυτό. την εικόνα 36 φαίνεται μια τυπική διάταξη τύπου γέφυρας [2].



Εικόνα 35: Διάταξη τύπου C [2]



Εικόνα 36: Διάταξη τύπου γέφυρας [2]

2. Παράμετροι ελέγχου και απόδοσης της κατεργασίας

2.1 Παράμετροι ελέγχου της κατεργασίας

2.1.1 Διαφορά δυναμικού

Στην συγκεκριμένη κατεργασία, σαν παράμετρος ορίζεται η διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στο διάκενο μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου, λέγεται αλλιώς και **τάση εν κενώ**, V_o , με μονάδα μέτρησης το 1 Volt [V]. Για υψηλότερες τιμές παρατηρείται μεγαλύτερος ρυθμός αφαίρεσης υλικού και μεγαλύτερο διάκενο, το οποίο συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη απομάκρυνση ακαθαρσιών και αποβλίττων, ταυτόχρονα όμως προκαλείται πιο αδρή κατεργασμένη επιφάνεια και ταυτόχρονα αυξάνει και ο ρυθμός φθοράς του ηλεκτροδίου [4].

2.1.2 Ένταση ρεύματος

Όσον αφορά την ένταση ρεύματος, σαν παράμετρος ορίζεται η **υψηλότερη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος** που ρέει στο διάκενο μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου (**peak current**), με μονάδα μέτρησης το 1 Ampere [A]. Χάρη στην ένταση αυτή πραγματοποιείται η κατάρρευση του διηλεκτρικού με αποτέλεσμα την παραγωγή θερμότητας που προκαλεί την αφαίρεση υλικού. Κατά τη διάρκεια ενός κύκλου δημιουργίας σπινθήρα, το ρεύμα αυξάνει συνεχώς μέχρις ότου σταθεροποιηθεί σε μια τιμή μικρότερη ή το πολύ ίση της προκαθορισμένης υψηλότερης τιμής της έντασης. Υψηλότερες τιμές της έντασης αυτής δίνουν υψηλότερη ενέργεια εκκένωσης και υψηλότερο ρυθμό αποβολής υλικού, παράλληλα όμως προκαλείται σχηματισμός αδρότερης κατεργασμένης επιφανείας και αυξημένος ρυθμός φθοράς του ηλεκτροδίου [4].

2.1.3 Χαρακτηριστικά παλμού

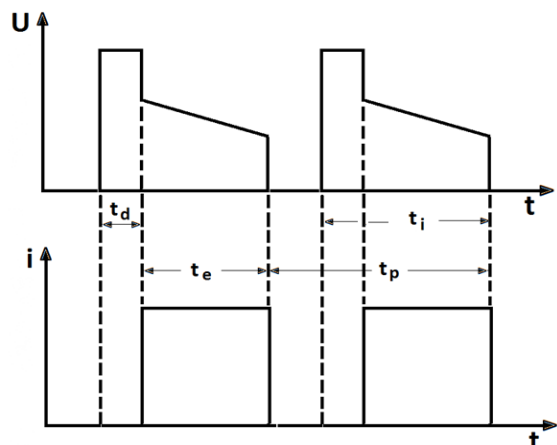
Ο παλμός τάσης που τροφοδοτεί το μηχανισμό της συγκεκριμένης κατεργασίας είναι μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος της κατεργασίας και αυτό πιστοποιείται από το γεγονός ότι απαιτείται η ρύθμιση ποικίλων χαρακτηριστικών του, τα οποία περιλαμβάνουν τη **χρονική διάρκεια ενός παλμού**, το **μεσοδιάστημα μεταξύ δύο παλμών**, την **κυματομορφή** του και τον **κύκλο λειτουργίας (duty ratio)**.

Η χρονική διάρκεια ενός κύκλου ηλεκτρικής εκκένωσης χωρίζεται σε δύο τμήματα, στο **χρόνο που διαρκεί ένας παλμός**, t_{on} και στο **μεσοδιάστημα μεταξύ δύο παλμών**, t_{off} στο οποίο η παλμογεννήτρια δεν στέλνει σήμα. Με τη σειρά του, το χρονικό διάστημα ενός παλμού, χωρίζεται σε δύο τμήματα, στο **χρονικό διάστημα υστέρησης**, t_d και στο **πραγματικό διάστημα διάρκειας παλμού**, t_e . Ισχύει ότι $t_d \ll t_e$ και μάλιστα συνήθως στην πράξη ισχύει πως $t_e \cong t_{on}$.

Η **πραγματική χρονική διάρκεια ενός παλμού**, t_e , εκφράζει το χρονικό διάστημα στο οποίο πραγματοποιείται η αφαίρεση υλικού, καθώς τότε υφίσταται η στήλη ρεύματος που

την προκαλεί. Ο ρυθμός αποβολής υλικού συνδέεται άμεσα με αυτήν, όπως 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, συνεπώς χρειάζεται βελτιστοποίηση η επιλογή κατάλληλης διάρκειας [4]. Το **χρονικό διάστημα υστέρησης**, t_d , εκφράζει το χρόνο στον οποίο εφαρμόζεται μεν τάση σε ηλεκτρόδιο και τεμάχιο, αλλά ακόμα δεν έχει ιονιστεί το διηλεκτρικό μέσο, με αποτέλεσμα να μην ρέει ρεύμα σε αυτό.

Το **μεσοδιάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών**, t_{off} , εκφράζει το χρονικό διάστημα στο οποίο κόβεται η ροή ρεύματος στο διάκενο μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου και άρα δεν πραγματοποιείται εκδήλωση σπινθήρα. Κατά το μεσοδιάστημα πραγματοποιείται η έκπλυση του διακένου από ακαθαρσίες και απόβλιττα, συνεπώς παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση ευσταθών συνθηκών λειτουργίας κατά την κατεργασία, συγχρόνως όμως, για μεγάλες τιμές του μεσοδιαστήματος, αυξάνει σημαντικά και η συνολική διάρκεια της κατεργασίας, άρα χρειάζεται και σε αυτήν την περίπτωση βελτιστοποίηση. Όλα τα παραπάνω χρονικά διαστήματα μετρούνται συνήθως σε microseconds [μs] [4].



Εικόνα 37: Ιδανική μορφή παλμών από παλμογεννήτρια τύπου τρανζίστορ [9]

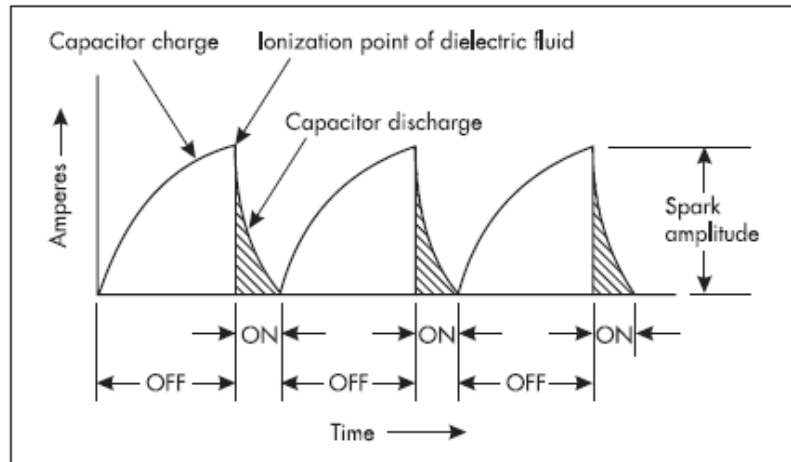
Ο **κύκλος λειτουργίας** (duty ratio), τ , ορίζεται ως το πηλίκο του χρόνου διάρκειας του παλμού προς το συνολικό χρονικό διάστημα του κύκλου σχηματισμού ενός σπινθήρα, δηλαδή

$$\tau = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

Σαν έννοια εκφράζει το βαθμό απόδοσης ενός παλμού και συνήθως με την αύξησή του προκαλείται και αύξηση του ρυθμού αποβολής υλικού [4]. Συνήθως στις μηχανές αντί για απευθείας ρύθμιση της διάρκειας του μεσοδιαστήματος δίνεται η δυνατότητα ρύθμισης της διάρκειας παλμού και του κύκλου λειτουργίας.

Η διαδικασία παραγωγής σπινθήρα περιγράφεται μέσω των διαγραμμάτων διαφοράς δυναμικού και έντασης σε σχέση με το χρόνο, στα οποία τα προς μελέτη μεγέθη αναπαρίστανται ως κυματομορφές, των οποίων η ερμηνεία έχει μεγάλη σημασία για τη μελέτη της κατεργασίας. Σε μια στατική παλμογεννήτρια (τύπου τρανζίστορ) η ιδανική κυματομορφή του παλμού τάσης έχει σταθερή την εν κενώ τιμή στο χρονικό διάστημα υστέρησης, στο χρονικό διάστημα εκδήλωσης σπινθήρα μειώνεται γραμμικά και στο

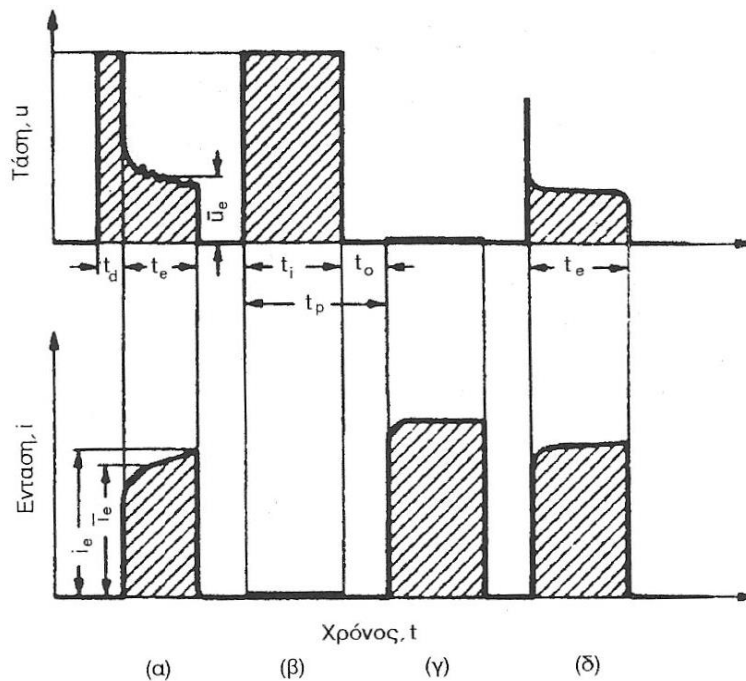
μεσοδιάστημα παίρνει μηδενική τιμή, ενώ η ιδανική κυματομορφή ρεύματος έχει σχήμα ορθογώνιου παλμού στο χρονικό διάστημα εκδήλωσης σπινθήρα με τιμή αυτήν της έντασης ρεύματος κατεργασίας και στα υπόλοιπα χρονικά διαστήματα παίρνει μηδενική τιμή. Στην περίπτωση της παλμογεννήτριας RC οι κυματομορφές εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του πυκνωτή του κυκλώματος.



Εικόνα 38: Κυματομορφή έντασης ρεύματος από παλμογεννήτρια τύπου RC [2]

Επιπλέον, ανάλογα με το μέγεθος του διακένου δύναται να παρουσιαστούν τέσσερις καταστάσεις που επηρεάζουν τις παραγόμενες κυματομορφές, οι οποίες περιλαμβάνουν [9] :

- την κυματομορφή κανονικής κατάστασης σε κανονικό διάκενο
- την κυματομορφή παλμού εν κενώ, στην οποία το διάκενο είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να μην μπορεί να εκδηλωθεί σπινθήρας και άρα δεν ρέει ρεύμα στο διάκενο
- την κυματομορφή βραχυκυκλώματος, στην οποία το ηλεκτρόδιο ακουμπά στο τεμάχιο και άρα παρατηρείται μηδενικό διάκενο, με αποτέλεσμα η ένταση του ρεύματος να παίρνει τη μέγιστη δυνατή τιμή και η τάση μηδενική τιμή
- την κυματομορφή εσφαλμένης εκκένωσης η οποία εμφανίζεται σε πολύ μικρές τιμές διακένου



Εικόνα 39: Η επίδραση της μορφής του παλμού στη διεξαγωγή της EDM [9]

2.1.4 Έλεγχος διακένου

Ο έλεγχος του διακένου χρειάζεται για την επίτευξη ευσταθούς κατεργασίας, ενώ επηρεάζει και τις υπόλοιπες παραμέτρους απόδοσης της κατεργασίας, όπως το ρυθμό αποβολής υλικού και την ποιότητα της κατεργασμένης επιφανείας.

Ξεκινώντας με το **μήκος του διακένου**, αν πάρει μικρές τιμές, αυξάνει το ποσοστό της εκδήλωσης αναποτελεσματικών σπινθήρων, βραχυκυκλωμάτων και τόξων, καθιστώντας την κατεργασία ασταθή. Σε τέτοιες συνθήκες πέραν της ανεπιθύμητης φθοράς που προκαλείται στο τεμάχιο, παρατηρείται και αυξημένη φθορά του κοπτικού εργαλείου κυρίως λόγω των αναποτελεσματικών σπινθήρων, οι οποίοι το φθείρουν, με λίγα λόγια παρατηρείται μείωση του ρυθμού αποβολής υλικού (MRR) σε συνδυασμό με αύξηση του χρόνου κατεργασίας και της φθοράς του ηλεκτροδίου (TWR). Από την άλλη, αν το μήκος του διακένου αυξηθεί πολύ, μειώνεται πολύ ο ρυθμός αποβολής υλικού, διότι αυξάνεται ο αριθμός των παλμών που αδυνατούν να προκαλέσουν αποτελεσματικό σπινθήρα.

Πέραν του μήκους μια άλλη παράμετρος είναι η **ταχύτητα κίνησης του ηλεκτροδίου στον άξονα Z (tool feed rate)**, η οποία ελέγχει τη διατήρηση συνεχούς παραγωγής αποτελεσματικών σπινθήρων. Υψηλές τιμές της αυξάνουν το ρίσκο σχηματισμού τόξου DC. Δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$F_Z \left[\frac{mm}{s} \right] = k \cdot \text{sgn}(V_{gap} [V] - V_{th} [V])$$

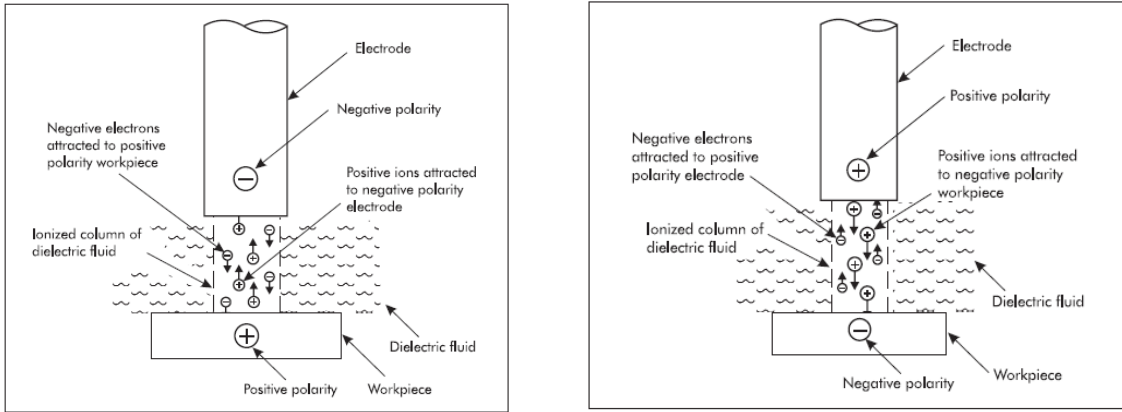
όπου F_Z [mm/s] η ταχύτητα του ηλεκτροδίου, k η παράμετρος ελέγχου διακένου, V_{gap} [V] η τάση στα άκρα του διακένου και V_{th} [V] μια τάση αναφοράς που καθορίζει τη κατεύθυνση της κίνησης του ηλεκτροδίου στον άξονα Z [4].

2.1.5 Πολικότητα

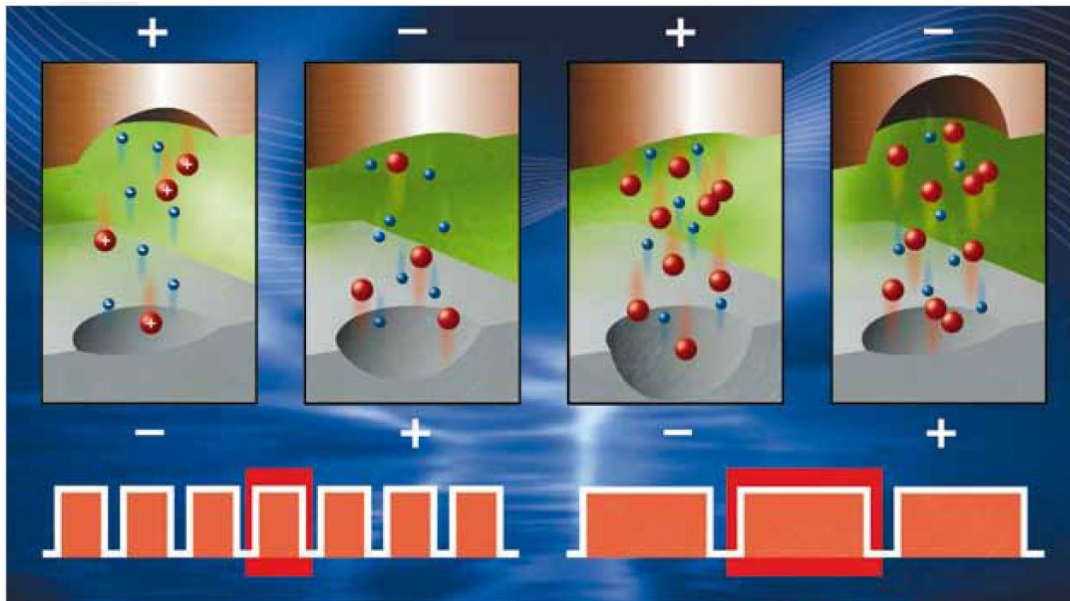
Η πολικότητα της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται σε ηλεκτρόδιο και τεμαχίο καθορίζει την κατεύθυνση της ροής ηλεκτρονίων και θετικά φορτισμένων ιόντων. Στην πλειοψηφία των μηχανών η πολικότητα ορίζεται ως θετική ή αρνητική, με αναφορά την πολικότητα του ηλεκτροδίου. Προφανώς η πολικότητα του τεμαχίου είναι σε κάθε περίπτωση η αντίστροφη.

Η πολικότητα επηρεάζει χαρακτηριστικά της κατεργασίας, όπως το ρυθμό αποβολής υλικού, τη φθορά του ηλεκτροδίου και τη διάρκεια της κατεργασίας [2]. Αυτό συμβαίνει, γιατί όταν ιονίζεται το διηλεκτρικό υγρό, τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια (ανιόντα) έλκονται από τη θετικά φορτισμένη, ενώ οι θετικά φορτισμένοι πυρήνες των ατόμων που απομένουν (κατιόντα), έλκονται από την αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια. Η ειδοποιός διαφορά των ηλεκτρονίων και των θετικά φορτισμένων πυρήνων, είναι το γεγονός ότι οι πυρήνες είναι χιλιάδες φορές πιο βαριοί από τα ηλεκτρόνια και, άρα, επιταχύνουν πολύ πιο αργά από αυτά, με αποτέλεσμα να φτάνουν στην αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια πολύ λιγότεροι σε αριθμό από τα ηλεκτρόνια που φτάνουν στην άλλη επιφάνεια. Ως αποτέλεσμα, τα ηλεκτρόνια προκαλούν ταχύτερη και αποτελεσματικότερη αφαίρεση υλικού, από ό,τι 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.

Γνωρίζοντας τη σημασία της επίδρασης του είδους των ιόντων που βάλλουν τις επιφάνειες ηλεκτροδίου και τεμαχίου, μπορεί κανείς να περιορίσει τη φθορά του κοπτικού εργαλείου, να λαμβάνει λιγότερο αδρή κατεργασμένη επιφάνεια ή και να αυξομειώσει το ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Όμως, δεν αρκεί μόνο η γνώση του μηχανισμού αυτού, καθώς το αποτέλεσμα διαφέρει με τη χρήση διαφορετικών υλικών ηλεκτροδίου και με τον ορισμό συνθηκών κατεργασίας, όπως η διάρκεια του παλμού εκκένωσης [2].



Εικόνα 40: Αρνητική πολικότητα ηλεκτροδίου[2] Εικόνα 41 Θετική πολικότητα ηλεκτροδίου[2]



Εικόνα 42: Η επίδραση της διάρκειας παλμού εκκένωσης και της πολικότητας στο μέγεθος των κρατήρων [16]

2.2 Παράμετροι απόδοσης της κατεργασίας

2.2.1 Ισχύς κατεργασίας

Η ονομαστική ισχύς της κατεργασίας ορίζεται ως εξής [10]:

$$P_{nom} [W] = I_p [A] \cdot V_p [V]$$

όπου I_p η τιμή της έντασης του ρεύματος σε έναν παλμό και V_p η τάση στα άκρα του διακένου σε έναν παλμό.

Επιπλέον, ορίζεται και η μέση ισχύς της κατεργασίας ως εξής [10]:

$$P_{av} [W] = P_{nom} [W] \cdot \tau [\%] \cdot f_{eff} [\%]$$

όπου P_{nom} η ονομαστική ισχύς της κατεργασίας, τ ο κύκλος εργασίας (duty ratio) και f_{eff} η αποδοτικότητα κατεργασίας.

2.2.2 Ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης

Η ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης είναι η μέση τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας ανά παλμό, η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα και μπορεί να εκφραστεί ως εξής [14] :

$$E_p [mJ] = \int_0^{t_e} u_p(t) \cdot i_p(t) \cdot dt \cong V_p [V] \cdot I_p [A] \cdot t_e [\mu sec] \cdot 10^3$$

όπου I_p η τιμή της έντασης του ρεύματος σε έναν παλμό, V_p η τάση στα άκρα του διακένου σε έναν παλμό και t_e η πραγματική χρονική διάρκεια εκδήλωσης του παλμού, η οποία είναι μικρότερη της γνωστής t_{on} , διότι θεωρητικά στην t_{on} περιλαμβάνεται και ένα μικρό χρονικό διάστημα t_d που εκφράζει καθυστέρηση. Εντούτοις, στην πράξη, ισχύει πως $t_e \cong t_{on}$ και άρα χωρίς βλάβη του αποτελέσματος μπορεί να υπολογιστεί η ενέργεια εκκένωσης μέσω της ακόλουθης σχέσης :

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

2.2.3 Ρυθμός αποβολής υλικού (MRR)

Ο ρυθμός αποβολής υλικού εκφράζει τον όγκο του υλικού που απομακρύνεται από το τεμάχιο ανά μονάδα χρόνου. Υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης :

$$MRR \left[\frac{mm^3}{min} \right] = \frac{(m_{bef} [g] - m_{aft} [g])}{\rho \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot t_{total} [sec]} \cdot 60 \cdot 1000$$

όπου m_{bef} και m_{aft} οι τιμές της μάζας του τεμαχίου πριν και μετά την κατεργασία αντίστοιχα, ρ η πυκνότητα του υλικού του τεμαχίου και t_{total} ο συνολικός χρόνος κατεργασίας. Ο ορισμός του χρόνου αναφοράς στον παρονομαστή θέλει προσοχή, διότι στη βιβλιογραφία μπορεί να συναντηθεί ο καθαρός χρόνος κοπής αντί του συνολικού, με το σκεπτικό πως η μηχανή λειτουργεί διακοπτόμενα και δεν παράγει συνεχώς ηλεκτρικές εκκενώσεις.

Ενδεικτικά, δύο φυσικές ιδιότητες του υλικού του τεμαχίου που καθορίζουν σημαντικά το ρυθμό αποβολής υλικού ανά εκκένωση είναι το σημείο τήξης και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, με τις οποίες ο MRR συνδέεται αντιστρόφως ανάλογα, καθώς όσο αυτές αυξάνονται, ο MRR μειώνεται [5].

2.2.4 Λόγος φθοράς εργαλείου (TWR)

Ο λόγος φθοράς εργαλείου ή λόγος σχετικής φθοράς εκφράζει τη φθορά του ηλεκτροδίου ως ποσοστό του όγκου που αφαιρείται από το τεμάχιο. Υπολογίζεται ως εξής [9] :

$$TWR[\%] = \frac{V_E [mm^3/min]}{V_W [mm^3/min]}$$

Όπου V_E ο όγκος αφαιρούμενου υλικού του ηλεκτροδίου ανά μονάδα χρόνου και V_W ο όγκος αφαιρούμενου υλικού του τεμαχίου ανά μονάδα χρόνου.

Προφανώς όσο μικρότερος αυτός ο λόγος, τόσο πιο ανθεκτικό το ηλεκτρόδιο στην κατεργασία και άρα οικονομικά πιο συμφέρον, καθώς αποφεύγεται η συχνή αποκατάσταση της γεωμετρίας του, αλλά και ο κίνδυνος αλλοίωσης της γεωμετρίας της ζητούμενης επιφάνειας προς αποτύπωση στο τεμάχιο.

2.2.5 Ποιότητα κατεργασμένης επιφάνειας

Όπως σε κάθε κατεργασία αφαίρεσης υλικού, έτσι και στην ηλεκτροδιάβρωση, μια παράμετρος που θεωρείται σημαντική είναι η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Μακροσκοπικά μελετάται με το μέγεθος της τραχύτητας, είτε μέσης είτε μέγιστης, ενώ μικροσκοπικά δίνεται έμφαση στη γεωμετρία των κρατήρων, στις επιστρώσεις επαναστερεοποιημένου υλικού και στις λοιπές θερμικά επηρεασμένες στρώσεις. Η τραχύτητα επιφάνειας επηρεάζεται από όλες τις παραμέτρους ελέγχου ηλεκτρικές και μη, αλλά και από την πίεση του υγρού κατά την έκπλυση του διακένου και από το είδος του ηλεκτροδίου [4].

Τέλος, παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας που αναγράφει την επίδραση ορισμένων παραμέτρων ελέγχου στις παραμέτρους απόδοσης της κατεργασίας [4] :

Παράμετρος κατεργασίας	Ρύθμιση για αύξηση MRR	Ρύθμιση για μείωση TWR	Ρύθμιση για μείωση μέσης τραχύτητας
Πολικότητα	Αρνητική	Αρνητική	Αρνητική
Τάση εν κενώ	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
Μέγιστη ένταση	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή
Διάρκεια παλμού	Υψηλή/μέτρια	Χαμηλή	Χαμηλή
Μεσοδιάστημα παλμών	Χαμηλό	Μέτριο	Μέτριο
Κύκλος εργασίας	Υψηλός	Χαμηλός	Χαμηλός
Συχνότητα παλμών	Υψηλή	Χαμηλή/μέτρια	Χαμηλή
Πίεση έκπλυσης	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή

Πίνακας 6: Ρύθμιση παραμέτρων ελέγχου για την απόκτηση κατάλληλων παραμέτρων απόδοσης

3. Πειραματική Διαδικασία

Η συγκεκριμένη εργασία και τα πειράματα που διενεργήθηκαν έχουν ως στόχο τη διερεύνηση παραμέτρων (ένταση ρεύματος, διάρκεια παλμών, γεωμετρία ηλεκτροδίου) και μελέτη της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης (die sinking EDM) σε 5 διαφορετικά υλικά, χάλυβα, αλουμίνιο, εργαλειοχάλυβα, καρβίδιο και ανθρακόνημα αεροπορικών εφαρμογών.

3.1 Εργαλειομηχανή

Η μηχανή στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα είναι η AGIETRON EMT 1.10. Τη συγκεκριμένη εργαλειομηχανή απαρτίζουν τρεις ανεξάρτητες μονάδες, κύρια μηχανή, μονάδα παροχής διηλεκτρικού μέσου και μονάδα παροχής ισχύος, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με αγωγούς ρεύματος και διηλεκτρικού μέσου. Η κύρια μηχανή είναι διάταξης τύπου "C", με δεξαμενή εργασίας συνδεδεμένη πάνω σε τράπεζα που επιτρέπει την κίνηση στο επίπεδο X-Y. Όπως προαναφέρθηκε, επιλέχθηκε η μελέτη της μεταβολής της έντασης του ρεύματος και της χρονικής διάρκειας του παλμού.

Στη μονάδα παροχής ισχύος πραγματοποιείται ο έλεγχος των παραμέτρων κατεργασίας που αφορούν την ένταση του ρεύματος κατεργασίας, την τάση εν κενώ, τη χρονική διάρκεια των παλμών εκκένωσης και του μεσοδιαστήματός τους, το μήκος του διακένου και ο τρόπος λειτουργίας της μηχανής, με συνεχή ή διακοπτόμενη λειτουργία. Το βάθος κοπής ορίζεται από μια συσκευή αριστερά της σερβοκεφαλής και η πολικότητα τεμαχίου - ηλεκτροδίου καθορίζεται από τη συνδεσιμότητα των καλωδίων στο πίσω τμήμα της συσκευής. Επιπλέον, πάνω στην μονάδα ισχύος υπάρχουν συνδεδεμένα αμπερόμετρο, που δείχνει την ένταση του ρεύματος κατεργασίας, βολτόμετρο, που δείχνει την τάση στα άκρα του διακένου ενώ έχουν τοποθετηθεί και δυο λυχνίες με ενδείξεις αποδοτικότητας. Ακόμα, η παλμογεννήτρια είναι τύπου τρανζίστορ.



