



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ**  
**ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΕ ΚΡΑΜΑ**  
**ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΩΜΑ Γ. ΚΟΝΤΟΡΙΑΝΟΥ**

Διπλωματούχου Μηχανικού Αεροσκαφών Σχολής Ικάρων

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

Α. Μαρκόπουλος

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2023**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ  
ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΕ ΚΡΑΜΑ  
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΩΜΑ Γ. ΚΟΝΤΟΡΙΑΝΟΥ**

Διπλωματούχου Μηχανικού Αεροσκαφών Σχολής Ικάρων

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Α. ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. ΚΟΛΛΙΑ, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2023**



Copyright © Θωμάς Κοντοριάνος, 2023

All rights reserved. Με επιφύλαξη παντός δικαιωμάτος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της διπλωματικής εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο δεν δηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.

*Στην σύζυγό μου Δήμητρα  
και στον γιο μου Γεώργιο Ηλία*

## **ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ**

Δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα εργασία είναι αποτέλεσμα πρωτότυπης έρευνας και δεν χρησιμοποιεί πνευματική ιδιοκτησία τρίτων χωρίς αναφορές. Αναλαμβάνω όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες σε περίπτωση που αποδειχθεί ότι η εργασία μου αποτελεί προϊόν λογοκλοπής ή προϊόν τρίτων.

Θωμάς Γ. Κοντοριάνος

Μεταπτυχιακός φοιτητής

A.M.151120017

03/02/2023

## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές και επιστημονικούς συνεργάτες που συνεργάστηκαν άψογα και συνέβαλαν στην ομαλή διεξαγωγή και ολοκλήρωση του παρόντος Μεταπτυχιακού Προγράμματος, υπό τις πρωτόγνωρες συνθήκες μίας πανδημίας (COVID-19), που κανείς δεν μπορούσε να φανταστεί, παρέχοντας μας τις απαιτούμενες γνώσεις, προβληματισμούς και ανατροφοδότηση αναφορικά με την Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέπων καθηγητή μου, κ. Άγγελο Μαρκόπουλο καθώς και τον επιστημονικό του συνεργάτη κ. Εμμανουήλ Παπάζογλου, για τη συνεχή στήριξη, ανταπόκριση και άψογη συνεργασία, αναφορικά με την εκπόνηση, συγγραφή και ολοκλήρωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας παρά τις δύσκολες υγειονομικές συνθήκες.

Τέλος, θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην οικογένειά μου για την συμπαράστασή τους, τις πολύτιμες συμβουλές του και για όλα όσα μου έχουν προσφέρει στα χρόνια της ζωής και σπουδών μου.

## Περιεχόμενα

Εικόνες – Πίνακες – Διαγράμματα - Εξισώσεις .....	9
Περίληψη.....	11
Abstract .....	12
Εισαγωγή.....	13
Κεφάλαιο Πρώτο .....	15
1. Ηλεκτροδιάβρωση (EDM).....	15
1.1. Αρχές λειτουργίας της Ηλεκτροδιάβρωσης .....	16
1.2. Βασικά μέρη – στοιχεία της EDM.....	17
1.2.1. Τεμάχιο (workpiece).....	18
1.2.2. Ηλεκτρόδιο (electrode).....	19
1.2.3. Διηλεκτρικό μέσο (dielectric fluid) .....	22
1.2.4. Μονάδα Ελέγχου (control unit) .....	25
1.2.5. Γεννήτρια ηλεκτρικών παλμών (pulse generator).....	26
1.2.6. Δομικά μέρη (structural parts).....	27
1.2.7. Σύστημα έκπλυσης (flushing system) .....	28
1.2.8. Πίνακας ελέγχου (control panel) .....	29
Κεφάλαιο Δεύτερο .....	31
2. Παράμετροι και υλικό κατεργασίας .....	31
2.1. Παράμετροι κατεργασίας.....	31
2.1.1. Διαφορά Δυναμικού.....	31
2.1.2. Ένταση ρεύματος.....	32
2.1.3. Γενικά χαρακτηριστικά παλμού.....	32
2.1.4. Έλεγχος διάκενου .....	33
2.1.5. Ρυθμός αποβολής υλικού.....	33
2.1.6. Λόγος φθοράς ηλεκτροδίου.....	34
2.1.7. Τραχύτητα επιφανείας .....	34
2.1.8. Πίεση διηλεκτρικού μέσου .....	35
2.2. Υλικό κατεργασίας .....	35
2.2.1. Aluminum 7075.....	37
2.2.2. Παράμετροι και περιορισμοί του αλουμινίου 7075.....	38
Κεφάλαιο Τρίτο .....	40
3. State of the art.....	40
3.1. Το ηλεκτρόδιο ως μέσο για το βέλτιστο αποτέλεσμα .....	41
3.1.1. Σχήμα ηλεκτροδίου .....	43

3.1.2. Χημική σύσταση και ιδιότητες ηλεκτροδίου .....	44
3.2. Τεχνολογικές εξελίξεις στο διηλεκτρικό μέσο.....	45
Κεφάλαιο Τέταρτο.....	48
4. Πειραματική διαδικασία.....	48
Κεφάλαιο Πέμπτο.....	53
5. Αποτελέσματα και στατιστική ανάλυση.....	53
5.1. Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας .....	54
5.2. Στατιστική ανάλυση πειραματικής διαδικασίας .....	54
5.2.1. MRR .....	55
5.2.2. TMRR.....	58
5.2.3. SR.....	61
5.2.4. Ποιότητα επιφανείας .....	66
Κεφάλαιο Έκτο.....	76
6. Συμπεράσματα.....	76
Βιβλιογραφία.....	78



## Εικόνες – Πίνακες – Διαγράμματα - Εξιιώσεις

Εικόνα 1: Μη συμβατικές Κατεργασίες [1].	14
Εικόνα 2: Αρχή λειτουργίας της EDM [2].	15
Εικόνα 3: Μηχανισμός λειτουργίας EDM [2].	16
Εικόνα 4: Die sinking EDM machine.	17
Εικόνα 5: Βασικά μέρη λειτουργίας της ηλεκτροδιάβρωσης [5].	18
Εικόνα 6: Κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης εντός του διηλεκτρικού υγρού [8].	29
Εικόνα 7: Πίνακας ελέγχου EDM [9].	30
Εικόνα 8: Διάφορα σχήματα και τύποι αλουμινίου.	36
Εικόνα 9: Εικόνες SEM του ηλεκτροδίου μετά την κατεργασία.	43
Εικόνα 10: Κατάσταση φυσαλίδων αέρα και υπολείμματα της κατεργασίας στο πλευρικό διάκενο με χρήση ηλεκτροδίου τύπου αναδευτήρα.	44
Εικόνα 11: Τρισδιάστατες μορφολογίες και προφίλ διατομής κρατήρων εκκένωσης που δημιουργούνται από εκκένωση ενός παλμού. (α) ηλεκτρόδιο Cu. (c) ηλεκτρόδιο Sn. (b),(d) τεμάχιο εργασίας από ανοξείδωτο χάλυβα 304.	45
Εικόνα 12: Διαδικασία κατασκευής smart fluid με διηλεκτρικές ιδιότητες.	47
Εικόνα 13: EDM machine AgieCharmilles Roboform 350 Sp.	48
Εικόνα 14: Digital microscope VHX-7000.	51
Εικόνα 15: SEM εικόνες που απεικονίζουν το τεμάχιο εργασίας σε διαφορετική μεγέθυνση και παραμέτρους μηχανικής κατεργασίας.	68
Εικόνα 16: Επιφάνεια Al7075 που έχει υποστεί κατεργασία EDM σε SEM ( $I_p=13[A]$ και $T_{on}=25[\mu\text{sec}]$ ) $\times 1000$ μεγέθυνση.	69
Εικόνα 17: Επιφάνεια Al7075 που έχει υποστεί κατεργασία EDM σε SEM ( $I_p=17[A]$ και $T_{on}=100[\mu\text{sec}]$ ) $\times 1000$ μεγέθυνση.	70
Εικόνα 18: Επιφάνεια Al7075 που έχει υποστεί κατεργασία EDM σε SEM ( $I_p=9[A]$ και $T_{on}=12.8[\mu\text{sec}]$ ) $\times 500$ μεγέθυνση.	70
Εικόνα 19: Εικόνες από τομή κατεργασμένης σε EDM επιφάνειας Al 7075 με a) $I_p=9[A]$ και $T_{on}=25[\mu\text{sec}]$ σε μεγέθυνση $\times 1000$ και b) $I_p=13[A]$ και $T_{on}=25[\mu\text{sec}]$ σε μεγέθυνση $\times 2000$ .	72
Εικόνα 20: Εικόνες από τομή κατεργασμένης σε EDM επιφάνειας Al 7075 με $I_p=17[A]$ και $T_{on}=100[\mu\text{sec}]$ σε μεγέθυνση $\times 1000$ .	73
Εικόνα 21: EDX χάρτης χημικής σύνθεσης για συνθήκες κατεργασίας 17A και 100μs.	74
Εικόνα 22: Ανάλυση χημικής σύστασης για $I_p$ 13 A και $T_{on}$ 15 μs.	75
Πίνακας 1: Σύγκριση μεταλλικών Ηλεκτροδίων και ηλεκτροδίων γραφίτη.	21
Πίνακας 2: Συνθήκες για βασικά υλικά τεμαχίων εργασίας.	21
Πίνακας 3: Σύγκριση προϊόντων πετρελαίου και απιονισμένου νερού ως διηλεκτρικό μέσο στην κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης.	24
Πίνακας 4: Χημική σύνθεση Αλουμινίου 7075 (wt.%).	49
Πίνακας 5: Παράμετροι εισόδου.	49
Πίνακας 6: Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας για Al7075.	54
Διάγραμμα 1: Σχέση MRR με αυξανόμενες τιμές $I_p$ .	56
Διάγραμμα 2: Σχέση MRR με αυξανόμενες τιμές $T_{on}$ .	57
Διάγραμμα 3: Αλληλεπίδραση MRR με $I_p$ και $T_{on}$ .	57
Διάγραμμα 4: Αλληλεπίδραση αποτελεσμάτων MRR και $I_p$ με τη μέθοδο Fisher.	58

Διάγραμμα 5: Αλληλεπίδραση αποτελεσμάτων MRR και $T_{on}$ με τη μέθοδο Fisher. ....	58
Διάγραμμα 6: Σχέση TMRR με αυξανόμενες τιμές $I_p$ . .....	59
Διάγραμμα 7: Σχέση TMRR με αυξανόμενες τιμές $T_{on}$ . .....	60
Διάγραμμα 8: Αλληλεπίδραση TMRR με $I_p$ και $T_{on}$ . .....	60
Διάγραμμα 9: Αλληλεπίδραση αποτελεσμάτων TMRR και $I_p$ με τη μέθοδο Fisher. ....	61
Διάγραμμα 10: Αλληλεπίδραση αποτελεσμάτων TMRR και $T_{on}$ με τη μέθοδο Fisher..	61
Διάγραμμα 11: Σχέση Ra με αυξανόμενες τιμές $I_p$ . .....	63
Διάγραμμα 12: Σχέση Ra με αυξανόμενες τιμές $T_{on}$ . .....	63
Διάγραμμα 13: Αλληλεπίδραση Ra με $I_p$ και $T_{on}$ . .....	64
Διάγραμμα 14: Σχέση Rz με αυξανόμενες τιμές $I_p$ . .....	64
Διάγραμμα 15: Σχέση Rz με αυξανόμενες τιμές $T_{on}$ . .....	65
Διάγραμμα 16: Αλληλεπίδραση Rz με $I_p$ και $T_{on}$ . .....	65

## Περίληψη

Το EDM - Electrical Discharge Machining, ή η κατεργασία ηλεκτρικής εκκένωσης, είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση και την κοπή ηλεκτρικά αγώγιμων υλικών. Ένα τέτοιο υλικό που χρησιμοποιείται στο EDM είναι το αλουμίνιο 7075. Αυτό το κράμα είναι γνωστό για την υψηλή αντοχή, την αντοχή στη διάβρωση και τις καές μηχανικές ιδιότητες. Ωστόσο, όταν κατεργαζόμαστε με αλουμίνιο 7075 σε EDM, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τη συγκεκριμένη συμπεριφορά αυτού του κράματος προκειμένου να επιτευχθούν βέλτιστα αποτελέσματα.

Η πειραματική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την έρευνα περιελάμβανε τη χρήση EDM για την κατεργασία αλουμινίου 7075. Διάφορες παράμετροι όπως η ένταση ρεύματος ( $I_p$ ), ο χρόνος παλμού ( $T_{on}$ ) ή ο ρυθμός αποβολής υλικού (MRR – Material Removal Rate) μελετήθηκαν προκειμένου να καθοριστούν οι καλύτερες παράμετροι για την επίτευξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι το αλουμίνιο 7075 μπορεί να κατεργαστεί επιτυχώς με χρήση EDM, αλλά ορισμένες παράμετροι πρέπει να ελέγχονται προσεκτικά προκειμένου να επιτευχθούν τα καλύτερα αποτελέσματα.

Επιπλέον, έχει μελετηθεί η επιφανειακή και η υποεπιφανειακή μικροδομή του κατεργαζόμενου τεμαχίου σε EDM, με τη χρήση Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (SEM) που επιτρέπει την παρατήρηση κορυφογραμμών, σφαιριδίων, θυλάκων, μικρορωγμών και κρατήρων που μπορεί να εμφανιστούν στην επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας, αυτές οι μικροδομές σχετίζονται με τις παραμέτρους μηχανικής κατεργασίας που εξετάσαμε.

Συμπερασματικά, το EDM είναι μια βιώσιμη μέθοδος για την κατεργασία του αλουμινίου 7075, αλλά απαιτεί προσεκτική προσοχή σε ορισμένες παραμέτρους προκειμένου να επιτευχθούν βέλτιστα αποτελέσματα. Περαιτέρω έρευνα σε εναλλακτικές μεθόδους και νέες τεχνολογίες γιγλεκτρικού μέσου (υψηλής ποιότητας και νανο-υλικά ρευστά), μπορεί να βελτιώσει τη διαδικασία μηχανικής κατεργασίας και να παράγει καλύτερα αποτελέσματα. Επίσης, στατιστικές αναλύσεις όπως η μέθοδος του Fisher και η μέθοδος πολλαπλής σύγκρισης αλληλεπιδράσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας.

# **Study of the Electrical Discharge Machining Process for Aluminum Alloys**

Thomas G. Kontorianos

## **Abstract**

EDM, or electrical discharge machining, is a process that is used to shape and cut electrically conductive materials. One such material that is used in EDM is aluminum 7075. This alloy is known for its high strength, corrosion resistance, and good mechanical properties. However, when working with aluminum 7075 in EDM, it is important to understand the specific behavior of this alloy in order to achieve optimal results.

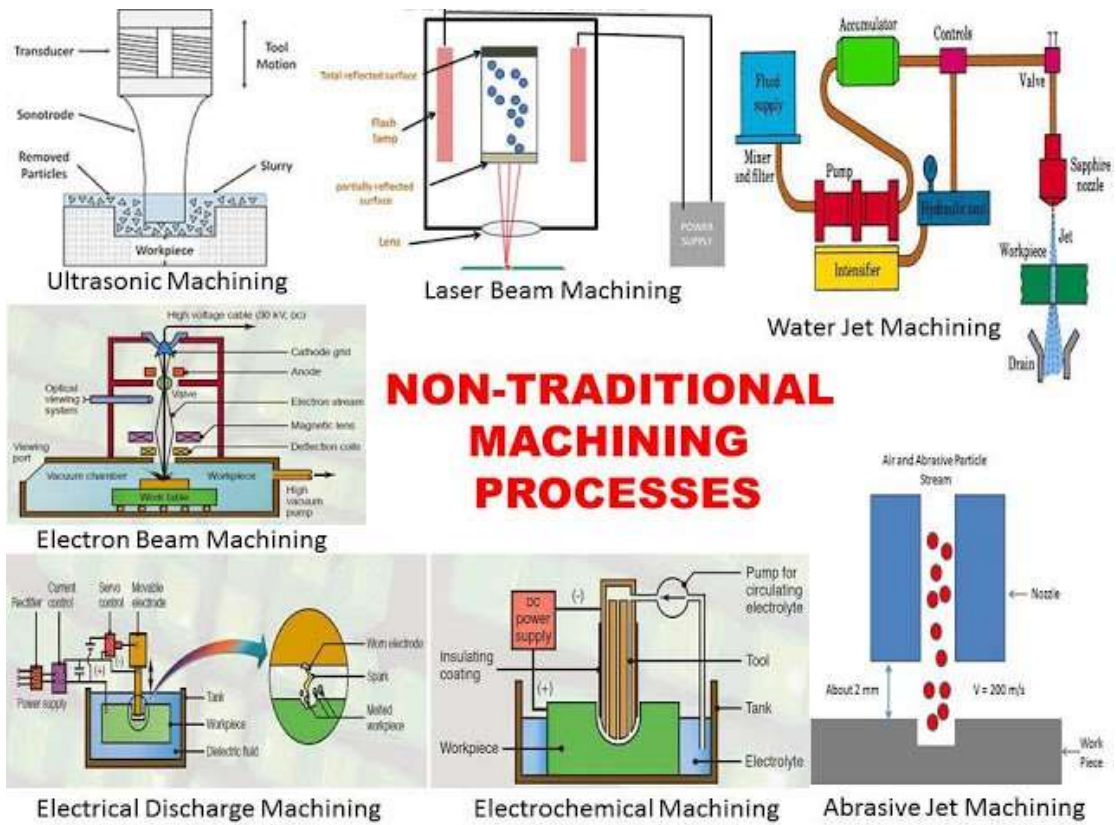
The experimental process used in this research involved the use of EDM to machine aluminum 7075. Various parameters such as pulse on current ( $I_p$ ), pulse on duration ( $T_{on}$ ) or material removal rate (MRR) were studied in order to determine the best configurations of achieving optimum results. The results of this research showed that aluminum 7075 can be successfully machined by using EDM, but that certain parameters must be carefully controlled in order to achieve the best results.

In addition, study has been conducted on the subsurface microstructure of workpiece in EDM, with the use of Scanning Electron Microscopy (SEM) which allows to observe ridges, globules, pockmarks, micro-cracks and craters that may appear on the surface of the workpiece. This microstructures are related to the machining parameters we have already examined.

In conclusion, EDM is a viable method of machining aluminum 7075, but it requires careful attention to certain parameters in order to achieve optimal results. Further research on alternative methods and new technologies such as High-Performance Fluid and Nano-Fluid, can improve the machining process and produce better results. Also, statistical analysis such as Fisher's method and multiple comparison method can be used to optimize the process.

## Εισαγωγή

Οι εξελίξεις και οι δυνατότητες στα πεδία της επιστήμης και τεχνολογίας υλικών συνεχώς κινούνται με ταχύτατους ρυθμούς, δημιουργώντας βελτιωμένες ιδιότητες όπως συνεχώς αυξανόμενη αντοχή σε μηχανικά και θερμικά φορτία, στη φθορά αλλά και σε σκληρότητα. Ωστόσο είναι επιτακτική η ανάγκη έρευνας και ανάπτυξης νέων μη συμβατικών μεθοδών κατεργασίας οι οποίες θα ανταποκρίνονται στις σύγχρονες απαιτήσεις της βιομηχανίας και της παραγωγής. Πλεον οι μη συμβατικές κατεργασίες διαχωρίζονται βάσει το μηχανισμό και το είδος της ενέργειας που χρησιμοποιούν. Η ηλεκτροδιάβρωση (EDM) που θα επικεντρωθούμε στη παρούσα διπλωματική εργασία ανήκει στη κατηγορία των θερμικών – θερμοηλεκτρικών. Στην ίδια κατηγορία είναι η κοπή με δέσμη Laser (LBC - Laser Beam Cutting), με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM - Electron Beam Melting), με δέσμη πλάσματος (PBM - Powder Bed Fusion). Άλλες κυρίες κατηγορίες μη συμβατικών κατεργασιών πέραν των θερμικών – θερμοηλεκτρικών είναι οι μηχανικές κατεργασίες και οι χημικές – ηλεκτροχημικές. Οι μη συμβατικές κατεργασίες μας προσφέρουν μία σειρά από πλεονεκτήματα βελτιστοποιώντας τόσο τα αποτελέσματα αλλά και το ίδιο το περιβάλλον της κατεργασίας. Στη συνέχεια θα αναφερθούν τα βασικότερα σημεία που υπερτερούν οι μη συμβατικές κατεργασίες. Αρχικά υπάρχει η δυνατότητα πέραν των κλασικών εργαλείων να χρησιμοποιηθεί κάποιος εναλλακτικός τρόπος όπως μία δέσμη laser (με ότι αυτό συνεπάγεται όπως για παράδειγμα ότι για δέσμη laser δεν μας απασχολεί η σκληρότητα). Επιπλέον έχουμε την δυνατότητα μεγαλύτερης ακρίβειας καθώς και καλύτερης ποιότητας επιφανείας. Επιπρόσθετα στις περισσότερες μη συμβατικές κατεργασίες δεν χρησιμοποιείται μόνο μηχανική ενέργεια αλλά κάποιος άλλος μηχανισμός (π.χ. σε ECM - Electrochemical Machining χρησιμοποιείται ηλεκτροχημικός μηχανισμός). Υπάρχει μεγαλύτερος χρόνος ζωής των εργαλείων, χαμηλότερη ποσότητα αποβλήτων και σε γενικά πλαίσια χαμηλά επίπεδα θορύβου. Ωστόσο ο εξοπλισμός έχει ιδιαίτερα υψηλό κόστος και δεν ενδεικνύεται οικονομικά για κατεργασία οποιουδήποτε υλικού. Επιπλέον η οργάνωση της παραγωγής είναι πολυπλοκότερη και απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό. Όπως είναι λογικό η εξέλιξη από μόνη της ωθεί την επιστήμη αλλά και την τεχνολογία των υλικών να εξελιχθεί και να αναβαθμιστεί και αυτή, κάτι που συμβαίνει από τα πανάρχαια χρόνια, ωστόσο πάντα κάθε βήμα εξέλιξης περιέχει τόσο αρνητικά όσο και θετικά στοιχεία που η σύγχρονη βιομηχανία προσπαθεί να αξιοποιήσει.

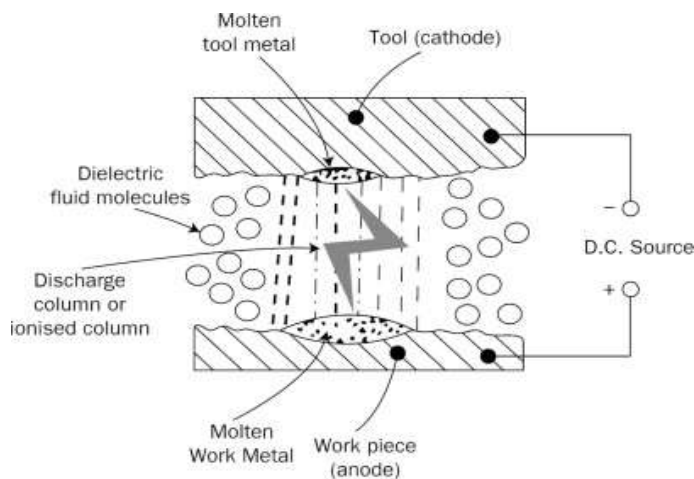


Εικόνα 1: Μη συμβατικές Κατεργασίες [1].

## Κεφάλαιο Πρώτο

### 1. Ηλεκτροδιάβρωση (EDM)

Η κατεργασία της Ηλεκτροδιάβρωσης (EDM – Electrical Discharge Machining) αποτελεί μία από τις παλαιότερες μη συμβατικές κατεργασίες, μάλιστα ιστορικά οι πρώτες αναφορές για διάβρωση του μετάλλου συνέβησαν τον 17<sup>ο</sup> αιώνα αρχικά από τον Benjamin Franklin (φαινόμενο διάβρωσης του μετάλλου με την ύπαρξη σπινθήρα) και στη συνέχεια από τον Joseph Priestly (διαβρωτική λειτουργία λόγω ηλεκτρικής εκκένωσης). Στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα οι Dr. B.R. Lazarenko και N.I. Lazarenko καθιέρωσαν την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης ως μέθοδο αποβολής υλικού μέσω ελεγχόμενων ηλεκτρικών εκκενώσεων [2] [3]. Αρχικά οι καθηγητές Lazarenko κατασκεύασαν έναν πρότυπο απλό μηχανισμό (servo-controller) όπου το διάκενο ανάμεσα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και το εργαλείο παρέμεναν σταθερο. Στη



Εικόνα 2: Αρχή λειτουργίας της EDM [2].

συνέχεια βέβαια με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και μεθόδων η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης συνεχώς εξελισσόταν ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Το βασικό πλεονέκτημα της κατεργασίας EDM είναι η δυνατότητα κατεργασίας υλικών (και ιδιαίτερα αγώγιμων υλικών) ανεξάρτητα από την σκληρότητα, την αντοχή και άλλες μηχανικές ιδιότητες. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής τεμαχίων με πολύπλοκη γεωμετρία, διαστασιακή ακρίβεια και ποιότητα επιφανείας. Η μη συμβατική μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται εκτός του τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, στην αεροδιαστημική, την βιοιατρική ακόμα και στο πεδίο των μικρο-ηλεκτρονικών. Οι κύριες παραλλαγές της EDM είναι η ηλεκτροδιάβρωση αποτυπώσης (die sinking EDM), η ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire EDM) και η ηλεκτροδιάβρωση φρεζαρίσματος (milling EDM). Με την τελευταία έχουμε τη δυνατότητα κατασκευής τρισδιάστατων γεωμετριών (3D shapes).

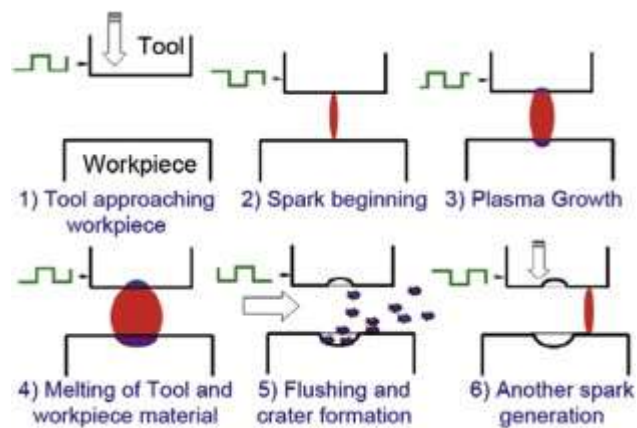
συνέχεια βέβαια με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και μεθόδων η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης συνεχώς εξελισσόταν ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Το βασικό πλεονέκτημα της κατεργασίας EDM είναι η δυνατότητα κατεργασίας

### 1.1. Αρχές λειτουργίας της Ηλεκτροδιάβρωσης

Η EDM χρησιμοποιεί τις ίδιες βασικές αρχές λειτουργίας τόσο στη παραλλαγή die sinking EDM όσο και στη wire EDM. Οι κύριες διαφορές βασίζονται σε κάποιες παράμετρος της κατεργασίας αλλά και στη διάταξη του μηχανισμού. Το κύριο σκεπτικό της κατεργασίας είναι ότι απομακρύνουμε υλικό από ένα ηλεκτρικά αγώγιμο τεμάχιο εργασίας με τη χρήση επαναλαμβανόμενων και σύντομων ηλεκτρικών εκκενώσεων ενώ σημαντική είναι και η παρουσία διηλεκτρικού υγρού μέσου. Κατά την εξέλιξη της διαδικασίας εφαρμόζεται μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο εργασίας και ταυτόχρονα το διάκενο ανάμεσά τους είναι καθορισμένο κατά την προετοιμασία της κατεργασίας. Στη συνέχεια το ηλεκτρόδιο πλησιάζει το τεμάχιο εργασίας, παρουσία πάντα του διηλεκτρικού μέσου (νερό ή κάποιο έλαιο που έχει τη λειτουργία του μονωτή αλλά και του ψυκτικού μέσου) και δημιουργείται μία έντονη ηλεκτρομαγνητική ροή. Στο σημείο που ελαχιστοποιείται η απόσταση από το τεμάχιο εργασίας

με το ηλεκτρόδιο έχουμε τη μέγιστη ισχύ του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που υπολογίζεται περίπου από  $10^{11}$   $W/m^2$  έως  $10^{14}$   $W/m^2$  [4]. Καθώς το έντονο ηλεκτρικό πεδίο επιδρά, ξεκινάει η διάσπαση της διηλεκτρικής σταθεράς του μέσου που παρεμβάλλεται με αποτέλεσμα



Εικόνα 3: Μηχανισμός λειτουργίας EDM [2].