Εικόνα 43: Η μηχανή AGIETRON EMT 1.10 [10]

Ο έλεγχος της έντασης του ρεύματος πραγματοποιείται από τους τρεις 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_T”» και όχι σε Αμπέρ. Το προαναφερθέν μέγεθος “J_T” προκύπτει ως το άθροισμα των τιμών των διακοπών “I_T” και “I_P”. Η τιμή του διακόπτη “I_B” προστίθεται μόνο κατά την τελική κατεργασία, κατά την οποία η μηχανή αφού έχει κόψει μέχρι το επιθυμητό βάθος, επιχειρεί να επιτύχει καλύτερη τραχύτητα επιφανείας, συνεπώς κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, θα αγνοηθεί. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης, σε κάθε αναγραφόμενη μονάδα ρεύματος αντιστοιχούν περίπου 3 Αμπέρ **έντασης ρεύματος κατεργασίας I_P [A]**. Επιπλέον, στη μονάδα ισχύος υπάρχει συνδεδεμένο και ένα αμπερόμετρο [14].

Η **διάρκεια παλμού t [μs]** ελέγχεται ομοίως μέσω ενός περιστροφικού διακόπτη στη μονάδα παροχής ισχύος. Επιπλέον, το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών ελέγχεται μέσω του περιστροφικού διακόπτη με ένδειξη “τ”, όπου τ ο **παράγοντας σταθερότητας**, του οποίου τα ψηφία δεν έχουν φυσική σημασία, ούτε μετατρέπονται αμέσως σε μονάδες χρόνου [14]. Είναι σημαντικό ακόμα να αναφερθεί πως η λειτουργία της εργαλειομηχανής για λόγους σταθερότητας και αποδοτικότητας έχει οριστεί να είναι διακοπτόμενη και όχι συνεχής. Πιο συγκεκριμένα, ανά τακτά χρονικά διαστήματα διακόπτεται η παροχή παλμών και αποσύρεται ελαφρώς το ηλεκτρόδιο, έτσι ώστε να πραγματοποιείται αποτελεσματικότερη απόπλυση. Αφού παρέλθει ένα τέτοιο χρονικό διάστημα, η κεφαλή κατέρχεται στην πρότερή της θέση και συνεχίζεται η κατεργασία. [14].

Σαν τρόπος έκπλυσης, τέλος, χρησιμοποιείται πλευρικά του τεμαχίου δέσμη jet διηλεκτρικού υγρού χαμηλής πίεσης. Μέσω της ίδιας διάταξης γεμίζει η λεκάνη διηλεκτρικό υγρό πριν την έναρξη της κατεργασίας.

3.2 Τεμάχιο – Ηλεκτρόδιο

Ως τεμάχια προς κατεργασία χρησιμοποιούνται :

- Μια ορθογώνια παραλληλεπίπεδη πλάκα μαλακού χάλυβα



Εικόνα 44: Η πλάκα χάλυβα

- Δύο ορθογώνιες παραλληλεπίπεδες πλάκες αλουμινίου ΑΙ6061



Εικόνες 45,46 Οι πλάκες αλουμινίου

- Τέσσερα τριγωνικά καρβίδια βολφραμίου πλευράς 10 χιλιοστών [mm]



Εικόνες 47, 48, 49, 50: Τα καρβίδια βολφραμίου

- Δύο κομμάτια εργαλειοχάλυβα μολυβδενίου M42 ακαθόριστης γεωμετρίας



Εικόνες 51, 52: Τα τεμάχια εργαλειοχάλυβα

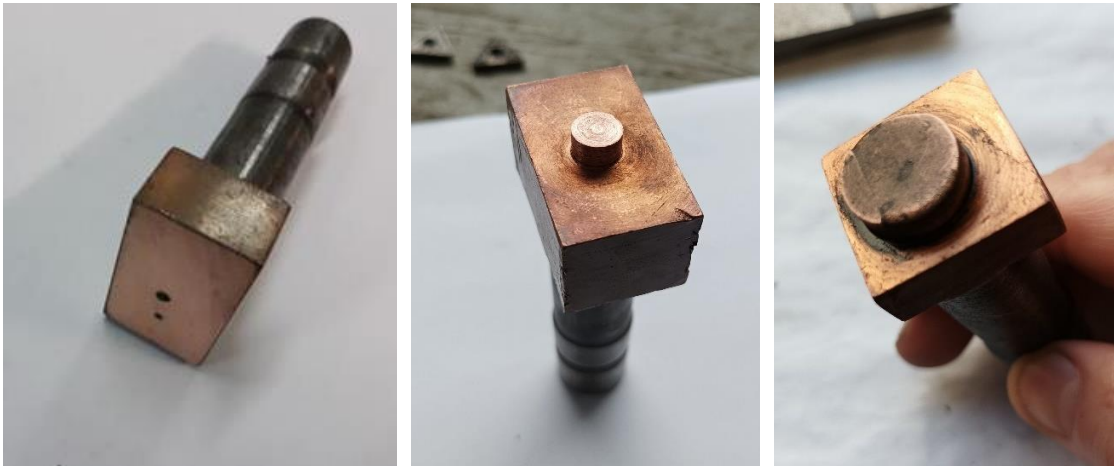
- Μια ορθογώνια παραλληλεπίπεδη πλάκα ανθρακονήματος αεροπορικών εφαρμογών



Εικόνα 53: Το πλακίδιο ανθρακονήματος

Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται είναι από χαλκό με γεωμετρίες :

- Ορθογώνια, διαστάσεων 38x23 χιλιοστών [mm]
- Κυκλική, διαμέτρου 8 χιλιοστών [mm]
- Κυκλική, διαμέτρου 15 χιλιοστών [mm]



Εικόνες 54,55,56: Τα τρία ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν [10]

3.3 Πειραματική Διαδικασία – Μετρήσεις

Βασικός στόχος της διαδικασίας είναι η διερεύνηση της κατεργασιμότητας των υλικών, δηλαδή της σχετικής ευκολίας με την οποία μπορούν να κατεργαστούν από την μηχανή [8]. Σαν κριτήρια θα εξεταστούν ο **ρυθμός αποβολής υλικού** $MRR [mm^3/min]$ και η **μέση τραχύτητα** $R_a [\mu m]$ της κατεργασμένης επιφανείας, ενώ έμφαση θα δοθεί και στις κατάλληλες συνθήκες που επιτρέπουν κοπή με εύρυθμη λειτουργία της μηχανής.

Για κάθε υλικό/πάσο ακολουθήθηκε η εξής ακολουθία ενεργειών:

- Μέτρηση μάζας πριν την κατεργασία
- Κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης
- Μέτρηση μάζας μετά την κατεργασία
- Σκληρομέτρηση τοπικά πέριξ της κατεργασμένης επιφανείας
- Τραχυμέτρηση της κατεργασμένης επιφανείας
- Προετοιμασία για μεταλλογραφία – τεμαχισμός, εγκιβωτισμός, λείανση
- Μεταλλογραφική μελέτη σε οπτικό μικροσκόπιο

Παρακάτω θα ακολουθήσει λεπτομερέστερη περιγραφή των ενεργειών και αναφορά στα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν. Για καλύτερη οργάνωση της πληροφορίας που θα ακολουθήσει, επιλέχθηκε μια συνολική περιγραφή του συνόλου των δραστηριοτήτων που διατηρήθηκαν ίδιες για κάθε υλικό/πάσο και στη συνέχεια περαιτέρω διαχωρισμός σε υποκεφάλαια με βάση το υλικό κατεργασίας στα οποία θα παρατίθενται οι μετρήσεις που λήφθηκαν και θα παρουσιάζονται οι περαιτέρω διαφοροποιήσεις στις διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν.

3.3.1 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

Όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία ξεκινά με τη ζύγιση του τεμαχίου σε ζυγαριά ακριβείας της Kern, η οποία έχει διακριτική ικανότητα το 0.1 του γραμμαρίου. Όπως θα φανεί στη συνέχεια, η εν λόγω διακριτική ικανότητα θα αποδειχθεί ανεπαρκής για την επιθυμητή ακρίβεια ορισμένων αποτελεσμάτων, ωστόσο αυτή η ατυχής συγκυρία διαπιστώθηκε μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας.

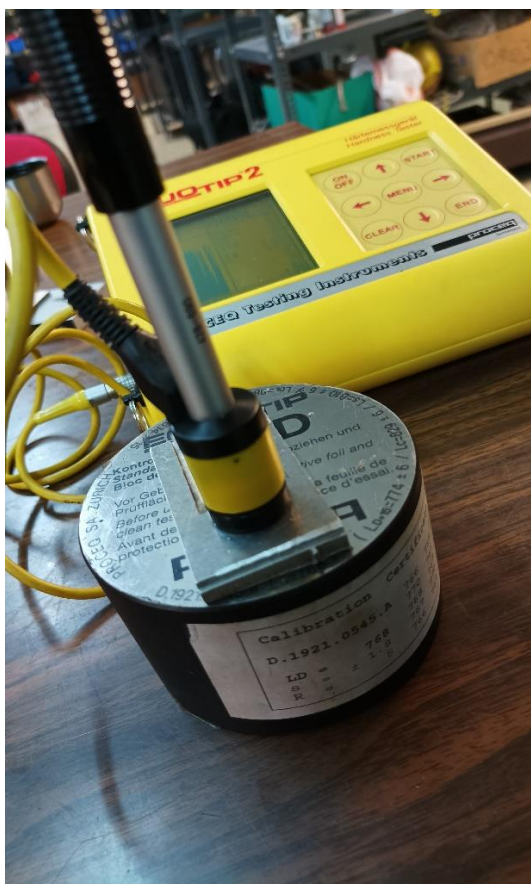


Εικόνα 57: Η ζυγαριά ακριβείας

Ακολουθεί η κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης στην εργαλειομηχανή AGIETRON EMT 1.10, που ορισμένες σημαντικές λειτουργίες της αναφέρθηκαν και παραπάνω. Αρχικά τοποθετείται και ασφαλίζει το κατάλληλο ηλεκτρόδιο στην υποδοχή που του αντιστοιχεί στη μηχανή και στη συνέχεια το τεμάχιο πάνω στη βάση, μαζί με εδράσεις οι οποίες θα εμποδίσουν πιθανή μετακίνησή του κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, όσο θα βάλεται με τη δέσμη διηλεκτρικού υγρού. Έπειτα επιλέγονται οι συνθήκες κατεργασίας (τάση, ρεύμα, διάρκεια παλμών κοκ) και το επιθυμητό βάθος κοπής σε μm . 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, αφού ελεγχθεί ότι το πορτάκι της λεκάνης είναι καλά κλεισμένο, ξεκινά η έγχυση του διηλεκτρικού υγρού μέχρις ότου καλυφθεί πλήρως το τεμάχιο. Η κατεργασία εκκινεί πιέζοντας το κουμπί της εκκίνησης και περατώνεται με δύο τρόπους, είτε φτάνοντας στο ζητούμενο βάθος κοπής, όπου πραγματοποιείται και η υπολειμματική εξομάλυνση της επιφάνειας, είτε με «βίαιο» τρόπο, πατώντας το κουμπί με την ένδειξη “stop”. Προφανώς αν η κατεργασία διακοπεί απότομα, δεν λαμβάνει χώρα η περαιτέρω εξομάλυνση της επιφάνειας.



Εικόνα 58: Ολοκληρωμένη κατεργασία EDM στην πλάκα αλουμινίου



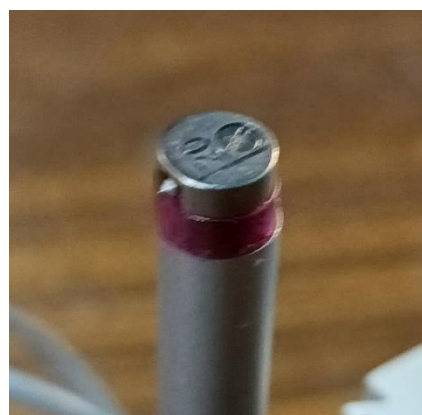
Το πλέον κατεργασμένο τεμάχιο καθαρίζεται και ξαναζυγίζεται στη ζυγαριά ακριβείας. Σειρά έχει η διαδικασία της σκληρομέτρησης, η οποία πραγματοποιείται περίξ των κατεργασμένων επιφανειών με το σκληρόμετρο τύπου Brinell EQUOTIP 2 της εταιρείας PROCEQ. Η λήψη μετρήσεων αποδείχθηκε ιδιαίτερα δύσκολη, όσο απλή κι αν φαίνεται σαν διαδικασία, καθώς μεγάλο ρόλο παίζει το πόσο καλά στερεωμένο είναι το κομμάτι του σκληρομέτρου με το σφαιρίδιο, ούτως ώστε να μπορέσει να αναπηδήσει σωστά.

Η πειραματική διαδικασία συνεχίζεται με τις τραχυμετρήσεις των κατεργασμένων επιφανειών. Χρησιμοποιείται το όργανο Surtronic 3+ της εταιρείας Taylor-Hobson. Οι μετρήσεις λήφθηκαν εν γένει πιο εύκολα από ό,τι με το σκληρόμετρο, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι δεν χρειάστηκε αρκετές φορές να γίνουν επαναλήψεις, καθώς το τραχύμετρο μπορούσε να παρασύρει τα πιο ελαφρά τεμάχια (ειδικά τα καρβίδια και το ανθρακόνημα).

Εικόνα 59: Σκληρομέτρηση



Εικόνα 60: Το τραχύμετρο



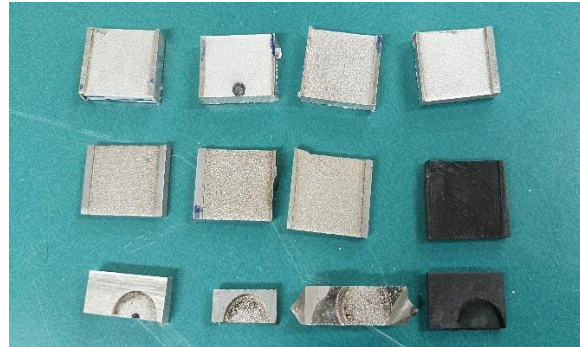
Εικόνα 61: Λεπτομέρεια από την ακίδα του τραχυμέτρου

Με το πέρας της λήψης και καταγραφής των απαραίτητων μετρήσεων, η μόνη διαδικασία που έμεινε είναι η μεταλλογραφία, η οποία όμως απαιτεί καλή προετοιμασία. Πιο συγκεκριμένα, το τεμάχιο χρειάζεται να τεμαχιστεί κατάλληλα με χρήση δισκοτόμου, πιο

συγκεκριμένα του Discotom-2 της εταιρείας Struers, ούτως ώστε να μπορέσει να χωρέσει στο καλούπι ρητίνης για τον εγκιβωτισμό.



Εικόνα 62: Δισκοτόμος



Εικόνα 63: Τεμαχισμένα δοκίμια

Το καλούπι είναι κυλινδρικό και η ρητίνη είναι διάφανη, εποξική δύο συστατικών, η στερεοποίησή της δε, απαιτεί περίπου 24 ώρες. Το τελευταίο στάδιο πριν τη μελέτη στο μικροσκόπιο είναι η λείανση, η οποία πραγματοποιείται στο λειαντικό δίσκο DAP-V της εταιρείας Struers. Στον τροχό χρησιμοποιούνται διαδοχικά ντουκόχαρτα με πάχος κόκκων 220-320-400-800-1000-2000-4000 βαθμών. Οι στροφές ανά λεπτό του δίσκου κατά την εκχόνδριση (μέχρι τους 800 βαθμούς) ορίζονται στις 200, στα 1000 και 2000 grit ορίζονται στις 250 και στον δίσκο με τους 4000 βαθμούς φτάνουν ενίοτε και τις 400, ανάλογα το επιθυμητό επίπεδο σιλπνότητας. Σημειώνεται πως πρόκειται για μια διαδικασία που χρειάζεται σταθερό χέρι, υπομονή και ικανότητα, καθώς μπορεί πολύ εύκολα να καταλήξει σε φθορά του δοκιμίου (γρατζουνιές, μη οριζόντια η επιφάνεια που θα δει το μικροσκόπιο).



Εικόνες 64,65: Εγκιβωτισμένα Δοκίμια



Εικόνες 66,67: Ο λειαντικός τροχός και ο τρόπος χρήσης του

Όλα είναι έτοιμα πλέον για το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας, την μεταλλογραφία. Χρησιμοποιείται το οπτικό μικροσκόπιο 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 με ειδική πλαστελίνη σε πλακίδιο με τη βοήθεια εργαλείου που ασκεί πίεση και εξετάζεται σε μεγεθύνσεις 5x, 10x, 20x και 50x. Περαιτέρω προετοιμασία του δοκιμίου που δεν έγινε, όπως στίλβωση με άλλη μέθοδο και προσβολή (etching) με άλλες ουσίες στερούν τη δυνατότητα λήψης πιο λεπτομερών και ποιοτικών λήψεων. Με αυτόν τον τρόπο η πειραματική διαδικασία ολοκληρώνεται.



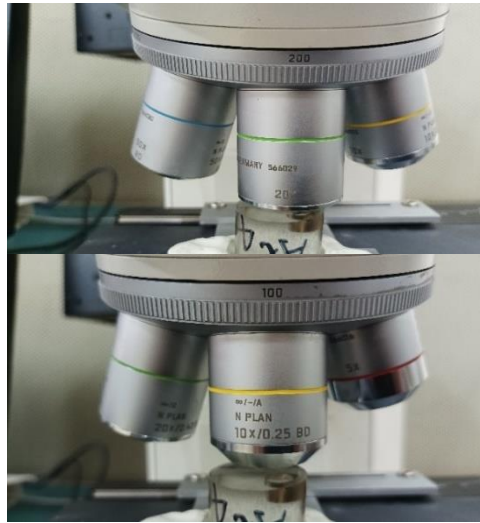
Εικόνα 68: Στερέωση δοκιμίου στο πλακίδιο



Εικόνα 69: Το οπτικό μικροσκόπιο



Εικόνα 71: Η ψηφιακή κάμερα



Εικόνα 70: Λεπτομέρεια φακών του μικροσκοπίου

Οι μετρήσεις που λήφθηκαν περιλαμβάνουν τα μεγέθη :

- Τάση εν κενώ, V_0 [Volt]
- Χρονική διάρκεια παλμού, t_{on} [μ s]
- Ενδείξεις διακοπών ρεύματος “ J_T ” και “ J_P ” [μονάδες ρεύματος “ J_T ”]
- Χρονική διάρκεια κατεργασίας, t_{total} , στη μορφή [hh:mm:ss]
- Ονομαστικό βάθος κατεργασίας, z [μ m]
- Μάζα τεμαχίου πριν την κατεργασία, m_{bef} [g]
- Μάζα τεμαχίου μετά την κατεργασία, m_{aft} [g]
- Μέση τραχύτητα, R_a [μ m]
- Σκληρότητα κατά Brinell [HB]

Επιπλέον, στους πίνακες παρουσιάζονται και τα εξής παράγωγα μεγέθη από αυτά που μετρούνται :

- Άθροισμα διακοπών ρεύματος “ J_{tot} ” και “ J_P ”, “ J_T ” [μονάδες ρεύματος “ J_T ”],

όπου $J_{tot} = J_T + J_P$

- Ένταση ρεύματος κατεργασίας I_P [A], όπου $I_P = 3 \cdot J_{tot}$

3.3.2 Παράμετροι κατεργασίας

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 : Εξαιρετικά ραφινάρισμένο χαμηλού ιξώδους (<7 cSt @ 40 °C) **ορυκτέλαιο, CUT-MAX SE 2** της Houghton

3.3.3 Μετρήσεις στα τεμάχια από μαλακό χάλυβα

Στα τεμάχια από μαλακό χάλυβα πραγματοποιήθηκαν τέσσερις κοπές, οι τρεις χρησιμοποιώντας το ηλεκτρόδιο με το ορθογώνιο προφίλ 23x38 [mm] και η τέταρτη χρησιμοποιώντας το ηλεκτρόδιο με το κυκλικό προφίλ διαμέτρου 15 [mm]. Οι συνθήκες κατεργασίας επιλέχθηκαν με βάση την εμπειρία του βοηθού του εργαστηρίου. Ακολουθούν οι πίνακες με τις μετρήσεις. Επιπλέον, από τον προμηθευτή των δοκιμών λαμβάνεται η πληροφορία για την **πυκνότητα μαλακού χάλυβα**, $\rho_{st} = 7.8$ [g/cm³], ενώ η **θερμοκρασία τήξης** του, που θα χρειαστεί σε μετέπειτα υπολογισμούς, είναι ίση με $T_{w,st} = 1350$ [°C] [7].

Πείραμα	z [μm]	t_{on} [μs]	J_T [-]	J_P [-]	J_{tot} [-]	I_P [A]
Χάλυβας 1	1000	200	4	4	8	24
Χάλυβας 2	1000	500	4	4	8	24
Χάλυβας 3	1000	100	5	4	9	27
Χάλυβας οπή	3000	200	4	4	8	24

Πίνακας 7: Μετρήσεις παραμέτρων για τον μαλακό χάλυβα

Πείραμα	V_0 [Volt]	t_{total} [h:mm:ss]	t_{total} [sec]	m_{bef} [g]	m_{aft} [g]
Χάλυβας 1	100	0:15:05	905	237.1	230.8
Χάλυβας 2	100	0:14:40	880	230.8	224.5
Χάλυβας 3	100	0:14:30	870	224.5	218.2
Χάλυβας οπή	100	0:10:50	650	218.2	214.1

Πίνακας 8: Μετρήσεις παραμέτρων για τον μαλακό χάλυβα

Πείραμα	Τραχύτητα R_a [μm]					
	1	2	3	4	M.O.	max
Χάλυβας 1	10.6	9.8	10.4	9.8	10.15	10.6
Χάλυβας 2	15	14.6	13.6	13.8	14.25	15
Χάλυβας 3	8	7.4	9	9	8.35	9
Χάλυβας οπή	5.34	4.84	6.74	5.68	5.65	6.74

Πίνακας 9: Τραχυμετρήσεις για τον μαλακό χάλυβα

Πείραμα	Σκληρότητα [HB]				
	1	2	3	4	M.O.
Χάλυβας 1	118	146	136	124	131
Χάλυβας 2	118	146	136	124	131
Χάλυβας 3	118	146	136	124	131
Χάλυβας οπή	118	146	136	124	131

Πίνακας 10: Σκληρομετρήσεις για τον μαλακό χάλυβα

3.3.4 Μετρήσεις στα τεμάχια από αλουμίνιο Al6061

Στα τεμάχια από αλουμίνιο πραγματοποιήθηκαν πέντε κοπές, αντί για τέσσερις που ήταν προγραμματισμένο, μια και σε μία περίπτωση δημιουργήθηκε τόξο DC πλάσματος και αναγκαστήκαμε να τη διακόψουμε. Διατηρήθηκε ωστόσο το τεμάχιο προς μελέτη, μια και η κοπή είχε ολοκληρωθεί κατά το ήμισυ, συνεπώς είχε νόημα η λήψη μετρήσεων. Στις τέσσερις κοπές χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρόδιο με το ορθογώνιο προφίλ 23x38 [mm] και στην πέμπτη χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρόδιο με το κυκλικό προφίλ διαμέτρου 15 [mm]. Οι συνθήκες κατεργασίας επιλέχθηκαν με βάση την εμπειρία του βοηθού του εργαστηρίου. Ακολουθούν οι πίνακες με τις μετρήσεις. Επιπλέον, από τον προμηθευτή των δοκιμών λαμβάνεται η πληροφορία για την **πυκνότητα αλουμινίου Al6061**, $\rho_{al} = 2.7$ [g/cm³], ενώ η **θερμοκρασία τήξης** του, που θα χρειαστεί σε μετέπειτα υπολογισμούς, είναι ίση με $T_{w,al} = 660$ [°C] [6].



Εικόνα 72: Το εμφανές σημάδι τόξου DC στην επιφάνεια κατεργασίας

Πείραμα	z [μm]	t _{on} [μs]	J _T [-]	J _P [-]	J _{tot} [-]	I _P [A]
Αλουμίνιο 1	1000	100	3	4	7	21
Αλουμίνιο 2	1000	500	4	4	8	24
Αλουμίνιο 3	400	50	4	4	8	24
Αλουμίνιο 4	1000	75	4	4	8	24
Αλουμίνιο οπή	3000	150	4	4	8	24

Πίνακας 11: Μετρήσεις παραμέτρων για το αλουμίνιο

Πείραμα	V ₀ [Volt]	t _{total} [h:mm:ss]	t _{total} [sec]	m _{bef} [g]	m _{aft} [g]
Αλουμίνιο 1	100	0:06:12	372	45.2	42.8
Αλουμίνιο 2	100	0:06:27	387	42.8	40.4
Αλουμίνιο 3	100	0:03:11	191	44.5	43.5
Αλουμίνιο 4	100	0:06:08	368	43.5	41.1
Αλουμίνιο οπή	300	0:10:50	650	41.1	39.7

Πίνακας 12: Μετρήσεις παραμέτρων για το αλουμίνιο

Πείραμα	Τραχύτητα R_a [μm]					
	1	2	3	4	M.O.	max
Αλουμίνιο 1	11	12.4	11.4	12	11.7	12.4
Αλουμίνιο 2	18.2	21	17	19.8	19	21
Αλουμίνιο 3	10.4	9.2	7.2	8	8.7	10.4
Αλουμίνιο 4	10.8	10.6	9.6	11	10.5	11
Αλουμίνιο οπή	8.46	10	7.4	8.66	8.63	10

Πίνακας 13: Τραχυμετρήσεις για το αλουμίνιο

Πείραμα	Σκληρότητα [HB]				
	1	2	3	4	M.O.
Αλουμίνιο 1	112	105	107	107	107.75
Αλουμίνιο 2	112	105	107	107	107.75
Αλουμίνιο 3	114	102	94	105	103.75
Αλουμίνιο 4	114	102	94	105	103.75
Αλουμίνιο οπή	114	102	94	105	103.75

Πίνακας 14: Σκληρομετρήσεις για το αλουμίνιο

3.3.5 Μετρήσεις στα τεμάχια από καρβίδιο βολφραμίου

Στα τεμάχια από καρβίδιο πραγματοποιήθηκαν πέντε κοπές, δύο με το ηλεκτρόδιο ορθογωνικού προφίλ 23x38 [mm] και τρεις με το ηλεκτρόδιο κυκλικού προφίλ διαμέτρου 8 [mm]. Οι κοπές με το ηλεκτρόδιο ορθογωνικού προφίλ δεν στέφθηκαν με επιτυχία, καθώς δεν επιλέχθηκαν οι κατάλληλες συνθήκες για εύρυθμη λειτουργία, ενώ παράλληλα προκάλεσαν σημαντική φθορά και στο κοπτικό εργαλείο, αλλά και στη βάση πάνω στην οποία εδράζονταν. Εντούτοις, επιλέχθηκε να ληφθούν μετρήσεις και να παρουσιαστούν εικόνες των τεμαχίων μετά την κατεργασία, όπως επίσης και της φθοράς σε ηλεκτρόδιο και βάση που προκάλεσαν. Για τον περιορισμό της φθοράς, αλλά και για την ευκολότερη αποκατάστασή της, επιλέχθηκε ηλεκτρόδιο με αρκούντως μικρό κυκλικό προφίλ, έτσι ώστε οι οπές να μπορούν να μετρηθούν και να μελετηθούν χωρίς απώλεια ακρίβειας και πληροφορίας. Οι συνθήκες κατεργασίας επιλέχθηκαν με βάση παλιότερη εργασία που εκπονήθηκε στο ΕΜΠ (Tzamouranis et al., 2011)[12].



Εικόνες 73, 74, 75: Τα καταστρεπτικά αποτελέσματα της πρώτης απόπειρας

Να σημειωθεί ακόμα, πως η αποκατάσταση της φθοράς στο ηλεκτρόδιο παίζει σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίηση σωστών κοπών. Το ηλεκτρόδιο ορθογωνικού προφίλ αποκαταστάθηκε όποτε χρειάστηκε με τρίψιμο σε ντουκόχαρτο, το δε ηλεκτρόδιο κυκλικού προφίλ με τονάρισμα, γίνεται άρα αντιληπτή η διαφορά στην ευκολία της αποκατάστασης.

Το ιδανικό για τη μελέτη θα ήταν αν τα πλακίδια προέρχονταν από τον ίδιο τύπο, με τις ίδιες επιστρώσεις, συστάσεις κλπ, ωστόσο αυτό δεν κατέστη εφικτό. Η αναμενόμενη διαφοροποίηση στη διαδικασία είναι στις μετρήσεις της σκληρότητας, καθώς είναι μια ιδιότητα η οποία επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη διαδικασία κατασκευής του πλακιδίου. Και τα τέσσερα πλακίδια είναι της εταιρείας Tungaloy, προορίζονται και για την ίδια χρήση, συνεπώς αναμένεται παρόμοια φόρμουλα κατασκευής του κράματος και άρα μπορεί να γίνει η υπόθεση εργασίας πως θα παρουσιάσουν την ίδια συμπεριφορά στις συνθήκες κατεργασίας που θα τους επιβληθούν. Επιπλέον, με βάση την παραπάνω θεώρηση, μπορεί να υποτεθεί πως θα έχουν και την ίδια **πυκνότητα καρβιδίου βολφραμίου**, η οποία υπολογίζεται διαιρώντας το μ.ο. των μαζών των τεσσάρων δοκιμών προτού κατεργαστούν, ίση με 10.95 γραμμάρια [g], προς τον μ.ο. του όγκου τους, περίπου ίσο με 0.73 κυβικά εκατοστά [cm^3] και προκύπτει τιμή ίση με $\rho_{tc} = 15 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. Τέλος, η **θερμοκρασία τήξης** του είναι ίση με $T_{w,tc} = 2775 \text{ [}^\circ\text{C]}$ [6]. Ακολουθούν οι πίνακες με τις μετρήσεις. Οι λατινικοί δείκτες αναφέρονται στα πειράματα με το ορθογωνικό ηλεκτρόδιο και οι δείκτες με την αραβική αρίθμηση στα πειράματα με το κυκλικό.



Εικόνα 76: Φθορά του ηλεκτροδίου μετά την κατεργασία καρβιδίου

Πείραμα	z [μm]	t_{on} [μs]	J_T [-]	J_P [-]	J_{tot} [-]	I_P [A]
Καρβίδιο Ι	-----	500	5	4	9	27
Καρβίδιο ΙΙ	-----	300	4	4	8	24
Καρβίδιο 1	1000	20	1.5	4	5.5	16.5
Καρβίδιο 2	250	50	1.5	4	5.5	16.5
Καρβίδιο 3	1000	7.5	1.5	4	5.5	16.5

Πίνακας 15: Μετρήσεις παραμέτρων για τα καρβίδια

Πείραμα	V_0 [Volt]	t_{total} [h:mm:ss]	t_{total} [sec]	m_{bef} [g]	m_{aft} [g]
Καρβίδιο Ι	100	0:03:00	180	11.1	11.1
Καρβίδιο ΙΙ	100	0:18:22	1102	11	11
Καρβίδιο 1	100	0:25:15	1515	11	10.8
Καρβίδιο 2	100	0:13:39	819	11.2	11.1
Καρβίδιο 3	300	0:27:39	1659	10.5	10.4

Πίνακας 16: Μετρήσεις παραμέτρων για τα καρβίδια

Πείραμα	Τραχύτητα R_a [μm]					
	1	2	3	4	M.O.	max
Καρβίδιο Ι	3.6	4.4	3.6	5.6	4.3	5.6
Καρβίδιο ΙΙ	12.2	14.4	12	16.4	13.75	16.4
Καρβίδιο 1	8.2	5	5.4	4.2	5.7	8.2
Καρβίδιο 2	7.6	8.2	8.4	8.6	8.2	8.6
Καρβίδιο 3	4.4	5	5.2	4.6	4.8	5.2

Πίνακας 17: Τραχυμετρήσεις για τα καρβίδια

Πείραμα	Σκληρότητα [HB]				
	1	2	3	4	M.O.
Καρβίδιο Ι	643	649	602	654	637
Καρβίδιο ΙΙ	591	573	612	604	595
Καρβίδιο 1	591	573	612	604	595
Καρβίδιο 2	589	561	585	625	590
Καρβίδιο 3	619	593	557	629	599.5

Πίνακας 18: Σκληρομετρήσεις για τα καρβίδια

3.3.6 Μετρήσεις στα τεμάχια από εργαλειοχάλυβα M42

Στα τεμάχια από εργαλειοχάλυβα M42 πραγματοποιήθηκαν τρεις κοπές με το ηλεκτρόδιο κυκλικού προφίλ διαμέτρου 15 χιλιοστών [mm], καθώς εκτιμήθηκε ότι θα προκαλούσε σημαντική φθορά στο ηλεκτρόδιο ορθογώνιου προφίλ, όπως συνέβη και με τα καρβίδια. Οι συνθήκες κατεργασίας επιλέχθηκαν με βάση την εμπειρία του βοηθού του εργαστηρίου. Επιπλέον, από τον προμηθευτή των δοκιμών λαμβάνεται η πληροφορία για την **εργαλειοχάλυβα M42**, $\rho_{tst} = 7.81$ [g/cm³] και τέλος, η **θερμοκρασία τήξης** του, είναι ίση με $T_{w,tst} = 1490$ [°C] [6]. Ακολουθούν οι πίνακες με τις μετρήσεις.

Πείραμα	z [μm]	t_{on} [μs]	J_T [-]	J_P [-]	J_{tot} [-]	I_P [A]
Εργαλειοχάλυβας 1	2000	100	4	4	8	24
Εργαλειοχάλυβας 2	2500	300	4	4	8	24
Εργαλειοχάλυβας 3	2000	50	4	4	8	24

Πίνακας 19: Μετρήσεις παραμέτρων για τον εργαλειοχάλυβα M42

Πείραμα	V_0 [Volt]	t_{total} [h:mm:ss]	t_{total} [sec]	m_{bef} [g]	m_{aft} [g]
Εργαλειοχάλυβας 1	100	0:05:40	340	25	22.7
Εργαλειοχάλυβας 2	100	0:09:50	590	22.7	19.8
Εργαλειοχάλυβας 3	100	0:05:07	307	13.1	10.8

Πίνακας 20: Μετρήσεις παραμέτρων για τον εργαλειοχάλυβα M42

Πείραμα	Τραχύτητα R_a [μm]					
	1	2	3	4	M.O.	max
Εργαλειοχάλυβας 1	12.4	12	11.6	11.6	11.9	12.4
Εργαλειοχάλυβας 2	14.6	12.4	14.6	13.2	13.7	14.6
Εργαλειοχάλυβας 3	5.6	6.6	5.2	4.4	5.45	6.6

Πίνακας 21: Τραχυμετρήσεις για τον εργαλειοχάλυβα M42

Πείραμα	Σκληρότητα [HB]				
	1	2	3	4	M.O.
Εργαλειοχάλυβας 1	484	486	508	515	484
Εργαλειοχάλυβας 2	484	486	508	515	484
Εργαλειοχάλυβας 3	585	563	632	575	585

Πίνακας 22: Σκληρομετρήσεις παραμέτρων για τον εργαλειοχάλυβα M42

3.3.7 Μετρήσεις στα τεμάχια από ανθρακόνημα αεροπορικών εφαρμογών

Στα τεμάχια από ανθρακόνημα αεροπορικών εφαρμογών πραγματοποιήθηκαν τέσσερις κοπές, η μία χρησιμοποιώντας το ηλεκτρόδιο με το ορθογώνιο προφίλ 23x38 χιλιοστών [mm] και οι άλλες τρεις χρησιμοποιώντας το ηλεκτρόδιο με το κυκλικό προφίλ διαμέτρου 15 χιλιοστών [mm]. Η κατεργασία του αποδείχθηκε ιδιαίτερα δύσκολη, καθώς μολονότι οι ίνες άνθρακα είναι αγωγίμες, η μήτρα από ρητίνη με την οποία είναι εμποτισμένες δεν είναι. Για να ελαττωθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, η πλάκα τρίφθηκε εκατέρωθεν των πλευρών της που συμμετέχουν στην κατεργασία με ντουκόχαρτο, έτσι ώστε να αποκαλυφθούν «ξεγυμνωμένες», αγωγίμες ίνες άνθρακα.

Η επιλογή συνθηκών κατεργασίας αποτέλεσε δυσεπίλυτο πρόβλημα, το οποίο επιδέχθηκε ένα αρκετά περιορισμένο πλήθος λύσεων. Για την ακρίβεια, η κατεργασία κατέστη δυνατή μόνο με τη χαμηλότερη δυνατή τιμή έντασης ρεύματος που μπορούσε να παρέχει η εργαλειομηχανή, δηλαδή 1.5 Αμπέρ [A], η οποία προσδιορίστηκε μετά από συνδυασμό δοκιμών και μελέτης παλιότερης εργασίας με αντίστοιχο θέμα που εκπονήθηκε στο ΕΜΠ (Gourgouletis et al., 2011) [11]. Παρατηρήθηκε μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή διάρκειας παλμών, παρόλο που και σε αυτήν την παράμετρο χρειάστηκαν δοκιμές. Σε οποιονδήποτε συνδυασμό συνθηκών δεν πληρούνταν οι προϋποθέσεις για εύρυθμη λειτουργία κατά την κοπή, παρατηρούνταν η δημιουργία τόξου μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου, καθιστώντας την κατεργασία μη βιώσιμη.



Εικόνα 77: Αποτέλεσμα εμφάνισης τόξου DC Εικόνα 78: Επιτυχημένη απόπειρα κατεργασίας

Σαν επιπλέον παρατηρήσεις, οι κοπές χρειάστηκαν πάρα πολύ χρόνο για να πραγματοποιηθούν σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά, με την πιο σύντομη να διαρκεί μια ώρα και 14 λεπτά και την πιο χρονοβόρα να διαρκεί 2 ώρες και 35 λεπτά! Επιπλέον, στην τελευταία εκ των τεσσάρων κοπών εμφανίστηκε τόξο λίγο μετά την συμπλήρωση μιας ώρας κατεργασίας, με αποτέλεσμα την απότομη διακοπή της.

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας, μετά το πέρας της διαδικασίας του πειράματος, μετρήθηκε η μάζα της πλάκας που απέμεινε (14.31 γραμμάρια [g]), στη συνέχεια ο όγκος της ως ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο (7.4 x 3.6 x 0.3 κυβικά εκατοστά [cm³]) και από την

διαίρεση αυτών των δύο μετρήσεων προέκυψε η τιμή της **πυκνότητας ανθρακονήματος** περίπου ίση με $\rho_{cf} = 1.79 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. Περί σημείου τήξεως, το ανθρακόνημα είναι σύνθετο υλικό που αποτελείται από δύο συστατικά, τις ίνες άνθρακα και τη μήτρα από πολυμερές υλικό. Το σημείο τήξης του υλικού της μήτρας δεν ξεπερνά τους 200-400 βαθμούς Κελσίου [6] ενώ των ινών άνθρακα ξεπερνάει τους 3500 βαθμούς Κελσίου [6]. Στην βιβλιογραφία δεν βρέθηκε σαφής θέση για τον προσδιορισμό σημείου τήξης του ανθρακονήματος και έτσι επιλέχθηκε μια θεωρητική τιμή κατόπιν έρευνας στο διαδίκτυο, η οποία λαμβάνει υπόψη της τη θερμοκρασία τήξης των ινών άνθρακα και λαμβάνεται ίση με $T_{w,cf} = 3660 \text{ [}^\circ\text{C]}$. Ακολουθούν οι πίνακες με τις μετρήσεις.

Πείραμα	$z \text{ [}\mu\text{m]}$	$t_{on} \text{ [}\mu\text{s]}$	$J_T \text{ [-]}$	$J_P \text{ [-]}$	$J_{tot} \text{ [-]}$	$I_P \text{ [A]}$
Ανθρακόνημα Ι	496	500	0.5	0	0.5	1.5
Ανθρακόνημα 1	1500	500	0.5	0	0.5	1.5
Ανθρακόνημα 2	1500	200	0.5	0	0.5	1.5
Ανθρακόνημα 3	1100	750	0.5	0	0.5	1.5

Πίνακας 23: Μετρήσεις παραμέτρων για το ανθρακόνημα

Πείραμα	$V_0 \text{ [Volt]}$	$t_{total} \text{ [h:mm:ss]}$	$t_{total} \text{ [sec]}$	$m_{bef} \text{ [g]}$	$m_{aft} \text{ [g]}$
Ανθρακόνημα Ι	100	2:34:45	9285	32.7	32.2
Ανθρακόνημα 1	100	2:11:56	7916	32.2	31.9
Ανθρακόνημα 2	100	1:14:20	4460	18.2	18
Ανθρακόνημα 3	300	1:02:00	3720	17.9	17.8

Πίνακας 24: Μετρήσεις παραμέτρων για το ανθρακόνημα

Πείραμα	Τραχύτητα $R_a \text{ [}\mu\text{m]}$					
	1	2	3	4	M.O.	max
Ανθρακόνημα Ι	5.6	6.6	5.8	6	6	6.6
Ανθρακόνημα 1	4.04	3.36	4.16	3.28	3.71	4.16
Ανθρακόνημα 2	4.8	5.4	6.2	5.8	5.55	6.2
Ανθρακόνημα 3	7.4	7	7.6	9	7.75	9

Πίνακας 25: Τραχυμετρήσεις για το ανθρακόνημα

Πείραμα	Σκληρότητα [HB]				
	1	2	3	4	M.O.
Ανθρακόνημα Ι	649	573	527	565	578.5
Ανθρακόνημα 1	649	573	527	565	578.5
Ανθρακόνημα 2	649	573	527	565	578.5
Ανθρακόνημα 3	649	573	527	565	578.5

Πίνακας 26: Σκληρομετρήσεις για το ανθρακόνημα

3.4 Επεξεργασία Μετρήσεων

Ακολουθεί η επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων που λήφθηκαν. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η συσχέτιση και συγκριτική μελέτη των παραμέτρων κατεργασίας που εξετάστηκαν κατά την πειραματική διαδικασία (ένταση ρεύματος κατεργασίας, διάρκεια παλμών) με τον ρυθμό αποβολής υλικού, MRR [mm^3/min] και με τη μέση τραχύτητα, R_a [μm]. Επιπλέον θα πραγματοποιηθεί και διερεύνηση της επίδρασης της γεωμετρίας της επιφάνειας του ηλεκτροδίου στα δύο παραπάνω μεγέθη (ρυθμός αποβολής υλικού, μέση τραχύτητα) σε όσα υλικά πραγματοποιήθηκε κατεργασία με δύο είδη ηλεκτροδίου.

Ο ρυθμός αποβολής υλικού MRR [mm^3/min] υπολογίζεται με βάση τον τύπο :

$$MRR \left[\frac{mm^3}{min} \right] = \frac{(m_{bef}[g] - m_{aft}[g])}{\rho \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot T_{total} [sec]} \cdot 60 \cdot 1000.$$

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.

Επειδή στα πειράματα εξετάστηκαν ταυτόχρονα οι συνθήκες 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 ξεχωριστά. Συνεπώς χρησιμοποιείται ένα μέγεθος που τις περιλαμβάνει και τις δύο, εν προκειμένω η **ενέργεια ανά παλμό** E_p [mJ], το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση :

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

Ακόμα, για λόγους πληρότητας, υπολογίζεται και η **ονομαστική ισχύς κατεργασίας** P_{nom} [W] μέσω της σχέσης :

$$P_{nom} [W] = I_p [A] \cdot V_p [V].$$

Στη συνέχεια, θα ελεγχθούν κατά πόσο επιβεβαιώνονται από τα πειραματικά δεδομένα δύο σχέσεις που δίνονται από τον Kalpakjian (1997) οι οποίες υπολογίζουν το ρυθμό αποβολής υλικού και τη μέση τραχύτητα [7] :

$$MRR \left[\frac{mm^3}{min} \right] = (4 \cdot 10^4) \cdot I_p [A] \cdot (T_W [^\circ C])^{-1.23}$$

όπου I_p το **ρεύμα κατεργασίας** και T_W η **θερμοκρασία τήξης** του υλικού προς κατεργασία,

$$R_a[\mu m] = 0.0225 \cdot (I_p[A])^{0.29} \cdot (10^{-6} \cdot t_{on}[\mu sec])^{0.38}.$$

Τέλος, θα επιχειρηθεί να προσεγγιστεί για κάθε υλικό μια εμπειρική σχέση που να συνδέει τον ρυθμό αποβολής υλικού με τις προς μελέτη παραμέτρους κατεργασίας (διάρκεια παλμών και ένταση ρεύματος κατεργασίας) η οποία είναι της μορφής :

$$MRR \left[\frac{mm^3}{min} \right] = a \cdot (I_p[A])^b \cdot (t_{on}[\mu sec])^c,$$

με άλλα λόγια θα υπολογιστούν οι συντελεστές a, b και c .

Για τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών γίνονται οι εξής **παραδοχές** :

- Σαν **ρεύμα κατεργασίας**, $I_p[A]$, θεωρώ την τιμή της έντασης του ρεύματος που προκύπτει από τον ορισμό των συνθηκών στη μηχανή. Δεν είναι απόλυτα σωστό αυτό, καθώς το πραγματικό ρεύμα κατεργασίας έχει χαμηλότερη τιμή, περίπου το 70% σε εφαρμογές στην ίδια μηχανή, όπως φαίνεται και σε άλλες εργασίες [10].
- Σαν **τάση κατεργασίας**, $V_p[V]$, θεωρώ πως σε κάθε περίπτωση **εφαρμόζονται 30 Volt**, μια τυπική τιμή σε μηχανές τέτοιου τύπου [2] και όχι 100 που είναι η τιμή της τάσης εν κενώ.

Σε όλες τις περιπτώσεις που θα ακολουθήσουν παρουσιάζονται τριών ειδών διαγράμματα τα οποία συγκρίνουν την ενέργεια ανά παλμό με το ρυθμό αποβολής υλικού, την ενέργεια ανά παλμό με τη μέση τραχύτητα και τον ρυθμό αποβολής υλικού με τη μέση τραχύτητα.

3.4.1 Αποτελέσματα για τα δοκίμια μαλακού χάλυβα

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων του χάλυβα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

Πείραμα	t_{on} [μs]	I_p [A]	t_{total} [sec]	m_{bef} [g]	m_{aft} [g]	E_p [mJ]	MRR [mm ³ /min]	R_a [μm]	P_{nom} [W]
Χάλυβας 1	200	24	905	237.1	230.8	144	53.55	10.15	720
Χάλυβας 2	500	24	880	230.8	224.5	360	55.07	14.25	720
Χάλυβας 3	100	27	870	224.5	218.2	81	55.7	8.35	810
Χάλυβας οπή	200	24	650	218.2	214.1	144	48.52	5.65	720

Πίνακας 27: Αποτελέσματα μετρήσεων για το χάλυβα

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των σχέσεων του Kalpakjian :

Πείραμα	MRR [mm ³ /min] πειραματικό	MRR [mm ³ /min] θεωρητικό	MRR πειραματικό / θεωρητικό	R_a [μm] πειραματικό	R_a [μm] θεωρητικό	R_a [μm] πειραματικό / θεωρητικό
Χάλυβας 1	53.55	135.51	0.4	10.15	80.69	0.13
Χάλυβας 2	55.07	135.51	0.41	14.25	114.3	0.12
Χάλυβας 3	55.7	152.45	0.37	8.35	64.16	0.13
Χάλυβας σπή	48.52	135.51	0.36	5.65	80.69	0.07

Πίνακας 28: Αποτελέσματα σχέσεων Kalpakjian για το χάλυβα

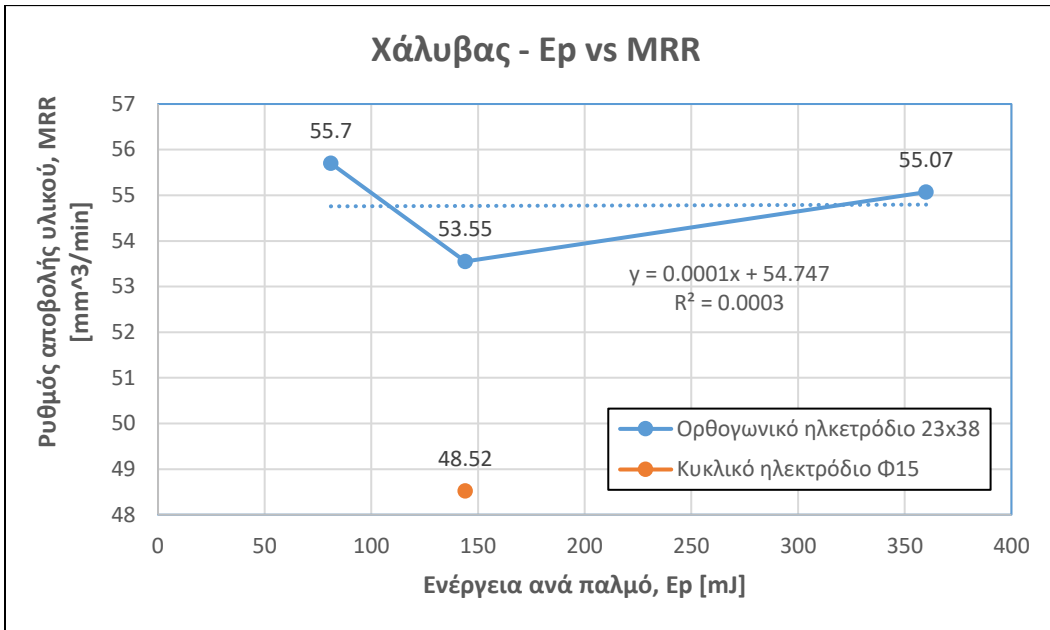
Καταρχάς στη βιβλιογραφία δεν κατέστη σαφές με βάση ποιες συνθήκες και παραμέτρους κατεργασίας προέκυψαν οι προς εξέταση σχέσεις. Παρατηρούνται αποκλίσεις από τα πειραματικά δεδομένα και στους δύο τύπους, όπου όμως ο λόγος πειραματικών προς θεωρητικών τιμών είναι περίπου σταθερός ή έστω δεν παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις. Από αυτό το γεγονός εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι σχέσεις προσεγγίζουν σωστά τη συσχέτιση των μεγεθών σε ποιοτικό επίπεδο, όχι όμως σε ποσοτικό. Μια παράμετρος που πιθανότατα επηρεάζει την ποσοτική απόκλιση είναι η παραδοχή που αφορά την ένταση του ρεύματος κατεργασίας, $I_p [A]$, με βάση την οποία χρησιμοποιείται στις σχέσεις μεγαλύτερη τιμή της έντασης του ρεύματος κατεργασίας από την πραγματική και ενδεχομένως να μεγεθύνει τις τιμές των υπολογισμένων αποτελεσμάτων. Τέλος, ο τύπος της γεωμετρίας του ηλεκτροδίου εκ πρώτης όψεως φαίνεται να επηρεάζει το λόγο της τραχύτητας R_a , ωστόσο για το λόγο της MRR δεν μπορεί να εξαχθεί αντίστοιχο συμπέρασμα.

Ακολουθούν συντελεστές της εμπειρικής σχέσης που προαναφέρθηκε, για το ηλεκτρόδιο ορθογωνικής διατομής 23x38 [mm] από χαλκό, οι οποίοι παίρνουν τις τιμές :

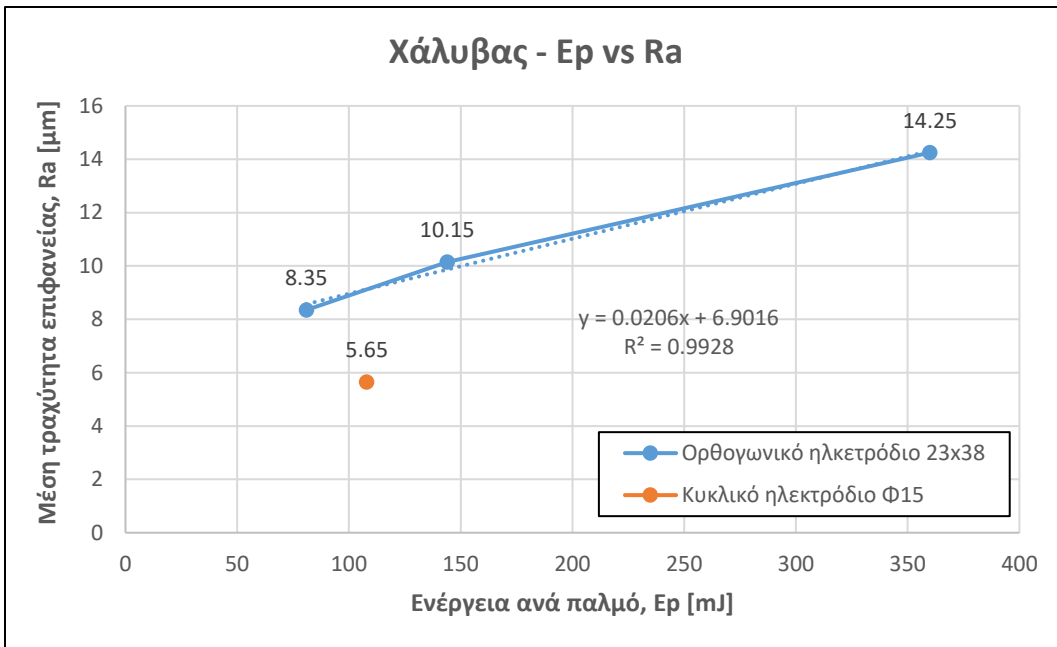
a	b	c
8.894	0.514	0.031

Πίνακας 29: Συντελεστές εμπειρικής σχέσης της μορφής $MRR = a \cdot (I_p)^b \cdot (t_{on})^c$ για χάλυβα

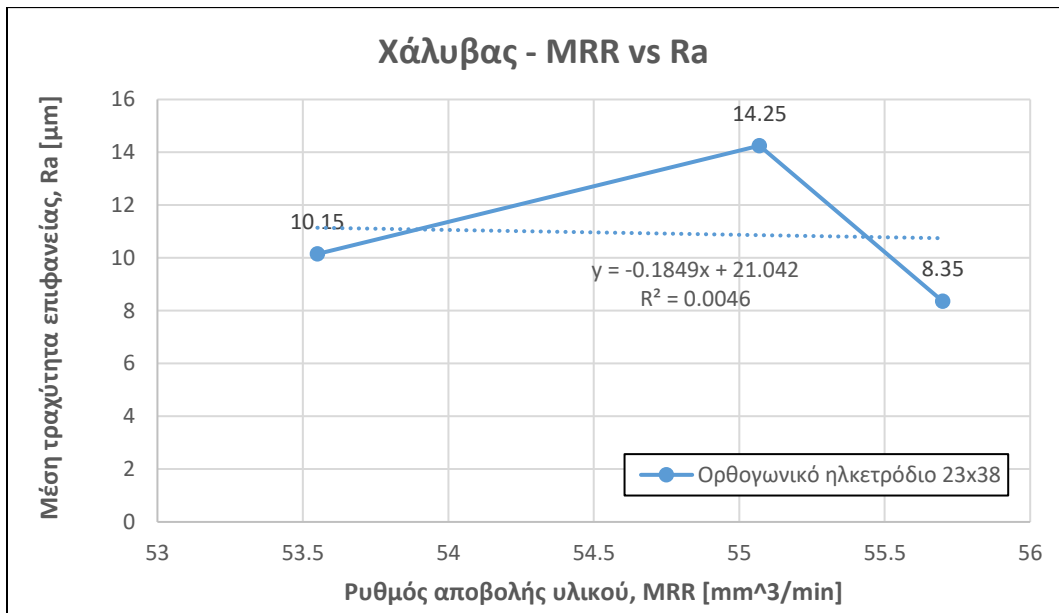
Τέλος, ακολουθούν τα διαγράμματα και ο σχολιασμός τους :



Σχήμα 1: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει του MRR για το χάλυβα



Σχήμα 2: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για το χάλυβα



Σχήμα 3: Διάγραμμα MRR συναρτήσεως της μέσης τραχύτητας για το χάλυβα

Στο σχήμα 1 παρατηρείται ταλάντωση των μετρήσεων γύρω από μια ευθεία προσαρμογής η οποία έχει σχεδόν μηδενική κλίση, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα πως η αύξηση της ενέργειας ανά παλμό για τις τόσο υψηλές τιμές έντασης ρεύματος που επιλέχθηκαν δεν οδηγεί σε κάποια ουσιαστική μεταβολή στο MRR. Το MRR του πειράματος που εκτελέστηκε με το κυκλικό ηλεκτρόδιο είναι αισθητά χαμηλότερο και αυτό οφείλεται στο μεγάλο βάθος κοπής που απαιτήθηκε, όπου η δυσκολία της έκπλυσης αποβλίττων αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του βάθους, γεγονός που παρατηρήθηκε και κατά τη διάρκεια του πειράματος, όπου η μηχανή δυσκολευόταν ολοένα και περισσότερο να πραγματοποιήσει την κοπή όσο αυξανόταν το βάθος.

Η συσχέτιση της ενέργειας ανά παλμό με τη μέση τραχύτητα που φαίνεται στο σχήμα 2 παρουσιάζει μια αυξητική τάση, γεγονός αναμενόμενο, καθώς η αύξηση της ενέργειας επιφέρει και πιο μεγάλες διαστάσεις στους κρατήρες, καθώς και παραγωγή περισσότερων αποβλίττων, εκ των οποίων ένας αριθμός επαναστερεοποιείται στην επιφάνεια του τεμαχίου. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί η μικρότερη τιμή της μέσης τραχύτητας στην κατεργασμένη επιφάνεια του δοκιμίου που κόπηκε με το κυκλικό ηλεκτρόδιο έναντι των τιμών τραχύτητας στις υπόλοιπες κοπές.

Στο σχήμα 3 παρατηρείται μια συσχέτιση που αντιτίθεται στη διαίσθηση, δηλαδή η μείωση της τραχύτητας με την αύξηση του MRR. Ωστόσο, δεν είναι ασφαλές να εξαχθεί απευθείας συμπέρασμα, καθώς η εν λόγω συσχέτιση αποτελεί προϊόν δυο παραγόντων που μεταβάλλονται ταυτόχρονα και ο καθένας επιδρά με διαφορετικό βαθμό σε καθένα εκ των δύο συγκρινόμενων μεγεθών.

Από τα τρία πειράματα, εκείνο που δίνει τις καλύτερες συνθήκες κατεργασίας, δηλαδή το μεγαλύτερο δυνατό MRR και την ελάχιστη δυνατή τραχύτητα είναι εκείνο που πραγματοποιείται με τη χαμηλότερη ενέργεια ανά παλμό, δηλαδή για ένταση ρεύματος κατεργασίας ίσο με 27 [A] και για διάρκεια παλμού ίση με 100 [μ s], όπως φαίνεται και στο σχήμα 3. Αξίζει να αναφερθεί πως ο παραπάνω συνδυασμός περιλαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή ρεύματος και τη μικρότερη τιμή διάρκειας παλμών από τα τρία πειράματα, γεγονός που επιβεβαιώνει τα βιβλιογραφικά ευρήματα στο υλικό του χάλυβα, πως δηλαδή με μεγάλες εντάσεις ρεύματος επιτυγχάνεται αυξημένο MRR και με χαμηλές διάρκειες παλμών πιο λείες επιφάνειες.