να δημιουργείται ένας ηλεκτρικός σπινθήρας (single spark to be discharge). Ο σπινθήρας αυτός εμφανίζεται στο μικρό διάκενο που έχουμε προσαρμόσει στην αρχή της διαδικασίας ανάμεσα στο τεμάχιο εργασίας και το ηλεκτρόδιο (spark gap). Σε συνάρτηση με τις συνθήκες ψύξης το εύρος των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται είναι από  $6000^{\circ} C$  έως  $12000^{\circ} C$  με τελικό αποτέλεσμα το υλικό να τήκεται και να εξαχνώνεται σχηματίζοντας ένα κρατήρα. Επιπλέον να αναφέρουμε ότι το ψυκτικό μεσο πέραν την λειτουργίας της ψύξης συμπαρασύρει το υλικό που έχει τηχθεί από το τεμάχιο εργασίας. Κατά την εξέλιξη την κατεργασίας ο κύκλος αυτός που αναφέραμε και παρουσιάζεται στην Εικόνα 3, επαναλαμβάνεται πολλές φορές ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Η ένταση του ρεύματος υπολογίζεται από την διαφορά δυναμικού και την αντίσταση του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα προσδιορίζεται η ενέργεια του σπινθήρα και κατ'



επέκταση και το μέγεθος του διάκενου. Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο έχουμε σπινθήρα (δηλαδή ηλεκτρικό ρεύμα) ονομάζεται διάρκεια παλμού και συμβολίζεται με  $T_{on}$  (pulse duration) και ο χρόνος χωρίς σπινθήρα ή αλλιώς ή αλλιώς μεσοδιάστημα συμβολίζεται  $T_{off}$  (pulse interval) και αποκαθιστά τις συνθήκες στο διάκενο ώστε ένας νέος κύκλος να ξεκινήσει και να επαναληφθεί η διαδικασία. Όπως αντιλαμβανόμαστε αποβάλλεται υλικό λόγω του σπινθήρα το οποίο στερεοποιείται σε μικροσκοπικά σφαιρίδια τα οποία απομακρύνονται διαμέσου του διηλεκτρικού μέσου. Ο όγκος του υλικού που απομακρύνεται σε κάθε κύκλο είναι της τάξης των  $10^{-6} - 10^{-4} \text{ mm}^3$  δίνοντας μας έτσι μία εικόνα ότι επιτυγχάνεται υψηλό επίπεδο ακρίβειας μέσω της κατεργασίας EDM.



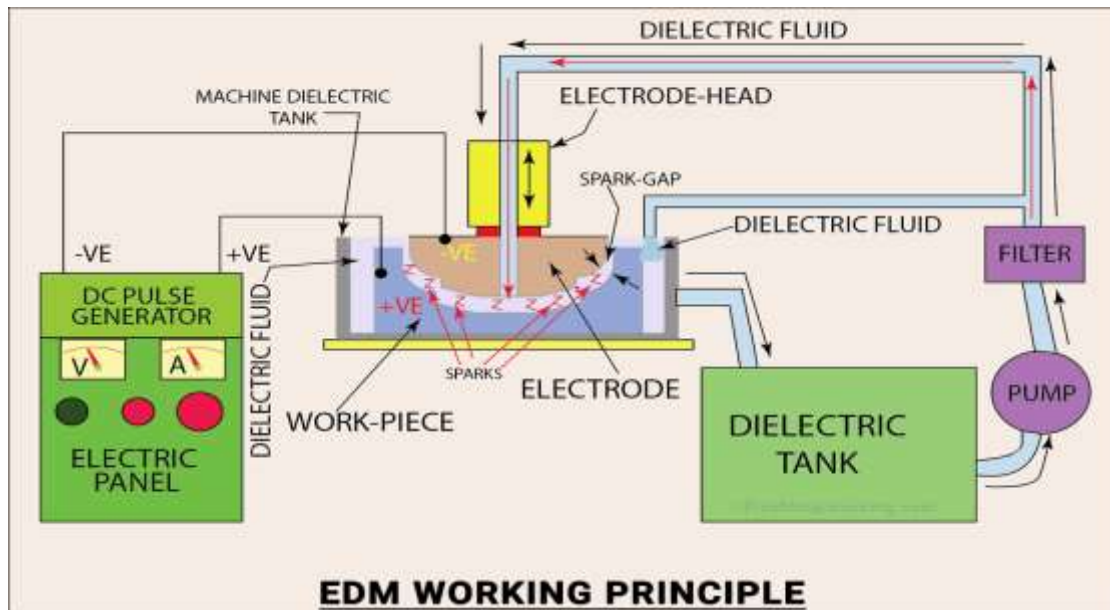
Εικόνα 4: Die sinking EDM machine.

## 1.2.Βασικά μέρη – στοιχεία της EDM

Τα βασικά στοιχεία – μέρη που απαρτίζουν την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης είναι τα εξής:

- το προς κατεργασία τεμάχιο εργασίας (workpiece)
- το ηλεκτρόδιο (electrode)
- το διηλεκτρικό μέσο (dielectric fluid)
- η μονάδα ελέγχου (control unit)
- η γεννήτρια ηλεκτρικών παλμών (pulse generator)
- τα δομικά μέρη (structural parts)

- σύστημα έκπλυσης (flushing system)
- πίνακας ελέγχου (control panel)



Εικόνα 5: Βασικά μέρη λειτουργίας της ηλεκτροδιάβρωσης [5].

### 1.2.1. Τεμάχιο (workpiece)

Η ηλεκτροδιάβρωση μας δίνει την δυνατότητα κατεργασίας οποιουδήποτε ηλεκτρικά αγώγιμου υλικού, ανεξάρτητα των υπόλοιπων μηχανικών ιδιοτήτων όπως η σκληρότητα του. Βασική λοιπόν απαίτηση είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω της φύσης της κατεργασίας ως μία θερμοηλεκτρική μέθοδος. Οι θερμικές ιδιότητες του υλικού επηρεάζουν απόλυτα την αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα της κατεργασίας ώστε να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Οι παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν και συναντούνται και στις αντίστοιχες εξισώσεις είναι [6]:

- πυκνότητα [ $\text{kgm}^{-3}$ ]
- θερμοκρασία τήξης [K]
- θερμική αγωγιμότητα [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]
- θερμοκρασία βρασμού [K]
- θερμοχωρητικότητα [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]
- θερμότητα σχηματισμού [ $\text{kJmol}^{-1}$ ]
- συντελεστής θερμικής διαστολής [ $\text{K}^{-1}$ ]
- ηλεκτρική αντίσταση [ $\Omega\text{m}$ ]
- σκληρότητα
- διαστάσεις τεμαχίου

### 1.2.2. Ηλεκτρόδιο (electrode)

Το ηλεκτρόδιο αποτελεί από τις σημαντικότερες παραμέτρους της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης καθώς μία σειρά από κριτήρια και παράγοντες επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Στη συνέχεια θα αναφέρουμε τα σημαντικότερα. Αρχικά κατά τη διάρκεια της ηλεκτροδιάβρωσης έχουμε ταυτόχρονη απομάκρυνση υλικού τόσο από το τεμάχιο εργασίας όσο και από το ηλεκτρόδιο. Συνεπώς γίνεται αντιληπτό ότι προκύπτει η ανάγκη επιλογής υλικών για το ηλεκτρόδιο, υψηλής αντοχής στη φθορά. Τα κύρια κριτήρια που λαμβάνονται υπ'οψιν είναι:

- Υλικό τεμαχίου
- Ρυθμός αποβολής υλικού
- Αντίσταση και αντοχή στη φθορά
- Ποιότητα επιφανείας
- Κόστος κατεργασίας
- Κόστος πρώτων υλών
- Ηλεκτρικές ιδιότητες (ηλεκτρική αντίσταση και αγωγιμότητα)
- Θερμικές ιδιότητες (θερμοκρασία τήξης, βρασμού, θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα)

Βέβαια οι επιθυμητές παράμετροι από ένα υλικό ηλεκτροδίου είναι να έχει υψηλό σημείο τήξης, υψηλή κατεργασιμότητα και χαμηλό κόστος. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες που χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια στην ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης, τα μέταλλα και τα ηλεκτρόδια από γραφίτη. Τα ηλεκτρόδια από γραφίτη πλεονεκτούν στο χαρακτηριστικό ότι έχουν σχετικά χαμηλό ρυθμό φθοράς (wear rate) και χρησιμοποιούνται για κατεργασίες ξεχονδρίσματος σε αντίθεση με τα μεταλλικά ηλεκτρόδια που έχουν υψηλό ρυθμό φθοράς ωστόσο είναι κατάλληλα για κατεργασίες φινιρίσματος.

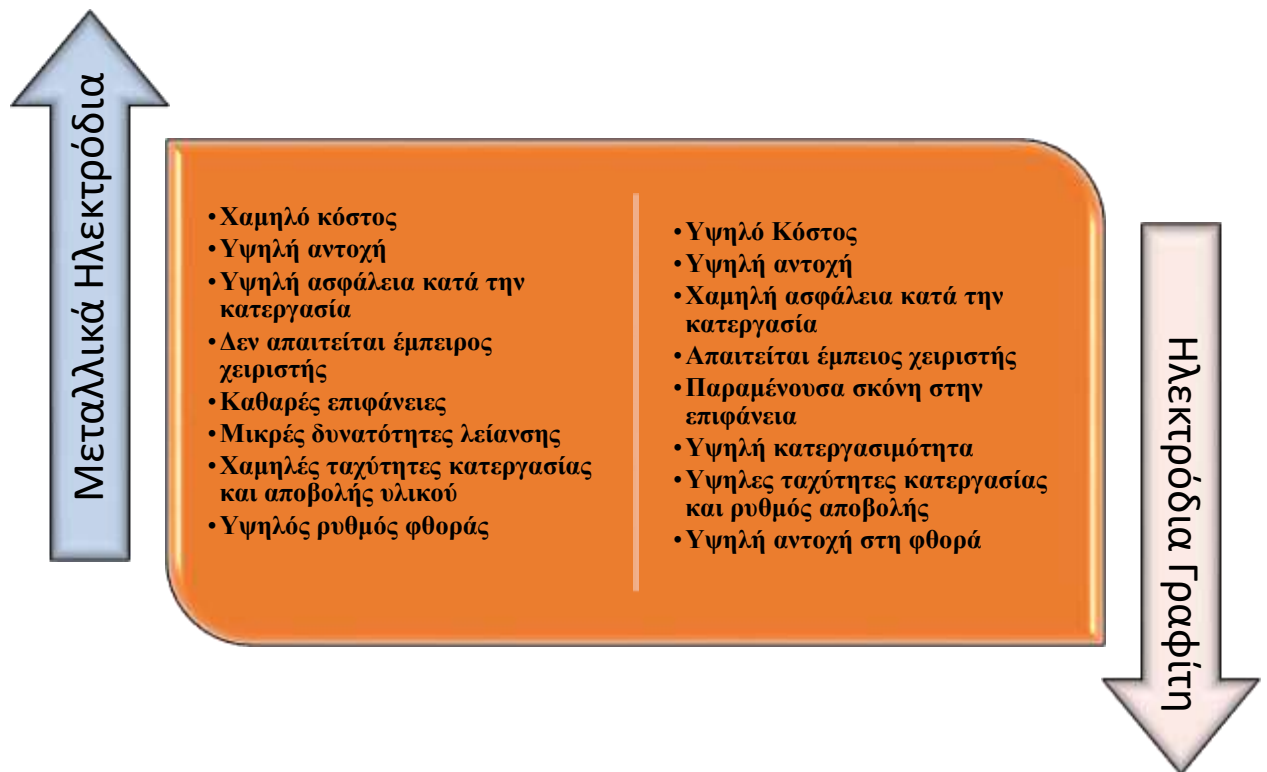
Τα συχνότερα υλικά είναι :

- Ορείχαλκος (brass), διαθέτει ικανοποιητική αντοχή στη φθορά για κατεργασίες χάλυβα αλλά όχι σε κατεργασίες βολφραμίου καθώς έχει υψηλούς ρυθμούς φθοράς. Επιπλέον σε διατάξεις RC παροχής ισχύος δεν συνίσταται.
- Χαλκός (copper), χρησιμοποιείται ιδανικά σε κατεργασίες «μηδενικής φθοράς» όχι όμως σε κατεργασία λειαντικών τροχών με EDM (grinding).

- Χαλκός – Βολφράμιο, συνιθίζεται να είναι σε αναλογίες 70% βολφράμιο και 30% χαλκός με υψηλές αντοχές στη φθορά αλλά ιδιαίτερες δυσκολίες στην κατεργασία του.
- Ψευδάργυρος (zinc), χρησιμοποιούνται αλλά όχι συχνά λόγω της υψηλής φθοράς.
- Άργυρος (silver), χρησιμοποιείται σε EDM υψηλής ακρίβειας, ωστόσο το κόστος τους είναι μεγαλύτερο από τους άλλους τύπους ηλεκτροδίων με πολύ καλή αγωγιμότητα αλλά υψηλή φθορά.
- Διαμάντι (diamond), τα ηλεκτρόδια από διαμάντι χρησιμοποιούνται για πολύ σκληρά υλικά με μεγάλη διάρκεια ζωής και υψηλή αντοχή στη φθορά ωστόσο το κόστος είναι ιδιαίτερα υψηλό.
- Γραφίτης (graphite), υπάρχει διαθέσιμος σε διαφορετικές πυκνότητες οι οποίες εξαρτώνται από την κοκκομετρία που παράγεται, έχει υψηλή αντοχή στη φθορά και υψηλή κατεργασιμότητα. Ένα από τα χαρακτηριστικά του γραφίτη είναι ότι δεν τήκεται αλλά εξαχνώνεται και μάλιστα σε θερμοκρασίες κοντά στις θερμοκρασίες τήξης των καρβιδίων του βολφραμίου συνεπώς δεν χρησιμοποιείται για την κατεργασία τέτοιου είδους υλικών. Επιπλέον δεν χρησιμοποιείται σε διατάξεις RC παροχής ισχύος.
- Χαλκός – Γραφίτης, πρόκειται για υλικό πολύ λεπτής κοκκομετρίας γραφίτη με διαποτισμένο χαλκό δίνοντας έτσι τα χαρακτηριστικά του γραφίτη αλλά την ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού.

Παρακατώ θα δοθούν σε πίνακες κάποιες ενδεικτικές συνθήκες και συγκρίσεις για τυπικά υλικά ηλεκτροδίων.

**Πίνακας 1: Σύγκριση μεταλλικών Ηλεκτροδίων και ηλεκτροδίων γραφίτη.**



**Πίνακας 2: Συνθήκες για βασικά υλικά τεμαχίων εργασίας.**

Τεμάχιο	Ηλεκτρόδιο	Πολικότητα	Συχνότητα για Εσχόνδρισμα	Συχνότητα για Φινίρισμα
Χάλυβας	Γραφίτης	Positive	Χαμηλή	Μεσαία/Υψηλή
Αλουμίνιο	Cu/CuW	Positive	Χαμηλή	Μεσαία/Υψηλή
Χαλκός	Cu/CuW	Negative	Υψηλή	Υψηλή
Τιτάνιο	Cu/CuW	Negative	Υψηλή	Υψηλή
Καρβίδια	Cu/CuW	Negative	Υψηλή	Υψηλή
Χαλκός - Βολφράμιο	Cu/CuW	Negative	Υψηλή	Υψηλή

### 1.2.3. Διηλεκτρικό μέσο (dielectric fluid)

Κατά την εξέλιξη της κατεργασίας της ηλεκτροδιάβρωσης γνωρίζουμε ότι το ηλεκτρόδιο αλλά και το τεμάχιο εργασίας είναι ηλεκτρικά αγωγικά υλικά με αποτέλεσμα κατά την εφαρμογή μία διαφοράς δυναμικού θα δημιουργούνταν σπινθήρες. Ωστόσο οι σπινθήρες αυτοί δεν είναι επιθυμητοί και το μέσο απομάκρυνσης τους είναι το διηλεκτρικό μέσο που λειτουργεί ως μονωτής και έχει ως κύριο σκοπό να ελέγχει τους σπινθήρες που πρόκειται να δημιουργηθούν, καθώς αυτοί θα απομάκρυναν υλικό από το τεμάχιο εργασίας μην επιφέροντας τα επιθυμητά αποτελέσματα. Επιπλέον το διηλεκτρικό υγρό λειτουργεί ως ψυκτικό μέσο καθώς τόσο το ηλεκτρόδιο όσο και το τεμάχιο είναι πλήρως βυθισμένα μέσα σε αυτό και ταυτόχρονα απομακρύνονται υπολείμματα ή κατακρημνίσματα που δημιουργούνται κατά την εξέλιξη της διαδικασίας.

Πέραν όμως των λειτουργιών που αναφέραμε το διηλεκτρικό μέσο είναι ένας σημαντικός παράγοντας κατά τον σχεδιασμό της κατεργασίας καθώς επηρεάζει μία σειρά από μεταβλητές. Αρχικά να αναφέρουμε ότι η τάση που εφαρμόζεται είναι τόσο υψηλή που έχει την ικανότητα να προκαλέσει αλλαγή του υγρού από μονωτή σε ηλεκτρικό αγωγό, το σημείο αυτό καλείται σημείο ιονισμού και το βασικό του χαρακτηριστικό είναι ότι η ηλεκτρική ενέργεια (με τη μορφή σπινθήρα) ρέει άκολα μέσω του διηλεκτρικού υγρού που βρίσκεται ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο εργασίας. Επιπλέον ο χρόνος ενεργοποίησης των σπινθήρων αποτελεί σημαντικό στοιχείο κατά τον σχεδιασμό καθώς καθορίζει το χρόνο που θα διαρκέσει η ροή ηλεκτρικής ενέργειας πετυχαίνοντας έτσι το σημείο ιονισμού που αναφέραμε. Αντιλαμβανόμαστε ότι όταν η ηλεκτρική ενέργεια με μορφή σπινθήρα είναι απενεργοποιημένη τότε το διηλεκτρικό μέσο λειτουργεί και πάλι ως μονωτής και το ηλεκτρικό φορτίο σταματά να ρέει. Η συχνότητα αυτής της «επανάληψης» μονωτής – αγωγός είναι της τάξης των 500 KHz [7].

Επιπλέον να αναφέρουμε ότι το ιξώδες του διηλεκτρικού μέσου αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο κατά τον σχεδιασμό την κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης. Όσο χαμηλότερο είναι το ιξώδες τόσο πιο εύκολα ρέει το ρευστό στο διάκενο ηλεκτροδίου – τεμαχίου. Ανάλογα με το αποτέλεσμα που επιθυμούμε και την ακρίβεια στο τεμάχιο εργασίας προσαρμόζουμε και το απαιτούμενο ιξώδες του διηλεκτρικού μέσου, για παράδειγμα χρησιμοποιούμε χαμηλό ιξώδες σε μικρά διάκενα όπου η ένταση του ρεύματος είναι χαμηλή και οι συχνότητες υψηλές με το αποτέλεσμα του τεμαχίου να διακρίνεται για την ακρίβειά του.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι διηλεκτρικού μέσου ωστόσο τα συνηθέστερα είναι απιονισμένο νερό, προιόντα πετρελαίου και κάποια ειδικά υγρά.

- Το απιονισμένο νερό συμπαρασύροντας σωματίδια κατά την κατεργασία μεταβάλλονται οι διηλεκτρικές του ιδιότητες καθώς πολλές φορές καθίστανται αγώγιμο. Η αλλαγή αυτή επηρεάζει το σημείο ιονισμού με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η ίδια η κατεργασία ως προς την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητά της. Η κύρια χρήση του ως διηλεκτρικό μέσο είναι στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος όπου η διαδικασία δεν εκτελείται μέσα στο διηλεκτρικό μέσο αλλά κινείται με μεγάλη ταχύτητα και στη συνέχεια επιστρέφει στο σημείο κοπής.
- Τα προιόντα πετρελαίου μας προσφέρουν τη δυνατότητα ενός ελεγχόμενου περιβάλλοντος γύρω από τον σπινθήρα. Επιπλέον οι χαρακτηριστικές τους ιδιότητες είναι δύσκολο να επηρεαστούν από τα υπολείμματα ενώ ταυτόχρονα κατά την εκδήλωση του σπινθήρα το διηλεκτρικό μέσο πετρελαίου διασπάται σε άνθρακα, υδρογόνο και υποπροιόντα διατηρώντας τις διηλεκτρικές του ιδιότητες.
- Υπάρχουν ειδικά υγρά που χρησιμοποιούνται σε ιδιαίτερες συνθήκες στην κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης με βάση τον εστέρα (ester based fluids – με καλές μονωτικές ιδιότητες και φιλικά προς το περιβάλλον, βιοδιασπώμενα), την σιλικόνη (silicone based – πολυμερή με καλές μονωτικές ιδιότητες και κατάλληλα σε εφαρμογές ιατρικού ενδιαφέροντος), τον φθοράνθρακα (fluorocarbon based – χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με πολύ υψηλές θερμοκρασίες), νανοϋλικά (nanofluid based – έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα και ψύχουν αποτελεσματικά το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο εργασίας.

**Πίνακας 3: Σύγκριση προϊόντων πετρελαίου και απιονισμένου νερού ως διηλεκτρικό μέσο στην κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης.**

Προϊόντα πετρελαίου	Απιονεσμένο νερό
Δεν προκαλεί ζημιά λόγω ηλεκτρόλυσης	Υπάρχει το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης με τις επακόλουθες φθορές
Πιο σκληρές άρα και πιο εύθραυστες επιφάνειες στο τελικό τεμάχιο	Οι επιφάνειες είναι λιγότερο σκληρές και εύθραυστες
Περιορισμένη ταχύτητα κοπής	Υψηλότερες ταχύτητες κοπής
Καλύτερη ποιότητα επιφανείας	Τραχείες επιφάνειες
Το ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται ως θετικός πόλος με χρήση ελαίου ως διηλεκτρικό μέσο	Το ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται ως αρνητικός πόλος με χρήση νερού ως διηλεκτρικό μέσο
Χαμηλότερη φθορά ηλεκτροδίου	Έντονη φθορά ηλεκτροδίου
Χαμηλότερο λειτουργικό κόστος	Υψηλό λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης

Το διηλεκτρικό μέσο απαριθμεί μία σειρά από λειτουργίες με τια σημαντικότερες να αναλύονται παρακάτω:

- Μόνωση (insulation). Ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο εργασίας το διηλεκτρικό μέσο λειτουργεί ως μονωτής εμποδίζοντας τη ροή του ηλεκτρικού



ρεύματος έως το σημείο ιονισμού όπου η κατάσταση μεταβάλλεται σε αγωγός, στο σημείο αυτό δημιουργείται ο σπινθήρας.

- Ψύξη (cooling). Ο σπινθήρας που προκαλείται ταυτόχρονα δημιουργεί μία ροή θερμότητας στην περιοχή ανάμεσα στο τεμάχιο εργασίας και το ηλεκτρόδιο. Το διηλεκτρικό μέσο που περιβάλλει όλη αυτή τη διαδικασία συμβάλει στην απομάκρυνση – απορρόφηση της παραγόμενης θερμότητας. Επιπλέον όπως αναφέραμε και αρχικά στο κεφάλαιο κατά την εξέλιξη του φαινομένου λαμβάνει χώρα και η εξάχνωση των υλικών του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα «σύννεφο» εξάχνωμένου υλικού. Το διηλεκτρικό μέσο ψύχει το «σύννεφο» αυτό και στερεοποιεί του ατμούς. Είναι λογικό λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται να απαιτείται η ψύξη του διηλεκτρικού μέσου κατά την εξέλιξη της κατεργασίας.
- Έκπλυση (flushing). Το διηλεκτρικό μέσο χρησιμοποιείται για να απομάκρυνση των αποβλήτων που δημιουργούνται στην περιοχή του σπινθήρα. Σημαντική παράμετρος είναι ο ρυθμός απομάκρυνσης των αποβλήτων που το επιθυμητό είναι να είναι ίδιος με το ρυθμό παραγωγής αποβλήτων ώστε να διατηρείται σταθερή η πυκνότητα αποβλήτων στην περιοχή του διάκενου. Είναι σημαντική η απομάκρυνση ώστε να μην εμποδίζεται η διαδικασία την ηλεκτρικής εκκένωσης αλλά και να μην επηρεάζεται η ακρίβεια της κατεργασίας.
- Προστασία (protection). Ορισμένα ειδικά υγρά χρησιμοποιούνται ως διηλεκτρικά υγρά για την προστασία του τεμαχίου εργασίας σε ειδικές συνθήκες, για παράδειγμα σε περιπτώσει κατεργασίας εύγλυκτων υλικών χρησιμοποιούνται ειδικά υγρά (π.χ. fluorocarbon based fluids) για τη μείωση του κινδύνου πυρκαγιάς.

#### **1.2.4. Μονάδα Ελέγχου (control unit)**

Η μονάδα ελέγχου διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης ότι θα είναι αποδοτική και αποτελεσματική. Επιτρέπει στο χειριστή να ελέγχει τις μεταβλητές της διαδικασίας EDM και να κάνει τις απαραίτητες προσαρμογές ώστε να επιτύχει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Συνοπτικά η μονάδα ελέγχου περιλαμβάνει τον έλεγχο της ηλεκτρικής τροφοδοσίας (power supply unit). Το τμήμα αυτό ελέγχει την ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της

ηλεκτρικής εκκένωσης μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου εργασίας καθώς ρυθμίζεται η τάση, το ρεύμα και η διάρκεια του παλμού που επιθυμούμε (voltage, current, pulse). Επιπλέον πραγματοποιείται έλεγχος της κίνησης του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου (electrode and workpiece movement control), διασφαλίζοντας έτσι ότι είναι σωστά τοποθετημένα μεταξύ του τα δύο μέρη και το διάκενο του σπινθήρα έχει την σωστή απόσταση. Ταυτόχρονα υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της ροής του διηλεκτρικού υγρού (dielectric fluid flow control), διασφαλίζοντας έτσι ότι το διάκενο σπινθήρα συνεχώς παραμένει καθαρό και παρεμποδίζεται η μη επιθυμητή ηλεκτρική εκκένωση. Σημαντική είναι η παρακολούθηση της διαδικασίας μέσω της μονάδας ελέγχου (process monitoring) όπου το τμήμα αυτό της μονάδας ελέγχου μας δίνει τη δυνατότητα να παρακολουθείται κάθε παράμετρος κατά την εξέλιξη της κατεργασίας και να πραγματοποιούνται απαραίτητες προσαρμογές ώστε να διασφαλιστεί το αποτέλεσμα. Επιπλέον η μονάδα ελέγχου προσφέρει τη δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων (data storage) κατά το οποίο αποθηκεύονται οι παράμετροι και οι ρυθμίσεις που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία με σκοπό τη δημιουργία αναφορών ανάλυσης της κατεργασίας.

### **1.2.5. Γεννήτρια ηλεκτρικών παλμών (pulse generator)**

Η γεννήτρια ηλεκτρικών παλμών είναι μία συσκευή που παράγει ηλεκτρικούς παλμούς και στο πλαίσιο της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ηλεκτρικών παλμών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της ηλεκτρικής εκκένωσης μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου εργασίας. Περιλαμβάνει μία σειρά από επιμέρους τμήματα με τις δικές τους λειτουργίες:

- Τροφοδοσία (power supply), η πηγή ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των ηλεκτρικών παλμών.
- Κύκλωμα χρονισμού (timing circuit), είναι το κύκλωμα που ελέγχει το χρονισμό των παλμών συμπεριλαμβανομένης της διάρκειας και του ρυθμού επανάληψής τους.
- Κύκλωμα «σκανδάλης» (trigger circuit), έχει ως κύρια λειτουργία την ενεργοποίηση της γεννήτριας με σκοπό τη δημιουργία παλμού όταν λαμβάνει το κατάλληλο σήμα
- Κύκλωμα εξόδου (output circuit), μεταδίδει τους παλμούς που παράγονται στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο εργασίας.

- Κύκλωμα ελέγχου (control circuit), ελέγχει κάθε λειτουργία τη γεννήτριας παλμών όπως για παράδειγμα την παροχή και τα υπόλοιπα κυκλώματα.