3.4.2 Αποτελέσματα για τα δοκίμια αλουμινίου Al6061

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων του αλουμινίου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

Πείραμα	t_{on} [μ s]	I_p [A]	t_{total} [sec]	m_{bef} [g]	m_{aft} [g]	E_p [mJ]	MRR [mm^3/min]	R_a [μ m]	P_{nom} [W]
Αλουμίνιο 1	100	21	372	45.2	42.8	63	143.37	11.7	630
Αλουμίνιο 2	500	24	387	42.8	40.4	360	137.81	19	720
Αλουμίνιο 3	50	24	191	44.5	43.5	36	116.35	8.7	720
Αλουμίνιο 4	75	24	368	43.5	41.1	54	144.93	10.5	720
Αλουμίνιο οπή	150	24	175	42.7	41.3	108	177.78	8.63	720

Πίνακας 30: Αποτελέσματα μετρήσεων για το αλουμίνιο

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των σχέσεων του Kalpakjian :

Πείραμα	MRR [mm^3/min] πειραματικό	MRR [mm^3/min] θεωρητικό	MRR πειραματικό / θεωρητικό	R_a [μ m] πειραματικό	R_a [μ m] θεωρητικό	R_a [μ m] πειραματικό / θεωρητικό
Αλουμίνιο 1	143.37	285.92	0.5	11.7	59.65	0.2
Αλουμίνιο 2	137.81	326.76	0.42	19	114.3	0.17
Αλουμίνιο 3	116.35	326.76	0.36	8.7	47.65	0.18
Αλουμίνιο 4	144.93	326.76	0.44	10.5	55.59	0.19
Αλουμίνιο οπή	177.78	326.76	0.54	8.63	72.34	0.12

Πίνακας 31: Αποτελέσματα σχέσεων Kalpakjian για το αλουμίνιο

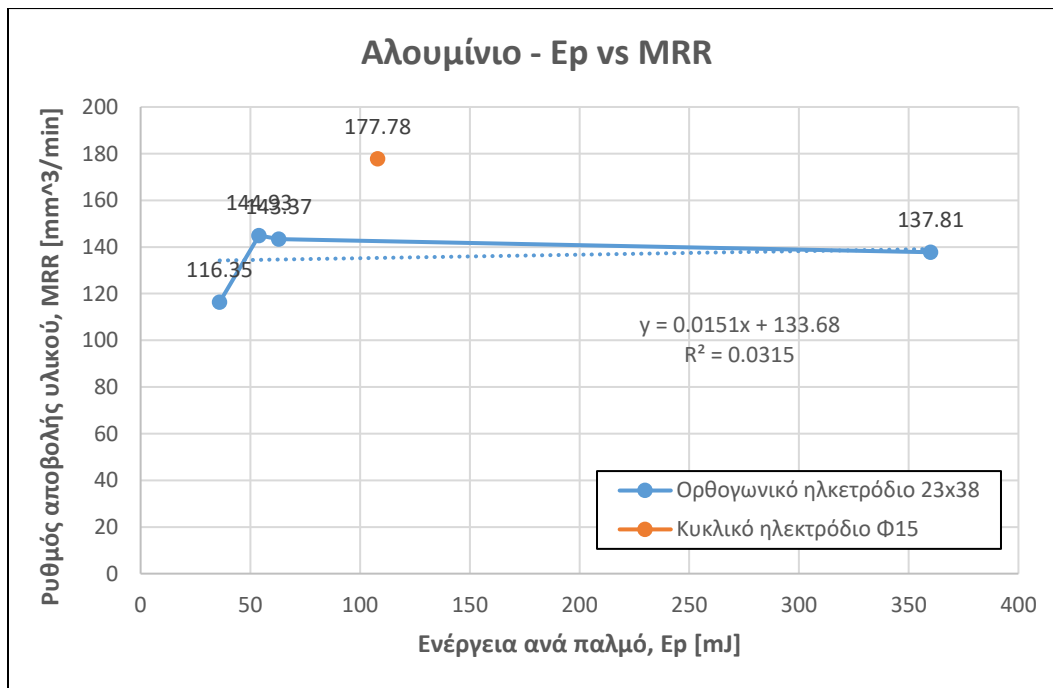
Παρατηρούνται ομοιότητες στις συσχετίσεις με την περίπτωση του χάλυβα, δηλαδή περίπου σταθερή αναλογία πειραματικών προς θεωρητικών αποτελεσμάτων, με τον λόγο του MRR να παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά από ό,τι ο λόγος της τραχύτητας R_a . Επιπλέον, εκ πρώτης όψεως ο διαφορετικός τύπος γεωμετρίας ηλεκτροδίου φαίνεται ότι επηρεάζει και τους δύο λόγους, παρά τη μεγάλη διασπορά στην περίπτωση του MRR .

Ακολουθούν συντελεστές της εμπειρικής σχέσης που προαναφέρθηκε, για το ηλεκτρόδιο ορθογωνικής διατομής 23x38 [mm] από χαλκό, οι οποίοι παίρνουν τις τιμές :

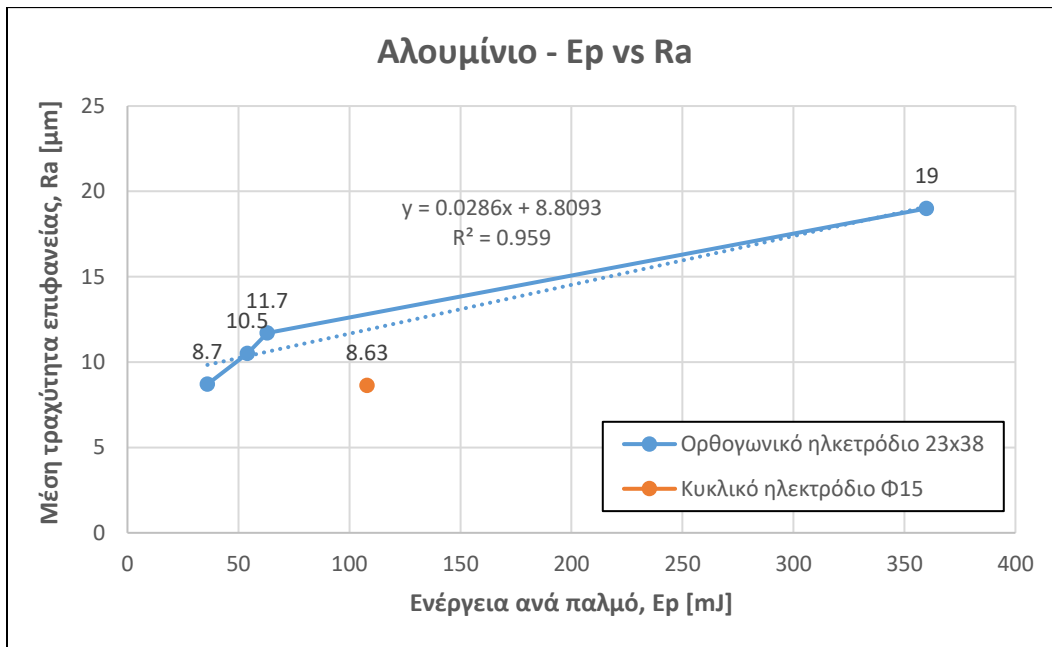
a	b	c
3.876	-0.799	0.167

Πίνακας 32: Συντελεστές εμπειρικής σχέσης της μορφής $MRR = a \cdot (I_p)^b \cdot (t_{on})^c$ για αλουμίνιο

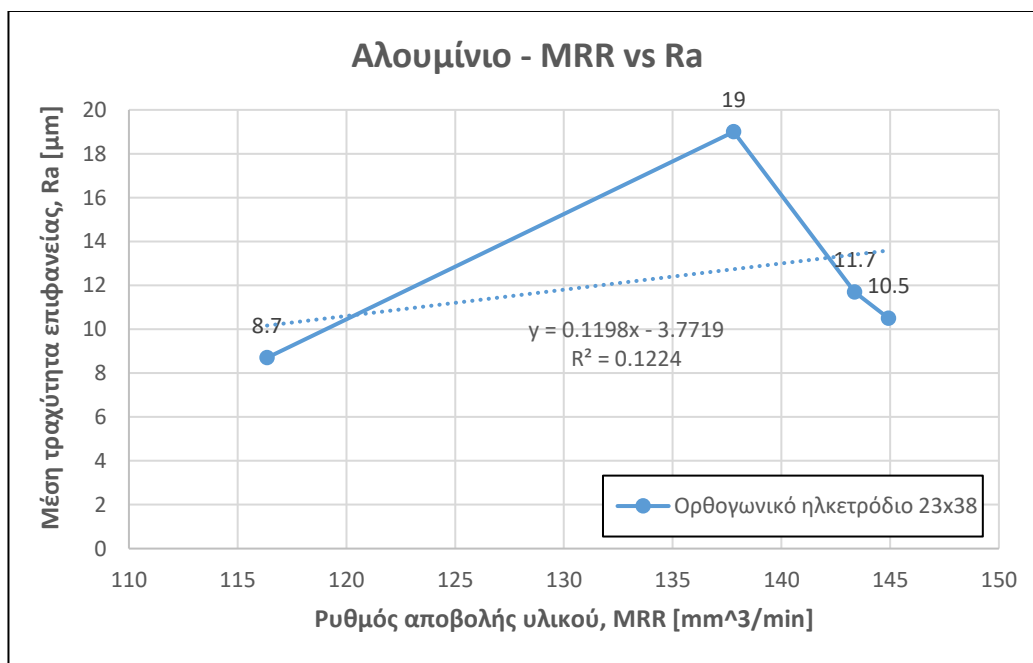
Τέλος παρατίθενται τα διαγράμματα και ο σχολιασμός τους :



Σχήμα 4: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει του MRR για το αλουμίνιο



Σχήμα 5: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για το αλουμίνιο



Σχήμα 6: Διάγραμμα MRR συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για το αλουμίνιο

Όπως και στην περίπτωση του χάλυβα, έτσι και σε αυτήν δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση του MRR με την αύξηση της ενέργειας ανά παλμό, μολονότι οι τιμές των μετρήσεων

ταλαντώνονται με σημαντικές αποκλίσεις γύρω από τη γραμμή προσαρμογής. Το MRR της οπής είναι μεγαλύτερο των υπολοίπων κοπών, παρατήρηση που αντιτίθεται στην παρατήρηση της περίπτωσης του χάλυβα. Μια εξήγηση είναι η διαφορά στην κατεργασιμότητα των υλικών, με το αλουμίνιο να είναι το πιο κατεργάσιμο, γεγονός που πιστοποιείται και από τις μεγάλες τιμές MRR που επιτεύχθηκαν, για την ακρίβεια οι μεγαλύτερες εκ των πέντε υλικών. Επιπλέον, ενδεχομένως τα απόβλιττα να αποτελούν μικρότερο πρόβλημα σε αυτήν την περίπτωση.

Στο σχήμα 5 η τραχύτητα φαίνεται να αυξάνεται με την αύξηση της ενέργειας παλμών, για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν στην περίπτωση του χάλυβα. Και σε αυτήν την περίπτωση, η οπή εμφανίζει μικρότερη τιμή τραχύτητας στην κατεργασμένη της επιφάνεια από ό,τι η αντίστοιχη κοπή με το ορθογώνιο ηλεκτρόδιο.

Το τελευταίο διάγραμμα (σχήμα 6) αναφέρεται μόνο στις κοπές που πραγματοποιήθηκαν με το ηλεκτρόδιο ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 23x38 τετραγ. χιλιοστών. Φαίνεται σε αυτό αύξηση της τραχύτητας με την αύξηση του MRR, κάτι που διαισθητικά βγάζει νόημα, αν και συνεχίζουν να ισχύουν οι επιφυλάξεις που αναφέρθηκαν στο αντίστοιχο εδάφιο στην περίπτωση του χάλυβα. Με βάση αυτό το διάγραμμα ο καλύτερος εκ των τεσσάρων συνδυασμών για να παραχθεί δοκίμιο με υψηλό MRR και χαμηλή τραχύτητα είναι εκείνος που δίνει το υψηλότερο εκ των τεσσάρων MRR, παρόλο που δεν συνοδεύεται από την μικρότερη μέση τραχύτητα, δηλαδή για $I_p = 24$ [A] και για $t_{on} = 75$ [μ s].

3.4.3 Αποτελέσματα για τα δοκίμια καρβιδίων του βολφραμίου

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων των καρβιδίων του βολφραμίου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

Πείραμα	t_{on} [μ s]	I_p [A]	t_{total} [sec]	m_{bef} [g]	m_{aft} [g]	E_p [mJ]	MRR [mm^3/min]	R_a [μ m]	P_{nom} [W]
Καρβίδιο I	500	27	180	11.1	11.1	405	0	4.3	810
Καρβίδιο II	300	24	1102	11	11	216	0	13.75	720
Καρβίδιο 1	20	16.5	1515	11	10.8	9.9	0.53	5.7	495
Καρβίδιο 2	50	16.5	819	11.2	11.1	24.75	0.49	8.2	495
Καρβίδιο 3	75	16.5	1659	10.5	10.4	37.13	0.24	4.8	495

Πίνακας 33: Αποτελέσματα μετρήσεων για τα καρβίδια

Στα τεμάχια που κατεργάστηκαν με το ηλεκτρόδιο ορθογωνικής διατομής στην πραγματικότητα πραγματοποιείται αφαίρεση υλικού, ωστόσο δεν δύναται να μετρηθεί με

τη συγκεκριμένη ζυγαριά που χρησιμοποιήθηκε, λόγω ανεπαρκούς διακριτικής ικανότητας. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των σχέσεων του Kalpakjian :

Πείραμα	MRR [mm ³ /min] πειραματικό	MRR [mm ³ /min] θεωρητικό	MRR πειραματικό / θεωρητικό	R_a [μm] πειραματικό	R_a [μm] θεωρητικό	R_a [μm] πειραματικό / θεωρητικό
Καρβίδιο Ι	0	62.84	0	4.3	118.27	0.04
Καρβίδιο ΙΙ	0	55.85	0	13.75	94.13	0.15
Καρβίδιο 1	0.53	38.4	0.01	5.7	30.17	0.19
Καρβίδιο 2	0.49	38.4	0.01	8.2	42.74	0.19
Καρβίδιο 3	0.24	38.4	0.01	4.8	49.86	0.1

Πίνακας 34: Αποτελέσματα σχέσεων Kalpakjian για τα καρβίδια

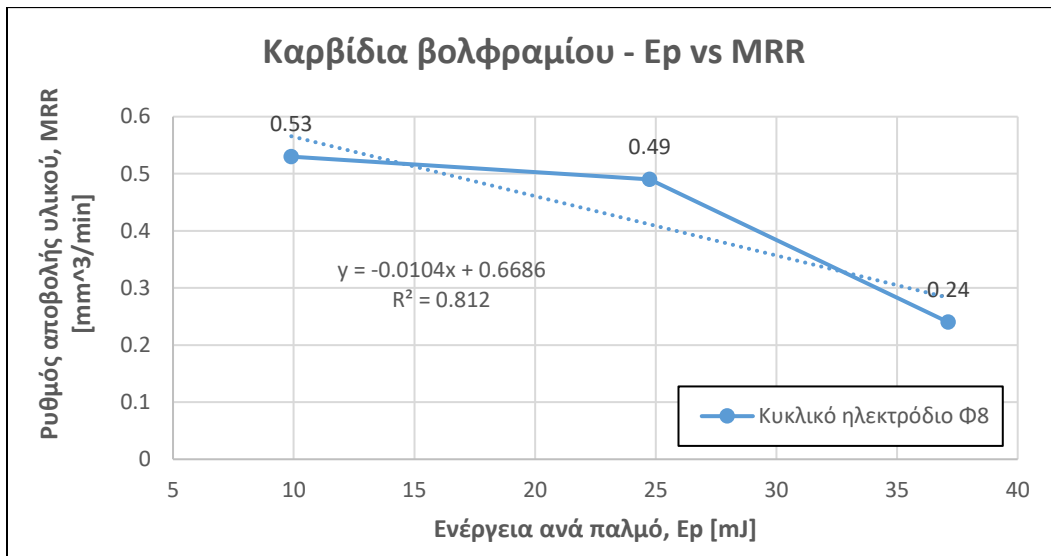
Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται απόκλιση δύο τάξεων μεγέθους στην περίπτωση του MRR , γεγονός που καταδεικνύει την ακαταλληλότητα της σχέσης αυτής του Kalpakjian για την πρόβλεψη του MRR στην περίπτωση των καρβιδίων βολφραμίου. Η σχέση που δίνει τη μέση τραχύτητα εμφανίζει αντίστοιχη συμπεριφορά με τις προηγούμενες περιπτώσεις, ήτοι παρόμοιους λόγους πραγματικής προς θεωρητικής τιμής, οι οποίοι για κάθε τύπο ηλεκτροδίου φαίνεται να τείνουν σε συγκεκριμένη τιμή.

Ακολουθούν οι συντελεστές της εμπειρικής σχέσης που προαναφέρθηκε, για το ηλεκτρόδιο κυκλικής διατομής διαμέτρου $\Phi=8$ χιλιοστών [mm] από χαλκό, οι οποίοι παίρνουν τις παρακάτω τιμές :

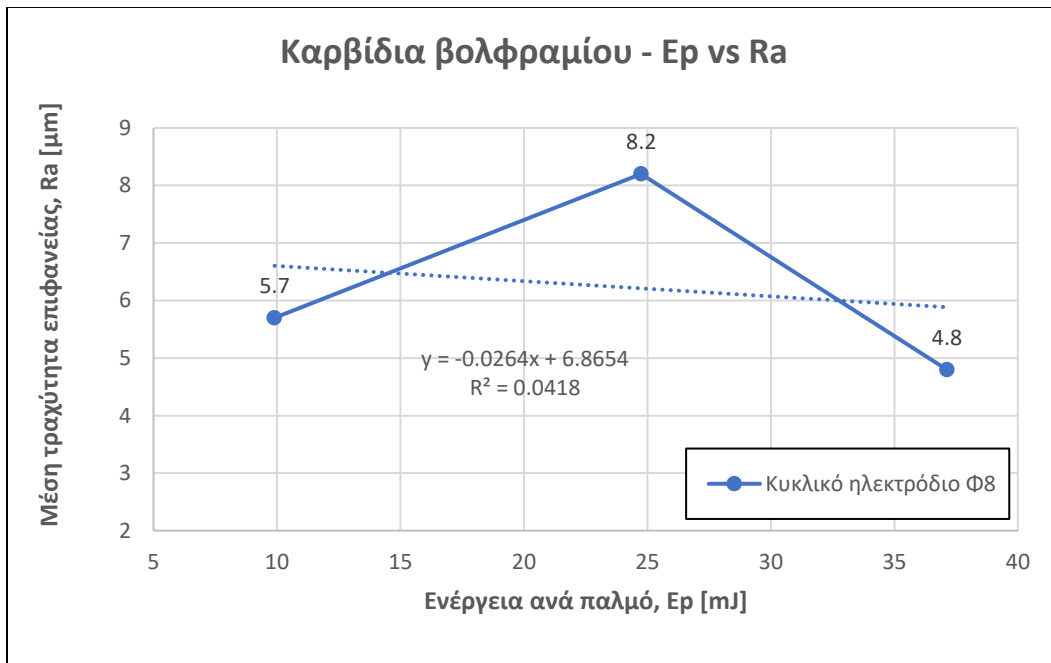
a	b	c
0.728	0.326	-0.397

Πίνακας 35: Συντελεστές εμπειρικής σχέσης της μορφής $MRR = a \cdot (I_p)^b \cdot (t_{on})^c$ για καρβίδια

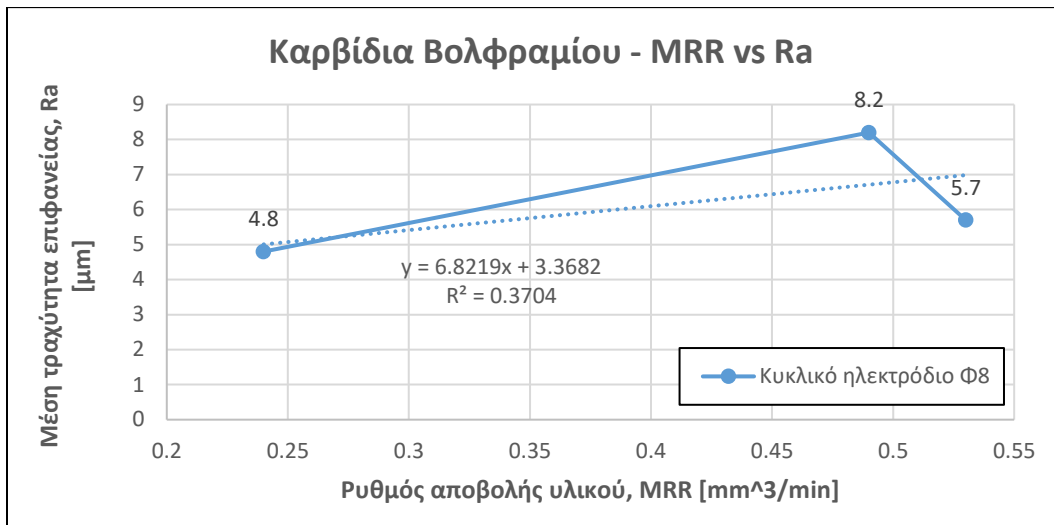
Τέλος, ακολουθούν τα διαγράμματα και ο σχολιασμός τους. Για λόγους βολικότερης σχεδίασης των γραφημάτων επιλέχθηκε να παραλειφθούν τελείως οι μετρήσεις των κατεργασιών με το ορθογωνικό ηλεκτρόδιο, μια και η ενέργεια ανά παλμό είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με αυτές με το κυκλικό, ωστόσο θα συμπεριληφθούν στον σχολιασμό.



Σχήμα 7: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει του MRR για τα καρβίδια



Σχήμα 8: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για τα καρβίδια



Σχήμα 9: Διάγραμμα MRR συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για τα καρβίδια

Παρατηρείται μια πτωτική τάση του MRR όσο αυξάνει η ενέργεια ανά παλμό, το ίδιο ισχύει και για τη γραμμική τάση της μέσης τραχύτητας, με μικρότερο όμως ρυθμό. Είναι χαρακτηριστικές οι πολύ μικρές τιμές του MRR που παρατηρούνται στην κατεργασία αυτού του υλικού, χωρίς μάλιστα να έχει επιτευχθεί μεγάλη τιμή βάθους κοπής, γεγονός που καταδεικνύει τη δυσκολία κατεργασίας αυτού του υλικού. Επιπλέον, η τραχύτητα παίρνει αρκετά μικρές τιμές, παρατήρηση που σχετίζεται με τις πολύ χαμηλές τιμές του MRR, που παραπέμπουν σε σχηματισμό κρατήρων μικρής διαμέτρου και βάθους.

Παρατηρώντας το τελευταίο διάγραμμα, ο **καταλληλότερος συνδυασμός συνθηκών** εκ των τριών που δίνει συνδυασμό υψηλού MRR και χαμηλής μέσης τραχύτητας είναι **αυτός με τη χαμηλότερη ενέργεια ανά παλμό**, ήτοι για τιμή ρεύματος κατεργασίας 16.5 Αμπέρ [A] και χρονικής διάρκειας παλμού ίσης με 20 microseconds [μs]. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τις συνθήκες κατεργασίας υψηλής ενέργειας ανά παλμό που χρησιμοποιήθηκαν στις πρώτες αποτυχημένες απόπειρες, αποδεικνύοντας **πως δεν απαιτούνται κατ' ανάγκη τέτοιες έντονες συνθήκες κατεργασίας για την κοπή πολύ σκληρών υλικών**.

3.4.4 Αποτελέσματα για τα δοκίμια εργαλειοχάλυβα

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων του εργαλειοχάλυβα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

Πείραμα	t_{on} [μs]	I_p [A]	t_{total} [sec]	m_{bef} [g]	m_{aft} [g]	E_p [mJ]	MRR [mm ³ /min]	R_a [μm]	P_{nom} [W]
Εργ/βας 1	100	24	340	25	22.7	72	51.97	11.9	720
Εργ/βας 2	300	24	590	22.7	19.8	216	37.76	13.7	720
Εργ/βας 3	50	24	307	13.1	10.8	36	57.56	5.45	720

Πίνακας 36: Αποτελέσματα μετρήσεων για τον εργαλειοχάλυβα M42

Πείραμα	MRR [mm ³ /min] πειραματικό	MRR [mm ³ /min] θεωρητικό	MRR πειραματικό / θεωρητικό	R_a [μm] πειραματικό	R_a [μm] θεωρητικό	R_a [μm] πειραματικό / θεωρητικό
Εργ/βας 1	51.97	120.02	0.43	11.9	62.01	0.19
Εργ/βας 2	37.76	120.02	0.31	13.7	94.13	0.15
Εργ/βας 3	57.56	120.02	0.48	5.45	47.65	0.11

Πίνακας 37: Αποτελέσματα σχέσεων *Kalpakjian* για τον εργαλειοχάλυβα M42

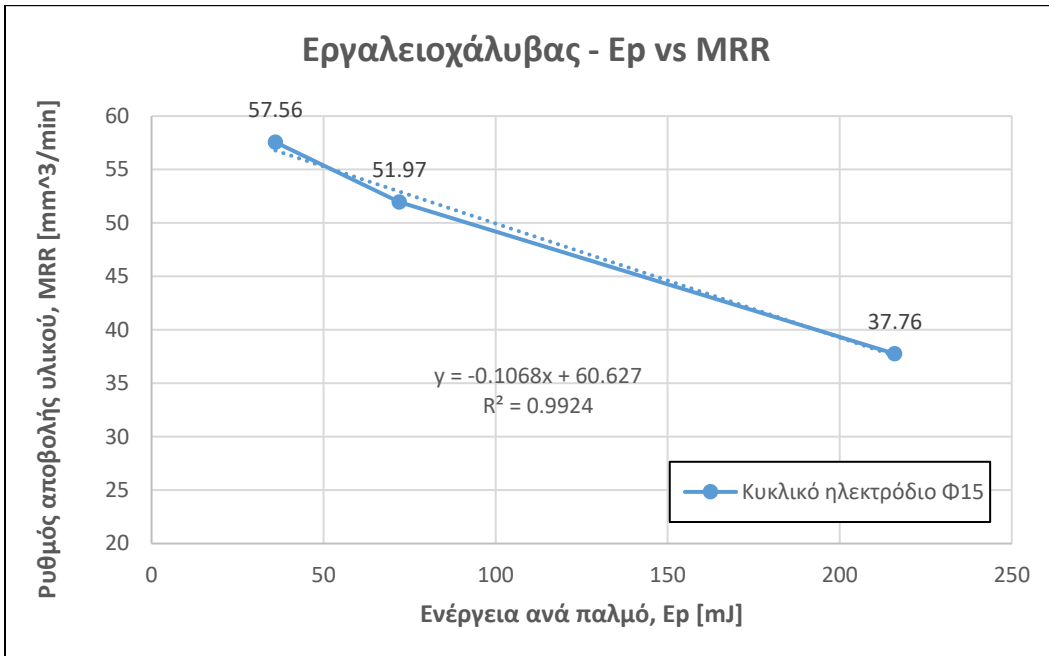
Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούνται λόγοι MRR αντίστοιχοι των άλλων δύο μετάλλων, αλουμινίου και χάλυβα, με μεγαλύτερη, όμως, διασπορά γύρω από τη μέση τιμή τους. Δυστυχώς το δείγμα δεν είναι αρκούντως μεγάλο για να εξαχθεί συμπέρασμα για την 2^ο πείραμα, στο οποίο ο λόγος διαφέρει αρκετά από τις άλλες δύο περιπτώσεις. Περί μέσης τραχύτητας, παρατηρείται μεγάλη διασπορά σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις και δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα για το αν μπορεί να προσεγγιστεί έστω ποιοτικά η πειραματική τιμή της μέσης τραχύτητας.

Ακολουθούν οι συντελεστές της εμπειρικής σχέσης που προαναφέρθηκε, για το ηλεκτρόδιο κυκλικής διατομής διαμέτρου $\Phi=15$ [mm] από χαλκό, οι οποίοι παίρνουν τις παρακάτω τιμές :

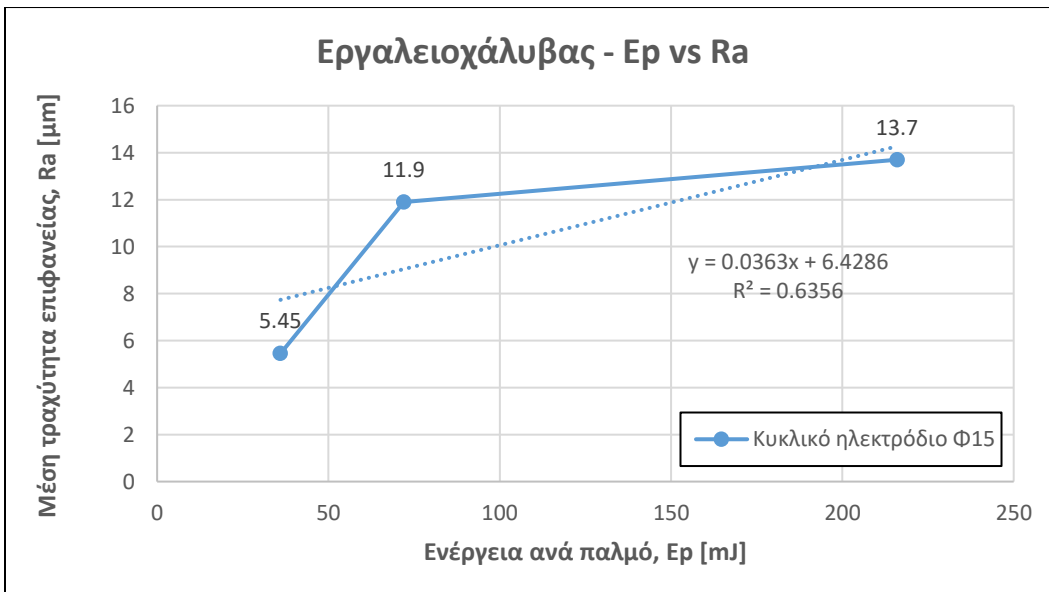
a	b	c
1.038	1.377	-0.11

Πίνακας 38: Συντελεστές εμπειρικής σχέσης της μορφής $MRR = a \cdot (I_p)^b \cdot (t_{on})^c$ για εργαλειοχάλυβα M42

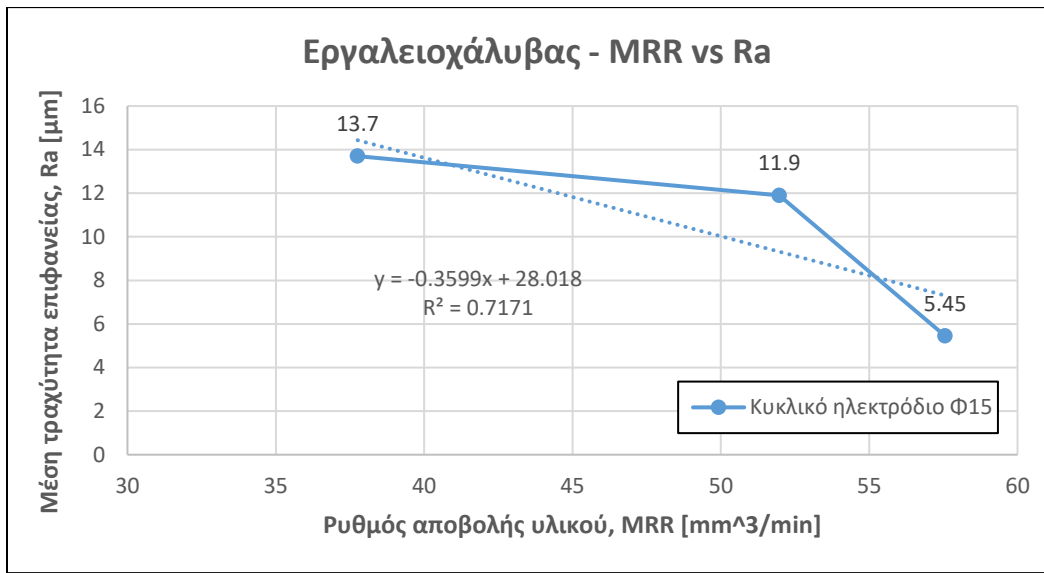
Τέλος, ακολουθούν τα διαγράμματα και ο σχολιασμός τους :



Σχήμα 10: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει του MRR για τον εργαλειοχάλυβα



Σχήμα 11: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για τον εργαλειοχάλυβα



Σχήμα 12: Διάγραμμα MRR συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για τον εργαλειοχάλυβα

Και σε αυτήν την περίπτωση, όπως και σε αυτής των καρβιδίων, παρατηρείται πτώση του MRR με την αύξηση της ενέργειας ανά παλμό και μάλιστα με σημαντική διαφορά μέγιστης και ελάχιστης τιμής. Ένας πιθανός λόγος της τόσο σημαντικής μείωσης είναι οι αυξημένες απαιτήσεις βάθους κοπής (2500 έναντι 2000 [μm]), που προκαλούν δυσκολία στην έκπλυση των παραγόμενων αποβλίττων. Επιπλέον, το γεγονός ότι και στις τρεις περιπτώσεις έχει χρησιμοποιηθεί η ίδια τιμή της έντασης ρεύματος κατεργασίας, δίνει τη δυνατότητα να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση της χρονικής διάρκειας παλμών (πάντα σε συνάρτηση με τη συγκεκριμένη τιμή έντασης ρεύματος). Παρατηρείται αρνητική επίδραση στο MRR με την αύξηση της διάρκειας των παλμών για αυτές τις αρκούντως υψηλές τιμές ρεύματος, η οποία αύξηση συνοδεύεται και από αύξηση στην παραγωγή αποβλίττων, γεγονός που ενισχύει την παρατήρηση της εργασίας του κ. Παπάζογλου (Parazoglou, 2018) [10] που αναφέρει ως μια αιτία της μείωσης του MRR την αυξημένη παραγωγή αποβλίττων που υπερβαίνει τη δυνατότητα έκπλυσής τους.

Η μέση τραχύτητα επιφανείας φαίνεται να αυξάνει όσο αυξάνει η ενέργεια ανά παλμό (ή/και η διάρκεια παλμών) γεγονός που ενισχύει ακόμα περισσότερο την αρνητική επίδραση της αύξησής της στην ποιότητα της επιφάνειας. Με γνώμονα και το σχήμα 12 που απεικονίζει τη σύνδεση MRR και μέσης τραχύτητας, δίνεται άλλη μια επιβεβαίωση πως ο **καλύτερος συνδυασμός** από τους τρεις που δίνει χαμηλή τραχύτητα και υψηλό MRR είναι αυτός της **χαμηλότερης ενέργειας ανά παλμό**, δηλαδή για τιμή ρεύματος κατεργασίας 24 Αμπέρ [A] και χρονικής διάρκειας παλμού ίσης με 50 microseconds [μs].

3.4.5 Αποτελέσματα για τα δοκίμια ανθρακονήματος

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων του ανθρακονήματος παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

Πείραμα	t_{on} [μs]	I_p [A]	t_{total} [sec]	m_{bef} [g]	m_{aft} [g]	E_p [mJ]	MRR [mm ³ /min]	R_a [μm]	P_{nom} [W]
Ανθρακόνημα Ι	500	1.5	9285	32.7	32.2	22.5	1.81	6	45
Ανθρακόνημα 1	500	1.5	7916	32.2	31.9	22.5	1.27	3.71	45
Ανθρακόνημα 2	200	1.5	4460	18.2	18	9	1.5	5.55	45
Ανθρακόνημα 3	750	1.5	3720	17.94	17.78	33.75	1.44	7.75	45

Πίνακας 39: Αποτελέσματα μετρήσεων για το ανθρακόνημα

Πείραμα	MRR [mm ³ /min] πειραματικό	MRR [mm ³ /min] θεωρητικό	MRR πειραματικό / θεωρητικό	R_a [μm] πειραματικό	R_a [μm] θεωρητικό	R_a [μm] πειραματικό / θεωρητικό
Ανθρακόνημα Ι	1.81	2.48	0.73	6	51.15	0.12
Ανθρακόνημα 1	1.27	2.48	0.51	3.71	51.15	0.07
Ανθρακόνημα 2	1.5	2.48	0.6	5.55	36.11	0.15
Ανθρακόνημα 3	1.44	2.48	0.58	7.75	59.67	0.13

Πίνακας 40: Αποτελέσματα σχέσεων Kalpakjian για το ανθρακόνημα

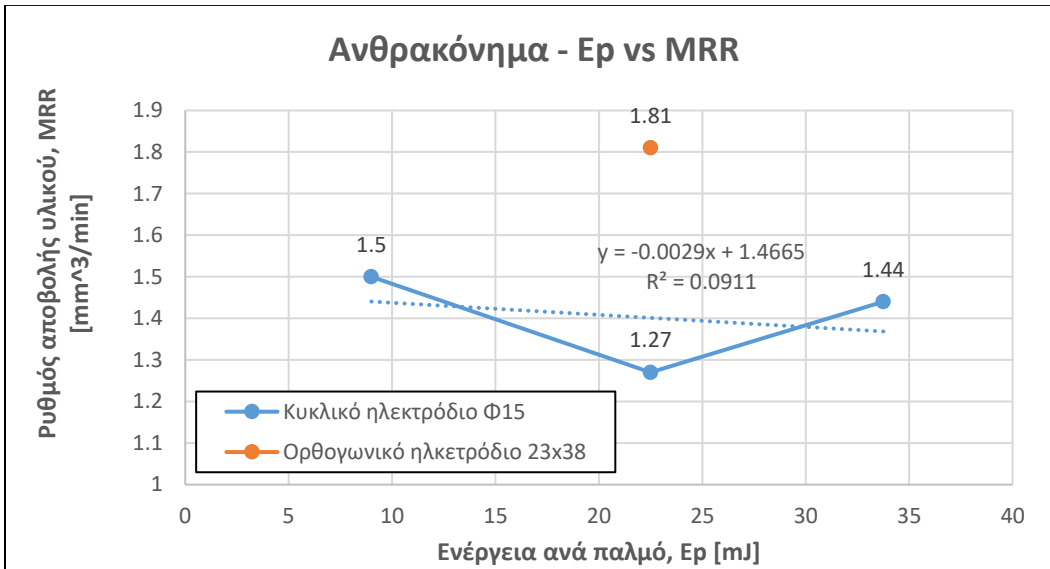
Θεωρώντας ως αποδεκτή την θεωρητική τιμή για το σημείο τήξης των ιών του άνθρακα στο ανθρακόνημα και χρησιμοποιώντας την στην σχέση του Kalpakjian που δίνει το MRR, παρατηρείται μια αρκετά καλή προσέγγιση των πειραματικών τιμών σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Η αναλογία πειραματικής προς θεωρητικής τιμής τείνει στο να είναι σταθερή στην περίπτωση του κυκλικού ηλεκτροδίου, ενώ η τιμή του λόγου στην περίπτωση του ορθογώνιου ηλεκτροδίου φαίνεται ελαφρώς μεγαλύτερη. Συνεχίζοντας στη δεύτερη σχέση, παρατηρείται ξανά η ύπαρξη μιας σταθερής τιμής στο λόγο πειραματικής προς υπολογισμένης τιμής γύρω από την οποία ταλαντώνονται οι μετρήσεις, η οποία όμως, φαίνεται να μην λαμβάνει υπόψη της το είδος του ηλεκτροδίου. Συμπερασματικά, και οι δύο σχέσεις καταφέρνουν ποιοτικά να προσεγγίσουν τη συσχέτιση των παραγόμενων μεγεθών με αυτά που χρησιμοποιούνται στις σχέσεις, ωστόσο χρειάζεται η προσθήκη κάποιας σταθεράς για να σημειωθεί και ποσοτική προσέγγιση.

Ακολούθως, οι συντελεστές της εμπειρικής σχέσης που προαναφέρθηκε, για το ηλεκτρόδιο κυκλικής διατομής διαμέτρου $\Phi=15$ [mm] από χαλκό, παίρνουν τις παρακάτω τιμές :

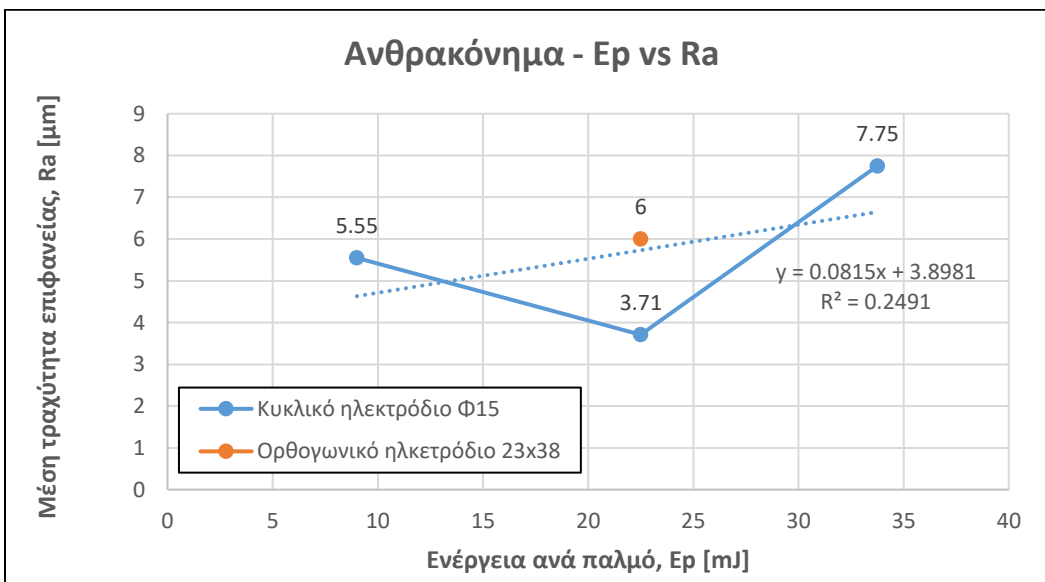
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1.429	-0.754	0.047

Πίνακας 41: Συντελεστές εμπειρικής σχέσης της μορφής $MRR = a \cdot (I_p)^b \cdot (t_{on})^c$ για ανθρακόνημα

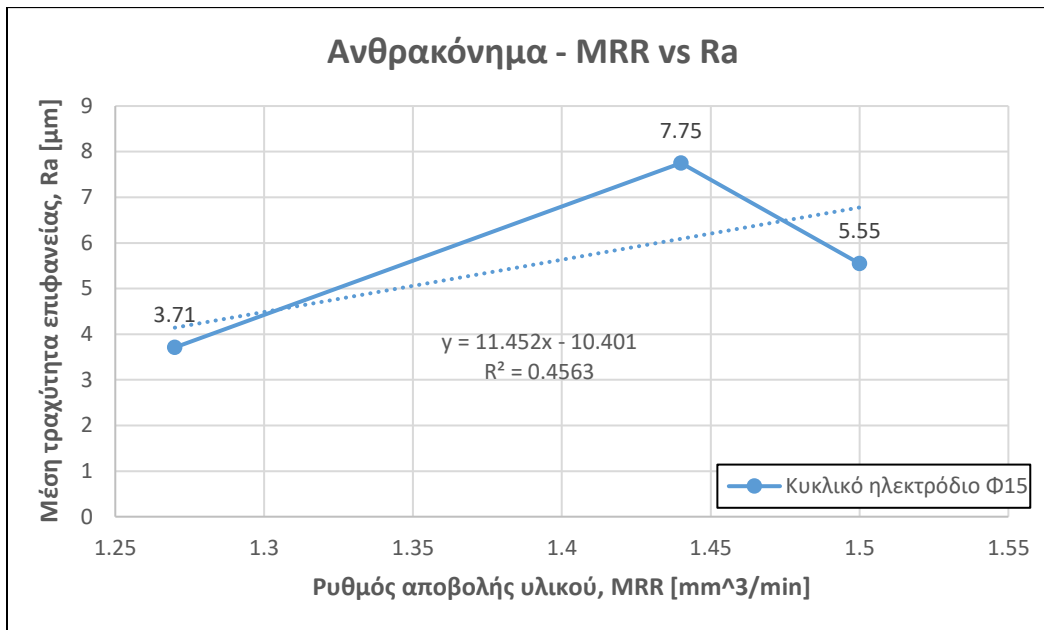
Τέλος, παρατίθενται τα διαγράμματα και ο σχολιασμός τους :



Σχήμα 13: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει του MRR για το ανθρακόνημα



Σχήμα 14: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για το ανθρακόνημα



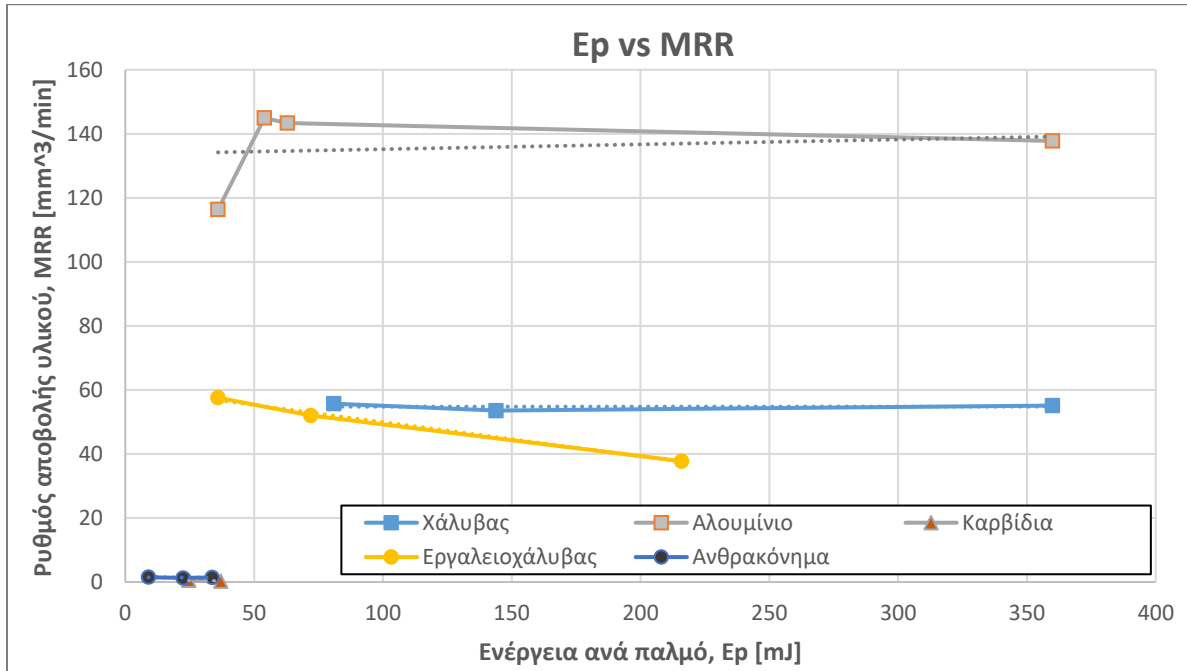
Σχήμα 15: Διάγραμμα MRR συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για το ανθρακόνημα

Αρχικά, όσον αφορά το MRR, παρατηρείται μείωσή του όσο αυξάνει η ενέργεια. Το MRR που μετρήθηκε με τη χρήση του ορθογώνιου ηλεκτροδίου είναι εμφανώς μεγαλύτερο από το αντίστοιχο αυτού του κυκλικού ηλεκτροδίου, παρατήρηση που μπορεί να εξηγηθεί από τη δυσκολία για κοπή σε μεγαλύτερο βάθος που απαιτήθηκε στις κατεργασίες με το κυκλικό ηλεκτρόδιο.

Συνεχίζοντας, η μέση τραχύτητα εμφανίζει αυξητική τάση σε σχέση με την αύξηση της ενέργειας ανά παλμό, αναμενόμενη παρατήρηση, καθώς και σε αυτήν την περίπτωση έχει διατηρηθεί σταθερή η τιμή της έντασης ρεύματος και αλλάζει μόνο η διάρκεια των παλμών, η οποία σύμφωνα με τη θεωρία, επιτρέπει το σχηματισμό μεγαλύτερων κρατήρων στα μεταλλικά υλικά. Προφανώς σε αυτήν την περίπτωση του σύνθετου υλικού, το αποτέλεσμα της αφορά την επίδραση ενός σπινθήρα σε μεγαλύτερη επιφάνεια και βάθος στο υλικό, που μεταφράζεται σε πιο αδρή επιφάνεια. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός πως η επιφάνεια που λήφθηκε με το ορθογώνιο ηλεκτρόδιο εμφάνισε μεγαλύτερη αδρότητα από την αντίστοιχή της που σχηματίστηκε με τη χρήση του κυκλικού.

Η επιλογή του καλύτερου συνδυασμού εκ των τριών με το κυκλικό ηλεκτρόδιο δεν είναι τόσο καταφανής, καθώς η τραχύτητα με το MRR εμφανίζουν τις βέλτιστες τιμές τους σε διαφορετικά πειράματα. Λαμβάνοντας υπόψη πως οι τιμές της τραχύτητας είναι ήδη πάρα πολύ μικρές και με ακόμα μικρότερες διαφορές, δίνεται προτεραιότητα στο MRR και, άρα, επιλέγεται ως καλύτερος συνδυασμός αυτός που δίνει το μέγιστο MRR, δηλαδή αυτός με τη μικρότερη ενέργεια ανά παλμό, όπου η ένταση ρεύματος κατεργασίας είναι ίση με 1.5 [A] και η χρονική διάρκεια παλμού ίση με 200 [μs].

Κλείνοντας την ενότητα αυτή, παρατίθεται ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα που περιλαμβάνει τα MRR όλων των υλικών συναρτήσει της ενέργειας ανά παλμό.



Σχήμα 16: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει του MRR για όλα τα υλικά

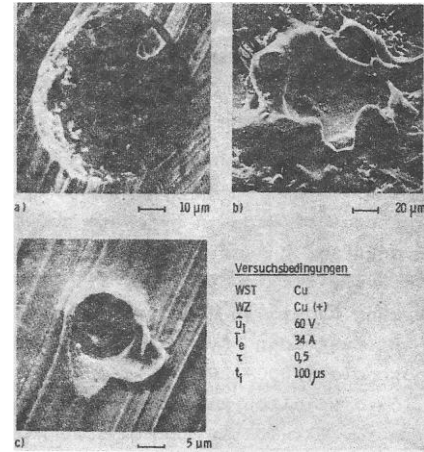
Το αλουμίνιο παρουσιάζει το μεγαλύτερο MRR όλων των υλικών και δοκιμάστηκε επιτυχώς σε μεγάλο εύρος ενεργειών ανά παλμό. Ακολουθεί ο χάλυβας, ο οποίος επίσης δοκιμάστηκε σε πολύ μεγάλο εύρος τιμών ενέργειας ανά παλμό, χωρίς να μεταβάλλεται ιδιαίτερα το MRR του. Ο εργαλειοχάλυβας κατεργάστηκε σε μικρότερο εύρος τιμών ενέργειας ανά παλμό και μάλιστα σε μεσοχαμηλές τιμές. Τέλος, το ανθρακόνημα και τα καρβίδια κατεργάστηκαν σε ένα πολύ μικρό εύρος ενεργειών ανά παλμό, με πολύ μικρές τιμές του εύρους 0-50 [mJ]. Ταυτόχρονα, παρουσίασαν και το χαμηλότερο MRR, για την ακρίβεια τα καρβίδια, με MRR λιγότερο από 1 [mm³/min].

4. Μεταλλογραφική μελέτη δοκιμίων

4.1 Τοπογραφία κατεργασμένης επιφάνειας

4.1.1 Κρατήρες

Η κατεργασμένη επιφάνεια αποτελείται από αλληπάλληλους αλληλοεπικαλυπτόμενους κρατήρες που σχηματίζονται ως αποτέλεσμα των πολύ σύντομων χρονικά ηλεκτρικών εκκένωσης 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 [1]. 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 [4].



Εικόνα 79: Διάφορες μορφές κρατήρα από EDM σε χαλκό με ηλεκτρόδιο χαλκού [9]

Η αθροιστική επίδραση όλων αυτών των ηλεκτρικών εκκένωσης προκαλεί το σχηματισμό μιας επιφάνειας με χαρακτηριστικά που μπορούν να μετρηθούν και να χαρακτηρίσουν την ποιότητά της, τα οποία περιλαμβάνουν την **μέγιστη τραχύτητα**, R_t , η οποία αντιστοιχεί περίπου στο μέσο όρο του βάθους των σχηματισμένων κρατήρων και την **μέση τραχύτητα**, R_α . Με βάση τη μέση τραχύτητα, μπορεί να εκτιμηθεί το **μέγιστο βάθος του κατεστραμμένου στρώματος (damaged layer)** ως 2.5 φορές μεγαλύτερο της R_α , ενώ μπορεί να εκτιμηθεί και η **μέγιστη τραχύτητα** R_t , ως δέκα φορές την τιμή της R_α [1].

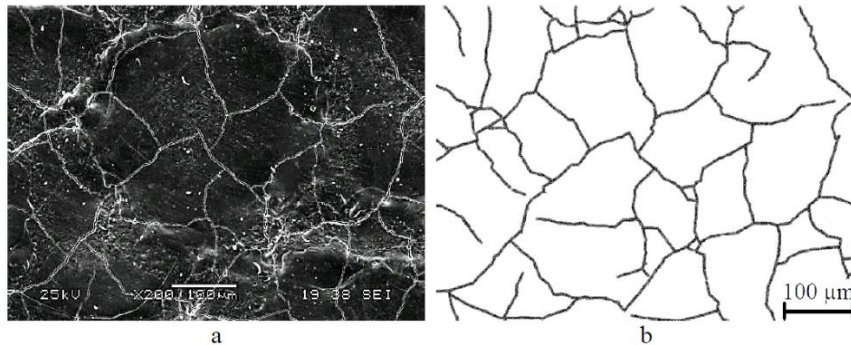
4.1.2 Επιφανειακές ρωγμές

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 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 [1].

Συνήθως ένα δίκτυο ρωγμών αποτελείται από κλειστούς βρόχους οι οποίοι περιβάλλουν τα σύνορα των κρατήρων, ενώ τέμνονται κάθετα στο εσωτερικό τους. Συνεχιζόμενες ρωγμές πάνω από αλληλοεπικαλυπτόμενους κρατήρες υπονοούν τον πολλαπλασιασμό τους λόγω επόμενων εκκενώσεων στις περιοχές αυτές. 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 [1].



Εικόνα 80: Δίκτυο ρωγμών (a) σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, (b) διαγραμματικά [4]

4.2 Μικροδομή υποστρώματος

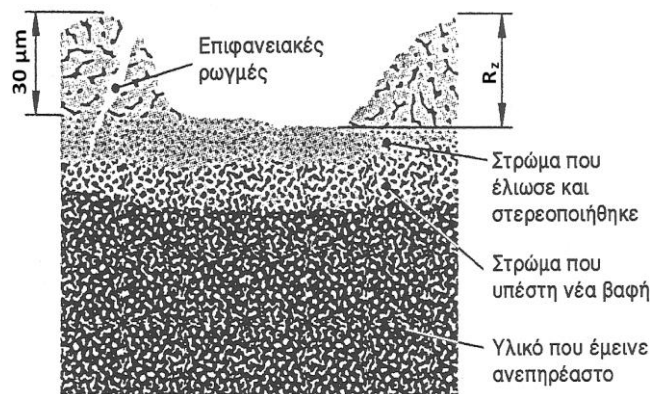
Ο μηχανισμός απομάκρυνσης υλικού, όντας μια θερμοηλεκτρική διαδικασία, απελευθερώνει ποσά θερμότητας τα οποία διαχέονται στο διηλεκτρικό υγρό και στο περιβάλλον, αλλά επηρεάζουν και το τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο. Συνεπώς συντελούνται μεταλλουργικές αλλαγές στα επιφανειακά στρώματα του τεμαχίου, ενώ παράλληλα πραγματοποιείται και σχηματισμός μιας πολύ λεπτής επιφανειακής ζώνης επαναστεροποιημένου υλικού[1, 2].

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το επιφανειακό υπόστρωμα του τεμαχίου μπορεί να χωριστεί σε πέντε διακριτές θερμοκρασιακές ζώνες (εικόνα 82):

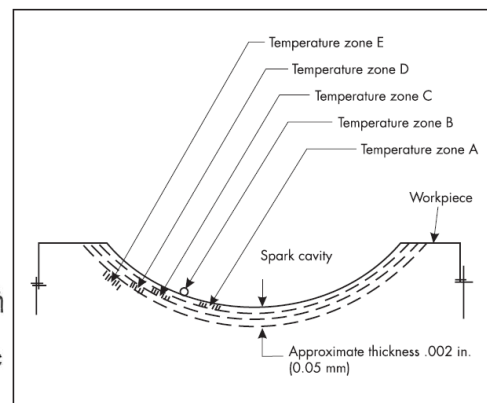
- Η **πρώτη ζώνη** περιλαμβάνει την επιφάνεια του τεμαχίου που έρχεται σε επαφή με τους σπινθήρες και εκτίθεται σε τόσο υψηλές τιμές θερμοκρασίας, που από αυτήν εξαχνώνεται υλικό. Ακριβώς πάνω και πολύ κοντά σε αυτήν βρίσκεται τμήμα των ατμών που αποτελούνται από εξαχνωμένο υλικό του τεμαχίου, του ηλεκτροδίου και του διηλεκτρικού μέσου, το οποίο με το πέρασ του σπινθηρισμού ψύχεται και στερεοποιείται στη επιφάνεια του τεμαχίου. Επειδή το υλικό αυτό απομακρύνθηκε πρωτίστως από το τεμάχιο, η στρώση που σχηματίζεται ονομάζεται **επανακατατεθειμένη (re-deposited layer)**. Η στρώση αυτή χαρακτηρίζεται από σκληρότητα, ψαθυρότητα και έντονη εντατική κατάσταση, διότι επιδέχεται βαφή μετά την απενεργοποίηση του σπινθήρα. Όπως προαναφέρθηκε, η στρώση αποτελείται και από ξένα υλικά πέραν του υλικού του τεμαχίου, όπως για παράδειγμα υψηλές συγκεντρώσεις άνθρακα που προέρχονται από το διηλεκτρικό μέσο αφότου έχει υποστεί κατάρρευση, ενώ στα χαλύβδινα τεμάχια οι συνθήκες απότομης θέρμανσης και ψύξης ευνοούν το σχηματισμό δομών μαρτενσίτη [2].
- Η **δεύτερη ζώνη** θεωρείται τμήμα της πρώτης και αποτελείται από σφαιρικές προεκβολές που εκτείνονται προς τα έξω, ο οποίες ονομάζονται **σφαιρίδια (globules)**. Στην πραγματικότητα είναι μικρά τμήματα ατμού που, κατά τη διακοπή του σπινθήρα, έρχονται σε επαφή με την επανακατατεθειμένη επιφάνεια και προσδένονται σε αυτήν, παίρνοντας τη χαρακτηριστική αυτή μορφή. Τα σφαιρίδια είναι πολύ μικρά και εμφανίζονται σαν στίγματα στην επιφάνεια των κρατήρων [2].
- Η **τρίτη ζώνη** βρίσκεται κάτω από την πρώτη και η θερμοκρασία σε αυτήν είναι αρκούτως ψηλή ώστε να λιώσει, αλλά όχι να εξαχνώσει υλικό, συνεπώς το στρώμα στερεοποιημένου υλικού που σχηματίζεται ονομάζεται **αναδιατυπωμένο (recast layer)**, διότι προέρχεται από τηγμένο υλικό.
- Η **τέταρτη ζώνη** βρίσκεται κάτω από την τρίτη και η θερμοκρασία σε αυτήν είναι αρκετή για να επηρεάσει τις ιδιότητες του υλικού μεν, ωστόσο είναι χαμηλότερη του σημείου τήξεως.