Η γεννήτρια παλμών είναι από τα σημαντικότερα τμήματα της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης και παράγει παλμούς με πολύ μικρή διάρκεια της τάξης των microsecond και με υψηλή τάση της τάξης των δεκάδων έως εκατοντάδων volt. Η ηλεκτρική εκκένωση που δημιουργείται μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου διαβρώνει μέρος από το υλικό του τεμαχίου και δημιουργείται έτσι η τελική, επεξεργασμένη επιφάνεια. Υπάρχει η δυνατότητα ρυθμίσεων παραμέτρων (ρυθμός επανάληψης, διάρκεια παλμού) στην γεννήτρια με σκοπό να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

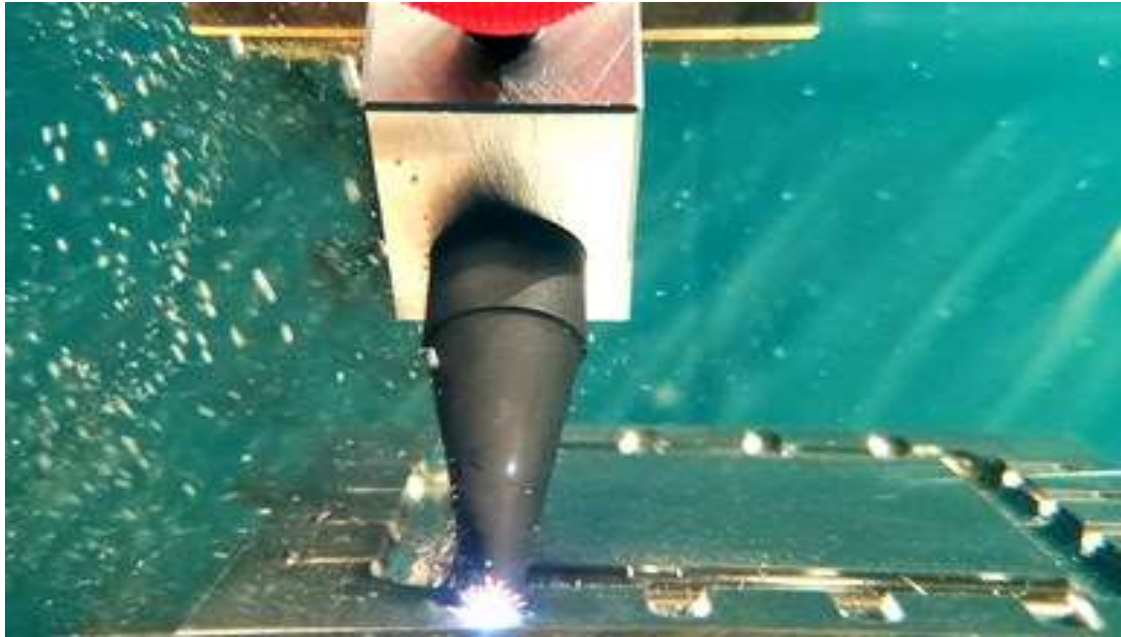
#### **1.2.6. Δομικά μέρη (structural parts)**

Τα δομικά μέρη περιλαμβάνουν το σύνολο των στοιχείων στήριξης και τοποθέτησης για την εξέλιξη της κατεργασίας της ηλεκτροδιάβρωσης. Αρχικά υπάρχει μία βάση (base) με τη μορφή σταθερής πλατφόρμας που αποτελεί τη βάση της μηχανής. Στη συνέχεια υπάρχει ένα κατακόρυφο τμήμα (column) που στηρίζει την τράπεζα και τον άξονα καθώς και την άτρακτο (spindle) που συγκρατεί το ηλεκτρόδιο ενώ στη τράπεζα (table) τοποθετείται το τεμάχιο εργασίας. Επιπλέον τα δομικά μέρη περιλαμβάνουν οδηγούς και ράγες (guides and rails) που χρησιμοποιούνται για την καθοδήγηση και τοποθέτηση του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου εργασίας ώστε να διασφαλιστεί το επιθυμητό διάκενο σπινθήρα. Επιπρόσθετα υπάρχει το δοχείο εργασίας (work tank) όπου εξασφαλίζει τη συνεχή παραμονή του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου εντός του διηλεκτρικού υγρού που συνεχώς ανανεώνεται. Υπάρχουν βέβαια και πιο εξιδεικευμένες μηχανές EDM που διαθέτουν αυτόματο εναλλάκτη εργαλείων όπου αντικαθίσταται γρήγορα και εύκολα το ηλεκτρόδιο (automatic tool changer) και κάποιους ενσωματωμένους ανιχνευτές (probes) που μετρούν μία σειρά από παραμέτρους κατά την εξέλιξη της κατεργασίας δίνοντας έτσι στον χειριστή τη δυνατότητα να παρακολουθεί αλλά και να κάνει επιθυμητές προσαρμογές όπου απαιτείται. Συνοπτικά τα δομικά μέρη πέραν της υποστήριξης και τοποθέτησης του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου ελέγχει και μία σειρά από παράμετρους όπως το διάκενο αλλά δίνει και την δυνατότητα παρεμβάσεων ώστε η κατεργασία να είναι αποτελεσματική και ακριβής.

### 1.2.7. Σύστημα έκπλυσης (flushing system)

Το σύστημα έκπλυσης είναι ένα σύνολο εξαρτημάτων που χρησιμοποιείται στις μηχανές EDM που έχει ως στόχο τόσο την έκπλυση του διηλεκτρικού υγρού πάνω από το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο όσο και στην ψύξη του ηλεκτροδίου και την απομάκρυνση υπολειμμάτων. Περιλαμβάνει τη δεξαμενή υγρού (fluid reservoir) που συγκρατεί το διηλεκτρικό υγρό όπως επίσης και την αντλία (pump) που χρησιμοποιείται για την άντληση του διηλεκτρικού υγρού από τη δεξαμενή στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο. Επιπλέον υπάρχουν φίλτρα (filters) που απομακρύνουν τυχόν σωματίδια που υπάρχουν στο υγρό και μπορεί να αλλάξουν ακόμα και τις ιδιότητές του. Όπως είναι λογικό το σύστημα περιλαμβάνει ακροφύσια ψεκασμού (spray nozzles) που ψεκάζουν το διηλεκτρικό υγρό με συγκεκριμένες παραμέτρους στη περιοχή του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου εργασίας όπως για παράδειγμα οι βαλβίδες ελέγχου ροής (flow control valves) που ελέγχουν την ροή του διηλεκτρικού υγρού στα ακροφύσια. Επιπλέον υπάρχουν πιο εξειδικευμένες μηχανές EDM έχουν επιπρόσθετα σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας του διηλεκτρικού υγρού (temperature control system) που δίνει τη δυνατότητα να διατηρείται η θερμοκρασία του ρευστού εντός ενός συγκεκριμένου επιθυμητού εύρους θερμοκρασιών. Η ακρίβεια της διαδικασίας θα μπορούσαμε να πούμε ότι βασίζεται στο σύστημα έκπλυσης καθώς το διάκενο σπινθήρα πρέπει να διατηρείται πάντοτε καθαρό για να μην παρεμποδίζεται η ηλεκτρική εκκένωση, ταυτόχρονα αποτελεί και ένα μέσο προστασίας από ζημιές του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου κατά την διαδικασία της κατεργασίας.

Ένας σημαντικός παράγοντας της διαδικασίας αποτελεί η πίεση του ρευστού. Σε χαμηλές πιέσεις είναι δύσκολη η απομάκρυνση των στερεών αλλά και των αέριων προϊόντων της διαδικασίας ενώ σε υψηλές πιέσεις επιταχύνεται η φθορά του ηλεκτροδίου και δημιουργούνται ανεπιθύμητοι στροβιλισμοί. Επιπλέον η πίεση του υγρού μπορεί να επηρεάσει τη ποιότητα επιφανείας όπου πιο συγκεκριμένα η ταχύτητα επιφανείας με μεταβολή της πίεσης αρχικά μειώνεται αλλά στη συνέχεια αυξάνεται με κάθε αύξηση της πίεσης έκπλυσης.



Εικόνα 6: Κατεργασία ηλτροδιάβρωσης εντός του διηλεκτρικού υγρού [8].

#### 1.2.8. Πίνακας ελέγχου (control panel)

Ένα ακόμα σημαντικό μέρος μίας μηχανής EDM είναι ο πίνακας ελέγχου που επιτρέπει στο χειριστή να εισάγει παραμέτρους και ρυθμίσεις ώστε να παρακολουθεί την διαδικασία και να κάνει τις απαραίτητες προσαρμογές. Περιλαμβάνει τις συσκευές εισόδου (input devices) που μπορεί να είναι κουμπιά μέχρι οθόνες αφής επιτρέποντας στον χειριστή να εισάγει παραμέτρους και ρυθμίσεις όπως η τάση. Επιπλέον ο πίνακας έχει οθόνες (displays) που εμφανίζουν τις τρέχουσες τιμές των παραμέτρων και των ρυθμίσεων καθώς και πρόσθετες πληροφορίες όπως το διάκενο σπινθήρα, τη ροή του διηλεκτρικού υγρού και άλλα. Υπάρχουν συναγερμοί και ενδείξεις (alarms and indicators) που ενημερώνουν το χειριστή για τυχόν προβλήματα ή σφάλματα προκύπτουν κατά την διαδικασία καθώς και κουμπί έκτακτης ανάγκης (emergency stop button) που δίνει τη δυνατότητα στο χειριστή να σταματήσει τη διαδικασία σε περίπτωση ανάγκης. Τέλος υπάρχει και ο «χώρος» αποθήκευσης δεδομένων (data storage) με σκοπό την αποθήκευση των παραμέτρων και των ρυθμίσεων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία. Πέραν της παρακολούθησης της κατεργασίας και της εισαγωγής των βασικών πριν την κατεργασία ο πίνακας ελέγχου δίνει την δυνατότητα παραμετροποίησης της κατεργασίας σε πραγματικό χρόνο με σκοπό την ακρίβεια του αποτελέσματος.



**Εικόνα 7: Πίνακας ελέγχου EDM [9].**

## Κεφάλαιο Δεύτερο

### 2. Παράμετροι και υλικό κατεργασίας

Υπάρχουν μία σειρά από παράμετροι που καθορίζουν τόσο την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης όσο και το ίδιο το αποτέλεσμα. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρθηκαν κάποιοι από αυτές καθώς περιγράφονταν τα βασικά μέρη μία μηχανής EDM, σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μία σύντομη περιγραφή της κάθε παραμέτρου της ηλεκτροδιάβρωσης. Επιπλέον θα αναφερθούμε στο βασικό υλικό που μελετήθηκε στο πειραματικό στάδιο, που ήταν το αλουμίνιο, ένα μεταλλικό στοιχείο με μοναδικές ιδιότητες και την γενικότερη ικανότητα του να αντιστέκεται στην διάβρωση.

#### 2.1. Παράμετροι κατεργασίας

Υπάρχουν μία σειρά από παραμέτρους που προσαρμόζονται αντίστοιχα σε κάθε κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης, οι παράμετροι αυτές έχουν ως στόχο κάθε φορά να ρυθμίσουν κατάλληλα τις μεταβλητές εκείνες ώστε να υπάρξει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Οι βασικοί παράμετροι που καθορίζουν την κατεργασία είναι:

- Διαφορά δυναμικού
- Ένταση ρεύματος
- Γενικά χαρακτηριστικά παλμού
- Έλεγχος διάκενου
- Πίεση διηλεκτρικού υγρού

Ενώ οι δείκτες αποδοτικότητας της κατεργασίας είναι:

- Ρυθμός αποβολής υλικού
- Λόγος φθοράς ηλεκτροδίου
- Τραχύτητα επιφανείας

##### 2.1.1. Διαφορά Δυναμικού

Ανάμεσα στο τεμάχιο εργασίας και το ηλεκτρόδιο αναπτύσσεται μία διαφορά δυναμικού. Το μέγεθος αυτής της διαφοράς δίνει και διαφορετικά αποτελέσματα, υψηλές τιμές της διαφοράς δυναμικού δίνει την δυνατότητα για μεγαλύτερο διάκενο που διευκολύνει την έκπλυση στην περιοχή αυξάνοντας το ρυθμό αποβολής υλικού ωστόσο το τελικό αποτέλεσμα διακρίνεται σε επιφάνειες με υψηλή τραχύτητα

επιφανείας και φθορά ηλεκτροδίου. Το αντίθετο συμβαίνει εάν μειώσουμε τη διαφορά δυναμικού.

### 2.1.2. Ένταση ρεύματος

Η ένταση ρεύματος αποτελεί το δεύτερο χαρακτηριστικό και διαχωρίζεται σε μέγιστη τιμή ρεύματος (peak current) που είναι υπεύθυνη για τον ιονισμό του διηλεκτρικού μέσου και σε μέση τιμή που αποτελεί το μέσο όρο της έντασης κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Όσο ψηλότερη είναι η μέγιστη τιμή έχει ως επακόλουθο να απελευθερώνει μεγαλύτερο ποσό ενέργειας με αποτέλεσμα ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού να τήνει να αυξάνεται. Για τον υπολογισμό της μέσης έντασης του ρεύματος χρησιμοποιούμε τον τύπο:

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

όπου  $\bar{I}_p$  [A] η μέση ένταση ρεύματος κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

### 2.1.3. Γενικά χαρακτηριστικά παλμού

Στα πλαίσια ανάλυσης των χαρακτηριστικών του παλμού μας ενδιαφέρουν κυρίως τρεις μεταβλητές, η διάρκεια του παλμού ( $T_{on}$ ) το μεσοδιάστημα ( $T_{off}$ ) και η κυματομορφή.

Η διάρκεια ενός παλμού ορίζεται το χρονικό διάστημα που υπάρχει ροή ρεύματος ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο εργασίας, ταυτόχρονα σε αυτό το διάστημα παρατηρείται και αποβολή υλικού. Συνεπώς οι δύο αυτοί παράμετροι πιθανόν συνδέονται ( $T_{on} - MRR$ ). Βέβαια πρέπει να αναφέρουμε ότι υπάρχει πιθανότητα μεγάλης διάρκειας παλμοί να δημιουργούν υψηλή τραχύτητα και όχι τόσο καλή ποιότητα στην κατεργαζόμενη επιφάνεια ενώ για σύντομους παλμούς το αποτέλεσμα είναι σίγουρα καλύτερο.

Το μεσοδιάστημα (pulse interval) αποτελεί το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο παλμών, στη διάρκεια αυτή δεν υπάρχει ροή ρεύματος στην περιοχή του διακένου ωστόσο η διάρκειά του αποτελεί σημαντικό στοιχείο καθώς απομακρύνονται τα υπολλείμματα από την περιοχή της κατεργασίας. Όσο μεγαλύτερη διάρκεια έχει το μεσοδιάστημα τόσο πιο χρονοβόρα καθίστανται η κατεργασία. Αναφορικά, το πηλίκο της διάρκειας παλμού ( $T_{on}$ ) προς το άθροισμα των δύο παραπάνω παραγόντων ( $T_{on} + T_{off}$ ) ορίζεται



ως duty ratio και μας πληροφορεί για το ποσοστό του χρόνου που έχουμε απομάκρυνση υλικού.

Η κυματομορφή της διαφοράς δυναμικού και της έντασης του ρεύματος παρουσιάζουν τη ροή ενέργειας προς το τεμάχιο εργασίας δίνοντας μία ρεαλιστική εικόνα για την μελέτη της κατεργασίας. Υπάρχουν διάφορες περιπτώσεις που αναλύεται η κυματομορφή με αρκετές διαφοροποιήσεις δίνοντας και αντίστοιχα διαφορετικά αποτελέσματα ωστόσο δεν θα αναλυθούν στη συγκεκριμένη εργασία.

#### 2.1.4. Έλεγχος διάκενου

Ο έλεγχος του διακένου έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση του ρυθμού αποβολής υλικού αλλά και την εξασφάλιση της ποιότητας της κατεργασμένης επιφάνειας. Γνωρίζουμε ότι όσο μικρότερο είναι το διάκενο τόσο βέλτιστο είναι το αποτέλεσμα, βέβαια υπάρχει ένα κατώτατο όριο όπου δεν εκδηλώνεται σπινθήρας αλλά δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο που καθιστά την κατεργασία ασταθή. Στη συνέχεια όσο αυξάνεται το διάκενο αφαιρείται περισσότερο υλικό από το ηλεκτρόδιο ενώ μειώνεται ο ρυθμός αποβολής υλικού από το τεμάχιο εργασίας. Σε πολύ μεγάλες τιμές αυξάνεται το ποσοστό των παλμών και δεν δημιουργείται ο σπινθήρας με αποτέλεσμα να μειώνεται εκθετικά ο MRR.

#### 2.1.5. Ρυθμός αποβολής υλικού

Ο όγκος υλικού που απομακρύνεται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ονομάζεται ρυθμός αποβολής υλικού και συμβολίζεται με MRR. Η μονάδα μέτρησης είναι κυβικά χιλιοστά ανά λεπτό ( $mm^3/min$ ) και μπορούμε να την υπολογίζουμε από τη διαφορά βάρους του τεμαχίου πριν και μετά την κατεργασία. Επηρεάζεται από την ένταση του ρεύματος, το χρόνο παλμού και μεσοδιαστήματος, το διάκενο και τις φυσικές ιδιότητες του υλικού. Μπορούμε να υπολογίζουμε το ρυθμό αποβολής από τον παρακάτω τύπο:

$$MRR = \frac{W_{start} - W_{finish}}{\rho * t} \quad (2)$$

Όπου  $\rho$  [ $gr/mm^3$ ] είναι η πυκνότητα υλικού τεμαχίου και  $t$  [min] ο συνολικός χρόνος της κατεργασίας.

### **2.1.6. Λόγος φθοράς ηλεκτροδίου**

Ο λόγος φθοράς ηλεκτροδίου (EWR – Electrode Wear Ratio) ονομάζεται και λόγος φθοράς εργαλείου (TWR – Tool Wear Ratio) και ορίζεται ως ο λόγος του όγκου υλικού που απομακρύνθηκε από το ηλεκτρόδιο προς τον όγκο υλικού που απομακρύνθηκε από το τεμάχιο εργασίας. Εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό (%) και αποτελεί το βασικό τρόπο μέτρησης της φθοράς του ηλεκτροδίου. Όπως είναι κατανοητό όσο χαμηλότερες είναι οι τιμές τόσο αποδοτικότερες, οικονομικότερες και σταθερές είναι οι κατεργασίες.

### **2.1.7. Τραχύτητα επιφανείας**

Η τραχύτητα της επιφάνειας είναι η απόκλιση της επιφάνειας από ένα τέλειο επίπεδο και συνήθως μετρείται σε μικρόμετρα ( $\mu\text{m}$ ) ή μικρο ίντσες ( $\mu\text{in}$ ) και συμβολίζεται με «R», επιπλέον μας ενδιαφέρει ως μεγεθος η μέση τραχύτητα επιφανείας ( $R_a$ ) καθώς και η ελάχιστη ή μέγιστη τιμή της ( $R_z$ ). Στη κατεργασία EDM, η τραχύτητα της επιφάνειας επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος του υλικού που υφίσταται κατεργασία, ο τύπος του διηλεκτρικού ρευστού που χρησιμοποιείται, ο τύπος του ηλεκτροδίου που χρησιμοποιείται, το διάκενο σπινθήρα, ο χρόνος ενεργοποίησης και ο χρόνος απενεργοποίησης παλμού και η πίεση έκπλυσης. Ένα υψηλότερο διάκενο σπινθήρα μπορεί να οδηγήσει σε μία κακής ποιότητας επιφάνεια λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους του κρατήρα εκκένωσης, ενώ ένα μικρότερο διάκενο σπινθήρα θα παράγει μία καλής ποιότητας επιφάνεια. Ομοίως, ένας μεγαλύτερος παλμός στο χρόνο ή μια υψηλότερη πίεση έκπλυσης θα έχει ως αποτέλεσμα ένα πιο τραχύ φινίρισμα της επιφάνειας, ενώ ένας μικρότερος παλμός στο χρόνο ή μια χαμηλότερη πίεση έκπλυσης θα παράγει πιο ομαλό φινίρισμα επιφάνειας. Ο τύπος του ηλεκτροδίου και ο τύπος του διηλεκτρικού ρευστού που χρησιμοποιείται επηρεάζουν επίσης την τραχύτητα της επιφάνειας. Τα σκληρά υλικά παράγουν συνήθως ένα κατώτερης ποιότητας επιφάνεια από τα μαλακά υλικά, ενώ η χρήση ενός ηλεκτροδίου σύρματος θα παράγει ανώτερης ποιότητας επιφάνεια. Ο τύπος του διηλεκτρικού ρευστού που χρησιμοποιείται επηρεάζει επίσης την τραχύτητα της επιφάνειας. Το απιονισμένο νερό παράγει ανώτερης ποιότητας επιφάνεια από το ορυκτέλαιο ενώ το συνθετικό λάδι παράγει πιο λεία επιφάνεια από το ημισυνθετικό λάδι. Η επιθυμητή τραχύτητα επιφάνειας για μια συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από την ίδια την εφαρμογή, για παράδειγμα, ένα φινίρισμα τραχιάς επιφάνειας είναι επιθυμητό για

ορισμένες εφαρμογές όπως γρανάζια, ενώ ένα φινίρισμα λείας επιφάνειας είναι επιθυμητό για άλλες εφαρμογές όπως καλούπια ή μήτρες. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι η τραχύτητα είναι ένα μέγεθος που αξιολογεί το αποτέλεσμα και μία σειρά από παράγοντες το επηρεάζουν. Ρυθμίζοντας κατάλληλα τις μεταβλητές στη EDM μπορούμε να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα

### **2.1.8. Πίεση διηλεκτρικού μέσου**

Η πίεση έκπλυσης στη κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης είναι η πίεση στην οποία το διηλεκτρικό υγρό διοχετεύεται στο διάκενο σπινθήρα. Διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη διαδικασία EDM διασφαλίζοντας ότι το διάκενο σπινθήρα ξεπλένεται συνεχώς με υγρό για να διατηρείται καθαρό και να αποτρέπεται η παρεμπόδιση της ηλεκτρικής εκκένωσης. Μια υψηλότερη πίεση έκπλυσης θα αυξήσει την ταχύτητα του υγρού, η οποία μπορεί να βοηθήσει στην πιο αποτελεσματική απομάκρυνση των υπολειμμάτων. Ωστόσο, μπορεί επίσης να αυξήσει τη φθορά του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου εργασίας. Επηρεάζει επίσης την απαγωγή θερμότητας από το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο εργασίας. Επομένως, η πίεση έκπλυσης πρέπει να ρυθμιστεί σε ένα επίπεδο που να είναι επαρκές για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων αλλά όχι τόσο υψηλό ώστε να προκαλεί υπερβολική φθορά ή να επηρεάζει την απαγωγή θερμότητας. Η πίεση έκπλυσης συνήθως μετριέται σε Pascals (Pa) ή λίβρες ανά τετραγωνική ίντσα (psi). Το συνιστώμενο εύρος πίεσης έκπλυσης για τη διαδικασία EDM ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του διηλεκτρικού ρευστού που χρησιμοποιείται, τον τύπο του υλικού που υποβάλλεται σε κατεργασία και τον σχεδιασμό της μηχανής EDM. Τέλος, η πίεση έκπλυσης επηρεάζεται επίσης από τον ρυθμό ροής του διηλεκτρικού ρευστού, τη γωνία και το σχήμα του ακροφυσίου ψεκασμού και την απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου εργασίας. Όλοι αυτοί οι παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη ρύθμιση της πίεσης έκπλυσης για να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα της κατεργασίας.

## **2.2. Υλικό κατεργασίας**

Στην συγκεκριμένη μελέτη το υλικό που επιλέξαμε να μελετήσουμε με την μέθοδο της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης είναι το αλουμίνιο. Το αλουμίνιο (aluminum) είναι ένα χημικό στοιχείο με το σύμβολο Al και τον ατομικό αριθμό 13. Είναι ένα ασημί-λευκό, μαλακό, μη μαγνητικό και όλκιμο μέταλλο στην ομάδα του βορίου. Το

αλουμίνιο είναι το τρίτο πιο άφθονο στοιχείο (μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο) και το πιο άφθονο μέταλλο στον φλοιό της Γης. Βρίσκεται σε διάφορες μορφές σε πολλά ορυκτά, όπως ο βωξίτης και ο κρυόλιθος. Το αλουμίνιο έχει μια ποικιλία χαρακτηριστικών που το καθιστούν χρήσιμο σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Είναι ελαφρύ, με καλές μηχανικές ιδιότητες, ανθεκτικό, με χαμηλή πυκνότητα και υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος. Είναι επίσης μη τοξικό, μη σπινθηροβόλο και μη μαγνητικό, γεγονός που το καθιστά χρήσιμο σε εφαρμογές όπου απαιτούνται αυτές οι ιδιότητες. Επιπλέον, είναι καλός αγωγός θερμότητας και ηλεκτρισμού, γεγονός που το καθιστά χρήσιμο σε ηλεκτρικές εφαρμογές.



**Εικόνα 8: Διάφορα σχήματα και τύποι αλουμινίου.**

Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα προϊόντων, από καθημερινά είδη οικιακής χρήσης, όπως κουτιά και αλουμινόχαρτα έως πιο προηγμένες εφαρμογές όπως εξαρτήματα αεροσκαφών και διαστημικών σκαφών, αυτοκίνητα και ηλεκτρονικά είδη. Χρησιμοποιείται επίσης στον κατασκευαστικό τομέα, ιδιαίτερα με τη μορφή κραμάτων αλουμινίου, τα οποία είναι συνδυασμοί αλουμινίου με άλλα μέταλλα. Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται επίσης στην κατασκευή προϊόντων όπως κουφώματα παραθύρων, κουφώματα θυρών, σύρμα και άλλα είδη οικοδομικών υλικών. Επιπλέον χρησιμοποιείται στην παραγωγή οξειδίου του αλουμινίου, το οποίο εμφανίζεται στην κατασκευή λειαντικών, κεραμικών και πυρίμαχων υλικών.

Το αλουμίνιο είναι επίσης ένα σημαντικό υλικό για την κατασκευή ηλιακών συλλεκτών, ανεμογεννητριών και ηλεκτρικών οχημάτων. Η ανακύκλωση του αλουμινίου είναι μια σημαντική πτυχή της παραγωγής και χρήσης του, είναι ένα απείρως ανακυκλώσιμο υλικό, μπορεί να ανακυκλωθεί επανειλημμένα χωρίς καμία απώλεια ποιότητας.

### **2.2.1. Aluminum 7075**

Το αλουμίνιο 7075 είναι ένα κράμα αλουμινίου που είναι γνωστό για την υψηλή αντοχή και τις εξαιρετικές μηχανικές του ιδιότητες. Αποτελείται κυρίως από αλουμίνιο (90-97%), ψευδάργυρο (5-6%) και μικρές ποσότητες άλλων στοιχείων όπως χαλκό, μαγνήσιο και χρώμιο. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του αλουμινίου 7075 είναι η υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος. Θεωρείται ένα από τα ισχυρότερα κράματα αλουμινίου που υπάρχουν, με αντοχή (όριο) διαρροής έως 83.000 psi και αντοχή εφελκυσμού έως 73.000 psi. Αυτή η υψηλή αντοχή το καθιστά χρήσιμο σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που απαιτούν υψηλή αντοχή και χαμηλό βάρος, όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η αμυντική βιομηχανία. Το αλουμίνιο 7075 είναι επίσης γνωστό για την εξαιρετική του αντοχή στην κόπωση γεγονός που καθιστά εύκολη την κατεργασία του και με τη χρήση συμβατικών μεθόδων. Το αλουμίνιο 7075 χρησιμοποιείται συνήθως στην αεροδιαστημική βιομηχανία για εξαρτήματα όπως δομές πτερυγίων και ατράκτων, καθώς και στην αυτοκινητοβιομηχανία για εξαρτήματα υψηλής καταπόνησης, όπως γρανάζια και άξονες. Έχει επίσης καλή αντοχή στη διάβρωση, αλλά όχι τόσο καλή όσο άλλα κράματα όπως το 6061. Πρέπει να σημειωθεί ότι το κράμα αλουμινίου 7075 δεν είναι κατάλληλο για συγκόλληση, καθώς έχει κακή συγκολλησιμότητα, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε ψευδάργυρο [10].

Το αλουμίνιο 7075 είναι ένα κράμα που είναι γνωστό για τις εξαιρετικές μηχανικές του ιδιότητες, που το καθιστά κατάλληλο για υλικό που θα κατεργαστεί με EDM. Η διαδικασία EDM επιτρέπει τη μηχανική κατεργασία πολύπλοκων σχημάτων και γεωμετριών με υψηλή ακρίβεια, κάτι που είναι σημαντικό για την αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία και την αμυντική βιομηχανία, όπου χρησιμοποιείται συνήθως κράμα αλουμινίου 7075. Επιπλέον, το κράμα αλουμινίου 7075 έχει υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, πράγμα που σημαίνει ότι είναι πολύ καλός αγωγός του ηλεκτρισμού,

αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκαλεί μεγαλύτερη διάβρωση στο ηλεκτρόδιο, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερη διάρκεια ζωής του ηλεκτροδίου και πάλι σε υψηλότερο κόστος.

Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι τι κράμα αλουμινίου 7075 μπορεί να είναι κατάλληλο υλικό για τη διεργασία EDM, έχει ορισμένους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη στη φάση του σχεδιασμού (όπως η χρήση ενός συγκεκριμένου τύπου διηλεκτρικού ρευστού ή η προσαρμογή των ρυθμίσεων τάσης και ρεύματος).

### **2.2.2. Παράμετροι και περιορισμοί του αλουμινίου 7075**

Το αλουμίνιο 7075 είναι ένα κράμα που είναι γνωστό για την υψηλή αντοχή και τις εξαιρετικές μηχανικές του ιδιότητες, αλλά έχει επίσης ορισμένους συγκεκριμένους περιορισμούς που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη χρήση του στη διαδικασία ηλεκτροδιάβρωσης (EDM).

- **Κακή συγκολλησιμότητα:** Λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε ψευδάργυρο, το κράμα αλουμινίου 7075 έχει κακή συγκολλησιμότητα. Δεν είναι κατάλληλο για συγκόλληση και δεν συνιστάται η χρήση αυτού του κράματος σε εφαρμογές όπου απαιτείται συγκόλληση.
- **Υψηλή θερμική αγωγιμότητα:** Το κράμα αλουμινίου 7075 έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, που σημαίνει ότι διαχέει τη θερμότητα γρήγορα.
- **Υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα:** Το κράμα αλουμινίου 7075 έχει επίσης υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, πράγμα που σημαίνει ότι είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού. Αυτό μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερη διάβρωση στο ηλεκτρόδιο, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερη διάρκεια ζωής του ηλεκτροδίου και υψηλότερο κόστος της διαδικασίας EDM.
- **Πολύπλοκες γεωμετρίες:** Η γεωμετρία του τεμαχίου κατεργασίας παίζει επίσης ρόλο στη συμπεριφορά του αλουμινίου 7075 στη διαδικασία EDM. Οι σύνθετες γεωμετρίες και οι βαθιές κοιλότητες μπορεί να είναι δύσκολο να επεξεργαστούν με χρήση EDM, καθώς μπορούν να προκαλέσουν ανομοιόμορφη κατανομή της ηλεκτρικής εκκένωσης και να οδηγήσουν σε κακό φινίρισμα της επιφάνειας.
- **Υψηλό κόστος:** Λόγω της υψηλής αντοχής του, το κράμα αλουμινίου 7075 είναι πιο ακριβό από άλλα κράματα αλουμινίου, γεγονός που μπορεί να το κάνει λιγότερο οικονομικό για την πλειοψηφία των εφαρμογών

- Υψηλή ευαισθησία στη θερμότητα: Το κράμα αλουμινίου 7075 είναι ευαίσθητο στη θερμότητα, αυτό σημαίνει ότι η υπερβολική θερμότητα που παράγεται κατά τη διαδικασία EDM μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση ή ρωγμές στο τεμάχιο εργασίας.

Αντιλαμβανόμαστε ότι μία σειρά από μεταβλητές των χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου κράματος αλουμινίου επηρεάζουν τη διαδικασία της ηλεκτροδιάβρωσης ωστόσο οι κύριες εφαρμογές του υλικού (αεροδιαστημική, αμυντική βιομηχανία) είναι από μόνες τους απαιτητικές και κοστοβόρες σε σχέση με τις καθημερινές χρήσεις.

## Κεφάλαιο Τρίτο

### 3. State of the art

Η εξέλιξη στην τεχνολογία της ηλεκτροδιάβρωσης (EDM) εξελίσσεται διαρκώς και σημειώνονται πρόοδοι σε πολλούς τομείς. Θα αναφέρουμε αρχικά επιγραμματικά μερικούς από τους βασικούς τομείς προόδου και στην συνέχεια θα γίνει μία μεγαλύτερη ανάλυση σε κάποιους από αυτούς. Η εξέλιξη περιλαμβάνει:

- Σχεδιασμό μηχανών. Οι μηχανές EDM γίνονται πιο στιβαρές και αποτελεσματικές, με βελτιωμένη ακρίβεια. Νέα μηχανήματα αναπτύσσονται για να παρέχουν ταχύτερη και ακριβέστερη κατεργασία, με χαρακτηριστικά όπως γεννήτριες υψηλότερης ισχύος, προηγμένα συστήματα ελέγχου και βελτιωμένα συστήματα ψύξης [11].
- Νέες πηγές ενέργειας. Πηγές ενέργειας, όπως γεννήτριες υψηλής συχνότητας και γεννήτριες micro EDM αναπτύσσονται για τη βελτίωση της απόδοσης και της ακρίβειας της διαδικασίας EDM. Αυτές οι πηγές ενέργειας παρέχουν υψηλότερες πυκνότητες ισχύος και βελτιωμένο έλεγχο της ηλεκτρικής εκφόρτισης, με αποτέλεσμα βελτιωμένο φινίρισμα της επιφάνειας και μειωμένη φθορά των ηλεκτροδίων [12], [13].
- Συστήματα ελέγχου. Αναπτύσσονται προηγμένα συστήματα ελέγχου για τη βελτίωση της ακρίβειας της διαδικασίας EDM. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν αισθητήρες, βρόχους ανάδρασης και προηγμένους αλγόριθμους για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της διαδικασίας κατεργασίας σε πραγματικό χρόνο, γεγονός που επιτρέπει πιο ακριβή και συνεπή αποτελέσματα κατεργασίας [14], [15].
- Ηλεκτρόδια. Νέα υλικά και σχέδια ηλεκτροδίων αναπτύσσονται για τη βελτίωση της ακρίβειας και του χρόνου ζωής των ηλεκτροδίων EDM. Αυτά τα ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένα από υλικά όπως ο χαλκός, ο γραφίτης και το διαμάντι, τα οποία παρέχουν βελτιωμένη αντοχή στη φθορά και καλύτερη θερμική αγωγιμότητα [16], [17], [18].
- Διηλεκτρικά μέσα. Νέα διηλεκτρικά υγρά αναπτύσσονται για τη βελτίωση της ψύξης και της έκπλυσης της διαδικασίας EDM. Αυτά τα υγρά έχουν καλύτερες θερμικές ιδιότητες και υψηλότερη διηλεκτρική αντοχή, γεγονός που έχει ως



αποτέλεσμα βελτιωμένη ταχύτητα κατεργασίας και φινίρισμα επιφάνειας [19], [20].

- Αυτοματισμός. Ο αυτοματισμός και τα ρομποτικά συστήματα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας EDM, η οποία επιτρέπει ταχύτερη και ακριβέστερη μηχανική κατεργασία. Αυτό επιτρέπει επίσης μεγαλύτερη ευελιξία και βελτιωμένη απόδοση στην παραγωγή [21].
- Μη συμβατικές τεχνικές. Διαφορετικές τεχνικές όπως wire - EDM και micro-EDM, οι οποίες επιτρέπουν την κατεργασία σκληρών υλικών, λεπτών χαρακτηριστικών και μικροδομών [22], [23].
- Τεχνητή Νοημοσύνη. Εφαρμόζεται στην ηλεκτροδιάβρωση για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων κατεργασίας και την πρόβλεψη της φθοράς του εργαλείου, καθώς και για τη βελτίωση του φινιρίσματος της επιφάνειας και τη μείωση του χρόνου κατεργασίας [24], [25].

### **3.1. Το ηλεκτρόδιο ως μέσο για το βέλτιστο αποτέλεσμα**

Το ηλεκτρόδιο όπως αναφέραμε και νωρίτερα είναι ένα κρίσιμο στοιχείο στη διαδικασία της ηλεκτροδιάβρωσης (EDM), καθώς είναι το εργαλείο που παρέχει την ηλεκτρική εκκένωση στο τεμάχιο εργασίας. Η επιλογή του υλικού και του σχεδιασμού του ηλεκτροδίου μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ακρίβεια, την απόδοση και το κόστος της διαδικασίας EDM. Η χρήση του σωστού υλικού ηλεκτροδίων είναι απαραίτητη για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων στο EDM. Τα πιο κοινά υλικά ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται στο EDM είναι ο χαλκός, ο γραφίτης και το καρβίδιο του βολφραμίου. Ο χαλκός είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό λόγω της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της θερμικής του αγωγιμότητας, που έχει ως αποτέλεσμα βελτιωμένη ταχύτητα κατεργασίας και φινίρισμα επιφάνειας. Ο γραφίτης χρησιμοποιείται επίσης συνήθως ως υλικό ηλεκτροδίων λόγω του χαμηλού κόστους και της καλής μηχανικής του ικανότητας. Το καρβίδιο βολφραμίου χρησιμοποιείται για την κατεργασία σκληρών υλικών λόγω της υψηλής αντοχής του στη φθορά.

Ο σχεδιασμός του ηλεκτροδίου παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στη διαδικασία EDM. Το σχήμα και το μέγεθος του ηλεκτροδίου επηρεάζουν την ακρίβεια και το φινίρισμα της επιφάνειας του κατεργασμένου εξαρτήματος. Η χρήση ηλεκτροδίων ακριβείας

μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη ακρίβεια και φινίρισμα επιφάνειας του κατεργασμένου εξαρτήματος.

Επιπλέον, η χρήση πολλαπλών ηλεκτροδίων μπορεί να αυξήσει την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας EDM, αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως Multi-Electrode EDM (ME-EDM) και χρησιμοποιείται στην παραγωγή μικροχαρακτηριστικών και μικροδομών όπως τα χειρουργικά εργαλεία.

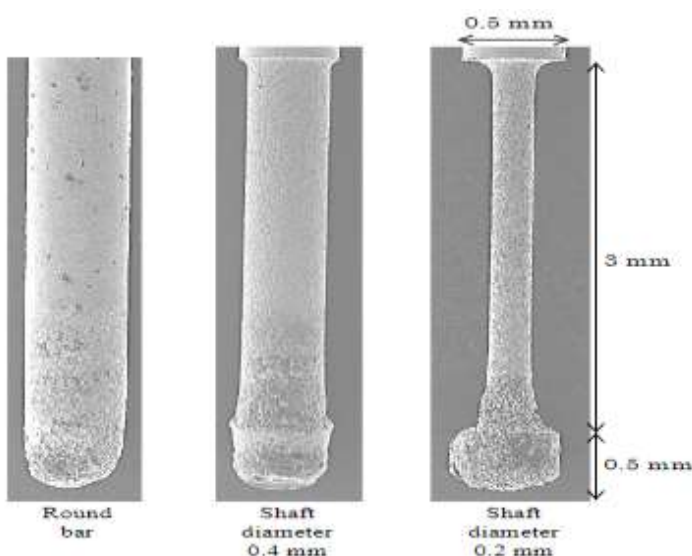
Ο σχεδιασμός του ηλεκτροδίου διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης, καθώς επηρεάζει την ακρίβεια και το φινίρισμα της επιφάνειας του κατεργασμένου εξαρτήματος. Το σχήμα, το μέγεθος και το υλικό του ηλεκτροδίου θα πρέπει να λαμβάνονται προσεκτικά υπόψη κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή του τεμαχίου εργασίας.

- **Σχήμα.** Το σχήμα του ηλεκτροδίου είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στο EDM. Το σχήμα του ηλεκτροδίου πρέπει να είναι σχεδιασμένο ώστε να ταιριάζει με το σχήμα του τεμαχίου εργασίας. Τα πιο κοινά σχήματα που χρησιμοποιούνται για τα ηλεκτρόδια είναι κυλινδρικά, ορθογώνια και κωνικά. Τα κυλινδρικά ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατεργασία κυλινδρικών εξαρτημάτων, τα ορθογώνια ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για την κατεργασία επίπεδων επιφανειών και τα κωνικά ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για την κατεργασία κωνικών επιφανειών.
- **Ανοχή.** Η ανοχή του ηλεκτροδίου είναι επίσης σημαντική. Το ηλεκτρόδιο πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις τελικές διαστάσεις του τεμαχίου εργασίας, ώστε να ελαχιστοποιείται η ποσότητα του υλικού που πρέπει να αφαιρεθεί σε κάποια πιθανή επόμενη κατεργασία.
- **Σύσταση.** Το υλικό του ηλεκτροδίου είναι επίσης σημαντικό. Το υλικό του ηλεκτροδίου πρέπει να έχει καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, υψηλή αντοχή στη φθορά και καλή μηχανική ικανότητα.
- **Φινίρισμα επιφάνειας:** Το φινίρισμα της επιφάνειας του ηλεκτροδίου είναι επίσης σημαντικός παράγοντας στο EDM. Το ηλεκτρόδιο θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο ώστε να έχει λεία επιφάνεια με σκοπό να επιτυγχάνεται το βέλτιστο αποτέλεσμα.
- **Multi-Electrode:** Η χρήση πολλαπλών ηλεκτροδίων μπορεί να αυξήσει την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας EDM, αυτή η τεχνική

είναι γνωστή ως Multi-Electrode EDM (ME-EDM) και χρησιμοποιείται στην παραγωγή μικρο-χαρακτηριστικών και μικρο-δομών.

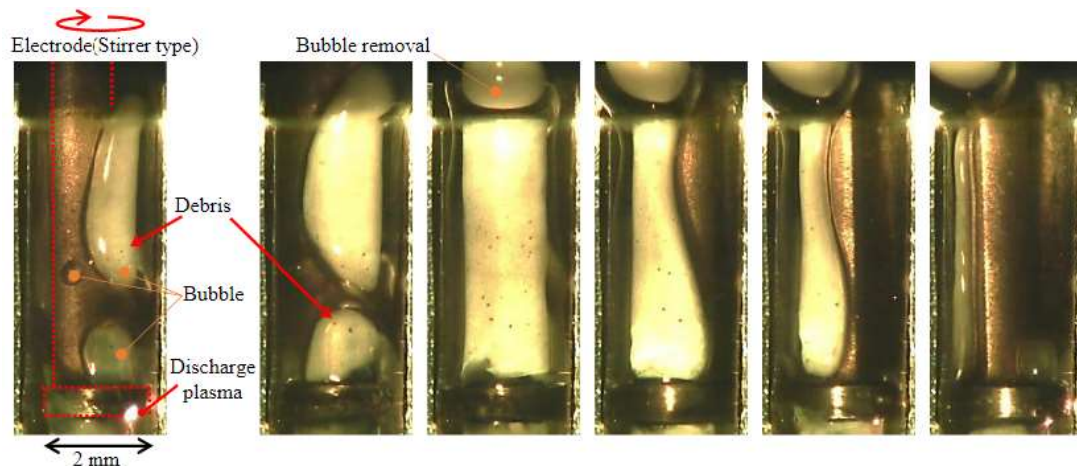
### 3.1.1. Σχήμα ηλεκτροδίου

Μέσα από πειραματικές διαδικασίες έχουμε την δυνατότητα να καταλήξουμε σε συμπεράσματα για την συμπεριφορά των ηλεκτροδίων τόσο αλλάζοντας το σχήμα του ηλεκτροδίου όσο και των άλλων παραμέτρων που αναφέραμε με σκοπό να συσχετίσουμε το τεμάχιο εργασίας με τις κατάλληλες παραμέτρους του ηλεκτροδίου. Για παράδειγμα σε πειραματική διαδικασία με τη μέθοδο deep hole EDM (ηλεκτροδιάβρωση βαθιάς οπής), χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά σχήματα ηλεκτροδίου και στη συνέχεια με μικροσκόπιο υψηλής ανάλυσης έγιναν οι κατάλληλες παρατηρήσεις ώστε να εξακριβωθούν οι διαφορές στη κατεργασία. Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρόδιο σε σχήμα αλτήρα (dumbbell – shaped) το βάθος της οπής αυξήθηκε σε σχέση με την περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε ένα ηλεκτρόδιο συμπαγούς στρογγυλής ράβδου. Στη συνέχεια όταν χρησιμοποιήθηκε ένα ηλεκτρόδιο σε σχήμα αλτήρα οι φυσαλίδες αέρα εκκενώθηκαν, αλλά τα υπολείμματα της κατεργασίας έμειναν πίσω. Χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρόδιο σε σχήμα αναδευτήρα (stirrer – shaped), η κατεργασία προχώρησε χωρίς στασιμότητα ακόμα και όταν το βάθος της τρύπας αυξήθηκε καθώς η διαδικασία εξελισσόταν πιο ομαλά. Αντίθετα στην περίπτωση χρήσης ηλεκτροδίου σε σχήμα αναδευτήρα, παρατηρήθηκε ότι οι



φυσαλίδες αέρα και τα υπολείμματα της κατεργασίας απομακρύνθηκαν εύκολα. Καταλήγουμε λοιπόν μέσα από την πειραματική διαδικασία να επιλέξουμε το κατάλληλο ηλεκτρόδιο σύμφωνα με τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Εικόνα 9: Εικόνες SEM του ηλεκτροδίου μετά την κατεργασία.



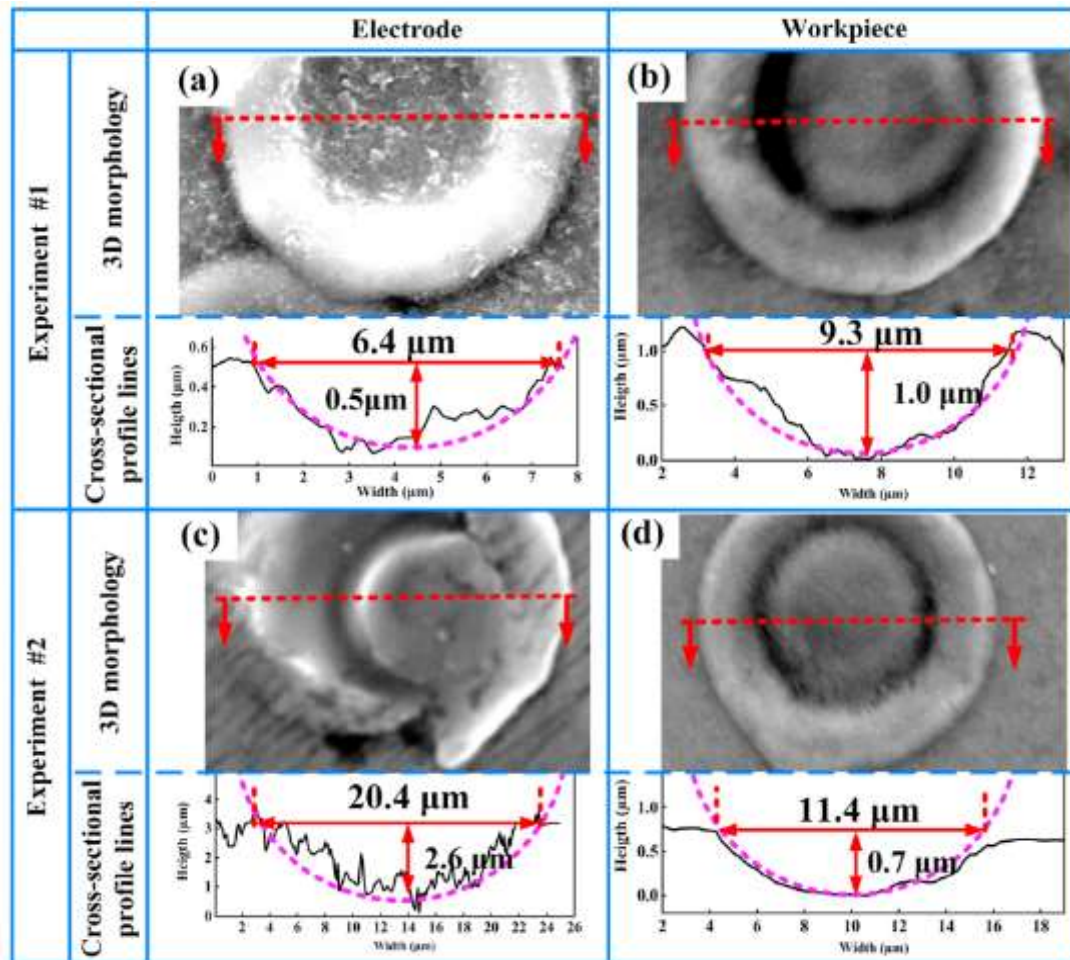
**Εικόνα 10: Κατάσταση φυσαλίδων αέρα και υπολείμματα της κατεργασίας στο πλευρικό διάκενο με χρήση ηλεκτροδίου τύπου αναδευτήρα.**

### 3.1.2. Χημική σύσταση και ιδιότητες ηλεκτροδίου

Η κατεργασία EDM έχει μία συνεχώς αυξανόμενη εφαρμογή σε μικροσκοπικές μήτρες και καλούπια όπου απαιτούνται χαμηλές ενέργειες αλλά και ηλεκτρόδια με χαρακτηριστική υψηλή αντοχή στη φθορά. Τα αποτελέσματα της ερευνητικής διαδικασίας επιβεβαιώνουν την απαιτούμενη χημική σύσταση εκ του αποτελέσματος καθώς ακόμα και μία μικρή επίδραση στοιχείων μπορεί να επιφέρει μεγάλες αλλαγές. Εκτός της φθοράς του ηλεκτροδίου ταυτόχρονα μελετάτε και το αποτέλεσμα της κατεργασίας στο τεμάχιο εργασίας ώστε να έχει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Υπάρχουν μία σειρά από παραμέτρους που πρέπει να ελέγξουμε κατά την πειραματική διαδικασία για να καταλήξουμε στην επιθυμητή σύσταση του ηλεκτροδίου. Συνοπτικά:

- Ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υλικού του ηλεκτροδίου χρησιμοποιώντας ένα πολύμετρο ή άλλο ηλεκτρικό εξοπλισμό δοκιμών μπορεί να βοηθήσει στον προσδιορισμό του υλικού που θα είναι το πιο αποτελεσματικό για τη διαδικασία EDM.
- Θερμική αγωγιμότητα. Η δοκιμή θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να γίνει με τη μέτρηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας μέσω του υλικού χρησιμοποιώντας ένα μετρητή θερμικής αγωγιμότητας.
- Φινιρίσμα επιφάνειας. Η δοκιμή φινιρίσματος επιφάνειας μπορεί να πραγματοποιηθεί μετρώντας την επιφανειακή τραχύτητα του υλικού χρησιμοποιώντας έναν ελεγκτή τραχύτητας επιφάνειας.

- Ανάλυση μικροδομής. Η μικροδομή του υλικού του ηλεκτροδίου μπορεί να αναλυθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM), η φασματοσκοπία ακτίνων X διασποράς ενέργειας (EDS) και η περίθλαση ακτίνων X (XRD) [26].



Εικόνα 11: Τρισδιάστατες μορφολογίες και προφίλ διατομής κρατήρων εκκένωσης που δημιουργούνται από εκκένωση ενός παλμού. (α) ηλεκτρόδιο Cu. (ε) ηλεκτρόδιο Sn. (β),(δ) τεμάχιο εργασίας από ανοξείδωτο χάλυβα 304.

- Χημική ανάλυση. Η χημική ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί για τον προσδιορισμό της σύνθεσης του ηλεκτροδίου, αυτή η δοκιμή μπορεί να γίνει με τη χρήση τεχνικών όπως ο φθορισμός ακτίνων X (XRF), η φασματοσκοπία οπτικής εκπομπής (OES) και η επαγωγικά συζευγμένη φασματοσκοπία πλάσματος-μάζας (ICP- MS).

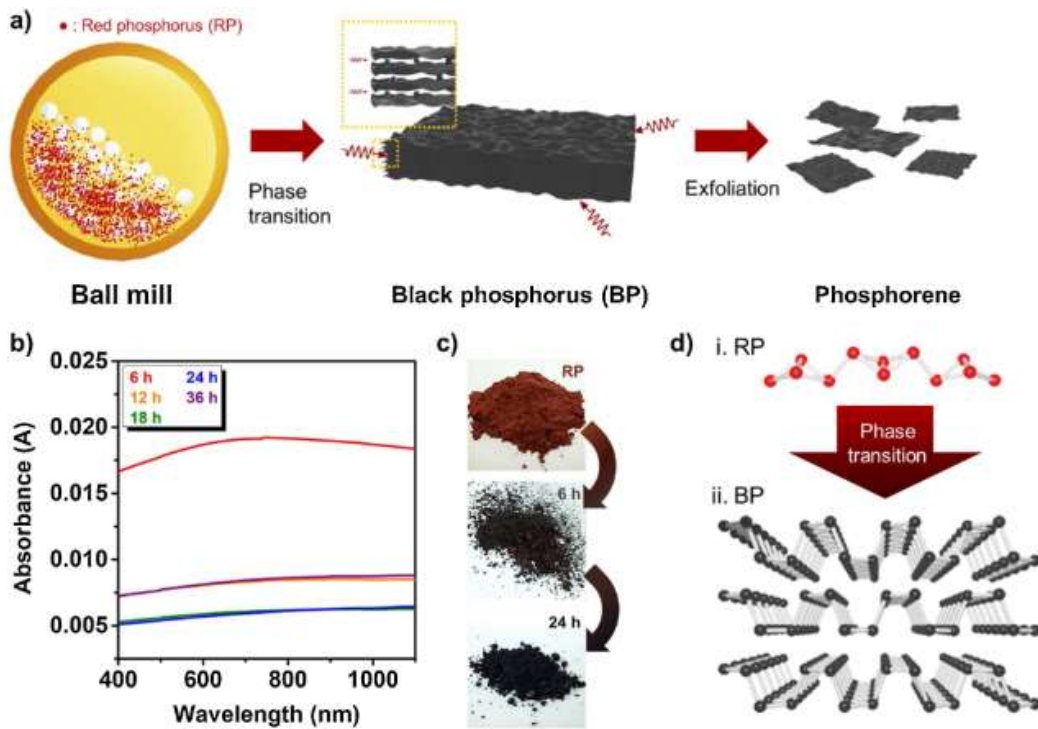
### 3.2.Τεχνολογικές εξελίξεις στο διηλεκτρικό μέσο

Μία σειρά από απαιτήσεις στο χώρο της βιομηχανίας είχαν ως αποτέλεσμα την συνεχή έρευνα γύρω από κάθε παράμετρο στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης και πέραν

της αναφοράς που κάναμε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο στο ηλεκτρόδιο σημαντική είναι και η συμβολή στην εξέλιξη της τεχνολογίας στο διηλεκτρικό μέσο που χρησιμοποιείται. Πέραν των συμβατικών υγρών η κεταργασία της ηλεκτροδιάβρωσης περιλαμβάνει μία σειρά από διηλεκτρικά μέσα με «ξεχωριστές» ιδιότητες:

- Υγρά υψηλής απόδοσης. Η έρευνα και η ανάπτυξη σε διηλεκτρικά υγρά οδήγησαν στην ανάπτυξη υγρών υψηλής απόδοσης που μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση και την ακρίβεια της διαδικασίας EDM. Αυτά τα υγρά έχουν σχεδιαστεί για να έχουν καλύτερη θερμική αγωγιμότητα, υψηλότερη διηλεκτρική αντοχή και καλύτερη αντίσταση στη διάσπαση, γεγονός που μπορεί να βοηθήσει στην αύξηση της ταχύτητας και της ακρίβειας της διαδικασίας EDM.
- Συνθετικά υγρά. Τα συνθετικά υγρά έχουν αναπτυχθεί ως εναλλακτική λύση στα υγρά με βάση τα ορυκτέλαια. Τα συνθετικά υγρά έχουν καλύτερη θερμική σταθερότητα, καλύτερες διηλεκτρικές ιδιότητες και είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Έχουν επίσης καλύτερη αντοχή στην οξείδωση και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τα υγρά με βάση τα ορυκτέλαια.
- Νανορευστά. Τα νανορευστά είναι μια νέα κατηγορία ρευστών που περιέχουν σωματίδια μεγέθους νανομέτρων αιωρούμενα σε ένα υγρό. Έχουν αναπτυχθεί για τη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας των διηλεκτρικών υγρών. Αυτά τα υγρά έχει βρεθεί ότι έχουν καλύτερη διάχυση θερμότητας και καλύτερες διηλεκτρικές ιδιότητες από τα παραδοσιακά υγρά, τα οποία μπορούν να βελτιώσουν την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας EDM [27] [28].
- Βιοδιασπώμενα υγρά: Τα βιοδιασπώμενα υγρά είναι μια νέα κατηγορία υγρών που έχουν σχεδιαστεί για να είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Αυτά τα υγρά είναι κατασκευασμένα από φυσικά ή συνθετικά υλικά που μπορούν να διασπαστούν από μικροοργανισμούς. Είναι μη τοξικά και δεν αφήνουν επιβλαβή υπολείμματα [29].
- Ρευστά χαμηλού ιξώδους: Τα ρευστά χαμηλού ιξώδους έχουν αναπτυχθεί για τη βελτίωση της ταχύτητας και της ακρίβειας της διαδικασίας EDM. Έχουν χαμηλότερη αντίσταση στη ροή, η οποία επιτρέπει την πιο αποτελεσματική κίνηση του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου εργασίας, βελτιώνοντας την ταχύτητα της διαδικασίας κατεργασίας.

- Smart Fluids: Τα έξυπνα υγρά είναι μια νέα κατηγορία υγρών που έχουν αναπτυχθεί για να βελτιώσουν την απόδοση της διαδικασίας EDM. Αυτά τα υγρά έχουν σχεδιαστεί για να αλλάζουν τις ιδιότητές τους ως απόκριση στις αλλαγές στο περιβάλλον μηχανικής κατεργασίας, βελτιώνοντας την ταχύτητα και την ακρίβεια της διαδικασίας EDM [30].



Εικόνα 12: Διαδικασία κατασκευής smart fluid με διηλεκτρικές ιδιότητες.

## Κεφάλαιο Τέταρτο

### 4. Πειραματική διαδικασία

Στόχος της πειραματικής διαδικασίας είναι η διερεύνηση των παραμέτρων της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης και η μελέτη μία σειράς διαφορετικών συνθηκών όπως υψηλή ένταση ρεύματος και μεγάλη διάρκεια παλμών σε αλουμίνιο τύπου 7075. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε μηχανή EDM AgieCharmilles Roboform 350 Sp, πρόκειται για μηχανή υψηλής απόδοσης και έχει σχεδιαστεί για κατεργασία ακριβείας σε σύνθετα τεμάχια με αυστηρές ανοχές. Είναι εξοπλισμένο με προηγμένα χαρακτηριστικά, όπως κεφαλή κατεργασίας υψηλής ταχύτητας, γραμμική κίνηση κινητήρα ακριβείας και σύστημα ελέγχου CNC. Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν τη γρήγορη και αποτελεσματική αφαίρεση υλικού. Η μηχανή EDM είναι επίσης εξοπλισμένη με ένα διηλεκτρικό σύστημα υψηλής απόδοσης με διηλεκτρικό υγρό υψηλής απόδοσης (high performance) που επιτρέπει την αποτελεσματική αφαίρεση των υπολειμμάτων και τη βελτιωμένη ταχύτητα κατεργασίας. Η μηχανή διαθέτει επίσης ένα σύστημα ψύξης υψηλής απόδοσης που βοηθά να διατηρείται το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο εργασίας στη κατάλληλη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει ακόμα περισσότερο την ακρίβεια της διαδικασίας.



Εικόνα 13: EDM machine AgieCharmilles Roboform 350 Sp.



Επιλέχθηκε το κράμα αλουμινίου Al7075 ως υλικό κατεργαζόμενου τεμαχίου λόγω των ιδιοτήτων του (υψηλή σκληρότητα, καλές μηχανικές ιδιότητες, αντοχή σε κόπωση) και λόγω της ευρείας εφαρμογής του στην αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία κλπ. Η χημική σύνθεση του Al7075 παρατίθεται στον Πίνακα 4. Το ηλεκτρόδιο ήταν ορείχαλκος (brass) και ως διηλεκτρικό υγρό χρησιμοποιήθηκε κηροζίνη. Στη πειραματική διαδικασία μελετήθηκαν δύο παράμετροι κατεργασίας, το ρεύμα ενεργοποίησης (pulse on current) και ο παλμός σε χρόνο (pulse on duration).

**Πίνακας 4: Χημική σύνθεση Αλουμινίου 7075 (wt.%).**

Al	Zn	Si (max)	Fe (max)	Ti (max)
Bal.	5.1-6.1	0.4	0.5	0.2
Cu	Mn (max)	Mg	Cr 0.18-	Zr + Ti (max)
1.2-2	0.3	2.1-2.9	0.28	0.25

Οι παράμετροι αυτοί είχαν τέσσερα επίπεδα και αποτέλεσαν δεδομένα εισόδου. Αντίστοιχα τα δεδομένα εξόδου που μας ενδιέφεραν και επιλέχθηκαν ως οι σημαντικότεροι δείκτες απόδοσης της κατεργασίας αποτέλεσαν ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού (MRR), ρυθμός φθοράς εργαλείου (TWR) και η τραχύτητα της επιφανείας (SR – Surface Roughness). Στη συνέχεια σε αυτούς τους δείκτες έγινε μία εκτενή στατιστική ανάλυση με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων και διαγραμμάτων για να γίνουν πλήρως κατανοητά τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας. Στον Πίνακα 5 παρατίθενται αναλυτικά οι τιμές των παραέτων κατεργασίας μαζί με τις σταθερές παραμέτρους (π.χ. τάση ανοιχτού κυκλώματος).

**Πίνακας 5: Παράμετροι εισόδου.**

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Pulse on Current ( $I_p$ )	5 [A]	9 [A]	13 [A]	17 [A]
Pulse on duration ( $T_{on}$ )	12.8 [ $\mu$ s]	25 [ $\mu$ s]	50 [ $\mu$ s]	100 [ $\mu$ s]
Duty factor	0.5			
Polarity	Straight			

Open circuit voltage	120 [V]
Dielectric Fluid	Cactus normal paraffin and hydrocarbon

Το ρεύμα ενεργοποίησης παλμού κυμαινόταν από 5 έως 17 A και ο χρόνος ενεργοποίησης παλμού από 12.8 έως 100  $\mu$ s που καλύπτουν ένα ικανοποιητικό εύρος ισχύος μηχανικής κατεργασίας και ενεργειών ανά παλμό. Τέλος το ονομαστικό βάθος κοπής ορίστηκε σε 1 mm προκειμένου να εξασφαλιστεί μία πλήρως ανεπτυγμένη και σταθερής κατάστασης διαδικασία κατεργασίας.

Το MRR και το TMRR υπολογίστηκαν μετρώντας τη διαφορά βάρους του τεμαχίου εργασίας και του υλικού εργαλείου πριν και μετά το EDM για δεδομένο χρόνο κατεργασίας, χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις:

$$MRR = \frac{W_{wb} - W_{wa}}{t * \rho_w} \quad (3)$$

$$TMRR = \frac{W_{eb} - W_{ea}}{t * \rho_e} \quad (4)$$

όπου,  $W_{wb}$  και  $W_{wa}$  (gr) είναι το βάρος του τεμαχίου εργασίας πριν και μετά (workpiece before/ workpiece after) την κατεργασία,

$W_{eb}$  και  $W_{ea}$  (gr) είναι το βάρος του ηλεκτροδίου πριν και μετά την κατεργασία,

$t$  (min) ο χρόνος κατεργασίας,

$\rho_w$  και  $\rho_e$  ( $\text{gr}/\text{mm}^3$ ) η πυκνότητα του τεμαχίου εργασίας και του ηλεκτροδίου αντίστοιχα.

Η πυκνότητα του τεμαχίου εργασίας και του ηλεκτροδίου είναι 0,00281 και 0,00873  $\text{gr}/\text{mm}^3$  αντίστοιχα.

Η τραχύτητα της επιφάνειας (SR) αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας ένα μικροσκόπιο εξαιρετικά βαθύ πεδίου VHX-7000 (KEYENCE, Mechelen, Βέλγιο) με βάση το

μικροσκόπιο διακύμανσης εστίασης (FVM – Focus Variation Microscope) και έναν αντικειμενικό στόχο 20-2000. Αυτή η τεχνολογία είναι συγκρίσιμη με την ομοεστιακή μικροσκοπία και ο μηχανισμός μέτρησης ενός μικροσκοπίου FV βασίζεται σε μια πηγή λευκού φωτός LED που περνάει μέσω ενός ημιδιαφανούς καθρέφτη και ενός φακού πριν φτάσει στην επιφάνεια μέτρησης. Το ανακλώμενο φως από τις στοχευόμενες περιοχές στη συνέχεια επιστρέφει μέσω του φακού και κατευθύνεται από έναν διαχωριστή δέσμης σε έναν φωτονικό ανιχνευτή, ο οποίος καταγράφει τις γεωμετρικές και φωτομετρικές πληροφορίες. Με άλλα λόγια, συνδυάζοντας το μικρό βάθος ενός παραδοσιακού οπτικού συστήματος με κάθετη σάρωση, το FV μπορεί να προσφέρει πολύχρωμα δεδομένα επιφάνειας 3D υψηλής ανάλυσης. Μετά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, το SR προσδιορίστηκε από δισδιάστατες φωτογραφίες με βάση το πρότυπο ISO 25178 [31].



**Εικόνα 14: Digital microscope VHX-7000.**

Τέλος η σειρά αλουμινίου 7075 (ονομάζεται επίσης κράμα αλουμινίου-ψευδαργύρου) είναι το ισχυρότερο σφυρήλατο κράμα αλουμινίου και χρησιμοποιείται ευρέως ως δομικό υλικό σε εφαρμογές στη ναυτιλία, την αυτοκινητοβιομηχανία και τις

αερομεταφορές λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων του όπως αναφέραμε και νωρίτερα. Η επίδραση του ρεύματος παλμού και του χρόνου ενεργοποίησης παλμού στα MRR και TMRR έχει διερευνηθεί προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση της μηχανικής κατεργασίας. Επιπλέον, η τραχύτητα επιφάνειας υπολογίστηκε ως προς τη μέγιστη τραχύτητα Rz και τη μέση τραχύτητα επιφανείας Ra. Τέλος, ακολουθήθηκε στατιστική ανάλυση, προκειμένου να καθοριστεί η επίδραση κάθε παραμέτρου ελέγχου στα αποτελέσματα της μηχανικής κατεργασίας.

## Κεφάλαιο Πέμπτο

### 5. Αποτελέσματα και στατιστική ανάλυση

Γνωρίζουμε ότι η διαδικασία EDM οδηγεί σε εξαιρετικά μη γραμμικές τάσεις, και ως εκ τούτου, η επίδραση των παραμέτρων μηχανικής κατεργασίας (δηλαδή  $I_p$  και  $T_{on}$ ) πρέπει να μελετηθεί προσεκτικά και διεξοδικά. Το  $I_p$  και το  $T_{on}$  σχετίζονται με την ισχύ μηχανικής κατεργασίας και την εκφορτιζόμενη ενέργεια ανά παλμό. Ως εκ τούτου, ενστικτωδώς, μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι το υψηλότερο ρεύμα ενεργοποίησης παλμού και ο χρόνος ενεργοποίησης παλμού οδηγεί σε υψηλότερο MRR και υψηλότερο TMRR. Ωστόσο, αυτή η υπόθεση δεν είναι απαραίτητα σωστή, και μάλιστα, πολλές φορές, είναι εντελώς λανθασμένη, οδηγώντας σε εσφαλμένες αντιλήψεις. Αν και η υψηλότερη ονομαστική ισχύς κατεργασίας και η εκφορτιζόμενη ενέργεια ανά παλμό μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα αυξημένο όγκο λιωμένου υλικού, σύνθετοι υποκείμενοι φυσικοί μηχανισμοί επηρεάζουν έντονα τη συνολική διαδικασία, δηλαδή τη διαστολή της στήλης του πλάσματος με την πάροδο του χρόνου, την παρουσία και την πυκνότητα των υπολειμμάτων και την εναπόθεση άνθρακα. Πιο αναλυτικά, καθώς αυξάνεται ο χρόνος ενεργοποίησης του παλμού, το κανάλι πλάσματος επεκτείνεται καταναλώνοντας σημαντικό ποσοστό της εκφορτιζόμενης ενέργειας, ενώ η ισχύς κατανέμεται σε μεγαλύτερη περιοχή, οδηγώντας σε χαμηλότερες πυκνότητες ισχύος. Παράλληλα, η υψηλότερη ισχύς κατεργασίας και η ενέργεια ανά παλμό λόγω της αυξημένης  $I_p$  και  $T_{on}$  μπορεί να αυξήσει τη συγκέντρωση υπολειμμάτων μεταξύ του τεμαχίου εργασίας και του ηλεκτροδίου. Η παρουσία αυτών των υπολειμμάτων υλικού επηρεάζει σημαντικά τη διαδικασία, καθώς όχι μόνο αλληλεπιδρούν με το κανάλι πλάσματος και τον σπινθήρα που εμφανίζεται (σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να προκύψουν ακόμη και συνθήκες τόξου), αλλά, ταυτόχρονα, καταναλώνουν ενέργεια για την τήξη τους ξανά. Ένα άλλο φαινόμενο που λαμβάνει χώρα και επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας είναι η εναπόθεση άνθρακα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο εργασίας. Ο άνθρακας που προέρχεται από την αποσύνθεση του υδρογονανθρακικού λαδιού λόγω των εξαιρετικά υψηλών τοπικών θερμοκρασιών, εναποτίθεται στις επιφάνειες σχηματίζοντας ένα στρώμα με βάση τον άνθρακα. Ταυτόχρονα, αυτό το στρώμα μπορεί να λειτουργήσει ως προστατευτικό στρώμα για το ηλεκτρόδιο και αρνητικά για το MRR. Από αυτή τη σύντομη ανάλυση, συνάγεται εύλογα το συμπέρασμα ότι το MRR και το TMRR δεν

αναμένεται να αλλάξουν γραμμικά και μονότονα όσον αφορά το ρεύμα ενεργοποίησης παλμού και το χρόνο ενεργοποίησης παλμού.

### 5.1. Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας

Στον Πίνακα 6 παρατίθενται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας για το AI7075.

**Πίνακας 6: Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας για AI7075.**

A/A	Ip [A]	Ton [μs]	DF	Eb [gr]	Ea [gr]	Wb [gr]	Wa [gr]	Time	Time (min)	MRR [mm <sup>3</sup> /min]	TMRR [mm <sup>3</sup> /min]	Ra [μm]	Rz [μm]	TWR
1	5	12.8	0.5	181.133	180.374	86.133	85.019	1h47m	107	3.71	0.81	1.39	11.00	0.219305065
2	5	25	0.5	180.374	179.624	85.019	83.992	2h10m	130	2.81	0.66	2.03	12.69	0.235062254
3	5	50	0.5	178.936	178.133	83.992	82.983	3h10m	190	1.89	0.48	2.39	14.47	0.256163032
4	5	100	0.5	178.133	177.282	82.983	82.009	4h53m	293	1.18	0.33	2.39	14.48	0.281230669
5	9	12.8	0.5	199.161	198.457	30.35	29.167	53m	53	7.94	1.52	2.34	13.64	0.191549045
6	9	25	0.5	198.457	197.844	29.167	28.091	51m	51	7.51	1.38	2.38	14.22	0.183375064
7	9	50	0.5	175.727	175.135	28.241	27.254	1h10m	70	5.02	0.97	2.56	16.96	0.193061924
8	9	100	0.5	175.135	174.453	27.254	26.202	1h54m	114	3.28	0.69	4.48	21.24	0.208670334
9	13	12.8	0.5	195.697	195.123	72.411	71.304	15.5m	15.5	25.42	4.24	3.85	22.34	0.166900004
10	13	25	0.5	193.797	193.331	71.304	70.279	11.5m	11.5	31.72	4.64	4.66	24.20	0.146336993
11	13	50	0.5	193.331	192.785	70.279	69.209	19m	19	20.04	3.29	5.05	27.41	0.164248322
12	13	100	0.5	196.136	195.697	73.356	72.411	20.5m	20.5	16.40	2.45	7.74	36.09	0.149528779
13	17	12.8	0.5	190.603	189.979	76.927	75.695	15m	15	29.23	4.77	5.06	25.31	0.16302941
14	17	25	0.5	189.979	189.409	75.695	74.467	14m	14	31.22	4.66	5.85	31.82	0.149406181
15	17	50	0.5	187.4	186.846	74.467	73.245	14.5m	14.5	29.99	4.38	7.24	34.24	0.145925314
16	17	100	0.5	186.846	186.282	73.245	71.948	18m	18	25.64	3.59	8.20	39.59	0.139968789

### 5.2. Στατιστική ανάλυση πειραματικής διαδικασίας

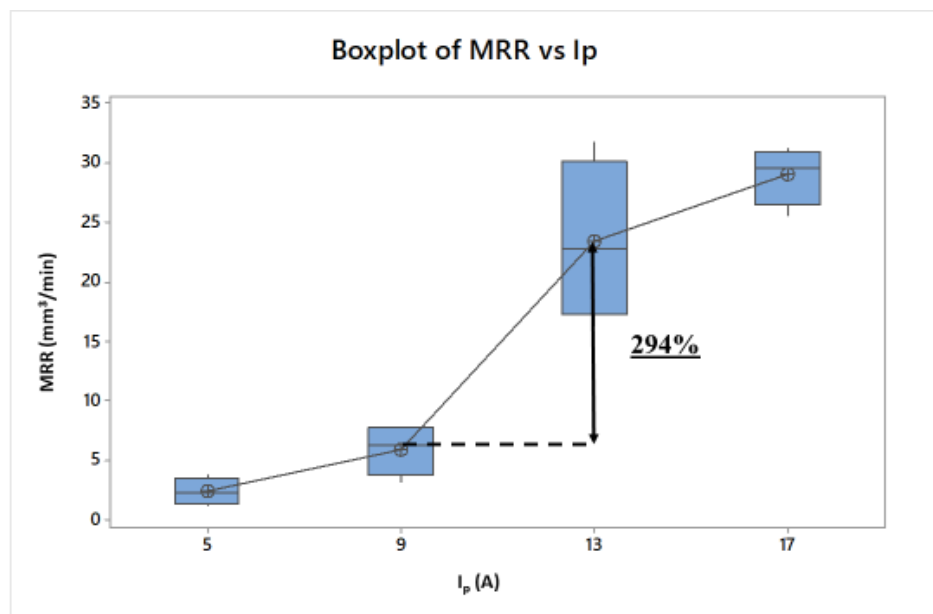
Η στατιστική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη κατεργασία EDM για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της ακρίβειας της διαδικασίας και την εξαγωγή πολιτικών συμπερασμάτων. Ορισμένοι τρόποι με τους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η στατιστική ανάλυση είναι ο έλεγχος της διαδικασίας καθώς οι τεχνικές στατιστικού ελέγχου διεργασιών (SPC - Statistical Process Control) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της απόδοσης της διαδικασίας EDM, όπως η ταχύτητα κατεργασίας, το φινίρισμα της επιφάνειας και η ακρίβεια διαστάσεων. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό και τη διόρθωση τυχόν παραλλαγών στη διαδικασία, κάτι που μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της απόδοσης. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα βελτιστοποίησης της διαδικασίας με τη σχεδίαση πειραμάτων (DOE - Design Of Experiments) καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό του καλύτερου συνδυασμού παραμέτρων διεργασίας όπως ρεύμα, τάση και πλάτος παλμού που θα έχει ως αποτέλεσμα τη βέλτιστη απόδοση. Πολύ σημαντικός είναι ο ποιοτικός έλεγχος όπου η στατιστική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της ποιότητας των

εξαρτημάτων που παράγονται από τη κατεργασία EDM, όπως η ακρίβεια διαστάσεων, το φινίρισμα της επιφάνειας και οι ιδιότητες του υλικού. Επιπλέον η στατιστική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της φθοράς του ηλεκτροδίου με την πάροδο του χρόνου, η οποία μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη του πότε πρέπει να αντικατασταθεί το ηλεκτρόδιο. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό τρόπων μείωσης του κόστους και βελτίωσης της κερδοφορίας. Συμπερασματικά, η στατιστική ανάλυση μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό και τη διόρθωση παραλλαγών στη διαδικασία, στον εντοπισμό του καλύτερου συνδυασμού παραμέτρων διεργασίας και στην παρακολούθηση της ποιότητας, της φθοράς των ηλεκτροδίων και του κόστους της διαδικασίας EDM. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία ανάλυση των αποτελεσμάτων από την πειραματική διαδικασία με στόχο την σύγκριση των μεταβαλλόμενων μεταβλητών που θέσαμε στο πείραμα ( $I_p$  και  $T_{on}$ ) μιας μεταβλητές ενδιαφέροντος (MRR, TMRR και SR).

### 5.2.1. MRR

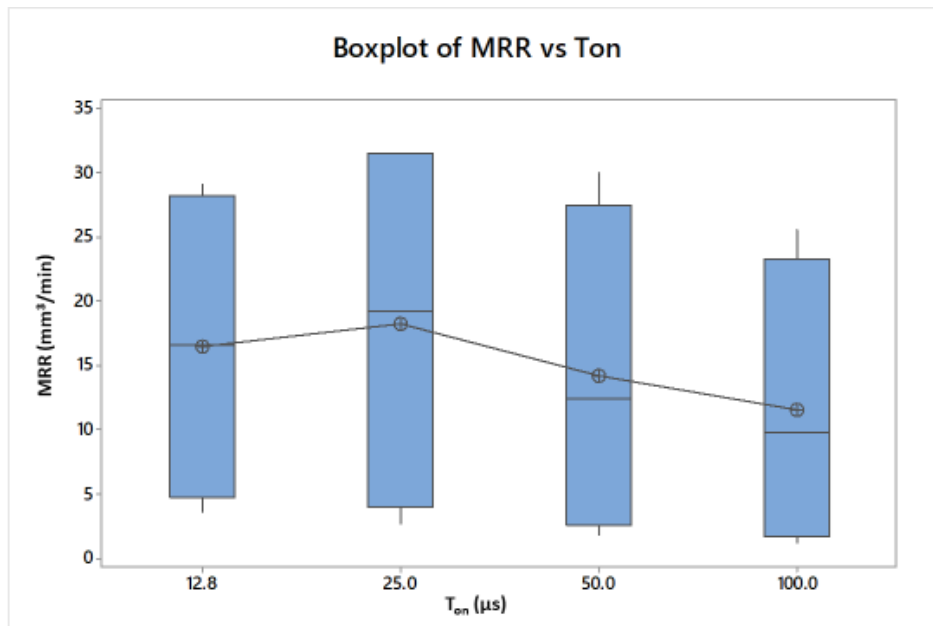
Στα Διαγράμματα 1 και 2 παρουσιάζονται η αλληλεπίδραση μεταξύ του MRR και των παραγόντων  $I_p$  και  $T_{on}$  αντίστοιχα. Από τα κύρια στατιστικά αποτελέσματα είναι εύκολο να διακριθεί ότι η ένταση ρεύματος ( $I_p$ ) είναι που επηρεάζει κυρίως το MRR ενώ ο χρόνος παλμού ( $T_{on}$ ) έχει μικρή επίδραση και αόριστες επιπτώσεις. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι αυξάνοντας το ρεύμα από 9 A σε 13 A το MRR αυξήθηκε κατά 294% περίπου, ενώ στο Διάγραμμα 2 παρατηρούμε ότι μία πολύ μικρή αύξηση στο MRR γίνεται από τα 12.8  $\mu$ s στα 25  $\mu$ s ενώ στη συνέχεια αυξάνοντας το χρόνο, μειώνεται. Ωστόσο για να αποφευχθούν ψευδή συμπεράσματα είναι απαραίτητο να γίνει πιο λεπτομερής ανάλυση στην αλληλεπίδραση των αποτελεσμάτων βλέποντας τα Διαγράμματα 3. Αρχικά παρατηρούμε ότι η απόκλιση του MRR για τις τιμές  $I_p$  5 A, 9 A και 17 A είναι πολύ χαμηλή ενώ για 13 A είναι ιδιαίτερα σημαντική. Μία ακόμα σημαντική παρατήρηση είναι ότι στα 13 A η αύξηση του χρόνου από τα 25  $\mu$ s στα 100  $\mu$ s οδήγησε σε σημαντική μείωση του MRR, επηρεάζοντας αρνητικά γενικότερα οποιαδήποτε αύξηση στο  $T_{on}$ . Μία ακόμα παρατήρηση αναδεικνύεται στις έντονες διαφορές μεταξύ 9 A και 13 A παρόλο που η μεταβολές του ρεύματος γίνονται ανα 4 A μόνο μεταξύ 9 - 13 υπάρχουν έντονες διαφορές όπως φαίνεται κάτω αριστερά στο Διάγραμμα 3. Εάν εξεταστεί το φαινόμενο κλιμακωτά με τη μέθοδο Fisher παρατηρούνται σημαντικές διαφορές για τιμές  $I_p$  μεταξύ 5-13, 5-17, 5-13, 9-17 ενώ για

τις τιμές χρόνου  $T_{on}$  δεν παρατηρείται καμία αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ των χρονικών θέσεων. Ως γενικό συμπέρασμα επιβεβαιώνεται πειραματικά η θεωρία σχετικά με την επίδραση του  $I_p$  και  $T_{on}$  σε σχέση με το MRR και παρατηρείται επίδραση από τον συνδυασμό των παραμέτρων κατά την κατεργασία EDM. Η μέθοδος Fisher είναι μια στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για να συνδυάσει τα αποτελέσματα πολλαπλών ανεξάρτητων δοκιμών σε μια ενιαία στατιστική δοκιμή. Είναι επίσης γνωστό ως δοκιμή συνδυασμένης πιθανότητας Fisher. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος αυτή με σκοπό την παρουσίαση πολλαπλής σύγκρισης στο πείραμα που εκτελέσαμε. (Υπάρχουν ωστόσο και άλλες μέθοδοι πολλαπλής σύγκρισης όπως η Bonferroni correction, Tukey's range test, Holm-Bonferroni method, False Discovery Rate (FDR) control).

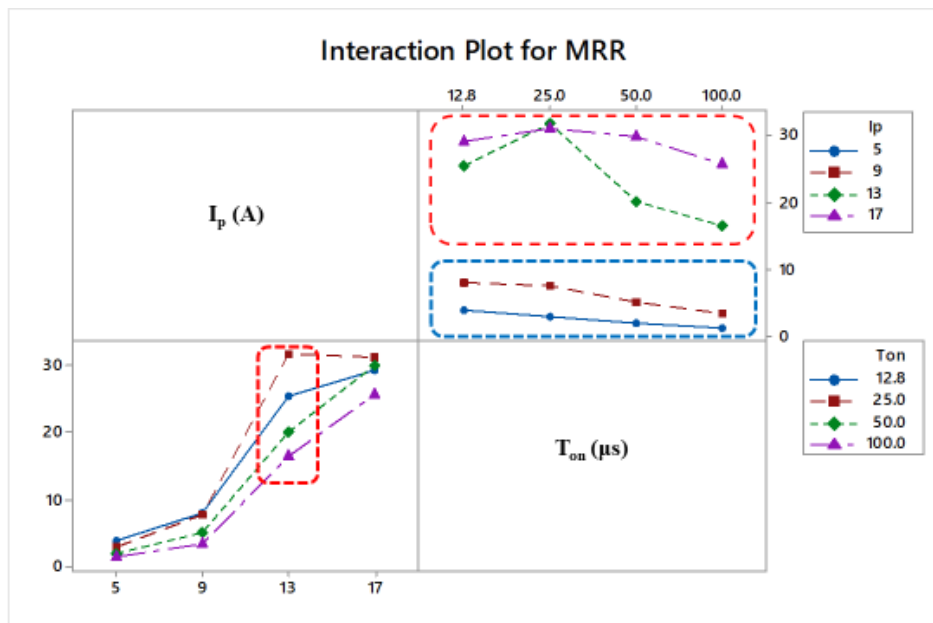


Διάγραμμα 1: Σχέση MRR με αυξανόμενες τιμές  $I_p$ .