- Η **πέμπτη ζώνη** είναι αρκούντως μακριά από την επιφάνεια που δέχεται τον σπινθήρα, ώστε να μην επηρεάζονται από τη θερμοκρασία τα χαρακτηριστικά του υλικού, έτσι το υλικό σε αυτή τη ζώνη χαρακτηρίζεται ως **υλικό-γονιός (parent material)**.

Η **θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ)** του τεμαχίου, άρα, αποτελείται από την **πρώτη ζώνη**, που περιλαμβάνει την εξαχνωμένη και την επανακατατεθειμένη στρώση, την **τρίτη ζώνη**, που περιλαμβάνει τη λιωμένη και την αναδιατυπωμένη στρώση και την **τέταρτη ζώνη**, στην οποία συντελούνται αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού [Jameson]. Το βάθος της ΘΕΖ εκτείνεται από 50 μικρόμετρα [μm] σε κατεργασία φινιρίσματος ως και 200 μικρόμετρα [μm] σε κατεργασία εκχόνδρισης [1].



Εικόνα 81: Κρυσταλλική δομή στη θέση κατεργασίας[9]



Εικόνα 82: Οι πέντε θερμοκρασιακές ζώνες[2]

4.3 Μελέτη δοκιμίων

Η μελέτη που θα παρουσιαστεί παρακάτω αφορά τη μεταλλογραφία του υποστρώματος, αλλά περιλαμβάνονται και εικόνες που αναφέρονται στην τοπογραφία επιφανείας. Τα δοκίμια που υπέστησαν ηλεκτροδιάβρωση τεμαχίστηκαν κατάλληλα, εγκιβωτίστηκαν σε ρητίνη και λειάνθηκαν με χρήση τροχού, όπως περιεγράφηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να τονιστεί πως δεν πραγματοποιήθηκε καμία περαιτέρω ενέργεια, όπως περαιτέρω στίλβωση και προσβολή των επιφανειών με κατάλληλες ουσίες για την ανάδειξη των μεταλλογραφικών δομών (πχ Nital etching), με αποτέλεσμα να μην διακρίνεται αρκετή πληροφορία στο μικροσκόπιο.

Το μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι οπτικό της εταιρείας Leica και δοκιμάστηκε σε μεγεθύνσεις 5x, 10x, 20x και 50x, εξοπλισμένο με λάμπα μεταβλητής στάθμης φωτεινότητας, η οποία επηρέασε κατάλληλα την ποιότητα των εικόνων που λήφθηκαν. Οι εικόνες δέχτηκαν περαιτέρω επεξεργασία στα λογισμικά ImageJ και Photoshop, επιχειρήθηκε δε και τοποθέτηση κλίμακας αναφοράς, η οποία προέκυψε από κατάλληλους υπολογισμούς που περιλαμβάνουν στοιχεία από τους φακούς που παρέχει ο κατασκευαστής, **τον αριθμό οπτικού πεδίου (field of view number) των φακών** συγκεκριμένα, $FN [mm]$, και **την ανάλυση σε εικονοστοιχεία (pixels)** των εικόνων που λήφθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, σαν μήκος αναφοράς για μετατροπή του μήκους από pixels σε μm, χρησιμοποιήθηκε η **διάμετρος οπτικού πεδίου, D_{FOV}** , η οποία υπολογίζεται από τη σχέση

$$D_{FOV}[mm] = FN[mm]/M,$$

όπου M η **μεγέθυνση του φακού**, ήτοι 5, 10, 20 και 50 στην προκρινόμενη περίπτωση [17]. Στο λογισμικό ImageJ, τέλος, πραγματοποιείται η αντιστοίχιση της διαμέτρου του οπτικού πεδίου στο αντίστοιχο μήκος σε εικονοστοιχεία, το οποίο μπορεί να μετρηθεί με κατάλληλο εργαλείο που παρέχει το λογισμικό.

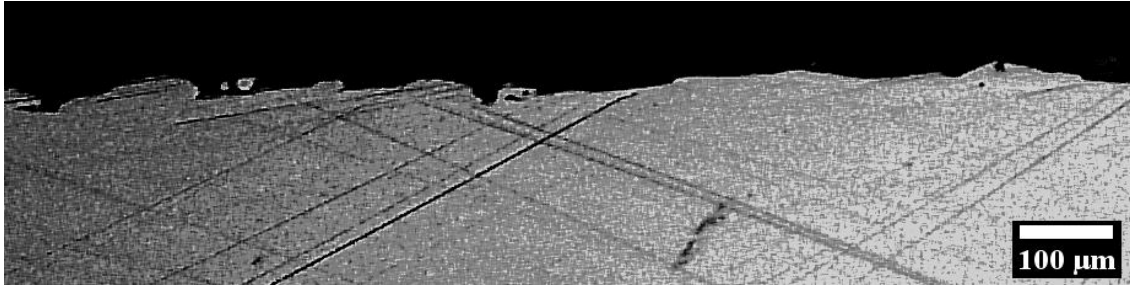
Ακολουθεί πίνακας με τους αριθμούς FN , που βρέθηκαν στην ιστοσελίδα του κατασκευαστή για κάθε φακό [18], και με τα αποτελέσματα των D_{FOV} .

M	$FN [mm]$	$D_{FOV}[mm]$	$D_{FOV}[\mu m]$
5x	22	4,4	4400
10x	25	2,5	2500
20x	22	1,1	1100
50x	22	0,44	440

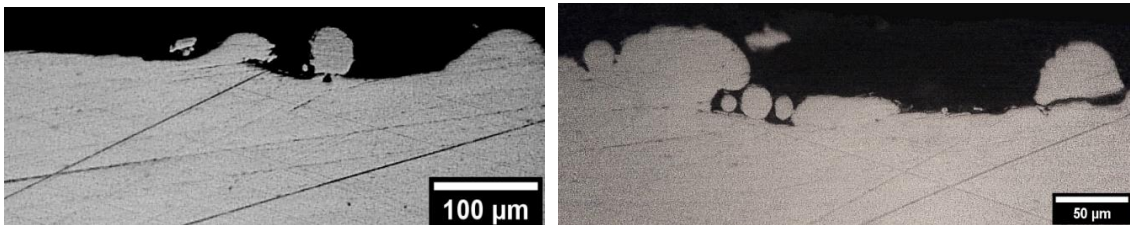
Πίνακας 42: Υπολογισμός μήκους αναφοράς για προσθήκη κλίμακας στις εικόνες του μικροσκοπίου

4.3.1 Δοκίμια χάλυβα

- Δοκίμιο #1



Εικόνα 83: Συνθήκες: $I_p = 24 [A]$, $t_{on} = 200 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x

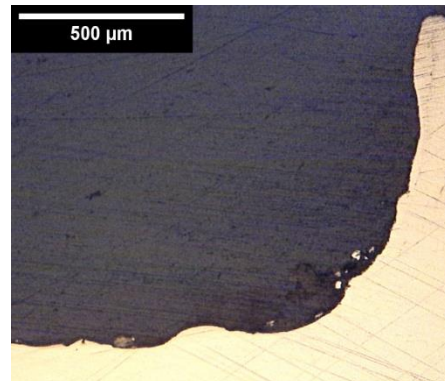


Εικόνα 84: Μεγέθυνση 20x

Εικόνα 85: Μεγέθυνση 50x

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του ορθογώνιου ηλεκτροδίου διαστάσεων 23x38 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 200 [\mu sec]$ και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 24 [A]$.

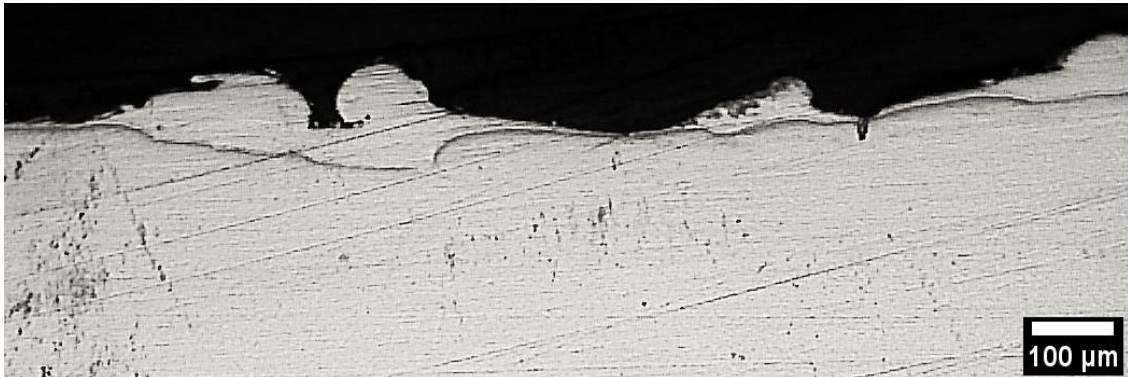
Στις εικόνες διακρίνονται οι αλληπάλληλες επιστρώσεις επαναστερεοποιημένου υλικού, γεγονός που πιστοποιείται από τις παράλληλες μικρορωγμές που διακρίνονται σε αυτές, όλα αυτά στην πρώτη θερμοκρασιακή ζώνη. Επιπλέον παρατηρούνται τα σφαιρίδια της δεύτερης θερμοκρασιακής ζώνης. Η ΘΕΖ είναι δυσδιάκριτη και φαίνεται κυρίως στην εικόνα που δείχνει το πλευρικό τοίχωμα.



Εικόνα 86: Πλευρικό τοίχωμα – μεγέθυνση 5x

Η οριζόντια επιφάνεια είναι λιγότερο αδρή προς το κέντρο σε σχέση με τις γωνίες, όπου διακρίνεται καμπυλότητα και έντονη διαφορά στο ανάγλυφο της επιφάνειας, γεγονός που καταδεικνύει σχετικά υψηλό ρυθμό αφαίρεσης υλικού.

• Δοκίμιο #2



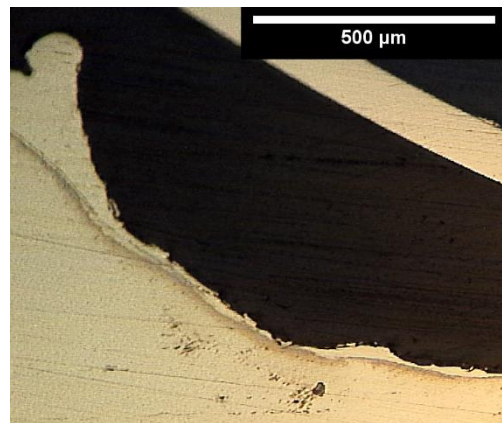
Εικόνα 87: Συνθήκες: $I_p = 24 [A]$, $t_{on} = 500 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x



Εικόνα 88: Μεγέθυνση 20x



Εικόνα 90: Μεγέθυνση 50x



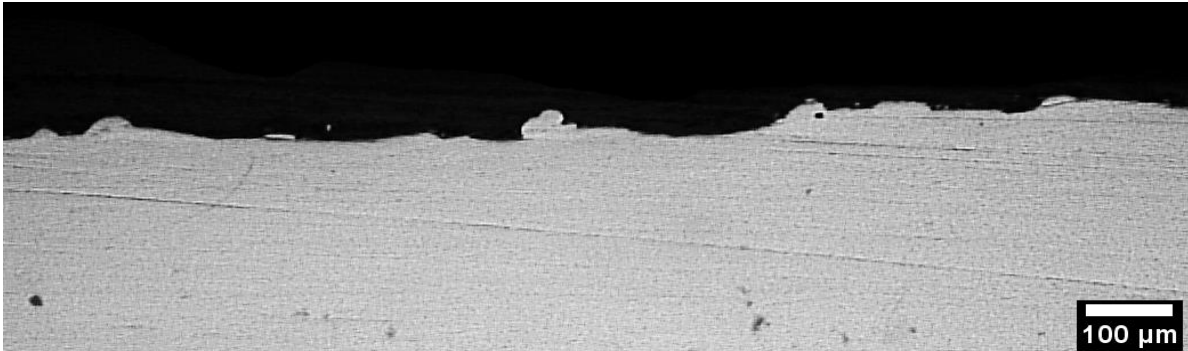
Εικόνα 89: Πλευρικό τείχωμα – μεγέθυνση 5x

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του ορθογώνιου ηλεκτροδίου διαστάσεων 23x38 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 500 [\mu sec]$ και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 24 [A]$.

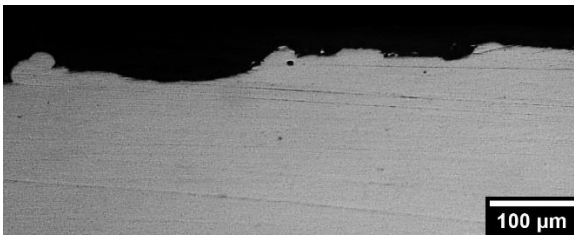
Στις εικόνες διακρίνονται οι αλληπάλληλες επιστρώσεις επαναστερεοποιημένου υλικού, γεγονός που πιστοποιείται από τις παράλληλες μικρορωγμές που διακρίνονται σε αυτές, όλα αυτά στην πρώτη θερμοκρασιακή ζώνη. Επιπλέον παρατηρούνται τα σφαιρίδια της δεύτερης θερμοκρασιακής ζώνης, καθώς και η ΘΕΖ, της οποίας το σύνορο με την μη επηρεασμένη θερμικά ζώνη είναι αρκετά ευδιάκριτο.

Παρατηρείται μια αδρότερη επιφάνεια σε σχέση με το δοκίμιο #1, ενώ εντύπωση κάνει η μεγάλη καμπυλότητα που συνδέει την οριζόντια επιφάνεια με το κάθετο τοίχωμα, ευρήματα που καταδεικνύουν συνθήκες εκχόνδρισης.

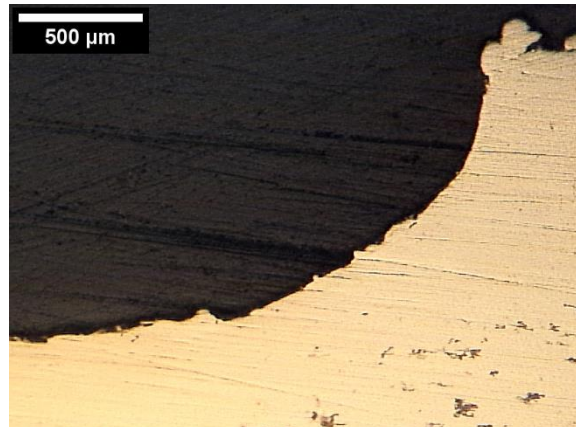
- **Δοκίμιο #3**



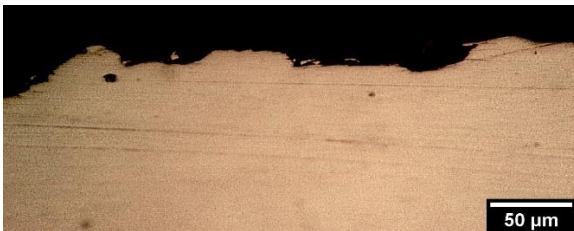
Εικόνα 91: Συνθήκες: $I_p = 27 [A]$, $t_{on} = 100 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x



Εικόνα 92: Μεγέθυνση 20x



Εικόνα 94: Πλευρικό τοίχωμα – μεγέθυνση 5x



Εικόνα 93: Μεγέθυνση 50x

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του ορθογώνιου ηλεκτροδίου διαστάσεων 23x38 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 100 [\mu sec]$ και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 27 [A]$.

Στις εικόνες διακρίνονται οι αλληπάλληλες επιστρώσεις επαναστερεοποιημένου υλικού, γεγονός που πιστοποιείται από τις παράλληλες μικρορωγμές που διακρίνονται σε αυτές, όλα αυτά στην πρώτη θερμοκρασιακή ζώνη. Επιπλέον παρατηρούνται τα σφαιρίδια της δεύτερης θερμοκρασιακής ζώνης. Η ΘΕΖ είναι δυσδιάκριτη και σε αυτήν την περίπτωση.

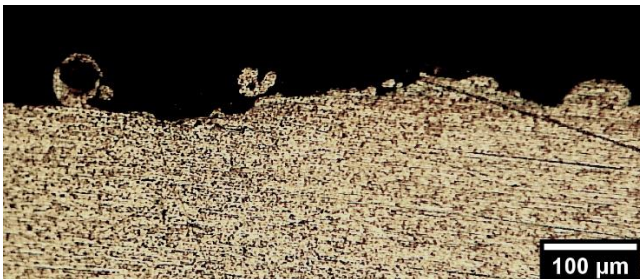
Η οριζόντια επιφάνεια φαίνεται λιγότερο αδρή από αυτές και των δύο προηγούμενων δοκιμίων, ενώ και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται σημαντική καμπυλότητα στην τομή οριζόντιου με κάθετου τμήματος. Οι παραπάνω παρατηρήσεις καταδεικνύουν σχετικά υψηλό ρυθμό αφαίρεσης υλικού σε συνδυασμό με ευνοϊκές συνθήκες για χαμηλή τραχύτητα.

4.3.2 Δοκίμια αλουμινίου

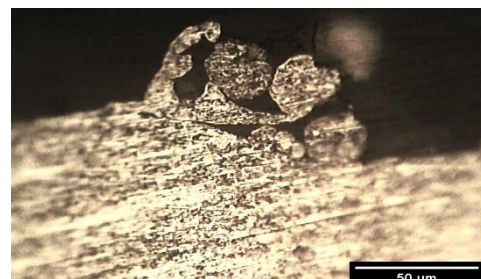
- Δοκίμιο #1



Εικόνα 95: Συνθήκες: $I_p = 21 [A]$, $t_{on} = 100 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x



Εικόνα 97: Μεγέθυνση 20x

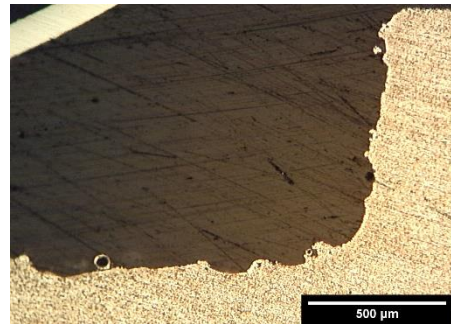


Εικόνα 96: Μεγέθυνση 50x

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του ορθογώνιου ηλεκτροδίου διαστάσεων 23x38 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 100 [\mu sec]$ και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 21 [A]$.

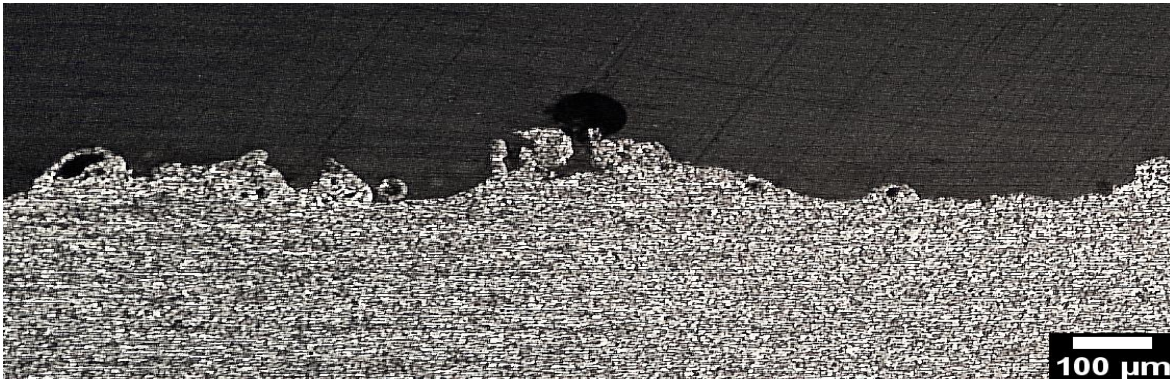
Στις εικόνες είναι δύσκολο να διακριθούν οι διάφορες θερμοκρασιακές ζώνες της ΘΕΖ, λόγω της μικροδομής του υλικού του αλουμινίου σε συνδυασμό με το φωτισμό. Ευδιάκριτα, ωστόσο, είναι τα μικρά κομμάτια και σφαιρίδια επαναστεροποιημένου υλικού πάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια.

Η επιφάνεια παρουσιάζει μέτρια αδρότητα προς το κέντρο, της οποίας η εικόνα δυσχεραίνεται από τον αυξημένο αριθμό εναποθέσεων που εξέχουν από την επιφάνεια. Η καμπυλότητα στη διεπιφάνεια μεταξύ οριζοντίου επιπέδου και κάθετου τοιχώματος είναι σχετικά μικρή, ενώ η τραχύτητα σε αυτήν είναι αυξημένη σε σχέση με το μέσο, όπως αναμενόταν. Τα στοιχεία καταδεικνύουν σχετικά υψηλό ρυθμό αφαίρεσης υλικού, με κατάλληλες επιλογές για σχετικά καλή ποιότητα επιφανείας.



Εικόνα 98: Πλευρικό τείχος – μεγέθυνση 5x

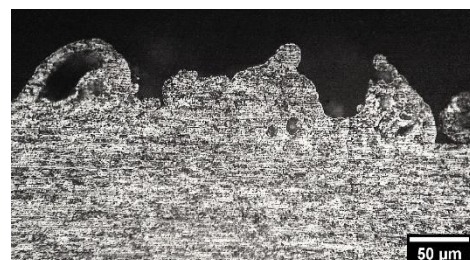
• Δοκίμιο #2



Εικόνα 99: Συνθήκες: $I_p = 24 [A]$, $t_{on} = 500 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x



Εικόνα 100: Μεγέθυνση 20x



Εικόνα 101: Μεγέθυνση 50x

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του ορθογώνιου ηλεκτροδίου διαστάσεων 23x38 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 500 [\mu sec]$ και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 24 [A]$.

Όπως και στο προηγούμενο δοκίμιο, έτσι και σε αυτό στις εικόνες είναι δύσκολο να διακριθούν οι διάφορες θερμοκρασιακές ζώνες της ΘΕΖ, λόγω της μικροδομής του υλικού του αλουμινίου σε συνδυασμό με το φωτισμό. Ευδιάκριτα, ωστόσο, είναι τα μικρά κομμάτια και σφαιρίδια επαναστεροποιημένου υλικού πάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια. Επιπλέον, στη ζώνη επανακατατεθημένου υλικού διακρίνονται οπές που αντιστοιχούν σε αέριες ουσίες που απεγκλωβίστηκαν από το περιβάλλον υλικό του αλουμινίου.

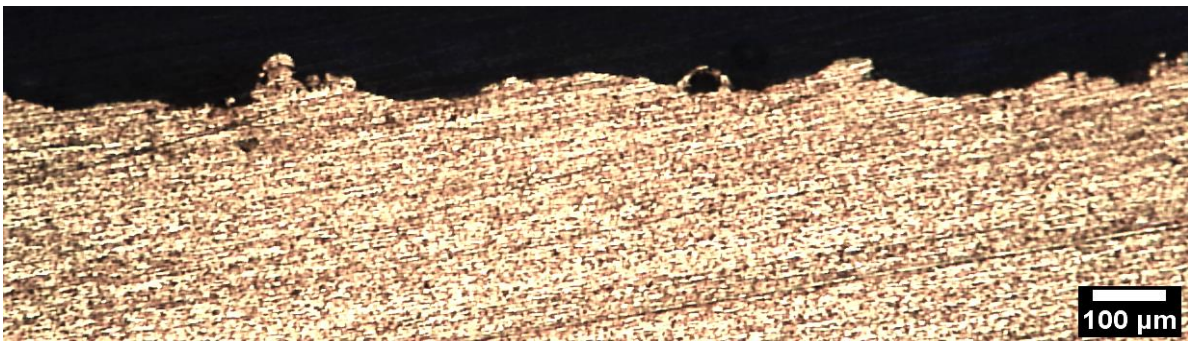


Εικόνα 102: Πλευρικό τοίχωμα – μεγέθυνση 5x

Η επιφάνεια σε αυτήν την περίπτωση είναι αισθητά πιο αδρή, ακόμα και στα κάθετα τοιχώματα. Η καμπυλότητα στην ένωση του οριζόντιου επιπέδου με το κάθετο τοίχωμα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από ό,τι στην

προηγούμενη περίπτωση. Τα στοιχεία καταδεικνύουν περίπτωση εκχόνδρισης χωρίς τις κατάλληλες επιλογές για λιγότερο αδρή επιφάνεια.

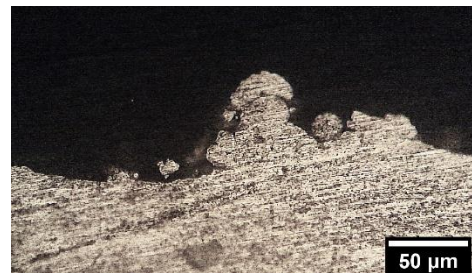
- Δοκίμιο #3



Εικόνα 103: Συνθήκες: $I_p = 24 [A]$, $t_{on} = 75 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x



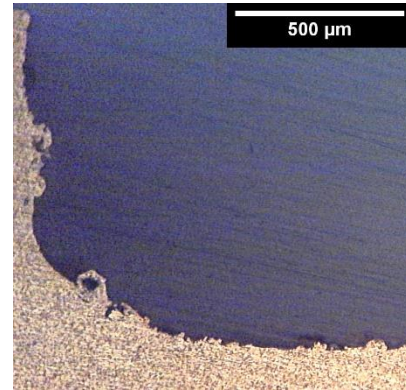
Εικόνα 104: Μεγέθυνση 20x



Εικόνα 105: Μεγέθυνση 50x

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του ορθογώνιου ηλεκτροδίου διαστάσεων 23x38 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 75 [\mu sec]$ και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 24 [A]$.

Όπως και στο πρηγούμενο δοκίμιο, έτσι και σε αυτό στις εικόνες είναι δύσκολο να διακριθούν οι διάφορες θερμοκρασιακές ζώνες της ΘΕΖ, λόγω της μικροδομής του υλικού του αλουμινίου σε συνδυασμό με το φωτισμό. Ευδιάκριτα, ωστόσο, είναι τα μικρά κομμάτια και σφαιρίδια επαναστερεοποιημένου υλικού πάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια. Επιπλέον, στη ζώνη επανακατατεθημένου υλικού διακρίνονται οπές που αντιστοιχούν σε αέριες ουσίες που απεγκλωβίστηκαν από το περιβάλλον υλικό του αλουμινίου.



Εικόνα 106: Πλευρικό τοίχωμα – μεγέθυνση 5x

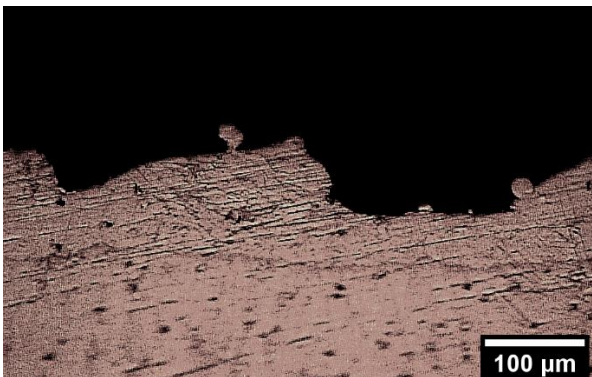
Η επιφάνεια φαίνεται λιγότερο αδρή από του δεύτερου δοκίμιου και λίγο πιο αδρή από του πρώτου, κάτι που αντιτίθεται στις αποτελέσματα των τραχυμετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Η καμπυλότητα στη διεπιφάνεια κάθετου τοιχώματος με οριζόντιου επιπέδου είναι αυξημένη σε σχέση με του πρώτου δοκίμιου. Οι εικόνες καταδεικνύουν κατεργασία σχετικά υψηλού ρυθμού αφαίρεσης υλικού, αλλά με επιλογές παραμέτρων κατάλληλες για χαμηλή τραχύτητα.

4.3.3 Δοκίμια εργαλειοχάλυβα

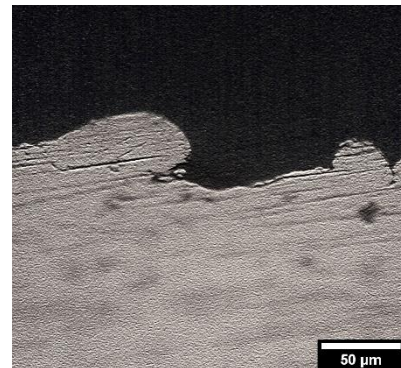
- Δοκίμιο #1



Εικόνα 107: Συνθήκες: $I_p = 24 [A]$, $t_{on} = 100 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x



Εικόνα 108: Μεγέθυνση 20x

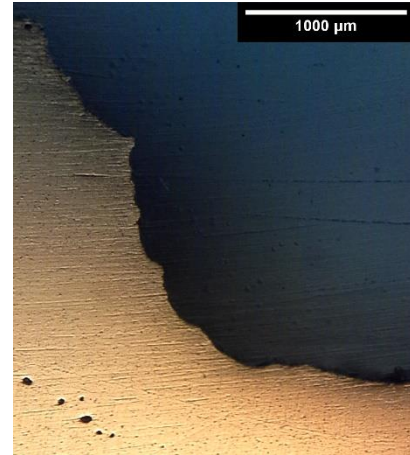


Εικόνα 109: Μεγέθυνση 50x

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του κυκλικού ηλεκτροδίου διαστάσεως διαμέτρου 15 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 100 [\mu sec]$ και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 24 [A]$.

Είναι ευδιάκριτη η ΘΕΖ σε αυτήν την περίπτωση, καθώς και οι αλληπάλληλες στρώσεις από επαναστερεοποιημένο υλικό, οι οποίες διαχωρίζονται από αρκετά ευκρινείς ρωγματώσεις. Τα έντονα μαύρα στίγματα εντός του υλικού αντιστοιχούν σε κοβάλτιο που είναι μέρος του κράματος του συγκεκριμένου εργαλειοχάλυβα.