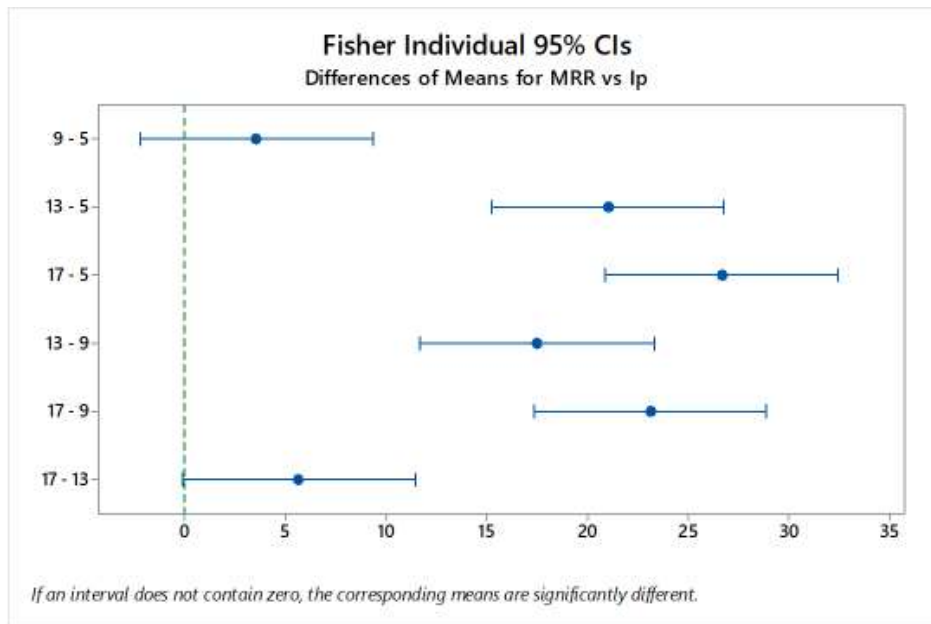




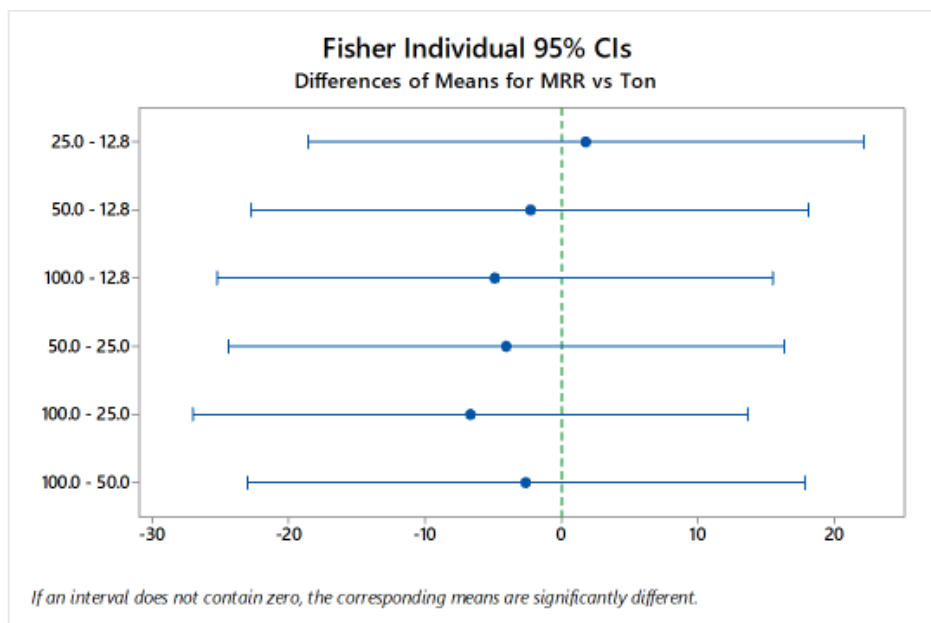
Διάγραμμα 2: Σχέση MRR με αυξανόμενες τιμές  $T_{on}$ .



Διάγραμμα 3: Αλληλεπίδραση MRR με  $I_p$  και  $T_{on}$ .



**Διάγραμμα 4: Αλληλεπίδραση αποτελεσμάτων MRR και  $I_p$  με τη μέθοδο Fisher.**

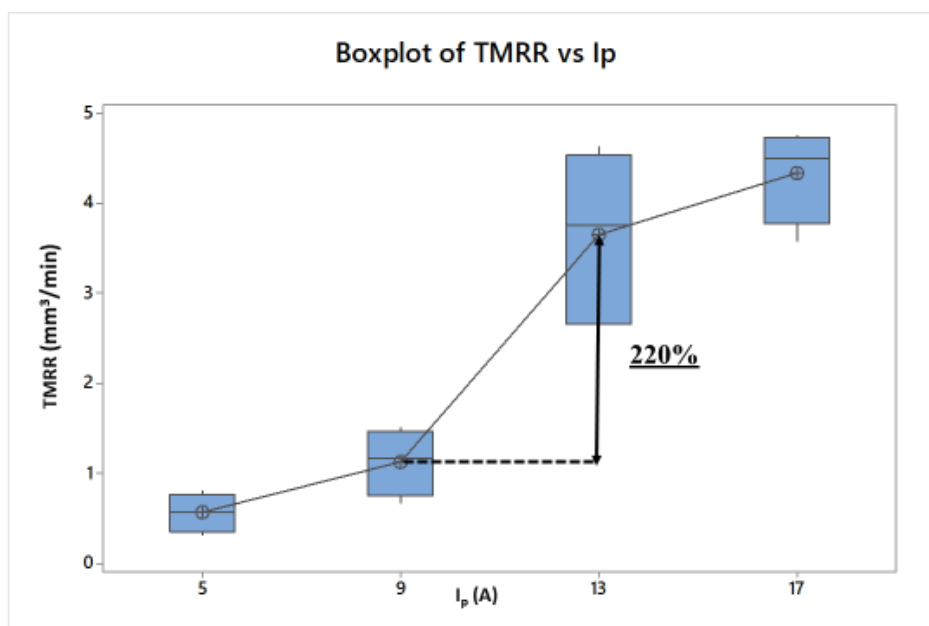


**Διάγραμμα 5: Αλληλεπίδραση αποτελεσμάτων MRR και  $T_{on}$  με τη μέθοδο Fisher.**

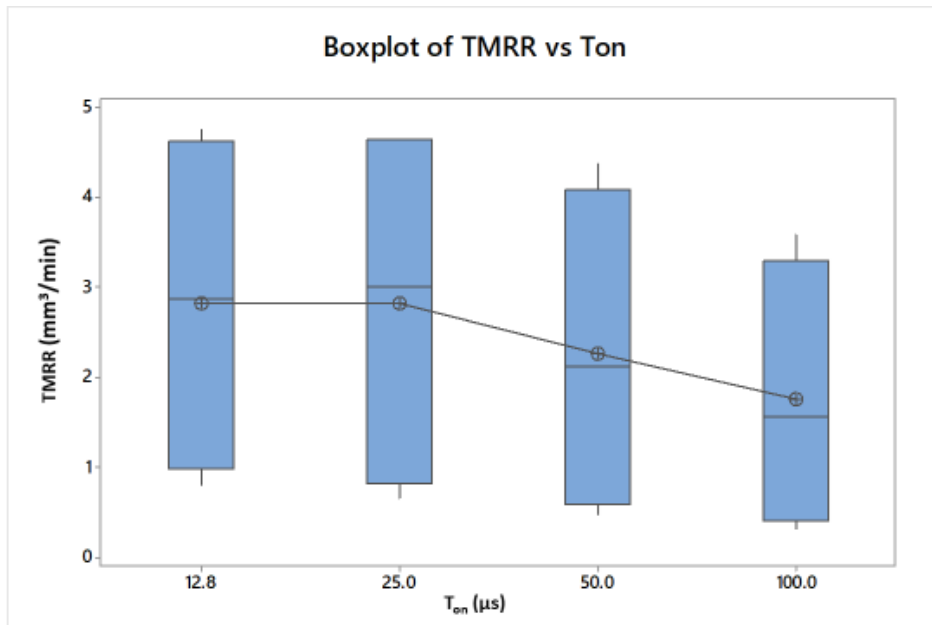
### 5.2.2. TMRR

Στα Διαγράμματα 6 και 7 παρουσιάζονται η αλληλεπίδραση μεταξύ του TMRR και των παραγόντων  $I_p$  και  $T_{on}$  αντιστοίχα. Από τα κύρια στατιστικά αποτελέσματα είναι

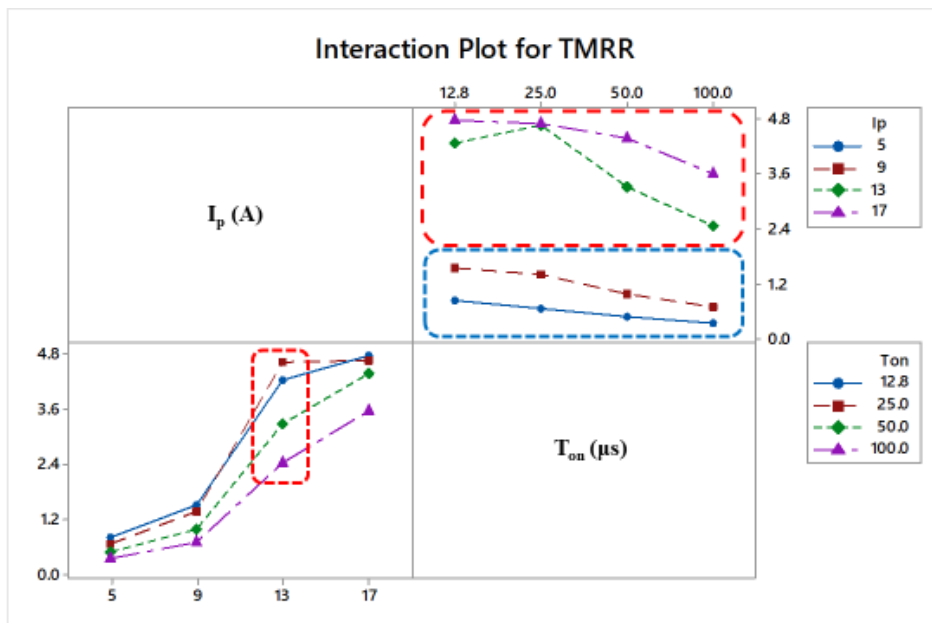
εύκολο να διακριθεί ότι η  $I_p$  είναι που επηρεάζει κυρίως το TMRR ενώ ο χρόνος παλμού  $T_{on}$  έχει μικρή επίδραση και αόριστες επιπτώσεις. Παρατηρούμε ότι MRR και TMRR ακολουθούν την ίδια τάση. Συγκεκριμένα το  $I_p$  είναι η παράμετρος που επηρεάζει τη μέση τιμή του TMRR ενώ το  $T_{on}$  δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη επίδραση. Παρατηρούμε ότι για  $I_p$  9 A και 13 A υπάρχει μία αύξηση της τάξης 220% ενώ για  $T_{on}$  μικρότερη των 25  $\mu$ s η μέση τιμή TMRR σταδιακά μειώνεται. Το γενικότερο συμπέρασμα είναι ότι καθώς το  $T_{on}$  αυξάνεται η TMRR συνεχώς μειώνεται ενώ το αντίθετο συμβαίνει με την αύξηση του  $I_p$ . Αξιοσημείωτο είναι ότι για  $I_p$  13 A υπάρχει σημαντική απόκλιση στην TMRR όπως συνέβη και στα αντίστοιχα Διαγράμματα με το MRR ενώ όπως φαίνεται με τη μέθοδο Fisher στα Διαγράμματα 9 και 10 μόνο το  $I_p$  στα διαστήματα 5-13, 5-17, 9-13, 9-17 υπάρχει αξιωματική απόκλιση. Ωστόσο αυτό που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι οι παραγοντες λειτουργούν συνδυαστικά καθώς αλληλοεπηρεάζονται και για βέλτιστο αποτέλεσμα δε απομονώνουμε μονομερώς δεδομένα. Για παράδειγμα, για το χαμηλότερο TMRR (5A – 100 $\mu$ s – 0.38mm<sup>3</sup>/min) η αναλογία TMRR και MRR είναι 0,28 ενώ για το υψηλότερο TMRR (17A – 12.8 $\mu$ s – 5.44mm<sup>3</sup>/min) η αντίστοιχη αναλογία είναι 0,16 υπονοώντας πιο αποτελεσματική κατεργασία. Συμπεραίνουμε ότι κατά τη διαδικασία σχεδιασμού είναι απαραίτητος ο συνδυασμός των παραμέτρων της κατεργασίας ακόμα και με άλλες απαιτήσεις όπως η τραχύτητα και η ποιότητα επιφανείας.



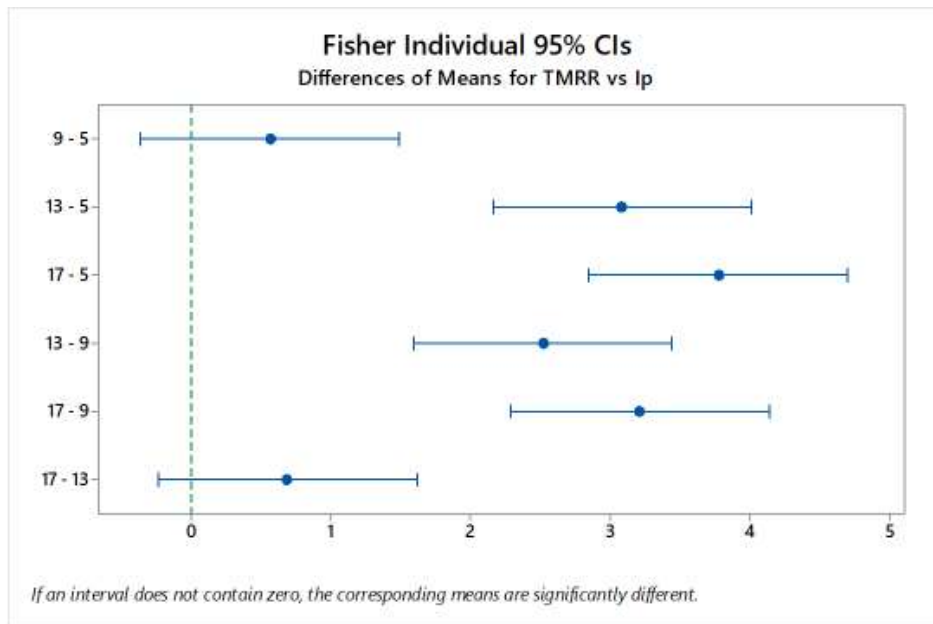
Διάγραμμα 6: Σχέση TMRR με αυξανόμενες τιμές  $I_p$ .



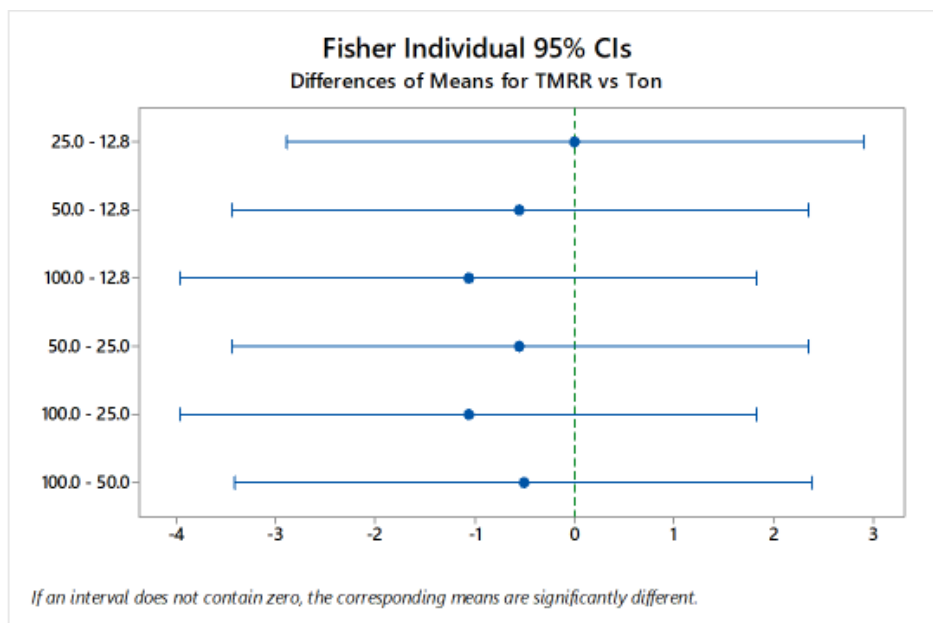
Διάγραμμα 7: Σχέση TMRR με αυξανόμενες τιμές  $T_{on}$ .



Διάγραμμα 8: Αλληλεπίδραση TMRR με  $I_p$  και  $T_{on}$ .



**Διάγραμμα 9: Αλληλεπίδραση αποτελεσμάτων TMRR και  $I_p$  με τη μέθοδο Fisher.**



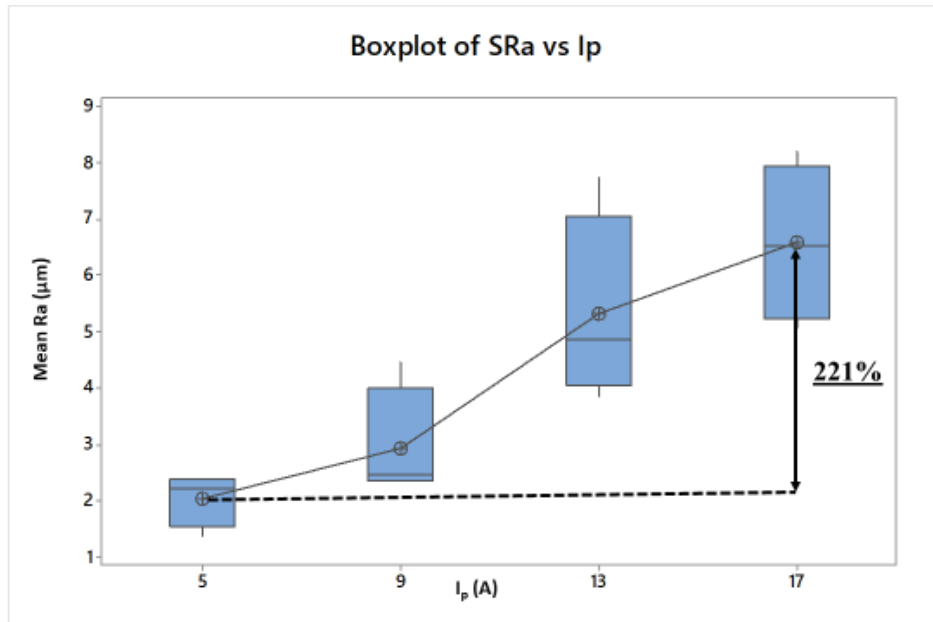
**Διάγραμμα 10: Αλληλεπίδραση αποτελεσμάτων TMRR και  $T_{on}$  με τη μέθοδο Fisher.**

### 5.2.3. SR

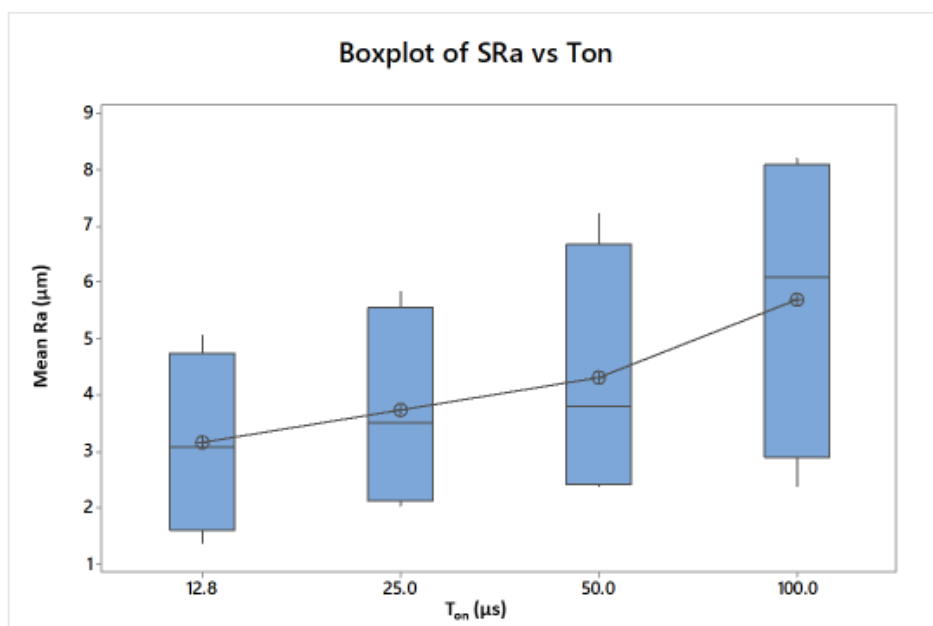
Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων επιφανειών είναι αποτέλεσμα διαδοχικών σπινθήρων υψηλής ενέργειας που επηρέασαν τις επιφάνειες. Η τραχύτητα

της επιφάνειας συσχετίζεται με την κατανομή των κρατήρων που σχηματίζονται λόγω της αφαίρεσης υλικού από επαναλαμβανόμενους ηλεκτρικούς σπινθήρες. Δεδομένου ότι η επιφάνεια δημιουργείται κυρίως λόγω της ενέργειας εκφόρτισης, το  $I_p$  και ο  $T_{on}$  είναι δύο από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος του παραγόμενου κρατήρα, δηλαδή του SR. Κατά κανόνα, με την αύξηση του χρόνου ενεργοποίησης παλμού, η περίοδος μεταφοράς της ενέργειας εκφόρτισης στα ηλεκτρόδια και στη στήλη πλάσματος αυξάνεται, οδηγώντας σε κρατήρες μεγαλύτερης διαμέτρου. Από την άλλη πλευρά, το υψηλό ρεύμα παλμού έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία υψηλής ενέργειας εκφόρτισης που δημιουργεί δυνάμεις κρούσης και προκαλεί βαθύτερους κρατήρες στην επεξεργασμένη επιφάνεια [32]. Η τραχύτητα της επιφάνειας υπολογίζεται από το άθροισμα του μέγιστου βάθους της κοιλάδας και του μέγιστου ύψους κορυφής  $Rz$  και έναν αριθμητικό μέσο όρο των τοπικών κορυφών  $Ra$ . Στα Διαγράμματα 11, 12 και 14, 15, παρουσιάζονται τα διαγράμματα συγκρισης για τα  $Ra$  και  $Rz$  ενώ η αλληλεπίδραση παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 13 και 16 αντίστοιχα. Η γραφική παράσταση του Διαγράμματος 11 υποδηλώνει ότι το  $Ra$  αυξάνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται η  $I_p$ . Αντίθετα, η μεταβολή του  $T_{on}$  δεν έχει την ίδια σαφή επίδραση στο  $Ra$  και αυτό οφείλεται κυρίως στη σημαντική απόκλιση για τον ίδιο  $T_{on}$  στις τιμές  $Ra$ . Δηλαδή, και με βάση το Διάγραμμα αλληλεπίδρασης του  $Ra$ , για την ίδια  $I_p$ , υψηλότερο  $T_{on}$  έχουν ως αποτέλεσμα αυξημένο  $Ra$ . Ωστόσο, για τους ίδιους χρόνους ενεργοποίησης παλμού υπάρχει μια πολύ υψηλή απόκλιση στις τιμές  $Ra$  ανάλογα με την  $I_p$ , υποδηλώνοντας ότι το  $Ra$  επηρεάζεται έντονα από τον συνδυασμό των παραμέτρων κατεργασίας και της ενέργειας ανά παλμό. Για παράδειγμα, οι συνδυασμοί 13 A-50  $\mu$ s και 17 A-12.8  $\mu$ s όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 13 έχουν σχεδόν τον ίδιο  $Ra$ , μια άλλη παρατήρηση που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι για τη κατεργασία χαμηλών ενεργειών το  $Ra$  φαίνεται να είναι πρακτικά σταθερό. Για παράδειγμα, για 9 A μεταξύ 12.8  $\mu$ s και 50  $\mu$ s δεν υπάρχει σχεδόν καμία αλλαγή στο  $Ra$ , όπως για 5 A μεταξύ 25  $\mu$ s και 100  $\mu$ s. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται για το  $Rz$  με την κύρια απόκλιση να είναι στο 148% με αύξηση του  $I_p$  από 5 A σε 17 A όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 14. Όμοια το  $T_{on}$  στο Διάγραμμα 15 δεν επιδρά με κάποιο ιδιαίτερο τρόπο καθώς η διαφορά του  $Rz$  είναι μικρή. Αντίστοιχα στο Διάγραμμα 16 οι τιμές 13 A-50  $\mu$ s και 17 A - 12.8  $\mu$ s πάλι παρουσιάζουν σχεδόν το ίδιο  $Rz$  όπως και για 9 A μεταξύ 12.8  $\mu$ s και 25  $\mu$ s δεν υπάρχει σχεδόν καμία αλλαγή, το ίδιο συμβαίνει και για 5 A μεταξύ 50  $\mu$ s και 100  $\mu$ s. Η ανάλυση αυτή μας υποδεικνύει ότι κατά τον σχεδιασμό της κατεργασίας και με βάση τις απαιτήσεις SR,

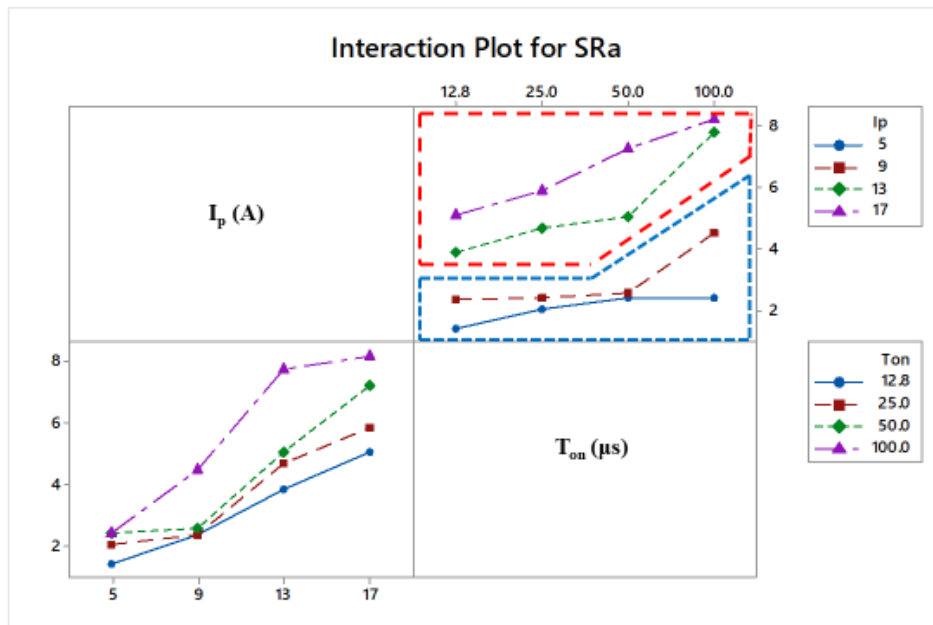
ο συνδυασμός  $I_p$  και  $T_{on}$  πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη με βάση ένα συνδυασμό παραμέτρων για πιο αποτελεσματική κατεργασία.



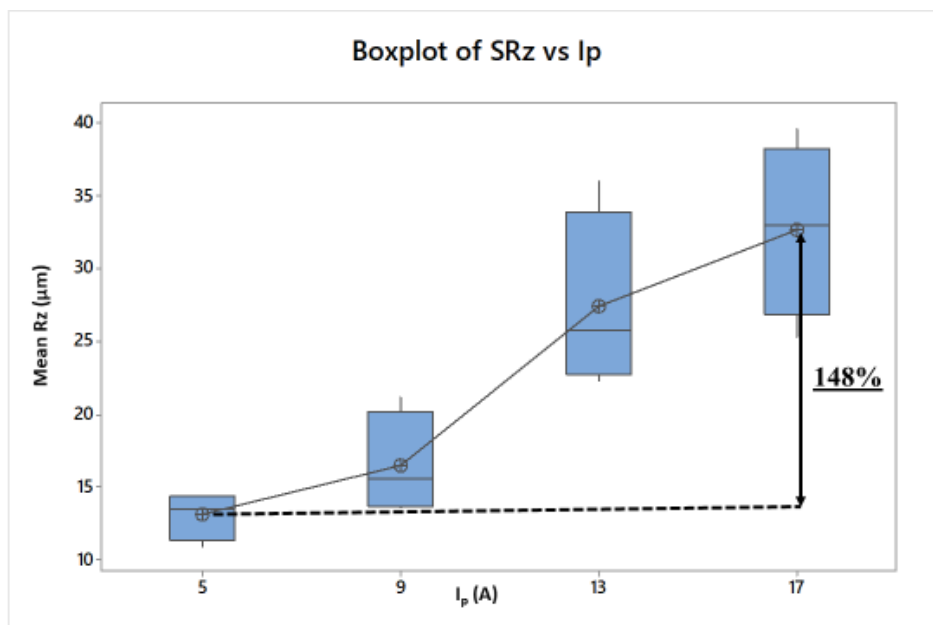
Διάγραμμα 11: Σχέση Ra με αυξανόμενες τιμές  $I_p$ .



Διάγραμμα 12: Σχέση Ra με αυξανόμενες τιμές  $T_{on}$ .

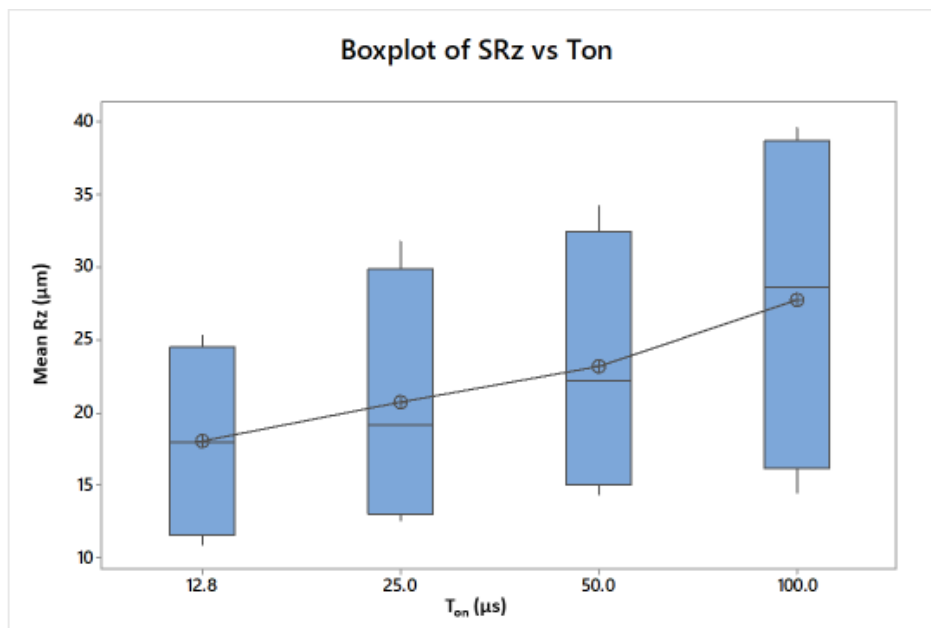


Διάγραμμα 13: Αλληλεπίδραση Ra με  $I_p$  και  $T_{on}$ .

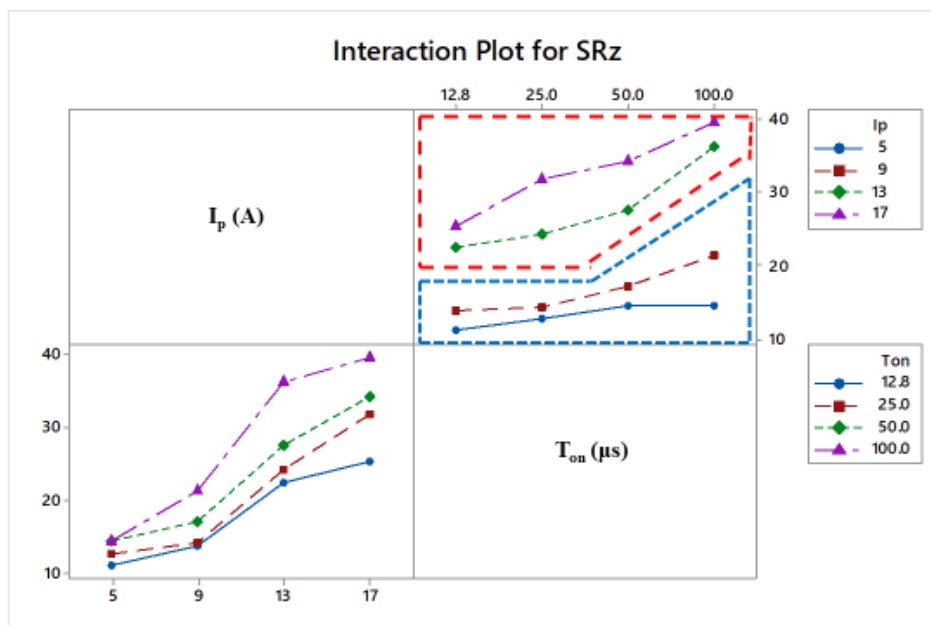


Διάγραμμα 14: Σχέση Rz με αυξανόμενες τιμές  $I_p$ .





Διάγραμμα 15: Σχέση Rz με αυξανόμενες τιμές T<sub>on</sub>.



Διάγραμμα 16: Αλληλεπίδραση Rz με I<sub>p</sub> και T<sub>on</sub>.

#### 5.2.4. Ποιότητα επιφανείας

Κατά την ανάλυση της ποιότητας των τεμαχίων αλλά και το χαρακτηρισμό τους τόσο στην επιφάνεια όσο και στην υποεπιφάνεια χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM - Scanning Electron Microscopy). Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) είναι ένας τύπος ηλεκτρονικού μικροσκοπίου που χρησιμοποιεί μια δέσμη ηλεκτρονίων για να σαρώσει την επιφάνεια ενός δείγματος και να παράγει εικόνες υψηλής ανάλυσης των χαρακτηριστικών της επιφανείας του. Τα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν με τα άτομα του δείγματος, τα οποία στη συνέχεια εκπέμπουν δευτερεύοντα ηλεκτρόνια, οπισθοσκεδασμένα ηλεκτρόνια ή ακτίνες X, τα οποία στη συνέχεια ανιχνεύονται και χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μιας εικόνας. Το SEM είναι σε θέση να παράγει εικόνες υψηλής ανάλυσης με μεγεθύνσεις έως και 50.000 φορές, καθιστώντας το χρήσιμο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως ανάλυση υλικού, ανάλυση αστοχιών και ποιοτικό έλεγχο.

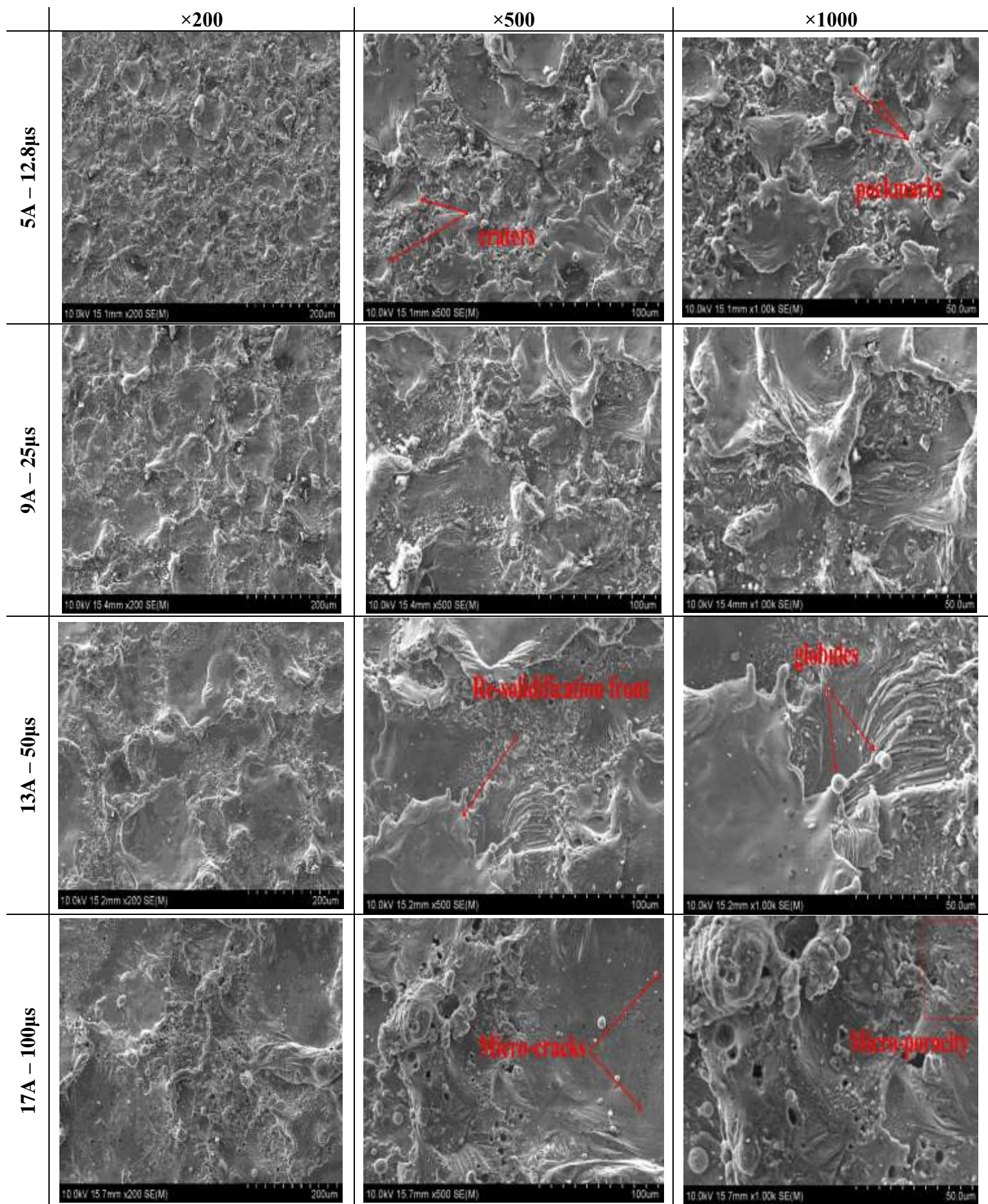
Παρατηρώντας ένα κατεργασμένο τεμάχιο εργασίας με EDM χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), μερικά από τα πράγματα που μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι:

- Το επιφανειακό φινίρισμα. Το SEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξεταστεί η ποιότητα της επιφανείας του τεμαχίου εργασίας, συμπεριλαμβανομένων τυχόν τραχύτητας, ομαλότητας και χαρακτηριστικών επιφανείας, όπως το στρώμα ανακατασκευής, μικρορωγμές και παραμόρφωση [33].
- Τη σύνθεση της επιφανείας. Το SEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της χημικής σύνθεσης της επιφανείας του τεμαχίου εργασίας. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας μια τεχνική που ονομάζεται φασματοσκοπία ακτίνων X διασποράς ενέργειας (EDS), η οποία μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τη στοιχειακή σύνθεση της επιφανείας [34].
- Το πορώδες. Το SEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξετάσει την επιφάνεια του τεμαχίου προς κατεργασία για τυχόν σημάδια πορώδους, όπως κενά ή πόρους, που μπορεί να υποδηλώνουν πρόβλημα με τη διαδικασία EDM [35].
- Παραμένουσες τάσεις. Το SEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξετάσει το τεμάχιο εργασίας για τυχόν παραμένουσες τάσεις στο τεμάχιο εργασίας. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας μια τεχνική που ονομάζεται οπισθοσκέδαση ηλεκτρονίων (EBSD - Electron Backscattered Diffraction), η οποία μπορεί να

παρέχει πληροφορίες για τον προσανατολισμό των κρυστάλλων και την κατάσταση τάσης του τεμαχίου εργασίας [36].

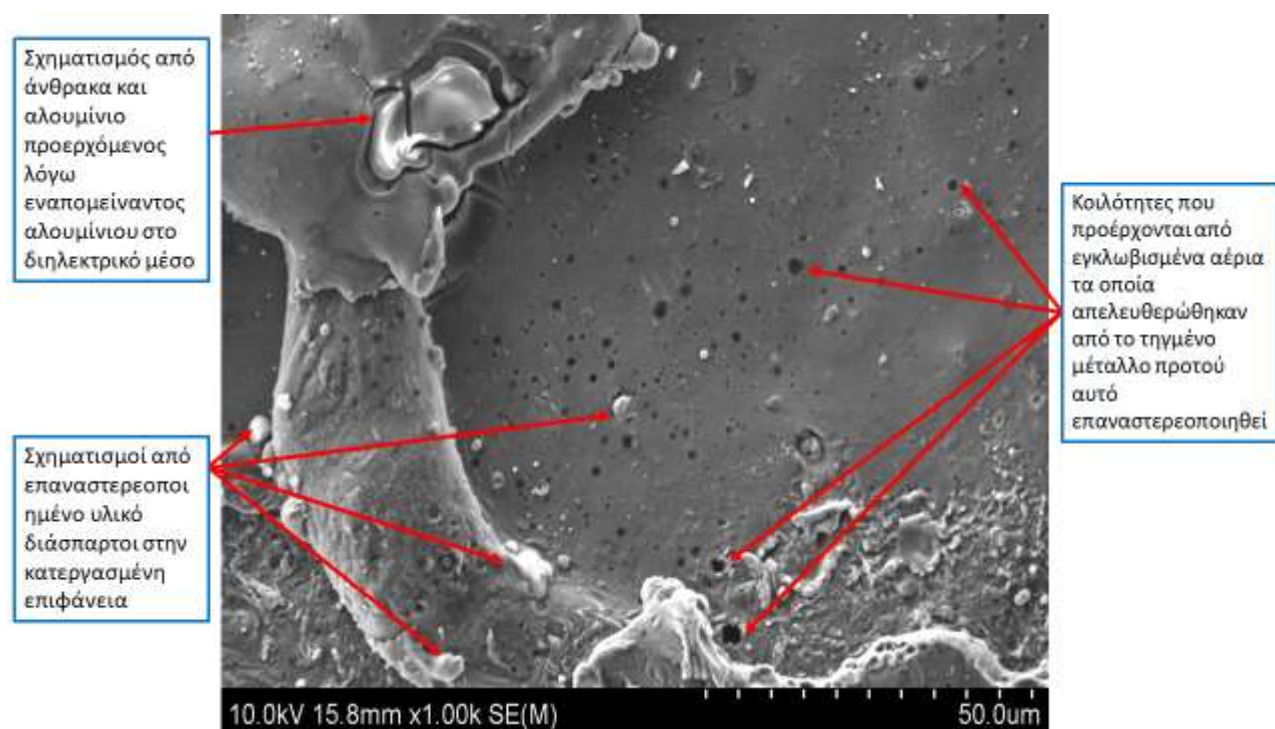
- Τη μικροδομή. Το SEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξέταση της μικροδομής του τεμαχίου εργασίας. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας υψηλή μεγέθυνση για να εξεταστεί η δομή των κόκκων, οι φάσεις και τυχόν ελαττώματα ή εγκλείσματα στο υλικό [37].
- Τέλος τη γεωμετρία των άκρων. Το SEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξετάσει τη γεωμετρία των άκρων του τεμαχίου εργασίας, ειδικά την ακτίνα γωνίας, η οποία μπορεί να υποδεικνύει οποιοδήποτε πρόβλημα με τη διαδικασία EDM [38].

Στην επιφάνεια ενός υλικού που έχει υποστεί ηλεκτροδιάβρωση μπορούμε να συναντήσουμε μία άτακτη κατανομή κρατήρων (arbitrary distribution) όπου το μέγεθός τους εξαρτάται από τη διάρκεια του παλμού, την ένταση του ρεύματος το ίδιο το υλικό που επεξεργαζόμαστε και τις ιδιότητές του και τη σύσταση του διηλεκτρικού μέσου. Επιπλέον στην επιφάνεια συναντάμε κορυφογραμμές (ridges) οι οποίες σχηματίζονται από τη ροή του τηγμένου υλικού. Επιπλέον συναντάμε σφαιρίδια και θύλακες (globules, rockmarks) που σχηματίζονται από τα εγκλωβισμένα αέρια που απελευθερώνονται από το τηγμένο υλικό πριν αυτό σταθεροποιηθεί. Επικαθήσεις υλικών του ηλεκτροδίου συναντούνται ανάλογα με το συνδυασμό διηλεκτρικού μέσου και υλικό ηλεκτροδίου, για παράδειγμα γραφίτης σε συνδυασμό με έλαιο δημιουργεί έντονο φαινόμενο επικαθήσεων ενώ ηλεκτρόδιο χαλκού με απιονισμένο νερό δημιουργεί σπάνιες επικαθήσεις. Αντιλαμβανόμαστε ότι αυτοί οι πειραματικοί συνδυασμοί αποτελούν πηγή έρευνας με σκοπό τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας. Τέλος μπορούμε να συναντήσουμε ρωγμές που αποτελούν προϊόν των ισχυρών τάσεων συστολής που ξεπερνούν το όριο θραύσης του υλικού. Όπως είναι φυσικό, η διάρκεια παλμών, η ένταση ρεύματος, το υλικό του τεμαχίου και του διηλεκτρικού μέσου αποτελούν τους βασικούς παράγοντες ύπαρξης ρωγμών στη κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης.



Εικόνα 15: SEM εικόνες που απεικονίζουν το τεμάχιο εργασίας σε διαφορετική μεγέθυνση και παραμέτρους μηχανικής καταργασίας.

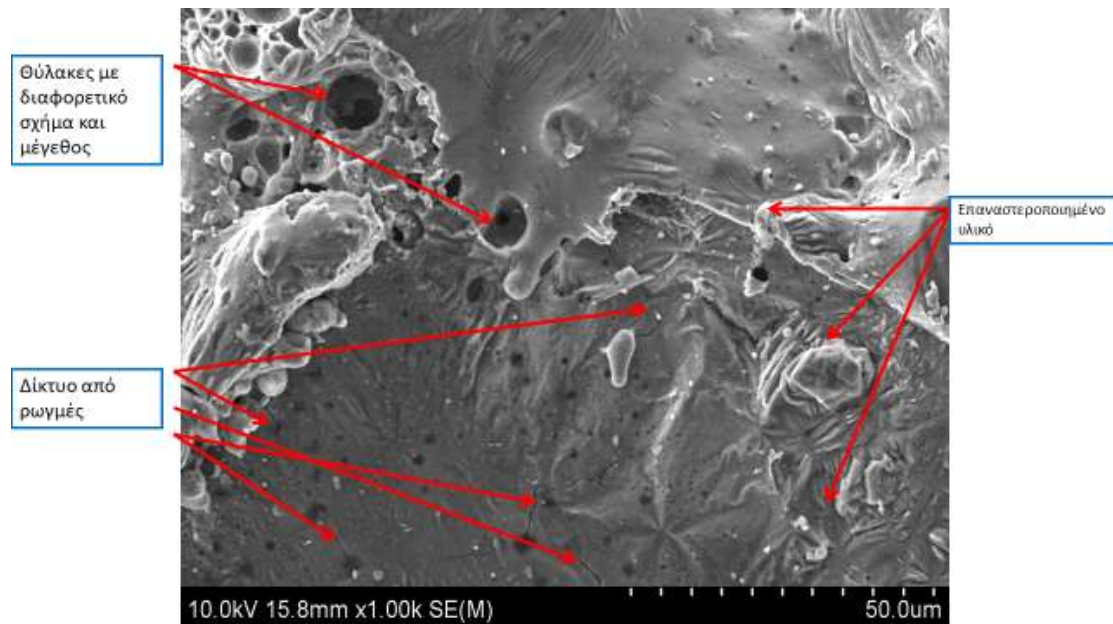
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το αλουμίνιο 7075 είναι ένα «δύσκολο υλικό» στην κατεργασία λόγω της υψηλής αντοχής του, γεγονός που το καθιστά πιο επιρρεπές σε επιφανειακά χαρακτηριστικά όπως ρωγμές, «σκασίματα» και κακό φινίρισμα επιφάνειας. Επομένως, είναι σημαντικό να βελτιστοποιηθούν οι παραμέτροι της διαδικασίας EDM, να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρόδια υψηλής ποιότητας και να διατηρηθεί στις κατάλληλες συνθήκες το διηλεκτρικό υγρό για να ελαχιστοποιηθούν τα χαρακτηριστικά επιφάνειας στο αλουμίνιο 7075. Όπως παρατηρούμε στην Εικόνα 15 στη σειρά των πειραμάτων μας εμφανίστηκαν στο κατεργασμένο τεμάχιο τα επιφανειακά χαρακτηριστικά που αναφέραμε.



**Εικόνα 16:** Επιφάνεια Al7075 που έχει υποστεί κατεργασία EDM σε SEM ( $I_p=13[A]$  και  $T_{on}=25[\mu\text{sec}]$ )  $\times 1000$  μεγένθυση.

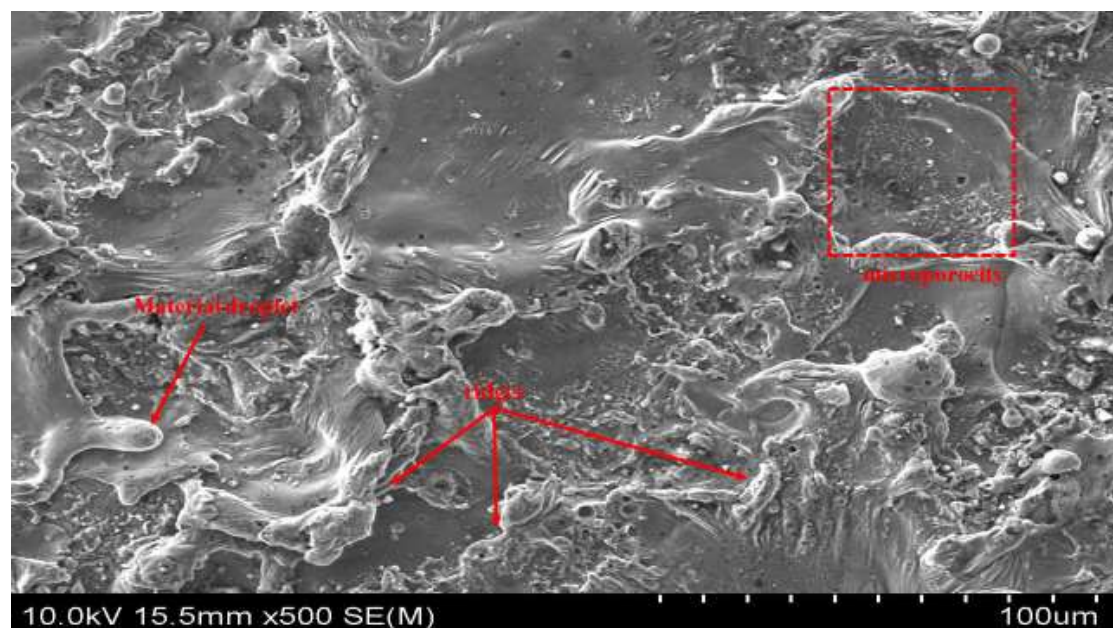
Οι κορυφογραμμές είναι χαρακτηριστικά ανυψωμένης επιφάνειας που μπορεί να εμφανιστούν σε ένα κατεργασμένο τεμάχιο με EDM. Συνήθως προκαλούνται από τη συσσώρευση υλικού στα άκρα της επεξεργασμένης περιοχής. Οι ραβδώσεις μπορεί επίσης να προκληθούν από ακατάλληλη σχεδίαση ηλεκτροδίων ή από χρήση φθαρμένου ηλεκτροδίου. Τα σφαιρίδια είναι μικρά χαρακτηριστικά στρογγυλής επιφάνειας που συνήθως προκαλούνται από τη συσσώρευση υλικού στη διεπαφή ηλεκτροδίου-τεμαχίου εργασίας. Οι θύλακες είναι μικρά, ρηχά χαρακτηριστικά

επιφάνειας που προκαλούνται από τη συσσώρευση υλικού στην επεξεργασμένη περιοχή.



**Εικόνα 17:** Επιφάνεια Al7075 που έχει υποστεί κατεργασία EDM σε SEM ( $I_p=17[A]$  και  $T_{on}=100[\mu\text{sec}]$ )  $\times 1000$  μεγένθυση.

Οι μικρορωγμές είναι μικρές, επιφανειακές ρωγμές που μπορούν να εμφανιστούν εξαιτίας των υψηλών θερμικών καταπονήσεων. Τέλος οι κρατήρες είναι μικρά, ρηχά χαρακτηριστικά επιφάνειας που το πιο πιθανό είναι να προκληθούν από τη αφαίρεση υλικού στην επεξεργασμένη περιοχή.

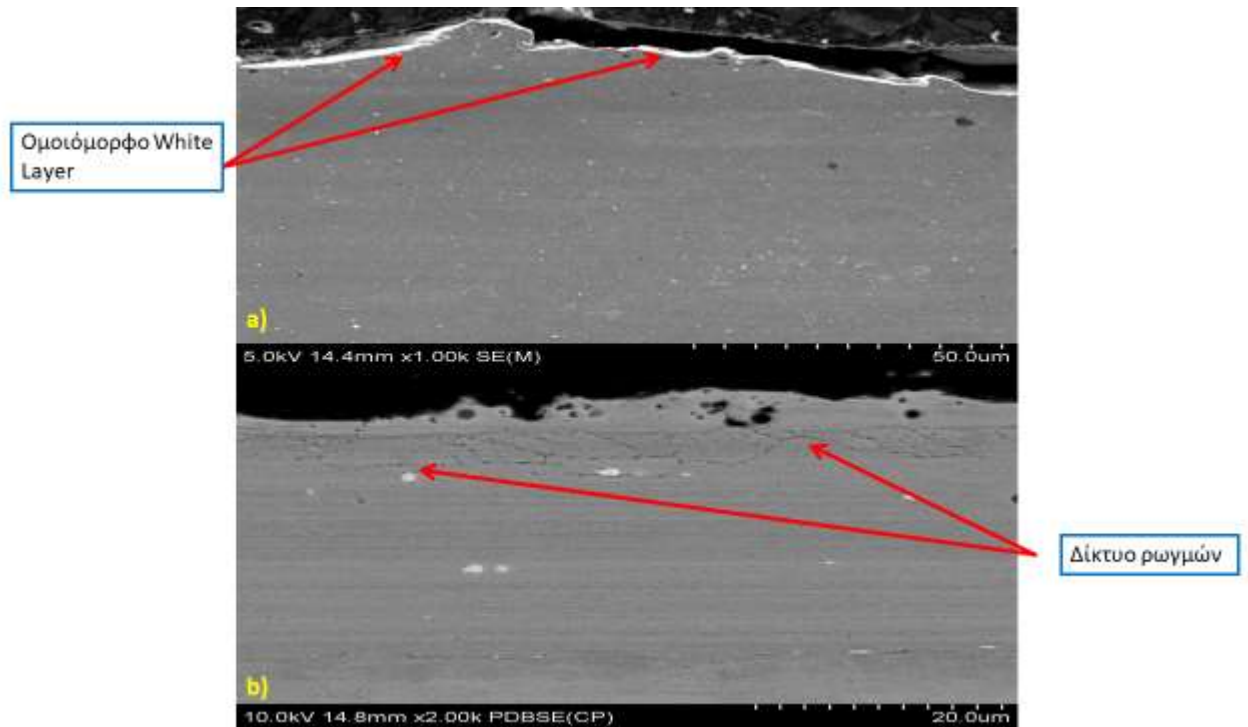


**Εικόνα 18:** Επιφάνεια Al7075 που έχει υποστεί κατεργασία EDM σε SEM ( $I_p=9[A]$  και  $T_{on}=12.8[\mu\text{sec}]$ )  $\times 500$  μεγένθυση.

Αναλύοντας την μικροδομή του υποστρώματος με την βοήθεια τη SEM μικροσκοπίας παρατηρήσαμε τις αλλαγές που συνέβησαν κάτω από την επιφάνεια του τεμαχίου. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να προκληθούν από τις υψηλές θερμικές καταπονήσεις που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία EDM και μπορεί να έχουν αντίκτυπο στις μηχανικές ιδιότητες και την απόδοση του τεμαχίου εργασίας. Μερικές από τις υποεπιφανειακές μικροδομικές αλλαγές που μπορούν να συμβούν σε ένα κατεργασμένο τεμάχιο EDM περιλαμβάνουν [39] [40]:

- Παραμένουσα καταπόνηση (residual stress), οι υψηλές θερμικές καταπονήσεις που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία EDM μπορούν να οδηγήσουν σε υπολειπόμενη τάση στην υποεπιφανειακή περιοχή του τεμαχίου εργασίας [41].
- Στρώμα επαναστερεοποίησης (recast layer), το στρώμα αυτό είναι ένα υποεπιφανειακό στρώμα υλικού που τήκεται και στερεοποιείται εκ νέου κατά τη διαδικασία EDM. Το επαναστερεοποιημένο στρώμα μπορεί να έχει διαφορετική μικροδομή και σύνθεση από το αρχικό υλικό.
- Μικρορωγμές (Micro-cracks), οι υψηλές θερμικές καταπονήσεις που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία EDM μπορούν να οδηγήσουν στο σχηματισμό μικρορωγμών στην υποεπιφανειακή περιοχή του τεμαχίου εργασίας.
- Πορώδες (Porosity), ο εγκλωβισμός αερίων κατά τη διαδικασία EDM μπορούν να οδηγήσουν στο σχηματισμό πορώδους στην υποεπιφανειακή περιοχή του τεμαχίου εργασίας.