Η επιφάνεια φαίνεται αδρή με σχετικά βαθιούς κρατήρες, μεγάλης διαμέτρου, ενώ παρατηρείται μικρός αριθμός σφαιριδίων που αντιστοιχούν στη δεύτερη θερμοκρασιακή ζώνη που αναλύθηκε παραπάνω. Η κάθετη επιφάνεια παρουσιάζει έντονη μεταβολή στην κλίση, η οποία οφείλεται στην ανάγκη για αποτελεσματικότερη απομάκρυνση αποβλίττων από την οπή, όσο αυξάνεται το βάθος της, ενώ παρατηρείται καμπυλότητα μικρότερης ακτίνας σε σχέση με τα δοκίμια χάλυβα. Τα στοιχεία παραπέμπουν σε κατεργασία με μεγάλο ρυθμό αποβολής υλικού.

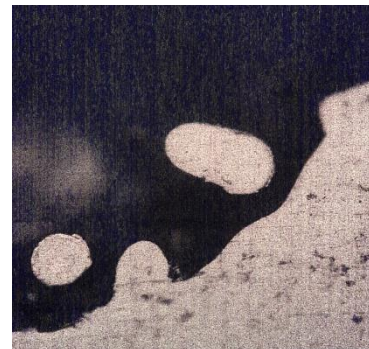


Εικόνα 110: Πλευρικό τόχωμα – μεγέθυνση 5x

- Δοκίμιο #2



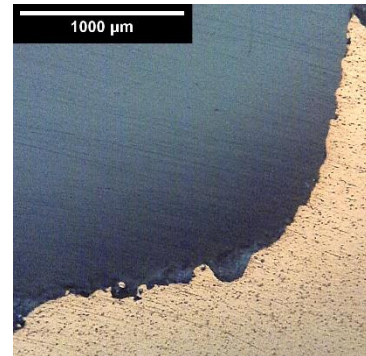
Εικόνα 111: Συνθήκες: $I_p = 24 [A]$, $t_{on} = 300 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x



Εικόνα 112: Μεγέθυνση 50x



Εικόνα 114: Μεγέθυνση 20x



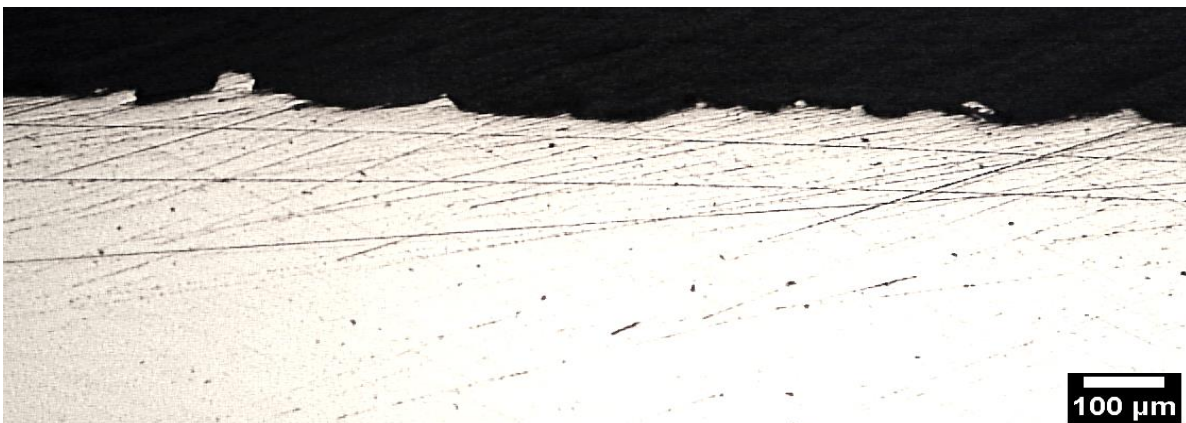
Εικόνα 113: Πλευρικό τοίχωμα – μεγέθυνση 5x

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του κυκλικού ηλεκτροδίου διαστάσεως διαμέτρου 15 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 300 [\mu sec]$ και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 24 [A]$.

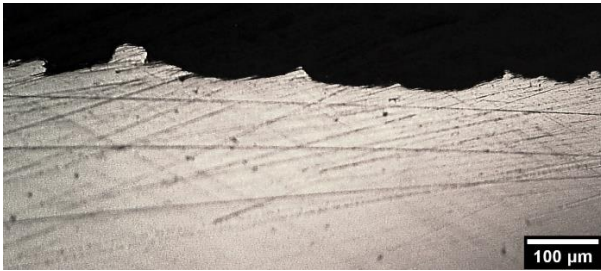
Η ΘΕΖ δεν είναι ευδιάκριτη και ταυτόχρονα παρατηρείται αυξημένη παρουσία σφαιριδίων της δεύτερης θερμοκρασιακής ζώνης.

Η επιφάνεια φαίνεται πιο τραχιά από αυτήν στο πρώτο δοκίμιο και παρουσιάζει κρατήρες μεγάλου βάθους και μεγάλης διαμέτρου στην περιοχή κοντά στο κάθετο τοίχωμα. Η μετάβαση από το κάθετο τοίχωμα στην οριζόντια επιφάνεια παρουσιάζει αρκετά μεγάλη καμπυλότητα. Τα στοιχεία υποδηλώνουν κατεργασία εκχόνδρισης χωρίς την επιλογή κατάλληλων συνθηκών για περιορισμό της αδρότητας της κατεργασμένης επιφανείας.

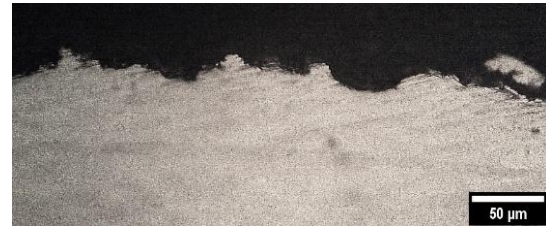
- **Δοκίμιο #3**



Εικόνα 115: Συνθήκες: $I_p = 24 [A]$, $t_{on} = 50 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x



Εικόνα 116: Μεγέθυνση 20x



Εικόνα 117: Μεγέθυνση 50x

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του κυκλικού ηλεκτροδίου διαστάσεως διαμέτρου 15 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 50 [\mu sec]$ και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 24 [A]$.

Η ΘΕΖ δεν είναι ευδιάκριτη, παρά μόνο οι στρώσεις επαναστερεοποιημένου υλικού.

Η επιφάνεια φαίνεται αρκετά πιο λεία σε σχέση με των άλλων δύο αντίστοιχων δοκιμίων, με μικρούς κρατήρες σε βάθος και διάμετρο σε τέτοιο βαθμό που τη μεγαλύτερη επίδραση στην τραχύτητα έχουν οι στρώσεις επαναστερεοποιημένου υλικού. Η καμπυλότητα της διεπιφάνειας κάθετου τοιχώματος με οριζόντιο επίπεδο είναι σχετικά μικρότερη παρόλο που στο κάθετο τοίχωμα παρατηρείται διαφορά στην κλίση για λόγους αποτελεσματικότερης απομάκρυνσης αποβλίττων. Τα στοιχεία δείχνουν κατεργασία με σχετικά υψηλό ρυθμό αποβολής υλικού, αλλά με επιλογή κατάλληλων συνθηκών για περιορισμό της τραχύτητας της κατεργασμένης επιφάνειας.



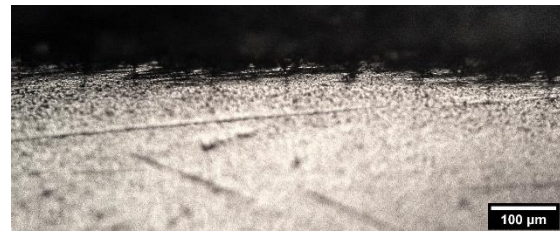
Εικόνα 118: Πλευρικό τοίχωμα – μεγέθυνση 5x

4.3.4 Δοκίμια καρβιδίου του βολφραμίου

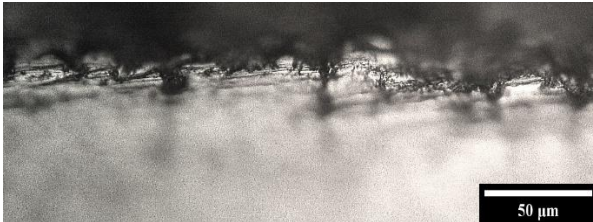
- Δοκίμιο #1



Εικόνα 119: Μεγέθυνση 10x



Εικόνα 120: Μεγέθυνση 20x- Συνθήκες: $I_p = 16.5 [A]$, $t_{on} = 20 [\mu sec]$

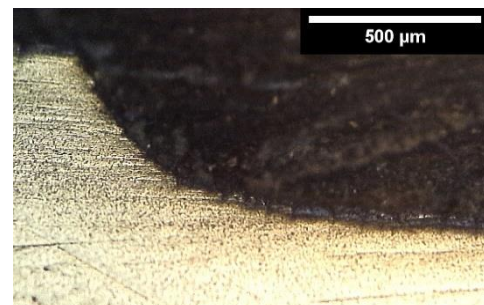


Εικόνα 121: Μεγέθυνση 50x

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του κυκλικού ηλεκτροδίου διαστάσεως διαμέτρου 8 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 20 [\mu sec]$ και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 16.5 [A]$.

Το πάχος της επηρεασμένης ζώνης είναι αρκετά μικρό και για αυτό είναι δυσδιάκριτη η ΘΕΖ, το μόνο στοιχείο που μπορεί να διακριθεί είναι οι στρώσεις επαναστεροποιημένου υλικού. Σφαιρίδια και περαιτέρω στοιχεία της δεύτερης θερμοκρασιακής ζώνης δεν παρατηρούνται.

Η επιφάνεια φαίνεται να μην είναι ιδιαίτερα αδρή και το βάθος των κρατήρων μικρό, σε σημείο που την τραχύτητα την επηρεάζουν περισσότερο οι στρώσεις επαναστεροποιημένου υλικού. Παρά το μικρό βάθος κατεργασίας, η καμπυλότητα μεταξύ κάθετου τοιχώματος και οριζόντιου επιπέδου είναι μεγάλη.



Εικόνα 122: Πλευρικό τοίχωμα – μεγέθυνση 5x

- Δοκίμιο #2



Εικόνα 123: Μεγέθυνση 10x



Εικόνα 124: Μεγέθυνση 20x



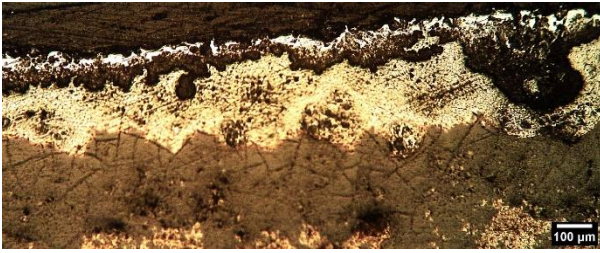
Εικόνα 125: Μεγέθυνση 50x - Συνθήκες: $I_p = 16.5 [A]$, $t_{on} = 50 [\mu sec]$

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του κυκλικού ηλεκτροδίου διαστάσεως διαμέτρου 8 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 50 [\mu sec]$ και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 16.5 [A]$.

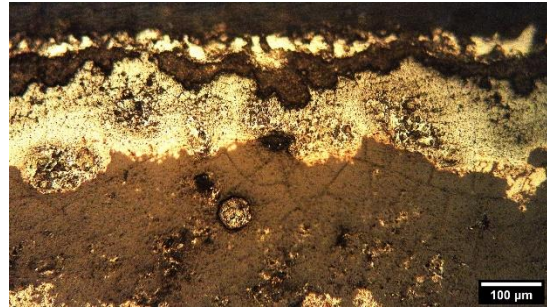
Και σε αυτό δεν διακρίνεται η ΘΕΖ αλλά οι στρώσεις επαναστερεοποιημένου υλικού.

Η επιφάνεια είναι εμφανώς αδρότερη από αυτήν του πρώτου δοκιμίου με αρκετούς κρατήρες μικρής διαμέτρου και βάθους. Το βάθος κατεργασίας είναι μικρό και για αυτό η καμπυλότητα με το πλευρικό τοίχωμα είναι πολύ μεγάλη.

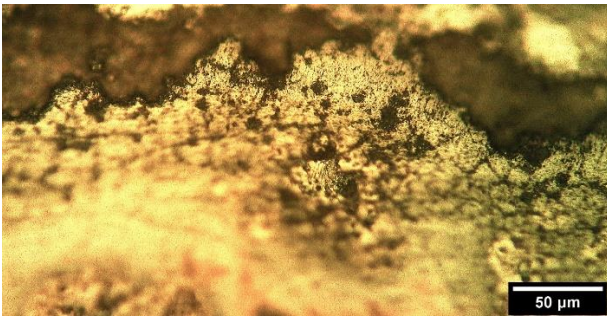
• Δοκίμιο #3



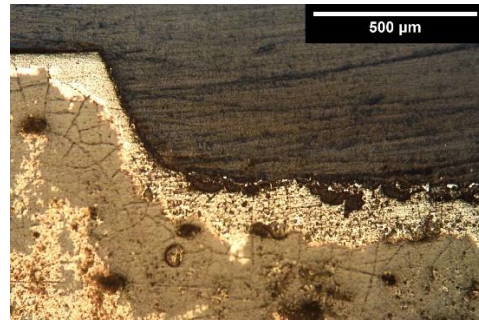
Εικόνα 126: Συνθήκες: $I_p = 16.5 [A]$, $t_{on} = 75 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x



Εικόνα 127: Μεγέθυνση 20x



Εικόνα 128: Μεγέθυνση 50x



Εικόνα 129: Πλευρικό τείχωμα – μεγέθυνση 5x

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του κυκλικού ηλεκτροδίου διαστάσεως διαμέτρου 8 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 75 [\mu sec]$ και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 16.5 [A]$.

Η εικόνα του δοκιμίου αυτού δεν έχει πολλές ομοιότητες με των άλλων αντίστοιχων δύο. Παρατηρείται αρκετά ευδιάκριτα η ΘΕΖ και οι στρώσεις επαναστερεοποιημένου υλικού.

Η επιφάνεια είναι αρκετά πιο αδρή σε σχέση με τα άλλα δύο τεμάχια με κρατήρες πιο μεγάλου βάθους. Η καμπυλότητα με το πλευρικό τείχωμα είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με των άλλων δύο δοκιμίων.

4.3.5 Δοκίμια ανθρακονήματος

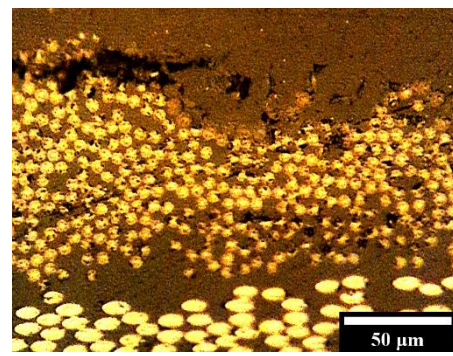
Το ανθρακόνημα διαφέρει με τα υπόλοιπα υλικά στο γεγονός ότι δεν είναι μέταλλο, αλλά αποτελείται από παράλληλες ίνες άνθρακα μέσα σε μήτρα ρητίνης [6] και παρουσιάζει διαφορές με αυτά όσο αφορά την κατεργασμένη επιφάνεια. Περισσότερες λεπτομέρειες ακολουθούν στην ανάλυση των δοκιμίων.

Ακόμα, σαν παρατήρηση επί της παρουσίασης των εικόνων του μικροσκοπίου, έχει πραγματοποιηθεί αρκετή επεξεργασία σε λογισμικά επεξεργασίας εικόνων, διότι το ανθρακόνημα δεν ξεχωρίζει καλά από το παρασκήνιο, μάλλον διότι όντας μαύρο υλικό, δεν δύναται να ανακλάσει το φως της λάμπας του μικροσκοπίου, ούτως ώστε να ξεχωρίσει καλύτερα.

- Δοκίμιο #1



Εικόνα 130: Μεγέθυνση 10x



Εικόνα 131: Μεγέθυνση 20x



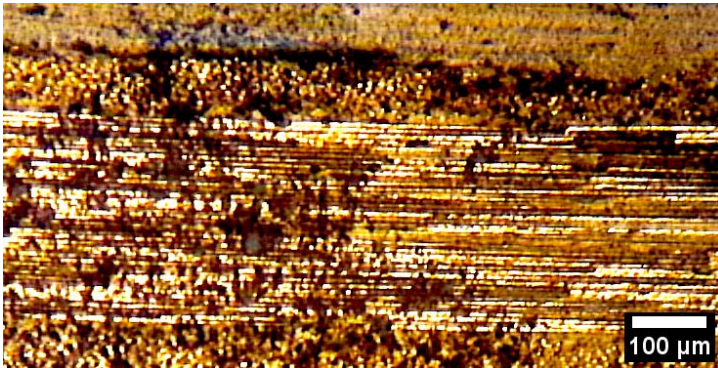
Εικόνα 132: Μεγέθυνση 50x - Συνθήκες: $I_p = 1.5 [A]$, $t_{on} = 500 [\mu sec]$

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του ορθογώνιου ηλεκτροδίου διαστάσεων 23x38 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 500 [\mu sec]$ και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 1.5 [A]$.

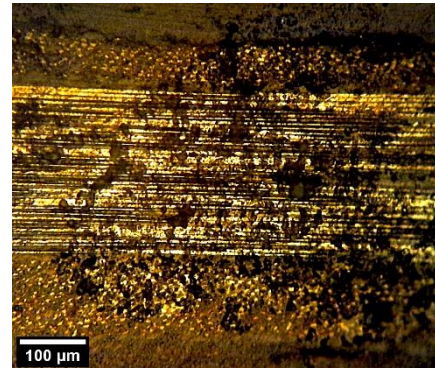
Οι εικόνες φανερώνουν τον τρόπο που αφαιρείται υλικό στο ανθρακόνημα, ο οποίος είναι μέσω της καταστροφής των ινών άνθρακα που το αποτελούν. Η υψηλή θερμοκρασία των σπινθήρων δεν επηρεάζει μόνο τις ίνες στην επιφάνεια του ανθρακονήματος, αλλά δύναται να επηρεάσει και ίνες σε μεγαλύτερο βάθος, όπως φαίνεται στις εικόνες. Προφανώς δεν τίθεται θέμα για επαναστεροποιημένο υλικό, καθώς πραγματοποιείται καταστροφή της επιφάνειας που δέχεται τους σπινθήρες.

Μια ακόμα λεπτομέρεια που γίνεται αντιληπτή μέσω της προβολής του τεμαχίου στο μικροσκόπιο είναι και το γεγονός ότι το πραγματικό βάθος κοπής σε αυτήν την περίπτωση είναι εμφανώς μικρότερο του αναγραφόμενου στη μηχανή.

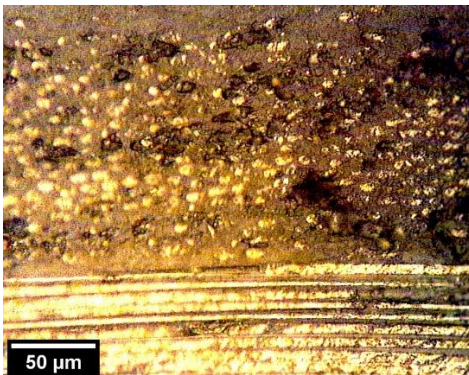
- **Δοκίμιο #2**



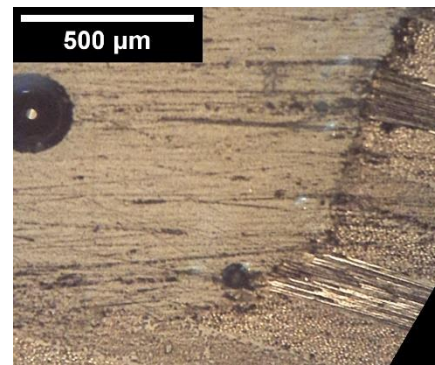
Εικόνα 133: Μεγέθυνση 20x



Εικόνα 134: Μεγέθυνση 10x



Εικόνα 135: Μεγέθυνση 50x



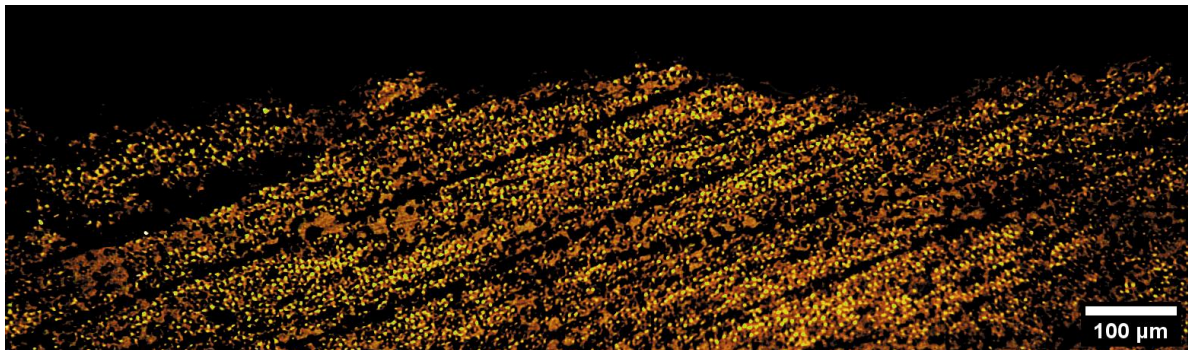
Εικόνα 136: Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του κυκλικού ηλεκτροδίου διαστάσεως διαμέτρου 15 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 500 [\mu sec]$ και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 1.5 [A]$.

Σε αυτήν την περίπτωση δοκιμίου το βάθος κοπής φαίνεται να είναι πιο κοντά στο αναγραφόμενο από τη μηχανή. Αξίζει να παρατηρηθεί το βάθος στο οποίο παρουσιάζεται το θερμικά επηρεασμένο, στην ουσία καμένο, υλικό, σε σημείο μάλιστα που να έχουν σχηματιστεί οπές σε ενδιάμεσα στρώματα μακριά από την επηρεασμένη επιφάνεια.

Όσον αφορά την πλευρική επιφάνεια, δείχνει κομμένη σχεδόν κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο, μέχρι τη μέση περίπου, όπου και παρατηρείται έντονη καμπυλότητα.

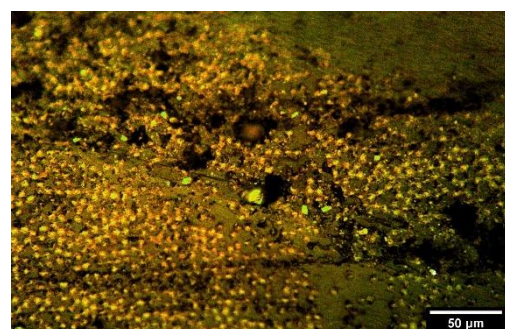
- **Δοκίμιο #3**



Εικόνα 137: Συνθήκες: $I_p = 1.5 [A]$, $t_{on} = 200 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x



Εικόνα 138: Μεγέθυνση 20x



Εικόνα 139: Μεγέθυνση 50x

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του κυκλικού ηλεκτροδίου διαστάσεως διαμέτρου 15 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 200$ [μsec] και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 1.5$ [A].

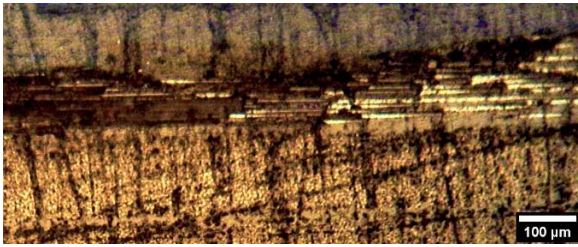
Και σε αυτήν την περίπτωση το βάθος κοπής φτάνει κοντά στο αναγραφόμενο στην ένδειξη της μηχανής, ενώ παρατηρείται αφαίρεση υλικού και σε περιοχές εντός των εσωτερικών στρωμάτων του ανθρακονήματος.

Στις πιο μακροσκοπικές λήψεις δίνεται η δυνατότητα καλύτερης παρατήρησης της τραχύτητας της επιφάνειας, καθώς φαίνεται το μέγεθος των «κρατήρων» που σχηματίζονται στην κατεργασμένη επιφάνεια. Στην προκειμένη περίπτωση παρατηρούνται κρατήρες μεγάλης διαμέτρου και μικρού βάθους, οι οποίοι συντελούν στη διαμόρφωση μιας σχετικά αδρής επιφάνειας.

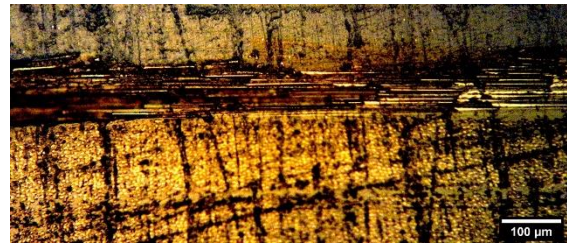


Όσον αφορά την πλευρική επιφάνεια, και σε αυτήν *Εικόνα 140: Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x* δείχνει κομμένη σχεδόν κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο, μέχρι τη μέση περίπου, όπου και παρατηρείται έντονη καμπυλότητα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανομοιόμορφη κοπή της κάθετης επιφάνειας, χαρακτηριστικό που υποδηλώνει την πολυπλοκότητα των μηχανισμών αυτής της κατεργασίας.

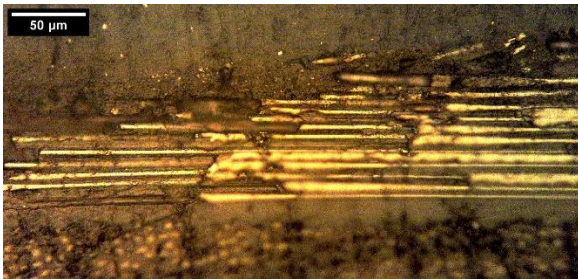
• Δοκίμιο #4



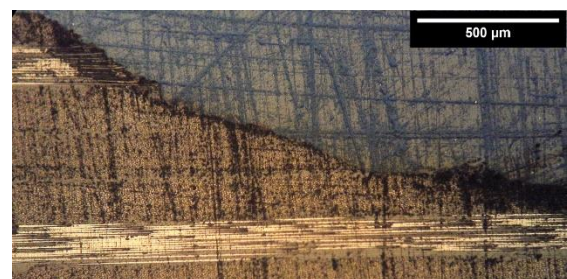
Εικόνα 141: Μεγέθυνση 10x



Εικόνα 142: Μεγέθυνση 20x



Εικόνα 143: Μεγέθυνση 50x



Εικόνα 144: Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x

Το συγκεκριμένο δοκίμιο προήλθε από κατεργασία με χρήση του κυκλικού ηλεκτροδίου διαστάσεως διαμέτρου 15 χιλιοστών [mm] σε συνθήκες κατεργασίας **χρονικής διάρκειας παλμού εκκένωσης** $t_{on} = 750 [\mu sec]$ και **έντασης ρεύματος κατεργασίας** $I_p = 1.5 [A]$.

Και σε αυτήν την περίπτωση το βάθος κοπής φτάνει κοντά στο αναγραφόμενο στην ένδειξη της μηχανής, ενώ παρατηρείται αφαίρεση υλικού και σε περιοχές εντός των εσωτερικών στρωμάτων του ανθρακονήματος.

Παρατηρείται εντονότερο επιφανειακό κάψιμο σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις και αυτό έγκειται στο γεγονός ότι σε κάποια φάση κατά την κατεργασία δημιουργήθηκε τόξο το οποίο επέβαλε την απρογραμμάτιστη διακοπή της. Το γεγονός αυτό είναι και μια από τις αιτίες της παρατηρούμενης σχετικά έντονης τραχύτητας της επιφάνειας.

Όσον αφορά την πλευρική επιφάνεια, σε αντίθεση με τα προηγούμενα δοκίμια κυκλικών κοπών δεν παρατηρείται κάθετη κοπή, αλλά παρουσιάζεται μια ομαλή μετάβαση από την κορυφή του δοκιμίου ως το επίπεδο της οριζόντιας επιφάνειας.

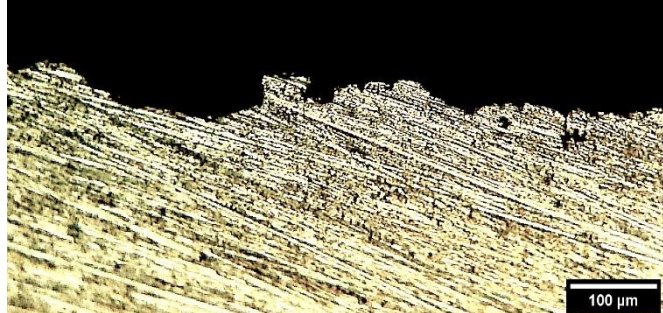
4.3.6 Άλλες οπτικές των δοκιμών

- Κατόψεις οπών

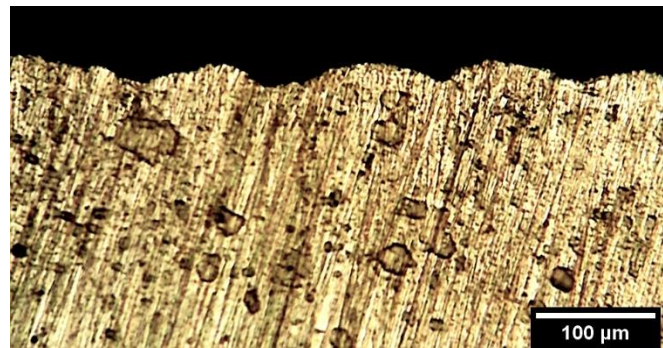
Δίπλα παρατίθενται τρεις εικόνες από την κάτοψη τριών υλικών στο επίπεδο μηδενικού βάθους κοπής, στις οποίες απεικονίζεται η τραχύτητα των πλευρικών τοιχωμάτων των οπών. Και οι τρεις οπές έχουν σχηματιστεί με το κυκλικό ηλεκτρόδιο διαμέτρου 15 χιλιοστών [mm]. Τα δοκίμια ανήκουν σε αλουμίνιο, χάλυβα και ανθρακόνημα.