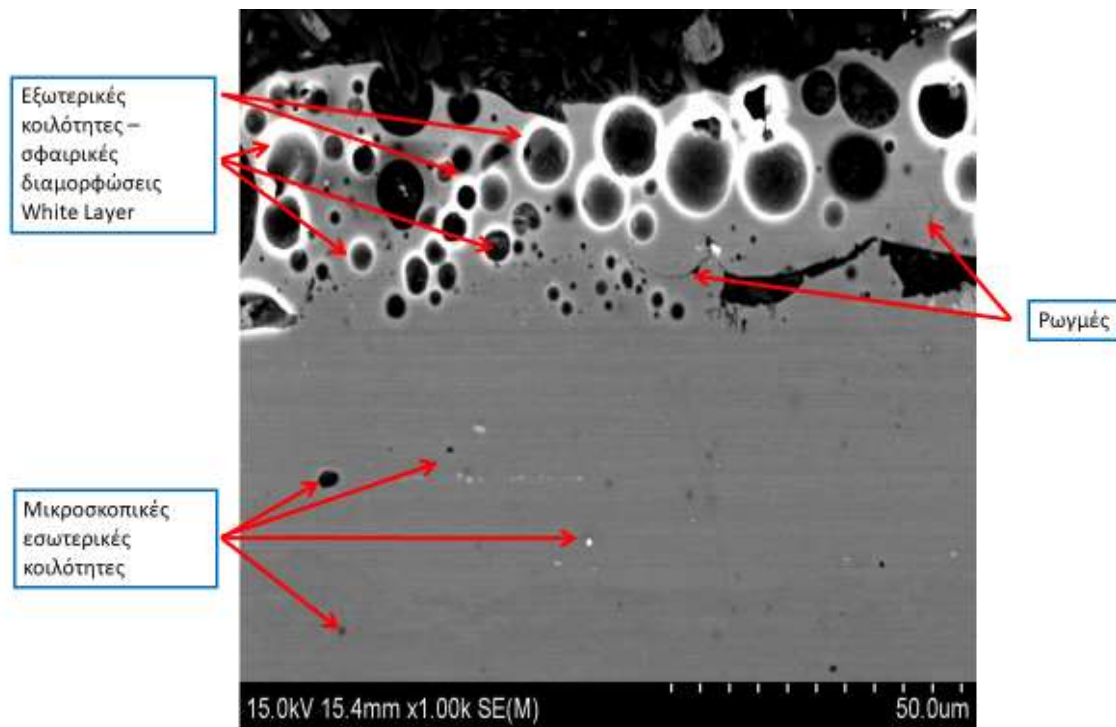
Στη συνέχεια χρησιμοποιήσαμε τη μικροσκοπία SEM ώστε να μελετήσουμε το White Layer (WL) αλλά και την κατανομή των χημικών στοιχείων στα τεμάχια που επεξεργαστήκαμε. Το White Layer είναι ένα στρώμα υλικού που σχηματίζεται στην επιφάνεια ενός κατεργαζόμενου τεμαχίου κατά τη διαδικασία της κατεργασίας EDM. Αποτελείται από επαναστερεοποιημένο στρώμα του υλικού που υποβάλλεται σε κατεργασία EDM και είναι συνήθως πιο ανοιχτό χρώμα από το βασικό υλικό, επίσης είναι άμορφο ύλιο χωρίς κρυσταλλική δομή.



**Εικόνα 19:** Εικόνες από τομή κατεργασμένης σε EDM επιφάνειας Al 7075 με a)  $I_p=9[A]$  και  $T_{on}=25[\mu\text{sec}]$  σε μεγέθυνση  $\times 1000$  και b)  $I_p=13[A]$  και  $T_{on}=25[\mu\text{sec}]$  σε μεγέθυνση  $\times 2000$ .

Το λευκό στρώμα μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στο φινίρισμα της επιφάνειας και στην ακρίβεια των διαστάσεων του τεμαχίου εργασίας και συχνά αφαιρείται με μεθόδους μετα-επεξεργασίας, όπως λείανση. Επιπλέον, το White Layer μπορεί να προκληθεί από τη χρήση ενός διηλεκτρικού υγρού χαμηλής ποιότητας ή από υψηλή πίεση έκπλυσης και υψηλό ρεύμα αιχμής. Το λευκό στρώμα μπορεί επίσης να προκληθεί από τη χρήση λάθος συνδυασμό ηλεκτροδίου προς το τεμάχιο μας. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το EDM είναι μια κατάλληλη λύση για την κατεργασία υλικών για απαιτητικές εφαρμογές. Είναι σημαντικό να καθοριστεί η μηχανική και χημική συμπεριφορά του WL. Οι περισσότερες από τις πρόσφατες μελέτες επικεντρώθηκαν στην ποιότητα της επιφάνειας ωστόσο γνωρίζουμε ότι η ποιότητα του υλικού αλλάζει κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Οι Εικόνες 19 και 20 μας δείχνουν αλλαγές στα χαρακτηριστικά WL που παρατηρούνται σε διαφορετικές τιμές  $I_p$  και  $T_{on}$ . Το WL είναι μάλλον λεπτό και ομοιόμορφο στην Εικόνα 19a για  $I_p$  και  $T_{on}$  9 A και 25  $\mu\text{s}$ , αντίστοιχα. Ενώ στην Εικόνα 20 με δεδομένα 17 A και 100  $\mu\text{s}$  στο WL παρατηρείται μία ανομοιογένεια, με αποτέλεσμα περιοχές με σημαντικές διαφορές πάχους WL (περιοχές με εξαιρετικά λεπτό WL και περιοχές με παχύτερο WL σε περιοχές γύρω από κοιλότητες που δημιουργήθηκαν).



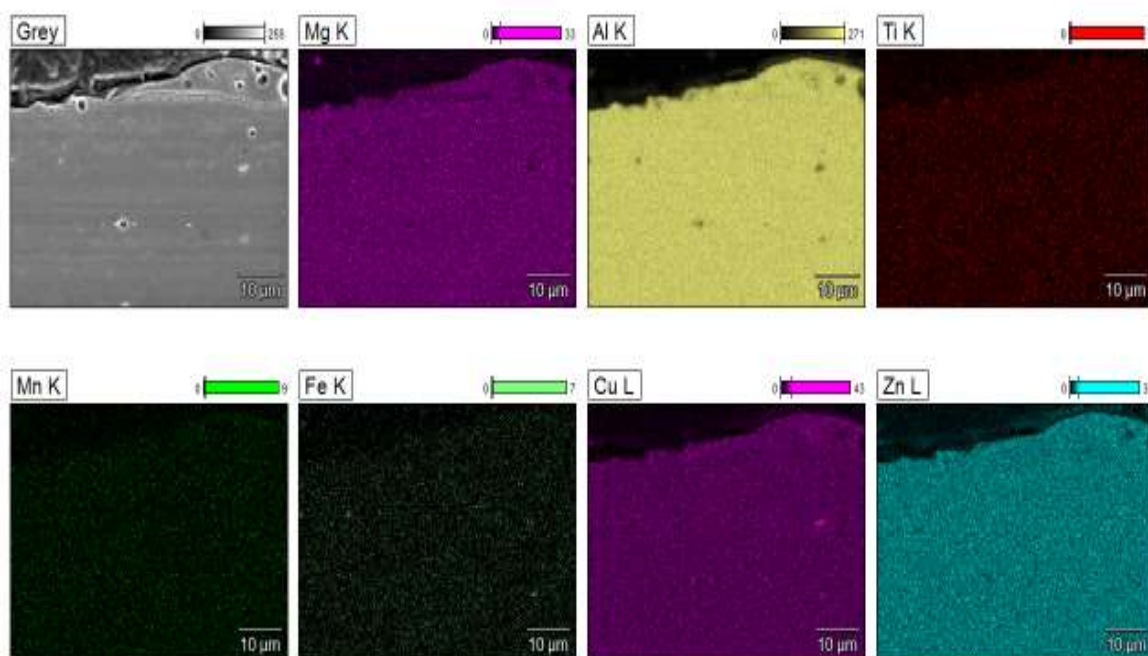


**Εικόνα 20:** Εικόνες από τομή κατεργασμένης σε EDM επιφάνειας Al 7075 με  $I_p=17[A]$  και  $T_{on}=100[\mu\text{sec}]$  σε μεγέθυνση  $\times 1000$ .

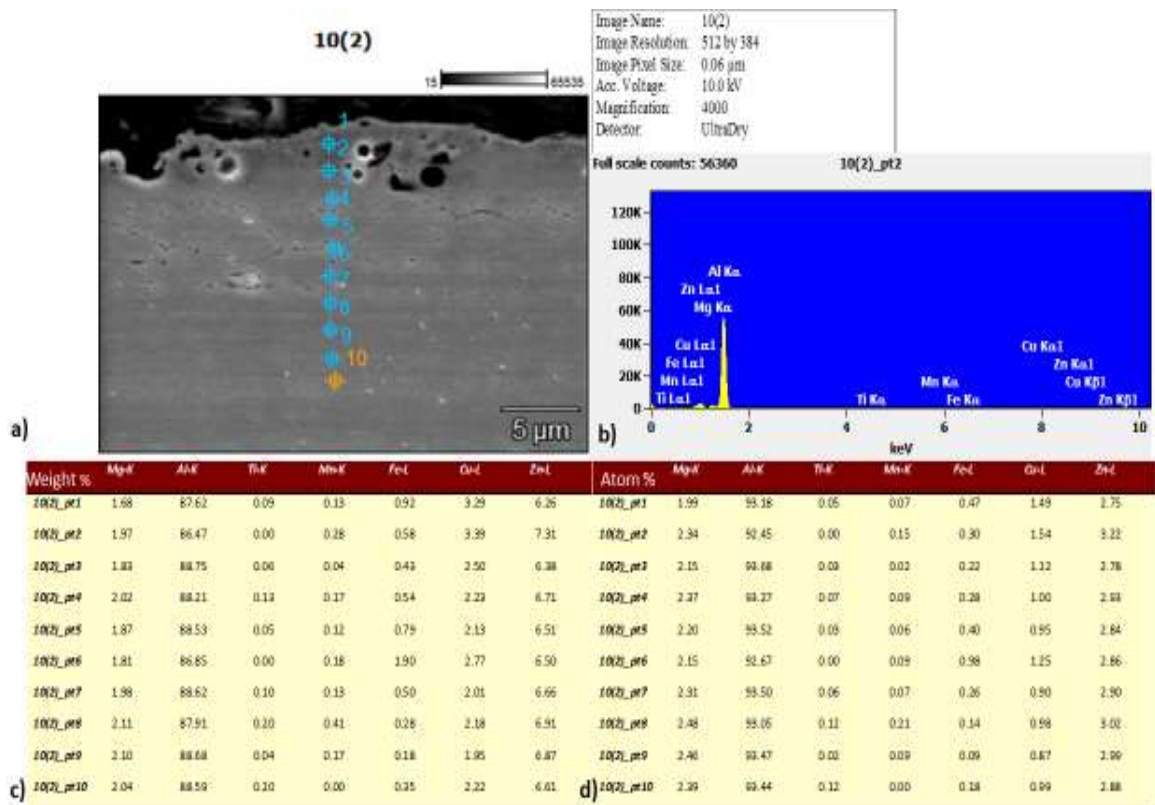
Η κατανομή χημικών στοιχείων αναφέρεται στην κατανομή διαφορετικών χημικών στοιχείων μέσα σε ένα τεμάχιο εργασίας. Στην περίπτωση του EDM, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τη χημική σύνθεση του τεμαχίου εργασίας, καθώς ορισμένα στοιχεία μπορεί να είναι πιο δύσκολο να επεξεργαστούν ή να προκαλέσουν προβλήματα όπως αυξημένη φθορά στο ηλεκτρόδιο. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να ληφθούν μέσω τεχνικών όπως ο φθορισμός ακτίνων X ή η φασματοσκοπία ακτίνων X διασποράς ενέργειας (EDS) που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της χημικής σύνθεσης του τεμαχίου εργασίας. Είναι πολύ σημαντικό να προσδιορίσουμε τη μεταλλουργική δομή και η χημική σύνθεση του λευκού στρώματος για την κατανόηση των μηχανικών ιδιοτήτων του. Η χημική σύνθεση μελετήθηκε με τη βοήθεια της μεθόδου EDX. Η EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται στην επιστήμη των υλικών και τη μεταλλουργία για τον εντοπισμό και την ανάλυση της χημικής σύνθεσης ενός δείγματος [42]. Ο χάρτης EDX είναι μια οπτική αναπαράσταση της κατανομής διαφορετικών στοιχείων μέσα σε ένα δείγμα, που συνήθως δημιουργείται χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) εξοπλισμένο με ανιχνευτή EDX. Για τη δημιουργία ενός χάρτη EDX, το δείγμα τοποθετείται πρώτα στο SEM και μια σειρά φασμάτων ακτίνων X συλλέγεται από διαφορετικές περιοχές του δείγματος [43]. Αυτά τα φάσματα στη συνέχεια αναλύονται

για να προσδιοριστεί η σύνθεση του δείγματος σε κάθε θέση. Τα δεδομένα που προκύπτουν χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τη δημιουργία ενός χάρτη που δείχνει την κατανομή των στοιχείων μέσα στο δείγμα, με διαφορετικά χρώματα ή αποχρώσεις που αντιπροσωπεύουν τα διαφορετικά στοιχεία. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η EDX είναι μια ποιοτική μέθοδος και δεν μπορεί να σας δώσει την ακριβή σύνθεση των στοιχείων στο δείγμα. Αλλά μπορεί να σας δώσει μια ιδέα για τα στοιχεία που υπάρχουν και τις σχετικές συγκεντρώσεις τους [44]. Το κύριο ενδιαφέρον μας βασίζεται στη κατανομή των στοιχείων όπου μας επιτρέπει τον ορισμό της ομοιογένειας και του βαθμού μόλυνσης με στοιχεία από το μητρικό υλικό και το ηλεκτρόδιο σύρματος.

Σε έναν χάρτη EDX, στην Εικόνα 21 απεικονίζεται η τυπική κατανομή στοιχείων από τις μετρήσεις ενός συγκεκριμένου στοιχείου σε σχέση με τη θέση του στη ζώνη του χείλους. Οι περισσότερες μετρήσεις ενός στοιχείου σε ένα σημείο, τόσο πιο φωτεινό είναι το σχετικό σημείο στο χάρτη. Δεν είναι εφικτό να ποσοτικοποιηθεί το σύνολο της χημικής ουσίας ώστε να γνωρίζουμε μία ενδεικτική τιμή για τη σύνθεση του. Όπως αναφέραμε και νωρίτερα η βασική σύνθεση του τεμαχίου μας περιγράφεται στον Πίνακα 4 και το υλικό βάσης είναι το αλουμίνιο 7075, στη συνέχεια ο ψευδάργυρος και το μαγνήσιο ενώ το ηλεκτρόδιο ήταν από ορείχαλκο.



Εικόνα 21: EDX χάρτης χημικής σύνθεσης για συνθήκες κατεργασίας 17A και 100μs.



Εικόνα 22: Ανάλυση χημικής σύστασης για  $I_p$  13 A και  $T_{on}$  15  $\mu$ s.

Στη συνέχεια όπως φαίνεται στην Εικόνα 22 υπάρχει η δυνατότητα ανάλυσης της χημικής σύστασης του τεμαχίου εργασίας μας σε διαφορετικά σημεία ώστε να γνωρίζουμε τη κατα βάρος κατανομή των στοιχείων κατά βάθος του τεμαχίου. Σημαντική παρατήρηση είναι το βάρος του χαλκού (Cu) που προέρχεται κατά κύριο λόγο από το ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιήσαμε και παρατηρούμε ότι στην επιφάνεια ξεκινάει με 3.29% στο σημείο ελέγχου 1 ενώ συνεχώς μειώνεται έως το σημείο 10 που φτάνει στο 2.22%. με αυτά τα δεδομένα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η επιφανειακή σύσταση επηρεάζεται πολύ περισσότερο από την υποεπιφανειακή με την απόθεση υλικού από το ηλεκτρόδιο [45].

## Κεφάλαιο Έκτο

### 6. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, η χρήση του EDM στη μηχανική κατεργασία αλουμινίου 7075 έχει βρεθεί ότι είναι μια αποτελεσματική μέθοδος. Η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε τη χρήση μιας συγκεκριμένης μηχανής EDM, AgieCharmilles Roboform 350 Sp, καθώς και ενός συγκεκριμένου διηλεκτρικού υγρού (Cactus normal paraffin and hydrocarbon). Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι το EDM μπορεί να παράγει με επιτυχία σχετικά λεία επιφάνεια στο αλουμίνιο 7075, με όχι σημαντική τραχύτητα επιφάνειας και μικρή υποεπιφανειακή ζημιά [46].

Εκτελέστηκαν πειράματα με εύρος  $I_p$  από 5 A έως 17 A και  $T_{on}$  από 12.8  $\mu s$  έως 100  $\mu s$  και ακολούθησε στατιστική ανάλυση με κύρια στοιχεία ανάλυσης το ρυθμό αποβολής υλικού – MRR , το συνολικό ρυθμό αφαίρεσης υλικού - TMRR καθώς και την επιφανειακή τραχύτητα – SR των τεμαχίων εργασίας μας.

Τα βασικά ευρήματα αυτής της έρευνας ήταν η παρουσία μίας σειράς χαρακτηριστικών στην επιφάνεια και στην υποεπιφάνεια όπως κορυφογραμμές, σφαιρίδια, θύλακες, μικρορωγμών και κρατήρες. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι αποτέλεσμα της έντονης θερμότητας και πίεσης που παράγονται κατά τη διαδικασία EDM και είναι χαρακτηριστικά του αλουμινίου 7075 που έχει υποστεί κατεργασία EDM [47]. Η παρουσία αυτών των χαρακτηριστικών μπορεί να ελαχιστοποιηθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλα υλικά ηλεκτροδίων και βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους της διαδικασίας EDM. Τα κύρια συμπεράσματα της πειραματικής διαδικασίας είναι ότι:

- Το MRR επηρεάζεται κυρίως από το  $I_p$ , ενώ ο  $T_{on}$  έχει πιο ασαφή αντίκτυπο σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα, καθώς το ρεύμα ενεργοποίησης παλμού αυξήθηκε από 9 σε 13 A, η μέση MRR αυξήθηκε κατά 294%.
- Το TMRR επηρεάζεται επίσης κυρίως από το  $I_p$ , σημειώνοντας αύξηση 202% μεταξύ 9 και 13 A, ενώ και πάλι το  $T_{on}$  φαίνεται να έχει ασαφή αντίκτυπο.
- Η διαδικασία, σε σχέση με το MRR και το TMRR μπορεί να ταξινομηθεί σε κατεργασία χαμηλής ισχύος και κατεργασία υψηλής ισχύος, με ξεχωριστή συμπεριφορά.
- Το  $I_p$  έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στο SR, καθώς η αύξησή του έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερα Ra και Rz.

Μια άλλη σημαντική πτυχή αυτής της έρευνας ήταν η ανάλυση της υποεπιφανειακής μικροδομής του τεμαχίου εργασίας. Με τη χρήση της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (SEM), διαπιστώθηκε ότι η επιφάνεια του τεμαχίου προς κατεργασία χαρακτηριζόταν από την παρουσία White Layer, το οποίο είναι αποτέλεσμα της συσσώρευσης επαναστερεοποιημένου υλικού. Επιπλέον συναντήσαμε την κατά βάρος κατανομή χημικών στοιχείων ώστε να γνωρίζουμε τη σύσταση του τεμαχίου μας σε μία σειρά από σημεία [48].

Κλείνοντας ένα γενικό συμπέρασμα είναι ότι η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης είναι αρκετά πολύπλοκη. Τα δεδομένα εισόδου είναι εξαιρετικά ευαίσθητα και τα αποτελέσματα διαφέρουν ανάλογα τις συνθήκες που έχουν επιλεγεί [49]. Απαιτείται προσεκτική και συστηματική προσέγγιση ώστε μέσω των πειραμάτων να κατανοούνται τα φαινόμενα και να έχουμε τα τελικά επιθυμητά αποτελέσματα στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης.

## Βιβλιογραφία

- [1] StudentLesson, "METALWORK," 25 FEBRUARY 2022. [Online]. Available: <https://studentlesson.com/definition-application-diagram-types-methods-advantages-and-disadvantages-of-non-traditional-machining-processes/>.
- [2] M. P. Jahan, *Electrical Discharge Machining*, New York: Nova Science Publishers, 2015.
- [3] Lazarenko, *About the inversion of metal erosion and methods to fight ravage of contacts*, Moscow: WEI Institute,, 1943.
- [4] I. C. Jameson, *Electrical Discharge Machining*, USA: SME, 2001.
- [5] STAFF, "FINEMETALWORKING," FINEMETALWORKING, 4 May 2021. [Online]. Available: <https://finemetalworking.com/edm>.
- [6] M. P. Jahan, *Micro EDM based Multi process Machining of Tungsten Carbide*, National University of Singapore.: Department of Mechanical Engineering, 2009.
- [7] A. A. I. a. A. A. Khan, *Influence of Process Parameters on Electrical Discharge Machined Job Surface Integrity*,, American J. of Engineering and Applied Sciences, 2010.
- [8] E. Doran, "Modern Machine Shop," Modern Machine Shop, 7 October 2021. [Online]. Available: <https://www.mmsonline.com/articles/machining-101-what-is-electrical-discharge-machining>.
- [9] B. &. Associates, "BELTIM & ASSOCIATES," Silicon Valley, California, [Online]. Available: <https://www.beltim-usa.com/electrical-discharge-machining-edm>.
- [10] "Weldability of Zinc-Coated Steels.," *Welding Technology*, vol. 59, no. <https://doi.org/10.3390/met10010033>, pp. 33-38, 2021.

- [11] A. Z. M. T. J. Soundhara, "ScienceDirect," January 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.01.019>.
- [12] S. L. X. Y. J. G. D. W. Yijin Zhao, "Study on characteristics of EDM using pulse power supply with active high-frequency oscillation," September 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.155>.
- [13] F. Y. D. Q. L. L. Zhipeng Wang, "High Frequency Pulse Power Generator for Micro-EDM," January 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.194>.
- [14] M. Z. Z. L. Y. Xin Mu, "Intelligent electrical discharge machining (EDM) molybdenum-titanium-zirconium alloy by an extended adaptive control system," May 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.003>.
- [15] H. J. Y. Y. H. Ming Zhou, "An Extended Adaptive Control System for EDM," 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.152>.
- [16] R. B. P. B. Eckart Uhlmann, "Validation of different tungsten carbide-cobalt grades as tool electrode material for sinking EDM," 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.136>.
- [17] H. G. T. Atsutoshi HIRAO, "Effect of Electrode Shape on High Aspect Ratio Deep Hole Drilling by EDM," 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.156>.
- [18] A. A. S. Y. N. Mehdi Hourmand, "Development of new fabrication and measurement techniques of micro-electrodes with high aspect ratio for micro EDM using typical EDM machine," February 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.11.020>.
- [19] P. S. R. P. Mohd. Yunus Khan, "Investigations on the feasibility of Jatropha curcas oil based biodiesel for sustainable dielectric fluid in EDM process," 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.325>.

- [20] Y. S. S. N. Avinash Yadav, "Sustainability of vegetable oil based bio-diesel as dielectric fluid during EDM process – A review," 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.967>.
- [21] L. Q.-Y. C.-C. X.-S. Z. Yan-Xin SUN, "Spatial Planetary Movements for Multi-Axis EDM," 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.159>.
- [22] T. Z. Y. Weiran Xie, "Study on discharge state detection of micro-EDM based on wavelet transform method," 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.106>.
- [23] P. S. J. J. A. S. R. D. S. J. Udaya Prakash, "Multi-objective optimization using grey relational analysis for wire EDM of aluminium matrix composites," 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.415>.
- [24] S. K. S. S. S. Sanjeev Kumar, "Artificial neural network based modeling to predict micro-hardness during EDM of cryo-treated titanium alloys," 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.426>.
- [25] B. A. Vikas Kanake, "Prediction of tool wear length in micro-EDM process using an artificial neural network," 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.345>.
- [26] X. W. L. H. G. T. D. Kai Jiang, "Investigation on the geometric evolution of microstructures in EDM with a composite laminated electrode," 20 May 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126765>.
- [27] D. R. U. Pravin Omprakash Sharma, "Augmentation of pool boiling performance using Ag/ZnO hybrid nanofluid over EDM assisted robust heater surface modification," 20 December 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130150>.
- [28] S. S. H. Ishwar Bhiradi, "Energy efficient and cost effective method for generation of in-situ silver nanofluids: Formation, morphology and thermal



- properties," 2020. [Online]. Available:  
<https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.08.010>.
- [29] B. R. B.P. Mishra, "Evaluation of technical feasibility and environmental impact of Calophyllum Inophyllum (Polanga) oil based bio-dielectric fluid for green EDM," July 2020. [Online]. Available:  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107744>.
- [30] Y. L.-Y. S. Yun Ki Kim, "Black phosphorus-based smart electrorheological fluid with tailored phase transition and exfoliation," 2020. [Online]. Available:  
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.07.032>.
- [31] Keyence, Digital Microscope VHX-7000,  
[https://cores.research.asu.edu/sites/default/files/2021-12/AS\\_114992\\_VHX-7000\\_UM\\_96M16688\\_WW\\_GB\\_2110\\_1.pdf](https://cores.research.asu.edu/sites/default/files/2021-12/AS_114992_VHX-7000_UM_96M16688_WW_GB_2110_1.pdf), 2020.
- [32] M. S. S. N. B. O. M.R. Shabgard, "Influence of input parameters on characteristics of EDM process," 2011. [Online]. Available:  
<https://doi.org/10.5545/sv-jme.2011.035>.
- [33] J. C. a. D. D. A.K. Dhindsa, "Microstructural Analysis of EDM Surfaces Using a Scanning Electron Microscope," *Materials Processing Technology*, vol. 56, pp. 1-11, 1995.
- [34] M. A.-O. a. J. Cairns, "A Comparative Study of Surface Characteristics of EDMed and Grinding Workpiece Materials," *Materials Processing Technology*, vol. 199, pp. 549-557, 2008.
- [35] Y. Z. a. H. Z. X. Lu, "Investigation of Surface Integrity of EDM-Processed Ti-6Al-4V Alloy," *Materials Processing Technology*, vol. 211, pp. 797-805, 2011.
- [36] Y. Z. a. H. Z. X. Lu, "Investigation of Surface Roughness and Residual Stress of EDMed Ti-6Al-4V Alloy," *Materials Processing Technology*, vol. 212, pp. 554-561, 2012.
- [37] M. A.-O. a. J. Cairns, "A Study of Surface Integrity of Hardened AISI H13 Steel Using EDM," *Materials Processing Technology*, vol. 213, pp. 1653-1662, 2013.

- [38] P. J. a. S. G. S.K. Singh, "Microstructural Characterization of EDM Surface using SEM-EBSD and XRD Techniques," *Materials Engineering and Performance*, vol. 26, pp. 791-798, 2017.
- [39] Y. Z. a. H. Z. X. Lu, "Subsurface microstructure and residual stress of EDMed Ti-6Al-4V alloy," *Materials Processing Technology*, vol. 212, pp. 554-561, 2012.
- [40] S. S. a. S. G. R.K. Mishra, "Microstructural analysis of EDM-processed titanium alloys," *Materials Engineering and Performance*, vol. 24, pp. 2977-2983, 2015.
- [41] Y. Z. a. H. Z. X. Lu, "Subsurface microstructure and mechanical properties of EDMed Ti6Al4V alloy," *Materials Engineering and Performance*, vol. 26, pp. 791-798, 2017.
- [42] B. a. S. Cullity, "Energy-dispersive x-ray spectroscopy in the scanning electron microscope," *Applied Physics*, vol. 85, pp. 6683-6694, 1999.
- [43] C. G.-L. R. G.-G. L. G.-M. S. G.-M. J.L. García-López, Analysis of the chemical composition of metal matrix composites by energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and X-ray fluorescence (XRF), *Materials Characterization*, 2017.
- [44] C. Z. L. W. Y. W. J. C. L. Wang, "Elemental analysis of multi-component alloys using energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF)," *Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 32, no. 9, 2017.
- [45] J. P. Davim, *Machining and Machine-tools*, Research and Development, 2013, pp. 135-168.
- [46] S. P. D. S. P. Pujari Srinivasa Rao, "Influence of WC/Co powder metallurgy electrodes made by micron and nano particles on EDM performance," November–December 2021. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0026-0657\(21\)00304-0](https://doi.org/10.1016/S0026-0657(21)00304-0).

- [47] S. A.-H. a. M. Al-Jumaili, "Investigation of the Electrical Discharge Machining of Aluminum 6060-T6," *Materials Processing Technology*, vol. 211, no. 6, pp. 1098-1106, 2011.
- [48] S. P. a. S. P. P.K. Patra, "Influence of Process Parameters on Surface Integrity of EDMed Aluminum 6060-T6," *Manufacturing Processes*, vol. 19, pp. 479-487, 2015.
- [49] S. P. a. S. P. P.K. Patra, "Optimization of Surface Roughness in EDM of Aluminum 6060-T6 Alloy Using Taguchi Method," *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 85, pp. 1229-1239, 2016.