Η επιφάνεια του αλουμινίου παρουσιάζει ανομοιομορφία στην τραχύτητα, με απότομες κοιλιάδες και όρη, ωστόσο αυτή η εικόνα δεν εμφανίζεται στο σύνολο της πλευρικής επιφάνειας, όπου εν γένει παρουσιάζεται μια πιο ήπια εικόνα. Η επιφάνεια του χάλυβα εμφανίζει μεγαλύτερη ομοιομορφία ενός προφίλ με επαναλαμβανόμενα όρη και κοιλιάδες παρόμοιων μεγεθών.

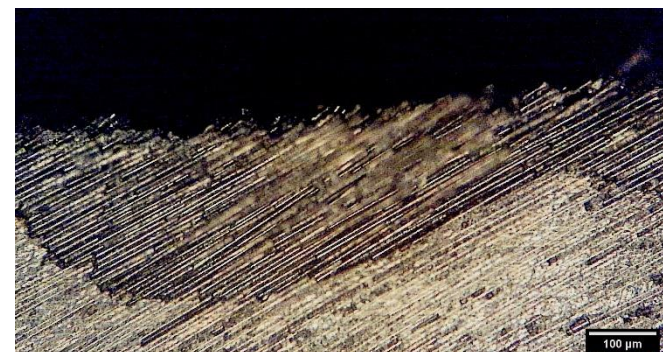
Η επιφάνεια του ανθρακονήματος, τέλος, αποτελείται από κομμένες ίνες που εξέχουν στο κενό, «απελευθερωμένες» από τη συνθετική μήτρα για ελάχιστα μικρόμετρα. Στην εικόνα παρατηρείται ακόμα, αλλοίωση σε μια λεπτή στρώση της μήτρας, η οποία μάλλον έχει επηρεαστεί θερμικά από τις πολύ υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν κατά την κατεργασία.



Εικόνα 145: Αλουμίνιο, Συνθήκες: $I_p = 24 [A]$, $t_{on} = 150 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 20x



Εικόνα 146: Χάλυβας, Συνθήκες: $I_p = 24 [A]$, $t_{on} = 200 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 20x

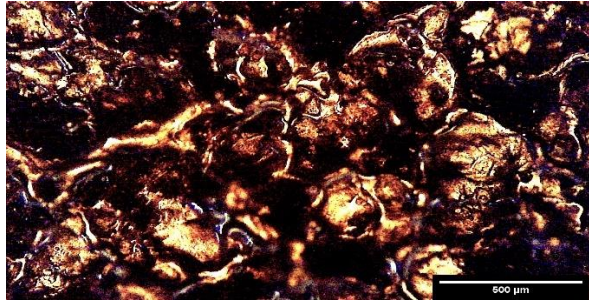


Εικόνα 147: Ανθρακόνημα, Συνθήκες: $I_p = 1.5 [A]$, $t_{on} = 200 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 20x

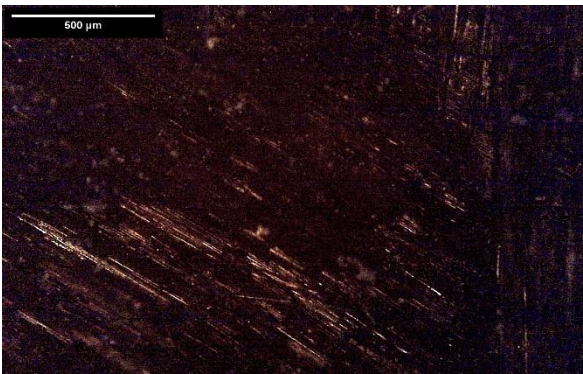
- Κατόψεις κατεργασμένων επιφανειών



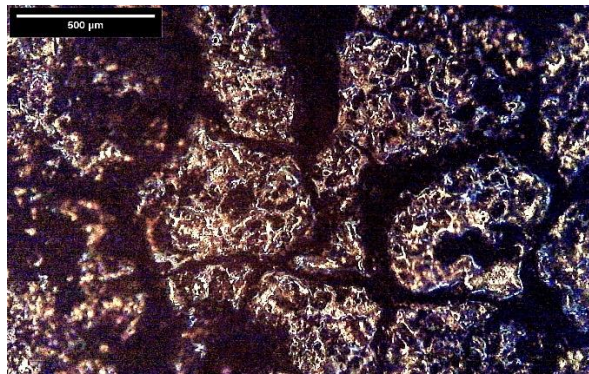
Εικόνα 148: Αλουμίνιο, μεγέθυνση 5x



Εικόνα 149: Χάλυβας, μεγέθυνση 10x



Εικόνα 150: Ανθρακόνημα, μεγέθυνση 10x



Εικόνα 151: Καρβίδιο, μεγέθυνση 10x

Οι παραπάνω εικόνες αντιστοιχούν σε αλουμίνιο, χάλυβα, ανθρακόνημα και καρβίδιο βολφραμίου. Στις περιπτώσεις **του αλουμινίου και του χάλυβα** διακρίνεται περίπου η ίδια εικόνα μιας επιφάνειας με έντονο ανάγλυφο, στην οποία διακρίνονται δίκτυα ρωγματώσεων, σφαιρίδια επαναστεροποιημένου υλικού, κρατήρες και μικρότερες οπές της τάξεως των δεκάδων μικρομέτρων σε διάμετρο, οι οποίες αντιστοιχούν σε εξατμισμένες αέριες ουσίες ή/και σε κρατήρες. Στην περίπτωση **του ανθρακονήματος** παρατηρούνται ίνες άνθρακα σε κάτοψη και μάλιστα στο δεξί τμήμα ης εικόνας παρατηρούνται ίνες διαφορετικής διεύθυνσης, οι οποίες ανήκουν σε στρώση που υπερκαλύπτει αυτήν των ινών με την άλλη διεύθυνση. Φαινόμενα ρωγματώσεων, επαναστεροποιημένου υλικού ή κρατήρες και άλλες επιφανειακές ατέλειες δεν παρατηρούνται. Τέλος, στην περίπτωση **του καρβιδίου**, είναι πολύ πιο ευδιάκριτο το δίκτυο ρωγματώσεων και κατ' επέκταση οι «νησίδες» στερεού υλικού που σχηματίζονται από αυτό. Στις «νησίδες» αυτές παρατηρείται έντονο ανάγλυφο με πάρα πολλούς μικρούς κρατήρες της τάξεως των δεκάδων, κυρίως, μικρομέτρων σε διάμετρο.

5. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, η πραγματοποίηση των πειραμάτων έδειξε πως η κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης-βύθισης δύναται να εφαρμοστεί σε **τεμάχια ποικίλης σκληρότητας**, από περίπου 100 ως και σχεδόν 650 Brinell, **και σύστασης**, δηλαδή και σε μέταλλα (χάλυβας, αλουμίνιο, εργαλειοχάλυβας) και σε κεραμικά (καρβίδια βολφραμίου) και σε σύνθετα υλικά (ανθρακόνημα) με **βασική προϋπόθεση να μπορούν να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα**.

Ο ρυθμός αποβολής υλικού που υπολογίστηκε κυμαίνεται σε τιμές της τάξεως των 0.24 ως και 145 κυβικών χιλιοστών ανά λεπτό [mm^3/min], ενώ στα πειράματα φάνηκε η **εξάρτησή του και από τις συνθήκες** κατεργασίας που ορίστηκαν, αλλά και από τις **ιδιότητες του υλικού** των τεμαχίων προς κατεργασία, **θερμοηλεκτρικές και μηχανικές**.

Η μέση τραχύτητα των κατεργασμένων επιφανειών κυμάνθηκε από περίπου 5 ως 20 μικρόμετρα [μm], καταδεικνύοντας έτσι την ικανότητα του συγκεκριμένου τύπου κατεργασίας να παράγει επιφάνειες **καλής ποιότητας ακρίβειας**, ενώ και από τις εικόνες του μικροσκοπίου φαίνονται και οι δυνατότητες για επίτευξη **καλής διαστατικής ακρίβειας**. Σημαντική προϋπόθεση για τα παραπάνω αποτελεί η **χρήση κατάλληλου ηλεκτροδίου** χωρίς φθορές και γεωμετρικές ατέλειες.

Πιο συγκεκριμένα, για τα πέντε υλικά, με βάση τις συγκεκριμένες παραμέτρους κατεργασίας που αναλύθηκαν στα πειράματα, έχουμε :

- **Χάλυβας** : Υλικό που μπορεί να κατεργαστεί με **υψηλές τιμές έντασης ρεύματος** και με **μεσο-υψηλές τιμές διάρκειας παλμών**
- **Αλουμίνιο** : Υλικό που μπορεί να κατεργαστεί με **μεσο-υψηλές τιμές έντασης ρεύματος** και με **μεσο-υψηλές τιμές διάρκειας παλμών**
- **Εργαλειοχάλυβας** : Υλικό που μπορεί να κατεργαστεί με **μεσο-υψηλές τιμές έντασης ρεύματος** και με **μεσο-χαμηλές τιμές διάρκειας παλμών**
- **Καρβίδιο βολφραμίου** : Υλικό που μπορεί να κατεργαστεί με **μεσο-χαμηλές τιμές έντασης ρεύματος** και με **χαμηλές τιμές διάρκειας παλμών (<100)**
- **Ανθρακόνημα** : Υλικό που μπορεί να κατεργαστεί μόνο στην **πιο χαμηλή τιμή έντασης ρεύματος** και με **υψηλές τιμές διάρκειας παλμών**

Ένα γεγονός που κατέστη σαφές κατά τη διαδικασία των πειραμάτων είναι το ότι **τα υλικά υψηλής σκληρότητας δεν απαιτούν κατ' ανάγκη συνδυασμούς παραμέτρων που πορσφέρουν τη μέγιστη δυνατή ενέργεια ανά παλμό και ισχύ κατεργασίας**, αποδείχθηκε το αντίθετο μάλιστα. **Το μεγαλύτερο ρόλο τον παίζουν οι θερμοηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών και όχι οι μηχανικές**.

Επιπλέον, από τις συγκρίσεις πειραμάτων με αντίστοιχες συνθήκες κατεργασίας αλλά με διαφορετική γεωμετρία ηλεκτροδίου, εξάγεται το συμπέρασμα πως **το ηλεκτρόδιο παίζει όντως ρόλο στις παραμέτρους απόδοσης**, όμως παρατηρήθηκε και ο ρόλος που παίζει η **αποτελεσματική έκπλυση του διακένου**, ειδικά στην μείωση του MRR των πειραμάτων με

κυκλικό ηλεκτρόδιο, στα οποία πραγματοποιήθηκε κοπή σε **μεγαλύτερο βάθος κατεργασίας**. Εντέλει, **η αποτελεσματικότητα της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης εξαρτάται από πολλές παραμέτρους που συντρέχουν ταυτόχρονα** και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στη μελέτη τους.

Περί των **εμπειρικών σχέσεων του Kalpakjian** που υπολογίζουν MRR και μέση τραχύτητα, σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρήθηκε ποιοτική συσχέτιση με τα πειραματικά δεδομένα, αλλά όχι ποσοτική, που σημαίνει πως **χρειάζονται την προσθήκη κάποιας σταθεράς (scaling constant) η οποία θα αλλάζει την κλίμακα της ποσότητας** κατάλληλα σε κάθε περίπτωση. Επιπλέον, **η σχέση του MRR επηρεαζόταν από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου**, ενώ η σχέση που δίνει τη μέση τραχύτητα σε κάποιες περιπτώσεις φαινόταν να μην επηρεάζεται από αυτόν τον παράγοντα.

Εν γένει οι χαμηλές τιμές του ρυθμού αποβολής υλικού, οι ανάγκες συντήρησης και διατήρησης των ηλεκτροδίων σε καλή κατάσταση, καθώς και οι ψηλές τιμές ισχύος που απαιτούνται για τη λειτουργία της μηχανής οδηγούν στο συμπέρασμα πως η ηλεκτροδιάβρωση δεν είναι από μόνη της οικονομικά συμφέρουσα ως κατεργασία, για αυτό και συνήθως συνδυάζεται με άλλες. Παρόλα αυτά, οι δυνατότητες που προσφέρει είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τη βιομηχανία και για αυτό το λόγο βρίσκει ευρεία εφαρμογή ακόμα και σήμερα, παρά το μειονέκτημα του κόστους.

Κλείνοντας το κεφάλαιο των συμπερασμάτων, ακολουθεί η πρόταση ιδεών προς μελέτη σε κάποια μελλοντική διατριβή πάνω στο θέμα. Προτείνεται η διερεύνηση διαφορετικών παραμέτρων κατεργασίας, όπως ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών και οι παράμετροι που αφορούν το διάκενο μεταξύ τεμαχίου και ηλεκτροδίου, καθώς και η διερεύνηση της πολικότητας του ηλεκτροδίου σε διάφορα υλικά. Επιπλέον, θα είχε ενδιαφέρον η χρήση διαφορετικών υλικών πέραν του χαλκού ως ηλεκτρόδια και ίσως ακόμα και η μελέτη της κατασκευής ενός ηλεκτροδίου με περίπλοκη γεωμετρία. Τέλος, θα ικανοποιούσε πολύ τον συγγραφέα της παρούσας διπλωματικής, αν πραγματοποιούνταν πειραματικός έλεγχος και περαιτέρω διόρθωση των εμπειρικών σχέσεων, των οποίων τους συντελεστές επιχείρησε να προσδιορίσει.

6. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση ιδιοτήτων και παραμέτρων για μεταλλικά ηλεκτρόδια και ηλεκτρόδια γραφίτη.....	21
Πίνακας 2: Προτεινόμενες συνθήκες κατεργασίας για διάφορα υλικά τεμαχίου	22
Πίνακας 3: Σύγκριση απόδοσης διαφόρων υλικών ηλεκτροδίου σε διάφορες παραμέτρους κατεργασίας	22
Πίνακας 4: Σύγκριση ιδιοτήτων για δυο τύπους διηλεκτρικού μέσου.....	23
Πίνακας 5: Επίδραση της πίεσης έκπλυσης στις παραμέτρους της κατεργασίας.....	29
Πίνακας 6: Ρύθμιση παραμέτρων ελέγχου για την απόκτηση κατάλληλων παραμέτρων απόδοσης	40
Πίνακας 7: Μετρήσεις παραμέτρων για τον μαλακό χάλυβα	53
Πίνακας 8: Μετρήσεις παραμέτρων για τον μαλακό χάλυβα	53
Πίνακας 9: Τραχυμετρήσεις για τον μαλακό χάλυβα	53
Πίνακας 10: Σκληρομετρήσεις για τον μαλακό χάλυβα	53
Πίνακας 11: Μετρήσεις παραμέτρων για το αλουμίνιο	54
Πίνακας 12: Μετρήσεις παραμέτρων για το αλουμίνιο	54
Πίνακας 13: Τραχυμετρήσεις για το αλουμίνιο	55
Πίνακας 14: Σκληρομετρήσεις για το αλουμίνιο	55
Πίνακας 15: Μετρήσεις παραμέτρων για τα καρβίδια.....	57
Πίνακας 16: Μετρήσεις παραμέτρων για τα καρβίδια.....	57
Πίνακας 17: Τραχυμετρήσεις για τα καρβίδια.....	57
Πίνακας 18: Σκληρομετρήσεις για τα καρβίδια	57
Πίνακας 19: Μετρήσεις παραμέτρων για τον εργαλειοχάλυβα M42	58
Πίνακας 20: Μετρήσεις παραμέτρων για τον εργαλειοχάλυβα M42	58
Πίνακας 21: Τραχυμετρήσεις για τον εργαλειοχάλυβα M42	58
Πίνακας 22: Σκληρομετρήσεις παραμέτρων για τον εργαλειοχάλυβα M42.....	58
Πίνακας 23: Μετρήσεις παραμέτρων για το ανθρακόνημα.....	60
Πίνακας 24: Μετρήσεις παραμέτρων για το ανθρακόνημα.....	60
Πίνακας 25: Τραχυμετρήσεις για το ανθρακόνημα.....	60
Πίνακας 26: Σκληρομετρήσεις για το ανθρακόνημα	60
Πίνακας 27: Αποτελέσματα μετρήσεων για το χάλυβα	62
Πίνακας 28: Αποτελέσματα σχέσεων Kalpakjian για το χάλυβα	63
Πίνακας 29: Συντελεστές εμπειρικής σχέσης της μορφής $MRR = a \cdot IPb \cdot (ton)^c$ για χάλυβα.....	63
Πίνακας 30: Αποτελέσματα μετρήσεων για το αλουμίνιο	66
Πίνακας 31: Αποτελέσματα σχέσεων Kalpakjian για το αλουμίνιο.....	66
Πίνακας 32: Συντελεστές εμπειρικής σχέσης της μορφής $MRR = a \cdot IPb \cdot (ton)^c$ για αλουμίνιο	67
Πίνακας 33: Αποτελέσματα μετρήσεων για τα καρβίδια	69
Πίνακας 34: Αποτελέσματα σχέσεων Kalpakjian για τα καρβίδια	70

Πίνακας 35: Συντελεστές εμπειρικής σχέσης της μορφής $MRR = a \cdot IPb \cdot (ton)^c$ για καρβίδια	70
Πίνακας 36: Αποτελέσματα μετρήσεων για τον εργαλειοχάλυβα M42	73
Πίνακας 37: Αποτελέσματα σχέσεων Kalpakjian για τον εργαλειοχάλυβα M42	73
Πίνακας 38: Συντελεστές εμπειρικής σχέσης της μορφής $MRR = a \cdot IPb \cdot (ton)^c$ για εργαλειοχάλυβα M42	73
Πίνακας 39: Αποτελέσματα μετρήσεων για το ανθρακόνημα	76
Πίνακας 40: Αποτελέσματα σχέσεων Kalpakjian για το ανθρακόνημα.....	76
Πίνακας 41: Συντελεστές εμπειρικής σχέσης της μορφής $MRR = a \cdot IPb \cdot (ton)^c$ για ανθρακόνημα	77
Πίνακας 42: Υπολογισμός μήκους αναφοράς για προσθήκη κλίμακας στις εικόνες του μικροσκοπίου	84

7. Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει του MRR για το χάλυβα	64
Σχήμα 2: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για το χάλυβα	64
Σχήμα 3: Διάγραμμα MRR συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για το χάλυβα	65
Σχήμα 4: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει του MRR για το αλουμίνιο	67
Σχήμα 5: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για το αλουμίνιο	68
Σχήμα 6: Διάγραμμα MRR συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για το αλουμίνιο	68
Σχήμα 7: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει του MRR για τα καρβίδια	71
Σχήμα 8: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για τα καρβίδια	71
Σχήμα 9: Διάγραμμα MRR συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για τα καρβίδια	72
Σχήμα 10: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει του MRR για τον εργαλειοχάλυβα	74
Σχήμα 11: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για τον εργαλειοχάλυβα	74
Σχήμα 12: Διάγραμμα MRR συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για τον εργαλειοχάλυβα ..	75
Σχήμα 13: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει του MRR για το ανθρακόνημα ..	77
Σχήμα 14: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για το ανθρακόνημα	77
Σχήμα 15: Διάγραμμα MRR συναρτήσει της μέσης τραχύτητας για το ανθρακόνημα	78
Σχήμα 16: Διάγραμμα ενέργειας ανά παλμό συναρτήσει του MRR για όλα τα υλικά	79

Εικόνα 43: Η μηχανή AGIETRON EMT 1.10 [10].....	41
Εικόνα 44: Η πλάκα χάλυβα.....	43
Εικόνες 45,46 Οι πλάκες αλουμινίου.....	43
Εικόνες 47, 48, 49, 50: Τα καρβίδια βολφραμίου.....	43
Εικόνες 51, 52: Τα τεμάχια εργαλειοχάλυβα.....	44
Εικόνα 53: Το πλακίδιο ανθρακονήματος.....	44
Εικόνες 54,55,56: Τα τρία ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν [10].....	45
Εικόνα 57: Η ζυγαριά ακριβείας.....	47
Εικόνα 58: Ολοκληρωμένη κατεργασία EDM στην πλάκα αλουμινίου.....	47
Εικόνα 59: Σκληρομέτρηση.....	48
Εικόνα 60: Το τραχύμετρο.....	48
Εικόνα 61: Λεπτομέρεια από την ακίδα του τραχυμέτρου.....	48
Εικόνα 62: Δισκοτόμος	Εικόνα 63: Τεμαχισμένα δοκίμια.....
Εικόνες 64,65: Εγκιβωτισμένα Δοκίμια.....	49
Εικόνες 66,67: Ο λειαντικός τροχός και ο τρόπος χρήσης του.....	50
Εικόνα 68: Στερέωση δοκιμίου στο πλακίδιο.....	50
Εικόνα 69: Το οπτικό μικροσκόπιο.....	50
Εικόνα 70: Λεπτομέρεια φακών του μικροσκοπίου.....	51
Εικόνα 71: Η ψηφιακή κάμερα.....	51
Εικόνα 72: Το εμφανές σημάδι τόξου DC στην επιφάνεια κατεργασίας.....	54
Εικόνες 73, 74, 75: Τα καταστρεπτικά αποτελέσματα της πρώτης απόπειρας.....	56
Εικόνα 76: Φθορά του ηλεκτροδίου μετά την κατεργασία καρβιδίου.....	56
Εικόνα 77: Αποτέλεσμα εμφάνισης τόξου DC	Εικόνα 78: Επιτυχημένη απόπειρα κατεργασίας.....
Εικόνα 79: Διάφορες μορφές κρατήρα από EDM σε χαλκό με ηλεκτρόδιο χαλκού [9].....	80
Εικόνα 80: Δίκτυο ρωγμών (a) σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, (b) διαγραμματικά [4].....	81
Εικόνα 81: Κρυσταλλική δομή στη θέση κατεργασίας[9]	Εικόνα 82: Οι πέντε θερμοκρασιακές ζώνες[2].....
Εικόνα 83: Συνθήκες: $IP = 24 [A]$, $ton = 200 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x.....	85
Εικόνα 84: Μεγέθυνση 20x	Εικόνα 85: Μεγέθυνση 50x.....
Εικόνα 86: Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x.....	85
Εικόνα 87: Συνθήκες: $IP = 24 [A]$, $ton = 500 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x.....	86
Εικόνα 88: Μεγέθυνση 20x.....	86
Εικόνα 89: Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x.....	86
Εικόνα 90: Μεγέθυνση 50x.....	86
Εικόνα 91: Συνθήκες: $IP = 27 [A]$, $ton = 100 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x.....	87
Εικόνα 92: Μεγέθυνση 20x.....	87
Εικόνα 93: Μεγέθυνση 50x.....	87
Εικόνα 94: Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x.....	87
Εικόνα 95: Συνθήκες: $IP = 21 [A]$, $ton = 100 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x.....	88
Εικόνα 97 Μεγέθυνση 20x.....	88

Εικόνα 96 Μεγέθυνση 50x	88
Εικόνα 98 Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x.....	89
Εικόνα 99: Συνθήκες: $IP = 24 [A]$, $ton = 500 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x	90
Εικόνα 100 Μεγέθυνση 20x	90
Εικόνα 101 Μεγέθυνση 50x	90
Εικόνα 102 Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x.....	90
Εικόνα 103: Συνθήκες: $IP = 24 [A]$, $ton = 75 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x.....	91
Εικόνα 104 Μεγέθυνση 20x	91
Εικόνα 105 Μεγέθυνση 50x	91
Εικόνα 106 Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x.....	92
Εικόνα 107: Συνθήκες: $IP = 24 [A]$, $ton = 100 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x	93
Εικόνα 108 Μεγέθυνση 20x	93
Εικόνα 109 Μεγέθυνση 50x	93
Εικόνα 110 Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x.....	94
Εικόνα 111: Συνθήκες: $IP = 24 [A]$, $ton = 300 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x	94
Εικόνα 112 Μεγέθυνση 50x	94
Εικόνα 113 Μεγέθυνση 20x	95
Εικόνα 114 Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x.....	95
Εικόνα 115: Συνθήκες: $IP = 24 [A]$, $ton = 50 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x.....	95
Εικόνα 116 Μεγέθυνση 20x	96
Εικόνα 117 Μεγέθυνση 50x	96
Εικόνα 118 Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x.....	96
Εικόνα 119: Μεγέθυνση 10x	97
Εικόνα 120: Μεγέθυνση 20x- Συνθήκες: $IP = 16.5 [A]$, $ton = 20 [\mu sec]$	97
Εικόνα 121: Μεγέθυνση 50x	97
Εικόνα 122 Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x.....	97
Εικόνα 123: Μεγέθυνση 10x	98
Εικόνα 124: Μεγέθυνση 20x	98
Εικόνα 125 Μεγέθυνση 50x - Συνθήκες: $IP = 16.5 [A]$, $ton = 50 [\mu sec]$	98
Εικόνα 126 : Συνθήκες: $IP = 16.5 [A]$, $ton = 75 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x.....	99
Εικόνα 127: Μεγέθυνση 20x	99
Εικόνα 128: Μεγέθυνση 50x	Εικόνα 129 Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x
	99
Εικόνα 131: Μεγέθυνση 10x	100
Εικόνα 130: Μεγέθυνση 20x	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Εικόνα 132: Μεγέθυνση 50x - Συνθήκες: $IP = 1.5 [A]$, $ton = 500 [\mu sec]$	100
Εικόνα 133: Μεγέθυνση 20x	Εικόνα 134: Μεγέθυνση 10x
	101
Εικόνα 135: Μεγέθυνση 50x	Εικόνα 136: Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x
	101
Εικόνα 137: Συνθήκες: $IP = 1.5 [A]$, $ton = 200 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 10x.....	102

Εικόνα 138: Μεγέθυνση 20x	102
Εικόνα 139: Μεγέθυνση 50x	102
Εικόνα 140 Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x.....	103
Εικόνα 141: Μεγέθυνση 10x	104
Εικόνα 142: Μεγέθυνση 20x	104
Εικόνα 143: Μεγέθυνση 50x	104
Εικόνα 144 Πλευρικό τόιχωμα – μεγέθυνση 5x.....	104
Εικόνα 145: Αλουμίνιο, Συνθήκες: $IP = 24 [A]$, $ton = 150 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 20x.....	105
Εικόνα 146: Χάλυβας, Συνθήκες: $IP = 24 [A]$, $ton = 200 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 20x	105
Εικόνα 147: Ανθρακόνημα, Συνθήκες: $IP = 1.5 [A]$, $ton = 200 [\mu sec]$ - μεγέθυνση 20x	105
Εικόνα 148: Αλουμίνιο, μεγέθυνση 5x	Εικόνα 149: Χάλυβας, μεγέθυνση 10x
.....	106
Εικόνα 150: Ανθρακόνημα, μεγέθυνση 10x	Εικόνα 151: Καρβίδιο, μεγέθυνση 10x
.....	106

9. Βιβλιογραφία

1. **El-Hofy, Hassan.** *Fundamentals of Machining Processes.* USA : CRC Press, 2019.
2. **Jameson, Elman C.** *Electrical Discharge Machining.* USA : SME, 2001.
3. **Shey, John A.** *Introduction to Manufacturing Processes.* USA : McGraw-Hill, 1987.
4. **Jahan, M. P.** *Electrical Discharge Machining.* New York : Nova Science Publishers, 2015.
5. **Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid.** *Manufacturing and Engineering Technology (7th Edition).* India : Pearson, 2013.
6. **Παντελής, Δημήτρης Ι.** *Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά.* Αθήνα : Παπασωτηρίου, 2008.
7. **Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης, Δημήτρης Ι. Παντελής.** *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών.* Αθήνα : Παπασωτηρίου, 2008.
8. **Πετρόπουλος, Πέτρος Γ.** *Μηχανουργική Τεχνολογία.* Θεσσαλονίκη : Ζήτη, 1998.
9. **Δημήτριος Ε. Μανωλάκος, Άγγελος Μαρκόπουλος.** *Σημειώσεις του Μαθήματος των Μη συμβατικών Κατεργασιών.* Αθήνα : ΕΜΠ.
10. **Παπάζογλου, Λάζαρος Ε. Ι.** *ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΒΥΘΙΣΗΣ (DIE SINKING EDM) ΜΕΣΩ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ & ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.* Αθήνα : ΕΜΠ, 2018.
11. **Konstantinos Gourgouletis, Nikolaos M. Vaxevanidis, Nikolaos I. Galanis, Dimitrios E. Manolakos.** Electrical discharge drilling of carbon fibre reinforced composite materials. *Int. J. Machining and Machinability of Materials.* 2011, Τόμ. 10, 3, σσ. 187-201.
12. **D. Tzamouranis, N. M. Vaxevanidis, N. I. Galanis, D. E. Manolakos.** ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF TUNGSTEN CARBIDES. *Further Manufacturing Processes.* 4th ICMEN, 2011.
13. **Marin Gostimirovic, Pavel Kovac, Milenko Sekulic, Branko Skoric, et al.** Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM. *Journal of Mechanical Science and Technology.* Springer, 2012, Τόμ. 26, σσ. 173-179.
14. **AGIE.** Operation Instructions AGIETRON EMT 1.10.
15. **B.M. Schumacher, R. Krampitz, J.-P. Kruth, et al.** *Historical phases of EDM development driven by the dual influence of "Market Pull" and "Science Push".* s.l. : Elsevier B.V., 2013.
16. **Oelheld.** oelheld.com. [Ηλεκτρονικό]
<https://www.oelheld.com/de/service/faq/wissenswertes-zur-senkerosion/technologie-des-senkerodierens/>.

17. **Essential Pathology**. essentialpathology.info. [Ηλεκτρονικό].
<http://www.essentialpathology.info/gradingschema/index.html?HelpfulMethods>

18. **Leica Microsystems**. leica-microsystems.com. [Ηλεκτρονικό].
<https://www.leica-microsystems.com/>